

今日制造·升级

— Manufacture & Upgrading Today —

何无违



» P13 变革与趋势

“双碳”目标提出两周年： 大国重任 言出必行

在应对气候变化问题上，中国一直是言必信、行必果，有信心、有决心。这种信心和决心体现在方方面面。两年间，一系列相关政策措施密集出台，高压与疏导并存，“双碳”目标的实现路径不断明确，日益清晰。



功率范围：120~960 W
整体转换效率高达 95%



创变智造新未来

导轨型电源 Force-GT 系列

产品具备高功率密度、超薄等特色，机体宽度较前代系列缩小 30% ~ 50%，-30°C ~ 70°C 宽温设计，能在严苛的工业环境稳定供电。

Force -GT 系列通过多项国际安规认证，适合如半导体设备、高阶精密工业、工业机器人等高阶设备应用。



扫一扫，关注官方微信

中达电通股份有限公司
www.delta-china.com.cn

客服热线 400 - 820 - 9595

台达
DELTA
[广告]

更多触控 更强PC 更高性能

www.br-automation.com/multitouch

- Automation Panel | Panel PC | Automation PC
- 多点触控 | 单点触控
- 宽屏 | 4:3
- 横屏 | 竖屏
- 摆臂型 | 机柜型 | 不锈钢
- 任意组合
- Smart Display Link 3 | 100 m
- Intel Core i3 | i5 | i7
- Intel Atom Bay Trail



B&R

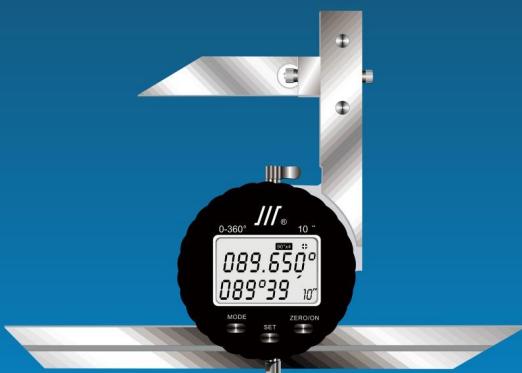


®

成于坚韧

量出完美

新品推荐



电子数显万能角度尺



单参数螺纹量规



三点内径千分尺



防水电子数显卡尺



超高硬度钢丝锥



石油油管专用丝锥



奥氏体不锈钢锥管丝锥

成都新成量具有限公司
CHENGDU NEW CHENGLIANG TOOLS CO., LTD.
(成都成量工具集团有限公司)



ISO9001:2015
ISO14001:2015
ISO10012-2003

APISPEC5B
APISPEC7-2
APISPEC11B

[广 告]

广州制造业博览会

Guangzhou Manufacturing Exposition

广州国际数控机床展

CGMT

广州塑料及橡胶展览会

Guangzhou Plastics & rubber Exposition

广州包装展览会

Guangzhou Packaging Plant Exposition

2022. 11. 23 – 25

广州·中国进出口商品交易会B区12.1

主办单位：中国机械工业集团有限公司

中国机械国际合作股份有限公司

承办单位：广州中汽服务贸易有限公司

中国如意技贸有限公司



中国如意技贸有限公司

地 址：北京海淀四季青路8号柳城工作区633室

电 话：010-64045931-8009

联系人：高先生 18612292912 张女士 18519998913

[广 告]

今日制造与升级

— Manufacture & Upgrading Today —

机工通

2022年第10期，总第152期·月刊

主管单位 / Supervisor

中国机械工业联合会 / China Machinery Industry Federation

主办单位 / Sponsor

北京卓众出版有限公司 / Beijing Prominon Publishing Co., Ltd

编辑出版 / Publisher

《今日制造与升级》编辑部 / Manufacture & Upgrading Today

总编辑 / Chief Editor

张红林 / Zhang Honglin

编辑部主任 / Manager of Editorial Department

张 兰 / Zhang Lan

运营 / Operator

洪林林 / Hong Linlin

AUTOMATION TODAY | 今日自动化 | 机床 METAL CUTTING | 金属切削

主编 / Editor-in-chief

张 兰 / Zhang Lan

编辑 / Editor

何 琚 / He Jun 张苗苗 / Zhang Miaomiao 曹楷楠 / Cao Kainan

责任编辑 / Executive Editor

董瑞瑞 / Dong Ruirui

通联 / Liaison Person

晏冬冬 / Yan Dongdong 徐 浩 / Xu Hao

美术编辑 / Art Editor

张 国 / Zhang Guo

电话垂询 / Tel 010-64882936 64883100

地址 / Address

北京市德外沙滩 1 号 16 邮箱 (100083)

P.O.Box 16, No.1 Beishatan, Dewai, Beijing 100083, P.R.China

广告代理 / Advertising Agency

北京鸿业国际文化传媒有限公司

官方网站 / Website

<http://www.jrzmt.com>

电子邮箱 / E-mail jrz2006@163.com

国际标准连续出版物号：ISSN 2095-6932

国内统一连续出版物号：CN10-1196/TN

广告发布登记：京朝市监广登字 20170064 号

印刷：北京中科印刷有限公司

定价：20 元 / 期

—— 版权声明 ——

本期文字和图片，经著作权人授权刊登，未经许可，不得转载、摘编。经书面许可转载、摘编时，请注明作品名称、作者姓名及本刊刊名、期次。

本刊已许可中国知网、万方数据、重庆维普资讯有限公司、超星“域出版”平台等单位在其网络及系列数据库产品，以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。以上单位的著作权使用费与本刊稿酬，已从论文发表收取的版面费中扣除，不再另付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。如有异议，请在投稿时说明，本刊将按作者说明处理。

CONTENTS | 目次

News | 资讯

行业动态

P7 工信部启动首批产业链供应链生态体系建设试点工作

P8 西门子为日产纯电动跨界 SUV Ariya 打造数字化生产线

P9 台达加速研发布局 杭州设计中心再扩容

Market | 市场

宏观

P10 非凡十年 机械工业交出亮眼成绩单

变革与趋势

P13 “双碳”目标提出两周年特别报道

Focus | 聚焦

活动现场

P24 西门子数控系统：为机床行业数字化转型按下加速键

P26 西安研发中心 10 周年庆生 施耐德电气加码“绿色创新”

高端访谈

P28 “双碳”赛道风起

汇川技术数字化赋能企业绿色发展

P30 穿越困境 坚定自动化的力量

——访贝加莱工业自动化（中国）有限公司肖维荣

Application | 应用

案例

P33 万片级焊速

三菱电机成就光伏领域跨界黑马

协办单位

中国汽车工程学会

中国齿轮专业协会

中国机械制造工艺协会

中国航空航天工具协会

中国机床工具工业协会工具分会

中国机械工业金属切削刀具技术协会

中国纺织机械器材工业协会

中国食品和包装机械工业协会

中国印刷及设备器材工业协会印刷机械分会

中国机床工具工业协会数控系统分会

本期广告目录

封二 台达

P1 贝加莱

P2 成量

P3 CGMT 广州展

P5 《今日制造与升级》征文

封三 《设备管理与维修》杂志

封底 《今日制造与升级》杂志

征文



《今日制造与升级》 征稿启事

欢迎投稿、订阅、刊登广告

1. 杂志简介

《今日制造与升级》(Manufacture & Upgrading Today)杂志创刊于2014年，是由中国机械工业联合会主管，北京卓众出版有限公司主办和编辑出版的国内外公开发行的科技类期刊。国内统一连续出版物号：CN 10-1196/TH，国际标准连续出版物号：ISSN 2095-6932，月刊。

《今日制造与升级》杂志重点聚焦制造业转型升级过程中的新热点、新趋势，传递产业政策导向，展示转型升级典型案例，为企业市场决策提供指引；深度关注制造业转型升级中所需的数字化/智能化/网络化制造技术及自动化技术，贴合当前制造业转型升级大势，积极传递新理念、新应用和先进技术，聚焦行业技术创新，推动今日制造升级。

2. 主要栏目

市场、聚焦、专题策划、自动化技术与应用、制造与工艺、试验技术与装备、运行与维护等。

3. 征稿范围

数字化设计与制造，智能设计理论、方法及系统，自动化与现代制造系统，机器人技术及应用，虚拟设计与虚拟样机，网络化控制与制造技术，绿色设计与制造中的智能技术、智能加工以及智能检测与控制，数字化工厂等。

《今日制造与升级》主要刊载：在现代机械制造、电子控制的理论研究和实际生产中，有关数字化/智能化/网络化制造技术、机械设计、智能控制技术、数控机床相关技术、3D打印技术、工业自动化、绿色制造、数字化设计与制造、机械加工理论与技术、金属加工工艺和装备，以及自动控制、电力电子、运动控制、过程控制和软件技术等的创新、优化、应用、研发方面的论文，以及加工车间和生产线的设计、改造、管理方面的论文。

本刊重点面向制造业专家学者、工程技术人员、机床整机和关键功能附件制造商、刀具制造商、工业自动化设备供应商、自动化系统集成商、代理商等征稿，希望能就生产实际中的案例或解决方案撰写文章，为我们提供来自生产制造一线的最新应用论文。

4. 稿件要求

论文观点鲜明、材料翔实、数据准确、论证严谨、语句通顺、图文并茂，每篇文稿（含图表）一般不超过10000字为宜。稿件文档采用Word格式，单、双栏排版皆可，正文使用5号字体。来稿应包括如下内容：

①中文题名，作者姓名，作者单位，所在省市，邮政编码，文章摘要（200~400字），关键词（3~5个），正文，参考文献（5条以上）。

②第一作者的出生年份、性别、籍贯、职称（学历）、主要研究方向，联系人及联系方式。

③基金项目研究的文稿，请在首页地脚处注明基金项目名称及编号。

5. 审稿与出版

本刊实行三级审稿制，即编辑部初审、同行专家评审和主编/总编终审。收到投稿后的2个月内，编辑部将通过电子邮件告知作者稿件是否录用。若录用，编辑部将及时反馈作者返修意见，并按照有关规定收取相应的版面费；若不录用，编辑部将通过电子邮件告知作者。编辑部有权对录用稿件作适当文字删改。

6. 其他约定

投稿作者应严格遵守国家及行业的有关保密规定，稿件刊出后文责自负。文稿中摘引他人成果，请按《著作权法》有关规定指明原作者姓名、作品名称及其来源，在参考文献中列出。请勿一稿多投。本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》、CNKI系列数据库、《中国学术期刊综合评价数据库》以及《中文科技期刊数据库》等全文收录。作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意文章被收录，请在来稿时向本刊声明，本刊将作适当处理。

7. 联系方式

咨询电话：010-64882936 64883100

投稿邮箱：jrzz2006@163.com

投稿咨询：15510329158（微信同步）

联系地址：北京市德胜门外北沙滩1号《今日制造与升级》编辑部（100083）

CONTENTS | 目次

2022年第10期



»P36
派克汉尼汾：
守护只此“氢”绿

P36 派克汉尼汾：守护只此“氢”绿

Technology | 技术

自动化技术与应用

- P38 基于神经网络遗传算法的冲压件拉深工艺参数优化
P41 垃圾焚烧发电厂垃圾吊全自动控制系统设计
P45 基于 PLC 和 HMI 的电机无级调速系统的设计与实践
P48 基于弹性系数的短期电力负荷预测
P52 抽水蓄能电站紧急支援功能控制策略的应用研究
P56 基于罗克韦尔（AB）PLC 的电袋除尘器清灰控制系统设计与应用
P59 APF 直流侧纹波分析及电压外环控制研究

制造与工艺

- P62 制动器故障保护功能失效分析
P64 核主泵试验台热平衡系统设计
P67 回路电阻测试仪常见故障处理
P69 ALSTOM GL314 配 FK3-1 机构动作原理及缺陷分析
P73 无锡地铁 1 号线电客车 LCU 改造全寿命周期分析
P76 金属材料表面质量及精度控制的影响研究
P79 混合煤气压力与热值稳定方案
P82 左旋螺纹在装夹工件中的应用
P84 热泵余温加热水族箱设计方法及节能性分析
P87 选矿厂颚式破碎除尘系统改造
P90 大直径盾构机电气系统组成及常见故障处理
P93 超低排放燃煤电厂 1000MW 发电机组低负荷运行安全策略
P96 L360QS/Incoloy825 复合管 GTAW 焊接数值模拟
P102 一种基于保持架的偏心锁紧机构的设计与实现
P104 单曲率变厚度蒙皮数控铣切工艺研究
P107 高原地区制氧装置的研究
P110 一种高性能 RV 减速器的研制

P113 臭氧发生器用超大功率高频逆变器设计方案及器件选型

- P115 5.0mmER50-6E 高速线材生产工艺开发
P118 600MW 超临界湿冷机组无电泵启动应用分析
P121 叙毕铁路柔性接触网分段绝缘器安装技术
P124 2-丙基庚醇羰基反应转化率控制研究
P127 小型汽轮机轴封抽汽热能回收的研究
P130 航空发动机机匣数控加工技术研究
P133 船舶电气自动化系统技术现状及设备故障排除方法
P136 有色金属矿山机械设备安装质量的提升策略
P139 大型精密数控转台装配工艺分析
P142 电厂循泵电机转子转轴断裂失效分析
P146 基于倒装法的闪速炉改造方案
P149 PCBN 超硬刀具加工蠕墨铸铁的切削性能研究
P152 某城轨车辆压力传感器压力漂移分析及改进
P154 6 机架冷连轧 5 机架时张力优化设定方法研究
P157 机械设计中模块化设计方法的应用
P160 锂离子电池电极预锂化技术工程化进展
P163 全尺寸飞机强度试验整体框架设计技术研究
P167 SNCR 脱硝技术在冶炼行业烟化炉的应用
P170 双高棒模块精轧机及其安装调整方案
P173 塑料连接管件工艺分析及模具设计
P175 排气机真密度的技术研究
P178 真空可移动式目标模拟系统结构设计
P181 ZJ17 型卷烟机接装纸多形式缺陷故障维修
P184 基于主管道接管座内圆角打磨的三通倒角研究
P186 西门子 PR2 型刀闸配 MA7684 机构机芯结构改造

试验技术与装备

- P189 全机静力试验技术展望
P192 高量值强冲击物理试验测控系统上位机软件设计
P194 一种冲击射流实验装置的设计
P196 水陆两栖飞机全机静力试验随动支持技术研究及应用
P199 制作石墨辐射热流标定设备方法的研究

行业动态

工信部启动首批产业链供应链生态体系建设试点工作

近日，工业和信息化部正式确定杭州、武汉、成都、宁德、南通、潍坊、合肥、株洲、广州、深圳、包头、齐齐哈尔等12个城市首批开展产业链供应链生态体系建设试点。开展产业链供应链生态体系建设试点是贯彻落实党中央、国务院决策部署，提升产业链供应链创新能力，增强稳定性和竞争力的重要举措。

试点城市要通过机制创新、要素集聚、平台搭建、数智赋能和政策支持，推动区域产业链供应链生态体系迭代升级，形成龙头企业、配套企业、高等院校、科研院所、第三方平台、金融机构等协同联动、竞合共生的生态发展格局。通过试点，探索形成“遴选试点—加强指导—资源倾斜—滚动评估—持续优化—推广应用”的工作推进模式，树立一批可复制、可推广的发展标杆，推广典型案例和成功经验，助力制造业高质量发展。

2022世界制造业大会在合肥开幕



9月20日上午，2022世界制造业大会在安徽合肥开幕。本届大会为期4天，以“制造世界·创造美好”为主题，聚焦前沿趋势，探索制造业高质量发展新路径。展馆总面积5.9万平方米，展示了全球先进制造的发展新成果。

本次大会先后举办开幕式暨主旨论坛等各类重要活动38场次，共有641家参展企业，其中既有世界500强、中国500强企业，也有独角兽企业、专精特新“小巨人”企业，一批新产品、新技术、新应用的集中亮相。在展览展示方面，2022世界制造业大会首次举办了大国制展、安徽制造强省建设发展成就展，首次引入新能源汽车展等三场市场化展览，首次推出有美德日韩等国参加的室外农机展。

新能源汽车免征车辆购置税将延续至2023年底

财政部、税务总局、工业和信息化部发布关于延续新能源汽车免征车辆购置税政策的公告。此次三部门正式发布公告，表明截止至2023年12月31日，购买新能源汽车仍旧能享受免征车辆购置税政策。

该公告明确，对购置日期在2023年1月1日至2023年12月31日期间内的新能源汽车，免征车辆购置税。免征车辆购置税的新能源汽车，通过工业和信息化部、税务总局发布《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》（以下简称《目录》）实施管理。自《目录》发布之日起购置的，列入《目录》的纯电动汽车、插电式混合动力（含增程式）汽车、燃料电池汽车，属于符合免税条件的新能源汽车。购置日期按照机动车销售统一发票或海关关税专用缴款书等有效凭证的开具日期确定。

2022年度智能制造试点示范行动

工业和信息化部、国家发展改革委、财政部、市场监督管理总局日前联合印发通知，部署开展2022年度智能制造试点示范行动。试点示范内容包括智能制造优秀场景和智能制造示范工厂。

将坚持立足国情、系统推进、分类遴选、动态调整的原则，以揭榜挂帅方式建设细分行业智能制造示范工厂，凝练总结一批具备较高技术水平和推广应用价值的智能制造优秀场景，带动突破一批关键技术、装备、软件、标准和解决方案，探索形成具有行业特色的智能制造转型升级路径。

各地工业和信息化、发展改革主管部门建立会商机制，联合财政、市场监管主管部门组织对本地区申报项目进行推荐。

合作

西门子为日产纯电动跨界SUV Ariya打造数字化生产线

西门子近日宣布与日产达成合作，将在日产位于日本栃木县的工厂内，为其全新纯电动跨界SUV Ariya建设数字化生产线。双方合作由来已久，日产一直应用西门子数字化工业软件产品组合进行自身设计和生产的优化。得益于端到端的数字线程，日产能够实现打通产品生命周期管理（PLM）平台，让信息跨平台自由流通。

日产全新开发的电动动力总成，旨在通过系统架构实现动力总成加工和装配的标准化。它涵盖了西门子的安全型PLC Simatic S7-1500、ET200SP分布式I/O模块及西门子One Single Solution（OSS）。Profinet能够实现从现场到管理层的端到端通信，工程框架TIA Portal则全面集成了所有的自动化设备。基于此，日常可以全面了解从数字规划到集成工程和透明化运作的整个数字化自动化过程。智能汽车需要在车辆中配备更多高性能的电子控制单元（ECU），全新的日产Ariya正是如此。

西门子股份公司管理委员会成员、西门子数字化工业集团首席执行官奈柯（Cedrik Neike）表示：全新产线的正式启动，是西门子与日产合作的又一里程碑。气候变化与日益严格的环境法规，推动着电动汽车动力总成的加速发展。通过此次合作，西门子将以自身前沿数字化技术，赋能高度灵活、高效和可持续的汽车生产。”

《驾驭数字化转型——数字化赋能绿色智能制造高管洞察2022》发布

近日，施耐德电气携手工业和信息化部国际经济技术合作中心（以下简称国合中心）联合发布《驾驭数字化转型——数字化赋能绿色智能制造高管洞察2022》。该报告汇聚了来自10大门类125家企业高管的实践心得，旨在探索制造业的转型升级现状，为广大制造企业破解难题提供新思路，进一步赋能其迈向高质量发展。

洞察报告聚焦制造业数字化转型的三大趋势、四大挑战，汇集领军企业和施耐德电气自身的成功实践提出四大价值主张，致力于用来自一线的实践和洞察，为中国制造业实现双转型、迈向绿色智能制造提供有价值的指引，助力工业企业高效率、高韧性、高水平地迈向可持续发展的未来工业。

ABB助力齐鲁石化数字化转型 引领能源产业绿色发展



对于石化企业而言，生产工艺流程复杂、生产装置大型化、生产过程连续性强等特点是“双碳”目标下的真实写照，企业亟需找到适合自身转型升级的数字化降碳路径，从设备维护、能效管理、智能运维等方面挖掘降本增效的潜力，在保证稳定生产的前提下实现经济效益和环保效益的双赢。

基于对ABB配电数字化解决方案的高度认可，齐鲁石化采用ABB UniGear ZS1数字化中压开关柜、ABB Ability™ MyRemoteCare设备健康管理及ABB ZEE600智慧配电管理解决方案，构建远程管理和预测性维护体系，进一步提升企业现场的用电可靠性和运维效率，精益化生产运营水平，为国内能源产业的绿色智能化转型树立了良好典范。

齐鲁石化运维中心电气科科长刘加庆表示，“齐鲁石化在中石化集团内较早地尝试使用了ABB智能化中压开关柜，这项技术帮助我们为后续的产业绿色升级打开了新思路。未来，我们将继续聚焦‘双碳’目标，在其他新建变电所中深化与ABB的合作，力争打造绿色能源标杆企业，为国内石化行业的绿色转型做出表率。”

目前，齐鲁石化六变电所已成功应用ABB UniGear ZS1数字化开关柜。未来，双方将继续聚焦“碳中和”目标，在其他新建变电所中深化合作，为国内石化行业提供更多值得借鉴的转型经验。

拓 展

台达加速研发布局 杭州设计中心再扩容

全球电源与散热管理厂商台达再度扩展研发布局，台达电力电子（杭州）设计中心新增办公区于10月10日正式揭幕启用。



该设计中心位于杭州市滨江区双城国际大厦，包括办公区和研发实验室，总面积相较之前扩增一倍，可容纳员工500人。台达在全国各地设有研发中心，包含上海、杭州、武汉、台北等地，研发方向聚焦在高端网络和数据中心电源、电动车车载电源、LED照明及光伏逆变器电源和储能关键零组件等，产品广泛应用于数据中心、5G通信设备、新能源等领域，以节能科技助力实现“双碳”目标。基于对人才的重视，台达致力于为员工提供良好的办公环境，并持续扩大研发布局，期待更多人才加入台达，共创绿色未来。

新 品

菲尼克斯电气小型PLC重磅上市

随着自动化技术的快速发展，自动化市场竞争日渐激烈，客户对控制系统的核心部件——PLC 提出来更多的要求。由此，菲尼克斯电气首款小型PLC——MAX100上市。该产品稳定可靠，性能强大，功能丰富，灵活，高效，具有高性价比。



MAX100 PLC将多种功能集于一身，极大提高了产品的适用性，可应对多样的应用场景，满足多数客户的应用需求；PLC本体支持4路100kHz的高速脉冲输出，通过脉冲的方式，最多可实现4个电机的位置、速度控制，满足机械设备的精确定位需要；具备丰富的通信接口，同时集成RS232和RS485，支持多种通讯协议，助力数字化、智能化的实现；具有强大的扩展能力，可扩展多个信号模块，可控制多达142个点位的系统，满足复杂系统的需要。

横河电机被壳牌选为MAC，建设欧洲的大型可再生氢工厂

横河电机宣布，已经被壳牌公司选定为主要自动化承包商（MAC），在荷兰鹿特丹港建设荷兰氢能I号工厂。荷兰氢能I号工厂将利用海上风电场的电力生产可再生氢气，一旦2025年投入运营，预计将成为欧洲最大的可再生氢气工厂。作为MAC，横河电机将通过集成其系统和设备来优化工厂的运营。

荷兰氢能I号工厂将拥有一个200MW的电解槽，每天将生产多达60,000千克的绿色氢气。该工厂生产的绿色氢气将通过管道运输到鹿特丹壳牌的能源和化工园区，取代炼油厂中使用的一些灰氢，以消减该工厂汽油、柴油和航空煤油等能源产品生产过程中产生的二氧化碳。

横河电机副总裁兼能源与可持续发展业务总部和全球销售总部负责人中冈 兴志（Koji Nakaoaka）表示：“我们公司的目标是，基于系统体系（System of Systems）的概念，在实现系统紧密集成的世界中发挥主导作用。在氢气供应链中，生产、管道运输、存储和供应等功能都有单独的系统，每个系统都归不同的实体所有。通过参与帮助客户实现脱碳战略并为企业增值的项目，横河电机将不断为实现可持续发展的社会贡献力量。”

Beckhoff Vision：自主设计硬件产品系列与TwinCAT Vision相辅相成

作为基于PC的控制技术专家，倍福始终致力于将所有设备功能集成到同一个控制平台中，因此自2017年推出TwinCAT Vision以来一直在完善图像处理的软件功能。全面的Vision硬件系列进一步完善了倍福在这一领域的布局。



Beckhoff Vision为设备制造商和最终用户提供完整的图像处理系统，其涵盖了从软件到光源等所有必要的组件，可以无缝集成到基于EtherCAT的控制系统中，为用户带来显著的竞争优势，包括与所有设备流程的高精度同步，降低工程和硬件成本，以及简化调试和技术支持工作。

非凡十年 机械工业交出亮眼成绩单

△记者 | 何君

党的十八大以来，机械工业全行业以稳增长保全局、转型升级稳步推进的实际行动，为国家经济社会发展作出了积极贡献。

近日，中国机械工业联合会党委书记、会长徐念沙发表了名为《十年辉煌挺起装备制造的脊梁》的署名文章，从产业规模、创新驱动和对外交流等方面回顾总结了新时代机械工业取得的非凡成就。

坚持稳中有进

党的十八大以来，机械工业坚持稳中求进工作总基调，加强形势研判、经济运行监测与信息统计分析，全力攻坚克难、稳增长保全局，为落实“六保”“六稳”积极作为。

据统计，过去十年间，我国机械工业增加值、资产总额、

营业收入、实现利润和外贸出口年均分别增长8.2%、9.5%、7.9%、5.8%和6.8%。在外部形势复杂多变、新冠肺炎疫情冲击的背景下，2020和2021两年我国机械工业增加值、资产总额、营业收入、实现利润和外贸出口年均增速依然达到8.0%、9.4%、9.9%、11%和16.8%，有力支撑了国民经济发展。

在经济运行保持平稳健康发展的同时，产业规模实力明显增强。2021年机械工业增加值同比增长10%，机械工业资产总额达到28.4万亿元，实现营业收入26万亿元，实现利润总额1.6万亿元，完成进出口总额首次突破1万亿美元，实现贸易顺差3144亿美元，各项指标创历史新高。机械工业产业规模、汽车、电工电器等一批重点产品产量连续位居世界前茅。

威图和易盼 — 驱动机柜系统的智造未来

Rittal and Eplan:

Your strong partners for
sustainable panel building and switchgear manufacturing.



微信扫一扫 关注官方微信

Scan the QR code to follow our WeChat official accounts

截至 2021 年年底，机械工业规模以上企业达到 9.9 万家，占全国工业规模以上企业总数的 24.22%。此外，机械工业营业收入在全国工业中的占比为 20.32%，利润总额占比 18.47%，资产总额占比 20.09%。机械工业对全国工业新增营业收入贡献率达到 16.89%，拉动全国工业收入增长 3.27 个百分点，拉动就业作用突出，支柱产业地位稳固。

坚持创新驱动

党的十八大以来，机械工业坚持以科技创新为核心动力，围绕行业发展中的断点堵点和短板弱项，依托国家重大技术装备工程项目，持续推进产学研用联合攻关，推动产业提档升级、强链补链和自主安全可控，提升了现代化水平。

从创新成果来看，十年来，行业企业、科研院所和高校等单位累计申报机械工业科学技术奖项目 8117 项，共有 3772 项获得机械工业科学技术奖，其中特等奖 29 项、一等奖 355 项；组织科技成果和新产品鉴定 3530 项，其中新产品 1851 项，科技成果 1679 项；新增创新平台 66 家，截至目前，

挂牌运行和批准建设的创新平台达 234 家。

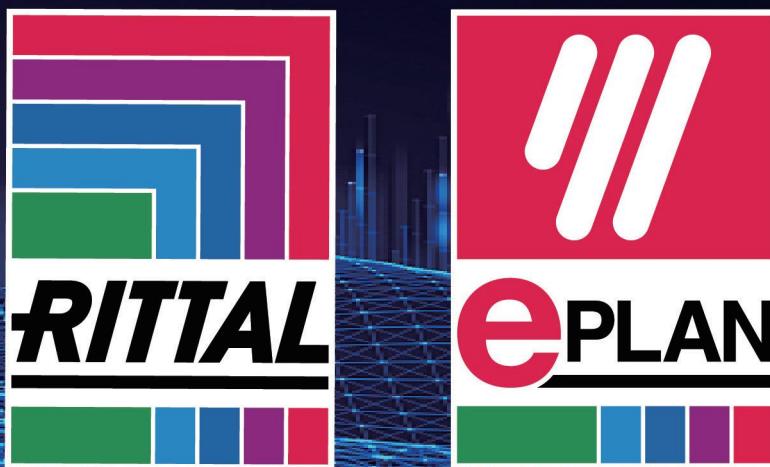
从装备自给率来看，目前机械主导产品的技术来源中，国内占比从 20 世纪 80 年代的 24.5% 上升到目前的 70% 以上。一批自主设计制造的发电、通用、工程机械等重大技术装备达到或处于国际先进水平。16 米级超大直径盾构机、700 吨挖掘机、4000 吨级履带起重机和 400 马力拖拉机等一批重大装备研制成功，中国品牌汽车市场份额达到 44%。机械产品自给率超过 85%，基本改变了先进装备主要依靠进口的被动局面。

从重大技术装备来看，依托三代核电、超超临界火电、特高压输变电、特大型水电站、大型煤化工、油气长输管线、大型矿山采掘与煤矿综采等国家重点工程建设项目，我国已完成 500 余项重大技术装备的国产化研制任务。其中，“华龙一号”“国和一号”三代核电机组，1000 兆瓦二次再热超超临界机组、超超临界高效煤电机组和百万千瓦混流式水电机组等项目，国产成套装备技术水平达到国际先进，打破了国外垄断，解决了“卡脖子”难题，为推动重大技术装备高质量发展奠定了坚实基础。

增强产业基础

党的十八大以来，机械工业实施“绿色制造关键技术与装备”“关键基础件和通用部件”等国家科技支撑计划，围绕绿色制造技术与装备、重点产品节能技术、关键基础零部件和基础制造工艺等方面开展了 150 多项关键技术攻关，成效显著。

首先，基础支撑能力稳步提升。截至 2021 年年底，机械领域



国标与行标达到 18807 项。标准化技术委员会及分会 325 个；承担国际标准化技术委员会秘书处机构 16 个，担任国际标准化组织重要岗位中的主席、副主席 14 人，秘书（经理）17 人；行业国际标准转化率由 78.59% 上升到 88.2%；培育机械工业优质品牌 308 个、质量诚信企业 110 个、质量品牌领军人物 73 名、优秀工匠 145 位、领军企业 73 家，产业集群区域品牌 20 个，涌现一批“专精特新”小巨人企业。

其次，基础技术水平不断提高。十年间，我国攻克了一批制约产业发展的基础共性技术，取得一批原创性技术成果。在可靠性及实验技术方面，突破了大型升船机复杂系统可靠性多元评价方法与长寿命高可靠服役策略、大模数重型齿条制造技术与寿命评价、升船机可靠性评价准则与工程验证技术等。在基础工艺方面，掌握了大型复杂复合材料构件数字化柔性高效精确成形关键技术及复杂铸件无模复合成形制造关键技术。

再者，基础零部件取得突破。工业机器人减速器、伺服电机、控制器等三大核心零部件，以及高端核级密封件系列产品，打破了长期技术封锁和垄断。第三代轿车轮毂轴承实现产业化，替代进口并出口国外。高精高效五轴加工中心、超重型数控机床、大型压力机等基础制造装备取得重要进展。石岛湾全球首座球床模块式高温气冷堆核电站并网发电，工程设备国产化率达 93.4%。我国首套“一键式”人机交互 7000 米自动化钻机正式投入工业性试验。

推进转型升级

进入新时代，围绕强国战略与五年发展规划，机械工业坚持以供给侧结构性改革为主线，从生产端入手，持续推进产业转型升级取得成效。

“十年间，通过制定实施新兴产业发展规划，新兴产业发展蹄疾步稳，产业增长新动能有力迸发，供给体系质量提升，新兴产业对机械工业发展带动作用显著增强。”徐念沙说。

2021 年，新兴产业营业收入在机械工业中的占比达到 77.02%，利润总额占比为 75.51%。2021 年，我国工业机器人产量达到 36.6 万套，同比增长 44.9%，产量再上新台阶，并且连续 9 年成为世界最大市场。

在国家产业政策引导下，机械工业数字化、智能化和网络化转型升级步伐加快。5G 智慧工厂的示范应用，实现了从产品设计、生产制造到营销服务一体化的集成管控与决策体系，为我国机械装备制造与工业互联网的融合发展提供了可推广、可借鉴的应用案例。

“生产 + 服务”“产品 + 服务”等全方位价值链经营等服务型制造快速发展，一些骨干企业服务型制造占比达到 30% 以上。

新产业发展的同时，绿色制造快速推进。节能环保产业市场空间加速释放，营业收入在机械工业中的占比已超过 40%，战略地位不断提升。新能源汽车市场规模屡屡创新，连续 7 年稳居世界第一，2021 年全年销量超过 350 万辆，市场占有率达到 13.4%。

转型升级还体现在产业集中度提高、结构优化。目前，电工电器行业排名前三的集团总产量占全国的 70% 以上，汽车行业排名前十的企业轿车产量占全国的近 90%。能源结构不断优化，风电、水电和核电等清洁能源快速发展，占比提高，火电设备比重已由 2016 年的 73.2% 降至 2021 年的 42.4%。

开展对外交流

机械工业坚持开展对外交流合作，践行“一带一路”倡议。十年间，我国机械产品出口到全球 100 多个国家和地区，中国制造、中国装备遍布世界，享誉全球。

十年间，我国机械工业进出口贸易总额从 2012 年的 6472.2 亿美元，提高到 2021 年的 10386.58 亿美元，在世界经济低迷的背景下，首次突破万亿美元。出口金额从 3506 亿美元增加至 6765.4 亿美元，贸易顺差从 539 亿美元增加到 3144.22 亿美元，创历史新高。机械工业进出口占全国外贸总额比重，从 2012 年的 16.74% 提高到 2021 年的 17.16%。其中，进口占比从 17.11% 提高至 20.11%。这些数据充分显示了我国机械工业在全球制造业产业链供应链中的重要地位。

此外，机械工业出口产品结构持续优化，正快速由以加工贸易和中低档产品为主，向一般贸易和技术含量高、附加值高的产品及成套设备升级。近年来，机械工业一般贸易出口占比近 70%。2021 年汽车整车出口量超过 200 万辆，挖掘机、装载机、推土机和电动叉车等工程机械出口数量大幅增长，成为带动出口总额创新高的主要力量。

随着“走出去”步伐加快，一批排头兵企业积极拓展国际业务。2021 年，机械工业对“一带一路”沿线国家进出口额占全行业进出口总额的比重达到 37.93%。例如，徐工集团研制的 130 吨全地面起重机出口波黑，服务于伊沃维克风电项目，该项目建成后将成为波黑最大的新能源发电项目；东方电气集团与台塑集团签订了越南河静钢厂燃气系统改造项目合同，为越南绿色低碳发展助力。**MT**



“双碳”目标提出两周年： 大国重任 言出必行

记者 | 夏小禾

“大家看到，夜空中繁星闪烁，在天空中划出一道道明亮的迹线，要拍出这样的照片，一定要空气质量非常好。”在9月15日中宣部召开的新闻发布会上，生态环境部部长黄润秋手举着一张以故宫午门为背景的夜晚天空星轨图说，“这张图是北京这些年空气质量改善的一个真实写照。”

北京的变化只是我国空气质量变化的一个缩影。记者从发布会上了解到，10年来，我国74个重点城市PM2.5平均浓度下降了56%，重污染天数减少了87%。2021年，全国地级及以上城市重污染天数比2015年减少了51%。中国被誉为全球治理大气污染速度最快的国家。

为什么我国空气质量能在较短时间内有如此大的改善？在黄润秋看来，根本在于党中央、国务院的高度重视和科学决策。尤其是近两年积极推动实施“双碳”目标，这既是我国作为发展中大国的责任，也是推动生态文明建设和经济高质量发展的必由之路。

2020年9月22日，在第七十五届联合国大会期间，中国提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的目标。从这个时间节点开始，通过在国际国内多次重要会议场合反复强调，谋篇布局，抓纲举要，我国在中央层面为实现“双碳”目标按下了快进键。

近日，厦门大学中国能源政策研究院院长林伯强在接受媒体采访时指出，我国实践

“双碳”目标尚处于布局阶段。这两年，在疫情和极端天气双重叠加影响下，碳排放总量仍有所增加，但达成目标的信心是坚定不移的，从中央到地方，各相关部门在按部就班地持续推进。

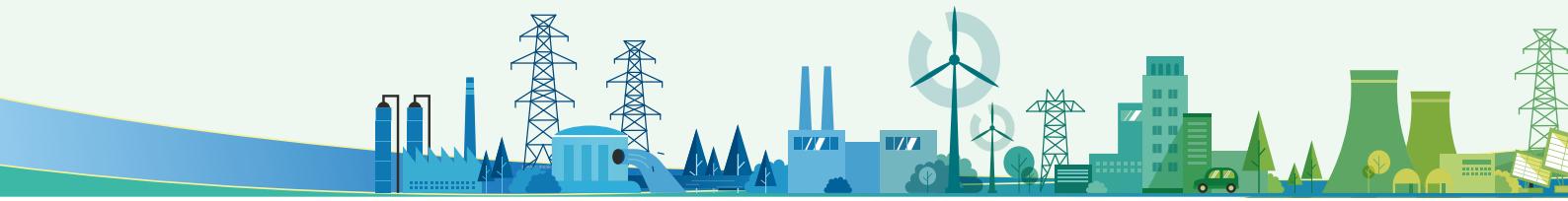
在应对气候变化问题上，中国一直是言必信、行必果，有信心、有决心。这种信心和决心体现在方方面面。两年间，一系列相关政策措施密集出台，高压与疏导并存，“双碳”目标的实现路径不断明确，日益清晰。

2021年10月12日，国家主席习近平以视频方式出席《生物多样性公约》第15次缔约方大会领导人峰会并发表主旨讲话。习近平指出，为推动实现碳达峰碳中和目标，中国将陆续发布重点领域和行业碳达峰实施方案和一系列支撑保障措施，构建起碳达峰碳中和“1+N”政策体系。之后，《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(以下简称《意见》)和《2030年前碳达峰行动方案》(以下简称《方案》)先后发布。

《意见》针对2025年、2030年和2060年3个阶段，提出了构建绿色低碳循环发展经济体系、提升能源利用效率、提高非化石能源消费比重、降低二氧化碳排放水平和提升生态系统碳汇能力等5个方面主要目标。

《方案》则将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程和各方面，提出重点实施“碳达峰十大行动”，即能源绿色低碳转型行动、节能降碳增效行动、工业领域碳达峰行动、城乡建设碳达峰行动、交通运输绿色低碳行动、循环经济助力降碳行动、绿色低碳科技创新行动、碳汇能力巩固提升行动、绿色低碳全民行动，以及各地区梯次有序碳达峰行动。

国家发展改革委相关负责人表示，《意见》是党中央对碳达峰碳中和工作进行的系统谋划和总体



部署，覆盖碳达峰和碳中和两个阶段，是“管总管长远”的顶层设计。《意见》在碳达峰碳中和政策体系中发挥统领作用，是“1+N”中的“1”。

《方案》是碳达峰阶段的总体部署，在目标、原则、方向等方面与《意见》保持有机衔接的同时，更加聚焦2030年前碳达峰目标，相关指标和任务更加细化、实化、具体化。

《方案》是“N”中为首的政策文件，有关部门和单位将根据《方案》部署制定能源、工业、城乡建设、交通运输、农业农村等领域，以及具体行业的碳达峰实施方案，各地区也将按照《方案》要求制定本地区碳达峰行动方案。

除此之外，“N”还包括科技支撑、碳汇能力、统计核算、督察考核等支撑措施，以及财政、金融、价格等保障政策。这一系列文件将构建起目标明确、分工合理、措施有力、衔接有序的碳达峰碳中和“1+N”政策体系。

在《意见》和《方案》发布后，相关文件陆续出台。例如，2022年2月，国家发展改革委等四部门联合印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》；2022年5月，教育部印发《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》；2022年5月，财政部印发《财政支持做好碳达峰碳中和工作的意见》；2022年6月，农业农村部、国家发展改革委联合印发《农业农村减排固碳实施方案》；2022年8月，工信部等三部门印发《工业领域碳达峰实施方案》；2022年8月，科技部等九部门联合印发《科技支撑碳达

峰碳中和实施方案（2022—2030年）》；2022年8月，工信部等七部门联合发布《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022—2025年）》等。

2022年7月14日，碳达峰碳中和工作领导小组办公室召开联络员会议，全面总结2022年上半年工作进展，研究部署下半年重点工作。会议指出，总的看，碳达峰碳中和“1+N”政策体系已基本建立，各领域重点工作有序推进，碳达峰碳中和工作取得良好开局。

会议强调，下一阶段，各成员单位要认真落实党中央、国务院决策部署，推动“双碳”工作取得新成效。一是完善碳达峰碳中和“1+N”政策体系，加快推动相关政策文件出台实施。二是明确责任分工，细化任务安排，强化跟踪调度，加强对地方工作的督促指导，及时纠正偏差，既不搞“碳冲锋”，也不搞运动式“减碳”。三是加强调查研究和形势研判，密切跟踪“双碳”领域出现的新形势、新情况和新动向，及时研究提出政策建议。四是积极开展政策宣传和舆论引导，主动回应群众和市场主体关切，在全社会营造共同推进“双碳”工作的良好氛围。五是及时总结各地区各行业推进“双碳”工作的好经验、好做法、好案例和好建议，做好信息上传下达，加强典型经验做法的推广应用。六是准确把握气候变化领域国际斗争合作形势变化，积极参与双多边谈判磋商，认真筹备《联合国气候变化框架公约》第27次缔约方大会，大力宣传我国“双碳”工作成效，坚决维护我国发展权益。

“双碳”大事记 2020 年

2020 年

- 9月 国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上表示，中国将提高国家自主贡献力量，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取到2060年前实现碳中和。

2021 年

- 3月 碳达峰碳中和首次写入政府工作报告
- 5月 中央层面成立碳达峰碳中和工作领导小组
- 7月 全国碳排放权交易市场开市
- 10月 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》印发
国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》

2022 年

- 2月 国家发展改革委等四部门联合印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》
- 5月 教育部印发《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》
财政部印发《财政支持做好碳达峰碳中和工作的意见》
- 8月 工信部等三部门印发《工业领域碳达峰实施方案》
科技部等九部门联合印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030年）》
工信部等七部门联合发布《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022—2025年）》



聚焦“双碳”目标 共论绿色发展之道

△记者 | 杨歌

实现“双碳”目标既是一场广泛而深刻的变革，也是一项长期任务，其中充满着挑战和机遇。能源行业作为实现“双碳”目标的主战场，在践行“双碳”目标的过程中，企业的运营管理理念有着哪些变化？制定了哪些应对之策？推出了哪些具体的创新技术和解决方案……在“双碳”目标提出两周年之际，带着这些问题，本报采访了施耐德电气、西门子、菲尼克斯电气、山崎马扎克、正泰仪器仪表（以下简称“正泰仪表”）和汇川技术等一批具有技术引领能力和社会责任感的优秀企业，为业界提供有价值的参考。

Q

“双碳”目标提出两年来，公司运营管理理念有着怎样的变化？
对于践行“双碳”目标，公司自身制定了哪些具体的应对之策？

施耐德电气

施耐德电气一直将可持续发展作为企业战略核心，并贯穿于业务经营的方方面面。自2005年起，施耐德电气就推出量化评估体系，以衡量自身在践行可持续发展承诺方面的表现。2021年1月，施耐德电气发布了全新的“可持续发展影响指数（SSI）计划”，推动自身的可持续发展迈入新阶段。施耐德电气把可持续发展目标融入主业，并借力技术联手合作伙伴共同推进碳中和，既是可持续的践行者，也是赋能者。在中国，施耐德

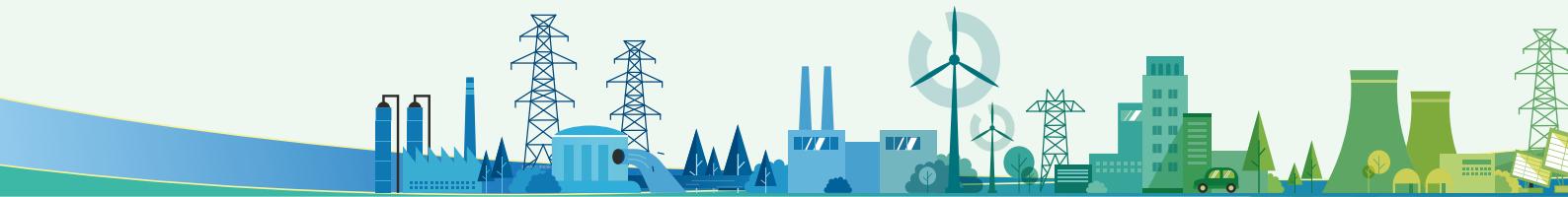
电气23家工厂中的13家已经成为工信部认证的“绿色工厂”，源源不断为中国和全球市场提供绿色创新产品。

针对以“碳中和”为主要议题的气候变化挑战，施耐德电气做出了一系列承诺，将减排效果从碳中和向净零排放递进：到2025年，在公司运营层面实现碳中和；到2030年，在公司运营层面实现净零碳排放；到2040年，整个端到端碳足迹实现碳中和；到2050年，公司供应链运营层面实现净零碳排放。

菲尼克斯电气

菲尼克斯电气积极践行低碳环保绿色发展，应对气候变化，为中国实现2030年碳达峰和2060年碳中和目标贡献菲尼克斯电气的力量。对标联合国2030可持续发展17个目标中，有许多与菲尼克斯电气有着直接

紧密的关系，其中“负担得起的清洁能源”，对菲尼克斯电气而言有着特别重要的意义，而“赋能全电气社会 – Empowering the All Electric Society”的战略目标将指引菲尼克斯电气未来十年的发展方向。



西门子

作为全球率先做出碳中和承诺的大型科技企业之一，西门子承诺将于 2030 年在业务运营中实现碳中和。作为全球数字化创新技术的领军者，西门子致力于凭借科学的咨询规划和先进的数字化解决方案，协同上下游生态合作伙伴，为各行业深度减碳。

2021 年 9 月，西门子正式启动了“西门子中国零碳先锋计划”，在可持续发展的道路上翻开了新的篇章。在自身运营层面，我们坚定践行“零碳先锋计划”，持续落实节

能举措，加强精益和数字化生产，推动减碳进程。2022 年 6 月，西门子全球首座原生数字化工厂在南京投运，预计每年可减少二氧化碳排放 3325 吨，节水 6286 立方米。目前，西门子多家工厂通过部署分布式屋顶光伏系统、采用数字化运维解决方案、执行绿色建筑标准建设，以及构建智慧能源管理平台等，已经取得或正在申请获得国家级和省级“绿色工厂”认证。面向供应链和客户，我们也采取了一系列积极的减碳举措。

正泰仪表

为了更好地实现“双碳”目标，正泰积极布局“源 – 网 – 荷 – 储”智能管理的计量、监测、通信和控制系列产品线，目前，正泰已在户用光伏发电和分布式工商业光伏发电智能监控、大用户负荷分类监控、储能充放电管理、充电桩有序调度、台区配用电融合管理等方面开发了对应的智能化监控设备和系统化解决方案，并已在用户端进行试点和批量供货。

汇川技术

在国家提出“双碳”目标之前，我们就一直在为社会节能减排提供技术支撑，比如新能源汽车的驱动系统，风力发电的变桨偏航系统，电液伺服和高能效永磁同步电机在注塑机行业的应用，在冶金行业应用的液压站节能方案等。



近两年，为推进“双碳”目标，贵公司针对哪些行业与用户推出了相关技术产品与解决方案？应用效果如何？

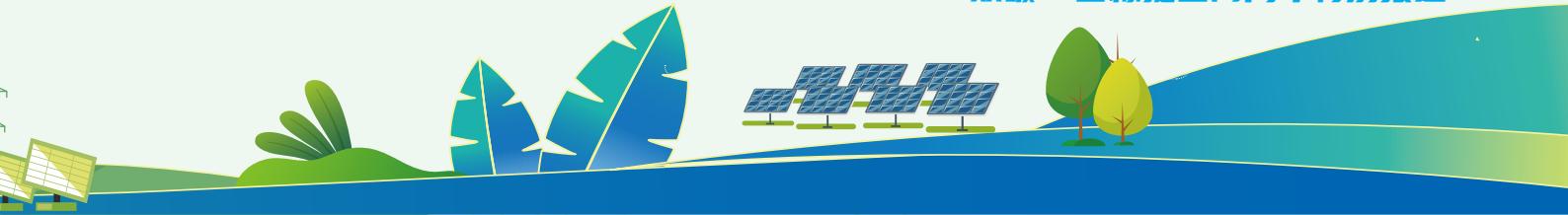
施耐德电气

施耐德电气为中国合作伙伴提供从咨询、规划，到实施、运维四位一体的碳减排解决方案，打造中国企业的碳金竞争力。以数字化利器破解工业碳中和落地难题。

在工业领域，施耐德电气早在 2019 年就已经提出“绿色智能制造”理念，倡导通过综合运用信息技术、运营技术、数据技术、能源技术和通讯技术，帮助企业实现生产和运营的信息化、自动化、数字化、绿色化和

网络化，以此提升工业的效率、韧性和可持续性。

在工业场景中，施耐德电气推出了基于人工智能的增强现实操作顾问、AVEVA APC 先进过程控制、AVEVA RTO 工艺实时优化、能效优化、供应链优化、高级生产排程以及对话机器人等系列产品，以软硬件结合的解决方案和微服务等形态为客户创造更高价值。



数字化既是碳中和的最佳武器，也是当下最可行、同时也被低估的武器。在供应链端，施耐德电气通过数字化等技术打造端到端绿

色供应链，涵盖了绿色设计、绿色采购、绿色生产和绿色交付等上下游各个环节，可持续理念已经融入到施耐德电气业务的方方面面。

菲尼克斯电气

菲尼克斯电气助力清洁能源生产，在风电、光伏光热发电等清洁能源领域耕耘数十年，拥有全面的解决方案，推进能源系统智能化、高效化低碳绿色发展。菲尼克斯电气 Emalytics 智能楼宇能效管理系统，全面提升楼宇能效，从而给人们带来更加舒适的体验，向智慧生活更进一步。

在智慧交通领域，菲尼克斯电气作为核心成员参与了国际和国内电动汽车充换电行业标准工作，与全球多家头部车企合作，提

供符合国际与国内主流标准的更安全、更智慧、更丰富的充换电解决方案。

在智慧基础设施领域，菲尼克斯电气促进基础设施领域实现全面的电气化、网络化和自动化，实现能源效率提升、发电和用电之间的平衡，加速推动基础设施领域绿色发展。

在智慧工业领域，菲尼克斯电气凭借创新产品、数字化技术和解决方案，帮助客户建设绿色、精益、智能工厂，实现智能制造节能减排和绿色生产。

西门子

近年来，西门子推出了多项新技术、新产品与解决方案，碳足迹可信精算与追溯解决方案 SiGreen，实现以小时为单位，准确计算出产品核心生产设备及相关全制造过程的碳排放数据，包含直接排放和间接排放。西门子环保气体绝缘开关设备 blueGIS，在运行时不产生任何对环境带来损害的气体或化学添加成分，目前已为北京、湖北、浙江、陕西、四川、江苏和河北等地区的客户带来帮助，最新应用在张家口市的基础设施升级改造项目中。

西门子在绿色环保领域积累了丰富的行

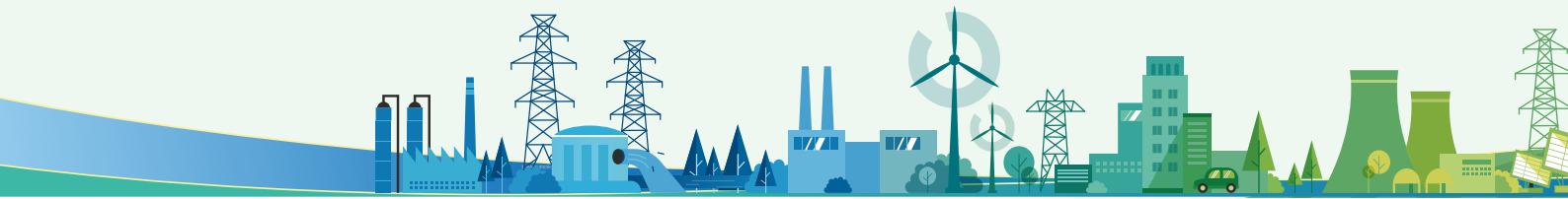
业知识和实践经验，可以为广大企业提供高定制化、高可行性的端到端碳中和解决方案，涵盖碳基线核查、碳中和战略与路线图制定、智慧能源管理，以及数字化工厂减碳等。

在智能基础设施领域，西门子帮助国内一家领先的输配电装备制造企业进行了“双碳”顶层规划，包括碳足迹追溯、“双碳”目标设定、技术实施路线图和绿色产品设计。在绿色钢铁领域，西门子与河钢集团始终并肩前行。从唐钢新区智能无人化料场，到石钢智能钢厂顶层规划及关键设备预测性维护，双方携手树立了一个又一个创新标杆。

山崎马扎克

技术开发需要在实现零碳化的同时，兼顾生产效率的提高。山崎马扎克提倡通过以下3种综合方法，在不影响客户生产效率的情况下，减少对环境的影响，实现社会的可持续发展。

一是节能技术，产品生命周期中约80%的二氧化碳是客户在工厂使用机器时排放的。山崎马扎克通过开发带有节能功效的新型号机床来减少客户工厂对环境的影响。同时，还通过电源再生转换器回收主轴电机和



伺服电机加减速时产生的能量，将其有效用于其他设备，不会浪费电力。二是使用人工智能和数字技术，可实现机床稳定的连续加工精度，从而消除因加工缺陷而导致的加工时间浪费，并且可应对工厂的温度变化，从而降低冷暖空调的电费，减少能耗。通过活

用数字孪生技术的数字准备功能降低能耗。三是工序集约，采用混合复合加工机和自动化系统进行工序集约，缩短生产周期和减少碳排放量，通过工序集约减少中间品的运输，减少碳排放量，通过自动化系统促进能源高效利用。



针对公司所处的行业，稳步推进“双碳”目标的实施，公司有哪些建议？这其中有着怎样的机遇与挑战？

施耐德电气

施耐德电气凭借多年的减碳实践、丰富的技术储备、深厚的产业积累，以及对政策走势的理解等，为行业客户带来了一整套立足中国国情，适合企业顶层需求的碳减排解决方案，并从规划、管理、执行和运营等层面给出建议。

在战略规划阶段，施耐德电气能为客户提供市场分析和行业趋势报告、行业对标分析报告，以及基于企业业务发展的科学碳中和总体战略。在管理提升阶段，建立监测、报告和核查（MRV）体系，量化分析可行性减排举措，建立碳中和路径减排模型等。在执行优化阶段，通过提供数字化现场可再

生能源与微网优化工具、数字化能效管理工具和数字化碳排放管理工具，进行供应链协同能力建设，落实减排计划。在绿色运营阶段，交付能源和可持续发展数字化工具，以及碳中和项目实施跟踪进展报告，同时可建立一套数据处理系统和自动化工具，并交付合规的披露报告，进行报告及绩效相关认证。

通过战略规划、体系设计、执行优化和绩效展现这4个步骤，施耐德电气推动工业企业实践可落地的低碳化行动。这其中，无论是碳排放的追踪、成本优化、风险预知，还是能源优化等，都可以建立在一套框架体系下，实现工业企业面向未来的可持续发展战略。

菲尼克斯电气

“双碳”目标的实现是一项开创性的复杂系统工程，覆盖能源、工业、交通、基础设施和生态环境等关键领域，同时也亟需发展众多新技术加以支撑，如电力行业减碳脱碳的电气化技术、“源-网-荷”侧多类型的储能技术、赋能智能工厂的数字工业技术、交通降碳的新能源汽车技术，以及碳捕集、

利用与封存技术等。

实现碳达峰碳中和，需要集全社会之力。不仅要加强顶层设计，建立健全相关的政策、标准和法律法规体系，还需要企业积极推动数字化转型，带动生产运营模式向高端化升级，发挥自身在承担社会责任，引导社会消费升级方面的重要作用。



西门子

目前，很多中国企业迈向碳中和的进程还处于初期阶段，在此阶段，企业必然会面临很多挑战，不同的企业会面临不同的问题。总体来说，可归结为以下几个方面。

一是如何实现经济效益和环境效益双赢。如何兼顾经济和环境效益，是摆在每个企业面前的难题。

二是如何制定清晰的绿色转型路线图。很多企业虽然已经意识到低碳转型是未来发展的方向，但仍不知道该如何着手去做。

三是如何采用创新技术和手段进行绿色转型。技术创新是实现绿色转型的主要途径，但不少企业由于技术创新根基薄弱，数字化应用水平不高，并且缺乏相应的专业人才，

从而导致转型艰难。

在企业面临诸多挑战的同时，更要看到机遇，从而把减碳作为长期发展战略。不同于“弯道超车”，“双碳”目标将倒逼企业转换“新赛道”，并循序渐进地推进转型。数字化和低碳化，是驱动中国高碳产业实现绿色低碳发展目标的双引擎。其中，数字化是推动减碳的重要抓手，也是实现可持续增长的关键助力。

不久前，西门子中国董事长肖松提出了“一点一杠双驱动”的观点，即以产业低碳化为支点，以低碳产业化为杠杆，数字化和低碳化双轮驱动，这也正是西门子能为广大中国企业提供的核心价值。

汇川技术

实现“双碳”目标，单单依靠某些组织或者某几个行业是远远不够的，它需要全社会采取一致行动，共同努力。对于广大像汇川技术一样的离散制造业企业来说，首先要从节能增效和节材增效两个方面入手。

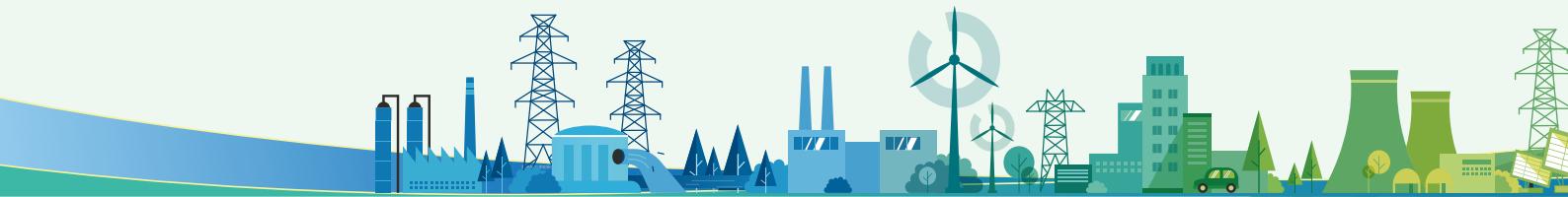
从企业实现碳达峰碳中和的可选路径来看，开展节能增效工作是最具普适性和经济性的。这就要求我们以更大的决心和力度去践行精益生产，用系统化数字化的工具去持

续挖掘节能潜力，从管理和技术两个角度去持续推进节能，减少浪费，增加效益；节材增效则需要通过产品绿色设计、使用绿色工艺来提高对原材料的利用率和物料的循环使用比例，减少对原材料的浪费，从而降低上游产业链的温室气体排放。目前，我们的工厂正在全面推行上述措施。汇川技术愿与社会各界积极交流，分享经验成果，为全社会共同减排贡献力量。

正泰仪表

我们的产品线涵盖智能电表及终端、智能燃气表、智能水表、工控仪表、便携式仪表、光伏计量箱和模拟电表八大系列。为推进“双碳”目标落地，正泰仪表提出了从能源计量

向碳计量转变的重要策略，凭借公司在能源计量管理方面的技术人才和经验积累，积极开发测碳、减碳、控碳相关的设备和系统解决方案，迎接又一次飞跃式发展。



“十四五”时期是我国实现“双碳”目标的窗口期和关键期。在迈向“双碳”目标的过程中，作为重要的参与者，公司有什么具体的计划和目标？

西门子

未来，西门子将从以下三方面入手，持续支持中国低碳转型。

在技术赋能方面，西门子是全球数字化创新技术的先行者，我们致力于将“绿色”和“数字化”基因融入企业发展，帮助不同领域、不同规模的企业取得经济效益和环境效益的双赢。

在生态构建方面，作为全球率先做出碳中和承诺的大型科技企业之一，我们深知低碳转型绝非一家企业能独立完成的。西门子愿意作为先行者、践行者和赋能者，积极联

合客户、供应商等合作伙伴打造零碳产业链，共创绿色生态。今年6月，西门子发布了开放式数字商业平台 Xcelerator，可以集成优选的物联网业务组合，持续迭代线上交易平台，支持客户、合作伙伴和开发者之间的互动与合作。

在积极打造零碳产业园方面，西门子将分享自身对于智慧园区在碳中和及数字化发展方面的行业洞见，提出以数字化手段和智慧化管理实现零碳园区的可行路径，为中国零碳产业园的发展助力。

施耐德电气

从2018年到2022年第二季度，施耐德电气依托 EcoStruxure™ 架构解决方案，已帮助客户和供应商累计减少3.81亿吨碳

排放。到2025年，施耐德电气计划帮助全球客户节约和避免二氧化碳排放量8亿吨，并在公司运营层面实现碳中和。

山崎马扎克

山崎马扎克中国是山崎马扎克在中国设立的子公司，全面负责山崎马扎克在中国市场的研发、生产、销售和服务，拥有1座备

件中心、2座生产基地。我们设定的环境目标是，与2010年相比，2030年产品价值提升100%，碳足迹减少50%。

汇川技术

“十四五”期间，一方面，我们要继续以先进技术支撑全社会减排，用更好的产品和服务去助力“源网荷储”全环节减排；另一方面，在业务快速增长的前提下，大

幅降低自身排放强度，同时协助上下游产业链共同减排，凸显企业社会责任和可持续发展理念，为公司早日实现碳达峰碳中和打好基础。



节能 75%，威图 Blue e+ 创新技术与数字化共建绿色低碳未来

记者 | 丁宜

中国“双碳”计划为中国产业链的发展带来深远影响，并对未来经济持续注入绿色动力。在现代工业领域，持续采用科技创新正是实现“双碳”目标的关键所在。作为控制柜领域的改革者与先驱者，利用突破性节能技术与数字科技助力不同规模、不同行业的客户实现环境效益与经济效益的双赢，是威图不断深耕的目标与企业发展的必然选择。

威图 Blue e+ 突破性技术实现革命性节能 75%

为助力客户显著减少碳排放，实现碳中和发展，持续推动“减碳”进程。威图突破性创新技术，行之有效的温控解决方案——新型全变频节能空调 Blue e+，以其完善的制冷区间，让客户的选择更游刃有余。

该系列采用新型环保制冷剂 R-513A (GWP 631)，更低全球变暖潜能值，低于 R134a 56% (GWP 1430)。同时，压缩机制冷和热管制冷相结合，全变频智能控制，显著延长设备使用寿命，平均节能高达 75%：以 Blue e+ 2 千瓦机型为例，在额定功率条件下，每台每年可以减少高达 3 吨二氧化碳排放，一年所节约的能源相当于一台家用汽车一年的碳排放量；4 台 Blue e+ 空调耗电量相当于一台市面常见常规普通定频空调的耗电量。高效可持续，完美契合碳中和政策。

灵活多样，全球通用。工作温度范围 -20~60℃，耐高温，应用范围广阔；独

特的宽电压设计，110~240V 通用，可选 380~480V，应用范围广；外挂和全嵌两种安装方式，共用一个矩形安装开孔；售后联保，全球认证齐全 (cUL Listed, cULus FTTA, CE & EAC, UKCA, 保障机柜 IP 防护等级的证书 UL FTTA 等)，国际通用。

高防护，高性能，安全稳定。内循环高 IP 等级，UL Type 3R/12；外挂式安装预先点胶密封条，高效安装，省时省力；其冷凝水蒸发器消除冷凝水排放烦恼，提供一站式服务；可根据回风温度、出风温度、特定位等精准温控；24 小时实时监控，柜内温度区间一手掌握；提供预测性维护，提前显示设备潜在运行障碍；使用寿命长，全变频智能控制，温度波动小，避免空调高负荷运转。

人性化设计，高效简洁。全新手机式触摸显示屏，操作灵活顺畅；新型百叶格栅外观设计，精致美观，拆卸更换过滤网更便捷；外观面配置 LED 灯带，直观显示空调运行状态；外包装预先打印序列号，简化用户运输检验流程。

数字科技推动“减碳”进程

在实现“双碳”目标的征途中，威图致力于通过数字科技与数字创新，将“减碳”落到实处。配合威图最新推出的 Scan and Service App，得以将设备一键互联，轻松管理。

这样的智能服务理念可以实现轻松、智能地监控冷却设备的运行，可帮助客户在高度复杂和网络化的“工业 4.0 生产”场景中，始终确保精确的温控，有效规避机器故障和

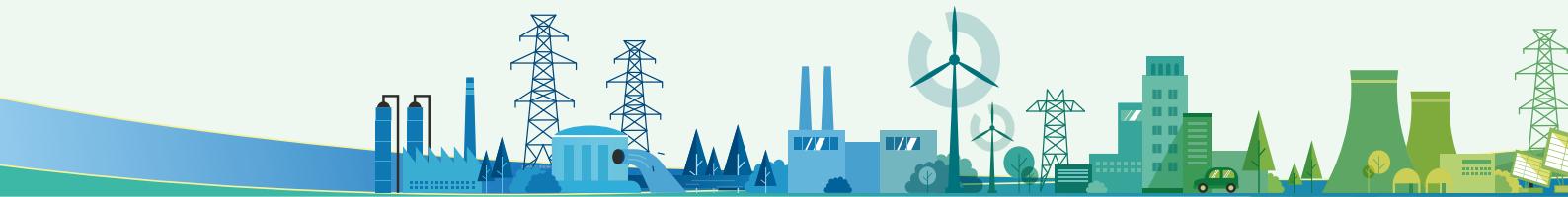


ABB 携多项创新技术 助力多个行业推进绿色低碳转型

记者 | 林楚

中国 “ABB 将通过电气化、自动化和数字化并举的创新技术，以及聚焦清洁能源利用、能源效率优化、电气化率提升三大领域的解决方案，助力电力、工业、交通和建筑等行业提升能源效率，推进绿色低碳转型。”近日，ABB 对外正式发布《开启下一站，绿色可持续未来》白皮书（以下简称《白皮书》），阐述了 ABB 作为全球电气化和自动化的领先企业，在迈向碳中和的进程中积极担负自身使命和责任。

直面三大挑战

《白皮书》表示，在各行业的低碳转型过程中，工业电气化、交通电气化及新型数

字基础设施的发展，会推动电力消费的持续增加，到 2050 年电能在终端能源的消费比重将提高至 50% 左右。践行“3060”战略，能源转型是关键，电力是主力军，需要不断深化电力改革和持续推进技术创新，以解决新型电力系统发展在“源－网－荷”侧带来的挑战。

《白皮书》对上述三大挑战一一进行分析。挑战一是“源”，如何推进清洁能源建设及清洁能源发电效率提升？针对碳中和的时间表，大力开展分布式能源建设，推动可再生能源就近消纳还面临很多困难和实际问题。分布式能源发电设备运行状态感知能力弱，运行管理极其复杂，现有调度管理模式和信息化手段不能充分满足新能源调度的需要。传统集中式发电调控管理不适用于分布式能源微网的管理，需要开发新能源自主运

产线停机的风险，降低运维成本。

物联网接口也是威图冷却解决方案或环境监测传感器智能联网的核心组件。它配备了广泛的接口和协议，将数据整理并传输到上级 IT 系统或本地设备状态监控系统。通过 USB 接口，连接 RiDiag 后台软件，实现空调的详细功能分析和参数设置；通过 LAN 接口，连接威图智能服务平台，实现可视化实时监测，远程管理；通过 IoT 通讯模块，

支持所有通讯协议，实现远程监控、智能联网。

种种迹象表明，我们所处的世界，正日趋复杂。过去十年间，我们见证了前所未有的经济增长，目睹了触目惊心的自然灾害，经历了席卷全球的疫情……各行各业对于如何应对挑战达成共识，即努力实现“可持续发展”。在可持续的旅途中，威图中国将持续创新，携手更多生态合作伙伴，探索未来可持续的无限可能。



行控制及多源协调控制系统。

挑战二是“网”，如何构建新型电力配电网以适应更高比例的清洁能源接入？新一代电力系统为了适应更高比例的清洁能源的接入，未来将推进单端电源系统向多端电源系统转变，形成大电网、微电网、分布式电网有机互补的多元电网形态，以及发展“源－网－荷－储”一体化就近利用等模式。

“十四五”期间，数字新基建、电动充电桩、电能替代、需求侧响应和基于数字技术的“虚拟电厂”均对更加灵活互动的配电网系统提出迫切需求。

挑战三是“荷”，负荷侧模式如何实现由单向流动向“源－网－荷－储”双向互动模式转变？以工业、交通、建筑和新型数字基础设施为代表的能源负荷侧，将推动传统用能方式从单一能源消费转变成能源生产和消费相结合，并利用先天优势在负荷侧建设风电、光伏等清洁能源发电设施。通过定义及识别用能设备的用电可调节度，深度挖掘电动汽车、柔性负荷等可调节负荷的灵活性价值，并通过能源管理系统将负荷侧打造成能源调节的基础。

数字化赋能低碳社会

ABB一直是低碳路上的践行者。2020年11月，ABB发布了2030年可持续发展战略与目标，提出到2030年实现自身运营碳中和，并赋能客户减少碳排放，通过平衡社会、环境和经济的需求，为所有利益相关方创造价值。

《白皮书》指出，ABB通过电气化+数字化的创新技术，聚焦清洁能源利用、能源效率优化、电气化率提升三大领域，赋能低碳社会。

在清洁能源利用方面，ABB的控制设备可以保证风电、光伏等清洁电力的可靠运行。在过去30余年，ABB为世界各地领先的风电机组客户提供了3.5万台发电机，覆盖中

国70%的风机，积极推进中国清洁能源的发展。ABB Ability™智慧能源及配电管理系统可以帮助园区提高清洁能源的就地消纳。该系统可监控整个园区的能源供应及负荷情况，并进行优化计算，根据园区能源需求及供应情况分析清洁能源的最优配置比例，从而助力园区最大限度利用清洁能源。

在能源效率优化方面，ABB Ability™智慧能源及配电管理系统可以将园区生产区域，办公区域以及公共区域能源系统互联，统筹调控全系统能源生产与消费，智能预测生产负荷，主动调配可调节负载，灵活调节建筑能源，满足多种应用场景下智能高效的管理需求，提高总能源使用效率，实现节能减排。

在电气化率提升方面，从发电端到用电端，ABB提供智能中低压配电、关键电源、楼宇产品及控制系统、电动汽车充电等电气化全系列产品及解决方案，以数字化创新技术助力电气化转型的加速，推动全社会电气化率的提升。针对电动交通的发展趋势，基于ABB Ability™数字化平台，ABB充电桩集成了高级网络工具，可以对充电桩实施远程诊断，及时发现故障，从而确保充电桩的稳定、高效运行，降低运维成本。同时，ABB完善的配电解决方案可以帮助电网客户提高资产利用率，满足电气化带来的负荷提升需求。

“作为全球电气化和自动化的领先企业，ABB将创新融入基因。在中国，ABB积极承担企业社会责任，坚持数字化创新，在促进自身绿色发展的同时，帮助客户、合作伙伴实现长期可持续发展。”

《白皮书》指出，ABB立足电力、工业、交通和建筑等多个行业，提供智慧电力、智慧园区、智慧建筑、智慧交通和智慧城市等数字化解决方案，支持中国迈向碳中和宏伟目标。**MT**

西门子数控系统： 为机床行业数字化转型按下加速键

△记者 | 曹楷楠

时至今日，数字孪生得到越来越广泛的应用。在机床制造领域，数字孪生已经由概念走向现实，西门子正是这一实践的推动者。

西门子以数字化技术为核心，依托西门子在机床行业的多年深耕和数控机床领域的技术积淀，实现从产品设计、生产计划到制造执行的全过程数字化，实现虚拟与现实的无缝交互，赋能机床企业探索新的业务形式，助力企业数字化转型。

从标准型到高端 西门子数控系统多管齐下

数控系统被誉为数控机床的大脑，决定了机加工的智能化水平。西门子第一款全球数控系统产于1960年，如今，西门子数控也已与中国机床行业客户合作了数十年。针对不同的客户需求，西门子研发了一系列数控系统，具体型号包括标准型数控系统 SINUMERIK 808D，中端数控系统 SINUMERIK 828D，以及全新一代“数字化原生”高端数控系统 SINUMERIK ONE。

“不过，在生产制造中，数控系统的选并非是由企业规模决定的，而是由企业实际加工机床的形状、速度和效率等决定。”西门子中国有限公司数字化工业集团运动控制事业部机床数控系统部总经理段龙坦言，对中小企业来说，关注点更多聚焦在标准型数控系统上，比较注重数控系统是否易操作、易维护、易管理且应用性强，满足其加工零部件的需求。而大企业则更需要采用从标准到高端的全套数控系统，覆盖到各方面的加工流程。

西门子数控系统产品涵盖全面，可以灵活地根据企



西门子中国有限公司数字化工业集团，运动控制事业部机床数控总经理段龙

业的实际生产需求做调整，满足不同客户的需求。具体说来，标准型数控系统 SINUMERIK 808D 可以配合机床进行正常的车削铣削；中端数控系统 SINUMERIK 828D 除了车削铣削外，还能满足磨削、齿轮相关的切削工艺的需要；最新的 SINUMERIK ONE 则涉及更广泛的加工，可适用于几乎所有类型的机床应用，为数字化时代开启新篇章。

SINUMERIK ONE 虚拟与现实的无缝交互

作为“数字化原生”数控系统，SINUMERIK ONE 是西门子推动机床行业数字化转型的关键产品，可以实现在研发投产之前，将研发设计和优化步骤完全在数字化环境中进行测试，用虚



西门子全面的数字孪生方案



西门子 SINUMERIK ONE

拟技术来模拟产品的设计和生产，提前发现不足并加以改进，安全、高效、经济地完成生产准备工作，通过这种虚拟与现实的无缝交互，大大提高加工的速度、精度和质量。

段龙补充道：“面对一个新的应用场景时，用户需要新的机床或者对原有机床进行优化和调整，数字化设计的优势就凸显出来了，在虚拟世界里做出对应的调整可以大幅降低成本、提升效率。利用数字化整体解决方案，我们可以极大地缩短机床面世的时间，降低设计风险。”

正如段龙所言，对机床制造商而言，在新机床的研发上，可以利用 SINUMERIK ONE 创建机床的数字孪生，加速新机型的研发，并降低研发过程中的投入和风险。对机床最终用户而言，他们可以首先在机床的数字孪生上进行测试，在虚拟环境下进行测试和评估，从而安全、高效、经济地完成生产准备工作。因此，SINUMERIK ONE 能够帮助企业持续地优化生产工作流程，树立生产力方面的新标杆。

基于数字化环境的优势，SINUMERIK ONE 被广泛地应用于各行各业，包括五金管件、汽车零部件、3C 电子消费品、新能源汽车、工程机械、能源发电、医疗，并适用于几乎所有类型的机床应用，如车、铣、立车、镗铣、龙门、五轴、磨削、齿轮、激光、冲压、多任务加工、复合材料加工、传输、增材制造、机器人等。相信未来还会有更多的应用场景出现。

数字化技术 让减碳有据可循

除了聚焦数字化技术本身的创新和应用之外，西门子也可以帮助企业和工厂改善运营模式、降低自身碳排放。段龙认为，从长期来看，低碳转型可以帮助企业降本增效，增加未来的发展韧性。“经济发展是不断变化的，尽早进行低碳布局对于企业的可持续发展非常有

益，会使企业在未来的发展中更具韧性，这也是保持长期竞争力的关键所在。”段龙补充道。

那么，到底该如何实现低碳转型呢？

西门子认为，数字化是低碳转型的引擎。借助数字化手段，企业可以清晰地了解工厂、产业和应用过程中的哪些环节产生了碳，在掌握碳路径之后，企业才能清楚地知道哪里需要减碳。西门子数字化技术能够首先在系统中进行减碳的模拟仿真，通过验证后再在工厂中真正进行实施。因此，西门子数字化技术会帮助企业预知其所采用的生产方式什么时候减碳、减多少碳、能否安全地减碳，以及减碳的过程中效率是否受到影响，进而实现低碳运营。

值得一提的是，2021 年西门子启动了西门子中国“零碳先锋计划”，以数字化创新和跨领域知识与经验为切入点，携手中国各方伙伴共创绿色生态，打造端到端的零碳产业链。力争至 2025 年在中国帮助超过 500 家重点供应商加速减碳步伐，助力数十个行业的上万家企业节能增效，推动产业绿色低碳转型。

从标准数控到高端数控，从提升运营效率到全面实现数字化转型，西门子数控系统正为机床行业的高质量发展插上腾飞的翅膀，“展望未来，西门子将矢志不渝，不断强化本土创新，更好更全面地服务国内客户，同越来越多的合作伙伴一道，通过数字化的手段，为机床行业的数字化、可持续发展按下‘加速键’。”段龙对于行业共同构建美好未来充满了信心。 **MT**

西安研发中心 10 周年庆生 施耐德电气加码 “绿色创新”

记者 | 韩建新

近日，借西安研发中心成立 10 周年之際，施耐德电气携手合作伙伴进一步加快“绿色创新”的步伐。

9月28日，施耐德电气西安研发10周年庆典暨中国科学院城市环境研究所签约仪式于施耐德电气西安研发中心成功举办。

施耐德电气高级副总裁、能源管理低压业务中国区负责人任婧指出：“作为一家在西安深耕多年的高科技创新企业，施耐德电气始终将创新视为发展的源动力。10年来，施耐德电气西安研发中心在当地政府的支持下快速成长。未来，我们将在创新中不断寻求突破，携手行业伙伴，进一步强化西安战略定位，加大产研投入，并积极推进人才培养和生态圈建设，助力西安提升‘制造硬实力’和‘创新软实力’，谱写创新与绿色可持续发展新篇章。”

创新引擎

2012年，施耐德电气与西安市高新技术产业开发区正式签署投资合作协议，全面启动西部区域总部建设等多个项目，而组建西安研发中心则是其中关键一环。

作为西安研发中心10年成长的见证者，施耐德电气中国能源管理低压事业部研发副总裁、中国研究院院长高深对此感慨颇深。他在接受媒体采访时表示，当初在中西部多

个城市选址时，西安凭借其在中西部地区的中心区位优势、地方政府对于投资的优惠政策与扶持力度，以及当地的人才优势，再加上施耐德电气已决定在当地投资成立施耐德电气设备工程（西安）有限公司等多重因素，施耐德电气最终将除了上海和深圳外的中国第三大研发基地设在了西安。

“组建初期，西安研发中心仅有十几人，且人员多缺乏丰富的工作经验，可谓挑战重重。”据高深介绍，研发中心当时的重点工作是关注中国标准及国内客户的需求，致力于开发和维护针对中国市场及客户的产品，同时对客户的定制化需求及产品的升级换代做到快速响应，并提供相应解决方案。“随着西安研发能力的持续提升，以及经过众多项目的历练，2016年，施耐德电气对西安研发中心进行了重新定位与布局，即从单纯的面向国内研发开始走向国际化。”

正是基于对未来发展的精准定调，施耐德电气全球总部的投入力度持续加大，这让西安研发中心迎来了一波高速发展期。“2015年，我们的实验室取得了CNAS认可，2018年AFDD实验室也通过CQC认证，并取得CB现场检测CTF资质。”据高深介绍，尤其是2015年组建的绿色生态设计和低压成套设备设计两大研发团队的快速崛起，2019年，施耐德电气决定将其全球低压成套设备设计中心和全球绿色节能设计中心落户西安，西安研发中心也成为施耐德电气重要的全球产品设计中心之一。

2020年，以西安研发中心为主体的施耐德（西安）创新技术有限公司宣告成立，这也是施耐德

电气在中国的首个以研发活动为主营业务的独立法人实体。至此，西安研发中心实现了从单一研发，到全生命周期研发管理的升级，涵盖了设计、实验、质量、采购和工业化等全链路环节。而其研发团队也从 2015 年的 40 多人发展到如今 120 多人，并主导和参与了超过 100 件专利的申报，向全球输出了诸多研究成果，彰显了中国智慧的全球化价值。

值得关注的是，作为西安研发中心的重要组成部分，施耐德电气全球绿色节能设计中心已开发出 40 余项生态创新技术，参与制定了超过 10 项绿色设计产品技术标准。截至目前，施耐德电气已实现新项目开发 100% 采用绿色设计、总营收 75% 产品授予 Green Premium 生态标签的成果。

2015 年，施耐德电气设备工程（西安）有限公司全面升级，迁入具备先进绿色智能制造与精艺管理体系的新厂址。不难发现，伴随不断的加码与投入，施耐德电气在西安逐步搭建起了研、产、销、供应商一体的生态圈，凭借西安研发中心的强大引擎，将创新研发源源不断地转化为推动产业发展的现实动力。

剑指“绿色”

在当天的庆典仪式上，施耐德电气与中国科学院城市环境研究所正式签约。双方将共建绿色低碳设计创新中心，并在“绿色标准、生态设计”等领域开展“产-研”合作，将围绕完善产品环境评价和生态设计体系、孵化产品生态设计创新技术、搭建产品绿色低碳评价与设计平台、编写产品绿色评价和生态设计教材四大方面开展合作，以更切实的绿色创新推动“双碳”目标落地。

对此，高深表示：“此次携手中国科学院城市环境研究所，施耐德电气将基于既有的绿色设计创新成果以及丰富的行业应用场景，进一步加强生态设计标准化与科技创新有效互动，加速绿色设计体系的完善和绿色设计创新成果的落地。”

我国《“十四五”工业绿色发展规划》中明确提出，要强化全生命周期理念，全方位全过程推行工业产品绿色设计。作为可持续发展的长期践行者和赋能者，施耐德电气始终强调全生命周



期减碳创新理念。

据施耐德电气全球绿色节能设计中心负责人、施耐德电气爱迪生环境专家刘果果介绍，施耐德电气从产品研发设计阶段开始，就充分考虑其全生命周期节能低碳、提高资源循环利用率，从源头推动采购、制造和交付等环节实现全程绿色。“‘双碳’目标的推进，需要做好碳的‘算’与‘减’。”她表示，“算”是需要摸清实际的排放情况，才能有利于“减”的针对性与高效性，而这也是施耐德电气一贯倡导的“先医后药”原则。“‘算’的关键点是标准与数据。一方面，施耐德电气正积极推动所处行业的碳核算标准；另一方面，借助施耐德电气迭代更新的数字化解决方案，可以帮助客户了解真实的排放，并能精准抓取数据。”

如今，绿色低碳已成为提升企业发展的核心竞争力。“未来，带有绿色低碳标签的硬件产品与解决方案，将会带来巨大的商业价值。”在高深看来，不满足低碳要求的企业将会逐步失去市场机会，而走在绿色变革趋势之前的企业将会获取资金资源支持，能够紧紧抓住市场发展机遇。

“不仅如此，融合 IT 与 OT 的数字化转型，是实现更可靠、更智能、更高效能源利用的最快途径，这也是施耐德电气的优势所在。”高深表示，数字时代，没有一家企业能够独自完成所有创新，各方需要围绕数字价值链形成共创。据他介绍，施耐德电气正在实施的面向科创企业的“创赢计划”，已与明阳集团、宁德时代等企业展开的“联合创新”，目的就是与生态伙伴保持密切协作，共同推动创新技术落地。

“秉承开放创新，我们正集结多元化合作伙伴的优势，在最大化满足客户需求的同时，将‘绿色’进行到底。”高深指出。MT

“双碳”赛道风起 汇川技术数字化赋能企业绿色发展

记者 | 石珊珊

经过近 20 年耕耘，一直深耕自动化行业的汇川技术仍是在一路狂奔。其 2022 年最新中报显示，上半年汇川技术营业收入达到 103.97 亿元，归母净利润达到 19.75 亿元，与去年同期相比，业绩再创新高。这其中，得益于领跑者汇川技术董事长朱兴明的不懈坚持和敏锐的市场洞察力。“从 2016 年到 2021 年，经过 5 年‘双王’战略的实施，汇川技术在工业自动化和新能源汽车领域都做到了中国领先的位置。2021 年，随着国家‘双碳目标’的提出，公司也由‘双王’战略向数字能源管理战略转移，并取得了不错的成绩。”

目前，汇川技术已经在光伏、风电、储能、新能源汽车和港口岸电等众多领域交出了靓丽的成绩单。如为 500 吉瓦 + 光伏项目提供制胜产业链解决方案，超过 2 万台风机应用了汇川技术的风电变桨和偏航系统解决方案，为 700 吉瓦时 + 锂电池产线提供全产业链解决方案，国内港口 40% 以上岸用电源由汇川技术制造，为超过 5 种工程机械电动化提供解决方案，为新能源汽车提供超过 100 万台电控产品，为 1000+ 电动汽车、电动重卡换电站提供全套解决方案，为 9000 米石油钻机提供核心控制器以及势能回收综合能源方案……据测算，仅 2021 年度，汇川技术的产品

和方案应用所带来的直接和间接温室气体减排效应总计达到了 3600 万吨。

应时而变 应势而为

朱兴明这位华为出身的技术型领导，带领汇川技术从无到有在自动化领域成为了中国的龙头企业，在全球范围内也成为了极少数拥有从传感层 - 执行层 - 驱动层 - 控制层 - 信息层综合产品及解决方案全覆盖的自动化公司。

“如果不是身在其中，你很难理解我国在某些领域遭遇的‘卡脖子’现状。汇川技术成立到现在 19 年了，从成立的第一天开始，我们的目标就是瞄准核心技术的国产化，这个目标从来没有停止过。”朱兴明说。这个过程中，汇川技术不断积累各种行业应用，从电机的驱动控制，到工程技术的电动化，再到新能源乘用车、商用车动力总成，汇川技术的发展与国家智能制造和产业转型升级战略高度契合。

数字能源管理的提出让汇川技术的经营理念发生了 3 个大变化。朱兴明介绍，“第一，国家‘双碳’目标提出后，汇川技术从源网荷储侧进行详细的战略解码，发现了很多市场机会。而且我们也做到了‘有所为、有所不为’，有优势的我们去做，没有优势但国家需要的我们也必须去做；第二，‘双

碳’让公司‘推进工业文明、共创美好生活’的愿景和使命得到升华，我们的一切创新都要围绕着如何让这个世界更美好，这就是‘科技向善’；第三，公司的经营理念发生了很大的变化，在业务的选择上，把‘双碳’落地的过程中客户急需要的技术平台放在最优先的位置去解决。”

“源网荷储机”解决用能 “最后一公里”

要想实现碳达峰碳中和，核心还是要解决如何高效利用电能，如何少用电的问题。因此，无论是服务风电、光伏、储能，还是港口岸电建设，汇川技术一直致力于通过推动产线的工艺升级，降低能源产业链核心部件的成本，提高产品的可靠性，推动新能源发电降本增效，从而服务于新型电力系统建设，助力“双碳”目标实现。

“我们要做好最后一公里的建设，汇川技术要给客户提供效率更高、控制更好、调节更好的解决方案，让能源利用率达到极致。”朱兴明说。

汇川的数字能源管理，将“源网荷储机”5个关键环节互相配合协作。在源侧，汇川技术主要作为支撑角色，在风电行业推出了变桨和偏航产品。在网侧，汇川技术配合国网南网建设了国家级样板储能项目，支撑了新型电力系统的稳定运行。在荷侧，汇川技术推出了数字能源管理平台，并率先在苏州工厂上线应用。该系统依托物联网、互联网、大数据、云计算和人工智能等技术，针对水、电、气、冷、热、光、储和充等多场景，从能源供应、输送和消耗全流程多环节提供集中动态监控和数字化管理的方案，帮助用户实现能源的平衡、优化、预测、节能和降耗；在储能环节，除了为电化学储能系统提供PCS系统之外，汇川技术还向飞轮储能系统



汇川技术董事长朱兴明

提供了核心部件，此外更是全流程参与了锂电池的制造，为储能行业的发展提供了助力。在机侧，以光伏产线装备为例，汇川提供了包括PLC、伺服、机器人和视觉系统在内的多个整套解决方案，帮助硅晶产线大幅提升制造效率的同时，进一步降低能耗。

与其他公司不同，汇川技术在“双碳”落地上拥有无可比拟的天然优势。“汇川技术跟传统的数字能源管理公司不太一样，每年驱动产品累计发货就超过180吉瓦，拥有数千家各行各业的企业客户，对工业场景，生产线里面的负载、产线，以及这些产线的连接非常熟悉。此外，汇川技术构建了新的基于模型驱动的数字化平台，就像是软件行业的乐高，能够让我们的客户以DIY的模式去自我构建数字化能源管理系统，从而带来一个可持续的数字能源发展模式。”朱兴明讲道。

今后，汇川技术将围绕设备物联、设备节能、管理节能、能效分析和绿电构建，着力实现“自动化+数字化+能源管理”的综合解决方案落地，努力走出一条智能化和绿色能源深度融合的发展之路。**MT**

穿越困境 坚定自动化的力量

——访贝加莱工业自动化（中国）有限公司肖维荣

△记者 | 张 兰

丘吉尔说过，“永远不要浪费一场危机”。

在疫情冲击叠加诸多国际因素的影响下，很多企业都陷入了前所未有的困境：物流受阻、供应链断裂、原材料短缺、交付周期延长……

贝加莱工业自动化大中华区总裁肖维荣博士不止一次地问自己：在这样一个充满变数和挑战的时代，自动化将扮演怎样的角色？贝加莱还可以做哪些事情？如何更好地服务制造业的转型？

更加开放的自动化策略

“尽管4月份我们的业务发展受到了一些冲击，但贝加莱今年依然会超预算发展，实现两位数的业务增长。”肖维荣透露，得益于中国制造发展动力和长期潜力，中国有望在未来5-10年内跃升为贝加莱全球第一大市场。

对未来的信心让贝加莱更加关注风险管理，尤其是在疫情的影响下，如何降低客户的损失、提高客户对项目的自主性、增强供应链的安全韧性，成为肖维荣重点思考的方向，“我们要用自动化、数字化的手段帮助客户管控风险，在出现任何变化时第一时间将风险降到最低。”

一个显著的改变是，贝加莱在战略上正



贝加莱工业自动化大中华区总裁肖维荣

在趋于更加开放——从向客户提供整体解决方案扩展到提供通用项目模板（GAT）。“这类似饮食界的预制菜肴，我们不是给客户把菜做熟，而是提供切好的配菜、佐料甚至工具，客户只需按照适合他需要的配方，自己加热一下就可以吃了。”肖维荣形象地阐释道，这相当于我们给客户的解决方案中有80%是标准化的，另外有20%个性化的部分可以满足客户基于应用的灵活性。“标准化可以降低成本，而个性化可以助力客户形成差异化的竞争力。”

《贝加莱 Automation Studio 自动化项目开发指南》，以“自动化备查宝典，工程师能力助推器”为编著思想，按照工程项目开发的流程化繁为简，深入浅出的开发，并给予了项目开发模板（GAT）用于让新手也能快速入门，具有非常强的实用性。

基于这种模块化的构想，贝加莱的客户及合作伙伴可以在完整的应用框架之下快速构建项目，大幅降低开发周期，提升项目实施效率。从硬件来看，贝加莱为客户提供的从CPU、I/O、驱动系统、电机到HMI的灵活的配置架构；从软件来看，贝加莱利用自身的行业Know-How和客户一起研发供应平台，为客户打造独特的价值。

“实际上，这种模块化的策略在某种程度上是不利于贝加莱的销售的。”肖维荣开诚布公地谈到，但是我们要着眼于未来，着眼于客户的愿景，采用这种开放灵活的配置架构可以让客户在出现风险如硬件供应不足时，第一时间做出改变，化险为夷。

让机器学习发挥更大价值

提到智能制造，“黑灯工厂”似乎代表了数字化转型的最高水平。在肖维荣看来，这不是最有效、最经济的制造模式。未来，智能工厂的最佳状态是将知识通过人集成“封

装”进机器中，实现人与机器的有效协作。

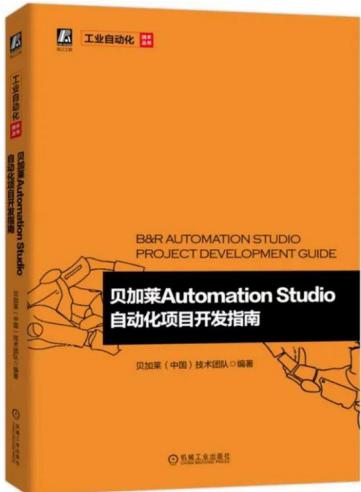
所以说，数字化要落地，机器设备是关键。与传统的只需完成车铣刨磨功能的设备不同，今天的机器被赋予了更多“智能”的含义，机器学习开始发挥更大的作用。

这其中有两个非常关键的前提，一是机器向人学习，二是特定的应用场景。肖维荣坦言，不存在通用的算法解决所有问题，机器智能只有和物理场景结合才有意义，否则对制造业而言就没有任何价值可言。而贝加莱的工作便是聚焦在基于行业Know-How，通过机械、电气控制、智能算法与模型以解决装备制造业面临的问题，提升效率、降低成本，脚踏实地协助他们打破数字化转型的瓶颈、实现对数字化转型的需求。

exOS，贝加莱最新推出的 Enhanced Cross-over Operating System—增强跨界操作系统，它是一个旨在将IT与OT世界连接的技术，为机器制造商提供了更为广泛的创新设计可能性。

首先是以通用取代专用，以制药、注塑等行业的动态称重为例，由于受到空气阻力、温度、继续状态等诸多环境因素的影响，上下料的动态称重一直是个难点，通常装备制造商会为设备搭配昂贵的专用系统，通过辅助测量来达到精确的称重效果。贝加莱在通用设备中纳入算法，通过人工智能的方式建





模、训练、推理，从而用较低的成本实现同样的功能，为客户带来价值。

其次是用软件替代硬件，以故障早期诊断为例，通过增加一些硬件如振动传感器、温度传感器等，进行数据测量，分析设备的使用状况和使用寿命，进而判断设备是否需要更换。但硬件的方式无疑会增加设备成本，贝加莱以软件的方式，通过算法构建一个物理模型，比对设备相应的参数，来判断不同的参数变化，获取机械的特殊表现，同样可以达到故障早期诊断的目的。

“只有懂得工艺、了解实际问题、理解客户痛点的工程师，才能够巧用机器学习、将机器学习的效益发挥到极致，省去专用系统，替代额外的硬件，提高装备的竞争力。”肖维荣补充说。如今，在包装印刷、注塑、电子半导体等诸多工业应用场景下，贝加莱可以为机器学习提供多种解决方案，通过挖掘数据的潜能，提升用户生产运营效率。

布局新赛道

过去十年，以光伏发电、风力发电为代表的中国新能源行业实现了华丽蜕变，从靠补贴到拼技术，从两头在外到问鼎全球，中国新能源产业硕果累累，成绩斐然。

尤为让人赞叹的是光伏发电技术的快速迭代，大幅降低光伏发电成本，最为显著的技术成果归功于金刚线切割技术的进步，运

动控制在其中起到了稳定的支撑作用。

肖维荣解释道，随着行业对硅片“薄片化”的追求，在金刚线切割中，切割线径越来越细，这对高精度的放卷及张力控制提出了巨大的挑战，贝加莱的张力控制库可以确保高速动态下的张力稳定控制。

在单晶炉、切片、清洗制绒、扩散、PECVD 等核心工艺设备中，都有贝加莱电气控制与传动技术、智能技术、数字化技术等关键技术的应用，贝加莱也着实成为光伏装备产业崛起的见证者和受益者，行业年增长幅度超过 30%。

在风电行业，原本预期的平价缓冲期迟迟没有出现，由于上网电价不断下调，降低度电成本的压力就落在了制造商的身上。据肖维荣透露，贝加莱正以后来者的角色，凭借独特的技术创新为风力发电产业降低成本、提高发电效率做出贡献。

首先，贝加莱为风电行业的客户提供一个供应平台，助力国产化的开发，在这个框架之下，整机制造商更换系统，加快国产化步伐，进而降低主机成本。

其次，贝加莱通过“*All in One*”的解决方案，使风力发电机的变频、变桨和主控共用一个 CPU，从而提高机组提高的可靠性，降低成本。

特别值得一提的是贝加莱为风电行业开发的全新智能偏航系统。偏航系统的控制策略与风电机组的最大风能捕获量息息相关，直接决定了机组的发电量。传统的偏航系统执行机构通常采用机械方式，即电机锁定齿轮的结构，以确保系统偏航机舱平稳顺畅不振动，但正是由于这种相互制约、相互摩擦，容易造成机械损伤，不仅影响设备寿命，还会降低对风效率和发电量。贝加莱智能偏航通过伺服控制的手段，使机舱在无损耗、无摩擦的情况下实现旋转，大大提升偏航相关机械零部件的利用率，提高机组发电量。

如今，随着“双碳”目标的落地，新能源产业更是迎来黄金发展期，技术革新依旧是未来行业发展的颠覆性因素，贝加莱将继续与产业协同共进，共谋健康、可持续的未来。MT

万片级焊速 三菱电机成就光伏领域跨界黑马

▷ 三菱电机

每小时逼近 10000 片，这是宁夏小牛自动化设备有限公司光伏电池片自动化焊接的速度。

从 2008 年起，这家从生产彩扩设备起家的公司，通过战略转型、研发创新，携手三菱电机研制光伏组件自动化生产设备——太阳能电池片全自动串焊机系列产品，打破了我国光伏串焊机依赖进口的局面，一举成为光伏领域的跨界黑马。2021 年，宁夏小牛产品在国内市场占有率达到 60%，实现产值 15.69 亿元。

客户痛点：自我革新与转型升级

“刚开始我们使用单片机系统，但随着客户群体的增加，过程中暴露的问题越来越突出。”宁夏小牛总经理王小牛谈到，来自客户的需求反馈越来越多，原有控制系统面临着何去何从的抉择，转型升级迫在眉睫。

自 1999 年成立以来，宁夏小牛一直致力于自



宁夏小牛总经理 王小牛

动化设备的研发、生产及销售。2008 年宁夏小牛进入光伏行业，通过不断创新，推动组件制造环节自动化的发展。核心产品组件前端智能焊接系统，包含超高速划焊一体机、高精度排版机、汇流带焊接机、贴胶带机及多主栅串返机等。

近年来，依托自动化与数字化技术，实现产线的高效集成与智能升级，成为推动光伏产业扩产增效的关键。而光伏发电的核心组件——太阳能电池片，其加工涉及上料、搬运、归正、划片，到叠片、焊接、检测、切断等加工环节，不仅需要设备稳定可靠，还对位置、精度和效率提出了更高要求。

“只有勇于自我革新，才能赢得发展主动权。”对于宁夏小牛来说，除了外部的需求驱动，源自内部的创新驱动是转型升级的根本动力。

“我们非常重视提升技术创新能力与自主研发能力，每年都会根据光伏市场的发展变化开展新项目的研究工作。”王小牛谈到，目前宁夏小牛已申报专利 253 项，产品主要销往国内龙头光伏组件厂家，并出口加拿大等 20 多个国家和地区。

解决方案：从定制到迭代 持续推进机型研发

作为宁夏小牛的事业伙伴，三菱电机紧跟行业发展趋势与宁夏小牛发展步伐，从商务支持、技术升级到售后服务开展全方位合作，助力宁夏小牛持续深化技术创新，赋能光伏行业发展。

控制系统的适时切换

2017年，迫于生产经营的压力，宁夏小牛着手推进控制系统的转型升级。

“当时很多客户反映，单片机的控制系统出现问题后，除了极少数了解单片机的工程师外，其他人压根没法维修。”宁夏小牛电控研发总工雍刚介绍，随着使用客户的增加，设备的维修量也相应上升，不同客户对控制系统的要求也越来越高。



宁夏小牛电控研发总工 雍刚

此时，距离宁夏小牛第一台全自动串焊机CH2316诞生，已经过去了七年的时间。从影像设备移植到工业自动化设备后，单片机控制系统的局限性逐渐暴露出来，设备的升级改造、二次开发都比较困难，严重影响了终端客户的使用体验。

“当问题发生时，只有少数人能够解决，必然会影响大规模的发展。”意识到这一隐患后，宁夏小牛当机立断，推动单片机控制系统转向PLC控制系统。

行业领先的技术实力、稳定可靠的产品品质，是三菱电机进入宁夏小牛合作视野的重要原因。产品研发过程中，三菱电机技术团队驻扎现场一个多月，随时处理宁夏小牛遇到的各类技术难题，尤其在机器人动作优化方面，更是给予了大力的支持，直接促成了200片/小时的产量提升。

“当时可以说是不计成本，但取得了非常大的成功。”雍刚回忆道，宁夏小牛发展之初的策略是主打“性价比”，采用三菱电机

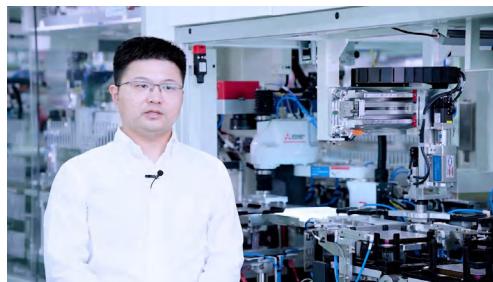
产品是一次全新的尝试。2017年多主栅划片串焊一体机CHn40推出后，产能提升到3600片/小时，市场占有率更是达到60%，一下子成为宁夏小牛引以为傲的一款产品。

尝到甜头的宁夏小牛，开始全线采用三菱电机产品，并将更多精力放在关注客户需求上。

45天的定制开发

“我们的目标，是在CHn40的基础上，实现产能翻番。”2019年，不满足于现状的宁夏小牛开始研发新一代产品——S4000串焊机。机械结构研究即将完成之际，宁夏小牛研发团队发现，机器人必须侧装，才能解决占地面积小的问题。

“留给我们的时间非常少。”三菱电机项目负责人陆一鸣回忆，从产品立项到整机交付，只有四个半月的时间，而当时整个进度已经过半，不允许有任何“差池”。



三菱电机项目负责人 陆一鸣

“接到任务的当天，我们所有人一起，头脑风暴了两天两夜。”陆一鸣回忆，尽管很疲惫，但最终明确了壁挂式机器人的开发方向，以及布局规划、设计尺寸等关键信息。

返回上海后，三菱电机技术团队，会同日本总部的技术专家，马不停蹄地细化推进，仅用45天完成了壁挂式机器人的定制开发，助力宁夏小牛迅速占领技术高地，获得了大批量的客户订单。

超高速划焊一体机重磅亮相

谈到技术创新，雍刚笑称：我们属于“研发上瘾”型企业。在宁夏小牛看来，只有持续性的自我革新、储备技术，才能抢占市场先机。



三菱电机定制化壁挂式机器人

这一理念与三菱电机不谋而合。百余年来，三菱电机长期占据自动化领域技术高地，从生活日常到绿色出行，从数据中心到智慧医疗，广泛服务于社会进步的各个领域。

S5000P 超高速划焊一体机，是宁夏小牛新一代自主研发的组件前端智能串焊设备，属于 S4000、S5000 串焊机的“升级版”。

S5000P 串焊机

为了实现高产能、高质量、低损耗地输出产品，宁夏小牛针对自动化运动控制提出诸多技术要求：控制系统运行速度要快，控制系统和驱动系统的信息数据交互稳定性要高，分布式控制系统的相应速度要快且能够实现异常后快速复位，伺服驱动的定位精度要高且产品线全。



S5000P 串焊机

针对这一研发诉求，三菱电机依托百余年的制造经验和完整的自动化产品体系，提出适用于宁夏小牛的智能制造解决方案，在降低成本、提升产能的同时，进一步优化结构设计，提高设备的友好性、稳定性。

2022 年，S5000P 重磅亮相，客户如潮水般涌来。其前沿的先进技术、稳定可靠的产品品质，成为业内口口相传的口碑。

客户效益：9000 片 / 小时 跨界的华丽转身

“在双方的共同努力下，S5000P 成功实现了一小时九千片加工的高效生产。”雍刚谈到，逼近万片级的速度，已经达到了串焊机的天花板。

回顾一路携手的历程，雍刚坦言，“把难题交给三菱电机的时候，其实我们心里没有底”。但从整体结果来看，三菱电机的技术服务与产品品质都无可挑剔。无论产品研发过程中遇到哪类技术难题，三菱电机都能从既有的技术解决方案中找到最优解；即使是非标设计，三菱电机也能进行定制化开发，满足个性化的客户需求。

宁夏小牛当家人王小牛更是直言，“三菱电机助力我们取得了一个又一个成功”。经过二十余年的积累，宁夏小牛拥有完整的产业链、供应链及售后服务体系，在自我革新中为行业为社会持续创造价值。

如果说卓越稳定的产品品质，是三菱电机收获信任的基础，覆盖伺服驱动、变频器、PLC、工业机器人和低压电器的产品线，是三菱电机的重要优势，那么，及时全面的技术支持和快速定制化的产品开发，则成为三菱电机赢得宁夏小牛长期认可的关键。

2022 年 8 月 16 日，三菱电机与宁夏小牛再度携手，正式签订战略合作框架协议，誓为光伏行业带去更多智造力量，助力中国早日实现“30·60”双碳目标。从初识到深交，三菱电机将携手宁夏小牛，继续深化双方在技术创新的合作，持续突破价值创新的新极限，推动光伏行业智能制造的发展。MT

派克汉尼汾：守护只此“氢”绿

△派克汉尼汾

氢能是世界公认的清洁二次能源，是实现双碳目标的有效途径。近期，国家发展与改革委员会发布《氢能产业发展中长期规划（2021—2035）》，明确指出氢能是我国未来能源体系的重要组成部分，将氢能产业提升至战略性新兴产业和未来产业重点发展方向。而绿氢因产自可再生能源、从生产到使用均零碳排放而备受青睐。据国际能源署预测，到2050年全球对氢气的需求将达到5.2亿吨，其中绿氢要占到约60%，绿氢产业正迎来发展热潮。作为运动和控制领域的先行者，派克汉尼汾（以下简称“派克”）可为绿氢制取与储运提供高品质产品与解决方案，帮助客户应对技术挑战，在绿氢赛道上占据主动权。

点对点助力 让氢气制备更高效

绿氢是指利用风能、太阳能等可再生能源制取的氢气，整个生产过程实现真正的零碳排放。目前，稳定、快速、大批量制取绿氢的技术路线主要为电解水。国内多地明确提出要实施“风光氢储”多能互补，推进风光等可再生能源大规模电解水制氢。

电解水制氢技术分为碱性电解水、质子交换膜电解水和固体氧化物电解水三类，目前碱性电解水制氢大规模应用技术成熟，而质子交换膜电解水将是未来主流方向。在这两类制氢方法中，电解槽出来的电解液一路富含氢气，另一路富含氧气。氧气经气液分离装置处理后排放到室外，氢气则继续在分离装置内经过洗涤、冷却、干燥等流程，成为高纯氢气。

在电解过程中，制氢装置内的原料水会不断消耗。为确保水电解的连续进行，需定期向电解槽补充原料水。进入电解槽的原料水如未



经过滤，其含有的颗粒杂质就会影响电解槽的性能和使用寿命，派克推出的 XtreamPure® 系列过滤器在此时具备明显优势。

作为一款纳污量高的大流量液体过滤器，XtreamPure® 可高效过滤原料水中的颗粒杂质，使其水质符合要求，保护电解槽。XtreamPure® 选用直径达 152 毫米，长度可选（1016 毫米、1524 毫米）的大滤芯，以内进外出的过滤方向让杂质停留在滤芯内部，从而保持滤筒清洁。

从电解槽分离出来的氢气会携带水分、管垢等杂质，还需进行纯化。在这个过程中，派克卧式气体聚结器 Gemini PuraSep®2 可发挥大作用。

这是一款采用气体聚结技术的新型产品，配置两级滤芯，同时具备过滤和聚结功能，不仅可高效过滤氢气中低至 0.3 微米的固体颗粒和液滴，还可去除压缩后的氢气流中夹带的润滑油。与传统立式聚结器相比，它能更有效地处理大气量、高污染物含量的气体，其配套的 PGC 滤芯集过滤与分离功能于一身，客户无需再配置二级叶片或旋风管等除雾设备。

过滤后的氢气还会含有微量水分，派克旗下的干燥机通过变压吸附，可对氢气作进一步的干燥处理。它采用高品质吸附剂，吸附性好，气耗低、能耗低，耐磨损，可通过物联网远程监控系统进行远程监控。此外，派克旗下的 Hyperchill 冷水机可用于电解槽制氢系统，精准控制系统温度，还可带走电气设备产生的热量，为它们降温。冷水机采用独立温度控制器，控制精准、制冷效果好。

精密级仪表管阀件 让氢气储运更安全

氢能产业的爆发性增长，使得氢能储运成为决定成败的关键因素。现阶段常见的氢气储运方式为高压气态储氢，即将制备好

的氢气压缩至高压气态形式，存储到储氢瓶，再通过长管拖车等工具运输至用氢点。

在这个过程中，由于氢气分子量小，在高压环境中极易发生泄漏，达到一定浓度时还易燃易爆。因此，确保氢气管路系统的安全可靠至关重要。此外，与压缩机连接的管路还要应对因压力波动而造成的振动，其耐压性能和抗振性也要足够优秀。

