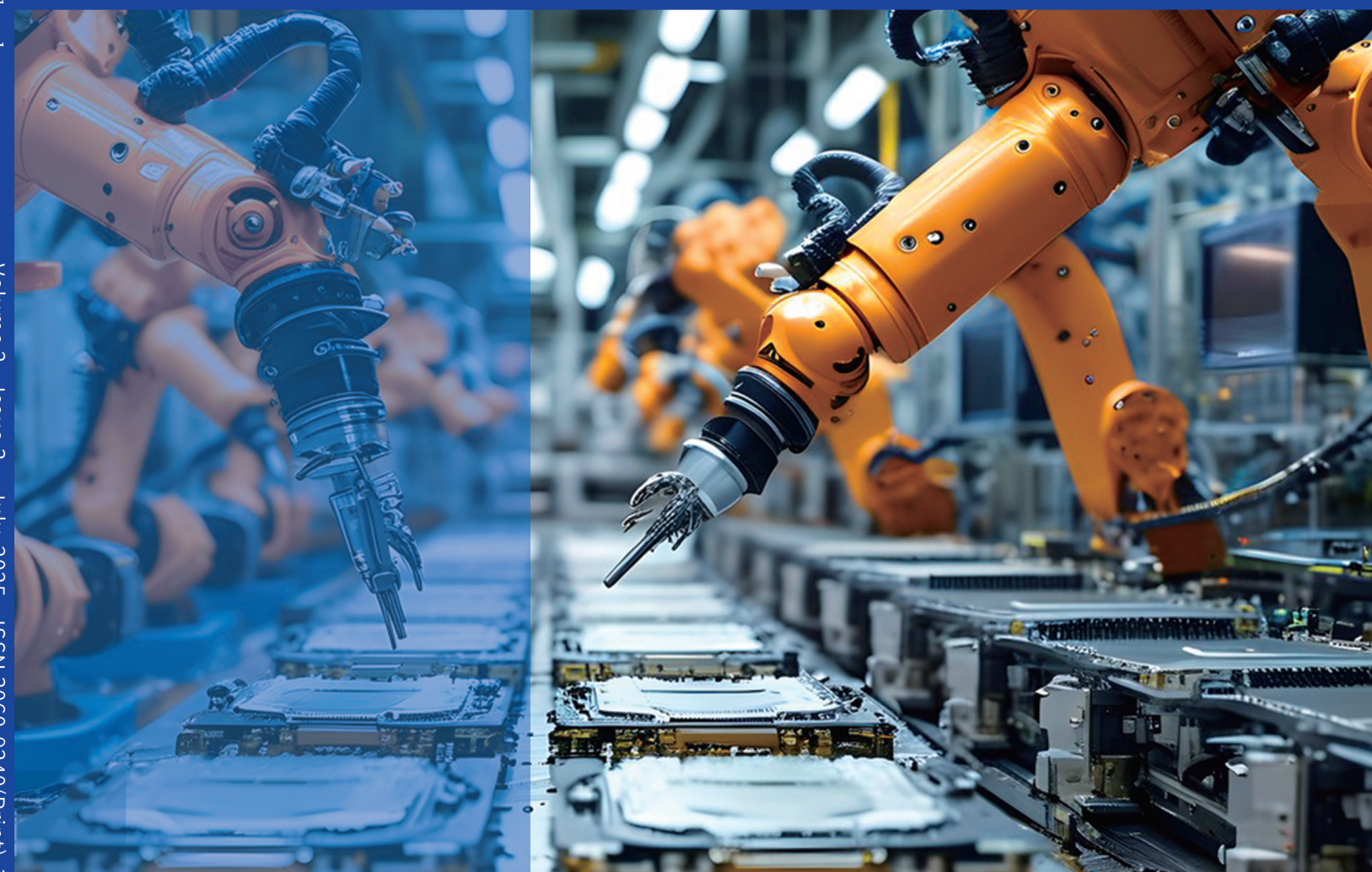


现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2 • Issue 3 • July 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

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。

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>



现代工业与技术

Modern Industry and Technology

Volume 2·Issue 3· July 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	电气自动化技术在工业生产过程控制中的应用探讨 / 赵耀	29	蒸压加气混凝土砌块强度检验要点及质量管控 / 周治国
4	忆阻器等效模型及其在高阶有源滤波电路中的应用 / 陈柏华 田育坤 董佳	32	数字孪生在智能装备制造中的应用 / 张振富
7	基于 BIM 技术的污水厂装配式机电设备协同安装方法探讨 / 李林 高研 于浩波 赵磊 张明义	35	硅材料加工中的表面粗糙度控制技术研究 / 冯小娟
10	特种纸表面处理技术的改进与创新 / 徐匡荣	38	化工企业危险化学品存储与运输安全管理 / 丁嘉奎 卿闲
13	引信工艺设计中的可靠性与安全性分析 / 王少平 郭晨光	41	末子级消旋地面模拟器的设计与控制研究 / 冯冰 鲁延文 汪胜鹏 樊继壮
16	光固化 3D 打印模具行位对样板制作周期的缩短效应研究 / 蔡霆峰	44	海上景观喷泉设备选择的探讨 / 李德胜
19	工业自动化生产线中的电气安全防护体系设计与实现 / 袁子惠	47	火电厂脱硫废水零排放工艺研究 / 雷犁兵 王飞丽 郑祥华 孙中臣 陈万库
22	煤矿机电运输系统中自动化技术的应用思考 / 刘建	50	机械热动设备的智能监测与故障诊断技术研究 / 王峰涛
25	JMatPro 在 45 钢热轧棒材工艺设计中的应用 / 刘家荣 田淑芯	53	三维实景数字露头技术驱动智慧博物馆展厅建设——以成都自然博物馆（成都理工大学博物馆）为例 / 郭垚 肖瑾 胡瑾娅 林宗祺 周磊

1	Application of electrical automation technology in industrial production process control discusses / Yao Zhao		
4	The equivalent model of memristor and its application in high order active filter circuit / Chen Bohua Tian Yukun Dong Jia		
7	Discussion on collaborative installation method of prefabricated electromechanical equipment in sewage plants based on BIM technology / Lin Li Yan Gao Haibo Yu Lei Zhao Mingyi Zhang		
10	Improvement and innovation of surface treatment technology of special paper / Kuangrong Xu		
13	Reliability and Safety Analysis in Fuze Process Design / Shaoping Wang Chengguang Guo		
16	Study on the shortening effect of light curing 3D printing mold on sample making cycle / Tingfeng Cai		
19	Design and Implementation of Electrical Safety Protection System in Industrial Automation Production Line / Zihui Yuan		
22	Consideration on the application of automation technology in coal mine electromechanical transportation system / Jian Liu		
25	Application of JMatPro in the Process Design of 45 Steel Hot Rolled Rod / Jiarong Liu Shuxin Tian		
29	Autoclaved aerated concrete block strength inspection points and quality control / Zhiguo Zhou		
		32	The Application of Digital Twins in Intelligent Equipment Manufacturing / Zhenfu Zhang
		35	Research on Surface Roughness Control Technology in Silicon Material Processing / Xiaojuan Feng
		38	Safety management of storage and transportation of hazardous chemicals in chemical enterprises / Jiakui Ding Xian Qing
		41	Design and control of a ground simulator for terminal subgrade / Bing Feng Yanwen Lu Shengpeng Wang Jizhuang Fan
		44	Discussion on the selection of offshore landscape fountain equipment / Desheng Li
		47	Study on zero discharge process of desulfurization wastewater in thermal power plant / Libing Lei Feili Wang Xianghua Zheng Zhongchen Sun Wanku Chen
		50	Research on intelligent monitoring and fault diagnosis technology of mechanical thermal equipment / Fengtao Wang
		53	Intelligent Museum Construction Driven by 3D Digital Outcrop Technology: A Case Study of Chengdu Museum of Natural History (Chengdu University of Technology Museum) / Yao Guo Jin Xiao Jinya Hu Zongqi Lin Lei Zhou

Application of electrical automation technology in industrial production process control discusses

Yao Zhao

Puyang Technician College, Puyang, Henan, 457000, China

Abstract

With the continuous development of modern industrial production technology, electrical automation technology is used in more and more applications in industrial production process control. This paper analyzes the characteristics and advantages of electrical automation technology. Taking the speed control, temperature control and pressure management of the production line as examples, the specific application of electrical automation technology is described in detail. The practice shows that the application of electrical automation technology makes the production process more stable, rapidly improves the production efficiency, and effectively improves the product quality, and reduces the labor intensity of workers. And the outstanding role of electrical automation technology in promoting the intelligence and digitalization of all industrial links is discussed. In addition, it also puts forward the new trend and research direction of the development of electrical automation technology in the future, which has important reference value for promoting the modernization and intelligence of industrial production.

Keywords

electrical automation technology; industrial production process control; production efficiency; product quality; industry intelligence

电气自动化技术在工业生产过程控制中的应用探讨

赵耀

濮阳技师学院, 中国 · 河南 濮阳 457000

摘 要

随着现代工业生产技术的不断发展, 电气自动化技术在工业生产过程控制中的应用越来越广泛。本文分析了电气自动化技术的特点和优势。并以生产线的速度控制、温度调节、压力管理等几个关键节点为例, 详述了电气自动化技术的具体应用。实践表明, 电气自动化技术的应用, 使得生产过程更加稳定, 迅速提高了生产效率, 并且有效提高了产品质量, 减轻了工人劳动强度。并针对电气自动化技术在推动工业各环节智能化、数字化方面的突出作用进行了探讨。此外, 还提出了未来电气自动化技术发展的新趋势和研究方向, 对于推动工业生产的现代化与智能化具有重要的参考价值。

关键词

电气自动化技术; 工业生产过程控制; 生产效率; 产品质量; 行业智能化

1 引言

当前, 我们正处于加速向数字化、智能化的工业生产转型阶段, 多元化的工业生产线有着多样化的需求。在这样的背景下, 电气自动化技术以其先进性、高效性和实用性, 在工业生产过程控制中得到了广泛应用。不仅如此, 电气自动化技术更是以其独特的技术特点和优势, 充分体现了现代科技的精髓, 为工业生产线的各个环节提供了强大支持。然而, 电气自动化技术在工业生产中具体如何运用、运用的效果如何、未来的发展趋势和研究方向是什么呢? 这些都是我们关注与研究的重点。为此, 本篇文章将以生产过程的关键环节为切入点, 详细探讨电气自动化技术在其中的应用, 并

以此为基础, 推动工业生产进一步向现代化与智能化转变。

2 电气自动化技术的基本概念和特点

2.1 电气自动化技术的基本概念

电气自动化技术是现代工业生产中不可或缺的一部分, 旨在通过电气设备和系统实现生产过程的自动化控制与管理^[1]。该技术集成了多个领域的先进技术, 包括电子、计算机、信息技术和控制工程, 以优化和提升生产效率。电气自动化技术的核心在于其能够通过自动化装置代替传统人工操作, 实现对各种工艺流程的精准控制。这种技术通过感知、计算与控制, 实现对生产线的实时监测、调整以及反馈控制, 从而形成智能化的生产管理系统。

在工业生产过程中, 电气自动化技术通过传感器和执行器等设备采集数据, 结合控制系统进行信息处理, 最终通过作动器完成对机械设备的精准控制。这一技术不仅极大提

【作者简介】赵耀(1979—), 男, 中国河南方城人, 高级技师, 从事电气自动化研究。

升了生产过程的自动化程度，还显著提高了产品的质量一致性和生产效率，降低了能耗和资源消耗。在实际应用中，电气自动化技术可用于多种工业环境，包括制造业、能源、电力、化工等多个行业，通过复杂的控制算法和网络通信技术，实现跨设备、跨系统的高效协作，不断推动工业生产的智能化与现代化进程。

2.2 电气自动化技术的主要特点

电气自动化技术具有几个显著特点，使其在现代工业生产过程中占据重要位置。其高精度和高可靠性显著提高了生产线的运行稳定性^[2]。通过精确地控制和实时的监测，能够有效减少人为操作误差，从而增强生产过程的一致性和可控性。

电气自动化技术具有极强的灵活性和可扩展性。在面对不同的生产需求时，可以通过软件系统的升级和硬件设备的扩充，快速实现生产线的调整和优化。这种灵活性不仅满足了多样化的生产要求，还降低了企业的运营成本，提升了生产效率。

这一技术种类丰富，涉及传感器、控制器、执行器以及信息管理系统等多种设备和技术手段。通过集成多个系统，能够实现生产线的自动监控、数据采集和分析，为企业决策提供强有力的数据支持。

电气自动化技术在节能和环保方面的成效也不容忽视。通过优化能源的管理和有效利用，减少了生产过程中的能源浪费和环境污染。这不仅顺应了绿色生产的需要，也符合可持续发展的趋势。

2.3 电气自动化技术的优势

电气自动化技术的优势在于其对工业生产过程的显著提升。该技术能够有效提高生产效率，通过精确的实时监控和快速响应，确保生产线的稳定运行。在产品质量方面，电气自动化技术通过减少人为误差和波动，实现了更高的一致性和合格率。该技术可显著降低人工成本，减轻工人的劳动强度，通过自动化设备替代重复性劳动，提升了整体生产环境的安全性及舒适性。电气自动化技术与现代信息技术的结合，促进了生产系统的智能化发展，使得生产决策更加精准和高效。电气自动化技术在推动工业生产现代化方面发挥了关键作用。

3 电气自动化技术在工业生产过程控制中的应用实例

3.1 在生产速度控制中的应用

在现代工业生产线上，速度控制是确保生产效率和产品质量的重要环节。电气自动化技术在这一领域的应用主要体现在精确的速度调节、实时监控和自动故障处理等方面^[3]。

通过电气自动化技术的引入，实现了生产线速度的精确控制。利用先进的电机驱动器和控制系统，可以根据生产需求动态调整设备运行速度，从而避免机械磨损和能源浪费。例如，变频器的应用能够根据生产节奏实时调整电机转

速，实现生产线的平稳运行。相比传统的机械调速方法，电气自动化系统能够提供更高的控制精度和响应速度，有效减少了生产过程中的波动和误差。

实时监控是电气自动化技术在速度控制中另一个关键作用。通过传感器和数据采集系统，能够实时收集生产线各节点的速度数据，并将其传输到中央控制系统进行分析和处理。中央控制系统通过工艺要求对速度进行调整，确保整个生产过程的同步性和一致性^[4]。实时监控不仅提高了生产效率，还减少了人为操作带来的误差，提高了生产线的安全性。

在自动故障处理方面，电气自动化技术能够快速识别并处理生产线上的速度异常情况。利用传感器和监控设备，可以及时发现速度偏差，并通过自动控制系统进行调整或报警，避免因速度不正当导致的停机或产品质量问题。自动故障处理系统不仅提升了生产线的稳定性和可靠性，还减少了因停工维修带来的生产损失。

电气自动化技术在生产线速度控制中的应用显著提升了工业生产的效率、稳定性和产品质量。这为现代工业生产提供了坚实的技术保障，推动了工业自动化和智能化的发展。

3.2 在温度调节中的应用

在工业生产过程中，温度调节是确保产品质量和生产效率的关键环节。电气自动化技术在温度调节中的应用主要体现在实时监控和精准控制两方面。通过使用温度传感器，实时采集生产设备或生产环境的温度数据，这些数据通过控制系统进行分析和处理，生成调控指令，并反馈至执行机构，如加热器或冷却设备，从而精确地维持在预设范围内。通过PLC和DCS等控制系统的应用，实现了温度调节的自动化和智能化，不仅提高了控制精度，还能够通过人机界面进行远程监控和调整，极大地提高了生产线的稳定性和效能。电气自动化技术通过先进的控制算法和集成的网络通信技术，进一步优化温度调节过程，使得能耗降低，资源利用率提升，并有效保障了工人的工作环境安全。应用于如化工、食品加工等行业，显示出显著的经济效益和社会效益。

3.3 在压力管道中的应用

在压力管道中的应用中，电气自动化技术实现了精准的压力监测与控制，通过传感器实时监测压力变化，确保系统稳定运行。PLC（可编程逻辑控制器）与DCS（分布式控制系统）结合运用，自动调节阀门和泵的操作，维持压力在设定范围内，避免波动带来的安全隐患。自动化控制系统提高了响应速度，减少了人为干预可能引起的误差，保障了设备的安全性和生产工艺的稳定性，显著提升了整体生产效率。电气自动化技术在压力管道中的应用，有力地支持了工业生产的智能化。

4 电气自动化技术在推动工业智能化和数字化中的作用及未来趋势

4.1 电气自动化技术在推动工业智能化中的作用

电气自动化技术在推动工业智能化过程中扮演着至关重要的角色。电气自动化技术通过高效的自动控制系统和先进的检测技术,使得生产过程中的各个环节能够实现精确控制和实时监测。这不仅减少了人为干预的需求,还大大提高了生产效率^[9]。自动化系统能够及时反馈生产过程中出现的各类异常情况,并通过自我调整功能,确保整个生产线的连续性和稳定性。

电气自动化技术的应用促进了设备之间的互联互通,形成了智能化生产系统。通过采用现代通信技术和网络技术,各类生产设备能够实现数据共享和远程控制,使得生产管理更加集成化和智能化。一旦某一设备出现故障,系统可以自动定位故障点,并在最短时间内进行调整和维修,从而最大限度地减少停机时间。

电气自动化技术还在智能决策支持方面发挥了重要作用。利用先进的传感器和数据采集系统,电气自动化技术能够实时收集生产过程中的大量数据,并通过大数据分析和机器学习方法,对生产计划进行优化和调整。这不仅提高了生产的灵活性和响应速度,也使得资源配置更加合理,降低了生产成本。

在全生命周期管理方面,电气自动化技术通过设备健康监测与预维护,延长了设备的使用寿命,提高了整个生产系统的经济效益。智能化的电气自动化系统还能够根据市场需求的变化,快速调整生产线的运行状态,为企业提供更强的市场竞争力。

电气自动化技术在推动工业智能化方面具有不可忽视的作用,不仅提高了生产效率和产品质量,还为实现工业智能化奠定了坚实的基础。

4.2 电气自动化技术在推动工业数字化中的作用

电气自动化技术在推动工业数字化中扮演着关键角色,通过数据采集、传输和处理,实现生产过程的数字化监控和管理。其核心在于利用传感器和智能设备,实时获取生产线各环节的数据,如设备状态、工艺参数和环境条件等。这些数据通过工业互联网传输至中央控制系统,由先进算法进行分析与处理,为生产决策提供科学依据。电气自动化技术通过云计算和大数据技术,实现了大规模生产数据的存储和分析,提高生产管理的准确性和灵活性。借助数字孪生技术,可在虚拟环境中模拟整个生产过程,预判潜在问题,优化生产流程,实现预防性维护。电气自动化技术在保障数据安全

的基础上,促进数据共享和协同工作,加速企业向数字化转型,全面提升了生产效率和产品质量,推动工业生产向智能化与精细化发展。

4.3 电气自动化技术的未来研究方向和发展趋势

电气自动化技术的未来研究方向主要在以下几个方面进行探索:一是深度融合物联网和人工智能技术,实现更高层次的智能化控制体系;二是加强对大数据分析和预测技术的应用,以提高生产过程的精确度和效率;三是推动边缘计算与云计算的结合,实现分布式控制和实时数据处理;四是发展高可靠性的网络通信技术,确保自动化系统的安全性和稳定性;五是开发绿色自动化技术,推动节能减排,实现可持续发展目标。

5 结语

本文通过具体案例分析了电气自动化技术在工业生产过程中的应用,突出其在提高生产效率、优化产品质量和降低劳动强度方面的显著优势。电气自动化技术不仅仅局限于单一的控制功能,更在智能化和数字化的工业环节中发挥着关键作用。虽然研究取得了一定的成果,但电气自动化技术在实际应用中仍面临一些技术和应用层面的挑战,例如系统的集成性和兼容问题、长期运行的稳定性等需进一步深入研究。未来研究可以集中在提高系统综合集成技术,以及智能化、网络化控制系统的创新应用上。同时,加强电气自动化技术与互联网、大数据等其他高新技术的融合,将是推动工业生产自动化和智能化发展的重要方向。通过不断的技术创新和理论研究,电气自动化技术将在工业生产中展现更大的潜力和价值。

参考文献

- [1] 刘彬彬.工业生产过程中的电气自动化[J].今日自动化,2021,(12): 125-126.
- [2] 魏斌.自动化控制技术在工业生产过程中的实践[J].时代农机, 2019,46(05):40-41.
- [3] 郭志坚.工业生产过程的产品质量控制以及应用[J].百科论坛电子杂志,2020,(06):1730-1731.
- [4] 田慧子.电气自动化控制技术在工业生产中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2023,(04):0005-0008.
- [5] 庞华兴.化工安全生产过程自动化控制技术[J].中国化工贸易, 2019,11(20):40-40.

The equivalent model of memristor and its application in high order active filter circuit

Chen Bohua Tian Yukun Dong Jia

Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300350, China

Abstract

To address challenges in physical fabrication of memristors and design/performance optimization of memristor-based filter circuits, this study employs a comprehensive approach integrating theoretical analysis, model development, simulation, and experimental validation. The research focuses on three key aspects: equivalent circuit design for memristors, active high-pass filter circuits utilizing memristors, and programmability enhancement of memristors. Two types of equivalent circuits—single-ended grounded and universal configurations—are designed to simulate fundamental memristor electrical characteristics. Additionally, first-order, second-order, and fourth-order active high-pass filter circuits are constructed to evaluate their filtering performance across different orders. Results demonstrate that the proposed equivalent circuits effectively replace traditional memristors, with higher-order filters exhibiting superior performance. Notably, the cutoff frequency can be dynamically adjusted by modifying the memristor resistance value. These findings establish memristors as promising candidates for filter circuit applications, providing a practical solution to design challenges in memristor-based filter circuits.

Keywords

memristor; equivalent circuit; filter circuit; cutoff frequency; programmability

忆阻器等效模型及其在高阶有源滤波电路中的应用

陈柏华 田育坤 董佳

天津职业技术师范大学, 中国 · 天津 300350

摘 要

针对忆阻器实物制备困难、基于忆阻器的滤波电路设计及性能调控存在挑战等问题, 本文采用理论分析、模型构建、仿真与实验验证相结合的方法, 对忆阻器等效电路、基于忆阻器的有源高通滤波电路及忆阻器可编程性展开研究。设计了单端接地和通用型两种忆阻器等效电路, 模拟忆阻器基本电学特性; 构建了一阶、二阶和四阶有源高通滤波电路, 分析不同阶数电路的滤波效果。结果表明, 所设计的等效电路可有效替代忆阻器, 高阶滤波电路滤波效果更优, 通过改变忆阻值可动态调整截止频率。研究得出忆阻器在滤波电路中具有良好应用潜力的结论, 为解决忆阻滤波电路设计难题提供了可行方案。

关键词

忆阻器; 等效电路; 滤波电路; 截止频率; 可编程性

1 绪论

1.1 国内外研究现状

忆阻器作为第四种基本电路元件, 由加州理工大学蔡少棠教授于 1971 年首次提出, 他用忆阻器来定义电荷量与磁通量的关系, 推断其具有记忆电荷量的特性, 用 M 来表示^[1]。2008 年, 惠普公司的 Strukov 团队在《Nature》发文, 认为 Pt/TiO₂/Pt 三明治叠层结构器件在电压扫描过程中出现捏滞回线是忆阻现象, 并构建了忆阻模型^[2]。这一现象证实了蔡绍棠教授提出的忆阻器的特性。

忆阻器的成功研制激发了国内外研究人员的探索热情,

大量相关文章开始出现^[3-5]。2010 年, Pershin 和 Ventra 在 IEEE 上发表了一篇文章, 提出一种基于数字电位器和微控制器基础上的忆阻器模型, 利用这个模型^[6], 分别设计了具有忆容、忆感特性的忆容、忆感电路。经多次试验, 证明了该器件的等效电容及忆感回路的电感值连续可调。

在国内, 人民教育出版社在 1980 年和 1981 年分别出版了蔡绍棠教授的《非线性网络理论引论》和《非线性电路理论》的译著, 译者分别是电子科技大学虞厥邦教授和清华大学肖达川教授^[7-8]。华中科技大学、西南大学、中国科学院微电子研究院等高校和科研院所展开了关于忆阻器的相关研究^[9-12]。2023 年 10 月, 清华大学吴华强团队成功研制出全球首款全系统集成的忆阻器存算一体芯片^[13]。该芯片, 在人工智能等领域应用前景广阔。此外, 国内学者在忆阻混沌电路、人工神经网络权值存储等领域也取得显著进展。

【作者简介】陈柏华(2004-), 男, 中国福建福州人, 在读本科生, 从事微电子科学与工程(师范类)研究。

1.2 研究问题

尽管忆阻器研究已取得显著进展，但实际应用仍面临诸多问题。从自身来看，其实物化对材料和工艺要求极高，需在纳米尺度精确控制材料结构与性质以实现电阻可控变化，且其特性易受温度、电压、湿度等外界因素影响，可靠性与稳定性难以保障，这些限制了大规模生产应用。

在与滤波电路结合方面，传统滤波器性能参数固定，难以灵活调整；虽可利用忆阻器阻值可调特性动态调控滤波器性能，但忆阻滤波电路设计仍是一大挑战，目前相关研究多处于理论和仿真阶段，实际电路常存在滤波效果不理想、稳定性差等问题。

此外，忆阻器等效电路设计有待完善：因实物制备困难，研究多采用等效电路模拟其特性，但现有等效电路在精度和适用性上不足，尤其在可编程滤波电路中表现难达预期。同时，高阶忆阻滤波电路研究较少，且多集中于巴特沃斯滤波器，对贝塞尔、椭圆、切比雪夫等其他类型滤波器研究不足，限制了忆阻器在滤波领域的广泛应用。

1.3 研究目的及意义

本研究旨在围绕忆阻器在滤波电路中的应用，解决当前忆阻滤波电路研究存在的问题，推动其实用化。具体包括：设计可准确模拟忆阻器电学特性的等效电路模型，为相关研究提供可靠模拟器件，缓解实物制备难题；基于忆阻器及等效电路，设计性能优良的一、二、四阶有源高通滤波电路，通过改变忆阻值动态调整截止频率，探究不同阶数电路的滤波效果差异，为高阶电路设计提供参考。

本研究意义显著：理论上可完善忆阻器理论体系，丰富滤波电路设计方法，为电子电路领域发展提供新思路；实际应用中，忆阻滤波电路具备体积小、功耗低、性能可调等优势，在无线通信、音频处理等领域前景广阔，所设计的等效电路和可编程电路可为工程实践提供可行方案，推动忆阻器技术产业化，助力电子信息产业发展。

2 滤波器与忆阻器的理论基础

2.1 滤波器

滤波器是允许特定频率信号通过而阻止其他频率信号电子电路，按传输频带分为低通、高通、带通和带阻滤波器；按元件类型分为无源与有源滤波器。无源滤波器由电容、电阻、电感组成，结构简单但性能有限；有源滤波器含运算放大器等有源元件，具备放大、增益控制功能，适用于高精度场景。

其主要特性参数包括截止频率（信号开始显著衰减的频率点）、通带带宽（允许通过的频率范围）、阻带带宽（显著衰减的频率范围）、阻带衰减（对无用信号的屏蔽能力）及阻抗（影响信号传输效率）。

滤波器在生活中应用广泛，如无线充电垫保障电磁兼容、家庭自动化设备过滤环境噪声、音频设备优化音质、计

算机稳定电源供应等。

2.2 忆阻器

忆阻器是一种新型电子元件，电阻值随通过的电荷量可逆变化，具有非易失性（断电后仍能保持信息），凭借低能耗、高速度、可扩展性等优势，成为下一代存储技术的核心候选。

其工作原理基于离子迁移机制：电流通过时引发内部材料结构变化，导致电阻改变，反向电流可使其恢复原状。制作材料主要包括金属氧化物（如 TiO_2 ）、过渡金属硫化物（如 MoS_2 ）、有机材料、钙钛矿型材料和硅基材料等，材料特性直接影响其电学性能与稳定性。

忆阻器应用广泛：在非易失性存储领域，性能优于 SRAM、DRAM 等传统存储器，集成面积小、能耗低、读写速度快；在神经形态计算领域，可模拟人脑突触功能，实现高效信息处理且功耗极低。

2.3 理想忆阻器 SPICE 模型

惠普实验室的忆阻器模型为 TiO_2 功能层夹于两铂电极间的三明治结构，总忆阻值随混合区宽度变化。通过引入 Joglekan 窗函数，建立符合边界迁移模型的 PSPICE 模型，仿真显示其 V-I 特性呈理想捏滞回线，电流随正弦电压周期性变化，为忆阻器电路设计提供了理论基础。

2.4 双极性阈值忆阻器行为模型

为刻画忆阻器阈值特性，Biolek 提出双极性阈值模型，借助平滑阶跃函数和绝对值函数削弱数学收敛影响。PSPICE 仿真表明，该模型仅呈现高阻态和低阻态，电压超过阈值时电阻状态改变，可准确描述实际忆阻器件的双极性阈值行为。

3 忆阻等效电路及在滤波电路中的设计

3.1 忆阻器等效电路模型

忆阻器实物化面临材料控制、工艺技术等难题，研究人员通过设计等效电路模拟其特性。在单端接地忆阻模型基础上，提出通用型忆阻等效电路如图 3-1，等效导纳具有记忆特性，仿真显示其 V-I 特性呈斜 8 字形，频率越高越接近直线，高频时忆阻效应消失，扩大了应用场景。

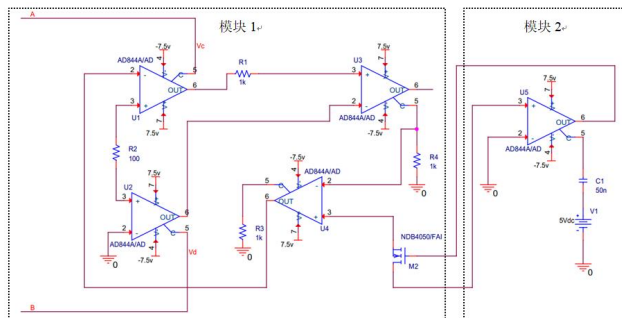


图 3-1 忆阻器等效电路图

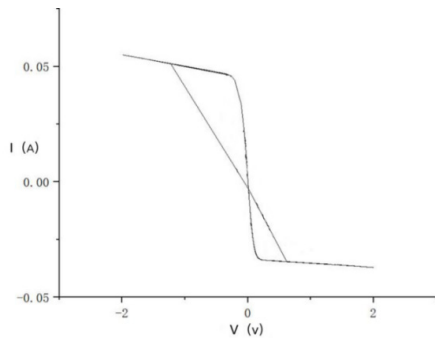


图 3-2 等效忆阻电路仿真

3.2 一阶有源高通滤波电路

忆阻器实物化受材料控制、工艺技术等难题制约,研究人员通过设计等效电路模拟其特性。单端接地忆阻等效模型由运算放大器、电容、模拟乘法器等组成,仿真显示其 $V-I$ 特性呈斜 8 字形,频率越高越接近直线,高频时忆阻效应消失。通用型忆阻等效电路由电压控制浮地阻抗电路和电流积分器构成,等效导纳具记忆特性,可模拟忆阻器电学行为,拓宽了应用场景。

3.3 二阶有源高通滤波电路

基于巴特沃斯滤波器设计的二阶有源高通滤波电路,用忆阻器替代电阻后,通过改变忆阻值可动态调整截止频率。通过仿真可知,输入频率低于截止频率时抑制明显,高于时无显著衰减,且忆阻值增大时幅频特性曲线反向偏移,分辨率提高。二阶等效忆阻滤波电路截止频率约 995Hz,实验验证其滤波效果符合预期。

3.4 四阶忆阻有源高通滤波电路

四阶滤波电路由两级二阶电路级联而成,采用两个忆阻器分别调节两级截止频率。

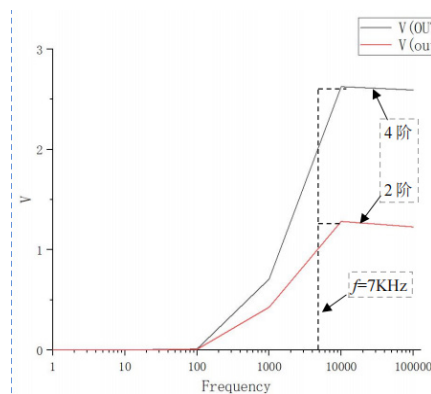


图 3-3 频域特性图

该四阶等效忆阻滤波电路的幅频特性如图 3-3 所示,其幅频特性更陡峭,过渡带更窄,滤波效果优于二阶电路。该电路截止频率约 7KHz,表现出优异的高通特性,实际搭建电路测试验证了其有效性。

3.5 实验验证

搭建一阶、二阶、四阶等效忆阻滤波电路,测试表明

在截止频率范围内,电路对低频信号衰减显著,高频信号无明显抑制,与仿真结果一致,证实了等效忆阻电路在实际滤波中的可行性。

4 总结与展望

4.1 工作总结

本文设计忆阻器理想模型及两种等效电路,仿真验证其可实现忆阻器基本电学特性;构建基于忆阻器及等效电路的一、二、四阶有源高通滤波电路,显示高阶电路滤波效果更优,且等效电路可替代忆阻器实现功能;还设计两种忆阻器编程电路,应用于一阶滤波电路可调节截止频率。

4.2 展望

未来将完善忆阻电路模型以接近实际器件,将可编程电路应用于高阶滤波实现截止频率实时调整,拓展忆阻滤波电路在多种类型滤波器中的研究,优化等效忆阻电路设计以提升其在可编程电路中的性能,推动忆阻器在滤波领域的实际应用。

参考文献

- [1] Chua L. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5): 507-519.
- [2] Strukov DB, Snider GS, Stewart DR, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 453(7191): 80-83.
- [3] Rose GS. Overview: Memristive devices, circuits and systems[C]. in: Paris, eds. Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. France: IEEE, 2010: 1955-1958.
- [4] Merrih-Bayat F, Shouraki SB. Memristor-based circuits for performing basic arithmetic operations[J]. Procedia Computer Science, 2011, 3: 128-132.
- [5] Joglekar YN, Wolf SJ. The elusive memristor: properties of basic electric circuits[J]. European Journal of Physics, 2009, 30(4): 661-663.
- [6] Pershin YV, Di Ventra M. Memristive circuit simulates memcapacitors and meminductors[J]. Electronics Letters, 2010, 18(6): 517-518.
- [7] 蔡少棠. 非线性网络理论引论下册[M]. (虞厥邦). 北京: 人民教育出版社, 1981: 100-108.
- [8] 蔡少棠. 非线性电路理论[M]. (刘小河). 北京: 人民教育出版社, 2009: 35-45.
- [9] 李伟. 基于硫系化合物的类神经元突触的认知存储器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [10] 张金箭. 碲基硫系化合物材料的忆阻特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [11] 董哲康. 基于忆阻器的组合电路及神经网络研究[D]. 成都: 西南大学, 2015.
- [12] 刘明. 新型阻变存储技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 78-83.
- [13] Zhang W, Yao P, Gao B, et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip[J]. Science, 2023, 381(6663): 1205-1211.

