

09
2025

INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING RESEARCH

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Tel.: +65 65881289

E-mail: contact@nassg.org

Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819



信息科学与工程研究

INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING RESEARCH

Volume 6 Issue 9 September 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



Information Science and Engineering Research

信息科学与工程研究

Volume 6 Issue 9 September 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



ISSN 2737-4815
09 >
9 772737 481254

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

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

《信息科学与工程研究》征稿函

期刊概况：

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

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure
www.cnki.net

出版格式要求：

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

版权声明/Copyright

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

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

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



出刊及存档：

- 电子版出刊（公司期刊网页上）
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 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 研 Yan Li

朱朝阳 Chaoyang Zhu

房锐波 Ruibo Fang

张 力 Li Zhang

- | | | |
|----|--|--|
| 1 | 基于 SDH 的光通信网络拓扑优化与可靠性提升策略研究
/ 唐栋林 胡纯华 | / 刘嘉宝 |
| 4 | 复杂电磁环境下跳频通信抗干扰技术及实现方法
/ 胡亮 | 39 制造业企业国产化云桌面替代 Citrix 的探索与研究
/ 贺乐乐 厉浩 |
| 7 | 基于并行计算的星座覆盖分析算法设计
/ 韩续 韦二龙 苏峰 梁苏南 | 42 开关电源的抗干扰设计研究
/ 魏路军 |
| 12 | 企业信息化建设中的网络信息安全管理研究
/ 杨蕾 | 45 人工智能在计算机网络技术中的应用研究
/ 王建锋 |
| 15 | 新基建背景下通信工程项目全生命周期的协同管理模式创新
/ 桑维 谭纪振 谭颖芳 | 48 针对产后抑郁情绪改善的物联网声光产品的交互设计与评估
/ 高嘉瑜 |
| 18 | 单极变换技术在通信电源设计中的应用
/ 彭岳龙 | 51 窄带物联网智能燃气表通信中的时钟同步方法设计
/ 李梦洋 张炜健 吕修琦 刘永成 刘世章 |
| 21 | 物联网技术在智慧物流中的应用研究
/ 廖梓渊 | 55 工控网络安全态势感知模型及可视化技术研究
/ 马瑶 |
| 24 | 广播传输台站智慧运维平台建设构想探讨
/ 何大宇 | 58 铁路漏泄同轴电缆典型故障机理与智能监测防控研究——基于 0558-RU 基站驻波处理案例的实证分析
/ 王晶 |
| 27 | 信息安全专业学员学习激励机制研究
/ 张志红 付钰 魏国珩 | 61 AI 相位识别提升负荷管理效能
/ 韩骞 |
| 30 | 装备数字化建设的制度机制及推进数字化建设的思考
/ 谢菲 | 64 基于实时图像获取的助盲导航智能眼镜系统研究
/ 梁永章 郑创炎 谢润 李坚 |
| 33 | 人工智能赋能广播电视媒体融合发展的机制与路径研究
/ 陈菁菁 | 67 基于 ISWE 技术的材料创新与多性能优化研究
/ 尹子恒 邓亚轩 王雨涵 张翔宇 |
| 36 | 中国铁塔质量管理体系数字化转型实践研究 | 70 一种垂直极化短波天线的小型化设计
/ 王彦召 |

- 1 Research on topology optimization and reliability improvement strategy of optical communication network based on SDH
/ Donglin Tang Chunhua Hu
- 4 Anti-jamming technology and implementation method of frequency hopping communication in complex electromagnetic environment
/ Liang Hu
- 7 Design of constellation coverage analysis algorithm based on parallel computing
/ Xu Han Erlong Wei Feng Su Sunan Liang
- 12 Research on network information security management in enterprise informatization construction
/ Lei Yang
- 15 The collaborative management mode innovation of the whole life cycle of communication engineering project under the background of new infrastructure construction
/ Wei Sang Jizhen Tan Yingfang Tan
- 18 The Application of Unipolar Conversion Technology in the Design of Communication Power Supplies
/ Yuelong Peng
- 21 Research on the application of Internet of Things technology in intelligent logistics
/ Ziyuan Liao
- 24 Discussion on the construction of intelligent operation and maintenance platform for broadcasting transmission station
/ Dayu He
- 27 Research on Learning Incentive Mechanism for Students Majoring in Information Security
/ Zhihong Zhang Yu Fu Guoheng Wei
- 30 The system and mechanism of equipment digital construction and the consideration of promoting digital construction
/ Fei Xie
- 33 Research on the mechanism and path of artificial intelligence enabling the integrated development of radio and television media
/ Jingjing Chen
- 36 Research on the Digital Transformation Practice of China Tower's Quality Management System
- 39 Exploration and Research on Domestic Cloud Desktop Solutions Replacing Citrix in Manufacturing Enterprises
/ Lele He Hao Li
- 42 Research on Anti-interference Design of Switching Power Supplies
/ Lujun Wei
- 45 Research on the application of artificial intelligence in computer network technology
/ Jianfeng Wang
- 48 Interaction design and Evaluation of Internet of Things Audio-visual Products for improving postpartum depression
/ Jiayu Gao
- 51 Design of clock synchronization method in narrowband Internet of Things smart gas meter communication
/ Mengyang Li Weijian Zhang Xiuqi Lv Yongcheng Liu Shizhang Liu
- 55 Research on Industrial Control Network Security Situation Awareness Model and Visualization Technology
/ Yao Ma
- 58 Research on typical fault mechanism and intelligent monitoring and prevention of railway leakage coaxial cable—Empirical analysis based on 0558-RU base station standing wave processing case
/ Jing Wang
- 61 AI phase recognition improves load management efficiency
/ Qian Han
- 64 Research on an Intelligent Glasses System for Assisting the Visually Impaired with Navigation Based on Real-time Image Acquisition
/ Yongzhang Liang Chuangyan Zheng Run Xie Jian Li
- 67 Research on Material Innovation and Multi-Performance Optimization Based on ISWE Technology
/ Ziheng Yin Yaxuan Deng Yuhuan Wang Xiangyu Zhang
- 70 A compact design of a vertically polarized short wave antenna
/ Yanzhao Wang

Research on topology optimization and reliability improvement strategy of optical communication network based on SDH

Donglin Tang Chunhua Hu

Institute of the 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin, Guangxi, 541000, China

Abstract

As the information age advances, business demands are placing higher demands on network bandwidth, stability, and reliability. Synchronous Digital Hierarchy (SDH), a core transmission technology for supporting large-capacity and multi-service traffic, continues to play a crucial role in optical communication networks. This paper examines the current architecture and bottlenecks of the SDH optical transmission system from the perspectives of network structure optimization and reliability enhancement. It proposes optimization strategies for node selection, link layout, and protection mechanisms. Through model analysis and simulation evaluations of different topologies, the proposed solutions have been verified to improve performance metrics such as network capacity utilization, fault recovery speed, and service availability. The research findings indicate that optimized topology design can significantly enhance network resource efficiency and fault tolerance, providing a reference for the smooth evolution of SDH networks and their integration with packet-switched networks.

Keywords

SDH; topology optimization; optical communication; reliability; fault recovery

基于 SDH 的光通信网络拓扑优化与可靠性提升策略研究

唐栋林 胡纯华

中国电子科技集团公司第三十四研究所，中国·广西 桂林 541000

摘要

随着信息化时代的深入发展，业务需求对网络带宽、稳定性和可靠性提出了更高要求。同步数字体系（SDH）作为支持大容量、多业务承载的核心传输技术，依然在光通信网络中发挥关键作用。本文从网络结构优化和可靠性提升角度出发，系统梳理 SDH 光传输体系中的架构现状及存在瓶颈，针对节点选址、链路布局、保护机制等方面提出优化策略。通过对不同拓扑结构进行模型分析与仿真评估，验证提出方案在性能指标上的改善，包括网络容量利用率、故障恢复速度、服务可用性等。研究结果显示，经优化后拓扑设计能显著提高网络资源效率与故障容忍能力，为 SDH 网络平滑演进以及与分组网融合提供参考依据。

关键词

SDH；拓扑优化；光通信；可靠性；故障恢复

1 引言

光纤传输凭借大容量、低损耗特性成为主干网建设首选，SDH 技术作为电信网核心传输手段，在城域与骨干网广泛部署。尽管分组交换技术发展迅速，但 SDH 在可管理性、时延确定性方面优势明显。然而，随着业务形式向高清视频、云计算、物联网等多样化演进，对网络拓扑提出更高要求，如何在现有 SDH 网络中实现结构优化与容错能力提升成为关键问题。

当前，许多运营商采用的环状或网状 SDH 拓扑存在诸

多问题，如节点布局不均、链路冗余度不足、保护机制配置滞后等，导致网络资源浪费、故障恢复慢、维护成本高。而且已有研究多侧重单一保护方式，缺乏综合方案与多维度协同优化研究。

优化 SDH 网络拓扑意义重大，能提升资源利用率、降低建设和运维成本，增强可靠性与恢复性能，保障关键业务连续性。本文聚焦节点选址、链路布局、网络保障机制等方面提出协同优化方法，构建满足业务增长与可靠性要求的 SDH 网络拓扑模型，优化节点选址与链路配置，引入协作保护机制并仿真评价其性能，最终针对部署与升级提出可行建议，为网络平滑演进和运营效率提升提供理论与实践支撑。

【作者简介】唐栋林（1995-），男，中国广西全州人，本科，助理工程师，从事通信研究。

2 SDH 光通信网络现状分析

SDH 体系以统一时钟框架为基础，支持 STM - 1、STM - 4、STM - 16 等多种速率，在网络应用中具备显著优势。它实现了网络管理的统一化，让网络管理更加高效有序；能够及时进行故障定位，便于快速排查和解决问题；还能适配多种业务接口，满足不同业务的接入需求。然而，SDH 体系也存在一些不足，其拓扑静态性较强，难以灵活适应网络变化；业务承载透明性较弱，可能会对部分业务的传输造成一定影响；保护机制过度依赖冗余链路，增加了网络建设和维护成本。

常见的 SDH 网络拓扑形式有单环（UPS）结构、双环（BLSR）结构和网状结构。单环结构简单，但故障恢复能力较弱，一旦出现故障，业务恢复时间较长。双环结构保护可靠，能快速实现业务切换，但成本较高。网状结构节点互联增加了网络的灵活性，但规划复杂度也大幅提高。此外，SDH 网络还存在主要瓶颈点，如节点部署布局不合理会造成交换资源浪费，光纤链路冗余度不足会影响容错能力，保护机制覆盖不完整以及节点等级与链路带宽不匹配等问题，这些都需要在建设和优化 SDH 网络时加以重视和解决。

3 节点布局优化策略

在通信网络节点选址与规划中，需综合多方面因素以实现高效、可靠的网络布局。

交通流量引导的节点选址是重要环节。借助交通矩阵引导方法，以业务流量数据为分析根基，对候选节点开展加权评分。在此过程中，要全面考量业务量大小、地理覆盖范围以及现有交换中心设施情况，确保选定的节点既能满足业务需求，又能合理利用现有资源，实现资源的最优配置。

层次化节点等级划分有助于提升网络运行效率。依据业务密度和传输需求，将节点划分为聚合节点与核心节点。核心节点具备大容量汇聚和故障切换功能，是网络的关键枢纽；聚合节点则负责区域内的业务分配。这种划分策略能精简链路，提高节点间的互联效率，保障网络的稳定运行。

基于混合整数规划的选址模型为节点选址与链路容量规划提供了科学依据。通过建立联合规划模型，以最小化总成本、保障业务路由可达、满足冗余保护要求为目标，运用启发式算法求解，并对比不同布局方案的成本与容错性能，从而选出最优方案。

4 链路配置与冗余设计

4.1 主 / 备链路结构设计

根据网络拓扑结构与实际业务流量需求，合理设计主链路与备份链路是提高网络稳定性和业务连续性的关键。在 SDH 网络架构中，链路的可靠性直接关系到关键业务的实时传输能力，因此必须建立具有快速切换能力的主备结构。常用的方案包括双向共享保护环（BLSR）、子网连接

保护（SNCP）和双套 SDH 系统（DSSDH）等，其中 BLSR 适用于核心环网，具备高度可恢复能力和自动路径重构特性；SNCP 适合点到点链路，操作简单且切换时间短；而 DSSDH 则以独立系统构建主备通道，提供物理层冗余保障。

4.2 链路带宽分级与弹性配置

在实际网络运行过程中，不同链路承担的业务种类和流量差异显著，若一律采用统一带宽配置，将导致资源利用率低下。因此，将链路按照流量强度和业务等级进行分级设计成为提升网络效率的重要策略。通过流量监控平台获取一段时间内的流量数据，分析链路的最大负载、日均流量和波动范围，可将其划分为高带宽链路（如核心汇聚路径）、中等带宽链路（如区域间互联路径）与低带宽链路（如边缘接入路径）。此分级方式可有效避免链路拥塞或资源浪费问题。

4.3 链路阻断恢复机制

链路阻断是网络运行中最常见的故障形式之一，其影响范围取决于故障链路的位置、所承载的业务类型及是否具备冗余机制。因此，为增强网络的容错性与可自愈能力，必须构建高效的链路阻断恢复机制。该机制应基于完整的网络拓扑图和路径冗余策略，结合节点布局特点，设计多路径传输通道并配合保护协议实现自动切换。在链路中断发生后，系统需第一时间检测异常并依据预设规则启动次级路径，保障业务在不中断的前提下继续传输。

5 保护机制协同优化

5.1 混合保护模式

为确保不同业务类型在网络传输过程中的稳定性与服务等级，需建立针对性更强的多层次保护体系。在当前的 SDH 网络中，关键业务如语音核心交换、重要政企专线等对中断敏感，应采用具备快速故障切换与高恢复保障能力的双环型 BLSR（双向线性共享保护环）机制。该结构允许在单点失效时迅速启用备路，保障环内任意两个节点之间通信不中断。而对于普通数据传输类业务，如监控视频、普通互联网接入服务等，则可选用成本相对较低的 SNCP（子网连接保护）机制实现点到点保护，其具有配置灵活、资源消耗小等优点。

5.2 级联保护逻辑设定

单一保护机制在大型城域或跨省级网络中往往难以应对复杂链路拓扑下的多点联动故障。因此，在原有保护架构基础上引入级联保护机制显得尤为关键。级联逻辑设定的核心是构建故障传播路径图谱，并对其进行动态权重分析，形成影响因子模型。系统依据节点的拓扑位置、业务承载量及冗余能力等参数建立分层影响域，当某一链路或节点发生故障时，快速定位其影响范围，并触发相应层级的保护动作。

例如，若主路径故障且首备路径不可用时，应立即调用跨区域链路或备用核心节点参与服务切换，形成纵深防御策略。该机制还需与网络控制平面紧密配合，借助 SDH 控

制协议（如 APS 自动保护切换）与路由策略同步更新，确保切换过程的准确性和最小业务抖动。通过仿真分析表明，级联保护机制显著提高了多故障情况下的服务恢复能力，同时对冗余资源的占用更为合理，有效降低长期运维压力。

6 仿真实验与性能评价

6.1 仿真平台与参数说明

为验证上述拓扑优化与保护机制设计的有效性，构建仿真平台成为关键环节。本研究依托 NS3 与自研 SDH 模拟模块，综合网络拓扑信息、业务流量矩阵、物理链路参数与节点能力设定进行建模。仿真网络涵盖不同等级的节点布局，设定核心节点 8 个、聚合节点 16 个、接入节点 32 个，总链路数超过 100 条，分别模拟不同流量密度下的传输状态与故障响应过程。

在参数设定方面，链路延迟区间设定在 0.5ms 至 5ms 之间，带宽设置为 STM4 至 STM64 不等。保护机制仿真覆盖 SNCP、BLSR、链路备份与级联切换机制，故障事件包括单点链路断裂、节点故障、区域级中断三类。主要评估指标包括：1) PST (保护切换时间)；2) 网络整体可用性 (Availability)；3) 冗余资源利用率；4) 恢复路径效率；5) 配置复杂度评分等。所有测试均重复运行 10 次以上，保证结果稳定性。

6.2 优化前后比较

仿真结果显示，经拓扑与保护机制优化后，网络整体表现出现显著改善。在资源配置方面，优化模型下冗余链路配置更为合理，平均资源利用率为原有的 67% 提升至约 87%，冗余资源占比下降 12%，反映出链路配置的精准度大幅提高。在故障响应方面，BLSR 与级联机制协同作用使得平均故障切换时间从原先约 120ms 降至 47ms，部分核心路径甚至实现近实时（小于 30ms）恢复。

在可用性层面，全年平均网络可用性达到了 99.9992%，高于行业标准的“5 个 9”目标，表现出极高的服务连续性保障能力。同时，优化方案在总体建设成本上增加幅度控制在 6% 以内，在可接受范围之内，且未来可通过规模部署实现边际成本下降。综合对比说明，本研究提出的协同优化策略在保障业务连续性、提升网络鲁棒性及降低资源浪费方面具备明显优势。

7 部署建议与未来展望

7.1 实施步骤建议

实施本方案需遵循系统化推进路径，逐步实现从规划到落地的闭环管控。首要阶段为数据收集与流量分析，通过部署流量监测设备采集网络运行数据，建立业务流量热度图，并与地理信息系统（GIS）进行映射，明确核心区域与瓶颈路径。随后构建仿真平台，应用上述拓扑优化模型对现网架构进行模拟验证，形成初步优化建议方案。

中期阶段应分区域开展试点部署。选择典型区域（如

业务集中区或网络高频故障区）进行分批次升级改造，部署优化后的节点链路与保护策略，并实施性能评估。同时加强网管系统与调度平台的联动，实时记录故障响应效率与业务恢复能力变化。在试点结果达标后，逐步扩展推广范围，实现网络结构的整体优化。项目后期应设定常态化性能监控机制，确保优化持续有效，并建立滚动优化机制应对业务变化。

7.2 跨网融合与自主升级

未来光通信网络将持续迈向 IP 化、智能化与融合化。SDH 网络虽稳定可靠，但其静态资源配置与透明传输模式在应对弹性调度、多业务融合方面显露短板。因此建议逐步引入新型分组交换技术如 MPLSTP、OTN，以提升网络智能调度与多服务支持能力。在演进过程中，应构建 SDH 与分组交换系统的协同演进机制，通过统一控制面和管理面实现资源协调、故障联动和服务质量保障。

此外，推进自动化网络维护体系建设，如基于 AI 的故障预测与智能调度技术，在运维层实现自学习与策略推演，将大幅提高网络自主适应与灾备响应能力。面向未来业务场景（如 5G 承载、工业控制、应急通信等），需构建具备高带宽、低时延、高鲁棒性的统一承载平台，为 SDH 网络转型升级提供可持续路径。

8 结语

本文面向现有 SDH 光通信网络在结构布局与保护机制方面的典型问题，系统提出了一套拓扑优化与多层次可靠性提升的协同策略。研究内容涵盖节点选址、链路配置、混合保护机制与级联故障响应等关键模块，建立了理论模型并进行了仿真实证。结果表明，通过优化设计可在保持网络稳定性的同时显著提高资源利用效率与业务恢复能力，在多个性能维度均优于传统设计模式。

更进一步，本研究在部署建议方面给出了具有可操作性的步骤指导，涵盖从流量分析、模型建立到试点实施与全网推广的完整链路，同时结合行业发展趋势展望了 SDH 网络未来的演进方向。在实现路径上提出跨网融合、自主升级及智能运维等策略，为运营商平衡成本、性能与扩展能力提供参考。

随着光通信业务的持续深化与新兴技术的不断涌现，传统 SDH 网络的改造与融合将成为网络演进的关键命题。未来应继续深入挖掘网络结构优化与服务保障的协同空间，推动 SDH 网络向高弹性、智能化、自适应方向发展，以应对复杂多变的通信需求挑战。

参考文献

- [1] 梁玉亭.SDH网络性能优化算法研究[D].电子科技大学,2010.
- [2] 沈杨.电力系统SDH光纤传输网的优化策略及应用[D].华北电力大学(北京),2015.
- [3] 金梦颖.基于MSTP的SDH传输网应用研究[D].华北电力大学,2015.

Anti-jamming technology and implementation method of frequency hopping communication in complex electromagnetic environment

Liang Hu

China Electronics Technology Group Corporation 10th Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610036, China

Abstract

Frequency-hopping communication, as a crucial form of spread spectrum technology, demonstrates significant value in high-reliability scenarios such as military and emergency communications due to its rapid frequency switching and dispersed transmission characteristics. However, the complex electromagnetic environment characterized by spectrum congestion, dense interference, and intelligent adversary tactics poses challenges including frequency locking and synchronization interference. This paper analyzes the features and interference types in complex electromagnetic environments, elaborates on the principles, advantages, and limitations of frequency-hopping communication, and proposes anti-interference strategies such as adaptive frequency-hopping sequence optimization, intelligent spectrum sensing, interference suppression, coordinated frequency-hopping, and multi-antenna systems. A cognitive radio and deep learning-based implementation method is developed. Through engineering practice, hardware architecture, signal processing workflows, and algorithm optimization are explored. Research findings indicate that the integration of multiple technologies can significantly enhance system stability under strong interference, providing valuable references for subsequent design and application.

Keywords

frequency hopping communication; anti-jamming technology; complex electromagnetic environment; spectrum sensing; cognitive radio

复杂电磁环境下跳频通信抗干扰技术及实现方法

胡亮

中国电子科技集团公司第十研究所，中国·四川成都 610036

摘要

跳频通信作为扩频通信的重要形式，凭借频率快速切换与分散传输的特点，在军事、应急等高可靠通信场景中具有重要价值。然而，复杂电磁环境下频谱拥挤、干扰密集及手段智能化，使其面临频点锁定、同步干扰等挑战。本文分析了复杂电磁环境特征与干扰类型，阐述跳频通信原理及其优势与局限，提出自适应跳频序列优化、智能频谱感知、干扰抑制、协同跳频和多天线等抗干扰策略，并构建基于认知无线电与深度学习的实现方法。结合工程实践探讨硬件架构、信号处理流程与算法优化，研究表明多技术融合可显著提升系统在强干扰下的通信稳定性，为后续设计与应用提供参考。

关键词

跳频通信；抗干扰技术；复杂电磁环境；频谱感知；认知无线电

1 引言

无线通信在信息化社会与军事体系中至关重要，跳频通信凭借频率切换和能量分散降低窄带干扰与截获风险。然而，频谱紧张与智能干扰的发展，使其在复杂电磁环境下易遭频点锁定、同步受扰和可用频点减少等问题。该环境中干扰种类多、变化快，对系统实时性与鲁棒性要求极高。近年来，数字信号处理、认知无线电、人工智能及多天线等技术

为跳频通信的抗干扰提供了新思路。通过频谱感知、智能调度与自适应分配，可在强干扰下保持高质量通信。本文从理论基础、干扰机制、技术路径到工程实现，系统研究复杂电磁环境下跳频通信的抗干扰技术与方法，为相关应用提供技术参考。

2 复杂电磁环境与跳频通信的基本原理

2.1 复杂电磁环境的特征与干扰类型

复杂电磁环境是指在有限频谱资源中，多种通信、雷达、导航、遥测等信号与多类干扰信号共存的场景，其特点包括频谱利用率高、信号密度大、干扰手段多样化且变化频繁。在此环境中，干扰可分为有意干扰、无意干扰和复合干扰三

【作者简介】胡亮（1984-），男，中国江西抚州人，硕士，工程师，从事通信研究。

类。有意干扰如扫频干扰、窄带跟踪干扰、噪声调幅 / 调频干扰及脉冲干扰，通常针对性强、信号功率高，并可根据目标通信模式调整干扰策略；无意干扰源自其他通信系统的邻道泄漏、谐波干扰及设备非线性失真等，虽无直接破坏意图，但会对接收端的解调精度和通信稳定性造成影响；复合干扰则表现为多种干扰信号叠加并随时间动态变化，既可能来自同一干扰源的多种形式信号，也可能由不同设备、系统产生的干扰共同作用。这种干扰环境复杂度高、时变性强，对跳频通信系统的频谱选择、信道估计及信号恢复提出了更严苛的要求。

2.2 跳频通信的基本原理

跳频通信通过在多个预先设定的载频上按照特定规律快速切换来传输信息，其核心思想是分散信号能量，降低单一频点长期暴露于干扰的概率。跳频速率可分为慢跳和快跳两种模式：慢跳模式下，载频切换速度低于符号速率，每个频率上可传输多个符号；快跳模式则在一个符号周期内可发生多次频率切换，大幅提高了抗窄带干扰能力。系统主要由跳频序列生成模块、频率合成器、发射端调制器、接收端同步与解调模块等部分构成。其中，跳频序列的随机性、不可预测性以及与通信双方的同步精度，直接决定了系统在干扰和截获条件下的表现。为提升性能，现代跳频系统常引入加密算法与伪随机序列生成机制，使序列对外部观测更难预测，进一步增强安全性与抗干扰能力。

2.3 跳频通信在复杂环境中的优势与局限

在面对窄带干扰时，跳频通信能够通过频率切换将受干扰时间比例降低至极低水平，从而显著提升信噪比和传输可靠性。其频率跳变特性也有效分散了能量，增强了信号的保密性与抗截获能力，尤其在敌对环境中能延长链路存活时间。然而，在频谱紧张、干扰密度高或干扰具有窄带跟踪能力的情况下，跳频通信可能面临频点被快速锁定、序列预测精度提升、系统同步易丢失等风险。同时，快速变化的干扰模式会使传统固定序列的跳频策略失去优势。因此，需要引入自适应频率分配、协同跳频、多天线空间分集以及干扰规避等技术，与跳频机制形成互补，从而有效应对复杂电磁环境下的多源、多类型干扰挑战。

3 复杂电磁环境下的跳频通信干扰机制分析

3.1 扫频与窄带跟踪干扰的影响机理

扫频干扰是一种常见且高效的有意干扰方式，其通过在一定带宽范围内以较快速度连续扫描，将干扰信号依次覆盖跳频通信系统可能使用的各个频点。这种干扰可在短时间内对多个载频造成影响，尤其是在跳频速率较低或频谱较窄的系统中，效果尤为显著。窄带跟踪干扰则更具针对性，它通过干扰机的信号检测与分析功能，实时捕获并跟踪通信方的跳频模式，在目标切换至某一频点后迅速施加高功率干扰。这类干扰常借助先进的频谱分析和锁相技术，反应速度

极快，可在毫秒甚至微秒级别完成锁定与干扰施放。由于传统固定跳频序列的可预测性较高，这两类干扰往往能够较快地掌握频率变化规律，从而持续有效地抑制通信信号，使接收端出现误码率急剧上升、链路中断等现象。因此，在应对此类干扰时，必须考虑引入高度随机化、实时更新的跳频序列以及频点伪装和混淆技术，以提升规避能力。

3.2 宽带与脉冲干扰的干扰特性

宽带干扰的主要特征是覆盖范围大，其干扰信号带宽可与跳频系统的整个工作带宽相当，甚至完全覆盖，使得跳频机制的频率规避优势大幅削弱。此类干扰通常采用高功率噪声或调制信号，能在频域内形成均匀的干扰背景，使所有跳频频点都处于较低的信噪比水平下，导致系统整体性能下降。相比之下，脉冲干扰以瞬时高功率脉冲的形式发射干扰信号，时间占空比低但瞬时能量极高，足以在短时间内严重破坏信号传输。对于快跳系统而言，脉冲干扰对其同步与捕获环节影响尤为明显，一旦在关键符号传输或同步字期间施加干扰，可能导致接收端失步或频繁重同步，从而降低有效吞吐量。更复杂的是，宽带干扰和脉冲干扰还可能叠加使用，形成既有大范围覆盖又有瞬时冲击的复合威胁，对传统滤波和频率规避手段提出了更高要求。

3.3 智能干扰与多源干扰的复合威胁

随着人工智能与信号处理技术的发展，智能干扰成为复杂电磁环境中的新型威胁。这类干扰借助机器学习、深度神经网络和信号识别算法，对跳频通信的频谱特征进行实时分析与建模，能够在较短时间内学习和预测跳频模式，实现高度精确的定向干扰。例如，基于长短期记忆网络（LSTM）的干扰机可通过历史频率序列预测未来的跳频频点，从而提前锁定并施加干扰。同时，在实际场景中，智能干扰往往并非单一存在，而是与其他干扰类型叠加，形成多源、多类型的复合干扰环境。在这种情况下，系统不仅要应对不同频域、时域特性的干扰信号，还要处理它们在时间上错落叠加、相互掩盖的复杂效应。这类环境下，传统单一抗干扰策略效果有限，必须采用多技术融合的整体防御体系，如联合频谱感知、多天线空间分集、信号编码增强以及动态功率控制等，才能在多重威胁中维持通信质量与链路稳定。

4 抗干扰技术路径研究

4.1 自适应跳频序列优化技术

自适应跳频序列优化技术旨在根据电磁环境的实时变化，对跳频序列进行动态调整，使通信频点能够有效避开干扰密集区。在复杂电磁环境中，干扰的频率分布往往随时间波动，固定的跳频序列难以保持长期有效性。通过引入频谱感知与干扰强度评估模块，可以在通信过程中实时获取各频点的干扰状况，并将这些信息输入到优化算法中进行频率选择与序列更新。遗传算法、粒子群优化等智能优化方法能够在多维搜索空间中快速找到适合当前环境的频率组合，同时

保持序列的随机性与不可预测性，防止被干扰方推测出跳频规律。此外，优化过程中还需考虑通信双方的同步需求，通过合理的序列生成和更新机制，确保在动态调整时不影响数据传输的连续性与稳定性。工程实现中，可结合 FPGA 或高速 DSP 平台，实现毫秒级甚至微秒级的序列更新速度，使系统能够在干扰模式突变时迅速做出响应，从而显著提升抗干扰性能。

4.2 智能频谱感知与干扰规避

智能频谱感知技术是抗干扰的核心手段之一，其基于认知无线电理念，通过对频谱使用状态和干扰信号分布的实时监测，动态调整通信频点选择。与传统频谱扫描不同，智能频谱感知不仅能获取当前频谱占用情况，还能利用深度学习模型对干扰趋势进行预测，从而提前采取规避措施。例如，通过卷积神经网络（CNN）提取频谱能量分布特征，结合循环神经网络（RNN）对时序数据进行分析，可以准确预测未来时刻某一频段的干扰概率。在此基础上，系统可在干扰发生前将通信跳转至相对干净的频段，实现主动规避而非被动应对。该方法特别适合干扰变化频繁且强度不均的环境。此外，智能频谱感知还可与地理信息和历史干扰数据库结合，形成环境特征感知与长期策略优化机制，使跳频通信在不同区域、不同时间段均能保持较高的可用性与稳定性。

4.3 信号处理与干扰抑制技术

信号处理与干扰抑制技术通过算法手段直接在接收端削弱干扰分量、增强有用信号，从而提高系统的抗干扰能力。自适应滤波器可根据输入信号与参考信号的相关性，动态调整滤波系数以消除干扰分量，特别适用于窄带干扰抑制。空时自适应处理（STAP）利用天线阵列的空间分集特性，将空间滤波与时间滤波相结合，在空域和时域同时抑制干扰，对多源干扰和干扰信号方向可分辨的场景效果显著。此外，多用户检测技术可以在多址通信环境中区分并恢复目标信号，降低多址干扰对通信质量的影响。在工程应用中，这些方法往往与前端低噪声放大、频域均衡、信道估计等模块配合使用，形成多层次的干扰抑制链路。通过优化算法复杂度和硬件实现方式，可以在保证处理性能的前提下减少计算延迟，从而在实时通信中实现高效的干扰抑制与信号增强。

5 系统实现方法与工程应用

5.1 基于认知无线电的抗干扰架构设计

基于认知无线电的架构赋予跳频通信自适应感知与动

态优化能力，由频谱感知、跳频序列生成、干扰检测决策和信号处理等模块构成。频谱感知模块实时获取频谱占用与干扰分布，序列生成模块依据感知结果和规则动态调整跳频序列，干扰检测模块结合干扰信息和链路质量快速决策，信号处理单元执行滤波、均衡、调制解调等操作。在硬件实现上，采用FPGA+DSP混合架构可兼顾高速并行处理与灵活控制，实现毫秒级响应；模块化和可重构设计则方便不同任务快速切换算法与配置，提高系统适应性。

5.2 基于机器学习的干扰识别与预测

机器学习可提升干扰识别与预测的准确性与实时性。卷积神经网络（CNN）可提取干扰信号的时频特征，长短时记忆网络（LSTM）可分析时间序列的长期依赖，从而预测干扰趋势。该组合模型可在极短时间内完成干扰分类与频段干扰概率估计，为跳频策略提前调整提供依据。工程实现中，可将模型部署在嵌入式 GPU 或高性能 DSP 中进行边缘计算推理，避免延迟与带宽占用，并通过在线微调保持在不同环境下的高准确率。借助这种机制，系统不仅能在干扰发生时迅速响应，还能提前规避，显著提高通信稳定性与抗干扰性能。

6 结语

复杂电磁环境对跳频通信的稳定性与安全性提出了前所未有的挑战。通过将自适应跳频、频谱感知、干扰抑制、多天线协同与智能预测等技术有机结合，能够显著提升系统的抗干扰能力与通信质量。未来，随着人工智能和认知无线电技术的持续发展，跳频通信的抗干扰能力将在更广泛的场景中得到验证与应用，为高可靠通信提供坚实保障。

参考文献

- [1] 马松,王家豪,张蔺,等.基于深度学习的非扩跳频通信体制窄带干扰抑制技术[J].电子科技大学学报,2024,53(06):862-870.
- [2] 郑重,管芸笛,李文吉,等.多头注意力机制的卫星通信干扰波形决策方法[C]//中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会.第十八届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集.中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部;国家航天局卫星通信系统创新中心;,2024:228-234.
- [3] 李洪敏.浅议超短波无线电通信抗干扰技术的发展趋势[J].中国宽带,2024,20(10):100-102.
- [4] 夏重阳,吴晓富,靳越.一种面向宽带跳频双动作的智能干扰决策算法[J].电讯技术,2024,64(09):1467-1473.

Design of constellation coverage analysis algorithm based on parallel computing

Xu Han¹ Erlong Wei¹ Feng Su² Sunan Liang³

1. China Electronics Technology Group Corporation, 54th Research Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

2. China StarNet Network Application Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100029, China

3. Beijing Hongyu Aerospace Technology Co., Ltd., Beijing, 100086, China

Abstract

With the rapid development of space technology, the number of satellite constellations continues to grow exponentially. This surge in coverage analysis demands processing massive datasets containing billions of target entities. Addressing this challenge requires efficient handling of such enormous data volumes. Our study proposes a parallel computing-based design for constellation coverage analysis. By decoupling coupled computational components and distributing them across multiple CPU cores, we significantly reduce computation time. Experimental results demonstrate that when data scales reach critical thresholds, this parallel computing approach achieves substantial reductions in processing time while maintaining operational efficiency.

