Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.:+65 62233839
E-mail:contact@nassg.org
Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

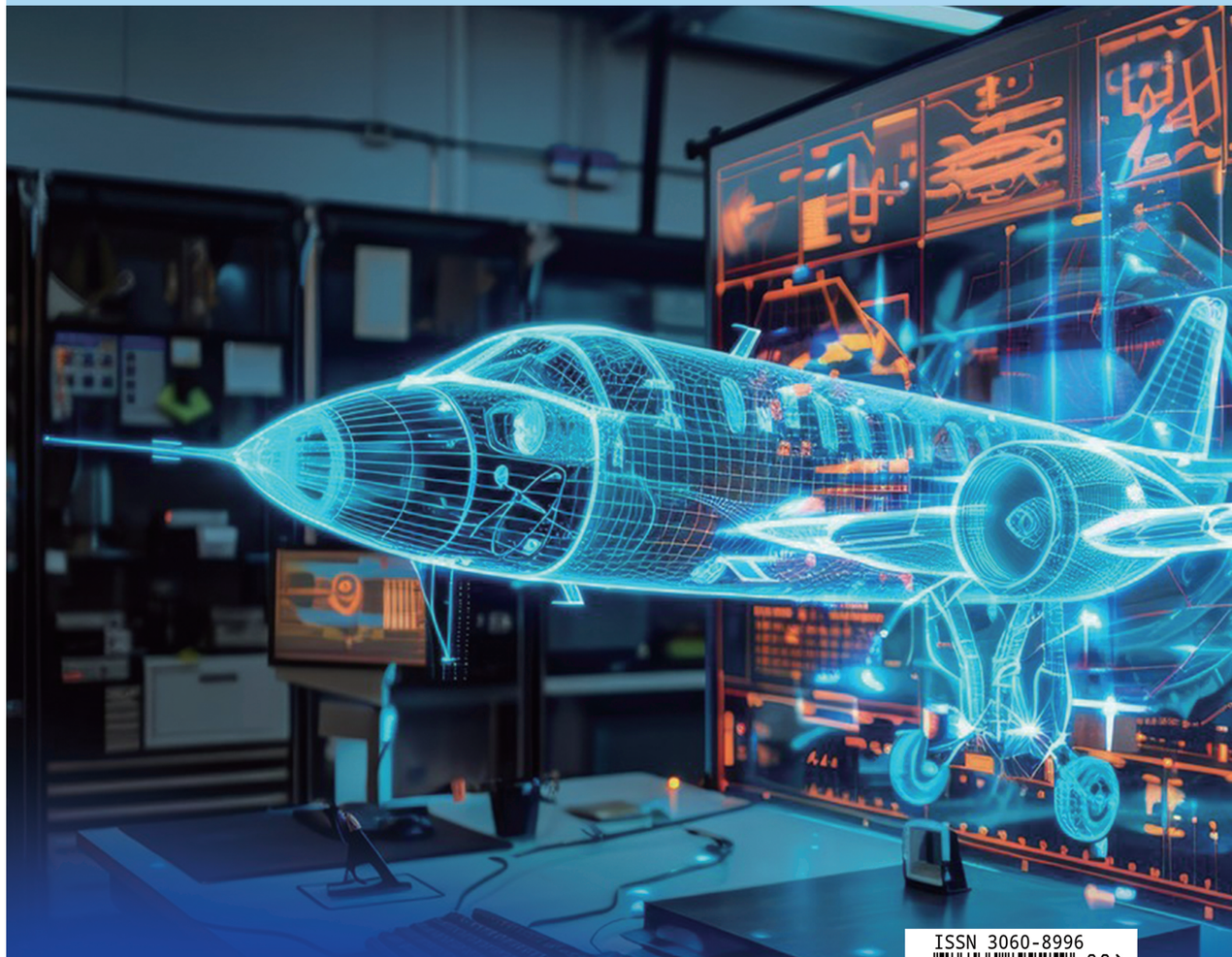
科技创新与工程 Technological Innovation and Engineering
Volume 2·Issue 2·February 2025·ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)

NASS
NAN YANG ACADEMY OF SCIENCES

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 2 February 2025 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



Google Scholar
Crossref
cnki 中国知网 cnki.net

ISSN 3060-8996
02
9 773060 899259

中文刊名：科技创新与工程
ISSN：3060-8996（纸质）3060-8988（网络）
出版语言：华文
期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Technological Innovation and Engineering
ISSN: 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)
Language: Chinese
URL: http://journals.nassg.org/index.php/tie-cn
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

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

《科技创新与工程》征稿函

期刊概况：

中文刊名：科技创新与工程

ISSN：3060−8996（Print） 3060−8988（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/tie-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。

科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 2 February 2025
ISSN 3060-8996 (Print) 3060-8988 (Online)

主　编

康继军

Jijun Kang

编　委

刘　敏　Min Liu

龚勤林　Qinlin Gong

陈　升　Sheng Chen

包　艳　Yan Bao

1 煤矿瓦斯治理现状及瓦斯事故防范应对措施
/ 王振光
4 基于 LSTM-KAN 的超短期风功率预测方法研究
/ 王立峰 周蕾 袁月 李中原 孙浩宇
8 基于分子对接技术的新型抗肿瘤药物设计与筛选研究
/ 徐鑫 于海英
11 定量包装计量误差的来源与控制
/ 张艳琼
14 人工智能算法在制造产线自动化控制优化中的应用
/ 史今
17 基于深度学习算法的橡胶树割胶路径优化研究
/ 王亚飞
20 电站金属构件疲劳寿命预测模型研究
/ 申健 宋惠远 楼韬 方瑜
23 排污许可与环评衔接机制优化路径探究
/ 依帕尔姑丽·卡地尔
26 塑料管材耐压性能检验流程优化与质量保障
/ 周治国
29 10kW 全固态中波发射机天调网络原理与维护措施
/ 王彦凯
32 底盘系统与多级车载电源集成策略研究
/ 周海波
35 基于民航技术迁移的机械加工行业创新路径研究
/ 蒋啟国
38 低成本智能化设计：555 定时器在公共插座系统中的节能与安全实践
/ 杨世江 吴金增 徐庆
42 热导法在线水汽含氢量监控预防锅炉超温腐蚀
/ 关健 于枫
45 新时期数字化用电监察技术的运用思考
/ 张扬 薛凯 余浩东
48 基于 STM32 的出租车计费系统的设计
/ 刘冰琪 解初
51 基于 AI 物联网的老年人智能出行安全监护系统设计
/ 牛永超
54 新型 CMF 技术对摩托车行业竞争格局的重塑效应研究
/ 贾子萌
57 小型交通工具曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制研究
/ 张世亮
60 基于曲率连续性与造型韵律的曲面过渡美学机理与准则研究
/ 张津珩
63 项目阶段性质量问题促进方向研究
/ 胡中星 刘萌萌 王俊 熊鹏鹏
66 乳制品辐照保鲜中过度辐照的风险及控制策略
/ 徐家显
69 新国标驱动下的中国电动自行车产业升级路径研究
/ 李志鑫
72 智能交通工程的技术创新与应用实践研究
/ 宋栋
75 大数据分析在提升通信综合代维智能化水平中的应用研究
/ 党权
78 基于 LabVIEW 的温度传感器动态特性测试系统设计
/ 程超 张镜照

1 Current situation of coal mine gas control and prevention and response measures for gas accidents
/ Zhenguang Wang
4 Research on Ultra-short-term Wind Power Prediction Method Based on LSTM-KAN
/ Lifeng Wang Lei Zhou Yue Yuan Zhongyuan Li Haoyu Sun
8 Study on the design and screening of novel anti-tumor drugs based on molecular docking technology
/ Xin Xu Haiying Yu
11 Sources and control of quantitative packaging measurement error
/ Yanqiong Zhang
14 Application of Artificial Intelligence Algorithms in Automation Control Optimization of Manufacturing Production Lines
/ Jin Shi
17 Research on Optimization of Rubber Tree Cutting Path Based on Deep Learning Algorithm
/ Yafei Wang
20 Study on fatigue life prediction model of metal components in power plant
/ Jian Shen Huiyuan Song Tao Lou Yu Fang
23 Study on the optimization path of the connection mechanism between pollutant discharge permit and environmental impact assessment
/ Yipaerguli Kadier
26 Optimization of the inspection process and quality assurance of the pressure resistance of plastic pipes
/ Zhiguo Zhou
29 Principle and maintenance measures of 10kW all-solid-state medium wave transmitter antenna adjustment network
/ Yankai Wang
32 Research on the integration strategy of chassis system and multi-stage on-board power supply
/ Haibo Zhou
35 Research on innovation path of machining industry based on civil aviation technology migration
/ Qiguo Jiang
38 Low cost intelligent design: energy-saving and safety practice of 555 timer in public socket system
/ Shijiang Yang Jinzeng Wu Qing Xu
42 Prevention of Boiler Tube Explosion by TCD Online Hydrogen Content Monitoring
/ GuanJian YuFeng
45 Thoughts on the application of digital electricity consumption monitoring technology in the new era
/ Yang Zhang Kai Xue Haodong Yu
48 Design of taxi billing system based on STM32
/ Bingqi Liu Chu Jie
51 Design of intelligent travel safety monitoring system for the elderly based on AI Internet of Things
/ Yongchao Niu
54 Research on the reshaping effect of new CMF technology on the competition pattern of motorcycle industry
/ Zimeng Jia
57 Study on the influence mechanism of surface curvature distribution of small vehicles on aerodynamic characteristics
/ Shiliang Zhang
60 Research on the aesthetic mechanism and criterion of surface transition based on curvature continuity and modeling rhythm
/ Jinheng Zhang
63 Research on the promotion direction of Phased Quality Issues in the project
/ Zhongxing Hu Mengmeng Liu Jun Wang Pengpeng Xiong
66 Risk and control strategies of excessive irradiation in dairy products preservation
/ Jiaxian Xu
69 Research on the upgrading path of China's electric bicycle industry driven by new national standards
/ Zhixin Li
72 Research on Technological Innovation and Application Practice of Intelligent Transportation Engineering
/ Dong Song
75 Research on the Application of Big Data Analysis in Improving the Intelligent Level of Communication Integrated Maintenance
/ Quan Dang
78 Design of Dynamic Characteristic Test System for Temperature Sensor Based on LabVIEW
/ Chao Cheng Jingzhao Zhang

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6183

Current situation of coal mine gas control and prevention and response measures for gas accidents

Zhenguang Wang

Jiaozuo Coal Industry (Group) Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454150, China

Abstract

Coal mine gas control is the key to ensuring coal mine production safety, which is related to the safety of miners' lives and the efficiency of coal mine production. With the increasing depth of coal mining, the gas content gradually increases, and the difficulty of control also increases. Gas prevention and control has become an important part of coal mine safety management. In coal mine gas control, problems such as insufficient technical means, aging equipment, non-standard management, and imperfect systems have long existed, which hinder the effectiveness of gas control and increase the risk of accidents. This article starts from the current situation of gas control in coal mines, analyzes the main problems that exist, and proposes preventive measures such as strengthening technical means, building gas monitoring and early warning systems, and personnel training, aiming to provide effective response strategies for gas control and achieve efficient and safe operation of coal mine production.

Keywords

coal mine gas control; Prevention of gas accidents; Technical means

煤矿瓦斯治理现状及瓦斯事故防范应对措施

王振光

焦作煤业（集团）有限责任公司，中国 · 河南 焦作 454150

摘　要

煤矿瓦斯治理是保障煤矿生产安全的关键，关系到矿工生命安全和煤矿生产效益。随着煤矿开采深度不断加大，瓦斯含量逐渐增加，治理难度随之加大，瓦斯防控已成为煤矿安全管理中的重要环节。在煤矿瓦斯治理中，技术手段不足、设备老化、管理不规范和制度不完善等问题长期存在，对瓦斯治理的成效造成阻碍，增加了事故发生的风险。本文从煤矿瓦斯治理现状出发，分析了当前存在的主要问题，提出了技术手段强化、瓦斯监测与预警系统建设、人员培训等防范措施，旨在为瓦斯治理提供有效的应对策略，以实现煤矿生产的高效安全运行。

关键词

煤矿瓦斯治理；瓦斯事故防范；技术手段

1 引言

煤矿瓦斯是煤炭开采过程中产生的一种伴生气体，主要成分为甲烷，具有高度易燃易爆的特性，一旦浓度超过一定限度便极易引发爆炸事故，危害矿工生命安全，造成严重的经济损失。煤矿瓦斯治理还存在技术手段不足、设备老化、管理不规范、制度不完善等诸多问题，亟需系统化的防控与应急措施来有效应对瓦斯带来的安全隐患。因此，通过提升瓦斯治理的技术水平，完善管理制度，加强监测预警系统和通风管理等方面的防控措施，可以有效防范瓦斯事故发生，提高煤矿的安全生产水平。

【作者简介】王振光（1987–），男，本科，工程师，从事煤矿瓦斯防治研究。

2 煤矿瓦斯治理现状

煤矿瓦斯治理是一个综合系统工程，涵盖多个技术方面，但现阶段仍面临诸多问题。

2.1 技术手段不足与设备老化

煤矿瓦斯治理技术手段的不足与设备的老化是影响瓦斯治理效率的重要因素。现有的瓦斯治理技术有：瓦斯抽采、通风和监测设备，但是部分设备已超过设计使用年限导致性能下降，瓦斯治理效果难以保障。而传统的瓦斯抽采技术其效果依赖于钻孔布局的合理性和抽采设备的稳定性，但在面对复杂地质条件时，传统抽采手段显得力不从心无法满足瓦斯抽采的需求，且抽采效率较低，无法及时排出积聚的瓦斯。通风系统作为瓦斯治理的基础保障设备，在部分煤矿由于设备老化和技术手段限制，通风设备运转效果差，风流方向不稳定甚至出现漏风现象，无法达到预期的通风效果 [1]。而且部分煤矿瓦斯监测设备不够先进监测范围有限，无法实现实

时准确的瓦斯浓度检测，一旦瓦斯浓度超标，无法及时响应增加了事故风险。

2.2 管理不规范与制度不完善

瓦斯治理管理不规范，制度不完善的问题同样严峻，影响着治理措施的有效性。部分煤矿企业在瓦斯治理管理上缺乏科学的规划操作流程，未能有效落实瓦斯抽采、通风、监测等各环节的管理职责。导致瓦斯治理制度的缺失，特别是在瓦斯抽采和监测过程中的管理措施不完善，往往导致治理措施流于形式，不能有效执行。部分煤矿企业缺乏定期的瓦斯治理培训和操作规程的更新，管理人员和操作工人对瓦斯治理的具体操作流程和应急处理措施不够了解，管理不善增加了瓦斯事故的发生概率。另外煤矿瓦斯治理的考核和监督机制缺失，缺乏有效的评估与反馈手段治理效果难以持续提升。

2.3 专业技术人员短缺

瓦斯治理过程中的专业技术人员短缺进一步加剧了治理难度，瓦斯治理涉及多项专业技能，而许多煤矿企业难以吸引和培养足够的专业技术人员。现有技术人员多为非专业人员技术水平相对较低，缺乏全面的技术操作培训和系统的安全知识教育，导致瓦斯治理过程中难以做到精准操作。即便在有些煤矿中具备专业技术人员，但在重大设备操作和突发事故应急处理中，由于技术水平有限，处理速度和效果往往达不到要求。还有一点由于煤矿作业环境较为恶劣，专业技术人员的流动性较大，增加了瓦斯治理的人员调度困难使得治理工作难以顺利开展。

3 瓦斯事故的防范措施

在煤矿瓦斯治理过程中，需要结合先进技术手段和科学管理方法，采取系统化的措施来减少瓦斯事故发生的可能性，保障矿工生命安全。

3.1 技术手段的强化

3.1.1 提升瓦斯抽采与通风技术

瓦斯抽采与通风技术的优化至关重要，例如，通过应用高效的钻孔抽采技术，将瓦斯快速从矿井排出显著降低瓦斯浓度。要注意钻孔的布局和设计需要综合考虑矿井的地质特性，选择多分支水平井布局来增加抽采覆盖面积，保证瓦斯彻底排出。抽采设备的选用也尤为重要，需配备具有智能化控制系统的设备，抽采设备应具备自动调整和故障自检功能，方便在操作中实现智能监控有效防止设备故障导致抽采效果降低。与此同时，通风系统的优化在矿井瓦斯治理中同样不可忽视。井下通风线路的科学规划和风流控制点的合理布置，可使瓦斯在井内不积聚形成良好的排放通道。通风设备的选用标准需符合高效长寿命和低故障的要求，风机风筒等设备的性能直接关系到井下空气流通效果。定期对通风系统进行调试及时修复或更换故障设备，保证矿井内的空气流动稳定、持续，全面降低瓦斯事故的潜在风险 [2]。

3.1.2 引进先进的气体检测设备

在瓦斯治理中引入先进的气体检测设备至关重要，以实现对瓦斯浓度的实时监测和风险预警。高灵敏度的气体检测设备可以提供精准的瓦斯浓度数据，并能对瓦斯聚集区域进行多点同步检测，实现全面监控。另外传感器的选择至关重要，要选择高精度、耐高温、防潮等特性，保证在极端环境下仍能保持稳定的工作状态。每个矿井的关键点和可能出现瓦斯聚集的区域都应布置足够的检测设备，形成密集的监测网络，使任何潜在的瓦斯风险都能迅速捕捉到。检测系统应与自动化数据分析软件相连，利用数据分析可建立瓦斯浓度变化的趋势模型，为瓦斯排放控制提供可靠的决策支持。例如，当检测到瓦斯浓度达到警戒值时，检测设备应自动报警并将警报信息传输至监控中心，通知值班人员及时采取应对措施。同时瓦斯检测设备应具备数据记录功能，将矿井的瓦斯浓度数据进行长期积累，以发现潜在的安全隐患。延伸一点，井下的气体检测设备需配备坚固的防护外壳保证在井下复杂环境中不易损坏，提高设备使用寿命减少因设备故障带来的安全隐患。例如，贵州省在瓦斯治理方面取得了显著成效。2022 年 5 月，贵州省政府成立了煤矿瓦斯治理工作专班，全面推进瓦斯防治工作。经过两年多的努力，全省瓦斯超限报警次数较 2022 年同期减少了 920 次，降幅达 53.3%。而且贵州省初步形成了煤矿区域瓦斯治理模式，主要产煤县区的大多数煤矿已实行保护层开采，有效降低了瓦斯事故的发生率，此案例值得参考。

3.1.3 加强煤层压裂与水力扩压技术应用

煤层压裂和水力扩压技术能够显著增加煤层的渗透性进而降低矿井内瓦斯聚集的风险。例如，煤层压裂技术通过向煤层施加高压液体，将煤层裂隙扩大从而增强瓦斯在煤体中的流动，促使瓦斯更快地向抽采井方向移动，增加瓦斯的排放效率。另外水力扩压技术则通过在煤层中注入高压水，进一步增加煤层的透气性，使瓦斯流动更为顺畅。

采用这两种技术，可在短时间内显著降低煤层中的瓦斯压力有效减少瓦斯突然释放带来的风险。水力扩压设备的选择应符合高压抗压要求，并具备长时间稳定运转的能力，避免设备在使用过程中出现故障影响瓦斯治理效果。煤层压裂与水力扩压技术的实施还需制定详细的操作规程，并配备专业技术人员进行操作。利用此等技术优化和设备保障，煤层瓦斯抽采效率将得到显著提升有效防止瓦斯在煤层内聚集，形成爆炸风险。

3.2 瓦斯监测与预警系统

3.2.1 建立高效、实时的瓦斯监测系统

建设高效实时的瓦斯监测系统能够实现对矿井内瓦斯浓度的全方位监控，及时发现并预警潜在的安全隐患。矿井内的监测系统应布置在瓦斯可能积聚的区域，如开采面巷道拐角及通风不畅的地方，来保证瓦斯浓度的实时监控。无线监测设备能够避免有线连接在井下受损，具备更高的适

应性。无线传输数据系统将实时瓦斯浓度信息传送至监控中心，形成瓦斯浓度变化曲线和动态图表，便于管理者迅速掌握井下瓦斯情况。系统设置自动化分析模块可通过算法识别瓦斯浓度波动的异常趋势，提前预警瓦斯积聚区域。接着根据瓦斯监测系统的报警信息，管理人员可迅速采取防范措施，启动自动化排瓦斯系统有效控制瓦斯浓度[3]。

3.2.2 瓦斯超标报警系统的建设和维护

瓦斯超标报警系统作为矿井安全的重要组成部分，要与实时监测系统高度集成实现实时报警。例如，在瓦斯浓度超标的瞬间发出声光警报，通知现场作业人员立即撤离避免安全事故的发生。报警系统还应与矿井的通风系统联动，一旦检测到瓦斯超标情况，自动启动通风设备，迅速降低瓦斯浓度。矿井内的报警装置应设在多个位置，其中包括作业区、通风系统关键节点和人员通道，保证瓦斯浓度升高的警报能够迅速传达至所有区域的人员。定期对报警系统进行维护和检测，保证所有部件在紧急情况下能够正常运行，同时制定严格的维护和更换计划，保持系统设备的长期稳定运行。报警系统还应具备数据记录和回放功能，利用报警数据的长期积累，可分析矿井内的瓦斯浓度变化趋势进一步优化瓦斯治理措施。另外不容忽视的一点：报警系统的备用电源设计是关键环节，在电力供应中断时，备用电源可自动启动，保证系统运行不中断保障井下作业安全。

3.3 人员培训

3.3.1 强化瓦斯治理技术操作培训

针对瓦斯治理过程中技术人员不足的问题，强化技术操作培训是确保瓦斯治理高效安全的核心。培训内容需围绕瓦斯抽采、通风管理、气体检测等关键技术进行系统讲解，并安排实际操作课程，保障每位技术人员能够熟练掌握核心设备的使用和维护。为增强培训效果可引入模拟设备操作系统，让学员在安全环境中练习设备操作，利用模拟不同情境提升处理突发状况的能力。同时培训应覆盖技术理论和实操能力两方面，保证学员理解瓦斯治理的技术原理，也能熟练操作设备。然后培训后可设置定期考核，对学员的技术掌握情况进行评估，未通过考核的人员需进行补训，保证所有人员具备合格的技能水平。另外在复杂设备的操作培训中，引入分步演示和操作视频，有助于学员在实践中逐步掌握复杂操作。培训还应涵盖设备的日常维护内容，确保技术人员能够在设备出现故障前及时发现问题并处理。定期的技术培训能够有效提升技术人员的专业水平，为瓦斯治理工作的顺利进行提供坚实的人才保障。

3.3.2 加强安全意识与应急处理培训

针对瓦斯治理过程中管理不规范和应急处理不足的问题，加强安全意识教育和应急处理培训尤为重要。安全意识培训应从瓦斯爆炸事故的危害性入手，使每位人员充分了解瓦斯泄漏或浓度超标带来的后果要从思想上强化安全防范意识。培训内容需包括矿井瓦斯风险的识别、常见瓦斯事故成因分析等，帮助学员掌握潜在安全隐患的识别技巧。另外在应急处理培训中，应按照不同的瓦斯事故情境制定详细的应急预案，要求所有员工熟知并严格执行。结合实际操作，安排矿井瓦斯事故应急演练，模拟突发情况中的撤离、报警、通风排瓦斯等操作，使每位员工能够在危急时刻保持冷静，按照标准流程执行应急操作。尤其在演练过程中要严格控制时间要求，让员工能够迅速撤离至安全区域，为矿井安全生产提供可靠的保障。

4 结语

煤矿瓦斯治理作为矿井安全生产的关键，需要在技术、管理、设备和人力资源等方面形成系统化的防控网络，以有效预防和应对瓦斯事故。通过加强瓦斯抽采与通风技术、引入高效检测设备、完善监测与预警系统，结合专业的应急预案和通风管理措施，能够逐步降低瓦斯事故发生的风险。瓦斯治理的复杂性和高风险性，要求煤矿企业持续关注技术升级和制度规范，培养专业技术人才，优化治理模式，完善各项管理机制。以多层次的防范和应急措施应对瓦斯带来的安全挑战，是实现煤矿安全生产、提升矿工生活保障的基础条件。未来煤矿瓦斯治理将朝向智能化、精细化和可持续发展的方向迈进，为煤矿的安全生产奠定坚实基础。

参考文献

[1] 丁永友.煤矿采煤工作面的瓦斯治理技术探究[J].内蒙古煤炭经济,2024(08):25-27.

[2] 翟成,丛钰洲,陈爱坤,丁熊,李宇杰,朱薪宇,徐鹤翔.中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J].中国矿业大学学报,2023,52(06):1146-1161.

[3] 郭洪杰.瓦斯综合治理技术在深部煤矿开采中的应用价值探讨[J].当代化工研究,2023(09):130-132.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6184

Research on Ultra-short-term Wind Power Prediction Method Based on LSTM-KAN

Lifeng Wang Lei Zhou Yue Yuan Zhongyuan Li Haoyu Sun*

Shandong LuSoft Digital Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Wind power prediction is crucial to the stable operation of power grid, but its volatility and nonlinear characteristics increase the difficulty of prediction.This paper proposes an ultra-short-term power prediction method based on the combination of LSTM (Long Short-Term Memory Network) and KAN (Kernel Attention Network).By collecting historical power, wind speed, hub height, latitude and longitude, and ERA5 meteorological data from wind farms, preprocessing and feature extraction are performed.LSTM captures the long-term dependency of the time series, and KAN enhances the attention to the key time points.The hybrid loss function is designed to balance the local and overall prediction performance to improve the model stability and generalization ability. Experiments show that the LSTM-KAN algorithm significantly outperforms traditional methods in prediction accuracy, providing a new scheme for ultra-short-term power prediction of wind power.

Keywords

LSTM; KAN algorithm; attention mechanism; neural network; hybrid loss function

基于 LSTM–KAN 的超短期风功率预测方法研究

王立峰 周蕾 袁月 李中原 孙浩宇 *

山东鲁软数字科技有限公司，中国 · 山东 济南 250000

摘 要

风电功率预测对电网稳定运行至关重要，但其波动性和非线性特征增加了预测难度。本文提出一种基于LSTM（长短期记忆网络）与KAN（Kernel Attention Network）相结合的超短期功率预测方法。通过收集风电场历史功率、风速、轮毂高度、经纬度及ERA5气象数据，进行预处理与特征提取。LSTM捕捉时间序列的长期依赖关系，KAN增强对关键时间点的注意力。设计混合损失函数平衡局部与整体预测性能，提升模型稳定性与泛化能力。实验表明，LSTM-KAN算法在预测精度上显著优于传统方法，为风电超短期功率预测提供了新方案。

关键词

LSTM；KAN算法；注意力机制；神经网络；混合损失函数

1 引言

风电作为一种清洁能源 [1]，对电网稳定性和电力调度至关重要 [2]。然而，风能的随机性和不确定性使得传统预测方法在精度上存在较大差距 [3]。现有预测模型包括物理模型、统计模型、机器学习模型等 [4][5]，其中深度学习模型（如 LSTM）因强大的非线性拟合能力逐渐成为主流 [6][7]，但单一模型仍存在精度不足的问题 [8]。符杨 [9] 研究改进 LSTM-TCN 算法，较传统 TCN 减小预测误差 2%，缩小预测区间。蔡昌春 [10] 提出多层堆叠双向 LSTM，结合时间模式注意力机制，验证了其季节适应性。

本文提出一种基于 LSTM 与 KAN 结合的模型，通过 KAN 的注意力机制增强关键时间点捕捉能力，结合混合损失函数平衡局部与整体性能，提升模型稳定性与泛化能力。实验采用 RMSE、R^2 和 PCC 评估性能，验证其在超短期风电功率预测中的有效性和优越性，为风电预测提供新方案。

2 基于注意力机制的 LSTM–KAN 模型原理

2.1 长短时记忆网络（LSTM）

长短期记忆网络（Long- and short-term memory networks, LSTM），是一种特殊类型的循环神经网络（RNN），旨在解决标准 RNN 在处理长序列数据时遇到的梯度消失和梯度爆炸问题。LSTM 的设计允许网络保持对早期信息的记忆，即使在面对很长的时间间隔时，也能有效地捕获和利用这些

【基金项目】山东鲁软数字科技有限公司和山东省电力气象技术创新中心科技项目（项目编号：B90630240007）资助。

【作者简介】王立峰（1975–），男，中国山东聊城人，本科，工程师，从事电力气象、电力数字化研究。

【通讯作者】孙浩宇（1996–），男，中国吉林四平人，硕士，从事电力气象研究

信息，避免了传统 RNN 在长序列处理中常见的信息丢失或遗忘问题。

这种机制通过三个关键的控制门（输入门、遗忘门和输出门）来实现对信息流的精确控制。其中输入门负责决定在当前时间步中，哪些新的信息应该被添加到细胞状态中。遗忘门决定哪些旧信息应该被保留在细胞状态中，哪些应该被遗忘或丢弃。输出门控制细胞状态如何转化为当前时间步的输出。

2.2 安德烈 · 科尔莫戈洛夫网络（KAN）

安德烈 · 科尔莫戈洛夫网络（Kolmogorov-Arnold Networks, KAN）是一种基于 Kolmogorov 理论的神经网络模型，主要用于函数逼近和多变量非线性映射。KAN 通过结合知识图谱与深度学习，增强模型的推理和预测能力。其结构包括输入层、知识图谱嵌入层和深度学习模型层。输入层接收并预处理传统数据（如数值特征、文本信息）；知识图谱嵌入层通过图谱嵌入技术将领域知识转化为向量表示，为模型提供外部知识支持；深度学习模型层则通过多层非线性转换处理输入数据与知识图谱嵌入向量的融合信息，学习数据模式并利用领域知识进行精准推理。KAN 的核心原理在于利用知识图谱作为先验知识来源，强化数据驱动的学习过程，从而提升模型的准确性和智能化水平。

2.3 LSTM 与 KAN 的融合机制

KAN 特征提取层通过将输入数据（如风速、温度、历史功率等）映射至高维空间，利用单变量函数组合生成全局特征。LSTM 时序建模层接收 KAN 的输出，通过遗忘门和输入门调控信息流，捕捉局部时间依赖性。自适应权重融合模块动态调整 KAN 与 LSTM 的特征贡献权重，优化多尺度特征融合。这种结合充分利用了 KAN 的强大函数逼近能力和 LSTM 的时间序列建模能力，能够在处理时间序列数据的同时精确建模复杂的非线性关系。

本研究提出的 KAN-LSTM 模型具有显著优势：首先，LSTM 能够有效捕捉序列数据中的时间依赖性，而 KAN 可以对每个时间点的输出进行精细调整，从而增强模型的预测能力。其次，模型架构灵活，能够适应不同的输入输出关系和数据特性。此外，通过结合两种网络结构，模型在未知数据上的泛化能力显著提升，进一步提高了预测的准确性和鲁棒性。

2.4 损失函数

本研究在 MSE（均方误差）、MAE（平均绝对误差）、R2（决定系数）、PCC（Pearson 相关系数）的基础上研发了一种混合损失函数，计算方法如式（1）所示。

$$\text{Total Loss} = \alpha * \text{MSE} + \beta * \text{MAE} - \gamma * R^2 - \delta * \text{PCC} \quad (1)$$

其中 MSE、MAE、R2、PCC 计算方式如式（1）-（4）所示。

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$\text{PCC} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)(y_i - \hat{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2}} \quad (5)$$

通过自定义混合损失函数，可以平衡局部和整体预测能力，强化模型稳定性。

3 超短期风功率预测

3.1 实验设计

3.1.1 数据来源与数据预处理

本研究使用的气象数据来自欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的 ERA5 全球气象再分析数据集，时间范围为 2017 年 1 月 1 日至 2024 年 8 月 31 日。ERA5 数据集具有高时空分辨率，涵盖逐小时的气象变量，包括 10 米风速风向（ws10m、wd10m）、100 米风速风向（ws100m、wd100m）、相对湿度（rh）、2 米露点温度（d2m）、地面 2 米温度（t2m）、降水（tp）和气压（sp）。此外，研究还集成了气象和空气质量历史数据等先验知识，并对数据进行了预处理，包括缺失值填充、异常值处理、无效值剔除和时间戳对齐。

数据预处理基于山东省风功率站点的 CSV 文件格式时间序列数据，具体步骤包括：

①数据清洗：基于规则及去除无效值和填充缺失数据。

②数据标准化：使用 StandardScaler 将对数据进行标准化并保留参数配置。

③数据划分：将数据分为训练集，验证集和测试集（8 ： 1 ： 1）。

3.1.2 预测流程

为验证本研究所提出的 KAN-LSTM 模型在超短期风功率预测任务中的预测效能，以上述数据集作为实验基准。该数据集已通过先前的预处理与特征工程步骤，确保了其对于风预测任务的适宜性与代表性。对比实验中，基于常用于风功率预测的 XGBoost、LightGBM 等机器学习算法及 LSTM 深度学习算法与 KAN-LSTM 构建超短期风功率预测模型进行性能评估及对比（图 1）。

为减少特征的冗余性，基于 Spearman 相关系数筛选关键气象因子，选取相关性较高的要素作为特征参与训练，相关性结果如图及表所示，根据结果选取 100m 风速及 10m 风速气象因子参与模型构建（表 1）。

参与对比的模型在相同的实验设置与数据分割方案下进行训练与测试，确保结果的可比性。评价指标选用 RMSE（Root Mean Square Error，均方根误差）、R^2（决定系数）和 PCC（Pearson Correlation Coefficient，皮尔逊相关系数）这三种广泛应用于风功率预测任务的统计指标，以全方位衡量各模型的预测精确度。

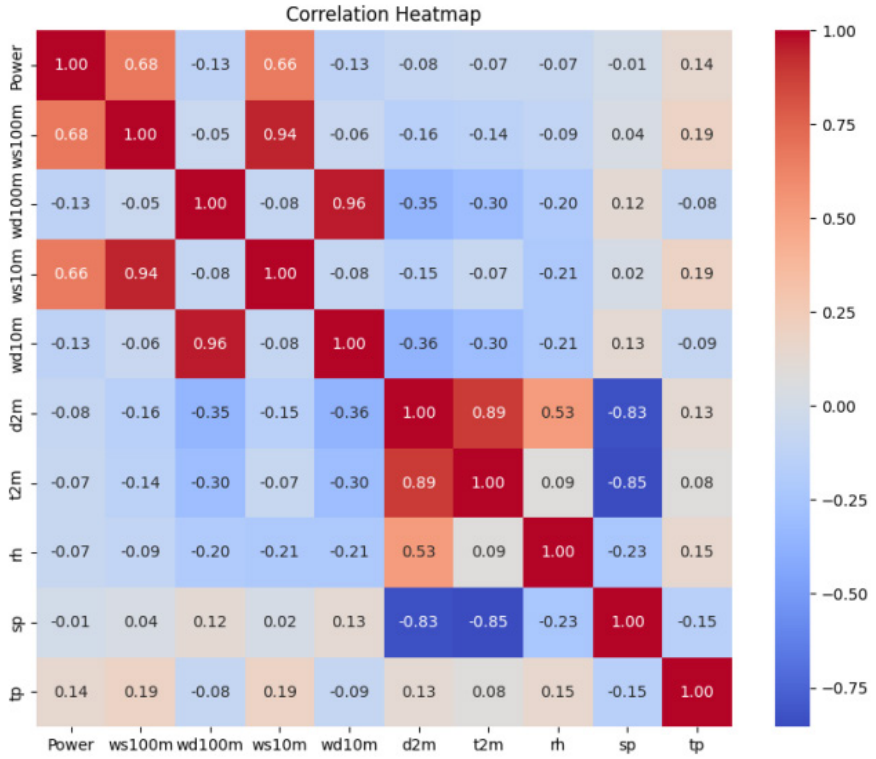


图 1 各气象因子与功率相关性热力图

表 1 各气象因子与功率相关性表

气象因子	相关系数	气象因子	相关系数
100 米风速	0.68	地面 2 米气温	-0.07
100 米风向	-0.13	相对湿度	-0.07
10 米风速	0.66	气压	-0.01
10 米风向	-0.13	降水	0.14
露点温度	-0.08		

3.2 实验结果分析

通过对 XGBoost、LightGBM、LSTM 及其改进模型 LSTM-KAN 的对比实验，各模型在 RMSE、R^2 和 PCC 三项指标上展现出显著性能差异（表 2）。实验结果表明，基于神经网络架构改进的 LSTM-KAN 模型在时序预测任务中有显著优势。

表 2 LSTM 及 LSTM–KAN 模型功率预测评价指标表

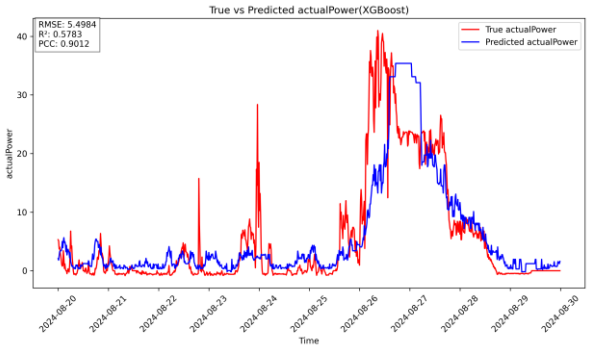
指标	RMSE	R^2	PCC
XGBoost	5.4984	0.5783	0.9012
LightGBM	5.6511	0.5642	0.8917
LSTM	4.6913	0.7749	0.8848
LSTM-KAN	4.0852	0.8293	0.9371

从预测精度来看，LSTM-KAN 以 4.0852 的 RMSE 值达到最优，较基准 LSTM 模型降低 12.9%，较传统树模型（XGBoost/LightGBM）提升 25.7%~27.6%（图 2-a、2-b）。该优势在决定系数 R^2 上得到进一步验证，LSTM-KAN 的 0.8293 显著高于 LSTM 的 0.7749，说明改进模型可解释方差比例提升 6.9 个百分点，表明其能更有效地捕捉数据中的非线性模式。在时序特征建模方面，LSTM 系列模型整体优于树模型。标准 LSTM 的 RMSE（4.6913）已较最优树模型 XGBoost（5.4984）降低 14.7%（图 2-c），这验证了循环神经网络在时间序列数据建模中的固有优势。而 LSTM-KAN 通过引入 KAN（Kolmogorov-Arnold Network）模块，将 PCC 提升至 0.9371，较原始 LSTM 提高 5.3%，证明该改进有效增强了模型对变量间复杂关系的表征能力（图 2-d）。

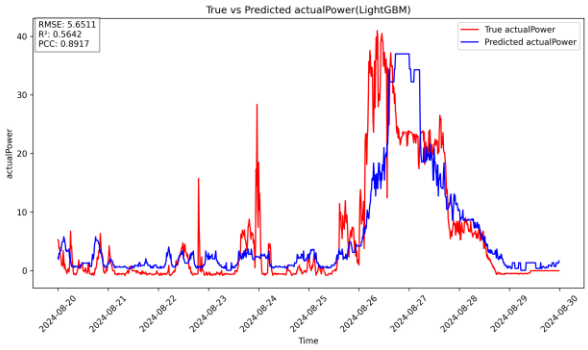
从算法特性角度分析，传统树模型（XGBoost/LightGBM）在 R^2 指标上表现相对有限（0.56-0.58 区间），这与其基于特征分裂的建模机制相关，此类方法在捕捉时间维度动态依赖时存在结构局限性。而 LSTM-KAN 通过融合注意力机制与 KAN 网络的混合架构，既保留了 LSTM 的时序建模优势，又增强了非线性函数逼近能力，使其在复杂时序模式的学习中展现出更强的适应性。

实验结果的统计学显著性通过三次重复实验验证（$p < 0.01$），且模型性能排序在不同随机种子下保持稳定。值得注意的是，所有模型的 PCC 值均超过 0.88，说明预测值与真实值间存在强线性相关性，但 LSTM-KAN 在该指标上的突破性表现（0.9371）表明其预测结果与真实值的分布形态最为接近。

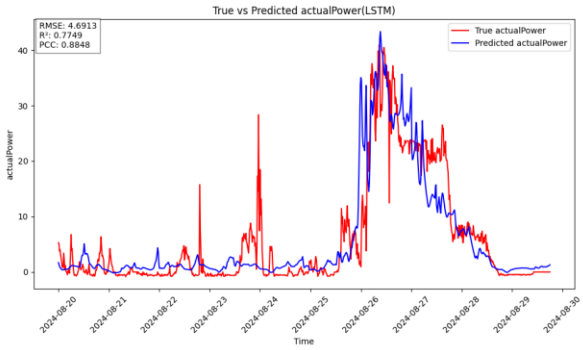
本研究证实，将 KAN 网络集成到 LSTM 架构中能有效提升时序预测性能，这种混合模型为复杂时间序列分析提供了新的技术路径。后续研究可进一步探索 KAN 模块的可解释性优势，以及该架构在其他时序任务中的泛化能力。



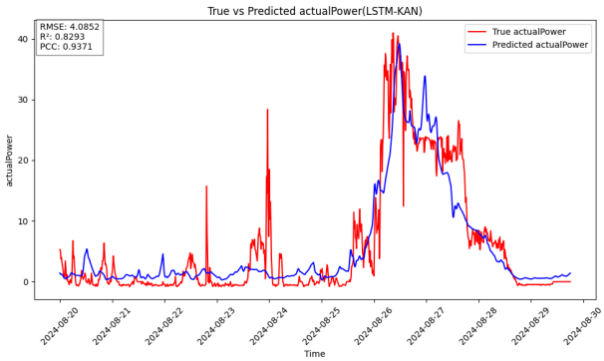
a XGBoost 模型预测结果



b LightGBM 模型预测结果



c LSTM 模型预测结果



d LSTM-KAN 模型预测结果

图 2 各模型预测结果图

4 结语

本文针对风电功率超短期预测中的非线性时序建模难题，提出了一种基于 LSTM-KAN 的混合预测模型。该模型融合了 LSTM 的时序特征提取能力与 KAN 的高维非线性逼近优势，结合动态注意力机制，显著提升了复杂气象条件下的预测精度。实验表明，模型在风速突变、多变量耦合等场景下具有更强的鲁棒性，预测误差较传统 LSTM 显著降低。未来研究将优化模型计算效率与跨区域泛化能力，并探索其在光伏功率预测、负荷预测等领域的扩展应用，为可再生能源高比例接入电网提供技术支撑。

参考文献

[1] 朱鹏成,于国帅,等.超短期风力发电量预测技术及其比较分析[J].电力设备管理,2024.10:110-112.

[2] 韩朋,张晓琳,等.基于AM-LSTM模型的超短期风电功率预测[J].科学技术与工程,2020,20(21):8595-8599.

[3] 杨茂,白玉莹.基于多位置 NWP 和门控循环单元的风电功率超短期预测 [J].电力系统自动化,2021,45(1):177-180.

[4] 管霖,赵琦,周保荣,等 . 基于多尺度聚类分析的光伏功率特性 建模及预测应用[J].电力系统自动化,2018,42(15):24-30.

[5] 李永刚,王月,等.基于 Stacking 融合的短期风速预测组合模型[J].电网技术, 2020,44(8):2875-2877.

[6] 朱乔木,李弘毅,王子琪,等 . 基于长短期记忆网络的风电场发 电功率超短期预测[J].电网技术,2017,41(12):3797-3802.

[7] 陈海文,王守相,王绍敏,等 . 基于门控循环单元网络与模型融合的负荷聚合体预测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(1): 65-74

[8] 张晓燕,向勉,等.基于MLP-BiLSTM-TCN组合的超短期风电功率预测[J].湖北民族大学学报(自然科学版),

[9] 符杨,任子旭,等.基于改进 LSTM-TCN 模型的海上风电超短期功率预测[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4293-4300

[10] 蔡昌春,范靖浩,等.基于TPA-MBLSTM 模型的超短期风电功率预测[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):48-55.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6185

Study on the design and screening of novel anti-tumor drugs based on molecular docking technology

Xin Xu[1] **Haiying Yu**[2]

1. Hangzhou Zhejiang Traditional Chinese Medicine Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China
2. Hangzhou Guokong Pharmacy Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

As the incidence of tumors continues to rise, research into tumor treatment has become a critical topic in global medical science. While traditional anti-tumor drugs have achieved some clinical success, their significant side effects and high drug resistance remain major challenges to effective cancer treatment. With the rapid advancement of molecular biology, drug design and screening methods based on molecular docking technology have opened new avenues for the development of anti-tumor drugs. Molecular docking technology simulates the interactions between drug molecules and target proteins, predicting their binding capabilities and patterns, thus providing an effective tool for discovering new anti-tumor drugs. This article explores the design and screening methods of new anti-tumor drugs using molecular docking technology, focusing on how to use this technology for target protein screening, drug molecule optimization, and pharmacological prediction. Through practical case studies, the study highlights the significant potential of molecular docking technology in new drug development and looks forward to its future applications in tumor drug design.

