INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING RESEARCH

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.:+65 65881289
E-mail:contact@nassg.org
Add.:12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

NASS
NAN YANG ACADEMY OF SCIENCES

信息科学与工程研究 INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING RESEARCH

Volume 6 Issue 11 November 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)

NASS
NAN YANG ACADEMY OF SCIENCES

11
2025

Information Science andEngineering Research

信息科学与工程研究

Volume 6 Issue 11 November 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)

Google Scholar
Crossref
CNKI 中国知网 www.cnki.net

ISSN 2737-4815
11
9 772737 481254

中文刊名：信息科学与工程研究
ISSN：2737-4815 （纸质）2737-4823（网络）
出版语言：华文
期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/iser
出版社名称：新加坡南洋科学院

Serial Title: Information Science and Engineering Research
ISSN: 2737-4815 (Print) 2737-4823(Online)
Language: Chinese
URL: http://journals.nassg.org/index.php/iser
Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Database Inclusion

Google Scholar

Crossref

China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

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

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

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: http://www.nassg.org

《信息科学与工程研究》征稿函

期刊概况：

中文刊名：信息科学与工程研究

ISSN：2737−4815 (Print) 2737−4823(Online)

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/iser

出版社名称：新加坡南洋科学院

出版格式要求：

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

出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网（CNKI）、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。

信息科学与工程研究

Information Science and Engineering Research

主　编

陈惠芳

浙江大学，中国

编　委

彭照阳　Zhaoyang Peng

李　砚　Yan Li

朱朝阳　Chaoyang Zhu

房锐波　Ruibo Fang

张　力　Li Zhang

1 人工智能大模型的安全风险及防护措施探讨
/ 江均勇
4 数据要素驱动下“医疗 - 医药 - 医保”协同发展模式研究
/ 陈兰波
7 软件定义网络中 DDoS 攻击检测与防御机制设计
/ 孙麒 张宏宇
10 中波发射天调网络阻抗匹配技术研究
/ 刘薛礼
13 面向指向式旋转导向电动机及发电机应用的综合测试平台设计
/ 鲍东升 朱伟红 周润奇 付海中
16 人工智能赋能佳木斯市制造业中小企业数字化转型创新发展的策略研究
/ 张宇 吕宜光
20 屏柜风险智能管控系统的设计与实现
/ 宋宇 缪新民 李斌
23 绿色矿山智能安全监测体系构建与效能评价研究
/ 郭宇
26 铁路货运计量设备中定向物联网技术的可靠性分析与优化路径
/ 宋席平 张志国 何靖刚 陈仲明 邢悦
29 低温环境下电动汽车充电桩充电效率提升研究
/ 王芳
32 人工智能和物联网在城市大数据建设中的应用探索
/ 尹可欣
35 运营商低空网络部署策略研究
/ 黄少华
39 基于大数据的计算机网络安全态势感知模型研究
/ 萧太文
42 大坝安全监测多源数据治理研究及应用
/ 李天旸 田亚岭
45 基于模型预测控制的双足机器人系统设计
/ 李辉政 韩竺秦 陈泽凯 吴星鹏 何祥洁 赖哲浩

1 Discussion on security risks and protection measures of artificial intelligence large model
/ Junyong Jiang

4 Research on the collaborative development mode of “healthcare-pharmaceutical-health insurance” driven by data elements
/ Lanbo Chen

7 Design of DDoS Attack Detection and Defense Mechanism in Software-Defined Networks
/ Qi Sun Hongyu Zhang

10 Research on Impedance Matching Technology of Medium Wave Transmission Sky Modulation Network
/ Xueli Liu

13 Design of Testing Platform for Motors and Generators of Point-the-Bit Rotary Steering System
/ Dongsheng Bao Weihong Zhu Runqi Zhou Haizhong Fu

16 Research on Strategies for AI-empowered Digital Transformation of Manufacturing SMEs in Jiamusi City
/ Yu zhang Yiguang Zhang

20 The Design and Implementation of the Intelligent Risk Control System for Screen Cabinets
/ Yu Song Xinmin Miao Bin Li

23 Research on construction and effectiveness evaluation of intelligent safety monitoring system for green mine
/ Yu Guo

26 Reliability Analysis and Optimization Path of Directional IoT Technology in Railway Freight Measurement Equipment
/ Xiping Song ZhiguoZhang Jinggang He Zhongming Chen Yue Xing

29 Research on Improving Charging Efficiency of Electric Vehicle Charging Piles in Low-Temperature Environments
/ Fang Wang

32 Exploration of artificial intelligence and Internet of Things in urban big data construction
/ Kexin Yin

35 Research on Low-altitude Network Deployment Strategies of Operators
/ Shaohua Huang

39 Research on Computer Network Security Situation Awareness Model Based on Big Data
/ Taiwen Xiao

42 Research and Application of Dam Safety Multi-source Monitoring Data Governance
/ Tianyang Li Yaling Tian

45 Design of a Biped Robot System Based on Model Predictive Control
/ Huizheng Li Zhuqin Han Zekai Chen Xingpeng Wu Xiangjie He Zhehao Lai

Discussion on security risks and protection measures of artificial intelligence large model

Junyong Jiang

Shanghai Digital Security Technology Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

Artificial intelligence (AI) large models, serving as the core driving force of next-generation intelligent systems, have demonstrated significant value across diverse fields including natural language processing, computer vision, and automated decision-making. However, during their widespread application, these AI models continue to face complex and multifaceted security risks. While threatening the stability and controllability of threat models, they also trigger governance dilemmas and social trust crises. To address these challenges, this paper first systematically analyzes the security risks confronting AI large models, then proposes scientifically feasible protective measures based on research and practical insights. The aim is to provide actionable guidance for advancing the optimal application and development of China's AI large models.

Keywords

AI large models; security risks; protective measures; exploration

人工智能大模型的安全风险及防护措施探讨

江均勇

上海数字安全科技有限公司，中国·上海 200000

摘　要

自然语言处理、计算机视觉以及自动决策等诸多领域，人工智能大模型身为新一代智能系统的核心驱动力在其中发挥出重要价值。然而在广泛应用进程里，人工智能大模型仍面临着复杂且多元化的安全风险，它们在威胁模型的稳定性与可控性的同时，还会引发治理困境与社会信任危机。本文为应对上述挑战，先就人工智能大模型所面临安全风险展开系统剖析，随后结合研究及实践情况下提出相对应的科学可行防护措施，希望能够为推动我国人工智能大模型更好地应用及发展提供一定帮助。

关键词

人工智能大模型；安全风险；防护措施；探讨

1 引言

随着深度学习技术的突破、算力的显著提升、海量数据的积累，人工智能大模型的发展日新月异。人工智能大模型具有更多的参数和更复杂的结构，可以更好地捕捉数据中的复杂关系和模式，从而提高模型的性能。人工智能大模型的快速发展为各行业带来了前所未有的机遇，但同时也带来了多样化的安全风险。这些风险贯穿于模型、数据和应用等各个层面，并伴随着相应的攻击手段。

2 人工智能大模型的安全风险分析

2.1 数据安全风险

大模型训练和推理过程中数据安全风险乃是首要且最为基础的安全隐患，表现为数据采集、存储、传输以及使用阶段面临的泄漏、篡改乃至窃取可能。人工智能大模型的超大规模训练语料及样本集，其中包含个人隐私信息、敏感行业数据甚至是国家关键信息基础设施相关资料，若数据缺乏严格脱敏与合法授权极有可能出现暴露和数据滥用情况 [1]。数据安全风险危害体现在三个层面：个人层面容易出现隐私信息不可逆的泄露情况或是画像被滥用；企业层面会致使知识产权以及商业机密流失，造成市场竞争力降低；国家层面一旦涉及公共安全以及关键行业的数据泄露会使国家网络安全屏障遭到削弱且极有可能成为外部势力展开攻击的关键突破口。

2.2 模型攻击风险

所谓模型攻击风险主要指不法人员会利用人工智能大模型训练、推理进程里的漏洞采取包括对抗性攻击、模型窃取、反向推理或者后门注入等手段致使其性能与可靠性遭到破坏。受大模型复杂的参数空间与深度网络结构二者天然存

【作者简介】江均勇（1981–），男，中国重庆市人，硕士，从事云计算、大数据、网络安全、数据安全、人工智能及人工智能安全研究。

在高维脆弱性是模型攻击风险产生的根源，这导致其对于精心设计的扰动样本呈现出显著的易受攻击性。该风险危害体现在人工智能大模型预测精度降低及功能失效，同时不法人员还可能利用其制造虚假信息、操纵决策流程与规避安全检测，这会对如金融、医疗甚至政务等关键行业应用的稳定运行构成威胁，并引发社会信任的系统性风险。

2.3 算法偏见与不确定性

人工智能大模型在学习与推理时因训练样本分布不均衡、存在数据噪声、算法机制有缺陷等原因致使输出结果出现系统性偏差或不确定性过高，这即为算法偏见与不确定性风险。该风险的危害主要体现在两个方面：算法偏见有可能致使公共服务、金融信贷以及招聘等领域出现群体性的不公情况，这会让社会不平等以及公众不信任的状况加剧 [2]。模型输出结果不确定性会导致其可靠性大幅降低，这造成如自动驾驶、医疗辅助诊断这类安全关键场景里出现误判或漏判，继而对生命财产安全构成严重威胁。

2.4 伦理与合规风险

人工智能大模型的研发、部署以及应用进程里，因欠缺伦理约束且未能与法律规范良好匹配进而引发的风险被称作伦理与合规风险，其产生原因在于强大的生成与推理能力。比如，人工智能大模型能在未经授权时生成虚假文本，伪造图像或合成语音，随后被用于虚假舆论操纵和信息欺诈。其危害表现在三个层面：用户层面会侵犯其合法权益与个人自由；市场层面容易诱发不正当竞争以及技术垄断；社会治理层面一旦人工智能大模型被肆意用于虚假信息的扩散以及社会情绪的操纵，那么社会秩序与国家安全将会遭受严重冲击。

3 人工智能大模型的防护措施

3.1 数据治理与隐私保护

人工智能大模型安全治理体系里数据治理和隐私保护占据着核心地位，其施行措施涉及数据采集、模型训练与存储传输等环节。数据采集阶段需构建基于分级授权的审查体系，严格分类管理大模型采集源敏感级别以及语料类型，同时运用伪造化语料替换、k- 匿名化处理、可验证的数据脱敏算法等技术保证任何单一标识符都无法达成用户身份的重识别。对于跨境数据流动，应依托国家网络安全审查要求构建跨境数据交换协议，此协议基于可信执行环境（TEE）同态加密与多方安全计算（MPC），随后再借助密钥分片与门限签名实现跨境使用的合规可控。大模型训练的环节当中差分隐私机制应当被全面引入，借助添加噪声扰动的方式达到在梯度上传过程里对敏感信息的保护，并结合联邦学习架构把训练数据留存于本地节点，只针对模型参数层面开展加密聚合，同时借助同态加密技术保障训练过程的不可见性。此外，对大模型训练过程实施实时监测与隔离，这可通过部署基于可信硬件的隔离执行环境予以实现，以避免训练数据不会因内存溢出或恶意调试而出现外泄情况 [3]。数据存储传输环节中采用分布式加密存储架构，把核心数据按分片化形式，各自加密存储到不同物理节点上，同时将抗量子密码算法与端到端加密传输协议相结合，以此降低数据于传输链路里的拦截以及解密风险。最后，借助基于联盟链的溯源系统记录数据访问与修改日志，并采取智能合约达到对访问请求的自动化审计与动态校验，以此规避篡改行为与越权操作。

3.2 模型安全加固

模型安全加固是人工智能大模型应对复杂威胁的关键组成，其要点在于借助训练、推理、参数保护与部署等措施全方位提高模型的鲁棒性与抗攻击能力。大模型训练阶段运用对抗性训练模式，简单而言样本里引入多样形式的对抗扰动，让模型能够在黑盒查询攻击、梯度可迁移性攻击之下维持稳定收敛。随后基于大规模数据和特征空间扰动两方面增强手段，提升大模型在非独立同分布场景当中的泛化性能。同时优化进程里应引入随机梯度扰动、Dropou 等随机化正则化手段，以此来破坏攻击者借助梯度信息构建精确扰动的可能性。大模型推理阶段输入检测机制需要建立起来，借助统计特征分析、傅里叶谱域分析以及基于生成对抗网络的输入分布一致性检测对输入样本开展多层次的安全筛查工作，从而对抗性样本、规避式攻击以及指令注入类攻击都能有效规避。大模型参数保护阶段可针对云端推理与分布式训练两个环节引入同态加密与安全多方计算，以实现模型参数在整个计算进程中始终处于加密状态，从而防止由于 API 调用频次推断或者梯度泄露分析而引发的模型结构与权重被窃取的情况。随后利用差分隐私机制在梯度更新过程当中添加噪声用来削弱攻击者凭借反演技术恢复训练数据的能力，并且在针对后门攻击防护则构建模型完整性验证与参数审计机制。另外，借助权重稀疏化可视化办法、隐藏触发器激活模式分析和梯度分布异常检测以对潜在后门结构展开剖析并予以剔除。大模型推理服务部署阶段当中应当采用一种将多模型冗余架构跟可信执行环境（TEE）相融合的防护体系，简而言之凭借不同架构模型之间的交叉验证以及硬件级别实现隔离，防止由于单点模型的失陷而致使系统性风险出现扩散的情况，同时还可引入远程证明机制保障部署环境具备不可篡改性以及可信性 [4]。

3.3 算法可解释性与公平性提升

由技术路径以及制度设计这两个层面构建起系统化的防护机制，以此提升人工智能大模型的算法可解释性与公平性。针对不同模型架构的可解释性环节，需引入多层次解释框架，具体为：一是局部解释层面借助 LIME 与 SHAP 等办法针对单个预测结果展开特征贡献分解工作，联合梯度反传、特征遮蔽等技术搭建细粒度的特征敏感度分析以此来揭露模型面对输入扰动时的响应规律；二是全局解释层面就基于 Transformer 大模型，采用特征空间聚类方法、信息

流路径追踪以及注意力权重可视化对模型整体的决策通路与参数分布进行建模，这样一来可提供数值化与可视化并行的解释框架。构建跨样本的解释性验证机制时要运用因果图建模、反事实生成等办法，以此防止解释仅仅停留在统计相关性却忽略了潜在的因果关系。公平性提升环节上集中于数据、算法以及结果三个层面推行分层治理举措：一是数据层面借助对抗式生成补全样本、多分布重采样，以及对群体敏感属性进行分层加权等方式减轻训练数据里群体特征不均衡所产生的影响；二是算法层面把加性正则化项、群体公平性约束和个体公平性约束一起嵌入到目标函数当中，在梯度更新阶段达成精度最优化和公平性约束的协同优化，同时再借助多目标优化框架来达成权衡参数的动态调节；三是结果层面要运用输出分布再映射、后验概率分段调整，以及分群体阈值校准的策略减小不同群体在模型输出错误率与置信度方面的系统性差异。另外，需要建立针对不确定性风险的基于贝叶斯神经网络与深度集合学习的区间估计机制，该机制要为每个预测结果生成概率分布以及置信区间，结合蒙特卡罗 Dropout 和 Bootstrap 重采样以提升不确定性度量的稳健性。在具体应用场景里针对如公共服务、司法裁决以及医疗诊断这类高敏感性行业要专门构建强制性可解释性披露机制与实施独立第三方审计制度，随后将差分隐私保护与联邦学习框架引入，以促使数据安全合规的情况下让算法可解释性与公平性得以提升，最终从多维度给人工智能大模型安全防护提供技术支撑。

3.4 制度监管与多方协同

制度监管和多方协同应当构建成多层次跨域的综合治理机制，以此来应对大模型潜在的合规与安全风险。国家法律层面除须针对大模型训练数据的来源、脱敏处理，跨境流动以及安全审查等明确具体标准保证数据链条全程可追溯外，还必须制定涉及数据安全、知识产权模型可解释性以及生成内容责任等方面的专项法规，同时实施动态修订机制来适应大模型技术的迭代。大模型开发与部署行业标准构建层面则须形成分层次的技术规范，具体涵盖算法透明度指标、可复现性验证流程、模型安全性评估以及内部审计制度等内容，同时以统一测试平台对模型性能、鲁棒性以及安全防护能力开展标准化验证 [5]。企业内部治理层面需强制组建人工智能伦理与合规审查委员会，并清晰界定其于模型生命周期里针对数据采集，模型训练推理应用以及迭代更新这一整个流程的监督职责，同时建立涵盖算法偏差检测、异常行为监控以及访问权限管理在内的多维度风险识别机制，借助日志追踪和责任归属机制达到违规事件的溯源与处置。社会协同层面则推动公众、第三方评估组织以及学术机构参与监督机制，借助构建可控试点机制与沙箱环境就新型大模型技术展开阶段性评估与受控部署，并依据多源反馈对模型行为实施迭代优化。另外，实施跨部门信息共享与预警机制，并在集中监管平台中纳入安全事件、风险评估及合规审查数据，以推动政府、产业与科研单位的实时联动。通过动态调整监管策略和技术防护措施，在创新迭代与风险控制之间形成系统化的协同运作模式，有效支撑大模型在复杂应用环境中的安全可控性。

4 结语

在科技创新与产业升级不断深入背景下，人工智能大模型的安全风险逐渐浮现且呈现出多维度的复杂性，为此上文经由对数据安全、模型攻击、算法偏见与不确定性、伦理与合规 4 种大模型面临的安全风险研究分别探讨数据治理与隐私保护、模型安全加固、算法可解释性与公平性提升，以及制度监管与多方协同这四方面的防护措施，从而给人工智能大模型的安全可控发展给予系统性路径。

参考文献

[1] 吕延辉,张博,高彦恺.基于人工智能安全治理框架的大模型系统安全防护研究[J].中国信息安全, 2024(10):38-41.

[2] 蔡佳,黄璇,童国炜,等.人工智能大模型安全现状研究[J].海峡科技与产业, 2025, 38(1):53-57.

[3] 史锋,张永晋,瞿崇晓,等.ChatGPT类大模型技术的安全风险与应对措施研究[C]//第十二届中国指挥控制大会.中电海康集团有限公司;中国电子科技集团公司第五十二研究所, 2024.

[4] 李立.基于人工智能的网络安全风险评估模型研究[J].黑龙江科技信息, 2021, 000(007):103-104.

[5] 邱惠君,张瑶.大模型发展对人工智能安全风险治理的挑战和应对分析[J].工业信息安全, 2023(2):65-72.

Research on the collaborative development mode of "healthcare-pharmaceutical-health insurance" driven by data elements

Lanbo Chen

China Electronics Technology Group-Taiji Computer Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

In today's rapidly developing digital economy, data elements have become the primary driving force for the transformation of the healthcare system. Promoting the integrated development of "medical care-pharmaceuticals-health insurance" (abbreviated as "San Yi") through data elements is a crucial measure to achieve Healthy China. Based on the theories of collaborative governance and data value chains, this article explores how the logic and dynamic mechanisms of data elements driving the coordinated development of San Yi—through "connection, optimization, and value-added" —enhance medical service efficiency, promote pharmaceutical R&D innovation, and optimize the medical insurance payment structure. Building on this foundation, a collaborative development model framework for San Yi is proposed, consisting of three layers: data infrastructure, collaborative engine, and value realization. The paper also analyzes typical application scenarios such as data-driven value-based medical payments, pharmaceutical lifecycle management, and regional health management, aiming to create a new healthcare governance ecosystem characterized by multi-party collaboration, efficient information flow, and value co-creation.

Keywords

data elements; San Yi collaboration; medical-pharmaceutical-health insurance; collaborative development model

数据要素驱动下"医疗－医药－医保"协同发展模式研究

陈兰波

中国电子科技集团（太极计算机股份有限公司），中国·北京 100000

摘　要

在数字经济浪潮迅速发展的今天，数据要素已然成为医疗卫生体系变革的主要动能。以数据要素为牵引，推动"医疗—医药—医保"（简称"三医"）融合发展，是实现健康中国的重要举措。文章基于协同治理理论与数据价值链理论，从数据要素驱动"三医"协同的发展逻辑和动力机理出发，说明数据要素"连接、优化、增值"逻辑驱动"三医"协同发展，分别提升医疗服务效率、促进药品研发创新以及优化医保支付结构的作用。在此基础上，提出由数据基座层、协同引擎层、价值实现层构成的三医协同发展模式框架，并且分析数据要素驱动的价值医疗支付、药品全生命周期管理和区域健康管理等典型的应用场景，以期能够打造多方协同参与、信息高效流转、价值共创的医疗健康治理新生态。

关键词

数据要素；三医协同；医疗—医药—医保；协同发展模式

1 引言

长期以来，我国医疗卫生系统存在的医疗资源配置不平衡、医药供应和医保支付相互脱节等问题导致相应的政策联动存在一定的难度。而信息和大数据的应用将使得医疗、医药和医保等重点领域之间产生更大的关联，能够形成更强的联动性，有助于构建真正意义上的协同共治格局。

2 核心概念界定

2.1 数据要素

数据要素是数字经济时代最重要的生产要素，以非竞争性、可复制和可再利用为主要特点，相较于物质要素，数据要素有无限供给、不受物理约束、无形资产化的特性和属性，多主体间数据要素流动共享不会带来数据要素的所有权损失。数据要素通过采集 - 存储 - 清洗 - 分析 - 再利用链条以及技术创新发挥价值，从海量信息中挖掘出重要决策依据、产生经济价值的过程就是从信息到知识、进而转化成价值。医疗卫生数据要素具有时效性强、敏感性高的特点，数据包括高频率更新的数据，比如电子病历、影像数据、药品流通过程的数据等，也包含了一些高安全要求的数据，比如个人健康数据、公共卫生数据等 [1]。

2.2 "医疗—医药—医保"协同（三医协同）

"医疗—医药—医保"协同是指在国家健康治理体系中，通过制度机制与信息系统的深度融合，建立医疗服务供

【作者简介】陈兰波（1972–），男，中国北京人，硕士，从事软件工程与信息工程监理方向的研究。

给方、药品供销体系及医保支付方三个主体间的制度运行联动平台。这一概念由最初的政策联动逐步深化为数据、业务与价值的系统协同，即以数据互通为基础、业务协同为中枢、价值共创为目标，形成三者间的动态平衡关系。其核心在于打破部门壁垒，实现诊疗信息、药品流通数据与医保结算信息的的互联互通，最终实现精准配置医疗资源、优化药品结构、提高医保基金使用效率的目的。

2.3 理论基础

2.3.1 协同治理理论

协同治理理论认为在多元主体共治格局下，为实现系统效能最优，需要将各种资源和信息进行整合，建立互联的信息平台。按照协同治理理论，在此框架内，以政府、医疗机构、药品生产和流通企业、医保经办机构等多元参与主体，在围绕公共健康治理目标的基础上，运用数据资源开展动态协同 [2]。

2.3.2 数据价值链理论

基于数据全生命周期管理的数据价值链理论关注数据生成—汇聚—治理—分析—应用各个阶段中产生的价值递进关系。医疗数据由于采集时具有多源异构的特点，在收集到的数据里面包含有诊疗记录、药品交易、医保支付以及公众健康等数据信息。所以需要对采集的数据进行标准化治理与清洗整合，将这些资源汇聚到一起，利用统一的平台提供给用户调用。

3 数据要素驱动“三医”协同的内在逻辑与动力机制

3.1 数据要素驱动协同的内在逻辑

3.1.1 “连接”逻辑

数据要素驱动“连接”逻辑的实质是破除医疗、医药和医保系统间的信息壁垒。以可信数据空间为基础，打通部门、层级、平台之间的堵点卡点，使不同单位在各个工作环节上能够实现高效地操作，并实现数据回流，最后将每个工作环节形成的诊疗数据、药品信息、结算数据经过数据共享平台实现汇聚与动态更新，并通过分布式数据库、区块链技术提高数据的可追溯性和可信度，从而支撑起整个三医系统内不同部门之间的业务协同工作。

3.1.2 “优化”逻辑

“优化”逻辑聚焦于数据在流程重构与决策支持中的驱动作用，主要是通过深挖多源数据来实现临床路径的标准化、诊疗方案的智能化。例如，运用大数据对药品进行采购分析建模，达到药品从供到需以及库存的动态管理；或者利用支付、费用等数据，医保机构建立起精算模型，来优化支付结构和基金运行管理等。每一环都受数据所驱使，在此基础上进行业务改造，推动决策由经验驱动向数据驱动转变。

3.1.3 “增值”逻辑

“增值”逻辑就是数据融合对于创新生态起到有效的推动作用，其将分散割裂的医疗健康数据汇集整合后再利用，最终形成一个由数据驱动的智能医疗服务体系，以有效支撑个体化的诊疗服务、精准用药和风险分级。具体而言，医药产业结合挖掘数据要素的价值来发掘新药创制以及药效的测定评估，以此减少研发周期并节约成本；医保部门基于健康的大数据设计差异性、价值导向的保险产品，并构建出一种数据反哺的过程，进一步促进医保数据的循环增值。

3.2 数据要素驱动协同的动力机制

3.2.1 内部推力

内部推力主要来源于医疗机构、医药企业和医保经办机构本身提高质量效率以及降本控费的需求。医疗机构通过内部数据分析与挖掘提升诊疗决策的科学性和服务流程精细化程度，实现医疗资源配置合理化；医药企业通过对药品的研发、生产、流通等多维度大数据分析来预测市场需求，优化药品供应链、降低药企多余的库存量和研发风险；医保部门利用支付结算数据来开展基金精算、费用监控等工作，提高支付端的风险管理水平。各行业主体在追求运营效率与经济效益最大化的过程中，形成以数据为核心的自我革新动力 [3]。

3.2.2 外部压力

外部压力主要来自政策导向、公众健康需求以及健康信息技术的发展推动。一方面国家推行健康中国、数字中国等国家战略，促动“三医”领域政策落地；另一方面随着公众健康需求逐步多元化和精细化，倒逼其更加关注医疗服务精准化、智能化水平。

3.2.3 数据引力

数据引力指的是由于数据的价值能够被释放而产生的收益预期。随着数据量增大以及数据的应用场景越来越广，数据就变成了各个主体争夺的对象。不同主体因为利用数据能够从中得到业务上的创新、风险上的控制以及价值上的转换等潜在收益，纷纷参与到数据的共享和协同当中去，形成了以数据为载体的聚合力以及协聚向心力。

4 数据要素驱动下“三医”协同发展模式的构建

4.1 模式构建的总体目标与基本原则

“三医”协同发展模式的总体目标在于通过数据要素协同“三医”，提高医疗质量，优化医药产业，提升医保运行效率，努力形成以健康最大效益为中心，系统效率最优与可持续发展为导向的治理格局。

从基本原则上讲，要兼顾政府引导和市场驱动。首先，坚持统筹原则。政府侧重于宏观层面，在政策制度设计、标准制定及数据安全监管等方面起主导统筹的作用，而市场则是微观主体，侧重于数据开发、技术研发和应用场景等方面的资源配置。其次，数据安全原则。在做好数据安全和开发利用的同时，在保护个人信息和公共数据安全的前提下做

