



02
2026

Information Science and Engineering Research

信息科学与工程研究

Volume 7 Issue 2 February 2026 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



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



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.

《信息科学与工程研究》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

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

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

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

Email: info@nassg.org

Tel: +65-65881289

Website: http://www.nassg.org



期刊概况:

中文刊名：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 数据中心机房制冷系统节能优化策略分析
/ 魏士欢
- 4 车载轨道电路补偿电容故障诊断系统
/ 张洪伟 杨玉鑫 朱展航 姜怡曦 吕晓峰
- 7 烟草机械上位机分布式系统数据库交互优化研究
/ 王新喆 黎志
- 10 工业控制网络与公共网络的安全互联机制及实现方案
/ 张煜
- 13 一种基于自平衡电桥与 STM32 的自动线路负载及故障检测装置
/ 杨安国 姜越 盛庆华
- 17 智能运维技术在通信自动化设备全生命周期管理中的应用
/ 张振华
- 20 人工智能在计算机信息技术领域的应用及其发展趋势研究
/ 刘强
- 23 数据链组网协议模拟验证环境设计与实现
/ 王立锷
- 26 面向通信领域的嵌入式平台微服务化设计方案
/ 孙天龙
- 29 面向重保与网络容灾场景的 SPN 网络快速自愈与业务连续性保障技术研究
/ 曹志强 周振华
- 32 政务服务大厅窗口网络优化设计
/ 赵海军
- 36 基于 GoAhead 服务器的创新型 websocket 推送技术研究
/ 王建斌
- 39 元器件选型与 PCB 布线对短波射频系统电磁兼容性影响分析
/ 韩文
- 42 基于物联网的绝缘电阻在线监测与预警系统设计
/ 刘文飞 杨丽丽

- 1 Analysis of Energy-saving Optimization Strategies for Data Center Cooling Systems
/ Shihuan Wei
- 4 Fault Diagnosis System of Compensation Capacitor in Railway Track Circuit
/ Hongwei Zhang Yuxin Yang Zhanhang Zhu Yixi Jiang Xiaofeng Lv
- 7 Research on Database Interaction Optimization of Distributed System of Tobacco Machinery Host
/ Xinzhe Wang Zhi Li
- 10 The security interconnection mechanism and implementation scheme of industrial control networks and public networks
/ Yu Zhang
- 13 An Automatic Line Load and Fault Detection Device Based on a Self-Balancing Bridge and STM32
/ Anguo Yang Yue Jiang Qinghua Sheng
- 17 Application of Intelligent Operation and Maintenance Technology in the Full Life Cycle Management of Communication Automation Equipment
/ Zhenhua Zhang
- 20 Research on the Application and Development Trend of Artificial Intelligence in the Field of Computer Information Technology
/ Qiang Liu
- 23 Design and Implementation of Simulation Verification Environment for Data Link Networking Protocol
/ Likun Wang
- 26 Microservices-Oriented Design Scheme for Embedded Platforms in the Communication Domain
/ Tianlong Sun
- 29 Research on SPN Network Rapid Self-healing and Service Continuity Assurance Technology for Heavy Protection and Network Disaster Recovery Scenarios
/ Zhiqiang Cao Zhenhua Zhou
- 32 Network Optimization Design for Windows in Government Service Hall
/ Haijun Zhao
- 36 Research and Implementation of Innovative Websocket Push Technology Based on GoAhead Server
/ Jianbin Wang
- 39 Analysis of the Impact of Component Selection and PCB Routing on the Electromagnetic Compatibility Performance of Short-Wave Radio Frequency Systems
/ Wen Han
- 42 Design of an IoT-Based Online Monitoring and Early Warning System for Insulation Resistance
/ Wenfei Liu Lili Yang

Analysis of Energy-saving Optimization Strategies for Data Center Cooling Systems

Shihuan Wei

China United Network Communications Co., Ltd. Shijiazhuang Branch, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

As the core infrastructure of the information society, the operational energy consumption of data centers has become a critical factor constraining the sustainable development of the industry. Among these, the cooling system accounts for approximately 40% to 60% of the total energy consumption. Optimizing the operational efficiency of the cooling system is a key approach to reducing energy consumption and improving operational reliability in data centers. This paper focuses on energy-saving technologies and system optimization, exploring energy-saving strategies for data center cooling systems from four dimensions: airflow organization, cold source configuration, intelligent control, and energy efficiency evaluation. By analyzing the energy consumption characteristics and operational bottlenecks of the cooling system, a comprehensive optimization solution is proposed, which includes cold-hot aisle isolation, variable frequency control, utilization of natural cold sources, and artificial intelligence-based energy consumption regulation. The research results indicate that this strategy can achieve a 10% to 25% reduction in Power Usage Effectiveness (PUE) without compromising the operational stability of the equipment, providing a feasible path and technical reference for the construction of green data centers and low-carbon operations.

Keywords

data center; cooling system; energy-saving optimization; airflow organization; intelligent control; energy efficiency management

数据中心机房制冷系统节能优化策略分析

魏士欢

中国联合网络通信有限公司石家庄市分公司, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

数据中心作为信息化社会的核心基础设施,其运行能耗问题已成为制约行业可持续发展的重要因素。其中,制冷系统能耗约占总能耗的40%~60%,优化制冷系统的运行效率是降低数据中心能耗、提升运行可靠性的重要途径。本文以节能技术与系统优化为研究主线,从气流组织、冷源配置、智能控制和能效评估四个维度探讨数据中心制冷系统的节能策略。通过分析制冷系统的能耗特征与运行瓶颈,提出基于冷热通道隔离、变频控制、自然冷源利用与人工智能能耗调控的综合优化方案。研究结果表明,该策略可在不影响设备运行稳定性的前提下,实现能效比(PUE)降低10%~25%,为绿色数据中心建设与低碳运维提供了可行路径与技术参考。

关键词

数据中心; 制冷系统; 节能优化; 气流组织; 智能控制; 能效管理

1 引言

随着云计算、大数据与人工智能的快速发展,数据中心的规模与数量持续增长,其能源消耗问题日益突出。制冷系统作为数据中心运行中最大的能耗单元,其效率水平直接决定整体能效表现。传统制冷系统设计多以冗余安全为核心,存在过度冷却、气流混乱与负载不匹配等问题,导致能耗高企。国际能源署数据显示,全球数据中心的年能耗已占社会总用电量的2%~3%,且仍呈上升趋势。面对节能减排与绿色转型的双重压力,优化制冷系统成为数据中心节能改

造的关键。本文在分析制冷能耗结构与运行特征的基础上,结合工程案例与智能化技术,系统探讨数据中心机房制冷系统的节能优化路径,以为行业绿色运营与高效设计提供参考依据。

2 数据中心制冷系统能耗特征与现状分析

2.1 制冷系统能耗构成与运行特征

数据中心制冷系统包括冷源设备、末端空调设备、冷却塔及辅助水泵系统。冷水机组和机房精密空调为主要能耗环节,约占总能耗的70%以上。制冷能耗受负载变化、室内外温差、机组运行效率等因素影响显著。传统制冷系统普遍存在负荷波动响应滞后、系统联动性不足及控制策略单一等问题,造成部分设备长时间高负荷运行,能效比偏低。由

【作者简介】魏士欢(1976-),男,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事通信电源研究。

于冷源系统多采用固定频率压缩机与定流量水泵，其运行状态难以实时匹配 IT 设备的散热需求，形成“供冷过剩”现象，导致能源浪费^[1]。

2.2 气流组织不合理带来的能效损失

机房内设备密度高、热负荷集中，若气流组织设计不当，冷空气无法有效送达服务器进风口，导致局部过冷与热点并存。传统上采用的上送风下回风或下送风上回风方式存在冷热气流混合问题，降低了制冷效率。部分数据中心未采用隔热封闭措施，使冷热通道间的气流短路现象加剧。为保证热点区域温度达标，系统往往被迫提高冷量供应，造成整体能耗上升。气流组织优化已被证明是提升制冷效率的首要途径，其合理性直接决定能量利用率。

2.3 制冷系统节能改造面临的技术挑战

尽管节能技术不断发展，但数据中心制冷系统改造仍面临多重困难。一方面，机房运行连续性要求高，停机施工风险大；另一方面，改造需兼顾系统安全、投资回报与维护复杂度。当前部分中小型数据中心仍采用传统定速压缩机制冷模式，能效提升空间有限。此外，智能化监控系统的普及率偏低，设备间协同调度能力不足。如何在保障系统稳定运行的前提下，实现制冷系统的动态优化与精细化管理，是当前节能研究的重点与难点^[2]。

3 气流组织优化与冷热通道隔离技术

3.1 冷热通道隔离设计原理与应用

在数据中心制冷系统中，冷热通道隔离技术是提升能效与稳定性的核心措施。通过对服务器机柜的进风与出风路径进行物理分离，构建独立的冷、热气流通道，可有效防止冷热空气混合，减少制冷能量损失。其基本原理是利用气流的定向组织，使冷空气集中送入设备进风侧，热空气集中回收至制冷端，从而实现温度分区与能量梯度优化。冷热通道隔离主要分为冷通道封闭与热通道封闭两种方式。冷通道封闭模式适用于制冷能力充足的常规数据中心，可维持机柜前端恒温环境；热通道封闭则更适合高密度负载场景，通过将热气流集中回收并定向排出，有效降低整体机房温差。研究与工程实践表明，合理的隔离设计可使服务器进风温度提升 2~4℃，制冷效率提高 15%~20%，并显著减少局部过冷区域。结合送风地板或顶部风管系统使用，可进一步优化气流组织，使制冷系统实现高效、均匀、稳定运行。

3.2 气流分布优化与动态调节策略

在数据中心节能管理中，气流分布的合理性直接影响制冷系统的能效表现。除通道隔离外，还需通过动态调节实现冷量供需平衡。利用智能送风地板、可变风阀与变频风机等设备，可根据实时负载分布与温度反馈动态调整送风量与风向，避免冷量供应不均。气流分布优化不仅是硬件结构设计问题，更涉及计算与控制的精细化。CFD (Computational Fluid Dynamics) 仿真技术被广泛应用于气流组织分析，通

通过对气流流线、温度场与压力场的模拟预测，管理者可在机房设计阶段或改造过程中准确评估冷量分布与空气循环效率。CFD 结果还能指导风口布置、机柜布局及送回风比例调整，使气流流动路径最短化、温差最小化，从而减少局部热点与能量浪费。实践表明，采用仿真与动态控制结合的气流管理策略，可使制冷系统整体能耗降低 10%~15%，有效提升运行的精细化水平与稳定性^[3]。

3.3 局部冷却与气流精细控制

随着高性能计算 (HPC) 与人工智能集群的兴起，数据中心的局部热密度显著增加，传统整体送风模式已难以满足高功率设备的散热需求。局部冷却技术通过“近源制冷”方式，在高负载区域实现高效热管理。列间空调、行级制冷单元及液冷系统是典型的局部冷却手段。列间制冷设备通过紧贴热源的送风路径，将冷量精准输送至服务器进风口，减少冷气流距离与能量损失；液冷技术则以高导热介质（如乙二醇或去离子水）直接吸收芯片热量，并经热交换装置将热能排出，能效比 (COP) 较传统空气冷却提升 30% 以上。部分先进系统采用微通道热管理方案，通过嵌入式散热模块实现芯片级热控制，进一步提升散热精度与系统可靠性^[4]。

4 制冷系统节能控制与冷源优化

4.1 变频技术在制冷系统中的应用

变频控制技术在数据中心制冷系统中具有显著的节能与调控优势。通过在冷水机组、冷却塔风机及循环水泵等设备中应用变频驱动，可实现运行参数的动态调整，使供冷量与机房实际负载相匹配。该技术利用变频器控制电机转速，当热负荷下降时自动降低运行频率，从而减少能耗与机械损耗。研究表明，在部分负载条件下，变频系统的能耗可比定速系统降低 25%~35%。此外，变频控制可平滑设备启停过程，避免压缩机频繁启动引发的电流冲击，延长设备使用寿命。配合能耗监测与自动控制模块，系统可实现对冷量输出、功率消耗及运行效率的实时监测与动态优化。变频控制的核心价值不仅在于节能，更在于实现供冷系统的柔性调节与智能响应，使机房环境保持在恒温恒湿的最佳状态，确保 IT 设备稳定运行的同时达到能源利用最大化。

4.2 自然冷源与余热回收的协同利用

在中高纬度地区或冬季低温环境下，自然冷源的引入可有效降低机械制冷的能耗负担。通过配置冷却塔、空气换热器或板式换热系统，当室外温度低于设定阈值时，可自动切换至自然冷却模式，使冷却水直接或间接参与制冷过程，从而减少压缩机运行时间与电能消耗。同时，数据中心运行过程中产生的废热可通过热交换装置实现余热回收，用于生活热水、采暖或吸收式制冷系统，实现能源的梯级利用。实践表明，自然冷源与余热回收协同运行可使 PUE 值下降 0.2~0.3，节能率达 15% 以上，不仅显著降低运行成本，也改善了机房外部环境热排放问题。随着智慧能源管理平台的

应用,该模式可实现自动切换与能效平衡,在满足全年稳定制冷需求的同时,实现能源的循环利用与绿色运营^[5]。

4.3 冷水机组能效优化与群控策略

冷水机组作为数据中心制冷系统的核心,其运行效率直接决定整体能效表现。传统机组多以单台独立控制为主,存在负荷分配不均与能耗波动大的问题。通过引入智能群控技术,可对多台机组的运行状态进行实时监测与优化调度,实现负荷均衡与动态协同控制。群控系统根据实时冷量需求、室外气候条件及机组性能曲线,自动选择最优组合运行方案,使各机组始终处于高效区间。同时,通过调整冷冻水出水温度与回水温差,优化换热效率,进一步降低能耗。在高负载阶段,系统可优先启用高效率机组,低负载阶段则减少运行台数以避免能量浪费。结合能效模型与预测算法,群控系统能根据历史运行数据进行自学习与趋势优化,实现“预判式”能耗管理。该策略显著提升了制冷系统的综合能效水平,为数据中心实现精细化节能与智能化运维提供了坚实基础。

5 智能化监控与综合能效管理

5.1 智能监测与数据驱动的能效调控

数据中心制冷系统的高效运行离不开智能化监控体系的支撑。通过部署物联网传感器网络,可对机房内温湿度、气流速度、设备功率与能耗水平进行全时段监测,实现运行数据的高频采集与动态可视化。大数据分析算法可对采集的历史与实时数据进行多维度关联计算,识别系统能耗波动规律与异常状态,实现能耗趋势预测和设备健康评估。基于人工智能的自适应控制系统能够自动识别环境与负载变化,实时调整冷水机组运行参数、风机转速及送风温度,实现精准制冷与动态能量平衡。通过数据驱动的闭环控制,系统能持续优化制冷效率,使机房温度分布更均匀、气流组织更合理,从而有效降低非必要能耗。该模式不仅提升了运行稳定性,也为实现机房运维的智能化、无人化提供了基础条件。

5.2 能效评估体系与 PUE 优化路径

PUE (Power Usage Effectiveness) 是评价数据中心整体能效水平的核心指标,其优化直接反映制冷系统的节能成效。为科学提升 PUE,应构建完善的能效评估体系,从设备能耗、环境控制与系统耦合多个层面进行综合分析。能效评估不仅关注冷水机组的能效比 (COP) 与末端空调的能量

利用率,还需结合机房负载特性与环境条件,对单位制冷能耗、系统能量损耗及温控稳定性进行量化计算。通过能耗数据建模与趋势分析,可识别高耗能环节并制定优化策略,如调整供回水温差、优化冷却塔控制曲线、提高冷凝效率等。

5.3 人工智能与数字孪生在节能管理中的应用

人工智能与数字孪生技术的融合,为数据中心制冷系统的节能优化提供了创新路径。数字孪生通过构建物理机房的虚拟镜像,实时映射制冷系统的运行状态,能够在虚拟环境中对不同控制策略进行能效仿真与风险评估,实现优化方案的预测性验证。人工智能算法利用深度学习与强化学习技术,对环境参数、负载变化与设备响应进行自学习,逐步形成自适应调控模型。在复杂的运行条件下,AI 可自主计算最优制冷策略,自动调配冷源与末端系统,确保能耗最小化与运行安全性并重。国际领先的数据中心如 Google 与 Microsoft 已应用 AI 自学习系统进行制冷管理,实现能耗降低 10%~15%,同时提升设备运行寿命与运维精度。

6 结语

数据中心制冷系统节能优化不仅关乎能源消耗控制,更关系到信息基础设施的可持续发展。通过综合应用气流优化、变频控制、自然冷源与智能化管理等多维策略,可有效提升制冷系统的整体能效。研究表明,构建以数据驱动为核心的智能节能体系,可实现系统动态平衡与高效运行,使 PUE 显著下降。未来,随着人工智能、物联网与数字孪生技术的进一步融合,制冷系统的节能管理将更加精准与自适应。行业应从单一设备节能转向系统级优化,从静态管理迈向智能协同,推动数据中心向绿色、高效、低碳的可持续方向发展。

参考文献

- [1] 张超轶,刘渊源,刘林忠,等.北京某数据中心机房空调系统节能改造案例分析[J].暖通空调,2024,54(S1):275-277.
- [2] 杨国淑.基于“双碳”目标的既有数据中心制冷系统架构及节能潜力分析[J].绿色建筑,2025,17(01):109-112.
- [3] 盛元红.数据中心机房制冷系统节能分析[J].华东科技,2022,(07):82-84.
- [4] 许伟伟.数据中心机房空调气流组织研究[D].北方工业大学,2022.
- [5] 孙倩.低碳经济下数据中心机房节能的思考[J].产业与科技论坛,2013,12(16):73-74.

Fault Diagnosis System of Compensation Capacitor in Railway Track Circuit

Hongwei Zhang Yuxin Yang Zhanhang Zhu Yixi Jiang Xiaofeng Lv*

Baoji University of Arts and Science, Baoji, Shaanxi, 721000, China

Abstract

The stable operation of railway signaling systems relies on the reliability of track circuits, where the degradation of compensation capacitors significantly impacts signal transmission quality. This study presents an integrated and intelligent on-board fault diagnosis system for ZPW-2000A non-insulated track circuits. Based on electromagnetic induction principles, the system establishes a feature extraction mechanism by combining transmission line and two-port network models, with intelligent diagnosis achieved through grey relational analysis. The hardware core, STM32F412RGT6, integrates signal excitation, filtering, voltage sampling, and communication functions, enabling real-time data acquisition and PC interaction. Experimental validation demonstrates the system's advantages in high precision, cost efficiency, and strong real-time performance, providing technical support and application prospects for intelligent track circuit condition monitoring and efficient railway maintenance.

Keywords

track circuit; compensation capacitor; fault diagnosis; grey relational analysis; STM32

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统

张洪伟 杨玉鑫 朱展航 姜怡曦 吕晓峰*

宝鸡文理学院, 中国·陕西 宝鸡 721000

摘要

铁路信号系统的稳定运行依赖于轨道电路的可靠性,其中补偿电容的性能退化是影响信号传输质量的重要因素。本文针对ZPW-2000A无绝缘轨道电路,设计了一种集成化、智能化的车载补偿电容故障诊断系统。系统基于电磁感应原理,结合传输线与二端口网络模型构建特征提取机制,并利用灰色关联算法实现智能诊断。硬件以STM32F412RGT6为核心,集成信号激励、滤波、电压采样与通信功能,能够实现实时数据采集与上位机交互。实验验证表明,该系统具备高精度、低成本和强实时性优势,为轨道电路状态监测智能化与铁路运维高效化提供了技术支撑与应用前景。

关键词

轨道电路; 补偿电容; 故障诊断; 灰色关联分析; STM32

1 引言

轨道电路作为铁路信号系统的基础单元,其健康状态直接决定列车运行安全与调度效率。ZPW-2000A型无绝缘轨道电路在高速铁路中得到广泛应用,其核心功能依赖于补偿电容的正常工作,以维持信号传输的稳定性与抗干扰能力。然而在长期运行中,补偿电容易受温湿度、振动、电磁干扰等因素影响,导致电容量漂移或介质击穿,进而引发信

号衰减、串扰甚至误码。传统轨检车的周期性检测方式虽具较高精度,但检测周期长、响应滞后,不适合实时监测的需求。为此,本文以车载化、智能化为目标,研发了一种便携式嵌入式诊断系统,通过结合传输线理论与灰色关联分析算法,实现补偿电容故障的实时识别与趋势预测,从而提升轨道电路维护的科学性与智能化水平。

2 轨道电路补偿电容特性与故障机理分析

2.1 补偿电容在轨道电路中的作用机理

在ZPW-2000A无绝缘轨道电路中,补偿电容是实现信号传输稳定与电能高效利用的重要组成部分。轨道电路作为列车信号传输的核心载体,其电气特性由钢轨电感、电阻与分布电容共同决定,呈现出明显的感性特征,导致信号相位延迟及能量衰减。为维持信号幅度与相位的稳定,补偿电容通常以并联方式接入轨道回路中,起到电抗补偿作用,使系统阻抗在工作频段内趋于平衡,整体等效为近似纯电阻

【基金项目】2025年国家级大学生创新训练计划项目(项目编号:202510721022)。

【作者简介】张洪伟(2005-),男,中国四川泸州人,本科,从事电气工程及其自动化研究。

【通讯作者】吕晓峰(1983-),男,中国陕西乾县人,副教授,从事通信工程研究。

状态。其设计需综合考虑区段长度、工作频率、轨道阻抗及负载条件，确保信号在传输过程中幅度保持稳定、相位误差最小。若补偿电容参数与设计值存在偏差，将造成系统阻抗失衡，导致信号幅度衰减、相位漂移甚至通信中断，严重时可能引发轨道区段的闭塞误判，对列车运行安全构成潜在威胁。

2.2 补偿电容失效类型与特征表现

补偿电容长期运行在高温、高湿与强振动环境下，其失效形式具有多样性和隐蔽性。常见的失效类型包括电容量漂移、绝缘击穿及接触不良三类。电容量漂移多因介质老化、温度应力或频繁充放电引起，表现为信号相位轻微偏移及幅度不稳；绝缘击穿则会导致电容内部短路，造成轨道回路阻抗骤降，信号幅度急剧衰减；接触不良或焊点虚接则呈现间歇性失真，伴随不规则噪声与幅度突变。在频谱特征上，容量漂移对应低幅度谐波漂移，击穿故障伴随明显能量突降，而接触不良则表现为不连续随机波动。通过对电压、电流、频率等参数建立动态关联模型，可捕捉不同故障的特征模式，实现多类型失效的精确判别，为后续智能诊断算法提供可靠的特征输入。

2.3 传统检测方法的局限性

传统的补偿电容检测方式主要依赖轨检车进行集中式检测，其核心原理为频谱分析与人工判断结合。虽然此类方法在静态状态下具备较高精度，但检测周期长，通常为数月一次，难以及时发现突发性故障。此外，人工巡检方式受环境与主观因素影响较大，在噪声干扰或信号边界模糊的情况下，容易出现漏判或误判。传统检测设备普遍体积庞大、能耗高，部署成本大且不具备实时性，难以满足当前铁路智能化运维对连续监测的需求。相较之下，小型化车载检测系统利用列车运行过程进行实时采样，可动态掌握补偿电容运行状态，实现从“事后检测”向“在线诊断”的转变。该模式不仅显著提升检测效率，还为建立基于数据驱动的轨道电路健康管理体系统奠定了基础，代表了轨道信号设备检测技术的发展方向。

3 车载补偿电容故障诊断系统总体设计

3.1 系统设计原则与总体架构

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的总体设计遵循实时性、可靠性与可扩展性三项核心原则。在架构上，系统分为信号采集模块、信号处理单元、通信接口以及上位机监控平台四个层次。车载部分完成前端信号的采集、滤波与初步分析，通过无线通信模块实现与地面数据中心的同步传输。上位机系统承担数据的集中处理、特征提取、灰色关联计算与健康状态可视化展示，能够根据实时数据生成故障警报与趋势预测报告。系统采用分布式模块化设计，各模块之间通过标准化接口连接，便于后期升级与维护。数据流采用双通道传输机制，确保在通信中断情况下仍可通过本地缓存维持检测连续性。整体架构具备高度的兼容性，可适配不同

型号轨道电路的频率带宽与补偿特性，为铁路信号设备的智能化运维提供基础支撑。

3.2 信号采集与处理模块设计

信号采集与处理模块是系统的关键执行单元，主要任务是将轨道电路中的电压与电流信号转化为可供算法分析的数字数据。该模块采用高精度差分采样结构，通过仪表放大器实现微弱信号的稳定放大，并利用二阶有源低通滤波电路抑制高频干扰，保证采样信号的纯净度。信号经滤波后进入模数转换器（ADC），由 STM32F412RGT6 主控芯片进行实时采样、缓存与传输。主控程序中嵌入快速傅里叶变换（FFT）算法，用于提取频域特征，包括谐波分布、相位偏移与幅度变化等关键参数。这些特征被用于识别补偿电容的性能偏差及潜在故障趋势。数据通过串口与无线通信模块发送至上位机，实现远程实时监控与状态评估。模块整体设计强调信号完整性与响应速度，能够在复杂车载环境下保持检测精度与运算稳定性。