Keywords

parallel computing; constellation coverage analysis; decomposition and decoupling

基于并行计算的星座覆盖分析算法设计

韩续¹ 韦二龙¹ 苏峰² 梁苏南³

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050081

2. 中国星网网络应用研究院有限公司, 中国·北京 100029

3. 北京宏宇航天技术有限公司, 中国·北京 100086

摘要

随着航天事业的快速发展, 各类卫星星座数量会越来越多, 各种覆盖分析都存在海量目标实体的计算需求, 如何快速有效地处理海量数据, 是星座覆盖分析过程中需要解决的问题。本文提出了一种基于并行计算的星座覆盖分析设计的方法, 把耦合的计算实体拆分解耦, 并将它们分配到不同的CPU内核进行并行计算, 从而减少计算时间。实验结果表明当数据量达到一定的规模后, 采用并行计算的方法能够大幅减少数据处理的时间, 提高效率。

关键词

并行计算; 星座覆盖分析; 拆分解耦

1 背景

随着航天事业的快速发展, 各类卫星星座数量会越来越多, 航天应用场景中的覆盖分析计算、巨型星座仿真分析计算和轨道优化计算等计算任务日益繁重, 处理海量的数据需要占用大量的计算机资源和时间, 海量数据的快速处理需求与数据处理长耗时的矛盾越发突出。面对各种覆盖分析、碰撞分析中的海量目标实体快速计算需求, 只有提升软件系统的整体计算效能, 才能满足各种计算分析应用的需求, 助力我国航天事业的发展。

2 现状

2.1 卫星轨道计算发展现状

随着科技的进步, 航天器的发展尤为迅速, 在航天领域的研究中, 人们精益求精, 对轨道精度提出了更高的要求, 但与此同时, 也要面临更复杂的轨道计算过程。为了简化这个计算过程, 国内外学者进行了实验研究并得到了多个结论。

进行卫星轨道计算往往需要使用北美防空联合司令部(NORAD)开发的SGP4/SDP4模型^[7], SGP4(Simplified General Perturbations)是简化常规摄动模型, SDP4(Simplified Deep Space Perturbations)是简化深空摄动模型。对于轨道周期小于225分钟的近地球物体, 可使用SGP4模型; 对于轨道周期大于225分钟或者远离地球的物体, 可以使用SDP4模型^[8]。

【作者简介】 韩续(1984-), 男, 中国河北石家庄人, 硕士, 工程师, 从事航天运控与仿真, 航天信息应用研究。

在国内，空间碎片轨道预测的精度分析使用了 SGP4/SDP4 模型，指出在处理中高近圆轨道时，预测的最大偏差不大于 3 千米，且运算速度快，但计算目标的轨道近地点高度小于 500 千米时，其计算结果会产生较大的偏差^[1]。在计算一千多个不同类型的空间目标中使用了 SGP4/SDP4 模型，指出对于低轨目标而言，轨道高度越低预报误差越大；对于高轨目标而言，轨道高度越高预报误差越大；对于椭圆轨道目标而言，近地点高度越低误差越大^[3]。在国外，对 GPS 卫星使用 SGP4 模型进行了轨道预报，其预报结果与历书、精确星历计算结果对比后，说明 SGP4 的轨道预报误差在历元时刻前后 15 天内是可以接受的，越接近历元时刻，误差越小，历书计算结果精确度越高^[6]。

鉴于 SGP4/SDP4 模型在轨道计算中起到了不可忽视的作用，为了让研究内容更具备现实意义，本文将采用 NORAD 公布的双行元文件进行 SGP4 轨道仿真实验。

2.2 并行计算技术发展现状

自 2005 年以来，单个处理器内核的计算能力并没有显著提高，主处理器的时钟频率仍停留在 2-4 GHz 的范围内，处理器的总功耗约为 100 瓦，这是计算机可控散热的最大功率。因此，多核或多处理器并行是提高计算性能的有效途径，我们需要根据硬件设计的变化对程序进行并行调整，充分利用计算机的计算能力来加快程序的运算速度。

在处理器中引入多核 / 集群并行计算（并行计算）技术是提高算法程序计算速度的有效途径，其基本思想是将程序的计算任务进行划分，分配到不同的内核中进行计算，以达到单位时间内做更多计算的目的，从而缩短整体计算时间。

3 研究内容

航天技术快速发展至今，卫星星体数量达到了巨大的规模，人们通过庞大的星体群获得了更多更有效的数据用于生产研究，这些数据在多个领域的发展中发挥了关键作用。但在获得利好的同时，也面临着数据处理的严峻考验。

一方面，由于星体数量越来越多，进行星座覆盖分析时需要处理的数据量也随之剧增；另一方面，生产研究对星座覆盖分析的要求已经变得越来越高，不论是覆盖分析面积的增大，还是分析计算精度的提高都需要额外处理巨大的数据量。然而，受限于 CPU 单个核心的计算能力，CPU 单核心串行计算的方法在庞大的数据量面前已经是捉襟见肘的情形，完成一次覆盖分析便需要耗费很多时间，无法满足当今生产研究期待的快速完成星座覆盖分析的需求。

为了保证覆盖分析计算的精度，本文提出了闭合区域网格点的划分方法以及闭合区域可见性的计算方法；为了提高星座覆盖分析的计算速度，本文提出了星座轨道、星座覆盖的并行计算方法，并验证了星座轨道、星座覆盖的并行分组计算能力以及并行计算后的数据整合能力。

3.1 闭合区域网格点划分

任意多边形闭合区域的网格点划分过程如下所示。

(1) 算法输入：

- a) 闭合区域边界的顶点集合
- b) 网格的划分精度

(2) 算法输出：划分后的网格点集合

(3) 理论基础：

a) Delaunay 三角剖分算法^[5]，即所有三角形的外接圆均满足空圆性质的三角剖分

b) Bovier-Watson 算法，即通过点插入法构建 Delaunay 三角形横截面的算法

(4) 算法处理过程：

a) 基于 Delaunay 三角剖分算法，将闭合区域划分为三角形集合

步骤 1：计算区域的边界框，创建两个超三角形作为初始三角形网格，根据边界曲线创建边界点；

步骤 2：将边界点逐个插入三角形网格。每次插入后，使用 Bovier-Watson 算法计算新的 Delaunay 三角网格；

步骤 3：删除步骤 1 中插入的辅助点（并删除与之相关的三角形），以获得所有边界点的 Delaunay 三角网格；

步骤 4：在一定条件下将重心插入三角形网格区域内的三角形中，并根据 Bowyer-Watson 算法进行调整，得到新的 Delaunay 三角形交点。重复上述操作，直到所有的重心都被放置到三角形网格中，然后就得到了该区域完整的 Delaunay 三角形网格；

b) 根据网格划分精度进一步处理所有的三角形集合

遍历所有的划分后的三角形，判断每个三角形的最长边是否大于网格划分精度；

若三角形的最长边大于网格划分精度，则将此三角形作为闭合区域再次执行步骤 1 的三角形划分算法；

若三角形的最长边小于网格划分精度，则将此三角形添加到最终的划分结果中；

c) 计算三角形最终划分结果集合中每个三角形的中心点，得到划分后的网格点集合

根据计算三角形中点的算法，计算所有划分后的三角形的中心点；

d) 汇总所有的网格点得到最终的算法输出。

3.2 单个卫星对单个网格点的可见时间计算方法

单个卫星对单个网格点的可见时间计算过程包括数据输入和算法处理两个部分。

3.2.1 数据输入

输入要计算可见性的开始时间和结束时间；输入卫星的轨道参数，通过轨道计算方法求出卫星轨道数据，由此可得到卫星轨道上每个点的位置信息以及卫星经过这个点的时间信息；最后输入地球模型数据，通过模型数据确定地球

的椭圆方程；最后输入地球表面单个网格点的经纬度位置坐标，连接卫星和网格点，得到一条直线。

3.2.2 算法处理

基于地球中心 ICRF 坐标系建立笛卡尔坐标系 F，在坐标系 F 中，对于某个时刻 t，计算卫星在时刻 t 时的位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ，计算网格点在时刻 t 时的位置 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ，通过卫星和网格点的位置坐标 $F_0(x, y, z)$: $\frac{x-x_0}{x-x_1} = \frac{y-y_0}{y-y_1} = \frac{z-z_0}{z-z_1}$ ，可得出 P_0P_1 的直线方程，这个直线方程随卫星的位置改变而改变。

使用解析几何方法可以求解得到地球椭球方程 $F_1(x, y, z)$ 与直线方程 $F_0(x, y, z)$ 的随时间变化的关系，假设直线 F_0 与椭球 F_1 有两个交点，其中一个交点为网格点，另一个交点为 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ，卫星与两个交点相连，可得到两条线段 $|P_0P_1|$ 和 $|P_0P_2|$ ，由此可将可见性问题转化为数学问题，即：设 $d = |P_0P_1| - |P_0P_2|$ ，当 $d < 0$ 时，表示网格点在线段 P_0P_2 之间，此时卫星与网格点可见；当 $d = 0$ 时，表示交点 P_1 与 P_2 重合，直线与椭球相切，此时卫星与网格点恰好可见；当 $d > 0$ 时，表示网格点在线段 P_0P_2 的延长线上，此时卫星与网格点不可见。

在实际情况中，由于卫星轨迹、地球自转都是连续量，所以对于 $d = F_3(t)$ 建立的函数也是一个连续函数。因此可以采用布伦特方法找到函数 $d = F_3(t)$ 中， $d \leq 0$ 时自变量 t 的取值范围，该范围即卫星与网格点的所有可见时间段。

3.3 闭合区域可见性计算方法

任意闭合区域的可见性计算过程如下所示。

3.3.1 算法输入

- a) 卫星的轨道参数以及轨道计算方法
- b) 可见性计算时间，包括：开始时间、结束时间、计算条件：瞬时通信不考虑光速
- c) 覆盖区域的划分后的网格点集合
- d) 计算精度参数，包括：时间精度、误差范围

3.3.2 理论基础

- a) 约束算法
- b) 牛顿 - 拉斐逊方法^[4]

3.3.3 算法处理过程

- a) 遍历所有的网格点

步骤 1：根据单个卫星对单个网格点计算方法的求解得到该网格点的所有可见时间段；

步骤 2：单个网格点可见性计算过程示意图如图 1 所示；

b) 汇总所有卫星对所有的网格点的可见时间段，得到最终的算法输出。

3.4 星座轨道并行计算处理方法

在星座轨道并行计算中输入卫星轨道根数、开始时间、结束时间、时间步长、积分器等；对数据进行处理计算后，输出卫星星历数据。

由于每个卫星的轨道计算是相互独立的，所以可以根

据要计算的卫星轨道数量和当前环境的处理器核心数，得到划分给每个并行计算子模块所要执行的计算任务。当每个并行计算子模块计算完毕后，即可将计算结果输出到结果收集进程（即主进程）。

轨道并行计算算法流程图如图 2 所示：

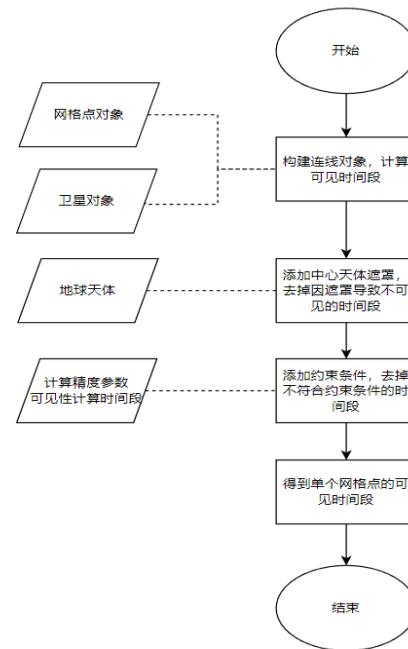


图 1 单个网格点可见性计算过程示意图

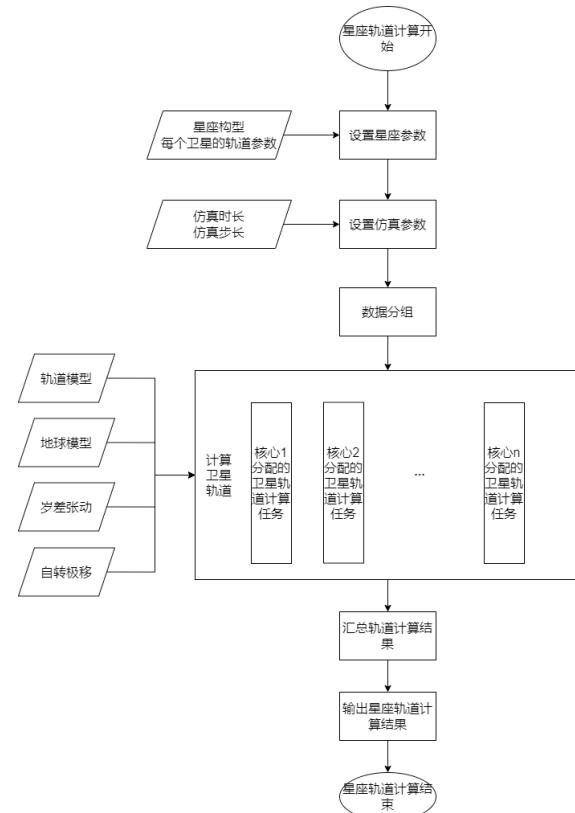


图 2 星座轨道并行计算算法流程图

图中，轨道模型采用 SGP4 算法模型。Vallado 等对 1980 年以来的多种 SGP4 版本进行了总结，提出了普遍认可的双行根数的时间系统和坐标系统。双行根数采用的时间系统为协调世界时 UTC，坐标系统为瞬时真赤道平春分点坐标系（TEME）。TEME 与 J2000 坐标系存在如下的变换关系：

$$\vec{r}_{J2000} = (R_P)^{-1} \cdot (R_N)^{-1} \cdot R_Z(-\Delta u) \cdot \vec{r}_{TEME}$$

式中： R_P 为岁差矩阵， R_N 为章动矩阵， R_Z 为绕 Z 轴的旋转矩阵， Δu 为赤经章动。J2000.0 采用的时间系统为地球动力学时 TT，TT 与 UTC 和原子时 TAI 存在如下转换关系：

$$TT = TAI + 32.184^s$$

$$TAI = UTC + \Delta AT$$

其中， ΔAT 为跳秒，具体可查阅 IERS 的公告。

3.5 星座覆盖并行计算处理方法

在星座覆盖并行计算中输入卫星星历、开始时间、结束时间、时间步长、覆盖区域以及覆盖特性值定义等，对数据进行处理计算后，输出星座对区域的覆盖特性值数据。

数据分割的方式是将区域的覆盖计算划分成多个小区域的覆盖计算，对于每个小区域，都需要计算整个星座对其的覆盖特性值数据。根据区域的划分数量和当前环境的处理器核心数，将所有区域覆盖计算任务分配到不同的内核中进行并行计算。

当所有区域覆盖计算完成后，将计算结果数据归集到某个进程中，进行合并处理。数据合并处理完成后得到卫星星座对于整个区域的覆盖特性值数据。

星座覆盖分析并行计算算法流程图如图 3 所示：

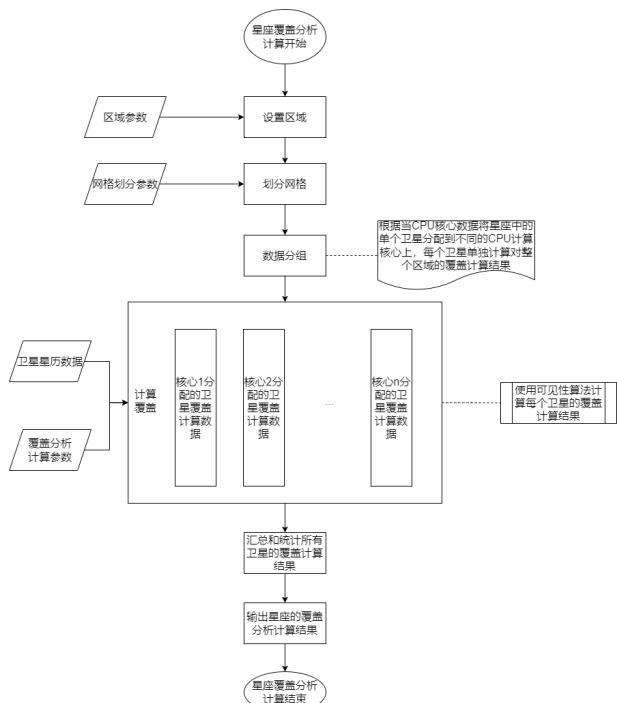


图 3 星座覆盖分析计算算法流程图

覆盖特性值数据是从覆盖数据中统计出来的，以覆盖特性值平均访问时间（Access Time）和平均重访时间（Revisit Time）为例，说明一下覆盖特性值得统计算法。经过可见性计算，区域中某个点被覆盖资源访问的时间是不连续的时间段序列，记为 Intervals，不被访问的时间也是不连续的时间段序列，记为 Gaps，则平均访问时间和平均重访时间的统计算法如下：

$$(AccessTime)_{average} = \frac{\sum_{i=0}^M (Intervals)_i}{M}$$

$$(RevisitTime)_{average} = \frac{\sum_{i=0}^N (Gaps)_i}{N}$$

其中，M 为所有可见时段的个数，N 为所有不可见时段的个数。

4 实验验证

4.1 卫星组数不同

(1) 计算环境：

仿真使用的轨道参数为：半长轴 8000 千米、偏心率 0.0、轨道倾角 86.0°、升交点赤经 0.0°、近地点幅角 0.0°、平面近点角 0.0°、定轨时间 2022 年 1 月 1 日 12:00:00UTC。转换到双行元格式后的轨道参数下所示：

1 11801U 17001.50000000 .00000000 00000-0 00000-0
0 8

2 11801 86.0000 00.0000 0000 0.0000 0.000 12.1330 6

仿真时间：2022 年 1 月 1 日 12:00:00 UTC~2022 年 1 月 2 日 12:00:00 UTC

步长：60s；

操作系统：Windows 10 x64

CPU：英特尔酷睿 i7-10700，CPU 架构：Comet Lake-S，核心主频：3.8GHz，加速频率：5.1GHz，三级缓存大小：16M，8 核心 16 线程，125W 热设计功耗。

GPU：NVIDIA GeForce GTX 860M，具备 640 个 CUDA 核心，配备 4096MB 的显存容量。

(2) 计算结果对比：

实验数据基于 NORAD 发布的双行轨道参数文件，设置覆盖区域范围：纬度环 $-5^\circ \sim 5^\circ$ ，分辨率 1° ，分别读取 1 组，10 组，100 组，500 组，1000 组，5000 组，10000 组卫星在 release 环境下进行 SGP4 轨道仿真，对比运算效率与加速比，如表 1 所示。

4.2 覆盖范围不同

(1) 计算环境：

模拟中使用的轨道参数如下：半主轴 8000 公里，偏心率 0.0，轨道倾角 86.0°，节距长度 0.0°，近地点幅度 0.0°，平面近点角 0.0°，定点时间 2022 年 1 月 1 日 12:00:00 UTC。转换为双行元格式后的轨道参数如下：

1 11801U 17001.50000000 .00000000 00000-0 00000-0

0 8

2 11801 86.0000 00.0000 0000 0.0000 0.000 12.1330 6

模拟时间：2022 年 1 月 1 日 12:00:00 UTCG ~ 2022 年
1 月 2 日 12:00:00 UTCG。

步长：60s；

操作系统：Windows 10 x64

CPU：英特尔酷睿 i7-10700，CPU 架构：Comet Lake-S，核心主频：3.8GHz，加速频率：5.1GHz，三级缓存大小：16M，8 核心 16 线程，125W 热设计功耗。

GPU：NVIDIA GeForce GTX 860M，具备 640 个 CUDA 核心，配备 4096MB 的显存容量。

表 1 仿真时间与加速比

数据组数	CPU 串行计算时间 (s)	CPU 并行计算时间 (s)	加速比
1	3.2	36.3	0.088
10	11.7	40.4	0.290
100	70.4	73.4	0.959
500	353.1	150.2	2.351
1000	738.7	187.9	3.931
5000	4206.6	550.3	7.644
10000	8560.3	901.1	9.500

(2) 计算结果对比：

实验数据基于 NORAD 发布的双行轨道参数文件，共处理了 1000 颗卫星的数据。这些数据的覆盖范围按纬度划分为以下几组：-5° 至 5°，-10° 至 10°，-30° 至 30°，-60° 至 60°，以及 -90° 至 90°。在正式发布的环境中，使用 SGP4 轨道模型对这些卫星的轨道进行了仿真分析，对比运算效率与加速比，如表 2 所示。

表 2 仿真时间与加速比

覆盖范围 / 纬度	CPU 串行计算时间 (s)	CPU 并行计算时间 (s)	加速比
-5~5	738.1	887.3	0.832
-10~10	968.5	1042.8	0.929
-30~30	4205.8	1535.5	2.739
-60~60	7120.3	1917.7	3.713
-90~90	13457.2	2265.2	5.941

由仿真结果可知，随着数据组数的增加，CPU 串行计

算时间呈正比式增长，单 CPU 并行计算时间增长速度较缓慢。因为对于数据量较少时，CPU 并行需要线程池的初始化和线程的申请以及执行数据划分逻辑，所消耗的时间占总的计算时间大。因此对于数据量较小的计算使用 CPU 并行的效率比 CPU 串行耗时更多。当涉及到 SGP4 轨道模型的仿真，并且轨道数量超过 500 条时，为了提升仿真的效率，可以考虑采用 CPU 并行处理技术。但整体运行加速比随着数据量的变大而增大，但由于硬件条件的限制，其加速比上限将受限于 CPU 的核心数。

5 结语

本文提出了基于并行计算的星座覆盖分析系统设计方法，研究了任意多边形闭合区域的网格点划分方法、任意闭合区域的可见性计算方法、星座轨道并行计算处理方法以及星座覆盖并行计算处理方法，开发实现了基于并行计算的星座覆盖分析系统，并对上述方法进行了实验验证。实验结果表明当计算处理的数据量达到一定的规模后，采用并行计算的方法能够大幅减少数据处理的时间，为星座覆盖分析提供了高效的数据处理解决方案。

参考文献

- [1] 韩蕾, 陈磊, 周伯昭. SGP4/SDP4 模型用于空间碎片轨道预测的精度分析[J]. 中国空间科学技术, 2004, 24(4):75-91.
- [2] 刁宁辉, 刘建强, 孙从容, 等. 基于 SGP4 模型的卫星轨道计算[J]. 遥感信息, 2012, 27(4):56-71.
- [3] 韦栋, 赵长印. SGP4/SDP4 模型精度分析[J]. 天文学报, 2009, 50(3):312-337.
- [4] 吴金兰. 多柔体系统约束方程的牛顿-拉斐逊算法研究. 山西师范大学学报. 2010, 3, 10.
- [5] 丁永祥, 夏巨湛. 任意多边形的 Delaunay 三角剖分. 国家科技图书文献中心. 1994-04-004.
- [6] Kelso T S C. Validation of SGP4 and IS-GPS-200D Against GPS Precision Ephemerides[C]// 2007
- [7] Hoots F R, Roehrich R L. Models for Propagation of NORAD Element Sets[J]. Spacetrack Report, 1980.
- [8] FELIX R H, RONALD L R. Space track report No.3-models for propagation of NORAD element sets[R]. Peterson: Aerospace Defence Command, United States Air Force, 1980: 1-79.

Research on network information security management in enterprise informatization construction

Lei Yang

Inner Mongolia Civil Aviation Airport Group Co., Ltd. Hohhot Branch, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

Abstract

With the accelerated digital transformation and widespread adoption of information technology, enterprise informatization has become a critical pathway to enhance competitiveness. However, the escalating cybersecurity threats have made information security management a major challenge that enterprises must confront. Starting from the practical needs of enterprise informatization, this study provides an in-depth analysis of the importance of network information security management. It systematically explores six key security management strategies: technical protection, institutional norms, personnel training, risk control, technological innovation, and supply chain management. The research reveals that establishing a multi-layered and comprehensive security protection system forms the foundation for ensuring enterprise information security. Moreover, the organic integration of technical measures and management practices is crucial for enhancing security effectiveness.

Keywords

enterprise informatization; network security; information security management

企业信息化建设中的网络信息安全管理研究

杨蕾

内蒙古自治区民航机场有限责任公司呼和浩特分公司，中国·内蒙古 呼和浩特 010000

摘要

随着数字化转型进程的加速推进和信息技术的广泛应用，企业信息化建设已成为提升竞争力的关键途径，然而网络安全威胁的日益严峻使得信息安全管理成为企业必须面对的重大挑战，本研究从企业信息化建设的实际需求出发，深入分析了网络信息安全管理的重要性，系统探讨了包括技术防护、制度规范、人员培养、风险管控、技术创新和供应链管理在内的六项安全管理策略，研究发现，构建多层次、立体化的安全防护体系是保障企业信息安全的基础，而将技术手段与管理措施有机结合则是提升安全防护效能的关键。

关键词

企业信息化；网络安全；信息安全管理

1 引言

在全球数字经济蓬勃发展的背景下，企业信息化建设已经从可选项转变为必选项，成为企业保持市场竞争优势的重要支撑，但与此同时，网络攻击手段的不断升级、数据泄露事件的频繁发生，以及各类安全威胁的层出不穷，使得网络安全问题日益凸显，成为制约企业信息化健康发展的关键因素，如何在推进信息化建设的同时确保网络安全，已经成为企业管理者必须深入思考和着力解决的核心问题，基于此，本文将从企业信息化建设的现实需求出发，全面剖析网络信息安全管理的重要性，并提出切实可行的管理策略，以期为企业构建安全可靠的信息化环境提供理论指导

和实践参考。

2 企业信息化建设中的网络信息安全管理重要性

2.1 确保核心业务数据安全，防范机密信息泄露风险

企业在信息化建设过程中产生和积累的海量数据已成为其最宝贵的资产之一，这些数据涵盖了客户资料、财务信息、研发成果、战略规划等核心商业机密，一旦发生泄露将给企业带来难以估量的损失，网络信息安全管理的首要任务便是为这些关键数据筑起坚固的防护屏障，防止内部人员的恶意窃取和外部黑客的非法入侵^[1]。在当今复杂多变的网络环境中，数据泄露的途径日趋多样化，既包括传统的网络攻击手段，也涉及社会工程学等新型威胁方式，因此企业必须建立全方位的数据安全防护机制，从数据的产生、传输、存储到使用的各个环节实施严格管控，确保核心业务数据始终

【作者简介】杨蕾（1987-），女，中国甘肃隆德人，本科，工程师，从事网络信息安全研究。

处于安全可控的状态之下。

2.2 维护系统运行稳定性，保障企业运营连续性

信息系统的稳定运行是企业正常开展各项业务活动的基础保障，而网络安全事件往往会导致系统崩溃、服务中断等严重后果，直接影响企业的生产经营活动。勒索软件攻击、分布式拒绝服务攻击等恶意行为可能使企业的核心业务系统陷入瘫痪，造成订单处理延误、生产线停工、客户服务中断等一系列连锁反应，进而导致经济损失和声誉受损，强化网络信息安全管理能够有效预防和抵御各类网络攻击，确保企业信息系统的高可用性和业务连续性。此外，完善的安全管理体系还能够帮助企业建立快速响应和灾难恢复机制，即使在遭受攻击的情况下也能够迅速恢复系统运行，将损失降至最低，从而为企业的稳健发展提供坚实保障。

2.3 满足合规监管要求，规避法律责任和经济损失

随着各国对数据安全和隐私保护的重视程度不断提升，相关法律法规日趋严格和完善，对企业的网络信息安全管理提出了更高要求，欧盟《通用数据保护条例》、中国《网络安全法》《数据安全法》等法规的实施，明确规定了企业在数据收集、处理、存储等方面合规义务，违反相关规定将面临巨额罚款和法律制裁^[2]。企业必须建立符合监管要求的安全管理体系，确保在数据处理的全生命周期中严格遵守相关法律法规，这不仅是企业履行社会责任的体现，更是避免法律风险和经济损失的必要举措。同时，良好的安全合规管理还能够提升企业的市场信誉和客户信任度，为企业赢得更广阔的发展空间和更多的商业机会，成为企业核心竞争力的重要组成部分。

3 企业信息化建设中的网络信息安全管理策略

3.1 构建多层次技术防护体系，实现纵深安全防御机制

企业应当采用纵深防御的理念构建多层次的技术防护体系，形成从网络边界到核心数据的立体防护架构，在网络边界层面部署高性能防火墙、入侵检测系统和入侵防御系统，实时监控和阻断外部威胁，在网络内部实施网络分段和访问控制，将不同安全级别的系统和数据进行隔离，防止威胁的横向扩散，针对终端设备部署终端安全管理平台，统一管理防病毒软件、主机防火墙和设备准入控制，确保每一个接入点的安全性。

在应用层面实施 Web 应用防火墙、数据库审计系统等专业防护措施，对应用程序的输入输出进行严格检查，防范 SQL 注入、跨站脚本等常见攻击，同时部署数据防泄露系统，对敏感数据的流转进行全程监控和管控，防止内部数据的非授权外传，在数据层面采用加密技术对重要数据进行加密存储和传输，确保即使数据被窃取也无法被解读利用。

3.2 建立完善制度规范体系，强化安全管理标准化程度

制度建设是网络信息安全管理的基础工作，企业需要

建立涵盖组织架构、岗位职责、操作流程、应急预案等各个方面的完整制度体系，首先明确安全管理的组织架构和责任分工，设立专门的信息安全管理部或安全管理委员会，明确各级管理人员和技术人员的安全职责，建立自上而下的安全责任体系，确保安全管理有人抓、有人管、有人负责^[3]。

制定详细的安全操作规程和管理流程，包括账号管理、权限分配、数据备份、系统维护、安全审计等各项日常工作的标准化操作程序，每一项操作都应有明确的执行步骤、审批流程和记录要求，避免因操作不当造成的安全隐患，建立安全事件分级分类标准和应急响应预案，明确不同级别安全事件的处置流程和责任人，确保在安全事件发生时能够快速、有序地进行处置。

3.3 加强人员安全意识培养，提升全员网络安全防护能力

人是网络安全防护体系中最关键也是最薄弱的环节，企业必须高度重视员工安全意识的培养和安全技能的提升，建立分层分类的安全培训体系，针对不同岗位、不同层级的人员制定差异化的培训方案，对于普通员工重点培训基础安全知识、安全操作规范和常见威胁识别方法，对于技术人员则加强专业安全技能和最新攻防技术的培训，对于管理人员着重培养安全管理理念和决策能力。

创新培训方式方法，采用案例分析、模拟演练、在线学习等多种形式开展培训活动，特别是通过真实案例的剖析让员工深刻认识到安全威胁的严重性和防护的必要性，定期组织钓鱼邮件测试、社会工程学演练等实战化训练，检验员工的安全意识水平和应对能力，对于测试中暴露出的问题进行针对性的强化培训，营造浓厚的安全文化氛围，通过安全知识竞赛、安全主题活动、安全标语宣传等方式，让安全意识深入人心，成为企业文化的重要组成部分。

3.4 实施动态风险评估管控，建立预警响应处置联动机制

风险管理是网络信息安全管理的核心环节，企业需要建立动态的风险评估和管控机制，持续识别、评估和应对各类安全风险，构建全面的资产台账和风险清单，对企业的信息资产进行分类分级管理，明确各类资产的重要程度和面临的主要威胁^[4]，采用定性和定量相结合的方法进行风险评估，综合考虑威胁发生的可能性和影响程度，确定风险等级和优先处置顺序。

部署安全态势感知平台，整合各类安全设备和系统的日志信息，运用大数据分析和人工智能技术进行威胁检测和行为分析，实现对安全风险的实时监测和预警，建立分级分类的预警机制，根据威胁的严重程度和紧急程度采取不同的响应措施，对于高危威胁立即启动应急响应流程，对于中低风险制定整改计划并限期完成，构建安全运营中心，配备专业的安全分析人员进行 7×24 小时的安全监控和事件处置。

建立与外部安全机构的合作机制，及时获取最新的威胁情报和漏洞信息，提前做好防范准备，定期开展渗透测试、

漏洞扫描等主动安全检测活动，发现系统和应用中存在的安全隐患并及时修复，建立安全事件的复盘机制，对已发生的安全事件进行深入分析，总结经验教训，优化防护策略和响应流程，形成持续改进的闭环管理模式，确保安全防护能力不断提升。

3.5 推进安全技术创新应用，提升智能化防护检测水平

面对日益复杂和智能化的网络威胁，企业必须积极拥抱新技术，推动安全防护手段的创新升级，将人工智能和机器学习技术应用于安全领域，建立基于 AI 的威胁检测和响应系统，通过对海量安全数据的深度学习和模式识别，实现对未知威胁和零日攻击的有效检测，利用机器学习算法建立用户和实体行为基线，对异常行为进行智能识别和预警，大幅提升安全检测的准确性和及时性。

探索区块链技术在数据安全和身份认证方面的应用，利用区块链的不可篡改性和去中心化特性，建立可信的数据共享和身份验证机制，特别是在供应链安全管理和多方数据协作场景中，区块链技术能够提供更加安全可靠的解决方案，推进零信任安全架构的建设，摒弃传统的边界防护理念，对所有用户、设备和应用进行持续验证和动态授权，实现更加精细化和智能化的访问控制^[5]。

部署安全编排自动化和响应平台，将安全事件的检测、分析、响应和处置流程进行自动化编排，大幅缩短安全事件的响应时间，提升处置效率，探索量子加密、同态加密等前沿加密技术的应用，为未来的数据安全防护做好技术储备，建立安全技术创新实验室或与高校、科研机构合作，持续跟踪和研究最新的安全技术发展趋势，确保企业的安全防护能力始终保持在行业前列。

3.6 完善第三方合作管理，确保供应链安全可控性

在企业信息化建设过程中，第三方合作伙伴的参与不可避免，包括软件供应商、系统集成商、云服务提供商、外包服务商等，这些第三方往往需要接触企业的敏感信息和关键系统，因此加强第三方安全管理至关重要，建立严格的供应商准入机制，在选择合作伙伴时将安全能力作为重要评估指标，要求供应商提供安全资质证明、安全管理体系文档和过往安全事件记录，对于关键供应商进行现场安全审计，确

保其具备足够的安全保障能力。

在合同签订阶段明确双方的安全责任和义务，包括数据保护要求、安全事件通报机制、违约责任条款等，要求供应商签署保密协议和安全承诺书，对于需要访问企业系统或数据的第三方人员，实施与内部员工同等严格的身份认证和权限管理，建立专门的第三方访问通道和监控机制，对其操作行为进行全程记录和审计，定期评估第三方的安全状况，通过安全检查、渗透测试等方式验证其安全措施的有效性。

建立供应链安全风险评估机制，识别供应链各环节可能存在的安全隐患，特别关注关键组件和服务的安全性，对于发现的风险制定相应的缓解措施，建立多供应商策略，避免对单一供应商的过度依赖，降低供应链中断的风险，加强与供应商的安全协同，建立安全信息共享机制，及时通报安全威胁和漏洞信息，共同提升整个供应链的安全防护水平，在供应商退出时做好安全收尾工作，确保企业数据和访问权限的完全回收，防止安全风险的延续。

4 结语

企业信息化建设中的网络信息安全管理是一项系统性、持续性的工作，需要企业从战略高度充分认识其重要性，在未来的发展中，企业应当持续关注网络安全技术的演进趋势，不断优化和完善安全管理体系，将安全理念融入企业文化业务流程的方方面面，只有这样才能在享受信息化带来的效率提升和竞争优势的同时，确保企业的信息资产安全和业务的持续稳定发展，为企业的数字化转型和长远发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 吴琴. 国有企业信息化建设中的网络安全管理探讨[J]. 科技创新导报, 2021, 18(24): 134-136.
- [2] 王秀斌. 企业信息化建设中的网络安全管理问题分析[J]. 中国管理信息化, 2021, 24(06): 103-104.
- [3] 汤荣秀. 企业信息化建设中的网络信息安全[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(23): 230-232.
- [4] 刘忠海, 刘永胜, 于海, 等. 对企业信息化建设中的网络安全管理问题探讨[J]. 数码世界, 2020, (11): 258-259.
- [5] 何玉霞, 姚沪兰. 论企业信息化建设中网络安全管理[J]. 通讯世界, 2020, 27(02): 109-110.

The collaborative management mode innovation of the whole life cycle of communication engineering project under the background of new infrastructure construction

Wei Sang¹ Jizhen Tan² Yingfang Tan¹

1. China Mobile Yunnan Co., Ltd. Kunming Branch Engineering Construction Management Center Kunming, Yunnan, Kunming, 650200, China

2. Guandu District Fire Rescue Brigade, Kunming, Yunnan, 650200, China

Abstract

This paper mainly analyzes the new requirements of communication engineering management under the background of new infrastructure. Using 5G, BIM, Internet of Things and other technologies, a complete ‘technology-process-organization’ three-dimensional collaboration model is established to break through the data barriers between the parties. Reconstruct the whole life process of communication project construction, and determine the responsibilities of project design, construction and operation. Construct a multi-agent cooperation system and strengthen the interest coordination and risk sharing mechanism among owners, designers, construction parties and operation and maintenance parties.

Keywords

new infrastructure ; communication engineering ; full life cycle ; collaborative management ; innovation

新基建背景下通信工程项目全生命周期的协同管理模式创新

桑维¹ 谭纪振² 谭颖芳¹

1. 中国移动通信集团云南有限公司昆明分公司工程建设管理中心，中国·云南昆明 650200

2. 官渡区消防救援大队，中国·云南昆明 650200

摘要

通信工程作为我国数字经济发展的重要支撑，其规模不断扩大，技术集成度和迭代速度日新月异，传统的“分段式、信息孤岛”管理方式已经很难与规划、设计、施工、运维等有效的协作要求相适应，造成了资源浪费、工期延误和风险管控不足等问题。为解决这一问题文章主要分析新基建背景下，通信工程管理的全新需求。采用5G、BIM、物联网等技术，建立完整的“技术—过程—组织”的立体协作模型，突破各方之间的数据壁垒。重塑通信工程项目建设全生命流程，确定项目设计、施工和运营等各环节的职责。构建多主体的通力合作体系，强化业主、设计方、施工方和运维方之间的利益协调和风险分担机制。

关键词

新基建；通信工程；全生命周期；协同管理；创新

1 引言

通讯工程是新基建设施的重要连接载体，伴随着《“十四五”新型基础设施建设规划》等一系列国家战略的出台，以5G基站、数据中心和工业互联网为主要内容的通讯基础设施的发展迅速，不但改变了通信工程的技术形式和规模，而且也对“协同化、智能化、全周期化”的项目管理方式提出了崭新的需求。在这种情况下，对通信工程项目进行全生命周期协作管理方式，以此为我国通信建设领域的科

学高效发展提供新的思路和方法。

2 新基建背景的简介以及为通信工程项目管理创新带来的机遇

2.1 新基建背景

新基建是以数字化和智能化为主要特点，以“数字底座”和“产业赋能”为核心，构建基础设施体系。按照我国的战略需求，其核心内容包括：5G基站、数据中心、工业互联网等，融合基础设施（智慧交通、智慧能源等）和创新基础设施（重大科技基础设施、产业技术创新平台等）领域，本质是通过技术迭代与业态创新，重构经济社会运行的底层支撑逻辑^[1]。在新基建已经成为我国重要的战略领域，《“十四五”新型

【作者简介】桑维（1985-），男，中国四川南充人，硕士，工程师，从事移动通信研究。

基础设施建设规划》中也对“2025 年将初步形成”的新基建框架进行了详细的阐述，在资金支持、土地保障和规范等方面给予了作为信息技术的重要支撑的通信项目一个空前的发展窗口期。通讯工程是新基础设施的“数字神经网络”的重要组成部分，其施工的好坏和运行的高效与否，将会影响到新基础设施对数字经济和实体经济的促进作用，并将其由“工程建设领域”提升到“国家战略执行的核心”^[2]。

2.2 为通信工程项目管理创新带来机遇

新基建的技术性和战略性要求，打破了通信工程项目管理的传统发展瓶颈，带来多维机会。从技术赋能的角度来看，新基础设施自身所包含的 5G、建筑信息模型（BIM）、物联网、大数据、人工智能等技术带来的“工具革命”：5G 的低延迟特征可以对施工现场进行远程实时监测，BIM 技术可以建立涵盖整个工程的 3D 可视化模型，打破勘测、设计到运营的“数据断层”。通过物联网设备对施工设备状况、材料消耗等数据进行准确的数据支持，从而扭转了以往依靠人工统计和经验判断的落后局面^[3]。

从过程重组的角度来看，新基础设施建设对“全程价值”的需求，促使其由“分段割裂”转变为“协同闭环”：针对“设计—施工—运维”过程中，由于“设计—施工—运维”过程中存在的“设计—施工分离，运维缺少建设数据支持”的难题，构建一个完整的“设计—建设—运维”一体化体系。

在行业生态层面上，新基础设施将促使通讯产业链由“线性合作”转变为“生态协同”：通讯工程不再是单纯的业主、施工方和供应商之间的简单直线连接，而是上升到涉及芯片研发、设备制造、软件服务、运营维护等整个产业链的过程，需要构建跨主体、跨领域的协作机制，比如通过“平台组织”将产业链上的资源进行集成，实现材料采购、技术研发和工程施工的一体化，在减少资源配置的同时加快技术的应用效果。

3 新基建背景下通信工程项目全生命周期的协同管理模式创新措施

新基建背景下通信工程项目全生命周期协同管理模式的创新，需要以“技术—过程—组织”为主线，以数字工具为支撑，以流程再造为抓手，以组织协同为保证，建立一个涵盖项目立项—勘察设计—物资采购—项目实施—验收审核—审计归档的闭环管理系统，使管理过程由碎片化到整体协同。

3.1 利用科技赋能建立数字化全生命周期管理协作平台

科技为企业突破信息壁垒，实现企业协同管理提供了重要的支持。在新基础设施建设方面，需要构建“云一体，多端互联”的通讯工程项目数字化协作平台，将不同信息技术手段相结合，构建“数据同源，实时共享，智能决策”的管理中心平台。在系统框架设计方面，需要将其划分为数

据—功能—应用三个层次：数据层对工程建设过程中的空间数据进行采集，其中包含勘测阶段的空间数据（由 GIS 采集）、设计阶段的 BIM 建模数据（包含构件参数、工艺规范）、施工过程中的实时进展数据（利用 5G 模块进行数据采集）以及运维过程中的设备工作数据（5G 模块）进行数据清洗、脱敏和标准化，从而建立统一的数据资源库。功能层面围绕协同管理的关键要求，研发“设计协同”“进度控制”“质量监控”“材料管理”“风险预警”和“运维联动”六个主要功能，包括：设计协同模块，允许多个设计人员进行 BIM 模型的实时更新，管道碰撞等设计矛盾的自动发现^[4]。在应用层面，针对业主、设计方、施工方、监理方、运维方等多主体参与，及时地获得所需要的数据，启动协作任务，并追踪任务进度，从而有效地克服了“信息不对称，交流效率低下”的问题。

3.2 通过管理流程重组建立全生命周期协同管理机制

全生命周期管理需要突破以往“分段管理”的线性过程，构建涵盖整个工程过程的闭环协作过程，并以规范的设计方式保证各个环节之间的衔接顺畅和责任明确。确定需求评价与设计过程的对接方式，即在立项阶段，业主联合设计方和运维方对《项目需求说明书》进行需求调查，编制出“技术指标—运营要求—成本预算”的《项目需求说明书》，并在此基础上组织业主、施工单位和运维方对设计方案进行审核，并对设计方案进行审查，主要检查设计方案的建造可行性（例如塔基承载能力与当地地质情况相匹配）和维护方便性（如：设备维修通道等），以防止后续设计更改。“建设—验收—运营”的一体化过程，施工过程中需要同步保存相关的重要信息，比如施工单位每次安装一个基站设备，都需要将设备调试报告和质量检测记录（附照片）上传到该项目，验收阶段监理方可直接基于平台数据开展验收，无需重复现场核查，验收通过后，平台自动将设备参数、施工记录同步至运维系统，为后期运维提供数据支撑。“材料—建筑”匹配过程，在材料采购环节，由采购、建设、设计三方共同编制《物资需求清单》，列出设备型号、交货时限和质量标准，并在物资到达后，在系统中扫描设备编号、生产日期等相关数据，并将其与相应的 BIM 模块进行关联，达到“材料—部件—进度”精确匹配。

3.3 组织协同构建跨主体动态协作架构

组织是协同管理的实施主体，需要突破“业主主导，各方被动合作”的等级结构，构建“多元参与、利益共享、风险分担”的动态合作机制，保证参与各方由“被动执行”转变为“主动协同”。“策略协同层”，即在项目经理的带领下，联合设计院、施工总包、核心设备供应商和运维服务商等组成的项目协调小组通过定期（例如月度）开会，协调项目整体目标、协调跨主体重大问题（技术标准统一、资源配置优先等），并签署《协同管理协议》，确定各方在成本、进度、质量等方面的职责界限和收益分配（例如，建立联合

奖惩基金，对超额达成目标的各方进行表彰）。“策略实施层”，即在施工高峰时段，建立多个交叉学科协作团队，比如由承建方土建工程师、设备供应商技术工程师和监理工程师组成的基站建设协调团队，利用数字技术，实现问题实时交流，快速决策，克服层层上报引起的决策滞后。构建“作业分层”，确定各重点岗位（如施工队长、设计负责人）的协作责任，如施工队长每天要在平台上进行施工进展汇报，并与物料管理人员进行沟通，确定第二天的材料供给，设计主责人要在接到施工方提出的设计疑问后 24 小时内予以回复，确保协调责任落实到人。在收益和风险协调机理的研究中，需要打破单纯的“定约价”模型，引入“目标费用+奖励评估”契约模型。以“利益共享、风险共担”绑定各方利益，激励协作积极性。

3.4 依托保障体系夯实协同管理落地基础

在体制保证上，需要制定《协同管理考核办法》，将协作效能、信息共享及时性、问题处理速度等作为考评内容，并将其与合同付款和项目后续合作的资质相结合。在人才保证上，需要进行协同管理能力训练，注重对跨专业认知、数字化工具应用、协同沟通等技能的训练，比如，对设计师进行建筑工艺知识的学习，对建筑人员进行 BIM 基本作业的学习，保证各个岗位的人员都具有协作的意识和技能。在文化保证层面，通过协同经验交流和成果共享研讨会等方式，推广建设单位与设计单位协同攻关的典型案例，形成“主动协同、互助共赢”的企业文化环境，使合作思想由“制度要求”向“行为习惯”转变。在实施制度保证方面，需要构建

“三级监管机制”来保证评价方法的落实，即：以项目协调小组为首的第一轮监管，每季度对其进行一次专项监管，主要考察各方在实施过程中，有没有按照规定完成信息共享、解决问题等工作；第二层监管，则是在项目建设单位成立的协调管理处进行，对各项目进行月度的数据汇总，生成《协同效率分析报告》，对于上报滞后或响应时间过长的单位，下发相应的整改通告；其中，三级监理公司引进了第三方中介组织，每年对监理单位的绩效进行独立评价，并以评价成果为基础确定下一次监理单位的资质。

4 新基建背景下通信工程项目全生命周期的协同管理模式创新方向

随着新基础设施建设的不断深入和数字化技术的不断更新，通讯工程建设的整个寿命周期内的协作管理方式将向更智能、更开放、更融合的发展，需要在技术深度融合、管理边界拓展和行业生态三个方面进行深入研究，不断打破现存的瓶颈，发挥更大的管理价值。

4.1 促进技术集成

在技术集成的层面上，“人工智能+协作管理”是未来的发展趋势。目前的数字协作系统虽然已经达到了信息融合和过程的联机状态，但是在智能的决策水平上还有待提高。以大数据为基础对勘察设计、施工、运营等各个阶段的数据进行融合，利用 AI 算法进行进度偏差预测，自动识别风险，以及对资源进行动态优化。在运营期，人工智能可以根据设备的工作状态，对隐患进行及时的检测，实现对维修的早期预警，将协作管理由“被动响应”转变为“主动预判”。另一方面，利用区块链技术，以分布式的方式记录工程各个阶段的信息（设计变更记录、材料采购契约等），以保证“数据信任”，保证信息的不被篡改，为各方合作提供可靠的数据依据。

4.2 管理边界拓展

从扩展的管理领域来看，企业间的协作将会打破传统意义上的“项目本身”，扩展到“链上—下游”和“跨工程”。一方面，随着通讯技术与新能源和智慧交通等相关技术的不断深入（比如 5G 基站和新能源充电站），需要将更多的参与主体（比如新能源企业、交通部门）整合到一起，形成跨行业协作机制，实现资源共享和需求对接；另外，对于一个地区的多个通讯工程（如 5G 基站和数据中心），可以利用一个协作平台将公共资源（施工设备、材料供应商等）进行集成，从而有效地协调各项目之间的资源配置和进度，防止重复投资和资源浪费，提高整个地区通讯基础设施的总体效能。

5 结语

在新基建大背景下，对通信工程项目进行全程协同管理，不仅是打破“信息孤岛、流程割裂、协同低效”困境的重要途径，更是顺应数字技术赋能、产业链融合发展趋势的一种战略性措施。建立技术—过程—组织的立体协作系统，以数字平台打通数据壁垒，规范流程衔接全周期环节，形成跨主体结构的协作能力。通过人工智能、区块链等新科技的深入应用，以及产业生态的不断优化，为通信项目夯实基础。

参考文献

- [1] 覃振祝. 大数据技术在通信工程项目管理中的应用探讨[J]. 数字通信世界, 2025, (05): 142-144.
- [2] 卢承财. 全生命周期通信工程项目管理系统设计[J]. 电信快报, 2025, (01): 38-43.
- [3] 刘映波, 刘玉凤, 李志龙, 等. 全过程管理在通信工程建设中的应用分析[J]. 广东通信技术, 2024, 44 (11): 75-79.
- [4] 袁刚, 刘丽萍. 融合管理方法在通信工程建设中的应用研究[J]. 中国管理信息化, 2024, 27 (15): 123-126.