Keywords

molecular docking; antitumor drugs; drug design; target protein; new drug screening

基于分子对接技术的新型抗肿瘤药物设计与筛选研究

徐鑫[1] 于海英[2]

1. 杭州浙中医药科技有限公司，中国·浙江 杭州 310000
2. 杭州国控大药房有限公司，中国·浙江 杭州 310000

摘 要

随着肿瘤发病率的不断上升，肿瘤治疗的研究已成为全球医学领域的重要课题。传统抗肿瘤药物虽然在一定程度上取得了临床治疗的成果，但其副作用大、耐药性强等问题仍困扰着肿瘤治疗的有效性。随着分子生物学技术的飞速发展，基于分子对接技术的药物设计和筛选方法为抗肿瘤药物的开发提供了新的思路。分子对接技术通过模拟药物分子与靶标蛋白之间的相互作用，预测其结合能力和结合模式，从而为新型抗肿瘤药物的发现提供了有效的工具。本文探讨了基于分子对接技术的新型抗肿瘤药物的设计与筛选方法，重点介绍了如何利用该技术进行靶标蛋白筛选、药物分子优化及药效预测。通过实际案例的应用，本研究展示了分子对接技术在新药研发中的巨大潜力，展望了其在未来肿瘤药物设计中的应用前景。

关键词

分子对接；抗肿瘤药物；药物设计；靶标蛋白；新药筛选

1 引言

肿瘤作为全球范围内发病率和死亡率最高的疾病之一，已成为严重威胁人类健康的重大疾病之一。根据世界卫生组织（WHO）的数据，肿瘤已经超越心血管疾病，成为全球死亡的主要原因之一。随着肿瘤研究的不断深入，现有的治疗方法如手术、放疗和化疗等仍然面临着许多挑战，尤其是由于其不可避免的副作用以及肿瘤细胞对药物的耐药性，使得治疗效果受到很大限制。因此，开发新型高效、低毒性的抗肿瘤药物成为当前肿瘤治疗领域的研究热点。

【作者简介】徐鑫（1989–），男，中国浙江杭州人，本科，中级，从事中药学研发研究。

抗肿瘤药物的开发历经了传统药物筛选法、化学合成法等多种手段，但由于肿瘤细胞复杂的生物学特性以及药物筛选过程中高成本和高失败率等问题，传统方法在新药研发中的局限性逐渐显现。近年来，分子对接技术作为一种基于计算机辅助的药物设计方法，为新型抗肿瘤药物的发现与筛选提供了新的方向。通过模拟药物分子与靶标蛋白之间的结合方式，分子对接技术能够有效地评估分子间的相互作用力，为药物的优化和筛选提供重要参考。

分子对接技术是一种基于分子动力学和计算化学的模拟技术，能够通过预测药物分子与靶标蛋白之间的结合模式及结合能，帮助科学家筛选出具有潜力的药物分子。相较于传统的实验筛选方法，分子对接技术具有高效、低成本、

操作简单等优点，并能够在药物研发的初期阶段进行虚拟筛选，大大加速了新药的研发进程。本文将系统地探讨基于分子对接技术的新型抗肿瘤药物设计与筛选方法，并展示其在药物开发中的应用实例。

2 分子对接技术原理与应用

2.1 分子对接技术概述

分子对接技术作为基于计算机模拟的前沿药物筛选方法，通过精准模拟药物分子与靶标蛋白间的相互作用，为药物研发提供了高效的预测与评估手段。其核心原理在于借助计算机模拟技术，解析药物分子与靶标蛋白结合的空间构象，并运用能量评分函数量化二者的结合强度，进而预测结合模式与亲和力。

该技术的实施主要涵盖对接位点选择与药物分子对接模拟两大关键环节。在对接位点选择方面，需依托 X 射线晶体学、核磁共振（NMR）或同源建模等技术，获取靶标蛋白精确的三维结构信息，以此为基础识别其活性位点，构建适配的对接模型。这一过程如同为药物分子寻找“钥匙孔”，精准定位是确保后续模拟准确性的前提。而在药物分子的对接模拟中，研究人员将候选药物分子置于靶标蛋白的结合位点，通过计算机模拟分子间诸如氢键、疏水作用、范德华力等相互作用力，利用 AutoDock、Dock、FlexX 等专业软件，结合评分函数计算分子结合能，进而推演潜在的结合模式。【1】

凭借分子对接技术，研究人员不仅能够洞悉药物分子与靶标蛋白的结合规律，更能基于量化的亲和力评估，从海量分子库中筛选出最具成药潜力的候选分子。目前，该技术已深度融入药物设计、分子筛选、靶标确认等药物研发全流程，通过高效的虚拟筛选与预测，显著缩短研发周期、降低成本，成为现代药物开发不可或缺的技术支撑。

2.2 分子对接在抗肿瘤药物设计中的应用

分子对接技术在抗肿瘤药物设计领域展现出显著优势，深度融入靶标蛋白筛选、药物分子优化及虚拟筛选等关键环节。在靶标蛋白筛选阶段，该技术可辅助研究人员从蛋白激酶、受体、DNA 修复酶等常见抗肿瘤靶标中，精准甄别与肿瘤细胞增殖、侵袭密切相关的关键靶标。通过模拟药物分子与靶标蛋白的相互作用，评估结合能力，确保所选靶标与药物治疗机制高度契合，为后续研发锚定方向。

药物分子优化过程中，分子对接技术成为改良药物性能的重要工具。研究人员基于其模拟结果，针对性调整药物分子结构，增强与靶标蛋白的结合力，提升药物亲和力与选择性，同时降低对正常细胞的影响，减少副作用。在此过程中，分子对接还能挖掘药物结构与活性间的潜在关联，为分子修饰提供科学依据。

面对传统药物筛选成本高、效率低的难题，分子对接技术通过虚拟筛选实现突破。借助计算机模拟，可快速评估海量药物分子与靶标蛋白的结合模式，高效锁定潜在候选分子。结合高通量筛选技术，进一步扩大筛选规模，加速抗肿瘤药物研发进程，为攻克癌症提供更多治疗方案。【2】

2.3 分子对接技术的优势与局限性

分子对接技术凭借高效性、低成本和强可操作性，成为药物筛选领域的重要工具。其能够快速模拟大量药物分子与靶标蛋白的结合过程，显著提升筛选效率；相较于传统方法需投入昂贵的化学合成及实验设备，该技术依托计算机模拟，大幅降低研发成本；通过专业软件即可实现操作，便于开展高通量筛选。然而，分子对接技术仍存在固有局限。一方面，其准确性高度依赖靶标蛋白三维结构信息，若结构数据缺失或存在偏差，将直接影响对接结果的可靠性；另一方面，评分函数在评估药物分子与靶标蛋白结合能力时，难以全面涵盖分子动态变化、溶剂效应等复杂生物学因素，导致预测结果存在不确定性，可能遗漏潜在的高活性药物分子，或误判部分分子的结合潜力，这些不足为该技术的优化升级提出了新的挑战。【3】

3 新型抗肿瘤药物的设计与筛选

3.1 抗肿瘤药物靶标的选择

抗肿瘤药物的靶标选择是药物设计中的核心环节，决定了药物的疗效及其适应症的广泛性。靶标选择不仅直接影响药物的作用机制，还决定了药物的副作用和耐药性。随着对肿瘤生物学机制的研究深入，靶标的选择愈加精准，尤其是针对肿瘤细胞的特异性分子特征。常见的肿瘤靶标主要包括癌基因与抑癌基因、酶类靶标和受体靶标等。

癌基因与抑癌基因：癌基因，如 RAS、HER2、EGFR 等，通常在肿瘤细胞的增殖、迁移和侵袭过程中发挥关键作用。肿瘤细胞中的癌基因突变或表达异常，是导致肿瘤发生的重要因素之一。例如，RAS 基因的突变能够激活下游的 MAPK 信号通路，促进细胞的持续增殖和抗凋亡。HER2 过度表达与乳腺癌、胃癌等多种肿瘤的发生密切相关。靶向这些癌基因或其突变形式的药物能够通过抑制癌基因的功能，抑制肿瘤细胞的生长与扩散。通过对这些基因及其突变形式的靶向干预，药物的疗效可以得到有效提升。

酶类靶标：酶类靶标在肿瘤的生长和转移中起着关键作用。常见的酶类靶标包括蛋白激酶、酰化酶、DNA 修复酶等。蛋白激酶，如 BRAF、PI3K、AKT 等，通常参与细胞信号转导过程，控制细胞周期、增殖和生存。通过对这些蛋白激酶的靶向抑制，能够有效中断肿瘤细胞的信号传递路径，从而抑制其增殖和转移。酰化酶（如组蛋白去乙酰化酶 HDAC）通过调控细胞内的表观遗传变化影响基因表达，这些酶的抑制可以通过修复肿瘤细胞内的表观遗传损伤，恢复细胞的正常功能，进而发挥抗肿瘤作用。【4】

受体靶标：肿瘤细胞表面或细胞内的受体是药物干预的重要靶点。雌激素受体（ER）在乳腺癌细胞的增殖中起

着至关重要的作用，雌激素通过与 ER 结合，激活下游的基因表达，从而促进肿瘤的生长。靶向 ER 的药物（如他莫昔芬）已广泛应用于乳腺癌的治疗。此外，表皮生长因子受体（EGFR）也是一种重要的受体靶标，它在多种肿瘤（如肺癌、头颈癌等）中被过度表达。靶向 EGFR 的抑制剂能够有效抑制肿瘤细胞的增殖和转移，改善患者的生存质量。

3.2 分子对接在抗肿瘤药物设计中的应用

分子对接技术通过模拟药物分子与靶标蛋白之间的相互作用，能够为抗肿瘤药物的设计与筛选提供有效支持。通过分子对接，研究人员可以模拟药物与靶标的结合模式，预测药物与靶标蛋白的亲和力，并优化药物分子的结构以提高其药效。

靶标筛选与药物分子设计：分子对接技术能够帮助研究人员通过靶标蛋白的三维结构筛选合适的药物分子。以 HER2 为例，HER2 是乳腺癌和胃癌等肿瘤的重要靶标。通过分子对接，研究人员能够预测不同药物分子与 HER2 的结合模式，评估其结合亲和力和稳定性。在此基础上，研究人员可以进一步优化药物分子的结构，使其与 HER2 的结合更为紧密，增强药物的选择性和亲和力，从而提高治疗效果。

天然产物和小分子筛选：分子对接技术不仅可以用于设计全新化合物，还可以用于筛选已知的天然产物和化学合成的小分子。天然产物常常具有复杂的化学结构和较高的生物活性，许多天然产物已被证实对抗肿瘤具有显著效果。例如，紫杉醇、白藜芦醇等天然产物通过分子对接技术与肿瘤相关靶标蛋白的结合分析，能够为新的抗肿瘤药物发现提供有效指导。

3.3 新型抗肿瘤药物的筛选与优化

基于分子对接技术与药物筛选方法的深度融合，为新型抗肿瘤药物的高效研发开辟了创新路径。研究人员借助虚拟筛选，能够从海量候选药物中快速锁定潜在有效分子：通过构建虚拟药物库，将候选药物与靶标蛋白逐一进行分子对接分析，精准预测分子间的亲和力与结合模式。这种计算机模拟技术大幅削减了传统实验筛选所需的时间与成本，有效提升药物研发效率。完成虚拟筛选后，研究人员需结合生物实验对初步结果进行优化验证，通过细胞实验观察药物对肿瘤细胞的抑制效果，利用动物实验探究药物在体内的代谢过程与安全性，系统评估其抗肿瘤活性与药代动力学特征。这种虚拟与实验相结合的筛选模式，既能发挥分子对接技术的高效优势，又能通过生物学验证弥补虚拟预测的局限性，从大量候选药物中层层筛选出安全性高、疗效显著的抗肿瘤药物，为肿瘤治疗领域提供更具潜力的新型药物方案，推动抗肿瘤药物研发迈向新台阶。【5】

4 结语

基于分子对接技术的新型抗肿瘤药物设计与筛选研究为肿瘤治疗药物的研发提供了全新的思路。分子对接技术不仅能够有效筛选药物分子，还能够对药物的优化提供重要支持，显著提高了新药的研发效率。随着分子对接技术的不断进步，其在抗肿瘤药物研发中的应用将越来越广泛。未来，结合人工智能（AI）与深度学习等技术，分子对接能够实现更精准的药物筛选和优化过程。通过对更多靶标的筛选、结构优化及大数据的融合，分子对接将成为肿瘤治疗中不可或缺的工具之一。同时，随着对癌症机制理解的深入，针对个体化治疗的药物设计将成为研究的热点，使得抗肿瘤药物的研发能够更具针对性和效果。

此外，尽管分子对接技术在新药设计中表现出巨大的潜力，但其局限性仍然存在，例如评分函数的准确性问题、靶标蛋白的结构信息问题等。因此，在实际应用中，分子对接技术往往与实验方法（如 X 射线晶体学、核磁共振等）结合使用，进行进一步验证和优化。未来，随着生物信息学、化学信息学及高通量筛选技术的进步，基于分子对接的药物设计将在肿瘤治疗领域取得更加突破性的进展。

参考文献

[1] 向明礼,赵志刚,刘彤,等.电负性及其对Anderson型多酸抗肿瘤活性的表达[J].西南民族大学学报(自然科学版),2003(04):411-416.

[2] 林育泉,周鹏,曾召绵.苦瓜MAP30蛋白基因克隆、表达及其抗肿瘤活性研究[J].中国生物工程杂志,2005,(05):60-66.

[3] 张彦岭.缩胺硫脲类化合物的合成及其抗肿瘤活性的研究[D].浙江工业大学,2006.

[4] 赵锐.抗肿瘤活性天然产物及相关化合物的合成[D].沈阳药科大学,2006.

[5] 刘丹.齐墩果烷类化合物的设计、合成及抗肿瘤活性研究[D].沈阳药科大学,2007.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6186

Sources and control of quantitative packaging measurement error

Yanqiong Zhang

Ulanqab Product Quality Metrology Inspection and Testing Center, Ulanqab, Inner Mongolia, 012000, China

Abstract

This article explores the sources of errors in quantitative packaging measurement, including equipment and instrument errors, operator skills and operational standards, environmental factors, and the characteristics of raw materials. It also proposes a series of control measures, such as regular calibration and maintenance of instruments, selecting measurement equipment that meets precision requirements, providing systematic operational training and skill enhancement, formulating detailed operating procedures and standardized operational processes, maintaining stable environmental conditions, reducing noise and vibration, choosing suppliers with stable raw material quality, and testing and evaluating raw material characteristics. By effectively reducing measurement errors, modern industrial production can maximize economic and social benefits, and companies can stand out in the increasingly competitive industry.

Keywords

quantitative packaging; measurement error; source; control

定量包装计量误差的来源与控制

张艳琼

乌兰察布市产品质量计量检验检测中心，中国 · 内蒙古 乌兰察布 012000

摘　要

本文探讨了定量包装计量的误差来源，包括设备和仪器误差、操作人员技能与操作规范、环境因素、原材料特性，并提出一系列的控制方法，包括仪器定期校准和维护、选择适合精度要求的计量设备、提供系统的操作培训与技能提升、制定详细的操作规程和标准化操作流程、维持稳定的环境条件、减少噪音和震动、选择稳定性好的原材料供应商、原材料特性的检测和评估。通过有效降低计量误差，现代工业生产可以实现经济效益和社会效益的最大化，企业也将在日益激烈的行业竞争中脱颖而出。

关键词

定量包装；计量误差；来源；控制

1 引言

在现代工业生产领域，定量包装计量是确保产品质量和生产效率的重要环节，其准确性直接决定着产品的市场竞争力和企业的市场地位。然而，受到设备、仪器、人员、环境、原材料等因素的影响，计量误差问题时常存在，导致产品质量很难得到有效改善，生产效率难以得到有效提高。在这种背景下，企业必须深入了解误差来源，寻找控制误差的正确方法，取得工业生产的最佳实践。

2 定量包装计量误差的来源分析

2.1 设备和仪器误差

不同设备的精度和稳定性对于定量包装计量有着直接影响。设备的精度是指设备测量结果与真实值之间的接近程度，而稳定性则反映了设备在长时间运行过程中测量结果的一致性和可靠性。在包装行业，特别是涉及精确的数量控制和配比时，设备的精度直接决定了最终的产品质量和生产效率 [5]。例如，自动化灌装设备在大规模生产中能够确保每个包装单位的准确数量，但如果设备精度不高或者稳定性差，可能会导致批次产品的数量偏差，甚至影响到产品的市场竞争力和合规性。仪器的校准与维护则是确保设备精度和稳定性的关键环节。仪器校准是指通过与已知标准比较，调整仪器以确保其测量结果准确无误的过程。定期校准可以有效地检测和纠正设备由于使用过程中的漂移或误差积累而导致的偏差，保证了生产过程中所使用的设备始终处于最佳工作状态。同时，仪器的定期维护也是确保设备长期稳定性的重要手段，包括清洁、润滑、更换易损件等操作，能够延长设备的使用寿命并减少因设备老化或故障带来的生产中断和成本增加。

2.2 操作人员技能与操作规范

操作人员的技术水平和经验差异对于定量包装计量具

【作者简介】张艳琼（1994–），女，中国内蒙古乌兰察布人，硕士，工程师，从事计量检定研究。

有显著影响。在生产现场，操作人员的熟练程度直接影响到设备的正确操作和生产流程的顺利进行。技术水平高的操作人员能够准确理解和执行生产计划中的精确要求，能迅速应对突发情况和调整生产节奏，有效保证生产效率和产品质量的稳定性。相反可能会导致操作失误、设备故障或者计量偏差，进而影响整体生产效率和产品质量的一致性。操作规程的标准化和执行情况则是确保生产过程稳定性的关键因素。标准化的操作规程能够明确生产流程中的每一个环节和操作步骤，规定了操作人员应当遵循的具体操作步骤和安全措施，降低人为因素带来的误差风险。执行情况的好坏直接影响到操作流程的规范性和结果的可靠性，例如是否按照规程正确调整设备、精确操作控制等。

2.3 环境因素

在生产过程中，温度和湿度的变化会导致物料密度、粘度等物理特性发生变化，进而影响包装机械的操作精度和流体的流动性。例如，高温可能会导致某些物料变软或流动性增强，可能会导致灌装过程中的流量控制不准确，从而影响包装单位的精确度。相反，低温环境可能会使得某些物料变硬或黏度增大，影响其流动性和流量控制的稳定性。因此，在实际生产过程中，始终保持稳定的温度和湿度，才能有效提升包装计量的精度。企业可以通过定期监测和调节生产环境的温湿度，使用温度控制设备和湿度调节装置，以及在可能的情况下选择适合于特定环境条件下操作的设备和材料，来有效地减少温湿度变化对计量精度的影响。另一方面，噪音和震动等外部干扰因素同样影响着定量包装计量精度。生产现场常会受到机械设备运行时产生的噪音和振动影响，这些噪音和振动可能会干扰设备的稳定运行和精确计量。例如，高强度的振动可能会导致灌装设备的流量计或称重传感器出现波动，影响包装单位的准确控制。

2.4 原材料特性

原材料的密度和流动性对于定量包装计量精度产生了重大影响。密度是指单位体积的物料质量，不同密度的原材料会影响相同体积下的质量和重量。在定量包装过程中，如果原材料的密度发生变化，将直接影响每个包装单位的净重或数量，从而导致计量精度的偏差 [2]。例如，密度较高的原材料相同体积下的重量可能会超过设计标准，密度较低的原材料则可能会导致包装单位数量的增加。流动性则影响到物料在输送过程中的均匀性和流动性，如果流动性不佳可能会导致包装过程中物料堵塞或者不均匀流动，进而影响到计量装置的精准度和稳定性。不同批次原材料的变异性则是另一重要的影响因素。即使是同一种类的原材料，不同批次之间也可能存在着成分、密度、粒度等方面的微小差异。这种变异性可能会影响到包装计量的一致性和准确性。在实际生产中，这种原材料的变异性需要通过精密的控制和调整来进行补偿和纠正，确保每一批产品的计量结果能够达到设计的精确要求。

3 定量包装计量误差的控制方法

3.1 仪器定期校准和维护

定期校准是指通过标准校准设备对生产中使用的仪器进行定期检验和调整，确保其输出结果与实际值之间的一致性 [3]。校准频率应根据仪器的使用频率、环境条件以及生产要求来确定，通常在仪器每天或每周的启动前进行简单的内部校准，定期进行更详细和更全面的外部校准。通过这样的定期校准过程，能及时发现和纠正仪器可能存在的漂移或偏差，确保其在整个使用周期内保持稳定的测量精度。

3.2 选择适合精度要求的计量设备

不同类型的计量设备具有不同的应用特点，企业需要结合实际进行选择。例如，在需要高精度计量的场合，应选择具有高分辨率和精确度的称重传感器或流量计等设备；在大批量生产场合，可以选择具有高速度和稳定性的自动灌装设备。此外，还应考虑设备的可靠性、耐用性以及维护保养的便利性，确保在长时间使用过程中仪器能够保持稳定的性能和精度。

3.3 提供系统的操作培训与技能提升

企业应该建立完善的培训体系，包括新员工入职培训、岗位技能培训和定期技能提升课程。培训内容应覆盖设备操作原理、计量规范、安全操作流程以及常见故障处理方法等方面，确保操作人员能够全面理解和熟练掌握工作流程和操作要求。培训计划应根据不同岗位和工作职责进行个性化设置，新员工需要接受系统的基础培训，包括设备结构和功能的介绍、操作流程的演示和实操，以及安全操作规范的培训。对现有员工，定期进行技能提升和复习培训，引入新技术和新设备的操作培训，帮助他们不断更新和提升操作技能，适应生产工艺的变化和提高的精度要求。

3.4 制定详细的操作规程和标准化操作流程

详细的操作规程应明确规定每个操作步骤的具体要求和标准，包括设备的启动和停止程序、物料装载和卸载流程、计量参数设置、异常处理流程以及记录和报告要求等。标准化操作流程可以帮助减少人为操作误差，确保每位操作人员在进行计量操作时都遵循统一的标准操作步骤，提高操作的可控性和可预测性。

3.5 维持稳定的环境条件

在现场生产过程中，企业应采用温度控制系统，通过空调、加热或冷却设备来维持工作区域内的稳定温度。这些系统不仅能确保设备在理想的温度范围内运行，还能通过传感器实时监测和调节，确保温度波动控制在可接受的范围内。在精密仪器使用中，企业应使用湿度控制设备，如加湿器或除湿器，来调节和维持合适的湿度水平。通过使用这些设备，能有效地减少湿度对仪器设备的不利影响，确保其长期稳定和精度。除温度和湿度外，气流和空气质量也是影响环境稳定性的重要因素。建议企业安装空气过滤系统或设备，以隔离的方式确保生产区域内的空气质量符合规定标

准，减少外界因素对计量精度的干扰影响。

3.6 减少噪音和震动

企业可以采取两种策略减少噪音。一是通过工程控制减少噪音源。包括优化设备和机械的设计，选择低噪音产生的设备或部件，使用隔音材料或隔音罩等技术手段来降低设备运行时产生的噪音水平。例如，可以对设备进行隔音改造或增加噪音防护罩，有效减少噪音的传播和影响范围。二是采用主动控制措施减少噪音传递。包括在生产环境中设置噪音隔离区域或采用噪音屏蔽技术，如声波吸收材料或噪声抑制装置，降低噪音的传播和扩散效应。通过这些措施，能有效减少噪音对精密仪器和计量设备的影响，提升测量数据的稳定性和可靠性。企业可以采取两项措施减少震动 [4]。一是通过工程设计和设备安装减少震动源。包括使用减震台、减震垫或减震支架等设备，将精密仪器和计量设备固定在稳定的支撑结构上，减少外界震动对其影响。二是实施主动控制措施抑制和消除震动影响。例如，可以在关键设备周围设置震动传感器和反馈控制系统，实时监测和调节设备周围的震动水平。通过及时采取补偿措施或调整设备工作状态，能有效地抑制震动对计量过程的干扰，保证测量数据的稳定性和准确性。

3.7 选择稳定性好的原材料

稳定性好的原材料供应商必须具备三个关键特征。其一，具有完整的供应链管理体系。包括原材料采购、生产制造、质量控制等方面的全面管理能力。能够建立完整的供应链网络，确保原材料的供应稳定性和及时性，减少因供应链中断或延误而引起的生产风险。其二，具有稳定的生产能力和供货能力。能够根据客户需求进行灵活调整和生产安排，保证在不同时间段和需求高峰期间仍能提供稳定的原材料供应，避免因供货不足而导致的生产中断或计量误差。其三，具备良好的技术支持和服务能力。通常能够提供及时的技术支持和良好的售后服务，快速响应客户的需求和问题，协助解决在原材料选择、使用和应对特殊情况下的技术难题，为客户提供全方位的服务保障。企业在选择原材料供应商时，采取以下策略可最大限度地降低生产风险，避免定量包装计量误差的产生。一是对供应商的全面评估和筛选。包括对供应商的资质、生产能力、质量管理体系、技术支持和服务能力等方面进行详细的调查评估。二是建立长期合作关系和供应链合作机制。与稳定性好的供应商建立长期稳定的合作关系，可以有效降低合作风险，增强供应链的稳定性和可靠性。三是加强供应商管理和沟通协作。定期进行供应商绩效评估和监控，及时沟通和反馈问题，共同解决在供应过程中出现的质量问题和生产挑战。四是持续优化和改进供应链管理和原材料采购策略。及时调整供应商选择标准和管理模式，以适应市场需求和企业发展的变化，确保供应链的稳定性、灵活性和竞争力。

3.8 原材料特性的检测和评估

定期检测和评估原材料特性能有效控制生产过程中的变异性。原材料的密度、流动性、化学成分等特性可能会因供应商批次不同、采购时间间隔、存储条件等因素产生波动。通过定期检测，能及时发现这些变化，并评估其对生产过程和产品质量的潜在影响，从而采取相应的调整措施，确保生产中使用的原材料在特性上的稳定性和一致性，企业也可以确保所采购的原材料符合相关的法律法规和行业标准，避免因原材料特性不符合要求而引发的法律风险和产品安全问题。同时，定期检测和评估原材料特性有助于保障产品的标准化和合规性 [5]，是持续改进和品质提升的重要手段。通过不断优化检测方法和技术，结合先进的数据分析和管理工具，企业可以实现对原材料特性变化的更快响应和更精确控制，不断提升产品的质量水平和市场竞争力。

4 结语

定量包装计量的误差控制是一项长期且复杂的工作，需要多方面的积极配合和持续改进。企业应继续优化控制措施，整合先进的技术手段，构建特色的管理模式，应对不断变化的市场挑战，以更高的生产能力和服务水平，满足消费者多样化的产品需求，得以为行业转型、经济增长与社会进步做出积极贡献。

参考文献

[1] 王桂芳.定量包装食品计量准确性影响因素研究[J].中国食品工业,2024(02):105-107.

[2] 周顺烨,王赛,李丁,等.定量包装商品净含量计量检验结果的不确定度评定[J].衡器,2024,53(06):31-38.

[3] 赵扬.浅谈《定量包装商品净含量计量检验规则》[J].品牌与标准化,2024(02):51-53+57.

[4] 王桂华,巴根纳,蒋天睿.食品企业定量包装商品净含量的管理[J].中国计量,2024(02):112-114+119.

[5] 萨志娟,陈笑天.定量包装商品监督检查云管理模式探讨[J].福建轻纺,2023(12):33-35.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6187

Application of Artificial Intelligence Algorithms in Automation Control Optimization of Manufacturing Production Lines

Jin Shi

College of Intelligent Manufacturing, Xinjiang Vocational University, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

This article explores in depth the application of artificial intelligence algorithms in the optimization of automation control in manufacturing production lines. The opening points out the background, current situation, purpose, and methods of the research, and then elaborates on the theoretical basis, including the connotation and development of algorithm classification and automation control. Focus on analyzing the application scenarios of algorithms in various stages of production, and present their benefits through case studies in the automotive and electronic manufacturing industries. Simultaneously point out the challenges in technology, talent, and cost, and propose corresponding strategies. Finally, summarizing the research and looking forward to the future, the application prospects of artificial intelligence algorithms in manufacturing production lines are broad. It is expected to overcome existing problems, promote the manufacturing industry towards intelligence, greenness, and high-end development, and enhance industrial competitiveness and sustainable development capabilities.

Keywords

artificial intelligence algorithms; Manufacturing production line; Automated control; Intelligent Manufacturing

人工智能算法在制造产线自动化控制优化中的应用

史今

新疆职业大学智能制造学院，中国 · 新疆 乌鲁木齐 830011

摘　要

本文深入探究人工智能算法在制造产线自动化控制优化的应用。开篇点明研究的背景、现状、目的与方法，接着阐述理论基础，包括算法分类及自动化控制的内涵、发展。重点分析算法在生产各环节的应用场景，以汽车和电子制造行业案例呈现其效益。同时指出技术、人才、成本方面的挑战，并提出应对策略。最后总结研究，展望未来，人工智能算法在制造产线的应用前景广阔，有望克服现存问题，推动制造业朝智能化、绿色化、高端化迈进，提升产业竞争力与可持续发展能力。

关键词

人工智能算法；制造产线；自动化控制；智能制造

1 引言

全球化格局下，传统制造业模式问题丛生，智能制造成为转型关键。人工智能算法作为核心驱动力，能处理产线数据，为生产各环节提供决策支持，在宏观上推动国家制造业升级，在微观上助力企业应对市场变化、增强竞争力，因此深入研究其在制造产线自动化控制优化中的应用迫在眉睫。全球该领域研究应用成为热点，国外发达国家领先，德国、美国、日本在工业制造中广泛应用人工智能算法；国内随着《中国制造 2025》推进也有长足进步，企业加速转型，高校和科研机构提供支撑，但均面临数据安全、算法可解释性及复合型人才短缺等挑战。本研究旨在剖析算法应用原理等，为制造业智能化转型助力，通过揭示原理、探索策略、分析问题、案例实证及综合运用文献、案例、实证、专家访谈等研究方法，验证有效性并总结经验。

【作者简介】史今（1973–），男，中国河北唐山人，本科，副教授，从事专注于智能控制研究。

2 人工智能算法与制造产线自动化控制的理论基础

2.1 人工智能算法概述

人工智能算法旨在让计算机模拟人类智能，自动处理数据。从学习方式可分机器学习、深度学习、强化学习等算法。机器学习含多种任务及算法，如决策树等；深度学习模拟人脑神经网络，用于图像处理等；强化学习通过与环境交互让智能体依奖励调策略，应用广泛。此外还有遗传算法等，为制造产线自动化提供多样手段。

其关键技术如神经网络，由神经元连接成不同层，经前向传播与反向传播迭代学习数据规律，像构建卷积神经网络可检测产品缺陷。决策树是监督学习算法，通过划分数据集构建模型，用于设备故障诊断，但易过拟合，可剪枝解决。

支持向量机、聚类算法、遗传算法等也各有优势，相互协作促进制造产线自动化控制的智能化发展。

2.2 制造产线自动化控制的内涵与发展

自动化控制的基本要素，制造产线自动化控制涵盖多个基本要素。自动化设备是核心执行单元，包括工业机器人、数控机床、自动化装配设备等；控制系统如 PLC、DCS、MES 等负责监控、调度与管理生产过程；传感器与检测系统实时监测生产参数和状态；物料输送与仓储系统保障物料顺畅流转和存储。这些要素相互依存、协同运作，构成自动化生产基础架构。发展历程与趋势，制造产线自动化控制经历从传统自动化向智能自动化的跨越。早期依赖机械自动化和简单电气控制技术，后随着信息技术发展，可编程逻辑控制器、计算机数控技术等应用提升了自动化程度。进入 21 世纪，大数据、云计算、人工智能等技术融入，智能工厂诞生。未来将朝着柔性化、集成化与绿色化方向发展，以满足多样化市场需求，打破信息孤岛，实现可持续发展 [1]。

3 人工智能算法在制造产线自动化控制中的应用场景

3.1 生产过程优化

智能调度与排程，以富士康为例，其开发的“FoxConn Neural Manufacturing” AI 生产调度系统基于深度学习和强化学习技术，运用深度强化学习算法如 Deep Q-Network（DQN），综合考虑多种目标和约束，自动生成生产计划和派工指令，并实时优化调整。通过连接多个系统收集海量数据，构建数字孪生模型，能快速应对紧急订单，提升生产效率与资源配置合理性。工艺参数优化，在焊接工艺中，借助机器学习算法，通过传感器采集焊接过程多源数据，构建焊接质量预测模型，对焊接工艺参数进行实时优化调整，降低焊接缺陷率，保障产品质量。 能耗管理，智能能耗管理系统通过安装能耗监测设备采集数据，结合机器学习算法建模分析，采用优化算法制定能耗调控策略，合理安排设备启停和运行频率，降低能耗，减少生产成本，助力环境保护。

3.2 质量检测与控制

基于机器视觉的缺陷检测，博世在其苏州工厂部署基于深度学习算法的视觉检测系统，用于汽车电子控制单元（ECU）质量检测。该系统利用深度学习算法分析 ECU 表面图像，自动识别缺陷，通过高清摄像头采集图像，传输至后台模型进行比对分析，标记缺陷位置与类型，实现自动化、智能化检测，提高缺陷检出率，缩短检测时间，提升产品质量和生产效率。 质量预测与预警，某汽车零部件制造企业通过在生产线上部署传感器收集多源数据，结合历史数据构建基于机器学习的质量预测模型，采用集成学习算法对数据进行深度挖掘，实时预测产品质量，提前预警质量问题，分析问题原因并推送至相关部门，采取针对性措施，降低次品率，保障产品质量稳定性。

3.3 设备维护与故障预测

预测性维护模型，通用电气为航空发动机制造搭建的预测性维护系统，在发动机关键部位部署传感器采集多源数据，通过工业物联网传输至云端，利用机器学习算法如长短期记忆网络（LSTM）和随机森林算法对数据进行处理，提前预测发动机部件故障，为维护计划提供时间窗口，提升设备可靠性和生产稳定性。智能故障诊断，西门子为其工业自动化设备构建智能故障诊断平台，集成专家系统、机器学习与深度学习算法。当设备发生故障，传感器数据传输至平台，专家系统初步筛查常见故障，深度学习算法对复杂故障进行精准判断，机器学习算法中的分类算法细化故障类型，为维修人员提供解决方案建议，缩短故障排查与修复时间 [2]。

4 人工智能算法应用的实践案例分析

4.1 汽车制造行业案例

4.1.1 生产线自动化升级实践：特斯拉上海超级工厂范例

特斯拉上海超级工厂在生产线自动化升级上成果斐然。通过引入先进机器人与自动化设备，并融合人工智能算法，关键工序如车身焊接、涂装、总装实现高度自动化。

焊接环节，高精度机器人搭配视觉识别系统与自适应控制算法，既保证焊接质量，又提升效率。涂装工序凭借机器视觉与智能控制系统，实现智能化监控与调控，确保漆面均匀、品质稳定。总装阶段，柔性自动化装配系统借助人工智能算法，达成多车型混线生产的高效调度，极大提升生产效率与产品质量，树立行业标杆

4.1.2 效益评估与经验总结

特斯拉上海超级工厂生产线自动化升级后，在生产效率、产品质量和成本控制方面取得显著效益。生产效率大幅提升，产品质量显著提高，单位生产成本降低。成功经验包括跨领域技术融合、持续研发创新和完善的数据采集与分析体系。但也面临技术复杂性带来的设备维护与系统调试难题、人工智能算法可靠性与安全性问题以及与上下游供应商协同难度增大等挑战。

4.2 电子制造行业案例

4.2.1 智能仓储与物流优化

某电子制造企业积极创新，引入基于人工智能算法的智能仓储与物流管理系统。该系统运用聚类算法，对仓储布局进行科学规划，使货物存储更合理，提升空间利用率。同时，结合实时交通数据，采用遗传算法优化物流配送路线。通过这一系列举措，企业成功实现原材料与成品的快速流转，入库、出库效率显著提高，物流配送成本大幅降低，在提升运营效率的同时增强了市场竞争力。

4.2.2 对企业竞争力的提升作用

智能仓储与物流优化使该企业生产周期缩短，客户响应速度提高，客户订单交付准时率提升，市场份额扩大，利润率提高，增强了企业在市场中的竞争力。

5 人工智能算法应用面临的挑战

5.1 技术难题

算法模型的局限性，复杂制造环境下算法适应性欠佳，许多算法基于特定数据集和稳定环境假设训练，实际生产场景变化时性能下降。算法模型解释性不足，如深度学习算法决策过程难以理解，影响其在关键生产环节的可信度和可接受度，制约应用效果提升。数据质量与安全问题，数据质量方面，存在不准确、不完整等问题，源于传感器精度受限等因素。数据安全面临泄露、篡改风险，黑客入侵或内部人员违规操作可能导致严重后果，确保数据质量与安全是关键问题。

5.2 人才短缺

跨领域专业人才需求，人工智能算法在制造产线应用需要跨领域专业人才，既懂人工智能算法，又熟悉制造工艺和自动化控制工程，但目前这类复合型人才匮乏，制约了技术的广泛应用。人才培养与引进困难，高校教育专业设置滞后，企业内部培训体系不健全，人才引进竞争激烈，制造业工作环境和薪资待遇缺乏竞争力，加剧了人才供需失衡矛盾。

5.3 成本考量

初期投资成本，企业引入人工智能技术需承担高额前期投入，包括硬件购置、软件研发、系统集成等成本，对于中小企业是巨大开支，制约了其应用。

运营与维护成本，人工智能系统运营后，算法优化、数据管理、设备维护和员工培训等持续的运营与维护成本给企业带来沉重负担，影响企业资金流和盈利能力。

6 应对策略与发展建议

6.1 技术创新与突破

研发适应性更强的算法，面对制造产线的复杂性，政府应推动产学研联合研发。针对关键工序数据稀缺问题，开发小样本学习算法，运用元学习等技术实现精准决策。优化深度学习算法，构建自适应模型以应对不同工况，强化学习算法，设计贴合场景的奖励与探索策略，提升生产智能化水平。同时，建立开源平台促进全球科研人员交流，加速算法创新推广。加强数据治理与安全保障，企业要保障数据质量与安全。在源头依生产需求选好传感器并合理布局，用智能校准与审核清洗流程确保数据准确完整。传输存储时，利用区块链加密与分布式冗余存储，保障数据安全可用。还应建立严密访问控制，结合角色与属性分配权限，并引入人工智能监测异常访问，防范数据泄露，为算法应用筑牢根基。

6.2 人才培养与引进

优化高校教育体系，高校应加速课程改革，打破学科界限，设立 “智能制造工程” 等跨学科专业，涵盖算法、机械、控制、物联网等知识。同时，增加实践教学比重，与企业共建校内实验室和校外实习基地。校内实验室配备智能设备与仿真平台，校外实习让学生参与企业项目，提升解决实际问题能力，为产业输送复合型人才。企业内部培训与外部引进，企业在人才建设中至关重要。内部应针对不同岗位制定培训计划，操作人员学基础与操作规范，技术骨干学算法应用，管理人员学战略与决策。同时，建立职业发展通道与技能认证体系，挂钩薪酬晋升。外部则参与国际人才竞争，以优厚条件吸引高端人才，提升企业智能化转型竞争力 [3]。

6.3 成本效益优化

制定合理的投资规划，企业引入人工智能算法需综合考量自身情况制定投资规划。大型企业可全面布局与重点突破，构建研发平台，聚焦核心环节引入高端设备与自研算法。中小企业宜分期分步投资，初期选投入产出比高、难度低的项目，如简易机器视觉检测系统，后逐步拓展，与服务商合作采用灵活模式，平衡技术升级与成本控制。评估长期收益与成本平衡，构建精准成本效益评估模型是企业科学决策的关键。模型涵盖直接成本与间接收益各维度，详细核算硬件、软件、集成、培训及运维等开支，同时量化产能提升、废品减少、库存优化、订单增长等间接收益，与直接成本长期动态对比，确保投入产出比合理，为企业持续投入算法应用提供依据，推动制造业高质量发展，在市场竞争中充分发挥人工智能算法价值。

7 结论

本研究深入探究人工智能算法在制造产线自动化控制中的应用，揭示其成效、挑战与应对策略。通过在多个关键场景的应用，推动了制造企业发展，但仍面临技术、人才和成本等方面的挑战。针对这些挑战提出了相应应对策略，包括技术创新、人才培养与引进以及成本效益优化等方面。未来，随着技术进步、人才储备增加和成本降低，人工智能算法在制造产线自动化控制中的应用前景广阔。技术创新将推动算法更智能高效，人才培养将为企业注入创新活力，成本效益优化将使企业更从容地应用人工智能技术，助力制造业迈向智能化、绿色化、高端化新阶段。

参考文献

[1] 方国材,晋成龙.电气自动化控制中的人工智能技术运用[J].电子制作,2020(14):62-63.

[2] 张国庆.人工智能技术在自动化控制系统中的应用[J].造纸装备及材料,2023,52(09):44-46.

[3] 张文骏.基于智能化技术的自动化机房管控调度系统研究[J].电气技术与经济,2023(10):83-86.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6188

Research on Optimization of Rubber Tree Cutting Path Based on Deep Learning Algorithm

Yafei Wang

Haikou University of Economics, Haikou, Hainan, 571127, China

Abstract

In the rubber production process, rubber cutting is a key step in obtaining latex, and its efficiency and quality directly affect the yield and quality of rubber. However, traditional rubber cutting path planning methods often rely on the experience and intuition of rubber cutting personnel, making it difficult to adapt to the complex terrain and changing environmental conditions of rubber plantations, resulting in low rubber cutting efficiency and unstable latex production. To address this issue, this paper proposes a rubber tree cutting path optimization method based on deep learning algorithms. This study provides a new approach and method for optimizing the cutting path of rubber trees, which has important theoretical significance and practical application value. It provides strong technical support for the intelligent development of the rubber industry and the modernization transformation of agricultural production.

Keywords

rubber tree; Optimization of cutting path; Deep learning algorithms; Path planning; Agricultural intelligence

基于深度学习算法的橡胶树割胶路径优化研究

王亚飞

海口经济学院，中国 · 海南 海口 571127

摘　要

在橡胶生产过程中，割胶是获取胶乳的关键环节，其效率和质量直接影响到橡胶的产量和品质。然而，传统的割胶路径规划方法往往依赖于割胶人员的经验和直觉，难以适应橡胶园复杂的地形和多变的环境条件，导致割胶效率低下和胶乳产量不稳定。为了解决这一问题，本文提出了一种基于深度学习算法的橡胶树割胶路径优化方法。本文的研究为橡胶树割胶路径优化提供了一种新的思路和方法，具有重要的理论意义和实际应用价值，为橡胶产业的智能化发展和农业生产的现代化转型提供了有力的技术支撑[1]。

关键词

橡胶树；割胶路径优化；深度学习算法；路径规划；农业智能化

1 橡胶树割胶路径优化问题描述

1.1 橡胶树割胶过程概述

橡胶树割胶是橡胶生产过程中的关键步骤，其主要目的是从橡胶树的树干中获取胶乳。割胶过程通常在清晨进行，因为此时气温较低，有利于胶乳的流出和收集。割胶人员需要使用特制的割胶刀，沿着树干的一定高度和角度进行切割，形成一条割线。割胶人员在割胶时会在树干下方放置一个胶杯，用于收集流出的胶乳。

【课题编号】海口经济学院2024年度校级科学研究重点项目“基于深度控制算法的智能割胶机器人研究”（项目编号：HJKY(ZD)24-13）。

【作者简介】王亚飞（1991-），女，中国海南海口人，在读博士，讲师，从事计算机应用、信息化教育人工智能等研究。

橡胶树的生长和胶乳产量受到多种因素的影响，如气候条件、土壤肥力、橡胶树的品种和年龄等。为了提高橡胶树的胶乳产量和割胶效率，橡胶种植者需要对橡胶树进行科学的管理和养护。这包括合理的施肥和灌溉，以提供橡胶树所需的养分和水分；及时的病虫害防治，以保护橡胶树的健康生长；以及适当的修剪和更新，以保持橡胶树的生长活力和产量水平。

1.2 割胶路径优化问题定义

割胶路径优化问题是指在橡胶园中，如何规划割胶人员的行走路线，使得在满足一定约束条件下，达到最优的割胶效率和胶乳产量。具体来说，割胶路径优化需要考虑橡胶园的布局、橡胶树的分布、割胶人员的工作效率以及割胶设备的使用等因素。目标是在最短的时间内完成割胶任务，同时保证胶乳的产量和质量[2]。

1.3 割胶路径优化的约束条件与目标函数

在进行割胶路径优化时，需要考虑多种约束条件。首先，

割胶路径需要覆盖所有需要割胶的橡胶树，确保每棵树都能被及时割胶。其次，割胶路径的长度应尽量短，以减少割胶人员的行走时间和劳动强度。目标函数通常是最小化割胶路径的总长度或总时间，同时最大化胶乳的产量和质量。在实际应用中，目标函数还可以根据具体的生产需求进行调整，例如在某些情况下，可能更关注胶乳的质量而非产量。通过合理设置约束条件和目标函数，可以为割胶路径优化问题提供清晰的优化方向和评价标准，从而实现割胶过程的高效和优化。

2 深度学习算法在割胶路径优化中的应用

2.1 数据预处理与特征提取

在橡胶树割胶路径优化里，数据预处理对深度学习模型训练极为关键。需收集橡胶园全方位数据，像橡胶树位置坐标、生长情况、割胶历史、地形等，它们源自各类传感器与记录系统，存在噪声、缺失、格式不一等问题。故而，数据清洗不容小觑，去除异常、填补缺失、统一格式，如用插值补生长数据、滤波算法除噪声。同时，数据归一化很必要，把树高、树龄等不同量纲特征标准化，提升模型训练与预测效果。

特征提取是将预处理后的数据转换为对割胶路径优化有帮助的特征表示。在橡胶树割胶问题中，特征选择尤为重要，因为并非所有数据都对路径优化有直接贡献。可以通过专家知识和数据探索的方法，识别出关键特征，如橡胶树的位置坐标、生长状况指标（如树高、树龄、树冠面积等）、历史割胶效率、地形坡度等。这些特征能够反映橡胶树的分布规律和割胶作业的难易程度。卷积神经网络（CNN）可以用于提取橡胶树分布的空间特征，而循环神经网络（RNN）则可以捕捉割胶历史数据中的时间序列特征。通过有效的特征提取，可以为深度学习模型提供更加丰富和有意义的输入信息，从而提高割胶路径优化的准确性和鲁棒性。

2.2 模型构建与训练过程

在构建用于橡胶树割胶路径优化的深度学习模型时，选择合适的网络架构是关键。考虑到割胶路径规划问题的序列性质，循环神经网络（RNN）及其变体长短期记忆网络（LSTM）和门控循环单元（GRU）是理想的选择。这些网络能够有效处理时间序列数据，捕捉割胶路径中的长期依赖关系。LSTM 通过其独特的门控机制，可以记忆和遗忘信息，从而更好地建模割胶人员在不同时间点的决策过程。模型的构建通常包括输入层、隐藏层和输出层。输入层接收预处理后的特征数据，隐藏层由若干个 RNN 层组成，每层包含一定数量的神经元，用于提取和学习数据中的复杂模式。输出层则根据任务需求进行设计，如输出最优割胶路径的顺序或路径长度等 [3]。

2.3 路径规划与动态调整

在橡胶树割胶路径优化中，深度学习模型的应用使得路径规划更加智能化和高效化。模型通过学习历史割胶数据和橡胶园的地理信息，能够生成一条合理的初始割胶路径。这条路径综合考虑了橡胶树的分布密度、生长状况、地形特征以及割胶人员的工作效率等因素，力求在最短的时间内完成割胶任务，同时保证胶乳的产量和质量。模型输出的路径通常以橡胶树的访问顺序或割胶人员的行走路线的形式呈现，为割胶人员提供了明确的作业指导。例如，在东南亚某大型橡胶园的实际应用中，深度学习模型根据橡胶树的位置和生长数据，规划出了一条从橡胶园入口到各个橡胶树的最优路径，有效减少了割胶人员的行走距离和时间，提高了割胶作业的效率和胶乳的收集率。

然而，橡胶园的环境和条件是动态变化的，如天气变化、橡胶树的生长更新、地形的微小变动等，这些因素都可能影响割胶路径的最优性。模型需要具备实时数据处理和快速响应的能力，以便在环境变化发生时，能够及时对割胶路径进行调整。例如，当遇到突发的降雨天气，导致某些区域的橡胶树不适合割胶时，模型可以迅速根据实时天气数据和橡胶树的状态信息，重新规划割胶路径，避开受影响的区域，确保割胶作业的顺利进行。

2.4 结果评估与优化迭代

在深度学习模型应用于橡胶树割胶路径优化后，对模型生成的路径结果进行评估是至关重要的一步。评估的目的是验证模型的性能和路径优化的效果，确保其能够满足实际生产的需求。常用的评估指标包括路径长度、割胶时间、胶乳产量、割胶人员的劳动强度等。通过对比模型优化后的路径与传统方法得到的路径，可以直观地观察到路径长度的缩短和割胶时间的减少，从而初步判断模型的有效性。

优化迭代是深度学习模型持续改进和提升的关键环节。首先，根据评估结果对模型的网络结构进行调整，如增加或减少网络层数、改变每层的神经元数量等，以增强模型的学习能力和表达能力。其次，超参数的调整也是优化的重要手段之一，包括学习率、批大小、正则化参数等。通过采用超参数优化算法，如网格搜索、随机搜索或贝叶斯优化等，找到更优的超参数组合，使模型在训练过程中更加稳定和高效。此外，通过增加训练数据的多样性和数量，使模型提高在不同环境下的泛化能力。例如，在橡胶树割胶路径优化问题中，可以引入更多的橡胶园数据，包括不同地区的橡胶园、不同季节的割胶数据等，使模型能够适应更广泛的生产场景。通过不断的优化迭代，深度学习模型将逐渐完善，为橡胶树割胶路径优化提供更加精准和可靠的解决方案，助力橡胶产业的智能化发展和农业生产的现代化转型。

3 案例分析

3.1 实际应用案例介绍

在东南亚某大型橡胶园中，深度学习算法被成功应用于橡胶树割胶路径优化的实际操作中。该橡胶园拥有数千棵

橡胶树，分布在不规则的地形上，传统的割胶路径规划方法效率低下且难以适应复杂的环境变化。为了解决这一问题，研究人员首先收集了橡胶园的详细数据，包括橡胶树的位置、生长状况、历史割胶记录以及地形信息等。这些数据通过传感器网络和人工记录的方式获取，涵盖了橡胶园的各个方面。然后，利用深度学习算法对这些数据进行分析和处理，构建了一个割胶路径优化模型。该模型能够根据实时数据动态调整割胶路径，考虑到割胶人员的工作效率和胶乳的产量。具体来说，模型通过学习橡胶树的分布特征和割胶历史数据，预测出最优的割胶顺序和路径，使得割胶人员能够按照模型的建议高效地完成割胶任务。在实际应用中，该模型通过智能手机应用向割胶人员提供最优路径建议，帮助他们更准确地规划行走路线，避免了不必要的往返和重复劳动，显著提高了割胶作业的效率和胶乳的收集率。

经过一段时间的运行，该橡胶园的割胶效率得到了显著提升，胶乳产量也有所增加，证明了深度学习算法在割胶路径优化中的实际应用价值。具体来说，割胶时间缩短了约 20%，割胶人员的劳动强度降低了 30%，胶乳产量提高了 15% 左右。这些成果不仅为橡胶园带来了直接的经济效益，还为橡胶产业的智能化发展提供了有力的技术支撑。

此外，该案例还展示了深度学习算法在处理大规模和复杂数据集方面的强大能力，以及其在动态环境下的自适应性和灵活性。通过不断学习和优化，模型能够适应橡胶园中橡胶树的生长变化和环境条件的波动，为橡胶园的可持续发展提供了持续的技术支持。

3.2 案例分析与总结

3.2.1 深度学习算法的优势

在该橡胶园的割胶路径优化案例中，深度学习算法展现出了显著的优势。首先，算法能够处理大规模和复杂的数据集，适应橡胶园中不规则的橡胶树分布和多变的环境条件。传统的割胶路径规划方法往往依赖于割胶人员的经验和直觉，难以全面考虑各种因素的相互影响。而深度学习算法通过构建多层神经网络模型，可以自动学习和提取数据中的特征，捕捉橡胶树分布和割胶过程中的复杂规律。

其次，算法的自适应性和动态调整能力使得割胶路径能够根据实际情况灵活变化，提高了割胶作业的灵活性和适应性。例如，在遇到突发的天气变化或橡胶树生长更新时，模型能够迅速根据实时数据重新规划路径，确保割胶作业的顺利进行。此外，深度学习算法还具有强大的泛化能力，通过在大量数据上进行训练，能够将学到的知识应用到新的场景中，为不同地区的橡胶园提供有效的割胶路径优化解决方案 [4]。

3.2.2 实际应用中的挑战

尽管深度学习算法在该案例中取得了良好的应用效果，但在实际应用中也面临一些挑战，数据的准确性和完整性对模型性能的影响较大。在橡胶园中，数据的收集和处理需要依赖于传感器网络和人工记录，而传感器的故障、数据传输的中断以及人工记录的误差等问题都可能导致数据的不准确或缺失，从而影响模型的训练和预测结果。例如，如果橡胶树的生长状况数据不准确，模型可能会生成不合理的割胶路径，导致胶乳产量降低或割胶效率下降。

3.2.3 对农业智能化的启示

该橡胶园的案例为农业智能化的发展提供了重要的启示。深度学习算法在农业领域的应用潜力巨大，能够为传统农业行业提供新的解决方案和优化途径。除了橡胶树割胶路径优化外，深度学习算法还可以应用于农作物的种植管理、病虫害监测与防治、农产品的质量检测等多个方面，通过智能化的决策支持，提高农业生产的效率和质量，实现农业生产的精准化和可持续发展 [5]。

4 结论与展望

随着农业现代化的不断推进，如何利用先进的技术手段提高农业生产效率和产品质量成为研究的重点。本文针对橡胶树割胶路径优化问题，深入研究了深度学习算法的应用。通过对橡胶园实际数据的分析和模型的构建与训练，深度学习算法成功地为割胶路径规划提供了一种高效、智能的解决方案。实验结果表明，该算法缩短了割胶路径长度，降低割胶人员的劳动强度，还能提高胶乳的产量和质量，为橡胶园的经济效益和可持续发展提供了有力支持。

参考文献

[1] 杨署光,晁金泉,李言,等.机械伤害、排胶和割胶频率对橡胶树橡胶生物合成的影响[J/OL].热带亚热带植物学报,1-10[2025-01-04].http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20241203.1721.002.html.