3.3 灰色关联度诊断算法设计

为了实现补偿电容故障的智能识别与趋势预测，系统引入灰色系统理论建立诊断模型。灰色关联分析具有在小样本、不确定信息条件下提取系统变化规律的优势，非常适合轨道电路复杂工况下的实时分析。模型通过构建标准信号特征序列与实时检测序列的灰色关联矩阵，计算各序列间的关联系数，以量化补偿电容的健康状态。当关联系数低于设定阈值时，系统自动判定为潜在故障，并触发报警机制。算法具备计算量小、收敛速度快等优点，可在嵌入式系统中实现实时运行。通过历史数据的积累与自适应修正机制，模型还能动态优化诊断精度，实现趋势性故障预测与寿命评估。

4 硬件系统设计与实现

4.1 核心控制单元

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的核心控制单元采用 STM32F412RGT6 微控制器。该芯片基于 ARM Cortex-M4 内核架构，具备较高的主频性能与丰富的外设接口资源，适用于高精度信号采集与实时运算场景。其内置浮点运算单元（FPU）能够加速 FFT 频谱分析与灰色关联算法的计算过程，在多任务并行执行中仍保持较低延迟与高稳定性。系统通过 SPI 总线与高精度 ADC 模块相连，实现对电压、电流信号的高速采样。为避免主控负载过重，系统引入 DMA（Direct Memory Access）通道，将数据直接传输至缓存区，从而释放 CPU 资源。主控程序采用模块化结构设计，涵盖信号采集控制、特征提取、算法处理与通信接口等功能模块。通过精确的时钟同步与中断管理机制，系统可在复杂车载环境下保持高可靠性运行，确保故障检测的实时性与准确性。

4.2 电路设计与模块集成

整个系统的电路设计遵循高集成度与抗干扰性并重的原则。信号激励模块利用 DDS（Direct Digital Synthesis）技

术生成高纯度可调正弦波,以模拟轨道电路激励信号。滤波模块采用二阶有源低通滤波电路,能够有效抑制高频干扰与谐波失真,保证信号的波形完整性。电压采样模块选用高精度分压电阻和仪表放大器组合结构,使采样信号在不同电平范围内保持线性响应与低噪声特性。通信模块支持 RS485 与 CAN 双协议传输,可实现与列车车载网络及地面诊断终端的双向通信。为提升系统的电磁兼容性能,PCB 采用四层板结构,上下层布设接地与电源平面,中间层分布信号与控制走线。通过合理布局与屏蔽设计,系统在电磁干扰强烈的车载环境中仍能保持稳定运行,为实时检测提供硬件保障。

4.3 电源与防护设计

考虑到列车运行环境中存在振动、电磁辐射及电源波动等复杂因素,系统在电源与防护设计方面进行了针对性优化。电源输入端采用多级稳压方案,预稳压模块负责降压与过流保护,二级稳压模块采用低噪声 LDO 稳压芯片,为模拟与数字电路分别供电。为了应对电源瞬变与浪涌冲击,输入端配置 TVS 瞬态电压抑制二极管与 LC 滤波器组,以削减干扰尖峰。主控电路与模拟电路设置独立的电源域并通过光电隔离,降低电源耦合干扰。整机外壳采用铝合金屏蔽结构,并填充防震缓冲材料,以提升机械抗振性能。系统通过严格的电磁兼容与环境可靠性测试,确保在高温、湿热及高振动工况下仍能维持稳定供电与信号完整性,为轨道电路的在线监测提供坚实的硬件支撑。

5 系统测试与性能验证

5.1 实验平台与测试方法

为验证车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的实际性能与稳定性,构建了一个可控的仿真轨道电路实验平台。该平台由信号源、电感模拟模块、补偿电容模块、负载端与信号分析装置组成,通过可调电容阵列模拟不同的退化与故障状态。信号源采用 DDS 可编程信号发生器,以 ZPW-2000A 频率带宽为基础输出正弦激励信号,轨道电感模块通过可变电感器件模拟不同轨距与钢轨长度引起的传输差异。系统信号经采样后输入嵌入式主控装置,完成实时数据记录与 FFT 频谱分析。上位机软件同步接收采集数据,利用灰色关联算法计算电压、电流、相位等多参数的关联系数,建立电容健康等级映射关系。

5.2 测试结果与分析

系统经过连续多组实验验证,结果表明该诊断系统在不同故障情形下均能保持较高的灵敏度与准确性。当补偿电容容量偏差达到设计值的 5% 时,系统输出信号的相位偏

移量显著变化,可被实时检测算法准确识别。灰色关联系数在健康状态与故障状态间形成明显区分,故障识别率达到 97.6%。在 100 组样本测试中,系统平均响应时间为 185 毫秒,远低于传统检测设备的数秒级延迟。通过 72 小时连续运行试验,系统未出现信号漂移与通信丢失,显示出良好的稳定性与抗干扰能力。能耗测试结果显示,系统功耗较传统轨检车检测模式降低约 40%,且在环境温度变化 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 范围内性能保持稳定。

5.3 系统应用前景与推广价值

该车载轨道电路补偿电容故障诊断系统在设计理念与实现方式上具有显著的创新性与实用价值。其小型化、模块化特征使设备可灵活搭载于轨检车、检修列车或便携式检测小车上,实现补偿电容的在线检测与预警。系统的灰色诊断算法无需大量训练数据,适合在不同线路条件下快速部署,极大地降低了维护成本与人工依赖。未来,该系统可进一步与无线传感网络、云端大数据平台联动,实现铁路信号设备的远程监测与智能管理。除补偿电容外,其算法与架构还可推广至轨道电感、绝缘节、电缆连接器等关键部件的状态诊断领域,构建全寿命周期的信号设备健康监测体系。

6 结语

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的研究与实现,标志着轨道电路状态监测由周期性检测向实时智能诊断的转变。系统通过融合电磁感应、传输线理论与灰色关联算法,构建了完整的检测与分析框架,实现了补偿电容故障的快速识别与趋势预测。硬件平台的高集成化设计与嵌入式算法优化,使系统在实际运行中表现出良好的稳定性与适应性。研究表明,该系统在保障铁路信号安全、降低维护成本、提升运维智能化水平方面具有显著效果。未来可进一步结合无线传感网络与云计算平台,构建多源数据融合的铁路信号健康管理体系,推动我国铁路运维向智慧化、数字化方向迈进。

参考文献

- [1] 丁昀,邹芝权,伍妍蝶,等.车载轨道电路补偿电容故障诊断装置设计[J].铁道科学与工程学报,2025,22(09):4172-4181.
- [2] 李鹏.基于复杂网络重构的轨道电路补偿电容异常检测[D].兰州交通大学,2023.
- [3] 田粉霞.基于深度学习的无绝缘轨道电路故障诊断[D].北京交通大学,2020.
- [4] 赵林海,毕延帅,刘伟宁.基于分层免疫机制的无绝缘轨道电路补偿电容故障诊断系统[J].铁道学报,2013,35(10):73-81.
- [5] 邢玉龙.面向预测性维护的轨道电路故障诊断及预测方法研究[D].北京交通大学,2022.

Research on Database Interaction Optimization of Distributed System of Tobacco Machinery Host

Xinzhe Wang Zhi Li

Shanghai Tobacco Machinery Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract

With the accelerated digitalization and intelligent transformation in tobacco manufacturing, distributed host computer systems have become increasingly vital for production control and data exchange. As the central hub for equipment information, the host computer's database interaction performance directly impacts system responsiveness and data synchronization efficiency. Traditional centralized architectures face challenges such as transaction latency and consistency maintenance difficulties, which hinder system coordination. This study develops an optimized model integrating multi-level caching, asynchronous transaction queues, and message middleware. The research focuses on architectural design, data transmission, and load balancing, with validation conducted in cigarette packaging workshops. Results demonstrate that this model significantly enhances concurrent processing capabilities and response speed, providing an efficient and reliable database interaction solution for intelligent manufacturing in tobacco machinery.

Keywords

tobacco machinery; host system; distributed database; data interaction optimization; caching mechanism; transaction consistency

烟草机械上位机分布式系统数据库交互优化研究

王新喆 黎志

上海烟草机械有限责任公司, 中国·上海 200120

摘要

随着烟草制造业数字化与智能化进程加快, 分布式上位机系统在生产控制与数据交互中的作用日益凸显。上位机作为设备信息枢纽, 其数据库交互性能直接影响系统响应与数据同步效率。传统集中式架构存在事务延迟与一致性维护困难等问题, 制约系统协同。本文构建了融合多级缓存、异步事务队列与消息中间件的优化模型, 从架构设计、数据传输与负载均衡等方面展开研究, 并在卷包车间进行验证。结果表明, 该模型显著提升并发处理能力与响应速度, 为烟草机械智能制造提供了高效可靠的数据库交互方案。

关键词

烟草机械; 上位机系统; 分布式数据库; 数据交互优化; 缓存机制; 事务一致性

1 引言

在烟草制造业信息化生产体系中, 上位机系统承担设备监控、数据采集与控制指令下发等核心任务。随着卷包等环节自动化水平提升, 分布式上位机逐渐取代单机控制, 实现多节点并行与协同控制, 但也带来了数据库交互频繁和数据一致性维护困难的问题。由于生产数据实时性强、并发量大、结构复杂, 传统集中式数据库已难以满足高性能与高可靠需求。为此, 本文提出一种融合缓存优化、消息队列与异步事务处理的数据库交互优化方案, 通过结构重构与算法改进, 显著提升系统的响应速度与数据一致性, 为烟草机械智能制造中的上位机分布式系统提供高效、可扩展的技术路径。

【作者简介】王新喆(2000-), 男, 本科, 从事自动化研究。

2 烟草机械上位机分布式系统特征分析

2.1 系统架构与功能定位

烟草机械上位机系统在分布式生产环境中承担数据采集、过程监控与智能控制的核心角色。系统整体由设备层、通信中间层与数据处理层构成, 形成“采集—传输—分析—决策”的闭环结构。设备层以 PLC、传感器和执行单元为基础, 负责实时采集关键工艺参数; 通信中间层通过工业总线、OPC UA 及消息队列协议, 实现设备节点与服务器之间的高效数据传输; 数据处理层则集中完成数据库存储、事务管理与统计分析任务。分布式架构使各上位机节点既能独立完成任务, 又能通过数据库交互实现工艺参数的全局共享与协同控制。系统运行过程中, 大量设备需实时上传状态信息, 这对数据库的吞吐量与响应速度提出了极高要求。若交互机制设计不当, 易引发锁竞争、I/O 瓶颈及事务延迟, 严重影响生产节拍与数据同步效率。

2.2 数据交互的实时性与一致性需求

烟草机械的连续生产特性决定了其数据交互必须具备高实时性与严格一致性。系统需快速响应工艺参数变化，保证控制调节与报警处理的即时性。实时性不足将导致控制滞后，进而影响生产质量与能耗优化。同时，一致性维护是系统可靠运行的关键，任何写入延迟或数据冲突都可能造成工艺参数错配，触发控制异常。分布式数据库架构下，多节点并发写入与同步更新极易导致主从延迟、写冲突或部分数据覆盖，因此必须引入高效的事务隔离机制、全局时间戳控制及双向同步策略，确保在高并发情况下数据的一致性与完整性。通过优化分布式事务模型与异步校验机制，可在提升系统并发处理能力的同时，保证工艺数据的准确同步与决策层数据的实时可用。

2.3 传统架构的瓶颈与限制

目前多数烟草机械生产系统仍依赖单节点数据库架构。该架构虽然在单机控制阶段能满足基础需求，但在分布式上位机体系中暴露出明显瓶颈。集中式事务处理模型导致并发写入冲突频繁，事务锁等待时间增加；当设备数量和数据量激增时，数据库 I/O 带宽与 CPU 资源均成为限制性能的主要因素。部分企业尝试通过主从复制或分库分表方案提升性能，但依旧存在读写不均衡、负载集中过高和同步延迟等问题。尤其在网络环境复杂的车间现场，集中式数据库容易因网络抖动或节点断连造成数据丢失或任务中断，难以支撑持续运行的工业生产需求。由此可见，传统架构已难以满足烟草机械上位机分布式系统在高并发、低延迟与高可靠性条件下的数据库交互需求，亟需从架构层面进行系统性优化与重构。

3 数据库交互优化总体设计

3.1 多级缓存体系的构建

针对烟草机械上位机系统中频繁的高并发读写访问问题，本文构建了基于 Redis 的多级缓存体系，以实现数据访问的分层优化与响应加速。系统根据数据访问频率与业务重要性将缓存划分为三级：一级缓存驻留于内存，用于存放高频访问数据，实现快速读取响应；二级缓存部署于共享内存或集群节点，用于存储中频数据，实现跨节点共享与快速查询；三级缓存则以数据库持久层为支撑，存放低频访问数据与历史记录。通过异步写入与延迟同步机制，系统在数据写入时先更新缓存，后台批量同步至主数据库，减少数据库直接访问压力。多级缓存机制有效提升了系统查询效率，降低了数据库资源占用率，在高峰时段保持稳定性能，缓解了分布式系统的访问瓶颈与响应延迟问题。

3.2 异步事务与消息队列融合机制

在分布式上位机系统中，设备节点的数据采集、加工与入库操作常处于高并发状态，传统同步事务处理在此场景下易出现锁等待与线程阻塞，严重影响系统性能。为此，

本文提出基于消息队列的异步事务融合机制。各节点将数据写入请求封装为标准化消息，交由中间件进行排队与缓冲处理。数据库后端以消费者方式批量接收消息，并采用异步提交方式执行事务。该机制显著降低了锁竞争，提高了事务并行度和数据库吞吐量。系统同时引入幂等性校验与事务日志追踪机制，确保在网络异常或消息重复投递情况下依然维持数据一致性与可靠恢复能力。该机制为高并发场景下的稳定运行提供了坚实支撑。

3.3 数据分片与负载均衡策略

为进一步优化分布式数据库的整体性能与可扩展性，系统采用基于 Hash 算法的数据分片策略，将数据分配至独立节点进行存储与处理。通过逻辑分区与物理分片相结合的方式，实现数据的并行查询与分布式存储，有效降低了单节点负载压力。在访问调度层，系统引入 Consistent Hashing 一致性哈希算法，通过反向代理实现请求的动态分配与负载均衡。当节点扩展或故障发生时，系统能够自动迁移部分数据，维持平衡的负载状态并保证业务连续性。分片与负载均衡机制有效提升了数据库整体吞吐量，缩短了查询响应时间，并在节点扩展时保持良好的扩展效果，支撑了烟草机械上位机系统在大规模分布式部署环境中的高可用性与高性能运行。

4 数据库交互优化关键技术实现

4.1 连接池与事务控制优化

在烟草机械上位机分布式系统中，数据库访问频率极高，传统的逐次建立连接模式造成频繁的资源分配与释放，增加了系统负载。为此，系统引入基于连接池技术的统一数据库访问接口，采用动态连接复用与空闲连接回收机制，使多线程请求能够在连接池中高效分配资源，显著降低连接建立的时间成本。事务处理方面，系统将复杂的大型事务拆解为多个可并发执行的小事务，并通过异步确认与延迟提交机制，在确保数据一致性的同时降低了锁竞争概率。针对高并发场景，事务调度模块采用优先级队列算法，对实时性强的生产控制事务优先处理。优化后的方案充分验证了连接池与细粒度事务管理在工业控制系统中的高效性与可扩展性。

4.2 分布式缓存一致性维护

多级缓存体系的引入有效分担了数据库访问压力，但也带来了缓存与主库间一致性维护的挑战。针对这一问题，系统设计了基于发布/订阅机制的分布式缓存同步方案。当数据库更新或事务提交完成后，消息队列立即向相关缓存节点发布更新通知，触发数据刷新流程，从而实现多节点数据状态的实时一致。对生产关键参数采用双写校验与版本号控制机制，防止缓存脏读或版本回退。对于网络延迟或节点故障导致的缓存失效，系统自动启动重同步机制，通过日志比对恢复最新数据状态。该方案在性能与一致性之间取得平衡，显著提升了系统在高并发场景下的数据稳定性，为烟草

机械上位机实时监测与指令传输提供了坚实支撑。

4.3 分布式日志与故障恢复机制

分布式环境下的节点故障与网络异常极易引发数据丢失与事务中断问题。为增强系统可靠性，本文设计了分布式日志与故障恢复机制。各数据库节点均设有本地事务日志模块，实时记录事务执行顺序、提交状态与数据快照，并通过中心协调器进行异步归档与索引维护。当节点出现故障时，协调器根据日志索引定位未完成事务，自动执行事务回放操作，实现断点续传。系统采用多副本日志冗余策略，确保在多节点同时故障情况下仍具备数据恢复能力。日志模块的分级写入策略有效降低了 IO 写入压力，使系统在故障恢复与稳定运行间取得平衡。该机制的引入显著提高了上位机分布式系统的容错性与业务连续性，为烟草制造生产的安全与稳定提供了关键保障。

5 应用实践与性能验证

5.1 卷包车间应用实例

在卷包生产线中，优化后的数据库交互架构率先投入试运行，涵盖多台上位机节点。系统在高并发数据采集与实时控制任务下表现出显著稳定性。通过异步事务队列和分布式缓存的协同运行，数据处理由串行转为并行批量执行，显著减少了数据库访问阻塞。多节点间数据同步精度达到工业控制要求，实现了高精度状态一致性。实践表明，该架构在保证实时性的同时，显著提升了卷包生产的连续性与设备协同效率，为后续模块化工艺优化提供了数据基础。

5.2 性能对比与评估

在对比实验中，优化后的分布式数据库架构在并发处理能力、响应延迟及可靠性方面均优于传统集中式模式。系统并发处理能力显著提升，数据库写入成功率达到工业级高标准。系统可靠性指标大幅提高，长周期运行无异常宕机记

录。数据一致性与事务完整性测试均满足工业控制要求。应用反馈显示，新架构有效降低了人工维护频次和停机检修时间，支持跨区域数据协同与远程监控需求，为烟草机械智能制造系统的持续运行提供了高可靠、高性能的数据基础设施保障。

6 结语

烟草机械上位机分布式系统的数据库交互优化，是实现生产线高效协同与数据智能管理的核心环节。本文通过多级缓存、异步事务与分片负载均衡等技术手段，构建了兼具高性能与高可靠性的交互架构。在卷包生产实践中，该系统有效解决了传统架构下的集中瓶颈、延迟积累与一致性维护难题，显著提升了工业控制系统的实时性与稳定性。未来研究可在现有基础上进一步引入 AI 自适应调度与时序预测机制，实现数据库访问动态优化与异常预测。同时，结合边缘计算与数字孪生技术，可实现数据层与控制层的深度融合，构建面向智能制造的高自治分布式上位机系统，为烟草行业的数字化转型与精益化生产提供持续动力。

参考文献

- [1] 王朝夕, 邓丽, 费敏锐, 等. 分布式自动化生产线控制系统中上位机与 PLC 之间的通信方法 [J]. 仪表技术, 2013,(11):24-28.
- [2] 晏小平, 谢亦三, 郑根发. 建立烟草薄片生产线的上位机与生产控制模型 [C]// 上海市烟草系统 2008 年度优秀学术论文集. 上海烟草(集团)公司上海卷烟厂; , 2009:64-74.
- [3] 姚伟. 液压站数据采集监控系统上位机软件设计 [J]. 工业控制计算机, 2025,38 (12):1-3.
- [4] 杨洋. 一种新型智能差示扫描量热仪 (DSC30) 的上位机系统软件设计与实现 [J]. 软件导刊, 2015,14 (07):145-149.
- [5] 李欢. 数字图像处理系统上位机系统设计 [D]. 大连海事大学, 2012.

The security interconnection mechanism and implementation scheme of industrial control networks and public networks

Yu Zhang

Guizhou Tobacco Company, Guiyang Branch, Guiyang, Guizhou, 550002, China

Abstract

With the advancement of industrial intelligence, industrial control networks are breaking away from the closed structure through public networks such as the Internet and 5G, enabling efficient applications such as remote operation and data sharing. However, the fundamental differences in architecture and transmission characteristics between the two have given rise to four major security risks: boundary penetration, protocol flaws, equipment operation and data leakage, which seriously threaten production stability and the security of national critical infrastructure. Therefore, this paper builds a “five-in-one” security interconnection mechanism of “boundary isolation + identity authentication + protocol protection + data encryption + behavior auditing”, constructing a full-chain protection system from five core dimensions. At the same time, it designs a three-layer implementation scheme of “edge-end-cloud”, through boundary protection deployment, equipment protocol modification, security platform establishment and management system support, to form “technology + management” dual guarantees. Practical applications have shown that this mechanism and scheme are in line with the requirements of industrial scenarios and can effectively solve the core security problems of interconnection.

Keywords

Industrial control network; Public network; Security interconnection; Boundary protection; Protocol parsing

工业控制网络与公共网络的安全互联机制及实现方案

张煜

贵州省烟草公司贵阳市公司, 中国·贵州 贵阳 550002

摘要

随着工业智能化推进, 工业控制网络正通过互联网、5G等公共网络打破封闭格局, 实现远程运维、数据共享等高效应用。但两者在体系架构、传输特性等方面的本质差异, 催生了边界渗透、协议缺陷、设备运维及数据泄露四大安全风险, 严重威胁生产稳定与国家关键基础设施安全。为此, 本文搭建“边界隔离+身份认证+协议防护+数据加密+行为审计”的“五位一体”安全互联机制, 从五大核心维度构建全链条防护体系。同时设计“端-边-云”三层实现方案, 通过边界防护部署、设备协议改造、安全平台搭建及管理制度配套, 形成“技术+管理”的双重保障。实际应用表明, 该机制与方案贴合工业场景需求, 能有效破解互联核心安全难题。

关键词

工业控制网络; 公共网络; 安全互联; 边界防护; 协议解析

1 引言

新一代信息技术与制造业深度融合, 工业控制系统正逐步跳出传统封闭运行框架。它借助互联网、5G网络等公共网络, 实现跨地域远程运维、数据共享分析及云端协同管控等新型应用。这一互联模式为工业企业带来诸多利好, 既能提升生产效率、优化运维成本, 还能推动决策向智能化升级^[1]。不过, 这也让工控网络暴露在公共网络的复杂威胁中, 彻底打破了传统工控系统“物理隔离即安全”的防护逻辑。实际应用中, 工控设备固有漏洞、协议安全缺陷、边界防护

薄弱、第三方运维隐患等问题愈发凸显, 严重威胁国家关键基础设施安全与工业生产稳定。构建科学完善的安全互联机制、设计适配工业场景的实现方案, 已是工业互联网发展的迫切需求。因此, 本文将对工业控制网络与公共网络的安全互联机制及实现方案展开分析。

2 工业控制网络与公共网络的特性差异及互联风险

2.1 核心特性差异

工业控制网络与公共网络在设计目标、体系架构、传输内容上有着本质不同, 这种设计差异直接埋下了互联安全的隐患。从体系架构来看, 工控网络多采用纵向高度集成的分层架构, 覆盖现场控制层、监督控制层、生产执行层。主

【作者简介】张煜(1987-), 中国贵州贵阳人, 硕士, 工程师, 从事网络安全研究。

站与终端节点是严格的主从关系，节点功能单一，对稳定性的要求却极高。公共网络则相反，采用扁平对等架构，节点具备通用计算能力，支持动态接入和数据交互，架构设计优先保障灵活性而非稳定性。再看传输特性，工控网络核心传输遥测、遥信、遥控、遥调“四遥信息”——即设备状态监测、指令下发等关键数据，对实时性、可用性要求严苛，允许适度丢包但绝禁篡改。公共网络以文本、图像等通用数据传输为主，侧重提升传输效率和带宽利用率，对实时性要求相对宽松，核心防护重点是防范数据泄露与窃取。设备及生命周期层面差异也明显。工控设备生命周期长达 5 至 10 年，软硬件升级难度大，默认口令、未修复漏洞等问题普遍存在。公共网络设备迭代周期短，可定期更新安全补丁、优化防护策略，安全适配能力更强。

2.2 主要互联安全风险

工控网络与公共网络互联主要存在四大安全风险如图 1 所示。

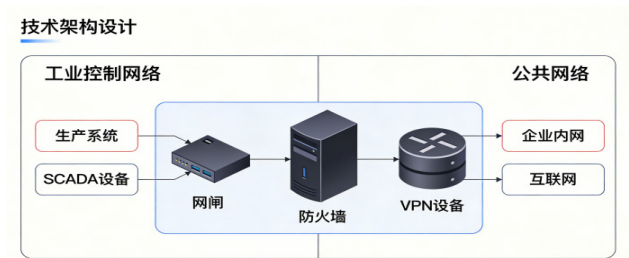


图 1 工控网络与公共网络互联安全风险示意图

2.2.1 边界渗透风险

工业控制网络与公共网络互联后，边界就成了攻击者的首要目标。不少企业因数据交互便捷，要么不部署有效边界防护设备，要么用传统 IT 防火墙替代工业专用款，根本挡不住针对工控协议的攻击。攻击者可先通过公共网络入侵企业管理网，进而横向渗透至工控网络——比如借助 MES 系统攻击 OPC 服务器，篡改生产参数引发设备异常。