Discussion on collaborative installation method of prefabricated electromechanical equipment in sewage plants based on BIM technology

Lin Li Yan Gao Haibo Yu Lei Zhao Mingyi Zhang

Hebei Construction Investment Engineering Construction Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

The construction and management of wastewater treatment facility systems in wastewater treatment plants face numerous challenges, such as insufficient visual clarity of two-dimensional design drawings, high rework rates in equipment installation, and inconvenient operation and management. Therefore, the practical application management technology for prefabricated electromechanical equipment in wastewater plants urgently needs improvement. This article discusses the collaborative installation method of equipment, leveraging Building Information Modeling (BIM) technology and digital prefabricated electromechanical equipment collaborative installation technology. It delves into various aspects such as core technology configuration, platform expansion, innovative highlights of installation methods, and technical benefit indicators, aiming to comprehensively enhance the overall production and operation level of wastewater plant equipment.

Keywords

BIM technology; wastewater treatment plant; prefabricated electromechanical equipment; collaborative installation method; technical benefit indicators

基于 BIM 技术的污水厂装配式机电设备协同安装方法探讨

李林 高研 于浩波 赵磊 张明义

河北建投工程建设有限公司, 中国 · 河北 石家庄 050000

摘 要

污水厂污水处理设施体系的构建与管理面临诸多挑战, 如二维设计图纸直观性不足、设备安装返工率高、运行管理不便等。因此, 污水厂装配式机电设备的实践应用管理技术亟待改进。本文探讨的设备协同安装方法, 借助建筑信息模型技术 (BIM) 与数字化装配式机电设备协同安装技术, 从核心技术配置、平台扩展、安装方法创新亮点及技术效益指标等多方面展开讨论, 旨在全面提升污水厂设备的综合生产运行水平。

关键词

BIM技术; 污水厂; 装配式机电设备; 协同安装方法; 技术效益指标

1 引言

当前, 污水厂生产运行正朝着数字化、智能化、集成化方向迈进, 大量装配式机电设备投入厂内生产。BIM 技术与装配式设备协同安装技术功能强大, 可用于设计污水处理生产流程, 实现从设计到施工的协同化管控, 最大程度减少设计变更和施工失误, 大幅提升装配机电设备的生产运行效率。此外, BIM 技术与污水厂装配式机电设备的结合, 还能实现厂内设备安装的集成化与施工的数字化, 为问题诊断与预测性维护工作降低成本。^[1]

2 项目背景

研究污水厂装配式机电设备安装已成为行业趋势, 其数字化发展显著, BIM 技术融合技术将推动污水处理行业实现数字化转型, 有效提升行业效率与智能化水平。

本文所探讨的某地区污水厂, 为实现可持续的资产升级, 厂内配置了装配式机电设备, 采用协同安装方法, 结合 BIM 技术与智慧化装配式技术分析管理体系, 有效平衡节能降本, 推动形成集约、循环、高效技术发展应用新格局。BIM 技术的应用可优化项目传统粗放的生产模式, 解决高污染高耗能问题。采用 BIM 技术模型后, 项目的建设管理效率得到最大化规范, 满足企业项目施工要求, 助力企业实现降本增效的发展目标。

该污水厂的装配式机电设备协同安装借助 BIM 技术,

【作者简介】李林 (1989-), 男, 中国河北沧州人, 本科, 工程师, 从事建筑设计与结构计算研究。

计划分段完成管道施工，在各分段管道上添加专属“二维码名片”，深化设计 BIM 模型并输出电子版图纸，同时预制构件安装位置、调整数据结果，通过施工工艺与规范生成最终二维码，满足管道加工、复核、运输、现场验收、吊装、拼装等各环节的信息需求，有效解决设备协同安装过程中的“信息孤岛”问题。^[2]

3 BIM 协同式安装研究

3.1 BIM 模型分类

污水厂装配机电设备的协同安装主要采用 BIM 技术模型，根据不同设备功能及应用场景，BIM 模型可分为以下 3 种：

处理设备模型：负责管理泵、格栅除污机、风机等直接参与污水处理过程的设备 BIM 技术需实时监管这些设备的协同安装运行操作过程，以提高设备管理效率。

监测设备模型：各种 BIM 传感器及监控装置，用于实时监测污水处理过程中的关键参数。

支撑设备模型：负责管理管道、阀门及支架等设备，虽不直接参与污水处理，但对系统正常稳定运行至关重要。

除此之外，BIM 技术应用还涉猎诸多职业岗位，具体参考图 1。

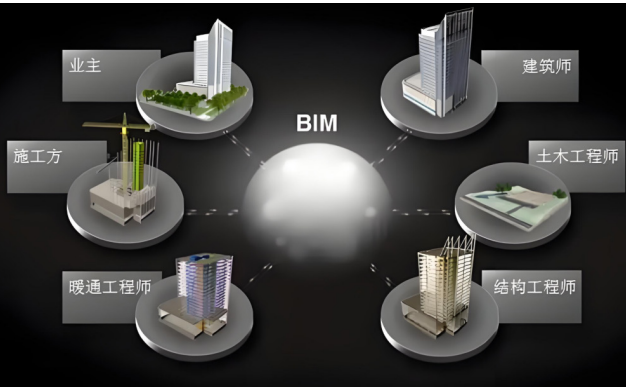


图 1 BIM 模型的应用领域示意图

3.2 BIM 模型的建立

在污水厂中，BIM 模型的建立结合设备现场协同安装工作进行，主要用于详细收集污水处理设备的特征数据，如设备材质、尺寸、性能参数等。安装工作中，利用 Revit、Navisworks 等专业 BIM 软件收集数据，设计管道及机电设备的三维模型。在 BIM 模型中设置详细的参数信息，明确技术规格及安装要求，以保证模型的准确性与实用性。同时，参考污水厂处理工艺及现场条件，对 BIM 模型进行优化，确保其在设计、材料生产组装过程中高效应用。

3.3 结合 BIM 技术的现场协同安装方案

污水厂装配式机电设备主要结合 BIM 技术与装配式设备协同安装技术进行现场协同安装，以实现快速施工并降低安装成本。依据 BIM 模型及设计图纸预制生成设备模块，实现现场快速组装，借助 BIM 模型最大限度缩短施工周期。同时，利用 BIM 模型进行三维定位，提高设备安装的精确性，实时监控设备整体安装质量，形成完整的 BIM 模型映射关系，优化映射技术方式。为实现设备的快速识别与信息查询优化，保证装配设备贴上带有唯一标识的二维码，形成 BIM 模型映射条件。在 BIM 模型数据库中，所有设备模型都分配有唯一的标码符，与二维码一一对应。因此，在协同安装设备过程中，技术人员将技术参数、设备安装位置、维护记录等整合到 BIM 模型中，通过二维码即可快速访问、处理数据。技术人员可利用智能手机或平板电脑等移动设备的扫描功能扫描二维码，访问对应的 BIM 模型及装配式机电设备信息。^[3]

总之，要建立污水厂的污水机电设备体系，需保证数字化装配式机电设备与 BIM 技术深度融合，以提高设备设计质量，有效辅助施工开展，管理设备运行机制，实现施工管理的智能化与信息化，为污水厂生产提供强大技术支持。在污水厂中，BIM 技术不仅用于协同安装设备，还为生产过程提供全新的技术理论方法，有力推动污水厂处理技术向数字化、智能化转型。某地区的污水厂数字化机电设备现场协同安装全周期管理工作内容如图 2 所示。

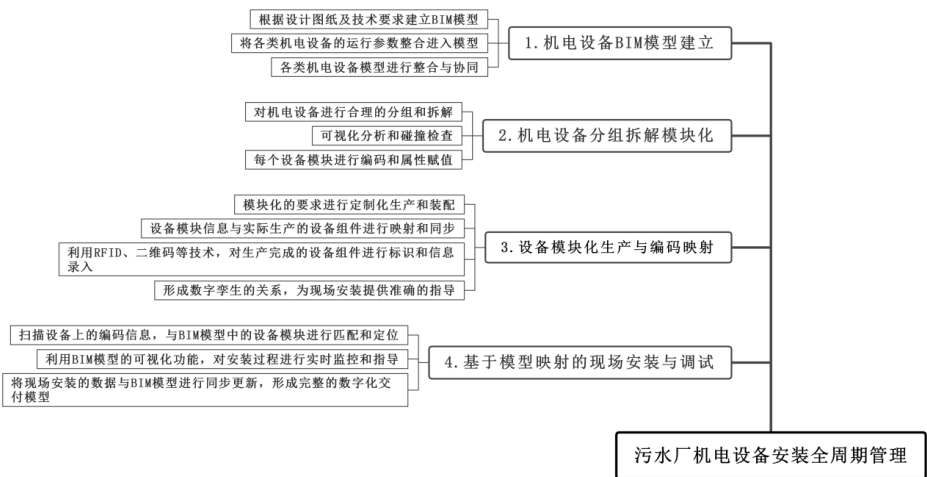


图 2 某地区污水厂的数字化机电设备现场协同安装全周期管理工作内容示意图

参考图2,污水厂数字化机电设备的现场协同安装方法首先建立机电设备BIM模型,进行分组拆解模块化技术处理,并利用RFID、二维码实现设备模块化生产与编码映射,基于模型映射进行现场安装与调试设备,实现BIM模型与现场协同安装数据的同步更新,形成完整的数字化交付模型。

另一方面,污水厂在BIM技术模型基础上+装配式设备协同安装技术,首先进行技术对比,分析污水处理过程中的横向平台数据及设备同一项目在不同时间内的纵向数据,找出数据差距与空间,为调整设备现场协同安装创造有利条件,扩充产能,提供多维度决策数据。目前,污水厂已打造装配式设备协同安装技术数据一张图,实现平台数据的高效率、一体化管理,助力设备现场协同安装,决策并引领高技术应用辅助经济发展,实现可视化、智能化管理工作的优化。

3.4 技术亮点

污水厂装配式机电设备的现场协同安装具有诸多创新亮点,在将BIM技术与装配式设备协同安装技术融入装配式机电设备的过程中,主要提出了协同设计安装新模式。在设计阶段,完成对设备模型的参数赋值,确保设备制造商依据所设计模型的参数进行设备生产优化,实现设备安装过程的数字化管理优化。例如,建立模型与设备之间的映射关系,为施工单位建立模型与装配式设备的数字孪生关系创造条件,完善现场设备协同安装工作任务。另外,设备模块化生产与编码映射要求污水厂采用上述二维码技术与RFID技术,主要对生产完成的装配式机电设备组件进行标识及信息录入,使其与BIM模型中对应的设备模块完全映射,形成数字孪生关系。参考模型映射的现场安装与调试条件,对BIM模型进行设备布置与逻辑顺序安装,由人工配合数字化技术完成设备之间的现场协同安装与调试工作。与传统安装模式相比,每个设备的安装工期至少节省5天,现场协同安装工作效率大幅提升。^[4]

在创建完整的数字化交付模型过程中,需后续设备运维管理提供数据支持。参考当前国内大量市政污水厂的基础能耗问题,提出污水处理技术与装配式设备协同安装技术应用策略。该平台支持信息管理与数据实时监测,可动态调整技术数据的核算与报告生成功能,嵌入多套核算管理方法,调整多维度、可视化界面,实时了解设备的污水排放情况。另外,采用装配式设备协同安装技术也能迎合BIM技术应用提高生产效率,为企业争取更多经济效益。

4 效益分析

4.1 经济效益

污水厂装配式机电设备协同安装采用BIM技术并建立装配式设备协同安装技术体系,在设计阶段可精确完成材料与构件规划,减少资源成本浪费。在施工阶段,预制化和

模块化操作可显著减少现场作业时间与成本,最大程度降低返工可能性,使项目总成本降低约10%。以处理规模为1.0万m³/d的市政污水厂为例,总建设成本约2000万元,项目设备现场协同安装施工成本可节约10万元左右。这是由于现场BIM模型配合RFID技术与二维码技术,缩短了设备安装施工周期,大幅提高1设备现场安装速度。

4.2 社会效益

污水厂已从传统生产模式向数字化生产模式转型,装配式机电设备的协同安装走智能化发展路线,主动建立BIM模型,实现了设计与施工过程的数字化衔接,全面提高了行业信息化发展水平。借助BIM技术的精准建模与数字化管理,设备现场协同安装减少了设计错误与施工风险,极大提高了项目建设质量与安全水平。

4.3 环境效益

污水厂现场协同安装装配式机电设备在环境效益方面收获颇丰采用数字化BIM技术可实现对设备与材料的优化使用,降低能耗,减少废物产生,对环境的影响较小。特别是装配式设备协同安装技术体系的建立,为污水厂设备安装与生产运行提供了优越的技术条件,可实现设备的可持续发展目标。

5 展望与总结

在数字化转型的大背景下,我国污水厂装配式机电设备的协同安装生产水平得到提高,生产效率大幅改善。本文研究了BIM技术+装配式设备协同安装技术体系在设备现场协同安装中的应用,探讨了其中的创新技术亮点、各种收益及未来发展前景。本文研究的BIM技术使用于污水厂装配式机电设备现场协同安装工作的适配度较高,满足重大工程建设及装备研制需求,为项目实施形成庞大的市场规模,带来较高的经济收益。在当前污水处理设施生产运行需求持续增长的大背景下,污水厂将迎来更大的市场发展契机。因此未来需主推行业数字化转型,提高生产技术水平,走可持续发展路线,推动BIM技术在污水厂装配式机电设备协同安装方面全面有序发展。

参考文献

- [1] 何仲虎. 基于BIM技术的机电安装工程的装配式施工技术[J]. 大众标准化, 2025, (08): 152-154.
- [2] 高建. 探究BIM技术在装配式建筑机电安装工程中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (02): 82-84. DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2025.02.025.
- [3] 张朝阳. 装配式一体化综合支吊架施工技术研究与应用[C]//《施工技术》杂志社. 2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 中铁上海工程局集团建筑工程有限公司, 2024: 1182-1184. DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.075652.
- [4] 王成行, 蒋润萍, 张必洪. 基于BIM技术的装配式建筑机电系统应用与分析[J]. 云南水力发电, 2024, 40 (12): 167-170.

Improvement and innovation of surface treatment technology of special paper

Kuangrong Xu

Kingdecor (Zhejiang) C., Ltd., Quzhou, Zhejian, 324022, China

Abstract

With the continuous expansion of specialty paper applications, surface treatment technology has become a critical factor in enhancing product performance. This paper systematically explores improvement and innovation pathways for specialty paper surface treatment technologies, focusing on two key aspects: optimization of traditional processes and functional coating development. By refining conventional techniques such as coating, calendering, and sizing, the physical properties and surface uniformity of paper are significantly improved. Additionally, functional coatings with water/oil resistance, antibacterial preservation, and conductive responsiveness are introduced to broaden application scenarios. Through equipment upgrades and process adaptability optimization, this research promotes the advancement of surface treatment technologies toward intelligent and efficient development.

Keywords

special paper; surface treatment technology; functional coating

特种纸表面处理技术的改进与创新

徐匡荣

浙江夏王纸业有限公司, 中国 · 浙江 衢州 324022

摘 要

随着特种纸应用领域的不断拓展, 其表面处理技术成为提升产品性能的关键环节。本文系统探讨了特种纸表面处理技术的改进与创新路径, 重点从传统工艺优化与功能化处理技术两方面展开研究。通过改进涂布、压光、施胶等传统工艺, 提升纸张的物理性能与表面均一性; 同时引入防水防油、抗菌保鲜、导电响应等功能化涂层, 拓展特种纸的应用场景。结合设备升级与工艺适配性优化, 推动表面处理技术向智能化、高效化方向发展。

关键词

特种纸; 表面处理技术; 功能化涂层

1 引言

特种纸因其优异的性能和广泛的应用领域, 在高端印刷、食品包装、医疗器材及电子器件等行业中发挥着重要作用。表面处理技术作为提升特种纸功能性与适用性的关键环节, 直接影响其光泽度、印刷适性、防水抗菌等核心性能。因此, 探索更加高效、环保且具备多功能性的表面处理技术, 具有重要的现实意义和应用价值。

2 传统表面处理技术的优化路径

2.1 涂布工艺的改进

涂布工艺是特种纸表面处理中的关键环节, 直接影响纸张的平滑度、光泽度及功能性。近年来, 涂布均匀性的提升成为工艺优化的重点方向。传统涂布方式在涂层厚度控制

和分布均匀性上存在局限, 难以满足高端产品对表面质量的严苛要求。为解决这一问题, 新型涂布头结构设计逐步推广, 如气刀式、刮刀式及喷嘴式涂布头, 可根据纸张基材特性与涂料流变性进行动态调节, 提升涂层的一致性。同时, 高精度计量系统的引入, 使得涂布量控制更加精细, 误差范围显著缩小, 尤其在高速生产线上, 可有效减少因涂布不均导致的纸张瑕疵和性能波动。在涂料方面, 环保压力推动水性涂料和生物基粘合剂逐步替代传统溶剂型材料。水性涂料挥发性有机物 (VOCs) 排放大幅降低, 生物基粘合剂则利用可再生资源合成, 不仅减少对石化原料的依赖, 还可在保持良好涂布性能的同时实现更优的成膜性与附着力。这些改进措施已在部分特种纸生产企业中得到应用, 涂布纸的表面质量与功能稳定性均有明显提升。

2.2 压光与整饰工艺的精细化控制

压光与整饰工艺在特种纸生产中承担着提升表面光泽、平滑度及整体质感的关键作用。随着纸张应用需求的精细化发展, 传统压光设备在调节精度与工艺适配性方面逐渐暴

【作者简介】徐匡荣 (1985-), 男, 中国江西上饶人, 本科, 助理工程师, 从事特种纸的研发和生产研究。

露出不足。多段可控压光系统的引入,为实现更高效、精准的表面整饰提供了技术支撑。该系统通过分段施压与独立温控,使压光过程可根据纸张克重、含水率及用途进行动态调整,避免了整体压光中压力分布不均导致的表面缺陷。实际运行数据显示,采用多段压光后,纸张表面光泽度可提升10%以上,平滑度波动范围明显收窄,尤其适用于对表面质量要求严苛的高端艺术纸和标签纸生产。

温控与压力调节的协同优化是提升压光效果的关键因素之一。在压光过程中,辊筒温度的精确控制有助于改善纸张表面纤维的塑性变形能力,增强光泽形成效果;而压力的分级调节则可避免过度压榨导致的纸张变薄或结构损伤。在实际生产中,部分企业已通过集成传感器与自动控制系统,实现压光温度与线压力的实时反馈调节,提升了工艺稳定性与产品一致性。

2.3 施胶技术的优化与功能拓展

施胶技术在特种纸生产中直接影响纸张的表面强度、耐破度及吸墨性能,是决定其印刷适性与物理性能的重要工艺环节。传统工艺中,表面施胶与内部施胶往往独立进行,难以形成协同效应。近年来,通过优化两者的配合比例与施胶顺序,逐步实现功能互补。表面施胶主要增强纸张表层的致密性和抗磨损性,而内部施胶则提升纤维间的结合强度,二者协同作用可有效改善纸张的整体机械性能与表面响应特性。新型施胶剂的引入进一步推动了这一工艺的升级,如氧化淀粉、聚乙烯醇(PVA)、阳离子淀粉及新型合成聚合物等材料的应用,显著提升了纸张的干湿强度与吸墨均匀性^[1]。采用复合施胶工艺后,纸张的表面强度提高15%以上,吸墨速度更易控制,适用于高精度印刷需求。此外,部分功能性施胶剂还可赋予纸张一定的防水、防油或抗菌性能,拓展了特种纸的应用边界。在施胶过程中,施胶剂的渗透深度与分布均匀性成为影响效果的关键因素,部分企业通过改进施胶辊结构与控制施胶浓度,使施胶层更均匀稳定。这种技术优化不仅提升了特种纸的使用性能,也为后续表面处理工艺提供了更优质的基材基础。

3 功能化表面处理技术的创新应用

3.1 防水防油处理技术的创新

防水防油处理技术是提升特种纸在严苛环境条件下使用性能的重要手段,近年来在材料与工艺层面均实现了显著创新。疏水性纳米涂层的开发成为该领域的重要突破,通过在纸张表面构建纳米级疏水层,显著提升了其对水和油类物质的抵抗能力。这类涂层通常采用二氧化硅、氧化锌或氟硅烷类材料,借助溶胶-凝胶法或喷涂工艺实现均匀覆盖,不仅保持纸张原有手感与透气性,还能在微观层面形成稳定防护屏障。经纳米涂层处理的特种纸接触角可提升至120°以上,具备良好的防渗透性能,已在食品包装、医疗记录纸等领域逐步推广应用。与此同时,出于对环保法规与健康安全

的考量,传统含氟类疏水剂的使用受到限制,推动环保型氟替代材料的研发与应用。生物基或可降解疏水剂,如改性植物油、脂肪酸衍生物等,逐渐成为替代方案。这些材料在降低环境污染的同时,仍能维持一定的防水防油效果,部分产品已在中低端应用场景中实现商业化使用。

3.2 抗菌与保鲜功能涂层的应用

抗菌与保鲜功能涂层的应用正成为特种纸高端化发展的重要方向,尤其在食品包装与医疗用纸领域展现出显著的技术价值。银离子因其广谱抗菌性和稳定性,被广泛用于纸张表面处理,通常通过浸渍、喷涂或原位生成技术负载于纤维表面,形成持久抗菌层。壳聚糖作为天然多糖材料,具备良好的生物相容性与可降解性,近年来在环保型抗菌涂层中受到重视。其通过交联或复合改性方式增强在纸张表面的附着能力,不仅抑制细菌生长,还能在一定程度上延缓食品腐败。在实际应用中,抗菌涂层已成功用于一次性食品包装纸、医用敷料纸及手术记录纸等产品,有效降低微生物污染风险。测试数据显示,经处理的纸张对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌率可达99%以上,且在常温储存条件下保持抗菌效果稳定。此外,部分保鲜型涂层还具备调节气体交换、抑制乙烯释放的功能,进一步延长食品保质期。

3.3 导电与响应型表面材料的发展

导电与响应型表面材料的发展为特种纸在智能电子与高端包装领域的应用提供了新的技术路径。导电聚合物作为近年来研究较为成熟的功能性材料,已在电子纸等柔性显示器件中实现初步应用。这类材料如聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)和聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)具有良好的导电性与环境稳定性,可通过涂布或印刷方式附着于纸基表面,形成轻薄且柔性的导电层。部分电子纸产品已采用纸基导电涂层作为电极或信号传输层,在弯曲、折叠等复杂形变条件下仍能保持稳定性能,为柔性电子器件的低成本制造提供了可行方案。与此同时,温敏、光敏等响应型材料的应用正在推动特种纸向智能包装方向拓展。温敏材料如相变蜡与热致变色聚合物可随温度变化改变颜色或导电状态,用于包装内的温度监测;光敏材料则在紫外或可见光照射下触发响应,具备防伪或环境感知功能。这些材料已在部分高端食品、药品包装中开展测试,能够通过颜色变化或电信号反馈反映产品储存条件是否异常。

4 特种纸表面处理设备与工艺的协同优化

4.1 特种纸表面处理设备的技术升级与智能化发展

涂布设备的技术升级是提升特种纸表面处理质量与生产效率的关键环节。近年来,高速涂布机的广泛应用显著提高了单位时间内的产能,同时对配套干燥系统提出了更高要求。节能干燥系统通过优化热能利用方式,如采用红外加热与热风循环相结合的复合干燥技术,使涂层在短时间内均匀固化,减少因干燥不均导致的涂层开裂或气泡缺陷。从实际

生产情况来看,高速涂布与节能干燥的匹配使用,不仅缩短了干燥时间,还降低了单位能耗,提升了整体工艺的稳定性与经济性。

智能控制系统的引入进一步增强了涂布过程的可控性,借助传感器与自动化算法,系统可实时采集涂布量、涂料粘度、环境温湿度等关键参数,并据此动态调整涂布速度与涂料供给量,确保涂层厚度的一致性^[2]。部分企业已在生产线上集成在线检测与反馈控制模块,实现对涂布精度 $\pm 1\text{g/m}^2$ 以内的控制水平。

4.2 压光设备的结构优化与工艺适配性提升

压光设备作为特种纸生产过程中实现表面整饰与性能提升的关键装置,其结构优化对纸张表面质量的精细化控制具有重要影响。结构优化方面,柔性压光辊的应用成为当前设备改进的重要方向,柔性压光辊因其良好的弹性特性,能够在不破坏纸张内部结构的前提下,实现对纸张表面更均匀的压力分布,从而有效提升表面致密性与平滑度。同时,柔性辊与热压光技术的结合进一步强化了压光效果。在热压条件下,纸张纤维的塑性增强,有利于形成更加均匀、致密且光滑的表面层,显著提升纸张的光学性能与印刷适性。

现代压光设备普遍配备了智能温控与压力调节系统,以提升工艺适配性。温度控制方面,通过内置电加热或油加热系统,可实现辊面温度的精确调节,通常控制在 $80\sim 140^{\circ}\text{C}$ 范围内,以满足不同纸种对热压条件的差异化需求。压力调节则采用液压或气压伺服控制系统,能够根据纸张克重、含水率及目标光泽度参数,实现线压力的动态调整,避免因压力过高造成纸张变薄、强度下降等质量问题^[3]。为进一步提升产品质量的一致性,部分先进生产线已实现压光工艺与前端涂布、干燥等工序的联动控制。通过数据集成与工艺协同,系统可根据实时生产参数自动调整压光参数,从而确保各工艺环节的匹配性与稳定性。

5 表面处理技术的具体应用

高档艺术纸对表面光泽度与印刷适性的要求极为严苛,直接影响其在高端出版、画册印刷等领域的应用效果。为提升其表面质量,生产企业普遍采用多段可控压光与高精度涂布相结合的工艺。通过柔性压光辊与温控系统的配合,使纸张在受热状态下获得更均匀的塑性变形,从而提升光泽一致性。同时,采用纳米级涂料与高精度计量系统进行表面涂布,使涂层分布更加均匀,显著改善油墨吸收性与色彩还原

能力。实际测试数据显示,经过优化处理的艺术纸光泽度可达 70° 以上,印刷网点还原精度提高10%以上,满足高端印刷对细节表现的高标准要求。

医疗用纸在临床诊断、手术记录及一次性医疗用品中广泛应用,其表面处理需兼顾生物相容性与书写、打印性能。为满足这一需求,部分企业采用壳聚糖类天然抗菌材料进行表面改性处理,不仅具备良好的抑菌性能,同时减少对皮肤与黏膜的刺激。此外,通过控制施胶剂种类与涂布量,在提升纸张湿强度的同时,避免了传统化学助剂可能引发的过敏反应。例如,某品牌医用敷料包装纸通过优化表面处理工艺,使其在接触皮肤时无刺激、无残留,并在高温灭菌条件下仍能保持结构稳定。这类处理方式已在多家医疗机构的无菌包装与记录用纸中实现批量应用,具备良好的临床适应性。

食品包装纸的表面处理重点在于抗菌性与阻隔性能的协同提升,以确保食品安全并延长保质期。当前,部分企业采用银离子负载涂层或植物提取物改性处理技术,在纸张表面构建长效抗菌层,对常见致病菌如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌率可达95%以上。同时,通过引入疏水性材料如改性淀粉或纳米二氧化硅,增强纸张对油脂与水汽的阻隔能力,使其适用于油脂类食品包装。

6 结语

特种纸表面处理技术的持续改进与创新,已成为提升产品附加值与拓展应用领域的重要推动力。从传统工艺的精细化优化,到功能化涂层的引入,再到设备与工艺的协同升级,各项技术进步在提升纸张表面性能、拓展其功能性方面发挥了关键作用。涂布均匀性的提升、压光工艺的精准控制、施胶技术的功能延伸,为特种纸在光泽、强度、吸墨性等方面提供了稳定保障;抗菌、防水、导电等功能性涂层的应用,则进一步拓宽了特种纸在食品、医疗、电子等高端领域的适用边界。随着环保要求的提高与智能制造的发展,特种纸表面处理技术将向绿色化、智能化与多功能集成方向演进,推动行业迈向更高水平的技术融合与产业协同。

参考文献

- [1] 党鹏程.交联型聚乙烯醇表面施胶剂的合成及其对特种纸的增强作用研究[D].陕西科技大学,2023.
- [2] 牟成.数字印刷技术对特种纸适印性的影响机理研究[J].华东纸业,2025,55(05):16-19.
- [3] 唐继春,武伟伟,付克诚.高平滑特种纸用工业造纸毛毯的研制[J].产业用纺织品,2023,41(02):19-22+43.

Reliability and Safety Analysis in Fuze Process Design

Shaoping Wang Chengguang Guo

Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

Fuze is an important component of ammunition systems, and its stability directly affects the success rate of weapon launch and operational safety. Under complex battlefield conditions, fuses must be able to be used accurately and reliably under predetermined conditions, and safety accidents caused by accidental triggering must be avoided. Therefore, conducting systematic reliability and safety research on it is not only related to combat effectiveness, but also crucial for ensuring personnel safety and preventing secondary injuries. In this context, this article provides an overview of the foundation of fuse and fuse process design, explores the reliability and safety in fuse process design, proposes a collaborative analysis and optimization strategy for reliability and safety, and conducts case analysis and application research, aiming to provide written reference and inspiration for relevant designers.