The Application of Unipolar Conversion Technology in the Design of Communication Power Supplies

Yuelong Peng

Beijing Zhongwang Huatong Design Consulting Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

In the design of communication power supplies, unipolar transformation technology, relying on its simplified topological structure and high energy transmission efficiency, has become a key means for optimizing emergency communication and mobile communication power supplies. This article focuses on the application of unipolar conversion technology, analyzes its reliability under high power density conditions, stability and dynamic response when operating in parallel with modular heat dissipation, as well as key technical difficulties such as electromagnetic compatibility and filtering issues, and proposes corresponding design optimization strategies. Research shows that through reasonable thermal management scheme control strategies and circuit topology design, power supply performance can be optimized, ensuring the safety and stability of system operation, and providing technical support for the efficiency and reliability of communication power supplies.

Keywords

Unipolar transformation technology Communication power supply “Design; Application; Key points

单极变换技术在通信电源设计中的应用

彭岳龙

北京中网华通设计咨询有限公司，中国·北京 100000

摘要

在通信电源设计中单极变换技术依靠其拓扑结构简化，能量传输效率较高的特性已然成为应急通信以及移动通信电源优化的关键手段。文章聚焦单极变换技术的应用，剖析其于高功率密度状况下的可靠性与散热模块化并联运行时的稳定性与动态响应，还有电磁兼容及滤波问题等关键技术难点，提出对应的设计优化策略。研究显示，通过合理的热管理方案控制策略以及电路拓扑设计，能优化电源性能，保证系统运行的安全与稳定，为通信电源的效率和可靠性提供技术支撑。

关键词

单极变换技术；通信电源；设计；应用；要点

1 引言

在移动通信与应急通信场景里，传统电源架构的局限性正逐步显现，这是由于通信网络对于供电稳定性以及响应速度的要求在持续提高。因其具备高能效低器件压力以及灵活拓扑特性，单极变换技术成为通信电源设计的新趋势，在有限空间里该技术能够完成功率转换以及电压调节，为模块化与并联运行给出可行方案从而满足快速启动和负载波动时的电力需求。

2 单极变换技术的原理与特性

在通信电源设计中常用的拓扑形式之中单极变换技术是较为典型的一类，它的关键特性在于借助单个磁性元件的

磁通转换，达成电压的升降以及隔离。在工作机理方面，该技术借助单极性驱动信号，对功率开关器件的导通以及关断过程实施控制，通过这种方式让输入端的能量，能够经由变压器磁通传递到输出端。如此一来既确保能量传递效率，还能降低元件应力。在控制环路设计中单极变换技术鉴于开关频率颇高，一般能够于较小体积状况下达成稳定输出且具备较强的动态响应能力^[1]。

从特性方面来讲单极变换技术具备显著优势，第一，电路结构相对简洁，在中低功率通信电源的应用场景中十分契合。磁元件工作期间电流波形连续性颇佳，能有效降低电磁干扰程度，给后级滤波设计带来便利。第二，该技术在达成电气隔离之际维持了较高的能量利用率，与传统的双极性变换拓扑相比，其导通损耗以及反向恢复损耗都有一定程度地减轻，这进一步提升了系统的整体转换效率。第三，在通信电源领域单极变换技术于器件挑选，以及散热设计方面呈现出显著的灵活性，该技术可以依据通信电源所具备的电压

【作者简介】彭岳龙（1990—），男，中国湖南岳阳人，本科，工程师，从事通信电源工程设计研究。

等级情况，以及负载呈现出的特性状况对自身进行优化配置，在保证可靠性的前提下兼顾轻量化和高效化的需求。

3 单极变换技术在通信电源设计中的应用模式

3.1 通信基站电源设计中的应用

在通信基站电源的设计工作中单极变换技术被引入的目的在于让能量传输的稳定性以及效率得以提高。传统电源架构在基站运行时面对负载频繁波动，瞬态响应常出现迟滞。单极变换技术却不同，它借助对拓扑结构和控制环路的优化达成对输入电压的快速调节，这能让直流母线电压在窄幅波动区间内保持稳定，进而确保射频设备交换设备等核心模块持续供电的稳定性。在高频开关的驱动作用下，该技术能够切实减轻设备重量，有效降低磁性元件体积，为基站电源的小型化给予技术方面的支撑^[2]。此外，通常基站电源需要满足能耗控制与高效散热的双重要求，在工作进程中单极变换技术凭借减少导通损耗以及开关损耗提升整体的能效比，降低电能于传输与变换环节里的损失，以此来降低发热量增强电源系统在高温或者复杂环境下运行的可靠性。该技术与此拥有模块化扩展的优势，能够依据不同基站规模对功率等级灵活加以配置，防止因过度设计致使资源出现浪费。

3.2 数据中心通信电源设计中的应用

在数据中心通信电源设计中单极变换技术应用的重点，是要去应对大规模服务器群对于电能供应所提出的高密度且连续性的需求。在高度集约化特征显著呈现于数据中心设备运行负载的状况下，电源系统在长时间维持满负荷工况时极其容易遭受电压波动以及谐波干扰的影响。在大规模计算与存储单元面临高并发任务时，单极变换技术借助高频开关控制，搭配精确的能量分配手段以此保障直流母线电压的稳定。

在转换效率方面这项技术具备优势，能够对能量损耗起到有效降低的作用。传统供电方式在数据中心内部复杂的电力消耗结构里，多级能量转换过程易出现效率下滑。单极变换架构则凭借减少中间变换环节，缩短能量传递路径达成高效功率转换，这既有助于减轻散热压力又能提升整体功率密度。该技术的拓扑设计与此便于跟冗余电源系统相结合，让电源架构的可靠性得以增强使其拥有应对大规模节点失效的能力。除此之外，单极变换技术在控制系统中可与数字化管理平台相结合，以实现实时监测以及动态调节。在服务器群突发扩容或者计算任务出现激增情况时，借助多点对电压以及电流参数展开采集操作，并运用智能化算法予以快速校正，如此能够让供电维持连续性与均衡性。该机制不但为数据中心的能耗优化提供了可操作的技术路径，也为机架级、模块级供电的灵活部署创造条件。

3.3 新能源与 5G 基站融合电源中的应用

在 5G 基站与新能源融合电源的设计里，单极变换技术的应用关键在于化解高频通信设备稳定性同可再生能源波动之间的矛盾。单极变换技术凭借快速电压调节与电流分配

机制，让光伏风能这类受环境条件影响输出功率波动大电压曲线有不规则起伏的新能源能够平稳接入直流母线，防止因能量波动造成基站射频模块和信号处理单元运行不稳定。

在高功率密度需求下，这项技术通过改进开关频率以及磁性器结构来减小传输能量的路径，借此提升能量转化率且降低整体系统的损耗。在基站部署规模不断扩大，功耗持续攀升的状况下，这种特性让其能够维持高效供电以此减轻散热方面的压力，确保系统在复杂环境中得以持续运行。不仅如此，单极变换技术结合新能源储能单元，能够达成对电池组双向能量流的控制，在负载处于低谷阶段时把富余能量储存起来，于高峰阶段将储存的能量释放，以此保障基站全天候稳定运行。在 5G 基站对于低时延以及高可靠性有需求的情况下，单极变换技术借助数字化控制平台能够达成毫秒级的动态响应，电源系统在应对瞬态负载突增时，借助对输入侧和输出侧参数展开实时采集以及快速调整的操作，能够维持母线电压稳定。这一举措可降低对功率器件的冲击，进而延长电源设备储能模块的使用寿命。在大规模分布式基站的建设与运维场景，这一特征尤其适用。

3.4 应急通信与移动通信电源中的应用

在移动通信电源以及应急通信的设计中，单极变换技术可有效对能量传输路径予以简化，让电源系统的快速响应能力得以提升。在突发环境里应急通信系统常遭遇电力供给不稳定的状况，单极变换技术让电源装置于启动和切换进程中拥有较高的效率与稳定性，借助减少能量在转换环节的损耗，以此确保通信设备能够在短时间内投入运行。

在负载波动频繁的条件下，移动通信电源设计中的单极变换技术不仅能够维持输出电压的平稳，还提升了电压调节的灵活性。单极变换技术凭借单一环节达成电压的升降与稳定，降低了系统的复杂性与故障率。在电源散热与电磁兼容性上，该技术的表现极为突出，能够借助优化电路拓扑这一方式，有效减少高频损耗与干扰。在移动通信电源持续供电以及应急通信电源快速部署方面，单极变换技术凭借这些特性已然成为重要的设计方向^[3]。

4 关键技术问题与解决策略

4.1 单极变换技术在通信电源中面临的电磁兼容与滤波问题

在通信电源设计领域里单极变换技术凭借拓扑结构紧凑，能量传输效率高的特点被广泛运用，然而在实际运行阶段电磁兼容性以及滤波问题一直都是限制其性能提升的关键要素。在开关器件高频动作的情况下，单极变换电路会产生较强的电磁干扰信号，要是这种信号未能得到有效抑制，就非常容易对周边通信设备产生耦合干扰，致使信号出现畸变或者误码率升高。此外，供电质量波动会因电源本身输出电压与电流叠加的高频纹波造成，这对敏感负载设备的稳定运行形成潜在威胁。

针对上述问题在电路拓扑层面展开优化工作尤为关键。

首先，通过对开关节点电压变化率以及电流上升率予以降低，来有效削弱电磁干扰源。如，使用软开关技术来将瞬态冲击电流降低，从根源之处对高频干扰的幅值予以控制。其次，在设计滤波环节，需要依照通信电源对于动态响应的要求对输入端滤波器以及输出端滤波器进行合理地配置。在输入侧多级 LC 滤波结构可供选用，以此对传导干扰加以抑制，而输出侧在满足快速调节这一条件的基础上还要对滤波深度予以兼顾，以减小输出纹波的幅度。再者，单极变换电源的电磁兼容性提升方面，屏蔽与接地技术同样有着重要作用，采用金属屏蔽措施于关键电路区域，能够将辐射干扰路径阻断。

4.2 高功率密度条件下的散热与可靠性设计

单极变换技术应用于通信电源时，系统设计的核心影响因素是高功率密度。随着集成功率水平在单位体积内的提升，器件发热量明显增大。要是散热机制不够完善，会使得器件结温过高进而加速材料老化，还会缩短系统寿命。如何在有限空间里达成高效散热以及可靠性设计，成为此类电源研发的关键问题。

在散热路径的优化工作当中，对于热源分布均衡化设计应当予以优先考量，可借助对功率器件布局以及电路板走线进行调整这一方式，实现局部区域热堆积情况的降低。常用散热措施是在高发热元件下方安置金属基板或者热管结构，目的是提高热流传导效率，利用高导热界面材料降低器件与散热结构之间的热阻，以此达成热量的快速传递。在大功率模块下为解决长时间高负荷工况引发的温升问题，还能够将液冷或者喷雾冷却加以结合运用，在可靠性设计方面，需将散热与器件的电气应力控制相结合。此外，提升系统在频繁开关操作下的稳定性，需选择高耐温高热循环寿命的半导体与封装材料，采用多物理场仿真手段对电热耦合效应预先评估，了解极端条件下的应力分布，以此为结构优化提供依据。

4.3 模块化并联运行时的动态响应与稳定性控制

在通信电源系统中模块化的并联运行能够极大地提升

功率扩展能力以及冗余设计水平，然而在动态响应和稳定性控制领域，却面临着巨大的技术挑战。在负载突变或者输入出现扰动的情况下，并联模块之间电压电流分配不均衡的问题会造成系统瞬态响应出现延迟现象，甚至可能引发振荡情况或者导致环路失稳。在控制策略层面要建立高精度的电压调节与电流共享机制，以此来优化动态性能保证各模块于不同工作状态时输出的功率能够协调一致。在控制回路设计领域，需运用多环路协同控制架构，把电流环和电压环予以分层耦合处理，模块间负载平衡依靠电流环快速响应模块输出的瞬态变化来维持，而电压环负责整体输出稳定性以及负载调节。此外，引入前馈补偿与相位优化的方式，来有效抑制系统振荡。对于并联数量较多的模块需考虑控制信号传输延迟和功率器件动态特性的差异，使用分布式数字控制或高速通信接口，以同步不同模块间的信息，以此减小响应时间差异并提高系统抗扰能力。

5 结语

总而言之，单极变换技术的应用有效提升了通信电源的系统性能，为应急通信和移动通信提供了高效、可靠的电力保障，在复杂负载与高功率密度条件下，针对电磁兼容模块化并联以及散热管理实施优化策略能够达成电源的稳定运行。今后，结合数字控制与多物理场仿真技术的设计方法，将进一步增强单极变换技术在通信电源中的实用性与应用广度。

参考文献

- [1] 黄振威.基于单级变换器的动态无线电能传输技术的研究[D].华南理工大学,2023.
- [2] 马凯,李振东.单极变换技术在通信电源设计中的应用研究[J].通信电源技术,2024,41(13):91-93.
- [3] 王静怡,王盼,袁雷,等.单极倍频与单极性调制策略对比及特性分析[J].电子器件,2023,46(5):1364-1371.
- [4] 刘文建;吴硕.浅析通信电源技术的多元化发展及标准研究要点[J].中国新通信,2024(01): 4-6.

Research on the application of Internet of Things technology in intelligent logistics

Ziyuan Liao

Guangdong Institute of Technology, Zhaoqing, Guangdong, 526000, China

Abstract

This paper focuses on the practical application, practical challenges and future development direction of the Internet of Things (IoT) technology in the field of smart logistics. First, the study defines the basic concepts of IoT technology and smart logistics, and then deeply analyzes the specific application forms of IoT technology in smart logistics scenarios, including intelligent warehousing, intelligent picking, intelligent packaging and intelligent distribution. On this basis, the paper further discusses the core problems faced in the integration of IoT technology into smart logistics. Finally, the paper looks forward to the future development prospect of IoT technology in the field of smart logistics. Practical research has confirmed that the in-depth application of IoT technology has effectively improved the efficiency of logistics operations and the transparency of the whole process, and provided key technical support for the sustainable development of the smart logistics industry.

Keywords

Internet of Things technology; intelligent logistics; intelligent picking; intelligent packaging; intelligent distribution

物联网技术在智慧物流中的应用研究

廖梓渊

广东理工学院，中国·广东肇庆 526000

摘要

本文聚焦物联网技术在智慧物流领域的实践应用、现实挑战与未来发展方向。研究首先对物联网技术与智慧物流的基础概念进行界定，随后深入剖析物联网技术在智慧物流场景中的具体落地形式，涵盖智能仓储、智能拣选、智能打包、智能配送等。在此基础上，文章进一步探讨了物联网技术融入智慧物流过程中面临的核心难题。最后，文章对物联网技术在智慧物流领域的未来发展前景展开展望。实践研究证实，物联网技术的深度应用有效提升了物流运作效率与全流程透明度，为智慧物流行业的持续发展提供了关键技术支撑。

关键词

物联网技术；智慧物流；智能拣选；智能打包；智能配送

1 引言

随着信息技术迭代，物联网技术正深度重塑传统物流行业，而智慧物流作为现代物流升级核心方向，通过融合先进信息技术与智能硬件实现全流程自动化、智能化与高效协同，物联网技术则是其关键支撑并为行业转型注入新活力^[1]。本研究旨在系统梳理分析物联网技术在智慧物流领域的应用现状、现存挑战及未来走向，深入探究其在智能仓储、拣选、打包、配送等场景的落地应用，阐释其对提升物流效率与流程透明度的关键价值，同时剖析应用中的现实难题，以期为相关学术研究与产业实践提供参考思路^[2]。

2 物联网技术与智慧物流概述

物联网技术是借传感装置、按预设协议连接物品与互联网，实现物品智能管理的网络技术，具感知、传输、处理特性，分感知层、网络层、应用层且覆盖数据全流程；智慧物流作为现代物流高级阶段，依托物联网等技术实现物流系统智能高效运作^[3]。

智慧物流是将条形码、射频识别、传感器、GPS 等物联网技术与信息处理、网络通信平台融合，应用于物流运输、仓储、配送等核心环节，以实现货物全流程自动化运作与效率优化，达成提升服务、降本降耗目标的现代化模式，具备实时数据采集分析、自动化决策执行、全程可视化追踪等特征，在效率、准确性及客户体验上优势显著^[4]。

物联网与智慧物流深度融合正颠覆物流行业，依托物联网实现物流全流程关键环节无缝衔接与实时数据互通，显著提升系统运转效率与响应速度，不仅推动物流企业运营模

【作者简介】廖梓渊（1995-），男，中国广东梅州人；硕士，助教，从事数据挖掘，大数据研究。

式根本转变，还为客户带来更透明便捷的服务，优化行业生态。智慧物流总体技术架构图如图 1 所示。

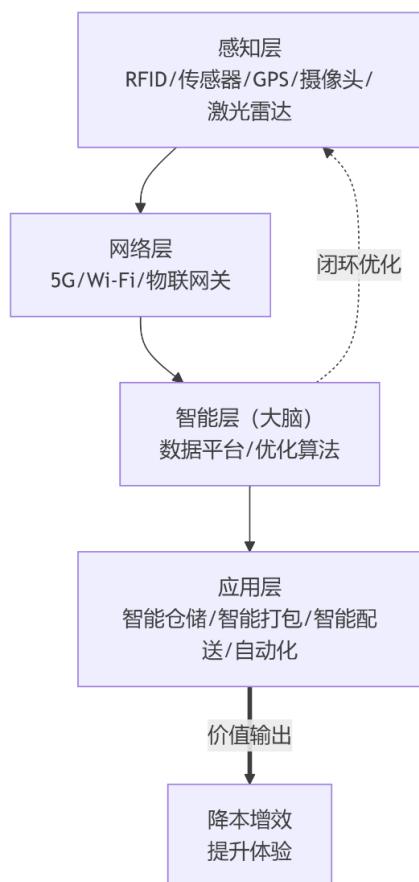


图 1 智慧物流总体技术架构图

3 物联网技术在智慧物流中的具体应用

3.1 智能仓储管理系统

在智能仓储管理方面，物联网技术助力仓库从“人找货”到“算法找货”的变革。物联网技术通过RFID标签、传感器网络等手段，实现了对仓储货物的动态货位管理。系统会根据商品的物流属性、销售趋势和打包组合等数据，自动优化货物的存放位置。每个货架都配备了物联网条形码

标签，拣货员通过手持终端扫描后，系统会自动规划最优拣货路径，大幅提高了仓储作业效率。基于物联网采集的实时数据，系统采用智能路径优化算法，能够自动规划最短拣货路径。实践表明，采用物联网技术的智能仓储系统可以实现12个订单一次性完成拣选，完全避免了走回头路的情况。某大型物流企业的数据显示，应用该系统后，拣货员每日行走步数从4万步降至3万步，整体效率提升了25%。此外，物联网系统通过分析历史销售数据，还能够智能预测商品之间的关联性。例如，经常被同时购买的洗发水和护发素会被就近存放，这种基于物联网数据分析的智能布局可显著减少拣货时间，提高仓储作业效率。智能仓储系统架构图如图2.1所示。

3.2 AR 增强现实智能拣选系统

在智能拣选方面，物流企业引入AR增强现实技术辅助拣选，通过AR眼镜实现虚拟信息与现实场景叠加，提供视觉导航、商品信息提示和操作指引。首先，系统会生成虚拟光标与地面导航箭头，引导拣货员移动；接着，商品信息以文字形式直接显示，替代传统条码识别；最后，配备语音助手（如“物流小助手Miss蔡”）实时提示任务步骤。AR增强现实拣选系统无需记忆货架位置或商品信息，完全依赖系统指引，有利于降低认知负荷；在无经验情况下，新手拣货员仅用52秒完成拣选任务，且零差错，大大提高了拣选的效率与准确性；通过游戏化机制，如任务奖励、称号授予等人性化设计有利于提升拣货员的工作积极性。

3.3 三维装箱优化智能打包系统

智能打包是物联网技术在物流领域实现精准装箱的另一重要应用。三维装箱优化算法通过物联网设备实时采集商品的尺寸、重量等数据，结合易碎性、防污染等特殊需求，系统会自动匹配最优的箱型和装箱方案。相比传统人工装箱，物联网赋能的智能打包系统可以减少15%的空间浪费，同时有效避免商品在运输过程中的挤压损坏。统计数据显示，采用物联网智能打包技术后，单个包裹可节省0.12元配送费和0.16元耗材费。以一个日均处理10万单的仓库计算，年节省费用超过1000万元。同时，包装材料的使用量减少了5%，实现了经济效益和环保效益的双赢。

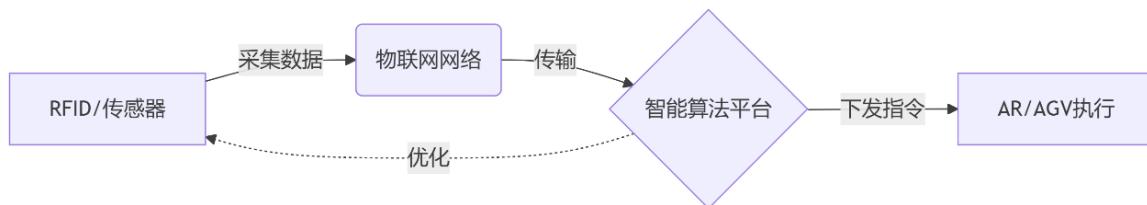


图 2.1 智能仓储系统架构图

3.4 智能配送路径规划与调度系统

在智能配送方面，物联网技术通过智能三段码分拣系统、动态路径规划系统以及实时运力调配机制去优化“最后一公里”。智能三段码分拣系统基于物联网构建的百亿级地

址库，系统能够自动生成“省-市-区县”三段码，并直接对应到具体的快递员编号。实际应用表明，该技术使分拣时间从原来的7-8秒/件大幅降至1-2秒/件，同时分拣错误率显著降低。同时，动态路径规划系统实时采集交通路况、

小区禁行规则、天气情况等多维数据，为每位快递员规划最优配送路线。例如，对于车辆禁入的小区，系统会自动调整为步行路线；在高速路段则会优化行车路径，确保配送效率最大化。此外，实时运力调配机制通过物联网设备实时监控各网点的包裹量和突发情况，如暴雨、暴风雪等恶劣天气，系统能够动态调整快递员数量和配送范围。某物流企业的运营数据显示，该技术使准时送达率提升了 15%，客户满意度显著提高。智能配送路径规划与调度系统架构图如图 2.4 所示。

3.5 物流自动化机器人协同作业系统

在物流自动化和智能化方面，物联网技术通过 AGV 自动引导机器人、机械臂分拣系统及末端配送机器人等技术在效率、准确性与人性化方面显著优于传统物流。AGV 机器人通过中控系统统一调度，实现多机协同、路径规划与拥堵避免，可用于货架搬运与场内物流协调。AGV 机器人按任务需求扫描货架条码，自主导航至目标站台（白框为出站口，蓝框为入站口）；同时，AGV 机器人通过激光雷达感知环境，避让动态障碍物；此外，AGV 还具备自动充电功能，续航 6-8 小时，低电量时自主返回充电站。AGV 机器人有利于减轻人工搬运负担，提升场内物流效率，支持大规模部署，如 100 台以上的集群作业。智能机械臂分拣系统可实现存储、拣选与分拨全自动化。首先，智能机械臂分拣系统利用圆柱体暂存库这一核心组件将货品入库后暂存于此，机械臂根据订单需求抓取对应货箱；接着，再利用吸盘机械臂这一核心组件，通过真空吸附原理抓取商品，按订单需求分拣至流水线；最后，利用末端分拨机械臂这一核心组件进行扫描条码识别订单箱，自动投递对应商品。智能机械臂分拣系统完全替代人工作业，覆盖库内 80% 以上流程，高效精准，显著降低差错率与人力成本。末端配送机器人可实现最后一公里无人配送。末端配送机器人通过多传感器融合，例如激光雷达、摄像头、超声波传感器等模拟“眼耳”功能；通过智能算法，使其具备环境建模、路径规划、动态障碍物识别与避让能力。末端配送机器人通过物联网与电梯系统联动，自动呼叫并进入电梯，实现自主乘梯；同时，末端配送机器人通过室内外导航去适应狭窄空间与复杂环境，如避让婴儿车、行人等障碍物；此外，末端配送机器人通过无接触交付的方式实现收件人扫码取件，支持灵活时间配送，提升配送时效性与便利性，尤其适用于办公区、社区等场景。

4 物联网技术在智慧物流中应用的挑战

物联网技术在智慧物流应用中虽有优势，但落地推广仍面临现实挑战，数据安全与隐私防护是核心问题之一。因物联网系统需大规模采集传输数据，物流核心信息及客户隐私存泄露、违规使用风险，故构建高可靠数据加密机制与精

细化访问控制体系，是保障物联网物流系统安全稳定运行的关键^[5]。

此外，技术标准不统一、系统互操作性不足，制约物联网向物流领域深度渗透。当前物联网设备厂商通信协议与数据格式差异大，导致物流系统难无缝对接、数据互通，增加集成复杂度与成本，影响物联网方案规模化落地，故制定统一行业标准与开放系统接口是破局关键。

5 物联网技术在智慧物流中的未来发展趋势

展望未来，物联网技术在智慧物流领域的应用将多维度深化，呈现两大趋势：一是 5G 技术全面普及为物联网物流筑牢网络底座，其高带宽、低时延、大连接特性支持海量设备同时接入，助力远程操控无人仓储分拣、运输全程高清可视化等复杂场景落地，进一步拓宽物联网应用边界并加深核心环节渗透；二是人工智能与物联网深度协同成为智慧物流升级关键，将 AI 算法嵌入物联网架构可提升数据解析与决策智能水平，如通过机器学习精准预测物流需求、AI 调度系统优化路径与运力、异常检测算法识别仓储运输问题，赋予物流系统更强自适应与动态优化能力，进而提升运作效率与服务品质^[6]。

6 结论

物联网技术正深度变革智慧物流运作模式，既已渗透至智能仓储、拣选等全链条环节并显著提升效益，也仍面临数据安全、技术标准、成本效益等需行业协同破解的挑战；未来随边缘计算、5G 等技术融合发展，其应用将更广泛深入，物流企业需借技术创新推动智慧物流升级，政府与行业组织也应加强标准制定与政策引导，为其健康应用营造良好环境。

参考文献

- [1] 吴衍.人工智能与物联网融合下的智慧物流系统对绿色经济的影响[J].中国航务周刊,2025,(24):68-70.
- [2] 王子瑜.基于物联网技术的智慧物流系统构建及其对供应链效率的影响研究[J].中国储运,2025,(04):74-75.
- [3] 李珊珊,向少华,蒲富贵,等.基于物联网与大数据分析的智慧物流平台设计与开发[J].电子元器件与信息技术,2024,8(10):129-132.
- [4] Y. D .Exploring the scale application of internet of things in the field of smart logistics[J].IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association,2018,30(7):414-418.
- [5] 吕沙.基于物联网技术的智慧物流供应链系统设计[J].集成电路应用,2024,41(10):150-151.
- [6] Roman G .Intelligent logistics systems in E-commerce and transportation.[J].Mathematical biosciences and engineering : MBE,2023,20(2):2348-2363.

Discussion on the construction of intelligent operation and maintenance platform for broadcasting transmission station

Dayu He

Xinjiang Radio and Television Bureau 2041, Kashi, Xinjiang, 843800, China

Abstract

In line with the National Radio and Television Administration's 234 operational positioning, this study establishes a smart operation and maintenance system for radio and television transmission to overcome traditional operational challenges. The intelligent maintenance framework for wireless medium-wave transmission stations prioritizes cost reduction and safety assurance. By integrating cutting-edge technologies including artificial intelligence, IoT, and big data analytics, it drives innovation in transmission management. Amid rapid technological advancements, this initiative seeks to harness AI empowerment and new productivity models. The ultimate goal is to transform station operations from reactive emergency response to proactive early warning systems, intelligent decision-making processes, and predictive diagnostics – ultimately enhancing broadcast quality and service excellence.

Keywords

intelligent operation and maintenance; top-level design; artificial intelligence; big data application

广播传输台站智慧运维平台建设构想探讨

何大宇

新疆广播电视台 2041 台，中国·新疆 喀什 843800

摘要

以国家广电总局二三四工作定位，通过构建广播电视台智慧运维体系，破解广播电视台传统运维模式和技术瓶颈，无线中波发射台广播传输智慧运维建设主要以“降本增效、保障安全”为核心，旨在通过人工智能、物联网技术、大数据运用等先进技术实现新一轮广播电视台传统运维模式升级，在信息技术飞速发展的当下，力争在激烈的技术革新中寻求科技赋能和新质生产力，最终目标是推动无线广播电视台传统运维从“被动抢修”向“主动预警”“智能决策”和“智能诊断”等新模式跃进，提升广播传输和优质服务。

关键词

智慧运维；顶层设计；人工智能；大数据应用

1 引言

习近平总书记在党的二十大报告中指出：“加快全媒体传播体系建设，塑造主流舆论新格局”，在国家的战略要求下，在信息技术飞速发展的当下，把准国家广播总局二三四工作定位和智慧广电建设目标，广播传输台站面临着新的机遇与挑战。传统的运维模式已难以满足日益增长的业务需求，实现智慧运维建设成为广播传输台站发展的必然趋势。智慧运维通过融合物联网、大数据、人工智能等先进技术，能够实现台站设备的全面监控、智能诊断与高效管理，有效提升广播传输的安全性、稳定性和高效性，为广大听众提供更优质的广播服务。

【作者简介】何大宇（1980—），男，中国四川南部人，本科，高级工程师，从事无线电波传输和智慧运维播出管理研究。

2 现状分析

2.1 无线转播台站传统运维模式的不足

人工依赖程度高，日常运维工作如台站检修维护、值班巡检、故障排查等主要依靠人工完成，效率较低且易受人为因素影响。

播出设备面临的压力，传统运维模式下，播出设备智能化程度不高，输出接口、通信协议、数据采集存储标准不统一，数据共享、智能运维上无法有效兼容。

实时监控能力有限，无法对台站内众多播出系统设备进行全方位、实时的状态监控采集。

数据管理与分析困难：运维过程中产生的大量数据分散存储，缺乏有效的整合与分析手段，难以从这些数据中挖掘出有价值的信息，为台站的优化决策提供支持。

2.2 当前面临的挑战

广播转播运维模式的单一性和智慧广电建设目标的必要性之间的矛盾，其二是人民日益增长的文化需求质量和体

验感受与数字业务增长、设备老化的矛盾；随着广播业务的不断拓展，对传输质量、收听感受和稳定性的要求越来越高，如何在有限的资源下保障播出系统设备的正常运行和业务的顺利开展是一大技术挑战。

新技术应用的适应问题，物联网、大数据、人工智能等新技术在广播传输领域的应用逐渐深入，严格来说还在起步摸索阶段，在新技术的引入和应用过程中可能面临技术难题和管理挑战，需加强人员培训和技术深度融合。

安全保障压力增大，广播传输涉及信息传播安全，面临网络攻击、信号干扰等安全威胁。在智慧运维建设过程中，如何确保数据安全和系统稳定运行，防止信息泄露和恶意攻击，习近平总书记多次强调没有网络安全就没有国家安全，因此传统的无线传输台站应对网络安全基本上是力不从心。

3 智慧运维建设目标

实现转播台站播出设备的智能监控与管理，通过一系列的传感器和智能监测设备，对台站的发射机、天馈系统、动力环境等关键设备和环境参数进行实时、全面的监控，实现设备状态的可视化展示，及时发现设备故障，并能够自动进行故障诊断和预警。

提升故障处理效率，利用大数据分析和人工智能技术，对设备运行数据和故障历史数据进行深度挖掘和分析，建立故障预测模型和智能诊断算法，实现故障的快速定位和精准处理，缩短故障处理时间，降低停播率。

优化运维管理流程，构建一体化的智慧运维管理平台，整合台站运维的各个环节，实现运维任务的自动化调度、提高运维管理的规范化、科学化水平，降低运维成本。

保障广播传输安全，加强网络安全防护和数据安全管理，建立完善的安全保障体系，确保广播传输过程中信息的保密性、完整性和可用性。

4 智慧运维建设方案

4.1 物联网技术应用

设备数据采集，在广播传输台站的各设备上安装传感器，实时采集设备的运行参数，包括设备的工作状态、性能指标、能耗等数据，并通过物联网传输至数据中心。

设备远程控制，借助物联网技术，实现对台站设备、频率切换、主备发射机切换等操作，运维人员可以在远程监控中心通过电脑或移动终端对设备进行实时控制。

实行实时监测，当环境参数超出正常范围时，自动启动相应的调控设备，如空调、通风、消防等，确保机房环境稳定。

4.2 大数据分析与处理

数据存储与管理，建立大数据存储平台，对台站运维过程中产生的海量数据进行集中存储和管理，包括设备运行数据、故障数据、环境数据、运维记录等，确保数据的完整性、准确性和安全性。

数据分析与挖掘，运用大数据分析技术，对存储的数据进行深入分析和挖掘，提取有价值的信息，为设备优化升级和台站的管理决策提供数据支持。

故障预测与预警，基于大数据分析结果，建立设备故障预测模型，通过对设备运行数据的实时监测和分析，提前预测设备可能出现的故障，提醒运维人员采取相应的预防措施，降低故障发生的概率。

4.3 人工智能技术应用

智能诊断，利用人工智能的机器学习和深度学习算法，对设备故障数据进行训练和学习，建立智能诊断模型，准确判断故障原因和故障部位，提高故障诊断的准确性和效率。

智能决策，根据设备的运行状态、故障预测结果和运维经验，人工智能系统可以为运维人员提供智能决策建议，辅助运维人员做出科学合理的决策。

智能巡检，开发智能巡检机器人或无人机，利用人工智能的图像识别、语音识别等技术，实现对台站设备和设施的自动巡检，代替人工重复性、危险性较高的巡检工作，提高巡检的效率和质量。

4.4 智慧运维管理平台搭建

平台架构设计，采用分层分布式架构设计，包括数据采集层、数据传输层、数据处理层、应用层和用户界面层。数据采集层负责采集台站各类设备和环境的数据；数据传输层通过物联网、有线网络或无线网络将采集到的数据传输至数据中心；数据处理层对数据进行存储、分析和挖掘；应用层提供各种运维管理功能模块；用户界面层为运维人员和管理人员提供直观、便捷的操作界面。

平台功能模块开发：①设备管理模块：实现对台站设备的全生命周期管理，包括设备档案管理、设备维护计划制定、设备维修记录查询、设备报废管理等功能。②故障管理模块：对设备故障进行实时监测、报警、诊断和处理，记录故障处理过程和结果，生成故障报告和统计分析报表。③运维调度模块：根据设备的运行状态和运维任务需求，自动生成运维调度计划，合理安排运维人员和资源，实现运维任务的高效执行。④安全管理模块：加强台站的网络安全防护和数据安全管理，包括用户权限、数据加密、网络入侵检测、安全漏洞扫描等功能。⑤报表统计模块：根据运维数据生成各种报表和统计图表，如设备运行报表、故障统计报表、运维工作量报表等，为台站的管理决策提供数据依据。

平台集成与接口设计，智慧运维管理平台应具备良好的开放性和兼容性，能够与台站内现有的其他系统，如播出控制、监测、办公自动化、数据共享等等系统和通信接口协议等，实现数据的共享和交互。便于未来与上级管理部门的平台或其他外部系统进行对接。

5 智慧运维平台建设实施步骤

5.1 第一阶段：智慧平台顶层规划与架构设计

1、行业顶层牵头成立智慧运维建设项目团队，负责智

慧建设平台项目的整体规划、设计和实施，明确架构顶层设计。

2、对广播传输台站的现状进行全面调研，包括设备设施、运维管理流程、人员技术水平等方面，明确智慧运维建设的需求和目标。

3、根据调研结果，制定详细的智慧运维建设方案，制定详实的五年实施推进方案，实施进度安排、预算估算等内容。

4、组织专家对建设方案进行论证和评审，确保方案的科学性、合理性和可行性。

5.2 第二阶段：平台建设设备与系统采购

1、根据建设方案，按省或行业顶层分区域进行设备和系统的采购工作，包括传感器、智能监测设备、物联网传输设备、大数据存储设备、人工智能服务器、智慧运维管理平台软件等。

2、在采购过程中，严格按照政府采购法律法规和相关规定，进行公开招标或竞争性谈判，选择具有良好信誉和丰富经验的正规高科技公司供应商，确保设备和系统的质量和性能。

3、与供应商签订详细的合同，明确设备和系统的技术参数、交货时间、售后服务等条款，保障项目的顺利实施。

5.3 第三阶段：智慧平台安装与调试

1、按照设备安装手册和施工规范，进行传感器、智能监测设备等硬件设备的安装工作，确保设备安装位置准确、牢固，布线整齐、规范。

2、完成硬件设备安装后，进行物联网传输网络的搭建和调试工作，确保数据能够稳定、准确地传输至数据中心。

3、对采购的智慧运维管理平台软件进行安装和配置，根据台站的实际需求进行定制化开发和功能测试，确保平台的各项功能正常运行。

4、将硬件设备和软件系统进行集成，进行整体联调工作，对系统的性能、稳定性、兼容性等方面进行全面测试，及时发现和解决问题。

5.4 第四阶段：运维人员培训与平台试运行

1、组织台站工作人员参加智慧运维系统的操作培训，包括设备的监控与管理、故障诊断与处理、运维调度操作、平台功能使用等方面的培训，使工作人员熟悉系统的操作流程和功能特点，提高工作人员的技术水平和业务能力。

2、在培训完成后，进行智慧运维系统的试运行工作，试运行时间不少于 6 个月。在试运行期间，对系统的各项功能进行实际应用和检验，收集工作人员和用户的反馈意见，及时对系统进行优化和完善。

5.5 第五阶段：智慧平台建设验收与正式运行

1、试运行结束后，组织相关部门、设备供货商、智慧运维架构设计团队和行业专家对智慧运维系统进行三方验收，验收内容包括系统的功能、性能指标、稳定性、安全性和后期售后维保等方面。

2、根据验收意见，对系统存在的问题进行整改和完善，确保系统满足验收要求。

3、验收合格后，智慧运维系统正式投入运行，建立完善的运维管理制度和流程，加强对系统的日常维护和管理，为广播传输台站的发展提供有力支持。

5.6 智慧运维平台建设预期效果

1、提高运维效率，通过设备的智能监控和自动化运维管理，减少人工巡检和操作的工作量，缩短故障处理时间指标（顶层设计标注必要技术标准要求）。

2、降低设备故障率，利用大数据分析和人工智能技术进行故障预测和预警，降低设备故障率，延长设备的平均无故障运行时间指标。

3、优化资源配置，根据设备的运行状态和运维需求，实现运维资源的合理调度和优化配置以及资源共享，降低运维成本和运维人员成本指标。

4、提升服务质量，为听众提供更优质的广播服务，广大听众可实现订单式选择收听感受，提高听众的满意度和忠诚度。

5、促进台站和数据中心发展，智慧运维建设有助于广播传输台站适应信息技术发展的趋势，提升台站的管理水平和技术实力，为台站的可持续发展奠定坚实的基础。

6 结论

广播传输台站智慧运维平台建设是一项系统性工程，具有重要战略意义，通过应用物联网、大数据、人工智能等先进技术，搭建智慧运维管理平台，能够有效解决传统运维模式存在的问题，提升台站的运维管理水平和广播传输质量。在实施过程中，需要充分考虑台站的实际情况，合理规划建设方案，加强项目管理和人员培训，确保智慧运维建设项目的顺利实施，实现广播传输台站的智能化、规范化、高效化发展，为广电系统二三四定位属性进行科技赋能。

参考文献

- [1] 武文霞. 广播电视微波传输系统的信号抗干扰技术研究 [J]. 信息记录材料, 2025, 26 (09): 211-213+230.
- [2] 马泽英. 基于5G技术的超高清广播电视信号实时传输策略与实现 [J]. 中国宽带, 2025, 21 (10): 100-102.
- [3] 杨继文. 广播电视无线覆盖信号源传输方案优化设计 [J]. 电视技术, 2025, 49 (08): 136-138.

