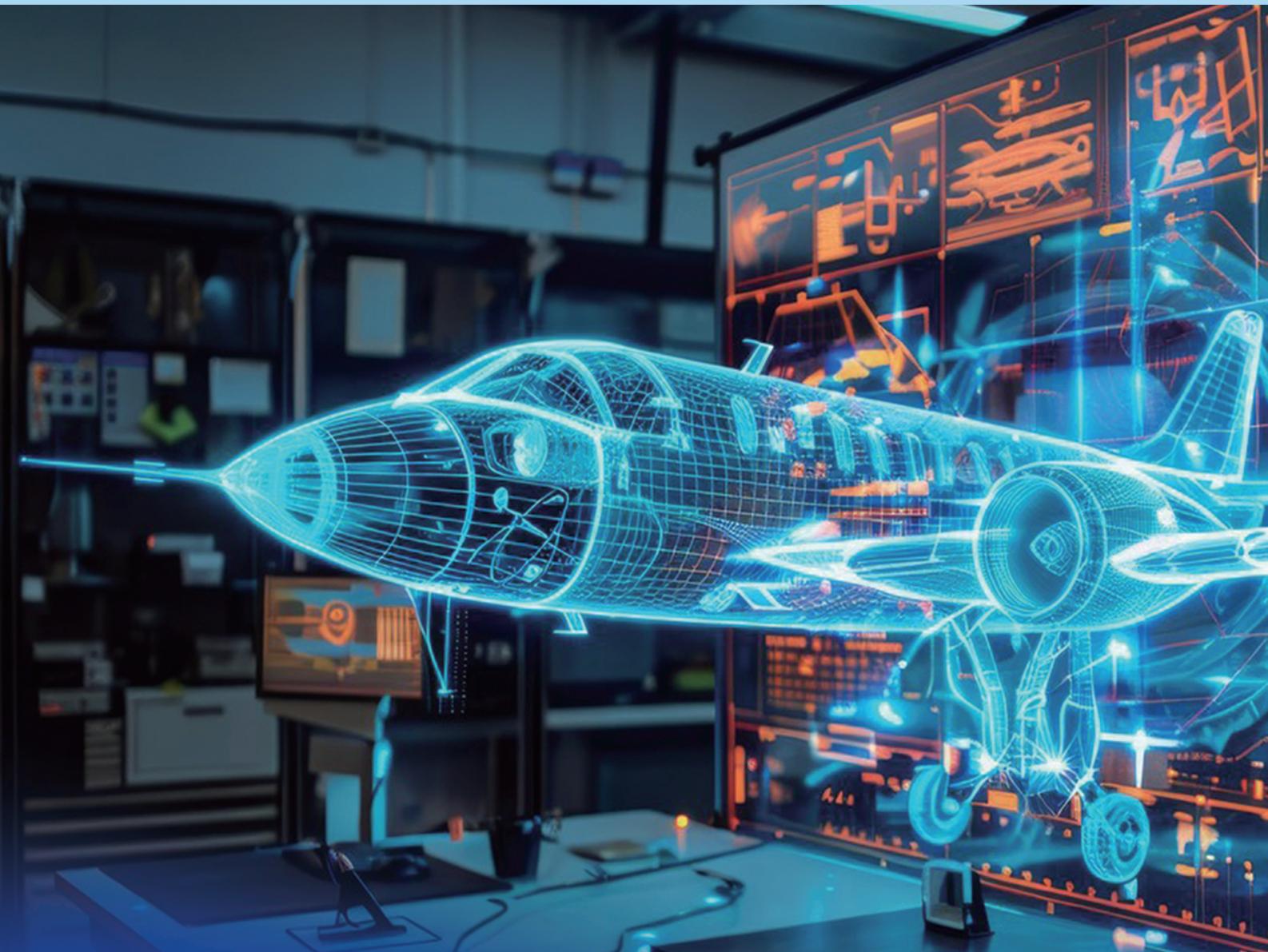


科技创新与工程

Technological Innovation and Engineering

Volume 2 Issue 10 October 2025 ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



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



技术创新与工程 Technological Innovation and Engineering

Volume 2 · Issue 10 · October 2025 · ISSN 3060-8996(Print) 3060-8988(Online)



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.

《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

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

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

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>



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 10 October 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

夏旭东 Xudong Xia

- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | 人工智能时代公共博物馆智慧化管理与服务初探
/ 金硕 | 1 | Preliminary Study on the Intelligent Management and Service of Public Museums in the Era of Artificial Intelligence
/ Shuo Jin |
| 4 | 食品质量检验中农药残留检测技术的运用
/ 柴智超 | 4 | Application of Pesticide Residue Detection Technology in Food Quality Inspection
/ Zhichao Chai |
| 7 | 基于数据动态降阶的发电设备物理场级数字孪生模型构建方法
/ 宋为平 | 7 | Construction Method of Physical Field Digital Twin Model of Power Generation Equipment Based on Dynamic Degradation of Data
/ Weiping Song |
| 10 | 基于模拟退火算法的作物种植策略
/ 李卫 何文林 | 10 | Crop planting strategy based on simulated annealing algorithm
/ Wei Li Wenlin He |
| 13 | 基于机器学习的新能源汽车自适应节能控制策略研究
/ 汤富强 | 13 | Research on Adaptive Energy Saving Control Strategy of New Energy Vehicles Based on Machine Learning
/ Fuqiang Tang |
| 16 | 大数据隐私保护技术的创新与应用实践分析
/ 代杨 牛振东 赵一丞 李涛 | 16 | Analysis of Innovation and Application Practice of Big Data Privacy Protection Technology
/ Yang Dai Zhendong Niu Yicheng Zhao Tao Li |
| 19 | 电网建设工程现场施工安全风险管理创新
/ 刘伟 | 19 | Innovation of Construction Safety Risk Management in Power Grid Construction Project
/ Wei Liu |
| 22 | 配网抢修作业人员安全行为分析与干预措施
/ 刘丙辉 | 22 | Safety Behavior Analysis and Intervention Measures of Distribution Network Repair Personnel
/ Binghui Liu |
| 25 | 电力系统电压调节与稳定性分析
/ 高俊志 | 25 | Analysis of Voltage Regulation and Stability of Power System
/ Junzhi Gao |
| 28 | 智能电网无人机巡检路径规划与能效优化策略研究
/ 徐玉梅 | 28 | Research on Path Planning and Energy Efficiency Optimization Strategy for Unmanned Aerial Vehicle Inspection in Smart Grid
/ Yumei Xu |
| 31 | 基于 ROV 的滑模变结构抗扰控制算法研究
/ 曹亮 | 31 | Research on Sliding Mode Variable Structure Anti-disturbance Control Algorithm Based on ROV
/ Liang Cao |
| 34 | 恒星坐标系的建立及其潜在的应用前景研究
/ 黄志新 | 34 | Establishment of stellar coordinate systems and its potential applications
/ Zhixin Huang |
| 37 | 钢结构虚拟预拼装技术的研究与应用
/ 李毅 朱爱珠 俞栋华 杨大彬 | 37 | Research and Application of Virtual Prefabrication Technology for Steel Structures
/ Yi Li Aizhu Zhu Donghua Yu Dabin Yang |
| 40 | 基于物联网的汽车远程检测与诊断系统研究
/ 罗长威 | 40 | Research on Remote Detection and Diagnosis System for Automobile Based on Internet of Things
/ Changwei Luo |

Preliminary Study on the Intelligent Management and Service of Public Museums in the Era of Artificial Intelligence

Shuo Jin

National Library of China, Beijing, 100000, China

Abstract

Against the backdrop of the deepening application of artificial intelligence technologies, the management and service systems of public museums are exhibiting new trends toward systemic integration, platform-based operation, and intelligent development. Through the adoption of intelligent monitoring, data recognition, and interactive technologies, the conservation process has shifted from passive protection to proactive early warning, significantly enhancing the responsiveness of key functions such as environmental monitoring, artifact condition identification, and risk assessment. As smart construction continues to advance, the cultural supply capacity, public service performance, and social value of public museums are experiencing substantial improvement, providing strong support for the high-quality development of public cultural services.

Keywords

public museum; smart conservation; smart management; smart services; digital construction

人工智能时代公共博物馆智慧化管理与服务初探

金硕

国家图书馆，中国·北京 100000

摘要

在人工智能技术不断深化应用的背景下，公共博物馆的管理与服务体系呈现出体系化、平台化与智能化的新趋势。通过引入智能监测、数据识别与交互技术，文物保护环节实现了从被动防护向主动预警转变，馆藏环境监控、文物状态识别与风险分析等关键环节的响应效率显著提升。随着智慧化建设的持续推进，公共博物馆的文化供给能力、公共服务效能与社会价值呈现出新的提升空间，为公共文化事业高质量发展提供重要支撑。

关键词

公共博物馆；智慧文保；智慧管理；智慧服务；数字化建设

1 引言

公共博物馆作为国家文化记忆的重要载体，承担着文物保护、教育传播和公共服务等多重功能。在数字化时代背景下，传统的管理方式与服务模式逐渐难以满足社会公众对高品质文化体验的需求。人工智能技术的发展和应用，使博物馆具备了更强的感知能力、数据处理能力与服务延展能力，为行业治理理念和运行机制带来了新的变革动力。智慧文保推动文物监测更加精细，智慧管理提升馆务协同的效率，智慧服务扩展了公共文化供给的空间。随着跨领域技术的融合加快，公共博物馆的治理体系正向着信息集成、决策精准与服务主动的方向演进，为提升文化资源的传播效能与公共服务均等化水平奠定了重要基础。

2 公共博物馆智慧文保体系的建设路径

2.1 数字化文物建档与智能监测体系构建

数字化文物建档为智慧文保建设奠定了基础，通过高精度影像采集、三维建模和参数记录，对文物形态、材质和保存状况进行结构化整理，使文物信息管理更加细致。结合感知设备开展实时监测，可对温湿度、光照、振动和空气颗粒物等关键因素进行连续采集，形成稳定的数据链条。监测数据在平台内集中处理，能够识别文物保存环境的变化趋势，为管理者提供风险提示。数字化建档与智能监测的结合，使文物保护从阶段性管理向全生命周期管理延伸，为后续的维护、修复和展陈决策提供可靠依据，并推动文物信息资源库建设更加科学化^[1]。

2.2 文物环境智能感知与风险预警机制优化

文物对环境因子变化极为敏感，通过智能感知技术对展柜、库房和展厅的环境参数进行实时监测，可捕捉微小波动，为风险识别提供精确数据。传感设备持续采集光照、湿

【作者简介】金硕（1985—），男，中国北京人，本科，副研究馆员，从事博物馆安全运营及文物保护技术研究。

度、温度和空气质量等信息，平台自动分析指标变化，及时判断光照超标、湿度波动或污染物升高等风险情况，并发出分级预警。预警机制根据文物材质特征和风险特点进行响应策略制定，使处置措施更加有效。风险信息可同步推送至相关岗位，形成快速处置链条。通过对历史数据、异常事件和干预效果的比对分析，预警机制持续优化，实现环境控制的精细化管理。

3 公共博物馆智慧管理体系的运行机制

3.1 馆藏资源管理的数字化统筹模式

馆藏资源数量庞大、种类复杂，通过数字化统筹管理能够实现资源信息集中整合。平台对馆藏实物、档案材料和保护记录进行一体化管理，依托条码、电子标签等方式实现流转跟踪，便于掌握文物出入库、借展调拨和状态变化等动态信息。数据在系统内形成资源图谱，支持结构化检索、状态识别和使用调度，提高资源管理精度。数字化管理还可在线陈规划、库房管理和文物保护等模块间共享信息，减少重复录入。随着数据积累，资源统计与分析能力逐步增强，为制定收藏规划、展示策略和资源配置方案提供可靠依据，使馆藏管理更加科学。

3.2 运营调度与安全管理的一体化平台建设

公共博物馆运营涵盖设备运行、安防巡查、人员调配和能源管理等内容，通过一体化平台整合相关模块，可实现多业务在同一界面协同调度。平台实时展示设备运行状态、监控画面和环境指标，便于快速发现异常并采取远程措施处理。巡检任务可在系统内设定路线、频次和要求，巡检人员通过移动终端上传现场情况，使记录更加真实完整。安全管理模块整合视频监控、报警设备和门禁系统，实现重点区域动态监管，对异常行为进行即时响应。平台结合场馆开放安排调节人员分布，提高服务保障能力，推动运营管理走向集成化与高效化^[2]。

4 公共博物馆智慧服务体系的拓展方向

4.1 基于多源数据的观众行为分析与服务响应机制

观众行为呈现多样化，通过入馆记录、移动轨迹、互动参与等数据构建行为画像，有助于掌握观众需求与偏好。平台对数据进行处理，生成热力分布、路径模型和趋势判断，为展陈布局调整、服务岗位设置和导览规划提供依据。系统能够根据实时数据变化自动触发服务响应，如调整咨询点位置、增加志愿者支持或推送相关展览信息，提高服务精准度。历史数据对比可揭示长期趋势，为公共文化活动策划和服务模式创新提供参考。多源数据分析促进服务方式更加精细，使博物馆能够更好满足不同人群的体验需求。

4.2 智慧导览、交互展示与沉浸体验的服务设定

智慧导览通过定位技术和导览终端形成服务链条，为观众提供个性化路线规划和内容推荐，提升参观便利度。交互展示采取多媒体呈现、触控设备和互动装置，使观众能够

参与展示过程，提高知识吸收效率。沉浸体验通过声光环境、情景模拟和虚拟展示营造空间氛围，使观众获得更丰富的文化体验。各类展示方式可根据观众年龄、文化背景和学习方式差异进行配置，使服务更具适应性和参与性。智慧化展示技术拓展了文化传播渠道，使公共博物馆在提升文化吸引力和教育成效方面具备更强支撑。

4.3 公共文化教育服务的数字赋能路径

公共文化教育服务借助数字技术实现内容扩展和方式创新。数字平台可提供线上展览、专题课程和虚拟课堂，使教育资源突破场馆限制，在更大范围传播。平台整合图片、音频、视频和知识讲解资料，为教育活动提供丰富素材，提高内容质量。教育活动的数据记录便于分析受众结构、学习偏好和参与深度，为课程设计与活动策划提供参考。线上与线下结合的方式增强受众互动性，使文化教育的覆盖面更广、形式更加多样。数字赋能推动公共文化服务向普惠化、便捷化和持续化方向发展，为文化传播创造新的增长空间。

5 公共博物馆智慧基础设施的集成建设

5.1 馆内信息网络体系的升级与互联互通设计

公共博物馆的智慧化发展依托稳定、高速和安全的信息网络体系，通过对现有网络结构进行优化改造，可提升数据传输效率和系统协同能力。馆内网络覆盖展厅、库房、办公区域和公共空间，使监测设备、信息终端和管理平台保持可靠连接。网络架构在带宽、延迟和容错能力方面进行系统化提升，能够支撑高清视频监控、多终端数据上传和大规模交互展示运行。网络节点之间通过结构化布线和标准接口实现互联互通，使馆内不同业务系统形成数据传输通道。无线网络在重点区域加强信号覆盖，提升观众使用移动导览设备的便捷性。通过对网络安全策略、访问权限与监控机制的综合设置，馆内信息网络形成可管理、可扩展、可维护的运行格局，为全馆智慧化体系的高效运作提供基础支撑。

5.2 智能终端、感知设备与服务设施的协同配置

智能终端和感知设备在智慧博物馆中承担环境监测、数据采集、服务互动等任务，通过协同配置实现业务联动，提高系统运行效率。展厅与库房布设温湿度、光照、颗粒物浓度等传感装置，可实时捕捉环境数据，为文物保护提供应对依据。监控设备、门禁系统和巡查终端形成安全防范体系，使重点区域的状态变化能够被及时识别。服务设施中的移动导览终端、触控屏、语音交互设备与导航系统共同构成智慧服务链条，为观众提供便捷体验。设备之间通过平台进行数据联动，使监测信息、服务指令和运营任务能够跨设备传递。设备布局在空间规划中进行整体设计，使监测覆盖、展示互动和服务支持形成协调布局。通过设备运行状态监测和维护管理机制，保障各类智能装备的稳定性与持续性^[3]。

5.3 数据资源整合、共享与治理能力建设

数据资源贯穿文保、管理和服务等多个业务领域，通

过整合与治理实现数据价值的有效释放。各类监测设备、管理系统和服务终端所产生的数据在平台中汇聚，形成统一的数据资源池，为分析研判提供丰富基础。数据共享以标准化接口为支撑，使文物保护信息、馆藏管理数据、运营指标和服务行为数据能够在不同模块之间流动，为综合决策提供依据。数据治理体系围绕数据质量、分类分级、权限控制与安全管理开展建设，使数据使用更加规范。数据处理流程通过清洗、标注与结构化管理提高准确性，为后续分析模型提供可靠输入。通过持续优化数据架构与管理规则，博物馆的数据资源体系逐步完善，为智慧化管理提供长期支撑。

6 公共博物馆智慧化发展中的制度保障

6.1 智慧管理规范体系与技术标准体系构建

智慧化建设涉及多类技术与多种业务场景，通过建立管理规范体系和技术标准体系，可确保系统建设与运行处于可管可控状态。管理规范涵盖文保监测流程、设备使用要求、数据处理规则和服务响应机制，使各项智慧化职能具备制度基础。技术标准围绕设备接口协议、数据格式、系统架构和互联互通指标进行制定，使不同系统和设备在同一框架下协同使用。建设过程中的验收标准、运行中的维护要求和升级中的兼容性规则均纳入规范体系，推动智慧化基础设施建设更加规范。通过对标准体系的动态调整，使其能够适应技术发展与业务变化，为智慧博物馆持续推进提供制度保障。

6.2 数据安全、隐私保护与运维保障机制

智慧博物馆运行过程中产生大量敏感数据，通过构建数据安全与隐私保护机制，可防止数据泄露、篡改或滥用。系统在数据传输、存储和处理环节采取加密、防护和备份措施，降低风险隐患。隐私保护机制围绕观众行为数据、人员信息和馆内监控内容构建权限体系，使敏感数据在授权范围内使用。系统运行中的访问日志、风险监测和防护策略形成闭环管理，提高安全防范能力。运维保障机制对设备巡检、系统更新和故障处理进行规范化管理，使智慧系统保持稳定运行。通过应急预案建立风险响应程序，为突发安全事件提供处置路径，使智慧化系统在复杂环境下具备可靠性。

6.3 专业人才体系建设与能力提升机制

智慧化管理需要具备数字技术应用能力、文物保护知识和公共服务意识的复合型人才，通过构建专业人才体系为系统建设与运营提供支撑。人才体系涵盖设备运维人员、数据分析人员、文保技术人员和服务管理人员，通过岗位分类明确能力要求。能力提升机制通过培训课程、技能竞赛、外部交流与实践项目等方式开展，使人员掌握设备操作、数据分析、平台使用和风险识别等技能^[4]。馆内人才梯队建设通过培养核心岗位骨干、引入专业人才和推动跨岗位协作，使智慧化任务具备可持续保障。通过人才评价机制和激励措施，促进人员技能提升和岗位能力增长，使智慧博物馆运行具备稳定的人才支撑体系。

7 结语

公共博物馆在智慧化转型过程中呈现出管理模式更新、服务体系拓展和文物保护能力提升等多重成效。以数据为驱动、以技术为支撑的建设路径，使博物馆在资源统筹、风险防控和公共服务方面展现出更高效能。智慧文保提升文物安全保障水平，智慧管理强化场馆运行的协同性，智慧服务扩展文化传播的深度与广度，基础设施和制度体系的完善进一步巩固了智慧化发展的整体架构。随着技术进步和公共文化需求不断变化，公共博物馆将在数字平台、智能设施和治理机制的共同作用下形成更加开放、灵活与可持续的运营格局，为提升国家文化治理能力和满足公众文化需求持续贡献力量。

参考文献

- [1] 潘守永,石倩雯.博物馆数智化进程中的知识组织：人工智能时代的机遇、挑战和思考[J].故宫博物院院刊,2025,(10):93-106+274-275.
- [2] 孔雯莉,郝琳霞,徐浩,李华飙.生成式人工智能在博物馆中的应用实践与思考[J].中国信息化,2025,(10):70-72.
- [3] 王亚萍.人工智能在博物馆展览讲解领域的应用探究[J].收藏与投资,2025,16(09):105-107.
- [4] 夏梦秋,周洁.人工智能时代非遗竹编数字博物馆建设路径研究[J].丝网印刷,2025,(18):115-117.

Application of Pesticide Residue Detection Technology in Food Quality Inspection

Zhichao Chai

Xilin Gol League Inspection and Testing Center, Xilinhot , Inner Mongolia, 026000, China

Abstract

Pesticide residues constitute a critical threat to food safety, with prolonged consumption of contaminated products potentially causing chronic poisoning and other health risks. Given the increasing complexity of agricultural supply chains and the growing diversity of pesticides, residue detection has become a cornerstone of food quality assurance. The scientific application of these methods directly impacts food safety and public health. This study, based on extensive literature review and years of practical experience, systematically examines current developments in this field. It provides an in-depth analysis of commonly used detection technologies and optimization strategies, aiming to offer actionable insights for both industry practices and academic research.

Keywords

food quality inspection; pesticide residue detection; technology application; measures

食品质量检验中农药残留检测技术的运用

柴智超

锡林郭勒盟检验检测中心，中国 · 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要

农药残留是威胁食品安全的重要因素之一，长期摄入农药残留超标的食品可能导致慢性中毒等健康风险。同时，加之现阶段农产品供应链的复杂化及农药种类的多样化，农药残留检测成为了当前食品质量安全检验的核心环节，其科学运用直接关乎食品消费安全与公共健康。有鉴于此，本文通过对相关文献资料查阅以及结合自身多年工作实践情况下，立足该检测领域的现实价值出发，系统梳理当前发展态势，深入探讨常用检测技术的应用及优化措施，希望能够为相关实践与研究提供参考。

关键词

食品质量检验；农药残留检测；技术应用；措施

1 引言

经济增速的加快与民众生活质量的持续改善，使得食品安全问题的关注度与重要性愈发突出。而农业生产作为食品生产的源头往往需要使用农药来保产增收。其过程难免出现农药不合理使用、过度使用、滥用等问题，使得食品中出现严重的农药残留，这些农药残留进入人体极易引发急性中毒、慢性疾病、生殖与发育等方面的问题，严重威胁人体健康^[1]。因此，做好食品农药残留的高效检测与精准筛查至关重要，是保障食品安全不可或缺的关键一环。

2 食品质量检验中农药残留检测的重要意义

农药残留检测在食品质量检验中具有不可替代的重要性，若食品中农药残留超标，将引发一系列食品安全隐患。

【作者简介】柴智超（1987-），女，中国内蒙古锡林浩特人，本科，工程师，从事食品质量与安全研究。

农药中的有机磷、除虫菊酯等成分随着食品进入人体累积到达一定量之后，将会引发急性中毒、免疫系统紊乱等各种健康问题，甚至有些农药成分还会增加患癌风险。屡见不鲜的食品安全问题也在不断警示着农药残留检测工作的重要性。唯有对食品实施严格、准确的农药残留检测，方可有效防止有害食品流入市场，保障人们身体健康与安全。而且农药残留超标的食品流入市场也会对市场秩序产生严重冲击，不但会严重损害消费者权益，削弱食品市场的可信度，而且会助长不当竞争的行为，严重破坏公平的市场秩序。市场监管部门以准确的食品质量检验为依据，对销售农药残留超标食品的商家进行处罚，实施严格的食品质量管控，促进食品的依法依规经营，营造健康的市场环境。此外，食品的国际贸易对农药残留也有着十分严格的标准要求，一旦食品中的农药残留超标，将会遭到进口国的拒绝入境、退货、销毁等，不仅会导致出口企业蒙受实质性的利益损失，更会对国家的国际形象造成严重破坏。利用农药检测技术加强食品质量检验，严把食品出口质量关，有助于减少国际贸易顺差，提高

国家食品出口的国际竞争力。

3 食品质量检验中农药残留检测现状分析

农药残留检测技术的应用，是筑牢食品安全防线的核心环节。当前，较为常用的农药残留检测技术种类较多，包括气相色谱法、液相色谱法、酶联免疫吸附法等，不同的检测技术有着不同的适用范围与应用优势，比如，气相色谱法用于对强挥发性农药残留的检测方面的灵敏度与分离效率较高，可以达到对农药有机磷成分的精准分离与定量测定的目的；液相色谱法则主要用于对不易挥发、热不稳定的农药检测，搭配质谱联用技术，能够实现对多种杀菌剂残留的准确、快速的定性与定量检测等^[2]。同时，随着技术不断进步，超高效液相色谱——串联质谱技术等新技术也在不断涌现，大幅提高了农药残留的检测效率。但是这些技术的应用往往存在较高的设备运维成本与操作专业要求，不利于食品质量检验的进一步发展。我国的农药残留检测离不开第三方检测机构的作用，而不同的检测机构在资质、技术、设备、人员等的配置方面有着不同的侧重点与优势，在实际的食品质量检验过程中也需要结合对农药残留检测的具体需求选择最为权威、可靠的第三方检测机构进行检测。但是随着食品安全监管要求的越发严格，以及市场需求的不断增长，第三方检测机构仍然需要致力于提高农药残留检测方面的技术能力与服务水平，方能与不断严格化的食品质量检测标准要求相契合。虽然在科技不断进步的推动下食品质量检验中的农药残留检测水平也在不断提升，但也需要正视存在的诸多客观问题。如部分传统检测方法灵敏度不足、操作复杂、效率不高等，无法胜任大规模食品质量检验需求。而新技术同样存在成本高、技术复杂等不利因素而影响其应用推广。以及不同国家、地区在农药残留检测方面的标准差异，农药残留检测标准体系不完善等，也是当前食品质量检验需求得不到充分满足的重要原因。同时专业人才不足，也严重制约着农药残留检测技术应用水平提升。此外，高昂的检测成本也对食品质量检测中农药残留检测工作的高效开展造成了极大制约，食品安全隐患难以消除。