Keywords

Fuze process design; Reliability; safety

引信工艺设计中的可靠性与安全性分析

王少平 郭晨光

西安机电信息技术研究所, 中国·陕西 西安 710065

摘 要

引信是弹药系统的重要组成部分, 其性能的稳定性直接关系到武器发射的成功率和作战安全性。在变化复杂的战场条件下, 引信必须能够在预定条件下准确可靠地使用, 而且要避免因意外触发而引发的安全事故。为此, 对其进行系统的可靠性和安全性研究, 不但关系到作战效能, 更是保障人员生命安全、防止次生伤害的关键。在此背景下, 本文概述了引信及引信工艺设计基础, 探究了引信工艺设计中的可靠性与安全性, 提出了可靠性与安全性的协同分析与优化策略, 并开展了案例分析与应用研究, 旨在为相关设计人员提供书面参考与借鉴。

关键词

引信工艺设计; 可靠性; 安全性

1 引言

为提高引信的智能化和对外界的适应能力, 需要融入先进的科技手段, 如微电子技术、传感器技术和智能控制算法等, 并将可靠性评估与安全性分析相结合, 从设计、制造、贮存到服役等各个阶段进行严格把控, 保证引信的各种功能参数都处于最佳状态, 以保证其在复杂的战斗条件下能够准确响应指令, 并将突发事件的危险性降到最低, 确保作战任务的高效执行与人员安全。

2 引信及引信工艺设计基础

引信又称信管, 装在炮弹、炸弹、地雷等上的一种引爆装置。引信是利用目标信息和环境信息, 在预定条件下引爆或引燃弹药战斗部装药的控制装置(系统)。典型引信结构由三部分构成: 机械机构(含保险栓、击发组件等, 负责

物理保险与机械能传递)、含能元件(包括雷管、传爆序列, 是实现能量输出的核心)、电子模块(由传感器、控制器组成, 完成目标探测与起爆逻辑控制), 如图一典型引信结构示意图所示。引信工艺设计是从设计方案转化为实物产品的全过程技术规划, 需要满足高精度(装配容差达到微米)、高安全(抗意外引爆)和高可靠(适用于极限条件)等多个方面的需求, 涵盖材料选取、加工和性能试验等多个阶段, 是实现“平时安全、战时可靠”的前提^[1]。

3 引信工艺设计中的可靠性分析

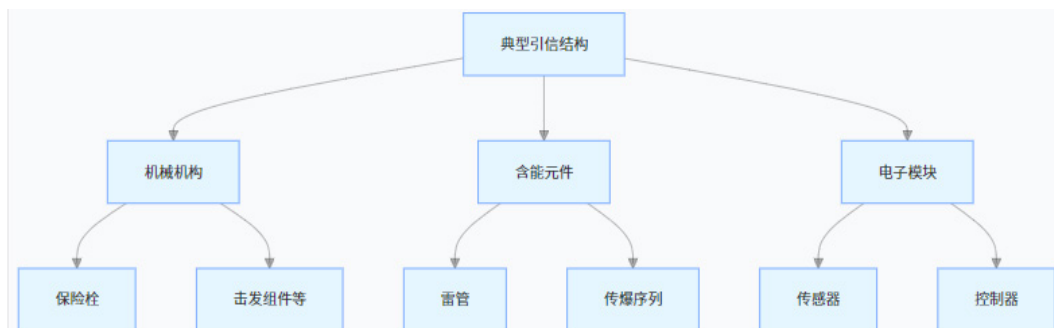
3.1 影响引信可靠性的工艺因素

在构件制作过程中, 加工精度是核心变量: 以深孔钻孔为例, 如果钻孔过程中存在 0.02 mm 的轴向误差, 就会引起套管的壁厚不均, 从而引起传爆失效。目前, 国内外研究主要集中于金属材料的表面改性, 而金属材料的表层存在着较大的起伏(5-8 μm , 实测误差大于 3 μm), 将严重降低其耐腐蚀性能, 且在潮湿和高温条件下易发生锈蚀而造成机械卡死。装配工艺的稳定性同样关键, 如果压力超过设定值

【作者简介】王少平(1992-), 男, 中国陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 从事引信工艺设计及试制研究。

(如规定 500-600 N, 实际达 800 N), 将引起弹性形变, 导致安全装置释放延迟。清洁度不够(如残余 0.1mm 以上的金属碎片)会引起过早爆炸或瞎火。而含能物质加工过程

对炸药爆炸效果的影响则更加直观, 药剂混合的过程中, 由于搅拌速度的变化, 引起颗粒级配不均匀, 炸药爆炸威力的基准偏差大于 15%。



图一：典型引信结构示意图

3.2 可靠性分析方法与模型

在定性层面, 以“故障模式与影响分析”为基本手段, 对“工艺环节-故障模式-影响范围”进行系统的梳理, 可识别关键风险点, 例如“焊接工艺虚接→电路断路→引信拒爆”, 并通过风险优先数排序确定改进优先级。在定量分析方面, 通过建立“顶事件-中间事件-底事件”的逻辑关系模型, 对过程参数进行定量描述。以引信作用时间偏差为例, 顶事件为“作用时间超差 $\pm 10\text{ms}$ ”, 底事件可追溯至“弹簧刚度偏差”“装配间隙波动”等工艺因素, 采用布尔代数方法对各个底层过程的贡献进行量化分析。采用快速寿命试验 (ALT) 方法, 对主要加工参数 (温度、振动应力等) 施加异常荷载, 构建“应力-寿命”关系函数, 预测其在常态条件下的服役寿命^[2]。

3.3 工艺可靠性提升策略

利用 Taguchi 法对核心工艺参数进行优化, 即通过正交试验优选出“压药压力 25 MPa+保压时间 8s”的最佳组合, 将传爆率的平均值由 12%降低到 5%。引入数字化建模工具, 对深孔成形过程中零件的力学性能进行数值仿真, 从而减少零件制造过程中 40% 的试错量。基于智能控制实现流程的最优控制, 在系统中配置大量的物联网传感设备, 实现对环境的温度 ($\pm 1^\circ\text{C}$)、湿度 ($\pm 2\%$)、压力 ($\pm 0.5\%\text{FS}$) 等多个参数的在线监控, 当超过临界值时, 会发出警报。在高风险生产环节 (如含能装配) 中实施了自动控制, 并用机械臂代替人力, 使因错误造成的失败率低于 0.1%。除传统的试验方法, 增加环境应力筛选 (ESS), 通过随机振动 (20-2000Hz) 与高低温冲击暴露工艺潜在缺陷。构建工艺-可靠性的关联数据库, 绑定历史失效案例与工艺参数偏差, 形成预测模型, 提高预警准确率。

4 引信工艺设计中的安全性分析

4.1 影响引信安全性的工艺因素

在设计制造过程中, 由于存在的各种因素导致了引信的安全事故, 核心风险点集中在三个方面。第一, 含能材料

处理工艺。混合过程中搅拌速率超出了临界值, 会产生摩擦发热, 引起药物的局部发热, 从而导致自燃; 压药压力变化, 会造成药柱内的浓度分布不均匀, 出现“热点”现象, 严重时会引起爆破事故。第二, 机械加工工艺的精度缺陷。如保险栓的尺寸误差 (设计为 0.01mm, 而在实践中达到 0.03mm), 会造成保险机构卡滞或过早失效; 击发组件的表面粗糙度超标 ($R_a > 1.6\mu\text{m}$) 会使部件的摩擦系数增大, 从而导致早爆。第三, 装配工艺的操作规范执行不到位。如果在含能部件的组装过程中没有按照要求使用防静电工具 (比如用普通扳手代替铜制扳手), 则静电放电电量可能达到 0.1 mJ 以上, 超出药剂感度阈值; 清洁度控制失效液会在振动环境中形成撞击火源。

4.2 安全性分析与评估方法

引信工艺安全性分析需构建“识别-量化-分级”的完整体系。基于“过程要素偏离→危害情景→结果影响程度”的链式分析方法, 可以实现对风险的精确识别。比如, 在“高温焊电、保险丝烧断、意外起火”的情况下, 这种情况在变异矩阵法中被划分为“极高风险” (风险等级 I 级), 需要进行强制性改造。采用“发生概率”与“后果严重度”双重评分的方法, 将工艺环节划分为“禁止级” (如手工混药, 风险值 > 80)、 “限制级” (如半自动装配, 风险值 40-80) 和“允许级” (如全自动压药, 风险值 < 40)。运用事故树分析聚焦追溯性评估, 将“意外起爆”作为顶事件, 反向推导“药剂感度过高→包覆工艺缺陷→涂覆厚度不足”等底事件, 量化评价各个过程节点的贡献度, 从而为改善方案提供针对性的指导。

4.3 工艺安全性保障措施

确保引信工艺的安全性, 需通过“技术防控+管理规范”双重保障。在技术方面, 对危险工艺进行自动化改造, 使用机器人进行能量物料的运输和组装, 降低人工接触; 采用静电清除技术 (离子风枪+接地监测), 实现过程中静电电压小于 50 V, 低于药剂的点燃临界值 (一般 $> 100\text{V}$)。在参数控制的过程中, 实行闭环管理: 压药工序采用伺服压力机

(控制精度 $\pm 1\text{MPa}$)，与红外线测温(对药柱的温度进行实时监控，超过 50°C 就会停止运转)；焊接工艺引入激光探伤技术，保证无虚焊和漏焊(检测精度达 0.01mm)，防止电路的非正常发热。在管理层面上构建全程可溯源系统：利用区块链对各生产环节(压药时间、操作人员、设备编号等)进行实时监控，达到“工艺数据-产品批次-安全责任”的精确关联。建立相应的等级体系，对含能工艺的操作人员进行理论和实践的双重考核(合格率必须达到 100%)，并且每季进行一次复训，以提高操作人员的规范意识^[3]。

5 可靠性与安全性的协同分析与优化

在引信工艺设计中，要想实现可靠性与安全性的协同优化，需要打破“单一目标最优”的固定思维，构建“约束-平衡-增益”的闭环体系。在系统设计过程中，将可靠性要求(如响应时间误差 $\leq 5\text{ms}$)和安全性约束(如火灾发生率 $<0.01\%$)转化为能够量化的工艺参数边界。以电子引信焊接工艺为例，采用多目标优化方法，对“焊缝温度-焊点强度-钢绞线抗温性能”Pareto 优化问题进行求解，并在 $220^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内，实现焊点拉剪与消除因高温引起的早期爆炸工艺执行层面对过程实施级的智能化协调控制，借助“数字化孪生”技术，对系统进行可靠度和安全度的实时耦合调控。在监测含能材料装配压力超过最佳可靠值(如设计 25MPa ，实际 28MPa)的情况下，将压力调整到一个安全临界值($\leq 30\text{MPa}$)再启动补偿机制(延长保压时间 2s)，以保证传爆序列密度满足要求。在验证方面，需要建立“双维综合试验体系”，将振动、冲击等可靠性增强实验与静电、冲击等安全极限实验相结合。比如，在 $20\text{-}2000\text{Hz}$ 的环境下，实现对引信工作可靠性(触发成功率 $\geq 99.5\%$)和保险机制安全性的同步监测，确保引信在实际应用中达到最优状态，实现可靠性与安全性的双赢局面。

6 案例分析与应用研究

美军“标枪”导弹引信曾因装配工艺存在偏差，在实战中出现 12% 的瞎火率。借助故障树分析(FTA)发觉，关键问题是传爆序列装配时轴向间隙超出标准(设计要求为 $0.02\text{-}0.05\text{mm}$ ，实际偏差达到了 0.1mm)，后续采用定位

精度在 $\pm 0.005\text{mm}$ 的自动化压装设备，还引入在线激光测隙系统，实现将间隙波动控制在 0.03mm 以内的目标，可靠性提升至 99.8% 。国内特定型号迫击炮弹引信在高温环境试验时频繁早爆，实施 HAZOP 分析后，查明是雷管药剂包覆工艺中涂覆厚度不一致(标准 $5\text{-}8\mu\text{m}$ ，实际某些局部仅为 $2\mu\text{m}$)，造成高温环境下药剂吸潮敏感度急剧上升。改进后采用静电喷涂工艺，还添加上恒温恒湿固化环节，高温安全性试验通过率从 72% 增长到了 100% 。某军工企业针对引信电子模块焊点虚连问题，采用 DOE 实验优化焊接工艺参数，时间从 0.8s 延长至 1.2s)，结合超声探伤测定，促使焊点失效概率从 3.2% 降低为 0.5% 。(如表 1 所示。)

表 1 案例分析评估表

案例	问题根源	改进工艺措施	效果指标
标枪导弹引信	传爆序列轴向间隙超差	自动化压装 + 激光测隙	可靠性从 $88\% \rightarrow 99.8\%$
迫击炮弹引信	药剂包覆厚度不均	静电喷涂 + 恒温固化	高温安全性从 $72\% \rightarrow 100\%$
电子模块焊点	焊接参数不合理	优化电流/时间 + 超声检测	失效概率 $3.2\% \rightarrow 0.5\%$

7 结语

综上所述，引信工艺设计中的可靠性与安全性分析，对于提高作战效率、保障作战安全具有重要意义。通过对制造过程中各种关键技术要素的系统研究，建立相应的计算模型与优化方案，并以实例加以检验，能够为引信设计工作提供科学依据与实践指导。今后，随着科技水平的不断提高，引信的可靠性和安全性也会得到进一步提高，为国防现代化建设提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 汪柯,郑监,施长军,郭莎,任新联,胡宏伟.全电子引信抗过载研究现状[J].探测与控制学报,2025,47(01):15-23.
- [2] 徐利平,王大鹏,许嘉晨,文帅.伪码引信高速实时可配置宽带正交解调方法[J].探测与控制学报,2024,46(04):13-18.
- [3] 赵平伟,刘树洁,郑晨皓,李艳萍,李楠.基于数字射频存储平台的调频毫米波引信自动测试系统[J].探测与控制学报,2024,46(04):178-183.

Study on the shortening effect of light curing 3D printing mold on sample making cycle

Tingfeng Cai

Liqliang Precision Hardware (Dongguan) Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523000, China

Abstract

With the continuous enhancement of manufacturing demands for product development cycles and flexible production capabilities, the application value of rapid prototyping technology in prototype and mold manufacturing has become increasingly prominent. Light-curing 3D printing technologies (SLA/DLP, etc.) are gaining widespread adoption in mold manufacturing due to their advantages such as high forming accuracy, rapid production of complex structures, and advanced automation. This paper systematically explores the mechanism and practical effectiveness of light-curing 3D printing molds in shortening prototype production cycles through their design and application. Starting with a comparison between traditional molds and the structural characteristics of molds, this article analyzes multiple advantages of light-curing 3D printing molds in prototype processing, including integrated efficiency, assembly flexibility, process simplification, and multi-iteration support capabilities, using typical production cases. Based on a full-cycle decomposition of prototype design, mold manufacturing, debugging, and production processes, this study proposes the impact pathways of light-curing 3D printing molds on prototype development efficiency.

Keywords

light curing 3D printing; mold line; sample making; manufacturing cycle; rapid prototyping

光固化 3D 打印模具行位对样板制作周期的缩短效应研究

蔡霆峰

立强精密五金（东莞）有限公司，中国·广东 东莞 523000

摘 要

随着制造业对产品研发周期和柔性生产能力要求的持续提升，快速成型技术在样板及模具制造环节的应用价值日益凸显。光固化3D打印技术（SLA/DLP等）凭借高成型精度、复杂结构快速制造、工艺自动化程度高等优势，正在模具制造领域得到广泛推广。本文围绕光固化3D打印模具行位的设计与应用，系统探讨其对样板制作周期缩短的作用机理与实际成效。文章从行位的结构特性与传统模具对比入手，结合典型生产案例，对比分析了光固化3D打印模具在行位处理上的集成效率、装配灵活性、工序简化与多迭代支撑能力等多方面优势。基于样板设计、模具制造、调试、生产全流程的周期拆解，提出光固化3D打印模具行位对样板开发时效的影响路径。

关键词

光固化3D打印；模具行位；样板制作；制造周期；快速成型

1 引言

在智能制造和精益生产理念不断推进的背景下，制造企业对于新产品开发周期、生产效率以及定制化能力提出了更高要求。传统模具制造过程通常涉及设计、开模、加工、装配、调试等多环节，特别是在应对结构复杂、迭代频繁的小批量或定制化样板开发时，工序繁杂、周期冗长、投入成本高，已成为制约产业创新效率的重要瓶颈。3D 打印技术作为数字化制造的重要组成部分，通过直接由三维数字模型到实体构件的加工方式，实现了复杂结构的一体成型、

工艺链缩短及制造流程再造。光固化 3D 打印（如立体光固化 SLA、数字光处理 DLP 等）以其高精度、高表面质量和较强材料适应性等特点，成为样板及模具快速制造领域的热门技术路线。模具行位作为复杂模具分型、脱模与多功能集成的重要结构，直接影响样板制作周期与工艺效率。以往采用传统机加工方式对模具行位进行分件与加工，不仅工序繁琐，还容易受人为因素影响，装配和调试周期长，难以满足快速交付和多变需求。光固化 3D 打印模具行位通过数字一体化设计与集成成型，极大提升了模具结构的灵活性和高效性，为缩短样板制作周期提供了新的解决方案。本文以光固化 3D 打印模具行位为研究对象，从结构原理、工艺路径、实际效能与优化策略等多维度展开系统分析，旨在为制造企业提升样板开发效率、推进数字化转型和柔性制造提供理论

【作者简介】蔡霆峰（1986-），男，中国香港人，硕士，工程师，从事不锈钢加工研究。

与实践支持。

2 光固化 3D 打印模具行位的结构特性及成型优势

2.1 行位在模具结构与功能实现中的作用

行位 (Slide/Insert) 作为模具结构中实现型腔分割、复杂脱模、局部功能集成的重要构件,广泛应用于产品具有侧孔、内凹、复杂分型线或局部镶嵌等结构的模具设计中。传统工艺下,行位多采用数控机床分件加工与装配,结构设计需兼顾强度、配合精度和脱模机构复杂性。受限于机加工刀具路径及材料去除工艺,部分异形行位制造难度大,后续装配与调试环节耗时费力,导致整体模具开发周期较长。行位结构往往成为样板制造流程中的“卡脖子”环节,制约快速交付和多变定制的实施能力。

2.2 光固化 3D 打印技术对模具行位结构创新的促进

光固化 3D 打印以激光/光源对光敏树脂进行逐层扫描固化,结合高精度分层与复杂路径规划,可以实现复杂曲面、内孔、分型及微型结构的一体成型。与传统机加工相比,光固化 3D 打印不受刀具形状、下刀方向和材料去除限制,可根据行位功能需求灵活实现多层嵌套、异形孔隙和集成化脱模结构。通过一体化数字建模与仿真优化,支持在单次成型内完成多组行位件的批量制造,降低了设计迭代门槛与制造难度。对于多功能集成的行位(如嵌件内置、可拆卸组合、活动滑块等),光固化工艺可通过参数化建模与结构创新实现多种创新构型,提升行位制造的定制化和柔性化水平,为多品种小批量及复杂定制类样板开发提供新路径。

2.3 3D 打印行位对模具整体开发周期的影响

在样板及模具制造全流程中,行位的设计、加工与装配通常占据较高的时间与成本比例。传统行位加工需多道机加工工序,且配合精度要求高,装配调试复杂,常常是开发周期的主要瓶颈。光固化 3D 打印模具行位通过高集成度的一体成型工艺,大幅缩短设计到成品的转换周期,减少传统加工、运输和二次调试工序。在多品种并行开发和多迭代场景下,能够支持快速结构调整和定制优化,提升样板研发的敏捷性。实证数据显示,采用光固化 3D 打印模具行位的样板开发周期较传统方式普遍缩短 30%-50%,为企业快速响应市场、压缩开发周期和降低试制成本提供了有力技术支撑。

3 光固化 3D 打印模具行位缩短样板制作周期的机理分析

3.1 数字化设计集成与并行工程效应

光固化 3D 打印在模具行位制造中的应用,显著提升了数字化设计集成水平,实现了设计、仿真、工艺与制造的深度并行。依托三维 CAD 建模和数字孪生技术,设计师可在虚拟环境下完成模具行位的全流程数字定义与功能仿真。通过参数化建模,设计人员可以灵活调整结构尺寸、分型面、嵌件布局等关键参数,并利用有限元分析对结构强度、变形、

受力状况进行精准预测。同时,脱模路径仿真和装配干涉检查在虚拟空间中就可提前发现设计缺陷,大大降低返工和返修率。数字化模型直接驱动 3D 打印设备,无需传统工艺中的繁杂图纸转化、手工编程、刀路规划和分件校核,极大缩短了设计到制造的流程。

数字化手段的引入还促进了设计、工艺、制造的协同与并行。设计师、工艺工程师和制造人员可基于同一套数据模型协同工作,实时共享模型参数和工艺变更,消除信息孤岛。行位结构在设计、分析、工艺规划与制造阶段可并行推进,各环节互为反馈,实现同步优化。特别是在样板开发和产品小批量迭代场景下,通过参数化建模一键修改,能够快速适应客户需求变化,无需重新开模和大规模工艺调整。如此高效的数字化集成与并行工程,大幅提升了样板开发效率和企业的市场响应速度,充分发挥了数字化工程的灵活性和敏捷优势。

3.2 复杂结构一体成型与后工序简化

光固化 3D 打印凭借其极高的结构成型自由度,彻底颠覆了传统行位制造的结构设计与工艺流程。通过逐层固化光敏树脂材料,3D 打印能够实现空间异形孔、内嵌曲面、复杂通道、薄壁微结构等传统加工难以实现的一体成型。对于具备多方位侧孔、多层嵌件、活动机构等复杂特征的行位结构,设计师可通过分区打印、局部支撑和拓扑优化,将复杂多变的结构集成于单一打印工序之中,省却了传统工艺中的多道分件、精密对接、定位、装配与后期调整环节。成型后仅需进行简单的支撑去除、表面修整,即可进入后续调试或试制阶段。相比传统工艺,极大压缩了多道装配与调试的工时和人工成本。

特别值得一提的是,部分复杂样板的开发可直接通过 3D 打印一体成型的模具行位进行产品试制,无需额外工装、夹具或辅助模具,显著提升了开发效率与产品一致性。对于多品种、定制化需求频繁的企业,光固化 3D 打印为快速开发、灵活迭代提供了坚实的工艺基础,有效支撑了小批量、多品种、短周期的研发创新模式。

3.3 工艺自动化与多品种迭代能力提升

光固化 3D 打印具有高度自动化的工艺特性,从数据导入到成品成型全过程无需人工干预,支持批量多件、异形件同步制造。自动化排产和数字化交付使样板开发过程中的资源配置更加高效,工艺过程稳定、可控,成品质量一致性显著提升。对于传统制造中需多工序串联、人工紧密配合的行位件开发,3D 打印可以实现工艺流程标准化和自动排程,极大缓解设备、人工资源瓶颈。

多品种、小批量样板开发尤其受益于 3D 打印的柔性制造优势。工程师可通过数字化作业排程,实现结构不同的行位件一键批量输出,随时响应客户多样化、个性化的定制需求,无需耗时的模具更换或设备调整。企业可根据市场反馈或设计优化意见,实时修改参数、快速迭代,促进产品升级

和持续创新。对比实测数据显示,传统复杂行位样板开发从设计到交付往往需历时数周,而采用光固化3D打印可将开发周期缩短至数天,大幅提升了企业新品研发和试制速度。

此外,3D打印的数字化工艺链便于数据追踪和全流程质量管控。通过智能监控、过程记录与反馈,企业可实时掌握每一道工艺环节的状态,及时发现和纠正异常,确保样板开发的高效与高质。高度自动化、柔性和智能化的生产模式,为模具行位样板开发注入了新的活力,也为上下游产业链协同创新创造了良好基础,推动整个制造业向高端化、智能化、绿色化方向转型升级。

4 光固化3D打印模具行位应用中的典型案例分析

针对制造业中的典型样板开发项目,光固化3D打印模具行位的实际效能得到了充分验证。在汽车内饰件、医疗器械外壳、精密电子元器件等领域,常见产品存在结构复杂、分型线多、脱模路径异形等特点。某汽车零部件企业采用光固化3D打印技术,设计并制造了集成滑块与侧抽芯结构的样板模具行位,整体开发周期由原本的28天缩短至10天,产品迭代能力显著增强。项目团队通过数字化参数建模,优化了行位的分型、导向与配合机构,3D打印后经简单后处理即可完成装配调试。后续产品迭代仅需修改数字模型并重新打印,无需拆装和繁琐调试,极大降低了样板开发的人力和物料成本。在高端医疗领域,光固化3D打印行位同样支持多型腔、复杂曲面及内部结构一体成型,有效满足了医用设备样板的小批量、高精度和快速交付需求。通过实际生产数据回溯,光固化3D打印模具行位对缩短样板开发周期、提升企业响应速度和市场竞争力具有显著推动作用。

5 光固化3D打印模具行位应用面临的问题与优化方向

虽然光固化3D打印模具行位对缩短样板制作周期具有显著优势,但在实际应用中仍存在诸多问题亟待解决。材料性能方面,光敏树脂模具的力学强度、耐热性和耐久性与金属或高分子传统材料尚有差距,影响行位在批量生产中承载力和寿命。结构复杂性提升后,打印过程中支撑设计和应力

集中易造成微观裂纹、变形等缺陷,需要进一步优化打印参数和后处理工艺。数字模型与实际成型之间存在细微误差,导致高精度装配和配合环节需额外修整。工艺标准缺失也是制约其大规模推广的重要障碍,模具行位的打印流程、性能测试、验收标准和维护规范亟需行业统一。为进一步提升技术效能,可从新型高性能光敏树脂开发、复合材料应用、打印工艺优化、数字孪生精度提升及行业标准建设等方面着力。企业还应加强设计人员与工艺工程师的协同创新,强化数字化管理与质量追溯,实现模具行位从设计到制造的全流程高效协同与质量保障。

6 结语

光固化3D打印模具行位作为现代快速成型与数字制造技术的重要创新,为制造业样板开发带来了革命性变革。通过一体化结构设计、数字化仿真和高效自动化制造,极大压缩了样板制作周期,提高了多品种、小批量和高复杂度产品开发的敏捷性。实证分析表明,光固化3D打印模具行位在降低研发成本、优化工艺流程、提升市场响应速度等方面具有突出优势,有望成为制造业数字化转型和柔性智造的重要支撑。未来,随着材料性能升级、工艺标准完善及智能制造体系建设的推进,光固化3D打印模具行位将在更多领域实现规模化推广与深度应用。建议行业加快数字化、智能化技术研发和标准体系建设,提升产业链协同创新能力,持续推动样板开发与模具制造高质量发展。

参考文献

- [1] 明越科,黄润鹏,范英,等.纤维增强复合材料3D打印研究进展及在汽车上的应用前景[J].工程塑料应用,2024,52(12):184-191.
- [2] 段培开,张广明,付志国,等.3D打印陶瓷电路板的研究进展与未来展望[J].精密成形工程,2024,16(12):54-67.
- [3] 仲夏.3D打印背景下的文创产品设计制作方法研究[J].天工,2024,(34):67-69.
- [4] 姚永诚,李光耀.3D打印技术在定制家具制造中的应用研究[J].工程建设与设计,2024,(22):70-72.
- [5] 田永刚.光固化3D打印技术在雕塑中的应用[J].合成树脂及塑料,2024,41(06):62-65.

Design and Implementation of Electrical Safety Protection System in Industrial Automation Production Line

Zihui Yuan

Guangxi Occupational Safety Technology Development Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

The widespread application of industrial automation production lines has promoted the continuous improvement of production efficiency, but the accompanying electrical safety issues have become increasingly prominent. It is urgent to build a scientific and comprehensive protection system to ensure the safety of equipment and personnel. This article focuses on the characteristics of electrical safety risks in the industrial automation environment, systematically analyzes the necessity and technical points of safety protection system design, and focuses on the configuration of overload protection, grounding measures, electromagnetic protection, and control system safety logic. By building a protective system that covers the entire process of design, construction, operation, and maintenance, the reliability and stability of automated equipment operation can be improved. The article further proposes a monitoring and emergency response mechanism in the operation of the system, providing a feasible path for enterprises to implement electrical safety management.

Keywords

industrial automation; Electrical safety; Protection system; Control logic; Operation and maintenance

工业自动化生产线中的电气安全防护体系设计与实现

袁子惠

广西职安科技发展有限公司, 中国 · 广西 南宁 530000

摘要

工业自动化生产线的广泛应用推动了生产效率的持续提升,但随之而来的电气安全问题亦日益突出,亟需构建科学完备的防护体系以保障设备与人员安全。本文围绕工业自动化环境下的电气安全风险特点,系统分析了安全防护体系设计的必要性与技术要点,重点探讨了过载保护、接地措施、电磁防护及控制系统安全逻辑的配置方式。通过构建涵盖设计、施工、运行、维护全流程的防护体系,提升自动化设备运行的可靠性与稳定性。文章进一步提出了体系运行中的监测与应急响应机制,为企业实施电气安全管理提供了可行路径。

关键词

工业自动化; 电气安全; 防护体系; 控制逻辑; 运行维护

1 引言

随着制造业智能化水平的提升,工业自动化生产线成为现代工厂布局的主流形态。其依赖复杂的电气控制系统与自动化设备协同运行,高度集成化带来了前所未有的生产效率,但也伴随着更为严峻的电气安全挑战。电气故障一旦发生,不仅可能造成设备损坏与生产中断,甚至危及操作人员生命安全,影响企业经济效益与安全生产形象。传统的电气安全设计多聚焦于单点保护,难以适应现代自动化系统多源联控、高频运行、系统耦合的实际需求。因此,构建系统性、闭环化的电气安全防护体系已成为保障自动化生产稳定运行的核心课题,亟须从理论设计到工程实现进行全方位探索。

【作者简介】袁子惠(1985-),中国黑龙江牡丹江人,硕士,工程师,从事安全生产咨询、安全评价研究。

2 电气安全防护体系建设的必要性分析

2.1 工业自动化发展对电气安全的新要求

工业自动化水平的持续攀升促使生产线设备趋于集成化、信息化,控制逻辑和电气系统的复杂度显著提升。这种变革虽极大提高了生产效率与作业精准度,却也显著加剧了电气系统运行风险,尤其是在长周期连续运行、高速响应等工况下,短路、过载、接触不良、电气火灾等问题频发。面对大规模、分布广、协同强的电气设备网络,传统防护措施在精准性和实时性方面难以适应新需求。构建适用于现代自动化环境的电气安全防护体系,不仅是保障人员与财产安全的关键环节,更是提升工业运行韧性与可持续性的基础支撑。

2.2 生产线电气事故的风险类型与诱因辨析

自动化生产线中的电气事故具有链条长、传导快、难

预测的特征,风险类型涵盖线路过热、控制失灵、电压不稳、电气火花、电击伤人等多个方面。其诱因包括但不限于导线老化、负载波动、电源不稳、接地不良以及不规范操作等,同时受环境湿度、温差、电磁干扰等外部因素叠加影响,形成典型的系统性安全隐患。部分企业忽视隐性故障积累,未能设置系统级保护或缺乏及时巡检,导致小故障迅速演化为大事故,影响范围由单一设备扩大至整条产线,严重时可能造成区域性停产和人身伤害,亟需通过技术手段加以控制。

2.3 安全防护体系缺失带来的系统性隐患

电气安全管理中的结构性缺失往往体现在保护配置不合理、检测手段滞后、联动逻辑缺乏等方面。一旦生产线中部分环节出现接地失效、保护延迟或误触发等问题,往往难以及时隔离故障源,进而引发连锁反应,造成设备烧毁、数据丢失或误动作,严重扰乱自动化控制流程。系统性隐患的形成往往并非源于单点错误,而是由于防护体系未能形成从设计到运维的全生命周期闭环,从而在日常运行中逐渐积累风险。尤其在多源供电、多段控制、多工位协同的复杂产线上,一旦缺乏统一防护体系,整体系统的安全阈值将被大幅压缩。

3 电气安全防护体系的技术构成要素

3.1 过载与短路保护装置的配置标准

为保障电气系统的运行稳定,应结合负载等级、用电性质与运行环境,合理配置具备选择性分断能力的保护装置。常见配置包括热磁型断路器、快速熔断器、电子保护模块及可编程故障检测器等,其作用在于故障初期实现精准断电,避免故障电流传导至上游设备。在多级配电系统中,应科学设定分断能力、延时参数与响应优先级,防止发生保护重叠或动作失败。需注重设备冗余与容差预留,以应对功率波动带来的瞬时超载。整体配置标准应兼顾安全性、响应速度与易维护性,形成结构合理、功能互补的分层防护体系。

3.2 接地与绝缘系统的防护结构设计

接地系统作为电气系统的重要安全屏障,其设计应保障在任意故障状态下能实现有效泄流,防止外壳带电或电位反窜。保护接地、电气隔离与屏蔽措施需在设计阶段同步规划,合理布设接地网、设置等电位连接,并确保所有导体间具备连续性。对于特殊工况如高温、高腐蚀区域,还需增加辅助接地或采用强化绝缘封装方式以提升抗干扰能力。绝缘系统设计应严格符合额定电压要求,选用高阻抗、高耐压材料,并加强关键节点如接线端子、电缆交叉点的局部绝缘防护,形成多维度电隔离体系,有效防止漏电、电弧、短路等问题发生。

3.3 电磁干扰与雷击防护的集成方案

在自动化设备密集、数据传输频繁的生产线中,电磁干扰和雷电浪涌是影响系统稳定运行的重要因素。应在系统架构中集成浪涌抑制器、磁屏蔽材料与分布式滤波装置,在电源入口、信号线接口及控制箱内形成多级屏障,阻断外部高能量干扰传导。雷击防护方面,可采用接闪器、引下线与接地体组成完整防雷系统,并确保设备机壳与接地体具备低

电阻通道,形成有效泄放通路。通信类设备应通过隔离模块与主控制器分离布线,减少感应耦合。整体方案应在保证响应速度的前提下提升抗干扰阈值,构建面向工业环境的高可靠防护集成体系。

4 电气控制系统中的安全逻辑设计

4.1 PLC 控制程序中的安全冗余逻辑构建

在工业自动化系统中,PLC作为核心控制装置,其程序逻辑的安全性直接决定设备响应的准确性和故障隔离的可靠性。通过在关键控制段构建冗余逻辑结构,可在主通道失效时自动切换至备用路径,实现不中断控制。系统通常配置2套独立的CPU模块和3组输入输出接口,实现多路径校验与指令比对。对故障电压监测、电机转速反馈、位移检测等关键信号采用三重采集机制,误差大于5%时自动触发报警并中止当前流程。在600点以上的复杂控制逻辑中,冗余判断语句占比提升至20%,显著增强了系统容错能力。通过编程语言中增加状态锁定、误动作回溯与联动授权等模块,实现对异常信号的逻辑阻断与顺序重构,确保系统在高频率切换与高负荷运行中保持安全稳定。