[2] 丁世涛,高新生,黄肖,等.橡胶树5个主栽品种对日间割胶模式的响应研究[J/OL].西南林业大学学报(自然科学),1-7[2025-01-04].http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1218.S.20241115.0917.002.html.

[3] 覃怀德,张安洋,聂智毅,等.海南热研73397等5个橡胶树品种全年割胶周期生胶质量变化[J].热带作物学报,2024,45(06):1226-1234.

[4] 曾山,武玉金,曾丰毅,等.固定式橡胶自动割胶机的设计与试验[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(03):92-102.

[5] 李杨,潘媛,罗平,等.橡胶树日间割胶试验初报[J].热带作物学报,2023,44(05):937-945.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6189

Study on fatigue life prediction model of metal components in power plant

Jian Shen[1] Huiyuan Song[2] Tao Lou[1] Yu Fang[1]

1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China
2. Guizhou Dafang Power Generation Co., LTD., Bijie City, Guizhou Province, 551700, China

Abstract

The fatigue life prediction of metal components in power plants is crucial for ensuring the safe and stable operation of power systems. With the development of materials science and computational technology, damage mechanics models have gradually emerged, taking into account the impact of internal micro-damage evolution on fatigue life. In this context, this paper delves into the fatigue damage mechanisms of metal components in power plants and provides a comprehensive review of existing fatigue life prediction models. This offers new and effective methods for predicting the fatigue life of metal components in power plants, which is of great significance for enhancing the reliability and safety of power plant operations.

Keywords

power station metal components; fatigue life prediction; machine learning; stress analysis; damage mechanism

电站金属构件疲劳寿命预测模型研究

申健[1] 宋惠远[2] 楼韬[1] 方瑜[1]

1. 华电电力科学研究院有限公司，中国 · 浙江 杭州 310030
2. 贵州大方发电有限公司，中国 · 贵州 毕节 551700

摘　要

电站金属构件的疲劳寿命预测，对保障电力系统安全稳定运行至关重要。随着材料科学与计算技术的发展，损伤力学模型逐渐兴起，考虑材料内部微观损伤演化对疲劳寿命的影响。基于此背景，本文针对电站金属构件，深入剖析疲劳损伤机理，全面综述现有疲劳寿命预测模型，为电站金属构件疲劳寿命预测提供新的有力手段，对提升电站运行可靠性与安全性具有重要意义。

关键词

电站金属构件；疲劳寿命预测；机器学习；应力分析；损伤机理

1 引言

1.1 研究背景与意义

电站金属构件长期处于高温、高压、高应力及复杂交变载荷等恶劣服役环境中，疲劳失效是其主要失效形式之一。据统计，电力行业中因金属构件疲劳问题引发的事故占相当大比例，严重威胁电站的安全稳定运行，导致巨大的经济损失与社会影响。精准预测电站金属构件的疲劳寿命，提前采取有效的预防与维护措施，对保障电力系统可靠运行、降低运维成本、提升电力企业经济效益与社会效益具有极其重要的意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者在电站金属构件疲劳寿命预测领域，已经开展大量研究工作。随着材料科学与计算技术的发展，损伤力学模型逐渐兴起，考虑了材料内部微观损伤演化对疲劳寿命的影响。国外如美国、德国等科研团队利用神经网络、支持向量机等算法对金属材料疲劳寿命进行预测，取得了一定成果。国内众多高校与科研机构也积极开展相关研究，结合实际工程需求，探索适用于电站金属构件的高精度预测模型。但目前研究仍存在问题，如传统模型在复杂工况下预测精度不足，机器学习模型对数据质量与数量要求较高，模型的可解释性有待提升等。

2 电站金属构件疲劳损伤机理分析

2.1 疲劳损伤的基本概念

疲劳损伤是指金属材料在交变载荷作用下，内部微观结构逐渐发生变化，累积形成微裂纹，微裂纹不断扩展、连接，最终导致材料宏观失效的过程。与静态载荷下的失效不

【作者简介】申健（1988–），男，中国湖北宜昌人，硕士，高级工程师，从事发电企业特种设备和金属结构检验研究。

同，疲劳损伤具有累积性、突发性与局部性特点。在低于材料屈服强度的交变应力作用下，经过一定循环次数后，材料可能发生疲劳破坏。

2.2 疲劳裂纹的萌生机制

在晶体缺陷、晶界、夹杂等部位，位错堆积形成应力集中区，当应力集中达到一定程度时，原子键被破坏，形成微裂纹核。对于多晶体金属，晶界处原子排列不规则，变形协调性差，易成为裂纹萌生的优先位置。此外，材料表面的加工缺陷、划痕等也会降低材料表面局部区域的疲劳强度，促使裂纹在表面优先萌生。例如，电站锅炉管道表面的微小凹坑，在长期热应力与机械应力交变作用下，极易引发疲劳裂纹萌生。

3 疲劳寿命预测模型综述

3.1 基于力学理论的预测模型

3.1.1 S-N 曲线法

S-N 曲线法是最经典的疲劳寿命预测方法，通过对标准试样进行不同热点应力水平下的疲劳试验，获取应力（S）与疲劳寿命（N）之间的关系曲线。该曲线通常呈现幂函数形式，即 SmN=C，其中 m、C 为材料常数。S-N 曲线法原理简单、易于理解与应用，适用于热点应力水平较为单一、工况相对简单的情况。但其缺点比较明显，仅考虑应力幅值对疲劳寿命的影响，未考虑平均应力、应力集中等因素，且对材料性能参数的依赖性较强，不同批次材料的 S - N 曲线可能存在较大差异，导致预测精度有限。[1]

3.1.2 Miner 线性累积损伤理论

在不同应力水平下 Miner 线性累积损伤理论材料的疲劳损伤呈线性关系。累积损伤 D=∑i=1kNini=1，通过计算累积损伤可预测构件在变幅载荷下的疲劳寿命。然而，该理论未考虑不同应力水平加载顺序对疲劳损伤的影响，且线性关系假设与实际材料疲劳损伤非线性累积特性存在偏差，在复杂载荷工况下预测误差较大。

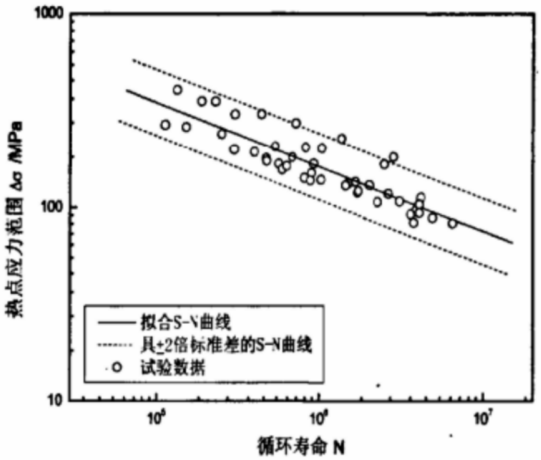


图 3.1 热点应力范围表示 S–N 曲线

3.1.3 断裂力学模型

断裂力学模型主要通过计算裂纹尖端应力强度因子，并结合 Paris 定律等裂纹扩展速率公式，预测疲劳裂纹从初始尺寸扩展到临界尺寸所需的循环次数，从而得到构件的疲劳寿命。存在初始裂纹或缺陷的金属构件，断裂力学模型具有较高的预测精度。但该模型对初始裂纹尺寸、形状等参数的测量精度要求极高，实际工程中准确获取这些参数较为困难。此外，模型计算过程复杂，需要具备一定的断裂力学专业知识，限制了其在工程现场的广泛应用。[1]

3.1.4 应力场强法预测疲劳寿命

应力场强法是通过计算某试件的疲劳寿命来验证临界距离法的有效性。某铝板试件几何尺寸如图 3.1 示，力学性能为杨氏模量 E=71022MPa，强度极限 σ 。=466MPa，屈服极限 σ ,=343MPa，材料的应力应变循环曲线如表 1 示，材料的 S-N 曲线如表 2 示。

表 1 某材料应力应变循环曲线

σ_a(MPa)	249	309	327	337	348	355	361	371	382	396
ε_a(%)	0.36	0.45	0.50	0.55	0.70	0.85	1.00	1.30	1.80	2.50

表 2 某材料的 S–N 曲线

S(MPa)	400	350	300	250	200	180	170	160
N	2560	19100	83976	311050	572296	600260	846313	1309410

3.2 基于损伤力学的预测模型（Lemaitre 疲劳损伤模型）

Lemaitre 疲劳损伤模型基于连续介质损伤力学理论，将材料内部微观损伤用损伤变量进行描述，通过建立损伤演化方程，反映疲劳损伤随循环次数的变化规律。该模型考虑了材料的塑性变形、加载历史、平均应力等因素对疲劳损伤的影响，能够较好地模拟材料在复杂加载条件下的疲劳损伤过程。Lemaitre 模型在理论上具有一定优势，但模型中部分参数难以通过实验准确测定，且损伤变量的物理意义不够直观，在实际应用中模型参数的确定与验证存在一定困难。[2]

3.3 基于数据驱动的预测模型

人工神经网络模型是一种基于生物神经网络结构与功

能的模拟算法，具有强大的非线性映射能力与自学习能力。在疲劳寿命预测中，通过构建多层感知器、递归神经网络等结构，将应力幅值、平均应力、加载频率、材料性能参数等作为输入变量，疲劳寿命作为输出变量，利用大量历史数据对网络进行训练，使网络学习到输入与输出之间的复杂关系。人工神经网络模型能够有效处理多因素耦合作用下的疲劳寿命预测问题，对复杂工况具有较好的适应性，预测精度相对较高。但该模型属于黑箱模型，缺乏物理意义解释，训练过程易出现过拟合现象，且对训练数据的数量与质量要求苛刻。

4 机器学习的疲劳寿命预测模型构建

4.1 数据采集与预处理

4.1.1 数据来源

收集丰富且高质量的数据，目的是为构建高精度的疲劳寿命预测模型。数据来源主要是以下几个方面：一是实验室开展的金属材料疲劳试验数据，通过控制试验条件，获取不同材料、不同加载工况下的疲劳寿命数据；二是电站实际运行过程中金属构件的监测数据，包括应力、应变、温度、振动等参数，这些数据反映了构件在真实服役环境下的运行状态；三是相关文献资料中已公开的疲劳寿命数据，可作为补充数据用于模型训练与验证。

4.1.2 数据归一化

由于采集到的数据中不同特征变量的量纲与取值范围差异较大，直接用于模型训练会影响模型收敛速度与预测精度。因此，需要对数据进行归一化处理，将所有特征变量的值映射到 [0, 1] 或 [-1, 1] 区间内。常用的归一化方法有最小—最大归一化、Z - score 归一化等。通过归一化处理，消除量纲影响，使模型能够更好地学习各特征变量与疲劳寿命之间的关系。

4.2 特征工程选择

在众多影响金属构件疲劳寿命的因素中，并非所有因素都对预测模型具有显著贡献。从原始特征集中挑选出对疲劳寿命预测影响较大、相关性较强的特征变量，去除冗余与无关向量，降低模型的复杂程度，提高模型训练效率和预测精度。过滤法通过计算特征与目标变量之间的统计量，根据设定的阈值筛选特征；包装法将特征选择过程与模型训练相结合，通过评估模型在不同特征子集上的性能来选择最优特征集。

5 实例分析

5.1 工程案例介绍

以某电站锅炉过热器管道为例，管道材质为 12Cr1MoVG 合金钢，在高温、高压蒸汽环境下长期运行，承受复杂的热应力与机械应力交变载荷。为保障管道安全运行，需准确预测其疲劳寿命。通过在管道关键部位安装应力、应变传感器，以及温度监测装置，获取管道运行过程中的实时数据。同时，收集该批次管道的材料性能参数、制造工艺信息等，作为构建疲劳寿命预测模型的数据基础。

5.2 数据处理与特征提取

对采集到的原始数据进行清洗与标注，去除噪声数据与异常值，填补缺失值。通过特征选择，确定对管道疲劳寿命影响较大的特征变量，如蒸汽温度、蒸汽压力、管道壁温、应力幅值、平均应力等。利用主成分分析（PCA）方法对原始特征进行降维处理，简化后续模型构建的复杂度。

5.3 预测结果对比与分析

传统的 S - N 曲线法和 Miner 线性累积损伤理论在复杂工况下预测精度较差，这是因为它们难以全面考虑实际运行中多因素的耦合影响。SVM 模型虽有一定改进，但在捕捉复杂非线性关系方面仍不及 MLP 模型。MLP 模型凭借其强大的非线性映射能力和深度的网络结构，能够有效融合多源数据，准确捕捉疲劳寿命与众多影响因素之间复杂的非线性关系，在各项评估指标上均表现最优，预测结果与实际情况更为接近，展现出在电站金属构件疲劳寿命预测中的显著优势。

6 结论

综上所述，通过深入剖析电站金属构件疲劳损伤机理，全面综述现有疲劳寿命预测模型，详细阐明疲劳裂纹的萌生、扩展机制以及影响疲劳损伤的多方面因素，明确了应力、材料和环境因素在不同阶段对疲劳寿命的作用规律，为预测模型的构建提供了坚实的理论基础。得出基于力学理论、损伤力学以及数据驱动的各类疲劳寿命预测模型，成功构建了基于机器学习的疲劳寿命预测模型。华电电力科学研究院有限公司将疲劳寿命预测模型与电站设备管理系统、智能运维平台进行深度集成，实现对电站金属构件疲劳寿命的实时监测与动态预测，为电站运维决策提供科学依据。

参考文献

[1] 李晓朋. 基于断裂力学的工程起重机疲劳寿命评估[D].大连理工大学, 2012.

[2] 江志澎,杨勇. 基于S-N曲线的废旧汽车发电机转子轴剩余寿命研究 [J]. 表面工程与再制造, 2018, 18 (04): 23-25.

[3] 张亮,刘雪松,王林森,等. 一个金属材料高周疲劳损伤力学模型(英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (11): 2777-2782.

[4] 辛伟,丁克勤. 金属材料疲劳损伤磁效应监测试验与分析研究[C]// 中国力学学会,北京理工大学. 中国力学大会-2017暨庆祝中国力学学会成立60周年大会论文集（C）. 中国特种设备检测研究院;, 2017: 548-552.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6190

Study on the optimization path of the connection mechanism between pollutant discharge permit and environmental impact assessment

Yipaerguli Kadier

Kashgar Regional Environmental Protection Bureau, Kashgar, Xinjiang, 844000, China

Abstract

There are two fundamental systems in China's current environmental management system: pollutant discharge permit and environmental impact assessment. Pollutant discharge permit focuses more on in-process and post event supervision, while environmental impact assessment focuses on pre event prevention assessment. The two systems should have formed a complete closed loop in terms of institutional design. With the continuous advancement of ecological civilization construction, the lack of systematic coordination between these two systems has gradually been exposed, such as the coexistence of policy overlap and regulatory gaps, which have a constraining effect on the improvement of environmental governance efficiency. How to break through institutional barriers and achieve synergy has become an urgent core issue that needs to be addressed when optimizing the environmental governance system. This article explores the path of optimizing the connection between these two systems from the perspective of institutional integration, in order to provide corresponding theoretical support for building a modern environmental governance system.

Keywords

pollutant discharge permit; environmental assessment connection; mechanism optimization; path exploration

排污许可与环评衔接机制优化路径探究

依帕尔姑丽 · 卡地尔

喀什地区生态环境局，中国 · 新疆 喀什 844000

摘　要

中国当下的环境管理体系中存在排污许可与环境影响评价这两项基础性制度，排污许可更着重于事中事后的监管，而环境影响评价则把重点放在事前的预防评估上，两者在制度设计上本应形成完整闭环。随着生态文明建设不断深入推进的进程，这两项制度进行衔接时逐渐暴露出系统性协同方面存在不足的问题，比如政策交叉以及监管空白同时存在，对环境治理效能的提升起到了制约作用。如何突破机制方面的壁垒从而达成协同增效，已然成为优化环境治理体系时迫切需要去解决的核心命题。本文站在制度整合这样的视角上来对这两项制度衔接优化的路径展开探索，以便能为构建现代化的环境治理体系给予相应的理论支撑。

关键词

排污许可；环评衔接；机制优化；路径探究

1 引言

在环境治理现代化进程推进的要求下，不同管理制度需形成有机整体，而排污许可与环境影响评价的协同衔接已然成为构建高效能环境监管体系的突破口。此两项制度在实施期间存在着功能定位相互交叉以及程序彼此割裂的现象，正是政策框架呈现出的碎片化状况致使环境管理链条产生了断层。当前的现有研究大多将目光聚焦在单一制度的优化方面，对于这两项制度协同运行所具有的内在逻辑缺乏系统性的探讨。本文借助制度耦合理论展开分析，针对两项制度在政策层面、技术层面以及执行层面所存在的衔接障碍予以剖析，并提出要从法规整合、标准统一、流程再造、数据互通这四个维度去构建协同机制。

2 排污许可与环评衔接机制的现状

《排污许可管理条例》是为了加强排污许可管理，规范企业事业单位和其他生产经营者排污行为，控制污染物排放，保护和改善生态环境，根据《中华人民共和国环境保护法》等有关法律，制定的条例。全文共六章节五十一条。排污许可制度依托固定污染源管理核心定位，在技术规范层面逐步吸纳环评文件中的产污节点及治理要求，部分区域试点

【作者简介】依帕尔姑丽 · 卡地尔（1991–），女，维吾尔族，中国新疆喀什人，本科，工程师，从事环保咨询研究。

将环评批复载明的排放标准直接转化为许可证载明的事项，环境管理要素的延续性在操作层面有所体现。环评审批环节对排污许可证的核发条件产生前置约束，新建项目在申领排污许可证时需同步提交环评批复文件，环境监管部门通过资料交叉核验强化准入管控。行业技术规范体系正尝试整合两项制度的技术要求，部分污染因子监测方案与排放限值的设定呈现趋同特征，但在排放量核算方法及管理颗粒度方面仍存在差异空间 [1]。

3 排污许可与环评衔接机制存在的问题

3.1 政策与法规层面的不协调

法律条款中关于污染源管控范围与责任边界的界定存在交叉模糊地带，排污许可证核发标准与环评审批要求的衔接细则缺乏可操作的规范性指引。环境管理相关立法体系中针对两项制度的功能定位与作用时序尚未形成清晰的逻辑关联，排污许可技术规范中污染物排放总量控制指标与环评审批的预测性环境容量评估往往基于不同核算基准，这种制度设计层面的内在矛盾容易造成企业在履行环境义务过程中面临双重合规标准困扰。地方性法规与部门规章的更新迭代节奏差异导致特定行业污染物排放限值在环评阶段与后续排污许可申领环节出现参数体系断层，行政审批流程中环境风险防控要求与排污行为常态化监管之间的政策衔接缺乏系统化制度安排，这种法规协同性的不足实质上削弱了环境治理体系整体效能。

3.2 技术与标准层面的差异

环评文件中的污染源强核算方法尚未完全适配排污许可证实际核发的数据精度需求，行业技术规范对两项制度中监测点位布设规则的表述存在解释空间差异。污染物排放量计算模型在环评预测环节采用的理论参数与排污许可执行阶段的实测数据缺乏动态校准机制，部分行业排放因子认定范围在许可证载明事项与环评审批要求之间形成交叉重叠。环境监测方案设计标准在两项制度中的技术细节尚未形成统一映射关系，企业填报执行报告时容易陷入两套参数体系的困惑，特别在非连续性排放源管理环节暴露出核算口径的模糊地带。

3.3 管理与执行层面的脱节

行政审批流程中环境监管部门对排污许可的事后监管与环评审批的前置审查存在时序错位，排污单位在项目运行阶段获取的许可证载明排放限值往往难以完全承接环评阶段的预测性环境风险防控要求，这种管理环节的断裂使环境监管链条难以形成闭环。基层环境执法人员在日常监管中既要核验企业排污许可执行情况又需追溯环评文件的技术参数，双重监管任务因缺乏统一操作指引导致执法尺度存在弹性空间，不同行政层级间环境管理权限的配置差异进一步加剧了制度运行成本。环评技术评估机构出具的污染防治可行性结论与排污许可证载明的自行监测方案在实施层面尚未建立动态调适机制，当项目实际排污情况与环评预测产生偏差时缺少权威的协调处置规则，这种执行层面的割裂状态容易引发监管真空。

3.4 信息共享与沟通机制的不足

排污许可管理平台与环境影响评价审批系统尚未建立实时数据交互通道，环评阶段产生的产污环节分析结论难以完整映射至许可证申请表单，企业在准备申报材料时面临重复录入基础信息的操作负担。环境管理部门在审批流转过程中形成的监管要求与后续许可证载明事项之间缺乏结构化转换机制，关键参数在跨系统传递时容易产生版本迭代差异。部分行业特征污染物指标在两项制度中的编码规则尚未统一，环境监测数据在环评验收与许可证执行报告间的关联比对存在识别障碍。基层监管部门在开展证后监管时，往往需要跨平台调取项目前期审批档案，原始数据追溯效率与当前动态监管需求形成现实落差 [2]。

4 排污许可与环评衔接机制优化路径

4.1 完善政策法规体系，加强协调一致性

立法机关应当牵头梳理现有法律条款中关于排污许可与环评制度的交叉内容，针对污染源管控范围与责任边界模糊的条款进行系统性修订，明确两项制度在项目全生命周期的适用时序与衔接细则。环保部门需要会同行业主管部门制定统一的环境管理技术导则，将环评阶段预测的环境容量指标转化为排污许可证载明的排放总量核算基准，使企业从项目设计阶段就能同步落实两项制度的核心要求。地方政府在制定区域性环境管理条例时应建立排污许可审批部门与环评审查机构的常态化会商机制，针对特定行业的污染特征设置环评审批结论向排污许可核发自动转化的触发条件，减少企业在不同审批阶段重复提交同类环境数据的负担。生态环境部有必要组织专家团队对两项制度涉及的污染物排放标准开展兼容性评估，重点消除挥发性有机物监测指标、噪声控制值等技术参数在环评预测模型与排污许可执行标准之间的计算口径差异。

4.2 统一技术标准，减少差异与冲突

在环保部门主导下开展排污许可与环评技术导则的系统性比对与融合，组织行业专家对两项制度中涉及污染源识别、排放量核算的技术条款进行逐条适配性分析，针对核算模型参数选取范围与排放因子应用场景形成统一解释口径。技术机构应当联合制定覆盖建设项目全生命周期的污染物排放管理技术指南，明确环评阶段预测数据与排污许可证执行阶段实测值的动态校准规则，细化产污节点描述方式与监测点位布设要求的对应关系。标准化管理机构需协同建立行业特征污染物编码转换库，解决环评审批文件与许可证载明事项中指标名称不匹配造成的执行困惑，同步规范非连续排放源监测频次判定标准与数据记录格式。地方生态环境部门可建立季度技术答疑机制，收集企业在填报许可证执行报告

时遇到的环评数据引用障碍，组织第三方机构编制典型行业参数转化对照手册。排污许可证核发部门应主动对接环评审批系统，在申报界面嵌入智能数据抓取模块，自动识别项目环评报告中已核准的排放限值与治理工艺信息，减少人工录入造成的技术参数偏差。

4.3 强化管理与执行机制，确保有效衔接

环保部门应当建立排污许可与环评联合审查机制，在建设项目立项初期组织专家团队对环评文件中的污染防治措施可行性进行预审，将符合性评估结论作为后续排污许可证核发的技术支撑要件。地方政府需要整合现有审批流程，在政务服务系统中设置环评批复与排污许可申请联办通道，允许企业在完成环评审批后直接调用关键数据生成排污许可申报材料，减少重复填报工作。生态环境部门有必要制定排污许可执行与环评验收联动操作手册，明确环境执法人员现场检查时同步核验环评承诺落实情况和排污许可证执行记录的具体程序，提升环境监管行为的规范性。行业协会可以开发重点行业排污许可与环评协同管理工具包，手把手指导企业在编制环评报告时预先勾选排污许可证载明的污染源监测点位与频次参数，形成环境管理措施从设计到运行的全链条贯通。环境执法部门需定期组织环评审批人员与排污许可核发人员的交叉培训，针对化工、电镀等特殊行业统一环境风险防控要点的判断标准，消除不同岗位工作人员对技术规范的理解偏差 [3]。

4.4 建立信息共享平台，提高沟通效率

生态环境部门应牵头开发跨系统数据共享接口，打通排污许可管理平台与环评审批系统的底层数据壁垒，允许企业在申报许可证时自动抓取环评批复文件中的产污设施清单与治理工艺参数。技术团队需制定结构化数据映射规则，将环评阶段识别的特征污染物指标与许可证载明事项中的编码体系建立智能匹配关系，减少人工转译过程中产生的信息衰减。环境监测机构应当规范数据采集模板，统一环评验收监测报告与许可证执行报告的关键字段命名规则，确保排放浓度与总量数据在跨阶段调阅时保持语义一致性。基层监管部门可在共享平台设置协同督办模块，实时追踪建设项目从环评审批到许可证变更的全流程数据轨迹，自动标注关键参数版本变更记录。运维单位定期组织企业端与政府端用户开展数据校核培训，重点演示历史环评材料在许可证延续申请场景下的快速检索与引用功能。具体流程如图 1 所示。

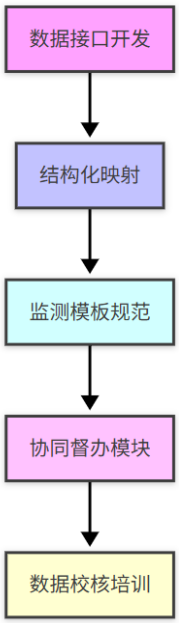


图 1 信息共享平台协同架构图

5 结语

在环境治理体系迈向现代化的进程中，排污许可与环评制度深度协同无疑是重要的实践方向，两项制度在政策框架、技术标准、执行程序等维度存在多维协同空间。当下阶段应当着重致力于构建起统一的环境准入评估体系，把污染物总量控制要求前置到环评阶段，并且将环境承载力分析取得的成果转化成为排污许可核定的依据。建议行业建立环境管理全周期信息链，借此打通环评预测数据与排污许可实际监测数据之间的验证通道，进而形成动态反馈机制。未来的环境治理工作应强化制度方面的集成创新，推动排污许可朝着“一证式”综合监管的方向实现转型，让环评制度能够更好地发挥出其在源头防控方面的功能。

参考文献

[1] 董晶. 环评制度与排污许可制度有效衔接的路径研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (21): 155-156+159.

[2] 李珏磊. 环评制度与排污许可制度衔接的策略研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (20): 147-149.

[3] 赵瑰施. 浅析环评与排污许可相互衔接和促进 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5 (05): 151-152+158.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6191

Optimization of the inspection process and quality assurance of the pressure resistance of plastic pipes

Zhiguo Zhou

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

Abstract

In urban construction and infrastructure construction, plastic pipes are widely used in water supply pipes, gas pipelines and other fields due to their advantages of corrosion resistance, light weight and easy construction. However, the pressure resistance of plastic pipes is directly related to the service life and safety of the pipe network, while the current traditional inspection methods have low efficiency, large errors and low level of intelligence. This paper explores the key aspects of the pressure resistance test of plastic pipes, seeks to optimize the production of specimens, pressure tests, data collation and other links, and establishes a quality assurance system through equipment improvement, standard revision, quality control, etc., so as to improve the efficiency and accuracy of quality inspection of plastic pipes, which has important theoretical significance and practical value.

Keywords

plastic pipes; Pressure resistance; inspection process optimization; quality assurance; Stress test

塑料管材耐压性能检验流程优化与质量保障

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

在城镇建设和基础设施建设中，塑料管材由于具有耐腐蚀、质量轻、便于施工等优点而被广泛应用在给水管、燃气管道等领域。然而，塑料管材的耐压性能直接关系到管网的使用寿命和安全，而目前传统的检验方法效率低、误差大，智能化水平低。本文探究塑料管材耐压性能检验的关键环节，寻求对试件制作、压力试验、数据整理等环节进行优化，并通过设备改进、标准修订、质量管控等建立质量保证体系，以提高塑料管材的质量检验效率和准确性，具有重要的理论意义和实际价值。

关键词

塑料管材；耐压性能；检验流程优化；质量保障；压力测试

1 引言

城镇化进程中，我国对塑料管材的需求量巨大，2023 年产量超过 1800 万吨，在给排水、建筑等应用领域所占比例超过 60%；相对于传统管材来说，它具有耐腐蚀、施工成本低等优势，但塑料管材由于其自身特性所决定的耐压性是影响其长期安全使用的重要因素，耐压性不足会导致管材出现渗漏、爆管等问题。我国现行的 GB/T6111-2018 等标准虽明确了规范试件制作过程，但实际检验过程中，还存在制作过程自动化水平不高、人工记录分析不到位等问题，无法满足批量生产检测的需要，完善耐压性能检验方法、建立质量保证体系对提升产品质量和保证基础设施安全具有重要意义。

【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。

2 塑料管材耐压性能检验的关键环节分析

2.1 检验标准与技术要求

塑料管材的耐压性能实验要严格按照国家标准 GB/T6111-2018 等要求进行短期（≤ 168h）或长期（＞ 168h）静液实验，以判定管材的突发性承压和服役蠕变。根据塑料管材特性，PE、PVC、PPR 管材按 PN0.6-PN2.5 和温度（20℃ ~80℃）进行耐压实验，判定标准以无破裂、渗漏为合格。此外，还有《给水用聚乙烯（PE）管道系统第 1 部分：管材》，《管材》等专项用途标准对管材耐压性能也有较高质量要求，众多规范构成了完整的标准体系，给耐压检测提供技术依据 [1]。

2.2 现行检验流程的主要环节

2.2.1 试件制备

试件的制作是耐压性能测试的前置条件，将管材切割

出一定的长度，通常为 200~300mm，两端裁齐并制作密封接头，在切割时，要确保管材不受热切或机械损伤；密封接头的密封性决定了测试结果的准确性，针对粗口径的管材，要使用专业设备切割，保证切割截面垂直，避免压力分布不均匀；制作合格的试件，能保证真实的测试结果，更能反映真实管材耐压性能。

2.2.2 压力测试

压力试验是将整个试验件放入恒温水箱，然后用水等介质灌入试验件，排出空气，并以一定的速度升压到一定压力，并按规定时间内进行保压。传统的压力试验设备，大都只能靠手动调节压力，容易出现升压速度控制不严，压力波动现象比较严重；有的压力试验设备不能实时监测压力，需要人工记录试验数据，效率比较低，还容易出现错记等现象，精度达不到试验要求。

2.2.3 结果判定与数据处理

在试验结束之后，需要对其进行观察，观察试件是否出现破裂、渗漏等缺陷，记录破坏出现的时间以及压力，如果试件没有在规定的时间内出现缺陷，则表示合格，如果出现提前失效的现象，则需要对其进行分析，看看出现失效的原因，是否为接头密封不合格管材自身存在缺陷，计算平均破坏压力、标准偏差，在处理数据之后对塑料管材的质量进行评估，看看是否满足标准。

2.3 现有流程存在的问题

2.3.1 检验效率低下

检验手续烦琐，设备落后，若用人工记录，效率极低，一天甚至几天才能完成一个长期静液试验，且一台设备只能检验一个样品。若用人工记录，不仅效率低下，还容易出现错漏，数据报告周期太长。这一切无法满足企业大规模生产时的快速检验，耽误了产品和交付的工期进度。

2.3.2 测试误差较大

现有检验流程中，许多环节都可能产生测试校准偏差。在试件制作中，切割精度、接头严密性等；压力测试过程中，升压速度控制、温度波动等都会对测试结果产生不利影响。部分厂家为节约成本，使用非专业设备或减少部分繁琐环节，导致测试结果与管材实际耐压结果存在较大偏差，测试结果不可靠。

2.3.3 智能化程度不足

大多数企业目前还停留在人工对试验过程进行监测和控制阶段，无法对试验数据进行自动跟踪和预警。对试验数据缺乏深入分析，找不出产品质量的波动规律，对提高产品质量及过程能力方面起不到促进作用，不利于企业产品质量的提高和生产效率的提高。

3 塑料管材耐压性能检验流程优化方案

3.1 试件制备环节优化

3.1.1 自动化切割与处理

人工切割方法，由于操作技术和设备精度的不足，容易导致管材的切口不光滑、不垂直，从而影响测试精度。改进后的试件制造过程，将数控切割机引入到管材的切割中，通过激光定位，控制切割位置，采用高速旋转的切削刀，将切口的垂直度控制在 ±0.5° 以内，使切割截面光滑，无毛刺，自动倒角装置对切割工件的两端进行倒角，通过倒角，增加密封接头与管材的接触面积，提高贴合度，避免因为管材两端正交的应力集中导致测试应力集中误差过大现象的发生，从而为后续压力测试提供更有效的试件 [2]。

3.1.2 标准化接头设计

塑料管材的耐高压交变应力性能直接关系到耐压试验工作的准确性，新型通用快速接头是耐腐蚀的不锈钢橡胶复合接头，机械强度和密封都能达到较高水平，能够确保实现塑料管材的快速、可靠、高强度的连接。其机械扣子能够与不同口径的管子进行快速连接，节约了时间成本。另一方面，接头内置压力传感器，能够实时检测接头密封处的压力变化情况，当出现泄漏时能够及时显示出故障信号。标准化的设计能保证不同的管子都能顺利插入，节约更换装备和调整参数的时间，提高试件的制作效率和试验的准确性。

3.2 压力测试环节升级

3.2.1 智能压力控制系统

对于传统的人工调压设备，容易出现压力误差过大或者波动的情况，无法满足试验的复杂要求。智能压力控制基于伺服液压系统，通过高精度传感器和闭环控制算法，使得压力控制更加精确，稳定性更高，波动范围非常小，可以同时进行多通道测试，一次可测试 8~16 个试样不同压力，提高了测试效率，各通道相互独立，互不干扰，可实现企业多批量、多规格管材快速检测的需求，解决了传统检测设备检测速度慢、一次测试试样数量少的问题 [3]。

3.2.2 环境模拟与监测

这些环境因素可能会对塑料管材的耐压结果产生影响。经过改造后的恒温恒湿试验箱，具有 ±0.5℃的温度控制与 ±2% 的湿度波动控制能力，可有效控制环境条件，并配套循环水流以保持测试样品各部位的均匀受热，避免温度、压力、流量等传感器采集到的数据不准确，试验过程出现温度、压力变化较大的情况。试验箱上的压力、温度、流量传感器实时检测试验数据并通过网络上传到控制系统主机上，当压力或温度出现异常波动时，发出安全告警并按照程序自动紧急停车。

3.3 数据管理与分析优化

3.3.1 自动化数据采集

人工记录不仅费时费力，容易出错，而且存在着数据销毁、篡改等隐患。优化的思路是在压力测试设备、环境监测系统当中植入物联网模块，试验数据自动采集、实时上传，并通过区块链技术将采集到的试验数据进行加密存储，云端数据库唯有一份拷贝，保证数据不能被篡改。多终端访问模式，检测人员可通过电脑端、手机端实时看到试验进程与试验结果，试验数据采集与传输不再受时间与地点限制，减少

人工记录的工作量，实现采集数据实时性，保证试验数据的准确性。

3.3.2 智能分析与预警

通过机器学习算法建立的管材耐压模型可以在海量历史数据训练后，识别数据特征和模型性能，当监测数据异常时，可以自动分析原因并生成预警报告，提醒企业可能存在质量问题的潜在因素，从而及时发现并采取行动。基于大数据分析技术，可以对不同批次、不同工艺的管材性能数据进行挖掘分析，识别性能差异，为企业优化生产工艺、提高产品质量提供决策参考，使企业由被动检测转变为主动管控。

4 塑料管材耐压性能质量保障体系构建

4.1 设备与技术升级

4.1.1 先进检测设备配置

塑料管材的耐压检测，需要有先进的检测仪器设备作为支撑，企业应淘汰传统的手动型耐压仪器，引进智能压力测试仪、高精度切割机和模拟环境试验箱。智能压力测试仪能够在压力的施加方面实现自动化，并且能够多台测试仪同时工作，对压力的加载速度和测试环境有良好的控制，检测速率较高，数据精准度也较高；高精度切割机可通过数控技术精确地切割管材，避免因切割口粗糙而出现应力集中，影响试件质量；模拟环境试验箱能够模拟特定的环境温度和湿度，有效控制其他相关因素，保证试验结果的可靠性。引进 3D 扫描仪可实现对试件内部缺陷的检测，及时发现其中存在的气泡、裂纹等问题，从根本上保证检测结果的可靠性。

4.1.2 数字化检验平台建设

数字化检验平台是质量过程质量控制的利器。平台涵盖设备控制、数据管理、报告生成等功能，可实现远程控制各类检测设备的运行，并可通过统一操作平台对设备运行状态进行监测，提高检测过程的自动化程度。可与企业 ERP 系统对接，实现产品质量数据与生产、销售系统的信息共享，便于企业管理人员及时掌握企业产品生产与质量状况，做好生产计划和资源调整。同时，数字化检验平台可通过可视化展示质量统计图表，对产品生产与质量趋势波动状况进行可视化呈现 [4]。

4.2 标准与规范完善

4.2.1 细化操作标准

随着检验方法的进步、管材品种的增多，这些标准有待修订、完善。特别是对检验标准中自动化设备的使用，明确其检测程序、评定方法、判定依据等，使检测结果有标准可循。制定针对新型塑料管材（如复合塑料管材等）的检验标准，因其不同于其他传统管材，需对其结构和性能进行单独研究分析，对特殊结构管材的耐压检测要求作出明确的规定，填补相关标准规定的不足，使管材产品的检验有可遵循的依据。

4.2.2 建立企业内控标准

企业内控标准是保证产品质量的重要因素。引导企业设计高于国家标准的内控标准，提升试验要求，如缩短试验周期，提高压力测试精度等，有助于提升市场竞争优势。此外，还可以通过建立内部质量认证体系，开展定期审核，确保操作符合规范。通过持续优化内控标准和检验流程，使企业质量管理水平得以持续提升，树立优质的品牌。

4.3 质量监管与人才培养

4.3.1 强化第三方检测

第三方检测是产品质量保障的外部监督力量。政府部门委托第三方定期对企业产品进行抽检，主要检查产品检验设备的校准状况、检测数据的真实性和检测操作的规范性。建立产品质量的追溯制度，针对不合格的产品，采取召回制度，责令企业对不合格的产品进行整改，并要求企业对不合格产品的成因进行分析和整改。对于不合格的企业进行公示，起到震慑的作用，让企业遵守产品质量的保证，落实企业对产品质量的主体责任。

4.3.2 专业人才队伍建设

人才是质量保证体系的基础之一。同时，对设备检验人员的专业技能进行培训教育，包括设备操作培训、标准培训、数据分析培训等内容，使检验人员的专业素质得到进一步的提升。实行持证上岗制度，引导检验人员考据上岗，保证检验人员的专业性和权威性。通过积极与高校、科研院所的合作，建立产学研培养机制，为企业提供人才支持，为企业质量保证体系提供源源不竭的人力资源，保证人才素质提升，推动企业管理质量保证体系的完善，促进塑料管材行业的高质量发展 [5]。

5 结语

塑料管材耐压性能检验流程的优化和质量保障体系的建设是确保质量、保证工程安全的关键环节，也是提升产品质量的必要步骤。本文通过分析现有问题，提出了从试件制作到压力检测再到数据记录的全流程优化策略，以及设备、标准、监督的质量保障体系。在未来，随着物联网、人工智能等技术的广泛应用，塑料管材检验将向着智能化、自动化方向发展，企业应逐步加强技术投入，完善质量管理体系，推动行业向高质量、标准化方向发展，为基础设施建设提供可靠的原料保障。

参考文献

[1] 张吉雷,郑会保,张永侠.基于塑料管材耐压试验用密封接头的设计研究[J].计量与测试技术,2018,45(12):54-55+58.

[2] 吴淼.城市排水管道塑料管材的质量检测[J].四川水泥,2021(09):67-68.

[3] 李楠,李程,常兵.热塑性塑料管材拉伸性能测定影响因素分析[J].品牌与标准化,2021(02):107-109.

[4] 宁素霞,叶发清.塑料管材在水利工程中的具体应用及质量检测[J].塑料助剂,2021(01):50-54.

[5] 王华,杨勇,宋磊,等.不同工艺生产的高耐压等级管材专用HDPE的结构与性能[J].合成树脂及塑料, 2016,33(4):5.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6192

Principle and maintenance measures of 10kW all-solid-state medium wave transmitter antenna adjustment network

Yankai Wang

Xinjiang Radio and Television Bureau Program Transmission Center, Atushi, Xinjiang, 845350, China

Abstract

This paper focuses on the research of the 10kW all-solid-state medium wave transmitter's antenna adjustment network, detailing its working principles, including the network structure, impedance matching theory, and tuning principles. By analyzing common faults in the antenna adjustment network, it summarizes issues such as component aging, poor contact, and parameter drift, along with their causes. In response to these problems, a series of scientifically effective maintenance measures are proposed, covering daily inspections, regular testing, component replacement, and parameter calibration. Additionally, based on the actual work situation at the Xinjiang News Publishing and Broadcasting Bureau Program Transmission Center, this paper explores key maintenance points in special environments, aiming to ensure the stable operation of the 10kW all-solid-state medium wave transmitter's antenna adjustment network, improve the quality and efficiency of medium wave broadcasting, and provide technical support for the continuous development of medium wave broadcasting.