4 食品质量检验中农药残留检测技术的应用

4.1 气相色谱法

食品农药残留检测中气相色谱法的应用，主要是借助专业气相色谱仪检测食品样品。对样品进行提取、净化等处理后，注入气相色谱仪中，在不同农药成分在色谱柱中的运动差异的原理下，利用检测器将农药组分浓度信号转换成为电信号输出，在数据处理系统的记录与分析作用下对农药进行定性，并根据保留时间的峰高，完成农药残留的定量分析。值得注意的是，需要结合检测的农药类型，选择合适的气相色谱柱和检测器，才能发挥气相色谱法的应用优势。气相色谱法在有机磷农药残留检测方面有着较高的灵敏度与分离效率，适用于对乐果、敌敌畏、毒死蜱等多类有机磷农药的

检测，甚至可以达到纳克级别的检测限，在低浓度农药残留检测方面的应用效果显著。

4.2 高效液相色谱法

高效液相色谱法的应用，主要是利用了样品中各种组分在固定相与流动相之间存在分配系数差异的原理，以不同组分在色谱柱中的迁移速度差异为依据，对农药中的各个组分进行分离。然后利用检测器对分离出来的组分浓度进行电信号的转化，接着在数据处理系统的作用下得到色谱图，完成对农药残留组分的定量与定性分析^[3]。这一检测方法主要适用于难挥发性、不挥发性、热不稳定的极性农药残留检测。比如，利用高效液相色谱仪与紫外检测器对多菌灵农药残留进行检测，能够实现对农药残留组分及含量的准确测定，检测限也能够达到皮克级别。

4.3 气相色谱——质谱联用法

这一方法的应用能够很好地发挥气相色谱法强大的分离能力优势，同时能够利用质谱高灵敏性、高特异性的鉴别能力，得到更为准确的检测结果。在实际应用中，先是借助对气相色谱完成对样品农药组分的分离。然后利用质谱仪对各个分离之后的组分进行离子化处理，以离子质荷比差异为依据采用质量分析器进行组分的分离与检测，得到质谱图。最后将解析后的质谱图和标准谱库进行比对，进而对农药种类、结构等进行准确确定，实现对农药残留的定性分析。并且以离子强度的定量分析为依据，进行农药组分含量测定，得到较为准确的定量结果。利用气相色谱——质谱联用的方法，能够实现对极低浓度农药残留的有效检测，检测限能够达到飞克级别，特别是在对复杂食品中农药残留进行定性与定量分析时，有着理想的应用效果。

4.4 酶联免疫吸附法

该方法的应用主要是利用了抗原——抗体的特异性反应原理。把已经明确的农药抗原或者抗体，固定在固相载体的表面。然后将处理后的待检测食品样品溶液，加入到固相载体当中，使得样品中的残留农药分子和其相应的抗体、抗原发生特异性反应。然后利用酶标记的抗体或者抗原，得到标记后的抗体复合物，最后结合对酶催化底物显色原理的应用以颜色深浅的测定对照标准曲线，测算农药残留含量，实现对食品农药残留的快速筛查。在实际应用中，能够借助对ELISE试剂盒的应用在农产品批发市场进行果蔬的批量、快速检测，整个检测过程具备设备简单、操作便捷，能够在短时间内完成对大量样品的初筛工作，初步判定果蔬农药残留的超标情况。但是这种方法的应用有着较强的特异性，不同类型农药残留检测往往需要采用多种试剂盒进行逐一测定，并且检测结果的准确性会受到相似结构的农药成分交叉反应影响。在检测的灵敏性方面也较色谱——质谱联用技术低，无法胜任对痕量农药残留的检测任务。

4.5 其他检测技术

红外光谱法等波普法在食品农药残留检测中的应用主

要是利用了不同农药分子能够实现对特定波长的电磁波进行吸收或者发射的原理进行检测，通过对这些电磁波、光波的吸收、发射情况的测量绘制出光谱图，和标准图谱进行比对完成对农药的定性分析。这种方法应用能够实现对食品的无损检测，且分析速度较快，但是在灵敏度方面稍差，通常需要和其他检测技术联合使用来提高检测效果。毛细管电泳技术则是利用了样品各组分在高压电场中的迁移差异进行组分分离，再借助检测器的使用完成农药的定性与定量分析。这一技术的应用具备分离效率高、分析速度快、样品消耗小等优势，但分离效果极易受基质影响，一旦样品处理不当则无法得到准确结果^[4]。生物传感器通过集成酶、抗体、核酸等生物识别元件，借助其对农药组分的特异性识别能力，将目标农药的存在状态及含量信息转化为电信号、光信号等可量化检测的物理化学信号，实现对农药残留的间接测定。虽然生物传感器测定方法的应用具备灵敏、快捷及选择性好的优势，但是由于生物识别元件的稳定性较差及寿命短的不足，往往会产生较高的检测成本。

5 食品质量检验中优化农药残留检测技术应用质量的相关措施

5.1 加强技术研发与创新

随着农药种类以及食品基质的越发复杂，对检测技术应用的精度、效率要求也越来越高，因此加强对农药残留检测技术的创新、研发十分重要。一方面要聚焦超高效液相色谱 - 串联质谱、高分辨质谱、生物组学方法等前沿技术的应用与发展，重视加强对现场快检设备的研发，不断探索人工智能、物联网与检测技术的融合应用，提高检测效能；另一方面还需重视加强对跨学科研发平台的建设，实现对化学、生物学、仪器科学等多领域专家、技术、设备等资源的有效整合，构建协同创新体系共同致力关键技术攻关，切实提高食品质量检验中农药残留检测技术的应用水平。

5.2 提高检测人员专业素质

一方面要重视做好对检测人员的培训管理。通过组织定期专业培训的方式，夯实技术人员在样品处理、仪器操作、技术要点控制等方面的专业技能，拓展其在农药残留检测技

术应用方面的的眼界与认知。通过邀请行业专家进行座谈交流等方式进行实际工作经验与案例的探讨，切实提高检测人员的理论与实践水平。另一方面则需加强完善考核管理机制，做好对检验人员在理论、实操等方面的定期考核评估，落实针对性地整改提升措施，强化检验人员的责任意识与质量控制意识，以高水平的专业素质完成食品质量检验任务。

5.3 完善检测标准与规范

检测结果的准确性与可比性需要以统一的、完善的农药残留检测标准与规范作为依据与保障。针对农药残留限量标准的国际差异、地区差异，相关部门需要重视加强对相关标准的研究与制定，及时结合国际标准变化不断完善国内检测标准，为检测工作的标准、规范开展提供依据。检测机构需严格遵循统一的检测规范与标准要求，对样品检测全流程实施标准化管控，强化内部质量审核与过程质量控制机制，以确保食品农药残留检测的规范、科学^[5]。

6 结语

综述可知，农药残留检测作为食品质量检验的重要内容，关乎人民生命安全。面对越发严格的食品质量检验要求，检测机构及相关部门需要认清当前农药残留检测现状，加强对检测技术的应用探索，积极采取多元化有效措施，持续推动食品质量检验领域农药残留检测技术的创新升级与应用深化，进一步筑牢食品安全保障防线，更好地为食品安全提供保障。

参考文献

- [1] 边力,王红红,王燕燕,等.食品质量检验中农药残留检测技术的运用分析[J].食品界, 2025(3):54-56.
- [2] 戴瑞荣.食品质量检验中农药残留检测技术的运用分析[J].食品安全导刊, 2023(32):160-162.
- [3] 高兰萍,郭建亭.食品安全检测技术在农产品农药残留检测中的运用[J].现代商贸工业, 2017, 38(31):2.DOI:CNKI:SUN:XD SM.0.2017-31-090.
- [4] 韩学霞.农药残留检测技术在食品质量检验中的应用研究[J].中国质量监管, 2024(12):76-79.
- [5] 赵国辉.对食品检测中农药残留检测技术的几点思考[J].饮食保健, 2019, 6(9).DOI:10.3969/j.issn.2095-8439.2019.09.370.

Construction Method of Physical Field Digital Twin Model of Power Generation Equipment Based on Dynamic Degradation of Data

Weiping Song

Harbin Electric Science and Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150000, China

Abstract

This paper presents a data-driven dynamic dimensionality reduction method for constructing physical field-level digital twin models. First, it elucidates the core value of model dimensionality reduction under the digital twin paradigm and analyzes the limitations of traditional simulation technologies in cross-domain and lifecycle reuse. Second, it highlights the pivotal role of model dimensionality reduction in breaking down simulation barriers and enabling knowledge reuse, focusing on two dimensions: cross-platform interaction between 3D simulation and system simulation, and model migration between design and operational phases. The paper then details the technical principles of model dimensionality reduction, including its two-phase (offline-online) computational architecture, mainstream dimensionality reduction methods, and research progress in nonlinear scenarios. Finally, it summarizes the core advantages of model dimensionality reduction in enhancing interactivity, reliability, continuity, accessibility, and distributability.

Keywords

digital twin; model reduction; lifecycle reuse; power generation equipment; real-time simulation

基于数据动态降阶的发电设备物理场级数字孪生模型构建方法

宋为平

哈尔滨电气科学技术有限公司，中国·黑龙江哈尔滨 150000

摘要

本文提出一种基于数据动态降阶的物理场级数字孪生模型构建方法。首先阐述数字孪生范式下模型降阶的核心价值，分析传统仿真技术在跨领域、跨生命周期复用中的瓶颈；其次，从三维仿真与系统仿真的跨平台交互、设计阶段与运行阶段的模型迁移两个维度，揭示模型降阶技术在打破仿真壁垒、实现知识复用中的关键作用；进而详细介绍模型降阶的技术原理，包括离线-在线两阶段计算架构、主流降维方法及非线性场景的研究现状；最后总结模型降阶在交互性、可靠性、连续性、可访问性与可分布性方面的核心优势。

关键词

数字孪生；模型降阶；跨生命周期复用；发电设备；实时仿真

1 引言

在数字化浪潮的推动下，颠覆性创新正以深远的经济与社会影响力重塑产业形态，而仿真技术作为数字化转型的核心支撑，通过数字孪生实现了物理实体与数字空间的精准镜像映射。数字孪生的本质是一场范式革命——它打破了传统专业割裂的工具应用模式，构建了通过后台仿真与物理、数字环境持续交互的自主辅助系统，为全生命周期决策提供智能化支撑^[1]。模型降阶技术作为数字孪生的核心基石，通过大幅削减模型自由度，在保证精度与可预测性的前提下

提升计算效率，同时解决了仿真模型跨场景复用与知识产权保护的关键难题，尤其实现了产品设计阶段仿真模型在运行阶段的高效复用，为数字孪生的工程化落地提供了核心技术路径。

当前，复杂产品与系统的工程研发及运维正面临双重挑战：一方面，系统集成复杂度持续提升（如异构宏观系统融合、新型制造技术应用），业务端对创新迭代速度的要求不断提高，催生了对高性能模型化软件工具的迫切需求；另一方面，专业人才储备的局限性制约了基于模型的方法规模化应用。在此背景下，数字孪生已成为引领产业数字化转型的核心战略技术趋势，其核心价值在于整合产品全生命周期（从概念设计到报废处置）的可操作信息与数据，通过嵌入

【作者简介】宋为平（1988-），男，硕士，高级工程师，从事电力设备力学完整性分析相关的研究。

式智能为日常决策提供支持，最终实现系统可靠性、质量与效率的协同提升。

传统仿真技术多应用于产品研发早期的设计规划与尺寸优化，而数字孪生要求仿真贯穿全生命周期——不仅为研发阶段的工程师提供设计验证支持，更要为运维阶段的操作人员提供状态监测、优化控制与预测性维护服务。这一转变需要将动态软件模型深度集成至现有仿真工作流，实现专业工程知识的结构化存储与高效复用，使非专业人员及生命周期各阶段均可共享核心技术沉淀，其技术逻辑如图 1 所示。

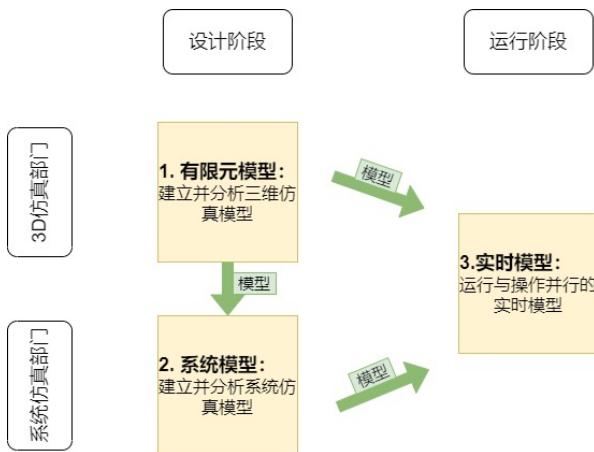


图 1 数字孪生中的模型转换

2 从三维仿真到系统仿真的模型交换

仿真技术已在各工程领域实现规模化应用，但传统仿真多采用“Silo”格式（即通过专用 API 函数库读写二进制科学数据），导致模型难以跨领域复用，成为制约基于模型的系统工程（MBSE）推广的核心瓶颈^[2]。MBSE 的核心思想是通过数字系统模型捕获所有子系统的互联行为，以虚拟专业模型与系统模型为基础，通过增量式、连续性适配模型模拟虚拟测试场景，实现系统需求、功能与行为的早期关联验证。

MBSE 将仿真划分为两个核心层次：

系统仿真：聚焦核心行为模拟（如基于 Mworks、

Matlab 平台），涵盖软件、控制等多学科领域，是系统级解决方案的核心研究工具；

专业特定建模与仿真：基于三维几何或计算机辅助工程（CAE）工具（如西门子 Simcenter、Comsol、ANSYS 多物理场）构建高复杂度、高精度模型，用于专业领域的详细验证与优化。

当前工业实践中，三维仿真与系统仿真部门存在明显割裂——各部门依赖专属商业或自研工具构建模型，当三维仿真模型完成校准后，需手动提取核心信息并重建为系统仿真模型，效率低下且易引入人为误差。模型降阶技术的出现恰好解决了这一痛点：结合供应商中立的功能模型接口（FMI）标准（已在 100 余种工具中实现兼容）[3]，模型降阶算法可直接以详细三维仿真模型为输入，自动生成标准化格式的压缩模型，为系统仿真软件提供高效可用的组件模型。这一过程不仅实现了模型的跨平台转移，更推动了模型交换的全流程自动化，其技术架构如图 2 所示。

3 从设计阶段到运行阶段的模型交换

随着计算能力的提升与数学算法的迭代，计算机辅助技术已成为运维阶段的核心支撑手段。相较于传统方法，计算机辅助方案展现出更优的成本效益比——例如，通过先进控制算法提升卡车能源效率的投入产出比，显著优于空气动力学优化措施。

在工业运维场景中，数据驱动方法与模型预测方法各有优劣：机器学习方法通过挖掘传感器数据规律替代传统启发式规则，但受限于数据可用性（如客户数据含知识产权、特殊故障数据稀缺）^[4]；模型预测方法可有效提升运维决策的前瞻性，但要求仿真模型具备超实时计算能力，而产品设计阶段的仿真模型通常计算成本高昂，难以直接应用于运维场景，导致其仅能在高价值或大批量应用中推广。模型降阶技术可对大规模三维仿真模型进行高效压缩，生成的降阶模型能够实现超实时评估（如图 3 所示），既解决了数据驱动方法的样本依赖问题，又避免了运维阶段重新构建模型的资源消耗，为故障预测、效率优化与业务规划等新型运维服务提供了可行路径。

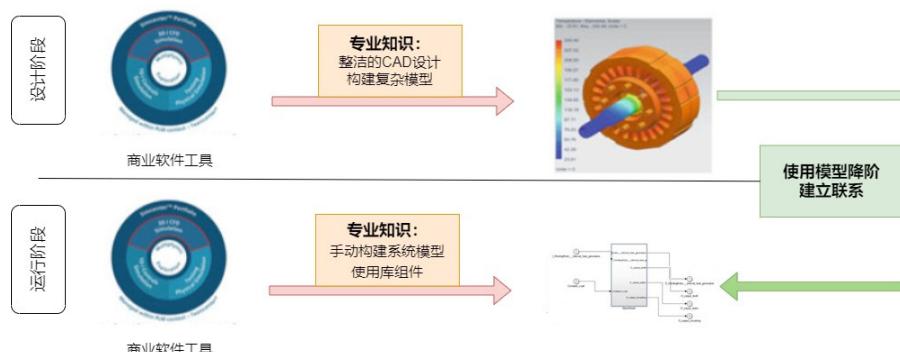


图 2 从三维仿真到系统仿真的模型交换

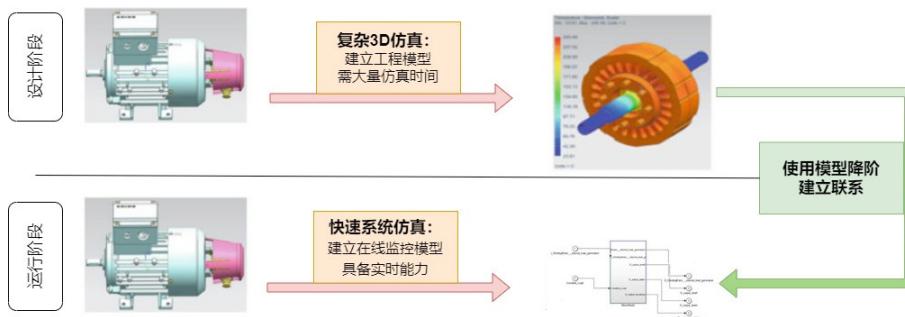


图 3 从设计阶段到运行阶段的模型交换

4 模型降阶核心技术

数字孪生的核心特征是持续背景仿真，而模型降阶是实现这一特征的关键数学技术。在工程设计中，三维偏微分方程的数值求解是核心手段，经空间离散化后会形成百万级未知量的大型线性稀疏方程组，直接导致实时仿真难以实现。模型降阶技术通过将计算过程拆分为离线阶段与在线阶段，将大量计算负荷转移至离线阶段（如基函数构建、数据预处理），在线阶段仅需通过低维模型快速求解，从而实现交互式与实时仿真 [5]。

过去数十年间，模型降阶技术已形成多种成熟方法，主流包括本征正交分解、平衡截断、缩减基法与 Krylov 子空间方法等，其核心思想均是通过构建低维基函数空间，实现高维问题的降维求解。对于（近）线性模型，模型降阶技术已发展为计算工程与科学领域的成熟技术；而针对非线性模型的高效降阶方法，目前仍是学术研究与工程应用的热点方向。模型降阶技术在产品生命周期仿真链中的突破性价值如图 4 所示。

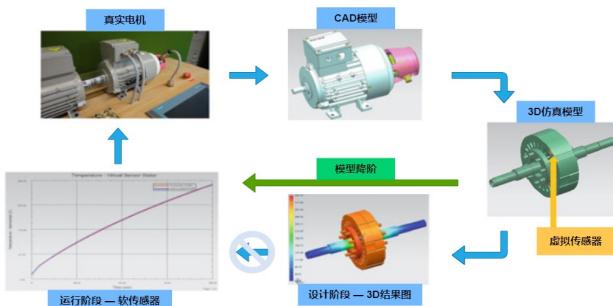


图 4 产品生命周期仿真链中的模型降阶（绿）超越目前的方法（蓝）

5 结语

模型降阶技术作为数字孪生全生命周期落地的核心数学支撑，将仿真模型的交互性、可靠性、连续性、可访问性与可分布性提升至新高度，其核心优势体现在：

交互性：相较于依赖硬件架构优化或求解技术改进的

传统加速方法，模型降阶直接削减自由度，可快速生成适配不同场景的模型；针对实时应用需求，可通过自适应方法实现精度与速度的动态平衡；

可靠性：多数模型降阶方案具备完善的误差分析机制，能够量化简化模型与原模型的精度差异，结合数据校准技术可提供误差范围与置信区间，解决了传统加速方法精度衰减不可控的问题；

连续性：模型降阶技术实现了设计阶段高精度模型向运维阶段快速模型的自动化转化，打破了生命周期各阶段的模型壁垒，避免了重复建模的资源浪费，构建了无缝衔接的仿真工作流；

可访问性：通过标准化格式封装，模型降阶生成的快速模型可被非专业人员直接集成至系统仿真，降低了专业知识的复用门槛，是数字孪生技术规模化推广的关键支撑；

可分布性：降阶模型的求解仅需矩阵向量乘法运算，可在嵌入式设备等小型计算平台运行，无需依赖专用工作站；同时，降阶模型无法反向重建原始 CAD/CAE 模型，有效保护了知识产权，为模型的跨企业、跨区域共享提供了安全保障，推动了“部件 + 数字孪生”一体化交付模式的落地。

未来，随着非线性模型降阶技术、动态自适应降阶方法的持续突破，模型降阶将进一步提升数字孪生模型的实时性与鲁棒性，为发电设备等复杂工业系统的全生命周期智能化运维提供更强大的技术支撑，助力产业数字化转型向纵深发展。

参考文献

- [1] 王青山, 严波, 陈岩, 等。基于降阶模型和数据驱动的动态结构数字孪生方法 [J]. 应用数学和力学, 2023, 44 (7):757 - 768.
- [2] 全小冬, 鲍劲松, 陶飞。协同进化的数字孪生——数字工程的多维动态方法 [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024,
- [3] 佚名. 大型发电机端部绕组电磁力物理数字孪生建模 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0633>.
- [4] 李琦, 张霖, 陶飞。数字孪生模型的复用与演化机制研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (5):1421 - 1433.
- [5] 赵星海, 刘畅, 王鹏。发电设备多物理场耦合仿真的模型降阶技术应用 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (18):6198 - 6208.

Crop planting strategy based on simulated annealing algorithm

Wei Li Wenlin He

School of Mechanical and Electrical Engineering Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong, 524048, China

Abstract

To achieve sustainable development of the rural economy, it is not only necessary for farmers to adapt to local conditions, but also for agronomists to formulate efficient planting strategies. It formulates the optimal planting strategies for the village's crops from 2025 to 2030 and then solves the problem using a linear programming model. Finally, the simulated annealing model improved based on the Monte Carlo method was adopted to solve the established linear programming model, and the optimal planting strategies for the crops in this village from 2045 to 2030 under the two scenarios were obtained.