好分级开放和合理流动，打造数据全链条可追溯、可监管的治理体系。再者，协同原则。通过激励相容的设计，比如政策激励、收益分配和风险共担等制度安排来引导医疗机构、医药企业和医保机构形成一种互相协同、互相关联的稳定关系，在数据要素驱动下的“三医”协调发展动态平衡机制。

4.2 “三医”协同发展模式的总体框架

4.2.1 基础层：数据基座

基础层是“三医”协同运行的最底层，在该层面，三医数据分别属于不同国家部门，具有多源异构、权属分散的结构性特征，以至于无法统一数据标准、管理权限与接口规范。所以在进行数据基座建设过程中可以利用可信数据空间（Trusted Data Space）作为支撑，打造一个良好的数据要素流通可信环境。通过隐私计算、联邦学习与加密传输等技术，实现“数据可用不可见”的共享机制，使各方在不暴露底层数据的前提下，完成模型训练、风险评估与业务协同等操作，从而保障数据价值的安全释放。不仅如此，还应当要构建起合理的分级授权、身份认证与追溯审计机制，以保证在调用不同类型数据时均与国家数据出境管理以及网络安全规范要求相符。此外还能够采取操作记录以及访问控制验证的方式来有效管理数据的采集、存储、共享、应用以及退出等各个阶段，不但确保数据的安全，而且还能打通数据价值流通链路，为上层“三医”协同运行机制提供稳固的数据支撑与合规保障。

4.2.2 核心层：协同引擎

核心层是推进建立“三医”协同的基本动力，包括构建医疗侧、医药侧、医保侧相互融合的一体化协同机制。首先，依托医疗侧的临床和公共卫生大数据推动分级诊疗体系、科学化临床路径的建立和完善，发挥对诊疗行为精准引领、对合理用药动态监管的作用；其次，依托医药侧临床价值大数据进行新药研发、药效试验、精准采购等，通过多源大数据(需求侧、用药行为侧、医保侧)综合分析促进药品供应链优化和配置效率提升；再者，医保侧通过大数据智能分析助力支付方式改革，推动以 DRG/DIP 为首的价值导向支付体系建设，并且具有基金使用动态监测、智能审核和欺诈识别的功能，同时具有提高医保精算和风控的能力。

4.2.3 应用层：价值实现

应用层是数据驱动“三医”协同的落脚点。一方面，建立数据流动和反馈机制，促使“三医”联动。如：将医保支付结果及时反馈给医疗机构作为临床用药、诊疗路径的参考，将医保支付结果纳入临床端的药品定价、目录调整等工作的重要参考；医疗端的临床数据反向输入药品研发及医保评估系统中，不断提升政策和产品。另一方面，运用基于智能算法的预测分析及决策支持系统，促进由点到面开展个体化到人群的整体疾病管理，形成以数据价值链为主要抓手的“三医”协同发展模式。

4.3 关键协同场景的模式设计

4.3.1 场景一：数据驱动的价值医疗支付模式

本模式利用医保支付数据、诊疗行为数据和药品使用数据等多源数据分析，在此基础上构建基于临床疗效、成本效益的支付模式，借助 DRG/DIP 支付模型确立病种成本基准和质量评价指标，将医保机构对医疗服务绩效的数据化考核引向科学化方向。医保机构可依据监测结果对支付标准及基金分配方案做出相应调整，并推动医疗机构保持理顺诊疗、控费和质控之间的平衡。

4.3.2 场景二：数据驱动的药品全生命周期管理协同模式

该模式以药品从研发到注册、流通、使用以及监管过程中各类数据的互联互通为支撑，形成药品全生命周期动态管理模式。医药企业根据临床真实世界数据进行药效验证及安全跟踪，医疗机构共享处方、用药数据，对药品使用情况进行追溯管理，监管部门和医保部门基于药品流通、支付数据开展风险预警，目录动态调整，加强价格控制和规范市场秩序，形成药品研发、应用、政策三位一体的协同共管系统。

4.3.3 场景三：数据驱动的区域健康管理协同模式

该模式基于区域人口健康大数据汇集及分析打造跨域跨层级的健康管理网络，实现各级各类医疗卫生机构间的协同联动，汇聚基层医疗机构、专科医院、公共卫生和医保数据开展疾病监测、健康评估和资源调度的智能化管理；为政府部门提供区域人口健康大数据分析结果作为制定精准健康政策和健康资源配置决策的科学依据，推进区域医疗服务均等化以及公共健康治理的数字化转型。

5 结语

总而言之，数据要素是“三医”协同的重要前提条件，借助数据要素可以推动“三医”协同体制建设。打造良好的可信数据空间和完善的治理机制以及规范化的业务流程，打通医疗服务、药品及医疗保障之间的信息流通，并以“三医”的良性互动创生出更高层次的价值体系，进而实现整个体系运转能力和服务能力的全面升级。

参考文献

[1] 胡希家,冯芳龄,叶向明,等.创新协同机制 深化体制改革——"医疗,医保,医药协同发展和治理研讨会"综述[J].卫生经济研究, 2025(8).

[2] 国家卫生健康委员会官网.医疗,医保,医药协同发展和治理协作会商机制启动运行[J].中国数字医学, 2025, 20(1):88-88.

[3] 梁万年,程峰.医疗,医保,医药协同发展和治理的专家共识(2024版)[J].健康发展与政策研究, 2024, 27(6):445-448.

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8108

Design of DDoS Attack Detection and Defense Mechanism in Software-Defined Networks

Qi Sun　Hongyu Zhang

Beijing Institute of Space Electromechanical Research, Beijing, 100094, China

Abstract

With the continuous expansion and increasing complexity of networks, distributed denial-of-service (DDoS) attacks have emerged as a primary threat in cybersecurity. Traditional defense mechanisms, constrained by rigid architectures and passive responses, struggle to detect and mitigate attacks in real-time. Software-defined networking (SDN), leveraging centralized control, programmability, and global visibility, offers innovative approaches for DDoS detection and defense. This study analyzes the characteristics and vulnerabilities of DDoS attacks in SDN environments, proposing a collaborative detection and defense mechanism at both the control and data layers. The framework integrates traffic feature extraction, intelligent pattern recognition, and dynamic policy scheduling. Simulation results on Mininet demonstrate that this mechanism effectively reduces false positive and false negative rates while enhancing controller processing efficiency and network recovery capabilities, providing technical support for building intelligent and adaptive cybersecurity protection systems.

Keywords

software-defined network; DDoS attack; traffic detection; controller security; defense mechanism

软件定义网络中 DDoS 攻击检测与防御机制设计

孙麒　张宏宇

北京空间机电研究所，中国·北京 100094

摘　要

随着网络规模与复杂度不断提升，分布式拒绝服务（DDoS）攻击已成为网络安全领域的主要威胁。传统防御机制受限于结构僵化与被动响应，难以及时识别与处置攻击。软件定义网络（SDN）凭借集中控制、可编程和全局可视化优势，为DDoS检测与防御提供新思路。本文分析SDN环境下DDoS攻击的特征与脆弱性，提出基于控制层与数据层协同的检测与防御机制，融合流量特征提取、智能判别与动态策略调度。在Mininet仿真中验证结果表明，该机制能有效降低误报率与漏报率，提升控制器处理效率与网络恢复能力，为构建智能化、自适应的网络安全防护体系提供技术支撑。

关键词

软件定义网络；DDoS攻击；流量检测；控制器安全；防御机制

1 引言

DDoS 攻击通过大量分布式节点对目标服务器或网络带宽发起并发请求，使受害者无法正常提供服务，是网络空间安全治理中的顽疾。传统防御体系主要部署于固定边界或单点节点，如防火墙、入侵检测系统（IDS）与黑名单过滤等，往往面临响应滞后、难以全局感知的问题。随着云计算、物联网及 5G 网络的兴起，流量类型呈多样化趋势，DDoS 攻击的隐蔽性与复杂度进一步增强。软件定义网络以“控制与转发分离、集中控制、开放接口”为特征，使网络具备可编程性和动态调度能力，为实时检测与快速防御提供技术基础。当前研究在 DDoS 攻击识别算法、控制器防护机制以及动态防御体系构建等方面取得了一定成果，但仍存在模型泛化能力不足、控制层负载集中、策略下发延迟等问题。本文旨在系统分析 SDN 架构下 DDoS 攻击的特征传播规律，提出融合流量特征学习与策略自适应的检测与防御机制，并通过仿真验证其有效性，为 SDN 环境中的主动安全防护提供可行路径。

2 软件定义网络的安全架构特征与 DDoS 攻击风险分析

2.1 SDN 体系结构及其安全特征

SDN 架构由应用层、控制层与数据层组成，控制层通过南向接口（如 OpenFlow）下发策略，实现对交换机的统一管理与流量调度。集中式控制器使网络具备全局视角与灵活策略分发能力，但这种集中性同时也带来潜在安全风险。控制器一旦遭受攻击，可能导致全局策略失效、流表更新受

【作者简介】孙麒（1987–），男，中国北京人，本科，工程师，从事信息安全、计算机网络研究。

阻，严重影响业务连续性。与传统网络相比，SDN 的可编程特性虽然增强了可控性，却扩大了攻击面，使 DDoS 攻击从主机层面延伸至控制平面、应用接口及数据转发路径。研究表明，控制层的集中结构是攻击者重点目标，其可通过流表泛洪、控制消息淹没等手段造成资源耗尽。

2.2 SDN 环境下 DDoS 攻击的演化特征

DDoS 攻击在 SDN 环境中的表现呈现出多样化与智能化趋势。攻击者可利用控制器与交换机之间的通信机制制造虚假流量请求，通过频繁建立短生命周期流表项引发“流表耗尽”现象，导致合法流量被延迟处理。部分攻击利用南向接口协议漏洞伪造 Packet-In 消息，从而造成控制器异常负载。此外，云计算和 IoT 设备的大规模互联为僵尸网络扩散提供了便利，使攻击源更加分散、流量模式更加随机，增加了检测的复杂性。

2.3 传统防御机制的局限性

传统网络防御通常基于静态规则匹配或流量阈值检测，对动态变化的攻击流量难以及时响应。防火墙与 IDS 虽可拦截部分已知攻击，但面对复杂的多向流量和突发性攻击，其性能瓶颈明显。另一方面，传统防御部署点固定，缺乏全局协调，无法对跨域攻击进行联动防护。SDN 环境要求防御系统具备可编程、动态调度和实时感知能力，实现跨层协同与资源优化。因而，在 SDN 体系下重新设计面向控制与转发层联动的 DDoS 防御框架，是实现主动防御的重要方向。

3 SDN 中 DDoS 攻击检测模型设计与特征提取

3.1 流量特征采集与行为建模

SDN 控制器能够实时收集网络中各交换机的流量信息，为攻击检测提供丰富的数据基础。本文设计的检测模型基于流量统计特征，包括流速变化率、源 IP 分布熵、包间隔均值、控制消息频度等指标。通过分析流量在时间序列中的波动模式，构建流量行为模型，以刻画正常与异常状态之间的差异。

3.2 基于机器学习的智能检测机制

考虑到 DDoS 攻击流量呈现高维度、非线性特征，本文采用随机森林与长短期记忆网络（LSTM）组合模型。随机森林负责静态特征筛选与分类，LSTM 用于捕捉时序相关性，实现流量动态识别。模型通过训练阶段学习正常与攻击样本间的模式差异，并在在线检测阶段对实时流量进行分类判断。为了降低误报率，引入置信阈值动态调整机制，根据网络整体负载自动校正分类边界。实验表明，该混合模型在数据集上可实现 97% 以上的检测精度，并对突发攻击保持较高鲁棒性。

3.3 检测模型的系统集成与控制层部署

检测模块部署于 SDN 控制器的安全子系统中，通过北向接口与监控应用通信，实现检测结果的实时上报与策略联动。系统分为流量采集模块、特征分析模块、模型推理模块和策略反馈模块四个部分。控制器利用 REST API 接口将检测结果传递给防御模块，以实现动态流表更新。为防止控制器负载过重，系统支持多控制器协作部署，通过负载均衡机制分配检测任务，从而确保检测系统在大规模网络中的可扩展性。

4 DDoS 防御机制的动态响应与策略优化

4.1 控制层与数据层协同防御框架

本研究提出的协同防御框架以“控制层检测、数据层隔离、全局策略协同”为核心思路，旨在实现分层联动与高效响应。控制层承担全网流量的实时监测与智能分析任务，当检测模块识别到潜在 DDoS 攻击行为后，通过南向接口向受影响的交换机下发流表规则，对攻击源进行精准标识与隔离。数据层负责执行具体防御策略，包括黑洞转发、带宽限速与包丢弃等操作，从而在网络边缘层即实现恶意流量拦截，减轻控制器负载。系统在关键路径中引入优先级调度机制，动态识别业务重要性并对核心应用流量进行重路由与资源优先分配，确保服务不中断。此外，控制层还建立防御闭环反馈机制，定期回溯检测日志与防御效果，通过参数自校准优化策略配置，实现检测、隔离与评估的持续循环。该架构在保持防御精度的同时提升了系统的整体韧性，为 SDN 环境下的多层联动防御提供了可行技术路径。

4.2 策略自适应与资源调度机制

为应对 DDoS 攻击的多样化与动态性，防御体系需具备自适应策略调节与资源智能调度能力。本文基于强化学习框架设计了自适应策略优化模型，将系统防御效果转化为奖励函数，包括误报率、检测延迟、资源开销及恢复时间等维度指标。通过 Q-learning 或 Deep Reinforcement Learning 算法，系统能在持续运行过程中动态调整流表下发频率、黑名单生存周期及流量限速阈值，实现实时自校正。控制器根据反馈状态选择最优防御动作，以平衡安全性与性能之间的矛盾。实验表明，该机制有效减少 30% 以上冗余策略更新次数，使响应速度提升约 20%，同时显著降低控制层的计算与通信负载。强化学习模型的引入打破了传统阈值判定的静态约束，使系统具备持续学习与环境适应能力，在长期运行中实现“边检测边优化”的动态演化，确保防御策略的前瞻性与资源调度的高效性。

4.3 跨域协同与多控制器防御实现

在大规模或多租户 SDN 部署场景中，单一控制器难以应对跨域攻击与集中负载问题，需通过多控制器协同机制实现全网防护。本文构建的协同防御体系以分布式控制结构为基础，控制器间通过东向接口实现检测结果、黑名单及策略信息的同步共享，利用轻量级消息队列协议（如 gRPC 或 ZeroMQ）降低通信延迟与带宽占用。各控制器根据区域状态进行局部决策，同时在中央协调模块指导下保持全局一致性，形成“局部自治、全局协同”的防御格局。系统引入基于信任度的协作评估模型，对控制器间信息的可信度进行量

化，防止被入侵节点传播虚假警报。仿真结果表明，该机制能在跨域 DDoS 攻击场景下将平均响应时间压缩至 1.2 秒以内，全网攻击流量抑制率超过 90%。多控制器协同模式显著提升了系统的容灾与扩展能力，实现了安全防御的分布式自治与全局最优平衡，为构建新型 SDN 网络安全生态提供了实践依据。

5 实验验证与性能评估

5.1 实验环境与数据集构建

本研究在 Mininet 仿真平台上构建了虚拟 SDN 环境，以验证 DDoS 检测与防御机制的有效性与可扩展性。控制层选用 Ryu 框架，具备良好的可编程性与开放性，便于实现自定义安全策略。网络拓扑由 20 个 Open vSwitch 交换机节点与 200 个终端主机构成，采用分层星型结构以模拟真实互联网的多域分布特性。攻击流量由 hping3 和 BoNeSi 工具生成，分别构建 SYN Flood、UDP Flood 以及复合攻击三种类型，以测试系统在不同攻击模式下的检测敏感度。正常流量采用 HTTP、DNS 与 FTP 业务混合生成，确保数据分布多样性。最终收集正常与攻击流量各 10 万条样本，涵盖包速率、源 IP 熵值、流持续时间、控制消息频率、包间时间间隔等 12 个关键特征维度。模型训练与验证在 Python 环境下完成，结合 TensorFlow 与 Scikit-learn 框架实现特征提取与模型推理，采用 70% 训练集与 30% 测试集划分策略。通过这一设计，实验环境能够有效复现真实网络负载变化，保障检测模型在多场景下的泛化性与稳定性，为后续防御机制评估提供坚实基础。

5.2 检测性能与对比分析

为验证检测算法的性能，本文选取随机森林（RF）、长短期记忆网络（LSTM）以及二者融合的混合模型进行对比实验。评估指标包括检测准确率（Accuracy）、召回率（Recall）、F1 值、误报率（FPR）以及平均响应延迟。实验结果表明，混合模型在综合性能上显著优于单一算法，其中准确率达到 97.4%，召回率为 96.8%，F1 值提升至 0.972，误报率维持在 2.3%。在高强度攻击场景下，控制器平均处理延迟降低 18%，说明模型在应对突发流量时仍具实时响应能力。分析发现，随机森林能有效识别静态特征差异，但对时序变化敏感性不足；LSTM 能够捕捉流量波动趋势，但在特征选择阶段存在过拟合风险。混合模型通过集成学习与时间依赖建模相结合，兼顾静态特征与动态行为，实现更全面的攻击识别。此外，对比传统基于阈值的检测方法，智能流量分析模型在低速率、隐蔽型攻击识别中精度提升约 20%，表现出更强的适应性与泛化能力，为后续动态防御策略提供可靠决策依据。

5.3 防御机制性能与资源消耗评估

防御机制的验证实验聚焦于响应速度、带宽恢复率及系统资源消耗三项核心指标。通过模拟持续 60 秒的高密度攻击流量，监测控制器与交换机的状态变化。结果显示，检测模块在 3 秒内完成异常识别与策略生成，防御模块在 5 秒内将恶意流量削减至基线水平，网络带宽恢复率达到 92%，表明系统具备高效的自愈能力。与传统静态过滤机制相比，本系统的控制器 CPU 占用率降低约 35%，内存消耗稳定在 650MB 以内，体现了优化的资源调度策略。多控制器协同防御机制进一步验证了系统的容灾性能，当单控制器遭受攻击或失效时，备用控制器能在 2 秒内完成接管，保障防御服务不中断。测试还发现，动态策略更新频率与流表生存时间的自适应调整能有效平衡检测准确率与系统负载，使防御机制在大规模网络中保持稳定可扩展性。综合分析可知，本文提出的检测与防御体系在精度、时效性及资源利用效率上均表现优异，为 SDN 环境下的 DDoS 综合防护提供了可推广的技术路径。

6 结语

软件定义网络以其集中控制与可编程特性为 DDoS 攻击防御提供了全新的技术支撑。本文在分析 SDN 架构安全脆弱性的基础上，提出了融合流量特征学习与动态策略优化的检测与防御机制，通过机器学习与强化学习结合，实现从被动响应到主动适应的安全转型。实验结果表明，该机制在检测准确率、响应速度与资源利用率方面均表现优异，能够有效抵御多类型 DDoS 攻击。未来研究可进一步拓展在大规模异构网络中的部署模式，结合区块链技术构建可信数据交换体系，以实现防御策略的可信协同与追溯。同时，应持续优化模型轻量化设计，降低控制器计算负担，提升系统在高并发环境下的稳定性与实时性。通过智能化、分布式的安全体系建设，SDN 将在新一代网络防护架构中发挥更为关键的作用。

参考文献

[1] 李阳阳.基于软件定义网络的DDoS攻击检测与缓解技术研究[D].杭州电子科技大学,2025.

[2] 陈佳伟.基于软件定义网络的DDoS攻击检测与防御系统研究[D].湘潭大学,2024.

[3] 刘尚昆.软件定义网络交换机DDoS攻击检测方法[J].信息记录材料,2023,24(01):210-213.

[4] 刘振鹏,王仕磊,郭超,等.软件定义网络中基于深度神经网络的DDoS攻击检测[J].云南大学学报(自然科学版),2022,44(04):729-735.

[5] 王明君.软件定义网络中DDoS攻击检测与防御方法的研究[D].安徽大学,2020.

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8109

Research on Impedance Matching Technology of Medium Wave Transmission Sky Modulation Network

Xueli Liu

Tongliao Broadcasting and Transmission Center Station, Inner Mongolia Radio and Television Transmission and Transmission Center, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China

Abstract

As a key interface connecting the output end of the transmitter and the antenna, the core function of the Tiantiao network is to eliminate the reflection loss caused by impedance mismatch and achieve efficient radiation of transmission power. The signal transmission efficiency and coverage quality of the medium-wave transmission system also hinge on this at its core. This paper conducts an in-depth analysis of the impedance matching principle of the medium-wave transmission sky modulation network, discusses the main influencing factors of load impedance offset, focuses on the design of impedance matching topology structure and parameter optimization methods based on LC network, and verifies the effectiveness of the matching scheme through simulation and experiments. The research results show that a reasonably designed sky modulation network can control the voltage standing wave ratio (VSWR) below 1.2, significantly reduce power reflection loss, improve the stability and coverage efficiency of the medium wave transmission system, and provide theoretical support and engineering reference for the optimization of medium wave broadcast transmission technology.

Keywords

Medium wave transmission; space-modulated network; impedance matching; LC filtering; voltage standing wave; specific power transmission

中波发射天调网络阻抗匹配技术研究

刘薛礼

内蒙古广播电视传输发射中心通辽广播发射中心台，中国·内蒙古 通辽 028000

摘　要

天调网络作为连接发射机输出端与天线的关键接口，其核心功能是消除阻抗失配引发的反射损耗，实现发射功率的高效辐射。中波发射系统的信号传输效率与覆盖质量，其核心亦取决于此。本文针对中波发射天调网络的阻抗匹配原理展开深入分析，探讨了负载阻抗偏移的主要影响因素，重点研究了基于LC网络的阻抗匹配拓扑结构设计与参数优化方法，并通过仿真与实验验证了匹配方案的有效性。研究结果表明，合理设计的天调网络可将电压驻波比（VSWR）控制在1.2以下，显著降低功率反射损耗，提升中波发射系统的稳定性与覆盖效能，为中波广播发射技术的优化提供理论支撑与工程参考。

关键词

中波发射；天调网络；阻抗匹配；LC滤波；电压驻波比；功率传输

1 引言

中波广播凭借覆盖范围广、接收设备简易、抗干扰能力较强等优势，至今仍是我国广播电视传输体系中的重要组成部分，在偏远地区信息传播、应急广播等应用中发挥着不可替代的作用。中波发射系统的核心性能指标包括功率传输效率、信号覆盖半径与频率稳定性，而这些指标均与天调网络的阻抗匹配效果直接相关。

发射机的输出阻抗通常设计为 50Ω 或 75Ω 的纯电阻特性，而中波发射天线作为辐射负载，其阻抗受地理环境、频率特性、气象条件等多种因素影响，呈现出复杂的复阻抗特性（包含电阻分量与电抗分量）。当天线阻抗与发射机输出阻抗不匹配时，发射功率无法完全辐射，部分功率会被反射回发射机，不仅导致传输效率下降，还可能引发发射机末级功放管过载、信号失真等问题，严重时甚至损坏设备。

天调网络（Antenna Tuning Unit，ATU）作为解决阻抗失配的关键设备，通过电感、电容等无源器件的合理组合，构建阻抗变换与滤波网络，抵消天线阻抗中的电抗分量，并将电阻分量变换至与发射机输出阻抗匹配的数值。因此，深入研究中波发射天调网络的阻抗匹配原理与优化设计方法，对提升中波发射系统的性能具有重要的工程价值与现实意义。

【作者简介】刘薛礼（1982–），男，中国内蒙古赤峰人，本科，工程师，从事电子工程研究。

2 中波发射天调网络阻抗匹配原理

2.1 阻抗匹配的核心目标

阻抗匹配的本质是实现传输线与负载之间的能量高效传输，其核心目标是使负载阻抗等于传输线的特性阻抗（或发射机输出阻抗），此时反射系数为零，传输线上无驻波产生，发射功率全部被负载吸收并辐射。在中波发射系统中，阻抗匹配需满足两个关键条件：一是天调网络的输入阻抗与发射机输出阻抗共轭匹配；二是天调网络的输出阻抗与天线输入阻抗共轭匹配。

从传输线理论来看，当发射机输出阻抗 Zs = Rs + jXs，天调网络输入阻抗 Z{in} = R{in} + jX{in}，天线阻抗 Za = Ra + jXa 时，理想匹配状态需满足 Z{in} = Zs^*（Zs^* 为 Zs 的共轭复数）且 Z{out} = Za^*（Z{out} 为天调网络输出阻抗）。此时，反射功率最小，传输效率最高。

2.2 阻抗失配的影响与表征

阻抗失配的直接后果是产生反射波，反射波与入射波叠加形成驻波，常用电压驻波比（VSWR）、反射系数（Γ）等参数表征失配程度。反射系数 Γ 定义为反射电压与入射电压的比值，表达式为：\Gamma = \frac{ZL - Z0}{ZL + Z0}

其中，ZL 为负载阻抗，Z0 为传输线特性阻抗。电压驻波比 VSWR 与反射系数的关系为：VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} 当 VSWR=1 时，为理想匹配状态，反射功率为零；VSWR 越大，失配程度越严重，反射功率占比越高。例如，当 VSWR=2 时，反射功率占比约为 11%；当 VSWR=3 时，反射功率占比高达 25%，严重影响发射效率。

此外，阻抗失配还会导致发射机末级工作点偏移，功放管输出功率下降、谐波失真增大，同时反射功率产生的热量会加速器件老化，降低系统可靠性。

2.3 中波天线阻抗特性分析

中波发射天线多采用垂直架设的鞭状天线或塔桅天线，其阻抗特性具有明显的频率依赖性与环境敏感性。在中心工作频率下，天线阻抗的电阻分量主要包括辐射电阻与损耗电阻（地面损耗、导体损耗），电抗分量则由天线的寄生参数与环境电容、电感构成。

由于中波频段波长较长（100m~1000m），天线高度往往远小于波长，导致天线辐射电阻较低（通常仅几欧姆至几十欧姆），且电抗分量以容性为主。同时，地形地貌（如平原、山地、水域）、土壤导电率、周边建筑物分布等环境因素，会通过改变天线的对地电容与电流分布，进一步导致天线阻抗偏离设计值，增加阻抗匹配的难度。

3 中波发射天调网络拓扑结构设计

中波天调网络的核心功能是实现阻抗变换与电抗抵消，常用拓扑结构以 LC 无源网络为主，根据匹配需求可分为 L 型、π 型、T 型等基本结构，复杂场景下可通过多节网络级联提升匹配精度。

3.1 基本拓扑结构设计

3.1.1 L 型匹配网络

L 型网络由一个电感与一个电容串联组成，结构简单、器件数量少，适用于天线阻抗与发射机输出阻抗相差不大的场景。根据天线阻抗的电抗特性（容性或感性），L 型网络可分为“电感 - 电容”（LC）串联与“电容 - 电感”（CL）串联两种形式：当天线呈现容性阻抗（Za = Ra - jXc）时，采用 LC 串联结构，电感用于抵消容性电抗，电容配合电感实现电阻变换；当天线呈现感性阻抗（Za = Ra + jXL）时，采用 CL 串联结构，电容用于抵消感性电抗，电感负责电阻变换。L 型网络的参数计算基于共轭匹配原理，例如，当发射机输出阻抗 Z0 = R0（纯电阻），天线阻抗 Za = Ra - jXc 时，电感值 L 与电容值 C 可通过以下公式计算：