Research on Learning Incentive Mechanism for Students Majoring in Information Security

Zhihong Zhang Yu Fu Guoheng Wei

Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei, 430033, China

Abstract

The rapid development of information technology has brought about corresponding security problems, and the learning effect of students majoring in information security has a key impact on the development of the industry. Based on incentive theory, through investigation, this paper explores the learning status of students majoring in information security and finds that there are problems such as lack of internal interest, weak connection of career planning, lack of pressure relief mechanism, narrow coverage of incentives, and disconnection between teaching and practice. Accordingly, a five-in-one incentive system including goals, emotions, materials, spirits, and role models is constructed, aiming to achieve the core goals of stimulating interest, clarifying plans, precise incentives, and practical implementation. The empirical results show that after the application of this mechanism, students' learning enthusiasm has been significantly improved, indicating that the system has a good application effect among students majoring in information security.

Keywords

Incentive Theory; Learning Incentive Mechanism; Five-in-One Incentive System; Information Security; Empirical Research

信息安全专业学员学习激励机制研究

张志红 付钰 魏国珩

海军工程大学，中国·湖北武汉 430033

摘要

信息技术快速发展带来了相对应的安全问题，信息安全专业学员学习效果对行业发展具有关键影响。以激励理论为基础，通过调查，探究信息安全专业学员学习现状，发现其存在内在兴趣匮乏、职业规划衔接薄弱、压力疏导机制缺失、激励覆盖狭窄、教学实践脱节等问题。据此，构建目标、情感、物质、精神、榜样五位一体激励体系，旨在达成兴趣激发、规划明确、激励精准、实践落地核心目标。实证结果显示，该机制应用后，学员学习积极性显著提升，表明该体系在信息安全专业学员中具备良好应用效果。

关键词

激励理论；学习激励机制；五位一体激励体系；信息安全；实证研究

1 引言

信息安全专业学员的学习成效，直接关系到未来信息安全领域的人才质量与行业发展。然而，信息安全专业课程基础性和理论性强，具有较强的实践性，内容枯燥，易导致学员学习积极性不高。大学教育更加关注构建大学生的自学能力^[1]，从而使学生能够自我驱动学习^[2]。赵云辉^[3]提出注重自主学习意识培养等激励方法；曹翔^[4]提炼出学习动力激励的一般性原则，并优化现有学习激励机制；但目前缺少专门针对信息安全专业学员的学习激励机制。因此，本研究对于提升信息安全专业学员学习积极性、提高教学质量具有重要意义。

2 激励理论概述

2.1 马斯洛的需求层次理论

将人类需求从低到高分为生理需求、安全需求、社交

需求、尊重需求和自我实现需求五个层次。在学生学习激励中，只有当较低层次的需求得到满足后，较高层次的需求才会成为激励因素。例如，学校应首先确保学生的基本生活条件，满足学生的生理和安全需求；再通过营造良好的学习氛围、提供情感支持等方式满足学生的社交和尊重需求；最终，通过设置具有挑战性的学习目标和任务，激发学生的自我实现需求，促使他们积极投入到学习中。

2.2 双因素理论

由赫茨伯格提出，认为影响人们工作满意度和激励的因素可以分为两类，即保健因素和激励因素^[5]。在学生学习情境中，保健因素如学校的学习环境、教学设施、师生关系等，这些因素如果处理不当会导致学生不满，但即使处理得很好也未必能极大地激发学生的学习积极性；而激励因素如成就感、认可、学习内容的趣味性等，能够真正激励学生努力学习。

2.3 自我决定理论

该理论强调个体的内在动机和自主性对行为的重要性。

它认为人的行为动机可以分为内在动机和外在动机，内在动机是个体因对活动本身的兴趣和满足感而产生的动机，外在动机则是由外部奖励或压力引发的动机。在学习激励中，应注重培养学生的内在学习动机，让学生感受到学习过程中的乐趣和成就感；同时，合理运用外部奖励，如表扬、奖学金等，增强学生的外在学习动机。

2.4 期望理论

由弗鲁姆提出，个体的行为动机取决于期望值、工具性和效价三个因素的乘积^[6]。在学生学习中，期望值是指学生对自己能够完成学习任务并取得好成绩的信念；工具性是指学生认为完成学习任务能够带来某种结果的信念；效价则是学生对这些结果的重视程度。因此，教师应帮助学生树立合理的期望，明确学习目标和结果之间的关系，并提高学生对学习结果的重视程度，从而激发学生的学习动机。

2.5 强化理论

由斯金纳提出，认为行为的结果会强化行为本身。在学习激励中，正强化是指当学生表现出期望的学习行为时，给予积极的反馈和奖励，以增强这种行为再次出现的可能性；负强化则是指通过消除不愉快的刺激来增强学生的学习行为。教师应根据学生的特点和需求，灵活运用正强化和负强化手段，塑造和巩固学生的学习行为。

3 信息安全专业学员学习激励机制的现状与问题

3.1 激励对内在兴趣的引导不足，动机驱动失衡

学员学习动力以工具性动机为主：半数以上因提升专业技能和综合素质、希望未来获得良好就业机会学习，仅三分之一源于对信息安全知识的浓厚兴趣。这反映出当前激励机制缺乏对内在兴趣的针对性引导。未通过实战项目、案例分享、兴趣社群等方式激发学员对专业本身的热爱，长期易导致学员因被动为就业学习产生疲劳感，影响学习持续性。

3.2 激励与职业规划的衔接薄弱，规划引导不足

仅极少数学员对未来职业规划非常清晰；且半数以上学员关注职业发展机会，但现有激励方式未充分覆盖该需求。这说明当前激励机制缺乏与职业规划的深度绑定，未针对不同年级的学员提供职业细分指导、实习资源对接、岗位能力匹配等激励措施，导致学员因规划模糊缺乏长期学习方向，难以将学习目标与职业目标关联，削弱激励效果。

3.3 激励对压力管理的支撑缺失，未缓解学习负担

学员认为学习压力非常大，主要通过听音乐、睡觉、运动等个人被动方式减压，且无数据显示学校提供官方减压激励。这表明当前激励机制未将压力疏导纳入体系，未针对专业难度高、学习压力大的特点，设计学业辅导补贴、压力管理讲座、同伴互助奖励等措施，容易导致学员因压力无法

有效缓解影响学习状态，甚至可能因高压降低对激励的敏感度。

3.4 激励措施覆盖面窄、针对性弱，未匹配核心需求

少数学员认为学校和教师在学习激励方面做得一般；且学员对激励的核心需求集中在物质奖励和职业发展机会，但现有激励未充分满足。物质激励覆盖面不足，仅聚焦成绩优异者，导致多数普通学员难以获得认可；职业激励落地性差，学员希望提供更多实习机会，但现有激励未明确企业合作实习、就业推荐的具体路径，仅停留在口头引导，缺乏实际支撑。

3.5 激励与教学实践的结合松散，未解决理论脱节问题

学员认为激励机制需改进实践教学方法，说明教学实践薄弱是影响激励效果的关键短板。当前激励机制未将学习激励与教学优化深度结合：未通过实践项目奖励、实战课程学分激励、企业导师合作授课补贴等方式，解决理论与实践脱节的问题，导致学员因所学知识无法应用降低学习热情，即使有物质奖励、职业机会，也因技能不达标难以参与，使激励流于形式。

4 基于激励理论的学习激励体系构建

针对上述存在的问题，从目标、情感、物质、精神、榜样五个角度，构建学习激励体系。

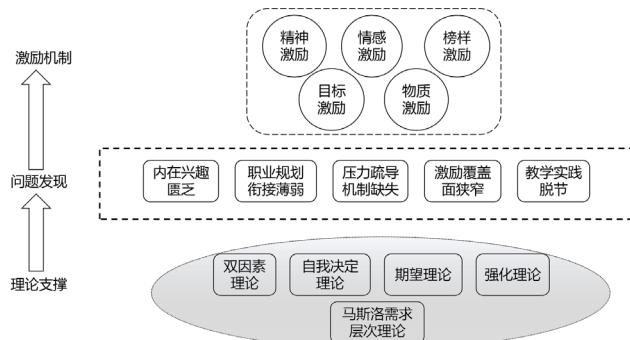


图 1 学习激励机制体系图

4.1 目标激励：锚定“学习 – 职业”双目标，解决规划模糊问题

分阶段学习目标拆解。制定阶梯式学习目标。大二，明确 3 个月掌握 2 项基础工具、完成 1 次校园网络安全基础排查的短期目标，目标达成纳入技能成长档案；大三，设定 1 学期完成 1 个行业场景实战项目、掌握 1 项进阶技能的中期目标，目标与课程考核挂钩；大四，确立考取 1 项行业认证、获得 1 次企业实习推荐的长期目标，目标达成作为优秀毕业生评选重要依据。

职业目标与学习强关联。针对学员关注职业发展机会的需求，将学习目标与职业岗位绑定：若学员目标岗位为网络安全工程师，则学习目标聚焦防火墙配置、入侵检测系统使用等核心技能；若目标为数据安全分析师，则重点设定数

据分类分级、AES 加密算法实践等任务；每学期开展 2 次职业目标匹配度评估，根据评估结果调整学习目标。

4.2 情感激励：营造“归属 – 支持”氛围，解决兴趣不足问题

兴趣社群情感联结。依托问卷中多数学员认可的浓厚学习氛围，按技能方向组建兴趣小组，开展情感化互动活动：每周 1 次小组问题分享会，鼓励学员分享学习中遇到的困难，同伴互助解决，增强被支持感；每学期 2 次兴趣主题活动，邀请学员分享感兴趣的安全案例，强化兴趣共鸣，提升内在学习动力；跨年级师徒结对，完成基础目标，双方均获得互

助积分，增强社群归属感。

压力疏导情感支持。针对问卷中学员学习压力大的问题，建立情感减压机制。每月开展 1 次学业压力管理心理健康讲座，提供线上心理咨询预约服务，学员参与可获得减压积分；对因压力导致学习滞后的学员，提供弹性目标调整，如延长目标完成时间，避免高压劝退，保障学习积极性。

4.3 物质激励：覆盖“基础 – 进阶 – 创新”层次，解决激励覆盖面窄问题

分层物质奖励设计。结合学员倾向物质奖励的需求，设置基础进阶创新三级物质激励：

表 1 分级物质奖励

奖励层级	针对人群	奖励内容	触发条件
基础	全体学员	专业书籍补贴、学习积分	完成阶段学习目标
进阶	技能提升学员	专项奖学金、认证考试补贴	完成进阶实战项目、考取行业认证
创新	能力突出学员	创新奖学金、企业实习机会	漏洞挖掘项目入选行业平台（如 CNVD）、竞赛获奖

物质奖励每月统计、学期末集中发放，发放名单在学校官网公示，确保公平性。

实践资源支持。实验室 24 小时开放，为实战项目提供设备支持，如高性能漏洞扫描设备，避免设备不足影响实践；为进阶项目组，如数据安全项目，提供数据样本采购补贴，确保项目顺利开展，呼应学员对实践教学的关注。

4.4 精神激励：强化“认可 – 成长”反馈，满足归属与胜任需求

多维度认可机制。学员完成阶段目标，发放技能达标证书，并公开表扬；实战项目获奖团队，推送项目成果故事，展示团队成员贡献，增强荣誉感；优秀项目推荐至行业平台，学员获得行业认可证书，提升职业荣誉感。

成长可视化反馈。为每位学员建立成长档案，记录目标完成度、项目贡献、工具掌握情况，每月生成成长雷达图；雷达图直观展示学员在工具使用、项目实践、理论知识等维度的进步，强化胜任感；每学期开展成长复盘会，肯定进步、明确改进方向，让学员感受到被关注、被重视。

4.5 榜样激励：搭建“校内 – 行业”榜样桥梁，明确学习方向

校内榜样示范。挖掘校内优秀学员，如创新层项目获得者，作为校内榜样；每学期举办榜样分享会，榜样分享学习方法、目标达成经验，为其他学员提供可借鉴的路径；设立榜样帮扶岗，榜样与学习滞后学员结对，提供学习指导，帮扶成效纳入榜样评优，形成榜样带动的良性循环。

行业榜样引领。对接学员对职业发展机会的需求，邀请行业专家作为行业榜样；每学期邀请企业安全部门工程师进校园，分享职业成长路径、行业前沿趋势；为优秀学员提

供行业榜样职业咨询机会，解答岗位能力要求、职业选择困惑等问题，帮助学员强化学习动力。

5 结语

选取某信息安全专业班级作为实验对象，将激励机制应用于教学实践，为期一个学期。通过问卷调查、考试成绩分析收集数据，对比实验前后学员的学习积极性和学习效果。应用新的学习激励机制后，学习积极性显著提高，学习成绩也有所提升。

本文基于激励理论，深入探讨了信息安全专业学员学习激励机制的现状、问题及优化策略，并验证了优化策略的有效性。建议教师在教学实践中，注重激励方式的多样化，明确目标，完善评价体系，以提高学员的学习积极性和教学效果。可进一步探讨不同激励方式在不同学习阶段的应用效果，以及根据学员的个体差异设计个性化学习激励机制。

参考文献

- [1] 张宇昕.基于ERG理论的市民终身学习激励机制研究[J].知识文库,2025,41(02):187-190.
- [2] 高勇,张晶.大学生自主学习激励机制研究[J].山西青年,2024,(13):43-45.
- [3] 赵云辉,刘佳新,孙子清.国家一流专业大学生自主学习激励机制建设研究[J].科技风,2024,(20):40-42.
- [4] 曹翔,宋军.新工科背景下机器人工程专业学习激励机制优化研究[J].高教学刊,2023,9(30):91-94.
- [5] 陈翠文.成人职业教育学习激励机制研究——基于双因素理论[J].云南开放大学学报,2023,25(03):5-11.
- [6] 艾鑫,王兆飞,谢瑞姣,等.发扬铁人“识字搬山”精神，创新学习激励模式[J].创新世界周刊,2023,(08):80-86.

The system and mechanism of equipment digital construction and the consideration of promoting digital construction

Fei Xie

4th Military Representative Office in Nanjing, Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

Against the backdrop of rapid technological advancements in big data, cloud computing, and artificial intelligence, coupled with growing demands for digital transformation in military equipment development, this study analyzes key challenges faced by defense enterprises in advancing weapon system digitization and organizational digital transformation. The analysis addresses critical issues including inadequate management capabilities and design methodologies in current digital infrastructure development. By examining key requirements for military equipment digitization and practical research processes within defense enterprises, the paper proposes actionable strategies to accelerate digital transformation and enhance operational efficiency.

Keywords

defense industry; digital transformation; challenges; implementation approaches

装备数字化建设的制度机制及推进数字化建设的思考

谢菲

驻南京地区第四代表室，中国·江苏南京 210000

摘要

在当前大数据、云计算、人工智能等技术迅猛发展，武器装备数字化建设需求不断增强的背景下，从数字化装备建设中存在的管理能力不足、设计手段缺失等多方面分析了当前国防军工企业在武器装备数字化建设，乃至企业数字化转型过程中所面临的主要挑战。同时，结合当前武器装备数字化建设的重点需求及国防军工企业科研过程等实际情况，为国防军工企业加快武器装备数字化建设、推动企业实现数字化转型，提出工作建议及思路。

关键词

国防军工、数字化转型、挑战、思路

1 引言

当前以大数据、云计算、人工智能等数字技术为特征的第四次工业革命深入发展，武器装备的数字化建设成为新时代强国强军战略的必经之路。武器装备作为国防和军队现代化建设的重要物质基础，是数字化技术实践的主战场。国防军工企业推动数字化转型战略，是贯彻习近平强军思想和新时代军事战略方针的必然要求，是落实设计装备就是设计未来战争任务的核心支撑手段。

装备数字化建设是指利用新一代信息技术（如大数据、人工智能等），对传统装备进行全寿命周期的数据采集、分析、建模和优化，实现装备的智能化、服务化和网络化，最终提升装备性能，实现武器装备体系效能的倍增、推动作战模式的根本性变革的过程。

但在数字化转型的过程中，企业普遍面临模型置信度

不高，数据模型碎片化管理，基础软件和工业软件等数字基础薄弱，以及制度机制不健全等诸多问题。针对数字工程中的上述诸多问题，结合当下企业的实际情况，对装备数字化建设的制度机制问题以及推进武器装备数字化建设的思考主要如下。

2 装备数字化推进中企业面临的主要挑战

未来的装备研制需要构建以装备需求、数字样机、数字装备为核心的数字模型体系，在数字空间开展战略策划、装备论证、研制生产、试验鉴定和运用保障等装备全寿命周期建设管理活动，建立虚实互动的武器装备建设新范式。由于未来战争中装备所面临的作战对象具有多样性、复杂性和不可预估性，这就需要企业应用系统工程的方法，从体系建模仿真开始，逐级建模仿真，设计分解，测试验证。对于武器装备而言，应用系统工程的方法，以作战需求为输入，构建数字平行战场，建立体系模型，通过开展装备体系运用推演，将数字装备代入装备体系，验证体系，改变传统的“数据靠仿、场景靠想”的装备研制方式。

【作者简介】谢菲（1992-），女，中国江苏南京人，本科，助理工程师，从事电子信息装备建设研究。

目前国内的部分民营企业数字化转型取得了显著成果，国内部分电子行业部分单位也在构建协同研发平台，应用于高度综合化、集成化电子装备的研发，开展多专业数字化协同研发活动，但总体上发展较为缓慢。对标国内外先进企业发展趋势和最佳实践，装备研制企业目前在协同研发管理、协同建模仿真等方面，面临的主要问题和挑战如下：

1) 在协同研发管理方面，目前存在项目综合管理能力不足、不支持协同研发、知识管理与重用能力不足、质量问题管理及技术状态管理能力不足的问题。平台系统与各类专业设备需求不一，导致协同研发困难，难以融合满足各方需求。

2) 项目综合管理能力不足；缺乏综合项目管理的数字化工具手段，综合计划管理、监控以人工、会议为主，导致进度监控困难、效率低下；缺乏数字化工具手段，导致产品研发流程无法落地，无法实现约束和引导设计师按照标准规范开展研发活动。数字化项目复杂度高、不确定性大，传统的软件瀑布式开发方式不再适用，需要更敏捷、迭代速度更快的开发管理模式，需要企业及项目实际管理人员在实践中不断积累经验，

3) 协同设计能力不足：产品研制基于逆向工程的跟踪研仿，而不是基于正向设计的自主创新；设计师基于经验和文档的串行研发模式，无法满足综合化、集成化装备的研发需求；缺乏协同空间，无法实现设计模型、仿真模型、测试数据在不同专业间的互联互通和共享，研发过程数据分散管理，多人协同与问题追溯困难。模型和相关的建模技术已经被使用作为基于文档的系统工程方法的部分进行应用已经很多年，包含功能流程图、行为图、原理方框图、性能仿真和可靠性模型等。然而，模型的使用通常被限制范围来支持特定的分析类型或选择的系统设计方面，独立的模型没有集成到一个连贯的整体系统模型中，且建模活动没有集成到系统工程过程中。国防军工企业技术人员对于装备实操及使用经验的缺乏，同样致使装备数字化所需的操作技术与信息技术的深度融合难以实现。

4) 知识管理能力不足：知识资源缺乏积累、管理、共享和重用手段，没有融入研发活动，导致知识与研发相分离、知识资源的浪费。

5) 基础软件和工业软件等数字化基础薄弱，大部分企业缺乏基础的数字化设计、仿真工具，无法支撑仿真建模技术的应用和发展。AI 算法、数字孪生等技术方案众多且迭代迅速。在装备数字化转型的初期，企业容易面临“选择困难症”，一旦选错技术路线或与平台系统技术路线不同，容易导致系统不兼容、后期维护成本高等多方面失利。

6) 组织架构的变革和流程再造：数字化转型不是简单的数字技术层面的应用，忽视了组织架构和文化的变革。数字化转型是一场“一把手工程”，需要企业最高管理层有坚定的决心和强大的推动力。企业为了有效推进数字化转型，

不仅需要运用新的数字技术并有机的融入到业务活动中，还需要进行组织架构变革、工作流程改变，从思想上要抛弃传统的思维观念，强化数字化转型的意识。

7) 复合型人才极度短缺。面对当前数字化装备需求，需要既懂设备原理，又懂数据分析、软件应用，还需兼顾实操使用的复合型人才，国防军工行业的特殊性，使该类人才只能由企业培养，其所需的培养周期长、成本极高，致使短时间内难以达到装备数字化建设的需求。

8) 装备数字化建设初期投入较大、且需保持持续的资金投入，包括硬件改造、软件许可、人员培新、试用改进等。军工企业面临 5% 规定利润比例限制，且在市场化中，本身需投入更多技术研发成本，难以支付高昂的数字化建设投入。

3 企业数字化转型落地的主要原则

在企业数字化转型过程中，主要遵循如下原则：一是在时间维度上，长远规划，分步实施（近期、中期和远景）。二是在空间维度上，统一规划、统一组织、协同实施、有序进行。

3.1 战略引领、持续投入

装备数字化转型必须源于企业战略，服务于业务目标。企业应将数字化战略作为企业核心战略的重要组成部分，由高层主导制定清晰的愿景、目标和路线图。可建立跨职能的敏捷团队，促进协作，围绕价值流而非只能模块进行组织。信息保障部门、技术部门、售后服务部门等多部门协同，共同确定用户使用需求。同时企业还需认识到数字化投资与汇报的长期性，保持战略定力，给予持续的资金和资源支持。

3.2 整体设计，突出统筹

数字化转型不仅仅是新技术的实施和运用，而是对企业的战略、人才、经营模式乃至组织方式产生深远影响的全面变革。如何实现数字化转型属于系统工程的范畴。而任何一个系统工程首先就要有顶层设计来指明前进的方向。因此，装备企业将坚持系统观念，立足当下，着眼未来，围绕市场需求和业务战略，强化顶层设计。但应摒弃“大而全”的传统瀑布式开发，采用敏捷迭代方式，通过最小可行产品快速验证想法，成品快、学习快、调整快。

3.3 应用主导，重点突破

加强研发、制造和管理等数字化应用场景的主导作用，数字化技术驱动与业务需求牵引相结合，聚焦研发创新能力、先进制造能力和现代化治理能力提升。在此过程中，数字能力是装备研制企业实现数字化规划落地的基础。若缺少基础数据的支撑和应用，以及由此形成的对新知识的学习能力、新挑战的响应能力、新场景的适应能力、新业务的开拓能力，企业的数字化转型即是空谈。数字能力建设是通过数字技术实现对企业运营全环节、全过程、全链条的改造和提升，包括数据收集、数据治理和数据资源整合运用，打通各

个环节数据链条，形成全流程的数据闭环。

3.4 安全自主，开放融合

统筹发展与安全，积极应用安全防护新方法、新技术、新设备。积极运用、善于运用社会资源，建设更广泛、更协同的合作生态，聚合创新力量，在技术创新和系统完善的基础上，通过生态协作赋能，加速企业数字化转型进程。应与同行业一同建立统一的数据标准，质量管理和安全体系，打破“数据孤岛”，确保数据的准确性、可用性和安全性。

4 企业推进数字化转型的主要思路

针对企业自身的实际情况以及在数字化转型中面临的诸多挑战，数字化转型的主要思路如下：

一是构建装备数字化研发环境。

基于 DoDAF 理论，建设需求论证平台，提供统一的建模环境、规范的对象模型和多模态外部接口。利用对象化、结构化和关联性管理，实现规范统一的装备需求定义、分解、分配、实现及可追溯性验证。为利益相关方提供了一个公共通用的、无二义性的设计信息交流平台。通过需求的结构化定义寻求电子对抗装备方案设计最优解。同时，追踪用户需求分解直至产品实现全过程，实现数字化的需求生成能力。构建统一建模环境、统一研发环境、统一标准规范、统一数据源，进行系统需求生成、协同设计仿真验证；通过设计要素结构化、模型化表征，实现知识转换；开展基于模型的体系作战架构设计、需求分析建模和仿真验证，实现各设计要素相互关联、知识快速便捷重用，实现用户需求与系统作战能力的对标，实现基于模型驱动的协同研发能力。构建虚实结合的试验环境，开展虚拟试验验证能力，完善数据采集，加强物理试验、仿真试验数据的汇聚管理和使用，基于数据开展装备效能评估、数据融合分析、仿真模型优化、趋势预测等工作。推进模型校核验证与确认技术应用，实现以试验结果反向优化设计和设计寻优，增强虚实结合的协同试验能力。

二是提升企业的数字化柔性制造能力

大力推进三维数字化工艺在工艺设计和工艺仿真中的应用。加强生产制造过程数据化、异构数据知识化、工艺知识结构化、制造资源网格化、加工作业标准化，提升工艺设计数字化、精益化能力。以数字化组织为基础，以智能制造为主攻方向，推动生产制造技术变革和优化提升，推动生产

方式转变，在生产要素资源不增加的情况下大幅度提升交付能力。推进基于数字孪生装备故障预测与视情维修。构建实景、视景驱动的使用培训模式，推动虚拟培训、虚拟体验的全方位装备培训，增强对多场景、个性化、虚实结合的沉浸式实战化训练支撑能力。加强制造流程端到端全流程数据贯通。推进工艺流程和布局优化，构建产线运营管控与仓储、检验检测、工艺文件和制造资源的强集成能力，合理设置产线节拍，最大化利用生产资源。

三增强数字化创新管理能力。

加强以项目为核心的全过程全要素闭环管理，推进装备研制的进度、质量、成本一体化风险分析与态势预判。强化研发制造过程数据管理和集成应用，推动管理过程由流程驱动向数据驱动转变，管理决策由经验型向基于数据的分析预测转变。建立跨只能的敏捷团队，围绕价值流协同工作。

四是补齐数字化基础

制定数字化标准体系和规范。聚焦数字化转型业务形态变化所涉及的平台技术、应用集成、基础数据等，加强网络互联、信息交互、数据治理、基于模型的系统工程、智能制造、数字孪生应用等方面标准规范制定与应用。推进数据持续积累，构建完整的数据治理体系，建立面向产品全生命周期的权威数据源管理机制。

五是建立人才与组织支撑能力

把数字化转型纳入企业发展战略，建立组织队伍，制定数字化转型实施方案，明确目标景象、实施路线图、任务举措等。对外引进关键数字人才（如数据专家、AI 工程师等），对内大规模开展数字化技能培训，提升人员数字素养。加快建立数字化转型高层次、复合型人才培养机制；完善数字化专业技术人才岗位晋升通道和激励机制。

参考文献

- [1] 王巍巍,王乐.美国数字工程战略发展分析[J].航空动力,2022 (5):23-26.
- [2] 卫旭芳,刘彬.美军数字工程建设发展研究及启示[J].航空兵器,2023,30(3):56-66.
- [3] 任璐英,谭立忠,姜开波,王庆国,张海峰.加快推进装备数字化转型发展建设的启示[J].军民两用技术与产品,2023 (8) :11-14.
- [4] 邝彦辉,李沐斋,董凯.推动装备数字化迈向发展新阶段[J].机器人产业, 2022 (3) : 24-28

Research on the mechanism and path of artificial intelligence enabling the integrated development of radio and television media

Jingjing Chen

Urumqi Radio and Television Station (Urumqi Radio and Television Group), wulumuqi, Xinjiang, 830092, China

Abstract

Amid the digital revolution, artificial intelligence (AI) is reshaping media ecosystems at an unprecedented pace. By 2025, breakthroughs in generative AI (AIGC) will drive transformative changes in media production paradigms. In Jiangsu Broadcasting Corporation, AI-generated content now accounts for over 40% of media output. Meanwhile, CCTV's "Central Media Large Model" has achieved automated news video generation, marking a critical phase in the intelligent transformation of broadcasting and television media. The Third Plenary Session of the 20th CPC Central Committee further clarified the need to "improve regulatory mechanisms for generative AI development," providing policy support for industry integration. However, challenges persist including ethical risks, content homogenization, and organizational resistance during technological empowerment. This paper first analyzes the mechanisms through which AI facilitates media convergence in broadcasting and television. It then elaborates practical implementation pathways, examines case studies, and proposes corresponding strategies and challenges, offering valuable insights for related research.

Keywords

Artificial intelligence; Radio and television media; Integrated development; Mechanism and path

人工智能赋能广播电视媒体融合发展的机制与路径研究

陈菁菁

乌鲁木齐广播电视台(乌鲁木齐广播电视台集团),中国·新疆 乌鲁木齐 830092

摘要

在数字化浪潮席卷下,人工智能技术以前所未有的速度重塑传媒生态。2025年,生成式人工智能(AIGC)技术突破推动媒体生产范式变革,江苏台AI生成内容占比超40%,央视网"央视听媒体大模型"实现新闻视频自动生成,标志着广电媒体进入智能化转型关键期。与此同时,党的二十届三中全会明确"完善生成式人工智能发展和管理机制",为行业融合发展提供政策支撑。然而,技术赋能过程中仍面临伦理风险、内容同质化、组织变革阻力等挑战。本文先是具体分析了人工智能赋能广电融合的机制,随后详细阐述了人工智能赋能广电融合的实践路径,紧接着具体分析了相关典型案例,最后提出了相关对策与挑战,以期为相关研究提供有益思考与借鉴。

关键词

人工智能;广播电视媒体;融合发展;机制与路径

1 引言

在媒介技术迭代加速的背景下,广电媒体融合发展已从"相加"阶段迈向"相融"深水区。截至2025年,我国短视频用户规模突破12亿,传统广电受众流失率年均达8%,倒逼行业探索智能化转型路径。人工智能技术凭借其强大的数据处理能力与内容生成潜力,成为破解广电媒体发展困境的关键变量:江苏台通过AI Hub平台实现新闻采编全流程

智能化,央视网运用多模态大模型重构节目生产范式,湖南广电"AI 导演爱芒"参与综艺录制,标志着技术赋能已从局部应用转向系统重构。然而,现有研究多聚焦技术工具层面,对AI驱动下的组织变革、伦理治理等深层机制探讨不足。本研究基于技术-社会协同演化理论,构建"机制-路径-治理"分析框架,为广电媒体智能化转型提供系统性解决方案。

2 人工智能赋能广电融合的机制分析

2.1 技术融合机制

技术融合是人工智能赋能广电媒体融合发展的基础支撑,通过构建智能生产工具链、开发垂类模型以及升级算力

【作者简介】陈菁菁(1974-),女,满族,中国辽宁北镇人,本科,高级工程师,从事广播节目录音制作技术和广电技术赋能发展研究。

基础设施，实现技术要素与媒体业务的深度整合。江苏台打造的 AI Hub 平台集成 100 余款智能工具，形成覆盖新闻采编、节目制作全流程的智能化工具链，可实现文生图、视频自动剪辑等功能，降低 AI 应用门槛，提升采编效率^[1]。主流媒体还开展垂类模型开发，央视网训练的多模态视听模型，能为新闻分类、检索和推荐提供支持；江苏台联合开发的情感分析模型，可把握观众喜好，支撑数智人“小零”交互。此外，荔枝云平台算力调度引擎的引入，解决了大模型训练和 4K/8K 超高清视频生成的算力瓶颈，实现算力高效利用，提高模型开发效率，确保视频高质量输出，满足高品质内容生产需求。

2.2 内容生产机制

人工智能技术为广电媒体内容生产带来革命性变化，在智能化生产流程、个性化内容推荐和沉浸式体验创新方面成效显著。智能化生产流程上，新华社“美债炸弹”动画短片借助 AI 技术，实现新闻可视化制作自动化、智能化，AI 系统自动分析关键信息、生成脚本和模型、完成渲染合成，制作周期从数周缩短至数天，时效性和传播效果大幅提升。个性化内容推荐方面，中国广电智能推荐频道基于用户画像技术，分析用户多维度数据精准描绘画像，实现“千人千面”个性化服务，如为体育爱好者推荐赛事相关内容，为文艺爱好者推荐影视综艺，点击率提升 35%。沉浸式体验创新上，2025 江苏卫视跨年演唱会采用 AI 数字人“张加帅”与真人互动，其逼真外观和自然动作表情营造出虚拟与现实交织的视听震撼，丰富了节目形式，也为广电媒体在新领域发展探索新路径。

2.3 用户交互机制

人工智能技术革新了广电媒体与用户的交互方式，借智能客服系统、互动节目创新和用户共创生态增强用户参与感与粘性。南京广电牛咔视频的智能审核中台，能对文本、图片、视频全要素实时审核，利用人工智能自动识别违规和不良内容，像检测文本敏感词汇、图片暴力元素等，还会拦截处理并反馈结果，且具备学习功能以提升审核准确性和效率^[2]。咪咕视讯的《比特互动演出》节目，通过 5G + VR 技术让观众用动作捕捉参与虚拟演出，观众佩戴设备，动作实时传输到虚拟场景与演员互动，还能选角色剧情线，打破单向传播模式，5G 保障了互动的实时准确。“ai 荔枝”客户端的 AI 新春送祝福功能构建用户共创生态，用户上传照片生成数字分身制作个性化视频并分享，激发创作热情，扩大媒体影响力与传播范围。

2.4 管理创新机制

管理创新是人工智能赋能广电媒体融合发展的重要保障，借智能中台建设、数据驱动决策与组织架构变革，提升管理效率与决策科学性。智能中台建设方面，河北广电“冀时云”引入人工智能技术实现媒资智能管理，利用图像、语音识别和自然语言处理技术自动分析标注素材，生成标签，使素材检索效率提升 60%，还具备版权管理功能。数据驱

动决策上，江苏台融媒大数据平台整合多源数据，为内容生产提供精准用户画像和市场分析。通过深度挖掘分析，管理者了解用户兴趣偏好等，据此调整节目，让内容更贴近需求，提高市场竞争力与传播效果。组织架构变革中，主流媒体设立人工智能融媒应用中心，打破技术部门与内容部门壁垒，整合人才形成跨部门创新团队，在开发智能工具链和垂类模型时，双方密切合作，为广电媒体智能化转型提供组织与人才保障。

3 人工智能赋能广电融合的实践路径

3.1 技术赋能路径

技术作为广电融合发展的基石，借助工具化应用、模型化开发与平台化整合，为广电媒体注入强劲动力。工具化应用是降低 AI 使用门槛的要点，推广智能剪辑、语音合成等基础工具，让一线采编人员无需高深技术就能运用 AI。如智能剪辑工具依预设规则自动筛选、拼接素材生成视频，提升制作效率；语音合成技术将文本转为自然语音，用于新闻播报等，丰富内容形式。模型化开发基于自有数据训练垂类模型，满足广电特定需求，江苏台的高真实感三维场景重建模型可精准还原场景，为节目提供逼真背景，增强观众沉浸感。平台化整合构建 AI 中台，如同智能中枢，统一调度工具、模型、数据，整合资源，避免浪费，提升协同效率，为广电业务创新提供有力支撑。

3.2 内容创新路径

内容创新是广电融合发展的核心驱动力，人工智能在新闻生产、节目形态与文化传播等多维度推动着内容的深刻革新。在新闻生产领域，智能化借助 AI 显著提升了时效性与质量，AI 辅助撰写突发新闻可快速生成稿件，抢占传播先机，央视网多语种播报自动生成则打破语言壁垒，拓宽传播边界^[3]。节目形态方面，引入 AI 数字人主持人带来全新视听感受，湖南广电“AI 导演爱芒”参与综艺录制，凭借智能交互与创意策划，为节目注入新活力，吸引年轻受众。文化传播上，运用 AI 数字复原技术让古籍人物动态化呈现，使历史人物鲜活起来，以生动有趣的形式传播传统文化，极大增强了文化的吸引力与感染力，为广电内容创新开辟了广阔新空间。

3.3 用户服务路径

用户服务作为广电融合发展的关键环节，借助个性化推荐、智能交互与场景化体验设计，有效提升用户满意度与忠诚度。个性化推荐系统依托用户行为数据，深入剖析其兴趣偏好，达成“千人千面”的内容精准分发，为用户量身推送契合口味的内容，既提高了信息获取效率，又增强了用户粘性。智能交互服务方面，推出如荔枝智能体助手等智能体，提供节目查询、新闻爆料等一站式服务，使用户能随时随地获取所需信息并参与媒体互动，极大提升了用户参与感。场景化体验设计则开发出 AI 新春祝福、虚拟旅行等场景化应用，满足用户在不同场景下的多样化需求，让用户感受科技

与传统的交融，领略世界美景，进而增强用户对广电媒体的依赖与喜爱。

3.4 治理保障路径

治理保障是广电融合发展的坚实支撑，通过伦理规范建设、版权保护机制与人才队伍建设，全力营造健康有序的发展环境。伦理规范建设方面，制定严格的 AI 生成内容审核标准，清晰划定内容创作边界，有效防范虚假信息传播，确保 AI 生成内容真实、客观、公正，有力维护媒体公信力。版权保护机制则明确 AI 生成内容版权归属，构建完善原创内容保护体系，切实保护创作者权益，激发创新创作活力，推动广电媒体内容生态良性发展。人才队伍建设注重培养“技术+内容”复合型人才，江苏台设立 AI 创新实验室，为人才搭建实践与创新平台，借助培训、交流等多元方式，提升人才综合素质，为广电融合发展提供坚实的人才保障，助力行业迈向新高度。

4 典型案例分析

4.1 江苏台：全链条 AI 赋能实践

江苏台开展全链条 AI 赋能实践成果斐然。技术布局上，构建“工具—模型—平台”三级体系，AI Hub 平台作为核心枢纽，日均调用量超 50 万次，整合各类工具和模型，实现资源集中管理与高效调度，方便一线采编人员获取工具，还为模型训练优化提供数据支持，促进技术与业务融合。内容创新方面，实现 AI 生成内容对新闻、综艺、纪录片全品类覆盖，2025 年跨年演唱会应用 12 项 AI 技术，在舞台设计、节目创作、后期制作等环节均有出色表现，引领行业潮流。用户运营中，借助“ai 荔枝”客户端精准定位用户、提供个性化服务，上线 3 个月用户突破 800 万，AI 互动功能使用率达 65%，增强了用户参与感与粘性。

4.2 央视网：大模型驱动媒体变革

央视网以大模型驱动媒体变革成效显著。模型开发上，训练的超大规模视听模型是重大技术突破，支持从文本到 4K 视频自动生成，能依文本生成高质量素材，缩短制作周期、降低成本，为新闻报道、广告制作等提供更多可能。应用场景方面，在两会报道中发挥优势，实现 AI 虚拟主播 24 小时播报，其能根据主题场景调整语速、语调与表情，播报生动自然，生产效率较传统人工提升 4 倍，还能多平台同步播报，扩大传播范围与影响力。生态构建上，推出“央视听”开放平台，吸引第三方开发者接入 AI 能力，构建开放共赢的媒体生态，促进产业融合，开发者可借此开发创新应用，央视网也获创新思路与技术支持，推动媒体技术进步。

5 挑战与对策

5.1 主要挑战

广电媒体在 AI 应用中面临诸多挑战。技术伦理风险凸

显，AI 算法复杂、数据来源多样，其生成内容或有虚假信息，像伪造新闻、名人言论等误导公众；训练数据中的偏见还会被放大传播，在人物塑造、观点表达上出现性别、种族等偏见，损害社会公平，冲击媒体公信力。内容同质化问题严重，部分媒体过度依赖 AI 模板创作，作品风格、题材和表现形式高度相似，虽提高效率却缺乏创意个性，难以满足观众多样化审美，长期会降低观众兴趣，使媒体在竞争中失利。组织变革阻力也较大，传统媒体人面对 AI 技术冲击有技术焦虑，担心技能不适应、失业，转型意愿低，且媒体内部架构和管理模式固化，新技术应用推广慢，影响整体转型进程。

5.2 对策建议

为应对广电媒体 AI 应用挑战，可从三方面着手。一是建立 AI 治理框架，制定《广电媒体 AI 应用伦理指南》，明确生成内容在真实性、公正性、隐私保护等方面的伦理原则与规范，确立内容审核责任主体，构建多层次审核机制，如设专门 AI 内容审核团队，结合人工与技术手段全面审查，确保内容合法合规、符合伦理。二是推动人机协同创作，建立“AI 初稿 + 人工润色”模式，发挥 AI 高效生成与人类创意情感表达优势，AI 完成基础创作后由专业人员润色，添加人文温度与深度分析，提升内容质量与效率。三是完善人才培养体系，高校开设智能传播专业，课程涵盖多领域且注重实践；媒体机构开展 AI 技能轮训，组织培训与交流活动，提升从业人员技术能力，缓解焦虑，推动媒体顺利转型。

6 结语

本研究全面解析了人工智能赋能广播电视台媒体融合发展的机制与路径，其通过技术融合、内容生产等机制，在工具化应用、内容创新等路径上成效斐然，江苏台与央视网的典型案例便是明证。不过，广电媒体在应用 AI 时，也面临技术伦理风险、内容同质化、组织变革阻力等难题。对此，可通过建立 AI 治理框架、推动人机协同创作、完善人才培养体系等举措加以应对，推动广电媒体智能化转型。展望未来，人工智能将更深度融入广电媒体融合，更先进的算法和模型会优化内容生产与用户体验。行业需完善治理体系，平衡创新与规范，还要加强国际交流合作，借鉴先进经验，共同探索新模式、新路径，引领全球广电媒体行业迈向智能化、高质量发展新征程。

参考文献

- [1] 米家铭.媒介融合视域中湖南人民广播电台新闻理念与现实变革研究[D].新疆大学,2023.
- [2] 杨青峰.智能化转型重塑传统媒体竞争优势的机理与路径研究 [D].中国传媒大学,2022.
- [3] 滕芳.困境与突围：传播技术演进视角下中国广电媒体融合转型研究[D].华东师范大学,2021.