4.2 安全继电器与急停回路的联动设计

安全继电器作为故障断电与急停执行的核心元件,在自动化生产线中承担多级联动保护功能。每套控制单元配置2个独立安全继电器分别用于电机回路与控制回路切断,实现互为监控的功能分离。在5ms以内完成通断响应,并对48V以下低压系统与380V高压负载区分设定动作阈值。急停按钮设计为3段式结构,包括按钮触发、继电器断电与连锁反馈,能在2秒内完成全线断电响应。急停信号与主PLC的EMG模块通过RS485总线进行同步确认,并在触发后3秒内生成故障编码上传至HMI界面。多站点设备设置总急停链路,通过硬线回路将15台以上设备纳入同一保护逻辑,避免单点响应滞后造成联动延迟。整体设计充分结合人机操作频次、区域危险等级与设备自检能力,实现标准化、分区化的安全控制结构。

4.3 连锁保护机制在多设备协同运行中的应用

在多台设备并联运行的自动化生产线上,建立连锁保护机制对于防止异常扩散具有重要意义。每台设备配置独立逻辑节点与控制反馈接口,通过布设在主干线的输入输出模块实现逻辑联动。当某台设备检测到过载、欠压或位置异常时,可在200ms内向上游设备发出停机信号,并同步传输至下游控制模块,确保控制命令与实际状态匹配。系统内平均部署15组数字量输入与12组继电器控制输出,通过总线系统构建闭环监控。连锁条件包括门限电流、传感器故障、气缸行程不到位等,触发后将禁止相关动作继续执行,并进行系统级阻断。在单批次产品通过4道设备同时作业的流程中,若检测出第3台设备电流升高5A以上,系统将中断全线启动指令。通过标准化通信协议与数据交互逻辑,构建高度协同与自动响应机制,确保任何单点异常不致蔓延至整条产线,详情见表1。

表 1 电气控制系统与安全运行维护分析表

	控制环节	功能目标	典型配置	响应时间	适用场景	存在问题
1	PLC程序冗余	提高故障容错率	双CPU冗余结构	5ms以内	复杂逻辑工艺	程序复杂度高
2	安全继电器联动	实现断电联动保护	双继电器配置	5ms以内	高压控制区域	继电器老化风险
3	急停控制逻辑	快速切断故障源	三段式急停回路	2秒内全断	人员密集操作区	按钮误触风险
4	多设备联锁保护	隔离异常设备	多节点数据同步	200ms完成	连续协同作业	信号误传风险
5	信号反馈机制	同步设备状态	RS485数据接口	3秒内上传	信息共享平台	网络延迟干扰

5 电气安全体系的运行维护与持续改进机制

5.1 定期巡检与状态监测的制度化配置

建立电气安全体系的关键在于构建可持续运行机制，制度化的巡检流程与在线状态监测配置成为常态化管理的重要工具。应以周检、月检、季度全面检测为时间轴设置梯级巡检任务，涵盖配电柜温升、电缆绝缘、电气间隙、电压稳定性与接地电阻等项目。通过部署电流、电压、温度、振动等多参数采集模块，对关键节点进行 24 小时不间断状态监测，并与控制中心数据集成。现场操作人员通过手持终端完成标准化检查记录，并上传至数据平台形成趋势分析与预警图谱。每次巡检应具备闭环校验机制，对于异常项需在 72 小时内完成整改反馈。以制度为约束，以数据为支撑，实现从被动检修向主动预判的管理转型，切实提升电气安全体系的稳健性和响应能力。

5.2 安全事件响应机制与应急预案设计

电气安全管理不仅依赖技术措施，更需要成熟完备的响应机制与预案体系。在体系设计中应设定事故分类分级响应标准，依据事件影响范围、电压等级、故障类型确定应急流程。系统应具备故障定位模块、区域隔离机制与联动启动装置，确保在事故发生后能迅速切断故障源并保护重要负

载。针对不同场景设计火灾、触电、设备损毁、误操作等专项预案，明确岗位职责、联络顺序与恢复流程。演练周期建议控制在 6 个月内至少一次，并覆盖白班夜班操作流程。事故发生后应在 1 小时内完成现场记录、数据上传与初步复盘，并在 48 小时内完成整改报告及体系修订建议。通过制度规范、流程固化与实践演练相结合，提升系统面对突发电气风险的综合应对能力。

5.3 技术升级背景下的安全体系动态调整路径

随着自动化技术的快速演进，电气安全体系需具备自适应调整能力，满足设备迭代与控制逻辑变更后的安全要求。应建立以生命周期管理为核心的安全策略体系，涵盖初始设计、安全评估、运行优化与退役评估等阶段。在设备升级改造过程中同步评估其对现有安全边界的影响，动态调整断电门限、联锁逻辑与接地模式等关键参数。对新增模块应配置独立的保护单元与状态接口，并同步更新系统软件及 PLC 程序。定期开展基于风险等级的体系审计与模拟测试，识别潜在失效点与新型干扰源，提出改进策略。通过引入版本管理机制与变更控制流程，保障体系在扩容、迁移、改造等操作中依然维持高可靠性与高响应力，实现安全体系的动态闭环演化，详见表 2。

表 2 电气安全体系运行维护机制分析表

	管理要素	主要内容	实施频率	技术手段	核心作用	改进方向
1	定期巡检	制度化检查流程	月/季度	手持终端记录	发现潜在隐患	增加标准项
2	在线监测	实时参数采集	全天候	传感器+数据网关	预警系统异常	提升采集精度
3	应急预案	分类事故处置	半年一次	流程固化演练	压缩响应时间	加强场景匹配
4	事件响应	快速隔离恢复	分级响应	自动定位系统	阻断事故蔓延	优化流程链条
5	动态调整	系统版本管理	升级同步	PLC逻辑更新	适配新技术要求	引入风险模型

6 结语

构建完善的电气安全防护体系是保障工业自动化生产线高效稳定运行的根本前提。通过系统性分析风险类型与诱因，明确技术构成与控制逻辑设计路径，结合现场运行维护机制与动态更新策略，可有效构建起覆盖全过程、多层次、可演进的安全防护体系。在生产复杂化、节奏加快、协同增强的背景下，电气安全管理已不再是附属模块，而是核心功能的一部分。唯有将安全理念融入设计、实施、运维每一环节，才能实现安全与效率并重的现代化工业目标。

参考文献

[1] 陈志敏,刘俊.工业自动化设备的电气安全试验[J].科技风,2019,(19):150.

[2] 柳晓菁,施奇维,尚羽佳.浅析工业通信设备的电气安全要求[J].仪器仪表标准化与计量,2018,(06):20-21.

[3] 马瑞林.工业自动化设备的电气安全试验[J].信息系统工程,2018,(10):76.

[4] 张国静.工业企业电气安全的应用研究[J].住宅与房地产,2017,(27):236.

Consideration on the application of automation technology in coal mine electromechanical transportation system

Jian Liu

Shandong Energy New Mine Group Great Wall No.6 Mine, Ordos, Inner Mongolia, 016200, China

Abstract

With the rapid development of the coal industry, there has been a growing demand for automation technology in coal mine electromechanical transportation systems. This study explores the application of automation technology in such systems and analyzes its critical role in enhancing mine safety and transportation efficiency. The research demonstrates that implementing real-time monitoring technologies and intelligent control systems can significantly optimize material flow and personnel scheduling within mines, reduce accident rates, and improve production efficiency. Furthermore, the study emphasizes that automation integration should be implemented concurrently with miner safety training and system maintenance to ensure effective operation and worker safety. This research provides theoretical foundations and practical strategies for automating electromechanical transportation systems in coal mining, contributing to the modernization of this industry.

Keywords

coal mine electromechanical transportation system; automation technology; safety and efficiency improvement

煤矿机电运输系统中自动化技术的应用思考

刘建

山东能源新矿集团长城六矿，中国·内蒙古 鄂尔多斯 016200

摘 要

随着煤炭工业的快速发展，煤矿机电运输系统对自动化技术的需求日益增加。本研究探讨了自动化技术在煤矿机电运输系统中的应用，并分析了其对提升矿山安全性和运输效率的重要性。研究表明，通过引入实时监控技术和智能控制系统，可以显著优化矿井内部的物料流动和人员调度，降低事故率，提高生产效率。研究还指出，自动化技术的集成应与矿工安全培训和系统维护并行实施，以确保技术的有效运行和工作人员的安全。此项研究为煤矿领域的机电运输系统自动化提供了理论依据和实施策略，有助于推动该行业的现代化进程。

关键词

煤矿机电运输系统；自动化技术；安全性及效率提升

1 引言

如今煤炭工业领域发展很快，煤矿机电运输系统的自动化技术逐渐成为大家关注和实践的主要方向。技术水平一直在提升，尤其是信息技术还有自动控制技术进步非常大，自动化对提高煤矿安全和生产效率的影响特别明显。自动化技术可以让煤矿运输系统实现更高级别的运行管理和精准控制，这对保护矿工的生命安全以及合理安排资源使用有很大帮助。通过查看事故统计数据就能发现，矿井发生安全事故往往跟运输系统的运行效率以及安全管理水平有很大关系。基于这样的现实情况，接下来会详细分析自动化技术在煤矿机电运输系统中的具体应用方式和带来的各种好处。借助对煤矿内部物料流动及人员调度系统的智能型改善，自

动化技术不只能够缓解工人的劳动强度，亦可以高效减少工作场所的事故率，这一点已经多项研究所证明。另外研究表明，自动化技术的实施应当与矿工的安全培训和系统的持续维护相融合。这样的整合策略可以确保自动化系统的稳固运作，与此同时保障矿工的操作安全。本文的研究目的是供给一套完整的理论框架和实操策略，以促进煤矿机电运输系统自动化的实施，并且为煤矿行业的现代化建设奉献力量。

2 自动化技术在煤矿机电运输系统的重要性

2.1 需求背景与发展趋势

随着煤炭需求的不断增加，煤矿机电运输系统所承受的负担变得越来越大，自动化技术的关键作用显得非常重要。过去的老式运输系统完全靠人工来操作，工作效率非常低，还存在很多安全风险和隐患。引进自动化技术后，可以很好地解决这些麻烦的问题。全球矿业发展的趋势明确显示，自动化技术的使用不仅大大提高了矿井的生产效率，而

【作者简介】刘建（1981-），男，中国山东泰安人，本科，助理工程师，从事电气自动化研究。

且明显降低了事故发生的概率，全面改进了整个生产过程。矿山企业已经清楚认识到，自动化技术是提升竞争能力的重要方法，这种深刻的理解有力推动了自动化技术在煤矿机电运输系统中的普及和广泛应用。物联网和人工智能这些前沿技术的不断进步，让煤矿运输自动化系统变得更加聪明，能够进行智能化的操作和全方位的监控，帮助矿井安全管理工作提供全新的改进方案。技术的前进方向非常清楚地表明，煤矿机电运输系统的自动化将会逐渐变成行业发展的关键趋势，帮助矿山企业在技术改进和实际运用方面不断加快速度。

2.2 矿山安全性与自动化技术的关联

自动化技术在煤矿机电运输系统中的应用和矿山安全性密不可分。借助自动化技术，可以达成对于矿山设备和运输过程之即时监控，有效减少人为操作失误造成的安全隐患。智能化的监测系统能迅速探查异常情况，防范隐性安全事故，且迅速应对意外事件。如此积极防护措施明显削减了矿工在作业过程中面临的风险。自动化技术可以改善人员调度，削减工人在高危环境中置身时间，因此减少事故率。亦通过对于设备状态的即时分析，预先发现故障，开展防范性维护，规避由于设备损坏以致引发的安全事故。融合培训和技术支持，自动化技术于矿山安全性提高方面拥有无可取代的作用。

2.3 运输效率提升及其经济影响

自动化技术在提升煤矿机电运输系统的运输效率方面施展着重要作用。自动化系统可以达成对物料和运输设备的精确控制，缩减人为干预引发的操作误差，增进全面运输速度和准时性。智能化的优化调度系统可以依据实时需求达成资源的恰当分配，尽可能地减少闲置和等待时间。运输效率的增进不但有利于提高产出的及时性，还能明显减少运营成本，提升煤矿企业的经济效益，达成资源的高效利用，有力促进行业的可持久发展。

3 煤矿机电运输系统中的自动化技术应用

3.1 实时监控技术的引入与实施

监控技术已经成为煤矿机电运输系统自动化的核心组成部分，推广这项技术是为了提升矿井的安全保障水平和运输工作的效率，结果确实很不错。煤矿在运行过程中，监控系统能够仔细检查设备的运转情况、工作人员的具体位置以及物料的移动轨迹。借助传感器网络和数据传输设备的紧密结合，成功收集并研究矿井内部各个运输环节的相关数据。监控系统能够发现潜在的各种危险状况，并且发出警示信号，降低事故发生的概率。一旦设备发生故障或者出现异常状况，系统会准确判断并将信息传递至控制中心，采取有力措施，确保安全生产的环境保持平稳，保护矿工的生命安全。通过监控人员和设备的实时位置，改进运输调度方案，高效减少运输时间，提升矿井整体生产效率。实时监控技术在煤

矿机电运输系统中不只提升了安全性，而且促进了作业流程的改进，为未来矿井智能化发展的核心环节。

3.2 智能控制系统的构建与优化

智能控制系统在煤矿机电运输系统中的构建与优化对于提升系统效率具有关键作用^[2]。这种系统以信息系统为基础，通过数据采集、传输和处理，实现对运输设备的自动控制和管理。优化的智能控制系统能够通过分析传感器数据，自动调节设备的运行状态，从而提高设备的响应速度和精确度。应用人工智能算法与机器学习技术，可以对运输过程中的各种变量进行预测与调整，增强系统的自适应能力。优化过程还包括硬件设施的升级与软件算法的改进，以确保系统的稳定性和可靠性。智能控制系统的成功实施将助力实现矿井运输的自动化和智能化，显著提升生产安全性和效率。

3.3 物料流动与人员调度自动化

煤矿中物料运输和工人调配的自动化管理变成了保证机电运输系统高效运行的关键因素。采用自动化技术，把先进的传感器设备、数据处理工具和智能决策计算方法结合起来，达到对矿井内部物料运输的精确掌控，同时对工人的调配进行科学合理的改进。物料运输的自动化操作能够减少因为人工操作而出现的错误风险，使得运输过程变得非常流畅并且精准无误。工人调配的自动化管理使用监控设备和数据分析手段，科学合理地分配工人的工作任务和上班时间，缩减人工成本的花费，同时提高生产效率的水平。多种技术的结合使用可以大幅提升矿井运行的整体效率，增强生产能力，保障工人在工作环境中的人身安全得到保护，维护矿区的稳定运行。

4 自动化技术的集成与挑战

4.1 技术集成的标准与实施难点

在煤矿机电运输系统想要实现自动化技术的融合，面临很多制定标准和落实标准时遇到的困难。制定技术标准时，必须仔细研究煤矿环境的特殊情况，比如地理位置的特点、矿石的种类和属性，还有设备之间的匹配程度。制定出的标准要让设备和系统能够互相配合，顺利完成技术的融合。落实标准的时候，最大的问题集中在新旧设备能不能匹配，以及系统融合时如何做好协调和管控。技术融合还需要解决因为技术太复杂而带来的调整上的麻烦。如果系统的复杂程度变高，可能会要求技术人员掌握更厉害的技能，这样就得增加学习机会和技术支持的投入。精细的管控和调度对系统稳定运行特别重要，必须建立完善的监管办法和评价方法。把技术标准定得清楚明白，解决好落实中的困难，就能有力推动自动化技术在煤矿机电运输系统中的广泛使用^[3]。

4.2 工作人员的安全培训需求

在煤矿机电运输系统自动化技术的融合进行中，工作人员的安全培训显得格外关键。伴随自动化程度的增强，工作人员必须熟练新设备和系统的操控规程。安全培训不只包

含技术层面,同时包括应急处理能力的提高,以处理自动化系统可能故障造成的风险。培训计划应当依据不同岗位需求因地制宜,保证每位工作人员全部拥有必需的知识和技能。培训内容能够涵盖新技术运用、设备维护、安全标准以及事故处理程序等方面。通过不断的培训和考核机制,能提高人员的安全意识和处理复杂问题的能力,进而维护自动化技术的高效运作和矿井的全面安全。矿工在接触到新技术时,知晓怎样无危、快捷地操控设备,会明显减少事故出现的概率。

4.3 系统维护与技术更新

系统维护与技术更新在煤矿机电运输系统中至关重要,直接影响自动化技术的有效运行和矿山安全性。定期维护确保设备的稳定性和精准度,减少因磨损或故障带来的停机时间和事故风险。技术更新能够及时引入先进的自动化解决方案,提升系统的响应能力和效率,适应不断变化的矿业需求。维护和更新还需要与操作人员的技能提升相结合,确保他们能够识别潜在问题,并利用新技术进行优化操作。这种动态维护和技术进步为煤矿自动化系统的长期成功奠定了基础。

5 煤矿机电自动化系统的未来发展

5.1 创新技术的探索与应用

创新技术针对煤矿机电自动化系统进行深入研究和广泛应用,成为推动煤矿行业未来发展的重要关键因素。新兴科技包括物联网、人工智能还有大数据解析等技术手段,目前正处于煤矿机电运输系统自动化领域打开全新机会的阶段。引进这些技术并不断提升水平,能够实现更高层次的自动化管理,提高系统运行时的响应速度和操作准确性。通过全面部署物联网设备,矿井环境可以实时被感知和详细分析,从而优化设备运行效率,提升矿井通风管理的效果。应用人工智能技术能够智能预测设备可能出现的故障,提前进行维护工作,减少意外停机的次数,确保制造过程更加稳定,让生产能够顺利进行下去。大数据分析可以融合解决多源数据,为运输系统调度和管理给予科学依据。结合应用这些创新技术,有利于达成煤矿生产从传统人力密集型向智能化、自动化方向的积极转型,为煤矿行业的可持续发展确立基础。

5.2 政策环境与行业支持的作用

产业扶持也为实现和整合自动化技术提供了良好的环境包括资金和技术的共享和行业标准的制定。这两种模式相互补充形成了一个有利于科技发展的生态体系。

5.3 长期效益与可持续发展策略

煤矿机电自动化系统的持久效益体现在推动矿山的可持续发展,借助提升生产效率、减少事故发生率,达成资源的优化配置。自动化技术可以延展设备使用寿命,削减能源消耗,因此减少运营成本,增强经济效益。为了达成可持续发展,必须拟定全面的策略,涵盖技术的持续创新、政策支持的加强以及行业标准的改进。需保障技术与环境保护相融合,削减矿山行为对生态系统的负面影响,达成人与自然的和谐共生。

6 结语

研究人员对煤矿机电运输系统的自动化技术使用状况进行了细致的调查和分析,重点放在如何增强矿山作业的安全程度以及提升运输任务的执行效果上。借助实时监控仪器和智能控制设备,可以合理规划物料搬运的流程和工作人员的日常任务分配,还能大幅削减意外事故发生的几率,从而让整体生产能力得到增强。自动化技术使用过程中难免会碰到一些难题,设备保养工作显得有些麻烦,矿工学习新技术也得接受系统的指导和学习。研究工作需要集中精力解决这些实际问题,尝试开发出性能更优的系统整合方案,注重设备保养工作的改进和工作人员技能的提升,确保技术运行不出差错,保障矿工操作时的生命安全。自动化技术于煤矿机电运输领域的全面铺开和实际执行,定会成为引领这个行业迈向先进发展的重要动力来源。

参考文献

- [1] 任富强,李刚,康宇全.煤矿机电运输系统中的自动化技术分析[J].新型工业化,2022,12(08):76-79.
- [2] 刘芳忠.煤矿机电运输系统及其自动化技术对策[J].冶金管理,2022,(07):34-36.
- [3] 周久浩.煤矿机电运输系统自动化技术及其发展[J].石油石化物资采购,2022,(23):174-176.

Application of JMatPro in the Process Design of 45 Steel Hot Rolled Rod

Jiarong Liu Shuxin Tian

Tianjin Iron and Steel Group, Tianjin, 300301, China

Abstract

Analyze 45 # steel using the metal material phase diagram and performance calculation software JMatPro. The equilibrium phase composition, undercooled austenite isothermal transformation curve (TTT), undercooled austenite continuous transformation curve (CCT), and TTA diagram describing time, temperature, and degree of austenitization during the austenitization heating process of 45 steel were calculated through software. The liquid phase temperature of hypoeutectoid steel 45 is 1493°C, and the temperature at which high-temperature ferrite begins to precipitate is below 1493°C. When the temperature drops to 1480 °C, the first drop of liquid phase transforms into austenite at a temperature between 1480 °C and 1415 °C. The liquid phase continuously transforms into austenite, and the liquid phase composition decreases continuously. When the austenite content increases to the solid phase line at 1415 °C, all the liquid phase alloys used transform into austenite without undergoing phase transformation. The solubility of carbon in austenite decreases at 774°C, and the austenite begins to transform into ferrite. At temperatures between 774°C and 727°C, the solubility of carbon in austenite gradually decreases, and ferrite will first eutectoid from austenite. When the temperature drops to 727°C, the remaining austenite undergoes eutectoid transformation into ferrite, pearlite, and a small amount of cementite. At 727°C to room temperature, ferrite will precipitate from ferrite, and the final room temperature structure will be composed of ferrite and cementite. Based on the simulation results, a rolling process for bar 45 steel was developed. After testing, the matrix structure was found to be ferrite+pearlite, with a grain size of 8.5, a yield strength of ≥ 375 MPa, a tensile strength of ≥ 620 MPa, and an elongation at break of $\geq 15\%$.

Keywords

45 steel; Bar; Thermodynamics; Phase transition; JMatPro

JMatPro 在 45 钢热轧棒材工艺设计中的应用

刘家荣 田淑沁

天津钢铁集团, 中国 · 天津 300301

摘 要

利用金属材料相图与性能计算软件JMatPro对45号钢进行分析。通过软件计算得到了45号钢不同温度下的平衡相组成、过冷奥氏体等温转变曲线(TTT)、过冷奥氏体连续转变曲线(CCT)以及奥氏体化加热过程中描述时间、温度和奥氏体化程度的TTA图。铁碳合金相图结合计算结果亚共析钢45号钢的液相线温度为1493°C, 高温铁素体开始析出的温度是在低于1493°C, 温度降至1480°C时第一滴液相转变为奥氏体温度在(1480°C—1415°C)液相不断向奥氏体转变, 液相成分不断减少, 奥氏体成分增多达到1415°C固相线时所用液相合金全部转变为奥氏体温度降低奥氏体不发生相变。奥氏体中碳的溶解度降低在774°C奥氏体开始向铁素体转变, 温度在(774°C—727°C)碳在奥氏体中溶解度逐渐下降将从奥氏体中析出先共析铁素体, 降到温度727°C时剩余奥氏体发生共析转变为铁素体、珠光体和少许渗碳体, 在727到常温时将从铁素体中析出铁素体最终室温组织为铁素体和渗碳体。依据模拟结果, 制定了棒材45号钢轧制工艺, 经检测基体组织为铁素体+珠光体, 晶粒度8.5级, 屈服强度 ≥ 375 MPa, 抗拉强度 ≥ 620 MPa, 断后伸长率 $\geq 15\%$ 。

关键词

45钢; 棒材; 热力学; 相变; JMatPro

1 引言

45 号钢为中碳钢含碳量在 0.42%-0.5% 之间的优质碳素结构钢, 具有高强度、良好的韧性、优良的加工性能和一定的耐磨性、耐腐蚀性及耐热性, 广泛用于机械制造、汽车工

业、建筑及石油化工领域, 如齿轮、齿条、轴承、连杆等核心部件。45 号钢一般需要热处理调质后, 具有较高的屈服强度和抗拉强度, 能够满足大部分机械零件的强度要求。针对特定用途工件的热加工工艺设计, 需兼顾不同加工阶段的性能需求, 具体要求如下:

2 热轧阶段性能要求

在工件处于热轧状态时, 其需具备优良的加工成型性能。该性能需满足后续产品加工制造环节对材料可塑性、可

【作者简介】刘家荣(1988—), 男, 中国陕西汉中, 助理工程师, 从事轧钢工艺技术和产品研发研究。

切削性等指标的基础要求，确保加工过程顺利进行，避免因材料加工性能不足导致工件成型缺陷或加工效率下降。

3 成型后热处理与性能调控

待工件完成加工成型工序后，需通过特定热处理工艺实现性能优化：

采用调质处理结合高温淬火的复合工艺方案，对成型工件进行后续处理；

经工艺处理后，工件需达到表面与芯部的差异化性能指标：表面需形成较高硬度，以保障工件服役过程中的优良耐磨性能，延长使用寿命；芯部则需保留良好的冲击韧性，确保工件在承受冲击载荷时不易发生断裂，满足复杂工况下的结构安全性需求。我厂生产的 45 号圆钢也多用于轧制无缝钢管。

JMatPro 计算软件是一款计算金属材料性能和金属铁碳合金相图性能功能软件，用来计算多种材料的各项力学性能以便建立各项理论模型，主要有热力学性能例如热导率和表面张力等等；金属材料力学性能包括强度、硬度、冲击韧性、塑性、应力应变曲线等等；相转变温度动力学包括亚共析钢和共析钢的 TTT 曲线、奥氏体连续冷去转变 CCT 曲线和析出相等温时效等。近年来 JMatPro 软件在国内金属材料研究方面的应用逐渐增多，软件的预测精度得到广泛认可。研究对象为 45 号钢，热力学性能和相转变的计算结果依赖于 JMatPro 7.0 软件，根据计算结果而制定加热和轧制工艺制度。

4 研究对象

钢种生产工艺为：转炉冶炼→LF 炉精炼→连铸方坯（185mm×185 mm×12m）→热坯直装→加热→棒材轧机轧制→精整→检验、打捆→入库。

5 合金平衡相计算和分析

45 号钢液相线计算温度为 1493℃，在液相线温度下液相中体心立方结构的铁素体 F 开始少量析出，计算铁素体含量在温度为 1489℃时的含量为 9.18%，体心立方结构的铁素体 F 发生相变转变为面心立方结构的奥氏体 A 的温度是低于 1480℃，液相成分减少奥氏体 A 成分增多，达到固相线温度 1 415℃时，所有液相全部转变为奥氏体 A，并析出极少量 MnS 相，温度降低奥氏体 A 不断发生相变，奥氏体 A 中的碳溶解度逐渐降低在 774℃奥氏体 A 开始向铁素体 F 转变析出先共析铁素体，到达温度 727℃奥氏体 A 发生共析转变为铁素体和渗碳体，达到温度 715℃时剩余奥氏体 A 全部转化为珠光体和少量碳化物；45 号钢在常温下的稳定相由铁素体相 93.44 %、渗碳体相 5.48% 和少许碳化物以及其它相，其中碳化物主要是 0.86 %M₇C₃，其它相 0.04 %M₂P + 0.02 %MnS + 0.1 %Cu + 0.06 %G-Phase。

6 合金相转变参数模拟和分析

6.1 等温奥氏体化转变曲线（TTA 图）

奥氏体化是指钢加热至临界点以上是形成奥氏体的过

程，温度达到共析温度以上，在室温下将铁素体和渗碳体转变为奥氏体。奥氏体化过程涉及奥氏体核的形成和生长；渗碳体的溶解和奥氏体成分的均匀化导致珠光体转变为奥氏体，奥氏体成分均匀化。图 1 显示了 JMatPro 软件计算的 45 号钢的 TTA 曲。

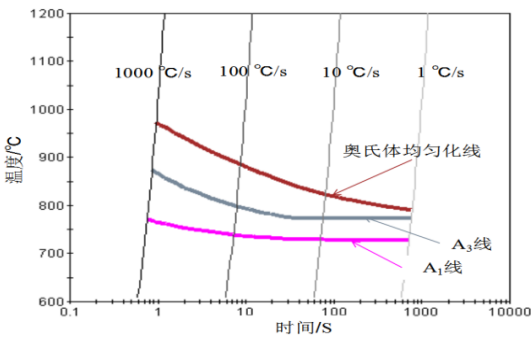


图 1 45 钢 TTA 图

表 1 为加热速率对 45 钢奥氏体均匀化和时间的影响。由表 1 可知，随着加热速率的增加钢材的 A₁、A₃ 及奥氏体均匀化临界温度均升高，奥氏体均匀化所需时间快速下降，这有利于钢坯加热时减少氧化、脱碳的影响，抑制奥氏体晶粒粗化，使晶粒变得更加细小从而改善钢材的力学性能。因此，在实际生产中常采用高温快速加热的方式来减少钢坯氧化烧损和限制奥氏体原始晶粒过度长大。

表 1 为加热速率对 45 钢奥氏体均匀化和时间的影响

加热速度 / (°C /s)	A ₁ /°C	A ₃ /°C	奥氏体均匀化 温度 /°C	奥氏体均匀化 时间 /s
1000	771	916	973	0.95
100	739	874	886	8.66
10	729	775.2	823	80.3
1	728	773	791	771

6.2 过冷奥氏体等温转变曲线（TTT 曲线）

TTT 曲线是反映过冷奥氏体等温冷却时，转变产物类型以及转变量与时间、温度之间的关系曲线。图 2 为通过软件计算得到的 45 钢的 TTT 曲线。

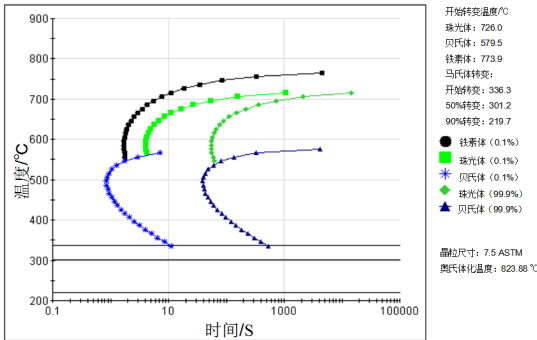


图 2 通过软件计算得到的 45 钢的 TTT 曲线

合金经奥氏体化后冷却过程中铁素体、珠光体和贝氏

体可析出最高温度依次是 773.9℃、726.0℃和 579.5℃。其中珠光体“鼻尖”温度为 596℃，过冷奥氏体在此温度下保温 4.15 s 开始析出珠光体，贝氏体“鼻尖”温度为 496℃，过冷奥氏体在此温度下保温 0.85 s 开始析出贝氏体，马氏体开始析出温度为 336.3℃。

6.3 过冷奥氏体连续冷却转变曲线（CCT 曲线）

45 号钢过冷奥氏体连续冷却转变图中不仅出现了先共析铁素体析出区，而且还出现了贝氏体转变区，过冷奥氏体连续冷却开始出现马氏体时速度为 8℃/s 时，温度为 302.8℃马氏体开始转变。

表 2 显示了不同冷却速率下 45 钢的相组成含量。表 2：铁素体和珠光体的显微组织是在以 0.01℃/s 的速度冷却至室温后获得的。随着冷却速度的增加，珠光体的数量增加，铁素体的数量减少。随着冷却速度的持续增加，铁素体和珠光体的形核量减少，过冷度增加，导致奥氏体转变为贝氏体。室温下，铁素体含量为 19.58%，珠光体含量为 80.42%，冷却速度为 2℃/s；在室温下组织中铁素体含量 18.06 %、珠光体含量 64.92 %和贝氏体含量 17.02 %冷却速度为 3℃/s，发生贝氏体转变是在冷却速率 2~3℃/s 时析出；在室温下组织中贝氏体含量 75.94 %冷却速度为 7℃/s；随着冷却速率的再次增加，达到冷却速度为 8℃/s 时室温下组织中出现马氏体含量 7.35 %，过冷奥氏体转变马氏体在冷却速度为 7~8℃/s 之间时出现。

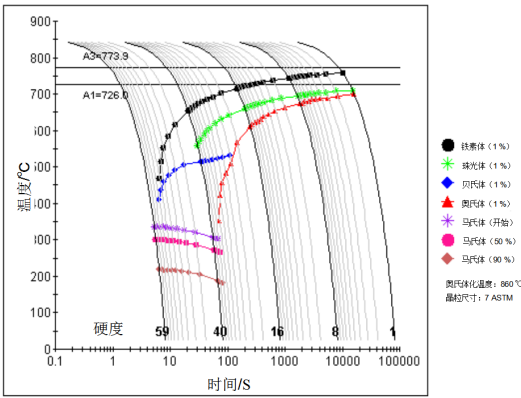


图 2a 45 钢的 CCT 曲线（温度 - 时间）

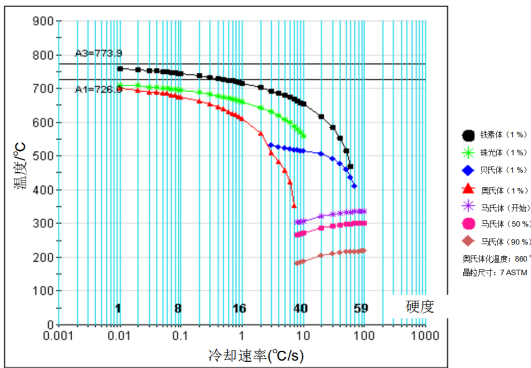


图 2b 45 钢的 CCT 曲线（温度 - 冷却速率）

表 2 为 45 钢在不同冷却速度下的相组成含量。由表 2 可见，以 0.01℃/s 冷却速度降至室温后获得铁素体和珠光体组织，随冷却速度的增加，铁素体含量减少、珠光体含量增多，随着冷速继续增加铁素体、珠光体来不及形核或形核量减少，同时导致过冷度增大，促使奥氏体向贝氏体转变。当冷却速度为 2℃/s 时室温下组织中为 19.58 % 铁素体 +80.42 % 珠光体；当冷却速度为 3℃/s 时室温下组织中为 18.06 % 铁素体 +64.92 % 珠光体 +17.02 % 贝氏体，说明在冷却速率 2~3℃/s 发生了贝氏体转变；当冷却速度为 7℃/s 时室温下组织中贝氏体质量分数为 75.94 %；随着冷却速率的进一步增加，贝氏体也开始逐渐减，当冷却速度为 8℃/s 时室温下组织中出现马氏体，质量分数为 7.35 %，说明冷却速度在 7~8℃/s 之间时出现了过冷奥氏体马氏体转变。

表 2 45 钢在不同冷却速度下的相组成含量

冷却速度 / (℃/s)	0.01	0.1	1	2	3	7	8
铁素体 /%	41.77	32.36	20.98	19.58	18.06	17.51	17.38
贝氏体 /%					17.02	75.94	70.84
珠光体 /%	58.23	67.64	79.02	80.42	64.92	6.52	4.4
马氏体 /%							7.35

7 热连轧工艺制度

根据 JMatPro 软件计算模拟得到的热力学及相变数据，制定 45 号钢热加工工艺和热连轧轧制工艺制度流程。

8 测试结果

经热连轧棒材产线批量生产 45 钢，规格范围 ϕ 18 mm - 26 mm，成分满足设计要求。力学性能检测如表 3 所示，可以看出，所生产的 45 钢的力学性能完全满足标准要求，且富余量较大。

表 3 45 钢力学性能

标准及实际值	下屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	断后伸长率 /%	断面收缩 率 /%
内控标准	≥ 375	≥ 620	≥ 15	≥ 40
最大值	449	680	23	48
最小值	385	655	20	43
平均值	428.1	667.6	22.7	44.6

9 结论

1) 45# 钢在室温下的稳定相组织由 93.44% 的铁素体相、5.48% 的渗碳体相和少量的碳化物和其他相组成。碳化物主要为 0.86%M7C3，其他相为 0.04%M2P+0.02%MnS+0.1%Cu+0.06%G 相。

2) 45 号钢奥氏体化后的低温转变特性 45 号钢经奥氏体化处理后，其过冷奥氏体在不同冷却温度下会发生不同类型的相变，具体转变规律如下：当 45 号钢完成奥氏体化

后, 若将其冷却至 774℃并维持该温度条件, 其内部的过冷奥氏体将发生相变并转变为铁素体组织; 而当冷却温度控制在 726℃时, 该钢种的相变过程与产物则会呈现出与 774℃下不同的特征(注: 原文此处表述不完整, 若需补充 726℃下的具体相变产物, 可结合实验数据进一步完善, 此处基于现有信息明确温度与相变的对应关系)。

上述不同温度下的相变差异, 本质是热力学条件对 45 号钢相变路径的调控作用, 该规律可为后续制定合理的冷却工艺、调控材料显微组织提供关键依据。

3) 根据热力学和相变数据, 可以开发 45 钢的热加工和热轧工艺, 生产出符合使用要求的 45 钢。

参考文献

- [1] 谷召坤,路晨龙.45Mn2热轧圆钢中心裂纹产生原因分析[J].天津冶金,2020,(02):64-66.
- [2] 刘颖.45#圆钢顶锻裂纹形成原因及改善[J].河北冶金,2023,(10):77-82.
- [3] 李华强,张正波,廖美华.45#钢圆钢心部缺陷分析[J].江西冶金,2023,43(05):415-419.
- [4] 代玉杰.JMatPro在42CrMo4钢热处理工艺设计中的应用[J].热处理技术与装备,2023,44(04):58-61+73.