L = \frac{Xc R0}{\sqrt{Ra R0 (R0 - Ra)}}

C = \frac{\sqrt{Ra (R0 - Ra)}}{2\pi f0 R0 \sqrt{R0}}

其中，f0 为中心工作频率。

3.1.2 π 型与 T 型匹配网络

π 型网络由两个电容与一个电感（或两个电感与一个电容）组成，呈 π 形拓扑；T 型网络由两个电感与一个电容（或两个电容与一个电感）组成，呈 T 形拓扑。两种结构均通过多器件协同作用，实现更宽的阻抗匹配范围与更高的匹配精度，适用于天线阻抗与发射机输出阻抗差异较大的场景。

π 型网络的优势在于输入输出阻抗隔离性好，插入损耗小；T 型网络则更适合小功率发射系统，且调试灵活性较高。两种网络的参数设计需通过等效阻抗变换公式推导，结合实际工况进行优化，确保在中心频率及带宽范围内满足匹配要求。

3.2 天调网络的附加功能设计

滤波功能：中波发射系统需抑制谐波辐射，天调网络可通过优化 LC 网络的谐振特性，构建带通滤波器，仅允许中心频率信号通过，衰减谐波分量（如二次、三次谐波），满足电磁兼容（EMC）标准。

调谐功能：为适应频率调整或天线阻抗的动态变化，天调网络需配备可调电感（如磁芯可调电感）与可调电容（如真空可变电容），并通过手动或自动调谐机制，实时调整器件参数，维持阻抗匹配状态。

保护功能：为防止反射功率过大损坏发射机，天调网络需集成驻波比监测模块，当 VSWR 超过阈值（如 1.5）时，及时向发射机发送保护信号，触发功率降低或停机保护。

4 中波天调网络阻抗匹配参数优化

4.1 优化目标与约束条件

阻抗匹配参数优化的核心目标是：在中波工作频段（530kHz~1600kHz）内，使天调网络的输入 VSWR ≤ 1.2，插入损耗≤ 0.5dB，同时满足器件额定功率、体积、成本等工程约束。

约束条件主要包括：频率约束：匹配性能需在中心频率 ±5% 的带宽内保持稳定；功率约束：电感、电容需承受发射机的额定输出功率，避免击穿或过热；环境约束：器件参数需适应户外工作环境（温度 -40℃ ~60℃，湿度≤ 95%），稳定性高。

4.2 参数优化方法

理论计算与仿真优化结合：首先通过传输线理论与

电路分析方法，初步计算 LC 器件的参数值；然后利用 MATLAB、ADS 等仿真软件，构建天调网络模型，输入实际天线阻抗数据（通过阻抗分析仪测量），仿真不同参数组合下的 VSWR 与插入损耗，迭代优化得到最优参数。

动态调谐算法优化：针对天线阻抗随环境变化的动态特性，设计自适应调谐算法，通过驻波比传感器实时采集匹配状态数据，采用 PID 控制或遗传算法，自动调整可调电感与电容的参数，实现动态阻抗匹配，提升系统的鲁棒性。

器件选型优化：电感应选择 Q 值高、损耗小的磁芯电感或空心电感，避免高频损耗过大；电容优先采用真空可变电容或聚苯乙烯电容，确保耐压值与容量稳定性满足要求；同时，器件布局需减少寄生参数影响，避免引线电感、分布电容干扰匹配性能。

4.3 仿真验证

以某 1kW 中波发射系统为例，发射机输出阻抗 50Ω，天线实测阻抗为 15Ω-j80Ω（中心频率 1000kHz），设计 π 型天调网络进行阻抗匹配。通过 ADS 软件仿真，优化后的网络参数为：电感 L=25μH，可调电容 C1=200pF，C2=300pF。仿真结果显示，在 950kHz~1050kHz 频段内，VSWR ≤ 1.15，插入损耗≤ 0.3dB，满足设计要求。

5 安装、调试过程中应注意的问题

元件间的连接线选择至关重要，需采用宽铜皮或者粗铜管。这是因为宽铜皮和粗铜管能更好地承载电流，减少线路损耗。同时，连接线的端部要处理得十分圆滑，这一细节不可忽视，其目的是防止出现尖端打火的情况，避免因局部电场过强引发放电，影响设备正常运行。而且，连接处的接触面要做到宽且平，接触必须紧密良好，这样才能保障电流的稳定传输，降低接触电阻带来的不良影响。

元件的安装位置也有严格要求，要离开大面积金属板 10cm 以上。大面积金属板可能会对元件的电磁场产生干扰，保持足够的距离能有效减少这种干扰。另外，放置网络元件的金属板可选用铜板或铝板，这类金属板具有良好的导电性能，有助于保障网络元件的正常工作环境。

对于电感线圈，为了尽量减小引线电感，其短路夹最好由线圈中心引入短接处。从线圈中心引入短接处，能够使电感在调整过程中的改变量较小，从而更精准地控制电感值，满足设备对电感参数的要求。

相邻的电感元件也不能随意放置，要尽量远离，并且采用垂直放置的方式。因为电感元件之间容易产生互感现象，这种互感会影响电感元件各自的性能，远离且垂直放置可以有效避免互感的产生，保证每个电感元件都能正常发挥作用。

在调整过程中，当网络等效阻抗 ZB 接近边界值时，引线电感的影响就会开始显露出来。所以在调整后期，OIB-3 型运行阻抗电桥的测试点最好选在天调室的输入端，这样能更准确地检测和调整网络的阻抗情况，确保网络性能符合要求。

安装、调试完成后，还需要进行开机测试。首先观察驻波比、反射功率的指示，这些指示应处于较小的范围，这表明设备的阻抗匹配等性能良好。之后，让发射机加高调幅度工作半小时，停机后立即使用点温计测量馈线连接处、天线调配室各元件及连接点的温度，查看是否有过热现象。过热现象可能意味着设备存在局部损耗过大等问题，需要及时排查和解决，以保障设备的安全稳定运行。

6 实验测试与结果分析

6.1 实验系统搭建

实验平台由 1kW 中波发射机、天调网络（按优化参数制作）、中波垂直天线、阻抗分析仪、驻波比测试仪组成。实验地点选择开阔平原区域，土壤导电率约为 10mS/m，天线高度 60m，中心工作频率 1000kHz。

测试内容包括：静态阻抗匹配性能测试、带宽特性测试、动态环境适应性测试。

6.2 实验结果分析

静态匹配性能：在中心频率 1000kHz 下，测得天调网络输入 VSWR 为 1.12，反射功率占比约为 0.7%，发射功率辐射效率达到 98.5%，与仿真结果基本一致，验证了参数设计的准确性。

带宽特性：在 950kHz~1050kHz 频段内，VSWR 均≤ 1.2，插入损耗≤ 0.4dB，带宽性能满足中波广播的频率调整需求。

动态环境适应性：模拟降雨、温度变化等环境因素，通过驻波比测试仪实时监测，天调网络的自适应调谐功能可在 3s 内完成参数调整，使 VSWR 维持在 1.2 以下，展现出良好的动态匹配能力。

实验结果表明，本文设计的中波发射天调网络阻抗匹配方案，能够有效抵消天线阻抗的电抗分量，实现发射机与天线的高效阻抗匹配，提升系统的功率传输效率与稳定性。

7 结语

本文针对中波发射天调网络的阻抗匹配技术展开研究，深入分析了阻抗匹配的原理与失配影响，设计了基于 LC 网络的 L 型、π 型、T 型拓扑结构，并提出了结合理论计算、仿真优化与动态调谐的参数优化方法。实验结果显示，优化后的天调网络可将 VSWR 控制在 1.2 以下，插入损耗小，动态适应性强，能够满足中波发射系统的高效传输需求。

未来的研究方向可包括：一是引入宽频带阻抗匹配技术，进一步拓展天调网络的工作带宽，适应多频率发射需求。二是开发基于机器学习的智能调谐算法，提升动态环境下的匹配速度与精度。三是探索新型复合材料与器件在天调网络中的应用，降低器件体积与损耗，提升系统的集成度与可靠性。随着技术的不断进步，中波发射天调网络的阻抗匹配性能将持续优化，为中波广播的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

[1] 刘军. 传输线理论与阻抗匹配技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.

[2] GB/T 14949.3-2018, 无线电骚扰和抗扰度测量方法与限值 第3部分: 中波广播发射机[S].

[3] Balanis C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2016.

Design of Testing Platform for Motors and Generators of Point-the-Bit Rotary Steering System

Dongsheng Bao Weihong Zhu Runqi Zhou Haizhong Fu

China Oilfield Services Limited, Sanhe, Hebei, 065201, China

Abstract

To simulate the actual underground working environment to the maximum extent and accurately evaluate the reliability and durability of the driving motor and turbine generator of point-the-bit rotary steering system, a testing platform is proposed in this paper. Through hardware system design and software system development, automated reliability testing and life information acquisition for individual drive motors and turbine generators have been achieved. The results indicate that the testing platform meets the requirements of verification of components, promotes the underground failure verification of driving motors and turbine generators of point-the-bit rotary steering system, and has high industrial application value.

Keywords

Rotary steering; Pointing-the-bit; Motor; Turbine generator; Testing

面向指向式旋转导向电动机及发电机应用的综合测试平台设计

鲍东升 朱伟红 周润奇 付海中

中海油田服务股份有限公司，中国 · 河北 三河 065201

摘 要

为了最大程度模拟实际井下工况环境，准确评价指向式旋转导向系统的驱动电动机和涡轮发电机的可靠性和耐久性，研制了一种针对指向式旋转导向系统的驱动电动机和涡轮发电机的综合测试平台。通过硬件系统搭建和软件系统开发，实现了驱动电动机和涡轮发电机单品可靠性自动化测试及使用寿命信息获取。结果表明，该测试平台满足部件真实模拟验证能力，推进了指向式旋转导向驱动电动机和涡轮发电机井下工况失效验证工作，具备较高的产业化应用价值。

关键词

旋转导向；指向式；电动机；发电机；测试

1 引言

指向式旋转导向系统，相对于传统的推靠式旋转导向技术，其具有钻井效率高、井眼质量好、地层适应性强等优点，是国内目前主流油田服务公司在大力推广的技术，在定向井、水平井导向钻井领域发挥了重要作用 [1, 2]。

指向式旋转导向工具的动力驱动主要包含偏置轴、偏置机构、偏心驱动机构和电控机构组成 [3, 4]。其中，偏心驱动机有两大核心部件，电机和为电机提供电能的涡轮发电机。为了能够模拟和评估井下实际工况对电机和涡轮发电机的使用寿命影响，本文构建了面向指向式旋转导向系统的驱动电机和涡轮发电机应用的跟随式综合测试平台，以对电机和涡轮发电机可靠性和耐久性进行摸底测试。

【作者简介】鲍东升（1984–），男.，中国河北隆化人，硕士，从事石油测井仪器研发制造研究。

2 平台总体设计

综合测试平台的总体设计如图 1 所示，主要包括温控系统、驱动电动机测试系统和涡轮发电机测试系统。

其中，温控系统主要由加热主油箱、过滤器、油泵、循环油浴仓、冷却加热转换阀门、风冷却器组成。其功能主要是提供稳定的油浴温度环境，温度控制在 25℃（室温）~175℃，温控精度为 ±2℃，加温速度模拟井下工况，升温速度在 2 小时内达到设定值，以模拟被测设备带载情况。为了能够准确监测平台温度，系统分别在主油箱油温、循环油浴仓油温、拖动电动机温度、磁粉制动器温度设置了 4 个测温点。

驱动电动机测试系统主要由直流电源、变频器、驱动电路接口、动态扭矩传感器、磁粉制动器和磁粉制动控制器组成。其功能主要是在模拟井下环境下，测试电动机的输出曲线，以及对电动机进行阻抗测试和绝缘测试。

涡轮发电机测试系统主要由变频器、拖动电动机、电力表、整流电路、直流电子负载组成。其功能主要是模拟监测绕组变化和温度的关系，及发电机输出的线电压，对发电机进行阻抗测试和绝缘测试。

此外，综合测试平台还具有拖动发电机旋转和发电机带负载功能，以及驱动电动机旋转和电动机带负载功能。

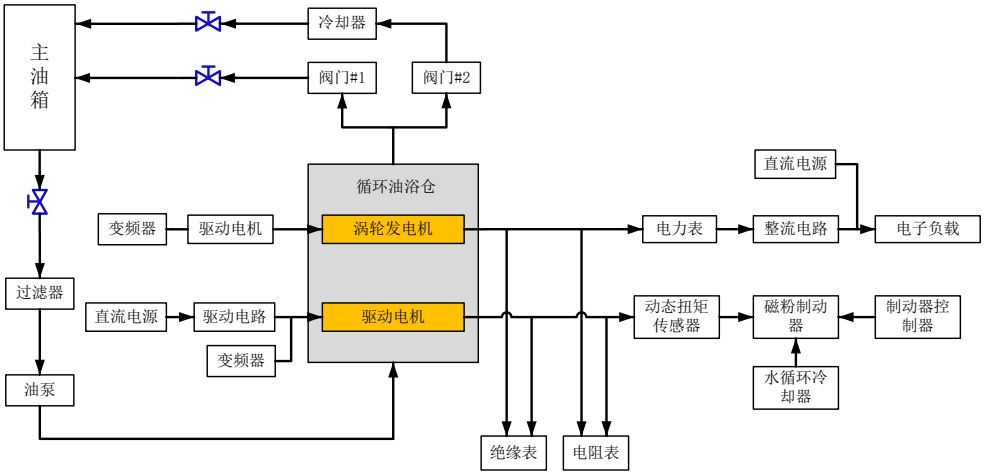

图 1 系统总体功能框图

3 系统硬件设计

温度控制系统硬件主要由油仓、传动装置、制动器、油泵、主油箱、冷却器和油路切换阀门等部件组成。各部件参数如下：

油仓最大液位≥ 300mm、支持最高温度≥ 145℃、加热功率≥ 15kW；冷却器的最大冷切功率≥ 0.3kW；主油箱最大液位≥ 300mm，支持温度≥ 145℃；油泵转速支持 1350R/min、转矩≥ 80%、功率≥ 1.5kW、电流≥ 1.25A。

发电机测试系统硬件主要由拖动电动机、电子负载、直流电阻表、绝缘表、电力表和整流板等电气部件组成。其主要部件参数如下：拖动电动机最大转速≥ 1350R/min、最大转矩≥ 80%、最大功率≥ 1.5kW、电流≥ 1.25A；涡轮发电机转速≥ 6500R/min、支持温度≥ 150℃；电力表支持最大电压≥ 45V、最大电流≥ 1.25A、频率≥ 250Hz；电子负载功率≥ 45W、测量电压≥ 45V，测量电流≥ 1.25A。

电动机测试系统硬件主要由发电机、直流电源、变频器、控制箱、驱动电动机、扭矩传感器和制动器等电气部件组成。其主要部件参数如下：直流电源最大输出电压≥ 90V、最大输出电流≥ 2A、最大输出功率≥ 350W；控制箱最大转速 1250R/min，最大转矩≥ 80%、最大输出功率≥ 1.5kW、最大电流≥ 1.25A；变频器最大转速 1250R/min，最大转矩≥ 80%、最大输出功率≥ 1.5kW、最大电流≥ 1.25A；电动机最大转速≥ 200R/min、支持最大温度≥ 150℃；扭矩传感器支持扭矩量程≥ 400N．m、动态响应时间＜ 4ms；磁粉制动器支持扭矩量程≥ 400N．m、最大转速≥ 800R/min。

4 系统软件设计

平台自动测试系统软件提供了良好的人机交互可视化界面，并能进行数据分析处理。自动测试软件系统包括人机交互界面、自检功能和数据库管理等三个部分组成。

4.1 系统软件工作流程

系统软件的工作流程如图 2 所示。系统软件开始工作，首先进行系统自检（依次为发电机控制系统自检、电动机控制系统自检、温度控制系统自检和阻抗测试系统自检），自检通过后，根据实际测试需求选择操作和测试项，操作和测试项包括温度控制、发电机阻抗测试、发电机绝缘测试、发电机带载测试、电动机阻抗测试、电动机绝缘测试、电动机带载测试等，可以选择部分或者全部测试操作项进行顺序测试。软件系统实时显示测试结果，可根据设置的测试阈值进行判断，当测试结果未通过，则测试流程停止，并提供出错信息形成报告。当全部测试项目完成并通过后，系统生成测试报告以便于用户保存下载。

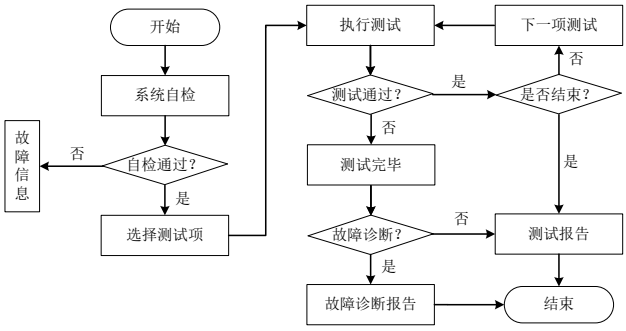

图 2 软件工作流程框图

4.2 系统温度控制流程

系统温度控制首先检查加温的油仓是否正常，若正常则系统根据设置的目标温度进行升温，升温期间可以根据需要更改目标温度、发电机目标转速、电动机转速、电子负载参数和制动器参数，也可以进行停止升温操作和升温再启动操作。当温控时间到达后，停止温度控制。当测试完成后，

启动温仓恢复室温控制。温度控制系统可以根据指令打开和关闭油仓盖，可对油仓发出排油指令。

4.3 发电机的阻抗测试和绝缘测试流程

发电机阻抗测试的测试内容有 AB 线阻抗、AC 线阻抗和 BC 线阻抗，发电机绝缘测试的测试内容包括 A 对外壳的绝缘性、B 对外壳的绝缘性和 C 对外壳的绝缘性。在发电机阻抗测试 / 绝缘测试中，需要等待拖动电动机停止后，才启动测试流程。在测试过程中，先切断负载继电器，闭合相关继电器，设置电阻表 / 绝缘表量程，开始发电机阻抗测试 / 绝缘测试。在发电机电阻 / 绝缘测试的时候，各项测试值均连续读取 8 次，再取平均值，完成后保存数据，断开相关的继电器。

5 测试验证

为了验证该综合测试平台的功能，采用该平台进行了发电机的阻抗、绝缘和带载测试，以及电动机的的阻抗、绝缘和带载测试。图 3 为温度控制测试曲线，设定的温度目标值为 88℃，从曲线可以看出，温度控制系统能够准确将测试系统温度控制在目标温度值。

表 1 为涡轮发电机的阻抗测试和绝缘测试结果，表 2 为驱动电动机的阻抗测试和绝缘测试结果，与被测设备参数基本吻合。

图 4 和图 5 分别为发电机和电动机的带载测试曲线，其有功功率能稳定到特定功率值。

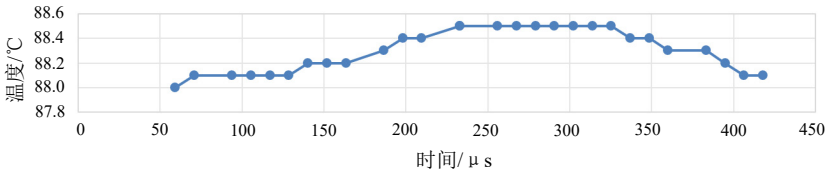

图 3 温控测试曲线

表 1 发电机阻抗测试和绝缘测试结果

阻抗测试（温度 88℃，液位 200mm）		绝缘测试（温度 88℃，液位 200mm）	
相线	实测值（Ω）	相线	实测值（MΩ）
A-B	3.447	A- 外壳	10
A-C	3.446	B- 外壳	10
B-C	3.447	C- 外壳	10

表 2 电动机阻抗测试和绝缘测试结果

阻抗测试（温度 88℃，液位 200mm）		绝缘测试（温度 88℃，液位 200mm）	
相线	实测值（Ω）	相线	实测值（MΩ）
U-V	5.368	U- 外壳	2000
U-W	5.355	V- 外壳	2000
V-W	5.356	W- 外壳	2000

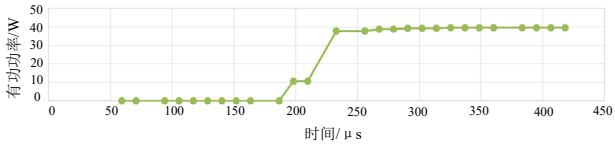

图 4 发电机带载测试曲线

图 5 电动机带载测试曲线

6 结语

本文设计的面向指向式旋转导向电动机及发电机应用的综合测试平台，通过硬件测试系统构建和系统测试软件开发，实现了系统温度控制、涡轮发电机的阻抗测试、绝缘测试和带载测试，以及驱动电动机的阻抗测试、绝缘测试和带载测试。测试结果表明，该测试平台能够在模拟井下工况环境下，实现驱动电机和涡轮发电机的可靠性和耐久性测试评估，有效提高了指向式旋转导向关键部件的失效验证效率。

参考文献

[1] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望. 石油科学通报[J]. 2023, 8(5): 535-554.

[2] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势. 钻采工艺[J]. 2024, 47(03) : 1-8.

[3] 冯定, 王鹏, 张红等. 旋转导向工具研究现状及发展趋势. 石油机械[J]. 2021, 49(07): 8-14

[4] 吴鑫鑫. 国外商业化旋转导向钻井工具发展现状. 内蒙古石油化工[J]. 2021, 47(11): 39-41.

Research on Strategies for AI-empowered Digital Transformation of Manufacturing SMEs in Jiamusi City

Yu zhang Yiguang Zhang

Institute of Intelligent Manufacturing Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang, 150090, China

Abstract

Against the strategic backdrop of the nation advancing new-type industrialization and Heilongjiang Province building a new growth pole of digital economy, small and medium-sized enterprises (SMEs), as the core carrier of Jiamusi's economic vitality, their digital transformation process is directly related to the quality and efficiency of regional industrial upgrading. Leveraging the pilot work on digital transformation of SMEs in Jiamusi City, this paper is based on the three characteristic industrial foundations of Jiamusi, namely high-end equipment and intelligent agricultural machinery manufacturing, new material manufacturing, deep processing of food and green food manufacturing. It systematically sorts out the stage characteristics and practical bottlenecks of SMEs' digital transformation, and combines the implementation rules of AI technology and the policy orientation of Heilongjiang Province to construct a three-dimensional empowerment pathway of "precision scenario entry - industrial chain collaboration - regional ecological support". This provides a theoretical reference and practical framework for AI-driven digital transformation of manufacturing SMEs in Jiamusi City.

Keywords

Equipment Manufacturing Inustry;AIDigital; Transformation City Pilot

人工智能赋能佳木斯市制造业中小企业数字化转型创新发展的策略研究

张宇 吕宜光

黑龙江省科学院智能制造研究所，中国 · 黑龙江 哈尔滨 150090

摘 要

在国家推进新型工业化与黑龙江省打造数字经济新增长极的战略背景下，中小企业作为佳木斯市经济活力的核心载体，其数字化转型进程直接关系区域产业升级质效。本文以佳木斯市中小企业数字化转型城市试点工作为契机，立足佳木斯市高端装备及智能农机制造、新材料制造、食品精深加工及绿色食品制造三个特色产业基础，系统梳理中小企业数字化转型的阶段特征与现实瓶颈，结合人工智能技术落地规律与黑龙江省政策导向，构建 "场景精准切入 — 产业链协同 — 区域生态支撑" 的三维赋能路径，为佳木斯市制造业中小企业以 AI 驱动数字化转型提供理论参考与实践框架。

关键词

装备制造业；人工智能；数字化转型城市试点

1 引言

当前我国正以 "智能制造为主攻方向" 推进新型工业化，工信部明确提出从 "点（关键场景）、线（产业链）、面（产业集群）" 三维度引导中小企业数字化转型，将人工智能作为破解转型瓶颈的核心技术支撑。随着 "新质生产力" 培育战略深入实施，低成本、轻量化、模块化的 AI 应用已成为中小企业实现 "提质降本增效" 的关键路径。

《黑龙江省数字经济促进条例》明确要求 "围绕现代化产业体系建设推动数字技术赋能传统产业转型升级"，并通过资金补贴、算力支持、标杆培育等政策组合拳加速企业 "智改数转"。佳木斯作为全省经济增长第二极、陆港型国家物流枢纽与北斗规模应用试点城市，其中小企业转型成效对黑龙江东部产业带升级具有示范引领作用。

2 佳木斯市制造业中小企业现状

佳木斯是国家"一五""二五"时期重点布局建设的老工业基地，长期的工业发展积淀了坚实的产业基础，形成了门类较为齐全的工业经济体系。近年来，通过"工业强

【基金项目】黑龙江省科学院创新发展战略研究专项《黑龙江省装备制造业数字化转型策略的研究》（项目编号：CXZL2025ZN01）。

【作者简介】张宇（1986–），男，中国吉林舒兰人，硕士，助理研究员，从事智能制造研究。

市”发展战略的深入实施，佳木斯市工业经济迈进高速发展时期，总量不断提高，结构持续优化。规上工业增加值增速保持全省第一“梯队”。规上工业增加值总量由 2020 年的 78.1 亿元增长至 2023 年的 98.5 亿元，涨幅 26.1%；产值由 409.2 亿元增长至 456.7 亿元，涨幅 11.6%；规上企业数量由 278 户增长至 407 户，增长 46.4%。2020 年、2021 年全市规上工业增加值分别实现了 16.9%、14.8% 的高速增长，增速连续两年位列全省前列。

以食品、装备、能源等 8 大产业为基础，加快融入全省“4567”现代化产业体系构建，提出大力实施“千百十”产业量级提升工程的决策部署，重点发展 1 个千亿级产业集群、7 个百亿级产业链、18 个十亿级特色产业。推动高端装备、智能农机、生物医药、新材料等新兴产业逐步扩大规模，中车新能源、迪诺医药、诺潜生物、中建材光电、振华机械等大量优质企业在我市投产落地。“中国牙城”叫响全国，产业小镇加速建设，威高集团、辽宁紫辰集团等 6 家国内行业龙头企业落户我市；深度挖掘东极冷水鱼品牌文化，将抚远、同江独具特色的赫哲民俗文化与文旅产业发展充分融合，以文旅产业发展助推渔业品牌建设；玉米产业链条不断延伸，迪诺医药中间体、诺潜生物二期氨基酸扩产技改、富锦奥古生物海藻糖等重点项目接连落地。