派克在氢气应用领域处于前沿地位，拥有数十年的经验，能为氢气管路提供安全可靠的 A-LOK® 卡套接头、针阀及仪表管等高品质管路解决方案。

A-LOK® 双卡套接头通过 EC-79 认证，具有优秀的抗振性能和密封性能，可作为派克所有仪表阀的整体终端连接接口，以降低对螺纹部件的需求，减少管路安装的潜在泄漏点。这款接头采用派克硬化处理技术，在加强硬度的同时提高抗腐蚀能力，其临界点蚀温度 (CPT) 可高达 76°C。

在氢气管路系统中，各种截止阀或止回阀必不可少，它们可以随时切断氢气或控制氢气流向，从而满足氢气下游系统的要求。派克推荐选用针阀作为氢气管路系统的开关阀，相较于球阀，针阀在氢气介质下密封性更好、使用寿命更长。派克可提供 6000~150000 psi 中高压等级的针阀，以适配不同氢气压力的管路系统。其中 Autoclave 高压阀通过 ISO19880 规范，阀杆及阀座经过改良能有效密封小分子气体，提升氢气系统使用安全，使用寿命超过同类产品 40%。针对氢气介质应用场景，派克还对高压截止阀和单向阀的密封结构进行设计升级，满足用户对产品长期高压氢应用的密封等级要求。

打造一个无泄漏的管路系统，适用的仪表管功不可没。派克仪表管产品采用光亮退火和机械抛光工艺，圆整度和表面光洁度更高。仪表管各项指标均高于行业标准，与卡套接头连接更可靠。目前，派克的仪表级管路解决方案已成功应用于国内一家风氢储多能互补示范项目，深受客户认可与信任。

除了高压气态储氢，低温液态储氢技术也在迅速发展，被行业认为是未来氢气储运的趋势。为了更好助力液氢储运，派克在原有的深冷 (-196°C) 阀门基础上，研发出多个系列的低温液氢阀，适用于压力高达 50 bar 的液氢应用。

精准传控 让氢气压缩更可靠

在氢气储运过程中，氢气压缩的重要性亦不容忽视。拥有广泛运动与控制产品技术组合的派克，可为氢气压缩提供整套电液控制系统，该系统已成功应用在国内某客户的液氢储运项目中。

整套电液控制系统分为供油系统、控制系统和执行机构及软件，包含液压站、伺服油缸及伺服比例阀组、电气控制等组件。在液氢压缩过程中，油缸运动速度需要根据氢气的实际流量进行精准调节。油缸既要做快速往返运动，又要满足高精度定位。油缸在 10 cm 的单次行程里，每分钟往复次数高达 140 次，同时定位误差需控制在 ± 0.5 mm 之间。这意味着油缸必须在 35 ~ 45 毫秒之间完成加速或减速，才能实现精准定位。最终，派克通过全套控制系统解决了这一难题。

在控制系统中，派克针对高性能运动控制应用研发的轴控制器发挥关键作用。该控制器基于性能强大的中央运算处理器，在内部集成闭环液压轴控制功能，并支持 CoDeSys 环境下的二次开发编程，尤其适用于需要高速、高精度控制的电液应用场合。在本次应用中，轴控制器基于油缸位移传感器的反馈，实时监测油缸的运动位置，并通过伺服比例阀及时调整进入油缸的流量。

为了减少油缸运动阻力，派克选用一款低摩擦力伺服油缸，油缸上方装有 D1FP 伺服比例阀组。该阀采用新型 VCD® 驱动器驱动，实现真正的伺服阀频率响应，在最大流量下仍具有优异的动态特性，适用于高精度的液压位移、压力与速度控制。它会根据轴控制器的“指令”实时调整进入油缸的油量，让油缸实现所需的运动速度和定位精度。派克还对油缸和比例阀做了防爆处理，技术团队也根据客户实际需求提供定制化的程序编程、调试与安装服务。这些举措更好地提升了客户体验，赢得客户的高度评价。

派克在氢能领域行业经验丰富，其拥有的卓越产品及解决方案远不止于此。无论是在氢气制取环节，还是在加氢站等储运环节，亦或者在氢能源车等应用领域，派克都能提供仪器仪表、流体连接件、液压、密封及过滤等高品质解决方案。这些解决方案在国内已得到成功应用，满足不同的氢能项目需求……可以预见，在绿氢这条新赛道上，派克必大有作为！ **MT**

基于神经网络遗传算法的冲压件拉深工艺参数优化

李 宇, 赵博宁

(柳州铁道职业技术学院智能制造学院, 广西柳州 545616)

[摘要] 目前, 工业领域对冲压件提出了更高的要求, 只有满足相应的要求, 才能使零件在实际工作中发挥出最大的作用。要生产出高质量的冲压件, 可采用神经网络遗传算法对拉伸工艺参数予以优化。文章以深腔型零件为研究对象, 通过有限元分析, 结合神经网络遗传算法对该零件冲压拉伸工艺的参数进行了优化, 为设计出更加良好的冲压件提供技术支持。

[关键词] 神经网络遗传算法; 冲压件; 拉伸工艺; 参数优化

[中图分类号] TG346 **[文献标志码]** A

现代零件制造领域中存在多种不同的零件制造工艺, 冲压法是其中较为常见的一种, 主要用于薄壁材料塑性处理, 操作流程简单, 所需成本不高, 制造周期较短, 且有利于材料的节约, 因而应用在汽车、航空等诸多领域。据调查统计, 汽车制造生产过程中, 超过70%的零件采用了该工艺。为了制作出更加良好的冲压件, 本文对基于神经网络遗传算法的冲压件拉深工艺参数优化进行了研究。

1 有限元分析

1.1 零件特征与材料性能参数

本次研究中, 选择某深腔型冲压件作为研究对象, 对基于神经网络遗传算法的参数优化进行了研究。该零件结构如图1所示, 属于左右对称结构, 全长652mm, 宽度352mm, 最大深度155mm, 最小圆角3.6mm。该零件制作采用304不锈钢, 抗腐蚀性较强, 塑形变形量较大, 冷加工处理时可能出现硬化, 拉伸可能出现褶皱等。与此同时, 对该材料做拉伸试验后能够发现, 应力与应变可看做是线性关系, 即应变力越大, 材料所产生的应变量越高。

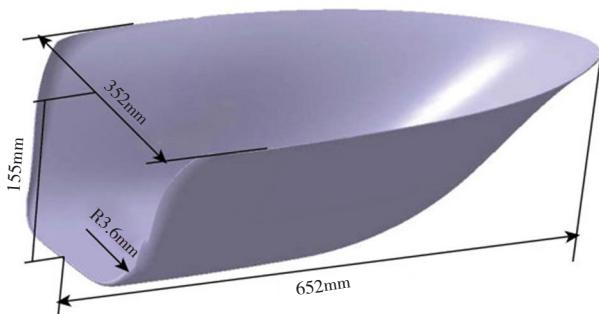


图1 某零件结构

1.2 有限元模型构建

通过对该零件的观察能够发现, 其属于对称性结构, 因而为了得到更加精确的运算结果, 并减少计算量, 将该

零件平均分成左右两部分, 仅选择其中一部分展开分析。在凹模缺口25mm左右位置处, 设置呈现为圆形的拉延筋, 深度控制在4mm左右, 其中在凸筋处, 圆角半径控制在4mm, 在凹筋处, 圆角半径控制在5mm, 凸筋的宽度为11mm。确定出上述设计流程后, 利用CATIA软件构建零件模型, 如图2所示。

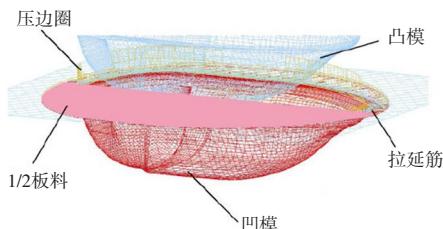


图2 某零件的有限元模型

1.3 选择试验因子

根据零件材料、工艺等具体情况, 分别设定了零件的初始参数, 见表1。以此为基础, 逐渐对各项参数予以优化, 从而得到最佳的冲压工艺参数。

表1 某零件冲压工艺初始参数

指标	参数
材料类型	Cr18Ni10N
冲压速度 (m/s)	0.25
压边力 (MN)	0.98
厚度 (mm)	1.2
摩擦因数	0.125
模具间隙 (mm)	0.12

1.3.1 压边力条件

压边力指的是作用在防皱压边圈(简称“压边圈”)上的压力。这一参数设置得是否合适, 直接关系到整个零件制作质量。若压边力较大, 虽然可控制褶皱的出现, 但由于局部区域施加了很高的应力, 使得零件出现破损。因

而在零件冲压制造时，必须要设计出最佳的压边力。根据以往的工作经验，可确定出压边力的计算公式：

$$F=qA \quad (1)$$

式中， F 为压边力； q 为单位内材料表面施加的应力，若板材厚度在0.5mm以上， q 值通常处于2~2.5MPa； A 为压边的总面积。某零件制作时，初始厚度设定成1.2mm，因而 q 值选择为2.5MPa，压面约684856mm²，将数据代入公式(1)后，可推导出 $F \approx 1.712\text{MN}$ 。

1.3.2 冲压速度

零件冲压工艺当中，冲压速度的设定至关重要，直接关系到材料塑性变形量，只有设置出最佳的冲压速度，才会保证零件加工质量。在有限元软件当中，设定刚性模具加载速度时，通常是现实速度的10倍。结合某零件生产加工需求，在冲压工艺当中，分别设置了5种冲压速度，具体为：0.15m/s、0.2m/s、0.25m/s、0.3m/s、0.35m/s。

1.3.3 模具间隙与摩擦因数

零件加工制造时，不仅受到上述几个指标的影响，而且还与模具间隙与摩擦因数有关。这两个指标与零件冲压时所产生的阻力有关，进而影响到零件的壁厚。间隙与摩擦系数呈反比例关系，间隙较小，摩擦因数较高，均会增加材料的阻力，不利于材料的流动，使得零件壁厚并不均匀。相反，间隙较大，摩擦因数较小将会导致零件表面产生明显的褶皱，或是出现贴模度差等问题。为此，在模具间隙方面，将其设定成板厚的10%~20%。根据作用区域的不同，可将零件划分成两个模块，每个模块内，由于其形状、厚度等方面存在差异，导致其与材料间存在的摩擦因数略有不同，其中，在压边处，摩擦因数设定成 A ，在凸模处，摩擦因数设定成 B 。本研究当中，为了简化分析和计算流程，将该指标设定成典型数值，即 B 值为0.05、0.125、0.15、0.17与0.12。

通过上述分析，可得到5个试验条件，见表2。

表2 试验条件

指标	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	条件 5
压边力 (MN)	1.372	1.519	1.666	1.813	1.960
冲压速度 (m/s)	1.5	2	2.5	3	3.5
模具间隙 (mm)	1.2	1.26	1.32	1.38	1.44
因数 A	0.05	0.125	0.15	0.17	0.17
因数 B	0.05	0.125	0.15	0.17	0.12

1.4 评价指标

冲压件生产制作时，很容易出现各种缺陷，其中，破裂是最为常见的一种，主要是由于工艺流程、材料质量等

诸多因素的影响，使得零件出现较高的壁厚减薄量，最终导致零件出现破裂。所以，本研究当中，对零件制造质量进行评估时，将壁厚减薄量作为主要指标，其运算公式为：

$$h = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中， t_0 为零件设置的初始厚度， t_1 为零件成型后的厚度。

2 参数优化

2.1 灰度关联分析

对冲压件工艺参数优化时，要进行灰度关联分析，流程如下。

首先，做出假设，存在序列 $y=[y(1), y(2), \dots, y(n)]$ ，并按照公式(3)，确定出参数的标准化分布。

$$f[y(k)] = \frac{y(k) - \min_k y(k)}{\max_k y(k) - \min_k y(k)} = x(k) \quad (3)$$

其次，将 $x_0=\{x_0(k), k=1, 2, 3, \dots, n\}$ 作为参考序列。式中， k 为时间点。假设在工艺当中，共包含 m 个序列，可确定出在 k 时间点处， x_i 与 x_0 间的关联系数，具体为：

$$\xi_i = \frac{\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|}{|x_0(t) - x_i| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|} \quad (4)$$

式中， ρ 为分辨常数； $\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 为级差谷值； $\max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 为级差峰值。

最后，可得到 x_i 与 x_0 的关联度：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (5)$$

在归一化处理时，通过均值法的方式，降低其他因素对关联度的干扰，即将分辨率设定成0.5。在公式(5)中，分别代入表2的数据，进而推导出各指标的关联度，具体为： $F=0.798404$ ， V (冲压速度)=0.643081， S (模具间隙)=0.574453， $A=0.561681$ ， $B=0.516463$ 。由此可知，相对于压边力与冲压速度来说，其他各项指标的关联度较低，对零件冲压质量的影响较弱，因而可根据生产标准来确定，即 $S=1.32\text{mm}$ ， $A=0.05$ ， $B=0.2$ 。

2.2 拉丁超立方抽样

对于以上试验来说，选择的是绝对参数，可能导致试验结果存在较大的误差。因此，为了缩小结果误差，提高分析结果的准确性，应用拉丁超立方抽样的方式，对参数进行改进。其中，在冲压速度方面，从[1.5, 3.5]m/s的范围内取值，在压边力方面，从[1.372, 1.960]MN的范围内取值，共可获取50个样本，将这些样本整理后，能够得到图3所示图像。

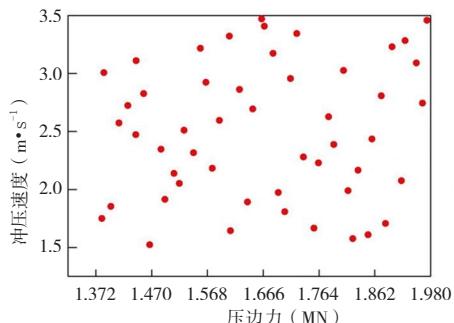


图3 拉丁超立方抽样结果

2.3 遗传算法寻优

2.3.1 构建BP神经网络

对数据进行处理后，则应通过BP神经网络的方式，对冲压工艺进行模拟。这一过程中，学习值是较为关键的因素，直接关系到最终模拟结果的精确性，若学习值较高，会提升训练速度，降低训练系统的稳定性；若学习值较小，则会降低收敛速度，影响计算速度。本研究当中，将学习值选取为0.1。与此同时，利用公式(6)，确定出隐层神经元数量。

$$l = \sqrt{m+n} + a \quad (6)$$

式中， l 为隐层神经元数量； m 为录入数据量； n 为输出数据量； a 为常数，取值1~10，且为整数。通过上述数据分析后，可得到 l 处于[3, 13]范围内，取中间值8。

2.3.2 寻优结果

按照上述原理，选择减薄率峰值当做适应度，采用二进制编码的方式，优化冲压件的工艺参数。通过分析可以发现，在种群当中，规模量为20，交叉概率为20%，变异概率为20%，共迭代100次。由此，即可得到适应度谷值，也就是说，减薄率谷值为16.57%，这一情况下，变量为(1562.5, 140.0)，进而推导出冲压速度 $V=1.5255\text{m/s}$ ，压边力 $F=1.761\text{MN}$ ，具体如图4所示。

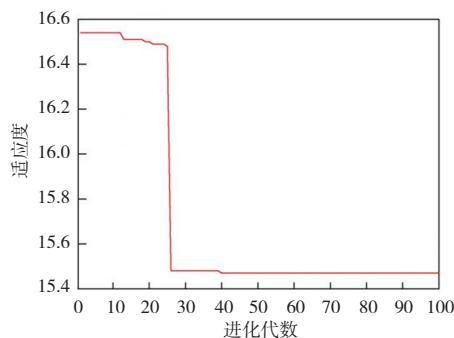


图4 适应度分析结果

3 结束语

本研究当中，以神经网络遗传算法为主要工具，以某零件作为实例，对冲压件拉伸工艺参数进行了优化。通过优化后可得：冲压速度 $V=1.5255\text{m/s}$ ，压边力 $F=1.761\text{MN}$ ，壁厚减薄率谷值=16.57%，符合零件生产要求。由此表明，该方法应用效果良好，可将其应用到实际当中。

参考文献

- [1] 于传浩, 张毅. 基于Dynaform的凸缘圆筒件拉深工艺有限元分析[J]. 锻压技术, 2022, 47 (2) : 56–61.
- [2] 白颖, 钟李欣, 范子翠, 等. A286薄壁大径双曲排气半管拼焊拉深工艺探索[J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (9) : 65–72.
- [3] 胡垚, 章争荣, 董勇, 等. SUS304/Al1050/SUS430复合叠层板拉深工艺参数对筒壁起皱的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (9) : 144–149.
- [4] 魏巍, 贺雷永, 李垂辉. 基于遗传算法和灰色神经网络的电力机车产品需求预测方法[J]. 包装工程, 2022, 43 (12) : 37–44.
- [5] 郝佩瑶, 朱金伟, 廖继龙, 等. 基于神经网络和遗传算法的铸锭晶体硅质量控制及工艺优化[J]. 人工晶体学报, 2022, 51 (3) : 385–397.

基金项目

广西中青年能力提升项目 (2020KY44005)

作者简介

李宇 (1981—), 男, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为机械制造技术。

垃圾焚烧发电厂垃圾吊全自动控制系统设计

曾 峥¹, 周 明¹, 刘子铭², 李 楠³, 刘峻男⁴

(1.中电国际新能源控股有限公司, 上海 200086; 2.德阳和新环保发电有限责任公司, 四川德阳 618003;
3.杭州集益科技有限公司, 浙江杭州 311200; 4.中电国际新能源海南有限公司, 海南海口 570106)

[摘要]目前垃圾吊以手动或半自动方式作业, 影响垃圾焚烧发电站燃烧效率。利用激光扫描技术, 建立垃圾池的三维模型, 结合定位技术、安全防护技术以及垃圾吊原有半自动控制系统, 设计了远程全自动控制系统和相应的全自动控制策略, 将垃圾吊控制室迁移到中控室, 实现了垃圾吊的远程全自动控制, 就地无人值守。现场运行表明, 垃圾吊全自动控制系统的实施有效促进了垃圾库及发电厂的安全高效经济运行, 为国内同类垃圾焚烧发电厂的高效运行提供了借鉴。

[关键词]垃圾焚烧发电厂; 垃圾发电; 垃圾吊; 全自动控制; 三维模型

[中图分类号] TM619 **[文献标志码]** A

当前垃圾焚烧环保发电领域的垃圾给料系统都是设计一个独立的垃圾吊操作室, 从进料、堆料至上料操作大部分由人工进行控制。因人员操作技能水平参差不齐, 影响到上料垃圾的混合均匀程度、发酵程度, 有时不能达到焚烧炉对垃圾热值的最佳需求。这是导致垃圾焚烧环保发电厂燃烧效率偏低的一个重要因素。

国内垃圾吊多采用通用起重机配专用抓斗, 控制方式多为手动或半自动方式, 远程控制或全自动化控制研究仍处于起步阶段。李力等利用三维定位技术, 提出桥式起重机空间避让策略^[1]。胡阳军等研究了无人化垃圾吊全自动控制系统的功能要求^[2]。聂福全等通过对垃圾高度、区域划分、防摇摆、全自动工艺优先级等关键技术的研究, 提出了全自动垃圾吊技术方案^[3]。张冒等基于垃圾仓2D激光扫描获得垃圾表面高度, 利用网格划分法分析安全取料点, 并建立全自动控制系统^[4]。

可以看出, 目前相关研究内容着重于垃圾吊的关键技术, 没有全自动控制系统的工程应用。本文利用激光扫描技术, 建立垃圾池的三维模型, 结合定位技术、安全防护技术以及垃圾吊原有半自动控制系统, 设计了远程全自动控制系统, 将垃圾吊控制室迁移到中控室, 实现了垃圾吊的远程全自动控制, 就地无人值守。

1 垃圾吊全自动控制系统概述

某生活垃圾焚烧发电厂, 配置1个垃圾池、2台垃圾吊。垃圾池长51m, 宽24m, 深17m, 有效容积约为20808m³, 可储存垃圾约8947t, 可储存垃圾时间约7d。在垃圾池上部安装2台行车及3台抓斗, 二用一备。2台垃圾吊与卸料门有联锁保护接口, 已实现半自动控制, 具有定位、防晃、

防倾斜、防碰撞等功能。

垃圾吊全自动控制系统如图1所示, 在采用原有垃圾吊定位数据及半自动控制数据的基础上, 利用垃圾池和投料区的激光扫描数据, 建立垃圾池和投料口表面三维模型, 并以此确定抓斗的抓料点和路线规划, 从而实现垃圾吊远程全自动控制。

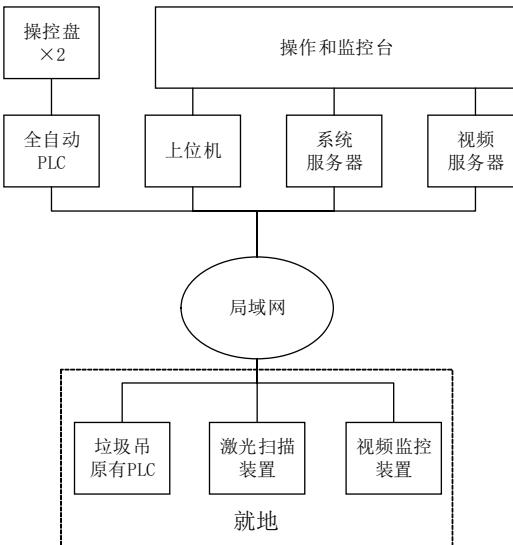


图1 垃圾吊全自动控制系统框图

2 垃圾吊全自动控制系统设计

按照功能系统, 垃圾吊全自动控制系统分为定位系统、三维模型系统、视频监控系统、安全保护系统以及控制系统。

2.1 定位系统

垃圾吊定位系统是整个全自动控制系统的基础。系统采用数据接口驱动程序从垃圾吊原有PLC系统采集大车位置、小车位置、抓斗位置数据。为消除大车、小车在行

走方向上的编码器累计偏差，系统启动前或累计行走一定时间后，自动将垃圾吊大车、小车自动行走至左右边界限位，触发一次位置校准。

2.2 三维模型系统

三维模型系统是整个垃圾吊全自动控制系统的核心技术之一，系统后台的实时料堆三维模型及实时投料口三维模型是垃圾吊全自动控制过程中完成自动定位、自动堆料和投料、自动路径规划的关键。

2.2.1 实时扫描

在垃圾池、投料口分布安装多套三维激光扫描装置，每套激光扫描装置包括单台 / 多台固态激光扫描仪。实时激光扫描数据送至系统服务器，通过建模软件完成三维建模。

2.2.2 三维模型软件

系统服务器接收垃圾池和投料口的实时激光扫描数据，进行料堆三维建模。对于多台固态激光扫描装置的点云数据，需要预先进行数据拼接。

(1) 点云数据拼接。在调试阶段，利用特定标志点，确定多台固态激光扫描装置的位置以及相对姿态，并确定各固态激光扫描装置两两之间的数据重叠区域。接收到各个固态激光扫描仪的数据后，根据各激光头相互之间的重叠区域来确定两两拼接关系；再从相互拼接的数据中选取3对以上的同名点进行粗拼，将2个点云大致拼在同一个坐标系；再利用迭代最近点（Iterative Closest Point，ICP）技术进行精密拼接，选择最优拼接效果方法；重复操作使多台固态激光扫描仪数据全部拼接为一个整体。对拼接后的数据进行整体调平操作，将数据调整到实际水平的效果。在此基础上，生成多台点云固态激光扫描仪数据拼接转换矩阵。

(2) 三维建模。利用多台固态激光扫描仪数据拼接转换矩阵，对各台固态激光扫描装置的实时数据进行拼接，拼接后所有点处于同一坐标系。因作业环境的原因，噪点较多，对拼接后点云进行去噪处理；根据水平面划分为若干网格，获取每个网格中 Z 值最小的点，即生成水平网格的最高点，剔除掉不符合要求的点，所以部分网格没有最高点数据；利用处理后的点，三角化处理生成面片，利用面片对每个水平面网格进行 Z 值的处理，形成每个水平网格的坐标和高度值，进一步生成料堆三维模型。

2.3 安全防护系统主要功能

(1) 接入垃圾吊原系统所有安全保护装置过载、异步、限位、防撞、禁区等信号，以及双机协同避障、系统网络

状态检测等保护。

(2) 在全自动控制系统中增加基于垃圾吊位置信息的软限位功能，优先级高于垃圾吊自带保护。保护信号发出后解除自动控制，转为就地手操模式。

(3) 大块异物识别。针对垃圾中掺杂的大块异物，采用图像识别的方式进行处理。在垃圾吊堆料、倒料、投料、清沟等运行过程中，通过软件重点对松料位置、卸料口位置、投料口位置的图像进行实时分析处理，识别大型异物时进行标注并声光报警。

(4) 垃圾车卸料与垃圾吊抓取安全闭锁。利用卸料口料位高度参数及卸料门车辆位置识别功能，将信号全接入全自动控制系统，同时接入各卸料门信号，用于判断当前卸料口安全情况。控制系统根据信号情况、卸料区垃圾情况、垃圾吊工作情况自动进行安全闭锁。当垃圾车在卸料时，垃圾吊不前往卸料区。选用高杆下落式道闸，当垃圾吊在卸料区抓料时，控制卸料口道闸自动关闭，防止卸料门频繁操作，增加故障率。

(5) 通信故障保护。系统实时监测远程控制网络状态（操作员站、数据服务器、图形服务器、PLC 之间建立网络通信用心跳判断程序）。当有网络故障，远程无法控制垃圾吊时，垃圾吊自动停止运行，切换为就地手动运行模式，同时声光报警。

(6) 操作台上设置硬紧急按钮，在非常紧急情况下，操作员可以拍下操作紧急按钮，切断垃圾吊的工作电源。

2.4 控制系统

控制系统包括垃圾吊原有 PLC、全自动 PLC、上位机及操控盘。原有 PLC 已实现半自动控制，具备定位、自动移位投料、防晃、防倾斜、防碰撞、与卸料门联锁等功能。全自动 PLC 与原有 PLC 进行通信，将上位机指令和操控盘指令转发至原有 PLC。上位机提供人机界面，与三维模型系统进行对接，获取垃圾池和投料口的料堆三维模型，自动规划抓料、堆料、投料等任务的作业点和作业路径，并将指令下发至全自动 PLC。操控盘模拟垃圾吊控制室的操作手柄，配合监控视频实现远程操作，完成全自动控制作业之外的少量手工作业任务。

2.5 视频监控系统

在卸料大厅、垃圾池、垃圾吊及投料口，配置高清摄像头，方便运行人员远程监视。

3 控制程序设计

系统控制软件分为二层，一是安装于系统服务器的策略程序，二是全自动 PLC 程序。策略程序通过定位信息、

垃圾库和投料口的三维模型数据，自动制定垃圾吊作业计划、行走轨迹规划、作业控制指令下达、避让控制等；全自动 PLC 程序根据策略程序的作业控制指令，进一步通过实时检测数据，做出对垃圾吊原有 PLC 的动作指令，从而完成既定的作业程序。

3.1 策略程序设计思路

3.1.1 作业路线选择

系统根据作业目标位置、料场三维模型、垃圾吊运行状态等自动规划安全、最优化作业路线。

3.1.2 两台垃圾吊控制选择

采取避障为先，投放需要，效率最优的原则，软件分析料场三维数据，自动进行垃圾吊选择及工作智能化调度。

3.1.3 卸料口选择

根据卸料门状态和卸料门下方料堆高度，选择工作目标卸料口。

3.1.4 堆料控制策略设计

(1) 系统根据开启的卸料门信号和卸料区域的料堆三维模型，控制垃圾吊进行自动抓料作业。

(2) 堆料顺序以从内向外、先低后高、分层打底堆料的原则进行，以梯形堆料为目标。

(3) 利用三维模型体积大小判断是否转入满库存模式。满库存模式下将投料区剩余垃圾上层干料转运至备用区，带水料转至发酵区。

(4) 投料区揭顶。投料区揭顶至发酵区，揭顶高度调试确定。

(5) 在堆料过程中，抓斗开斗与大车、小车移动需在规定区域同步，使垃圾撒料均匀。垃圾抛洒的高度为离垃圾面 2m。

(6) 堆料高度的控制。根据各分区特性，设定各分区的堆料高度。

(7) 堆料坡度的控制。根据安装调试情况，确定固定的坡度值，按照一定的坡度要求来进行堆料码料。

3.1.5 投料控制策略设计

(1) 投料口料位识别。对投料口前后两次激光扫描得到的三维模型进行比对，计算出投料口内垃圾消耗量和消耗速度，进而控制投料时间。

(2) 入炉垃圾选择。根据堆放时间判断选择最佳入炉的垃圾，以安全、经济的抓斗运动路径运行。

(3) 取料控制。根据料堆三维模型，计算出取料位置，快速定位，完成取料。取料点按照先高后低原则选择。

(4) 投料控制。根据料斗内三维模型计算出来的料位

决定抓斗的开度和投料的速度，投料时要控制料位的均匀分布，投料过程从左到右、从右到左交替进行。每斗垃圾分两三次开斗投放。

(5) 投料期间定期进行投料区拦污栅前的区域清沟作业，拦污栅前区域清除的垃圾转至堆料区上部堆放。

(6) 实时监测投料区与相邻区的垃圾堆高位差，防止相邻区域垃圾堆体坍塌。

(7) 操作站具备单独投料子程序，优先于自动控制信号。

(8) 操作站引入锅炉 DCS 数据，包括推料器工作状态信号、干燥炉排温度数据、料斗挡板位置信号等，在数据异常情况下转换垃圾吊工作模式。

3.2 控制逻辑设计

根据策略程序设计思路，2台垃圾吊投料和堆料逻辑流程如图2所示，在抓料点定点抓料过程的全自动 PLC 控制逻辑如图3所示。

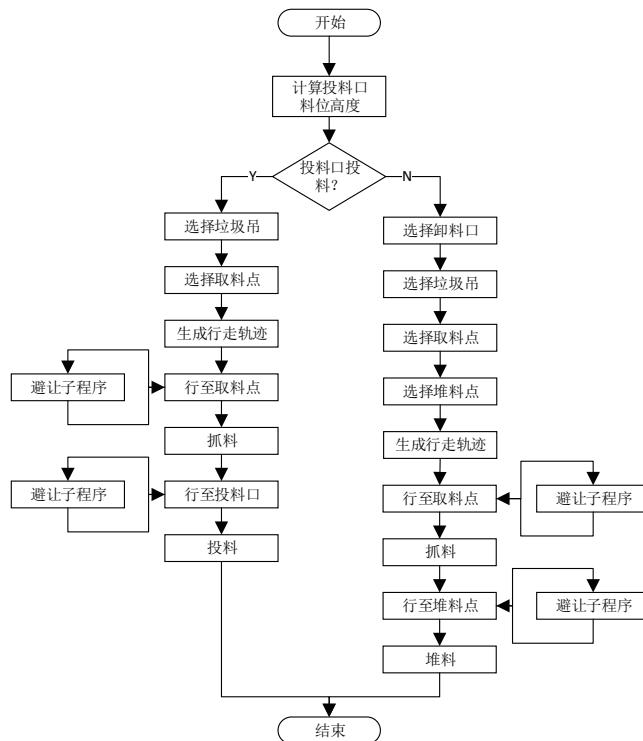


图2 策略程序投料和堆料逻辑流程

策略程序的操作主界面和三维仿真如图4和图5所示。现场运行表明，垃圾吊全自动控制系统大幅降低了操作人员劳动强度，减少了运行人员数量，提高了系统可靠性和安全性，有效促进了垃圾库及发电厂的安全高效经济运行。

4 结束语

本文利用激光扫描技术，建立垃圾池的三维模型，结合定位技术、安全防护技术以及垃圾吊原有半自动控制系

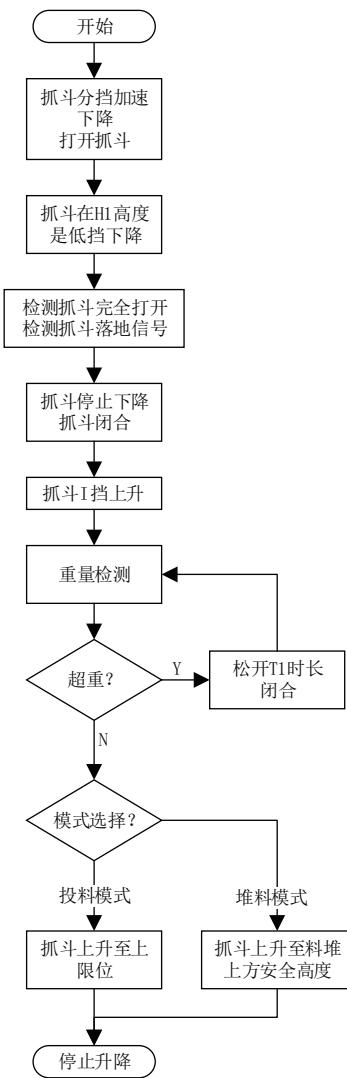


图3 抓料过程全自动PLC控制逻辑

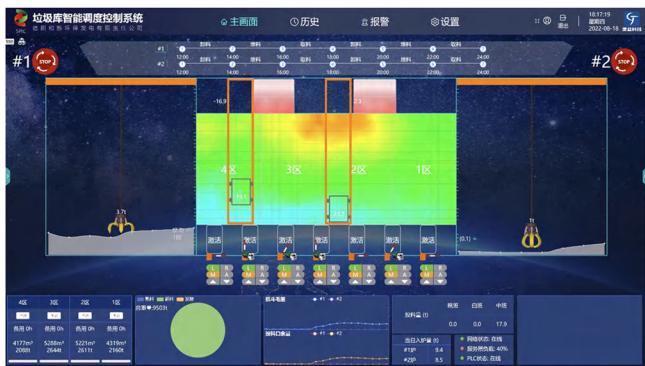


图4 垃圾吊控制策略程序主界面

统，设计了远程全自动控制系统。

(1) 垃圾吊全自动控制系统分为定位系统、三维模型系统、视频监控系统、安全保护系统以及控制系统。三维

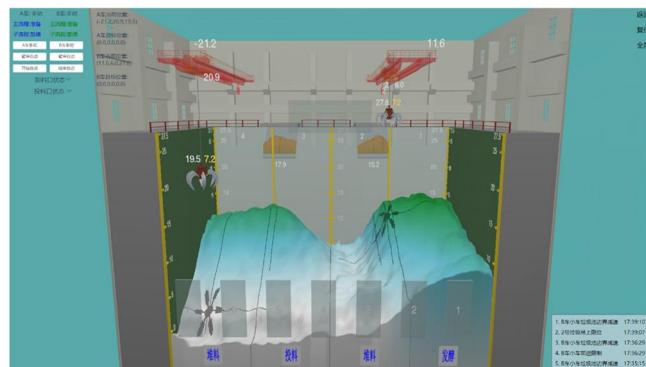


图5 垃圾吊控制策略程序三维模型

模型系统是整个垃圾吊全自动控制系统的核心技术之一，实时料堆三维模型及实时投料口三维模型是垃圾吊全自动控制过程中完成自动定位、自动堆料和投料、自动路径规划的关键。

(2) 设计了控制系统的控制策略，包括作业路线、垃圾吊、卸料口的选择策略以及堆料控制、倒料控制、投料控制、清沟控制的策略设计。

垃圾吊实现远程全自动控制系统后，可将垃圾吊控制室迁移到中控室，实现了垃圾吊的远程全自动控制，就地无人值守。现场运行表明，垃圾吊全自动控制系统的实施有效促进了垃圾库及发电厂的安全高效经济运行。

参考文献

- [1] 李力, 岳文翀, 潘彦宏. 基于三维定位技术的桥式起重机空间避让策略[J]. 起重运输机械, 2019 (22) : 80-82.
 - [2] 胡阳军, 沈建, 赵文川. “无人化”垃圾吊全自动控制系统功能分析[J]. 电工技术, 2020 (24) : 1-2.
 - [3] 聂福全, 聂雨萱, 张科广, 等. 浅析全自动垃圾起重机关键技术问题及解决方案[J]. 中国设备工程, 2021 (22) : 253-255.
 - [4] 张冒, 程文明, 杨翰元. 全自动垃圾搬运起重机控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2022 (6) : 73-76.

作者简介

曾峥（1983—），男，湖南长沙人，硕士研究生，信息系统项目管理师，主要研究方向为发电企业自动化智能化应用。

基于PLC和HMI的电机无级调速系统的设计与实践

张丽

(昌吉职业技术学院, 新疆昌吉 831100)

[摘要]设计利用变频器进行三相异步电机的无级调速, 利用工业触摸屏实现人机交互, 具有成本低、运行稳定、扩展性好、节能的优点。在三相异步电机速度控制领域有很好的应用价值。

[关键词] S7-200; 触摸屏控制; MM420 变频器; 无级调速

[中图分类号] TM921.51 **[文献标志码]** A

目前, 对三相异步电机的控制除了传统的点动、连续运转、正反转、制动等以外, 对其速度运行方面要求也在不断提高, 要求速度调节范围广且平缓, 无级调速的需求越来越多。随着科技不断发展, 各种实现无级调速的方法也涌现出来。文章设计了以使用触摸屏为上位机, 利用 PLC 的数模转换功能实现对三相异步电机平滑的无级调速。

1 整体设计思路

文章设计的无级调速系统采用 TPC7062Ti 触摸屏作为上位机, 无极调速触摸屏上输入一个 1 ~ 50 的整数代表速度, 通过 PLC 数模转换模块进行数据处理, 变成一个 1 ~ 10V 的模拟量, 输出到变频器, 以实现对电机的平滑速度控制。三相异步电机无级调速整体系统框图如图 1 所示。



图1 三相异步电机无级调速系统框图

1.1 变频器对三相异步电机的速度控制

由电机的速度公式 $n = (60f/p)(1-s)$ 可知, 可以通过改变电源频率、电机磁极对数、转差率来实现对电机的速度控制。要实现速度从 0 到额定转速的平滑变化, 利用变频器使电源频率从 0 ~ 50Hz 变化是比较容易实现的。

变频器主要由整流(交流变直流)、滤波、逆变(直流变交流)、制动单元、驱动单元、检测单元和微处理单元等组成。通过控制 IGBT 的开断来调整输出电源的电压和频率, 将电网电压提供的固定电压和固定频率的交流电变换为电压幅值和频率均可以调整的交流电, 使电源频率从 0 开始变化, 最大值也不超过额定电流。不仅实现对速度平滑控制, 更减轻了对电网的冲击和对供电容量的要求, 延长了设备和阀门的使用寿命, 同时也节省设备的维护费用, 进一步达到节能的目的。

西门子 MM420 变频器是用于控制三相交流电机速度的变频器, 分为多段速调速和无级调速两种。多段速控制最多可以设置 7 个速度, 通过对数字量端子 5、端子 6、端子 7 设置 001、010、011、100、101、110、111 共 7 个值。模拟量调速可以通过在端子 3、端子 4 之间接入模拟电压、模拟电流来实现。电源电压 220V, 单相交流额定输出功率 0.75kW, 额定输入电流 9.9A, 额定输出电流 3.9A, 操作面板为基本操作面板 (BOP)。

进行主电路接线时, 变频器模块面板上的 L1 和 L2 插单相电源, 接地插孔接保护地线; 3 个电机插孔 U、V 和 W 连接到三相电动, 注意不能接错电源, 否则会损坏变频器。

MM420 变频器操作面板 (BOP) 如图 2 所示。BOP 具有 5 位数字的 7 段显示, 可以显示参数的序号和数值, 报警和故障信息, 以及设定值和实际值, 但不能存储参数的信息。



图2 MM420面板

MM420 变频器面板上引出了它的数字输入点 DIN1 (端子 5)、DIN2 (端子 6)、DIN3 (端子 7); 内部电源 +24V (端子 8)、内部电源 0V (端子 9); 模拟量输入 + (端子 3)、模拟量输入 - (端子 4)。

1.2 PLC 的选择及接线

(1) PLC 选择的原则。S7-200 系列 PLC 具有紧凑的设计、良好的扩展、低廉的价格等特点, 能很好地满足

小规模控制系统的要求，适用于不同场合的检测与自动控制，在集散控制系统中能充分发挥强大优势，广泛应用在机床、机械、电力设施、民用设施、环境保护设备等领域。在本文变频器控制的三相异步电机无级调速系统中，选择 I/O 数量较少且具有模拟量输出的西门子 S7-200CN PLC 即可。

(2) PLC 的接线。输入信号由触摸屏通过 3CB30 电缆传输；24V 直流电源亦和触摸屏共用，M 端接触摸屏的 24V 端子，L+ 接触摸屏的 0V 端子；输出信号通过 PLC 的模拟量 V 端和 M 端连接到变频器 3 端和 4 端；220V 交流电源 L1 端接任一火线，N 端接零线。三相异步电机无级调速的硬件接线如图 3 所示。

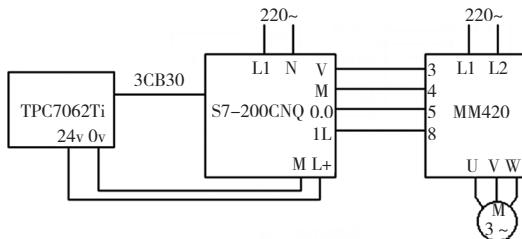


图3 硬件接线图

1.3 人机交互界面的设计

触摸屏技术是用图形代替传统按钮、指示灯、蜂鸣器等硬件，在图形界面中既可实现启动、停止等控制，亦可设置参数，显示数据监控设备状态等。触摸屏在工业控制中应用越来越广泛，不论是在中央集中控制显示各设备运行状态、采集设备运行数据，还是在各个操作点进行个别设备的操作，触摸屏的优势都十分明显。在进行系统设计时它使整个工业控制系统外部设备更加优化，后期功能修改、扩展更加简便，观察运行情况和操作都更加便捷直观。

触摸系统包括触摸屏控制器和触摸检测装置两个部分，触摸检测装置就是屏幕，用于检测用户的触摸位置，并传送给触摸屏控制器；控制器接收从触摸检测装置发送来的触摸信息，并以坐标的形式发给 CPU，同时也接收 CPU 发来的命令加以执行。

该无级调速系统使用昆仑通态 TPC7062Ti 触摸屏。使用 MCGS 组态软件进行功能设计，首先新建一个工程，选择触摸屏型号为 TPC7062Ti，在设备窗口双击设备窗口的小榔头图标进行通用串行父设备的设置，PLC 为西门子 S7-200，串口号选择 COM1。在 S7-200 设备窗口增加以下设备通道：1 个 Q 寄存器，Q0.0 表示电机正转信号；2 个 M 寄存器，M0.0 表示启动按钮，M0.1 表示停止按钮；1 个 V 寄存器，用于存储从触摸屏输入的表示速度的数值。

再进入设备窗口，进行子设备的设置，选择设备 0，选择西门子 S7-200，双击修改连接变量。再进入用户窗口，进行用户交互界面设计，绘制一个按钮用于启动、一个按钮用于停止、一个指示灯用于表示输出设备、一个输入框输入 0 ~ 50 的数据用于速度控制，以及加上必要的提示文本“三相异步电机无级调速系统”“请输入 0~50 之间的整数”。将这几个对象设置好基本属性、操作属性，并关联到前面的设备变量。设计好之后用 USB 线连接电脑和触摸屏，在 MCGS 主菜单上单击“下载”快捷图标，连接方式选择“USB 通讯”，然后依次点击“联机运行”“工程下载”“启动运行”，即可将设计好的人机交互界面下载成功。人机交互界面如图 4 所示。



图4 人机交互界面

2 PLC控制程序的设计

本控制系统需要 2 个主令器件，一个启动，一个停止，因为触摸屏，故输入元件设为 M0.0 和 M0.1，一个输出元件 Q0.0。按下启动按钮，Q0.0 得电并保持，变频器的模拟量输入端 5 打开，允许电机正转。此时在触摸屏的输入框内输入 1 ~ 50 的整数，乘法指令 MUL_I 将整数 640 与 VW0 中的数据相乘，送给累加器 AC0。传送指令 MOW_W 将累加器 AC0 中的数据传送给模拟量输出映象寄存器 AQW0 中，再由 D-A 转换器将这个数字量转换为模拟量，作为速度值通过 PLC 的模拟量输出端 (V、M) 传输到变频器的模拟量输入端 (3、4) 控制电机的转速。PLC 的控制程序如图 5 所示。

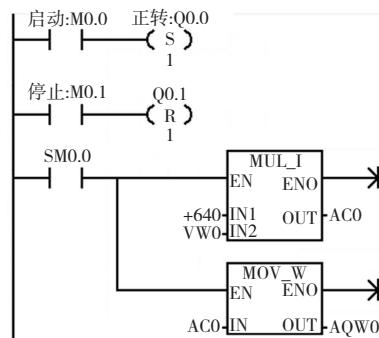


图5 PLC控制程序

3 变频器的参数设置

通过给变频器输入电压模拟信号的方式进行三相异步

电机的无级调速，要进行参数设置，主要步骤如下。

(1) 首先，恢复出厂设置。先将用户访问级别 P0003 设为 1，即标准级访问；然后设定 P0010 为 30，即进入工厂复位准备状态；设定 P0970 为 1，即将所有变频器参数复位到出厂设定。

(2) 其次，进行模拟输入的设置。将用户访问级别 P003 设为 2，即扩展级访问；然后将命令源参数 P0700 设为 2，表示命令信号由变频器外部接线端子输入；频率设定的选择参数 P1000=2，表示变频器的频率由模拟量控制，即 PLC 模拟端口输出的电压值在 0 ~ 10V 间变化，对应频率为 0 ~ 50Hz；数字输入的功能参数 P00701 设为 1，表示电机正转启动。

(3) 最后，进行电机运行参数的设置。先将用户访问级别 P0003 设为 1，即标准级访问；然后设定 P0010 为 1，进行电机参数设置；根据电机铭牌，设定其他参数为 P304=380（电机额定电压为 380V）、P305=15.4（额定电流为 15.4A）、P307=7.5（额定功率为 7.5kW）、P311=1440（额定转速为 1440r/min）。

4 程序下载及安装调试

(1) PLC 程序下载。在电脑上用 STEP7-MicoWIN 软件，在程序块的主程序中按图 5 录入梯形图，单击 PLC 菜单中的“全部编译”，直到状态栏中显示没有错误。再单击下载按钮选择程序块下载至 S7-200CN 中。

(2) 触摸屏程序下载。在电脑上用 MCGS 组态软件

设计好人机交互界面，并设置好相应参数后，就可以通过 USB 线下载到触摸屏，连接方式选择“USB 通讯”，然后依次点击“联机运行”“工程下载”“启动运行”。

(3) 调试。在触摸屏上点击绿色启动按钮，指示灯亮表示 Q0.0 得电，在文本输入框中输入一个 0 ~ 50 的整数，电机开始正转，修改数值可以任意改变电机的速度。实现三相异步电机的无级调速。

5 结束语

本系统使用昆仑通态 TPC7062Ti 触摸屏作为人机交互设备，利用西门子 S7-200CN 实现数模转换，把 0 ~ 50 的数字量变化为 0 ~ 10V 的电压模拟量，作为变频器的频率设定，再使用变频器 MM420 实现了三相异步电机的无级调速。调速效果好，系统后期功能修改维护也更加方便。

参考文献

- [1] 黄永红. 电气控制与 PLC 应用技术[M]. 北京：机械工业出版社，2018.
- [2] 李文明. 西门子 MM420 变频器的模拟信号外部控制技术[J]. 集成电路应用，2021(9)：8—9.

作者简介

张丽（1984—），女，四川巴中人，本科，讲师，主要研究方向为机电一体化。

基于弹性系数的短期电力负荷预测

文 霏

(湖南大唐先一科技有限公司, 湖南长沙 410007)

[摘要] 短期电力负荷预测是电力系统可靠经济运行的基础性工作, 为了提高区域短期电力负荷预测的精度, 分析电力系统负荷趋势变化日、周规律, 建立了基于弹性系数的短期负荷预测算法。采用此方法对工作日及休息日的统调用电负荷进行预测, 预测结果表明, 该方法预测误差较小, 具有较高的预测精度, 适用于电力系统短期负荷预测。

[关键词] 短期负荷特性; 负荷预测; 弹性系数; 周期性

[中图分类号] TM714 **[文献标志码]** A

电网负荷预测在电力系统发展规划与电网稳定性方面有着非常重要的意义。目前经济飞速发展, 电网负荷预测准确性越来越重要。短期电力负荷预测主要针对未来几小时、1d 或者几天的电力负荷进行预测。电力负荷预测的准确性对于保障电网可靠经济、机组检修计划合理安排及电力经济调度非常重要。随着新一轮电力体制改革迈入稳步发展, 电力生产和消费日益市场化, 对负荷预测的可靠性和准确性提出了更高的要求, 负荷预测已经是现代化电力系统建设的重要研究方向之一。

短期负荷预测能否起到作用主要在于其预测精度, 国内外学者做了很多负荷预测方面的研究工作, 建立了各种预测模型, 试图提高电力负荷预测的准确性。短期电力负荷预测的方法主要有两大类: ①时间序列法及回归分析法等传统算法; ②人工神经网络、支持向量机等机器学习算法。这些预测方法各有优缺点, 传统算法在短期电力负荷预测时对天气等因素不敏感, 难以预测出因气象因素对短期负荷的影响。机器学习算法无法避免在训练过程中产生的学习不足或者是过拟合现象, 且收敛速度慢。上述预测方法中, 时间序列法、ARIMA 是从数据本身分析负荷变化规律, 人工神经网络等算法则是分析其他影响因素与负荷间的关系。以上方法均试图找出其他影响因素和负荷间确定的数学关系, 然而在实际应用中, 该数学关系难以得出, 并且运算复杂繁琐, 因此在实际工程中的应用效果不佳。

1 电力负荷的影响因素及特点

1.1 电力负荷的影响因素

电力负荷预测是依据历史电力负荷和实时负荷数据来预测未来的电力负荷数据, 因此电力负荷受到诸多因素影响, 存在不确定性。影响因素包括国家宏观政策、天气、

电价、化石能源价格、电网的覆盖率和稳定性等。

(1) 国家政策调控。电力行业作为社会基础公共行业, 电力负荷受到经济结构调整等国家宏观调控的影响。

(2) 气候因素。随着空调等家用电器的逐年增长, 高温、低温、降雪等天气因素成为影响生活用电需求的主要因素, 干旱、洪涝、台风等极端气候会严重影响生产而给电力负荷带来重要影响。

(3) 电价因素。电价是电力供应和电力需求的纽带, 电价的变动会在一定程度上影响用电需求。国家扶持新兴行业, 适当降低这些行业的电价, 或取消某些产业优惠电价政策, 也会使电力需求受到影响。

(4) 化石能源价格因素。电能和其他化石能源之间具有可替代性, 石油、液化气、天然气、煤等能源价格的波动, 人们会选择较低价格的能源, 从而导致用电需求的波动。

(5) 电网的建设和稳定性。电能是通过电网由电厂送往电力用户的, 因而电力负荷受到电网覆盖率和电网稳定性的影响, 居民的用电条件受到电网的容量和网络损耗的影响。

1.2 短期电力负荷的特点

由于受国家宏观政策、电价、天气、经济等多方面因素的影响, 短期电力负荷会呈现出明显的随机性, 电力负荷和历史负荷数据之间通常具有一定的规律性。归纳而言, 短期电力负荷具有以下特点。

(1) 周期性。电网负荷的周期性主要体现在负荷在一定时期的重复性。电网负荷周期特性主要表现在日周期性、周周期性和年周期性。年周期性主要表现为季节性; 周周期性主要表现为一周内工作日与周末交替, 工作日与周末负荷趋势特征不同; 日周期性主要表现为每天各用电时刻趋势也有规律可循, 对一天来说, 每天的负荷趋势会

存在波谷、波峰，负荷趋势往往相似。因此分析负荷曲线的日周期性及周周期性是提高短期负荷预测准确性的基础。

(2) 相似性。负荷趋势具有相似性的规律，但该规律具有地区、时间的局限性，该负荷规律通常仅适用于某个地区，正由于该相似性，能为地区负荷预测提供有效的依据。相似性还出现在历史某个特定时期的负荷趋势，如节假日，预测方法中被广泛使用的相似日法、历史类比法及类推法，都是基于这一特点。这些方法被应用在节假日（春节、五一、中秋等）的负荷预测中，取得了很好的负荷预测准确性。

(3) 连续性。区域电网在不受负荷冲击的影响下，短期负荷趋势一般为连续平滑的曲线，某一时刻的负荷数值与其前后时刻点的负荷数值不会相差太大，通常不会出现跳变。

2 短期负荷预测的模型建立

负荷预测是采用负荷的历史数据资料，搭建数学模型来预测未来的负荷。电网负荷趋势既有规律性，也有随机性，只有掌握负荷趋势规律，才能较好地进行未来负荷的预测。电力负荷主要受生产生活规律、天气情况、社会事件等的影响。根据混沌理论，一个系统的状态由多个分量组成，各个分量之间具有相互作用，这些相关分量的信息也就隐含在任一分量中。一般而言，季节性天气性的变化规律隐含在负荷历史数据中，生产生活用电规律主要反映在工作日和休息日的负荷峰谷变化中。负荷具有日、周规律，利用负荷的周期变化规律性建立工作日及休息日的标准负荷曲线，用历史负荷曲线乘以弹性系数得到预测曲线。工作日的负荷趋势和休息日的负荷趋势存在较大差别，传统的基于时间序列等方法的负荷预测准确度不高，造成双休日的负荷预测有较大误差。因此本文对工作日、周六及周日的负荷预测分别进行建模。

2.1 工作日的负荷预测

用预测日前工作日历史负荷进行负荷预测。在此基础上引入弹性系数 K ，其定义公式如下：

$$K(t) = X(t) / X_n(t) \quad (1)$$

式中， $K(t)$ 为日弹性系数， $X(t)$ 为预测日前一个工作日第 t 时刻的负荷， $X_n(t)$ 为离预测日前一个工作日最近的 n 天的第 t 时刻所对应的平均负荷，标准负荷值为

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X(t), \text{ 其中, } n \text{ 可通过调试选择最优值。} \quad (2)$$

$$K_{\text{week}}(t) = X(t) / X_j(t) \quad (2)$$

式中， $K_{\text{week}}(t)$ 为前一周同一个工作日的周弹性系数， X_j

(t) 为前一周同一工作日。

根据一周内每个工作日的负荷趋势略有不同，使用 $K_{\text{week}}(t)$ ，对负荷预测模型中的弹性系数进行修正。

$$K'(t) = \alpha K(t) + \beta K_{\text{week}}(t) \quad (3)$$

式中， $K'(t)$ 为 t 时刻修正后的弹性系数， α 和 β 为权重。因此，工作日的负荷预测模型为：

$$X'(t) = K'(t) X(t) \quad (4)$$

式中， $X'(t)$ 为工作日 t 时刻的负荷预测值。

2.2 周六负荷预测

休息日和工作日负荷趋势不同，因此休息日不能采用工作日的负荷预测模型，需要重新进行建模。本周六和前 n 个周六的负荷曲线趋势基本一致。根据天气等因素造成的负荷周增长率具有一定规律，而负荷周增长率可以通过本周五与前 n 个周五标准负荷的增长率来得到。可以用周五的周负荷增长率来预测周六的负荷，因此采用周五的弹性系数：

$$K_{\text{week(Fri)}}(t) = X_{(\text{Fri})}(t) / X_{n(\text{Fri})}(t) \quad (5)$$

式中， $K_{\text{week(Fri)}}(t)$ 为周五 t 时刻的周弹性系数， $X_{(\text{Fri})}(t)$ 为本周五 t 时刻的负荷， $X_{n(\text{Fri})}(t)$ 为前面 n 周的周五 t 时刻的平均负荷。

则周六的预测模型为：

$$X_{(\text{Sat})}'(t) = K_{\text{week(Fri)}}(t) X_{n(\text{Sat})}(t) \quad (6)$$

式中， $X_{(\text{Sat})}'(t)$ 为周六 t 时刻的负荷预测值， $X_{n(\text{Sat})}(t)$ 为前面 n 周的周六 t 时刻的平均负荷。

2.3 周日负荷预测

周日与周六的负荷曲线趋势具有一定的相似特性，根据预测日上一周的周六周日负荷数据，算出周日相对于周六的弹性系数 $K_{(\text{ss})}$ 。

$$K_{(\text{ss})} = X_{(\text{Sun})}(t) / X_{(\text{Sat})}(t) \quad (7)$$

式中， $X_{(\text{Sun})}(t)$ 为周日 t 时刻的负荷， $X_{(\text{Sat})}(t)$ 为周六 t 时刻的负荷。

根据周日负荷与周六负荷趋势的相似性，且周增长率可从本周周六与前 n 周周六负荷的变化得出。因此定义周弹性系数为：

$$K_{\text{week(Sat)}}(t) = X_{(\text{Sat})}(t) / X_{n(\text{Sat})}(t) \quad (8)$$

式中， $X_{(\text{Sat})}(t)$ 为本周周六第 t 时刻的负荷， $X_{n(\text{Sat})}(t)$ 为前 n 个周六 t 时刻的平均负荷，其值为：

$$X_{n(\text{Sat})}(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_{(\text{sat})}(t) \quad (9)$$

因此，依据负荷的周增长特性，用周弹性系数 $K_{\text{week}}(t)$ 对模型进行修正。周日的负荷预测模型为：

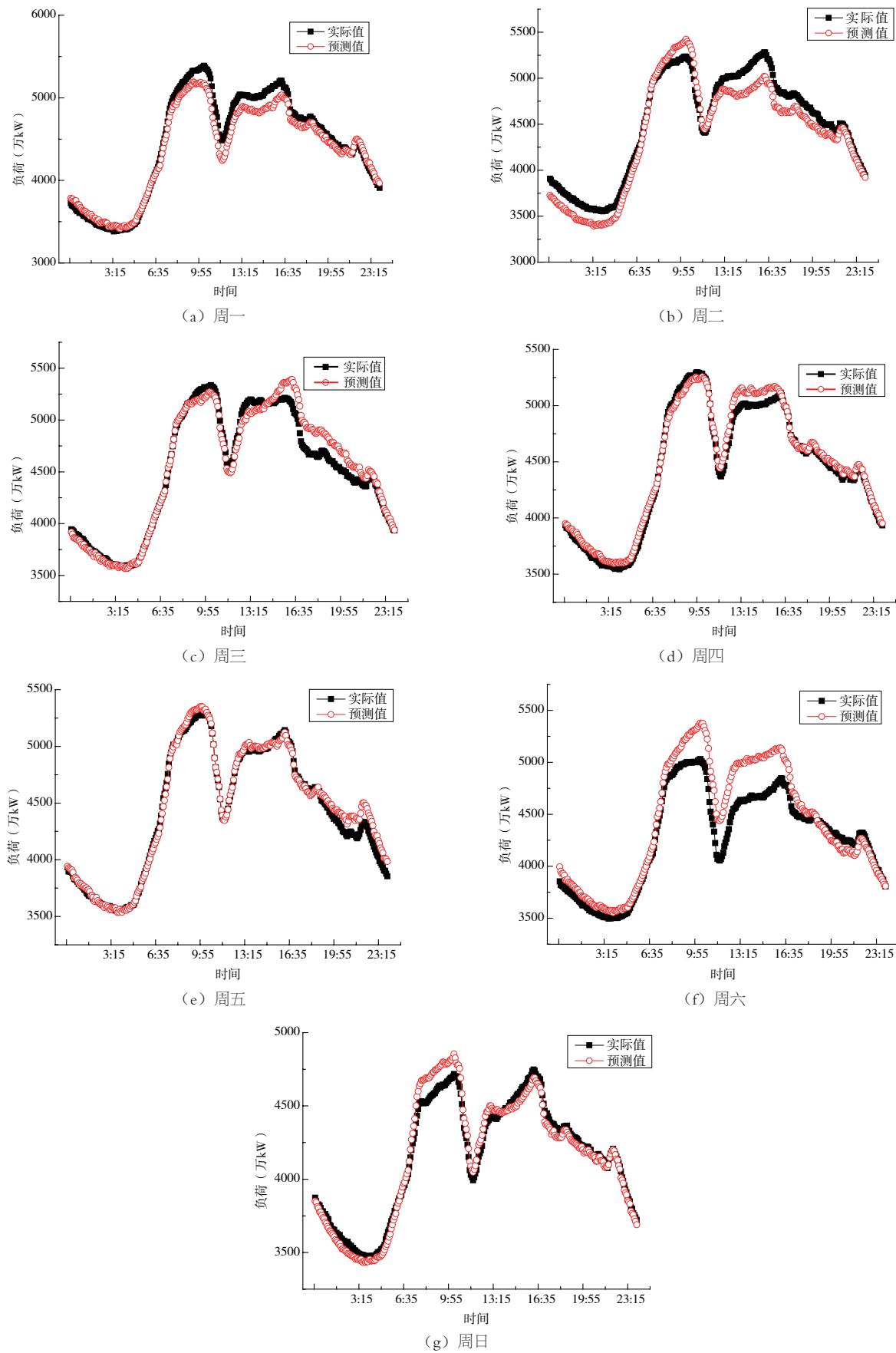


图1 一周用电负荷预测

$$X_{(\text{sun})}'(t) = \alpha K_{\text{week(sat)}}(t) X_{n(\text{sun})}(t) + \beta K_{\text{(ss)}}(t) X_{(\text{sat})}(t) \quad (10)$$

式中, α 、 β 为权重, $X_{n(\text{sun})}(t)$ 为前 n 个周日 t 时刻的平均负荷。

3 算例及其分析

采用浙江省电网电力负荷数据进行短期电力负荷预测建模分析, 模型预测的误差评价采用平均绝对百分比误差 MAPE (Mean Absolute Percentage Error) 进行评价。

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (11)$$

式中, y_i 为时刻 i 的负荷实际值, \hat{y}_i 为时刻 i 的负荷预测值。

用模型分别对一周每天 24h 的 288 个点进行预测。预测结果如图 1 所示, 预测误差见表 1, 可以看出, 此方法有较高的预测精度。

表1 负荷预测误差统计

时间	MAPE (%)
周一	2.16
周二	3.08
周三	1.64
周四	1.13
周五	1.03
周六	3.60
周日	1.29

4 结语

电力系统用电负荷受诸多因素的影响, 很难建立一种负荷和天气等因素之间的确切的数学模型。负荷和天气等因素之间的关系是非线性的, 并且涉及到多个因素间的相互关系。

本文利用电力系统电力负荷日、周负荷趋势的规律, 基于历史电力负荷数据, 利用弹性系数对工作日、周六、周日分别建模进行负荷预测。提出基于弹性系数的短期电

力负荷预测算法, 具有较高的电力负荷预测精度, 且相对于机器学习等大数据挖掘算法而言, 预测时间快, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王德文, 孙志伟. 电力用户侧大数据分析与并行负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (3) : 527–537.
- [2] 徐东升, 杨巍, 魏哲. 基于SPSS的短期负荷特性分析及其预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (21) : 147–151.
- [3] 程宇飞. 基于人工神经网络的短期电力负荷预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [4] 张素香, 赵丙镇, 王风雨. 海量数据下的电力负荷短期预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (1) : 37–42.
- [5] 王保义, 赵硕, 张少敏. 基于云计算和极限学习机的分布式电力负荷预测算法[J]. 电网技术, 2014, 38 (2) : 526–531.
- [6] 雷正新, 韩蓓, 聂萌. 配电网大数据环境下的多点负荷预测算法与应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (23) : 68–78.
- [7] 李啸骢, 李春涛, 从兰美. 基于动态权值相似日选取算法的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (6) : 1–8.
- [8] 刘毅. 某市电力需求预测分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

作者简介

文雯 (1989—), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向智慧能源、能源数字化。

抽水蓄能电站紧急支援功能控制策略的应用研究

朱 冬

(上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

[摘要]介绍目前华东电网区域内运行于成组控制模式下的抽水蓄能电站机组响应调度远方紧急支援功能的控制策略。重点提出了电站在现有日负荷爬坡曲线的基础上,如何更快更充分地满足电网调度侧对于负荷的应急响应需求,释放抽水蓄能机组的潜能,更好地服务电网。同时进一步预测了抽蓄机组紧急支援控制功能的发展方向和优化建议。

[关键词]抽水蓄能; 紧急支援; 负荷调配

[中图分类号] TM621 **[文献标志码]** A

截至2021年,华东电网电源装机总容量已高达44512.48万kW,其中包含风电、光伏等类型的新能源装机占比已经上升至22.16%。较上一年度,风电、光伏装机容量分别增加46.2%、20.2%,且增长趋势十分迅猛。新能源电源的接入削弱了整个电网的转动惯量,对电网频率的冲击也越发明显。此外,近年来为缓解我国电力负荷布局不平衡而大力发展的特高压直流工程也不断接入区域电网。特高压直流输送功率大,一旦发生极闭锁、换相失败等大扰动将对送电、受电端系统的有功功率平衡造成较大的冲击,若无有效的应对措施,极可能导致电网稳定破坏。

抽水蓄能电站作为华东电网目前最主要的电网侧辅助设施,充分发挥了其削峰填谷、稳定网频、事故备用等重要作用。随着抽蓄机组发电量与抽水量的整体上升,充分体现了其消纳新能源的能力,减少了弃光弃风比率,提高了新能源的利用率及其经济效益。然而除了日常调峰运行外,华东电网区域内的抽水蓄能电站还具备着应急响应的特殊功能。电网一旦出现重大事故,例如,发生特高压断线、新能源场站故障性解列亦或是其他常规火电机组非停等情况,抽水蓄能机组需要在极短时间内达到其可用容量的极限出力,从而缓解网频下降趋势,抑制事故扩大化,属于华东电网故障频率恢复紧急支援控制体系。

1 负荷调配原则

目前,华东电网区域内的所有抽水蓄能电站均运行于成组控制模式,即以电站为一调控单元,根据电站总负荷指令,自行计算分配机组负荷,自动进行机组启停控制,满足电网对电站负荷需求。而电站的总负荷指令取自于电网调度每日向各个电站下发的96点日负荷曲线,也被称为DLC计划曲线。当华东电网系统频率严重低于正常范

围时,电网侧主站的调控服务器会根据当前的网频、电压、潮流及负荷情况,计算出目前电网所欠缺的总有功功率 $\Sigma \Delta P$ 。同时根据各抽水蓄能电站实时上送的全厂可支援容量 T_c 进行负荷匹配,将 $\Sigma \Delta P$ 拆分成满足各抽蓄电站可变出力的紧急支援附加值功率 $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$,并下发至各个目标电站的成组服务器内,而当任意一抽蓄电站接收到网调下发的紧急支援功能启动指令及紧急支援附加值后,会立即将所接收到的遥调指令 ΔP 叠加至当前的电站总负荷指令上,并根据当前电站运行状态及叠加后总负荷指令大小重新进行负荷分配计算,其后对站内处于成组控制模式下的单元机组执行相应的启停工况或变负荷调节流程,最终完成整个开环控制,如图1所示。

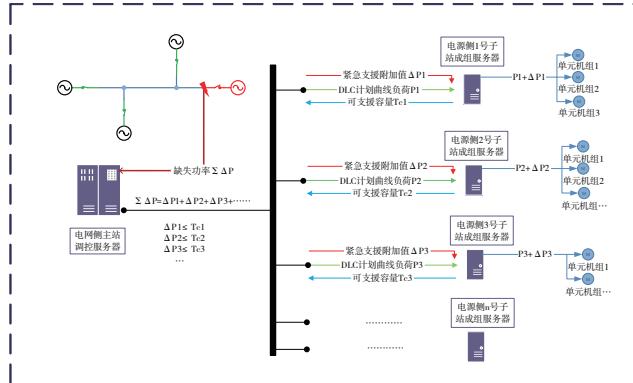


图1 紧急支援功能架构

2 抽蓄机组常规启动方式

在日常的运行过程中,华东电网调度的抽水蓄能电站根据并网运行管理实施细则中的要求,按每15min为一个时间点,单日共96点的计划曲线,结合启停机时间整定单的方式进行机组的开环调度控制。而为了缓解抽水蓄能机组在启停机过程中因大幅度升降负荷对电网频率所造

成的冲击，抽蓄机组在并网后或解列前，均通过斜率模式进行负荷的升降调节，即将15min内负荷的变化总量均分为15等份，以1min变化1次的速率实现负荷的均速等量调节。

单台抽蓄机组在并网后为保证运行安全，会迅速将负荷拉升，避开振动摆度较大的负荷不稳定区域，运行于机组最低负荷限值以上，其后以1min调节1次的爬坡方式实现负荷的抬升，启动过程如图2所示，图中 T_b 为机组并网时间点。而在多台机组运行的情况下，新机组并网后，已经发电运行的机组将立即下调负荷，使得全厂并网机组的有功总出力仍可以追踪当前时刻的计划曲线斜线值。在其后的负荷拉升阶段，逐一抬升发电机组负荷，最终在第15min到达前完成整个升负荷的过渡过程，启动过程如图3所示，图中 T_b 为2号机组并网时间点。平缓而匀速的调节方式有效地保证了电网频率的稳定，防止了因负荷突变对电网带来的影响。

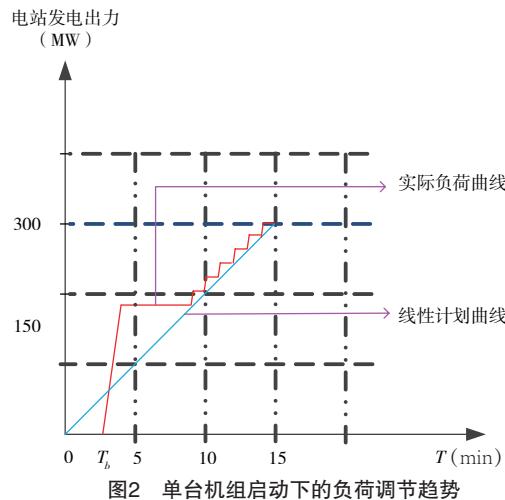


图2 单台机组启动下的负荷调节趋势

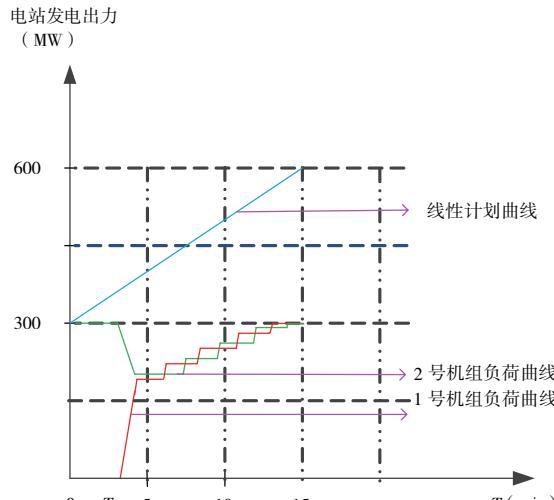


图3 多机组运行工况下的负荷调节方式

3 紧急支援工况下的应对策略

抽水蓄能电站由于其灵活的调控特性以及快速的启停能力备受电网调度重视，这也使得抽蓄机组在每日的运行过程中启停次数频繁，变负荷工况更是屡见不鲜。同时抽水蓄能机组作为电网调峰填谷的重要辅助设备，运行工况复杂多变，除常规发电工况外，还包括作为负载情况下的抽水调相工况及抽水工况等。因此，当电网发生事故，需要计划外负荷支援的情况下，抽蓄电站可能运行于不同工况、不同负荷下。而在这些工况下，抽蓄电站执行紧急支援的响应策略不尽相同，需要区别对待。

3.1 电站运行于稳定发电工况下

以单机额定容量为300MW的抽蓄电站为例，假设当 T_e 时刻电网发生事故，该时刻全站已有1台机组满负荷发电运行。此时电网调度侧对该电站下发紧急支援投入指令以及紧急支援附加值 $\Delta P=300\text{MW}$ 。电站成组服务器判断全厂需要多开1台机组才能满足调度的总负荷指令需求，立即向其中1台停机机组发出发电方向开机指令。该台机组执行启动顺控流程后，于 T_b 时刻成功同期合闸并网，并网后该台机组将闭锁其缓速拉升负荷的爬坡调节方式，以其最快的开导叶速率将负荷拉升至满载，启动过程如图4所示。图中 T_e 为紧急支援投入时刻， T_b 为支援机组并网时刻。整个紧急支援的投入过程取决于电站机组的启机时长，通常耗时约3~4min，而支援负荷投入时长则取决于电网调度恢复故障或平衡负荷所需的时间。理论上说，只要抽蓄电站的上库水量充足，紧急支援功能可以保持一直投入的状态。当电网恢复至正常网频后，调度主站侧再通过逐步减小紧急支援附加值 ΔP 的方式来缓慢退出电站侧的紧急支援负荷。

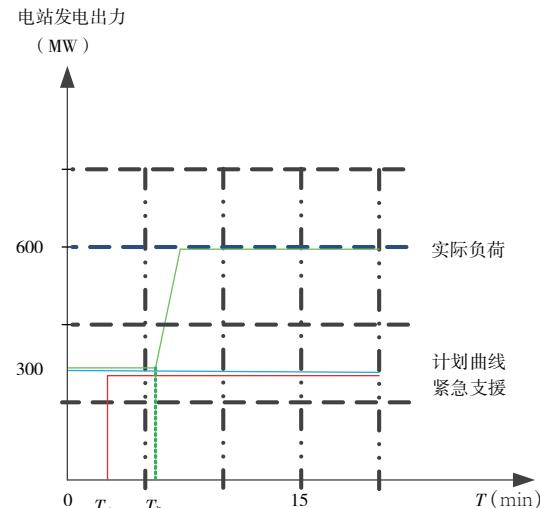


图4 稳定发电工况下的紧急支援负荷响应曲线

3.2 电站运行于发电工况升负荷阶段

假设电站在当前15min时段内正按照DLC的负荷计划曲线由300MW逐分钟向600MW增加, T_e 时刻电网发生事故, 调度主站侧对该电站下发紧急支援投入指令以及紧急支援附加值 $\Delta P=300\text{MW}$ 。电站侧成组服务器判断电站已经启动的两台机组未达到满负荷运行, 将立即取消负荷爬坡的调节方式, 直接以最快速率拉升两台机组至满负荷工况运行, 同时计算出当前运行的机组台数无法完全满足紧急支援负荷缺失以及当前时段的DLC计划负荷的总量, 需要额外的机组进行功率补偿, 则执行备用机组的启动流程。当备用机组完成启机并网后, 成组服务器将立即对全站机组重新进行一次负荷计算及分配, 把3台机组的总负荷指令调节至当前时刻DLC负荷斜线值与紧急支援附加值叠加后的总负荷值上, 以完成此次紧急支援响应需求。其后全站机组的负荷爬坡功能解锁, 电站机组仍以1次/min的速率完成后续的DLC负荷曲线增量。整个紧急支援过程如图5所示, T_e 为紧急支援投入时刻, T_b 为支援机组并网时刻。由于备用机组的启动及同期并网需要约3~4min的等待时长, 因此紧急支援总计300MW的负荷增量被分为立即响应和延后响应两个阶段补偿完毕, 立即响应部分在主站侧下发支援需求的10几秒内即可完成, 而延后响应部分则需在备用机组启机并网后完成。

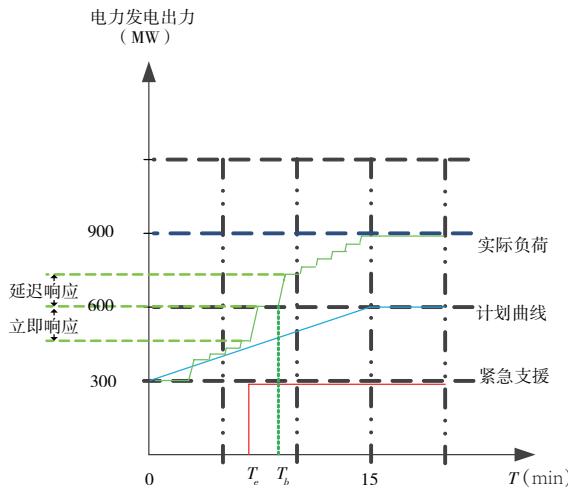


图5 升负荷过程中的紧急支援负荷响应曲线

3.3 电站运行于发电工况降负荷阶段

假设电站在当前15min时段内正按照DLC的负荷计划曲线由600MW逐分钟向300MW减小, 电站机组以20MW/min的速率执行停机之前的降负荷过程。当 T_e 时刻电网发生事故, 调度主站侧对该电站下发紧急支援投入指令以及紧急支援附加值 $\Delta P=300\text{MW}$ 。电站侧成组服务

器将立即判断电站机组当前状态, 若原本准备执行停机流程的机组已进入解列阶段(解列过程不可逆), 则立即执行1台备用机组的启机流程; 若该台机组尚处于减负荷过程而未进入解列阶段, 则立即中止该机组的停机流程, 并以最快速率将其负荷拉升至满负荷, 以保证当前全站运行机组总负荷的最大出力, 同时执行一台备用机组的启机流程。当备用机组完成启机流程并网后, 成组服务器再次进行全站机组的负荷计算, 将紧急支援叠加后的总负荷指令分配至各台机组之上。全站的负荷曲线如图6所示, T_e 为紧急支援投入时刻, T_b 为支援机组并网时刻。负荷的补偿过程也如同升负荷情况一样, 分为立即响应和延后响应两个部分, 其大小则取决于紧急支援指令投入时刻全站机组可调负荷余量的多少。

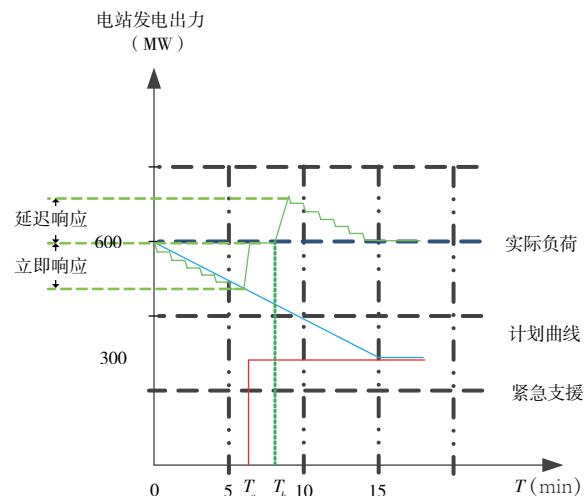


图6 降负荷过程中的紧急支援负荷响应曲线

3.4 电站运行于调相工况

抽水蓄能机组存两种调相工况, 分别为发电调相(SCT)工况及抽水调相(SCP)工况。处于此类工况下的机组可进行大范围的进相或滞相运行, 用以吸收或发出无功功率, 同时为了维持机组调相工况下的额定转速, 还需要从电网吸收少量的有功功率。通常来说, 抽蓄机组晚间进行抽水(PO)工况前均需要先将机组运行至SCP工况, 而后再由SCP工况转换至抽水工况。因此对于抽蓄机组, SCP工况也属于常态工况, 相反SCT工况的利用率则极低, 一般不作为常态工况考虑。

由于抽蓄机组的SCP工况无法调节有功负载, 同时为了便于电网主站侧负荷调控运算的统一性与准确性, 因此约定若电站有机组运行于SCP工况的状态下, 电站上送电网调度的当前可支援容量 T_c 为0, 电站运行状态为SCP工况状态。而主站侧根据当前 T_c 值的大小判断该电站无

法立即提供有效负荷支援情况下,为了防止电网频率进一步失衡,会向该电站侧发送紧急支援投入指令,同时发出禁止 SCP 转 PO 的闭锁指令,用以防止机组转换到水泵工况后加大电网负载的负担。而遥调值紧急支援附加值 ΔP 的大小决定了电站需要闭锁几台 SCP 工况的机组向 PO 工况转换。网频恢复后,主站侧将解除闭锁指令的同时快速减小附加值 ΔP ,当 ΔP 下降至一定的阈值后,子站侧成组服务器将按照 DLC 计划曲线的目标值执行机组 SCP 转 PO 的工况转换,如图 7 所示。

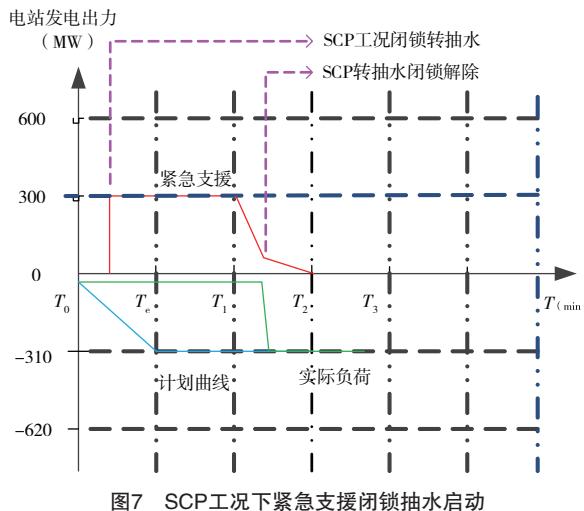


图7 SCP工况下紧急支援闭锁抽水启动

3.5 电站运行于抽水工况

电网负荷填谷期间,抽蓄机组通常作为电网的受电负载用户运行于水泵工况。在此期间若发生电网事故,抽水工况下的抽蓄机组无法立即提供正向有功出力,只能通过减小负载大小的方式来减小电网的负荷负担。然而目前国内已经投产的绝大多数抽水蓄能机组不具备抽水工况下调节负载大小的能力,因此只能通过直接停机的方式来实现负载的紧急支援功能。

如图 8 所示,假设当前电站按照负荷计划曲线的需求处于 3 台机组抽水运行状态,当 T_e 时刻电网发生故障并下发紧急支援需求及附加值 $\Delta P=600\text{MW}$ 时,电站侧服务器根据运算后的总负荷指令立即将其中两台抽水机组转停机。当机组停机完成后,由于后续 T_2 , T_3 , T_4 时段的 DLC 计划曲线仍存在 3 台抽水机组的负载需求,而电站子站侧又无法判断主站侧会何时退出此次紧急支援的负荷需求,为保证后续抽水负载的及时响应,子站系统会立即根据下一时刻的 DLC 负荷曲线提前将停机机组启动至抽水调相(SCP)工况。当进入 T_3 , T_4 时段后,主站侧开始退出紧急支援负荷,电站机组可以无需等待相对耗时较长的 SCP 启动并网时间,立即将机组由抽水调相工况转至抽水工况。

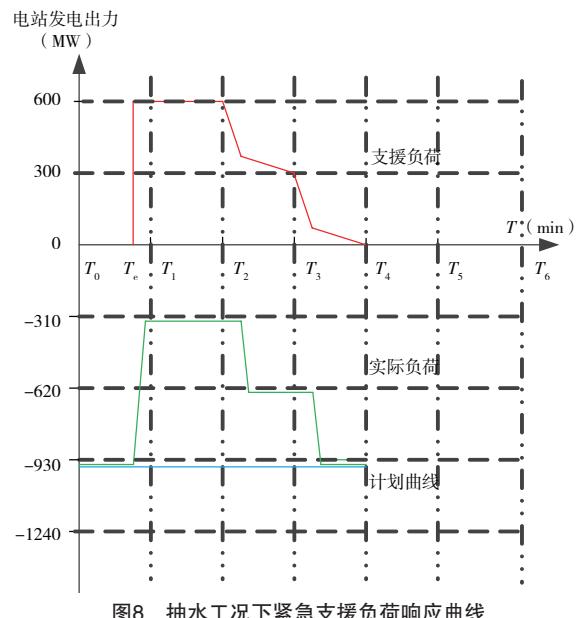


图8 抽水工况下紧急支援负荷响应曲线

4 紧急支援功能的展望与建议

紧急支援功能作为电网发生大功率缺失的情况下的应急手段,从其响应能力及响应速率的情况来看仍属于二次调频的调控范畴。目前调度主站侧采用的是类似于 AGC 模式的精细化负荷调控方式,但由于紧急支援情况下一般所调控的负荷都比较大,通常涉及到机组的启停,对支援负荷的响应时间难以做到精准预判,继而无法实现有效的闭环控制,因此精准的负荷分配反而不利于电网大容量负荷的需求响应。在应急响应阶段,利用抽蓄机组启停迅速灵活的特点,使其执行简单粗犷的大负荷调节策略,而通过常规火电、水电机组的一次调频或是飞轮、电化学等储能设备精准高效的充放电能力来实现电网频率的稳定和平衡反而会更加理想。

随着控制策略及计算方式的优化,可以将抽蓄电站在紧急情况下可支援容量进一步加大。例如,目前一台抽水机组的可支援容量为机组抽水有功的额定功率,若该台机组在抽水停机后转发电运行,即可视为该台机组向电网支援了 2 倍的单机额定负荷,对于电网而言极大地增加了可支援容量的体量。类似的,若电站机组处于调相工况,也可将该机组认定为具备转发电运行的能力,同样提高了电网在发生事故情况下备用负荷的可利用余量。

5 结束语

华东电网区域抽水蓄能电站成组模式下的紧急支援功能经多年的开发、调试已基本全面投用,但由于电网结构及需求的变化,其控制策略及响应方式也在不断地进行

(下转第 58 页)

基于罗克韦尔（AB）PLC的电袋除尘器清灰控制系统设计与应用

苏明义

（福建省亿和建设有限公司，福建龙岩 364000）

[摘要]介绍罗克韦尔（AB）1769 PLC 在燃煤电厂火力发电锅炉除尘系统中脉冲清灰控制的应用。根据电袋复合式除尘器袋区清灰工作的基本原理，以神华神东电力有限责任公司郭家湾电厂电袋复合式除尘系统项目为例，介绍了基于罗克韦尔（AB）PLC 的脉冲喷吹清灰控制系统的整体设计与应用，以及系统投运后的效果。

[关键词]电袋复合式除尘系统；编程软件；脉冲喷吹清灰；罗克韦尔（AB）PLC

[中图分类号] X773 **[文献标志码]** A

神华神东电力有限责任公司郭家湾电厂位于陕西省府谷县大昌汗镇郭家湾工业集中区，建设规模为 $2 \times 350\text{MW}$ 火力发电机组。燃煤锅炉烟尘除尘器选用福建龙净环保股份有限公司生产的电袋复合除尘器。

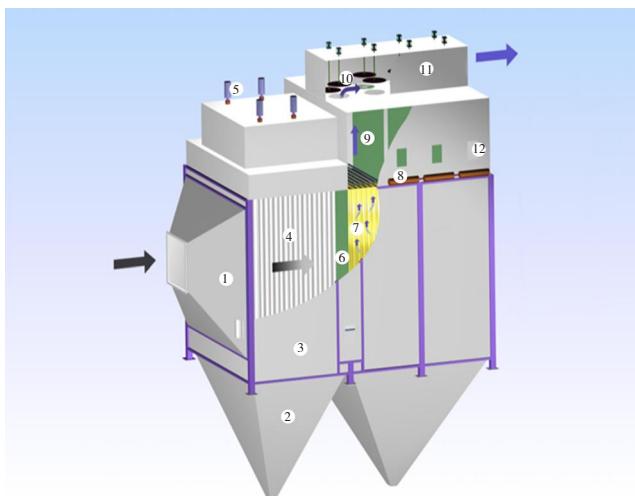
1 电袋复合式除尘器工作原理

不同于传统的静电除尘器和布袋除尘器，电袋复合除尘器是一种将两者有机结合的高效除尘设备。电除尘祛除含尘烟气80%以上的颗粒物，袋式除尘负责剩余细微颗粒物的捕集，同时承担除尘器出口稳定排放的职责。烟气中粉尘微颗粒物在电场区带电后，在电凝并作用下，异性电荷粉尘小颗粒逐渐形成较大颗粒，使得布袋拦截效率大大提升，此时，带有同种电荷的小粉尘颗粒物相互排斥并迅速在后级除尘空间扩散，以气溶胶形式悬浮并分布在各室，使附着滤袋表面的颗粒物之间形成排列有序、透气性好、利于清灰的粉尘层，使得袋区运行压差显著降低。为了使袋区除尘系统长期、稳定、高效除尘，必须配置一套结构合理、能耗低、运行稳定的清灰系统，确保除尘系统排放达到国家环保要求。电袋复合式除尘器如图1和图2所示。

2 高效清灰系统必须考虑的因素

(1) 脉冲喷吹的压力。压缩空气的供气速度和系统压力决定了喷吹效果，供气速度越快，系统压力越高，滤袋就能够迅速膨胀，抖落滤布表面的粉层越高效；相反，系统压力过低，喷吹气流速度慢，布袋表面的粉层抖落效果就差。从技术及经济方面考虑，喷吹压力调整在 $0.25 \sim 0.8\text{MPa}$ 。

(2) 脉冲阀喷吹的时间间隔。即每排布袋清灰的频率，



1.进气烟箱；2.灰斗；3.壳体；4.收尘极；5.振打装置；
6.导流装置；7.滤袋；8.清灰系统；9.净气室；
10.提升机构；11.出气烟箱；12.人孔门

图1 电袋复合式除尘器三维模型

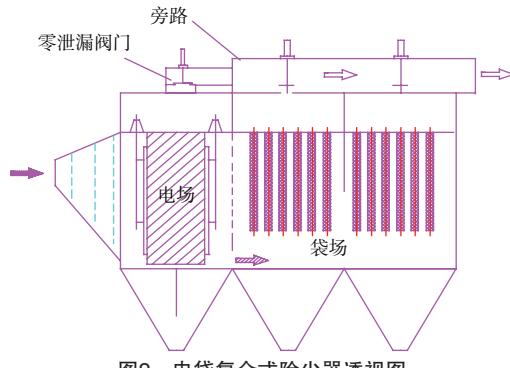


图2 电袋复合式除尘器透视图

这与电袋复合式除尘器的进出口差压及分室差压关系密切。适当的喷吹间隔时间，可以在保证清灰的同时减少压

缩空气的消耗量。

(3) 喷吹时间。即脉冲阀打开、压缩空气吹扫滤袋的时间。适当的喷吹时间，既可以保证清灰效果，又能减少压缩空气消耗量。

(4) 系统压差阻力。即滤袋迎正面与净层面的负压差值。系统压差的稳定性，决定了除尘系统的除尘效率与能耗。喷吹系统在工作时，该除尘室的压差会产生波动，滤袋在清灰过程中，会有一小部分粉尘透过滤布间隙排到大气中，因此应避免多个除尘室同时喷吹导致排放瞬间超标，以及系统补气引起能耗增加的问题。

(5) 除尘系统的烟气量。此项因素由锅炉引风机做功产生，由锅炉燃烧系统调节控制。烟气量在除尘器设计时已考虑，体现在滤袋过滤风速为 $1 \sim 4\text{m/s}$ 。固定风量情况下，如果清灰系统工作异常，将会导致系统压差过高或过低，因此清灰系统必须可靠运行。

(6) 除尘系统进风口烟气温度。目前电袋除尘器常规采用的滤料为pps(涤纶针刺毡)，适宜的工作温度不能超过 180°C 。锅炉工况异常，烟气温度超过pps耐受温度时，清灰系统必须关闭并将系统切换旁路，以保护滤袋。

3 控制系统方案

3.1 硬件方案

本方案逻辑控制采用美国罗克韦尔(AB)1756系列PLC，上位机采用国产研华品牌工控机，监控软件平台采用IFIX4.5软件。本系统采用一台工控机做为工程师站兼操作员站，采用以太网与PLC通信。

3.2 软件设计

下位机软件采用RSLogix 5000v15.02.00编程软件，RSLogix 5000由美国罗克韦尔研发，是配套PLC进行编程的平台。该编程软件功能丰富，编程时可以采用顺序流程图、梯形图、功能块图形等编程语言，实现控制功能。通过软件平台，可实现对控制系统各个模块的设置、监视和诊断。软件平台通过背板总线连接所有模块，完成对信号等的采集及控制命令的发出。

3.2.1 硬件配置

在硬件组态一栏背板总线中插入两个CPU1756-L72模块、2个以太网卡1756-CNBR/Ecent、4个DI模块1756-IB32/B、6个DO模块1756-OB32、4个AI模块1756-IF16。本项目AI模拟量信号主要是压力、温度，所以AI模块信号都配置成 $4 \sim 20\text{mA}$ 信号。PLC硬件模块的配置及功能见表1。

表1 PLC硬件模块的配置及功能

名称	型号	功能描述
CPU模块	1756-L72	罗克韦尔ControlLogix 5570系列处理器
通信模块	1756-CNBR/E	ControlNet网络通信模块
模拟量输入模块	1756-IF16	现场温度、压力等模拟电流信号采集
数字量输入模块	1756-IB32/B	提升阀、旁路阀运行状态等数字信号采集
数字量输出模块	1756-OB32	现场脉冲阀等设备远程遥控

3.2.2 程序编写

首先，对所有模块的每个输入输出点、程序变量进行定义，然后编写主程序和子程序。

本项目袋区低压控制系统分成几个控制单元，如脉冲喷吹清灰单元、开关量显示单元、进出口烟温显示单元等。每个单元分别编好一个子程序模块，每台除尘器根据控制的具体对象，分别调用上述功能的子程序。

3.2.3 脉冲清灰控制程序逻辑

可对定压方式脉冲间隔时间(6s)、定时方式脉冲间隔时间(10s)、脉冲宽度(180ms)、压差报警设定值(1800Pa)、压差工作方式上限值(1200Pa)、压差工作方式下限值(500Pa)、清灰大周期(600min)和定压方式保护时间(720min)进行设置。

操作人员在上位机操作系统界面，可对每个布袋除尘分室进行操作，运行方式：在线/离线；清灰方式：定时清灰/压差定时清灰。

(1) 在线。该分室投入清灰工作程序，进行脉冲喷吹清灰时，该除尘分室的提升阀保持开启状态。

(2) 离线。该分室投入清灰工作程序，在进行脉冲喷吹清灰前，关闭该分室提升阀。该分室脉冲喷吹清灰工作结束后，系统输出控制信号打开分该室提升阀。

(3) 退出。该除尘分室退出清灰工作循环节点，程序循环至该除尘分室时，直接跳过进入下一个分室。

(4) 定时清灰工作顺序。按照编号为1—3—2—4除尘分室的顺序，进行循环喷吹清灰工作。

3.3 通信设置

打开RSLink软件，连接PLC，确认上位机IP地址，配置菜单中选择模块ethernet devices，把机架模块的IP地址设置成与上位机同一个网段，测试PLC和上位机画面的通信。上位机画面反馈信号，代表设置成功。上位机组态软件采用IFIX，该软件功能强大，操作简便，通过画面可以控制电袋复合式除尘器各单元设备的启停及参数的设置，同时显示温度和压力信息。

3.4 工程师站画面组成

3.4.1 电袋复合式除尘器主画面

通过主画面，操作人员可以实时了解除尘器进出口烟温、高压电源电压电流参数、袋区旁路阀和提升阀状态、袋区脉冲喷吹系统工作压力及工作状态，以及袋区各分室的压差参数。郭家湾电厂 A 侧除尘系统监控主画面如图3所示。



图3 除尘系统监控主画面

3.4.2 历史数据曲线画面

历史数据曲线画面的主要作用是对关键数据如进出口烟温、除尘器进出口压差、脉冲清灰系统压力等参数的实时监控和存储。当需要调取历史数据时，可以在此画面进行查询，如图4所示。

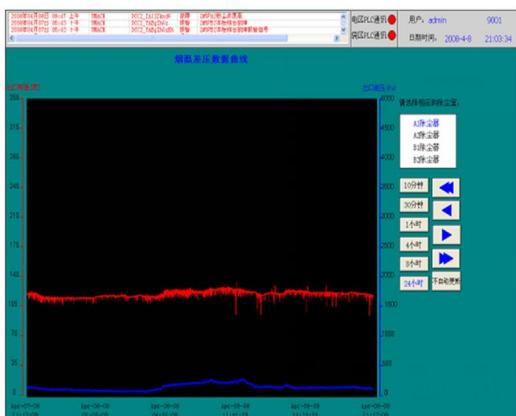


图4 烟气温度与除尘器压差历史曲线

4 系统操作

根据袋式除尘器的特点和现场实际情况，设定好运行

(上接第55页)

更新与完善。相信随着抽水蓄能技术与其装机容量的持续发展，紧急支援功能在电网中所展现出来的重要性将愈发明显。

参考文献

- [1] 项捷, 高伏英, 周毅, 等. 华东抽水蓄能电站侧紧急支援系统的实施和应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2

方式，以利于设备高效运行。

(1) 脉冲喷吹工作方式选择。本项目刚开始投产时采用定时喷吹方式，待系统运行稳定后，采用压差定时喷吹，降低系统能耗。

(2) 除尘器温度保护设定。本项目中，除尘器进口烟气温度由锅炉燃烧工艺控制，因此，需要锅炉集控中心根据锅炉尾部烟气温度调节空气预热器等设备，将除尘器入口烟气温度调节在160~180℃。当除尘器入口温度在160~180℃时，除尘器主画面显示正常状态；当除尘器入口温度高于180℃时，除尘系统旁路阀打开，提升阀关闭，保护滤袋。同时，将温度异常情况显示在画面上并进行声光报警。直到温度降到180℃以下，提升阀打开，旁路阀关闭。

5 结束语

随着现场调试工作的顺利完成，电袋复合式除尘器正式投入运行。系统参数、能耗指标、尾气排放均达到或优于技术方案要求，得到业主的肯定和赞誉。设备的投运对当地环保治理产生积极效益，对地区燃煤电厂污染排放治理改造提供了很好的解决方案。

参考文献

- [1] 王素洁. 脉冲喷吹清灰流场与清灰性能分析[D]. 绵阳：西南科技大学，2021.
- [2] 姚宇平, 刘美玲, 杜宇江. 清灰过程动态分析与脉冲阀喷吹性能研究[C]. 《环境工程》2019年全国学术年会论文集（下册），2019.
- [3] 任超凡. 远程布袋式除尘器智能控制系统的设计与实现[D]. 济南：济南大学，2020.
- [4] 张殿印, 张学义. 除尘技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.

作者简介

苏明义（1984—），男，福建龙岩人，本科，工程师，主要研究方向为电力设备的生产与安装。

(1) : 6-8, 21.

- [2] 吕斌, 贡晨晖, 吴浩, 等. 溧阳抽水蓄能电站负荷成组及紧急支援控制[J]. 水力发电, 2018 (7) : 55-56.

- [3] 朱佳. 华东桐柏抽水蓄能电站远方紧急支援功能的实现[J]. 水电站机电技术, 2015, 38 (11) : 65-68.

作者简介

朱冬（1985—），男，江苏江阴人，硕士研究生，工程师，主要研究方向为电力系统及其自动化。

APF直流侧纹波分析及电压外环控制研究

王 鹏¹, 刘忠富¹, 张树仁², 邵 辉³

(1.中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林长春 130000;
2.中建六局水利水电建设集团有限公司, 天津 300222; 3.国网聊城供电公司, 山东聊城 252000)

[摘要] 对三相三线制系统有源电力滤波器直流侧电压纹波机理进行分析。针对直流侧电压传统的 PI 控制策略的缺点, 提出一种基于模糊控制的模糊变 PI 策略。通过仿真验证, 模糊变 PI 策略可提升直流侧电压控制的动态性能。

[关键词] 有源电力滤波器; 直流侧电压; 模糊控制

[中图分类号] TM711 [文献标志码] A

0 引言

近年来, 随着电力电子技术不断突破, 电力电子设备等非线性原件在电网中广泛应用, 导致电网谐波增加。有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF) 在解决谐波问题方面可起到积极作用。然而, APF 直流侧电压稳定是关键, 直流电压的波动将会对补偿效果有影响。

1 APF 直流侧电压纹波机理分析

1.1 APF 直流侧电压纹波理论推导及纹波规律分析

为简化分析, 设三相电源的电压为正序, U_s 为三相电源电压的有效值, 设三相电源电压为:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} U_s \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

三相三线制系统中, APF 输出补偿电流的频次主要为 $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3 \dots, n$) 次, APF 三相输出电流为 i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} , 为基波电流与谐波电流之和。

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sum \sqrt{2} I_{(n)} \begin{bmatrix} \cos[(n\omega t + \varphi_{(n)})] \\ \cos[(n\omega t + \varphi_{(n)} - \frac{2}{3}\pi)] \\ \cos[(n\omega t + \varphi_{(n)} + \frac{2}{3}\pi)] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $I_{(n)}$ 和 $\varphi_{(n)}$ 为 n 次电流对应的幅值与相位。APF 可能也会补偿负序无功或者负序谐波, 因此, (2) 式中的 n 应考虑到正整数和负整数, 即 $n=\pm(6k\pm 1)$, 其中, $k=0, 1, 2, 3, \dots, n$ 。

结合式 (1) 与式 (2), 得到 APF 输出到电网的三相瞬时有功功率为:

$$p = u_{sa} i_{ca} + u_{sb} i_{cb} + u_{sc} i_{cc} = 3U_s \sum I_{(n)} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{(n)}] \quad (3)$$

针对式 (3) 展开分析, $n=1$ 时, 对应为 APF 三相瞬时功率的直流部分:

$$p_{(0)} = 3U_s I_{(1)} \cos \varphi_{(1)} \quad (4)$$

APF 输出电流其他分量则将会在瞬时有功功率中形成波纹, 角频率为 $m\omega$ 的瞬时有功功率纹波分量可由式 (5) 表示。

$$p_{(m\omega)} = 3U_s [I_{(m+1)} \cos(m\omega t + \varphi_{(m+1)}) + I_{(-m+1)} \cos(m\omega t - \varphi_{(-m+1)})] \quad (5)$$

APF 在稳态运行时, 直流侧的电压由一直流恒定分量和交流分量组成, 得到:

$$u_{dc} = \bar{u}_{dc} + \tilde{u}_{dc} \quad (6)$$

事实上, 直流分量 \bar{u}_{dc} 即为直流侧的电压参考值。

由交直流两侧瞬时功率相等可得:

$$\frac{1}{2} C_{dc} u_{dc}^2 = \int p dt \quad (7)$$

将式 (4) ~ (6) 代入式 (7), 可得:

$$\frac{1}{2} C_{dc} (\bar{u}_{dc}^2 + 2\bar{u}_{dc}\tilde{u}_{dc} + \tilde{u}_{dc}^2) = \int p_{(0)} dt + \int p_{(m\omega)} dt \quad (8)$$

从式 (8) 可知, APF 的瞬时有功功率直流成分对应于直流恒定分量的变化, 瞬时有功功率交流成分则对应于直流侧电压的纹波分量。由式 (8) 可得出直流侧电压中的角频率为 $m\omega$ 交流纹波分量的表达式:

$$\tilde{u}_{dc(m\omega)} = \frac{3U_s}{m\omega C_{dc} \bar{u}_{dc}} [I_{(m+1)} \sin(m\omega t + \varphi_{(m+1)}) + I_{(-m+1)} \sin(m\omega t - \varphi_{(-m+1)})] \quad (9)$$

1.2 APF 直流侧电压控制策略

1.2.1 基于传统 PI 控制的 APF 电压外环分析

基于传统 PI 控制的 APF 的直流侧电压稳定控制结构如图 1 所示。

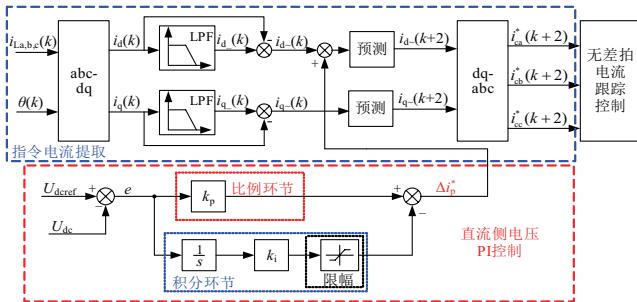


图1 基于PI控制的APF直流侧电压稳定控制结构

由图1可以看出,首先,电压控制误差($U_{dcref}-U_{dc}$)输入到PI控制器,并由PI控制器输出相应有功电流 Δi_p ;其次,将其叠加至负载电流的d轴的直流分量上;最后,APF三相指令电流中将会含有一定的基波有功电流,经过指令电流预测、无差拍电流跟踪控制等环节,使 U_{dc} 趋于稳定。 U_{dcref} 为参考电压。

1.2.2 基于模糊算法的改进电压外环PI控制

模糊控制(Fuzzy Control)思想最早在20世纪中叶由美国学者L.A.扎德提出,E.H.曼达尼首先将其应用于升温设备控制的场景中。此后,这种控制方法就被广泛应用于各类工业控制的场合,例如,航空航天系统、车辆无人驾驶、生产调配系统、能源生产体系、机器人以及过程控制等,并得到迅猛发展^[1]。相比传统控制方法,模糊控制具有以下特点^[2]。

- (1) 传统控制需以对系统的清晰建模为基础,而模糊控制无需事前对被控对象进行精确建模,仅需掌握受控目标的物理特征,对于简单或较为复杂的控制对象都适用。
- (2) 模糊控制体现了人的基础思维。它利用与人们思考过程相一致的模糊量来描述受控目标的物理特征,如“偏高”“中等”“偏低”等,容易被理解和接受。
- (3) 控制器输出的控制量依据模糊推理规则(控制规则)导出,构造较为容易。
- (4) 控制系统的实时性好,超调小,抗干扰能力更强。

因此,可将模糊控制与传统PI控制相结合,形成模糊变PI控制策略,以提升直流侧电压控制的动态性能。基于二维模糊变PI控制的APF电压外环结构如图2所示。

2 仿真验证与分析

为了同时考察对比两种直流侧电压控制策略的稳态及动态控制性能,分别设置非线性负载电阻在0.2s时由10Ω减小至5Ω(对应使负载电流突增至原值的2倍),在0.7s处又由5Ω恢复至10Ω(使负载电流突减恢复至原值)。以A相为例,仿真结果如图3和图4所示。

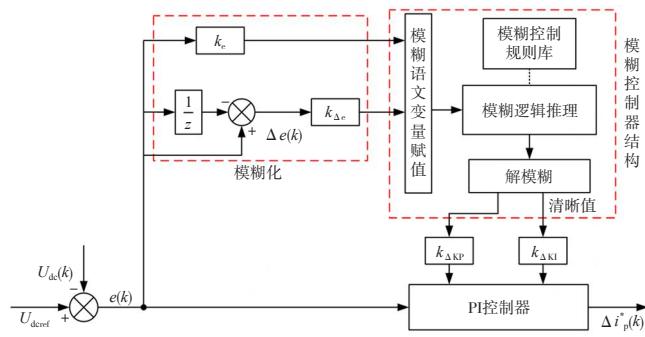
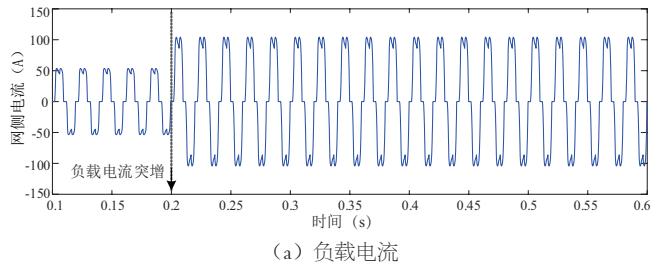
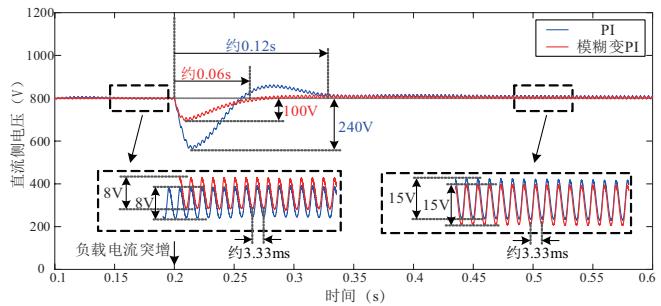


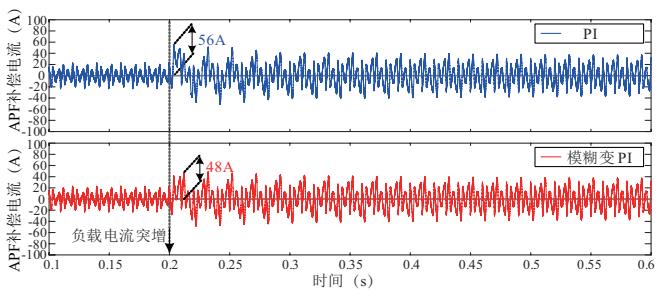
图2 基于二维模糊变PI控制的APF电压外环结构



(a) 负载电流



(b) APF直流侧电压



(c) APF输出补偿电流

图3 负载突增时的仿真结果

从稳态控制的角度分析,由图3(b)和图4(b),当APF系统补偿电流稳定在某一固定值时,采用传统PI和模糊变PI控制时的直流侧电压的波动幅度几乎相同,对应负载电流幅值为54A,104A时的直流电压的稳态波动幅度分别为8V,15V。相对于 $U_{dcref}=800V$ 条件下的波动百分比仅为1%,1.875%,证明模糊变PI与传统PI控制器均可带来相当理想的稳态控制效果。

在负载电流突增的动态阶段,由图3(b),采用传统

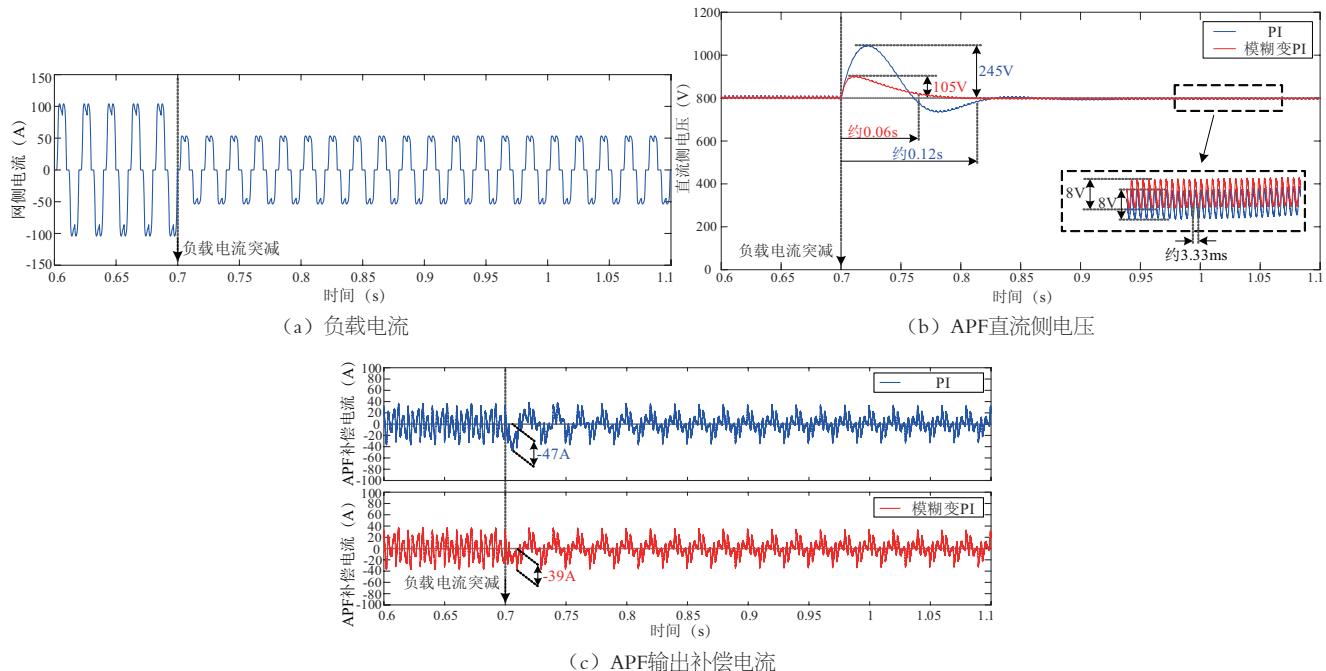


图4 负载突变时的仿真结果

PI 时, 直流侧电压 U_{dc} 的跌落幅度高达 240V, 同时, 以 U_{dc} 波动值稳定在其参考值的 2% 以内为标准, 整个过渡过程的持续时间为 0.12s; 而采用模糊变 PI 控制策略时, U_{dc} 的波动幅值仅为 100V, 过渡时间缩短至约 0.06s。反映到 APF 输出补偿电流中, 由图 3 (c), 补偿电流在负载突变后的过冲幅值也可由 PI 对应的 56A 减小至 48A。

两组动态仿真结果表明, 传统 PI 控制策略对直流侧电压的动态控制效果不佳, 存在较大的超调量和较长的调节时间, 继而影响了 APF 的动态谐波补偿性能。采用模糊变 PI 对直流侧电压进行控制时, U_{dc} 的超调量和调节时间均得到大幅度减小, 同时, 新的策略对 APF 动态谐波补偿效果的优化效果也较为明显, 这证明了所提控制器的有效性, 也说明直流电压的稳定是 APF 可高效、安全可靠地进行谐波补偿的必要条件。

3 结论

直流侧电压的有效控制是保障 APF 谐波补偿效果的

必要条件。仿真结果表明, 在负载电流突变工况下, 传统控制策略下的直流侧电压波动很大且响应时间较长, 模糊变 PI 则可大幅度削弱直流电压的波动幅度, 显著提高响应时间。

参考文献

- [1] 李岚. 自适应模糊控制综述[J]. 山东工业技术, 2015 (10): 209-210.
- [2] Cheng Z, Xu Y, Zhang H, et al. Coordinated Control of Independent DC Micro-grid Based on Fuzzy-PI Algorithm[J]. The Journal of Engineering, 2019 (16): 1107-1111.