Autoclaved aerated concrete block strength inspection points and quality control

Zhiguo Zhou

Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture Institute of Inspection, Testing and Certification, Wenshan, Yunnan, 663000, China

Abstract

In the green development period of the construction industry, autoclaved aerated concrete block, as a new green wall material, has the advantages of light weight, heat preservation and energy saving, and plays an important role in the strength of the project. Strength performance is related to the structural safety and durability of the building, but there are problems such as large strength fluctuation and unreasonable inspection methods in actual engineering. In this paper, the relevant points of the strength inspection of autoclaved aerated concrete blocks are expounded, including: the preparation of specimens, the strength test methods, the factors affecting the strength inspection, and finally the quality assurance measures are put forward from the aspects of actual raw material management, block production, quality inspection and supervision, etc., so as to improve the strength stability of the blocks and provide technical guarantee for the subsequent construction of the construction project.

Keywords

autoclaved aerated concrete block; strength test; quality control; specimen preparation; Construction

蒸压加气混凝土砌块强度检验要点及质量管控

周治国

文山壮族苗族自治州检验检测认证院, 中国 · 云南 文山 663000

摘 要

在建筑行业绿色化发展时期, 蒸压加气混凝土砌块作为一种绿色新型墙体材料, 具有轻质、保温、节能等优势, 在工程中的强度发挥着重要作用。强度性能关系到建筑的结构安全和使用耐久性, 但在实际工程中存在强度波动大、检查方法不合理等问题。本文对蒸压加气混凝土砌块强度检验的相关要点进行了阐述, 包括: 试件准备、强度检验方法、影响强度检验的因素, 最后从实际原材料管理、砌块制作、质量检验监管等方面提出了质量保证措施, 提高砌块的强度稳定性, 为后续建筑工程施工提供技术保证。

关键词

蒸压加气混凝土砌块; 强度检验; 质量管控; 试件制备; 建筑工程

1 引言

“双碳”背景下, 建筑行业对节能环保的材料需求增长, AAC (蒸压加气混凝土砌块) 作为一种轻质、保温等优势显著的建材, 被广泛应用于建筑墙体、屋面等的保温。目前, 我国每年生产超过上亿立方米的 AAC 砌块, 在新型墙体材料市场上占据超过 20% 的份额, 但在实际生产、应用中仍然存在砌块强度不佳、离散程度大等问题。AAC 生产企业由于自身生产工艺控制不严, 导致产品实际强度不满足《蒸压加气混凝土砌块》(GB/T11968-2020) 的要求, 而检验中往往

由于试件制作、测试方法等不当等原因导致检测结果不准确。因此, 研究 AAC 砌块强度检验要点, 强化过程质量控制, 在当前形势下对推动行业发展、促进建筑安全意义重大。

2 蒸压加气混凝土砌块强度检验要点分析

2.1 强度等级与技术要求

按照 GB/T11968-2020, 将蒸压加气混凝土砌块分为 A1.0~A10 共 7 个等级, 抗压强度平均值范围为 1.0MPa~10.0MPa, 为砌块在建筑墙体中能发挥抗压强度提供强度等级选择。规定每个砌块强度的最小值, 保证产品的稳定性。干密度等级 (B03-B08) 与强度等级有关, 同样砌块的轻质节能。除了抗压强度等级外, 还有干燥收缩值得考虑, 它直接影响到墙体裂缝的产生。另一个是抗冻性, 没有足够的抗冻性能, 在寒冷地区无法保证砌块的长期使用。这三个指标是相辅相成, 共同构成了砌块质量性能的评价。任一指标不

【作者简介】周治国 (1977-), 男, 壮族, 中国云南富宁人, 在职硕士, 高级工程师, 从事工业产品的实验室检验管理研究。

合格砌块在建筑工程中无法推广使用,甚至无法安全应用于施工中。

2.2 试件制备关键环节

2.2.1 试件取样与尺寸加工

对于试件的取样是决定检测结果是否具有代表性的关键因素。必须要从同一品种、同一规格、同一等级的砖瓦当中进行取样,并且在随机抽取的样品当中选择3块作为检测样本。在进行取样过程中,要将试件切割成统一规格(100mm×100mm×100mm)的试件,同时,尺寸的偏差要控制在±2mm的范围内,以确保检测结果的准确性。在切取过程中,要利用专业机具,通过机械操作来保证试件的表面平整,避免出现表面纹理,这样才能减少应力。另外,如果切取的试样出现缺棱、掉角或裂纹等情况,都会使试样的受力发生变化,这时,就要重新进行试件的切取,避免因试件本身的质量问题影响检测的准确性^[1]。

2.2.2 试件养护处理

试件养护直接决定其强度发展。标准养护条件为温度(20±2)℃、相对湿度≥90%,周期不少于28天。温湿度控制至关重要,过高或过低的温度、不足的湿度会干扰胶凝材料水化,阻碍强度增长。养护期间需定期检查温湿度记录,及时校准环境参数。对于已完成蒸压养护的砌块,虽可直接测试,但需确保试件表面洁净,无浮灰、油污等杂质,避免影响试件与压力机压板的接触,以保证测试结果的准确性。

2.2.3 强度测试方法与操作规范

(1) 抗压强度测试。抗压强度的试验要使用压力试验机进行,加载速度要控制在(2.0±0.5)kN/s。实验时,要确保试件的底部支承面处于压力机的下压板中央位置,确保压力机的承压面垂直于试件的成型顶面,并确保各个受力均匀。在加载过程中,要控制好加载的速度,按照控制的加载速度加载,尽量使试件在破坏时不会失控。记录试件破坏时的荷载,经过计算得出试件的强度。当试件在承受压力时出现偏心受压和局部受压破坏时,就说明试件的受力情况不正常,这种试验结果是无效的,需要重新进行实验,得出正常的试验结果。

(2) 强度数据处理。强度数据处理,会直接影响检测结果的可靠性。以3块试件抗压强度的算术平均值为该组砌块的强度。当单块试件强度值与强度的平均值相差超过20%,说明该试件的数据不正常,应剔除,剩下试件强度的平均值作为最终结果。两块以上试件强度值与强度的平均值相差超过20%,说明该组试件离散程度过大,不能真实反映砌块强度,该组试验无效,应重新进行取样试验,以保证强度检测结果真实反映蒸压加气混凝土砌块的质量水平^[2]。

3 影响蒸压加气混凝土砌块强度的关键因素

3.1 原材料质量影响

3.1.1 硅质材料与钙质材料配比

硅质材料与钙质材料的配比是影响砌块强度的核心因

素。硅质材料提供二氧化硅,钙质材料提供氧化钙,二者在蒸压养护中发生水化反应,生成托勃莫来石等胶凝性产物,其含量直接决定砌块强度。当硅钙比(SiO_2/CaO)控制在2.0-2.5时,利于托勃莫来石充分生成,提升强度。硅质材料占比过高会导致水化不充分,胶凝产物不足;钙质材料过量则产生过多氢氧化钙结晶,降低砌块耐久性与抗冻性^[3]。

3.1.2 发气剂与调节剂作用

发气剂是决定砌块内部气孔质量和强度的关键因素,核心是铝粉;若活性差或掺量少,则气孔少、气孔小,不利发挥轻质的真正作用;若掺量大或活性高,则气孔大、气孔不均匀,强度偏低。调节剂可控制发气速度,保证铝粉充分反应,若添加比例不当,发气过快,会造成气孔塌陷变形;发气过慢,则会耽误成型时间,导致砌块内部不能密实,达不到均匀,从而降低砌块强度。

3.2 生产工艺控制影响

3.2.1 搅拌与浇筑工艺

搅拌和浇筑过程决定了砌块强度均匀与否,因此砌块的强度均匀性和稳定性首先与搅拌时间及搅拌速度的快慢有关,当搅拌时间过短时,各种原材料的均匀性得不到充分体现,硅质材料与钙质材料搅拌不充分,容易造成局部比例失衡,使得水化反应不能充分进行,而当搅拌时间过长时,又会破坏铝粉结构,影响其发气效果,导致气孔结构较差。浇筑环节浆料流动性太大会造成浇筑不密实,出现空洞,而流动性太小则会导致分层、离析现象,使得砌块不同位置的强度各不相同,分布不均匀,强度降低。

3.2.2 蒸压养护制度

蒸压养护是决定砌块强度的重要工序。在养护过程中,温度、压力、时间都要控制得当。养护温度和压力是水化反应的能源和条件,温度过低、时间过短,水化反应不充分,胶凝产物不能充分形成,砌块强度达不到要求;温度过高、压力过大,也会使砌块内部产生较大的热应力和机械应力,破坏已形成的组织,使砌块产生裂缝、疏松等。只有在适宜的蒸压养护条件下,如1.2MPa压力养护8-10h,才能使各种材料完全反应,得到理想的水化产物,使砌块获得预期的强度^[4]。

3.3 环境与运输因素影响

3.3.1 环境温湿度影响

温度和湿度变化对砌块强度影响贯穿于砌块的存放和使用过程中,潮湿环境会使砌块多孔结构吸收大量的水分,使得砌块内部孔隙水含量升高,胶凝材料粘结力减弱,抗压强度降低,同时水分的长期存在还可能会引起内部物质的溶解和迁移,对砌块结构稳定性造成影响;干燥环境则会使砌块内部水分快速蒸发,产生收缩变形,当收缩应力大于砌块材料的抗拉强度时,就会导致砌块出现裂缝,严重降低砌块的结构性能和承载能力。

3.3.2 运输与堆放管理

砌块的运输和堆放不规范也会对其造成破坏。运输过程中由于车辆的颠簸、碰撞等造成的外力,会使砌块容易缺

棱掉角,破坏砌块的表面,损伤砌块内部,影响砌块的强度。堆放过程中,不合理的堆放方式,即堆放的高度太大,受压的砌块下部太重,这样,会使砌块所受的压力增大,容易造成砌块内部裂缝,使砌块受损。所以砌块的运输和堆放,要使用专门的运输工具,合理控制堆放的高度(不超过2m),保证砌块在运输和堆放过程中不受损害,是保证砌块强度性能的一个重要措施。

4 蒸压加气混凝土砌块质量管控策略

4.1 原材料质量源头把控

4.1.1 建立原材料检验制度

原材料是生产制造蒸压加气混凝土砌块的物质基础,企业应建立严格的原材料检验制度,制定硅质材料、钙质材料、铝粉等原材料检验标准和检验方法。在化学成分方面,测定硅质材料二氧化硅、钙质材料氧化钙、铝粉活性铝的含量;在物理性能方面,测定各种原材料的颗粒级配,防止由于原材料的细度、粒度、超细度和粗度不符合要求而影响反应和制成品;测定各种原材料的活性,如粉煤灰的烧失、石灰的消化速度等。原材料必须检验合格后才能投入生产,不合格的原材料一律退货,杜绝劣质原材料进入。

4.1.2 优化原材料储存管理

科学的保管是为了保持原材料的完好无损。硅材料、钙质材料受潮后易结疙瘩失去原有的活性,所以这些材料必须分仓保管,并且库房还应该配置相应的防潮措施,比如:铺上防潮层、设置通风等。铝粉的化学活性很活泼,在空气中很容易氧化,所以必须用密封的容器将其储存,并且要隔绝空气和水。原材料储存仓要做到定期清理,以防残留杂质对原材料造成污染。做好原材料的批次追溯管理制度,每批次原材料的进货时间,联系供应商,检验结果,使用情况都要记录在案,在出现质量问题时,能够第一时间追踪到问题根源,并立即采取相应的措施给予纠正,同时也方便对供应商进行追根溯源。

4.2 生产工艺精细化管理

4.2.1 标准化生产流程控制

规范的生产流程能维持产品质量的一致性。按照搅拌、浇筑、发气、切割、蒸压等要求编写作业指导书,规定操作条件,制定质量标准。搅拌——控制时间、速度,均匀混合;浇筑——控制浆料高度、流动速度,防止涨浮;发气——根据原料、环境控制反应速度,保证均匀出气;切割——控制尺寸,降低切割误差;蒸压——遵循温压曲线,保证充分水化。使用自动化控制装置,跟踪控制参数,提示并纠偏。实时控制动态流程^[9]。

4.2.2 设备维护与更新

生产设备的性能与产品质量和生产效率密切相关。加强对搅拌机、切割机、蒸压釜等生产设备定期维护保养,检查磨损零部件,一旦发现磨损严重,应及时更换。积极采用

先进的“自动化”生产设备,如自动配料系统、智能数控切割机。自动配料系统采用精密传感器和计算机算法,原材料配比的误差可以控制在很低的范围,避免“低级错误”;数控切割机可以完成切割,提高切割精度,提升产品尺寸和“美观”。加强设备的维修和更新,提高自动化生产线水平。

4.3 质量检测与监管强化

4.3.1 完善企业内部检测体系

企业内部检测是质量控制的第一个关口。配备专业检测设备及检测人员。建立原材料检验制度、过程检验制度、成品检验制度。在生产过程中按规定时间间隔对砌块强度、干密度、气孔构造等关键指标进行检测。及时发现和纠正生产过程中的异常。成品出厂前按规定进行每批产品全检,符合国家标准和合同规定的合格产品。建立检测信息管理系统。用统计的方法检测质量波动规律,寻找质量问题根源,为工艺改进、生产优化提供依据,形成“检测—分析—改进”的质量提升闭环。

4.3.2 加强第三方检测与监管

政府部门、行业组织也应发挥管理职责,加强抽检力度,对各类蒸压加气混凝土砌块由第三方机构检测,随机抽样品检测,检测结果真实公正。对不合格的产品,要严格按照规章制度严肃查处,倒查生产企业,督促企业整改。推行行业质量信用评定,把企业质量检测、质量事故记录等纳入考评,对信誉良好的企业给予扶持,对失信企业实行联合惩戒,通过市场调节机制促使企业自觉提高产品质量,形成公平竞争、质量第一的市场环境。

5 结语

蒸压加气混凝土砌块强度检测和质量控制关乎建筑建设安全,文章通过探究强度检测要点、检测影响因素、强度质量控制路径等方面对瓦工砌块质量进行了有效管控。在今后的生产与应用中,企业需要对原材料质量做好控制,优化生产流程,完善检测手段;市场监督管理部门也要发挥应有的作用,督促行业标准化发展。

参考文献

- [1] 陈兵.蒸压加气混凝土砌块及其在现代住宅建筑中的应用[J].佛山陶瓷,2024,34(12):163-165.
- [2] 刘佳玉,王斌,肖亮,等.蒸压加气混凝土砌块产品质量检验中抗压强度不合格的原因及控制方法[J].中国检验检测,2023,31(03):21-23.
- [3] 王迪,王贵禄,柏光山.蒸压加气混凝土砌块抗压强度检测新方法研究[J].砖瓦,2024,(03):16-19.DOI:10.16001/j.cnki.1001-6945.2024.03.006.
- [4] 团体标准绿色低碳建材技术要求蒸压加气混凝土砌块(板)[J].上海建材,2023,(01):4-6.
- [5] 吴汝莉,徐煜.新《蒸压加气混凝土砌块》和《蒸压加气混凝土性能试验方法》国家标准研读[J].建材发展导向,2022,20(12):76-78.

The Application of Digital Twins in Intelligent Equipment Manufacturing

Zhenfu Zhang

Zibo Industrial Economic Development Promotion Center, Zibo, Shandong, 255000, China

Abstract

This paper focuses on the application of digital twin technology in the field of intelligent equipment manufacturing, and deeply explores its technical principles, application models and practical value. By analyzing the background and significance of the integration of digital twins and intelligent equipment manufacturing, the core role of digital twins in product design, production and manufacturing, operation and maintenance services and other links is revealed. The research finds that digital twin technology, by constructing a virtual mapping model of physical entities, realizes real-time data interaction and dynamic simulation, which can significantly improve the efficiency of equipment design, optimize the production process, and reduce operation and maintenance costs. Moreover, solutions are proposed for the technical bottlenecks and data security issues existing in current applications. To provide theoretical basis and practical reference for promoting the upgrading of the intelligent equipment manufacturing industry.

Keywords

Digital Twin Intelligent equipment manufacturing Full life cycle management Virtual simulation Industrial Internet

数字孪生在智能装备制造中的应用

张振富

淄博市工业经济发展促进中心, 中国 · 山东 淄博 255000

摘 要

本文聚焦数字孪生技术在智能装备制造领域的应用, 深入探讨其技术原理、应用模式及实践价值。通过分析数字孪生与智能装备制造融合的背景与意义, 揭示其在产品设计、生产制造、运维服务等环节的核心作用。研究发现, 数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射模型, 实现数据实时交互与动态仿真, 能够显著提升装备设计效率、优化生产流程、降低运维成本, 并针对当前应用中存在的技术瓶颈、数据安全等问题提出解决方案, 为推动智能装备制造产业升级提供理论依据与实践参考。

关键词

数字孪生; 智能装备制造; 全生命周期管理; 虚拟仿真; 工业互联网

1 引言

随着工业 4.0 与智能制造战略的推进, 智能装备制造已成为制造业转型升级的核心驱动力。智能装备不光需具备高度自动化与智能化功能, 还需要完成全生命周期的精准管理及优化, 融合了物联网、大数据、人工智能等前沿技术的创新手段——数字孪生技术, 采用构建物理实体在虚拟空间的镜像模型做法, 达成对装备全生命周期的实时映射及动态优化处理, 为智能装备制造铺就了新的技术坦途。就目前的发展现实情况看, 于航空航天、汽车制造、工程机械等领域, 数字孪生技术初步应用成果已达成, 然而在智能装备制造深度融合及全面推广的实践里, 仍面临诸多挑战, 亟待攻克的问题有怎样高效采集和融合多源异构数据、怎样构建高精度

的虚拟模型以及怎样保障数据安全与隐私。深入研究数字孪生在智能装备制造中的应用, 对于提升装备性能、降低制造成本、推动制造业高质量发展具有重要的理论与现实意义。

2 数字孪生技术概述

2.1 数字孪生的基本概念

所谓数字孪生, 是在虚拟空间创建与物理实体对应的数字化模型, 运用物联网、传感器等技术达成物理实体和虚拟模型间数据的实时交互及双向映射关系, 该模型除包含物理实体几何结构、材料属性等静态资讯外, 还可实时体现其诸如运行状态、性能参数等动态数据, 由此达成对物理实体全生命周期的精准管理与可视化监控^[1]。

2.2 数字孪生技术架构

数字孪生技术主要由数据层、模型层、平台层和应用层四个层次搭建起数字孪生技术架构, 数据层借助传感器、工业物联网等装置收集物理实体的多源异构数据; 模型层借

【作者简介】张振富(1982-), 男, 本科, 工程师, 从事智能装备研究。

助三维建模、仿真分析等技术打造高精度虚拟模型；平台层实现对数据的存储、处置与剖析，并给出数据交互以及协同服务；应用层凭借平台数据及模型，开发多种应用场景实例，诸如设备监控、故障预察、优化决断之类。

数字孪生跟智能装备制造结合可创造三大核心价值：借助虚拟仿真对装备设计方案加以优化，缩短开发周期；二是于生产进程里开展实时的监控与调整，增进制造精度和效率水平；三是在运维阶段对设备状态进行预测并实施健康管理，减少维护开支，该融合为智能装备制造给予了从设计到服务全链条的优化途径，促进制造业往智能化、数字化方向升级。

3 数字孪生在智能装备制造中的应用场景

3.1 产品设计阶段的应用

当处于智能装备制造产品设计阶段，数字孪生技术构建出一套从概念构想至方案验证整个流程的虚拟验证系统，极大提升设计质量及效率，处于传统设计模式期间，装备研发需借助物理样机反复做测试，既让周期变得很长，又让成本大幅增加，而且难以对复杂工况开展全面模拟，而数字孪生凭借集成计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)等技术，可在虚拟空间内构建1:按照1:1搭建的装备三维模型，完成多学科与多物理场的联合仿真操作^[2]。

3.2 生产制造阶段的应用

在生产制造阶段，数字孪生技术采用构建生产过程的虚拟副本方式，达成制造全流程的实时查看、动态改进与质量倒查，依靠安装到生产设备上的传感器，实时采集设备运行的各项参数、加工工艺数据及物料状态情况，即刻同步输送至虚拟模型，以实施数控机床加工为例，数字孪生模型能实时呈现出刀具转速、进给量、切削力等参数内容，并借助与预设工艺标准的对比，迅速对异常工况给出预警。

依靠数字孪生可达成生产排程与资源调度的智能优化，通过模拟不同生产计划里设备负荷、物料流动及能耗的情况，系统能自动形成最优排产方案，在智能工厂这个空间，数字孪生模型可依照订单优先级、设备的可用程度及物料库存状态，即时改变生产线的加工顺序及资源分派，减轻设备闲置的时间占比，带动整体生产效率上扬，利用数字孪生技术可精准追溯质量上的问题，倘若产品显现出质量缺陷，系统可对生产过程中的工艺参数、设备状态以及操作人员信息进行回溯，迅速锁定问题源头。

3.3 运维服务阶段的应用

处于智能装备运维服务的阶段，设备全生命周期健康管理依靠数字孪生技术得到了革命性解决方案，凭借打造设备的数字孪生对象，实时展现装备运行状态、性能的退化以及故障隐患，实现从被动应对维修到主动开展运维的转变，利用数字孪生可实时开展设备状态监测与故障预测，系统将齿轮箱振动数据、发电机温度数据和叶片应力数据进行采集，采用机器学习算法打造故障预测模型，要是模型预测某

部件剩余寿命低于所设阈值，即刻生成维护工单，同时举荐最恰当的维修方案^[3]。

远程运维与虚拟调试得到数字孪生的支持，技术人员可借助远程方式访问设备数字孪生模型，实时掌握设备运行参数、开展故障检测与程序调试工作，无需亲身抵达现场，在工业机器人维护这个工作里，工程师可在虚拟环境去模拟机器人的运动轨迹，审定程序修改的可行性，防止现场调试引发的停机局面，还可运用数字孪生对装备的性能进行优化与升级，对设备历史运行数据展开分析，评价不同工况下产能表现及能耗效率，给出工艺参数优化建议及设备改造具体解决办法。

4 数字孪生应用面临的挑战与对策

4.1 面临的挑战

4.1.1 数据采集与融合难题

处于智能装备制造场景当中，数据来源呈现高度分散的特性，在装备运行这个阶段，诸如传感器、PLC控制器、工业机器人等设备能产生结构化数据，像运行参数、控制指令，也需将设计图纸、仿真模型等非结构化数据纳入管理范畴，各个设备厂商的数据接口协议差异明显，Modbus、OPC UA、Profinet等通信协议一同并存，造成数据的兼容性能差。

4.1.2 模型构建与优化困难

要构建高精度数字孪生模型，得兼顾物理实体几何结构、材料属性、动力学特性等维度的多元信息，就大型工程机械装备而言，其结构复杂多样，存在着流体、机械、电气等多学科耦合关系，传统建模方案难以实现精度要求，模型构建进程消耗大量计算资源，诸如三维建模、有限元分析这类操作，对硬件配置的要求极为苛刻，受成本压力所困，中小企业难以实施相关工作，物理实体运转时会呈现性能衰退、结构改变等动态变化，为与实体保持一致，模型得实时更新，但现有模型更新机制大多依赖人工实施干预，自动操作水平欠佳，导致模型与实际工况出现滞后，无法精准呈现装备当前状态。

4.1.3 数据安全与隐私保护

数字孪生系统对装备全生命周期数据加以集成，涉及到设计图纸、工艺参数、用户操作习惯等敏感数据，在数据传输的阶段里，工业互联网环境里，网络攻击(像DDoS攻击、数据窃取等情况)也许会让核心数据泄露。

4.1.4 标准与规范缺失

就目前而言，数字孪生技术无统一行业标准，造成不同企业、不同系统的互操作性难以达成，以数据层面的角度观，数据格式和编码规则依旧未统一，就像有部分企业采用JSON格式对设备状态数据进行存储，另外一部分企业采用XML格式，拉高了数据共享的难度水平，从模型构建的角度而言，建模流程、精度评估及模型接口等未具备标准化规范，让不同厂商研制的数字孪生模型无法达成相互兼容^[4]。

4.2 应对策略

4.2.1 完善数据采集与处理体系

凭借“边缘计算+5G”技术架构优化数据采集的效能,在装备实地安置边缘计算节点,实时针对传感器原始数据进行过滤、净化和初步研判,减少非有效数据的传输;凭借5G网络体现出的低时延、高带宽特性,保障关键数据迅速上传到云端平台成为现实。

4.2.2 优化模型构建与管理

开发智能建模工具,用人工智能及机器学习技术达成模型的自动化组建,用深度学习算法对装备历史运行数据进行解析,自动衍生动力学模型;用生成式对抗网络(GAN)对三维模型细节实施优化,减少人工开展建模的工作量,构建模型全生命周期的管理机制,利用数据驱动实现模型的动态更迭。要是物理实体运行数据与模型预测结果出现了偏差,系统自行触发模型校正流程,采用最新数据对模型参数做优化,推行轻量化模型相关技术,采用模型压缩、简化算法的手段减少模型计算复杂度,令其适配不同性能规格的硬件设备,弱化企业应用的门槛约束。

4.2.3 加强数据安全防护

搭建起“端-边-云”协同的数据安全防护架构,就终端设备层面,借助可信执行环境(TEE)技术保障传感器数据采集的安全;在边缘计算节点装设入侵检测系统(IDS)及防火墙,抵御非法的访问行径;云端采用数据加密(像国密算法SM4这样的)、访问控制(实行RBAC角色权限管理)、区块链等技术,保证数据存储及共享安全无虞^[5]。

4.2.4 推动标准与规范建设

行业协会担当牵头角色,联合科研院所、龙头企业一起制定数字孪生技术标准,处在数据标准维度,让数据格式、通信协议及接口规范统一起来,助力OPC UA、MTConnect等通用协议普及应用落地;就模型标准这一方面而言,出台

建模流程规范、模型精度评估指标及接口相关标准,提高模型互操作的水平。已发布《数字孪生应用白皮书》的是中国智能制造系统解决方案供应商联盟,为行业的发展给予指引,创建数字孪生项目认证体系,利用第三方机构对项目技术合规性及应用效果做评估,促进该行业实现规范化成长,激励企业参与国际标准的编订,抬高我国在数字孪生领域的话语地位,加快技术在全球的应用及合作步伐。

5 结论

作为智能装备制造关键支撑的数字孪生技术,在产品的设计、生产制造以及运维服务等诸多环节,呈现出极大的应用潜能,依靠构建物理实体的虚拟映射样板,实现数据实时互换与动态仿验,数字孪生技术能切实增进装备制造的智能化层级,减少装备生产开支,增强企业的竞争潜力。即便当下数字孪生技术在应用时还面临着数据采集、模型构建、安全保护等方面的阻碍,然而随着技术不停歇地发展与完备,于智能装备制造领域,数字孪生会起到更关键的效用,推动制造业迈向高质量发展阶段,应进一步增进数字孪生技术的研究与创举,提升其在智能装备制造中的应用水平,为制造业的转型升级注入源源不断的动力。

参考文献

- [1] 任俊恩.数字孪生技术在智能机械加工制造中的应用[J].装备制造技术,2024,(08):142-144.
- [2] 韦兰花,黄亮.数字孪生技术在智能制造中的应用[J].电子技术,2024,53(04):366-368.
- [3] 江海凡,丁国富,肖通,等.数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用[J].西南交通大学学报,2022,57(06):1386-1394.
- [4] 许可.基于数字孪生的机械加工工艺在智能制造中的应用研究[J].新型工业化,2021,11(05):89-90+93.
- [5] 黄海松,陈启鹏,李宜汀,等.数字孪生技术在智能制造中的发展与应用研究综述[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(05):1-8.

Research on Surface Roughness Control Technology in Silicon Material Processing

Xiaojuan Feng

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

As the core foundation of microelectronic devices and optoelectronic components manufacturing, the surface roughness during the processing of silicon materials directly affects the performance and yield of finished products. To meet the manufacturing requirements of high-performance devices, controlling the microstructure of silicon material processing surfaces has become a key technical step. This article focuses on the roughness issues that arise during the cutting, grinding, polishing, and other processing stages of silicon materials. It systematically summarizes the core factors that affect surface quality, explores the application mechanisms and effects of control paths such as ultra precision machining, chemical mechanical polishing, and laser assisted technology, and compares and analyzes typical process technologies. By constructing a correlation model between roughness control technology and terminal application performance, the balance relationship between control accuracy, processing efficiency, and cost is pointed out, the bottlenecks in the current industrialization process are clarified, and the direction basis for future sustainable development is proposed.