Keywords

Simulated annealing algorithm; Monte Carlo simulation; Optimal planting strategy for crops

基于模拟退火算法的作物种植策略

李卫 何文林

岭南师范学院机电工程学院, 中国·广东 湛江 524048

摘要

为了实现乡村经济的可持续发展, 不仅需要农民因地制宜, 而且需要农艺师制定高效的种植策略, 在尽可能提高作物产量的同时, 尽可能减小生产风险。本文以华北地区的一个乡村用来演示制定种植策略, 并考虑两种处理超出预期销量的情况, 分别制定该乡村2025年至2030年作物的最优种植策略, 然后采用线性规划模型来进行求解。最后采用基于蒙特卡洛思想改进的模拟退火模型对所建立的线性规划模型进行求解, 解出两种情况下该乡村2045年至2030年作物的最优种植策略。

关键词

模拟退火算法; 蒙特卡罗模拟; 作物的最优种植策略

1 引言

为了实现乡村经济的可持续发展, 不仅需要农民因地制宜, 合理地利用各种农田, 种植合适的作物, 而且需要农艺师制定高效的种植策略, 在尽可能提高作物产量的同时, 尽可能减小生产风险^[1-2]。现存在一个华北山区乡村, 其拥有34个大小不一的地块, 地块面积总计1201亩, 四种地块类型分别为平旱地、梯田、山坡地和水浇地^[3]。该乡村还拥有16个普通大棚和3个智慧大棚, 且每个大棚的面积均为0.6亩^[3]。

因此, 考虑两种处理超出预期销量的情况, 分别制定该乡村2025年至2030年作物的最优种植策略。本文采用线性规划模型来进行求解。我们首先定义决策变量, 以便后续确定哪种作物在某季度会被种植到哪个地块。然后以各耕地类型的适种作物不同、同一地块(含大棚)在连续的两个季度里种植不同的作物、每个地块(含大棚)在三年里至少种植一次豆类作物以及每种作物每季的种植地尽可能的集中

为约束条件, 以每年的盈利达到最大值为目标函数, 建立线性规划模型。最后采用基于蒙特卡洛思想改进的模拟退火模型对所建立的线性规划模型进行求解, 最终求解出两种情况下该乡村2025年至2030年作物的最优种植策略。

2 模型假设

- 假设本文所使用的数据均准确有效;
- 假设2023年各作物的产量等于2023年各作物的销量;
- 假设所有作物的种植成本平均每年增长4%至6%之间;
- 假设蔬菜类作物的销售价格平均每年增长4%至6%之间;
- 假设所有地块都相连在一起。

3 线性规划模型建立

3.1 定义决策变量

$$x'_{i,j,k} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中的 $x'_{i,j,k}$ 为 0-1 变量, 0 表示第 j 种作物在第 k 季时不种植在第 i 块地块上, 1 表示第 j 种作物在第 k 季时种植在第 i 块地块上。

【作者简介】李卫(1988-), 男, 土家族, 中国湖北巴东人, 博士, 讲师, 从事计算摩擦学、连接结构动力学研究。

3.2 确定目标函数

因为本问要求我们制定最优的种植策略，其目的在于每年作物销售后都能获取最大的盈利，所以本问的目标函数设为每年的盈利达到最大值。又因为需要考虑“超过部分滞销，造成浪费”和“超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售”两种情况，所以其转换而来的数学表达式分别为：

①超过部分滞销，造成浪费

$$\max f_1 = \sum_{t=2024}^{2030} \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{107} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times (sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) - pc_j \times area_j) \quad (2)$$

其中的 sv_j 表示第 j 种作物的预期销量， ay_j 表示第 j 种作物的亩产量， sp_j 表示第 j 种作物的销售单价， pc_j 表示第 j 种作物的每亩种植成本， $area_j$ 表示第 j 种作物的种植面积。

②超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售

$$Q_j = sv_j - ay_j \times area_j = \begin{cases} Q_j, & Q_j > 0 \\ 0, & Q_j \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\max f_2 = \sum_{t=2024}^{2030} \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{107} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times area_j \times [(sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) + Q_j \times sp_j^{2023} \times 0.5) - pc_j] \quad (4)$$

其中 Q_j 的表示第 j 种作物总产量超过相应的预期销售量的部分， sp_j^{2023} 表示 2023 年第 j 种作物的销售单价。

3.3 确定约束条件

当地块类型为智慧大棚时，每年可以种植两季的蔬菜，所以其转换而来的数学表达式为：

$$x_{i,j,k}^t = 1, j = \text{两季蔬菜}, i = \text{智慧大棚} \quad (5)$$

每个地块（含大棚）在三年里至少需要种植一次豆类作物，所以其转换而来的数学表达式为：

$$\sum_{t=T}^{T+2} \sum_{j \in \text{豆类作物}} x_{i,j,k}^t \geq 1, T = 2024, \dots, 2027 \quad (6)$$

为了确保每种作物每季的种植地尽可能的集中，本文引入最小阈值 δ_{minj} ，让每种作物的每季种植面积不能小于 δ_{minj} ，其转换而来的数学表达式为：

$$\sum_{i=1}^{34} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times area_j \geq \delta_{minj} \quad (7)$$

为了避免作物连续重茬种植而导致产量减小，本文引入不重茬约束，其转换而来的数学表达式为：

$$\sum_{t=2024}^{2030} x_{i,j,k}^t \times x_{i,j,k}^{t-1} = 0 \quad (8)$$

在上述数学表达式中，当连续两年种植同一作物时即和的值均为 1 时，的结果也为 1，表达式不成立。因此只有连续两年种植不同作物时，上述表达式才成立。故该表达式可用于约束不重茬。

3.4 建立线性规划模型

结合目标函数和约束条件，分别建立两种情况的线性规划模型，数学表达式如下：

超过部分滞销，造成浪费

$$\max f_1 = \sum_{t=2024}^{2030} \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{107} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times (sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) - pc_j \times area_j) \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{i,j,1}^t = 1, \forall i \in (\text{平旱地、梯田、山坡地}) \\ x_{i,j,2}^t = 0, \forall i \in (\text{平旱地、梯田、山坡地}) \\ x_{i,j,1}^t = 1, \forall j = (\text{单季的水稻,两季的蔬菜}), i = \text{水浇地} \\ x_{i,j,2}^t = 1, \forall j = \text{两季的蔬菜}, i = \text{水浇地} \\ x_{i,j,1}^t = 1, j = \text{蔬菜}, i = \text{普通大棚} \\ x_{i,j,2}^t = 1, j = \text{食用菌}, i = \text{普通大棚} \\ x_{i,j,1}^t = 1, j = \text{两季蔬菜}, i = \text{智慧大棚} \\ \sum_{t=T}^{T+2} \sum_{j \in \text{豆类作物}} x_{i,j,k}^t \geq 1, T = 2024, \dots, 2027 \\ \sum_{i=1}^{34} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times area_j \geq \delta_{minj} \\ \sum_{t=2024}^{2030} x_{i,j,k}^t \times x_{i,j,k}^{t-1} = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$\max f_2 = \sum_{t=2024}^{2030} \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{107} \sum_{k=1}^2 x_{i,j,k}^t \times area_j \times [(sp_j \times \min(ay_j \times area_j, sv_j) + Q_j \times sp_j^{2023} \times 0.5) - pc_j] \quad (11)$$

约束条件见式 10 所示。

综上所述，基于模拟退火算法的种植策略建模流程见图 1 所示。

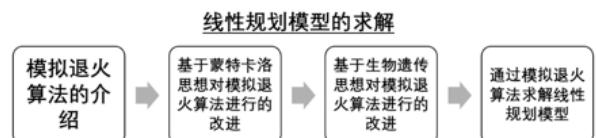


图 1 建模流程图

线性规划模型求解超过部分按 2023 年销售价格的 50% 降价出售

3.5 基于蒙特卡洛思想对模拟退火算法进行的改进

模拟退火算法^[4]是一种以概率为基础的全局优化算法，它通过对固体退火过程进行模拟，增大搜索范围从而找到全局最优解。蒙特卡洛模拟^[5]是一种随机模拟方法，它以概率和统计理论为基础，使用随机数（或伪随机数）来解决问题。本文采用蒙特卡洛模拟思想对模拟退火算法进行改进，蒙特卡洛思想的流程图为（图 2）：

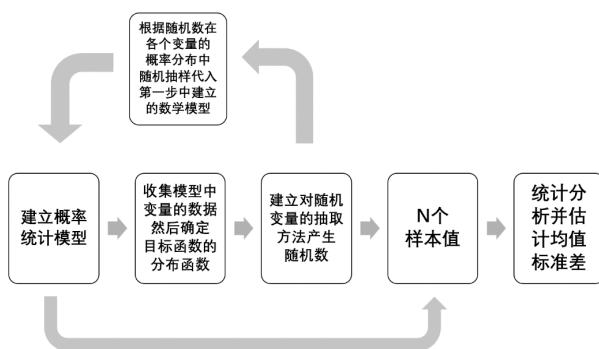


图 2 蒙特卡洛思想的流程图

3.6 基于生物遗传思想对模拟退火算法进行的改进

在模拟退火的寻优过程中,为了找到最合适最优解,本文引入生物遗传中的生物变异思想,即在模拟退火算法确定种植作物A时,把作物A随机变异成符合条件的作物B,

如果盈利得到增加,我们就把作物A换成作物B,否则就保持不变,以此来寻找最优解。该模型不仅能提高搜索效率,而且可以产生多种最优解,从而找到最合适的解^[6-7]。

3.7 通过模拟退火模型求解线性规划模型

本文通过 Matlab 分别建立基于两种不同思想改进的模拟退火模型,进而对上述线性规划问题进行求解。模拟退火初始温度为 1000C°,最大迭代次数 500,温度衰减系数 0.95。将相关数据代入上述两种模拟退火模型,比较两种模型得到的结果,从而得到该乡村在两种情况下 2024 年至 2030 年作物的最优种植策略。由于本文篇幅有限,只展示第二种情况(式 11)各年最大盈利的结果,如表 1 所示。

以 2024 年第一种情况和第二种情况的求解结果为例,得到第一种情况的最大盈利为 20619637 元,第二种情况的最大盈利为 315436392 元,它们的求解迭代图如图 3 和图 4 所示。

表 1 第二种情况下的各年最大盈利(元)的结果

2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年
315436392	282035756	233440454	288899963	282972007	296129182	237239408

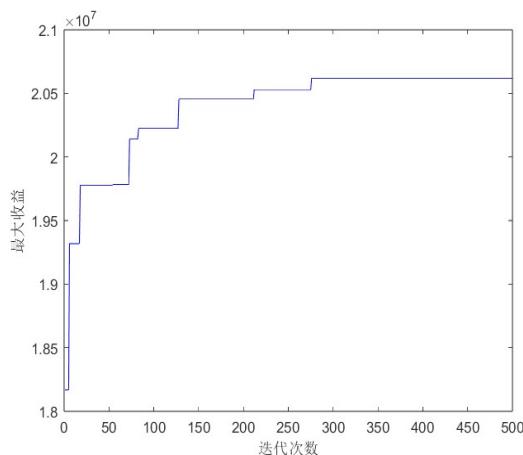


图 3 2024 年第一种情况的求解结果迭代图

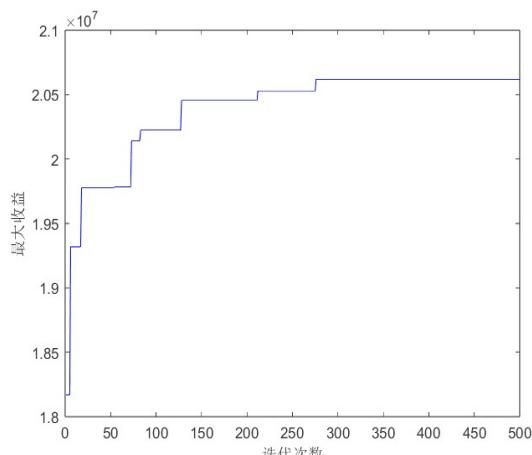


图 4 2024 年第二种情况的求解结果迭代图

4 结语

本文所使用的模拟退火算法拥有较强的搜索能力,能够帮助我们准确地找出全局最优的种植决策。本文模型不用繁琐的数学推导与结果计算,这有利于我们的理解与应用。但是,本文所使用的模拟退火算法的收敛速度较慢,进而导致找出全局最优解所需的时间比较长。

参考文献

- [1] 郑明立.河南省白灵菇栽培现状与发展前景[J].河南农业,2007,(12):15+17.
- [2] 陆静雯.我国羊肚菌产业发展的机遇与挑战[J].蔬菜,2018,(05):

61-67.

- [3] 朱柳蓉,王钰,黄筱珂.奋力耕耘正当时[N].中国县域经济报,2024-01-18(007).
- [4] 谢云.模拟退火算法的原理及实现[J].高等学校计算数学学报,1999,(03):212-218.
- [5] 朱陆陆.蒙特卡洛方法及应用[D].华中师范大学,2014.
- [6] 姜德重.新玉米上市季小麦替代影响几何[N].粮油市场报,2021-09-09(003).
- [7] 董楠.不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制[D].中国农业大学,2017.

Research on Adaptive Energy Saving Control Strategy of New Energy Vehicles Based on Machine Learning

Fuqiang Tang

Xiaomi Automotive Technology Co., Ltd., Xiangyang, Hubei, 441002, China

Abstract

As the global energy crisis intensifies and environmental protection requirements become increasingly stringent, new energy vehicles (NEVs) have emerged as a crucial pathway to reduce carbon emissions and promote energy conservation. The energy efficiency of NEVs remains one of the core challenges in the automotive industry. To further enhance the energy efficiency of NEVs, this paper proposes an adaptive energy-saving control strategy based on machine learning. By monitoring real-time vehicle operating conditions, driving behaviors, and road information, the strategy dynamically adjusts energy-saving control measures through machine learning algorithms to maximize energy utilization and minimize unnecessary energy consumption. The paper provides a detailed analysis of the design philosophy, key technologies, and practical advantages of the adaptive energy-saving control strategy. Experimental results demonstrate that the machine learning-based control strategy significantly improves the overall energy efficiency of NEVs across various driving scenarios, offering both theoretical foundations and practical support for future energy-saving technology development.

Keywords

new energy vehicles; machine learning; adaptive control; energy-saving optimization; energy management

基于机器学习的新能源汽车自适应节能控制策略研究

汤富强

小米汽车科技有限公司，中国·湖北 襄阳 441002

摘要

随着全球能源危机的加剧和环境保护要求的日益严格，新能源汽车（NEV）逐渐成为减少碳排放、节能减排的重要途径。新能源汽车的能效问题一直是汽车产业的核心挑战之一。为了进一步提升新能源汽车的能效，本文提出了一种基于机器学习的自适应节能控制策略。该策略通过实时监控车辆的运行状态、驾驶行为以及路况信息，结合机器学习算法动态调整节能控制策略，以实现能源利用最大化并减少不必要的能量消耗。文章详细分析了自适应节能控制策略的设计思路、关键技术及其在实际应用中的优势。通过实验结果验证，基于机器学习的控制策略能够在不同驾驶场景下显著提高新能源汽车的整体能效，为未来的节能技术发展提供了理论依据和实践支持。

关键词

新能源汽车；机器学习；自适应控制；节能优化；能源管理

1 引言

随着全球环保政策日益严格，新能源汽车，尤其是电动汽车，以其零排放、低能耗的优势逐渐成为主流。然而，尽管在环境保护上具有显著优势，新能源汽车的能源效率仍有提升空间。传统节能控制方法通常基于固定算法，无法适应复杂多变的驾驶环境。近年来，机器学习技术的发展为节能控制提供了新的解决方案，通过学习历史数据并根据实时信息自适应调整策略，优化能效。本文旨在提出并验证一种基于机器学习的自适应节能控制策略，通过优化控制算法提升新能源汽车在多变驾驶环境中的能源效率，为相关技术的进一步发展提供理论支持。

【作者简介】汤富强（1986—），男，硕士，从事车辆工程专业研究。

2 机器学习在新能源汽车节能控制中的应用背景

2.1 新能源汽车节能技术的现状与挑战

新能源汽车节能技术的研究可以追溯到电动汽车的初期阶段。随着电池技术和电机驱动技术的不断进步，新能源汽车的能效得到了显著提升。特别是电池能量密度的提高和电机效率的优化，使得新能源汽车在短途和城市内出行中表现出色。然而，新能源汽车的能效在长途行驶、高速公路行驶以及复杂路况下仍面临着较大挑战。现有的节能技术通常包括动力系统的优化、能量回收系统的设计、以及驾驶策略的调整等方面。动力系统的优化主要通过改进电动机的控制策略，提高能量转换效率；能量回收系统则通过再生制动技术，回收制动过程中产生的能量；驾驶策略调整则通过优化驾驶行为，减少能量浪费。然而，这些技术大多依赖于固定

的模型和规则，难以实时适应复杂的行驶环境和驾驶行为，因此存在一定的局限性。

2.2 机器学习技术的发展及其在控制系统中的应用

机器学习作为人工智能领域的重要技术，近年来得到了广泛的应用。特别是在数据驱动的控制系统中，机器学习通过对大规模数据集的分析和建模，能够发现传统控制方法无法识别的规律。在新能源汽车的节能控制领域，机器学习技术被逐渐引入，通过对驾驶员行为、路况信息及车辆状态等多维数据的学习，自动调整控制策略，以实现节能和优化。常见的机器学习算法包括监督学习、无监督学习、强化学习等。监督学习主要通过标注数据进行训练，能够预测车辆在特定工况下的能效表现；无监督学习则能通过聚类等技术发现数据中的潜在模式，适用于复杂且未知的场景；强化学习则是一种通过与环境的交互来优化决策的学习方法，在节能控制中具有广泛的应用潜力。

2.3 现有节能控制策略的不足与改进需求

传统的节能控制策略通常依赖于静态的优化算法，如基于预设规则的能量管理系统。这些系统无法实时适应驾驶员的行为和变化的路况信息，因此在某些情况下，节能效果并不显著。此外，传统的节能策略对于复杂的驾驶环境缺乏灵活性，无法有效处理非线性和高维度的数据，导致其适应性较差。为了克服这些问题，需要引入更加智能和动态的控制策略。基于机器学习的自适应控制策略能够实时学习和调整控制模型，充分考虑驾驶行为、路况信息等多方面的因素，从而实现更加精确和高效的节能控制。

3 基于机器学习的自适应节能控制策略设计

3.1 自适应控制理论概述

自适应控制是一种能够根据系统动态特性变化而自动调整控制参数的技术。在新能源汽车的节能控制中，自适应控制可以根据实时获得的车辆运行数据，动态调整能量管理策略，以最小化能量消耗并确保驾驶舒适性。自适应控制的基本思想是通过不断更新控制参数，使系统始终处于最优工作状态。自适应控制系统的设计通常包括模型参考自适应控制（MRAC）和自适应增益控制（L1 adaptive control）等。对于新能源汽车的节能控制，模型参考自适应控制是一种较为常见的选择，因为它能够通过参考模型的输出与实际输出的误差进行控制，从而优化系统的能效。

3.2 机器学习算法的选择与应用

机器学习在自适应节能控制中的应用，要求能够处理复杂的动态环境和高维度数据。常见的机器学习算法包括支持向量机（SVM）、决策树、神经网络、深度学习以及强化学习等。在选择合适的算法时，需要考虑数据的可获取性、实时性要求以及计算资源的限制。支持向量机（SVM）是一种基于监督学习的分类和回归算法，能够通过最大化分类间隔来获得较好的泛化能力。在新能源汽车节能控制中，

SVM 可以用来识别不同的驾驶模式，并根据驾驶员的行为调整控制策略。神经网络，尤其是深度神经网络（DNN），能够自动从数据中提取特征，适用于复杂的非线性问题。强化学习则通过与环境的交互来优化决策，特别适合用于多目标优化的节能控制。

3.3 控制策略的优化模型与设计框架

基于机器学习的节能控制策略通常包括三个主要部分：数据采集与处理、特征提取与学习、控制决策与执行。首先，通过传感器采集车辆的各类数据，包括车速、电池电量、驾驶行为、路况信息等；接着，使用机器学习算法分析这些数据，提取出影响能效的关键特征；最后，根据学到的模型，实时调整能量管理策略。控制策略的设计需要考虑多方面的因素，如驾驶员的驾驶风格、实时交通信息、路况变化等。因此，设计一个动态更新的学习模型显得尤为重要。通过引入强化学习或深度学习模型，能够实现更加精细化的控制。

4 基于机器学习的节能控制系统实现与实验

4.1 系统架构与关键技术

基于机器学习的节能控制系统通常包括数据采集、处理、决策和执行四大模块。首先，数据采集模块通过车辆内置的传感器实时采集车辆的各项运行数据，如车速、电池电量、驾驶员行为以及外部环境信息（如路况、气象等）。这些数据为后续决策提供了关键的输入信息。数据处理模块则对原始数据进行预处理，包括噪声去除、异常值检测以及对数据进行时序对齐等步骤。此外，特征提取技术在这一模块中也至关重要，通过提取与能效相关的关键特征，为机器学习模型提供有效输入。决策模块是核心部分，基于不同的机器学习算法（如支持向量机、深度学习等），对处理后的数据进行分析，并形成最优的节能控制策略。最后，执行模块根据决策模块的指令，调整车辆的能量管理系统，如控制电池的充放电过程、调整电机输出等，确保系统能够实时、有效地响应不同驾驶工况，优化能效。

4.2 数据采集与预处理方法

数据采集是基于机器学习的节能控制系统的基础。为了确保节能控制策略的准确性，系统必须通过高精度传感器收集车辆的实时运行数据，包括车速、加速度、电池电量、发动机负载等。此外，驾驶员行为（如急加速、急刹车等）和外部环境信息（如交通状况、路况变化等）也是重要的输入数据。在数据采集之后，为了确保系统能够有效处理这些数据，必须进行一系列的预处理操作。常见的数据预处理方法包括数据去噪，以去除传感器可能带来的噪声和误差；特征选择，通过选择对节能控制最有影响的特征，减少冗余数据的干扰；数据归一化，将不同尺度的数据映射到同一范围内，提高模型的训练效率和预测准确性。通过这一系列的处理，数据的质量和有效性得到了保障，确保了后续模型训练和决策的准确性。

4.3 实验设计与结果分析

为了验证基于机器学习的自适应节能控制策略的效果，本文设计了一系列实验，模拟了不同的驾驶工况，如城市驾驶、高速行驶、山路行驶等。每种工况下，系统都需要根据驾驶员的行为和路况的变化，动态调整节能控制策略。实验结果显示，基于机器学习的控制策略能够在大多数情况下显著提高能效，特别是在复杂的路况条件下，如上坡或山路行驶，系统表现出了较强的适应性和优化能力。在城市驾驶的实验中，系统能够根据车辆的低速行驶和频繁加减速，优化能量分配，减少不必要的能量损失；在高速行驶中，控制策略则着重于优化电机输出和能量回收系统，最大化行驶距离。此外，实验还验证了系统的实时性和稳定性，表明该控制策略能够在快速变化的驾驶环境中快速响应，实时调整控制策略，保证节能效果和驾驶舒适性的平衡。

5 基于机器学习的节能控制策略的性能分析与评价

5.1 节能效果评估方法

节能效果的评估是验证控制策略性能的关键步骤。为了全面评估基于机器学习的节能控制策略的有效性，常通过与传统控制策略的对比实验进行。首先，通过对比两种策略在相同驾驶场景下的能量消耗，分析其在不同驾驶条件下的能源利用效率。此外，还通过对驾驶舒适性的评价，包括加速、制动平顺性等指标，来衡量控制策略对驾驶体验的影响。系统响应时间也是评估的重要维度，通过测量策略调整的响应速度，评估其对瞬时驾驶变化的适应能力。为了更全面地测试策略的灵活性，还会模拟不同驾驶员行为（如急加速、急刹车等）和不同路况（如上坡、下坡、城市道路等）的变化，观察控制策略在这些动态变化下的表现。综合多维度的评估方法，可以更准确地反映基于机器学习的控制策略的优势与不足。

5.2 不同算法的对比分析

在基于机器学习的节能控制策略中，不同算法在节能效果上的表现存在差异。实验结果表明，强化学习算法在长期、多任务的控制环境中具有显著优势，尤其在复杂的交通环境中，通过与环境的持续交互来优化策略，其能够根据实时数据动态调整控制决策，有效提高能效。相比之下，支持向量机（SVM）在较为简单的驾驶场景中表现较好，能够通过高效的分类与回归模型，快速响应系统需求，优化能量管理。但在面对更复杂的驾驶场景时，其能力有所局限。深度学习算法，特别是在处理非线性问题时，展现出强大的能力。深度神经网络通过多层次的特征提取，能够捕捉到复杂

的驾驶行为模式，适用于复杂的节能控制系统。通过对比不同算法的节能效果，可以为选择合适的控制策略提供依据，进一步提高系统的优化效果。

5.3 系统稳定性与实时性分析

系统的稳定性和实时性是基于机器学习的节能控制策略在实际应用中的关键性能指标。在驾驶过程中，环境和驾驶员的行为时刻发生变化，如何快速、准确地响应这些变化，确保系统的稳定性和优化性能，是一个重要挑战。实验结果显示，基于机器学习的节能控制策略能够实时响应车辆的动态变化，自动调整控制策略以适应不同的驾驶工况。例如，在急加速或急刹车情况下，系统能够及时调整能量分配策略，确保能效最大化，同时保障驾驶舒适性。控制策略的实时性表现在算法处理速度上，确保系统在驾驶过程中无明显延迟。而稳定性则表现为在不同驾驶条件下，系统能够持续输出稳定的控制信号，避免由于算法波动而导致的能效波动。通过对系统稳定性与实时性的深入分析，可以确保基于机器学习的节能控制策略能够在实际驾驶中稳定运行，并为驾驶员提供优质的使用体验。

6 结语

本文提出的基于机器学习的自适应节能控制策略，通过引入先进的算法，实现了新能源汽车在多种驾驶工况下的节能优化。实验结果表明，该策略能够在复杂和变化多端的驾驶环境中显著提升能效，具有较强的适应性和灵活性。然而，研究中仍存在一些不足之处。首先，实验数据主要来自于有限的驾驶场景，未来需要扩展到更多真实驾驶条件下的验证；其次，机器学习模型的训练过程较为复杂，如何在确保精度的前提下提高模型的实时性和计算效率仍需进一步探索。展望未来，随着智能交通系统和车联网技术的进步，结合大数据和云计算的节能控制策略将在提升系统性能和应对更加复杂的交通环境方面发挥重要作用。优化算法的实时性和计算效率将是下一阶段研究的关键方向。

参考文献

- [1] 龚星月.基于机器学习与多源数据融合的新能源汽车股价指数预测框架[D].四川师范大学,2024.
- [2] 陈长.基于机器学习的锂电池老化轨迹与健康状态预测方法研究[D].深圳大学,2023.
- [3] 杨建银.新能源汽车电池管理系统控制策略研究[J].汽车测试报告,2023,(19):4-6.
- [4] 吴乐琪.基于网络搜索数据和机器学习方法的新能源汽车发展研究[D].中国石油大学(北京),2022.
- [5] 张智鹏.新能源汽车电池管理系统故障诊断与健康状态评估方法探析[J].汽车测试报告,2024,(14):47-49.