Research on the Digital Transformation Practice of China Tower's Quality Management System

Jiabao Liu

Taiyuan Branch of China Tower Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

To enhance the pathways, practices, and data empowerment of quality management digital transformation, China Tower has established the vision of building a “digital enterprise” and positioned digital transformation as the core support and key empowerment mechanism for its “three horizontal and three vertical” quality management system. To break through traditional quality management bottlenecks, the company systematically constructed a dual-driven model combining “digitalized production operations + digitalized quality management”: On the production operation side, it integrated data links throughout the entire process of base station construction and maintenance to achieve real-time visibility of business processes; On the quality management side, it built a data analysis platform to consolidate data from fault prediction, quality sampling, and other dimensions. Through this dual-wheel synergy, the company has transformed quality management from an “experience-driven” model relying on manual experience to a “data-driven” model centered on data insights, effectively improving both efficiency and precision in quality management.

Keywords

Quality Management; Digitalization; Transformation

中国铁塔质量管理体系数字化转型实践研究

刘嘉宝

中国铁塔股份有限公司太原市分公司，中国·山西 太原 030000

摘要

为了提升质量管理数字化转型的路径、实践与数据赋能，中国铁塔以建设“数字化企业”为愿景，将数字化转型作为“三横三纵”质量管理体系的核心支撑与关键赋能手段，为打破传统质量管理瓶颈，公司系统构建“生产运营数字化+质量管理数字化”双轮驱动模式：生产运营端打通基站建设、运维等全流程数据链路，实现业务环节实时可视；质量管理端搭建数据分析平台，整合故障预警、质量抽检等维度数据。通过双轮协同，推动质量管理彻底从依赖人工经验的“经验驱动”模式，转向以数据洞察为核心的“数据驱动”模式，有效提升质量管理效率与精准度。

关键词

质量管理；数字化；转型

1 打造一体化数字底座：从“分散系统”到“平台赋能”

1.1 业务中台与数据中台的双中台协同

构建“前台灵活响应、中台强大支撑、后台稳定运行”的新型 IT 架构。业务中台整合构建了销售、运维、供应链、能源等 8 大共享能力中心，例如运维中台实现了从网络告警自动生成、智能派单到工单处理的全流程自动化，日均处理告警信息 1110 万条。数据中台则全面整合了来自 43 个核心业务系统的 7939 张业务表，建立并严格执行“七个一”数据治理体系（包括数据一本账、模型一个库、标准一套规、质量一把尺、服务一目录、安全一体系、治理一流程），形

成高质量数据资产 3476 项，有效支撑各省分公司开发并上线了 977 个数据分析模型。通过打造“领导驾驶舱”和各级管理看板，实现了工程质量合格率、客户满意度、故障处理时长等核心质量指标的实时可视化监控与管理，支撑管理层进行精准决策与动态调整。

1.2 边缘算力与 AI 能力的前沿布局与融合应用

布局“中心云+边缘云”协同的算力网络体系。在山东、辽宁等业务密集区域建设多个边缘计算节点，有效支撑智能运维、视联监控等低时延、高带宽业务场景。例如，智能运维系统通过边缘计算节点实现站址自动巡检，自动化率达到 51%，全年减少不必要的上站核查 27.7 万次。公司投入建设企业级 AI 训练与推理平台，自主研发并应用超过 150 个 AI 模型，覆盖工程质检（如“塔桅构件安装合规性识别”模型准确率 95.5%）、服务响应（如“智能客服意图识别”模型准确率 85%）、产品管理（如“磷酸铁锂电池健康度

【作者简介】刘嘉宝（1984-），中国山东日照人，硕士，工程师，从事工程项目管理研究。

评估”模型准确率 92%）等多个质量管控场景。初步测算，2024 年 AI 模型的规模化应用为公司累计节约运营成本超过 1.2 亿元。

2 关键业务场景的深度数字化转型

2.1 工程建设全流程数字化管控

依托统一的 PMS（Project Management System）系统，实现工程项目从“需求归集—方案设计—施工实施—验收交付—运维归档”的全流程线上化、透明化管理。在需求阶段，通过“需求统筹管理系统”智能整合三家电信运营商的建站需求，2024 年有效减少重复建设铁塔超过 800 座。在设计阶段，应用 BIM 及数字化设计工具，自动生成数字图纸与物料清单（BOM），使造价评估效率提升 30%。在施工阶段，推广使用移动端 APP，施工人员实时进行“工序打卡”“质量照片上传”，施工数据自动同步至云端。在验收阶段，全面推广电子签章系统，年内覆盖 7510 个项目，在线签署工程文件 1.8 万件，实现工程文档 100% 无纸化。2024 年，工程项目的平均交付时长从传统的 120 天显著缩短至 80 天。

2.2 能源业务全生命周期数字化运营

自主研发全国统一的“智慧能源平台”，全面支撑换电、充电、备电三大主营业务。在换电业务方面，平台实时监控全国 7.7 万个智能换电柜、220 万组智能电池的运行状态（包括电量、温度、位置等），2024 年累计提供换电服务 19 亿次，日均换电次数超过 200 万次，通过精准的资产管理与调度算法，电池丢失率从 0.5% 降至 0.1%。在充电业务方面，平台成功接入社会 330 万个充电端口，通过“智能调度与推荐算法”优化充电资源分配，平台日均充点量达到 200 万度。在备电业务方面，平台对全国 8 万个备电点位进行实时状态监测与 AI 预警，预警准确率达到 90%，2024 年成功完成重大活动与应急备电保障任务万余次，实现安全零事故。

2.3 智联业务全场景数字化感知与赋能

打造全国统一的“视联平台”，实现“感知设备接入—数据汇聚—AI 算法分析—行业应用”的端到端一张网管理。在数据接入层面，平台支持接入摄像头、传感器、雷达等 170 余种感知设备，累计采集中高点位视频样本 4.95 亿条。在算法能力层面，平台自主研发并沉淀了 176 种场景化 AI 算法，有效解决了“小微目标识别”“夜间低照度识别”“复杂天气条件下识别”等行业难题，例如森林防火识别准确率提升至 98%。在行业应用层面，基于平台能力孵化出“耕地智保”“河湖智保”“蓝天智保”等 15 款标准化行业产品，服务国土、水利、环保、应急等 40 多个政府部门和行业领域，2024 年公司智联业务在 24 个重点应用场景的新增市场份额排名第一。

3 数据治理与数据价值化探索

3.1 数据质量：从“人工清理”到“智能稽核”

建立“L1+L2”分层级的数据自动化稽核体系。L1 层

面向客户、财务等核心主数据，实现 100% 自动化稽核，2024 年通过规则引擎自动清理异常客户数据 1.7 万条，客户数据完整性提升至 98%。L2 层面向供应链、工程项目等复杂业务数据，实现 50% 的自动化稽核，全年开发并部署 824 条稽核规则，自动稽核业务订单 130.4 万条，准确率保持 100%。引入 AI 技术提升数据治理效率，如开发“数据字典智能贯标”工具，将新业务数据标准的贯标时间从 7 天缩短至 1 天。

3.2 数据价值：从“内部支撑”到“外部输出”

积极探索数据要素的市场化流通与价值化变现。对内，开发“大屏、中屏、小屏”（指挥中心大屏、PC 中屏、移动小屏）协同的数据产品体系，例如“掌上经分”APP 支持区域经理实时查看所辖站址的关键运营与质量指标，月活跃用户达 2203 人。对外，对脱敏后的匿名数据进行产品化包装，形成“基站分布热力图”“区域人流分析”“换电需求预测”等 26 个数据产品，并向南宁供电局、上海应急管理中心等外部单位提供数据服务，初步实现了数据价值从“0 到 1”的突破。公司还联合中国电子技术标准化研究院成立“数字经济联合实验室”，共同开展数据安全、数据可信流通等前沿技术研究与标准制定，为行业数据要素化发展提供实践标杆。

4 质量竞争力、品牌价值与社会责任的协同提升

“三横三纵”穿透式质量管理体系的全面落地，不仅提升了中国铁塔的内部质量管理水平，更在质量竞争力构建、品牌形象塑造、客户满意度提升、绿色供应链管理等方面产生了显著的协同效应，有力推动了企业实现“高质量、可持续”发展目标。

4.1 质量竞争力：从“行业跟随”到“行业引领”

4.1.1 核心质量指标持续行业领先

截至 2024 年，公司多项关键质量指标达到行业领先水平。在工程领域，通过深化共享理念，新建铁塔共享率从成立初期的 14.3% 大幅提升至 86.2%，相当于累计少建通信铁塔 121 万座，节约行业整体投资超过 2170 亿元。在产品领域，10 类核心硬件产品抽检合格率连续多年保持 100%，软件平台产品合格率稳定在 93.6% 以上，远超行业平均水平。在服务领域，智联业务故障平均处理时长缩短至 13.5 小时（同比下降 30%），能源业务故障平均处理时长缩短至 7.5 小时（同比下降 75%），客户投诉的“万户比”指标下降 4.34 个百分点。

4.1.2 行业影响力与权威认可

公司的质量创新实践获得了政府、行业与社会的广泛认可。2024 年，公司荣获中国质量协会颁发的“质量技术奖”二等奖 2 项、三等奖 5 项；河南分公司 QC 成果《提高 AI+铁塔资产识别准确率》荣获中央企业 QC 成果发表赛一等奖；全系统内共有 6 家单位获评“用户满意服务组织”称号，27

个基层班组获评“质量信得过班组”称号。公司的质量管经验被国务院国资委收录至《国有企业改革深化提升行动简报》，“共享竞合的铁塔模式”作为国企改革的典型案例在全国范围内得到推广。

4.2 品牌建设：从“业务导向”到“价值引领”

4.2.1 品牌定位与核心价值升级

公司明确提出了“数字基础设施创新共享引领者”的全新品牌定位，围绕“共享、品质、服务、科技、创新、责任”六大核心价值，系统构建了“母品牌 - 子品牌”协同发展的品牌架构。母品牌“中国铁塔”持续聚焦通信基础设施的共享建设与运营，子品牌“铁塔智联”与“铁塔能源”则分别专注于数字化治理解决方案与新能源社会化服务。2024年，公司成功发布通信行业首个超百亿参数的视觉大模型—“经纬大模型”，以及《边缘算力技术与产业蓝皮书》，极大地强化了公司在科技与创新领域的品牌形象。

4.2.2 品牌传播与社会责任实践深度融合

通过“主题宣传+公益实践”相结合的方式，持续提升品牌美誉度与社会影响力。组织开展“高质量发展看铁塔”“信号升格专项行动”等大型媒体调研活动，全年在新华社、中央电视台等主流媒体刊发报道超 2600 篇次。策划“铁塔慢直播”系列公益传播活动，镜头聚焦红色文化基地、自然灾害抢险现场等，累计吸引超过 6 亿人次观看。在全国范围建设并运营 600 余个“骑手之家”，为 139 万名外卖骑手提供休息、饮水、充电等暖心服务。全年投入乡村振兴资金 8610 万元，对口帮扶 102 个县乡改善通信基础设施与产业发展条件，切实履行中央企业的社会责任。

4.3 客户满意度：从“被动满足”到“主动创造”

4.3.1 客户分层与差异化服务策略

针对不同客户群体的核心诉求，提供精准化的服务解决方案。对运营商客户，建立“需求快速响应—工程精准交付—运维高效保障”的全生命周期服务模式，2024 年运营商业务客户满意度提升至 95.7 分。对政企（B 端）客户，提供“视联监控 + 大数据分析”的综合解决方案，例如为水利部防汛部门提供接入 5 万路监控视频用于全国汛情指挥调度。对公众（C 端）用户，持续优化“铁塔换电”APP 的用户体验，实现“找柜—换电—支付—售后”一站式服务，能源业务用户满意度提升至 92.3 分。

4.3.2 客户参与的质量共治机制

建立“客户参与、客户评价、客户监督”的质量共治机制。定期邀请重要运营商客户、行业专家参与公司质量标准的制修订研讨会，2024 年共收集客户提出的标准改进建议 156 条，其中 32 条被采纳并融入新版标准。开展“客户开放日”活动，组织客户参观智能运维中心、视联平台演示中心，增强客户对铁塔质量能力的直观感知和信任。建立“客户满意度评价

结果与员工绩效薪酬”联动机制，将外部客户评价纳入相关部门和员工的绩效考核（KPI），有效驱动服务质量的持续改善。

4.4 供应链管理：从“采购管控”到“生态协同”

4.4.1 供应商全生命周期管理

构建并完善了“严格准入—科学评价—有效激励”的供应商全生命周期管理体系。在准入阶段，应用“供应商信用与能力评价模型”对潜在供应商进行多维度筛选，2024 年新增合格供应商 7174 家，供应商资质达标率 100%。在评价阶段，从产品质量、交货及时率、服务水平、技术响应等多个维度对合作供应商进行量化评估和分级，依据评估结果动态调整采购份额，对绩效不佳或存在严重违约的供应商纳入黑名单管理。在激励阶段，开展年度“优秀供应商”评选活动，2024 年共表彰 30 家综合表现突出的供应商，在供应链体系中营造了“质量至上、合作共赢”的良性竞争氛围。

4.4.2 绿色供应链体系建设

将“绿色、低碳、循环”理念全面融入供应链管理体系。在采购环节，将供应商是否通过 ISO14000 环境管理体系认证作为重要评审因素，在电池等核心产品采购中新增“产品碳足迹”评审要求。在履约环节，推动并协助供应商实施节能降耗技术改造。在回收环节，与供应商共同构建废旧电池回收处理网络体系，2024 年累计回收处理废铅酸蓄电池 6959 吨，有效促进了资源的循环利用与环境保护。

5 结语

中国铁塔构建并实践的“三横三纵”穿透式质量管理体系，是中央企业积极响应国家“质量强国”战略、主动拥抱数字时代、系统性推进质量管理变革与数字化转型的成功典范。该体系通过“横向业务全覆盖、纵向管理全穿透”的矩阵式设计，有效解决了通信基础设施行业长期存在的“管控难、协同弱、数据散”的痛点问题；通过将人工智能、大数据、物联网等数字技术深度融入质量标准的制定、过程的监控、结果的评价与持续的改进之中，实现了质量管理从“传统经验模式”向“现代数智模式”的跨越式发展；通过推动质量管理工作与品牌建设、客户服务、供应链协同、绿色发展等战略目标的深度融合，形成了“高质量驱动高价值创造”的良性发展循环。

参考文献

- [1] 中国铁塔“十四五”数字化规划 [Z].侯宾/姚久花，中国铁塔股份有限公司. 2022.11.12
- [2] 2024年中央企业集团年度质量管理工作报告 [Z].尤建新，科学出版社.中国铁塔股份有限公司. 2024.
- [3] 中国质量协会质量技术奖管理办法 [Z].中国质量协会.黄玉成，2024.09

Exploration and Research on Domestic Cloud Desktop Solutions Replacing Citrix in Manufacturing Enterprises

Lele He Hao Li

CRRC Nanjing Puzhen Rolling Stock Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

Amidst intensifying global tech competition and growing demands for information technology autonomy, manufacturing enterprises are actively pursuing domestic alternatives to reduce reliance on foreign technologies and enhance data security. As a critical component of modern enterprise IT infrastructure, cloud desktops play a pivotal role in this localization drive. This paper examines the implementation paths of domestic cloud desktop solutions replacing Citrix systems in manufacturing enterprises. It provides an in-depth analysis of the current development status of domestic CPUs and operating systems, discusses multiple challenges including system compatibility, transitional management, and resource utilization efficiency during implementation, and proposes two solutions: dual PC deployment and desktop cloud architecture. By comparing operational costs, resource optimization, and smooth transition between the two approaches, this study demonstrates the desktop cloud's significant advantages in achieving efficient management, data security assurance, and long-term cost control.

Keywords

Domestic cloud desktop; Citrix replacement; Digital transformation in manufacturing; System compatibility

制造业企业国产化云桌面替代 Citrix 的探索与研究

贺乐乐 历浩

中车南京浦镇车辆有限公司，中国·江苏南京 210000

摘要

在全球科技竞争日益激烈和信息技术自主可控需求不断提升的背景下，制造业企业正积极推动国产化替代进程，以减少对国外技术的依赖并增强数据安全。云桌面作为现代企业IT基础设施的重要组成部分，其国产化替代尤为关键。本文聚焦于制造业企业采用国产化云桌面解决方案替代Citrix系统的实践路径，深入分析国产化CPU与操作系统的发展现状，探讨改造过程中面临的系统兼容性、过渡期管理及资源利用效率等多重挑战，并提出双PC部署与桌面云架构两种解决方案。通过对两种方案的运维成本、资源优化与过渡平滑性，论证桌面云在实现高效管理、数据安全保障及长期成本控制方面的显著优势。

关键词

国产化云桌面；Citrix替代；制造业数字化转型；系统兼容性

1 引言

在全球科技竞争格局深刻变革的背景下，信息技术自主可控已成为国家战略的重要组成部分。近年来，国家大力推进制造强国、网络强国战略，出台《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》等一系列政策文件，明确提出要加快关键软件研发应用，提升工业信息安全保障能力。制造业作为国民经济的主体，其数字化转型过程中面临的核心技术自主化问题日益凸显。国产化替代不仅是技术升级需要，更是保障产业链供应链安全稳定的必然要求。随着国产基础软硬件技术持续突破，制造业企业迎来信息技术

基础设施更新换代窗口期。如何在这一进程中实现平滑过渡与安全可控的统一，成为制造业数字化转型亟待解决的关键课题。

2 国产化信息技术建设现状分析

近年来，国产化信息技术生态体系取得了显著进展，尤其在CPU和操作系统领域涌现出一批具有自主知识产权的产品^[1]。国产CPU如飞腾、龙芯、鲲鹏等系列，通过持续的技术迭代与市场应用，逐步提升了处理能力与兼容性，已能够满足大多数制造业企业的日常办公与生产管理需求。与此同时，国产操作系统如统信UOS、麒麟OS等在界面、稳定性及软件适配方面不断优化，为企业提供可靠基础软件平台^[2]。制造业作为国民经济支柱，国产化改造进程加速，许多企业部署国产化办公终端与业务系统，构建自主可控IT基础设施，这降低了对外部技术依赖，带来更高安全性

【作者简介】贺乐乐（1987-），男，中国陕西蒲城人，本科，高级工程师，从事信创工程研究。

与可控性。不过,国产化与非国产化系统并存阶段不可避免,如何在过渡期确保业务连续性与效率,是企业亟待解决的核心问题。

中车南京浦镇车辆有限公司密切关注国产 CPU 与操作系统领域的技术突破与生态进展,为积极响应国家信息技术应用创新战略,系统性地开展了基于国产基础软硬件的业务系统替换可行性研究。公司组建了专项技术团队,从芯片性能、操作系统兼容性、外设驱动支持、关键业务软件适配等多个维度,对主流国产技术路线进行了充分评估与测试验证。在确立技术可行性与实施路径后,公司审慎地将办公计算机的国产化替代作为规模化推广的先行试点,旨在通过该环节积累经验、验证模式。基于前期扎实的研究结论,公司最终明确了以国产化桌面云为核心的技术路线,制定了分阶段、平滑渐进的建设路径,为全面实现自主可控的数字化基础设施转型奠定了坚实基础。

3 国产化终端改造面临的核心问题

3.1 系统兼容性障碍

制造业企业在推进 Windows 电脑国产化改造过程中面临的首要挑战在于系统兼容性问题,特别是基于 CS 架构的业务客户端在国产化操作系统上的适配困难。许多制造企业在终端设备国产化替代过程中,发现原先部署于 Windows 环境的核心业务终端软件,其底层依赖的运行时库、硬件驱动及 API 接口在迁移至国产操作系统(如统信 UOS、麒麟 OS)时,常出现兼容性缺失或性能波动^[3]。这类兼容问题导致终端功能无法正常运行,甚至引发数据读写错误、界面显示异常等现象,直接影响生产终端操作效率与工作连续性。

3.2 双系统并行运维压力

在国产化终端过渡阶段,企业需同时维护国产化与非国产化两套终端设备环境,这显著增加了终端运维的复杂性与成本。双平台并行意味着需管理两类硬件终端、两种操作系统版本及多套终端安全策略,运维团队需具备跨平台终端的技能储备,并投入额外资源进行终端监控、补丁更新与故障排查。这种并行状态易导致终端资源分配冲突,例如网络带宽、存储空间及计算资源的竞争使用,可能引发终端性能瓶颈或服务延迟^[4]。同时,双终端环境加大终端安全管理难度,非国产终端未修复漏洞或成攻击入口,国产终端安全机制未充分验证,形成终端防护盲区。运维人员频繁切换终端管理工具与操作流程,既降低响应效率,也可能因人为失误引发终端兼容性冲突或数据不一致问题。

3.3 资源浪费与成本攀升

部分企业为应对兼容性挑战,采用双 PC 部署方案,为员工同时配备国产化 PC 与 Windows PC 访问不同业务系统。该方案短期内解决应用访问问题,但造成资源冗余与成本上升^[5]。硬件采购上,企业需双倍投入终端设备、外围配件和电力基础设施,使固定资产支出与能耗成本大增。同时,双 PC 方案未有效利用计算资源,Windows PC 运行少数未适配应用时利用率低,国产化 PC 也可能因业务负载不均衡闲置。

长期看,这种资源分配模式违背国产化改造降本增效初衷,还增加电子废弃物处理压力。随着改造推进,Windows PC 渐被淘汰,前期投入成沉没成本,影响企业整体投资回报率^[6]。

4 制造业企业国产化云桌面替代过程中问题解决方案

4.1 构建双系统并行访问的过渡型云桌面架构

针对制造业国产化替代过程中必然出现的业务系统并存期,企业需构建一种能够无缝兼容新旧两种生态的过渡型云桌面架构,这是实现平滑替代的技术基石。该方案的核心在于,采用基于国产 C86 服务器架构(如华为鲲鹏、中科海光)的云桌面平台,通过虚拟化技术为每位终端用户按需分配两台虚拟机(VM)。后期可以根据业务系统改造进度,完成 VM 操作系统的调整,避免资源浪费。

在业务系统并存时期,一台虚拟机搭载国产化操作系统,如统信 UOS 或麒麟 OS,并部署已完成国产化适配与认证的核心业务应用,如 MES、ERP 的客户端,用于处理日常的生产管理与行政办公流程。另一台虚拟机则保留一个纯净、文档的 windows 环境,专门用于运行那些尚未完成源码移植或适配、强烈依赖 Windows 特定底层框架或硬件驱动的专业工程软件,如 CAD 设计软件。用户通过国产化瘦客户机,利用桌面交付协议,可依任务需求在低延迟网络下无缝切换显示出两套虚拟桌面,获本地化操作体验。此架构业务上规避兼容性导致的生产中断风险,确保业务功能连续可用;投资与运维上,避免为员工配两台物理 PC 带来的高成本、高能耗及繁重维护工作。计算与存储资源集中于数据中心,为企业 IT 提供统一管理与监控,为后续削减 Windows 虚拟机资源、实现全面国产化奠定灵活基础。

4.2 双 PC 过渡方案的部署模式与实施路径

双 PC 过渡方案作为应对国产化兼容性挑战的常见策略,其核心是为每位员工同时配备两台物理计算机:一台搭载国产化操作系统(如统信 UOS 或麒麟 OS),用于运行已完成适配的日常办公与生产管理类应用;另一台保留原有 Windows 系统,专门处理尚未完成迁移、高度依赖 Windows 环境的核心专业软件,如高端 CAD、CAE 及专用工程辅助工具。在实施过程中,该方案通常以“终端并置、用户切换”的方式运作,用户根据实际任务需求,在不同计算机之间进行手动切换操作,或借助 KVM 切换器等外设实现一套键鼠对两套主机的控制。

该方案的优势在于技术复杂度低、部署周期短,可快速解决关键业务因兼容性问题无法在国产终端运行的情况,避免因系统迁移导致的生产中断。然而,其弊端亦非常显著:企业需承担双份硬件采购成本,包括国产终端、Windows 终端及配套的外设与基础设施;日常运维需同时维护两套完全独立的系统环境,包括双倍的安全策略部署、补丁管理、故障排查及软硬件更新,显著增加运维人力和时间成本;此外,双 PC 模式导致资源利用率低下—Windows PC 多数时间仅运行个别专业软件,国产终端在业务负载较轻时同样存

在闲置，整体能效比差，不符合绿色集约化建设目标。

5 两种替代方案综合对比分析

5.1 双 PC 过渡方案存在管理效率低下与资源利用率不足的缺陷

双 PC 部署作为常见的过渡应对策略，虽然在初始阶段因技术简单、无需调整现有网络拓扑而具备一定易用性，但其分散式架构在长期运维中暴露出显著弊端。该方案缺乏集中化管理机制，IT 人员需分别对国产终端和 Windows 物理 PC 进行个体维护，如双系统安装、软件更新、外设调试与故障排查等，这种点对点运维方式耗费人力、管理效率低。资源利用上，为用户配备两套计算设备造成硬件冗余与重复投资；很多 Windows PC 仅运行少数未适配国产化的专业应用，大部分时间资源低负载或闲置，整体利用率严重不足。国产化改造完成后，Windows 终端将被淘汰，使企业面临前期投入沉没、设备处置成本升高、环保压力增大等问题，违背降本增效和可持续发展目标。

5.2 桌面云方案实现资源整合与平滑过渡的优势显著

相较于双 PC 过渡方案所面临的运维与资源挑战，桌面云方案依托资源池化与虚拟化技术，构建出高度集中、弹性灵活的 IT 资源交付模式。该方案通过数据中心对计算资源进行统一整合与调度，可按需动态分配国产化或 Windows 虚拟机，彻底避免物理终端冗余带来的资源浪费，显著提升资源利用效率。其基于中心的统一管理平台极大增强了 IT 管控能力，支持通过模板化技术批量部署虚拟机、统一下发系统镜像与安全策略，实现自动化运维与大规模监控，有效降低人为配置错误和安全风险。在过渡策略方面，云桌面架构展现出高度灵活性，管理员可依据国产化应用适配进展，在后台无缝调整虚拟机操作系统类型、资源配置及用户访问权限，支持从混合环境向全国产化体系平滑迁移，既保障业务连续性，也为企业长期数字化转型提供可靠、经济且可持续的技术支撑。

5.3 双系统云桌面差异化资源调度与自动化运维管理策略

在成功部署双系统云桌面架构后，为确保其在大规模制造业环境中稳定、高效且安全地运行，必须实施一套精细化的资源调度与自动化运维管理策略。该策略旨在智能地解决双系统并行带来的资源分配与运维复杂性挑战。首先，基于制造业应用负载的特性差异实施分层资源调度。

对于承担重任的 Windows 环境云桌面，尤其是运行如 MES 终端、CAD 辅助设计等对计算性能和稳定性要求较高的专业软件实例，通过资源池的 QoS（服务质量）策略，将其优先调度至配备高性能 CPU 与充足内存的专用计算节点，并分配足够的 vCPU 与独占内存资源，以保障高负载任务的实时响应与稳定运行。相比之下，主要用于日常办公、浏览器访问及轻量国产化应用的国产系统云桌面，因其资源需求较为常规，可部署于标准性能节点，并采用更高密度整合策略，从而提升整体资源利用效率，避免资源闲置。其次，面

对大量异构虚拟机环境，需引入强大的自动化运维平台，实现对全部虚拟机生命周期的集中化管理，包括通过模板化技术实现国产与 Windows 桌面快速部署，利用差分镜像技术减少系统更新资源占用，制定统一安全基线完成漏洞扫描与补丁安装，建立监控告警体系实时感知异常。这套策略减轻了 IT 运维团队维护双轨并行系统的压力，降低人为失误风险，确保过渡期生产环境稳定、高效、安全。

6 国产化桌面云替代方案带来的额外价值

桌面云方案不仅解决了国产化替代过程中的兼容性与管理问题，还为中车南京浦镇车辆带来了多方面的额外价值。在数据安全方面，虚拟桌面将数据存储在数据中心而非本地设备，减少了数据泄露与丢失的风险，同时可通过加密访问、权限控制与行为审计等功能增强整体安全性。在运维管理方面，集中化的管理平台支持远程维护、快速故障恢复与统一策略部署，大幅提高了 IT 团队的响应效率与服务质量。此外，桌面云架构可扩展性良好，能随企业业务增长灵活调整资源规模，支持新技术集成与系统升级。从成本看，虽初期投入可能较高，但长期可通过资源整合与运维自动化降低总拥有成本（TCO），实现投资回报最大化。这些优势使桌面云方案不仅是国产化替代的有效手段，更是中车南京浦镇车辆带来了构建未来数字化基础设施的战略选择。

7 结语

国产化云桌面替代 Citrix 系统的探索实践，是制造业企业数字化转型实现技术自主可控与安全保障的重要举措。本文分析国产化信息技术发展现状，指出改造面临系统兼容性、过渡期管理、资源利用效率等核心问题，提出双 PC 与桌面云两种解决方案。综合对比显示，桌面云方案在管理效率、资源优化、过渡平滑性上优势显著，还能增强数据安全、降低运维成本、具备长期可扩展性。随着国产化技术成熟普及，桌面云架构有望成制造业企业主流选择，助其保持竞争力与创新力。未来，企业应结合自身需求和资源，制定循序渐进的替代策略，关注技术演进与行业最佳实践，确保国产化改造项目成功实施与持续受益。

参考文献

- [1] 杨汉民,张艳.基于云桌面平台的无机化学实验教学模式与实践[J].大学化学,2023,38(8):77-84.
- [2] 杨森,刘文艳,王珂,等.云桌面技术在高校计算机实验教学中的应用探究[J].中国信息技术教育,2025(2):98-103.
- [3] 许琦.基于KVM架构的云桌面GPU虚拟化技术研究[J].自动化与仪器仪表,2023.
- [4] 陈柏英.云桌面数据的迁移方法,节点和服务器:CN202110879884.2[P].
- [5] 蒋宇,陈思佳.云桌面下的计算机虚拟实验室建设[J].实验室研究与探索,2025(7).
- [6] 周杨.基于云桌面技术的高校同声传译语音室远程控制方法[J].信息技术,2023,47(6):113-118.

Research on Anti-interference Design of Switching Power Supplies

Lujun Wei

Sichuan Hushan Electric Appliance Co., Ltd., Mianyang, Sichuan, 621000, China

Abstract

Switching power supplies have been widely applied in numerous fields such as consumer electronics, industrial control, and audio equipment due to their high efficiency, small size, and strong adaptability. During the high-frequency switching process, electromagnetic interference (EMI) is inevitably generated. If not effectively suppressed, it will not only affect the stable operation of the power supply itself, but also may interfere with the digital power amplifier and audio signal processing circuit, ultimately leading to a decrease in the overall performance of the system. Based on this, the article will start from the interference mechanism, discuss key measures such as circuit topology optimization, PCB layout and routing filtering, and shielding grounding system design, and propose comprehensive design strategies in combination with actual application scenarios, hoping to provide references for improving the electromagnetic compatibility performance of electronic devices.