作者简介

王鹏 (1994—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为电能质量。

制动器故障保护功能失效分析

陈 庆

(福建省特种设备检验研究院漳州分院, 福建漳州 363000)

[摘要] 制动器是电梯重要的安全保护部件。文章提出了验证制动器故障保护功能是否失效的方法, 为安装、质检、检验提供参考。

[关键词] 电梯; 制动器; 监测

[中图分类号] U463.51 **[文献标志码]** A

1 概述

近年来, 因制动器原因导致的电梯安全事故频发。制动器作为电梯重要的安全保护部件, 其能否正确可靠地动作关系电梯的安全运行。为了保证制动器在电梯运行过程中正确可靠动作, 现行标准规范要求新制造的电梯应配备监测制动器动作状态的监测功能, 控制系统通过读取监测开关反馈的信号来判断制动器是否正确动作。在 GB 7588—2003《电梯制造与安装安全规范》和 TSG T7001—2009《电梯监督检验和定期检验规则 - 曳引与强制驱动电梯》实施后, 检验人员在检验时发现因安装人员未按设计图纸施工导致监测开关无法正确监测制动器的正确动作, 不满足 GB 7588—2003 和 TSG T7001—2009 的相关要求。

2 制动器工作原理及相关标准、安全技术规范要求

目前我国电梯使用的制动器主要是机-电式电磁制动器, 其结构型式常用的有鼓式制动器和盘式制动器两种。电梯制动器为常闭式制动器, 即制动器线圈失电时, 制动闸瓦在制动弹簧的作用下与制动轮贴合, 依靠制动闸瓦和制动轮间的摩擦力制停电梯; 电梯运行时, 制动器线圈得电, 电磁铁克服制动力矩推动制动闸瓦开闸, 电梯运行。

TSG T7001—2009 第 2.8 (8) 规定: 应当具有制动器故障保护功能, 当监测到制动器的提起(或释放)失效时, 能够防止电梯的正常启动。

GB/T 10060—2011 第 5.1.8.9 条规定: 应装设对机-电式制动器的每组机械部件工作情况进行检测的装置。如果有一组制动器机械部件不起作用, 则曳引机应当停止运行或不能启动。

3 制动器监测设计原理

目前电梯中针对制动器提起(或释放)动作监测的设计大致可分为两种方式: 一种是监测制动器线圈电流的验

证方式, 另一种是行程开关通断的验证方式。

3.1 电流监测方式

电流监测方式的原理是当控制制动器的两个接触器吸合后, 制动器电磁线圈得电, 形成电流回路, 通过监测制动器回路是否有电流来判断制动的动作情况。如图1所示, 当 KMY 和 KMB 吸合时, 若电流互感器 TA1 有电流, 则判定为制动器已正确打开; 若 TA1 无电流, 则判定为制动器未正确打开, 电梯故障停梯。

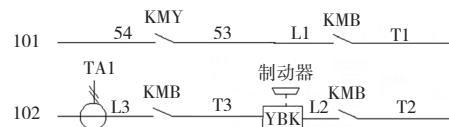


图1 电流检测方式制动回路原理

3.2 行程开关监测方式

行程开关监测方式就是在两个制动器机械动作位置分别安装一个监测用行程开关, 利用制动器提起与释放两种状态下行程开关的通断来判定制动器是否做出相应正确的动作。如图2所示, 当制动器提起时开关 BZK1 和 BZK2 的状态为断开, 当制动器释放时开关 BZK1 和 BZK2 的状态为接通, 系统通过开关信号来判断电梯制动器是否正常动作。

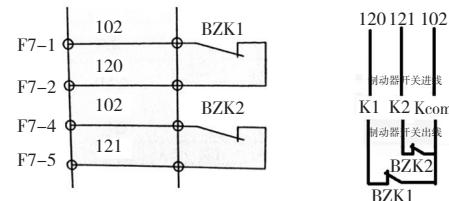


图2 行程开关检测方式原理及接线

以抱闸时行程开关闭合为例, 其电气原理图和设备制动器开关盒接线端子图如图2所示。控制柜主板上的监测点 102、120 和 121 分别接到制动器开关盒接线 3 个端子。端子功能如下: 102 为公共信号输出点, 输出高电平信号,

均接在接线盒的公共端 Kcom 上；120 和 121 端子分别接在接线盒的 K1 和 K2 上。当制动器释放时，监测开关 BZK1 和 BZK2 处于闭合状态，120 和 121 端子均能接收到 102 端子输出的高电平信号；当制动器提起时，BZK1 和 BZK2 均处于断开状态，120 和 121 端子均接收不到 102 端子输出的高电平信号。这样 120 和 121 端子接收到的信号分别受 BZK1 和 BZK2 的通断控制，因此均能单独监测到制动器两组机械部件的提起和释放信号。

4 制动器监测缺陷分析

4.1 电流监测方式缺陷

电流监测方式当制动器线圈接触吸合且制动器线圈回路电流正常时，只能说明制动器线圈回路正常，但此时制动臂是否正确打开系统无法监测到，电梯还是按预定程序启动运行，无法因制动器未提起而故障停梯，电梯则会带闸运行，对制动器闸瓦造成严重磨损。该监测方式只对制动器线圈是否正常工作进行监测，并未对制动器的制动闸瓦是否正常工作进行监测，且该方式也无法对制动器是否释放进行监测。

4.2 行程开关监测方式缺陷

(1) 检验时受检设备制动器接线端子的接线如图3所示，此时公共信号输出点 102 分别接到 K1 和 K2 端子上，而信号监测点 120 和 121 被接在公共端 Kcom 上，此时监测开关 BZK1 和 BZK2 并联接法。当电梯启动运行，抱闸打开，如果有任意一组闸瓦未打开，则 120 和 121 端子均能接收到 102 端子输出的高电平信号，此时系统监测到制动器未正确打开，停梯保护。但当电梯正常停止运行，制动器释放制动时，如果其中一组制动器机械部件因故障无法释放下闸时，其对应的监测开关 BZK1 和 BZK2，

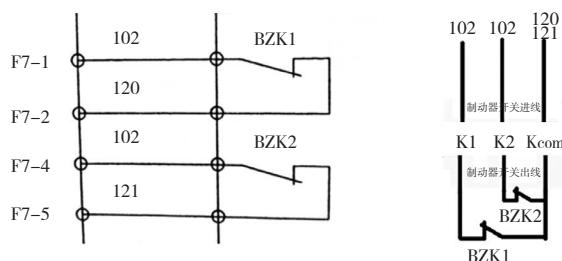


图3 常闭方式失效接线图

一个处于闭合状态，一个处于断开状态。此时 120 和 121 端子均能接收到 102 端子输出的高电平信号，而接收不到其中一个制动器机械部件无法释放下闸的故障信号，就会出现系统误判定为制动器均已正确释放，电梯因监测不到故障还能正常启动运行。故此电梯的制动器检测功能对一个制动臂无法下闸制动的故障保护功能失效（对

提起的监测未失效），电梯如果一个制动闸瓦未闭合可能出现制动力不足，将导致电梯紧急停止时制动力不足出现的冲顶或蹲底的事故或是电梯装载时出现溜车挤压、剪切的严重事故。

(2) 由于监测开关 BZK1 和 BZK2 上都配有常开和常闭两组触点，且系统对于该信号的监测也是可以按开关的接法进行常开（或常闭）的监测设置。如果安装人员不按出厂设计施工，而将监测方式改为常开（图4），即接到监测开关的常开触点，而不是图纸要求的常闭触点。这种接法会出现当制动器提起时，如果有一组制动器机械部件因故障无法提起时，其对应的监测开关 BZK1 和 BZK2，一个处于闭合状态，一个处于断开状态。此时 120 和 121 端子均能接收到 102 端子输出的高电平信号，接收不到制动器机械部件无法提起的故障信号，电梯可以正常启动运行，这将导致制动器的制动闸瓦（制动钳）与制动轮（制动盘）发生摩擦。长时间的带闸运行会使制动闸瓦严重磨损，制动能力降低，严重时将无法满足电梯的制动力要求，可能导致电梯溜梯，造成挤压、剪切、冲顶或蹲底的事故。

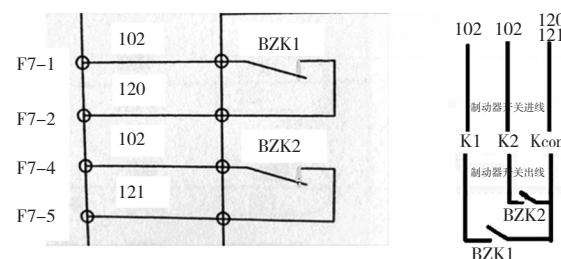


图4 常开方式失效接线

上述两种常见的采用行程开关通断来验证制动器是否正确动作的失效模式，笔者在检验中都遇到过，造成失效的原因是安装人员未严格按图施工。

5 处理及预防措施

(1) 为了能可靠地对制动器的正确动作进行监测，可加入对曳引机的电流大小监测，同时监测曳引机和制动器的电流。曳引机的电流大小是由所需力矩决定的，而这是根据轿厢实际载重量来确定的电梯每次启动运行需要的启动电流，如果系统按预先给出的电流工作时电梯无法启动运行，则可以判断该电梯启动运行有异常，系统故障停梯。

(2) 安装人员应严格按照电气图施工，对于公共线和监测线不得错接，电梯制造单位及安装单位应加强对安装人员及质检员的培训，质检员应认真检查安装人员是否按图施工，并且还要检查功能的有效性。

(下转第 75 页)

核主泵试验台热平衡系统设计

陈 波

(天台县基础设施投资有限公司, 浙江天台 317200)

[摘要] 热平衡系统是核主泵试验台最重要的辅助系统, 其设计需要进行大量传热、热应力和管道阻力计算。文章介绍热平衡系统的功能、组成和系统原理, 并以实际设计项目为例, 介绍该系统的设计思路、方法和程序, 为同类系统设计提供参考。

[关键词] 核主泵试验台; 热平衡系统; 冷热负荷; 管道阻力

[中图分类号] TM623 **[文献标志码]** A

核主泵出厂试验时, 试验项目多, 时间长, 精度要求高, 试验台应具备优良的热平衡性能, 以实现系统静态和动态运行时的高可控性和快速平衡能力。试验台的热平衡性能主要是指主泵试验时, 试验回路中冷热负荷的供给、传递及控制能力^[1]。此外, 回路外主泵电机有较大热耗损失, 由独立冷却系统散热。

文中主要介绍我国北方某企业 CAP1400 核主泵试验台试验回路热平衡系统的设计。由于主泵电机的散热系统比较简单, 仅作简要介绍。CAP1400 核主泵试验台既需要满足屏蔽电机主泵试验, 也需要满足轴封主泵试验, 因轴封主泵相对流量大、扬程低, 以下设计有关主泵参数以轴封主泵参数为主。

试验回路的热平衡主要通过辅助回路的冷却和加热支路来实现, 核主泵试验台辅助回路简要系统如图 1 所示, 其设计程序如下。

(1) 根据核泵各试验项目的具体过程和要求, 归结出试验台热平衡核算的极端工况及其冷、热负荷。

(2) 根据实地条件和耦合关系, 通过试算初定回路冷却器的面积、辅助回路管径、外部循环(二次)冷却水参数和回路加热器功率。

(3) 确定调节阀。

(4) 校核验算。

1 极端工况及其冷热负荷

1.1 工况A(换热最不利工况)

核主泵各频率(25Hz/30Hz/40Hz/50Hz)转速下冷态性能试验时, 回路最低稳定运行温度不大于85°C(压力2.7MPa), 如图1所示。此工况下回路冷负荷即各转数下的主泵轴功率(忽略其他散热), 其中额定转速(50Hz)时的最大轴功率定为8000kW(有一定预留)。

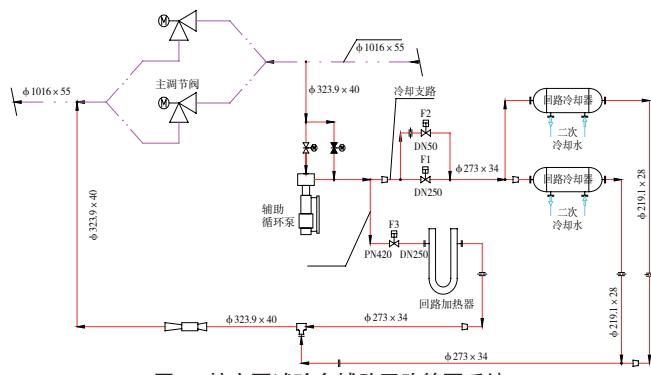


图1 核主泵试验台辅助回路简要系统

1.2 工况B(最大冷负荷工况)

核主泵额定转速(50Hz)最大功率负荷运行, 回路要求55°C/h降温速率, 且回路介质温度不大于130°C(压力15.5MPa)。此工况下冷负荷计算如下。

(1) 主泵最大轴功率(有一定预留)为8000kW。

(2) 回路降温速率55°C/h需要的冷却功率。回路高温高压管道(包括主管及设备+辅管及设备)总质量约296t, 降温速率为55°C/h时, 需冷却功率约为2080kW; 回路高温高压管道内总容积62m³, 回路工作水温度130°C, 降温速率为55°C/h时, 需冷却功率为3800kW。降温所需总冷却功率3800+2080=5880kW。

(3) 回路高温高压管道保温层外表总面积约680m², 回路工作水温度130°C, 室温按20°C计算, 漏热功率约80kW。

(4) 回路加压系统在保持系统压力平衡时, 向系统注入20°C工作水, 按2m³/h考虑。回路工作水温度130°C时, 这部分注入水自身的冷却功率约250kW。

因此, 回路最大冷负荷Q=8000+5880-80-250=13550kW。

1.3 工况C（最大热负荷工况）

主泵额定工况运行，回路工作水压力15.5MPa，温度290℃，回路要求55℃/h升温速率。此工况下热负荷计算如下。

(1) 升温速率55℃/h需要的系统加热功率。回路高温高压管道升温所需加热功率2080kW，回路高温高压管内工作水升温所需加热功率3710kW。

(2) 回路高温高压管道（含设备）保温层外表面积约680m²，回路工作水温度290℃，室温按20℃计算，系统保温漏热功率约为120kW。

(3) 回路加压系统注入20℃工作水，按2m³/h考虑，这部分注入水所需的加热功率约590kW。

回路最大热负荷 $Q=2080+3710+120+590=6500\text{kW}$ 。

2 初定参数

2.1 初定参数时应明确的问题

辅助回路的管径与回路冷却器面积相互耦合，并与外部循环（二次）冷却水参数关联，需要通过试算来初步确定，试算时应明确以下几点内容。

(1) 辅助回路设计前，应根据主回路流动性能分析结果，计算出主泵在各试验转速下，各特定工况时，主阀前后的压差值 ΔP_i 。一般工况下， ΔP_i 应大于辅助回路系统流经回路冷却器支路的总管阻 ΔP_f （含设备阻力）。

(2) 对于回路冷却器，其热流程工况多且恶劣，极端工况时热程压力达17MPa，进出口温差超过250℃，有大的温度梯度和热应力，热程管束容易损坏。设计采用热程柔性较好的螺旋缠绕管式换热器，并在考虑一定富裕的情况下尽量减小其换热面积。增大辅助回路管径，加大热程流量有利于换热并减小换热面积，但管径的确定还需综合考虑辅助回路管道柔性、布置空间及成本等因素。本设计中将冷却支路设计成两路，一方面减小单个冷却器换热面积，同时提高可靠性，另一方面也有利于减小管阻。

(3) 螺旋缠绕管式换热器传热系数高，是一般管壳式换热器的2~3倍，初定计算时取保守值 $K=1600\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 。

(4) 对于辅助管道流速，由于轴封主泵试验时的辅助回路最大许用管阻即 ΔP_i 不大，设计时主要辅管流速不大于2m/s，局部最大管道流速不大于3m/s。

(5) 对于外部（二次）循环冷却水，考虑到台位建设在北方，设计计算用循环冷却水供水、回水温度分别为33℃和43℃。

2.2 初定辅助回路管径和冷却器面积

按上述工况A额定转数（50Hz）时主泵参数来计算，轴封主泵最大流量点主阀前后压差 $\Delta P_i=0.18\text{MPa}$ （1.8bar），主泵轴功率按8000kW考虑。按8000kW换热功率，采用逆流对数平均温压法计算传热平均温差^[2]，经迭代传热计算可得，当热程流量为 $2 \times 125\text{m}^3/\text{h}$ （进口温度85℃）时，所需换热面积为 $2 \times 78.9\text{m}^2$ ，同时辅助主管取值为Φ323.9×40（材料TP347）时的管道流速 $u \approx 1.5\text{m/s}$ ，这样初定比较合适。

根据试验台位中预留的辅助管道布置空间、支撑位置等，并充分考虑管道柔性需求，预设辅助管道的空间走线和各支管管径，并按公式（1）^[3]、（2）计算管道阻力。

$$h_f = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) u^2 / 2 \quad (1)$$

$$h_f = \lambda \left(\sum L_i / D \right) u^2 / 2 \quad (2)$$

式中， h_f 为局部阻力， λ 为摩擦因子， L 为管长， D 为管道内径， u 为流体平均流速， $\sum L_i$ 为同径当量长度之和。直管阻力采用公式（1）计算，弯头、三通、普通阀门等局部阻力按当量长度法，采用公式（2）计算。管路中调节阀、换热器热侧的局部阻力，若已确定供货商，可分别根据供货商提供的流阻系数（阀门取100%开度）来计算；若尚未确定厂家，一般可考虑先按0.02~0.04MPa（0.2~0.4bar）来估计，待定好供货商后再进行复核。

按预设的辅助管道进行总管阻 $\Delta P_f = \sum h_f$ 计算，若 $\Delta P_f < \Delta P_i = 1.8\text{MPa}$ ，则该预设初步可行（否则，重新预设后计算管阻直至 $\Delta P_f < \Delta P_i$ ），然后进行管道应力分析，对各工况下的管道应力、管道柔性及对设备作用力进行验算。值得注意的是，辅助管道必须与主回路管道同时进行应力分析计算。若不能满足应力或柔性要求时，需调整管道支承、管径或管道布置直到满足需求，在此过程中若管径或管道布置有调整，则需要再次进行管道阻力校核，直至管道阻力和应力等均满足要求。

设计中，经多次调整、计算后的 $\Delta P_f=0.168\text{MPa}$ （1.68bar），各管径如图1所示，回路冷却器面积初定为 $2 \times 80\text{m}^2$ 。

2.3 计算确定外部循环（二次）冷却水量

按2.2节初定辅助管道尺寸和布置核定工况B中的管道总质量、总容积及保温层外表总面积，并计算出回路最大冷负荷 $Q=13550\text{kW}$ 。试验台另一冷负荷为主泵电机的热耗损失，据《AP1400屏蔽电机主泵试验台设计规范》，这部分损失最大为3000kW。电机冷却介质应为软化水，设计中采用独立闭式（一次）冷却水系统传递热量，由外

部循环（二次）冷却水带走。

因此，台位总的最大冷负荷 $Q_{\text{总}} = 13550 + 3000 = 16550 \text{ kW}$ ，按 $33 \sim 43^\circ\text{C}$ 的进出口温度，需要外部循环冷却水量约为 1425 t/h 。设计采用 1450 t/h 。

2.4 确定回路加热器的功率

一般情况下，主泵运行时，回路升温所需热能通过主泵做功来获得，特殊工况如“失电试验”“丧失外部冷却水试验”及工况 C 等则需要回路加热器来辅助加热。经比较，工况 C 所需辅助加热功率最大。轴封主泵额定功率约 5275 kW ，需要辅助加热功率为 $6500 - 5275 = 1225 \text{ kW}$ 。设计采用 $2 \times 750 \text{ kW} = 1500 \text{ kW}$ 的电加热器。

3 确定调节阀

回路冷负荷平衡速度和精度主要通过调节冷却支路即回路冷却器热程流量来实现。上述参数初定后，应计算出冷却支路调节阀门的流量系数 C_v 的范围，用以确定调节阀门方案。屏蔽主泵和轴封主泵冷、热态性能试验，各转速下取 3 点（包括最大、最小流量点）作为计算工况点，具体计算过程如下。

- (1) 确定或估算工况点主泵轴功率，即回路冷却器换热功率。
- (2) 计算工况点冷却支路即回路冷却器的热程流量。
- (3) 计算工况点除调节阀外冷却支路管阻。
- (4) 计算工况点主阀前后的压差值 ΔP_i 。
- (5) 计算工况点调节阀前后压差。
- (6) 计算工况点调节阀流量系数 C_v 。

按此过程计算，本项目冷却支路调节阀 C_v 范围约为 $2.7 \sim 290$ ，单个调节阀难以实现，设计采用名义通径分别为 DN250 和 DN50 两个调节阀组成调节阀组来调节，确保阀组 C_v 值在 $2.7 \sim 290$ 范围内连续高精度可调。

辅助回路加热支路的加热功率通过调节回路加热器电控柜的输出电压来控制，支路流量调节精度要求不高，设计采用一个 DN250 调节阀。

4 校核验算

按上述初定的回路冷却器面积 $2 \times 80 \text{ m}^2$ [$K = 1600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C})$]、辅助管道管径（图 1）及布置、外部循环冷却水参数（进、出口温度 $33 \sim 43^\circ\text{C}$ ）和调节阀门参数，校核验算工况 A 和工况 B 能达到的最低稳定运行温度。

其中工况 A 选各转数下的最大流量点（轴功大，流量大，扬程低）来计算，具体过程如下。

- (1) 计算工况点主阀前后的压差值 ΔP_i 。
- (2) 关闭 F3 阀，全开 F1 和 F2 阀（图 1），取 $\Delta P_f = \Delta P_i$ ，计算流经回路冷却器的最大热程流量。
- (3) 确定、估算或拟定工况点主泵轴功率，即回路冷却器换热功率。
- (4) 迭代计算，算出回路冷却器热程最低进口温度即该工况点最低平衡温度。

本设计中工况 A 按实际确定或估算的轴封主泵轴功率来计算，各转速下的最低稳定运行温度在 $76 \sim 79^\circ\text{C}$ ，工况 B 最低稳定运行温度为 116°C 。符合要求，校验合格。

5 结语

综上所述，核主泵试验台热平衡系统主要由辅助回路加热、冷却支路和外部循环冷却水系统构成，其设计需要进行大量传热、应力和管阻计算，核心和难点是计算确定辅助冷却支路管径、管道布置、阀门和冷却器。本设计计算前应先确定或完成以下内容。

- (1) 试验核泵试验项目及主要过程。
- (2) 试验核泵冷、热态性能参数或设计参数（需考虑一定预留）。
- (3) 主回路管道系统（含设备）设计完成，并进行了主回路 CFD 流场分析且满足流通性要求。

参考文献

- [1] 陈波. 核主泵试验台工艺系统分析[J]. 工程建设与设计, 2022(1): 101-103.
- [2] 杨世铭. 传热学: 2 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [3] 中国石化集团上海工程有限公司. 化工工艺设计手册: 3 版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

作者简介

陈波 (1975—)，男，湖北京山人，硕士研究生，高级工程师，主要从事大型流体机械试验台工艺系统研究设计工作。

回路电阻测试仪常见故障处理

张茹萱

(杭州意能电力技术有限公司, 浙江杭州 310006)

[摘要]回路电阻值的测量和比对记录作为电力工作工程交接和预防性试验中所必须进行的步骤, 是非常重要的关键环节。作为电力系统中广泛应用的试验仪器, 回阻仪不仅需要确保断路器安全运行, 也需要真实反映出接触电阻值。文章简要介绍回阻仪的基本工作原理及设备性能, 对实验室校准过程中常见的故障进行分析, 并提出相应解决方法。

[关键词]回阻仪; 故障; 处理方式

[中图分类号] TM934.1 **[文献标志码]** A

当前, 在规模不断扩大的电力系统中, 对电力系统的可靠性运行要求也越来越高。回路电阻参数不仅是开关类设备中最重要的特性指标, 也是异常状况早期告警的关键信息之一。作为一项可靠指示和指标, 回路电阻参数常被用在连接失效预测或系统性能衰变评估中, 参数值的大小会对通载额定工作电流的断路器温升和短路状态下的动稳定性及热稳定性产生直接影响^[1]。

回路电阻的组成主要包括材料的本体电阻、连接处电阻及触头之间的接触电阻(以接触电阻为主)。根据预防性试验规程 DL/T 596 中的规定, 在现场工作中必须对断路器进行回路电阻的测量试验^[2]。回路接触电阻的增大可能是因为动静触头的压力不足, 或表面氧化等。这些情况都可能引起触头发热, 以至烧熔在一起, 产生拉弧。严重时会引发设备运行异常甚至引发电网停电事故。在工程交接和预防性实验中均需要密切注意回路电阻值的变化。

回路电阻测试仪(Loop Resistance Tester), 又称接触电阻测试仪(以下简称“回阻仪”)。电气从业人员要保证回阻仪的性能稳定并对回路电阻值进行准确测量, 确保量值传递工作是非常重要的。

1 回路电阻测试仪的性能

较普遍的台式回阻仪面板结构如图1所示。目前市场上已大量出现了便携的手持式回阻仪, 面板有所不同, 如图2所示。

对比手持式和台式面板可以看出, 手持式在整体功能按键上都做了简化。此款仪器现已在浙江省电力系统中较为普遍。最右侧按键除了作为开关键以外也作为测试键使用。右键用来选择功能, 上下键做功能的调节使用。

以往电力系统普遍采用常规的双臂直流电桥, 在测试



1.电源开关; 2.电流与电阻显示面板; 3.AC220V电源接口; 4.电流端口; 5.电压端口; 6.接地线; 7.电流调节按钮; 8.测量/打印按钮

图1 台式回阻仪面板结构



图2 手持式回阻仪

过程中, 由于输出电流大小与时长的不足, 难以发现变压器线圈存在的缺陷。受到油膜和氧化层的影响, 对高压开导电回路的接触电阻进行测量时, 则无法得到真实的接触电阻值, 可能会测得偏大的数值。根据 DL/T 845.4—2019《中华人民共和国电力行业标准电阻测量装置通用技

术条件》的要求，对回阻仪的测量输出电流作出不小于100A的规定，以此确保仪器测量的准确度。

现在市场上较常见的回阻仪一般分为内置电源和外置电源两种。不同厂家、不同型号的外置电源回阻仪，测试电流可选择范围在100~600A，并可存储或通过蓝牙装置传输至移动端。时间范围均设定为满足标准中不小于1min的要求。

便携式回阻仪由于采用内置电源，体积小，所以容量偏低，只能满足100A电流的输出。它的核心是恒流源发生模块，将输入的较低的直流电压转换为100A的恒流源输出。

部分回阻仪采用的开关电源技术，能在长时间避免连续的脉冲式大电流的输出；数字信号处理技术能使仪器分辨率达到0.001 μΩ。这些技术使仪器测试时不但可顺利击穿触头氧化膜，还能保持数值准确。即使现场环境存在一定程度的干扰，大部分仪器依然能保持较好的稳定性和重复性。

同时，大部分回阻仪选用的CPU都具有较高的性能，在电流选择“自动”挡位时可自动对量程进行切换。若仪器温度超过内部设置温度，会自动断开电流，以保证设备的安全运行。

内置电源的回阻仪大多配有RS232串口或USB，这样可以很方便地完成与计算机的通信。目前一部分型号的仪器安装了蓝牙装置，使通信过程更加方便。

2 回阻仪的工作原理

外接电源的回阻仪采用高频开关电源提供100~600A的测试电流。若电流设置选择“自动”挡位，当测量键被按下时，高频开关电源就会自动输出相对合适的电流值；若选择对应电流挡位则会对应输出相应的电流。电路采样后，所获的信号将会通过放大器放大，再进行信号转换，最后通过对数据的滤波、运算、处理后，通过显示器显示电流和电阻值。

回阻仪所采用的方式以四线制测量法为主。对其进行校准和检测的过程也同样采用此法。直流压降法基本原理见式(1)，即直流电阻的欧姆定律。

$$\begin{cases} R_x = U_x / I_x \\ U_x = U_+ - U_- \\ I_x = I_+ - I_- \end{cases} \quad (1)$$

如图3所示，当设备通电时，电流源经“ I_+ ”、“ I_- ”两个端口，供给被测电阻 R_x 电流。电流经电流表读取，电压表读取 R_x 两端的电压降。最后算出被测电阻值，并在屏幕上显示出来。

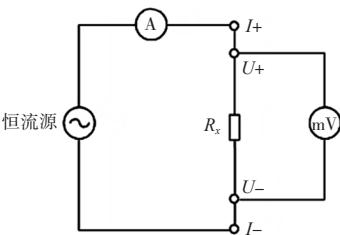


图3 测试原理

若回路中有因接触不良或连接点断开等问题导致的线路不通，回阻仪会自动断开电流输出，部分仪器还配有蜂鸣报警器，起到警示操作人员的作用。

3 回阻仪检测常见故障及原因分析

在实验室对回阻仪的校准（检定/检测）过程中，可能会遇到不同种类的故障，影响仪器的正常工作。为了确保回阻仪校准过程的顺利有效进行，下面根据实验室校准过程中可能出现的故障进行梳理分析。

(1) 外接220V交流电源（不可接入直流电源或380V交流电源），打开开关后风机无运转，显示屏无显示。这一现象出现的可能原因有：电流源不通、保险丝熔断或未安装等。可通过更换电源线或检查保险丝的方式排查。若更换保险丝后，通电再次熔断，则需联系生产厂家解决。

若该型号为内置电源，则可能无风机配置或无保险丝。若按下开关后屏幕无显示，原因可能是电池没电（蓄电不足或电池损坏）或屏显损坏。可通过接入电源进行充电排查电池原因。若电源接入后屏幕仍无显示，则可能是屏幕损坏或接触不良，建议返厂维修。

(2) 当回阻仪正常开启并选择电流挡位后，按下“测试”键，无电流值显示，或显示“电流故障”，亦或是直接断开测试，均有可能是测试回路未闭合的原因。可通过排查电流线接线问题（包括但不限于重新搭接或重夹标准源侧电源夹、重连或扭动设备侧接口），以确认各触点接触良好。也可重新闭合“测试”开关排除开关接触不良等问题。

(3) 当测试电流正常并顺利对标准电阻进行测试时，电流输出稳定但电阻显示值波动，可通过排查标准电阻端子触头接线是否接触良好。若接口采用插入式接线，可改为线夹的方式改善接触不良的问题。若数值显示异常或负值，则可能是因为线夹位置有误或接反。目前常用仪器已较少出现这类情况，若线路接反通常直接报错或自动断开电流。

(4) 回阻仪开始测试时，通电电流达不到100A（差

（下转第72页）

ALSTOM GL314配FK3-1机构动作原理及缺陷分析

陈朝廷

(深圳供电局有限公司, 广东深圳 518000)

[摘要] 文章分析了 ALSTOM GL314 配 FK3-1 机构动作原理及缺陷。ALSTOM 断路器广泛应用于电网中 110kV 及 220kV 电压等级开关设备上。GL314 配 FK3-1 机构结构紧凑，弹簧振动较小，整体可靠性较高，对开关设备安全可靠运行起到重要作用。结合 FK3-1 机构动作原理及缺陷案例的分析，找出机构缺陷主要原因，提前制定检修计划，能够及时、有效地处理设备问题，减少电力安全事故。

[关键词] FK3-1机构；齿轮；惯性飞轮；储能过渡引导齿条

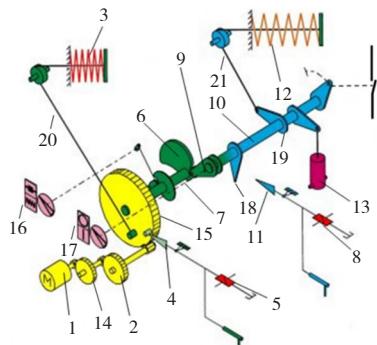
[中图分类号] TM561 [文献标志码] A

高压断路器是电网中最重要的控制和保护设备，它既能接通或断开电路的空载电流和负载电流，也能迅速、自动地切断故障电流。FK3-1机构作为 ALSTOM GL314型断路器的核心驱动，对断路器能否安全可靠运行起着重要作用。ALSTOM GL314 配 FK3-1 机构在 110kV 及 220kV 电网中应用量较大，为提高断路器的动作可靠性，防止断路器发生误动、拒动事件，了解 FK3-1 机构动作原理并分析 FK3-1 机构出现缺陷的原因，可以对同类设备及时采取预防性措施，能有效降低电网运行风险，同时对 FK3-1 机构故障处理也有重要意义。

1 FK3-1机构动作原理

1.1 FK3-1机构

ALSTOM GL314配FK3-1机构为弹簧机构，其主要组件如图1所示。



1. 储能电机； 2. 储能传动齿轮； 3. 合闸弹簧（该弹簧为螺旋压缩弹簧）； 4. 合闸掣子； 5. 合闸线圈； 6. 合闸凸轮； 7. 合闸轴；
8. 分闸线圈； 9. 带滚轮的拐臂； 10. 主轴； 11. 分闸掣子；
12. 分闸弹簧（该弹簧为螺旋压缩弹簧）； 13. 分闸缓冲器；
14. 减速齿轮； 15. 惯性飞轮； 16. 储能指示； 17. 分合闸位置指示；
18. 拐臂1； 19. 拐臂2； 20. 合闸弹簧连接链条； 21. 分闸弹簧连接链条

图1 FK3-1机构简图

1.2 FK3-1机构储能及合闸原理

机构原始状态为分闸位、弹簧未储能状态，当储能电机通电后，它就会通过惯性飞轮、减速齿轮以及合闸弹簧连接链条给合闸弹簧储能。合闸弹簧储能到位时，中间齿轮会停在惯性飞轮上没有齿牙的位置，而减速齿轮则会停下来，以免合闸掣子受力变形。如图2所示，执行合闸操作命令时，合闸线圈通电时或操作手动合闸杠杆时，合闸掣子就会与惯性飞轮脱开；在合闸弹簧的作用下，合闸轴会旋转 180° ；合闸凸轮推动带滚轮的拐臂让主轴发生旋转，旋转 60° 以后，主轴上的拐臂1就停靠在分闸掣子上。与此同时，通过主轴上拐臂2的旋转，带动分闸弹簧连接链条运动，给分闸弹簧储能，安装在中间齿轮上的自由轮可以阻止惯性飞轮继续转动。

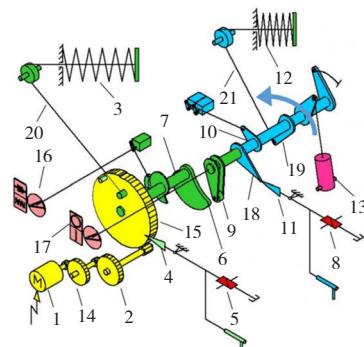


图2 FK3-1机构合闸位置示意图

1.3 FK3-1机构分闸原理

如图3所示，在主轴上拐臂2逆时针旋转，带动分闸弹簧连接链条运动，使分闸弹簧储能完毕，当分闸线圈通电时或手动操作分闸杠杆时，分闸掣子就会脱开主轴上的拐臂1，在分闸弹簧的作用下，主轴将沿顺时针方向旋转60°，直到“分闸”位置。此时分闸缓冲器将吸收剩余的

能量，以便分闸动作能平稳完成。

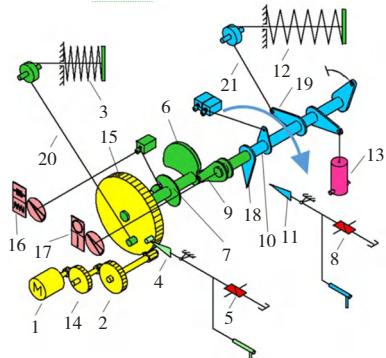


图3 FK3-1机构分闸位置示意图

2 ALSTOMGL314配FK3-1机构缺陷分析

2.1 500kV某站2501开关B相机构合闸异常情况

2022年4月11—13日，运维班组人员在对500kV某站2501开关停电运维工作中，对2501开关传动时发现2501开关B相机构无法正常合闸。现场检查发现B相合闸线圈烧坏，进一步检查发现机构储能离合轴过渡引导齿明显崩损（此时开关A相、C相机构均在合闸已储能状态，B相机构在分闸已储能状态）。该开关由苏州ALSTOM高压电气开关有限公司于2012年3月生产，2013年6月投运，系GL314型断路器配FK3-1机构。

打开B相机构箱，能闻到一股刺鼻烧焦气味，操作机构无进水锈蚀情况，分闸缓冲器无渗油，辅组开关完好，分闸线圈外观无异常，合闸线圈有明显受热变形痕迹；检查二次控制回路，测量合闸回路电阻为 1.2Ω ，测量合闸线圈电阻仅 0.2Ω ，合闸线圈短路损坏，如图4所示。



图4 故障合闸线圈

对B相机构手动释放弹簧能量时，发现机构不能正常释能；进一步检查机构的机械传动部分，发现机构合闸掣子与惯性飞轮滚珠已脱开，惯性飞轮仅向释能方向运动了约2cm便停止，合闸弹簧能量并未得到释放。合闸掣子与惯性飞轮掣子的正常位置与异常位置如图5所示。

检查惯性飞轮储能过渡导向齿条，正常储能过渡导向齿条有4齿，但B相机构的储能过渡导向齿条仅剩1齿，



(a) 正常位置 (b) 异常位置

图5 合闸掣子与惯性飞轮掣子的位置

且在机构箱底部找到掉落的断齿。同时惯性飞轮齿轮齿尖与离合器传动齿轮齿尖相互顶撞，没有啮合。惯性飞轮储能过渡导向齿条完好情况及损坏情况如图6所示。



图6 储能过渡导向齿条完好情况及损坏情况

运维人员通过手动储能杆手摇输出轴，带动离合储能齿轮转动，在微动了半个齿位时，惯性飞轮与储能齿轮啮合，弹簧能量释放，开关由分闸位置变为合闸位置，机构内凸轮、拐臂位置处在合闸状态的正常位置。现场又对B相机构进行了5次手动合分闸试验，其中有2次出现合闸掣子动作后，合闸弹簧未正常释能、机构未合闸的情况，2次合闸异常，均需手动转动储能齿轮约半个齿位后，机构才能正常动作。

2.2 FK3-1机构缺陷分析

由于2501开关B相机构存在大概率无法正常合闸的情况，当线路发生故障时，该断路器有极大可能重合闸动作失败。调取该开关2019年以来动作的SOE信息，计算该开关每次合闸时间（开关合闸SOE时间—控制回路断线动作SOE时间），计算结果如图7所示。

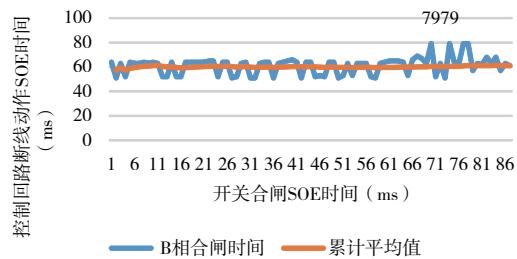


图7 开关合闸SOE时间—控制回路断线动作SOE时间统计

在统计的数据中出现了4次合闸时间为79ms的数据。

第一次79ms之后的第9次合闸时,发现B相机构无法合闸。在第一次79ms之前的最大值为69ms,最短的为51ms。在第一次出现79ms时,累计平均误差超过了30%。B相各次合闸时间与累计平均值的误差如图8所示,异常合闸最大值约为正常合闸最大值的2倍。根据生产厂家运维要求,开关合闸间隔不能小于1min,过于频繁操作会对机构及分合闸线圈造成不同程度的影响。导致B相合闸线圈烧损的重要原因是多次动作,使存在机械位置卡涩的机构线圈长时间通过电流,产生局部高热,烧坏线圈闸间绝缘。

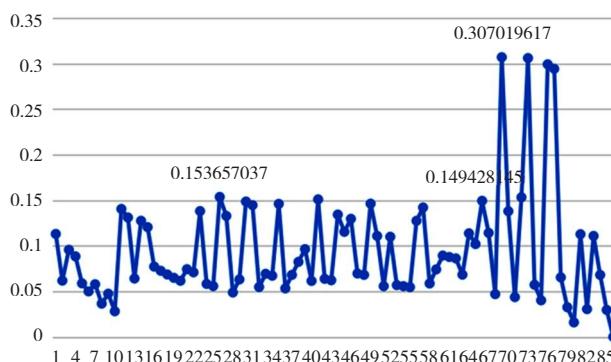


图8 B相各次合闸时间与累计平均值的误差

对储能过渡引导齿材料进行宏观及微观分析,根据引导齿材料检测报告,引导齿材料为尼龙材料,从宏观上来看,断面位于齿根部,由一侧扩展至另外一侧,如图9所示。

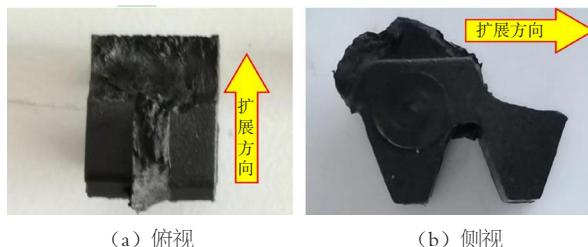


图9 储能过渡引导齿条断面

从微观上来看,整体断面玻纤方向较单一,平行于齿根断面。断面中间部位有部分气泡群,气泡位置玻纤呈多方向分布,气泡分布情况如图10所示。

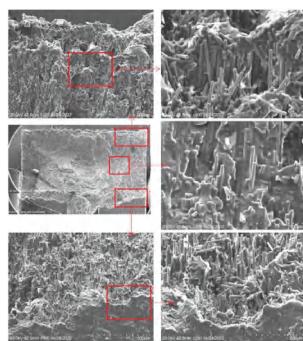


图10 断面气泡分布及玻纤分布

2.3 FK3-1机构缺陷的原因

2.3.1 直接原因

由于储能轴停止转动后与齿条的相对位置具有随机性,在储能过渡导向齿条断裂且齿条仅剩的1颗齿牙的情况下,不能保证齿条每次都能正常牵引带动离合储能轴转动与惯性飞轮啮合,当惯性飞轮齿尖与离合储能齿轮齿尖对撞后,惯性飞轮释能运行被离合储能齿轮阻止,导致释能停止,从而造成机构无法合闸。由于释能过程停止,合闸回路一直处于带电状态,合闸线圈在长时间通电后发生短路,导致线圈损坏。

2.3.2 间接原因

(1) 储能轴停止转动后与过渡引导齿条的相对位置可以在齿尖对齿至完全啮合之间随机变动,而过渡引导齿条的运行复位依靠其后侧的弹簧驱动。在储能轴与引导齿条未完全啮合的情况下,齿条之间存在间隙,惯性飞轮运动后正常带动引导齿条运动,驱动储能轴过渡到惯性飞轮上;当两者完全啮合的情况下,齿条后侧弹簧施加的力不足以推动储能轴运动,由于惯性存在,引导齿条并未随惯性飞轮一块运动,惯性飞轮对引导齿条产生剪切,造成齿条断齿。

(2) 由于断齿根部由一侧扩展到另一侧,玻纤方向单一,可能是齿根部结合力较差而顺玻纤方向断裂。

(3) 机构长期运行,过渡引导齿存在老化。

(4) 过渡齿轮和惯性飞轮的间隙存在久积的灰尘,灰尘与润滑油混合形成油泥,导致传动过程卡滞,在电机储能的高速运转过程中造成断裂。

(5) 机构和设备本体之间也可能存在配合问题,设备内部可能存在异常的情况。仅根据现场开关提供的测试数据和设备性能分析,可靠性比较低。

(6) 按照厂家运维要求,两次合闸操作间隔时间不能小于1min,频繁合闸操作也会对机构造成影响。

3 针对GL314配FK3-1机构缺陷的合理化建议

(1) 重新选择储能过渡引导齿条材料,找出适配惯性飞轮齿条且塑性低的适当材料,确保齿条与齿牙的啮合强度足够。

(2) 重新设计储能过渡引导齿条的形状,引导齿条齿牙横截面由平面设计趋于线性设计。在原惯性飞轮齿数不变的前提下,对齿面适当修形,减小齿牙间的扭矩,同时依然保障恒定传动比,使两齿接触点法线随时能通过节点,保证齿与齿啮合的时候不会出现对齿而造成惯性飞轮卡滞的情况。

(3) 定期维护 FK3-1 机构内各个齿轮盘、传动轴及运动部件的操作流畅度，及时清理久积的油泥；对 FK3-1 同类型机构的储能过渡引导齿条开展排查工作，通过监控后台遥测信号及开关机械特性试验数据，判断机构运行标准是否在合格标准范围内，确保机构合闸、分闸及重合闸动作可靠。

4 结束语

断路器的适配机构是带动断路器完成分合闸过程的重要机械，虽然弹簧机构是断路器适配机构的一种类型，但同样是操动能源的核心，对适配机构内的各个零部件应加强重视，同时也要将关键零部件纳入监造。了解机构原理，分析缺陷机构原因，能提前察觉机构异样，及时制定运检计划，采取预防性措施，防止电力事故发生，保障电网运行安全性、可靠性。

(上接第68页)

距较远）。对于一般仪器，原因可能是电源电压过低、测试所用电阻标准器负载过大、电压输出压降过大、电源线内阻过大、电源线接触不良等。对于外置电源的仪器，排查方式可以先检查电源是否合格。若测试用导线太长或导线的截面积过小，则导线电阻的增大也会加大线路负载。可在满足工作要求的情况下适当将导线长度缩短或更换为截面积更大的导线。若仪器搭配专用电源线，可将专用电源线换上。有的厂家所配电源线过细，这会导致在规定通电时间内电源线持续发热，影响内阻和电源输出。接触不良的情况需对接头重新连接。接头松动可以通过更换旋钮或添加夹片的方式改善。

在对内置电源仪器排查故障时，有的仪器因内置电源本身容量不足，导致在负载增加时无法正常输出电流，该情况需返厂由厂家解决。

(5) 对于出厂日期比较早的旧仪器，若在测试过程中出现示值波动的情况，可能还有测试线缠绕的原因。这是因为电感线圈缠绕使得测试线互感值增加。此时需要将测

参考文献

- [1] 苗全堂, 王凯, 王佳辉, 等. 一起220kV弹簧机构断路器合闸故障分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(4): 59-62.
- [2] 于柠源, 任庆帅, 兆伟, 等. 一起500kV瓷柱式断路器弹簧操作机构机械故障导致合闸失败的原因分析[J]. 通信电源技术, 2018, 35(2): 275-277.
- [3] 朱信德. Alstom GL312、GL314储能故障处理及分析[J]. 机电信息, 2016(36): 75, 77.

作者简介

陈朝廷 (1996—), 男, 重庆人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为变电检修技术。

试线拉开, 避免缠绕, 以减小互感值, 避免回路电阻测试的不稳定。

4 结束语

在实验室的实际工作中, 基于回阻仪的工作原理, 做好量值传递, 是确保电力安全的一项不可或缺的重要工作。通过对校准过程中的常见故障进行分析, 并运用恰当的处理方式确保仪器的测量准确性和稳定运行, 是实现回阻仪正常工作的必要之举。

参考文献

- [1] 王祥, 王伟, 刘浩, 等. 影响超级电容回阻仪放电电流的参数分析[J]. 电工技术, 2019(9): 137-139.
- [2] 丛晶. 排除感应电影响的回阻仪改造[J]. 机电信息, 2018(33): 66.

作者简介

张茹萱 (1993—), 女, 浙江建德人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为计量检测。

无锡地铁1号线电客车LCU改造全寿命周期分析

顾 阳, 王家鉅

(无锡地铁运营有限公司, 江苏无锡 214000)

[摘要] 无锡地铁1号线电客车控制回路均采用继电器触点开合来实现电路的通断。继电器长期工作后, 其动静触点会产生粘滞、卡滞等故障。故采用 LCU 替代继电器实现无触点逻辑运算, 减少继电器卡位、抖动、接触不良等先天缺陷, 有效提升了地铁列车控制电路的整体可靠性。文章通过对比继电器和 LCU 全寿命周期可靠性及维护成本, 表明 LCU 比继电器优势更明显。

[关键词] 电客车; 继电器; LCU; 全寿命周期; MTBF

[中图分类号] U279.3 **[文献标志码]** A

根据无锡地铁运营公司2015—2019年正线故障统计, 共发生5起继电器故障导致清客、晚点、停运等情况。若继电器发生瞬时故障, 也无法追溯, 只能全面排查该线路上所有继电器, 无法精确定位。针对以上情况, 逻辑控制单元(LCU)采用热备冗余或二乘二取二模块化设计, 采集司机控制器、按键开关组、隔离开关、接触器辅助触点等电气信号, 经逻辑计算后驱动车辆各类负载, 完成指定的时序控制功能。无触点控制方式没有继电器卡位、抖动、接触不良等先天缺陷, 有效提升了地铁列车控制电路的整体可靠性。

1 现状

无锡地铁电客车是B型四拖二动6节编组列车, TC车继电器50个, M1车12个, M2车15个, 共154个继电器。整车LCU采用分布式控制, 每节车厢安装1台LCU, 1列车共6台LCU。两端车头各配置1个7寸显示器。A车司机室采用规格为6U(19英寸)机箱, 客室采用规格为3U(16英寸)的机箱。各LCU之间功能相互独立, 实现各自逻辑控制功能。整车所有LCU间通过独立的安全CAN网络(双冗余独立CAN网关)实现列车级信号的数据交互。两个A车通过以太网线将整车故障上传至司机室显示单元, 用于上报I/O状态数据和故障信息, 进行远程维护。

经过与厂家对接, 无锡1号线LCU改造采用热备冗余加二乘二取二模块化设计, 主要对司机占有、列车方向控制、牵引使能、制动使能、紧急制动、停放制动控制、摩擦制动监视、内外部照明功能、全列车门监视等9个功能替代, 共替代了84个继电器。

2 继电器与LCU全寿命周期对比

2.1 可靠性对比分析

根据标准GJBZ 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》的元器件计数可靠性预计法, 计算各功能模块的失效率, 见表1。

表1 LCU机柜各功能模块的失效率

序号	板卡类型	失效率($10^{-6}/h$)
1	PWR	5.70×10^{-2}
2	MCU	1.21×10^{-1}
3	DIO	1.81×10^{-1}
4	背板	5.03×10^{-1}
5	接口板	5.13×10^{-1}
6	CAN	1.20×10^{-1}
7	MVB/ETU	1.30×10^{-1}
8	VIO	2.22×10^{-1}

根据各个单模块失效率计算出整机两套冗余系统失效率, 计算公式如下。

$$\lambda_{\text{冗余}} = \lambda^2 T_{\text{维修}} / 2 \quad (1)$$

式中, $\lambda_{\text{冗余}}$ 为冗余板卡失效率, λ 为单板失效率; $T_{\text{维修}}$ 为设备维修恢复时间, 本系统为18h。

2.1.1 LCU整机失效率

无锡1号线LCU 3U失效率=冗余DIO板失效率 $\times 1 +$ 冗余VIO板失效率 $\times 3 +$ 冗余主控板失效率 $\times 1 +$ 冗余电源板失效率 $\times 1 +$ CAN板失效率 $\times 1 +$ ETU板失效率 $\times 1 +$ 接线板失效率 $\times 3 +$ 背板失效率 $\times 1$ 。根据 $MTBF = 1/\lambda$, 可以计算出3U机箱 $MTBF = 436681.2227h$ 。

同理, 根据以上公式, 推算出无锡1号线6U机箱 $MTBF = 224215.2466h$ 。无锡1号线列车LCU系统失效率= $6U$ 失效率 $\times 2 + 3U$ 失效率 $\times 4$ 。根据以上计算, 可得出

无锡1号线整车 LCU 系统 $MTBF=55309.7345h$ 。

2.1.2 被取代继电器的系统失效率(表2)

继电器失效率 = 整列车被替换的继电器用量 \times 通用失效率 \times 通用质量系数。无锡1号线列车被取代继电器的系统失效率见表2。整车取代部分继电器 $MTBF=1975.4257h$ 。

结论：通过无锡1号线LCU系统和替代继电器的 $MTBF$ 数据对比分析，LCU比继电器平均无故障时间高，约是继电器的28倍，LCU系统更加可靠。

表2 无锡1号线列车被取代继电器的系统失效率

类型	取代数量	通用失效率($10^{-6}/h$)	失效率($10^{-6}/h$)	$MTBF(h)$
特别关键继电器	12	7.775	93.3	10718.1136
关键继电器	56	5.735	321.16	3113.7127
非关键继电器	16	5.735	91.76	10897.9948
取代继电器	84	—	506.22	1975.4257

2.2 全寿命成本对比分析

2.2.1 LCU全寿命周期成本

目前，无锡1号线LCU执行的检修情况见表3。

表3 LCU执行的检修工时及维护费用

检查周期	检修内容	地铁车辆段维护人员的人工时	维护费用(万元)
月检	除周检内容外，需打开设备柜柜门，通过PTU 软件下载日志记录，同时需确认个车LCU板件状态指示灯是否正常	2人、2h/列	无
架修	(1) 取出板件，用压缩空气对柜内灰尘、异物等进行清扫； (2) 将所有主控板卡返厂进行纽扣电池的更换和相关性能测试	4人、3h/列	0.6
大修	(1) 将每列车所有LCU机箱从列车上拆下； (2) 将拆下的LCU所有机箱进行返厂维修； (3) 厂方更换机箱内所有电解电容和纽扣电池； (4) 厂方对所有板卡模块进行可靠性测试，对不稳定的元器件进行更换； (5) 厂方对所有板卡和机箱进行清洁和恢复	4人、4h/列	9.2

LCU设计使用寿命为20a，正式交付后每列产品有3a的质保期，返厂大修后每列设备也有3a质保期。

由表3分析可知，每列LCU在全寿命20a期间检查周期需要的人工时为1000h，按照中级工的费用60元/h计算，人工费用为 $1000 \times 60 = 60000$ 元。

检查周期中的日检、月检和年检除了车辆段检修人员的人工费用外没有其他额外的维护费用。在架修和大修期内则包含相应的厂家维护费用，在LCU设计使用寿命中会经历2次架修和1次大修，架修期对1列LCU每块主控板进行电池更换和相关功能测试的费用约为500元，1列的费用为 $500 \times 12 = 6000$ 元，大修期对1列LCU每

块板卡进行测试、维护的费用约为800元，1列的费用为 $800 \times 114 = 91200$ 元，故1列LCU在架修和大修期的维护费用合计约为 $2 \times 6000 + 91200 = 103200$ 元。

1列LCU全寿命日常维护的费用为地铁车辆段人员的人工费加上在架修和大修期的维护费用总共为： $60000 + 103200 = 163200$ 元。

2.2.2 替代继电器全寿命周期成本

目前无锡1号线继电器全年继电器检查需要的人工时为192人工时，按照中级工的费用60元/h计算，每年继电器普查的人工费用为 $192 \times 60 = 11520$ 元，在20a的时间内人工检修成本为 $11520 \times 20 = 230400$ 元。LCU的自主故障检测和上报大大节省了人工成本，这是LCU的极大优势之一。此人工时不包括检查发现继电器触点阻值过大进行更换或去氧化的时间，若进行更换则需拆除继电器全部接线，并重新安装再接线，所需要的时间更长。在检查周期内列车的维护需要经过1个大修期、2个架修期，预计每列车更换继电器 $84 + 84 \times 2 = 252$ 个，按照继电器平均价格为800元，更换继电器的费用为 $252 \times 800 = 201600$ 元。

整车继电器全寿命日常维护的费用为地铁车辆段人员的人工费加上在架修和大修期更换继电器的费用： $23.04 + 20.16 = 43.2$ 万元。

2.3 故障检修及更换成本分析

2.3.1 LCU板卡故障检修及更换成本分析

根据GJBZ 299C—2006中元器件计数可靠性预计法，可计算得出1列LCU全寿命期间故障板卡数，见表4。

表4 1列LCU全寿命期间预估故障板卡数

板卡类型	1列车板卡数量	1列LCU全寿命期间故障板卡数(个)
PWR	8	1
MCU	12	1
DIO	16	1
背板	8	1
接口板	24	2
CAN	6	1
MVB/ETU	8	1
VIO	52	2

根据LCU的运行维护数据统计得出，故障板卡数中约有50%可以进行维修，有50%不能维修，必须更换新板。根据每种板卡维修和更换新板的价格，可以计算出每列LCU在全寿命期间的故障检修的总费用为1.15万元。

2.3.2 继电器的故障及更换成本分析

继电器发生故障时，需要将相应的线缆拆除后再将故障继电器拆除、更换，重新接上控制线缆，费时费力。无锡1号线继电器故障数据：B型车年度普查对全列车的154

个继电器进行了检查，平均每列车发现触点阻值超标的继电器数量为2个，失效率为1.3%，考虑到继电器的失效率具有澡盆曲线的特性，定义全寿命周期内1列地铁列车的继电器平均故障率为10%，总共故障数量为55个。按照单个继电器平均价格0.08万元计算，继电器故障检修的成本为 $55 \times 0.08 = 4.2$ 万元。

LCU比继电器在故障检修成本上可节省约3万元，同时LCU在故障板卡的拆卸、更换上比继电器更加简便、易于操作。

2.4 综合对比分析

通过上述的分析，可以得出每列车LCU系统和继电器系统在全寿命20a中的总花费，见表5。

表5 LCU与继电器全寿命期内综合成本对比

类型	改造费用 (万元)	日常维护费用 (万元)	故障检修费用 (万元)	综合成本 (万元)
LCU	28	16.4	1.15	45.55
替代继电器	6.72	43.2	4.2	54.12

每列LCU在全寿命期间的日常维护和故障检修方面投入的总费用为45.55万元，每列继电器在全寿命期间的日常维护和故障检修方面投入的总费用为54.12万元，LCU比继电器在成本上总共节约了8.57万元。除此之外，LCU系统的日常维护和故障检修比继电器系统更加快捷、

简便，故障定位更加清晰、准确。故LCU系统相较继电器优势非常明显。

3 结束语

该项目对无锡地铁1号线既有车辆进行了LCU改造，取代原有52%的继电器，分别在Tc、M1、M2电气柜安装LCU机柜，重新布置了原有机柜，简化走线方式。LCU集中化管理，由原有的继电器目视检查转换成对板卡的使用维护，减少了班组的工作量，缩短了检查维修时间，全寿命周期成本较低，提高了车辆可靠性。1号线LCU改造前后历时半年之久，包括现场施工改造、LCU点位测试、车辆动静试验、试车线试车，正线转场功能测试，目前已正线运营1a，无异常，运用状态良好。

参考文献

[1] 乐建锐. 基于二乘二取二冗余—安全控制的地铁LCU设计[J]. 城轨交通, 2020 (5) : 11.

作者简介

顾阳(1988—),男,江苏泰兴人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电气工程及自动化。

(上接第63页)

(3) 检验人员在对制动器的检验过程中，要严格按照相关标准和规范的要求，对制动器的监测开关设置和功能进行验证性检验。制动器监测开关的检验除了要整体进行检验外，还需单独对每个制动臂的动作进行检验，即人为使一个监测开关异常，验证电梯能否监测出相应的故障，直到每个监测开关的功能都正常有效，才能判定该设备监测制动器是否正确动作的故障保护功能符合要求。

6 结束语

电梯制动器故障保护功能能否准确、可靠监测制动器的动作状态和电梯安全运行有着非常密切的关系，提高制动器监测功能的可靠性能，可减少因电梯制动器故障导致的事故。通过对上述施工存在缺陷进行分析，提出处理及预防措施，作业人员应加强学习安装工艺及要求，严格按照施工图施工，避免设备的一些保护功能失效。

TSG T7001-2009[S].

[2] 电梯安装验收规范: GB/T 10060-2011[S].

[3] 辛琪杰, 吴建通, 钟佳奇. 电梯制动器故障保护装置动作的分析[J]. 特种设备安全技术, 2019 (3) : 48-50.

[4] 林高钦, 周武杰, 寿庆, 等. 电梯制动器检测开关典型故障及其应对措施[J]. 中国电梯, 2020, 31 (7) : 58-61.

[5] 魏小兵, 徐波. 关于电梯制动器检测开关的分析[J]. 中国电梯, 2015 (19) : 67-70.

[6] 赵午刚, 陈良. 浅谈电梯制动器的标准要求[J]. 西部特种设备, 2020 (5) : 47-50.

作者简介

陈庆(1986—),男,福建漳州人,本科,工程师,主要从事特种设备检验工作。

参考文献

[1] 电梯监督检验和定期检验规则—曳引与强制驱动电梯:

金属材料表面质量及精度控制的影响研究

郝丽敏，冯勇钦

(重庆航天职业技术学院，重庆 400021)

[摘要]文章基于金属材料表面质量对机械使用的影响展开分析，并就原材料质量、技术水平、残余应力、冷作硬化、机床加工误差、刀具加工误差、机械定位误差、机械调整误差对于金属材料表面质量及加工精度的影响进行讨论，通过加强原材料质量控制，合理选择加工技术，做好加工过程控制，减少原始误差，做好误差补偿等措施，优化机械加工环境，提高成品的加工质量。

[关键词]金属材料；表面质量；机械加工

[中图分类号]TH161.1 **[文献标志码]**A

在当今工业化生产活动快速发展的背景下，机械制造业已成为国民经济的支柱产业，影响着人们生活的方方面面。机械加工时，由于各种因素（设备、人工、环境等）影响到金属材料表面质量和加工精度，从而大幅缩减了机械的使用寿命。对此，提出相应的处理措施，对于加快机械加工速度，提高成品应用质量有着积极意义。

1 金属材料表面质量对机械使用的影响

1.1 机械疲劳强度

基于应用经验，机械加工过程中，会受到多种（机械间、碰撞等）载荷作用，使得金属材料表面易出现疲劳裂纹，尤其是粗糙度较高的金属材料，其产生的疲劳裂纹数量多、裂纹深度大、抗破坏性差，从而大大缩减了金属材料的使用寿命。

1.2 机械耐磨性

表面质量对耐磨性的影响主要表现为：(1) 表面粗糙度对耐磨性的影响。零部件表面越光滑，机械表面间的磨损越小，即耐磨性就越好。但机械表面也不能过于光滑，而是应保持一个相对稳定的度。(2) 表面冷作硬化对耐磨性的影响。冷作硬化可以在一定程度上提升机械表面的硬度，同时提升耐磨性。但过度的冷作硬化会导致金属疏松和疲软，严重的甚至会造成金属表层脱落，进而导致其耐磨性降低。

2 金属材料表面质量的影响因素

2.1 原材料质量

基于计算数据可知，原材料质量的影响权重占比超过70%，原材料质量也是确保机械加工活动顺利进行的基础条件。影响原材料质量的因素主要如下。

(1) 金属材料的选择不规范，使得初始状态下金属材

料质量无法满足加工要求，从而影响到成型后材料的表面质量。

(2) 金属材料存储环境不达标，造成原材料出现锈蚀等问题，从而影响机械零件表面加工质量。

2.2 技术水平

机械加工中使用到的加工技术如图1所示。技术水平是影响金属材料表面质量的重要因素，主要体现如下。

(1) 各类参数选择不当，从而影响到加工结果的可靠性，影响金属材料表面质量。

(2) 人工操作失误，虽然目前机械加工过程已经基本实现了自动化，但有时仍需要人工进行操作，因此也会造成加工技术操作失误，从而影响金属材料的表面质量。

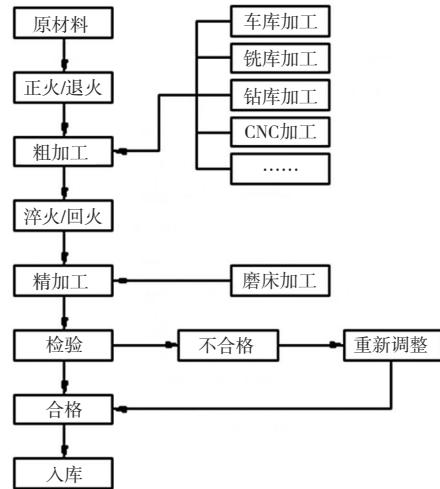


图1 机械加工流程

2.3 残余应力

金属材料的加工过程中，会受到各类工艺因素的作用，

在这些因素消失之后，所产生的作用并不会立刻消失，而是会存留部分作用在金属材料内，这种作用便是残余应力。残余应力和多种因素存在联系，包括切削速度、进给量、切削力等，如图2所示，切削速度和残余应力之间存在较大关联性，在切削速度达到150m/min时，最大残余应力达到最小值，约670MPa。这对金属材料表面质量带来较大影响，从而增加金属材料断裂风险。

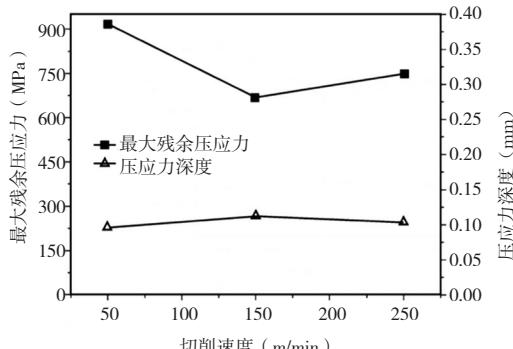


图2 残余应力和切削速度之间的关系

2.4 冷作硬化

表层冷作硬化也是影响机械表面质量的重要因素，机械加工过程中，表层冷作硬化会伴随塑性变形和金相组织变化，从而影响金属材料加工结果的稳定性。且在机械加工工序完成后，受到冷作硬化影响，使得金属材料的体积与形状发生变化，该过程不确定性较强，使得机械加工质量无法得到有效保障。

3 金属材料加工精度的影响因素

3.1 机床加工误差

机械加工过程都是直接在机床上完成的，因此机床几何误差对加工表面质量和精度控制会产生直接影响。机床的几何误差主要包括主轴回转误差、导轨误差和传动链误差等3类。其中，作为加工动力源，主轴的回转误差是影响机械加工表面质量控制的关键因素。机械加工是依靠机床和工件的相对运动来实现，而导轨正是控制机床上刀具、工件间相对位置的关键。如果导轨存在误差，则会使机床上各零部件间的相对位置出现偏差，最终导致机械表面质量下降。

3.2 刀具加工误差

在金属材料加工过程中，刀具加工误差是影响加工精度的重要因素。具体表现为：

(1) 刀具长期工作负荷，使其出现了一定程度的磨损，在加工零件时，也影响到加工零件的精准度，使成品合格率下降15%～25%。

(2) 刀具制作质量，结合大数据技术、信息技术统计结果显示，普通碳钢或合金钢属于常用刀具制作材料，合金钢的耐磨损性高出普通碳钢20%～35%。

3.3 机械定位误差

机械定位误差也是影响金属材料加工过程中加工精度的重要因素。定位过程中出现的误差，可以细分为定位不准确以及基准无法重合两种情况。前者是指在实践过程中，由于夹具上用于定位的原件不够精准，使得金属材料无法按照既定规范尺寸进行制造。根据统计数据显示，最大容错率可达到15%，从而影响到金属材料制作结果的准确性。后者则是指在应用中未遵循相应的设计基准展开设计，内容涉及到零件固定位置、加工尺寸等，降低了成品的加工质量，影响到零件加工结果的可靠性。

3.4 机械调整误差

影响加工精度的重要因素还有机械调整误差，由于机械零件配置要求的调整，金属材料在加工时需要做出相应工艺调整，从而导致机械误差问题。据统计，这一类误差问题的发生概率在10%～15%。此类误差问题的出现，是因为调整过程中无法动态控制各项参数，不能确保各项调整参数控制在合理范围内，进而导致金属材料加工精度较差的问题^[1]。

4 金属材料表面质量及精度控制要点

4.1 表面质量控制措施

4.1.1 加强原材料质量控制

通过加强原材料质量控制，可以为后续作业活动的有序进行提供保障，从而确保金属材料加工结果的可靠性。在具体实践中，应注意以下问题。

(1) 在金属材料的选择中，需要做好机械加工过程的整理工作，内容涉及到加工基准、精度要求、耐久性要求等，以此为基础来拟定可靠的材料采购计划，细化采购计划内容，如采购量、采购要求等内容，严格按要求进行采购，确保原材料采购质量的合规性。

(2) 金属材料在外界氧化环境下，很容易出现原材料腐蚀问题，因此在校核采购材料质量合规性之后，需要拟定可靠的材料存储计划，将其放置在干燥、通风的环境中，并且在材料取用时优先使用上一批剩余材料，从而将金属材料表面质量合格率调整到96%以上^[2]。

4.1.2 合理选择加工技术

通过合理选择加工技术，能够确保机械加工过程中的有序性，提升金属材料加工结果的合理性。在具体实践中，也需注意以下内容。

(1) 充分使用大数据技术、互联网技术、信息技术来整理机械加工过程中涉及到的相关技术，并且对于技术应用过程进行整理，包括加工成本、适用环境等，以此来组建施工技术管理体系，为加工技术选择提供参考。

(2) 对于加工技术流程进行梳理。以切削过程为例，在工序梳理中需要确定切削速度、切削深度等内容，确定每个节点所需要注意的内容。而且在工序应用前也需要做好人员交流，帮助其熟知该工序应用过程中需注意的内容，从而减少人为因素带来的负面影响，确保机械加工活动的有序推进。

4.1.3 做好加工过程控制

通过做好加工过程控制，可以确保各环节加工结果的合理性，以提升机械加工结果的可靠性。从实际应用情况来看：

(1) 参考图1中的内容，将机械加工过程细分为多个阶段，然后对于各阶段的内容进行细化，期间也会利用大数据技术来整理资料，并且在信息技术的帮助下，从整理数据中筛选30%~50%的价值数据，以此为基础来完成加工管理体系的搭建，确保体系的指导性。

(2) 做好管理队伍的建设工作，为了确保金属材料表面质量顺利达标，除了依靠机械自身精度来监督加工过程外，也需要在现场组建监督管理队伍，对于整个加工过程进行监督，搭配不定时抽检，确定各环节操作质量的合规性。同时也可以加快问题的发现速度，及时作出调整，这样也可以减少20%~30%的资源浪费，提升材料加工结果的合理性。

4.1.4 合理选择冷却条件

合理选择冷却条件，能够确保零件冷却质量的合规性，降低不规则形变问题的发生概率。从实际应用情况来看，一般会使用冷却液作为冷却处理时的载体，以此缓解金属材料磨削时产生的高温，避免金属材料热膨胀带来的负面影响。在冷却液的使用中，会将其直接喷洒到机械零件的表面，从而实现有效降温。喷嘴的选择也需要根据零件切削时的压力值来做出调整，这样可以在确保冷却效果的同时，避免浪费冷却液。另外，考虑到金属材料加工中使用到的砂轮结构比较复杂，喷洒的冷却液很容易出现只停留在表面，无法对内部降温的情况。为此，在冷却液喷洒中也需要做好液体引流工作，使其可以充分引入到结构的腔槽内，确保砂轮结构可以维持均匀的降温状态，发挥出冷却液85%以上的应用效果，同时也将资源利用率提升到90%以上。

4.2 精度控制措施

4.2.1 减少原始误差

减少或避免原始误差能够大大提高机床的几何精度，这不仅需要提高夹具、量具以及精密零件自身的精度，还要靠工艺的操控来避免出现受热变形等原始误差。

(1) 应对原始误差产生的主要原因进行分析，根据不同情况采取对应的方案和措施。例如，对于零件成形表面的加工，需要通过减少刀具误差来提高精度，而对于精密零件的加工则要通过提高机床的刚度和热加工来实现。

(2) 可以采用误差转移法降低误差，即将误差中比较敏感的方向进行转移，使其停留在非敏感的区域，降低其对核心零件和精密零件的干扰度。

由此可见，虽然误差是不可避免的，但是可以通过工艺手段降低其带来的损害，进而提高加工的质量与精度。

4.2.2 做好误差补偿

做好误差补偿，可以将加工误差累计值控制在极小范围，以提升加工零件的精准度。此方式在使用中就是要在人为干预下，制造新的误差以抵消零件原始误差，从而实现加工精度稳定提升的效果。从实际应用情况来看，需要在应用中做好原始误差的整理工作，利用信息技术整理基础数据，在挖掘技术应用背景下筛选30%左右价值数据，以量化的方式来得到客观计算结果。根据得到的计算结果确定误差补偿数值，并且将这些内容有序均匀融入到加工活动中，以提高误差补偿结果的合理性。

4.2.3 分化误差控制

通过做好分化误差控制工作，能够进一步降低不确定误差带来的影响，提升零件加工结果的精准度。所谓分化误差是对误差进行统一规划的方式，是对原始误差数据进行平均化处理的方法。在具体应用中，也需要结合原始误差反馈的基本情况，对工件进行分组整理，并且对每一组工件存在的误差进行统计，根据得到的整理结果来对参数进行调整，以提升定位结果的可靠性。

5 结束语

综上所述，加强原材料质量控制，可以为后续作业的有序进行提供保障；合理选择加工技术，能够确保机械加工过程中的有序性；做好加工过程控制，可以确保各环节加工结果的合理性；合理选择冷却条件，能够确保零件冷却质量的合规性；做好误差补偿，可以将加工误差累计值控制在极小范围；做好分化误差控制工作，能够进一步降低不确定误差带来的影响。通过采取恰当措施来提高金属

混合煤气压力与热值稳定方案

李佳奇，林挺，徐明华

(新余钢铁集团有限公司，江西新余 338001)

[摘要] 钢铁行业混合煤气热值及压力需求不同，统一配置热值的混合煤气给不同需求的生产单位或生产线带来不利影响。文中介绍了以该模式运行的新钢公司煤气混合加压站的工作方式及弊端，并提出了针对该改进需求的自动控制方案设想。通过对其混合加压理念的改进，及自动控制热值输送优化，实现了混合煤气热值的稳定可控，和煤气压力的稳定可调。

[关键词] 混合煤气；热值稳定；自动控制

[中图分类号] TF089 **[文献标志码]** A

0 引言

钢铁行业混合煤气主要由高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气等混合，如新余钢铁集团有限公司（以下简称“新钢”）的热轧混合加压站，混合煤气热值要求保持在 $11000 \sim 13000 \text{ kJ/m}^3$ 运行，根据煤气平衡状况，大流量配入焦炉煤气，并手动控制高炉煤气流量，转炉煤气仅少量掺入，使混合煤气热值稳定在上述范围。具体配比根据新钢能源中心进行调度。这种控制方法受人为因素影响较大，热值和压力均波动较大，稳定性较差。对此，分析用户需求和现状后提出解决方案和改造设想。

1 热轧加压站煤气混合方式

1.1 气源工艺条件

(1) 煤气压力（配比管前主管压力）。高炉煤气管网： $4.5 \sim 10 \text{ kPa}$ ；焦炉煤气管网： $2.5 \sim 6 \text{ kPa}$ ；转炉煤气管网： $13 \sim 16 \text{ kPa}$ 。

(2) 气源煤气热值（参考值）。高炉煤气： 2900 kJ/Nm^3 ；焦炉煤气： 17500 kJ/Nm^3 ；转炉煤气： 6200 kJ/Nm^3 。

1.2 混气管系统管网结构

新钢热轧加压站是新钢三期工程项目的辅助性项目，其将高炉煤气和焦炉煤气进行混合后通过加压机加压后提

供给用户使用。混气加压站采用焦炉煤气（COG）、高炉煤气（BFG）及转炉煤气（LDG）的三气混合加压工艺。混合煤气系统中热轧加压站管网结构如图1所示，主要用户有轧钢厂中厚板线线棒材线、卷板厂热轧薄板线、烧结厂和新钢环科等。

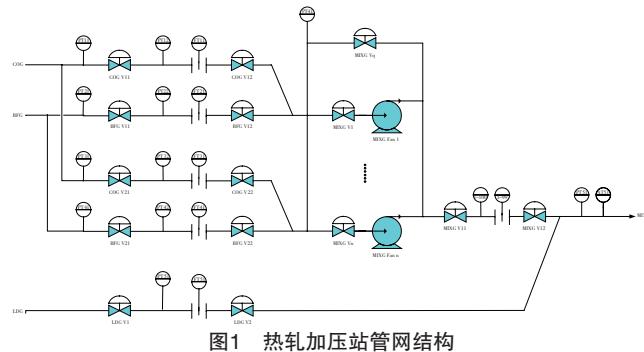


图1 热轧加压站管网结构

混气管网由3套相同的双混管网构成，分别为大流量 COG+BFG 双混管网、小流量 COG+BFG 双混管网、MIXG+LDG 双混管网。各支管规格为：高煤管道（BFG）主管 DN2000、大流量 DN1800、小流量 DN1200；焦煤管道（COG）主管 DN1600 大流量 DN1400、小流量 DN900；转煤管道（LDG）DN1200；混气管道（MIXG）DN2400。

材料表面质量与精度控制水平，对于促进机械加工行业经济稳定发展有着积极的意义。

[2] 母洪峻. 金属材料机加工表面质量与精度控制工艺研究[J]. 科技展望, 2016, 26 (36) : 51.

参考文献

- [1] 岳徐翔. 关于机械加工中的表面质量与精度控制技术分析[J]. 时代农机, 2018, 45 (3) : 94.

作者简介

郝丽敏 (1988—)，女，山西原平人，硕士，讲师，主要研究方向为工程材料。

1.3 同热值输送问题

从管网结构图和管径分布可知，这种先混合后加压的混合煤气输送方式主要优点是加压系统简单，投资较少，不必单独加压两种煤气，便于生产维护和气量调节；但所有用户必须使用相同热值的煤气，尤其是高热值配比时，会导致一些用户，如主要用户热轧出现一些产品质量问题。特别是在高炉煤气、焦炉煤气配比发生变化时，混合煤气热值及压力会出现较大波动。各管流量范围见表1。

表1 各管流量范围

万m³/h

参数	数值
COG 流量	最大值：10；平均值：7；最小值：4
BFG 流量	最大值：5；平均值：3；最小值：1.5
LDG 流量	最大值：3；平均值：1；最小值：0
一级 MIXG 流量	最大值：15；平均值：10；最小值：5
二级 MIXG 流量	最大值：17；平均值：11；最小值：7

如热轧1#、2#加热炉设计为7500~9200kJ/Nm³，但实际焦炉煤气配比在0.7以上，热值可达12500kJ/Nm³以上，影响温度的均匀性，降低产品质量。

高热值煤气使烧嘴能力无法正常发挥，燃料热值高、用量少，导致下部烧嘴火焰长度较短。加热炉炉膛宽度为11.7m，由于炉宽方向跨度大，造成钢坯长度方向加热不均匀，出现钢坯头尾温度高，中心温度低的现象，导致温度命中率偏差大，影响轧钢的稳定性和产品性能，经常造成一些质量异议，尤其对无取向硅钢等一些温度敏感性强的钢种影响巨大。

1.4 问题存在原因

煤气混合配比执行在混合加压站班组，但操作工需根据煤调实时动态平衡后所收到的指定来操作。操作通过调整阀门开度来控制配比，这个配比一般没有固定值。热轧混合加压站的控制，一般是大焦阀门开到极大值，大高阀门根据管网压力和转炉煤气是否需要保压来适当调整，当焦炉煤气管网压力临近放散点情况下，确实存在需要将配比调整为全焦炉气的状态。目前新钢煤气系统平衡属于瓶颈期，升改项目均在施工阶段，此操作方式持续很多年。

如此操作，一是满足中厚板热值要求，中厚板使用热轧混合加压站煤气，加热炉热值设计要求大约在9200kJ/Nm³(±800kJ/Nm³)，实际生产要求越高越好，以满足快速烧透以达产量；二是主要避免煤气大量放散，若为了煤气热值稳定在热轧要求的区间，大焦阀门应调至50%左右，焦炉煤气可下降约10000Nm³/h，需要额外补充高炉煤气约10000Nm³/h。所消耗的高炉煤气将影响高效发电效率，并带来焦炉气的大量放散，发电经济损失折合约每天20万元。

2 改造方案分析

2.1 自动控制改造方案前提分析

加压站机前高炉煤气压力在4.5~11kPa波动，焦炉煤气压力在2.5~6.5kPa波动，在这种情况下采用全自动控制方式会导致高、焦炉煤气互窜，使混合煤气热值波动更大，有时会造成只输送单一的某种气体。所以，要实现全自动控制稳定热轧混合煤气热值，首先要稳定公司高炉煤气、焦炉煤气管网压力。

目前热轧加压站高炉煤气、焦炉煤气大小流量调节阀采用普通的气动蝶阀进行流量调节，蝶阀开度对流量控制效果较差，无法满足流量的精细控制，对煤气热值稳定控制效果较差。同时，气动蝶阀故障率较高，也不适合进行全自动控制调节。要实现全自动控制稳定热轧混合煤气热值，需要对现场4个DN900大流量调节阀、4个DN600小流量调节阀进行更换，采用配比精度高、质量好的电动阀。

现阶段混合加压站采用取中间值的方式进行配比计算，实际热值肯定会出现较大偏差，不能反映用户的实际热值情况，对用户的使用造成一定影响。要实现全自动控制稳定热轧混合煤气热值，需要增加4台热值仪，即高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气、混合煤气管网各增加1台热值仪，根据热值仪反映的实际热值进行跟踪配比，可以实现热值稳定。

2.2 热轧混合煤气热值自动控制的思路

目前新钢热轧混合煤气热值较高，相当于高炉煤气和焦炉煤气的配比量为3:7左右。如果转炉煤气掺入量大，高炉煤气和焦炉煤气的配比量要达到2:8左右才能满足。

在全自动控制时通过大流量系统采用焦炉煤气满足加压机机前压力控制，高炉煤气根据配比要求自动跟踪焦炉煤气流量进行配比的方式，同时根据高焦混合煤气与转炉煤气掺入流量计算出高炉煤气和焦炉煤气的配比量进行自动调整。

采用小流量系统在机前压力和配比流量相对变化不大时参与调节控制，就完全可以达到自动稳定混合煤气的目的。

3 自动混合加压实施方案设想

3.1 混合煤气的热值控制技术

混合煤气热值过程是个大滞后、多变量、非线性的对象，混合煤气的热值受到煤气热值测量环节的大滞后、各气源本身热值的波动、各煤气管网压力波动引起对应支管流量的变化、混气负荷改变时因各阀门操作不同步引起的流量比值变化等影响。

混合煤气的热值控制只有通过对 COG、BFG 支管流量的精确调节，在气源煤气热值、混气目标热值、各压力等条件变化的环境下确保同步稳定和灵活调整煤气流量比例，才能获得所需的混合煤气热值，热值控制的本质是煤气流量的控制。

自动控制技术具有抗滞后、多变量解耦、非线性控制等多项先进控制功能，在此基础上建立的混气压力 – 热值控制方案能够针对过程特点，在混气热值出现偏差时兼顾气源热值、负荷大小、混气热值目标等多种扰动因素，有效协调每台阀门的动作方向和幅度，实现混气管网整体同步的操作效果，无论是在过程平稳工况还是负荷大幅度变化工况，均可获得稳定的混气热值。

3.2 混合煤气的压力控制

混气过程采用“混合 – 加压 – 混合”的二级双混气工艺运行方式，来自相应煤气总管的 COG、BFG 煤气在一级混气管网按比例混合，经加压机加压，与 LDG 煤气在二级混气管网完成配比混合后送用户。

混气压力控制需同时兼顾各总管压力、混合煤气的压力和流量变化，协调操作煤气支管各阀门开度、加压机连通阀门和机前阀的开度，建立和维持混气管网 – 加压机 – 混气负荷三方面的供需平衡关系。

混气压力控制需要操作连通阀 – 机前阀等执行器设备，充分利用执行器各自的特点和优势，规避不良操作隐患，动态转换不同执行器的主导与辅助作用，在加压机安全运行的前提下为混气用户提供稳定的混合煤气。

3.3 混气控制难点及自动控制对策

在煤气的热值测量过程中存在大滞后特性，包括混合煤气主管道煤气传输延迟、取样器管道的煤气传输延迟、热值仪测量过程的测量和计算延迟等，且各项延迟时间不确定，导致热值测量结果等待时间过长，测量结果不能及时反映当前热值实际状况，极易引发控制过程频繁振荡，混气热值难以收敛和稳定。且各种阀门都存在不同程度的非线性。在需要对流量精确控制的过程中，尤其在使用大口径阀门的条件下，非线性的不良作用显得更为突出。由于非线性特性因设备而异，因时间而异，使得以往采用基于数学模型的工程解决方案涉及极大的工程量，且运行维

护难度增加，难以保证实用性。

自动控制功能通过预估控制有效抑制过程振荡，从而提高热值控制的灵活性和有效性。尤其适用于延迟时间随机变化的复杂过程对象。自动控制基于解耦控制算法，综合协调各阀门的操作动作，同步实现装置运行的总体目标，改善各操纵变量之间相互同步和协调的性能，从而保证整体系统的控制品质。

对于热值稳定而言，配置热值动态比值发生器模块，当热值仪工作异常或处于维护检修状态时，混气热值控制的被控变量不能及时反映过程的变化，使得热值调节无法维持，由此造成混气热值波动甚至失控的不良结果，直接影响企业的生产运行。自动控制系统支持热值仪容错控制，当工艺管网中配置的各气源、混气的热值仪出现任意1台或多台失效时，仍然能够保证混气热值的稳定，维持较高的混气压力 – 热值控制系统自动控制投运率。

4 结语

通过对混合加压站的自动控制改造和管理改进，预计可提升混合煤气利用效率，使混合煤气维持压力；同时根据系统中的所有相关变量实时生成煤气混合的动态比例关系，可提高对各种工况的适用能力，配合精细化的流量控制，可达到稳定混气压力 – 热值的双重工艺目标。

参考文献

- [1] 贾锐, 高喜义. 大小混合煤气调节系统自动控制方式改进[J]. 冶金动力, 2020 (12) : 26–28.
- [2] 吕丹丹, 高喜义. 一种新型混合煤气热值调节系统[J]. 冶金动力, 2020 (5) : 22–23, 37.
- [3] 赵戈. 煤气混合过程的智能控制[J]. 甘肃冶金, 2016, 38 (4) : 116–118, 122.
- [4] 李雨. 煤气混合站热值与流量波动的探讨[J]. 冶金动力, 2016 (4) : 11–13.

作者简介

李佳奇 (1989—), 男, 江西抚州人, 本科, 工程师, 主要从事钢铁行业煤气及工业气体的生产、使用管理。

左旋螺纹在装夹工件中的应用

陈元刚，吕英俊，张 莹，李一凡，关鑫蕊

(辽沈工业集团有限公司，辽宁沈阳 110045)

[摘要]在日常生产加工中，常遇到带有螺纹且下道工序难以装夹的问题，若直接利用螺纹连接进行装夹，加工后由于旋紧力作用，工件很难拆卸或因拆卸造成工件划伤，产生废品。左旋螺纹与右旋螺纹旋紧力方向不同，文章介绍利用左旋螺纹消除工件加工后产生的旋紧力和摩擦力。

[关键词]左旋螺纹；旋紧力；摩擦力

[中图分类号] TG62 **[文献标志码]** A

螺纹类零件广泛应用于航空、航天、兵器等领域，其加工质量、精度和加工效率直接影响产品性能及生产周期。辽沈工业集团有限公司某重点项目产品关键零部件之一为一种内外螺纹类工件，为批量生产件。为提高产品质量及加工效率，通常设计工装保证产品各部分精度，提高效率。

1 加工内螺纹工件的外形曲面

1.1 传统加工方法

传统工装装夹过程是将工件内螺纹旋入工装夹具外螺纹上，工装夹具定位面和工件螺纹端面紧密结合。在外形车削完成后，由于工件螺纹与工装夹具是螺纹连接，在车削过程中由于受切削力的影响使工件螺纹端面与夹具螺纹尾端定位端面完全接触，旋得非常紧，拆卸非常困难。拆卸时间比加工时间还长，加工效率很低。稍有不慎就会划伤工件表面，产生废品。因此一种新型、拆卸灵活的工装更具优势，解决了此类难题，能够提高加工效率，提升产品质量。

1.2 利用左旋螺纹改进方法

改进工装如图1所示，夹具装夹轴一端光轴由数控设备夹紧装夹，另一端为与工件配合右旋外螺纹，与加工工件内螺纹配合。与螺纹连接处为小于工件螺纹的左旋螺纹，在两处螺纹之间设计定位直台面。再制作内螺纹为左旋螺纹的配合作件——左旋螺母，外径要大于工件定位台面直径，外径四周要做好扳手孔，方便拆卸。左旋螺母拧紧后，与装夹轴1的右旋螺纹直台面贴合形成定位面。工装的工作面留有余量，装夹到设备夹爪上再精加工完成，保证外螺纹与设备主轴同轴度，以此保证加工以后工件内外同轴度要求。再次装夹时可以打表找正外径、端面来保证装夹轴的右旋螺纹，及端面和机床回转中心的同轴度和垂直度要求，以此保证产品的尺寸精度和行为公差要求。

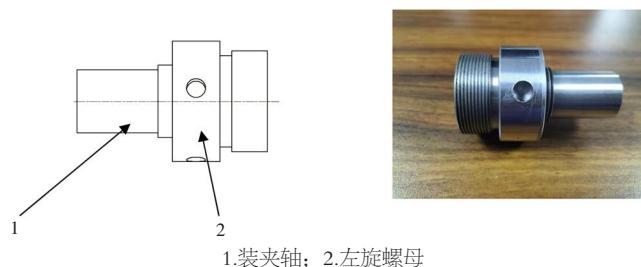


图1 加工外形曲面工装

加工时，主轴正转。工件为右旋螺纹，往主轴方向看，旋紧力方向为顺时针向右，使工件往夹盘方向有移动趋势。同时使左旋螺母也有往主轴方向移动趋势。装夹轴上为左旋外螺纹，往远离主轴方向有移动趋势，产生相对运动。使左旋螺母与工件越转越紧，既实现定位，又实现装夹。

拆卸时，只需用扳手顺时针（远离主轴方向看）松下左旋螺母，使左旋螺母与工件之间产生间隙，工件失去旋紧力、摩擦力，即可顺利拆卸，实现快速拆卸，并可防止用工具因拆卸困难划伤工件表面及端面。

该工装是一种用于螺纹类工件车削曲面外形装夹及拆卸的工装，结构简单，制造成本低，操作简单，拆卸效率高。可根据实际产品尺寸制作不同规格的工装胎具，具有一定通用性。同时避免因传统方法拆卸工件对工件造成的划伤，减少废品，提高产品质量。

2 类似工件加工的胎具设计

2.1 传统加工方法

数控车将工件长度加长，先加工外形曲面，一端留直台，再由加工中心装夹直台，通过螺纹铣加工内螺纹，螺纹长度加长，完成后再由线切割去掉多余直台，最后再由钳工修理内螺纹及去毛刺。此方法加工完螺纹口部缺少倒角，且线切割加工时间较长，严重影响加工效率。

2.2 利用左旋螺纹改进方法

数控车先将工件粗加工成大小阶梯轴，再由加工中心装夹阶梯轴小端，按实际尺寸加工完成大端平面及通过螺纹铣加工内螺纹，螺纹倒角也可完成。再由数控车左旋螺纹胎具利用工件内螺纹及端面装夹工件，加工完成外形曲面及长度。此方法节省了工件所用材料，取消了线切割，极大提高加工效率，节约成本，提高产品质量。

此左旋螺纹胎具在实际操作时如图2所示，利用固定厚度垫片将左旋螺母定位，再将工件与胎具右旋螺纹连接，端面与左旋螺母端面贴合，再通过扳手将左旋螺母向工件方向带紧，卸下垫片（避免工件与胎具的左旋螺纹、右旋螺纹连接处端面贴合产生旋紧力，造成拆卸困难）。此时，工件与左旋螺母紧密贴合。工件正转，工件与左旋螺母旋紧力方向相反，工件与左旋螺母互为定位，使工件不会发生移动。加工完工件端面及外形曲面后，此时由于旋紧力影响，工件难以直接卸下。利用扳手将左旋螺母与工件端面脱离，使旋紧力消失，再用手就可以直接卸下工件。避免了工件因拆卸困难照成的划伤现象发生。

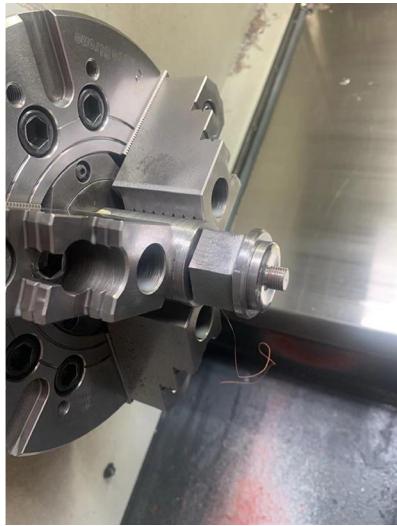


图2 类似工件加工工装示意

加工完成后，工件端面毛刺较大，增加一把切刀，在加工外形后，再紧贴端面处做切槽处理，将毛刺尽量减少，卸下工件后，在平台上放细砂纸，再把工件端面在细砂纸上来回几下即可轻松去除毛刺。

圆环类外螺纹工件在个机械领域都广泛使用，此类工件在切断时，切断处需要去毛刺，装夹困难。辽沈工业集团有限公司某重点工件为该类工件，且为批量生产，为了提高生产效率及加工质量，设计该工装。本工装用于去除外螺纹环形工件切断时切断处毛刺，结构简单，制造成本低，操作简单，拆卸效率高，降低了工人劳动强度。同时

避免因拆卸工件对工件造成划伤，减少废品，提高产品质量；装夹及拆卸方便，提高加工效率。可根据实际产品尺寸制作不同规格的工装，具有一定的通用性。

3 加工外螺纹环形工件切断处毛刺

3.1 传统加工方法

传统加工方法是切断后使用加工中心，安装镗刀，制作胎具定位夹紧工件，利用镗刀在工件毛刺处旋转，将毛刺去除。该方法夹紧工件时需要4点夹压，为了不影响镗刀旋转，夹压面积小，容易出现工件不平，导致毛刺去除不均匀。通过该方法生产效率低。

3.2 利用左旋螺纹改进方法

如图3所示，件1一端由数控设备装夹，件2与件1通过左旋螺纹连接，件3与件1通过右旋螺纹连接，连接后通过固定销固定。件3与工件连接处设计定位面，转动件2与件3定位面贴合，装夹工件即将工件旋入件3内，端面与件2贴合，实现工件Z向定位。

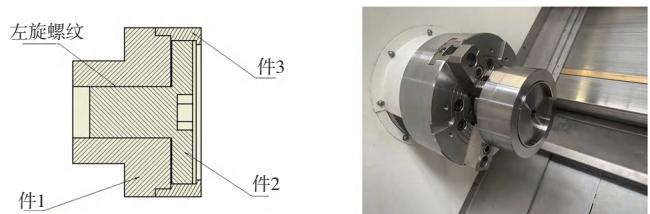


图3 加工切断处毛刺所用工装示意

加工时，主轴正转，件2由于是左旋螺纹，在旋紧力作用下向外方向移动，工件与件3由于是右旋螺纹，在旋紧力作用下向内移动，在摩擦力作用下实现件2与工件紧密贴合。

拆卸时，如果直接拆卸工件，由于摩擦力影响，很难拆卸，所以件2设计有六方扳手孔，利用扳手旋转件2，使件2与工件脱离，没有了旋紧力、摩擦力影响，很轻松就能将工件卸下。

其中件3与工件连接螺纹、外径及端面最好在该胎具组装好，装夹到数控设备上再加工；使工件与主轴高度同轴。保证外螺纹与设备主轴同轴度，以此保证加工以后工件切断处倒角的一致性。当再次装夹时可以打表找正件3外径、端面来保证件3的右旋螺纹、端面和机床回转中心的同轴度及垂直度要求，以此保证产品的尺寸精度、形位公差要求。

此设计思路可以广泛应用在类似的机械加工领域，涉及外螺纹环形类工件切断处毛刺处理及此类工件内型加工装夹难问题等均可采用此项目方法完成加工。该创新加工方法直接应用于辽沈工业集团有限公司机加车间类似外螺

热泵余温加热水族箱设计方法及节能性分析

陈森林，何卫建，熊成龙，肖俊安，何承雄，付 强，张人杰

(武汉科技大学，湖北武汉 430081)

[摘要]文章介绍利用热泵对水族箱进行加热，热泵在工作时同时存在冷端和热端，在用热端对水族箱中的水加热的同时，利用冷端进行制冷和降低房间温度。通过分析计算得出，热泵加热水族箱与冷柜的复合系统与传统电加热棒系统相比，节能率可达70%。热泵的利用可以实现水族箱加热的同时能耗更少，此外，热泵装置冷端产生的冷量可以用来给冷柜制冷，实现了能量的多项利用，节能性好。

[关键词]热泵；水族箱；冷柜；复合系统；能耗

[中图分类号]TP273 **[文献标志码]**A

随着人们生活水平的提高，家庭美化被越来越多的人所认可，在客厅内摆放水族箱，饲养观赏性鱼，是一种常用的美化室内的手段。在中国，水族箱的市场规模也逐年提升。其中热带鱼在观赏鱼中占有很大比例，由于热带鱼所适宜的水温较高，因此需要在水族箱中增加加热装置才能使热带鱼正常生存^[1]。传统的水族箱利用电加热棒对水族箱中的水进行加热，从而达到水族箱水温恒定的目的。电加热棒的能耗大，持续加热会消耗更多能量，且电加热棒的选型需根据水族箱的尺寸来确定。传统电加热棒离水族箱水面较浅，存在水体受热不均匀的问题。电加热棒直接与水体长时间接触会增加局部漏电的可能^[2]，危险性更高，对热带鱼的正常生长有较大影响。

有些学者对电加热棒做了很多改善方案，如中国专利97240403.1^[3]，其改进原有的电发热管方式，采用十字架型，该结构增大热交换面积，加热效率更高，而且散热性能好。又如，中国专利96237767.8^[4]，发热丝并联后绕在玻璃管上，

两发热丝间局部用绝缘丝带隔开，使电加热棒加热时发热丝不下垂，这样可以提高电加热棒的发热效率和使用寿命。以上两个改进的方法，尽管能够从某些方面改善电发热棒的性能，但不能从根本上克服传统的电发热棒安全性差、耗电量大等缺点。

文章针对以上传统水族箱加热装置存在的问题，通过对原理和结构进行分析，提出了采用热泵替代电加热棒作为加热装置来维持水族箱水温的恒定，并在热泵的冷端设计冷柜装置，提高能量利用效率，减少能耗。将热泵装置的压缩机和冷端换热设备安装在水族箱的下面，既节省空间也使电机部分远离水体。热泵的热端换热设备采用传热性能好的铜管，分布在水族箱的底部加热水体。压缩机的侧边安放冷柜和用于降低室温的管道。将热泵应用于水族箱上面，取代传统的电加热棒，不仅节能安全，而且在加热水体的同时还能利用冷端的冷量制冷，具有传统电加热棒所不具备的优点。

纹环形产品生产加工中，为同类产品的加工提供了实验数据和成功案例，具有很强的推广价值。后续还将在中国兵器工业集团其他单位以及省市相关企业单位推广应用。

4 结论

以上实例表明，左旋螺纹胎具与右旋螺纹工件配合，可以广泛应用在装夹及拆卸右旋螺纹工件中，提高生产效率和产品质量。

参考文献

- [1] 赵兵，张守阳，王辉，等.九级盘装配连接螺栓预紧力评估与分析[J].中国机械工程，2020，31（13）：7.

[2] 张忠伟，王峻青，史雄飞，等.螺栓连接预紧力测量技术综述[J].中国机械，2020（8）：96-97.

[3] 王启广.螺纹联接的预紧力控制[J].矿山机械，2001（6）：63-64.

[4] 陈亭志.螺纹紧固件拧紧扭矩的确定方法研究[J].武汉职业技术学院学报，2013（1）：4.

[5] 董红莉，李少龙，黄南.航空发动机螺纹连接拧紧力矩应用分析[J].航空科学技术，2019，30（5）：5.

