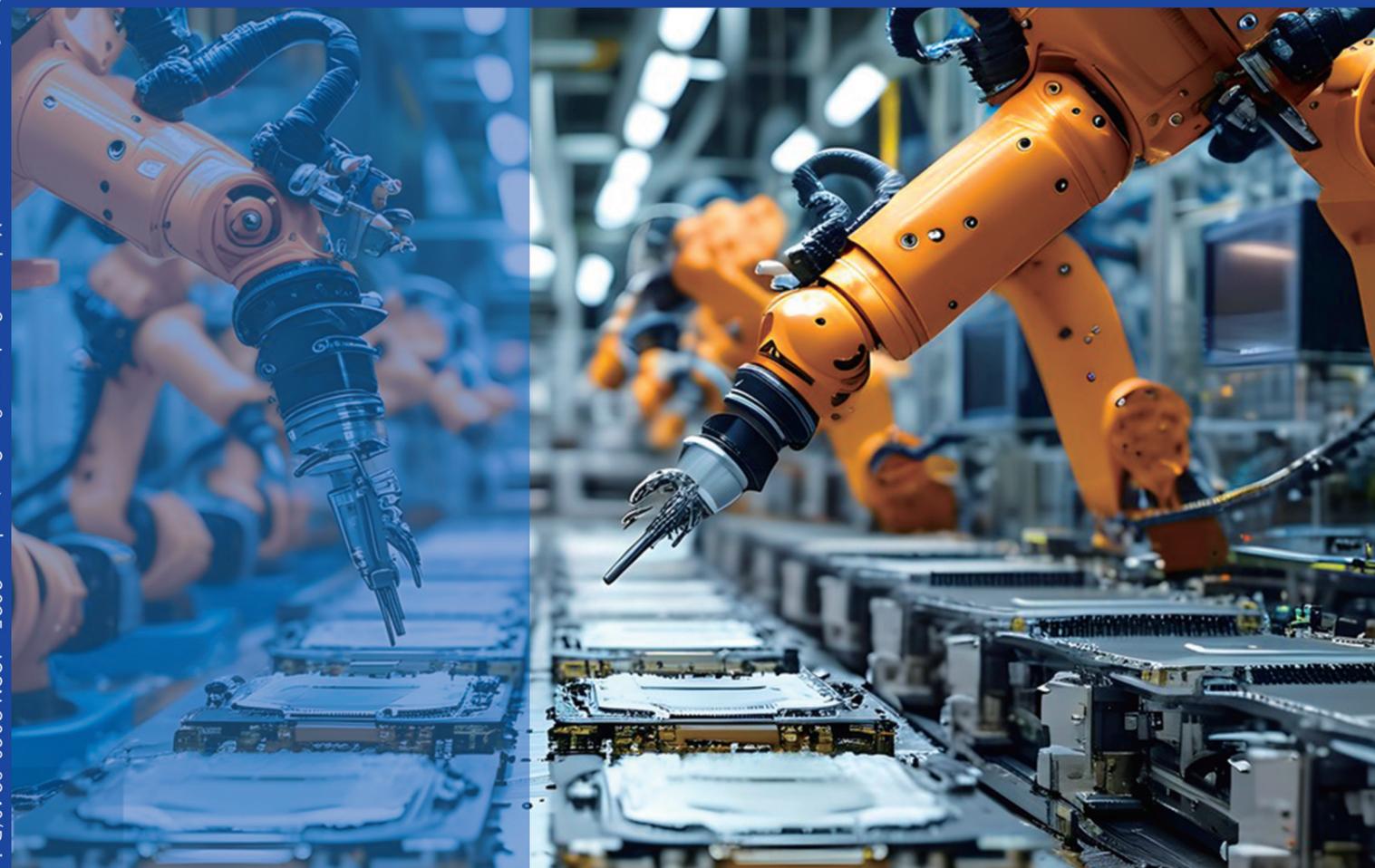


现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 9 • September 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)



现代工业与技术
Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 9 • September 2025 • ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(Online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.:+65 62233839

E-mail:contact@nassg.org

Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (纸质) 3060-9259 (网络)

出版语言：华文

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Modern Industry and Technology

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

Language: Chinese

URL: <http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

《现代工业与技术》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料，除另作说明外，作者有权依据Creative Commons国际署名—非商业使用4.0版权对于引用、评价及其他方面的要求，对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时，必须注明原文作者及出处，并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: <http://www.nassg.org>



期刊概况：

中文刊名：现代工业与技术

ISSN: 3060-9240 (Print) 3060-9259 (Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：<http://journals.nassg.org/index.php/mit-cn>

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

- 稿件格式：Microsoft Word
- 稿件长度：字符数（计空格）4500以上；图表核算200字符
- 测量单位：国际单位
- 论文出版格式：Adobe PDF
- 参考文献：温哥华体例

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 谷歌学术（Google Scholar）等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益：

- 期刊为 OA 期刊，但作者拥有文章的版权；
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档；
- 以开放获取为指导方针，期刊将成为极具影响力的国际期刊；
- 为作者提供即时审稿服务，即在确保文字质量最优的前提下，在最短时间内完成审稿流程。

评审过程：

编辑部和主编根据期刊的收录范围，组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审，并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登，提供高效、快捷、专业的出版平台。

现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 9· September 2025·ISSN 3060-9240(Print) 3060-9259(online)

编委会

主 编

蒋 晶 郑州大学

编 委

李伟锋 华东理工大学

李 硕 重庆理工大学

李益国 东南大学

高学金 北京工业大学

郭乃信 通力电梯有限公司

- 1 煤中铬含量测量结果的不确定度评定
/ 安金兰
- 4 高校供暖系统时分分温控制节能技术深入研究
/ 张德财
- 7 低含水原油的深度脱水性能研究
/ 张向红 吴艳青 常安康 尹凯全 陈维维
- 10 工业仪器仪表在复杂工况下的测量精度与稳定性分析
/ 王志豪
- 13 基于防雷击膜的复合材料复合层设计与性能优化
/ 火盈飞 刘良点 南茜 张璐璐 贺栋培
- 16 防雷击复合膜的导电性能优化结构设计
/ 刘良点 南茜 贺栋培 火盈飞 张璐璐
- 19 面向产业应用的大面积钙钛矿组件技术研究进展
/ 杨铁斌
- 22 减速机制造过程中的质量控制措施研究
/ 鲁继东
- 25 电气二次继电保护装置的抗干扰设计与性能验证研究
/ 吴钊滔
- 28 基于破坏性物理分析的电子元器件失效机理研究
/ 张鹏 杨欢
- 31 汽轮机通流部分改造的节能效果分析
/ 王宇
- 34 电力系统自动化背景下内线安装标准化作业流程优化
/ 高天勇
- 37 变工况下混流式水轮发电机调速器参数适配性及优化
调控研究
/ 王海志
- 40 电力机车辅助系统单相接地故障检测方法优化研究
/ 白雪 刘炫德 袁琪
- 43 探究市政工程施工中管线施工技术要点及应用
/ 甘海燕
- 46 现代工业化进程中新能源电力与人居环境改善研究
/ 高磊 刘德明 折发春 刘海虹 陈佳

| | | | |
|----|---|----|---|
| 1 | Uncertainty Evaluation of Measuring Results of Chromium Content in Coal / Jinlan An | 25 | Research on Anti-Interference Design and Performance Verification of Electrical Secondary Relay Protection Devices / Fantao Wu |
| 4 | In-depth research on energy-saving technology of time-sharing and temperature-dividing control for heating systems in universities / Decai Zhang | 28 | Research on the Failure Mechanism of Electronic Components Based on Destructive Physical Analysis / Peng Zhang Huan Yang |
| 7 | Study on Deep Dehydration Performance of Low-Water Content Crude Oil / Xianghong Zhang Yanqing Wu Ankang Chang Kaiquan Yin Weiwei Chen | 31 | Analysis of energy saving effect of the turbine flow passage reconstruction / Yu Wang |
| 10 | Analysis of Measurement Accuracy and Stability of Industrial Instrument under Complex Working Conditions / Zhihao Wang | 34 | Optimization of Standardized Workflow for Internal Wiring Installation in Power System Automation Context / Tianyong Gao |
| 13 | Design and Performance Optimization of Composite Layer Based on Lightning Protection Film / Yingfei Huo Liangdian Liu Qian Nan Lulu Zhang Dongpei He | 37 | Research on Parameter Adaptability and Optimization Control of Variable-Speed Regulators for Mixed-Flow Hydro-Turbine Generators under Variable Operating Conditions / Haizhi Wang |
| 16 | Optimization of Conductive Performance and Structural Design of Lightning Protection Composite Film / Liangdian Liu Qian Nan Dongpei He Yingfei Huo Lulu Zhang | 40 | Optimization Research on Single-Phase Ground Fault Detection Method for Auxiliary System of Electric Locomotives / Xue Bai Xuande Liu Qi Yuan |
| 19 | Progress on Large-area Perovskite Solar Cells: Toward Photovoltaic Application / Tiebin Yang | 43 | Research on the key points and application of pipeline construction technology in municipal engineering construction / Haiyan Gan |
| 22 | Research on Quality Control Measures in the Process of Reducer Manufacturing / Jidong Lu | 46 | Research on New Energy Power and Human Settlement Improvement in Modern Industrialization / Lei Gao Deming Liu Fachun She Haihong Liu Jia Chen |

Uncertainty Evaluation of Measuring Results of Chromium Content in Coal

Jinlan An

Shaanxi Energy Quality Supervision and Inspection Institute, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

This study establishes a measurement model for determining chromium content in coal using flame atomic absorption spectrophotometry (FAS). The uncertainty sources in FAS measurements are analyzed from five aspects: measurement repeatability, sample weighing, standard curve, standard solution, and volumetric volume. The evaluated chromium content in coal samples, determined by the method described in this paper, is $C_{rad} = (62 \pm 6) \mu\text{g/g}$ with a k value of 2 (where k represents the 95% confidence interval). Among the components of measurement uncertainty, repeatability and standard curve have the most significant impacts. In daily testing, strict control of repeatability conditions and the use of precision instruments for standard curve preparation are essential. Additionally, improving laboratory operational environments and continuously enhancing the professional competence of laboratory personnel are crucial to enhance measurement precision and accuracy.

Keywords

coal; chromium content; measurement result; measurement uncertainty; uncertainty component; evaluation

煤中铬含量测量结果的不确定度评定

安金兰

陕西省能源质量监督检验所, 中国·陕西 西安 710065

摘要

基于火焰原子吸收分光光度计法测定煤中铬含量的方法建立测量模型, 从测量重复性、试样称量、标准曲线、标准溶液、定容体积, 五个方面分析火焰原子吸收法测定煤中铬含量时其测量结果的不确定度来源; 所测试样按照文中方法评定的煤中铬含量测量结果为 $C_{rad} = (62 \pm 6) \mu\text{g/g}$; $k=2$ 。(k为95%概率下的包含因子); 在煤中铬含量的测量不确定度各分量中, 测量重复性和标准曲线这两个分量的影响最大, 在日常检测中, 应严格控制重复性测定条件和配置标准曲线时选用精度良好的量具, 同时, 尽可能完善实验室的操作环境和不断提高实验操作人员的业务综合素质, 以提高测量结果的精密性及准确度。

关键词

煤; 铬含量; 测量结果; 测量不确定度; 不确定度分量; 评定

1 引言

测量不确定度是根据所用到的信息, 表征赋予被测量分散性的非负参数^[1]。对煤中铬的测量结果而言, 其不确定度越小, 测量结果的质量就越高, 使用价值也越高, 反之就越低。此外, 对测量结果的不确定度评定, 可识别出检测过程中影响实验结果的关键不确定度因素^[2-4]。

2 实验过程

2.1 试剂与仪器设备

本方法所用试剂均为优级纯, 所用水为去离子水; 氢氟酸 40% 以上; 高氯酸 70% 以上; 硝酸溶液体积比

(1+1); 硝酸溶液体积比 (1+99); 火焰原子吸收分光光度计 PinAAcle 900F; 铬元素空心阴极灯; 感量 0.1mg 分析天平; 温度可调电热板; 马弗炉; 聚四氟乙烯坩埚 30mL。

2.2 实验步骤

煤样灰分不小于 30%, 称取 1.0000g 煤样于灰皿中, 摇匀放入马弗炉中, 由室温缓慢加热到 500℃, 灼烧 4 小时至无含碳物为止, 将灰样转入聚四氟乙烯坩埚中, 用少量水润湿, 加高氯酸 4mL, 氢氟酸 10mL, 摇匀于电热板上缓慢加热至近干, 取下坩埚稍冷, 用少量水冲洗坩埚内壁, 再加氢氟酸 10mL, 继续在电热板上加热至白烟冒尽。取下坩埚稍冷加硝酸溶液体积比 (1+1) 10mL, 水 10mL, 加热至近沸保持 1min, 取下坩埚, 用热水将坩埚中的液体转入 100mL 容量瓶, 冷至室温, 加水稀释至刻度, 摇匀, 采用火焰原子吸收分光光度计进行测定^[5]。

【作者简介】安金兰 (1983-), 女, 中国陕西宝鸡人, 本科, 助理工程师, 从事化学工程与工艺研究。

3 不确定度来源

3.1 测量模型

按照 GB/T 16658 的计算公式建立测量模型^[5]。

$$Cr_{ad} = \frac{200\rho}{m}$$

式中： Cr_{ad} 为铬含量的质量分数 ($\mu\text{g/g}$)； ρ 为在标准曲线上查得的待测元素的质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)； m 为煤样质量 (g)

3.2 不确定度来源

测量煤中铬含量不确定度来源主要有：①测量重复性 rep ；②试样称量 m ；③标准曲线；④标准溶液 ρ ；⑤定容体积 v 。

4 测量不确定度分量的评定

4.1 测量重复性的标准不确定度 $u(rep)$

样品从灼烧、酸溶、定容到测量，存在一些重复性误差，本次测量对一煤样进行了 7 次，测量结果见下表 1。

表 1 煤样 7 次测量结果

| 序号 | 煤样质量 g | 浓度 $\mu\text{g/mL}$ | 铬含量 $\mu\text{g/g}$ |
|-----|-----------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1.0001 | 0.315 | 63 |
| 2 | 1.0000 | 0.315 | 63 |
| 3 | 1.0001 | 0.312 | 62 |
| 4 | 1.0000 | 0.319 | 64 |
| 5 | 0.9999 | 0.303 | 61 |
| 6 | 1.0000 | 0.316 | 63 |
| 7 | 1.0000 | 0.306 | 61 |
| 平均值 | / | 0.312 | 62 |

用贝塞尔公式计算其单次测量结果的标准不确定度

$$u(rep)_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Cr_{ad} - \overline{Cr_{ad}})^2}{n-1}} \approx 1.200 \mu\text{g/g}$$

在实际检测中，同一煤样一般进行 2 次重复测定，故：

$$u(rep) = \frac{u(rep)_i}{\sqrt{2}} = \frac{1.200}{\sqrt{2}} \approx 0.849 \mu\text{g/g}$$

$$u_{rel}(rep) = \frac{0.849}{62} = 0.0137$$

其中“ u_{rel} ”为相对不确定度，以下同。

4.2 试样质量称量的标准不确定度 $u(m)$

称量用天平的检定证书示值误差为 $\pm 0.0001\text{g}$ 。假设为均匀分布，则：

$$u(m) = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} \approx 5.77 \times 10^{-5} \text{g}$$

$$u_{rel}(m) = \frac{5.77 \times 10^{-5}}{1.0000} = 5.77 \times 10^{-5}$$

4.3 标准曲线拟合产生的标准不确定 $u(\rho)$

将配置好的标准曲线溶液在最佳的仪器条件下，测量

结果见下表 2。

表 2 铬标准系列溶液质量浓度及相应的吸光度值

| 序号 | 浓度 | 测量的吸光度值 | | | |
|----|------------------|---------|--------|--------|--------|
| | $\mu\text{g/mL}$ | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
| 1 | 0.0 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |
| 2 | 0.2 | 0.0086 | 0.0079 | 0.0081 | 0.0082 |
| 3 | 0.4 | 0.0156 | 0.0158 | 0.0157 | 0.0157 |
| 4 | 0.6 | 0.0217 | 0.0210 | 0.0216 | 0.0214 |
| 5 | 0.8 | 0.0288 | 0.0286 | 0.0286 | 0.0287 |
| 6 | 1.0 | 0.0368 | 0.0360 | 0.0362 | 0.0363 |
| 7 | 1.5 | 0.0546 | 0.0545 | 0.0545 | 0.0545 |

采用最小二乘法拟合标准曲线方程： $y=0.0359x+0.0005$ ； $r=0.999$ (y 表示吸光度 A ， x 表示浓度 ρ ， 0.0359 为斜率 B ， 0.0005 为截距 B_0)，测量样品溶液中两次得铬的浓度 0.315mg/L ，按照贝塞尔公式^[6-7]，由标准曲线拟合产生的标准不确定度

$$u(\rho) = \frac{S}{B} \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(\rho - \overline{\rho})^2}{\sum_{j=1}^n (\rho_j - \overline{\rho})^2}} = \frac{0.0004589}{0.0359} \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{1}{18} + \frac{(0.315 - 0.75)^2}{1.08}} = 0.014$$

残差标准偏差 S 为：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (B_0 + B_1 x_i)]^2}{n-2}} = 0.0004589$$

以及 S_{xx} 为： $S_{xx} = \sum_{j=1}^n (\rho_j - \overline{\rho})^2 = 1.08$

其中： B ：斜率； P ：测试 ρ 的次数； n ：测试标准溶液的次数； ρ ：样品溶液中铬的浓度； $\overline{\rho}$ ：不同标准溶液的平均值 (n 次测试)； i ：表示标准溶液编号的下标； j ：表示获得标准曲线的测量次数的下标。

$$u_{rel}(\rho) = \frac{0.014}{0.315} = 0.0444$$

4.4 标准溶液引入的不确定度 $u(\text{标液})$

市售铬标准溶液浓度为 $1000\mu\text{g/mL}$ ，证书上相对扩展不确定度为 1% ， $k=2$ ，故相对标准不确定度为： $0.01/2=0.005$ 。

用 2mL 单标计吸量管移取铬标液 2mL 于 100mL 容量瓶中定容至刻度，制得 $20\mu\text{g/mL}$ 的铬标准使用液，查得 A 级 2mL 单标线吸量管检定规程^[3] 20°C 时，容量允差 $\pm 0.010\text{mL}$ ，按均匀分布，标准不确定度为： $0.010/\sqrt{3} = 5.77 \times 10^{-3}$ ；再用 5mL 带刻度吸量管分别移取 $0-5\mu\text{g/mL}$ 铬标准使用液配置标准系列溶液于 100mL 容量瓶配置标准系列溶液，A 级 5mL 带刻度吸量管流出式 20°C 时，容量允差为 $\pm 0.025\text{mL}$ ，按均匀分布，标准不确定度为： $0.025/\sqrt{3} = 0.0144$ 。

A级100mL容量瓶20℃时,容量允差为 $\pm 0.10\text{mL}$,按均匀分布,标准不确定度为: $0.1/\sqrt{3}=0.577$ 。

$$\text{则, } u_{rel}(\text{标液}) = \sqrt{0.005^2 + \left(\frac{5.77 \times 10^{-3}}{10}\right)^2 + \left(\frac{0.0144}{5}\right)^2 + \left(\frac{0.577}{100}\right)^2} \\ = 8.18 \times 10^{-3}$$

4.5 定容体积引入的不确定度 $u(v)$

用25mL单标计吸量管移取样品溶液25mL于50mL容量瓶中定容至刻度,查得A级25mL单标线吸量管检定规程^[8]20℃时,容量允差 $\pm 0.030\text{mL}$,按均匀分布,标准不确定度为: $0.030/\sqrt{3}=0.0173$ 。

A级50mL容量瓶20℃时,容量允差为 $\pm 0.05\text{mL}$,按均匀分布,标准不确定度为: $0.05/\sqrt{3}=0.0289$ 。

$$\text{则, } u_{rel}(v) = \sqrt{\left(\frac{0.0173}{25}\right)^2 + \left(\frac{0.0289}{50}\right)^2} = 9.02 \times 10^{-4}$$

5 计算铬含量合成标准不确定度

铬含量相对合成标准不确定度 $u_{crel}(Cr_{ad})$

$$u_{crel}(Cr_{ad}) = \sqrt{u_{rel}^2(rep) + u_{rel}^2(m) + u_{rel}^2(\rho) + u_{rel}^2(\text{标液}) + u_{rel}^2(v)} \\ = \sqrt{(0.0137)^2 + (5.77 \times 10^{-5})^2 + (0.0444)^2 + (8.18 \times 10^{-3})^2 + (9.02 \times 10^{-4})^2} \\ = 0.0472$$

铬含量合成标准不确定度 $u_c(Crad)$

$$u_c(Crad) = Cr_{ad} \times u_{crel}(Cr_{ad}) = 62 \times 0.0472 = 2.93 \mu\text{g/g}$$

6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则: $U(Crad) = 2 \times 2.93 = 6 \mu\text{g/g}$

7 测量结果报告

该煤样铬含量测量结果为: $Cr_{ad} = (62 \pm 6) \mu\text{g/g}$; $k=2$ 。

8 结论

采用火焰原子吸收分光光度法测煤中铬含量,其测量结果不确定度主要由以下2个分量构成:(1)测量重复性;(2)标准曲线。

在煤中铬含量日常检测中,测量结果不确定度最主要来源是测量重复性和标准曲线,所以为了确保检测结果质量,应注意以下两点:一是严格控制重复性测定条件;二是配置标准曲线时选用精度良好的量具。同时,尽可能完善实验室操作环境和不断提高实验操作人员的业务综合素质,以提高测量结果的精密度及准确度。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].2012
- [2] 吕丽丽.火焰原子吸收法测定沉积物中铬含量的不确定度评定[J].新疆有色金属,2020,43(03):13-14.DOI:10.16206/j.cnki.65-1136/tg.2020.03.007.
- [3] 谭梦玲.火焰原子吸收法测定油漆涂层可溶出铅、镉、铬含量的不确定度评定[J].山西化工,2024,44(02):58-64.DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2024.02.022.
- [4] 姜欣,任莉慧,蒋卓亚.火焰原子吸收分光光度法测定土壤样品中铜、锌、铅、镍、铬的不确定度评定[J].化学分析计量,2023,32(03):94-98.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 16658-2007 煤中铬、镉、铅的测定方法[S].2008
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 196-2006 常用玻璃量器检定规程[S].2007
- [7] 中国合格评定国家认可委员会. 化学分析中不确定度的评估指南[S]. CNAS-GL006
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 33303-2016 煤质分析中测量不确定度评定指南[S].2017

In-depth research on energy-saving technology of time-sharing and temperature-dividing control for heating systems in universities

Decai Zhang

Lanzhou Yuanda Zhicheng Technology Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

In response to the issues of high heating energy consumption and mismatch between supply and demand in universities located in the severe cold climate of the northwest region during winter, this paper takes universities in the Lanzhou area as the research object and proposes an intelligent heating control system based on Internet of Things (IoT) technology, featuring time-based temperature differentiation. By constructing a three-level linkage regulation model of "meteorological compensation - time-based zoning - terminal feedback", combined with the distributed temperature control terminal and cloud platform management system developed by Lanzhou Yuanda Zhicheng Technology Co., Ltd., dynamic optimization of the heating system operation is achieved. Practical application shows that this system can reduce heating energy consumption in universities by 22%-28%, increase the room temperature qualification rate to over 95%, and shorten the investment recovery period to 4 years, providing a replicable technical solution for the green heating renovation of universities in the northwest region.

Keywords

university heating; time-based temperature control; energy-saving renovation; Internet of Things technology

高校供暖系统时分分温控制节能技术深入研究

张德财

兰州远大至成科技有限公司, 中国 · 甘肃 兰州 730030

摘要

针对西北地区冬季严寒气候下高校供暖能耗高、供需不匹配等问题, 本文以兰州地区高校为研究对象, 提出基于物联网技术的时分分温智能供暖控制系统。通过构建"气象补偿-时分分区-末端反馈"三级联动调控模型, 结合兰州远大至成科技有限公司研发的分布式温控终端与云平台管理系统, 实现了供暖系统的动态优化运行。实际应用表明, 该系统可使高校供暖能耗降低22%-28%, 室温合格率提升至95%以上, 投资回收期缩短至4年, 为西北地区高校绿色供暖改造提供了可复制的技术方案。

关键词

高校供暖; 时分分温控制; 节能改造; 物联网技术

1 引言

西北地区冬季平均气温低于 -10°C , 高校作为人员密集的公共建筑, 供暖能耗占全年总能耗的 60% 以上 (甘肃省住建厅, 2022)。传统高校供暖普遍存在“大流量、小温差”运行模式, 存在以下问题: (1) 供暖时间与教学作息脱节, 假期空置区域持续供热; (2) 末端温度缺乏精准调控, 部分房间过热导致能源浪费; (3) 管网水力失调严重, 冷热不均现象普遍。据测算, 兰州地区高校供暖系统平均热效率不足 65%, 节能潜力巨大 (王建国等, 2021)。近年来,

随着《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》的实施, 时分分温控制技术因其显著的节能效益成为研究热点。该技术通过实时采集室内外环境参数, 结合用户行为特征实现供暖负荷的动态匹配, 已在北方集中供暖系统中得到初步应用 (李华等, 2020)。但现有研究多集中于住宅小区, 针对高校特殊场景 (如教室、宿舍、实验室等功能分区复杂) 的系统化解决方案仍显不足。本文依托兰州远大至成科技有限公司承担的“兰州现代职业学院高校智慧供暖节能改造项目”, 重点研究时分分温控制在高校场景下的适配性优化策略, 通过硬件设备研发、控制算法改进及工程实践验证, 形成一套适用于西北寒冷地区的供暖节能技术方案。

【作者简介】张德财 (1990-), 男, 本科, 工程师, 从事建筑节能与智能控制技术研究。

2 兰州高校供暖现状分析

2.1 气候与建筑特征

兰州属温带大陆性气候，冬季采暖期为 150 天（11 月 1 日至次年 3 月 31 日），极端低温达 -21.7°C 。高校建筑以多层教学楼、学生公寓为主，围护结构保温性能较差（外墙传热系数 $K=1.2-1.5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ），且存在大量玻璃幕墙，热损失较普通建筑高 30%（张明等，2019）。^[1]

2.2 现有供暖系统问题

时间维度：采用“全时全量”供热模式，寒假期间（约 40 天）供暖量仅减少 15%，空置宿舍、实验室等区域仍存在无效供热。

空间维度：按面积均摊热负荷，未考虑不同功能房间的使用差异。例如，图书馆阅览区需维持 $20-22^{\circ}\text{C}$ ，而仓库仅需 $5-8^{\circ}\text{C}$ 即可满足防冻要求。

控制方式：依赖人工调节阀门开度，响应滞后于环境变化，导致“过冷过热”现象交替出现。实测数据显示，兰州现代职业学院教学楼白天平均室温 24.3°C ，夜间降至 18.5°C ，波动幅度达 5.8°C （兰州现代职业学院后勤处，2021）。^[2]

3 分时分区控制系统设计

3.1 总体架构

系统采用“云-边-端”协同架构（图 1），由感知层、网络层、平台层和应用层组成：

感知层：部署无线温度传感器（精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）、热量表（误差 $\leq 2\%$ ）、电动调节阀等设备，实时采集室内外温度、流量、压力等参数；

网络层：采用 LoRaWAN 与 4G 混合组网，确保偏远区域数据传输可靠性；

平台层：基于阿里云搭建供暖管理云平台，集成气象数据接口（接入中国天气网 API）、负荷预测模型及远程控制模块；

应用层：开发 PC 端与移动端管理平台，支持管理员实时监控、策略配置及能耗分析。



图片发布者：唐山蓝迪通信科技有限公司

图 1 分时分区控制系统的架构

3.2 核心控制策略

3.2.1 分时控制模型

根据高校作息规律划分供暖时段（表 1）：

表 1

| 时段 | 时间范围 | 适用区域 | 设定温度 |
|------|-------------------------|---------|----------------------------|
| 教学时段 | 8:00-12:00, 14:00-18:00 | 教学楼、实验室 | $20-22^{\circ}\text{C}$ |
| 生活时段 | 18:00-23:00 | 学生公寓、食堂 | $18-20^{\circ}\text{C}$ |
| 值班时段 | 23:00-次日 8:00 | 行政楼、安保室 | $16-18^{\circ}\text{C}$ |
| 假期模式 | 寒假期间 | 全部区域 | $5-8^{\circ}\text{C}$ (防冻) |

3.2.2 分区控制算法

引入模糊 PID 控制算法，以室内温度为被控变量，室外温度、太阳辐射强度、人员密度为输入变量，动态调整供水温度（公式 1）：

$$T_g = T_n + K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + \Delta T_c$$

其中， T_g 为供水温度， T_n 为设定温度， $e(t)$ 为温度偏差， K_p 、 K_i 、 K_d 为 PID 参数， ΔT_c 为气象补偿值（通过历史数据训练得到）。

3.2.3 分区控制策略

将校园划分为教学区、生活区、办公区三大板块，每板块内进一步细分二级区域（如教学楼分为教室、走廊、卫生间）。通过安装带位置识别功能的温控面板，实现“一区一策”精准调控。例如，教室在无人时段自动切换至值班模式，仅维持基本温度。^[3]

4 系统实现与关键技术

4.1 硬件设备研发

智能温控终端：采用 STM32F103 主控芯片，集成 LoRa 通信模块与高精度温度传感器，支持 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 宽温工作，功耗 $< 0.5\text{W}$ ；

电动调节阀：选用 DN20-DN50 口径的直行程执行器，流量特性为等百分比，调节精度达 $\pm 2\%$ ；

数据采集器：支持 Modbus RTU 协议，可同时接入 16 路传感器信号，具备断点续传功能。

4.2 软件系统开发

负荷预测模块：基于 LSTM 神经网络，利用近 3 年供暖季的气象数据与能耗数据训练模型，预测未来 24 小时热负荷，准确率达 90% 以上；

故障诊断系统：通过异常数据检测算法识别管道泄漏、阀门卡涩等故障，自动生成维修工单并推送至管理人员手机 APP；

能耗分析看板：提供多维度统计报表（如各区域能耗占比、单位面积热耗、节能率趋势），支持同比/环比分析。^[4]

5 工程应用与效果分析

5.1 项目概况

选取兰州现代职业学院（建筑面积 102 万 m^2 ，供暖面

积 91.6 万 m³) 进行试点改造, 原系统为全时全量 + 按供暖面积收费, 改造后采用分时分温控制系统 + 按热计量收费。项目总投资 1845.5812 万元, 其中硬件设备 1553.6392 万元, 软件系统 125 万元, 施工费用 116.942 万元。

5.2 运行效果

能耗指标: 改造后首个供暖季 (2023-2024 年) 总供热量为 268045 GJ, 较改造前 (328623 GJ) 下降 22.6%; 单位面积热耗从 0.358GJ/m² 降至 0.292GJ/m², 优于《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012) 中规定的 0.52GJ/m² 标准。

室内环境: 随机抽查 100 间房间, 室温合格率为 96.3% (18-22℃), 较改造前提升 28.5%; 温度波动幅度由 ±3℃ 缩小至 ±1.5℃, 舒适度显著提高。^[5]

经济效益: 按兰州新区供暖热计量收费标准 75.73/Gj 计算, 年节约总热量为 328623 GJ-268045 GJ=60578GJ, 则节约供暖费约 458.75 万元, 扣除运维成本 (8 万元/年), 静态投资回收期应该是总投资除以年净收益, 即年净现金流量 = 年节约额 - 年运维成本 = 458.75 - 8 = 450.75 万元, 所以回收期 = 1845.5812 / 450.75 ≈ 4 年。

5.3 社会效益

项目实施后, 每年可减少 CO₂ 排放约为:

标准煤 (中国常用): 1 吨标准煤热值约 29.3GJ, 碳排放因子约 2.46 吨 CO₂/吨标准煤。

节约的标准煤量 = 60578 GJ ÷ 29.3 GJ/吨 ≈ 2,068 吨标准煤,

减少的 CO₂ 排放量 = 2,068 吨 × 2.6 吨 CO₂/吨 ≈ 5377 吨

(约 5,400 吨)。相当于种植 50 万棵冷杉的年固碳量 (IPCC, 2021)。同时, 通过智能化管理减少了人工巡检工作量, 提升了后勤管理效率。^[6]

6 结论与展望

本文提出的分时分温控制系统通过“时间-空间-温度”三维协同调控, 有效解决了兰州现代职业学院供暖系统的高能耗、低效率问题。工程实践表明, 该系统可使供暖能耗降低 22%-28%, 投资回收期约 4 年, 具有显著的经济与环境效益。未来研究方向包括: (1) 结合光伏-储能技术, 探索可再生能源与供暖系统的耦合应用; (2) 引入数字孪生技术, 构建校园供暖系统虚拟仿真模型, 实现更精准的预测与控制; (3) 拓展系统在医院、商场等公共建筑中的应用, 形成标准化解决方案。

参考文献

- [1] 甘肃省住房和城乡建设厅. 甘肃省“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[Z]. 2022.
- [2] 王建国, 李红梅. 北方高校供暖系统节能改造技术研究[J]. 暖通空调, 2021, 51(3): 45-50.
- [3] 李华, 张伟. 分时分温控制在集中供暖系统中的应用[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 123-128.
- [4] 张明, 刘阳. 西北地区高校建筑围护结构热工性能分析[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(5): 78-82.
- [5] 兰州现代职业学院后勤处. 2021年度供暖系统运行报告[R]. 2022. [6] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge University Press, 2021.