Keywords

Switching power supply; Electromagnetic interference; Filtering; PCB design; Electromagnetic compatibility

开关电源的抗干扰设计研究

魏路军

四川湖山电器股份有限公司，中国·四川绵阳 621000

摘要

开关电源凭借高效、体积小和适应性强等特点在消费电子工业控制以及音频设备等众多领域得到广泛应用。在高频开关过程中电磁干扰(EMI)不可避免地产生，倘若没有进行有效抑制，不但会对电源自身的稳定运行产生影响，而且还可能干扰数字功放以及音频信号处理电路最终致使系统整体性能降低。基于此，文章将由干扰机理切入，对电路拓扑优化、PCB布局布线滤波与屏蔽接地系统设计等关键措施进行探讨，结合实际应用场景提出综合性设计策略，期望能为提升电子设备的电磁兼容性能给予参考。

关键词

开关电源；电磁干扰；滤波；PCB设计；电磁兼容

1 引言

电力电子技术的迅猛发展一方面带动了电源技术的发展，另一方面也给电源产品提出了越来越高的要求。开关电源具有线性电源无可比拟的优点：体积小、重量轻、效率高等。但是，功率密度的增大和频率的提高所产生的电磁干扰对电源本身及周围电子设备的正常工作都造成威胁^[1]。关变换器本身具有一定的开关噪声，从而会从电源的输入端产生差模与共模干扰信号。所以针对开关电源的抗干扰设计展开深入研究，不仅是确保电源可靠运行的必要举措，更是提升音频设备整体性能的关键所在。

2 开关电源的干扰机理分析

2.1 传导干扰

开关器件在高频导通关断过程里引发的电流脉冲是传导干扰的主要表现，其会通过输入电源线，以及输出端口朝外部传输。在开关进程中电流以及电压的变化率处在极高状态，极易在导线上催生丰富的谐波成分，电源网络里这些谐波相互叠加，从而形成频谱范围较宽的干扰信号。并且整流环节输入的非线性特性加上滤波电容的充放电行为，会让电流畸变进一步加剧，致使传导干扰幅值在低频段和高频段都有所呈现^[2]。

通常来说，传导干扰主要划分为差模与共模干扰两种形式，其中，差模干扰的原因在于开关器件电流的急剧变化。以至于频谱集中处在相对较低频段，且沿着相线与中性线之间的路径进行传输。共模干扰源在开关节点显著的高 $\frac{dv}{dt}$ 效应，借由寄生电容在相线和地线之间构建起泄漏电流，

【作者简介】魏路军（1985—），男，中国四川射洪人，本科，工程师，从事开关电源、数字功放、音频信号处理研究。

它的能量分布处在较高频率区间，对外部电路所产生的影响更为显著。除此之外，传导干扰的严重程度受整流电路滤波电容，以及磁性元件等非理想特性影响颇大，举例来说，电容的充放电行为在输入电流里极易产生高幅度尖峰，而磁芯的非线性会致使电流谐波数量增多，进而让干扰水平进一步攀升。

2.2 辐射干扰

开关电源里的高速开关器件在运行期间产生诸多高频谐波，这是辐射干扰的主要来源。当电流与电压以较高变化率切换时，由电路中寄生电感和寄生电容构成的非理想通道会把高频能量转变为电磁波。这些电磁波通过布线散热结构以及器件引脚等导体，以天线的形式向外辐射出去，既包含由非线性效应引发的高次谐波，也包括开关频率的基波成分，其频谱范围较宽进而在较大频段内呈现出显著的电磁干扰特征。

在具体的机制当中电路布局和辐射干扰存在着紧密的关联，高频电流会因功率环路面积过大，增强等效辐射天线效应进而让干扰场强显著增大。当布线没能对信号回路的闭合路径予以控制时，具备高 dv/dt 的节点更容易形成强烈的电场辐射，在高频运行时磁性器件会产生磁通泄漏，这些泄漏的磁通叠加到周边导体上，使得空间辐射水平得到进一步提高。除此之外，在高频条件下散热器金属外壳，以及地平面都有可能成为电磁辐射源，在电磁场激励下，要是接地不连续或者结构不完整，这些金属部件就会产生共模电流^[3]。共模电流会让辐射通道的有效面积增大，使得干扰信号能够在较远的距离传播，并且会对相邻的敏感电路或者设备造成影响。

2.3 耦合途径

在高频运行阶段的开关电源电磁干扰常借助多种耦合途径侵入敏感电路，其常见的形式涵盖电磁感应，电容耦合以及公共阻抗耦合。首先，当大电流以高 di/dt 切换时，邻近导体上会感应出干扰电压，电磁感应耦合主要发生在功率回路与信号回路之间，该干扰电压幅度与耦合回路面积及相对位置密切相关。若布线间距不够或者平行长度过长，那么感应效应会明显增强，这将导致低电平信号很容易受到干扰。其次，高 dv/dt 开关节点与相邻导体间的分布电容会因与寄生电容相关，产生电容耦合形成电流传输通道把高频电压直接叠加到敏感节点。在开关频率提升的条件下，此类耦合的高频特性尤为突出，对控制电路和检测模块影响颇大。此外，在开关频率提升的条件下，此类耦合的高频特性尤为突出，对控制电路和检测模块影响颇大，当不同电路模块共用同一回路路径时，公共阻抗耦合与接地或供电回路的阻抗相关。高频电流在该路径上形成的电压降，会叠加到其他电路中表现为共模噪声或控制信号畸变。

在实际的系统里，上述三种耦合机制常常共同存在，并且在复杂的布线环境当中相互叠加。这就导致干扰路径

很难被单一隔离，从而进一步加大了系统电磁兼容设计的难度。

3 开关电源的抗干扰设计措施

3.1 电路拓扑与开关策略优化

在开关电源抗干扰设计里，对开关策略与电路拓扑进行优化是降低传导干扰以及辐射干扰的关键措施。第一，合适的拓扑结构应依据负载类型、输入输出特性以及功率等级来进行选择。诸如反激、正激半桥以及全桥等拓扑需依据磁性元件特性，功率器件承受能力以及开关频率来开展匹配工作，以此对电流波形特性与电压应力分布予以优化。在此过程中，需考虑高频噪声生成机理来选择拓扑结构，尽可能防止尖峰电压与振铃效应被放大，以此来降低高频干扰源的强度。此外，进行拓扑优化时需要针对关键节点的寄生参数展开分析以及实施补偿，开关尖峰和振铃的产生是由于功率器件的输出电容、寄生电感以及 PCB 走线寄生影响所导致，为有效降低其中的高频成分，可通过匹配补偿网络或者对缓冲电路进行合理布局来实现^[4]。第二，在开关策略上要想实现干扰能量的分散，可以借助对开关频率、占空比以及相位关系作出调整来达成。通过软开关技术如零电压开关 (ZVS) 或零电流开关 (ZCS)，降低开关瞬态尖峰电压和电流，从源头控制高频干扰产生。同时高频 PWM 控制需结合负载动态特性开展频率调节工作，防止特定频率段出现共振耦合现象。对高压输入或大功率输出电路而言可采用多级转换拓扑，把电压与电流分摊到多个子模块达成低电压应力操作让单元器件的开关噪声得以降低。进行控制环路设计时要依照拓扑特性对反馈路径予以优化，在瞬态负载出现变化的情况下，通过运用快速采样以及闭环调节这两种方式能够实现迅速响应，避免开关波形的异常跳变带来的干扰扩散。

3.2 PCB 布局与布线控制

在开关电源的抗干扰设计工作里，PCB 的布局以及布线控制是达成高频噪声抑制以及保障系统稳定性的基础性环节。首先，按照电源拓扑结构对功能区域予以划分。分别集中设置功能区域，将功率器件、控制芯片、滤波网络以及信号处理电路，防止高频开关噪声经由导体耦合到敏感区域。为避免出现干扰问题，应尽量让功率回路靠近器件引脚，形成最短的回路路径，这样做能够降低寄生电感，减小回流路径的阻抗。其次，在布线策略方面，需要着重考量电流回路的闭合路径连续性，对在高频开关节点的走线宽度，要确保满足电流密度方面的要求，尽力规避急转弯情况以及长线跨越现象，以此来降低由环路电感所引发的尖峰干扰。并且，敏感信号线(模拟采样反馈以及控制信号)需远离功率回路，在必要的条件下应采用差分走线或者屏蔽走线，以此抑制共模与差模干扰的叠加效应。再者，在多层板设计方面，要把关键信号层夹在连续的电源层或者磁层之间，借由层间电容耦合来降低高频噪声的传播，并且形成稳定的参考电位，以

此确保信号完整性^[5]。同时需将去耦电容布局紧贴器件电源引脚，且让它与高频电流回路形成最短路径，确保瞬态电流能稳定供应降低电压尖峰。此外，开关管二极管以及滤波器件在器件布局时需进行成组排列，如此一来高频干扰源能够集中，方便实施局部屏蔽与滤波措施。并尽量将大电流回路靠近 PCB 的供电层或靠近低阻抗铜箔区域，以此来分散热量降低导通阻抗，当信号线和高频功率线出现交叉布线的情况时，要通过采取垂直交叉的方式，或者增添底层屏蔽以此来避免耦合干扰进入到敏感信号通道之中。

3.3 滤波与屏蔽措施

在开关电源抗干扰设计里，屏蔽与滤波措施乃是控制辐射干扰和传导干扰的关键手段。第一，应在输入端与输出端采用多级滤波结构。一般而言这种结构涵盖共模电感和差模电容的组合，目的是达成对高频低频干扰成分的双重抑制效果。紧邻电源接口布置输入端的 EMI 滤波器，以此减少电缆引入的共模噪声。同时需结合负载特性对输出端滤波器的参数进行优化，保证输出纹波符合系统稳定性要求并且抑制高频尖峰对后续敏感电路产生的干扰。第二，在滤波器的设计工作里需要针对电感的饱和电流能力还有电容的等效串联电阻展开精准的选型操作，避免在大电流的状况下滤波性能出现下降或者引发局部发热的现象。对于共模滤波可以通过确保磁芯材料在目标频段拥有足够阻抗的方式来有效吸收高频干扰能量；对于差模滤波则可以采取 LC 组合来有效抑制功率回路噪声。滤波网络布线时高频回路路径应尽可能缩短，要防止敏感信号层和大电流回路出现平行布线情况，以此降低耦合干扰。第三，在屏蔽设计时要依据电路功能区域实施分区屏蔽操作，把开关器件 PWM 控制模块和模拟信号处理模块进行物理隔离，将关键干扰源采用金属罩或者导电箔包覆起来，以此限制高频能量朝着周边电路进行辐射。同时在必要位置留设滤波孔或引线孔，以此实现信号与功率的分流控制，屏蔽体要和接地系统良好连接，确保回流路径具备低阻抗。在电源转换器里针对内部的高频开关节点，可借助滤波电容和局部屏蔽的协同设计来减少开关尖峰向外泄漏以此保证系统整体具备良好的抗干扰性能。

3.4 接地系统设计

开关电源抗干扰设计里接地系统的搭建，是达成高频噪声抑制以及保障信号完整性的关键所在。首先，就多模块系统而言，需将单点接地和多点接地策略结合运用，让低频

与高频干扰的控制成效都能得到兼顾。对于高频环路，可采取多点接地以缩短回流路径，降低寄生电感对开关波形的作用；对于低频环路，则进行单点接地，能够有效避免地电位差引发的环路电流干扰。其次，在布线布局当中高频开关节点的回流路径要优先同功率地平面紧密耦合起来，防止信号跨越有着大面积的阻抗，进而降低电磁辐射以及共模干扰的耦合风险。再者，做好各类功能电路的接地隔离设计，对其进行实施干扰分区管理。对于音频处理模、拟信号采集以及数字控制电路，在进行地平面设计时需与功率模块达成合理隔离状态。倘若有必要可以借助隔离电容或者磁屏蔽，来达成对噪声衰减的二次抑制。此外，导体截面积与接地线的宽度要依据回流需求和电流密度展开精确计算，防止因过窄造成局部发热或电压跌落。并且要尽可能降低接地点的交叉和分支情况，以此减小公共阻抗耦合的可能性。在进行模块接口以及外部端口布局工作时，接地优化工作需要紧密结合 PCB 层叠结构来开展。应当把敏感信号层放置在连续的接地层中间位置，以此达成电磁屏蔽的良好效果。在接地点附近针对高频电源输出端以及信号输入端可布置磁珠与去耦电容，让高频噪声回流至地平面抑制瞬态干扰。

4 结语

在音频系统以及其他各类电子设备里，开关电源的抗干扰设计是确保其能够可靠应用的关键重要环节，通过滤波与屏蔽，强化接地系统，优化拓扑以及 PCB 布局合理化等措施能够有效抑制辐射与传导干扰，进而提升电磁兼容性能。为契合高保真音频和复杂电子系统的要求，未来研究可以进一步把新型功率器件与智能控制相结合，对更高效低干扰的电源设计方案展开探索。

参考文献

- [1] 陈志彬.开关电源电磁兼容设计分析[J].光源与照明, 2025(3).
- [2] 安立先.基于无线通信技术的开关电源监测系统设计[J].通信电源技术, 2025(12).
- [3] 范国涛,李森,周阳.高压开关设备智能组件电磁抗干扰方法研究[J].数码精品世界, 2023(5):461.
- [4] 孙娟.开关电源的抗干扰技术分析[J].通信电源技术, 2022, 39(4):39-41.
- [5] 刘明刚,折勇刚.基于双变压器LLC谐振变换器的开关电源设计[J].机电信息, 2024(13):1-5.

Research on the application of artificial intelligence in computer network technology

Jianfeng Wang

Henan Institute of Physical Education, Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

Against the backdrop of deepening informatization and digital transformation, China's AI research and industrial applications are maturing steadily. The integration of computer network technologies is demonstrating multidimensional development trends. Leveraging deep learning, reinforcement learning, and adaptive algorithms, AI demonstrates broad application potential in multiple domains including network traffic optimization, resource scheduling, anomaly detection, and intelligent operations. This paper first analyzes the interconnection mechanisms between AI and computer network technologies through research and practical insights, then explores their specific application priorities, ultimately providing actionable pathways to support efficient and secure network system operations.

Keywords

artificial intelligence; computer network technology; relevance; application; research

人工智能在计算机网络技术中的应用研究

王建锋

河南体育学院，中国·河南 郑州 450000

摘要

在信息化与数字化不断深入发展的大背景下，我国人工智能技术的研究以及产业应用正逐步迈向成熟阶段，而在计算机网络技术领域的整合态势愈发凸显出多维度的发展走向。人工智能借助深度学习、强化学习以及自适应算法，在计算机网络流量优化、资源调度，异常检测以及智能运维等众多领域彰显出较为广泛的应用潜能。有鉴于此，文章结合研究与实践先就人工智能与计算机网络技术二者关联机制展开分析，接着探讨其具体的应用要点，以此为网络系统的高效安全运行提供具有可操作性的路径支撑。

关键词

人工智能；计算机网络技术；关联性；应用；研究

1 引言

计算机技术与人工智能技术的深度融合，已在社会多个领域发挥重要作用，有力推动了社会发展，也引起了相关科研人员的高度关注。人工智能通过模拟人类思维与意识，实现智能化操作，在生产企业可助力智能化生产，在网络技术应用中能简化程序、提升网络运行效率。如今，人工智能受到社会广泛关注，相关基础研究不断加强，并在计算机网络技术中得到应用，推动了科学技术革新，完善了计算机网络的智能化功能。

2 人工智能与计算机网络技术关联性分析

结合实践来看，人工智能计与算机网络技术具有高度

的耦合关系，二者从数据驱动、算法优化以及系统智能化这三个方面展现出了核心关联。计算机网络系统产生的大量数据涵盖了网络流量日志，用户行为轨迹以及设备运行状态，这些给人工智能模型训练提供重要数据基础，比如给深度学习、强化学习在流量检测、网络异常检测和路由优化应用给予支持^[1]。同时也正得益于计算机网络技术的数据支持，人工智能可优化调度网络层级结构和数据传输机制，借助图神经网络建模网络拓扑达到高精度流量预测与路径规划，以此有效增强网络吞吐率与延迟控制能力。同时人工智能和计算机网络安全机制融合可使后者实现异常行为识别，攻击特征提取以及自适应防御策略生成，进而推动网络系统主动响应潜在威胁的能力提升。另外，当前工业互联网与 5G 网络的部署进程里，人工智能除在边缘计算节点开展实时数据的智能分析工作外，同时还可借助云端协同来优化网络资源的分配达到端到端的智能化管理目标。

【作者简介】王建锋（1974-），男，中国河南登封人，本科，讲师，从事计算机教学研究。

3 人工智能在计算机网络技术中的应用

3.1 智能流量管理与优化

受网络规模庞大影响,当前网络流量呈现出高度的动态性与复杂性特质,这给传统的静态调度以及优化方法带来了极大的挑战。而人工智能的应用凭借着多维特征建模以及实时决策能够达到精细化的流量管理目标,具体而言:在核心路由器,边缘节点以及汇聚交换机开展高维流量数据采集,涵盖数据包尺寸分布、流量方向、丢包率时延特性与突发流量峰值等,接着建立关联拓扑图与流量矩阵,并借助归一化处理与特征选择方法提取关键流量指标,以此为后续人工智能调度算法训练提供支撑。基于深度强化学习的路由优化能够在多智能体系统框架里进行部署,不同网络域的智能代理借助策略梯度或者 Q-learning 方法,可实现对路径拥塞程度以及链路可靠性展开自主评估形成分布式协同决策。此外,为了应对复杂的网络状态变化,可采取经验回放及动态奖励函数设计来对收敛速度予以优化^[2]。针对流量预测跟异常检测上,以卷积神经网络抽取时空流量图特征或是利用图神经网络针对节点间拓扑关联以及流量传播路径展开建模,接着以历史流量序列与拓扑演化模式来训练预测模型,达到对突发流量事件以及链路瓶颈的前置预测,同时再辅以边缘计算节点实施局部负载调节,从而实现近实时流量的再分配。另外,利用迁移学习技术定期更新全网优化模型参数让已训练策略针对突发访问峰值,新型业务模式以及季节性业务波动具有较强的响应能力,并且结合云端策略管理中心同步优化全局路由策略,达到网络吞吐率最大化和端到端路径延迟最小化,最终实现持续迭代过程里维持策略的稳定性与适应性。

3.2 自适应网络安全防护

现阶段复杂的网络环境下,计算机网络智能防御体系构建核心在于自适应网络安全防护。针对多源安全数据采集环节,入侵检测系统 (IDS) 日志、网络流量异常记录、终端行为数据以及应用层事件等都要开展统一规范化处理。通过建立涵盖时间序列行为、协议异常、会话连续性和用户行为模式等高维特征矩阵,借助基于梯度提升树的特征重要性评估这类特征选择算法进行关键指标的提取,从而提升后续建模效率并降低数据冗余。针对异常行为分类与预测环节,构建多层卷积神经网络 (CNN) 与循环神经网络 (RNN) 的融合模型,实施流量突发性异常、恶意会话以及潜伏型攻击行为开展多标签预测。再借助变分自编码器 (VAE) 针对未知攻击模式实施重构误差检测达成零日攻击的识别,在这一过程中模型参数依靠自适应梯度优化器进行动态更新,以此来应对特征漂移。针对动态防御策略生成环节,运用基于深度强化学习 (DRL) 的策略优化器,借助构建状态—动作空间映射并把网络拓扑、流量分布以及安全事件状态当作输入,以实现防火墙规则、访问控制列表调整方案及流量限速策略地自动生成,同时依靠策略迭代机制持续对防御效果进

行优化^[3]。针对分布式环境的部署环节,借助联邦学习框架,让各节点的智能防护代理开展协同训练。通过共享梯度而非原始数据构建起全局攻击特征模型,并将节点本地敏感信息进行隔离达到跨域攻击特征感知与防御能力的提升。引入连续学习机制,把滑动时间窗口和在线模型更新策略相结合,对攻击特征开展周期性迭代训练,以异常检测反馈作为增量样本输入使得计算机网络在面对复杂多变威胁时实现网络安全防护系统的自适应调整以及智能策略优化。

3.3 动态资源调度与负载均衡

在计算机网络里,人工智能借助多层次多维度的数据驱动达到对动态资源的调度以及负载均衡目的。先建立起多源异构资源监控体系,把服务器端的 CPU 周期利用率、内存占用率、磁盘 I/O 性能指标、网络链路带宽使用率,还有虚拟机和容器实例负载数据都收集起来。接着将它们进行标准化处理以形成多维资源状态矩阵,随后基于时间序列特征以及业务请求模式利用主成分分析或者自适应特征选择算法来降低维度以此增强模型训练效率。针对动态资源分配问题需建立强化学习框架,采用深度 Q 网络 (DQN) 或者策略梯度方法,对虚拟机迁移网络带宽分配以及边缘缓存策略实施联合优化。同时凭借状态—动作映射达成多节点资源实时调控,并在训练过程里将经验回放机制与优先采样策略相结合,以此增强模型针对突发负载的响应能力。借助图神经网络 (GNN) 对数据中心网络拓扑与节点间负载关系展开建模,以此把服务器、交换节点及链路抽象成图结构,随后利用节点特征传播、边权重优化达成跨节点负载均衡让计算任务分配与链路带宽匹配达到最佳状态。另外可将约束条件加入进负载迁移策略里,从而促使服务质量让迁移开销实现最小化。把边缘计算和中心云协同调度相融合,按照任务的数据依赖性、时延敏感性先将实时响应要求高的业务调度到延迟最小的边缘节点,而非时延敏感业务则以云端进行集中化处理。借助多层调度器以及任务队列对资源占用进行动态调整,从而确保整体网络负载均衡。另外,长短期记忆网络 (LSTM) 或者变分自编码器 (VAE) 这类时间序列预测模型引入,以对未来的负载变化及业务请求量开展预测^[4]。凭借前瞻性调度预先对缓存容量分配,链路带宽分配以及虚拟机迁移策略予以调整,在有效降低网络拥塞与节点瓶颈风险情况下连续动态优化调度资源。

3.4 网络服务智能预测与维护

网络服务的智能预测与维护,人工智能可借助多维度的数据分析以及预测模型实现精细化网络性能管控。搭建全面的网络服务监测体系,通过采集网络延迟、时延抖动、丢包率、TCP 重传次数与连接中断事件等端到端 QoS 指标,随后基于用户访问模式、业务类型和流量分布信息建立高维时间序列数据集以给后续建模打造完整输入特征。搭建构建深度序列预测模型,其以长短期记忆网络 (LSTM) 与门控循环单元 (GRU) 为核心。运用滑动窗口和多尺度特征提

取捕捉短期波动与长期趋势，同时借助归一化处理、特征重要性加权以及残差优化技术促使预测精度提高。接着再辅以交叉验证与自适应学习率策略对模型参数予以调整，从而精准预测不同拓扑结构与流量模式情形下网络服务性能的变化。计算机网络故障诊断及运维系统深度融合预测结果，运用异常检测算法找出潜在瓶颈节点并生成自动化维护指令，再以软件定义网络（SDN）、网络功能虚拟化（NFV）技术执行动态故障切换负载迁移及路由优化，如此一来能促使关键业务链路持续不断，且让节点冗余利用率实现最大化。把智能运维代理部署在网络核心交换节点与边缘计算节点，一方面可实时开展预测任务，另一方面则对带宽调节、缓存优化以及会话负载平衡等资源分配策略进行动态调整，另外再借助强化学习来优化策略更新路径达成模型和实际网络环境之间的闭环自适应调节。此外，基于增量学习以及模型参数的连续更新，最终让预测系统能够对网络拓扑变化、业务增长以及异常流量模式做出响应，借助历史数据建立经验库，并将迁移学习方法进行结合以此提升在新场景下预测的鲁棒性和响应效率，促使网络服务得以持续智能运维和性能优化。

3.5 自优化网络架构设计

人工智能在计算机网络技术中自优化网络架构设计利用多层次数据驱动方式，达到动态调整网络拓扑与资源配置目的。实施网络监测探针与流量采集系统部署以此开展高精度核心交换节点、接入节点与链路带宽使用率、时延分布、丢包率及历史故障事件等采集，接着把所获数据转化成多维拓扑矩阵，其维度包含节点度、链路负载路径冗余以及故障频次，如此一来可为后续智能分析给予基础数据支持^[5]。针对拓扑矩阵采用图神经网络（GNN）开展结构与性能特征编码工作，凭借节点嵌入表示、多跳传播机制、邻接矩阵特征卷积实现网络全局和局部信息获取。接着以遗传算法或者强化学习策略针对包括网络节点部署、关键路径配置、链路冗余选择等展开优化，以此达成节点间负载均衡以及冗余资源的最优分配。第三，运用高精度虚拟仿真平台对不同

突发事件情景以及业务流量模式展开模拟，借助流量生成模型、拥塞控制机制与服务质量约束等技术以迭代方式调整拓扑参数并生成多轮优化方案，同时辅以强化学习算法针对仿真结果实施策略更新，促使网络拓扑设计的持续优化。资源分布层环节采取云端数据中心与边缘计算节点协同模式实现基于业务负载、延迟要求和地理分布的计算、存储及缓存资源智能调度，同时通过深度强化学习算法动态迭代资源调配策略，一方面可让使网络整体吞吐量及响应时延达到优化状态，另一方面则保证关键节点具备高可用性。另外，实施在线反馈闭环机制，以流式数据分析模型把实时网络运行状态、链路波动以及节点异常输入智能优化模块以此触发自动化拓扑调整与负载迁移策略，这样既实现网络多业务场景下自适应优化，又可保障网络结构调整性能指标和冗余策略之间的动态协调性，最终建立起持续迭代的智能化网络架构管理体系。

4 结语

综上所述，结合人工智能与计算机网络技术研究及实践来看，在包括网络流量管理、资源调度、网络安全服务预测以及架构优化等方面人工智能呈现出极高的应用价值。借助于图神经网络、深度学习以及强化学习等技术助力下，计算机网络系统凭借数据驱动得以实现自适应决策、动态优化及智能调控，从而推动其朝着自主化、智能化方向前进。

参考文献

- [1] 钱利君.人工智能在计算机网络技术中的应用研究[J].产城:上半月, 2023(2):0139-0141.
- [2] 宋义秋.计算机网络技术人工智能应用研究[J].新潮电子, 2024(1):82-84.
- [3] 张松林.大数据时代下人工智能在计算机网络技术中的应用[J].电脑迷, 2023(22):13-15.
- [4] 刘博升.大数据时代人工智能在计算机网络技术中的应用研究[J].电子通信与计算机科学, 2024(8).
- [5] 黄庆涛,李峤.人工智能在计算机网络技术中的应用研究[J].信息与电脑, 2025(10).

Interaction design and Evaluation of Internet of Things Audio-visual Products for improving postpartum depression

Jiayu Gao

Chengdu Neusoft University, Sichuan Province, Chengdu, Sichuan, 611844 ,China

Abstract

Postpartum depression affects many new mothers and their families. This article delves deeply into the causes of postpartum depression, including genetics, hormonal changes, psychological factors, etc., and analyzes the principles by which Internet of Things (iot) audio-visual products improve postpartum depression, such as phototherapy regulating human physiology and psychology and music therapy improving mood. It has designed iot audio-visual products that cover functions such as physical and mental monitoring, audio-visual therapy, and social interaction. Based on the feedback from 50 parturients and a comparison with 50 parturients who did not use the product, it was found that the overall satisfaction rate of the product reached 85%. It performed well in terms of emotion monitoring, sound and light adjustment, ease of use, and social interaction. Moreover, the depressive symptoms of the parturients who used the product improved significantly. Studies show that this product can effectively alleviate postpartum depression symptoms. In the future, it can be integrated with artificial intelligence technology to enhance the treatment effect.

Keywords

Postpartum depression; Internet of Things audio-visual; Interaction design

针对产后抑郁情绪改善的物联网声光产品的交互设计与评估

高嘉瑜

四川省成都东软学院，中国·四川成都 611844

摘要

产后抑郁影响众多产妇及其家庭。本文深入探究产后抑郁成因，包括遗传、激素变化、心理因素等，并剖析物联网声光产品改善产后抑郁的原理，如光疗调节人体生理心理、音乐疗法改善情绪等，设计出了涵盖身心监测、声光治疗、社交互动等功能的物联网声光产品。经50名产妇使用体验反馈及与50名未使用产品产妇的对比，发现该产品整体满意度达85%，在情绪监测、声光调节、使用便捷性、社交互动等方面表现良好，且使用产品的产妇抑郁症状改善明显。研究表明，该产品能有效缓解产后抑郁症状，未来可融合人工智能技术提升治疗效果。

关键词

产后抑郁；物联网声光；交互设计

1. 引言

产后抑郁常见且危害大，既影响产妇身心健康，也破坏家庭和谐。近年科技发展下，物联网声光技术产品为改善产后抑郁提供了新思路。

数据显示，全球约 10% ~ 25% 产妇会受产后抑郁困扰。目前虽无专门的物联网声光产后抑郁改善产品，但相关领域研究已奠定基础；国内对产后抑郁关注度渐升，研究证实有效护理可改善患者症状与生活质量，且物联网技术应用进展也为这类产品设计提供了技术支撑。

2 相关理论研究

2.1 产后抑郁的成因与影响

产后抑郁成因包括遗传、激素变化、心理因素、既往病史等，其中分娩后雌激素与孕激素骤降，易影响产妇情绪

与心理状态。其危害显著，会使产妇长期陷入抑郁悲伤，损害自尊自信，甚至存在较高自杀风险，还会影响家庭关系与新生儿照料质量。

2.2 物联网声光产品改善产后抑郁的原理

2.2.1 光疗的作用原理

光疗通过特定光线调节人体状态，蓝光可调整产妇睡眠-觉醒周期、提升白天精神，红光能增加血清素以改善心理状态，白光接近自然光可缓解抑郁；且柔光光线能放松神经、减轻压力焦虑。

2.2.2 音乐疗法的作用原理

音乐疗法借不同音乐改善情绪：古典音乐可助产妇放松、减轻焦虑抑郁，节奏明快的流行音乐能传递积极力量，舒缓轻音乐可缓解疲劳、促进睡眠，间接缓解抑郁。

2.2.3 声光产品改善产后抑郁的优势

产品可依产妇生理心理数据定制声光方案，如为睡眠

差者配舒缓音乐与柔光线；依托物联网能实时监测数据，异常时预警并调整方案；产品便携易操作，还设社交平台方便产妇交流。

3. 产品设计方案

3.1 产品系统结构

从交互设计的角度出发，本物联网声光产品系统结构可分为战略层、范围层、结构层、框架层和表现层等五大层次。

首先是战略层，其用户是产后抑郁产妇，核心目标是通过声光刺激缓解其抑郁情绪、提升心理健康，同时满足产妇对情绪调节、睡眠改善、情感支持的需求，及对产品易用性、舒适性、安全性的期望。

在范围层确定了核心功能—监测功能通过高精度传感器采集心率、血压等生理数据及情绪、压力等心理数据并分析；声光治疗功能提供个性化音乐与光线组合；社交功能搭建交流社区，助力产妇分享支持、缓解孤独焦虑。

结构层是梳理功能逻辑与信息架构，建立数据处理流程，采集数据传至云端分析后生成并执行声光治疗方案；社交社区设话题分类、私信等功能，方便产妇找感兴趣话题。

在框架层，设计简洁易操作的界面布局，合理分布监测数据展示、声光控制、社交入口区域；优化操作流程减少步骤，通过弹窗、震动等方式提示监测异常、新消息等重要信息。

最后表现层面，视觉上用柔和温馨色彩、简洁圆润图标字体，营造舒适氛围；听觉上保证音乐音质清晰、光线变化过渡自然，避免让产妇不适。

3.2 产品功能设计

方案共设计了四类主要功能，分别是注册登录、情绪监测、声光调节、提醒与社交。以下为系统的功能结构图。

其中，情绪监测功能又细分为生理数据监测、心理数据监测、云端分析建模；声光调节包含了音乐播放、光线选择；提醒与社交功能是健康提醒和社交互动的综合形式。

3.2.1 情绪监测功能

为精准监测产妇情绪，产品采用多类技术：

生理数据监测：集成心率、血压、皮电、脑电传感器。心率传感器借 PPG 技术测心率波动，血压传感器用示波法算血压值，二者可通过心率、血压变化初步判断情绪；皮电传感器测皮肤电反应，脑电传感器分析脑电波特征，进一步精准识别情绪。

心理数据监测：通过语音识别（分析语音内容、语调、语速）和表情识别（捕捉面部表情）获取情绪信息。

数据处理：采集的生理与心理数据经无线传输至云端，用大数据与 AI 算法挖掘分析，建立情绪识别模型，精准识别抑郁、焦虑等情绪并评估严重程度。

3.2.2 声光调节功能

产品依情绪监测结果提供个性化方案：

音乐调节：设含古典、流行、轻音乐的音乐库，情绪低落时推明快流行乐，焦虑时推舒缓古典乐。

光线调节：配可调节 LED 灯，休息时用柔和暖光（如淡黄色、低亮度）助眠，需提神时用明亮自然光（如白色、高亮度）。

手动控制：操作界面设简易按钮，产妇可自行切换音乐、调音量及光线参数。

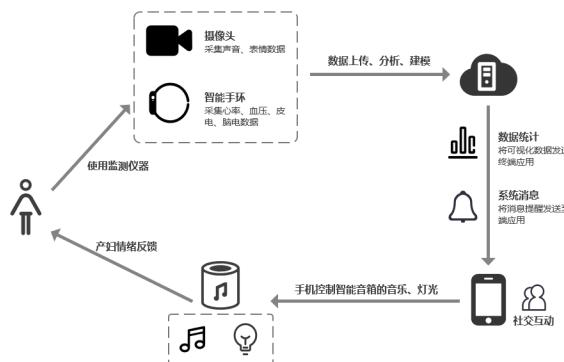
3.2.3 健康提醒与社交互动功能

健康提醒：产妇通过手机 APP 设喝水、进食、康复运动等提醒，以声音、震动、弹窗等方式确保及时接收。

社交互动：搭建专属平台，产妇可发布心情、育儿经验并互动；平台定期办线上活动，邀专家讲解产后知识，助力产妇获情感支持、缓解焦虑。

3.3 方案具体设计

3.3.1 系统整体逻辑



上图呈现产妇情绪监测与反馈的系统逻辑，核心是通过智能设备收集产妇生理及情绪数据，经分析提供个性化反馈支持。

首先，产妇使用摄像头（采声音、表情数据）与智能手环（采心率、血压、皮电、脑电数据），这些数据经上传、分析建模转化为有效信息。

系统接收信息后，统计数据并将可视化结果发送至终端应用，助力掌握产妇当前情绪；同时，系统消息会将提醒推送至终端，确保产妇或护理人员及时获取重要信息。

此外，系统支持手机应用实现社交互动，产妇也可通过手机控制智能音箱的音乐与灯光，调节情绪及环境氛围，既有助于情绪管理，也提供放松娱乐方式。

综上，该系统通过多维度数据采集分析，为产妇提供情绪监测与反馈，助力其产后管理情绪和健康，完整呈现产品架构细节。

3.3.2 终端原型设计

依据表现层设计原则，产品以粉色、浅蓝色等柔和暖色调为主，操作界面简洁，按钮布局合理易触摸，以下为健康监测页与声光调节首页示例：

健康监测页顶部显实时心率（75 bpm，附当日变化趋势图）与体温（36.5° C，提示正常）；中部“查看健康建议”

按钮可提供个性化指导；下方柱状图展示当日不同时段血压波动，整体粉色色调显温馨，数据图表让健康信息清晰易懂。

声光调节首页顶部以“58/100”分数显“今日心情指数”；下方有音乐库选曲按钮，中部可自动或手动调灯光颜色亮度，底部展示轻音乐曲目供直接播放。



综上，终端原型设计简洁、色彩柔和、操作便捷，适配注重健康与生活品质的用户。

4. 使用体验与交互设计反馈

为全面验证产品交互设计的合理性与有效性，本研究结合 50 名使用产妇的问卷调查、操作行为观察及深度访谈，从信息架构、操作流程、视觉交互、反馈机制四大核心维度展开评估。

从使用体验来看，产妇对产品整体满意度达 85%：80% 的产妇认可情绪监测功能的准确性，能通过数据直观感知自身情绪变化；75% 的产妇认为个性化声光方案对缓解抑郁有明显帮助，尤其在夜间哄睡新生儿后，舒缓音乐与暖光组合能快速平复焦虑；90% 的产妇反馈产品操作门槛低，无智能设备使用经验者也能在 10 分钟内掌握基础功能；70% 的产妇通过社交平台获得情感支持，减少了产后孤独感。另有产妇提出改进建议，如希望增加民族音乐、支持自定义提醒时段与频率。

在交互设计评估方面，各维度表现如下：

信息架构合理性：产品框架层设计健康监测、声光调节、社交互动三大核心模块，调查显示 92% 的产妇能在 3 秒内定位目标功能，仅 5% 的用户混淆“情绪分析报告”与“健康建议”入口，主要因二者图标风格相近。访谈发现，产妇更倾向于将“情绪报告”归类至“健康监测”模块，后续可优化模块内标签命名，增强辨识度。

操作流程效率：针对核心任务（启动个性化声光方案、查看情绪监测结果）的操作测试显示，88% 的产妇能在 10 秒内完成进入声光调节、选择方案类型、确认启动的操作，12% 的产妇反馈“选择音乐子类型”步骤冗余，建议增加常用方案一键启动，减少重复操作。

视觉交互适配性：表现层采用的粉色、浅蓝色等柔和色调，获 89% 产妇认可，认为能营造温暖舒适的使用氛围；但 15% 的产妇反馈夜间模式下，健康数据图表的图标对比度不足，暗光环境中难以快速读取心率、血压数值，需调整夜间模式下的图标亮度与色彩饱和度。

反馈机制有效性：产品设计的弹窗、震动、声光提示等反馈方式中，85% 的产妇能准确识别情绪异常、健康提醒等关键信息；但 10% 的产妇反馈夜间休息时震动强度不足，易错过喂奶时间提醒，建议增加日间强震动、夜间弱声光的分级提醒模式。

5 结语

本研究针对产后抑郁干预，结合其成因与危害，依托物联网技术及声光疗法，完成物联网声光产品交互设计与评估。研究明确该技术可针对性缓解产后抑郁，实现“监测-定制-调整”闭环，填补专项产品空白；构建的五层交互设计体系，精准匹配产妇需求，各功能适配产后场景；评估与对比实验验证产品有效性，满意度达 85%，使用产妇抑郁症状显著缓解，高频使用者改善更优。

综上，该产品为产后抑郁干预提供可行方案，未来融合人工智能优化情绪预测与方案推荐，可进一步提升智能化与干预效果，助力产妇健康。

参考文献

- [1] Huong Thi Thanh Nguyen, Anh Phuong Hoang, Ly Thi Kim Do, Stephen Schiffer, Huyen Thi Hoa Nguyen. (2021). The Rate and Risk Factors of Postpartum Depression in Vietnam from 2010 to 2020: A Literature Review. *Frontiers in psychology*.
- [2] 朱鹏,李丽,褚海燕. (2013). 心理干预对产后抑郁症患者焦虑抑郁情绪的影响. *中国现代医生*(1).
- [3] 曹荣俊.(2024-12-16).产后抑郁不容忽视.甘肃科技报,005.
- [4] Sarah,Tebeka,Caroline,Dubertret. (2019). [Postpartum depression]. *La Revue du praticien*(2).
- [5] 何亚辉. (2020). 产后抑郁怎么回事. *健康必读*(27).
- [6] 高艳英. (2013). 护理干预对光疗婴儿母亲产后抑郁的影响. *中国卫生产业*(23).
- [7] 恩和吉雅. (2023). 轻音乐在剖宫产麻醉中的效果观察. *中文科技期刊数据库* (全文版) 医药卫生.
- [8] Rosyati Pastuty, Elita Vasra, Gustiana Gustiana. (2023). THE EFFECTIVENESS OF AUDIO HYPNOTHERAPY IN REDUCING POSTPARTUM DEPRESSION DURING NEW NORMAL. *NSC Nursing*(6).
- [9] Seeba Sulekha Abdulkader, Uvais Ahmed Qidwai. (2021). PPG压缩技术与实现综述.
- [10] 严程娟,胡希文,傅菊萍,张英,毛艳. (2024). 爱丁堡产后抑郁量表评分在经产妇产后抑郁症状评估中的应用及产后抑郁的影响因素分析. *中国妇幼保健*(20).

Design of clock synchronization method in narrowband Internet of Things smart gas meter communication

Mengyang Li Weijian Zhang Xiuqi Lv Yongcheng Liu Shizhang Liu

1. Kunlun Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing, 102206, China

2. CNPC Kunlun Gas Co., Ltd, Jinan, Shandong, 250400, China

Abstract

For remote communication between smart gas meters equipped with Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) and remote data acquisition systems, synchronization of system clocks between both ends is essential to enable the meters to utilize the acquisition system's clock. Although NB-IoT modules in smart gas meters feature manufacturer-specific time synchronization AT commands, differences in meter embedded systems, NB-IoT module models, and telecom operators often prevent unified access, configuration, and operational management of clock servers. Building on the NTP clock synchronization concept for universal servers, this paper proposes a timestamp-based method to calculate network transmission delays for clock synchronization. This approach allows gas companies to achieve standardized clock synchronization across meters using different manufacturers' IoT modules through NB-IoT networks via a unified application-layer protocol. Experimental verification demonstrates that clock synchronization accuracy between smart gas meters and information acquisition system servers can reach 5ms.