2.2.2 协议安全缺陷风险

主流工控协议设计之初以功能实现为核心，未将安全性纳入首要考量，存在明文传输、缺乏身份认证、功能码易滥用等固有缺陷。Modbus 协议采用明文传输模式，无内置加密与身份认证机制，攻击者可通过 Wireshark 等抓包工具直接截获设备状态数据与控制指令，甚至利用功能码滥用漏洞——如未经授权使用功能码 06、16 篡改生产参数。某水处理厂曾因 Modbus 协议未做防护，被攻击者篡改水泵转速指令，导致供水压力异常。OPC 协议基于 Windows 平台开发，继承了 Windows 系统的漏洞隐患，且客户端常使用 admin/admin、root/root 等通用账号密码，极易引发越权访问。此外，OPC 协议的数据传输未做默认加密，攻击者可通过中间人攻击截获生产配方、工艺参数等核心数据。据国家工业信息安全漏洞库 (CNVD) 统计，2024 年上半年涉及 OPC 协议的漏洞报告达 87 起，其中高危漏洞占比 42%。

3 工业控制网络与公共网络的安全互联机制构建

工业控制网络与公共网络的安全互联机制构建，如图 2 所示。

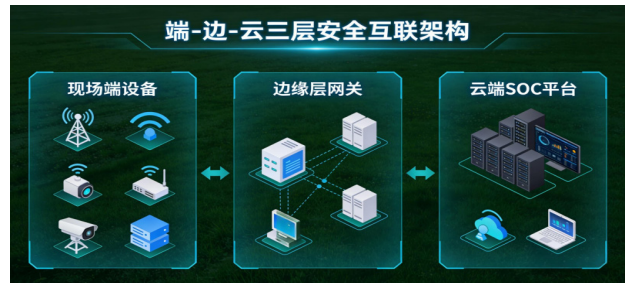


图 2 “端-边-云”三层安全互联总体架构图

3.1 边界隔离机制

边界隔离是工控与公共网络安全互联的基础，实际防护中需采用“纵向隔离+横向分区”的双重策略，以此搭建起多层次的边界防护体系。纵向防护上，要在工控网络与公共网络、企业管理网之间部署工业网闸、工业防火墙等专用防护设备，彻底切断网络间的直接连接，依靠专有数据块“摆渡”完成数据交换，同时严禁公共网络直接访问工控核心设备。横向管控方面，需按业务重要性将工控网络划分成核心控制区、监控区等不同安全区域，落实分区分域管控，严格限制区域间的数据流向与访问权限。而面对无线互联的特殊场景，还需制定严格接入控制策略，关闭 SSID 广播、做无线设备双向身份认证，通过工业级 VPN 构建加密链路，限制接入设备权限，防范非法接入与信号截获攻击。

3.2 身份认证与权限管控机制

要搭建覆盖设备、用户、应用三层面的全维度身份认证体系，从根源上确保互联主体可信。面向设备端，为工控设备、网关、服务器等分配唯一身份标识，设备接入网络时完成双向认证，直接禁止未授权设备接入。针对用户群体，采用“账号密码+双因子认证”模式，对管理员、运维人员等实施分级授权，严格遵循最小授权原则，禁用冗余默认账户，及时清理过期账户。聚焦跨网络应用，对 OPC、MES 等应用做精细化权限管控，细化操作权限粒度，限定访问与数据操作范围，防范越权访问与恶意操作。除此之外，还需建立权限动态调整机制，根据业务需求、人员岗位变动及时更新权限配置。

3.3 协议安全防护机制

面对工控协议先天设计短板，可搭建“协议解析+过滤审计+漏洞防护”全流程防护体系（如图 3 所示）。优先部署工业协议安全网关，借助深度协议解析技术对 Modbus、IEC104 等主流协议做四维检测，过滤非法报文与异常指令，比如校验报文头格式、拦截未授权功能码^[2]。针对 OPC 这类高危协议，要升级至 OPCUA 标准，用 AES-256 加密和 X.509 证书认证替代通用账号密码，再配专用网关实现协议隔离。漏洞管理方面，定期用 Nessus 等工具扫

描,同步 CNVD 漏洞库信息;可修复漏洞选停机时段打补丁,老旧设备就用工控 IPS 旁路防护,像某电厂曾靠这招阻断 CVE-2023-38148 漏洞攻击,拦截率达 98%。



图 3 协议安全防护技术流程图

3.4 数据安全传输机制

要围绕工控数据采集、传输、存储、使用全生命周期,搭建专属的数据安全防护体系。传输环节,用商用密码算法加密工控数据,结合 IPsec、SSL 构建加密传输通道,保障公网传输的机密性与完整性;实时控制数据需优化加密算法,适配毫秒级时延要求,避免干扰生产流程。数据分类分级上,先梳理工控数据资产,区分核心与重要数据实施差异化防护,核心生产数据必须境内存储,确需出境的依法开展安全评估;存储环节则采用加密存储、冗余备份技术,定期开展备份恢复测试,保障数据可用性。

4 安全互联实现方案设计

4.1 方案总体架构

采用“端-边-云”三层架构实现工控与公共网络的安全互联,现场端聚焦设备安全接入,边缘层负责边界防护与数据预处理,云端做集中管控与智能分析,各层级协同联动,搭建全链条安全防护体系。现场端改造 PLC、传感器等工控设备,关闭冗余接口服务,设唯一身份标识,装终端防护软件,严禁违规接公网。边缘层部署工业网闸、防火墙等设备,实现边界隔离、协议解析等功能,过滤异常数据与攻击报文。云端搭建工控 SOC,集成设备管理等功能,实时监控安全状态、预警风险。

4.2 关键环节实现路径

4.2.1 边界防护系统部署

在工控网络与企业管理网间部署工业网闸,采用“2+1”硬件架构实现物理隔离,仅允许授权生产数据按规则摆渡传输,保障毫秒级时延适配工控实时性需求。企业管理网与公共网络间,部署工业防火墙与 VPN 设备,防火墙配置工控协议防护规则拦截攻击,远程运维需经 VPN 加密通道接入,完成“账号密码+硬件令牌”双认证,严格限定访问范围与授权时长,操作全程审计。5G 无线场景部署工业级 5G 网关,支持 SIM 卡认证与 AES-256 加密,关闭冗余服务,

通过网络切片隔离工控与公共业务,配置时延 $\leq 20\text{ms}$ 、丢包率 $< 0.01\%$ 的 QoS 参数,契合工业生产传输要求。

4.2.2 工控设备与协议安全改造

对工控设备开展安全加固,修改默认口令、关闭冗余接口与服务,安装设备安全管理插件,实时监测设备运行状态和漏洞情况^[1]。部署工业协议安全网关,解析过滤 Modbus、IEC104 等协议,拦截非法功能码与异常报文,封装 OPC 协议实现身份认证与加密传输。引入应用软件白名单技术,限定授权软件在工控主机运行,定期病毒查杀、补丁更新,防范勒索软件等恶意程序感染。

4.2.3 安全运营平台搭建

搭建工控安全运营中心(SOC),集成核心模块。资产盘点采用“主动扫描+被动监听”,动态生成设备型号、协议版本清单。漏洞管理关联 CNVD 工控漏洞库,实现扫描、评估、修复闭环。嵌入 AI 异常检测模型,精准识别协议异常、参数篡改等风险。集中存储审计日志,支持多维度检索追溯,联动应急响应模块快速处置安全事件。

4.2.4 管理制度体系建设

配套建立完善的工控安全管理制度,覆盖资产管理、配置管理、供应链安全等多方面。明确资产管理责任部门,建立工控资产清单并定期核查。规范账户与口令管理,定期更新口令,对权限实施分级管控。与供应商签订安全协议、明晰权责,选用经安全认证的工控软硬件;强化运维人员培训考核,第三方运维全程旁站监督审计,严禁私自操作核心设备。

5 结语

工控与公共网络的安全互联,是工业智能化发展的必然走向,只是这一过程的安全防护,要兼顾工业生产的实时性、可用性,以及网络安全的机密性、完整性。本文搭建的“五位一体”安全互联机制,从边界隔离、身份认证等五大维度形成全链条防护,设计的一体化实现方案贴合工业实际应用场景,能有效破解互联过程中的核心安全难题。未来,AI、数字孪生、6G 等技术持续发展,工控与公共网络的融合会更深入,安全风险也将呈现复杂化、智能化特征。后续可深挖 AI 驱动的自适应安全防护技术,实现攻击行为的精准识别与主动防御;也可探索数字孪生与工控安全的深度融合,构建虚拟仿真防护体系,提前预判互联风险,为工业互联网安全发展筑牢技术支撑。同时还需强化行业标准体系建设与跨领域协同,打造“技术+管理+标准”的立体化安全保障体系,切实筑牢国家关键基础设施的安全防线。

参考文献

- [1] 王庚辰,姜庆超,颜学峰.基于深度学习的工控系统网络攻击多分类检测[J/OL].华东理工大学学报(自然科学版),1-11[2026-01-21].
- [2] 淮文军,刘树立,高士伟,等.工业网络控制系统故障诊断与智能运维研究[J].电脑编程技巧与维护,2025,(11):173-176.
- [3] 桂松涛.石油企业工业控制系统网络安全体系建设研究[J].信息系统工程,2025,(10):99-102.

An Automatic Line Load and Fault Detection Device Based on a Self-Balancing Bridge and STM32

Anguo Yang Yue Jiang Qinghua Sheng

School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract

This paper presents a device capable of automatically detecting line load conditions and short-circuit faults, featuring real-time load identification, fault alarming, and short-circuit location without human intervention. The system employs an STM32H743IIT6 microcontroller as the main controller, utilizing its built-in 14-bit SAR ADC together with an external 24-bit Δ - Σ ADC (ADS131A04) for high-precision signal acquisition. A relay module switches between load-detection and fault-detection modes. The load detection is based on a self-balancing bridge method to accurately measure the amplitude and phase of voltage and current, while short-circuit distance estimation uses a high-frequency phase-comparison technique. On the software side, low-pass sampling, Fast Fourier Transform (FFT), and All-Phase FFT (AP-FFT) algorithms are integrated to extract impedance characteristics, classify load types (resistive, inductive, capacitive, and their combinations), compute component parameters, and estimate fault distances. Experimental results demonstrate that the measurement error of component parameters is less than 3%, and the short-circuit localization error remains below 5% even under interference, confirming the system's high accuracy and robustness.

Keywords

line load and fault detection; FFT; AP-FFT; IDFT; self-balancing bridge

一种基于自平衡电桥与 STM32 的自动线路负载及故障检测装置

杨安国 姜越 盛庆华

杭州电子科技大学电子信息学院, 中国·浙江 杭州 310018

摘要

本文设计并实现了一种可自动检测线路负载状态与短路故障的装置, 具备实时负载识别、故障报警及短路点定位功能, 无需人工干预。系统以 STM32H743IIT6 为主控, 结合内置 14-bit SAR ADC 与外置 24-bit Δ - Σ ADC (ADS131A04) 进行高精度信号采集, 并通过继电器切换负载检测与故障检测模式。负载检测采用自平衡电桥法, 精确获取电压电流幅值与相位; 短路距离测量采用高频鉴相法。软件上融合低通采样、FFT 与全相位 FFT (AP-FFT) 算法, 实现阻抗特性提取、负载类型判别 (R/L/C 及其组合)、元件参数计算及短路距离估算。测试结果表明, 参数测量误差小于 3%, 短路定位误差在干扰下仍低于 5%, 系统具备良好的精度与鲁棒性。

关键词

线路负载及故障检测; FFT; AP-FFT; IDFT; 自平衡电桥

1 引言

在智能电网、工业自动化及轨道交通等领域, 输电线路的负载状态识别与短路故障快速定位对保障系统安全至关重要。传统 LCR 表仅支持离线测量, 而直流电阻法定位

易受温度与接触阻抗影响。本文提出一种融合自平衡电桥与高频鉴相测距的在线检测方案, 通过 AP-FFT 精确提取相位信息, 并结合频域直流分量抑制导线抖动噪声, 实现高精度、高鲁棒性的负载识别与故障定位。

2 系统检测原理与论证

2.1 LCR 及负载类型检测

传统串联采样法在连接处存在对地漏电流, 影响测量精度。为解决此问题, 本装置采用自平衡电桥法。该拓扑利用运放深度负反馈将负载与采样电阻连接点钳位至虚地, 有效消除了分流误差, 确保流经两者的电流严格一致。

在原理层面, 利用扫频信号获取负载网络的阻抗模值

【基金项目】2024年浙江省大学生新苗人才计划项目《面向集成电路装备精密运动控制系统的高精度电机驱动器》(项目编号: 2024R407A006)。

【作者简介】杨安国(2004-), 男, 中国浙江温州人, 本科, 从事仪器仪表、FPGA, 嵌入式系统等研究。

与相位。依据阻抗公式，通过的正负及变化趋势判别负载呈阻性、感性或容性（及其组合结构），并据此计算 R、L、C 具体参数，实现高精度识别。

2.2 短路故障定位

相比恒流源测距法存在的电流波动与温漂干扰问题，本装置采用高频鉴相法。基于传输线理论，高频激励下导线视为分布参数网络（如图 1 所示），其等效电感会引起信号相移，且相移大小与导线长度成正比。

系统选用 AD9959 产生高频正弦激励，利用 AD8302 鉴相器检测信号经过导线前后的相位差。通过建立相位差与线长的映射关系，克服了集总参数模型在定位上的局限性，从而实现高精度的短路距离测量。

3 电路与程序设计

3.1 系统框图

系统硬件框图如图 2 所示，装置以 STM32H7 为核心控制器，AD9959 产生正弦激励信号，电源模块由 SX1308 与 TPS5430 级联输出 $\pm 5V$ 。系统利用继电器灵活切换检测回路：负载检测模式下，信号经自平衡电桥与 INA821 仪

表放大器调理后，由 MCU 片上 ADC 采集；故障检测模式下，信号经 AD8302 鉴相转换为直流电压，通过外置高精度 ADC ADS131A04 获取数据。最终处理结果通过串口屏实时显示。

3.2 激励信号发生电路设计

激励信号源选用四通道 DDS 芯片 AD9959，DDS 与 STM32 通过 SPI 协议通信，可以分别调整输出信号的频率、幅度和相位，频率步进 1Hz，输出串联带通滤波器以减小 DDS 高频输出时波形失真。

3.3 信号检测及处理电路设计

3.3.1 信号调理与采集

采用高带宽（4.7MHz）仪表放大器 INA821 差分采集负载与采样电阻（299 Ω ）两端的电压信号。外部 ADC 选用 24 位 ADS131A04，利用其多通道同步采样特性，消除通道间延时对相位测量的影响。

3.3.2 电源与切换

负电源由 TPS5430 构建，产生稳定 -5V 电压。系统利用继电器在负载检测与故障检测回路间灵活切换：负载模式下接入自平衡电桥，故障模式下接入鉴相电路。

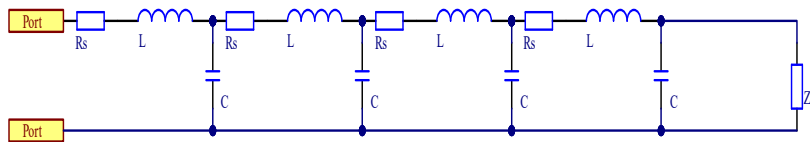


图 1 高频同轴电缆等效模型

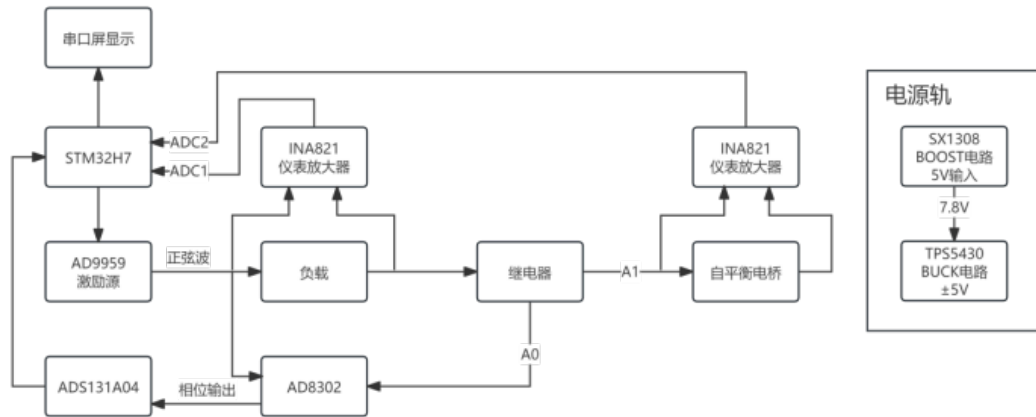


图 2 硬件系统框图

3.4 信号处理程序设计

3.4.1 总框图

软件总程序流程图如图 3 所示。系统开始先对外设以及计算变量初始化，然后利用继电器切换到负载类型检测电路，计算负载的阻抗与相位，判断负载网络是否短路。如果负载未开路或短路，则进一步扫频获得幅频、相频响应，判断网络类型和 L、R、C 参数；如果负载开路或短路，则利用继电器切换到故障检测电路，实时测量短路距离。

3.4.2 信号处理程序设计

信号处理程序部分框图如图 4 所示，系统上电默认进入负载检测模式，控制 AD9959 输出 100Hz-300KHz 扫频信号。MCU 利用双 ADC 同步采集并经全相位 FFT（AP-FFT）算法提取幅响应，优选频点计算阻抗。若判定为开路或短路，自动切换至故障检测回路，输出 10MHz 高频激励，经 ADS131A04 采集 AD8302 输出的鉴相电压后解算短路距离。

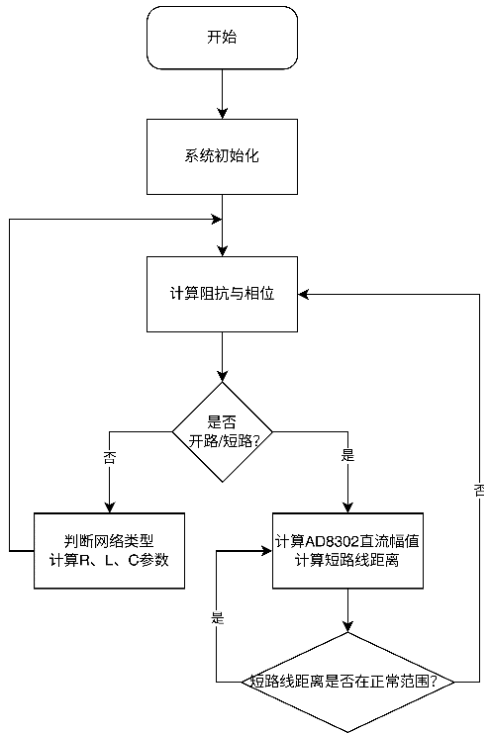


图 3 系统总框图

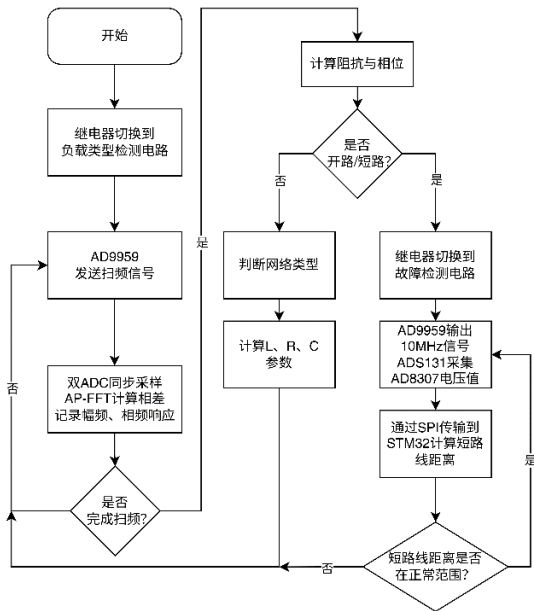


图 4 信号处理部分框图

4 测试方案与测试结果

4.1 系统测试方案

4.1.1 测试仪器

测试仪器型号如表 1 所示。

表 1 测试仪器列表

序号	仪器类别	仪器型号	数量	性能参数
1	信号源	SSG3032X	1	3.2GHZ
2	示波器	SDS2352X-E	1	350MHz
3	学生电源	MPS-3005L-3	1	30V、3A

4.1.2 测试方法

第一，进行线路负载与故障检测测试。

(1) 模拟负载开路与短路故障，验证系统报警功能是否正常。

(2) 给定电阻、电容和电感元件，进行测量，记录测量值并计算相对误差，确认测量精度是否在要求范围内。

(3) 检测系统能否识别出任意 2-3 个元件串联或并联组成的负载网络结构。

第二，进行系统抗干扰测试。

(1) 设置两根导线上的短路故障点使其与 A 点或 B 点距离相等，测量故障点与 A 点（或 B 点）的距离并验证误差。（如图 5 所示）

(2) 加入另一信号发生器产生的扫频信号，分别只接入导线 A 点和同时接入 A 点和 B 点处，再次测量故障点距离，验证系统抗干扰能力，确保在干扰情况下测量的准确性与稳定性。

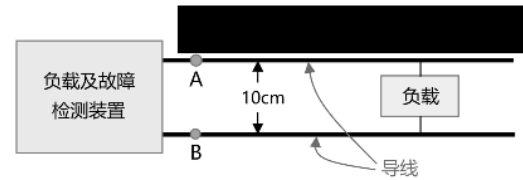


图 5 测试示意图

4.2 测试结果与分析

4.2.1 负载开路和短路异常的测试结果

负载开路和短路异常的测试，测试结果如表 2 所示。

表 2 异常情况测试

测试情况	测量情况
开路	开路
短路	短路

4.2.2 L、C、R 负载类型判断以及参数测量测试结果

负载测量分别采用 3 种不同参数的 L、C、R，结果如表 3 所示。

4.2.3 负载网络结构测量测试结果

给定由电阻、电容、电感串并联形成的负载网络，检测网络结构，结果如表 4 所示。

表 3 负载测试数据

实际器件	325.7uH	219.8uH	439.8uH	979.3Ω	1.970kΩ	268.1Ω	1.991uF	1.034uF	218.4nF
显示类型	电容	电容	电容	电阻	电阻	电阻	电感	电感	电感
负载参数	319.3uH	220.2uH	437.0uH	962.1Ω	1.952kΩ	263.0Ω	1.947uF	1.012uF	213.051nF
相对误差	1.962%	0.180%	0.633%	1.756%	0.914%	1.902%	2.210%	2.128%	2.449%

表 4 负载网络测试数据

实际负载网络	理论情况	测量情况	测量结果
506.2nF 981.8Ω	R C	R C	正确
957.2uH + 987.9Ω + 221.4nF	R + L + C	R + L + C	正确
218.4nF + 212.3uH	C + L	C + L	正确
979.4Ω + 1.034uF	C + R	C + R	正确
452.4uH + 1.970kΩ	L + R	L + R	正确
228.9n 439.8uH	C L	C L	正确
268.1Ω 332.1uH	L R	L R	正确

4.2.4 系统抗干扰测试结果

分别在不加噪声、仅在 A 点接入噪声 1、在 A 点和 B 点分别接入噪声 1 和 2 条件下，测量短路故障点距离，结果如表 5。

表 5 不同条件下短路故障点距离测试数据

实际值 /cm	条件	测量值 /cm	长度差值 /cm	相对误差
21	无噪声	20.028	0.972	4.629%
35	无噪声	34.065	0.935	2.671%
47	无噪声	46.994	0.006	0.013%
27	噪声 1	26.428	0.572	2.119%
37	噪声 1	36.420	0.580	1.568%
43	噪声 1	42.589	0.411	0.956%
40	噪声 1+2	39.370	0.630	1.575%
49	噪声 1+2	49.113	0.113	0.231%

4.2.5 结果分析

对上述测量数据进行分析计算可知，线路负载类型判断准确，L、C、R 参数测量误差小于 3%，在不同类型的噪声干扰下，短路故障点距离测量误差小于 5%，展现出较强的鲁棒性，充分满足设计要求。

5 总结

本文设计并实现了一种基于自平衡电桥与 STM32 的自动线路负载及故障检测装置。系统通过自平衡电桥消除漏电流干扰，结合 AP-FFT 算法精确提取电压电流相位信息，实现 R/L/C 负载类型判别与参数测量；短路故障下切换至高频鉴相模式，利用 AD8302 测量相移以估算故障距离。测试结果表明，元件参数测量误差小于 3%，短路定位误差在干扰环境下仍低于 5%，具备高精度、强鲁棒性与全自动运行能力，可广泛应用于工业在线监测与智能运维场景。

参考文献

- [1] 吴润强,项璟晨,郝鸣,等.基于FPGA的LCR测量仪的设计与实现[J].大学物理实验,2023,36(04):62-68.DOI:10.14139/j.cnki.cn22-1228.2023.04.013.
- [2] 李娟,马利祥.LCR自动测量系统设计[J].黑龙江工程学院学报,2022,36(01):25-30.DOI:10.19352/j.cnki.issn1671-4679.2022.01.005.
- [3] 扈蓓蓓,吴康,金海彬,等.基于自动平衡电桥的LCR阻抗测量仪设计[J].计量学报,2019,40(S1):111-115.
- [4] 宋永,杨阔.LCR测量仪的研究与设计[J].仪表技术与传感器,2019,(05):43-45+72.吴永乐.基于传输线理论的广义史密斯圆图、扩展型阻抗匹配器及多性能功率分配器研究[D].北京:北京邮电大学,2011.