Study on Deep Dehydration Performance of Low-Water Content Crude Oil

Xianghong Zhang Yanqing Wu Ankang Chang Kaiquan Yin Weiwei Chen

Deshi Energy Technology Group Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257000, China

Abstract

Currently, some crude oils exhibit rapid initial dehydration but insufficient subsequent dehydration, resulting in inadequate deep dehydration performance and the presence of small amounts of emulsified water, which fails to meet the requirement of $\leq 0.5\%$ water content for external transportation. This study synthesized four types of demulsifier products using phenol-amine-aldehyde resin, phenol-formaldehyde resin, propylene glycol, and tetraethylene pentamine as starting agents. Performance evaluations were conducted on two combined station crudes (with emulsified water contents of 6% and 3%, respectively). The results indicate that the phenol-amine resin-based demulsifier DP-150 and the polyamine-based demulsifier DP-213 demonstrate high dehydration rates, rapid dehydration speed, clear water quality, and well-defined interfaces. Both product types feature multi-branch structures, providing direction for the subsequent rapid development of demulsifiers suitable for low-water-content crude oils.

Keywords

phenolamine aldehyde; phenol alcohol; polyamine; low moisture content; demulsification

低含水原油的深度脱水性能研究

张向红 吴艳青 常安康 尹凯全 陈维维

德仕能源科技集团有限公司, 中国 · 山东 东营 257000

摘要

目前针对部分原油出现的前期脱水快、后期脱水力度不足问题,表现出深度脱水性能不够,少量乳化水存在原油中,致使达不到外输含水 $\leq 0.5\%$ 的要求。本文以酚胺醛树脂、酚醛树脂、丙二醇、四乙烯五胺为起始剂合成了四个类型破乳剂产品,以两个联合站原油(乳化含水分别为6%和3%)为目标进行性能评价,结果表明酚胺醛树脂类破乳剂DP-150和多胺类破乳剂DP-213脱水率较高、脱水速度快、脱出水水质清、界面齐,其两类产品具有多支链结构,为后续快速匹配适用于低含水原油的破乳剂产品提供方向。

关键词

酚胺醛; 酚醛醇; 多胺; 低含水; 破乳

1 引言

无论是陆上常规/非常规油田,还是海上平台,外输原油含水率一般要求 $\leq 0.5\%$ 。随着各主力油田进入高含水开发后期,采出液的含水率较高,经过一、二级分离后,原油中含水被脱除大部分,仍有一部分原油呈现低含水(3%~10%)的特点,少量水以微滴形式高度分散在油相中,形成油包水(W/O)型稳定乳液,常规沉降或电脱水难以进一步深度脱水^[1-3]。

低含水意味着体系水相比例小,水滴间距大,碰撞聚并几率低,破乳动力学过程慢,并且天然表面活性物质(胶质、沥青质、有机酸)与开采助剂协同形成弹性界面膜,水滴粒径分布和界面膜强度直接影响破乳几率,表现出低含水

难破乳的现象。

本文合成四个不同类型破乳剂,以四种结构破乳剂为初步研究对象,选取低含水原油进行性能评价,筛选出适用于低含水原油的破乳剂,实现深度脱水。

2 实验

2.1 试剂与仪器

试剂:起始剂原料:双酚A、甲醛溶液、二乙烯三胺、腰果酚、丙二醇、四乙烯五胺,以上均为分析纯;催化剂:氢氧化钾(分析纯),中和剂:冰乙酸(分析纯),其他原料:环氧丙烷(工业品,含量 $\geq 99.90\%$)、环氧乙烷(工业品,含量 $\geq 99.90\%$)。

仪器:油浴锅、恒速电动搅拌器、电子天平、永磁旋转搅拌高压釜、循环水式真空泵、电子秤、恒温水浴、微量注射器、台式离心机。

【作者简介】张向红(1991-),女,中国山东潍坊人,本科,工程师,从事油田用化学品的研究。

2.2 合成过程

2.2.1 酚胺醛类破乳剂的合成

以双酚 A、甲醛和二乙烯三胺为原料,按 1 : 4 : 6 的摩尔比例,双酚 A 和二乙烯三胺,放入圆底烧瓶中搅拌,直到双酚 A 完全溶解,以一定速度滴加一定量的甲醛,滴加完毕后恒温反应一段时间,在 120℃真空减压蒸馏,除去过量的甲醛和二乙烯三胺及反应副产物水,得到酚胺醛树脂。将上述酚胺醛树脂作为起始剂依次与环氧丙烷、环氧乙烷进行开环聚合,最终得到酚胺醛类破乳剂 DP-150。

合成的产品红外谱图见图 1:

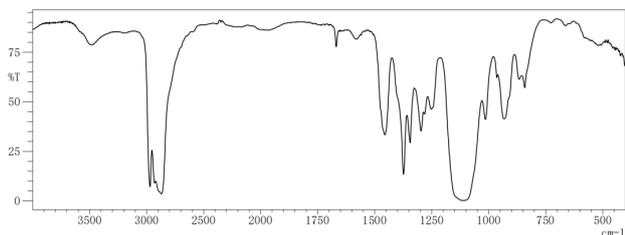


图 1 酚胺醛类破乳剂 DP-150 的红外谱图

由图 1 可知,在 3355 cm^{-1} 和 3028 cm^{-1} 处双酚 A 中的 OH 振动吸收峰及双酚 A 苯环上的 C—H 伸缩振动峰消失。在 1110 cm^{-1} 处出现 C—O—C 特征峰,在 2930 cm^{-1} 处有 R—CH₂—NR₂ 特征峰,且在波数为 1347 cm^{-1} 处出现了芳香叔胺 C—N 键的伸缩振动,说明了 C—N 键与苯环相连,在 1458 cm^{-1} 处出现了一CH₂—的弯曲振动,在波数为 2970 cm^{-1} 和 839 cm^{-1} 处出现了 C—H 和—C(CH₃)₂ 特征峰,说明分子存在双酚 A 骨架,由此红外光谱图可以看出,所得产物与目标分子结构一致,实验得到了预期结果。

2.2.2 酚醛类破乳剂的合成

以腰果酚、甲醛为原料,以氢氧化钾为催化剂,腰果酚与甲醛摩尔反应比按 1:1,在 30-35℃下反应 2 小时,再在 140℃减压蒸馏,得到酚醛树脂起始剂。将合成的酚醛树脂起始剂与环氧丙烷在高压釜中反应,控制温度在 130-135℃,逐步加入环氧丙烷反应后加入环氧乙烷继续聚合,最终得到酚醛类破乳剂 DP-382。

合成的产品红外谱图见图 2:

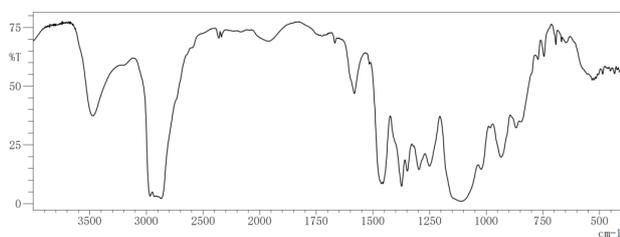


图 2 酚醛类破乳剂 DP-382 的红外谱图

在 3486 cm^{-1} 处出现—OH 的伸缩振动吸收峰,在 1110 cm^{-1} 处出现 C—O—C 的伸缩震动吸收峰,在 2970 cm^{-1} 处出现饱和 C—H 键的对称伸缩振动吸收峰,在 1254 cm^{-1} 处

出现=C—O—C(芳醚)的伸缩震动吸收峰,表明环氧乙烷、环氧丙烷接枝到了酚醛树脂的分子上;在 772 cm^{-1} 和 665 cm^{-1} 之间的 698 cm^{-1} 处出现了吸收峰,表明苯环间位上有取代基;从图上还可以看出,1737 cm^{-1} 处的 C=O 吸收峰较弱,说明合成的产物中几乎没有原料甲醛残留。此外,苯环及碳链上其他官能团的特征吸收峰依然存在,从而表明酚醛树脂与环氧丙烷和环氧乙烷发生了聚合反应。

2.2.3 醇类破乳剂的合成

以丙二醇为起始剂,在氢氧化钾催化下与环氧丙烷在高压釜中反应,控制温度在 135±5℃,逐步加入环氧丙烷反应,再加入环氧乙烷在 120℃继续聚合,最终得到多元醇类破乳剂 DP-360。

合成的产品红外谱图见图 3:

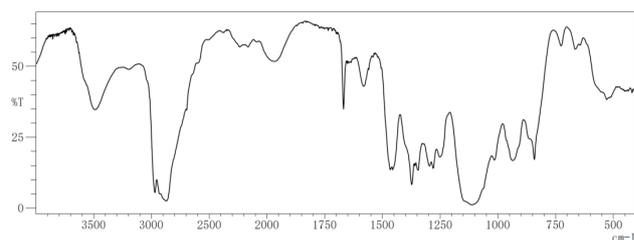


图 3 醇类破乳剂 DP-360 的红外谱图

由图 3 可知,1383 cm^{-1} 是一CH₃的对称变形振动吸收峰,1458 cm^{-1} 是一CH₂—的面内弯曲振动吸收峰,在 3486 cm^{-1} 左右为一OH 的特征吸收峰,在 1110 cm^{-1} 处出现 C—O—C 的伸缩震动吸收峰,说明有丙二醇与与环氧丙烷和环氧乙烷发生了聚合反应。

2.2.4 多胺类破乳剂的合成

以四乙烯五胺为起始剂,在氢氧化钾催化下与环氧丙烷在高压釜中反应,控制温度在 135±5℃,逐步加入环氧丙烷反应,形成油头后,加入环氧乙烷在 125±5℃聚合,最终得到多元胺类破乳剂 DP-213。

合成的产品红外谱图见图 4:

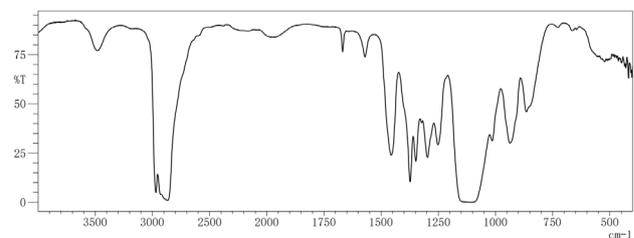


图 4 胺类破乳剂 DP-213 的红外谱图

在 3486 cm^{-1} 附近的峰对应于 OH 的拉伸振动,1383 cm^{-1} 是一CH₃的对称变形振动吸收峰,1458 cm^{-1} 是一CH₂—的面内弯曲振动吸收峰,位于 1657 cm^{-1} 和 1290 cm^{-1} 的峰分别对应于 N—H 的弯曲振动和 C—N 的拉伸振动。1110 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 C—O—C 键的拉伸振动,说明了目标产物制备成功。

2.3 破乳剂的性能评价

采用石油天然气行业标准 SY/T 5280-2018《原油破乳剂通用技术条件》规定的评价方法,对四个产品进行性能评价。

3 结果与讨论

采用某站点 1# 原油进行性能评价,原油乳化含水 6%,试油量为 80ml,脱水温度 63℃、破乳剂加量 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、脱水时间为 7h;四个破乳剂产品的脱水实验结果见表 1。

由表 1 可知,对于联合站 1# 原油,酚胺醛树脂类破乳剂 DP-150 及多胺类破乳剂 DP-213 脱水率较高,可达到

97.9% 和 95.8%,性能优于 DP-382 和 DP-360,并且 DP-150 和 DP-213 表现出脱出水清、界面齐的特点。

第二个目标原油为某联合站 2# 二段处理后的原油,原油乳化含水 3%,试油量为 80ml,脱水温度 60℃、破乳剂加量 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、脱水时间为 24h;四个破乳剂产品的脱水实验结果见表 2。

由表 2 可知,对于联合站 2# 二段处理原油,酚胺醛树脂类破乳剂 DP-150 及多胺类破乳剂 DP-213 脱水率较高,可达到 91.7% 和 95.8%,性能优于 DP-382 和 DP-360,并且 DP-150 和 DP-213 表现出脱出水清、界面齐的特点,在脱水速度上 DP-213 脱水速度更快。

表 1 四种破乳剂对联合站 1# 原油的破乳性能

| 破乳剂产品 | 产品用量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 脱水时间与脱水量 /mL | | | | | | | 脱水率 % | 水质 | 界面 |
|--------|--|--------------|-------|-----|------|-----|-----|-----|-------|----|----|
| | | 15min | 30min | 1h | 1.5h | 2h | 3h | 7h | | | |
| DP-150 | 200 | 0 | 1.2 | 1.8 | 2.4 | 3.7 | 4.3 | 4.7 | 97.9 | 清 | 齐 |
| DP-382 | 200 | 0 | 0.3 | 0.8 | 1.3 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 72.9 | 较清 | 较齐 |
| DP-360 | 200 | 0 | 0.2 | 0.6 | 1.0 | 2.0 | 2.7 | 2.9 | 60.4 | 较清 | 较齐 |
| DP-213 | 200 | 0 | 0.9 | 1.3 | 2.0 | 3.2 | 4.2 | 4.6 | 95.8 | 清 | 齐 |
| 空白 | - | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | - | 不清 | 不齐 |

表 2 四种破乳剂对联合站 2# 二段处理原油的破乳性能

| 破乳剂产品 | 产品用量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 脱水时间与脱水量 /mL | | | | | | | 脱水率 % | 水质 | 界面 |
|--------|--|--------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----|----|
| | | 15min | 30min | 1h | 2h | 3h | 4h | 24h | | | |
| DP-150 | 200 | 0 | 0.5 | 1.2 | 1.6 | 1.8 | 1.9 | 2.2 | 91.7% | 清 | 齐 |
| DP-382 | 200 | 0 | 0 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 1.2 | 50% | 较清 | 较齐 |
| DP-360 | 200 | 0 | 0.1 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.5 | 1.7 | 70.8% | 较清 | 较齐 |
| DP-213 | 200 | 0.1 | 0.7 | 1.4 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 2.3 | 95.8% | 清 | 齐 |
| 空白 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | - | 不清 | 不齐 |

4 结语

(1) 对某站点 1# 原油,原油乳化含水 6%,在 63℃ 的破乳温度下,破乳剂总用量 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱水时间 7h,破乳剂 DP-150 和 DP-213 脱水速度快、脱出水清、界面齐,脱水速度分别达到 97.9% 和 95.8%。

(2) 对联合站 1# 二段处理原油,原油乳化含水 3%,在 60℃,破乳剂总用量 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱水时间 24h,破乳剂 DP-150 和 DP-213 脱水速度快、脱出水清、界面齐,脱水速度分别达到 91.7% 和 95.8%。

(3) 从产品结构看,DP-150 和 DP-213 破乳剂为多支

链型破乳剂,经过初步产品研究,可得结论,多支链型破乳剂产品针对低含水原油的深度脱水更有效,在针对其他低含水原油的深度脱水问题,可往支链结构型破乳剂方向研究。

参考文献

- [1] 丁昱.基于原油乳液的低温破乳剂制备及其破乳性能研究[D].长江大学,2024.
- [2] 魏立新,王锦秀,侯进才,等.原油低温破乳剂的研究与应用综述[J].内蒙古石油化工,2009,35(23):5-8.
- [3] 冯涛.低温破乳剂的研制与应用[D].东北石油大学,2007.DOI:10.7666/d.y1224952.

Analysis of Measurement Accuracy and Stability of Industrial Instrument under Complex Working Conditions

Zhihao Wang

Henan Shenma Nylon Chemical Co., Ltd., Pingdingshan, Henan, 467000, China

Abstract

With the continuous development of industrial production, the application of industrial instruments and meters in various complex working conditions is becoming increasingly widespread. The measurement accuracy and stability of these instruments are crucial for controlling and optimizing the production process. This paper starts with the working principles and classification of industrial instruments, analyzing the impact of complex working conditions on the measurement accuracy and stability of instruments and meters. It explores the interference of environmental factors, fluctuations in working conditions, and other factors on the instrument's response characteristics. By combining methods for evaluating accuracy and stability, effective strategies for measuring error analysis and correction are proposed. Additionally, this paper provides a detailed discussion of the optimization design and technical improvements of instruments in complex working conditions, focusing on methods to improve measurement accuracy and stability, as well as calibration and maintenance strategies. Through theoretical analysis and practical case studies, this paper offers effective guidance and recommendations for the application of industrial instruments, aiming to promote technological progress and application development in the field of industrial automation.

Keywords

Industrial instruments and meters; Measurement accuracy; Stability; Complex working conditions; Optimization design

工业仪器仪表在复杂工况下的测量精度与稳定性分析

王志豪

河南神马尼龙化工有限责任公司, 中国·河南 平顶山 467000

摘要

随着工业生产的不断发展,工业仪器仪表在各类复杂工况下的应用越来越广泛,其测量精度与稳定性对生产过程的控制与优化至关重要。本文从工业仪器仪表的工作原理与分类出发,分析了复杂工况对仪器仪表测量精度和稳定性的影响,探讨了环境因素、工况波动等因素对仪器响应特性的干扰。结合精度与稳定性的评估方法,提出了有效的测量误差分析与修正策略。此外,本文还就仪器仪表在复杂工况下的优化设计和技术改进进行了详细阐述,重点探讨了提高测量精度与稳定性的技术途径及仪器仪表的校准与维护策略。通过理论分析与实际案例结合,本文为工业仪器仪表的应用提供了有效的指导建议,旨在推动工业自动化领域的技术进步与应用发展。

关键词

工业仪器仪表; 测量精度; 稳定性; 复杂工况; 优化设计

1 引言

在现代工业自动化生产中,仪器仪表的测量精度与稳定性直接影响到生产过程的效率和产品的质量。尤其是在复杂工况下,许多外部因素会对仪器仪表的性能产生干扰,导致测量误差的增加。复杂工况通常包括高温、高湿、高压、振动等恶劣环境条件,这些因素常常导致传统仪器仪表的性能下降。为了保证生产过程的稳定性与安全性,必须深入分析复杂工况对仪器仪表的影响,采取适当的评估方法和优化措施,提升仪器的测量精度和稳定性。因此,本研究将针对

工业仪器仪表在复杂工况下的测量精度与稳定性进行全面分析,重点探讨其应用中的挑战与改进方向,为工业自动化系统的优化提供理论支持和实践指导。

2 工业仪器仪表的基本原理与分类

2.1 工业仪器仪表的工作原理

工业仪器仪表用于测量、检测和控制生产过程中各种物理量与化学量的变化,依赖于不同的原理进行数据采集与处理。它们通过传感器将被测对象的物理或化学信号转换为电信号,利用电路或计算机系统对信号进行处理与分析,从而实现准确的测量、控制与反馈。常见的工作原理包括电阻、电压、电流变化原理、光电效应、热效应及磁效应等。例如,温度传感器通常依赖于热电效应工作,通过测量热电偶的电

【作者简介】王志豪(1986-),男,中国河南平顶山人,本科,助理工程师,从事仪器仪表选型、安装及维护研究。

势差来确定温度；压力传感器通过变形元件的形变与应力关系来测量压力变化。通过这些基本原理，工业仪器仪表能够在各类复杂的生产环境中进行精准的参数监控和控制，确保生产过程的稳定与安全。

2.2 常见工业仪器仪表的分类及应用领域

工业仪器仪表种类繁多，根据功能和应用领域的不同，通常分为测量类、控制类和检测类仪器。测量类仪器用于检测和量化温度、压力、流量、液位等物理量，如温度计、压力表、流量计等；控制类仪器则通过监测和反馈来调节生产过程中的各项参数，例如自动化控制系统、PLC 控制器等；检测类仪器则用于检测物质的化学成分和物理性质，如气体分析仪、液相色谱仪等。在应用领域上，工业仪器仪表广泛应用于石油、化工、电力、冶金、环保等行业，具体应用包括生产过程的实时监控、质量控制、设备维护与管理等方面。

2.3 工业仪器仪表的关键技术指标

工业仪器仪表的关键技术指标直接影响其性能和应用效果。常见的技术指标包括测量范围、精度、分辨率、响应时间和稳定性。测量范围决定了仪器可以测量的最小与最大物理量范围；精度表示测量结果与真实值之间的偏差，通常以误差范围或误差百分比表示；分辨率是仪器能够区分的最小信号变化量，反映了仪器的灵敏度；响应时间指仪器对信号变化作出反应的时间，越短说明仪器反应越灵敏；稳定性是指仪器在长期运行过程中，性能是否能够保持一致，不受外部环境变化的影响^[1]。

3 复杂工况对测量精度与稳定性的影响

3.1 复杂工况的定义与特点

复杂工况指的是在极端或不稳定的环境条件下进行的工业生产过程，通常伴随着高温、高湿、振动、强电磁干扰等因素。这些工况的特点在于它们对仪器仪表的工作环境产生显著影响，可能导致仪器的测量误差和性能波动。例如，高温环境下，传感器的材料可能发生膨胀或变形，从而影响其测量结果；振动和冲击可能会导致仪器内部机械结构的松动或损坏，影响其长期稳定性。在这些条件下，传统的工业仪器仪表往往难以保持精度和稳定性，因此需要特别的设计与优化，以确保仪器能够在复杂工况下稳定运行。

3.2 环境因素对测量精度与稳定性的影响

环境因素是影响工业仪器仪表测量精度和稳定性的主要外部条件。温度、湿度、气压等因素可能会直接影响仪器的工作性能。例如，温度波动可能导致传感器的材料特性发生变化，从而使得测量结果出现偏差；湿度过高会引起电路短路或腐蚀，进而影响仪器的稳定性；气压变化则可能导致气体流量计和压力传感器的测量误差。因此，在设计和使用仪器时，需要考虑到这些环境因素，采取措施如温控、加湿或除湿等，以降低环境变化对仪器性能的影响，保证测量精度。

3.3 工况波动与仪器仪表响应特性分析

在工业生产过程中，工况波动是常见的现象，如压力、流量、温度等参数的突然变化。这些波动对仪器仪表的响应特性产生重要影响。响应速度过慢的仪器可能无法及时捕捉到工况变化，导致测量失真或延迟反馈；而响应速度过快的仪器则可能出现过度反应，导致系统不稳定。因此，分析工况波动的特点并优化仪器的响应特性至关重要。对于复杂工况中的波动，仪器需要具备较强的抗干扰能力和自适应能力，能够在瞬间调整其测量和控制策略，减少波动对系统的影响，确保生产过程的平稳进行。

4 测量精度与稳定性的评估方法

4.1 精度评估的基本方法

测量精度评估主要通过误差分析来进行，常用的方法包括偏差分析、标准差计算和相对误差测量。偏差分析用于评估仪器测量值与真实值之间的差距，通常要求测量误差不超过实际值的 2%。标准差反映了测量值的离散程度，标准差越小，说明仪器测量的稳定性和精度越高。例如，温度传感器在测量 100° C 的温度时，如果其标准差为 $\pm 0.5^\circ \text{C}$ ，表示仪器的精度相对较高。相对误差则是测量值与真实值的差异与真实值的比值，通常用百分比表示。对于流量计来说，要求相对误差不大于 $\pm 1\%$ 。通过这些基本方法，可以较为全面地评估仪器的测量精度，确保其在实际应用中的可靠性。

4.2 稳定性评估的技术手段

稳定性评估通常依赖于长期运行测试、温度循环实验以及应力测试等手段。长期运行测试通过在不同时间段内对同一仪器进行多次测量，比较其输出信号的变化，评估其稳定性。例如，某台压力传感器在连续使用 6 个月后，其输出信号的漂移不超过 $\pm 0.3\%$ ，表明该仪器具有较好的稳定性。温度循环实验则通过在不同温度范围内反复测试仪器，观察其性能变化。经过 100 次温度循环后，温度传感器的测量误差未超过 0.4°C ，证明其温度适应性和稳定性较好。应力测试则模拟工况下的外部冲击，通过对仪器的耐受性分析，进一步验证其稳定性。如果应力测试过程中，仪器输出信号波动在 $\pm 0.2\%$ 以内，则说明该仪器具备良好的稳定性，可以应对恶劣工况^[2]。

4.3 测量误差分析与修正策略

测量误差的分析与修正是确保仪器精度和稳定性的关键步骤。常见的误差类型包括系统误差、随机误差和人为误差。系统误差通常由仪器的校准不准确或环境因素引起，对于流量计而言，通过定期校准，保证误差不超过 $\pm 0.5\%$ 即可修正此类误差。随机误差则是由于测量环境的微小变化引起的波动，通常通过多次测量取平均值来减少误差。例如，某气体分析仪在测量时，其标准误差为 $\pm 0.3\%$ ，通过取 10 次测量值的平均值，误差可降至 $\pm 0.1\%$ 。人为误差主要源

于操作人员的使用方法不当,通过加强操作培训和标准化操作流程可以有效降低此类误差。对于复杂工况下的测量误差,除了常规校准和数据处理外,还可以通过建立误差模型,对仪器进行动态补偿,修正因工况波动引起的误差,保证测量结果的准确性。

5 工业仪器仪表在复杂工况下的优化设计与改进

5.1 仪器仪表设计的优化原则

仪器仪表的优化设计原则主要是提高其在复杂工况下的稳定性、精度和可靠性。首先,设计时需考虑仪器的抗干扰能力,特别是在高温、高湿、强振动等环境下,仪器应具备良好的抗电磁干扰能力和耐环境变化能力。例如,在电磁干扰较强的环境中,采用屏蔽设计和滤波技术,可以有效减少干扰信号,保证仪器的测量精度。其次,应优化仪器的结构设计,使其在恶劣环境下仍能保持较高的稳定性。在高温工况下,选择耐高温材料,并进行热隔离设计,可以有效减少温度波动对测量结果的影响。此外,模块化设计也是优化的重要方向,通过采用标准化模块和组件,可以提高仪器的维护性和更换便捷性,降低长期使用中的维护成本。优化设计还包括考虑仪器的自动化和智能化程度,提高其自适应能力。通过嵌入式系统与智能算法,使仪器能够根据环境变化自动调整工作参数,提升其在复杂工况下的适应性和稳定性^[1]。

5.2 提高测量精度与稳定性的技术途径

提高测量精度与稳定性是优化设计的重要目标,可以通过多种技术途径来实现。例如,采用高精度传感器可以显著提高仪器的测量精度。某高精度温度传感器的误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,而常规传感器的误差通常在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,通过采用这种传感器,精度得到了大幅提升。另一种方法是利用信号处理技术,对传感器输出信号进行过滤和补偿,从而减小噪声干扰对测量结果的影响。例如,使用高通滤波器可以有效消除低频噪声,确保信号的稳定性。此外,采用先进的温控技术,也能有效提高仪器在复杂工况下的稳定性。通过安装温控系统,使仪器在高温环境下能够保持恒定的工作温度,从而避免温度波动带来的测量误差。在一些高振动工况下,通过加装减震装置,可以减少振动对仪器测量的影响,提高测量的准确性和稳定性。通过这些技术途径的组合应用,可以显著提升工业仪器仪表的测量精度和长期稳定性。

5.3 仪器仪表校准与维护策略

仪器仪表的校准与维护对于保证其在复杂工况下的精

度和稳定性至关重要。定期校准是保障仪器精度的基本手段。例如,每隔6个月进行一次标准压力传感器的校准,确保其误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。对于测量误差较大的仪器,应根据生产环境的变化,缩短校准周期,确保其精度保持在要求范围内。校准过程中,需使用准确的标准设备和参照物,确保校准结果的可靠性。除了校准外,日常维护也非常重要。定期检查仪器的工作状态,及时清洁传感器和电路,以防止灰尘、腐蚀或其他污染物影响测量结果^[4]。例如,在湿度较高的环境中,传感器的电极可能会受到腐蚀,因此定期清洁并涂覆保护层,可以延长仪器的使用寿命。对于长期使用的仪器,建立定期检测与故障预测系统也是提高其稳定性的有效手段。通过安装智能监控系统,实时检测仪器的工作状态,一旦发现异常,如信号漂移或误差增大,即可进行故障诊断和修复,避免因设备故障导致的生产停滞和数据失真。通过这一系列校准和维护措施,可以有效提高工业仪器仪表的长期稳定性和可靠性。

6 结语

工业仪器仪表在复杂工况下的测量精度与稳定性是确保现代生产系统高效、可靠运行的基础。本文通过分析仪器仪表的基本原理、复杂工况对测量精度和稳定性的影响,以及优化设计与改进策略,提出了提高测量精度和稳定性的有效技术途径。无论是选择合适的传感器、优化仪器结构,还是采用精确的校准与维护策略,都能显著提升仪器在恶劣工况中的表现。随着技术的不断进步,未来的工业仪器将更加智能化、自动化,能够更好地应对复杂多变的生产环境。通过不断优化设计和改进措施,工业仪器仪表将在保障生产过程精准控制、提高产品质量、降低成本方面发挥越来越重要的作用,为工业自动化和智能制造的发展提供坚实的技术支持。

参考文献

- [1] 焦兴.自动化控制技术在工业仪器仪表中的应用[J].世界有色金属,2025,(22):229-231.
- [2] 董建宁.自动化技术在热仪器仪表计量检定中的应用及热仪器仪表计量检定的发展趋势研究[J].质量与市场,2025,(10):72-74.
- [3] 潘帝池,刘畅.工业仪器仪表中自动化控制技术的应用探析[J].装备维修技术,2025,(03):49-51+55.
- [4] 罗朝珠.自动化仪表工程安装与调试问题探析[J].硫磷设计与粉体工程,2025,(02):40-43+56.