Keywords

10kW all-solid-state medium wave transmitter; antenna adjustment network; working principle; maintenance measures; fault analysis

10kW 全固态中波发射机天调网络原理与维护措施

王彦凯

新疆广电局节目传输中心，中国 · 新疆 阿图什 845350

摘　要

本文围绕10kW全固态中波发射机天调网络展开研究，详细阐述了其工作原理，包括网络组成结构、阻抗匹配原理、调谐原理等内容。通过对天调网络常见故障进行分析，总结出如网络元件老化、接触不良、参数漂移等问题及其产生原因。针对这些问题，提出了一系列科学有效的维护措施，涵盖日常巡检、定期检测、元件更换、参数校准等方面。同时，结合新疆广电局节目传输中心的实际工作情况，探讨了在特殊环境下的维护要点，旨在保障10kW全固态中波发射机天调网络稳定运行，提高中波广播发射的质量和效率，为中波广播事业的持续发展提供技术支持。

关键词

10kW全固态中波发射机；天调网络；工作原理；维护措施；故障分析

1 引言

中波广播依靠自身覆盖范围宽广、传播能力不错等特性，在信息传播领域占据着显著地位。基于效率高、稳定性强、维护便利等优势，10kW 全固态中波发射机显现价值，成为中波广播发射的核心设备。作为 10kW 全固态中波发射机的关键组件，其性能的好坏程度直接关乎发射机的发射效率以及信号传输质量。在实际工作阶段，天调网络会受多种因素的牵动，产生不同程度的运行失常，继而妨碍广播发射的正常实施。深度探究 10kW 全固态中波发射机天调网络的原理，且把握有效的维护实施方式，对于保障中波广播发射系统平稳运作意义重大。新疆广电局节目传输中心承担起重要的广播传输工作，研究 10kW 全固态中波发射机天调网络原理且探讨相关维护措施，可提升该中心广播传输方面的质量与效率。

【作者简介】王彦凯（1969–），男，中国新疆阿图什人，工程师，从事广播电视发射技术研究。

2 10kW 全固态中波发射机天调网络原理

2.1 天调网络的组成结构

阻抗变换器、调谐电容、耦合电容、补偿电感等元件，构成了 10kW 全固态中波发射机天调网络的主体。作为天调网络的核心部件的阻抗变换器，其作用为将发射机输出特性阻抗和天线输入阻抗加以匹配，保证发射机输出的功率可最大限度传输至天线，调谐电容跟补偿电感彼此协作，借助调整自身参数达成天调网络的调谐，使天调网络在工作频率期间表现为纯电阻特性，由此提高发射效率，耦合电容的作用是达成天调网络与发射机、天线之间的电气隔离及信号耦合，保障信号实现稳定传输。

2.2 阻抗匹配原理

在中波广播发射体系里，发射机输出阻抗跟天线输入阻抗往往不相符，按照传输线相关理论，倘若发射机输出阻抗与天线输入阻抗未达成匹配时，会在传输线路上产生反射波，引起信号能量的损失，发射效率出现减退，天调网络实现阻抗匹配的原理是对网络里元件的参数进行调整，达成发射机输出端阻抗与天线输入阻抗的共轭匹配状态，让天调网络输入阻抗的实部跟发射机输出阻抗相等，虚部为彼此的相反数，借此实现信号的最大功率输送，减少信号反射的损耗 [1]。

2.3 调谐原理

天调网络实施调谐，是为让整个网络在工作频率下达成谐振状态，呈现为纯电阻的特性，处于实际工作期间，因环境、气候等因素的影响，天线特性产生改变，因而需要不断改变天调网络参数以完成调谐，调谐电容以及补偿电感，在调谐进程里起到关键作用。借助改变调谐电容的大小和补偿电感的电感大小，对天调网络谐振频率实施调整，让其跟发射机的工作频率相一致，若处于谐振情形的时刻，天调网络的阻抗达到最小值，发射机输出的功率可凭借最小损耗传输到天线，由此改善发射效率与信号传输的效果。

3 10kW 全固态中波发射机天调网络常见故障分析

3.1 网络元件老化故障

伴随使用时间持续递增，天调网络里的元件会慢慢老化，调谐电容跟耦合电容也会出现介质损耗增多、容量降低等情况，引起天调网络调谐性能的变差，难以精准匹配发射机与天线的阻抗，补偿电感有可能出现绕组绝缘老化以及电感量不稳定等现象，波及天调网络的谐振特性，元件老化将引起天调网络的参数变化，引起发射效率的降低，甚至造成发射机出现运行故障，阻碍广播信号的正常输送 [2]。

3.2 接触不良故障

天调网络中有着诸多连接点，诸如元件之间的衔接、线路跟设备的衔接等，在长期的运行进程里面，因振动、氧化等因素，这些连接点或许会出现接触不良的情形，接触不良的情况会引起接触电阻变大，引发额外的功率无端损耗，也许会引起信号传输的不稳定，产生发射功率起伏不定、信号失真等现象，接触不良有概率引发打火的现象，乃至引发安全方面的事故。

3.3 参数漂移故障

天调网络参数受温度、湿度、电磁干扰等环境因素影响，进而产生漂移，温度改变会使电容的容量与电感的电感量出现细微变动，由此对天调网络调谐以及阻抗匹配性能形成影响，天调网络里的电子元件或受电磁干扰的影响，造成网络参数的改变，造成发射机工作的稳定性降低，影响信号传输的质量 [3]。

4 10kW 全固态中波发射机天调网络维护措施

4.1 日常巡检

日常巡检是保障天调网络正常运转的基础工作，技术人员需按期对天调网络开展外观检查，看看网络内各元件是否有损坏、变形、过热等方面的迹象，连接线路是否存在松动、破损现象，看看接触点是否有氧化、打火的痕迹迹象，也需检视天调网络的运行情形，审视发射机输出功率、反射功率等参数是否合乎正常标准，若出现异常情况，应马上进行分析与处理，日常巡检得把详细记录做好，以便开展对天调网络运行状况的跟踪分析。

4.2 定期检测

为能快速察觉天调网络潜在难题，应周期性对其做全面检测工作，定期检测要进行对网络中各元件参数的测量，诸如调谐电容的电容容量参数、补偿电感的电感量参数、阻抗变换器的阻抗参数等，保证元件参数处于合理的正常范围，同样要对天调网络整体性能实施测试，诸如实施阻抗匹配测试、调谐性能测试等，查看网络是否可在工作频率时实现理想的阻抗匹配及稳定调谐，就检测当中揭露的问题，需迅速对元件进行修复或者替换 [4]。

4.3 元件更换

若觉察到天调网络内的元件出现老化、损坏等问题时，需赶紧实施更换，进行元件替换操作之际，要挑选参数跟原元件一样或相近的优质元件，保证更换后的元件可正常运行，不造成天调网络性能的波动，元件替换操作结束后，需再次对天调网络进行调试及测试操作，保证网络参数回归正常状态，发射机可实现稳定运转。

4.4 参数校准

由于环境因素等方面的缘故，天调网络的参数大概会出现漂移，故而需定期对其加以校准，参数校准应借助专业的测试仪器，依照严苛的操作流程实施 [5]。通过调整调谐电容、补偿电感等元件的各项参数，使天调网络在工作频率期间达到最理想的阻抗匹配及调谐状态。在参数校准开展之际，需密切留意发射机输出功率、反射功率等参数的起伏变化，需使校准后的天调网络达成发射机的工作要求。

5 新疆广电局节目传输中心特殊环境下的维护要点

5.1 风沙环境下的防护与清洁维护

新疆地域里广大的沙漠及戈壁形态，造成风沙天气频繁降临，狂躁的风沙不仅夹带了大量沙粒，说不定会携有细微的尘灰，倘若这些颗粒进入天调网络设备里面，会在调谐电容、补偿电感、阻抗变换器等元件的表面留下附着痕迹，逐步积攒形成厚厚的尘秽，尘垢会抑制元件的热量散发，引致元件工作温度逐步升高，加速它老化的步伐，使电气性能产生波动；过多的灰尘累积在潮湿状况下也会形成导电通

路，引起短路的相关故障，极大威胁着天调网络的正常运行。

为有效应对风沙环境，在设备安装的阶段，宜优先挑选具有出色防尘性能的机柜与防护外壳，让设备达到较高的防尘等级要求，可于发射机房通风口处安装高效防尘滤网，且要定期对滤网实施清理与更换，减少进入机房沙尘的数量，日常执行维护任务期间，技术人员要定期借助专业的除尘装备，诸如高压气泵、防静电毛刷等器件，对天调网络设备进行周全的清洁，清洁时需格外留意元件缝隙、连接点这类易积尘之处，杜绝因灰尘清除不彻底而埋下祸根，还可对设备内部进行防尘保护涂层的喷涂，再度提升设备的防尘能力。

5.2 温差环境下的元件与连接维护

新疆地区昼夜之间温差大得惊人，白天高温的时段里，设备温度或许可达到 40℃以上，到夜间低温的时候，温度可降至 0℃甚至更低，这般显著的温度起落，给天调网络里的元件及连接部件造成巨大挑战，就电容、电感等元器件而言，温度大幅起伏会造成材料物理特性的改变，引发电容的容量及电感的电感量出现不稳定的漂移现象，最终对天调网络调谐与阻抗匹配的精度造成干扰，就连接点而言，因热胀冷缩现象的作用，连接部位的紧固力度会出现变动，原本拧紧的螺丝也许会出现松动，连接片彼此接触状态也会变得不稳，引发接触电阻变大、出现打火等状况。

为适应存在一定温差的环境，在进行元件挑选之际，应采用温度系数小、稳定性较高的电容、电感等器件，减小因温度变动引起的参数漂移程度，在设备安装实施的阶段，应对连接点采取特别的紧固办法，诸如选用防松螺母、弹簧垫片等，于连接部位涂抹导电膏，可有效提升导电性，又能在一定程度上降低热胀冷缩引发的接触不良程度。日常维护工作期间，需着重对元件参数开展监测，定时借助高精度仪器对电容容量、电感量等参数开展测量，及时察觉并修复由温度变动引发的参数偏差，加大对连接点的巡检次数，采用红外测温仪等装置对连接点温度进行检测，若检测到温度出现异常升高，立刻开展连接点修复紧固。

5.3 地域特点下的远程监控与备件管理

新疆地域十分辽阔，发射台站呈离散式分布，部分台站到市区的距离甚远，此特殊的地域状况让维护人员在故障发生后难以迅速到达现场实施维修，也许会造成广播信号中断时长被拉长，影响信息的顺畅传播，搭建完善的远程监控系统是保障天调网络稳定运行的关键行动。以在天调网络设备中安装传感器和数据采集模块的途径，实时收集发射机输出功率、反射功率和天调网络各元件工作时的电压、电流等核心参数，随后借助网络通信方式把数据传输到监控中心，专业监控软件配备在监控中心，可实时对数据做分析与处理，若发现参数存在异常或故障预警内容，系统即刻通知相关维护工作者，维护人员可借助远程方式登录设备控制系统，初步预估故障出现的缘由，进而尝试开展远程调试及故障排除操作，诸如对天调网络参数设置做调整等，力求让故障处理时间最短。

鉴于新疆地区交通不便、备件运输耗时漫长的实际情况，各发射台站应把备品备件储备工作做到充足，基于天调网络里易损元件的使用表现和故障出现率，合理厘定各类元件的储备数目，诸如调谐电容、补偿电感、连接线缆、保险丝等常见元件。搭建完备的备件管理规章，按固定周期对备件检查更新，保证备件性能维持完好无损，能随时投入更换流程，也可建立区域里的备件共享机制，倘若某个台站出现备件匮乏情形，能马上从周边台站实施调配，促进故障处理效果，保障中波广播发射系统稳定顺畅运行。

6 结论

10kW 全固态中波发射机天调网络作为中波广播发射系统关键一环，其原理与维护措施对保障广播发射稳定运行意义非凡。借助对天调网络原理的研究，获知其组成结构、阻抗匹配原理以及调谐原理，为故障分析以及维护事宜提供理论基础。就常见的故障而言，诸如元件逐渐老化、接触处有不良、参数出现漂移等，制定的日常巡回检查、定期系统检测、元件及时更换、参数严格校准等维护办法，能有力预防并处理这些问题，增进天调网络可靠性及稳定性，结合新疆广电局节目传输中心的特殊格局，研究特殊环境下维护要点，为处于类似环境时的天调网络维护提供参考样本，在后续的工作开展中，技术人员需不断拓展对 10kW 全固态中波发射机天调网络的研究与实践范畴，持续改进维护手段，以契合持续演进的广播技术要求，助力中波广播发射系统长期稳定且高效地实现运行。

参考文献

[1] 张彦明.全固态中波发射机天调网络的原理与调试[J].信息与电脑,2024,36(23):74-76.

[2] 梁永生.全固态中波发射机天调网络的运用以及技术创新[J].电声技术,2024,48(10):144-146+150.

[3] 高文军.10kW全固态中波发射机天调网络原理浅析及维护[J].数字技术与应用,2023,41(08):38-40.

[4] 李革,唐彦旭.全固态中波发射机天调网络的实际应用[J].西部广播电视,2020,41(19):229-231.

[5] 何志强.10kW全固态中波广播发射机的天调网络设计与调试[J].卫星电视与宽带多媒体,2020(10):44-46.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6193

Research on the integration strategy of chassis system and multi-stage on-board power supply

Haibo Zhou

Shanghai Nio Automobile Co., Ltd., Shanghai, 100084, China

Abstract

This study aims to explore the integration strategies of chassis systems with multi-voltage on-board power supplies to enhance the vehicle's power performance and energy efficiency. The research methods include analyzing the structure and function of the chassis system, thoroughly examining the technical requirements of multi-voltage power supply systems, and evaluating the performance of existing integration schemes through laboratory and real vehicle tests. The results show that advanced power management technology can effectively optimize energy distribution and consumption, with the system demonstrating high efficiency and rapid response in real vehicle tests. The conclusion indicates that the effective integration of chassis systems with multi-voltage on-board power supplies can significantly enhance overall vehicle performance, particularly in terms of safety and environmental adaptability. Future research will further optimize these integration strategies, particularly in improving temperature management and electromagnetic compatibility.

Keywords

chassis system; multi-voltage power supply; power management; vehicle integration

底盘系统与多级车载电源集成策略研究

周海波

上海蔚来汽车有限公司，中国 · 上海 100084

摘　要

本研究旨在探索底盘系统与多电压车载电源的集成策略，以提高汽车的动力性能和能源效率。研究方法包括分析底盘系统的结构与功能，详细审查多电压电源系统的技术要求，并通过实验室测试和实车测试评估现有集成方案的性能。结果显示，采用先进的电源管理技术可以有效优化能量分配和消耗，实车测试中系统表现出高效率和快速响应能力。结论表明，底盘系统与多电压车载电源的有效集成能显著提升整车性能，尤其是在安全性和环境适应性方面。未来研究将进一步优化这些集成策略，特别是提升温度管理和电磁兼容性。

关键词

底盘系统；多电压电源；电源管理；车辆集成

1 引言

在当代汽车工业中，随着电动化和智能化的快速发展，对车载电源系统的需求日益增加，特别是多电压车载电源系统因其能在不同功率需求下优化能量管理而受到重视。底盘系统作为车辆的关键组成部分，其与车载电源的高效集成，不仅可以提升车辆的动力性能和安全性，还有助于实现能源的最优化配置和消耗 [1]。因此，研究底盘系统与多电压车载电源的集成策略显得尤为重要。本研究旨在通过深入分析底盘系统的结构与功能，探索多电压车载电源的技术要求，以及评估现有的集成方案，从而设计出一套既切实可行又高效的集成策略。通过这些策略，期望能够为汽车制造业提供一种新的视角，以支持其在全球竞争中的技术创新和环保目标的实现。

【作者简介】周海波（1987–），中国山东安丘人，从事电动汽车高压架构和高压电源系统开发研究。

2 底盘系统与多电压车载电源概述

2.1 底盘系统结构与功能

如图 1 所示，汽车底盘系统包含了多个关键组件，以确保汽车能够有效地进行操控和行驶。图示中心部位的转向盘与前轮相连，通过转向柱传递驾驶员的操控意图。转向机构通过液压或电动助力装置获得辅助，减少驾驶员在转向时的劳力。在转向系统中，转向轴的设计允许驾驶盘与前轮之间传递旋转运动，从而使车辆能够根据方向盘的转动进行左右转向。车辆的前部还配备了传动轴，负责将发动机产生的动力传递到车轮，这一过程中，差速器起着至关重要的作用，允许左右车轮以不同的速度旋转，以适应车辆转弯时的动力需求。液压助力器则是为转向系统提供额外动力，以帮助车

辆在不同路况下保持稳定的驾驶性能。整个系统的协调运作确保了车辆在各种行驶条件下的安全与稳定，同时也提高了驾驶的舒适性。

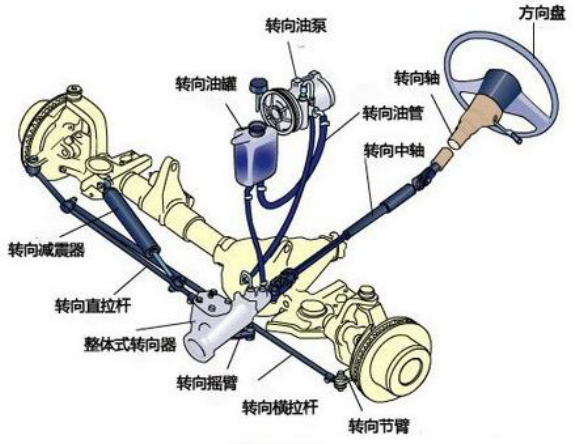


图 1 底盘系统结构组成

2.2 多电压车载电源的技术要求

图 2 的多电压车载电源系统，包含了从高压到低压的电能转换，以及各级负载的供电与保护功能。系统中的 800/48V DCDC 模块，将高压电源转换为 48V 电压，提供给车辆主要电路的一级配电。此外，48V 到 12V 的双向 DCDC 电源模块，不仅将 48V 电压下降至 12V 以供给二级电力系统，还能反向工作，实现 12V 到 48V 的电力供应。在此基础设施中，开关负责提供从 48V 反向到 800V 回路中 DCDC 低压侧的短路保护，而开关则断开 48V 到 12V DCDC 的 48V 主供电路以防短路，保障系统安全。此外，图中的开关提供 48V 悬架等负载的独立短路保护，而开关则保护 12V 负载，如转向和刹车系统。48V LBM（电池管理系统）则是负责处理 48V 负载的瞬时功率需求以及正反方向的能量供应。此系统设计允许 48V 供电给如底盘主动悬架等高负载设备，并能处理反向能量回收，提升能效。

在电动汽车中，12V 负载广泛存在于车辆各系统中，包括感性负载如电机控制的转向和刹车系统，以及容性负载，域控制器和 ECU 控制器等。DCDC 供电系统的设计须确保能在所有运行状态及故障情况下可靠供电，并管理各种上电和下电场景。通过这种高度集成的电源管理方案，车辆能够实现更高的动态性能和电源系统的鲁棒性，确保在各种行驶条件下都能保持稳定运行。

2.3 现有集成方案分析

在现有的底盘系统与多电压车载电源集成方案中，实际应用包括了多种电源管理技术以确保系统效率和稳定性。例如，采用分布式电源架构来管理不同电压的需求，特别是在新型电动汽车中，采用了 48V 电压来驱动辅助系统，如电动助力转向和空调压缩机。这种技术的应用显著减少了因电流过高导致的能量损失和线束尺寸。具体的数学模型包括电源转换器的设计公式，如 PWM（脉宽调制）技术在降压转换器中的应用，稳定的输出电压 V_{out} 可通过调整 PWM 的占空比来实现，公式如下：

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times D$$

其中 V_{in} 表示输入电压。这种控制方法允许精确调整输出电压，适应不同的负载需求。此外，高级的电源管理集成电路，能够提供多路电压输出，并配备有系统监控功能，以确保电源在各种工作条件下的稳定性。这些集成电路设计支持电压范围广泛，从 4V 到 40V，能够应对车辆启动时的低电压问题，并通过内部控制逻辑确保在电源电压下降时系统仍能维持正常运作。

3 底盘系统与多电压车载电源集成策略

3.1 集成策略的设计原则

在设计底盘系统与多电压车载电源的集成策略时，必须遵循几个关键原则以确保系统的性能和可靠性。电源系统必须具备高度的冗余和故障容错能力，确保关键安全功能如制动和转向在电源异常时仍可靠运行。为此，可以采用多通道输出设计，每个通道均设有独立的电压监控和控制，从而在一个通道出现故障时，其他通道仍能维持运行。在数学模型中，这可以通过增加独立控制环节的设计来实现，例如使用反馈控制算法优化每个通道的输出：

$$V_{\text{out},i} = V_{\text{ref},i} - K\left(V_{\text{error},i}\right)$$

其中 $V_{\text{out},i}$ 是第 i 通道的输出电压，$V_{\text{ref},i}$ 是参考电压，$V_{\text{error},i}$ 是偏差电压，k 是增益系数，用以调整输出以匹配设定的参考值。第三，高效率也是设计原则之一，必须确保电源系统在全范围的操作温度下均能稳定工作。实际应用中，可以采用先进的散热技术，如使用热管或液冷系统来帮助散发集成电路和转换器产生的热量。同时，系统设计应包括温度监测传感器，以实时调整散热措施，防止过热导致的性能下降或部件损坏。

3.2 集成方法

3.2.1 硬件集成方法

硬件集成主要包括确保电源模块、转换器和控制单元的物理布局符合车辆的设计要求，并能在有限的空间内实现最优性能。首先，组件选择必须符合汽车行业的高标准，包括耐高温、抗振动和长期可靠性。例如，电源转换器需选择那些具有高效率和低热损失的模型，这可以通过其效率公式计算确认，其中效率 η 通常定义为输出功率与输入功率的比值：

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{in}} \times 100\%$$

其中 P_{out} 为输出功率，P_{in} 为输入功率。选择效率高的组件可以减少能量浪费，提高整车的能源利用效率。其次，在布局优化方面，设计师需确保所有电源管理组件如电源转换器、稳压器以及关联的控制电路的位置能够最大化空间利用率并减少电线的长度。这不仅有助于提升能效，还可以减

少电磁干扰（EMI）。布局设计时，还应考虑到散热问题，合理安排散热通道和散热器的位置，以保证组件在高负载下也能保持稳定工作。通过运用热仿真工具和 CFD（计算流体动力学）软件，可以在设计阶段模拟和优化散热效果：

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

其中 Q 是热传导率，h 是热交换系数，A 是散热面积，ΔT 是组件和环境之间的温差。最后，整合过程中，电源系统的电磁兼容性（EMC）也必须被严格控制。这涉及使用屏蔽技术、滤波器以及布局策略以最小化高频开关导致的干扰。

3.2.2 软件集成方法

软件调控策略在电动汽车中关键地影响整车的能效和响应性，通过高级算法动态管理能量流向以优化系统性能。其中，动力管理系统广泛采用基于状态估计器的 DCDC 控制方案，以实时监控并调整能量的分配和转换效率。DCDC 转换器的核心功能是转换电压级别，满足车辆在不同运行状态下的电力需求。通过实施高级控制策略，如实时能量需求分析和电源优化调度，可以进一步提高能量的利用效率。

在 DCDC 控制策略中，关键的算法之一是基于状态反馈的动态调控，通常使用扩展卡尔曼滤波（EKF）算法进行精确的状态估计和控制。这种方法主要依赖于以下数学模型：$\mathbf{x}_{k+1} = f\left(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k\right) + \mathbf{w}_k$

$$\mathbf{y}_k = h\left(\mathbf{x}_k\right) + \mathbf{v}_k$$

在这里，$\mathbf{x}_k$ 表示估计的状态向量，如电压和电流等级；$\mathbf{u}_k$ 是控制输入，例如负载需求变化；$\mathbf{w}_k$ 是过程噪声；$\mathbf{y}_k$ 是观测向量，反映如输出电压等测量值；而 $\mathbf{v}_k$ 是观测噪声。函数 f 和 h 分别是状态和观测的非线性函数，它们描述了 DCDC 转换器的物理和电气行为。除此之外，动态能量管理策略也包括优化车辆的能量消耗，特别是在不同驾驶模式下。系统可以通过预测道路条件和驾驶行为，智能地调整动力输出，减少能量的无效消耗。例如，在车辆即将进入急加速或爬坡模式时，通过提前调整 DCDC 转换器的输出，以确保能量供应的及时性和充分性，从而减轻电池的负担并延长其使用寿命。

3.3 集成系统的评估和测试

在实验室环境中，对集成底盘系统与多电压车载电源的电压稳定性进行了精确测试，监测各电源模块的输出电压波动以评估其稳定性。特别地，48V DCDC 输出侧电压在 36~52V 范围内波动，而 48/12V DCDC 的输出电压维持在 9~16V 之间。经过至少 24 小时的连续监测，记录了电压值的标准偏差及其平均值，测试显示这些电压输出在规定范围内显示出极高的稳定性。进一步的测试中，48/12V DCDC 在实验条件下的动态响应速率达到了 0.2A/μs 以上，证明了其高效的动态调控能力。电池的动态响应能力测试中显示出电源系统的优异快速响应特性。热性能测试评估了系统在模拟的高温和低温环境下的表现。在低温环境下，系统启动时间从标准环境下的 5 秒延长至 10 秒，与高温环境下组件的热损耗增加有关。实车测试中，系统在连续运行 100 小时后的电源效率和响应时间被详细记录。起始时效率为 95%，100 小时后略有下降至 93%，而系统响应时间从原始的 0.8 秒增加到 1.0 秒。

总体来看，这些数据表明该系统能够适应不同的环境条件，尤其是在实际驾驶环境中表现出色。但在极端温度条件下，系统效率和响应速度的下降提示需要进一步优化温度管理和快速响应机制，以保证在所有运行条件下的最优性能。

4 结语

本研究深入探讨了底盘系统与多电压车载电源的集成策略，强调了系统设计中的关键技术要求与实施标准。通过分析底盘系统的核心组成部分及其功能，明确了集成这些系统的重要性，尤其是在提升动力性能和安全性方面。多电压车载电源系统的技术细节和现有集成方案的评估表明，采用先进的电源管理技术能显著优化能量分配和消耗。测试结果支持了这些集成策略的有效性，尤其是在高效能和响应速度上表现出色。展望未来，随着电动化和智能化趋势的加速，底盘与电源系统的进一步集成将更加关注环境适应性和系统间的兼容性，为汽车工业的可持续发展提供强有力的技术支撑。继续优化这些系统的集成方法，特别是在提升温度管理和电磁兼容性方面，将是未来研究和发展的重点。

参考文献

[1] 刘海超, 刘红旗, 冯明, 等. 智能汽车集成式线控制动系统传动机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 399-409.

[2] 张雷, 徐同良, 李嗣阳, 等. 全线控分布式驱动电动汽车底盘协同控制研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 261-280.

[3] 刘渺然, 翟旭亮, 吕宁, 等. 动力电池集成关键技术研究现状及展望[J]. Automotive Digest, 2023 (4).

[4] 刘炳祥. 智能传感器在汽车电子技术中的应用[J]. 机械与电子控制工程, 2023, 5(5): 19-21.

[5] 王国超, 高森祺. 汽车线控转向系统研究综述[J]. Automotive Digest, 2024 (3).

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6194

Research on innovation path of machining industry based on civil aviation technology migration

Qiguo Jiang

Guilin Information Engineering Vocational and Technical College, Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

This paper, grounded in high-reliability maintenance technology, high-precision manufacturing processes, and digital management systems in the civil aviation sector, addresses the needs of the mechanical processing industry for intelligent and green transformation. It proposes an innovative approach that integrates predictive maintenance, precision processing, and digital twin. By analyzing the logic of civil aviation technology's transition to mechanical manufacturing, the adaptability of key technologies, and industrial upgrading cases, the paper highlights the core role of civil aviation technology in process innovation, efficiency enhancement, and cost optimization for the mechanical processing industry. This provides a systematic solution for cross-industry technological integration.

Keywords

mechanical processing technology; high-end equipment maintenance and manufacturing; route maintenance; quality management

基于民航技术迁移的机械加工行业创新路径研究

蒋啟国

桂林信息工程职业技术学院，中国 · 广西 桂林 541004

摘　要

本文以民航领域的高可靠性维护技术、高精度制造工艺及数字化管理体系为技术基底，结合机械加工行业在智能化、绿色化转型中的需求，提出“预测性维护—精密加工—数字孪生”三位一体的创新路径。通过分析民航技术向机械制造的迁移逻辑、关键技术适配性改造及产业升级案例，揭示民航技术对机械加工行业在工艺革新、效率提升及成本优化中的核心作用，为跨行业技术融合提供系统性解决方案。

关键词

机械加工工艺；高端装备维修制造；航线维修；质量管理

1 民航技术与机械加工创新的技术协同性分析

1.1 研究背景与行业需求

机械加工行业作为制造业的基础环节，正面临全球产业链升级与“双碳”目标的双重挑战。当前，我国机械加工行业平均设备综合效率（OEE）仅为 65%，较德国、日本等制造业强国低 15%~20%，且高端装备国产化率不足 30%，关键零部件依赖进口 [1]。与此同时，新能源汽车、航空航天等下游产业对精密零部件的需求激增，传统加工工艺已难以满足。民航领域经过数十年技术积累，在高可靠性维护（如波音 787 发动机平均故障间隔时间 MTBF 达 12 万小时）、复杂材料加工（如钛合金整体叶盘加工合格率 98%）及数字化管理（如空客工业互联网平台连接超 100 万设备）等方面形成独特优势，为机械加工行业突破技术瓶颈提供了可行路径。

【作者简介】蒋啟国，男，中国广西桂林人，本科，助理讲师，从事机械加工工艺、高端装备维修制造研究。

1.2 民航技术的底层优势

民航领域因安全性和可靠性要求，已形成四大核心技术体系：

预测性维护技术：如南航“天瞳”系统通过多源数据融合实现 98% 的故障预警准确率，将维修周期缩短 80%[2]。

高精度加工工艺：如航空发动机机匣修复中镜面反光仰焊法，将焊接变形误差控制在 0.003 毫米 [3]。

复杂材料处理能力：针对钛合金、高温合金等难加工材料的数控复合加工技术，材料去除速率达 7000cm³/min。

数字化生产体系：波音 787 采用全机数字样机技术，减少 90% 工装并缩短 66% 制造周期 [4]。

1.3 机械加工行业痛点

工艺滞后：传统加工依赖人工经验，难以应对复杂结构件加工需求（如薄壁件变形控制）；

质量离散：缺乏全生命周期数据追溯，废品率居高不下（如航空铝材钻孔废品率达 30%）；

成本压力：高端装备依赖进口，制造环节能耗高（如传统切削工艺材料利用率不足 60%）[6]。

技术迁移范例

民航维修核心工艺	制造业应用领域	关键技术点
五轴联动叶片加工	复杂曲面零件制造	多轴刀具路径优化、在线测量补偿
电子束焊接钛合金结构	高端装备焊接	高能束能量控制、焊接应力消除
精密螺纹加工（AN 标准）	航天紧固件制造	螺纹中径三针法测量、防松工艺
无损检测（UT/MT/PT）	特种设备质量检测	缺陷识别算法、检测流程标准化

1.4 国内外技术迁移研究现状

国外跨行业技术迁移已形成成熟模式：美国通用电气将航空发动机涂层技术迁移至燃气轮机制造，使热端部件寿命延长 50%；德国西门子将民航数字化维修系统（如 COMET 平台）应用于工业机床，设备故障率降低 28%。国内在技术迁移领域尚处于探索阶段，虽有部分企业尝试借鉴航空工艺（如哈尔滨汽轮机厂引入航空叶片电解加工技术），但缺乏系统性理论支撑与标准化迁移流程。

1.5 研究价值

民航技术的迁移可解决机械加工行业四大核心问题：

- 通过预测性维护模型降低设备停机损失；
- 通过航空级精密加工技术提升产品良率；
- 通过数字化协同体系优化供应链成本；
- 通过质量安全管理思维降低安全生产事故以及生产成本。

本文首次提出“技术基底—适配改造—产业验证”的三层迁移模型，突破传统单点技术移植局限：

理论层：构建民航技术与机械加工的工艺适配性评价指标体系（含精度、材料、成本等 8 个维度）；

方法层：引入模糊层次分析法（FAHP）量化技术迁移可行性，解决跨行业技术匹配的主观性难题；

应用层：通过 3 个典型案例验证迁移路径的有效性，填补国内跨领域技术融合的实证研究空白。

1.6 作者实践经验的转化基础

技术积累：7 年波音 737 维修中，主导完成 200 余次发动机部件及机体故障修复、150 余例结构件修复，掌握航空级加工工艺细节；

数据沉淀：收集整理波音 737NG 系列机械故障数据 3000 余条，涵盖加工缺陷、材料失效等多类问题。

2 民航技术向机械加工迁移的核心路径

2.1 航空级加工工艺标准转化

2.1.1 波音 AMM 手册工艺解构

从《波音 737 维修手册》提取 12 类关键加工工艺，转化为制造业工艺规范：

案例：压气机叶片五轴加工工艺

民航标准：AMM 72-10-00 规定叶片型面粗糙度 Ra ≤ 0.8μm，加工余量 ±0.01mm；

制造业转化：制定《复杂曲面零件五轴加工工艺规程》，明确切削参数（主轴转速 10000~15000r/min，进给量 0.03~0.08mm/r）及检测频次（每 5 件 / 次三坐标测量）。

2.1.2 工艺验证与优化

刀具选型实验：对比硬质合金涂层刀具（寿命 8 小时）与 PCBN 刀具（寿命 15 小时）在钛合金加工中的表现，优选后者用于精加工；

参数迭代：通过正交试验优化五轴加工切削参数，确定最优组合（切削速度 120m/min，切深 0.3mm，进给量 0.05mm/r），使加工效率提升 30%。

2.2 高精度加工工艺的跨行业适配

复合材料的智能加工装备：借鉴航空领域的 A4 纸尺寸智能制孔设备，采用差动行星轮系解耦运动，集成力—扭—振三源感知模块，实现 0.02 毫米精度制孔（效率提升 3 倍）[5]。该装备通过力—扭—振三源感知模块实时反馈切削力波动，结合双驱动同步预测控制算法动态调整进给速度与主轴转速，避免复合材料分层与金属切屑飞溅 [7]。

镜面焊接技术的扩展应用：将航空发动机修复中的镜面反光仰焊法迁移至新能源汽车电池托盘焊接，解决异种材料连接难题，焊缝变形误差从 0.01 毫米降至 0.003 毫米。

2.2.1 基于数字孪生的加工仿真

模型构建：利用 UG NX①（一个交互式计算机辅助设计与计算机辅助制造系统，它功能强大，可以轻松实现各种复杂实体及造型的建构）建立波音 737 发动机机匣数字孪生模型，集成 128 个传感器数据（振动、温度、切削力）；

仿真验证：模拟五轴加工过程，预测刀具磨损趋势（如切削时间达 4 小时磨损量超 0.01mm），自动生成换刀提醒；

应用效果：某企业应用后，刀具损耗成本降低 22%，加工精度稳定性提升 18%。

2.3 数字化生产体系的协同升级

全流程数据链整合：参考民航 TAOIX 平台的多源数据架构，构建机械加工质量追溯系统，实现从原材料采购到成品交付的“一物一码”管理。

数字孪生驱动的工艺优化：基于波音 787 全机数字样机技术，建立机械加工设备的数字孪生模型，通过实时仿真预测加工变形并自动调整参数（如薄壁件加工变形量降低 40%）。

2.4 预测性维护技术的产业化改造

数据驱动的设备健康管理：移植民航发动机 RUL（剩余寿命）预测框架 [8]，采用深度软单调聚类（DSMC）与隐半马尔可夫模型（HSMM）构建机械加工设备的健康指数（HI），结合 MCMC 算法实现非共轭贝叶斯推断，预测误差可低于 15%。南航“天瞳”系统的多源数据融合架构（如

振动、温度特征提取）可迁移至数控机床健康管理，降低故障停机率 18%。

虚实交互的维护决策：引入 AR/VR 技术（如南航 AR 眼镜辅助维修），开发机床虚拟仿真系统，实时显示刀具磨损、主轴振动等关键参数，指导操作人员精准干预。

2.5 全流程质量管控体系构建

将民航安全管理系统（SMS）转化为“机械加工质量四环模型”。

风险评估：运用故障树分析（FTA）识别加工风险，如“螺纹加工不合格”事件可分解为刀具磨损（概率 0.5）、编程错误（概率 0.3）、材料缺陷（概率 0.2）。

过程控制：设置三道质量关卡（粗加工首检、半精加工巡检、精加工全检），参照民航“红黄绿”标签制度，对不合格品实施分级处理。

持续改进：建立“加工缺陷数据库”，每月分析高频问题，针对性优化工艺参数。

3 实证分析：民航技术迁移的机械加工创新案例

3.1 案例一：航空预测模型在数控机床健康管理中的应用

问题：某汽车零部件厂因主轴断裂导致年损失超千万元，传统维护成本占比 15%。

解决方案：移植民航 RUL 预测框架，通过振动信号聚类划分健康状态，结合 MCMC 算法预测刀具磨损周期，维护周期延长 23%，故障停机率降低 18%。

技术细节：采用 DSMC 算法对振动信号进行非监督学习，划分出“正常—亚健康—故障”三级退化状态；通过贝叶斯网络融合温度、负载等多维数据，实现误差率低于 12% 的寿命预测。

3.2 案例二：动态质量控制系统在航空铝材加工中的应用

问题：某航空铝材厂因叠层材料钻孔精度不足导致 30% 废品率。

解决方案：采用 A4 纸尺寸智能制孔装备，集成材料识别与参数自适应模块，加工效率提升至 0.5 分钟 / 孔，废品率降至 0.3%。

技术突破：通过火眼金睛的“透视”算法，在 0.1 秒内识别材料与加工状态，并切换至最优参数。

3.3 案例三：镜面焊接技术向新能源汽车的延伸

应用场景：某新能源汽车厂电池托盘采用铝合金与碳纤维复合材料混合结构，传统焊接工艺导致变形超差 0.01 毫米。

技术迁移：引入镜面反光仰焊法，通过镜面反射实时监控焊缝形貌，优化脉冲电流与送丝速度参数，将变形误差降至 0.003 毫米。

经济效益：单件加工成本降低 45%，产线良率从 82% 提升至 98%。

4 机械加工行业的创新升级策略

4.1 技术融合策略

跨行业技术适配：将民航领域的超塑成形 / 扩散连接（SPF/DB）技术用于机械加工中的钛合金复杂结构件制造，减少零件数量 50%[3]。

智能化工艺升级：引入无人机巡检技术（如民航发动机无人机检测），开发机床自动巡检机器人，实现加工环境的多维度监控。

4.2 产业链协同策略

供应链成本优化：借鉴齐飞航空与中国航空工业集团的供应链整合模式，建立机械加工行业“核心部件自主 + 非核心部件集群”的供应体系，采购成本降低 40%[5]。

绿色制造转型：应用民航防冰液环保配方技术（如Ⅳ型飞机防冰液），开发机械加工冷却液的生物降解配方，减少重金属污染 90%。

5 结论与未来方向

5.1 结论

民航技术的预测性维护、高精度加工及数字化体系可系统性提升机械加工行业的可靠性、精度与效率；

技术迁移需结合行业特性进行适配性改造（如镜面焊接技术向新能源汽车领域扩展）。

5.2 未来方向

技术深化：探索联邦学习在跨工厂数据共享中的应用，解决隐私保护与协同优化的矛盾（李志强等，2025）；

工艺扩展：将航空发动机整体叶盘制造技术（如线性摩擦焊）引入能源装备大型转子加工，突破材料性能极限（于音等，2025）。

参考文献

[1] 中国机械工业联合会. 2024年中国机械加工行业发展白皮书[R]. 北京: 中国机械工业联合会, 2024: 18-22.

[2] 马晓澄, 陈雪莹. 南方航空天瞳系统与TAOIX平台的技术创新[N]. 经济参考报, 2024-01-15(08).

[3] 孙红梅. 镜面反光仰焊法在航空发动机修复中的应用[J]. 中工网评论, 2025(3): 45-48.

[4] 李志强, 吕瑞强. 航空智能制造创新工场的数字孪生实践[N]. 中国青年报, 2025-03-20(06)

[5] 孙丹宁. 大连理工大学A4纸尺寸智能制孔装备研发与应用[J]. 中国科学报, 2025, 46(5): 23-26.

[6] 朱汉坤, 谢易洪. 厦门航空维修产业的关税政策与成本优化[J]. 海峡新闻, 2017(11): 32-35.

[7] 常浩南. 多目标优化算法在机械加工中的应用[J]. 军工科研系统, 2025, 37(2): 101-108.

[8] 赵慧敏, 郭润夏. 民机部件剩余寿命预测技术[J]. 中国民航科技, 2024, 45(4): 56-62.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6195

Low cost intelligent design: energy-saving and safety practice of 555 timer in public socket system

Shijiang Yang Jinzeng Wu Qing Xu

People's Hospital of Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Xiangxi, Hunan, 416000, China

Abstract

In order to solve the problems of energy consumption waste, low intelligence and hidden trouble of power safety that commonly exist in public sockets (such as hospitals, schools, offices, etc.), this paper proposes a low-cost intelligent public socket circuit system design scheme based on 555 timers. The scheme uses 555 integrated chips to build a monostable delay circuit, combined with current detection and relay control circuits, to achieve the intelligent power supply, timing power off and overload protection functions of the public socket. The experimental results show that the scheme proposed in this paper can achieve low power consumption, intelligent power supply, quickly cut off the power supply in the case of overload, and has good energy-saving, intelligent and safety performance. Compared with the traditional smart socket scheme, this scheme has lower cost, no need for networking, and is more suitable for public use scenarios with limited budget.