Analysis of Innovation and Application Practice of Big Data Privacy Protection Technology

Yang Dai¹ Zhendong Niu¹ Yicheng Zhao¹ Tao Li²

1. Guizhou Digital Technology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550002, China

2. Guiyang Block Data City Construction Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550000, China

Abstract

With the rapid development and widespread application of big data technology, data has become a key production factor driving social progress and economic growth. However, privacy leakage issues have become increasingly prominent during large-scale data collection, transmission, sharing, and deep mining, with their severity continuously escalating. This paper aims to systematically analyze data privacy protection technologies in the big data environment, focusing on their innovative achievements and practical applications. The article first elucidates the necessity and core challenges of big data privacy protection, then delves into technical innovations and practical implementations. It provides in-depth analysis of cutting-edge technologies such as differential privacy, federated learning, homomorphic encryption, and data desensitization, explaining their principles and characteristics. By examining typical industry scenarios including finance, healthcare, and government services, the paper evaluates their implementation effects and strategic value. Finally, it summarizes and prospects future development trends of big data privacy protection technologies, aiming to provide references for theoretical research and practical exploration in related fields.

Keywords

big data; privacy protection; differential privacy; federated learning; homomorphic encryption

大数据隐私保护技术的创新与应用实践分析

代杨¹ 牛振东¹ 赵一丞¹ 李涛²

1. 多彩贵州数字科技股份有限公司, 中国·贵州贵阳, 550002

2. 贵阳块数据城市建设有限公司, 中国·贵州贵阳 550000

摘要

伴随大数据技术的飞速发展与广泛应用, 数据已成为推动社会进步与经济增长的关键生产要素。然而, 在数据的大规模采集、传输、共享及深度挖掘过程中, 隐私泄露问题日益凸显, 其严峻性持续升级。本文旨在系统剖析大数据环境下的数据隐私保护技术, 聚焦其创新成果与实践应用。文章首先阐明大数据隐私保护的必要性及核心挑战, 进而从技术革新与应用实践两个维度展开深入探讨: 重点解析差分隐私、联邦学习、同态加密及数据脱敏等前沿技术的原理与特性, 并结合金融、医疗、政务等典型行业场景, 分析其落地效果与战略价值。最后, 文章对大数据隐私保护技术的未来发展趋势进行总结与展望, 以期为相关领域的理论研究与实践探索提供参考。

关键词

大数据; 隐私保护; 差分隐私; 联邦学习; 同态加密

1 引言

大数据技术通过海量数据的采集、存储、挖掘与分析, 为商业智能、社会治理、科学研究等领域带来了前所未有的发展机遇。然而, 在数据价值释放的过程中, 个人隐私数据、敏感数据被过度采集、滥用和泄露的风险日益凸显, 成为制约大数据产业健康可持续发展的关键障碍。传统隐私保护手段(如匿名化处理、访问控制等)在面对大数据的关联分析

能力与重识别攻击时, 往往难以有效抵御隐私泄露威胁。在此背景下, 如何在充分释放数据价值的同时, 构建切实可行的个人隐私、敏感数据的安全防护体系, 已成为学术界与业界共同关注的焦点。本文基于这一现实需求, 旨在系统梳理当前主流的隐私保护技术创新方向, 结合典型应用场景分析其实施路径与效能, 探索数据价值挖掘与隐私安全防护之间的动态平衡机制。

2 现状描述

近年来, 我国大数据隐私保护的法律法规体系不断完善, 形成了以《中华人民共和国网络安全法》《中华人民共和国数据安全法》《中华人民共和国个人信息保护法》为核

【作者简介】代杨(1981—), 男, 土家族, 中国贵州贵阳人, 工程师, 从事政务信息化、大数据、隐私计算、公数运营等研究。

心的“三驾马车”，并出台了《网络数据安全管理条例》《个人信息出境标准合同办法》等配套法规，明确数据处理者的主体责任、数据分类分级保护等要求。

随着大数据的广泛应用，隐私保护技术不断创新，其中隐私计算（Privacy-Preserving Computation）成为解决数据孤岛与隐私保护矛盾的关键技术。

3 大数据隐私保护的核心技术创新

大数据环境下的隐私保护技术已从传统的数据加密与匿名化手段，逐步演进为一系列更契合复杂计算场景与多方共享需求的创新解决方案，隐私计算的核心逻辑是在不泄露原始数据的前提下，实现跨主体的数据协作与分析，通过差异化防护机制，为数据隐私安全构建了多层次、动态化的防御体系。

3.1 差分隐私技术

差分隐私作为一种基于严谨数学框架的隐私保护技术，其核心机制在于向查询结果注入符合特定概率分布的随机噪声。该技术确保对于任意可能的查询操作，在仅相差一条个体记录的两个相邻数据集上，其输出结果的概率分布高度近似，难以被有效区分。换言之，无论特定个体是否参与或退出数据集，其对最终发布的统计结果的影响均被控制在极低水平，从而使得攻击者即便掌握除目标个体外的所有辅助信息，也难以通过观察和分析查询结果来可靠地推断出该个体的敏感信息^[1]。

差分隐私的重大创新在于首次为隐私保护提供可严格量化的理论支撑。其核心参数 -- 隐私预算 (ϵ)，直接定义了隐私保护的程度：当两个相邻数据集生成的输出分布越接近时，所施加的隐私保护程度越高，需添加的噪声量通常也越大。这种精准的数学关联使数据管理者能明确量化隐私风险与数据效用之间的权衡关系，为差分隐私在统计数据库查询、公共数据发布等场景中的应用提供理论依据。通过构建隐私减损与数据有效性的科学平衡，能在保障个体隐私安全的同时，确保发布数据在宏观层面仍具备较高的统计价值。

3.2 联邦学习技术

联邦学习的核心在于突破传统机器学习“数据集中、模型训练”的固有范式，实现了“数据不动、模型动”的分布式协同学习架构。在该框架下，多个拥有本地数据的数据持有方（称为客户端）无需向服务器或第三方上传原始数据，仅需在本地利用私有数据独立训练模型，并将计算得到的模型更新（如梯度或权重变化量）进行加密后传输至协调方。

协调方（通常为中央服务器）负责收集来自各客户端的模型更新，并通过特定聚合算法（如联邦平均算法）将分散的更新整合和优化为一个统一的全局模型。该全局模型经优化后重新分发至各参与方，开启新一轮本地训练，形成“本地训练 - 全局聚合 - 模型迭代”的闭环循环。这种工作模式从架构层面彻底阻断原始数据跨本地环境传输的路径，

从根本上消除因数据集中收集、传输和存储引发的隐私泄漏风险。

3.3 同态加密技术

同态加密技术是密码学领域的里程碑式突破，其核心在于支持对加密状态下的数据进行特定代数运算 -- 无论是基础的加法、乘法运算，还是复杂的函数计算，经解密后的结果与直接在原始明文上执行相同运算的结果完全一致。这一特性使得数据处理方在完全无法接触明文的前提下，仍能完成有意义的计算任务，真正实现了“数据可用不可见”的安全范式，为破解数据隐私保护与价值挖掘之间的固有矛盾提供了革命性技术路径。

早期的全同态加密方案因极高的计算与通信开销而难以实用化，但随着理论算法的持续优化及专用硬件加速技术的突破，正逐步跨越实验室阶段走向实际应用。当前，其处理效率与资源消耗已取得显著进步，为规模化落地创造了现实条件。最具潜力的应用场景包括云计算环境下的安全外包计算（用户可将加密数据委托给云服务商处理而无需泄露任何敏感信息），以及多方参与的联合数据分析（实现隐私保护下的协同建模与知识发现）。这充分表明，同态加密正在为构建兼顾隐私安全与数据价值释放的新型计算生态奠定坚实基础^[2]。

4 大数据隐私保护技术的应用实践

4.1 金融风控领域

在金融领域，数据驱动已成为业务发展的核心引擎，尤其在风险管控与精准营销等关键环节中，跨机构数据共享与联合建模的需求日益迫切。但客户隐私保护法规与商业秘密要求，使得银行间及与外部公司间的原始数据直接交换面临重大合规挑战。因此，联邦学习技术通过“数据可用不可见”的加密计算机制，有效破解跨机构数据共享的合规困境。以商业银行反欺诈场景为例，多家机构可基于联邦框架构建联合风控模型：各参与方仅上传本地客户交易数据的梯度更新信息（如特征权重调整参数），通过加密通道进行聚合优化。可在确保用户账户信息与交易细节始终保留在本地的前提下，显著降低数据泄露风险，大幅提升金融网络对新型欺诈模式的识别与防御能力。如江苏银行与腾讯安全合作的实践表明，该技术使信用卡反欺诈模型的 K-S 值提升 25.1%，同时实现黑灰产特征变量在加密状态下的安全融合。

在金融数据开放场景中，差分隐私技术通过向统计结果中注入经过精密数学计算的随机噪声，实现统计信息披露与隐私保护的量化平衡。如中国人民银行向研究机构或公众发布宏观统计数据时，系统自动向统计结果添加符合 (ϵ, δ) -差分隐私约束的高斯噪声，确保任何个体客户的敏感交易行为或身份信息无法从汇总数据中被逆向推导。

4.2 医疗健康领域

医疗数据作为高度敏感的个人信息，其安全共享机制

对推动精准医学研究及创新药物研发具有关键意义。针对基因数据隐私保护需求，同态加密技术提供了一种创新解决方案：该技术允许研究人员在加密状态下直接对基因序列执行统计分析、对比运算、突变检测及相关性研究等操作，全程无需接触原始明文数据。这一机制在切实保障患者隐私权益的同时，为跨机构、跨地域的基因数据协同分析提供了技术支持，既显著降低数据泄漏风险，又加速遗传疾病研究与个性化治疗方案开发的进程^[3]。

在临床诊疗数据应用领域，联邦学习技术通过分布式模型训练模式实现多方数据价值的整合利用。各医疗机构可基于本地存储的患者电子病历，在不共享原数据的前提下，共同优化疾病诊断模型与预后预测系统。该框架仅需交换加密后的模型参数更新信息，而非直接传输诊疗记录，从而在数据物理隔离的状态下实现知识聚合。这一模式既严格遵循 HIPAA 等法规对患者健康信息的保护要求，又有效打破医疗机构间的数据壁垒，为构建更精准的医疗人工智能模型提供合规高效的实现路径。

4.3 智慧政务领域

在数据驱动决策的背景下，政府部门在利用人口、经济等大规模数据资源进行公共政策分析和服务提升时，面临着数据公开与隐私保护的双重挑战。差分隐私技术通过向统计查询结果或数据集中添加精确计算的随机噪声，有效防止从宏观数据中逆识别特定个体或家庭信息的风险，成为人口普查报告、区域经济统计等官方数据发布的核心技术。该技术既保障数据的统计效用，为政策制定提供可靠依据，又从根本上切断从汇总信息反推个人身份的可能性。

为赋能公共数据运营，公数运营平台创新采用联邦学习与差分隐私的协同防护机制，在传统数据脱敏技术基础上构建起“数据可用不可见、价值可控可溯源”的多层次安全体系。该技术通过联邦学习的分布式架构确保原始数据不出域，同时利用差分隐私在模型参数传输阶段注入可控噪声，有效抵御模型逆向攻击与数据重识别风险。在保留数据分析价值的前提下，将个人隐私泄露风险降至最低，为公共管理决策、学术研究创新及社会应用开发提供了兼具安全性和可用性的数据支撑。

5 大数据隐私保护技术的发展趋势与展望

伴随技术进步和应用深化，大数据隐私保护技术正呈现多维度、融合化与标准化的发展趋势，其核心演进路径可归纳为以下三个层面。

5.1 技术融合与协同增强：构建体系化防护体系

单一隐私保护技术难以应对复杂多变的数据安全风险，技术融合成为突破方向。联邦学习虽能实现数据“可用不可见”，但仍面临模型逆向攻击等安全漏洞；而差分隐私通过

可控噪声注入可有效抵御此类攻击。二者协同应用可在参数传输阶段构建双重防护机制，显著提升系统安全性。此外，同态加密与安全多方计算的结合，能够在密文状态下实现多方安全计算，在保障数据安全的同时兼顾计算效率。这种技术协同不仅提升整体防护能力，更推动隐私计算从单点防御向体系化防护的跨越，为跨机构、跨地域的数据协作提供可靠技术支撑。

5.2 性能优化与实用化突破：破解“效率 – 安全”悖论

尽管全同态加密等前沿技术虽具备理论安全性，但计算与通信开销过大制约了应用成效。未来研究将聚焦三大方向：一是研发轻量级加密算法与近似计算策略，在满足基本隐私需求的同时提升处理速度；二是开发专用硬件加速芯片，通过异构计算优化资源分配；三是构建可调节的隐私 - 效率平衡机制，实现安全性与实用性的动态适配。结合边缘计算等新型架构，这些优化将推动隐私保护技术向物联网、实时推荐系统、医疗诊断等高时效性场景渗透，完成从“技术可行”到“应用好用”的跨越。

5.3 标准规范与生态构建：完善制度保障体系

隐私保护技术的健康发展需要技术、法律与生态的协同推进。全球范围内，GDPR、国内《个人信息保护法》等法规体系正倒逼企业采用合规技术方案。行业亟须建立统一的隐私度量标准、可审计的技术评估体系及跨系统互操作协议。随着国际监管政策逐步接轨和技术认证体系完善，正在形成“政府引导 - 企业实践 - 学术支撑”的协同生态，涵盖技术研发、合规运营、伦理审查等全链条，为隐私保护技术的大规模应用奠定制度基础与社会信任根基。

6 结语

综上所述，大数据时代的隐私保障是一项兼具复杂性与长期性的系统工程。本文系统剖析了以差分隐私、联邦学习和同态加密为代表的创新性隐私防护技术，这些技术从数据可用性、安全性和计算效率等维度，为平衡数据价值挖掘与隐私保护提供多元化解决方案。在金融风控、医疗数据共享、政务协同等领域的实践表明，相关技术已从理论探索迈入规模化应用阶段，并展现出显著的社会经济效益。

参考文献

- [1] 张晗,谢鹏,武兰.人工智能技术应用中的数据隐私保护技术研究[J].互联网周刊,2025,(20):21-23.
- [2] 辛翠平.大数据环境下的隐私保护与数据脱敏技术研究[J].网络安全和信息化,2025,(09):121-123.
- [3] 邱景,赵笑尘,胡徐茜,张丽杰.大数据医疗时代的人工智能与患者个人隐私保护的技术方案研究[J].国外电子测量技术,2025,44(07):294-300.

Innovation of Construction Safety Risk Management in Power Grid Construction Project

Wei Liu

Tangshan Electric Power Construction and Installation Co., Ltd., Zunhua Zhongtai Branch, Tangshan, Hebei, 064200, China

Abstract

With the continuous expansion of power grid construction projects, on-site safety risk management faces increasing challenges. Traditional safety management models struggle to address the growing complexity of construction environments and evolving safety hazards, making innovative risk management approaches particularly crucial. This paper analyzes major safety risks in current power grid construction and identifies shortcomings in conventional management practices. It proposes an innovative risk management strategy leveraging big data, intelligent technologies, and digital platforms. By establishing a multi-tiered safety management system, strengthening safety culture, enhancing staff training and emergency drills, the study aims to elevate overall safety management standards.

Keywords

power grid construction project; construction safety; risk management; innovative mode; big data.

电网建设工程现场施工安全风险管理创新

刘伟

唐山电力建筑安装有限公司遵化众泰分公司，中国·河北 唐山 064200

摘要

随着电网建设工程规模的不断扩大，施工现场的安全风险管理面临着越来越多的挑战。传统的安全管理模式已难以应对日益复杂的施工环境和多变的安全隐患，因此，创新的安全风险管理模式显得尤为重要。本文分析了当前电网建设工程施工中的主要安全风险及传统管理模式存在的问题，提出了基于大数据、智能化技术和信息化平台的安全风险管理创新路径。通过构建多层次的安全管理体系，强化安全文化建设，加强施工人员培训与应急演练，提升整体安全管理水平。

关键词

电网建设工程；施工安全；风险管理；创新模式；大数据

1 引言

电网建设工程作为基础设施的重要组成部分，具有复杂的施工环境和较高的安全风险。随着电网建设规模的不断增大，施工现场的安全问题日益突出，传统的安全管理方法已无法适应现代施工的需求。当前，电网建设项目面临着施工人员安全意识薄弱、施工现场环境复杂多变、设备老化等诸多安全隐患。与此同时，传统安全管理方式缺乏有效的风险预测和实时监控，导致安全事故频发。为应对这一挑战，创新的安全风险管理模式显得尤为迫切，对电网建设工程施工现场的安全风险进行有效管理，提升施工安全性，并确保项目的顺利推进和人员生命财产安全。

2 电网建设工程施工安全风险的现状分析

2.1 电网建设工程施工的主要安全风险

电网建设工程施工过程中的安全风险主要集中在高空作业、电气设备操作、机械设备使用以及施工环境的管理等方面。根据近几年安全事故报告，约 70% 的事故发生在高空作业中，其中主要涉及施工人员坠落、物体打击等问题。此外，电气设备的安装和维护过程中，由于技术操作不当，造成了电气设备故障和电击事故的发生。机械设备如起重机、吊车等的使用，若未能严格按照操作规程进行，也常常导致设备故障或人员伤亡。据统计，机械设备相关事故占总事故的 15%。施工现场环境的复杂性，如天气、场地设施的缺陷等，也是造成安全隐患的原因之一。对于这些风险，传统管理模式难以全面评估和控制，导致事故频发^[1]。

2.2 传统施工安全管理存在的问题

目前，电网建设工程的传统施工安全管理仍存在许多不足。传统的管理模式多依赖人工巡检和现场报告，缺

【作者简介】刘伟（1979–），男，满族，中国河北唐山人，本科，从事电网建设工程现场施工安全管理研究。

乏实时监控和风险评估的能力。施工现场的安全隐患往往在事后才被发现，导致了应急反应不足，影响了事故的处理效率。此外，传统模式中的数据记录和管理方式不规范，难以对安全数据进行系统分析和长期跟踪。因此，事故的根源分析和预防措施的落实不够有效。根据调查数据，超过 60% 的电网建设项目未能及时实施安全管理优化措施，导致潜在的安全隐患未得到及时识别和处理。通过这种传统管理模式，施工过程中的动态风险变化未能得到及时反馈和管控，从而增加了安全事故的发生几率。

3 电网建设工程安全风险管理创新的必要性

3.1 施工安全形势的变化与挑战

随着电网建设规模的扩大和施工项目的多样化，施工安全形势逐渐变得更加复杂。现代电网建设工程项目的施工环境涉及的区域广泛且条件复杂，传统的安全管理模式已无法有效应对这些挑战。施工现场的人员流动性较大，且大部分作业过程在高空、高压等危险环境中进行，安全风险较高。随着新技术的不断应用，施工设备的技术复杂性增加，带来了更多的操作风险。根据某大型电网建设项目的调查报告，项目中涉及的设备和技术更新频繁，给施工人员带来了更高的操作要求与技术难度。与此同时，由于安全文化的普及和安全意识的不足，事故发生频率未能显著下降，施工安全仍然面临较大的挑战。

3.2 创新管理模式对提升安全性的作用

创新的管理模式能够有效提升施工现场的安全性。通过引入信息化、智能化手段，可以实现对施工现场的全面监控和动态管理。例如，大数据技术可以帮助实时分析施工过程中可能出现的风险，提前进行预警。智能化设备的引入，如无人机巡检、智能传感器等，可以帮助实时检测施工环境中的安全隐患，并及时传递信息给管理人员。通过这些创新手段，施工安全得到了全面保障，事故的发生几率大大降低。根据某项目的实际应用，采用智能化监控设备后，安全事故发生率降低了近 40%。这种模式的推广将有效提高施工项目的安全性，减少人员伤亡，降低事故处理成本。

3.3 政策与技术支持对创新的推动作用

政策与技术支持对电网建设工程安全管理创新起到了重要的推动作用。近年来，国家相关部门出台了多个关于施工安全管理的政策法规，明确要求施工单位采用现代化、安全化的管理手段。特别是在电网建设领域，随着国家对智能电网的重视，技术创新与政策支持相辅相成，推动了安全管理的升级。例如，《建筑施工安全管理条例》对施工安全提出了明确的要求，推动了信息化和智能化安全管理技术的应用。此外，国家对施工安全技术的研发与资金支持，也为企业提供了创新的技术平台。随着技术的不断进步，施工安全管理手段的创新将不断推进，进一步提升项目的安全性和效率^[2]。

4 电网建设工程安全管控与风险防范目标

4.1 核心本质安全目标

通过“1136”本质安全工程，电网建设工程旨在建立全员全过程的风险管控体系，实现人身安全、电网安全及设备安全的可控、在控、能控。从根源上消除安全隐患，守住电网和人身安全的生命线。“1136”本质安全工程通过明确责任、加强培训、实施标准化管理及引入先进的安全技术手段，确保所有工作人员在施工、运维过程中全面掌握安全要求并严格执行。特别是，强化现场安全监督与风险评估机制，利用信息化平台实现实时监控与风险预警，使得安全管理从传统的事后整改转变为全过程的风险预测与防控。通过该体系，项目在施工和运营过程中能够识别并消除潜在风险，保障电网安全的同时，确保人员生命安全，降低事故发生率，提高整体工作效率。

4.2 电网安全管控目标

电网安全管控的首要目标是杜绝大面积停电，防范各类安全事故和安全事件的发生，确保电网系统的稳定运行。特别是在京津唐电网的支撑作用下，必须完成迎峰度夏等特殊时段的保供任务，保障大电网的平稳运行。通过提升风险预控能力，强化对重点线路设备的巡查，确保设备稳定运行，防止事故的发生。实施特巡检查措施，增加对重点设备和线路的监控力度，以确保在任何突发情况下能迅速响应并做出调整。数据表明，在实施这一管控目标后，电网的供电稳定性得到明显提高，事故发生率较之前减少了 30%。同时，211 个重要客户的供电得到了充分保障，确保了社会经济和人民生活的正常运转。

4.3 设备精益管理目标

设备精益管理目标旨在通过推进设备全寿命周期管理，确保设备从安装、运维到维护的全过程质量控制。通过持续优化设备的管理模式，重点解决设备的重过载、老旧等隐患问题。设备管理不仅关注设备的日常运行，还强调定期的状态检测与性能评估，确保设备能够在长时间内保持高效、安全的运行。为此，采用先进的状态检测技术进行实时监控，及时发现设备潜在的故障隐患，提前进行维护和修复，减少设备的非计划停运事件。具体数据显示，通过该管理模式的实施，设备的可靠性得到了显著提高，非计划停运减少了 25%。设备的精益管理不仅提升了设备运行的稳定性，还大幅降低了维修成本，提高了整体系统的效率和可靠性，确保了电网的长期稳定运行。

5 创新风险管理模式的实施策略

5.1 构建多层次安全管理体系

构建多层次安全管理体系能够有效提高电网建设工程的安全性。此体系包括从现场作业到高层管理的全覆盖，确保每个环节都有专业的人员进行监督与管理。在技术层面，利用智能监控系统，结合传感器和实时数据分析，可以对施

工现场的危险因素进行早期预警。通过构建层次分明的安全管理结构，现场工程师能够即时获悉安全隐患信息，并做出应对决策。数据表明，通过该体系实施后的项目，安全事故率降低了 40%。此外，系统化的管理手段使得风险控制更加精确，操作过程中的风险被减少至最小，确保了项目的高效推进。

5.2 加强人员安全培训与应急演练

加强施工人员的安全培训与应急演练是提升施工现场安全管理水平的核心措施。通过针对性的安全培训，确保所有施工人员熟悉相关安全操作规程，掌握必要的应急处理技能。技术方面，可以通过虚拟现实（VR）技术进行高危作业的模拟训练，使人员在非危险环境中获得真实的作业体验。同时，定期组织全员参与的应急演练，模拟各种突发安全事故，确保人员在真实情境下能够迅速、有效地反应。据统计，通过这些措施，施工人员的安全意识明显提升，事故发生率下降了 25%。培训与演练的增强，不仅有效提升了人员的应急处置能力，还提升了整体施工团队的协作能力和安全管理水^[4]。

5.3 强化安全文化的建设与推广

强化安全文化的建设与推广是长远保障施工安全的有效策略。通过制定企业安全文化的核心价值观，确保安全理念从管理层到一线工人全员落实。技术手段方面，可以通过企业内部信息平台，定期发布安全管理动态与先进的安全操作经验，利用在线学习模块持续提升员工的安全素养。此外，企业可通过设置安全奖惩机制，激励员工参与安全文化建设。数据表明，经过一段时间的文化推广后，员工的安全行为发生了显著变化，现场安全隐患减少了 30%，且员工的事故报告意识得到了提升。通过这种文化驱动的安全管理模式，施工现场的整体安全水平得到了有效保障。

6 电网建设工程安全风险管理创新的效果评估

6.1 安全事故率的变化分析

创新的安全风险管理模式实施后，电网建设工程的安全事故率显著降低。数据表明，在采用大数据分析与智能监控系统后，某项目的事故率从原来的每年 12 起下降至 5 起，减少了约 58%。这一变化表明，通过引入创新技术与管理模式，能够有效预防潜在的安全隐患，降低事故发生频率。安全事故率的下降，直接体现了风险管理措施的有效性，为工程的顺利推进和员工的生命安全提供了有力保障。

6.2 施工效率与安全管理成本的对比

采用创新安全管理模式后，施工效率和安全管理成本发生了明显变化。根据数据，项目在实施智能化安全监控和多层次安全管理体系后，施工效率提高了 20%。在相同的时间内，完成了更多的工程量。同时，尽管在技术投入和培训方面增加了成本，但由于减少了事故发生，整体安全管理成本有所降低。具体数据显示，安全管理成本较传统模式下降了 15%。因此，创新的管理模式在提升效率的同时，也为企业节省了成本，体现了较高的经济效益。

6.3 创新管理对项目进度与质量的影响

创新安全管理模式不仅提升了施工安全性，还对项目进度与质量产生了积极影响。由于安全隐患得到及时控制，施工人员的伤亡事故大幅减少，工期也得以按计划推进。数据表明，采用智能化监控系统后的项目，比未采用系统的项目提前完成了 7% 的工程量，且施工质量得到了保障。项目质量问题的发生频率较之前减少了 30%。这表明，创新的安全管理模式能够提高项目的整体进度，同时确保施工质量，从而促进项目的顺利交付和长期稳定运营。

7 结语

综上所述，电网建设工程施工安全风险管理的创新路径，对于提升施工安全性、提高效率、降低成本具有重要意义。通过大数据、智能化设备和信息化平台的引入，能够实现对施工现场的全方位监控与风险预警，从而有效防范安全事故的发生。同时，构建多层次安全管理体系，加强人员安全培训与应急演练，强化安全文化的建设，进一步优化了施工环境的安全性。创新管理模式不仅降低了安全事故率，还提升了施工效率和项目质量，具有显著的经济效益和社会价值。未来，随着技术的不断发展和安全管理模式的持续优化，电网建设工程的施工安全将得到更加有效的保障，推动行业向更高标准、更高效的方向发展。

参考文献

- [1] 殷作洋.安全生产风险管理体系在电网工程建设中的研究与应用[J].机电工程技术,2020,49(09):198-200.
- [2] 李盛元.多举措强化电网工程建设安全管理[J].中国电力企业管理,2020,(03):60-61.
- [3] 王志强.电力施工安全现状及优化措施[J].中国高新科技,2019,(18):52-54.
- [4] 谭德军.配电网施工现场安全管理探讨[J].中国高新技术企业,2017,(03):177-178.