作者简介

陈元刚（1987—），男，辽宁岫岩人，本科，工程师，主要研究方向为夹具工装设计。

1 基本原理

1.1 热泵原理

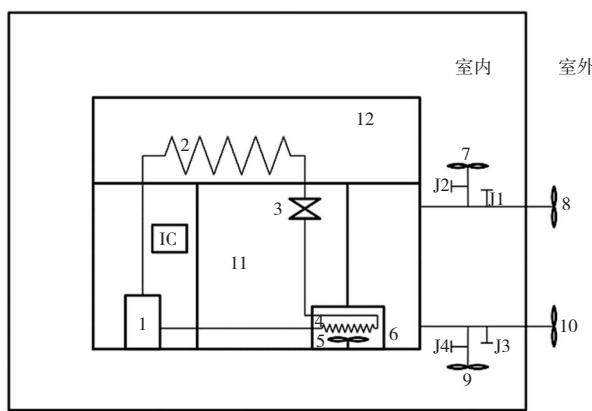
“热泵”这一术语是借鉴“水泵”一词而得来^[3]。水泵的通常作用是把水从低处抽送到高处的一种设备，而热泵是将低品位的热能转化成高品位热能的一种设备。热泵在工作时，它本身消耗一部分能量，把环境介质中贮存的能量加以挖掘，通过传热工质循环系统提高温度进行利用，而整个热泵装置所消耗的功仅为输出功中的一小部分，因此，采用热泵技术^[4~6]可以节约大量高品位能源。

热泵工作时，蒸发器从周围环境中吸取热量以蒸发传热工质，工质蒸汽经压缩机压缩后温度和压力上升，高温蒸汽通过冷凝器冷凝成液体时，释放出的热量传递给了水族箱中的水。冷凝后的传热工质通过膨胀阀后返回到蒸发器，而后再被蒸发，如此循环。

在目前节能减碳的时代背景下，正是由于热泵技术能提高能源利用率，是合理用能的典范，有良好的节能效益，能够为国家双碳目标献一份力。

1.2 复合系统工作原理

本装置利用热泵在工作时同时存在冷端和热端，在用热端对水族箱中的水加热的同时，利用冷端对冷柜进行制冷和降低房间温度，如图1所示。



1.压缩机；2.冷凝器；3.节流阀；4.蒸发器；
5, 7~10.风扇；6.风箱；11.冷柜；
12.水族箱；J1~J4.控制阀；IC.自动控温装置

图1 热泵水族箱与冷柜复合系统结构

1.2.1 夏季工况

系统运行开始时，箱体内的压缩机启动，压缩机从蒸发器中吸入低压气体制冷剂，通过压缩机做功，将低压气体制冷剂压缩成高温高压气体。高温高压气体进入冷凝器内的工质管，工质管与水族箱里面的水进行换热，给水族箱加热。高温高压气体在冷凝器中被冷凝成低温高压液

体，低温高压液体通过节流阀节流后变成低温低压液体进入蒸发器，此时吸收蒸发器的风扇带来的热量，使得冷柜温度降低。当冷柜达到冷饱和时，控制阀J2和J4开启，J1和J3关闭。风箱室内侧的风扇9启动，将室内的空气抽吸至风箱内。进入风箱里面的空气被蒸发器装置吸收热量后温度降低。风箱内被冷却的空气被风扇7从风箱内抽吸至室内，从而使得室内温度也降低。制冷剂吸热蒸发后又变成低压气体，又进入压缩机，如此往复。同时系统还配备IC自动控温装置，当IC控温装置检测到水族箱内水温达到设定温度时，IC将控制压缩机的启停或转速，防止水温超过设定温度。当IC控温装置检测到水族箱内水温低于设定温度时，压缩机则开始正常运行。

1.2.2 冬季工况

冬季工况时，其原理和夏季相似，唯一不同就是为了保证冬季室内热量不流失和冷柜负荷饱和后不影响工作效果，当冷柜负荷达到冷饱和时，控制阀J1和J3开启，J2和J4关闭。室外侧的风扇8和风扇10启动，室外空气被风扇10抽吸至风箱，吸收蒸发器的热量，然后风箱内被冷却的空气被风扇8抽吸至室外。制冷剂吸热蒸发后又变成低压气体，再进入压缩机，如此往复进行。

2 系统性能理论计算

为证明复合系统较常规电加热棒更节能，选取某一实际水族箱。水族箱尺寸长120cm×宽40cm×高50cm，容纳水量为240L，水族箱加热到设定温度所需时间为3h，一般的热带鱼适合的水温在23~30℃。分别在夏季和冬季工况下对电加热棒和热泵水族箱、冷柜系统进行理论计算。

2.1 冬季工况下的理论计算

系统工况参数：制冷剂采用R134a，蒸发温度-27℃，冷凝温度33℃，室内温度18℃，水族箱设定温度25℃，水的比容4200J/(kg·℃)。

2.1.1 电加热棒系统

电加热棒单独对水族箱进行加热时，水得到的热量等于电加热棒的发热量。根据加热所需的时间、水族箱设定温度和室内温度，电加热棒的功率为

$$Q_k = cm(t_s - t_n) \quad (1)$$

$$P_e = Q_k / \tau \quad (2)$$

式中， Q_k 为水族箱所需热负荷； P_e 为电加热棒功率，kW； c 为水的比热容； m 为水的质量； t_s 为水族箱设定温度； t_n 为室内温度； τ 为加热时间。计算可得， P_e 为0.653kW。

2.1.2 复合系统

复合系统对水族箱进行加热时，冷凝器放出的热量等于水吸收的热量。水族箱所需热负荷根据（1）式得到。结合前面系统工况参数，R134a在整个过程中的压焓图（lgp-h）可由制冷仿真设计软件 CoolPack 绘制，如图2所示^[5]。

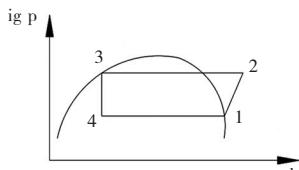


图2 复合系统循环lgp-h图

单位质量制冷剂的制热量为

$$q_k = h_2 - h_3 \quad (3)$$

式中， h_2 为状态点2的焓值，kJ/kg； h_3 为状态点3的焓值，kJ/kg。

制冷剂质量流量为

$$M_r = Q_k / q_k \quad (4)$$

压缩机理论耗功率为

$$W = M_r (h_2 - h_1) \quad (5)$$

式中， h_1 为状态点1的焓值，kJ/kg。

冷柜可获得的冷量

$$Q_0 = M_r (h_1 - h_4) \quad (6)$$

式中， h_4 为状态点4的焓值，kJ/kg。

由式（5）可计算出压缩机理论耗功率 W 为 0.197kW，同时冷柜可获得的冷量为 0.458kW。

2.2 夏季工况下的理论计算

系统工况参数：制冷剂采用 R134a，蒸发温度 -27℃，冷凝温度 33℃，室内温度 23℃，水族箱设定温度 25℃，水的比容 4200J/(kg · ℃)。

2.2.1 电加热棒系统

同理，电加热棒的功率同样可由式（1）、（2）得到。计算可得电加热棒功率 P_e 为 0.187kW。

2.2.2 复合系统

同理，根据式（3）～（6），可计算出复合系统的压缩机理论耗功率 W 为 0.056kW，同时冷柜可获得的冷量为 0.131kW，见表1。

表1 复合系统与电加热棒系统能耗对比

工况	负荷 (kW)	复合系统能 耗(kW)	电加热棒系 统能耗(kW)	额外获得冷 量(kW)	节能率 (%)
冬季	0.653	0.197	0.653	0.458	69.8
夏季	0.187	0.056	0.187	0.131	70.1

3 结论

文章提出的复合系统，同时利用热泵的冷端和热端，并通过调节控制阀实现了不同工况下工作模式的转换。综上所述，得出如下结论。

（1）无论是在夏季还是冬季，在用该装置加热水族箱的同时，均可获得额外的冷量。该冷量既可用于冷柜制冷，也可在冷柜冷饱和后用于降低夏季室内温度。

（2）通过实例计算得出，热泵加热水族箱与冷柜的复合系统与传统电加热棒系统相比，节能率可达 70% 左右。因此，如果将该装置用于水族箱加热，不仅比传统的加热方式更节能，还能获得一定的冷量，实现能量的多项利用。

（3）压缩机、冷柜和风箱位于水族箱下部的箱体内，既不占用过多的空间，也使整个装置更加一体化，更加满足美观需求。

参考文献

- [1] 皖西学院.一种热带鱼恒温鱼缸: CN201420345905.8[P]. 2014-10-22.
- [2] 大连北港石油仪器有限公司.一种防漏电的低温恒温槽: CN202120326667.6[P]. 2021-10-15.
- [3] 黄桐.一种水族箱加热棒:CN97240403.1[P]. 1999-06-02.
- [4] 黄桐.一种水族箱加热棒:CN96237767.8[P]. 1998-03-11.
- [5] 孙熊.关于热泵技术及其应用综述[J].管理学家, 2014 (13): 306-307.
- [6] 魏子栋, 周祥, 王智超.热泵技术在移动空调上的应用研究[C].2017年全国热泵学术年会论文集, 2017.
- [7] 黄焕璋.新能源的开发与热泵技术的应用[C].2008年山西省可再生能源开发利用研讨会论文集, 2008.
- [8] 谭羽非.工程热力学, 6版[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

基金项目

校级大学生创新创业训练计划项目 (22Z022)

作者简介

陈森林 (2001—)，男，湖北利川人，本科在读，主要研究方向为建筑环境与能源应用工程。

选矿厂颚式破碎除尘系统改造

胡衡彦¹, 马建新², 孙海侠¹

(1.湖南有色冶金劳动保护研究院有限责任公司, 湖南长沙 410014; 2.飞翼股份有限公司, 湖南长沙 410600)

[摘要]介绍某选矿厂颚式破碎除尘系统的改造过程。分析原有除尘器的设计缺陷, 对相关参数进行科学计算, 优化除尘管网的设计和滤袋的选型, 采用先进的脉冲清灰方式等, 原有的除尘系统得到了优化改进。通过对数据的统计和分析可知, 改造实施后, 除尘器的除尘效率显著提高, 不仅节约了更换滤袋的材料成本和用电量, 更有效改善了破碎工段的整体环境。

[关键词] 颚式破碎; 粉尘治理; 除尘器改造

[中图分类号] X78 **[文献标志码]** A

1 颚式破碎除尘系统简介

某公司230万t/a铜硫选厂于2015年11月开始建设, 2017年4月正式投料试生产。该选厂采场供给原矿最大块度1000mm, 经ZB2400×9000型重型板式给料机向CJ815型颚式破碎机给料, 粗碎后矿石粒度控制为250mm, 破碎后经1#胶带机转运至粗矿堆场。其颚式破碎除尘系统在重型板式给料机头部(颚式破碎机进料口)及1#皮带受料点前各设置一个吸尘罩, 吸尘点设计抽风量分别为8500m³/h和5500m³/h, 吸尘管采用标准焊管, 管径分别为Φ426和Φ325。系统选用脉冲袋式除尘器, 设计过滤面积300m²。滤袋规格Φ160×4000, 数量150条, 以每排10条、共15排分布, 配用上海袋配电磁1.5"脉冲阀, 分气包采用Φ219×3500, 收集粉尘经星形卸灰阀、螺旋输送机, 加湿处理后卸至1#皮带。配套风机为东润牌风机, 风量14000m³/h, 全压5350Pa, 转速2150r/min, 右45°。同时还设计安装了喷雾抑尘设施, 但是除尘系统投入运行以来, 现场防尘效果并不十分理想, 造成1#皮带受料点吸尘效果差, 大量粉尘在生产车间内弥漫, 使得生产岗位呼吸性粉尘浓度严重超标, 影响操作工人的职业健康。同时布袋清灰效果差, 容易堵塞, 布袋更换频率较高, 灰斗卸灰、输灰不畅。

2 颚式破碎除尘系存在问题分析

2.1 除尘系统存在的问题

本除尘系统用于处理原矿粗破过程中所产生的扬尘。粗破工艺设备包括重型板式给料机、重型给料机散落物料收集转运皮带、颚式破碎机及1#转运皮带。其设置吸尘点为给料机头部(颚式破碎机进料口)及1#皮带受料点前各设置一个吸尘罩, 吸尘点设计抽风量分别为8500m³/h

和5500m³/h。存在的主要问题为部分产生点未设置吸尘罩, 设置的吸尘罩离产生点距离远且角度设计不合理, 吸尘管道设计安装不合理, 管路阻力较大, 吸尘罩内未形成有效的负压, 粉尘容易扩散不易收集, 造成粉尘外逸, 无法收集, 无组织外排。

2.2 除尘器设计存在的缺陷

2.2.1 喷吹清灰系统

除尘器滤袋分布为15×10, 15排, 每排10袋, 袋长4m, 布袋间距为30mm, 每排过滤面积20m²。根据大量研究及脉冲阀使用性能要求, 喷吹面积大于15m²所配套脉冲阀不得小于2", 分气包容积不小于0.2m³。而现场所配套的脉冲阀为1.5", 分气包容积0.11m³(Φ219×4200)。另外1.5"脉冲阀所需分气包容积不得小于0.15m³, 气包容积太小, 除尘器脉冲阀选型不合理^[1], 清灰压缩空气量较小, 布袋清灰困难, 滤袋表面附着的粉尘不易剥落, 造成滤袋透气性差, 除尘器阻力上升, 吸尘管路风量减小, 吸尘效果不理想。

2.2.2 进出风口

进风口位于灰斗上部, 进风口上平面与袋底距离约200mm, 气流以10m/s以上的速度进入灰斗后没有经过平流沉降, 直接进入滤袋区, 粉尘大部分随气流粘附至滤袋上, 滤袋的透气率在较短时间内变差。同时滤袋下部在气流作用下倾斜并挤靠在一侧, 一方面使得气箱内气流上升速度快, 滤料的局部过滤负荷太高, 影响布袋的清灰效果, 另一方面造成滤袋底部碰撞磨损, 在运行数月内部分滤袋底部破裂。

出风口位于净气室侧部, 未设计集气管, 出口长度只有600mm, 相对于3500mm长的箱体来说会出现严重的气

流不均匀现象，造成除尘器内气流分布不均匀和清灰时粉尘二次返袋现象，使得除尘器清灰不畅，运行阻力大。

2.2.3 箱体结构

过滤室未设置平流沉降空间。平流沉降空间有利于气流的重新分布，气流进入平流沉降空间后，因空间容积的突然扩大，气流速度降至 2m/s 以下，气流速度发生突变形成紊流区，在这一过程中部分粉尘将沉降在灰斗内，最大程度地减少了滤袋表面附着的粉尘，保证了滤袋的透气性能，确保除尘器的过滤效果。同时气流重新分配后有一个平稳上升的空间，滤袋不会受到气流冲击而发生偏移。

灰斗安息角设计不符合规范要求。各种粉尘的流动性都不一样，因此灰斗设计时其安息角必须满足粉尘流动特性的要求^[2]，一般性粉尘不得小于 60° 。本除尘器灰斗安息角分别约 45° 和 60° ，不符合设计规范要求，造成灰斗内粉尘卸灰不畅。

2.3 使用及操作方面存在的缺陷

(1) 除尘器投入使用时因干湿并用，粉尘含水量高，造成滤袋板结，无法清灰，对整批滤袋进行了重新更换。袋式除尘器对含尘空气含水量要求非常严格，含尘空气含水量一般在2%以下，容易亲水性粉尘过滤时必须采用经过特殊处理的滤材。

(2) 输灰系统为星形卸灰阀+螺旋输送机，考虑到二次扬尘的影响，在螺旋输送机内对粉尘进行了加湿处理。因星形卸灰阀的气密性并不理想，因此水雾在负压作用下可能被吸入除尘器内，可能造成滤袋上出现局部板结，灰斗内粉尘搭桥现象，影响过滤效果和卸灰效果。

(3) 除尘器设计方面的缺陷导致清灰困难。当风机停机后，袋表积尘在重力作用下大量沉降在灰斗内，如果不能及时排走，亲水性粉尘易吸水板结，造成灰斗壁板上粉尘清洁困难，或者卸灰阀上部出现粉尘搭桥，输灰系统不能正常工作。

(4) 现场了解情况时除尘系统处于运行状态，风机运转正常，但未见喷吹清灰系统和输灰系统工作。

(5) 除尘器漏风严重，主要部位为除尘器上盖板、检修门、灰斗等处。

3 除尘系统改造方案

根据现场实际情况及使用单位要求，除尘系统改造分为两个部分：管网部分和除尘器本体部分，具体改造内容如图1所示。

3.1 管网部分

根据现场情况及用户要求，系统管网需增加2个吸尘

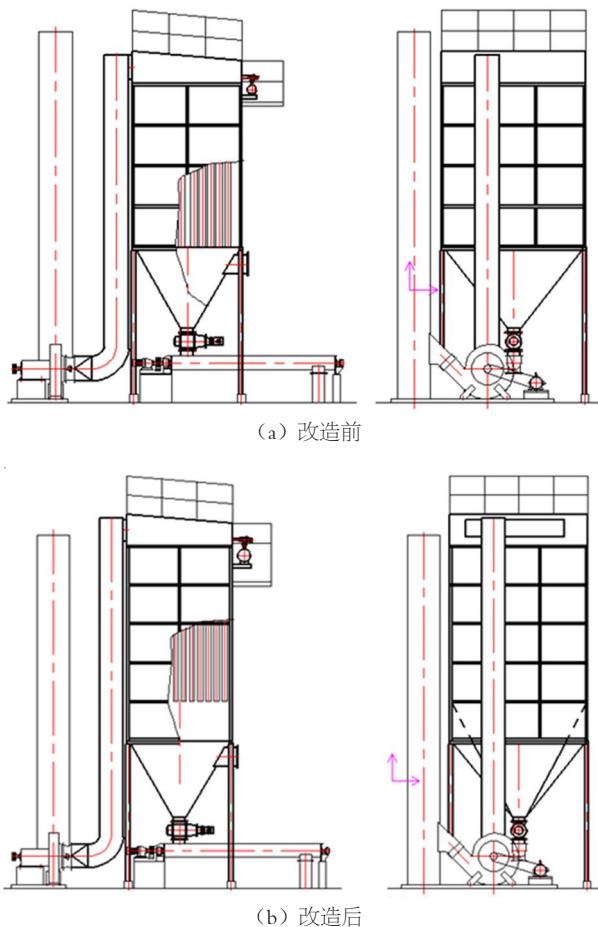


图1 除尘器改造前后对比

点：1#皮带受料后部增加一个吸尘点，重型板式给料机散落物料收集转运皮带卸料溜槽增加一个吸尘点^[3]。

1#皮带受料点前后各一个吸尘点，前部风量 $3000\text{m}^3/\text{h}$ ，后部风量 $2000\text{m}^3/\text{h}$ ，合计风量 $5000\text{m}^3/\text{h}$ ，主管 $\Phi 326$ 不变。

重型板式给料机散落物料收集转运皮带卸料溜槽处制作一个整体密闭罩，将卸料溜槽密闭，密闭罩长宽为 $1\text{m} \times 2\text{m}$ ，高约 2m ， 1m 方向两面为活动门，方便操作。活动门上设可视孔便于观察，设计风量 $2500\text{m}^3/\text{h}$ ，重型板式给料机头部（颚式破碎机进料口）设计风量 $7000\text{m}^3/\text{h}$ ，合计风量 $9500\text{m}^3/\text{h}$ ，主管 $\Phi 426$ 不变。

两路管道合并后风量 $14500\text{m}^3/\text{h}$ ，原主管道管径 $\Phi 478$ ，需拆除重新制作，设计主管管径 $\Phi 560$ 。

3.2 除尘器本体部分

本部分改造包括净气室、喷吹系统、灰斗、电气控制系统的。

(1) 将除尘器净气室加高 1.0m ，净气管加集气管。使得除尘器布袋与进风口之间的距离增加到 1m 以上，增大粉尘沉降距离，使得除尘器内含尘气流均匀分布。将除尘

器喷吹管喷吹间距改为 210mm，布袋改为 $\Phi 130 \times 4200$ ，增大布袋之间的间距。

(2) 将原 1.5" 脉冲阀改为 2.5" 脉冲阀，相应地将其气包改为 $\Phi 325 \times 4200$ ，对脉冲喷吹管的脉冲控制仪进行改进。

(3) 改进除尘器倾角，将除尘器灰斗 45° 壁板加内衬板，安息角改为不小于 60°。

(4) 将除尘器上盖板重新设计和重新制作，将其余漏风点重新焊接，保证除尘器的密闭性，保证除尘器的漏风率小于 3%。

(5) 取消 2 台振动电机，重新安装另外一台振动清灰电机，保证振动电机轴线处于水平，配套脉冲控制仪。振动电机及输灰系统控制不变。

(6) 结合现场粉尘粒径小，具有一定的亲水特性，加上矿区常年气候潮湿，空气含湿量较大，粉尘黏性大，容易结块等特点，滤袋必须经防水防油处理，使除尘器满足现场运行条件。

(7) 停用喷雾抑尘系统，降低袋式除尘系统运行时吸入空气含湿量；停用螺旋输送机加水系统，防止除尘器运行时，水雾进入箱体，造成布袋粘袋，箱体内粉尘“搭桥”，清灰困难。完善操作规程，除尘器采用定时卸灰，按章操作，确保运行正常。

4 除尘器改造成效

4.1 除尘效果

在原设计的基础上增加了重板给料机散落物料收集转运皮带卸料溜槽吸尘点和 1# 皮带受料点后部吸尘点，将原除尘管网重新设计。将除尘器上箱体增高 1m；花板改为 $\Phi 135$ ，布袋改为 $\Phi 130 \times 4200$ ，布袋之间的间距增加到 80mm；除尘器滤袋分布为 16×12，16 排，每排 12 袋，共 192 条布袋，过滤面积为 330m²，过滤风速由原来的 0.8m/s 降到 0.73m/s；将气包改为 $\Phi 325\text{mm}$ ，脉冲阀改为 2.5"；对除尘器的电气控制进行相应改造。除尘器及管网改造安装好后，经过现场运行使用，效果非常好，各扬尘点均未发现粉尘外溢，生产岗位环境明显得到改善。而且由于过滤面积增大，粉尘外排浓度明显降低。为了验证实际使用情况，企业组织了现场测试，测试结果粉尘外排浓度为

55mg/m³，远低于国家和地方相关排放标准。

4.2 经济性分析

滤袋是决定袋式除尘器除尘效率的关键元件，更换滤袋的费用又是袋式除尘器的主要费用。本除尘器改造后采用防水防油涤纶针刺毡滤袋，正常使用寿命可达 2a 以上，布袋更换周期由原来的两个月变为 2a 以上，减少了购买布袋成本和更换布袋的人力成本；同时取消了 2 台功率 4kW 的振动电机，也可以节约电能；改造后不再发生粉尘粘袋和灰仓卸灰困难等问题，维修人员的工作量和劳动强度大大减轻，隐形效益十分突出。

5 结语

此次改造充分利用现场原有除尘器的部分壳体、风机和排气筒等，尽可能减少改造费用。优化设计除尘器结构，在利用原除尘器壳体的基础上，采用增高上箱体高度。通过改造除尘器的花板和喷吹管喷吹间距，增加滤袋长度和数量来满足过滤面积和降低过滤风速的要求，并结合现场粉尘粒径小等，具有一定的亲水特性，加上矿区常年气候潮湿，空气含湿量较大，粉尘黏性大，容易结块等特点，优选防水防油针刺毡滤袋，使除尘器满足现场运行条件，使得除尘效率达到 99.9%，有效解决了颚式破碎扬尘点粉尘大量外溢、工人操作岗位呼吸性粉尘浓度严重超标的难题，使操作岗位粉尘浓度低于国家工业企业卫生标准，粉尘外排浓度满足日益严格的环保排放标准，同时高效的过滤增加了有价值的粉尘的回收率。

参考文献

- [1] 蒋家坚. 脉冲袋式除尘器在除尘改造中的应用[J]. 装备制造技术, 2010 (8) : 175-176.
- [2] 陈志伯, 刘斌, 李绍军. 用气箱脉冲袋式除尘器对烘干磨除尘系统进行改造[J]. 水泥, 2006 (1) : 55-56.
- [3] 李少平. 改善破碎机除尘效果的措施[J]. 水泥, 2003 (7) : 40-41.

作者简介

胡衡彦 (1991—)，女，湖南衡阳人，本科，工程师，主要研究方向为通风除尘、清洁生产、职业卫生、安全生产。

大直径盾构机电气系统组成及常见故障处理

侯志德

(中国铁建投资集团有限公司, 北京 100855)

[摘要] 盾构机是机械、电气一体化的专业隧道开挖施工机械, 是大型化、智能化、自动化的大型机械设备。盾构机控制环节多, 工序复杂且相互关联影响, 任何环节出现故障都将影响正常掘进甚至停机维修, 特别是大直径盾构机, 工况更加复杂恶劣, 风险更高, 故障更复杂。电气系统作为大直径盾构机的主要系统, 一旦出现故障, 将直接导致盾构机无法正常工作, 必须制定事前预防、事后处置的方案措施。文章介绍大直径盾构机的电气系统组成, 以及常见故障的处理措施。

[关键词] 大直径盾构机; 电气系统; 故障

[中图分类号] U455.39 **[文献标志码]** A

1 大直径盾构机电气系统的组成

大直径盾构机是集液压、机械、电气、自动化、智能化于一体, 专门用于穿江越海等复杂地质的大直径隧道地下开挖的高科技工程装备。大直径盾构机技术先进, 结构庞大, 主配件繁多, 配备众多先进仪器仪表, 体现了生产制造企业的技术水平及施工企业的管理水平, 体现了一个国家工业化水平, 堪称国之重器。

盾构机依次由刀盘、盾体、后配套台车三大部件组成, 如图1所示。电气系统是盾构机的神经系统, 采用PLC控制, 保证系统稳定可靠运行。电气系统主要设备包括配电系统、变频驱动系统、变压器, 数据采集、监控、通信系统, 自动化控制系统、接地、补偿电容器、软启动器等^[1]。

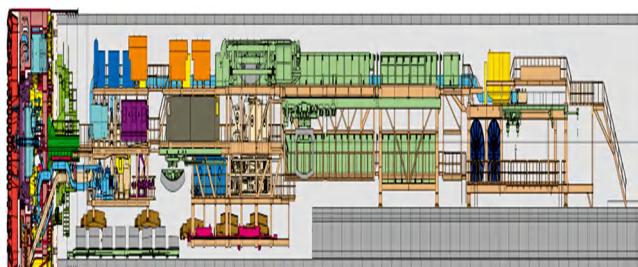


图1 盾构机整体结构

1.1 配电系统

配电系统按电压高低又可分为高压配电系统、低压配电系统。

1.1.1 高压配电系统

大直径盾构机高压配电系统主要由环网柜、配电室、变电站、高压电缆等组成。盾构机整机功率负荷较大, 一般采用10kV电力供电, 双路电源、一主一备, 保障了盾构机的连续掘进。

1.1.2 低压配电系统

大直径盾构机低压配电系统主要由盾构机上配套的各种类型变压器、整流器组成, 提供交流400V、24V, 直流24V等照明电源和控制电源。照明电源一般都会在工作区和行人通道配备防水照明灯, 具体数量视设计情况而定。为保证盾构机各系统操控人员以及维保人员的正常工作需要, 特别重要区域均配置了应急照明灯, 应急照明时间一般不少于90min。

1.2 变频驱动系统

在实际运行过程中, 一般情况下变频器驱动电机均按照一对一配备, 变频器之间均采用现场总线通信联动, 所有变频器要求控制速度同步, 转动力矩均衡。若其中一台变频器故障后, 能够从系统中隔离, 剩余变频器正常运行。变频器由变频柜内的PLC控制。

1.3 变压器

变压器可根据冷却方式不同进行划分, 分为干式和波纹密封油浸式两种。前者的特征表现为维护方便, 有较高的过载能力, 但成本高; 后者的体积小, 有很强的密封性, 可避免油劣化问题, 因而稳定性和可靠性更高, 但维护十分不便^[2]。

1.4 数据采集、监控、通信系统

盾构机的数据采集、监控、通信系统, 用于将盾构机掘进数据实时传送到地面计算机, 便于管理者了解盾构机的状态, 进行控制及生产调度等。整个系统主要由数据采集监控、视频采集监控、导向及电话通信等系统组成。数据采集监控系统主要用于盾构机工作状态监视、掘进参数统计与分析、历史数据查阅和故障信息统计, 打印输出掘

进报告相关资料，如图2所示^[3]。

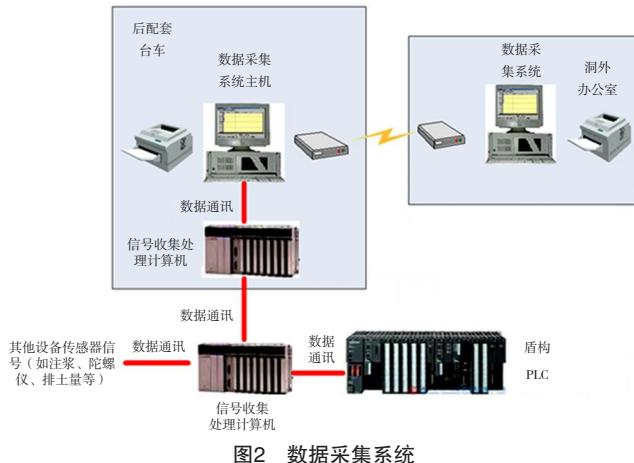


图2 数据采集系统

1.5 自动化控制系统

自动化控制系统主要由计算机、导航定位系统、PLC模块操作系统组成，如图3所示。PLC是核心组成部分，其中主要有处理器、接口、电源、信号模块、机架相关的模块。PLC的处理功能强，编程方便，成本低，在应用过程中可以方便进行扩展，这有利于提高其适应能力。西门子S7-300 PLC、S7-400 PLC等在海瑞克盾构机上较为常用。

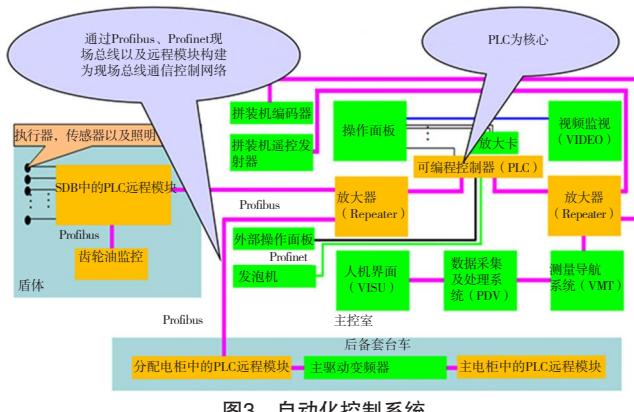


图3 自动化控制系统

1.6 接地

接地系统一般采用安全性高的TN-S系统，其N线和PE线都绝缘且独立运行，工作时用电设备的金属外壳同PE线连接，当设备漏电产生短路电流时，保护装置迅速动作切断漏电设备的电源，保障人身安全。

2 大直径盾构机电系统常见故障的分析解决

盾构机出现故障多因其掘进工期紧张，作业环境恶劣等外部因素导致，内部PLC出现问题的概率不高。盾构机常见故障及处理措施如下。

2.1 电气元器件的损坏

传感器和电磁阀在运行过程中可能由于多方面因素影

响而出现烧毁或者故障问题，从而不能正常使用。

解决措施：当电气元器件出现故障时，总控室屏幕会显示数据异常，如测盾尾油脂量程的压力传感器出现问题时，总控室屏幕就会显示盾尾油脂的压力传感器读数异常。此时可核查油脂泵量程的人工记录，同时采用排除法：将此传感器拆卸并接到相同工作的传感器接口，然后进行观察，如发现其运行正常，将其他可靠运行的传感器接到产生故障的接口，这种情况下如果发现无法正常运行则可判断出接口故障。在此基础上继续进行检查，判断出传输线路是否有异常，即可准确快速地找出是哪个部位出现故障。若元件或者接头损坏就必须进行更换^[4]。

2.2 油脂气动注脂泵不能自动停止

根据相关资料可知，这种泵的油脂油桶上一般会设置一台光电型接近开关，其包含2个探头，分别对高低液位进行检测。在实际运行过程中低液位信号控制注脂泵启动，且向油桶内补油；高液位信号则起到结束运行的作用。在运行时出现故障情况下，可打开其上的PLC程序显示，根据显示结果进行故障判断。

- (1) 桶中油位很低的情况下，i29.4, i29.5均为0，此时置位SR，立即开启气动注脂泵进行自动注脂。
- (2) 桶中油位较低的情况下，i29.4为0，i29.5为1，此时SR保持原状态信号不变，继续进行自动注脂。
- (3) 桶中油位较高条件下，i29.4, i29.5都为1，复位SR，自动停止注脂泵动作。

由此可以看出，该故障是光电接近开关的高液位感测探头损坏造成的。

解决措施：若有传感器备件则立即更换，否则就暂时更改系统中的PLC控制程序，将i29.4临时改写为i29.5，这样可保证在桶中的油位很低时，将自动启动气动注脂泵，后续尽快更换传感器元件。

2.3 刀盘电机不能正常启动

某盾构机在进行调试时，出现某台刀盘电机不能正常启动。解决措施如下。

- (1) 刀盘电机由变频器实时控制，控制信号由总控室操作人员在操作面板和触摸屏上操控发出，传到操作盘的PLC，继续传给动力盘的PLC，再传给变频器盘的PLC，最后传到变频器。当电机启动时，若变频器的控制屏上显示“0”，并且输出端无电压输出，但是将电机接到其他变频器上，能正常工作，则表明故障原因不是刀盘电机本身。
- (2) 启动刀盘电机时，若发现启动信号、速度信号、正反转信号均已到达变频器，且输出正常，则表明信号传

输线路没有故障。

(3) 进一步尝试更换控制面板，更换后再启动。

2.4 刀盘电机的故障灯闪亮或常亮，且启动电机时没有任何反应

故障灯闪亮可能因为电机过热，亮灯报警，而常亮可能是电机断路器未合闸，或因电机电流超载而自动跳闸。

解决措施：故障灯闪亮，极可能是热保护继电器发生故障或线路发生故障，可立即更换继电器并检修线路。当故障灯常亮时，若断路器未合闸，则合上断路器即可。若因电机电流超载而跳闸，则应先检查断路器的过载电流保护值是否设定合理，若偏小则适当调大，若保护值设定合理，则动力回路很可能有短路现象，应立即检查回路是否完好、电机工作是否正常。

2.5 连接线路出现问题

如果元器件与模块连接有问题，如接触不良或短路情况下，无法正常地进行数据传输，这样数据信息无法传输到处理器。这种情况下短路故障不容易处理，其原因在于盾构机上的线路较长，连接很复杂，难以进行准确判断。

解决措施：将电箱里的线路一端进行临时短接，再用电阻测量仪测其另一端的电阻，若显示有电阻，则对应的故障可能为接头不紧或中间线路断开，确定出故障点后进行可靠连接，为设备正常可靠运行提供支持。

2.6 管片拼装机前后动作不灵敏

管片拼装机前后动作不灵敏，控制拼装机红、蓝色油缸伸缩和前后动作的电磁阀均正常工作，且操作手柄时也未发生报警。

通过上述设备的状态可推断无线发射、接收信号正常，进一步对操作手柄进行拆卸后，发现其控制油缸伸缩和行进的按钮上的簧片亦分别接触到电路板。此时测试发现油缸可以正常行进，但伸缩操作反应迟钝，进一步拆解该簧片，发现其中的触头已断裂。

解决措施：更换簧片或整个操作手柄。

上述6种故障，是大直径盾构机电气系统常见的故障，需要及时有效处理，避免将故障延误加重，导致设备停机等重大损失，从而加重工期压力，带来安全隐患。

3 盾构机故障的预防要点

3.1 熟练掌握设备状态

日常工作中维保人员要熟知盾构机电气、机械、液压系统之间的关联配合情况和工作原理，及各系统中各零部

件的功能和原理，方可快速发现并解决故障。

3.2 正确的维保思路

维保人员进行设备维修应依次遵循“看”“思”“修”的思路，出现故障时首先要看清楚是何种故障，思考是否为电气、机械、液压亦或其他原因造成，理清维修思路，切忌盲目动手，以免影响维修进度甚至将问题扩大化，要准确找到问题根源后再动手，这样才能快速排除故障。

3.3 做好记录

故障解决的同时做好维修记录，事后总结故障原因、维修过程、维修结果，后续再遇到类似问题就可以查看记录，提高维修效率，也可以供其他维修人员参考使用。

3.4 加强保养

设备的日常维护、保养也十分重要，电气油脂、刷漆防锈等都不可马虎，保养到位可以降低设备故障率，提高设备使用寿命。

3.5 其他

值得一提的是，维修人员往往忽视最简单的问题，如线缆破皮、断裂、脱落等，而是去排查复杂的问题，所以建议维修设备应先外部后内部，避免遗漏。

4 结语

大直径盾构机电气系统组成复杂，零部件繁多，为保障盾构机顺利掘进，维修人员应当在设备安装调试时，尽早发现问题，采取预防措施。如果遇到故障，应准确快速有效地解决，避免延误工期，带来安全风险。

参考文献

- [1] 敬洋. 盾构电气组成系统及常见故障的解决[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(11): 181.
- [2] 吕志明. 略论盾构施工电气系统[J]. 中国高新技术企业, 2017(11): 346-347.
- [3] 王义杰, 蔡骏. 浅谈盾构电器组成系统及常见故障的解决[J]. 智能城市, 2019, 5(7): 154-155.
- [4] 李军. 盾构机电气系统的设计概要[J]. 智能城市, 2018(1): 98-100.

作者简介

侯志德(1989—)，男，湖北武汉人，本科，工程师，主要从事轨道交通机电设备系统建设管理工作。

超低排放燃煤电厂1000MW发电机组 低负荷运行安全策略

蒋 琛

(国家能源集团谏壁发电厂, 江苏镇江 212006)

[摘要]文章对燃煤电厂1000MW发电机组低负荷运行安全策略进行研究。通过控制燃烧煤种煤质, 调整锅炉炉膛空气系数, 提升运行人员操作水平策略等, 及时调整发电机组运行参数, 降低负荷变化, 确保燃烧工况稳定, 以期优化燃煤电厂运行效率, 实现燃煤电厂环境保护、节能减排的目标。

[关键词]超低排放技术; 燃煤电厂; 1000MW发电机组; 低负荷; 安全策略

[中图分类号]TK227.1 **[文献标志码]**A

近年来, 我国经济发展迅速, 整体综合国力得到提升, 人们的物质条件和生活水平与社会发展态势同步。在经济发展的同时, 不管是国家主体, 还是社会个体, 都更加关注生存环境的优劣^[1-2]。当前, 随着新能源发电的快速发展, 在太阳能、风力发电等发电模式中, 为使传统的燃煤发电得到最大的应用效果, 需要对燃煤电厂发电机组进行低负荷调峰运行, 以此降低燃煤大气污染物排放浓度^[3]。我国西北地区燃煤机组具有装机容量大、机组负荷高的特点, 在实际运行中会产生大量的燃煤大气污染排放物, 因此需要调整燃煤机组发电负荷, 降低供电煤耗。但是, 直接降低燃煤机组发电负荷会影响电厂运行的安全性和稳定性。例如, 燃煤电厂发电机组在低负荷情况下时, 锅炉炉膛内的气流均匀性会降低, 导致炉温下降, 从而造成锅炉燃烧稳定程度较差, 降低了SCR反应器的催化剂层效果, 使入口烟气温度较低, 降低了N₂的选择性, 提升了NH₃的消耗。当NH₃量增多时, 便会加剧空预器的堵塞, FGD吸收塔的工质流量下降, 造成锅炉水动力不稳定, 从而导致锅炉过热器管壁超温等问题^[4-5]。因此, 在燃煤电厂1000MW发电机组低负荷运行过程中, 对影响发电机组安全性和稳定性的因素进行深入研究, 寻求提高发电机组低负荷安全稳定运行的安全策略具有重要意义。

燃煤电厂的发电机组在运行时会排放一定量的大气污染物, 其在低负荷运行时的能源节约和减排问题更加突出。利用超低排放技术对燃煤电厂发电机组运行过程进行调控, 通过多种污染物协同脱除集成方式实现燃煤电厂发电机组低负荷安全稳定运行。文中以1000MW发电机组为例, 在超低排放技术下对燃煤电厂低负荷运行安全

策略展开研究。

1 超低排放技术对燃煤电厂低负荷运行的意义

超低排放技术可以使燃煤锅炉所产生的大气污染物排放浓度降低至燃气机组排放值的标准。利用多种污染物协同脱除集成方式对燃煤电厂发电机组低负荷运行时所产生的烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度进行下降处理, 可以有效提高燃煤电厂发电机组的清洁生产能力。

通过脱硝改造调整燃煤电厂发电机组低负荷运行的二次风和燃尽风的配比, 提高燃尽风比例, 降低燃尽风区域产生的氮氧化物(N₂O、NO、NO₂、N₂O₃、N₂O₄和N₂O₅), 有效减少大气污染物。燃煤电厂发电机组在低负荷运行时容易产生屏式过热器结焦, 通过屏式过热器吹灰提高吸热效果, 可有效降低烟气温度, 保证换热效果。通过脱硫改造可以提高发电机组低负荷运行时的传质速率, 能够使空预器的烟气分布更加均匀, 强化传质机理。通过除尘技术可以增加烟气在电除尘内部的停留时间, 降低燃烧温度, 避免发生局部高温情况。利用超低排放技术, 提升燃煤电厂低负荷运行可靠性, 通过组合的方式降低低负荷运行阻力, 使燃煤电厂达到长期超低排放要求, 保证发电机组在低负荷运行时可以同步实现节能减排目标。

超低排放技术可以最大限度地减少燃煤电厂低负荷运行时产生的大气污染排放量, 最大限度地提高运行效率, 以此保证我国电力系统的稳定和燃煤电厂能耗的降低, 推动我国经济持续稳步长远发展。

2 燃煤电厂1000MW发电机组低负荷运行存在的问题

2.1 锅炉灭火次数增多

燃煤电厂1000MW发电机组在低负荷运行的情况下,

容易发生锅炉灭火事故。锅炉灭火的主要原因为锅炉负荷过低，发电机组在低负荷运行过程中，吸风机、送风机、给粉机等设备突然发生故障，停止运行，便会造成锅炉灭火。同时，燃煤电厂发电机组为了降低能耗，使其在低负荷条件下运行，进而容易引起锅炉炉膛温度下降、燃烧不稳定等情况，造成锅炉灭火。锅炉灭火事故控制时间较短，因此不会对燃煤电厂造成太大的经济损失。但是，当锅炉灭火次数增多时，锅炉炉内温度与外界温度存在一定温差，容易破坏锅炉炉内正常空气动力工况，增加了锅炉爆燃的危险。

2.2 主汽温度调节不达标

燃煤电厂 1000MW 发电机组在低负荷运行时常出现主汽温度达不到设计值的情况。主汽温度调节不达标的原因，主要为发电机组滑停前未对锅炉进行全面吹灰，没有调节减温器，造成汽温在下滑过程得不到较好的控制。同时，在滑停过程中没有保持火嘴集中运行，进而导致燃烧不稳定，使汽温下降速度过快。在各减温水调门及总门处于开启状态时，没有暂缓减负荷，压制汽温，造成锅炉炉膛蓄热效果下降，致使主汽温度产生突降。

2.3 运行人员操作不流畅

部分操作人员未对低负荷运行时发电机组设备产生的超标时间、超标次数、超标原因进行分类和记录。对发电机组低负荷运行情况进行总结时，由于对设备不熟悉，未形成系统化的设备归纳体系，无法对发电机组仪表标定、仪表故障、启停机等设备进行故障检修和低负荷运行调整。

3 燃煤电厂 1000MW 发电机组低负荷运行安全策略

3.1 控制燃烧煤种煤质，及时调整发电机组运行参数

燃煤电厂 1000MW 发电机组在低负荷运行工况下，燃烧煤种的变化会直接影响锅炉燃烧的稳定性，根据燃烧煤种煤质判定影响锅炉下限运行的主要因素，以此调整发电机组运行参数，有效避免锅炉灭火事故。1000MW 发电机组在低负荷运行时，可以通过控制燃烧煤种中水分的含量，降低氧气浓度，进而降低煤种的挥发性，缩短高温区停留时间，有效提高发电机组低负荷运行效率。同时，将燃烧用的空气剩余部分以二次空气输入的形式构成富氧燃烧区，选择空隙较多且煤粉较细的煤种完成煤种燃烧，能够有效提升火焰传播速度，稳定火焰燃烧程度，确保锅炉处于持续稳定燃烧煤种状态。

在发电机组低负荷运行过程中，需要确保锅炉及其吸风机、送风机、给粉机等附属设备的稳定运行，避免设备突发故障。通过定期检查维修给粉机设备的运转情况，及

时调节运转速率，可以有效提升给粉机下粉效果，减少燃烧工况大幅度波动情况，避免发生锅炉燃烧恶化情况。通过检修发电机组调速系统，设定符合加减负荷幅度的规定值，均衡锅炉煤种燃烧调节幅度，使风粉配比达到最优参数，避免锅炉灭火事故。同时，相关操作人员还需要在吸风机、送风机发生故障停运时，做好燃烧调整工作，及时查看故障发生原因，防止火焰燃烧程度过高，导致过分偏斜，确保发电机组稳定有序低负荷运行。在吸风机、送风机故障检修完毕后，需要指派专业的操作人员完成设备启动，有效监控锅炉炉膛负压情况，防止设备启动时破坏燃烧工况，避免再次发生故障停运事故。

3.2 调整锅炉炉膛空气系数，降低负荷变化

通过燃烧调整锅炉炉膛过剩空气系数，控制空气系数保持在 1.3 ~ 1.5，提高锅炉热效率，稳定炉膛燃烧程度。在 1000MW 发电机组低负荷运行时，需要对层燃炉进行调节控制，以烟气流经各烟道段的漏风量为基础，将炉膛出口处空气过剩系数调整至 1.4，排烟处空气过剩系数调整至 1.9，确保燃煤电厂运行安全性。在调整锅炉炉膛空气系数时，需要注意冷空气的流通情况，避免大量冷空气进入炉膛内部，造成燃烧工况不稳。通过减少烟气容积的方式，缓解排烟热损失情况，进而降低鼓引风机负担，避免发电机组电耗增加。

1000MW 发电机组在低负荷运行时，需要降低负荷变动对周围环境产生的冲击影响。当锅炉热效率为 110%，主汽温度为 10℃ 时，其升压速率通常为 5MW/min。当过剩空气系数增加时，煤种燃烧产生的烟气量增加，烟气在垂直方向的扩散流动速度较快，致使对流换热增强，使过热蒸汽温度上升。因此，为了提高燃煤电厂 1000MW 发电机组低负荷运行安全性，必须在锅炉燃烧调节中严格控制过剩空气系数，加深对过高的过剩空气系数造成严重危害的认识程度。相关操作人员需要合理配风并且落实有效的监测控制手段，通过 O₂ 含量测定法对锅炉含氧量进行测定，解决锅炉微正压燃烧和密封问题。以连续测得的含氧量数值为基础，调节过剩空气系数和空燃比，完成烟气含氧量实时在线测量工作，实现锅炉低氧燃烧。在发电机组低负荷运行时，对锅炉燃烧过程的低氧燃烧进行自动调控，使锅炉热效率得到提高，以及时和定期维护设备的方式尽可能降低氮氧化物排放量，提升发电机组低负荷运行安全。

3.3 提升运行人员操作水平，确保燃烧工况稳定

燃煤电厂 1000MW 发电机组在低负荷运行时，需要专业化程度较高的操作人员完成发电机组运行参数和锅炉炉

膛空气系数的调整工作，以此确保锅炉燃烧工况稳定。通过定期开展专业化培训的方式，提高发电机组低负荷运行人员的操作水平，确保燃煤电厂发电稳定性。运行人员在落实1000MW发电机组低负荷运行时，需要确保炉膛出口处空气过剩系数和排烟处空气过剩系数为正常水平，提升燃烧工况稳定性。运行人员需要注意检查锅炉及其吸风机、送风机、给粉机等附属设备的情况，调整发电机组运行参数和锅炉炉膛空气系数，及时对燃烧工况进行有效分析，进而提升1000MW发电机组低负荷运行的安全性。

发电机组在低负荷运行时，运行人员还需要定时查看锅炉进粉量，以防炉膛进粉量过少，导致炉膛不稳定，进而发生锅炉灭火事故。针对锅炉的燃烧工况调整，操作人员需要尽可能地实现风量和燃料的配比优化。使得锅炉的各种性能指标均达到稳定的状态，从而实现煤种燃烧加热的均匀分配，提高锅炉热效率。在燃烧工况调整时，禁止突然增加和减少风量和燃料，确保发电机组在低负荷运行时的稳定性。操作人员需要定期对各设备的仪表和参数进行全面分析，及时找出潜在故障，并对其进行妥善的预处理，避免设备突发故障，造成锅炉燃烧工况不稳，甚至停止运行。

在日常培训过程中，需要加强大数据挖掘技术等信息技术的应用，提升锅炉燃烧工况信息交互能力，使操作人员、维修人员、管理人员之间保持着密切联系。利用线上数据信息处理的方式，通过大数据技术实时监控锅炉燃烧工况，有效获取发电机组低负荷运行环节中的各类型数据。通过数据聚类的方法对氧气浓度、空气剩余、燃烧工况波动、发电机组仪表参数等数据进行有效整合，并将聚类整合后的数据上传至云端，进而开展燃煤电厂1000MW发电机组低负荷运行安全参数优化，以此实现燃煤电厂能源节约和减排。

4 结束语

发电机组低负荷运行可以严格控制瞬间超标，降低大气污染物排放量，既保证燃煤电厂发电效率，又对燃煤电厂的节能减排作出贡献。针对燃煤电厂1000MW发电机组低负荷运行的实际情况，通过控制燃烧煤种煤质、调整锅炉炉膛空气系数、提升运行人员操作水平等，可确保电机组低负荷安全稳定运行，降低发电机组运行能耗，缓解大气环境污染程度。

参考文献

- [1] 元宇鹏，李德波，陈拓. 1000MW火电机组超低排放改造的FGD性能试验分析[J]. 电力学报，2021，36(5)：421–433.
- [2] 袁明玉，张岩. 火力发电厂发电机组集控运行技术研究[J]. 电站系统工程，2021，37(3)：65–66.
- [3] 吴晔. 燃煤电厂SCR脱硝系统喷氨优化策略应用研究[J]. 工业控制计算机，2022，35(4)：19–20.
- [4] 张国喆. 1000MW超超临界燃煤发电机组低负荷运行安全分析及节能措施[J]. 青海电力，2021，40(3)：24–27，50.
- [5] 秦文学，尹琦，李玉洲，等. 燃煤电厂1000MW机组超低排放改造项目实践[J]. 科学与信息化，2020，5(18)：89–90.

作者简介

蒋琛（1982—），男，江苏无锡人，本科，助理工程师，主要从事燃煤机组运行管理工作。

L360QS/Incoloy825复合管GTAW焊接数值模拟

李 阳¹, 宁永乔², 任艳辉³, 陶科宇³, 卢静祥⁴

(1.四川石油天然气建设工程有限责任公司, 四川成都 610000; 2.中国石油西南油气田基建工程处, 四川成都 610000; 3.中国石油西南油气田川东北气矿, 四川成都 610000; 4.西南石油大学, 四川成都 610000)

[摘要] 在实际焊接工艺条件下, 基于 Simufact.Welding6.0 软件对 L360QS/ Incoloy825 双金属复合管的 GTAW 焊接过程进行数值模拟, 对数值模拟结果进行熔池截面、温度场、应力场验证。温度场结果显示, 12° 焊接坡口角度的焊缝及热影响区峰值温度低, 高温停留时间短。应力场结果显示, 12° 焊接坡口角度具有更低的等效峰值残余应力以及峰值环向残余应力。模拟结果显示: 在实际焊接工艺条件下, 采用 12° 焊接坡口角度有利于获得较小的残余应力。

[关键词] 双金属复合管; 温度场; 应力场

[中图分类号] TG404 [文献标志码] A

1 概述

管道输送的石油天然气通常会附带 H₂S、CO₂、Cl⁻ 以及硫元素, 导致管道容易发生腐蚀, 降低使用寿命, 甚至导致事故, 造成巨大的损失^[1]。双金属复合管是目前油气管道防腐蚀的一个较好的解决方案, 但双金属复合管焊接中有许多困难, 一直制约着双金属复合管的应用与发展^[2]。

结合计算机对焊接进行数值模拟计算, 能够解决焊接应力场演化、熔池凝固动态观察等复杂问题, 能够在预防焊接缺陷以及控制焊接质量等方面起到很大的作用, 对焊接工程可以起到指导作用^[3-6]。文中以 L360QS/Incoloy825 双金属复合管为研究对象, 模拟 L360QS/Incoloy825 双金属复合管的 GTAW 焊接温度场、应力场变化, 研究在实际焊接工艺下, 不同焊接坡口角度 (8° /12°) 对焊接温度场、焊后残余应力分布的影响。

2 实验材料

本次实验采用 L360QS/Incoloy825 双金属冶金管, 规格为 Φ219×(10+3) mm。采用 Φ1.0mm 的 ERNiCrMo-3 焊丝进行 GTAW 焊接, 采用 GTAW 进行焊接, 坡口类型及角度分别为 U型 12° 坡口以及 U型 8° 坡口, 焊接参数见表 1。

表1 焊接参数

编号	焊接层道	电源极性	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (cm/min)
U/12°	根焊	DC-	170 ~ 180	10 ~ 11	3.8 ~ 4.7
	填充	DC-	180 ~ 190	10 ~ 11	4.5 ~ 6.2
	盖面	DC-	180 ~ 190	10 ~ 11	5.0 ~ 7.2
U/8°	根焊	DC-	100 ~ 120	10 ~ 11	3.8 ~ 4.7
	填充	DC-	110 ~ 120	10 ~ 11	4.5 ~ 6.2
	盖面	DC-	120 ~ 130	10 ~ 11	5.0 ~ 7.2

本次数值模拟对象为 L360QS/Incoloy825 双金属复合管的焊接, 采用的焊接材料为 ERNiCrMo-3, 在材料库中对应的材料分别为 L360QS、Incoloy825 以及 Inconel625。3 种材料的热物理参数见表 2。

表2 材料热物理参数

材料类别	熔点 (℃)	泊松比	潜热 (J/kg)	屈服强度 (MPa)
L360QS	1525	0.3	233290	380
Incoloy825	1390	0.3	210200	240
Inconel625	1336	0.3	246220	414

焊接数值模拟的焊接工件为 L360QS/Incoloy825 双金属复合管, 焊接工件几何模型以及划分网格后的几何模型如图 1 所示。焊接初始温度为室温 20℃, 焊接过程中对流传热系数为 20/(m²·K), 辐射传热系数为 0.6W/(m²·K), 接触传热系数为 1000W/(m²·K), 计算采用基于收敛性的自动步长设置。

3 实验结果与讨论

3.1 温度场结果

焊接模拟结果与实际结果熔池对比如图 2 所示, 8° /12° 焊接坡口角度的焊缝处熔池宽度测量与熔池宽度模拟值的误差值分别为 3.3% 以及 0.8%。在焊接过程中, 实际测试的焊接热循环结果与模拟的焊接热循环结果的趋势具有高度相似性, 如图 3 所示。在跟踪点位置的实际焊接的峰值温度为 849℃, 模拟焊接的峰值温度为 830℃, 误差范围为 2.24%。对比焊接模拟与实际实验的降温速率, 误差为 2.21%。结果显示, 模拟热循环结果与焊接测试热循环结果具有较高的一致性。

焊接温度场结果如图 4 所示, 不同的焊接坡口角度下的温度场变化规律基本一致。在一个焊接热循环过程

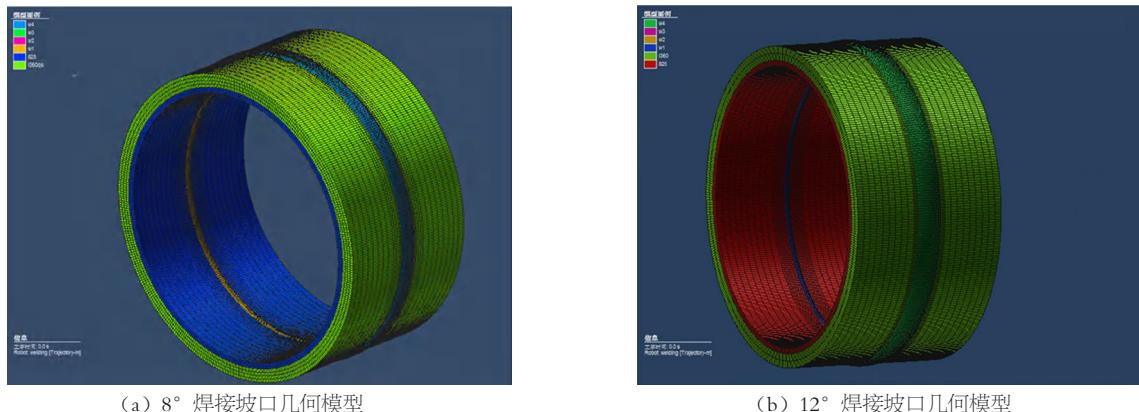


图1 焊接工件几何模型以及划分网格后的几何模型

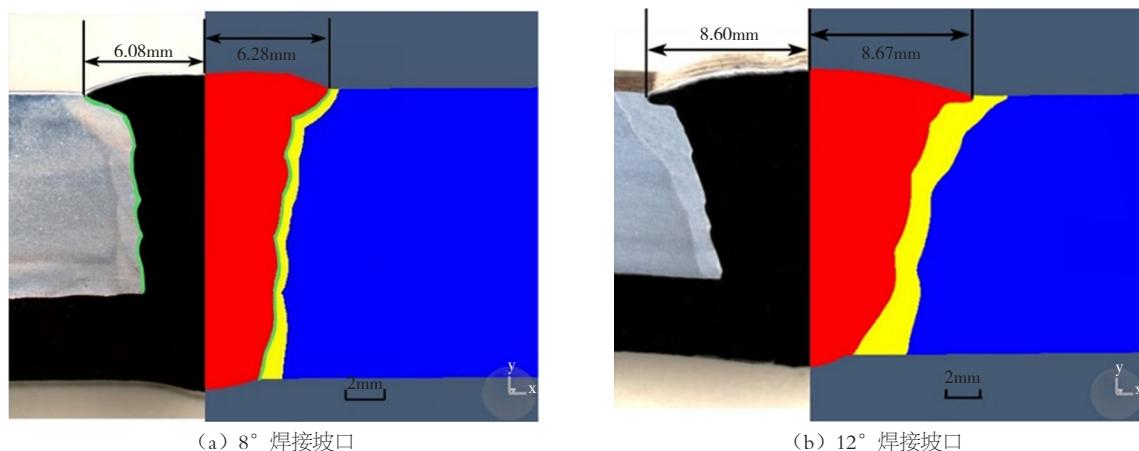


图2 焊接模拟结果与实际结果对比

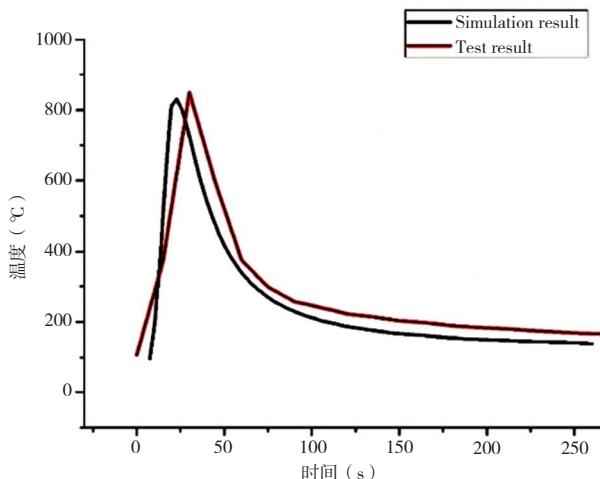


图3 模拟结果与测试结果对比

中，焊缝处均具有最高的温度，随着距热源位置距离的增加，温度逐渐降低，在任一时刻的焊接温度场均具有分布不均匀的特征。对内层焊缝处热影响区域的第一个焊接热循环结果进行跟踪，结果如图5和表3所示。通过对比温度场结果， 8° 焊接坡口在焊缝及热影响区具有较高的峰值温度（2031K/1492K），以及高温停留时间

（16.7s/10s）。

表3 一个焊接热循环内的温度场结果

焊接工件	焊缝峰值温度 (K)	焊缝高温停留 时间(s)	热影响区峰值 温度(K)	热影响区高 温停留时间(s)
8° 焊接坡口	2031	16.7	1492	10
12° 焊接坡口	1987	14.6	1445	8.4

3.2 应力场结果

对 8° 焊接坡口外表面环向应力进行验证，结果如图6所示，验证结果显示数值模拟结果与实际实验测得的结果具有很好的一致性，焊接残余应力在焊缝位置具有较高的环向残余应力，热影响区附近具有最高值，而后随着距焊缝位置距离的增加而降低。

3.2.1 不同焊接坡口角度下的焊后等效残余应力

通过对焊接过程的热 – 力耦合，对不同焊接坡口的焊接应力场进行计算，不同焊接坡口角度下（ 8° / 12° ）的焊接接头内表面及外表面的等效应力计算结果如图7和图8所示。

不同的焊接坡口角度下，内外表面焊后等效应力分别具有类似的等效应力分布趋势。内表面等效应力分布由焊

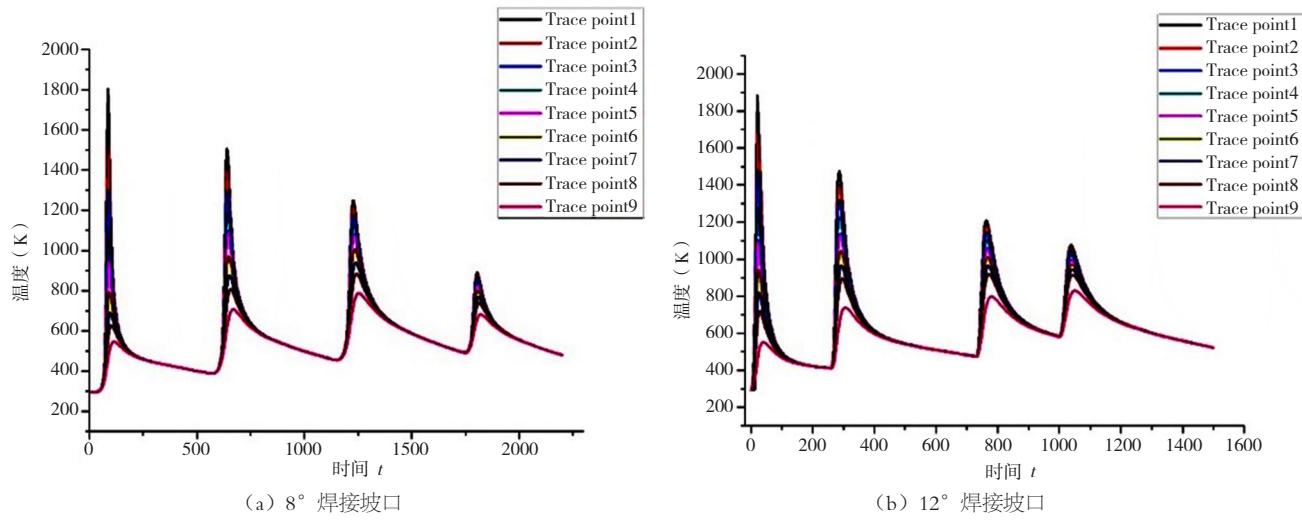


图4 不同焊接坡口跟踪点的温度场结果

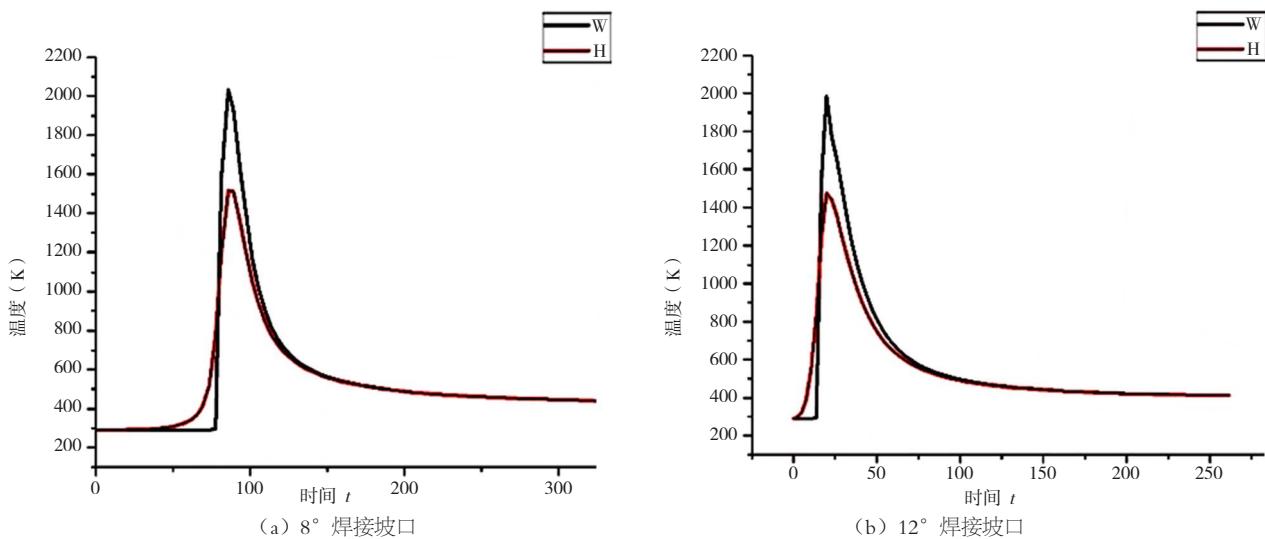


图5 焊接热循环结果

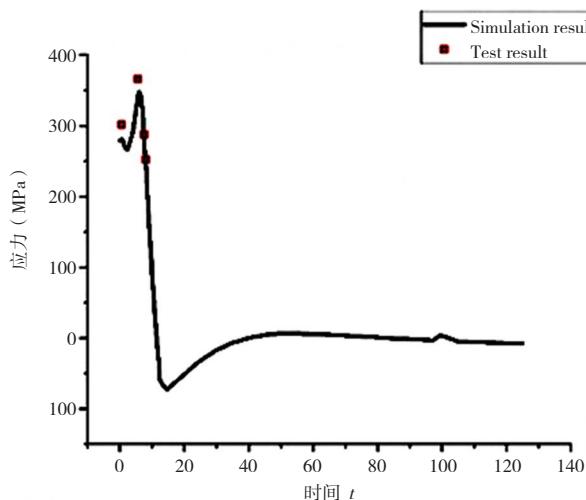
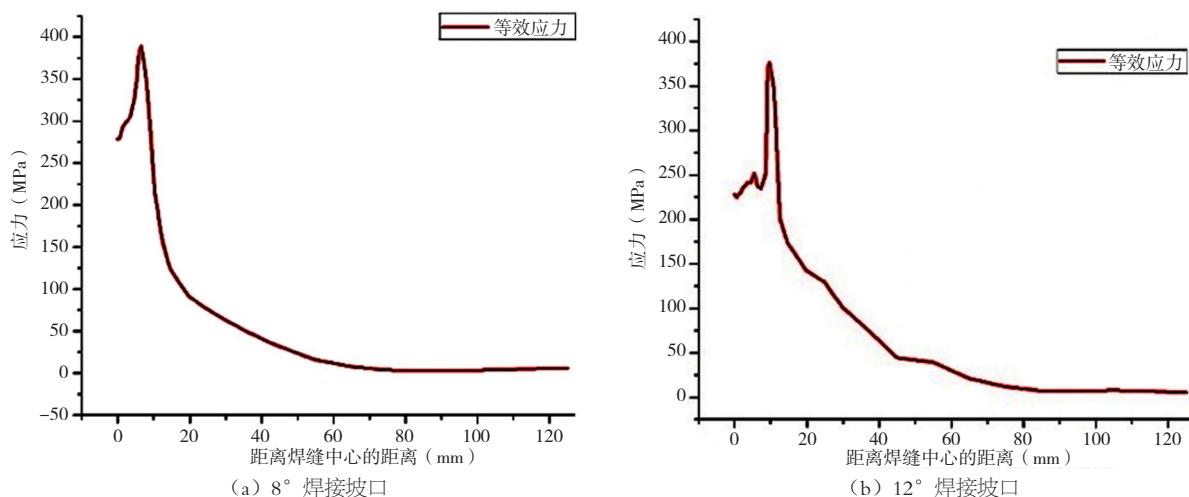
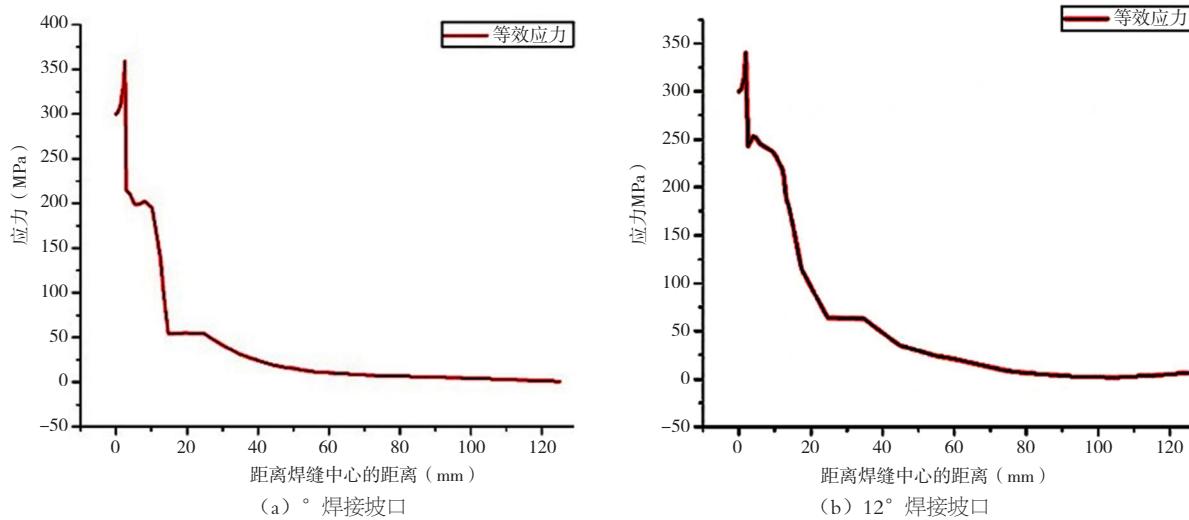


图6 环向残余应力校核结果



缝中心到焊缝与母材交界处的位置均具有增加的趋势，焊缝与母材交接处达到峰值，而后逐渐下降，在距离焊缝10mm附近等效应力在一定距离内保持稳定，而后又快速下降到趋于0。

内表面焊缝中心等效应力值及峰值等效应力值见表4，不同焊接坡口角度内表面焊缝中心等效应力基本一致，12°焊接坡口峰值等效应力更低。两种焊接坡口的外表面等效应力分布由中心到焊缝与母材交界处的位置均具有增加的趋势，在焊缝与母材交接处附近达到峰值，而后下降到趋于0。在焊缝的外表面，12°焊接坡口在焊缝具有较小的焊后等效应力值227.5MPa以及峰值等效应力值375.9MPa。

表4 等效应力结果			
焊接工件	位置	焊缝等效应力 (MPa)	峰值等效应力 (MPa)
8° 焊接坡口	内表面	299.8	358.9
	外表面	278.5	389.0
12° 焊接坡口	内表面	300.2	342.8
	外表面	227.5	375.9

图9为不同焊接坡口角度下(8° /12°)焊接接头内外表面的等效应力云图。在焊接过程中由于焊缝材料更高的屈服强度，在受热膨胀而后冷却收缩过程中会产生更大的残余应力，使得焊缝(熔合线附近)区域具有更高的焊后等效应力。

3.2.2 不同焊接坡口角度下的环向残余应力

图10、图11为不同焊接坡口角度下(8° /12°)焊接

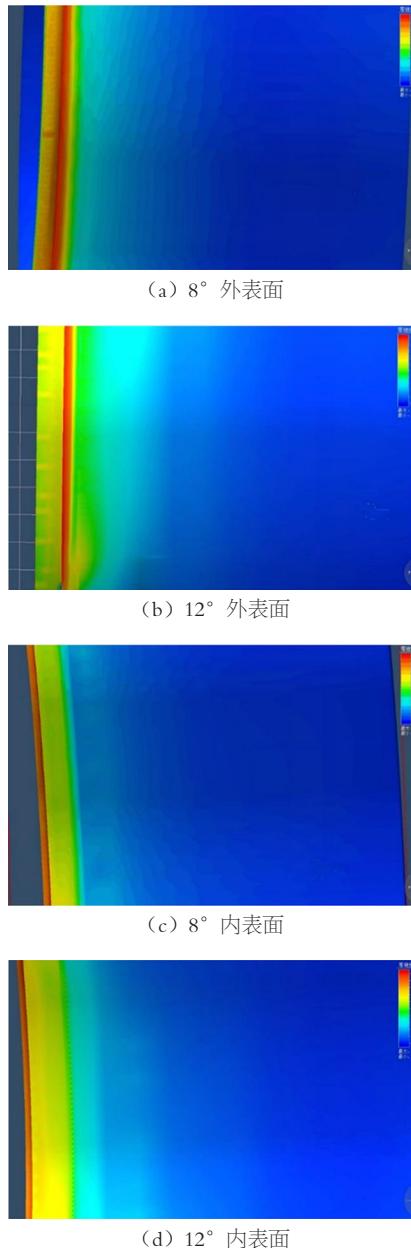


图9 焊接坡口等效应力云图

接头内外表面的等效环向残余应力结果。在不同的焊接坡口角度下，内外表面的焊后环向等效应力都分别具有类似的分布趋势。不同焊接坡口角度的内表面等效应力分布由焊缝中心到焊缝与母材交界处的位置均具有增加的趋势，而后在热影响区附近残余应力再次上升，而后下降到负值再上升到趋于0。在外表面的焊缝与母材交接处等效环向残余应力达到峰值，而后逐渐下降，随后又上升到趋于0。

不同焊接坡口角度的内表面环向应力的焊缝中心环向应力值以及峰值环向应力值见表5。12°焊接坡口下具有更低的残余应力，这是由于更低的峰值温度以及高温停留时间，使得焊缝及附近区域受热膨胀程度更小，12°焊接

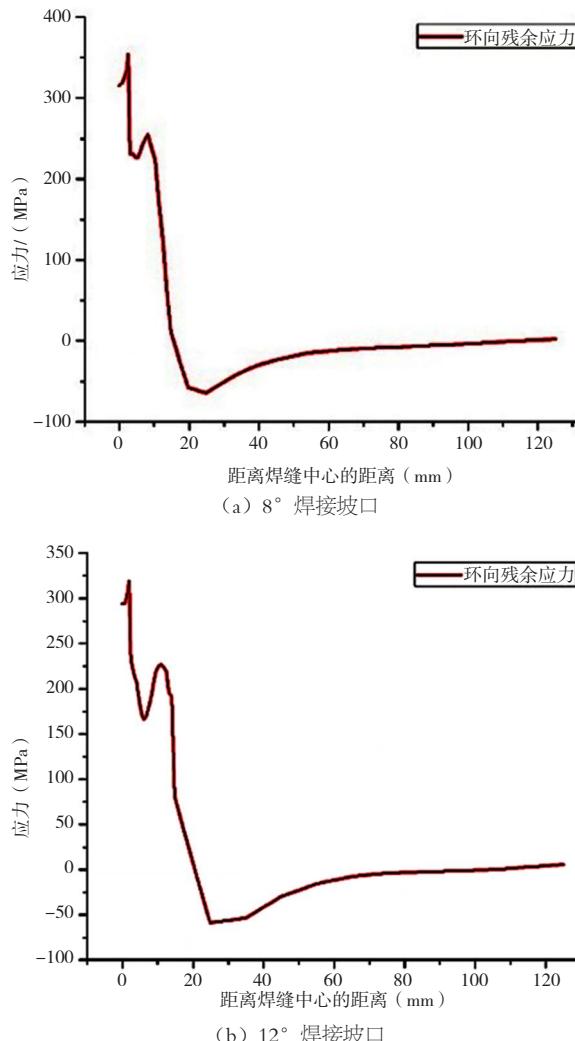


图10 不同焊接坡口内表面的环向应力

坡口的焊接接头具有更低的焊后应力。

表5 等效环向应力结果

焊接工件	测试位置	焊缝等效环向应力 (MPa)		
		峰值等效环向应力 - (MPa)	峰值等效环向应力 + (MPa)	峰值等效环向应力 (MPa)
8° 焊接坡口	内表面	315.2	-64.30	353.9
	外表面	279.1	-72.65	347.9
12° 焊接坡口	内表面	293.5	-59.96	319.1
	外表面	202.2	-97.71	341.4

4 结束语

通过焊接模拟与实际焊接过程中测量的热循环曲线的对比，焊接模拟得到的热循环曲线与实际焊接测量热循环曲线峰值温度误差为2.24%，冷却速率误差为2.21%，焊接应力测试结果与模拟结果表现出较高的一致性。

8°/12°焊接坡口角度的温度场具有相似的变化规律，表现为在一个焊接热循环过程中，焊缝处均具有最高的温度，随着距离热源位置的距离增加，温度逐渐降低，任一时刻的焊接温度场分布不均匀。12°焊接坡口角度在焊缝

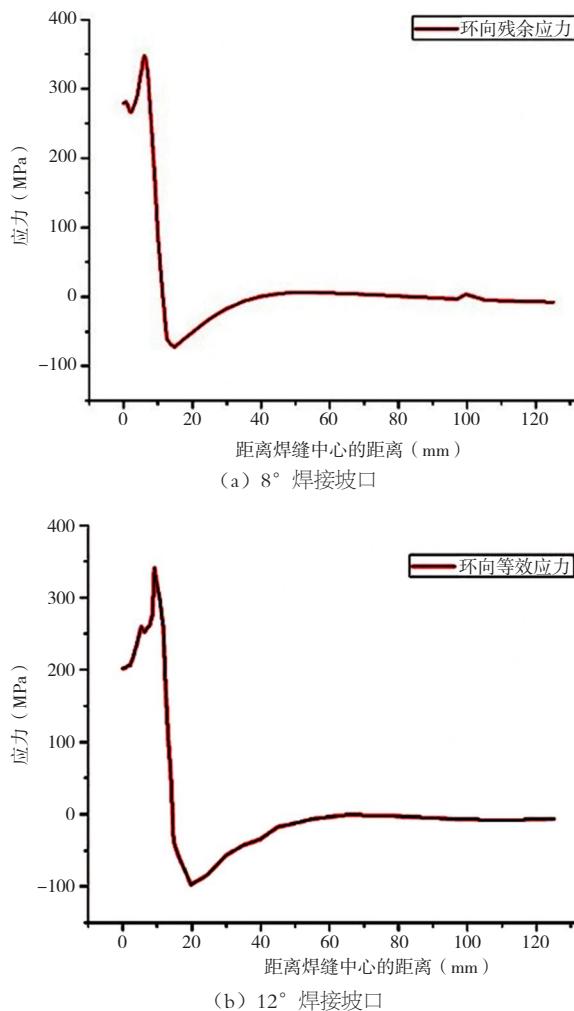


图11 不同焊接坡口外表面的环向应力

/热影响区具有更低的峰值温度(1987K/1445K)以及更短的高温停留时间(14.6s/8.4s)。

应力场模拟计算结果显示,在焊接接头的内/外表面,12°焊接坡口焊接接头具有各自较低的焊后等效应力值以及峰值等效应力值。应力场环向应力结果显示,12°焊接

坡口在焊缝及热影响区具有更低的焊后正向峰值环向应力值以及更高的焊后负向峰值环向应力值。应力场模拟结果显示:在实际焊接工艺条件下,采用12°焊接坡口角度有利于获得较小的残余应力。

参考文献

- [1] Alam M. Corrosion Protection of Carbon Steel by Pongamia glabra Oil-Based Polyetheramide Coatings[J]. International journal of electrochemical science, 2018, 13 (3): 3124–3135.
- [2] Dezhi Z, Qingsong D, Tan G. The Research Progress in the Anti-Corrosion Technology of Bimetal Pipe[J]. Oil-Gas field Surface Engineering, 2008, 27 (12): 64–65.
- [3] 张淮. 不锈钢复合焊管焊接质量检测方法及标准研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- [4] 王莅, 吴志生, 李岩, 等. 坡口形式对304/Q345复合管焊接接头残余应力影响的数值模拟研究[J]. 焊接技术, 2020, 49 (3): 5–10.
- [5] 罗德通. X80级管线钢单丝多层焊接温度场的数值模拟[D]. 北京: 中国石油大学(华东), 2014.
- [6] Abid, M, Qarni, M J. Numerical investigation of residual stresses and distortions due to multi-pass welding in a pipe-flange joint[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2010, 224 (E4): 253–267.

作者简介

李阳(1987—),男,四川泸州人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为管道焊接技术。

一种基于保持架的偏心锁紧机构的设计与实现

李 婷

(长沙职业技术学院, 湖南长沙 410217)

[摘要]文章基于现有的偏心锁紧机构, 改进设计了一种基于保持架的偏心锁紧机构, 实现了小载荷情况下零件在光轴任意位置上的快速定位和锁紧, 并在花炮机械切筒机上进行了验证。

[关键词]切筒机; 夹紧机构; 偏心锁紧; 结构设计

[中图分类号] TH87 **[文献标志码]** A

花炮行业作为浏阳地区的特色产业, 近年来得到了快速发展, 花炮产业已经向集约化、自动化、智能化的方向发展^[1-2], 传统的切筒机逐渐被自动化、智能化设备替代, 但是仍然有不少自动化水平较低的切筒机在切割不同型号的纸筒时需要更换不同的刀具安装轴, 以实现不同尺寸纸筒切筒刀具的定位和安装, 这就大大降低了生产效率, 增加了生产成本。为此, 文中设计了一种基于光轴的能快速实现零件轴向固定的偏心锁紧机构, 并针对现有设计中存在的问题进行改进, 最终设计出一种新型基于保持架的偏心锁紧机构, 并在切筒机上验证了其有效性。

1 偏心夹紧机构原理

偏心夹紧机构是利用旋转中心与几何中心的偏移实现对工件夹紧的。常见的偏心夹紧机构如图1所示, C点为偏心夹紧机构的几何中心, O点是偏心夹紧机构的回转中心。偏心夹紧机构的半径为R, OC之间的距离e为偏心距。当偏心夹紧机构在外力的作用下绕回转轴沿顺时针旋转时, 相当于图示中的阴影部分作为一弧形楔楔入以R-e为半径的圆柱体和工件被夹表面之间, 实现工件夹紧^[3]。

偏心夹紧机构利用偏心轮回转的自锁性来实现其功能, 结构简单, 制造容易, 夹紧迅速, 操作方便, 在夹具中有广泛的应用, 常用于夹紧力不大的场合。

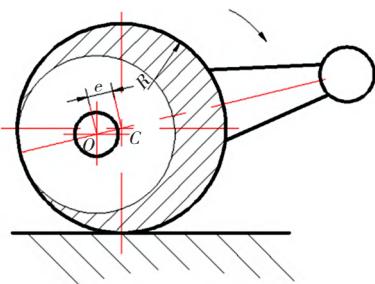


图1 偏心夹紧机构原理

2 现有偏心锁紧机构

现有偏心锁紧机构主要由套座、圆柱滚子、C型弹力环

组成, 如图2所示。当套座在转矩M的作用下顺时针旋转, 圆柱滚子沿套座内偏心槽移动, 压迫C型弹力环, 实现光轴夹紧。在偏心槽内侧设计有圆弧卡槽, 当圆柱滚子落入圆弧卡槽时, 偏心锁紧机构夹紧过程结束。当反向给套座施加转矩时, 偏心锁紧机构放松。具体的结构设计如图3所示^[4]。

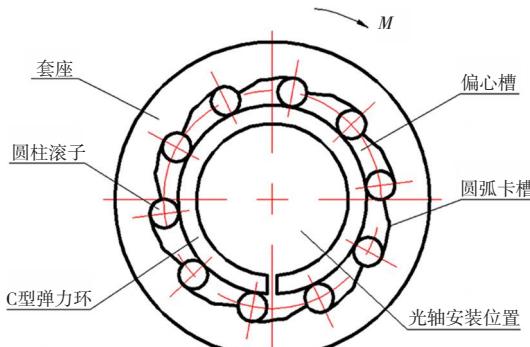


图2 偏心锁紧机构示意图

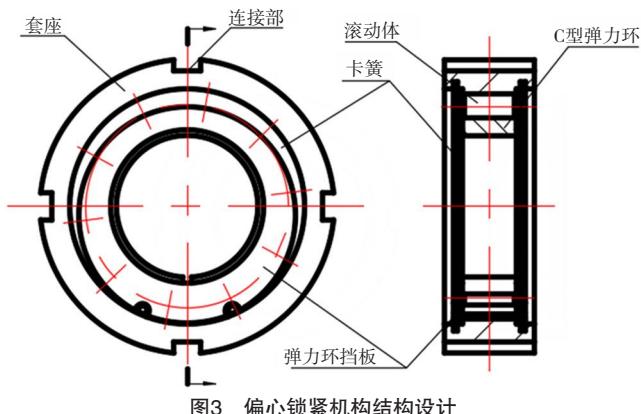


图3 偏心锁紧机构结构设计

锁紧机构采用具有较高的疲劳强度和耐磨性的高碳铬轴承钢GCr15加工套座和滚动体。GCr15经过淬火加低温回火后具有较高的硬度、均匀的组织、良好的耐磨性、高的接触疲劳性能。弹力环采用T9A弹簧钢。弹力环与滚动体和光轴接触的两侧对硬度和耐磨性有要求, 需进

行淬火回火处理。C型弹力环采用ABS塑料注塑而成，卡簧和弹力环挡板采用常见的65Mn弹簧钢，表面氧化处理。

3 现有偏心锁紧机构试制中存在的问题及原因分析

(1) C型弹力环安装不方便。C型弹力环以压缩状态进行安装，目的在于增加在夹紧过程中滚子的摩擦力，保证夹紧的可靠性，正是由于套作与C型弹力环之间无间隙的设计，给C型弹力环安装带来困难。

(2) 夹紧过程中滚子中心线会发生偏转，导致工作过程不顺畅。在现有设计中，滚子无周向定位结构，仅由偏心槽进行定位，因此在夹紧或放松时，滚子的轴线不能确保随时与夹紧机构中心线平行，会发生一定偏转，从而导致工作过程不顺畅。

因此需要通过改进设计，进一步限制滚子的中心线，并使得C型弹力环安装更为方便。

4 一种基于保持架的偏心锁紧机构改进设计

基于上述存在的问题，通过增加保持架这一结构，实现对滚子中心线的限定，并配合保持架，进一步优化圆弧卡槽设计，实现滚子在偏心槽位置的可调，留出安装空间，以此解决C型弹力环安装不方便的问题。改进的基于保持架的偏心锁紧机构如图4所示，由套座、保持架、C型弹力环、圆柱滚子、弹簧、弹力环挡板和卡簧组成。

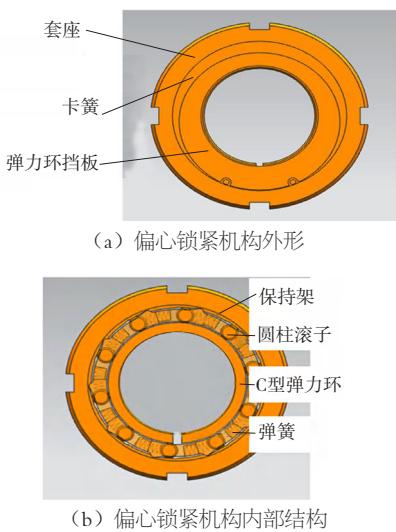


图4 基于保持架的偏心锁紧机构设计

保持架的结构如图5所示。保持架采用ABS塑料通过注塑方式制成，滚子通过弹簧在保持架上限位。

当安装C型弹力环时，通过顺时针旋转C型弹力环，此时滚子会因为受到挤压而向顺时针方向退到更宽的径向空间，使得C型弹力环安装更容易。图6为基于保持架的

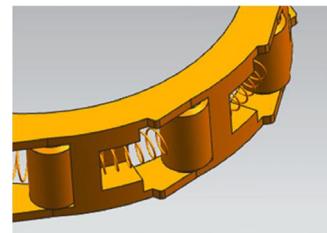


图5 保持架结构设计

偏心锁紧机构的两种工作状态，机构处于夹紧状态时滚子落入圆弧卡槽中。

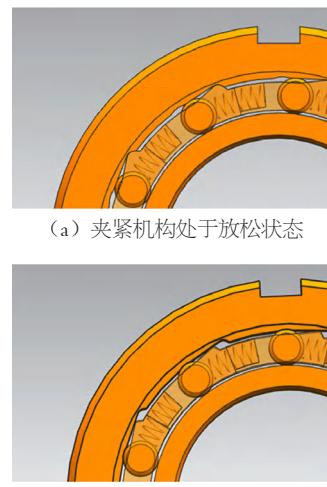


图6 基于保持架的偏心锁紧机构工作状态

5 基于保持架的偏心锁紧机构的实现与应用

本设计的一个应用案例是在花炮切筒机中，将偏心锁紧机构分别安装在盘刀两侧，通过定位装置，将盘刀进行定位、锁紧。偏心锁紧机构零件及装配情况如图7所示。



图7 基于保持架的偏心锁紧机构实物

6 结语

本文针对现有偏心锁紧机构存在的不足，对偏心锁紧机构的结构进行了改进设计，通过增加保持架和相应结构，解决了现有锁紧机构C型弹力环安装不方便和锁紧机构工作过程不顺畅的问题，改进后的基于保持架的偏心锁紧机构实现了光轴上盘刀的任意位置固定，在花炮切筒机中得到了有效应用。

单曲率变厚度蒙皮数控铣切工艺研究

丁婷婷, 季熠杰

(上海飞机制造有限公司, 上海 200120)

[摘要] 针对传统的化铣工艺在蒙皮制造过程存在的协调关系复杂、生产周期长和污染严重等问题, 以单曲率变厚度蒙皮为例, 尝试在五坐标加工中心, 以数控铣切的方式加工出蒙皮的厚度下陷。文中介绍了该蒙皮的成形和数控铣切工艺流程, 对制造环节中的成形和接刀差问题进行了优化, 体现出机加工艺生产蒙皮的优势。

[关键词] 化铣; 单曲率变厚度蒙皮; 滚弯成形; 数控铣切

[中图分类号] V262.3⁺³ **[文献标志码]** A

1 概述

蒙皮是构成飞机外形的主要部分, 形式多样, 外形复杂, 按其外形特点分为单曲度、多曲度和复杂形状蒙皮, 成形方式多样, 包括拉伸、滚弯、压弯、落压等。单曲度蒙皮一般采用压弯和滚弯方法成形, 也可以用拉伸方式成形, 主要应用在飞机机身和机翼上。为起到减重的作用, 设计蒙皮时需要在受力较小的部位局部减厚, 因而蒙皮往往是不等厚的。

传统的单曲率变厚度蒙皮的制造流程为下料→成形→钻协调孔和粗切轮廓→化铣→精切轮廓, 存在以下缺点。

(1) 协调关系复杂。成形完成后需要钻制各类定位孔, 以保证零件成形、化铣、精切轮廓和钻孔的精度, 整个过程需要两次以上定位, 以及化铣样板刻线本身也存在误差, 无法达到精确成形。

(2) 生产周期较长。目前国内冷作钣金工艺和化铣工艺由不同工位完成, 蒙皮制造路线复杂, 需要车间之间来回周转协调; 且化铣工艺流程工序较多, 清洗→喷保护胶→刻形→绑扎→入槽化铣。对于复杂厚度的蒙皮, 需要多次重复刻形和下槽流程。化铣完成之后再进行精切割轮廓, 过程冗长。使得生产周期延长, 来回周转也不利于蒙皮表

面质量。

(3) 化铣工艺存在耗电大、环境污染、铝回收困难等问题。

五坐标加工中心的出现, 实现了复杂曲面的加工。本文以某单曲率变厚度蒙皮为例, 不采用化铣工艺, 而是尝试以数控铣切形式加工出零件的各曲面下陷特征。

2 蒙皮加工过程

以某机型单曲率变厚度蒙皮为例, 如图1所示, 该蒙皮厚度分布为6mm, 4.5mm, 3.6mm, 3mm, 材料为铝锂合金, 可加工性良好。蒙皮的制造流程为: 滚弯前的准备工作→滚弯成型→定位孔铰至理论→数控铣切(蒙皮下陷、内外形、钻孔)→校形。

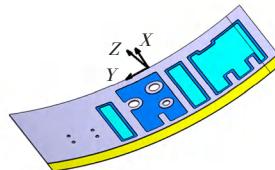


图1 单曲率变厚度蒙皮

滚弯前准备工作主要是毛料以平板形式吸附在真空平台上, 数控铣切出直边和定位孔(孔位与铣切工装定位孔

参考文献

- [1] 黄康. 浏阳加大力度推动花炮生产机械化[J]. 花炮科技与市场, 2016 (4) : 23.
- [2] 贺俊杰. 花炮生产机械化的影响因素及推进策略[J]. 花炮科技与市场, 2018 (1) : 39-40.
- [3] 田丰. 夹具CAD系统中偏心轮夹紧机构的夹紧力计算[J]. 机械制造, 2002, 40 (4) : 40-42.
- [4] 李婷. 一种快速实现零件轴向固定的偏心锁紧机构研

究[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50 (6) : 88-90.

基金项目

长沙职业技术学院科技研究项目(CZKJ18ZD01); 湖南省教育厅科学项目(19C0234)

作者简介

李婷(1986—), 女, 辽宁海城人, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为机械结构设计、增材制造技术。

协调)。铣切出直边的目的是保证滚弯时毛料进给时始终处于对正状态,如图2所示,滚弯弧度由切面外形样板保证,间隙不超过0.5mm。



图2 10m数控滚弯机工作示意

由于滚弯成形会使已铣定位孔变形至椭圆,所以在平板铣孔时应先铣初孔,完成滚弯成形后再将孔铰至理论值。

3 编程方案设计与程序仿真

蒙皮的厚度尺寸、孔位及外形轮廓是需要保证的关键特征。按照厚度和外形特征,需要逐层加工,各层厚度依靠测厚仪保证。为保证切削效率和切削质量,分为粗加工和精加工两步。

3.1 数控铣切粗精加工编程方案设计

首先对下陷区域进行粗加工。为提升加工效率,可以选用较大直径的铣刀,粗加工时可暂不考虑表面质量和接刀差的问题。令刀路沿X方向(参考图1中的X方向),刀路简明,加工效率较高。

精加工时需要兼顾零件厚度尺寸要求和加工区域的表面质量,因此应采用大转速、小进给、小切深的铣切参数。

零件整体弧面单曲率变化,根据此特征在刀路选择上可以进行优化,以提升表面质量,即保证加工后满足表面粗糙度Ra1.6的要求,且无明显接刀差。令刀路方向与零件曲率变化方向一致,能够从理论上避免接刀差的问题。采用较大直径刀具会造成铣切范围根部残留较多,清根工作量大,因此采用小直径刀具。

3.2 铣切夹具与刀具参数

逐层加工厚度、铣切轮廓并钻孔,要求蒙皮具有较好的装夹状态。真空吸附类夹具能确保蒙皮与夹具处于良好贴合状态,能够避免铣切后的厚度不均或厚度超差的情况,同时采用真空吸附夹具时能够稳定铣切,避免振颤,有利于铣切区域表面质量的提升。

粗加工主要考虑加工效率,精加工关注加工面的表面质量。粗精加工均选用硬质合金立铣刀,能够满足铝锂合金的高速铣削。铣切参数见表1。

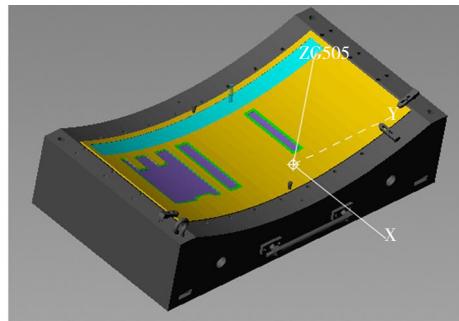


图3 VERICUT程序仿真

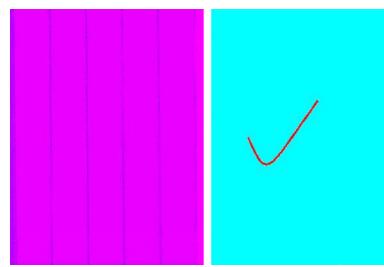
表1 粗精加工铣切参数

参数	粗加工	精加工
	刀具 Φ20R1(刃数3)	Φ100R0.5(刃数3)
每齿切削量(mm)	0.1~0.12	0.08~0.1
转速(r/min)	12000	8000
进给(mm/min)	4000	2000
切削宽度(mm)	16	8
切削深度(mm)	≤1	≤0.5

3.3 程序仿真分析

为保证程序的正确性,防止残余或过切出现,同时避免加工中的碰撞,在加工之前需要对程序进行仿真。用VERICUT软件进行仿真时,需要导入机床数模及控制系统、工装数模、零件和毛坯数模以及程序,仿真结束后可与理论数模进行对比分析。VERICUT程序仿真示意如图3所示。

同时也可验证刀路沿曲率变化方向是否更利于表面质量,通过VERICUT软件仿真后分析进行初步判断。图4为不同轨迹方向下,VERICUT软件中零件表面质量模拟的结果,刀路沿X方向变化时,能够看见明显的接刀差痕迹。可见,令刀路沿曲率方向变化,从理论上避免了接刀差的产生。



(a) 刀路沿X方向 (b) 刀路沿曲率变化方向

图4 不同刀路VERICUT中零件表面质量模拟示意

4 蒙皮的装夹切

影响蒙皮表面质量和加工精度的因素较多,例如,真空吸附情况不佳,蒙皮与工装之间存在间隙会导致铣切后的厚度超差;边缘装夹不好会导致铣切外形轮廓过程中的振颤;刀路设计不合理会导致接刀差,严重影响表面质

量等。此外，由于蒙皮较厚，刚性较大，过度滚弯曲率偏大或者滚弯不到位曲率偏小、中间鼓包或者波纹度不能满足成形要求等，都有可能导致装夹时蒙皮与工装之间存在间隙，造成铣切厚度不均乃至超差的情况，因此要确保蒙皮成形后满足外形要求。

铣切工装为真空吸附实体夹具，依靠两端定位销与成形后毛料上所铰孔配合定位，真空吸附后压紧毛料周围压板，完成装夹。装夹完成后必须检查吸附状态，防止蒙皮与工装之间存在间隙。

零件数控加工在五坐标加工中心上进行，五坐标加工中心多轴联动，能适应不同角度变化，满足曲面蒙皮类零件的加工要求，同时可以完成较高精度要求的孔位钻制工作。

加工过程中采用超声测厚仪进行动态测量，确保加工完成后满足厚度公差要求。实际加工过程见图5所示。



图5 五坐标加工中心铣切蒙皮过程

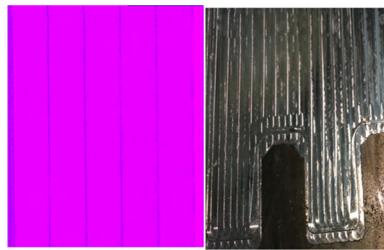
蒙皮机加完成后机加区域表面光滑，无明显触感，用粗糙度对照块检验机加区域表面质量，满足表面粗糙度Ra1.6的要求。用测厚仪对各个下陷区域多点测量，厚度偏差范围在 $-0.05 \sim +0.05\text{mm}$ ，满足厚度公差要求。同时关节臂测量机测量孔位和外形轮廓，满足精度要求。铣切加工蒙皮效果如图6所示。



图6 铣切加工蒙皮效果

粗加工时的刀路为X方向，通过实际加工结果与程序仿真结果进行对比，零件表面接刀差较为明显，见图7所示。精加工时刀路方向与曲率变化方向一致，已从理论上避免接刀差的问题，结合图4和图6，零件表面质量良好，

可见通过优化刀路使加工区域的表面质量得到了提升。



(a) 刀路沿X方向 (b) 实际加工结果

图7 优化刀路加工区域表面质量

5 结束语

以尺寸约为 $1500\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的蒙皮为例，蒙皮到达阳极化和喷漆等表面处理工作之前的状态，采用化铣工艺制造所需时间约 $4 \sim 5\text{d}$ ，而采用机加工工艺则只需要 2d 。采用机加工工艺只进行一次定位，准确加工出零件的下陷和孔等特征，可以达到精准制造。同时，采用机加工工艺也不存在污染问题。综上，以机加工工艺替代化铣工艺在生产蒙皮时存在较大优势。对于单曲率的蒙皮在加工时综合考虑加工效率和关键质量特性要求，合理安排刀路，选择适合的铣切参数，能够达到较优的表面质量。

采用真空类铣切工装定位装夹可以实现蒙皮的精确制造，但实体工装制造存在周期长、成本较高的问题。目前柔性装夹技术在国内已经能够成熟应用，可以实现蒙皮的精确钻孔和切边工作，镜像铣切技术可以完全替代化铣可手工切割，在无需实体工装的前提下大大简化变厚度蒙皮的制造流程，将会成为蒙皮高效、精确、绿色制造技术的发展趋势。

参考文献

- [1] 丁党平, 张士华. 成形蒙皮的数控加工[J]. 装备制造, 2011, 11 (1) : 41-43.
- [2] 张志国, 徐学民. MMS: 新型绿色蒙皮加工系统[J]. 航空制造技术, 2010 (19) : 83-86.
- [3] 张新娟, 段雪峰. 飞机蒙皮零件的柔性装夹及数控铣切技术[J]. 航空制造技术, 2015 (S1) : 42-44.
- [4] 张彤. 飞机蒙皮厚度精确加工的最新技术——以数铣替代化铣的绿色加工工艺[J]. 教练机, 2011 (4) : 26-30.
- [5] 阳波, 赖丽珍, 陈金平. 飞机研制阶段变厚度单曲率蒙皮快速成型法[J]. 智能制造, 2015 (8) : 41-42.

作者简介

丁婷婷(1989—), 陕西渭南人, 硕士研究生, 工艺师, 主要研究方向为机加工艺。

高原地区制氧装置的研究

李宇杰，贺瑞鹏，修 凯，乔宁宁，王文瑶，吴冰倩

(中船(邯郸)派瑞氢能科技有限公司, 河北邯郸 056010)

[摘要]为解决高原地区供氧所需氧源问题, 研究和开发一台适用于高原地区的低功耗、低成本、长寿命和强稳定性制氧装置势在必行。文章模拟高原地区气候条件, 搭建一套 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的制氧装置, 研究冲洗和均压方式、冲洗管径、吸附时间对制氧装置所生产氧气浓度和产量的影响, 同时测定制氧装置在最佳条件下的稳定性。结果显示高原制氧装置在冲洗方式为常冲洗、均压方式为上均压、冲洗管径为 10mm 、吸附时间为 36s 时制氧效果最佳且稳定性较好, 此时氧气浓度和产量分别为 $(91.34 \pm 0.2)\%$ 和 $(32.5 \pm 0.3)\text{m}^3/\text{h}$ 。

[关键词]氧气; 高原; 变压吸附; 低功耗; 浓度

[中图分类号]TQ116.14 **[文献标志码]**A

氧气无色无味, 以无形的形态存在于人类周围, 是人类生产、生活中不可或缺的一种气体^[1]。平原地区, 大气压高, 氧气充足, 可满足人类日常生活的各种需要。海拔升高, 大气压降低, 空气密度减小, 氧气含量减小。据报道, 海拔每升高 1km , 大气压和空气密度相应地分别降低 11.5% 和 9% 。因此, 人们长期处于缺氧环境的高原地区, 虽然不会危及生命, 但长期下去会给人的生理机能造成不良影响^[2-3]。随着生活和工作需要, 更多人前往高原地区旅游和工作, 会出现头痛、恶心和注意力下降等高原反应。因此, 为改善高原地区居民的生存环境和带动高原地区的经济, 国家和高原地区政府大力倡导“氧进家”之民心、民生工程^[4-5]。实现供氧的首要以及关键问题是氧源问题, 制氧方式有分离空气法、化学试剂法和电解水法等, 目前较为成熟和利用最多的方式是分离空气法, 其进一步可分为深冷法^[4]、变压吸附法和膜分离法^[6]。

变压吸附法是利用氮气和氧气在分子筛上吸附性能存在差异的原理, 高压下分子筛对氮气进行吸附, 得到富氧气体, 低压下, 氮气从分子筛上解析, 分子筛获得再生^[7]。目前变压吸附制氧装置因其方便快捷、投资小、自动化程度高、可随开随用的特点被人们所喜欢^[8], 但此制氧装置在平原地区应用更加广泛, 在高原地区应用较少。将适用于平原地区的制氧装置应用于高原地区, 制氧装置能耗高, 寿命低, 故障率高。因此, 针对高原地区的气候特征, 研究和开发一台适用于高原地区的制氧装置迫在眉睫。真空变压吸附制氧装置是通过低压吸附真空解析分离空气制取氧气的工艺, 由于其吸附压力低, 整个系统能耗低, 运行稳定性好, 关键材料和零部件的使用寿命均得以延长, 再利用高原地区较低的大气压进行自然真空解析, 进一步节

约能耗, 所以与变压吸附制氧相比其综合成本低, 使用寿命长, 运行稳定, 是将来高原地区中大规模制氧的一个发展方向。

文章拟搭建一套 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的可模拟高原地区的制氧装置, 研究冲洗方式、均压方式、冲洗管径、吸附时间对制氧装置所生产氧气浓度和产量的影响, 同时测定制氧装置在最佳条件下的稳定性, 为开发适用于高原地区的制氧装置奠定基础。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验吸附塔中所使用的材料共有3种, 见表1。

表1 实验材料

名称	规格 (mm)
13X分子筛	0.4 ~ 0.8
Li-X分子筛	0.4 ~ 0.8
瓷球	2.0 ~ 3.0

1.2 实验设备及仪器

实验装置由动设备、静设备和管道阀门组成, 见表2。

表2 实验设备

名称	规格型号	数量 (台)
离心压缩机	MT-6N-1.35	1
真空泵	V0100	2
氧压机	VWY-50/1-10	1
进气缓冲罐	1.5m^3	1
空气缓冲罐	2.5m^3	1
吸附塔	0.5m^3	2
氧气缓冲罐	4m^3	1
真空罐	4m^3	1
氧气储罐	8m^3	1
质量流量计	MF5619	1
氧气分析仪	BEE-M-310	1

1.3 装置组成

为研发适合于高原地区的制氧装置，设计与搭建模拟高原地区环境的制氧装置，如图1所示。装置通过管道阀门依次连接进气缓冲罐、离心压缩机、空气缓冲罐、吸附塔、真空泵、真空罐、氧气缓冲罐、氧压机和氧气储罐，采用PLC控制系统控制整个装置中阀门的开闭以及开度，实现氧气连续输出。在吸附塔出口和氧气储罐出口分别安装氧分析仪和质量流量计，实时监测装置的氧气浓度和氧气产量。此外，为模拟高原地区气压低、氧气稀薄的气候特征，增加进气缓冲罐和真空罐。具体控制方式如下：将进气缓冲罐入口手动阀和真空罐手动补气阀打开至某开度，设定进气缓冲罐压力和真空罐压力为某海拔高度处压力，在PLC控制程序中建立进气缓冲罐入口调节阀和真空罐自动补气阀与压力的反馈调节机制，当进气缓冲罐和真空罐压力高于设定值，降低调节阀开度和关闭补气阀，减少进气量，当进气缓冲罐和真空罐压力低于设定值，增大调节阀开度和打开补气阀，增大进气量，从而模拟高原地区进气与解析条件。

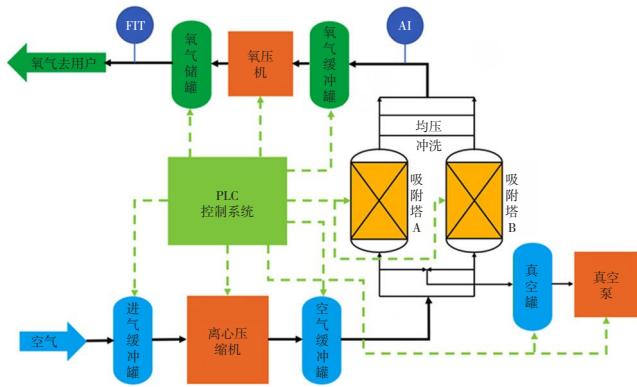


图1 模拟高原地区制氧装置示意

1.4 实验步骤

(1) 检查离心压缩机冷却系统水位是否低于刻度值，如低于刻度值，对其进行补水后即可开机；反之，则正常开机。

(2) 启动离心压缩机，待离心压缩机稳定运行15min后，启动PLC控制系统，打开吸附塔进气阀门和气源阀门，同时启动真空泵。

(3) 通过氧分析仪观察氧气浓度，待氧气浓度高于90%以上时，启动氧压机，打开氧气储罐入口阀，将氧气储罐压力增压到0.2MPa，记录其所需时间，计算氧气产量，多次测量取平均值。

1.5 实验内容

平原环境下模拟高原地区制氧实验，研究内容如下。

- (1) 冲洗方式和均压方式对氧气浓度和产量的影响。
- (2) 冲洗管径对氧气浓度和产量的影响。
- (3) 吸附时间对氧气浓度和产量的影响。
- (4) 稳定性测试。

2 结果与讨论

2.1 冲洗方式和均压方式对氧气浓度和产量的影响

冲洗方式和均压方式是影响高原制氧的关键因素。冲洗方式分为间断冲洗和常冲洗。

本实验通过PLC控制系统控制冲洗管阀门为间断开启和常开启两种状态来实现冲洗方式的切换。结果显示，装置采用间断冲洗方式制得的氧气浓度较低，氧气产量较高，波动性均较大，氧气浓度和产量分别为 $(88.36 \pm 0.8)\%$ 和 $(32.8 \pm 1.4) \text{ m}^3/\text{h}$ ；而采用常冲洗方式制得的氧气浓度较高，氧气产量较小，波动性较小，氧气浓度和产量分别为 $(91.34 \pm 0.2)\%$ 和 $(32.5 \pm 0.3) \text{ m}^3/\text{h}$ 。这是由于常冲洗方式冲洗时间长，冲洗气量大，能够彻底解析吸附剂中杂质气体，提高吸附剂的吸附性能，获得高浓度的氧气。同时，这也会浪费一部分氧气，导致氧气产量降低。综合制氧装置对氧气浓度不低于90%和稳定性的要求，故高原制氧装置的冲洗方式宜选择常冲洗。

均压方式分为上均压、下均压和上下均压。本实验主要考察了上均压和上下均压两种均压方式对高原制氧装置的影响。结果显示，两种均压方式下的氧气浓度基本相当，且均在90%以上；氧气产量却相差较大，采用上均压方式的氧气产量高于上下均压方式。这是由于下均压会造成吸附完成的塔中富氮气体进入即将进行吸附的塔中，进而降低吸附塔的气体处理量，氧气产量降低。综合得出，高原制氧装置适合采用上均压的均压方式。

2.2 冲洗管径对氧气浓度和产量的影响

除冲洗方式对氧气浓度和产量有影响外，冲洗管径也对氧气浓度和产量有较大影响。因此，为高原制氧装置匹配合适的冲洗管径具有重要意义。高原制氧实验装置分别使用内径为4mm、6mm、8mm、10mm、12mm和14mm的6种尺寸管径作为冲洗管，测定出口氧气浓度和产量，氧气浓度和产量随冲洗管径的变化曲线如图2所示。

由图2可知，氧气浓度随着冲洗管径尺寸增大而增大，氧气产量随着冲洗管径尺寸增大而降低。冲洗管径越小，单位时间内的冲洗气量越少，吸附剂解析越不彻底，从而导致氧气浓度较低，因冲洗管径小，用氧气较少，故氧气产量增大；反之，则氧气浓度逐渐增大，氧气产量减小。当冲洗管径为8mm时，氧气浓度为 $(90.2 \pm 0.4)\%$ ，氧气

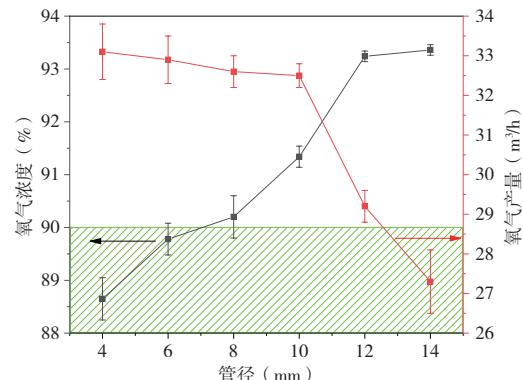


图2 氧气浓度和产量随冲洗管径的变化曲线

浓度波动低于90%，因此管径偏小。当冲洗管径 $\geq 10\text{mm}$ 时，氧气浓度波动均高于90%。为遵循氧气浓度达到要求的情况下氧气产量最大的原则，故本高原制氧装置的最佳冲洗管径尺寸为10mm，此时氧气浓度为 $(91.34\pm 0.2)\%$ ，产量高达 $(32.5\pm 0.3)\text{m}^3/\text{h}$ 。

2.3 吸附时间对氧气浓度和产量的影响

高原制氧装置是通过吸附剂对氮气与氧气的吸附速率差的原理来制取氧气的，而速率差是通过控制吸附时间来实现。吸附时间过短，吸附剂有效利用率低，氧气产量较小，解析时间短，解析不干净，导致氧气浓度下降；吸附时间过长，吸附剂对氮气和氧气的吸附速率差缩小，氮气穿透床层，氧气浓度降低。因此，研究吸附时间对高原制氧装置的影响十分必要。吸附时间由24s间隔1s逐渐增大为40s时，测得氧气浓度和产量如图3所示。

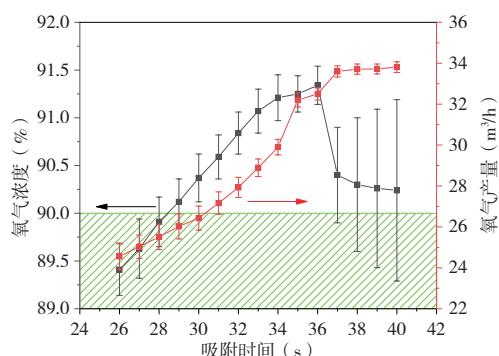


图3 氧气浓度和产量随吸附时间的变化曲线

由图3可知，随着吸附时间的延长，氧气浓度先升高后降低，氧气产量逐渐增大且在37s后基本保持不变。36s时，氧气浓度最大，且氧气浓度在升高阶段波动较小，降低阶段波动较大，这是由于吸附时间短，吸附压力较低，氮氧分离较差，氧气浓度较低；吸附时间长，吸附剂被穿透，氧气浓度下降。综合考虑氧气浓度和产量，高原制氧装置最佳吸附时间为36s，此时氧气浓度和产量分别为

$(91.34\pm 0.2)\%$ 和 $(32.5\pm 0.3)\text{m}^3/\text{h}$ 。

2.4 稳定性测试

评价高原制氧装置的性能指标除氧气浓度和产量外，稳定性也是其重要评价指标。采用上述实验的最优条件(冲洗和均压方式分别选择常冲洗和上均压，冲洗管径选择10mm，吸附时间选择36s)对高原制氧装置进行24h的稳定性测试，测得氧气浓度和产量随吸附时间的变化曲线如图4所示。

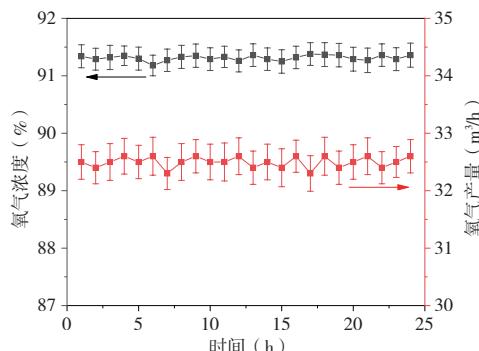


图4 连续运行24h氧气浓度和产量随吸附时间的变化曲线

由图4可知，高原制氧装置连续运行24h，氧气浓度和产量分别维持在91.3%和 32.5m^3 ，波动范围较小，进一步表明该装置具有较好的稳定性，可满足高原地区供氧的需求。

3 结论

模拟高原地区气候条件，搭建一套 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的制氧装置，研究冲洗方式、均压方式、冲洗管径、吸附时间等参数对制氧装置性能的影响及制氧装置的稳定性，结论如下。

- (1) 高原制氧装置最佳冲洗方式和均压方式分别为常冲洗和上均压。
- (2) 高原制氧装置最佳冲洗管径为10mm。
- (3) 高原制氧装置最佳吸附时间为36s。
- (4) 高原制氧装置在上述最佳条件下连续稳定运行，稳定运行时氧气浓度和产量分别维持在91.3%和 32.5m^3 。

4 展望

在平原地区模拟高原地区展开实验，取得了基础实验数据。由于时间和条件的限制，无法在高原地区进一步进行实验，研究各参数最佳条件与模拟实验的一致性。此外在不同海拔的高原地区进行实验，探索海拔对制氧装置各参数和能耗的影响也十分必要。因此，下一步工作是将装置搭建在不同海拔的高原地区，探索各参数的最佳条件和测定该装置的能耗。

一种高性能RV减速器的研制

王友斌

(南京工程学院, 江苏南京 211167)

[摘要] RV 减速器是工业机器人的核心关键部件。文章重点介绍一种高性能 RV 减速器在试制过程中, 关键零部件的产品设计、技术要求以及关键工序的加工工艺。对自研的 RV 减速器的传动精度、空载跑合和模拟工况等关键性能参数指标进行测试, 分析结果表明, 其性能已经接近国外先进水平。

[关键词] RV 减速器; 工艺设计; 加工工艺; 加工工装; 传动精度

[中图分类号] TH132.46 **[文献标志码]** A

1 概述

RV 减速器是工业机器人的核心关键部件, 市场需求量非常大。截至 2021 年, 我国工业机器人绝对产量高达 33 万台, 同比 2020 年增长 49%^[1]; 其中在六关节自由度的工业机械臂上, RV 减速器约占整个机械臂成本的 35%^[2], 且非常依赖进口, 成为工业机器人“卡脖子”的关键零部件。欧美和日韩企业在精密减速器领域有着先天优势, 在 RV 减速器的研发、设计与制造等方面均处于领先地位^[3]。我国的精密减速器起步较晚, 虽然也出现了一批精密减速器制造企业, 但是 RV 减速器产品的综合性能仍然亟待提升。

近年来, 国内学者分别在减速器的设计理论^[4-5]、加工工艺^[6]、整机性能测试^[7]等方面开展了详细研究。但是,

目前国内的研究大多聚焦于实验室环境下的小批量 RV 减速器, 对满足工业机器人批量使用要求的高性能减速器的研究相对较少。本项目组对标日本帝人机器人用 RV-20E 摆线针轮减速器, 通过自主研发, 完成产品的设计、工艺、加工和检测, 使得减速器性能接近国外先进水平。

2 工艺研发

2.1 产品设计

本项目组设计的 RV-20E 摆线针轮减速器主要由 2 套曲柄轴组件(包括曲柄轴、两端成组的紧凑型专用圆锥滚子轴承、轴颈上成组的专用滚针轴承)、1 套主支撑组件和 1 套摆线轮传动组件构成, 并与 2 只正齿轮、2 只专用薄型角接触球轴承, 通过螺钉、定位销等装配形成一种高性能 RV 减速器。根据装配精度要求和设计零件图纸, 对其零

参考文献

- [1] Jee J G, Kim M B, Lee C H. Pressure swing adsorption processes to purify oxygen using a carbon molecular sieve[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60 (3) : 869-882.
- [2] 田朴, 李宁, 孔庆平, 等. 高原小型便携式供氧装置的现状及发展趋势[J]. 现代盐化工, 2021, 48 (3) : 106-108.
- [3] 冉庄, 罗勇军. 高原制氧供氧技术及合理用氧研究进展[J]. 人民军医, 2019, 62 (5) : 466-470.
- [4] 李勇, 孟芳兵, 陈远富, 等. 西藏制氧技术发展及研究现状[J]. 低温与特气, 2021, 39 (4) : 5-9, 31.
- [5] 李勇, 王世锋, 吴琪, 等. 变压吸附制氧分子筛材料研究发展现状[J]. 现代化工, 2021, 41 (8) : 68-71.
- [6] 李勇, 孟芳兵, 吴琪, 等. 西藏高原制供氧发展现状

存在问题及未来发展思考[J]. 低温与特气, 2022, 40 (1) : 1-5.