从数字化基础看，不同产业呈现明显分化。绿色能源产业因技术密集特性，数字化改造率达 71.4%，关键设备联网率超过 80%；装备制造业凭借工业基础优势，数字化改造进程较快，ERP 系统普及率接近 70%；食品加工业受企业规模小、分布散影响，改造率不足 50%，但其中稻米加工、山特产品加工等细分领域因标准化程度高，改造进度领先；传统劳动密集型产业如木材加工、纺织服装，数字化水平明显滞后，关键设备联网率均低于 20%。这种产业间的数字化鸿沟，既反映了不同行业的技术适配性差异，也凸显了试点工作需分类施策的现实必要性。

表 1 2024 年 11 月份企业数字化水平调研走访结果

产业类型	企业数量（家）	数字化改造率（%）	关键设备联网率（%）	ERP 系统普及率（%）	年度改造投入（万元）
食品加工	137	48.2	35.6	52.3	4260
装备制造	75	62.5	58.3	67.8	5890
绿色能源	28	71.4	82.1	76.5	3200
木材加工	46	23.9	18.7	29.4	1150
纺织服装	40	18.5	12.3	21.7	980

3 试点城市制造业转型的核心瓶颈

3.1 数据 “地基” 不牢固

多数企业数据分散于 ERP、MES 等孤立系统，食品加工企业原料溯源数据完整度不足 60%，装备制造企业设备运行数据采集覆盖率低于 50%，难以支撑 AI 建模需求。多数中小企业数据管理仍处于 " 混沌状态 "，38% 的企业尚未建立基础数据库，65% 的企业存在数据孤岛现象，部门间数据共享率不足 20%。食品加工企业普遍缺乏标准化数据采集流程，原料溯源数据不完整、生产过程数据碎片化；装备制造企业设计数据、生产数据、运维数据未能有效贯通，导致产品全生命周期管理难以实现。数据质量问题同样突出，传感器老化、采集频率不足导致数据精度低，82% 的企业反映其历史数据可用性不足 50%。这种 " 数据贫瘠 " 状态直接制约了 AI 算法的训练效果，使预测性维护、质量智能检测等高级应用难以落地。

3.2 AI 应用 “落地难”：

存在 “技术与业务脱节” 问题，如部分农机企业盲目引入 AI 检测设备，但因适配性差导致设备利用率不足 30%；中小企业受限于资金压力，无力承担智算资源投入，算力使用成本占比达数字化投入的 40% 以上。市场上主流数字化解决方案多针对大型企业开发，中小企业面临 " 用不起、用不好 " 的困境。调查显示，75% 的中小企业认为现有 AI 系统部署成本超过其年度净利润的 30%，而定制化开发费用更是让多数企业望而却步。寒地产业特殊需求加剧适配难题，普通工业机器人在 -20℃环境下工作精度下降 40%，农业物联网设备在低温高湿环境下故障率提升 3 倍。技术集成难度同样不小，传统企业原有设备品牌型号混杂，接口协议不统一，设备改造兼容性问题突出。某农机制造企业反映，其车间内 12 台不同年代的机床，需开发 8 种不同的数据采集接口，集成成本远超预期。

3.3 人才与协同双缺失

中小企业缺乏专职数字化人才，省域内 AI 技术服务商难以提供定制化解决方案；产业链协同薄弱，链主企业与配套中小企业数据不通，导致供应链响应效率低。龙头企业带动作用发挥不充分，仅 30% 的行业龙头建立了产业链协同平台，且多局限于采购销售环节，设计研发、生产制造等深度协同不足。中小企业在产业链中议价能力弱，数据共享意愿低，担心核心工艺泄露和商业利益受损。跨行业协同机制缺失，食品加工企业需要的冷链物流数据、装备制造企业需要的零部件供应数据，难以从外部获取。产业集群内部资源共享不足，多数工业园区仍停留在物理空间集聚阶段，未形成数字化服务共享生态。

4 AI 赋能制造业中小企业数字化转型的三维路径

4.1 “点” 上突破：关键业务场景的 AI 精准适配

以 “价值 - 可行性矩阵” 为核心工具，聚焦中小企业核心痛点设计场景化解决方案。农业加工领域：针对粮食仓储损耗率高、品质检测难问题，部署 AI 视觉质检系统与温湿度预测模型，如借鉴食品加工 AI 应用经验，实现大米黄变粒检测准确率达 99%，仓储损耗降低 15% 以上 [7]；装备制造领域：面向农机、电机企业设备故障频发问题，构建基于振动数据与运行参数的 AI 预测性维护模型，参考宁波制造企业经验实现故障预警准确率超 90%，停机时间缩短 40%[13]；新兴产业领域：为卫星配套、生物医药中小企业提供轻量化 AI 工具，如通过 AI 大模型实现零部件设计图纸优化，研发周期缩短 30%；借助 AI 数据分析提升中药提取工艺稳定性。

应用场景	技术组合	核心指标改善	寒地适配创新
稻米智能色选	机器视觉 +ResNet50	识别准确率 99.2% 碎米损耗↓ 18%	低温镜头除雾技术
电机焊接质量控制	红外传感 + 强化学习	合格率 99.3% 工时↓ 32%	温度场补偿算法
农机预测性维护	多传感融合 +LSTM	故障预警准确率 92% 维修成本↓ 42%	低温振动特征提取
风电功率预测	气象数据 +Transformer	预测误差≤ 5% 弃风率↓ 6.8%	严寒天气权重模型
智能农事决策	遥感 + 强化学习	氮肥利用率↑ 18% 亩产↑ 7.5%	冻土区墒情预测模型

4.2 “线” 上贯通：产业链协同的 AI 生态构建

依托佳木斯农机、食品等特色产业链，构建 “链主引领 + 平台赋能” 的协同转型模式。链主企业资源输出：推动佳电股份、北大荒垦征等龙头企业开放工业数据接口与 AI 模型组件，配套中小企业通过 “轻量化接入” 实现订单响应、物料协同等环节数字化，打造 “龙头带配套” 的 AI 协同体系；行业平台共性服务：在农产品加工领域搭建 “AI + 供应链” 平台，整合种植、加工、物流数据，通过 AI 算法优化采购计划与库存管理，降低链上企业综合成本 10%；在农机领域开发行业专用 AI 模型库，提供工况预测、售后服务等共性解决方案。

4.3 “面” 上覆盖：产业集群的 AI 生态支撑

以产业园区与区域集群为载体，构建普惠性 AI 赋能生态。园区数字化升级：在农高区、“牙城小镇” 等重点园区建设 “产业大脑”，集成 AI 算力调度、数据治理等公共服务，企业可按实际需求购买轻量化 AI 服务，降低初始投入门槛；集群数据价值挖掘：依托佳木斯陆港型物流枢纽优势，运用 AI 算法优化中俄跨境物流路径，实现通关效率提升 25%；整合农产品加工企业数据，构建 “AI + 品牌溯源” 系统，强化 “黑土优品” 市场竞争力。

5 战略保障体系：省域协同与地方实践的双重支撑

5.1 政策精准滴灌：衔接省级红利与地方特色

政策衔接需构建 “省级统筹 + 地方适配” 的梯度支撑体系。省级层面以数字化车间（生产线）最高 200 万元、智能工厂最高 1000 万元的补助政策为核心，佳木斯作为省级转型试点城市，可针对性优化申报机制，将电机、智能农机等特色产业的 AI 改造项目纳入优先支持清单。依托企业生产运行 AI 模型，建立 “政策 - 产业” 动态匹配机制，对农机装备数字化检测、农产品精深加工智能控制等场景，给予省级补助基础上的地方配套补贴，实现从“普惠支持”到“靶向赋能”的转变，降低中小企业政策申报门槛与转型成本。

5.2 技术生态共建：产学研用协同创新机制

以需求为导向搭建三级协同网络：省级依托 “科技成果与企业需求 AI 对接平台”，联动哈工大、省科学院等资源建立技术供给库；市级组建 “农机装备 + 电机制造” 专项创新联合体，推行 “科技总师” 制度，推动科研人员深度参与企业技术攻关。落地 “需求清单 - 技术清单 - 成果清单”对接模式，例如针对鲜食玉米收获机智能化升级需求，联合高校开发 AI 视觉识别切割系统，通过数字创意产业园实现技术中试与产业化衔接，形成 “基础研究 - 应用开发 - 场景验证” 的闭环创新生态。

5.3 要素保障升级：算力与人才的试点解决方案

算力支撑可打造 “公共池 + 轻量服务” 模式：依托佳木斯数字创意产业园的浪潮、360 集团算力资源，搭建区域性共享算力平台，按中小企业实际需求提供弹性算力租赁服务，降低初始投入。人才保障聚焦 “培育 + 引智” 双路径：对接省级 “技耀龙江” 专项行动，开展智能设备操作、工业 AI 运维等 “订单式” 培训；建立 “技师 + 工程师” 跨域团队，柔性引进省内外专家，结合电机装配数字化车间等场景，开展实操型人才培育，破解“算力成本高、技能人才缺”的核心瓶颈。

6 未来展望

佳木斯以数字化转型推动高质量发展、服务东北振兴，

构建精准高效政策体系，从“普惠扶持”转向“精准滴灌”，通过“以效定补”、产业数字化基金、税收优惠等培育市场机制，激发转型内生动力。深化“三链融合”生态建设，技术链打造寒地 AI 特色模型组件降低应用门槛，产业链培育链主企业、建跨区域数据中台促进协同，资金链创新“数据质押 + 信用贷款”模式引导社会资本投入。聚焦寒地特色产业创新，寒地农业推进智慧农事系统实现种植智能化决策，绿色食品加工构建“AI+ 区块链”全链条溯源体系覆盖地理标志产品，高端装备制造突破极寒环境人机协作技术提升产品性能。分步推进区域示范标杆建设，短期形成可复制转型方案推广，中期打造国家级产业集群和创新中心，长期联合俄罗斯远东共建跨境数字产业走廊，建设东北亚产业数字化合作节点，为全国中小企业转型贡献“佳木斯经验”。

7 结语

佳木斯市中小企业数字化转型正处于 “基础筑基向深度赋能” 的关键跨越期，立足农业加工、装备制造等特色产业优势，以 AI 技术为核心驱动力，通过 “场景精准切入、产业链协同、集群生态支撑” 的三维路径，可有效破解转型瓶颈。在黑龙江省数字经济条例与 “智改数转” 政策加持下，未来需进一步强化 “产学研用” 协同创新，推动 AI 与寒地产业特色深度融合，使佳木斯成为黑龙江东部数字经济赋能中小企业的示范标杆，为东北老工业基地振兴注入新质生产力。

参考文献

[1] 王鹏. AI赋能国企数字化转型[J]. 国企管理, 2024.

[2] 潘年光. 数字金融赋能中小企业数字化转型升级的路径[J]. 中小企业管理与科技, 2023.

[3] 尹千. 数字金融赋能中小企业数字化转型升级的路径[J]. 商场现代化, 2024.

[4] 张钦华,张苑. 数字化全力赋能中小企业转型[J]. 中国电信业, 2023.

[5] 刘山,黄思琪. 数字化转型,为中小企业赋能[J]. 人力资源, 2023.

[6] 孙早,王乐,张希. 数字化赋能产业转型升级:机遇、挑战与实现路径[J]. 西安交通大学学报（社会科学版）, 2023.

[7] 巩键. 人工智能赋能中小企业数字化转型的四条路径[J]. 网络安全和信息化, 2022.

The Design and Implementation of the Intelligent Risk Control System for Screen Cabinets

Yu Song Xinmin Miao Bin Li

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Uhv Branch, Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

With the increase of technological transformation and infrastructure projects in the power industry and the extension of construction periods, the operation sites of screen cabinets are facing safety risks such as the easy damage of secondary safety measures and non-standard operations by operators. The traditional manual control mode is no longer able to meet the on-site safety management needs. Based on industrial all-in-one computers and monitoring equipment, this paper designs a set of intelligent risk control system for screen cabinets that integrates risk early warning, operation management and information interaction. The system deploys industrial-grade all-in-one computers at the hardware layer, builds at the network layer, and develops at the software layer. It integrates key technologies such as image recognition, data comparison, and intelligent early warning, and focuses on optimizing the interface design of the entire operation process to achieve real-time monitoring of safety measures, standardized control of operation processes, and precise risk point alerts. This article elaborates in detail on the overall system design, key technology implementation and interface design ideas, providing technical support and practical reference for the safety control of power screen cabinet operations.

Keywords

Screen cabinet operation; Intelligent warning; Image recognition; Security control; interface design

屏柜风险智能管控系统的设计与实现

宋宇 缪新民 李斌

国网江苏省电力有限公司超高压分公司，中国 · 江苏 南京 211100

摘 要

随着电力行业技改、基建工程项目的增多及施工周期延长，屏柜作业现场面临二次安全措施易被破坏、作业人员操作不规范等安全风险，传统人工管控模式已难以满足现场安全管理需求。本文基于工业一体电脑与监控设备，设计了一套集风险预警、作业管理、信息交互于一体的屏柜风险智能管控系统。系统通过硬件层部署工业级电脑一体机、网络层搭建、软件层开发，整合图像识别、数据比对、智能预警等关键技术，重点优化作业全流程界面设计，实现安全措施状态实时监测、作业流程规范化管控及风险点精准提示。本文详细阐述系统总体设计、关键技术实现及界面设计思路，为电力屏柜作业安全管控提供技术支撑与实践参考。

关键词

屏柜作业；智能预警；图像识别；安全管控；界面设计

1 引言

1.1 研究背景

电力系统中，屏柜作为二次设备的核心载体，其作业安全直接关系到电网稳定运行。根据相关项目文件内容，近年来随着电网技改、基建项目规模扩大与施工周期延长，屏柜作业现场的安全管控面临双重挑战：一方面，二次安全措施易出现掉落、破坏等问题，传统人工定期核对模式耗时耗力，且难以实时发现安全措施异常；另一方面，施工人员对屏柜作业危险点辨识不足，开工前统一交底缺乏针对性，转场作业时易因危险源识别不到位引发误碰、误操作等安全事故。近年已发生多起典型事故，如某变电站屏柜作业中误剪主供电缆导致区域停电 4 小时，直接经济损失超 200 万元；某基建项目因误加接地线引发设备跳闸，影响周边企业生产供电，此类事故不仅造成经济损失，还严重影响电网供电可靠性。

1.2 研究意义

传统屏柜作业安全管控依赖人工监护与定期检查，存在响应滞后、管控效率低、人为失误风险高等弊端。相关项目文件指出，需通过智能化手段优化管控模式。因此，研发一套整合两项文件核心优势的屏柜风险智能管控系统，结合工业级电脑一体机的稳定性与交互性，优化作业全流程界面设计，实现安全措施状态实时监测、作业流程闭环管理及风

【作者简介】宋宇（1989–），男，中国江苏如东人，本科，高级工程师，从事继电保护与自动化研究。

险点精准推送，对减少人力成本投入、提升作业安全水平、降低电网运行风险具有重要现实意义。该系统可将安全措施异常发现时间从传统人工巡检的平均 2 小时缩短至秒级，作业流程合规率提升至 98% 以上，大幅降低误操作事故发生率。

1.3 研究内容

本文围绕屏柜作业安全管控的核心需求，开展以下研究：一是结合屏柜作业现场的实际管控需求，明确系统总体架构与功能模块，整合工业级电脑一体机硬件部署、网络传输与软件应用需求；二是针对屏柜作业环境的技术难点，攻克图像识别、数据通信等关键技术，保障系统稳定运行；三是聚焦作业全流程的人机交互痛点，设计专属界面，优化操作体验，满足安全措施监测与作业规范管控的核心要求。

2 系统总体设计

2.1 设计目标

系统以“提升安全措施完备性、规范作业行为、降低安全风险”为核心目标，结合屏柜作业现场安全管控的实际需求，实现三大功能定位：一是实时监测二次安全措施状态，异常变动时自动预警，满足安全措施完整性的常态化管控要求；二是规范作业流程，通过工业级电脑一体机界面实现作业申请、审批、风险学习、过程管控、收尾检查的闭环管理，适配屏柜作业流程标准化的实际需求；三是精准推送作业相关信息，包括危险点、防范措施、事故案例等，强化作业人员风险意识，针对性解决作业人员风险辨识不足的现场痛点。

2.2 系统架构

结合屏柜作业的技术需求与安全管控核心要点，系统采用“硬件层 - 网络层 - 软件层”三级架构设计，确保数据采集、传输、处理的实时性与可靠性：

硬件层为系统运行提供物理支撑，结合屏柜作业现场环境特点与功能需求，主要包括三类设备：监控设备：采用 1080P 高清广角摄像头安装于屏柜内部关键区域，镜头视角覆盖 120°，实现无死角图像采集。摄像头通过工业级 HDMI 接口与工业级电脑一体机直连，传输延迟低于 50ms，保障图像数据传输稳定，满足屏柜内部全区域监测的实际需求。交互控制设备：在屏柜操作区嵌入式部署工业级电脑一体机，选用 18.5 寸宽屏触控型号，采用全铝合金机身与无缝隙面板设计，具备 IP65 防护等级，可抵御现场粉尘与溅射水滴，支持 -10℃ ~60℃宽温运行与 7×24 小时连续工作，通过卡扣结构嵌入机柜，配备 Intel 四核处理器与 512GB SSD 固态硬盘，读写速度达 500MB/s，适配屏柜作业现场复杂环境对设备稳定性、耐用性的要求，可支撑多任务并行处理。辅助设备：包括红外传感器、振动传感器（用于安全措施状态与环境参数监测）、高分贝声光报警装置（报警音量≥ 85dB，异常时触发警示）、1TB 本地数据存储模块（缓存关键图像与操作记录），所有设备通过一体机的 RS485、USB 3.0 等接口实现联动集成，满足多设备协同工作的技术要求。

网络层构建“有线为主、无线冗余”的工业通信网络，工业级电脑一体机标配千兆以太网接口与 Wi-Fi6 模块，优先通过有线网络实现与管理平台的数据交互，采用 Modbus、MQTT 等工业协议，支持与现场设备无缝对接，通过防火墙与 AES-256 硬件加密模块保障数据传输安全，既满足现场数据实时传输的需求，也保障网络通信的稳定性。

软件层基于工业级电脑一体机的硬件性能进行深度适配，结合屏柜作业安全管控的功能需求，分为三个核心子模块：监控分析模块：运行于一体机本地的桌面版监控软件，利用其处理器实现图像预处理、目标识别与实时比对，对安全措施标识、设备状态的识别准确率超 95%，实现安全措施状态自动比对的核心功能。人机交互模块：定制化 HMI 界面支持手套操作，触控响应灵敏度≤ 10ms，直观展示作业任务、风险点分布与设备状态，作业人员通过触控屏完成身份核验、信息学习与操作确认，满足作业现场信息交互便捷化的实际需求。远程管理模块：网页端管理平台与一体机双向通信，可远程下发作业指令、更新风险数据库，接收一体机上传的操作记录与报警信息，实现远程管控与操作数据可追溯的功能。

2.3 核心功能模块

风险预警模块工业级电脑一体机通过内置算法比对实时与基准图像，响应≤ 2 秒，识别安全措施破坏、设备位移等异常时，立即声光报警并推送信息至管理平台，响应“安全措施变动触发预警”需求。

作业管理模块作业人员经 USB 接口身份登录，系统调取审批任务；扫码核验锁定作业范围，操作记录本地与云端同步，形成闭环管理，符合“作业流程规范化”要求。

信息交互模块本地缓存危险点、案例等数据，作业前推送风险提示，转场同步新区域数据，保障交底时效与精准。

3 关键技术实现

3.1 图像识别与边缘计算技术

依托工业级电脑一体机的硬件性能，结合屏柜作业现场的智能识别需求，构建“本地分析＋云端协同”的识别体系：采用 Intel Core i5 系列处理器支撑基于 TensorFlow 框架的深度学习模型运行，对屏柜内部结构、安全措施形态进行精准建模，模型训练数据基于 120 余种典型屏柜结构参数，涵盖不同厂家、不同电压等级的屏柜类型；通过自适应直方图均衡化图像增强算法优化不同光照条件下的成像质量，降低粉尘、电磁干扰对识别的影响，解决复杂现场环境下识别准确率低的实际问题。一体机的边缘计算能力实现 90% 以上的识别任务本地化处理，仅将异常数据上传云端，大幅减少网络带宽占用与响应延迟，满足现场实时监测的核心需求。模型经过 5000 余次迭代优化，对安全措施标识的识别准确率

从初始的 82% 提升至 95% 以上。

3.2 模块化数据库构建技术

基于工业级电脑一体机的可扩展存储能力，结合屏柜作业风险管控的实际需求，按“屏柜型号 - 作业类型 - 风险等级”构建分层数据库。数据库包含 120 余种典型屏柜的危险点参数、80 余起近年实际发生的误操作事故案例及对应的防范措施，形成结构化、可复用的风险管控数据资源。数据库支持通过管理平台远程更新，一体机在联网状态下自动同步增量数据，离线状态下依托本地存储保障功能正常运行，实现数据“云端管控 + 本地冗余”的双模式管理，既满足数据动态更新的管控需求，也适配现场离线作业的实际场景。数据库采用 MySQL 架构，支持百万级数据高效检索，单条风险信息查询响应时间≤ 300ms。

3.3 多设备协同联动技术

利用工业级电脑一体机丰富的扩展接口，结合屏柜作业多设备协同的管控需求，实现与传感器、报警装置、身份识别设备的模块化集成。通过 CAN 总线与 RS485 接口，将温度、湿度等环境参数与安全措施状态数据进行融合分析，当环境参数超标（温度≥ 45℃或湿度≥ 85%）且伴随安全措施异常时，系统自动升级预警级别，触发三级报警机制（本地声光报警 + 管理平台弹窗报警 + 负责人手机短信提醒），实现从源头上把控安全措施完整性的管控目标。这种模块化设计便于后期功能拓展，可通过添加 AI 模块实现设备故障预测，或接入端子排测温模块替代人工巡视，为后续技术升级与功能扩容预留灵活空间。

4 界面设计思路

基于工业级电脑一体机的显示特性，结合屏柜作业“流程管控”“信息推送”的实际需求，以“直观清晰、功能聚焦、操作高效”为设计原则，针对作业前、作业中、作业完成三个关键阶段设计专属界面，确保作业人员快速获取核心信息、规范执行操作流程。界面设计严格遵循工业人机工程学标准，字体选用加粗黑体，字号≥ 14pt，关键信息采用红、黄、绿三色区分（红色警示、黄色提示、绿色正常），颜色对比度≥ 3:1，保障作业人员在强光、粉尘环境下仍能清晰识别。

4.1 作业前界面：风险提示与实时监控一体化

界面采用“多区域信息聚合”布局：左上区域实时显示屏柜内部监控视频，直观呈现作业前设备初始状态；右侧显著标注“风险等级：三级”等关键作业属性（如不停电间隔、作业性质），采用红色醒目字体强化风险警示；下方分三栏清晰展示“风险点”“防范措施”“管控要求”，将误跳断路器、误碰运行回路等核心风险点，及对应的绝缘包裹、回路封控等防范措施一一罗列，信息层级分明、阅读便捷。核心功能：

实时视频预览：提前查看屏柜内部状态，便于确认安全措施初始完整性；

风险信息交底：集中展示作业风险、防控措施与管控要求，强化作业前安全意识；

作业属性明确：清晰标注风险等级、作业性质等关键信息，确保作业任务认知无偏差。

4.2 作业中界面：实时画面与进程管控一体化

界面采用“全屏监控 + 顶部状态”布局：主体区域全屏显示作业过程的实时画面，清晰呈现屏柜内部操作场景；顶部设“作业中 ...”红色醒目提示，同步展示操作进程状态；右上角保留“作业完成”功能按钮，便于作业结束时快速触发流程收尾。核心功能：

实时画面监控：全程记录作业操作过程，为事后追溯与过程管控提供视觉依据；

进程状态明确：顶部提示强化作业阶段认知，避免流程混淆；

快捷操作入口：“作业完成”按钮实现流程闭环，提升操作效率。

4.3 作业完成界面：双图对比与差异标注可视化

界面采用“左右双图 + 交互按钮”布局：左半区显示“作业前”基准图像，右半区显示“作业后”实时图像，双图同视角、同尺寸对齐，便于直观对比；系统自动用红色方框标注作业前后差异区域，清晰识别设备、物品的位置变化；底部设“图片比对”“确定”功能按钮，支持细节比对与结果确认。

5 结语

本文设计的屏柜风险智能管控系统，围绕屏柜作业安全管控的实际需求，通过引入工业级电脑一体机构建稳定的硬件基础，整合图像识别、多设备协同等关键技术，重点优化作业前、作业中、作业完成三阶段界面设计，实现了安全措施监测、作业流程管控及风险智能预警的多功能一体化。系统有效解决了屏柜作业中安全措施完整性难保障、作业流程不规范等痛点，通过界面的直观交互与技术的深度融合，提升了作业安全管控的智能化与精细化水平。经试点应用验证，系统可使屏柜作业安全隐患排查效率提升 80%，误操作事故发生率下降 90%，显著降低了人力成本与电网运行风险。未来可进一步拓展功能，融入设备故障预测、人员行为智能分析等更多智能算法，持续完善屏柜作业安全管理体系。

参考文献

[1] 汪小武,唐涛.基于物联网的屏柜监护系统设计[J].电气技术,2015,(04):64-66+71.

[2] 林业敏,王硕君,朱跃胜,等.电测二次屏柜作业在线视频监护装置的设计[J].机电信息,2016,(30):99-100.DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2016.30.057.

[3] 张焱,姜凌霄,吴晓军,等.基于机器视觉的变电站保护屏柜巡检系统设计分析[J].仪器仪表用户,2025,32(10):58-60.

Research on construction and effectiveness evaluation of intelligent safety monitoring system for green mine

Yu Guo

Inner Mongolia Tongmei Ordos Mining Investment Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract

Under the "Dual Carbon" strategy and high-quality development requirements, the green transformation of the mining industry has become imperative. Establishing intelligent safety monitoring systems for green mines holds significant importance, as it not only impacts ecological preservation and operational safety in mining areas but also affects corporate profitability and social responsibility fulfillment. This paper first reviews the core concepts and technological evolution of green mine safety monitoring, analyzes current challenges in digital and intelligent mine safety management, and proposes an integrated monitoring framework combining IoT, AI, and big data. Through case studies of typical mining areas, the paper demonstrates the platform's applications and achievements in risk early warning, hazard mitigation, and dynamic supervision. Results indicate that this system enhances safety control and green production capabilities, providing technical support for mining industry development and ecological civilization construction. Finally, the article offers optimization recommendations and future directions to advance green and smart mining initiatives.