Application of Intelligent Operation and Maintenance Technology in the Full Life Cycle Management of Communication Automation Equipment

Zhenhua Zhang

Shanxi Wanjiashai Yellow River Water Supply Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

With the exponential expansion of communication network scale and the complexity of its architecture, the traditional operation and maintenance paradigm has failed to meet the requirements for high reliability and efficiency of the full life cycle management of communication automation equipment. This paper focuses on the application practice of intelligent operation and maintenance technology in the entire process of planning, deployment, operation and decommissioning of communication automation equipment, relying on the integrated application of cutting-edge technologies such as big data analysis, machine learning algorithms and digital twin. It builds an intelligent operation and maintenance management system covering equipment health status assessment, fault early warning prediction, precise root cause localization and dynamic optimization of resources, and explains the specific implementation path and application effects of intelligent operation and maintenance technology. The measured data show that after the deployment of intelligent operation and maintenance technology, the accuracy of core network equipment fault prediction has been improved, the average fault handling time has been reduced, and the energy utilization efficiency of the equipment has been optimized. This research confirms that intelligent operation and maintenance technology is the core technical support for achieving lean management of communication automation equipment and ensuring the continuous and stable operation of communication networks.

Keywords

Intelligent operation and maintenance; Communication equipment; Full life cycle management; Predictive maintenance

智能运维技术在通信自动化设备全生命周期管理中的应用

张振华

山西万家寨引黄水务集团有限公司, 中国·山西太原 030000

摘要

伴随通信网络规模扩容与架构复杂度的指数级攀升,传统运维范式已无法适配通信自动化设备高可靠性、高效率的全生命周期管控要求。本文聚焦智能运维技术在通信自动化设备规划、部署、运营及退网全流程管控中的应用实践,依托大数据分析、机器学习算法及数字孪生等前沿技术的融合应用,构建涵盖设备健康状态评估、故障预警预测、故障根因精准定位及资源动态优化的智能运维管控体系,阐释智能运维技术的具体落地路径与应用成效。实测数据表明,智能运维技术部署后,核心网设备故障预测精准度实现提升,平均故障处置时长实现缩减,设备能源利用效率实现优化。此次研究证实,智能运维技术是达成通信自动化设备精益化管控、保障通信网络持续稳定运行的核心技术支撑。

关键词

智能运维; 通信设备; 全生命周期管理; 预测性维护

1 智能运维技术体系概述

当前,实现现代通信网络的稳定运行大部分只是依赖于自动化通信设备,此项技术主要是通过基站设施、光传输设备、核心网元、数据中心服务器及动力环境监控系统等核心载体实现。其全生命周期的管控会贯穿规划设计、安装调试、运行监控、维护优化及退网回收等关键的流程。智能运维的目标是在于依托大数据、人工智能及自动化技术的深度

融合,从而实现运维数据的深度挖掘与智能化分析研判^[1],其核心技术架构包含数据采集与融合层、智能分析层、自动化行动层三层内容。

2 通信自动化设备全生命周期管理现状与挑战

当前通信运营商与大型互联网企业及水利、能源等关键基础设施行业在设备全生命周期管控环节均承受显著压力。水利行业内,布设于江、河、湖、库等水域的闸门启闭机、水文遥测站、泵站控制系统等自动化测控设备,长期面临野外工况恶劣、供电保障能力不足、通信链路稳定性欠佳、设备空间布设分散等行业性特殊挑战。传统人工巡检的运维模

【作者简介】张振华(1985-),男,中国山西左云人,本科,工程师,从事通信自动化研究。

式不仅存在运维成本高、作业效率偏低的问题，更无法实现对设备运行状态的实时感知与精准调控，进而造成设备故障的发现与处置环节存在显著滞后性，直接削弱了防洪调度、水资源优化配置等水利核心业务的运行可靠性。

2.1 规划设计阶段

在此阶段中，通过历史运维经验与静态化容量测算模型开展设备选型论证与容量规划设计，难以对未来业务扩张引致的非线性负载波动进行精准预判，极易造成初期建设投资冗余浪费或后期被迫实施高频次扩容改造^[1]。水利自动化系统在规划与设计阶段，常对极端气象、突发水文情势等因素引发的设备负载骤升情形缺乏充分预判，致使部分核心监测与调控节点在汛期运行过程中陷入性能受限的瓶颈困境。

2.2 部署与调试阶段

设备加电启动、软件镜像部署、业务参数配置及系统联调测试全流程高度依赖人工操作模式，不仅作业效率长期处于低位，且人为失误诱发的故障风险居高不下。水利自动化设备的施工作业多布设于偏远野外场地，调试技术人员的现场往返调度存在显著不便，设备配置偏差、软硬件兼容性故障等问题往往需延迟数日方能被识别并完成处置，对整体工程的推进节奏造成严重阻滞。

2.3 运营与维护阶段

该阶段为全生命周期内存续周期最长、资源投入成本最高的关键环节，其面临的核心挑战集中体现于故障处置呈现显著被动响应特征性能管控模式呈现明显粗放化特征、资源调度机制呈静态固化特征、能耗管控体系存在明显缺位现象四个方面^[2]。水利工程系统内，泵站非计划停机、闸门控制功能失效等设备故障问题，往往直至对供水保障、防洪安全造成实际影响时才被察觉，使得相关应急处置工作承受极大的响应压力。

2.4 退网与回收阶段

水利行业内部分自动化设备因缺乏精准的状态评估体系，普遍存在“故障失效后更换”或“固定周期强制更换”的粗放式资产管理问题，致使设备资产的整体利用效能处于较低水平。

3 智能运维在设备全生命周期管理中的核心应用

3.1 基于仿真的容量与风险评估

在前置阶段中，通过对数字孪生技术架构进行引入，进一步搭建高保真设备虚拟映射模型，通过对网络拓扑结构

与业务流量特征模型进行整合，进而开展多场景仿真推演。基于对未来多元业务增长场景的模拟分析，从而对设备容量承载压力、潜在性能瓶颈及故障诱发风险进行精准评估，以此为设备选型论证与网络架构优化设计提供量化决策依据。在水利工程领域，可搭建融合水文模型、设备物理模型及控制逻辑模型的数字孪生体系，针对不同来水工况下泵站、闸门等水工设备的运行负载状态与性能响应特征开展仿真模拟，以此实现设备选型方案与系统整体配置的科学化优化。

3.2 自动化部署与智能验收

基于智能运维平台内嵌的标准化配置模板与合规性校验规则，进而达成设备的无人工干预开局部署与配置策略自动化下发。针对水利领域的自动化测控设备，可研发适配性专用部署模板与标准化测试用例体系，实现设备的远程一键式部署与功能的全流程自动化校验，显著压缩设备现场调试的周期时长。

3.3 预测性维护与智能优化

3.3.1 设备健康度综合评估与预测性维护

通过对多维度设备健康度评估模型进行搭建，对设备性能指标、告警事件、运行日志、业务负载等多源异构数据进行整合，依托 XGBoost、生存分析模型等机器学习算法，量化生成设备健康评分，同时精准预测设备剩余使用寿命、潜在故障发生概率及故障预判时间窗口。如表 1 所示为某数据中心针对使用年限超 3 年的服务器集群开展健康度评估及故障预测工作的结果抽样，表格数据为模拟数据，反映通用评估维度。水利设备健康状态评估工作，需重点聚焦振动、腐蚀、绝缘等可表征设备机械与电气运行状态的专属监测指标，针对性构建适配野外复杂工况的设备状态预测模型。

依托精准的预测分析结论，运维模式可实现从传统定期预防性维护向需求驱动型精准维护的转型，据此科学制定靶向性维护方案。

3.3.2 故障智能诊断与根因定位

在告警触发或性能指标出现异常波动的场景下，依托知识图谱技术搭建“设备-链路-服务-应用”全链路关联拓扑图谱，融合时序异常检测算法模型，实现海量离散告警信息向根因设备或变更事件的快速收敛定位^[4]。水利自动化系统的故障诱因往往涉及传感器、执行机构、通信链路、控制中心等多个技术环节，故障根因智能定位技术可对现场设备故障、通信链路中断、控制指令异常等故障类型实现快速甄别与精准判定。

表 1 服务器健康度评估与故障预测示例

设备序列号	CPU 老化指数	内存 ECC 错误率 (次 / 日)	硬盘 SMART 预警等级	历史告警 频次	健康度得分 (0-100)	未来 90 天内 故障概率	建议措施
SVR-2021-0017	0.85	5	中度	低	72	18%	加强监控，准备备件
SVR-2021-0043	0.92	152	严重	高	41	65%	计划内更换
SVR-2021-0079	0.78	0	无	极低	94	2%	常规运维

3.3.3 资源弹性调度与能效优化

捕捉业务负载的周期性波动特征，依托强化学习算法动态调适设备运行参数，或实施跨设备负载调度，实现计算、存储资源的弹性调度与按需供给。在水利自动化应用场景下，可依托实时水情监测数据与调度指令要求，对泵站机组的启停组合方式及运行转速实施智能化动态调控，在保障提排水作业需求充分满足的基础上，达成系统运行能效的最优化目标。在能耗管控维度，处于数据中心场景下，借助人工智能算法实时研判 IT 负载水平、室外环境温度、冷却系统运行效率等多元参数，动态优化制冷系统的运行模式与策略。

4 S 省级 J 运营商核心网设备智能运维实践案例详析

4.1 案例背景

S 省 J 省级运营商于 4G/5G 融合核心网领域完成百台级虚拟化网元的分布式部署，所涉网元涵盖 vMME、vPGW、vPCRF 等关键类型，且全部承载于多套核心资源池的硬件架构上。此案例借鉴了 S 省 A 水利企业针对水雨情监测站、视频监控终端、闸门控制单元等通信自动化设备开展集中化智能运维管理的初步实践探索经验。现阶段该运营商在运维工作中面临一系列核心痛点，具体体现为故障根因定位效率低下、性能瓶颈的前瞻性预判能力匮乏、各核心资源池之间的负载分布态势失衡等问题。而该省 A 水利企业在运维环节同样存在显著难题，受设备品类繁杂、通信协议多样、布设区域分散等因素影响，其运维工作呈现出数据整合难度大、故障定位耗时久、预防性运维体系缺失等突出问题。

4.2 智能运维平台建设

该运营商联合设备厂商，共建核心网智能运维管控平台，核心功能模块部署包含全域数据采集模块、数字孪生建模模块、智能算法部署模块。全域数据采集方面，采集覆盖网元级性能指标包含每秒信令处理量、并发会话数、CPU/内存占用率等，虚拟基础设施层运行指标包含宿主机负载率、网络传输时延等，业务维度关键绩效指标包含终端附着成功率、网间切换成功率等，数据采集周期精准至分钟级。A 水利企业的智能运维管理平台，需实现对各类传感监测数据、设备运行状态感知数据、控制指令执行日志数据与视频监控流媒体数据等多源信息的一体化整合。A 水利智能运维平台需针对性研发适配时序水文数据解析与设备机械故障趋势预判的专属算法模型。

4.3 实施效果与量化数据

平台正式上线运行满一年后，斩获如下核心应用成效。故障管理效能显著提升，业务影响类重大故障预测精准度达 87%，平均预警前置时长为 4.5 小时，告警收敛比、即原始告警总量与有效故障事件量比值达 120:1，故障平均定位时长由原先 2 小时压缩至 25 分钟。资源利用效率实现优化，依托负载趋势预测与智能调度机制，资源池 CPU 平均利用率由 24% 提升至 38%，借助削峰填谷动态调控策略，业务峰值时段资源过载风险降幅达 70%。运维管理成本有效压降，非计划性紧急维护工单量降幅达 55%，对应运维人力成本测算降幅约 20%。集群能耗水平稳步下降，基于低负载时段物理服务器智能休眠与唤醒策略，目标集群整体能耗降幅约 18%。依托水利企业的前期实践探索，经智能运维系统的落地应用，其核心遥测站点的监测数据完好率实现约 15% 的提升，设备平均故障修复时长则缩减约 40%。

表 2 智能运维平台应用前后关键指标对比

关键性能指标 (KPI)		应用前 (基准)	应用后	提升 / 降低幅度
通信网络核心指标	重大故障预测准确率	未系统实施	87%	-
	平均故障定位时间	约 120 分钟	约 25 分钟	降低约 79%
	资源池 CPU 平均利用率	24%	38%	提升 14 个百分点
	计划外紧急维护工单数	月均 40 单	月均 18 单	减少 55%
	相关设备集群能耗	基准值	基准值的 82%	降低 18%
水利自动化参考指标	关键遥测站点数据完好率	约 82%	约 94%	提升约 12 个百分点
	平均故障修复时间	约 82%	基准值的 60%	缩短约 40%

5 结语

通信自动化设备全生命周期管理，正从凭靠人工经验的经验导向型技艺，演进为以数据与算法为核心驱动的量化决策型科学。智能运维技术凭借大数据分析 with 人工智能技术的深度耦合，为设备全生命周期管理各环节赋予智能化内核，智能运维技术的落地应用，可实现网络可靠性的显著提升、资源利用效率的优化配置、运维成本与能源消耗的双重压降，是通信行业迈向自动驾驶网络架构、践行可持续发展战略的核心技术路径。未来，伴随大模型等前沿技术的迭代升级，智能运维技术将朝着高阶认知智能与自主决策能力方

向持续演进，进而深度重塑通信自动化设备全生命周期管理模式。

参考文献

- [1] 周富龙. 电力通信网络智能运维故障诊断系统探讨[J]. 中国信息界, 2025, (09): 232-234.
- [2] 郑姣. 水利信息系统运维费支出标准建设研究[J]. 四川水利, 2024, 45(05): 164-166.
- [3] 彭蔚. 面向电力通信设备智能运维的知识图谱应用[J]. 无线互联科技, 2024, 21(23): 64-68.
- [4] 马宜东, 赵雨森. 水利行业构建一体化 IT 运维管理系统[J]. 网络安全和信息化, 2023, (07): 79-80.

Research on the Application and Development Trend of Artificial Intelligence in the Field of Computer Information Technology

Qiang Liu

Tencet, Beijing, 100080, China

Abstract

In the new round of information technology revolution, artificial intelligence has deeply integrated into the core links of the computer information technology system, reshaping the landscape of computing power, data, security, and operation and maintenance. This study focuses on key application scenarios such as network security, data processing, software development, and intelligent terminals, systematically analyzing the embedding logic, operation mechanism, and efficiency transmission path of artificial intelligence. It conducts a structured analysis mainly around the dimensions of algorithm evolution, technology integration, and industrial collaboration. The research concludes that artificial intelligence is driving information systems to shift from rule-driven to model and data-driven, and the cloud-edge-device collaborative pattern is becoming increasingly mature, while the demand for security protection and ethical governance is rising simultaneously. The research conclusions of this paper can provide theoretical references and practical guidance for the strategic planning of computer information technology and the digital upgrade of industries.

Keywords

Artificial Intelligence; Computer Information Technology; Development Trends

人工智能在计算机信息技术领域的应用及其发展趋势研究

刘强

腾讯科技(北京)有限公司, 中国·北京 100080

摘要

在新一轮信息技术变革中,人工智能已深度融入计算机信息技术体系的核心环节,正重塑算力、数据、安全与运维的格局。本研究聚焦网络安全、数据处理、软件开发与智能终端等关键应用场景,系统剖析人工智能的嵌入逻辑、运行机制及效能传导路径,重点围绕算法演进、技术融合与产业协同等维度展开结构化分析。研究认为,人工智能正推动信息系统由规则驱动转向模型与数据驱动,云—边—端协同格局日趋成熟,安全防护与伦理治理需求同步上升。本文的研究结论可为计算机信息技术的战略规划与行业数字化升级提供理论参考与实践指引。

关键词

人工智能; 计算机信息技术; 发展趋势

1 引言

在数字经济加速渗透的当下,人工智能作为核心驱动力,正在打破计算机信息技术领域传统的技术边界与应用模式,引发算力分配、数据价值挖掘、系统安全保障等多方面的深刻变革。在这一关键时期,精准把握人工智能在网络安全、数据处理、软件开发与智能终端等关键环节的作用机理,理清其技术演进脉络与产业融合路径,对于研判信息系统的发展方向、释放技术创新红利具有重要意义。

2 人工智能在计算机信息技术领域的具体应用

2.1 在计算机网络安全领域的应用

人工智能嵌入网络安全防护体系的识别、溯源与策略联动等环节,安全系统借助深度学习与图模型对流量、日志与行为特征建模,将静态规则匹配转化为异常路径识别,提升对潜在扫描与数据泄露的识别能力[1]。入侵检测与态势感知平台以时序建模与行为聚类算法为核心,对海量日志与告警记录进行智能化关联分析,在攻击链初期即触发预警,并同步生成与资产重要性等级匹配的处置优先级。针对零日漏洞与未知样本等防护难题,安全团队构建基于相似度与对抗训练的判别模型,将人工分析转化为智能筛选流程,缓解规则更新滞后与人力负担压力。

【作者简介】刘强(1981-),男,中国天津人,硕士,从事计算机与信息技术研究。

2.2 在数据处理与分析领域的应用

人工智能技术已构建起覆盖全流程的数据智能支撑体系。在采集与预处理阶段，人工智能通过特征工程与异常识别算法，对多源异构数据完成清洗、对齐与标注，为建模提供高质量基础；在建模与洞察阶段，人工智能技术凭借深度神经网络与预训练语义模型，对文本、图像、传感器流等非结构化与半结构化数据进行高维特征分析，精准挖掘传统分析方法难以捕捉的潜在关联结构与隐含规律。面对业务决策情境时，智能系统整合预测、聚类与模拟模型，构建指标监测与决策支持框架，生成多类可选方案，并通过可视化技术呈现关键变量与参数阈值，使决策更具前瞻性。

2.3 在软件开发与运维领域的应用

在软件开发中，人工智能已融入需求分析与代码生成环节，辅助工具依托语料与语义模型解析语言与代码意图，自动生成结构规范的代码草案，推动编码从“重复书写”向“逻辑优化”转型^[2]。在代码质量管控中，分析平台利用模式识别与图结构分析遍历调用路径，标记异常位置并生成可复用修复建议。进入运维阶段，AIOps体系通过融合日志、监控指标与链路追踪数据，构建系统运行画像，并借助异常检测算法与根因分析模型，在系统性能波动与早期故障信号出现时，及时推送预警信息与处置方案，推动调度策略与扩容操作逐步向自适应调节模式转化。

2.4 在智能终端与物联网领域的应用

在终端与物联网场景中，人工智能依托语音识别、图像理解与多模态技术，赋予设备更自然、高效的交互能力，终端部署的轻量模型可在资源受限下完成唤醒词识别与目标检测，实现部分本地反馈，减轻对中心节点与网络的依赖。另一方面，边缘网关基于预测与异常检测模型，对传感器数据与能耗曲线建模，在状态异常前生成调节建议，推动运维前置化。针对大规模物联网部署场景，平台层结合设备画像构建与行为模式聚类算法开展分群管理，在固件更新与带宽分配等任务中形成分层控制结构，减轻中心系统的调度压力。

3 人工智能赋能信息技术系统的效能表现

3.1 算力效率提升与系统响应优化

面对业务并发持续增长挑战，算力调度与资源预测模型不再依赖固定阈值与经验分配，而是基于历史负载、请求特征与硬件状态预判高峰算力需求，联动容器编排与弹性伸缩，缩短任务等待时间并减少资源浪费。对延迟敏感型业务，系统结合强化学习与多目标优化算法在线调整算力与内存配比，在时延与吞吐约束下寻求平衡，并将推理环节前移至边缘，由中心侧下发策略参数以缩短链路，保障服务响应的连续性与可预测性。

3.2 数据处理自动化与智能化决策能力增强

在数据处理环节，人工智能参与数据接入、质量评估

与特征构建，自动完成缺失填补、异常识别与字段标准化，将原依赖人工脚本的预处理流程转化为可配置结构，使多源数据接入后可直接用于分析^[3]。面向经营分析与监测场景，智能系统融合时序模型、图算法与强化学习，对指标波动与资源分配进行推演，在风险与成本约束下生成可选路径，并借助可视化呈现关键参数，推动决策从静态报表向动态推演转变。

3.3 安全防护与异常识别能力强化

在安全防护体系中，人工智能更多承担了威胁感知与异常筛查的角色。日志平台与终端代理将连接行为与系统操作转化为序列特征，供模型学习常态轨迹；一旦访问行为在时序或结构上偏离预设阈值，系统便触发预警，有效压缩入侵发现时间差。面对勒索软件与横向渗透等隐蔽攻击，智能系统借助样本聚类构建特征空间，整合告警、溯源路径、锁定受影响资产，并联动策略模块生成隔离与收紧访问的处置策略，促使前端防护与业务侧控形成闭环联动。

3.4 用户体验提升与人机交互能力扩展

人工智能嵌入搜索、推荐与语音助手等模块，借助语义理解模型将自然语言转化为结构化指令，结合用户画像与使用场景生成应答动作序列，操作方式从多级点击转向对话式交互，学习成本显著降低^[4]。图像识别与界面优化算法基于视线与点击轨迹数据，动态调整元素布局与信息密度，使高频功能聚集于感知核心区域。在多终端协同环境中，系统还会根据设备尺寸与交互方式重构界面，保障体验一致性与操作流畅度。

4 人工智能在计算机信息技术领域的发展趋势

4.1 技术迭代趋势：算法优化与算力资源协同升级

在技术迭代层面，智能算法正朝着“高效化、轻量化、泛化性”方向深度演进。一方面，智能算法从依赖海量标注样本的深层网络转向自我监督、小样本与迁移学习路径，模型结构朝着轻量化与模块化方向演化，在保障推理精度的同时优化算力分配，使人工智能模型能够更高效地部署于实时性要求高、任务复杂度多样的应用场景。另一方面，算力资源由单一服务器扩展为云、边、端的分层协同体系，智能调度系统以负载预测与能耗评估为基础，对GPU、专用加速芯片与通用处理器进行协同编排，在吞吐、时延与能耗、成本约束及资源利用率之间构建鲁棒性强的动态平衡机制，最大化提升算力资源利用率。

4.2 应用拓展趋势：场景化、智能化与普惠化

目前，人工智能正加速嵌入更细分、贴近实操的业务流程，感知、分析与执行模块被组合为任务链条嵌入一线场景，算法能力逐步贴合具体操作节奏。典型行业中已形成若干可复用的任务模板，推动智能技术从平台外围走向流程核心，同时人机协作界面更为智能，终端设备借助预置模型与云推理服务获得智能入口，中小机构与用户在无需掌握复杂算法

的前提下，亦可调用建模与分析功能，智能资源正朝普惠供给方向扩展。人工智能的嵌入方式与任务结构表现（见表 1）。

4.3 融合发展趋势：多技术交叉融合深化

人工智能与云计算、物联网、区块链等技术融合加深，底层架构借助统一接口整合感知、传输、计算与存储资源，

智能模型可调用多源数据并参与协同决策，构建采集—处理—反馈闭环^[9]。在行业落地中，人工智能更强调业务逻辑、物理过程与虚拟模型的对照关系，将知识图谱、仿真模型与学习算法融合为运行单元，有助于沉淀适应场景的复合能力，并反向优化系统设计。

表 1 不同应用场景中人工智能嵌入形式与任务结构对照表

应用场景	嵌入环节	任务结构特征	智能化表现路径
智能客服系统	问答匹配、意图识别	多轮对话 + 语义解析	基于预训练模型生成响应建议
制造产线监测	异常检测、预测维护	传感器数据 + 时间序列建模	结合边缘推理进行状态预判与调节
医疗图像辅助诊断	病灶识别、特征标注	图像识别 + 知识图谱映射	模型输出诊断建议 + 标注风险等级
金融风险评估	信用评分、欺诈检测	多变量聚合 + 行为模式识别	模型实时评分 + 风险预警触发机制
城市交通管理	路况预测、信号调度	时空数据整合 + 策略仿真	结合强化学习实现动态信号控制

4.4 安全与伦理发展趋势：治理规范与防护强化

随着人工智能技术的广泛应用，安全防护与伦理治理已成为计算机信息技术领域必须应对的关键议题，相关制度建设正从原则倡议向“标准化、流程化、可落地”的方向推进。在治理规范层面，算法可解释评估、数据使用边界与权限分级管控被纳入信息系统建设的前期设计环节，确保模型开发、部署与运维过程具备可追溯与可审计的技术支点，并与分级分类等既有规范形成联动机制。在安全防护层面，防护体系从传统网络边界拓展至模型参数、训练数据等核心环节，通过引入对抗样本检测、模型水印、联邦学习等隐私计算技术，构建多层次智能安全防护屏障，能有效抵御模型窃取、数据泄露、对抗性攻击等新型安全威胁。同时，安全评估与伦理审查机制被纳入业务上线与版本更新的标准化流程，实现了风险的前置防控。

4.5 产业发展趋势：生态化与协同化

人工智能与计算机信息技术正朝多层次协同生态演进，聚焦芯片、框架、平台与行业场景之间的深度融合，标准接口、开源组件与数据合作机制促成主体分工明确，创新更专注于场景理解与服务能力打磨。产业链上下游在算力租赁、模型服务与集成交付中协作，强化资源协同与价值共创。区域性创新平台与行业联合体通过承接试点任务、验证项目与培育区域品牌等方式，加速形成“技术研发 - 产业应用 - 反

馈优化”的良性循环。

5 总结

当前，人工智能已深度嵌入信息技术体系，在推动算力供给、数据流动与系统动态重组中形成协同格局，信息系统由规则驱动向模型和数据驱动演进的趋势已在网络安全、数据分析、软件开发与智能终端等关键环节显现。面对更复杂的场景和更严苛的安全、伦理约束，人工智能发展有赖于在算法可靠性、算力资源配置、治理机制与产业协同之间把握稳健平衡，使计算机信息技术在保持创新张力的同时兼顾可控边界、风险防线、公共利益与体系韧性。

参考文献

- [1] 莫晓明.人工智能技术在计算机网络信息安全领域的应用研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(04):232-235.
- [2] 王琴.计算机信息技术在人工智能领域发展中的应用[J].信息与电脑(理论版),2024,36(02):142-144.
- [3] 徐海.人工智能在计算机信息技术中的应用[J].电子技术,2023,52(04):96-97.
- [4] 丁园园.人工智能在当代计算机信息技术中的应用研究[J].信息记录材料,2023,24(01):66-68.
- [5] 邢雨杉.人工智能在计算机应用中的发展趋势与挑战[J].信息与电脑,2025,37(11):49-51.