Design and Performance Optimization of Composite Layer Based on Lightning Protection Film

Yingfei Huo Liangdian Liu Qian Nan Lulu Zhang Dongpei He

Yangzhou Pinghang Aviation Power Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

Abstract

To address the vulnerability of composite materials to lightning strikes in aerospace applications, this study investigates the structural design and performance optimization of lightning protection composite layers. By strategically selecting high-performance matrices and conductive materials, a multi-layer composite structure was developed, achieving coordinated enhancement of both shielding efficacy and mechanical properties. The results demonstrate that the optimized lightning protection composite layer not only significantly improves the material's lightning resistance but also enhances its overall strength and durability. This research provides robust technical support and theoretical foundations for safety protection of critical components in advanced equipment and the expansion of composite material applications.

Keywords

lightning protection film; composite material; structural design; performance optimization; lightning resistance capability

基于防雷击膜的复合材料复合层设计与性能优化

火盈飞 刘良点 南茜 张璐璐 贺栋培

扬州平航航空动力技术有限公司, 中国 · 江苏 扬州 225200

摘要

针对复合材料在航空航天领域易受雷击影响的问题, 本文开展了防雷击膜复合层的结构设计与性能优化研究。通过合理选用高性能基体与导电材料, 构建多层复合结构, 实现了材料屏蔽效能与力学性能的协调提升。研究表明, 优化的防雷击复合层不仅显著增强了材料的抗雷击能力, 还改善了其整体强度与耐久性。本研究为高端装备关键部位安全防护和复合材料应用拓展提供了有力技术支撑和理论依据。

关键词

防雷击膜; 复合材料; 结构设计; 性能优化; 抗雷击能力

1 引言

伴随航空航天技术的进步, 复合材料在航空器和航天器的结构部位中获得普遍使用, 然而其在高空飞行时易遭雷击等环境因素作用, 造成性能减退乃至失灵, 进而影响设备安全。当前的防雷击措施大多依托表面涂层或者嵌入导电材料, 然而难于兼备防护效果与力学性能, 常会造成强度减弱或者耐久性不够。变成迫切需要处理的技术难题。针对上述问题, 本文提出了一种依托防雷击膜的新型复合层设计方案, 借助多层结构改进, 恰当选择基体与导电材料, 达成复

合材料的防雷击性能和力学性能同时提高。通过试验得出的结果显示, 这项新设计大大加强了材料抵抗雷击的能力, 同时也让材料的强度和耐久性表现得到了优化提升。研究人员利用复合层结构的优化方法, 成功突破了传统防雷技术遇到的限制难题, 给航空航天领域中复合材料的可靠防护和高端应用提供了全新的解决思路 and 理论支持, 展现了非常重要的创新价值和广阔的未来应用空间。

2 防雷击膜复合材料的发展现状与需求

2.1 航空航天领域对防雷击性能的技术要求

航空航天行业快速进步导致性能更好安全标准更高, 雷击防护水平已经成为关键技术指标之一。飞机处在高空位置容易遇到雷电打击, 雷电打击会破坏飞机结构完整程度电子仪器安全水平产生很大损害。切实提升复合材料抵御雷击能力变成航空航天工程重要研究项目。雷击防护技术需求不单单针对雷电冲击进行直接阻挡, 还包含材料本身稳定程度耐久程度效果长期保持能力。航空航天行业需要抗雷击复合

【基金项目】扬州市科技计划产业前瞻与共性关键技术项目“飞机轻量化防雷击表面膜研制”(项目编号: YZ2023025)。

【作者简介】火盈飞(1989-), 男, 中国江苏人, 本科, 工程师, 从事复合材料研究。

材料必须具备优秀电磁屏蔽效果，不能因为增加防护层给飞机重量结构强度带来不利作用。材料务必可以在极端温度和气候条件下维持功能性，不妨碍飞行器的操作效率及安全性。这就关系到对复合材料结构和导电机理的详尽探究，还有对材料在实际应用中的可靠性验证，属于保证飞行器雷击防护性能合格的关键技术要求。优质的防雷击膜设计可以为飞行器给予更完善的防护，保证航空航天器材在恶劣环境中的持久可靠运作。

2.2 现有防雷击膜复合材料的技术瓶颈

现在防雷击膜复合材料性能和应用遇到一些技术困难。导电能力以及屏蔽效果还没有达到强大雷击环境里面完全保护要求，主要原因在于导电材料分布不均匀，材料之间连接效果差，最终造成屏蔽能力受到严重限制。力学性能方面，传统复合材料经常需要在结构强度和韧性之间艰难选择，因此限制材料复杂受力环境里面长期使用能力。防雷击膜复合材料制作过程特别复杂，不同材料匹配性很差，严重阻碍大规模生产可能性。制作过程参数出现稍微偏差，就会造成产品性能不稳定，影响实际使用效果。目前研究大部分只关注某一种性能提升，忽略屏蔽效果、力学性能、耐久性三者结合综合分析，迫切需要制定更加全面改进方案和性能测试方法，解决这些现有问题。

2.3 高端装备防护的应用挑战

高端装备对防雷击性能的需求越来越提升，特别是于航空航天领域，其对材料的耐久性、可靠性和轻量化特性带来了更严格要求。当前复合材料在达到力学性能的通常很难同时具备电磁屏蔽效能，这于雷击多发的环境中变成明显挑战。怎样于未提高装备重量的前提下，改善抗雷击性能同样为重大难题。此类因素制约了高端装备在严苛环境中的安全防护能力，迫切需要借助创新材料与结构设计以攻克。

3 防雷击膜复合层材料体系与结构构建

3.1 基体与导电材料的选择与配比

防雷击膜复合层材料体系当中，基体和导电材料选择以及比例搭配直接决定材料性能能不能明显提高。基体材料必须拥有优秀力学性能和热稳定性，这样才能适应航空航天应用非常严格环境。通常选用环氧树脂、聚酰亚胺或者其他高分子材料来作为基体，确保复合材料保持良好韧性和持久耐用性。导电材料主要包含金属纤维、碳纳米管、石墨烯这些种类，高导电性能成为最重要要求。导电相选择直接影响复合层屏蔽效果，必须根据具体应用目标需求来进行合理选择。材料比例搭配过程当中，需要把导电性能提高和力学性能保持两者平衡，通过多次实验找到最佳比例，确保复合材料高强度性能和耐冲击性能都得到明显提高。基础材料以及导电材料经过改善之后共同使用，可以提高复合材料整体性能，给航空航天防雷击提供可靠支持。

3.2 多层复合结构的集成原理

多层复合结构融合原理重点研究制造拥有很好屏蔽效

果和很强力学性能防雷击膜复合层。结构设计过程里面，高性能基体材料跟导电组分巧妙结合，制造出功能梯度分布结构层。导电层复合层表面合理布置，有效减弱电流密度集中，从而完成快速导流和减少损伤目的。每层厚度跟材质比例变成融合设计核心内容，这些因素一起决定复合材料雷击事件里面反应路径和损伤控制能力。复合层不同材料之间需要提高界面结合性能，确保结构整体力学稳定性。材料界面和内部结构协调设计，能够提高复合层抵抗雷击干扰时候整体耐受能力和热稳定性。这种融合原理提供防护性能技术支持，同时推动复合材料航空航天领域广泛应用。

3.3 屏蔽效能与力学性能的协同机制

设计防雷击膜复合层时，平衡屏蔽效果和机械性能属于主要目标。屏蔽效果代表材料面对雷击过程中电磁干扰的抵抗能力。选用高导电材料，比如金属填料，能够明显提高材料电磁屏蔽能力。保持整体结构机械性能，基体材料需要拥有高强度和韧性，承受雷击造成机械冲击和热应力。多层复合结构设计同时考虑各层材料电磁屏蔽特点和力学支撑功能，通过层间优化提升整体性能。这种平衡方式保证材料复杂环境里面拥有抗雷击并且可靠防护性能。

4 防雷击膜复合层性能提升策略

4.1 雷击防护能力的优化路径

提升防雷击膜复合层抵抗雷击能力，需要依靠材料性能改善以及结构设计两个方面。合理选择导电能力优秀并且稳定性强的导电材料，成为提高雷击防护效果最关键部分。导电能力强材料能够显著加快电荷快速转移和扩散能力，降低雷击能量集中程度，减轻雷击造成材料损伤程度。复合层里面基体材料选择直接影响吸收雷击能力以及承受损伤能力。基体需要拥有优秀电绝缘能力、耐高温能力以及力学稳定性，确保结构面对雷击产生高温时候保持完整。采用多层复合结构设计方式，实现材料厚度、电导率、机械性能最佳组合。借助改进层间导电路径，达成电流的高效分导和消散，减小雷击作用对于某个单层的损伤几率。在此基础之上，加入纳米级界面增强填料，提升层间结合强度，更进一步增强整体性能。依据雷击多物理场耦合分析，构建面向复合层设计的模型优化方法，能够给性能的提升给予理论支撑。

4.2 强度与耐久性的提升方法

提高复合材料强度和耐久性属于增强防雷击能力最重要部分。挑选基体材料必须注重力学性能和稳定性，高分子材料跟金属基体结合可以有效增加复合层结构强度和抵抗疲劳性能。加入纳米增强材料比如碳纳米管或者石墨烯，既可以提高材料强度，又可以改善抗磨损能力。复合层结构设计必须考虑层间粘接强度，采用适当界面处理技术增加不同层材料之间结合力，从而提高整体耐久性。导电材料分布优化必须保证雷击能量快速散开从而减少结构损伤。改善热机械性能对于材料在恶劣环境长期保持稳定非常重要。导电网络稳定程度和材料热膨胀系数必须特别关注，从而保证材料

在复杂条件保持稳定运行。

4.3 复合层服役性能的可靠性保障

选用材料结构使用过程这些环节全面考虑非常重要。挑选稳定性高基体材料加上耐久性好导电材料,确保复合层实际使用过程里面能够长时间保持优秀性能。设计合理层状结构能够减少环境应力带来损害,提高抵抗雷击能力。工程使用时候需要进行严格性能检测加上可靠性检查,确保材料复杂气候环境里面保持稳定状态保持安全状态。结合理论计算加上实验检验,构建可靠评估方法,用于指导材料实际应用以及推广使用。

5 防雷击膜复合层在飞机轻量化防护中的工程应用

5.1 关键部位轻量化防雷击表面膜应用需求

飞机用减轻重量的防雷击表层薄膜,关键部位使用要求重点体现在两个地方,一是把结构重量降下来,二是把防雷保护能力提上去。航空航天领域里面,设备零件重量大小直接关系到飞机飞得省不省油、效率高不高,所以必须选用特别轻的材料。但是重量很轻的材料一旦被雷击打中,大多数情况下防雷保护效果很差,几乎挡不住雷电。为了让飞机零件既轻又能很好地防雷,就要使用一种新型的防雷击薄膜复合材料。这种新型复合材料可以明显减小零件整体重量,同时拥有非常好的导电性能和结构稳定性,雷电打过来的时候能快速把雷电流安全导走,从而大幅降低飞机机身受到的损伤和破坏。关键部位通常受到飞行环境复杂作用影响,需要表面膜具备出色耐久性能和适应能力,保持长期稳定工作状态。技术要求驱动复合材料设计朝着更精密方向发展并且实现多种功能结合,确保不增加飞机整体重量情况下提高安全水平。通过这次应用需求分析,进一步清楚认识到轻量化防雷击膜在高端装备里面实现高效保护的重要性。

5.2 技术推广与应用前景

防雷击膜复合层航空航天领域工程应用具备广阔前景和重要价值。技术推广可以很好满足飞机减轻重量同时保持高安全防护两方面要求。利用经过科学设计的防雷击复合结构,能够保持整机重量基本不变情况下,大幅提升关键部位抵御雷击能力,这种做法非常符合当今航空器追求高性能低油耗发展目标,意义十分重大。应用前景主要体现在高端装备多个领域持续拓展。防雷击膜复合层拥有优秀屏蔽效果和突出力学特性,为技术用于商用飞机、无人机以及军用航空器表面防护提供可靠支持。技术逐步成熟并且实现部件化生

产,也为未来实现大规模工业生产创造必要条件。技术大概率发挥关键作用,进一步推动航空航天领域安全标准提升,并且扩大复合材料在先进装备防护方面应用深度和覆盖范围。

5.3 推动复合材料防护技术发展的理论价值与实践意义

阻止雷电击穿多层结构研究和应用给复合材料防护技术发展带来关键理论依据以及实用经验借鉴。采用新式材料搭配结合层层堆叠方式制造,显著提高材料阻挡性能和力学强度,达到航空航天领域减少重量和高安全标准两方面要求同时实现。这个成果不但推动复合材料在苛刻环境应用范围扩大,而且促进高端装备关键安全部位结构改进,对增加设备服役寿命和提高可靠性水平带来很大好处。这项研究给防护技术不断发展建立牢固科学根基。

6 结语

这项工作面对飞机航天复合材料需要防雷击保护的要求,认真完成防雷击膜复合层结构设计以及性能提高任务。利用优秀基体加上导电材料共同组合,实现复合层材料屏蔽效果和力学性能显著提高,给雷击情况重要设备提供可靠保护。测试数据清楚显示,经过提高复合层材料不但大幅加强抵抗雷击能力,而且提高整体力学强度和耐久能力,实现结构功能跟防护能力很好结合。工作存在一定不足,实际使用情况复合材料长期保持稳定情况以及多尺度损伤发展过程需要继续深入探索,雷击能量多种复杂变化引起微观反应机理仍然缺乏完整研究。性能优化过程中参数选择和材料界面设计仍需更深入精准化研究。未来能从多尺度模拟与实验验证、材料界面工程及复合层智能化适应等方向开展详尽工作,促进防雷击膜复合材料在更广泛、高端应用领域达成超越,并且为其持久可靠使用供给科学依据和技术保障。

参考文献

- [1] 奉晔.浅谈船舶防雷击[J].天津航海,2021,(02):40-42.
- [2] 肖尧,李斌,刘晓山,张献逢,董俊,魏小龙.碳纤维复合材料电导率改性及抗雷击性能[J].航空材料学报,2021,41(01):74-82.
- [3] 肖万宝,李洪峰,曲春艳,王德志,张杨,杨海冬,王永强.高韧性防雷击复合材料表面膜研究[J].航空科学技术,2023,34(01):105-110.
- [4] 王金莲,马闪红,廖可,高慧聪,毛萍萍.进口防雷击复合胶膜环境适应性研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2021,(02):0322-0323.
- [5] 张荣鑫,田世成,纪涛.VLCC复合材料风帆防雷击与静电标准探讨[J].中国船检,2023,(03):65-70.

Optimization of Conductive Performance and Structural Design of Lightning Protection Composite Film

Liangdian Liu Qian Nan Dongpei He Yingfei Huo Lulu Zhang

Yangzhou Pinghang Aviation Power Technology Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 225200, China

Abstract

With the increasing demand for lightweight and performance improvement of aircraft materials, lightning protection safety has become an important issue in structural design. This article focuses on the application of composite films in aircraft lightning protection, starting from the optimization of material conductivity, and comprehensively analyzing the influence of structural parameters on the conductivity path and film performance. By designing the thickness, interface structure, and material arrangement of the film layer reasonably, the composite film has significantly improved its current dispersion and shielding ability while ensuring mechanical strength. The optimization results show that structural design plays a key role in improving the overall lightning protection function of composite films, providing theoretical basis and technical support for the innovation and application of aviation and aircraft safety protection materials.

Keywords

lightning protection composite film; Optimization of conductivity performance; Aviation aircraft; Current dispersion capability

防雷击复合膜的导电性能优化结构设计

刘良点 南茜 贺栋培 火盈飞 张璐璐

扬州平航航空动力技术有限公司, 中国·江苏 扬州 225200

摘要

随着航空飞行器材料的轻量化与性能提升需求不断增加, 防雷击安全性成为结构设计的重要课题。本文聚焦于复合膜在飞行器防雷击中的应用, 从材料导电性能优化入手, 综合分析了结构参数对导电路径及膜层性能的影响。通过合理设计膜层的厚度、界面结构及材料排列方式, 实现了复合膜在保证机械强度的同时, 显著提升其电流分散和屏蔽能力。优化结果显示, 结构设计对于提升复合膜整体防雷击功能具有关键作用, 为航空飞行器安全防护材料的创新与应用提供了理论依据与技术支持。

关键词

防雷击复合膜; 导电性能优化; 航空飞行器; 电流分散能力

1 引言

航空飞行器于高空航行进程中常常遭遇繁杂的电磁环境, 特别是雷击事件对于飞行器结构安全形成了巨大威胁。复合膜凭借其出色的力学性能和优良的设计可塑性, 逐步变成防雷击技术的关键研究对象。本文全面解析不同结构参数对于复合膜导电路径和整体性能的交互影响, 意在给出一种既要保证机械强度, 同时可以明显提高防雷击能力的一类优化结构设计方案, 给航空飞行器防护材料的创新供给理论基

础和工程指导。

2 防雷击复合膜在航空飞行器中的应用现状

2.1 复合膜材料的基本特性与发展趋势

复合膜材料已经变成飞机防雷击这个领域里面非常关键的功能材料, 因为它拥有独特性能所以得到大家广泛关注。最核心优势就是导电性能很强、力学性能非常好并且环境适应性能也很优秀。通过认真选择合适材料并且合理设计结构, 复合膜能够在遭受雷击时候快速把电流分散出去, 从而明显减少高压电弧对飞机机身造成的局部破坏。重量很轻这个优点完全满足飞机需要减轻整体重量的要求, 这样就能让飞机整体飞行性能变得更好。目前研究工作正朝着功能更多样、制作更精密方向发展, 主要包括把多层结构设计得更好、把不同种类材料结合起来使用、把纳米技术加进去, 这些做法都大幅度增加了材料在导电性能、电磁屏蔽性能以及机械强度这些方面的提升空间。

【基金项目】扬州市科技计划产业前瞻与共性关键技术项目“飞机轻量化防雷击表面膜研制”(项目编号: YZ2023025)。

【作者简介】刘良点(1989-), 男, 中国安徽人, 硕士, 工程师, 从事复合材料研究。

2.2 现有防雷击复合膜的功能局限

目前使用的防雷击复合膜存在明显的功能缺点，具体体现在导电能力跟机械强度很难同时做到很好，而且电流分散能力比较弱。有些复合膜材料导电路径设计的不够合理，所以雷电流通过的时候分布很不均匀，容易出现局部地方温度升得特别高或者发生烧坏熔化的情况。膜层厚度厚薄不一致，或者跟基材表面粘合得不够牢固，就会导致界面出现脱落分开或者整体结构受到破坏。复合膜面对复杂电磁环境的时候，屏蔽效果和使用寿命都还不够理想。这些缺点严重影响了复合膜在高性能飞行器结构上面的大量应用，必须尽快通过调整材料成分和重新设计结构的方式来改进，才能真正满足实际使用的各种要求。

3 复合膜导电性能影响因素

3.1 材料成分对导电性能的作用

影响复合膜导电能力的最关键因素属于材料组成成分，不同种类材料本身具备的电导率高、分子排列方式还有接触面具体情况会直接决定导电通道能不能顺利形成以及电流通过时候效率到底有多高。制作复合膜整个过程里面，把高导电能力材料比如金属纳米颗粒、碳纳米管、石墨烯这些东西加进去，就能很显著地把整层膜导电能力提升上去。这些高导电能力材料依靠搭建出效率很高导电网络，给电流创造出电阻特别小通道，这样就大大增强复合膜遇到雷击时候把电流分散开的能力。复合材料里面基体材料跟导电填料之间相容程度好坏直接决定接触面情况优秀还是糟糕，相容程度特别好就能帮助确保导电网络分布得非常均匀，让整层膜导电能力变得更加稳定可靠。选择材料成分的时候必须同时考虑它的机械强度和适应各种环境的能力，要避免导电成分加得太多比例过大，这样做会使整个结构的强度变得比较差。通过改变和调整所用材料的种类以及它们之间的具体比例关系，就可以让整体性能得到比较大的提高。

3.2 膜层厚度与界面结构优化

膜层厚度大小和界面结构情况属于影响复合膜导电性能改善设计最关键的两个因素。关于膜层厚度这个部分，设计厚度合适就能同时满足电流容易通过的要求和材料需要足够结实的要求，膜层做得太厚就会让整体电阻变大，电流通过起来更困难，膜层做得太薄又会让挡住电磁干扰的能力变差。把界面结构改进做好，对于让电流流动的通道更加连续通畅并且更加稳定可靠这件事非常重要。界面接触地方的物理贴合质量好坏以及化学键合方式种类不同，会明显影响到电流能不能顺利通过以及能不能均匀分散。通过把界面之间的微小结构进行调控，比如让纳米级别的表面变得更加平整光滑、让界面之间结合力量变得更强，就可以明显减小电子在界面处被乱反射的现象，从而减小这种反射对整个导电能力的负面影响。两种材料接触的地方结合得不够牢固，这种情况会让电流通过时遇到很大阻碍，电流就会挤到一起形

成堵点，所以必须使用能够在不同材料接触面实现高效连接的技术来让接触面变得更好更通畅。控制膜的厚度并且同时把接触面的结构也管理好，这两件事一起做好对整个复合膜的性能变得更好起到了非常大的作用，同时也给怎样设计才能让导电能力变得更好提供了清楚的理论依据和指导。

3.3 材料排列方式对电流分散能力的调控

材料排列方式对复合膜电流分散能力有很大影响。导电材料在膜层里面怎么排列，直接决定载流子走哪条路以及走得快不快。通过让材料排列得很有规律，可以形成连续性更好的导电通道，这样电阻就会变小，电流分散效果也会变得更好。不同比例的导电材料分布结构，会影响到载流子运动是否均匀，如果分布不均匀，就容易在某些地方电场集中得很厉害，从而使防雷能力变差。把导电材料的排列方式改得更更有规律，比如采用交错层状结构或者均匀分散结构，就能非常有效地提升复合膜传导电流的能力，并且全面加强抵抗雷击的本领。

4 导电性能优化的结构创新

4.1 多层复合结构的构建思路

设计多层复合结构对于提高防雷击复合膜导电性能具有非常重要作用。通过科学合理构建各层之间关系，能够有效改善电流流动路径，提高复合膜分散电流能力以及屏蔽电磁干扰能力。在结构设计过程中，采用多层层叠方法，能够把不同材料各自优秀特性结合到一起，比如高导电层提供优秀导电能力、增强层提供更好机械强度、绝缘层提供电气隔离功能，这些功能一起发挥作用，最终实现机械强度和电气性能两者平衡统一。不同种类材料在多层结构里面合理安排位置，通过改善界面导电特性，能够显著降低整体电阻数值，提高整个材料导电效率。精确控制每层厚度对于形成合理电流流动路径非常重要，利用不同层之间界面产生特殊效应，也能够有效减弱雷击带来能量快速传递过程。多层复合结构有利于减弱单一材料对于整体性能的限制，进而明显提高复合膜的可靠性和使用寿命。优选构造的复合结构设计给航空飞行器赋予了更加高性能的防护能力，而且给新型防雷材料的研发建立了关键基础。

4.2 异质界面设计促进电流传导

不同材料之间形成的界面设计大大提高了复合膜的导电能力，这种设计最重要的一点就是通过调整界面的各种特点来让电流流动的路线变得更好。人们通过加入导电性能不同的材料成分，制造出导电能力、绝缘能力和机械强度各不相同的界面区域，这样就能非常有效地降低界面处的电阻大小，同时加快电荷移动的速度。研究人员对界面在微小尺度下的结构进行仔细设计，通过改变主体材料和添加填充物之间的排列方式以及分布的具体形态，最终让电流能够在整个膜上分布得更加均匀。不同材料形成的界面能够显著减少因为局部电流密度太大而产生的过多热量聚集和电弧放电现

象,这样就使膜层的结构更加稳定并且使用时间变得更长。采用多层界面互相交叉重叠的方式,将导电性能特别好的通道和高强度区域结合到一起,既实现了非常优秀的电磁波屏蔽效果,同时也让整体的机械强度保持稳定可靠。这种全新的设计方法为复合膜用来防止雷击损伤提供了非常好的改进途径。

4.3 机械强度与电磁屏蔽能力的综合提升途径

以便于提高导电性能的同时兼顾机械强度和电磁屏蔽能力的要求,研究集中于复合膜的多功能结构设计。借助改良复合膜的层间粘结力,强化材料界面处的力学性能,进而增进其抵御外界冲击能力。异质材料的合理组合能在达成优异机械性能的同时,构建连贯并且高效果的电流分散路径,强化电磁屏蔽效果。阶梯式膜层设计可以有力缓和内部应力集中,更进一步提升结构全局的力学稳定性和电磁性能。引入具备导电性以及高强度的纳米材料能在细观层面上巩固导电网络的连接性,既能提高电流传导性能,同时优化材料的屏蔽效能,因而达成多重性能的协同完善。

5 关键技术突破与工程应用前景

5.1 优化结构对飞行器防护效果的保障

调整结构设计对提高飞行器抵御雷击的能力具有关键作用。把复合膜材料的结构加以改进,就可以大幅增强电流扩散能力和电磁屏蔽能力,进而显著加强整体抵御雷击的保护性能。经过改进的多层复合结构,会仔细调整每一层的厚度大小和不同材料的叠放顺序,既能让电流高效顺畅地传出去,又能明显改善电磁屏蔽的效果。不同材料交界面的特别设计,在电流传导的时候起到连接通道的功能,让电荷在不同材料之间移动得更加流畅,这样非常有利于雷电流迅速分散到更大范围。工程师把这些结构设计方法全部结合起来,再应用到实际的工程项目中,就能够在尽量保持重量很轻的情况下,获得十分优秀的防雷保护效果。这不只提高了飞行器在雷击环境之中的安全性,而且促进了新型防雷材料于航空领域的应用。借助结构优化,材料在雷击保护里的表现获得更进一步改善,对克服传统复合膜材料于应用里的局限性带来了实用且高效的思路。在未来的航空航天防雷技术发展中,这一领域将会拥有优秀的应用前景以及宽广的发展空间。

5.2 工程实现中的主要难点及其解决路径

航空飞行器防雷击复合膜工程实现过程中,技术难点集中结构优化、材料兼容性、工艺控制这些方面。复合膜导电性能提升必须精确控制膜层厚度以及界面特性,但是实际制造里面,高精度加工工艺难以满足设计要求,造成性能波

动很大。复合膜材料热膨胀系数不同很容易产生界面不匹配情况,直接降低整体结构可靠程度并且缩短使用年限。保持机械强度条件下面,膜层电流分散能力提升会受到材料排列方式、工艺方法限制。面对这些技术难点,需要使用高精度制膜设备,搭配先进涂布技术、层压技术,来精确控制膜层结构。依靠挑选合适材料并且添加界面缓冲层来处理界面不匹配情况。另外建立依靠数值模拟方法工艺参数优化模型,提高材料排列均匀程度,提高导电路径形成速度和质量。各个不同学科的专家们开展合作,就可以让这种复合膜材料在实际的工程项目里面发挥出更好的使用效果。

5.3 未来航空航天防雷材料的发展方向

未来航空航天防雷材料将要重视智能化和多功能整合演进,借助纳米技术和仿生设计达成材料在导电性、轻质性及耐用性方面的全方位提高。研究将要聚焦于自愈合材料的应用、高性能界面优化还有绿色环保复合膜的研制,来适应极端环境之中的高效果保护,给飞行器带来更强稳定的可靠保证与更为环保持久的技术支撑。

6 结语

为了满足飞机等航空飞行器防止雷击的安全要求,研究人员深入开展了复合材料薄膜导电性能的改进结构设计工作。通过仔细分析薄膜厚度、层与层之间的界面结构以及材料排列方式这些关键因素,成功实现了导电路径的多层次调节,这样做显著提高了复合薄膜分散电流和屏蔽电磁的能力,而且很好地兼顾了材料机械强度的需求。实验和分析结果清楚表明,结构设计和材料选择联合优化才是增强复合薄膜防雷击能力的最主要方法,这种方法为飞机安全防护材料的实际设计和工程使用提供了全新理论依据和技术参考。值得注意的是,目前这项研究还存在一些不足之处,比如在复杂实际环境下薄膜长期性能的变化规律还没有完全弄清楚,多尺度计算机模拟结果跟真实使用条件之间还存在一些差距。未来,有必要进一步结合多场耦合仿真、耐久实验与新材料开发,细化复合膜在极端气候和复杂电磁环境下的防护性能研究,为飞行器安全防雷提供更为完善的解决方案。

参考文献

- [1] 杨帆.微型扑旋翼飞行器结构设计[J].中国科技信息,2021,(06):38-41.
- [2] 王璐,王樱霖,张永力,韩继先,侯锦秋,姜睿智.新型复合导电垫片的结构设计及性能研究[J].新技术新工艺,2022,(06):59-62.
- [3] 奉晔.浅谈船舶防雷击[J].天津航海,2021,(02):40-42.
- [4] 谌鑫杨海诚.基于数字化技术的单人飞行器结构设计及优化研究[J].南方农机,2021,52(05):34-37.