Keywords

silicon materials; Surface roughness; Ultra precision machining; Process optimization; Microscopic morphology control

硅材料加工中的表面粗糙度控制技术研究

冯小娟

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘 要

硅材料作为微电子器件和光电组件制造的核心基础, 其加工过程中的表面粗糙度直接关系到成品性能与产品良率。为实现高性能器件的制造需求, 控制硅材料加工表面的微观形貌成为关键技术环节。本文围绕硅材料在切削、研磨、抛光等加工阶段中出现的粗糙度问题, 系统梳理了影响表面质量的核心因素, 探讨了超精密加工、化学机械抛光、激光辅助技术等控制路径的应用机理与效果, 并对典型工艺技术进行了对比分析。通过构建粗糙度控制技术与终端应用性能的关联模型, 指出控制精度、加工效率与成本之间的平衡关系, 明确了当前产业化过程中存在的瓶颈, 提出了未来可持续发展的方向依据。

关键词

硅材料; 表面粗糙度; 超精密加工; 工艺优化; 微观形貌控制

1 引言

在信息技术和微纳制造技术迅速发展的背景下, 硅材料作为主流半导体基底, 其表面质量控制问题日益成为产业技术升级的关键一环。随着芯片集成度的不断提升和元器件微缩化趋势的加速, 硅片表面的微观粗糙程度对器件性能的影响被显著放大。传统的机械加工方法难以满足高端电子制造对亚微米级表面平整度的严苛要求, 因此研究与开发适用于不同工艺阶段的表面粗糙度控制技术显得尤为必要。本文聚焦于硅材料加工过程中各类物理和化学手段对表面形貌的调控作用, 尝试构建完整的控制策略体系, 为半导体制造

及光学元件加工提供工艺支撑, 同时也为后续相关研究提供理论参考。

2 硅材料加工工艺概述

2.1 硅材料的类型与结构特性

硅材料广泛存在于地壳资源中, 具有良好的化学稳定性、电性能和热导率, 在半导体领域中主要以单晶硅和多晶硅两种形态应用。单晶硅具有完整有序的晶格结构, 其导电性能可通过掺杂调节, 满足芯片制造中的高精度需求。多晶硅由多个晶粒组成, 具有成本低、工艺适应性强的特点, 适用于光伏和一般电子元件领域。晶格排列对加工性能和表面形貌形成具有决定性影响, 材料纯度、缺陷分布和晶向控制在加工工艺中发挥着重要作用。

【作者简介】冯小娟(1992-), 女, 中国湖北孝感人, 硕士, 工程师, 从事硅单晶生长, 硅材料加工研究。

2.2 主流加工技术及其发展趋势

当前硅材料加工主要依赖于切削、研磨、抛光和化学处理等多种工艺组合,以实现高平整度与低损伤率的技术目标。机械切削适用于硅锭初步整形,研磨通过磨粒作用实现表面修整,抛光则在亚微米尺度上进一步降低表面粗糙度。近年来,化学机械抛光技术成为实现高端硅片制造的核心环节,结合化学反应与机械力的双重效应,有效控制材料去除速率与表面残余应力。激光辅助加工和等离子体辅助技术在提升加工精度和热损伤控制方面显示出潜力,加工工艺正向智能化、无损化和高集成方向演进,推动整体制造链条的协同优化。

2.3 加工过程中表面缺陷的形成机理

硅材料在机械和化学加工过程中易产生微裂纹、划痕、残余应力与非晶层等多种表面缺陷,这些微观结构的形成受材料本征特性与工艺参数共同影响。切削时刀具与材料间的摩擦与热效应易在晶体界面引发位错滑移和晶格畸变,从而在加工面形成应变带。研磨过程若磨粒分布不均或施力不稳,易导致表面产生凹陷和颗粒嵌入现象。

3 硅材料加工中影响表面粗糙度的关键因素

3.1 机械切削参数对表面形貌的影响

在硅材料的初步加工阶段,切削速度、进给速率、刀具材料与几何形状等参数直接决定表面形成过程中的微观变形特征。较高的切削速度有助于减少裂纹扩展区,但可能增加热积累引发表面熔融层形成。进给量过大会加剧材料去除时的脆性断裂行为,进而导致粗糙度增大。刀具刃口半径和材料硬度的匹配程度决定了切削路径的稳定性,若刀具磨损严重,将出现明显加工痕迹。加工中产生的振动也会在硅片表面留下周期性波纹,加重微观凹凸结构的形成。合理调控切削参数是提升初始表面质量的基础,对后续精加工阶段粗糙度控制具有决定意义。

3.2 化学腐蚀与等离子体处理的作用机制

化学腐蚀和等离子体处理在硅材料表面处理工艺中被广泛应用,用于实现表面去除、钝化或结构改性。酸碱性溶液通过对硅氧键的选择性破坏实现材料去除,反应速率受温度、浓度和反应时间影响较大。等离子体处理技术通过高能粒子轰击方式实现非接触式微纳尺度修整,其等离子体密度、气体种类及施加功率决定了蚀刻效果与表面完整性。处理过程中若未精确控制反应区域,将导致表面产生台阶、微坑或重新沉积物,对粗糙度指标造成不利影响。

3.3 环境因素与加工设备稳定性的耦合作用

加工环境的温度、湿度与洁净度对硅材料表面质量产生持续影响,若温度波动大,可能引发材料热胀冷缩导致微观应力不均,进而诱发表面起伏。湿度对静电吸附和化学反应速率具有调节作用,在湿度较高环境中,腐蚀反应加剧可能导致局部过蚀现象。加工设备的稳定性直接决定了加工轨

迹与刀具行为的可控性,若存在微小偏移或震动,将导致刀具路径重复误差,引发加工痕迹累积。高速旋转系统的轴心偏移或支撑系统的位移漂移均会在微观尺度上放大粗糙度波动。只有确保加工环境的稳定性与设备精度,才能有效保证硅材料表面粗糙度处于可控范围内。

4 硅材料加工中表面粗糙度控制的技术路径

4.1 超精密加工技术的应用与演化

超精密加工技术以亚微米级控制精度实现硅材料表面质量提升,纳米级刀具进给系统和高稳定性主轴驱动系统可将表面粗糙度控制在 2nm 以内。在超精密车削中,采用金刚石刀具的切削深度控制在 100nm 以内,配合 20nm 级进给系统,可显著降低表面机械损伤区域。飞秒激光辅助超精密切削加工中,局部热影响层厚度小于 200nm,有效避免了传统加工中热裂纹的生成。超精密抛光技术结合微米级磨粒和压力可控液体抛光浆料,可将多晶硅片的粗糙度由 18nm 降低至 6nm。在纳米压痕测试下,通过高稳定性空气浮动平台系统与高频反馈补偿系统联动,系统整体震动值可控制在 0.05 μ m 以内,显著提升了加工过程的表面平整性一致性。

4.2 基于工艺参数优化的粗糙度调控方法

硅材料加工中切削力、转速、磨粒粒径和载荷强度对表面粗糙度呈非线性耦合关系,切削速度在 1800rpm 至 2800rpm 区间变化时,粗糙度平均值可从 9.8nm 降至 4.2nm。在化学机械抛光中,磨盘转速由 30rpm 调整至 60rpm,同时浆液流量从 150ml/min 提升至 250ml/min,抛光速率提高 27%,表面残余颗粒密度下降 34%。刀具后角在 10° 至 20° 之间时,材料去除量与微裂纹产生概率呈反向关系,控制角度在 15° 以内时粗糙度可稳定在 3nm 以下。酸碱比例调整为 $H_2O_2 : NH_4OH : H_2O = 1 : 1 : 5$ 时,反应均匀性最高,腐蚀深度波动小于 50nm,有效抑制局部过蚀现象。参数协同优化下,整体表面粗糙度提升效果优于单一变量控制,对系统性控制策略提出更高要求。

4.3 先进测量手段在反馈控制中的作用

表面粗糙度控制依赖于高精度测量手段构建闭环反馈机制,原子力显微镜具备分辨率小于 1nm 的探针扫描能力,可对加工表面轮廓实现三维建模。激光干涉仪测量重复精度达到 0.5nm,在硅片旋转抛光过程中的实时位移监测中,配合位移补偿机制可将局部波动控制在 2nm 以内。白光干涉技术在检测面积为 500 μ m $\times$ 500 μ m 的区域中,可实现 5fps 的扫描频率,满足在线检测速度要求。表面轮廓仪在加工后粗糙度 Ra 值分析中可准确识别 1 μ m 以下波纹周期差异,配合自适应修正模型对刀具路径调整后粗糙度平均降低幅度达到 38%。测量系统与加工系统之间实现纳秒级信号传输链路,构建加工过程中的闭环反馈控制平台,有效支撑高一致性硅材料表面处理需求,详见表 1。

表 1 某企业硅材料表面粗糙度控制技术应用效果分析

技术路径	处理后 Ra 值 (nm)	加工深度 控制 (nm/mm)	误差或波动控制
超精密车削	2	100nm	0.05μm
飞秒激光辅助加工	5.7	0.1mm	20μm 裂纹
超精密抛光	6	微米级	非晶层 80nm
参数优化控制	4.2	NA	粗糙度下降 58%
CMP 参数优化	2.5	NA	颗粒密度下降 34%
等离子体反馈控制	3.1	NA	粗糙度下降 38%

5 硅材料加工中典型加工技术对比分析

5.1 机械抛光与化学机械抛光的效率与精度评估

机械抛光通过磨料与工件表面之间的机械接触作用实现材料去除，其加工效率高，但难以实现纳米级表面平整度。在硅片厚度为 775μm 的条件下，机械抛光每分钟去除厚度约为 0.5μm，表面粗糙度 Ra 在 12nm 至 18nm 之间波动，表层残余应力区平均深度超过 300nm。化学机械抛光融合机械作用与化学反应，通过反应层弱化后再配合微粒去除，实现材料的均匀加工。抛光速率维持在 0.25μm/min 时，表面粗糙度可控制在 2.5nm 以内，非晶层深度降低至 80nm，加工后的反射率提升了 15%。两种方式在产能目标上差距不大，但化学机械抛光在表面光洁度、形貌一致性和应力控制方面表现优越，更适配高端器件对界面质量的严格要求。

5.2 激光辅助加工对微观粗糙度的改善效能

激光辅助加工通过瞬时高能束流在局部区域形成热软化带，有效降低材料硬脆响应，提升加工界面完整性。在切削深度控制在 0.1mm 时，CO₂ 激光功率提升至 180W，粗糙度 Ra 值从 11.3nm 降至 5.7nm，加工裂纹带宽度由 60μm 减小至 20μm。采用脉冲激光调制方式进行切削辅助，加热区宽度精确至 400μm，热影响层厚度不超过 100nm，有效避免晶格层间热崩解。与传统冷加工相比，激光辅助方式在 45min 加工周期内可实现单位面积粗糙度下降比率达到 48%，表面应力集中度降低约 32%，切削边缘形貌更加规整。对于形状复杂或微结构加工任务，该技术显示出更高的材料兼容性和加工一致性。

5.3 低温等离子体辅助加工的表面效果特性分析

低温等离子体技术通过高能离子轰击与反应气体作用，实现非接触式的材料表面活化与微结构修整，在硅材料粗糙度控制中具有重要意义。在处理压力维持在 20Pa、功率 120W 条件下，连续处理 8 分钟可将表面 Ra 值从 7.6nm 降至 3.1nm，表面氧化层厚度稳定控制在 6nm 以内。通过引入 CF₄ 与 O₂ 混合气体，刻蚀选择性显著增强，表面结构边缘过渡区宽度控制在 1.5μm 内，表面电荷均匀度提高 17%。等离子体温度低于 80℃ 时能有效避免热应力引发的微观变形，保证晶格稳定性。该技术在抛光后作为精修工艺可将边界粗糙度进一步压缩至 2nm 以下，对器件光学性能和界面

封装的提升具有显著促进作用，详见表 2。

表 2 某企业典型加工技术对比分析

加工技术	处理后 Ra 值 (nm)	材料去 除速率 (μm/min)	热影响 层厚度 (nm)	表面提升指标
机械抛光	12	0.5	300+	--
化学机械抛光	2.5	0.25	80	反射率提升 15%
激光辅助加工	5.7	NA	100	应力集中度降低 32%
低温等离子体 处理	3.1	NA	<80	界面粗糙度压缩至 2nm

6 硅材料表面粗糙度控制技术的集成价值与工程意义分析

硅材料表面粗糙度控制技术在微电子、光电、传感与高精密元件制造等领域中具有重要工程支撑作用。通过多路径协同集成，包括超精密切削、化学机械抛光、激光辅助加工及等离子体精修等手段，硅片表面粗糙度可稳定控制在 2nm 以内，显著提升材料界面性能与器件封装可靠性。在高端 MEMS 器件与太阳能电池组件中，粗糙度的微小波动会引发载流子散射增加、接触电阻上升及光吸收效率下降，直接制约转换效率与使用寿命。通过构建加工—检测—反馈一体化流程，可在不增加成本的前提下实现批量工艺一致性，保障大尺寸硅材料在精密制造链条中的功能稳定性和加工经济性。

7 结语

硅材料表面粗糙度控制已成为高精密制造领域中不可或缺的核心技术，贯穿于硅片从初加工到精修的各个阶段。通过对加工工艺、关键影响因素与技术路径的系统梳理，可为实现纳米级表面质量提供清晰的技术支撑。在复杂多变的加工环境中，粗糙度不仅反映了加工精度，更体现出系统协同能力与工艺稳定水平。将超精密加工、参数优化与高分辨率测量系统有机整合，能够有效突破传统技术在一致性与适应性方面的瓶颈。未来硅材料加工的发展将更加依赖粗糙度控制技术与整体制造平台的深度融合，为微电子器件、高端传感系统及光学组件提供坚实的制造基础。

参考文献

[1] 于瑞江.单晶硅固结磨粒套料加工系统稳定性及表面质量研究[D].导师：李淑娟.西安理工大学,2024.

[2] 侯进,包甄珍,韩奎国.产业技术发展方向专利导航研究——以高性能材料产业为例[J].中国发明与专利,2023,20(05):31-36+46.

[3] 王生.单晶硅双锥度自由曲面镜的超精密磨削加工关键技术研究[D].导师：赵清亮,郭兵.哈尔滨工业大学,2022.

[4] 郭兵健,刘小磐,徐一俊,黄笑容,吴晓峰,周玲,何国君,蒋委达,梁忠明.浙江中晶科技股份有限公司,单晶硅材料高效绿色加工工艺和全自动加工线的研发及应用[Z].项目立项编号:2018C01076.鉴定单位:浙江省科技厅.鉴定日期:2022-01-01.

Safety management of storage and transportation of hazardous chemicals in chemical enterprises

Jiakui Ding¹ Xian Qing²

1. Sichuan Guotai Min'an Safety and Environmental Protection Technology Service Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

2. Sichuan Liang Safety Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Chemical enterprises are extensively involved in the production and operation of various hazardous chemicals, and their storage and transportation processes are directly related to personnel safety, environmental protection, and social stability. Due to the flammable, explosive, corrosive, and reactive nature of hazardous chemicals, any oversight in management can easily lead to safety accidents with serious consequences. Therefore, strengthening the safety management of hazardous chemicals and establishing scientific storage norms and transportation mechanisms are crucial for ensuring the inherent safety of chemical enterprises. This article focuses on the risk characteristics of hazardous chemicals, systematically analyzes key points in the construction of storage facilities, control of transportation processes, implementation of institutional systems, and whole-process supervision, and proposes optimization suggestions, with the aim of improving the management level of hazardous chemicals in chemical enterprises, reducing safety hazards, and achieving sustainable and safe development.

Keywords

hazardous chemicals; chemical enterprises; safety management; storage control; transportation risks

化工企业危险化学品存储与运输安全管理

丁嘉奎¹ 卿闲²

1. 四川国泰民安安全环保技术服务有限公司, 中国·四川成都 610000

2. 四川力昂安全技术有限公司, 中国·四川成都 610000

摘 要

化工企业在生产与运营过程中广泛涉及各类危险化学品, 其存储与运输环节直接关系到人员生命安全、环境保护与社会稳定。由于危险化学品具有易燃、易爆、腐蚀性强及反应活泼等特性, 若在管理中存在疏漏, 极易引发安全事故, 带来严重后果。因此, 加强危险化学品的安全管理, 构建科学的存储规范与运输机制, 是保障化工企业本质安全的重要内容。本文围绕危险化学品的风险特性, 系统分析存储设施建设、运输过程控制、制度体系执行及全流程监管等方面的关键要点, 并提出优化建议, 以期提升化工企业危险化学品管理水平, 减少安全隐患, 实现可持续安全发展。

关键词

危险化学品; 化工企业; 安全管理; 存储控制; 运输风险

1 引言

随着现代化工产业规模的持续扩大和生产技术的不断进步, 危险化学品的使用与流通日益频繁, 其安全管理问题逐渐成为制约行业健康发展的关键因素。化工企业在面对危险化学品管理时, 常常面临着复杂的物质特性、严苛的技术要求和多变的运输环境, 这对其安全管理能力提出更高要求。尤其在存储与运输两个环节中, 若监管不力、制度不全或操作不当, 极易引发火灾、爆炸、中毒等严重事故, 不仅

造成财产损失, 还会威胁公众生命健康与生态安全。基于此, 亟需从系统性角度出发, 构建全流程、闭环化的安全管理制度, 推动危险化学品管理的规范化、精细化和信息化发展, 为化工企业安全运营提供有力保障。

2 危险化学品的种类特性及风险识别

2.1 危险化学品的种类特性

危险化学品包括易燃物品、爆炸品、毒害品、腐蚀品、放射性物质等多个类别, 不同类型具有不同的物理化学性质和潜在危害。在物理特性方面, 部分危险化学品具有低闪点、高挥发性或强氧化性, 容易在空气中形成爆炸性混合物或自燃现象。在化学特性方面, 一些物质与水反应剧烈释放大量

【作者简介】丁嘉奎(1977-), 男, 中国四川绵阳人, 本科, 高级工程师, 从事安全技术服务及安全评价研究。

热量或有毒气体,甚至引发连锁反应。毒性方面,一些危险化学品可通过呼吸道、消化道或皮肤接触引发急性中毒或慢性损伤,对中枢神经、肝肾功能和造血系统造成严重影响。这些复杂特性决定了危险化学品在生产、储存、运输和使用过程中必须严格控制环境条件,防止交叉反应或事故升级,确保操作过程的安全可控。

2.2 危险化学品的风险识别

危险化学品的风险识别是实现安全管理的前提,主要通过对其理化性质、作业环境和操作过程的系统分析完成。风险识别包括对化学品爆炸性、易燃性、毒害性、腐蚀性等危害属性的认定,同时结合作业人员暴露时间、接触方式及周边环境特征,评估潜在事故发生的可能性和后果严重程度。在识别过程中,需结合物料安全技术说明书(MSDS)、危险化学品分类标签以及实际应用场景,建立动态风险清单。通过对化学反应条件、泄漏扩散特性和接触暴露路径的细致分析,可揭示隐性风险,预判事故链条,提升事故防范能力和应急响应效率,强化管理人员和操作人员的风险感知与行为控制能力,从而实现对危险化学品全流程的有效安全控制^[1]。

3 危险化学品存储环节的安全控制要点

3.1 存储环境的安全监控与维护措施

危险化学品的储存环境对其稳定性具有显著影响,必须通过科学监控手段保持其在安全范围内。温湿度控制系统应全天候运行,防止高温或潮湿条件下物料发生分解、挥发或吸湿反应。光照强度与通风速率需根据化学品特性设定,并定期检测与调校,确保环境参数不偏离设定值。监控系统应覆盖全仓关键点位,具备实时数据传输与异常报警功能,便于安全管理人员及时干预。日常维护中应定期清洁通风口、更换过滤材料、检查电气线路与消防设备,确保其持续处于良好工作状态。储区进出通道应设专人巡查制度,杜绝无关人员随意出入。

3.2 危险化学品分类储存与隔离制度落实

对不同危险特性的化学品实行分类储存与物理隔离,是防范连锁反应和交叉污染的关键手段。依据危险性类别与相容性原则,需在仓储区域内明确划分爆炸品区、易燃液体区、毒害品区等独立存储单元,并设置醒目的警示标识。相互反应性强的化学品不得同库混放,应采用单独仓间或专属柜体进行分隔,必要时辅以阻燃材料隔断墙体。高毒高腐蚀性物品应集中存放并加装安全围堤与排液槽,避免泄漏外溢。各类物品的堆码高度与间距需严格执行规范,避免因压迫或跌落引发破损。

4 危险化学品运输过程的风险防范措施

4.1 运输方式的选择与技术保障要求

危险化学品运输需根据其物理形态、反应特性与危险等级选择合适的运输方式,并配置相应的技术防护手段。液

体与气体类化学品多采用专用槽罐车、压力容器运输,固体类则通过密封包装配合厢式车辆进行运送。对于易燃易爆品,宜选用具备耐高温、防静电与自动灭火功能的运输装备。运输过程中需设置实时监控系統,用于追踪车辆位置、温度压力变化及周边环境动态。对于跨省长距离运输,应建立运输计划报备制度,强化行前检验与技术审核环节,确保所有设备处于良好工况。

4.2 运输车辆与容器的安全性能管理

运输危险化学品的车辆和容器必须具备专业技术性能与高度稳定性,以确保承运过程中的安全可控。运输车辆需取得道路危险货物运输资质,安装具有爆燃抑制、防滑稳定、液位报警与视频监控等系统装置,保障驾驶与装载状态的全程可视与可控。容器的选用应满足抗腐蚀、抗压耐震、防泄漏等要求,定期开展强度测试、密封性检测与残留物清除操作,避免因老化、损坏或杂质积聚而诱发事故。装卸过程中需严格控制充装量与压力,避免超限运行造成系统过载。运输前后应做好车辆与容器的清洗与除污工作,杜绝交叉污染与化学反应可能。规范的设备维护制度与科学的使用流程,有助于全面提升运输载体的安全保障能力^[2]。

5 安全管理制度体系的构建与执行

5.1 岗位职责划分与操作规程制定

化工企业在管理危险化学品时,应通过系统化的岗位职责划分与规范化操作规程制定,形成清晰有序的责任体系。企业内部需建立从高层领导到基层操作人员的分层级安全职责矩阵,明确每个岗位在储运环节中的职责边界、操作权限与监督内容。操作规程应覆盖危险化学品的接收、分类、储存、装卸、运输及突发事件处置等各环节,并以图文并茂的方式编制成册,便于员工掌握与执行。规程制定需依托标准化体系建设,结合实际工作场景与历史事故教训进行动态修订。通过设立安全责任制度、明确考核机制和奖惩规则,保障岗位职责的刚性执行。岗位职责明晰与操作规范完整是确保全员参与、全流程防控的制度基石。

5.2 日常检查与隐患排查制度落实

危险化学品管理过程中,日常检查与隐患排查制度是发现问题、消除隐患、防止事故的重要手段。检查制度应涵盖储罐设备、管线阀门、电力系统、通风照明、防火设施等关键部位,建立定人定岗定期的巡查机制,填写检查记录与整改闭环台账。隐患排查应由企业组织安全生产管理小组牵头开展,结合岗位人员反馈、监测数据分析与第三方专业评估,系统识别操作失误、设备老化、制度缺失等潜在风险。发现问题后应及时制定整改措施,落实责任人及完成期限,并通过复查验收确保问题彻底解决。对重复性问题或严重隐患要开展事故预警分析并提级处理。通过制度化、常态化的检查机制,可提前干预风险点,推动安全管理由被动反应向主动预控转变^[3]。

5.3 人员培训与安全意识持续强化

危险化学品管理的实效依赖于人员素质与安全意识的全面提升,必须构建系统的培训机制与长效的教育体系。企业应制定年度培训计划,分层级开展新员工岗前培训、岗位技能提升培训及特殊工种持证培训,确保所有人员熟悉化学品特性、应急流程与操作规范。培训内容应结合典型事故案例、模拟演练和现场教学,提升员工风险识别能力与应急处置反应。安全文化建设应融入日常管理,借助宣传栏、标语口号、安全日活动等形式营造浓厚氛围,引导员工树立安全至上的理念。管理层应以身作则,推动安全理念由上至下传导并转化为具体行为。通过持续不断的培训与教育,逐步形成人人懂安全、事事讲规范、处处防风险的良好管理生态。

6 危险化学品全流程安全监管的优化路径

6.1 信息化平台建设提升动态监管能力

构建覆盖危险化学品采购、储存、运输、使用到处置全过程的信息化监管平台,是提升安全管理效能的关键举措。平台应集成实时监测、数据分析、预警推送、行为识别与可视化展示等功能,实现对危险化学品动态状态的全景感知。通过物联网感知设备获取仓储环境参数、运输轨迹与设备运行状态,结合大数据算法判断风险等级,及时预警异常波动或违规操作。平台还应支持多角色登录与权限配置,保障管理层、操作员与监管机构的信息同步与决策一致。系统数据应定期备份与加密管理,确保信息完整性与安全性。建立信息流、业务流与监管流融合的运行架构,可有效消除管理盲区,推动企业从静态台账向动态实景转型,实现全过程、全天候、全节点的精细化监管。

6.2 联动机制构建促进行业协同治理

推动危险化学品安全管理从企业个体管控向多主体协同治理转变,需要构建部门联动、区域互通与行业共管的综合机制。在政府层面,应设立专责协调机构,统筹应急管理、环保、交通、市场监管等多部门资源,建立联合执法、信息互通与事件联处机制,提升监管响应效率。在企业层面,应推动上下游单位之间建立风险信息共享机制、事故应对协作协议与互查互帮制度,实现供应链协同防控。区域管理可探索建立危险品园区统一调度平台和共享应急资源库,增强地理邻近企业之间的联防联控能力。行业协会可发挥技术支持与经验传播作用,组织标准研讨、事故复盘与培训推广活动,

促进行业自律与共治氛围。通过多元力量合力构建联动机制,形成系统完整、反应灵敏、执行有力的监管协作网络^[4]。

6.3 法规制度完善推动企业内控提升

健全的法律制度是强化危险化学品安全管理的制度保障,有效法规应涵盖全生命周期的风险控制要求,并明确企业主体责任与监管主体职责。制度建设应注重可操作性与执行力,细化从立项审批、储运许可、设施设计、安全评价到应急预案备案等全流程规定,构建闭环式合规体系。在企业内部,应依据国家与地方标准修订操作规程、安全规范与岗位管理制度,建立符合实际的内控制度体系。对违法违规行为应设立量化惩戒机制,将安全表现与信贷评级、政府补贴、项目审批挂钩,提升企业自觉守法的积极性。鼓励企业参与标准制定与技术导则修订,推动法规内容贴近实践。通过法制建设与企业内控同步推进,打造权责清晰、制度完备、执行有力的本质安全治理结构,为危险化学品安全管理提供坚实制度支撑^[5]。

7 结语

危险化学品的存储与运输安全管理是化工企业安全体系中的核心环节,关乎员工生命安全、社会公共安全与生态环境保护。面对化学品种类繁多、风险因素复杂的现实,必须以系统化视角构建从风险识别、规范储存、安全运输到制度执行与信息化监管的全流程管理体系。通过完善技术设施、强化人员培训、压实岗位责任、推动协同治理与法规落实,可有效提升企业的安全防控能力,降低事故发生概率,实现安全生产与绿色发展的协同共进,为化工行业高质量发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 田小慧.化工企业安全管理体系一体化建设路径研究[J].现代职业安全,2025,(07):32-34.
- [2] 徐晓兰,薛苗,赵丹丹,谷乐,朱仰磊.石油化工企业安全生产风险控制的关键技术[J].石化技术,2025,32(07):19-21.
- [3] 刘仲平,刘坤.化工企业安全文化建设对生产安全绩效的影响研究[J].化工管理,2025,(19):19-22.
- [4] 党博.化工企业安全风险智能化管控平台的功能构建[J].化工管理,2025,(19):76-78+100.
- [5] 朱金子,苏敏娟.化工安全管理标准与事故应急处置策略[J].大众标准化,2025,(12):7-9.

Design and control of a ground simulator for terminal subgrade

Bing Feng Yanwen Lu Shengpeng Wang Jizhuang Fan

Harbin Institute of Technology, Robot Research Institute, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

Abstract

This paper designs a final-stage ground-based chiral rotation simulator for the microgravity environment in outer space. Through modeling and computational methods, the study conducts comprehensive simulation of the final stage, structural design optimization, zero-gravity levitation, and zero-friction rotation system design. Based on modeling results and issues identified during mass center and inertia matching, we developed a robust simulator structure, a simplified yet stable rotational axis system, and an adjustable pitch angle mechanism with precision control capabilities. The equipment has been successfully implemented in field applications, meeting operational requirements in both rotational accuracy and control performance.