Safety Behavior Analysis and Intervention Measures of Distribution Network Repair Personnel

Binghui Liu

Tangshan Electric Power Construction and Installation Co., Ltd., Yutian Xindi Branch, Tangshan, Hebei, 064100, China

Abstract

Distribution network emergency repair operations are high-risk tasks where workers' safety behaviors directly determine operational safety and personnel health. As repair missions grow increasingly complex, safety concerns have become more prominent. Non-compliant behaviors by workers during operations have led to multiple accidents. This paper analyzes the current safety status of distribution network emergency repairs, examines workers' safety behaviors and their influencing factors, and proposes intervention measures including enhanced safety training, optimized work processes, and adoption of advanced safety technologies. These measures aim to improve workers' safety awareness, standardize safety practices, and reduce accident risks.

Keywords

distribution network emergency repair; safety behavior; intervention measures; safety management; accident prevention and control.

配网抢修作业人员安全行为分析与干预措施

刘丙辉

唐山电力建筑安装有限公司玉田鑫迪分公司，中国·河北 唐山 064100

摘要

配网抢修作业是一项高风险的工作，作业人员的安全行为直接关系到作业安全和人员生命健康。随着配网抢修任务的日益复杂，安全问题逐渐突显，作业人员在执行任务时存在不规范的行为，导致了多起事故发生。本文通过对配网抢修作业安全现状的分析，探讨了作业人员安全行为的问题及其影响因素。针对存在的安全行为问题，提出了加强安全培训、优化作业流程、引入先进的安全技术装备等干预措施，旨在提高作业人员的安全意识，规范安全行为，减少事故发生。

关键词

配网抢修作业；安全行为；干预措施；安全管理；事故防控

1 引言

配网抢修作业是电力系统中重要的保障性工作，其主要任务是恢复配网正常供电，保障居民和工业的用电需求。然而，由于作业现场环境复杂、作业时间紧迫、操作技术要求高，作业人员在执行任务过程中面临诸多安全隐患。特别是在恶劣天气、夜间作业等特殊条件下，作业风险显著增加。近年来，随着电力行业的迅速发展，配网抢修作业任务逐渐增多，但作业人员的安全管理却未能得到同等重视，导致了安全事故的频繁发生。作业人员安全行为不规范、安全意识薄弱，是导致事故的主要因素之一。因此，分析作业人员的安全行为及其干预措施，对于提高配网抢修作业的安全性、保障作业人员的生命安全具有重要意义。

2 配网抢修作业安全现状分析

2.1 配网抢修作业的特点与风险

配网抢修作业通常是在电力系统出现故障时，迅速恢复供电的工作。由于涉及高压电力设备，作业人员在执行任务时必须面对严峻的安全挑战。作业场所大多位于高空、狭窄的环境或恶劣天气条件下，增加了作业难度和风险。尤其在大规模停电或突发自然灾害发生时，抢修任务通常紧迫且时间较短，作业人员需在有限时间内完成复杂的维修任务。此过程中，不仅存在设备故障、电力设备运行不稳定的风险，还可能遭遇大风、雷电等自然灾害的威胁，进一步提升了作业的安全隐患。配网抢修作业中的风险，除却自然因素外，还有人为操作失误、缺乏有效安全保障措施等问题，这些因素共同作用，构成了较高的安全风险。

2.2 作业人员安全行为现状

作业人员的安全行为直接关系到抢修任务的顺利完成与作业安全。然而，当前配网抢修作业中，部分作业人员对安全规范的理解和执行存在差距。许多作业人员在高强度、

【作者简介】刘丙辉（1977-），男，中国河北唐山人，从事配电工程施工及配网抢修工作研究。

高压环境下作业时，往往忽视了一些基本的安全操作，甚至为了提高工作效率，有时忽略必要的安全防护措施。例如，部分人员未按规范佩戴个人防护装备或未及时进行电气设备的检修和检查。此外，抢修过程中，有些作业人员的安全意识较弱，在压力下容易产生冒险行为。部分人员缺乏充分的安全培训，导致他们对潜在的危险源无法做出正确判断，进而影响安全行为的执行。这些不规范的安全行为，增加了配网抢修过程中事故发生的概率。

2.3 影响作业人员安全行为的因素

影响配网抢修作业人员安全行为的因素较为复杂。首先，作业人员的安全意识是一个重要的影响因素。若作业人员对安全知识的理解不到位或忽视安全培训，将导致安全行为不规范。其次，作业人员的工作压力也是一个不可忽视的因素。抢修作业通常需要在有限时间内完成，尤其在紧急情况下，作业人员的心理压力较大，这可能导致他们在任务执行中做出不安全的决定。此外，作业现场的安全管理制度和安全保障措施不完善，也容易影响作业人员的安全行为。如果企业在制度执行和监督上存在漏洞，作业人员可能会放松警惕，忽视安全规范的实施。最后，工作环境的恶劣程度也对安全行为产生影响，复杂的作业环境往往使得作业人员难以按照规范执行每一项操作，增加了发生事故的风险^[1]。

3 配网抢修作业人员安全行为问题的识别

3.1 常见安全行为问题分析

配网抢修作业中，作业人员常见的安全行为问题主要体现在操作不规范和忽视防护措施。首先，一些作业人员未严格按照操作流程执行，存在跳过关键步骤的现象，尤其在高温或恶劣天气条件下，因急于完成任务而忽略了必要的设备检查和测试。其次，部分人员未正确佩戴个人防护装备，如安全帽、防护手套等，这增加了遭遇电击或发生机械伤害的风险。此外，在配网抢修作业中，有时作业人员未能按时进行停电操作，导致在带电状态下进行作业，极大地提高了安全事故发生的概率。对于操作过程中的高压电器和危险设备，部分作业人员未按标准进行检查与验证，未能有效防止事故的发生。

3.2 作业人员安全意识薄弱原因分析

作业人员安全意识薄弱的原因主要与个体素质、培训不足以及管理制度的执行力度有关。首先，部分作业人员对于安全操作的重视程度不高，认为以往的工作经历没有出现问题，因此在日常工作中忽视了对安全的重视。其次，培训体系的不足也是导致安全意识薄弱的重要原因。很多作业人员的安全培训停留在理论层面，缺乏实际操作和应急演练，导致在面对突发事件时无法冷静应对。再者，部分企业在安全管理方面的投入不足，未能有效建立起完善的安全管理体系和持续监督机制。由于企业对安全管理的松懈，作业人员对安全行为的规范性要求也有所放松，进一步加剧了安全行为问题。

3.3 安全行为不规范的后果与影响

配网抢修作业中安全行为的不规范直接导致了安全事故的频发。这些不规范的安全行为往往在短期内不易显现危害，但一旦发生突发事故，后果可能非常严重。例如，未按标准进行操作的抢修任务，可能引发电气设备损坏、人员电击或严重的设备火灾，甚至可能导致全系统停运。除此之外，安全行为不规范也会造成作业人员的心理负担和健康隐患，长期处于高风险环境下作业，可能会导致心理压力过大，出现疲劳过度和判断失误等问题^[2]。长期来看，这不仅影响了作业人员的身体健康和安全，还影响了企业的整体运作效率和公共服务质量。因此，规范作业人员的安全行为，必须纳入到配网抢修工作管理的重要内容。

4 配网抢修作业安全行为干预的必要性

4.1 提高安全性的重要性

配网抢修作业是确保电力系统正常运作的重要环节，其安全性直接影响到电力供应的可靠性。提高作业安全性，不仅能够减少事故发生频率，还能有效降低对社会和经济造成的损失。在作业过程中，电力设备和高压电流的存在使得作业风险极高，任何细微的疏忽都可能导致严重后果。因此，采取有效的安全行为干预措施，提升安全性，是保障电力系统稳定运行的关键。提高安全性能够增强作业人员的安全防范意识，促使他们更加谨慎地执行作业任务，从而有效预防事故的发生。随着电力行业的发展和配网作业的复杂性增加，提高安全性成为保障工作顺利进行、保护作业人员生命健康的必要措施。

4.2 保障作业人员生命安全的需求

作业人员的生命安全是配网抢修作业中最重要的因素之一。由于作业环境的复杂性和高风险性，作业人员在执行任务时经常面临电击、机械伤害等多种威胁。若作业人员的安全行为未得到有效管理，必然会增加事故发生的几率，进而威胁到他们的生命安全。保障作业人员的生命安全，不仅是企业的法律责任，也是社会责任的体现。采取干预措施提高作业人员的安全意识、规范其安全行为、落实必要的防护措施，能够减少作业中的潜在危险，有效避免伤亡事件的发生。作业人员安全的保障是电力企业可持续发展的基础，是提升企业形象与社会信誉的重要环节。

4.3 提升作业效率与安全水平的双重作用

在配网抢修作业中，提高安全性不仅能够防止事故，还能有效提升作业效率。规范的安全行为要求作业人员在操作过程中更加细致、谨慎，从而减少因操作不当而造成的设备损坏或返工。这种高效的作业方式有助于缩短抢修时间，提升作业人员的工作效率，同时避免因安全事故导致的作业停滞或人员伤亡。在保障安全的同时，提升作业效率能确保电力供应的及时恢复，满足社会需求，提高电力公司的服务质量。安全与效率的双重提升，使得企业能够在保障电力系统稳定性和作业人员安全的同时，最大限度地提高工作效率。

益，为企业的长远发展打下坚实基础。

5 配网抢修作业人员安全行为干预措施

5.1 加强安全培训与教育

安全培训与教育是提升作业人员安全行为的基础。作业人员需要掌握必要的安全知识、技能及操作规范，明确安全作业的重要性。通过定期举办安全培训，强化作业人员对安全操作流程的理解和掌握，使他们在实际操作中能熟练运用所学知识，有效识别潜在风险，防范安全事故的发生。同时，安全培训还应注重培养作业人员的应急处理能力，提升他们在突发情况下的反应速度和应对能力。通过持续性的安全教育，作业人员能够不断更新其安全意识，提高对安全隐患的警觉性，确保每一次抢修作业都在可控的安全范围内进行^[3]。

5.2 完善作业流程与安全标准

完善作业流程与安全标准是确保配网抢修作业安全的关键环节。作业流程应当遵循严格的安全管理规范，涵盖从作业前准备到作业后检查的每一环节，确保每一步操作都有明确的安全要求和标准。通过优化作业流程，能够减少操作中的随意性，避免因流程不规范导致的安全隐患。同时，建立健全的安全标准，对所有作业环节进行标准化管理，使得每位作业人员都能按照统一的安全标准执行任务。这不仅有助于提升作业质量，还能确保作业过程的可追溯性，一旦发生问题，便能迅速找出原因并进行整改。

5.3 引入先进的安全防护技术与装备

随着技术的不断发展，许多先进的安全防护技术与装备已被应用于配网抢修作业中。引入这些技术和装备，不仅能够提升作业人员的安全防护能力，还能提高作业的精准度和效率。例如，利用智能化设备进行实时监测，能够及时发现电力设备中的异常，提前预警潜在风险；通过穿戴式安全防护装备，如智能安全帽、智能防护手套等，可以实时检测

作业人员的生命体征，一旦发生危险，可及时启动报警系统。此外，远程操作技术的引入，也能够减少作业人员在高风险环境中的直接操作，降低电击等危险的发生概率^[4]。引入先进的安全防护技术与装备，能够为作业人员提供全方位的安全保障，进一步提升作业安全水平。

6 结语

在配网抢修作业中，安全问题始终是不可忽视的核心内容。通过对作业人员安全行为的分析，可以看出，安全意识薄弱、不规范的安全操作以及缺乏有效的安全保障措施是导致事故发生的主要原因。为了有效降低安全风险，提升作业安全性，必须采取一系列干预措施，包括加强安全培训与教育、完善作业流程与安全标准、引入先进的安全防护技术与装备。这些措施不仅能够提高作业人员的安全意识和操作规范，还能为他们提供更加全面的安全保障，确保作业顺利进行。通过提高安全性和作业效率，配网抢修作业的整体安全水平将得到显著提升，从而有效保障作业人员的生命安全，推动电力行业的可持续发展。总之，强化安全管理、落实安全行为干预措施是配网抢修作业中不可或缺的一部分，只有这样，才能实现高效、安全的电力保障工作。

参考文献

- [1] 闫磊,高君,杨培林,陈立.基于多传感器监测的接触网作业车作业平台安全防控系统设计与实现[J].中国设备工程,2025,(22): 88-90.
- [2] 郭俊青.配网不停电作业环境下自适应照明系统设计与实现[J].中国照明电器,2025,(10):120-122.
- [3] 孟宪和,张福河,马丹.配网不停电作业安全性的研究探讨[J].电子元器件与信息技术,2025,9(09):138-140.
- [4] 刘一帆.极端天气条件下配网作业安全保障策略及应急处置方案[A].2025年第七届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集[C].广西网络安全和信息化联合会:2025:190-191.

Analysis of Voltage Regulation and Stability of Power System

Junzhi Gao

Tangshan Electric Power Construction and Installation Co., Ltd., Yutian Xindi Branch, Tangshan, Hebei, 064100, China

Abstract

With the continuous expansion and development of power systems, voltage regulation and stability issues have garnered increasing attention. Voltage regulation serves as a critical technology for ensuring the safe and stable operation of power systems, directly impacting both power quality and equipment performance. It involves not only responding to load fluctuations but also considering multiple factors such as system capacity, line characteristics, and operational modes. This paper analyzes the importance and functions of voltage regulation in power systems, introduces its fundamental principles and common regulation methods, and further explores the key factors affecting voltage regulation. Through research on voltage regulation and stability in power systems, the paper proposes recommendations to enhance operational efficiency and safety.

Keywords

power system; voltage regulation; stability; intelligent control; load fluctuation

电力系统电压调节与稳定性分析

高俊志

唐山电力建筑安装有限公司玉田鑫迪分公司，中国·河北 唐山 064100

摘要

随着电力系统规模的不断扩大与发展，电压调节与稳定性问题日益受到关注。电压调节是保障电力系统安全、稳定运行的关键技术，直接影响到电力系统的电能质量和设备的正常运行。电力系统的电压调节不仅包括对负荷波动的响应，还需要考虑系统的容量、线路特性及运行模式等多方面的因素。本文分析了电力系统电压调节的重要性与作用，介绍了其基本原理与常用的调节方法，进一步探讨了影响电压调节的主要因素，通过对电力系统电压调节与稳定性研究，提出了提升电力系统运行效率和安全性的相关建议。

关键词

电力系统；电压调节；稳定性；智能化控制；负荷波动

1 引言

电力系统作为现代社会的重要基础设施，其稳定性对国家经济发展与民生保障至关重要。电力系统中，电压作为基础参数之一，其调节与稳定性直接影响到系统的可靠性和电能质量。近年来，随着电力负荷的多样化与电力源的分布式接入，电压调节的难度和复杂性大大增加。电压调节不仅涉及到传统的变压器调节、发电机励磁控制，还需要借助现代化的智能化控制系统与电力设备。针对这一背景，电压调节与稳定性问题逐渐成为电力系统研究的热点。本文将系统地探讨电力系统电压调节的基本概念、影响因素及其稳定性分析，提出切实可行的调节方法与解决方案，为电力系统的安全运行提供理论支持。

【作者简介】高俊志（1979—），男，中国河北唐山人，本科，从事电力系统综合管理研究。

2 电力系统电压调节的基本概念

2.1 电压调节的重要性与作用

电力系统中的电压调节至关重要，其作用在于保证电力系统在不同负荷变化下的稳定运行。电压不稳定或过低将导致电力设备损坏，影响设备的效率和寿命；而过高的电压则可能导致电气设备的过载，甚至引发故障或电气火灾。电压调节不仅保证了电力系统的稳定性，还能确保用户用电质量，减少电能损失，提高电力传输效率。随着电力系统规模的不断扩展，调节范围与复杂度也随之增加，这要求电压调节系统具备更高的精度和响应速度，以应对日益增长的用电需求和电力设备的多样化。

2.2 电压调节的基本原理

电压调节主要依赖于改变电力系统中不同电气设备的操作状态来维持稳定的电压水平。电力系统中的电压调节通过调整变压器的调压装置、发电机的励磁系统以及调节分布式发电源的输出，来确保电压的稳定。通过控制系统对电压的实时监控，能够在负荷波动或设备故障的情况下及时调整

系统的电压水平。此过程依赖于反馈机制，在电压偏差出现时，通过调节设备的调控动作来纠正电压偏差，最终使电压维持在设定的安全范围内。

2.3 电压调节的主要方法与技术

电压调节的主要方法包括自动调压、人工调节以及现代的智能化调节技术。自动调压是通过调节变压器的分接开关、调节发电机的励磁电流等方式自动调节电压，这种方法常用于大规模的电网中。人工调节通常适用于负荷较小或特殊情况下的系统。近年来，随着智能化技术的发展，电压调节开始依赖于自动化控制系统与实时监测系统。通过对电压调节过程进行大数据分析，智能系统能够预判电压变化趋势，提前进行电压调节，大大提高了电压稳定性和电力系统的响应速度^[1]。

3 电力系统电压调节的影响因素

3.1 系统负荷的变化

电力系统的负荷变化直接影响到电压的稳定性。负荷增加时，电力需求增大，电网中的电压容易下降；负荷降低时，电压可能会升高。根据实际负荷的变化，电力系统需要实时调整各个电气设备的运行状态。例如，负荷增加时，发电机需要增加功率输出以满足负荷需求，而此时可能需要通过提高励磁电流来增强电压的稳定性。此外，系统负荷的波动还受到季节变化、气候条件、经济活动等多种因素的影响，这使得电压调节必须具备灵活性和精准性，才能确保在各种情况下保持电网的电压稳定。

3.2 输电线路的参数与状态

输电线路的状态和参数对电压调节有重要影响。输电线路的电阻、电抗、线路长度等参数会影响电流的流动和电压的变化。当输电线路存在较高的电阻或电抗时，电压损失会增加，电力传输效率降低，从而影响到电压稳定性。此外，输电线路的老化、破损或负荷过载等情况会使电压调节变得更加困难，甚至可能引发电压波动或故障。因此，定期的输电线路检测与维护，对于确保电力系统的电压调节效果至关重要。

3.3 发电机的控制与运行模式

发电机的控制系统和运行模式直接影响到电力系统的电压调节性能。发电机的励磁系统是控制电压稳定性的重要环节，通过调节励磁电流，可以改变发电机的输出电压。根据系统的负荷变化，发电机需要实时调整其输出功率以维持系统的电压稳定。此外，发电机的运行模式，如同步发电与异步发电模式，也会对电压的调节产生不同的影响。在多发电机并网的情况下，协调各个发电机的运行，合理分配功率输出，是确保电压稳定的关键^[2]。

4 电力系统电压稳定性的分析

4.1 电压稳定性的定义与分类

电压稳定性是指在电力系统中负荷变化、设备故障或

其他扰动下，系统能够维持正常电压水平的能力。电压稳定性可以分为静态电压稳定性和动态电压稳定性两类。静态电压稳定性指的是在长期负荷变化或设备配置调整情况下，系统能够维持稳定电压的能力。动态电压稳定性则描述了系统在受到扰动后的电压恢复能力，如发电机励磁调整或自动调压设备的作用。在正常运行条件下，电力系统的电压一般要求在 10% 以内波动。

4.2 电压稳定性的分析方法

电压稳定性分析通常采用直接法、逐步法以及灵敏度分析法等方法。直接法通过分析系统的电压 - 功率特性曲线，研究系统在负荷增大或设备故障时，电压的变化趋势，能够直观地揭示电压稳定性问题。逐步法通过逐步增加负荷，模拟电压下降的过程，计算系统在负荷增加过程中电压维持的极限。灵敏度分析法则通过对电力系统中各节点电压与系统参数之间的关系进行计算，评估不同因素对电压稳定性的影响^[3]。

4.3 电压稳定性的影响因素

电压稳定性受多种因素的影响，主要包括负荷变化、发电机输出、输电线路的状态以及电压调节设备的运行状态。负荷变化是影响电压稳定性的重要因素，尤其是突发负荷波动时，电压容易出现剧烈变化。例如，在夏季高峰负荷时，电网负荷增加 30% 以上，可能导致电压下降超过 6%。发电机输出功率的波动也会对电压产生显著影响，尤其是在大型电网中，多个发电机并网时，其输出功率的不平衡可能导致电压波动。输电线路的电抗与电阻也会影响电压的稳定性，长距离输电或线路参数不匹配可能导致电压降幅过大。电压调节设备的性能，如变压器调压能力、自动调节装置的响应速度，也在很大程度上决定了电网的电压稳定性。电压调节设备的及时响应和调整可以有效防止电压的剧烈波动，从而提高电力系统的稳定性^[4]。

5 电力系统电压稳定性问题的解决方案

5.1 电压调节设备的选择与优化

电压调节设备的选择与优化对于提高电力系统的电压稳定性至关重要。常见的电压调节设备包括变压器、自动电压调节器、无功补偿设备等。变压器是电压调节的基础设施，通过调整分接开关来控制系统电压。自动电压调节器通过实时监测系统电压并自动调节发电机励磁电流来维持电压稳定。无功补偿设备，如静止无功补偿装置（SVC）和静止同步补偿器（STATCOM），能有效调节电网中的无功功率，提升电压的动态响应能力。为了确保电压调节的效率，电压调节设备的选择需要根据电网的实际负荷特性、地理位置及电网结构进行优化。通过合理配置设备与优化控制策略，可以使电压调节系统响应更迅速、调节范围更广。比如，在某些负荷较大的区域，可选择额外配置 STATCOM，以减少电压波动；而在长距离输电线上，则可增设电压调节变压器。

以稳定电压。同时，通过定期的设备检测与维护，确保设备长期稳定运行，也有助于保障电力系统的电压稳定性。

5.2 智能化控制系统的应用

智能化控制系统的应用为电力系统的电压调节提供了全新的解决方案。与传统的人工调节和手动控制不同，智能化控制系统能够实时收集电力系统的各项数据，包括电压、负荷、功率因数等信息，通过大数据分析、机器学习等技术实现对电网状态的精准预测和实时调整。智能化控制系统能够自动识别电力系统中的电压波动并进行快速响应，不仅减少了人工操作的延迟，还提升了调节的精度与灵活性。通过对电力系统的实时监控和分析，智能化控制系统可以预测负荷变化趋势，提前进行电压调整。比如，系统通过分析过去的数据，可以提前识别出负荷波动大的时段，提前做好电压调节准备，避免突发的电压波动造成电网崩溃。智能化控制系统还能优化电压调节设备的运行状态，自动切换不同的电压调节模式，使电网在复杂的运行条件下保持高效、稳定的运行。此外，智能化控制系统的自学习能力还能够根据电网的运行情况不断调整优化策略，以应对电力系统中不断变化的负荷与环境条件。

5.3 系统运行模式的优化与调整

电力系统的运行模式优化对于电压稳定性至关重要。合理的运行模式不仅能提升电网的运行效率，还能有效减少电压波动和系统失稳的风险。优化电力系统的运行模式首先要考虑合理分配负荷，并根据电网结构特点和负荷预测调整发电机的运行方式。例如，在负荷较低时，电网中的发电机可以通过并网运行，以保证各个电压节点的稳定，而在负荷高峰时，电网可能需要采取分时段调节或局部发电机停机的方式来缓解电压波动。在这种模式下，通过对负荷的动态调节，系统能够实现负荷的平衡，避免电压过高或过低的现象。除了负荷调度，电力系统还需优化电网的拓扑结构，通过合

理配置开关设备和电力线路，确保电流路径最优，避免因线路不平衡导致的电压不稳定。现代电力系统还可通过“分布式能源”与“虚拟电厂”技术来优化运行模式，这些创新的技术手段可以更灵活地调节各类发电资源，平衡负荷波动，增强系统的电压稳定性。通过优化系统运行模式，电力系统能够实现高效、安全、稳定的运行，提升电压调节的响应速度与准确性，确保电网在面对突发状况时能够迅速恢复稳定状态。

6 结语

电力系统的电压调节与稳定性是保障电力供应安全与高效运行的关键因素。通过合理选择与优化电压调节设备、应用智能化控制系统、优化系统运行模式，可以有效提高电压稳定性，确保电力系统在不同负荷波动、设备故障或其他外部扰动下依然能够保持稳定运行。电压调节设备的高效运作、智能控制系统的实时响应以及灵活的运行模式共同作用，增强了电力系统的适应性和韧性。在未来，随着电力需求的不断增长及可再生能源的广泛应用，电力系统将面临更多挑战，进一步提升电压调节与稳定性将成为电力行业持续发展的重要课题。通过持续创新与技术优化，电力系统的电压调节与稳定性问题有望得到更加高效与智能的解决。

参考文献

- [1] 杨军,骆亚帅,李伟,王伟,张红洁.有源配电系统电压调节仿真系统设计[J].东北电力技术,2025,46(10):7-12.
- [2] 刘贤斌.大规模光伏发电并网对电力系统稳定性影响与对策[J].电力设备管理,2025,(15):94-96.
- [3] 杨宴轮.分布式储能系统与电力系统自动化协同控制方案[A].第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集 (四) [C].江西省工程师联合会:2025:511-514.
- [4] 马红杰.基于PLC技术的电力系统电压自动调节和控制方法[J].自动化技术与应用,2025,44(08):42-46+51.