Progress on Large-area Perovskite Solar Cells: Toward Photovoltaic Application

Tiebin Yang

Shenzhen Skyworth PV Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518107, China

Abstract

Perovskite solar cells (PSCs) have shown huge potential for next generation photovoltaic due to its high power conversion efficiency (PCE) and low costs. However, the PCE of PSCs decrease dramatically from lab-scale small area devices (1cm^2) to large-area modules ($> 800\text{cm}^2$) because of the different fabrication method between spin-coating and slot-die or blade coating. In this review, we summarized the key technologies in large-area PSCs fabrication, including scalable perovskite film deposition method, nucleation engineering, and interfacial passivation strategies. Finally, outlooks and challenges on large-area perovskite module for photovoltaic application were discussed.

Keywords

perovskite; solar cells; large-area; review; film engineering

面向产业应用的大面积钙钛矿组件技术研究进展

杨铁斌

深圳创维光伏科技有限公司, 中国 · 广东 深圳 518107

摘要

钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 因其高光电转换效率 (PCE) 制备成本低等优势, 成为下一代光伏技术的有力竞争者。然而, 在从实验室厘米级器件放大至平米级工业化组件过程中, 随着 PSCs 器件面积增大, PCE 出现大幅下降。这主要由于小面积器件的制备难以导入大面积组件的实际生产中。本综述从大面积钙钛矿光伏组件制备的关键技术出发, 重点介绍薄膜沉积工艺、成核工程、添加剂工程以及界面调控策略。分析包括刮涂/狭缝涂布、真空闪蒸、气相辅助沉积、混合两步法等在内的可扩展制备技术, 并探讨溶剂工程、添加剂工程、界面钝化等如何协同解决大面积薄膜的均匀性、缺陷控制及稳定性难题。最后, 对大面积钙钛矿光伏组件技术发展未来和产业化前景进行展望, 旨在为钙钛矿光伏技术的规模化应用提供参考。

关键词

钙钛矿; 太阳能电池; 大面积; 综述; 成膜工艺

1 引言

本文首先总结大面积钙钛矿组件常用的成膜工艺, 然后从材料体系、添加剂工程、溶剂工程以及界面钝化等方面阐述实现均匀大面积钙钛矿膜层的方法策略, 并展望未来高效钙钛矿组件的应用前景。

2 大面积钙钛矿组件的成膜工艺

2.1 器件结构

PSCs 有五大功能层组成: 衬底透明导电层、电子传输层 (electron transporting layer, ETL)、钙钛矿层、空穴传输层 (hole transporting layer) 和电极层。按各膜层受到太阳光照射的顺序划分, 可分为 n-i-p 正式和 p-i-n 反式结构,

其 n/p 分别代表 ETL/HTL, 其中反式结构中的 HTL 主要有 NiOx, PEDOT:PSS, PTAA 等, ETL 材料主要有 C60/SnOx/BCP/PCBM 等, 正式电池中 HTL 通常为 spiro-OMeTAD, ETL 则多为 SnOx 和 TiO₂。早期的 PSCs 由于从染料敏化电池演化而来, 因此延续了其正式的电池结构。但在正式的电池的 ETL 中, TiO_x 的制备工艺需要高温退火, SnO₂ 的制备则需要长时间的化学浴沉积 (CBD), 高性能的 HTL 材料 spiro-OMeTAD 价格高昂同时需要有机锂盐进行活化, 限制了大面积钙钛矿正式组件的发展^[1-5]。

相比于正式 PSCs, 反式 PSCs 工艺更为简单, 常用的 HTL 材料 NiOx 可以通过旋涂或磁控溅射实现镀膜, PEDOT:PSS 和 PTAA 可以通过旋涂实现镀膜, 而 ETL 材料 C₆₀ 等则可以通过真空蒸镀的方式进行沉积, 大大简化了工艺流程并且提升了工艺的稳定性。此外, 近年来科研人员发现反式 PSCs 可以采用一种含有磷酸和咪唑基团的有机分子, 通过自组装形成单分子层 (Self Assemble Monolayer,

【作者简介】杨铁斌 (1997-), 男, 中国黑龙江宁安人, 博士, 从事钙钛矿太阳能电池研究。

SAM) 作为 HTL。SAM 材料具有高的空穴传输性能和内偶极矩, 能够实现界面处空穴和电子的定性传输, 大幅提升了反式 PSCs 的性能, 并在 2024 年后保持 PSCs 器件的效率记录。

2.2 可扩展的钙钛矿薄膜沉积工艺

PSCs 小器件的钙钛矿层通常采用一步旋涂法制备, 通过衬底高速旋转形成厚度均匀的钙钛矿湿膜, 随后经过热板退火使钙钛矿成核生长。经过十几年的发展, 在小尺寸器件 ($0.05\text{-}1\text{cm}^2$) 中, 旋涂工艺已经可以保证钙钛矿高质量的结晶过程, 同时通过混合溶剂体系 (N,N 二甲基甲酰胺, DMF 和二甲基亚砜 DMSO)、添加剂工程 (甲基氯化铵, MACl) 控制结晶, 实现超过 27% 的电池效率。此外, 在旋涂过程中通过对转速、反溶剂添加时间的精细控制, 旋涂法也可扩展至 $5\text{x}5\text{cm}^2$ 乃至 $10\text{x}10\text{cm}^2$ 的钙钛矿小组件。然而, 随着衬底面积扩大, 旋涂过程中的“咖啡环”效应更加严重, 同时由于旋涂过程中 90% 的溶剂被浪费, 限制了其在大面积上的应用。

此外, 钙钛矿膜层还可以通过二步法或全真空法制备, 即先采用真空热蒸镀的方式制备钙钛矿层中的无机盐骨架碘化铅 (PbI_2) 和卤化铯等, 再通过湿法涂布有机盐使无机骨架生长转化成钙钛矿膜层。在全真空法中, 有机盐层也通过真空蒸镀的形式通过相互扩散反应形成钙钛矿膜层。Huang 等人提出一种反向逐层沉积策略, 通过先蒸镀有机甲胺碘 (FAI) 再蒸镀无机前驱体 (碘化铯 (CsI) / 氯化铅 (PbCl_2) / 碘化铅 (PbI_2)) 来调控固相前驱体的互扩散。后续退火可显著增强界面接触、提升电荷提取效率, 并实现自上而下、垂直均一性优异的钙钛矿结晶。基于此, 制备出全热蒸发反式钙钛矿太阳能电池, 在 0.066 cm^2 活性面积下实现 25.19% 的光电转换效率, 1 cm^2 器件效率达 23.38%。未封装器件在最大功率点连续运行 1000 h 后, 仍保持初始效率的 95.2%。

大面积 PSCs 组件的钙钛矿层通常采用刮涂或狭缝涂布形成湿膜, 配合氮气风刀或真空闪蒸促进钙钛矿成核形成钙钛矿薄膜。这类方法工艺简单, 材料利用率高, 同时容易调节钙钛矿膜层的形貌和厚度。其中刮涂法通过刀头与基底间形成的狭缝, 将前驱体溶液以恒定的厚度涂布于移动的基底上。Zhu 等人通过引入“分子胶” (一种界面分子锚定剂, 三甲基氯化铵 (TMACl)), 降低 SnO_2 层界面处载流子符合, 采用刮刀涂布在环境空气中制备了孔径面积 57.20 cm^2 的组件, 实现了 21.60% 的认证效率, 并在 1500 小时最大功率点跟踪后保持了 93.25% 的初始效率。

狭缝涂布法中前驱体溶液则通过精密的狭缝头被泵出, 与衬底间建立半月板型液帘从而形成连续、均匀的湿膜。该技术更适用于高速、连续的大面积生产, 是显示行业中面板制造的标准工艺。Zhao 等人报道了使用狭缝涂布在 $30\text{ x }30\text{cm}^2$ 乃至 $1\text{ x }2\text{m}^2$ 的超大基底上制备均匀钙钛矿薄膜,

并获得了超过 20% 认证效率的组件。Xiao 等人则通过优化绿色溶剂体系 (γ -戊内酯/2-甲基四氢呋喃/二甲基亚砜), 结合边缘保护策略, 成功制造了 7200 cm^2 的商业尺度组件, 获得了 17.2% 的稳态认证效率, 并通过了全套 IEC 61215 可靠性测试。

综合来看, 采用二步法和全真空法工艺制备的钙钛矿膜层常具有较高的致密度和均匀度, 厚度控制精准, 工艺重复度高。但其原料利用率偏低, 在多源蒸镀过程中难以协同控制, 增加了工艺制备难度。同时在产业化过程中真空类设备成本和运营成本远高于涂布设备, 使得溶液法涂布成为当下大面积 PSCs 组件的首选工艺。但溶液法在干燥过程中, 由于表面张力梯度和马兰戈尼对流, 溶质易向边缘迁移, 导致薄膜中心与边缘厚度、成分不均。对钙钛矿前驱液的添加剂、溶剂工程, 以及风刀干燥和真空闪蒸过程中的成核与结晶动力学提出了新的要求。

3 大面积钙钛矿组件的工程策略

3.1 溶剂工程

区别于旋涂法中大量的溶剂在旋转过程中由于离心力的作用被去除, 涂布过程中全部的溶剂均保留在衬底表面形成前驱体的湿膜溶液, 这使得传统的 DMF/DMSO 混合溶剂体系不再使用。涂布采用的钙钛矿前驱体溶液既要满足钙钛矿前驱体材料的溶解性, 同时又要在风刀干燥或真空闪蒸的过程迅速挥发形成干膜。Chen 等人提出一种由 2-甲氧基乙醇 (2ME) /DMF/ 甲基-2-吡咯烷酮 (NMP) 组成的三元混合溶剂体系, 其中, 2ME (高挥发性、弱配位) 负责快速触发均匀成核, 抑制针孔; DMF 保证溶解; NMP (强配位、高沸点) 则通过与 PbI_2 形成稳定中间相, 拓宽加工窗口, 允许晶粒缓慢有序长大, 从而获得高质量大面积薄膜。基于此体系制备的反式组件分别在 100.15cm^2 和 2123.8cm^2 面积上实现了 18.73% 和 14.62% 的认证效率。

针对于 DMF 溶剂毒性问题, Xiao 等人采用低毒、高沸点、良好溶解性的 γ -戊内酯 (GVL), 搭配高挥发性的 2-甲基四氢呋喃 (2-MeTHF) 共溶剂来调节结晶动力学。同时配合十二烷基三甲基氯化铵作为表面活性剂, 调节在长时间涂布过程中溶剂边缘易挥发的现象。在 1017.5cm^2 的组件上实现了 22.1% 的转化效率, 并在 7200cm^2 组件上取得了 17.2% 的认证效率, 并成功实现 IEC61215 的商用认证。

3.2 添加剂工程

添加剂作为钙钛矿前驱体溶液中调控钙钛矿薄膜质量的重要方法, 已经被广泛应用于从小面积到大面积的 PSCs 制备过程中。添加离子液体通常可以调节钙钛矿的结晶动力学, 而添加具有不同官能团的小分子通常可以钝化体相缺陷, 提高器件的光电性能^[9]。

作为当前最常见的添加剂, MACl 被广泛的应用于钙钛矿前驱体溶液中, Kim 等人系统的分析了 MACl 在钙钛矿

薄膜成核过程中的作用,在结晶过程中 MACl 可以诱导中间相形成,进而促进钙钛矿活性相的形成。随着 MACl 含量增加,钙钛矿膜层的晶粒尺寸随之增大,膜表面粗糙度降低。形成能表明,与没有 Cl 的系统相比,Cl 在热力学上稳定了钙钛矿结构。Cl 的作用可以增强甲咪离子和碘离子的相互作用,这有助于提高钙钛矿结构的稳定性。Dou 等人开发了一种含乙二醇醚侧链的氯盐离子液体 (MEM-MIM-Cl),通过螯合未配位的 Pb^{2+} 形成中间相、调控钙钛矿结晶、稳定埋底界面,并显著提升了钙钛矿太阳能电池的效率和极端条件下的长期运行稳定性。基于 MEM-MIM-Cl 的器件实现了 25.9% 的转换效率,并在持续光照和 $90^{\circ}C$ 热应力下 1500 小时后仍能保持 90% 的初始性能。

Huang 等人用还原型甲基胍离子替代部分铯离子或甲脞阳离子后,能够有效抑制碘化物的氧化反应,并增加碘化物离子的迁移障碍。可以有效抑制相分离现象,从而提高宽带隙钙钛矿太阳能电池的稳定性。此外,胍基团通过 Pb-N 键与材料中的缺陷结合,起到了良好的钝化作用,开路电压损失仅低至 0.37V。在小面积器件上实现了 23.3% 的转换效率,制作的微型模组也展现了 19.8% 的转换效率。

3.3 界面工程

界面是载流子提取的关键区域,也是离子迁移、非辐射复合和降解的主要发生地。大面积组件的界面工程需具备均匀性、稳定性和可扩展性。

钙钛矿电池上界面通常可以通过多种长链铵盐小分子进行钝化,从而形成二维/三维钙钛矿异质结结构,对上界面能级进行调控,钝化表面缺陷位点的同时促进电荷的传输。

如何修饰钙钛矿电池的埋底界面是近年来受到广泛关注的话题。在反式钙钛矿电池中, SAM 材料如甲基 4-磷酸吡啶 (Me-4PACz) 因超薄、能级可调等,已成为小面积器件不可获取的材料。然而由于其超薄特质,使得在大面积制备过程的均匀性通常较差。为此, Zhao 等人开发了一种“SAM-in-matrix”策略,通过电增强锚定策略或将其嵌入稳定基质(如三(五氟苯基)硼烷, BCF),显著增强了 SAM 与基底 (ITO/FTO/ NiO_x) 的结合力与覆盖均匀性,提升了界面稳定性与大面积重复性。制备的 $2m^2$ 级大面积组件取得了 20.26% 的认证效率。

而在正式大面积钙钛矿组件中, HTL 层 SnO_2 的分散性和均匀度同样是提升组件性能的关键。Huang 等人将聚丙烯酸引入 SnO_2 纳米晶体墨水中,改善了纳米晶体的分散性并减缓了溶剂的蒸发速度,从而使制备的电子传输层具有理想的覆盖率。同时,聚丙烯酸还优化了界面结构,提升了电荷传输效率并抑制了非辐射复合现象。经过改性处理后的柔性器件具有 22.46% 的转换效率;在经过 3000 次弯曲测试后,其效率仍保持初始值的 89.3%;而在储存 200 小时后,其效率仍为 92.4%。尺寸为 $30 \times 30cm^2$ 的柔性模块的转换效率达到了 16.40%。

4 总结与展望

PSCs 目前已进入产业化快速发展的时期,大面积钙钛矿光伏组件的研发已从早期的简单工艺放大,进入以解决特定科学问题为导向的精细工程学阶段。本文回顾了大面积钙钛矿组件制备工艺中针对钙钛矿膜层开发的最新进展,主要得出以下结论。(1) 狭缝涂布因其较高的工艺稳定性和成本,已经成为大面积和产品级组件钙钛矿层制备工艺的首选。

(2) 制备低缺陷密度和高质量的钙钛矿薄膜的关键在于前驱体溶液的调控,通过溶剂/添加剂工程精准调控结晶动力学和成核窗口,实现高效的钙钛矿组件。(3) 大面积钙钛矿薄膜同样需要界面钝化实现载流子的有效传输,同时减少界面处的复合损失。

大面积钙钛矿组件的产业化还面临以下挑战:(1) 目前,小面积电池效率 > 中型迷你模块效率 > 超大组件效率的趋势依然明显。随着面积放大,光电流损失尤为显著。如何以可接受的成本代价,将 > 25% 的实验室电池效率几乎无损地放大到 > $1m^2$ 的组件上,是最大的工程科学难题。

(2) 实验室加速老化测试(如 ISOS 系列)与真实户外 25 年以上运行条件的等效性仍存疑问。在多样化的气候带(高温高湿、干热、寒冻、紫外辐照强烈等)进行长期、大批量的户外实证,收集真实世界的衰减数据,是目前商用组件需要解决的问题。(3) 高纯度、低成本的钙钛矿前驱体材料(如甲脞盐、铯盐)、专用添加剂、封装材料的规模化供应链尚未形成。此外,组件性能的测试标准、衰减率的评估方法、乃至含铅产品的安全标准与回收流程,都急需产业界与标准组织共同制定。

参考文献

- [1] KIRCHARTZ T, YAN G, YUAN Y, et al. The state of the art in photovoltaic materials and device research[J/OL]. *Nature Reviews Materials*, 2025, 10(5): 335-354. DOI:10.1038/s41578-025-00784-4.
- [2] KIM J Y, LEE J W, JUNG H S, et al. High-Efficiency Perovskite Solar Cells[J/OL]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(15): 7867-7918. DOI:10.1021/acs.chemrev.0c00107.
- [3] HAN J, PARK K, TAN S, et al. Perovskite solar cells[J/OL]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2025, 5(1): 3. DOI:10.1038/s43586-024-00373-9.
- [4] JIANG Q, ZHU K. Rapid advances enabling high-performance inverted perovskite solar cells[J/OL]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9(6): 399-419. DOI:10.1038/s41578-024-00678-x.
- [5] 彭飞, 白建明, 于越, 等. 高效柔性钙钛矿太阳能电池研究[J/OL]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 116-121. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-2008.
- [6] 曾雨熙, 陈建林, 田俏俏, 等. 钙钛矿太阳能电池的离子液体添加剂工程[J/OL]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 72-84. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1398.

Research on Quality Control Measures in the Process of Reducer Manufacturing

Jidong Lu

Jiangsu Taiyu Reducer Co., Ltd., Taixing, Jiangsu, 225402, China

Abstract

As a critical component in mechanical transmission systems, the manufacturing quality of gearboxes directly impacts equipment safety and operational stability. To enhance overall gearbox performance, this study explores quality control measures during production. First, it outlines key manufacturing stages and analyzes potential quality issues at each phase. Second, it systematically addresses common quality control challenges in raw material procurement, processing techniques, and assembly testing, proposing corresponding optimization strategies. The research demonstrates that enhanced process monitoring, improved inspection methods, and standardized operational procedures significantly improve gearbox yield and reliability. This study holds practical significance for guiding gearbox manufacturers in elevating quality management standards.

Keywords

reducer; quality control; manufacturing process

减速机制造过程中的质量控制措施研究

鲁继东

江苏泰宇减速机有限公司, 中国·江苏·泰兴 225402

摘要

减速机作为机械传动系统中的关键部件,其制造质量直接影响设备运行的安全性与稳定性。为提升减速机的整体性能,本文围绕制造过程中的质量控制措施进行探讨。首先综述了减速机制造过程的主要环节,分析各阶段可能产生的质量问题。其次,针对原材料采购、加工工艺、装配测试等环节,梳理了常见的质量控制措施,并提出了相应的优化建议。研究结果显示,强化过程监控、完善检测手段及标准化操作流程,有助于显著提升减速机的成品率和可靠性。该研究对推动减速机制造企业提升质量管理水平具有重要的实践意义。

关键词

减速机; 质量控制; 制造过程

1 引言

减速机作为动力传递和速度调整的核心机械部件,在工业制造、运输以及能源等多个领域起着至关重要的作用。随着我国制造业加快朝着智能化、自动化转型,对于减速机质量带来了更加严苛的要求。依据工信部有关数据显示,减速机产品的可靠性与成品合格率直接影响到下游高端装备制造制造的平稳运行和产业竞争力,并且制造过程中产生的微小质量缺陷常常会引发严重设备故障,带来经济损失和安全风险。综观国内外减速机行业发展,虽然部分企业已经采用ISO9001等国际质量管理体系,但在材料选取、生产工艺以及装配检测等环节,依然存在质量控制手段不健全、监控体系不严谨等显著问题。以前很多人已经对制造工艺改进、

无损检测、过程统计控制这些方向做了非常多的研究,可是实际用起来的时候,还是会碰到质量措施零散、标准落实到位这些老大难问题。这篇文章就是要系统总结减速机整个生产流程里最重要的质量控制方法,把原材料买进来开始,一直到加工、装配、测试每一个步骤,都具体分析质量问题到底是怎么产生的,然后提出真正能落地、效果好的改进办法,希望能给行业实现高质量发展的道路上提供一些有用的理论依据和实际操作经验。

2 减速机制造过程综述

2.1 减速机的重要性与应用领域

减速机属于机械传动系统里面绝对不能缺少的核心部件,主要任务就是把转速降下来,同时把动力顺利传递出去,这样可以明显提升设备运行效率,大量节省能源消耗,并且大大增强整套机器运行时的稳定性。人们可以通过调节输入轴跟输出轴之间的转速比例以及输出端的扭矩大小,让减速

【作者简介】鲁继东(1972-),男,中国江苏泰兴人,本科,工程师,从事减速机研发及质量控制研究。

机广泛用在电力行业、冶金行业、化工行业、矿山行业等各种工业生产场合，尤其在机床设备、输送生产线以及自动化生产线上占据特别核心的位置。现在减速机同样大量出现在新能源汽车、电动汽车还有智能制造设备当中，早就变成把先进技术真正变成现实生产力的最重要桥梁之一。

2.2 制造过程的主要环节

减速机制造过程包括多个关键环节，涉及原材料的选用与加工、零部件生产、装配测试以及最终成品检验^[2]。在原材料阶段，选取符合质量性能要求的材料是保证减速机性能的基础。零部件加工阶段需要采用精密加工工艺，以确保齿轮、轴承等核心部件的尺寸及表面质量达到标准。装配过程中，应合理控制装配工序，确保零部件间配合紧密，并避免因操作不当导致偏差。测试环节通过运行测试验证产品性能指标，及时发现潜在问题及隐患，提升可靠性。最终成品检验则依据标准规范对减速机各项性能参数进行全面核查，确保所交付产品符合设计要求。

2.3 常见质量问题及成因

减速机生产过程中质量问题最容易出现在原材料选购、零件加工、整机组装还有出厂检验这几个环节。原材料里面如果混进太多杂质或者材料强度硬度达不到要求，零件用着用着就容易出问题。零件加工时候受机床精度、设置参数、工人操作熟练度影响很大，一不小心尺寸就超差直接报废。组装时候前面每个小误差叠加起来加上工人没完全按规范操作，装好后的减速机跑起来就抖动噪音大不平稳。出厂检验时候用老旧量具或者检验方法不够完善，有些隐藏缺陷根本检查不出来。这些问题大多因为生产流程管得不够严、标准制定不够细、技术设备更新慢引起，直接损害减速机运行可靠性和使用寿命。只要把每个环节原因找清楚，再采取对应改进办法，就能把质量问题发生概率大幅降下来。

3 原材料与零部件质量控制

3.1 原材料采购与检验标准

原材料质量属于减速机制造过程中质量控制最核心部分，直接决定设备最终性能和可靠性高低。加强原材料采购和检验标准可以显著减少质量问题发生，保证后面所有工艺流程保持稳定。原材料采购阶段必须严苛筛选供应商，强制要求供应商提交完整质量证明文件、性能检测报告还有相关合格证书，同时形成稳定合作关系来降低采购风险。检验标准制定必须遵循行业规范跟国家标准，还要根据减速机具体设计和性能要求，对采购进来材料的化学成分、物理性能、机械性能开展彻底检测。采购和检验时候，使用先进检测技术和设备，比如光谱分析、无损检测这些方法，可以大幅提高检验速度和准确度。依靠建立一套完整原材料追溯系统，做到采购开始一直到供应结束整个过程都进行质量把控。必须保持一套随时运转检测机制，这样才能快速处理材料性能出现波动情况，确保每一批材料质量都稳定一致。把这个环

节好好改进，就可以大幅提升减速机生产出来质量，让产品更加可靠耐用，长远来看非常有利于制造企业保持强大市场竞争力。

3.2 关键零部件的加工控制

减速机核心零部件加工质量直接决定整台减速机性能好坏和能不能长期可靠运行。整个加工过程中必须严格控制每一种工艺参数，确保所有零部件尺寸精度、形状位置公差还有表面粗糙度完全达到图纸设计标准。不断优化加工方法，广泛采用高精度数控机床加上先进刀具技术，这样既能大幅提高加工速度又能保证更高精度，还能有效减少机床本身误差导致的质量问题。对于那些容易磨损零部件，一定要合理选用耐磨材料，同时必须做好表面热处理、渗碳淬火或者喷涂耐磨涂层等工艺，显著增强零部件耐磨能力和整体使用寿命。整个工艺流程设计必须做到完全规范化、标准化，彻底避免因为工艺安排不合理留下各种隐患缺陷。实际生产过程中一定要建立起一套完善质量监控体系，对每一个重要工序都做到实时检查跟踪，把加工误差控制最低限度，最大程度减少后续装配困难以及最终整机性能下降风险。

3.3 原材料追溯与管理机制

原材料追溯和管理办法能起到关键质量保障作用。建立完整追溯系统，可以实现从原材料采购、存储、使用一直到成品交付的全过程信息都要登记记录，这样就能确保原材料来源可靠、同一批次不会混淆。使用信息化管理方式，通过条形码或者二维码给每份原材料做标记，这样就能随时跟踪、精准找到具体材料。加强供应链管理，制定清楚原材料质量标准 and 验收要求，跟供应商一起把出厂检测做得更好。一旦出现质量问题，通过追溯数据分析就能快速找出问题所在、查清哪个环节责任，从而大大提高减速机整个制造过程质量的稳定程度。

4 生产工艺与装配流程优化

4.1 关键工艺参数控制措施

精准控制关键工艺参数，才能可靠确保减速机制造品质这个核心环节。加工过程中，工人对齿轮啮合部分、轴承匹配部分、密封部件这些重要零件，进行精细调整工艺参数，就能大幅降低加工误差带来的品质问题。齿轮精度等级高低会直接影响传动效率高低和噪声大小，所以制定严格齿轮加工公差控制标准，可以减少啮合时候应力集中情况出现。轴承配合尺寸必须完全按照设计图纸要求进行检测，这样才能防止设备运转时候产生振动或者轴向窜动问题。密封部件加工时候需要特别重视表面粗糙度数值和密封间隙大小，这样做才能确保设备长时间运行也不会出现渗漏油液情况。

温控和湿度监测对生产过程中精密部件的尺寸稳定性亦拥有重要意义，能通过即时调节生产环境参数，保证工艺稳定性。同时加工设备的精度维护必须列入持续监测机制，定时开展检修校准，以免由于设备老化导致产品质量波动。