Keywords

zero gravity; zero friction; chapter angle adjustment; Creo modeling; software control

末子级消旋地面模拟器的设计与控制研究

冯冰 鲁延文 汪胜鹏 樊继壮

哈尔滨工业大学机器人研究所, 中国 · 黑龙江 哈尔滨 150080

摘 要

本文设计了一种外太空失重环境下的末子级地面消旋模拟器结构, 采用建模和计算对末子级进行整体模拟、结构设计、零重力气浮和零摩擦旋转设计。根据建模结果以及末子级质心、惯量设计匹配中出现的问题, 设计出了强度可靠的模拟器结构、简洁稳定的旋转轴系结构和可调节倾角精度的章动角调节结构。本文设备在现场已得到了实际应用, 在旋转精度和控制能力方面均达到了使用要求。

关键词

零重力; 零摩擦; 章动角调节; Creo建模; 软件控制

1 引言

根据末子级消旋试验的需求, 利用大理石气浮台, 将末子级缩比模型放置于气浮装置上, 末子级缩比模型上配置消旋载荷, 用于验证消旋载荷对末子级的消旋能力, 系统由气浮装置、末子级缩比模型、消旋载荷组成。

末子级缩比模型以某一旋转轴, 以一定的角速度旋转, 模拟末子级在轨旋转特性, 消旋载荷根据缩比模型的质量特性及附着位置进行消旋控制, 消旋到一定程度后, 将相应的旋转速度作为机械臂抓捕操控半物理试验系统的输入参数, 继而可开展后续的机械臂维修救援操作试验。

2 末子级消旋装置结构设计

2.1 气浮单元的设计

气浮单元是整个气浮试验装的核心组件, 原理上采用空气悬浮结构。气浮单元整体尺寸: 长 * 宽 * 高 = 1675mm * 1675mm * 1175mm, 气浮单元质量: 396kg。

本实验装置设计上选用的是气体作润滑剂的滑动轴承。此气足空气轴承是指借助于轴承滑动副表面之间形成的压力空气膜将负荷支撑起来的轴承, 工作时滑动副表面之间完全由气膜分开。空气轴承属于滑动轴承中之流体滑动轴承, 工作时为流体润滑, 其润滑介质为空气。

空气轴承的压力空气膜是由外部的压缩空气通过节流器导入滑动副表面之间形成, 如图所示。空气静压轴承需要洁净的外部气源。^[1]

1) 空气轴承特点

① 摩阻极低

由于气体粘度比液体低得多, 在室温下空气粘度仅为 10 号机械油的五千分之一, 而轴承的摩阻与粘度成正比, 所以气体轴承的摩阻比液体润滑轴承低。

② 适用速度范围大

气体轴承的摩阻低, 温升低, 在转速高达 5 万转 / 分时, 其温升不超过 20~30℃, 转速甚至有高达 130 万转 / 分的。气体静压轴承还能用于极低的速度, 甚至零速。

③ 适用温度范围广

气体能在极大的温度范围内保持气态, 其粘度受温度

【作者简介】冯冰 (1991-), 男, 中国山东高塘人, 本科, 工程师, 从事机械工程研究。

影响很小(温度升高时粘度还稍有增加,如温度从20℃升至100℃,空气粘度增加23%),因此,气体轴承的适用温度范围可达-265℃到1650℃。

④ 承载能力低

动压轴承的承载能力与粘度成正比,气体动压轴承的承载能力只有相同尺寸液体动压轴承的千分之几。由于气体的可压缩性,气体动压轴承的承载能力有极限值,一般单位投影面积上的载荷只能加到0.36兆帕。

⑤ 加工精度要求高

为提高气体轴承的承载能力和气膜刚度,通常采用比液体润滑轴承小的轴承间隙(小于0.015毫米),需要相应地提高零件精度^[2]。

2) 气浮计算

拟选择气浮滑块足型号: #200, 额定工作压力0.4Mpa, 排气量6L/min, 可悬浮最大负载200kg, 气膜厚度8μm。四组气浮足最大可悬浮800kg, 模拟器质量396kg, 满足试验要求。

气瓶选型: 高强度碳纤维复合气瓶, 容积12L, 工作压力30Mpa, 气瓶尺寸: 直径195mm, 长度595mm, 质量6.5kg。

根据气足排气量及气瓶压强、容积计算得, 单个气瓶给单个气足供气, 在额定0.4Mpa工作压力下, 气浮单元工作时长: 150min, 大于2小时。满足工作时长要求。

3) 结构质量、惯量及轴承摩擦力计算

气浮单元整体框架采用钢结构, 内部零部件采用铝合金材质整体质量约396kg(不包含安装螺钉及轴承等微小零部件)

气浮单元惯量如下(后期可选择配平质量块对气浮单元进行惯量匹配):

- 1、载荷舱绕 Xh 轴的转动惯量: $J_{wx}=98\text{kg} \cdot \text{m}^2$;
- 2、载荷舱绕 Yh 轴的转动惯量: $J_{wy}=114\text{kg} \cdot \text{m}^2$;
- 3、载荷舱绕 Zh 轴的转动惯量: $J_{wz}=119\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

本气浮单元中空轴采用气浮轴承, 摩擦系数取

值0.00001, 气浮单元自重396kg, 单元悬浮与大理石台面理论摩擦力为0。

2.2 旋转驱动单元的设计

旋转单元位于整个装置的中心正上方, 主要由电机、减速机、气缸、直线轴承、接触法兰和一对啮合斜齿轮组成, 工作时减速电机驱动齿轮啮合, 带动接触法兰与气浮装置一同旋转, 当达到一定转速时气缸收缩接触法兰与气浮装置脱离, 完成末子级缩放模拟件自旋转。

本气浮试验装置中轴处设计有转速反馈传感器, 传感器动盘与旋转万向轴承座连接, 静盘与中空固定走线轴连接。动盘旋转, 静盘通过光栅读取动盘转速信号, 工作中可实时反馈气浮试验装置消转速^[3]。

3 控制系统设计方案

3.1 控制系统架构

在本项目的试验装置中, 控制系统拟采用分散式控制

结构, 如图1所示, 并结合一台高性能工业控制计算机, 以实现更高效的设备控制和数据处理。这种架构将控制系统分为多个相对独立的子系统, 每个控制单元负责不同的功能模块, 通过通讯方式进行数据交换和协调, 从而降低系统的复杂性, 提高系统的可靠性。

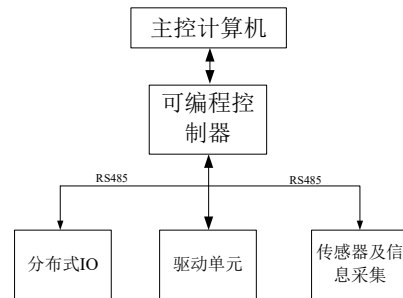


图1 控制系统结构框

高性能工业控制计算机主要负责设备的人机交互和数据处理, 实现以下功能:

①试验信息的采集显示: 通过连接传感器和数据采集模块, 实时采集试验数据并在计算机界面上显示。

②数据分析: 对采集到的数据进行分析处理, 提取关键信息并进行计算。

③数据存储: 将试验数据存储在计算机硬盘或数据库中, 以便后续查询和分析。

④数据打印: 将试验结果以报告或图表形式打印输出, 方便用户查阅和记录。

通过引入高性能工业控制计算机, 整个试验装置的控制系统变得更加灵活和智能化, 同时提高了数据处理的效率和准确性。计算机与其他控制单元之间通过通讯方式进行数据交换, 实现了各个功能模块之间的协同工作, 为试验装置的稳定运行和数据处理提供了有力支持^[4]。

3.2 控制系统功能

控制系统的整体硬件结构组成。首先在测控系统硬件选型上, 选用一台工业PC计算机作为设备监控、操作及数据处理核心系统, 其它硬件选型包括PLC及其相应模块, 驱动电机、电机驱动器、角度传感器、光电开关、无线通讯模块、移动电源等, 在保证满足技术要求性能指标的基础上, 均采用性能十分成熟产品, 以保证设备工作的可靠性;

在这个系统中, PLC起到了控制中枢的作用, 根据预定的程序控制各个执行元件的工作状态。电磁阀和驱动系统用于控制执行元件的运动, 实现设备的启停和运行。编码器和传感器则用于采集设备运行时的状态信息, 反馈给PLC进行实时监控和控制。

PC端作为上位机, 通过RS485与PLC进行数据交互, 实现对设备状态的监控和处理。同时, PC端也可以通过无线通讯与外部电气元件进行交互, 实现更加复杂的控制功能。

整个系统大致的运行流程如下:

①上位机人机交互界面设置运动参数，发送启动命令给 PLC；

② PLC 根据预定程序开始运行，通过无线模块发送控制命令给气足的控制电磁阀，使其气足充气，达到模拟体的气浮效果；

③ PLC 发送控制命令给电气驱动系统，驱动模拟体旋转，待模拟体达到设定的速度后，PLC 发送指令给驱动单元离合单元，使驱动单元与模拟体机构断开机构连接；

④ PLC 通过无线通讯，给模拟体内的控制模块发送指令，使其按照设定的通讯协议连接模拟体上的消 X 载荷控制单元，控制其开始按照设定的方式启动工作；

⑤ PLC 采集模拟体运动过程中编码器的数据，并实时记录模拟体的运动速度和相关传感器的数据^[5]；

⑥设备运行过程中，PC 端程序通过 PLC 对数据进行实时采集和监控及记录处理，并通过无线通讯与外部电气元件进行交互，发现异常及时停止设备运行。

3.3 测控系统的故障及保护措施

1) 测控系统的故障种类

测控系统的故障包括位置、速度伺服控制故障以及测控系统实时运行控制故障等，表 1 给出了测控系统的故障种类。

表 1 测控系统的故障列表

故障名称	描述
自检失败	当设备处于自检运行状态时，未按照自检程序达到预定的效果
电机驱动系统故障	如果伺服电机驱动系统发生故障，系统将被置于“任务退出”状态
速度运动指令超限	主机发出超出运动速度输出限制的控制指令，或有关事件的参数与分析不符，产生此故障并报警。
位置信号超限	如果位置信号超出正常工作范围，运动系统将“任务退出”。
电源故障	当系统供电发生故障时，发出报警
零位故障	当系统复位时无法回到设定的零初始位置，发出报警，并停机

2) 运动控制系统的故障保护措施

根据系统发生故障的种类及严重程度不同，将故障按轻重分为三类：声光报警、任务退出和紧急停车，根据不同的故障，采取下述三种保护措施^[6]。

声光报警：

此时实时控制计算机检测到如自检失败、电源故障时，控制系统将通过控制面板的指示灯和扬声器进行声光指示，但不采取任何措施。

任务退出：

当控制系统计算机检测角速度超限以及运动指令超限时，将立即执行任务退出的操作，控制系统声光报警并进入“退出”模式。在此情况下设备停止运行，但不断电，设备不接收任何其它指令。

紧急停车：

设备运行过程中有位置信号超限情况发生时，使设备紧急停车。此时，设备执行机构的供电电源将被切断，测量系统维持供电，以供操作者查询此时设备工作状态。也可以通过紧急停车按钮使设备紧急停车^[7]。

4 结论

通过对末子级消旋地面试验装置的设计与控制分析研究，验证了消旋载荷对末子级的消旋能力，模拟末子级在空间环境中的实际旋转工作状态，获取测试实验中的各种性能参数数据，通过分析以考核消旋机构的消旋作业性能，作为产品结构定型、及其他相应机构设计的依据。测控方案设计合理，可以满足空间模拟测控中提出的各项技术指标和性能要求。

本方案所采用的伺服驱动技术、信息采集和数据处理技术都是目前国内外成熟技术，其技术难点的解决途径也已明确，另外在测控系统所用的外购件选型上，在保证性能要求的前提下尽量选择性能价格比高、性能可靠、制造商信誉好的外购件，并借鉴以往的使用经验，以国内外知名厂商为货源，确保产品质量。依据现有的技术力量完全能够研制出符合任务书要求的设备测控系统。

参考文献

[1] 雍子豪,刘鹰,朱雄峰,崔朋,王铁兵,韩秋龙,郑琦.基于运载火箭末子级构建空间试验平台的有关思考[J],国际太空,2024,05(2):总第545期.

[2] 唐亮,刘辉,陈晨,黄春华,杜英霞.基于末子级应用的可重构通信载荷研究设想[J],空间电子技术,2017,14(01):1674-7135.

[3] 马红鹏,郭嘉,陈华伟,周天送,张毅博,小卫星分离机构微重力试验系统测试技术研究[A],宇航计测技术,2025,06(03).

[4] 张晓辉,魏玉章,汤晖,刘博,黄凌旻,彭俊彪.柔性连接的大行程、双驱同步气浮运动载台设计与研究[J/OL],机械科学与技术,2025,01(03).

[5] 曹国庆,陈雨,周青华.基于数字孪生系统的气浮平台设计与应用[A],人工智能,2025,01(006).

[6] 温众普,石照耀,谭久彬,吴剑威,崔海龙.超精密气浮关键技术及发展趋势[D]机械工程学报,2025.03.6.(05).

[7] 路艳辉,贾晨辉,贾硕,符瑞涛,申旭,静压气体轴承气浮间隙调节机构的设计与运动分析[B]润滑与密封,2024.08.08.

Discussion on the selection of offshore landscape fountain equipment

Desheng Li

Shenzhen Mingzhahui Smart Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

With the continuous development of marine tourism and coastal landscape construction, offshore fountain installations have emerged as a distinctive and eye-catching visual element that has gained increasing attention. The selection of offshore fountain equipment directly impacts multiple aspects including performance effectiveness, operational stability, durability, and maintenance costs. This paper explores key considerations in selecting offshore fountain systems, covering essential elements such as fountain types, water pumps, nozzles, control systems, material selection, and installation/maintenance practices. The research aims to provide comprehensive guidance for designing and implementing offshore fountain projects, ensuring the creation of aesthetically pleasing yet functional marine fountain landscapes.

Keywords

landscape fountain equipment pump fountain control system

海上景观喷泉设备选择的探讨

李德胜

深圳市明之辉智慧科技有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

随着海洋旅游和滨海景观建设的不断发展, 海上景观喷泉作为一种独特而引人注目的景观形式, 逐渐受到人们的关注。海上景观喷泉设备的选择直接影响到喷泉的效果、稳定性、耐久性以及运行成本等多个方面。本文将深入探讨海上景观喷泉设备选择过程中需要考虑的各种因素, 包括喷泉的类型、水泵、喷头、控制系统、材质以及安装维护等, 旨在为海上景观喷泉项目的设计和施工提供全面而系统的指导, 以确保打造出既美观又实用的海上喷泉景观。

关键词

景观喷泉设备; 水泵; 喷泉控制系统

1 引言

海上景观喷泉以其壮观的喷水效果和独特的海上背景, 成为吸引游客、提升滨海区域魅力的重要景观元素。与传统陆地喷泉相比, 海上喷泉面临着更为复杂的海洋环境, 如海水的腐蚀性、潮汐变化、风浪影响等。因此, 在选择海上景观喷泉设备时, 需要综合考虑多方面因素, 以保障喷泉能够稳定、高效运行, 并展现出令人满意的景观效果。合理选择设备不仅能延长喷泉的使用寿命, 降低维护成本, 还能提升喷泉的艺术表现力, 为游客带来独特的视觉体验。

2 海上景观喷泉的类型

2.1 漂浮式喷泉

漂浮式喷泉是将喷泉设备安装在漂浮平台上, 使其能够

随水位变化而上下浮动。这种类型的喷泉不受水深限制, 安装相对简便, 适用于各种水域条件。其优点在于可以灵活布置在海面的不同位置, 能根据需要移动, 且能适应潮汐和水位的频繁变化。例如, 在一些海滨浴场或休闲度假区, 漂浮式喷泉可以作为动态景观, 吸引游客的目光。然而, 漂浮式喷泉也存在一定局限性, 由于其漂浮在水面, 稳定性相对较弱, 在风浪较大时可能会出现晃动, 影响喷泉的正常运行和观赏效果。而且, 漂浮平台的设计和制作需要考虑浮力、稳定性和抗腐蚀性等多方面因素, 增加了设备成本和技术难度。

2.2 固定式喷泉

固定式喷泉是将喷泉设备固定安装在海底或海岸边的基础上。这种喷泉稳定性高, 能够承受较大的水流压力和风浪冲击, 适合建造大型、高扬程的喷泉。在一些大型滨海广场或主题公园的临海区域, 常采用固定式喷泉来打造震撼的景观效果。不过, 固定式喷泉的安装需要在海底进行基础施工, 工程难度大, 成本高, 且对海洋环境的影响相对较大。同时, 一旦安装完成, 位置难以更改, 灵活性较差, 需要在

【作者简介】李德胜 (1976-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 工程师, 从事城市道路照明、景观文旅灯光、楼宇泛光照明、喷泉等专业的设计施工运营研究。

规划阶段充分考虑喷泉的布局和周边环境的协调性。

3 水泵的选择

3.1 水泵类型

3.1.1 潜水泵

潜水泵是海上景观喷泉中常用的一种水泵类型，它直接潜入水中工作，具有结构紧凑、安装方便的特点。潜水泵的电机与泵体一体化设计，减少了占地面积，并且由于在水下运行，噪音相对较小。对于海上喷泉，需要选择具有良好耐腐蚀性能的潜水泵，通常采用不锈钢材质或特殊防腐涂层的泵体和叶轮，以抵御海水的侵蚀。例如，一些品牌的不锈钢潜水泵，采用优质不锈钢材料制造，能够在恶劣的海水环境中长期稳定运行。潜水泵的流量和扬程范围较广，可以根据喷泉的规模 and 设计要求进行选择，适用于不同规模的海上喷泉项目。

3.1.2 离心泵

离心泵利用叶轮高速旋转产生的离心力将水甩出，从而实现抽水 and 供水。离心泵具有流量大、扬程高的优点，适合用于大型海上景观喷泉，能够满足高水柱喷射的需求。在选择离心泵时，要注意其密封性能，确保在海水环境下不会发生泄漏，影响泵的正常运行和海洋环境。同时，离心泵的安装位置通常在水面以上，需要配备相应的引水装置，以保证泵在启动时能够正常吸水。

3.2 水泵参数选择

3.2.1 流量

水泵的流量应根据喷泉的设计喷水效果和喷头数量来确定。要确保水泵提供的流量能够满足所有喷头同时工作时的水量需求，并且考虑到一定的余量，以应对可能出现的水压波动等情况。例如，一个设计有多个大型喷头的水上喷泉，每个喷头的流量要求为 X 立方米/小时，那么水泵的总流量应至少为所有喷头流量之和再加上一定的安全余量，一般安全余量可设定为 10% - 20%。

3.2.2 扬程

扬程是指水泵能够将水提升的高度，对于海上喷泉，扬程需要考虑从水泵位置到喷头的垂直高度、管道阻力以及喷头所需的工作压力。在计算扬程时，要准确测量和估算各部分的压力损失，包括管道的沿程阻力损失、局部阻力损失（如弯头、阀门等造成的阻力）以及喷头的工作压力。例如，若喷头要求的工作压力为 P ，管道总阻力损失为 ΔP ，从水泵到喷头的垂直高度为 H ，那么水泵的扬程 H 泵应满足 $H \geq H + P + \Delta P$ 。同时，要根据实际情况选择合适扬程的水泵，扬程过大可能导致能源浪费和设备磨损加剧，扬程过小则无法达到预期的喷水高度。

4 喷头的选择

4.1 喷头类型

4.1.1 直流喷头

直流喷头是最基本的喷头类型，它喷出的水柱呈直线

状，水流集中，射程较远。在海上景观喷泉中，直流喷头常用于打造高大、壮观的主喷泉柱，能够吸引人们的注意力，成为喷泉景观的视觉焦点。例如，在一些标志性的海上喷泉项目中，采用高扬程的直流喷头，将水柱喷射至数十米甚至上百米的高空，在阳光和海风的映衬下，形成一道独特的风景线。

4.1.2 旋转喷头

旋转喷头通过内部的旋转机构使喷头在喷水时产生旋转运动，从而使喷出的水柱形成各种动态的图案和造型。旋转喷头可以增加喷泉的趣味性和观赏性，常用于打造富有变化和动感的喷泉效果。在一些休闲娱乐场所的海上喷泉中，旋转喷头与灯光、音乐相结合，能够营造出欢快、活泼的氛围。

4.1.3 雾化喷头

雾化喷头将水雾化成微小的水滴喷出，形成如烟似雾的效果。雾化喷头在海上喷泉中可以用于营造梦幻、浪漫的氛围，特别是在夜晚与灯光配合时，能够产生独特的光影效果。同时，雾化喷头喷出的水雾还能起到降温、加湿的作用，改善周边环境的舒适度。例如，在一些海滨度假酒店的海洋景观喷泉中，雾化喷头与彩色灯光相结合，为客人提供了一个惬意、浪漫的休闲环境。

4.2 喷头材质选择

由于海上环境的腐蚀性，喷头材质的选择至关重要。常用的喷头材质有不锈钢、铜合金和工程塑料等。不锈钢具有良好的耐腐蚀性和强度，能够适应海水的长期侵蚀，是海上喷泉喷头的常用材料之一。铜合金也具有较好的耐腐蚀性和加工性能，但其成本相对较高。工程塑料材质的喷头重量轻、成本低，且具有一定的耐腐蚀性，但其强度和耐高温性能相对较弱，适用于一些对喷头强度要求不高的小型海上喷泉项目。在选择喷头材质时，要综合考虑喷泉的使用环境、成本预算以及喷头的工作压力等因素，确保喷头能够长期稳定运行。

5 控制系统的选择

5.1 常规控制系统

常规控制系统通常采用可编程逻辑控制器（PLC）来实现对喷泉设备的控制。PLC 可以根据预设的程序控制水泵的启停、喷头的切换以及灯光的变化等。它具有可靠性高、编程简单、易于维护等优点，适用于一些对控制功能要求相对简单的海上喷泉项目。通过 PLC 编程，可以实现喷泉的定时启停、不同水型的切换以及简单的音乐同步功能（如根据音乐的节奏控制水泵的转速，从而改变喷水高度）。

5.2 智能控制系统

智能控制系统则利用先进的传感器技术、计算机技术和网络通信技术，实现对喷泉的智能化控制。智能控制系统可以实时监测喷泉设备的运行状态，如水泵的工作压力、流

量、电机温度等，一旦出现异常情况，能够及时报警并采取相应的保护措施。同时，智能控制系统还可以根据环境因素（如风力、光照强度等）自动调整喷泉的运行参数，以保证喷泉在不同的环境条件下都能达到最佳的运行效果。例如，当风力较大时，自动降低喷水高度，避免水柱被风吹散影响观赏效果；当光照强度较低时，自动调整灯光亮度，增强视觉效果。此外，智能控制系统还支持远程控制和监控，用户可以通过手机、电脑等终端设备对喷泉进行远程操作和管理，提高了管理的便捷性和灵活性。

6 材质的选择

6.1 设备主体材质

除了水泵、喷头等关键部件的材质选择外，整个喷泉设备的主体结构材质也至关重要。海上环境的高湿度、强腐蚀性以及可能面临的风浪冲击，要求设备主体材质具有良好的耐腐蚀性、强度和韧性。常用的设备主体材质有不锈钢、铝合金和玻璃钢等。不锈钢具有优异的耐腐蚀性和强度，能够承受较大的外力作用，但其成本相对较高。铝合金材质较轻，强度较高，且具有一定的耐腐蚀性，加工性能好，成本相对不锈钢较低，常用于一些对重量有要求的喷泉设备结构件。玻璃钢是一种由玻璃纤维和树脂组成的复合材料，具有重量轻、耐腐蚀、绝缘性好等优点，但其强度相对金属材料较低，适用于一些非关键受力部件或对耐腐蚀性要求极高的部件。在选择设备主体材质时，要综合考虑喷泉的使用环境、预算以及结构设计要求等因素，确保设备的安全性和耐久性。

6.2 管道材质

喷泉的供水管道需要承受一定的水压和海水的腐蚀，因此管道材质的选择也不容忽视。常用的管道材质有不锈钢管、铜管、塑料管等。不锈钢管具有良好的耐腐蚀性和强度，能够在海水环境下长期稳定运行，适用于大型海上喷泉的主供水管道。铜管的耐腐蚀性也较好，且具有一定的抗菌性能，但成本较高，一般用于对水质要求较高或对管道外观有要求的喷泉项目。塑料管如聚乙烯（PE）管、聚丙烯（PP）管等，具有重量轻、耐腐蚀、成本低、安装方便等优点，但其耐压性能相对较弱，适用于一些低压供水管道或小型喷泉项目。在选择管道材质时，要根据管道的工作压力、输送介质、安装环境以及成本等因素进行综合考虑，确保管道系统的安全可靠运行。

7 安装与维护考虑

7.1 安装要点

7.1.1 基础施工

固定式海上喷泉的基础施工是保障稳定性的关键，需考虑海底地质、潮汐及海浪影响。先详细勘察海底地质，确定基础承载能力与稳定性，再据此选桩基础（适用于软地质，通过打桩提供支撑）或沉箱基础（适用于硬地质，将预制沉箱下沉固定）。施工中需严控质量，确保基础尺寸、位置和

强度符合设计要求。

7.1.2 设备安装

需按说明书操作，保证部件安装位置准确、连接牢固。水泵、喷头等关键部件要严格调试测试，确保运行正常。安装管道时注意坡度和密封性防漏水，合理布置避免交叉碰撞以保水流顺畅。漂浮式喷泉需确保漂浮平台稳定平衡，装好锚泊系统以防风浪中漂移。

7.2 维护要点

定期检查是保障喷泉设备正常运行的重要措施，需检查水泵运行状态（电机温度、振动、噪音）、喷头是否堵塞、管道有无泄漏、控制系统参数及设备腐蚀情况。发现问题要及时处理，如清理喷头杂物、修复管道泄漏、采取防腐措施等。

清洁与保养可延长设备寿命、提高运行效率。需定期清理喷泉池杂物和污垢，保持水质清洁，防止杂质损坏水泵和喷头；对水泵、喷头定期保养，如添加润滑油、更换易损件；定期冲洗管道，防止结垢和腐蚀；同时维护控制系统，更新软件版本，确保其控制功能先进可靠。

8 案例分享

深圳市前海湾城市品质提升工程喷泉项目位于前海湾沿江高速段，采用固定式设计。设备选用耐腐蚀的 304L 不锈钢潜水泵，适配海水环境以保障长期稳定运行；喷头组合直流与旋转类型，搭配智能控制系统，实现多样水型变化及灯光同步。

材质上，设备主体与管道均采用 304L 不锈钢，兼顾强度与防腐性，确保供水安全可靠。

该喷泉经多年运行仍状态良好，吸引大量游客，成为当地标志性景观。其成功得益于充分考量海上环境特点，合理选择设备类型、材质及控制系统，并重视安装质量与后期维护。

9 结论

海上景观喷泉设备选择是复杂系统工程，需综合考虑类型、水泵、喷头、控制系统、材质及安装维护等，结合海上环境特点，确保设备在恶劣海洋条件下稳定运行，实现预期景观效果。还需注重性价比与后期维护成本，选质量可靠设备以降总成本。合理选择并把控安装维护，可打造美观实用的海上喷泉，助力海洋旅游等。未来随科技进步，设备将不断创新，带来更丰富视觉体验。

参考文献

- [1] 张明, 李红. 304L 不锈钢在海洋环境中的腐蚀行为及防护措施[J]. 材料保护, 2020, 53 (6): 45-50.
- [2] 刘军, 王芳. 智能控制系统在景观喷泉中的设计与应用研究[J]. 自动化仪表, 2019, 40 (3): 23-27.
- [3] 赵刚, 陈静. 海洋工程中桩基础与沉箱基础的选型及施工技术[J]. 海洋工程, 2021, 39 (2): 67-73.

Study on zero discharge process of desulfurization wastewater in thermal power plant

Libing Lei Feili Wang Xianghua Zheng Zhongchen Sun Wanku Chen

Huaneng Yunnan East Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655000, China

Abstract

With the continuous growth of electricity demand, higher requirements are being placed on the power generation industry. As thermal power plants expand in scale and quantity, their daily production wastewater discharge has significantly increased. If desulfurization wastewater is not properly treated, it will not only harm the environment but also hinder the sustainable development of thermal power plants. Therefore, these facilities should prioritize the application of zero-process discharge technology for desulfurization wastewater, implement optimized treatment methods and environmental protection measures to achieve high-quality development. This study conducts a comprehensive analysis of desulfurization wastewater management in thermal power plants, examines pretreatment processes, explores the content and characteristics of zero-discharge technologies, and proposes optimization strategies for reference by relevant professionals.

Keywords

thermal power plant; desulfurization wastewater; zero discharge process

火电厂脱硫废水零排放工艺研究

雷犁兵 王飞丽 郑祥华 孙中臣 陈万库

华能云南滇东能源有限责任公司, 中国 · 云南 曲靖 655000

摘 要

随着社会用电需求量不断增大, 对发电行业提出了更高的要求。随着规模不断扩大, 数量增多, 火电厂日常生产废水增多。脱硫废水若得不到优化处理, 会对环境造成影响, 也不利于火电厂的进一步发展, 因此火电厂应当重视脱硫废水零排放工艺的应用, 做好优化处理和环境保护, 实现高质量发展, 鉴于此, 开展本文研究工作, 简单概述火电厂脱硫废水的情况, 分析预处理工艺, 探究零排放工艺的内容和特点, 提出优化措施, 以供相关人员参考。

关键词

火电厂; 脱硫废水; 零排放工艺

1 引言

火电厂生产运行产生了大量的烟气脱硫废水。烟气脱硫废水具有强碱强氟的特点, 含有大量的硫化物和悬浮固体。因此国家也越来越重视火电厂脱硫废水的处理, 通过应用零排放工艺, 升级传统工艺, 做好对废水的深度处理, 可以保护环境, 也能促进火电厂的高质量发展。而在具体应用中, 火电厂需要对废水进行预处理, 采取适当的浓缩 + 蒸发结晶、烟气余热蒸发浓缩等相关的工艺技术, 实现零排放的相关标准。

2 火电厂脱硫废水的概述

我国对火电厂水资源论证和环境影响批复中都有具体的要求, 火电厂需要进行废水集中处理。处理后的废水回收

利用严格依照废水零排放的要求进行设计。火电厂的脱硫废水主要来自石灰石 - 石膏法脱硫系统的浆液排水, 成分复杂, 波动大。脱硫废水具有腐蚀性强、含盐量大、硬度高的特性。腐蚀性强而指的是废水中含有较大比例的强酸弱碱盐、工业废酸, 浓度不高, 但腐蚀效果比较强, 不仅会腐蚀火电厂的仪器设备, 还会严重破坏生态环境^[1]。含盐量高主要是受化学制剂的影响, 其中含有大量的强酸弱碱盐。脱硫废水还具有较高的硬度, 十分容易结垢。其中钙镁离子的稳定性不足, 温度上升时, 钙镁离子呈现结晶态, 产生结垢。脱硫废水还具有高悬浮物, 包括石膏颗粒、粉煤灰等, 浓度可达 1000~5000mg/L。脱硫废水中含有多种重金属离子, 存在重金属污染。

3 火电厂脱硫废水的预处理

火电厂脱硫废水预处理工艺主要包括软化处理和固液分离处理。脱硫废水具有高硬度, 浓缩处理中形成碳酸钙、

【作者简介】雷犁兵 (1986-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 工程师, 从事火电厂化学环保工作管理研究。

硫酸钙等无机盐沉淀,使反渗透膜系统或者蒸发结晶反应器出现结垢的情况,影响到系统的正常运行^[2]。预处理的核心目标是去除 90% 以上的悬浮物,避免堵塞或者磨损后续的设备,降低 80% 以上的硬度深度去除重金属,并氧化还原性物质,降低设备的腐蚀风险。使用高级化学软化技术,添加碳酸钙颗粒,诱导结晶,提升沉淀效率,可以投加硅酸盐去除剂或者镁剂,强化除硅,可以有效降低废水的硬度和污泥量。使用膜法进行预处理。主要发挥超滤微滤和纳滤作用。超滤与微滤可以深度去除其中的胶体细菌和悬浮物。纳滤能够分离二价离子和一价离子,为分盐结晶提供条件。该方法的出水水质极佳,适合后续膜浓缩或者蒸发结晶。使用电化学预处理,可以同步去除重金属离子,有机物和胶体。

4 火电厂脱硫废水零排放工艺

4.1 浓缩 + 蒸发结晶

浓缩 + 蒸发结晶工艺因处理效果稳定、能实现水与盐的彻底分离,成为当前主流的脱硫废水零排放技术路线之一。核心逻辑是通过预处理降低废水危害、浓缩减少废水体积、蒸发结晶实现水盐分离,最终达到零排放目标。浓缩阶段的核心是通过物理或化学方法减少废水体积,将经预处理后的低浓度废水浓缩为高浓度浓盐水,降低后续蒸发结晶的能耗和处理量。浓缩工艺可分为膜浓缩和蒸发浓缩两类。膜浓缩利用膜的选择透过性,通过压力驱动实现水与盐的分离,水透过膜成为淡水回用,盐则保留在浓水中。蒸发浓缩通过加热使废水中的水分蒸发为蒸汽,蒸汽冷凝后回用,盐分留在浓缩液中。浓缩后废液排入 MVR 强制循环制盐结晶系统中,蒸发继续,浓缩液的浓度增加,产生结晶岩固液,有效分离^[3]。通过该过程有效处理脱硫废水。膜浓缩 + 蒸发结晶方法的应用,对处理提出了一定要求。

4.2 烟道雾化蒸发

烟道雾化蒸发法是火电厂脱硫废水零处理工艺中的一种处理工艺,它的核心是利用锅炉烟道中的高温烟气余热将脱硫废水雾化后蒸发,使水分转化为蒸汽,然后随烟气排放。而其中的盐分和污染物则会以固态的形式被除尘器捕获,从而实现废水的零排放。首先,脱硫废水经过预处理,通过高压雾化喷嘴喷入锅炉尾部。烟道中高温烟气作用下,雾滴迅速吸热蒸发。在这一过程中,水分快速转化为水蒸气,所以烟道进入脱硫除尘系统中,然后进行排放。而废水中的盐分,例如氯化钠、硫酸钙等^[4]。还有一些未溶解的固体颗粒,会以细小固态颗粒的形式分散在烟气中,最后被除尘器捕获,同飞灰一起处理。在具体应用中需要匹配合适的烟道位置,满足蒸发温度窗口这一特点,如果温度过高,可能会导致一些盐分熔融粘结在阴道壁上,温度过低则导致脱硫废水的蒸发并不完全。温度需要 $\geq 150^{\circ}\text{C}$,确保雾滴在烟道内完全蒸

发,流速需与雾滴运动轨迹相匹配。还要关注预处理的具体情况,若预处理不充分,废水中高浓度的钙镁离子会形成硬垢,沉积在烟道或喷嘴表面,导致传热效率下降,甚至堵塞。

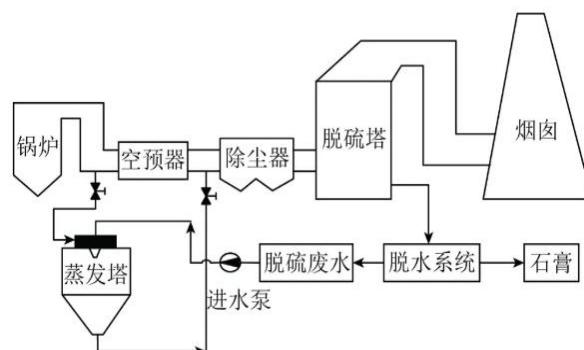


图1 烟道蒸发结晶

4.3 烟气余热蒸发浓缩

烟气余热蒸发浓缩工艺的核心是通过换热器将锅炉烟气中的中低温余热传递给脱硫废水,使废水在密闭设备中蒸发浓缩,可以减少后续末端处理所需的水量。首先,脱硫废水经过预处理之后进入蒸发浓缩器中,和换热器的烟气进行间接热交换。在烟气侧高温烟气流经换热器释放后,温度降低再进入后续的烟道或者脱硫系统中。废气侧吸收烟气热量以后,沸水温度升至 $60\sim 90^{\circ}\text{C}$,水分蒸发为二次蒸汽废水,提升废水浓度,然后进入末端处理单元^[5]。其中的核心装置有余热换热器、蒸发浓缩器、二次蒸汽处理和浓缩处理单元。余热换热器常见的油管式换热器、板式换热器和烟气余热锅炉集成式,可根据情况优化选择。蒸发浓缩器分为常压浓缩器和负压浓缩器。烟气温度决定了浓缩效率,温度越高,单位烟气量的换热量越大,浓缩速率越快。因此在处理中要关注烟气余热品质。废水浓缩的过程中,硫酸钙、碳酸钙等盐分会因过饱和在换热面吸出形成硬垢,导致传热效率降低。该技术的优势是废水与烟气间接换热,盐分不进入烟气,避免飞灰被盐分污染。密封设备中可控蒸发浓缩倍数可达 $3\sim 10$ 倍,浓缩效果稳定。蒸发产生的二次蒸汽冷凝水水质比较好,可用于脱硫系统补水,实现水资源的回收。

4.4 旋转喷雾蒸发

旋转喷雾蒸发的基本原理是将脱硫废水经旋转雾化器雾化以后,喷入旁路干燥塔中。热烟器将脱硫废水完全蒸发,其中的盐类和杂质转化为固体结晶物,一部分随烟气在烟道口处被除尘器捕集,另一部分进入干燥塔底的灰斗中^[6]。旋转雾化器是旋转喷雾蒸发的关键设备,它能够将废水溶液雾化成小雾滴。小雾滴与高温热烟气充分结合,使水分迅速蒸发。该技术对废水适应性较强,且不需要对废水进行预处理。

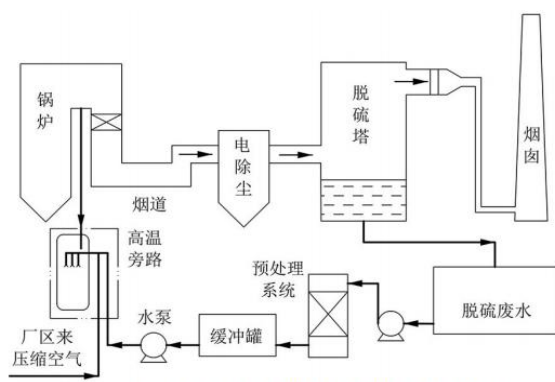


图2 烟气喷雾蒸发

4.5 浓缩 + 干渣蒸发

浓缩 + 干渣蒸发工艺核心是通过浓缩单元减少废水体积,再利用锅炉干渣的余热实现废水蒸发,最终将盐分转移至干渣中。预处理后进行浓缩处理,通过浓缩技术减少废水体积,提高盐浓度,降低干渣蒸发的水量负荷。利用干渣余热实现浓缩废水的蒸发。将浓缩后的高盐废水通过喷嘴均匀喷洒在输送中的干渣表面,或通过搅拌使废水与干渣充分混合。干渣的高温为废水提供蒸发潜热,水分快速汽化,盐分则结晶并附着在干渣颗粒表面,得到有效处理^[7]。蒸发后附着盐分的干渣需合规处置,如果干渣盐分含量较低,可直接送至灰渣填埋场。如果盐分较高,评估综合利用的情况,也可以通过固化处理后填埋,避免盐分溶出污染土壤或地下水。

5 火电厂脱硫废水零排放处理工艺的优化应用

为了充分发挥脱硫废水零排放处理工艺的优势,火电厂还应当重视技术的优化与创新。首先火电厂要加强现行的监管工作,结合国家等相关标准要求,完善规章制度,做好日常运行的监督管理工作,发挥工艺优势,达到良好的处理效果。其次,提升循环水系统的浓缩倍率,可以减少循环水排污的实际耗水量,在这一阶段合理地应用,优化废水处理

设施,分流处理雨水和污水的情况,提高废水的回用率,也能降低废水的实际排放量。第三,优化工艺,实现创新。可以使用高效药剂与协同工艺,开发复合功能药剂,例如混凝螯合一体化药剂,可以提高悬浮物和重金属的去除率。可以使用分置预处理和资源回收的方式,对废水进行预处理回收其中的资源。例如,使用碳化软化工艺,使其中的钙离子以碳酸钙的形式沉淀回收,作为脱硫系统石灰石补充量。对污泥进行减量化处理,可以使用高压板框压力,降低污泥的含水量,减少后续的处置成本。第四,引进先进技术,开展在线监测,利用 AI 算法实时调整药剂的投加量,可以优化整个过程的控制,提升处理效率。

6 结语

综上所述,火电厂脱硫废水零排放工艺的合理应用,可以提高废水处理效率,减少废水的排放量,促进火电厂的稳步发展,因此在具体应用中,火电厂需要结合水质特性,优化工艺设计。做好脱硫废水的预处理,选择合适的零排放处理工艺,实现预期目标,建设更加环保清洁的配套设施,使火电厂获得更多的经济效益和生态效益。

参考文献

- [1] 刘伟雄,范鑫帝,兰叶,等. 火电厂脱硫废水“零排放”预处理工艺探究[J]. 中国环保产业,2024(3):65-68.
- [2] 万德强. 火电厂湿法脱硫废水“零排放”处理工艺浅析[J]. 电力系统装备,2020(17):55-56,195.
- [3] 邱艺雄. 蒸发结晶工艺在火电厂脱硫废水零排放中的应用[J]. 环球市场,2021(10):184.
- [4] 王胜虎. 火电厂脱硫废水零排放研究和实施分析[J]. 仪器仪表用户,2023,30(11):82-86.
- [5] 吕庆. 火电厂脱硫废水零排放技术[J]. 数码设计,2023(1):134-136.
- [6] 刘剑桥. 关于火电厂脱硫废水零排放技术应用[J]. 中国设备工程,2022(8):174-175.
- [7] 孔凡旺. 火电厂脱硫废水零排放处理工艺介绍[J]. 百科论坛电子杂志,2021(4):1817.