[7] 杨中贵, 周历科, 张勇, 等. 变压吸附气体分离技术研究进展[J]. 化工管理, 2022 (3) : 76-78.

[8] 刘显杰, 窦群康, 闵文博, 等. 变压吸附制氧及其在电弧炉炼钢中的应用[J]. 炼钢, 2020, 36 (2) : 6-9, 28.

基金项目

40L 氧气系统的研制 (PR21-01)

作者简介

李宇杰 (1995—), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为变压吸附。

通讯作者

修凯 (1971—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为变压吸附。

件均进行全套加工工艺设计，以便对外协加工中的关键工序进行指导，并配备必要的加工工装，以确保加工精度严格遵守要求，且易于加工和装配。

2.2 技术要求

(1) 外壳。轴承孔和内齿圈的加工。两端轴承孔同轴度为 0.01 ；中间内齿圈(40处销针孔)处针齿销孔的分布圆直径极限偏差，精度等级为4级，极限偏差为 $1/2IT4$ 。

(2) RV齿轮。2只轴承孔、中间工艺过孔和39齿齿形的加工。单个摆线轮上两个曲柄轴轴承孔中心距需控制在 $\pm 1/2IT6$ 以内，单个摆线轮上两个曲柄轴轴承孔对摆线齿轮分度圆中心的对称度需按6级精度控制，单个摆线轮上两个曲柄轴轴承孔中心的平行度需按6级精度控制。最后加工测绘得到的摆线轮廓与理论齿形误差需控制在 $\pm 0.002mm$ 以内。

(3) 曲柄轴。两处偏心圆、两处轴承轴颈和一处花键的加工。同一个曲柄轴上的两个转臂轴颈偏心距的相位角严格要求为 180° ，需控制在 $\pm 2'$ 以内；同一台减速器上两个曲柄轴上用于行星轮的渐开线花键与各自偏心距的相位角要求严格保证；所有转臂轴颈偏心距离尺寸等同性要求较高，需控制在 $\pm 0.003mm$ 以内。

2.3 加工工艺

(1) 外壳。两端轴承孔的加工，采用数控车床和高精度内外圆磨床，并配备专用工装加工，如图1所示，确保两次粗精磨削过程中内外圆尺寸、同轴度和垂直度等要求；内齿圈的加工，应该采用专用数控内齿磨床进行磨削加工。此外，设计了一套慢走丝用专用工装，并配套到进口的高精度慢走丝设备上，分2次粗精加工，多次修形，确保了内齿圈的位置精度、垂直度和同轴度等多项较高要求。经检测，内齿圈销针孔的位置精度均在 $0.005mm$ 左右。

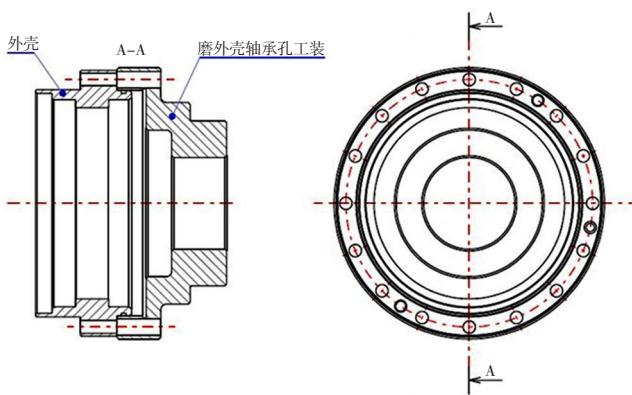


图1 磨外壳轴承孔加工工装

(2) RV齿轮。轴承孔的加工常规工艺是单件进行加工，

但组合后难以保证相互一致性要求，装配精度也难以保证。现采用2件一起组合，用高精度数控坐标磨粗精加工，在保证单个零件位置精度和孔径精度前提下，也保证了相互一致性的精度要求；而外齿圈多数厂家采用慢走丝加工手段，现样件加工采用高精度专用磨床，并配备项目组设计的专用工装，如图2所示，同时将2个零件精磨到规定尺寸。在试加工过程中，还优化了磨削参数，在线检测和修整砂轮，确保了齿形精度和一致性。经检测齿形跳动均在 $0.002mm$ 以内，完全达到了设计要求。

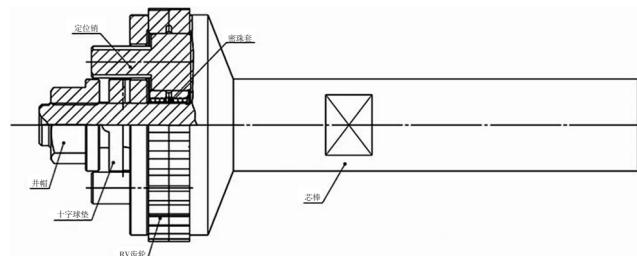


图2 RV齿轮磨齿工装

(3) 曲柄轴。多数厂家采用数控随动磨加工，或采用专用夹具2次装夹进行加工。其设备成本较高或加工精度难以保证。现采用2件组合加工，将零件顺序布置，确保2件花键和偏心圆的相位关系一致性。采用高精度外圆磨床加工2处偏心圆，并配合使用项目组专门设计的专用自制偏心夹具一次装夹完成2件4个曲拐的加工，如图3所示，确保了偏心距和相位关系。花键加工则通过粗滚、硬滚等工艺进行，但加工过程中要注意零件变形等问题。经检测，其偏心距误差均在 $0.003mm$ 以内。

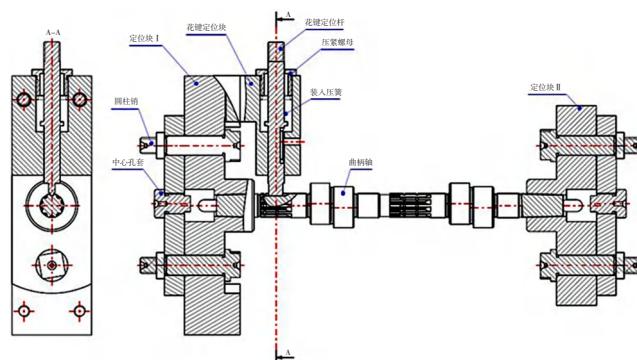


图3 曲柄轴磨曲拐加工工装

3 测试结果

按照上述产品研发过程，共加工装配了3套RV减速器样机。为了检测这些减速器的各项性能指标，项目组又专门设计了关键精度（传动精度、回隙）的简易测试台架。主要检测指标包括传动精度误差（正反转角度传递误差、回隙误差、单圈误差）、空载跑合以及模拟工况。

3.1 传动精度检测

传动精度测试数据见表1, 可以看出, 日本帝人RV减速器的角度传递误差为 $1.29' \sim 1.68'$, 回隙误差基本在 $0.99'$ 以内。多次检测数据均比较稳定, 说明其精度较好。自制的RV2和RV3两套样品, 其整圈的检测误差均在 $1'$ 以内, 多数在 $0.2'$ 左右。说明RV减速器单圈精度均较好。第一轮自制RV1传动精度数据较差, 为 $1.38' \sim 2.11'$, 经分析主要还是与零件加工精度、装配情况, 以及外购件, 尤其是轴承的精度有关。第二轮自制的RV2和RV3, 通过加工工艺和加工工装不断的优化, 提高了零件的加工质量和精度, 检测数据就有了明显改善和提高, 角度传递误差基本在 $1.05' \sim 2.21'$, 回隙误差基本在 $1.08' \sim 1.38'$ 。与日本帝人相比, 差距已明显缩小。

表1 传动精度误差数据 单位(°)

类别	测试日期	正传角度传递误差		反转角度传递误差		回隙误差最大值	单圈误差值		
		误差		误差					
		最大值	最小值	最大值	最小值				
日本帝人 RV	2014-06-11	1.29	-0.10	1.68	0.00	-0.99	0.00		
自制 RV1	2014-08-07	1.38	-0.73	2.11	-0.16	-1.48	0.16		
自制 RV2	2014-08-12	1.05	-0.76	2.21	0.30	-1.38	0.16		
自制 RV3	2014-08-13	1.11	-0.36	2.10	0.26	-1.08	0.16		

3.2 空载跑合检测

空载跑合试验的温升变化见表2。可以看出, 随着时间的增长, 各样品温度也随着上升。其中第二轮样品RV2和RV3的温升速度明显要低于第一轮的样品RV1。与日本帝人的产品相比, 本项目组样品在低转速下的温升速度较慢, 性能优于日本帝人, 但是当转速较高时, 温度上升速度则较为明显, 与国外产品还存在一定的差距。后期通过更换销针, 在保证传动精度的前提下, 可以进一步提高空载时的转速, 而温度升高的问题也得到一定的改善, 说明各项性能指标还有提高的空间。

表2 空载跑合试验温升数据

转速 (r/min)	时间 (min)	温度(℃)			
		帝人	RV1	RV2	RV3
605	0	32	28	28	28
	30	34	29	28	28
	60	34	32	30	29
	90	34	34	32	30
	120	34	34	33	32
1815	0	27	28	28	28
	30	33	36	36	36
	60	39	45	47	46
	90	41	46	52	46
	120	42	46	52	46
2975	0	28	28	28	28
	5	32	40	38	37

3.3 模拟工况检测

为了进行模拟工况试验, 尤其是加载情况下精度检测, 专门设计了一个3轴数控桌面机器人, 安装了2套自制的RV减速器、3套西门子伺服电机和驱动, 通过PLC和一套真空吸盘进行简单的动作控制, 完成了重复定位精度的测试, 也完成了反复抓取工件的模拟工况和多种转速下加载寿命试验。检测数据显示, 桌面机器人的重复定位精度 $\leq 0.01\text{mm}$; 在输入转速2400r/min情况下, 3轴桌面机器人180°往复式运动达到了30次/min, 已达到桌面机器人国内同等水平。这些表明项目组试制的RV减速器样品取得了初步的成功。

4 结束语

通过对RV减速器关键零部件的产品设计、技术要求以及关键工序的加工工艺进行研究, 成功试制出了一款高性能RV减速器。在传动精度、空载跑合和模拟工况等关键参数指标上与国外产品非常接近, 部分指标甚至超过国外产品, 为大规模应用生产提供基础。但是对于零件部分工序的高精度加工和检测还有一定难度, 后期还需对减速器的精度、温升、噪声、扭矩等进一步研究和改进, 以完全达到设计和国外同行主要性能的要求。

参考文献

- [1] 汤勇, 王志威, 陈恭, 等. 摆线齿轮低成本冷精整加工关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58 (14) : 154-160.
- [2] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (9) : 1-13.
- [3] 林江海, 黄鹏程, 王燕霜, 等. 工业机器人用精密减速器研究现状[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (3) : 96-100.
- [4] 肖君君, 何卫东. RV减速器摆线轮的有限元模态分析[J]. 传动与控制, 2009 (9) : 46-47.
- [5] Y. H. Meng, C. L. Wu, L. P. Ling. Mathematical modeling of the transmission performance of 2K-H pin cycloid planetary mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42 (7) : 776-790.
- [6] 赵铮. 工业机器人减速器RV320的修形参数优化与工艺性研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [7] 位云成. 机器人用RV减速器传动误差的测试[J]. 电气与自动化, 2016 (2) : 167-169.

作者简介

王友斌(1964—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 实验师, 主要研究方向为机械制造与装备。

臭氧发生器用超大功率高频逆变器设计方案及器件选型

廖佳荣

(福建龙净环保股份有限公司, 福建龙岩 364000)

[摘要] 大型工业臭氧发生器广泛应用于污水处理及烟气脱硝等污染治理领域。作为臭氧发生器主要核心部件之一的高频电源仅被少数大公司掌握, 单机大产量的工业臭氧发生器电源所需的超大功率高频逆变器是臭氧行业科研人员积极研究的前沿技术。文章对超大功率高频逆变器的各组成部分进行选型, 为研发成功奠定技术基础。

[关键词] 臭氧发生器; 高频逆变器; 超大功率

[中图分类号] TM464 **[文献标志码]** A

随着我国经济的高速发展、环保意识的增强和人们对臭氧认识水平的提高, 市政饮用水、污水处理、工业废水处理、纸浆漂白、化工氧化、烟气脱硝等行业对工业用大型臭氧发生器的需求逐步增加。因此不同形式的大型臭氧发生器纷纷推向市场, 但由于各种技术条件未得到有效突破, 仅有少数国外知名公司掌握高频臭氧发生器的关键技术, 国内知名的臭氧发生器生产厂家或采用单机可控硅中频电源, 或采用发生器分区的小型 IGBT 高频电源并联, 或采用单机 IGBT 中频电源等。就目前超大功率臭氧发生器市场来看, 无论采用单机可控硅中频电源还是 IGBT 高频电源并联或是 IGBT 中频电源的臭氧发生器均有一定市场, 其中单机可控硅中频电源占据了国内臭氧电源市场的半壁江山, 发生器分区 IGBT 高频电源次之, 并没有真正的单机超大功率高频臭氧电源。

目前市场上应用的大功率臭氧电源缺点及劣势也较明显, 单机中频电源由于工作频率才几百 Hz, 其变压器及电抗器体积相当大, 需要耗费很多铁芯及铜导线, 而近几年这些材料也在日益涨价, 采用该技术的臭氧电源成本将越来越高。采用发生器分区 IGBT 高频电源是将多组电源直接输出, 由于无法做到零相位差, 发生器各分区之间需设置耐压 2 倍以上工作电压的绝缘间隙, 导致必须加大发生器本体尺寸。臭氧发生器本体一般采用 316L 不锈钢制造, 由于体积增大, 需要增加不少的材料费用, 其是以增大体积为代价来降低电源系统的设计及制造难度。超大功率高频电源频率高, 变压器及电抗器的体积均可大大减小, 从制造成本上来说, 可以节省材料费用。而且超大功率高频电源的主要器件为 IGBT, 随着半导体技术的快速发展及应用, 其价格将逐渐下降, 成本会越来越低。从成本上分析, 超大功率电源具有很大优势。另外, 运行频率越高, 放电

管的放电越平滑, 有利于产生臭氧。从发展趋势来看, 高频将是大功率臭氧电源的发展方向。综上, 研制单机超大功率高频电源意义重大, 作为超大功率高频电源的逆变器研发极为重要。

1 关键技术指标

本项目研发的超大功率高频逆变器关键技术指标见表 1。

表 1 超大功率高频逆变器关键技术指标

项目	参数	项目	参数
额定输入电压 (V)	AC3L-380 ± 15%	额定输出电压 (V)	AC530
额定输入频率 (Hz)	50/60	开关频率 / 输出频率 (kHz)	4 ~ 6
额定输入电流 (有效值) (A)	1500	额定输出电流 (有效值) (A)	1500
输入电流峰值 (A)	2500	输出电流峰值 (A)	2300
额定输入容量 (kVA)	800	输出有功功率 (kW)	≥ 640

2 实现方案

超大功率高频逆变器的功能是将电网的三相交流电整流及滤波后得到约 530V 直流电压。采用 IGBT 及驱动板组成的 H 桥逆变电路进行 PWM 调制, 逆变出高频的交流电流, 驱动后端的负载。主要组成部分为: 整流系统、缓启系统、直流支撑系统、H 桥逆变部分、IGBT 驱动模块、叠层铜排、散热部件等, 还有母线电压检测、输出电流检测、放电电阻等控制及安全所需的辅助部分, 如图 1 所示。

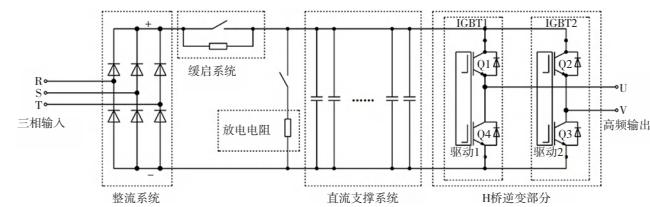


图 1 逆变器主要组成

3 各部分设计选型

3.1 整流系统设计选型

整流系统可以采用三相全控、半控、不控整流方式。

由于前两种涉及信号、器件较多，需要耗费较大精力进行开发，会影响项目开发进度，且整流系统为独立的系统，在项目开发成功后可回过头来再进行优化，为加快进度，本项目采用三相全波不控整流。这种电路无需用到N线，输入电压谐波小，输出电压纹波小，原理简单，采用6只二极管串并方式即可组成，也可以直接选择三相整流模块，实现起来非常简单。电网三相交流电压有效值为380V，电网波动按技术指标的±15%考虑，则直流电压 $U_{dcpeak}=1.414 \times 380 \times 1.15 \approx 618V$ ；整流二极管的反向重复耐压 $U_{rm} \geq 2U_{dcpeak}=618 \times 2=1236V$ 。按三相输入电流有效值1300A推算，及考虑2倍左右设计余量，选取3个800A/1600V三相整流桥并联。

3.2 缓启系统设计选型

逆变器中一个重要的组成部分为直流支撑电容，在上电瞬间，由于电容内部电阻非常小，相当于短路，如果直接通入交流电，冲击电流非常大，所以必须设置缓启系统。一般采用电阻与直流继电器的主触点并联实现，上电时，三相交流电通过电阻对电容进行充电，在电容电压上升到一定数值时，控制继电器触点吸合，启动过程完毕。由于充电时间短且电阻散热条件好，充电电阻按 $250\Omega/500W$ 选取，正常工作时主回路电流有效值1300A，很难选到这么大额定电流的直流继电器，本项目采用630A/3P的交流接触器并联使用。

3.3 直流支撑系统设计选型

由于逆变器工作时产生很高的脉动电流及脉动电压，一般需要增加直流支撑系统。多数情况下，组成直流支撑系统的主要器件是电容。电容的作用主要是使直流电压波动保持在允许范围内，其作用还要吸收负载电感反馈的能量及吸收IGBT通断时产生的高纹波电流。直接采用整流桥作为逆变器的直流电源时，IGBT关断时，由于整流桥的单向导通型，负载电感中的能量无法反馈到电源中，极可能损坏IGBT模块。电容作为其中一个重要的缓冲环节，既提高了逆变器的效率，又可以保护IGBT器件。电容可以选择铝电解电容，也可以选择薄膜电容，两者各有优缺点。电解电容在容量上有绝对的优势，但其可承受的纹波电流值低，额定电压也低，其使用寿命一般为5000h。薄膜电容虽然容量小，但可承受的纹波电流远高于电解电容，且额定电压较高，使用寿命可高达10万h。IGBT开关时产生很高的纹波电流，所以在选择电容时尽量选用承受纹波电流高的产品，且电解电容寿命较短，不利于产品长期稳定运行。综上，项目采用薄膜电容，按5%~10%的电

压纹波，通过计算得出支撑电容 $C \geq 12000\mu F$ ，采用12个900V/1050μF薄膜电容并联，可以控制纹波在8%左右。

3.4 H桥逆变电路部分设计选型

随着电力电子技术的飞速发展，IGBT因其开关速度快，开关及通态损耗低，易于控制等优点，已是常用的功率开关模块。按系统额定输出电流1500A，取2倍左右设计余量，IGBT模块需选择3000A。如此大电流的IGBT模块市面上很少见，且成本非常高，也很少有成熟的商用情况。项目采用IGBT并联方案，由4个1400A/1200V模块组成H桥，每两个IGBT模块并联成一相使用。既解决了大电流IGBT模块设计选型难题，同时有效控制了研发成本。

3.5 IGBT驱动模块设计选型

由于H桥为4个IGBT组成，每两个IGBT并联使用，选择国内专门做IGBT驱动的厂家定做了双通道两并联驱动，采用光纤传输驱动信号及故障信号，引出IGBT温度检测NTC。驱动模块有有源钳位、短路保护、软关断等功能。表2为驱动模块验收时测试数据。

表2 驱动模块不均流度测试数据

测试部位	开通特性		关断特性		不均流度 (%)
	开通延时 (μs)	反向恢复 电流 (A)	关断延时 (μs)	V_{ce} 尖峰 (V)	
上管 1	0.512	886	1.354	802	962
上管 2	0.58	845	1.27	784	874
下管 1	0.526	805	1.402	791	956
下管 2	0.532	777	1.305	756	870

经过测试，该驱动模块在IGBT开关延时、尖峰电压控制均在IGBT手册要求的范围内，电流不均流度在10%以内，满足项目要求。

3.6 叠层铜排设计选型

由于直流回路寄生电感及IGBT自身电感影响，大功率的功率模块在开关过程中，会产生很高的尖峰电压。过高的尖峰电压会增加开关损耗，造成IGBT模块发热严重，严重时会损坏模块，所以必须减少直流回路的寄生电感。通常采用叠层铜排来降低寄生电感，由于电流大、频率高，趋肤效应非常严重，市场上常见的叠层铜排为两层结构，通流能力不够，本项目采用4层叠排设计，有效减弱了趋肤效应的影响，增大了叠层铜排的通流能力。

3.7 散热部件设计选型

对于超大功率的高频逆变器，显然采用风冷散热器无法满足散热要求，本项目采用水冷方案。通过三维建模软件，对水冷板及IGBT分别建模，设计水流通道，组建仿

5.0mmER50-6E高速线材生产工艺开发

刘鹤, 严冉冉, 史任博, 杜伟, 陈秋叶

(中天钢铁集团有限公司, 江苏常州 213100)

[摘要]介绍中天钢铁焊接用钢盘条5.0mmER50-6E的生产工艺, 设计冶炼、轧制关键工艺参数, 优化了孔型与控轧控冷工艺。实物质量检测5.0mmER50-6E盘条组织均匀, 抗拉强度530~545MPa, 伸长率≥32%, 断面收缩率≥80%, 盘条通条性能稳定, 通条极差≤15MPa, 在满足客户深拉拔需求的同时也为客户降低了拉拔工序成本。

[关键词]5.0mmER50-6E; 工艺参数; 性能; 降本增效

[中图分类号]TF76 **[文献标志码]**A

受国际形势、疫情、“双碳”政策等影响, 近两年进口铁矿石、煤炭等钢铁行业原燃料价格持续突破新高, 钢企盈利空间逐渐受到挤压, 降本增效是整个钢铁企业面临的生存问题^[1], 在此背景下, 中天钢铁开发5.0mmER50-6E气保焊丝用钢。随着焊丝钢在国内钢企稳定批量开发, 近几年, 国内市场CO₂气体保护焊焊丝制造量占到全球市场

的50%, 消耗量约占全球总量的40%, 其良好的焊接性成为新一代CO₂气体保护实芯焊丝的主要原料^[2-4]。

1 化学成分设计

焊丝钢由于其本身低强度、高塑性、良好焊接性能的要求, 故需要准确控制C, Si, Mn含量, 严格控制P和S元素含量, 以保证加工后终端产品的性能。其中, C含量

真模型, 按额定工况创建仿真条件, 进行水冷散热效果仿真。通过仿真, 确定水流量、水流速要求。通过对各种水冷通道的布置仿真对比, 最终确定了最优的水冷通道方案。

3.8 其他设计选型

(1) 母线电压检测模块选型。母线电压有效值530V, 按接近2倍余量选择转换模块, 实际选取输入范围0~1000V, 输出范围0~5V的直流电压变送器。

(2) 输出电流检测模块选型。根据输出有效值1500A, 按一定设计余量, 项目选择输入范围0~2000A, 输出范围0~4V开环霍尔模块。

(3) 放电电阻选型。由于逆变器采用的直流支撑系统电容容量大, 在停止工作时, 直流支撑系统上还存着大量电荷, 容易造成事故, 故设备停止工作时, 需要迅速将电容上的电荷放掉。项目选取250Ω/500W, 可保证在5s内将电压降低到安全范围内, 避免触电事故。

4 结束语

文章对目前市场上主流的大型臭氧发生器及其技术路线进行分析, 明确了单机超大功率高频逆变器的研发重要性。根据超大功率逆变器的关键技术指标确定研发方案, 并对方案中的主回路器件进行设计选型。经过样机试制及测试, 基本满足项目技术指标要求, 从而基本掌握了单机

大产量的工业臭氧发生器电源所需的核心关键技术, 为相关业务的开展及技术储备积累宝贵经验。

参考文献

- [1] 佚名. 国内首台120kg/h大型臭氧发生器在青岛通过科技成果评估[J]. 给水排水动态, 2012(4): 42-43.
- [2] 薛飞, 孙荣生. 高频臭氧发生器(250kW)变压器研制过程的几点体会[C]. 2007年全国臭氧专业年会论文集, 2007.
- [3] 孟志强, 王翠, 彭永进. 臭氧发生器的关键技术[C]. 2007年全国臭氧专业年会论集, 2007.
- [4] 赵勇, 耿传勇. 大功率变频电源的优化设计[J]. 电源世界, 2006(11): 37-40.
- [5] 孙承志, 万山明, 黄声华, 等. 介质阻挡放电用高频逆变电源的研制[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 16-17, 31.

作者简介

廖佳荣(1977—), 男, 福建龙岩人, 大专, 工程师, 主要研究方向为电除尘高低压控制系统设计。

的精准控制是成品焊丝焊缝稳定性和焊接过程焊渣稳定控制的保证。**Mn** 和 **Si** 含量稳定控制，一方面保证盘条及成品单丝的抗拉强度，防止强度波动造成拉拔过程不稳定以及模具损耗异常；另一方面也防止偏析严重导致带状组织的出现，导致拉拔断丝^[5]。钢中的 **S** 和 **P** 均属有害元素。**P** 虽能使钢材的强度、硬度增高，但对应塑性、冲击韧性下降，在低温时会产生“冷脆”现象，使冷加工及焊接性能变差；**S** 主要以 **FeS** 形态存在于钢中，当钢材热加工时，由于 **FeS** 化合物过早融化而导致工件开裂的现象称为“热脆”，导致焊接过程出现裂纹^[6]。因此，5.0mm 焊丝钢 ER50-6E 成分设计见表1。

表1 5.0mm焊丝钢 ER50-6E 化学成分 质量分数 (%)

元素	标准	内控
C	0.06 ~ 0.12	0.06 ~ 0.09
Si	0.8 ~ 1.15	0.80 ~ 0.92
Mn	1.40 ~ 1.85	1.45 ~ 1.55
P	≤ 0.025	≤ 0.020
S	≤ 0.025	≤ 0.010
Cr	≤ 0.15	≤ 0.05
Cu	≤ 0.15	≤ 0.05

2 工艺路线选择

焊丝钢线材生产工艺流程：120tKR → BOF → LF → CCM160×160mm²钢坯→加热→高速线材32道次连续轧制→热眼在线探伤→斯太尔摩冷却→集卷→打包→入库。

2.1 炼钢工艺控制

2.1.1 转炉冶炼

转炉冶炼，除对铁水 **P** 和 **S** 含量严格要求外，同时选择专用清洁废钢和生铁块^[7]，防止 **Cu** 和 **Cr** 等残余元素含量过高而影响钢材和焊丝性能。转炉吹炼采用副枪炼钢模型根据终点成分温度要求控制过程加料，转炉终渣碱度控制 2.0 ~ 3.5，实现终点碳控制目标 0.02% ~ 0.06%，**P** ≤ 0.025%，温度 ≥ 1620℃，符合工艺要求。为精准控制出钢下渣和回磷，出钢时利用滑板挡渣和红外下渣检测，采用高硅硅锰、硅铁合金，钢包出钢全程吹氩，获得均匀的成分和温度。

2.1.2 LF精炼炉

为提高钢水的洁净度，钢水到达 LF 精炼炉后开始通电升温，在渣面加入石灰、化渣剂和萤石进行化渣，同时加入碳化硅进行脱氧。精炼终渣碱度 (**CaO/SiO₂**) 控制在 1.5 ~ 2.5，钢水温度达到浇铸要求后，开始进行软吹。钢水表面添加覆盖剂防止钢水裸露，导致钢水氧化，软吹时间控制在 10 ~ 20min。软吹结束后钢水中总氧低于

25×10^{-6} ，**Ca** 含量低于 0.0010%。

2.1.3 连铸浇铸

焊丝钢 ER50-6E 连铸坯为 160mm×160mm 小方坯，采用十机十流全弧型连铸机，大包长水口与钢包下水口采用吹氩气进行密封，中间包第一层采用覆盖剂进行覆盖，第二层采用碳化稻壳灰进行保温，中间包内钢水过热度控制在 20 ~ 30℃，浇铸控流采用塞棒自动控制，浇铸拉速控制在 2.0 ~ 2.5m/min，开启结晶器电磁搅拌，结晶器回水温差控制在 7.0 ~ 8.0℃，二冷采用气雾冷却。ER50-6E 连铸坯中心疏松和偏析控制在 1.5 级以内，缩孔 1.0 级以内，铸坯质量良好。

2.2 轧钢工艺控制

2.2.1 开轧温度

高温加热工艺会导致晶粒粗大，多道次轧制后不利于铁素体析出，易在相变时产生有害组织贝氏体，导致客户拉丝过程断丝，无法满足 5.0mm 多道次拉拔至 0.8mm。与此同时，较低的加热温度会导致钢坯加热不均匀，在轧制过程中温降大(5.0mm 粗轧速度较慢)。5.0mm 生产过程中，钢坯温降明显大于中规格，容易导致角部温度低，多道次轧制后产生裂纹、结疤缺陷，还可能引发翘头、咬入打滑等堆钢故障。结合以上分析，参照 5.5mmER50-6E 加热工艺，5.0mm ER50-6E 开轧温度设定为 1020 ~ 1050℃。

2.2.2 进精轧机+进减定径温度

精轧机为摩根 5 代 10 机架轧机，精轧机前设定 2 个水冷箱，水箱能力 4000L/min，进精轧机温度设定为 900 ~ 920℃，通过机架间冷却水阀度调节，控制终轧温度为 940 ~ 960℃，控制终冷温度，细化奥氏体晶粒，精轧机后设置 3 个水冷箱，通过流量调整，控制进减定径温度为 920 ~ 930℃。

2.2.3 吐丝温度+冷却速率

焊丝钢中 **Mn** 和 **Si** 含量较高，**C** 含量较低。合金成分越高，在吐丝后过冷奥氏体稳定性越好，相变时易穿过铁素体、珠光体相变区间，产生贝氏体有害组织。斯太尔摩散冷线长 109m，总计 23 个保温罩，参照 ER50-6E CCT 曲线，设计吐丝温度 900 ~ 915℃，冷却速率 0.2 ~ 0.4℃ / s，使其入罩温度控制在 732℃，保温罩内充分转变，获得铁素体 + 珠光体组织。

2.2.4 孔型优化及过程尺寸

焊丝钢成分设计中 **Si** 含量较高，由于其硬度高，且含有与硬质合金亲和性大的元素和较高含量的 **Si** 等非金属元素，易对辊环轧槽产生粘着磨损与磨粒磨损，导致轧槽

的过钢量低，出现过程尺寸偏大、料型不规整问题，在精轧机与减定径间出现张力波动，造成成品尺寸超差、酸洗异常、堆钢故障等问题。因此，在考虑生产稳定性与降本增效的基础上，对粗轧5#与中轧13#孔型进行优化，通过改进槽深与槽底宽度，来有效对过程尺寸进行管控，避免由于过程尺寸持续偏大引发的质量异常和生产故障等问题，孔型修改如图1所示。

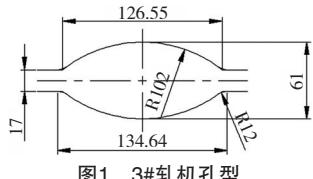


图1 3#轧机孔型

2.2.5 低速模拟轧制

5.0mm由精轧机10机架+减定径4机架连续轧制，核心控制要素是精轧机与减定径间速比的控制，其中涉及通条温度均匀性、通条尺寸均匀性的控制。为保证减定径来料符合要求，稳定张力与成品尺寸，在生产前用17.1mm铅棒进行爬行模拟，模拟机架弹跳，不断修正各道次辊缝设置，以保证热轧态时过程尺寸和机架间张力符合减定径来料要求。经多次模拟，过钢后首支出成品如图2所示。

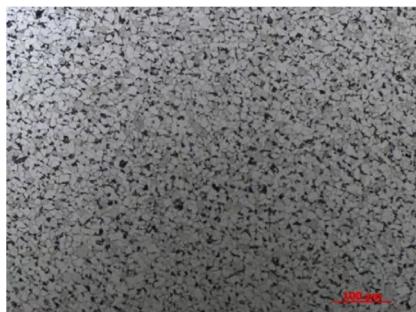


图2 200×焊丝轧材金相组织

2.2.6 成品尺寸及表面质量

客户加工工艺为原材料开卷→机械剥壳→清理→粗拉至2.2mm→精拉至0.8mm单丝。原材料盘条的尺寸、椭圆度是拉拔模具损耗的主要影响因素之一，椭圆度越大对磨具的损耗越大。吨钢消耗增加且单丝尺寸不均匀，不利于客户单丝质量的稳定和降低模具的损耗。通过粗中轧孔型优化与精轧机、减定径低速模拟轧制以保证过程尺寸、张力，结合导卫安装，轧制线对中，成品尺寸偏差≤0.12mm，不圆度≤0.15mm。轧制线采用滚动化进口和导槽，无过程擦划伤，成品表面质量优佳。

3 金相组织与性能

焊丝轧材组织为大量铁素体+少量珠光体组织，抗拉

强度530~545MPa，伸长率≥32%，断面收缩率≥80%，盘条通条性能稳定，通条极差在15MPa以内，跟踪客户使用，拉拔过程稳定，可连续拉拔至0.8mm，磨损损耗降低(相对5.5mm)，单丝质量稳定且拉拔速度可提升5%，且焊丝在焊接过程中飞溅小、烟雾小，无不良缺陷产生，成品焊接试验焊缝抗拉强度达到用户拉拔、焊接等的力学性能要求。

4 结论

(1) 通过设计炼钢工艺与轧钢工艺参数，使得焊丝钢盘条的钢种成分均匀、组织优良、成品尺寸精度高且表面质量优佳。

(2) 焊丝轧材组织为大量铁素体+少量珠光体组织，抗拉强度530~545MPa，伸长率≥32%，断面收缩率≥80%，盘条通条性能稳定，通条极差在15MPa以内，跟踪客户使用，拉拔过程稳定，可连续拉拔至0.8mm，磨损损耗降低(相对5.5mm)，单丝质量稳定且拉拔速度可提升5%。

参考文献

- [1] 陶明月, 沈伟, 魏凯. 对新形势下钢铁企业系统化降本增效工作的思考[J]. 冶金经济与管理, 2022 (4) : 40-42.
- [2] Alberto Bemporad, Daniele Bernardini, Francesco Alessandro Cuzzola, et al. Optimization-based automatic flatness control in cold tandem rolling [J]. Journal of Process Control, 20102 (20) : 396-407.
- [3] Zhang Jinling, Cui Zhenshan. Continuous FEM simulation of multi-pass plate hot rolling suitable for plate shape analysis[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18 (1) : 16-22.
- [4] 郑世伟, 朱立光, 曹胜利, 等. ER50-6E焊丝钢热轧盘条难酸洗及损坏模具的原因分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (19) : 174-176, 179.
- [5] 王礼银, 黄肇信, 王庆贤, 等. ER50-6E盘条生产工艺研究[J]. 金属制品, 2004, 30 (1) : 34-36.
- [6] 于荣, 左茂方, 周明军, 等. ER50-6E焊丝钢热轧盘条的开发生产实践[J]. 山东冶金, 2015, 37 (4) : 14-16.
- [7] 丁建国. 焊接用热轧盘条ER50-6生产实践[J]. 山西冶金, 2018 (1) : 80-81, 103.

作者简介

刘鹤 (1988—), 男, 安徽六安人, 本科, 工程师, 主要研究方向为高速线材轧钢工艺。

600MW超临界湿冷机组无电泵启动应用分析

林长治

(国能孟津热电有限公司,河南孟津 471112)

[摘要]文章通过总结国能孟津热电有限公司一期 $2\times600\text{MW}$ 超临界湿冷机组直接采用汽动给水泵冷态启动过程,分析超临界湿冷机组采用无电泵启动方式的可行性及具体操作方法,探讨采用无电泵启动方式存在的问题以及对机组启动期间厂用电的影响。以此进一步优化机组启动方式,在提升机组启动安全性的同时,降低机组启动电耗及成本,提升机组经济水平。

[关键词]超临界;湿冷;无电泵;启动;应用

[中图分类号]TM621.3 **[文献标志码]**A

1 系统介绍

国能孟津热电有限公司(以下简称“孟津公司”)一期工程建设为2台 600MW 超临界湿冷机组,锅炉为东方锅炉(集团)股份有限公司制造生产的单炉膛、超临界、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢构架悬吊结构变压运行直流炉,型号为DG1900/27.22- π 4,最大连续出力BMCR工况为 $1900\text{t}/\text{h}$ 。汽轮机为日本富士电气公司采用西门子技术生产制造的超临界、一次中间再热、三缸两排气、单轴单背压反动凝汽式汽轮机,型号为HMN600-24.2/538/566。

每台机组给水系统配套3台给水泵组,分别是2台50%容量的汽动给水泵和1台35%容量的电动调速给水泵,正常运行期间2台汽动给水泵运行,电动给水泵作为启动(备用)泵。电动给水泵为沈阳鼓风机(集团)有限公司制造生产的双壳体筒式多级泵(芯包为水平中开结构),型号为MDG346-CHTZ7、液力耦合器调节,配套电机功率8300kW。

汽动给水泵配套汽轮机为青岛捷能汽轮机集团股份有限公司生产,型号为N9.996-1.204,型式为单缸、单流、凝汽式,调速范围为 $2900\sim5800\text{r}/\text{min}$;配套给水泵为沈阳鼓风机(集团)有限公司制造生产的双壳体筒式多级泵(芯包为水平中开结构),型号为MDG366-CHTZ5。

给水泵汽轮机设计汽源有3路,分别是汽轮机四段抽汽(正常工作汽源)、冷段再热蒸汽(高压备用汽源)、辅助蒸汽(调试汽源),工作汽源与高压备用汽源可实现无扰内切换,分别进入独立的低压调节阀组和高压调节阀组,设计控制逻辑为当低压汽源调节阀组开度大于90%时,高压汽源自动投入。经过调研了解实际运行自动切换时容易

出现转速大幅波动导致给水量大幅变化,容易出现给水泵跳闸或者机组非计划停运。给水泵汽轮机3种汽源设计参数见表1。

表1 给水泵汽轮机3种汽源设计参数

汽源	压力(MPa)	温度(℃)	备注
四段抽汽(低压汽源)	0.432~1.28	344.5~397.3	汽源切换点为冷段再热蒸汽(高压备用汽源)
冷段再热蒸汽(高压备用汽源)	1.397~4.491	284.3~284.8	40%额定负荷
辅助蒸汽(调试汽源)	0.8~1.2	280~390	四段抽汽、冷再、启动锅炉、邻机

随着外部电力市场形势不断变化,机组启动次数逐步增加,相应启动能耗指标不断增加。为适应不断变化的电力市场形势,同时践行绿色低碳节能理念,降低机组启动期间的电耗、油耗、水耗等能耗愈发重要。为此,基于孟津公司机组设备型式及系统特点,在广泛开展同类型机组启停节能方式优化调研的基础上,结合上级单位发布的运行优化导则中机组启停部分,开展机组冷态方式下无电泵直接启动方式研究与分析。

2 机组无电泵启动可行性分析与论证

2.1 安全性方面

(1)给水泵汽轮机汽源稳定性方面。按照目前火力发电厂的常规设计,无论是新建电厂投产初期还是已投产的机组,启动锅炉、邻机或老厂均可稳定提供辅助蒸汽系统汽源。在机组启动初期由邻机、启动锅炉等辅汽系统通过联络管,再经过调试用汽管道提供给2台给水泵汽轮机用汽,汽源能够保证稳定且可连续,此方面可行。

(2)启动初期给水流量控制方面。由于启动初期锅炉热负荷小、汽轮机冲转用汽量低、机组未带负荷或带初负荷暖机,整个过程锅炉蒸发量小,所需给水流量相对机组正常运行低,电动给水泵可通过液力耦合器上的勺管开度

来调节给水泵转速，配合给水量的大小调整电动给水泵再循环调阀开度，进而调节控制与锅炉启动初期匹配的给水量。

而采用汽动给水泵直接启动时，由于汽动给水泵设计容量可满足 50% 容量负荷需求，机组启动初期给水流量小、变化幅度大且给水泵汽轮机转速受临界转速及排气温度等多种因素限制，单纯采用汽动给水泵转速调节无法满足锅炉给水流量及压力的要求。要保证机组启动安全，不因给水流量低等因素导致机组启动失败或给水流量过高导致汽温难以控制，需要有可靠和灵活的调节手段，以保证无电泵的方式下实现机组安全启动。

基于此，针对给水流量调节与控制问题，结合孟津公司给水系统在 1 号高加出口管道设计有启动旁路的特点以及汽动给水泵定速 3000r/min（临界转速为 2000 ~ 2850r/min）时，给水压力、流量、排气温度等参数，经综合评估，容量 30%BMCR 给水量时，即一般在机组负荷 180MW 前可通过机组启动旁路与汽动给水泵再循环调阀共同调整给水量，在机组负荷 180MW 后将给水旁路切换到给水主路实现汽动给水泵的正常调节，无电泵启动方式可行。

2.2 经济性方面

整个机组启动过程采用汽动给水泵上水、冷 / 热态清洗、升温升压、并网带负荷及暖机等全过程，一直到机组负荷 240MW 时利用本机四段抽汽冲转另 1 台汽动给水泵，定速 3000r/min 后逐步并入给水系统运行，到达机组深度调峰 280MW 负荷以下的运行工况（保持 1 台汽泵再循环一定开度）。在机组负荷达到 300MW 且稳定时，将首台汽动给水泵汽源切换至本机四段抽汽供汽，恢复机组正常运行方式，整个启动过程完成。机组启动全过程电泵停运备用，可有效降低机组启动电耗，具有良好的经济效益，无电泵启动方式可行。

综合以上两个方面的分析和论证，机组采用无电泵启动方式是可行的。

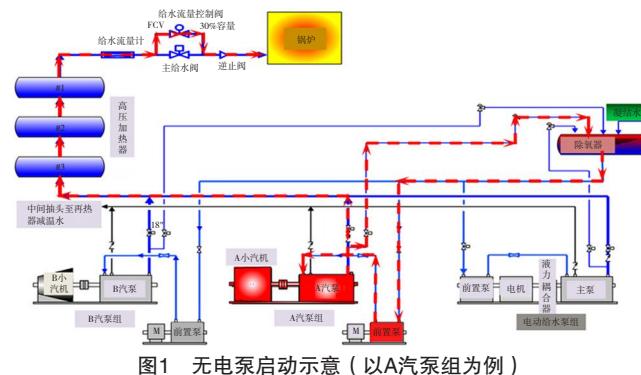
3 孟津公司无电泵启动方式及过程介绍

3.1 基本运转情况

孟津公司 1 号高加出口管道设计有 30%BMCR 容量的给水启动旁路，在锅炉上水、冷态冲洗、升温升压等启动初期，通过该启动旁路调节锅炉给水流量及压力，简要启动步骤如图 1 所示。

(1) 凝结水系统冲洗合格，除氧器水位补至正常液位，启动循环水系统并开始暖投本机辅助蒸汽系统。

(2) 通过邻机来辅助蒸汽供给本机辅汽联箱，进行投



轴封、抽真空等操作，利用本机辅机至小机调试用汽冲转 1 台汽动给水泵。

(3) 通过该汽动给水泵进行高压加热器及给水管道注水，完成后进行给水系统主、旁路清洗，清洗水质合格后通过设定给水旁路流量控制阀差压调整锅炉上水流量进行锅炉上水及冷态清洗。锅炉上水水质要求及上水流量、时间参照规程或锅炉说明书执行，注意冬季工况及夏季工况上水时间的差异。上水过程中务必注意水冷壁壁温、各排空点排气出水情况以及汽水分离器液位，严禁汽侧进水。

(4) 锅炉冷态清洗合格，点火前通过差压控制调节给水旁路阀开度并配合调整汽动给水泵再循环调阀开度，调节给水流量至点火流量或启动流量。点火后根据汽水分离器出口压力设定给水旁路调节阀前后差压，配合使用该汽动给水泵再循环调阀调整给水压力、流量等参数，完成锅炉热态清洗、升温升压至汽轮机冲转参数操作。

(5) 汽轮机冲转并定速 3000r/min，直至机组并网带负荷至 180MW，此时锅炉一直保持湿态运行，过程中注意控制汽水分离器液位及 361 阀开度，防止提前转干态。负荷 180MW 后执行操作票，完成一级减温水水源由高压加热器出口切换至省煤器出口，然后缓慢开启给水主路电动阀进行给水主、旁路切换。切换完成后关闭给水旁路控制阀，通过给水泵汽轮机转速及再循环调阀来调节给水流量以匹配机组启动需求。此时机组进入单汽动给水泵带负荷运行阶段，给水控制可投入遥控模式（汽泵再循环调阀也投入遥控），正常跟踪负荷变化即可。

(6) 机组升负荷至 240MW 时，通过本机四段抽汽冲转另 1 台汽动给水泵并入给水系统，此时 2 台汽动给水泵带负荷运行，处于机组深度调峰下 1 台汽动给水泵再循环调阀开启状态参与给水流量调节。机组负荷 300MW 且稳定时，将首台汽动给水泵的汽源由辅助蒸汽供汽切换至本机四段抽汽供汽。恢复正常运行方式，机组冷态无电泵启

动过程结束。过程中确认电泵处于正常倒暖状态即可。

3.2 机组无电泵启动注意事项及存在的风险点

(1) 在逻辑设计上,电动给水泵与汽动给水泵启动方式存在差异。孟津公司机组初期采用无电泵启动时需强制锅炉 MFT 联锁汽动给水泵跳闸逻辑,防止因风组尚未启动锅炉未吹扫 MFT 未复位时无法冲转给水泵汽轮机。在多次启动操作基础上,经过专业组讨论优化相关逻辑,将无电泵启动前须强制锅炉 MFT 动作联锁跳闸 2 台汽泵组信号由“长指令”信号修改为“60s 脉冲”信号,避免机组每次无电泵启动时需在后台强制逻辑,防止其他操作风险。

(2) 机组采用无电泵启动时,给水泵汽轮机汽源来自辅助蒸汽(邻机辅汽),加上除氧器加热用汽、轴封用汽、油枪雾化用汽等,启动机组辅汽用汽量较大,虽有利于邻机提高蒸汽参数。但需要注意邻机辅汽参数稳定以及高负荷下给水系统等参数。如邻机在 480MW 负荷点出现冷段再热蒸汽与四段抽汽压力接近点,自动切换会出现辅汽温度的大幅变化,以及邻机满负荷运行时给水控制可能到上限,无法满足启动机组大流量用汽需求。

(3) 无电泵启动过程中需要严密监视大汽轮机相关参数,如盘车转速、高中压缸上下缸温差、四段抽汽管道壁温等,并确认四段抽汽管道各疏水阀门开启,严防辅助蒸汽通过给水泵汽轮机调试用汽管道串入四段抽汽管道,进入汽轮机汽缸出现异常。

(4) 孟津公司配套的给水泵汽轮机设计调节范围为 2900 ~ 5800r/min,一阶临界转速区为 2000 ~ 2850r/min,加上给水泵汽轮机 2000r/min 以下长时间运行时易出现排气温度高等问题,一般机组无电泵启动时均将汽动给水泵冲转至 3000r/min 以避开临界区。此时汽泵出口压力约 11MPa,出口流量约 600t/h,机组启动期间调节给水流量需通过给水旁路控制阀与汽泵再循环调阀共同调节。

(5) 机组启动后期带负荷至 240MW 时,及时暖投本机四段抽汽至给水泵汽轮机供汽管道,做好另 1 台汽动给水泵冲转工作,采用本机四段抽汽冲转定速 3000r/min 无异常后并入系统运行,此时本机 2 台汽动给水泵汽源分别是邻机辅汽和本机四段抽汽,虽然汽源参数不同,但通过运行观察汽泵组运行参数均正常,给水调节自动跟踪均正常。机组负荷 300MW 时将首台汽动给水泵汽源由邻机辅

汽切换至本机四段抽汽,退出调试汽源,恢复机组正常运行方式。

4 机组采用无电泵启动方式安全性与经济性分析

(1) 安全性方面。通过前期安全性评估及机组多次启动时采用无电泵启动的具体实践,整体安全风险受控,实际操作量相对常规方式下先采用电动给水泵启动至 180MW 负荷,然后通过辅汽(本机冷段再热蒸汽或邻机辅助蒸汽供汽)冲转 1 台汽动给水泵并入系统,逐步退出电动给水泵至备用方式。机组带负荷至 240MW 以上用本机四段抽汽冲转另外 1 台汽泵并入系统直至正常运行的方式,减少了 1 台动给水泵 + 电动给水泵运行的并退及电动给水泵的退出操作。

(2) 经济性方面。通过对比同一机组采用不同启动方式下电动给水泵运行时间、电流,在机组纯冷态工况下采用汽动给水泵直接启动时,经综合计算可节约厂用电 9 万 kW·h/ 次,且因为操作量减少,启动时间可缩短约 1 ~ 1.5h。说明机组采用无电泵启动具有良好的经济效益,且减少了后期电动给水泵退出、2 台汽动给水泵依次并入的操作,整个机组启动过程的安全性也有了一定的提升。

5 结语

总结分析孟津公司 2 台机组无电泵启动方式,无论是安全性还是经济性都是成功的,且可以借鉴推广。针对该方式下启动期间存在的问题,通过运行方式优化完善可以很好地改善。目前火力发电机组多处于停备时间长、启停操作多的现状,在广泛开展机组节能降耗,提升机组经济性方面的同时,机组采用无电泵启动方式以降低机组启动成本无疑是成熟且可广泛推广的,孟津公司给水系统启动旁路设计对于新建电厂以及已投产机组设计、改造给水系统启动回路同样具有较好的参考价值。

参考文献

- [1] 孙树哲. 600MW 机组无电泵启停方式研究与应用[J]. 科技信息, 2010 (35) : 2.
- [2] 覃恒锋. 用汽动给水泵代替电泵方式启停 600MW 机组分析探讨[J]. 企业科技与发展, 2013 (11) : 55.

作者简介

林长治 (1983—),男,河南商丘人,本科,工程师,主要研究方向为火电厂运行管理、汽轮机运行。

叙毕铁路柔性接触网分段绝缘器安装技术

凌 杰

(中铁十二局集团电气化工程有限公司, 天津 300000)

[摘要]文章介绍电气化铁路柔性接触网的分段绝缘器在单线铁路中的运行状况及施工安装中可能出现的问题，并提出一些在安装过程中切实可行的解决方案。

[关键词]分段绝缘器安装；柔性接触网；调整

[中图分类号]U225 **[文献标志码]**A

新建叙毕铁路(川滇段)是隆黄铁路泸州市叙永县至贵州省毕节市铁路，是一条客货共线电气化铁路，位于川滇黔三省交界地区，属西南艰险山区，正线为单线，线路起自四川省泸州市叙永县，经宜宾市兴文县，云南省昭通市威信县、镇雄县，终于滇黔段省界，全长151.84km，共设14个车站，设计车速120km/h。站内道岔较多，涉及到供电臂的隔离，每个站均涉及到分段绝缘器的安装。分段绝缘器作为接触网关键性设备，对接触网的电气安全起着至关重要的作用，克服了绝缘锚段关节空间限制的缺陷，既保证了供电臂相序之间的绝缘距离，又保证了受电弓在正常运行速度不降弓的前提下，使受电弓快速地从一个供电臂过渡到另外一个供电臂，且不发生安全事故。因此，对于柔性接触网分段绝缘器的安装非常重要。

1 分段绝缘器安装关键技术

在分段绝缘器安装调整时，需结合各项安全、技术手段进行综合研究。在开展正式的分段绝缘器安装调整过程中，有以下几项工艺参数应严格把控。

(1) 通过测量接触线的中线位置，严格控制分段绝缘器距离线路中线的相对距离，并保持分段绝缘器导滑板、接头平滑平顺，减少受电弓对分段绝缘器的磨损量，保证列车运行安全。

(2) 通过测量出分段绝缘器的最佳安装高度，使受电弓经过分段绝缘器时，弓网关系处于最佳状态。分段绝缘器安装的坡度、平面度等参数均处于规范设计值内，减少对接触网的影响，提高了施工质量。

2 分段绝缘器安装技术

2.1 适用范围

适用于所有柔性接触网分段绝缘器安装调整施工。

2.2 工艺原理

通过现场测量，确定分段绝缘器及相关配件安装位置，并采用激光测量仪、水平尺等工具严格控制分段绝缘器距

离线路中线的相对位置，保证分段绝缘器与轨面平行，导滑板、接头过渡平顺。施工完成后再进行模拟检测，保证受电弓在分段绝缘器上安全通过。

2.3 施工工艺流程及操作要点

2.3.1 施工工艺流程

柔性接触网分段绝缘器安装施工工艺流程见图1。

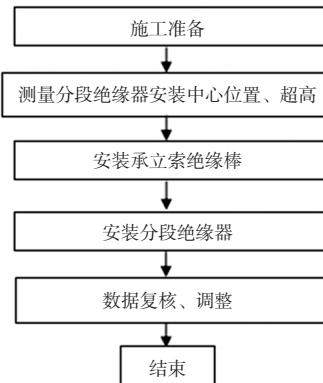


图1 柔性接触网分段绝缘器安装施工工艺流程

2.3.2 操作要点

2.3.2.1 施工准备

分段绝缘器需在断电条件下安装，并且接地设施需提前设置到位，以保证作业时的安全性。安装之前需检查其外观质量是否存在缺陷，同时清点其零部件数量，避免遗漏。规范的做法是分解分段绝缘器，将其零部件一一拆下，然后根据产品说明书核查其数量及类型，主要包括吊弦线夹、各种螺母、支撑架以及锁紧钢丝等。分段绝缘器产品类型并不统一，有些产品设计有U型螺栓，有些则没有，其作用位置在接头线夹处，如果是后一种情况，需准备接触线段，长度同线夹夹板。零件拆解后逐个检查核对，并妥善保管，不得遗失。

2.3.2.2 测量分段绝缘器安装中心位置、超高

根据施工设计图，确认安装分段绝缘器的路线以及分段绝缘器的大概位置。

安装地点：确认钢轨处绝缘节位置，或者在跨中央位置。利用线坠测量出承导线分段绝缘器中心位置，且必须保证该处承导线位于轨道中心±50mm范围内，如果超出±50mm，可前后移动，直至符合要求。且结构高度小于650mm的位置，不能安装分段绝缘器。

使用水平仪或者激光测量仪测量出该安装点处轨面超高。检查该锚段接触网是否存在扭面情况，如果存在，需要在安装之前将接触线矫正。

2.3.2.3 安装承力索绝缘棒

在安装承力索绝缘棒前，记录该跨距内各个吊弦处对于轨面的高度。

(1) 承力索绝缘棒安装时关键在于控制好承力索的收紧过程，其中承力索锥套式终端锚固线夹以及与其配套发生作用的承力索紧线器对收缩过程具有重要的影响。作业之前要先将这两个装置安装到正确的位置上，然后借助手拉葫芦收紧承力索，达到一定程度（以安装处承力索不再受力为判断依据）之后，将其剪断，以胶带将脚线位置的承力索紧固在一起，锥套式终端锚固线夹起到固定承力索的作用，承力索端头存在回头时，需控制好端头和线夹之间的最短长度，通常要达到10cm以上。

(2) 安装连接悬挂装置的绝缘棒及带有吊环的滑轮，调整螺栓等悬挂装置。松开条葫芦，拆除紧线器。

(3) 承力索与分段绝缘器接头连接。

①分段绝缘器的安装要点在于控制好接触线与绝缘器的位置关系。接触线上明确设定了绝缘器的安装点，安装方式为骑跨。接触线上存在特定深度的沟槽，用于和接头线夹嵌合，实现连接。如果线夹上未设计U型螺栓，此时需利用接触线代替U型螺栓，接触线的安装位置在接头线夹的上侧沟槽内。接头线夹以螺母进行固定，为了确保其紧固效果，应使用具有精确计量功能的扭力扳手，要求力控制在50N·m。将沟槽和线夹齿形角的紧固程度作为判断安装效果的依据。

②在分断绝缘器两端的接头线夹之间存在无效的接触线，这部分线缆需做剪断处理。剪断的具体位置在靠近接头线夹大约10cm的地方。

③接触线的头部需做特殊处理，使其达到一定的弯曲度，使用的工具为弯线钳。弯曲度取决于接头线夹上是否设计有U型螺栓，如果没有，向上弯曲45°；反之，弯曲度为120°。线头弯曲的过程中还要将其固定在线夹凹槽内部，并且要紧密贴合。线头固定使用螺母，在设计有U型螺栓的情况下，借助螺母将其固定牢靠，并且紧固时

运用扭力扳手。

④在紧线器的套环上紧固吊弦，并在吊弦上适当施力，主要目的在于使分段绝缘器进入张拉状态。但这种张拉仅仅是初步阶段，为后续安装做准备。施力张拉的过程中还要同步控制紧线夹，将其拧紧到一定程度，但不是完全拧紧。

⑤吊弦线夹、铜滑道的安装需做到精确控制。因此，在全面紧固之前先将其就位，螺栓和线夹等不用一开始就拧紧，而是要进行调节，使其达到足够的安装效果，最后再彻底拧紧。在安装过程中需注意以下问题：铜滑道的长条孔与悬挂组合件不锈钢制动片的圆孔之间存在位置上的对应关系，螺栓要从这些孔内通过。因此，安装时需将其对应好，以便于后续的螺栓安装与固定。分段绝缘器在安装时需呈现出负驰度，可通过调节吊弦线紧线器来使其达到相应状态。安装时对接触线和轨面之间的垂直距离提出了明确的要求，这一参数可通过弹簧秤来测量，如图2所示，使用弹簧秤将接触线提起，力度控制在120～150N。

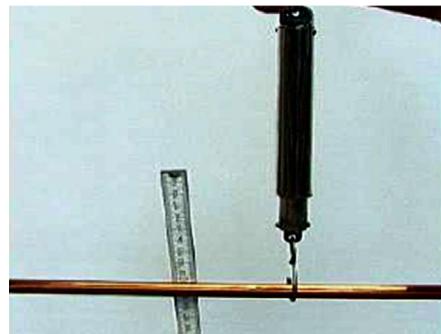


图2 接触网分段绝缘器安装高度示意

⑥在紧固铜滑道、吊弦线夹之前需精确测量其水平度，尤其是导轨。为了达到足够的测量精度，应使用激光设备开展测量，包括各个端部的标高，检测的同时利用之前未彻底紧固的螺栓来微调，使其达到足够的安装精度。

2.3.2.4 数据复核、调整

用水平仪按下列步骤调整铜滑道和绝缘滑道的相对安装位置。

(1) 测量分段绝缘器始触点处，受电弓最先开始接触分段绝缘器的点位，这一点是吊弦线夹螺栓孔中心线与铜滑道下表面的交点。在始触点要求两根铜滑道的下表面和接触线的下表面在同一平面上，并且与轨面平行。采用水平尺复核两根铜滑道的下表面和接触线的下表面在同一平面上，是否存在间隙。如果存在，需进行调整。采用激光测量仪测量两根铜滑道高度是否一致，如果不一致，需进行调整。复核完毕后，拧紧分段绝缘器两端吊弦线夹的螺栓。

(2) 对两根长铜滑道进行调节。这一步的调节目标包括两个，其一是将两根长铜滑道控制在同一水平面上，以底部标高为判断依据；其二是控制铜滑道和绝缘滑道的相对位置，前者在水平高度上需略低于后者，范围是大于2mm，小于5mm。高度调节的方式是控制消弧角铆钉下陷处。在完成以上的调节作业之后将绝缘棒长铜滑道处的螺母略微拧紧。

(3) 对两根短铜滑道进行调节。短铜滑道的高度调节以长铜滑道为依据，确保其下表面平齐，具体的操作位置与长铜滑道调节时相同。待调整完毕之后，如图3中所示(其中 a_1 表示轨道超高)，将绝缘棒短铜滑道处的螺母略微紧固。整体调节过程中需使用辅助性的工具，不可采用金属物体敲击铜滑道，推荐采用木榔头，作用力不可过大。

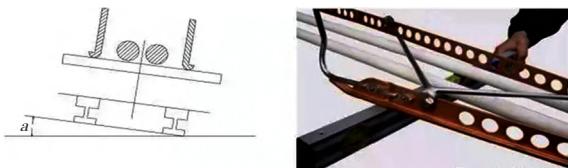


图3 调整短铜滑道水平度

调整好的分段绝缘器的两种滑道的最佳位置，铜滑道安装检测的主要指标是其水平度，在安装结束使用水平仪检测这一指标，如果检测时发现水平仪中气泡无法稳定在中间位置，则表明安装精度不达标，此时需再次进行调整，直到通过水平检测位置。最后将分段绝缘器两端、绝缘棒长铜滑道处及绝缘棒短铜滑道处的螺母拧紧，同样使用扭力扳手，将力矩控制在 $30N \cdot m$ 。所有紧固操作结束之后复测铜滑道，确定底部高度、水平度等参数，过程如图4所示。

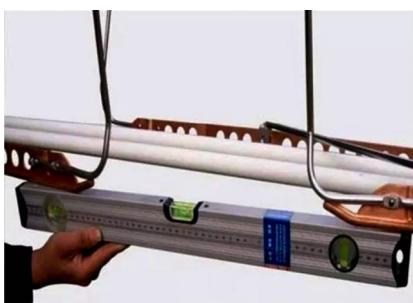


图4 接触网分段绝缘器铜滑道水平状况检测

铜滑道调节完成之后使用L型支架进一步加固，支架的固定部件是其定位夹块，并且结构上附带有垫片，支架配备有6套螺栓，规格为M10×20，以扭力扳手紧固到位，最后再安装开口销。

以上工作全部完成后，需全面检查受电弓在线路上的运行情况。受电弓正式运行时随机车高速运行，过程中不

可遭受任何碰撞。检查的重点是受电弓在线路上的通畅性和平滑性，待检查通过之后方可紧固螺母。紧线器相关螺母的安装非常关键，因为这些螺母具备防滑功能。吊弦线夹上同样具备类似的功能，检查重点是止动垫圈。

吊弦上的螺栓卡子通过螺母进行紧固，卡子上设置有薄片结构，当螺母拧紧之后，要将薄片向着螺母方向弯折，使其覆盖在螺母表面，吊弦上过长的部分盘成环状，提高整齐度。

在保持负驰度以及分段绝缘器高度不变的情况下重新调节两侧吊弦的松紧度，有时在调节中会出现定位管坡度与调节活动相互影响的现象，此时可更改定位管坡度，为分段绝缘器调节工作创造条件，重点是确保负驰度。

2.4 模拟冷滑

在模拟冷滑过程中使用专业设备，主要为模拟作业车，模拟过程中的车速控制在40km/h，模拟来程和去程，受电弓在模拟冷滑过程中沿着轨道运行，并且通过分段绝缘器时保持高度的平稳性，全程不得出现打弓的现象。一旦在分段绝缘器上检测到打弓的问题，需重复上述安装检测步骤，直至消除打弓现象。

2.5 结束

施工负责人填写施工记录。

3 结束语

以上理论研究的分段绝缘器零部件数据、尺寸均为理论数据，因此，在显示实际施工当中，施工单位的隧道净空尺寸、分段绝缘器安装要求、道岔型号、安装处接触网布置状况及各自生产的零部件差异，以及铺架单位的施工误差，导致线路中心难以避免产生误差。因此在具体安装调整过程中，应结合现场实际情况，根据设计要求调整分段绝缘器各项参数、接触网参数。

参考文献

- [1] 任国华. 浅谈电气化铁路分段绝缘器的安装[J]. 水泥工程, 2007 (2) : 45-47.
- [2] 陈朝珍. 电力机车国电分相电气过程机理[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [3] 苗为民. 非绝缘滑道式分段绝缘技术研究[J]. 电气化铁道, 2008 (5) : 33-35.

作者简介

凌杰（1982—），男，四川江油人，本科，工程师，主要研究方向为铁路接触网供电。

2-丙基庚醇羰基反应转化率控制研究

唐 通

(国家能源集团包头煤化工有限责任公司, 内蒙古包头 014010)

[摘要]文章简要介绍2-丙基庚醇的生产技术和工艺方法, 对影响羰基合成反应生成中间戊醛产品质量的因素进行分析研究, 针对影响羰基反应转化率的因素, 对羰基反应相关工艺控制进行了系统优化, 提高了中间产品收率, 也提出了生产解决方案。

[关键词]2-丙基庚醇; 羰基反应; 戊醛; 正异比; 提高收率

[中图分类号]TQ223.12 **[文献标志码]**A

某公司以煤基(MTO)抽余C₄中正丁烯, 顺、反丁烯和PSA单元通过变压吸附生产的合成气为原料, 在一定的温度压力下, 通过催化剂作用发生羰基化反应生成中间产品戊醛, 戊醛转化生成PBA, PBA通过加氢反应生成2-丙基庚醇。2-丙基庚醇分子式为C₁₀H₂₂O, 相对分子质量为158.3, 在常温下为无色透明液体, 密度为0.84g/cm³, 沸点为210℃, 折光率1.4371。2-丙基庚醇也称为异癸醇、2-丙基-1-庚醇, 简称2-PH, 常温下外观为无色透明液体状, 不溶于水, 可溶于一般有机溶剂。2-丙基庚醇是一种重要的有机化工原料, 是高碳醇中用量较大的产品之一, 可用来合成表面活性剂、增塑剂、胶粘剂等, 其中, 增塑剂是其重要应用市场, 可用来制造性能更优的聚氯乙烯(简称“PVC”)制品。

我国市场对塑料制品的性能与品质要求不断提高, 聚氯乙烯作为主要塑料产品, 市场空间大, 但其性能存在一定弊端, 限制了其在汽车、电缆、建材等领域的应用。DPHP增塑剂有助于聚氯乙烯性能的提升, 且环保性能更优, 价格低廉, 将替代DOP成为聚氯乙烯的主流增塑剂, 在此背景下, 我国2-丙基庚醇市场前景广阔。

1 2-丙基庚醇产品介绍

2-丙基庚醇产品是生产高级增塑剂的主要原料。以2-丙基庚醇为原料生产的新型增塑剂具有分子链更长、挥发性低、耐热性和耐肥皂水萃取性好、迁移性小、不易析出、更加安全等优点, 广泛用于工程塑料、生活塑料、绝缘材料制品等。此外, 2-丙基庚醇亦可用于表面活性剂生产。作为合成洗涤剂的活性组份, 2-丙基庚醇的丙烯酸酯还可以应用于粘合剂领域。2-丙基庚醇装置包含变压吸附氢单元(PSA)、原料精制单元、羰基合成反应单元、缩合反应单元、液相加氢及精制单元。上述公司年设计生产2-

丙基庚醇产品6万t, 年设计运行时间为8000h, 操作弹性为70%~110%。2-丙基庚醇采用该公司的低压羰基合成技术, 以C₄(C₄H₈)和合成气(H₂/CO)为原料, 通过羰基化反应生成中间产品戊醛, 戊醛经过缩合反应生成PBA(2-丙基庚醛), PBA加氢反应生成粗2-丙基庚醇, 再经过精馏系统后产出2-丙基庚醇产品。

2 2-丙基庚醇生产技术

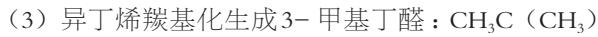
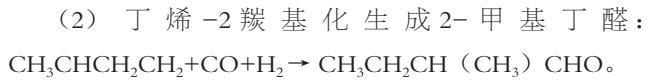
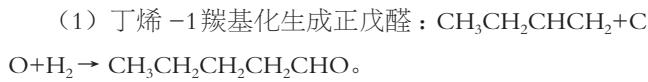
2.1 反应机理

2.1.1 羰基化反应

在上游MTBE装置1-丁烯精馏塔塔釜出料混合C₄, 主要组分是1-丁烯, 顺-2-丁烯、反-2-丁烯, 经过混合C₄精制反应单元除去催化剂中毒的硫化物、氯化物等; 来自甲醇装置的合成气, 经过本装置PSA单元变压吸附生成合成气, 合成气在精制单元除去可使催化剂中毒的羰基络合金属、氯化物、硫化物等。

经过净化的混合C₄原料和合成气, 在3个串联的羰基反应器中, 在一定的温度、压力、催化剂作用下发生羰基化反应, 生成中间产品正戊醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、丁烷等产物。

戊醛是丁烯和CO、H₂反应生成的。大部分的产品是直链正构戊醛, 也会生成少量的支链2-甲基丁醛和3-甲基丁醛、丁烷以及其他醛的自聚物。这些反应发生在压力1.4~1.2MPa(绝压), 温度65~75℃铑基催化剂作用下。主要反应如下。





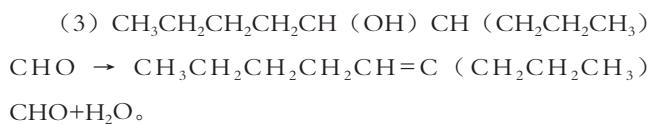
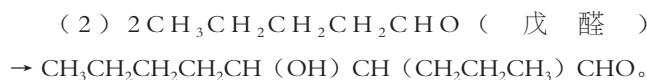
(4) 丁烯加氢生成丁烷: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHCH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ 。

中间产品戊醛的转化率, 直接会影响到2-丙基庚醇的产品收率, 所以控制混合C₄, 主要是1-丁烯, 顺-2-丁烯、反-2-丁烯转化率达到最高, 非常关键。在日常生产中, 密切关注样品分析结果, 通过分析结果找到具体原因, 对羰基反应器进行准确调整操作, 确保产品指标在规定的范围内。

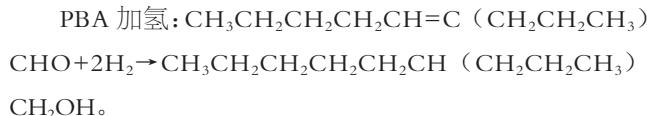
2.1.2 缩合反应

2-丙基庚醇由戊醛经过两个步骤反应生成。第一步戊醛在一定温度、压力、催化剂作用下缩合反应生成原发性的醇醛, 原发性的醇醛脱水生成2-丙基-3-丁基丙烯醛(PBA)。主要反应如下。

(1) 缩合 / 戊醛脱水。



2.1.3 加氢反应



2.2 催化剂介绍

配体催化剂与铑金属在戊醛溶液中形成1:1摩尔羰基催化剂。配价体决定了催化剂的活性、选择性及稳定性。金属铑催化活性和选择性高, 寿命长。金属铑是主催化剂, 配体催化剂是助催化剂。

在羰基反应中, 需要金属铑和配体催化剂共同作用, 才能发生羰基化反应, 转化生成戊醛产品。

2.3 配体催化剂使用和分解途径

配体是以与铑相结合的形态存在, 但要维持一定的过量“自由配体”, 通过频繁加入少量的配体, 保证自由配体的含量维持在一个稳定的低含量, 减少配体的总消耗。在反应溶液里维持适当的低浓度的自由配体可以减少配体的消耗, 也是维持正戊醛的高选择性的必要条件。在高自由配体浓度下配体的分解率会上升。正常运行下, 配体消耗的主要途径是与醛和水发生反应。在较小程度上, 由于氧化和被夹带走导致配体损失。

催化剂配体会缓慢分解成酸, 也有分解产物会形成催化剂毒物。酸本身会促进进一步的分解, 所以阻止其积累是非常重要的。如果酸不被及时清除, 数天内所有的催化剂将会全部中毒, 导致反应无法进行。催化剂配体分解如图1所示。

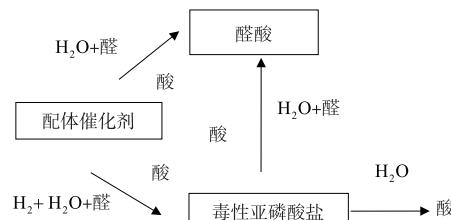


图1 催化剂配体分解情况

3 影响羰基反应器转化率的因素及控制措施

羰基反应即是丁烯-1和CO、H₂在催化剂条件下反应生成戊醛的反应。其中, 大部分反应产物是直链正构戊醛, 也会生成少量的异戊醛(包括2-甲基丁醛和3-甲基丁醛)和丁烷。正戊醛作为本装置生产2-丙基庚醇的中间产品, 其产品质量直接影响2-丙基庚醇的产品质量和收率, 因此提高戊醛的转化率对于提高2-丙基庚醇质量有非常重要的经济效益。

笔者根据多年实际操作经验, 对羰基合成反应的因素进行了全面分析, 总结了影响戊醛产品质量的因素主要有: 反应器中催化剂浓度控制、反应器的CO分压控制、羰基反应器和蒸发器温度控制、羰基反应器中溶液pH值控制、羰基反应器水含量控制、原料组分变化对反应的影响、装置负荷调整对反应的影响、反应器中合成气氢碳比控制。

3.1 羰基合成配体催化剂对正异比的影响

在羰基反应器中, 混合丁烯、CO和H₂与等摩尔的铑催化剂和配体催化剂结合, 在一定的温度和压力下反应生成戊醛, 其中反应器中配体催化剂浓度、铑浓度是影响正异比的关键因素。

在正常操作控制中, 确保分析结果的准确性, 根据分析数据及时补加配体催化剂, 保证戊醛转化率在控制的指标范围内。过低的配体催化剂浓度会使正异比明显降低, 导致戊醛转化率降低; 配体催化剂浓度远远高于控制指标, 会使配体催化剂分解生成毒性亚磷酸盐, 导致配体催化剂损失。

在正常生产过程中, 保证反应器温度、压力、氢碳比在正常控制指标范围内, 对于提高羰基反应的正异比有着至关重要的影响。

3.2 羰基反应CO分压对正异比影响

羰基反应器中总分压包括H₂、CO、丁烯、烷烃和惰性组分分压。CO分压的控制是羰基反应的关键指标。CO分压高，反应器活性低，正异比会降低；CO分压降低，反应器活性增强，正异比会增大，但是CO分压超过控制低限，羰基反应稳定性会变差，会使操作困难。

CO分压的调整中，关键需要控制合成气的H₂和CO及反应器气相排放量。所以需密切关注反应器在线分析色谱，确保在线分析仪表的准确性。

3.3 羰基反应器和蒸发器温度控制

羰基反应器中控制正常的反应温度，有利于提高戊醛的转化率。反应温度越高，反应活性越强，同时配体的分解速度也会加快。在实际生产中要结合配体分解速度和催化剂活性找到合适的温度控制。在经济的温度控制点，烯烃转化率会达到最佳效果。温度过低，催化剂活性低，正异比低；温度高，不利于反应操作，长期会影响催化剂寿命。随着反应温度升高，催化剂活性增强，反应速度加快，但是反应器温度过高，羰基反应稳定性变差，配体催化剂分解加快，从而生成副反应产物增多，降低了反应的效率。

值得注意的是，蒸发系统温度控制也是相当关键的。温度过高，虽然有利于产品和重组分的分离，但是催化剂配体分解速率加快。在实际生产中，要综合蒸发器热水温度、热水量和蒸发器循环量来保证一定的蒸发比，减少配体的分解，提高羰基反应的转化率。

3.4 羰基反应器中溶液pH值对正异比的影响

羰基反应生成戊醛工艺生产过程中，戊醛转化率的提高，除铑催化剂浓度、配体催化剂浓度、CO分压和反应温度的影响外，反应器内溶液的pH值是控制的关键因素。

在生产中要密切关注pH值和总磷浓度，确保pH值和总磷在合适的指标范围内。pH值低于正常控制指标，会使催化剂过酸，导致中毒失活，影响反应的正常进行，甚至会发生停车的风险；pH值高于正常控制指标，反应生成的毒性亚磷酸盐不水解，导致磷酸盐累积，影响催化剂活性，降低羰基反应的转化率。

3.5 羰基反应器水含量对反应的影响

羰基反应过程中会生成毒性亚磷酸盐和重组分，反应运行时间长，会使换热器结垢，导致羰基反应器反应热难以移出，反应器温度上涨，催化剂处于高温状态，长期会影响催化剂活性，导致戊醛转化率降低。

在水存在的情况下，反应器中毒性亚磷酸会水解，如果反应器中缺水，毒性亚磷酸盐不会水解，亚磷酸逐渐累

积，最终会让整个反应难以进行。所以，控制反应器中水含量在正常指标内，对于提高戊醛转化率很重要。

3.6 原料组分变化对反应的影响

混合C₄中1-丁烯、2-丁烯的变化会影响戊醛的转化率。1-丁烯和2-丁烯含量多，戊醛的转化率会提高，在平时生产中，经常关注混合C₄原料组分变化，操作过程中及时进行调整优化，对于提高羰基转化率至关重要。

3.7 装置负荷调整对反应的影响

本装置运行负荷一般在设计负荷的70%~110%，在原料组分不变，铑催化剂和配体催化剂，CO分压基本一致的情况下，随着装置负荷的提高，羰基反应的正异比会逐渐降低。所以装置负荷的调整，会影响戊醛的转化率。

在负荷调整过程中，要做到缓慢升降负荷，根据该公司化验分析数据结果分析具体原因，及时进行反应器的调整，保证戊醛转化率达到最高。

3.8 反应器中合成气氢碳比控制

在羰基反应器中，氢碳比的控制非常关键。PSA单元的合成气经过变压吸附处理，高压合成气和低压合成气充分混合，通过在线分析仪表，调节高压合成气的流量，保证氢碳比在控制指标范围内。根据反应器在线分析仪表，及时进行少量补H₂操作，确保混合C₄的转化率尽可能达到最高。

4 总结

(1) 羰基反应在生产过程中要密切关注各因素控制指标，尤其是自由配体催化剂浓度，这是保证催化剂活性和戊醛转化的关键控制指标。确保羰基反应器配体浓度达到合适的控制参数，对于提高羰基反应正异比，提高戊醛的转化率非常重要。在烯烃转化率达标的情况下，降低催化剂能耗，实现提质增效。

(2) 2-丙基庚醇生产工艺流程复杂，影响生成产品戊醛转化率的因素较多。在生产过程中，要密切关注在线分析结果，定期进行校表，保证在线仪表准确。根据分析结果，及时进行调整处理，确保中间产品戊醛转化率达到最高。

(3) 在正常生产过程中，如果出现装置生产波动，优先降低负荷，保证混合C₄转化率，确保中间产品戊醛在合格指标内。

(4) 中间产品戊醛的转化率，直接影响到2-丙基庚醇的质量和产量。在日常操作中，也要重点关注影响戊醛转化的正异比，将正异比控制在合适的指标范围内。

(5) 在羰基化过程中，反应器内溶液pH值的控制非

小型汽轮机轴封抽汽热能回收的研究

刘贵红

(中国铝业股份有限公司广西分公司, 广西平果 531400)

[摘要] 小型汽轮机轴封抽汽装置, 配有轴密封式和喷射蒸汽泵。轴密封式换热器中的凝结水、射汽泵的功率蒸汽和引出的轴封蒸汽一般都是直接排放, 从而导致凝结水的热量损失和对环境的噪声影响。对轴封抽汽技术进行聚体改进, 将射蒸汽泵替换为盐水蒸汽喷射管, 以水源代替蒸汽, 从而节省了热量和生产操作费用, 获得了较好的经济效果。

[关键词] 小型汽轮机; 轴封抽汽; 热能回收

[中图分类号] TK263.63 **[文献标志码]** A

我国的工业废热具有较高的储量, 并且在工业生产中分布很广, 废热资源是全国能源消费的43%, 回收物的可回收率高达60%, 可以提高废热的利用和节约能源的潜力。小型汽轮机轴封抽汽热能的再生是一种重要的废热再生方式, 对于推进我国工业的节能和减排工作有着重要作用。在机组启动和正常运转期间, 必须将高、低压两端的废气迅速排出。轴封式抽汽装置的作用是连续地将进入到热交换机中的轴封蒸汽和空气中的未凝结物排出, 其中所含有的热能在发电厂的燃油中占有相当大的比重。目前, 小规模的热电厂节能减排已成为不可忽略的工作。因此, 在电厂的节能减排和经济运行中, 轴封水泵的选用和循环利用是十分关键的。

1 轴封系统

汽轮机轴封装置中的关键装置有轴封进汽阀、轴封减压阀、轴封冷却器、凝汽器等。轴封蒸汽装置的作用是向汽轮机、给水泵、小汽轮机的轴封、主汽阀、调节阀的气缸汽封进行密闭, 并使汽封中的漏气被正确引导或排出。在涡轮增压部分, 轴密封装置的主要作用是阻止蒸汽的外溢, 保证涡轮机的高效运行; 在涡轮的低压部分, 可以避免外部的气流流入涡轮, 从而达到最大限度地保持高的真空中度, 同时也可以确保涡轮机组的工作性能。在汽轮机启动的早期, 轴密封进汽门对轴密封的汽轮机进行了控制,

使其向高压气缸内的各个部分输送, 此时, 轴密封安全阀基本上是闭合的。当机组负载增加时, 气缸中的蒸汽会向轴封总管涌去, 从而导致轴封总管的压力超过规定的限位, 轴封进汽门逐步闭合, 轴封减压阀门逐步开启以调节轴封总管的压力, 从而将过剩的轴封蒸汽送入冷凝装置。汽轮机轴封装置在保证汽轮机组的运行过程中, 不仅要对其进行轴封, 还要对其进行温度的调节, 以避免其温度升高。在汽轮机启动过程中, 汽轮机的热压是由汽源的温度决定的, 对汽源汽温进行调控就相当于对其进行了控制。在透平处于自闭的情况下, 因为轴封蒸汽实际上是一个高压缸的漏气, 它的温度高于气源, 此时, 该装置就会打开轴封的进汽门, 用更低的汽源气对轴封的水蒸汽进行降温。

2 汽轮机轴封蒸汽带水的原因分析

(1) 高压汽缸的轴封(末端气密), 其功能是防止蒸汽沿转子漏出, 高压汽缸的前、后两个汽缸末端的气密性差异较大, 在标称工作状态下, 调整级的喷口的压力是4.43MPa, 15级以后的压力是0.11MPa。这是因为有压差, 因此必须要保证发动机之间的空隙, 这样才能保证发动机的整体质量。以上两种情况, 很可能会导致水蒸汽沿着转子流到支座室内, 造成支座的温度上升, 从而导致油液在油路中凝固。显然, 解决油路中存在的水分问题, 关键在于消除轴封泄漏蒸汽。若涡轮增压气缸前端的轴封缝隙调

常关键。 pH 值过低或者过高都会影响正常的生产操作, 从而影响产品质量。在生产中保证 pH 值分析结果的准确性, 根据分析数据进行有效调整, 确保 pH 值在指标范围内。

参考文献

[1] 钱伯章. 二丙基庚醇的市场, 原料和技术综述[J]. 精细

化工原料及中间体, 2011(9): 14-20.

作者简介

唐通(1987—), 男, 内蒙古包头人, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为化学工程与工艺。

节不当，使轴封供汽从此处通过轴颈进入轴套，使机油中含有水分，从而使机油质量下降。

(2) 理想状态下，轴承内部的压力应当小于大气，而这个负压一般是由于轴承排出的油产生了吸附。但由于机油排出的油烟在转子的高速转动下，很快就会在轴承室里蔓延开来，将压力完全填满了轴承室。如果不能迅速排除，就会从挡位缝隙中泄漏，在油挡外面积聚，导致机油泄漏。因此，要用抽油器来维持承力箱内的负压，但不能使负压过大，以免把泄漏的气体吸进支座室内。这个问题很复杂，选择适当的负压来保证两种设备的负压都在 $12 \sim 30\text{mm}$ ，这要根据实际状况而定。

3 轴封抽汽系统运行概况

3.1 轴封抽汽系统改造前运行方式

改造前轴封抽汽模式：启动装置采用高速蒸汽喷射的作用对轴封换热器进行抽吸，使其压缩为水蒸气，并在汽轮机负载增大时逐步加大进汽阀门的压力，以适应汽轮发电机组的负载。采用U型水封法将轴密封的换热器中的凝结水排放出去。汽泵配有旁路阀门，在发生装置的问题时，可以从旁路排放。

3.2 运行中存在的问题

工作蒸汽通过喷汽泵将低压的封汽引射排放到空气中，再通过循环冷却水进行冷却，然后由U型水封管排放到下水道中。系统改造前的蒸汽和水消耗情况，如图1所示，两者都很徒劳，同时还伴随着噪声。随着重油价格持续走高，蒸汽成本持续上升，各大企业纷纷寻求新的节电途径，对轴封抽汽进行了优化和改造。

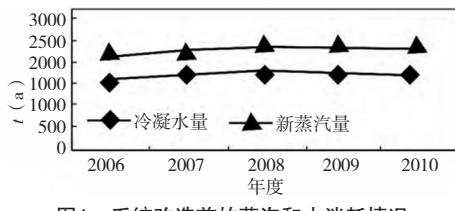


图1 系统改造前的蒸汽和水消耗情况

3.2.1 轴抽风机及出口积水

在运转的过程中，轴瓦经常会有渗漏现象，而且在运转的过程中，由于电机的振动较大，导致了风机的轴承受损。首先，对轴封式加热器进行了检测，结果表明，在轴封式加热器的蒸汽一侧，处于一个相对较低的位置，据此得出结论，该热水器内的水不会流入到轴风扇中。如果轴封加热炉没有返潮，则是因为轴吸风机的排气混合物（蒸汽和气体）中的冷凝水回流到轴排风扇的出口处。轴吸风扇的排气口出现冷凝现象的原因是排汽口和蒸汽室（高达

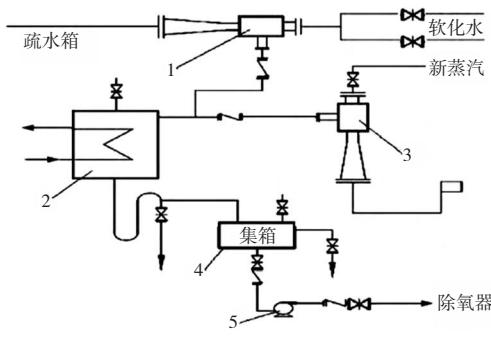
30多米）相连，然后再从空气通道排放出去。这样一来，从轴吸风扇排放的蒸汽和气体混合物（低于 50°C ）就会被排放到大气和空气中，变成了水。

3.2.2 低压缸轴封冒汽

在机组正常工作时，低压缸的前、后轴被封住了，低压缸的轴承盒上有很多的水珠，这些水珠会在机油中产生，从而造成液压系统和调节系统的阀芯堵塞、锈蚀，从而对机组的运行安全造成严重的威胁。为防止低压轴封冒蒸汽，在机组运转时，应关小低压气阀，以保证其处于紧闭的位置；同时，减小了轴封的蒸汽供给，但仍然有漏汽现象。针对这个问题，必须进行详细分析，了解到低压轴封的低压油缸内蒸汽压力具有相当高的正压，目前已达 2.5kPa 。而且，在这个时候，如果开启泄水阀（低压轴封倒气压力计），就会释放出很多的水。分析表明，由于低压力的轴封回汽管中存在水，造成了低压汽缸的轴封回汽管路阻塞，回蒸汽阻塞，低压力轴封发生了明显的冒汽现象。经过对低压力轴封回汽管路中的积水进行分析发现，经过降温后，高压油泵送至低压力轴封内，经过压力油罐的降温节流，使压力油泵内的蒸汽温度急剧降低，凝结成水，在回汽管路中积累，形成了大量的积水，使低压力轴封回汽管路受到阻碍。

4 轴封抽汽系统技改方案

通过对轴封抽汽工艺进行技术改进，节约了汽泵的汽耗，减少汽轮机能耗；增设凝气机，对轴密封换热器中的凝气液进行了循环利用。汽封抽汽系统改造后的工艺流程，如图2所示。



1. 水汽引射器；2. 轴封换热器；3. 射汽抽气器；

4. 集水箱；5. 冷凝水回收

图2 轴封抽汽系统改造后的工艺流程

4.1 水汽引射器工作特性

(1) 抽吸的真空并不要求很高，为了维持轴封换热器在多种工况下正常工作，其抽吸负压一般在 $0.005 \sim 0.01\text{MPa}$ 。

(2) 抽汽速率和抽汽量较大，且抽出的介质为汽气混合物。射汽水泵工作蒸汽由新汽缸节流，节流损耗大，从

节能角度来看不合算；利用水蒸汽喷射装置可以节约在射流水泵中的蒸汽，而且不需使用冷却装置，从而增加了电厂的经济效益。蒸汽喷射装置可以利用水作为能量来完成所需设备工作，无需电源、其他任何能源装置，具有结构紧凑、工作稳定等特点。它包括进水室，喷嘴，混合室，扩散管和反向阀门。蒸汽喷射系统的工作机理：当某一压强的软化水流进口水腔后，通过喷管的喷射，降低压强，喷射液质点的水平扰动，从而将高压水的压力能转换为速度能，在混合腔内产生真空环境，把轴密封换热器的气体和蒸汽混合物吸入到搅拌室内，对其进行加温，从而提高被吸入的空气流量，降低流动速率，降低压强，从而将动能转换为气压能。最终，当扩散管外压稍大于正常气压时，将被加热的软化水排放到锅炉的疏水罐中，降低了锅炉的脱氧量。蒸汽喷嘴的水源软化水来源于软化水，通过生产部门的热量吸收到蒸汽管道中，通过管道输送到锅炉；采用了0.45MPa的喷管，在42~52℃的高温下，采用0.005MPa的水蒸汽喷射装置，选用了WSJ10.2/65-65型水汽引射器，其性能指标见表1。蒸汽喷嘴是通过高速水流的喷射，使其在轴密封换热器上形成5~10kPa的负压。在汽轮机的操作中，需要对蒸汽和液体进行分离，并在蒸汽引入口加装反向阀门。同时，为保证抽汽装置的正常运转和安全，在蒸汽抽汽机的引出口加装反向阀门，并预留蒸汽抽汽机和旁路作为操作后备，保证了其安全性和经济性。

表1 水汽引射器主要特性参数

射水抽气器	表压 (MPa)	温度 (℃)	流量 (kg/h)
高压水	0.26 ~ 0.5	42 ~ 52	10000
低压水	0.1	65	10200
引射气	0.005 ~ 0.01(负压)	103	200

4.2 凝结水回收

凝结水回收设备由回收泵、集水箱和管道阀门组成。在循环水泵PT型式的换热器中，使用压缩气体将其压进脱氧机的水箱中。PT型循环水泵是一种小型循环再生设备，它利用高压气体把凝结的水从低位输送到更高的地方。凝结水的温度比常规的电离式离心泵要高得多，而且不存在气蚀、不存在渗漏的问题，而且可以从其他管道、设备中得到各种疏水性，例如在主蒸汽门前，见表2。

表2 回收泵参数

参数	数值
凝结水流量 (kg/h)	1.043
压缩空气压力 (MPa)	0.6
进水压力 (mm)	152
提升高度 (MPa)	0.4

5 技改后的效果

5.1 技改后运行方式

(1) 在机组开始处于低温状态时，采用蒸汽引射器对轴封换热装置进行抽汽，轴封蒸汽引出并加湿，并在蒸汽引射器内对蒸汽进行加热。在蒸汽机的负载不断增加的情况下，蒸汽引入器入室的开口量也随之增加。在常规工况下，蒸汽喷射装置开始工作，喷汽泵作为后备。汽封旁路阀还可以排除轴密封换热器的失效。

(2) 在常规操作中，先将U型管内的断流关掉，然后将轴封的冷却液导入自产的集水池中，然后送入疏水系统，由高压气体将其压入到脱氧机中。当疏水设备和管道阀门出现问题时，凝结水可以直接从U型水管中排放。

5.2 运行效果

汽轮机组启动，注入蒸汽喷射器的高压水，将压力调节到5~10kPa，汽封排气管进行观测，发现汽封排气管有少量冒烟，其工作指标与装置规定相符，说明蒸汽喷射装置可以达到轴密封的要求。利用水汽喷射装置换成软水，彻底解决了蒸汽向外排放和噪声的问题。在此基础上增设了一组蒸汽喷射装置和喷汽泵，使其在轴封抽汽装置中的使用更加可靠。通过调节压缩机的气压0.5MPa，使U型管上的断流阀门关闭，使其冷却后的水能自行排放到除氧机中，从而大大降低了锅炉的燃油和污水处理成本。改型后的蒸汽泵进蒸汽为1.64t/d，轴密封蒸汽为6.77t/d，经过以上改良后的热能全部恢复。按照359.48元/t的标准，每年的运营成本为110.36万元，设备改造费用13万元。

6 结语

本技术改造项目操作简单、易于维护；只需增加蒸汽导流管和疏水回收设备，即可实现设备的节能降耗，并且具备投资小、效果好、循环时间缩短等优点。从该装置的使用状况来看，不仅保证了汽轮的正常运转，而且还满足了蒸汽和冷凝水的循环利用，达到了节约能源和减少排放的目的，为类似设备轴封技术的改造提供了借鉴。

参考文献

- [1] 段坚, 马贤伟. 小型汽轮机轴封抽汽热能回收[J]. 节能技术, 2015, 33 (3) : 287~288.

作者简介

刘贵红 (1984—)，男，广西桂林人，本科，工程师，主要研究方向为电厂锅炉、汽轮机等热能动力设备的运行、维护和管理。

航空发动机机匣数控加工技术研究

汪 昭, 秦 杰, 周 贝

(中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412000)

[摘要] 机匣属于航空发动机的基本组成部件, 发动机机匣具有复杂的结构形状特征, 机匣加工的工艺材料性质也较为特殊。近年来, 数控加工的自动化技术已经全面融入机匣加工的实践过程, 通过构建仿真的机匣加工立体动态模型来模拟机匣的组成结构特征, 进而实现简化数控加工的操作流程以及确保机匣尺寸准确性的目标。文章探讨数控加工技术运用于航空发动机机匣的加工实施难点, 结合机匣加工的基本需求探析技术完善路径。

[关键词] 航空发动机机匣; 数控加工; 技术运用要点

[中图分类号] V263 **[文献标志码]** A

在航空发动机的体系结构中, 机匣零件主要由高温合金以及钛合金的工艺材料制作而成, 并且具有薄壁的内部结构特征。机匣的基本功能就是包容发动机的关键零部件, 对于发动机的上部结构荷载受力作用进行均匀分摊。航空发动机的机匣结构部件能否得到全面的精细化加工, 直接关系到发动机的整体结构坚固安全性能。数控加工工艺能够保证机匣加工的尺寸参数准确, 有效节约了机匣加工的操作实施成本。可见, 数控加工的智能控制技术应当全面推广运用于发动机机匣的加工生产过程。

1 航空发动机机匣的组成结构特征

目前航空发动机的机匣零件主要包含了箱体机匣以及环形机匣, 发动机机匣的完整结构应当包含机匣本体与静子叶片两个组成部分。发动机机匣的关键结构材料主要包括钛合金、铝合金、复合材料、高强度钢材、耐高温性质的特殊合金材料。现阶段的航空发动机型号规格呈现出丰富多样的总体发展特征, 因此决定了机匣传统结构应当实现全面的更新优化^[1]。

发动机机匣通常应当包含前后两侧的安装边以及机匣侧壁, 机匣壳体的外侧表面结构部位应当连接于环带或者加强筋, 机匣薄壁设计为圆柱体或者圆锥体的外观形状。环形开式的机匣组成结构主要设计为纵向的机匣安装边, 运用螺旋槽或者T型槽来组成机匣内部的表面结构。因此从总体角度来讲, 航空发动机的机匣箱体组成结构普遍呈现出较差的材料刚性与复杂的外观形状特征, 机匣侧壁结构相对较薄。在这种情况下, 加工机匣的全过程将会涉及到槽体与凹凸部位的特殊加工处理, 因此增加了机匣数控加工的实施难度。

2 航空发动机机匣数控加工的技术实施难点

2.1 数控加工的材料性质特殊

机匣加工材料是否具有特殊的材料性质, 直接关系到

机匣加工的操作实施难度。目前经常用到的机匣加工材料主要包含强度较高的合金材料以及钢材, 上述材料不仅具有较大的切削加工处理难度, 同时还会存在粘附力增加的情况。相比于普通的钢材结构而言, 机匣钢材结构的切削作用力达到125%左右。数控加工的操作实施人员如果没有妥善处理切削表面部位, 则较容易造成碎屑堆积的情况, 进而影响到整体的切削加工质量。在高温加工的情况下, 未经必要冷却处理的钛合金与钢材就会附着于切削刀具的表面部位, 从而形成瘤状物。

钛合金的加工金属材料具有较小的弹性模量特征, 由于受到零件回弹作用力产生的明显影响, 对于刀具表面的结构部位就会形成显著的磨损。例如, 高温合金的特殊材料在进行数控加工的实施过程中, 关键就是要准确界定材料的切削作用力大小。切削过程产生的热量如果没有得到及时散发, 则会聚集在表面的刀具部位, 导致碎屑积存。由此可见, 特殊的机匣加工材料将会显著增加切削加工的整体实施难度, 因此, 应当严格选择切削加工材料。

2.2 机匣本体结构较为复杂

机机匣本体结构具有复杂性, 机匣数控加工的全面实施过程应当建立在科学的加工方案前提下。目前各种机匣结构都存在孔系、凹凸与槽体等加工难度较大的部位, 并且分布着较为复杂的钢筋支撑结构。在锻造机匣毛坯的实施过程中, 技术人员不仅应当全面清理表面部位的焊渣, 同时还要保证经过铸造、锻造或者焊接处理以后的机匣腔体与槽体结构达到平整光滑的效果。对于加工涡轮叶片的机匣内部零件, 通常应当确保限定在0.02mm以内的加工尺寸误差, 防止超出加工尺寸偏差的范围限度。

在外部连接的机匣零部件中, 关键应当体现在全面加工机匣的冷却控制系统、油路系统、泵体与管路结构等,

严格确保达到最基本的加工尺寸精度标准要求。机匣本体结构的复杂性决定了机匣加工的数控工艺流程目前亟待得到全面的完善优化，旨在严格限定机匣加工的孔隙尺寸大小。加工技术人员应当保证机匣加工的体系结构坚固，避免存在焊接不够牢固等缺陷。数控加工机匣结构的技术应当包含材料技术、刀具加工技术、数控编程技术等，客观上体现了机匣加工工艺方案的复杂性。

2.3 数控加工的工艺流程繁琐

具有繁琐特征的数控加工操作实施方案应当得到合理的改进，但是现有的机匣加工步骤流程仍然存在复杂性。数控加工的基本要点应当体现在严格控制加工尺寸的偏差，为此要精心设计数控加工的编程方案。在此过程中，缺少加工管理的机匣加工尺寸就会产生误差，无法确保达到最基本的精准程度要求。数控加工的错误实施还容易导致增加机匣本体结构的变形风险，甚至导致加工后的机匣无法正常使用。

加工变形误差普遍存在于机匣加工的各个具体实施环节，机匣加工的变形误差在没有得到妥善纠正的情况下，则容易导致发动机的叶片频繁振颤，威胁到发动机的使用安全。发动机叶片存在较高的振动频率还会缩短发动机的使用年限，增加了发动机在安全运行中的隐患因素。现阶段的数控加工以及建模技术方法正在普遍适用于机匣加工领域。但是从总体角度来讲，机匣数控加工的繁琐工艺流程仍然未能从根本上获得转变。

图1为机匣数控加工的基本工艺流程，在有限元仿真的软件平台支撑下，首先应当模拟得到机匣切削的作用力大小，并且准确计算残余应力。仿真建模软件对于过大的零件切削作用力需要进行适度修正，运用加工变形作用力的仿真技术方法来实现必要的调整。通过实施以上的仿真模拟操作实施过程，能够确保得到最终的机匣加工工艺优化方案，确保了机匣加工的各项参数准确性。

3 航空发动机机匣数控加工的技术运用完善路径

3.1 合理优化机匣加工路线

机匣加工路线只有得到了科学合理的改进优化，才能为机匣加工的整体质量提供更为有效的保障。在此前提下，对目前机匣加工的技术实施路线应当进行必要的创新，确保将数控工艺手段融入贯穿于机匣加工过程。具体在制作机匣毛坯的操作实施步骤中，应当综合考虑机匣毛坯焊接与组装的各个流程技术要点，确保合理预留装夹位置。装夹操作实施的前提在于实现准确的装夹节点定位，这就必须保证装夹定位的外圆结构达到最基本的端面尺寸要

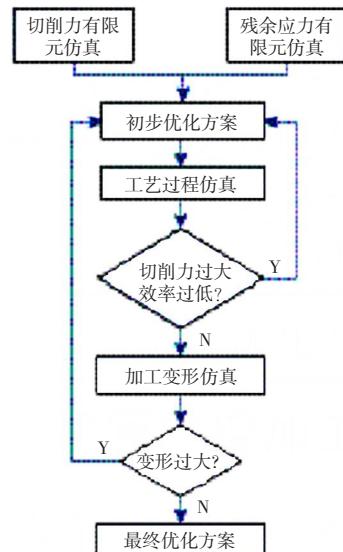


图1 机匣数控加工的工艺流程

求，避免出现装夹定位实施中的尺寸错误。

加工机匣的工艺路线应当严格按照先粗后精的基本实施要求，确保经过粗加工与精细化加工来保证机匣尺寸定位的准确性。具体针对于粗加工的先期处理工艺而言，关键应当落实在控制加工效率，确保运用合理的技术方法来提升粗加工的操作实施效率。相比而言，技术人员对于精细化的机匣部件加工过程应当严格限定加工尺寸的错误，尽可能消除机匣加工的尺寸误差。在热处理的工艺流程中，关键就是要准确判断机匣部件的表面变形风险，通过实施阶段性的表面变形控制技术来确保机匣尺寸的精度提高。

机匣机械设计与机械制造的整个开展过程都要依赖于企业的创新技术人才，机械制造生产企业的管理人员目前必须深刻认识到企业技术人才具备的重要实践影响。机械设计与机械生产制造的传统工艺流程表现为粗放式的缺陷，不仅违背了机械制造资源的优化配置使用宗旨目标，并且还会造成机械制造实践中的生态破坏以及生态污染后果。机匣机械制造的企业管理人员亟待创新自动化的生产企业方法，通过全面更新与转变现有的机械生产流程来提升企业环保效益。针对于排放固废污染物、控制机械运行噪声、循环利用机械制造资源等重点性的企业生产运行过程来讲，要积极采纳与运用自动化手段。针对企业信息化人才应当展开全方位的培养引进工作，旨在运用多元化的企业人员激励手段来培养更高水准能力的自动化机械制造人才。

3.2 构建机匣数控加工的信息化模型

近年来，仿真建模软件正在被普遍用于机匣数控加工的操作处理过程。机匣数控加工的全面实施过程不能缺少

数控加工的立体化模型作为必要支撑，旨在实现机匣加工的各个部位尺寸调整控制效果。按照现有的机匣加工尺寸精度控制要求，数控加工过程中的机匣铣刨余量应当限定在0.3mm以内，风扇机匣的车削余量应当避免超出0.2mm。通过实施精确化的机匣尺寸精度误差控制，应当能够有效确保经过合理优化以及全面调整后的机匣加工质量达标。

图2所示为机匣数控加工的BIM建模图，数控加工模型的基本组成部分包含定位槽、止口、压板、加强腹板以及螺栓螺母。BIM的仿真建模软件能够通过组合机匣各个零部件来形成完整的立体结构图，便于技术人员全面开展机匣仿真加工的实践过程。由此可见，自动化与信息化的机匣仿真加工模型具有显著的实践作用。在上述立体化机匣加工模型中，技术人员必须合理控制机匣压板、加强腹板与螺栓螺母的各个关键结构部件精确程度，旨在实现全方位的机匣尺寸精度合格要求。信息化模型的基本作用体现在严格确保加工处理后的机匣尺寸达到良好的精确指标，确保实现精细化的机匣加工处理目标。

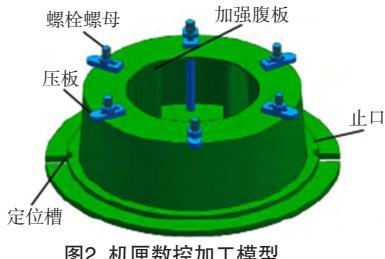


图2 机匣数控加工模型

目前，机匣制造企业生产规模日益扩大，企业技术人员应当掌握网络数据库、立体化模型等关键信息技术方法，正确应对当前背景下的机械设计制造全新发展趋势。机匣机械自动化的零部件设计与生产整体实施过程应当建立在规范体系的支撑基础上。因此，现阶段的企业管理人员必须尽快设立体系化与规范化的机械设计制造模式。机械制造的操作实施人员对于各个机械制造加工细节都要注意严格把控产品质量，进而在根本上防范机械产品的质量事故缺陷。网络数据库应当用于保存机械设计的图纸资料，切实维护机械制造加工生产企业的良好经济效益。机匣制造与加工的操作实施人员只有做到运用智能化的立体结构模型，才能确保完整收集与整合庞大規模的机械制造数据。

3.3 准确控制刀位轨迹

铣削工艺构成了机匣加工中的核心工艺要点，但是很多机匣加工人员在进行刀位轨迹的控制过程中，通常很难

保证机匣加工的刀位轨迹准确。这是由于刀位轨迹的优化设计过程必须要考虑到预留一定的铣削操作余量，确保对于粗加工的工艺实施路径进行合理的调整。因此，对于机匣凸台与回转面等关键结构部位，必须要严格控制刀位轨迹的深浅程度，按照灵活处理的基本思路来进行必要的完善创新。

刀位轨迹偏差在有限元软件上应当得到准确反映，从而形成精准程度更高的刀位轨迹误差控制系统。对于插入铣刀的深度位置以及角度位置都应当给予灵活的改变，通过准确采集实时性的刀位轨迹数据来实现上述优化控制效果。此外，技术人员还需要格外重视铣刀的刀具是否存在显著的磨损倾向，及时妥善处理铣刀过度磨损的缺陷。对于变形过大的尺寸精度缺陷应当立即进行纠正，确保制定出最优化的机匣加工方案，合理节约机匣数控加工资源。

模具回旋作用力对于机匣坯料固有的外观形态结构能够予以重新塑造，确保达到全面吻合机匣成型需求的目标。工程技术人员应当准确理解加工图纸，从而实现更好的金属可塑性以及韧性程度指标。冲压成型与铸造成型的金属材料成型处理工艺都属于二次成型工艺，机匣二次成型技术适用于激光冲压、合板成型以及高压成型等特殊的金属坯料加工处理。运用二次成型的金属加工处理工艺非常有利于控制模具加工的工艺成本。

4 结束语

综上所述，全面进行航空发动机的机匣结构数控加工的过程中，关键技术要点就是构建立体化的数控加工模型，运用模拟机匣加工参数的技术手段来避免产生机匣加工误差。由于受到繁琐的加工工艺流程以及特殊性质的机匣结构材料影响，导致机匣加工的工艺实施过程存在较大的难度。为了促进数控加工的工艺思路优化，目前应当着眼于数控加工中的刀位轨迹控制，确保机匣加工的工艺路线得到合理的优化。

参考文献

- [1] 邓元山, 刘宁, 胡志星. 铝镁机匣内间断式深孔数控高效加工技术[J]. 金属加工(冷加工), 2022(6): 74-77.