通过优化工艺参数控制且健全监控标准，能够达成减速机生产过程中的质量均一性与可靠性提高。

4.2 装配过程中的质量保障

执行过程的质量保证对减速机生产拥有关键作用，依靠规范高效的执行流程设计加上严格的质量控制手段能够显著减少废品率同时提升产品性能。执行阶段必须保证零部件完全达到技术规范要求，具体包含形状尺寸还有表面光洁度这些方面。执行人员需要掌握专业技术知识而且认真执行标准化作业指导书，这样可以减少人为错误给产品质量带来的不良影响。执行环境一定要维持洁净无尘状态，这样才能避免灰尘杂物进入关键部位从而导致设备后期运行出现故障。执行完毕之后要开展全面检验，着重检测装配间隙配合情况、润滑是否到位以及整机运转是否平稳。利用现代化检测设备对关键部件和装配结果开展精准测量，达成质量信息的全程可追溯和实时监控，这样有利于快速识别问题并且不断优化生产流程，最终提高减速机的可靠性和使用寿命。

5 检测手段与质量监督

5.1 检测技术的选用及发展

检测技术选择和不断发展能大大提高减速机产品质量，这一点非常重要。减速机检测技术主要包括尺寸测量、性能测试还有无损探伤，这些都直接关系到产品质量好坏。尺寸测量通常使用精密数控测量设备，比如三坐标测量仪，来保证每个零部件完全达到设计标准。性能测试主要集中在检测转矩、效率、振动这些关键指标，通过现代动态测试设备完成实时数据采集和分析，这样就能保证减速机完全适应各种复杂工作环境。无损检测技术包含超声波探伤和射线探伤，在发现材料内部缺陷和疲劳损伤时起到关键作用，可以彻底避免这些隐患危害最终产品质量。

随着工业智能化发展，减速机检测技术逐步迈向自动化智能化阶段。依靠光学原理打造的在线检测系统加上人工智能技术应用，明显提升了生产过程中检测效率和精度水平。检测技术持续改进不仅增强质量监督力度，还给减速机制造企业质量管理模式提供了强有力支撑，推动企业更好满足客户更高市场需求以及行业最新标准要求。

5.2 过程监控与智能化检测

过程监控加上智能检测技术用在减速机生产里，对把产品质量做得更好具有非常大的意义。厂家通过使用最新传感器和监控设备，可以实现生产过程中数据随时采集和分

析，快速发现可能出现的问题，然后马上采取措施进行纠正。智能检测技术依托人工智能和大数据分析平台，能够对重要工艺参数进行准确评估，确保整个生产过程保持稳定和一致。智能检测技术用在减速机检测环节能够精准捕捉哪怕非常微小的偏差，这样就能大大提高产品的合格率和使用可靠性。生产每个环节都实现自动化数据记录和追溯功能，给质量管理带来可靠依据，有助于推动企业质量管理体系不断创新和升级。

5.3 成品检验与可靠性提升措施

最后检测属于减速机生产过程中最关键一步，它直接决定产品性能好坏还有靠不靠谱。使用先进测量设备和技术，可以彻底考核减速机尺寸到底准不准、转起来稳不稳、扛不扛得住重负荷这些关键指标。制定严格检测标准和判断规则，可以大大减少因为质量问题引起的返工浪费。依靠引入疲劳试验、环境适应性试验这些可靠性测试，能够提前预测产品真实使用环境里能不能持久稳定工作，进而确保每台减速机跑起来都稳稳当当、质量始终如一。

6 结语

本文针对减速机制造过程中的质量控制措施进行了系统性研究，明确了各制造环节中影响产品质量的关键因素。通过对原材料采购、加工工艺及装配测试环节的细致分析，提出了实施过程监控、优化检测手段和标准化操作流程的有效举措。研究结果表明，上述措施能够显著提升减速机的成品率和运行可靠性，为制造企业优化质量管理体系提供了可行路径和理论支持。尽管本研究聚焦于现有工艺条件下的质量控制，仍存在自动化水平、检测精度及新材料应用等方面局限。未来可结合智能制造技术，大数据分析以及绿色制造理念，进一步完善减速机生产全过程的质量管控，以适应产业升级与市场需求变化。后续研究可深入探索不同行业应用场景下的个性化质量控制方案，为减速机制造业的高质量发展提供持续动力。

参考文献

- [1] 孙意良.减速机维修过程中的质量控制措施研究[J].中国设备工程,2021,(09):267-268.
- [2] 马义龙.热连轧主减速机采购质量控制[J].一重技术,2021,(06):71-72.
- [3] 蔡春堂,陈星宇,蒋雪.机械制造过程质量控制措施[J].造纸装备及材料,2021,50(04):68-70.

Research on Anti-Interference Design and Performance Verification of Electrical Secondary Relay Protection Devices

Fantao Wu

Yunfeng Power Plant, State Grid Lvyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

Electrical secondary relay protection devices serve as critical components for the safe operation of power systems, where their anti-interference performance directly impacts the accuracy of protection actions and system stability. With the increasing intelligence of power grids, challenges such as electromagnetic interference, power fluctuations, and communication noise have become more prominent. Based on analysis of interference sources and transmission mechanisms, this paper proposes a comprehensive protection system integrating hardware electromagnetic compatibility design, optimized signal isolation and filtering, and collaborative software fault tolerance with anti-interference algorithms. Simulation and field tests demonstrate that combining shielding and grounding optimization with digital filtering technology can significantly reduce interference amplitude and enhance system immunity. Adaptive algorithms and data redundancy mechanisms further improve device robustness. This research provides crucial technical support for improving the reliability of relay protection devices and ensuring the safe operation of smart grids.

Keywords

electrical secondary system; relay protection; anti-interference design

电气二次继电保护装置的抗干扰设计与性能验证研究

吴钊滔

国网绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

摘要

电气二次继电保护装置是电力系统安全运行的关键环节，其抗干扰性能直接关系到保护动作的准确性与系统稳定性。随着电网智能化程度提升，电磁干扰、电源波动及通信噪声等问题愈加突出。本文基于干扰源与传导机理分析，提出硬件电磁兼容设计、信号隔离与滤波优化、软件容错与抗干扰算法协同的综合防护体系。通过仿真与实测验证发现，屏蔽与接地优化结合数字滤波技术可显著降低干扰幅值，提高系统抗扰度；自适应算法与数据冗余机制进一步增强装置稳健性。研究为提升继电保护装置可靠性和智能电网运行安全提供了重要技术支撑。

关键词

电气二次系统；继电保护；抗干扰设计

1 引言

电气二次系统是电力系统中承担信息采集、信号传输与控制执行的重要环节，其核心设备——继电保护装置在异常情况下承担切除故障、保障电网稳定的关键任务。近年来，随着电力系统的自动化与数字化程度不断提高，装置的电子化、通信化特征更加显著，使其暴露在复杂的电磁环境之中^[1]。高频脉冲干扰、电磁辐射、地电位反击、浪涌冲击等因素，均可能导致保护误动、拒动或数据异常，从而引发系统连锁故障。抗干扰设计因此成为继电保护装置研发的重要方向。本文基于电磁兼容理论与系统工程方法，从硬件设计、软件算法及实验验证三方面入手，构建抗干扰技术体系，

并通过性能测试验证其有效性，旨在为电气二次系统的可靠运行提供可行的设计与验证参考。

2 电气二次继电保护装置的干扰特征与影响机理

2.1 干扰源与干扰类型分析

电气二次系统处于强电磁耦合环境中，其干扰来源可分为系统内部与外部两大类。内部干扰主要源自电力设备运行过程中的高能开关操作、电弧放电、变压器励磁涌流及电力电子元件产生的高频谐波。这些干扰常沿电源线与控制回路传导，对敏感信号通道造成冲击。外部干扰则多由雷击、电磁辐射、地电位反击及通信线路感应耦合引起，其影响范围更广、能量更高。干扰信号的频谱特征从低频工频谐波到高频瞬态脉冲均有分布，呈现出突发性和随机性。传导途径包括电源线传导、信号线感应以及空间电磁辐射三种形式^[2]。

【作者简介】吴钊滔（1989-），男，中国吉林集安，本科，中级，从事电气二次继电保护研究。

在复杂耦合条件下，干扰会导致采样偏移、逻辑误触发、通信丢包等问题，从而威胁继电保护装置的准确性与系统运行的连续性。

2.2 干扰对继电保护装置的影响机理

干扰信号通过电磁感应或导通路径侵入装置电路，产生寄生电压、电流并干扰信号处理过程。输入通道受到干扰时，易导致采样信号畸变，A/D 转换精度下降，进而影响保护算法的判断结果。高频脉冲会在极短时间内改变电流、电压瞬态值，使系统误判故障类型或区段，造成误动或拒动。浪涌与静电放电可能损伤高阻输入模块及存储单元，诱发短暂失效或重启。通信干扰导致数据帧校验错误与丢失，破坏保护装置间的信息一致性，增加系统延时与误判风险。长期干扰还会引发元器件温漂、电磁老化及参数漂移，使保护特性偏离设计初值，降低装置可靠性与长期运行稳定性。

2.3 电磁兼容性设计的重要性

电磁兼容性（EMC）设计是提升继电保护装置抗干扰能力的核心途径，其目标是在复杂电磁环境中确保装置功能稳定，同时不对外界设备产生不良影响。通过抑制电磁发射与增强抗扰度两方面入手，EMC 设计实现对干扰源、传导路径及敏感设备的综合控制。合理的屏蔽、滤波与接地措施可有效降低辐射耦合；信号隔离与电源净化技术则减少传导干扰^[3]。对于智能变电站与数字化配电系统而言，电磁兼容性不仅是硬件可靠性的关键评价指标，更是远程通信、自动化调度及信息安全运行的技术基础。高水平的 EMC 设计已成为电气二次系统从传统保护向智能化保护转型的重要保障。

3 抗干扰设计的硬件实现策略

3.1 电路结构优化与电磁屏蔽

在电气二次继电保护装置中，电路结构优化与电磁屏蔽是抗干扰设计的基础环节。多层印制电路板（PCB）的合理布局可有效减少信号耦合与寄生电感影响，通过信号层、地层与电源层的分层设计，使高频干扰通路得到约束。模拟与数字电路应在板上分区布置，以降低相互耦合效应。金属外壳屏蔽、电缆编织屏蔽和接插件屏蔽可阻断外部电磁辐射进入装置内部，其中屏蔽层的接地应采取单点连接，以避免形成地环路电流。对于低电平模拟信号，可采用差分输入与屏蔽放大电路，显著降低共模干扰影响；开关电源及逻辑控制模块应增加磁珠、共模电感和 RC 滤波网络，从而削弱高频尖峰脉冲。经过优化的电路结构不仅提升了抗干扰能力，还改善了电磁兼容性，为系统稳定运行提供硬件保障。

3.2 接地系统与信号隔离设计

科学的接地与隔离系统是防止干扰传导的关键。继电保护装置内通常设置保护地、信号地与电源地三类接地系统，采用单点汇流或多点等电位方式可有效控制地电位差。为防止地回路干扰，模拟部分宜采用“星形接地”方式集中

汇入总地端，而数字部分可根据干扰频率选用分段或屏蔽接地策略^[4]。信号隔离技术在不同功能模块间构建电气隔离屏障，常通过光电隔离器、磁耦合变压器或数字隔离芯片实现。隔离不仅防止高压干扰沿信号链传播，也能避免强弱电混合引发误触发。电源系统应配备 LC 滤波器、稳压模块与瞬态抑制电路，以保障供电纯净与稳定。在分布式保护系统中，采用屏蔽双绞线或光纤通信可从物理层面切断电磁干扰的传播路径，实现信号传输的安全与高保真。

3.3 浪涌与静电防护技术

在复杂电网环境中，雷击、电网切换及感性负载操作会产生高能浪涌，对继电保护装置的输入回路和电源模块造成冲击。浪涌防护设计应采用分级吸收策略：在一次入口处设置压敏电阻（MOV）以限制过压幅值，中间级使用瞬态抑制二极管（TVS）吸收剩余能量，末端辅以气体放电管或防雷模块泄放高电流脉冲，构成多层能量分散体系。针对静电放电（ESD）问题，可在面板、接插件及信号输入端添加导电涂层或防护环，使静电荷沿最短路径泄放至地。合理的接地屏蔽结构能进一步抑制放电反击效应。为验证防护效果，应依据 IEC 61000-4-2 和 4-5 标准进行测试，确保装置在 $\pm 4\text{kV}$ 接触放电及 2kV 浪涌条件下仍稳定工作。完善的浪涌与静电防护不仅延长装置寿命，还显著提升其在极端环境下的运行可靠性与抗扰能力。

4 软件抗干扰与容错机制设计

4.1 数据滤波与信号重构算法

软件抗干扰的核心在于信号质量优化与数据可靠性增强。电气二次系统的采样信号易受随机噪声、周期干扰及瞬态脉冲的影响，若不经处理，可能导致保护逻辑误判或采样漂移。卡尔曼滤波通过状态估计与协方差更新实现动态去噪，能有效消除随机扰动；均值滤波与加权移动平均算法则在低频干扰环境中表现出较好的稳定性，适用于连续信号的平滑处理。对于电力系统常见的工频谐波干扰，陷波滤波器能精准消除特定频率成分，保证信号波形纯净。在采样异常或数据突变时，数据重构算法通过前后数据趋势建模与插值预测，实现连续信号的合理修复，避免因短时干扰触发保护误动作。通过自适应算法，系统可根据实时干扰强度自动调整滤波参数，实现动态响应优化，从而在复杂电磁环境下保持高精度与稳定性。

4.2 冗余逻辑与故障自诊断

冗余与自诊断是软件抗干扰的结构性保障。通过冗余判断机制与多通道采样设计，可在干扰状态下保持系统的容错能力与逻辑一致性。在关键保护单元中采用双通道独立采样系统，每个通道配备独立的 A/D 转换与数据比对逻辑，一旦某通道出现异常波动，由备用通道进行实时校核，避免错误动作。逻辑冗余不仅提升数据可信度，还增强了算法在极端环境下的决策稳定性。自诊断机制则通过周期性检测模

块温度、电源波动、信号偏差与通信状态，对系统健康度进行量化评估。当检测到异常参数时，程序可自动触发告警或重启模块，确保装置功能不受持续干扰影响。该机制赋予保护装置一定的“自愈能力”，在无人值守或远程监控环境中尤显重要，为电网自动化运维提供技术支撑。

4.3 通信与控制算法的防护机制

电气二次系统中的通信链路易受电磁耦合、数据丢包与延迟影响，需在软件层面建立完备的防护机制。通信防护采用 CRC 循环冗余校验、数据帧重发与时序比对策略，确保数据完整性与传输同步性。通过引入错误检测与自动纠错编码（ECC）技术，系统能在受干扰的信道中恢复原始信息。对控制逻辑而言，容错状态机可在信号异常时维持安全状态，而看门狗监控程序则防止 CPU 因强干扰陷入死锁，实现程序级恢复。数据缓存与时钟同步模块使系统具备抗延迟能力，在多节点通信中保持逻辑一致。软件防护策略与硬件滤波、隔离技术形成互补关系，显著提高装置在强电磁环境中的通信可靠性与控制稳定性，确保继电保护动作的及时性与准确性。

5 性能验证与实验分析

5.1 实验平台与测试方法

为了系统验证电气二次继电保护装置的抗干扰设计效果，构建了以 DSP 控制芯片为核心的实验验证平台。平台包括信号采样模块、控制运算单元、输出执行模块及监测记录系统，能够模拟实际电网运行环境下的多种干扰条件。测试依据 IEC 61000-4 系列标准，覆盖静电放电、浪涌冲击、电快速脉冲群、电磁辐射等典型干扰源。试验采用逐级叠加法，即在干扰等级逐步提升的条件下，对装置动作时间、误动率与恢复特性进行综合评估。为确保数据的准确性，测试过程设置多通道监测系统实时采集关键参数，并利用高精度示波器记录瞬态响应波形。不同干扰类型下的响应结果经过统计分析与重复验证，形成装置抗干扰性能曲线。该平台能够在实验室条件下再现复杂电磁环境，为抗干扰结构设计和参数优化提供可靠依据，也为后续标准化测试方法的建立奠定了技术基础。

5.2 实验结果与数据分析

实验结果表明，经电磁屏蔽、滤波及接地系统优化后的继电保护装置，在多类电磁干扰条件下均表现出良好的抗扰性能。具体而言，在 $\pm 4\text{kV}$ 静电放电测试中，装置输入输出信号稳定，无逻辑误触发现象；在 2kV 电快速脉冲群干扰下，采样误差控制在 0.2% 以内。浪涌冲击实验中，保

护逻辑响应延迟不超过 2ms ，误动作率下降至 0.05% ，较传统设计降低约 80% 。采用双通道冗余采样与软件滤波协同机制的装置，在 10V/m 电磁辐射环境下依然能准确判定故障类型并输出正确动作指令。数据统计显示，优化后系统输出信号稳定性提升约 25% ，故障检测精度提高至 99.7% 。对比分析验证了硬件电磁兼容设计与软件容错算法的协同作用能够显著提升系统整体抗干扰水平。

5.3 工程应用与验证结论

所提出的抗干扰设计方案在 220kV 变电站二次系统中进行了长周期工程验证。装置在实际运行环境中经受了雷击、电网操作波及高频通信干扰等多重考验，连续运行一年无扰动与拒动记录。监测数据显示，装置在强干扰时段的信号波动小于 2% ，系统可靠性达到 99.9% ，远高于行业平均水平。现场测试进一步验证了硬件屏蔽、接地分区与软件算法相结合的多层防护体系在复杂环境下的稳定性与实用性。通过工程数据回溯分析发现，该设计有效降低了电磁耦合路径的影响，提高了抗干扰裕度，为后续智能继电保护装置标准化与智能化升级提供了技术支撑。研究成果证明，多层次抗干扰结构在电力系统中具有可复制性与推广价值，对提升电网自动化设备的安全性及可靠性具有重要工程意义。

6 结语

电气二次继电保护装置的抗干扰设计是电网安全运行的重要技术保障。本文通过硬件屏蔽、信号隔离、滤波控制及软件容错等多层次设计，建立了完整的抗干扰体系。实验验证表明，硬件电磁兼容结构与自适应算法的协同优化，显著提升了装置在复杂电磁环境中的稳定性与动作精度。未来，随着电力系统智能化和网络化水平的提高，继电保护装置的抗干扰设计将向智能识别与自学习方向发展。结合 AI 算法的自适应干扰检测、云端容错诊断及协同防护网络，将成为提升电网韧性的新路径。抗干扰性能的持续优化，不仅是电气二次系统技术进步的标志，更是智能电网安全可靠运行的核心支撑。

参考文献

- [1] 洪灿灿.浅谈电气二次回路的干扰与抗干扰[J].企业技术开发, 2012,31(26):89-91.
- [2] 闫强强.电力系统中的电气二次与继电保护研究[J].科技资讯, 2024,22(06):92-94.
- [3] 王小周.探讨电力系统中的电气二次及继电保护[J].电子世界, 2017,(03):159-160.
- [4] 孙浩.干扰对于继电保护设备安全运行的影响及预防[J].电站系统工程,2011,27(02):73-74.

Research on the Failure Mechanism of Electronic Components Based on Destructive Physical Analysis

Peng Zhang Huan Yang

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract

As the core foundation of equipment systems, the reliability of electronic components directly determines the overall performance and mission success or failure. This article uses destructive physical analysis (DPA) as the main research method to systematically explore the failure mechanism of electronic components. Through structural dissection, material characterization, and microscopic analysis of typical components, the results show that DPA can reveal the physical essence of material defects at the microscopic scale, accurately locate key failure links, and further identify the interaction path of coupled stress and the physical mechanism of failure. These analysis results can provide scientific basis for the selection of packaging materials, process optimization, and reliability enhancement design. On this basis, this article proposes an optimization strategy for failure traceability methods based on DPA, including standardization of detection processes, refinement of characterization methods, and systematization of data traceability, in order to improve the accuracy and engineering application value of component reliability assessment.

Keywords

destructive physical analysis; Electronic components; failure mechanism

基于破坏性物理分析的电子元器件失效机理研究

张鹏 杨欢

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

摘要

电子元器件作为装备系统的核心基础,其可靠性直接决定整机性能与任务成败。本文以破坏性物理分析(DPA)为主要研究方法,系统探究电子元器件的失效机理。通过对典型元器件进行结构剖解、材料表征与微观分析,结果表明:DPA能够在微观尺度上揭示材料缺陷的物理本质,精准定位失效的关键环节,并进一步识别耦合应力的交互路径与失效物理机制。这些分析结果可为封装材料选择、工艺优化以及可靠性强化设计提供科学依据。在此基础上,本文提出基于DPA的失效溯源方法优化策略,包括检测流程规范化、表征手段精细化和数据溯源体系化等,以提升元器件可靠性评估的准确性与工程应用价值。

关键词

破坏性物理分析; 电子元器件; 失效机理

1 引言

国产化替代进程加速的背景下,DPA在电子元器件质量提升中的作用愈发重要。当前,大部分的电子系统故障都源于元器件早期失效,而传统外观筛查等非破坏性检测只能发现表面问题,不能实现对封装内部的有效定位和材料微观层面缺陷的检测,致使失效分析停留在现象描述层面。破坏性物理分析通过定向拆解、显微观察和成分检测,可对电子元器件内部的封装分层、材料杂质等微观异常进行充分揭示,为设计优化和工艺改进工作的有序开展,提供有效的数

据支持。

2 破坏性物理分析的相关阐述

2.1 破坏性物理分析的定义

破坏性物理分析(Destructive Physical Analysis, DPA),是一种针对电子元器件的严格检测方法,旨在评估器件的内部结构、材料和工艺质量,即破坏性物理分析可以通过一系列物理试验和解剖分析手段,来验证电子元器件的设计、结构、材料以及制造质量是否契合预定用途或相关规范要求^[1]。DPA的主要作用包括验证器件是否符合规格要求、识别器件制造缺陷和工艺问题、评估器件的可靠性和寿命以及鉴别假冒伪劣产品。

2.2 破坏性物理分析的技术特点

破坏性物理分析具备以下技术特点,包括微观可视化、

【作者简介】张鹏(1987-),男,中国陕西渭南人,本科,助理工程师,从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

无损与有损协同和全流程覆盖：①微观可视化^[2]。利用扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）等工具，实现对微米、纳米级缺陷的高精度观测；②无损与有损协同。依托X射线检测（X-ray）、声学扫描显微镜（SAM）等无损手段，对异常区域进行有效定位，并在此基础上，开展针对性拆解活动，避免出现全局破坏的情况，并有效平衡信息获取和样品完整性；③全流程覆盖。DPA可以实现从互连结构到材料界面、从封装外壳到内部芯片的全环节检测和分析。

3 基于破坏性物理分析的电子元器件失效机理分类与归因

3.1 封装结构缺陷相关失效机理

材料物理特性不匹配、界面结合强度不足和封装工艺控制不当，是致使封装结构缺陷相关失效的主要因素，也是电子元器件早期失效的常见原因。从破坏性物理分析的角度出发，可以将封装结构缺陷相关失效机理划分为以下三种类型：①材料热膨胀失配引发的界面分层。陶瓷、塑封料等不同封装材料，具有显著差异的热膨胀系数（CTE），其中，典型陶瓷CTE约为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、常用塑封料CTE介于 $20 \sim 30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。当电子元器件经历温度循环时，材料间会因CTE差异产生剪切应力：高温下膨胀速率快的材料试图拉伸膨胀慢的材料，低温下则反向收缩，从而致使界面区域反复承受拉压应力循环。X-ray断层扫描、声学扫描显微镜等可直观揭示分层位置和拓展路径：初期表现为微米级空洞，随应力循环累积逐渐连通形成宏观分层。当分层区域扩展至互连结构附近时，会导致键合拉力下降、电信号传输中断，严重时甚至引发封装壳开裂。②封装内部孔洞与气密性失效。塑封料流动不充分等工艺缺陷会致使内部残留空洞，不仅会降低封装结构的机械完整性，更会破坏器件的环境隔离能力。并且，空洞也可能导致水汽、氧气渗透，从而引发内部金属化层氧化。对于非气密性塑封器件而言，空洞内部可能会积聚潮湿气体，且在高温条件下，形成蒸汽压力，加速界面分层以及塑封料开裂。破坏性物理分析通过切片观察，可确认空洞和周边材料的结合状态。③键合界面缺陷与互连可靠性下降。引线框架的连接等引线键合以及倒装焊的凸点互连质量，会对封装结构的电学与机械可靠性产生直接影响，常见缺陷包括键合空洞、键合根部撕裂、焊盘金属间化合物（IMC）生长过度等。基于破坏性物理分析，可通过扫描电子显微镜，观察键合截面并发现：键合空洞区域在振动或温度循环应力下易成为裂纹萌生点、过厚的IMC层会降低键合界面延展性。此外，封装设计缺陷也会加剧应力集中，进一步恶化键合可靠性。破坏性物理分析通过微观尺度证据可以揭示这些缺陷的物理本质，为封装材料选择、工艺优化和可靠性强化提供直接依据^[3]。

3.2 材料与工艺缺陷相关失效机理

材料本身的固有缺陷和工艺参数偏离设计等，是促使

材料与工艺缺陷相关失效的主要因素，也是导致器件性能退化或早期失效的重要诱因^[4]。基于破坏性物理分析视角，可以将材料与工艺缺陷相关失效机理划分为以下三种类型：

①材料固有缺陷与微观结构不均匀性。半导体材料、金属互连线和绝缘介质的特定物理特性，与电子元器件的核心功能息息相关，但晶格畸变、杂质偏聚等材料内部预存的微观缺陷，会在外部载荷下演变为失效核心，加速失效进程，如位错堆积引发微裂纹、金属互连线中Cu、Sn界面金属间化合物层厚度不均引起电阻异常升高、焊料合金冷却速率失控形成非晶相。破坏性物理分析可以实现对这些缺陷的有效诊断：利用透射电镜（TEM）衍射斑点分析，可以基于晶面间距偏差 $> 0.02\text{nm}$ 的预判标准，识别晶格畸变；利用电子探针（EPMA）成分扫描，可以基于局部杂质浓度 $>$ 基体10倍的预判标准，识别杂质偏聚；利用X射线衍射（XRD）物相定量，可以基于非平衡相占比 $> 15\%$ 的预判标准，识别相分布异常。②工艺过程缺陷与参数控制失效。一旦制造工艺参数偏离设计窗口，便会在极大程度上致使关键结构未达到预期性能，故而，制造工艺的精准控制对电子元器件的可靠性至关重要。一般情况下，若溅射镀膜环节腔室真空度 $> 5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ ，则会导致金属膜层孔隙率 $> 3\%$ ，电阻漂移；若回流焊接环节峰值温度 $> 250^{\circ}\text{C}$ 或 $< 220^{\circ}\text{C}$ ，则会出现虚焊、IMC过厚的情况；若塑封成型环节固化压力 $< 4\text{MPa}$ ，则会导致内部气泡率 $> 0.1\%$ ，引发分层。破坏性物理分析通过X射线检测焊接孔洞、SAT扫描界面分层，可实现对异常区域的有效锁定，进而可以确定工艺缺陷类型。③杂质与污染引入的可靠性退化。电子元器件制造过程中引入的微量杂质、环境污染物等，可以通过改变材料电学特性、催化化学反应的方式，切实降低元器件可靠性。通常情况下，铜、钠等金属离子会在半导体器件中形成深能级陷阱，增加漏电流，或引发阈值电压漂移；钠离子可从封装材料、工艺设备中引入，在高温或电场作用下迁移至芯片表面，与二氧化硅中的硅结合形成导电通道，致使绝缘失效；封装过程中的水汽残留会在高温下形成蒸汽压力，加剧塑封料和芯片间的分层。破坏性物理分析视角下，二次离子质谱可检测材料深处的杂质元素分布、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）可定量分析杂质浓度、环境试验后结合SEM观察腐蚀形貌可验证污染物的失效贡献。破坏性物理分析通过微观尺度证据精准定位失效的源头环节，可以为材料选择、工艺优化和设计改进等提供不可替代的科学依据。

3.3 电应力与环境应力耦合失效机理

电子元器件实际应用环境中，电应力与环境应力耦合失效是典型模式。从破坏性物理分析的角度来看，电应力与环境应力耦合失效并非电应力或环境应力的独立作用，而是二者通过物理机制以及化学机制相互增强，致使材料性能退化加速、缺陷扩展阈值降低、失效模式复杂化。该失效机理可以划分为以下两种类型：①电-力耦合应力下的机械结构失效。环境机械应力和电负荷同时作用时，会致使封装结构

的机械载荷显著增加,从而引发裂纹萌生、扩展。如连接器在高频电流下产生的电磁力和机械振动的共同作用下,镀层和基底金属的结合界面会产生剪切应力,导致镀层剥落或微裂纹;引线键合线在温度循环引发的热膨胀位移和大电流电惯性力协同作用下,会令线弧根部承受拉压-弯曲复合应力,优先发生断裂。破坏性物理分析视角下,利用扫描电子显微镜可观察显示键合线根部裂纹拓展路径、利用动态力学分析仪(DMA)验证材料在电-力复合载荷下的疲劳寿命^[5]。

②电-热耦合应力下的材料性能退化与击穿。若电子元器件承受高电负荷,则所引发的焦耳热效应、开关损耗等,会导致局部温度显著升高。同时,高温环境会进一步放大电负荷的热效应,形成“电生热-热加剧电效应”的正反馈循环。如互连线在大电流密度与高温共同作用下,原子迁移速率呈指数级增长,阳极侧空洞快速扩展导致断路;功率器件的栅极氧化层在高温与高栅压协同作用下, SiO₂ 介质中的陷阱电荷加速积累,导致电场分布畸变,局部电场强度超过材料本征击穿场强的临界阈值,引发氧化层击穿。破坏性物理分析视角下,利用能谱分析可以揭示高温下金属互连线界面生成的氧化层增厚、利用透射电子显微镜可观察显示氧化层中陷阱电荷聚集形成的缺陷簇。破坏性物理分析通过微观尺度证据揭示了耦合应力的交互路径与失效物理本质,为可靠性设计和应用环境适配提供了关键科学依据。

4 基于破坏性物理分析的失效溯源方法优化策略

电子元器件的传统失效方法往往停留在现象描述、简单归因层面,不能对根本原因进行精准溯源。破坏性物理分析视角下,需要构建系统化、层次化的分析流程,进而实现对失效机理的精准定位。首先,可以从宏观特征分析、微观形貌解析、成分深度剖析和结构完整性评估四个维度入手,搭建多维度证据链。从宏观特征分析的视角来看,要主动利用外观检查、X-ray 透视、声学扫描显微镜等技术,确定失效位置、模式,建立失效的第一现场证据;从微观形貌解析

的视角来看,要利用扫描电子显微镜、聚焦离子束切片等技术,观察失效区域的微观结构特征,揭示失效的物理形态;从成分深度剖析的视角来看,要利用能谱分析、二次离子质谱、电感耦合等方法,确定关键区域的元素分布与杂质浓度,特别是迁移性离子的分布特征;从结构完整性评估的视角来看,要利用透射电子显微镜等技术,分析晶体结构缺陷、界面结合质量与材料相组成。通过搭建多维度证据链,可有效避免单一证据的误判。其次,要结合大量 DPA 案例数据,建立电子元器件失效模式数据库,即要按照材料类型、器件结构、应用环境等维度,系统分类常见失效模式,且建立不同失效特征与潜在失效机理的对应关系规则库,从而实现从个案分析到系统归因的有效跨越。^[6]

5 结语

新时期,电子元器件的可靠性挑战日益严峻。本文基于破坏性物理分析视角,对电子元器件的失效机理和失效溯源方法优化策略进行了分析,可以为可靠性设计、制造工艺优化、质量控制提供靶向依据。未来,要持续深耕失效机理研究,切实增强电子元器件可靠性。

参考文献

- [1] 王爽,周钦沅. 电子元器件破坏性物理分析方法国内外发展趋势[J].标准科学,2025,(S1):227-232.
- [2] 刘飞,赫兰齐,叶峻豪,等. 基于2.5D/3D封装集成电路的破坏性物理分析(DPA)方法研究[J].产业科技创新,2024,6(05):125-128.
- [3] 戴晨阳,王文辉,楼艳仙,等. 破坏性物理分析(DPA)技术对国产电子元器件质量保障的作用[J].工业控制计算机,2024,37(05):135-136+139.
- [4] 张庆瑞. 浅谈军用航空电子元器件的破坏性物理分析和质量控制[J].中国设备工程,2024,(06):153-155.
- [5] 杨智帆,阳川,李凌博,等. 基于破坏性物理分析的假冒翻新器件识别方法[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(04):47-51.
- [6] 于春宏,贾兴辉,朱涛. 电子元器件失效分析及发展探究[J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 9 (04): 32-34. DOI:10.19772/j.cnki.2096-4455.2025.04.009.