Research on intelligent monitoring and fault diagnosis technology of mechanical thermal equipment

Fengtao Wang

Xinjiang Railway Vocational and Technical College, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract

This paper focuses on the intelligent monitoring and fault diagnosis technology of mechanical and thermodynamic equipment. The technology is born due to economic losses and security threats caused by equipment failure, and its foreign application is mature, while domestic development is fast but there is a gap. Intelligent monitoring includes sensors, data acquisition, transmission, processing and analysis, vibration and other monitoring technologies have their own advantages, and multi-parameter fusion is better. There are three types of fault diagnosis methods based on model, data and knowledge, machine learning and deep learning to improve diagnosis ability, and realize networked and multidisciplinary integration. The combination of the two can improve equipment reliability and cost reduction, and the case of power plants and chemical plants has been verified. The current technology is facing challenges such as data processing, and solutions such as optimizing collection and processing are proposed accordingly. In the future, the integration of multiple technologies will promote its wide application and help industrial intelligence

Keywords

mechanical and thermodynamic equipment; intelligent monitoring; fault diagnosis; Internet of Things

机械热动设备的智能监测与故障诊断技术研究

王峰涛

新疆铁道职业技术学院, 中国 · 新疆 哈密 839000

摘 要

本文聚焦机械热动设备的智能监测与故障诊断技术。该技术因设备故障致经济损失、安全威胁而生, 国外应用成熟, 国内发展快但有差距。智能监测含传感器、数据采集传输及处理分析, 振动等监测技术各有优势, 多参数融合更优。故障诊断有基于模型、数据、知识三类方法, 机器学习和深度学习提升诊断力, 且实现网络化、多学科融合。二者联用可提设备可靠性、降成本等, 电厂和化工厂案例已验证。当前技术面临数据处理等挑战, 相应提出优化采集处理等方案。未来, 多技术融合将促其广泛应用, 助力工业智能化

关键词

机械热动设备; 智能监测; 故障诊断; 物联网

1 引言

在现代工业中, 机械热动设备应用广泛, 但长期运行易因高温、高压等出现故障, 造成经济损失, 威胁人员安全与环境。为此, 智能监测与故障诊断技术应运而生。

国外在该领域起步早, 传感器技术创新不断, 无线传感器网络广泛应用。基于人工智能与数据驱动的故障诊断方法成熟, 众多企业已实现技术深度应用。国内近年来发展迅速, 传感器性能提升, 物联网助力数据采集传输, 机器学习与深度学习推动故障诊断研究, 部分大型企业开始应用相关技术, 但与国外仍有差距。未来, 该技术将向智能化、多参数融合与大数据分析、网络化与远程诊断方向发展, 并与

VR、区块链等技术融合, 为工业智能化提供支撑。

2 机械热动设备智能监测技术原理

机械热动设备智能监测技术由传感器技术、数据采集传输及处理分析构成。

传感器技术是监测基础, 温度、压力、振动、流量等传感器感知设备物理量变化, 转化为电信号, 像锅炉炉膛用热电偶测温度, 反应釜用电容式压力传感器测压力, 助力设备运行监测。数据采集系统收集传感器信号, 经调理、模数转换后传至计算机, 采集方式分连续和定时两种。数据传输有有线、无线两类, 前者稳定可靠, 后者灵活便捷, 但信号易受干扰。数据处理则先经清洗、滤波、归一化等预处理, 再用时域、频域、时频分析提取运行特征。

常见监测技术包括振动、温度、压力监测及多参数融合监测。振动监测用于旋转机械故障诊断, 如轴承、齿轮、

【作者简介】王峰涛(1993-), 男, 中国河南信阳人, 本科, 工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究。

轴故障会引起振动信号变化,某石化企业压缩机组借此及时发现叶片断裂。温度监测可察觉设备过热,电机、变压器等超温时能报警,钢铁企业热风炉借此保障稳定运行。压力监测能检测管道堵塞、泄漏及设备内部压力异常,热电厂蒸汽管道借此避免超压事故。多参数融合监测综合多个参数分析,弥补单一参数监测不足,化工反应釜和风力发电机组运用该技术,全面了解设备运行状态,准确诊断故障^[1]。

3 机械热动设备故障诊断技术

3.1 故障诊断技术分基于模型、数据和知识三类

基于模型的方法,构建设备数学模型,对比模型与实际输出的偏差诊断故障,常用状态估计法和参数估计法。航空发动机和机器人手臂因模型易建,常借此法监测故障。基于数据的方法,借助统计分析、聚类分析、主成分分析挖掘数据特征,诊断设备故障。以电力变压器为例,综合运用这些方法,能定位内部绕组局部短路故障。基于知识的方法,利用专家经验、设备原理和历史案例构建知识库,通过推理诊断故障。专家系统和模糊逻辑是典型应用,在航空航天和汽车制造领域发挥重要作用。该方法适应性强,但知识获取和更新存在难题,常与其他方法结合使用。

3.2 智能化故障诊断技术正不断发展

机器学习中,支持向量机在高维空间寻找分类超平面,能对旋转机械故障精准分类,且适应小样本;神经网络模拟大脑神经元,可学习故障规律,诊断电机多种故障。化工压缩机借助二者,诊断准确率提升超 20%。深度学习里,卷积神经网络自动提取局部特征,有效诊断旋转机械故障;循环神经网络及改进的 LSTM 处理时间序列数据,提前预警汽轮机故障。风力发电机组结合二者,诊断准确率提升超 25%,预警提前 3 - 5 天。随着物联网发展,故障诊断实现网络化,化工企业借此远程管理设备。同时,故障诊断融合信号处理、模式识别和人工智能多学科技术。

4 智能监测与故障诊断技术的联合应用

4.1 智能监测与故障诊断技术的联合应用,对现代工业意义重大

在价值层面,二者联合大幅提升设备可靠性。旋转机械依靠振动传感器监测振动,诊断技术分析数据,能及时察觉轴承磨损等隐患。同时,实现预防性维护,化工反应釜借助运行数据预测零部件寿命,延长设备使用寿命超 20%。此外,及时预警故障降低维修成本,电力企业应用后维修成本降低 30% 以上,还避免生产中断,汽车制造企业借此提升 15% 生产效率。在应用方法上,先通过高精度传感器采集数据,如火力发电厂汽轮机安装压电式振动、铂电阻温度和电容式压力传感器。接着集成传感器技术,化工反应釜利用无线传感器网络,同步采集多参数数据。随后采用先进算法处理数据,清洗去除噪声、缺失值,结合时域、频域分析提取特征,运用机器学习算法预测故障。之后,构建预警和

诊断系统,电力企业变压器监测系统油温、气体含量异常时报警,并给出故障分析和处理建议。

4.2 应用案例分析

某电厂引入智能监测与故障诊断技术,保障汽轮机稳定运行。在传感器布置上,依据汽轮机结构,在轴承座、进排汽管道、润滑油系统分别安装振动、压力、温度及油质传感器。数据采集与分析采用高速采集卡,以毫秒级频率采集数据,经光纤传输至处理中心。利用数据清洗、时域频域分析及小波变换,对数据进行预处理与深入分析,提取关键特征参数。故障诊断模型融合支持向量机、神经网络等机器学习算法,结合深度学习与专家系统,借助大量数据训练,实现精准诊断。该技术应用成效显著。一次监测中,系统发现轴承振动异常,经诊断确定为磨损故障,及时检修避免故障扩大。此外,汽轮机维修成本降低 30% 以上,停机时间减少 40% 左右,发电效率提高 5%。

某化工厂压缩机智能监测与故障诊断,化工厂为保障压缩机稳定运行,引入智能监测与故障诊断技术。在压缩机缸体、进出口管道、润滑油系统布置振动、压力、温度及油液传感器。数据采集系统以高频率采集数据,通过无线传输至监控中心。利用专业软件进行数据清洗、滤波,运用统计分析与相关性分析挖掘数据信息。故障诊断模型采用决策树、随机森林等机器学习算法训练,结合专家经验建立规则系统。应用过程中,监测系统发现压缩机振动、温度异常及压力波动,诊断为活塞环磨损,及时检修恢复运行。应用后,压缩机运行效率提高 25% 以上,生产中断次数减少 60% 左右,维修成本降低 40% 以上,有力保障了化工厂安全生产与经济效益^[2]。

5 技术挑战与解决方案

5.1 面临的挑战

数据采集与处理难题:机械热动设备运行环境恶劣,构造和原理复杂,数据采集难度大。以大型船舶动力系统为例,主机、辅机及传动装置运行时会产生转速、扭矩等多种物理量。采集这些数据,不仅要在关键部位合理部署传感器,还需兼顾选型、安装位置和兼容性。工业现场的电磁、机械振动等干扰,易造成数据失真。如钢铁厂轧钢车间,大型电机和电焊机产生的电磁干扰,会严重影响传感器精度,给后续分析带来阻碍。此外,设备产生的数据量呈爆发式增长,大型化工企业反应釜每日数据可达数 GB。传统数据处理方法难以应对海量数据,不仅处理速度慢,且数据中冗余和噪声多,有效信息提取难度大。

故障诊断精度问题:机械热动设备的复杂性和不确定性影响故障诊断精度。设备由众多零部件组成,不同故障可能表现出相似症状,同一故障在不同工况下表现也不尽相同。以汽轮机为例,轴承和叶片故障都会导致振动异常,但原因和特征差异明显,仅依据振动症状难以准确诊断。现有

的故障诊断方法存在局限性。基于模型的方法需深入了解设备结构和运行特性,模型参数确定困难,且实际运行环境多变,诊断准确率不高。基于数据的方法在处理小样本或新型故障数据时,容易出现过拟合或欠拟合问题,诊断精度受限。

实时监测与预警要求:机械系统运行状态变化迅速,对实时监测和预警要求高。但目前实现该目标存在诸多困难。数据传输延迟是一大难题,大型工业企业设备分布广,长距离传输易受网络带宽和信号干扰,偏远地区的风力发电场常出现传输延迟问题。同时,实时分析大量复杂数据,并准确判断设备状态难度较大,当前数据分析技术在计算速度和分析精度上有待提升。此外,实时监测与预警系统的可靠性和稳定性至关重要,系统故障或误报可能导致严重后果,如航空发动机监测与预警系统的故障或误报会危及飞行安全。跨学科知识整合困境:智能监测与故障诊断技术涉及机械工程、计算机科学等多个学科,跨学科知识整合难度大。不同学科知识体系和研究方法差异显著,缺乏统一理论框架,机械工程与计算机科学的结合存在一定难度。当前,跨学科人才培养不足,高校学科设置相对独立,学生跨学科知识和实践能力欠缺。在实际工作中,不同学科背景人员沟通协作困难,影响技术发展。此外,跨学科研究在管理和组织上存在挑战,不同学科研究团队目标和资源分配易出现分歧,难以形成合力。

5.2 解决方案探讨

优化数据采集与处理技术:选用高精度传感器,能够显著提升数据质量。比如,高精度加速度计振动传感器,测量精度可达 $\pm 0.001\text{g}$; K 型热电偶传感器适用于 $0 - 1300^{\circ}\text{C}$ 的高温环境;陶瓷电容式压力传感器则可在化工生产中测量腐蚀性介质压力。同时,运用降噪技术与滤波算法,能有效排除噪声干扰。均值滤波通过计算数据窗口平均值,抑制随机噪声,中值滤波选取中值输出,去除脉冲噪声。此外,借助并行计算技术,如 Apache Spark 框架,利用多核或分布式计算资源,可大幅缩短数据处理时间,搭配 Hadoop、Hive 等大数据分析工具,实现海量数据的存储与分析。

提升故障诊断精度:引入深度学习技术,能够有效提高故障诊断的精度。以卷积神经网络(CNN)诊断旋转机械故障为例,将振动信号转化为二维图像输入模型,模型可自动学习故障特征,相比传统方法,准确率能提高 15% - 20%。此外,结合基于模型、数据和知识的多种故障诊断方法,能发挥各方法优势。以电力变压器故障诊断为例,先基

于模型初步判断,再借助数据方法深入分析,最后用知识方法验证补充。

完善实时监测与预警系统:优化硬件与软件,能够增强实时监测的准确性与响应速度。硬件上,选用 NI 公司 USB - 6363 数据采集卡、Intel Xeon 系列处理器;软件方面,采用 VxWorks、RT - Linux 等实时操作系统,搭配快速傅里叶变换(FFT)、小波变换等算法。同时,设定合理预警阈值,采用声光报警、短信通知、邮件提醒等多种方式,确保维护人员及时获取警报信息。

加强跨学科合作:推动信号处理、模式识别、机器学习等多学科合作,有利于技术发展。各学科分别研究先进算法,提升设备信号处理、故障模式识别、诊断模型性能。通过多学科团队协作,研发如物联网智能监测系统等创新技术。此外,高校、科研机构与企业需加强跨学科课程设置与员工培训,培养跨学科人才^[3]。

6 结语

本研究聚焦机械热动设备,对智能监测与故障诊断技术展开深入探索。在智能监测层面,传感器采集设备运行参数,经由数据采集传输系统,送达处理中心分析,为故障诊断筑牢根基。振动、温度等监测技术各有优势,多参数融合监测成效更优。故障诊断包含基于模型、数据和知识的多元方法,机器学习和深度学习算法大幅提升诊断智能化程度。智能监测与故障诊断联合运用,可实现预防性维护,降低运维成本。但目前,该技术在数据采集处理、诊断精度等方面仍存挑战。对此,本研究提出采用高精度传感器、深度学习等应对策略。展望未来,人工智能、物联网、大数据技术的深度融合,将推动这项技术迈向新高度,实现更智能的诊断、远程设备管控和精准故障预测,助力航空航天、能源和制造业等领域的智能化转型,加速工业现代化进程。

参考文献

- [1] 刘雨,范怀伟,黄沛林,等. 施工现场大型机械设备智能监测系统的应用[J]. 工程技术研究,2019,4(5):123-124. DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2019.05.063.
- [2] 王楠. 浅谈机械设备故障诊断与监测的常用方法及其发展趋势[J]. 中国设备工程,2024(1):159-161. DOI:10.3969/j.issn. 1671-0711.2024.01.066.
- [3] 黄国虎. 机械设备的管理和维修措施及故障诊断分析[J]. 机电产品开发与创新,2025,38(02):133-136.

Intelligent Museum Construction Driven by 3D Digital Outcrop Technology: A Case Study of Chengdu Museum of Natural History (Chengdu University of Technology Museum)

Yao Guo¹ Jin Xiao² Jinya Hu² Zongqi Lin¹ Lei Zhou²

1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610000, China

2. Chengdu Museum of Natural History (Chengdu University of Technology Museum), Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

With the rapid development of technologies such as digital twins, 3D modeling, and artificial intelligence, the construction of intelligent museums has evolved from single-mode digital displays to multidimensional, interactive, and intelligent formats. Taking the Hall of Geological Environment, Hall of Life Origins, and Hall of Dinosaurs Found in Sichuan Basin in the Chengdu Museum of Natural History (Chengdu University of Technology Museum) as case studies, this research paper integrates high-precision 3D real-scene outcrop digitization technology to establish a intelligent museum system that combines high-precision modeling, dynamic interaction, and science communication. Through technological empowerment, the project achieves immersive presentation of exhibition content, offering an innovative solution for the digital transformation of geological museums.

Keywords

Digital Outcrop Models; Intelligent Museum

三维实景数字露头技术驱动智慧博物馆展厅建设——以成都自然博物馆（成都理工大学博物馆）为例

郭焱¹ 肖瑾² 胡瑾娅² 林宗祺¹ 周磊²

1. 成都理工大学，中国·四川成都 610000

2. 成都自然博物馆（成都理工大博物馆），中国·四川成都 610000

摘要

随着数字孪生、三维建模、人工智能等技术的快速发展，智慧博物馆的建设已从单一的数字化展示向多维度、交互式、智能化的方向演进。本文以成都自然博物馆（成都理工大学博物馆）地质环境厅、生命探源厅、龙行川渝厅等展厅为实践对象，结合高精度三维实景数字露头技术，构建了集高精度建模、动态交互、科学传播于一体的智慧博物馆体系。通过技术赋能，实现了展陈内容的沉浸式呈现，为地质类博物馆的数字化转型提供了创新性解决方案。

关键词

三维实景数字露头；智慧博物馆

1 引言

进入 21 世纪，数字孪生、三维建模、人工智能、虚拟现实（VR）与增强现实（AR）等信息技术快速发展，并在工业、文旅、文化遗产保护等领域广泛应用。三维实景建模作为连接物理与数字世界的核心手段，因其可高精度、全视角、交互式复原现实场景，在自然科学博物馆智慧化建设中

展现出巨大潜力。

地质学研究对象具有空间复杂性与时间延展性，地质露头是研究地球历史与结构的重要载体，但有不可移动、易受风化、观测受环境制约等局限。传统博物馆展陈难以完整还原野外露头的空间形态、地层结构与地质背景，观众难以获得接近野外科考的体验。三维实景数字露头技术（Digital Outcrop Models, DOMs）便应运而生。该技术通过多视影像采集、摄影测量（SfM）、激光扫描（LiDAR）等方式，将真实露头转化为可交互数字模型，既能高精度保存空间信息，又可在虚拟环境中灵活展示并嵌入多媒体，实现科研、教学与科普价值。近年来，DOMs 已从地质科研拓展至公众科普，并与智慧博物馆建设融合，推动展陈从“静态物理”

【基金项目】成都市科技项目（2024年度）（项目编号：2024-YF05-01344-SN）。

【作者简介】郭焱（1993-），女，中国江苏扬州人，硕士，研究实习员，从事自然科学博物馆科普教育研究。

向“沉浸交互”转型。

智慧博物馆是信息技术与博物馆业务融合产物,旨在通过数字化、网络化和智能化提升文物保护、展陈、服务与传播能力。在国际上,卢浮宫、大英博物馆等世界知名机构已建有较成熟的虚拟展览平台。如,大英博物馆依托高精度三维激光扫描与摄影测量技术,对部分珍贵文物及展厅进行全景建模,并通过 WebGL 等技术实现在线交互。国内方面,故宫博物院率先开展数字孪生技术应用,对紫禁城主要宫殿群进行毫米级精度的三维建模,并结合 VR、全景漫游和虚拟讲解,实现历史建筑与文化情境的沉浸式体验¹。然而,地质类博物馆智慧化仍有两大短板:其一,展陈内容静态、抽象,难以呈现地质现象的空间结构与动态演化;其二,交互体验不足,观众缺乏主动探究过程。

成都自然博物馆(成都理工大学博物馆)作为西南地区重要地学类自然博物馆,馆藏标本超过 6 万件,涵盖古生物化石、矿物岩石、现代动植物等多个领域,形成鲜明展陈特色。博物馆常设展项却面临两个突出问题:一是地质展品来自野外,其真实空间环境与地质背景难以完整呈现;二是部分地质现象动态性强,传统静态展品难以表现其形成演化过程。

三维实景数字露头技术正好可弥补不足。本研究基于 DOMs 的智慧博物馆建设架构,构建“数据采集—高精建模—交互设计—多平台部署—公众教育”的闭环体系,并结合其在博物馆常设展厅的应用,探讨该技术在提升展陈效果、丰富互动方式及促进科学传播方面的成效与前景。

2 三维实景数字露头技术对智慧博物馆建设的核心优势

三维实景数字露头技术(DOMs)起源于 20 世纪末期摄影测量与地形建模技术在地质学中的初步应用。早期露头数字化依赖全站仪测量和二维摄影,精度有限。进入 21 世纪,高分辨率数字影像传感器、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、计算机图形学和空间数据处理算法的快速发展,使 DOMs 技术迎来了快速演进期。

目前,DOMs 核心流程已趋于成熟,主要包括多视影像采集、多视影像平差、点云构网、纹理映射及可视化优化五个环节²:

(1) 数据采集:广泛采用无人机航摄、地面摄影测量与激光雷达(LiDAR)扫描等方式,以获取高重叠度、多角度露头影像或三维点云数据;

(2) 多视影像平差(SfM)技术可自动提取影像特征点并完成匹配,从而实现相机姿态恢复与高精度空间定位;

(3) 点云构网环节通过密集匹配生成高密度点云并进行三角网构建,获得完整几何结构;

(4) 纹理映射利用原始影像生成高真实感表面纹理,保留露头色彩与细节特征;

(5) 可视化优化通过场景裁剪、LOD(Level of Detail)

多层次细节管理、纹理压缩等技术,提升渲染效率和多平台适配性。

在发展趋势上,DOMs 技术正呈现出多源数据融合化、处理流程自动化、模型轻量化与应用场景多元化的特点³。一方面,无人机、LiDAR 与多光谱影像融合,使得露头建模不局限于表面几何形态,还可提取矿物组成、风化程度等多维信息;另一方面,基于深度学习的影像识别与点云处理算法,正大幅提高建模自动化程度与精度;同时,轻量化模型与 WebGL、Cesium 等在线三维引擎的结合,使 DOMs 可在网页、移动端、VR/AR 等多终端流畅运行;此外,DOMs 应用场景已从野外科研、教学实习扩展至博物馆展陈、地质公园解说、灾害监测与文化遗产保护等多个领域。

与传统二维影像或实体模型相比,DOMs 在地质信息记录与传播方面具有以下显著优势:(1)在厘米甚至毫米级精度下完整还原露头细节;(2)可在虚拟环境中操作模型,突破展厅物理空间与展示角度的限制;(3)数字模型可跨平台部署,实现线上线下融合传播。

智慧博物馆建设核心目标是利用数字化、网络化、智能化手段提升展陈服务与科学传播的整体水平。地质类博物馆展陈对象多为古生物化石、矿物岩石标本和地质模型,这些展品虽科学价值较高,但缺乏直观情境信息,难以让观众理解时空背景。例如,仅呈现采集自绵阳江油马角坝的腕足类化石,无法直观呈现其生存环境和四川盆地海陆演化历史。地质类博物馆展陈智慧化转型关键在于如何将静态、抽象的科学信息转化为动态、可感、可交互的学习体验。在此之下,由三维实景数字露头技术驱动的智慧博物馆建设,可采取以下模式:

(1) 沉浸式展示模式:将地质景观或化石产地的三维模型与大屏幕投影或 VR 头显结合;

(2) 交互式探究模式:在触控屏或桌面交互平台上提供可旋转、缩放的模型,嵌入科学解说与探究任务;

(3) 混合现实模式:通过 AR 眼镜或移动终端,将数字露头模型叠加在展品实物上,实现虚实融合的多维信息呈现;

(4) 线上虚拟展厅模式:将 DOMs 模型嵌入博物馆官方网站或小程序,实现远程访问与社交媒体传播。

这些模式既丰富了展陈表达手段,还为博物馆提供跨时空的科普传播能力,使其教育功能突破实体空间限制。

3 三维实景数字露头技术驱动的智慧博物馆建设的实践

基于 DOMs 驱动的智慧博物馆展厅建设遵循“数据采集—建模处理—交互呈现—教育传播”的闭环体系,实现路径有四个步骤:

数据采集层,通过无人机航摄、地面摄影测量及 LiDAR 扫描等多源手段,获取高重叠度、多视角露头及化石产地影像与点云数据,以完整保留几何精度与纹理细节。

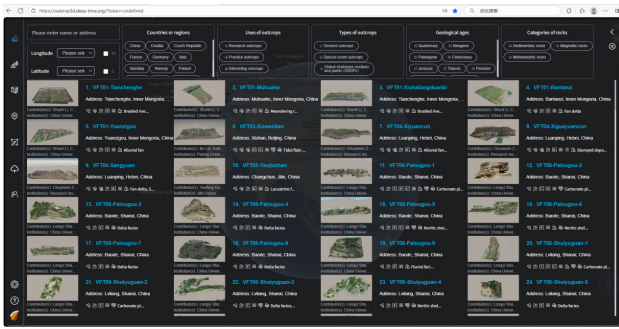


图1 应用于博物馆展陈的三维实景数字露头数据库

建模处理层,利用 SfM 及多视影像匹配算法进行多视影像平差,生成高密度点云;再通过三角网格重建与高分辨率纹理映射,实现几何结构与外观高度还原;并结合场景裁剪与 LOD 技术进行模型优化,以提升跨平台渲染性能。

交互呈现层,将优化后的模型部署至触控屏、大型互动投影、VR/AR 设备及 Web 端平台,配合剖切、缩放、信息标签点击等交互功能,构建多终端、多场景沉浸式体验,使观众可自主探索与发现知识点,提升参与度。

教育传播层,在模型中嵌入地质解说、剖面图、演化动画及化石发掘影像等多模态信息,并通过线上虚拟展厅、微信公众号及视频号等途径进行二次传播,实现展厅内外教育协同。

团队将 DOMs 技术应用于博物馆 3 个常设展厅中:

地质环境厅以四川及周边地质构造、地貌景观和典型剖面为核心,传统展陈多以岩石标本与二维展板为主,空间信息还原有限。DOMs 技术可将峨眉山、马角坝等地典型景观构建为厘米级精度模型,观众可在触控屏或 VR 中使用旋转、缩放、获取详细信息等功能,实现室内“野外考察”体验;

龙行川渝厅以恐龙化石及中生代生态为主题,传统展陈缺乏化石与发现环境的直观关联。利用 DOMs 技术将化石发掘地全景数字化,保留化石原位分布并引入交互系统,观众可查看化石分布与地层关系、模拟测量骨骼,展项实现恐龙化石与产地露头虚拟叠加,增强故事性与沉浸感。

生命探索厅以生命起源与演化为主线,现有展陈为化石展品与图文展板,缺乏对古生态演替的直观呈现。结合数字露头与动画模拟,可动态关联化石产地剖面与演化过程,如:在展示大竹重庆鱼化石时,同时呈现产地岩层与沉积成化石的过程,实现“化石—产地—环境—演化”的完整认知链条。

4 三维实景数字露头技术驱动下的博物馆展陈特色与公众教育效能提升

4.1 沉浸感:从“观看展品”到“进入场景”

沉浸感是衡量智慧展厅体验质量的重要指标,反映观

众在参观过程中对情境与内容的代入程度和专注度。传统地质类展陈多以二维图文与静态标本为主,观众感官刺激较为单一,难以形成强烈情境体验。引入 DOMs 技术,通过高精度建模与真实纹理映射,将野外露头、化石产地和古生态场景以三维可交互的形式还原到展厅中,显著增强了视觉真实度和空间沉浸感。例如,在地质环境厅的“四川盆地演化”展项中,观众可放大细节观察峨眉山玄武岩柱状节理,了解二叠纪峨眉山大火成岩省事件。

4.2 参与度:从“被动接收”到“主动探究”

参与度体现观众在展览中的互动频率与深度,是检验智慧展厅教育成效的重要维度。DOMs 展项为观众提供了自主探索的可能,观众可根据兴趣选择观察角度、缩放比例位置,在模型中查找信息标签,甚至完成设定的探究任务。例如,“龙行川渝厅”的虚拟发掘任务要求观众在数字剖面中找到并标注恐龙化石位置。这种从被动接受到主动探索的转变,是智慧展厅教育价值提升的重要标志。

4.3 传播延展性:从“展厅观众”到“线上共享”

智慧展厅建设的价值不仅体现在观众体验上,还应通过数字化资源的传播实现影响力延伸。博物馆将部分典型 DOMs 展项嵌入“成都理工大学博物馆”微信公众号中,观众可在手机或电脑端自由浏览模型、旋转观察并获取相关解说信息。据统计,数字露头模型上线后,相关网页访问量增至原有的 3.4 倍,相关地质露头科普短视频播放量超 200 万次,有效提升公众参与度和传播覆盖面。

此外,DOMs 数据可对接学校课程和在线学习平台,形成可复用的数字化教育资源。既延长了展项生命周期,也拓展了博物馆教育服务边界,使其成为区域性科教的重要数字资源中心。

5 总结

基于三维实景数字露头技术,成都自然馆构建了“数据采集—高精建模—交互呈现—教育传播”的智慧博物馆展厅建设体系。实践表明,DOMs 能够高精度再现野外地质景观的空间形态与地层结构,并通过多终端、多场景交互呈现,有效弥补传统展陈在真实感、动态性与参与度方面的不足。该模式为地质类博物馆数字化转型提供可复制、可推广的技术路径,对提升公众地学认知和科学素养具有重要意义。

参考文献

- [1] 贺琳,杨晓飞.浅析我国智慧博物馆建设现状[J].中国博物馆,2018,(03):116-126.
- [2] 陈建华,钟瀚霆,侯明才,等.数字露头实景三维Web平台研究与云端地质考察应用[J].地球学报,2024,45(02):232-242.
- [3] 徐琪,沈含笑,董少春,等.地质露头与标本的三维数字化现状与展望[J].高校地质学报,2023,29(03):403-418.