Research on Path Planning and Energy Efficiency Optimization Strategy for Unmanned Aerial Vehicle Inspection in Smart Grid

Yumei Xu

Beijing Huashang Electric Light Co., Ltd., Beijing, 101400, China

Abstract

The safe and stable operation of smart grids is closely related to the economy and reliability of power energy supply. However, in actual operation, the power grid is easily affected by factors such as natural environment, topography, and human damage, which can lead to communication failures, data errors, or equipment damage, seriously affecting the safety of power grid operation. To this end, power companies need to detect safety hazards in advance through inspections, in order to eliminate various faults and defects to the greatest extent possible. This article will discuss the planning ideas for unmanned aerial vehicle inspection paths in smart grids and propose optimization strategies for inspection energy efficiency, aiming to provide theoretical reference and guidance for the construction of intelligent and large-scale inspection models in smart grids.

Keywords

smart grid; UAV; Inspection route; energy efficiency optimization

智能电网无人机巡检路径规划与能效优化策略研究

徐玉梅

北京华商电灯有限公司，中国·北京 101400

摘要

智能电网的安全稳定运行与电力能源供应的经济性、可靠性密切相关，而电网在实际运行当中，受到自然环境、地形地貌、人为破坏等因素的影响，极易出现通信故障、数据错误或者设备损坏等问题，使得电网的运行安全受到严重影响。为此，电力企业需要通过巡检的方式提前发现安全隐患，以最大限度地消除各类故障及缺陷隐患。本文将通过对智能电网无人机巡检路径规划思路的论述，提出巡检能效优化策略，旨在为智能电网巡检智能化、规模化模式构建提供理论借鉴与参考。

关键词

智能电网；无人机；巡检路径；能效优化

1 引言

无人机巡检技术在智能电网巡检领域的推广应用，不仅突破了地理空间的限制，实现了对输电线路、杆塔金具、绝缘子等关键设备的全方位、高精度监测，并且缺陷识别准确率显著提升。但是，在对无人机巡检路径进行规划时，需要充分考虑巡检场景的复杂性、设备分布离散性以及多重约束条件，否则，将出现路径重复规划、障碍规避不及时、关键设备漏检的问题。为此，电力企业应当兼顾全局，设计一套满足路径优化多重需求的混合算法，以提高路径规划的科学性与合理性。并通过能效优化的方法，延长无人机续航时间、降低巡检成本，实现巡检路径最优化、能量消耗最小化与巡检效益最大化的美好愿景。

【作者简介】徐玉梅（1981—），女，中国北京人，本科，助理工程师，从事无人机应用于智能电网巡检研究。

2 智能电网无人机巡检路径规划思路

2.1 基于场景分层，规划巡检路径

智能电网所经路线复杂多样，每一个场景的巡检路径均呈现明显的差异性特征，为此，在规划无人机巡检路径时，首先需要考虑巡检场景，并结合电网设备的电压等级、地理环境特征、设备密集程度等指标参数，将巡检区域划分为不同层级，每个层级对应差异化的规划目标。比如将巡检场景划分为 500kV 及以上输电线路的超高压远距离山区巡检层、110kV-220kV 输电线路的高压城市近郊巡检层、10kV 及以下配电线路的密集城区巡检层，针对不同层级，分别规划不同的路径。以超高压远距离山区巡检层为例，设定的巡检目标是最大化延长单次飞行巡检里程，减少起降与补给次数。比如某省东部山区 500kV 输电线路，线路全长 178 公里，穿越 3 个山区县，沿线海拔落差达 1100 米，存在 42 处信号盲区与 22 个大型山体障碍。规划巡检路径时，借助于 GIS 地图

与激光雷达测绘数据构建三维地形模型，精准识别障碍区域与信号遮挡点。然后，采用折线式巡航、定点悬停相结合的模式，在地形平缓区域保持 6-8m/s 的经济巡航速度，减少能量消耗，并在杆塔附近及复杂地形区域降低速度至 3-5m/s，确保巡检精度^[1]。最后，合理设置中途补给点，结合能耗预测算法，将单次飞行路径长度控制在无人机续航极限的 80% 以内，避免因突发情况导致的续航不足问题。这种基于场景分层的路径规划思路，能够快速适应不同的巡检场景，显现出较强的通用性，并且可以大幅提升巡检综合效益。

2.2 基于多重目标，优化巡检路径

针对智能电网开展无人机巡检工作时，技术人员需要满足覆盖完整性、路径最短化、能耗最低化、安全最大化的多重目标，并以此为突破口，对巡检路径予以优化。如果只是单一的考虑路径最短的目标，则会影响巡检覆盖的完整性，或者增加飞行安全风险，如果单纯的考虑安全避障目标，则会增加能耗与巡检成本。为此，电力企业应当根据巡检任务的优先级与巡检场景特征，合理分配目标权重。以某城市中心街区 220kV 输电线路巡检为例，该线路全长 75 公里，沿线分布有 11 个大型居民小区、7 个商业综合体及 5 座交通枢纽，巡检场景的核心特点是人口密集、建筑物密集、电磁干扰严重，安全最大化与覆盖完整性成为首要目标，路径最短化与能耗最低化作为次要目标进行协同优化。其中，安全最大化权重设定为 0.4，覆盖完整性权重设定为 0.3，路径最短化与能耗最低化权重分别设定为 0.15。路径规划时，通过高清地图与电网设备台账数据，明确所有巡检点的精准坐标，确保覆盖完整性目标的实现。然后利用电磁仿真技术，绘制沿线电磁干扰强度分布图，将干扰强度超过安全阈值的区域划定为禁飞区，同时避开建筑物、交通要道等人员密集区域，设置不少于 50 米的安全飞行距离，保障飞行安全。最后，在满足安全与覆盖目标的前提下，采用路径平滑算法优化飞行轨迹，减少急加速、急转向等能耗较高的飞行行为，实现路径长度与能耗的合理控制。这种规划模式既可以圆满完成巡检任务，也能够提高无人机巡检数据准确率。

2.3 兼顾全流程动态反馈，制定路径迭代优化机制

无人机巡检全流程涉及巡检期间的所有数据信息，包括无人机飞行状态数据、设备检测数据、环境变化数据，通过对全流程数据的深度分析与精准评估，判断当前路径的合理性与优化空间，如果出现环境突变、设备缺陷、路径偏差等情况，需要及时调整路径规划方案，确保巡检任务的顺利推进与优化目标的实现。以某沿海地区 110kV 输电线路巡检为例，该线路全长 89 公里，沿线穿越滩涂、港口、工业区等多种地形，巡检过程中易受台风、雷暴等突发天气影响，同时港口起重机、工业电磁设备等会产生动态干扰，设备缺陷发生率较高，静态规划路径难以适配复杂多变的实际情况。在优化巡检路径时，首先搭建多源数据实时采集平台，通过无人机搭载的 GPS 定位模块、惯性导航系统、能耗传感器、可

见光 / 红外相机等设备，实时采集飞行位置、飞行姿态、剩余电量、设备状态、环境参数等数据。其次，建立路径评估模型，设定评估阈值，当某一维度指标超出阈值时，触发路径优化指令。最后，采用快速路径调整算法，结合实时采集的数据，在 1-2 秒内完成局部路径的重新规划，确保巡检任务的连续性。这种路径迭代优化机制的建立，不仅可以提高任务完成率，同时，路径规划精准度也得到持续提升^[2]。

3 智能电网无人机巡检能效优化策略

3.1 基于飞行全工况，实施能耗精准管控

无人机巡检过程中，主要包括四个核心工况，分别是：起飞爬升、水平巡航、悬停拍摄、下降降落，不同的工况，其能耗多少也存在明显差异。因此，为了实现巡检全流程能耗最优化，电力企业应当制定精准的能耗管控策略。首先，建立工况、参数、能耗的映射模型，优化飞行速度、高度、姿态角等关键参数，减少无效能耗。比如某山区 330kV 输电线路，线路全长 148 公里，沿线地形起伏较大，巡检点间距为 400-600 米，无人机需频繁进行爬升、巡航、悬停等操作，能耗控制难度较大。在起飞爬升阶段，根据巡检点海拔高度差异，采用分段式爬升速度策略，即：低于 500 米的低海拔区域采用 3m/s 的较快爬升速度，缩短爬升时间。高于 1000 米的高海拔区域采用 1.5-2m/s 的平缓爬升速度，减少电机输出功率，避免高负荷能耗。水平巡航阶段，根据巡检点间距与地形复杂度，动态调整巡航速度。地形平坦区域采用 7m/s 的经济巡航速度，兼顾效率与能耗。山谷、山脊等地形复杂区域采用 4-5m/s 的低速巡航速度，减少绕障与姿态调整带来的能耗增加。悬停拍摄阶段，优化拍摄角度与顺序，减少无人机水平位移与姿态调整次数，将单次悬停拍摄时间控制在 8-10 秒内，避免长时间悬停导致的能耗累积。下降降落阶段，采用滑翔式下降策略，当无人机距离地面高度超过 100 米时，关闭部分电机，利用重力势能缓慢下降，以减少下降阶段能耗^[3]。

3.2 基于设备优先级，实施巡检动态调度策略

不同的电力设备，其巡检优先级也有所不同，为了进一步提高巡检能效，降低能量消耗，电力企业应当建立设备优先级评估体系，动态调度巡检任务顺序与资源分配。在对设备优先级进行评估时，需要综合考虑设备电压等级、运行年限、故障影响范围、缺陷历史数据等多维度指标，并采用层次分析法确定各指标权重，将设备划分为特级、一级、二级、三级四个优先级等级。特级设备为超高压变电站出线杆塔、跨区输电线路关键杆塔等核心枢纽设备。一级设备为主干线杆塔、重要联络线等重要的输电通道设备，二级设备为一般输电线路设备，三级设备为配网分支线路设备。设备优先级划分标准与巡检策略如表 1 所示。

从表 1 可以看出：这种动态调度策略的应用使巡检过程中的能量消耗大幅降低，巡检能效显著提升。以某城市电

网无人机巡检为例，传统的无人机巡检模式下，单次飞行平均能耗为 1810Wh，完成全区域巡检需飞行 41 架次。采用动态调度策略后，无人机单次飞行平均能耗降至 1280Wh，全区域巡检仅需飞行 25 架次。并且特级设备的巡检响应时

间从原来的 48 小时缩短至现在的 12 小时，缺陷发现率较原来提升 30% 以上，一级设备的巡检覆盖率保持 100%，二级与三级设备的巡检效率提升 45%，实现了能耗降低与能效提升的双重目标。

表 1 电网设备优先级划分标准与巡检策略

设备优先级	核心评估指标	典型设备示例	巡检频率	能耗优化策略
特级	电压等级 $\geq 500\text{kV}$ 、故障影响范围 ≥ 100 万户、运行年限 ≥ 15 年、近 3 年缺陷率 $\geq 8\%$	500kV 跨区输电线路枢纽杆塔、特高压变电站出线绝缘子	每月 1 次	优先调度高性能无人机、采用“精准巡检+实时回传”模式，缩短巡检路径半径，避免无关区域飞行
一级	220kV-330kV 电压等级、故障影响范围 10-100 万户、运行年限 10-15 年、近 3 年缺陷率 3%-8%	220kV 城市主干线杆塔、区域联络线断路器	每 2 月 1 次	采用“常规巡检+重点复核”模式，优化巡检点顺序，减少跨区域往返飞行
二级	110kV 电压等级、故障影响范围 1-10 万户、运行年限 5-10 年、近 3 年缺陷率 1%-3%	110kV 近郊输电线路杆塔、配网主干线设备	每季度 1 次	合并邻近区域巡检任务，采用“批量巡检+集中分析”模式，降低起降频次与飞行距离
三级	$\leq 10\text{kV}$ 电压等级、故障影响范围 < 1 万户、运行年限 < 5 年、近 3 年缺陷率 < 1%	10kV 小区分支线杆塔、低压配电变压器	每半年 1 次	采用“无人机+地面巡检”融合模式，无人机仅覆盖地面难以到达区域，减少低空密集飞行

3.3 基于多能源补给，提高无人机续航能力

在执行大规模、长距离的巡检任务时，无人机的续航能力至关重要，为避免因续航不足导致的能耗浪费与任务中断现象的出现。电力企业应当构建一个多能源补给体系，以地面充电基站、空中换电平台、应急便携充电设备为核心，形成固定补给、移动补给、应急补给的全方位补给网络。以某跨省 1000kV 特高压输电线路巡检为例，该线路全长 710 公里，穿越平原、山区、沙漠等多种地形，沿线仅在两端及中间 3 个变电站设有固定场所，传统单一地面充电基站的补给模式难以满足长距离巡检需求。在多能源补给体系的应用中，首先在沿线 5 个变电站设置地面充电基站，配备 60kW 快速充电器，充电 15 分钟可满足无人机 30 公里飞行需求。在沙漠与山区等无固定场所的长距离路段，设置 8 个空中换电平台，每个平台覆盖半径 30 公里，无人机可自主对接换电，换电时间仅需 5 分钟。同时，巡检车辆配备 12 台应急便携充电设备，跟随无人机巡检路线移动，应对突发续航问题。另外，在实际应用过程中，一旦某一补给点设备出现故障，系统可以快速切换至备用补给方案，确保巡检任务不受影响。并且通过持续优化补给点布局与能耗预测算法，进一步降低补给成本与能耗损失。

4 结语

智能电网巡检工作的高效化、智能化水平事关电网的安全运行，而无人机巡检技术的介入为巡检效率与缺陷识别精度的提升提供了强大的技术支撑。为此，电力企业应当基于场景分层的规划框架、多目标协同的优化体系与全流程动态反馈的迭代机制，有效解决传统巡检模式场景适配性差、目标单一化、静态化局限的问题，促进巡检工作高效开展。与此同时，基于无人机飞行全工况的能耗精准管控、设备优先级的任务动态调度与多能源补给的续航拓展三大策略，构建飞行全流程能效优化体系，以延长无人机续航时间、降低巡检成本、减少能量消耗，实现智能电网巡检过程的自主决策与智能调度，为智能电网安全稳定运行保驾护航。

参考文献

- [1] 徐曙,陈潇,张成巍,等.无人机巡检智能管理系统在电网巡检作业的设计与应用[J].网络安全和信息化,2022,(04):74-76.
- [2] 张驯,杨启帆,李志茹,等.面向主干输电网架空设备巡检的无人机路径规划方法[J].自动化技术与应用,2023,42(11):122-124+168.
- [3] 国家电网公司无人机巡检图像人工智能识别技术评测结果公布[J].变压器,2023,60(05):37.

Research on Sliding Mode Variable Structure Anti-disturbance Control Algorithm Based on ROV

Liang Cao

HaiZhuang Military Representative Office, Zhengzhou, Henan, 450006, China

Abstract

Underwater robotic vehicles (ROVs), with their versatile operational capabilities, are extensively deployed in marine and lake environments for equipment maintenance and repair. However, ROVs inherently function as highly nonlinear, strongly coupled, and time-delayed systems. Dynamic uncertainties arise from hydrodynamic coefficient variations, modeling errors, and parameter disturbances, compounded by complex marine interference such as undercurrents, which pose significant challenges to their disturbance rejection control. This study employs sliding mode variable structure control (SMVSC) to enhance ROV's disturbance resistance, while integrating an ESO sliding mode disturbance observer (ESO-SDO) to further improve model robustness and disturbance tolerance.

Keywords

ROV; sliding mode algorithm; disturbance rejection control

基于 ROV 的滑模变结构抗扰控制算法研究

曹亮

海装某军事代表室，中国·河南郑州 450006

摘要

水下作业型机器人(ROV)因其广泛的作业能力，被广泛应用于海洋和湖泊等领域，如多种型号装备维修保障、海洋装备维修等领域。然而，ROV其本身是一个高度非线性、强耦合和时滞的系统，同时水动力系数的不确定、系统建模误差和参数扰动都会造成动力学的不确定性，加上海底暗流等很多复杂海洋环境干扰，使ROV的抗扰控制成为难题。本文使用滑模变结构控制算法增强ROV的抗扰能力，加上ESO滑模干扰观测器，进一步提高模型抗干扰能力和鲁棒性。

关键词

ROV；滑模算法；抗扰控制

1 引言

水下作业型机器人(ROV)是水下探测和作业的主力，广泛应用于海洋等项目中，如水下资源勘探等^{[1][2][3]}。滑模变结构控制通过不断变化迫使系统基于预定的滑动模态函数进行运动，具有响应速度快、抗干扰能力强等优点，符合复杂的水下工况。

本文设计一种带 ESO 干扰观测器的滑模变结构控制算法，提出 ESO 滑模干扰观测器，用于估计误差，提升建模精度，从而达到更好的控制效果。

2 伴有 ESO 干扰观测器的滑模抗扰控制算法

2.1 算法概述

ROV 是高度非线性、强耦合和时滞的系统，而水动力

系数的不确定、建模误差等均会造成动力学的不确定性，使 ROV 的控制面临诸多困难。滑模变结构控制是一种非线性控制器，表现为控制不连续，该控制策略与其他控制器的差异在于系统的“结构”不固定，且不断变化，使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。因滑模面可预先设计，当系统状态轨迹到达滑模面沿其滑动时，可保证暂态响应。因滑模面的设计与对象参数、模型等无关，使滑模变结构控制对系统参数变化及模型不确定性具有强鲁棒性，能有效抵抗外界扰动。为减少海底未知干扰估计的误差和提高响应、收敛速度，提出带有基于 ESO 的滑模干扰观测器。以路径规划仿真实验为例，从水下检修机器人运动学和动力学模型、ESO 滑模干扰观测器三方面概述该算法。

2.2 ROV 运动学建模

ROV 是六自由度的运动模型，为表示其运动状态，建立惯性、运动坐标系。惯性坐标系是固定在大地上的坐标系，记为 $E\text{-}XYZ$ ，其原点可以是海面上任意一点， X 正向指北， Y 正向指东， Z 正向则指向地心。运动坐标

【作者简介】曹亮（1987–），男，中国湖南益阳人，硕士，工程师，从事导弹发射装置研究。

系是固联在 ROV 重心上的坐标系, 记为 $O-X_bY_bZ_b$, 其中, X_b 是水下运载器的艏向, 其正方向是从船尾指向船首的方向; Y_b 的正方向是从重心指向右舷, 并垂直于 X_b ; Z_b 的正方向通过右手定则来确定。ROV 的位置坐标是本体坐标系的原点表示在惯性坐标系下的三维坐标点, 记为 $\eta = [x \ y \ z]^T$; 姿态则是通过体坐标系和惯性坐标系之间的关系表示的, 目前常用的表示方式有欧拉角和四元数两种。惯性坐标系下作业机器人的位置和姿态向量可以记为欧拉角形式 $\eta = [\eta^T \ \eta^T]^T$ 或者四元数形式 $\eta = [x^T \ \Omega^T]^T = [x \ y \ z \ \Omega^T]^T$ 。ROV 惯性坐标下的速度, 通过位置、姿态的微分形式表示; 体坐标系下的速度向量定义为 $v = [\mathbf{v}_1^T \ \mathbf{v}_2^T]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$, 其中, $\mathbf{v}_1 = [u \ v \ w]^T$ 体坐标系下的线速度, $\mathbf{v}_2 = [p \ q \ r]^T$ 是角速度。

2.3 ROV 动力学建模

ROV 可视作运行在理想空间中的刚体。根据牛顿定律与动量守恒, 分析其受力平衡关系, 得到 ROV 的刚体运动表达式, 如下所示, 详细参数定义如下所示。描述了在体坐标系下力的平衡关系。

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{pro} \quad (1)$$

M_{RB} 为质量惯性矩阵, C_{RB} 为科里奥利力和力矩矩阵, τ_{env} 为外部环境作用于机器人的力与力矩, τ_{pro} 为推进器推力和力矩输出。质量惯性矩阵 $M_{RB} \in R^{6 \times 6}$ 定义如下示。其中 m 为 ROV 的质量, I_0 为转动惯量, $S(r_g)$ 与 ROV 质心到体坐标系的向量, 由于该型 ROV 的体坐标系原点位于质心, 所以此项为零。

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_g) \\ mS(r_g) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

在考虑水作用时, ROV 水动力 τ_{hydro} 可以用分力的形式线性叠加到刚体运动方程上, 如下式所示。

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{hydro} + \tau_{pro} \quad (4)$$

其中根据 Fossen 的水动力模型, τ_{hydro} 表达式如下式所示。

$$\tau_{hydro} = -M_A\dot{v} - C_A(v)v - D(|v|)v - g(\eta) \quad (5)$$

将式(5)带入(4)中, 得到 ROV 六自由度水动力学模型, 如式(6)所示。

$$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB} + C_A(v))v + D(|v|)v + g(\eta) = \tau_{pro} + \tau_{env} + \tau_{hydro} \quad (6)$$

M_A 为附加质量矩阵, C_A 为科里奥利力和力矩的附加质量部分, $D(|v|)$ 为阻尼矩阵, $g(\eta)$ 为回复力, τ_{hydro} 为水动力。当水下物体与液体处于非相对静止时, 在制定系统方程就须考虑附加质量 M_A 。对于大多数低速水下机器人, M_A 矩阵非对角线元素对水下机器人影响较小, 常被忽略。对于形状复杂的机器人附加质量的计算难以通过经验公式得到, 因此本文将在后文中通过流体软件计算 M_A 。

阻尼矩阵是由线性阻尼项和二次项组成的矩阵, 为方便表示, 将阻尼矩阵划分线性阻尼 D 与二次型阻尼 $D_n(|v|)$ 两部分。

$$D(|v|) = D + D_n(|v|) \quad (7)$$

科氏力 C_A 是由附加质量产生的科氏力, τ_{env} 是环境干扰输入力与力矩。通常, 海洋环境下的风浪流对水下检修机器人的干扰较大。本文将风浪流的干扰作为一种不确定性因素, 在滑模变结构控制器的设计过程中考虑其影响, 并对其进行抑制。 τ_{pro} 是推进器输出力与力矩。

2.4 基于 ESO 的滑模干扰观测器设计

为减少干扰估计所产生的误差并收敛速度, 提出基于 ESO 的滑模干扰观测器, 在有限时间内将估计误差收敛至特定半径集合内。

该观测器的设计分两部分, 首先设计一个 ESO 观测器用于提供系统的状态估计以及对部分干扰 τ_d 的估计, 然后基于估计的信息设计滑膜干扰观测器的滑模面及相应结构对其余干扰 τ_w 进行估计。