Analysis of energy saving effect of the turbine flow passage reconstruction

Yu Wang

State Power Investment Corporation Fushun Liaodian Operation Management Co., Ltd., Fushun, Liaoning, 113007, China

Abstract

To address energy cost pressures and meet energy conservation requirements, implementing energy-saving retrofits on turbine flow passages has become crucial for enhancing the efficiency of aging units. This paper investigates the technical approaches and practical outcomes of energy-saving retrofits for traditional steam turbines, which suffer from energy loss due to performance degradation in flow passages. The analysis identifies key energy consumption factors such as blade wear and clearance leakage, while detailing the energy-saving mechanisms achieved through core technologies including optimized blade profiles and grid structures, upgraded sealing systems, and improved steam intake/exhaust mechanisms. Field applications demonstrate that these retrofits effectively enhance energy conversion efficiency, improve load adaptability, achieve significant reductions in specific energy consumption, and enhance operational stability, providing an effective pathway for enterprises to reduce energy consumption and facilitate technological transformation.

Keywords

steam turbine; flow path; energy-saving retrofit; energy loss; operational efficiency

汽轮机通流部分改造的节能效果分析

王宇

国家电投抚顺辽电运营管理有限公司, 中国·辽宁 抚顺 113007

摘要

为应对能源成本压力与节能减排要求,对汽轮机通流部位实施节能改造成为提升老旧机组效能的关键。本文针对传统汽轮机因通流部位性能衰退导致的能量损耗问题,探讨了其节能改造的技术路径与实际应用效果。文章分析了通流部位叶片磨损、间隙泄漏等主要能耗成因,重点阐述了通过优化叶片型线与叶栅结构、升级密封技术、改进进排汽机构等核心技术进行改造的节能机理。实践表明,改造能有效提升机组能量转换效率,增强负荷适应能力,实现单位能耗显著降低,并改善运行稳定性,为企业节能降耗与转型升级提供了有效途径。

关键词

汽轮机; 通流部位; 节能改造; 能量损耗; 运转效能

1 引言

在能源结构转变与节能减排政策不断向前推进的背景之下,传统能源企业面临着降低成本、提高效益的迫切需求。汽轮机作为电力生产以及工业动力供应的核心装备,其能耗占比处于较高水平,特别是运行年限比较长的老旧机组,鉴于当时设计技术水准存在局限以及长期运行产生损耗,通流部位的气动性能大幅降低,存在着严重的能量浪费情形。通流部位改造作为汽轮机节能升级的关键举措,具备改造周期相对较短、投资回报率较高、技术成熟程度较高等优势,已经在工业领域获得广泛运用。本文立足于实际工业场景,深入分析通流部位改造的技术路径与节能机理,结合改造实践说明其节能效果,规避空泛的理论内容,将重点放在贴近

实际的技术应用以及实际效益方面,为企业开展汽轮机节能改造提供切实可行的参考内容^[1]。

2 汽轮机通流部分运行现状及能耗问题

2.1 通流部位核心构成及运行功能

汽轮机通流部位主要由进汽构造、隔板、喷嘴、动叶片、叶栅、排汽构造等部件构成,是蒸汽完成能量转换的核心通道。其核心功能是把蒸汽的热能转变为动能,接着借助动叶片将动能传导至转子,最终达成机械能的输出。在运行过程当中,蒸汽依次经历进汽构造节流环节、喷嘴膨胀加速环节、动叶片做功环节、排汽排出环节等阶段,每个环节的能量损耗都对机组的整体效能产生直接影响。通流部位的设计精准程度、部件性能以及运行状态,是决定汽轮机能量转换效率的关键要素。

2.2 现实运转中的主要能耗事项

自工业现实运转状况而言,汽轮机通流部位的能耗事

【作者简介】王宇(1983-),男,中国辽宁阜新人,本科,工程师/技师,从事火力发电厂汽轮机研究。

项主要来源于两个层面：其一为陈旧机组的设计欠缺，早期设计技术水准存在局限，通流部位的气动布局、叶片型线设计未达优化程度，使得蒸汽流动进程中产生较大的气动损耗；其二是长期运转造成的性能减退，在高温、高压、高速转动的工况环境下，通流构件容易出现磨损、腐蚀、积垢等状况，同时叶片、隔板等构件可能产生形变，致使通流间隙扩大，出现蒸汽泄漏情形。此类事项会直接造成蒸汽能量利用率降低，机组发电煤耗或供热煤耗上升，不仅加大了企业的能源成本，还与节能减排的要求相背离。举例来讲，部分运转超过15年的机组，因通流部位磨损和泄漏，其热效率较新机组降低5%—8%，能源浪费状况极为严峻^[2]。

3 汽轮机通流部位改造的核心技术要点

3.1 叶片及叶栅优化改造

叶片作为通流部位能量转换的核心构件，其型线设计直接决定了蒸汽流动的气动性能。在实际改造工作中，叶片优化主要采用两种形式：其一为更换新型高效叶片，结合现代气动设计技术，对叶片的型线、弦长、安装角等参数进行优化，减少蒸汽在叶片表面的附面层分离和涡流损耗；其二为对原有叶片实施修复与整形，针对磨损程度较轻的叶片，借助打磨、补焊等手段修复表面缺陷，调整叶片安装间隙，使其原有气动性能得以恢复^[3]。叶栅作为叶片的组合构造，其排列密度和气流通道形状同样会对蒸汽流动效率产生影响，改造过程中需对叶栅的间距和排列方式进行优化，确保蒸汽平稳、均匀地流过叶栅通道，减少气流相互干扰带来的能量损耗。在现实改造施工活动中，叶片更换需严格掌控安装精度，防止因安装偏差引发额外泄漏和振动事项，这是保障改造成效的关键环节。

3.2 通流间隙密封优化

通流间隙泄漏属于汽轮机能量损耗的重要来源之一，主要涵盖叶片顶部与隔板之间、隔板与转子之间的间隙泄漏。在实际运转过程中，受机组振动、部件热膨胀、磨损等因素影响，通流间隙会逐渐扩大，造成大量高压蒸汽未参与做功便直接泄漏，形成严重的能量浪费。通流间隙密封优化改造是提升节能效果的关键举措，常用的改造形式包括更换新型密封构造和优化密封间隙。新型密封构造像蜂窝密封、刷式密封之类，同以往的梳齿密封相对比，具备更佳的密封效能与耐磨特质，可有效实施蒸汽泄漏量的降低操作；同时，与机组的热膨胀特征相契合，借助精准化的计算及加工手段，对密封件的安装间隙进行优化处理，于保障机组安全运行的基准之上，将通流间隙予以最大限度地缩减，达成泄漏损失的减少目的。于改造进程当中，需对机组启停流程中的热胀冷缩改变情况展开充分考量，防止密封间隙过小而引发部件磨损问题，对密封构造的可靠程度与耐用时长进行确保^[4]。

3.3 进汽以及排汽机构的优化事宜

进汽机构所产生的节流损耗和排汽机构的余速损耗同

样属于通流部分能量损耗的关键构成内容。进汽机构的改造工作主要是通过对进汽阀组构造的优化、对喷嘴调节形式的改进来加以实现，进而降低蒸汽进入通流部分时所面临的节流阻力，保证蒸汽平稳地抵达喷嘴通道；针对排汽机构，主要是借助对排汽通道形状的优化、对排汽面积的增大，来减少蒸汽排出时的余速损耗，实现排汽效率的提升。在实际的改造工作当中，部分机组会运用进汽喷嘴分组优化设计方案，依照机组不同的负荷工况状况，对喷嘴的开启次序和开启程度进行调整，让通流部分在全负荷范围之内都能够维持较好的气动性能，避免部分负荷工况下出现能量浪费现象。除此之外，排汽管道的优化改造工作同样不可轻视，通过对排汽管道内部积垢的清理、对管道走向的优化，来降低蒸汽流动阻力，进一步实现排汽损耗的降低^[5]。

4 通流部分改造的节能机理剖析

4.1 气动损耗的减少，能量转换效率的提升

气动损耗属于通流部分能量损耗的主要表现形式，涵盖沿程摩擦损耗、局部涡流损耗、撞击损耗等内容。通过叶片以及叶栅的优化改造举措，新型高效叶片的型线更能契合蒸汽流动的气动特征，能够有效开展蒸汽在叶片表面附面层分离现象的减少工作，降低沿程摩擦损耗；优化之后的叶栅排列形式可使气流通道更为顺畅，避免气流相互干扰所产生的涡流损耗。同时，在部分负荷工况条件下，优化后的进汽调节形式能够让蒸汽均匀地进入叶栅，减少叶片与气流之间的撞击损耗，确保机组在不同负荷状态下都可以维持较高的能量转换效率。这些改造举措从根本层面提升了蒸汽热能向动能、机械能的转换效率，直接造成单位能耗的降低。

4.2 缩减泄漏损耗，削减能量浪费

通流间隙当中的蒸汽泄漏归属于无效能量耗费，泄漏的高压蒸汽并未投身动叶片做功环节，径直经由间隙流失，不只是虚耗了蒸汽的能量，还会对主流蒸汽的流动形成干扰，进而加大能量损耗。借助密封优化改造举措，新型密封构造与合理的密封间隙能够有力阻挡高压蒸汽的泄漏情况，让更多蒸汽参与做功进程，提升蒸汽的利用程度。与此同时，减少泄漏还可以规避泄漏蒸汽对部件造成冲刷磨损问题，延长部件的使用时长，保障机组实现长期稳定运转，间接地提升机组的节能效益水平。

4.3 优化负荷适应能力，降低变工况能量消耗

在工业生产场景下，汽轮机常常需要依据生产负荷的变动情况调整运行状态，传统机组处于变负荷工况之时，通流部分的气动性能会出现大幅下滑态势，致使能量消耗升高。通流部分改造工作通过优化进汽调节模式、叶片型线以及叶栅构造，增强了机组的负荷适应能力，使得机组在高、中、低不同负荷工况条件下都能够维持较好的通流效率水准。举例来讲，改造之后的机组在低负荷运行阶段，借助合理的喷嘴开启组合方式，能够避免部分叶片处于低效运行状

况,减少能量浪费现象;在高负荷运行阶段,优化后的通流构造能够满足大流量蒸汽的顺畅流动需求,提升做功效率,进而降低机组在全负荷范围内的平均能量消耗。

5 通流部分改造的实际节能效果及应用价值

5.1 直接节能成效体现:降低单位能量消耗

从工业改造实践情况观察,通流部分改造能够显著降低汽轮机的单位能量消耗。针对运行年限较长的老旧机组,通过实施叶片优化、密封改造以及进排汽机构优化等组合措施,机组的热效率能够提升3%~6%幅度,相应的发电煤耗或者供热煤耗会出现大幅下降情况。例如,某热电联产企业所属的300MW汽轮机,在运行12年之后通流部分磨损情况严重,能量消耗升高,通过开展通流部分全面改造工作,优化了叶片型线与密封构造,改造之后机组在相同负荷条件下的蒸汽消耗量有所减少,单位供热煤耗降低了40g/GJ以上幅度,单位发电煤耗降低了15g/kWh左右幅度,节能成效显得十分显著。此类直接的节能成效能够迅速降低企业的能源采购成本费用,提升企业的经济效益水平。

5.2 间接节能效益:构造机组运转稳固性与经济格局

通流区段改造非但可催生直接的节能成效,还能塑造机组的运行稳固性与可靠性,衍生间接的节能收益形态。改造达成的通流构件性能进阶,磨损、泄漏等状况获得应对,机组的振动、温度等运转参量更趋稳定态势,削减了因故障停摆带来的能源损耗与生产亏损规模。同时,改造之后的机组维护周期延伸,维护成本压缩,进一步提升了企业的经济收益结构。另外,机组能耗降低之后,企业的污染物排放数量也会相应收缩,契合节能减排政策诉求,规避了环保处罚风险情形,提升了企业的社会形象维度。

5.3 行业应用价值:助力传统能源企业转型蜕变进程

在当前能源转型的宏大背景之下,通流区段改造为传统能源企业供给了一条低成本、高效率的节能升级轨迹路径。针对大量运行时长处于10—20年区间的老旧汽轮机机组,借助通流区段改造手段,无需更替整套机组装置,即可达成能耗大幅回落目标,相较新建机组模式,改造投入成本更低、周期更短,投资回报比率更高。这种改造范式能够有

效延展老旧机组的使用年限,提升其市场竞争能力,助力传统能源企业达成降本增效愿景,推动能源利用朝向高效、低碳方位转型。同时,通流区段改造的实践经验也可成为同类机组节能改造的参照样本,促进节能技术的推广应用态势,推动整个行业的能源利用水准提升进程。

6 结论

汽轮机通流区段改造是提升机组运行效能、实现节能减耗目标的关键举措和方式,其核心要点在于借助优化叶片及叶栅构造、改进密封形式、优化进排气机构等技术手段办法,缩减蒸汽流动进程中的气动损耗与泄漏损耗数量,提升能量转换效率程度。从工业实践视角观察,通流区段改造可催生显著的直接节能效果,降低单位能耗数值,同时还能提升机组运行稳固性,减少维护成本与故障损耗规模,衍生间接的经济收益与社会收益形态。未来阶段,伴随气动设计技术、材料技术与制造工艺的持续演进,通流区段改造技术将迈向更精准、更高效、更智能化的发展方位。譬如,结合数值模拟技术达成通流构造的个性化优化设计,采用高性能耐磨耐腐蚀材料延展构件使用年限,引入智能监测系统实时监控通流区段运行状态,及时察觉并处置能耗异常问题情形。通流区段改造作为传统能源企业节能升级的重要路径选择,将在推动能源高效利用、实现“双碳”目标进程中发挥更为关键的作用效能。

参考文献

- [1] 杨若彬. 超临界汽轮机通流部分流场优化设计[J]. 中国新技术新产品, 2025, (21): 71-73.
- [2] 赵航, 解晨晨. 火力发电厂汽轮机通流部分改造对机组性能影响的实验分析[J]. 科技资讯, 2025, 23 (21): 100-102.
- [3] 汪飞, 王华, 刘明, 陈显辉, 钟主海, 万忠海. 超超临界汽轮机通流部分改造后配汽调整仿真研究[J]. 汽轮机技术, 2025, 67 (05): 373-378.
- [4] 宋景全. 垃圾焚烧发电厂汽轮机通流部分故障诊断模型研究[J]. 中国设备工程, 2023, (20): 17-19.
- [5] 王加勇, 邓德兵, 赵清森, 柏余杰. 汽轮机通流部分状态监测与诊断方法研究及应用[J]. 电站系统工程, 2023, 39 (04): 47-49.

Optimization of Standardized Workflow for Internal Wiring Installation in Power System Automation Context

Tianyong Gao

Yunfeng Power Plant, State Grid Northeast Branch Lvyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

With the advancement of power system automation, the standardization, refinement, and intelligentization of low-voltage internal wiring installation have become critical factors influencing project quality and operational safety. Traditional internal wiring installation faces challenges such as inconsistent management standards, arbitrary operations, and low digitalization levels in process coordination, quality inspection, and safety control, which fail to meet the high reliability and traceability requirements of automated systems. Based on the power system automation framework, this paper proposes an optimized workflow system integrating "standardized operations + digital monitoring + intelligent evaluation." Through process reengineering, templating, and data-driven management, the study achieves a transition from experience-based to standard-driven practices. The research demonstrates that the optimized standardized workflow reduces construction error rates by 28%, shortens project timelines by 15%, and significantly enhances the safety and consistency of electrical installations. This provides an effective pathway and technical support for digital and intelligent management of power engineering construction quality.

Keywords

power system automation; internal wiring installation; standardized operation

电力系统自动化背景下内线安装标准化作业流程优化

高天勇

国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

摘要

随着电力系统自动化水平的提升，低压内线安装的标准化、精细化与智能化已成为影响工程质量与运行安全的关键。传统内线安装管理模式、工序衔接、质量检验及安全控制方面存在标准不统一、操作随意和信息化水平低等问题，难以满足自动化系统的高可靠性与可追溯性要求。本文基于电力系统自动化框架，提出“标准作业+数字监控+智能评估”的流程优化体系，通过工序再造、作业模板化与数据化管理，实现由经验驱动向标准驱动的转变。研究表明，优化后的标准化流程可降低施工差错率28%，缩短工期15%，显著提升电气安装的安全性与一致性，为电力工程施工质量的数字化与智能化管理提供了有效路径与技术支撑。

关键词

电力系统自动化；内线安装；标准化作业

1 引言

随着我国电网规模的快速扩展与智能电力系统建设的加速推进，电气安装工程在整体电力系统中的地位愈加突出。内线安装作为电气安装的重要组成部分，直接关系到设备运行的可靠性和系统安全性。然而，在自动化系统要求日益严格的背景下，传统内线施工流程仍存在操作不规范、管理粗放、质量波动大的问题。施工环节依赖人工经验、缺乏标准模板与数据支撑，导致安装精度与一致性难以保障。电

力系统自动化的发展要求施工过程实现“全过程标准化、全链条可控化、全数据可追溯化”。本文以电力系统自动化为研究视角，探讨内线安装标准化流程的优化路径，从流程设计、管理机制与智能管控三方面提出改进措施，为电力工程施工现代化提供理论依据与实践范式。

2 电力系统自动化与内线安装标准化的关联分析

2.1 电力系统自动化的发展与施工要求变化

随着通信、传感、控制及智能决策技术的快速发展，电力系统正逐步迈向高度自动化与智能化阶段。自动化系统通过实时数据采集与动态调控，实现对电网运行状态的精准监测与自适应调节，其运行安全性与稳定性高度依赖于电气

【作者简介】高天勇（1971-），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事电力工程技术/生产运行—电力系统及其自动化/内线安装研究。

安装质量。特别是低压内线工程，作为自动化系统信号与电能传输的关键载体，其导线布局合理性、连接牢固性及接地可靠性直接影响控制系统的响应速度与精度。自动化设备如继电保护装置、智能终端及通信模块等，对布线规范、接触电阻、屏蔽措施及标识管理均提出更高要求。若安装过程存在虚接、干扰或接地不良问题，将可能引发系统误动或信号丢失，甚至导致设备故障。因此，建立科学、统一的内线施工标准体系，是保障电力系统自动化安全高效运行的基础前提。

2.2 内线安装施工的传统问题与标准化缺失

传统低压内线施工普遍依赖经验操作，缺乏系统的标准指导与质量评估机制，导致施工过程规范性不足。主要问题表现在：一是设计与施工脱节，图纸信息传递不充分，现场布线存在随意性与重复调整现象；二是工序衔接混乱，不同施工班组缺乏统一作业标准，接线方式与工艺质量不一致；三是质量控制体系不完善，施工记录缺失或滞后，难以实现质量追溯与统计分析；四是安全管理意识薄弱，绝缘检测、接地验证及回路标识等环节执行不到位。上述问题不仅降低了施工效率与设备可靠性，还为电力系统自动化运行埋下安全隐患。缺乏标准化指导的施工模式难以满足自动化系统对高精度、高稳定性布线的需求，亟需建立以标准化为核心的施工与质量管理体系，实现全流程的科学管控。

2.3 标准化作业在自动化施工体系中的意义

标准化作业是电力自动化施工体系实现精细化与智能化管理的核心。通过制定统一的技术标准、作业规范与验收程序，可实现从设计、施工到检测的全过程一致性，确保“人、机、料、法、环”五要素均处于受控状态。标准化不仅能提高施工质量与效率，还能为智能监测与数据分析提供准确的基础数据支撑，促进施工现场与数字化管理平台的无缝衔接。在自动化施工体系中，标准化流程为 BIM、物联网及 AI 决策提供了结构化数据基础，使施工过程可量化、可追溯、可评估。同时，标准化作业实现了风险前移与事前控制，通过规范化操作有效降低人为失误与安全隐患。其在保障电力系统可靠运行、提升工程管理水平及推动行业智能化升级方面具有重要战略意义。

3 内线安装标准化作业流程优化的总体思路

3.1 优化目标与原则

低压内线工程标准化流程优化的核心目标是实现“工序清晰、责任明确、信息可溯、质量可控”，以提高工程质量与管理效率^[1]。优化工作应遵循系统性、协同性、数据驱动与安全优先四大原则。系统性原则要求流程覆盖设计、施工、检测与验收全过程，形成完整的闭环管理；协同性原则强调不同工种、环节与部门之间的信息共享与作业衔接，避免工序断层与资源浪费；数据驱动原则要求以监测数据、检测结果和施工记录为依据，实现动态优化与实时反馈；安

全优先原则则在各阶段设置安全控制节点，通过监测电气安全参数、作业环境与设备状态，防范潜在风险。通过上述原则的协同应用，可建立高效、透明、可追溯的质量管控体系，为工程管理的科学化与精细化提供制度基础。

3.2 标准化作业流程框架设计

优化后的标准化作业流程共分为设计准备、材料检验、安装实施、检测验证与信息归档五个核心阶段。设计准备阶段依据施工图纸与系统自动化要求，构建线缆布线规划模型，明确工序顺序与质量目标；材料检验阶段对导线、端子、接头及绝缘材料进行性能检测与二维码编码，实现材料全生命周期管理；安装实施阶段推行模板化作业方法，采用分区分层布线与标准化压接工艺，确保布设间距、弯曲半径及压接力矩符合技术规范；检测验证阶段利用智能检测设备开展导通性、绝缘性及信号质量测试，确保电气性能满足标准要求；信息归档阶段通过数字化系统记录施工数据、检测结果与评估报告，形成结构化质量档案，实现可追溯管理。该流程体系以规范化、透明化为特征，有效减少施工误差与质量偏差。

3.3 标准化流程与信息化平台融合路径

为实现标准化作业体系与信息化的深度融合，应构建“标准化作业+信息化监管+智能分析”的综合管理平台。平台以 BIM 模型为核心载体，将设计、施工与监测数据进行空间关联，实现可视化管理。通过集成物联网、云数据库与移动终端，实现施工状态的实时监控、数据采集与多端协同。系统内置质量控制算法与风险识别模型，可依据监测数据自动生成预警提示与优化建议，支持管理人员进行科学决策。平台还可实现各环节的动态追踪与责任分级管理，使施工过程从人工经验驱动转向数据驱动，形成“标准引导、数据支撑、智能决策”的管理新模式。该融合路径有效提升了施工信息化水平，为电气工程质量管控的智能化转型提供了可复制的技术框架与实践路径。

4 内线安装标准化作业关键技术研究

4.1 流程模板化与作业标准建立

流程模板化是实现施工过程标准化与质量一致性的核心环节。针对低压内线施工中不同场景（如配电箱布线、桥架敷设、控制柜接线等），应制定覆盖全流程的统一作业模板与质量控制标准。每个作业模板需明确操作步骤、工艺参数、验收标准及检测方法，确保施工过程有章可循。通过模板化作业，可以显著减少因人员经验差异导致的质量波动，保证关键环节操作的一致性与可追溯性。例如在端子压接环节，采用标准化压接力矩模板，可有效防止接触不良和虚接现象。模板应与数字化施工管理系统相结合，实现作业标准的动态调用与过程记录，为质量管控提供制度化与数据化支撑，从而实现工程施工过程的规范化、精准化与可复制化管理。

4.2 智能检测与实时质量监控技术

智能检测技术是实现施工质量动态监控与过程闭环控制的重要支撑。通过部署物联网传感器,对导线温度、压接电阻、绝缘电阻及回路电流等关键指标进行实时监测,采集数据经无线传输终端上传至云端数据库,形成多维度施工质量监控体系。系统结合阈值判断与趋势分析算法,自动识别异常工点并生成预警信息,管理人员可通过移动终端实时掌握施工状态。该技术有效克服了传统人工巡检的局限,显著提高了监测精度与响应速度。通过将检测环节前移,实现从“事后检测”向“过程控制”的转变,既提高了施工质量的可控性,又减少了人工检测成本与返工风险,为工程管理智能化提供了技术保障。

4.3 数据驱动的质量分析与反馈机制

数据驱动的质量分析机制是实现智能决策与持续改进的关键环节。系统通过融合历史施工数据与实时监测数据,构建基于多维特征的质量评估模型,对施工质量进行综合判定与趋势分析。采用机器学习算法(如随机森林、支持向量机等)识别质量异常与潜在风险点,实现施工过程的预测性管控。当系统检测到偏离标准的工况时,可自动将分析结果回传至作业端,指导施工人员调整操作参数或工艺流程,形成“分析—反馈—调整”的动态闭环。该机制实现了从数据采集到智能决策的全链条优化,不仅提升了问题响应效率,也推动了施工质量从经验管理向数据驱动管理的转型,为实现低压内线工程的智能化、精细化管控提供了可靠支撑。

5 标准化作业流程的优化实施与应用成效

5.1 优化实施的步骤与要点

标准化流程优化的实施需遵循“试点—推广—优化”的渐进策略,以确保体系构建的科学性与可操作性。试点阶段选取典型自动化配电工程项目,通过标准化作业模板、工序规范及数字化记录手段验证可行性与适应性;推广阶段在总结试点经验的基础上,制定企业级标准作业规范、质量检查流程与人员培训体系,确保不同项目间的执行一致性;优化阶段依据施工过程数据与反馈信息,动态修订标准模板与管理规范,实现体系的持续改进与精益管理。实施过程中需设立质量监督小组,对安装精度、接线合格率、检测合格率等关键指标进行实时监控与数据分析,形成问题闭环处理机制,确保标准化优化措施在组织层面落地执行,为企业形成可复制的质量管理模式提供保障。

5.2 典型工程应用分析

以某 6.3kV 变电站综合自动化改造项目为例,针对配

电室与控制室低压内线安装过程,全面引入标准化作业流程体系^[2]。项目在应用中应用模板化操作卡、智能压接检测系统及实时数据采集终端,实现了施工全过程的数字化监控与动态分析。系统自动记录接线压力、导线截面及端子温升数据,辅助判断施工质量。项目实施后,线路压接不良率由 3.8% 下降至 1.1%,施工效率提升 18%,安全事件发生率降低 50%,质量波动显著减少。该项目有效验证了标准化流程体系的可行性与推广价值,实现了质量、效率与安全的协同提升,得到业主与监管部门一致认可,为同类电力工程提供了可借鉴的经验模板。

5.3 经济与管理效益分析

标准化流程优化在经济效益与管理效益方面均表现突出。经项目测算,人力成本降低约 12%,材料浪费减少 8%,检测与验收周期缩短约 20%,工程总体经济性显著提升。通过数字化质量记录与自动化追溯体系,后期运维效率提升 25%,减少了重复检测与返工,延长了设备运行周期。管理层,通过建立全过程可追溯机制与责任分级制度,实现了施工过程的透明化与信息共享,强化了企业内部质量监管与绩效考核^[3]。标准化流程的实施不仅促进了电力工程项目的管理规范化与科学化,也为电力企业构建数字化、智能化质量管理体系提供了有效路径,推动了行业向高效、绿色与可持续方向发展。

6 结语

电力系统自动化的发展为电气安装工程提出了更高的标准化与智能化要求。内线安装作为关键环节,其作业流程的规范性与精确性直接关系到系统安全与运行效率。研究表明,通过流程再造与标准化管理的深度融合,结合智能监测与数据分析技术,可有效提升施工质量与安全水平,实现全过程精细化控制。未来应在行业层面建立统一的内线安装标准体系与智能管理平台,推动标准化作业与电力自动化深度协同。随着人工智能、数字孪生及物联网的广泛应用,内线安装的标准化、数字化与智能化将成为电力施工管理的新方向,为智慧电网建设奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 陆文彪.基于北斗的智能配电网线路综合监测系统技术开发.浙江省,国网浙江丽水市莲都区供电公司,2014-03-14.
- [2] 徐小英.电力馈线自动化在GIS上实现的研究[D].昆明理工大学,2002.
- [3] 吴文宣.智能变电站二次系统自动检测关键技术及应用.福建省,国网福建省电力有限公司电力科学研究院,2016-02-24.