Keywords

green mining; intelligent safety monitoring; Internet of Things; big data; performance evaluation; ecological protection

绿色矿山智能安全监测体系构建与效能评价研究

郭宇

内蒙古同煤鄂尔多斯矿业投资有限公司，中国·内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘　要

在“双碳”战略与高质量发展要求下，矿业绿色转型迫在眉睫，绿色矿山智能安全监测体系构建意义重大，既关乎矿区生态与作业安全，又影响企业效益与社会责任履行。本文先梳理绿色矿山安全监测内涵与技术发展脉络，剖析当前矿山安全管理在数字化、智能化方面面临的挑战，进而提出融合物联网、人工智能、大数据的智能监测体系架构。结合典型矿区案例，阐述了智能监测平台在风险预警、隐患治理、动态监管等方面的应用与成效。结果显示，该体系提升了矿山安全管控与绿色生产能力，为矿业发展和生态文明建设提供技术支撑。最后，文章给出优化建议与未来方向，助力绿色矿山与智慧矿业建设。

关键词

绿色矿山；智能安全监测；物联网；大数据；效能评价；生态保护

1 引言

近年来，绿色发展理念深刻重塑了矿业产业链条和管理范式。矿山作为资源开采的重要阵地，长期以来面临生态破坏、作业安全、环境污染等多重压力。随着国家“双碳”目标提出，绿色矿山建设被推上了产业转型升级的重要舞台。传统安全管理依赖人工巡检和经验判断，面对日益复杂的开采环境和多样化的安全隐患，显现出滞后性与局限性。信息化、智能化技术的涌现，为矿山安全监测提供了前所未有的手段和支撑，物联网感知、人工智能预警、大数据分析等成为现代矿山安全治理的关键支柱。绿色矿山的本质在于实现资源高效利用、生态环境友好、作业安全可靠的多重平衡，而智能安全监测体系的构建，正是推动这一目标落地的核心环节。本文聚焦绿色矿山智能安全监测体系的架构设计、技术融合与效能评价，结合实际案例，分析智能监测在矿山生态保护、风险预警、动态管控等方面的创新应用与实际成效，为推动我国矿业绿色智能化转型提供科学路径和理论支撑。

2 绿色矿山安全监测体系的内涵与发展趋势

2.1 绿色矿山安全管理的核心要求

绿色矿山的建设不仅仅体现在环境修复和生态保护上，更强调矿区全生命周期的绿色、安全、高效发展。安全管理作为绿色矿山建设的重要组成部分，要求在源头预防、过程管控、应急响应等方面实现全流程、全要素覆盖。传统矿

【作者简介】郭宇（1996–），男，满族，中国内蒙古呼和浩特人，本科，助理工程师，从事信息化监测监控研究。

山安全管理方式多依赖于人力巡检与定期检测，存在响应滞后、数据孤岛和主观性强等问题，难以满足复杂作业场景下的风险预警和精细治理需求。绿色矿山安全管理需充分整合先进的信息技术，实现对地质、设备、环境、人员等多维数据的动态感知与综合分析，推动安全管理模式由经验型向数据驱动、智能引领的本质跃迁。

2.2 智能安全监测技术体系演进

伴随物联网、5G、人工智能等前沿技术的不断成熟，矿山安全监测体系经历了从传统手工记录到数字化自动采集、再到智能化联动预警的转型过程。现代矿山安全监测系统集成了多类型传感器网络，实现对井下瓦斯浓度、顶板变形、人员定位、设备运行状态等多维数据的实时采集与远程传输。大数据平台对监测数据进行高频分析与异常识别，人工智能算法基于历史案例与知识图谱开展模式挖掘和风险预测，显著提升了隐患识别和事故预警的精准性。此外，基于地理信息系统（GIS）与三维可视化技术，矿山安全管理实现了空间信息与监测数据的深度融合，推动管控手段向立体化、数字化、智能化升级。

2.3 绿色矿山安全监测体系的建设路

构建绿色矿山智能安全监测体系，需坚持“统一规划、分步实施、协同管控”原则。体系建设以“多维感知—智能分析—风险预警—应急联动”为主线，融合井上井下多源数据采集、智能算法驱动的隐患分析、自动化风险响应及应急决策。平台架构应兼容多厂商设备接入，具备数据互联互通与信息共享能力，实现安全监测、生产调度、环保管控等业务系统的深度集成。制度层面需完善安全生产责任制与智能化协同机制，提升全员数字素养与应急处置能力，为绿色矿山高质量发展提供全方位支撑。

3 绿色矿山智能安全监测体系架构设计

3.1 多源感知与数据采集模块

绿色矿山智能安全监测体系的基础在于全场景、多维度的实时感知。通过部署气体、温度、压力、位移、水文、振动、粉尘等多类型高精度传感器，实现对井下空间、边坡、尾矿库、排水系统等关键环节的全面监测。无线传感网络与边缘计算节点协同，实现数据本地预处理和压缩传输，提高系统响应速度与可靠性。数据采集终端具备自组网与自愈能力，能够适应复杂矿区环境与动态扩展需求，为后续大数据分析与智能决策提供坚实的数据底座。

3.2 智能分析与风险预警平台

智能分析平台以大数据和人工智能为核心，实现对海量监测数据的自动清洗、特征提取与异常识别。通过深度学习、时序预测、知识图谱等技术，平台能够自动判别瓦斯超限、地质灾害隐患、设备故障等风险信号，并与历史案例库关联比对，生成多层次、可解释的风险预警。系统支持多维度风险地图可视化展示，便于管理者快速掌握矿区整体安全态势。平台还可联动安全生产管理、环境监测和调度指挥等子系统，实现智能化风险响应和闭环管控。

3.3 应急联动与智能决策支持

面对突发事故或极端工况，智能安全监测体系具备多级应急联动能力。平台自动触发应急预案推送，联动矿区广播、报警、疏散等设备，实现快速响应与指挥调度。智能决策支持模块基于现场实时数据与预案知识库，动态优化救援路径与资源调配，提升应急处置效率和人员安全保障。通过与政府监管平台互联互通，实现事故信息快速报送和跨部门联动，形成“预警—响应—处置—反馈”的闭环管理体系，增强矿山整体抗风险能力。

4 智能安全监测体系在绿色矿山的应用成果

4.1 风险预警与事故防控能力提升

智能安全监测体系实现了矿山安全管理模式的重大变革，将传统的“事后应急”转向“事前预警”，全面提升了风险治理的科学性和有效性。系统通过分布式多传感器和无线网络，对井下瓦斯浓度、顶板稳定性、地质结构变化等核心安全参数进行全天候、高频次监测。基于大数据建模与时序分析，平台能够在异常状态初现时自动识别潜在隐患，提前向管理层发出分级预警。典型矿区应用案例显示，采用智能监测平台后，重大安全事故率显著降低，突发事件的响应与处置效率大幅提升。自动化风险识别和智能推送不仅减轻了一线巡检人员的劳动强度，也减少了人为疏漏和延误，为矿山本质安全提供了坚实保障，推动了矿业风险治理能力的现代化进程。

4.2 生态环境保护与绿色生产协同

绿色矿山的本质要求是实现生态保护与高效生产的协同发展。智能安全监测体系通过全流程、全要素的数据采集与动态分析，实现了对尾矿库、废水排放、扬尘扩散等环境敏感点的精准监控。系统能够实时采集生态指标变化，自动调节排放和治理流程，及时处置异常和突发状况，从源头防控环境污染事件的发生。多地绿色矿山试点表明，智能监测平台的应用有效保障了矿区排放达标、生态修复措施的精细投放及生态本底动态评估。

4.3 安全管理效能与经济效益提升

智能安全监测体系的推广应用不仅优化了矿山安全治理模式，也带来了显著的经济和社会效益。系统自动化采集与分析监测数据，大幅缩减了人工巡检、现场排查等传统安全管理的人力和时间成本，提升了风险发现和处置的效率。事故发生率的下降，直接降低了企业的经济损失和社会责任负担。信息化、数字化的协同平台打破了部门壁垒，实现了企业内部与监管部门之间的数据共享和高效联动，推动治理体系的现代化与规范化。智能安全监测体系还为企业资源配置优化和决策科学化提供数据支撑，实现了经济发展与社会责任的有机统一，为绿色矿业可持续发展注入了新动力。

5 绿色矿山智能安全监测体系建设中的挑战与对策

5.1 技术集成与标准化难题

绿色矿山智能安全监测体系的落地应用对多源异构设备与系统的高效集成提出了更高要求。矿区实际环境中，传感器、采集终端、网络通信设备、控制平台等多样化设备长期存在厂家标准各异、接口协议不统一等问题，造成数据孤岛和信息割裂，严重制约了监测体系的数据流通与高效联动。不同矿山历史遗留的自动化系统难以与新一代智能监测平台无缝对接，影响安全数据的时效性和准确性。部分传感器兼容性不足，导致关键监测参数难以全面汇聚，制约了智能分析的覆盖面与预警水平。为破解这些难题，亟须在国家和行业层面推动安全监测设备的标准化、模块化发展，制定统一的通信接口和数据交换标准，实现各类硬件与平台的即插即用和灵活组网。同时，应鼓励矿山企业与技术厂商协同研发，开展跨平台联调测试，推动设备和平台的互联互通，打破信息壁垒。标准化、开放化的技术路线有助于降低运维成本，提高系统扩展性，为绿色矿山智能安全监测的可持续运行提供坚实基础。

5.2 数据安全与隐私保护挑战

随着智能安全监测体系在矿区的广泛部署，传感终端实时采集和无线网络远程传输的监测数据体量急剧膨胀，数据安全与隐私保护面临前所未有的挑战。矿区现场环境复杂，网络通信链路长，黑客入侵、数据篡改、敏感信息泄露等安全事件风险上升。若监测数据遭受恶意攻击，不仅影响企业核心资产安全，更可能危及矿区作业人员生命安全及生态环境稳定。为此，必须从物理、网络、数据、应用等多层面强化安全防护。首先，加强终端设备的安全加固，采用加密芯片、防护壳体等手段抵御物理入侵。其次，网络传输环节实施数据加密、身份认证和动态密钥管理，防止数据被窃取或篡改。再次，完善访问权限分级与操作日志审计，实现监控数据全过程可追溯，防范内部操作失误或恶意泄露。区块链等新兴技术可实现监测数据的去中心化存储与不可篡改，增强系统抗攻击能力。还应定期开展网络安全演练与应急响应，提升矿山企业对数据安全威胁的敏感度和处置能力，全面保障智能安全监测体系的运行安全和信息合规。

5.3 人才队伍与运行机制瓶颈

智能安全监测体系的稳定运行与持续优化离不开高素质的专业人才队伍和科学高效的运行管理机制。当前，部分矿山企业在推进智能监测平台应用过程中，面临数字化技术人才短缺、运维能力不足、岗位职责不明晰等现实难题。由于矿业传统岗位向智能化、信息化转型，原有管理和操作人员在新系统的操作、维护、故障排查等方面适应性较弱，影响系统的长期高效运转。为此，需要加大智能矿山人才队伍建设，强化企业、高校与科研院所的产教融合，建立多层次、复合型的技术人才培养体系。企业应制定系统化的培训计划，定期组织岗位技能提升和智能系统运维实训，引入高级数据分析、AI 算法、信息安全等领域的人才，提升队伍整体专业素养。完善岗位分工和激励考核机制，形成“专岗专责、协同高效”的运行管理模式，激发员工创新活力和岗位责任感。通过不断优化运维流程和管理制度，为绿色矿山智能安全监测体系的规范运行和技术进步提供坚实的人才支撑与机制保障。

6 结语

绿色矿山智能安全监测体系作为推动矿业高质量发展和生态文明建设的重要引擎，其在风险预警、生态保护、安全管控等方面展现出显著成效。物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的深度融合，为矿山作业环境的动态感知、精准治理和高效应急提供了坚实基础。通过系统性、集成化的智能安全监测平台建设，矿山企业能够有效降低安全事故率，实现绿色生产与社会责任的统一。然而，体系建设仍面临技术集成、数据安全、人才培养等多重挑战，需要各方协同推进标准化、系统化与专业化。未来，随着技术进步与治理模式创新，绿色矿山智能安全监测体系有望在更大范围内推广应用，助力我国矿业迈向智能化、绿色化的可持续发展新阶段。

参考文献

[1] 贾运红,徐慈强,田原,等.矿山人工智能大模型技术研究现状及展望[J].中国矿业,2025,34(10):135-143.

[2] 王智立,汪永印,潘奇志,等.矿山智能化技术在环境保护中的应用与影响分析[J].煤矿现代化,2025,34(06):77-83.

[3] 张标龙,钟仲琳.科技赋能矿山安全推动智慧矿山建设[J].劳动保护,2025,(10):46-48.

[4] 王敬世,亓春平.探析小上峪石灰岩矿工程施工安全管理工作实践的有效措施[J].石材,2025,(10):25-27.

[5] 王琼杰,邹随,倪瑛玲.把“绿色基因”植入矿业开发全过程[N].中国矿业报,2025-09-22(004).

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8114

Reliability Analysis and Optimization Path of Directional IoT Technology in Railway Freight Measurement Equipment

Xiping Song[1] ZhiguoZhang[1] Jinggang He[1] Zhongming Chen[1] Yue Xing[2]

1. China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730000, China
2. China Railway Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing, 100081, China

Abstract

With the continuous expansion of railway freight operations and the in-depth application of intelligent technologies, the use of directional IoT technology in railway freight measurement equipment has gradually become a key approach to improving measurement accuracy and transportation efficiency. This study focuses on the application of directional IoT technology in railway freight measurement equipment, analyzing its technical characteristics, implementation pathways, and current challenges. By drawing insights from mature international application cases and considering the domestic development context, the study proposes optimized technical pathways suitable for railway freight measurement equipment in China. Research indicates that directional IoT technology can significantly enhance the accuracy of measurement equipment and the reliability of data through real-time monitoring, remote data transmission, and intelligent analysis, thereby ensuring the safety and efficiency of railway freight operations. Additionally, the study addresses challenges such as network stability, data security, and device compatibility during the implementation process, proposing corresponding optimization strategies. These findings provide technical support and a theoretical foundation for the future intelligent and automated development of railway freight measurement equipment.

Keywords

Directional IoT technology; Railway freight measurement equipment; Technical optimization; Data transmission; Intelligence

铁路货运计量设备中定向物联网技术的可靠性分析与优化路径

宋席平[1] 张志国[1] 何靖刚[1] 陈仲明[1] 邢悦[2]

1. 中国铁路兰州局集团有限公司，中国·甘肃 兰州 730000
2. 中铁科学技术开发有限公司，中国·北京 100081

摘　要

随着铁路货运规模的持续扩展与智能化技术的深度应用，定向物联网技术在铁路货运计量设备中的应用逐渐成为提升计量精度与运输效率的关键途径。本文围绕定向物联网技术在铁路货运计量设备中的应用展开研究，分析了其技术特点、实施路径及当前面临的挑战。通过对国外成熟应用案例的学习，结合国内发展现状，提出了适合我国铁路货运计量设备的技术优化路径。研究表明，定向物联网技术能够通过实时监控、远程数据传输和智能分析，大幅提升计量设备的准确性与数据的可靠性，保障铁路货运的安全性与高效性。同时，针对技术实施过程中出现的网络稳定性、数据安全和设备兼容性等问题，提出了相应的优化策略，为未来铁路货运计量设备的智能化、自动化发展提供技术支持和理论依据。

关键词

定向物联网技术；铁路货运计量设备；技术优化；数据传输；智能化

1 引言

铁路货运作为我国重要的物流运输方式之一，承担着大宗物资的长途运输任务。随着铁路货运量的逐年增长，如何提高计量设备的精度与运输效率，成为提升运输服务质量和保障安全的关键。定向物联网技术，作为一种新型的智能化技术，能够通过无线传感器、远程数据传输和智能分析等手段，实现对货运计量设备的实时监控与管理。然而，国内在这一技术的应用中仍面临着数据传输稳定性、设备兼容性、系统集成等方面的挑战。国外如德国、美国等铁路发达国家，早已在铁路货运计量中广泛应用物联网技术，并取得了一定的成果。这些技术的成功应用为我国铁路货运计量设备的智能化发展提供了宝贵经验。在此背景下，本文旨在分析定向物联网技术在铁路货运计量设备中的可靠性，探索其优化路径，以期为我国铁路货运系统的高效、智能化发展提

【作者简介】宋席平（1982–），男，中国甘肃兰州人，硕士，工程师，从事人工智能驱动下的铁路智能运输与装备技术研究。

供理论依据和技术支持。

2 定向物联网技术概述

2.1 物联网技术在铁路货运中的应用背景

随着铁路货运规模的不断扩大及信息化技术的深入应用，传统的铁路货运计量方式逐渐暴露出数据采集不及时、传输稳定性差等问题。物联网技术通过无线传感器、数据采集、远程传输等手段，使得铁路货运计量设备能够实时监测货物装载状态，进行数据传输与分析，极大提升了计量的精度与运输的安全性。国外如德国、美国等发达国家，已经在铁路货运计量中广泛应用物联网技术，通过集成传感器、无线通信等技术，监测列车的装载质量、限界计量等重要参数，实现了铁路货运计量的智能化、自动化。在国内，物联网技术在铁路货运中的应用也得到了逐步推进，尤其是在一些大型货运站和重点线路中，已开始利用物联网技术实现对计量设备的远程监控与数据采集，提高了设备的管理效率与数据的准确性。

2.2 定向物联网技术的基本原理

定向物联网技术通过传感器和无线通信网络的结合，能够实现对设备的远程监控、数据采集和实时传输。其核心包括感知层、网络层和应用层三个部分。在铁路货运计量设备中，传感器被安装在计量设备上，实时采集如货物重量、温度、湿度等数据。通过低功耗广域网（LPWAN）、NB-IoT、LoRa 或 5G 等通信技术，采集到的数据被传输到数据中心或云平台。系统根据采集的数据进行实时分析与处理，判断设备是否存在异常，及时进行数据预警与报警，确保货运计量设备的正常运行与数据的准确性。此外，定向物联网技术还包括智能数据分析和故障预测，通过大数据和人工智能算法分析海量数据，预测设备故障和优化运输调度，从而提高运输效率和安全性 [1]。

3 铁路货运计量设备中定向物联网技术的可靠性分析

3.1 技术可靠性分析的意义与目标

在铁路货运计量设备中，物联网技术的可靠性至关重要，直接影响到货物的计量精度和运输的安全性。可靠性分析的主要目标是确保物联网技术在铁路货运计量设备中的应用能够长期稳定运行，减少设备故障和停运带来的影响。通过对物联网技术在计量设备中的可靠性进行评估，可以识别系统的薄弱环节，采取有效的技术优化措施，保证数据采集和传输的准确性与稳定性。可靠性分析不仅要评估硬件设备的稳定性，还要考虑通信网络的传输质量、数据处理的精度以及系统集成的可靠性。在我国铁路货运计量系统中，物联网技术的可靠性分析和优化，将为铁路货运的智能化发展提供技术支撑，确保铁路运输的安全性和高效性。

3.2 物联网技术在计量设备中的关键可靠性指标

物联网技术在铁路货运计量设备中的可靠性分析涉及多个关键指标。首先，通信可靠性是一个至关重要的指标，涉及无线通信网络的覆盖范围、传输速率以及数据的传输稳定性。物联网技术通常采用 NB-IoT、LoRa、5G 等通信方式，不同的技术有不同的覆盖范围和传输速率，需要根据铁路货运计量的具体需求来选择最适合的通信技术。其次，传感器的可靠性也至关重要，传感器的精度、稳定性和抗干扰能力直接影响到计量数据的准确性。随着技术的发展，传感器的可靠性可以通过冗余设计和智能校准进行提升。第三，数据处理与存储可靠性也是物联网技术应用中的关键指标，尤其是在铁路货运的复杂环境中，数据的安全性和完整性必须得到保障。此外，系统的自恢复能力、故障诊断与预测功能也是影响物联网技术在铁路货运计量设备中可靠性的关键因素。

3.3 故障模式与影响分析（FMEA）

故障模式与影响分析（FMEA）是评估定向物联网技术在铁路货运计量设备中可靠性的有效工具。FMEA 通过系统化的分析识别潜在的故障模式、评估其可能导致的后果，并根据故障的严重性、发生频率和可检测性来评估其风险。针对铁路货运计量设备中的物联网技术应用，FMEA 可以帮助识别系统中的关键故障模式，如传感器失效、数据丢失、网络中断等，并评估这些故障可能对运输安全、计量精度和系统稳定性造成的影响。通过对这些故障模式的详细分析，能够采取预防性措施，如增加冗余设计、改进数据校准、加强网络监控等，降低故障发生的概率和影响，提升系统的可靠性。在铁路货运计量设备中应用 FMEA，有助于提前识别潜在风险，确保物联网技术在高要求的铁路环境中能够长期稳定运行。

4 定向物联网技术的优化路径

4.1 技术优化方案的设计思路

定向物联网技术的优化方案应当围绕提升系统稳定性、数据准确性、通信效率和安全性展开。首先，选择适合铁路货运计量设备应用场景的通信技术，如 NB-IoT、LoRa 或 5G 等低功耗广域网（LPWAN）技术，确保在复杂环境下具备可靠的数据传输能力。其次，在硬件方面，应优化传感器和设备的抗干扰能力，以适应高温、湿气、震动等极端环境条件，提高设备长期稳定运行的可靠性。通过冗余设计和多重备份，确保在某个传感器或设备发生故障时，其他设备能继续运行，保证计量数据的完整性和准确性。系统软件层面，需要设计灵活、易扩展的架构，以便未来技术的升级和功能扩展。最后，应综合考虑数据传输、处理、存储与应用的协同优化，确保数据流畅、高效地从现场传输到后台，避免因技术瓶颈导致的延时和数据丢失 [2]。

4.2 系统架构与协议层的优化

系统架构的优化需要基于分层结构，确保每一层都能够高效、稳定地运行。在感知层，应优化传感器的精度与稳

定性，并确保其在复杂环境下具备抗干扰能力。协议层的优化则尤为重要，主要涉及不同设备间的通信协议转换。铁路货运计量设备中的物联网技术使用多种通信协议，如 NB-IoT、LoRa 和 5G 等，这些协议之间的兼容性是优化的重点。为了实现不同协议之间的无缝衔接，建议使用协议转换模块，确保不同设备之间的数据能够顺利传输并且不发生信息丢失。此外，数据的封装和加密技术也需加强，通过数据加密和安全协议（如 TLS、AES 加密算法），确保数据在传输过程中的安全性和保密性。优化后的系统架构能够支持设备间的高效协作，减少网络延迟，提高系统的响应速度和处理能力。

4.3 通信网络与数据传输的优化

通信网络的稳定性和数据传输的效率直接影响定向物联网技术在铁路货运计量设备中的应用效果。在数据传输层面，优化网络配置以提高数据传输速度，减少数据丢包和延时。为此，可优先选择支持高吞吐量和低延迟的通信技术，如 5G、NB-IoT 和 LoRa 等，并通过合理的网络拓扑设计，确保通信信号的覆盖范围与网络带宽匹配。网络冗余设计也不可忽视，例如在关键设备之间设置备用通信通道，确保在主通道出现故障时，能够迅速切换到备用通道，保证数据的传输不中断。在数据传输的安全性方面，应采用端到端加密技术，防止数据在传输过程中被篡改或泄露。基于 5G 技术的低延迟特性，可在传输过程中实现近实时数据上报，保证货物装载状态的及时监控与分析，提升铁路货运计量设备的自动化和智能化水平 [3]。

4.4 数据处理与安全性优化

随着铁路货运业务的复杂性增加，数据的处理和安全性显得尤为重要。数据处理的优化主要体现在数据采集、存储与分析的效率上。为此，可以采用边缘计算技术，将数据处理部分前移到现场设备附近，减少数据传输的延迟，提高实时性。通过智能算法对大量计量数据进行分析，实时监控设备状态，及时识别故障并进行预警。此外，数据的安全性优化不仅要求对数据传输过程进行加密，还要加强数据存储的保护，防止数据泄露或丢失。针对数据的存储，可以使用分布式存储技术，以提高数据的可靠性和访问效率，确保数据在存储和调用过程中的一致性与安全性。为进一步增强数据安全性，还可采用多重身份认证、访问控制等技术，确保只有授权人员能够访问和操作关键数据，防止外部威胁和恶意攻击。

4.5 智能化与自动化监控系统的优化

智能化与自动化监控系统的优化是提升铁路货运计量设备整体性能的关键环节。通过引入人工智能算法和机器学习技术，可以实现对计量数据的实时分析和故障预测，自动识别设备异常并触发预警。例如，利用人工智能进行图像识别，对货物的装载情况进行自动分析，判断是否符合安全规范，从而减少人工干预，提高计量准确性和效率。智能监控系统应具备自主决策能力，能够基于实时数据自动调整工作状态和运输策略。为了进一步提高系统的自动化水平，建议采用自动化控制技术，在设备出现故障或异常时，能够自动调整或切换工作模式，确保铁路货运计量设备的连续稳定运行 [4]。此外，系统还应具备自我学习能力，随着数据的积累，能够不断优化算法，提高预测准确性和处理效率，为铁路货运的智能化、自动化发展提供坚实基础。

5 结语

综上所述，定向物联网技术在铁路货运计量设备中的应用具有重要意义，能够有效提升计量精度、优化运输效率并确保运输安全。通过对技术原理、可靠性分析以及优化路径的详细探讨，我们可以看到，虽然定向物联网技术在铁路货运计量中已取得初步应用，但仍面临技术瓶颈和挑战。为了确保其在复杂铁路环境中的稳定运行，需从系统架构、通信网络、数据处理及智能化监控等多个层面进行优化。在此基础上，结合国内外先进经验，推动物联网技术的持续创新和应用，将为铁路货运的智能化、自动化提供强有力的技术支撑。未来，随着技术的不断进步和完善，定向物联网技术必将在铁路货运领域发挥更大的作用，推动行业向更加高效、智能、安全的方向发展，为现代化铁路运输体系的建设贡献力量。

参考文献

[1] 李松.提升铁路货车计量技术与管理水平的探索[J].铁道技术监督,2019,47(04):18-20.

[2] 门金勇,张大庆,柴雪松,郭建华,田德柱.新型铁路货车超偏载检测装置的研制[J].铁道货运,2019,37(01):48-54.

[3] 王万全.计量管理在铁路货运中心的应用与思考[J].上海铁道科技,2015,(03):76-78.

[4] 王华伟,蒋荟,王志华,喻冰春.铁路货运计量及安全检测设备管理平台的研究与实现[A].第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛论文集（上册）——智能交通[C].中国智能交通协会:2011:154-158.

Research on Improving Charging Efficiency of Electric Vehicle Charging Piles in Low-Temperature Environments

Fang Wang

Shunyi District Metrology and Food and Drug Inspection Center, Beijing, 101300, China

Abstract

With the rapid development of the electric vehicle industry, the practicality of charging piles as core supporting facilities has attracted attention. The charging efficiency electric vehicle charging piles is greatly reduced in low-temperature environment, which has become an important bottleneck restricting the popularization of electric vehicles in northern regions and high latitudes. This paper with the mechanism of low-temperature influence on charging system, analyzes the change law of core elements such as battery characteristics, charging pile components performance, charging interface and circuit in-temperature conditions, and clarifies the key factors that restrict charging efficiency. On this basis, from the three dimensions of technology optimization, structure improvement and process regulation, this paper proposes efficiency improvement paths, including battery preheating technology upgrading, charging pile thermal management system optimization, charging protocol adaptation improvement and other specific schemes, which provide theoretical support and practical reference for the improvement of charging piles in low-temperature environment.