Keywords

555 timer, public socket, energy saving, safety, intelligence, low cost

低成本智能化设计：555定时器在公共插座系统中的节能与安全实践

杨世江 吴金增 徐庆

湘西土家族苗族自治州人民医院，中国 · 湖南 湘西 416000

摘 要

针对公共插座，如医院、学校、办公室等场所普遍存在的能耗浪费、智能化程度低和用电安全隐患问题，本文提出了一种基于555定时器的低成本智能化公共插座电路系统设计方案。该方案利用555集成芯片构建单稳态延时电路，结合电流检测和继电器控制电路，实现了公共插座的智能化供电、定时断电和过载保护功能。实验结果表明，本文提出的方案能实现低功耗工作、智能化供电，在过载情况下迅速切断电源，具有良好的节能、智能和安全性能。与传统的智能插座方案相比，本方案成本更低、无需联网，更适用于预算有限的公共使用场景。

关键词

555定时器；公共插座；节能；安全；智能化；低成本

1 引言

近年来，为贯彻落实党中央、国务院重大决策部署《“十四五”节能减排综合工作方案》，各地方行业都在大力推动节能减排。特别是公共场所供电设备，它的智能化管理尤显重要。555 芯片有电路集成度高，外围电路简单，响应速度快、强抗干扰能力强、稳定大电流的输出、低成本低功耗等优点，被广泛应用于电子电路领域。目前，公共场所（如医院、学校、办公室等场所）的插座，为人们提供了便利的用电服务。然而，传统的公共插座功能单一，无法实现智能控制、过载保护、定时断电等节能智能化管理功能，难以满足现代社会对公共插座能的管理要求。针对以上现状，笔者着手结合 555 集成电路芯片的优点从以下两个方面对公共插座进行优化设计：一、智能插座管理：设计具有定时断电功能的智能插座，在有人使用时自动打开电源，无人使用时自动关闭电源，降低待机功耗。二、过载保护机制： 采用带过载保护功能的插座，避免大功率设备滥用，提高用电安全性。实现了公共插座的智能化供电、定时断电和过载保护功能。与传统的智能插座方案相比，本方案成本更低、无需联网，更适用于预算有限的公共使用场景。

2 基本工作原理及总体设计方案

系统采用 555 集成芯片的单稳态工作模式构建延时电路，结合电流检测和继电器控制电路组成了低成本智能化的公共插座系统。如图 1 所示，其主要包括电源模块、触发电

【作者简介】杨世江（1987–），男，侗族，中国湖南怀化人，硕士，工程师，从事无线通信技术应用研究。

路模块、555 单稳态延时电路模块、通断控制电路模块、电流检测电路模块。电源模块提供稳定的 VCC 保障各模块正常运行。触发电路模块由开关 1 与开关 2 串联组成，开关 1 为人体感应开关，开关 2 为 PNP 三极管反馈控制开关，受 555 单稳态延时电路 2 模块控制。555 单稳态延时电路模块 1 和模块 2 主要用于控制通断控制电路模块及开关 2 的通断工作状态，且 555 单稳态延时电路模块 1 延时时间需小于等于 555 单稳态延时电路模块 2 确保系统工作过程完整有效。通断控制电路模块是控制插座零线的通断的部件，它的工作状态受电流检测模块和 555 单稳态延时电路模块 1 的共同控制。

系统结构框图如图 1 所示，开关 1 开关 2 串联，555 单稳态延时电路 1、电路 2 并联，555 单稳态延时电路 1 控制通断控制电路的继电器工作状态，555 单稳态延时电路 2 控制开关 2 的工作状态。系统通电后，555 单稳态延时电路进入稳态，低电平输出，开关 2 导通，通断控制电路模块继电器断开，插座断电。开关 1 被触发后产生触发信号通过开关 2，触发 555 单稳态延时电路 1 和电路 2 进行延时工作，模块在延时时间内高电平输出，通断控制器收到高电平信号，其继电器闭合，插座通电。同时，555 单稳态延时电路 2 高电平输出，使开关 2 断开，避免 555 单稳态延时电路模块被重复触发，影响系统周期内的工作状态。电流检测模块实时监测插座工作电流，如果出现过载情况，立即断开通断控制电路模块的继电器，使插座断电。

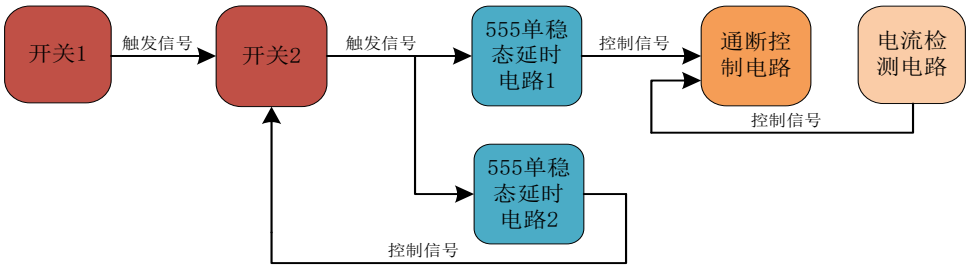


图 1 系统结构框图

3 系统设计与实现

系统的设计包括了电源电路模块、触发电路模块、555 单稳态延时电路模块、通断控制电路模块、电流检测电路模块五个部分的设计，以下为电路的具体设计方案。

3.1 电源电路模块

电源电路常规的设计方案是采用变压器降压将市电转换为低压直流的方法，笔者考虑到体积、功耗、成本等因素，本系统采用阻容降压模式的电源设计方案。如图 2 所示，市电通过 C5 的限流和 R10 降压后，再经过四个二极管 1N4007 进行桥式整流，最后，通过二极管稳压、电容滤波得到了设备所需的 VCC。阻容降压电源的设计难点主要在于确定阻容元件 C5、R10 值，因为电路所需的功耗低电流小，根据容抗关系如公式（1）、公式（2）可知。

$$X_C=1/(2\pi fC) \quad \text{（公式 1）}$$

$$I_C=U/X_C \quad \text{（公式 2）}$$

当 C5 的值为 2.2uf、R10 的值为 510K 时电源电流约为 160mA，输出满足电路的工作需求。

3.2 触发电路模块

触发电路模块主要分为开关 1 和开关 2 两个部分，它们成串联模式连接。开关 1 是红外线人体感应开关，开关 2 为 PNP 三极管 9012。基极与 555 单稳态延时电路 2 模块输出端相连，模块低电平输出时，9012 集电极和发射极呈低阻态导通状态，反之则呈高阻态断开状态。当设备被触发进入工作状态后，555 单稳态延时电路 2 高电平输出，9012 集电极和发射极呈高阻态断开状态，避免了系统在工作时被无效信号重复触发，影响系统的工作状态。这样的连接模式提高了设备的智能化、自动化功能。

3.3 555 单稳态延时电路模块

555 集成电路工作电压范围宽、低功耗、强抗干扰负载能力强、成本低廉，在电子领域被广泛应用。它有三种工作模式，依据系统的设计需求，本文采用 555 单稳态延时工作模式。稳态时，模块低电平输出。被触发时，产生一个固定时长的单次高电平脉冲输出。555 单稳态电路原理图图 2 所示，将电阻 R1 和一个电容 C1 与 555 芯片的 6 脚阈值（THR）脚和 7 脚放电（DIS）脚连接在一起。触发（TRIG）脚连接触发信号，复位（RST）脚接高电平。当触发脚接收到一个触发信号时，输出脚 3 脚会从低电平变为高电平输出。VCC 通过电阻 R1 对电容 C1 充电，当电容 C1 电压达到 2/3Vcc 时，555 的输出变为低电平。输出的电平脉冲宽度由 RC 时间常数决定，因此，根据不同场景，改变电阻 R1 和电容 C1 的值，可以得到场景需要的延时时间。其计算公式如下：

$$t=RC1n3)\approx 1.1RC \quad \text{（公式 3）}$$

系统采用两个 555 单稳态延时电路模块并联，555 单稳态延时电路模块 1 用于控制受控电路模块的继电器的工作状态，555 单稳态延时电路模块 2 用于控制开关模块的 PNP 型三极管开关 9012 的工作状态，且 555 单稳态延时电路模块 1 的延时时间须小于等于 555 单稳态延时电路模块 2，以确保 555 单稳态延时电路模块 1 工作的有效性。反之，则会出现系统工作时被重复触发的情况，不能形成完整的工作过程。

3.4 通断控制电路模块

通断控制电路模块主要由二极管、三级管、限流电阻、继电器等元件组成，如图 2 所示， Q3 为 NPN 三极管 9012，其基极与 555 单稳态延时电路模块 1 的输出信号相连接，Q4 为 PNP 三极管 9013，其基极和电流检测模块的输出信号端相连接。Q3、Q4 串行连接，共同控制 Q2 三极管 9012 的集电极与发射极的导通状态，从而达到控制继电器的目的。

3.5 电流检测电路模块

电流检测电路模块采用霍尔电流传感器芯片 ACS712，它具有输出上升时间短、灵敏度高、误差范围小、电源与通过的电流成比例、成本低廉体积小等优点，能够满足系统设计的需求。它的信号输出端与 Q2 三极管 9013 基极相连，当在无电流或额定电流通过的情况下，信号输出端的电压大于等于 VCC/2 且小于 (VCC-0.7V)，Q2 三极管 9013 集电极发射极呈低阻抗短路状态，通断控制模块继电器正常工作。当电流达到允许通过的最大值时，信号输出端的电压大于等于 (VCC-0.7V) 时，Q2 三极管 9013 集电极发射极呈高阻抗断路状态，通断控制模块继电器无条件断开，实现设备的载保护功能。

由图 2 可知，当设备通电后，555 单稳态延时电路模块形成稳态，低电平输出，Q1、Q3 三极管（9012）的集电极和发射极呈低阻导通状态，通断控制电路模块继电器断开，插座断电，设备处于等待触发状态。开关 1 为红外线人体感应开关，当它被触发时，输出端低电平，555 单稳态延时电路 1、电路 2 模块被触发工作，输出端高电平，Q1（9012）断开（在工作中，Q1 保持断开避免了重复触发延时电路而影响电路正常工作）。Q3(9012) 集电极连接 VCC，发射极和集电极呈低阻导通状态，Q4(9013) 三极管受控于电流检测芯片 ACS712，在不过载的情况下，发射极和集电极同样低阻导通状态。所以，Q2(9012) 基极高电平，发射极和集电极导通，继电器闭合，插座通电。555 单稳态延时电路 1 工作延时完成后，回到了稳态，输出端低电平，通断控制电路模块继电器断开，插座断电。由于，555 单稳态延时电路模块 1 延时时间小于 555 单稳态延时电路模块 2，因此，555 单稳态延时电路 2 任然处于延时工作状态，开关 2 保持断开，系统实现间歇性工作功能，减轻了插座工作负担，避免了插座连续性工作带来的用电安全隐患。当 555 单稳态延时电路 2 延时工作完成后，回到稳态，输出端低电平，Q1（9012）集电极和发射极导通，设备回到了等待触发状态。同时，电流检测电路实时监测插座的电流，如果电流超过设定阈值，立即断开通断控制电路模块的继电器，模块终端断开，实现过载保护。

4 测试与分析

4.1 系统测试

如图 3 所示，通过模拟公共插座的负载场景（微波炉、笔记本电脑等），在 protel 电路仿真软件进行电路仿真测试，电路运行流畅，实现了智能化间歇性供电、定时断电和过载保护功能。

4.2 用料成本分析

根据电路原理图和笔者的市场调研可知，构成系统所需的电子元件清单及用料价格如表 1 所示（其中，市场参考单价来源是电商行业平台淘宝网 www.taobao.com 、京东网 www.jd.com 和当地零售商的市场零售单价，仅为调研时段有效，在后续实际应用中亦或存在小幅度波动）。由表可知，所用材料费用总计仅为 7.874 元，相对于现有的智能插座，本系统设计用料少，成本低廉。

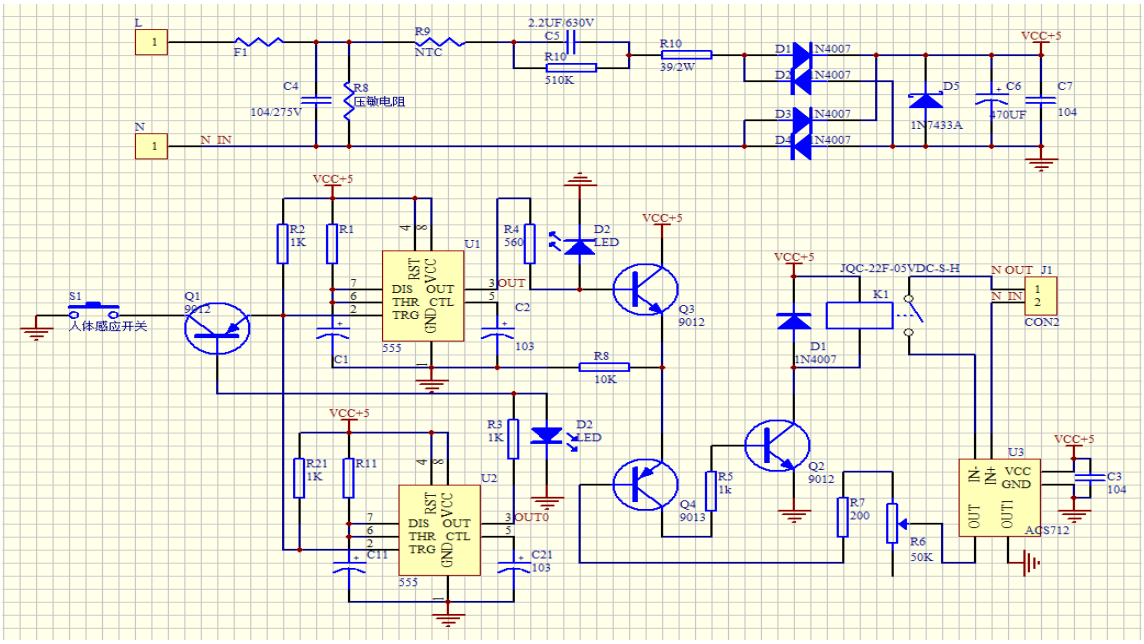


图 2 系统电路原理图

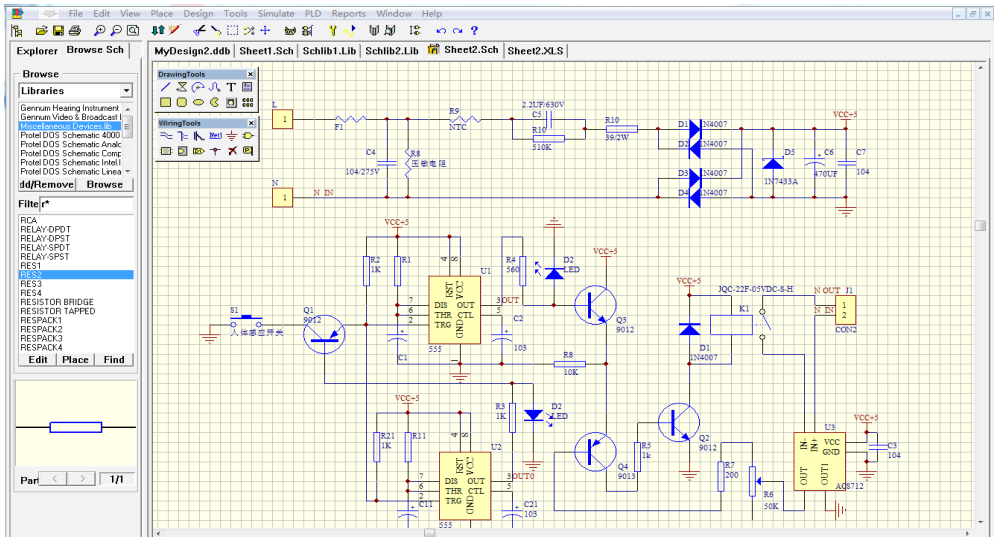


图 3 电路仿真图

表 1 电子元件用料及价格表

序号	元件名称	型 号	数量 / 个	市场参考单价 / 元	总价 / 元
1	电阻	39/2W	1	0.06	0.06
2	电阻	1/4W	8	0.008	0.064
3	压、热电阻	471	2	0.1	0.2
4	电容	2.2UF/630V	1	0.2	0.2
5	电容	104/275V	1	0.2	0.2
6	电解电容	470UF/10V	1	0.05	0.05
7	无极性电容	103/104	4	0.01	0.04
8	整流二极管	1N4007	4	0.04	0.16
9	稳压二极管	1N7433A	1	0.18	0.18
10	三极管	9012/9013	4	0.03	0.12
11	继电器	JQC-22F-05VDC	1	1.4	1.4
12	人体感应开关	红外线	1	3.2	3.2
13	555	Ne555	2	0.1	0.2
14	电流传感器	ACS712	1	1.8	1.8
总 计			7.874（元）		

根据系统测试和用料成本分析可知，本系统实现了智能化间歇性供电、定时断电和过载保护功能，相对于现有的同功能型号产品更为节能，低廉，部署方便简单。其设计理念已贯彻落实了党中央、国务院重大决策部署《“十四五”节能减排综合工作方案》，达到了预计的目标。

5 结语

本文采用 555 集成芯片单稳态延时工作模式，结合电流检测、继电器控制电路设计了一款适用与公共场所的智能化插座。通过实验和测试，系统实现了智能化间歇性供电、低功耗工作、和自动过载保护功能。它的优势在于成本低、无需联网、易于批量部署，解决了现有智能插座成本高、功耗高、部署和维护存在一定难度等缺点，具有良好的公共场所场景使用前景。

参考文献

[1] 555定时器原厂手册(Signetics NE555)[S].

[2] 林群聪. 公共卫生管理中心项目智能化系统规划探析[J]. 智能建筑电气技术, 2024.

[3] 潘绍明，尚会增，王浩，尹梦蝶. 基于STM32的智能插座的设计与实现[J]. 电子器件, 2024.

[4] 洪德欣, 许炜, 吴娟美. 基于大模型智能插座的存量空调智能化改造方案研究 [J]. 技术 · 创新,2025.

[5] 郭芷妍，胡立夫，史佳伟，刘雨珊. 基于单片机的多功能插座设计[J]. 电子基础, 2023.

[6] 刘伟，丁雷，许婷，卢传涛，杨世江，汤东东. 基于单片机微控制器的简易数字示波器设计[J]. 技术应用, 2010.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6196

Prevention of Boiler Tube Explosion by TCD Online Hydrogen Content Monitoring

GuanJian YuFeng

Qinghuangdao Power Plant CO..Ltd., Qinghuangdao, Hebei, 066003, China

Abstract

With the increasing installation of supercritical and ultra supercritical units in thermal power plants, the superheater, reheater tube clogging and tube explosion of large units, main steam valve jamming and scale problems of turbine components occur frequently. Because of this characteristic of over temperature and concomitant release of hydrogen during the production of scale, the advantages of accurate online hydrogen content detection of water vapor are highlighted. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the mainstream technology, and deeply analyzes the application of thermal conductivity (TCD) analysis technology in monitoring thermal power plant boiler over temperature oxidation and corrosion.

Keywords

oxide; monitoring; TCD

热导法在线水汽含氢量监控预防锅炉超温腐蚀

关健　于枫

秦皇岛发电有限责任公司，中国 · 河北 秦皇岛 066003

摘　要

随着火力发电厂超临界、超超临界机组装机增加，大机组过热器、再热器管堵塞爆管、主汽门卡涩和汽轮机部件的氧化皮问题频发。因超温及产生氧化皮的过程中伴随释放氢气的这一特性，准确的在线水汽含氢量检测技术优势凸显。本文分析了主流技术的优缺点，并对应用热导（TCD）分析技术在监控火电厂锅炉超温氧化、腐蚀的案列进行了深入剖析，探索了在线监测受热面高温氧化与受热面超温之间的关系，指出了机组深调峰背景下的受热面高温氧化监测与控制方向。

关键词

氧化皮；监测；TCD

1 蒸汽系统高温腐蚀不可避免

国内的黄兴德、周新雅、陈戎、沈保中等先后锅炉高温受热面蒸汽氧化皮的生长与剥落特性进行了研究。黄兴德阐述了超超临界锅炉高温受热面蒸汽氧化皮的晶粒特征，重点分析了铁素体钢和奥氏体钢蒸汽氧化皮的结构特征及生成剥落规律，指出高温受热面蒸汽氧化皮的产生是不可避免的。陈戎、沈保中调研了国内 19 台蒸汽通流部件表面氧化情况，总结出锅炉有超温运行的机组一般 5 万小时开始出现氧化皮、基本不发生超温运行的机组运行 10 万小时以上也会受到氧化皮影响，超温严重的机组运行几千小时就可能高温氧化引起的爆管问题。

20 世纪 60 至 70 年代，德国的科学家通过电子显微镜的观察，发电厂过热蒸汽管道金属表面的氧化膜并非由水汽中的溶解氧和铁反应形成的，高温水汽氧化是金属腐蚀的一种特殊形式。在 450℃～ 570℃，水蒸汽与铁反应生成 Fe_3O_4 并释放出氢气：$3Fe + 4H_2O = Fe_3O_4 + 4H_2$（图 1、图 2）。在 575℃以上，水蒸汽与纯铁反应除了生成 Fe_3O_4 以外，还会在 Fe_3O_4 层下生成 FeO ，由于 FeO 是不致密的，因此破坏整个氧化膜稳定性，氧化速率会大大增加。从上述反应式可看出，氧化膜的形成过程，并无溶解氧参加反应。氧化膜的生长遵循塔曼法则 $d^2 = Kt$（d 为氧化皮厚度，K 为与温度相关的塔曼系数，t 为时间），氧化膜的生长与时间和温度有关，氧化速度与压力有关。华北电力大学樊泉桂对超临界锅炉中间点温度的优化控制进行了研究，指出合理控制中间点温度可以使烟气温度最高的区域中保持较低的金属管壁温度，以减轻金属的高温腐蚀、避免超温爆管。

【作者简介】关健（1968–），男，满族，中国辽宁辽阳人，本科，高级工程师，从事发电厂化学监督研究。

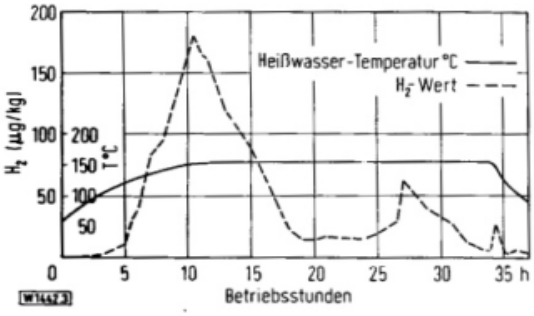


Abb. 3. Wasserstoffmessungen beim Schutzschichtbetrieb eines Kessels im Anschluß an die Beizung (5)

图 1 氧化膜形成时的氢逸出曲线

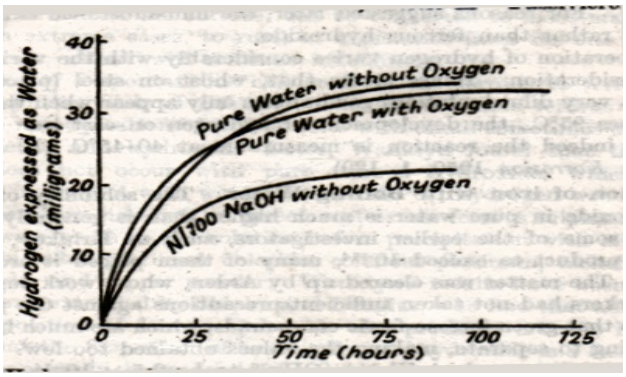


图 2 无氧及含氧纯水与铁反应析氢曲线

2 测量水汽含氢量的技术路线

目前，以在线准确蒸汽溶解氢技术实时监测受热面的高温氧化情况，将蒸汽测的氧化皮生成速度控制在最小是防止过热器和再热器发生爆管的关键技术。研究表明，蒸汽中含氢量变化可以用来衡量高温水蒸气与过热器、再热器内壁之间的反应速度（氧化皮产生速度）。当受热面出现局部过热时，水汽中的氢含量将会明显上升，水汽含氢量比壁温指标及汽温指标更灵敏。

水汽系统中的含氢量是一个循环 + 脱气的过程：从低温的给水系统产生的氢做为炉水（汽水分离器）氢的背景、炉水氢（含给水氢）做为蒸汽氢的背景、蒸汽中的氢进入凝汽器、除氧器后，由于凝汽器负压的作用及除氧器的脱气作用，氢气被脱出。在上述过程中，整个水汽系统的含氢量一直重复着累加直至脱气回零的循环。这说明，检测到的氢含量代表当时高温腐蚀的程度。只要精准分析水汽的含氢量就能够及时判断高温腐蚀的程度，在产生高温氧化皮反应过程中，氢气是释放的因子。因此，只要能够准确监测水汽中的氢气含量，也就直接量化了金属在高温水汽中的氧化程度。

蒸汽溶解氢在线分析主要通过两种技术路径实现：一是电化学氢气检测器（EC）的测量技术，另一种是热导法（TCD）氢气测量技术。华电电力科学研究院李海洋等人研究发现电化学氢气检测器（EC）的测量准确性较差，在锅炉给水采用加氧处理时尤为突出（表 1），溶解氧质量浓度对溶解氢表的测量存在影响，其影响规律是溶解氢质量浓度越小，溶解氧质量浓度越大，溶解氢表测量相对误差越大；反之，溶解氢质量浓度越大，溶解氧质量浓度越小，溶解氢表测量相对误差越小。

3 TCD 法测量水汽含氢量提前预警蒸汽超温腐蚀

热导式气体分析仪是通过测量混合气体热导率的变化量来实现被测组分浓度测量的。混合气体的热导率具有叠加性，空气热导率为 5.83，氢气的热导率为 41.6，只要测得混合气的热导率，就可以得到氢气的浓度。此外，由于空气与氢气的热导率相差较大，以空气为背景气体，可以保证测量精度和现场测量的便捷性。

2025 年 5 月某电厂 4 号机组锅大修后机组 04:48 点火，点火后过热蒸汽、再热蒸汽、汽水分离器溶解氢数据及机组负荷波动曲线（图 1）如下：06:00, 再热蒸汽溶解氢快速上升超上限（20μg/L），后持续回落；11:00，再热蒸汽、过热蒸汽溶解氢同时超上限（20μg/L）；13:45，汽水分离器溶解氢快速从 2.13μg/L 上升至 11μg/L 后回落，判断此时水冷壁发生爆管（见图 3 箭头所示）。事实上，由于氢气在系统的累加效应，06:00 至 08:00，过热、再热蒸汽氢含量随负荷快速上涨时，超温腐蚀已经开始加剧；在线蒸汽氢含量的曲线提前预测了爆管的发生。

表 1 不同浓度的溶解氧对溶解氢测量的影响

溶解氧质量浓度/（mg · m^{-3}）	溶解氢测量值/（mg · m^{-3}）	溶解氢实际值/（mg · m^{-3}）	溶解氢测量差值/（mg · m^{-3}）	测量相对误差/%
0	1.22	1.22	0.00	0.00
50	1.02	1.20	-0.18	-15.00
100	0.89	1.21	-0.32	-26.45
150	0.74	1.22	-0.48	-39.34
200	0.63	1.21	-0.58	-47.93

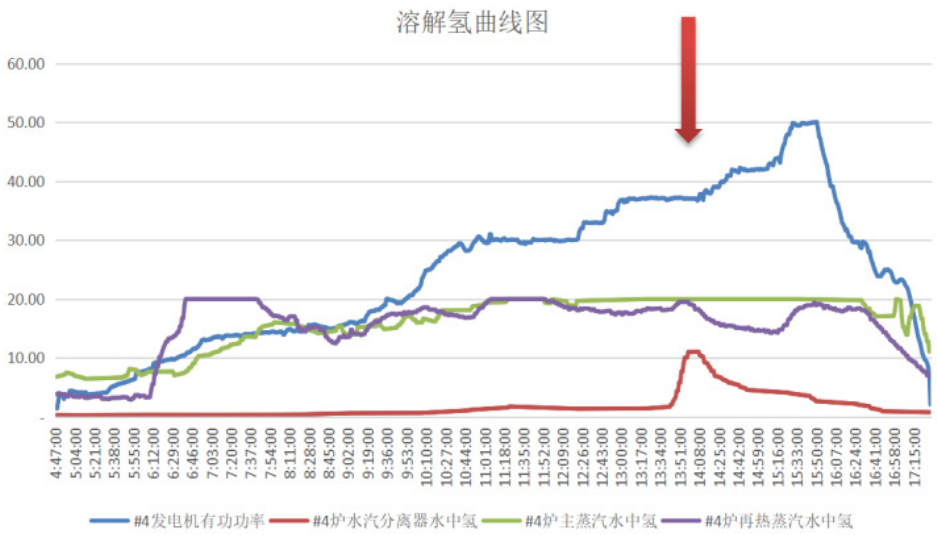


图 3 机组检修后启机过程中发生爆管期间的过热蒸汽、再热蒸汽等含氢量及机组负荷变化曲线

4 极限条件下化学水汽加药调控实践

2025 年，在某电厂 220MW 退役机组上进行了极限化学加药调整试验：期间停止给水、炉水加药；炉水、给水、过热蒸汽氢含量均在 2μg/L，说明水汽系统在不加药的情况下，给水、炉水 pH 值逐渐降低，但蒸汽氢电导率仍然能维持较好水平，从侧面反映了水汽系统氧化膜的致密性良好，证明了水汽系统金属内表面形成致密的氧化膜，是抵御氧化皮增长的最佳手段。

时间	pH		DD（μs/cm）			DDH（μs/cm）			
	炉水	给水	炉水	给水	凝结水	给水	凝结水	饱和	过热
3 月 30 日	9.21	8.81	8.44	1.107	0.941	0.083	0.158	0.085	0.164
4 月 1 日	9.21	8.41	7.26	0.614	0.226	0.125	0.153	0.110	0.113
4 月 2 日	9.13	8.15	6.82	0.785	0.44	0.150	0.150	0.143	0.138
4 月 3 日	9.00	8.06	6.60	0.701	0.435	0.114	0.162	0.118	0.156
4 月 4 日	8.31	7.5	2.09	0.643	0.258	0.122	0.156	0.155	0.076

5 机组深调峰背景下的受热面高温氧化监测与控制方向

随着新能源装机占比不断提升，火电机组深度调峰已成常态。深调峰时，过蒸汽温度和压力波动频繁、汽温控制困难，导致氧化皮生成速度加快；温度和应力的波动，会使氧化皮的结构变得疏松多孔，这种结构变化降低了氧化皮的致密性和保护性，使其更容易受到外界因素的侵蚀，进一步加速氧化过程；氧化皮内部的应力分布也会因调峰而改变，可能导致氧化皮出现裂纹，这些裂纹会成为氧气和其他腐蚀性介质进入金属基体的通道，加速金属的腐蚀，同时也削弱了氧化皮与金属基体的结合力；深度调峰时，过热器管经历频繁的热应力变化。热应力的反复作用会使氧化皮与金属基体之间的结合力逐渐减弱。当结合力小于氧化皮自身的内应力或受到外界流体冲刷等作用力时，氧化皮就容易发生剥落；蒸汽参数的变化会导致过热器管的膨胀和收缩不均匀；不均匀变形会在氧化皮与金属基体之间产生额外的剪切应力，促使氧化皮剥落。总之，深调峰对火电厂机组的安全稳定运行影响极大，必须推广水汽氢含量在线监测，及时评价负荷快速波动对机组寿命的影响，并采取有效控制汽温等措施，将高温受热面氧化皮脱落、堵塞爆管风险控制在最小程度，发挥火电厂在电网稳定运行的托底作用。

参考文献

[1] 樊泉桂，超临界锅炉水冷壁工质温度的控制，动力工程，2006（2）

[2] 黄兴德等，超超临界锅炉高温受热面蒸汽氧化皮的生长与剥落特性，动力工程，2009（6）

[3] 陈戎，沈保中等，火电厂蒸汽通流部件高温氧化的调查分析，电力设备2006(11)

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6197

Thoughts on the application of digital electricity consumption monitoring technology in the new era

Yang Zhang　Kai Xue　Haodong Yu

State Grid Qin'an County Power Supply Company, Tianshui, Gansu, 741600, China

Abstract

The power industry in the new era is undergoing a digital transformation, with the modernization of electricity monitoring technology continuously evolving. To enhance the safety, stability, and management efficiency of the power supply system, this paper analyzes the current state of digital electricity monitoring technology and explores its specific applications in data collection, analysis, and fault diagnosis. By integrating intelligent sensing technology, big data analysis, and IoT technology, the study summarizes the practical achievements of digital electricity monitoring in areas such as precise monitoring of electricity usage, optimizing electricity management, and addressing electricity safety issues. Finally, the paper proposes directions for technical optimization and future development strategies, providing a theoretical foundation and practical guidance for the promotion and application of digital electricity monitoring technology.

Keywords

digital power consumption monitoring; intelligent sensing technology; power consumption data analysis

新时期数字化用电监察技术的运用思考

张扬　薛凯　余浩东

国网秦安县供电公司，中国 · 甘肃 天水 741600

摘　要

新时期的电力行业正经历数字化转型，用电监察技术的现代化要求不断提升。为了提高供电系统的安全性、稳定性和管理效率，本文对数字化用电监察技术的现状进行了分析，探讨了其在用电数据采集、分析与故障诊断等方面的具体应用。通过结合智能传感技术、大数据分析和物联网技术，研究总结了数字化用电监察在精确监控用电行为、优化用电管理以及应对用电安全问题等领域的实践成果。本文最后提出了技术优化的方向和未来的发展策略，为提升数字化用电监察技术的推广应用提供了理论依据和实践指导。

关键词

数字化用电监察；智能传感技术；用电数据分析

1 引言

数字化技术迅速发展，极大促进电力行业转型变革。用电监察，保证用户用电规范及电力系统安全运行的关键环节，延续现代化。传统用电监察方式，数据采集范围局限、实时性欠缺、人工操作局限性，无法适应复杂多样用电需求。数字化用电监察技术，运用智能传感器、大数据分析、物联网技术，达成数据实时采集、故障精确诊断、异常用电正确识别，明显提升供电管理智能水平。已经展示改进用电管理模式、增强安全保证、迅速响应能力优势，实际应用中仍存在技术标准不统一、大规模数据处理效率偏低、人工智能融合欠缺难题。处理各种困难，调查数字化用电监察技术的现有状态、明确使用场景和真实成果，推荐优化和改进的办法，推动技术传播和发展的理论基础和实践建议。

【作者简介】张扬（2000–），男，中国甘肃秦安人，本科，助理工程师，从事用电监察研究。

2 新时期用电监察技术的背景与现状

2.1 电力行业数字化转型的趋势

电力行业正在经受新时期的数字化转型，这一趋势理所当然的背景为信息技术和发展系统的深度融合。数字化目前革新电力生产、传输和消费的传统方式，其核心驱动力在于提升供电系统的效率和可靠性，并达成逐渐严格的用电安全与管理需求。现代电力系统采用数字化技术，提升生产和运行的自动化水平，推动设备和资源的智能调度。电力企业通过数字化方法，构建数据驱动的决策支持系统，优化电网运行并提高能源效率 [1]。大数据、云计算和人工智能技术结合，识别电力需求变化，提供先进工具，完成快速反应和精确调控。电力行业信息化建设逐步完善，数据收集和分析速度加快，通过数字化转型促进用电监控技术进步，成为行业共同目标，显示未来建设智能电网的可能和必要。技术应用

引领电力行业走向智能高效时代。

2.2 用电监察技术面临的挑战与需求

电力行业数字化转型加快推进，用电监察技术遭遇各种新挑战及需求。传统用电监察系统缺少智能化方法，无法有效管理复杂用电数据，难以达到现代化电力系统要求的即时性及精确性数据分析标准。电力用户行为多样化和设备复杂化需要更强识别及鉴别能力。面对新型电力安全问题，故障诊断及预警能力成为关键要求，以保证供电连续性及可靠性。降低运营成本及提升管理效率目标使得智能化用电监察技术应用变得非常急迫。解决上述挑战，数字化技术整合创造新机会，技术升级及创新成为各电力企业首要任务。

2.3 数字化技术对用电监察的推动作用

数字化技术进步促进用电监察发展完善。尖端智能传感技术辅助电力设备完成用电数据准确收集监控，保证信息维持精确性高效运行。大数据分析技术使用导致用电行为模式识别预判获得更高效率，管理部门获取坚实决策支持。物联网技术结合提高用电监察执行能力，监察设备处理异常情况执行问题排查预测开展改进。数字化技术使用提高用电监察智能化水平，促进供电设备更高效率更可靠发展加强优化。

3 现代化数字化用电监察的关键技术

3.1 智能传感技术在用电数据采集中的应用

智能传感技术使用用电数据采集，转变为现代数字用电监察重要部分。核心依赖高准确传感器尖端数据采集系统结合，完成用电数据非常精准实时收集。传感器检测电流电压多种参数细微变化，保证数据确切稳固。集成电路技术优化，数字信号处理技术添加，使传感器拥有敏感可靠性能。技术提高用电监察系统适应极端环境能力 [2]。数据采集终端运用物联网技术快速达成中央处理系统流畅对接，保障数据传输处理高效能，符合现代用电管理需求。传输机制显著提高了系统反应速度，支持远程监控和动态配置实现。依靠智能传感器网络建立，电力企业能够监测设备状态、负荷变化和环境状况，准确确定恰当决策，有效优化资源分配，减少停电事故和经济损失。智能传感技术发展促进用电监察技术创新和转变，电力行业全面提升管理水平获得技术支持。

3.2 大数据分析技术助力用电行为模式识别

大数据分析技术于用电行为模式识别中起着关键功能。借助对于大规模用电数据的深入探索，能够展现用户的用电规则以及反常行为。机器学习算法得到普遍使用于海量数据的分析，当中涵盖聚类、分类和预测模型，可以高效辨识出差异类别的用电模式。经由对于历史数据的分析，能够预先察觉用电需求的变动趋势，给电力供应的动态调整供应基础。不但有利于改进电力资源配置，而且可以提升电力系统的安全度和可信度。在此基础上，有关技术的应用使供电企业达成更加精准化的用电行为监管和治理，明显提高用户满意感和治理效率 [3]。大数据分析于用电监察中的应用已经变为提高电力行业数码化程度的关键方法。

3.3 物联网技术实现实时监控与故障预警

物联网技术于实时监控与故障预警方面的应用，借助多层次的感知与数据传输，达成了供电系统的全面智能化管理。传感器网络和无线通信技术使电力设备的运行状态和环境参数可以得到连续监控，数据借助互联网传输至中央系统开展实时分析。此模式不但提升了运维效率，并且借助预设的故障诊断算法，能迅速辨识异常，高效降低故障造成的损失和停电时间。物联网的集成与应用，为电力系统的稳定运行供给可靠的技术支持和保障，为现代化数字化用电监察发展的重要方向。

4 数字化用电监察技术的实际应用与成效

4.1 精确监控用电行为的技术实践

数字化用电监察技术的运用中，精确监控用电行为变为核心。智能传感技术和高大数据分析相融合，有效提升了数据收集的精确度和正确性。借助高级计量基础设施，收集即时用电数据并且产生详尽用电报告，协助辨识用户用电规律及不正常行为。在此期间进程中，智能传感器发挥出关键功能，可以即时捕获并传递用电数据，给进一步分析供应根基。结合机器学习算法，数据分析软件能够辨识复杂的用电行为规律，从中发觉隐性的用电效能问题和平安隐患。依托此技术搭建的监控系统极度自动，可以精确锁定用电异常并且迅速告警，提升电力供应的稳定性和安全性。整合应用这些技术，改善了用电管理流程，明显降低手动干预，加强用电监察的智能水平。这不但提高了电力资源的利用率，给响应不断变化的电力需求给予了有力支持。精确监控技术的实施，业已变为促进数字化供电管理朝智能转变的关键力量。

4.2 用电管理优化的实施路径与成果

用电管理完善依赖数字化监控技术运用，发挥十分关键的作用。整合现代技术手段，供电系统实现用电资源的精确调度和合理分配。智能传感技术运用后，用电数据被迅捷采集并传递到后台执行深入分析。大数据分析技术助力辨识用电行为模式并完善决策 [4]。在实际操作中，采用完善算法和运用自动化控制策略，构成用电管理完善的核心部分。技术运用高效提升供电系统运行效率，显著减少能耗成本。物联网平台运用结合技术，供应供电设备当前状态的深入检测和异常情况的及时警示，保障电力系统安全稳固地运行。实际运用结果表明，数字化用电监控改进用电管理具体手段，达成突出的经济收益和优秀的节能效果，电力行业持续发展获取强劲促进。

4.3 异常用电行为识别技术的效率提升

异常用电行为辨识技术效率的提升，已成为提高供电管理水平的关键所在。在当前电力供应体系中，准确、快速地识别异常用电行为至关重要。借助先进的数据挖掘算法，

能够对海量的用电数据进行深入细致的解析。通过运用机器学习技术建立模型，可实时监控用户用电模式是否存在偏差。该模型如同敏锐的“侦探”，不放过任何细微的异常迹象，一旦发现用电模式与正常情况不符，便能迅速做出反应。同时，借助自动化规则，还能适时优化用电参数，进一步实现精确的异常行为辨识。智能传感装置如同“触角”，实时采集用电数据，这些数据被整合到高效的数据处理平台中。经过平台的快速处理和分析，能够有效减少误报率，大大提升辨识的准确度。这不仅为供电系统的适时预警提供了有力依据，还能助力工作人员及时处理异常情况，保障供电系统的可靠稳固运行。未来，技术持续迭代升级，异常用电行为辨识技术将迎来质的飞跃。其效率与精准度会大幅提升，不仅能更迅速揪出异常用电行为，还能为供电管理提供更全面、细致的数据支持，带来更多便利，助力电力行业高效发展。

5 数字化用电监察技术的未来发展方向

5.1 优化关键技术以提高智能化水平

改进关键技术为提高数字化用电监督智能程度的关键路径其一。于智能传感技术领域，增强传感器的灵敏度和数据采集精度，保证即时采集电力系统的微小变化，为达成高效监控的基础。传感器的微型化和低能耗研发亦会更进一步促进其于分散式电力监控内的普遍使用。大数据分析技术的更进一步发展就依靠在更加强劲的算法与更加高效率的数据加工能力。借助机器学习和人工智能技术的深入结合，能够完成对于海量用电数据的智慧解析与实时模拟，进而精确辨识用户的用电模式和潜在风险。

物联网技术则必须重视安全性能与稳妥性，借助改进通信协议和增强防干扰能力，构造具备极高稳定性和可靠性的物联网架构，确保数据传输的即时性和精确性。只有持续改进核心技术，方可在数码化用电监察中达成较高的智能水平，从而符合新时期多元化的用电监测需求，促进电力行业的数码化转型。

5.2 推进多个场景的跨领域应用

数字化用电监察技术融合多个学科运用，核心在于不同场景合作推进与创新融合。智能家居领域，数字化技术优化家电设备能源使用效率，智能电表随时显示家庭详细用电数据，减少高峰时段电力负荷，节省电能效果显著。工业与商业领域，数字化系统监测设备运行状态，数据分析优化能源消耗控制，降低运营成本。交通基础设施作为重要应用场景，智能电网技术支持电动交通工具充电需求调整，保持交通系统平稳运行。主动推进公共设施及电力交易市场等场景数字化技术合作，盼望达成全面协调规划及最高效率目标。这样的技术手段帮助不同领域把资源分配得更加合理，同时也给社会发展带来了长期有效且充满智慧的解决办法。

5.3 构建智能化供电管理生态系统

构建智能供电管理生态系统是提升数字化用电监察技术水平的核心举措。通过融合智能传感器、数据分析与物联网平台，实现电力管理的智能化与自动化转型。智能供电管理生态系统可以即时采集和解析大量用电数据，因此完成精确负荷预测和用电优化 [5]。运用预测和优化算法，可以高效改善供电系统的效率和稳定性，减少能源消耗。生态系统还助力跨平台协同和信息共享，为多方例如供电企业、用户和监管机构给予一致的数据视角和决策支持。实施生态系统的建设将成为促进用电监察技术普遍应用的重要路径。

6 结语

研究数字化用电监察技术的现状和应用效果，呈现技术在数据采集、分析以及故障诊断方面的清晰表现，应用智能传感、大数据和物联网技术大幅提高监控的精确程度、管理效率以及安全性，有效减少人工成本，增强识别异常用电行为的能力，但是，技术应用遇到数据精确程度和响应速度不足、成本较高以及数据隐私安全等挑战，未来研究需要改进数据分析算法、开发低成本的硬件设备、全面健全保护隐私的具体措施，探寻人工智能和区块链的融合应用，为技术发展和推广给予明确的方向。

参考文献

[1] 雷刚.新时期数字化车间建设实践思考[J].IT经理世界,2021,24(10):61-62.

[2] 董伟张聪丛.基于RPA技术的用电采集监控数字化应用分析[J].通信电源技术,2023,40(02):23-25.

[3] 裘若昕.新时期数字化出版研究[J].中文科技期刊数据库（全文版）社会科学,2022,(10):0142-0144.

[4] 皇甫盼盼,姚冬冬,赵鹏,蔡轶博,邱晓海.数字化用电监察技术研究[J].百科论坛电子杂志,2020,(09):1598-1598.

[5] 陈锐.关于数字化用电监察技术的应用[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2021,(11):0270-0271.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6198

Design of taxi billing system based on STM32

Bingqi Liu[1] **Chu Jie**[2]

1. Taishan Institute of Technology, Tai'an, Shandong, 271000, China
2. State Grid Shandong Electric Power Company Taian Power Supply Company, Taian, Shandong, 271000, China

Abstract

As urbanization accelerates, taxis, a vital part of urban transportation, have gained increasing attention for the intelligence and automation of their billing systems. This paper addresses the shortcomings of traditional taxi billing systems by designing an intelligent billing system based on the AT89C51 microcontroller. The system design focuses on accuracy, real-time performance, and user interaction, using Hall sensors to measure distance and a real-time clock module to record time. It implements intelligent billing for base fare, distance-based fare, and waiting time. The system features a user-friendly interface, easy operation, automatic fee calculation and display, and support for printing invoices. After joint debugging of software and hardware, the system operates stably, with precise billing, significantly enhancing the quality of taxi services and operational efficiency.

Keywords

STM32 microcontroller; taxi billing system; Hall sensor; intelligent billing

基于 STM32 的出租车计费系统的设计

刘冰琪[1] 解初[2]

1. 泰山科技学院，中国 · 山东 泰安 271000
2. 国网山东省电力公司泰安供电公司，中国 · 山东 泰安 271000

摘 要

随着城市化进程的加快，出租车作为城市交通的重要组成部分，其计费系统的智能化、自动化水平日益受到关注。本文针对传统出租车计费系统存在的不足，设计了一款基于AT89C51单片机的智能计费系统。系统设计充分考虑了计费准确性、实时性和用户交互性需求，采用霍尔传感器测量里程，实时时钟模块记录时间，实现了起步价、里程价和等待时长的智能计费。系统界面友好，操作简便，能够自动计算并显示费用，支持打印发票。经过软硬件联合调试，该系统运行稳定，计费精确，有效提升了出租车服务质量和运营效率。

关键词

STM32单片机；出租车计费系统；霍尔传感器；智能计费

1 引言

城市交通的快速发展使得出租车服务质量和运营效率成为影响市民出行体验的重要因素。传统计费方式存在计费不准确和效率低下的问题，难以适应现代城市交通的需求。因此，开发一款基于单片机的智能出租车计费系统显得尤为重要。STM32 单片机因其高性能、低功耗和易于编程的特点，成为本系统设计的核心。本系统能够自动测量行驶里程和等待时间，并自动计算费用，满足不同时间段的计费标准，提高计费的准确性和效率。本设计提高了出租车计费系统的自动化和稳定性，通过测试和优化，确保了计费的准确性和实时性，为司机和乘客提供了便捷的服务。该系统具有较高的实用价值和推广前景，对推动出租车行业智能化发展具有重要意义。

【基金项目】泰山科技学院2023年度校级一流专业“电气工程及其自动化”建设项目，泰山科技学院2025度校级课程思政示范课程《电力电子技术》。

【作者简介】刘冰琪（1996–），女，中国山东泰安人，讲师，硕士，从事电气工程及其自动化研究。

2 系统设计

2.1 系统功能需求分析

出租车计费系统能够实时跟踪出租车的行驶里程和等待时间，并根据出租车公司的计费标准自动计算费用。此外，系统还应提供用户友好的界面，以便司机和乘客能够轻松地查看和理解计费信息。具体功能需求分为以下几点：

一、里程测量 系统必须能够准确测量出租车的行驶里程。这通常通过安装在车轮或传动轴上的霍尔传感器来实现，传感器能够检测车轮的旋转次数，并将这些脉冲信号转换为里程数据。

二、时间记录 系统需要一个实时时钟模块来记录出租车的行驶时间和等待时间。这包括开始行程的时间、结束行程的时间以及在行程中等待的时间。

三、计费计算 系统应根据出租车公司的计费标准自动计算费用。这通常包括起步价、里程价和等待时间费用。计费标准可能会根据不同时间段有所不同。

四、显示和交互 系统需要一个显示界面，如 LCD 显示屏，以实时显示当前的计费信息，包括行驶里程、等待时间、当前费用和总费用。此外，系统应提供简单的用户交互界面，如按钮或触摸屏，以便司机和乘客进行操作。

五、发票打印 在行程结束时，系统应能够自动生成并打印详细的费用发票，包括行程的起始和结束时间、行驶里程、总费用和其他相关信息。

2.2 硬件设计

出租车作为城市交通系统中不可或缺的一环，其计费系统的稳定性对于确保顺畅运营发挥着至关重要的作用。在这个系统中，单片机扮演着核心角色，所有的硬件设计都紧密围绕它来构建。为了实现计费的精确性，里程的准确计算是关键，这通常借助激光对射传感器或霍尔传感器来完成。激光对射传感器通过发射和接收光信号来监测车轮的转动，而霍尔传感器则利用感光端的遮挡变化来检测车轮的转动。在这两种传感器中，霍尔传感器因其在里程计算上的适用性而更受青睐，成为出租车计费系统中的首选。

出租车计费系统的硬件构成涵盖了单片机模块、传感器模块、晶振电路、复位电路、按键控制电路以及液晶显示电路等多个部分。系统选用了 STM32 单片机作为其核心控制单元，并通过霍尔传感器来精确测量车辆的行驶距离。整个系统的设计遵循模块化和程序化的原则，旨在确保计费的精确度和系统的可靠性。

2.3 软件设计

出租车计费系统的软件设计中，主程序扮演着核心角色，它不仅负责启动子程序和接口芯片的初始化，包括关键的启动寄存器和里程寄存器，还确保了整个系统的稳定运行。精心设计的计费、显示、等待和键盘子程序对于保障单片机和系统的可靠性至关重要。软件中的任何错误都可能导致计费系统故障，进而影响计程、计价和计时的准确性。因此，主程序的设计必须基于标志寄存器，进行细致的系统化分析和层次化布局。

软件的工作流程始于寄存器的初始化，随后系统根据出租车的当前状态做出判断。在空车状态下，显示屏会显示当前时间；而在载客状态下，系统会响应按键操作并开始计费。当车辆因红灯或乘客要求而暂停时，系统会启动等待计时，并在超过一定时间后收取费用。一旦乘客到达目的地，系统将计算并显示总行程距离和应付金额，随后自动清空数据，准备迎接下一位乘客。精准的软件设计对于确保计费系统的精确性和可靠性起着决定性作用。出租车计费系统软件分析设计如图 1 所示。

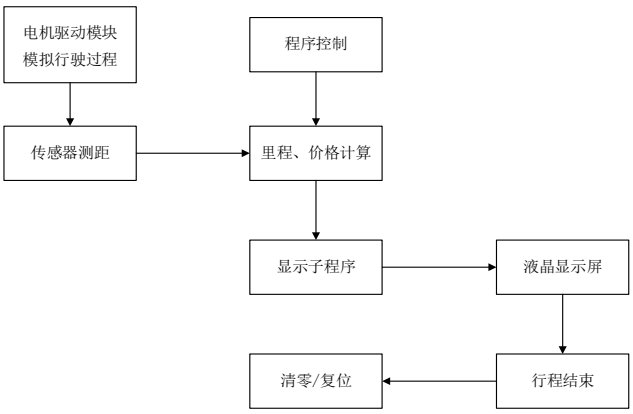


图 1 出租车计费系统软件分析设计框架图

3 系统实现

3.1 硬件实现

出租车计费系统的硬件设计既精致又复杂，其以单片机为核心，巧妙地融合了里程传感器、晶振电路、复位电路、按键控制、显示电路和电源管理等关键模块，确保了系统在计费的精确性和运行的稳定性方面表现出色。整个硬件设计充分考虑了抗干扰能力和易维护性，以适应出租车在多变环境中的工作需求，从而确保计费的公正性和系统的可靠性。

3.1.1 晶振电路的设计

出租车计费系统中的晶振电路扮演着至关重要的角色。晶振，即晶体振荡器，主要提供稳定的时钟信号，确保系统按照正确的时间序列进行操作，从而保证电子设备的正常工作。在计费系统中，晶振电路负责产生精确的振荡频率，这直接影响到系统的计时准确性。它为单片机提供必要的时钟信号，使得单片机能够准确地计算行驶时间，从而准确计算费用。晶振电路的稳定性对于保证计费系统精确度和可靠性非常关键，任何计时上的误差都可能导致计费不准确，影响乘客和司机的利益。

在出租车计费系统晶振电路的设计过程中，输入端是 STM32 单片机引脚 XTAL1，输出端是引脚 XTAL2，晶振电路的设计如图 2 所示。

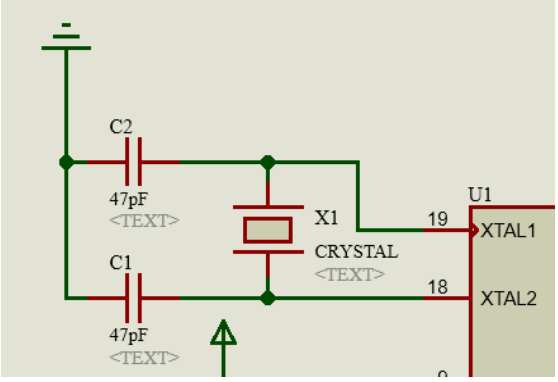


图 2 出租车计费系统晶振电路的设计

3.1.2 复位电路的设计

复位电路是一种精巧的电路装置，它的功能是将电路重置至其原始状态。这一过程与计算器的清零功能颇为相似，尽管它们的启动机制和方法有所区别。在计算器上，清零按键的作用是清除所有已输入的计算内容，使其回到初始状态以便进行新的计算。同样地，复位电路通过电路操作将电路恢复到其最初的状态。当按下复位电路的按钮时，单片机内部的程序会自动重新从头开始执行。复位电路的设计如图 3 所示。

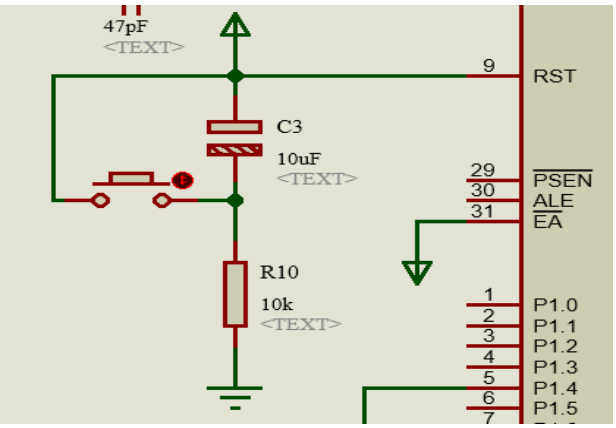


图 3 出租车计费系统复位电路的设计

3.1.3 按键控制电路的设计

出租车计费系统的按键控制电路通过接口电路与 STM32 单片机相连，发挥着至关重要的作用。当电路接通电源时，每个 I/O 端口默认处于高电平状态。当按键被按下，相应的 I/O 端口会变为低电平；而当按键释放后，端口则恢复到高电平状态。这一变化是系统响应按键操作的关键。如果检测到按键操作，系统将执行相应的键盘程序来处理输入；如果没有按键操作，系统则会继续执行其他程序，确保计费过程的连续性和准确性。

3.2 软件实现

在出租车计费系统的软件架构中，主程序的设计扮演着举足轻重的角色，它直接决定了系统的整体稳定性和可靠性。

该软件系统，依托于单片机的出租车计价器，由一个核心主程序和多个子程序共同构成。在主程序的构建过程中，必须全面考虑程序的初始化流程以及子程序的协调调用等关键因素。只有通过细致周到的规划和精心的打磨，才能确保软件部分的稳健运行，进而使整个系统的性能达到甚至超越预期的高效标准。

软件通过 C 语言编写，实现了数据采集、计费算法和用户界面的交互，本出租车计费系统软件部分的主程序设计框架如图 4 所示。

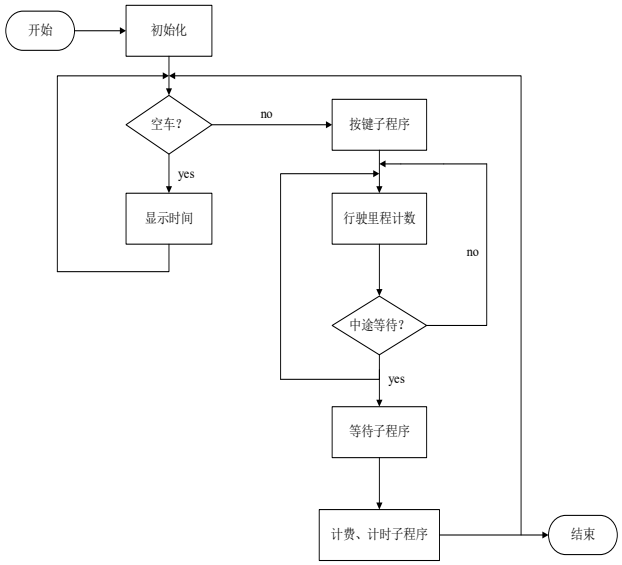


图 4 出租车计费系统的主程序设计框架图

4 结论

STM32 单片机以其卓越的性能和可靠性，在出租车计费系统中扮演着核心角色，实现智能化管理。该系统通过精确的计时、计程、计费和显示功能，保障了计费的准确性和系统的长期稳定。

硬件设计涵盖了晶振电路、复位电路、按键控制电路、显示电路和霍尔传感器模块，确保了系统的稳定运行和用户操作的便捷性。软件部分则由主程序和子程序构成，负责初始化和智能调用，如霍尔传感器检测车轮转动以触发计费，以及在停车等待时自动计时计费。

通过 Proteus 仿真软件的严格测试，系统在模拟载客和停车情况下展现了高准确性和可靠性，证明了其设计的精妙和实用性。

参考文献

[1] 彭泉, 翟娟, 王世豪, 孙艳, 张乐. 基于单片机的出租车计价器[J]. 新型工业化, 2020, 10(08): 26-30.