作者简介

汪昭 (1992—)，男，湖南株洲人，本科，高级技师，主要研究方向为机械制造－数控技术应用。

船舶电气自动化系统技术现状及设备故障排除方法

王 清

(中远海运船员管理有限公司天津分公司, 天津 300000)

[摘要] 目前, 船舶具备较为典型的大型化、快速化和现代化的特征, 各类新兴技术广泛应用于船舶的建设之中。这些技术在全面提升船舶功能性的同时, 也显著地提升了其适用范围。同时需要注意的是, 相关技术的日渐复杂也导致船舶在应用过程中出现故障的可能性日益增大, 尤其是船舶的电气自动化系统。文章从现阶段船舶电气自动化系统技术的应用现状入手, 探讨相关设备的故障现象及排除措施。

[关键词] 船舶; 电气自动化; 设备故障

[中图分类号] U672 **[文献标志码]** A

随着船舶上的电器和用电量的增加, 在其日常运行过程中, 各类电气设备均存在一定的故障风险, 会对船舶的电网稳定形成较大的影响。尤其船舶的电站是大型船舶供电的核心设备, 如果这些电气设施出现问题, 所造成的影响将较为严重, 甚至有可能带来人员的伤害以及关键设备的损坏等。为了防范这些状况, 相关工作人员需要掌握现阶段大型船舶的电气自动化技术应用现状及其在应用过程中常见的故障, 在发现问题之后采取正确的措施进行排除, 保障船舶设备的正常运转。

1 船舶电气自动化系统现状

1.1 船舶电气自动化的基本功能及结构

船舶的电气自动化组成包括船舶电力系统和船舶电气负载等, 其中, 船舶的电力系统是发电、变电、电力传输的关键性系统, 相关设备在发挥功能的过程中, 主要是通过船舶原动机(内燃机)消耗燃油输出动力去驱动船舶主发电机产生电能。这一过程的电气自动化系统主要由发电装置、配电装置和负载按照一定的方式进行连接, 从而实现对船舶设备进行供电的目的。电站是船舶电气自动化中最为核心的组成部分, 主要由发电机组、开关电气、保护装置、测量仪表和其他一系列控制设备等构成。从既往的实际运行过程来看, 当船舶电气设备进行安装的阶段, 其安装水平将会对整体的功能形成一定的影响, 因而在设备安装与维护环节应当以专业人员为核心来进行展开。针对不同的用电需求, 现阶段船舶中的电力网构成会存在一定的差异, 通常电力网主要分为动力电网、照明电网和应急电网。在自动化系统之下, 船舶的电站能够根据现阶段的实际用电需求和船舶的运行情况, 按照特定的程序进行设备的自动启动和停机, 且当前的技术条件下相关设备也可

以实现故障自动解列和停机等操作。为了确保船舶电力系统的正常运行, 相关系统还具有自动处理与报警、故障监视等设备及功能。

从船舶电站的情况来看, 相关的自动控制装置在应用过程中的任务主要分为单机管理和整体管理。首先从单机管理的角度来看, 相关控制系统在发挥功能的过程中需要针对不同的发电机组的状态进行控制, 以及在故障现象发生的阶段需要对单独的发电机组进行处理。从整体管理的角度来看, 则是需要针对现阶段船舶电站系统的并联运行状态进行管理。在传统的自动化管理模式中采用的方式是由数字电路结合模拟集成电路构成的系统对相关设备实施自动管理。以这种方式下的积木式自动化电站为例, 其在功能方面主要可以实现对船舶电站的自动启动-停车、电网监视、负荷控制、功率分配等的管理。

1.2 船舶电气系统的特征

(1) 电力系统容量小。相较于陆地上的供电系统, 船舶电力系统的装机容量相对较小, 只需满足单一船舶的用电需求。现阶段的万吨级以上船舶在发电机装机容量方面基本控制在 $1000 \sim 15000\text{kW}$, 即使是最大的船舶电站容量也只有数万千瓦左右。因为船舶的发电站装机容量相对较小, 所以在进行相关设备的启动阶段, 有可能对船舶电气设备造成较大的冲击, 从而有可能导致相应的设备故障现象发生。

(2) 电气设备集中程度较高。由于船舶本身的空间相对较为有限, 因而不允许船舶的各类电气设备之间存在过大的距离, 这种情况造成了船舶的电气设备整体密集程度较高的现象。但同时需要认识到, 电气设备集中度高也极大地降低了电力输送的距离, 因而不需要采用高压输电的

方式来进行电力输送，船舶电网供电的过程中电压和功率通常不会产生严重的损失。然而，由于整体的电网较小、线路较短、结构简单，所以在电网发生故障的情况下，也将会对整个船舶供电系统形成较大的负面影响。

(3) 工作环境恶劣。船舶电气系统具有极强的独立性，但其实际的工作环境相较于陆地而言更为恶劣，如海洋环境之中湿度较高，且存在盐雾、油雾等现象。长期处于这种工作环境之下，将会对金属部件形成较为严重的腐蚀，部分构件的性能和寿命会极大地降低。此外，在船舶航行的过程中将会不可避免地出现振动、摇摆等现象，同时机舱设备长期处于高温环境下，从而加速设备的老化过程。

2 船舶电气系统的故障类型分析及排除

2.1 船舶电气系统故障类型分析

船舶电气设备在实际的运行过程中所出现的故障，其通常是由于电气系统的整体性受到破坏。这种情况有可能造成设备的相应功能失调，不利于船舶的正常航行。在现代化的船舶电气系统之中，相关的故障可能发生在电源装置、配电装置、电力网等各个环节，具体介绍如下。

(1) 发电机故障。发电机故障可能表现为原动机本身故障、发电机内部故障等多种形式。其中原动机故障通常是由于滑油压力低、滑油温度高、冷却故障等因素导致。发电机故障则表现为电压异常、电压波动过大以及发电机逆功率等现象。

(2) 配电装置故障。配电装置故障现象可以表现为发电机主开关跳闸故障、短路及欠压保护跳闸等。

(3) 电力网故障。电力系统一相接地故障的情况下会表现出某相绝缘指示灯熄灭，另外两相绝缘指示灯异常明亮的现象。这种故障的原因主要为某用电负载单相绝缘击穿，从而导致接地故障，或是某负载电动及接线盒接线松脱碰壳等。

2.2 船舶电气系统故障排除

2.2.1 发电机的故障及排除措施

船舶发电机、电站、负载电机及变压器是船舶电气系统的关键组成部分，对其存在的故障进行把握与排除意义重大。船舶发电机出现故障的现象是比较多的，其主要包括不发电、电压低、电压不稳、频率波动大和过热等常见问题，见表1。这些问题产生的原因较为多样，其中如果相关的检测过程中发现发电机不发电，其可能的故障原因是相关设备在既往的检修与安装过程中出现接线错误、剩磁电压过低以及整流元件出现损坏、励磁系统故障等。针对这些问题，相关工作人员可以通过检查发电机的表现，

根据现象查找发电故障的原因，如电压低现象，则有可能是励磁系统故障或者是自动调压器故障，也有可能是励磁系统的电缆破损接地等原因，具体一项一项地排除。而如果是直接没有电压，则有可能是发电机消磁或者励磁系统电路故障等，针对消磁可以通过采取充磁措施进行维修，而励磁系统电路故障可能的原因包括温度、元器件振动等原因，针对具体原因进行优化，或者是检查励磁系统电路线是否破损、整流器是否正常等，由此有效排除发电机故障。如出现电压不稳的情况，首先应该确认原动机运转是否正常，如检查柴油原动机各缸是否正常。其次再通过检查相关电气元件是否已经发生损坏来确认故障点，并对故障元件进行拆卸更换，即可实现对电压不稳定问题的有效排除。

表1 船舶电站常见故障

发电机故障	故障原因
发电机不发电	接线错误 无剩磁 励磁系统出现故障 接触不良
电压低	设备转速不足 励磁电流不足 调压器故障 开关损坏、接触不良 电压表不准
发电电压不稳	励磁故障 接触不良
设备过热	载荷过大 通风阻塞 风扇损坏 轴承损坏 定转子绕组断路
绝缘电阻低	导线损坏接地

以实际情况为例，某船舶进行负载启动试验的过程中2号主发电机无法启动，观察相关控制箱发现当前该发电机状态为遥控状态，燃油压力为0.8MPa，燃油进机温度为105℃，低温与高温水压均为0.12MPa，润滑油预润压力0.06MPa，滑油合进主轴承压力0.025MPa，辅机空气瓶压力2.8MPa。检查中发现主发动机外观及各条件正常，但启动阶段的阻力较大，完成启动之后无法正常运行，根据这些信息认为发电机的叶片受损。对设备进行拆解，发现发电机叶片全部断裂，其形成原因为启动过程中受到管路内异物冲击。明确原因后进行设备的更换并启动，设备运行正常，故障排除。

2.2.2 配电故障及排除

主配电板是船舶电力系统中最重要的配电装置，其主

要由发电机控制屏、负载屏、组合启动屏等组成。主配电板故障主要包括发电机主配电板跳闸、发电机主配电板不闭合等。发电机主配电板跳闸故障一般是由于相关线路之中存在大电流短路、过载及逆功率、主开关与动力管理系统通信故障等情况，在进行处置过程中可以通过调整整定值，并严格按照当前船舶电站的整体负荷情况实施分级卸载、保证励磁恒压系统等措施来对这一故障进行处置。以实际情况为例，某船舶的3台发电机并联运行的过程中，2号发电机主开关突然发生自动跳闸的情况，且动力管理系统面板上显示“Set 2 : Generator Data Invalid ; Set 2 : Unexpected Trip Fault”，在对其故障实施诊断的过程中发现发电机主开关自动跳闸后，发电机并未发生自动停机现象，同时该发电机的运行过程也处于正常的状态之下，主开关上的过流脱扣器也处于正常状态，如图1所示。各脱扣原因指示灯并未亮起。对相关的通信回路进行检查，发现接线点出现松动，导致通信接线接触不良，从而导致故障。通过对接线进行重新处理后，启动发电机合闸运行，故障得以排除。



图1 过流脱扣器状态

发电机主配电板不闭合也是比较常见的故障现象，其产生的原因可能是齿轮打滑、合闸线圈烧毁以及控制单元故障等，在处置的过程中可以逐一对原因进行排除，从而确保其正常工作。以实际情况为例，某船舶在其1号发电机正常启动并平稳运行之后，利用主配电板进行并车，实施相关操作之后显示电压、频率均正常，等待一段时间之后出现并车失败警报以及合闸失败警报。在进行故障的排除过程中，首先针对其1号发电机主开关故障进行排除，

工作人员称以往出现过此类情况，但再次试车的时候成功。通过分析电气图后，判断有可能是PPU故障，对1号发电机进行重新启动，观察电压及频率正常，在进行同步的过程中，观察相关继电器和电动电位器，发现PPU升速端口输出正常。在达到并车条件之后，检查相关端口，显示PPU相关端口电阻为0，排除其故障可能性，基本确认为合闸线圈故障，使用备件对线圈进行更换，再次启动设备，故障排除。

3 结束语

船舶电气系统对于船舶的正常运行具有至关重要的影响，从既往的工作之中可以了解到，由于海上航行的整体工作环境较为恶劣，电气系统需要面临来自自然环境、人为因素和意外现象等多方面的影响，因而比较容易出现各类故障现象，对于船舶的运行和人员的安全都是巨大的威胁。相关单位和工作人员应当立足于对船舶电气系统的全方位掌握和分析，形成对各类故障的深刻认识，在出现故障之后能迅速采取合理方式对其进行排除。同时也有必要针对实际需求，建立起相对较为完善的船舶维护和管理制度，在日常工作之中加强对其管理与保障。

参考文献

- [1] 李启佳. 船舶电气自动化系统的可靠性保障技术分析[J]. 科技资讯, 2022, 20 (14) : 50-52, 66.
- [2] 吴志华, 张孝奕, 杜鹏飞, 等. 船舶锂电池舱布置和电气设备配置特点[J]. 船舶设计通讯, 2021 (2) : 78-84.
- [3] 吴志良, 李能, 姚玉斌, 等. 船舶电气系统保护单元可靠性预计的修正方法[J]. 中国航海, 2019, 42 (4) : 81-84, 103.
- [4] 丁先威, 赵建华, 计晨, 等. 船舶综合电力系统抗冲击性能研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39 (1) : 37-40.
- [5] 王云, 刘东, 王正甲, 等. 基于十五相推进电动机的船舶电气系统仿真研究[J]. 广东电力, 2015, 28 (8) : 44-54.
- [6] 李红江, 鲁宗相, 朱凌志, 等. 舰船电力系统生命力评估研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007 (3) : 533-536.

作者简介

王清(1988—),男,广西灌阳人,本科,工程师,主要研究方向为船舶电子电气工程。

有色金属矿山机械设备安装质量的提升策略

刘益龙

(深圳市中金岭南有色金属股份有限公司, 广东深圳 518000)

[摘要]文章从有色金属矿山机械设备安装的角度出发, 覆盖设备安装的各个阶段, 提出相关的机械设备安装质量提升策略。希望为一线作业人员提供帮助, 提升机械设备安装的质量, 提高设备运行的稳定性, 进而提高有色金属矿山开采作业的效率与质量。

[关键词]设备安装; 有色技术矿山; 设备调试; 安装质量提升

[中图分类号] TD407 **[文献标志码]** A

随着我国有色金属矿山开采机械化程度的提高, 保证机械设备运行的稳定性具有重要意义, 除了在机械设备使用过程中保证操作的规范性之外, 还需要保证机械设备的安装质量, 进而保证机械设备的工作效率、质量与使用寿命。本文从机械设备的安装前准备阶段、安装阶段、试运行阶段以及安装后准备阶段出发, 在每个阶段从各个角度进行研究, 提出提升机械设备安装质量的策略。

1 安装前准备阶段

1.1 保证安装设计方案的合理性

在设计安装方案前应对工程进行勘测, 充分考虑工程的实际情况。根据对现场的实际调查, 并结合工程需要确定合理的安装场地与选用适合的安装设备, 设备与场地是相辅相成的。同时要求设计人员应充分掌握设备的性能, 在选定设备与场地后, 还需要研究安装方式。安装方式主要包括设备运输转移以及辅助设备的选取。由于受环境条件的影响, 有色金属矿山机械设备安装较为复杂, 应结合路况制定设备运输的运输路线, 降低运输和转移途中的障碍影响; 设计安全防护措施, 保证转移过程中人员与设备的安全^[1]。在辅助设备的选用上应结合场地与设备的实际条件, 选取高效、合理的辅助安装设备。设计完成后, 将设计内容清晰、有效地通过图纸、说明、展示等方式形成安装设计方案。在形成安装设计方案之后, 严格按照分层审核制度对方案进行审核, 由设计人员、工程部等进行多层次的审核, 通过审核对方案进行合理地调整与修改, 经过多层次、多角度的讨论与修改, 提高设计方案的合理性, 从源头上保证安装的质量。

1.2 提高设备的质量控制

有色金属矿物组成较为复杂, 需要多重工艺进行处理, 因此有色金属矿山机械设备类别较多。以黄金矿山机械设

备为例, 黄金选矿工艺中的重选以及浮选在我国比较常用, 机械设备主要包括浮选机、球磨机、破碎机等, 在使用时部分设备可能为整体性设备, 无需进行组装等作业, 部分设备可能涉及组装。因此在进行安装前需检查机械部件、材料, 机械部件的检查主要包括数量上的清点以及形态检查, 在形态检查时观察部件是否发生变形、锈蚀等现象^[2], 材料检查则是根据部件的出厂资料等, 核查材料是否符合设计方案以及规定要求。当出现部件数量短缺、质量存在问题时, 及时记录与反馈, 与厂家进行沟通, 进行补充与更换, 保证投入使用的设备的质量满足使用要求。安装之前还需根据安装方案对设备的尺寸、预埋件进行验收, 保证设备的尺寸偏差在设计的偏差范围之内, 预埋件的布置符合设备的使用要求。

1.3 做好机械的清洗和润滑工作

由于矿山作业的特殊性, 需要机械设备保有一定的防锈抗腐蚀能力, 因此在设备安装前需要对设备进行必要的清洗作业, 通过清洗作业去除设备及部件表面的污垢。在清洗时需要对污垢的成分进行分析, 选用合适的清洗剂, 避免清洗剂对设备表面产生二次腐蚀。例如, 使用煤油对设备表面的干油进行清洗, 煤油挥发性较高, 且不与大部分设备表面的金属材料发生反应, 因此可以起到良好的清洁效果。当设备表面存在防锈漆等污垢时, 则可以采用具有一定稀释能力的药剂, 如使用天那水进行处理。在处理的过程中应严格按照药剂的使用说明进行, 防止出现如损害设备、燃烧爆炸、中毒等安全问题。在清洗剂使用后对除污处进行干燥处理, 利用棉纱布擦干等。在做好设备清洗工作后, 需对设备进行润滑处理, 设备润滑不仅仅局限于设备安装前的准备阶段, 应贯穿设备从安装到使用的整个过程。根据设备与环境选取适合的润滑油, 做好“五

定”“三过滤”，通过做好设备的润滑处理，减少设备在运行时的摩擦、磨损，并对设备起到冷却与防腐蚀等作用，提高设备的运行质量。

2 安装阶段

2.1 吊装过程的规范性

在有色金属矿山机械设备安装过程中，由于安装位置的原因，需要进行起吊作业。在进行起吊作业时应根据设备的重量等信息，确定吊装作业的最大起重量，以及根据作业环境信息，明确作业半径，根据最大起重量、作业半径等信息确定吊装设备的型号，设备的选取应按照安装设计方案进行。合理确定吊装设备后，在对设备进行起吊时，需注意设备与吊具之间固定的程度，使吊具钢索固定在设备合理的受力点上，避免因设备受力不均导致滑索等安全问题出现，避免设备因自重原因于设备内部产生压力、剪切力导致发生结构上的形变，造成设备损坏等问题。吊索与设备的接触面应设置防护措施，避免因摩擦、强作用力造成设备的磨损。在设置防护措施时应注意合理性，不能对吊索的固定产生负面影响。当设备的实际情况难以直接起吊时，则需通过框箱式结构体承载设备完成起吊作业，应注意结构的质量可以满足设备的自重要求。

2.2 定位调整

通过吊装将设备转移至安装位置时，需要进行找平处理。找平处理主要的工作内容是指保证设备的水平、垂直方向的中心线与基准点水平、垂直方向的中心线重合。基准点的位置与信息等内容应在安装设计方案中有所体现，基准点的设置应满足机械设备定位设计相应规范要求，根据规范要求选取数量、位置合理的基准点，并进行永久性中心标板的预埋工作。根据基准点对设备进行定位调整，设备在垂直方向进行调整时，要根据预埋的中心标板要求进行，并通过挂设基准线来测定垂直度。在基准线挂设时，应设置挂设线架，该挂线架应具有一定的支撑能力，且可以随时进行调整。基准线的材料应选用具有结构强度的钢线，在钢线选取上控制截面直径在 $0.03 \sim 0.07\text{cm}$ 为宜，挂设的距离不应超过40m，通过合理的挂设方式的选取，保证钢线在拉紧的状态下受力小于其最大承载力。基准线可通过铅锤法进行中心点的对正调整，将对正调整后的线体通过螺栓结构等进行固定处理，定期对其进行检查，保证其不发生位移等情况。在进行机械垂直方向的调整后，需对其高度进行标高调整。标高调整应对照基准点，通过水准仪进行调整，保证其满足设计使用要求。当参照的基准点设置较远时，以其作为参照点时可能会受到环境的限

制。因此针对该类情况，应在机械设备附近设置辅助点，在辅助点设置时应注意与基准点之间的尺寸、角度关系，保证辅助点设置的正确性、合理性。通过水平调整装置以及水准仪保证机械设备的水平度能满足其使用要求。

2.3 设备组装

当设备涉及组装过程时，应根据设备相关的说明进行组装作业，并在组装后对设备进行检验。以机械设备联轴器联接为例，联轴器作为联接主、从动轴的接手，其安装的质量决定着设备运行的质量。在完成设备组装后，需对设备各轴系进行校验找中处理，确保设备各轴系在运转时能够保证复核其设计特性。在找中处理时应注意，当设计电机设备时，应先完成电机磁场中心的找中处理。在进行联轴器找中时可采用“三表法”“无表法”等方法，该方法中的表是指百分表。以三表法为例，三表法设置的方法在平行于轴的端面于中心对称位置设置2块百分表，在垂直于轴的径向方向设置1块百分表。通过于平行且对称的位置设置的2块百分表消除轴在运转时的端面误差，利用垂直于轴径向方向设置的百分表，通过在轴的4个方向隔 90° 标记测量点，通过百分表测量转子在顺着轴运转方向运动时的数据，通过对数据进行分析、对比确定联轴器的平行度以及同轴度。关于联轴器的平行度确定时，要在联轴器冷态的状态下进行调节，并考虑轴系在联轴器热态运行下的位移值。

3 试运行阶段

试运行阶段是为了在设备正式投入使用前，对设备存在的缺陷与隐患进行探查，通过试运行阶段对机械设备进行使用前最后的调整、修理。当试运行阶段结束后，机械设备的运行应满足有色金属矿山开采、处理的需要。试运行阶段机械设备的检查步骤为，先使设备空载运转，然后再增加设备负荷，使设备负载运行。设备试运行检查时应先单机运行，检验单机运行时是否存在故障，然后再通过设备联动运行，检验设备在同一运行的情况下，是否存在联动问题。

3.1 设备主体调试

以轴承、风机调试为例，在进行轴承调试时，应主要关注轴承的润滑度、运行温度等。由于机械设备的运转特性，轴承在运转时存在明确的安全限值，当轴承的运行温度超过其使用正常使用限值，会导致润滑油脂的寿命降低，严重则导致轴承及其结构损坏，进而会导致机械设备在该运行状态下发生故障。在轴承润滑的过程中，润滑油脂在起着减小摩擦的作用基础上，还起着冷却的作用，因此润

滑度与运行温度并非各自单独存在，而是存在相互间的影响。以矿业常用的离心式风机调试为例，在该类设备的调试中除了利用专业的监测设备外，还可以通过“感官法”直接、简单地进行故障的判断。感官法主要通过听设备运行是否存在杂音、观察设备部件是否存在损坏情况、触摸设备温度是否存在异常过热情况以及嗅闻设备运转时是否存在异味等。该类方法的准确性基于技术人员的经验，因此具有一定的局限性，仅推荐作为辅助方法使用。

离心式风机的轴承常设置在外侧，当风机叶轮存在划痕、磨损时，会加大风机的缝隙，进而使轴承的运行约束环境发生变化，导致轴承因受力不均发生摆动等情况，造成轴承存在摩擦异常，进而导致温度异常升高，最终导致设备损坏。

风机在使用状态下，抽出的风量、风压不稳定，导致系统内压力和流量发生波动，且发生噪声剧增、机体产生强烈的振动时，风机可能发生了喘振现象。风机喘振现象是由于流量减少到最小值时，出口压力会猛烈下降，此时管道内的压力高于出口压力，导致介质倒流，直至出口压力升高，重新向管道输送介质，当管道中压力重新回复后，又会产生倒流的现象，致使管道内介质周期性震荡，发生机械振动。在风机调试中出现该类问题时，应及时对风机根据喘振区进行调整，并设置防喘振调节装置。通过对设备进行调试，保证安装后的设备在运行时减少故障发生的频率，提高运行的稳定性。

3.2 消防系统调试

除了对设备主体进行调试，还需对附属的消防系统进行调试，消防系统运行的稳定性保证了由于设备出现故障发生灾害时企业财产与员工的安全。有色金属矿山消防系统主要包括自动报警装置、消防联动装置，以自动报警装置的调试为例，自动报警装置主要由监测探头、报警控制器和手动报警按钮等3部分构成，在调试时应着重于其可靠性，保证出现警情时可以完成警报功能。以消防联动装置的安装调试为例，在消防联动装置安装时应注意其装置连接的规范性、正确性，保证用电配线的平直、联动接线盒的固定。配线应具有保护管道，可采用金属软管等，注意其固定工作，防止晃动对线路造成磨损致使线路断开。

3.3 用电接线

电力作为设备运转的主要能源，保证用电接线的规范性、合理性可以保证设备的正常运转。接线主要包括设备

与配电箱的接线以及设备的接地线，应对进入配电箱的接线与配电箱中的接线头进行标号处理，明确接线信息，接线要保证牢靠且留有余量，并尽量保证布线整齐，避免杂乱交叉。而设备在运行时会产生静电累积，当静电的累积量超过一定限值时，则会对设备中的控制系统造成损害，需要接地线将机械设备中的静电释放到外界中，从而保证设备的正常运行。因此在设备正式投入使用前应做好接地线工作。由于矿山环境的复杂性和接线工作的繁琐性，工程组应做好相应的监管工作，通过监管保证用电接线的规范性，从而保证设备能够安全、稳定地运行。

4 安装后验收阶段

验收通过意味着设备的安装质量满足正式投产的使用要求，因此应对验收环节严格把关，主要从验收流程规范化和验收人员专业化两方面进行。在验收过程中应对设备安装过程中的设计方案、设备与材料相关的监测资料、施工记录资料进行收集整理，形成相应的验收报告。形成规范化的验收流程，使设备安装中每个步骤、部件可验可查。在设备的安装中，不可避免地会出现误差，通过专业验收人员进行精准度的评价，控制误差在精度控制范围内，可以有效避免误差对于机械设备性能的影响，有效提升有色金属矿山机械设备安装的质量。

5 结束语

综上，由于有色金属矿山开采的复杂性，为保证开采作业的质量，对设备的要求较高，本文从设备的安装角度出发，基于机械设备安装的4个阶段，提出有关提升安装质量的策略，进而保证设备在使用中的稳定性与安全性，提高矿山开采工程的质量与效率，进而提高经济收益，推动行业的蓬勃与健康发展。

参考文献

- [1] 刘子勤. 简析矿山机电安装质量提升的策略[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021 (23) : 91-93.
- [2] 张雷, 郭郁汀, 吴艳芳. 有色金属开采中机械设备故障诊断及维修[J]. 有色金属工程, 2022, 12 (5) : 159-160.

作者简介

刘益龙（1967—），男，江西高安人，本科，高级工程师，主要研究方向为机械设备安装。

大型精密数控转台装配工艺分析

周进

(深圳迪能激光科技有限公司, 广东深圳 518000)

[摘要]近年,航空航天和能源等行业的高速发展,对大型精密数控转台的市场需求不断增加,具有广阔的发展空间,但在实际进行大型精密数控转台装配的过程中,流程比较繁琐,具有较大的难度,并且很容易出现失误,要想达到理想的装配效果,使其性能符合使用需求,就要掌握装配工艺的关键技术。文章主要分析一种大型精密数控转台装配工艺,介绍相应的关键技术。

[关键词] 大型精密数控转台; 装配工艺; 结构特点; 工作原理

[中图分类号] TG659 **[文献标志码]** A

0 引言

数控转台是数控机床重要的组成部分,可以提高数控机床的应用效果,优化产品的生产加工质量。对于大型高档数控机床来说,大型精密数控转台是其主要的功能部件,能够进一步扩大加工范围,优化设备的工作性能,提升其承载能力。因此,要重视大型精密数控转台的装配工艺,明确其关键技术要点,提高其设计生产制造水平。

1 大型精密数控转台

1.1 结构

(1) 工作台。主要采用优质铸铁材料制成,设有T型槽,主要作用是夹紧工件,其中心有定位止口,可用于工件定位。

(2) 滑座。主要用来支撑转台体。

(3) 静压支撑单元。主要由动导轨和静导轨组成,前者置于大齿圈上,后者由两部分组成,分别置于滑座和大齿槽外周的静压块上。静压油膜具有良好的刚度,能够确保工作台不会出现爬行现象。

(4) 回转运动传动单元。主要作用是驱动工作台回转。

(5) 回转运动夹紧单元。主要用于工作台回转夹紧,一共有4组夹紧装置,分别位于滑座4个角点位置。

(6) 回转定位单元。这一部分主要确保设备具有较高的回转精度,采用全封闭式圆光栅尺进行测量,形成全闭环位置控制。

工作台上的定位套、接近开关和定位轴等部分,共同组成四点定位机构,确保能够实现相应位置的精确定位^[1]。

1.2 工作原理

转台工作台静止时处于锁紧状态,在中小型的转台上,主要使用的锁紧方式为鼠牙盘锁紧;在大型数控转台上,

主要使用的锁紧方式为液压锁紧。这两种锁紧方式的主要区别在于锁紧力的大小,前者相对更小一些。当数控机台运行时,主要是由伺服电机进行驱动,其经过齿轮减速,然后带动涡轮蜗杆副使工作台转动。在这一过程中,齿轮啮合会产生侧隙,需要对偏心环进行调整,才能消除侧隙。通常情况下,会使用双螺距渐厚蜗杆,其左右侧面具有不同的螺距,所以齿厚逐渐增加。但不论是左侧还是右侧,同一侧的螺距并没有差别,因此能够正常进行啮合。要想消除蜗杆副间隙,可以调整其偏心轴套的中心矩^[2]。

1.3 安装数控转台对机床的意义

在装备制造业中,现代数控机床发挥着重要的作用,目前正在朝着大型化和精密化的方向发展,数控转台也同样面临大型精密化发展的需求。由于我国针对大型精密数控转台的相关技术研究时间较短,与西方先进国家存在一定差距。随着我国科技的不断发展,以及国家对装备制造业重视程度的提升,已经实现了一些技术突破。相信在不久的将来,我国的数控设备领域会得到更好的发展。在数控机床各项组成部件中,数控转台能够大幅提升数控机床的应用效果,为生产加工工作带来更大的助力,因此,必须重视设备的选择^[3]。在安装数控转台的过程中,应确保操作方法的正确性,否则,会对实际应用效果产生负面影响。如在设备安装后,产生了错位的现象,一旦继续进行生产加工,不仅会造成误差,也会导致资源浪费,需要关闭电源,合理调整,然后再次启动使用。同时,在安装设备的过程中,一旦发现存在任何故障隐患,都要及时进行维修处理,确保设备处于正常状态。在使用一段时间后,还需对设备进行检查,明确其具体的应用状态。

2 装配方案和总装工艺要求

2.1 装配方案

在制定装配工艺方案的过程中，不仅要考虑到产品的精度，也要结合具体的性能要求。在确定基础零部件达到设计要求后，根据从上到下，由里及外的顺序，对所有的零配件进行装配。在初步完成数控转台安装后，一旦发现与精度要求不符，应根据现有的精加工设备，对工作台面进行精磨处理，有效解决这一问题。为了保障工作台能够实现 $4 \times 90^\circ$ 的位置定位，应合理制订四点定位机构的装配方案。在实际进行装配的过程中，定位套要与定位销实现良好的配合，所以要求二者不仅要具有较高的精度，还要进行配合研磨^[4]。另外，在确定定位套位置时，为了确保能够满足四点定位的需求，可以采用注胶工艺，其具有较强的操作性，能够降低定位孔的加工难度，并且便于装配，具有很好的适用性。

2.2 总装工艺要求

在安装刹紧油缸组件时，应按照图纸要求，进行碟簧油缸的安装，拧紧油路管接头，确保油管走线的合理性和整齐性，防止出现渗漏现象。安装定位轴和圆柱滚子轴承时，前者应消除轴承游隙，确保锥面大端接触的可靠性，后者应对其下端至定位轴台阶面的距离进行测量，端面跳动精度 $\leq 0.02\text{mm}$ 。安装齿圈时，其端面跳动应 $\leq 0.02\text{mm}$ 。安装连接盘时，其旋转水平应 $\leq 0.02/1000\text{mm}$ 。调整刹紧结构时，应对刹紧片进行调整，并根据图纸要求，测量和调整刹紧组件。安装工作台编码器时，与中心轴的轴度不能超过 0.02mm 。安装阀组时，应确保安装的可靠性^[5]。完成这些零部件的安装工作后，应调整工作台端面跳动 $\leq 0.02\text{mm}$ ，平面度 $\leq 0.04\text{mm}$ ，中心孔对其回转中心的跳动 $\leq 0.015\text{mm}$ 。

3 零部件组装工艺

3.1 油缸组装

对于转台底座上的锁紧油缸孔，应进行相应编号，确保锁紧油缸能够顺畅地装入。直到所有的锁紧油缸都找到对应的孔，然后再对其进行编号。将抗磨环和密封环等组件装入相应的沟槽，按照竖直的方式放置锁紧油缸，同时，应确保其底部留有一定的空隙，然后再放入碟形弹簧，插入活塞杆，做好油路的接头工作。将所有的锁紧油缸部件接入液压站，对活塞杆端部到锁紧油缸体端部的距离进行测量，并详细记录，然后再进行加压操作，经过多次操作，直到伸出量稳定时，再对活塞杆至锁紧油缸的距离进行测量。在得出数值后，减去之前的数值，就是活塞杆的伸出量。

通常情况下，在 $2 \sim 3\text{mm}$ 才合格^[6]。最后按照编号顺序，将油缸逐渐装入孔内，接好油路接头。

3.2 定位轴与锁紧机构的安装

调整垫的厚度对定位轴的安装具有重要影响，所以应将定位轴放于操作台上，然后依次放入相应构件，如压紧套和双列圆柱滚子轴承等。对压紧套上的螺栓进行紧固，测量调整垫厚度，然后根据测量结果，对调整垫进行磨削。将转台底座放于支撑架上，先装入调整垫，然后再安装定位轴。在安装锁紧机构时，首先需要对调整板进行配磨，在转台底座，按照相应顺序装入齿圈等配件，然后进行紧固，测量安装调整板的面和安装夹紧板的面的距离，并对测量数值进行标记。将其与调整板和板总厚度进行对比，确定需要磨削的值。其次，应对调整套进行配磨。先装入压紧盘，有效控制其与夹紧板之间的接触面间隙，最好为 1mm 。接通液压站，使压紧盘达到最大伸出量，在此基础上，锁紧上端螺母。对压紧盘至活塞杆的距离进行测量，然后根据测量结果，对调整套进行配磨^[7]。最后，再对锁紧机构进行重新组装。按照装配图的顺序，依次放入调整板、套以及压紧盘等，然后锁紧上端螺母。

3.3 扣合转台

先对转台和齿圈进行紧固处理，然后打两个锥销孔，将齿圈装入转台底座。在完成操作后，应检查其是否与定位轴同心。然后按照图纸要求，进行油缸和密封件等部分的组装，将定位套装入转台上合适位置，然后对其进行翻转，并装入转台底座。

3.4 定位轴系与编码器的安装

在安装定位轴系时，先装入双列圆柱滚子轴承内圈，同时装入保持架，再装入外圈。然后根据图纸要求，装入深沟球轴承和压紧套等。对螺钉进行锁紧处理，主要根据双列圆柱滚子轴承的预压力进行操作，然后对压紧套进行拆除处理。在确定调整垫实际距离时，主要依据推力球轴承至套端面的距离，对其进行配磨处理后，再依次装入调整垫等，然后对螺钉进行锁紧处理。在安装编码器时，先对编码器和锁紧螺母等进行组装，然后在定位轴上合理装入编码器支架，再装入相应组件。最后依次装入定位套和密封盖等。

3.5 消隙齿轮箱的安装

在安装消隙齿轮箱时，先将其放到可调支架上，然后对安装螺钉进行紧固处理。对于中间存在的间隙，应使用量块垫实。缓慢转动减速机，使得齿轮与齿圈逐渐啮合。为了明确具体的啮合情况，可以涂抹红丹粉，再据此对间距进行调整。当接触面超过 70% ，并且呈现对称分布时，

根据量块的厚度，就能确定调整垫的尺寸。然后根据相应顺序，再次对齿轮箱进行装配。

3.6 精度检测与调试

数控转台精度设计的内容比较多，如定位精度和反向间隙等，在对其进行检测的过程中，主要使用精密双向自准直仪，除了该设备之外，在实际测量的过程中，还需使用八面棱体、表座、定位心轴以及指示器等工具。在实际进行检测的过程中，主要将数控转台作为参考点，并将八面棱体和心轴连接在一起，然后对锁紧螺母进行锁紧处理。夹紧心轴，放置自准直仪，将其瞄准八面棱体靶面，记录初始读数。通过数控系统程序的作用，使得转台分度记录分度位置的自准直仪读数值，并记录在相应表格当中，应确保记录的准确性和有效性。在完成读数后，根据相关标准的定位精度评定方法，对转台定位精度进行计算。在转台台面和驱动电机之间，数控转台的回转方向存在一定差异，会表现出反向空行程，也就是转向反向间隙。在对其进行测量时，可以在转台一侧安置指示器，然后使转台向一个方向回转，对指示器进行调整，然后记录准确的读数。接着再向另一个方向转动转台，然后记录指示器的读数，经过计算，就能获得转台反向间隙^[8]。在调试的过程中，应根据自检要求，先对工作台面跳动进行检查，然后对其平面度进行检查，以及其旋转水平。为了确定返修参考值，应在转台一侧放置可调支架，并设有磁力表座，然后旋转工作台，在台面标记四点最大的跳动值，并准确记录下来。根据记录的数值进行返修，使其最大跳动小于0.02mm。在架起的平尺上放置水平仪，然后将其旋转180°，其偏差必须小于1格。将桥板放置于工作台上，并在上面放置水平仪，然后从不同方向移动桥板，根据水平仪获取各个测量点到基准面的坐标值。根据其与坐标差值，确定实际误差，保证台面误差小于0.04mm，局部误差应小于0.015mm。

3.7 四点定位机构的安装

在工作台上，先放置方尺，并使其一边与工作台的移动方向保持平行。在零度定位盘上插入油缸定位销，确保其流畅性。在一个旋转方向上，让数控转台依次旋转0°、90°、180°和270°，锁紧对应定位盘，并打入定位胶，然后经过数小时的凝固处理，在这一过程中，要防止定位盘的位置发生变化。

4 相关建议

4.1 提供良好的环境

大型精密数控转台具有较高的精度，因此对环境的要

求也更高一些，在进行装配操作的过程中，应确保周围环境的整洁性。同时，还要有效控制装配地点的温度（20℃左右）和相对湿度（小于75%）。并且需要远离空气压缩机和冲床等振源，场地不能直接处于阳光直射下，也不能含有任何腐蚀性气体。

4.2 保障装配操作的规范性

大型精密数控转台有很多高精度零部件，如双列圆柱滚子轴承和中心定位轴等，在进行装配操作的过程中，应严格按照相应要求进行，不管是搬运还是安装的过程中，必须轻拿轻放，以免发生磕碰现象。并且由于转台重量较大，为了防止出现损伤转台的问题，应尽量采用机械进行吊挂操作。不能使用任何不在要求范围内的工具对零部件进行敲击，否则，很容易导致其丧失精度。另外，在装配过程中，还需保障各个基础零部件的清洁度，以免混入任何杂质，对数控转台的使用产生不利影响。

4.3 做好安装运行前的准备工作

数控转台的运转需要电力，所以为了保障电源电路的安全性，需要安装保护装置，如过电流保护装置。对于搭载数控转台的M/C，不仅要安装遮挡板，还要具备门锁功能。在实际进行安装操作之前，应切断M/C电源，然后才能进行相应电气操作。要注意这些操作应由专业人员完成，不能随意进行操作。同时，应在电源切断的情况下，进行布线和管路配置等作业，以免危害相应人员的人身安全。在安装数控转台时，应对机床的ATC进行检查，以免存在其他的干扰因素。在转台运转的过程中，为了防止配线阻碍操作，应对其进行固定捆绑操作，以免其妨碍转台的正常运转。在数控转台出厂之前，部分厂家会在盘面部分涂抹防锈油，在安装之前，应使用抹布擦拭干净。应防止汽油和柴油等与转台接触，否则，很容易导致设备出现生锈的情况。在完成安装后，为确保安装的完好性，应在无负载的情况下运行。在试运转的过程中，应保持低速传送状态，然后逐渐切换为高速传送。

5 数控转台的发展趋势

当前，国家对功能部件的发展提高了重视程度，为数控转台的技术创新带来了发展机遇。随着数控转台的发展，目前主要开发小型转台和大型转台，对新结构和新材料进行研发，以提高工作台的转速，增强转台承载能力。同时，对型式的研发也发生了转变，主要研制多轴并联回转的数控转台。在这种背景下，国内厂家应加强对新技术和新材料的应用，尽量缩短与国际先进水平的差距，形成形式多

（下转第145页）

电厂循泵电机转子转轴断裂失效分析

吴旭炜

(国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233)

[摘要]某电厂循泵电机运行多年后发生断轴事故, 断裂位置位于轴肩处, 通过对对其进行宏观、化学、力学、金相及扫描电镜分析, 得出其失效的原因为键槽处感应淬火工艺不当引发的疲劳开裂。

[关键词]感应淬火; 失效; 断裂; 疲劳

[中图分类号] TM63 **[文献标志码]** A

1 概况

某电厂循泵电机在2003年投入使用, 于2021年10月9日发生断轴事故, 主轴断裂下沉, 导致泵轴保护触发, 停止运转。现场断裂具体位置位于轴肩处, 如图1所示。来样宏观形貌如图2所示, 直径约为180mm, 长约200mm, 材料不详, 断面与泵轴端面基本齐平, 与断面垂直方向有一键槽。



图1 开裂部位具体位置及现场情况示意



图2 来样宏观形貌

2 参考标准

GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第一部分: 试验方法》, GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验

第1部分: 室温试验方法》, GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》, GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法(常规法)》, GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》, GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》, GB/T 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀试验方法》, GB/T 1979—2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》。

3 测试结果

3.1 宏观分析

断面形貌如图3所示, 可见断面整体氧化及磨损较严重。断面红色区域氧化最严重, 隐约可见疲劳扩展的痕迹; 蓝色区域为疲劳扩展区, 分布较多的垂直于疲劳扩展方向的扩展条带; 黄色区域为最终快速破坏区, 其中心可见一圆形区域, 为最终扭断区域。由此可初步推断, 疲劳源位于红色区域的键槽附近。

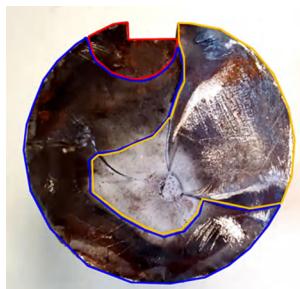


图3 来样断面宏观形貌

3.2 低倍检验

在近断面的截面处根据 GB/T 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀试验方法》进行低倍检验, 截面低倍组织形貌如图4所示。可见来样截面外圆附近有2mm左右的深腐蚀区, 推测为感应淬火硬化层, 其分布在圆弧表面较均匀, 而在键槽左、右转角处, 由于几何形状限制, 硬化层分布由外至内逐渐减薄, 呈不规则分布。在左侧转角处,

可见一小缺口，位于硬化层消失处。

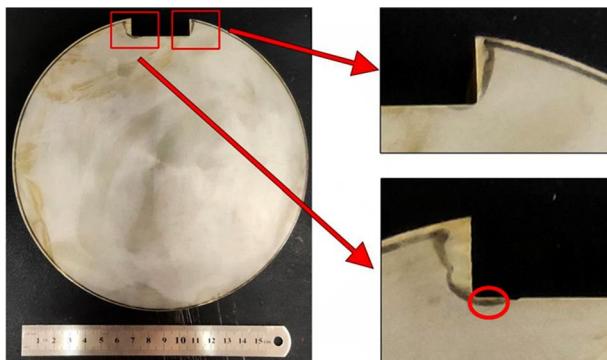


图4 截面低倍组织形貌(经20%硝酸溶液浸蚀)

3.3 光谱分析

在来样上截取试样，根据 GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法(常规法)》对其进行光谱分析，其中，C：0.49% (质量百分比)，Si：0.24% (质量百分比)，Mn：0.63% (质量百分比)，P：0.006% (质量百分比)，S：0.006% (质量百分比)。对比 GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》中的化学成分标准数据，该泵轴材料符合45钢的要求。

3.4 室温拉伸试验

在来样1/2半径处取3根纵向室温拉伸试样，根据GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》对其进行拉伸试验，室温拉伸试验结果如下：抗拉强度(R_m)分别为595MPa、603MPa和597MPa，下屈服强度(R_{el})分别为295MPa、297MPa和300MPa，断后伸长率 A 分别为31.5%、30.0%和30.0%，断面收缩率 Z 分别为47%、50%和50%。对比 GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》中45钢的拉伸标准数据：抗拉强度(R_m) ≥ 600 MPa，下屈服强度(R_{el}) ≥ 355 MPa，断后伸长率 $A \geq 16\%$ ，断面收缩率 $Z \geq 40\%$ ，材料的断后伸长率、断面收缩率符合标准要求值，抗拉强度接近标准要求值，而屈服强度低于标准要求值。

3.5 室温冲击试验

在来样1/2半径处取3件纵向室温冲击试样，根据GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对其进行室温冲击试验，试验结果如下：冲击吸收能量 KU_2 分别为43J、41J和46J。对比 GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》中45钢的冲击标准数据，冲击吸收能量 $KU_2 \geq 39$ J，材料的冲击性能符合要求。

3.6 显微维氏硬度检测

分别在来样截面的外圆表面及转角处根据 GB/T

4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第一部分：试验方法》进行显微维氏硬度测试，测试部位如图5所示，测试结果见表1。根据测试结果绘制维氏硬度趋势图，可见在正常的外圆部位，深度1.0~2.0mm处的硬度有很大的提升，而在转角处的硬度梯度并未出现明显的硬化现象，如图6所示。

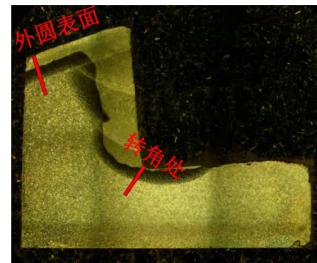


图5 维氏硬度测试部位

表1 显微维氏硬度

部位	距表面距离 (mm)	硬度值 (HV1)	部位	距表面距离 (mm)	硬度值 (HV1)
外圆表面	0.2	208	转角处	0.2	218
	0.4	203		0.4	210
	0.6	211		0.6	207
	0.8	207		0.8	198
	1.0	288		1.0	199
	1.2	318		1.2	198
	1.4	311		1.4	201
	1.6	296		1.6	186
	1.8	258		1.8	190
	2.0	216		2.0	191
	2.2	180		2.2	194
	2.4	198		2.4	185
	2.6	190		2.6	184
	2.8	189		2.8	184
	3.0	177		3.0	183

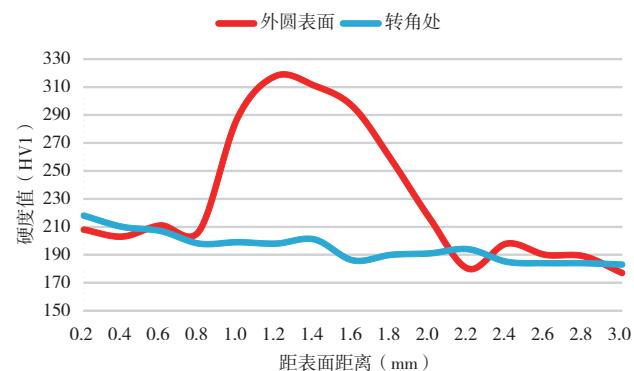


图6 维氏硬度趋势图

3.7 金相检测

对近断面键槽转角处截面进行金相分析，金相试样形貌如图7所示，可见外圆表面处的硬化层深度较均匀，而

键槽侧面的不均匀硬化层处有多条熔融过烧痕迹如箭头所示，可能是由于尖角效应导致的感应淬火电流密度在此处过大所致。同时可见在淬硬区和非淬硬区交界处存在明显凹坑，如红圈所示。

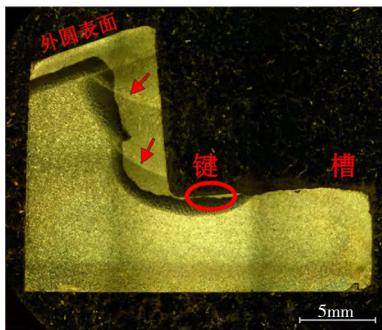


图7 金相试样形貌

转角处低倍组织形貌如图8所示，可见转角处被黑色淬硬层过渡层覆盖，转角过渡较圆滑。在键槽侧面硬化层过渡区发现一处缩孔缺陷，呈三角形，如图9所示。该缺陷位于熔融区域，可能由于周围熔融金属收缩所致。

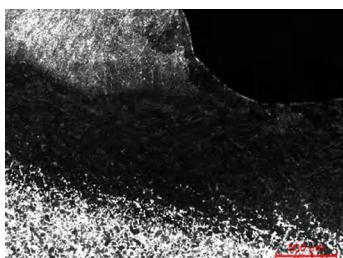


图8 转角处低倍组织形貌 (50×)

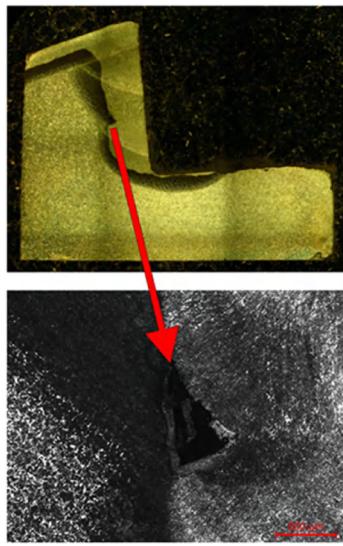


图9 硬化层过渡区缺陷 (50×)

转角处高倍下组织形貌如图10所示，组织为珠光体 + 柱状铁素体，组织较粗大，呈现过烧状态，并可见细小裂纹。芯部组织为珠光体 + 铁素体，晶粒较均匀，如图11所示。

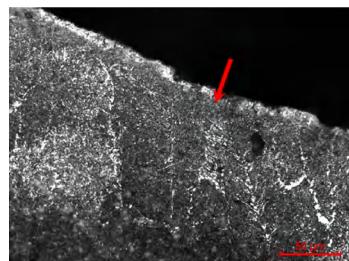


图10 转角处高倍下组织形貌 (500×)

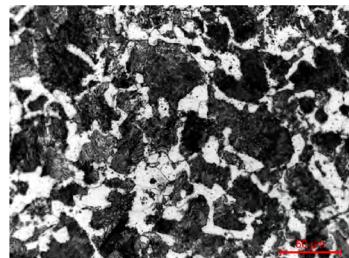


图11 心部组织形貌 (500×)

3.8 扫描电镜检测

对键槽转角进行扫描电镜分析，断口起始区低倍下形貌如图12所示，此处断口保留较完整，但表面氧化较严重。

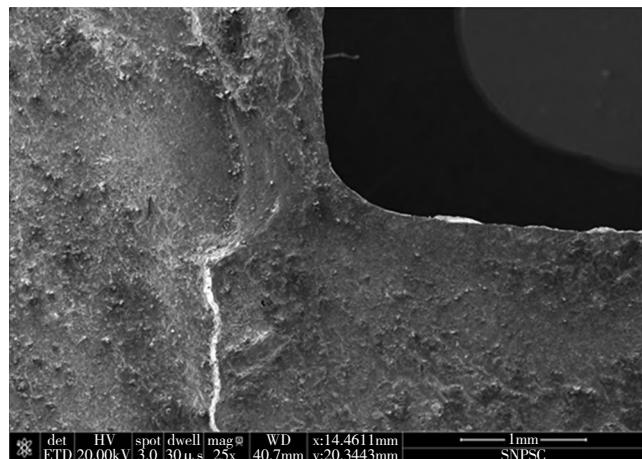


图12 断口起始区低倍下形貌 (SEI)

转角处高倍下疲劳辉纹形貌如图13所示，可见疲劳辉纹与转角表面平行分布，弧线圆心指向转角表面。近转角表面断口形貌如图14所示，可见断面大部分被氧化物覆盖，能见到部分疲劳辉纹分布在氧化物下层。可以判断此处断面为疲劳所致。

3.9 结论汇总

- (1) 根据化学分析的结果可知，材料符合45钢的成分要求。
- (2) 根据宏观分析结果可以推断，断面起始于键槽区域。
- (3) 根据低倍分析结果可知，工件经过感应淬火处理，键槽处硬化层不均匀。

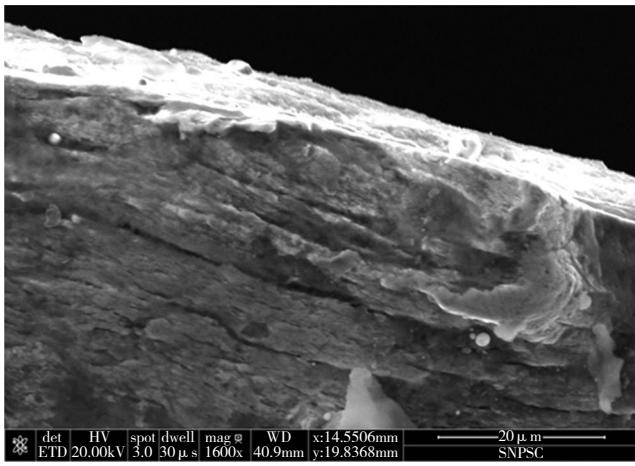


图13 转角处高倍下疲劳辉纹形貌 (SEI)

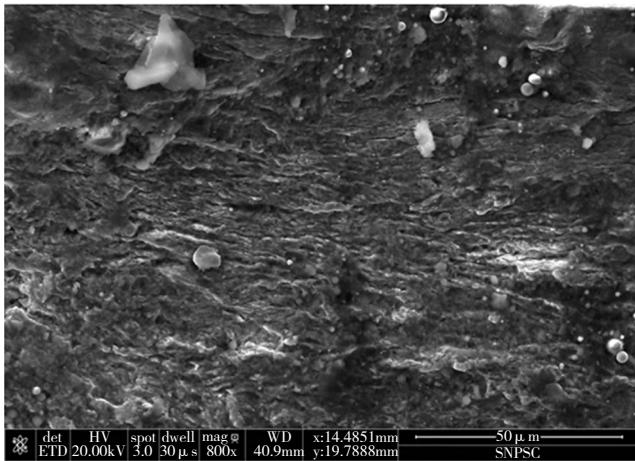


图14 近转角表面断口形貌 (SEI)

(4) 根据力学性能结果可知,轴的屈服强度低于45钢

要求,键槽转角处硬化层硬度偏低。

(5) 根据金相分析的结果可知,键槽转角处存在过烧现象,并存在微裂纹及缩孔等缺陷。

(6) 根据扫描电镜分析结果可知,该断口经历长期疲劳并扩展。

4 结论及建议

综上,该循泵电机主轴断裂主要原因是感应淬火的工艺不当所致。键槽处的特殊形状导致感应淬火存在尖角效应,使感应电流密度过大,从而引起组织的过烧,增加了转角处的脆性和应力集中,使其容易成为疲劳起始源。此外,在键槽硬化层与非硬化层交界处会形成较大拉应力,叠加此处的应力集中使此处也极易成为疲劳源。

因此,对于键槽处的感应淬火需要额外增加实验来调整感应淬火的相关电流参数,然后再应用于成品上,以达到使用要求。此外,也可增加相关轴的键槽处的无损检测,以监测工件的运行状态。

参考文献

- [1] 周汉平, 郑重, 周道泉. 弱化凸轮类零件感应淬火尖角效应的研究[J]. 中国科技博览, 2013 (31): 156-157.

基金项目

能源局科技部项目 (2019YFB1900905)

作者简介

吴旭炜 (1990—), 男, 上海人, 本科, 工程师, 主要研究方向为金属材料的失效分析。

(上接第141页)

样、规格齐全的数控转台生产模式,在产品质量、外观和性能上实现新的突破,加强国产数控转台产业的影响力。

6 结语

综上所述,对于大型精密数控转台的装配,应根据具体情况,合理制订装配工艺方案,明确零部件装配操作要点,提供良好的环境,确保其整洁,没有任何腐蚀性气体,并按照相应工艺要求,合理进行相应零部件的装配,确保数控转台的有效使用。

参考文献

- [1] 胡秋, 袁南南, 徐冲. 超精密液体静压转台装配技术[J]. 制造技术与机床, 2018 (8): 5.
[2] 白豪, 李冬英, 潘婷. 数控转台研究现状[J]. 时代农机, 2019 (10): 2.
[3] 何新林, 赵阳, 何宝庆. 基于注胶工艺的数控转台四点

定位系统设计[J]. 制造技术与机床, 2020 (10): 4.

- [4] 容康明. 数控转台可靠性分析与提升技术研究[J]. 河北农机, 2020 (2): 1.

- [5] 聂应新, 郭龙真, 张大卫, 等. 高精度卧式加工中心精密装配关键技术[J]. 制造技术与机床, 2018 (9): 98-102.

- [6] 杨华, 陈力平, 周和沛. 转台液压马达精密加工装配关键技术研究[J]. 金属加工: 冷加工, 2019 (11): 4.

- [7] 张俊晶, 董袖青. 双轴转台装配体的模态分析[J]. 机械制造, 2018 (1): 3.

- [8] 王建磊, 王云龙, 门川皓, 等. 精密磨床转台静压轴承的强健化设计[J]. 中国机械工程, 2020 (10): 8.

作者简介

周进 (1979—), 男, 广东深圳人, 工程师, 主要从事设备设计制作等工作。

基于倒装法的闪速炉改造方案

王凌志

(紫金矿业建设集团(厦门)有限公司,福建厦门 361000)

[摘要]闪速炉是一种强化生产的熔炼炉,具有生产效率高、能耗低、烟气中SO₂浓度高的特点。文章以国内建设工程承接的某国外铜冶炼厂扩建项目——闪速炉改造为例,从闪速炉概况、施工准备、具体施工流程3个角度出发,总结其改造施工方案。结果表明,基于倒装法下闪速炉的改造方案在安装质量、安装安全性、成本控制等方面均优于传统的闪速炉安装方法,具有一定推广价值。

[关键词]倒装法;闪速炉;反应塔;工业炉

[中图分类号]TF811 **[文献标志码]**A

倒装法是指在设备安装过程中,以储罐罐底为基准平面,先安装顶层壁板和储罐罐顶,然后按照自下而上的安装顺序将壁板逐层焊接顶起,到底层壁板安装完毕的一种施工方法。倒装法具有液压升降平稳、设备控制简单、设备适应性强、工期短、成本低的使用特点。近年来,国内大型铜冶炼厂,如紫金矿业、中国铜业、五矿资源等企业在闪速炉改造过程中,均采用了倒装法的施工工艺,最大限度节约了施工成本,提高了施工效率。由此可见,基于倒装法的闪速炉改造方案具有实践的推广价值^[1]。

1 闪速炉概况

某国外铜冶炼厂原闪速炉熔炼系统,包括配料、干燥、闪速炉、闪速炉余热锅炉、集散监控检测系统等。本次闪速炉改造计划由波尔项目直接承接。主要负责原闪速炉厂房钢结构的局部加固,依据工厂生产的实际需要,增加5层钢平台;原有反应塔的整体拆除、重建;沉淀池局部水套的拆除和更换;上升烟道出口门框水套的拆除和更换;增设相应的水套冷却循环系统和电气系统;闪速炉余热锅炉高跨和闪速炉电收尘内的输灰刮板机、破碎机、气力输送装置等的拆除、更换;改造对应设备的电气、仪表等。经项目施工完毕后,改造后的闪速炉工业炉本体应由反应塔、沉淀池、上升烟道和精矿喷嘴等4部分构成。并且,闪速炉附属系统也应包括冷却系统、热风系统、氧油燃烧系统及监控系统等。其中反应塔是闪速炉发生化学反应的主要部分,改造后的闪速炉,整个反应塔应吊挂支撑梁悬挂在钢骨架上。沉淀池的位置应位于反应塔和上升烟道的下方,是用于贮存冰铜和炉渣并使之分离的一个上大、下小的长方斗型池子。沉淀池地板铺设在炉底梁上,炉底梁通过基础板支撑在基础上。沉淀

池四壁是焊接钢结构框架,框架内铺设侧板和波纹板,并设置有冰铜排放口、出渣口,烧嘴,内衬耐火砖。上升烟道可充分吸收闪速炉冶炼时产生的高温烟气,并将烟气引致废热锅炉中,回收热量和烟尘。精矿喷嘴的位置应位于反应塔的顶部,在闪速炉正常工作中,将铜精矿粉和烟尘高速喷入反应塔内,反应塔所需的富氧、压缩空气和氧气也通过精矿喷嘴同时喷入塔内^[2]。

2 施工准备

2.1 技术准备

在闪速炉的改造项目施工前,施工团队应对改造图纸进行自审与会审,了解该闪速炉的主要构造、结构组成,以及使用图纸信息性能,明确安装方法和操作步骤。在施工过程中,要严格按照最终的设计蓝图、设计变更及设备技术文件和国家有关部门的施工及验收规范、质量检验评定标准等施工技术标准执行。当设计图纸出现变动时,设计人员应及时与施工团队同步图纸信息,避免在施工过程中出现技术返工的情况^[3]。当施工团队发现设计图纸前后矛盾或与现场实际改造情况有冲突时,施工人员也需及时向设计人员报告,以期总结最优的改造方案。

2.2 场地准备和设备验收

在闪速炉工程改造施工前,施工团队应清除吊车、拖车进场道路、设备存放处场地上的障碍物,保证吊装场地的整洁度。针对施工进场的技术设备进行开箱检查验收。组织专门的设备负责团队,办理好改造设备的交接手续。当遇到设备损坏的情况时,立即请生产厂家配合处理,根据设备损坏程度选择维修设备或更换设备,防止因设备损坏造成工程延期。并且,冷却铜水套和冷却钢管必须保管好,防止丢失或损坏^[4]。

2.3 基于倒装法的闪速炉改装方案的改造流程

施工准备→作业设备编制→安装技术交底→铜水套及钢管试压→反应塔上段安装→反应塔连接部安装→冷却水套安装→沉淀池顶部安装→沉淀池端墙水套安装→上升烟道挡板框架上部骨架安装→各部位烧嘴孔安装→冰铜口、出渣口装置安装→其他附件安装→配合筑炉安装冷却部件和吊装件→筑炉后系统试压→点火烘炉及投料。注：在上升烟道挡板框架上部骨架的安装中，需将各部位的冷却钢管、铜水套、锚钉板按相应的顺序安装。

3 具体施工流程

3.1 原反应塔的拆除

待闪速炉停产冷却后，立即进行闪速炉余热锅炉高跨和闪速炉电收尘内的输灰刮板机、破碎机、气力输送装置等的拆除。原反应塔的拆除步骤如下^[5]。

(1) 首先拆除闪速炉出渣口侧2层至3层的挡板，安装临时进料的钢平台，主要用于原反应塔拆除后，筒体外运和新反应塔筒体进料与其他材料的进出。施工人员可从闪速炉室外，用45t的吊车将反应塔各部件吊运至临时进料平台中，具体区域的操作划分如图1所示。



图1 原反应塔拆除的区域划分

(2) 待闪速炉停炉后，在炉体冷却的过程中，施工人员需逐步拆除炉体外围本次改造需拆除的管路，以及反应塔底部平台影响后续改造安装的格栅。在拆除过程中，施工团队要与设计人员实时沟通，确保拆除的准确性。在拆除原反应塔顶部精矿喷嘴及周边通风管时，通风管要保护性拆除，便于后续安装新反应塔时的恢复安装。经过以上施工操作后，炉体彻底冷却，此时施工人员需配合拆除耐火砖的施工队，先拆除本次改造需要更换的沉淀池上升烟道端侧墙水套。此处拆除后的位置作为沉淀池和原反应塔内部耐火砖拆除后的废料清理和后续安装材料的进出^[6]。

(3) 耐火砖施工团队将沉淀池上升烟道端和原反应塔内耐火砖清除完毕后，进行原反应塔的拆除。

(4) 拆除原反应塔前，需先确定反应塔塔体的中心线，

利用周边钢柱或钢平台，做好标记定位点。原反应塔水套拆除与钢框架梁示意图如图2所示。



图2 原反应塔水套拆除与钢框架梁

(5) 该闪速炉原反应塔的结构形式分为两层，一层为水平水套，一层为钢制法兰筒体。在拆除时遵循倒装法的拆除原则，按照从下到上的顺序进行拆除。先拆一层水平水套，再拆一层钢制法兰筒体。拆除后的水套从沉淀池上升烟道端侧墙拆除的进出料口运出，拆除后的反应塔钢制法兰及筒体，在沉淀池内分解成3段，从沉淀池顶部平台运出。以此完成原反应塔的拆装过程。

3.2 工业炉的安装

针对本项目闪速炉的改造方案，最核心的一步为工业炉的安装，其安装流程如下^[7]。

(1) 反应塔钢骨架的确定。反应塔钢骨架是承重型的钢构架，承担着反应塔本身和建筑材料的负荷，是闪速炉的核心部分。并且，反应塔钢骨架上还承载着精矿喷嘴安装支架。通过对原有钢骨架的性能测定，其强度与延展度均满足改造后闪速炉的实际需求，因此本反应塔钢骨架的选择为利用原有的钢骨架。

(2) 反应塔筒体和水套的安装。基于倒装法下闪速炉的改造工程，新反应塔的安装顺序采取由下往上倒装。反应塔塔体由支撑梁、筒体1、筒体2、立式水套、水平水套、锯齿形水套与连接部件组成。其中新反应塔筒体1、2的直径均为6420mm，采取分为两半的加工形式，便于材料运输。在筒体安装前，施工团队需利用沉淀池顶部的钢平台，采用HW200型钢塔搭设临时的组装钢平台，用于拼接筒体1和筒体2。在拼接筒体1的过程中，施工人员依托闪速炉外的临时进料平台，将筒体1运输进闪速炉的厂房内，并利用5t手动液压车，将筒体1运输至安装位置，并在临时组装平台上，将筒体1的两个部分进行组装焊接，待拼接完成后，安装筒体1上部的支撑梁，并利用反应塔顶部钢架梁挂设3个电动式手拉葫芦，用于起升筒体1的安装。筒体1安装完毕后，利用同样的方法进行筒体2的安装。当筒体1、2同时就位时，利用螺栓，将筒体与立式

水套、水平水套连接固定。在水套的安装过程中，锯齿形水套与其他水套之间的连接方式采用吊耳和调整千斤顶的方式连接。锯齿形水套分为水套钢架和铜水套两个部分。其中，水套钢架和铜水套通过镶嵌和螺丝连接，每块水套有两进两出冷却循环水管。塔顶水套和塔体水套与耐火砖共同组成整个反应塔，并由吊挂支撑梁悬挂在钢骨架上。

(3) 反应塔三角区的安装。反应塔底部为反应塔三角区，其底部四角通过反应塔下三角区水套封闭，每块反应塔下三角区水套上均设置吊挂板，反应塔下三角区通过水套挂件落在水套刮板上，吊挂在沉淀池顶岗梁上进行固定。

(4) 沉淀池顶的安装。待反应塔三角区安装完毕后，进行沉淀池顶水套的安装。沉淀池顶部水套同样是利用沉淀池顶部钢架作为支撑，利用吊挂件将水套吊挂在沉淀池顶部钢架下，以此确保沉淀池的性能稳定。在本次改造过程中，更换了沉淀池顶部上升烟道端侧墙水套、2个出渣水套与6个冰铜排放口水套。并利用钢板固定压条将水套用螺栓孔固定，确定水套位置。

(5) 燃烧阀组系统的安装。该改造后闪速炉的精矿喷嘴天然气阀组布置在4层，主要将天然气输送至精矿喷嘴中。天然气调节阀组布置在4层，主要将天然气和氮气输送至各部位的烧嘴控制阀组。其中2层有4个烧嘴控制阀组，3层有7个烧嘴控制阀组，共计11个。

3.3 反应塔的安装要求

在本次闪速炉改造工程中，基于倒装法的反应塔的安装要求有两点：第一，反应塔两片焊接后的精度要求。因要考虑到焊接后的焊缝收缩，所以在拼装时一定要做到精准施工，合理控制误差，尤其是拼接焊缝之间的间隙更要控制在2~3mm。第二，反应塔厚板焊接后，板厚可达到25~30mm，为防止焊接变形，在焊接过程中不允许板上有3mm以上的裂纹，并在焊接前用6个3t的手拉葫芦将上下法兰拉紧，在法兰对接处用钢板加固。采取以上措施后进行施焊，施焊位置由中间部位向两边进行。在正式焊接过程中，施工人员要通过相同的速度同时焊接法兰面三条焊缝，待检查合格后，再用1000A直流多头焊机进行焊接，以此降低裂纹的发生概率^[8]。

3.4 工程安全防护措施

在某国外铜冶炼厂闪速炉改造工程中，因其在倒装法的安装方法下进行，安全防护措施涉及施工前进行作业安全确认、作业工具检查、作业过程的管控、个体防护等方面内容，切实提高了施工人员的安全系数，保证了施工人员的生命安全。其具体防护措施主要涉及以下几点。

(1) 针对作业安全确认的实施。在现场起吊作业开始前，现场作业负责人要再次对吊绳卡扣、钢丝绳悬挂等进行确认。登高作业前，要确认作业人员安全带是否按要求佩戴，随身携带的工具是否有防掉落措施。

(2) 针对作业过程的管控。作业现场负责人要重点检查关注起吊过程中是否有无关人员进入起吊作业区，起吊物过程中，挂点牢固可靠，起吊物下禁止有人员。

(3) 针对起吊指挥的要求。工程现场作业需明确起吊指挥人员，并且只能有1人现场发布起吊信息，避免起吊信息过多而造成驾驶人员操作不清，导致安全事故的发生。

(4) 针对吊具的检查。在现场作业交接前，施工人员要对吊绳、卸扣等进行检查，不能安全使用的吊具不得放在现场。

(5) 针对起重设备的检查。每班要跟踪查看起重设备操作员是否对起重机的安全装置、设备状态等进行检查，确保起重设备能安全运行。

(6) 针对现场环境的要求。第一，施工现场要做到工完料清。第二，施工材料存放在固定位置，当日作业完成后，各种设备应停在指定地点，做到入库存放。

4 结语

综上所述，基于倒装法的闪速炉改造方案，在施工过程中，严格按照从下到上的施工顺序，依次安装闪速炉主体的构成部件。在某国外铜冶炼厂反应炉改造的实例案例中可以看出，从原反应塔的拆除，再到工业炉的实际安装，施工团队不需要搭设临时的施工平台，而通过将大件的零件设备转化为小件的零件组装，降低了大型吊车的使用成本，并在反应塔的安装过程中，做到了上面圈体和地面圈体的同时拼装，将2个工作内容放到了1个时间段进行，切实提高了工作效率，节约了施工工期。并且从工程安全防护角度来看，基于倒装法的闪速炉改造方案提高了施工过程中的安全系数，保障了施工人员的人身安全，具有实践推广价值。

参考文献

- [1] 许俊, 张建平, 张更生, 等. 闪速炉纯氧冶炼技术应用实践[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(3): 30-35.
- [2] 宫泽, 董智, 王德喜, 等. 基于相似理论的轻烧氧化镁闪速炉实验装置研究[J]. 节能, 2022, 41(1): 56-58.
- [3] 周俊, 陈卓. 闪速炉沉淀池中的冶金过程与炉况控制[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(12): 1-10.
- [4] 周俊, 陈卓. 闪速炉反应塔中的取样分析与炉况控制[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(11): 1-10.

PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的切削性能研究

向 侠

(株洲华锐精密工具股份有限公司, 湖南株洲 412000)

[摘要] 蠕墨铸铁具有特有优势, 包括良好的铸造性能、耐磨性和高强度等, 但是, 它也会引起普通合金刀具的磨损, 导致刀具的使用时间较短。文章通过对收集的数据进行分析, 旨在研究不同种类的 PCBN 超硬刀具在加工蠕墨铸铁过程中的切削性能, 包括蠕墨铸铁切削力研究、切削温度研究、蠕墨铸铁刀具的磨损研究和蠕墨铸铁切削形成机理研究。

[关键词] PCBN 超硬刀具; 蠕墨铸铁; 切削性能

[中图分类号] TG711; TG143 **[文献标志码]** A

1 PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的切削力研究

切削力是在切削工件材料过程中产生的一种阻力, 主要包括主切削力 (F_z)、径向力 (F_y) 和轴向力 (F_x), 测量三向力并制作 V_c - F 曲线, 在研究切削力的时候就会更加方便。当使用 PCBN 超硬刀具不断切削蠕墨铸铁时, 切削力过大或者过小都会在一定程度上影响切削刀具使用时间的长短和使用效率。下面主要从 3 个方面来研究切削力, 包括切削参数、刀尖圆弧半径和 PCBN 材料。

(1) 切削参数对切削力的影响。主要是切削速度对切削力的影响。采用 BT9000 的刀具进行实验, 控制其他条件不变, 改变切削速度, 切削速度有 5 个: 100m/min, 150m/min, 200m/min, 250m/min, 300m/min, 每次递加 50m, 然后再测量 F_z , F_y , F_x , 绘制如图 1 所示变化曲线。

由图 1 可知, 3 个切削力的大体趋势相同, 主要呈现增长的趋势。当切削速度达到 250m/min 时切削力最小。因为当切削速度在 100~200m/min 时, 由于刀具的磨损程度不断变大, 在切削热达不到时, 工件材料就不会变软变形, 所以这个时候刀具的切削力就比较大。随着切削速度的不断变大, 温度也在慢慢升高, 这个时候工件材料就会因温度太高而软化, 所以切削力也会随之减小。之后再加速, 刀具会发生磨损, 最终切削力会增加。

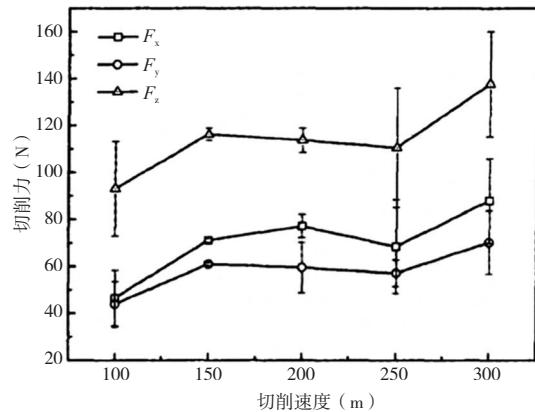


图1 不同切削速度下切削力的变化曲线

(2) 刀尖圆弧半径对蠕墨铸铁切削力的影响如图 2 所示。

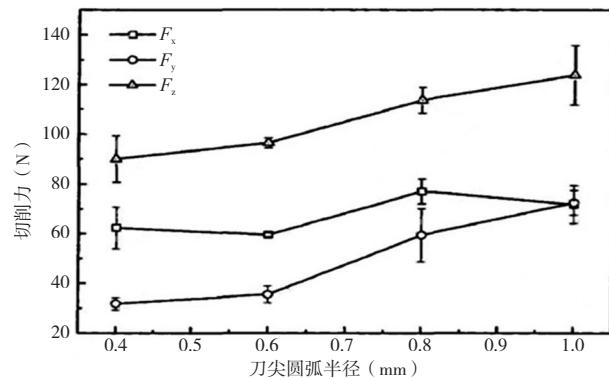


图2 不同刀尖圆弧半径下切削力的变化曲线

- [5] 康冬荣.Freelance系统在闪速炉沉淀池烧嘴控制中的应用[J].有色冶金设计与研究, 2021, 42 (3) : 34–35, 38.
- [6] 胡展, 朱永强.贵冶一系统闪速炉渣直排缓冷的优化与改造[J].铜业工程, 2020 (6) : 43–46.
- [7] 张冠华, 曹龙文, 魏文.“双闪”铜冶炼保温烟气脱硝技术方案比选[J].硫酸工业, 2020 (8) : 42–46.

- [8] 陈洪华, 牛辉.“双闪速炉”铜冶炼过程中伴生金属的流向分析与回收利用[J].世界有色金属, 2020 (7) : 17–18.

作者简介

王凌志(1968—), 男, 江西赣州人, 大专, 工程师, 主要研究方向为机电工程。

由图2可知，切削力是随着刀尖圆弧半径的增长而变大的。这个情况可以解释为：当刀尖圆弧半径增大时，刀具的切削刃就会随之变得更长，则主偏角会不断变小，最后会导致刀具切削变形，所以随着圆弧半径增大，切削力也在慢慢增大。

(3) 不同PCBN材料对切削力的影响如图3所示。

研究采用4种材料，分析材料中CBN含量不同时对切削力的影响。根据图3可知，CBN含量为90%时，切削力最小；CBN含量为80%的情况下，切削力最大。4种不同的材料，CBN含量最多的为90%，它的硬度是最高的，所以在切削的过程中所受的阻力比较小。

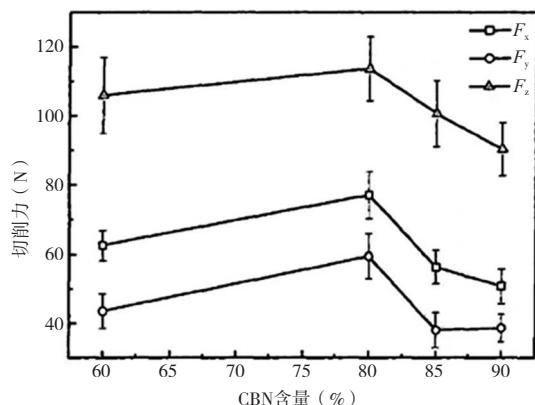


图3 不同PCBN材料下切削力的变化曲线

由以上几点可以得出结论：切削速度不断增加，3个方向的力都会增加。3个力由大到小分别是 F_z 、 F_x 、 F_y 。刀尖圆弧半径增加，切削力同样也会不断增加。并且不同刀具中CBN的含量不同，切削力也会不同。

2 PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的切削温度研究

切削过程中会不可避免地产生切削热，这种切削热就是切削温度。它指的是一种平均的温度。如果切削温度不断升高，会导致工件因为受热而发生变形，那么工件变形后不仅其表面会变粗糙，而且精度也会降低，这在一定程度上会影响到刀具的使用时间。所以研究基于PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁切削温度是有必要的^[1]。

(1) 切削速度对切削温度的影响。通过研究收集数据可知，加快切削的速度，切削过程中产生的摩擦热也会增加，所以在切削部分的温度就会逐渐升高。由于PCBN超硬刀具可以在高温中仍然稳定并且保持硬的状态，所以在温度升高时刀具仍然很硬，但切削的材料却会变软，很容易进行切削。

(2) 不同的切削深度也会对切削温度造成影响，随着切削深度的增加，切削温度会逐渐上升。通过分析可知，

切削越深，所接触的面积也会越大，那么在相同的时间里所切的材料更多，所以切削的温度也会上升。

3 PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的磨损研究

对基于PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的磨损研究有利于延长刀具的使用寿命，帮助提高加工效率。下面研究PCBN刀具切削蠕墨铸铁刀具寿命^[2]。

(1) 切削深度对刀具寿命的影响如图4所示，可以看出，4条曲线有缓慢上升的趋势，也就是说随着切削越来越深，刀面磨损程度越来越缓，最后刀具会越来越钝。

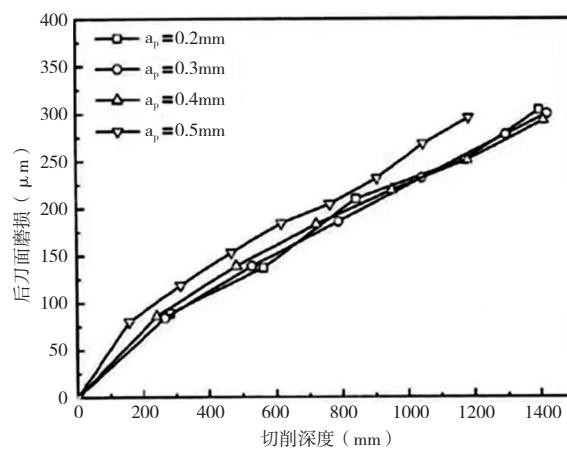


图4 不同切削深度对刀面磨损的影响

(2) 切削速度对刀具使用寿命的影响。如图5所示，可以看出，这里有5种不同的速度，5条曲线都是呈线性增加，随着长度的增加，刀具磨损程度呈现加深的趋势。当切削速度是280m/min时，刀具的寿命可以达到1.8km，在不断提高切削速度，直至达到500m/min，这时刀具的切削长度只能达到低速情况下的1/2，另外，刀具磨损程度还更加深了。并且可以看出，PCBN刀具切削蠕墨铸铁的最好保持速度在300~500m/min，此时，不仅切削的效率比较高，而且还能减少磨损，让刀具有更长的寿命。

(3) 刀尖圆弧半径对刀具寿命的影响。根据图6可知，当刀尖圆弧半径是0.4mm和0.6mm时，刀具在切削的过程中，磨损程度会不断加深，半径为0.4mm的刀具磨损的速度会相比较更加快。半径为0.8mm和1mm的刀具磨损的程度较轻一些。

总之，当刀具的刀尖圆弧半径在不断增加时，刚开始刀具的寿命是增加，随着切削的进行，会有减少的趋势。根据分析可知，这是因为刀具的刀尖圆弧半径比较小的时候，刀具会更加锋利，所以在切削过程中刀具的刀尖受到的压力会比较大一些，此时刀具轻易破损。然后增加刀具的刀尖圆弧半径，这个时候刀尖所受的压力会变小，所以

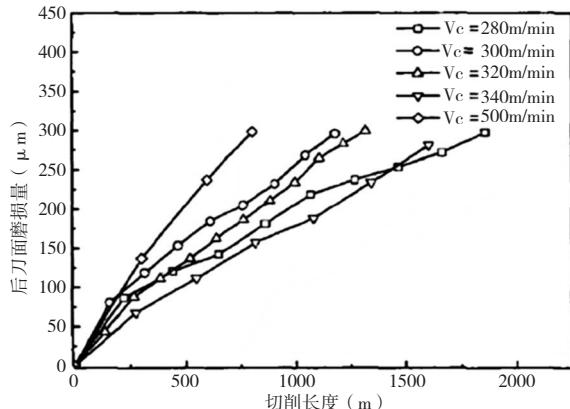


图5 不同切削速度对PCBN刀具磨损的影响

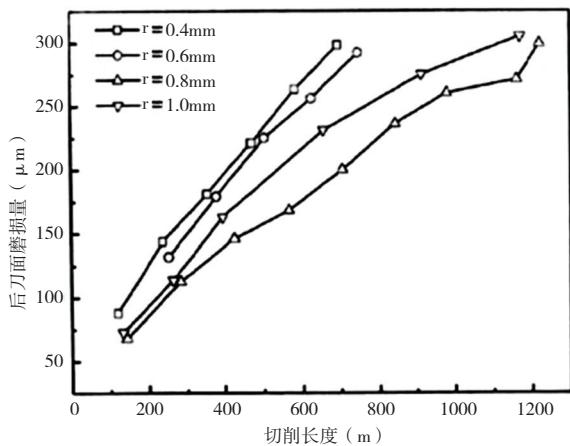


图6 不同刀尖圆弧半径下刀具的磨损

刀具的寿命会增长。但是并不是一直会增加，因为当半径增长到一定程度，切削的温度也会越来越高，这个时候刀具也会有磨损，由于这些原因刀具的寿命会减少。

4 PCBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的切削形成机理研究

影响切屑的形成有很多因素，比如刀片的材料不同、在不同的环境进行切削等条件都会影响其形成。同时，切屑的形态往往会对刀具的磨损程度等有着重要的影响，带状切屑、粒状切屑和锯齿状切屑等是几种常见的切屑几何形态，文中所研究的主要是锯齿状切屑。在切削的过程中，蠕墨铸铁锯齿化的现象很容易发生，以下是对切削参数对锯齿化程度的影响研究。

(1) 首先，是切削速度对锯齿形切削的影响，切削速度在很大程度上影响锯齿化程度。但是随着切削速度的增长，锯齿化程度并不是一直增长。可以看出，当切削速度是200m/min时，锯齿化程度为0.36，当速度为300m/min时，

锯齿化程度增加到0.42，但是如果再增快切削速度，这个时候锯齿化程度会降低，接着再增快速度，反而锯齿化程度又会增加。这个现象出现的原因是当切削的速度增快时，切削材料会变得很脆，就会产生锯齿化切屑。但是在切削的过程中，温度也会升高，切屑的形态也会发生变化。

(2) 其次，是切削深度对锯齿化程度的影响，曲线比较平缓，所以说明切削深度的变化对锯齿化程度影响不是很大。说明切削深度并不是影响锯齿化程度的重要因素。分析其原因，可能是因为切削深度越来越大，切削过程中的温度会越来越高，那么金属材料会被软化，但是切削的变形范围也在越来越大，所以在切屑剪切的地方温度变化不是很大，这些因素共同作用，导致所产生的影响互相平衡，所以最终锯齿化程度不是很明显。

由以上研究可知，在PCBN刀具切削蠕墨铸铁的过程中，切屑的形态会因为切削参数的变化而变化。和切削深度相比较，切削速度对锯齿化程度的影响较大，随着速度的增快，锯齿化程度会先慢慢的增大，接着再以更快的速度增大。而随着切削深度的增加，锯齿化程度先是会增大，但是到一定程度时就会不变了。

5 结语

总而言之，文中研究CBN超硬刀具加工蠕墨铸铁的性能，具有一定的理论意义和实践意义。有利于进一步优化PCBN刀具的材料，并且有利于精确切削工艺的参数，从而增长刀具的使用时间，还提高了刀具的切削效率等，最终有利于制造业水平的提高，增加生产加工的收益。

参考文献

- [1] 李苏洋, 唐梓敏, 丁峰, 等. 蠕墨铸铁加工研究综述[J]. 机电工程技术, 2020 (12) : 45-54.
- [2] 李艳国, 成照楠, 邹芹, 等. PCBN超硬刀具研究与进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019 (3) : 58-68.

作者简介

向侠(1987—),男,湖南张家界人,本科,工程师,主要研究方向为可转位刀具设计。

某城轨车辆压力传感器压力漂移分析及改进

王 鹏, 秦东宾

(中车制动系统有限公司, 山东青岛 266112)

[摘要] 压力传感器是城轨车辆制动系统的核心部件, 其在城轨车辆运行过程中监测一系列重要的压力指标, 以进行制动计算和车辆监控。压力漂移会对系统逻辑判断造成不良影响, 进而造成制动故障, 危及车辆安全。文章对压力传感器的压力漂移原因进行探究, 并提出相应的改进方案, 使制动故障得到有效改善。

[关键词] 城轨车辆; 压力传感器; 压力漂移; 焊盘污染

[中图分类号] U279 **[文献标志码]** A

1 概述

随着国内城市轨道交通的发展, 地铁车辆凭借其安全节能、运量大、节省土地、准点、绿色环保等特点, 在越来越多的城市作为主要的公共交通力量, 承担起更多的民生保证和运力运输功能。随着城市生活节奏的加快, 广大居民对轨道交通出行效率、舒适度、准点率的要求越来越高^[1]。制动系统作为列车车辆的核心系统, 控制着列车制动力的施加和缓解。压力传感器在制动系统中起重要的作用, 其采集车辆多个部位, 如总风管路、制动风缸等部件的空气压力传递给制动系统, 制动系统通过逻辑判断, 反馈出城轨车辆制动力施加、缓解的状态, 进一步调整车辆的制动力指令。

2 压力传感器的工作原理

压力传感器的主要功能是将气体压力信号(非电量)转化为电气信号(电量值)。压缩空气直接作用于压力传感器芯体的应变片, 随着应变片形状的变化引起电压变化, 后续信号调理电路和补偿电路对输出的电压变化进行转换, 得到符合要求的电气信号输出, 用于后续的制动控制计算。

某压力传感器在 $-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 使用, 输入电压为 24V DC, 检测压力范围为 $0 \sim 1000\text{kPa}$, 对应的输出范围为 $4 \sim 20\text{mA}$ 的电流, 压力与电流值线性相关。

3 故障描述

2020年8月, 某地铁车辆自检时司机室显示屏报制动故障, 经下载车辆数据分析, 发现某节列车压力传感器故障, 调取车辆监控数据确认某只压力传感器存在压力值漂移情况。为确认故障原因, 将该压力传感器对应的气路排空, 但是读取该传感器压力值为30余 kPa。列车跟车维护人员按照指导书要求更换该压力传感器后, 该故障消除,

进一步确认为压力传感器故障。

4 故障分析

4.1 初步性能测试

故障压力传感器在地面试验台上进行初步功能检测, 采用 24V DC 供电, 从 0 逐步增压至 1MPa, 依次每隔 0.2MPa 施加不同的标准压力, 再依次回落, 进行双循环压力测试。通过各压力点的测量数据, 可计算得到其非线性为 $0.054\%FS$ 、回差为 $0.181\%FS$ 、重复性为 $0.125\%FS$, 进而获得故障传感器基本误差。该产品基本误差明显大于 $0.3\%FS$, 产品失效。同时测量其绝缘电阻值仍为无穷大, 绝缘性能仍然良好。

4.2 拆解测试分析

对压力传感器进一步进行拆解分析, 传感器内部主要由外壳和3层 PCB 电路板组成。3层电路板分别是滤波器 PCB、电子 PCB、传感器 PCB。拆解后, 分别测量3块 PCB 电路板, 以确定压力传感器故障位置。经过排查, 滤波器 PCB、电子 PCB 功能正常。在测量传感器 PCB 时, 信号出现零点不稳定的情况, 显示出与故障件类似的波动, 确认故障位置在传感器 PCB。为进一步验证推断, 核实故障定位是否准确, 扩大了测试的样本数量, 发现同批次的传感器中存在不同程度的电阻偏移现象, 且拆解后均定位在传感器 PCB。

查阅电路板原理图, 发现在传感器 PCB 内部断开的2个触点(2点间电阻应为无穷大)出现了电阻偏移的情况, 即形成了漏电流, 漏电流位置如图1所示。该区域内连接器通过通孔回流焊工艺焊接, 使用的焊材为无铅焊料, 间距 0.2mm。

4.3 微观分析

为进一步分析故障原因, 使用光学显微镜分别观测故



图1 传感器PCB漏电流位置

障部件和正常合格部件的漏电流位置外观，先进行外观对比检查分析。通过光学显微镜观测发现：相较于正常合格部件，在故障器件焊盘器之间的间隙中存在具有晶体状结构的物质，具体形貌如图2所示。当刮除故障部件接焊盘之间的晶体状物质后，电阻偏移的情况明显改变，故障消除，可以得到稳定的绝缘电阻读数，且偏向于无穷大。

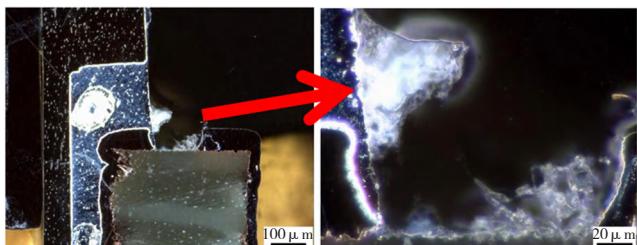


图2 光学显微镜观察图像

4.4 成分分析

利用电子扫描显微镜（SEM）对故障部件的漏电流区域进行形貌观察和X射线能谱分析。如图3所示，在失效2个触点之间的间隙中存在锡（Sn）和可导电的有机材料，并形成了铅结晶区域，而在合格部件的间隙中则观察到了更少的锡（Sn）和更少的可导电的材料。说明二者均存在锡（Sn）离子电迁移现象，只是正常样品电迁移程度较轻微，但是故障部件可以见到明显的结晶区域，正常合格部件未见明显结晶区域。电迁移（Electromigration, EM）是指电子和金属原子在高电流密度条件下，流动的电子与金属原子之间相互碰撞产生动量交换而引起的原子定向运动^[2]。金属互连结构中由电迁移引发的空洞将导致电路的断路或线路电阻的增加，从而引起电路功能的失效；而小丘（或晶须）的出现将有可能导致相邻互连引线相互桥接，并引发短路，导致极其严重的可靠性问题^[3]。故障件的锡（Sn）离子在电势差的作用下，逐渐发生了电迁移的现象。

同时，在故障部件与合格部件（均使用无铅焊料材料）之间最明显的区别是钾（K）的含量，见表1。在合格部件中未发现钾（K），而在故障部件，尤其是在接合垫和连接器之间的间隙上的污染物区域，可以检测到大量的钾（K）。

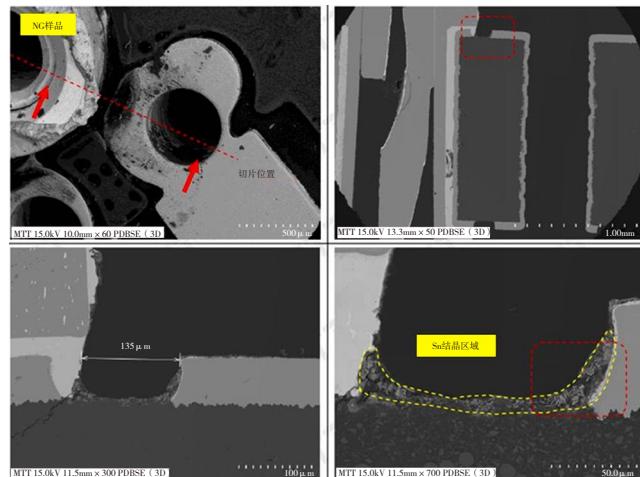


图3 故障部件切片和SEM和EDS

表1 故障部件与正常部件不同位置成分分析对比的质量分数 %

部件检测位置	C	O	AI	SI	K	Sn	Ni	Cu	P	Au	Br	Mg	Ca	Ag
故障件1 位置 1	13.8	10.7	—	0.2	5.4	55.8	7.2	2.7	4.2	—	—	—	—	—
故障件1 位置 2	14.7	26.3	—	—	20.4	—	28.5	—	3.3	6.8	—	—	—	—
故障件1 位置 3	17.7	30.3	—	0.4	22.1	—	23.4	—	3.9	2.2	—	—	—	—
故障件1 位置 4	24.0	22.9	—	—	24.4	14.3	6.6	—	5.6	—	2.1	—	—	—
故障件1 位置 5	11.5	12.8	—	—	5.4	—	44.5	—	5.3	20.5	—	—	—	—
合格件2 位置 1	73.5	10.0	—	1.2	—	11.3	—	—	—	—	4.0	—	—	—
合格件2 位置 2	54.0	6.6	—	—	—	23.8	6.6	—	1.1	7.8	—	—	—	—
合格件2 位置 3	16.5	3.2	—	0.7	—	48.5	13.5	—	—	15.5	—	—	—	—

为了进一步确认故障部件漏电位置的钾（K）的成分，对故障部件对应位置进行红外光谱分析（FTIR），测试结果可以确定故障部件污染物的主要成分是脂肪盐酸。这种脂肪盐酸具有较强的吸潮性，可以加速潮湿环境的形成。在高温高湿环境（故障发生时的环境条件为夏季且天气多雨）下金属离子会加速形成，为电迁移的形成提供充足条件，进而影响产品两个焊接接触点的电阻值。

污染物中的这类脂肪盐酸类物质属于无铅锡膏焊接的助焊剂。助焊剂在整个锡膏中所占的重量比较小，但作用却非常大。在焊接过程中，金属表面所形成的氧化薄膜会阻碍钎料的润湿铺展，妨碍焊接效果，因此通常需要使用某些特殊的活性物质来去除这些氧化物，使焊接过程可以顺利进行^[4]。其中成膜剂的加入可以有效提高锡膏的铺展性能和稳定性，但成膜剂的含量越大，锡膏中不挥发物的含量就越高，焊后残留就越多^[5]。原有传感器PCB焊盘之间的距离为0.2mm（额定电压DC 24V），外层未涂覆绝缘层。这种设计间距虽然符合电路板设计的一般电气间距要求，但是绝缘安全裕度不足，所以在锡膏和助焊剂污染焊盘后造成电阻偏移，产生漏电流问题。

6机架冷连轧5机架时张力优化设定方法研究

吴长生，何乐乐

(宝钢湛江钢铁有限公司冷轧厂，广东湛江 524072)

[摘要] 国内某新型5+1冷连轧机产线布置形式，可以同时完成超高强钢和普通钢种的生产。为进一步降低机组的能耗，提高机组生产效益，采用5机架生产模式。针对5机架生产过程中轧制能力超限和生产质量缺陷问题，文章从张力制度优化设定的角度出发，完成了轧制压力、轧制功率、打滑和热划伤模型建立与参数分析，形成了一套张力制度优化设定技术。相关技术模型在现场应用后，机组张力制度得到有效改善，进一步降低了生产质量缺陷。

[关键词] 冷连轧；张力；优化设定

[中图分类号] TP273 **[文献标志码]** A

金属板带作为现代化生产的重要产品，在汽车制造、航空航天、数码电子等行业担当重要角色，近年来上述产业的蓬勃发展刺激了金属板带的产量提升^[1-3]。同时，大部分产业对金属板带的成品质量也提出了更高的要求。冷连轧作为金属板带生产的重要环节，承担了大压下量和质量控制的双重责任。而机组的张力制度设定是优质金属板

带的保障，因此冷连轧生产过程中的张力制度设定对机组的能力极限和金属板带的质量保证有关键性的影响。

对于张力制度的优化主要体现在两个方面，一是机组的能力极限，包括轧制压力和轧制功率，超出机组能力极限的工艺设定是无效的，将会影响后续工序的正常运行；二是金属板带的质量控制，包括常见的打滑、热划伤缺陷

5 改进方案

5.1 电路板设计改进

为增加绝缘安全裕度，将原有传感器PCB焊盘的距离从0.2mm扩大到了0.71mm，并通过移除不需要的PCB特征获得额外的距离，此间距余量可满足航天行业印制板电路设计要求最小电气间距0.64mm的要求^[4]。同时提高产品工艺性，降低焊锡和助焊剂的残留。在此基础上，进一步增加绝缘涂覆层，可以有效增强电路的耐电压性。

5.2 工艺流程改进

一方面改进助焊剂的选择，使用污染更小的助焊剂；另一方面增加助焊剂清洁的工艺步骤，避免助焊剂及其他异物在电路板上的残留。

6 结语

针对某城轨车辆压力传感器压力漂移故障，通过拆解分析、微观分析、成分分析等方法，明确了故障位置，确定了故障原因。据此对电路板布局进行设计优化改进及工艺改进，压力传感器压力漂移问题得到有效改善，故障发生概率大幅度降低，为制动系统的稳定运行提供了重要支撑。

参考文献

- 王二虎. 城市轨道交通车辆运行控制技术研究进展[J]. 内燃机与配件, 2021 (9) : 208-209.
- 田雨. 晶粒数目及金属间化合物对Sn基焊点电迁移行为的影响[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- 邹嘉佳, 孙晓伟, 程明生. QFP引脚锡须在高温条件中的生长研究[J]. 电子工艺技术, 2016, 37 (3) : 138-140, 159.
- 林雨生. 电子封装用喷印锡膏和助焊剂制备技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- 杨雅婧, 赵麦群, 吴道子, 等. 成膜剂对低松香型助焊剂性能的影响[J]. 电子工艺技术, 2014, 35 (3) : 125-127.
- 姜培安, 张伟, 范清远, 等. 印制电路板设计要求[S].

作者简介

王鹏 (1988—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为轨道交通制动系统。

控制, 轧制过程缺陷的存在会影响金属板带的质量, 严重的甚至对机组设备产生影响。丁志宇^[4]等从数学模型角度出发, 分别构建了基于转矩和速度的张力控制模型; 聂梦麒^[5]基于自动张力控制理论基础并结合生产数据反馈, 研究了张力自动控制模型并生产应用。文章通过控制带钢生产缺陷并考虑机组的能力极限, 在机组运行能力范围之内, 最大限度地减少金属带钢产品缺陷的发生, 并基于此构建了张力优化设定模型。

1 某冷连轧机组设备简介

为了实现超高强钢量产的同时避免机组能力超限, 现国内某冷轧产线采用5+1的6机架冷连轧机组布置模式, 其中第4机架为小辊径轧机(Hyper-UCM, 其工作辊直径范围为320~360mm), 其余为常规轧机(工作辊直径范围为405~455mm)。

在实际生产过程中, 机组也需要兼顾其他常规钢种的生产, 因此综合考虑经济性与能耗节约, 同时为了避免产能过剩, 采取5机架的工作模式并保留小辊径轧机, 即选择1, 2, 3, 5, 6(F1, F2, F3, F5, F6)机架进行轧制, 如图1所示。为了保证产品质量和轧制稳定性, 对机组的张力制度设定提出了更高的要求。

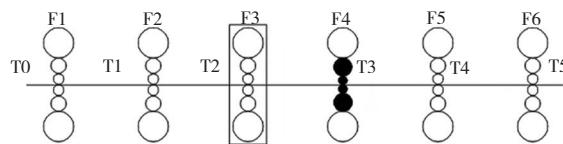


图1 某产线6机架冷连轧5机架生产布置

2 张力制度优化设定模型

轧制压力、轧制功率为机组能力极限的主要评价指标, 打滑、热划伤为冷轧板带常见缺陷。基于此, 本模型在保证机组运行能力极限范围之内的基础之上, 最大限度地减少带材的缺陷发生。其中, 轧制压力由式(1)表示。

$$\begin{cases} P_i = Q_F(K_m - \xi)B\sqrt{R'\Delta h_i} + \\ \frac{2}{3}\sqrt{\frac{1-\nu^2}{E}}\frac{h_i}{K_m\Delta h_i}(K_m - \xi)B\sqrt{R'\Delta h_i} \\ \xi = 0.3T_{i-1} + 0.7T_i \\ Q_F = 1.08 - 1.02r + 1.79r\mu_i\sqrt{1-r}\sqrt{\frac{R'}{h_i}} \\ r = \frac{h_{i-1} - h_i}{h_{i-1}} \\ R' = R_i \left[1 + \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \cdot \frac{P_i}{B(h_{i-1} - h_i)} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 为第*i*机架轧制压力, kN; Q_F 为外摩擦影响系数; K_m 为道次平均变形抗力, MPa; B 为带材宽度, mm;

ζ 为等效张力影响系数; R' 为工作辊压扁半径, mm; Δh_i 为第*i*机架压下量, mm; ν 为泊松比; E 为弹性模量, MPa; h_0 为第*i*机架带材入口厚度, mm; h_i 为第*i*机架带材出口厚度, mm; T_{i-1} 为第*i*机架前张力, kN; T_i 为第*i*机架后张力, kN; r 为压下率; μ_i 为第*i*机架摩擦系数; R_i 为第*i*机架工作辊半径, mm。

在上述轧制压力的基础之上, 轧制功率模型可表示为式(2)。

$$\begin{cases} W_i = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{V_i M_i}{R_i} \cdot \frac{1}{60} \\ M_i = P_i a \\ a = R_i \sin(\beta + \arcsin \frac{T_{i-1} - T_i}{2P_i}), T_{i-1} > T_i \\ a = R_i \sin(\beta - \arcsin \frac{T_i - T_{i-1}}{2P_i}), T_i > T_{i-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, W_i 为第*i*机架轧制功率, W; M_i 为第*i*机架轧制力矩, N·m; V_i 为第*i*机架轧制速度, m/min; η 为电机效率; a 为轧制力臂, mm; β 为不考虑张力时轧制力作用点对应的轧辊中心角, rad。

在保证轧制压力和轧制功率在机组能力极限范围之内的情况下, 打滑因子和热滑伤指数分别由式(3)和式(4)表示。

$$\psi_{ui} = \frac{\lambda_{di}}{4\mu_i} \left(\sqrt{\frac{\Delta h_i}{R_i}} + \frac{T_{i-1} - T_i}{P_i} \right) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ui} = \frac{\zeta_{ibx} - g(T_c)}{g(T_c)} \\ g(T_c) = a_c T_c^2 + b_c T_c + c_c \end{cases} \quad (4)$$

式中, ψ_{ui} 为第*i*机架打滑因子; λ_{di} 为第*i*机架工况对打滑的影响系数; φ_{ui} 为第*i*机架热滑伤指数; ζ_{ibx} 为第*i*机架轧制变形区润滑油膜厚度, mm; $g(T_c)$ 为带钢出口温度下的热划伤临界油膜厚度; a_c , b_c , c_c 为热划伤临界油膜厚度的函数系数。

为保证带材生产过程中轧制能力不超限, 同时最大限度兼顾打滑和热划伤缺陷的减少, 张力制度优化设定模型的目标函数可表示为式(5)。

$$\begin{cases} G_T(X_T) = \beta_1 \left[\alpha_1 (\psi_{ui}^* - \psi_{ui}) + \alpha_2 \varphi_{ui} \right] + \\ \beta_2 \left[\alpha_2 \left(4\psi_{ui}^* - \sum_{i=1}^5 \psi_{ui} + \psi_{u3} \right) + \alpha_2 \left(\sum_{i=1}^5 \varphi_{ui} - \varphi_{u3} \right) \right] \\ X_T = \{T_1, T_2, T_3, T_4\} \\ T_{i-1\min} \leq T_{i-1} \leq T_{i-1\max}, i = 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $G_T(X_T)$ 为张力制度优化目标函数; ψ_{ui}^* 为第*i*机架高强钢打滑因子临界值; α_1 为张力制度优化过程高强钢打

滑控制余量影响系数; α_2 为张力制度优化过程高强钢热滑伤控制余量影响系数; β_1 为张力制度优化过程小辊径轧机轧制稳定性影响系数; β_2 为张力制度优化过程常规轧机轧制稳定性影响系数; $T_{i-1\min}$ 为第*i*机架与第*i*-1机架之间最小张力值, kN; $T_{i-1\max}$ 为第*i*机架与第*i*-1机架之间最大张力值, kN。

综合考虑轧制压力、轧制功率、打滑和热划伤在轧制过程中对机组能力的要求, 张力制度优化设定模型的约束函数可表示为式(6)。

$$\begin{cases} P_i \leq P_{i\max} \\ W_i \leq W_{i\max} \\ \psi_{ui} \leq \psi_{ui}^* \\ \varphi_{ui} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{i\max}$ 为第*i*机架最大轧制压力, kN; $W_{i\max}$ 为第*i*机架最大轧制功率, W。

因此, 本模型中张力制度的优化设定模型演变为在式(6)的约束条件下, 寻找一组最优的张力制度 $X_T = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}$, 使得目标函数 $G_T(X_T)$ 值最大。这样在保证生产过程中不超出机组能力极限的前提下, 带材缺陷也得到了良好控制, 如图2所示。

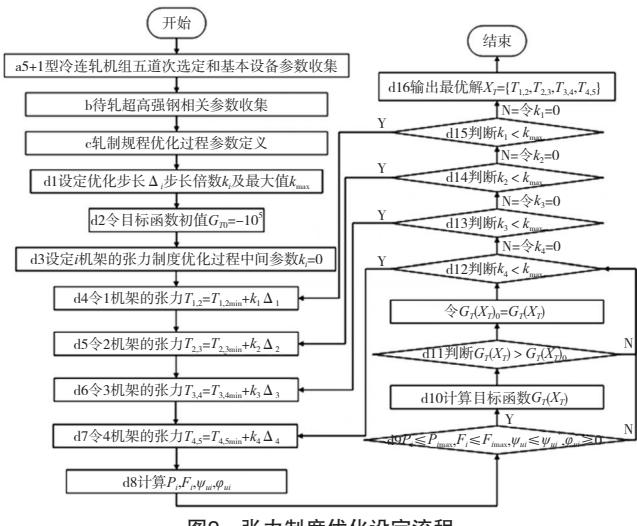


图2 张力制度优化设定流程

3 技术的现场应用

5+1型6机架冷连轧机组在国内外冷轧碳钢冷连轧产线为首次实践, 是冷轧产线布置上的一次创新举措。国内外相关学者和专家并无对新型连轧机组的生产工艺研究经验, 因此, 为了保障冷轧产线的稳定运行, 同时兼顾产线产能的高效利用, 文章建立了张力制度优化设定模型。在机组试生产之后不断进行模型优化, 并对产线设备进行改进, 张力制度优化设定模型与机组不断交融, 产品质量也

不断提升。以980DP典型钢种为例, 产线应用张力制度优化设定模型前后结果见表1, 其中, F1~F6为连轧机组的机架编号, F1代表第1机架, F2代表第2机架, 以此类推。

表1 张力制度优化前后对比

状态	参数	机架					
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
优化前	T_{i-1} (kN)	240	342	354	355	280	269
优化前	ψ_{ui}	—	0.12	0.45	0.35	0.46	0.32
优化后	ψ_{ui}	—	0.63	0.66	0.62	0.59	0.54
优化后	T_{i-1} (kN)	240	376	361	409	257	275
优化后	φ_{ui}	—	0.21	0.30	0.31	0.35	0.36
优化后	φ_{ui}	—	0.69	0.75	0.71	0.54	0.63

从表1中可以看出, 优化之前的打滑因子 ψ_{ui} 存在个别机架偏高的问题, 这样容易出现轧制缺陷, 甚至影响后续生产。相比之下, 优化之后的打滑因子 ψ_{ui} 分布较为均匀, 不存在个别机架偏高的问题, 有效降低了生产缺陷的出现概率。对于热划伤缺陷来说, 优化之后5个机架中有4个出现了热滑伤指数 φ_{ui} 升高现象, 说明整体热划伤缺陷在降低, 生产稳定性得到有效改善。

4 结束语

本文通过对国内某冷轧产线的新型5+1布置形式进行研究, 从张力制度优化的角度出发, 分别计算轧制力、轧制功率、打滑系数和热滑伤指数, 在保障机组能力极限的前提之下, 即轧制压力不超过机组允许最大轧制压力, 轧制功率不超过机组允许最大轧制功率, 同时尽可能地降低生产过程中出现打滑、热划伤缺陷的概率。通过现场实际生产, 证明模型对机组的生产缺陷控制有很好的效果, 同时说明打滑因子的均匀化和热滑伤指数的提高, 对生产缺陷的减少起到关键性作用, 直接证实了模型对现场生产具有积极影响。

参考文献

- [1] 马晓敏. 去年有色金属生产保持平稳增长[N]. 中国矿业报, 2022-02-21.
- [2] 吕晓倩. 智能制造在金属生产过程当中的策略研究[J]. 冶金管理, 2020 (15): 141-142.
- [3] 扈玲, 王练. 数字化时代下有色金属生产过程智能优化控制探究[J]. 有色金属工程, 2022, 12 (5): 158.