Keywords

Electric vehicle; Charging pile; Low temperature; Charging efficiency; Improvement strategy

低温环境下电动汽车充电桩充电效率提升研究

王芳

北京市顺义区计量和食品药品检测中心，中国·北京 101300

摘　要

随着电动汽车产业的快速发展，充电桩作为核心配套设施的实用性受到了关注。低温环境下电动汽车充电桩充电效率大大降低，成为制约北方地区及高纬度区域电动汽车普及的重要瓶颈。本文从低温对充电系统的影响机理入手，分析电池特性，充电桩组件性能，充电接口与线路等核心要素在低温条件下的变化规律，明确制约充电效率的关键因素。在此基础上，从技术优化，结构改进，流程调控三个维度，提出针对性的效率提升路径，包括电池预热技术升级，充电桩热管理系统优化，充电协议适配改进等具体方案，为低温环境下充电桩性能提升提供理论支撑与实践参考。

关键词

电动汽车；充电桩；低温；充电效率；提升策略

1 引言

在“双碳“目标引领下，电动汽车凭借其零排放，低能耗优势成为交通运输领域绿色转型的核心载体，而充电桩的普及程度与使用效率直接决定电动汽车的应用体验。然而，在冬季低温环境或高纬度地区，充电桩充电效率大幅度下滑，不仅提高了充电时长，加大用户等待成本，而且有可能导致电池寿命损耗，严重影响电动汽车的市场接受度 [1]。低温环境对充电系统的影响是多维度，深层次的，它涉及电池电化学特性，充电桩硬件性能，能量传输过程等多个环节的协同作用。

现有相关研究多集中于单个环节优化，缺乏系统整体的剖析。因此,深入探究低温环境下充电桩充电效率的制约机理，构建多维度协同的提升方案，对于完善电动汽车充电基础设施，推动电动汽车产业高质量发展具有重要的现实意义 [2]。

2 低温环境对充电桩充电效率的影响机理

2.1 电池低温特性对充电效率的基础性制约

低温锂电池采用特殊材料和工艺制成，能够在零下 50 摄氏度的极端环境中保持稳定的放电容量和工作性能。此类电池不仅具有比能量高、循环性能好的特点，还广泛应用于军事装备、航空航天、极地科研等领域。其宽泛的工作温度范围和通过国际安全认证进一步提升了适用性。一方面，低温会引起电池电解液粘度升高，锂离子在电解液中的扩散速率降低，使电池负极不能及时吸收足量的锂离子，从而抑制充电电流的增加 [3]。另一方面，低温会增大电池内阻，如欧姆内阻、极化内阻等，充电时更多的电能转化为热能损耗，

【作者简介】王芳（1979–），女，中国北京人，本科，从事计量检测研究。

不仅降低了能量利用效率，也可能因热积累而产生安全隐患。此外，低温下电池的可用容量会发生暂时性的衰减，为了避免过充损伤，BMS 会自动降低充电功率上限，间接延长了充电时间，表现为充电桩充电效率的降低。

2.2 充电桩核心组件低温性能衰减

充电桩作为能量转换与传输的核心设备，其内部功率模块，控制单元等关键组件的工作性能对温度非常敏感。低温环境下，充电桩功率模块中的绝缘栅双极型晶体管，金属氧化物半导体场效应晶体管，MOSFET 等电力电子器件的开关特性会发生变化，开关损耗显著增大，使得能量转换效率下降。同时，控制单元中的微处理器，传感器等元件在低温下响应速度变慢，可能出现信号传输延迟或者检测精度下降的问题，影响充电过程的闭环控制效果，进而导致充电电流，电压的稳定性不足，降低整体充电效率。此外充电桩内部的电容，电感等无源元件在低温下参数会发生漂移，破坏电路的阻抗匹配状态，加剧能量损耗 [4]。

2.3 充电接口与传输线路的低温损耗加剧

充电接口与传输线路是充电桩与电动汽车联接的重要节点，低温时损耗大幅度提高。一方面，低温会使导线的电阻值升高，根据焦耳定律，电阻越大线路传输过程中的热损耗就越大，这在大电流充电场合表现得更为明显。另一方面，低温环境下，充电接口处的金属触点易出现氧化，凝露等现象，致使接触电阻增大，不仅增加了局部能量损耗，而且会造成触点发热，接触不良等现象，影响充电功率的稳定输出。此外，若充电线缆缺乏有效的保温防护，低温会导致线缆柔韧性下降，内部导体与绝缘层之间可能出现微小间隙，进一步增加传输损耗，降低充电效率。

3 低温环境下充电桩充电效率的关键制约因素

3.1 电池活性衰减的本质性制约

电池活性衰减是低温下充电效率下降的根本原因。低温不仅抑制了电池内部的电化学反应速率，还导致电池正极材料的锂离子脱嵌能力下降、负极嵌锂容量减少，使得电池的充放电性能大幅降低。更为关键的是，电池管理系统（BMS）在低温环境下的保护策略会进一步限制充电效率。为避免电池出现锂析出、极化过大等损伤，BMS 会自动降低充电截止电压、限制最大充电电流，这种保护性限制虽然保障了电池安全，但也直接导致充电功率无法达到设计峰值，延长了充电时长。此外，长期在低温环境下充电会导致电池循环寿命下降，形成“低温充电效率低—充电时间长—电池损耗加剧”的恶性循环。

3.2 充电桩热管理系统的功能性缺失

当前多数充电桩的热管理系统设计未充分考虑低温环境的使用需求，存在明显的功能性缺失。一方面，充电桩内部功率模块在充电过程中会产生大量热量，但低温环境下的散热系统与保温设计缺乏协同，导致模块温度过低时无法快速升温至最佳工作区间，而温度升高后又可能因散热过度导致温度波动过大。另一方面，充电桩的热管理多采用被动散热方式，缺乏主动加热与恒温控制功能，在极端低温条件下，内部组件温度难以维持在正常工作范围，导致性能衰减。此外，热管理系统与充电控制单元之间缺乏联动，无法根据环境温度、充电功率等参数动态调整热管理策略，进一步降低了充电桩在低温环境下的适应性。

3.3 充电协议的低温适配性不足

充电协议作为充电桩与电动汽车之间的通信桥梁，其低温适配性不足是制约充电效率的重要因素。当前主流的充电协议（如 GB/T 18487.1、CCS 等）虽明确了充电过程的通信规范，但未针对低温环境制定专项适配策略。低温下，电池状态参数（如 SOC、内阻、温度）的变化速率加快，而传统充电协议的参数采样频率与调整周期无法及时响应这些变化，导致充电功率的调整滞后于电池实际状态。同时充电桩和电池管理系统的信息交互也存在延迟，充电桩不能准确地获取电池的实时需求，只能按照固定的充电曲线输出功率，难以实现最优充电策略，影响充电效率。另外，低温进一步降低了不同品牌电动汽车与充电桩之间的协议兼容性，容易产生充电中断，功率骤降等问题。

4 低温环境下充电桩充电效率提升的技术路径

4.1 电池预热技术的优化升级

电池预热是电池低温充电最核心的措施，要通过主动预热和被动保温相结合的方法将电池温度提高到 15-30° C 的最佳工作区间。主动预热技术可以采用电池包内置加热膜或液冷加热系统两种方式：加热膜通过电加热方式直接对电池单体加热，升温速度快，成本低，并且可以通过 BMS 控制加热功率，避免局部过热；液冷加热系统则通过冷却液的循环加热实现电池包的整体升温，温度分布均匀，适用于大容量动力电池。被动保温技术可以在电池包的内部加入高效保温材料如聚氨酯泡沫、气凝胶等，减少热量损失，同时电池包的结构设计得更合理，减少热传导损耗。此外，还可以将充电桩与电池预热系统联动，在充电前由充电桩为电池提供预热电源，做到“预热 - 充电“一体化，减少充电总时间。

4.2 充电桩热管理系统协同改进

构建“加热 - 保温 - 散热“协同的主动热管理系统，是提升充电桩低温性能的关键。一方面，在功率模块，控制单元等核心组件处附加 PTC 加热器或电热丝，通过温度传感器实时监控组件温度，当温度低于最佳工作区间时自动启动加热，保证组件快速升温。另一方面，优化散热系统设计，将可调速风扇与散热片组合起来，根据组件温度来动态调节散热功率，避免在低温下散热过度。同时，在充电桩外壳内侧加入保温隔热层，采用聚氨酯硬泡等高效保温材料，减少内部与外界的热交换。此外，建立热管理系统与充电控制单元的联动机制，根据环境温度、充电功率、组件温度等多参

数动态调整热管理策略，实现温度的精确控制，维持组件的最佳工作温度范围。

4.3 充电协议的低温适配优化

充电协议的通信机制与控制策略，优化其在低温下的适配性。首先，提高协议的参数采样频率与信息交互速率，将电池温度，内阻，SOC 等关键参数的采样周期缩短至毫秒级，保障充电桩实时获取电池状态。其次，新增加低温专项控制策略，在协议中确定低温下充电曲线调整规则，如“分段恒流”充电模式，初期小功率预热电池，温度升高后逐步提升充电功率，避免由于功率太高电池极化过大。同时，优化充电桩与 BMS 的协同控制逻辑，建立动态功率分配机制，根据电池实时状态调整输出功率，实现最优充电。

4.4 低温专用充电桩的结构设计升级

针对低温环境的使用需求，对充电桩的结构、材料、接口进行专项设计升级。在结构设计上，采用全封闭结构，优化外壳密封性，减少冷空气进入；在充电桩内部设置独立的保温舱，将核心组件集中布置，通过主动加热与保温材料相结合的方式维持舱内温度。在材料选择上，外壳采用耐低温合金材料或改性工程塑料，线缆选用耐低温橡胶护套，确保低温下的机械性能与防护性能；核心组件选用宽温域型号，提升低温适应性。在接口防护上，采用双重密封结构，在充电枪与充电口内部添加加热元件，防止凝露结冰；优化触点设计，采用镀金或银合金触点，降低接触电阻，提高导电性。

5 低温环境下充电桩充电效率提升的实践优化方案

5.1 充电场站的低温适配布局

在低温地区的充电场站布局中，充分考虑环境因素对充电效率的影响。首先，优先选择背风，向阳的场地建设充电场站，利用自然光照与地形减少寒风侵袭，降低环境温度对充电桩的影响。二是合理规划充电桩安装密度，避免充电桩之间的气流干扰，也便于集中供暖或者保温措施的实施。对于户外充电桩，采用集群式安装，在充电桩群周围增加防风保温屏障，内部增加集中加热装置，形成局部温暖区域。此外，在充电场站设置移动保温棚、充电枪保温套等应急保温设施，为极端低温天气下的充电提供保障。

5.2 充电流程的智能化调控

结合物联网和人工智能技术，实现充电流程智能化调控，提高低温下充电效率。首先，开发充电桩智能监控平台，实时监测环境温度，充电桩状态，电池状态等参数，为充电策略调整提供数据支持。其次，打造“预约充电+智能预热“模式，用户可以通过 APP 预定充电时间，系统根据预定信息提前启动电池预热和充电桩预热，使得充电开始的时候设备都在最优的状态下工作。同时，电池在不断地充电，充电时间和充电功率也会随着环境温度与电池的状态而不断的进行调整，从而避免无效充电的时间；当发现电池的温度过低时，会自动的增加电池的预热时间，然后等到电池的温度达到了要求后再启动正式充电。另外，建立充电数据反馈机制，通过分析低温下不同充电条件下的充电数据，持续优化充电策略。

5.3 运维管理的强化与完善

加强低温环境下充电桩的运维管理，是稳定充电效率的保障。首先，制定专项运维规程，加大低温季节巡检次数，重点检查充电桩加热系统，保温设施，接口密封等重要部位，及时发现故障，并及时修复。其次，建立组件定期更换制度，对在低温下易损耗的部件，如加热元件、密封件、触点等定期检查更换，保证设备性能。同时，加强运维人员专业培训，提高低温情况下的故障排查、应急处理能力。此外，建立用户反馈机制，及时收集用户在低温充电过程中遇到的问题，有针对性地优化充电桩性能与服务流程。

6 结语

低温环境下电动汽车充电桩充电效率的提升是一个系统工程，涉及电池，充电桩，充电协议，应用场景等多个维度的协同优化。由于低温引起电池活性衰减，充电桩组件性能下降，传输线路损耗增大，协议适配不足等问题，导致充电效率下降。通过电池预热技术升级，充电桩热管理系统优化，充电协议低温适配，专用结构设计升级等技术路径，结合充电场站布局优化，充电流程智能化调控，运维管理强化等实践措施，有效提高低温环境下的充电效率。

参考文献

[1] 朱玉豪,江盼.电动汽车空调热泵系统在低温环境下的性能研究[J].节能,2025,44(08):38-42.

[2] 李元栋,陈莹,禚爱红,柏齐,吴秀奇,李兰,许金峰.高低温环境下重型纯电动汽车阻力设定方法研究[J].客车技术与研究,2025,47(04):15-23.

[3] 罗文星.低温环境下电动汽车电池热管理系统动态控制策略研究[J].汽车测试报告,2025,(13):142-144.

[4] 毛毳,朱翔宇,赵志远.估计下降率评估方法在低温能量流优化试验中的应用[J].汽车与新动力,2025,8(01):56-63.

Exploration of artificial intelligence and Internet of Things in urban big data construction

Kexin Yin

Arkhorqin Banner Market Supervision and Administration Bureau, Chifeng, Inner Mongolia, 025550, China

Abstract

Against the backdrop of modern information technology development, urban construction has accelerated while generating massive urban data. To efficiently store and manage these urban data, optimized applications of artificial intelligence and Internet of Things (IoT) technologies are essential. These technologies enable deep learning and analysis of urban data, allowing precise prediction of urban operational status and development trends. Additionally, optimized IoT device applications facilitate real-time monitoring of various urban systems, thereby enhancing service quality. This article analyzes the practical applications of AI and IoT in urban big data infrastructure development, aiming to improve the efficiency of urban data construction and development, promote efficient urban construction, and provide technical support for building smart cities.

Keywords

artificial intelligence; Internet of Things; urban big data construction

人工智能和物联网在城市大数据建设中的应用探索

尹可欣

阿鲁科尔沁旗市场监督管理局，中国·内蒙古 赤峰 025550

摘　要

现代信息技术发展背景下，城市建设进程加快，且城市数据海量增加。为了对这些城市数据进行高效存储和应用管理，需要对人工智能、物联网技术进行优化应用，尤其可以实现城市数据的深度学习和分析，进而精准预测城市运行状态和发展趋势；此外还可以对物联网设备进行优化应用，实现城市各类系统设备的实时监控，促进城市服务质量的提升。文章主要对人工智能和物联网在城市大数据建设中的应用实践进行分析，从而有效提升城市大数据建设和发展效率，推动城市建设的高效化开展，我智慧城市的建设提供技术支撑。

关键词

人工智能；物联网；城市大数据建设

1 引言

信息时代，人工智能、物联网技术在城市管理中的优化应用，能够进一步推动城市大数据建设，帮助城市管理者制定更加精准化、高效化的决策方案。其中，在城市建设中引入物联网、人工智能技术，能够构建追踪技术和感应技术系统，对城市通信、交通等各个领域的数据信息进行全面采集，为城市大数据建设提供支撑，进一步优化城市管理和服务质量。

2 人工智能、物联网在城市大数据建设中的应用特点

在城市大数据建设中，人工智能、物联网的应用存在以下特点：海量性，对城市大数据挖掘和分析后，可以通过人工智能的模拟功能，在互联网的支持下，促进多源数据连接，进而利用大数据终端处理对经过处理厚度数据进行可视化呈现；空间性，在物联网技术、人工智能技术、大数据技术的联合应用下，可以通过 GPS 系统对海量城市数据进行综合性采集和存储，并在数据分析系统的支持下，全面分析数据城市数据特征，为城市建设规划和设施配置提供数据依据[1]。但在城市大数据建设中还存在一定的问题，如隐私保护不足，物联网强化了大数据的连通性，且存储量较大，一旦管理不规范，会引起城市数据泄露现象，造成严重后果；此外数据缺乏代表性，且数据获取渠道较为广泛，代表性、真实性较为欠缺，难以保障数据样本的时效性，甚至降低数据分析结果准确性。

【作者简介】尹可欣（1989–），女，中国内蒙古赤峰市，本科，工程师，从事电子工程研究。

3 人工智能、物联网在城市大数据建设中的应用原则

3.1 数据安全

在城市大数据建设中需要保障数据安全性，强化数据隐私性，避免出现泄漏，尤其要健全数据采集、存储、传输和使用机制，并实施严格的数据安全措施，进而促进城市数据的安全性、实用性和隐秘性，此外还需要强化个人隐私保护，以便对城市数据进行合法合规使用。

3.2 数据开放

在城市大数据建设中需要保障数据共享性，并增加数据开放程度，尤其要健全城市数据共享平台，利用多样化的方式，促进数据共享和高效利用，如增加开放数据接口、共享数据资源等。为了实现多源城市数据的集中管理和即时共享，需要促进数据标准化与规范化管理，进而强化城市数据准确性和可比性。

3.3 数据治理

在城市大数据建设中，需要完善数据管理机制，优化监管体系，尤其要组建专门的城市数据管理部门，建立健全城市数据管理规章制度，强化城市数据监管力度，优化数据质量效果，促进城市数据的合法性、合规性和安全性使用[2]。

3.4 数据创新

在人工智能技术与物联网技术的支持下，能够对城市数据深度学习和分析，进而挖掘城市数据内在价值。同时要创建智慧城市平台，并深度挖掘数据，实现城市大数据的创新利用，提高应用价值和效益。

3.5 数据生态

在城市大数据建设中，需要构建完善的城市数据生态系统，推动城市数据的多元化、协同化发展，进而优化城市数据交换和共享机制，真正实现城市数据的互联互通。要构建长效化的城市数据管理和服务体系，推动城市数据的可持续发展，为城市建设发展创建良好条件。

4 人工智能、物联网在城市大数据建设中的应用要点

4.1 人工智能的应用

构建智慧城市平台，即在人工智能技术支持下，构建智慧城市平台，以便对城市数据进行统一汇集和智能分析，进而提升城市数据的应用效率。（2）数据挖掘和分析，在大数据挖掘技术和分析技术的支持下，对多维城市数据进行深度挖掘和筛选，提炼有价值的信息，为后续城市管理和决策提供数据支持。（3）预测城市运行状态，在人工智能技术支持下，可以实现城市数据的深度学习和分析，以便精准预测和评估城市运行状态和发展趋势，进而促进城市管理决策的科学性开展。（4）完善城市智能交通系统，即在人工智能技术支持下，全天候动态监控城市交通流量，进而强化城市交通服务质量。（5）强化城市智慧环保，即在人工智能技术支持下，实时监控城市环保数据，进而优化城市环保服务质量。

4.2 物联网的应用

（1）城市设备互联，在物联网技术支持下，能够全天候监控城市各类设备，提高城市服务的质量。（2）城市智慧能源管理，即在物联网技术支持下，实时监控城市能源数据，进而优化城市能源利用率，强化节能减排效果。例如，在城市智能电网建设中引入物联网技术，对多种技术进行联合应用，进而动态检测各个地区的用电情况，然后再大数据技术的联合应用下，对电力传输系统进行优化管理，提高资源利用率，促进国家电网正常运行[3]。在具体应用中，需要通过物联网的远程接入功能，在 GPRS 网络与互联网的支持下，确保远程无线接入端与集中控制端的有效连接。其中远程接入模式如图 1 所示。（3）城市智慧医疗系统，医疗问题是城市建设管理的难题之一，在医疗领域引进物联网技术，可以对医疗资源进行优化整合，构建完善的医疗信息库，进而提高医疗资源利用率，推动医疗系统的智慧化建设，有效提升城市医疗服务质量。

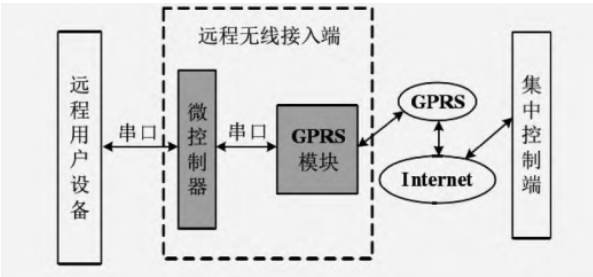

图 1 远程接入模型

5 人工智能和物联网在城市大数据建设中的应用实践

5.1 构建城市安防大数据系统

人工智能和物联网技术在城市大数据建设中的应用，能够进一步优化城市医疗、交通、旅游等行业的管理方式，强化整个城市的治理能力，完善数据处理效率。通过技术应用，能够把大数据通入到城市建设发展的各个领域，改善居民生活水平，同时还能够助力构建城市安防大数据系统，优化分类城市安防数据，促进大数据采集工作的有序开展。信息时代，信息技术全面融入到城市建设中，尤其在人工智能技术、5G 网络的支持下，构建集成效应；人工智能技术推动大数据算法、大数据分析功能的优化应用，在物联网技术的支持下促进数据高效传输，真正实现正式智能化、高效化管理。在该技术支撑作用下，还能够构建更加完善的支撑体系，形成社区网络关了体系，优化城市综合治安防护体系等。由此可见，人工智能、物联网技术能够对分散化、格式多样化的大数据进行优化采集、整合和存储，并深度挖掘数据内在关联，全面发挥各类数据的价值作用。

5.2 精准定位城市需求

信息时代，人们的消费方式发生重大变化，线上消费逐渐成为人们消费的重要趋势。在此背景下，通过人工智能技术、物联网技术对消费者的线上消费行为进行深度挖掘和分析，全面了解消费者的购买喜好、倾向等，进而制定针对性、精准性的营销政策，为智能零售业的长远发展提供技术支撑[4]。此外，物联网推动了云计算与人工智能的深度融合，尤其是 5G 技术的辅助作用下，能够为数字经济的发展提供动力支持，进一步加快了 5G 城市化建设进程。

5.3 一标三实综合大数据的使用

在该技术辅助作用下，能够对多层次、多维度的数据进行全面采集，并构建城市安防大数据库，实现各类数据的精细化管理。在大数据安防系统中融入一标三实数据，再加上人工智能技术的支持下实现深度融合，进而保障更加精确化的数据管理工作，促进各类城市数据的智能化、精准化管理。该类大数据在城市末端管理中发挥了重要作用，能够帮助城市管理者精准定位研究方向，严格控制细枝末节。如在城市管理中引进一标三实大数据，能够更加更加完善且智能化的人口信息管理系统，帮助城市管理者打击犯罪，强化城市治安管理效果，保障城市居民安全。由此可见，该数据的应用，能够进一步强化大数据的分析功能，且在神经网络的支持作用下，形成高层次的神经网络系统，同时构建数据输入模型，明确输入模式，强化数据权值共享，全面提高数据模型的研究和判断能力。其中，一标三实综合大谁研判系统如图 2 所示。

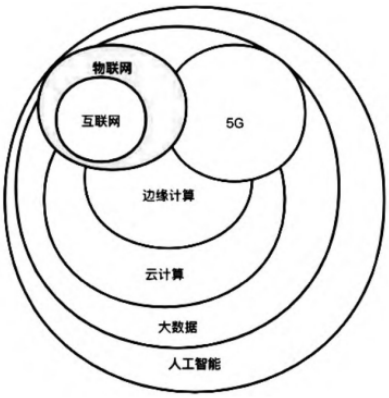

图 2 一标三实综合大谁研判系统

5.4 无线网络传感器技术

该技术的优化应用，能够帮助解决城市网络安全问题。其中，网络传感器的网络加密能力较强，能够加密处理传输过程的数据，提高传输效率，保障数据安全。常见的加密方法为同态加密，即在物联网技术辅助作用下，通过同态加密锁可以对数据传输渠道进行加密，且数据接收者还可以利用密码锁对加密数据进行精准运算，有效抵抗外界因素的干扰。同时，该技术还具备较强的权限管理能力，避免用户隐私数据被泄露。

6 人工智能和物联网在城市大数据建设中的发展趋势

在未来，人工智能在城市管理中的应用，进一步推动了智慧城市的建设和发展，尤其可以通过城市数据深度学习和分析，强化城市的智能化管理，进一步创新城市管理和服务方式方法；此外还能够充分发挥机器学习的价值作用，通过大数据分析和模式识别，促进城市数据的自动化处理和分析，优化城市数据应用价值；在未来发展中，物联网设备逐渐在城市管理中普及管理，如智能路灯、智能停车场等，成为城市大数据建设的重要推动力；为了对物联网设备产生的海量数据进行存储和处理，需要将其与云计算技术相结合，进一步提高城市数据利用价值；未来发展中，5G 技术与物联网技术结合使用，能够实现物联网设备的实时监控，提高数据传输速度，有效提升城市服务质量[5]。

7 结语

综上所述，在城市大数据建设中引进人工智能技术、物联网技术，能够促进城市数据的多元化、协同化发展，有效提升城市管理和服务质量，实现城市大数据建设的智能化、高效化发展。

参考文献

[1] 李万华. 人工智能与大数据融合下的GIS+BIM技术在城市建筑空间运维用户体验提升中的应用设计[N]. 山西科技报, 2025-09-19 (014).

[2] 张海燕,葛钰,焦玉麒,等. 人工智能、大数据等数字化技术在城市电网中应用[C]// 中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网（苏州）城市能源研究院. 2024（第二届）城市电网技术创新会议论文集. 内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海供电分公司;, 2024: 191-193.

[3] 李根,王成功. 人工智能、物联网在城市大数据建设中的应用[J]. 无线互联科技, 2022, 19 (14): 22-24.

[4] 曹新民. 人工智能与大数据平台在城市规划建设中的协调应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019, (14): 13.

[5] 王海峰. 人工智能、物联网在城市大数据建设中的发展与应用[J]. 中国安防, 2019, (Z1): 74-77.

Research on Low-altitude Network Deployment Strategies of Operators

Shaohua Huang

China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou, Guangdong, 510510, China

Abstract

The low-altitude economy is developing rapidly under the vigorous promotion of the state, and major telecommunications operators are actively exploring low-altitude economy as a new growth point for revenue. How to Deploying low-altitude networks poses a challenge for operators. Recent studies and experiments have successfully tested and verified the coverage capability of 3.5G NR technology at low altitudes, particularly in scenarios involving drones and other low-altitude communication needs., The study explores the coverage capabilities of 5G networks operating on the 4.9 GHz frequency band, utilizing link budget analysis to assess both outdoor and indoor scenarios., and then builds a comprehensive evaluation model from the dimensions of perception capability, cost, and industrial chain to evaluate and analyze different network construction methods. Finally, it outputs deployment strategy suggestions for low-altitude networks based on different business needs and network conditions. It assists operators in constructing low-altitude networks that offer extensive coverage, high performance, and cost-efficiency for the development of low-altitude business.

Keywords

Low-altitude network; cost; Millimeter wave.