Design and Implementation of Simulation Verification Environment for Data Link Networking Protocol

Likun Wang

China Electronics Technology Group Corporation, 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

To address the challenges of test environment deficiencies caused by delayed delivery of hardware and underlying software in wireless networking protocol development for data link terminals, as well as the limitations of existing simulation solutions in accurately reproducing the “one-to-many” feature of wireless links and insufficient flexibility in relay communication simulation, this paper proposes a verification environment solution based on UDP multicast one-to-many simulation and configuration-driven relay simulation. The environment, built on the Windows platform with a “single-process-single-node” architecture, offers the following advantages: ① Leveraging the inherent multicast communication characteristics of UDP to precisely replicate the broadcast-style transmission feature of wireless links; ② Flexible configuration of rejected platform ID lists through XML configuration files, enabling “node isolation” simulation without code modifications to accommodate different relay topologies. The system can perform multiple functions including network management message one-to-many transmission, network configuration verification, service data distribution, configuration-driven relay forwarding, and link anomaly simulation. Experimental results demonstrate that the one-to-many transmission success rate exceeds 99.8%, the configuration-driven relay simulation accuracy reaches 100%, network latency is $\leq 48\text{ms}$, and data forwarding success rate $\geq 99.5\%$. This solution effectively supports early-stage network protocol development and verification, significantly reducing R&D cycles.

Keywords

data link; networking protocol; UDP multicast; relay communication simulation

数据链组网协议模拟验证环境设计与实现

王立锟

中国电子科技集团有限公司第十研究所, 中国·四川·成都 610000

摘要

针对数据链端机无线组网协议研发中硬件与底层软件延迟交付导致的测试环境缺失问题,以及现有模拟方案难以还原无线链路一发多收特征、中继通信模拟灵活性不足的缺陷,提出一种基于UDP组播一发多收仿真与配置文件驱动中继模拟的验证环境方案。该环境基于Windows平台,采用“单进程-单节点”架构,优势在于:①利用UDP组播天然的组播通信特性,精准还原无线链路“一发多收”的广播式传输特点;②通过XML配置文件灵活配置拒收平台ID列表,实现“与指定节点不通”的中继通信模拟,无需修改代码即可适配不同中继拓扑。系统可完成网管消息一发多收、组网功能验证、业务数据分发、配置驱动中继转发及链路异常模拟处理等功能。实验结果表明,环境一发多收成功率 $\geq 99.8\%$,配置驱动中继模拟准确率100%,组网延迟 $\leq 48\text{ms}$,数据转发成功率 $\geq 99.5\%$,能有效支撑组网协议前期开发验证,大幅缩短研发周期。

关键词

数据链; 组网协议; UDP组播; 中继通信模拟

1 引言

1.1 研究背景与问题提出

数据链作为通信网络的支撑,承担态势广播、指令分发、多节点协同信息交互等关键任务,对无线链路特征的适配能力直接决定了数据链无线组网协议的可靠性^[1-2]。无线链路最典型的特征之一是“一发多收”的广播式传输,即单个节点发送的数据可被覆盖范围内的多个节点同时接收;同时,

中继通信作为拓展无线链路覆盖范围的关键手段,其主要特点是“选择性通信”——中继节点仅转发特定节点的数据。

在组网协议研发全流程中,上述特征的适配验证需依托专用硬件平台、底层信道仿真模块及SP信号处理软件构成的闭环环境。然而受硬件生产周期、信道建模复杂度等因素制约,支撑组件交付往往滞后协议开发3~6个月^[4],导致协议研发陷入“无环境可测”的困境。更关键的是,现有替代方案存在明显缺陷:①硬件在环仿真平台成本高昂(单套超200万元)、部署周期长,难以满足快速迭代需求^[5];②基于TCP的模拟环境因面向连接特性,无法还原无线链

【作者简介】王立锟(1982-),男,中国山东泰安人,硕士,工程师,从事计算机应用及软件研发技术研究。

路“一发多收”的广播本质，验证偏差超 30%[6]；③ 现有中继模拟方案多采用硬编码方式指定不通节点，灵活性差，无法适配多场景中继拓扑验证 [7]。因此，亟需设计一种能精准还原“一发多收”特征、支持灵活配置中继节点不通关系的低成本模拟验证环境，为组网协议研发提供可靠支撑。

1.2 研究内容与创新点

本文研究内容：① 基于 UDP 组播组加入机制实现“一发多收”精准仿真，精准还原无线链路广播式传输特征，多节点接收一致性 ≥ 99.8%；② 提出配置文件驱动的中继通信模拟方案，通过拒收平台 ID 列表灵活定义节点间通断关系，无需修改代码即可切换中继拓扑，适配不同组网验证场景；③ 构建“单进程 - 单节点”分布式架构，融合一发多收仿真与配置驱动中继功能，实现从消息分发到中继转发的全链路无线特征模拟，覆盖组网协议主要验证需求。

2 系统总体设计

系统采用分层架构设计，从上至下分为应用层、协议处理层、配置处理层与通信层，总体架构如图 1 所示，其中通信层的 UDP 组播模块与协议处理层的中继控制模块为主要模块。

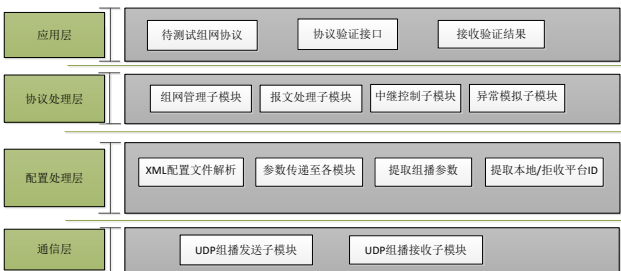


图 1 模拟验证环境软件总体架构图

模块功能说明：① 应用层：部署待测试组网协议，提供协议验证接口，接收一发多收消息与中继转发结果；② 协议处理层：含组网管理、报文处理、中继控制、异常模拟子模块，其中中继控制模块基于配置文件的拒收列表实现节点通断控制；③ 配置处理层：解析 XML 配置文件，提取组播参数、本地平台 ID 及拒收平台 ID 列表，为通信层与协议处理层提供配置参数。④ 通信层：含 UDP 组播发送 / 接收子模块，实现一发多收的组播消息分发。

3 模块设计与实现

3.1 XML 配置模块

配置解析模块是实现“配置驱动中继模拟”的基础，功能是读取 XML 配置文件中的组播参数与拒收平台 ID 列表，为系统提供初始化参数，尤其是定义“与哪个节点不通”的中继规则。

配置文件采用分层结构，重点强化“拒收平台 ID 列表”配置项，明确定义节点间通断关系，具体结构如下：

```
<?xml version=" 1.0" encoding=" UTF-8" ?>
< NetConfig>
  < MulticastConfig>
    < MulticastIP>239.0.0.100 < /MulticastIP>
    < BusinessPort>60003 < /BusinessPort>
  < /MulticastConfig>
  < NodeConfig>
    < LocalPlatformID>1001 < /LocalPlatformID>
    < NodeType>Relay < /NodeType>
    < DefaultTTL>2 < /DefaultTTL> <!-- TTL 初始值配置，用于转发跳数控制 -->
    < RejectPlatformIDs> <!-- 拒收列表，定义与哪个节点不通 -->
      < PlatformID>1003 < /PlatformID>
      < PlatformID>1005 < /PlatformID>
    < /RejectPlatformIDs>
  < /NodeConfig>
< /NetConfig>
```

关键设计：所有节点配置相同的组播 IP，确保加入同一组播组实现一发多收；通过 < RejectPlatformIDs> 节点灵活添加 / 删除拒收的平台 ID，直接定义“与哪个节点不通”，节点类型配置为“Relay”时启动中继转发功能。

3.2 组播发送与接收

将封装后的报文（模拟报文头 + 实装报文）发送至组播地址，实现“一发”功能，确保组内所有节点均可接收。所有节点加入同一组播组，实现“多收”功能，确保精准接收发送节点的广播消息，同时过滤无效数据。

3.3 中继控制模块

中继控制模块是实现“配置驱动中继模拟”的主要模块，基于配置文件中的拒收平台 ID 列表，动态决定是否接收特定节点的数据，从而模拟“与哪个节点不通”的中继通信特征。

实现逻辑：① 初始化阶段，读取配置模块传递的拒收平台 ID 集合（RejectPlatformIDs）与节点类型（Relay/Normal）；② 接收报文处理模块解析后的发送方平台 ID 及目的平台 ID；③ 若源平台在拒收集合中则直接丢弃报文不处理；若不在则判断目的节点是否是本平台，如是则处理接收报文；④ 若目的节点不是本平台，则判断本节点类型为 Relay（中继节点），若是则执行转发操作，若是普通节点则丢弃报文。

3.4 报文处理

报文处理模块设计自定义链路模拟报文头，包括发送方平台 ID、接收方平台 ID、报文总长度、报文序列号等字段，保障一发多收与中继转发过程中的数据可追溯性；节点组网模块基于一发多收的组播消息交互实现动态组网，中继节点转发组网消息时同样遵循配置的通断规则。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验环境搭建

实验环境基于 Windows 10 操作系统，硬件配置：Intel Core i7-12700H 处理器、16GB 内存、千兆以太网网卡；软件配置：Visual Studio 2019、MSXML6.0 库、Wireshark 抓包工具。部署 10 个模拟节点，所有节点配置相同组播 IP (239.0.0.100)，业务数据端口 60003；设置 3 个中继节点 (1001、1002、1003)，其中：① 节点 1001 配置拒收列表 {1003,1005} (与 1003、1005 不通)；② 节点 1002 配置拒收列表 {1006} (与 1006 不通)；③ 节点 1003 配置无拒收列表 (与所有节点通)；其余为普通节点。

4.2 实验设计

实验 1：一发多收功能验证——分为 2 个子实验，全面验证不同场景下一发多收特征的还原效果：① 不同报文长度场景验证：保持发送速率 10 条/s，分别发送 256 字节、512 字节、1024 字节、2048 字节的报文各 1000 条，统计一发多收成功率；② 不同发送速率场景验证：保持报文长度 512 字节，分别以 5 条/s、10 条/s、20 条/s、50 条/s 的速率发送 1000 条报文，统计一发多收成功率与平均接收延迟。

实验 2：配置驱动中继模拟验证——初始配置下，分别测试 3 个中继节点在不同拒收配置下的数据接收/丢弃情况，验证“与指定节点不通”的准确性；在此基础上修改节点 1001 的拒收列表，测试配置生效时间与模拟准确性。

实验 3：性能测试——测试不同节点数量 (2~10 个) 下的组网延迟、数据转发成功率，验证环境实时性与可靠性。

评价指标：① 一发多收成功率 = 所有节点成功接收报文数 / (发送总数 × 接收节点数) × 100%；② 中继模拟准确率 = 符合配置的接收 / 丢弃报文数 / 总测试报文数 × 100%；③ 配置生效时间 = 修改配置文件到中继规则生效的时间差。

4.3 实验结果与分析

4.3.1 一发多收功能验证结果

结果分析：① 实验 1：随着报文长度从 256 字节增加至 2048 字节，一发多收成功率仅从 99.84% 下降至 99.64%，降幅不足 0.2%，平均接收延迟从 14.8ms 平缓上升至 18.3ms，说明系统在不同数据量传输场景下，一发多收特征均保持稳定，适配无线链路不同业务数据传输需求；② 实验 2：发送速率从 5 条/s 提升至 50 条/s (10 倍增幅) 时，一发多收成功率仍维持在 99.50% 以上，平均接收延迟虽上升至 22.3ms，但未出现急剧飙升，延迟波动范围控制在 9ms 内，证明系统在高并发数据分发场景下，仍能精准还原无线链路“一发多收”的广播特征，且具有较强的抗干扰能力；③ 综合多场景数据，系统一发多收成功率始终 ≥ 99.50%，

平均接收延迟 ≤ 22.3ms，完全匹配战术通信中态势、指令等关键数据的“广播式分发”需求，解决了 TCP 模拟环境无法实现的问题，仿真保真度显著提升。

4.3.2 配置驱动中继模拟验证结果

结果分析：① 初始配置下，3 个中继节点均严格按照拒收列表实现“与指定节点不通”，模拟准确率 100%；② 修改节点 1001 的拒收列表后，配置生效时间仅 87ms (≤ 100ms 设计目标)，新的通断规则执行准确率仍为 100%。证明配置文件驱动的方案能灵活、精准地模拟中继通信中的节点通断关系，无需修改代码即可切换中继拓扑，大幅提升环境适配性。

5 结论

本文设计并实现了一种基于 UDP 组播一发多收与配置驱动中继的数据链组网协议模拟验证环境，精准解决了现有方案无法还原无线广播特征、中继模拟灵活性不足的问题。结论如下：① 基于 UDP 组播组通信机制，成功实现无线链路“一发多收”特征的精准仿真，多场景实验验证表明，在报文长度 256~2048 字节、发送速率 5~50 条/s 范围内，一发多收成功率始终 ≥ 99.50%，平均接收延迟 ≤ 22.3ms，接收一致性优异，适配无线链路不同业务数据分发需求；② 提出配置文件驱动的中继通信模拟方案，通过拒收平台 ID 列表灵活定义“与哪个节点不通”，配置生效时间 ≤ 100ms，模拟准确率 100%，无需修改代码即可切换中继拓扑；③ 系统集成组网管理、链路异常模拟处理等功能，在 ≤ 8 节点场景下组网延迟 ≤ 48ms，数据转发成功率 ≥ 99.5%，能有效支撑组网协议前期开发验证，大幅缩短研发周期 (预计缩短 40% 以上)，降低研发成本。

参考文献

- [1] 张军, 李建东. 数据链技术发展与应用[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 1-20.
- [2] 王壮, 刘峰. 战术数据链组网协议研究进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 789-800.
- [3] 李涛, 张宏科. 数据链模拟测试环境设计与实现[J]. 计算机工程, 2019, 45(8): 102-108.
- [4] 赵瑞, 王勇. 基于硬件在环的战术数据链仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 356-364.
- [5] 陈明, 李娜. 基于UDP的分布式模拟通信系统设计[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(11): 3456-3459.
- [6] 刘阳, 张伟. 基于UDP组播的节点通信模拟系统[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(7): 1789-1793.
- [7] 黄亮, 赵伟. 可配置数据链模拟环境设计[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(6): 145-149.

Microservices-Oriented Design Scheme for Embedded Platforms in the Communication Domain

Tianlong Sun

The 10th Research Institute of CETC, Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract

In the field of communication, to rapidly adapt to the frequent demands for embedded software iteration and updates, this paper proposes a microservices architecture design for embedded software platforms based on the principles of open system architecture. The proposed solution builds upon a layered architectural model, where each layer is decomposed into independent microservice components. Communication between layers is achieved through standardized service interfaces, while interactions among service components are facilitated by lightweight microservices communication middleware and event-driven communication middleware, enabling effective module decoupling. The embedded software platform developed based on this architecture achieves high cohesion and low coupling within its functional components, supports independent testing, deployment, and rapid development iterations. As a result, embedded software microservicesization has become a core technological approach for constructing next-generation communication systems.

Keywords

Microservices-oriented design; Software platform design; Interface design; Module decoupling

面向通信领域的嵌入式平台微服务化设计方案

孙天龙

中国电子科技集团公司第十研究所, 中国·四川 成都 610036

摘要

在通信领域, 为了能够快速适应嵌入式软件迭代更新的频繁需求, 本文基于开放式系统架构思想研究设计了嵌入式软件平台的微服务架构方案, 该方案在分层架构基础上, 设计每一层划分为微服务组件, 层与层间通过标准服务接口进行通信, 服务组件间通过轻量级微服务通信中间件和事件通信中间件等通信方式进行模块解耦合设计, 基于该方案研发的嵌入式软件平台, 能够实现软件内部功能组件高内聚低耦合, 支持独立测试、部署和快速开发迭代, 嵌入式软件微服务化已成为构建新一代通信系统的核心技术途径。

关键词

微服务化设计; 软件平台架构; 接口设计; 模块解耦

1 引言

随着通信技术的不断发展, 对软件平台能够快速适应外部新需求变化、快速迭代开发和灵活部署提出了更高的要求, 传统单体分层架构虽然具有容易构建、初期开发快等优势, 但其无法快速拓展、软件成熟度低, 后续的运维成本较高。

本方案在传统分层架构基础上, 进行微服务组件化设计, 在此架构中不同的服务通过标准化的“服务接口契约”进行交互, 微服务组件可以独立开发、测试和部署, 具有高拓展、低耦合、敏捷迭代开发等优势, 尤其在军用领域能够快速适应外部变化, 使得技术和人力资源能够合理的进行优

化配置, 因此军用嵌入式软件平台正加速向云原生方向发展 and 转型。

2 总体设计原则和微服务组件定义

2.1 总体设计原则

方案的总体设计原则包括: 1) 微服务组件划分合理, 每个微服务组件需要根据领域驱动设计方式进行业务划分, 具有独立的上下文, 服务划分不能过粗或过细; 2) 接口标准化和规范化, 所有微服务间的接口应该遵循统一的接口标准; 3) 可独立开发、测试部署和运维, 微服务组件能够独立进行开发测试以及升级、各服务组件间应该解耦合, 不能相互影响; 4) 服务可复用, 微服务组件应该遵循标准化接口设计, 设计时应考虑系统级、组件级的业务服务; 5) 混合通信模式, 嵌入式软件要考虑实时和非实时场景, 根据业务适应性使用同步和异步的通信方式。

【作者简介】孙天龙(1991-), 满族, 中国黑龙江绥化人, 硕士, 工程师, 从事通信软件系统设计研究。

2.2 微服务组件定义

微服务组件是微服务架构的软件实体，软件组件的属性一般设计包括：

1) 微服务组件名称；2) 微服务组件标识，唯一的 ID 号进行索引；3) 微服务组件地址，微服务架构设计中，服务地址作为服务组件的通信地址，如 URL 地址；4) 版本号：每个组件应该一定阶段具有它的版本号。

3 架构设计方案

3.1 软件平台架构

本方案嵌入式软件平台微服务化设计主要采用面向服务的软件架构进行服务组件的设计以及服务组件间的通信，软件架构按照平台资源层、平台通信层、应用服务层进行划分，各层通过标准化接口解耦，服务组件间通过服务方式通信，软件架构如图 1 所示。

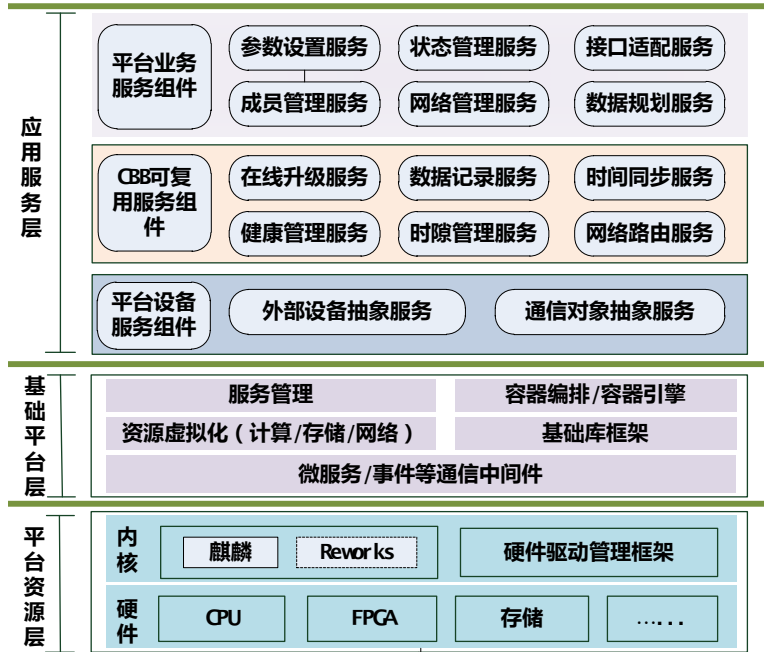


图 1 软件平台架构设计

3.2 应用服务层

3.2.1 平台业务服务组件

平台业务服务组件按照实际业务需求进行划分，如控制管理类软件划分为参数设置服务，状态监视服务等，消息处理类软件划分为消息适配、消息处理规则、消息打包、消息转译等，通过对相关功能进行抽象和服务化封装，对外提供标准化的服务接口。

3.2.2 CBB 可复用服务组件

CBB 可复用服务组件作为通用组件，与硬件平台和平台业务解耦合，其只调用操作系统底层接口和基础平台层接口，核心业务功能与特定的平台无关，可以被反复使用，不断开发迭代，逐渐形成软件产品化，从而提升软件的稳定性。例如平台通用服务只能调用平台基础框架获取平台相关信息，不能耦合平台其他模块业务。

3.2.3 平台设备服务组件

平台设备服务组件主要将外部设备、通信对象等进行抽象和封装，提供规范化的服务调用接口及基础平台通信能力。其主要作为应用层的服务组件，作为中间层隔离了物理外设，起到隔离硬件或特定平台的目的。如与外部系统交互，则抽象一个外部系统通信对象；如与底层链路进行交互，则

抽象一个底层链路通信对象。

3.3 基础平台层

包括基础库框架、服务管理、容器、资源虚拟化、通信中间件等，为上层提供平台层的调度、总线通信、服务接口等基础服务。如通过平台基础库框架、通信中间件等实现跨平台通信，使得应用层只关心业务，不关心平台。

3.4 平台资源层

针对不同硬件平台提供标准统一的硬件驱动管理，能够适配 reworks、麒麟、欧拉、天脉等操作系统，对上层提供统一资源层接口。

4 平台接口设计

本方案接口设计主要采用面向对象的 C++ 语言进行描述。

4.1 通用服务接口设计

通用服务接口设计主要目的是为所有微服务组件提供标准化的统一服务接口，以实现跨平台、可重用的软件架构。定义通用服务组件基类 CServiceComponentBase，该类接口设计包括：1) Initial 函数；2) ServiceStart 函数；3) ServiceStop 函数；4) ServiceDestroy 函数；5) GetServiceConfigInfo 函数；6) GetServiceState 函数；7) ServiceInterfaceCall 函数，

其中 `Initial` 函数为服务组件初始化调用接口，包括配置服务信息、进行服务注册等，`ServiceStart` 函数、`ServiceStop` 函数、`ServiceDestroy` 函数为服务启停接口，用于实现组件调度管理。`GetServiceConfigInfo` 函数和 `GetServiceState` 函数主要用于过去服务配置信息和服务当前状态。`ServiceInterfaceCall` 函数是通用操作入口，用于调用具体业务逻辑。

4.2 通信服务接口设计

通信服务接口设计主要目的为平台提供标准化、服务化的通信能力抽象，通过订阅发布机制实现与业务逻辑解耦合，主要与外部系统、进程间的服务组件通信，如与外部系统软件、内部设备等通过通信服务组件进行通信。应用服务层的平台设备服务组件一般需满足通信服务接口设计规范。定义通信服务组件基类 `CComServiceComponentBase`，该类接口设计包括：1) `sendData` 函数；2) `OnRecvData` 函数；3) `PublishTopic` 函数；4) `SubScribeTopic` 函数，其中 `sendData` 函数和 `OnRecvData` 函数接口主要实现通信对象的收发接口，如通过 FC 总线、IO 通道、设备通道等与其他软件进行通信。`PublishTopic` 函数和 `SubScribeTopic` 函数主要用于与其他非通信对象服务组件间通过微服务等通信中间件实现，主要用于服务间数据收发。

4.3 应用服务层接口设计

应用服务层主要为平台具体业务流程，一般业务流程可分为几个事件流程步骤，因此可定义事件类服务组件，事件服务组件间的通信需要使用事件发布订阅框架，事件服务组件与非事件服务组件间的通信通过主题发布订阅，通过订阅发布机制实现与业务逻辑解耦合。定义事件类服务组件基类 `CEventServiceComponentBase`，该类接口设计包括：1) `PublishEvent` 函数；2) `SubScribeEvent` 函数；3) `EventCallFunc` 函数；4) `PublishTopic` 函数；5) `SubScribeTopic` 函数；6) `TopicCallFunc` 函数，其中 `PublishEvent` 函数和 `SubScribeEvent` 函数主要进行事件服务组件间通信，用于业务流程步骤通知。`EventCallFunc` 函数为事件订阅后的回调函数。`SubScribeTopic` 函数和 `TopicCallFunc` 函数主要进行事件服务组件与非事件服务组件间的通信，用于服务间数据

收发。

4.4 基础平台层服务接口设计

基础平台层接口设计要符合标准化与一致性，一般设计包括服务认证接口、配置中心接口、服务注册发现接口、通信中间件数据收发接口、API 网关接口等。

4.5 平台资源层接口设计

该层通过统一封装设计，定义统一的硬件驱动管理框架接口，对上提供接口服务，一般使用标准的 POSIX 接口，包括 `Open` 函数、`Ioctl` 函数、`Write` 函数、`Read` 函数、`Close` 函数等。

5 结语

在面向通信领域的嵌入式软件平台架构设计中，微服务架构设计无疑具有重要的意义。本文给出了一种适用于通信领域的嵌入式软件平台微服务架构设计方案，该方案对微服务组件进行了详细的定义，设计了一种嵌入式软件平台微服务化的开放式架构，使用该架构进行嵌入式软件设计，能够隔离平台变化，便于软件平台的拓展式和迭代式演进，从而提高软件的鲁棒性、安全性和可靠性。

参考文献

- [1] 尹伟, 缪万胜, 王念伟, 等. 大规模复杂系统的开放式软件架构研究[J]. 航空电子技术, 2017,48(6):23-29.
- [2] 王亮, 王璇, 谢博琳. 基于FACE的航电系统软件架构设计, 信息技术与信息化, 2021.
- [3] 张起睿, 曲卡尔. 模块化开放式航空电子系统架构标准研究, 航空电子技术, 2022.
- [4] 未来机载能力环境技术标准(FACE™).3.1版, 2020.
- [5] 熊智勇, 刘青春. 面向云服务的直升机航电系统架构研究, 航空科学技术, 2023,34(9): 80-86.
- [6] 石钊铭, 刘传波. 基于微服务架构的作战筹划应用系统研究, 舰船电子工程, 2022,42(8): 13.
- [7] 钟伟宏. 基于微服务架构的航天应用软件集成平台设计与实现 [D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2021.
- [8] 吴化尧, 邓文俊. 面向微服务软件开发方法研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2020,57(3):525-541.