定义 ROV 系统中的各阶状态量为 $f_1 = \eta$, $f_2 = \dot{\eta}$, 定义扩张状态 $f_3 = \hat{M}^{-1}\tau_d$, 则有以下形式:

$$\begin{cases} f_1 = f_2 \\ f_2 = \hat{M}^{-1}\tau_c - \hat{M}^{-1}\hat{C}f_2 + \hat{\tau}_w + f_3 \\ f_3 = \hat{M}^{-1}\tau_d \end{cases} \quad (8)$$

设计如下 ESO 对上述系统的状态进行估计:

$$\begin{cases} z_1 = z_2 + l_1 e_b \\ z_2 = \hat{M}^{-1}\tau_c - \hat{M}^{-1}\hat{C}z_2 + \hat{\tau}_w + z_3 + l_2 e_b \\ z_3 = l_3 e_b \end{cases} \quad (9)$$

其中, $e_b = f_1 - z_1 = \eta - z_1$, z_1, z_2, z_3 分别是 f_1, f_2, f_3 的估计值, 所以 τ_d 的估计为:

$$\hat{\tau}_d = \hat{M}z_3 \quad (10)$$

注意到 $\hat{\tau}_w$ 和 τ_w 的估计, 将由待设计的滑模干扰观测器给出。而估计误差 e_b 的表达如下:

$$\dot{e}_b^{(3)} + l_2 \ddot{e}_b + l_1 \dot{e}_b + l_0 e_b = -M^{-1}C(\ddot{e}_b + l_2 \dot{e}_b) + \dot{f}_3 \quad (11)$$

令 $\mathbf{x} = [e_b^T, \dot{e}_b^T, \ddot{e}_b^T]^T$, 状态空间形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\dot{f}_3 \\ e_{ob} = C\mathbf{x} \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ -l_0\mathbf{I} & -l_1\mathbf{I} - l_2\mathbf{M}^{-1}\hat{\mathbf{C}} & -l_2\mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (13)$$

分析可得, 如果选取 l_0, l_1, l_2 使得矩阵 \mathbf{A} 为 Hurwitz 矩阵, 则 \mathbf{x} 能指数收敛至半径为 $\frac{\alpha_1 K}{\lambda}$ 的集合内, 即估计误差 \mathbf{e}_b 有界。

下面将设计滑模干扰观测器, 并给出 τ_w 。定义如下滑模面:

$$\mathbf{s} = \mathbf{z}_2 - \boldsymbol{\alpha} \quad (14)$$

其中 $\boldsymbol{\alpha}$ 满足以下辅助动态方程 (其中, $\mathbf{e}^* = \dot{\mathbf{e}}_b + l_2 \mathbf{e}_b$) :

$$\hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{a}} + \hat{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{y}} = \tau_c + \hat{\tau}_d + \hat{\tau}_w + \lambda_1 \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) - \hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{e}}^* \quad (15)$$

基于 ESO 的滑模干扰观测器设计为 (其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为观测器增益) :

$$\begin{cases} \hat{\tau}_w = \xi + \lambda_2 \hat{\mathbf{M}} \mathbf{z}_2 \\ \dot{\xi} = \lambda_2 (L - (\tau_c + \hat{\tau}_w)) + \hat{\mathbf{C}} \mathbf{e}^* + \hat{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{e}}^* + \lambda_3 \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \\ L = \hat{\mathbf{C}} \mathbf{z}_2 - \hat{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{z}}_2 - \hat{\tau}_d \end{cases} \quad (16)$$

2.5 伴随扰动的数值仿真实验

设两个仿真实验, 一是先定深后执行路径跟踪, 模拟实际定点作业工况; 二是给定水下坐标点, 进行路径跟随。两组实验控制器参数为: 滑模控制器: $\rho = 0.1, l_2 = 0.5, \kappa_0 = 9, \kappa_1 = 5.3$; 扩张状态观测器: $\rho = 0.1, l_2 = 0.5, \kappa_0 = 9, \kappa_1 = 5.3$; 滑模干扰观测器: $\bar{\tau}_w = 20, \lambda_2 = 12, \lambda_3 = 15$ 。

2.5.1 定深后路径跟随仿真实验

本节实验 ROV 首先定深至 1m, 然后在水下 1m 处进行路径点跟踪, 模拟 ROV 定位到检修点后定点前往作业的工况。通过加入正弦波干扰, 模拟水下海流等扰动, 通过分析定深、跟随过程中以及不加扰动的深度、航向、航速数据, 验证本节算法的抗扰能力。本节仿真实验的参数为: 深度取值 1m, 航速取值 2km, 航向为 0°, 扰动为正弦波, 仿真时间取值为 120s, 本文算法为 SMC(滑模变结构控制算法)。

经过定深后路径跟随仿真, 得出如下试验结论: 在不加扰动时, 路径跟随效果较好; 加正弦扰动后, 因扰动航迹偏移黑实线, 完成抗扰路径精准跟踪。深度控制仿真如图 1 所示, 前 40s 处于稳定下潜阶段, 40-120s 稳定控制在水下 1m, 整个过程控制效果较好。航向控制仿真如图 2 所示, 在 40s 时如图中红框所示, 进入直线航行并原地转圈阶段, 导致航向有一定的变动。

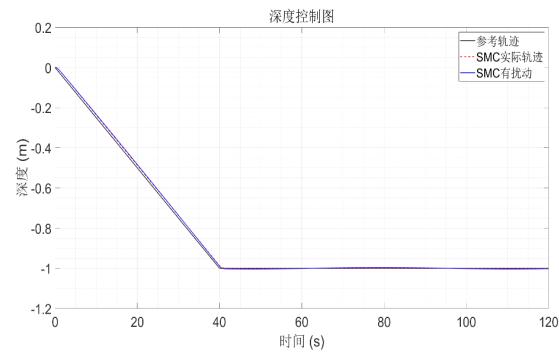


图 1 深度控制仿真图

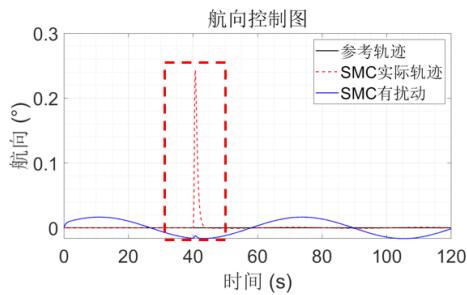


图 2 航向控制仿真图

2.5.2 水下路径点跟踪仿真实验

本节仿真实验的参数为: 坐标点 P1 取值为 [0,0,0]; 坐标点 P2 取值为 [10,10,-15]; 坐标点 P3 取值为 [15,10,-15]; 坐标点 P4 取值为 [25,15,-8]; 坐标点 P5 取值为 [35,15,-10]; 航速为 2km; 航向为 0°; 扰动为正弦波; 仿真时间取 120s; 本文算法为 SMC(滑模变结构控制算法)。

经仿真计算, 整体上无扰动情况下路径跟踪效果最好; 添加正弦扰动后, 跟随效果稍微偏离预设路径, 但整体跟随效果良好; 在大深度下潜并伴随扰动时, 算法控制效果误差大; 一定深度后, 效果良好, 跟踪效果更精准。伴随扰动情况下的误差比无扰动要差, 整体航向控制精度较好。

3 结语

本文针对 PID 算法存在参数整定困难、抗干扰能力有限, 采用滑模控制算法。出带有基于 ESO 的滑模干扰观测器的滑模控制器, 设计 ESO 预测该干扰项, 并融入模型, 提升整体抗干扰能力。

参考文献

- [1] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 44–51.
- [2] 李经. 水下无人作战系统装备现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1–5, 36.
- [3] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 1–30.

Establishment of stellar coordinate systems and its potential applications

Zhixin Huang

Guangzhou City Liwan District Science and Technology Association, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

This paper proposes a new coordinate system based on the simulation of the equatorial coordinate system. They are all key tools to determine the position of celestial bodies on the celestial sphere. The equatorial coordinate system takes the infinite extension line of the earth's rotation axis as the main axis, which is affected by the precession and rotation of the earth's rotation axis. The stellar coordinate system is based on the connection between the distant North star and the center of the earth as the main axis, has a relatively high stability, effectively avoids the unstable drift caused by the earth's rotation and revolution, and is not affected by the age difference and rotation.

Keywords

equatorial coordinate system; stellar coordinate system; Polaris; main axis of stellar coordinate system; aging; chapter

恒星坐标系的建立及其潜在的应用前景研究

黄志新

广州市荔湾区科技协会，中国·广东广州 510000

摘要

本文提出了一种模拟赤道坐标系建立的新的坐标系即“恒星坐标系”。它们均为确定天体在天球上位置的关键工具，赤道坐标系以地球自转轴的无限延伸线作为主轴，这一主轴会受到地球自转轴的进动和章动的影响。而恒星坐标系则基于遥远的北极星与地球中心的连线作为主轴，具有相对较高的稳定性，有效避免了因地球自转和公转所引起的不稳定漂移，且不受岁差和章动的影响。恒星坐标系在多个领域可能会发挥重要作用：包括但不限于天文学研究、航天测控与导航、深空探测、卫星通信与地球观测、导航与定位技术、时间系统校准，以及军事应用等等。这些领域的广泛应用进一步证明了恒星坐标系在科学的研究和实际应用中的重要价值。

关键词

赤道坐标系；恒星坐标系；北极星；恒星坐标系的主轴；岁差；章动

1 引言

当前在天文学中，天球赤道坐标系是最常用的坐标系，其主轴为地球自转轴的无限延伸，与天球相交于天北极和天南极两点，基本大圆为地球赤道面的无限延伸。赤道坐标系具有诸多优点（这里不一一列举），但也存在两个显著的弱点：其一是，由于地球自转轴围绕黄道极产生周期性的进动（周期为约 26,000 年），每年进动约 50 角秒，这引发了一系列问题。例如，春分点不断西移，导致岁差现象；其二是，由于月球和太阳的引力还会引起章动。这些问题使得天极围绕黄道极持续运动，导致恒星的赤经和赤纬以及黄经每年都会发生微小的变化。因此，天文学界每年都需要重新制定一张各星球在天球上的赤经和赤纬明细表，这无疑增加了大量

重复性工作，浪费了科研人员的宝贵时间。

此外，在天文学的时间系统中，除了平太阳时外，还有一种恒星时。然而，现有的天球坐标系都可以与平太阳时相对应，却没有一种坐标系能直接与恒星时相对应，只能通过平太阳时进行换算。上述种种矛盾都可以通过引入一种新的坐标系来一次性彻底解决。

2 恒星坐标系的描述

恒星坐标系，亦可称为宇宙坐标系，它的极点基于遥远恒星的位置确定，相对稳定。旨在与恒星时相对应。其几何参数的设计灵感源自天球赤道坐标系，且有所模拟与近似。

该坐标系的主轴定义为指向北极星（Polaris）与地球中心的连线方向，（需注意北极星并非固定不变，历史上和未来都会有变化，但变化极为微小，在可预见的将来可以忽略不计）。北极星在该坐标系中的位置被称为北星极，其恒

【作者简介】黄志新（1960-），男，中国广东广州人，硕士，工程师，从事数学，物理，工程发明，天文学研究。

星纬度固定为 $+90^\circ$ ；相反方向则定义为南星极，恒星纬度为 -90° 。主轴过地球中心的垂直平面被命名为恒道面，该平面与天球的交线构成恒星赤道圈，其恒星纬度为 0° 。与恒星赤道圈平行的圈层被称为恒纬圈，向北方向为正（范围从 0° 至 90° ），向南为负（范围从 0° 至 -90° ）。

恒星赤道面与黄道面的交角，有两个交点，可分别称为恒星春分点（或简称春星点）和恒星秋分点，但需注意它们与天文学中的春分点和秋分点并非同一概念。在目前情况下，由于恒星坐标系的主轴与赤道坐标系的自转轴非常接近，因此两者的各项参数在数值上确实相近，且随着地球自转轴的进动，它们的接近程度会越来越好；然而，这并不意味着春星点就等同于春分点；或秋星点就等同于秋分点。但是过了一百年之后由于两坐标系的主轴逐渐远离，这些点也就逐渐远离了。

从春星点起算，沿恒星赤道圈逆时针旋转的弧长被定义为恒星经度（或简称恒经），它从北星极经过恒星赤道圈

到达南星极。计量方面，逆时针旋转一圈相当于 24 小时时角（或 360° 经度），类似于赤道坐标系中的赤经。恒星经度同样具有时、分、秒的计量单位。

注：（1）恒星坐标系以上的各特征点及恒道圈与赤道坐标系（J2000.0）的对应点及赤道圈十分相近，在一般的业余观测中可以不加区别。但随着时间的流逝使得春分点的不断西移，各种天体在赤道坐标系中的数据会不断改变，而在恒星坐标系中的坐标数据却恒定不变。

（2）由于黄道面也会在产生极微小的变化，其变化量为每年 $0.13''$ ^[1]，约为岁差的 $1/387$ 。因此从建立更长远，更稳定的真正的恒星坐标系来说，一旦确立恒星坐标系之后，就要寻找一颗十分接近在春星点，恒经为 0^h ，并且横向移动极微的恒星作为今后恒经 0^h 的基准，这样就可以提供更为稳定的恒星坐标系了。

3 恒星坐标系与赤道坐标系的比较

恒星坐标系与赤道坐标系的比较见表 1。

表 1 恒星坐标系与赤道坐标系的比较

项目	赤道坐标系	恒星坐标系	备注
极点	北天极（P），南天极（N）	北星极（当前北极星的位置），南星极	赤道坐标系的极点由地球自转轴确定，随地球进动和章动而变化。恒星坐标系的极点则基于遥远北极星的位置确定，相对比较稳定。
天极变化	天极产生进动，每年约 $50.29''$ （角秒）	恒星天极相对稳定，无显著进动	赤道坐标系的极点因地球进动而缓慢移动，而恒星坐标系的极点则基于遥远恒星的位置，相对稳定
岁差	存在岁差现象，每年约 $50.26''$ （角秒）	不存在岁差现象	岁差是赤道坐标系中特有的现象，由于地球自转轴的进动而导致春分点在天球上的位置逐渐变化。恒星坐标系则不受岁差影响。
特殊点	春分点，每年退行约 $50.26''$ （角秒）	春星点，恒定不变。	赤道坐标系的春分点因岁差而逐渐远离初始位置；而恒星坐标系中的春星点，则基本不会随时间变化。
经纬度	赤经，赤纬	恒经，恒纬。	各天体的恒经，恒纬的定义及数据都类似于赤经，赤纬，并且现在两者的位置也很接近；但是以后赤经，赤纬会不断变化，而恒经，恒纬却基本恒定不变。
章动	存在章动现象	不存在章动现象	章动是赤道坐标系中由于地球自转轴的短期不规则变化而产生的现象。恒星坐标系则不受章动影响。
地球极移	对该坐标系有影响，导致极点位置微小变化	对该坐标系无直接影响。	地球极移是指地球自转轴相对于地球本体的微小变化，这种变化会直接影响赤道坐标系中的极点位置。而恒星坐标系则不受地球极移的直接影响。
时间系统（日）	$1 \text{ 平太阳日} = 24^\text{h}$ （平太阳时） $= 24^\text{h} + 3^\text{m} 56^\text{s}.555$ （恒星时）	春分点（或春星点）绕天球一圈，称为： $1 \text{ 恒星日} = 24^\text{h}$ （恒星时）	赤道坐标系使用平太阳时作为时间基准；恒星坐标系则基于春分点（或春星点）绕天球一周的时间，即恒星日，作为时间基准。
年	$1 \text{ 回归年} = 365.242\,192\,64 \text{ 日}$	$1 \text{ 恒星年} = 365.256\,366\,249 \text{ 日}$	$1 \text{ 恒星年} = 1.000\,038 \text{ 回归年}.$

4 恒星坐标系的主要优点

恒星坐标系作为一种天文学上将会使用的坐标系统，其主轴由遥远且稳定的北极星与地球中心连线构成，使得它在天球上的位置相对比较固定。与赤道坐标系相比，恒星坐标系避免了地球自转和公转引起的不稳定漂移（如春分点的岁差以及章动等），从而显示出显著优势^[2]。

鉴于这些优点，恒星坐标系在以下领域将会得到广泛的应用：

在广泛的应用：

5 恒星坐标系的潜在应用领域

天文学研究：恒星坐标系为天文学家提供了一个稳定且精确的参考框架，有助于他们更准确地观测和研究天体的位置和运动。

恒星坐标系的稳定性意味着，一旦我们绘制出一幅精确的天文星体图表，该图表可以在数百年内保持有效，而无

需频繁更新。每年仅需对春分点及一些具有明显横向自行（即在天球上相对于背景恒星的位置变化）的恒星或其它一些新天体需要测定新坐标。这一特性极大地节省了人力和物力资源。

新天体的定位方法：

在天体图中，我们首先识别出十多到二十几颗横向自行极小的恒星。把这些恒星分成两组：

第一组以定位精度高为主要要求，在当前的观测精度下几乎无法检测到其自行。它们主要应用于专业的天文学家、高精度时间系统校准、航天测控与导航、深空探测及其它需要精确定位坐标的工作中。

第二组以可见度为主要要求，它们主要应用于业余天文学家、以及其它并不需要十分精确定位坐标，而容易观测的工作之中，如导航与定位技术等等。

这些恒星分别大致均匀分布于整个天区，确保地球上每个地区都能观测到至少两到三颗同组的定位恒星。随后，我们精确测量这些恒星的位置，并将它们与北极星一起组成基准恒星表。

恒星坐标系的建立可能为天文学研究构建了一个精确且稳定的参考框架。天文学家利用这一框架来研究恒星、行星、星系等天体的位置和运动规律。当发现新天体时，我们利用至少两颗基准恒星与新天体组成球面三角形，运用球面三角公式即可准确确定新天体的位置。

恒星坐标系不仅能够精确描述恒星、星系等天体的空间位置，还能有效表征它们的运动状态。通过观测恒星在恒星坐标系中的位置随时间的变化，我们可以计算出恒星的自行、视差等天体测量学参数，这些参数为我们深入理解恒星的物理特性和演化过程提供了重要线索。

除此之外，恒星坐标系还有可能更好的完成以下的工作：

航天测控与导航：在航天任务中，恒星坐标系可以作为航天器姿态控制和导航的基准。通过测量航天器相对于恒星坐标系的位置和姿态，可以实现对航天器的精确测控和导航。

深空探测：在深空探测任务中，恒星坐标系有助于科学家确定探测器的位置和速度，并规划其飞行轨迹。

卫星通信与地球观测：在卫星通信和地球观测领域，恒星坐标系可以作为卫星姿态控制和数据处理的基准。这有助于提高卫星通信的可靠性和地球观测数据的准确性。

导航与定位技术：在地面导航和定位技术中，恒星坐标系可以作为辅助手段。通过观测恒星的位置和运动，可以实现对地面目标的精确定位和导航。

6 时间系统校准

恒星时是一种时间测量系统，它以春分点或春星点为参考点，用于精确地计量时间。恒星坐标系与时间系统之间

存在着密切的关联。

具体而言，我们通过观测恒星并确定其相对于春星点的位置，我们可以计算出恒星时。这一时间测量方式具有高度的精确性，因此常被用于校准其他时间系统，如世界时和原子时等。在校准过程中，恒星时作为一个稳定的参考标准，有助于确保其它时间系统的准确性和一致性，从而满足高精度时间同步和授时服务的需求。

军事应用：在军事领域，恒星坐标系可以用于导弹制导、飞机导航等任务。通过利用恒星坐标系提供的高精度位置信息，可以实现对目标的精确打击和导航^[3]。

7 存在的问题

虽然现在恒星坐标系的北星极与赤道坐标系的北天极十分接近，并且越来越接近，致使两坐标系大体相近，现在的北极星（勾陈一）将 2100 年左右最接近北天极点，达到北纬 $89^{\circ} 32' 50.62''$ ，使得两座标更容易互换；但是此后北极星便离北天极就会渐行渐远去，公元 2500 年左右，北极星的名号就会被勾陈五夺去。

北极星虽然在天球上的位置十分稳定，但是还是有极其微小的横向移动，经过极长时间的积累，还是会离开现在在天球中的位置的。

上述两种效应叠加，积累到一定程度之后，就会产生一些麻烦：恒星坐标系的主轴是继续由现在的北极星（勾陈一）与地心的连线担当，还是改由勾陈五接任呢？这留给有兴趣的天文学家去研究解决吧，但在五百年之内一定要提出有效的解决办法。

8 结语

赤道坐标系与恒星坐标系均为确定天体在天球上位置的关键工具。赤道坐标系以地球自转轴的无限延伸线作为主轴，这一主轴会受到地球自转轴的进动和章动的影响。相比之下，恒星坐标系则基于遥远的北极星的位置作为主轴，具有相对较高的稳定性，有效避免了因地球自转和公转所引起的不稳定漂移，且不受岁差和章动的影响。

恒星坐标系在多个领域可能会发挥重要作用：包括天文学研究、航天测控与导航、深空探测、卫星通信、地球观测、导航与定位技术、时间系统校准、以及军事应用等等。这些领域的广泛应用将会进一步证明了恒星坐标系在科学的研究和实际应用中重要的潜在价值。

参考文献

- [1] 苏宜编著，天文学新概论（第四版），科学出版社，2009年，P44-56.
- [2] 余明，陈大卫编著，简明天文学教程（第四版），科学出版社，2021年，P25-40.
- [3] 孙杨，胡中为编著，天文学教程（上），上海交通大学出版社，2020年11月，

Research and Application of Virtual Prefabrication Technology for Steel Structures

Yi Li¹ Aizhu Zhu² Donghua Yu³ Dabin Yang⁴

1. Hubei Gongjian Hongtu Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China
3. Hubei Industrial Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430076, China
4. Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, 250101, China

Abstract

With the continuous development of digital technologies, virtual pre-assembly techniques centered on 3D laser scanning, Building Information Modeling (BIM), and digital twins have emerged. Steel-structure virtual pre-assembly refers to the use of digital methods to simulate the on-site assembly process of structures, thereby enabling “data to substitute for physical objects” in pre-inspection and analysis. This approach has gradually become an inevitable trend in the development of the civil engineering industry. This paper systematically reviews the historical evolution of virtual pre-assembly technologies, analyzes the current status and challenges of virtual pre-assembly systems, standards and specifications, as well as engineering applications in steel structure projects, and further outlines the future prospects for the development of this technology.