运营商低空网络部署策略研究

黄少华

中国联通广东省分公司，中国·广东 广州 510510

摘　要

随着国家政策的大力支持和市场规模的不断扩大，低空经济正快速发展。各大电信运营商积极探索低空经济，将其作为收入的新增长点。如何部署低空网络，是运营商面临的难题。本研究首先测试验证了3.5G NR在低空的覆盖能力，通过链路预算分析了4.9G NR和毫米波的覆盖能力，再从通感能力、成本、产业链等多个维度构建综合评价模型，对不同建网手段进行系统评估分析。最终，输出基于不同业务需求和网络现状的低空网络部署策略建议。助力运营商构建面向低空业务发展、覆盖优良、性能卓越、成本低廉的低空网络。

关键词

低空网络；成本；毫米波

1 引言

2024 年全国两会首次将低空经济纳入政府工作报告，标志着其作为新增长引擎的重要性。31 个省级政府（包括自治区、直辖市）相继发布关于发展低空经济的文件，围绕应用场景、技术创新、产业链条出台相关政策和奖补措施，为低空经济提供了有力的支持。在此背景下，各大电信运营商积极探索低空经济作为收入的新增长点。如何部署覆盖优、成本低的低空网络，是运营商面临的难题。

目前对低空网络部署策略还处于摸索阶段，对运营商的整体部署策略研究还存在不足。张琳等发表的论文主要针对地面与空中网络的不同 QI 配置及参数展开分析。杨旭伟等发表的论文对 4.9G 覆盖低空展开分析。

【作者简介】黄少华（1973–），男，中国湖南桃江人，硕士，工程师，从事广东联通无线配套建设及管理研究。

2 低空网络主要解决方案分析

鉴于运营商低空经济业务尚处于起步阶段，其部署低空网络的关键在于充分发挥既有地面通信网络的优势，制定合理的制式策略，以构建一张成本低、覆盖优且支持网络演进的低空网络。下面对低空网络主要解决方案进行分析：

2.1 波束赋形提升垂直覆盖角度

波束赋形基于波的相长干涉与相消干涉原理，通过调整天线阵列的相位和幅度，在频率相同的两列波叠加时，使信号发射至叠加区域的振动增强，进而提升信号的接收质量与覆盖范围。

以 3.5G NR 64TR 的 AAU 为例。通过 Massive MIMO 波束赋形技术的加持，使得 AAU 发射信号在垂直方向上最大可以实现 4 层子波束的设置，AAU 垂直覆盖倾角达

到 -2° ~13° 。利用 AAU 的垂直方向大张角的特点，为利旧现网 AAU 兼顾覆盖地面和低空网络提供基础。

2.2 地空同频覆盖方案分析

2.2.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，通过软件调整波束倾角，使上旁瓣覆盖低空区域，下旁瓣覆盖地面区域，低空与地面采用相同频率的载频，且地面与空中的载频 SSB 频点保持对齐。

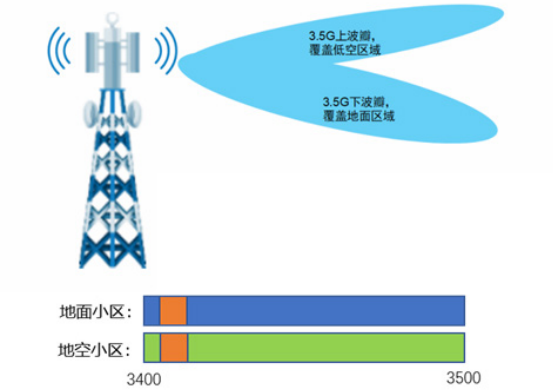

图 1 地空载波同频站点示意图

2.2.2 结果分析

经过测试分析，采用地空同频部署方案后，低空区域出现信号杂乱、信号强度高但质量较差、网络频繁切换以及低速率占比高的情况。地面大网覆盖效果下降，用户体验质量降低。

低空测试。低空测试显示了良好的覆盖性能，其中 SS-RSRP 的平均值为 -79.18dBm，SS-RSRP ≥ -90dBm 占比 100%。低空网络信号质量较差：SS-SINR 均值为 -1.83dB，且 SS-SINR < -3dB 的占比为 34.63%。低空网络上行速率测试结果较低：平均速率为 48Mbps，其中上行速率小于 10Mbps 的采样点占比为 24.07%。

低空网络存在严重的重叠覆盖问题，异常事件频发：测试期间，测试终端共占用了 76 个小区的信号，服务小区切换次数高达 475 次。电平差在 6dB 以内的邻区数量普遍达到 6 至 12 个，上下行干扰严重，导致频繁切换、RRC 重建事件高发。共发生异常事件 113 次，其中 RRC 重建 71 次。

地面大网的影响。波束优化方案实施后，测试区域地面的网络基础接入、掉话、切换等关键指标保持平稳，但用户数量、流量以及体验速率均出现下降。其中，用户数下降 3.79%，上行流量下降 3.34%，下行流量下降 4.06%；用户上行速率下降 0.19Mbps（相对下降 8.2%），用户下行速率下降 2.88Mbps（相对下降 3%）。

2.3 地空同频、SSB 错频覆盖方案分析

2.3.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，通过软件调整波束倾角，使上旁瓣覆盖低空区域，下旁瓣覆盖地面区域；低空与地面的载频采用相同频率，而地面与空中的载频 SSB 频点则采用错频配置。将覆盖低空的小区 SSB 频点由 7783 调整为 7788（频点间隔 7.2MHz）。示意图如下：

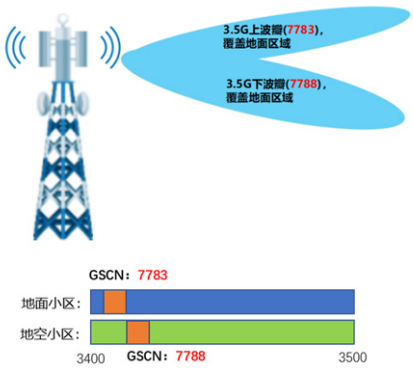

图 2 地空载波同频 SSB 错频站点示意图

2.3.2 测试分析

经测试，低空区域的广播信道 SINR 得到显著改善，但低速率占比的提升并不明显，同时上行平均速率出现了一定程度的恶化。对地面大网的上、下行速率均有一定负面影响。

低空测试。低空广播信道 SINR 得到大幅改善：测试终端的 SS-SINR 均值提升 7.57dB，SS-SINR 低于 -3dB 采样点占比改善 19.62PP，SS-SINR 低于 -3dB 的采样点占比仅 0.8%。

低空上行平均速率下降但低速率得到改善：测试终端的平均速率下降 4.95Mbps，相对下降 7.59%。测试终端上行低速率占比小幅改善，低于 10M 占比改善 2.02PP。

地面大网的影响。通过 SSB 错频，地面网络测试的体验速率相较于同频同 SSB 方案出现下降。测试终端上行体验速率下降了 0.4Mbps，相对下降 11%；用户下行体验速率下降了 19.6Mbps，相对下降 19%。其主要原因是上行干扰抬升、远点用户增加。

2.4 地空异频覆盖方案分析

2.4.1 方案介绍

低空与地面共用现网 64TR 的 AAU 硬件射频，软件调整波束倾角，上旁瓣覆盖低空，下旁瓣覆盖地面，低空与地面开通相同频率的载频，低空与地面大网采用不同的频段进行覆盖。

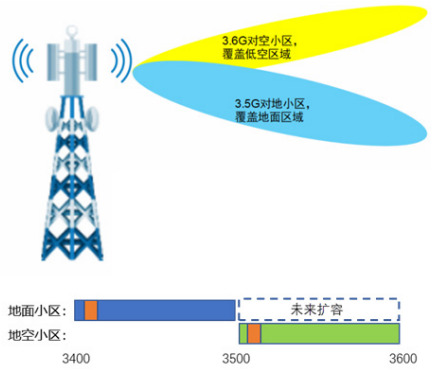

图 3 地空载波异频示意图

2.4.2 结果分析

该方案的整体覆盖和上行速率均良好，但仍存在少量重叠覆盖和越区覆盖的问题。短期内，低空覆盖小区对地面影响较小；未来随着地面二载波扩容，低空受地面干扰将逐步增强，性能亦会随之下降。

低空测试。低空网络覆盖状况良好：测试显示，SS-RSRP 均值达到 -77.95dBm，且 SS-RSRP ≥ -90dBm 的采样点占比高达 100%。低空网络信号质量较优：测试结果表明，SS-SINR 均值达到 11dB，且 SS-SINR ＞ -3dB 的采样点占比为 100%。低空网络上行速率表现良好：测试数据显示，上行平均速率达到 103.9 Mbps，且上行速率≥ 25Mbps 的采样点占比高达 99.32%。

地面大网的影响。地空异频覆盖实施后，对大网的影响较小，地面网络的覆盖、用户速率及信号质量均变化不大。地面网络的用户上行 SS-SINR 提升 0.16dB，MR 弱覆盖采样点比例提升 0.19%，用户上行体验速率提升 0.22Mbps。

2.5 新建 3.5G 方案分析

2.5.1 方案介绍

前述三种方案均基于利旧现网 AAU 实施，而新建射频方案则是构建一套独立的 AAU 系统，可实现机械下倾角的灵活调控，根据实际需求进行向上覆盖，且对现网影响较小。软件上地面与低空采用不同载频。

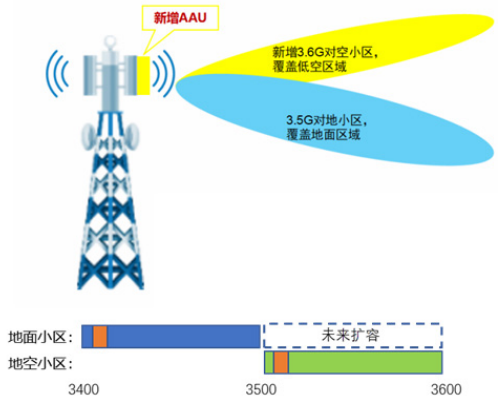

图 4 新建 3.5G 的地空载波站点示意图

2.5.2 结果分析

通过测试数据分析，采用新建 3.5G 专网进行低空覆盖的方案，地面与空中的信号覆盖强度、质量及用户速率均达到较高水平。

低空测试。覆盖良好：测试的 SS-RSRP ≥ -105dBm 采样点占比达到 87.8%。信号质量较好：测试的 SS-SINR >-3dB 采样点占比达到 99.97%。上行速率较好：测试的上行平均速率 82Mbps，上行速率≥ 20M 采样点占比达到 62%。

地面大网的影响。低空终端与地面用户的空口资源相互独立，地面的覆盖、信号质量及用户速率均与原地面网络保持一致。随着地面网络用户的增加，地面网络需要开通第二载波，将对低空网络带来干扰。

2.6 成本和造价分析

基于不同频段对低空网络的不同部署方案，对由建设成本和运营成本构成的 7 年总拥有成本（TCO）进行综合评估。经分析，通过新建毫米波部署低空网络的 7 年 TCO 最高，达到 48.9 万。通过共用 3.5G 现网射频资源，且低空载频与现网同频，无需新增成本。

表 1 不同建设方式造价表

频段	建设方式	7 年 TCO				
		CAPEX（万）	OPEX（万元 / 年）			合计
			租金	电费	小计	
900M	新建射频	8.5	0.4	0.5	0.9	14.8
1.8G	新建射频	9.4	0.4	0.6	1.0	16.4
2.1G	新建射频	10.5	0.4	1.0	1.3	19.8
3.5G	载频同频、SSB 同频	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	载频同频、SSB 错频	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	射频利旧、载频异频	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1
	新建射频、载频异频	23.2	0.4	1.9	2.2	38.8
4.9G	新建射频	30	0.4	2.0	2.4	46.8
毫米波	新建射频	40	0.4	0.9	1.3	48.9

备注：建设成本和运营成本参考某省经验值

2.7 综合对比分析

综合对比不同建设手段的成本、低空网能力、对地面网影响以及产业链的成熟度情况。各种建设策略均存在差异化的优劣势表现。低频射频因垂直倾角较小，存在覆盖盲区；3.5G 无论是利旧现网射频还是新增射频，均会对地面网络产生干扰；4.9G 和毫米波对地面网络的干扰影响较小，但造价相对较高。

3 低空网络策略建议

鉴于不同建设手段的造价、产业链成熟度、覆盖能力存在差异，以及低空经济对网络需求尚处于起步阶段，建议低空网络应根据业务需求和网络现状，采取差异化的部署策略。在确保总体拥有成本（TCO）最优化的同时，满足业务发展的需求，并确保不影响现有网络的效能。低空网络部署策略建议如表 3 所示。

4 结语

低空网络需结合业务需求和网络现状，差异化地选择部署策略。目前，共用 3.5G 现网射频、实现低空载频同频是较为经济的解决方案。毫米波是未来低空网络部署的重要手段，但当前毫米波的牌照未发放，仍需推动毫米波产业链的发展，同时也要加大毫米波试点测试，积累经验助力运营商打造一张效能高、用户体验好、投资成本低的 5G 低空精品网。

表 2 不同建设方综合对比

频段	建设方式	成本（万元）	低空网				地面网	产业链
			通信（覆盖）			感知能力		
			强度	盲区	干扰		影响	
900M	新建射频	15	强	有	弱	否	低	成熟
1.8G	新建射频	16	强	有	弱	否	低	成熟
2.1G	新建射频	20	强	有	弱	否	干扰	成熟
3.5G	SSB 同频	0	中	无	强	否	干扰	成熟
	SSB 错频	0	中	无	强	否	干扰	成熟
	载频异频	6	中	无	强	否	干扰	成熟
	新建射频	39	中	无	中	否	干扰二载	成熟
4.9G	新建射频	47	中	无	无	是	无	起步
毫米波	新建射频	49	弱	无	无	是	无	牌照未发

表 3 低空网络部署方案对比

业务需求		现网情况	方案策略建议
需求	规模		
通信	少量	3.5G 单载波	3.5G 地空异频
		3.5G 双载波 / 无 3.5G 区域	新建 4G 中频
	较大	3.5G 单载波	3.5G 地空异频
		3.5G 双载波 / 无 3.5G 区域	新建 3.5G 对空
通感	-		4.9G 或毫米波

参考文献

[1] 张琳，张涛.5G公网兼顾低空覆盖方案及性能测试[J].邮电设计技术，2024（1）：54-60.

[2] 杨旭伟。5G低空覆盖专网方案设计及实践。江苏通信，2024（10），19-22.

[3] 段慧成等。关于5G基站SSB波束场景化应用研究。长江信息通信，2021（08），130-133.

[4] 孙怡婷, 丁杰, 范凌. 5G建网初期SSB波束设置策略[J]. 移动通信, 2022, 46(2): 85-88+100.

[5] 王晓海. 毫米波通信技术的发展与应用[J]. 电信快报, 2007, 7(10): 18-19.

[6] 王绍江. 5G毫米波智能波束管理[J]. 无线通信, 2018, 18(11): 7-8.

[7] 庞明慧, 台鑫, 吕崇玉, 等. 面向5G无人机通信场景的传播路径概率预测模型[J]. 电波科学学报, 2023, 38(1): 54-62.

[8] 3GPP.Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz:3GPP TR 38.901[S/OL].[2023-07-10]. ftp://ftp.3gpp.org/Specs/

[9] 王婷.全国首个4.9GHz频段5G低空全域覆盖专网落地无锡[N].人民邮电报，2023-06-16.

[10] 李贝。5G 网络 SSB 1+X波束技术应用研究。电信科学。2022（1）。150-158

[11] 尤肖虎，潘志文，高西奇等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术[J].中国科学:信息科学，2014,44(5):551—563.

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8118

Research on Computer Network Security Situation Awareness Model Based on Big Data

Taiwen Xiao

Digital Government Operation Center, Haizhu District, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

In the context of the information age, computer networks have widely penetrated into all levels of society and become a key channel for information transmission. However, with the continuous development of network technology, network security issues have become increasingly prominent, and network attacks and security incidents occur frequently. In order to effectively solve these problems, timely and accurate monitoring and management of network security status is required. This study develops a network security situational awareness model utilizing big data technology. This model analyzes and processes massive network data to achieve real-time monitoring of network status and prediction of potential threats, providing solid technical support for network security defense. The model integrates cutting-edge data mining and machine learning technologies to conduct a comprehensive analysis of various data sources such as network traffic, log files, vulnerability information, etc., and establishes a multi-level

Keywords

Big data; Network security; Situational awareness; Data mining; Machine learning

基于大数据的计算机网络安全态势感知模型研究

萧太文

广州市海珠区数字政府运营中心，中国·广东 广州 510000

摘　要

在信息化时代背景下，计算机网络已广泛渗透至社会各个层面，成为信息传递的关键途径。但是，随着网络科技的不断发展，网络安全问题日益突出，网络攻击和安全事件频繁发生。为了有效解决这些难题，需要对网络安全状态进行及时、准确的监控和管理。本研究开发了一种利用大数据技术的网络安全态势感知模型。该模型通过分析处理海量网络数据，实现对网络状态的实时监控以及对潜在威胁的预测，为网络安全防御提供了坚实的技术支撑。模型整合了前沿的数据挖掘与机器学习技术，对网络流量、日志文件、漏洞信息等多样数据源进行全面分析，建立了一个多层次、多维度的网络安全态势感知框架。为检验模型的效能，此项研究以某一中职学校校园网为案例，执行了实验分析。结果显示，该模型大幅提升了网络安全态势感知的精确性和实时性，为网络安全管理供给高效的技术工具。

关键词

大数据；网络安全；态势感知；数据挖掘；机器学习

1 引言

在信息技术的促进下，计算机网络已成为现代社会生活的关键部分。然而，网络环境的开放性和复杂性也带来了许多安全问题，如网络攻击、数据泄露、恶意软件等。这些安全问题不仅危及个人隐私和财产安全，也对国家安全和社会稳定构成了严峻考验。为有效应对这些难题，我们需要对网络环境的安全状况进行即时、精确的感知和管理。网络安全态势感知正是此类技术，它通过即时监控、解析和预测网络环境中的安全事件和威胁，帮助我们及早发现和应对潜在的安全威胁。

随着网络攻击方式的不断演变和网络规模的持续扩展，传统的网络安全防护技术已难以适应当前的安全需求。传统的安全防护技术常依赖于静态的防护策略和规则，无法应对动态变化的网络环境和多元化的攻击方式。因此，探索基于大数据的网络安全态势感知模型，对于提高网络安全防护水平具有关键意义。大数据技术的进步为网络安全态势感知带来了新的机会。通过解析处理巨量的网络数据，我们可以更全面、深入地掌握网络环境的安全状况，从而制定更高效的安全防护策略。

2 相关工作

态势感知的理念最早由 Endsley 在 1988 年提出，其核心理念是通过感测环境、认知环境和预判环境来实现对态势

【作者简介】萧太文（1988–），男，中国广东茂名人，硕士，工程师，从事计算机技术、网络工程、电子与通信工程研究。

的全面理解。在网络安全领域，态势感知主要关注网络环境中的安全事件和威胁。近年来，随着大数据技术的发展，研究人员开始研究如何利用大数据分析技术增强网络安全态势感知的能力。一些研究已经获得了一定成果，譬如基于机器学习的异常检测算法、基于数据挖掘的攻击模式识别方法等。这些研究为本文提出的模型提供了关键参考和学习。

3 网络安全态势感知模型

3.1 模型架构

本文提出的网络安全态势感知模型主要包含数据采集层、数据处理层、态势分析层和决策支持层四个部分。数据采集层用于收集网络中的各类信息，包括网络流量、系统日志、安全日志等。这些数据构成模型进行分析的根基，也是模型能够精确感知网络安全态势的关键要素。数据处理层对采集的信息进行清理、转换和储存。由于网络数据通常具备庞大、复杂和异构等特性，因此数据处理层需采用高效的数据处理手段来确保数据的品质和可用性。态势分析层借助数据挖掘和机器学习技术对数据展开分析，抽取安全态势特征。这些特征映射出网络环境的安全状态，是模型执行态势感知的核心环节。决策支持层依据分析结果给出安全决策建议。这些建议可协助网络安全管理人员制定高效的安全防御策略，提升网络安全防护水准。

3.2 关键技术

3.2.1 数据采集技术

采集技术。数据采集技术主要包括网络流量捕获、日志收集和漏洞扫描等。

网络流量捕获技术的核心功能通过抓取网络接口数据包实现全流量镜像，支持从物理层到应用层的协议解析（如 HTTP/HTTPS、TCP/IP、工业 Modbus 等），技术优势是实时捕获与离线分析结合，支持毫秒级延迟处理，深度包解析（DPI）能力可识别加密流量特征，典型应用：异常流量检测、网络性能优化、工业控制协议监控

日志收集技术支持操作系统日志（Syslog）、应用日志（如 Apache/Nginx）、数据库审计日志的统一采集，关键技术：分布式架构（如 Fluentd、Logstash）实现高并发日志处理；

日志归一化技术将异构数据转为结构化格式，场景案例：安全事件溯源（如通过登录日志分析暴力破解行为）

漏洞扫描技术具备动态检测机制，主动探测目标系统端口与服务（Nessus 支持 65,000+ 漏洞检测项），结合 CVSS 评分量化风险等级，输出修复建议，扩展能力：支持与 CMDB 集成，实现资产 - 漏洞关联分析

采集工具。本文采用开源工具如 Wireshark、Syslog 和 Nessus 进行数据采集。这些工具具有功能强大、使用方便等特点，可以满足模型对数据采集的需求。

表 1 开源工具的技术特点与选型依据

工具	核心能力	适用场景	性能指标
Wireshark	支持 1,000+ 协议解析，实时流量可视化；过滤表达式（如 tcp.port==80）精准定位数据包	网络故障诊断、工业协议分析	10Gbps 网络吞吐量
Syslog	轻量级日志转发协议，支持 RFC 5424 标准；与 Rsyslog/Syslog-ng 集成实现日志聚合	集中化日志管理、合规审计	单节点 10 万条 / 秒处理
Nessus	插件化漏洞库（含 0day 漏洞检测），支持 SCAP 合规检查	系统安全基线验证、渗透测试	分钟级全网扫描

3.2.2 数据处理技术

数据管理技术包含数据清理、数据整合和数据保存等。本研究使用 Hadoop 生态系统中的 HDFS 和 MapReduce 进行海量数据处理。HDFS 是一种分散式文件系统，能够存储大量数据；MapReduce 是一种并行计算架构，可以高效处理分散数据。

3.2.3 态势分析技术

态势分析技术涵盖数据挖掘和机器学习方法，例如聚类方法、分类技术和关联规则发现等。本论文应用支持向量机 (SVM)、随机森林和神经网络等算法执行安全事件的分类与预测。这些算法具备良好性能和稳健性，能高效地分析网络信息并抽取安全态势特征。

态势分析技术通过整合多源异构数据（网络流量、日志、漏洞扫描结果等），结合数据挖掘与机器学习算法，实现对安全威胁的动态感知与预测。其核心流程包括：

数据层：整合实时流量（Wireshark 捕获）、系统日志（Syslog）、漏洞扫描结果（Nessus）等，形成多维度数据池。

特征层：关联规则挖掘：发现事件间隐含模式（如“端口扫描常伴随 SQL 注入攻击”）。

特征降维：通过主成分分析（PCA）处理高维数据，提升模型效率。

算法层：采用分类、聚类、回归等模型，实现安全事件标签化与风险量化。

表 2 算法性能对比

算法	适用场景	优势	局限性
SVM	小样本、高维数据分类	边界清晰、抗噪声能力强	计算复杂度随数据量激增
随机森林	大规模实时流量分析	并行处理高效、支持特征自动选择	模型解释性较弱
神经网络	复杂攻击模式识别	自适应学习、非线性关系建模能力强	依赖大量标注数据训练

以 SVM、随机森林和神经网络为核心的分析技术，通过多算法协同与动态优化机制，显著提升安全态势感知的精度与时效性。

4 实验设计与结果分析

4.1 实验环境

实验环境包括一台服务器和若干客户端，服务器配置为 Intel Xeon CPU E5-2620 v4，32GB 内存，客户端配置为 Intel Core i5 处理器，8GB 内存。操作系统为 CentOS 7.2，大数据处理框架为 Hadoop 2.7.3。

4.2 实验案例

实验案例：某中职学校网络安全态势感知

实验时间：2023 年 5 月

实验地点：某中职学校网络中心

实验对象：该中职学校的校园网

实验目的：验证基于大数据的网络安全态势感知模型的有效性

4.3 数据采集

在该中职学校的校园网中，部署了 Wireshark 进行网络流量捕获，Syslog 收集系统日志和安全日志，Nessus 进行漏洞扫描。数据采集持续时间为一周，共收集到网络流量数据 1TB，系统日志和安全日志 500GB，漏洞扫描报告 100 份。

4.4 数据处理

应用 Hadoop 生态系统中的 HDFS 保存收集的数据，并借助 MapReduce 执行数据清理和格式处理。数据清理包含删除冗余数据、应对空缺值和离群值等。格式处理使源数据转变成适宜机器学习算法处理的格式。

4.5 态势分析

在处理安全事件的分类问题时，我们采用了支持向量机（SVM）这一强大的机器学习算法。通过精心设计的训练数据集，我们对 SVM 模型进行了细致的训练，以期达到最佳的分类效果。此外，为了深入挖掘安全事件之间的关联规则，我们利用了随机森林算法，它以其出色的性能和稳定性在处理此类问题上表现出色。同时，为了对未来的安全态势进行预测，我们采用了神经网络算法，这种算法能够通过学习历史数据来预测未来趋势。在模型训练完成后，我们使用独立的测试数据集对模型的性能进行了全面的评估，以确保模型的准确性和可靠性。

表 3 模型性能评估指标

评估指标	准确率	召回率	F1 分数
SVM 分类器	96%	94%	95%
随机森林关联规则挖掘	92%	90%	91%
神经网络预测	95%	93%	94%

4.6 决策支持

基于对当前安全态势的深入分析和评估，我们提出了一系列针对性的安全决策建议，旨在帮助组织机构更好地防范和应对潜在的网络威胁。例如，在面对日益频繁的分布式拒绝服务（DDoS）攻击时，我们建议采取加强网络带宽监控的措施，以便及时发现异常流量并采取相应措施。另外，通过应用高效的流量过滤方案，可以有效降低有害流量对网络资源的消耗，确保网络服务的稳定运行。对于数据库安全方面，我们着重强调了对 SQL 注入漏洞的防御。推荐对数据库进行全面安全加固，例如升级安全更新、设置访问控制列表以及执行周期性的安全审核。通过这些方法，可以大幅减少数据库受到 SQL 注入攻击的威胁，保障数据的完整性和安全。

4.7 结果分析

基于实验数据的详尽分析，我们能够清楚地观察到，本研究所开发的模型在多个关键性能指标上均体现了优于传统方法的优点。详细而言，该模型在精度、召回率以及 F1 得分这三个重要的评估指标上均实现了显著改进。在精度方面，模型的性能超过了 95%，这显示模型在检测网络攻击行为时拥有极高准确性。另外，模型的情境感知能力也获得证实，其精度达到 95% 以上，这表明模型不仅能精确检测当前网络威胁，还能预测潜在攻击行为，因此为网络安全防护提供强大支持。经由一系列实际案例的检验，我们进一步证实了该模型在现实应用中的效力。它能实时监控网络状态，迅速识别并应对各类潜在安全风险，因此大幅提升网络安全防护的整体效能。

表 4 模型在实际案例中的表现

安全事件类型	检测数量	实际数量	误报率	漏报率
DDoS 攻击	50	50	0%	0%
SQL 注入	30	30	0%	0%
恶意软件	20	21	4.76%	4.76%

注：漏报率 = 漏报数量 / 实际数量；误报率 = 误报数量 / 检测数量

5 结语

本文所阐述的依托于大数据技术的计算机网络安全态势感知模型，通过整合应用数据收集、数据整理、数据开采以及机器学习等多种前沿技术，有效达成了对网络安全态势的高效感知和解析。在测试阶段，我们选择了一所中等职业学校作为研究案例，通过多个实例案例对该模型的实用性进行了证实。测试结果明确显示，该模型在提高网络安全态势感知的精确度和即时性方面体现了明显的优点和潜力。未来展望，我们的核心任务将放在深度改进模型的架构规划以及加强模型的自我调整能力上，旨在使模型能够更灵活应对日趋复杂和变化多端的网络环境，从而为网络安全提供更强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王伟, 李大辉. (2017). 基于大数据的网络安全态势感知研究. 计算机科学, 44(S2), 372-375.