Research on SPN Network Rapid Self-healing and Service Continuity Assurance Technology for Heavy Protection and Network Disaster Recovery Scenarios

Zhiqiang Cao¹ Zhenhua Zhou²

1. China Mobile Communications Group Hebei Co., Ltd. Zhangjiakou Branch, Zhangjiakou, Hebei, 075000, China
2. China Mobile Communications Group Hebei Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

Abstract

With the continuous development of information and communication technology, network security and disaster recovery capabilities have become critical factors in ensuring the stable operation of key information infrastructure. This paper focuses on the application of SPN (Slicing Packet Network) in critical protection and disaster recovery scenarios, proposing a technical solution based on SPN's rapid self-healing and business continuity assurance. By analyzing the re-routing functionality and self-healing mechanisms of SPN networks, a self-healing solution suitable for dual-ring disconnection scenarios is designed, addressing the issue of service interruptions in transmission networks under extreme conditions. This paper combines several typical application scenarios, including important event protection, high-speed railway transmission networks, and disaster-prone areas, providing systematic analysis and effect verification. The solution is not only innovative in terms of technology but also has high practical value, offering new approaches for disaster recovery and security assurance in the information and communication industry.

Keywords

SPN network; self-healing mechanism; business continuity; disaster recovery capability; rapid recovery

面向重保与网络容灾场景的 SPN 网络快速自愈与业务连续性保障技术研究

曹志强¹ 周振华²

1. 中国移动通信集团河北有限公司张家口分公司, 中国·河北 张家口 075000
2. 中国移动通信集团河北有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

摘要

随着信息通信技术的不断发展, 网络安全与容灾能力成为保障关键信息基础设施稳定运行的重要因素。本文聚焦于 SPN (Slicing Packet Network) 网络在重保与容灾场景中的应用, 提出了一种基于 SPN 网络快速自愈与业务连续性保障的技术方案。通过分析 SPN 网络的重路由功能与自愈机制, 设计了适用于环网双断场景的自愈方案, 解决了传输网络在极端情况中的业务中断问题。本文结合多个典型应用场景, 包括重要活动保障、高铁沿线传输网络以及易受灾区域, 进行了系统性分析与效果验证, 该方案不仅在技术上具有创新性, 而且具有较高的应用价值, 为信息通信行业的容灾与安全保障提供了新的思路。

关键词

SPN 网络; 自愈机制; 业务连续性; 容灾能力; 快速恢复

1 引言

在现代信息通信系统中, 网络的安全性与稳定性对保障经济社会的正常运转具有重要意义。随着“十四五”规划对信息通信行业发展提出更高要求, 如何提升网络容灾与自愈能力成为当前的技术难题。尤其在重保场景下, 如重要活

动赛事保障、高铁沿线传输网络以及自然灾害频发区域, 网络的快速恢复与业务连续性保障显得尤为重要。SPN 网络作为一种新兴的切片分组网络技术, 其在环网架构中的自愈功能展现了极大的潜力, 能够在网络出现故障时快速恢复业务, 确保传输不间断。本文将重点研究 SPN 网络的重路由功能及其在不同容灾场景中的应用, 提出一种基于 SPN 网络的业务保护与灾难恢复策略, 通过实验验证其在高负荷、高风险环境下的实际效果, 为提升网络安全性与容灾能力提供有力支持。

【作者简介】曹志强 (1980-), 男, 中国河北张家口人, 本科, 高级工程师, 从事传输设备组网研究。

2 网络安全与容灾技术现状

2.1 信息通信行业安全保障的规划与发展

随着信息通信技术的迅速发展，网络安全和容灾能力的提升已成为保障国家经济、社会稳定及信息安全的关键。根据《“十四五”信息通信行业发展规划》，行业对于信息安全的要求进一步提高，要求信息系统具备更强的抗风险能力和应急响应能力，确保网络在面临灾难性事件时的稳定运行。近年来，随着云计算、大数据和5G等新技术的迅猛发展，网络安全体系逐步完善，涵盖了网络传输、数据保护、业务容灾等多个层面。网络架构的安全防护能力也在持续提升，尤其在关键基础设施中，安全保障的标准和措施已从被动防御转向主动应对。与此同时，应急响应和容灾能力的建设也成为各行业发展的重中之重，以提高网络的韧性和稳定性，确保在各种突发情况下，网络能快速恢复，减少系统中断对社会经济活动的影响。

2.2 SPN 网络技术概述

SPN (Slicing Packet Network) 技术是一种基于网络切片概念的新型传输网络架构。它通过将网络资源进行虚拟化划分，提供定制化、灵活的网络服务，以满足不同业务需求。SPN 网络的核心特征是其支持多种业务类型的并行传输，能够根据不同业务的带宽、延迟、可靠性等要求，动态调整资源分配，确保每种业务的质量保障。在这一架构下，网络的冗余性和容灾能力得到了增强，能够在发生故障时迅速恢复数据传输。同时，SPN 技术采用了重路由和快速故障检测等自愈功能，能在发生网络故障时自动切换到备用路径，确保业务不中断。SPN 网络不仅适用于大规模通信网络的建设，也为关键基础设施的安全保障提供了更为灵活、可靠的解决方案，广泛应用于数据中心、云计算、物联网和5G网络等多个领域^[1]。

3 面向重保与容灾的 SPN 网络自愈机制

3.1 SPN 网络重路由功能的基本原理

SPN 网络的重路由功能基于网络拓扑的动态调整与路径选择机制。通过预先规划好多个备份路径，当网络发生故障或主要路径中断时，系统能够自动切换到备用路径，从而确保数据传输不中断。重路由的核心是基于网络控制器对网络拓扑的实时感知，利用流量工程算法动态调整网络流量分布。在故障发生后，SPN 网络能够通过控制器的集中计算功能，迅速选择最佳备份路径进行业务恢复，从而实现无感知的故障切换。该机制不仅提高了网络的可靠性，还提升了容灾能力，特别是在环网结构中，能够有效避免单点故障对整个网络的影响。通过重路由，SPN 网络能够确保在任何突发情况下，业务都能通过其他路径完成传输，保障业务的连续性和稳定性^[2]。

3.2 环网双断场景下的 SPN 网络自愈方案设计

在环网架构中，传统的容灾技术往往依赖于单一的冗

余路径设计，一旦出现环网首尾两端断缆的情况，可能会导致整个环网的服务中断。SPN 网络的自愈方案通过在环网结构中部署多条逃生路由，并利用重路由功能进行快速切换，解决了传统容灾方案的不足。具体来说，在环网设计阶段，通过计算机算法优化光纤路径，选择合适的备份链路，确保在出现环网双断时，系统能够自动将流量引导至这些预设的逃生路由。该方案的关键在于通过在 SPN 网络设备中部署支持 SR-TP (Segment Routing Traffic Protection) 隧道技术，来实现快速路径切换和流量转移。通过这一设计，SPN 网络能够在环网双断场景下实现业务的无感知恢复，最大程度地减少故障恢复时间和网络停机时间，提高了网络的容灾能力和服务可靠性^[3]。

4 SPN 网络快速自愈与业务连续性保障方案

4.1 重路由功能在业务连续性中的关键作用

SPN 网络的重路由功能是保障业务连续性的核心技术。该功能能够在发生网络故障时迅速识别并切换至备用路径，确保数据流在不中断的情况下持续传输。通过预先规划多个备份路径，SPN 网络可以在故障发生时自动进行流量重定向。重路由通过集中控制器进行路径计算，并依据网络拓扑结构优化流量路径，保障各项业务的正常运行。重路由功能的高效性来源于其对环网拓扑的深刻理解和动态调整能力。在 SPN 网络中，利用 SR-TP 隧道技术，能够在环网双断等复杂场景下快速恢复网络服务，避免长时间的业务中断^[4]。与传统的冗余方案相比，SPN 网络的重路由功能不仅提升了故障恢复的速度，也大大减少了人工干预和操作风险。该技术在多个场景中得到了验证，特别是在重要活动保障、高铁高速及易受灾区域，确保了业务的快速恢复并提升了用户体验。

4.2 环网双断场景下的自愈机制与解决方案

在环网结构中，环网双断是一个常见的故障场景，传统的环网设计往往只能依赖于单一路由的冗余，一旦发生环网首尾两端的断缆，将导致业务中断。针对这一问题，SPN 网络的自愈机制通过引入多路由冗余和智能重路由技术，解决了环网双断故障恢复的难题。SPN 网络自愈机制在环网结构中预设多个备份路径，并利用 SR-TP 隧道技术实时检测和切换流量。当环网发生双断时，控制器能够快速计算出最优备份路径，并将流量无缝切换至新的路径，避免业务的中断。该机制的关键技术在于其能够智能识别故障位置，并动态选择最佳路径进行流量恢复，不仅提高了容灾能力，也优化了网络资源的使用效率。在实际应用中，该方案已在多个高风险区域和重要场景中部署，验证了其在复杂环境下的高效性和可靠性，显著提高了网络的可用性和业务连续性。

4.3 基于 SPN 网络的业务保护与灾难恢复策略

SPN 网络的业务保护与灾难恢复策略结合了重路由技术、智能流量调度和容灾备份机制。该策略的核心是通过分

布式资源管理和冗余路径设计,在网络故障发生时实现业务的快速切换与恢复。具体来说,SPN网络在重要业务场景中通过动态调整带宽和时延要求,保障每条业务流的正常传输。当出现故障时,SPN网络能够通过预设的备份链路将业务流量迅速引导至备用路径,确保关键业务的无缝衔接。同时,SPN网络利用智能化的流量调度和容灾功能,支持多种业务类型的并行传输,在灾难发生时优先保障关键业务的稳定运行。通过引入跨环路的逃生路由方案,SPN网络能够在极端天气、突发事件等情况下,保证通信的可靠性和及时性。该策略不仅提升了网络的灾难恢复能力,也减少了运维成本和人工干预,实现了网络的自动化恢复。通过实践应用,SPN网络的业务保护与灾难恢复策略在多种场景下取得了显著成效,确保了网络的高可用性和业务的连续性^[5]。

5 SPN网络自愈方案的实践应用与效果分析

5.1 重要活动保障场景中的网络优化与故障恢复

在保障重要活动时,SPN网络自愈方案的应用能够显著提高网络的稳定性和故障恢复能力。例如,在2022年冬奥会期间,SPN网络通过部署重路由技术和逃生路由链路,确保了赛事期间传输网络的高可用性。在冬奥会核心赛区的7个接入环中,每个环路通过SPN重路由方案的支持,可以在环网双断发生时,确保无线和集客业务的秒级恢复。通过对比未使用重路由前后的故障恢复数据,在环网双断情况下,传统方案的恢复时间约为1.2小时,而SPN网络的恢复时间缩短至1秒内,成功提升了故障恢复效率。通过此优化,业务中断时间减少了99%以上,确保了赛事期间的业务不中断,保障了重要通信任务的顺利进行。此外,针对活动期间的高流量需求,SPN网络智能流量调度技术能够有效分配网络资源,避免因高负载导致的带宽瓶颈,从而实现了高效的数据传输与业务保护。

5.2 高铁沿线传输网络的容灾能力与应急响应

高铁沿线的SPN网络部署同样验证了其强大的容灾能力和快速应急响应能力。京张高铁沿线的SPN网络包含5个接入环路,通过SPN的重路由技术和跨环路逃生路由机制,实现了即使在极端天气或突发事件发生时,也能快速恢复网络服务。在2023年冬季,京张高铁因大雪天气导致部分环网出现物理断缆的情况,但得益于SPN网络的自愈方案,整个网络的故障恢复时间仅为3秒,业务无感知地切换至备用路径。相比传统的网络结构,SPN网络的应急响应时间减少了90%以上。通过部署10GE端口与高冗余链路,在高铁高速的传输网络中,SPN网络有效保证了沿线22个5G高铁VIP信源机房的业务稳定运行,避免了高端客户集

中投诉和服务中断的问题。此外,SPN网络的部署不仅提升了高铁沿线网络的可靠性,也为后续的跨地市、跨县区域的容灾提供了可参考的技术路径。

5.3 易受灾区域的网络恢复效率与容灾效果

在自然灾害频发的易受灾区域,SPN网络的自愈方案显著提升了网络的恢复效率和容灾效果。以张家口涿鹿县为例,该地区在2023年经历了连续几轮山洪灾害,导致部分区域通信中断,从2024年后在该地区部署SPN网络自愈方案后,采用跨环路逃生路由与重路由技术,确保了后期汛期网络恢复的快速性。在灾害发生后的60秒内,网络流量自动转移至备用路径,避免了大范围的通信中断。特别是在涿鹿县谢家堡、赵家蓬、棋尚地、大河南等灾区,SPN网络的智能路径选择和流量调度系统成功优化了有限的网络资源,确保了当地居民的通信需求得到及时响应,减少了因灾害带来的社会影响。在灾后评估中,SPN网络的恢复效率比传统网络方案提高了80%,故障恢复时间从原来的2小时缩短至10分钟以内,极大提升了灾后恢复的速度与效率,确保了紧急救援与社会秩序的有效维护。

6 结语

通过本文的研究与分析,SPN网络自愈方案在提升网络安全性和业务连续性方面展现了显著优势。在重要活动保障、高铁沿线传输及易受灾区域的应用案例中,SPN网络不仅成功应对了复杂的网络故障,还实现了业务的无感知恢复,显著缩短了故障恢复时间,提升了网络的容灾能力。尤其在高流量和高风险的场景下,SPN网络通过智能流量调度和重路由技术,确保了业务的高效传输与稳定运行。通过实践验证,SPN网络的自愈机制不仅优化了网络资源配置,也为未来的信息通信行业提供了强有力的技术支持。随着技术的不断进步,SPN网络将在更多领域得到广泛应用,为网络的高可用性和容灾能力提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李鑫.切片分组网SPN设备安全机制与防护优化研究[J].通信与信息技术,2026,(01):116-119.
- [2] 高源,邱萍,吴军,马一丹.面向铁路5G-R的SPN组网及业务承载方案研究[J].铁路通信信号工程技术,2026,23(01):59-65.
- [3] 杨昊平,叶珈好,秦海波,徐鹏,曹子卿,张越,迟立忠,姜林,吴斌.睡眠剥夺前后不同耐受组脑电网络功能链接特征差异性分析[J].航天医学与医学工程,2025,36(06):513-520.
- [4] 荆业楚,李岩石,赵睿,杨双坤.全国通信网络韧性构建与智能防灾体系研究[J].电信工程技术与标准化,2025,38(11):59-63.
- [5] 李旭,杨哲,王德松.双向转发检测在电力调度数据网网络快速自愈与恢复中的应用分析[J].云南电力技术,2020,48(06):35-38.

Network Optimization Design for Windows in Government Service Hall

Haijun Zhao

Lincang Municipal Government Service Administration Bureau, Lincang, Yunnan, 677099, China

Abstract

As the core venue for the government to provide comprehensive services to the public, the stability, flexibility and scalability of the window network in the government service hall directly affect the efficiency of government services and public experience. At present, government service halls generally face problems such as a large number of service windows, complex network lines, and dynamically changing business requirements. The traditional multi-line direct connection mode leads to disadvantages including excessive load on floor computer rooms, messy wiring, and high maintenance costs. Aiming at the core demand that the windows of government service halls need to support the Internet, e-government network, departmental private networks and voice lines simultaneously, this paper takes Lincang Municipal Government Service Hall as the practical carrier, and in accordance with the requirements of Technical Specifications for Local Area Network Security Accessing Government External Network and Technical Guidelines for Security Control of Dual-use Terminals on Government External Network issued by the National Management Center of Government External Network, proposes to adopt Fiber to the Desk (FTTD) technology and implement the architecture scheme of "core computer room - floor computer room - regional ONU - desktop". In this scheme, 4 to 8 windows form a functional area sharing one ONU device, and each network adopts independent hardware equipment to achieve physical isolation, which effectively solves the problem of messy lines in floor computer rooms. This paper analyzes in detail the existing problems of the traditional network architecture of Lincang Municipal Government Service Hall, expounds the technical principles, architecture design, implementation key points and application advantages of the optimization scheme. The feasibility and effectiveness of the scheme are verified through actual deployment, which provides theoretical reference and practical guidance for the network upgrading and reconstruction of government service halls.

Keywords

Government Service; Network Optimization and Upgrading; Physical Isolation; FTTD Technology

政务服务大厅窗口网络优化设计

赵海军

临沧市政务服务管理局, 中国·云南 临沧 677099

摘要

政务服务大厅作为政府面向公众提供综合服务的核心场所,其窗口网络的稳定性、灵活性与扩展性直接影响政务服务效率和公众体验。当前政务大厅普遍面临窗口数量多、网络线路复杂、业务需求动态变化等问题,传统多线路直连模式导致楼层机房负载过重、布线混乱、维护成本高等弊端。本文针对政务大厅窗口需同时支持互联网、电子政务网、部门专网及语音线路的核心需求,以临沧市政务服务大厅为实践载体,结合国家电子政务外网管理中心《接入政务外网的局域网安全技术规范》、《政务外网终端一机两用安全管控技术指南》要求,提出采用光纤到桌面(FTTD)技术,通过“核心机房-楼层机房-区域ONU-桌面”的架构方案,按4-8个窗口为一个功能区域共用ONU设备,各网络采用独立硬件设备实现物理隔离,有效解决楼层机房线路杂乱问题。文章详细分析了临沧市政务服务大厅传统网络架构的现存问题,阐述了优化方案的技术原理、架构设计、实施要点及应用优势,通过实际部署验证方案的可行性与有效性,为政务服务大厅网络升级改造提供理论参考与实践指导。

关键词

政务服务; 网络优化升级; 物理隔离; FTTD技术

1 引言

随着数字政府建设的深入推进,“高效办成一件事”已成为政务服务改革的核心目标,要求政务服务大厅打破部

门壁垒、优化办事流程、提升服务效能。政务服务大厅已从单一的线下办事场所转型为集行政审批、公共服务、信息咨询于一体的综合服务平台。窗口作为服务一线,需同时接入互联网、电子政务网、部门专网及语音线路,四条线路并行成为窗口标准化配置。然而,政务大厅窗口数量通常达数十甚至上百个,且业务办理类型动态调整,传统网络每工位

【作者简介】赵海军(1993-),男,中国云南临沧人,本科,副高,从事政务服务信息化革新研究。

预留3条超五类/六类非屏蔽网络线缆及1条语音线缆的模式,导致楼层机房线路密集、杂乱无章,设备负载过重,不仅影响网络稳定性,还增加了维护成本和故障排查难度。未来政务大厅窗口网络需具备超大带宽、多业务承载、易部署与易扩展等特性,传统网络以网线和交换机为基础,存在传输带宽不足、业务扩展困难、使用寿命短等问题,难以满足需求。因此,全光网络成为未来智慧园区基础网络建设的必然趋势根据《电子政务网络安全管理暂行办法》要求,政务内网与外网、业务专网与公共网络必须实现严格物理隔离,传统架构难以在保障隔离合规性的同时满足“高效办成一件事”对网络灵活性和扩展性的需求。因此,针对临沧市政务服务大厅的实际场景,设计一套兼顾物理隔离、线路优化、高效运维的网络升级方案,成为支撑政务服务高质量发展的迫切需求。本文以临沧市政务服务大厅为具体研究对象,构建“核心机房-楼层机房-区域ONU-桌面”的网络架构,探索FTTD技术与区域化共用ONU在政务网络物理隔离场景中的应用路径,旨在解决临沧市政务服务大厅楼层机房线路杂乱、维护困难等实际问题,提升网络运行稳定性和服务响应速度,为“高效办成一件事”改革提供坚实的技术支撑。同时,方案通过区域化共用ONU设备,降低硬件投入成本和运维压力,其成功实践可为全国其他地区政务服务大厅的网络升级改造提供参考案例,推动政务服务数字化转型提质增效。

2 政务服务大厅窗口网络现状及问题分析

2.1 网络需求特征

政务服务大厅窗口网络具有三大核心特征:一是多线路并行需求,每个窗口需同时支撑互联网(面向公众查询、线上申报)、电子政务网(政务数据交互、跨部门协同)、部门专网(各垂直业务系统)及语音线路(办公电话、服务咨询)四类网络业务,且各线路需物理隔离或逻辑隔离,确保数据传输安全;二是窗口数量规模化,政务大厅每层楼窗口数量在50-100个,共8个楼层,网络覆盖范围广、终端密度高;三是业务动态性,窗口业务会根据政策调整、办事高峰等因素灵活调整,要求网络具备快速扩容和灵活调整能力。

2.2 传统网络架构存在的核心问题

当前临沧市政务服务大厅传统网络采用“核心机房-楼层机房-桌面终端”的三级架构,楼层机房作为中间转发节点,直接向每个窗口敷设3条物理线路(互联网、电子政务网、语音线路),该模式存在以下突出问题:

目前部门专网与电子政务网线路共用,同时存在窗口调整后语音线路与互联网线路共用情况,线路复杂、维护困难,调整窗口或是链路出问题排查困难,楼层机房越来越杂乱。

楼层机房负载过重:按需求,每个窗口需4条独立线路,若大厅有100个窗口,楼层机房需引出300条网络线路

+100条语音线路,导致机房内配线架、交换机端口资源紧张,线缆密集缠绕,布线混乱,不仅占用大量机房物理空间,还增加了线路管理难度;同时,多条线路并行传输导致机房内信号干扰风险增加,影响网络稳定性。

布线成本高且维护困难:传统铜线布线距离受限(网线传输距离通常不超过100米),且多线路并行需敷设大量线缆,材料成本、施工成本较高;后期维护中,一旦某条线路出现故障,需在密集线缆中逐一排查,定位难度大、耗时长,易导致窗口业务中断,影响服务效率。

扩展性差,难以适应动态需求:若新增窗口或调整窗口业务,需重新从楼层机房敷设对应线路,不仅施工周期长,还可能破坏原有布线结构,影响其他窗口网络正常运行;同时,传统交换机端口数量固定,扩容需新增设备,进一步增加机房负载和成本。

传输性能受限:传统网线传输速率受距离和干扰影响较大,难以满足政务服务中高清视频会议、大数据传输等高速业务需求;语音线路采用传统电话线,音质易受干扰,且无法与数据网络融合,不利于后续业务升级。

物理隔离效果难以保障:虽然传统架构试图通过独立交换机实现四类网络的隔离,但由于楼层机房内设备密集、线缆交错,窗口动态调整,存在网络互联情况,无法满足《电子政务内网安全规范》(GB/T 39786-2021)中“物理隔离是指不存在任何物理连接、电磁耦合、光耦合的隔离方式”的严格要求。特别是电子政务网与互联网之间的隔离边界模糊,存在数据泄露的安全风险,不符合政务网络安全管理规定。