Keywords

virtual pre-assembly; steel structures; 3D laser scanning; digital construction

钢结构虚拟预拼装技术的研究与应用

李毅¹ 朱爱珠² 俞栋华³ 杨大彬⁴

1. 湖北工建洪图建设有限公司, 中国·湖北 武汉 430000
2. 华中科技大学, 中国·湖北 武汉 430074
3. 湖北省工业建筑集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430076
4. 山东建筑大学, 中国·山东 济南 250101

摘要

随着数字技术的不断发展, 以三维激光扫描、建筑信息模型 (BIM) 和数字孪生为核心的虚拟预拼装技术应运而生。钢结构虚拟预拼装技术就是通过数字化手段模拟结构现场拼装过程, 实现“数据代替实物”的预检验与分析, 已逐步成为土木工程行业发展的必然趋势。本文系统回顾了虚拟预拼装技术的发展历史, 分析了其当前钢结构工程虚拟预拼装技术体系、标准规范、工程应用等方面现状与挑战, 并展望了该技术的发展前景。

关键词

虚拟预拼装; 钢结构; 三维激光扫描; 数字化施工

1 引言

钢结构以其强度高、自重轻、施工快、造型美观等诸多优点, 广泛应用于各类大跨度空间结构、超高层建筑、复杂桥梁等工程中。传统的实体预拼装通过在专用场地将构件临时组拼, 检验加工精度、发现误差并及时修正, 最终保障现场安装顺利进行。随着大型复杂钢结构工程的日益增多, 传统的实体预拼装技术因其成本高、周期长、受场地环境制约等多方面缺点, 越来越难以适应现代工程建设的需求。

【作者简介】李毅 (1986-) , 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 中级规划师, 从事城市规划与设计研究。

随着数字技术的不断发展, 以三维激光扫描、建筑信息模型 (BIM) 和数字孪生为核心的虚拟预拼装技术应运而生, 其总体技术框架如图 1 所示, 该技术通常以工厂 / 现场扫描数据为输入, 经过点云预处理与模型配准对齐, 实现关键部位的偏差计算与可视化, 并输出检测报告与处置建议; 最终将结果反馈至加工修正、复检或安装方案优化, 形成闭环质量控制流程。该技术通过现代测量与信息技术, 在数字空间内高精度复现结构及其构件, 模拟结构实际拼装过程以实现对构件加工质量的高效、全面检测, 提高工程结构建造质量和建造效率, 并显著降低工程建造成本。

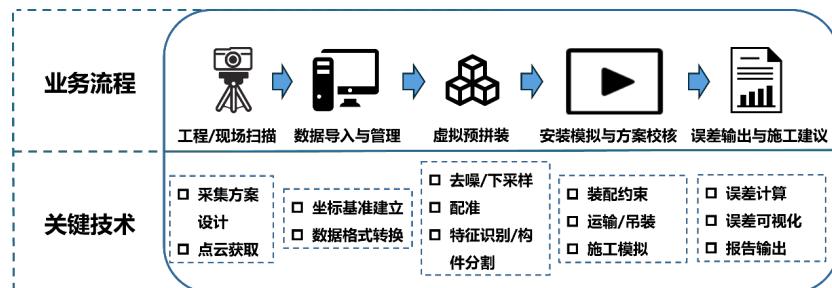


图 1 虚拟预拼装总体技术框架

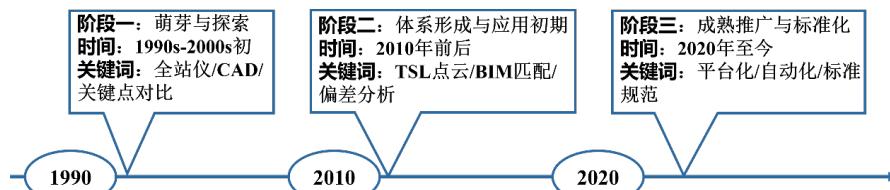


图 2 虚拟预拼装发展历程

2 虚拟预拼装技术的发展历程

虚拟预拼装技术的发展与测量技术和计算机技术的进步息息相关，大致可分为如图 2 所示的三个阶段：

第一阶段—萌芽与探索阶段：该阶段以“数字化放样”和“三维模型对比分析”为主要特征。从 20 世纪 90 年代开始到 21 世纪初期，全站仪和早期三维 CAD 软件逐渐诞生并快速普及，工程师们开始尝试将设计模型与构件关键点的实测坐标进行对比分析，检测构件加工精度。但受限于测量点数量少、处理和分析效率低、模型相对粗糙，仅能用于结构或构件局部或关键连接位置的校验，尚不能真正实现结构的虚拟拼装。

第二阶段—技术逐渐形成与应用初期阶段：三维激光扫描技术的成熟与 BIM 理念的引入是此阶段的主要条件。到 2010 年前后，高精度、高密度的点云数据能够完整捕捉构件实物的三维几何形态，通过将点云模型与基于设计图纸建立的 BIM 模型进行精准匹配与偏差分析，评估结构构件整体加工和建造质量。至今，该技术在国家体育场、上海中心大厦、大兴机场等重大工程中进行了成功尝试^[1]，证明了该技术在解决超大型复杂构件预拼装难题上有巨大潜力，可创造巨大的工程应用价值，这正标志着该技术体系的初步形成。

第三阶段—成熟推广与标准化逐渐形成阶段：这一阶段主要从 2020 年前后到未来数年间，钢结构虚拟预拼装技术将从“可用”向“好用、通用”变化。硬件方面，扫描仪速度、精度和便携性大幅提升；软件方面，出现了大量的专业化、自动化的虚拟预拼装分析平台和开源程序库（PCL 库等），算法更加快捷智能，检测精度高，且拼装过程和结果显示可视化效果好。更重要的是，相关技术标准陆续出台，如中国的《钢结构工程施工质量验收标准》（GB 50205-2020）^[2]中明确了虚拟预拼装可作为预拼装验收的一种方法。因此，在此阶段虚拟预拼装技术不断迈向成熟和标准化，逐

渐推广应用到各类建筑、桥梁等钢结构的建设工作中。

3 钢结构虚拟预拼装技术的发展现状与挑战

当前，钢结构虚拟预拼装技术已形成集“数据采集 - 模型处理 - 分析决策”于一体的完整技术链条：首先，以地面三维激光扫描为主流，摄影测量、激光跟踪仪等作为补充，实现毫米级精度的构件数字化；然后，通过坐标系统一定位、点云去噪与简化、智能配准等算法运算，将点云模型与 BIM 模型进行精准对齐与分析；最后，软件自动计算构件关键尺寸、孔位、接口尺寸等的加工偏差，生成彩色云图与量化分析报告，为项目决策者提供重要依据^[3]。

钢结构虚拟预拼装技术主要的应用模式包括构件出厂前质量控制、虚拟替代实体拼装、安装模拟与碰撞检查和竣工数字化存档等，如图 3 所示。其中，出厂前质量控制是在制造厂内扫描单体构件，确保其符合设计要求，从源头控制工程建造质量^[4]。虚拟替代实体拼装是对多个关联构件分别扫描后，在软件中模拟拼装，检测接口匹配误差，完全替代或大幅减少实体拼装^[5]。安装模拟与碰撞检查是结合施工方案，在虚拟环境中模拟吊装顺序和路径，提前发现潜在的碰撞冲突^[6]。竣工数字化存档则主要是形成记录构件实际形态的“数字资产”，为结构物后期运营、维护和改造提供精准可靠的数据基础。

然而，钢结构特别是大型复杂钢结构虚拟预拼装技术的研究和应用仍然面临许多挑战：首先，技术门槛高、预拼装成相对较高。主要表现为对人员的技术复合能力要求高，初期软硬件投入多。其次，标准细则待完善的空间大。主要表为现有标准对可接受偏差阈值、不同结构类型的适用方法等细节规定尚较欠缺。第三，数据流贯通不畅。在钢结构设计、工厂制造、场地扫描、点云处理和分析等各环节的数据格式与平台不统一，存在严重的“信息孤岛”现象，影响预拼装全过程效率。最后，环境条件影响复杂。钢构件或结构

扫描时环境温度产生的变形对扫描精度的影响机制、运输和吊装过程对结构构件变形的影响等无法准确获取，这些会直接影响预拼装技术预测的精度^[7]。

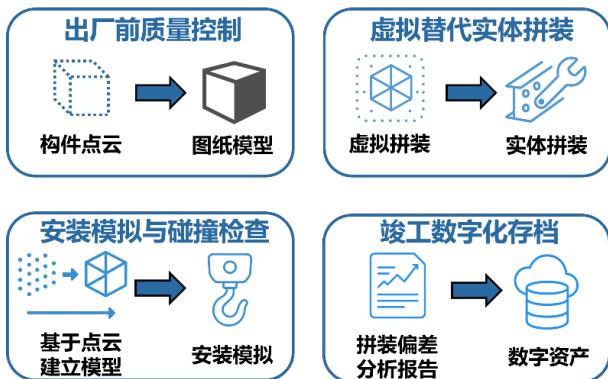


图 3 虚拟预拼装典型应用模式

4 钢结构虚拟预拼装技术发展趋势与应用前景

随着数字化技术的快速发展和相关软硬件系统的不断发展，钢结构虚拟预拼装技术将成为现代钢结构工程质量控制的“标配”，其未来发展将不再局限于技术本身精度的提升，而是深度融入到钢结构工程全生命周期，并与新一代信息技术发生“化学反应”，催生出全新的工作范式，创造出更多新价值。该技术近期的发展将可能呈现如图 4 所示的三种趋势。趋势一：全流程智能化。人工智能特别是深度学习将彻底改变点云数据处理模式。算法能够自动识别构件类型、特征线、焊缝、螺栓孔群，实现全自动、高精度的点云模型与 BIM 模型配准，并将处理时间从数小时缩短至数分钟，甚至更短；同时自动诊断偏差根源如切割或焊接变形等^[8]。通过在工厂制造的关键构件上预埋低功耗传感器，在运输、现场堆存及安装过程中，实时采集变形、应力、温度和湿度数据信息，同步更新结构及构件的数字模型，形成动态的施工过程检测分析。趋势二，平台化。基于云计算和 5G 网络，构建统一的工程项目数字孪生协同平台。钢结构工程设计、制造、安装、监理、总包等各方可基于同一权威数据源，进行远程的、并行的虚拟预拼装审核与决策。极大提升跨地域、多标段大型项目在建设各环节的协同效率，还能确保数据链条的完整性与可溯性。趋势三，标准体系化。随着虚拟预拼装技术的完善与普及，行业将推动形成更细致的、更全面的标准和规范体系，将针对不同结构类型（如大跨度桁架、高层框架、复杂节点）和应用场景（完全替代实体、部分替代、辅助实体），制定明确的精度等级、测量方案、验收标准和决策方案等。

结构虚拟预拼装形成的误差分析结果可直接反馈给自动化生产线如切割及焊接机器人，用于校准和工艺优化，实现精确建造，推动面向制造和安装的数字化设计，提升整个产业链的工业化和自动化水平。随着该技术标准化体系的建

立与完善，虚拟预拼装技术将从“有益补充”变为“不可或缺”，成为有效保障各类规模大、构造复杂且拼接精度要求极高的钢结构工程的高品质建设的必要手段。因此，钢结构虚拟预拼装技术在大跨度、大空间、造型复杂的各类建筑与桥梁结构建造工程中具有非常广泛的应用前景。

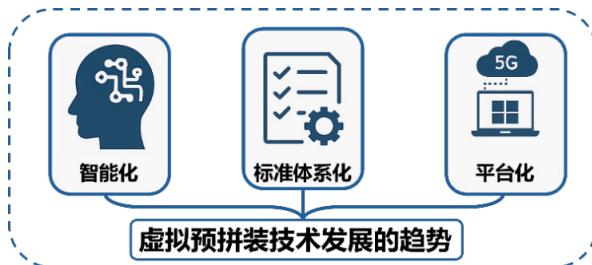


图 4 虚拟预拼装技术可能的发展趋势

5 结语

本文回顾了虚拟预拼装技术的主要发展历程，分析了该技术的发展现状和存在的现实挑战。虚拟预拼装技术从辅助性测量工具，已发展成为驱动钢结构工程产业变革的核心数字化技术，正沿着全流程智能化、平台化、标准体系化趋势发，未来将成为构建土木工程智能建造体系的关键基石。对于土木工程行业而言，持续推动该技术的标准化、培养复合型人才、构建开放协同的数字化生态，是充分发挥虚拟预拼装技术潜力、引领钢结构工程迈向更高品质与效率的必然路径。

参考文献

- [1] 余永明.北京大兴国际机场航站楼测量关键技术[J].北京测绘,2019,33(12):1425-1431.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205-2020[S].中国计划出版社,2020.
- [3] Liu J, Cui N, Cheng G, et al. Towards the automated virtual trial assembly of large and complex steel members using terrestrial laser scanning and BIM[J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116448.
- [4] 郭祺,杨振龙,冀小伟. 重型钢构件虚拟预拼装技术研究[J].建筑施工,2021,43(09):1786-1788.
- [5] Cheng G, Liu J, Cui N, et al. Virtual trial assembly of large steel members with bolted connections based on point cloud data[J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104866.
- [6] Wang Y G, He X J, He J, et al. Virtual trial assembly of steel structure based on BIM platform[J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104395.
- [7] 朱爱珠,王佳盟,潘文铭,等. 基于PCL的钢箱节段虚拟预拼装技术[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(01):10-17.
- [8] Kim B, Jo I, Ham N, et al. Simplified Scan-vs-BIM Frameworks for Automated Structural Inspection of Steel Structures[J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 11383.

Research on Remote Detection and Diagnosis System for Automobile Based on Internet of Things

Changwei Luo

Fuqing Automobile Repair and Maintenance Factory, Fuqing, Fujian, 350300, China

Abstract

With the rapid development of intelligent connected vehicles and vehicle electronic control technology, the traditional method of relying on on-board fault lights and manual diagnosis at maintenance stations is no longer suitable for the high integration of software and hardware in automotive systems, multi-dimensional coupling of fault modes, and complex and changing operating environments. The Internet of Things technology realizes real-time monitoring, remote data transmission and intelligent analysis of vehicle operation status through the collaboration of sensor network, edge computing and cloud, and provides a new technical path for the transformation of vehicle fault diagnosis mode. The results of this study indicate that the three-layer collaborative architecture of vehicle end edge cloud can effectively improve the accuracy and coverage of vehicle fault detection, significantly reduce maintenance costs, and improve user experience, providing important engineering value and theoretical support for the sustainable operation of intelligent connected vehicles.

Keywords

Internet of Things; Remote inspection of automobiles; Fault diagnosis; CAN bus

基于物联网的汽车远程检测与诊断系统研究

罗长威

福清市汽车修配厂，中国·福建 福清 350300

摘要

随着智能网联汽车与车辆电子控制技术的快速发展，传统依赖车载故障灯与维修站人工诊断的方式已难以适应汽车系统高度软硬件集成、故障模式多维耦合和运行环境复杂多变的现实需求。物联网技术通过传感器网络、边缘计算与云端协同，实现车辆运行状态的实时监测、远程数据传输与智能分析，为车辆故障诊断模式转型提供新的技术路径。本研究结果表明，车端—边缘—云端三层协同架构能有效提升车辆故障检测准确度与覆盖率，显著降低维护成本并改善用户体验，为智能网联汽车的可持续运行提供重要工程价值与理论支撑。

关键词

物联网；汽车远程检测；故障诊断；CAN 总线

1 引言

汽车电子系统集成度不断提高，从发动机管理系统、制动系统、车身电子到信息娱乐系统均由多组 ECU 构成的分布式控制网络协同运行，其内部功能耦合与通信依赖性极高，使局部异常在系统水平的传播路径呈指数式放大。传统故障诊断方式多以 DTC (Diagnostic Trouble Code) 检出与维修站扫描仪解析为主，缺乏长周期、跨子系统、多工况的连续性监测能力，导致诊断呈现滞后性和孤立性。因此，构建依托物联网架构的远程检测与诊断系统，利用分布式传感器数据、网络通信与云端知识库实现系统级故障识别，是智能汽车运维的重要变革。本文在梳理相关技术基础上提出实

用化诊断框架，并从数据获取、系统建模与安全治理三个层面展开深入研究。

2 基于物联网的汽车远程检测体系结构与通信协议

2.1 基于物联网的汽车远程检测体系结构

物联网架构下的汽车远程监测以车端感知层、边缘处理层与云端平台层构成完整技术体系。车端感知层包括主动状态监测传感器与车辆内部通信网络，前者涵盖温度、振动、压力、电流、电压与油液品质等多种传感单元，后者以 CAN、LIN、FlexRay 与以太网为数据总线基础，通过 ECU 之间的实时交互形成系统状态闭环。边缘处理层通常构建于网关设备，如 T-Box 或智能车机，负责协议解析、数据预处理与初步诊断，尤其在车辆移动性和通信不稳定环境下，通过局部计算降低数据丢失风险与网络依赖性。云端平台层

【作者简介】罗长威（1978-），男，中国福建尤溪人，本科，工程师、高级技师，从事汽车检测研究。

承助长周期数据分析、模型训练、故障演化趋势识别、软件 OTA 管理以及跨车队健康管理等功能，通过多车数据集训练深度学习模型，实现从单车经验型诊断向群体学习驱动的预测性维护转型。系统总体架构应具备可扩展性，以适配不同车型、混动结构与功能域集中式电子架构下的多域协作^[1]。

2.2 车端数据采集与通信协议

车端数据采集基于分布式电子电气架构，其核心是保障传感信息的完整性、时序一致性与模块间通信实时性。在传统分布式 ECU 架构中，CAN 总线以仲裁机制完成多节点通信，通过优先级标签确保动力系统与制动系统数据优先传输。随着 ADAS 与智能驾驶功能普及，FlexRay 高速总线与

以太网通信逐渐用于摄像头、毫米波雷达和激光雷达数据集成，实现大带宽、低延时的环境感知数据交换^[2-3]。OBD 诊断协议作为远程采集入口，支持 DTC、PID 参数和传感器监控信息的解析，而在新能源车辆中，还需采集 BMS(Battery Management System) 数据，包括 SOC、SOH、温度梯度与均衡状态。考虑车辆运行环境复杂、振动强度大、温差跨度广和 EMI 干扰显著，传感器布局需遵循冗余与去耦合原则，通过多点采样与结构隔振确保采集数据具有工程稳定性。随着车载电子逐渐由功能域集中向中央计算架构转移，数据采集协议将呈现融合化趋势，基于 TSN 的车载以太网有望成为未来主干方案。

表 1 典型车载通信总线协议在远程诊断场景下的性能对比

通信协议	典型带宽	传输延迟	网络拓扑	使用场景特征	对远程诊断的适配性评价
CAN (Controller Area Network)	125 kbps–1 Mbps	低延迟，毫秒级仲裁	多主线型，总线共享	传统 ECU 网络核心，用于动力与制动实时控制	适配基础故障码与实时数据采集，但带宽不足以承载大规模诊断特征流
LIN (Local Interconnect Network)	≤ 20 kbps	延迟较高	单主多从	车身舒适系统、传感器节点	适用于低频诊断与状态监测，不适合动态工况数据
FlexRay	10 Mbps	固定周期同步	双通道冗余	ADAS、稳定性控制系统	支持高可靠与时间触发诊断，但成本高、部署复杂
车载以太网 (Automotive Ethernet)	100 Mbps–1 Gbps	亚毫秒级	星型/环型，可 TSN	传感器融合、域集中架构	支持大规模传感数据与边缘推理，是未来远程诊断主干协议
OBD-II (On-board Diagnostics)	依赖底层协议	与 CAN 一致	桥接式	维修工具接口、法规排放检测入口	易于标准化采集 DTC 与 PID，是远程故障检索与法规诊断核心入口

上述通信协议从带宽、实时性到拓扑结构分别对应不同的诊断能力边界。低带宽协议如 LIN 难以支撑高频动态工况分析，而 CAN 虽然具备实时性，但受仲裁机制限制难以承载复杂多维感知数据，导致其功能更多集中在 ECU 级故障与安全控制。而以太网与 FlexRay 在远程诊断中表现更强，其高带宽与同步机制不仅适用于多传感器融合，更可支撑运行数据的边缘侧预处理与云端特征提交，使诊断对象从部件级拓展到系统级与行为级。表 1 对比可见，未来远程检测系统将呈现“诊断功能向高带宽协议迁移”的趋势，而 OBD-II 将继续承担法规检测与维保入口的核心角色。

3 边缘计算在车辆诊断中的应用与知识融合机制

3.1 边缘计算在车辆诊断中的应用

边缘计算的引入显著改变了车辆诊断模式，使数据处理能力从云端回落至车端或附近节点，从而降低通信延迟与带宽压力并增强实时诊断响应能力。在车辆运行环境下，边缘节点结合时序特征提取、异常点过滤与滑动窗口建模，对传感器数据进行预处理避免瞬态干扰造成误判。车端诊断算法多采用模型驱动与数据驱动协同策略：模型驱动方法依托热力学、机电系统与控制方程构建故障特征，例如利用发动机进气压力与节气门开度之间的偏差诊断混合气不足；数

据驱动方法则基于历史样本训练神经网络或支持向量机，在高维传感数据中提取模式分布与多变量耦合特征。边缘处理不仅提高实时性，也通过第一轮特征压缩显著降低上传数据量，从单车诊断延伸至车队诊断。特别是在动力电池管理中，通过边缘节点对温升速率、充放电梯度与单体一致性进行实时分析，可在劣化初期触发预警并执行降功率保护策略^[4]。

3.2 云端平台的诊断模型与知识融合机制

云端诊断以平台模式运行，通过跨车辆数据积累训练通用模型，从而有效应对车辆故障模式的个体差异与跨车型变化。云端平台通常构建矩阵式数据湖，存储历史运行数据、维修记录、故障标签与环境因子，对数据进行清洗、分群与特征工程处理；随后采用深度学习网络，如 LSTM 处理时间序列、GNN 处理拓扑信息、CNN 处理振动谱信号，从多视角构建诊断模型。另一方面，知识图谱作为专家知识表达工具，通过对 DTC、元件失效机理、维修经验和环境影响的图谱化描述，实现数据—机理—经验之间的统一推理，弥补纯数据模型在小样本、长尾场景下的性能不足。云端平台还承担持续学习功能，通过 OTA 向车端更新模型参数与诊断逻辑，使系统具备自我迭代能力，并对新型故障实现快速适应。在实际工程中，云端诊断的核心价值不在于单次判断，而在于构建闭环管理体系，使车辆生命周期的健康状态可被量化、预测与干预。

4 汽车典型子系统的物联网诊断应用研究

4.1 动力系统在物联网环境下的多维诊断机制

动力系统的故障检测与诊断呈现典型的跨模式特征，其复杂性不仅来源于传感参数的多维耦合，也源于不同动力类型下机理差异导致的特征表达方式非一致^[5]。在燃油动力车辆中，进气压力、空燃比与喷油控制构成发动机基本工作环路，三者的非线性偏移直接表现为热效率下降与排放增量。传统以故障码为中心的诊断体系往往只能捕捉结果性失效，而难以刻画瞬态扰动与边缘状态。在物联网系统中，通过在车端持续采集节气门开度、进气压力、排气温度及曲轴转速四类高频数据，在发动机加速、减速和怠速转换过程中构建时间序列训练样本，由边缘节点执行滑动窗口分析，可识别喷油脉冲宽度异常与进气压力滞后之间的耦合关系，并利用云端模型建立失效特征矩阵，实现“从症状反推机理”的智能诊断。此外，多源数据在不同工况下呈现的协方差结构可作为燃烧稳定性指标，例如氧传感器输出高频抖动与排气温度慢漂移的组合，往往意味着混合比调节逻辑不足或 EGR 阀迟滞。在新能源车辆中，动力电池系统成为诊断核心，其退化表现不具备离散性故障特征，而呈现缓慢累积过程，高温环境、充放电倍率与循环深度共同作用决定单体寿命。物联网体系下的 BMS 数据不仅记录电压、内阻与温升，还可捕捉充放电过程中的瞬态梯度，通过云端聚类模型识别出“长期轻微热应力”与“短时大倍率冲击”两类不同退化路径，并结合 SOH 预测模型构成动态阈值判断策略。在实际运行中，进一步引入累计应力理论，以充电倍率 × 温升时间 × 循环深度的三维积分量化电芯负荷，使系统能够在功能正常但退化临界的状态下提前触发限功率或均衡策略，从预测性维护层面延缓寿命衰退与热失控风险。

4.2 制动系统与车身电子系统的远程诊断路径

制动系统的失效具有更显著的系统性特征，其诊断不仅依赖单一传感器数据，更需要对执行器、控制软件与车载通信之间的协同状况进行分析。在 ABS、ESP 及 EHB 等电子制动架构中，CAN 总线为主线节点提供实时信号，包括车轮转速、制动压力以及液压执行阀的动作状态。物联网诊断系统通过长周期采集制动曲线，将制动力变化率与制动踏板力输入建立关联，并在不同路面附着系数条件下形成参考模型；当执行器延迟与压力反馈不匹配时，边缘节点能在毫秒级时间窗内识别非正常抖动模式，从而提示液压回路堵塞、执行阀疲劳或控制器软延迟。此外，ABS 触发频次在极端工况下会呈现“尖峰模式”，若长期在低制动承载环境

中出现高触发概率，通常意味着轮速传感器异常、制动液气泡或踏板行程反馈漂移，通过云端回放数据可以分离用户驾驶习惯干扰，提升误判抑制能力。相比之下，车身电子系统虽然对安全的直接影响较弱，但其诊断难度更高，因为故障多表现为通信质量下降和节点抗干扰能力削弱，而非功能完全丧失。在功能域集中式架构下，车身控制模块与显示系统、舒适系统通常共享通信资源，若局部节点对 EMI 敏感或软件版本差异，通信丢包率与时延将呈现跨域扩散趋势。物联网诊断系统通过统计多节点时延分布、丢帧数量以及域控制器间数据一致性指标，可捕捉潜在的电子架构疲劳趋势，并在系统降级前提出维护建议。实际工程中，通过建立多节点通信热图与波动区间模型，可识别软硬件老化导致的“微失效”，从而避免集中式系统因单点故障而触发级联降级机制，为车辆全生命周期的可靠性保障提供重要技术支撑。

5 结语

基于物联网的汽车远程检测与诊断系统通过构建车端、边缘、云端协同架构突破传统诊断模式的时效性与局限性，在跨系统、多工况与故障演化识别方面展现显著优势。通过分布式传感采集、协议融合通信和边缘智能处理，可实时发现关键部件异常并提前介入；基于云端的大规模数据分析与知识图谱推理，故障诊断能力从静态识别扩展至动态预测，形成车辆生命周期健康管理服务体系。面对新一代集中式电子电气架构与智能驾驶场景，系统安全、数据可信与隐私保护将成为核心约束。在未来研究中，应进一步深化诊断模型对不同车辆平台的适配机制，拓展边缘节点算力以适应高维感知数据，并通过法规体系与行业标准完善远程诊断系统的工程部署路径，从而推动智能网联汽车进入安全可控的可持续发展阶段。

参考文献

- [1] 张正甫, 赖兴余, 张华军, 等. 新能源汽车远程监控与故障诊断技术研究[J]. 汽车维修技师, 2025,(22):76-77.
- [2] 宋明祥. 数字化背景下远程监控在汽车发动机故障诊断与维修中的应用[J]. 汽车维修技师, 2025,(14):58-59.
- [3] 刘坚. 车联网环境下汽车年检远程检测技术与安全保障研究[J]. 时代汽车, 2025,(14):145-147.
- [4] 喻鑫. 基于物联网的新能源汽车远程监控与故障诊断系统[J]. 汽车维修技师, 2025,(02):52-53.
- [5] 罗天娇. 基于物联网技术的汽车起重机可靠性自动化检测研究[D]. 中国地质大学(北京), 2023.