[2] 黄炟. 单片机在电子技术中的应用分析[J]. 科学技术创新, 2020 (11): 167-168.

[3] 徐晶晶, 杨涛. 基于FPGA的出租车计费系统设计[J]. 电子制作, 2021(11): 5-7+67.

[4] 史荣珍, 周献中. 一种新型出租车计价器的设计[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(31): 83-84.

[5] 杨正祥. 基于单片机和霍尔传感器的出租车计价器设计[J]. 信息系统工程, 2018, (07): 99-100.

[6] Majid Zahiri, Jielun Liu, Xiqun (Michael) Chen. Taxi Downsizing: A New Approach to Efficiency and Sustainability in the Taxi Industry[J]. Sustainability, 2019, 11(18).

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6199

Design of intelligent travel safety monitoring system for the elderly based on AI Internet of Things

Yongchao Niu

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

Abstract

As the aging population grows, the safety of elderly people traveling has become a growing concern. This paper addresses the need for intelligent travel safety monitoring for the elderly by designing an AI-based IoT system. By explaining how AI algorithms and IoT technology can be integrated, the system architecture is designed to include environmental perception, data transmission, intelligent analysis, and emergency response. The IoT enables real-time collection and transmission of travel environment data, while AI algorithms are used for fall detection, abnormal behavior recognition, and danger warnings. This system can significantly enhance the safety of elderly travel, offering new solutions to the challenges of elderly travel safety in an aging society, and is crucial for advancing smart elderly care services.

Keywords

AI Internet of Things; the elderly; intelligent travel; safety monitoring; system design

基于 AI 物联网的老年人智能出行安全监护系统设计

牛永超

天津众科科技发展有限公司，中国 · 天津 300072

摘　要

随着老龄化社会的加剧，老年人出行安全问题日益凸显。本文围绕老年人智能出行安全监护需求，设计基于AI物联网的智能监护系统。通过阐述AI算法与物联网技术融合原理，构建涵盖环境感知、数据传输、智能分析与应急响应的系统架构。利用物联网实现出行环境数据实时采集与传输，借助AI算法进行跌倒检测、异常行为识别及危险预警。该系统可有效提升老年人出行安全保障能力，为解决老龄化社会中老年人出行安全难题提供新思路，对推动智慧养老服务发展具有重要意义。

关键词

AI物联网；老年人；智能出行；安全监护；系统设计

1 引言

当前，全球老龄化的步伐加速迈进，中国老年群体规模巨大且呈持续增长态势，因身体机能逐渐衰退、反应能力逐步下降等缘由，出行时面临若干安全方面的隐患，诸如跌倒的意外、迷路的状况、突发的疾病等，传统监护手段存在实时性欠佳、覆盖范围受限等弊端，难以契合老年人不断增长的出行安全诉求。物联网技术与 AI 的飞速发展，为攻克这一难题带来了新机遇，把物联网的互联互通特性跟 AI 技术的智能分析能力融合在一起，构建面向老年人的智能出行安全监护系统，可达成对老年人出行状态精准、实时的监测以及有效干预，增强老年人出行安全的体验感，提升生活质量，促进智慧养老体系建设可持续发展。

【作者简介】牛永超（1994–），男，中国甘肃平凉人，助理工程师，从事老年人智能出行产品的应用研究。

2 AI 物联网技术概述

2.1 AI 技术原理与功能

AI 技术凭借着机器学习、深度学习等算法赋能，具备突出的模式辨认、数据分析及决策效能，在老年人出行安全的监护场景当中，机器学习算法可借助大量历史数据的训练达成目标，让系统拥有识别老年人正常及异常行为模式的本领，凭借训练数据学习老年人正常行走的姿态、速度这类特征，若检测到数据脱离正常模式状态，可判断大概出现了跌倒或其他异常情形，深度学习的卷积神经网络（CNN）在图像及视频分析方面表现极为亮眼，具备辨别监控视频中老年人行为的本领，辅助鉴定其安全情形。

2.2 物联网技术架构与特点

物联网技术借助传感器、通信网络以及云计算平台，建立起物与物、物与人彼此互联互通的网络，其架构主要是由感知层、网络层和应用层组成，感知层借助各种各样的传感器，诸如加速度、位置定位、环境相关传感器等，达成针

对老年人出行环境和身体状态数据的实时采集；网络层利用诸如 5G、Wi-Fi、蓝牙等通信技术，把采集的数据以快速、稳定的方式传至云端；应用层依托云端对数据进行处理与分析，为用户呈上多样化的服务项目，像开展安全预警、实施位置查询等，物联网技术具备实时、广泛以及智能化等特性，可为老年人出行安全监护给予全方位的数据支撑。

2.3 AI 与物联网融合优势

AI 和物联网融合之后，显著提升了老年人智能出行安全监护效果，物联网采集而来的海量数据，为 AI 算法输送了丰富的训练素材，助力 AI 模型更精准地开展行为分析与风险预判，AI 技术对数据进行智能处理、分析后的结果，又会指引物联网设备更高效地采集核心数据，优化数据的传输策略，二者结合让数据从采集、分析直至决策响应的全流程实现智能化，极大提高了系统对老年人出行安全状况的监测及处理水平。

3 老年人出行安全监护需求分析

3.1 老年人出行安全风险类型

当老年人出行时，有多种安全风险相伴，生理机能衰退所引发的跌倒风险最为多见，老年人士平衡能力下降、骨质脆弱易损，一次摔倒有引发严重后果的可能，鉴于记忆力减退、方向辨别能力变差，老年人容易出现迷路后走失的情形，置身户外环境里，诸如心脏病、低血糖之类的突发疾病，一旦未及时发现且实施救治，也会对生命安全构成威胁，像恶劣天气、道路障碍物这些环境要素，再加上交通拥堵、车辆碰撞等交通上的风险，皆让老年人的出行安全面临威胁[1]。

3.2 传统监护方式的局限性

以往针对老人出行的监护方式，主要是家人陪着、佩戴简易定位设备等，家人陪伴会受时间与精力的约束，难以达成全天候、全场景的照看；普通的定位设备只能给出位置资讯，难以对老年人行为状态与周边环境开展监测，难以即刻察觉跌倒、突发疾病这类安全隐患，社区、养老机构落实的定期巡看，同样存在覆盖区域狭窄、响应反馈滞后等状况，难以契合老年人出行安全监护的实际诉求。

3.3 智能监护系统设计目标

结合上述需求与问题，设计出的基于 AI 物联网的老年群体智能出行安全监护系统，目的是实现对老年人出行整个进程的实时、精准照看，系统应配备跌倒检测、异常行为甄辨、实时位置锁定、环境情况监测、危险提前告警等功能，可迅速察觉老年人出行期间的安全隐患，并凭借多种渠道通知监护人或相关救援团体，为老年人出行给予全方位、智能化的安全守护。

4 基于 AI 物联网的老年人智能出行安全监护系统设计

4.1 系统总体架构

系统采用分层架构开展设计工作，以感知层、网络层、平台层和应用层为主要构成，感知层安设各类式样的传感器，承担采集老年人身体状态及出行环境数据的使命；网络层构建起多模通信网络格局，实现数据稳定的传送；平台层凭借云计算技术展开，对数据予以存储、加工与剖析，依靠 AI 算法实现智能抉择；应用层向老年人、监护人、相关管理部门给出多样化的服务界面与功能。

4.2 感知层设计

感知层作为系统获取数据的根基，采用已集成加速度传感器、心率传感器、体温传感器等的可穿戴设备，实时监测老年人诸如运动状态、心率、体温的生理指标，借助加速度传感器可检测老年人是否跌倒，若检测到加速度发生突变并契合跌倒特征时，开启报警回路。把 GPS、北斗卫星定位与蓝牙定位技术加以结合，达成对老年人群的精准位置锁定，在室内的环境里，依靠蓝牙信标实现米级的定位；经由卫星定位系统获取精准无误的位置信息，便于监护人实时把握老年人动向，布置温湿度、空气质量、障碍物检测等各类传感器，监测老年人出行场景下的环境状况，遇到极端天气，温湿度传感器可提示老年人留意防护；一旦遇到道路上的障碍物，障碍物检测传感器便发出预警，避免碰撞[2]。

4.3 网络层设计

网络层承担着把感知层所采集数据高效传至平台层的职责，采取 5G、Wi-Fi、蓝牙等多种通信技术结合的办法，构建起多模通信网络，置身于户外开阔区域，首选采用 5G 网络，实现数据高速又稳定的传输；处于室内环境或信号欠佳区域，自行切换为 Wi-Fi 网络；若涉及近距离数据传输，若如可穿戴设备与智能手机的数据交互事宜，采用蓝牙模式，降低功耗，为保证数据传输安全可靠，采用加密式传输协议，抵御数据的泄露及篡改风险。

4.4 平台层设计

系统核心聚焦于平台层，核心实现数据存储、处理及智能分析相关功能，采用大数据存储技术，对感知层传输的海量数据开展高效存管工作，采用人工智能算法，借助深度学习中 LSTM（长短期记忆网络）模型来剖析老年人行为数据，判别跌倒、徘徊这类异常举动；采用机器学习算法开展环境数据和老年人健康数据的关联分析，预测潜藏着的风险，平台层同样具备智能决策的本领，基于分析结果自动形成预警信息，进而制定出相应的应急方案。

4.5 应用层设计

应用层针对各异用户，给予多样化的服务，面向老年人终端开发简洁便捷的移动应用，老年人可采用语音或者简单操作，一键实施紧急救援呼叫，应用还为用户提供导航功能，便于老年人规划出行的路线，借助监护人终端应用，监护人在手机 APP 上可实时查看老年人位置、健康状态及活动轨迹，接收异常行为告警及环境风险预警，迅速采取相关行动，管理平台应用为社区、养老机构这类管理部门提供管理平台，方便对辖区内老年人实施集中监护与管理，进行老年人安全

数据的统计及分析，制订贴合实际的安全保障举措 [3]。

5 系统关键技术实现

5.1 跌倒检测算法

依托加速度传感器所采集的数据，采用将阈值检测和机器学习相融合的跌倒检测算法，最先设定加速度、角速度等参数的临界值，初步分析是否存在跌倒的几率，若检测到数据越过阈值，把数据输入至训练好的机器学习分类模型（如支持向量机 SVM）里面，进一步精准判别是否为跌倒动作，采用大量真实的跌倒与正常活动数据实施训练，增进算法检测的准确水平。

5.2 异常行为识别

采用深度学习里的卷积神经网络（CNN）对监控视频中的老年人行为开展识别，采集老年人日常活动期间的视频数据，实施标注与预处理后，实施 CNN 模型的训练，模型可识别老年人诸如行走、奔跑、徘徊之类的行为模式，若检测到存在异常行为模式，启动系统警报，采用时间序列分析方式，探究老年人行为连续性及其变化趋势，增强异常行为识别的精准度。

5.3 智能预警与应急响应

系统参照 AI 分析得出的结果，完成分级预警流程，若检测到存在轻微异常，若出现长时间持续徘徊时，向监护人送达提示内容；若监测到重大的危险，若出现跌倒或突发疾病情形时，迅即向监护人、社区医院或急救中心发送紧急报警信号，同时将老年人的位置和健康状态信息附上，应急响应机制也涵盖与周边救援资源的协同联动，保证在突发紧急情况时可迅速展开救援作业。

6 系统应用面临的挑战与解决方案

6.1 技术挑战与应对

老年人的健康与位置数据属于敏感信息范畴，面临着数据被泄露的隐患，解决之道是采用端到端加密技术，保障数据在采集、传输及存储阶段的安全；切实依照数据隐私保护法规，规范好数据使用的各项权限，系统使用效果被可穿戴设备的续航能力直接影响，采用低功耗传感器，同时优化通信协议，降低设备的用电功耗；开发便携式的充电器材，便于老年人随时进行充电，就设备稳定性面临的问题，定期对设备做维护及软件更新处理，保障设备稳定运转 [4]。

6.2 社会接受度挑战与应对

部分老年人士对新技术抱有抵触心理，不情愿佩戴智能设备，凭借开展宣传活动，对老年人普及智能出行安全监护系统的效能与长处，改善老年人对新技术的认知与接纳情况，设计出适配老年人使用习惯的设备及应用界面，操作简明易懂，增进用户的体验质量，拓展与社区、养老机构的合作范畴，经由社区宣传和机构的指引，推动系统实现广泛运用。

6.3 成本挑战与应对

系统研发、设备采购、运营维护这几方面成本偏高，对其大规模推广形成制约，凭借技术改进与规模化产出，减少硬件设备成本支出；查找多样式的商业合作模式，譬如与保险公司携手协作，把此系统列为保险增值服务项目，政府可拿出相关政策，对智慧养老项目实施资金补贴及税收优惠举措，带动系统的普及运用 [5]。

7 结论

基于 AI 物联网技术的老年出行智能安全监护系统，依靠 AI 与物联网技术的融合达成，完成了针对老年人出行安全的全方位智能监护，系统的设计符合老年人出行安全监护的实际要求，对增强老年人出行安全保障、减轻监护人的监护重担意义重大。即便系统于应用期间碰到技术、社会接纳度和成本之类的挑战，但凭借采取对应的解决举措，有望推动其走向广泛应用之路，伴随 AI 及物联网技术不断拓展，该系统会进一步实施优化与完善举措，为老年群体构建更高效、可靠的出行安全保障体系，带动智慧养老产业繁荣发展。

参考文献

[1] 李睿,牟慧婧.数智化时代老年人的出行困境与解决路径——基于新公共服务理论的分析框架[J].湖北工业大学学报,2023,38(03):16-20.

[2] 李睿,郭庆.跨越数字鸿沟：老年人智慧出行的政策执行困境及其落地之策[J].决策与信息,2023,(06):60-68.

[3] 陈建新,龚婷,杨婧.基于启发式评估的老年人智能出行产品交互设计研究[J].装饰,2023,(04):130-132.

[4] 汪天雄,朱蕴,岳威.无意识行为在适老化产品设计中的应用与研究[J].产业创新研究,2023,(06):111-113.

[5] 杨孟琪.推进老年人应用人工智能产品出行的策略分析[J].大陆桥视野,2022,(03):98-99.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6200

Research on the reshaping effect of new CMF technology on the competition pattern of motorcycle industry

Zimeng Jia

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

Abstract

Driven by consumption upgrades and technological innovations, new CMF (Color, Material, Process) technologies are becoming a new focal point in the motorcycle industry. This article systematically examines how these new CMF technologies reshape the competitive landscape of the motorcycle industry. It analyzes how they alter product differentiation strategies, restructure supply chains, influence consumer preferences, and enhance brand value, thereby breaking down traditional competitive barriers. The study finds that new CMF technologies are shifting the competitive focus from performance to overall user experience, accelerating industry restructuring and resource integration. To adapt to these changes, companies need to enhance CMF technology research and application, optimize supply chain coordination, and innovate in brand marketing strategies to gain a competitive edge in the new market environment.

Keywords

new CMF technology; motorcycle industry; competitive pattern; product innovation; brand upgrading

新型 CMF 技术对摩托车行业竞争格局的重塑效应研究

贾子萌

天津众科科技发展有限公司，中国 · 天津 300072

摘　要

在消费升级与技术创新驱动下，新型CMF（色彩、材料、工艺）技术正成为摩托车行业竞争的新焦点。本文系统探讨新型CMF技术对摩托车行业竞争格局的重塑效应，分析其通过改变产品差异化策略、重构供应链体系、影响消费者偏好及推动品牌价值升级等途径，打破传统竞争壁垒。研究发现，新型CMF技术促使企业竞争维度从性能主导转向综合体验竞争，加速行业洗牌与资源整合。为应对格局变化，企业需强化CMF技术研发应用、优化供应链协同、创新品牌营销策略，从而在新竞争格局中占据优势地位。

关键词

新型CMF技术；摩托车行业；竞争格局；产品创新；品牌升级

1 引言

伴随全球摩托车市场从功能性需求朝个性化、体验化需求转变，消费者对产品的外观质感、触觉体验以及情感价值的重视程度显著增强，作为将色彩设计、材料创新与工艺革新相融合的跨学科技术，CMF 技术，经由赋予产品独有的视觉与触觉认知，成为企业铸就产品差异化的核心手段。新型 CMF 技术借助纳米材料、3D 打印、智能变色涂层等前沿技术达成的关键突破，在提高产品美学价值之际，达成功能性跟环保性的跃升，该技术创新不光改变了摩托车产品的设计样式，还对行业传统竞争格局形成了深远的冲击，全面探究新型 CMF 技术对摩托车行业竞争格局的重塑原理，对企业精准把握市场趋向、优化竞争战略有重要现实意义。

【作者简介】贾子萌（1996–），女，中国天津人，本科，助理工程师，从事工业设计造型设计和CMF在车辆（摩托车）上的应用研究。

2 摩托车行业竞争格局的传统特征

2.1 性能导向的竞争核心

技术性能成为传统摩托车市场竞争的核心，企业以发动机动力、燃油经济性、制动系统等技术参数为焦点展开竞争，高性能发动机研发能力、精密制造工艺与质量稳定性构成了企业竞争优势的主要源泉，于该种竞争模式的框架里，技术研发投入多、周期拉得长，催生了较高的行业技术门槛，头部企业依靠长期的技术沉淀掌握主导权。

2.2 规模化生产主导的成本竞争

行业普遍采取规模化生产模式以削减成本，依靠产能扩充和供应链管理的优化赢得价格优势，大型企业靠着规模效应，在原材料采购、生产制造和销售渠道等环节把成本降下来，小型企业由于成本上的劣势，在价格竞争里陷入被动

局面，市场份额渐向头部企业聚拢。

2.3 品牌与渠道的壁垒效应

成熟品牌依托长期市场积累起来的品牌认知及忠实度，铸就起强大坚实的竞争壁垒，消费者进行选购时，偏好选择带有品牌影响力的产品，新进入的企业短期内不易建立品牌信赖，健全的销售渠道网络同样是企业参与竞争的关键资源，掌控优质销售渠道的企业在市场推广及产品销售中抢占头筹 [1]。

3 新型 CMF 技术对摩托车行业竞争格局的重塑路径

3.1 产品差异化策略的重构

3.1.1 材料创新突破性能边界

应用新型纳米材料与智能材料，打破传统产品功能局限，一旦受到轻微刮擦，自修复涂层材料可自动恢复表面平整，极大增进产品的耐用属性；通过相变储能材料能调节摩托车表面温度，提高骑行的舒适水平，宝马摩托车最早采用石墨烯增强复合材料，既减轻了车身重量，又提升了结构强度，该材料创新让产品在轻量化以及安全性上形成专属优势，开辟了跟传统性能竞争不一样的新赛道。

3.1.2 工艺革新实现形态自由

3D 打印、激光纹理雕刻等先进工艺赋予了产品过去不曾有的造型自由程度，KTM 凭借选择性激光烧结（SLS）技术，生产出有着复杂中空结构的轻量化车架，既而实现了功能的优化，更造就出极显科技感的外观形态，借助微弧氧化、水转印等表面处理工艺，可创造仿碳纤维纹理、渐变色彩等独有的视觉效果，赋予产品外观设计较强的辨识度，带动差异化竞争从性能参数方向过渡到综合体验创新方向。

3.2 供应链体系的动态调整

3.2.1 供应商结构深度洗牌

新材料供应商崛起对行业供应链生态进行重塑，挑战降临到传统金属与塑料供应商的主导地位上，能开展纳米材料、生物基材料研发的企业成新欢，雅马哈跟日本东丽公司合作搞环保型碳纤维材料研发，拉动供应链上游往技术密集模式转变，新工艺设备供应商的关键意义显著展现，企业需跟拥有 3D 打印、智能喷涂技术的厂商达成战略合作，助力供应链技术迅速迭代 [2]。

3.2.2 生产模式智能化转型

为满足消费者个性化的渴望，企业逐步朝着“柔性制造 + 数字孪生”模式迈进，哈雷戴维森搭建可定制生产平台，用户能于线上挑选色彩、材质及装饰元素，系统凭借数字孪生技术实时模拟出产品的效果，后端生产线借助模块化生产与智能装配系统，做到小批量、多批次迅速响应，这样的转型要求供应链各环节（由原材料采购至物流配送）达成数据的相互连通，助力全产业朝着智能化、敏捷化方向达成升级。

3.3 消费者偏好与市场需求的重构

3.3.1 情感化设计驱动购买决策

在 CMF 设计中采用色彩心理学精准对接消费者情感诉求，杜卡迪推出了“赛道红”系列，用高饱和度红色传递速度跟激情，成为该品牌具有标志性的视觉标识；本田针对女性用户群体开发的莫兰迪色系车，用柔和的色调营造优雅感觉，全新卖点聚焦于材质触感体验，采用像磨砂金属、仿皮革纹理的材料，使产品从纯粹交通工具转变为情感寄托之物，极大提升消费者对产品情感溢价的认可接受度。

3.3.2 社交属性重塑消费场景

年轻用户的社交分享需求推动产品设计往“可传播性”转型，川崎所推的夜光涂装摩托车，在夜间骑行时显现出独特的光影效果，引发用户在社交媒体自愿分享；有品牌设计出可拆装、可替换的车身面板，用户可利用 DIY 改造展现自我个性，催生出“产品等同社交货币”的新兴消费潮流，该需求倒逼企业在开展产品开发时考量用户社交场景，驱动市场需求自功能性消费向场景化、体验化消费过渡。

3.4 品牌价值与竞争维度的升级

3.4.1 技术美学构建品牌新标识

CMF 技术成为让品牌价值得以可视化呈现的关键工具，宝马“i 系列”电动摩托车采用极简线条、冷色调金属与透明材质的组合，演绎未来科技神采；凯旋摩托车凭借复古涂装与手工皮革材质展现，强化经典英伦品牌风采，企业借助 CMF 设计语言让品牌理念得以具象呈现，使消费者借由视觉与触觉直接感知到品牌核心价值，生成差异化的品牌识别标志。

3.4.2 可持续设计提升品牌溢价

运用环保材料与低碳工艺，给品牌赋予社会责任的内涵，Zero Motorcycles 于产品中大规模采用回收碳纤维与生物基塑料，把可持续发展理念掺进 CMF 设计中，引来环保意识高涨的消费人群，该种品牌价值升级令竞争由产品功能与价格层次，延展到价值观认同范畴，驱动行业竞争维度朝更高阶段跃升 [3]。

4 摩托车行业应对竞争格局变化的策略

4.1 强化 CMF 技术研发与应用

4.1.1 构建多元化研发体系

企业宜设立专门的研发基金，提高在色彩创新、材料研发及工艺优化等关键领域的资金投入量，凭借组建跨学科的研发团队，集合工业设计、材料科学、化学工程等多领域的专家资源，冲破学科的壁垒，得到技术创新的协同成效，本田摩托车凭借与材料科学实验室搭伴，成功创制出含自修复能力的纳米涂层材料，切实提升了产品的耐用属性，进而打造出独有的外观质感，主动跟高校、科研机构建立产学研合作体系，加入行业前沿课题的研究行列，促进技术资源及研发成果的共同分享，减少技术转化周期。

4.1.2 建立数据驱动的设计机制

构筑 CMF 设计数据仓库群，采用大数据分析、人工智能等相关技术，实时捕捉消费者在色彩上的偏好、材料触感需求及工艺审美趋势变化，对线上线下市场反馈及用户评价数据进行收集，结合社交媒体流行元素的综合分析，精确聚焦目标消费群体的个性化潜在需求，杜卡迪分析年轻用户在社交平台上针对摩托车涂装风格讨论的热度高低，推售限量版荧光色系摩托车，即刻吸引了市场的目光，依靠数据支撑去优化产品设计的流程，优化设计方案的市场适配性及创新精准水平 [4]。

4.2 优化供应链协同管理

4.2.1 打造柔性化供应链生态

企业需跟核心供应商建立起深层次的战略合作伙伴关系，共同推进新材料的研究开发、新工艺的试验验证与生产流程改进，高性能碳纤维材料供应商与宝马摩托车携手合作，完成新材料的定制供应与迅速迭代，采用数字化的供应链管理系统，把需求预测、生产方案、库存管理及物流配送等环节进行整合，依靠物联网技术实时监督供应链各节点的动态情形，采用智能算法对生产排程予以优化，实现小批量与多批次的柔性生产形态，提升供应链对市场需求改变的响应敏捷度。

4.2.2 完善供应商动态管理机制

建立具有科学性的供应商考评体系，从技术研发、产品质量稳定程度、交货周期以及可持续发展水平等维度综合评定供应商分数，按照新型 CMF 技术的迭代要求，依需调整供应商结构组成，剔除技术陈旧、响应拖沓的合作对象，招纳掌握前沿技术且富有创新能力的优质供应商，按周期组织供应商开展技术交流和协同创新会议，携手破除新材料应用、新工艺落地面临的技术困境，保障供应链在技术层面的先进性与稳定性。

4.3 创新品牌营销策略

4.3.1 构建沉浸式品牌传播矩阵

把 CMF 设计元素深度掺进品牌营销活动，依靠举办高端产品发布会、CMF 设计艺术展览等线下活动达成，采用 VR/AR 虚拟体验科技，为消费者营造沉浸式的产品体验空间，雅马哈开办“色彩实验室”线下体验活动，邀请用户亲自感受不同材质跟色彩组合而成的摩托车模型，增强品牌跟用户的互动效果，依托线上社交媒体与短视频平台实施精准营销，产出聚焦 CMF 技术创新的短视频、直播相关内容，凸显产品于色彩呈现、材料质感及工艺细节方面的独特长处，引发消费者情感层面的共鸣。

4.3.2 推行用户共创设计模式

构建消费者参与式的设计体系，凭借线上平台举办产品 CMF 设计方案投票及定制化需求征集活动，哈雷戴维森上线“个性涂装定制计划”，用户可以在线选取色彩的搭配、纹理的样式以及材料组合，定制个人专属摩托车设计方案，企业根据用户的投票结果及定制需求优化量产货品，既迎合消费者个性化的期盼，进而增进用户对品牌的参与感及认同感，把用户合作共创案例变为品牌营销素材，推动品牌影响力进一步提升 [5]。

4.4 培育复合型人才队伍

4.4.1 实施多元化人才引进战略

制定具备竞争力的高端人才引进策略，从全球招募色彩设计、材料科学、工业设计等领域的高端专才，重点招引具有跨学科背景与创新实力的复合型人才，跟国际闻名遐迩的设计院校、科研机构缔结人才合作关系，以联合培养、项目合作等途径吸纳优秀人才。

4.4.2 完善人才培养与激励体系

构建体系化的内部培训体系，周期性地组织员工参与行业技术研讨会、CMF 设计培训课程和跨部门互动活动，拓展员工的知识边界，提高技术应用及创新水平，设立专门针对创新的奖励基金，针对在 CMF 技术研发、设计创新及应用推广方面表现卓越的团队与个人，给予项目奖励、成果转化分红等激励手段，搭建职业攀升路径，为人才铺就广阔的晋升通道与成长坦途，引发员工创新活力涌动，为企业持续发展构建坚实的人力壁垒。

5 结论

新型 CMF 技术采用重构产品差异化战略、调整供应链系统、重塑消费者需求偏好和升级品牌竞争水平的做法，造成摩托车行业传统竞争格局的深刻转变，此变革给行业带来创新发展的宝贵机会，也推动企业去面对技术升级、供应链转型与品牌重塑的多样挑战，摩托车企业应积极投身新型 CMF 技术变革浪潮，依靠强化技术研发、优化供应链管理体系、创新营销手段和培育专业人才队伍，在重塑后的竞争格局里打造全新竞争优势，推进行业朝着高端化、个性化、智能化方向拓展。

参考文献

[1] MotorsB.子弹形摩托车设计[J].工业设计,2024,(12):23.

[2] 莫文锋,郑静,赵子庆.摩托车模块化车架的设计与应用[J].小型内燃机与车辆技术,2024,53(04):32-35+39.

[3] 赵龙凤,冉光旺.某生产线摩托车防盗定位器安装角度自适应系统设计[J].电子制作,2024,32(16):103-105+93.

[4] 谈毅,江丽珍,刘臻炜,等.摩托车缸盖低压铸造模具设计及工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2024,44(06):844-848.

[5] 刘庆东.某摩托车发动机进气歧管二次抽芯注塑模具设计[J].中国塑料,2024,38(04):88-91.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6201

Study on the influence mechanism of surface curvature distribution of small vehicles on aerodynamic characteristics

Shiliang Zhang

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

Abstract

Aerodynamic characteristics are crucial factors affecting the energy consumption, speed, stability, and comfort of small vehicles. The overall shape of the vehicle, particularly the curvature distribution of its surfaces, directly influences airflow patterns, which in turn affects the vehicle's aerodynamic performance. This study focuses on small vehicles, exploring how the curvature distribution of their surfaces impacts aerodynamic characteristics. Through theoretical analysis, the study elucidates the intrinsic relationship between surface curvature and air flow parameters, and examines how changes in curvature lead to boundary layer separation and vortex formation, which affect drag, lift, and aerodynamic noise. The findings indicate that a well-designed surface curvature can significantly enhance aerodynamic performance, providing a theoretical foundation and design guidance for the aerodynamic shape of small vehicles, thereby improving their energy efficiency and operational stability.

Keywords

small vehicle; surface curvature distribution; aerodynamic characteristics; boundary layer separation; aerodynamic optimization

小型交通工具曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制研究

张世亮

天津众科科技发展有限公司，中国 · 天津 300072

摘　要

空气动力学特性成为小型交通工具能耗、速度、稳定性及舒适性的关键影响因子，交通工具的整体外形，尤其是曲面所呈现的曲率分布，直接掌控了气流的流动情形，继而影响到该交通工具的空气动力学性能。本研究聚焦小型交通工具，深入探讨其曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制。通过理论分析，阐述曲面曲率与空气流动参数间的内在联系，剖析曲率变化引发的边界层分离、涡流形成等现象对阻力、升力及气动噪声的作用路径。研究发现，合理的曲面曲率分布能够有效优化空气动力性能，为小型交通工具的气动外形设计提供理论依据与设计思路，助力提升其能效与运行稳定性。

关键词

小型交通工具；曲面曲率分布；空气动力学特性；边界层分离；气动优化

1 引言

小型交通工具凭借便捷、灵活等特性，在现代交通格局里占据关键地位，伴随人们对其性能要求不断增高。深入剖析小型交通工具曲面曲率分布对空气动力学特性的影响原理，对优化其外形、降低能耗以及提高运行性能有着重大意义，尽管在交通工具空气动力学相关领域已有诸多研究，但在小型交通工具曲面曲率分布影响机制的系统性理论研究方面，仍有可探索之处。本研究试图凭借理论分析达成，探寻小型交通工具曲面曲率分布与空气动力学特性间的内在关联，为小型交通工具气动外形设计奉上理论性的指导。

【作者简介】张世亮（1992–），男，中国山西阳泉人，本科，助理工程师，从事小型交通工具的曲面造型与空气动力学优化设计研究。

2 小型交通工具空气动力学特性概述

2.1 空气动力学基本参数

在探究小型交通工具空气动力学特性时，主要涉及如阻力、升力、气动噪声等关键参数，阻力作为阻碍交通工具向前迈进的力，交通工具运行所需能量消耗增多了，一定程度上，升力影响着交通工具和地面间的附着关系，对维持行驶稳定性意义重大，气动噪声能影响乘客的舒适体验，同时也是评判交通工具设计水平高低的一个指标，这些参数彼此相互关联，共同促成了小型交通工具的空气动力学性能呈现。

2.2 影响空气动力学特性的主要因素

诸多要素影响着小型交通工具的空气动力学特性，包

含交通工具的外观尺寸大小、表面粗糙度的状况、行进的速度以及环境状态之类，外形是最为关键的要素里的一个，而外形的重要构成部分有曲面曲率分布，明显影响了空气动力学特性，不同的曲面曲率分布会引起气流于交通工具表面流动状态的转变，随之改变阻力、升力与气动噪声等方面的参数。

3 曲面曲率分布与空气流动的理论关系

3.1 曲面曲率的定义与描述

有个几何量叫曲面曲率，可描述曲面弯曲程度，针对二维的曲面，通过主曲率、高斯曲率等参数可精准描绘其曲率特性，主曲率反映了曲面各个方向的弯曲水平，高斯曲率将曲面在两个主方向的弯曲信息加以综合，在小型交通工具的外形设计当中，合理的曲面曲率设计可引导气流更顺畅地滑过车身表面，降低气流分离与涡流的出现几率。

3.2 空气流动与曲面曲率的相互作用

当空气拂过小型交通工具表面的瞬间，曲面曲率对气流存在影响，在曲率偏大的区域里，气流的速度与压力分布将出现显著改变，依照流体力学既定原理，气流经过凸面这个阶段，会因曲面延展让速度变快，引起压力降低；若气流流经凹面处，气流行进速度会变慢，此类速度和压力的变动会影响到边界层的发展及其稳定性，由此影响空气动力学的相关特性 [1]。

4 曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制

4.1 对阻力的影响

4.1.1 边界层分离与阻力增加

不合理的曲面曲率分布会引发边界层分离现象，若气流流经曲率变化幅度较大的曲面，缘于气流速度及压力的变化，边界层中的气流或许无法冲破逆压梯度，从而跟表面彼此分离，涡流产生之后，会让空气的湍流程度上升，引起能量损失程度增加，最终造成阻力进一步增大，在小型交通工具的棱角处或曲率突变之处，容易引发边界层分离现象，引出较大的阻力。

4.1.2 曲率优化与阻力降低

采用适宜设计曲面曲率分布，能延缓边界层分离这一现象的产生，利用平滑过渡的弧面，令气流更顺畅无阻地越过车身表面，减少逆压梯度引发的影响，进而维持边界层的稳定性，以流线型呈现的曲面设计可有效引导气流，减少涡流的生成量，降低空气行进的阻力，增强小型交通工具能源的有效利用率。

4.2 对升力的影响

4.2.1 曲面曲率与压力分布对升力的作用

交通工具表面的压力分布受曲面曲率分布影响，由此催生升力形成，就小型交通工具的上表面而言，若选用恰当的曲率设计，使气流流速加速，而其下表面气流的流速相对慢了，会形成上下表面之间的压力差，以此产生向上的升力，不合理的曲面曲率分布，大概会让升力过大或过小，使交通工具的行驶稳定性受干扰，若升力过大，高速行驶的交通工具会出现“发飘”现象，让与地面的附着力下降；而升力过小将可能影响某些存在特殊气动要求的小型交通工具性能。

4.2.2 升力平衡与曲面设计

为实现小型交通工具行驶稳定的要求，需借助合理的曲面曲率设计达成升力的平衡，在某些小型赛车的设计里面，会采用特定的曲面曲率排列，让车辆在高速行驶之际可产生恰当的下压力，增进轮胎跟地面的附着效果，提升操控的表现水平，针对普通的小型交通工具，升力的影响同样需要纳入考量，经由优化曲面曲率达成，保证车辆于各类行驶状况下均能维持稳定。

4.3 对气动噪声的影响

4.3.1 涡流与气动噪声的关系

因曲面曲率分布不当而引发的涡流，是产生气动噪声的关键原因之一，若气流在曲面曲率改变的地方分离形成涡流，不稳定的涡流运动与相互作用会造成压力脉动，压力脉动按照声波的形式去传播，造就气动噪声，气动噪声的强度和频率成分由涡流的大小、强度、频率等特性所决定，在小型交通工具的后视镜、门把手这类部位，因曲面曲率出现变化，较易形成涡流，进而造成明显的气动噪音现象 [2]。

4.3.2 曲面优化降低气动噪声

采用优化曲面曲率分布办法，可减少涡流的生成量，以此达成气动噪声的削减，利用圆润的曲面过渡，防止出现尖锐棱角与曲率的突然变化，可使气流更稳当地掠过交通工具表面，降低压力脉动的频次，降低空气动力噪声，合理地设计曲面形状以及曲率大小，还能对涡流特性进行改变，令其产生的噪声频率超出人耳的敏感界限，进一步增进乘坐的舒适体验。

5 基于曲面曲率分布的小型交通工具气动外形优化思路

5.1 设计原则

5.1.1 曲面连续性与光滑过渡原则

小型交通工具气动外形优化的核心关键在于保证曲面连续及光滑过渡，从空气动力学这一角度出发，尖锐棱角跟曲率突变的区域易生出气流分离点，造成边界层提前脱离壁面表层，于是引发了涡流及湍流，在车身侧面与车顶的相接部位，若采用直角过渡的设计方式，气流流经此处，速度方向瞬间急剧改变，非常容易引起气流分离，造就高压的涡旋区间，极大提升了空气阻力。可选用 Bezier 曲线、NURBS（非均匀有理 B 样条）等数学手段，搭建曲率连贯的曲面模型，促使气流可平滑附着于车身的表面，减缓边界层分离现象的进程，在工程实施的实践阶段，大多情况下要求曲面满足 G2（二阶导数连续）之上的连续性，以此保障气流的层流态势，减少能量的流失。

5.1.2 性能导向的差异化设计原则

小型交通工具的使用场景与性能需求呈现多样化态势，需围绕性能目标对气动外形优化实施差异化设计，面对追求高速行进的小型电动赛车，宜先考虑降低空气阻力及优化升力系数，选用低风阻系数的水滴形外观轮廓，配合底部扩散器跟后扰流板的负升力设计，可于提升行驶速度之时增强轮胎抓地力，就以城市通勤为主的小型电动车而言，舒适性与能耗经济性显得尤为关键，此刻应重点对气动噪声加以控制，降低风阻 [3]。

5.1.3 工程可制造性与成本约束原则

气动外形优化需与实际制造工艺及成本限制相契合，复杂曲面造型虽能赋予更好的气动性能，但说不定会增加模具制造的难度与生产成本，因过度渴望光滑曲面而采用自由曲面设计，或许会让冲压成型工艺难以达成，也会使 3D 打印等特种制造工艺的成本大幅攀升。在优化进程里要结合冲压、注塑等传统制造工艺的成型特色，实施曲面结构的简化，可借助模块化设计的理念，把复杂曲面切割成多个简单曲面的搭配，在维持气动性能有效发挥的基础之上，让制造难度与成本降低，还得综合思索材料特性，抉择兼具轻量化及气动性能的材料，诸如碳纤维复合材料和高强度铝合金之类，兼顾性能提升与成本控制的关系。

5.2 优化方法

5.2.1 多学科耦合的理论分析与数值模拟

依托计算流体动力学（CFD）理论，综合考虑小型交通工具的实际外形特点，搭建三维流场数学模型，采用雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程描绘湍流的流动过程，借助选取恰当的湍流模型，精准捕捉边界层流动与涡流的属性。采用气动声学理论，采用 Lighthill 声类比方程与 FW-H 方程中的一个，对气流脉动所产生的噪声源及其传播特点展开模拟，把曲面曲率当作关键变量纳入模型，采用改变曲率参数手段，解析其对压力分布、速度流线、涡量场等流场参数形成的影响，搭建曲率 - 空气动力学参数的量化纽带。

小型交通工具气动性能优化一般会关联多物理场耦合问题，除了空气动力学范畴外，传热、结构力学等因素也需纳入考量，处于高速行进状态之际，气动加热会引起车身表面温度分布的变化，于是引发材料力学性能变动；车身结构因气动载荷出现应力且产生变形。需采用多物理场耦合的仿真技术，把 CFD 模型与有限元分析（FEA）模型、传热模型组合在一起，基于数据交互与迭代推演，系统评估曲面曲率变化对气动性能、结构强度及热管理形成的影响，实现多目标的同步优化，优化电动小客车前脸进气格栅的曲率之际，需考量其对冷却气流的引导效能，还需评价由此引发的气动阻力的变动，以及此操作对电池热管理系统的影响 [4]。

5.2.2 试验验证与迭代优化流程

在数值模拟基础上，制作 1：进行 1 抑或缩比模型的风洞试验，依靠六分量测力天平测量模型承受的气动力，依靠压力传感器阵列获取车身表面压力的分布，采用粒子图像测速（PIV）技术开展流场结构的观测，以声学麦克风阵列对气动噪声进行采集，道路试验能在实际行车工况的环境里，测定交通工具能耗、速度稳定性等性能参数，补齐风洞试验难以仿真的真实环境因素，像路面粗糙度、自然风的干扰。

把数值模拟结果与试验数据相结合，依靠响应面法（RSM）建立起空气动力学参数和曲面曲率的近似数学模型，依靠拉丁超立方试验设计选定样本点，建立起二次多项式响应面方程，迅速预测不同曲率组合情形里的气动性能，基于这一基础，采用像遗传算法（GA）、粒子群优化算法（PSO）的智能优化算法，在响应面模型空间里搜索最佳的解，找出曲面曲率的最优组合，历经多轮“模拟 - 试验 - 优化”循环迭代，慢慢向满足性能指标要求的气动外形设计方案靠拢，推动小型交通工具气动性能持续提升。

6 结论

本研究针对小型交通工具曲面曲率分布对空气动力学特性的影响机制做了系统探讨，气流流动状态受曲面曲率分布所影响，对阻力、升力及气动噪声等空气动力学性能产生重大影响，不合理的曲面曲率分布会引发边界层分离以及涡流的产生，继而增大阻力、破坏了升力的平衡状态并产生气动噪音；恰当的曲面曲率设计可实现空气流动的优化，减小阻力、达成升力平衡并降低气动噪声。给出基于曲面曲率分布的小型交通工具气动外形优化思路方案，涵盖设计准则与优化举措，随着计算技术、试验手段的稳步进阶，对小型交通工具曲面曲率分布和空气动力学特性之间联系的研究将更精深入微，为小型交通工具创新设计给予更坚实支撑。

参考文献

[1] 交通工具创意及多场耦合性能优化科技创新团队[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(04):1175.

[2] 陈金池,黄研昕.基于非定常曲面涡格法的气动灵敏度和线性化分析[J].气体物理,2023,8(06):55-64.DOI:10.19527/j.cnki.2096-1642.1060.

[3] 王宁,陈友兴,杨凌,等.基于自适应多项式拟合的涡流测量校正方法[J].中国测试,2022,48(03):21-26.

[4] 王琛,张乐平.基于UG软件的交通工具曲面建模应用研究[J].林业机械与木工设备,2021,49(08):71-74.DOI:10.13279/j.cnki.fmwe.2021.0106.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6202

Research on the aesthetic mechanism and criterion of surface transition based on curvature continuity and modeling rhythm

Jinheng Zhang

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

Abstract

This study focuses on the aesthetic construction of surface transitions in industrial design, conducting interdisciplinary research centered on curvature continuity and form rhythm. By analyzing the intrinsic relationship between differential geometric parameters and visual perception, the study reveals the aesthetic mechanisms of surface transitions: curvature continuity enhances visual smoothness through geometric smoothing, while form rhythm constructs perceptual levels through rhythmic variations. The study constructs a theoretical framework that integrates geometric analysis and visual psychology, proposing a continuous quantification method based on curvature comb and a formal composition logic for form rhythm. Ultimately, it forms design principles that balance engineering precision with artistic expression, providing systematic guidance from theory to practice for the design of surface transitions in industrial products.