作者简介

吴长生 (1986—), 男, 江西赣州人, 本科, 工程师, 主要从事金属压力加工相关工作。

机械设计中模块化设计方法的应用

闫加杰¹, 刘雅婷¹, 王康龙², 林秋实¹, 吴彬¹

(1.昆明学院, 云南昆明 650214; 2.太原理工大学现代科技学院, 山西太原 030024)

[摘要]模块化设计技术的普及应用已经是当前机械设计中的必然趋势。模块化设计方法不仅能够极大提高产品设计的效率, 同时能够为设计人员提供清晰的设计思路, 更有助于后期的批量加工生产, 从而让优秀的设计方案能够快速落地应用并尽早创造出经济价值。文章对机械设计中模块化设计方法的优势进行了介绍, 并介绍了机械设计中模块化设计方法的应用实践步骤及实例。

[关键词]机械设计; 模块化设计; 辅助设计

[中图分类号]TH122 **[文献标志码]**A

模块化设计技术的普及应用已经是当前机械设计中的必然趋势。模块化设计方法不仅能够极大提高产品设计的效率, 同时能够为设计人员提供清晰的设计思路, 更有助于后期的批量加工生产, 从而让优秀的设计方案能够快速落地应用并尽早创造出经济价值。

1 机械设计中模块化设计方法的概念与优势

1.1 模块化设计方法的基本概念

机械设计中模块化设计方法的概念就是基于特定的产品类型及设计需求, 在进行机械设计时将不同功能、类别的功能模块进行组合而完成新产品的设计。这样就可以将机械设计过程简化为对多种模块进行选择与组合, 从而有效地缩短设计与生产周期, 促使新产品能够更快地完成设计和生产上市。设计人员只需要将重点放在各个模块的选择、兼容及组合方面, 根据需要设计的机械设备的类型、外观、体积等因素, 选择恰当的功能模块, 并将这些模块合理连接, 即可快速完成新的机械设计方案。模块化设计和生产的机械设备在某些功能发生损坏时, 只需更换对应的模块, 即可修复故障和继续投入使用, 降低产品维修保养成本。很多模块设计的机械设备也留有功能拓展的接口, 可以为后续产品升级留下一定的空间。

1.2 模块化设计方法的优势

1.2.1 模块化结构便于互换

机械设计中的一个重要原则就是需要具备模块或零部件的互换性。因为互换性越高的机械产品在使用中的维护保养也就越便捷且成本越低。对于一些生产或者交通领域的机械设备而言, 模块化的功能结构使其在出现任何故障时可以快速更换对应的功能模块并重新投入使用, 几乎不用考虑模块的适配性、可得性问题, 且各个模块的拆装都

比较简单并有着固定的方法, 这样也便于对维修人员在操作方面的快速培训。

1.2.2 适用于快速批量生产

由于模块化设计而成的机械产品主要就是由多个功能模块按照一定的方式组合而成, 所有模块均为成品, 其外观、功能也已经被确定, 经过模拟兼容性测试、模拟组装以及实物测试就可以进入批量生产环节。由于具有固定的模块选择以及组装方式, 因此可以使用自动化的生产设备来进行高效的组装, 或者组装人员仅需要简单培训即可上岗进行组装操作。由于模块化设计的机械设备的功能、结构以及安装方法都具有高度的标准性, 因此组装效率及精度都能够得到保障。

1.2.3 便于进行功能拓展

当前机械设计制造行业的竞争日趋激烈, 各类机械产品都力求在功能方面做出创新。对于企业而言, 设计创新能力以及产品创新水平都成为企业核心竞争力的重要指标。而大多数具有创新性的机械产品唯有尽可能高效快速地完成设计、生产和发售, 才能将创新方案变现为利润。机械设计产品的创新升级往往并非是彻底的变革, 而只是体现为一些功能的拓展或者改善, 而模块化的设计方案就可以通过更新功能模块来实现, 能够保证设计和生产效率并抢占市场先机。

1.2.4 便于使用各类模拟设计软件工具

当前机械设计已经全面进入自动化、智能化时代, 设计人员可以非常方便地使用各类设计软件工具来快速完成新产品的设计、调试与功能模拟。当前很多设计软件工具都内置了大量常用机械设计模块的参数及模拟信息, 并且支持对新功能的机械模块参数信息的快速导入从而生成设

计方案，还可以自动调试和对比多种设计方案，对于设计方案中在兼容、联接方面的冲突或不合理之处及时做出提示，为设计者的工作提供极大的帮助。

2 机械设计中模块化设计方法的应用实践步骤及实例

2.1 应用实践步骤

2.1.1 明确机械设计理念

在采用模块化设计方法进行机械设计时，必须要明确其设计理念。机械设计工作往往就是在既往的产品设计方案上做出适度的改进创新，因此明确设计理念也就是明确创新的要点和改进的目标等。例如，在进行内燃机曲柄连杆机构设计时，设计人员首先需要结合设计框架、结构形式、制造材料、功能预设、成本估算以及后期维护保养方案等，从而基于实现既定的功能、满足产品质量标准要求为导向，合理选择曲轴飞轮、活塞连杆和机体等模块组合。

2.1.2 合理选择功能模块以及确定连接形式

机械设计人员在使用模块化设计方法进行设计工作时，在明确了设计理念之后就需要按照产品的种类、功能从而合理地选择功能模块。首先要确保机械产品设计需求中的所有功能都有对应的模块来实现，然后还要从多种同类功能模块中确定具体选型以及不同模块之间的连接方式，既要确保产品的功能性和性价比，又要确保模块之间的兼容性。在初步完成模块选型之后就需要使用分层、分步设计的方式来将模块进行连接，并使用设计工具平台的调试功能对各种连接方案进行检查和优化。设计人员在选择以及连接模块时始终应该考虑到后续的产品升级，尽可能考虑到后续的机械产品模块更换与升级的需求，确保产品有一定的拓展性，或者可以通过简单的更换及调整模块即实现快速的迭代更新，也降低后续设计成本并提高设计效率。设计人员在选择模块时还必须考虑到所在国家或地区对机械产品所设定的设计及质量标准，确保所选择的具体功能模块以及设计方案符合当地的法律法规及行业规范。

2.1.3 对模块进行空间位置安排和编码

设计人员在确定模块的功能需求、具体选型以及连接方式之后，就需要根据产品功能需求、性价比要求以及便于后期维护保养的原则，基于特定的设计规则对产品内部模块进行编码。一般而言，机械设备的功能越丰富且实现原理越复杂，则内部功能模块以及辅助零部件的复杂程度和集成程度也就相应越高。在这样的情况下更是要合理安排各个模块主件以及辅件的紧密连接和位置安排，并且对各个零部件进行编码标记，再在设计方案说明上注明不同编码零部件的型号、种类、作用和连接方式等。这些记录

也是后期进行维修保养时的重要依据。尤其对于一些主要的功能模块部件或者昂贵的零部件，更是要在空间位置安排上对其进行保护，并且专门进行标记和说明，从而确保其在后期的生产、维修和保养过程中对于这些部位予以特别的关照。

2.1.4 进行模拟及实物的装配操作

在完成模块的空间位置安排及编码之后，即可进行模拟及实物的装配操作。模拟装配操作主要是验证连接方案的合理性、装配的可行性等，并且能够基于既定的装配方案对其兼容性和功能进行初步检验。例如，在工作过程中大致的功耗、各个部位的电流及电压强度、各个模块部件的受力乃至模拟其故障率和使用寿命等。在一些含有电路板的基础模块组织中，设计人员还必须为这类模块设计出合理的分层排布形式，并对模块之间的连接强度进行模拟测试，确保其能够胜任真实的工作环境，达到既定的使用寿命和故障率而不会轻易发生损坏。

在进行了模拟装配以及模拟实际工况的操作之后，就进入实物装配的阶段。首先使用选择的功能模块以及各个零部件按照设计方案装配出试验成品，在装配过程中验证设计方案用于实际装配的可行性，通过实物的装配观察其集成度、紧凑度是否达到了要求，对一些实际并不可行或者成本过高之处进行整改优化。然后再对装配的试验品在实际工况场景中的功能性、稳定性进行检验，发现任何问题都需要及时总结原因，然后再对设计方案进行调整，直至实物装配测试完全通过。

2.1.5 对结构应力强度及防护性能进行测试

由于大多数机械设备在实际应用场景中都需要承受较大的应力，而使用模拟的设计软件很难对真实的受力状况进行准确还原和分析。

(1) 不同机械模块之间具有多种连接以及排布形式，在内部应力上存在相互制约关系，同时还要受到外部应力的影响。因此设计人员首先需要在成本允许范围内尽可能选择受力较好的材料。

(2) 在选择组件封装形式时也需要考虑到安装生产以及使用中的受力问题。

(3) 除了受力问题，还需要保障的是成品的防护性能，包括防尘、防风、防水及防静电等，确保成品能够在实际工作环境中稳定地运行并满足既定的功能。

在进行应力测试时，测试人员既可以通过理论进行分析计算，也可以使用应力应变测试仪等工具对一些关键的模组部件、外部受力情况进行直接测量。在进行受力分析

及测试时，如果发现任何位置受力超出预计，则需要对设计方案予以进一步调整，包括调整构件位置或者连接方式，或者对材料进行适度升级，从而确保成品的承载及防护性能可以满足实际工况需求。

2.2 汽车装配工艺的模块化设计实例

2.2.1 前端模块化设计

汽车的前端模块包括前端框架、前保险杠、散热器及进出水管等。前端模块设计的目的就是为了将这些功能模块进行合理组装的同时，也能够进一步提高装配质量，例如，提高汽车的承载能力、防撞能力、防故障及防磨损能力。传统汽车设计流程中前端设计一般都是使用框架式结构和焊接方法来连接多个构件，这一方式不仅设计效率低下，并且装配成本高，装配难度大。而汽车前端模块设计可以使用模块化的设计方法，只需考虑多个既定模块的连接方式和位置规划即可，让多个功能模块相互连接并能够实现快速装配，后期的维修保养成本也极大地降低。

2.2.2 车门模块化设计

汽车的车门部分也包含了多个功能模块，包括车门挡板、车窗玻璃、车窗马达、车门锁具、车门把手等。车门的模块化设计可以在确保各个功能部件得到合理选择与连接的同时，也能够充分考虑到安装的可行性和使用的便捷度，达到易于安装、使用方便且舒适的效果。并且其模块化设计过程在设计软件平台上即可实现。

3 现代设计背景下模块化机械设计方法的发展趋势

3.1 软件工具平台更加先进

当前各类机械设计的软件平台如 CAD、CAE 和 CAM 的先进性都在不断提升，不仅内置了多种功能模块的模拟信息及参数，便于设计者快速选型和调用，同时还能够运用智能化技术生成多种设计方案，并对各种设计方案的实际效率、功耗和工况进行分析对比，对各个模块之间的兼容性进行自动解析，并给出设计建议以及对电路连接进行自动测试等。这类机械设计软件平台还会根据既往的机械设计实例对智能模拟算法进行不断改进，以确保设计方案生成更为合理，并且模拟运行与实际情况更为契合。

3.2 支持批量定制

现代机械制造企业很多时候都会接到与现有的成品在功能、外观及材料等方面与其他成型的产品有一定区别的订单，并且要求完成快速设计和批量定制。而在模块化设计方法的支持下，企业可以提高设计效率并且确保设计方案能够快速进行批量定制从而满足客户要求。可以说模块化机械设计方法的一大发展趋势就是如何支持批量定制的

实现，例如，在已有的产品设计方案基础上对某些功能模块进行更换或者扩展等，尽可能提高设计效率与生产精度，减少装配难度，也让企业能够通过快速的设计方案生成与批量定制从而获得更多的订单。

3.3 快速设计

当前各类计算机辅助机械设计的软件工具平台不仅能够支持模块化组装设计方案的快速生成和调试，甚至其本身已经发展出快速设计的功能，即内置了多套指定领域、类型及功能的机械设备的设计方案框架，设计者可以直接进行调用和修改即可投入调试和生产，或者系统可以根据设计者输入的功能需求来完成模块的自动选型和安装方案的自动优化等，而无需设计者再重新建立一套设计方案框架并且对功能模块进行手动选型。这一功能的进步也是凝结了全球机械设计领域的很多宝贵经验和优秀成果，并且能够通过软件辅助设计的功能确保其能够为全球机械设计领域的工作者所共享。

3.4 虚拟设计与虚拟制造技术相结合

随着目前软件技术以及人工智能的发展，各类机械设计软件工具平台不仅能够实现更加强大的辅助设计功能，还发展出了虚拟制造技术，即对设计方案的制造装配过程也进行模拟，继而能够反推出设计方案中存在影响生产效率或者合格率的潜在问题，并将其分析总结和呈现给设计者，以作为后续对设计方案进行优化更改的依据。这样也可以将更多的问题在设计阶段就得到解决，减少机械设备生产的风险，例如，生产过程中合格率过低、零部件损坏导致的虚耗浪费及返工问题。

4 结束语

当前机械设计模块化设计方法已经发展愈加完善，并且给机械设计领域带来了深远的变革，包括设计软件工具平台的先进性不断提高、提高了产品设计的效率与有效性、更加便于设计生产装配并且能够模拟制造过程等。广大机械设计从业者一方面需要积极掌握设计工具的先进功能，另一方面也要从设计生产实践中不断汲取经验，借助现有的先进技术，进一步做出自己的创新设计，推动我国机械设计的技术水平逐步走在世界前列。

参考文献

- [1] 鞠小冬. 互联网背景下机械设计自动化设备安全控制探讨[J]. 中国设备工程, 2022 (11) : 240-242.

作者简介

闫加杰 (2000—)，男，山西太原人，本科，主要研究方向为机械设计制造及其自动化。

锂离子电池电极预锂化技术工程化进展

詹世英, 何海平, 张正, 张凯, 王美春, 李海军

(格力钛新能源股份有限公司, 广东珠海 51900)

[摘要] 能量密度的提升是目前锂离子电池性能研究的重点方向之一, 开发新型高比容量的正负极材料是解决这一问题的有效途径。但由于其首次库伦效率低、循环稳定性差, 影响了这些新材料的推广应用。电极的预锂化技术则提供了一种高性价比的解决方案, 具备短期内工程化的可行性。文章介绍近年来主要的几种电极预锂化技术及其在行业内的工程化应用进展情况, 并展望了该技术的未来发展方向。

[关键词] 电极预锂化; 高能量密度; 硅基材料; 锂离子电池

[中图分类号] TM912 **[文献标志码]** A

0 引言

随着手机、扫地机器人、无绳电器、纯电动汽车等产品的快速普及, 锂离子电池作为其核心储能装置已形成了数码、电动工具、动力和储能等多种类型的产品系列, 在长三角和珠三角地区已经形成了比较完备的产业链和产业集群。中国的锂离子电池产能和产量均居世界首位。近年来, 锂离子电池相关的新技术也迎来了难得的工程化窗口期, 针对提升电池能量密度和循环寿命的“掺硅补锂”技术正是行业内竞相开发的方向之一。“掺硅补锂”分别指的是硅基负极材料和电极预锂化技术。硅基负极材料的理论比容量可以达到 4200mAh/g , 远超过目前大规模应用的石墨负极材料比容量 372mAh/g , 可以大幅度提升电池的能量密度, 被认为是现阶段最具应用前景的负极材料之一。硅基材料作为锂离子电池负极时, 其电压平台为 0.1V (vs Li/Li^+)。与石墨类似, 其在化成过程中有机溶剂、添加剂将被还原形成SEI膜, 同时会消耗锂离子, 形成含锂化合物和气体。但由于充放电过程中硅基材料的体积变化超过300%, 其颗粒受应力变化影响会发生开裂、破碎, 形成新的固液界面, 结果将导致新的SEI膜形成, 消耗更多的锂离子。因此, 硅基负极应用中存在的最主要问题是首效低、胀气、循环稳定性差。为了克服这些问题, 除了通过优化材料形貌、电解液配方、粘结剂等方法外, 为硅基材料提供更多的锂源, 即电极预锂化也是主要的研究方向。

目前锂离子电池中的锂离子主要来源于含锂的正极材料和电解液中溶解的锂盐, 这些锂根据其发挥的作用可分为非活性和活性两大类。非活性锂主要是指起到支撑材料空间结构的材料组分, 以及电极表面SEI膜形成和其他副反应造成的不可逆锂损失。有些正极材料中的锂离子是与

其结构稳定性密切相关的, 如果过度脱锂, 会造成不可逆的结构变化, 严重影响电池的循环稳定性。而在电池激活过程中形成的SEI膜和其他副反应则会大量消耗正极和电解液中的活性锂。以石墨为例, 首次充电会消耗掉约10%的活性锂, 用于形成SEI膜。而对于硅基负极而言, 由于存在较大的体积形变, 首次充电一般会形成更厚的SEI膜, 故其首次不可逆容量损失高达30%以上, 且后续新固液界面的不断产生还会导致新SEI膜的形成, 从而持续消耗活性锂, 导致电池的循环寿命快速衰减。活性锂则主要是指电池充放电过程中电极间起电荷输运作用的锂离子, 其数量直接影响电池的内阻、实际容量、能量密度, 以及倍率、循环等电池性能。由于电解液中锂盐的溶解量是有限的, 若通过直接将昂贵的正极材料用于负极的容量补偿, 在工业应用中既不经济也不现实。即使得以补偿, 正极过多的锂空位形成将导致电池的工作电压和实际存储容量的变低, 相应能量密度也会随之降低, 不利于高容量硅基负极材料在锂离子电池中的实际应用。电极预锂化技术的目的就是用较低的成本来补充电池中的锂源, 保证活性锂的数量, 避免正极过度脱锂, 从而提升电池的能量密度和循环寿命。预锂化技术的研究主要集中在负极预锂化和正极预锂化添加剂两个方向, 其他补锂方法还有在电池原材料制备合成和使用(包括新型电解液、电解液补锂添加剂、粘结剂等)、电池工艺(包括干电极技术、化成技术等)、实验生产设备改造等方面。文章将主要对电极预锂化两种技术方案研究进展做简要介绍, 并针对现阶段其工程化应用情况进行讨论。

1 负极预锂化

负极预锂化的设计思路主要是通过在负极材料中预存

一定量的活性锂，用来补偿 SEI 膜形成和其他副反应造成的不可逆锂损失，确保正极材料释放和电解液中的活性锂用于电荷传输。负极常见的方式是直接对负极补锂，如锂箔补锂、锂粉补锂等，都是目前重点发展的预锂化工艺。负极预锂化主要技术路线分为：掺混补锂（锂粉补锂、硅化锂粉等）、接触补锂（锂箔补锂等）、电化学补锂和化学补锂。表1对比分析了这几种负极预锂化方法的技术特点、技术效果和实际工程化应用情况。

表1 负极预锂化技术分类及简介

方法	技术特点	技术效果	工程化进展
接触补锂	将金属锂箔压在负极表面，直接补充活性锂	NCM622 SiO _x ，首效从 68% 提升至 87%，200 周容量保持率 74%	工程示范阶段
掺混补锂	用相对稳定的锂粉或锂合金粉替代金属锂，机理与接触补锂类似	NCM SiO，首效从 57% 提升至 88%，200 周容量保持率 75%	部分商品化
电化学补锂	通过电化学的方法牺牲含锂的第三极在负极表面形成 SEI 膜	NCM532 Si，首效从 25% 提升至 86%	实验室阶段
化学补锂	用化学试剂处理负极表面形成 SEI 膜，减少活性锂的消耗	Li ₂ S-PAN Si，首效从 70% 提升至 93%，50 周容量保持率约 85%	实验室阶段

从工程化开发和商业化进展情况来看，目前直接从事接触和掺混负极补锂相关材料、设备生产和补锂工艺研究的厂家较多，技术成熟度相对较高。特别是美国的富美实（FMC）公司已推出可以在干燥环境中使用的金属锂粉末产品——SLMP（Stabilized Lithium Metal Powder）。该材料具有核壳结构，表面被 2% ~ 5% 的碳酸锂包覆，具有高达 3600mAh/g 的比容量，添加到负极中可以提高电池的容量、首效和循环寿命。但目前影响接触和掺混负极补锂工程化进展的最主要问题是金属锂的不稳定性、生产过程中和大规模储运潜在的安全隐患。作为补锂原料，金属锂（锂粉、锂箔）是高反应活性的碱金属，能够与现有电池生产所用极性溶剂水、N-甲基吡咯烷酮（NMP）等发生剧烈反应，因此其对环境的控制要求十分严苛。另外，金属锂与常规电解液、粘结剂也会发生反应，与现有的热处理工序也不兼容，这就使得金属锂相关的负极补锂工艺实际应用过程中除了需要对生产线进行环境控制改造，还要开发新型的溶剂、电解质、粘结剂等材料，采购费用较高的专用补锂设备，并对现有的生产工艺进行调整。这些实际的工程应用问题极大地限制了其转入量产和推广。

2 正极预锂化

正极预锂化是指通过额外添加的活性锂源，来补偿不可逆的活性锂损失，确保电池内活性锂的充足。相较于流程复杂、安全风险高，且对环境和工艺要求较高的负极预

锂化技术，目前研究较多的正极预锂化技术集中在高性价比的富锂添加剂开发方面。富锂添加剂需要满足电化学窗口匹配、补锂容量足够高、兼容现有锂电池生产环境和工艺、残留少并无产气等副反应等要求。正极预锂化这种添加剂的设计思路类似于电解液解决电化学窗口、稳定性等问题的方案，加入少量功能性添加剂来拓展电解液的适用范围，可以同时满足性能和成本的需求。除此之外，正极预锂化技术也有类似于负极的电化学技术路线。表2对比分析了正极补锂技术方法、性能特点及现阶段工程化进展。

表2 正极预锂化技术分类及简介

方法	技术特点	技术效果	工程化进展
富锂添加剂	充电过程中分解并释放出 Li ⁺ ，补充活性锂	NCM 石墨，可逆比容量从 160mAh/g 提升至 179mAh/g，50 周容量保持率 84%	实验室阶段
富锂添加剂—过二元化合物	充电过程中释放 Li ⁺ ，放电过程中不回嵌，类似于锂化材料一次电池的正极	LCO-LFO HC，正极可逆比容量增加约 14%，50 周容量保持率从 90% 提升至 95%	部分商品化
正极过锂化	通过电化学方法预处理正极，使其锂含量过量，补偿 SEI 膜的活性锂损失	LNMO α-Fe ₂ O ₃ ，α-Fe ₂ O ₃ 可逆比容量达到 698mAh/g，60 周容量保持率 88%	实验室阶段

实际电池制造过程中，富锂添加剂可以直接在正极浆料的匀浆过程中添加，无需额外的环境改造和工序调整，更为重要的是富锂添加剂使预锂化工艺的安全性大大提高，现有的锂离子电池生产线不需要做任何调整，是所有预锂化方案在工程化方面可行性最高的技术路线之一。虽然富锂添加剂目前的价格相对较高，但其添加量一般不超过 5%，带来电池首效、能量密度和循环寿命的提升却十分显著。富锂添加剂商品化方面，深圳研一新材料已于 2021 年开始镍酸盐（Li₂Ni₂O₄）产品的批量生产和销售，专利号为 CN113571781A，补锂容量为 260 ~ 340mAh/g。德方纳米于 2021 年公告拟建设“年产 2.5 万 t 补锂剂项目”，其磷酸盐补锂剂已通过下游客户的小批量验证，专利号为 CN112117433A，其补锂容量更高，约为 700mAh/g。随着富锂添加剂材料量产化的快速推进，其成本有望在短期内大幅度降低，在提升能量密度的同时，还可以有效促进硅基、硬碳、软碳、锡合金等首效偏低材料的产业化应用。

3 专利及部分企业应用情况

在电极预锂化技术专利布局方面，从 2015 年开始，电池企业相关补锂技术专利开始陆续增加，与高比容量电极材料的发展趋势相一致。国内主要的电池厂商联合设备、上游原材料厂家等进行多方位设计开发，在预锂化设备研发与装置改造、电池工艺优化、电池原材料改性等方面积

累了丰富经验，这也为探索安全性高、环境适应性好、制造成本低、易于规模化等生产条件提供可能。从预锂化技术相关专利申请量来看，宁德时代居前，通过国家知识产权局平台可查到相关专利46篇，其中发明授权专利7篇，公开19篇，实用新型20篇。其专利内容主要涉及3个方面：一是负极补锂装置，采用轧制方式将锂箔与负极贴合；二是负极补锂技术，先后在负极表面涂覆/喷涂与SEI膜组分相同的负极膜和锂膜；三是正极补锂技术，在活泼的锂化合物如 Li_2O_2 表面制备 $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Li}_2\text{O}$ 保护膜后，在正极制浆时加入。国内其他厂商，包括国轩高科、比亚迪、亿纬锂能、杉杉能源等也在积极布局预锂化技术相关专利。例如，国轩高科（CN109103419A）通过在预锂电极的表面涂覆电解质锂盐制程的有机涂覆液，在预锂电极的表面形成有机薄膜层，提升锂离子电池的首次效率、循环稳定性和加工性能，同时降低了生产环境对补锂电极的影响；蜂巢能源（CN109687023A）采用含 Li_xS_y （ $2 \leq x \leq 4$, $2 \leq y \leq 8$ ）补锂添加剂的新型电解液，该电解液能够有效避免干法补锂时金属锂粉在空气中的漂浮，保证生产安全，而且整个工序简单，成本较低。从实施效果来看，宁德时代承担的国家重点专项“100MWh级新型锂电池规模储能技术开发及应用”中采用预锂化技术实现了磷酸铁锂电池12000次以上的超长循环寿命，相关成果已在福建省开展了示范应用。

4 结论与展望

在国家“30·60碳达峰、碳中和”背景下，高速发展的锂离子电池等化学储能作为风、光等新能源大规模推广应用的关键环节，其重要性尤为突出。以高能量密度、长循环寿命为特征的高性能锂离子电池工程化进展情况是新能源领域的重点关注方向，硅基等新型高容量负极材料是这一方向的研究热点，而预锂化技术则是攻克不可逆锂损失，提升电池能量密度、循环寿命等瓶颈问题的一种有效技术手段，其高性价比也符合工程化应用的需求。本文对比了电极预锂化两种技术方案，可以发现负极预锂化中的接触和掺混补锂的容量高，技术成熟度相对较高，但是成本投入较大，技术改造难度较大，操作复杂，对环境要求高，有一定安全风险。正极预锂化中的富锂添加剂技术优势主

要体现在安全稳定性高，与现有电池生产工艺兼容性好等方面。从工程化应用的角度来看，电极预锂化技术的安全性、稳定性、适应性和成本是其商业化和推广的关键影响因素。因此，以富锂添加剂为代表的正极预锂化技术有望率先在现有的锂离子电池体系中实现大规模应用，显著提升现有锂离子电池体系的能量密度和循环性能，并促进硅基等新型电极材料的应用和推广。而基于金属锂开发的负极预锂化技术原理和工艺路线明确，在解决了工程应用过程中潜在安全隐患，攻克材料、工艺、设备等方面的技术难点后具备更大的发展潜力。

未来负极补锂技术的研究应着重改进其在电池制造过程中的稳定性，解决潜在的安全风险问题，除了在原材料方面开发在空气中可以稳定存在的含包覆层锂粉外，还可以开发与工业化生产相兼容且工艺简单的技术方案。如干电极工艺技术，其加工过程无需添加溶剂，金属锂补锂可以顺利实施。正极预锂化则应着重开发化学性质更加稳定、分解电位低、补锂容量高、残余量小的添加剂材料，如 Li_3N 和 Li_2O 等分解电位低、补锂容量高，但需攻克其稳定性差、反应活性低、易产气等问题。此外，电极预锂化技术同样适用于软碳、硬碳、锡合金、富锂锰基等首效偏低的锂离子电池电极材料，在进一步提升电池能量密度的同时，还可以拓宽电极材料的可选范围，助推新一代锂电池的开发和应用。电极预锂化技术的研究设计思路对于钠离子、镁离子电池的性能优化提升同样具有积极的借鉴和指导意义。

参考文献

- [1] 潘璇, 王存国, 朱孟康, 等. 锂离子电池大容量硅基负极材料的研究进展[J]. 化工科技, 2017, 25(1): 6.
- [2] 李泓. 锂电池基础科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.

作者简介

詹世英（1981—），男，贵州铜仁人，博士研究生，工程师，主要研究方向为新能源锂电池。

全尺寸飞机强度试验整体框架设计技术研究

严 冲

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 陕西西安 710000)

[摘要] 整体框架设计技术是全机强度试验的基础技术之一, 但技术人员对该项技术缺乏系统的研究, 无相关设计规范。文章通过对典型整体框架设计过程的总结和分析, 初步提炼出该项技术的设计依据、设计流程及各流程内具体技术内容, 可为全尺寸飞机强度试验整体框架设计规范的编制提供技术基础。

[关键词] 全尺寸飞机强度试验; 整体框架设计技术; 研究

[中图分类号] V216.1 **[文献标志码]** A

在国内外的全尺寸飞机静力 / 疲劳试验中, 大量采用了整体框架作为主承载结构^[1], 如图1所示, 目前国内已在10余项静力及结构剩余强度试验中得到应用^[2]。虽然整体框架应用广泛, 但框架设计的各项技术环节及设计细节依赖于设计者本身的设计习惯和经验, 缺乏统一、明确的设计规范, 造成框架设计技术缺乏连续性与继承性。因此, 本文旨在对全尺寸飞机强度试验整体框架设计依据、设计流程及相关技术内容进行研究, 为全尺寸飞机整体框架设计规范的编制提供基础。

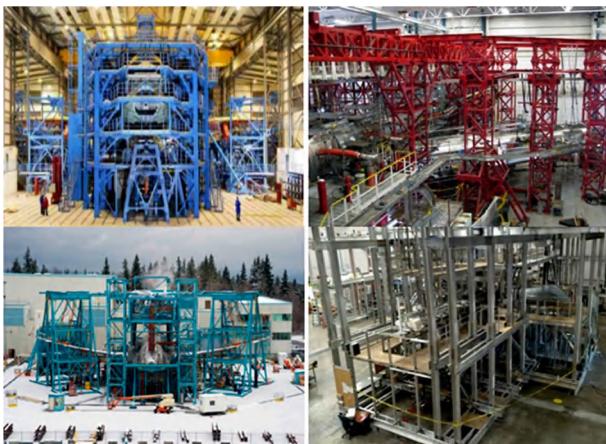


图1 整体框架在全尺寸飞机强度试验中的应用

1 全尺寸飞机强度试验整体框架设计参考的相关标准及依据

- (1) GJB 67.9A—2008 军用飞机结构强度规范——地面试验。
- (2) GJB 1452A—2004 大型试验质量管理要求。
- (3) GJB 1309—1991 军工产品大型试验计量保证与监督的要求。
- (4) CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准。
- (5) AP-21-AA-2011-03-R4 航空器型号合格审定程序。

(6) ZWA 质量手册。

(7) 相关安全生产及行业标准。

(8) 试验任务书。

2 设计流程及相关技术内容

全尺寸飞机强度试验整体框架设计流程包括需求分析、总体设计、总体优化、强度校核、详细设计优化及子系统设计等内容。

2.1 需求分析

整体框架设计依据试验整体需求开展。试验需求分析为论证、明确设计方案、确定总体参数提供基础设计输入。整体框架设计需求分析的主要信息应包含但不限于如下信息: 分析试验件外形尺寸、载荷及变形情况、试验支持、测控规模及布置、特殊需求等。

- (1) 外形尺寸, 应包含试验件长度、翼展、高度、外形等。
- (2) 载荷及变形情况, 应包含所有工况试验件各部位最大载荷及相应变形情况。
- (3) 试验支持, 包含支持种类、约束位置、占用空间、对承载结构的需求等。
- (4) 测控规模及布置, 包含总的测量规模、最大单次测量规模、测量布置(分布式或集中式)、最大加载点规模、各向加载点规模、控制形式(分布式或集中式)、测量控制线缆及设备对于平台的需求等。

(5) 型号特有的载荷及其他需求。

以某型飞机整体框架设计需求分析为例, 其主要需求分析如下。

- (1) 试验件尺寸及试验规模大, 飞机总占地面积达50m×50m, 加载点众多, 总数多达200个。
- (2) 试验载荷及飞机结构变形大, 双边机翼向上总载可达8000kN, 飞机结构在试验工况下最大变形可达4m。

(3) 试验加载难度大，大部分翼面加载方向均为空间斜加载，载荷方向复杂；垂尾侧向载荷加载点高度高，载荷大；机翼垂向载荷还有展向和航向分量。

(4) 试验要求高，试验要求框架有使用方便、功能齐全、通用性好、可靠性高等特点。在设计之初就要考虑周全，全面顾及到框架各个方面功能的实现，如油路、线路系统、安装检查平台等附属结构的布置，如何使框架整体强度、稳定性满足使用要求。

2.2 总体设计

在试验需求分析结果的基础上，进行整体框架的总体设计，确定整体框架的总体布局、主要尺寸、承载能力、结构形式等。

(1) 总体布局：框架的总体外形、空间布局、试验件进场考虑、起吊上夹具考虑、各向试验载荷的承载部位、测控的布置考虑、管路布局、楼梯设置、作业空间等。

(2) 主要尺寸：框架各主要部位长宽高、与试验件距离、考虑作动筒选择及试验件变形的加载净空间、预留平台及作业通道尺寸等。

(3) 承载能力：框架各承载部位最大单点载荷、最大总弯矩等。

(4) 结构形式：框架的点线模型，不包括楼梯平台等非承力结构。

以某型飞机整体框架设计为例，通过飞机外形尺寸明确了总体布局及尺寸，如图2所示；通过机翼的预估变形数据明确框架内部使用净高度；机翼的总载荷较大，采用双层轻型钢架式承载梁，如图3 (a) 所示；试验中存在较大的水平载荷，对立柱抗弯能力要求高，采用框筒型格构柱等，如图3 (b) 所示。

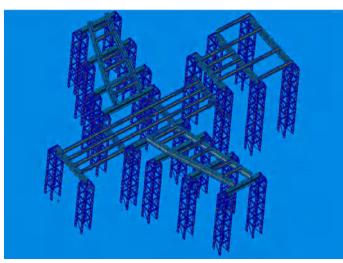
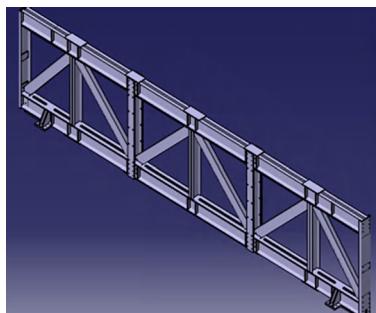


图2 框架的总体布局及尺寸

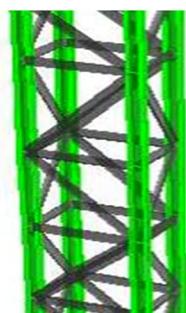
2.3 总体优化

整体框架设计是一个反复迭代优化的过程，根据整体强度校核结果及需求分析更新，完善设计方案，及时进行优化和改进。具有优化内容如下。

(1) 对总体设计阶段的框架数据进行复核，确定布局



(a) 双层轻型钢架式承载梁



(b) 框筒型格构柱

图3 不同结构形式的框架结构组件

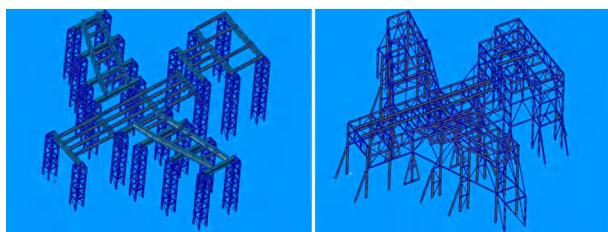
及尺寸。

(2) 对整体结构进行强度校核（含理论计算及有限元仿真），确定是否能在合理的结构型材尺寸内满足承载能力及安全系数要求。

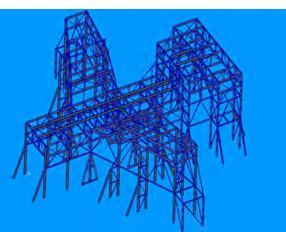
(3) 对结构进行优化，提高单位结构重量内承载能力。

(4) 对楼梯、平台等非承力结构的布局进行优化。

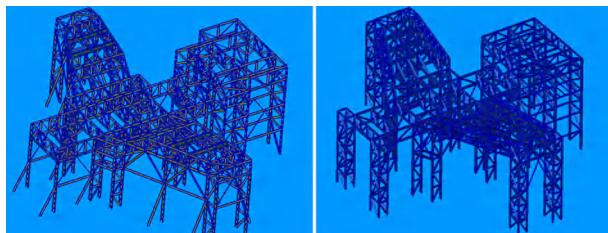
以某型飞机整体框架总体优化为例，依据需求分析更新及强度校核结果进行了3次大规模优化，最终形成最优总体设计，如图4所示。



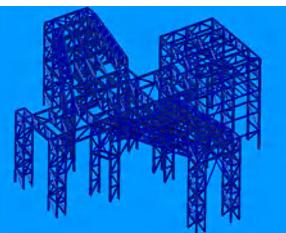
(a) 初步设计方案



(b) 设计方案改进1



(c) 设计方案改进2



(d) 最终设计方案

图4 某型飞机整体框架总体优化过程

2.4 强度校核

依据试验任务载荷，对完成总体优化的整体框架各承力结构进行详细强度、刚度及稳定性校核，受力严重部位应进行局部校核，应考虑各承力结构受载形式的不同及拉力、剪力、弯矩、扭矩等载荷的叠加及耦合。根据各承力结构的强度校核结果，选定承力结构的型材，形成最终设计模型。

某型飞机整体框架的强度校核如图5和图6所示，最终设计模型如图7所示。

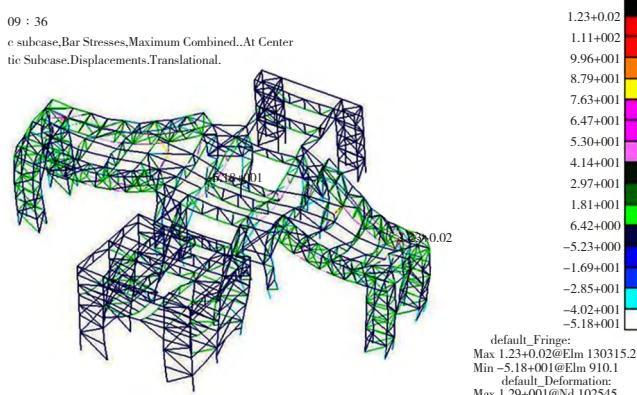


图5 某型飞机整体框架的详细校核

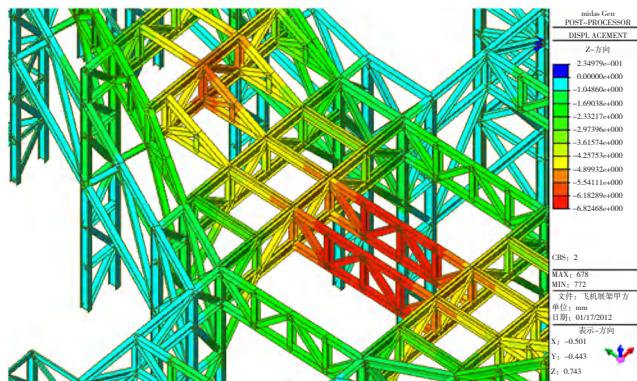


图6 受力严重部位的局部校核

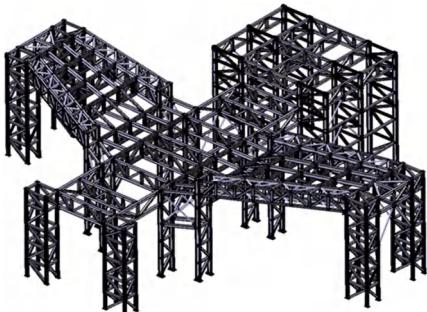


图7 经过校核及选材的最终设计模型

2.5 详细设计及优化

在详细设计阶段，应完成如下工作。

- (1) 对完成强度校核的最终设计模型进行分解，形成单独加工的各结构组件。
- (2) 确定各组件间合理的连接形式，完成连接节点设计，避免应力集中现象。
- (3) 设计组件内各部位的具体尺寸、型材焊接形式、接头形式、加筋补强、非承力结构的安装接头预留等。
- (4) 进行干涉检查，包括承力构件之间、连接螺栓之间、楼梯平台与承力构件、楼梯平台之间等。
- (5) 进行安装检查，各构件安装过程预设，容差设计、超差处理措施预案等，拐角等小空间位置的安装作业空

间检查。

(6) 对详细设计进行优化，主要集中在各构件的连接形式，使连接更简便，容差率更高，安装更快捷。

某型飞机整体框架设计中，组件间的连接方式对整个框架的传力方式及整体强度与刚度有着重大影响。组件间的连接设计是框架设计的重要环节，采用了高强螺栓连接。考虑到框架大部分载荷为向下载荷，各个组件间的连接在垂向方向上是近似固支，并对连接处进行结构上的加强，如焊接加强板、加强肋和斜撑等，来增加它的强度。由于试验载荷和规模大、各单元构件间的连接节点众多、连接形式复杂等因素，节点设计采用全螺栓摩擦面连接形式，并且有较高的刚性以增强节点的稳定性。对于安装困难的部位，连接螺栓孔局部采用长条孔设计，以方便连接安装，消除安装误差。该典型连接节点设计具体设计方案如图8所示。选取受力严重的典型节点，建立有限元分析模型，并进行强度分析计算。强度设计要求节点连接板、牛腿单独承载，均能满足强度有4.0安全裕度的要求，如图9所示。

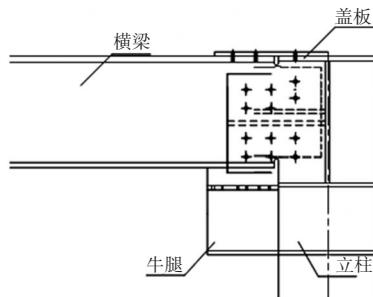


图8 典型节点连接形式

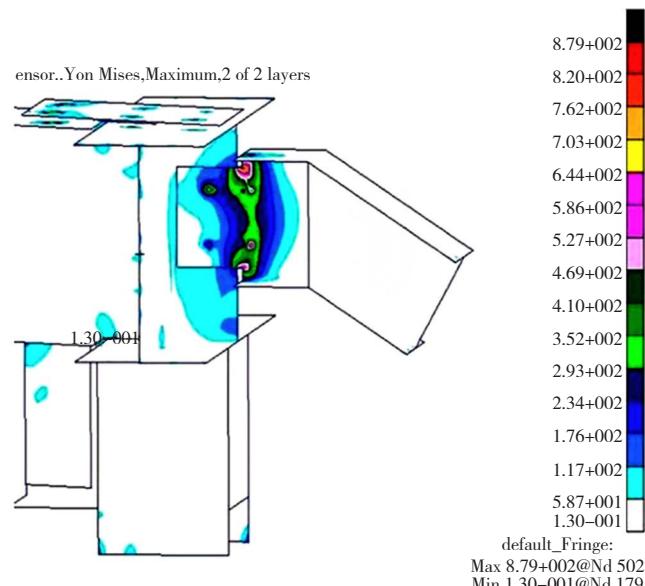


图9 连接节点校核

2.6 子系统设计

子系统设计是指试验实施所需的非承力系统设计，主要包括试验检查平台设计、油路系统设计、线槽设计及其他子系统设计。具体内容如下。

(1) 检查平台设计参照国标 GB4053.3—2009 进行，设计及尺寸满足相关技术要求，同时参照试验本身要求，预留足够试验实施空间，满足试验变形需求，必要时平台可采用移动式、折叠式或翻转式等结构形式。

(2) 依据试验框架布局、加载点总体布置等信息进行油路系统的设计，包括液压子站的布置、伺服电源布置、硬管软管的选择、管路线缆走向、油路开关布置等。

(3) 线槽设计依据测量规模确定测量设备及线缆数量，对测量进行分区，确定各分区合理的出线口位置，按照出线口位置、测量设备摆放位置、试验框架设计确定合理的线槽设计。

(4) 其他子系统设计依据试验需求及现场管理要求进行，应满足相关标准及规范。

某型飞机整体框架依附于主体框架结构之上，由横梁和走廊组成，横梁、走廊为标准件，可根据现场情况和试验要求，灵活搭建检查平台，使检查人员可以安全顺利到达需要检查的飞机部位及加载点，若与加载设备有干涉，可方便拆除。检查平台示意图如图 10 所示。由于试验加载点多、分布距离参差不齐对油源输送接口设置及管道布局有很大的影响，现场油源压力接口已经固定，根据飞机现场摆放位置进行了合理的规划，解决了加载设备运行平稳、恒定的油源需求。飞机应变测量点多达 3 万多片，应变测量线重达几吨，对飞机试验扣重影响很大。为解决应变测量的走位问题，设计了线槽系统，最大程度减小测量线的重量对飞机的影响。油路线槽系统示意图如图 11 所示。

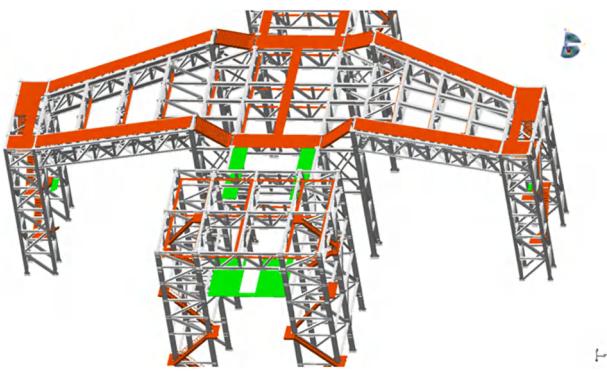


图10 检查平台设计

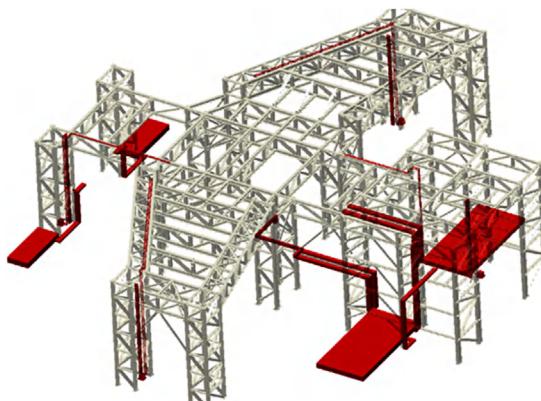


图11 油路及线槽系统设计

3 总结

全尺寸飞机整体框架设计是一个根据试验需求分析及强度校核不断进行设计优化迭代的过程。试验需求分析是整个设计过程的基础，需要对试验全流程各个环节进行详细考虑和论证，经过反复核算后提出，并在后续设计过程中根据试验任务输入的调整及时进行更新；总体设计中需要明确总体布局、主要尺寸、承载能力等顶层参数，保证整体方案的可行性，并进行必要的优化；强度校核是保证试验安全性的根本，建议采用多种校核方法同时进行，保证足够的安全裕度；优秀的详细设计可提高整体框架的承载重量比，提高试验设计、生产、安装效率；各种子系统在提高试验效率中发挥着重要作用，框架设计中应为子系统的设计安装提供必要的接口及支持。

参考文献

- [1] 中国飞机强度研究所. 航空结构强度技术[M]. 北京：航空工业出版社，2013.
- [2] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M]. 北京：航空工业出版社，2012.

作者简介

严冲（1987—），男，陕西乾县人，硕士研究生，工程师，主要研究方向为结构强度试验技术。

SNCR脱硝技术在冶炼行业烟化炉的应用

张林星

(福建龙净环保股份有限公司, 福建龙岩 364000)

[摘要] 电力行业燃煤锅炉持续运行且负荷较为稳定, SNCR 脱硝技术在电力行业具有广泛的研究和应用。但对于间歇性工作的冶炼行业烟化炉的研究及应用较少, 主要原因为烟化炉的间歇性运行, 负荷变化大导致 SNCR 脱硝效率极不稳定。文章通过分析冶炼行业烟化炉的特点, 结合韶关某冶炼厂烟化炉 SNCR 脱硝实验项目, 研究 SNCR 脱硝技术在烟化炉的应用。

[关键词] SNCR; NO_x; 烟化炉; 间歇性脱硝技术

[中图分类号] X784 **[文献标志码]** A

1 背景

1.1 行业概况

目前电力及热电联产燃煤锅炉已大面积推广烟气超低排放要求, 普遍执行烟气中氮氧化物(NO_x)浓度小于50mg/Nm³的排放标准; 水泥窑、玻璃窑等也已经开始执行更严格的NO_x排放标准。冶炼行业烟化炉由于工作特点, 工况变化频繁, 烟气中NO_x浓度波动大, NO_x排放尚未执行强制国家标准。但是目前已经有部分地区及企业把烟化炉NO_x浓度纳入环保考核项目中。

1.2 韶关某冶炼厂烟化炉工况

韶关某冶炼厂采用烟化炉吹炼工艺处理电热前床渣, 综合回收原料中的锌、铅、银等有价金属。每次吹炼5包炉渣, 第1包炉渣倒入完成开始进煤粉。由于这个阶段烟气中含氧量较高, 随着炉渣逐步倒入, 烟气温度从300~400℃上升到1100℃, 烟气中NO_x浓度从50~70mg/Nm³剧烈上升到700~800mg/Nm³。进渣完成后进入稳定吹炼阶段, 烟气中含氧量下降到6%左右, NO_x浓度逐步下降到50~70mg/Nm³。吹炼完成放渣阶段, 烟气温度逐渐下降, 烟气中含氧量逐步上升, NO_x浓度从50~70mg/Nm³剧烈上升到700~800mg/Nm³, 直到放渣完成, NO_x浓度下降到正常水平。每次冶炼周期(开始进渣到放渣完成)约2h。

1.3 SNCR脱硝效率与温度的关系

SNCR的脱硝效率主要取决于反应区烟气温度等因素。通常情况下, 若有足够的反应时间, 脱硝效率与反应温度存在关系, 如图1所示。温度在950℃附近时, 脱硝

效率最高, 温度逐渐下降, 脱硝效率将随之降低, 倘若温度超过950℃时, 脱硝效率不仅降低, 还将发生逆反应。因此, 烟化炉的较高脱硝效率, 需要确定烟道温度场、供氨喷枪所在区域的温度和脱硝效率及NO_x浓度较高时的温度。

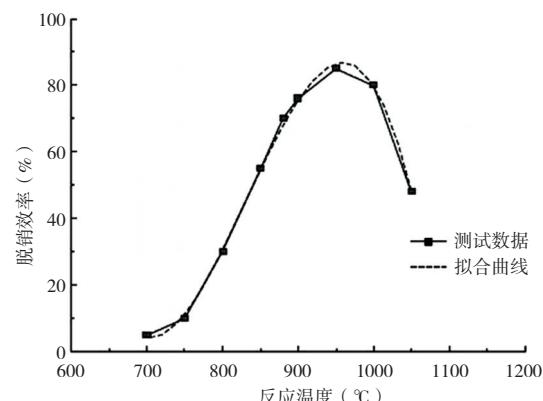


图1 脱硝效率与反应温度的关系曲线

2 烟化炉脱硝工况确定

通常, 温度是影响SNCR脱硝效率的重要因素。在确定烟化炉脱硝工况时, 应优选确定烟道温度场, 并分析烟化炉的工艺情况下NO_x浓度高值的温度分布, 结合烟道温度场与NO_x浓度高值的温度分布最终确定合理的SNCR脱硝反应区。

2.1 烟道温度场

根据韶关某冶炼厂现场烟道的实际情况, 利用已有温度点及烟道孔或烟道人孔门作为烟道温度场检测点。由于吹炼期间的烟气温度波动较小, 因此在吹炼期间利用便携式热电偶检测烟道各测点温度, 并将温度检测结果与已

有的温度测点（2#）作为比对的依据。对比对的结果与差值进行优化后，绘制烟道温度场，如图2所示。

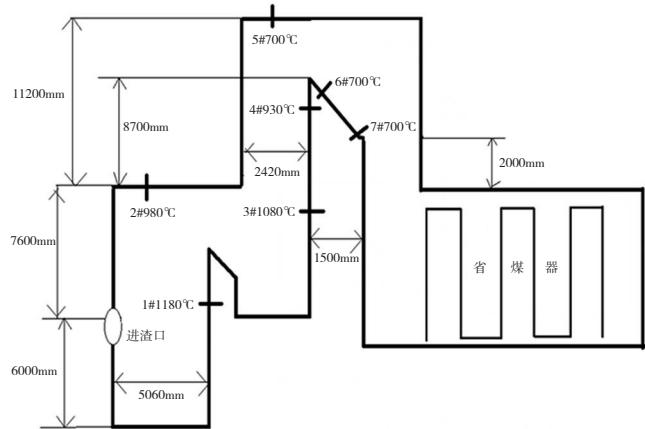


图2 烟化炉与锅炉烟道温度场

在进渣和放渣过程中，由于烟道流场的不均匀性，各测点和2#测点的温度差异同吹炼时的温度差相比存在较大区别。3#温度测点与2#温度测点在进渣和放渣的一段时间内的温度曲线如图3所示。

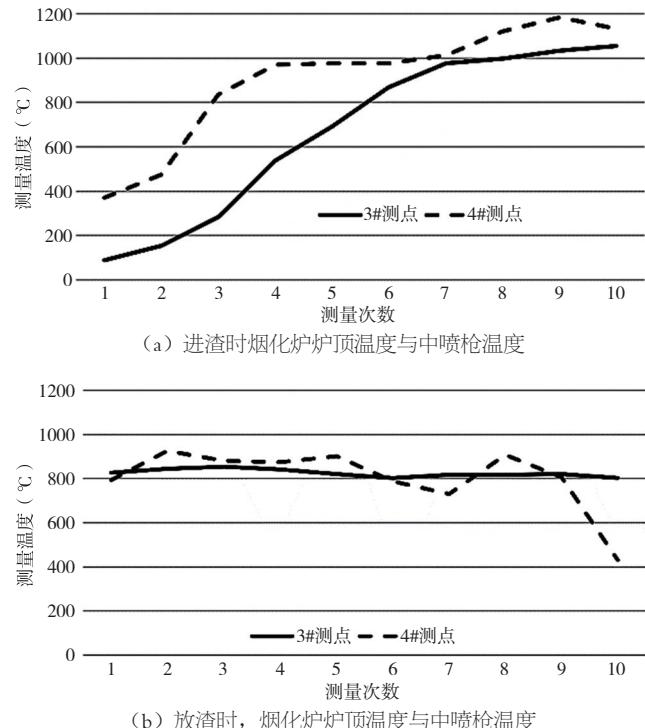


图3 进渣、放渣过程中的温度差异曲线

由于2#测点位置烟气流通较慢，导致温度变化的滞后性。进渣过程中，同一时刻两测点的温度最大差异超过400℃。随着温度升高并超过800℃，两侧点的温度差异逐渐稳定。放渣过程中，两测点温度差异近似为0，但随着温度持续降低，3#测点的温度将低于

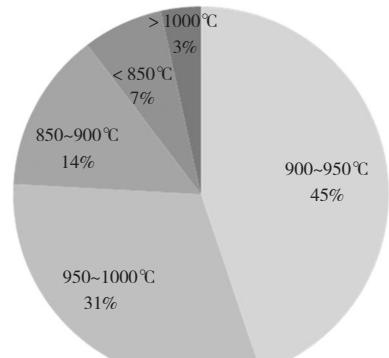
2#测点。

2.2 烟化炉NO_x浓度阶段统计

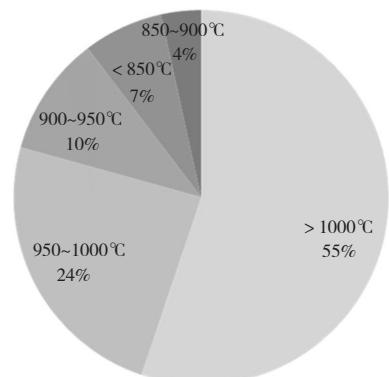
收集并汇总多组烟化炉工作过程（包括进渣、吹炼、放渣3个阶段）的数据，分别统计NO_x浓度较高值的进渣阶段、吹炼阶段及放渣阶段的温度（2#温度测点）。

进渣阶段通常起始温度较低，烟气温度和NO_x浓度从较小值迅速上升。统计NO_x浓度峰值期间的温度分布占比如图4（a）所示，NO_x浓度下降至低于100mg/Nm³时的温度分布占比如图4（b）所示。图4的统计结果显示，进渣阶段NO_x浓度高值出现的温度集中在900～1000℃吹炼阶段。由于工艺的需求，吹炼阶段的温度较高，一般都集中在950～1100℃。

放渣阶段，烟气温度成下降趋势，NO_x浓度成缓慢上升趋势，待停煤后，NO_x浓度迅速下降。统计NO_x浓度上升至100mg/Nm³的温度分布占比如图5（a）所示，NO_x浓度峰值期间的温度分布占比如图5（b）所示。图5的统计结果显示，NO_x浓度高值出现的温度分布集中在700～900℃。



(a) 进渣NO_x浓度峰值温度分布



(b) 进渣NO_x浓度下降时温度分布

图4 进渣的温度分布

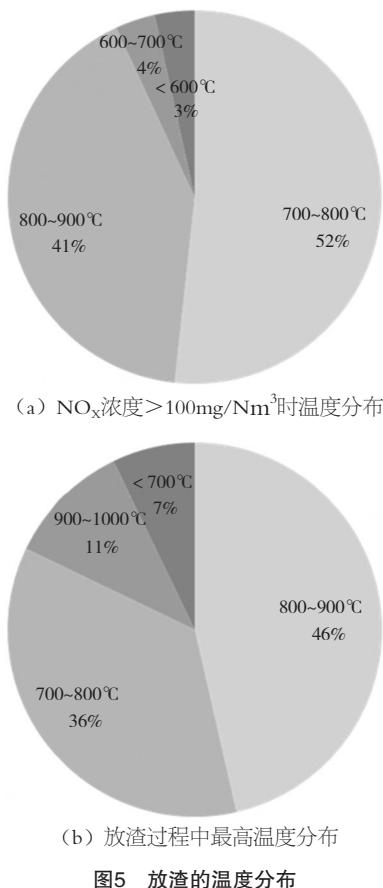


图5 放渣的温度分布

3 最佳脱硝反应区与脱硝效率

分析烟道温度场与烟化炉 NO_x 浓度高值的温度分布，确定最佳的脱硝反应区，见表1。

表1 脱硝反应区

名称	NO_x 浓度高值温度分布（ $^\circ\text{C}$ ）	温度场测点
进渣阶段	900 ~ 1000	3#
吹炼阶段	950 ~ 1100	4#
放渣阶段	700 ~ 900	1# 或 3#

结合现场实际情况，在1#、3#和4#温度测点附近确定供氨喷枪位置，并以2#温度测点为参考，通过现场实测确定1#、3#和4#等3个喷枪在不同温度下的脱硝效率。

1#供氨喷枪在烟化炉不同工作阶段及温度的脱硝测试见表2。测试结果显示，1#供氨喷枪在650 ~ 750°C时，具有较高的脱硝效率；若温度超过820°C时，将发生逆反应。1#供氨喷枪的实际温度比参考温度（图2所示2#测点）高约200°C，即1#供氨喷枪的实际脱硝反应温度约为850 ~ 950°C，基本符合脱硝效率和反应温度的关系曲线。

3#供氨喷枪在烟化炉不同工作阶段及温度的脱硝测试见表3。测试结果显示，3#供氨喷枪在800 ~ 880°C时，具有较高的脱硝效率；若温度超过920°C时，将发生逆反

应。3#供氨喷枪的实际温度比参考温度（图2所示2#测点）高约100°C，即3#供氨喷枪的实际脱硝反应温度约为900 ~ 980°C，基本符合脱硝效率和反应温度的关系曲线。

表2 1#供氨喷枪的实际脱硝反应温度

1#测点区温度区间（ $^\circ\text{C}$ ）	喷氨前 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	喷氨后 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	脱硝效率（%）
[820, 880]	52	90	逆反应
[780, 790]	130	100	23.08
[690, 740]	250	90	64.00
[640, 750]	200	80	60.00

表3 3#供氨喷枪的实际脱硝反应温度

3#测点区温度区间（ $^\circ\text{C}$ ）	喷氨前 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	喷氨后 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	脱硝效率（%）
[920, 930]	38	103	逆反应
[830, 880]	141	60	57.45
[800, 870]	148	77	47.97
[730, 745]	113	90	20.35

4#供氨喷枪在烟化炉不同工作阶段及温度的脱硝测试见表4。表中的测试结果显示，4#供氨喷枪在960 ~ 1030°C时，具有较高的脱硝效率；若温度超过1050°C时，将发生逆反应。4#供氨喷枪的实际温度比参考温度（图2所示2#测点）低约50°C，即4#供氨喷枪的实际脱硝反应温度约为910 ~ 980°C，基本符合脱硝效率和反应温度的关系曲线。

表4 4#供氨喷枪的实际脱硝反应温度

4#测点区温度区间（ $^\circ\text{C}$ ）	喷氨前 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	喷氨后 NO_x 浓度（ mg/Nm^3 ）	脱硝效率（%）
[1050, 1080]	82	143	逆反应
[990, 1030]	110	60	45.45
[960, 1000]	142	70	50.70
[880, 910]	100	70	30.00

由于烟化炉的工艺特点，进渣、放渣阶段炉内烟气温度波动较大，脱硝喷枪应在烟化炉进渣口以上约1m处到表面冷却器之间分多层布置，每层脱硝喷枪进液管道设气动阀，根据锅炉运行状态及烟气温度快速切换。

4 结语

根据烟道温度场与 NO_x 浓度高值的统计结果获取的供氨喷枪温度区域为1#供氨喷枪 [650°C, 750°C]，3#供氨喷枪 [800°C, 880°C]，4#供氨喷枪 [960°C, 1030°C]。脱硝反应区温度区间基本覆盖了 NO_x 浓度高值区间，再结合运行操作，可以获得有效的脱硝效率。

进渣阶段， NO_x 浓度高值出现的温度集中在900 ~ 1000°C，运行期间可以将温度保持在960 ~ 1000°C，

（下转第172页）

双高棒模块精轧机及其安装调整方案

张毅勃，张建李，张思聪，杨丛龙，高丽娜

(唐山钢铁集团有限责任公司，河北唐山 063000)

[摘要]高速棒材生产线因具有产品精度高、生产轧制速度快，冷却控制管理能力强等诸多优点被钢铁企业广泛采用。但传统的单高棒生产线年产量最多仅能达到80万t，已经不能满足企业以及社会的需求，而传统多切分产线又存在着难以准确控制轧件温度，产品质量得不到保证的问题。双高棒生产工艺可以解决单高棒产量低，又避免了传统棒材多切分产线温度控制能力差、产品质量不稳定等诸多问题，正越来越多地应用到国内新建棒材生产线上。作为棒材产线的核心设备，精轧机的选择及安装维护对生产的顺利进行及产品的精度质量起着愈发关键的作用。

[关键词] 双高棒产线；模块化精轧机；安装调整

[中图分类号] TG335.62 **[文献标志码]** A

1 双高棒产线

以某企业的双高棒生产线为例，其可生产Φ10~22mm带肋钢筋，年产量可达120万t，较传统单高棒提升50%。该生产线的前18架轧机布置与普通多切分棒材生产线基本一致，而在18架轧机后分为A、B支线进行轧制，精轧机前设有预水冷装置，用于控制轧件进精轧机温度；精轧机组设有合理的水冷装置，不同类型的钢筋采用不同的冷却工艺，获得理想的组织和性能。双高棒产线工艺流程，如图1所示。

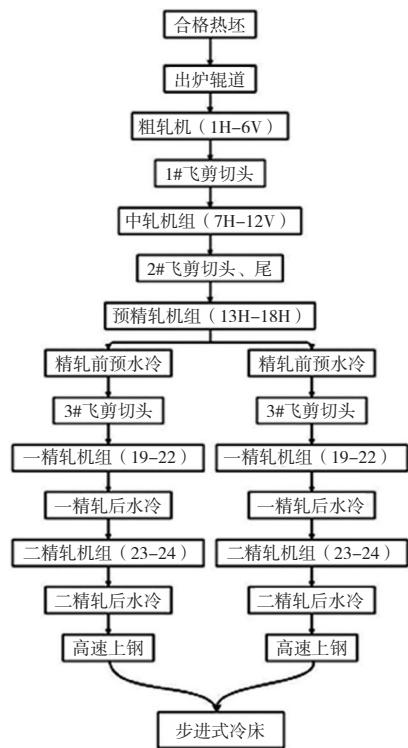


图1 双高棒产线工艺流程

2 模块化精轧机组

在双高棒产线生产中，精轧机是双高棒产线控制产品尺寸精度与质量的关键装备，其通过特定的轧制力、轧速、孔型等将中间坯轧制成型。传统的棒、线产线一般采用集中传动的精轧机，通过一台大功率电机驱动8~10架精轧机，实现顶交45°无扭转轧制，解决动态速降问题，实现生产顺行^[1]。但这种布置存在以下问题。

(1) 整个精轧机组采用集中传动，无法实现真正意义上的甩机架空过，即空过的轧机仍会高速转动，造成不必要的设备损耗及能源浪费。

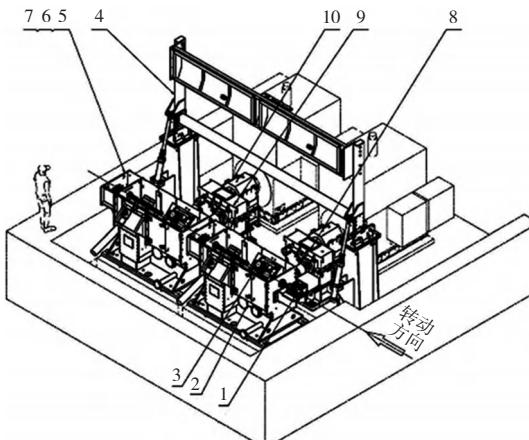
(2) 单电机、长传动链结构使得某架轧机传动箱的单独维护、更换费时费力。

(3) 传动链过长，机械设备结构复杂，整条精轧机组在传动上互相依赖，某一设备、部件出现问题很可能导致整个机组无法进行轧制生产。

由于上述问题，传统的集中传动轧机模式正逐渐被模块化轧机所取代。模块化精轧机的原理是把集中传动的传动箱和辊箱分离，以1台电机带动传动箱内2架辊箱轧制转动，实现单独传动。目前出现的模块化轧机传动如图2所示，分为一拖二（1套传动装置驱动2架轧机）、一拖一2种。由于高棒与高线的产品规格不同，对轧制力要求有所不同，再加上控轧工艺需要轧制低温料型，基本开发出230和250两种机型^[2]。

与集中传动的精轧机组相比，模块化精轧机组具有以下优势。

(1) 每组模块轧机单独传动，1台电机、减速机驱动1台传动箱内的2个辊箱，在工艺生产不需要时可实现甩机



1.卡断剪；2.传动箱装配；3.辊箱装配；4.轧机保护罩；
5.挡水板装配；6.干燥喷嘴装配；7.轧机导管与导槽装配；
8.齿轮箱；9.齿轮箱；10.主传动装配及组件

图2 高棒一拖二模块精轧机布置

架，节约成本，减少不必要的设备损耗。

(2) 单独传动的设计使得模块轧机的传动链更短，便于设备的维护、更换。

(3) 机械设备结构相对简单，每组模块轧机（含传动机构）之间互相独立，在某个轧机出现故障时不会影响其他轧机组，及时调整生产安排、空过问题架次可避免设备故障导致的生产中断。

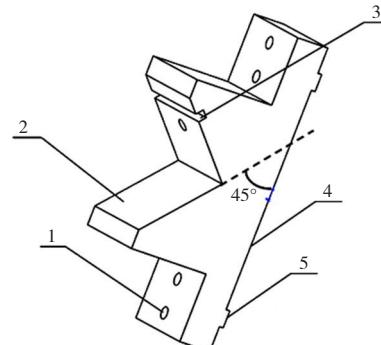
(4) 在传动箱上实现不同道次所需的速比，辊箱完全一致，从而使其模块化，实现备件统一^[3]。

3 高速棒材模块精轧机的安装调整方案

棒线材模块化精轧机的传动箱为一级圆柱齿轮，分别驱动轴交角为45°的两对螺伞，螺伞通过同步齿轮驱动轧辊实现相邻两组轧辊的45°交差布置，单个传动箱驱动两个辊箱。这种顶交45°型模块化轧机具有轧速高、结构紧凑、易于维护更换等优势。但由于其辊箱的面板为45°斜面，与轧机底座成45°角，在设备安装过程中存在找正困难的问题，通常需要反复挂线、测量标高才能完成轧机水平度与轧制线相对位置关系的调整，不仅安装难度大，作业时间长，无形中也增加了投资、维护成本。因此，设计一种简单、高效的安装调整方案，以提高顶交45°型模块轧机的安装效率及精度。

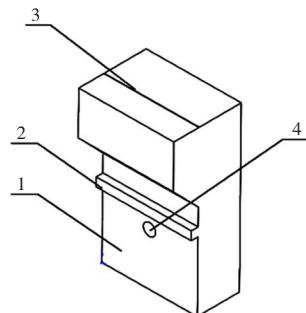
(1) 调整工装。为了解决45°斜面难以利用传统的工器具进行找平的问题，首先设计并制作不锈钢材料的调平工装及找正工装，如图3和图4所示。调平工装带一个90°角缺口，缺口两个面一个为调平面，另一个为与找正工装配合的安装面。这两个工装的精度等级高于轧机设备精度一个等级，且二者之间配磨加工，以实现两个工装之

间及调平工装与辊箱面板的安装面紧密贴合。由于缺口的调整平面与安装面成45°，能将斜面转化为平面。



1.螺栓孔（5个）；2.调平面；3.定位槽；4.安装面；5.定位键

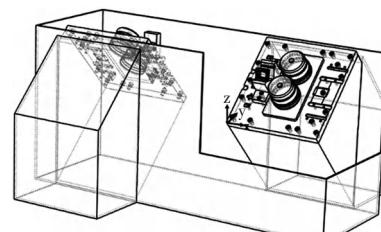
图3 调平工装



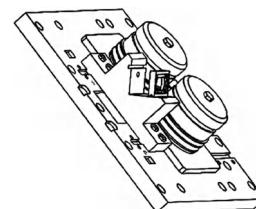
1.安装面；2.定位键；3.中心线；4.螺栓孔

图4 找正工装

(2) 轧机调平。如图5所示，将调平工装通过键槽、螺栓安装到辊箱面板。将100mm框式水平仪放置在调平面上，测量X、Y两个方向的水平度，通过调节传动箱底座斜垫铁、加减垫片调整模块轧机，满足≤0.1mm/m水平度要求。此时面板与水平面成45°，模块化轧机整体水平。



(a) 模块轧机调平示意



(b) 调平局部示意（仅保留面板）

图5 模块轧机的调平

(3) 轧机标高调整。完成模块轧机的水平调整后, 将标尺垂直放置在调平面上, 如图6所示, 用水准仪测量标高, 通过加减速传动箱底座的垫片调整模块轧机标高, 满足Z方向高度设计要求。同时在调整标高后需复测水平度。

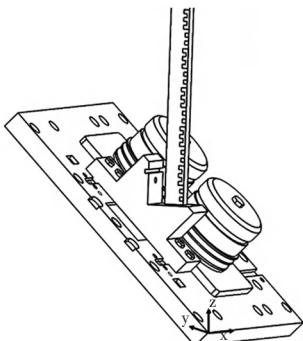
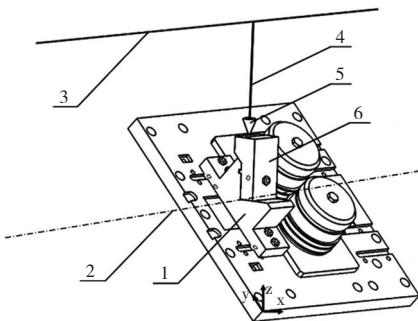


图6 模块轧机的标高调整局部

(4) 轧机X、Y方向位置调整。将找正工装安装在调平工装上, 二者通过键槽定位, 螺栓紧固。于面板上方悬挂过轧制线中心标板的钢丝线, 以及找正用的垂线和线坠, 调整模块轧机Y轴方向位置, 使中心标板钢丝线上任意两点满足线坠尖部落于找正工装的上棱边, 完成Y轴方向的找正及X方向上的共线, 如图7所示。对每组模块轧机进行上述调整操作, 即可保证轧制线的共线。



1.调平工装; 2.轧制线; 3.钢丝线; 4.垂线; 5.线坠; 6.找正工装

图7 X、Y方向位置调整

(上接第169页)

此区域开4#供氨喷枪将具有不错的脱硝效率。吹炼阶段, 正常温度区间为950~1100℃, 若NO_x浓度保持高位, 运行期间可以适当将温度控制在950~1030℃, 此时并不会影响吹炼的效果, 此区域开4#供氨喷枪将能明显地降低出口NO_x浓度。放渣阶段, NO_x浓度高值出现的温度分布集中在700~900℃, 运行期间需要根据实际温度切换1#供氨喷枪和3#供氨喷枪。结合烟化炉操作与脱硝各供氨喷枪, 获得高效的脱硝效率, 实现出口NO_x浓度达标。

参考文献

- [1] 苏大雄, 钱枫. 石灰湿法脱硫过程中PH条件对结构的

(5) 辊箱X方向定位可挂垂直轧制线的中心标板基准线, 测量、调整基准线距输出轴的中心距离, 完成X方向定位。

4 结论

(1) 相较于传统的集中传动精轧机组, 模块化精轧机应用于双高棒产线具有结构简单、传动链短、易于维护等诸多优点。同时各机组相互独立, 可根据设备状况及生产安排灵活配置投入使用的机架, 既能在正常生产中空过不需要参与轧制的架次, 也可实现某一轧机故障时调整钢种的生产安排来甩掉该轧机, 避免生产中断。

(2) 为了解决模块轧机辊箱面板为45°斜面导致的安装过程中定位调整困难的问题, 提出了一种简单、高效的棒线材顶交45°型模块轧机的安装调整方案, 可提高设备的安装效率及精度, 节约设备更换时间, 降低设备维护成本。

参考文献

- [1] 包连勤, 延飞. 高速线材达涅利双模块精轧机简述[J]. 新疆钢铁, 2003 (2) : 23~26.
- [2] 王超, 吕启春. 双高棒生产工艺的技术研究与应用探讨[J]. 现代冶金, 2021, 49 (2) : 37~40.
- [3] 王银兵. 达涅利精轧机辊箱装配精度及维护[J]. 冶金管理, 2021 (13) : 52~53.

作者简介

张毅勃 (1968—), 男, 辽宁本溪人, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为冶金设备。

影响[J]. 环境污染与防治, 2005 (6) : 199~200.

- [2] 周至祥, 段建中, 薛建明. 火电厂湿法烟气脱硫技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 韩峻峰, 李玉惠. 模糊控制技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [4] 李栋, 郝桂明. 基于模糊控制的火电厂湿法烟气脱硫系统[J]. 测控技术, 2013 (32) : 72~75.

作者简介

张林星 (1981—), 男, 福建龙岩人, 本科, 工程师, 主要从事烟气污染物 (尘、硫、硝、VOCs等) 治理设备的控制系统设计调试工作。

塑料连接管件工艺分析及模具设计

殷 悅, 丁 展, 付焕森, 张熠飞, 蒋福平

(泰州学院机电工程学院, 江苏泰州 225300)

[摘要]通过对塑料连接管件进行工艺性分析, 确定了型腔数目、注射机型号、分型面的选择, 主流道和分流道的设计。针对其大小两段轴线成 175° 的结构, 设计了“滑块+斜导柱”侧向分型机构, 同时设计了“推管+斜面”的脱模机构, 成功将塑件按照指定角度进行脱模, 保证了塑件的制定质量和模具的设计要求。

[关键词]塑料连接管件; 滑块; 斜导柱; 推管

[中图分类号]TH122 **[文献标志码]**A

塑料因其材料轻、化学性稳定、比强度高等特点被用于成型结构复杂, 功能多样化的构件^[1]。塑料制品在常见的场所以及日常用品中应用越来越多, 质量要求也越来越高。塑料连接管件广泛应用于汽车通风管、冰箱门衬垫及干燥机通风管等。本文以某种塑料连接管件为例, 研究其产品结构, 分析成型难点以及生产要求, 对其进行注塑模的结构分析与设计, 对有相似结构特点还有生产要求的塑料连接管件的注塑模设计有一定的指导意义。

1 塑件工艺性分析

1.1 产品结构分析

如图1所示, 该塑件为塑料连接管件, 连接管件由两部分组成, 分为大小两段, 且两端轴线成 175° 的夹角。两端圆柱面均有一定的带有锥度的锥形, 不允许有顶出痕迹和飞边, 端面带有利于连接的倒角圆, 材料为透明PP, 零件生产纲领为大批大量生产。

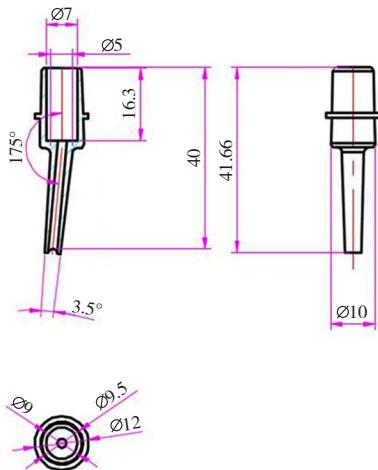


图1 塑料连接管件结构

1.2 塑件注射机型号的确定

该零件的尺寸精度比较低, 一般为5级, 可保证相应

模具相关零件的尺寸加工。通过计算塑料连接管件的体积和质量可以选用注射机型号以及确定型腔数目。经计算该塑件的体积为 1.621cm^3 , 根据设计手册, 查得密度为 $0.90 \sim 0.91\text{g/cm}^3$, 得塑件质量约为 1.475g 。型腔的数量和分布决定了注塑模的成本、制造加工的能力与难度^[2]。考虑到要求大批大量生产, 产品结构较小, 也较为简单, 采用一模两腔的模具结构。零件的体积粗算结果应当加上浇道的废料体积, 初步将注射量定为 6.5cm^3 。注射机型号选用XS-ZS-22, 其主要技术参数见表1^[3]。

表1 XS-ZS-22型注射机技术参数

参数	数值
理论注射量 (cm^3)	30, 20
注射压力 (MPa)	75, 117
最大开模行程 (mm)	160
锁模力 (kN)	250
最大模厚 (mm)	180
最小模厚 (mm)	60

2 注塑模的结构设计

经过总体对比分析, 模具的总体结构设计图如图2所示。

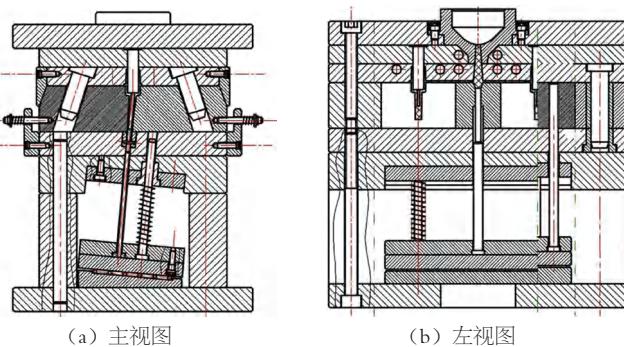


图2 塑料连接管件注塑模结构

2.1 分型面的选择

分型面的选择对型腔数目的确定、整体模具结构的设计难易程度和模具成本都有重要的影响。设计的分型面如图3所示。

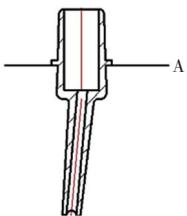


图3 分型面设计图

2.2 浇注系统的设计

2.2.1 主流道设计

根据XS-ZS-22型注射机喷嘴的有关尺寸，确定喷嘴前端孔直径 $d_0=2\text{mm}$ ，喷嘴前端球面半径 $R_0=12\text{mm}$ ，主流道球面半径 $R=13\text{mm}$ ，小道直径 $d=2.5\text{mm}$ ，主流道大端直径 $D=4\text{mm}$ 。

为了能够顺利将主流道中的凝料脱出，主流道设计为斜度为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的圆锥形，这样废料可以顺利从主流道中拔出，而在主流道端设计圆弧过渡，是为了让熔料顺利进入分流道。

2.2.2 分流道设计

分流道的设计要求熔料能尽快填充型腔，且在过程中尽可能降低温度降以及流动阻力。熔料也应均匀地填充至各型腔。半圆形分流道的优点是便于加工，因此选择半圆形横截面，且半径为 2mm ，如图4所示。

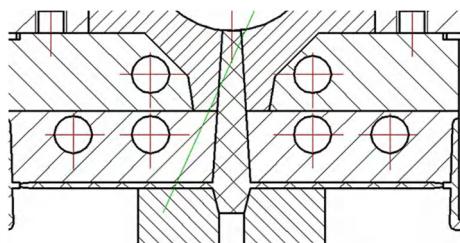


图4 分流道设计图

2.3 侧抽芯机构的设计

该塑件成型的最大难点就在于塑件大小段之间倾斜的夹角。为了配合成型，需要型芯和侧抽芯机构共同组成型腔。侧抽芯机构取“滑块+斜导柱”侧向分型机构，如图2所示。

2.3.1 滑块设计

由于一模两腔的设计以及塑件在成型过程中都要沿着两个方向侧向分型，所以以模具的轴线为分界，每个塑件设计两块拼接的滑块，如图5所示。

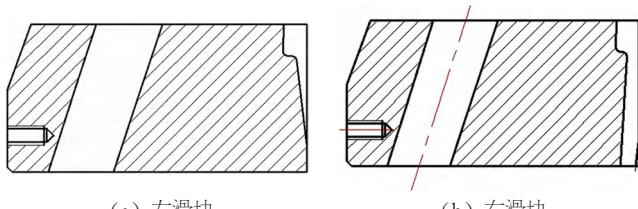


图5 滑块设计图

2.3.2 斜导柱的设计

滑块的宽度为 62.5mm ，根据经验取值，选取斜导柱的直径为 18mm 。如图2所示，斜导柱倾角一般选择常用的 18° ，斜导柱开始拨动滑块时接触滑块的长度大于滑块斜孔长度 $3/4$ 。一般规定：抽芯距离 $S_i = \text{塑件侧向凹凸深度 } S + (2 \sim 5) \text{ mm}$ 。式中， $2 \sim 5\text{mm}$ 为安全距离。本次设计中 $S=2.72\text{mm}$ 。但是由于本次设计中有一个斜推出机构，滑块需最少滑至导向柱所在的孔的外侧，所以 S_i 取 17mm 。

2.4 脱模机构的设计

由于要推出的塑件是细长管状，所以推出零件选择推管。因为推管的空心部位用定位销固定了一部分型芯，为了能顺利推出塑件，需要在推管上开设一段槽，如图6所示。

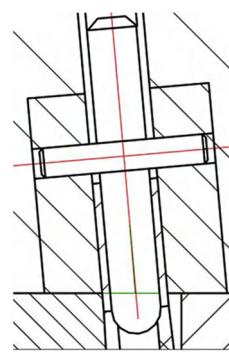


图6 推管设计图

由于需要的推出行程具有一定的角度，本设计中利用斜面的作用将垂直向上的运动转化为带有角度的运动。在斜面中挖掉一小块板，用来置放滚针，使推板和固定板在向上运动时能够同时向右运动，以让推管能够顺着角度将塑件推出。同时在推管旁边设计一导向柱，是为了能够在运动的过程中准确地控制角度。

2.5 注塑模材料及选用

根据各个零件在整体中所起的作用，材料的选择也各有区别。

- (1) 定模镶件材料。该材料要优于动模镶件材料，硬度也要比其材料高 5HRC 左右。
- (2) 型芯材料。该材料与镶件一致，其硬度应比镶件

排气机真空度的技术研究

张修波

(佛山电器照明股份有限公司, 广东佛山 528000)

[摘要] 真空度是排气机的重要性能指标, 真空度的高低直接影响成品灯的寿命。对生产ECO50卤素灯的排气机(圆排)真空度的应用进行研究, 由于ECO50卤素灯要求的光效高、寿命长, 对排气机的真空度要求十分高。文章探讨为开发ECO50卤素灯产品, 对提高排气机真空度进行的技术研究。

[关键词] 排气机; 真空度; 加热除气

[中图分类号] TM923.05 **[文献标志码]** A

1 改进排气机工位的结构, 提高真空度

由于电光源产品对真空度的要求不同, 对于高光效或长寿命电光源产品要求的排气机真空度比较高, 所以排气工位的设计结构也不相同。排气机的工位要达到高真空度要求(改进后的真空度可以保持在 $0 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ Pa), 必须选择性能良好的不锈钢材料, 而且需要对材料进行加热锻打、表面氮化处理或碳化处理, 增加表面硬度, 确保配合工作面的耐磨性、气密性, 防止串气或漏气。对排气工位的结构设计也必须做到合理、适用。

排气工位的加工精度和表面光洁度十分重要, 要确保排气工位同接头和连接管的密封性良好, 不能出现漏气等情况。由于工位—中心盘—真空泵之间是用多条连接管和相应的大量接头连接, 因此出现漏气的概率也很高, 有任何一处出现漏气都会造成排气机真空系统的真空度达不到成品灯要求的真空度, 严重影响成品灯的质量, 造成成品灯的寿命大幅下降。

排气工位锁头要选择密封性能和耐热性能优良的硅胶生产的硅胶粒, 同时硅胶粒的硬度要适中、延展性要好,

低4HRC左右, 选用45钢。

- (3) 定位销材料。该材料为SKD61(52HRC)。
- (4) 滑块使用材料为T8。
- (5) 斜导柱使用材料为20Cr。
- (6) 楔紧块使用材料为718。
- (7) 推管材料为T8A。
- (8) 定模、动模、推板、垫块均选用45钢。
- (9) 复位杆材料为T10A。

3 结论

根据塑料连接管件的模具设计过程, 得到以下结论。

(1) 该塑料连接管件的难点在于其与轴线成175°的一段, 在开模时会阻碍产品的推出, 需要设计相应的侧向分型机构和斜推出机构。

(2) 采用一模两腔的设计, 同时设计“滑块+斜导柱”侧向分型机构, 通过两块拼接的滑块拼出型腔, 开模时通过斜导柱的运动促进滑块的滑动从而抽芯, 同时滑块受力的中心尽量靠近导滑槽, 使滑动平稳可靠。

(3) 根据塑料连接管件的特殊形状, 采用推管作为推出零件, 通过斜面的作用推动推管将垂直向上的运动转化为带有角度的运动, 从而推出产品。

(4) 设计的塑料连接管件注塑模结构简单合理, 较为紧凑, 可为同类型塑料连接管件的模具设计提供参考。

参考文献

- [1] 石波, 李强. 汽车尾灯灯壳注射模设计[J]. 模具工业, 2022, 48(7): 51-54.
- [2] 韦煜成. 塑料顶盖注射工艺分析及模具设计[J]. 科技创新与应用, 2017(18): 21-22.
- [3] 齐卫东. 简明塑料模具设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.

作者简介

殷悦(1993—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 助教, 主要研究方向为机械结构设计。

胶粒中间孔的大小要与排气管的大小相匹配。选购材料优良、结构合理的密封圈及其真空脂（如蓖麻油等，既是密封材料，又是润滑剂）进行密封和润滑，使排气机的真空系统达到成品灯对真空度的要求。

基于上述具体要求和生产出口北美市场的高光效 ECO50 电光源产品订单技术需要，对原生产低光效 ECO30 电光源产品的排气机的排气工位进行了技术研究和改进。最初的 ECO50 排气机的排气工位立体图如图 1 所示。排气机工位与抽气管、充气管是用真空胶管连接，止气方式为紧压胶管进行阻断。由于真空胶管的密度等原因，造成气密性不一致，并且时间长容易产生老化，很难确保真空度的一致性，严重影响成品灯的内在质量。经过多次测试，原排气机真空度达不到 ECO50 卤素灯的要求，生产出来的成品灯在寿试 500h 左右就开始出死灯情况（注：ECO50 卤素的寿命要求在 1500h 以上）。

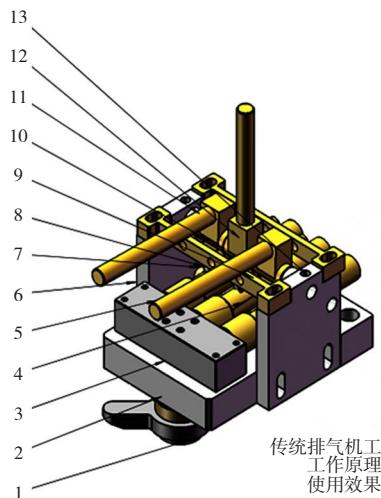
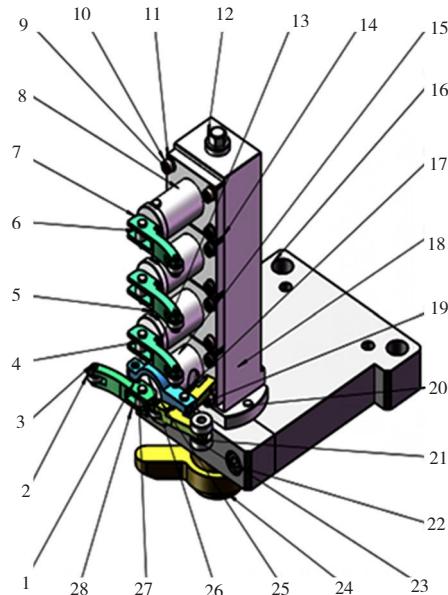


图1 原排气工位

1.锁母拨臂；2.排气机头子锁母；3.排气工位连接三通；4.胶管压板；5.真空胶管；6.压块侧板；7.胶管下压挡条；8.轴承626ZZ；9.夹紧限位板；10.充气阀杆；11.压块阻挡套；12.抽气阀杆；13.工位板



1.2.5×11.5滚轮轴销；2.3×10×4滚轮；3.3×11.5滚轮轴销；4.充气阀压臂；5.3×26.5定位销；6.抽气压簧轴；7.充气压簧垫片；8.充气压帕安装套；9.不锈钢内六角螺丝M4×12；10.不锈钢弹簧垫片M4；11.不锈钢平垫片M4；12.工位堵头；13.2.5×7×6滚轮；14.排气机压帕式工位；15. 抽气压簧垫片；16.工位板；17.4×16.5定位销；18.卧式工位；19.抽气阀曲臂；20.不锈钢内六角螺丝M6×25；21.工位头子锁母；22.不锈钢内六角螺栓M8×25；23.5×14×5滚轮；
24.锁母拨臂；25.曲臂固定件；26.抽气压簧垫片；
27.3.2×14.5定位销；28.抽气阀压臂

图2 改进后排气工位

同时为了进一步提高 ECO50 排气机真空度，加多了 2 个工位的烤灯火和 4 个工位的点灯测试，其效果有两方面，第一是检测对应排气工位的 ECO50 卤素灯是否完好；第二是对灯进行加热，使灯中的气体受热膨胀，同时加热后的空气中的氧气和水蒸气立即被抽走，这样进一步提高了排气真空度。

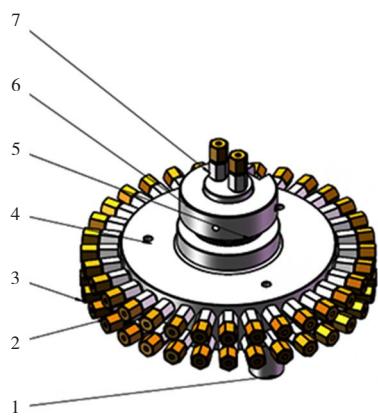
2 改进排气机的分气盘结构

ECO50 排气机的分气盘是一套由分气中心轴等组成的圆形盘，安装在排气机大盘的上面，分气盘对排气机真空度有着十分重要的影响。如分气盘的材料、结构、加工工艺、表面光洁度和表面的硬度对提高排气机真空度均有直接的影响。材料和热处理工艺影响分气盘的硬度和耐磨性，材质越好，材料锻打和热处理工艺越到位，分气盘的硬度和耐磨性就越好，排气真空度提高的效果就越好。

分气盘接头采用接嘴紧压铜套进行密封，使用前必须严格的用火除气，而且接嘴紧压铜套的上下两个面的光洁度要高，让分气盘的接头与连接管的连接不出现漏气，确

保每根连接管的气密性好并定期做好检测工作。

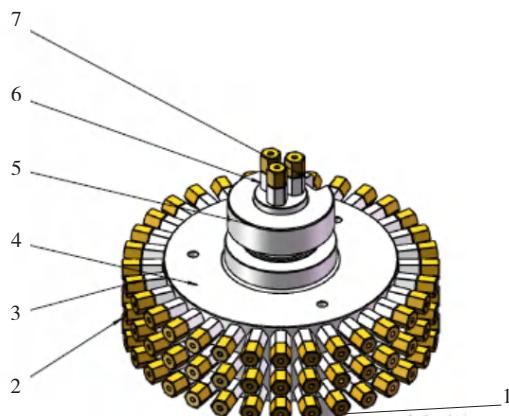
原分气盘只分上下两层结构，如图3所示，上层为卤气，下层为氢气。传统的工艺是从中心盘把氮气冲进灯腔进行冲洗，容易将油蒸汽带进灯腔造成污染，严重影响ECO50卤素灯的内在质量。



1. 分气盘垫脚; 2. 分气盘接嘴; 3. 接嘴锁母; 4. 43×51密封胶圈;
5. 轴承6910ZZ; 6. 分气盘主轴固定块; 7. 旧式分气盘主轴

图3 原分气盘及其接管分布图

经过对原分气盘的认真分析和研究，对ECO50卤素灯排气机的原分气盘进行改进，如图4所示。分气盘由原来两层结构改进成三层结构，工位的改进后，上层为卤气，中层为氮气，下层为氢气。这样氮气直接从分气盘充进灯腔，保证了气体的纯度，极大提高了ECO50卤素灯的内在质量和使用寿命。



1. 分气盘脚垫; 2. 接嘴锁母; 3. 分气盘接嘴;
4. 分气盘; 5. 分气盘主轴固定块; 6. 分气盘主轴; 7. 主轴固定套

图4 现改进三层分气盘及其接管分布图

3 使用高真空度的分子泵

真空泵的运用对真空度的提高及其重要，真空泵的发展也很快，如目前常用的德国莱宝泵、成都蓝光泵、浙江飞越泵，一般的机械泵的极限真空度只能抽到 5×10^{-2} Pa左右，但是分子泵的极限真空度可达到 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ Pa。

不同型号的真空泵抽气速率具有一定差异，抽速快的，可以缩短抽气时间，提高生产效率。先用抽速快的真空泵及时抽走零件放出来的气体，才能维持系统中所需的真空度。所以，现实生产使用时分为三个阶段，分别为粗抽、半精抽和精抽。改进后，对ECO50卤素灯排气机精抽位增加了2台高真空分子泵，确保了排气系统的真空度，保证了成品灯质量达到技术标准要求。

4 强化排气机真空管道日常检测

排气机的真空管道要定期进行检查和清洗，同时定期检测真空管道的气密性，确认气密性的一致与稳定，确保真空管道的密封性能达到要求。

如发现在真空度不稳定时，要立即对真空系统（由各种真空元件组成，如真空泵、零件、连接胶管、真空计、真空调等）进行查漏，及时排除故障。常采用真空检测仪，或采用打高频来判断是否有泄漏。

5 结论

电光源用排气机的发展，从单工位发展为多工位，但是对真空度的需求和工艺都是相近的。通过对排气机工位和分气盘的改进，并按工艺要求严格做好真空系统各个环节的清洗、防漏与检测，密封与润滑等工作。排气机真空系统的高真空度最终得到了实现，ECO50卤素灯排气机的真空度终于实现保持在 $0 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ Pa的效果，为提高ECO50卤素灯的品质和生产效率提供了有力保障。

参考文献

- [1] 张爱堂, 冯新三. 真空技术基础[M]. 北京: 轻工业出版社, 1992.
- [2] 郑爱云. 机械制图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [3] 濮良贵, 陈国定. 机械设计: 9版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [4] 黄云清. 公差配合与测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [5] 张爱堂, 冯新三. 电光源材料与工艺[M]. 北京: 轻工业出版社, 1986.
- [6] 孙恒, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [7] 莫纯昌. 电真空工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [8] 张以忱. 真空系统设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- [9] 张玉魁. 真空工程设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

作者简介

张修波(1974—)，男，河南商丘人，本科，工程师，主要研究方向为机械设备。

真空可移动式目标模拟系统结构设计

张 露

(中科院南京天文仪器有限公司, 江苏南京 210042)

[摘要] 可移动式目标模拟系统是用于卫星载荷相机光电性能指标的关键设备, 对各种航天航空实验测试都具有非常重要的作用。文章针对真空可移动式目标模拟系统结构设计, 提出了系统设计的基本原则, 对系统可调节支撑平台进行设计, 并对系统进行了有限元分析。分析结果显示设计的系统结构可以满足使用要求, 并计算得到系统的共振频率。

[关键词] 目标模拟; 结构设计; 有限元; 真空; 光学载荷

[中图分类号] U4412 **[文献标志码]** A

可移动式目标模拟系统是用于卫星载荷相机光电性能指标的关键设备, 用于模拟无穷远及有限远目标的完善像, 配合系统杂光抑制能力稳定性验证和热稳定性验证, 需具备上下、左右可调节功能, 完成成像性能稳定性快速检测与验证。在各项整星环境试验前后以及真空热试验过程中, 对相机的主要性能指标稳定性进行测试, 实现对系统性能全过程状态的无缝监控。

目前用于真空环境的目标模拟系统常为固定形式, 不能在真空罐内调节位置, 当需要与待测相机对接时, 只能靠移动相机位置实现。而可调节的目标模拟系统常设计为常压下使用, 如采用龙门升降机, 该形式对真空罐尺寸要求较高; 采用剪式升降机时, 精度较低且在高度方向尺寸较大; 采用大螺旋升降机时受限于润滑剂的限制, 无法在真空环境使用。为解决此问题, 本文采用将目标模拟系统安装在滚柱丝杆螺旋升降机上, 满足真空环境下不同位置的光学载荷测试需求。

1 真空可移动式目标模拟系统工作原理

在对相机的测试中, 目前国内外普遍采用的方法是用平行光管将测试靶标成像到无限远处来模拟相机的实际工作状态, 再通过相机的镜头将其成像到焦平面上, 得到靶标的图像。

测试相机调制传递函数的装置如图1所示。将高对比矩形靶标安置于平行光管的焦面处, 以模拟无穷远的景物目标。平行光管的光轴经过调整后, 与相机镜头(调制传递函数已知)的光轴共轴。高对比靶标的刻线被积分球的出射光均匀照亮, 经平行光管及相机镜头成像后被像元接收, 并转换为相应的电信号输出, 可以对相机成像质量进行对比测试。

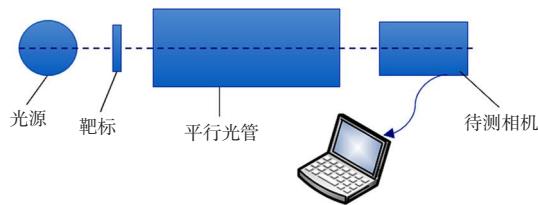


图1 模拟系统工作原理示意

真空可移动目标模拟系统是将光源、靶标、平行光管三部分放于一可调节的平台上, 并整体置于真空腔内, 对真空环境内不同位置的光学载荷进行测试的集成化系统。

2 系统设计

2.1 系统设计原则

为了满足使用需求, 在进行真空可移动式模拟目标系统的结构设计之前, 需要遵循一定的设计原则, 具体应该包括以下几点。

(1) 创新性。在进行设计之前, 除了充分确定真空可移动式模拟目标系统对于机械设计的要求, 同时还必须要查阅国内外相关文献, 确定当前模拟目标系统的研究现状。为了满足系统使用的多样性, 并且在短周期内确定系统设计方案, 同时使得系统设计具有很强的生命力, 就要求在整个系统设计中具有创新性, 在满足要求之余充分将理论和实践经验相结合。机械设计的创新性不仅体现在结构的创新性, 更体现在一些常规结构使用一些特殊材料上。这样不仅能够使得系统具有更强的稳定性, 也使得系统的成本更低, 制造周期更短。

(2) 安全性。真空可移动式模拟目标系统的结构需要在真空罐内使用, 在正常使用时对于结构的稳定性及安全性要求更高。同时在结构设计中需要对整体结构的强度进行评估, 对所有使用材料的性能、设计零件的强度、各种

机构的摩擦性能、机械移动平台的动态性能等进行设计及评估，以保证设计的系统能够保证安全性。

(3) 经济性。在进行系统设计前就需要和使用方确定各种技术指标，包括运动范围、系统机械强度、真空罐的各种参数等。在保证安全性的前提下，需要对整个系统设计中机械结构的经济性进行考量。这样才能让设计出的真空可移动式模拟目标系统的结构具有市场竞争力，让系统的制造成本更低。

(4) 工艺性。本文设计的真空可移动式模拟目标系统属于高新技术产品，因而在图纸设计完成之后，在生产阶段，所有相关的零部件需要进行试组装。组装时对于各零部件的配合要求非常高，特别是现代装备工艺技术在真空可移动式模拟目标系统中的应用尤为重要。如果使用传统的加工方法会使得加工效率较低，而其他很多新型的加工手段，特别是一些高精度组合加工的手段、光刻蚀等使得很多机械零件的加工和装配更加容易，因而在本文设计的系统中需要充分考虑工艺性。同时装配越简单，越有利于后期系统的现场调试，大幅度降低生产成本。

(5) 易于维护。作为一种高新技术产品，真空可移动式模拟目标系统必须要易于维护，特别是系统中使用较多的零件，必须在设计中考虑到后期维护或者更换的需求，或者在生产时就要留足备件。同时很多运动部件在真空中的移动会加速零件的磨损和老化，易于维护对于真空可移动式模拟目标系统的用户来说至关重要。另外，易于维护性也可以降低后期的维护和使用成本，同时也可以有效提升系统的使用寿命。

2.2 系统整体设计

如图2所示，可移动式高精度目标模拟系统由平行光管、焦面靶轮、积分球光源、可调节支撑平台等组成。

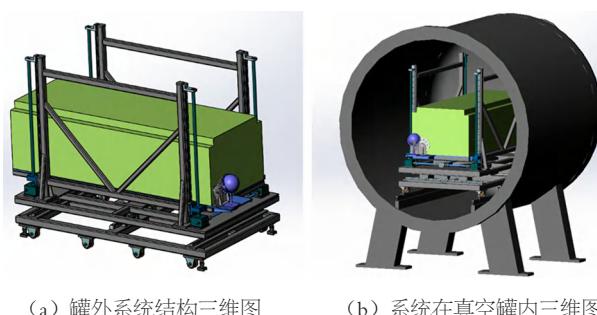


图2 罐外系统结构及罐外系统在真空罐内的三维示意图

(1) 平行光管主要包括主镜组件、次镜组件、温度补偿机构、焦面组件、遮光筒、底座等部分。次镜组件与主镜组件均安装在光管底座上，主镜采用光学检验中常用的

钢带悬吊支撑方式，外加若干辅助侧支撑；次镜机构能进行六维调整，以满足光学调试要求；主、次镜间设置殷钢组件，减小温度变化引起的镜间距变化。

(2) 焦面机构依照技术要求设计，结构紧凑，满足使用要求。

(3) 遮光筒部分采用不锈钢薄钢板弯折再固定在光管底座上，具有结构刚度好、稳定等优点。光管底座采用型材焊接成型，侧边可安装起吊环或者焊接吊耳，便于平行光管的整体起吊和长途运输。同时，可通过安装高精度水泡用以监测平行光管的光轴方向。

(4) 可调节支撑平台包括升降机构、一维平移机构和系统支撑底座。升降机构采用4台螺旋升降机的形式，升降行程1500mm。一维平移行程500mm，采用滚珠丝杆传动。在底座下方安装有4组支撑腿，可用于系统支撑，并能用于俯仰和方位调节。另外，在底座下方安装了4组滚轮，方便系统整体沿罐内导轨移动和在系统罐外的自由移动。

系统中所用钢材均为不锈钢材料，传动部分采用真空油脂润滑，满足一个标准大气压或 $\leq 1 \times 10^{-3}$ Pa的使用要求，并且能满足相对湿度50%±5%下使用。

调整台包含上下升降台以及横移平台。各平台模块化设计，可独立运动，组合后实现2个自由度的运动调整。设备使用占用空间尺寸约3500mm×1600mm×2485mm。此运动平台由于使用在真空环境中，在设备设计过程中，选用的所有材料及元器件均能在真空环境下使用。电动运动控制均由真空伺服电机进行驱动。选用了真空电磁制动器连接真空伺服电机，可使工作台运动到任意位置停止。

升降及水平横移轴两个轴系统传动中，均选用了相应的减速机组合连接传动，增强输出力矩，确保设备升降及横移运动停止时设备的稳固性。设备在两个轴的直线运动中，实现直线运动的介质分别为丝杠螺旋升降机和滚珠丝杆，配件为直线滑轨滑块。丝杠螺旋升降机在机械升降方面有广泛的应用，不仅占用空间小，且有着高效率的传动以及很强的升降能力。滚珠丝杠是常使用的传动元件，具有高精度、可逆性和高效率的特点，主要由螺杆、螺母、钢球、预压片、反向器和防尘器等组成。滑轨滑块在直线运动中起到导向和稳定的作用。所有机械配合的运动部分，均采用真空油脂进行润滑，如图3所示。

2.3 有限元分析

有限元分析方法是目前较为常用的针对系统结构的分析方法，使用有限元分析方法可以将系统中复杂的求解过程进行简化，从而得到系统的关键性能指标。振动模态是

弹性结构固有、整体的特性。通过模态分析方法可清楚了解结构物在某一易受影响的频率范围内的各阶主要模态的



图3 可调节支撑平台运动到底部和顶部示意图

特性，就可以预言结构在此频段内外部或内部各种振源作用下产生的实际振动响应。因此，模态分析是结构动态设计及设备故障诊断的重要方法。

使用有限元对系统结构进行分析的一般步骤包括前处理、施加载荷、设置求解参数并求解等，具体内容如下。

(1) 前处理。分析真空可移动式模拟目标系统当前的工作环境，同时建立新的工程文件，并对需要分析的结构设定材料类型和相关参数，如连接单元、一些材料的弹性模量、密度以及泊松比等。最后对建立的机械结构模型进行网格划分。网格划分是整个有限元分析中的关键步骤，即在建立的机械结构上形成最小单元网格 Mesh。不合理的网格划分会得到一些极不合理的结果，因而为了保证最终结果的正确性，在进行网格划分时需要格外注意。完成网格划分后，需要对真空可移动式模拟目标系统中各部分结构的边界条件进行定义，特别是一些自由耦合关系的结构，同时为了真实模拟在常温罐外和罐内系统的结构，正确设置参数并施加载荷。文中主要对系统的频率响应进行分析，因而可以直接在设置完后进行求解计算。

(2) 后处理。主要利用时间处理器对处理的结果进行可视化处理，包括各种数据图形等，最后得到真空可移动式模拟目标系统的分析报告。

本文使用有限元分析软件对系统进行分析，图4所示为用有限元计算方法求解的频率和模态阶数，结果显示其一阶频率为28Hz，满足系统的使用需求。同时，为了避免共振，在使用时的工作频率应尽量远离这一数值。

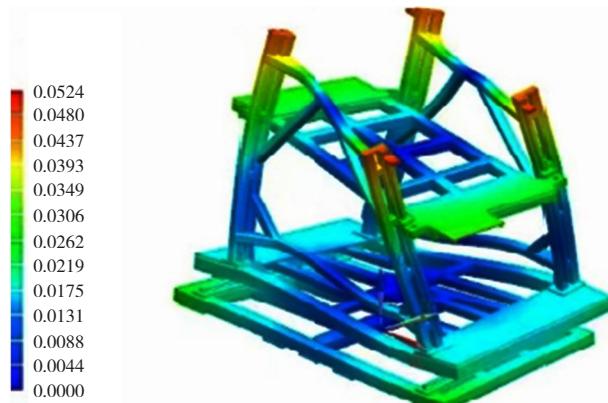


图4 系统有限元分析结果

3 结束语

目标模拟系统的结构设计对于目标模拟系统功能的完成至关重要，本文对真空环境下的目标模拟系统及可调节支撑平台进行了设计。为了使得系统能够在真空罐内工作更为稳定，使用有限元对系统结构进行了分析，发现系统的共振频率为28Hz，在实际使用时应予以避免。

参考文献

- [1] 向光峰, 孟炳寰, 黄婵, 等. 平行光管发散角对多角度偏振成像仪几何定标精度的影响及校正方法[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 71–78.
- [2] 曲卫东, 雷萍, 薛挺, 等. 大口径平行光管用于光轴平行度测量的实现[J]. 仪器仪表学报, 2006(S2): 1528–1529.
- [3] 刘秉琦, 余皓, 邹剑, 等. 基于WMPS的多光谱光轴平行性检测系统设计[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 894–897, 907.