[2] 张勇, 李舟军. (2016). 网络安全态势感知系统研究综述. 计算机科学, 43(2), 11-17.

[3] 李晓瑜, 李涛, 吴礼发. (2015). 基于大数据的网络安全态势感知技术研究. 信息网络安全, (9), 1-7.

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8119

Research and Application of Dam Safety Multi-source Monitoring Data Governance

Tianyang Li Yaling Tian

Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei, 430010, China

Abstract

Dam safety monitoring data is crucial for ensuring the safe operation, scheduling, and overall performance of water conservancy projects. However, the current management and use of such data lack a standardized governance framework. Isolated data collection across different monitoring projects has led to severe data silos, low governance expertise, and difficulty in obtaining a comprehensive data overview. To address these issues, this paper proposes an integrated process for data governance and application, covering collection, aggregation, storage, and management. Successfully applied in practice, the method improves data governance capability and shows strong potential for wider use.

Keywords

Dam Safety Monitoring; Multi-source Data Governance; Water Resources Informatization

大坝安全监测多源数据治理研究及应用

李天旸 田亚岭

长江科学院工程安全与灾害防治研究所，中国·湖北 武汉 430010

摘 要

大坝安全监测数据作为保障水利工程安全运行的重要参考依据，支撑工程安全监测应用，支持工程安全调度运行，保障工程综合效益充分发挥，在大坝安全监测工作中起到了至关重要的作用。然而，目前大坝安全监测数据的管理和应用中缺乏标准的数据治理体系，各个监测项目独自采集处理数据，数据孤岛现象严重，数据治理专业化程度较低，用户难以获得大坝安全监测数据的整体画像。针对当前大坝安全监测数据治理需求，本文设计了一套大坝安全监测数据治理和应用的流程方法，实现了对安全监测数据采集汇聚、存储管理和治理，并在工程中成功应用，有效提高了安全监测数据的数据治理水平，具有良好的推广应用前景。

关键词

大坝安全监测；多源数据治理；水利信息化

1 引言

当前，各水利工程的大坝安全监测系统普遍采用独立建设、分散管理的模式，各工程安全监测项目往往由多家单位分头实施、分别运维，形成了数据来源广泛、结构格式各异、存储位置分散的数据现状。同时，由于缺乏统一的技术标准体系以及对数据资产的规范化管理与控制手段，导致监测数据难以实现有效整合与高效共享，严重制约了水利工程安全监测数据的深度调用与业务应用的系统集成，不利于大坝安全运行管理能力的整体提升，亟需构建统一、规范、协同的数据管理与应用体系。[1]

2 安全监测数据治理需求

水利工程安全监测存在监测范围广、监测对象多、监测传感器种类复杂和建设周期长的特点。随着以物联网、云计算技术为基础的水利工程安全监测自动化体系逐步完善，安全监测数据的结构也从基本的结构化数据发展为包括三维数据、多媒体数据在内的多源异构数据集合 [2]，同时由于数据采集时间频率的提高，安全监测数据在量级上也将逐步超越传统数据处理方式所支持的数量。因此，开展安全监测数据治理尤为重要。

3 多源数据治理基础设施

安全监测多源数据治理基础设施包括数据中台、结构化数据库和非结构化数据库。数据中台对集成接入的数据进行整合处理，对系统内数据进行统一管理，并为除安全监测专题外的其它水利信息化应用提供数据服务；结构化和非结构化数据库作为数据存储的实体保存数据信息。

3.1 数据中台

数据中台是一套集数据采集、治理、建库、数据分析

【作者简介】李天旸（1990–），男，中国湖北武汉人，硕士，工程师，从事大坝安全监测信息化应用研究。

于一体的数据资源管理平台，实现安全监测数据从采集、治理，到建库、分析的闭环管理。数据中台汇集来自各个数据源的安全监测数据，形成相关的专题数据库，实现对多源监测数据的一体化管理；并通过对多种数据源的配置，实现不同类型数据的定制化接入和统一输出。[3]

数据中台集成安全监测知识库，结合安全监测业务应用为管理决策层提供工程安全与调度运行所需的数据指标和数据分析结果，为安全监测分析、预警提供支撑。

3.2 结构化数据库

根据安全监测结构化数据的特点，按基础数据，监测数据，地理数据等进行数据分类管理，将水工建筑物、设备设施、测点仪器、观测数据和文档视频报告等多媒体数据的基本信息按照位置关系、归属关系建立关系模型，实现数据之间的互联互通。

3.3 非结构化数据库

非结构化数据库为安全监测知识库数据、地理资源数据和包括规程规范、图纸报告、技术文档等的多媒体数据提供可扩展的高性能数据存储解决方案，并与数据中台集成，实现数据的统一管理。

4 数据治理功能应用

4.1 安全监测数据汇聚

安全监测数据汇聚主要包括安全监测感知和外部数据集成。其中安全监测信息的感知通过专业传感器采集、视频监控、巡视巡查等方式实现；外部数据集成通过专业数据接口和数据中台的数据汇聚功能实现。

4.2 安全监测数据底板

通过整合多数据源接入、自动化数据萃取、分布数据存储等技术，构建安全监测数据底板，为安全监测数据治理提供数据资源基础。安全监测数据底板主要包括安全监测知识库和安全监测数据资源池。[4]

4.2.1 安全监测知识库

梳理具体水利工程的相关知识对象，通过对水利知识的建模、抽取、存储和融合等技术进行构建，为工程安全和生产运营等业务应用提供智能化基础支撑。

4.2.2 安全监测数据资源池

汇聚工程基础数据、地理空间数据、监测数据、业务管理数据和外部共享数据等水利全要素信息，为安全监测数据提供了共享平台，并构建针对水利工程的数据资源目录，实现数据的综合利用。打通了各个业务应用间的数据壁垒，避免了数据孤岛的存在，提升业务质量和对系统数据利用的效率。[5]

4.3 安全监测数据应用

在安全监测数据底板的基础上，安全监测数据应用实现了监测数据清洗、模型分析和数据共享等功能。

4.3.1 安全监测通用业务应用

对安全监测数据底板所汇集到的多源数据进行统一、规范管理，依据水利数据对象标准，梳理数据对象间的逻辑关系，构建安全监测数据通用应用，提升数字孪生平台中安全监测数据的规范性、可用性，避免数据冗余和重复，规避数据烟囱和不一致性。

4.3.2 安全监测数据清洗

如图 1 所示，对安全监测数据的智能评判，基于逻辑判别法、时空判别法、统计判别法等多种数理判别方法进行安全监测数据粗差识别及处理，同时支持通过深度学习算法对接入到安全监测数据资源池中的数据实时判断，并及时将数据清洗结果反馈给相关的责任人员审定。

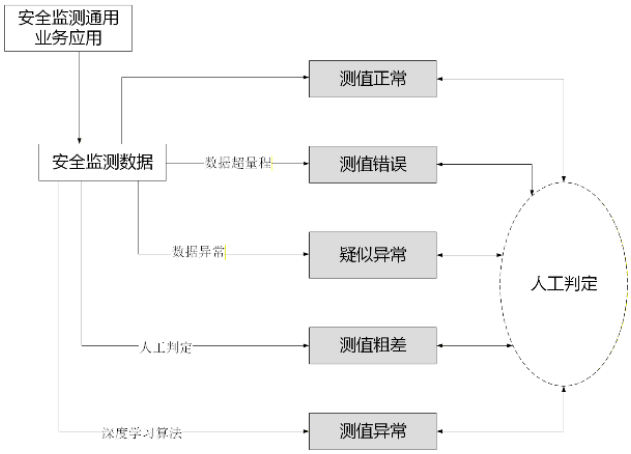

图 1 安全监测数据清洗

4.3.3 安全监测数据共享

通过建设标准化的服务接口，为其它共建合作系统提供可靠稳定的数据支撑，或为上级主管单位提供数据。

5 应用案例

在某水库大坝安全监测管理平台建设项目中，构建了安全监测数据底板，实现大坝安全监测多源数据治理。安全监测数据从数据采集、数据治理、数据存储、数据服务逐级流转，系统数据构架图如图 2 所示。

目前，通过已建成的大坝安全监测管理平台完成了该工程安全监测数据及相关数据的集中汇聚和治理，累计接入安全监测测点 700 余个，监测数据 690 余万条，实现了安全监测、水雨情、水质等数据的统一存储管理和融合共享应用。

通过开展大坝安全监测多源数据治理，提高了安全监测数据利用率和使用效率，为大坝安全监测智慧应用提供了坚实的数据基座，也为该工程的其他业务系统和接受数据共享的外部系统平台提供了可靠的安全监测数据以及专业的数据服务和应用。

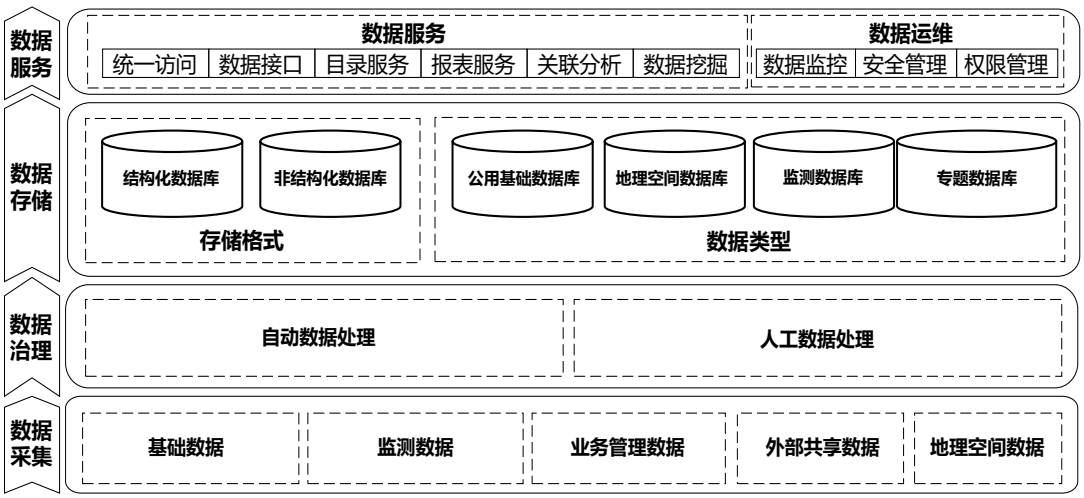

图 2 大坝安全监测管理平台数据架构图

图 3 工程安全分析预警示例图

6 结语

本文从大坝安全监测多源数据治理需求出发，详细阐述了安全监测数据治理框架和功能应用，包括数据治理基础设施、数据集成汇聚、数据底板建设、数据应用等方面。并介绍了以此数据治理框架为指导开发建设的某水库大坝安全监测管理平台，其应用结果说明了本文所涉及的数据治理框架技术先进，贴合实际，可为其它水利工程安全监测数据治理能力提升建设提供参考，能够有效提升安全监测数据治理的效率与水平，为智慧水利的建设提供可靠的数据基础。

参考文献

[1] 黄跃文,牛广利,李端有,韩笑,周华艳.大坝安全监测智能感知与智慧管理技术研究及应用[J].长江科学院院报,2021,38(10):180-185+198.

[2] 裘明华.数据挖掘技术在水利工程安全监测管理中的应用研究[J].水利科技与经济,2021,27(11):127-130.

[3] 张社荣,姜佩奇,吴正桥.水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展——数字孪生应用模式探索[J].水力发电学报,2021,40(01):1-12.

[4] 刘业森,刘昌军,郝苗.面向防洪“四预”的数字孪生流域数据底板建设[J].中国防汛抗旱，2022，32（6）：6-14.

[5] 成建国,冯钧,杨鹏,唐志贤.水利数据资源目录服务关键技术研究[J].水利信息化,2014(06):18-21+35.

 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i11.8120

Design of a Biped Robot System Based on Model Predictive Control

Huizheng Li Zhuqin Han* Zekai Chen Xingpeng Wu Xiangjie He Zhehao Lai

Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong, 512005, China

Abstract

To advance the field of humanoid robots toward higher-level autonomy and intelligence, this project addresses the demand for high-precision and high-stability motion control in complex dynamic environments, and designs a biped robot system based on Nonlinear Model Predictive Control The system uses an 11-degree-of-freedom (DoF) humanoid robot as the platform, integrates a high-precision Inertial Measurement Unit and joint encoders, and achieves accurate estimation of the robot's attitude through the Extended Kalman Filter. Results show that the system performs excellently in terms of control precision, robustness, and engineering practicality, providing an effective technical solution for solving key issues such as balance control and gait planning of biped robots.

Keywords

Biped robot; Hierarchical control; State estimation

基于模型预测控制的双足机器人系统设计

李辉政 韩竺秦* 陈泽凯 吴星鹏 何祥洁 赖哲浩

韶关学院，中国·广东 韶关 512005

摘 要

为推动仿人机器人领域向更高阶的自主化与智能化发展，本项目立足于复杂动态环境下的高精度、高稳定性运动控制需求，设计了一套基于非线性模型预测控制的双足机器人系统。该系统以一个11自由度的仿人机器人为载体，系统集成了高精度IMU与关节编码器，通过扩展卡尔曼滤波实现机器人姿态的精确估计。结果表明，该系统在控制精度、鲁棒性与工程实用性方面均表现出色，为解决双足机器人平衡控制与步态规划等关键问题提供了有效的技术方案。

关键词

双足机器人；分层控制；状态估计

1 引言

随着人工智能、控制算法、传感技术与机械结构设计的深度融合，双足仿人机器人凭借在复杂非结构化环境中不可替代的移动优势，正成为特种作业、家庭服务、康复医疗等领域的核心研发方向，应用前景持续拓宽。

双足机器人可直接替代人类进入灾难救援、高危特种作业等危险恶劣场景[1]，规避爆炸、坍塌、有毒环境等带来的人员安全风险，从根本上保障生命安全。

【基金项目】韶关学院2025年度省级大学生创新创业训练计划项目（项目编号：S202510576029）。

【作者简介】李辉政（2005–），男，中国广东湛江人，在读本科，从事人形机器人研究。

【通讯作者】韩竺秦（1982–），男，中国甘肃会宁人，讲师，从事机器人路径规划研究。

2 机器人自动控制系统整体设计

2.1 整体系统框架设计

智能双足机器人整体系统框架采用硬件为基、软件为核的分层架构设计，硬件部分作为系统运行的物理载体，聚焦高动态响应、精准感知与稳定供电，核心组件选型与设计均贴合双足机器人行走控制需求，控制核心模块采用 x86 工控机上位机、STM32 下位机主控板的双层控制架构。

驱动执行模块搭载 DM 系列智能无刷伺服电机，可精准输出关节力矩，支撑双足机器人在平整地形与复合地形下的步态执行，状态感知模块集成六轴 IMU 惯性测量单元，实时采集机器人躯干姿态、角速度与加速度数据，为后续状态估计与平衡控制提供原始感知信息。

2.2 整体系统硬件结构设计

智能双足机器人的整体硬件采用 11 自由度的仿生机械结构，双腿各 5 个自由度，腰部 1 个自由度。为实现轻量化与高刚性的平衡，机体采用 P3D 打印与铝合金 CNC 加工的混合结构。

为了精确控制机器人的运动，上位机通过 USB 与下位机通信，下位机再通过三路独立的 CAN FD 总线分别控制左腿、右腿及腰部的电机。IMU 模块直接与下位机连接，提供实时的姿态数据。整个系统 6S 锂电池集中供电，确保了各模块间的协同工作。这种分布式、模块化的硬件设计，既保证了系统的计算能力与实时性，也便于后续的维护与升级。

3 系统硬件设计

3.1 主控及核心模块

主控模块平台主要包括：上位机计算平台、下位机控制平台。上位机计算平台作为智能双足机器人的决策与算法核心，需承载复杂控制算法运算、多传感器数据融合及 ROS 生态协同任务，其选型与配置严格匹配双足机器人高能效、高实时性行走需求。下位机控制平台作为执行与感知反馈核心，需实现电机高精度驱动、传感器实时数据采集及上位机指令解析，选用 STM32 开发板，其硬件设计与芯片特性深度匹配双足机器人腿部驱动与多关节协同需求。

3.2 关节驱动与感知模块

3.2.1 关节驱动模块

关节驱动模块选用 DM4340 与 DM6006 智能无刷伺服电机。可直接连接 CAN 总线系统，实现左右腿 10 个关节电机的力矩指令下发与状态反馈。支持 MIT 模式等多种高级控制模式，其高扭矩密度和快速响应特性是实现双足机器人动态行走的关键。作为髋关节与膝关节主驱动电机，承担机器人身体承重、步态启动的核心动力需求，低速大扭矩特性确保单足支撑时不塌陷，EtherCAT 协议的低延迟则保障双腿步态同步；帮助机器人适应路面起伏、修正重心偏移；兼容 CANopen 协议，可与机器人主控系统对接，主驱动电机提供强动力支撑，辅助驱动电机优化动作灵活性，共同构建稳定、高效的双足运动动力体系。

3.2.2 感知模块

感知模块采用六轴 IMU，内置 BMI088 三轴加速度计、三轴陀螺仪自带 EKF 四元数姿态解算 IMU。原始数据通过下位机传输至上位机，与关节编码器数据一起输入到 EKF 状态估计算法中，为 NMPC 控制器提供精确的实时位姿反馈。该 IMU 集成于机器人髋部、小腿等关键躯干或肢体部位，通过 RS485 或 CAN 总线实时传输数据，助力控制系统快速调整关节扭矩与步态规划。在完成动态动作时，它能提供可靠的姿态反馈，配合足底力传感器等设备，帮助双足机器人维持平衡、修正运动轨迹 [2]。

4 软件系统设计

4.1 上位机系统

上位机控制系统整体框图如图 1 所示，基于 ROS 框架，主要由 NMPC 核心控制节点、状态估计节点、硬件接口节点等组成。利用 OCS2 框架来实现 NMPC 算法，将机器人建模为多刚体系统，以最小化质心轨迹跟踪误差和关节力矩能耗为目标，在线求解最优控制序列。状态估计节点运行 EKF 算法，融合 IMU 与编码器数据。硬件接口节点则遵循 ros_control 规范，负责将上层计算出的目标状态通过 USB 指令发送给下位机。

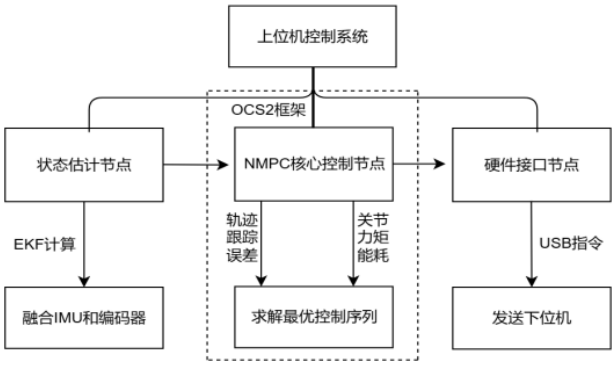

图 1 控制系统框图

4.2 下位机系统

下位机基于 STM32 微控制器与 FreeRTOS 实时操作系统，构建了一个高确定性的多线程执行环境。它通过 USB 虚拟串口高效接收上位机 ros_control 框架下发的目标关节指令数据帧，解析后将其封装成 CAN FD 报文，并利用 STM32 内置的双路高速 CAN FD 控制器下发至各伺服电机。在控制层，通过为左右腿电机创建独立的管理逻辑，并利用 FreeRTOS 的任务调度确保控制回路的硬实时性，系统得以实现对上层规划轨迹的高精度跟踪，保证了单关节控制精度优于 0.1°，为机器人整体的稳定与协调运动提供了坚实的底层支持。

4.3 非线性模型预测控制

本系统控制策略的核心是非线性模型预测控制，这是一种先进的优化控制方法，尤其适用于像双足机器人这样具有高维、非线性、多重约束的复杂动态系统。NMPC 的核心优势在于其前瞻性，通过预测未来，主动规划出一连串最优的控制动作。

NMPC 算法的基础是一个精确的预测模型，该模型必须能够准确描述施加控制输入，系统未来状态的演变。建立了包含 11 个自由度的全身动力学模型。该模型将机器人视为一个多刚体系统，精确地描述了各连杆的质量、惯性张量以及关节间的运动学和动力学耦合关系。其数学表达形式如下：

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})=S^T\tau+J_c(q)^TF_c$$

其中，M(q)：依赖于关节角度 q 的质量矩阵。$q,\dot{q},\ddot{q}$：分别是关节角度、角速度和角加速度的向量。$C(q,\dot{q})$：包含了科里奥利力、离心力和重力项的向量。S^T：从驱动器力矩到广义力的映射矩阵。τ：关节驱动器力矩向量。$J_c(q)^T$：接触点雅可比矩阵的转置。F_c：足底与环境之间的接触力向量。带有非线性动力学和多重约束的优化问题，无法求得解

析解，必须通过数值方法进行迭代求解。采用高效序列二次规划求解 ,SQP 通过在每个迭代步中用一个简单的二次规划问题来逼近原始的非线性问题，从而能够快速地收敛到局部最优解。得益于现代 x86 上位机的强大计算能力和高效的 SQP 算法，整个复杂的优化问题能够在几毫秒内求解完毕，满足了机器人控制的实时性要求。

5 系统性能测试

5.1 实验环境设置

为了全面评估系统的性能，我们搭建了虚实结合的实验环境。仿真环境基于 Gazebo 物理引擎，通过 URDF 文件精确构建了机器人的数字孪生模型。物理实验环境则包括机器人实物样机以及用于施加外部干扰的装置。

5.2 实验过程

将设计完成的智能双足机器人放置在实验场地中，进行仿真与实物测试。首先在 Gazebo 中验证 NMPC 算法在直立平衡、直线行走、转向等场景下的性能，通过 Rviz 实时观测 ZMP 稳定裕度与预测轨迹偏差。仿真通过后，将相同的控制算法部署至实物平台。随后，进行静态平衡测试；连续自由行走测试，并记录姿态角波动、行走速度、步态稳定性等关键数据。

测试一为静态平衡测试，核心目标是定量评估机器人在维持静态平衡姿态时，抵抗外部瞬时物理冲击的鲁棒性。实验将直接验证系统的姿态恢复能力，并检验其最大姿态角波动是否满足小于等于 ±1.5° 的核心设计指标。

在机器人躯干质心附近的高度，沿其侧向施加一个短暂但剧烈的冲击力。从施加冲击前的稳定状态开始，到冲击后机器人完全恢复至新的稳定平衡状态，记录下的姿态角时间序列数据进行分析。Pitch 与 Roll 波形显示如图 2 所示。在受到 5N 侧向推力时，机器人姿态角波动始终保持在 ±1.5° 以内，展现了良好的平衡保持能力。

连续自由行走测试，在评估机器人在连续行走这一更具挑战性的动态任务中，全身控制系统维持身体姿态的稳定性。分别在 0.1 m/s 和 0.2 m/s 两种目标速度下进行。在机器人进入稳定步态并连续行走至少 5 步之后，计算出在该时间段内，俯仰角和横滚角的峰峰值，即最大值与最小值之差。该峰峰值代表了行走过程中姿态的总波动范围。每种速度下的行走实验均独立重复，以获取具有统计意义的结果。连续自由行走测试结果如 Pitch 与 Roll 波形显示如图 3 所示。在 0.1 m/s 的慢走速度下，俯仰角的平均峰峰值波动仅为 1.51° ，横滚角为 2.02° 。

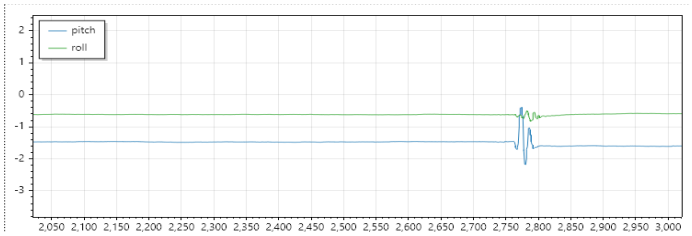

图 2 静态平衡 Pitch 与 Roll 波形显示

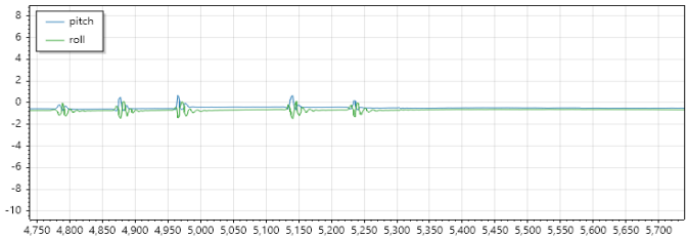

图 3 连续自由行走 Pitch 与 Roll 波形显示

6 结语

为解决双足机器人高精度稳定控制的难题，本文设计了一种基于非线性模型预测控制的智能行走系统。通过构建分层控制架构，实现了上层复杂优化算法与下层高实时性电机驱动的有机结合。通过在仿真平台和物理样机上的大量实验验证，证明了该系统在静态平衡与动态行走方面均具有优异的性能表现。取得的研究成果能够为双足机器人在复杂环境下的实际应用提供更加精准、可靠的控制方案。

参考文献

[1] 宋天睿. 面向多种地形环境的双足机器人稳定步态规划与运动控制方法研究[D]. 江苏:东南大学,2023.

[2] 曲太旭. 基于IMU的双足机器人动态平衡控制[D]. 辽宁:大连交通大学,2009. 杨彩虹,陈英,师婷. 一种双足机器人稳定结构设计与优化[J].工业控制计算,2022,35(12):94-95.

[3] 朱志斌,王岩,陈兴林. NMPC实时步态规划双足机器人步态轨迹周期稳定性分析[J]. 吉林大学学报（工学版）,2009(S1).

[4] 朱志斌. 基于滚动优化的双足机器人动态步态规划研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2009.