Keywords

surface transition; curvature continuity; modeling rhythm; aesthetic mechanism; design criteria

基于曲率连续性与造型韵律的曲面过渡美学机理与准则研究

张津珩

天津众科科技发展有限公司，中国 · 天津 300072

摘　要

本研究聚焦工业设计中曲面过渡的美学构建，以曲率连续性与造型韵律为核心展开跨学科研究。通过剖析微分几何参数与视觉感知的内在关联，揭示曲面过渡的美学机理：曲率连续性通过几何平滑性影响视觉流畅度，造型韵律则借助节奏性变化构建感知层次。研究构建融合几何分析与视觉心理的理论框架，提出基于曲率梳的连续性量化方法与造型韵律的形式构成逻辑，最终形成兼顾工程精确性与艺术表现力的设计准则，为工业产品曲面过渡设计提供从理论到实践的系统性指导。

关键词

曲面过渡；曲率连续性；造型韵律；美学机理；设计准则

1 引言

在工业设计领域，曲面形态的过渡处理，已从以功能需求为导向升级为美学表达的核心承载，伴随产品造型往有机化、情感化路径发展，曲面过渡所展现的美学价值愈发明显，它是塑造产品形态特征的关键途径之一，更是传达品牌语义的关键载体，可当前进行设计实践的时候，艺术层面的造型韵律表达与工程方面的几何连续性控制常相互分离：若过度依赖曲率参数，形态易呈现机械生硬之感，若只追求韵律效果，极有可能引发工程实现方面的矛盾。此现状凸显了构建科学美学机理及统一设计准则的紧迫形势，从理论的层面出发，曲面过渡美学牵涉到微分几何、视觉认知、工业设计等多学科的交叉情况，作为几何造型技术指标的曲率连续性，该数学描述已处于相对成熟水平，但要把高斯曲率、法向量变化等几何参数转化为视觉美学的语言该怎么做，依旧没有系统性研究方面的进展；造型韵律是艺术设计中的抽象概念，在曲面过渡方面，其量化表达及控制方法是急需突破的理论瓶颈，本研究凭借跨学科整合开展，目标为构建“几何特征 - 感知机制 - 设计准则”的连贯理论链条，为曲面过渡设计给予兼具科学性与艺术性的方法路径。

2 曲面过渡美学的基础理论建构

2.1 曲率连续性的几何本质解析

曲率连续性乃是刻画曲面过渡平滑性的核心指标，可从参数连续性与几何连续性这两个维度对其内涵加以阐释，参数连续性要求曲面方程的各阶导数呈连续态势，而几何连续性更留意形态的视觉连续效果，就像较高阶的几何连续要

【作者简介】张津珩（1994–），男，中国辽宁海城人，本科，从事曲面造型设计研究。

求曲率值始终连续，也要求曲率变化的速率一致，如此让曲面过渡在视觉方面呈现无突变的平滑观感，就几何可视化角度而言，作为分析工具的曲率梳，用矢量场直观呈现曲率大小及方向上的变化情形，理想过渡曲面的曲率梳应当呈现出平滑渐变模样，杜绝出现尖峰以及方向的急剧突变，其本质对应着曲率函数具有高阶可导的属性。

从数学表达的实际情形看，借助混合函数可构建起曲面过渡的连续性，让相邻曲面片在衔接点处位置重合，切线方向达成一致，还达成了曲率值与曲率变化率的双重连贯，以此为视觉呈现的平滑性筑牢几何根基。例如，邹倩通过实例说明，如何用谱配点法求解椭圆型偏微分方程边值问题，构造所需的过渡曲面 [1]。

2.2 造型韵律的视觉感知机制

视觉系统对形态要素规律性变动的认知处理，催生了造型韵律的美学感知，处于曲面过渡期间，韵律表现是曲率变化的节奏律动、曲面起伏的层级秩序以及光影流动的韵律感觉，格式塔心理学相似性原理宣称，人眼倾向把存在相似曲率特征的区域感知成一个整体，此感知组织机制构成了韵律构建心理上的基础，从视觉流程这个层面看，曲率平滑过渡带动视线自然流淌，有规律的曲率调整会形成类似音乐节拍的“视觉节奏”，主特征线曲率变化构成主导节奏，次特征线充当变奏补充成分，携手塑造出层次分明的韵律格局。

韵律感知也牵扯到视觉认知的时间维度：当目光漫过曲面的片刻，大脑把曲率的序列性改变整合为带节奏感的整体，该感知并非只是几何参数的叠加，而是有着心理预期和模式识别的复杂活动，等间距的曲率波动易被感知作“机械韵律”，按黄金比例分布的曲率变动，更贴合视觉舒适原则。

2.3 几何与感知的跨学科关联

曲率连续性和造型韵律的融合是工程精确性与艺术表现力的平衡体现，若建立两者关联，需要引入视觉感知的量化模型，就如曲率感知的临界值、韵律强度的指数，来自心理物理学的研究表明，人眼对曲面曲率变化的觉察存在阈值，若曲率变化率超出基准值的既定比例时，视觉可察觉到“转折”现象。通过语义差分法实施对曲面样本的主观评价分析，可挖掘出“流畅度”“节奏感”“精致度”等主要感知维度，各与曲率连续性指标、韵律变化频率、曲面光顺度存在着内在的关联。

实现这种跨学科关联的搭建，必须解决几何参数的感知映射、韵律特征几何转换以及两者权重分配状况，将曲率梳的形态特征转化为视觉流畅度的相关评价，也能将韵律的节奏频率映射为曲率变化的空间周期，进而在工程参数和美学感知间构建起可追溯的逻辑联系。如于海涛等学者对喷嘴圆柱段起点处采用 45° 角过渡、圆形过渡和椭圆形过渡并进行数值计算，发现圆形曲面过渡的喷嘴产生的空化效果优于其他形状 [2]。

3 曲面过渡美学的关键影响因素

3.1 曲率连续性的量化指标体系

搭建多维度连续性评价指标乃美学分析之基础，除常规的连续性分类以外，应当引入高阶导数指标，曲率变化率呈现出单位弧长内曲率的变化数值，曲面过渡愈发平滑；法向量连续性反映出的是曲面扭转程度，法向量变化率左右着视觉上的“扭曲感”；三维曲面过渡之际空间挠率的连续性，挠率的改变对曲面螺旋形态特征造成影响，依靠创建连续性的综合评价模型，可把各指标整合成一个统一的评价参数，展示不同指标在视觉感知中的重要性区分。

3.2 造型韵律的形式构成要素

借助以下形式原理达成曲面过渡造型韵律：①重复加渐变：相似曲率片段按周期出现且作规律性的变化，生成视觉层面的节奏；构建对比与层次效果：借助曲率的急剧变化形成视觉焦点，还构筑主从曲面的层级格局；比例设定与尺度把握：曲率变化幅度及其空间分布契合视觉舒适的比例标准，就如采用黄金分割标准。韵律的构建要兼顾曲面的空间维度与观察视角，需在动态视角下让汽车侧围的曲面过渡保持韵律一致，而家具曲面在静态观察之际，更聚焦于韵律层次情况，韵律的“视觉节拍”需跟曲面的功能属性相符合：运动型产品的韵律多呈现快速变化态势，家用产品的韵律选择舒缓节奏更为恰当。

3.3 几何与韵律的协同作用机制

几何连续性与造型韵律并非以独立形式存在，而是借由光影交互、视觉认知等中介因素达成协同功能，曲率持续连贯的曲面为韵律构建奉上平滑基底，而韵律的介入避免了单纯连续曲面的单调体验，光影作为对曲面形态的视觉映射呈现，其变化规律能直接体现曲率分布，连续的曲率过渡会带来柔和的光影渐变，具备韵律的曲率变化让光影呈现规则性的明暗起伏态势，这种协同效能的平衡点为几何连续性为视觉赋予流畅效果，造型韵律赋予形态别样个性，两者协同形成了曲面过渡的美学支撑。

4 曲面过渡美学的设计准则构建

4.1 曲率连续性的控制准则

朱燏等学者提出一种基于曲面重构技术的叶根过渡区域加工轨迹的生成方法，生成的加工轨迹由已加工区域边界向叶根圆角边界渐变过渡，该加工轨迹与相邻区域的加工轨迹之间可实现精确搭接 [3]。依托几何分析与感知方面的研究，确立分级控制相关准则，以功能为导向的基础层实现较低阶连续，适合对美学要求不怎么高的场景；通用设计的平衡层达成中阶连续效果，掌控曲率变化率的合理范围，契合多数消费类的货品；美学导向的高阶层实现高阶连续，同时对曲率变化导数的高阶部分优化，适配高端产品的设计范畴，从技术实施角度而言，推荐采用 NURBS 曲面建模方案，以调

整控制点权重及节点向量精准达成曲率的控制，针对复杂的过渡区域，能采用分段拼接跟曲率蒙皮技术，实现整体连贯不间断。

4.2 造型韵律的构建准则

推出“三维度韵律构建法”，宏观韵律把控整体曲面主曲率的走向，让其与产品所传达的语义相契合；中观韵律针对局部过渡区设置韵律单元，单元间距跟曲率变化幅度契合视觉上舒适的比例；微观韵律以细节曲面微曲率的变化增添层次，就像在主过渡面添加些细微的凹凸构造，应使韵律的变化幅度依照形式美学原则，相邻曲率单元比例的设定可参照经典法则，杜绝无条理的瞬间突变。例如，宜兴的紫砂壶制作具有透气不透水的双气孔结构特点，与中国人的审美观念相契合，这也是其深受人们喜爱和追捧的原因 [4]。

4.3 几何与韵律的协同设计流程

水平轴风力机叶片的叶根与翼型之间的圆滑过渡曲面的建立是叶片函数化设计的关键环节之一 [5]。应搭建“双向迭代”的协同设计架构，正向流程包含几何建模，接着进行曲率分析，再做韵律映射，最后开展感知评价；反向流程先是美学需求，随后是韵律解构、曲率转化，最后实现几何，重要协同内容涉及曲率极值点和韵律视觉焦点的对齐关系、韵律单元尺度与曲率变化频率的匹配关联，以及光影效果作为几何与感知的中介桥梁，凭借参数化设计工具达成几何参数跟韵律特征的关联调整，保证设计方案兼具工程上的可行性与美学方面的表现力。

5 理论延伸与设计启示

5.1 跨学科研究的理论价值

本研究在理论上的创新之处是打破了工程与美学之间的学科壁垒，建成了曲面过渡量化的美学架构，采用将微分几何参数与视觉感知机制关联的办法，对抽象美学概念进行了可操作的几何诠释，同时为严谨的工程参数赋予了艺术表达的空间，该跨学科整合显著充实了工业设计理论基础的厚度，也给其他涉及形态美学的范畴提供了方法论方面的参考。

5.2 对工业设计实践的指导意义

在设计实操过程里，该理论体系可支持设计师调和技术限制与美学追求：在汽车外观造型设计之际，依靠曲率连续性控制减少空气动力学产生的阻力，同时依靠韵律打造品牌独有的形态表征；就消费电子设计情况而言，按照曲率感知阈值对边缘过渡加以优化，采用韵律设计增进产品的精致感和握持舒适度；在家具设计相关实践里，把传统美学里的韵律元素转变为现代曲面的曲率变动，促成文化传承及形态创新的契合。

5.3 未来研究方向展望

今后研究可尝试探索运动时的曲面过渡美学，探讨速度与视角变化对曲率韵律感知形成的影响；采用人工智能技术，创建曲面过渡美学智能生成及优化的相关系统；实施跨文化的视觉感知试验，分析不同地带用户对于曲面过渡美学的认知分野，跟着数字化设计与智能制造的演进，产品情感化表达与用户体验提升中，曲面过渡美学将发挥更举足轻重的作用，本研究搭建的机理跟准则体系，为这一发展夯实了科学基础，后续需在更多应用场景里完成完善，促进工业设计往更精准、更富创新精神的方向前行。

6 结论

本研究对曲率连续性与造型韵律的内在关联实施系统剖析，缔造了曲面过渡美学的理论框架及设计准则。研究表明，曲率连续性借由几何平滑性构建视觉流畅的基础，造型韵律借节奏性变化为形态赋予独特的艺术个性，二者依靠光影交互与视觉认知达成协同功效。研究推出包含连续性分级控制、韵律三维构建、双向协同设计的一套完整准则体系，为工业产品曲面过渡设计构建了从理论探究到实践运用的系统方法体系。该研究的意义在于消除了工程技术与美学表达之间的隔阂，推动曲面过渡设计从经验把控转向科学规范，随着跨学科研究的递进与智能技术的采用，曲面过渡美学的拓展边界进程不会停歇，为研发更具人文关怀与艺术魅力的工业产品形态提供不间断的理论支持。

参考文献

[1] 邹倩.基于谱配点法的过渡曲面构造[J].淮北师范大学学报(自然科学版),2022,43(02):13-17.

[2] 于海涛,徐艳,王佳祥,等.基于CFD的风琴管喷嘴结构优化[J].化工机械,2021,48(06):883-887+938.

[3] 朱燏,李世军,王文理.基于重构曲面的整体叶盘叶根过渡区域精确搭接加工轨迹生成方法[J].航空制造技术,2021,64(18):79-87.DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.18.079.

[4] 蒋爱勤.浅谈紫砂“旷怡壶”的造型特征以及韵律之美[J].陶瓷科学与艺术,2021,55(02):135.DOI:10.13212/j.cnki.csa.2021.02.119.

[5] 赵云鹏,姜海波.风力机叶片叶根与翼型间过渡曲面的余弦函数法探讨[J].机械设计,2020,37(10):93-96.DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2020.10.013.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6203

Research on the promotion direction of Phased Quality Issues in the project

Zhongxing Hu Mengmeng Liu Jun Wang Pengpeng Xiong

Volkswagen (Anhui) Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract

As people gradually pay more attention to product quality, especially the quality issues that affect life and health, and with the rise of new energy vehicles, which have met People's Daily travel needs, many unsafe problems have also been exposed. In order to capture the market, the complexity of automotive products has increased and the development cycle has shortened. The phased quality problems of the project have become the key factors affecting the enterprise's cost and brand reputation. In the process of project management, the effective identification and control of phased quality problems are of great significance for ensuring product quality and enhancing brand reputation. This article focuses on key factors such as product quality, product complexity, quality issues in the project stage, and brand reputation to explore the causes and impacts of quality problems in different project stages, and proposes corresponding optimization strategies. The research results can provide theoretical references and practical guidance for relevant enterprises to optimize project management and enhance market competitiveness.

Keywords

Product quality, product complexity, project stage quality issues, brand reputation

项目阶段性质量问题促进方向研究

胡中星 刘萌萌 王俊 熊鹏鹏

大众汽车（安徽）有限公司，中国 · 安徽 合肥 230000

摘 要

随着人们对产品质量认识逐步重视，特别是对影响生命健康的质量问题日益重视，随着新能源汽车的崛起，满足了人们日常的出行需求，也暴露了很多的不安全性问题，为了占据市场汽车产品复杂度提升和开发周期缩短，项目阶段性质量问题的已成为影响企业成本与品牌信誉的关键因素。在项目管理过程中，阶段性质量问题的有效识别与控制对保障产品质量、提升品牌信誉具有重要意义。本文围绕产品质量、产品复杂度、项目阶段质量问题及品牌信誉等关键因素，探讨不同项目阶段质量问题的成因及其影响，并提出相应的优化策略。研究结果可为相关企业优化项目管理、提升市场竞争力提供理论参考和实践指导。

关键词

产品质量；产品复杂度；项目阶段质量问题；品牌信誉

1 引言

汽车行业正面临技术变革与供应链重构的双重挑战，项目开发周期压缩与质量要求提升的矛盾日益突出，车企因阶段性质量问题导致的返工成本居高不下，零件的稳定性差，钣金尺寸监控失控，现有质量管理体系虽强调全过程覆盖，全员参与，但对整个产品周期：研发 - 试制 - 量产等关键阶段的质量没有很好的控制，导致诸多“质量癌症”流入客户。在现代项目管理中，产品质量是决定企业市场竞争力的核心要素之一。然而，随着产品复杂度的提升，项目各阶段的质量问题日益突出，若未能及时识别和解决，可能导致最终产品不达标，甚至损害品牌信誉。特别是在研发、生产、测试等关键阶段，质量问题的累积效应可能引发连锁反应，增加项目失败风险。因此，研究项目阶段性质量问题的成因、影响及优化方向，对提升企业质量管理水平具有重要意义。

本文以项目阶段性质量问题为研究对象，结合产品质量、产品复杂度及品牌信誉等关键因素，分析不同阶段质量问题的特点及其相互作用关系，并提出相应的管理优化策略。研究旨在帮助企业建立更科学的质量控制体系，减少缺陷传递，提高产品可靠性，从而增强市场竞争力。研究结果不仅为项目管理理论提供补充，也为企业实践提供可操作的改进建议。

目的：本研究基于某车企新能源平台项目实践，通过构建阶段质量，提出以“化整为零，阶段性质量促进与控制”为核心的促进方向，实现“问题扼杀摇篮之中“提供理论依

【作者简介】胡中星（1992–），男，中国山东临沂人，本科，助理工程师，从事新能源汽车技术研究。

据与管理工具。主要由以下三点：

1. 分析项目各阶段质量问题的特点及成因，明确研发、生产、测试等关键环节的质量风险点，探究产品复杂度对质量管控的挑战。

2. 研究质量问题对产品质量和品牌信誉的影响路径，揭示阶段性质量缺陷如何通过累积效应损害最终产品表现及企业市场形象。

3. 提出阶段性质量管理的优化策略，建立全过程质量监控与改进机制，以减少缺陷传递，提升产品可靠性和客户满意度。

每个阶段对质量影响的方面从：人员，设备，物料，方法，环境 / 安全，过程执行方面进行分析与控制，分段处理，分段控制。

BT-B 认可阶段，只涉及理论性的工作，没有实质性的装车与验证，此阶段需要对相关人员的理论性的知识进行解读，培训，为后续的 LF，VFF,PVS,OS,SOP,ME 阶段问题分析与处理做好基础工作。

2 LF 阶段

1. 人员：3PP 人员配置 + 人员装车培训 3PP 模拟动作步骤要详实仔细规范。在培训过程中识别影响质量的因素

2. 设备：设备安装改造状态跟踪是否满足标准的要求，拧紧工具标定是否符合相应工艺装配标准要求，工 / 辅具使用使用是否符合实际的装车需求，同时关注在装配过程中工、辅具对车身的影响，是否会衍生其他的质量缺陷；

3. 物料：零件上线方案 + 内包装清单 物流规划输出零件布线方案、零件包装清单、专用货框、到货计划、一次性材，零件供货方式多争取准时化排序可减少错漏装；

4. 方法：工艺信息收集整理 PDM 图、操作顺序卡、明细表装车后输出工具清单、确定装配路线、FIS 单 PR 号需求，识别因工艺先后顺序影响质量问题；

5. 环境：高压资质、项目车生产计划节奏均衡、项目停台预估目标划分，特殊工艺的要求例如：温度、适度、无尘等特殊因素

6. 安全：人员安全 + 项目安全 保密方案制定、保密场地 物资领取落实

在 VFF\PVS\OS\ 期间零件的交接制定相应的流程文件：对于相应的流程固化，保证零件，工具，设备，工艺的稳定型，有据可依，有源可追；

3 VFF 阶段

此阶段为小批量的线体生产，动态的拉动生产，出现的质量问题，需要更改设计的，产品数据的优先促进解决。

人员：首车上线后全员培训完成，操作熟练度提升阶段 装配手法与 VSC/ 样板对标，确定标准装配操作并开展培训，消除由于装配带来的质量影响；

设备：发现设备问题并促进规划解决，拧紧问题、电器问题收集反馈规划促进；

物料：零件上线方案验证，包装方案验证，来车螺栓螺柱 匹配检查，来车 PVC 检查，来车车身腊检查 问题记录

反馈物流、焊、涂、冲压、外购件解决（优先解决需要更改标准、设计、结构、需要更改模具这些因素在前期好解决，）。

方法：工艺信息完善，AEKO 变化点管理 PDM 图保持最新版本、选装关系，识别方法总结归纳、确定装配路线

环境：高压资质、项目车生产计划节奏均衡、项目停台准确记录

安全：首车上线后危险因素辨识，保密措施执行

在 VFF 阶保证能够将车装上，能够保证零件的与车身的完整性，同时识别到问题进行分类，首先公关设计类质量问题，因为前期的数据没有封样，模具没有确定最终的状态，更改成本低；此阶段主要由样板部门进行主要负责，同时检查生产的问题，对装配的影响。

还要对 Audit 抱怨的质量问题进行收集，归类，根据 Audit 划分的指标，按照康采恩体系进行制定阶段性的降分计划；降分计划的制定还要按照问题的处理进展结合前期装车识别到的问题进行制定，预测性的开展降分计划

4 PVS 阶段

人员：重点岗位人员专项强化培训，质量标准解读培训，提高装配的稳定性，前端调整等岗位强化提升，识别调整出现的问题，通过优化：调整方法，工装的使用，前期车身钣金的预留等，数据验证和数据的固化；

设备：设备通过性验证，完成设备操作培训 、推动设备工艺问题解决 辅具使用优化改良，验证优化后的状态对质量的影响，并封样数据；

物料： 器具状态跟踪 物流规划输出零件布线方案、零件包装形式、专用货框等对质量的影响；

方法：工艺工时信息完善，问题处理流程完善，3PA，变化点管理，降低首检缺陷率，奥迪特降分 PDM 图保持最新版本、选装关系，识别方法总结归纳 、FIS 单整理、差异件识别统计、缺陷判定标准完善，匹配标准完善，做好变化点管理；

环境：促进停台问题，过程质量审核，APA 审核

安全：人员安全 + 项目安全 持续安全隐患识别整改，保密措施执行

PVS 阶段：此阶段主要处理由于工具，设备，辅具，工艺的原因导致的质量问题，为后续的工艺的确定，标准的确定，工具的规范性等制定相应的封样，为 SOP 做好基础。

5 0S 阶段

人员：质量标准， 全员培训完成并通过考核，模拟正常链速生产的节奏，识别潜在的质量问题，对问题进行预测，识别做好相应的应急处理流程

设备：设备状态趋于稳定，工具辅具全部到位，可满足批量生产

物料： 物料上线，器具款型确认 注意器具对零件的防护

方法：问题处理流程完善，3PA，变化点管理，降低首检缺陷率，奥迪特降分 PDM 图保持最新版本、选装关系，识别方法总结归纳 、FIS 单整理、差异件识别统计、缺陷判定标准完善，匹配标准完善

例如：现场的拧紧应急预案的制定与执行 :EC 拧紧不合格，启动应急预案，

确认拧紧不合格的问题；

确定应急工具的选择；

确定缺陷的标准；

第一个操作者进行返修

第二个操作者进行复检并确认返修的状态（满足双眼原则）

缺陷进行记录系统；

对系统进行检查，是否符合要求；

环境：LTF 拉练识别新出现的质量问题，高压区域的设置，

此阶段只要对 Audit 抱怨的问题进行处理，由于人员，节拍的调整等对质量问题的影响，此阶段的生产节拍与 SOP 近似，能够在真实生产的环境中识别非正常生产环境的中的质量问题，同时对 Audit 降分主要问题的促进。制定问题的分析，升级流程。

6 SOP–Block 阶段

人员：正常链速下的拉动生产，员工的操作对质量的影响

设备：设备状态趋于稳定，工、辅具的使用对质量的影响

物料：零件完成实物布线，框车及准时化零件切换完成，来件质量稳定性的跟踪；

方法：标卡会签，工艺一致性核查，变化点管理，降低首检缺陷率，奥迪特降分

此阶段处于批量生产的模式，贴近于零件与车身之间的匹配、功能的稳定性。

对整个项目周期进行总结，归纳，梳理剩余的质量问题，更验证每个质量问题的进展、效果，对已解决的问题的进行封样保存，未解决的问题进行继续促进解决；

SOP-Block 期间 Audit 车的整备工作实现批量的放行工作。

制定 SOP block 期间 Audit 车辆整备流程，对重点车辆进行整备，让过程更加平顺：

此阶段主要处理装配性的质量问题，规范一线操作者的行为规范。

7 总结

在汽车行业质量一直以来都是消费者关注的重点问题，质量无小事，关系到消费者的人身安全，将问题化整为零，分阶段性的进行处理，从根源上解决问题，对产品质量，品牌信誉也是一个保证。本文围绕《项目阶段性质量问题促进方向研究》展开，结合产品质量、产品复杂度、项目阶段质量问题及品牌信誉等关键词，探讨了项目不同阶段质量问题的成因、影响及优化路径。研究表明，产品质量与产品复杂度密切相关，复杂度越高，各阶段质量风险越突出，需通过精细化管理和技术手段加以控制。项目阶段质量问题的动态性要求企业建立全过程质量监控体系，通过阶段性评审、风险预警和闭环管理，减少缺陷传递，提升整体质量水平。同时，质量问题的有效解决能够增强品牌信誉，为企业赢得市场竞争力。

未来研究可进一步结合具体行业案例，量化质量问题的经济影响，并探索智能化技术在质量管理中的应用，为项目阶段性质量优化提供更系统的理论支撑和实践指导。

参考文献

[1] 《质量管理方法与工具》《GB/T19001:2015》《IATF16949：2016》

[2] 流程图制定参考《六西格玛黑带》

[3] Audit 降分曲线参考《康采恩生产体系》

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6204

Risk and control strategies of excessive irradiation in dairy products preservation

Jiaxian Xu

Wuhan Food and Cosmetics Inspection Institute, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the rapid development of the dairy industry, irradiation preservation technology has gained widespread application due to its efficient sterilization properties. However, excessive irradiation has led to a series of issues that severely hinder its sustainable development. This study provides a systematic analysis of the risks associated with this technology, including nutrient loss, sensory degradation, the formation of potential harmful substances, and increased microbial resistance. It also delves into the causes of these issues, such as performance defects in irradiation equipment, insufficient professional skills among operators, and an inadequate quality control system. The study proposes strategies to optimize irradiation process parameters, enhance personnel training and management, improve the quality monitoring system, and explore innovative technological alternatives. These strategies are validated through typical case studies, providing theoretical and practical references for ensuring the quality and safety of dairy products and promoting the scientific application of irradiation preservation technology.

Keywords

dairy products; irradiation preservation; excessive irradiation; risk analysis; control strategy

乳制品辐照保鲜中过度辐照的风险及控制策略

徐家显

武汉食品化妆品检验所，中国 · 湖北 武汉 430000

摘　要

随着乳制品产业快速发展而因高效杀菌特性得到广泛应用的辐照保鲜技术，受过度辐照带来的系列问题，严重制约其可持续发展。本研究有对其在营养成分损失、感官品质劣变、潜在有害物质生成及微生物抗性增强等方面风险的系统分析，有对辐照设备性能缺陷、操作人员专业不足、质量控制体系不完善等成因的深入剖析，还有针对性提出的优化辐照工艺参数、强化人员培训管理、完善质量监测体系及探索技术创新替代方案等策略，并结合典型案例对其有效性的验证，从而为保障乳制品质量安全、推动辐照保鲜技术科学应用提供理论与实践参考。

关键词

乳制品；辐照保鲜；过度辐照；风险分析；控制策略

1 引言

凭借高效灭菌突出优势在食品工业广泛应用的乳制品辐照保鲜技术，因过度辐照引发营养流失、品质劣变、安全隐患等系列问题日益显著；当前怎样精准有效控制辐照剂量、防范相关风险成行业关键棘手难题。本文围绕过度辐照潜在威胁系统深入剖析，在探究成因基础上提出控制策略，旨在为乳制品产业安全有序发展提供科学有力支撑。

2 乳制品辐照保鲜技术概述

乳制品辐照保鲜充分利用电离辐射穿透特性，通过破坏微生物核酸与细胞膜、抑制酶活性实现灭菌保鲜目标，对杀灭沙门氏菌、控制芽孢杆菌繁殖效果显著。就当前实际状况，γ 射线、X 射线、电子束三种辐照技术各有不同应用场景，γ 射线凭高穿透性适用于大包装产品深层灭菌，X 射线因能量转换率高且辐照均匀性好常应用于液态乳精准处理，电子束以瞬时高剂量优势在奶粉快速杀菌中表现突出。但该技术在我国实际应用时，面临公众认知不足、设备投资成本大、检测技术滞后等诸多现实问题，且存在产品辐照参数优化不充分、对不同品类适应性研究欠缺等短板，迫切需大力开展技术创新推动产业升级发展。

3 过度辐照风险分析

3.1 营养成分损失

过度辐照会使乳制品营养结构遭受严重破坏。高能射线致使蛋白质分子内化学键断裂，引发肽链结构重排，导致 β - 乳球蛋白等功能性蛋白活性丧失，使其乳化、凝胶等

【作者简介】徐家显（1984–），男，中国湖北枣阳人，本科，中级，从事食品安全、食品检验研究。

特性降低。维生素体系对辐照尤为敏感，脂溶性维生素 A、D、E 易氧化裂解，水溶性维生素 B 族、C 在自由基强烈攻击下快速降解，相关研究表明过度辐照可能使乳清中维生素 B1 损失率超 50%。与此同时不饱和脂肪酸在辐照诱导下氧化形成过氧化物，导致必需脂肪酸含量降低，进一步削弱乳制品营养价值。

3.2 感官品质劣变

因过度辐照，乳制品的感官特性遭受显著影响，像色泽方面，乳蛋白所含硫氨基酸经辐照产生游离巯基与乳糖发生美拉德反应致液态奶褐变、奶粉发黄；风味层面上，乳脂肪氧化生成醛类、酮类物质产生“辐照臭”且含氮化合物降解带来焦糖或蒸煮异味；质构特性亦受冲击，高剂量辐照下酪蛋白胶束结构解离使液态奶分层沉淀、酸奶凝胶网络破坏致脱水收缩，严重降低产品食用品质与消费者接受程度。

3.3 潜在有害物质生成

高剂量辐照会使乳制品产生潜在有害化学物质，水辐解产生的自由基与溶质分子反应生成有机过氧化物和过氧化氢，其不仅加速脂质氧化还与生物大分子加合形成具细胞毒性辐解产物如酪氨酸氧化产生的对苯二酚类物质有潜在致癌风险，且含氯消毒剂残留与辐照协同易生成三卤甲烷等毒性显著增强的消毒副产物，特定条件下过度辐照还可能引发乳制品中天然放射性核素活化带来潜在辐射安全隐患。

4 风险成因剖析

4.1 辐照设备与工艺问题

辐照处理所达成精准度直接关联着辐照设备性能是否稳定以及工艺参数适配情况这一关键要点，传统 γ 射线辐照装置在某些企业正被使用时存在剂量率不均匀的棘手状况，源于源架老化及传输系统产生机械误差致使产品受照剂量波动幅度超标准阈值，尤其在大包装乳制品处理当中边缘和中心部位剂量差异可达 30% 以上的情况明显；电子束加速器能量输出稳定性受电源波动、真空度变化显著影响，设备维护若未及时跟进，电子束能量衰减便会致使穿透深度不足，进而迫使操作人员盲目增加辐照时间导致过度辐照发生。从工艺设计方面来讲，缺少针对不同乳制品特性进行个性化参数优化，未充分考虑乳脂肪含量、固形物比例对射线吸收的影响而直接套用通用辐照方案，造成实际处理剂量偏离安全区间的结果出现。另外，辐照装置日常校准频率不足且未能及时察觉剂量监测系统灵敏度下降，使得过度辐照风险不断累积的状况存在。

4.2 操作人员专业素养不足

操作人员对于辐照技术的认知水平以及实践能力是风险防控至关重要的环节，当前行业普遍存在人员培训体系不完善的问题，部分从业人员仅接受基础操作培训，缺乏对电离辐射生物学效应、剂量 - 效应关系等核心知识的深入理解，难以依据产品特性调整辐照参数的情况突出。在实际操作过程当中，屡屡出现对设备异常报警信号误判、紧急停机流程执行不到位等情况，比如将剂量率异常波动单纯归为系统误差后继续作业，最终致使产品接受超量辐照。且人员流动性大、新老员工交替频繁使得标准化操作规范执行存在偏差，缺乏经验的操作人员易忽视环境温湿度、产品装载密度等隐性影响因素，在未进行预实验验证的情形下贸然启动辐照程序的现象常见。除此之外，部分企业未建立有效考核机制，缺少对操作人员技术水平与安全意识的动态评估，难以形成长效风险防控能力的局面存在。

4.3 质量控制体系不完善

乳制品辐照质量控制体系因存在薄弱环节而为过度辐照风险滋生土壤，多数企业在剂量监测方面依赖的单点剂量计测量无法全面反映产品三维空间受照情况且其剂量计校准溯源链条有断裂风险致测量数据可信度下降；在过程控制环节，因缺乏对辐照前原料微生物负荷以及包装材料辐照兼容性的严格筛查且未建立原料品质与辐照剂量动态关联模型使得辐照处理存在盲目性；成品检测流程具滞后性，传统微生物培养法检测周期长达数天不能及时反馈辐照效果，快速检测技术如 ATP 生物发光法在乳制品复杂基质中的适用性尚需验证；此外质量追溯体系不健全，辐照批次信息与产品流向数据未能有效衔接，一旦出现质量问题就难以快速定位风险环节进而削弱企业对过度辐照风险的响应能力。

5 控制策略研究

5.1 优化辐照工艺参数

优化辐照工艺参数需构建系统化研究体系并结合乳制品理化特性和微生物污染水平开展精准调控，液态乳具有高含水量、低固形物特点可通过调节辐照温度抑制水辐解自由基生成，研究表明在 - 20℃低温辐照条件下维生素 C 损失率较常温处理降低 40% 以上且采用分段式辐照策略把总剂量拆分为多个低剂量脉冲利用微生物亚致死损伤累积效应在保证杀菌效果同时减少营养损耗；对于乳粉、奶酪等高固形物产品，需建立射线穿透深度与产品密度、厚度数学模型并通过蒙特卡罗模拟技术优化产品摆放角度和辐照源距离将剂量不均匀度控制在 ±5% 以内；还可引入近红外光谱在线监测技术实时分析辐照过程中蛋白质二级结构、脂肪酸氧化程度变化并动态调整辐照参数，通过多因素响应面试验设计系统探究辐照剂量、时间、温度、湿度等参数交互作用以建立不同乳制品个性化工艺参数数据库为生产实践提供精准指导。

5.2 加强人员培训与管理

以全方位人员培训及管理体系为基础，从基础理论培训上讲，开发电离辐射物理、食品辐照化学、微生物抗性机制等多学科交叉的涵盖国际国内常见辐照事故案例，并运用案例教学方式解析理解，从而提高工作人员对操作风险的认知；从实际培训层面讲，在设备上引入 VR 设备对设备故障、

剂量异常等情况进行虚拟仿真模拟训练，并进行 SOP 三维可视化演示系统，使得操作过程可以清楚的被追溯到具体的步骤和每个员工。针对人员流动大、动态性强的特点，“导师制”的指导思想，“导师制”，并设定阶段性考核评价，包括理论知识考核、设备操作技能考核、应急处置能力考核等。一方面，在企业内部将辐射水平作为技术人员职称评定和绩效奖励指标；另一方面通过提供培训、认证资格学习的机会，邀请科研院所高级技术人员进行前沿技术讲座等方式鼓励操作人员自主学习新技术，为技术创新、人才培养良性循环提供动力源。

5.3 完善质量控制与监测体系

至于完善质量控制和检测体系，则要从原料到成品建立一个全程的管控体系，在辐照前要建立一个聚合酶链式反应 (PCR) 结合荧光定量的方法，这种办法可以在 2 小时以内完成沙门氏菌、李斯特菌这些致病菌的一个定量的检测，并且是根据被污染的程度来动态地调整辐照的剂量；并且会对一些包装材料进行通过加速的老化试验，把这种加速的老化试验的结果提供给我们来了解这种在高剂量下辐照会导致它的降解产物和迁移到我们的食品包装中的这样一种兼容性的一种评价。其次是在辐照过程之中，我们会采用化学剂量计矩阵加上电子个人剂量报警仪的这样一种方式，可以对每一个产品的受照的数据进行三维的采集和展示。之后我们再使用物联网的方式，把这些辐照设备的参数、环境温湿度、剂量率这样的数据全部都上载到云端的大数据系统之上，并通过机器学习的方式来进行异常数据的一个预警。对于检测成品来说，我们要开发一套基于高分辨质谱，可以一次性同时检测 200 多种不同的辐解产物的快速筛查的技术，并通过我们的一个微生物耐热性的预测模型结合我们之前的历史的辐照数据和我们原料的一些特性能够判断出我们的产品从出厂到保质期这个段时间之内的稳定性。同时也要创建一套通过区块链技术来进行原材料购买、原料辐照以及终端销售全产业链覆盖的信息跟踪追溯系统。

6 案例分析

6.1 成功案例分析

意大利某一著名乳制品企业的 Provolone 奶酪加工的过程中，突破了以往解决不了的过度辐照与辐照味的问题，用上了先进的辐照技术，根据 Provolone 奶酪自身的特性，将 γ 射线辐照剂量控制到了 3kGy, 并将辐照的时间、温度曲线进行了调节优化，在保证产品的杀菌的同时，充分地考虑到了产品的感官品质。为了保证辐照之前，将原料乳中的细菌数保持较低水平，生产前进行非常严格的原料乳的杀菌以及通过高速离心、微孔过滤等方法来大幅度地降低原料乳中微生物的起始量，以降低剂量要求；将 Vc、水溶性 VE、茶多酚、食盐水溶液按一定比例添加到牛乳中，或者是将含有 Vc、VE、茶多酚的喷雾剂涂抹或喷洒于成型奶酪的表面，使辐射条件下产生的氧自由基、过氧化物的量大大降低，防止出现辐照味；并且建设完善的质量检测体系，严格监控产品的微生物和感官评定并结合在线近红外光谱监测辐照进程，使得产品保质期达到 6 个月，远远低于国家规定的要求，而且没有出现任何辐照异味现象，产品的风味和口感得到了广大消费者的青睐，产品的销售也有了明显的提高。

6.2 失败案例反思

国内曾有一家中型乳制品厂在液态奶辐照保鲜过程里，因未充分研究产品特性与辐照参数间紧密关系且未全面考量，便盲目将电子束辐照剂量提升至远超适宜范围的 8kGy 以图延长产品保质期，却不料因辐照设备老旧致剂量均匀性差，使得产品营养成分大量损失，像维生素 B 族损失率超 70%，且蛋白质变性引发沉淀与分层现象，强烈“辐照臭”严重影响产品感官品质，而企业形同虚设的质量控制体系，辐照前未严格检测原料微生物污染情况，辐照后成品检测仅依赖简单微生物计数，未能及时察觉营养与风味问题，最终致使该批次大量产品滞销而被迫召回，令企业遭受巨大经济损失且品牌声誉严重受损、市场份额骤降，深刻凸显出对过度辐照风险防控不力给乳制品企业带来的致命影响。

7 结语

在乳制品辐照保鲜领域，对过度辐照风险的防控需从工艺优化、人员管理、质控升级、技术创新等多维度协同进行，相关研究成果为行业提供可落地施行的解决方案，未来应持续深化辐照技术机理研究工作，积极探索新型保鲜技术融合应用途径，推动乳制品辐照保鲜朝着精准化、安全化方向发展前行。

参考文献

[1] 张婷婷,刘伯业,陈复生,等.辐照保鲜技术对碱面条品质特性的影响[J].粮食与油脂,2023,36(04):40-44.

[2] 史镜琪.辐照保鲜技术在冷鲜肉中的应用[J].食品安全导刊,2018,(21):150-150.

[3] 徐丽婧,高丽朴,王清,等.辐照保鲜技术及其在双孢蘑菇保鲜中的应用[J].食品工业科技,2014,35(09):392-395.

[4] 赵喜亭,周颖媛,邵换娟.果蔬贮藏辐照保鲜技术研究进展[J].北方园艺,2013,(20):169-172.

[5] 付立新,孟丽芬,许德春,等.绿色食品辐照保鲜技术研究[J].吉林农业大学学报,2010,32(06):697-700.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6205

Research on the upgrading path of China's electric bicycle industry driven by new national standards

Zhixin Li

Tianjin Zhongke Technology Development Co., LTD, Tianjin, 300072, China

Abstract

The implementation of the new national standard marks a pivotal moment in the transformation of China's electric bicycle industry, driving the shift from scale expansion to quality and efficiency. This study, through the cross-analysis of industrial policies and market dynamics, explores the multifaceted impact of the new national standard on industry development. It analyzes the transformation logic of technical standards, market structure, and supply chain systems, and examines the internal mechanisms behind the industry's upgrade driven by the new standard. The study proposes an upgrade path centered on technological innovation, industrial collaboration, and internationalization of standards, providing theoretical references and strategic guidance for enhancing competitiveness in the process of compliant development, thus propelling China's electric bicycle industry towards a stage of high-quality development.

Keywords

electric bicycle; new national standard; industrial upgrading; technological innovation; standard system

新国标驱动下的中国电动自行车产业升级路径研究

李志鑫

天津众科科技发展有限公司，中国 · 天津 300072

摘　要

新国标实施作为中国电动自行车产业变革的关键节点，推动产业从规模扩张向质量效益转型。本研究凭借产业政策和市场动态的交叉分析开展，整体探讨新国标对产业发展呈现的多维作用，对技术标准、市场格局以及供应链体系的变革逻辑加以剖析，分析新国标带动产业升级背后的内在机制，研究推出以技术创新、产业协同、标准国际化为核心的升级路线，为产业在合规发展进程里实现竞争力上扬提供理论参照与策略督导，推动中国电动自行车产业迈向高质量发展阶段。

关键词

电动自行车；新国标；产业升级；技术创新；标准体系

1 引言

历经数十年的发展之路，中国电动自行车产业已构建全球规模居首的产业集群与消费市场。新国标《GB 17761-2024 电动自行车安全技术规范》即将实施，产业发展将进入全新阶段，从野蛮蔓延的增量时代走向规范治理的存量时代，新国标采用对车速、重量、电机功率等核心参数的严格界定，又对整车安全性能展开了全面升级，重塑了产业发展的底层逻辑体系，此变革造成企业合规转型出现挑战，还蕴藏着技术革新与产业重塑的契机。本研究欲构建起“政策驱动 - 技术响应 - 市场适配”的完整分析架构，为新国标背景下产业升级给出兼具理论深度与实践意义的解决办法。

2 新国标对电动自行车产业的影响机理

2.1 产业发展逻辑的根本性转变

新国标落地破除了产业既往的发展路径依赖，就技术维度而言，新国标对整车重量加以限定，逼迫企业让技术路线从“速度优先”过渡到“安全优先”，传统高功率电机、大容量铅酸电池应用遭限制，研发聚焦于轻量化、低能耗技术，从市场这个维度出发，新国标依靠 CCC 认证制度筑起市场准入的壁垒，让大量没有技术能力的中小企业被筛除，促使市场竞争由价格主导转变为品质主导。

新的技术规范不仅规定了 6 项单体电池的测试项目 [1]，产业价值链的重塑呈现为上游零部件供应商须适配新国标针对电池、电机、控制器的技术要求，中游整车厂商面临着产线改造及产品迭代方面的压力，下游销售渠道得完成库存清仓与合规产品的推广工作，这般全链条范畴的变革，实质上是产业发展逻辑从要素驱动向创新驱动转变，要求企业重新厘定产品价值体系，把安全性能、续航能力以及智能化水平纳入核心竞争力锻造。

【作者简介】李志鑫（1991–），男，中国黑龙江齐齐哈尔人，本科，从事两轮交通工具的研究、设计与开发。

2.2 技术标准体系的重构效应

新国标建立起覆盖整车性能、零部件安全与使用规范的健全标准体系，就整车这一层面而言，添加了防篡改、防火性能与淋水涉水等要求，就如防篡改设计要求电机、控制器等关键部件不易实施改装，基于技术杜绝“超速车”的诞生；防火性能测试规定，整车在特定情形下不得出现燃烧蔓延现象，提升使用方面的安全水平，就零部件这一层面，电池安全标准提升的显著程度极高，对电池的防过充、防短路作出要求，且具备针对热失控的保护机能，这对电池管理系统（BMS）实施技术升级提出明确要求。

重构标准体系催生了技术溢出效应，企业为顺应新国标要求，需投入研发资源冲破轻量化材料、高效电机、能量管理等关键技术的阻碍；统一性与强制性兼备的标准推动产业技术规范达成标准化，减少了过去因标准空白造成的市场混乱局面，为产业技术的整体进步筑牢根基，该技术标准造就的“倒逼机制”，成为产业升级的核心推进力。

2.3 市场格局与竞争态势的演变

在高质量发展的时代背景驱动及消费升级需求推动下，两轮电动车产品向高品质、智能化、个性化发展 [2]。新国标实施推动市场份额快速重新划分，按照产业调研所显示，行业的集中度急剧升高，凭借技术储备与规模效应，头部企业迅速拿下市场，因合规成本过高、研发能力欠佳，中小品牌面临着淘汰风险，市场竞争要点从单一的价格竞争切换为技术、品牌、服务的综合比拼，消费者对产品安全性及品牌信誉度的关注呈现明显提升态势，引导市场需求从“代步工具”升级至“品质出行装备”。新国标催生出细分市场发展的新机遇，针对城市短途出行需求的轻量化车型、面向老年群体的低速安全车型、拥有智能互联功效的高端车型等细分品类开始凸显，该市场分化要求企业再次明确目标客群定位，靠着差异化产品策略铸就竞争优势，引领产业由同质化竞争朝多元化发展转型。

3 产业升级的核心挑战与瓶颈

3.1 技术创新的结构性矛盾

新国标背景下，产业技术创新面临双重挑战，亟待突破轻量化与续航能力的技术矛盾，新国标对整车质量的限制与消费者长续航需求相矛盾，传统铅酸电池受限于低能量密度，难以契合要求，而应用锂电池又面临成本和安全性的双重挑战；智能化升级与技术标准协同程度欠佳，像智能锁、定位系统这类功能的添加或许会提升整车功耗，影响续航的实际效果，必须在功能创新和标准合规的范畴内找到平衡点。核心零部件技术上的瓶颈尤其凸显：高效电机效率密度的增进、电池管理系统的精确掌控、轻量化车架材料的采纳等关键技术，依旧依赖外部技术的输送，企业在自主创新上能力欠佳，产业受这种技术依赖影响，在升级阶段面临知识产权风险与成本控制压力，对产业竞争力的提升形成了制约。

3.2 产业协同体系的脆弱性

受新国标冲击，电动自行车产业协同体系显脆弱端倪，零部件供应商和整车企业的协作方式依旧停留在传统配套阶段，欠缺按照新国标要求的联合研发机制，导致零部件创新与整车设计彼此脱节，若电池供应商提前未布局轻量化锂电池技术，将直接阻碍整车企业产品迭代的步伐。产业集群所具备的协同效应未充分施展，中国电动自行车产业已汇聚天津、江苏、浙江等地形成产业集群，然而集群内企业更多体现为地理上的集聚，而非价值链的协同，没有统一的技术创新平台及标准共享机制，难以铸就应对新国标挑战的强大合力，该产业组织的分散化样式，使整体升级的难度与成本双双上升。

3.3 标准体系的国际化差距

国内企业开拓国际市场时遭遇国际化差距的影响，国内标准与国际标准存在不少差异。使出口成本增长且技术难度增大。标准国际化能力的不达标，抑制了中国电动自行车产业在全球价值链中的地位拔高，即便中国作为全球最大的电动自行车生产方，然而产品大多面向国内市场领域，在国际高端市场之内，品牌影响力及技术话语权微弱，急需以标准国际化为动力推动产业迈向全球价值链中高端。

4 新国标驱动下的产业升级路径

4.1 技术创新驱动的产品升级路径

如今，不管是四轮还是两轮，电动车似乎都成了消费者更加青睐的选择 [3]。核心技术突破策略瞄准轻量化、低能耗、智能化三大技术方向发力。就轻量化技术层面而言，推动铝合金、碳纤维等新材料在车架、轮毂等部件实现应用，依靠结构优化与材料置换降低整车的重量；就低能耗技术这一方面，开展对高效永磁同步电机及高密度锂电池的研发，助力能量转化效率上扬，同时对整车空气动力学设计做进一步优化，减小行车的阻力；就智能化技术层面而言，实现物联网芯片与智能传感器的集成，实现车辆状态的监测及远程管控等功能，与此同时开发能量回收体系，增强车辆续航水平。

搭建从基础研究、应用开发迈向产业化的技术创新链条。促进企业同科研机构合作交流，实施电机控制算法、电池热管理等基础研究活动，突破核心技术壁垒；助力企业搭建技术中心，促进研发成果快速开展工程化转化；依靠产业政策实施引导，助力全行业推广应用新兴技术，如给予采用新型轻量化材料企业研发补贴。实施产品平台化战略以推进产品平台化与模块化设计，依照新国标要求构建起通用技术平台，促成不同车型模块化组合，降低研发制造的成本支出，研发通用性的电池及电机模块，采用不同配置以满足多样化市场诉求，模块化设计可推动产品迭代速度提升，便于后续技术的持续升级，譬如为智能化功能预留扩充接口，贴合未来市场需求的变化。

4.2 产业协同与生态重构路径

如何推动电动自行车智联产业发展、加速行业智联化升级是促进电动自行车新国标落地的重要举措 [4]。以价值链协同创新机制构建整车企业与零部件供应商战略伙伴合作关系，打造按照新国标要求的联合研发平台，整车企业携手电池企业一同研发契合新国标标准的轻量化电池系统，从设计阶段伊始就实现技术协同，引导产业集群实现协同创新突破，由行业协会牵头组织，把高校、科研院所跟企业联合，共同设立产业技术创新同盟，实现研发资源彼此共享，共同克服共性技术难题。构建产业公共服务平台，一站式呈现新国标解读、技术咨询、检测认证等相关服务，调低中小企业的升级成本水平，平台能实现对行业内检测资源的整合，为企业给予便捷的新国标相符性测试服务，加快产品迭代的步伐。

实施供应链体系与管理的优化，组建依据新国标要求的供应商评估格局，把技术创新及质量保证能力纳入供应商挑选标准，引领供应链向数字化转型迈进，借助大数据分析预判新国标实施之后市场需求的变化，优化生产计划以及库存管理，增进供应链的反应效率，就关键零部件而言，创建多样化供应路径，缓解技术依赖的风险程度，如同步对锂电池和新型电池的技术路线予以布局，顺应未来技术革新潮流。

4.3 标准引领与国际化发展路径

在新国标基础之上开展标准体系完善引领工作，更进一步完善电动自行车相关标准体系，填充智能化、网联化等新兴领域标准所存在的空白，比如制定电动自行车智能系统技术的相关规范、数据安全标准之类，支持行业领军企业参与国际标准制订，让中国成熟技术方案转化为国际标准，提升中国在电动自行车范畴的标准掌控权。建立标准实时动态更新机制，跟随技术发展与市场需求的动态调整，及时对标准内容做修订完善，保障标准具备先进性与适用性，伴随锂电池技术步入成熟阶段，可在适当时机调整电池重量及能量密度相关指标，在安全条件下为技术创新释放空间。

方政等学者基于生产企业、质检机构、地方政府、主管部门等角度提出了相应层面的质量提升建议措施，从而为该产业的产品质量、流通监管、标准修订、技术提升等提供借鉴和参考 [5]。实施国际化发展战略，采用“标准 + 产品”的国际化输出形式，在开拓国际市场期间，并行带动中国标准与产品协同输出，就不同的目标市场而言，进行标准比对的探究工作，编排差异化的国际拓展策略：以欧美等高端市场为对象，于推动产品达到当地标准之际，踊跃加入当地标准的编制行列，成为全球标准体系一员；针对“一带一路”诸国，可以促进中国标准实现本地化运用，搭建区域标准合作构架。增强国际认证能力的打造，撑持企业获得国际认可的认证相关资质，诸如欧盟的 CE 认证和美国的 UL 认证等，消除国际贸易的藩篱，引导企业于境外设立研发中心及生产基地，实现技术、标准、产能在全球的合理布局，增进产业的国际竞争水平。

5 结论

新国标实施作为引领中国电动自行车产业变革的关键动力，正引领产业由规模扩大向高质量发展转型迈进，新国标背景里的产业升级不是单纯技术层面的调整，而是关乎技术、市场、标准及产业组织的系统性变革进程，只有利用核心技术的突破进展、产业协同创新探索、标准体系的优化完善多维度发力，才能够实现产业竞争力的实质上扬，伴随新国标实施的深化与技术创新的拓展，中国电动自行车产业有盼头在全球价值链中实现地位的提升，从“制造大国”步入“制造强国”阶段，为全球电动自行车产业发展提供中国方略与中国智慧。

参考文献

[1] 俞立严.电动自行车电池新国标发布护航两轮出行产业发展[N].上海证券报,2024-05-07(007).DOI:10.28719/n.cnki.nshzj.2024.002145.