作者简介

张露(1984—),女,江苏南京人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为光学精密仪器设计。

ZJ17型卷烟机接装纸多形式缺陷故障维修

赵 森, 杨雪超, 聂 坤, 罗 扬, 潘思禹

(贵州中烟工业有限责任公司毕节卷烟厂, 贵州毕节 551700)

[摘要] ZJ17型卷烟机作为国内重要的卷烟机组生产机型, 该烟机设备的高效运行与质量保证至关重要, 该机型偶有烟支接装纸包接不好且缺陷情况无规律, 缺陷占比甚至小于1%, 缺陷类型表现形式有内翘角、外翘角、严重泡皱等, 缺陷程度轻重不一, 在保证设备搓板、靠拢鼓轮、搓接轮、切纸轮与切纸刀均无卫生问题, 设备正负压均符合生产要求的情况下仍会出现接装纸包接不好的现象。文章着重讨论出现此类缺陷时如何快速定位缺陷, 降低维修时间。

[关键词] ZJ17型卷接机; YJ27滤嘴接装机; 接装纸; 故障维修; 缺陷; 设备故障

[中图分类号] TS43 **[文献标志码]** A

0 引言

ZJ17型卷烟机运行年限普遍较高, 各部件在长期的运行过程中会产生不同程度的磨损, 有一些磨损无法及时发现并杜绝。虽然设备清洁问题引起的质量缺陷较为常见, 但因设备固有的问题导致运行中产生故障的类型多样复杂, 设备维修的点位较多。YJ27滤嘴接装机是ZJ17型卷接机的滤嘴接装部分, 在生产过程中, 为缩短维修时间, 需要快速定位缺陷原因。可以通过总结设备维修经验, 分析其加工工艺流程与设备故障产生的原因, 并根据分析的结果来确定缺陷原因。

1 缺陷分析

接装纸剪切系统与搓接系统如图1所示。

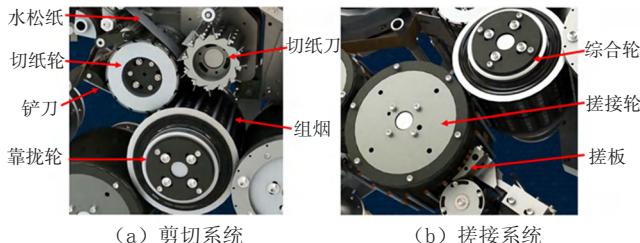


图1 剪切系统与搓接系统

1.1 接装纸剪切系统故障

(1) 切纸刀刀片装配精度不达标或刀刃磨损。切纸刀装配需要使用专用工装, 相对精度要求非常高, 其中的任一页刀片装配精度稍有偏差会磨损, 这种偏差或磨损虽不足以打坏刀片, 但会引起切割异常, 从而引发无规律的接装纸质量缺陷。

(2) 切纸轮磨损。切纸轮精度非常高, 偶然的磨损不易察觉, 但会导致接装纸片切割过程中出现接装纸切割异常, 造成接装纸折角或折皱, 从而引发接装纸一系列的质

量缺陷。

(3) 切纸轮和切纸刀安装位置不对。切纸轮和切纸刀的安装位置要相对匹配, 并和接装纸的供给速度相对应, 无论切纸刀相对切纸轮较快或较慢, 都可能引起接装纸切割过程中折角或折皱。

1.2 搓接工序故障

(1) 靠拢鼓轮或搓接轮位置偏移。靠拢鼓轮上的烟组与接装纸片交接汇合并进入搓接轮进行搓接工序。无论是靠拢鼓轮还是搓接轮, 起始位置发生偏移, 都会导致接装纸片与烟支的搭接和搓接产生异常, 从而引发多形式的接装纸质量缺陷现象。

(2) 搓板位置偏移或加热装置故障。搓板是对接装纸和烟组搓接的主要工序, 搓板位置的偏移, 是直接导致搓接不良的根本原因。搓板位置的调整, 搓板启动辊的调整都严重影响着烟支搓接质量, 搓板加热器温度的异常影响着搓接工序中胶液的粘合度, 搓板位置偏移和加热器故障是导致接装纸外观缺陷的主要原因, 设备故障检修时应优先排查。

1.3 接装纸供给系统故障

接装纸供给系统如图2所示。



图2 接装纸供给系统

(1) 胶辊故障，轴承损坏。接装纸上胶系统胶辊故障或轴承损坏，会使得接装纸在上胶过程中产生相对位置偏移。设备运行过程中，必须时刻保证接装纸的稳定运行，一旦接装纸出现相对位置偏移，会导致剪切过程不顺畅或局部上胶不良。剪切过程不顺畅将引起接装纸片折皱等现象，使得接装纸包接不到位或严重泡皱。局部上胶不良将导致外翘角质量问题。胶辊故障应检查胶辊齿轮的啮合情况，胶辊轴承的润滑和磨损程度，胶辊表面与胶缸底座是否变形。

(2) 卷曲器故障或瓷刮刀磨钝。卷曲器的作用主要是对接装纸进行打磨从而使打磨后的接装纸上胶良好。无论是卷曲器故障或是因为瓷刮刀磨钝将导致接装纸打磨不均不足，使得纸片卷曲度异常，从而导致接装纸被切割过程中出现相对位置的偏移或剪切过程中被刀刃带偏，引发接装纸错牙、接装纸翘角或严重泡皱等质量缺陷。

(3) 供纸辊或压纸辊故障。供纸辊和压纸辊共同作用于接装纸，同步供给接装纸输送至切纸刀处，切纸刀和切纸轮旋转剪切接装纸，当接装纸供给异常时，切纸轮上的刀槽位置与接装纸运动速度不同步，会导致接装纸被切割成宽度不一的纸，此外还可能出现相对歪斜从而引发接装纸折角或折皱。

(4) 导纸辊位置偏移、磨损或轴承损坏。接装纸导纸辊稳定输送接装纸，导纸辊磨损严重或轴承损坏，都会导致接装纸输送过程中产生相对位置偏移，导纸辊内轴承润滑不当也会导致接装纸输送过程中产生输送滞后或抖动等现象，从而导致接装纸剪切过程中发生异常，产生折角或折皱的纸片。

1.4 材料因素引起的故障

现代产品的不断更新使得设备对材料适应性逐渐不足，设备维修、设备调整的方法和要求越发严格。接装纸表面光滑导致压纸辊与接装纸产生相对位移，需调整设备以适应新材料的加工。

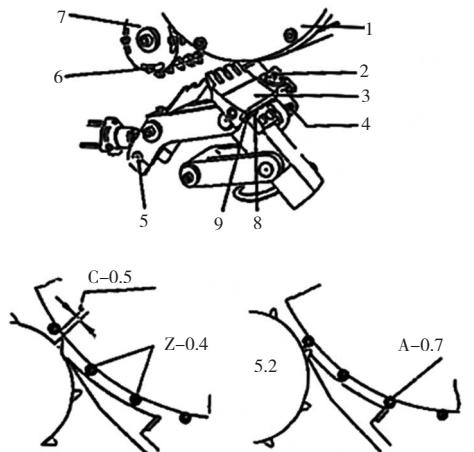
2 故障排除维修措施

发现无规律的接装纸外观质量缺陷问题，首先应该排除人为清洁保养不到位的因素，排除接装纸供给系统、切割、接装搓接工序的清洁问题。在检查设备气源参数等外部原因后再从设备原因入手。设备的检查维修应该根据加工工艺流程形成从主到次、从后至前的顺序，并逐步开机验证烟支质量问题^[1]。设备维修具体措施如下^[2]。

(1) 第一步：检查搓板磨损情况，确定是否更换，根据当前生产烟支直径选用标准量棒调整搓板和搓板启动辊

位置。

如图3所示，在进行搓板调整之前应确保搓板温度为工作温度。操作控制面板上的开关，观察搓板是否柔和地到达或脱离工作位置，否则，可通过调节节流阀来缓冲搓板的运动，以防冲击移位。当搓板处于工作状态时，将两根量棒放入搓板与搓接鼓轮轮槽之间，量棒直径为烟支直径加0.4mm，松开4个螺钉2，调整支座，同时转动偏心轴，使搓接鼓轮和搓板与量棒接触，且量棒仍能转动，拧紧4个螺钉2，检查对位情况，并根据需要可改变量棒位置重新调整。松开螺钉3，用手把一直径与烟支直径相等的量棒压在搓接鼓轮的轮槽内，用手转动归位轮，使其齿边与量棒的距离C为0.5mm，拧紧螺钉3。松开搓板前端刮板的2个螺钉4，取一根比烟支直径小0.7mm的量棒，放入搓接鼓轮轮槽内，移动刮板贴紧量棒，拧紧刮板螺钉4。搓板初步调整后，还要开车运行，并根据需要进行微调。



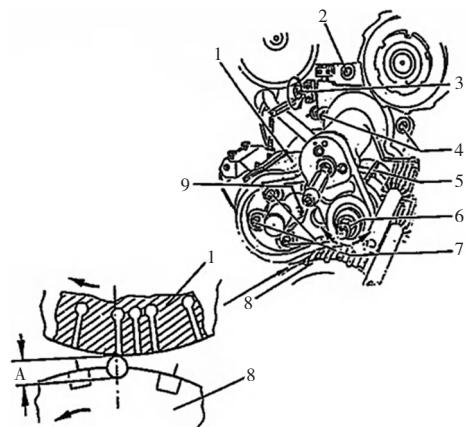
1.搓接鼓轮；2.螺钉 1；3.搓板；4.螺钉 2；5.偏心轴；
6.螺钉 3；7.归位轮；8.螺钉 4；9.刮板

图3 搓板调整

(2) 第二步：检查靠拢鼓轮和搓接轮内外磨损情况，包含轴承座、配气盘等磨损情况，必要时进行更换，检查切纸鼓轮与靠拢轮安装位置，并用量棒调整鼓轮位置。

如图4所示，切纸鼓轮与靠拢鼓轮的调整完成后，能保证水松纸片与烟组相粘。首先取一根直径小于烟支直径1.3~1.5mm的量棒，放入切纸鼓轮与靠拢鼓轮之间。拧开切纸鼓轮总成件与机架墙板相连接的3个螺钉1，调整切纸鼓轮总成件，在图示位置调整切纸轮使之靠拢量棒，拧紧螺钉1通过组合体上的开口，拧开螺钉4，盘车盘动切纸鼓轮，对齐切纸鼓轮外圆上第一排风孔的前沿与两轮的中心线，接着拧紧螺钉4。

(3) 第三步：检查切纸轮、切纸刀刀片磨损情况，包



1.切纸轮; 2.螺钉1; 3.调节螺钉; 4.螺钉2; 5.水松纸切刀;
6.前端螺母; 7.螺钉3; 8.靠拢鼓轮; 9.螺钉4

图4 切纸轮切刀与靠拢鼓轮的调整

含轴承座，切纸轮配气盘等磨损情况，根据磨损情况确定是否更换，用专用工具校准切纸刀刀刃装配精度，检查并校准切纸刀、切纸轮安装位置。

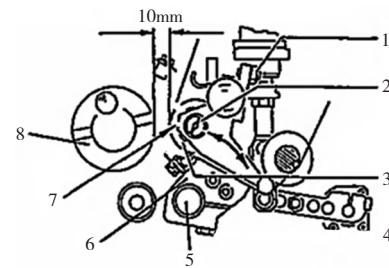
调整切纸轮和水松纸切刀的位置。应在靠拢鼓轮调好以后，先调整切纸轮与靠拢鼓轮的位置，再进行水松纸切刀与切纸轮的相对位置的调整，见图4，松开前端螺母，盘车调整水松纸切刀的位置，使任意水松纸切刀位于2组吸风孔之间，上紧前端螺母，继续盘车使被切下的水松纸纸片前端在任意吸风区第一排孔的前端1~1.5mm；分别将组合体与合体罩上的螺钉4与螺钉3松开，拧动螺钉3来调整切刀与轮之间的压力，然后拧紧螺钉3和4。保证水松纸切刀与轮之间压力较小的同时能够将水松纸切断。在调整完后，开启机器，观察水松纸在切纸轮与切刀上的运转情况，若水松纸纸片能够与靠拢鼓轮的“组烟”紧密粘贴，并且未出现掉纸片或粘连位置不正确的情况，则调整完成。

(4) 第四步：检查接装纸各导纸辊外表面磨损、导纸辊轴承磨损情况，必要时进行更换，对导纸辊轴承润滑。

(5) 第五步：检查接装纸上胶情况，检查胶辊磨损情况，检查并选取适当的润滑油润滑胶辊轴承，保证供胶系统运行正常，接装纸上胶均匀。

(6) 第六步：检查接装纸导纸辊、压纸辊是否磨损，必要时进行更换，检查压纸辊压紧情况，根据材料差异性调整压纸辊压紧程度，保证接装纸供给过程中不会发生偏移。

压纸辊的调整如图5所示，松开螺钉3，旋转偏心轴，将压纸辊调整到最上端位置，拧紧螺钉3。松开螺钉2，使螺栓处于最右端的位置，移动支架，使压纸辊与加速辊之间的距离为10mm，拧紧螺钉2。

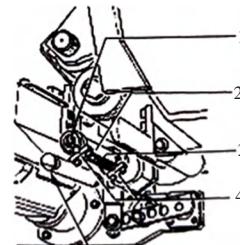


1.螺钉1; 2.偏心轴; 3.压纸辊; 4.螺钉2;
5.螺栓; 6.支架; 7.螺钉3; 8.加速辊

图5 压纸辊的调整

(7) 第七步：检查卷曲器工作是否正常，卷曲器瓷刮刀是否磨损，必要时进行瓷刮刀更换，调整卷曲器验证接装纸上胶效果。

卷曲器的调整如图6所示，调整卷曲器时松开螺钉并调节卷曲器来调整水松纸压力，使卷曲器，能够适应不同的水松纸材料，然后拧开压紧件上的螺钉，把瓷刮刀换一个面，重新上紧压紧件。若瓷刮刀的各个边都变钝时应更换瓷刮刀。更换时松开压紧件上的螺钉，取下钝的瓷刮刀，更换上新的瓷刮刀，拧紧螺钉。



1.螺钉; 2.卷曲器; 3.瓷刮刀; 4.压紧件

图6 卷曲器的调整

3 结束语

卷烟制品质量的保障是卷烟生产行业的重中之重，生产效率的保障也是不可忽略的因素，节约设备故障检修时间，保障产品质量，一方面提高了设备的综合利用率，另一方面也为生产创造了价值。因此针对无规律的接装纸故障排查检修，系统而科学的故障检修维修方式应受到生产行业的重视与利用。

参考文献

- [1] 李爱兵. 设备维修保养管理的策略及方法[J]. 机械工业标准化与质量, 2020 (7) : 38-39.
- [2] 李广锐. 烟草企业机械设备维修管理问题及对策探究[J]. 装备维修技术, 2020 (2) : 197.

作者简介

赵森(1988—)，男，贵州毕节人，本科，助理工程师，主要从事烟机设备管理与维修工作。

基于主管道接管座内圆角打磨的三通倒角研究

郑张利, 马中良

(上海核工程研究设计院有限公司, 上海 200233)

[摘要] 文章以理论建模为指导, 结合反应堆主冷却剂管道 ADS-4 接管座内圆角打磨的实践操作, 研究分析了影响打磨效果的关键控制因素, 形成一套合理可行的打磨方法, 为类似三通接管座打磨研究提供一定的技术参考。

[关键词] ADS; 打磨; 三通; 三维建模

[中图分类号] TL48 **[文献标志码]** A

1 概述

核电站反应堆主冷却剂管道(以下简称“主管道”)是反应堆冷却剂系统(以下简称“RCS”)中连接反应堆压力容器、蒸汽发生器的厚壁承压管道, 在核电站运行时, 处于高温、高压、高流速的工况, 属重要压力边界的一部分。由于 ADS-4 接管座(以下简称“接管座”)与主管道为三通垂直相贯, 在一定条件下, 易产生流体和管道的声固耦合共振^[1], 主要促成因素是在一定温度范围内, 主管道内的高速流体在 ADS-4 三通接管座处产生涡流, 造成流体与管道壁面紊动脱落, 产生流致振动。经研究, 在不改变相贯处前缘倒角情况下, 增大后缘倒角可以有效减弱流体激励^[1]。本文以理论建模为指导, 结合主管道 L001B 段内倒圆打磨实践操作, 研究分析了影响打磨效果的关键控制因素, 形成一套合理可行的打磨方法, 为类似三通管座打磨研究工作, 提供一定的参考。

2 打磨范围

打磨范围为 ADS-4 接管座靠近蒸汽发生器侧, 即主管道弯管侧(后缘), 打磨区域相关视图如图 1 所示。为便于研究分析, 以接管座管嘴中心轴线和母管长直段管道中心轴线的交点为原点, 建立基准坐标系。

3 打磨方法

打磨方法主要可从打磨区域的内外表面划线、数据采集及验证、打磨警戒线和最终打磨线的制定、控制线放样等 4 个方面体现。

3.1 内外表面划线

首先在接管座直段外表面确定 0°、90°、270° 和 180° 等 4 个方向位置点, 划出 4 个方向位置点的控制线, 然后采用均分弧长的方式, 画出 ADS 管嘴直段外表面其余角度位置的等分线。同理, 划出内表面等分线。由内外表面相同角度位置的划线相结合, 形成一个控制截面。

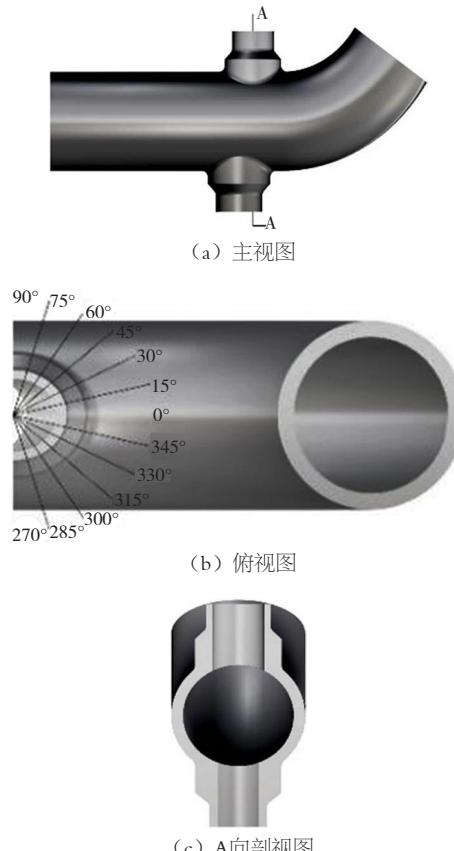


图1 打磨区域

同样, 共形成除 90° 和 270° 位置截面外的 11 个控制截面。打磨前控制截面示意图如图 2 所示。

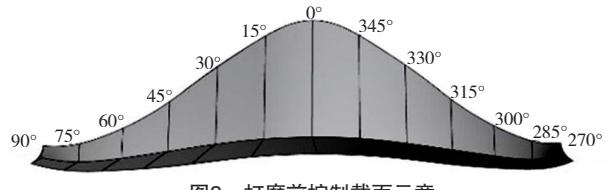


图2 打磨前控制截面示意

3.2 数据采集及验证

打磨操作前对 11 个控制截面的内、外表面进行数据采

集，将数据导入三维模型，并在已建立的基准坐标系中，拟合成曲线，绘制出各控制截面图形。同时，在每个打磨控制截面的直段上，选取一定间距的两点，测量出壁厚值，然后在管道产品上找到相应位置，进行 UT 测厚，以验证各截面数据采集的准确性。

3.3 打磨警戒线和最终打磨线

根据采集的实测数据、设计理论数据，分别建立三维模型，对各控制截面进行对比分析，选定打磨尺寸制定的基准数据。预设设备分区分层打磨的轨迹，以单个控制截面为基准，并以 ADS-4 接管座内表面与主管道内表面的相贯线交点水平方向向上 45°，为打磨深度推进方向，结合最终打磨尺寸要求，绘制并确定控制截面的打磨控制点。以 0° 控制截面为例，建立 A1、A2、A3 和 A4 等 4 个控制点，同样方法，分别建立其余各控制截面上的 4 个控制点。然后将 ADS 接管座打磨区域内表面各控制截面最外侧 11 个控制点进行圆滑连线，并将内侧 11 个控制点进行圆滑连线，形成上部打磨区域控制线。同样，绘制出主管道直段打磨区域内下部打磨区域控制线。最终确定打磨区域内的打磨控制线（打磨警戒线）和最终打磨线。0° 截面示意如图 3 所示，0° 截面打磨区域局部放大示意图如图 4 所示，上部打磨区域控制线示意图如图 5 所示，下部打磨区域控制线示意图如图 6 所示。



图3 0° 截面示意

3.4 控制线放样

通过三维模型，将上部打磨区域控制线和下部打磨区域控制线以空间曲面平铺方式，1 : 1 放样并打印，制成模板。利用模板对对应的 ADS 管座内表面打磨区域和主管道直段部分的打磨区域进行放样，最终画定产品管道上打磨区域的打磨警戒线和最终打磨控制线。

4 打磨设备及安装

设备安装精度直接决定了打磨的精准度。先将基体装配完成，然后吊运打磨设备至管口合适位置，竖直放置到

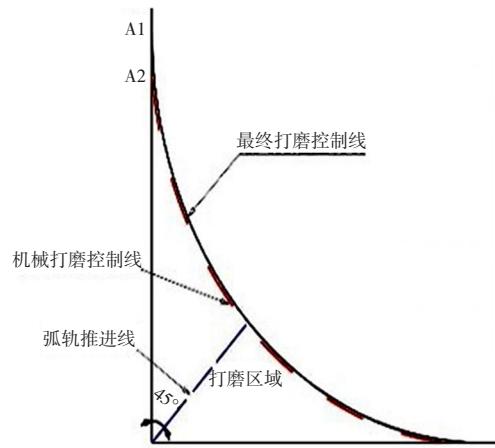


图4 0° 截面打磨区域局部放大示意

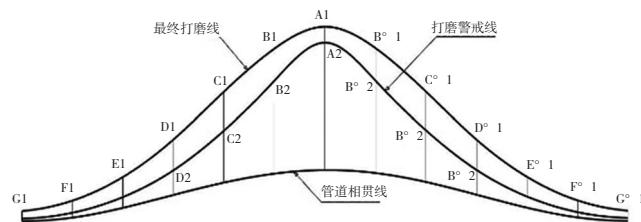


图5 上部打磨区域控制线示意图

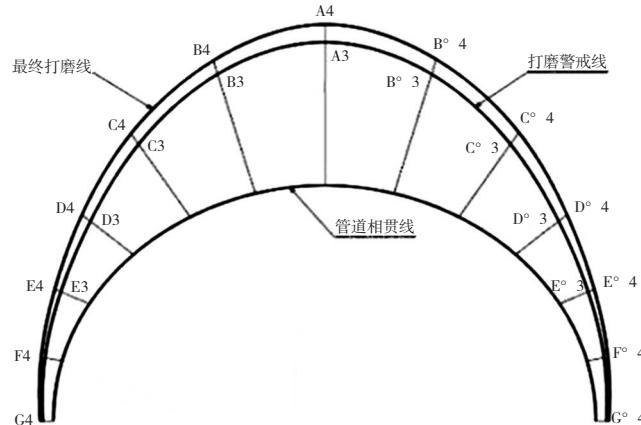


图6 下部打磨区域控制线示意

管道中，调整基体位置与管道内壁相贯线位置吻合，锁紧基体使固定到管道内壁，将打磨设备安装至中心轴接口位置，然后将百分表架设到基体升降中心轴上，表针接触管道内壁，旋转中心轴圆周测量表针误差，使主轴回转中心跳动误差在控制值内，并检查砂轮机安装角度与 ADS-4 管嘴夹角是否为 45°，确保实际打磨轨迹与理论建模分析保持一致。

5 打磨实施

打磨实施分为机械打磨和最终的手工抛磨两个阶段。机械打磨以各控制截面为基准，利用打磨砂轮在打磨区域内循环摆动、逐层打磨，打磨过程中注意层间温度控制，防止过热引起母材褪色。同时，控制打磨进给量，避免过

西门子PR2型刀闸配MA7684机构机芯结构改造

赵 洋，刘专红，陈朝廷

(深圳供电局有限公司，广东深圳 518000)

[摘要] 西门子 PR2 型刀闸广泛运用于电网中各个电压等级，是电网传输电能的重要电气设备。MA7684 机构是 PR2 型刀闸核心驱动机构的一类机构，其可靠性对 PR2 型刀闸稳固连接至关重要。MA7684 机构机芯故障，将会导致 PR2 型刀闸合闸不到位，引起触头严重发热，从而影响设备、电网无法安全稳定运行。针对 PR2 型刀闸的 MA7684 机构存在的机芯操作齿轮或中间齿轮打齿、刀闸动作时反向打齿、辅助开关拨叉与辅助开关驱动齿轮螺钉易损等问题，文章提出对 MA7684 机芯齿轮结构的新设计。新机芯结构取消了机构的中间齿轮、辅助开关驱动齿轮及拨叉和弹簧片，重新设计了辅助开关主驱动齿轮和辅助开关驱动齿轮适配方式，能有效解决机芯齿轮打齿问题，保障操动机构的可靠动作，提高电网运行的安全性及可靠性。

[关键词] PR2 型刀闸；机芯齿轮；打齿；电网

[中图分类号] TM564.1 **[文献标志码]** A

新型西门子刀闸 MA7684 机构完全解决了西门子 PR2 型刀闸合闸不到位损坏机芯齿轮、拔叉问题，同时解决了旧机构箱分合闸过程中不能反向操作的问题，减少了设备故障率，大大降低了班组人员因此项故障产生的工作量与

出勤率。

1 现状调查

西门子（杭州）高压开关有限公司生产 PR2 型隔离开关采用的机构箱 MA7684 电动机构存在如下缺陷：

打磨现象。手工抛磨是利用角磨机对台阶的尖角部位进行打磨和平滑过渡，避免有不规则隆起或空隙。打磨的磨削力不能太大，连续磨削的时间不能过长，否则磨削温度过高，会产生过烧^[2]。操作过程中应及时检查尺寸，避免超限打磨。

6 结果检测

结果检测包括内倒圆半径测量、壁厚检测、粗糙度检测、目视检测和液体渗透检测。打磨后截面效果示意图如图 7 所示。



图7 打磨后截面效果示意

反应堆主冷却剂管道 L001B 段 ADS-4 接管座内圆角打磨是理论与实践操作的有效结合，打磨前应做好充分的技术消化、详实的数据评测、全面的数据评估，有利于建立一套合理可行的、完整的打磨技术指导体系，以规范和指导打磨工作，为该类型管道打磨提供借鉴，也为类似三通管道打磨研究提供参考。

参考文献

- [1] 矫明，刘畅，张铠，等. 基于流体动力学分析的 ADS4 管系声共振解决方案的机理和试验探索[J]. 核科学与工程，2020，40(4)：615—624.
- [2] 薛丹，薛恒信. 核电主管道弯头内孔加工方法的研讨[J]. 科技传播，2012，4(18)：168—169.

作者简介

郑张利（1982—），女，河南郑州人，硕士研究生，高级工程师，主要从事核电站设备研究工作。

①刀闸合闸操作经常出现合闸不到位现象；②刀闸操作时中途停止后反向操作存在机构机芯内部操作齿轮或中间齿轮损坏（图1）风险；③当机构机芯齿轮损坏后，刀闸分合闸操作到位时容易造成驱动辅助开关拨叉与辅齿轮螺钉断裂，如图2和图3所示。

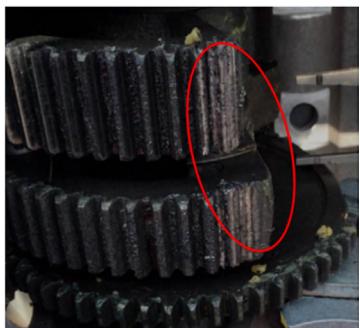


图1 机芯齿轮损坏



图2 辅助开关拨叉断裂



图3 辅齿轮螺钉断裂

故障案例：广州局220kV田心变，江门局220kV外海变、220kV开平变，茂名局500kV茂名变，梅州局220kV丰顺变，肇庆局220kV端州变、500kV砚都变，东莞局220kV裕园变，深圳局220kV象山变，惠州局220kV东彭变等均有发生送电时刀闸合闸不到位，机构齿轮损坏现象。

2 机芯齿轮故障原因分析

(1) PR2刀闸引进时为三相每相1台机构，由电气控制机构实现分合闸操作。因适用中国市场改为三相共用1台机构，由机械传动实现分合闸操作。由于三相刀闸驱动力聚集在1台机构，在机械传动过程中，连杆、齿轮箱与

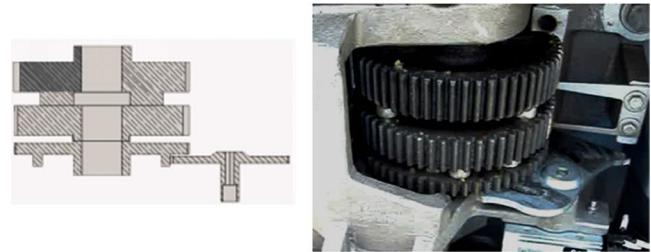
绝缘子产生间隙，使机构输出行程不足，操作齿轮无法正常与齿轮轴脱离，从而造成齿轮打齿损坏。

(2) 旧机构合闸操作，若在中间位置停止又改为分闸操作时，因为操作齿轮、中间齿轮、辅助开关驱动齿轮和辅助开关拨叉行程配合间隙，辅助开关会先到位，此时操作齿轮没有完全分闸到位，从而造成下次操作合闸时机构箱输出行程不足，导致操作齿轮打坏。

3 机芯齿轮改造措施分析

为了提出有效的解决措施，需要了解原机构操作时的动作过程：首先电机启动，齿轮轴带动辅助开关驱动齿轮和中间齿轮转动。同时辅助开关驱动齿轮驱动辅助开关拨叉，从而辅助开关动作，相应的信号输出。由于辅助开关驱动齿轮、中间齿轮与传动轴之间没有键连接，而此时齿轮轴与操作齿轮未进入离合状态，因此传动轴不工作。中间齿轮转过 58° 后，中间齿轮的挡块与操作齿轮的挡块接触，带动操作齿轮动作，操作齿轮通过键带动传动轴，垂直连杆动作，合闸起动。此时辅助开关驱动齿轮不驱动辅助开关拨叉。中间齿轮与操作齿轮共同作用，带动传动轴及垂直连杆转过 200° 。此时，操作齿轮与齿轮轴分开。中间齿轮也与齿轮轴分开，限位块到位。中间齿轮在弹性块的作用下，发生打滑，此时，辅助开关驱动齿轮又开始带动辅助开关拨叉，辅助开关动作，发出相应信号并切断电源。分闸过程同合闸，只是旋转方向相反，其内容可参照合闸过程。

鉴于上述动作过程，需要在不改变旧MA7684机构主体结构（图4）条件下，将旧机构机芯内部三层齿轮和驱动辅助开关的拨叉取消。采用新的齿轮与辅助开关驱动系统，新型驱动系统需要保证在分合闸时机构箱输出扭力、速率和行程与原机芯输出完全相同。同时还要满足新型MA7864机构功能数据，需要做机构箱输出行程测量、齿轮尺寸齿比测量。因辅助开关驱动方式改变，需要测量齿比、辅助开关行程并进行换算。



(a) 设计图

(b) 实物图

图4 旧MA7684机构主体结构

新MA7684机构主体结构如图5所示。新MA7684机芯齿轮轴、操作齿轮同步转动（操作齿轮与传动轴为键连接），通过辅助开关位置调整齿轮和辅助开关驱动齿轮的齿比转换，实现辅助开关行程与刀闸行程相同（辅助开关与刀闸位置行程同步），因此分合闸操作和操作过程中停止反向操作时不会出现打齿现象。

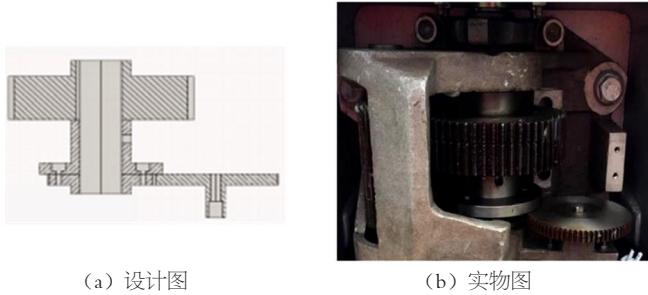


图5 新MA7684机构主体结构

4 改造内容及效果验证

(1) 将旧机构的操作齿轮由 200° 扇形齿轮改为 360° 圆形齿轮。由于刀闸三相拐臂过死点时力矩较大，为防止齿轮损伤，将原厚度30mm的操作齿轮改为厚度40mm的操作齿轮，如图6所示。

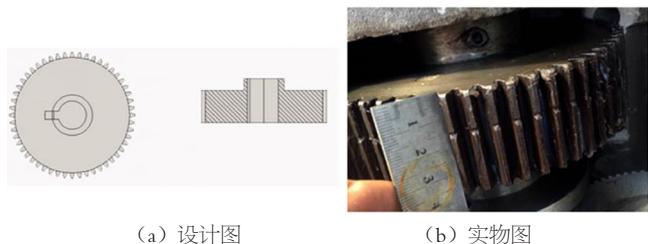


图6 改造后的操作齿轮

(2) 取消旧机构的中间齿轮和辅助开关驱动齿轮，取消部位的两个齿轮改为一个 360° 圆形辅助齿轮，如图7所示。

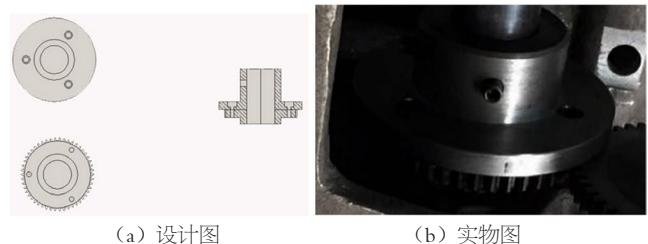


图7 辅助齿轮

(3) 取消旧机构弹簧片，旧机构辅助开关拨叉改为一个 360° 圆形辅助开关驱动齿轮，如图8所示，旧机构输出主轴上的分合闸指示牌位置（图9）改为置于机构箱箱壳顶部，便于观察。



图8 辅助开关驱动齿轮



图9 分合闸指示牌

改造后的动作过程：PR2型刀闸合闸时，首先电机启动，带动齿轮轴上操作齿轮及传动轴同步转动，同时辅助齿轮位置随主轴转动，带动辅助开关驱动齿轮，辅助开关动作，相应的信号输出并切断马达电源。PR2型刀闸分闸过程与合闸过程相同，仅旋转方向相反。

5 结论

综上所述，针对旧MA7684机构机芯齿轮的问题，新MA7684机构机芯进行了以下优化设计。

- (1) 机构机芯上两层齿轮设计为一体齿轮。
- (2) 拨动辅助开关的齿轮设计为独立齿轮。
- (3) 将拨动辅助开关拨叉设计为齿轮盘结构。

使用新型MA7684机构机芯后，能有效解决现原机构存在的刀闸操作合闸不到位、机芯操作齿轮或中间齿轮打齿损坏、刀闸操作时中途停止后反向操作打齿、辅助开关拨叉与辅助开关驱动齿轮螺钉易损等问题，提高了机构动作的精准程度和机械强度，保障了PR2型刀闸合闸时的可靠通流，能从一定程度上减轻电网安全事故的发生，保障电网安全可靠运行。

参考文献

- [1] 戴涌坚. 论高压隔旁开关的技术要求及常见故障的处理[J]. 科学之友, 2010 (10): 49-50.
- [2] 高压交流隔离开关和接地开关: GB 1985—2004[S].

作者简介

赵洋(1991—)，男，河南南阳人，本科，工程师，主要研究方向为电气一次设备运维。

全机静力试验技术展望

严 冲

(航空工业飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 陕西西安 710000)

[摘要] 全机静力试验是飞机研制流程的重要一环, 其复杂系统性工程的特性带来了技术、管理及风险控制方面的难点。工业技术的进步为全机静力试验技术的发展提供了更多契机, 为了保障型号研制及针对性解决试验遇到的难题, 提出了全机静力试验技术未来的发展思路。

[关键词] 全机静力试验技术; 发展原则; 发展思路

[中图分类号] V216.1 **[文献标志码]** A

21世纪以来, 我国航空业在新机研制领域取得了丰硕成果, 军用、民用、特种飞机领域均有新研飞机实现首飞。全机静力试验通过在地面环境下模拟飞机在使用过程中可能遇到的受力状况, 实现对机体结构的强度验证和校核, 是新机设计、制造、试验、试飞的研制流程中的重要一环^[1]。全机静力试验是一项复杂的系统性工程, 在技术、管理、风险控制等方面存在自身特点和难点, 依托先进的全机静力试验技术解决上述难点是新机研制的重要支撑和保障。为此, 掌握国内外各行业在试验相关技术领域的最新动态, 提升全机静力试验技术水平对于我国航空业发展具有重要意义。

1 全机静力试验的特点及难点

全机静力试验通常分为首飞前、首飞后两个主要阶段。首飞前一般只进行影响首飞安全的最直接的试验项目, 包括操纵系统和机构功能验证试验、各项目限制载荷试验和发动机、起落架等高载试验, 首飞后进行全部限制载荷和极限载荷试验^[2]。全机静力试验的内容及定位决定了其具有以下基本特点。

1.1 涉及专业广

通常全机静力试验所涉及的专业有: 飞机器结构及载荷、机械设计、自动控制、液压加载、应变及位移测量、安全监测、无损检测等, 各专业需要协调工作才能保证试验的顺利完成。

1.2 周期要求严格

首飞是新机研制活动的标志性节点, 全机静力试验作为首飞的前置研制流程, 试验周期要求较紧迫, 且试验完成的节点不可动摇。为了保证试验的按期完成, 在首飞前阶段, 通常需要进行超负荷的设计及实施工作。在首飞后阶段, 试验计划按照外场试飞活动制定, 在试飞科目发生

变化时, 通常造成相应的试验项目的临时调整及项目周期压缩, 给试验周期控制带来较大风险。

1.3 硬件资源要求高

进行一项全机静力试验需要的硬件资源主要有试验件、试验场地和试验设备。其中, 试验件为专门用于强度校核的静力试验机, 与真实飞机结构一致, 成本高昂; 试验场地为配备承力地坪等必要设施的试验厂房, 由于一项全机静力试验的全周期通常达数年, 加之后续全机结构疲劳试验的场地需求, 在多个型号研制并行的状态下, 通常需要配备专用试验厂房; 试验设备主要包括加载设备、控制设备、测量设备等, 其中大型全机静力试验的加载点数以百计, 测量点数以万计, 设备需求量极大。因此, 通过技术手段缩短试验周期, 提高硬件资源利用率具有重要意义。

1.4 试验容错率低

由于全机静力试验涉及专业广、加载点数量多、控制通道多、测量规模大、需要多专业协调配合完成, 增加了试验错误的风险, 由此可能造成的试验机损伤、试验周期延误的风险也随之提高。而新机研制对试验节点的要求、试验机及配套资源昂贵等因素决定了试验出错的代价极大, 故而全机静力试验容错率极低。

综上所述, 全机静力试验的特点带来了试验实施及资源协调难度大、效率及试验可靠性要求高、周期要求紧的难题, 且这些难题不局限于技术范畴, 是技术、管理、风险控制等多种因素耦合的结果。因此, 全机静力试验技术的发展应立足试验技术本身, 兼顾试验管理等多种需求, 通过试验技术进步解决上述难题。

2 全机静力试验技术的发展原则

针对上述全机静力试验的特点及面临的难题, 全机静

力试验技术发展的目标是提高试验质量，缩短试验周期，降低试验风险，提高试验效率，同时兼顾专业发展和经济效益。试验技术发展应遵循以下原则。

2.1 型号研制保障优先原则

型号研制是航空业最重要的科研活动，对于国防和经济发展具有重要意义。全机静力试验技术发展应以型号研制保障为首要目标，结合未来可能的研制计划及航空飞行器发展的方向进行技术研发与升级，如远程轰炸机、大型运输机的改装及改型、宽体客机、高超声速飞行器、智能材料飞机等，依据相应国军标及适航标准，做好技术储备，提高型号研制保障能力。

2.2 技术风险可控原则

目前，我国工业技术在快速持续进步，包括信息化、智能化、大数据及工业机器人等大量新技术得到了深入发展、应用及推广。全机静力试验由于容错率低的要求，在试验技术的创新及应用上应基于现有成熟度及可靠性高的工业技术，规避创新发展可能带来的试验风险。

2.3 兼顾经济效益原则

全机静力试验是一项技术活动，在项目管理方面，也具有一定的经济活动特征，试验技术的发展应考虑其应用的经济性、设备的通用性及可维护性等因素，为专业的可持续发展服务。

3 全机静力试验技术的发展思路

依据全机静力试验技术的发展原则，具体发展思路如下。

3.1 面向新飞机的试验设计能力

与全机静力试验技术相关的飞机主要发展方向有新构型、新材料和新工艺。相关试验设计能力包括以下内容。

(1) 针对新构型的试验方案规划。如扁平外形、飞翼布局、超常规机动布局、不同任务配置的运输机改型、新型无人机结构等，如图1所示，试验方案规划应包括基于新构型的试验整体布局、支持加载方案、控制方案等。

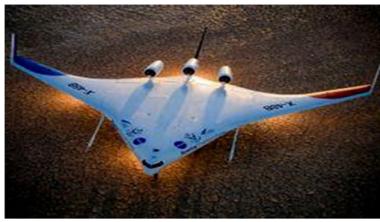


图1 未来飞机概念构型

(2) 针对特殊结构的试验设计能力。如特殊形式进气道、特殊功用起落架、特殊弹仓结构、机翼折叠机构等，如图2所示，依据其载荷特性、结构特性形成相应的特殊



图2 特殊形式进气道

加载模块设计流程及实施指导方案。

(3) 针对新材料的试验技术。如陶瓷基复合材料、新型合金等，包含相应的加载、测量等技术及相应实施工艺，该部分技术应基于成熟的元件级试验技术的升级及应用。

3.2 模块化的试验设计理念

模块化设计技术已广泛应用于多个工业制造领域^[3]，以典型的舰船制造为例，通过模块定义及划分，结合模块化建造，极大地降低了设计建造周期及成本^[4]，如图3所示。采用模块化设计的全机静力试验系统，按照飞机结构，可分为机身模块、机翼模块、发动机模块等，系统的搭建可视作各试验模块的总装；按照试验过程中的通用性，可分为通用模块和专用模块，如主体结构的通用模块，在多个试验工况中频繁调用，特殊结构的专用模块，仅在单个部件试验中调用。



图3 采用模块化建造的大型舰船

采用模块化的试验设计理念，基于并行工程的思想，对模块间接口进行约定，试验设计及制造过程可分块高度并行，通用模块的标准化可提高制造效率，模块的互换性可提高维修性，上述优点可有效缩短试验准备及实施周期。

3.3 先进的试验实施技术

全机静力试验的实施技术主要包括加载、控制、测量技术及相应的现场作业实施。先进的试验实施技术包括以下几个方面。

3.3.1 全电加载

相对于目前全机静力试验中普遍使用的液压缸，电动缸的性能接近，但与液压缸的原理不同，电动缸是将电能转化为机械能，此过程完全由机械结构实现。电动缸在结构、工作环境、精确控制、对周围环境影响以及安装维护

方面均有明显优势，因此电动缸在工程应用中有取代液压缸的趋势^[5]。具体见表1。

表1 电动缸与液压缸的比较

对比项	电动缸	液压缸
结构	结构紧凑，不需要额外的配套结构	结构复杂，需要额外的液压油源、液压阀、液压管路
工作环境要求	受温度波动影响小	受温度影响大
精确控制	具有良好的可控性	控制机理复杂
周围环境的影响	运动平稳，噪声小，无油液泄漏等问题	运行噪声大，经常发生油液泄漏
安装维护	密封性良好，几乎可以做到免维护，安装拆卸方便	需要经常维护，工作量大，成本高

目前，在部分试验中，电动缸已经得到了小规模应用，通过使用过程中暴露的问题与解决及相关经验积累，电动缸的大规模试验应用，甚至实现全电加载，具有较高的可行性。

3.3.2 去线化测控

当前试验测控技术应用会在试验现场产生大量线缆，包括应变测量线、位移测量线、电磁阀线、伺服阀线、传感器线等，大规模应用下，线缆规模巨大，给试验扣重、试验管理、实施作业均带来较大困难。可替代技术包括光纤应变测量、摄影位移测量、分布式控制技术等^[6-8]，上述技术均可有效降低试验现场线缆使用量，提高试验管理水平。其中光纤应变测量、摄影位移测量在某大部件试验、某无人机全机试验中小规模应用，大规模应用具有可行性。

3.3.3 机电化作业方式

当前全机静力试验的现场作业，人力作业仍普遍存在，在试验设计基础上，更多利用机电设备提高作业机电化水平存在较大进步空间。此外，对于部分特殊结构，人工作业难以实施，如飞机进气道内部作业，可引入工业机器人作业，解决此类问题。

3.4 信息化的试验流程管理及设计工具

在当今的信息化时代，产生了包括“透明工厂”、“数字化工厂”在内的很多新概念，信息化的生产管理模式对于生产效率的提升作用显著^[9]。在全机静力试验中，信息化的试验流程管理同样可对试验效率提升产生推动作用，主要包括试验设计流程及进度、技术文件和图纸的生成及传递、硬件设备准备完成情况、试验实时信息、试验总体进展等内容的透明化、信息化管理。目前的TPCP（Test Process Cooperation Platform）实现了部分技术文件及图纸的信息化管理，仍具备较大提升空间。

先进的试验设计工具对于试验技术提升有显著推动作用。当前试验设计工具主要是设计辅助软件，包括载荷处理、杠杆系统设计、加载点设计、测控相关设计等。通过

整合现有的辅助软件，打通软件间数据接口，形成功能完备、可提供“一站式”设计服务的软件工具，可助力试验技术提升。

3.5 试验数据的价值挖潜

全机静力试验数据用于验证、修正飞机结构设计，保证飞机结构强度安全，进行结构强度挖潜，降低飞机重量，以提高飞机性能。对历史数据进行整理，增强试验设计、控制、测量、音像等数据的融合，提高数据检索及利用能力，可对虚拟试验、数字孪生等强度技术领域新的发展方向提供有力支撑。

4 结束语

文章在全机静力试验定位及特点的基础上，提出了全机静力试验技术的发展原则及主要发展思路。在未来的全机静力试验实践中，有些技术可能得以很快应用，有些技术可能需要较长的时间来实现，有些技术可能被证明难以在试验中大规模应用，但这些都是有益的探索，为了我国航空业的发展，为了保障新型号飞机的研制，应该多进行这样的探索。

参考文献

- [1] 强宝平. 全尺寸飞机结构试验技术[J]. 航空科学技术, 2012 (6) : 10-13.
- [2] 中国飞机强度研究所. 航空结构强度技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [3] 刘纪超, 李晓舟, 许金凯. 产品模块化设计方法及其发展趋势[J]. 机电技术, 2015 (3) : 157-160.
- [4] 王玉娟. 轻型护卫舰的模块化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [5] 杨恺. 超大载荷电动缸技术及其在试验机上的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [6] 刘冲冲, 邹翔, 周正仙. 高精度动态光纤应变传感研究[J]. 光子学报, 2016, 45 (11) : 54-59.
- [7] 傅一帆. 分布式光纤应变测试技术工程应用试验研究[J]. 工程质量, 2016, 34 (9) : 56-59.
- [8] 张清勇, 郭永波, 高战朋. 摄影位移测量技术在飞机静力试验中的应用[J]. 测控技术, 2015, 34 (12) : 26-29.
- [9] 熊涛, 孙刚, 孟庆义. 航天器总装中的数字化工厂技术[J]. 航空制造技术, 2010 (23) : 97-100.

作者简介

严冲 (1987—), 男, 陕西乾县人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为结构强度试验技术。

高量值强冲击物理试验测控系统上位机软件设计

杨青春

(中国飞机强度研究所民机全尺寸飞机结构静力/疲劳实验室, 陕西西安 710065)

[摘要] 高量值强冲击物理试验测控系统可以完成试验件及相关产品高速强冲击试验的加载和测试要求。项目建成后, 通过上位机软件和硬件设备的配合, 可按任务要求开展试验件强冲击防护机理的研究, 为拓展试验件的抗毁设计提供完整的解决方案和验证手段, 填补国内高速强冲击试验验证空白。

[关键词] 高量值; 强冲击; 极限撞击试验

[中图分类号] V215.5⁺¹ **[文献标志码]** A

0 引言

高量值强冲击物理试验测控系统可以完成舱音记录仪及相关产品高量值强冲击试验的加载和测试要求, 是一套基于上下位机的具有数据传输、实时监控等功能于一体的非标测控系统。上位机软件主要完成子系统的数据采集、显示、保存, 控制指令的下发等功能^[1-2]。

1 测控系统硬件组成

高量值强冲击物理试验测控系统主要包括强冲击动力发生系统、试验工装系统、气路与管路系统及测控系统, 其组成如图1所示, 实体模型示意图如图2所示。

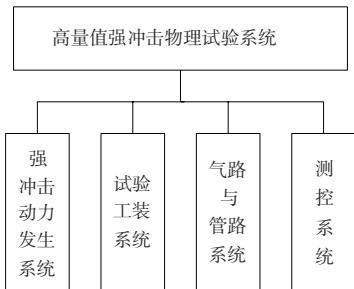


图1 硬件结构拓扑图

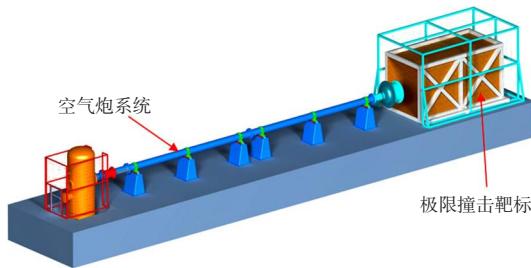


图2 高量值强冲击物理试验系统实体模型示意图

2 测控系统软件设计

程序主体使用 LabView2013 编写, 和下位机 PLC 通过网络通信, 并结合商用软件的设计规范与设计标准, 采用模块化的软件设计技术。

2.1 上位机软件的主要功能

- (1) 空压机压力、主气罐压力、辅助气罐压力设定值下发。
- (2) 自动、手动控制方式的转换。
- (3) 空压机压力、主气罐压力、辅助气罐压力等相关参数采集及保存。
- (4) 和主控 PLC、空压机 PLC、真空泵 PLC 通信, 获取数据并发送指令。
- (5) 采集光幕测试的速度值。
- (6) 试验结果分析、处理, 试验曲线绘制。

上位机软件流程图如图3所示。

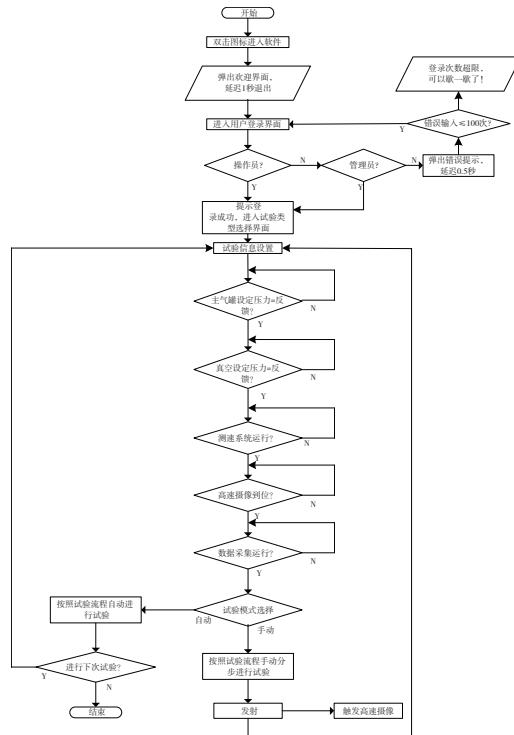


图3 软件流程

2.2 软件模块化设计

上位机软件功能主要包括登录、注销、系统设置、试验控制、试验查询、报表输出等。

2.2.1 软件启动界面

软件启动首先进入启动界面，界面如图4所示。在本界面必须先点击登录按钮进行用户登录，非法用户无法进行后续操作。登录成功后，可以进入系统设置界面、试验控制界面、试验查询界面、报表输出界面等。



图4 用户登录界面

2.2.2 用户管理界面

由启动界面可以进入系统设置界面，具有管理员权限的用户可以再点击“用户管理”按钮，进入用户管理界面，管理员可以添加或删除用户，设定用户的级别。

用户管理界面如图5所示。

用户管理			
No	用户名	密码	权限
1	rwe	*****	操作员
2	操作员	*****	操作员
3	工艺员	*****	工艺员
4	管理员	*****	管理员
5	系统管理员	*****	管理员

用户名: 密码: 更新 权限: 清空

图5 用户管理界面

2.2.3 控制主界面设计

点击图4的“试验控制”按钮，进入系统的试验控制主界面，如图6所示。在本界面主要是对试验过程进行控制，包括试验参数设定、控制、曲线显示、数据保存等。试验控制主界面包括以下几个功能区。

(1) 反馈值区。包括辅助气罐压力、驱动压力、主气罐压力、真空度、压缩机出口压力。

(2) 状态反馈区。包括各个气罐的充气、排气状态以及就绪报警信号，空压机和真空泵的状态信息等。

(3) 试验设备控制区。包括空压机控制、真空泵控制、驱动气罐控制、主气罐控制、发射装置、测距参数等。

(4) 试验过程控制区。包括参数设置、保存记录、报表输出等。

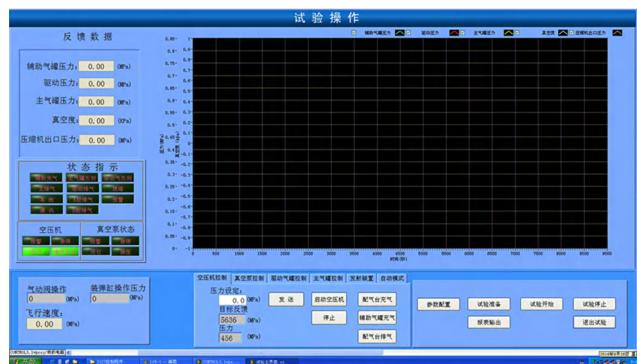


图6 试验控制主界面

2.2.4 试验控制流程

试验准备阶段包括空压机升压、真空泵控制、驱动气罐充气、主气罐充气的准备等工作，准备工作完成后进入发射控制阶段。具体需要操作的内容如下。

(1) 空压机控制。在“空压机控制”页面，输入“压力设定”值，点击“发送”，点击“启动空压机”，空压机开始按压力设定值打压，到达目标值后自动停止。打压过程中如果有紧急情况，可以按“停止”按钮停止打压。在本页面还可以按“配气台充气”“配气台排气”“辅助气罐充气”按钮对配气台和辅助气罐控制。

(2) 真空泵控制。输入“回差设定”值，点击“发送”，可以设置真空泵的回差值。然后输入“真空度设定”值，点击“发送”，点击“启动”，真空泵开始按设定值工作，到达目标值后自动停止。工作过程中如果有问题可以按“停止”按钮。

(3) 驱动气罐控制。驱动气罐在“远程”状态下才可以控制充气。输入“压力设定”值，点击“发送”，点击“充压”，开始按设定值给驱动气罐充气，到达目标值后自动停止。充气过程中如果有紧急情况可以按“排气”按钮排气。

(4) 主气罐控制。输入“压力设定”值，点击“发送”，点击“充压”，开始按设定值给驱动气罐充气，到达目标值后自动停止。

(5) 发射装置控制。在远程状态下可以控制发射装置。点击“发射”，系统自动发射试验件。

(下转第 204 页)

一种冲击射流实验装置的设计

李 杨¹, 王白石², 任江涛²

(1.德阳东汽电站机械制造有限公司, 四川绵竹 618200; 2.西安陕鼓动力股份有限公司, 陕西西安 710000)

[摘要]针对不同温度、不同工况条件的液体, 在进行射流混合时, 其温度场的分布不易分析的情况, 设计了一种冲击射流实验装置, 通过电动机构, 调整测点所在位置, 实现不同液面的温度测量; 加装应变测量装置, 可以反馈并记录在冲击射流实验中, 液体温度混合造成的液体压力变化; 设置窥视窗, 方便对实验进行观察, 实时调整实验进程。采用多种测量、控制系统, 实现实时曲线显示、实时控制显示、历史曲线追忆、棒图显示。

[关键词]冲击射流; 温度场; 液体; 应变测量; 窥视窗

[中图分类号]TK124 **[文献标志码]**A

不同温度的液体, 在进行射流混合时, 其温度场的分布情况较为复杂, 在实际情况下, 不同的工况条件对其分布场有怎样的影响也无法准确估计。为了解不同因素的影响, 有必要建立一种冲击射流实验装置, 用来模拟不同温度、不同条件的液体, 在进行射流混合时, 其温度场的变化及分布情况。

1 实验目的与整体结构

1.1 实验目的

冲击射流实验装置为3路不同温度的水, 在保证要求雷诺数的前提下进行射流混合, 通过测温元件及电动执行机构对混合后的液体在不同层截面的温度场进行测量, 并通过应变片对顶部金属板受到液体冲击的变形量进行测量, 通过相应传感器输出温度场曲线图及对应压力应变图。

1.2 整体结构

实验装置包含3台加热水箱、1台混合冲击射流实验室和1个冷水箱。加热水箱带插入式加热器和液位显示和远传, 根据实验要求可加热不同温度。混合冲击射流实验室内置窥视窗、喷嘴组、测温组件、电动执行机构及应变测试装置。冷水箱带液位显示和远传, 用于收集实验回水, 以便重复利用, 同时保证整个系统水量平衡。整体管道上配置1台主流量泵和3台调节流量泵。主流量泵用于给加热水箱供水, 3台调节流量泵用于给混合冲击射流实验室喷水, 同时保证实验过程中水压的稳定。混合冲击射流实验室与加热水箱之间的管道配套有相应的截止阀和流量计, 用于实验过程中确认和保持系统流量及压力平衡。所有设备均整体撬装在实验台面上, 方便安装, 同时减小占地面积, 如图1~图3所示。

2 实验过程

在设备安装完毕, 确认实验条件具备后, 首先通过

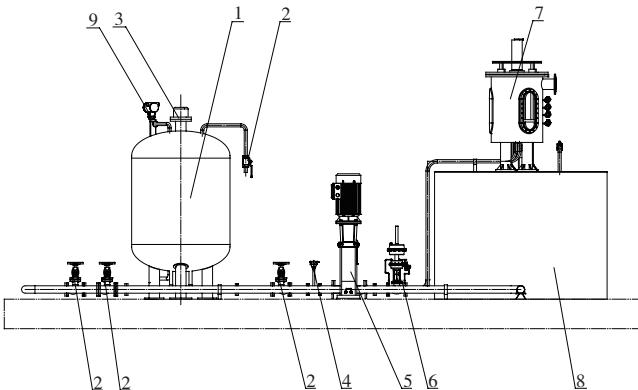


图1 冲击射流实验装置结构示意图

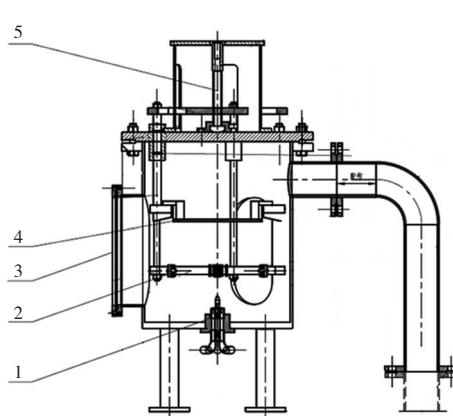


图2 冲击射流实验室结构



图3 冲击射流实验装置实物图

主流量泵向加热水箱补水，待水位达到预定液位后，温度控制系统自动控制电加热进行加热，待各加热水箱达到设定温度后，加热器进入保温状态；系统控制截止阀开启，同时调节流量泵工作，将加热水箱中的水送至冲击射流实验室。同时，系统根据流量计及压力表数据对管路进行实时监测，待对应管路压力、流量达到要求后，冲击射流实验室中的温度测量装置、应变测量片开始工作，同时通过电动执行机构调整温度测量装置位置，对不同液面进行测量，通过相应传感器输出温度场曲线图及对应压力应变图。实验完毕的水进入冷水箱，保证系统水量平衡。实验过程中，实验人员可随时通过冲击射流实验室的窥视窗对整个实验进行直观观察，保证实验顺利进行。

3 系统设计

3.1 设计雷诺数

为保证达到设计雷诺数，结合水量情况，确定对应管道直径，原则上设计雷诺数 Re 大于 120000。具体设计见表 1。

表1 系统设计方案

组别	设计温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	黏度 (Pa·s)	流量 (kg/s)	Re 值
1	50	988.1	0.000548	1	154973.9
	60	983.27	0.000467	1	181853.7
	70	977.85	0.000405	1	209693.1
2	50	988.1	0.000548	1	154973.9
	60	983.27	0.000467	1	181853.7
	60	983.27	0.000467	1	181853.7
3	50	988.1	0.000548	1	154973.9
	50	988.1	0.000548	1	154973.9
	60	983.27	0.000467	1	181853.7
4	40	922.27	0.000655	1	129657.5
	60	983.27	0.000467	1	181853.7
	80	971.88	0.000355	1	239227.3
5	30	995.69	0.0008007	1	106064.3

根据表 1 雷诺数计算结果，设计相应的喷嘴组，选择合适的喷嘴形式及喷嘴尺寸，在设定的流量及压力条件下，使液体在进行冲击射流时，能迅速有效地进行混合，尽可能避免因液体混合不均匀，从而影响到最终的温度场测量结果。同时，在设计喷嘴组时，除了保证液体混合均匀，还需考虑到混合时间，尽量保证在较短时间内完成液体混合，避免时间过长对最终测量结果产生误差。

3.2 系统水量平衡

为保证实验顺利进行，确保有充足的时间对温度场数据进行测量，结合场实际情况，原则上，保证反应器达到稳态后不低于 5min 测量时间。反应器稳态时间按 5min 设计。反应器尺寸为 500mm×700mm，容积 137.4L。系统水量平衡情况见表 2。

表2 系统水量平衡情况

流速 (kg/s)	反应器充满时间 (s)	可运行时间 (min)	水量 (m ³)
0.5	91.6	30	0.9
1.0	45.8	15	0.9
1.5	30.6	10	0.9

3.3 系统热量平衡

结合现场实际情况，为保证系统热量平衡，原则上加热功率控制在 150kW 以内，实验启动阶段不超过 1.5h。经测算系统总水量 3m³/h，进水温度 20℃，平均加热温度 60℃，总共需要 140kW。1.5h 则需要 93kW。系统热量平衡情况见表 3。

表3 系统热量平衡情况

组别	进水 T (℃)	一段加热			二段加热		
		加热 T (℃)	功率 (kW)	时长 (min)	加热 T (℃)	功率 (kW)	时长 (min)
1	20	50	30	60	5	0	—
	20	50	30	60	70	60	20
2	20	50	30	60	50	0	—
	20	50	30	60	60	60	10
3	20	50	30	60	50	0	—
	20	50	30	60	60	40	15
4	20	40	30	40	40	0	40
	20	40	30	40	60	30	40
5	20	30	30	20	30	0	—
	20	30	30	20	6	30	60
	20	30	30	20	90	60	60

按照表 3 中功率分布情况，按照低温加热器 30kW、中温加热器 40kW、高温加热器 60kW 设计。

4 系统控制

3 台加热水箱根据设置温度进行加热、恒温控制。当水温达到要求，可人为进行加热电源关闭，或当水泵启动亦或液位下降，加热器也会切断电源，保护加热装置。3 台加热水箱后分别设置水泵 + 调节阀 + 流量计，调节阀和流量计形成闭环控制，通过控制器设定的流量进行流量调节和控制，达到 3 路水的流量同时具备实验条件，进入射流混合反应器。

反应器测温元件为单层布置，可根据实验要求高度由电机、传动机构上下移动；同时喷射嘴周围设置有固定测温元件，达到测量温度场分布的实验要求。

3 台加热水箱恒温控制及水箱后热水流量回路控制，采用 2 台多路彩色调节无纸记录仪实现加热温控及阀门

(下转第 204 页)

水陆两栖飞机全机静力试验随动支持技术研究及应用

何月洲, 严冲

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳实验室, 陕西西安 710065)

[摘要] 大型水陆两栖飞机兼顾水陆两用, 主起落架多为双轮高支柱结构, 结构柔性大。在全机静力试验中, 主起落架多为全机支持主要部位。双轮高支柱起落架因其受载变形大, 对支持设计带来了较大困难。文章在以往试验起落架加载与支持技术的基础上, 研发了起落架随动支持技术, 并研制了相应装置, 已成功应用于国产大型水陆两栖飞机 AG600 全机静力试验中。

[关键词] 水陆两栖飞机; 高支柱主起落架; 全机静力试验; 随动支持

[中图分类号] V216.1 **[文献标志码]** A

1 存在的问题

全机静力试验是研究、验证与鉴定飞机结构在静载荷作用下其静强度特性的一种最可靠和有效的方法, 是飞机设计、制造生产和设计定型所必须和无法替代的重要环节之一^[1]。我国现行的军机强度规范^[2]及民用航空规章^[3]均强制要求进行全机结构静力试验。在全机静力试验中, 主起落架试验工况具有载荷量级大、载荷工况多、试验换装频繁等特点。同时由于主起落架本身相对其他飞机结构刚度大、承载能力强的特点, 也是全机静力试验中支持飞机的首选约束部位^[4-5]。目前国内对中小型陆上飞机的主起落架全机支持技术研究较成熟, 对于水陆两栖飞机的全机静力试验的支持研究还很匮乏, 针对 AG600 飞机主起落架为双轮高支柱超静定结构, 紧贴 V 型船底机身结构两侧, 较陆上飞机具有高支柱造成的结构柔性的特点, 同时水陆两用, 使用任务复杂、载荷工况多, 根据考核要求设置的飞机约束形式多, 在全机试验过程中需多次更换支持/加载形式^[6], 试验实施困难、风险大。主要存在以下问题。

(1) 高支柱起落架的双轮联合约束问题。双轮高支柱结构的起落架与机身距离近, 约束装置设计空间小且垂向力线与支柱重叠, 正确地将双假轮联合约束同时避开起落架支柱是设计的一个关键。

(2) 大变形下垂向载荷精确监控的问题。按照 CCAR25 部 25.301 载荷条款(c) 的要求, 如果载荷作用下的变形会显著改变外部载荷或内部载荷的分布, 则必须考虑载荷分布变化的影响。设计需充分考虑高支柱起落架大载荷下大变形要求, 需研究可靠、低阻性能好的随动方法, 降低大变形对约束点载荷的影响。

(3) 起落架的支持/加载快速换装问题。大型水陆两

栖飞机采用双轮高支柱起落架和机身船底结构, 机身下方要保证足够的水载荷加载空间, 需将试验机支持高度提高(支持高度需求 6m 以上), 对全机悬空静定支持提出了更高的要求。同时由于 AG600 飞机体积大、重量大, 支持与加载的频繁换装也是整个试验项目重点和难点。

本文根据大型飞机全机静力试验特点, 针对以上问题, 在总结以往型号试验技术和经验的基础上, 跟踪世界先进技术, 提出了起落架垂向随动支持及加载一体化设计思路, 利用框架式传载及双轮分载技术、低阻随动技术、自平衡平动加载装置结构, 研发了适用于全机静力试验的双轮高支柱起落架垂向随动加载与支持一体化装置, 解决了大型水陆两栖飞机全机悬空静定随动支持、换装试验支持、试验机姿态调整等多项难题。

2 起落架随动支持技术

全机静力试验中, 主起落架随动支持的主要要求是为全机提供安全可靠的独立约束, 不对其他约束产生附加约束。根据试验技术要求, 本文在严冲等提出的起落架随动加载装置^[7]基础上进行了改进, 提出了一种随动支持及加载一体化装置设计, 分为三大部件: 传载结构、随动结构、机械加载/支持机构。其中, 传载结构连接起落架假轮, 实现双轮起落架载荷传递; 随动结构位于传载结构与机械加载机构之间, 实现传载结构的低阻随动; 机械加载机构通过作动筒实现垂向位移控制, 通过锁止机构实现支持的功能。随动加载/支持一体化装置结构原理见图 1。

2.1 随动技术原理

本文所述水平随动原理依据杜星等人提出的一种起落架随动加载方法原理^[8], 使得加载装置在垂向受力过程中能够根据起落架的变形而自动调整, 始终保持垂向方向。

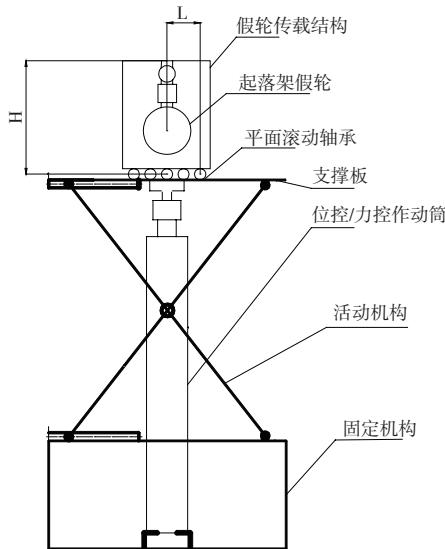


图1 随动加载/支持一体化装置结构原理图

随动加载装置受力如图2所示，在正压力 P 、牵引力 F_N 、法向支持力 F_N 及平面随动机构总摩擦力 F_s 的作用下处于临界平衡位置，钢珠数量为 n ，半径为 r ，钢珠滚动摩阻系数为 δ 。此时垂向随动加载装置有向右运动趋势，忽略设备自重，可得 $F=F_s=\sum_{i=1}^n F_{si}=P\delta/r$ 。若牵引力 F 大于摩擦力，则垂向随动加载装置开始向右移动。

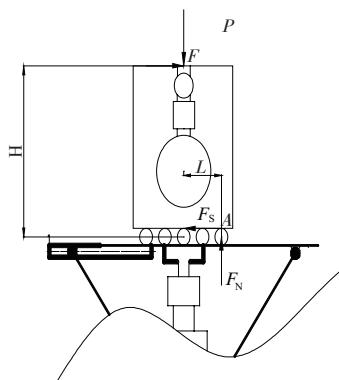


图2 随动加载装置受力分析

2.2 随动支持原理

支撑结构采用高承载四剪刀臂结构，剪刀臂均采用一端铰支、另一端简支的形式。该结构的几何特性可保证垂向变形时可随作动筒升降，升降过程中顶面保持水平。结构可自平衡水平随动位移产生的偏心矩，受力分析如图3所示。在起落架支柱与内置加载作动筒处于共线时， $e=0$ ；试验过程中，作动筒处于固定状态，垂向力为 P ，随动传载结构随起落架受载变形发生移动，即偏移量 e 变大，此时会对支撑板结构产生偏心矩 M ， $M=Pe$ 。该偏心矩由剪刀臂结构传递到固定机构。结构稳定则需满足：
① $\sum M = f(P, P_1, e) + f(F_1, F_2, L) = 0$ ；② $\sum F = f(P,$

$$P_1, F_1, F_2,) = 0.$$

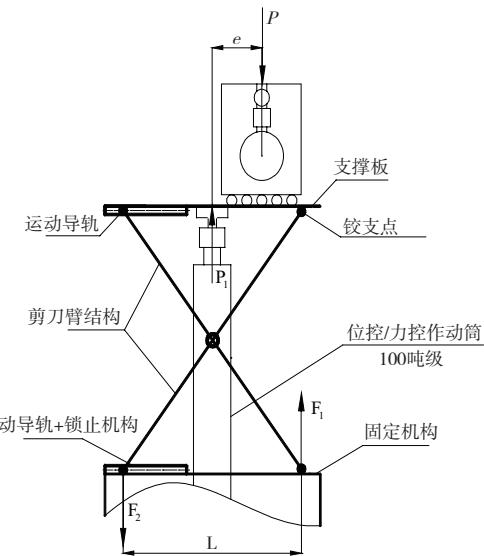


图3 结构加载/支持受力分析

剪刀臂简支端设置限位装置，当装置作为试验支持时，剪刀臂简支端限位销锁止，限制简支端水平位移，使结构可承受垂向载荷，限定垂向位移，起到垂向约束作用。同时通过水平随动结构不附加航向 / 侧向约束，实现了独立的垂向约束。为满足不同支持高度需求，限位销采用长度可调的螺套结构，滑动导轨上分布等间距限位槽，限位销设计的最大调节量大于限位槽间距，可使装置在行程内任意位置处于锁止状态，如图4所示。

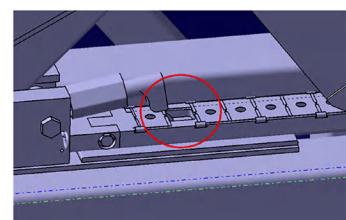


图4 剪刀臂限位机构

2.3 假轮传载结构设计原理

采用框架式传载结构作为小空间双轮起落架垂向载荷联合施加平台，通过框架及复合杠杆系统以拉向加载方式实现起落架大载荷受载，保证试验稳定性，以杠杆原理满足所有试验工况双轮载荷分配，如图5所示。

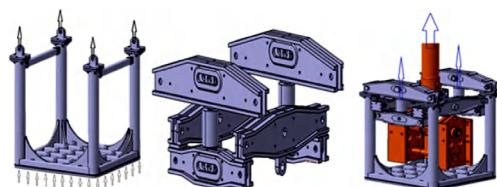


图5 假轮传载结构

2.4 支持/加载换装

对于起落架支持 / 加载快速换装问题，在试验过程中，作为试验机支持，采用剪刀臂限位机构，在试验机姿态调整中利用内置作动筒进行位移控制。同时内置作动筒还可以用于起落架载荷的主动施加，实现了约束、加载状态的灵活、快速转变。由于 AG600 飞机静力试验机重量主要在主起部位，通过加装 / 支持一体化装置内置位控作动筒，可实现不同支持状态下的飞机重量安全、快速转换，有效提高了试验效率。AG600 飞机试验机吊装和换装支持夹具流程见图 6。

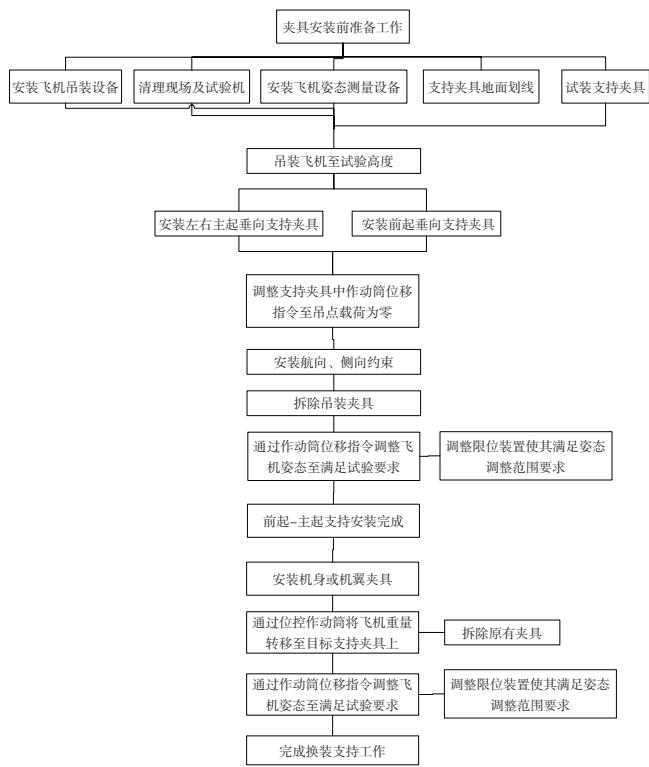


图6 试验机吊装和换装支持夹具流程

3 工程应用

本文所述装置已成功应用于 AG600 飞机全机静力试验支持及起落架静力试验项目。在全机试验支持中，限位销的锁止功能保证了试验支持的安全有效。在全机静力试验工况中，作为静定约束，约束点载荷误差有效控制在 5kN 以内，数据见图 7，满足试验需求；通过与内置作动筒的配合，多次实现飞机姿态的顺利调整；在主起落架试验工况间缓冲器压缩量调整中，可任意位置锁止的功能保证了现场作业的顺利进行。

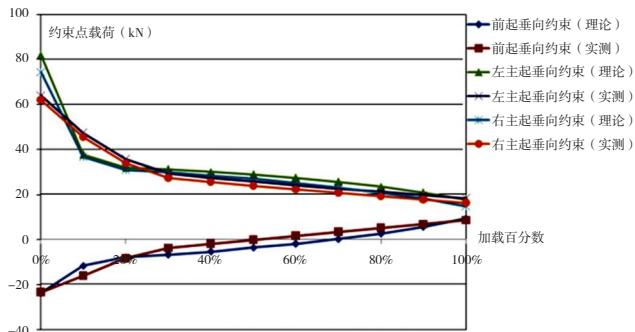


图7 AG600某试验工况约束点载荷误差

4 总结与展望

主起落架随动支持技术解决了大型飞机起落架垂向随动全机悬空静定支持、支持与加载快速换装等技术问题，提升了我国大型飞机全机静力试验的能力和水平，具有较高的工程应用价值，对其他大中型飞机全机静力试验中随动加载和支持方案设计有借鉴意义。

参考文献

- [1] 中华人民共和国航空行业标准：飞机结构静强度试验通用要求[S].
- [2] 中华人民共和国国家军用标准：军用飞机强度规范[S].
- [3] 中国民用航空章程第25部运输类飞机适航标准：CCAR-25-R4, [R]. 2011.
- [4] 刘权良, 尹伟, 夏峰. 飞机结构静强度试验支持方案的确定[J]. 航空科学技术, 2012 (5) : 32-35.
- [5] 强宝平. 飞机结构强度地面试验[M]. 航空工业出版社, 2014.
- [6] 何月洲, 赵洪伟. 水陆两栖飞机静强度试验悬空支持技术研究及应用[J]. 工程与试验, 2018, 58 (4) : 98-101, 105.
- [7] 严冲, 何月洲. 水陆两栖飞机静力试验起落架随动加载装置设计[J]. 工程与试验, 2019, 59 (4) : 120-124.
- [8] 杜星, 冯建民, 贺谦. 全机结构试验起落架随动加载技术研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (2) : 288-292.

作者简介

何月洲（1980—），男，河北唐山人，硕士研究生，高级工程师，主要从事飞机结构强度试验技术研究工作。

制作石墨辐射热流标定设备方法的研究

柴 蔚, 张佳斌, 郑 瑶

(中航工业飞机强度研究所四室, 陕西西安 710065)

[摘要] 20世纪60年代开始, 受到航空、航天技术发展需求和国防重大工程的牵引, 地面试验技术得到大力发展, 热流测量技术也得到相应发展, 但当前标定能力还不能满足热试验中热流密度测量的需要, 因此亟待开发响应能力。文章通过研究标定原理、筛选辐射热源, 研究传递过程, 形成相应的标定方法。并通过设计、搭建, 研制出可标定至 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 以上的热流标定平台, 最后通过对 $1\text{MW}/\text{m}^2$ 和 $1.5\text{MW}/\text{m}^2$ 的传感器标定试验, 分析了当前热流密度传感器的线性相关度和不确定度。

[关键词] 辐射标定; 石墨加热; 角系数

[中图分类号] TN03; TB34 **[文献标志码]** A

热流测量传感器的标定对于提高气动热与热防护试验中热流测量结果的准确度和可靠性, 促进热流测量的标准化是十分重要的。通过热流测量传感器的标定, 可以达到两个方面的目的: 一是通过标定, 确定热流传感器的响应特性和转换系数, 为各种测热技术提供标定手段, 帮助提高气动热与热防护试验热流测量的准确性; 二是通过标定, 实现热流测量向已有测量标准的溯源, 提高热流传感器的测量精度, 帮助建立热流测量的标准程序, 实现热流测量的标准化。

随着飞行器技术的发展, 对地面热强度试验验证技术也提出了更高的要求。其中对热流密度的测量上限要求提升到 $1 \sim 2\text{MW}/\text{m}^2$ 。为满足以上需求, 亟待建立标定能力不低于 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 的热流密度传感器标定/校准设备。

1 辐射标定原理

热流测量传感器的标定技术大体可以分为直接标定法和比较标定法两种。其中, 直接标定法中最广泛应用的是黑体辐射标定, 即实现热流密度向温度测量标准的溯源。比对标定方法是在直接标定的基础上, 将待标定传感器和标准传感器置于同一热流环境中, 将两者的测量结果进行比, 从而完成标定。

为保证溯源的一致性, 比较标定法一般选用辐射源作为间接溯源的方法完成标定, 其方法如图1所示。使用标准热流传感器来确定入射的基准热流, 将标准热流传感器与被校的辐射热流传感器同时置于稳定的辐射源下, 进行比较。通过标准热流传感器测出热流值和被校准热流传感器的输出值, 随着辐射源的调控改变辐射热流值, 标准热流传感器和待标定热流传感器将获得一系列的对应标定输

出结果。

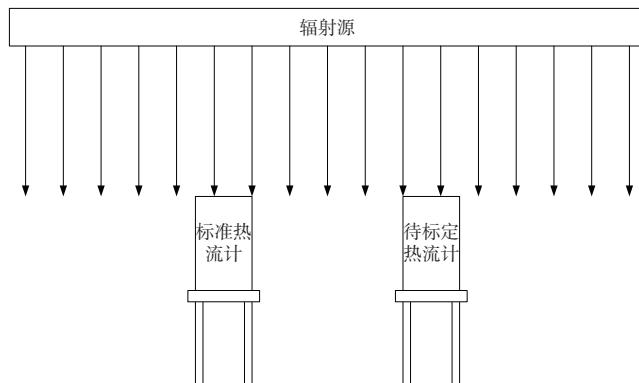


图1 标准辐射源的系统结构示意图

2 辐射源选定

按照比对法标定原理可选用的加热方案: 电弧作为热源、石英灯作为热源, 或石墨布和石墨板等作为热源。选择热流密度传感器标定台的加热方案时, 热源的辐射均匀特性、热源的稳定特性、热源误差的可量化特性等均为重要考核对象。

2.1 弧象热源分析

当高压电通过距离很近的两个电极后, 会产生一个电弧。将以上电弧作为加热源即是弧象热源的原理, 其装置如图2所示, 两块抛物面镜将电弧能量聚焦到测量传感器表面。

这种热源存在以下几个问题: 首先, 由于电弧是一个点源, 能量分布并不均匀; 其次, 镜面的能量损失无法估计, 因此不同部位的辐射是无法计算的; 另外, 电弧的阴影造成的影响也可能带来不可预估的误差。综上无法对这种方法出现的误差进行理论分析, 所以用这种系统作为标准

热源是不可行的。

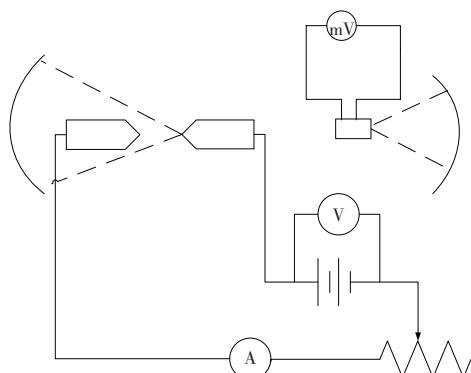


图2 弧象作热源示意图

2.2 石英灯热源分析

石英灯做热源有两种布置方法，第一种方法如图3所示，石英灯发光发热后通过反射镜聚焦于光学积分器，再照射到热流传感器上。第二种方法如图4所示，将石英灯管平行并排着，下面放着一个挡板，当石英灯组通电之后快速撤掉称之为快门的挡板，使标准热流传感器及被校准产品热流计同时受光照。

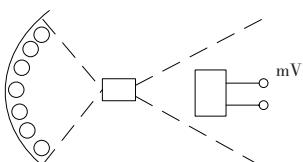


图3 石英灯组做热源

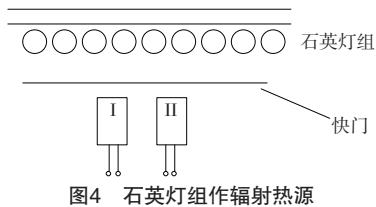


图4 石英灯组作辐射热源

以上辐射热源同样存在热场不均匀和输出不稳定的问题，另外实验表明，这种热源达到动态平衡需要耗费大量时间，而且石英灯的加热能力有限，无法实现 $2\text{MW}/\text{m}^2$ 的热量加载。综上，石英灯热源不适合作为本次搭建平台的热源。

2.3 碳布热源分析

为解决热源不均匀性，可采用两个电极加持一块碳布，通电之后碳布在短路状态工作，产生高温向外辐射，从而进行加热。但受到碳布的加工工艺的限制，在碳布厚度不均匀区域或当碳布局局部坏损时，则热源表面会产生显著的温度梯度，即会造成不均匀辐射热流。另外以上加热系统性能稳定性较弱，当周围环境发生变动或输入功率受到干扰时，辐射热流也会随之产生显著扰动。

2.4 石墨板热源分析

为使热源更加可靠、稳定地工作，采用石墨平板代替碳布作为辐射源，在石墨平板的两边用水冷电极夹持，通电后石墨平板在短路状态下工作，产生大量热量，其加热器样式如图5所示。通过试验分析可知，热源分布与石墨板两端的冷却情况有关。另外，加热器辐射的热流的大小与每次装配情况有关。针对以上问题，可通过适当加长石墨板尺寸，降低受冷却影响的低温区域对中心高温区域的影响，从而达到均匀热场的目的。而且，连接电极与石墨板之间的面接触改变为点接触也有利于提高中心区域的温度均匀性。另外，通过经验统计固化安装石墨板的工艺要求，可降低因安装的不一致对热流输出产生的稳定干扰。

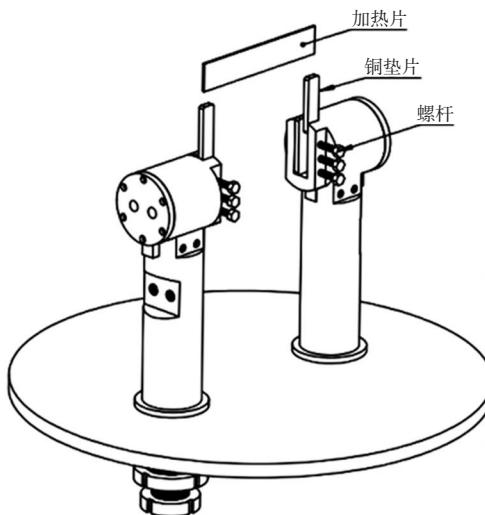


图5 石墨板作为热源结构

综上，确定水冷电极夹持石墨板为本次标定台的加热器设计方案。

3 平台设计

3.1 角系数及功率计算

3.1.1 角系数

如图6所示，设石墨板辐射面为 A_p ，传感器表面为 A_s ，传感器与石墨板平行且像距为 D ，石墨板与传感器表面之间的角度系数为 F_{sp} ，辐射热流计受热感应面的半径为 R ，石墨平板的长为 l 、宽为 w 。为计算角度系数 F_{sp} ，采用直角三角形分割法将石墨平板的表面按图6分割为8个直角三角形。设传感器表面 A_s 的面积为 A_1 ，直角三角形的两条直角边长分别为 L_1 和 L_2 ，且 $L_1=l/2$, $L_2=w/2$ ，分割出的直角三角形的表面积分别为 A_2 和 A_3 ，则 A_1 对 A_2 的角度系数 F_{12} 可由式(1)推导而出，同理可以推导出 A_1 对 A_3 的角度系数 F_{13} 。辐射热流计受热感应面对石墨平板

的角度系数 F_{sp} 与 F_{12} 和 F_{13} 之间的关系可表达为式 (2)。

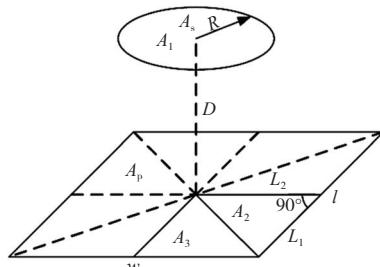


图6 直角三角形分割法示意图

$$F_{12} = \frac{D^2}{4\pi R^2} \left[\frac{L_1 L_2}{D^2} + \left(1 + \frac{R^2}{D^2} \right) \arctan \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \right] \quad (1)$$

$$- \int_0^{\arctan \left(\frac{L_1}{L_2} \right)} \frac{L_2}{D^2} \sqrt{\left(\frac{D^2}{L_2^2} + \frac{R^2}{L_2^2} + \sec^2 \phi \right)^2 - 4 \frac{R^2}{L_2^2} \sec^2 \phi} d\phi \quad (2)$$

$$F_{sp} = 4 (F_{12} + F_{13})$$

本项目设计中设计的石墨板尺寸长 l 为 200mm, 宽 w 为 60mm, 参考国标 JJG 163—2019 中传感器的标定距离 D 为 10mm, 通过计算辐射热流计受热感应面对石墨平板的

角度系数 F_{sp} 约为 0.9。

3.1.2 功率计算

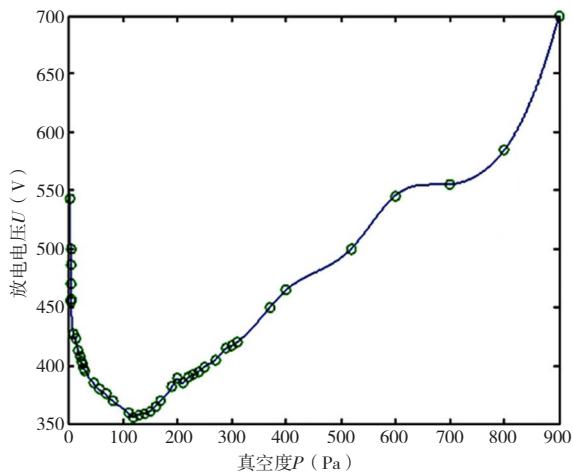
石墨的辐射能密量 q 与石墨片的温度有关, 可表达为斯蒂芬 - 波尔兹曼公式:

$$q = \sigma \varepsilon T^4 \quad (3)$$

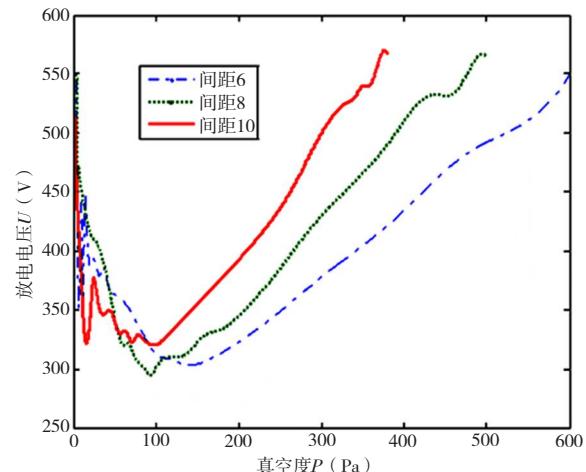
式中, q 为设计功率密度; σ 为波尔兹曼常数, 取值 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为石墨平板的表面发射率, 取值 0.85。则在石墨温度达到 2265°C 时即可满足 $2.0 \text{ MW}/\text{m}^2$ 的功率设计要求, 而实际石墨最高可加热至 3000°C 左右, 即理论上可实现 $4 \text{ MW}/\text{m}^2$ 左右。另外, 石墨板有效面积为 0.012 m^2 , 预计需要的功率约为 24kW, 则设备预配置的 50kW 是满足功率要求的。

3.2 安全措施

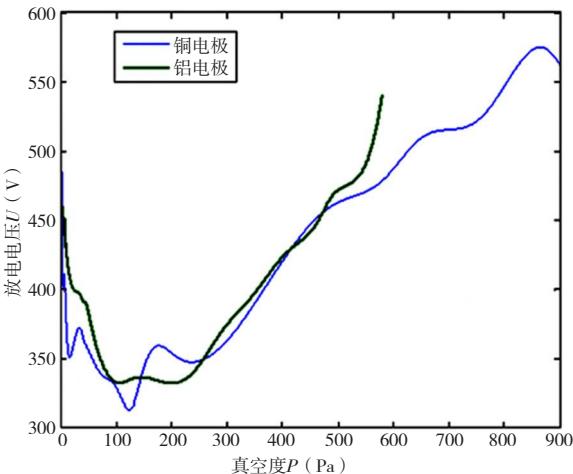
石墨加热器的电力应用存在一些不安全因素, 首先, 大功率高压供电使周边工作人员处于电力高压的风险之中; 其次, 石墨加热电极在真空环境下产生电弧, 对标准



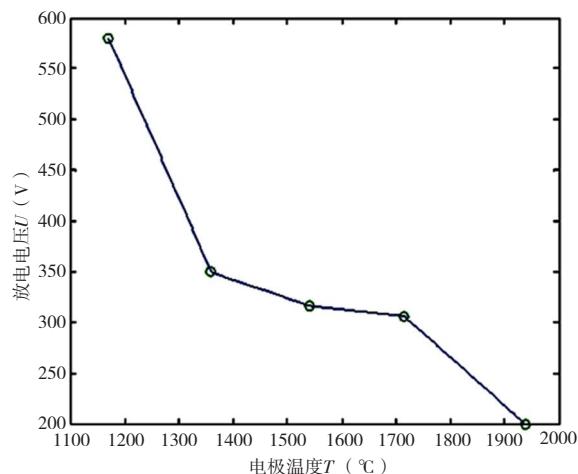
(a) 放电电压与真空度的关系



(b) 电极间距与放电电压之间的关系



(c) 电极材料、真空度与放电电压之间的关系



(d) 电极温度与放电电压之间的关系

图7 放电电压与各因素间的关系

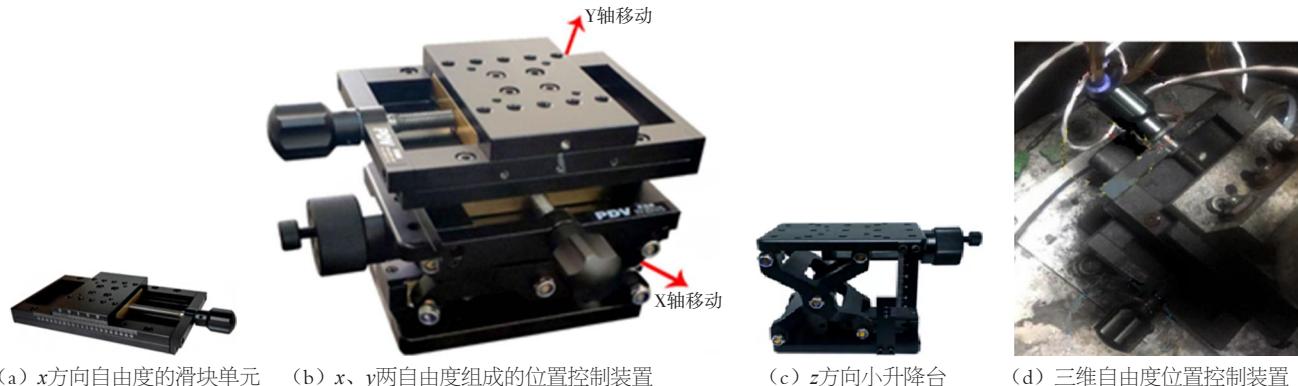


图8 三维自由度位置控制装置

传感器和仪器电极的完好存在隐患；最后，电极与壳体之间的漏电同样对操作人员人身安全构成威胁。针对以上不安全因素提出以下解决方案。

(1) 使用变电器，在不改变功率的前提下，将高压低电流供电改进为大电流低电压供电，电极两端采用24V安全电压供电，保证工作人员即使同时触摸两个电极也不会发生触电现象。

(2) 石墨的放电特性与电极间距、电极材料、环境真空度和电极温度等因素均相关。放电电压与以上因素间的关系如图7所示。分析以上影响因素和影响结果，选择工作真空度为0.02MPa，增加电极间距即可实现降低放电风险的目的，而且通过抽真空还可减慢石墨板的氧化速度。

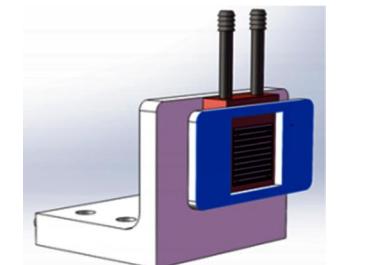
(3) 采用聚四氟乙烯作为绝缘性材料，聚四氟乙烯有良好的流动性，可涂抹在电极与壳体之间，形成均匀的绝缘保护层。另外，该材料具备一定的耐温属性，可使保护层在不低于180°C的温度下仍具有良好的绝缘性能。

3.3 位置控制与安装装置

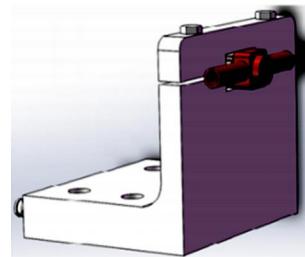
考虑到传感器外形的多样性和尺寸大小的多样性，传感器相对加热热源的位置需要具备三维自由度的可调节性。另外，热流传感器的外形也多种多样，因此需要设计不同传感器夹持安装装置。

针对三维自由度位置控制装置，可采用滑块与小升降台叠加的方式实现，如图8所示。

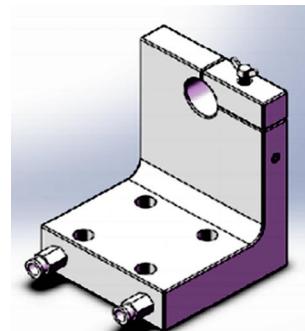
本系统提供多样的抓头组件，满足对平板型热流计、圆柱型热流传感器、异型热流传感器等不同结构传感器的固定，样式如图9所示。传感器安装装置的抓头上带有螺钉松紧，可调节安装尺寸，满足不同尺寸的传感器安装。所有抓头均采用铝质金属，并带直径为8mm的水路通道，起到良好的散热效果。



(a) 薄膜型(含水冷)热流计抓头三维图



(b) 异形热流计抓头三维图



(c) 圆柱形热流计抓头三维图

图9 传感器安装装置的抓头

4 工程应用

4.1 工程试验

标定试验的流程如图10所示。试验前首先开启水冷设备，水冷充足的情况下，关闭炉体上盖，抽取真空至目标

真真空度，最后在控制系统的控制下，由变电器向石墨加热器提供功率，石墨发热后产生辐射，对标标准热流计测量所得热流和待标定热流计的输出电压，即可得到待标定热流计的灵敏度系数和传感器的精度特性。

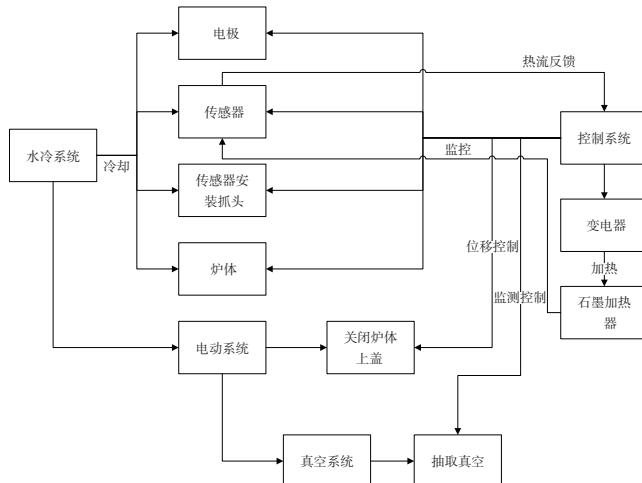


图10 标定试验流程

4.2 试验数据

4.2.1 线性度分析

按以上试验步骤完成量程 $1.5\text{MW}/\text{m}^2$ 的热流密度传感器（1#）和量程 $1\text{MW}/\text{m}^2$ 的热流密度传感器（2#）的标定工作，结果如图11所示。

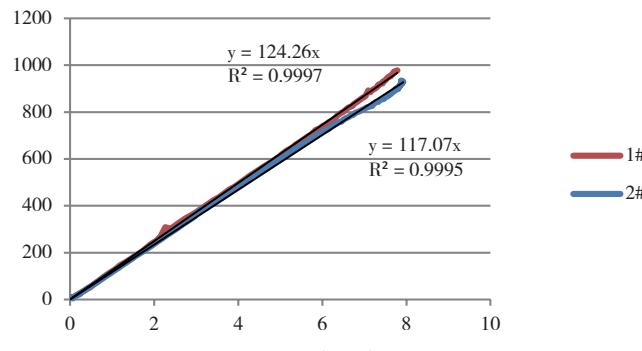


图11 标定曲线

由图11可见，1# 和2# 热流密度传感器的线性相关度均在0.999以上，线性度良好。经多次试验后传感器工作稳定，性能良好。

4.2.2 不确定度分析

影响标定结果的不确定度分量包括：被标定热流密度传感器测量重复性引入的标准不确定度分量 μ_1 ，标准热流密度传感器测量重复性引入的不确定分量 μ_2 ，辐射热流输出稳定性引入的标准不确定分量 μ_3 ，辐射热流输出均匀性引入的标准不确定分量 μ_4 ，数据采集系统引入的标准不确定度分量 μ_5 。

1# 和2# 热流密度传感器在 $500\text{kW}/\text{m}^2$ 环境下的测量

结果见表1。根据赛贝尔公式对测量结果进行分析，统计重复性引入的标准不确定度分量 μ_1 ，其中，1# 热流计的重复性不确定度分量为 $0.868\text{kW}/\text{m}^2$ ，2# 热流计的重复性不确定度分量为 $0.564\text{kW}/\text{m}^2$ 。

表1 1#和2#热流计在 $500\text{kW}/\text{m}^2$ 环境下测量结果

测量次数	2#	1#
1	500.6	500.8
2	501.0	500.2
3	498.3	497.9
4	498.9	499.8
5	497.1	498.9
6	497.8	498.9
7	496.7	498.0
8	497.0	498.2
9	497.3	498.8
10	497.6	499.7

标准热流传感器测量重复性引入的不确定分量 μ_2 ，本次比对采用标准辐射热流传感器量程为 $980.4\text{kW}/\text{m}^2$ ，不确定度为 3% ($k=2$)，经计算可知不确定分量 μ_2 为 $14.706\text{kW}/\text{m}^2$ 。

辐射热流输出稳定性引入的标准不确定分量 μ_3 的计算参考，本系统参数：石墨片稳定输出后热流密度的稳定性不大于 $0.5\%q/\text{min}$ 。以上参数的概率分布为均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，可得到不确定度 μ_3 为 $2.8\text{kW}/\text{m}^2$ 。

辐射热流输出均匀性引入的标准不确定分量 μ_4 的计算，参考热流输出均匀性 $\leq 1\%$ ，按均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，可得到不确定度 μ_4 为 $5.7\text{kW}/\text{m}^2$ 。

根据数据采集系统引入的标准不确定分量 μ_5 的计算，参考数据采集器的最大引入允差，按均匀分布考虑，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，可得到标准不确定度 μ_5 为 $0.3\text{kW}/\text{m}^2$ 。

综上所述，本系统的不确定度由各部分组成，合成标准系统不确定度计算方法如式(4)所示。

$$\mu_c = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_4^2 + \mu_5^2} \quad (4)$$

取其95%的置信空间，令 $k=2$ ，则1# 热流密度传感器的扩展不确定度为 $32.09\text{kW}/\text{m}^2$ ，2# 热流密度传感器的扩展不确定度为 $32.06\text{kW}/\text{m}^2$ 。

5 结语

文章论述了辐射环境下比对法的标定原理，对比各种热源的均匀性和误差可预估性，筛选出石墨板作为电阻热源；通过计算加热器的角系数和加热能力，确认施加功率满足标定要求；设计三维位置调整模块，满足传感器位置调整的需求；根据当前市场传感器外形设计传感器安装装置的抓头，实现不同外形传感器的辐射比对标定。最后通

过比对标定试验分析了1#和2#热流密度传感器的线性度与不确定度,为建立辐射比对标定能力提供技术支持。

参考文献

- [1] 刘初平. 气动热与热防护试验热流测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 国防科工委科技与质量司. 热学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

(上接第193页)

(6) 测距参数设置。测距参数主要是指光幕的安装距离,是激光测距传感器的重要参数。在试验现场安装好传感器,经过实际测量后输入测控系统软件,用于试验完成后试验件经过传感器时飞行速度的计算。

3 结语

通过上下位机结合的设计思路,依托试验台的硬件设备,完成了任务目标,实现了高量值、强冲击试验和高速极限撞击试验工作,为拓展高量值防护记录器的抗毁设计提供完整的解决方案和验证手段,填补了国内高量值强冲击试验验证空白。

(上接第195页)

流量调节控制),采用人工智能算式,仪表启动自整定功能,可以根据被控对象的特性,自动寻找最优参数以达到很好的控制效果,无需人工整定参数;具备RS485通信接口,以太网接口。

实验装置系统其他检测仪表信号接入1台多通道彩色无纸记录仪,可组态选择输入,包括标准电压、标准电流、热电偶、热电阻、毫伏等。根据需要可带多路报警输出或模拟量变送输出,具备RS485通信接口、以太网接口。具有强大的显示功能,包括实时曲线显示、实时控制显示、历史曲线追忆、棒图显示、报警状态显示。

实验装置现场设置1面仪控操作箱,前面板集成安装多路彩色调节无纸记录仪及多路彩色无纸记录仪,实现实验装置的数据采集显示、记录、报警、数据通信及温度、流量回路调节控制功能。

5 结束语

(1) 设计了一种冲击射流实验装置,可以模拟并测量多种工况下,不同温度流体混合后温度场分布情况。采用电动

- [3] 董磊, 杨永军, 蔡静. 利用平板炉校准辐射热流计时角系数影响的分析[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 4.
- [4] 辐射热流传感器: JJG 163—2019[S].

作者简介

柴葳(1989—),女,浙江舟山人,本科,工程师,主要研究方向为热强度测控技术。

参考文献

- [1] 吕济民. 大型多阶段任务系统可靠性的模块化分析方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [2] 郝丽, 赵伟. LabVIEW虚拟仪器设计及应用——程序设计、数据采集、硬件控制与信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.

作者简介

杨青春(1976—),男,陕西西安人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为非标测控和飞机结构静强度/疲劳试验控制。

执行机构,可以在同一实验过程中,同时对不同层截面温度场分布情况进行测量。加装应变测量装置,可以反馈并记录在冲击射流实验中,液体温度混合造成的液体压力变化。

(2) 实验装置采用多种测量、控制系统,可以实现实时曲线显示、实时控制显示、历史曲线追忆、棒图显示等,通用性强,操作面板直观方便。同时冲击射流实验室装设了窥视窗,实验人员可以在整个实验过程中,直观观察到整个实验情况,对实验过程进行有效把控。

参考文献

- [1] 徐惊雷, 徐忠, 肖敏, 等. 冲击射流的研究概述[J]. 力学与实践, 1999(6): 8–17.
- [2] 耿铁, 李德群, 周华民, 等. 冲击射流及其强化换热的研究进展[J]. 机械设计与制造, 2006(6): 154–156.

作者简介

李杨(1988—),男,四川什邡人,本科,工程师,主要研究方向为机械设计、热交换器设计、汽轮机辅机设计。

《设备管理与维修》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会和北京卓众出版有限公司共同主办的,是中国学术期刊综合评价数据库源泉期刊,1980年创刊,全国发行,发行覆盖广,数量大,是设备工程领域权威专业杂志。



扫描二维码
获取本刊最新资讯



《设备管理与维修》杂志 2020年开启全媒体时代

为客户——预见商业未来
为读者——传播科技新知
为企业——寻求解决方案

合作媒体:



[广告]

国际标准连续出版物号:ISSN 1001-0599 国内统一连续出版物号:CN 11-2503/F 邮发代号:2-395 联系电话:010-64000280

今日制造 MT

全媒体平台 · 一体化传播

“网”罗
智造新动态



网站



微信

多“微”度
展现智造新视角



“微”
言大意



微博



小程序

随时随地
刷新智造头条

“今日头条号” “一点资讯号” 等更多媒体平台
陆续开通建设中，敬请期待……

机电商报
Machinery & Electronics Business
[广告]