Keywords

clock synchronization; NB-IoT; narrowband Internet of Things; NTP; smart gas meter

窄带物联网智能燃气表通信中的时钟同步方法设计

李梦洋¹ 张炜健² 吕修琦² 刘永成¹ 刘世章¹

1. 昆仑数智科技有限责任公司, 中国·北京 102206

2. 中石油昆仑燃气有限公司山东分公司, 中国·山东济南 250400

摘要

在基于窄带物联网（Narrow Band Internet of Things，简称 NB-IoT）的智能燃气表表具和远端数据采集系统进行远程通信时，需要对通信两端进行系统时钟的同步，以达到表具采用采集系统时钟的目的。智能燃气表具中使用的 NB-IoT 模组虽具有厂商扩展的时间同步 AT 指令，但由于表具嵌入式系统、NB-IoT 模组型号以及通信运营商的差异性，往往无法进行时钟服务器的统一接入、配置以及后期的统一运营。本文基于通用服务器的 NTP 时钟同步思想，设计了一种基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，使得燃气企业能够以统一的应用层协议方式将来自不同厂商、使用不同物联网模组的表具按统一的方式通过 NB-IoT 网络实现网络时钟同步。通过实验验证，物联网智能燃气表与信息采集系统服务器之间的时钟同步精度可达到 5ms。

关键词

时钟同步；NB-IoT；窄带物联网；NTP；智能燃气表

1 引言

随着物联网技术的快速发展，以及 5G 通信网络的有力支撑，燃气领域中居民使用的传统插卡式 IC 卡燃气表正在逐步升级为基于物联网的智能燃气表^[1,2]。智能燃气表是一种在燃气计量基表基础上新增了电子和通信模块的新型燃气表^[3]，使燃气企业具备了可以通过远端数据采集平台采集表端计量信息进行实时计费和远程控制的能力。

燃气企业的远端采集平台，一般采用通用的互联网

服务架构，以请求响应的方式通过通信运营商的 NB-IoT（Narrow Band Internet of Things，窄带物联网技术）网络，实现与物联网智能燃气表的通信，以及进行相应的业务控制^[4]，如图 1 所示。



图 1 物联网智能燃气表通信模式

在采集平台和物联网智能燃气表进行通信的过程中，需进行二者之间的时钟同步，建立二者通信的时钟基准。目前，智能燃气表具中使用的 NB-IoT 模组虽具有厂商扩展的

【作者简介】李梦洋（1988-），男，中国辽宁锦州人，博士，工程师，从事能源领域信息与数智化技术研究。

时间同步 AT 指令，但由于表具嵌入式系统、NB-IoT 模组型号以及通信运营商的差异性，往往无法进行时钟服务器的统一接入、配置以及后期的统一运营。

2 时钟同步问题

当前民用燃气领域的现状是，燃气企业通过数据采集平台将其系统时钟下发至物联网燃气表，由物联网燃气表根据时间戳对表具端的时钟进行校正^[5]

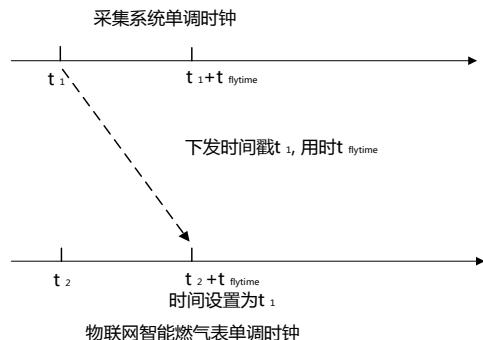


图 2 物联网智能燃气表简单时钟同步

这一过程如图 2 所示，采集系统在 t_1 时刻（此时物联网智能燃气表的时钟为 t_2 时刻）将系统时钟（时间戳 t_1 ）下发，当物联网智能燃气表收到时间戳 t_1 时，考虑到网络传输延迟，以及其他业务处理所消耗的时间，端到端的延迟时间计为 $t_{flytime}$ ，表具应在 $t_2+t_{flytime}$ 时刻将其时钟设定为。

$t_{flytime}$ 受网络传输状况的影响较大，是一个随时间变化的数值，包含有线网络的延迟和通信运营商无线通信网络的延迟两部分。

因此，工程实践中，表具在 $t_2+t_{flytime}$ 时刻收到时间戳，通常直接将时间修正为 t_1 。但当 $t_2 > t_1$ 时，在时刻 $t_2+t_{flytime}$ 将时间调整为 t_1 ，则可能会导致某些按照时间进行计算的逻辑出现“时间倒退”的现象，引起第三者视角从时间维度看到的业务产生混乱。

通过实测，当前采集平台端到表端的时间误差 $t_{flytime}$ 通常可达秒级。对于一般的民用燃气业务，这种误差不会产生较大影响，但若涉及到阶梯计费^[6]，则容易引起合同纠纷。

3 时钟同步设计

为提供一个可统一接入管理时钟误差的解决方案，以及提升时钟同步的精度，参考 RFC 5905 Network Time Protocol（简称 NTP，网络时间协议），本文设计了一种智能燃气表嵌入式系统时钟同步方法，可以屏蔽不同的表具型号、不同的 NB-IoT 模组型号，以统一的应用层协议的方式实现时钟同步，系统架构如图 3 所示。

图 3 中，燃气企业数据采集平台通过局域网 NTP 服务器实现数据采集服务集群内服务器间的时钟同步。通信运营商的 NB-IoT 网络平台通过广域网网关与燃气企业数据采集平台实现跨域通信，NB-IoT 通信网络通过无线通信实现与

城镇小区居民物联网智能燃气表的通信，最终实现燃气企业数据采集服务集群和城镇小区居民物联网智能燃气表的互联互通。

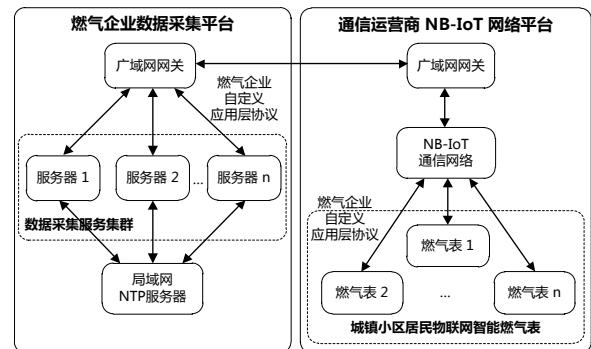


图 3 系统架构设计

核心的，在通信过程中需要利用燃气企业自定义的应用层协议实现燃气表和数据采集服务器的时钟同步。将端到端的系统进行抽象简化，以采集系统端的单调时钟为时钟基准，进行物联网智能燃气表端系统时钟同步的方法可概括为如图 4 所示的过程。

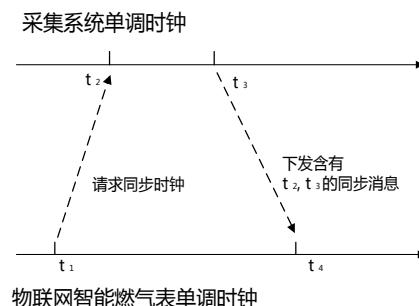


图 4 端到端的时钟同步设计

根据图 4，智能燃气表可在表端计算获得整个通信过程中的网络传输时间 t_n 为，

$$t_n = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$$

假定上下行通信的延迟时间是相同的，则可计算出单程网络传输时间 $t_{flytime}$ 为，

$$t_{flytime} = \frac{1}{2} t_n = \frac{1}{2} [(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)]$$

则表端可计算其时钟系统和采集系统时钟系统的时间误差 t_d 为，

$$t_d = t_2 - (t_1 + t_{flytime}) = \frac{1}{2} [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)]$$

需特别注意 $t_d < 0$ 的情况，即表端单调时钟系统超前于采集系统单调时钟系统，表端需要向后步进时间单位 $|t_d|$ 。若直接进行调整，则可能会导致表端业务时序混乱，如图 5 所示，此时，以第三者视角看来，表端的业务时序产生混乱。

为了避免出现“时光倒流”的现象，表具端应按照其实际时钟记录精度（例如 1ms），将需要调整的时钟误差

分割成多个较小的单位，按照逐步逼近的方式，多次进行时钟调整。或者，考虑到表具嵌入式系统中的微控制器实际时间的控制程度^[7]，可以使其单调时钟系统的“滴答”变慢，最终实现平滑的时间过渡。

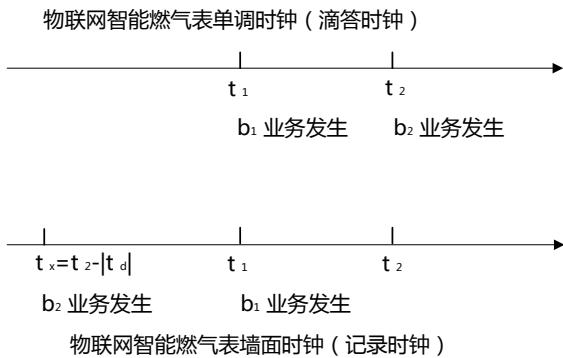


图 5 “时光倒流”现象示意图

4 实验验证

4.1 实验设计

实验网络拓扑如图 6 所示。主机 h_1 模拟数据采集平台，主机 h_2 模拟燃气表具，设定 h_1 到 h_2 端到端网络传输延迟时间为 1s，即 $h_1 - h_2$ 的网络 RTT (Round Trip Time，即网络往返时间) 为 2s， $h_1 - h_2$ 的网络带宽设置为 200Kbps，模拟实际 NB-IoT 网络的端到端的延迟以及传输带宽^[8]。

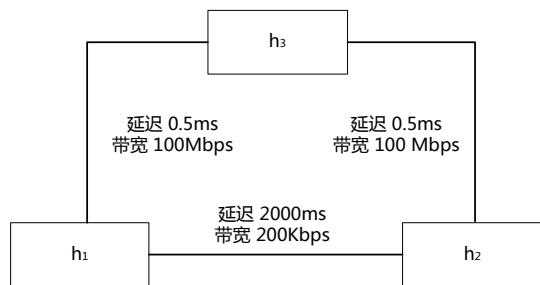


图 6 时钟同步实验网络拓扑示意图

主机 h_3 作为监控机器节点，实时获取节点 h_1 和节点 h_2 的系统时间，为了减少引入的时间误差，将 $h_3 - h_1$ 、 $h_3 - h_2$ 之间的网络带宽设置为 100 Mbps，RTT 设置为 0.5 ms。 h_1 、 h_2 、 h_3 3 个节点中的数据传输采用 TCP 协议。

然后分别按照简单时间戳下发的方法，和本文设计如图 4 所示的基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法进行时钟同步，对比时钟同步精度的提升程度。

4.2 软件设计

本文设计的时钟同步为单向时钟同步方式，两端为服务端（数据采集平台端）和客户端（智能燃气表端），服务端将其时钟单向同步至客户端。

智能燃气表端作为客户端，主动发起时钟同步请求。数据采集平台端作为服务端，响应客户端的时钟同步请求。

两者响应流程如 7 图所示。

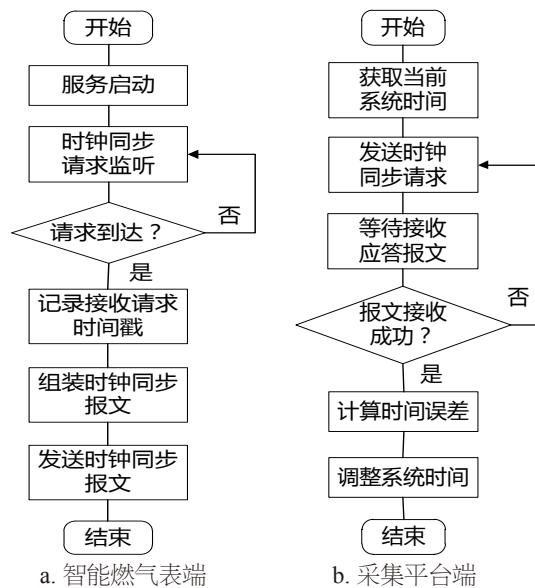


图 7 响应流程示意图

4.3 实验结果

通过表 1 的实验数据可知，运用简单时间戳下发的时钟同步方式后，客户端 h_2 和服务端 h_1 之间存在约 1 秒的时钟误差，且误差稳定为负值，处于 -1.002 秒到 -1.005 秒区间，这表明 h_2 的时钟相较于 h_1 慢了大约 1 秒，凸显出同步过程中无法回避的网络传输延迟。简单时间戳下发方法的本质是造成这种误差的主要原因：服务端直接把当前时间发送给客户端，客户端收到时间后加以设置，然而在信息传递进程中，信息传输时，数据包在网络传输中出现了延迟，且简单方法未对往返延迟和传输时间做补偿，故而会引入恒定的时间偏差，鉴于网络状况或许会出现波动，该方法在不同网络环境下的精准度或许会进一步降低，依据实验结果，即便误差大概为 1 秒，但误差值相对稳定且一致，表明该方法在短期内具备一定的稳定性与可重复性。

表 1 简单时间戳下发时钟同步实验数据

No	服务端 (h_1) 时钟	客户端 (h_2) 时钟	时钟误差 (秒)
1	2022-09-13 01:03:33.756	2022-09-13 01:03:32.754	-1.002
2	2022-09-13 01:09:01.294	2022-09-13 01:09:00.291	-1.003
3	2022-09-13 01:10:14.622	2022-09-13 01:10:13.617	-1.005
4	2022-09-13 01:11:17.043	2022-09-13 01:11:16.039	-1.004
5	2022-09-13 01:12:58.703	2022-09-13 01:12:57.700	-1.003

分析表 2 的实验数据可知，当采用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法之后，客户端 h_2 和服务端 h_1 间的时钟误差大幅降低，误差值处于 -0.004 秒至 -0.002 秒范围，约 2 到 4 毫秒，实验环境中同步精度可达 5ms。这显示该方法能有力克服网络传输延迟对时钟同步造成的干扰，和简单时间戳下发方法相比，精度提高了两个数量级。这种高精度

得以实现，主要是因为该方法在同步时把网络传输延迟纳入考量，通过记录消息收发的时间戳，算出往返时间并加以补偿，让客户端时钟能更精准地与服务端时钟同步。此外，实验环境下数据误差波动小，表明实验环境中，网络传输稳定且方法具备较强的抗干扰能力，即便历经多次同步，时钟误差依旧稳定在毫秒级，体现出极佳的稳定性与可靠性，利用时间戳计算网络传输时延的时钟同步手段，不但可明显降低固定偏差，又能在真实网络状况下实现高度精确的同步，适合对时间要求苛刻的分布式系统、工业控制以及金融交易。

表 2 基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步实验数据

No	服务端 (h_1) 时钟	客户端 (h_2) 时钟	时钟误差(秒)
1	2022-09-13 06:02:22.406	2022-09-13 06:02:22.403	-0.003
2	2022-09-13 06:04:00.703	2022-09-13 06:04:00.701	-0.002
3	2022-09-13 06:05:40.831	2022-09-13 06:05:40.828	-0.003
3	2022-09-13 06:05:40.831	2022-09-13 06:05:40.828	-0.003
4	2022-09-13 06:07:26.219	2022-09-13 06:07:26.217	-0.002
5	2022-09-13 06:08:47.532	2022-09-13 06:08:47.528	-0.004

5 结语

使用基于时间戳计算网络传输时延的时钟同步方法，可以在实验网络条件下，将时钟同步精度由 1s 提升至 5ms，时钟精度提升 99.5%。后续还需要在实际的智能燃气表具的嵌入式系统中实现如图 7 所示的软件逻辑，并与现有的燃气企业自定义应用层协议相结合，进一步验证在实际表具终端和通信运营商网络环境中的时钟同步精度。同时，还

需要考虑当表端时钟调整超过 1ms 时，在燃气表具端需采用分阶段调整的方法，以防止引起如图 5 所示的表端业务时序逻辑问题。

参考文献

- [1] 瞿淳麟. 试论 NB-IoT 物联网智能燃气表及其应用[C]. 中国燃气运营与安全研讨会（第十一届）暨中国土木工程学会燃气分会 2021 年学术年会论文集（上册）. 2021: 691-696. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.061668.
- [2] 田小梦. ITU 正式将 NB-IoT 技术纳入 5G 标准体系促进全球 5G 发展[J]. 通信世界, 2020(20): 29-30. DOI: 10.13571/j.cnki.cww.2020.20.014.
- [3] 刘兴伟, 陈婷婷, 法曙光. 城镇燃气计量仪表智能化标准发展探讨[J]. 煤气与热力, 2022, 42(05): 44-46. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.05.018.
- [4] 郑红立, 刘航, 胡洋. NB-IoT 技术在物联网智能燃气表领域的应用与推广[J]. 城市燃气, 2021(08): 6-11.
- [5] 王照伟, 曾鹏, 于海斌. 工业物联网环境下的时间同步技术分析[J]. 中兴通讯技术: 1-8 [2022-09-05].
- [6] 邵泽华. 物联网智能燃气表实施阶梯气价计费的途径[J]. 煤气与热力, 2020, 40(06): 25-26+46. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2020.06.017.
- [7] 吴天强, 叶敏, 朱剑, 潘超. 单片机系统实时时钟日差补偿的算法设计[J]. 科技风, 2019(34): 10-11. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.201934010.
- [8] 邹玉龙, 丁晓进, 王全全. NB-IoT 关键技术及应用前景[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(01): 43-46.

Research on Industrial Control Network Security Situation Awareness Model and Visualization Technology

Yao Ma

Ningdong Aluminum Branch of Qingtongxia Aluminum Industry Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia, 750100, China

Abstract

Industrial control networks are the core support for production automation and intelligent management, and play an important role in the transformation and upgrading of the manufacturing industry in the new era. The article takes situation awareness and visualization as the key points to ensure the security of industrial control networks. It constructs an industrial control network security situation awareness model from three aspects: data collection, data processing and analysis, and early warning and response. It discusses the commonly used visualization tools, analyzes the challenges in industrial control network security situation awareness and visualization, and proposes countermeasures.

Keywords

Industrial control network; Security posture; Perception model; Visualization technology

工控网络安全态势感知模型及可视化技术研究

马瑶

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司，中国·宁夏银川 750100

摘要

工控网络是生产自动化、管理智能化的核心凭借，在新时期制造业转型升级中占据着重要的地位。文章将态势感知与可视化作为保障工控网络安全的要点，从数据采集、数据处理与分析、预警与响应三个层面，构建了工控网络安全态势感知模型，探讨了常用的可视化工具，并分析了工控网络安全态势感知与可视化中的挑战，提出了应对策略。

关键词

工控网络；安全态势；感知模型；可视化技术

1 引言

工业控制网络（工控网络）是专为工业自动化系统设计的通信网络基础设施，具有实时监控、精确控制生产过程的功能，在提高生产效率，保障生产安全中发挥着重要的作用。近年来，随着工业与互联网的深度融合，工控网络逐渐从封闭架构转向开放互联^[1]。这使得工控网络面临的安全风险更为多样、复杂。态势感知与可视化是工控网络安全风险防控的两大要点，前者在数据采集的基础上，依托态势感知模型，动态监测、分析网络威胁，后者采用可视化技术，将态势感知结果，以图表等直观、形象的工具呈现出来。态势感知与可视化的联合运用，能显著提升工控环境的安全防御能力与应急响应效率。

2 工控网络安全态势感知模型

2.1 数据采集层

数据采集是工控网络安全态势感知的基础，数据采集是否全面、完整，对态势感知的结果有着直接的影响。应构建覆盖工控网络区域边界、网络通信节点以及计算环境的数据采集机制，消除数据采集中的漏洞、死角。首先，部署网络探针。工控网络为复杂的网络系统，包含多种类型的设备，如 PLC、传感器、SCADA 服务器等。这些设备的通信协议并不一致，常见的有 Modbus 协议、Profinet 协议、DNP3 协议等。差异化的通信协议，对数据采集的兼容性提出了更高的要求。可采用旁路监测模式，部署网络探针，实时捕获数据的同时，避免对正常生产通信造成干扰。其次，部署协议适配模块。针对异构设备的数据兼容问题，可在数据采集层部署协议适配模块，通过专用解析插件的开发与应用，将来源不同、类型多样的数据，转化为标准的结构化数据，为数据的集中处理提供条件。最后，引入数据校验机制。采集而来的数据中，存在着大量的噪声数据，如设备临时故障产生的异常日志。可引入数据校验机制，将噪声数据过滤出去，

【作者简介】马瑶（1996-），女，回族，中国宁夏银川人，本科，助理工程师，从事电解铝行业信息化、网络安全方向研究。

保障数据的真实性、可靠性。

2.2 数据处理与分析层

数据处理与分析是工控网络安全态势感知模型的核心，主要利用大数据、人工智能，充分挖掘数据价值，实现工控网络安全态势的精准评估与动态预测。

首先，数据清洗与特征提取。数据清洗方面，数据校验机制的引入，虽然能过滤部分噪声数据，但采集而来的数据中，仍存在大量的冗余信息、异常值。可通过结构化缺失值填补、重复值处理、异常值检测，清洗异常数据，确保数据质量^[2]。特征提取方面，从结构化数据中，提取能有效反映工控网络运行状态、潜在威胁的特征指标。例如，从设备日志中提取操作账号、指令类型、参数修改记录等特征指标，从流量数据中提取会话时长、数据包大小分布、协议交互频率等特征指标。

其次，模型分析。结合工控网络的行为特性选择适配的算法。工控网络正常运行时，设备的通信模式、操作流程相对固定，可采用无监督学习算法进行异常检测，如孤立森林算法能快速识别与正常行为差异较大的异常数据，自编码器则可通过重构正常数据的特征，对偏离重构范围的异常行为进行定位。针对已知威胁，可采用基于特征匹配的检测算法，将提取的特征与威胁情报库中的攻击特征，如恶意软件的签名、攻击 IP 的行为模式等进行比对，实现精准识别。

最后，量化评估。围绕设备运行状态、威胁严重程度、漏洞存在情况等，设计评估指标，并赋权，形成工控网络安全评估指标体系，将工控网络安全态势转化为直观的安全指数，指数越低表明安全风险越高，便于管理人员快速掌握整体安全状态。

2.3 预警与响应层

预警与响应层为工控网络态势安全感知模型的输出环节，能够根据数据处理与分析的结果，生成警告，并依托动态反馈机制，持续优化响应策略，从而保障工控网络安全。首先，构建分级预警机制。工控网络运行中的安全风险较为多样，不同安全风险的发生几率、紧急程度以及危害性有着很大的差异性。应在风险识别、评估的基础上，将风险划分为一般、较大、重大三个等级，并构建分级预警机制。对非授权 IP 的端口探测等一般风险，可通过日志记录与定期统计分析进行处置。对针对 SCADA 服务器的漏洞利用尝试等较大风险，应立即通知运维人员，开展漏洞修复，以防风险扩大。对恶意篡改 PLC 参数等重大风险，自动触发切断攻击源与目标设备的网络连接、启动备用设备切换流程等应急响应措施，以防攻击对生产安全造成影响。其次，优化动态反馈机制。预警准确性对于工控网络安全风险防控尤为重要，而动态反馈机制，则是提升预警准确性的关键。举例而言，系统会录每一次预警的处置结果，若某类预警多次被判定为误报，则自动优化分析模型，降低误报几率。

3 工控网络安全态势感知结果可视化技术

3.1 多维展现形式

可视化的核心，是借助图像、图形、表格等直观、具象的工具，多维呈现态势感知的结果，满足不同场景下安全监控的需求。常用的可视化工具主要有拓扑图、热力图、雷达图等。可根据工控网络安全风险防控的实际需要，选择针对性的可视化工具，并协同发挥好各类工具在保障工控网络安全中的作用。

表 1 常用可视化工具表

图表类型	特点	适用范围	作用
拓扑图	1. 采用分层绘制方式，覆盖物理层、网络层、应用层，分别呈现设备部署位置、设备间连接关系、运行的工控系统与服务。 2. 通过颜色编码区分设备状态，绿色代表正常运行，黄色代表存在异常，红色代表发生故障或被攻击	工控网络整体结构展示，需全面呈现设备部署、通信链路及系统服务分布的场景，如工厂工控网络、能源行业 SCADA 系统网络等。	帮助管理人员快速定位异常设备的具体位置，同时明确异常设备的关联节点，为故障排查与攻击溯源提供直观指引。
热力图	1. 以地理区域或设备类型为单位划分展示范围。 2. 通过颜色深浅直观反映威胁发生的频率与严重程度，颜色越深表示威胁越集中或级别越高	大型工控场景中威胁分布情况展示，如大型工厂、跨区域能源管网等。	清晰呈现高威胁区域，提示管理人员重点排查颜色较深的区域，判断是否存在持续攻击行为，提升威胁排查的针对性。
雷达图	1. 以资产风险、威胁风险、漏洞风险、运维风险为多维度坐标轴。 2. 坐标轴刻度代表对应维度的风险得分，通过图表形状可直观识别各维度风险差异	工控网络多维度风险综合评估场景，需同时分析资产、威胁、漏洞、运维等不同层面风险状况的情况。	帮助管理人员快速判断当前网络的主要风险短板，明确风险源头，进而指导优先开展的安全工作。

3.2 实时更新与交互

实时更新与交互，是动态反馈工控网络安全态势的关键。D3.js 框架支持复杂图形绘制与交互，在工控网络安全态势感知可视化中，具有良好的适配性。基于 D3.js 框架，开发可视化界面，从实时更新的角度而言，可将可视化系统

与后端流处理框架联动，Spark Streaming 等后端流处理框架，将数据处理与分析的结果，实时推送到前端，前端则通过异步刷新技术，动态更新可视化界面，便于安全人员把握工控网络安全情况。举例而言，当系统检测到针对工控网络的供给行为时，流处理框架依据不同来源的数据，从攻击目标、

攻击类型、影响范围等方面开展分析，将分析结果推送至前端，拓扑图、热力图、雷达图等可视化工具，及时更新。从交互的角度而言，可视化界面提供钻取分析、筛选查询等操作。安全人员可根据实际需要，与可视化界面交互。举例而言，当界面将某台设备的颜色标准为红色时，安全人员点击界面，便能获取设备型号、IP 地址、近期运行日志、关联流量数据、历史安全事件等更为详细的信息，从而精准把握设备运行状态。

4 工控网络安全态势感知与可视化的挑战与对策

4.1 挑战分析

态势感知模型与可视化技术能有效提升工控网络安全风险防控能力，然而，实践层面，态势感知模型与可视化技术的应用，仍面临着多重挑战。

一是实时性不足。工控网络对响应速度要求极高，部分攻击行为如参数篡改、指令注入可在秒级内对生产造成影响。现有分析模型中复杂的机器学习算法，如深度学习模型推理耗时较长，流处理框架在处理高并发数据时也可能出现延迟，导致告警与响应滞后，错过最佳处置时机。

二是准确性有待提升。工控网络中设备类型多样、协议复杂，设备启停、工艺调整等正常生产行为产生的数据与异常威胁数据相似，易被模型误判为攻击。同时，针对 5G 工业网关的未知攻击等新型工控威胁缺乏特征库支持，导致模型漏报，影响态势评估的精准性。

三是互操作性差。不同厂商的工控设备、安全产品采用差异化的协议与数据格式，如甲厂商的态势感知系统与乙厂商的防火墙无法直接互通数据，告警信息与日志格式不统一，导致多系统协同监测时出现数据孤岛，无法形成完整的态势视图。此外，部分老旧工控设备，如运行超过 10 年的 PLC，缺乏标准化的接口，难以接入态势感知系统，易形成监测盲区。

4.2 对策策略

实时性、准确性、交互性等方面的挑战，严重影响了态势感知模型与可视化技术在保障工控网络安全中的作用。对此，应采取有效的策略，全面改进态势感知模型与可视化技术，切实提升工控网络安全水平。

针对实时性不足的问题，可从模型优化与边缘计算部署两方面入手。模型优化方面，采用轻量化算法替代复杂算法，如将深度学习模型通过 TensorRT 工具进行量化压缩，减少模型参数与计算量，降低推理延迟。对算法流程进行简化，如在边缘节点先采用简单的规则匹配筛选出疑似异常数

据，再将疑似数据传输至中心节点进行深度分析，减少数据传输量与中心节点的处理压力^[3]。边缘计算部署方面，在工厂车间、区域变电站等靠近数据采集点的位置部署边缘计算节点，实现数据的本地化处理，如边缘节点可实时分析 PLC 设备的运行数据，发现异常时本地触发简单响应，无需等待中心节点的指令，大幅缩短响应时间。

针对准确性有待提升的问题，可构建多模型融合体系，并打造威胁情报库。不同算法，在数据分析、风险识别、危害研判中，有着不同的优势和适用范围。举例而言，孤立森林算法具有快速异常检测能力，能够在最短的时间内找出异常，基于威胁情报的特征匹配算法则具有精准识别能力，能够精准定位风险。可构建多模型融合体系，协同发挥各类算法在风险识别中的作用，有效解决单一算法导致的偏差问题。威胁情报库的构建，能够提升态势感知模型对新型威胁的识别能力。应以企业内部的历史安全事件数据为基础，全面整合行业专用威胁情报，打造本地化的情报库，同时，做好情报库的动态更新。

针对交互性差的问题，应从老旧设备改造以及标准化建设两个方面采取好措施。老旧设备改造方面，对已经无法接入系统的老旧设备，可部署外挂式采集模块，以非侵入式方式获取设备数据。以老旧 PLC 为例，可在通信线路旁部署信号采集器，解析设备的通信数据。同时，结合新形势下工控网络安全风险防控的需要，制定老旧设备的替换计划，以具备标准化接口、安全功能的新型设备，逐步替换老旧设备。标准化建设方面，不同厂商系统数据共享性差，使得工控网络安全态势感知中存在着数据孤岛的问题。可采用 OPC UA for Security 等工控安全标准统一数据交换格式，并围绕互联互通规范、接口协议、数据结构以及预警格式等方面，推进行业标准化建设。

5 结语

工控网络安全态势感知模型的构建以及可视化技术的应用，能够有效提升工控网络安全风险防控能力。应深刻认识到态势感知、可视化的作用，并结合当前面临的问题，从实时性、准确性、交互性三个方面，采取好策略。

参考文献

- [1] 王海达, 杨龙保, 胡传超.流域集控中心工控网络安全态势感知方法探析[J].数字技术与应用, 2025 (02) : 77-79.
- [2] 王强.基于GWO-GRU的工控网络安全态势预测模型分析[J].计算机应用文摘, 2023 (17) : 123-125.
- [3] 张晋宾.工控网络安全新兴理念及发展态势分析[J].自动化博览, 2024 (01) : 16-21.

Research on typical fault mechanism and intelligent monitoring and prevention of railway leakage coaxial cable—Empirical analysis based on 0558-RU base station standing wave processing case

Jing Wang

Guoneng Shuohuang Railway Yuanping Branch, Yuanping, Shanxi, 034100, China

Abstract

As a critical transmission medium in railway communication systems, leaky coaxial cables (LCC) serve as essential signal carriers for train control and wireless dispatching in enclosed or complex environments such as tunnels and mountainous areas. This paper systematically analyzes the structural characteristics, typical failure types, and evolution mechanisms of LCCs, with particular focus on environmental corrosion, mechanical damage, and electrical breakdown effects on signaling systems. Through a three-month monitoring and empirical analysis of a 0558-RU base station downlink Suyining-direction leaky cable standing wave alarm case, this study thoroughly investigates the detection and handling processes of hidden LCC faults. The research findings demonstrate that an intelligent O&M system integrating multi-source sensing, big data analytics, and artificial intelligence can achieve early warning and precise fault localization, significantly enhancing the accuracy and foresight of fault prevention.

Keywords

Railway communication; Leaky coaxial cable; Fault mechanism; Standing wave alarm; Intelligent monitoring; Full lifecycle management

铁路漏泄同轴电缆典型故障机理与智能监测防控研究—— 基于 0558-RU 基站驻波处理案例的实证分析

王晶

国能朔黄铁路原平分公司，中国·山西 原平 034100

摘要

漏泄同轴电缆（Leaky Coaxial Cable, LCC）作为铁路通信系统的关键传输媒介，在隧道、山区等封闭或复杂环境中承担着列车控制、无线调度等重要信号的覆盖任务。本文系统分析了LCC的结构特性、典型故障类型及其演化机理，重点探讨了环境腐蚀、机械损伤、电气击穿等因素对信号系统的影响。结合0558-RU基站下行肃宁方向漏缆驻波告警案例，通过为期三个月的跟踪监测与实证分析，深入研究了LCC隐性故障的检测与处理过程。研究结果表明，基于多源感知、大数据分析与人工智能的智能运维体系，可实现对LCC故障的早期预警与精准定位，显著提升故障防控的精准性与前瞻性。

关键词

铁路通信；漏泄同轴电缆；故障机理；驻波告警；智能监测；全寿命周期管理

1 引言

随着我国“交通强国”战略的深入推进，高速铁路和城市轨道交通网络呈现快速发展态势。截至 2024 年底，全国铁路营业里程已达 15.9 万公里，其中高铁里程 4.5 万公里，地铁运营里程超过 9700 公里。在这一背景下，铁路通信系统的可靠性和安全性面临着前所未有的挑战。漏泄同轴电缆作为隧道、山区等特殊场景下实现连续无线信号覆盖的关键

【作者简介】 王晶（1984-），男，中国山西怀仁人，本科，助理工程师本科，从事人工智能在铁路通信网智能运维与故障预测中的应用研究。

设备，其运行状态直接关系到列车运行安全。

LCC 通过屏蔽层上的周期性开槽实现电磁波的定向辐射，兼具传输线与天线的双重功能，特别适用于隧道、地下区间等空间受限的铁路环境。然而，由于铁路运行环境的特殊性，LCC 长期暴露在振动、湿度、温差、化学腐蚀等多重应力作用下，导致其故障率显著高于普通通信电缆。据统计，在铁路通信系统故障中，LCC 相关故障占比高达 35%-40%，且其中约 60% 为渐进性隐性故障，传统巡检手段难以早期发现。

2 LCC 结构特性与故障机理分析

2.1 LCC 结构与其在铁路环境中的特殊要求

漏泄同轴电缆由内导体、绝缘介质、开槽屏蔽层和外

护套四层结构组成。内导体通常采用铜或铝材，负责高频信号的传输；绝缘介质常用聚乙烯或氟塑料，保证信号传输的稳定性；开槽屏蔽层是 LCC 的核心部件，通过精确设计的槽孔实现电磁波的可控泄漏；外护套则提供机械保护和环境隔离功能。

与普通同轴电缆相比，LCC 在结构上有两个显著特点：一是屏蔽层采用周期性开槽设计，槽孔形状、尺寸和间距根据工作频率和耦合需求精确计算；二是绝缘介质需具备较低的介电常数和损耗因子，以确保信号传输效率。铁路运行环境对 LCC 性能提出了特殊要求。隧道内相对湿度常年在 80% 以上，温差可达 30-50°C，加之列车运行引起的振动加速度可达 0.5-2.0g，这些因素共同作用下，LCC 易出现材料老化、结构疲劳和电气性能劣化。此外，山区铁路还面临雷击、杂散电流等电磁干扰问题，要求 LCC 具备更强的屏蔽和防护能力。

2.2 典型故障类型与演化机制

2.2.1 环境腐蚀与绝缘老化机理

铁路隧道环境中的高湿度、高盐分及有害气体（如 SO₂、NO_x）是导致 LCC 腐蚀和老化的主要因素。研究表明，当相对湿度超过 75% 时，水分会通过外护套微裂纹逐渐渗入，导致绝缘介质吸湿增重（可达 0.5% ~ 1.2%），介电常数上升（增幅可达 10% ~ 15%），最终引发信号泄漏不均匀和传输损耗增加。

2.2.2 机械损伤与结构失效的动力学过程

LCC 在敷设和运行过程中承受多种机械应力作用，包括拉伸应力（主要来源于自重和安装张力）、弯曲应力（发生在转弯处）、挤压应力（来自固定卡具）和振动应力（列车通过时产生）。这些应力长期作用下，材料会发生疲劳损伤，表现为裂纹萌生和扩展。

2.2.3 电气击穿与谐波干扰的电磁机制

LCC 工作在高频条件下（铁路通信常用频段为 400MHz—2.6GHz），电气故障主要表现为局部放电和介质击穿。当绝缘存在缺陷或老化时，电场分布不均匀，局部场强超过临界值（空气中约为 3kV/mm）即引发放电现象。局部放电会产生高频电磁脉冲，干扰正常信号传输，同时加速绝缘劣化。

3 故障对铁路信号系统的影响机制

3.1 信号覆盖均匀性与质量劣化

LCC 故障对信号覆盖的影响主要表现为覆盖盲区、信号波动和质量下降。当屏蔽层出现局部损伤时，该处耦合损耗会发生突变，导致信号辐射不均匀。以 0558—RU 基站案例为例，故障点处的驻波比从正常值 1.05—1.10 上升至 1.30—1.53，相应区域的信号强度波动达 5—8dB，严重影响了 LTE 网络的稳定性。

3.2 系统安全与运行可靠性下降

LCC 故障引起的通信异常会连锁影响列车运行安全。数据表明，当无线通信中断持续时间超过 3 秒时，CTCS—3

级列控系统将触发降级程序；中断超过 10 秒，可能导致列车紧急制动。在 0558—RU 案例中，驻波告警累计达 372 次，其中重要告警 34 次，虽未造成行车事故，但已对运营可靠性构成严重威胁。

系统可靠性可用平均无故障时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）评价。研究表明，采用智能监测系统后，LCC 的 MTBF 可从原来的 2.5 年提升至 4 年以上，MTTR 从 8 小时缩短至 2 小时以内，系统可用性从 99.5% 提高至 99.9% 以上。

3.3 维护成本与生命周期管理压力

LCC 故障导致的维护成本包括直接成本（材料、人工）和间接成本（运营中断、安全风险）。据统计，单次 LCC 故障处理的平均成本为 1.5—3 万元，而更换整段电缆的费用可达 10—30 万元。在 0558—RU 案例中，由于智能监测系统的早期预警，避免了故障扩大化，预计节约维护成本约 15 万元。

4 实证分析：0558—RU 基站漏缆驻波告警案例

4.1 故障概况与监测数据统计

2025 年 3 月至 6 月期间，0558—RU 基站下行肃宁方向漏缆频繁触发驻波告警。监测系统记录显示，累计告警次数达 372 次，其中 6 月上旬重要告警（驻波比 >1.5）集中出现 34 次。驻波比统计特征为：最低值 1.30，最高值 1.53，平均值 1.41，标准差 0.06。告警时间分布具有明显规律性，每日 14:00—18:00 为告警高发时段，与气温日变化趋势吻合，表明故障特性受温度影响显著。

4.2 故障定位与处理过程分析

故障处理过程分为四个阶段：初期监测定位、外观排查、持续验证和最终处置。

第一阶段：智能监测定位（3 月 26 日）

漏缆在线监测系统基于时域反射（TDR）原理，通过分析反射信号的时间和幅度特征，精准定位故障点位于基站下行肃宁方向 125 米处。系统数据显示，该点位驻波比呈现规律性波动，每日告警 2-3 次，每次持续 2-3 小时后自动恢复，表明故障为间歇性特征。

第二阶段：现场外观排查（4 月 22 日）

作业组对定位区段进行详细外观检查，包括缆体表面状态、固定卡具紧固度、接头密封性等。检查结果未见明显异常，无破皮、挤压、变形等可见损伤，排除了外部机械损伤导致故障的可能性。

第三阶段：持续监测验证（4 月 23 日 -6 月 10 日）

通过近两个月的持续监测，发现告警频率呈上升趋势，尤其是环境温度较高时，告警持续时间延长。6 月 10 日进行的二次现场测试显示，从最近接头处测量的数据正常，与监测系统告警形成鲜明对比，进一步证实故障点位于两接头之间的缆体内部。

第四阶段：综合研判与故障处置（6 月 13 日）

基于监测数据趋势分析和现场测试结果，作业组判定故障原因为漏缆内部介质特性不良。6 月 13 日天窗期更换

故障段漏缆后，监测系统显示该点位驻波比恢复至 1.05-1.08 的正常范围，告警彻底消除。

4.3 故障机理验证与根本原因分析

更换下的故障漏缆经实验室解剖分析，发现外导体存在明显变形褶皱（如图 1 所示），褶皱深度约 0.3mm，长度约 15mm，位于距起点 125.3 米处，与监测系统定位结果高度吻合。内导体和绝缘介质未见明显异常。



图 1 故障漏缆外导体变形褶皱示意图

变形褶皱导致屏蔽层槽孔结构变形，改变了电磁波泄漏特性，引起阻抗不连续和信号反射，最终表现为驻波比异常。根本原因分析表明，该变形可能源于敷设过程中的机械应力集中，在温度变化引起的热胀冷缩作用下，缺陷逐渐扩大并显现。

这一案例证实了机械损伤与环境应力协同作用导致的隐性故障机理，也凸显了传统外观检查的局限性，以及智能监测在发现内部缺陷方面的优势。

5 LCC 故障智能防控体系构建

5.1 多源融合的在线监测平台架构

基于 0558-RU 案例的经验，构建了集感知层、传输层、平台层和应用层于一体的 LCC 智能监测平台。

感知层部署多类型传感器，包括：分布式光纤传感器(DTS/DAS)用于温度和振动监测；射频传感器用于驻波比和回波损耗测量；电流电压传感器用于电气参数采集；环境传感器用于温湿度、盐度等环境参数监测。传感器布设密度根据故障概率分布优化设计，重点区域监测点间距不超过 50 米。

传输层采用工业以太网和无线通信混合组网，确保数据实时可靠传输。在铁路环境中，特别考虑了电磁兼容性和防雷保护要求。

平台层基于云计算和大数据技术，构建数据存储、处理和分析能力。平台日均处理数据量超过 10TB，采用时序数据库和分布式存储架构，支持毫秒级数据查询和分析。

应用层提供故障预警、健康评估、决策支持等功能。基于机器学习算法开发的故障预测模型，可实现提前 7—30 天的故障预警，准确率达 85% 以上。

5.2 智能诊断与预测性维护技术

智能诊断系统融合多源监测数据，采用层次化诊断策略：第一层基于规则引擎实现实时异常检测；第二层采用信号处理技术（如小波分析、频谱分析）进行故障特征提取；第三层应用深度学习模型（如 CNN、LSTM）实现故障分类和严重程度评估。

5.3 全寿命周期防控措施与标准化流程

LCC 全寿命周期管理涵盖设计、施工、运维和报废四个阶段，各阶段关键控制点如下：

设计阶段：开展环境适应性设计，选用耐腐蚀、抗疲劳材料；进行可靠性预计和故障模式影响分析(FMEA)；优化槽孔结构设计，减少阻抗波动。

施工阶段：严格控制敷设张力和弯曲半径（通常不小于电缆外径的 15 倍）；规范接头处理工艺，确保防水密封性能；实施施工质量全过程监控。

运维阶段：建立“日常巡检+定期检测+专项评估”的多级运维体系；基于监测数据动态调整巡检周期和内容；推广模块化更换和快速修复技术。

报废阶段：制定科学的退役评估标准；规范废旧电缆回收处理流程，提高资源再利用率。

6 结语

本文通过理论分析与案例实证相结合的方法，系统研究了铁路漏泄同轴电缆的故障机理与智能防控策略：

第一，LCC 故障主要源于环境腐蚀、机械损伤和电气击穿三大机理，且多为多因素耦合作用的渐进性过程。0558-RU 基站案例表明，外导体变形等隐性故障难以通过传统手段及时发现，智能监测系统在此类故障的早期预警中发挥关键作用。第二，基于多源信息融合的智能监测平台可实现 LCC 运行状态的实时感知和精准评估。监测数据表明，该系统可将故障定位精度控制在 ±5 米以内，预警准确率超过 85%，显著提升运维效率。第三，预测性维护策略可有效降低 LCC 全寿命周期成本。实证分析显示，智能运维体系可将 MTTR 缩短 75% 以上，运维成本降低 20%-30%，设备使用寿命延长 2-3 年。

随着 5G-R、北斗导航等新技术在铁路领域的推广应用，LCC 将面临更高频段、更高速率的传输需求。未来研究应重点关注以下方向：一是开发基于光子晶体和超材料的新一代 LCC，提升高频传输性能；二是探索数字孪生技术在 LCC 运维中的应用，实现物理实体与虚拟模型的深度融合；三是研究基于区块链技术的 LCC 全寿命周期数据管理，提高数据可信度和追溯性。

只有持续推动技术创新与运维模式变革，才能构建更加安全、高效、智能的铁路通信系统，为交通强国建设提供坚实基础保障。

参考文献

- [1] 陈小平. 高速铁路漏泄同轴电缆智能检测系统[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(12):48-52.
- [2] 张国光. 铁路无线列车调度用漏泄同轴电缆的配置及接续技术[J]. 有线电视技术, 2008, (02):115-117.
- [3] 王震, 江兰, 章明, 等. 铁路无线通信用漏泄同轴电缆设计[J]. 电子科技, 2012, 25(05):30-33.
- [4] 刘爽. 漏泄同轴电缆间耦合分析及隔离度提升研究[D]. 华中科技大学, 2022.