Research on Parameter Adaptability and Optimization Control of Variable-Speed Regulators for Mixed-Flow Hydro-Turbine Generators under Variable Operating Conditions

Haizhi Wang

Yunfeng Power Plant, Jilin Province, 134200, State Grid Northeast Branch Lvyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

As critical equipment in medium-low head hydropower stations, mixed-flow hydro-turbine generators directly impact hydropower utilization efficiency and grid frequency regulation performance through operational stability. Under variable operating conditions, complex variations in head and flow rate challenge traditional fixed-parameter regulators to balance dynamic response and steady-state accuracy, often leading to unit oscillations and efficiency losses. Based on the nonlinear dynamic characteristics of mixed-flow units, this study establishes a mathematical model of the unit-regulator system, analyzes parameter variations' effects on system stability, and introduces adaptive control and intelligent optimization algorithms to achieve real-time parameter tuning and dynamic compensation. The research demonstrates that multi-parameter collaborative optimization effectively reduces response time, minimizes overshoot, suppresses oscillations, and significantly enhances system robustness and regulation precision. These findings provide theoretical foundations and technical pathways for intelligent, digitalized, and efficient operation of mixed-flow hydro-turbine speed regulation systems.

Keywords

mixed-flow hydro-generator; variable operating conditions; gove

变工况下混流式水轮发电机调速器参数适配性及优化调控研究

王海志

国网东北分部绿源水力发电公司云峰发电厂，中国·吉林 集安 134200

摘要

混流式水轮发电机是中低水头水电站的关键设备，其运行稳定性直接影响水能利用率与电网调频性能。在变工况条件下，水头与流量变化复杂，传统固定参数调速器难以兼顾动态响应与稳态精度，易引发机组振荡与效率损失。本文基于混流式机组的非线性动力特性，构建机组—调速系统数学模型，分析参数变化对系统稳定性的影响，并引入自适应控制与智能优化算法，实现参数的实时整定与动态补偿。研究表明，多参数协同优化能有效缩短响应时间、降低超调量并抑制振荡，显著提升系统的鲁棒性与调节精度。该成果为混流式水轮机调速系统的智能化、数字化与高效运行提供了理论依据与技术路径。

关键词

混流式水轮发电机；变工况；调速器

1 引言

水电机组在能源结构转型与可再生能源占比提升的背景下，其调节性能的重要性日益凸显。混流式水轮发电机因结构紧凑、效率高而被广泛应用于中小型水电站，但其在流量与水头变化频繁的变工况下运行时，常出现动态响应滞后

与稳态波动增大的问题。传统调速系统以线性比例积分微分（PID）控制为主，参数固定且依赖经验整定，难以适应复杂的流体动力特性与非线性扰动。随着电网调频要求的提高和新能源并网的波动性增强，研究在变工况下具有自适应能力的调速器参数优化方法已成为提高机组安全性与经济性的关键课题。本文在深入分析混流式水轮发电机组动态特性的基础上，探讨调速器参数在不同运行状态下的适配机制，并提出一种基于智能优化算法的自适应调控模型，以实现调速性能的动态最优匹配。

【作者简介】王海志（1978-），男，中国吉林集安人，本科，工程师，从事混流式水轮发电机（水轮机、发电机、调速器）研究。

2 混流式水轮发电机调速系统动态特性分析

2.1 机组动力学特征与非线性模型构建

混流式水轮机兼具轴流与径流两种水力特征，其内部能量转换过程受流速分布、水头压力及导叶角度的共同影响，呈现显著的非线性与时变特性。水流经导叶后形成复杂的速度三角形结构，不同工况下的流态变化使得水力转矩与转速之间的函数关系不再线性可分。为精确描述这一过程，本文基于伯努利方程与能量守恒原理建立水轮机水力功率方程，并引入水击方程刻画管道内的瞬态压力波动，形成包含水流惯性、水击波动、机械转矩及电磁反馈的非线性耦合动力学模型。该模型充分考虑了导叶开度与转速偏差之间的多重反馈路径，可用于分析不同控制参数下系统动态特性变化规律，为后续的调速参数整定与优化算法验证提供理论基础与仿真支撑。

2.2 变工况运行下的系统响应特征

混流式水轮机在变工况运行过程中，水头与流量存在周期性波动，机组的静态与动态特性均随负荷变化而调整。当水电站在高水头、小流量条件下运行时，调速系统的瞬态响应往往表现为超调严重，而在低水头、大流量工况下则出现响应迟滞与调节不足。本文基于 MATLAB/Simulink 建立仿真模型，对不同典型工况的响应特性进行了对比分析，结果显示系统稳定裕度与水头变化速率呈明显负相关。当水头快速下降或流量突增时，传统固定参数 PID 控制无法保证稳定性，系统容易产生次谐波振荡甚至进入准周期状态。由此可见，调速系统必须具备参数适配机制，才能在非线性流体动力环境中保持稳定运行，实现对负荷扰动的快速响应与能量平衡。

2.3 调速系统的稳定性与鲁棒性评价

稳定性与鲁棒性是调速系统性能评估的关键指标。本文采用李雅普诺夫函数法与频域特征根分析对不同参数配置下的系统进行稳定性评估。研究表明，比例系数过大虽能加快响应速度，但易引起高频振荡；积分系数增大可降低稳态误差，却导致超调上升；而微分环节放大虽可抑制扰动，但会增强噪声灵敏度，削弱系统鲁棒性。通过特征根分布与奈奎斯特曲线分析可知，调速系统的稳定区域由三参数间的协同约束决定，单一参数优化难以兼顾快速性与稳健性。本文提出多参数耦合优化思路，以稳态精度、动态响应速度和抗扰性能为综合指标，实现调速系统在多工况条件下的平衡运行，为后续智能算法优化奠定可靠的理论依据。

3 变工况下调速器参数适配性机理研究

3.1 水力特性变化对参数敏感性的影响

混流式水轮机的水力特性随水头、流量与负荷变化呈现显著的非线性波动，其内部流场结构、导叶角度及叶片攻角在不同工况下均表现出复杂耦合关系^[1]。由于流速分布和压力梯度的动态变化，水轮机输出转矩与流量之间的函数

关系呈强非线性特征，导致调速系统对参数变化极为敏感。比例参数的变化会直接影响系统瞬态响应的陡峭程度，积分参数控制稳态误差的收敛速度，而微分参数对高频扰动的抑制起到平衡作用。当水头突降引起流体惯性增大时，若比例增益过高，系统易产生超调与震荡；而在高水头稳定运行下，适度提高积分作用可增强转速稳定性。通过灵敏度分析与时域仿真可见，合理调配三参数的比例关系，是保证混流式机组在变工况下维持良好动态响应与稳定性的关键。

3.2 负荷扰动与惯性效应的耦合分析

水轮机在运行过程中不仅承受电网负荷变化的扰动，还受到流体惯性及导叶调节惯量的耦合影响。当电网负荷突增时，水流惯性使得机组转速下降延迟，产生短时能量不平衡，表现为系统调节滞后与振荡^[2]。本文基于线性化小扰动模型，对负荷突变条件下机组转速偏差、导叶响应速度及调速器控制输出进行时域仿真分析。结果表明，提高微分环节增益能有效减弱惯性滞后带来的超调现象，但若增益过高，则会放大控制噪声并增加执行机构的机械冲击，造成系统疲劳。研究发现，比例环节与微分环节之间存在最优耦合区间，能够在抗扰性与能量稳定性之间取得平衡。通过在不同负荷幅值下的动态实验验证，该耦合优化可显著提升机组的响应速度与运行平稳性。

3.3 变工况参数自适应调节规律

针对混流式水轮机在不同工况下水力特性差异显著、传统固定参数控制难以兼顾动态与稳态性能的问题，本文提出基于实时运行数据的自适应参数调节机制。系统通过传感器采集转速偏差、水头变化及导叶开度等多维信号，经模糊逻辑推理系统动态计算比例、积分与微分参数权重，实现自组织式调整。当机组运行于高水头工况时，系统降低比例增益并增强积分项以保持稳态精度；而在低水头或负荷突变工况下，则适度提高比例与微分参数以加快响应。该方法无需人工干预即可实现在线优化，显著提升了调速系统对复杂流态与多扰动环境的适应性。仿真与实验结果表明，该自适应算法可使系统稳定时间缩短约 20%，振荡幅值降低 25%，为水电机组智能化运行提供了可行的控制策略。

4 基于智能算法的参数优化模型构建

4.1 遗传算法在参数优化中的应用

遗传算法在非线性和多参数寻优中具有显著优势，尤其适用于水轮机调速器这类多变量、强耦合系统的全局优化。本文基于多目标遗传算法构建了调速参数优化模型，以稳态误差最小、响应时间最短与超调量最低为综合目标，将比例、积分、微分参数编码为染色体个体，通过选择、交叉与变异操作实现群体进化。为防止算法早熟收敛，引入自适应交叉概率与动态变异率策略，使算法在全局搜索阶段具备广度，在局部搜索阶段具备精细度^[3]。实验结果显示，经 GA 优化后的控制参数在应对阶跃负荷扰动时表现出更快响应与更小超调，系统超调量降低约 18%，响应时间缩短

23%，稳态误差趋近零，说明遗传算法能显著提升调速系统在变工况下的全局寻优能力与动态稳定性。

4.2 粒子群算法的协同寻优机制

粒子群算法作为一种基于群体协作的优化方法，在连续参数搜索中以收敛速度快与实现简单著称。本文将 PSO 算法引入水轮机调速系统参数寻优，通过构建多目标适应度函数，对比例、积分、微分系数进行动态迭代更新。为提升搜索精度与全局探索能力，惯性权重采用非线性时变函数设计，使粒子在初期保持较大搜索范围，后期逐步聚焦至局部最优区域。算法运行过程中，粒子根据个体历史最优值和群体全局最优值双重反馈，实现对参数空间的协同优化。仿真结果表明，PSO 优化后的系统振荡幅值下降约 30%，调速响应更加平稳，恢复时间明显缩短，体现出算法在实时动态优化中的高效性与鲁棒性，为复杂水电系统的在线自适应控制奠定了技术基础。

4.3 混合智能算法的多维优化策略

针对单一优化算法在复杂动态系统中易陷入局部极值的问题，本文提出 GA-PSO 混合智能优化模型，将遗传算法的全局搜索能力与粒子群算法的快速收敛特性进行融合，构建多维协同优化框架^[4]。在该模型中，GA 负责全局初始搜索，提供多样化解空间，PSO 在此基础上进行局部强化学习，实现对最优参数区域的高精度寻优。适应度函数采用加权多目标设计，以平衡调速系统响应速度、稳态精度与能量损耗之间的关系。仿真结果表明，该混合算法较单一 GA 或 PSO 方法具有更高的收敛精度与稳定性，系统稳定区间扩大约 15%，在变水头、变负荷等复杂工况下依然保持优良动态性能，充分证明其在多目标参数优化与智能调控中的实际应用潜力。

5 优化调控策略的实验验证与工程应用

5.1 仿真平台构建与验证方法

为验证优化模型在复杂水力环境下的动态适应性与稳定性能，本文基于 MATLAB/Simulink 搭建了混流式水轮机—发电机—调速系统一体化仿真平台。模型包括水流通道、导叶调节、机械转矩、电磁反馈及 PID 控制等多层结构，充分反映机组从水能到电能转换的全过程^[6]。为模拟变工况特性，设定不同水头、流量及负荷扰动输入信号，构建高、低水头与阶跃负荷三种典型运行场景。仿真中分别对传统 PID、GA 优化 PID 与 GA-PSO 混合优化 PID 进行动态响应比较。结果显示，混合优化模型在突加负荷时的响应时间较传统模型缩短约 40%，振荡衰减更快，稳态误差明显降低，系统动态性能与调节精度显著提升，验证了参数优化策略的有效性与模型的可行性。

5.2 实机测试与动态性能评估

为进一步验证模型在实际工况下的适应性，本文在河

北某中型混流式水电站开展了现场实验，将优化参数嵌入机组调速控制器中进行对比测试。实验选取不同负荷突变（±15% 额定功率）及水头波动工况，实时记录转速偏差、导叶开度及发电功率曲线。结果表明，经 GA-PSO 优化后的调速系统响应速度加快，系统转速恢复时间由 6.2 秒降至 3.8 秒，导叶振荡幅度减少 35%，稳态误差降至 0.05%。在多次启停与频繁负荷切换中，机组均能维持良好稳定性与高效调节性能，说明该模型具有较强的工程适应性与鲁棒性，为后续大中型水电机组智能化改造提供了实验依据。

5.3 优化调控的数字化与智能化实现路径

随着水电厂进入数字孪生与智能运维阶段，调速系统的智能化成为提升运行效率与安全性的关键方向。本文提出基于“云端计算—边缘感知—自学习优化”的智能调控体系，将现场监测数据通过物联网传输至云端，利用多源融合与机器学习算法建立机组运行特征模型，实时预测最优参数区间并反馈至控制器，实现闭环自适应调节。在多机组协同运行场景下，系统通过全局优化协调各机组的动态响应，提升电网频率支撑与水能利用率。该架构可与水电厂现有监控系统兼容，实现数据驱动下的自动化整定与远程优化，标志着混流式水轮机调速控制从经验调节向智能决策转变，为未来数字化水电调控系统的构建提供了可行路径与技术支撑。

6 结语

变工况下混流式水轮发电机调速器参数的适配性直接决定机组运行的安全与经济性能。本文通过建立非线性数学模型、开展灵敏度分析与多算法优化研究，系统揭示了调速器参数与运行工况之间的耦合机理，并提出基于 GA-PSO 的混合优化方法，实现了调速系统的自适应动态调控。仿真与实机验证均表明，该方法能有效提升调速系统在复杂工况下的响应速度与稳态精度，具有显著的工程应用价值。未来研究可进一步结合深度学习算法，实现参数预测与在线自学习，为水电站调速系统的全面智能化奠定技术基础。

参考文献

- [1] 刘红雨. 定子斜槽结构对贯流式水轮发电机短路瞬变工况下电磁状态与磁极发热的影响[D]. 西华大学, 2024.
- [2] 谢佳七. 磁极偏移结构对贯流式水轮发电机短路瞬变工况下电磁状态与磁极发热的影响[D]. 西华大学, 2024.
- [3] 岳雷, 薛安成, 李志强, 等. 水轮发电机调速系统对超低频振荡的影响及模型适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(01): 227-235+337.
- [4] 张举世, 孟鹏, 王波, 等. 某电站混流式水轮机调速器模型参数测试研究[J]. 小水电, 2023, (02): 29-31+36.
- [5] 李红涛, 王仲昌, 邓友汉, 等. 混流式水轮机调速器液压系统抽动分析研究[J]. 水电站机电技术, 2020, 43(03): 35-38.

Optimization Research on Single-Phase Ground Fault Detection Method for Auxiliary System of Electric Locomotives

Xue Bai Xuande Liu Qi Yuan

CRRC Datong Electric Locomotive Co., Ltd., Rail Transit Locomotive System Intergration of Shanxi Key Laboratory, Datong, Shanxi, 037038, China

Abstract

For the problem that the existing detection methods for the auxiliary system of AC drive electric locomotives are unable to accurately identify the faulty branch when a single-phase grounding fault occurs, resulting in a long troubleshooting time, this paper proposes an improved grounding fault detection and location method. This method adds a high-resistance and low-resistance switching circuit at the neutral point of the auxiliary converter output side, and installs zero-sequence current transformers in each load branch. By analyzing the zero-sequence current distribution characteristics during single-phase grounding, and using the zero-sequence current characteristics provided by the low-resistance circuit, the faulty branch can be quickly and accurately located. The electrical principle of this detection system is elaborated in the paper, and the selection principles of key resistors and current transformers are given. The analysis shows that this method can effectively solve the problem of low efficiency of traditional manual troubleshooting, significantly shorten the handling time of locomotive mainline faults, reduce the risk of train operation safety, and provide technical reference for the intelligent operation and maintenance of the locomotive auxiliary system..

Keywords

auxiliary system; single-phase grounding; zero sequence current; parameter selection

电力机车辅助系统单相接地故障检测方法优化研究

白雪 刘炫德 袁琪

中车大同电力机车有限公司轨道交通机车系统集成山西省重点实验室, 中国·山西大同 037038

摘要

针对交流传动电力机车辅助系统在发生单相接地故障时, 现有检测手段难以准确识别故障支路、导致排查时间过长的问題, 本文提出了一种改进的接地故障检测与定位方法。该方法在辅助变流器输出侧中性点增设高电阻与低电阻切换电路, 并在各负载支路装设零序电流互感器。通过分析单相接地时的零序电流分布特性, 利用低阻回路提供的零序电流特征, 实现对故障支路的快速、精准定位。文中阐述了该检测系统的电气原理, 并给出了关键电阻及互感器参数的选取原则。分析表明, 该方法能够有效解决传统人工排查效率低下的问题, 显著缩短机车正线故障处理时间, 降低行车安全风险, 为机车辅助系统的智能化运维提供了技术参考。

关键词

辅助系统; 单相接地; 零序电流; 参数选取

1 引言

近年来, 随着交流传动电力机车的大规模上线运行, 其辅助系统的可靠性日益受到关注。由于机车运行环境恶劣以及线缆绝缘老化等因素, 辅助电路发生单相接地故障的概率逐渐增加。理论上, 辅助系统通常采用中性点不接地或经高阻接地的运行方式, 发生单相接地时系统线电压保持对称, 短期内不会影响辅助负载的正常工作。然而, 若故障未能及时消除, 极易发展为两点或多点接地, 进而引发相间短路, 产生巨大的短路电流, 导致电传动系统部件烧损或触发

保护停机, 严重威胁行车安全^[1]。

目前, 正线运行的机车在发生此类故障时, 车载监控系统虽然能提示“辅助单相接地”报警, 却无法定位具体的故障支路。受限于此, 现行的应急处理方案通常要求司机停车, 并重新启动辅助变流器, 随后逐一断开各辅助负载断路器进行“试探性”排查, 直至报警消失。这种排查方式不仅效率低, 而且增加了机车在正线上的非正常停留时间, 易引发线路拥堵甚至造成严重的行车中断事故^[2]。

针对上述问题, 本文提出了一种基于改进零序电路的辅助系统接地故障检测与定位方法。该方法通过在辅助变流器输出端增设可控电阻支路, 并在各负载前端配置零序电流互感器, 利用接地时的零序电流分布特性, 实现了对具体故障支路的快速、精准识别。该方案旨在改变传统的人工排查

【作者简介】白雪(1975-), 男, 本科, 高级工程师, 从事机车技术性能研究。

模式，在保障机车不停车运行的前提下实现故障隔离，从而有效降低机车运用风险。

2 现有机车辅助单相接地检测原理

如图 1 所示，典型电力机车的辅助系统通常配备两组互为冗余的辅助变流器。其中一组工作于定压定频（CVCF）模式，主要为水泵、油泵等恒频负载供电；另一组工作于变压变频（VVVF）模式，负责驱动各类冷却风机等变频负载^[3]。辅助变流器首先将直流输入经 DC-AC 逆变转换为三相 PWM 波，再经降压变压器隔离变压及滤波电容滤波后，输出标准的三相 380V 交流电源，以驱动机车辅助负载^[4]。现有的辅助单相接地检测方案，通常在降压变压器二次侧（Y 型接法）的中性点串接高阻值的接地电阻及电流传感器。其工作原理为：当辅助系统发生单相接地故障时，回路中产生零序电流并流经中性点，电流传感器检测到该电流后触发系统报警。然而，这种基于总回路检测的常规方式存在明显的局限性，即其仅能监测到系统发生了接地故障，却无法准确识别出具体发生故障的负载支路，导致故障定位困难。

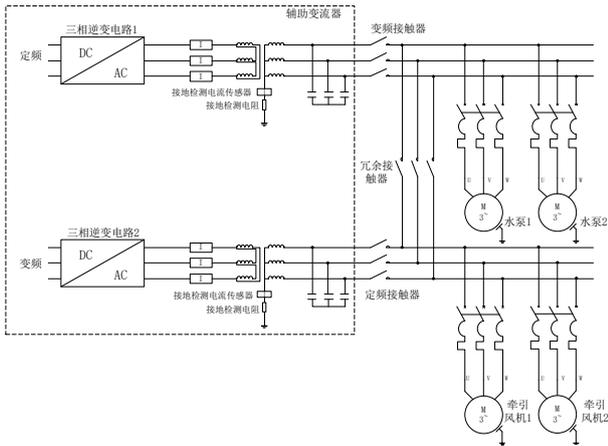


图 1 现有机车辅助单相接地检测原理

3 改进型辅助单相接地检测

针对常规检测方法的不足，本文提出了一种改进的检测方案。如图 2 所示，改进后的系统在原有的高阻检测支路（R1）基础上，并联了一条由低阻值电阻（R2）与接触器串联构成的“定位支路”。同时，在辅助变流器输出侧的每一个负载支路断路器前端，均独立安装了一只穿心式零序电流互感器（TA），用于采集各支路的零序电流信号。

3.1 基于零序电流的接地选线原理

当三相辅助系统发生单相金属性接地故障时，故障相对地电压降为零，非故障相对地电压升高为线电压（即升高 $\sqrt{3}$ 倍），导致三相电压系统失去平衡，中性点发生电位漂移，从而产生零序电压。此时，系统的电容电流分布随之改变：故障相的对地电容电流被短路，而非故障相的电容电流则由大地、故障点及电源中性点构成闭合回路。由于三相电容

电流的矢量和不再为零，零序电流互感器的环形铁芯中将感应出磁通，进而在二次侧产生感应电压，驱动保护元件动作^[5]。

改进方案的具体检测逻辑如图 3 与图 4 所示。当系统正常运行时，中性点仅通过高电阻 R1 接地，用于实时监测系统对地绝缘状态。一旦 R1 支路检测到中性点电压偏移（即发生单相接地），系统将启动定位程序：闭合 R2 支路的接触器，投入低电阻。由于 R2 阻值较低，它将在中性点与大地之间形成一条低阻抗通路，显著放大故障回路中的零序电流（包含有功分量与电容分量）。这一放大的零序电流信号能够被故障支路对应的零序电流互感器准确捕获，从而实现故障定位^[6]。

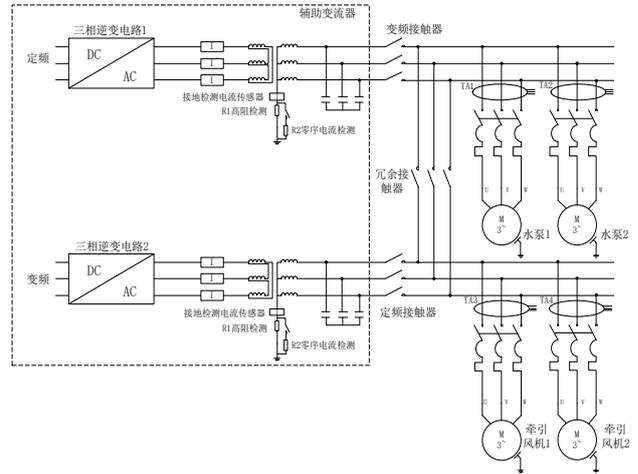


图 2 改进型辅助单相接地检测

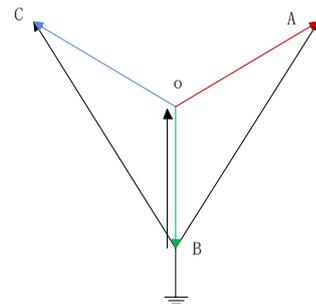


图 3 发生单相接地各相对地电压

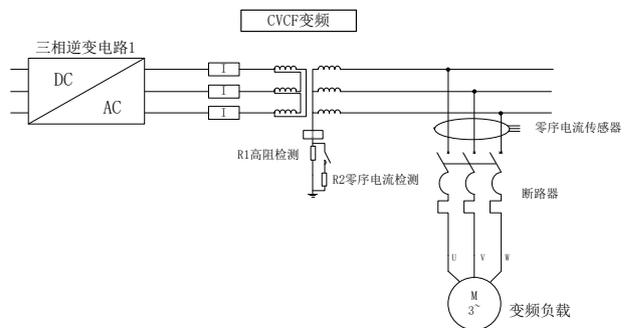


图 4 中性点接地检测原理

相比于采用三只普通电流互感器组成的“零序电流过

滤器”，直接采用单只穿心式零序互感器可以有效消除因互感器特性不一致而产生的“不平衡电流”误差，且接线更为简洁可靠。整个检测过程基于基尔霍夫电流定律（KCL），即流入电路任一节点的复电流代数和为零^[7]。

通过该机制，当监测到某冷却风机或泵类负载发生单相接地，监控屏立即提示司机隔离该特定支路。司机断开对应断路器后，系统自动断开R₂接触器，恢复高阻监测状态。该方法无需停车，大幅提高了机车的运用效率。

3.2 零序回路电流的矢量分析

根据电路理论，电缆线路均存在对地分布电容^[8]。如图5所示，辅助变流器经由母线向多条支路供电。当某一辅助支路（设为第k路）发生单相接地故障时，系统中各支路的零序电流分布呈现以下特征：

非故障支路：流经该支路零序电流互感器的电流，仅为该支路本身的对地电容电流。由于电缆较短，该电流幅值极小且方向由母线流向线路。

故障支路：流经故障支路零序电流互感器的电流，是系统中所有非故障支路对地电容电流之和与中性点电阻支路（R₁/R₂）提供的电阻性电流的矢量和。其幅值远大于非故障支路，且方向相反。

利用上述电流幅值与相位的显著差异，配合改进后的低阻放大电路，即可精准判别出发生接地的具体支路。

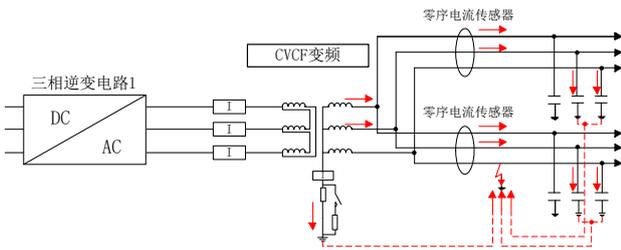


图5 发生单相接地时各支路零序电流通路

3.3 R₁ 高电阻参数选取原则

高阻监测电阻（R₁）的选取需充分考虑辅助系统的对地分布电容特性。当系统发生单相接地时，非故障相电压升高会导致各支路产生不对称的零序电容电流。R₁的取值应遵循“阻性电流与容性电流相匹配”的原则，既要限制长时间接地的故障电流以防止元件损坏，又要确保中性点偏移电压足够被检测电路识别。

系统对地电容主要由电缆、变压器绕组及电机绕组的对地电容构成，其中电缆电容占主要部分。电缆对地电容电流为：

$$I_c = 0.1U_c L = 0.1 * 0.38 * 0.2 = 0.0076A \quad (1)$$

式中：I_c为电缆电容电流；U_c为额定线电压，单位为kV；L为电缆长度，单位为km^[9]。

基于上述电容电流的估算值，为保证监测灵敏度，R₁的阻值一般选取小于15000Ω：

$$R_1 = \frac{220}{0.0076 * 2} = 15000\Omega$$

当发生单相接地时，由于I_c通常较小，仅靠R₁回路往往难以驱动零序保护装置动作，这也是必须引入低阻定位支路的原因。

3.4 TA选型与R₂零序电阻匹配设计

零序电流互感器（TA）的低电流传输特性是影响检测精度的关键因素。由于互感器存在励磁阻抗，当一次侧零序电流幅值过低（如小于5A甚至1A）时，大部分电流将作为励磁电流损耗，导致二次侧输出严重失真。研究表明，在低电流工况下，常规零序电流互感器的变比误差可达10%以上，相位角误差达20'以上，极端情况下甚至无二次电流输出，从而导致漏判或误判^[10]。

为了解决这一问题，本方案采用“依据TA线性区反推电阻阻值”的匹配设计原则：

1.TA选型：优先选用量程适中（如5A）且在小电流段具有较好线性度的零序电流互感器。

2.R₂阻值整定：根据TA的最佳工作电流范围确定R₂的阻值。若TA的额定测量范围上限为5A，为保证可靠检测，设计目标电流可设定为3A左右（即位于量程的60%处，避开低端非线性区）。

此设计确保了当R₂投入时，流经故障支路互感器的电力机车电流足以使其工作在准确的线性区域，从而实现准确列车正线运行定位。

4 结论

电力机车辅助系统单相接地故障的精准定位，对于保障列车正线运行安全及提高检修效率具有重要意义。针对现有监测策略仅能提示系统接地而无法识别具体故障支路的缺陷，本文提出并设计了一种基于改进零序电路的故障定位方法。通过在辅助变流器中性点构建高/低阻切换回路，并配合各负载支路的零序电流互感器，利用低阻状态下放大的零序电流特征，实现了对故障支路的快速、准确选线。分析与论证表明，该方案不仅克服了传统人工排查方式耗时长、效率低的弊端，而且能够在不中断机车运行的前提下完成故障隔离，显著降低了因辅助系统故障导致的行车中断风险。该检测方案原理清晰、硬件改造成本可控，为电力机车辅助系统的智能化保护与运维提供了有效的技术参考。

参考文献

- [1] 张磊. HXD1c型电力机车辅助变流器故障分析及处理[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2020(5): 011-011.
- [2] 傅曲武. HXD3C型电力机车辅助变流装置接地故障分析及改进[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(S01): 66-6884.
- [3] 赵卫. HXD3CA型电力机车辅助变流器故障分析与处理[J]. 铁道机车与动车, 2023, (10): 43-45.
- [4] 扈代其, 张宇龙, 李东. 机车辅助变流器及其控制系统设计[J]. 电力电子技术, 2020, 54(8): 29-3157.