3 优化方案设计

3.1 设计原则

3.1.1 物理隔离优先原则

严格遵循《电子政务网络安全管理暂行办法》《信息安全技术 网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019)等规范,互联网、电子政务网、部门专网及语音线路采用独立的核心设备、传输链路、接入设备,实现全链路物理隔离,杜绝任何形式的信号交叉与数据泄露。

3.1.2 区域化整合原则

结合临沧市政务服务大厅窗口按业务类型分区的实际情况,以4-8个窗口为一个功能区域,区域内共用一套多端口隔离ONU设备,减少接入设备数量,优化楼层机房布线,降低硬件成本与运维压力。

3.1.3 高效适配原则

方案需充分适配“高效办成一件事”改革需求,支持窗口快速扩容、业务动态调整,网络带宽可根据业务高峰灵活调度,确保政务服务流程顺畅高效。

3.1.4 经济实用原则

在满足功能需求的前提下,优化设备选型与布线设计,降低方案实施成本,确保投资效益最大化。同时,方案需具

具备良好的兼容性，可利用部分现有设备，减少资源浪费。

3.2 核心目标

解决楼层机房线路杂乱问题，使线缆数量减少 80% 以上，机房物理空间占用率降至 30% 以下；

实现四类网络的严格物理隔离，隔离度达 -60dB 以上，满足国家安全规范要求；

提升网络扩展性，新增窗口扩容周期缩短至 30 分钟内，支持业务动态调整；

降低网络故障率至 0.2% 以下，故障排查耗时 ≤ 5 分钟，年运维成本降低 50% 以上；

提升网络带宽至 10Gbps，满足大数据传输、高清视频交互等业务需求，支撑“高效办成一件事”改革落地。

3.3 技术原理

3.3.1 FTTD 技术

所谓的 FTTD 主要指的是应用光纤来替代传统铜线延伸到广大用户的电脑终端上，从整个过程上实现全光网络的一种技术。具有带宽大、传输距离远、抗干扰能力强、安全性高等优势。FTTD 由光线路终端 (OLT)、光配线网络 (ODN) 和光网络单元 (ONU) 三部分组成。其中，OLT 负责光电信号转换和上下行业务管理，ODN 实现光信号的传输和分配，ONU 则完成用户侧的业务接入。FTTD 技术无需中间有源设备，可有效减少故障点，降低维护成本。在临沧市政务服务大厅场景中，FTTD 技术可实现四类网络的独立光纤传输，为物理隔离提供坚实的技术支撑。

3.3.2 物理隔离技术

物理隔离技术通过部署两套完全独立的网络设备（包括独立的防火墙、交换机、光纤链路、ONU 设备），实现不同网络之间的物理断开，杜绝横向渗透攻击风险。针对政务网络特点，采用“独立核心设备 + 独立主干光纤 + 独立区域 ONU + 独立桌面接口”的全链路隔离方案，其中电子政务网与部门专网之间采用光闸 (FGAP) 进行单向数据传输，利用光的单向性确保高密级网络数据不泄露，光闸延迟可控制在纳秒级，数据差错率小于 1Bit/1Tbit，安全性与高效性兼具。

3.3.3 区域化共用 ONU 技术

区域化共用 ONU 技术是将 4-8 个窗口划分为一个功能区域，区域内共用一套多端口物理隔离 ONU 设备，ONU 内置独立的光模块与物理隔离通道，每个端口对应一个窗口的某类网络接入需求。该技术可减少 ONU 设备数量，优化楼层机房布线，同时通过 SDN 技术实现端口带宽的动态调度，确保区域内各窗口业务的稳定运行。

3.4 网络架构设计

3.4.1 总体架构

采用“核心机房 - 楼层机房 - 区域 ONU - 桌面”的四级全光网络架构，四类网络独立部署、并行运行。

3.4.2 各层级详细设计

3.4.2.1 核心机房层

核心机房按四类网络划分为独立物理区域，采用实体墙分隔，各区域设备、电源独立部署，杜绝跨区域信号泄露。具体设计如下：

电子政务网核心区：部署双机热备核心交换机，配备光闸 (FGAP) 与防火墙，光闸实现电子政务网与部门专网的单向数据传输，确保高密级数据安全；

互联网核心区：部署双机热备核心交换机与下一代防火墙，支持深度包检测 (DPI) 功能，防范网络攻击；

部门专网核心区：根据部门需求部署核心交换机，针对垂直业务系统特点配置访问控制策略；

语音网络核心区：部署 IP 语音交换机与语音网关，支持 SIP 协议，实现办公电话与语音咨询服务；

管理区：部署 SDN 控制器与运维管理平台，SDN 控制器实现各网络带宽资源的动态调度，运维管理平台支持网络状态实时监控、故障告警与统计分析。

3.4.2.2 楼层机房层

每个楼层机房为四类网络分别部署独立无源分光器，采用一级集中分光模式，减少中间节点，便于维护管理。采用无源分光器替换原有汇聚交换机，减少了汇聚层的有源设备，不仅更易部署，也提升了网络的可靠性。分光器选用 2:16 分光比，可满足 16 个区域 ONU 的接入需求，每个楼层机房最多可覆盖 128 个窗口（16 个区域 × 8 个窗口）。

3.4.2.3 区域 ONU 层

按 4-8 个窗口为一个功能区域划分，结合临沧市政务服务大厅“综合窗口”“一件事一次办”窗口的布局特点，综合服务区采用 8 个窗口为一个区域，专项审批区采用 4 个窗口为一个区域。每个区域配置 1 个区域安全隔离箱，内置四类网络 ONU 设备：

电子政务网 ONU：8 端口物理隔离型，每个端口对应一个窗口的电子政务网接入需求；

互联网 ONU：8 端口物理隔离型，支持 10Gbps 带宽传输；

部门专网 ONU：8 端口物理隔离型，根据部门需要接入，无部门专网区域作为备用；

语音 ONU：8 端口型，每个窗口分配 1 个端口。

区域安全隔离箱内的四类 ONU 采用金属隔板物理分隔，独立电源供电，避免电磁耦合与信号串扰。ONU 设备支持远程端口激活与带宽调整，通过 SDN 控制器实现集中管理。

3.4.2.4 桌面终端层

每个区域配置 1 个区域配线面板，面板按颜色区分四类网络接口（电子政务网蓝色、互联网绿色、部门专网黄色、语音黑色），窗口终端通过短距离屏蔽网线连接至配线面板对应接口，确保接口不易混淆。桌面终端包括电脑、打印机、

办公电话等设备，分别接入对应网络接口，实现四类业务的并行运行。

4 优化方案的应用优势

4.1 线路优化效果

政务大厅每层楼机房线缆数量从改造前的 160 条（40 窗口 × 4）减少至 28 条（4 条主干光纤 + 6 个区域 × 4 条区域光纤），线缆数量减少 82.5%；楼层机房物理空间占用率从 95% 降至 25%，配线架端口占用率从 90% 降 20%，机房布线整洁有序，彻底解决了线路杂乱问题。

4.2 物理隔离效果

第三方安全机构测试结果显示，四类网络之间的隔离度达 -65dB 以上，无任何物理连接、电磁耦合、光耦合现象；电子政务网与部门专网通过光闸实现单向数据传输，未出现数据泄露情况，完全符合《接入政务外网的局域网络安全技术规范》、《政务外网终端一机两用安全管控技术指南》的要求。

4.3 网络性能效果

改造后，网络带宽提升至 10Gbps，是传统铜线网络的 10 倍，大文件（100M）传输时间从 20 秒缩短至 2 秒；网络丢包率控制在 0.05%-0.08%，延迟 ≤ 1ms，满足高清视频会议、线上申报等业务需求。

4.4 运维效率效果

改造后，网络故障率从 0.8% 降至 0.15%，故障排查耗时从平均 120 分钟缩短至 2 分钟。窗口业务的动态调整，若窗口需新增某条线路或变更业务类型，仅需通过核心机房网络管理平台调整 ONU 配置即可，无需现场改动布线，新增窗口扩容周期缩短至 20 分钟内，适配“高效办成一件事”改革的灵活需求。

5 结论与展望

政务服务大厅窗口网络的优化升级是提升政务服务效率、改善公众体验的重要支撑。本文以临沧市政务服务大厅为实践载体，结合“高效办成一件事”改革需求，设计了“核心机房 - 楼层机房 - 区域 ONU - 桌面”的网络升级方案，通

过 FTTD 技术、物理隔离技术与区域化共用 ONU 技术的融合应用，有效解决了传统架构下楼层机房线路杂乱、物理隔离效果不佳、扩展性差、运维成本高等问题。方案通过四类网络独立设备部署实现严格物理隔离，按 4-8 个窗口为一个区域共用 ONU 设备优化布线设计，经试点实施验证，取得了显著成效：楼层机房线缆数量减少 82.5%，网络故障率降至 0.15%，运维成本降低 60%，完全满足“高效办成一件事”对网络稳定性、灵活性与安全性的要求。该方案的成功实施，为临沧市政务服务大厅的数字化转型奠定了坚实基础，也为全国其他地区政务服务大厅的网络升级改造提供了可复制、可推广的实践经验。

未来，随着 5G、物联网、人工智能等技术在政务服务中的深度应用，窗口网络将面临更高带宽、更低延迟、更智能管理的需求。后续可进一步优化方案，一是引入 AI 智能运维技术，基于机器学习算法实现故障预判、自动修复，进一步提升运维效率；二是结合量子加密技术，增强数据传输安全性，满足更高等级的安全需求；三是功能拓展，依托 SDN 控制器实现跨区域网络资源调度，支持“一件事一次办”跨部门协同业务的高效开展；对接政务服务大数据平台，实现网络流量与业务办理数据的联动分析，为政务服务优化提供数据支撑。通过持续的技术创新与功能拓展，推动政务服务网络向更安全、更高效、更智能的方向发展，为“高效办成一件事”改革提供更强大有力的技术保障，为“数字政府”建设提供更坚实的网络支撑。

参考文献

- [1] 杨猛猛. 探讨未来智慧园区全光网络的建设方式[J]. 通讯世界, 2025,32(6):7-9. DOI:10.3969/j.issn.1006-4222.2025.06.003.
- [2] 高杰. 光纤到桌面解决方案[J]. 通信电源技术,2022,39(5):57-60. DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2022.05.019.
- [3] 金雷,朱元彩,李晓东. 5G接入网FTTD无源光网络的关键技术研究[J]. 中国宽带,2024,20(3):49-51.
- [4] 唐艺.全光网络系统的应用[J].智能建筑电气技术,2020,16(4): 103-107.

Research and Implementation of Innovative WebSocket Push Technology Based on GoAhead Server

Jianbin Wang

Electromechanical Control, China Electronics Technology Group Corporation's 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract

The GoAhead server, as a web server for embedded platforms, is widely used in various embedded platforms such as Linux, VxWorks, and Reworks. Due to the fact that traditional technologies do not support the server's ability to actively push messages to clients and the function of asynchronous message processing, the client is unable to display the server status in real time. This paper aims to study the innovative WebSocket pushing technology based on the GoAhead server. By deeply analyzing the architecture of the GoAhead server and combining the advantages of the WebSocket protocol, the pushing function and asynchronous message processing function based on the GoAhead server are finally successfully implemented. Through testing, this research enables the changes in the server status to be quickly reflected on the client side, greatly improving the real-time performance of data interaction.

Keywords

GoAhead; websocket; HTTP; Asynchronous Message Processing; Active Push

基于 GoAhead 服务器的创新型 websocket 推送技术研究 与实现

王建斌

中国电子科技集团公司第十研究所, 中国 · 四川 成都 610036

摘要

GoAhead服务器作为一款为嵌入式平台web服务器, 广泛应用于Linux、VxWorks和Reworks等多种嵌入式平台。由于传统技术不支持服务器主动向客户端推送消息和异步消息处理功能, 导致客户端不能实时显示服务器状态。本文旨在研究基于GoAhead服务器的创新型websocket推送技术, 通过深入剖析GoAhead服务器架构, 结合websocket协议的优势, 实现了基于GoAhead服务器的推送功能与异步消息处理功能, 经测试, 该研究使得服务器状态变化能迅速反馈至客户端, 极大提升了数据交互的实时性。

关键词

GoAhead; websocket; HTTP; 异步消息处理; 主动推送

1 引言

随着计算硬件、软件技术、互联网技术以及嵌入式技术的飞速发展, 嵌入式设备被广泛应用到工业控制系统和通信设备中^[1]。但是嵌入式设备在运行过程中, 往往需要进行状态监控, 以便及时发现问题并采取相应措施。由于嵌入式设备通常缺乏人机交互界面, 远程监控成为了必然需求^[2]。一般嵌入式设备通过以太网总线进行远程监视, 以太网总线

的嵌入式设备远程监视系统分为 B/S 架构和 C/S 架构^[3]。C/S 架构虽然在数据处理和交互方面具有一定优势, 但它需要开发人员额外开发远程监控客户端软件, 且不同的客户端软件对部署的计算机硬件有要求, 这增加了开发和使用的复杂性^[3]。相比之下, B/S 架构只需在浏览器中输入设备的 IP 地址, 就能实现远程监控, 极大地简化了操作流程, 因此受到了广泛关注^[4]。

为了解决这一问题, 业界提出了多种解决方案。其中, websocket 技术以其独特的全双工通信特性脱颖而出。它不仅支持浏览器与服务器之间的“请求 - 响应”通信, 还支持服务器主动向浏览器推送数据。当嵌入式设备状态发生变化时, 服务器可主动向浏览器推送最新工作状态, 浏览器接收到数据后更新页面, 从而实现了设备状态的实时监控, 提升了客户端实时监测的能力^[7]。

【基金项目】红果园军工项目（项目编号：M17GY500160）。

【作者简介】王建斌（1985-），男，硕士，工程师，从事机电控制研究。

2 websocket 协议

websocket 协议是伴随 HTML5 发布的一种创新型网络通信协议,协议包括握手协议和数据传输协议,可以传输基于文本的消息和二进制数据,实现了浏览器与服务器之间的全双工通信^[5]。websocket 协议也发挥着重要作用。金融市场行情瞬息万变,通过 websocket 协议,服务器可以实时将最新的价格、成交量等数据推送给客户端,投资者能够及时获取这些信息,做出准确的投资决策。在物联网设备的状态监控与远程控制场景中,websocket 协议同样不可或缺。例如,智能家居系统中的各种设备,如智能摄像头、智能门锁、智能家电等,通过 websocket 协议与服务器建立连接,服务器可以实时监控设备的状态,并根据用户的指令远程控制设备,实现智能化的家居管理,为用户提供更加便捷、舒适的生活体验^[6]。

websocket 协议的通信过程主要包括握手和数据传输两个关键阶段^[7],在数据传输阶段,websocket 协议采用了独特的数据传输帧格式,以确保数据的准确、高效传输。数据传输帧格式包含了多个关键字段,每个字段都有其特定的含义和作用,通过这种数据传输帧格式,websocket 协议能够在保证数据传输可靠性的同时,提高传输效率,满足不同应用场景对数据传输的要求。

3 基于 GoAhead 的 websocket 模块设计

3.1 模块总体架构

基于 GoAhead 的服务器框架,在设计 websocket 模块时,需要兼容现有框架功能同时也要满足 websocket 协议。基于 GoAhead 的 websocket 模块设计主要握手处理子模块、数据处理子模块和主动推送子模块这三个核心部分协同构成,各子模块分工明确、紧密配合,共同实现高效的服务器推送功能和异步消息处理功能。

3.2 子模块功能设计

3.2.1 握手处理子模块

握手处理子模块主要完成与浏览器的 websocket 连接请求处理功能。握手处理流程如 5 所示。首先由浏览器客户端向服务器发起 TCP 连接请求,服务器 Accept 浏览器连接后,在本地创建一个对应套接字,通过套接字接收客户端浏览器发送 websocket 连接请求。当 websocket 模块接收到浏览器的握手连接 HTTP 请求数据包后,请求包如图 3 所示。首先检测连接路径是否已经在 websocket 路径管理集合中注册,如果检测失败,则回复客户端消息代码为 404 非法连接;如果检测成功,则将该套接字回调接收处理 HTTP 协议接口更新为处理 websocket 数据接口,后续接收到数据按照 websocket 协议进行处理,处理流程如图 9 所示,同时将该套接字以“IP+ 端口”为索引,添加到连接管理集合中,为客户端主动向浏览器推送消息提供接口。完成对 websocket

连接请求处理后,通过调用 `websGetVar(wp," HTTP_SEC_WEBSOCKET_KEY", 0)` 获取客户端连接 key 值,利用 sha 算法计算回复 key 值,向服务器上报消息代码 101(切换协议代码),通知客户端浏览器从接收 HTTP 协议数据切换到接收 websocket 协议数据,回复报文如图 4 所示。GoAhead 服务器框架为了提高套接字的利用率,对每一个 TCP 连接套接字进行 15s 是否有数据超时检测,如果在 15s 之内没有接收到任务数据,则执行关闭套接字操作。由于客户端浏览器与 websocket 模块套接字连接成功后,创建一个本地的 websocket 套接字,通过 websocket 套接字与客户端浏览器建立长时间通信,交互数据为触发式数据并非周期数据,因此在 websocket 模块确认与浏览器客户端连接成功后,通知 GoAhead 框架关闭对应 websocket 套接字的超时检测。

3.2.2 数据处理子模块

数据处理子模块主要完成接收浏览器下发数据,完成数据的分发和处理。首先从 websocket 套接字上接收 4 字节包头数据,按照协议帧格式解析负载数据长度。由于 websocket 协议采用的 TCP 数据流传输,因此在接收负载数据时,首先需要解析其长度,然后根据长度接收对应的负载数据。当接收到的负载数据与包头长度相等时,则证明接收到完整一包 websocket 数据,对负载数据进行 mask 转换后,根据应用程序注册的回调接口,处理浏览器客户端下发数据。

3.2.3 主动推送子模块

主动推送子模块主要完成将应用将软件数据推送到所有已经建立连接的浏览器客户端,主动推送消息流程由应用软件发起,不依赖于浏览器客户端请求。主动推送子模块通过遍历连接管理集合中所有已经连接的浏览器客户端,既可以完成文本数据推送,同时也可以完成二进制数据推送。

3.2.4 性能测试

基于以上 GoAhead 服务器 websocket 模块设计,本文搭建了一个模拟实际应用场景的测试环境,对 B/S 架构与 C/S 架构进行对比测试。

本次性能测试主要关注延迟时间这一关键指标,延迟时间是衡量系统实时性和响应速度的重要参数,它直接影响着用户体验和系统的实用性。在实际应用中,如实时监控系统、即时通讯软件等,低延迟对于及时获取信息和进行交互至关重要。

客户端采用 Perntium Dual CPU 主频 1.6GHz、内存未 4Gmb,服务器 PowerPC2020 主频 1.6GHz、内存 2Gmb,浏览器为谷歌浏览器。

在测试过程中,为了保证测试结果的可靠性和准确性,对每个数据长度进行了多次测试,避免因单次测试的偶然性因素导致结果偏差。对测试数据进行了严格的记录和整理,对不同长度数据延迟如表 3 所示。

表3 性能测试结果

长度(Byte)	B/S 延迟(ms)	C/S 延迟(ms)
4096	< 1	< 1
8192	1.5	1.3
10240	2.4	2.1
20480	3.5	3.2
40960	4.9	4.6
长度(Byte)	B/S 延迟(ms)	C/S 延迟(ms)
4096	< 1	< 1

从表3测试结果可以看出,对于相同长度的数据,B/S架构与C/S架构的延迟相差低于1毫秒。在数据长度为4096字节时,B/S架构和C/S架构的延迟均小于1毫秒,这表明在处理小数据量时,两种架构都能快速响应,满足实时性要求。随着数据长度的增加,如在8192字节时,B/S架构延迟为1.5毫秒,C/S架构延迟为1.3毫秒;在10240字节时,B/S架构延迟为2.4毫秒,C/S架构延迟为2.1毫秒。虽然B/S架构的延迟略高于C/S架构,但两者的差距非常小,在实际应用中,这种微小的延迟差异对于用户界面软件几乎没有影响。

这种结果的产生与两种架构的通信原理和数据处理方式密切相关。C/S架构中客户端与服务器直接建立连接,数据传输路径相对较短,且客户端可以分担一部分数据处理任务,因此在延迟方面具有一定的优势。而B/S架构虽然需要通过浏览器进行通信,增加了一定的网络开销和处理环节,但通过优化的websocket协议和高效的服务器实现,有效地降低了延迟,使其在性能上与C/S架构相当。在实际应用场景中,如实时监控系统、即时通讯软件等,这种低延迟的性能表现能够确保数据的及时传输和交互,为用户提供流畅的使用体验。对于实时监控系统,设备状态的变化能够及时推送给客户端,让监控人员能够迅速做出反应;在即时通讯软件中,消息能够快速传递,实现即时沟通的效果。

4 结论

本文研究了客户端浏览器与服务器之间异步响应和服务器主动向浏览器客户端推送数据的技术。利用websocket协议,设计实现了基于GoAhead服务器的websocket模块,实现了浏览器与服务器之间异步响应和服务器主动推送数据功能,解决了GoAhead服务器的B/S系统架构中,服务器状态变化后不能及时通知客户端更新的问题,提升了B/S系统架构中浏览器客户端界面监控的实时性。在实时监控系统中,服务器能够及时将设备状态变化推送给客户端,使监控人员能够迅速做出反应;在即时通讯软件中,消息能够快速传递,实现即时沟通的效果。这一成果为嵌入式设备的远程监控提供了更高效、更可靠的解决方案,提升了B/S系统架构中浏览器客户端界面监控的实时性,具有重要的理论意义和实际应用价值。

参考文献

- [1] SALUNKEPG, SAYYED A M Design of embedded web server based on NIOS-II soft core processor[C/OL]//2016 Internation Conference on Eletrical, Electronics and Optimization Techniques(ICEEOT) Chen gna:IEEE,2016:488-492[2019-0420]
- [2] 孙留存,苏卫江,库斯达,等.基于嵌入式的智能远程视频监控系统设计[J].自动化与仪器仪表,2024,(08):163-167.
- [3] 程耀,谢华,万思宇,等.基于嵌入式Linux的双通道DVR系统设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2022,(11):179-183.
- [4] 刘雪梅,王卫军.基于嵌入式的步进电机远程控制技术[J].自动化与仪器仪表,2021,(07):76-79.
- [5] 章立宗,孙洲,王华慧,等.基于分布式区块链的储能数据交互处理模型设计[J].电子设计工程,2023,31(15):70-74.
- [6] 张帝,周宾斌,孙畅子.基于嵌入式Linux的智能点餐系统的设计与实现[J/OL].企业科技与发展,1-5[2025-04-16].
- [7] 胡洋洋.基于WebSocket的服务器推送技术的研究与实现[D].南京邮电大学,2018.

Analysis of the Impact of Component Selection and PCB Routing on the Electromagnetic Compatibility Performance of Short-Wave Radio Frequency Systems

Wen Han

Nanjing Panda Hinda Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210014, China

Abstract

The short-wave radio frequency system is a key component in wireless communication and radio frequency identification. Its operating frequency band is susceptible to electromagnetic interference, which can lead to radiation and thereby affect electromagnetic compatibility. As the core part of the radio frequency system hardware design, PCB routing and component selection directly affect electromagnetic interference, propagation, and EMC performance. In the hardware design process, PCB routing, component selection, etc. all influence the level of electromagnetic compatibility. Component noise and linearity are also influencing factors. PCB routing and layout directly affect interference propagation, and there is a certain correlation between them. Through a systematic analysis, this paper focuses on the EMC core, analyzes the influence of active and passive components, deeply explores the influence laws of PCB routing and EMC performance, and proposes EMC optimization principles and design strategies, thereby providing certain basis for EMC optimization design.