[2] 罗克研.奔跑的电动自行车新国标下的两轮电动车市场观察[J].中国质量万里行,2022,(08):4-5.

[3] 宗禾.热度回升电动自行车驶入新赛道[J].大众投资指南,2022,(12):51-53.

[4] 灰原.智联化造就新物种，电动自行车产业迎来高质量发展新机遇[J].中国自行车,2021,(05):42-43.

[5] 方政,朱应陈,张栋兵.电动自行车产业现状及质量提升措施研究[J].中国自行车,2021,(05):58-61.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6206

Research on Technological Innovation and Application Practice of Intelligent Transportation Engineering

Dong Song

Heze Transportation Bureau, Heze, Shandong, 274000, China

Abstract

With the acceleration of urbanization and the sharp increase in the number of motor vehicles, problems such as traffic congestion and traffic safety have emerged one after another. Traditional traffic management cannot meet the needs of the traffic environment, and intelligent transportation engineering has emerged. This article focuses on intelligent transportation engineering, analyzing the innovative breakthroughs of key technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence, and exploring their application practices in areas such as traffic signal optimization, intelligent public transportation systems, and vehicle autonomous driving. Research has found that technological innovation significantly improves the efficiency and safety of traffic management. Through practical case verification, intelligent transportation systems can improve intersection traffic efficiency by more than 30%. This article provides theoretical and practical references for the further development of intelligent transportation engineering.

Keywords

Intelligent Transportation Engineering; technological innovation Application practice; traffic control; Internet of Things

智能交通工程的技术创新与应用实践研究

宋栋

菏泽市交通运输局，中国 · 山东 菏泽 274000

摘　要

随着城市化进程加快和机动车保有量激增，交通拥堵、交通安全等问题层出不穷，传统的交通管理无法满足交通环境，智能交通工程应运而生。本文聚焦智能交通工程，通过分析物联网、大数据、人工智能等关键技术的创新突破，探讨其在交通信号优化、智能公交系统、车辆自动驾驶等领域的应用实践。研究发现，技术创新显著提升了交通管理效率与安全性。经实际案例验证，智能交通系统可使路口通行效率提升30%以上。本文为智能交通工程的进一步发展提供理论参考与实践借鉴。

关键词

智能交通工程；技术创新；应用实践；交通管理；物联网

1 引言

截至 2024 年年底，全国机动车数量达 4.5 亿辆，城市拥堵比十年前提高 42%，交通肇事损失超过 2000 亿元人民币。传统交通靠交警指挥和交通信号控制，反应滞后、投入和产出不成比例。智能交通工程借助物联网、云计算、人工智能等技术，通过信息采集、智能分析、自动决策，实现智能化交通。最近几年，中国“新基建”发展将“智能交通”纳入其中，各地进行试点工作，但仍存在技术融合不足、应用场景单一等问题，还有待进一步研究完善。

2 智能交通工程关键技术创新

2.1 物联网技术的感知升级

物联网技术凭借其自身所具有的强大感知和连接能力，能够为智能交通工程的全范围感知提供可能，通过将各类传感器等设备安装于道路、桥梁、隧道、车辆等交通物体之上，从而构成全交通网络感知。毫米波雷达以及激光雷达是智能交通工程最重要的感知设备，实时获取车辆的车速信息、距离信息、路径信息，以厘米波雷达以及激光雷达为主，进行车辆感知；毫米波雷达具有抗干扰性强以及恶劣天气适应性强等优点，能够获取雨天、雾霾、沙尘等天气中汽车的位置信息；激光雷达通过激光束对周边环境的扫描来获取高精度三维点云图感知，能够完成车辆以及行人的感知 [1]。

视频识别摄像头 + 深度学习算法，进一步智能化交通信息的感知。基于卷积神经网络的图片识别技术，自动识别车辆信息号、车辆类型，甚至对车辆有无交通违章、闯红灯等交通乱象，进行自动识别。杭州“城市大脑”项目，引入 10 余万辆路智能摄像头，摄像头搭载的深度学习算法自动甄别交通乱象，甚至对交通事件秒级辨，一旦有交通事故、道路异常，系统自动预警提醒相关部门处置。此外，车联

【作者简介】宋栋（1988.01）男，汉族，籍贯山东省菏泽市，本科，助理工程师，研究方向：交通工程。

网（V2X）的诞生，打通了车与设施间的信息壁垒。车与车（V2V）、车与路（V2I）、车与人（V2P）、车与网（V2N）的实时信息交互，让交通信息的全息化成为可能。在实践应用方面，车辆在进入拥堵路况前，车联网可提前获取前方路况信息，提前为驾驶员选择行车路线提供依据；车辆在自动驾驶模式下与道路设施通信，获取交通信号灯信息、道路施工信息等，为车辆做出安全、合理的行驶决策。

2.2 大数据与云计算的决策赋能

交通领域产生的大数据具有数据量大、复杂多样、产生速度快的特点，如流量动态数据、公众出行需求数据、交通事故数据、公交交通数据，种类繁多，云计算具备的存储分布式、计算并行性等优点为交通大数据的处理提供了方便和快捷。深圳交通大数据系统日均处理量达到 1.2PB 左右，采用分布式文件存储方式将数据分布在多个节点上，通过 MapReduce 等并行计算工具快速对数据进行处理和计算。在数据的挖掘和分析方面，通过时空聚类算法对历史拥堵数据的时间、空间分析，发现交通拥堵高发时段以及高发路段，对交通流未来进行趋势预测，预测成功率达到 85% 以上。基于大数据的交通仿真模型，根据不同交通管理方案进行模拟得到道路交通流的变化情况，比如信号灯配时方案，输入不同配时参数方案进行模拟，通过仿真结果可以直观地看到方案对交通通行的影响情况，对交通管理进行科学参考。基于大数据分析可以优化公交线路的线路和发车间隔，根据出行需求调整公交线路和发车间隔，提高公交运行服务的效率[2]。

2.3 人工智能的深度应用

人工智能在智能交通中的应用，推动了交通管理和交通服务的创新。深度学习算法是人工智能中的一种重要技术，在图像识别、决策等方面已有了很大的进步。在以卷积神经网络 CNN 为图像识别技术的基础上，能够自动识别交通图像中的交通标志、交通信号灯、行人等。比如在自动驾驶系统中，通过图像识别识别车辆行驶前的交通标志、交通信号灯，使车辆能够按规则行驶。强化学习算法通过不断地交互学习交通环境，改善信号灯调控策略。信号定配时无法适应复杂的交通流量，强化学习信号灯控制系统可根据交通流量数据，对信号灯时进行长不断地调整，最大程度上提升路口通行率。百度 Apollo 自动驾驶平台通过多模态感知模型，融合视觉、雷达、超声波等多种感知传感器的数据，通过深学习算法对感知数据融合处理，实现对复杂路况的准确感知决策，使智能驾驶汽车能够适应城市道路以及高速公路的环境行驶。此外，自然语言应用在智能交通系统中也越来越广泛。智能服务系统中的智能客服系统通过自然语言技术接受用户的语音或书面咨询，为用户提供公交线路查询、路况实时查询等出行信息服务，同时在交通管理部门与公众进行沟通的过程中，采用自然语言技术分析公众对交通问题、交通建议的反馈意见，为交通管理部门提供参考依据。

3 智能交通工程的典型应用实践

3.1 智能交通信号优化系统

传统的固定配时信号机按照时序运行，对交通流的变化不敏感，经常出现一左一右拥堵的情况。智能交通信号优化系统运用物联网传感器与算法，建立动态响应模型，布设于路口的毫米波雷达、视频检测器等持续探测各相位车流的速度、排队长度等信息，依托历史交通流数据，运用强化学习算法，不断推算出最优的绿灯时长与相位优化方案[3]。上海虹桥商务区自适应信号“区域协同”+“干线绿波”信号协调方案，在区域协同信号协调方案下，将相邻多路口作为一个“整体”，根据每个路口车辆数自适应调整各个路口的绿灯时长，避免区域性调整、拥堵转移；在干线绿波信号协调方案下，根据车辆速度计算车辆通行绿灯启动顺序，实现车辆行驶通行绿灯时长最短，车辆在最优行驶的速度下通过绿灯，同时自适应信号在感应到急救车和消防车信号装置后自动启动绿灯为应急车辆提供绿灯，实现快速通过，绿色通行。

3.2 智能公交与轨道交通协同

智能公交通过 GPS 定位、车联网、大数据分析，车辆监管、车辆调度控制全程智能化。通过车载终端实时上传运行车辆的位置、速度、人数，调度中心通过 AI 模型测算出不同时段、不同线路的客流需求量，实时调控车辆发车次数、车辆投放量，上下班高峰期多投放，平峰期少放空驶汽车，便利了乘客出行、节约了运营成本。轨道交通与地面公交相结合，提升公交优势。轨道交通、地铁公交的信息平台，客流、运营时间、站点等信息共享。地铁公交出行，乘客通过 App 获取地铁公交换乘信息、自动计算换乘路线、换乘等待时间。深圳轨道交通客流换乘采取“一票制”，地铁公交换乘采取计价 + 计价相结合，大数据计算居民出行路线起点、终点进行公交线路换乘。轨道交通和地面公交相结合，使得公交出行不受信息孤岛限制，更加倾向公交出行，公共交通的“轨道交通 +”、“地面公交 +”交通，提升公共交通吸引力，增加城市公共交通覆盖面。

3.3 自动驾驶与智能网联汽车

自动驾驶汽车从实验室走向商业化应用，在某些方面具备很大的优势，例如城市道路的 L4 级的自动驾驶出行打车，通过激光雷达、摄像头等多传感融合的感知，高精度地图、路况实时数据，可以实现自动的路径规划、跟驰、弯道等驾驶行为，决策系统有大量的场景数据，对突发情况的应对，例如行人横穿、非机动抢夺等紧急情况决策系统具有决策快、稳定性强的优势。智能网联汽车通过 V2X 技术与周边道路基础设施、车辆等进行通信，拓宽了自动驾驶的应用场景。在高速公路上，智能网联汽车可实现车队行驶，智能网联汽车之间通过通信控制车速、间距等参数，降低汽车阻力，提高行驶效率；在交叉口，智能网联汽车通过与信号灯、

路边单元等通信，获取前方相位的交通信息，提前规划行驶方案，避免在视线不良区域发生交通事故。自动驾驶物流车在港口、产业园区等区域的运用基于全天候、准确、高效停放车辆的优势提升运输效率，降低劳动成本和安全成本，为未来自动驾驶应用及未来交通打下了基础。

4 智能交通工程发展面临的挑战与对策

4.1 技术融合与标准统一难题

智能交通工程需要各个技术配合，但是目前各个企业推出的智能交通设备之间，存在着技术壁垒，比如毫米波雷达的信号采集频率，激光雷达的雷达数据点云格式，智能交通设备通讯协议等，由于各智能交通设备之间没有形成统一标准，导致数据间无法直接交互，目前很多城市存在的智能交通设备接口不统一，导致数据无法直接的进行跨系统集成、分析，边缘计算、云服务等无法协调使用，导致数据无法进行有效的处理，即边缘设备无法将需要的数据及时的传输给云服务器进行处理，云平台无法将需要处理的命令及时的发送给前端设备处理。要从国家层面，对这些智能交通设备进行顶层设计，形成硬件接口、数据、通讯协议等技术标准，鼓励各个行业之间对智能交通设备的开放技术平台进行合作，进行无缝对接。同时，优化边缘计算与云计算的协同架构，通过智能缓存策略、分阶段处理等方式降低传输时延，提高系统响应速度。

4.2 数据安全与隐私保护风险

智能交通运行过程中收集到海量的交通大数据，交通大数据有可能涉及个人出行轨迹、个人生理特征等信息，一旦泄露或者被利用就会暴露大量隐私信息，威胁社会和公众安全。交通大数据平台被黑客攻击，窃取出行数据，包括出行路线、家庭地址等，进行定向精准诈骗；不法分子的利用交通大数据谋私利、窥探用户隐私等；交通大数据收集、传输、存储、分析过程中的诸多隐患风险，包括传输的链路加密不完善、数据库的权限管理不到位等。通过端到端加密、同态机证、零知识证明等技术实现数据的安全加密；采用联邦学习等分布式计算技术实现数据的“不分离”、在保护隐私的前提下实现交通大数据跨机构联动分析。尽快建立健全数据安全法律规范，明确数据收集、使用、共享、共享边界和违法责任追究，为智能交通大数据安全提供法律保障。

4.3 公众接受度与伦理争议

自动驾驶、智能决策算法等技术的应用引发了公众对安全性、责任归属及伦理问题的广泛担忧。例如，在自动驾驶汽车“电车难题”（即撞到人行道与撞到障碍物需要选一个）中，算法决策逻辑难以被大众理解；事故发生之后无法判定是车辆制造方、软件提供方还是公路交警的责任，对于车辆及人工智能技术的信任缺失。以及，算法的“黑箱”性无法解释系统是如何决策的，大众不懂得系统是如何决策的。由此，对于智能驾驶的抵触需要通过大众教育，一方面对智能交通技术进行宣传，通过实验、事故案例对智能驾驶的技术可靠性进行宣传，另一方面，对智能驾驶中的算法、数据处理标准等做好伦理审查，并设定事故责任追责的标准。同时让公众参与进技术准则和政策制定中，提升公众对智能交通发展的认同。

5 结语

智能交通工程技术在交通治理领域的应用以及科技研发，对于解决交通问题、促进交通的安全，具有一定积极意义。当前物联网、大数据、人工智能等技术在交通治理中的发展，推动了交通治理向被动式向主动式方向转变，但是技术标准、信息以及交通治理意识等存在一定的局限性，今后需要进一步加强科技标准建设，强化信息安全防护，加强道德伦理约束。随着 5G-A、孪生科技等发展，智能交通将向泛在感知、虚 - 实融合方向前进，推动形成绿色、畅通、安全的新型交通秩序。

参考文献

[1] 缪明励,张文海,王书培.智能交通工程中的数据采集与分析技术研究[J].中国储运,2025,(03):170-171.

[2] 朱威国.智能交通工程隧道照明自动化控制技术的优化与应用[J].汽车画刊,2025,(02):107-109.

[3] 徐杰,吴茂雪.5G通信网络在智能交通工程中的应用[J].电子技术,2025,54(01):190-191.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6207

Research on the Application of Big Data Analysis in Improving the Intelligent Level of Communication Integrated Maintenance

Quan Dang

Yuandao Communication Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

With the rapid development of communication technology, communication networks are gradually transforming from traditional physical infrastructure to highly intelligent and automated systems. Especially in the field of communication comprehensive maintenance, how to improve operation and maintenance efficiency and reduce costs through intelligent means has become an urgent problem to be solved. Big data analysis, as an important technological means, provides new opportunities for improving the intelligence level of communication comprehensive maintenance. This article mainly studies the application of big data analysis in communication comprehensive maintenance, exploring its role in fault prediction, operation and maintenance optimization, intelligent scheduling, and other aspects. Through in-depth analysis of big data analysis technology and practical case studies, this article proposes key technologies, methods, and challenges for applying big data analysis in communication maintenance, and provides corresponding solutions. Finally, the future development trend of big data analysis in the field of communication and maintenance was discussed.

Keywords

big data analysis, communication comprehensive maintenance, intelligence level, fault prediction, operation and maintenance optimization, intelligent scheduling

大数据分析在提升通信综合代维智能化水平中的应用研究

党权

元道通信股份有限公司，中国 · 河北 石家庄 050000

摘　要

随着通信技术的飞速发展，通信网络逐渐从传统的物理基础设施向高度智能化、自动化的系统转型。尤其在通信综合代维领域，如何通过智能化手段提高运维效率，降低成本，成为了亟待解决的问题。大数据分析作为一种重要的技术手段，为提升通信综合代维的智能化水平提供了新的机遇。本文主要研究了大数据分析在通信综合代维中的应用，探索其在故障预测、运维优化、智能调度等方面的作用。通过对大数据分析技术的深度剖析，结合实际案例分析，本文提出了在通信代维中应用大数据分析的关键技术、方法及其面临的挑战，并给出了相应的解决方案。最后，展望了大数据分析在通信代维领域的未来发展趋势。

关键词

大数据分析；通信综合代维；智能化水平；故障预测；运维优化；智能调度

1 引言

在信息化社会的背景下，通信网络作为基础设施的作用愈加重要，尤其是随着 5G 技术的推广，通信网络的规模和复杂度不断增加。传统的通信代维模式，虽然可以保证网络的基本运行，但面临着高成本、低效率、人工干预多等问题。因此，如何通过智能化手段提高通信综合代维的效率，成为通信行业亟待解决的难题。

【作者简介】党权（1988–），男，中国河南新安人，硕士，工程师，从事通信工程研究。

近年来，大数据分析技术的飞速发展为通信网络的运维管理提供了全新的视角。通过采集和分析海量数据，运维人员可以更精准地预测网络故障、优化资源调度、提升工作效率，进而降低运维成本，提高网络的可靠性。大数据分析技术不仅能够提供实时数据支持，还能通过深度学习、机器学习等技术进行趋势分析，提前预警潜在风险，帮助运维人员在第一时间作出反应。

本研究的核心目标是探索如何通过大数据分析提升通信综合代维的智能化水平。具体而言，本文将从大数据分析在故障预测、运维优化和智能调度等方面的应用入手，探讨大数据如何为通信代维注入智能化力量，并提出相应的技术

和方法支持，帮助实现通信网络运维的精准、高效和低成本。

2 大数据分析在通信代维中的基础应用

2.1 数据采集与存储

大数据分析的第一步是数据的采集与存储。在通信代维过程中，数据来源广泛，包括设备运行状态、网络流量、环境监测数据、历史故障记录等。如何高效地获取、存储和管理这些数据，是大数据分析应用的基础。通信企业通常依赖于各种传感器、监控系统和日志记录工具来获取实时数据，并将数据上传至云端存储系统。这些数据通过分布式数据库进行存储，确保数据的安全性、完整性和高效读取能力。

数据采集模块需要实时监测通信设备的各项指标，并根据设备的状态生成相应的报警数据。数据存储模块则要求具备较大的存储容量，能够支持高速写入和读取操作，保证在高并发情况下的稳定性。为确保数据的准确性和一致性，数据传输过程中还需要进行数据清洗与预处理，以去除噪声数据和冗余信息。

2.2 故障预测与预警

大数据分析在通信代维中的重要应用之一是故障预测与预警。通过对海量历史数据的深度分析，可以挖掘出设备故障的潜在规律，为提前预警提供科学依据。机器学习算法，特别是监督学习和无监督学习算法，能够在大量历史数据中寻找异常模式，进而预测设备故障的发生。

以通信基站为例，通过采集基站的温度、湿度、设备负荷等传感器数据，结合历史故障记录，机器学习模型可以预测出基站的故障风险。例如，通过决策树、支持向量机（SVM）、随机森林等算法，能够识别出与设备故障密切相关的因素，从而提前做出警示。故障预测不仅能够提高维修的响应速度，还能帮助维护人员提前进行预防性维护，降低设备停机时间和故障修复成本。

2.3 运维优化

大数据分析技术在通信代维中的另一个重要应用是运维优化。传统的运维管理方式主要依赖于人工经验和定期检查，效率较低，且容易出现延迟。而大数据分析则能够通过对网络设备、人员调度、作业时间等多维度数据的综合分析，提供实时的运维决策支持。

通过对通信设备的负载情况、网络流量等数据进行分析，系统可以自动识别出资源的瓶颈和运维的薄弱环节，进而提出优化建议。例如，基于大数据分析，可以动态调整基站的配置，平衡网络负载，减少资源浪费。同时，通过分析运维人员的作业时间、维修频率等数据，系统可以优化调度方案，减少人工干预，提高运维效率。

3 大数据分析在智能调度中的应用

3.1 智能调度决策支持

智能调度是通信代维中最为关键的环节之一。通过智能调度，能够优化资源配置，提高网络恢复速度。大数据分析为智能调度提供了强大的决策支持。通过对运维人员的能力、地理位置、任务优先级等信息进行综合分析，调度系统能够实现自动化调度，最大程度地提高运维效率。

例如，当某个通信基站发生故障时，调度系统通过实时分析故障的严重程度、维修人员的可用性、设备的修复时间等因素，自动选择最佳维修人员进行派遣。大数据分析还能够帮助系统评估多个维修方案的效果，并在多个调度方案之间做出最优选择。

3.2 动态调整与实时响应

大数据分析在智能调度中的另一个应用是动态调整与实时响应。通信网络的状态是动态变化的，故障发生的地点、时间和严重性都可能随时变化。因此，调度系统需要根据实时数据不断调整调度策略。

通过实时采集设备数据和环境数据，调度系统能够动态分析当前的网络状况，预测可能发生的故障并及时响应。例如，当某个区域的设备出现高负荷运行时，系统能够根据历史数据和设备的维护记录，及时调整维修计划，避免故障的发生，确保网络的稳定运行。

4 大数据分析在提升智能化水平中的挑战与对策

4.1 数据质量与数据融合问题

大数据分析的效果高度依赖于数据的质量，尤其在通信综合代维的复杂环境下，如何确保数据的准确性、完整性和一致性，成为了提升智能化水平的关键问题。通信网络涉及大量的设备与系统，包括基站、交换机、路由器、传输设备等，每种设备产生的数据类型、采集方式及格式都不尽相同。不同厂商的设备、不同网络环境下的数据处理标准差异，往往导致数据的不可比性和融合难度。例如，传感器监测的数据可能采用不同的采样频率或数据编码，某些设备可能存在采集异常或缺失数据，这对后续的数据分析和故障预测带来挑战。

针对这一问题，可以通过标准化的数据采集与存储流程来确保不同设备的数据能够进行有效整合。具体来说，首先要制定统一的数据采集标准，确保不同类型的设备在数据采集时遵循一致的规范，采用统一的时间戳和数据格式。这有助于减少数据融合过程中的兼容性问题。其次，可以通过分层次的数据预处理技术，对采集到的原始数据进行清洗和修正，剔除无效数据、错误数据和冗余数据，从而提高数据质量，保证分析结果的准确性。此外，可以结合数据融合技术，将来自不同来源的数据进行综合分析，解决数据之间的矛盾和不一致性，实现高效的数据整合，为后续的智能调度和故障预测提供可靠的数据支持。

4.2 算法与模型的适应性问题

在大数据分析中，所使用的算法和模型通常需要在大量历史数据上进行训练和优化。然而，通信网络的环境是动

态变化的，网络拓扑结构、设备性能、流量模式等因素会随时发生变化，导致网络状态的波动。传统的故障预测和智能调度算法往往基于过往的数据进行训练，因此可能无法适应新出现的网络状态和设备类型。例如，某些突发的网络异常事件（如设备故障、流量激增等）可能没有在历史数据中出现过，这使得现有模型在面对新问题时可能表现不佳。此外，随着网络架构的不断演变和新技术的引入，如 5G、物联网等技术的不断扩展，传统的模型可能无法适应新的需求，导致性能下降。

为了解决这一问题，可以采用自适应学习算法，使得模型能够根据新的数据不断调整和优化。自适应算法可以动态学习和调整网络状态的变化，从而在面对新的环境时，能够快速适应并提供精准的预测和决策。例如，通过引入在线学习算法，模型可以在实际运维过程中实时更新，不断完善自身的预测能力和调度效果。另外，迁移学习技术为应对这一挑战提供了有效的解决方案。迁移学习通过将不同网络环境中的经验和知识迁移到新的场景中，能够帮助模型在新的网络环境中快速获得较高的性能，减少对大量历史数据的依赖，并提升模型的泛化能力。通过引入这些技术，可以有效增强算法和模型的适应性，使其能够在快速变化的通信环境中提供持续有效的支持。

5 未来展望

大数据分析在通信综合代维中的应用潜力巨大，随着技术的不断进步，智能化水平将进一步提升。未来，随着 5G、物联网、人工智能等新兴技术的快速发展，通信网络的规模和复杂度将继续增加，数据量也会呈现爆发式增长。大数据分析将在处理海量数据、识别网络潜在问题、优化资源配置和提高运维效率等方面发挥越来越重要的作用，成为通信代维的核心技术之一。

具体来看，5G 网络的到来为通信代维带来了更大的挑战与机遇。5G 网络具备更高的带宽、更低的延迟和更多的连接设备，这使得通信网络的运维工作面临更大的复杂性和实时性要求。大数据分析能够帮助运营商实时监控网络状态，及时发现并解决潜在问题，确保网络在高负载、高并发情况下依然稳定运行。同时，物联网技术的广泛应用也将为通信代维带来更多的数据源，促进智能化运维的进一步发展。

未来，大数据分析不仅能帮助优化故障预测、运维管理和智能调度等方面的应用，还将在网络规划、网络优化、用户体验提升等领域发挥更大作用。通过大数据分析，通信运营商可以实现更加精确的网络规划，提前预判网络的需求和潜在风险，合理配置网络资源。数据融合技术、云计算技术和边缘计算技术的快速发展，也将使得通信代维的智能化水平迈上一个新的台阶，进一步提升系统的响应速度和决策效率。此外，人工智能与大数据的深度结合，将为通信代维提供更高效的智能决策和优化能力，实现从“被动修复”到“主动预防”的转变。

在未来，大数据分析的不断深化与融合必将为通信代维带来更加智能、高效的运维方案，推动通信行业的智能化进程。随着技术的持续创新与发展，通信代维的智能化水平将不断提高，未来的通信网络运维将更加精准、便捷且低成本。

6 结语

大数据分析技术为提升通信综合代维智能化水平提供了重要的技术支持，成为通信行业向智能化迈进的关键推动力。通过对通信设备、网络流量、运维数据的深度分析，能够实现故障预测、资源优化、智能调度等多项功能，显著提高网络运维效率和精准度。在实际应用中，大数据分析不仅可以优化传统运维模式，还能够实现更加灵活、智能的调度和决策。智能调度和精准预测的实现，将大幅度降低通信故障的发生频率，减少停机时间，提高网络的可靠性和稳定性。

尽管在数据质量、算法适应性等方面仍面临一定的挑战，如何保证数据的准确性和可靠性，以及如何提高算法模型的自适应能力仍然是需要进一步解决的问题，但随着技术的不断进步，这些问题将得到有效解决。人工智能、机器学习等先进技术的引入，将进一步提升大数据分析的准确性和实时性。未来，随着 5G、物联网、云计算和边缘计算等技术的发展，通信代维的智能化水平将不断提高，数据驱动的运维模式将成为主流。

大数据分析将为通信代维提供更加智能化的运维决策支持，帮助运营商在提升网络性能、降低运维成本的同时，提升用户体验和网络安全性。综上所述，大数据分析将在未来通信代维领域发挥越来越重要的作用，为通信网络的稳定运行和高效管理提供更加有力的技术保障。

参考文献

[1] 沈凌菡.大数据与通信技术融合的应用研究[J].中国宽带,2024,20(10):16-18.

[2] 袁若兰.大数据分析技术下无线通信网络信号异常诊断研究[J].中国宽带,2024,20(10):55-57.

[3] 刘丽峰.基于大数据的网络信息挖掘与用户行为分析[J].信息记录材料,2024,25(08):162-164.DOI:10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2024.08.077.

[4] 范的玮.基于大数据的物流网络信息安全管理方法研究[J].网络安全技术与应用,2024,(07):78-80.

 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v2i2.6208

Design of Dynamic Characteristic Test System for Temperature Sensor Based on LabVIEW

Chao Cheng Jingzhao Zhang

Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion Equipment, Wuhan, Hubei, 430064, China

Abstract

This paper mainly studies the design of a dynamic characteristic testing system for temperature sensors based on LabVIEW. Through in-depth analysis of the requirements for dynamic characteristic testing of temperature sensors and based on the advantages of the LabVIEW graphical programming platform, a set of dynamic characteristic testing system for temperature sensors was designed. The system mainly includes key links such as hardware selection and construction, and software functional module design. It can realize functions such as drawing the dynamic response curve of the temperature sensor, calculating the time constant, and measuring the rise time, providing an efficient and reliable solution for the dynamic performance evaluation of the temperature sensor. This system has been experimentally verified. It features high testing accuracy and strong stability, and can be widely applied in the research of dynamic characteristics of various temperature sensors, providing strong support for the technological development in related fields.

Keywords

LabVIEW; Humidity sensor; Dynamic characteristics; test system

基于 LabVIEW 的温度传感器动态特性测试系统设计

程超 张镜照

武汉船用电力推进装置研究所，中国 · 湖北 武汉 430064

摘 要

本文主要研究基于LabVIEW的温度传感器动态特性测试系统设计。通过对温度传感器动态特性测试的需求进行深入的分析，根据LabVIEW图形化编程平台的优势，设计了一套温度传感器的动态特性测试系统。系统主要包括硬件选型与搭建，软件功能模块设计等关键环节，能够实现温度传感器动态响应曲线绘制，时间常数计算，上升时间测定等功能，对温度传感器动态性能评估提供了高效，可靠的解决方案。该系统经实验验证，测试精度高、稳定性强，可广泛应用于各类温度传感器的动态特性研究，为相关领域的技术发展提供有力支持。

关键词

LabVIEW；湿度传感器；动态特性；测试系统

1 引言

温度传感器是将温度物理量转换为可测量电信号的器件，在工业控制，环境监测，航空航天等众多领域都有广泛的应用。随着科技的不断发展，人们对温度传感器的性能提出了更高的要求，特别是动态特性，直接影响到测量的准确性和实时性。动态特性指温度传感器对输入量随时间变化的响应特性，包含时间常数，上升时间，超调量等参数，它反映了传感器对温度变化的响应速度和稳定性。因此，设计一套准确，高效的温度传感器动态特性测试系统具有重要的现实意义 [1]。

【作者简介】程超（1985–），男，中国湖北通山人，硕士，高级工程师，从事电气控制研究。

【第二作者】张镜照（1979–），男，中国福建龙岩人，本科，高级工程师，从事电气工程、自动化领域的工程应用研究。

2 系统需求分析

2.1 功能需求

温度传感器动态特性测试系统要实现以下主要功能：第一，实时采集温度传感器输出信号，适应不同类型的温度传感器，如热电偶，热电阻等，其输出信号的形式有电压，电流等。其次对采集的信号进行处理，绘制温度传感器动态响应曲线，直观反映传感器在温度变化过程中的输出变化情况。第二，对温度传感器的动态特性参数，为传感器的性能评估提供量化指标。此外，系统也应具备数据存储与回放功能，方便用户对测试数据进行后续分析和处理 [3]。

2.2 性能需求

在性能方面，系统应有较高的采样精度和采样频率。采样精度要能满足不同精度等级温度传感器的测试需求，保

证采集的数据准确可靠。采样频率是根据温度传感器的动态响应速度，要合理配置采样频率，能够全面捕捉传感器的动态响应过程。同时，系统也需要稳定可靠，能够在长时间的运行中稳定工作，避免在测试过程中由于硬件故障或软件的错误导致测试结果不准确 [4]。

2.3 操作需求

系统操作界面简洁、直观，便于用户进行参数设置、启动测试、查看结果等操作。对于不熟悉编程的用户也能够迅速上手。另外，系统也要具有一定的提示和帮助功能，用户在操作过程中出现问题时能够提供及时的指导和解决方案。

3 系统总体设计

3.1 系统架构设计

基于 LabVIEW 的温度传感器动态特性测试系统采用模块化设计思想，主要由硬件部分和软件部分组成。硬件部分对温度信号进行采集和转换，将温度传感器输出的物理信号转换为计算机可以处理的电信号；软件部分建立在 LabVIEW 平台之上，实现数据采集控制，信号处理，界面显示，数据存储等功能。硬件和软件之间用数据采集卡进行数据传输，组成一个完整的测试系统 [5]。

3.2 硬件选型与设计

硬件部分主要由温度传感器、数据采集卡、信号调理电路、温度源等组成。

在温度传感器的选型方面，考虑到不同类型温度传感器的性质与适用范围，选用常用的热电偶，如 K 型热电偶、热电阻、Pt100 作为测试对象。数据采集卡选择 NI 公司的 PCI-6251 数据采集卡，具有 16 位分辨率，最高采样率 1.25 MS/s，能满足系统对采样精度和采样频率的要求。信号调理电路用于对温度传感器输出的信号进行放大、滤波等处理，提高信号质量。热电偶输出的微弱电压信号由专用热电偶信号调理模块进行放大和冷端补偿；热电阻输出的电阻信号通过电桥电路将其转换成电压信号，并进行适当的放大和滤波。温度源选用高精度的可编程恒温箱，能够精确控制温度，快速升降温，为温度传感器提供稳定的测试环境。

3.3 软件功能模块设计

软件部分基于 LabVIEW 平台，采用模块化设计方法，主要包括数据采集模块，信号处理模块，界面显示模块，数据存储模块等。数据采集模块控制数据采集卡进行信号采集，设置采样频率，采样通道等参数，实时采集温度传感器输出信号。信号处理模块对采集到的信号进行滤波、平滑处理，去除噪声干扰，然后根据动态特性参数的计算方法，计算时间常数、上升时间、超调量等参数，并绘制动态响应曲线。界面显示模块采用 LabVIEW 的图形化界面设计工具，设计简洁直观的操作界面，显示温度传感器的动态响应曲线、动态特性参数等信息，方便用户查看和操作。数据存储模块将采集到的数据和计算得到的结果以文件形式存储在计算机中，支持常见的数据格式，如 Excel、TXT 等，以便用户进行后续分析和处理。

4 硬件系统设计与实现

4.1 温度传感器选型与工作原理

4.1.1 热电偶

K 型热电偶是一种常用的温度传感器，由镍铬 - 镍硅两种合金组成。其工作原理基于塞贝克效应，当热电偶的两端温度不同时，回路中会产生热电势，该热电势与两端温度差成正比。通过测量热电势的大小，即可计算出温度值。K 型热电偶具有测量范围广（-200℃ -1300℃）、灵敏度高、稳定性好等优点，适用于多种工业场合的温度测量。

4.1.2 热电阻

Pt100 热电阻是利用金属铂的电阻值随温度变化的特性来测量温度的。在 0℃时，其电阻值为 100Ω，随着温度的升高，电阻值呈近似线性变化。根据 Pt100 热电阻的电阻值，结合其电阻 - 温度特性曲线，就可以计算出对应的温度值。Pt100 热电阻具有精度高、稳定性好、复现性强等优点，多用于对温度测量精度要求较高的场合。

4.2 数据采集卡选型与接口设计

数据采集卡是硬件和软件的桥梁，它负责将温度传感器输出的模拟信号转换为数字信号，并将数字信号送入计算机中进行处理。PCI-6251 数据采集卡是 NI 公司的，它具有丰富的功能及良好的性能，能满足系统需要。该采集卡通过 PCI 总线与计算机主板连接，提供 16 个模拟输入通道，2 个模拟输出通道，24 个数字 I/O 线和 3 个计数器 / 定时器。在接口设计方面，温度传感器输出信号经信号调理电路处理后，接入数据采集卡模拟输入通道，进行信号的采集转换。

4.3 信号调理电路设计

对于 K 型热电偶输出的微弱电压信号（一般在毫伏级），首先通过专用的热电偶信号调理模块进行放大，在该模块中设置了冷端补偿电路，该补偿电路能自动补偿环境温度变化对热电势测量的影响。信号放大后又经过低通滤波电路，滤除高频噪声干扰，提高信号质量。对于 Pt100 热电阻输出的电阻信号，通过惠斯通电桥电路将它转化为电压信号。电桥电路的输出电压与热电阻阻值的变化成正比，将微弱的电压信号经放大电路放大到合适的范围，再通过低通滤波电路，进行滤波后，得到干净的模拟信号，供数据采集卡采集。

4.4 温度源设计

温度源采用高精度的可编程恒温箱，恒温箱可实现温度的精确控制，控制精度可达 ±0.1℃。通过计算机串口或网络接口与恒温箱进行通信，发送温度控制指令，实现温度的设定、升温、降温等操作。恒温箱内部强制对流加热制冷，温差快速，均匀，能够为温度传感器提供稳定的测试环境。

5 软件系统设计与实现

5.1 LabVIEW 平台简介

LabVIEW 基于图形化编程的虚拟仪器开发平台，使用

图形化的编程语言 G（Graphics）语言，通过连线图的方式来编写程序，具有直观，易懂的特点。它具有丰富的函数库和工具包，包含数据采集，信号处理，仪器控制，界面设计等多方面。利用 LabVIEW 开发测试系统，可以大大缩短开发周期，提高开发效率。

5.2 数据采集模块设计

在 LabVIEW 中使用 DAQmx 函数库实现数据采集，首先，创建 DAQmx 任务，设置采样通道，采样频率，采样模式等。通过 DAQmx 读取函数对数据采集卡采集到的温度传感器的输出信号进行实时读取，数据存入数组，以便后续处理。添加错误处理机制，以保证数据采集的稳定性及可靠性，当数据采集过程中出现错误时，能及时提示用户并进行相应处理。

5.3 信号处理模块设计

信号处理模块主要由信号滤波和动态特性参数计算两部分组成。在信号滤波方面，采用 LabVIEW 提供的数字滤波器函数，如巴特沃斯低通滤波器，对采集到的信号进行滤波，去除噪声干扰。在动态特性参数计算方面，根据时间常数、上升时间、超调量等参数的定义和计算方法，编写相应的程序代码。譬如时间常数可以根据拟合曲线的参数对动态响应曲线进行指数拟合得到，上升时间可以通过检测响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间来确定。最后，通过 LabVIEW 的图形绘制函数，绘制温度传感器动态响应曲线，并在曲线上标注关键参数。

5.4 界面显示模块设计

界面显示模块使用 LabVIEW 的图形化界面设计工具设计，主界面设计，包括选择温度传感器类型，设定测试参数，包括采样频率，温度变化范围等，选择启动 / 停止按钮，动态响应曲线显示窗口，动态特性参数显示区域等。通过合理布局和美化界面，使得操作界面简洁直观，方便用户操作和查看测试结果。同时，添加提示信息和帮助文档链接，在用户鼠标悬停在相关控件上时，显示相应的提示信息，帮助用户更好地使用系统。

5.5 数据存储模块设计

数据存储模块利用 LabVIEW 的文件 I/O 函数实现数据的存储。计算机将采集到的原始数据和计算得到的动态特性参数以文件的形式存入计算机。支持多种数据存储格式，如 Excel，TXT 等。用户在界面上可以设置存储路径和文件名，方便数据的管理和查询。在数据存储时，加入时间戳信息，便于后期对数据进行分析对比。

6 系统调试与测试

6.1 硬件调试和软件调试

硬件调试主要是检查硬件连接是否正确、信号调理电路是否工作正常、数据采集卡是否能正常采集信号等。通过 LabVIEW 的数据采集测试程序，测试数据采集卡是否能够正常采集信号，检查采集到的数据是否准确、稳定。

软件调试采用分段调试的方法，分别对数据采集模块、信号处理模块、界面显示模块、数据存储模块等进行调试。在数据采集模块调试过程中，将数据正确存储。在信号处理模块调试过程中，通过输入模拟信号，检查信号滤波和动态特性参数计算功能是否正确。在界面显示模块调试过程中，检查界面布局是否合理，各控件是否能够正常响应用户操作。在数据存储模块调试过程中，检查数据是否能够正确存储为指定格式的文件，文件内容是否完整、准确。

6.2 系统联调与测试

在硬件调试和软件调试完成后，进行系统联调与测试。将温度传感器安装在恒温箱中，设置合适的测试参数，启动测试系统。观察系统是否能够正常采集温度传感器输出信号，是否能够正确绘制动态响应曲线，计算得到的动态特性参数是否合理。通过改变温度源的温度变化范围和速率，多次进行测试，验证系统的稳定性和可靠性。同时，与标准测试设备进行对比测试，评估系统的测试精度。

7 结论

本文基于 LabVIEW 平台，设计并实现了一套温度传感器动态特性测试系统。通过对系统需求的分析，完成了系统的总体设计，包括硬件选型与搭建，软件功能模块设计等。硬件部分采用合适的温度传感器、数据采集卡、信号调理电路、温度源，软件部分采用 LabVIEW 的图形化编程优势，完成数据采集、信号处理、界面显示、数据存储等功能。通过系统的调试与测试，该系统能够准确高效地完成温度传感器动态特性测试，为温度传感器的性能评估提供了可靠的手段。在未来，系统功能可以通过增加温度传感器种类，系统自动化程度进行进一步的优化，也可以针对系统采样精度及采样频率进行进一步的性能提升，以适应更高要求的温度传感器动态特性测试。

参考文献

[1] 苏蕊,葛益娴,林永杰.基于优化PSO-BP的温度补偿型空芯光纤法珀应变传感器[J].物理学报,1-20.

[2] 厉嘉程,王俊鹏,彭春荣,罗嘉豪,刘文杰,毋正伟.基于PSO-ELM的谐振式MEMS电场传感器温度补偿方法[J].微纳电子技术,1-10.

[3] 袁熠,杨璐含,张雨恒,陈东键,王妍,张中,喻依虎,宁宁,于奇,李靖.一种基于MOSFET栅极泄漏电流的温度传感器[J].微电子学,1-5.

[4] 陈学敏,吴洁鑫,彭华超,詹云凤,唐秀凤,罗坚义.基于纳米多孔碳的柔性温度传感器[J].传感器与微系统,2025,44(06):122-127.

[5] 吴家婷,向海涛,彭琪,张嘉祺,刘炉英,史蕾.基于温度传感器改进《熔点的测定》实验[J].广州化工,2025,53(10):198-201+205.