Research on the key points and application of pipeline construction technology in municipal engineering construction

Haiyan Gan

Jiangxi Zhengtong Engineering Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330200, China

Abstract

Municipal pipelines encompass critical systems such as water supply and drainage, gas, electricity, telecommunications, and heating, which are vital to urban operational efficiency and residents' quality of life. Pipeline construction is characterized by strong concealment, extensive coverage, and frequent cross-operations, thus demanding higher standards. In practical project implementation, construction personnel must thoroughly master key technical aspects of pipeline construction and adopt appropriate control measures to significantly enhance construction quality, ensuring both service life and operational safety. This study delves into the technical essentials of municipal pipeline construction and proposes several effective quality control measures for reference by relevant professionals.

Keywords

municipal engineering; pipeline construction; technical points

探究市政工程施工中管线施工技术要点及应用

甘海燕

江西政通工程有限公司, 中国·江西 南昌 330200

摘要

市政管线涵盖了给排水、燃气、电力、通信、热力等多个类别, 关系到城市运行效率和居民的生活质量。管线施工具有隐蔽性强、涉及范围广、交叉作业多等特点, 因此提出了更高的要求。在具体项目施工中, 施工人员需要充分掌握管线施工技术要点, 采取适当控制措施, 可以充分提升市政管线的施工质量, 保障整体的使用寿命和运行的安全性。在本文的研究工作中, 从市政管线施工技术要点入手进行充分探讨, 并提出几点有效的质量管控措施, 以供相关人员参考。

关键词

市政工程; 管线施工; 技术要点

1 引言

对于整个城市而言, 市政工程管线具有十分重大的意义, 可以为推动数字化建设提供一定基础和助力。在具体施工中, 管线施工涉及多项技术要点, 通过充分把握深埋、浅埋和非开挖施工技术要点, 提高管线施工质量。在施工中还要加强质量管控工作, 促进市政工程的稳定运行, 为居民的日常生活提供保障。

2 市政工程施工中管线施工技术要点

2.1 地下管线勘测施工技术

市政工程开展地下管线施工时, 需要做好勘测工作, 充分了解地下管线的规划布局, 结合原本的施工方案, 进一步勘察, 确定地下管线具体位置, 为后续施工奠定良好基础。

【作者简介】甘海燕(1995-), 女, 中国江西吉安人, 本科, 从事项目决策优化或者项目成本(质量)管理研究。

首先可以使用地质钻探、物探等技术手段明确土壤类型、承载力、地下水位、不良地质等基本情况, 可以为基坑支护、管线敷设工艺的选择提供依据。其次, 采用管线探测仪、查阅历史资料的方式, 精确定位既有给排水、燃气、电力、通信管线的位置、埋深、管径以及材质, 标注危险区域和防护范围, 绘制详细的现场勘查图。勘察工作结束后开展设计交底^[1]。组织建设、设计、施工、监理、勘察以及管线权属单位共同参与。逐一核对设计图纸中的管线走向、埋深、接口方式、节点构造以及与周边设施的安全距离等各种关键参数。发现其中的困境、难点和矛盾点, 优化解决, 确保方案设计与现场相符, 避免后续施工出现变更的情况。

2.2 管沟开挖施工

开槽埋管法是传统且应用广泛的施工工艺, 适用于地形平坦, 地下障碍物少, 埋深较浅的管线工艺。基坑开挖前, 需根据地质条件和开挖深度确定开挖坡度和支护方式, 避免基坑坍塌。对于土壤承载力较好、开挖深度 $\leq 1.5\text{m}$ 的基坑, 可采用放坡开挖, 坡度根据土壤类型调整。对于开挖深度 $>$

1.5m、土壤松软或周边有构筑物的基坑，需设置支护结构，常用支护方式包括钢板桩、槽钢桩、SMW工法桩、喷锚支护等。使用机械开挖，避免管沟底部土体结构被扰动，开挖至沟底标高大于30厘米时，需要马上停止施工，并采用人工方式进行清挖施工。人工挖掘时对管沟的高度和宽度进行严格控制，防止管沟底部土体结构被扰动。开槽之后，有序开展验槽施工，若槽底土基情况与相关规定要求不符，需要及时处处理基底问题。基底处理的核心是保证地基承载力满足设计要求，避免管线后期沉降变形。若基底为原状土且承载力达标，可直接在基底铺设砂垫层。若基底土壤承载力不足，需进行换填处理，换填材料可选用级配砂石、灰土等，换填厚度根据承载力要求确定，分层摊铺压实，压实度需符合设计标准。

2.3 地下管线浅埋加盖施工技术

浅埋地下管线是管线工程施工中的常见技术方法。浅埋的过程，施工人员需要掌握管线的直径距离，根据直径距离计算沟槽直径。当管径距离增多时，施工人员则可在管道铺设环节对管线进行加固。因此可以引入地下管线浅埋加盖施工技术，该技术在混凝土浇筑的过程中定位管线的具体位置，辅助施工人员加固管线，起到一定的稳定作用^[2]。

2.4 深埋施工技术

施工过程中，为了防止机械设备对原有的地下管线造成损害，施工前需要对原有的地下管线展开保护。假如管线直径较大，施工人员要注意作业区域周边建筑的地基埋深，使管线埋设的深度与作业区域周围建筑的地基埋深保持一致。结合地质实际情况，采用恰当的浇灌方法，保证深埋管线，作业周围的土体不会产生垮塌的问题。施工人员还需要综合考量作业区域的现实作业条件，保证管线的两端都具有两排注浆孔，而且靠近里侧的注浆孔，不可与管线距离过近。灌浆施工时，浆液顺着管道方向流动，保障注浆效果，对管线增固。采用分层注浆的方式，注意注浆的品质和管线周边土体的稳固性，提高施工的质量。

2.5 管线敷设与接口施工

管线敷设前，核对管材的规格型号，清理管材内部杂质与接口处的污渍，敷设时使用起重机吊装。管道敷设坡度符合设计要求，确保排水通畅。接口施工是防止管线渗漏的关键，根据管材材质选择对应的方式。PE管采用热熔连接或电熔连接的方法；钢管采用焊接接口，选择双面焊接工艺，加强质量检测；混凝土管采用刚性接口，涂抹水泥浆结合层，再分层抹压水泥砂浆；球墨铸铁管采用柔性接口，选择橡胶圈，确保其密封严密。

2.6 沟槽回填

管道安装结束后，对其进行闭水实验，然后开展沟槽回填施工。闭水试验时，地下管道属于无压力管道，水压应保持在正常水压两倍左右。回填施工中，全面清理管沟，防止管沟内残留积水和杂物，回填土选择沙土或者粉土，回填

前做好质量检测工作，确保其符合要求^[3]。回填施工中，从胸腔区域开始，选择分层对称方式填筑。为了保证回填土的填筑施工，每层回填厚度需不超过30毫米，对其进行及时的夯实处理。

2.7 非开挖施工技术要点

非开挖施工技术凭借对地面交通周边环境影响比较小，施工效率高的优势。广泛应用于各类管线工程中，常用的工艺包括顶管法和水平定向钻法。

顶管法适用于大管径长距离、埋深较大的管线施工，核心原理是通过顶管机在地下形成隧道，同步将管材顶入隧道内，无需大面积开挖地面。首先开展工作井和接收井施工。需要根据顶管长度、管径、地下条件确定尺寸和位置。工作井通过采用沉井法，钢板桩支护法等方法进行施工，并安装导轨，控制精度，避免影响管线轴线偏差。接收直径尺寸需要满足管材接收和顶管机取出需求。其次，根据地质条件，选择合适的顶管机型号，例如，软土地区选用土压平衡顶管机，砂层地区可选用泥水平衡顶管机。顶进前在工作井内安装顶进设备，千斤顶的出力需根据管材重量、土壤阻力等因素计算确定。顶进过程中，采用激光导向仪实时监测管线轴线和高程偏差。管材顶进时需与顶管机同步推进，管材之间采用柔性接口，确保接口密封严密，且适应一定的沉降变形。

水平定向钻法施工技术适用于中小管径、短距离、埋深较浅的管线施工。要根据设计图纸和现场勘测结果设计钻孔轨迹进行放线，确保钻孔方向准确，安装钻机进行适当的调试，并根据地质条件配制泥浆，软土地基可选用膨润土泥浆，砂层地区需增加泥浆黏度和比重。进行钻孔施工时，可采用分级钻进的方式，先钻导向孔，然后扩孔，扩孔直径需要大于管材直径，扩孔完成后检测钻孔，确保钻孔轨迹符合设计要求和孔壁稳定^[4]。最后进行管线回拖。管线回拖前，需将管材与钻具连接牢固，检查管材接口的密封性。回拖时匀速缓慢拖动，避免管材受损。回拖过程中，实时监测拉力变化。回拖完成后，切除管材两端多余的部分，进行接口处理和打压试验。

3 市政工程施工中管线施工的管理措施

3.1 做好管线施工全程控制

为了保证市政管线施工的整体质量，需要开展全过程管控工作。在前期工作中做好充足的准备，不仅要加强设计方案的审核和优化，还需要关注材料设备的质量。可以根据设计需求加强质量检测，确保其符合要求。材料进场前进行抽检，确保每批次的材料质量合格才可投入施工中。施工过程中，可利用先进技术加强实时化监控工作。利用地下管线电子监控系统，对地下管线施工进行综合性评估。发现问题及时处理，避免影响整体质量。例如可以应用BIM建模系统，实现三维可视化分析，不仅可以确保地下管线设计的合理性，解决管线冲突碰撞的问题；也能有效控制，精度偏差，

确保其符合施工要求^[5]。

3.2 加强质量检测

施工过程中需要对各分项工程进行实时检测,重点检测的内容有,基底承载力,管线轴线和高程偏差,接口密封性、压实度、防腐层质量等,每道工序完成以后,需经施工单位自检,监理单位验收合格以后,才可进入下一道工序的施工,验收记录需要留存归档。而在一些关键工序,例如接口连接、打压试验中,需要安排专人旁站监督,确保施工符合技术要求。管线施工完成后,需要按照规范要求专项试验检测,确保工程质量符合要求,给水管道要进行水压试验,排水管线进行闭水或闭气试验,燃气管线进行气密性试验。电力电缆进行绝缘电阻测试,通信光缆进行信号传输测试。试验检测不合格的,需要及时整改,重新试验,直至合格。管线施工完成以后,需要做好成品保护工作,避免后续施工对管线造成破坏,在管线区域设置警示标志,禁止重型

车辆碾压,堆放重物。雨季要做好排水,避免管线被浸泡,冬季进行防冻,防止管材冻裂。对已经完成的接口和防腐层要进行重点保护,避免破损。

3.3 加强安全施工管理

安全施工管理是地下管线施工中重点内容,通过加强安全管控工作,排除隐患,保障施工质量。施工现场需要设置明显的警示标识,划分作业区和危险区,严禁非作业人员进入危险区域。基坑开挖和顶管工作井等作业面,需要设置防护栏杆、安全警示灯和防护网,防止人员坠落。现场用电需要符合规范要求。机械作业时,相关人员要持证上岗,熟练设备操作和规程,严禁违规操作。顶管机、水平定向钻机等大型设备,施工前需要检查设备的稳定性,作业的过程中要实时监测设备的运行状态,发现异常及时停机处理。(如图1所示)。

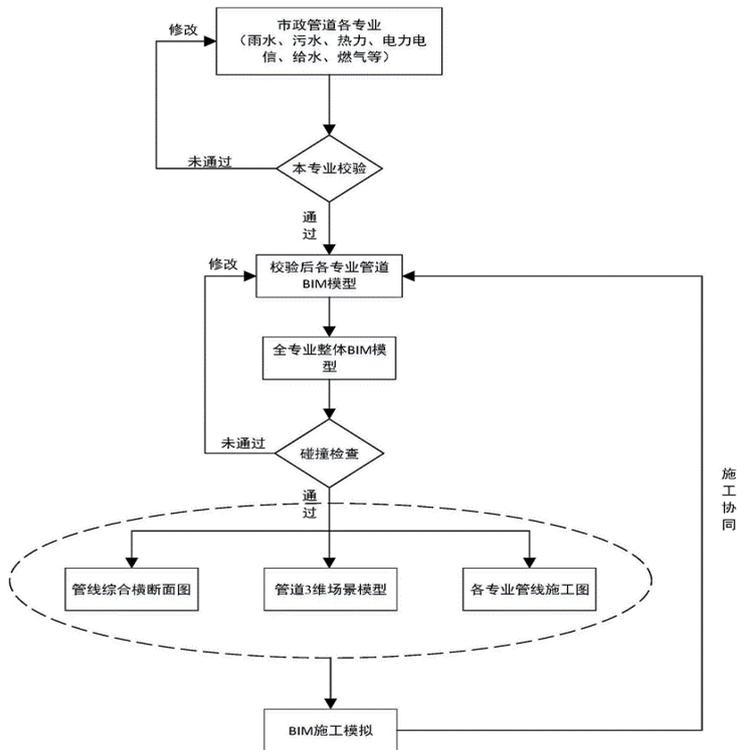


图1 BIM应用流程图

4 结语

综上所述,市政管线施工技术的合理性和应用规范性,直接决定了工程质量、安全和使用寿命,也影响城市的运行和居民的生活质量。因此在具体的工程项目中,施工队伍需要充分把握地下管线施工技术的各类要点,选择合适的技术和设备,制定详细方案,进行技术交底。开展全过程管控工作,并及时进行实验检测,确保各道工序符合要求,在各环节的把控下,提高地下管线施工质量,确保整体系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 叶达燧,吕治勇. 市政工程施工中地下管线施工技术的应用[C]//2025工程新技术与新方法经验交流论文集. 2025:1-3.
- [2] 郝玉龙. 市政工程施工中地下管线施工技术的应用分析[J]. 科技资讯,2023,21(7):78-81.
- [3] 闫俊杰. 市政工程施工中地下管线施工技术分析[J]. 砖瓦世界, 2025(1):100-102.
- [4] 姚晓平. 基于市政施工中地下管线施工技术要点分析[J]. 建材与装饰,2022,18(14):6-8.
- [5] 张凡,王光明,李如意,等. 市政施工中地下管线施工技术应用的要点分析[J]. 工程技术研究,2023,5(3):301-303.

Research on New Energy Power and Human Settlement Improvement in Modern Industrialization

Lei Gao Deming Liu Fachun She Haihong Liu Jia Chen

1. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited/Kunlun Talent in Qinghai Province, Xi'an, Shaanxi, 710000, China
2. China Energy Engineering Corporation Northwest Survey and Design Institute Co., Ltd., Engineering Construction Company, Xi'an, Shaanxi, 710000, China
3. Haixi Guotou Green Energy Co., Ltd., Delingha, Qinghai, 817000, China
4. Haixi Prefecture New Energy Industry Development Service Center, Delingha, Qinghai, 817000, China
5. China Three Gorges New Energy (Group) Co., Ltd. Qinghai Branch, Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

The rapid development of modern industrialization has driven economic growth but also exerted significant impacts on the environment, particularly on the quality of human living environments. New energy power, characterized by its clean, low-carbon, and sustainable utilization, serves as an effective solution to reconcile industrial development with ecological conservation and improve living environments. Based on the current state of industrialization and human settlement development, this paper identifies key issues in practical implementation, proposes targeted and feasible optimization measures, and promotes the deep integration of new energy power with urban and rural living environments. By fostering synergies among industrial development, energy transition, and living environment enhancement, it provides actionable recommendations for building green and livable urban and rural areas.

Keywords

modern industrialization; new energy power; human living environment; energy transition; green and livable

现代化进程中新能源电力与人居环境改善研究

高磊 刘德明 折发春 刘海虹 陈佳

1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 & 昆仑英才, 中国·陕西 西安 710000
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程建设公司, 中国·陕西 西安 710000
3. 海西国投绿色能源有限公司, 中国·青海 德令哈 817099
4. 海西州新能源产业发展服务中心, 中国·青海 德令哈 817099
5. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司青海分公司, 中国·青海 西宁 810000

摘要

现代化快速的发展促进了经济的发展,但也给环境造成了巨大的影响,特别是对人居环境质量的影响。新能源电力具有清洁低碳、可持续利用的明显特点,是解决工业化发展同生态保护矛盾、改善人居环境的有效途径。本文根据目前工业化发展和人居环境建设的现状,梳理实践过程中存在的主要问题,有针对性地提出具体的可行的优化措施,促进新能源电力同城乡人居场景的深度融合,使工业化发展、能源转型、人居环境提升三者相互促进,为城乡绿色宜居建设提供切实可行的建议。

关键词

现代化工业化; 新能源电力; 人居环境; 能源转型; 绿色宜居

1 引言

我国正处在现代化工业化深入推进的重要时期,工业生产规模不断增大,制造业转型升级速度加快,为城乡居民生

活水平提高打下了坚实的经济基础,但是传统的以化石能源为主的能源供应方式,造成了大气污染、土壤污染、噪声污染等环境问题,严重影响了人居环境质量的改善^[1]。随着居民对宜居生活、生态环境的需求越来越高,推动能源结构由高碳向低碳转变迫在眉睫,新能源电力的规模化应用正当时。风电、光伏、水电等新能源电力在生产过程中几乎没有污染物排放,可以从源头上减少工业和生活用能造成的环境压力,同时满足城乡分散式用能的需求,可以直接融入居

【作者简介】高磊(1994-),男,中国河北唐山人,硕士,从事新能源(风力、光伏、光热、氢能)及水利发电、建设等研究。

民的日常生活中。本文从实际的发展场景出发，对新能源电力和人居环境改善之间的关系进行分析，并针对存在的问题提出具体的解决办法，以达到工业化发展和生态宜居双赢的目的。

2 现代化进程中新能源电力改善人居环境存在的问题

2.1 分布式新能源电力布局与城乡人居场景融合度不足

目前新能源电力建设大多集中于大型集中式电站，对于城乡人居场景的分布式新能源项目规划滞后，与居民生活需求相脱离，没有充分利用城乡闲置空间，造成新能源电力不能直接惠及人居环境改善。城市地区建筑屋顶、小区空地、停车场等闲置资源没有得到充分利用，大部分建筑只满足居住功能，没有结合光伏、光热等新能源设施进行一体化设计，新建小区和老旧小区都没有系统的分布式能源布局规划。乡村地区部分新能源项目盲目建设，没有考虑到农户居住分散、用能需求小的特点，大型电站远离居民聚居区，电力输送损耗大，而且没有考虑农户采暖、生活用电等实际需要，部分已经建成的分布式光伏项目只用来发电上网，没有和居民日常生活用能直接对接，不能真正改善居住环境，造成资源利用和环境改善双重脱节。

2.2 新能源电力供应稳定性不足，难以适配人居用能连续性需求

风电、光伏等主流新能源电力受自然气候、昼夜交替、季节更替的影响较大，出力具有间歇性、波动性等特点，不能像传统火电一样持续稳定供电，不能满足居民日常生活、工业生产连续性用能的需求，影响人居环境改善的效果^[2]。晴天、大风天气发电量充足，阴雨天、无风天气发电量大幅下降，夜间光伏完全停止发电，造成电力供应时高时低，如果单纯依靠新能源电力，很容易出现用电高峰时段供电不足、用电低谷时段电力过剩浪费的现象。部分地区没有配套建设储能设施，或者储能设施的规模较小、容量不够，不能有效地储存富余的电力，在供电低谷的时候无法补充电力，造成新能源电力消纳困难，居民用电稳定性得不到保证，采暖、制冷、照明等日常用电场景容易受到影响，甚至出现断电、电压不稳等问题，降低居住舒适度，也影响到周边工业企业正常生产，间接加剧了环境和民生矛盾。

2.3 新能源电力配套设施不完善，城乡覆盖不均衡

新能源电力高效利用需要完善的输电、配电、储能、运维等配套设施，目前我国城乡新能源电力配套设施建设滞后，城乡分布不均，是制约人居环境改善的主要瓶颈。城市部分老旧城区电网改造滞后，传统电网承载能力小，不能满足分布式新能源电力并网的需求，造成新能源电力并网难、输送难的问题；储能、充电桩等配套设施布局不足，居民新能源用电、新能源车充电等需求不能得到满足。乡村地区配

套设施建设更差，电网线路老化、容量不足的现象比较普遍，分布式新能源项目并网程序复杂，运维服务覆盖面小，设备出现故障之后不能及时维修，造成部分乡村新能源设施闲置。配套设施不健全造成新能源电力不能高效输送到千家万户，城乡特别是乡村人居用能清洁化改造推进缓慢，人居环境改善力度不均衡。

3 现代化进程中新能源电力改善人居环境的具体策略

3.1 精准规划分布式新能源布局，深度贴合城乡人居场景

根据城乡不同地区、居民用能需求的差异，从精准化、精细化的角度出发，对分布式新能源与城乡人居场景的融合进行规划，实现新能源电力设施和居住空间的无缝对接，不占用优质土地资源，为人居环境的改善提供切实的服务。城市层面由住建、能源部门联合对老旧小区、新建小区、工业园区周边居民区的闲置空间进行排查，主要对建筑屋顶、小区公共区域、停车场、城市高架下方等闲置资源进行梳理，制定分区布局方案^[3]。新建居民小区应将分布式光伏、光伏车棚等设施作为规划设计内容的一部分，与建筑主体一同施工、验收，使用建筑光伏一体化设计，选择外观简单、不破坏建筑外观的光伏组件，设置在不影响居民采光的地方，不影响日常生活。老旧小区结合改造工程，分批推进屋顶光伏铺设工作，优先在公共楼顶、车棚上建设分布式光伏项目，产权归小区集体所有，发电收益用于小区环境维护和设施维修。乡村层面根据农户居住分散的特点，实行一户一策的分布式光伏布局，对平房农户来说，可以在屋顶上铺设小型光伏组件，满足自家的用电需求之后再将多余的电上网，对聚居村落来说，在村集体的闲置空地上或晒场处建设小型集中式分布式光伏电站，兼顾全村公共照明、党群服务中心用电以及农户的生活用电补充。同时，在工业密集区的周边居民区附近建设新能源电力设施，用工业厂区闲置屋顶建分布式光伏，发电先供周边居民使用，减小供电距离，降低污染传输的影响，使工业区域能源和居住区域能源共享、环境共治。规划过程中不得盲目建设，广泛听取居民意见，避开居民生活核心区域，保证设施布局不扰民、不破坏原有居住风貌，真正实现因地制宜、按需布局，使分布式新能源电力全面融入城乡人居场景，从源头削减生活用能污染。

3.2 完善储能配套建设，保障新能源电力供应持续稳定

针对新能源电力间歇性、波动性的特点，从人居用能连续性的角度出发，分级分类建设储能设施，形成发电、储能、供电一体化的体系，平抑电力波动，保证居民和周边工业生产用电的稳定，为人居环境改善提供能源基础。按照集中式储能和分布式储能相结合的原则，分区域推进储能设施建设，城市大型居民区、工业和居住混合区域配套建设中小

型集中式储能电站,选择磷酸铁锂储能设备,容量根据区域用电峰值确定,保证可以满足区域2到3小时的高峰用电需求,在新能源发电充足时段储存富余电力,发电不足时段稳定释放电力,维持电压稳定,避免断电、电压不稳影响居民生活和工业生产。城乡分散式居民区、农户家庭推广小型户用储能设备,容量与家庭日常用电相适应,与户用光伏组件配套安装,形成自发自用、余电储存的闭环模式,白天光伏发电优先满足家电、照明等需求,多余电力存入储能设备,夜间直接使用储能设备供电,完全摆脱自然条件对新能源电力的限制^[4]。同时,对储能设施运维进行改进,由专业的能源公司对储能设备实施日常巡检、保养和更新,创建起故障应急响应体系,城区储能设施出现故障时要在24小时之内得到处理,乡村储能设施在出现问题的时候也要在48小时内安排人员前去修理,从而防止由于设备发生故障而造成供电的影响。根据极端天气、季节变化等情况,提前制订储能调度方案,在冬季、阴雨天等发电低谷时段提前储备足够的电力,保证采暖、照明等主要用电需求。另外合理控制储能设施建设成本,采用集中采购、规模化建设的方式降低设备投入,对户用储能设备给予一定的补贴来减轻居民的经济负担,保证储能设施可以全面普及,从而解决新能源电力供应不稳定的问题,使清洁电力持续稳定地为人居环境改善服务。

3.3 分层推进城乡电网改造,均衡完善新能源配套设施

就配套设施不足、城乡分布不平衡而言,以电网改造为主,同时推进储能、并网、运维等配套服务的完善,创建起城乡一体化、全覆盖的新能源电力配套体系,打通新能源电力输送的最后一公里,让城乡人居环境改善同步推进。城市层面以老旧城区电网柔性化改造为主攻方向,更换老化线路、扩大变压器容量来提高传统电网对分布式新能源电力的承载和并网能力,简化分布式光伏并网的程序,居民、小区申请并网不需要繁琐的审批,由供电部门上门勘察、免费安装并网设备,保证分布式新能源电力可以很快接入电网^[5]。合理安排小区、商业区新能源充电桩位置,用光伏直供充电桩给居民提供新能源车充电服务,减少燃油车尾气排放,改善城市空气质量。从乡村角度出发,加大农村电网改造资金投入力度,对老旧线路进行全面更换,提高农村电网输电容量和稳定性,按照乡村分布式新能源布局规划要求同步建设相应的配套输电线路,使新能源设施与电网实现无缝对接。简化乡村新能源并网程序,实行一站式服务,村集体、农户

提出建设分布式新能源项目申请,由乡镇供电所全程代办手续,降低参与门槛。创建城乡一体化新能源设施运维服务体系,城市设片区运维站点,乡村设乡镇运维服务点,配专业运维人员及设备,定时对光伏组件、储能设备、电网线路开展巡检清理,迅速应对灰尘覆盖,线路故障等状况,提升新能源发电效能。对偏远乡村实行运维人员包村负责制,保证每个村落的新能源设施都有专人负责,防止出现运维盲区。分层改造、均衡布局,让城市和乡村居民都享有完善的新能源配套服务,促进新能源电力城乡全覆盖,缩小城乡人居环境改善差距,重点补足乡村人居用能清洁化短板,让乡村居民也享受到洁净、稳定的新能源电力,助推乡村生态宜居建设。

4 结语

现代工业化进程和人居环境改善不是相互排斥的关系,依靠新能源电力的清洁优势,可以有效地解决工业化发展所造成的环境矛盾,实现经济发展和生态宜居的共同进步。新能源电力改善人居环境,是符合民生需要、切实可行的一项系统工程,目前虽然还存在着布局融合不够、供应不稳定、配套滞后、衔接不紧等问题,但是通过科学规划分布式布局、完善储能保障、均衡配套设施、衔接生活用能等具体措施,可以一一解决难题,使新能源电力深度融入城乡人居场景。随着能源转型不断推进、技术日趋成熟,新能源电力的使用范围会越来越广,其作用也会越来越突出。只有立足于实际、聚焦民生、精准施策,不能盲目推进、宏观空泛地进行规划,才能使新能源电力真正成为改善人居环境的主要动力,使城乡居民在享受工业化发展成果的同时,拥有更加洁净、舒适、宜居的生活环境,实现现代工业化、能源绿色转型和人居环境高质量提升的长效共赢。

参考文献

- [1] 曹会芹. 乡村振兴背景下的人居环境改善方法研究[J]. 今传媒, 2023, 31 (08): 20-25.
- [2] 李小茜. 乡村人居环境改善中儿童社区参与的社会工作实务研究[D]. 西华大学, 2019.
- [3] 刘滨. 中国乡村人居环境发展水平测度及提升路径研究[D]. 南华大学, 2022.
- [4] 蒲俊宇. 广安市传统村落人居环境评价研究[D]. 西南科技大学, 2022.
- [5] 刘莉. 西部地区乡村人居环境质量对城乡收入差距的影响研究[D]. 四川农业大学, 2023.