Keywords

Component selection; PCB wiring; Short-wave radio frequency; Electromagnetic compatibility

元器件选型与 PCB 布线对短波射频系统电磁兼容性能影响分析

韩文

南京熊猫汉达科技有限公司, 中国·江苏 南京 210014

摘要

短波射频系统作为无线通信、射频识别的关键,其工作频段受电磁干扰容易产生辐射,进而影响电磁兼容度。作为射频系统硬件设计核心环节,PCB布线以及元器件选择等直接影响电磁干扰、传播以及EMC性能。在硬件设计中,PCB布线、元器件选择等均会影响电磁兼容水平,元器件噪声、线性度也是影响因素。PCB走线、布局直接影响干扰传播,二者具有一定关联。本文通过进行系统分析,从EMC核心进行处罚,通过分析有源器件、无源器件的影响,深入探究PCB布线、EMC性能的影响规律,并提出EMC优化原则以及设计策略,从而为EMC优化设计提供一定依据。

关键词

元器件选型; PCB布线; 短波射频; 电磁兼容性

1 引言

目前来说,短波通信整体优势明显,同时应用广泛。短波通信设备成本较为低廉,整体传输距离相对较远,因此在民用通信、航天、军事方面应用广泛。短波射频系统整体覆盖在3MHZ-30MHZ之间,由于外界电磁环境复杂、频谱密集,因此容易受到干扰。短波通信自身也会产生一定电磁辐射,直接影响周边设备运行,电磁兼容成为目前衡量短波射频的主要指标。电磁兼容的核心原则即为维持电磁环境稳

定,减少干扰的发生。当前来说,射频系统EMC一般集中于毫米波频段,对于短波系统研究较少。因此,通过系统研究元器件、PCB布线具有一定价值。

2 短波射频系统电磁兼容要求和特点

2.1 电磁兼容核心要求

当前短波射频系统EMC要求主要包含三个方面,电磁发射、电磁抗扰度以及内部电磁兼容^[1]。电磁发射要求中,由于系统自身射频杂散、传导发射,应符合GB/T 13837、GJB 151B的标准值。电磁抗扰度要求应以保持设备的灵敏度为主,同时间距信号质量。内部电磁兼容主要以避免干扰为主,射频、数字以及电源模块之间一般不产生干扰、耦合,

【作者简介】韩文(1982—),男,中国山西人,本科,工程师,从事短波发射机研究。

从而减少射频电路干扰的发生。

2.2 短波频段电磁干扰特点

短波频段干扰具有一定特征，第一，干扰源包含功率放大器、开关电源、数字时钟等相关设备，外部包含工业噪声、同频信号，整体种类相对较多。第二，传播路径较为复杂，通过传导、电容耦合等进行扩散。第三，对于寄生参数敏感。部分走线、电容等均会影响电路，导致信号产生反射。第四，通过接收微小信号电路，因此整体干扰容易被淹没、灵敏度下降。当前来说，短波射频系统应从多个方面进行优化，做好干扰源、传播路径、敏感电路控制。

3 元器件选型对短波射频系统 EMC 性能影响

当前电磁干扰的源头即为元器件，同时也是首要防线，其参数、频率直接影响 EMI 水平以及抗干扰能力。

3.1 有源器件选型影响

有源器件作为首要干扰源，同时也是系统核心单元。低噪声放大器决定系统接收灵敏度，其位于接收前端，整体噪声系统、抗干扰阈值等均是影响因素。线性度不足容易引起失真问题，但如果频段不匹配容易导致干扰增加。功率放大器最为干扰源，从最大辐射方面引起，其效率、杂散抑制均会是影响 EMI 指标的主要因素，在谐波抑制不足时容易导致发射超波，效率偏低则导致耦合加剧。设备中频率稳定性、相位噪声为关键点，如果噪声过大会造成干扰。混频器中频率变化以及隔离度不足容易形成耦合，在交调抑制不足时直接导致动态范围降低，影响干扰频率。数字干扰源中主要为数字控制器件、时钟电路，在高频脉冲时容易落入短波频段，因此应选择低辐射器件。

3.2 无源器件选型影响

无源器件一般不主动产生干扰，但其抗阻特性、频率直接影响传输效果。对于阻抗匹配器来说，应选用高频特性的器件，传统普通插器件寄生参数大，容易影响信号反射，系统标准阻抗匹配精度也是影响 EMI 水平的关键因素。为抑制干扰，应加强滤波器管理。射频滤波器整体精准度相对较高，电源滤波器直接抑制传导噪声，去耦电容通过进行就近放置，从而能够降低不良情况的产生。影响进出的主要通道即为天线、连接器，天气驻波比相对较大，直接造成反射加剧，因此应必须选用优良器件，避免产生不良情况^[2]。

3.3 元器件 EMC 选型原则

综合短波系统特点，严格进行系统、频段匹配，优先选择低噪声器件。对于电气参数来说应严格进行匹配，针对高干扰、敏感器件应做好分装屏蔽，以此来提升集成度，减少连线。元器件的电器参数应和系统电路进行匹配，避免由于参数不稳定产生额外干扰。针对大功率、高干扰的器件，优选选择屏蔽封装器件，提升抗干扰能力。

4 PCB 布线对短波射频系统 EMC 性能影响

EMC 设计的核心关键点即为 PCB 布线，其布局方式、

接地设计直接决定胸内部电磁干扰的耦合方式，在短波频段寄生时直接导致电磁侵入，影响干扰途径。短波频段的寄生对于走线即为敏感，不合理 PCB 布线直接导致 EMC 性能不达标，并导致电磁干扰产生。因此，PCB 应遵循 EMC 设计规律，在进行严格抗阻时进行合理布局，从而抑制电磁干扰产生，提升整体性能。

4.1 布局设计对 EMC 性能影响

PCB 布局作为基础，通过进行合理布局能够有效抑制干扰，在减少模块耦合时保证信号质量。短波射频系统应遵循就近布局原则，做好布局分区，将不同类型、不同干扰等级模块进行分离，从而避免干扰源产生耦合。将 PCB 进行分区布局，PCB 分为四个核心区域：射频发射区、射频接收区、数字控制区以及电源区等几个核心区域，对于各区域来说应保证一定距离。射频发射区作为高敏感区域，二者之间应避免发功率射频耦合以及走线交叉^[3]。数字控制区作为干扰源，和射频区域之间距离应在 15mm 以下，从而避免产生辐射。电源区作为干扰器，应靠近系统电源输入端进行布局，从而通过滤过电路隔离，避免产生干扰。

同一功能模块的元器件应进行就近布局，从而缩短信号线走线长度。LNA 输入以及输出端元器件应结合 LNA 布局，在紧靠元器件电源布局时提升信号传输效率。天线接口作为外部信号通道，靠近 PCB 边缘，通过和接收模块进行快速连接，降低信号反射。天线接收整体良好，能够避免程度电磁辐射天线。大功率器件在工作时容易产生一定热量，应保证良好散热。

4.2 阻抗控制对 EMC 性能影响

短波射频系统中射频信号线作为保证信号传输的核心，其中 PCB 布线中由于抗阻不匹配容易影响信号失真，同时产生额外电磁辐射。在抗阻严重不匹配时直接产生杂散干扰。PCB 走线抗阻值包含走向宽度、厚度以及介质厚度等几个方面，在短波频率应严格进行走线控制^[4]。依据 PCB 板材参数进行走线宽度设计，选择介电常数稳定的 PCB 板材。射频走线下方应设置完整接地层，从而避免由于介质厚度造成的抗阻偏差。将射频阻抗走线、电源线进行分开布局，减少干扰产生。

4.3 接地设计对 EMC 性能影响

EMC 设计的核心即为接地系统，主要作为即为电磁干扰信号从而为系统提供一定参考，抑制电磁辐射以及耦合。短波射频系统设计应采用混合原则，根据不同频段以及不同模块保证接地层的完整性，从而降低不良情况。PCB 应采用多层设计，保证接地层完整，避免出现被走线分割的情况。接地层厚度应保证完整，减少破坏并提升抗干扰能力。短波射频系统通过采用混合方式，低频段、高频段分别采用单点、多点接地模式，从而降低不良情况。

4.4 滤波与屏蔽布线对 EMC 性能影响

抑制电磁干扰的关键手段即为滤波，合理器件布局、

走线从而提升滤波效果。设置屏蔽线、屏蔽层减少电磁耦合，以此来提升 EMC 性能。滤波器件的核心关键即为靠近干扰源，去耦合紧靠器件布局，从而缩短滤波器件以及走线长度，降低寄生电感，提升整体效果。通过滤波器件放到接地层，保证直线，避免信号产生干扰。针对高干扰源模块，以 PCB 布线进行设置，减少电磁符合。在射频信号线两侧通过接地走线，连接接地层，避免产生干扰。射频信号应尽量保证平行走线，保证间距，避免产生耦合^[9]。电源线应采用款走线，通过抑制电源纹波传播，减少射频电路干扰。

5 元器件选型和 PCB 布线的 EMC 优化策略

元器件选型应和 PCB 布线相互关联，优质元器件应进行合理布局从而发挥自身性能。合理 PCB 布线应匹配元器件，应注重 PCB 布线，从根本上实现 PCB 布线的协同优化，减少干扰。

5.1 元器件电磁特性 PCB 布线优化

依据元器件的电磁干扰特性，进行 PCB 布线优化，从而抑制电磁干扰传播。针对振荡器等干扰有源器件，在 PCB 布线时进行屏蔽，将器件电磁辐射控制在屏蔽环中。器件电源应通过去耦电容布局抑制纹波耦合，缩短走线从而提升滤波效果。针对 LNA 和混频器等敏感器件，应将其放在中心位置，在器件合理输入、输出时缩短走线，减少耦合。根据滤波器件特性和要求合理选择布局，形成最佳滤波回路，降低传导干扰。对于射频滤波器来说，通过紧靠射频信号，从而缩短走线。在布局时应紧靠输入端布局，减少干扰。在实际工程设计中，元器件电磁符合直接影响 PCB 布局方式、效果，将 PCB 布线和元器件进行一体化流程设计，从源头降低电磁耦合，从而实现 EMC 性能提升，保证稳定可靠。

5.2 基于 PCB 布线特点元器件选型优化

依据 PCB 布线布局规则，针对性选择元器件，并提升系统 EMC 性能。如果 PCB 布局空间有限，优先选择集成度较高的元器件，减少走线长度、降低电磁耦合。依据 PCB 阻抗要求，选择高频特异性较优的方式匹配电阻电容，从而减少信号反射。采用 PCB 接地方式和设计，选择整体性能较好的元器件，整体便于连接。针对带有金属屏蔽封装器件，形成完整屏蔽。对于 PCB 滤波布线布局，从而便于紧靠电源，形成走线连接，缩短滤波。依据 PCB 接地方式和设计，便于连接接地层。优先选择接地脚丰富、屏蔽性能良的元器

件，通过形成完整屏蔽结构，阻断辐射干扰传播路径。依据 PCB 接地方式进行设计，便于可靠连接，形成完整性。

5.3 全流程 EMC 协同设计

短波射频系统 EMC 协同设计应从全流程进行优化。在需求分析阶段，依据系统工作频段以及 EMC 标准要求，明确系统 EMC 指标，确定元器件选型的设计布局，为后续协同设计奠定一定依据。结合系统 EMC 指标、PCB 布线初步规划，选择电磁特性匹配度好的设计，制作元器件选型清单，从而验证抗干扰能力。在 PCB 布线阶段，依据元器件的选型特性，结合仿真软件分析阻抗匹配以及电磁耦合，从而优化 PCB 布线，必要性调整元器件。在 PCB 详细布线阶段，动态优化，对超标问题进行分析，确保系统以及性能满足指标要求，制作系统样机，进行 EMC 测试，针对其中发现的问题进行分析，优化 PCB 布线实现动态优化，保证 EMC 性能达标。EMC 协同设计应贯穿方案设计、PCB 布线，从源头实现真正闭环优化。在需求分析、方案设计阶段，为后续设计奠定一定基础。

6 结语

EMC 设计的核心环节即为元器件选型、PCB 布线，其核心点直接决定电磁干扰传播能力以及强度。本文通过结合短波射频系统特点，在系统分析元器件选择以及 PCB 布线规律时，得出以下结论：有源器件的线性度、杂散抑制直接影响频率特性，同时也是影响 EMC 的关键因素，从源头上决定电磁发射基础。PCB 布线布局、设计直接决定电磁传播路径以及耦合方式，在布线时应遵循就近布局原则。元器件选型应和 PCB 布线进行结合，二者协同优化从而从源头上抑制电磁干扰。

参考文献

- [1] 张奇升. 广播电视覆盖系统多频电磁兼容设计分析[J].电视技术,2025,49(11):14-16.
- [2] 徐乐,王泽楷,李蕊,等. 基于仿真技术的电磁适应性评估技术及展望[J].安全与电磁兼容,2025,(05):25-38.
- [3] 梁文林,井占发. 电磁兼容技术在某车载配设备中的设计应用[J].机电元件,2025,45(03):29-33.
- [4] 丛一凡,王博,江秀红. 基于CIR-NO方法的电动飞机BTMS模块的电磁兼容优化设计[J].新能源航空,2023,1(06):69-80.
- [5] 伍光新,李归. 综合射频一体化系统技术发展综述[J].现代雷达,2023,45(05):1-14.D

Design of an IoT-Based Online Monitoring and Early Warning System for Insulation Resistance

Wenfei Liu¹ Lili Yang²

1. Shanxi Huakong Weiye Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030024, China

2. Taiyuan Jiancaoping District No.1 Middle School, Taiyuan, Shanxi, 030023, China

Abstract

Aiming at the industry pain points of traditional insulation resistance measurement for three-phase asynchronous motors, such as power shutdown requirement, manual operation, low efficiency and no real-time early warning, an IoT-based online insulation resistance monitoring and early warning system was designed and implemented. The system adopts a hierarchical distributed architecture, with the domestic AT32F microcontroller as the core, and integrates a self-developed DC high-voltage injection measurement circuit. It innovatively realizes the intelligent safety logic of "automatic measurement upon power-off and automatic disconnection upon power-on" based on voltage detection. The measured data is remotely transmitted and synchronized to the cloud platform via WiFi and MQTT protocol, and the background monitoring platform realizes data visualization, storage and multi-terminal early warning for over-limit values. Experimental results show that the system has accurate measurement and stable operation, which can effectively realize online perception and intelligent management of the insulation state of three-phase asynchronous motors, provide reliable technical support for predictive maintenance of industrial equipment, and has good engineering application value.

Keywords

Internet of Things; Online Insulation Resistance Monitoring; Power Traction Equipment; Wireless Sensor Network; Predictive Maintenance; AT32F; MQTT

基于物联网的绝缘电阻在线监测与预警系统设计

刘文飞¹ 杨丽丽²

1. 山西华控伟业科技股份有限公司, 中国·山西太原 030024

2. 太原市尖草坪区第一中学校, 中国·山西太原 030023

摘要

针对三相异步电机绝缘电阻测量需断电、人工操作、效率低下且无实时预警的行业痛点, 设计并实现一套基于物联网 (IoT) 技术的绝缘电阻在线监测与预警系统。系统以自研绝缘电阻测量仪为核心, 创新实现基于电压检测的“断电自测量、上电自切断”智能安全逻辑, 通过WiFi与MQTT协议完成测量数据的远程传输与云端同步, 后台监控平台实现数据可视化、存储与超限多端预警。实验结果表明, 该系统测量准确、运行稳定, 可有效实现三相异步电机绝缘状态的在线感知与智能化管理, 为预测性维护提供可靠技术支持, 具有良好的工程应用价值。

关键词

物联网; 绝缘电阻在线监测; 动力拖动设备; 无线传感网络; 预测性维护; AT32F; MQTT

1 引言

三相异步电机是工业、交通及能源领域的核心动力设备, 其绝缘系统受电、热、机械及环境多重应力影响, 成为设备最易劣化的薄弱环节^[1-3]。据工业运维统计, 该类电机约 30% 的故障源于绝缘劣化, 易引发生产线中断甚至电气火灾等安全事故。而传统绝缘电阻测量为离线人工操作, 存在需长时间断电、仅能获取离散数据、无实时预警等痛点,

既影响生产效率, 也无法支撑设备预测性维护, 难以满足工业现场的实际需求。

随着工业 4.0 与智能制造的推进, 物联网、大数据技术的成熟推动异步电机绝缘电阻测量技术向在线化、智能化演进^[4-6]。当前主流在线监测技术主要基于接地泄漏电流分析、高频阻抗、频谱分析、开关瞬态分析三类原理, 各有优劣^[7]; 前沿研究则融合物理检测与人工智能算法, 探索绝缘寿命预测模型。该领域技术发展呈现三大趋势与挑战: 监测对象向全绝缘系统扩展、技术路线向多信息融合转变、工程应用向低成本系统化发展, 这要求后续系统设计需兼顾全面性、智能性与经济性^[8-9]。同时国内外研究存在明显短板, 国内方案

【作者简介】刘文飞 (1985-), 男, 中国山东济宁人, 硕士, 工程师, 从事工业现场电机设备保护及故障分析研究。

多聚焦高压电机,低压电机的低成本高安全性监测方案稀缺,国外方案则存在成本高、适配国内组网环境差等问题^[10-13]。

在此背景下,研发适配低压三相异步电机的绝缘电阻在线监测系统迫在眉睫。本文设计实现一套基于物联网的异步电机绝缘电阻在线监测及预警系统,从硬件设计、软件开发、系统测试三方面展开研发,突破传统检测模式局限,推动绝缘管理向预测性维护转变,以为工业设备智能化升级提供技术路径,为设备安全运行与运维效率提升提供支撑,兼具重要的工程应用价值与实际推广意义。

2 系统总体设计方案

本文所设计的异步电机绝缘电阻在线监测系统,采用分层分布式架构,主要由绝缘电阻测量仪(前端采集单元)、无线 AP 设备(网络传输层)、后台服务器(含云端同步)(数据处理与服务中心)、以及移动式终端(用户交互层)四部分构成。系统通过无线局域网组网,实现测量数据的自动采集、远程传输、集中处理与可视化访问。其具体组成与工作流程如下:

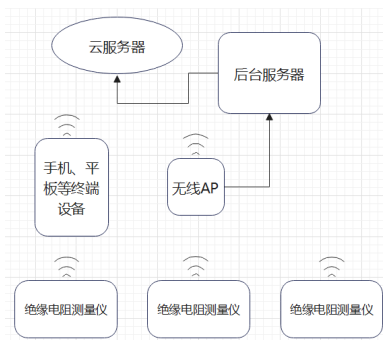


图 1 系统整体设计框图

绝缘电阻测量仪为前端测量单元,其按预设周期或远程指令精准检测电机对地绝缘电阻,内置 WiFi 通信模块,测量完成后将测量值、设备标识、时间戳等数据封装上传。

数据经无线 AP 构建的局域无线网络汇聚,再通过网线、光纤等有线网络稳定传输至远端后台服务器,保障数据传输的实时性与可靠性。

后台服务器作为系统中枢,完成前端数据的接收、解析、存储、分析及历史趋势计算,依托数据库与 Web 服务程序为移动式终端提供数据接口;用户通过终端可实时查看被监测电机的绝缘电阻值、历史曲线及异常预警状态,还能手动选定设备发起即时复测,实现自动化例行监测与人工主动核查的结合。

整套系统形成现场采集、云端管理、移动式终端应用的完整闭环,实现电机绝缘状态的远程、连续、智能化监控。

3 绝缘电阻测量仪硬件设计与实现

绝缘电阻测量仪硬件以微控制器(MCU)为核心,各模块协同实现供电、高压生成、安全连接与精准测量(见图

2),功能如下:

供电与电源管理模块:AC-DC 模块输出 12V、5V、3.3V 直流电为各单元供电,DC-DC 模块将 12V 升压至 500V/1000V 测试高压,提供绝缘测量高压源;测量核心与安全接入模块:电阻分压模块实现高压转低压信号以精准计算电阻,继电器隔离模块控制高压通断并实现电气隔离,三相线路接入模块通过标准接口可靠连接电机三相绕组;控制、交互与通信模块:MCU 统一调度各模块完成全流程控制;开关量输入及上电反馈模块采集外部状态,提升设备可监控性;按键显示模块提供本地操作界面;WiFi 通信模块完成数据无线传输与远程指令接收,为在线监测网络核心。

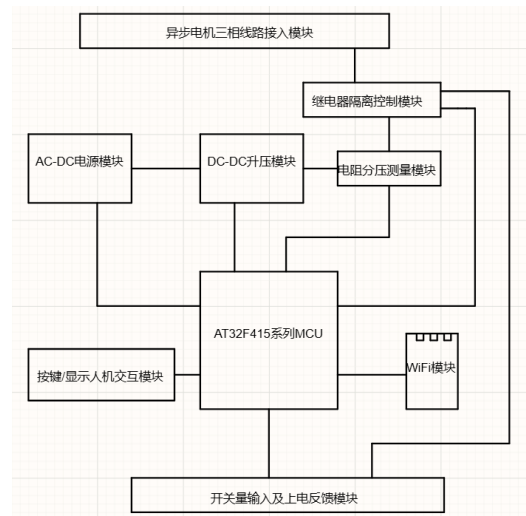


图 2 绝缘电阻测量仪硬件设计原理框图

4 软件系统设计与实现

4.1 绝缘电阻测量仪

测量程序基于 uC/OS-II 多任务实时系统开发,通过循环检测接入端电压信号,切换触发自动测量、安全保护、远程指令响应三种工作模式,兼顾测量的安全性与智能化。

自动测量模式下,检测到电机断电后,MCU 控制继电器切换,将测试高压接入三相绕组,经 ADC 模块采样分压信号并计算各相对地绝缘电阻,数据封装后通过 WiFi 上传。

安全保护模式中,监测到电机上电即中断测量,先关闭 DC-DC 升压模块切除高压,再断开继电器实现电气隔离,系统转入低功耗监听模式。

远程指令响应模式接收后台或移动式终端指令后,优先判定电机电压状态,断电则执行测量并反馈,上电则拒绝并回复状态,全程遵循安全第一原则,保障测量仅在安全断电时进行,同时满足自动化周期监测与远程即时触发需求。

4.2 后台软件设计

后台软件采用分层模块化设计,搭建了集数据接入、解析、处理、存储与可视化于一体的绝缘电阻监测平台。数据处理层基于 Spring Boot 框架开发,实现阈值判定、异常分级和多端报警;数据存储层采用 MySQL 数据库,定制表

结构管理设备、监测数据及系统日志；Web 监控界面基于 B/S 架构，实现多维度可视化功能。测量数据通过 MQTT 协议与无线 AP 交互，轻量级传输适配工业低带宽环境，提升数据传输的稳定性与抗干扰性，保障全流程数据流闭环可靠。

4.3 用户交互展示

用户使用移动式终端可通过微信小程序或网页直接访问后台或云端服务器，查看设备的绝缘电阻数据，并发送测量命令实现远程在线测量。

5 系统测试

为验证系统绝缘电阻自动测量、安全保护、远程指令响应、数据传输及终端显示功能的可靠性，本文搭建实验平台，开展系统综合测试。

绝缘电阻测量仪在检测电机断电后，自动进入测量模式，完成 A、B、C 三相绕组对地绝缘电阻的实时采集与状态判别。根据《三相异步电机维护与检修》(GB/T 30555-2014)，结合工业现场运维经验，设定 $0.5\text{M}\Omega$ 为低限报警阈值，当某一相绝缘电阻低于阈值时，立即输出报警信号，见图 3。



图 3 绝缘电阻测量仪自动测量模式界面

移动式终端可同步接收测量数据，界面可清晰显示各相绝缘电阻及设备状态，系统数据传输稳定性良好、终端显示实时性高，见图 4。



图 4 移动式终端显示界面

测试在工业现场模拟环境中进行（温度 25°C ，湿度

60% ，电磁干扰等级 3 级），除绝缘电阻静态测试外，还完成了电机断电、上电状态切换的 100 次循环测试，系统均能准确触发测量、安全保护模式；连续 72 小时监测测试表明，系统可自动完成绝缘电阻测量、异常判定、数据上传与终端显示，满足工业现场设备绝缘状态在线监测的工程应用要求。

6 结语

本文设计实现了基于物联网的绝缘电阻在线监测与预警系统，该系统突破了传统离线人工检测的局限性，实现了三相异步电机绝缘状态的连续在线感知与智能化管理，为工业低压动力拖动设备的预测性维护提供了一体化技术方案，可有效降低因绝缘劣化引发的设备故障与安全事故概率，提升工业生产运维效率。后续研究可进一步融合人工智能算法，挖掘绝缘电阻监测数据的变化规律，构建绝缘劣化趋势预测模型，实现从状态监测到寿命预测的升级；同时可拓展系统的设备适配范围，优化硬件功耗与通信组网方案，进一步提升系统的实用性与推广价值。

参考文献

- [1] 阙超豪,姚骁键,齐安康,王志胜,王鹏程,陈功.三相异步电机匝间短路故障的诊断方法[J].电气传动.2024,54(11):76-80.
- [2] 苏世民,任智学,渠淮波.电力变压器绝缘老化机理及在线监测技术分析[J].今日制造与升级.2025(10):135-137+153.
- [3] 陆芸,李文彬.低温环境频繁启停工况下的电机绝缘结构研究[J].绝缘材料.2025,58(11):81-88.
- [4] 李欣,杨弄潮.在线绝缘监测系统及其在关键电气设备中的应用[J].水电与新能源.2025,39(09):42-45+49.
- [5] 李汉超.电动机绝缘在线监测装置在电厂中的应用[J].电气技术与经济.2025(08):79-81.
- [6] 荆涛.发电机转子及定子绝缘电阻监测及接地定位方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.2025.
- [7] 赵依琳,冬雷,朱灏,张玉冕.基于反激变换电路的绕组匝间绝缘检测方法[J].微特电机.2025,53(11):27-30.
- [8] 赵琳霞.中压开关柜智能化在线监测技术研究[J].电气技术与经济.2025(05):146-148.
- [9] 张红海.高压电机绝缘介损试验与老化状态评估技术[J].实验室检测.2025,3(22):286-288.
- [10] 彭琳琳,李博,郝博,王伟,徐礼强,金鑫.基于无线传感网络的变压器绝缘故障状态在线监测方法[J].现代传输.2025(01):57-60.
- [11] 梁树利.水电厂高压电气设备绝缘状态监测与故障诊断研究[J].装备维修技术.2025(06):82-85.
- [12] 姚辉.中压电力系统绝缘在线监测与故障预防诊断研究[J].中国设备工程.2026(S1):301-303.
- [13] 勇天泽,马赛,张滔,源苏亮,程刚.超高压变电设备绝缘监测技术研究[J].科技与创新.2026(03):140-142.