AI phase recognition improves load management efficiency

Qian Han

State Grid Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan, Hubei, 432000, China

Abstract

To address challenges in distribution network management such as low-efficiency phase identification for low-voltage users and power supply reliability issues caused by three-phase imbalance leading to increased line losses, this paper proposes an AI-based phase recognition solution for low-voltage users based on the practical experience of Xiaogan Power Supply Company. The solution utilizes a data platform and measurement center to collect current, voltage, and power data from distribution transformers and low-voltage users at 15-minute intervals. A convolutional neural network (CNN) model with input layers, convolutional layers, pooling layers, fully connected layers, and output layers is constructed. Through cross-entropy loss function training (with 84 transformer districts and 504 samples achieving 100% accuracy after training), combined with power data-assisted verification (error $\leq 2\%$ indicates correct judgment), precise phase recognition is achieved.

Keywords

AI phase recognition; Convolutional neural network; Low-voltage users; Three-phase imbalance; Load management; Distribution network management

AI 相位识别提升负荷管理效能

韩骞

国网孝感供电公司，中国·湖北 孝感 432000

摘要

针对配网管理中低压用户相位识别依赖人工、效率低下，以及三相不平衡引发的供电可靠性下降、线损上升等问题，本文以孝感供电公司实践为基础，提出基于人工智能的低压用户相位识别方案。该方案依托数据中台与量测中心，以15分钟为间隔采集配变及低压用户的电流、电压、功率数据，构建包含输入层、卷积层、池化层、全连接层及输出层的卷积神经网络（CNN）模型，通过交叉熵损失函数训练（84个台区504条样本训练后正确率达100%），结合功率数据辅助验证（误差 $\leq 2\%$ 判定正确）实现相位精准识别。

关键词

AI相位识别；卷积神经网络；低压用户；三相不平衡；负荷管理；配网管理

1 引言

随着配网管理要求的日益提高，配变三相不平衡所带来的供电可靠性下降、电能质量不达标、线路损耗上升等问题日益突出，而配网设备点多面广，传统手段不能有效覆盖，急需数字化手段提升配网管理水平。目前供电公司对于低压用户挂接相位无法清晰感知，低压用户相位的识别一直依靠人工现场检查、现场测量获取相关信息，工作任务不仅繁重且效率低下，各种专业管理系统也缺乏对低压用户挂接相位准确记录。随着全社会对于电压质量和优质服务的要求进一步的提高，利用人工智能及算法对低压用户开展相位的识别能够精确指导基层站所开展低压用户调相工作，从而有效的杜绝因低压用户三相挂接不均衡引起的重过载、低电压等问题。

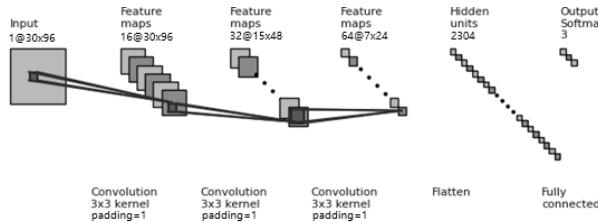
题，提升供电可靠性，提升优质服务水平。孝感供电公司通过积极探索利用配变、低压用户的电流、电压、功率等大数据基于一定的算法，通过人工智能不断修正和判断，开发了基于低压用户的AI相位识别应用，为精确支撑低电压用户调节提供数据支撑，进一步提升供电电压质量。

2 做法

配网低压用户相位识别测算方法如下：一是大数据获取。依托公司数据中台、量测中心，以15分钟为一个数据采集间隔。全量获取公司配变、低压用户的电流、电压、功率等数据。

二是搭建卷积神经网络的深度学习进行相位识别。卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）对用户电压数据进行相位识别评估。网络结构如下图：

【作者简介】韩骞（1983-），男，中国湖北孝感人，本科，工程师，从事工程技术专业研究。



神经网络包含输入层，三个卷积层（在上图中卷积层涵盖卷积部分和池化部分），全连接层以及输出层。下面分别对每一层的作用进行介绍：

输入层 (Input Layer): 输入层接收用户的电压数据，且将其转换为 30×96 的矩阵数据并予以归一化处理，接着将所得结果传递给下一层的神经元。训练前，为避免各个输入变量的数量级差异过大，影响求解算法的效果，一般会先将数据归一化到 $[-1, 1]$ 的区间。公式如下：

$$x = 2 * \frac{x_0 - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} - 1$$

式中 x 为归一化后的数据； x_0 为原始数据； x_{max} 为原始数据最大值； x_{min} 为原始数据最小值。

卷积层 (Convolutional Layer): 卷积层通过应用卷积核来提取输入数据的局部特征，采用参数共享的方式，减少了需要训练的参数数量，从而减少了过拟合的风险。第一个卷积层通常包含若干个卷积核，用于提取输入数据的特征。二维卷积计算公式如下：

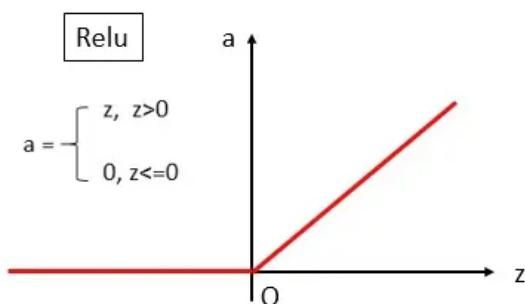
$$s(i, j) = (X * W)(i, j) = \sum_m \sum_n x(i + m, j + n)w(m, n)$$

X 为输入矩阵，W 为 $m \times n$ 的卷积核矩阵。

卷积层的输出采用 ReLU 激活函数，ReLU 激活函数是分段线性函数，且每段的导数都能简单，导数要么为 0，要么为 1。计算简单，使用梯度下降法时收敛的更快。因此，在训练过程中能够大幅加快训练速度。数学表达式如下：

$$f(x) = \max(0, X)$$

其对应的函数图像如下所示：

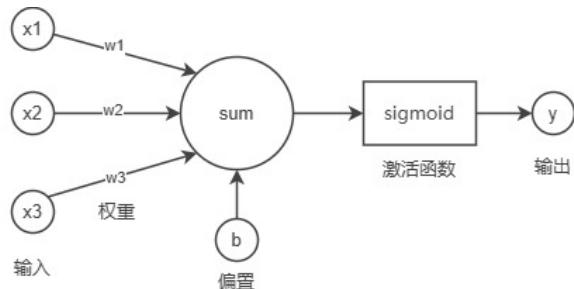


池化层 (Pooling Layer): 池化层用于对卷积层的输出进行降维，实现下采样，减少参数数量，同时保留重要的特征。本研究采用平均池化，窗口大小为 2×2 。计算区域子块所包含

所有像素点的均值，将均值作为平均池化结果。计算过程如下图所示：

1	1	2	4
5	6	7	8
3	2	1	0
1	2	3	4

全连接层 (Fully Connected Layer): 全连接层由 1080 个感知器神经元组成，感知器是模拟生物神经元行为的机器，有与生物神经元相对应的部件，如权重（突触）、偏置（阈值）及激活函数（细胞体），输出为 0 或 1。单个感知器神经元的结构如下：



数学公式：

$$y = \text{sigmoid}\left(\sum_{j=1}^m w_j x_j + b\right)$$

sigmoid 激活函数：

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

输出层 (Output Layer): 输出层使用 Softmax 激活函数，用于输出 3 个数字类别，分别代表用户电压属于 ABC 三相的概率分布。

Softmax 回归函数能够将输出转化为多个类别的概率分布，使得模型输出的结果更加直观和易于解释。此回归函数适用于多分类问题，能够处理多个类别的分类任务。并且在梯度下降等优化算法具有良好的凸性质，有利于模型参数的优化和收敛。

计算公式如下：

$$Y(x_i) = \text{softmax}(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=0}^2 e^{x_i}}$$

得到输出向量 $Y=[y_0, y_1, y_2]$, y_0 表示电压数据属于 A 相的概率值, y_1 表示电压数据属于 B 相的概率值, y_2 表示电压数据属于 C 相的概率值。

三是模型训练。采用交叉熵损失函数，交叉熵损失衡

量的是预测概率分布 p 与真实分布 q 之间的差异。对于分类任务，真实分布是一个 one-hot 编码的向量，目标类别的概率为 1，其他类别的概率为 0。公式为：

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i)]$$

其中 y_i 是真实标签（取值为 0 或 1）， \hat{y}_i 是模型预测的概率（取值范围是 [0,1]）。从历史数据中筛选出 84 个台区数据共 504 条电压数据样本。所有样本通过人工标注并输入到神经网络进行训练，网络学习正确率达 100%。经过 15 轮次 (Epoch)，每个 Epoch 504 个电压数据的训练，得到的损失曲线。

四是模型评估。利用验证集对神经网络模型进行性能评估，这一过程能够直观反映模型在非训练数据上的泛化能力。其次，引入功率数据作为辅助验证手段，通过对比分析确保分类结果的准确性。具体操作是将分类后的各相用户总功率与台区总表实测功率进行比对：若两者误差控制在 2% 以内，则判定分类结果正确；若出现显著差异，则认为分类存在错误。当出现分类错误时，需重新采集训练样本数据，对模型进行迭代训练，直至所有数据的功率计算值与台区总表实测值完全匹配。实际应用表明，经过最多三轮训练，模型分类正确率即可达到 100%。从历史数据中准备新的 252 条数据作为验证集。验证集可以提供一个对模型性能的无偏估计。在训练过程中，模型会根据训练集进行调整，因此训练集上的性能可能会高估模型的真实性能。而验证集是在训练过程中未被模型见过的数据，用它来评估模型的性能，可以更准确地反映模型在实际应用中的表现。

3 应用实例

对 08G0027680 台区和 08G0035751 台区及其用户采集了 2025 年 4.1 日—4.30 日台区电压、电流、功率数据，对台区下单相用户电压、电流、功率数据，采用了用户相位识别算法。

在数据采集与处理过程中，我们以 15 分钟为一个数据采集间隔。按 31 天计算，每天可获取 96 条数据，因此 2025 年 3 月的总数据量为 $30 \times 96 = 2880$ 条。

为了使数据能够适配神经网络的输入要求，我们将这一个月的每个用户及台区 ABC 三相的 2880 条数据进行转换，重新组织为一个 30×96 的矩阵向量，以此作为神经网络的输入数据，从而实现对数据的有效处理和分析。

4 成效

在三相不平衡的情况下，由于某一相电流过大，可能会使线路和设备过载，限制了电网的供电能力。通过分相调

整，使三相负载均衡，充分利用线路和设备的容量，可提高电网的供电能力，减少因三相不平衡导致的停电事故和设备损坏事故的发生。

通过对 08G0027680 台区和 08G0035751 台区下月电流数据分析判断，ABC 三相不平衡，通过自动分相技术，精确得出了低压用户的 ABC 三相。根据台区户变关系、电流数据等信息和构建的智能调节模型。对 08G0027680 台区下用户 4204028008312 从以前 A 相调整到 B 相。对 08G0035751 台区下用户 4206890493713、4204018113106、4206955091591 从 B 相调整到 A 相，4204000459821、4204018113090 从 C 相调整到 A 相，2 个台区按照上诉方法调整后，三相不平衡问题解决。

5 应用预期

通过上述对低压用户挂接相位的识别和分相合理化建议，后期可以在低压用户业扩报装、电能质量提升、优质服务方面能够提供数据支撑及合理化建议。现阶段，电压用户的业扩报装只能选定到台区及用户用电位置，没有挂接相位的相关要求，都是事后针对三相不平衡或者低电压、重过载等配变现象被动调整用户相位，通过上述算法，我们可以把计算结果做成数据看板，方便业扩报装受理人员提前知晓台区用户状态，做到主动平衡配变负荷。对于由于三相不平衡造成的低电压、重过载等现象提前介入，提升配网管理效率，提升优质服务水平。

6 结语

在配网精益化管理与数字化转型的背景下，本次 AI 相位识别技术在负荷管理中的实践，有效破解了传统低压用户相位识别“人工依赖重、覆盖范围窄、效率精度低”的痛点，为解决配网三相不平衡问题提供了技术新路径。通过构建卷积神经网络模型，依托多维度量测数据实现相位精准识别，再以数据驱动指导用户调相，不仅成功解决了 08G0027680、08G0035751 等台区的三相不平衡问题，更验证了人工智能技术与配网业务深度融合的可行性——从数据采集、模型训练到结果验证，形成了“技术赋能业务、业务反哺数据”的闭环，为负荷管理效能提升奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 杨晓霞,曾飞,缪惠宇,等.电网不平衡下三相 PWM 整流器模型预测直接控制策略[J/OL].电气传动,1-9[2025-10-10].https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd26479.
- [2] 李敬.浅谈低压配电系统三相不平衡的危害及治理方法[J].绿色建造与智能建筑,2025,(09):129-133.DOI:CNKI:SUN:ZNJZ.0.2025-09-033.
- [3] 高家豪.电力市场环境下需求响应机制与负荷管理策略[J].智慧中国,2025,(08):68-69.DOI:CNKI:SUN:ZHKG.0.2025-08-030.

Research on an Intelligent Glasses System for Assisting the Visually Impaired with Navigation Based on Real-time Image Acquisition

Yongzhang Liang Chuangyan Zheng Run Xie Jian Li*

Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong, 512005, China

Abstract

The mobility challenges faced by the visually impaired have long been a focal point of social concern and technological research. Traditional navigation aids for the blind only provide basic information and fall short of offering comprehensive, highly reliable, and naturally interactive travel support. This limitation creates significant obstacles to independent mobility for visually impaired individuals. To address these issues, this paper proposes the use of real-time image acquisition technology in smart glasses that provide tactile and auditory dual-modal feedback for blind navigation. The smart glasses integrate lightweight construction with stable wearability. Low-power image sensors capture real-time environmental data, and embedded algorithms calculate precise obstacle distances and directions. The smart glasses then deliver intuitive navigation and obstacle avoidance cues via a dual-modal feedback mechanism that combines left/right vibration motors with voice announcements. Experimental results demonstrate that these smart glasses effectively enhance travel safety and navigation experiences for visually impaired individuals, exhibiting strong practicality and promising application prospects.

Keywords

Blind Navigation Assistance; Real-Time Image Acquisition; Smart Glasses

基于实时图像获取的助盲导航智能眼镜系统研究

梁永章 郑创炎 谢润 李坚*

韶关学院智能工程学院，中国·广东韶关 512005

摘要

视障群体的出行问题一直是社会关注和技术研究的热点。传统的助盲导航工具仅能提供一些基本的信息，难以实现全场景、高可靠性、自然交互的出行保障，导致视障群体独立出行存在极大的困难。为解决上述问题，本文利用实时图像获取技术，设计了一款基于触觉听觉双模态反馈的助盲导航智能眼镜。该智能眼镜在结构设计上综合了轻量化与佩戴稳定性，通过采用低功耗图像传感器实时采集环境数据，设计嵌入式算法对图像进行处理，实时计算障碍物的精确距离及方位信息，并采用左右侧振动马达与语音播报相结合的双模态反馈机制，向用户提供直观的导航与避障提示信息。实验结果表明，该眼镜设备可有效提升视障人士的出行安全与导航体验，具有良好的实用性与应用前景。

关键词

助盲导航；实时图像获取；智能眼镜

1 引言

随着科技不断发展与智能化工具的广泛普及，面向视障人群设计的辅助设备已成为助盲领域科技创新的重要方向。据 Smith 和 Benfattoum 在 2019 年的研究显示视障者对于独立、安全出行的需求极为迫切^[1-3]。

然而当前主流助盲工具有显著局限性：导盲犬虽为有效出行辅助手段，但在我国发展严重滞后^[4-5]，无法满足超 700 万视障群体需求；导盲杖虽普及率高，但其机械结构仅能探测近地简易障碍物，超声波/红外升级版仍无法实现复杂环境导航（如路标识别、动态避障）^[6-7]；有线眼镜则存在人体工学缺陷，长期佩戴易引发耳鼻不适且运动稳定性

【基金项目】广东大学生科技创新培育专项“攀登计划”（项目编号：pdjh2024b341）；广东省教育厅普通高校特色创新类项目（项目编号：2023KTSCX138）；韶关学院博士科研启动项目（项目编号：440-9900064602）；韶关市科技项目（项目编号 230330098033679）。

【作者简介】梁永章（2004-），男，中国广东肇庆人，本科，从事机械设计研究。

【通讯作者】李坚（1989-），男，中国广东韶关人，博士，讲师，从事智能机器人与装备研究。

差，严重限制其实际应用与推广^[8]。由此可见，现有助盲技术虽在一定程度上提供基础帮助，却均难以实现全场景、高可靠性、自然交互的出行保障，无法真正满足视障群体在复杂城市环境中的导航需求。

针对以上问题，本研究旨在通过集成智能传感、实时数据处理及直观交互技术^[2]，开发一款基于智能传感与双模态反馈的便携式助盲导航眼镜系统，通过深度融合图像识别、实时数据处理及云端协同技术，构建一个高效、稳定的助盲导航平台。该系统采用振动触觉与语音提示相结合的双模态反馈机制，通过语音芯片与双侧振动马达协同工作，使用户能够直观感知障碍物方位与距离，显著提升环境信息的感知效率。并采用模块化、轻量化的 3D 打印外壳与可调节结构设计，在保证功能完整性和稳定性的同时，显著提升了设备佩戴舒适度，适应多种日常使用场景。

2 智能眼镜硬件组成

2.1 系统集成电路设计

助盲导航智能眼镜采用定制化的硬件设备，系统框架如图 1 所示，主控采用模组 XIAO ESP32S3 为处理器，摄像头与网络功能开启时平均功耗在 154mA 左右（3.7 锂电池供电），工作频率高达 240 MHz，可使用 USB 和电池供电，本项目采用锂电池供电，模组内部带有锂电池充放电管理功能，能够将 3.7V-4.2V 的电池电压稳压到 3.3V 供系统其它模块使用。系统采用两块 XIAO ESP32S3 模组，一块作为主控，另一块用于专门驱动 CMOS 摄像头。

摄像头采用豪威科技生产的 CMOS 图像传感器 OV2640。这款传感器支持 1080p 高清视频录制，具备高灵敏度和低光照性能，能够在不同的环境条件下捕捉清晰、细腻的图像。同时，OV2640 硬件上可以输出 JPEG 压缩格式，这可以大大减低单片机传输的负荷。

语音芯片采用 SYN6288 外围电路参考官方数据手册设计^[9]，电源采用主控单片机内置 LDO 单元输出的 3.3V 进行供电；晶振采用 16MHz 晶振配置 2 个 12pF 的匹配电容；此外，将反向器电路添加在与主控的串口通讯中，采用 NPN 三极管 S8050 串联 1K 欧姆电阻搭建反向器电路实现 RXD 接收并实现高低电平切换^[10]；导航播报信息输出到两个小喇叭，线路中间预留 0Ω 电阻用于后期平衡左右声道音量，并通过示波器测量信号，调整串联电阻阻值来平衡音量幅值，消除差异实际买到的喇叭的差异^[11]。

振动电机的驱动考虑到需要与单片机 IO 端口进行隔离和较高的开关频率，所以采用 NMOS 管 AO3400A 作为下管进行驱动，单片机驱动 IO 端口产生 PWM 信号，从而产生振动信号，栅极前面串联的 10K 电阻可以起到限流的作用，确保驱动电流不会过高损害引脚，下拉到 GND 的 10K 电阻可以提高抗干扰能力，确保 VGS 在截止状态下维持 -0.3V 至 +0.3V 的安全区间，抑制因米勒电容引发的寄生导通现象^[12]。

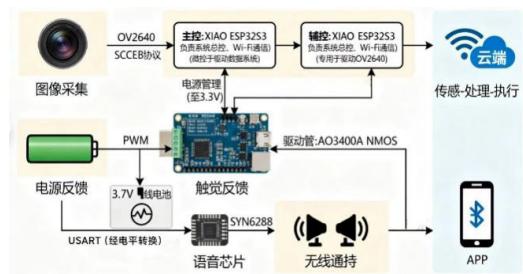


图 1 设备硬件框图

2.2 硬件外壳 3D 模型设计

图 2 是智能眼镜设备 3D 结构简图。装置采用可拆卸式模块化设计，由眼镜框架和眼镜壳体两大部分组成，便于组装、维修及功能扩展。壳体外观基于人体工学原理设计，形状贴合视障人群面部轮廓，提升佩戴舒适性。

本系统采用模块化结构设计，上壳体（10）中部精密加工有圆形安装孔位，通过螺丝柱与电路板模块（8）形成刚性连接，为摄像头（5）提供稳定的成像平台。显著提升设备在动态环境中的结构稳定性和抗冲击能力。壳体采用全包裹封闭式设计，结合隐藏式线槽结构，有效规整摄像头（5）与其他模块的连接线缆，在确保内部布线整洁的同时增强设备的防水防尘性能。壳体侧面预留符合人机工程学的标准化充电接口，既保持外观完整性又确保使用便利性。在材质选择上，主体框架采用 FDM 3D 打印工艺制造的 PLA 材料，兼具轻量化、环保性和结构强度；镜腿（9）采用柔性塑料注塑成型，通过材料弹性变形适应不同头型尺寸。佩戴结构设计包含多角度调节的自适应鼻托（1）和符合人体工学的防滑耳勾（6），耳勾末端嵌入防滑硅胶材料，确保持续佩戴的稳定性。镜腿（9）与镜框（2）连接处采用可拆卸螺丝铰链设计，兼顾连接可靠性与部件可更换性。微型振动马达（3）集成于镜框内部腔体，通过结构优化实现高效的触觉反馈功能。

3 实验和分析

基本上述研制的助盲导航眼镜样机，并借助华为云搭建的云端应用服务器，本文开展设备成像质量测试实验，从而验证所研设备的实时图像获取技术。

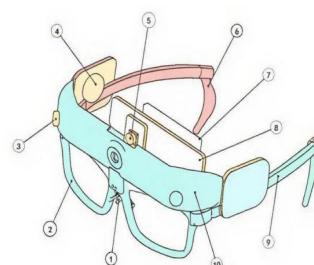


图 2 设备 3D 结构简图：1 为鼻托；2 为眼镜框；3 为微型马达；4 为麦克风；5 为摄像头；6 为耳勾；7 为电池；8 为主控电路板；9 为镜腿；10 为上壳体

实验中采用小米 13 后置 5000W 像素级摄像头作为标准参照的拍摄设备，眼镜样机考虑到低成本与低功耗采用 200W 像素级摄像头。图 3 是设备拍摄质量对照图，其中图 3 上方是设备拍摄图片，A1 是白天，B1 是阴天，C1 是夜晚；图 3 下方是手机拍摄的三张对应场景图像 A2、B2 和 C2。

实验通过图像质量对比算法，进行多维度参考评估方法分析图像特征，主要包括基于拉普拉斯算子的清晰度评估、局部方差中位数的噪声检测、直方图分布的曝光分析、标准差的对比度测量以及 RGB 通道均衡性的色彩平衡检查。该算法以参考图像为基准，通过 Python 计算机语言实现计算测试图像各指标的相对变化率（如清晰度比值、噪声倒数比），通过加权融合生成综合质量评分，并采用雷达图、直方图叠加和条形图实现可视化对比如图 5 所示。

通过对 A、B、C 三组场景的图像质量对比分析，可以得出以下结论：基于 OV2640 的眼镜设备在多数指标（如清晰度、噪声控制）上与小米 13 存在明显差距，这主要受限于眼镜设备的硬件成本与功耗设计。作为一款轻量化、低功耗的嵌入式图像传感器，OV2640 在分辨率（200 万像素）和感光能力上无法与旗舰手机传感器抗衡，导致在动态范围、低光表现等场景中相对劣势。在部分光照条件稳定的场景（如阴天 B 组），OV2640 的色彩平衡（1.00）和曝光控制（0.91）接近参考水平，表明设备图像处理算法在中等光照下能有效还原色彩真实性。这一特性使其在特定应用场景（如户外较好光照环境）中具备实用价值。



图 3 设备拍摄质量对照

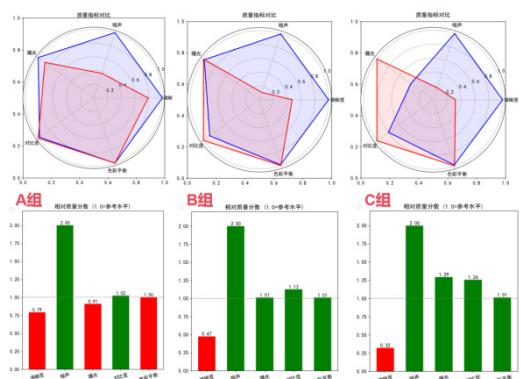


图 4 多场景图像质量参数对比可视化分析

4 智能眼镜硬件组成

本文设计并实现了一款基于实时图像获取的助盲导航智能眼镜系统，致力于提升视障人士在复杂城市环境中的独立出行能力与安全性。该系统以双微控制器为核心处理单元，配合低功耗的图像传感器实时采集环境信息，并通过嵌入式算法实现对障碍物的距离、速度与方位的快速估算。结合语音芯片与双侧振动马达组成的双模态反馈机制，系统能够以听觉与触觉相结合的方式，为用户提供清晰、直观的导航与避障提示。实验验证表明，受限于硬件成本与功耗要求，当前选用的 OV2640 传感器在图像分辨率及低光环境下的表现仍与高端商用传感器存在差距。但，在户外较好光照环境（盲人出现场景）中具备实用价值。

5 结语

展望未来，我们计划深化云端协同机制，整合多源地理信息与实时交通数据，构建更具智能性与个性化的导航策略。最终目标是研制出一套真正实用、可靠且普惠的助盲出行工具，为视障群体的社会融入与自主生活提供坚实的技术支持。

参考文献

- [1] 安业,李光胜,杜青,等.盲人语音导航避障系统的设计[J].电子测试,2020,27(17):12-14.
- [2] JIANG C, LIU Y, WANG Q, et al. Development and evaluation of a smart glass system to support indoor wayfinding for people with visual impairments[J]. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 2018, 112(6): 447-457.
- [3] SMITH G, BENFATTOUM L. Understanding the needs of blind and visually impaired pedestrians through real-world trials of an audio belt navigation system[J]. *Journal of Pervasive Computing*, 2019, 4(3): 69-82.
- [4] 国际助盲技术协会.全球助盲技术发展白皮书(2023版).
- [5] 汪冰倩导盲犬为何发展难[J].中国工作犬业,2023(5):13-14.
- [6] 王梦菲.基于视障用户体验的出行辅助产品设计研究[D].天津:天津科技大学,2022.
- [7] 武墨晗,荣学文,范永.导盲机器人的研究现状综述[J].计算机工程与应用,2020,56(14):1-13.
- [8] 黄晨光,吴晓.视障人士辅助设备的人因工程学分析[J].人类工效学,2021,37(2):189-193.
- [9] 高德地图开放平台。Wed服务AOI开发指南.(2023)[2025-09-07].<https://lbs.amap.com/api/webservice/guide>.
- [10] ALWI S R A W, AHMAD M N. Survey on outdoor navigation system needs for blind people[C]//2013 IEEE Student Conference on Research and Development.Piscataway:IEEE,2013:147-148.
- [11] 北京宇音天下科技有限公司.SYN6288中文语音合成芯片数据手册V2.1[Z].北京:宇音天下,2015.
- [12] 李强,张磊.基于NPN三极管的TTL电平转换电路设计与可靠性分析[J].现代电子技术,2020,43(9):112-115

Research on Material Innovation and Multi-Performance Optimization Based on ISWE Technology

Ziheng Yin Yaxuan Deng Yuhuan Wang Xiangyu Zhang

Chengxian College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, 210088, China

Abstract

Global water shortage and uneven distribution of safe drinking water are urgent issues that need to be addressed today. Utilizing solar energy technology to evaporate water can effectively alleviate people's concerns about the lack of fresh water resources and is also one of the key technologies to solve the uneven distribution of safe drinking water in the world today. Solar-driven interinterface water evaporation (ISWE) is an emerging energy conversion technology. This review is based on the research of material innovation and multi-performance optimization of ISWE technology. By analyzing the development trends of ISWE solar thermal conversion technology in recent years, it focuses on three directions: environmental protection design, thermal management optimization, and salt resistance innovation for detailed analysis. Finally, it summarizes and presents prospects. This review provides insights into the future development direction of ISWE and emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration in promoting progress in this field.

Keywords

Interface solar water evaporation (ISWE); Photothermal conversion materials; Optimization of salt resistance performance; Thermal management; Sustainable water purification

基于 ISWE 技术的材料创新与多性能优化研究

尹子恒 邓亚轩 王雨涵 张翔宇

东南大学成贤学院，中国·江苏南京 210088

摘要

全球水资源短缺和安全饮用水分布不均衡是当今急需解决的问题，利用太阳能技术蒸发水可以有效地缓解人们对淡水资源缺乏的担忧，也是解决当今世界安全饮用水分布不均匀的关键技术之一。太阳能驱动界面水蒸发（ISWE）是一种新兴的能源转换技术，本综述基于ISWE技术的材料创新与多性能优化研究，通过分析近年来ISWE光热转换技术的发展趋势，聚焦环保设计、热管理优化与抗盐创新三个方向进行详细分析，最后进行总结和提出展望。本综述为ISWE的未来发展方向提供了见解，并强调了跨学科合作在推动这一领域进步中的重要性。

关键词

界面太阳能水蒸发（ISWE）；光热转换材料；抗盐性能优化；热管理；可持续水净化

1 引言

在水资源和能源短缺的情况下，太阳能作为一种清洁、可再生、低成本、易采集的能源得到了全球的关注，太阳能驱动水净化技术开始迅速发展，其中界面太阳能水蒸发（ISWE）技术因其具备高效的能量转化和易制备的特性，这使它成为解决水资源短缺的前沿技术之一。

ISWE 光热转换技术的核心在于光热转换材料，该材料凭借出色的光吸收能力，能够高效吸收太阳光中的可见光和近红外辐射，使热量集中于蒸发界面，从而实现高效水蒸发。

尽管该技术具备成本低廉、高效转化和易制备等优点，但在蒸发器的长期工作中，蒸发器表面盐结晶、热损耗管理和冷凝水收集等问题也日渐显现。本综述旨在为 ISWE 光热转换技术的进一步发展提供理论支持，而多学科的交叉融合成为推动该技术发展的核心驱动力。

2 ISWE 光热转换技术的发展趋势

随着 ISWE 技术被全世界的研究人员所关注与研究，其存在的问题也在被逐个攻破，我们将根据 ISWE 蒸发器主要针对的光热转换分为 3 类，并对此展开详细的分析，它们分别是环保可持续发展、热管理性能的优化以及耐盐性能的优化。

【作者简介】 尹子恒（20014-），男，中国江苏昆山人，在读本科，从事功能材料研究。

2.1 更加环保的光热转换技术

近期, ISWE 的绿色环保以及可持续性开始被研究人员格外关注, 如何在不施加非体系内能源装置的基础上实现纯净水的高产能以及将废料和 ISWE 技术相结合实现高转换率是研究人员频繁所关注的点^{[1]-[3]}。

为提高 ISWE 蒸发效率, 可将其与新能源设备结合实现净水与再生能源联产。太阳能利用途径包括光伏、光热、光催化, 常见联产系统为清洁水 - 电及清洁水 - 氢热电联产^[4]。单一光伏发电效率仅 20%-30%, 大部分能量以热能形式损耗。Qu 团队^[5] 将光伏板、加热元件与 ISWE 结合形成光 - 电 - 热蒸发系统, 虽提高蒸发速率但未充分利用光伏板能源价值。相比之下, Ma 等人采用 RGO 复合纳米材料构建串联九网蒸发 / 发电阵列, 通过不对称策略实现太阳能 - 热电集成, 可持续输出 6V 电压, 蒸发速率达 $1.88\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 光热转换效率 94.3%。Xu 等人^[6] 设计的防水热互联层(WTIL)可直接传递光伏板热能至净水装置, 实现 $0.8\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 蒸发速率、20.4% 光电转换效率、54.2% 光热转换效率及 54.2% 蒸发效率, 最大化光伏板能源价值。

随着城市化进程地不断推进, 城市生活垃圾产量快速增长, 2021 年已达到 26913 万吨, 而且每年仍以 10% 速度不断增长, 同时垃圾污染也危害人类的健康, 废弃垃圾的再利用开始被众多研究人员所重视^{[7]-[9]}。受此启发, Zhang 等人以废塑料瓶为多孔炭材料, 用生活垃圾常用的木制海绵作为支撑载体, 构建了三维太阳能蒸发器, 相应的蒸发速率和能量转换效率分别达到 $1.59\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 88.49%, 除此之外, 该材料还具有优秀的耐盐性。

尽管本节仅总结了光伏 - 清洁水热电联产系统及单一化材料案例, 但其他联产系统与杂化材料同样具备设计优势。近十年通过学科交叉, 研究人员从光伏转热到余热回收, 实现了高效、经济且环保的太阳能水蒸发方案。复合式热电联产与杂化材料技术对提升能源效率、推动环保可持续发展意义重大, 其应用是实现绿色可持续城市化的关键。

2.2 热管理优化的 ISWE 光热转换技术

正如上一章节所提到的, 蒸发系统中常见的热损失分为热传导损失、热对流损失以及热辐射损失, 其中水蒸发的总热量可由下式计算:

$$mh_{fg} = Aaq_{solar} - A\varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4) - Ah(T - T_{amb}) - Aq_{water}$$

式中: A: ISWE 蒸发表面积; a: 材料的太阳能吸收率; q_{solar} : 太阳能输入的总能量, 即单位时间内接收到的太阳能量; ε : 材料表面发射率; σ : 斯特藩 - 波尔兹曼常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8}\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$; T: 蒸发表面的温度; T_{amb} : 环境温度; h: 对流换热系数, 表示由于空气流动导致的热量传递速率; mh_{fg} : 水蒸发的总热量; Aaq_{solar} : 太阳能输入的总能量; $A\varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4)$: 热辐射的损失能量, 该公式基于斯特藩 - 波尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律, 表明物体的辐射能量与其绝对温度的四次方成正比; $Ah(T - T_{amb})$:

热对流的损失能量, 该公式遵循牛顿冷却定律, 表明当物体表面与周围存在温差时, 单位时间从单位面积散失的热量与温度成正比; Aq_{water} : 热传导损失, 通常可忽略不计。

ISWE 因材料特性可忽略热传导损失, 但需关注热对流与热辐射损失对效率的影响, 需通过材料导热性优化、界面结构调控及表面性质设计降低热损失^[10]。Chen 等人^[11] 于 2014 年建立热管理系统并减少热损失, 为太阳能辅助蒸汽产生提供参考。Qu 团队^[12] 对比泵送冷凝与冷凝涂层技术发现, 泵送内部空气导致热量和蒸汽泄漏, 影响 SMDW 产量效率。传统蒸发器设计侧重增加蒸发表面, 但蒸汽若无法从多孔结构有效扩散, 仍难以实现高蒸发速率。封闭端多孔结构中, 蒸汽滞留会限制水分子补充及热量散失, 导致蒸发速率下降和热损失增加^[13]。近年研究表明, 引入空气对流可改善蒸发性能与热损失: Zhu 团队^[14] 设计的 3D 互联多孔结构 (3D IPCF) 通过增强蒸汽扩散能力, 在 1 sun 和 2 m/s 风速下实现 $5.6\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的蒸发速率, 其 3D 架构允许蒸汽有效扩散, 对流风速加速蒸汽向大气传递, 确保相变与扩散高效协同。

Zhu 等人^[15] 设计了一种利用太阳能和海水同时产生清洁水和电力的太阳能设备, 其核心技术在于存储和回收由界面太阳能蒸汽生成过程中产生的蒸汽焰。设备的太阳能吸收器基于石墨 / 非织造布, 具有高效的太阳能吸收和宽带吸收特性。该吸收器通过石墨乙醇溶液喷涂预加热非织造材料制成, 具备 250nm-2500nm 宽带吸收特性, 光吸收率达 98%。热存储腔室温度维持 100° C (室温 25° C) 时, 热电模块随温度升高输出电压与电流增加, 在 30 kW/m² 辐照下最大输出功率 574 mW, 功率密度 292.9 W/m², 效率 0.98%。

综合来看, 热对流和热辐射的共同作用影响了界面太阳能蒸发的总热量利用效率。而 ISWE 的热管理未来发展将是一个多方面、跨学科的挑战, 通过材料的导热性优化、界面几何结构的调控以及表面性质的设计, 可以有效减小这两种热损失, 从而提高蒸发效率和能量利用率, 这不仅是优化界面太阳能蒸发系统的重要技术路径, 也是未来实现更高效能量转换的关键点。

2.3 抗盐性能优化后的光热转换技术

ISWE 连续运行中, 表面盐积聚严重影响蒸发器稳定性及太阳能吸收、供水与蒸发效率^[16]。海水中总溶解固体含量为 3-3.5wt%, 蒸发器表面因 Marangoni 效应, 中心卤水浓度高于边缘, 导致盐溶液向边缘迁移并结晶 (图 6)。尽管盐分可在光照不足时溶解返回 bulk water, 但仍降低日间蒸发效率, 盐积聚仍是研究较少的关键挑战^{[17]-[19]}

He 团队^[20] 以玉米芯三维纤维网络为载体, 通过负载聚吡咯 (PPy) 增强碳化玉米芯 (PCC) 的亲水性与抗腐蚀性, 提升材料在恶劣环境下的稳定性。Yu 团队^[21] 开发的复合表面水凝胶蒸发器 (PSH) 虽非碳基材料, 却实现 1 sun 下 $4.0\text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ 的蒸发速率与 93% 效率。其表面经三氯辛基硅烷 (OTS) 部分修饰形成疏水 / 亲水区域, 水分子在亲水区域

富集加速逃逸，同时通过接触线扩散至疏水区域蒸发并带走盐分，实现自清洁防盐功能。

Zhang 等人提出甘蔗衍生各向异性结构，通过将甘蔗节切割垂直放置，实现热 - 质通量解耦：水流量该材料在 1 sun 下涂盐后仍保持 >80% 蒸发效率，长期运行无盐积聚，展现优异脱盐性能。以上三种设计通过材料升级优化、表面化学修饰及结构优化等交叉学科手段，提升 ISWE 的防污拒盐性能、热管理与水运输能力：He 团队^[20]通过化学反应将 PPy 和 PEI 加载于 PCC，提升亲水性和抗腐蚀性，弥补水供给不足，实现 1 sun 下 1.68 kg/m² 蒸发速率和 99.32% 光热效率；Yu 团队^[21]设计虽性能优异但结构复杂，工业应用成本或高于碳基材料；Zhang 等人通过改变 ISWE 放置方式优化热扩散与盐积聚问题：水流垂直于热通量减少向 bulk water 的热传递，水平方向充足水流将盐分快速运回 bulk water。未来拒盐研究热点：材料层面引入仿生设计与智能响应材料（如自适应环境材料、动态盐分排斥材料）；结构优化持续改进几何空间布局，提升系统稳定性和效率。

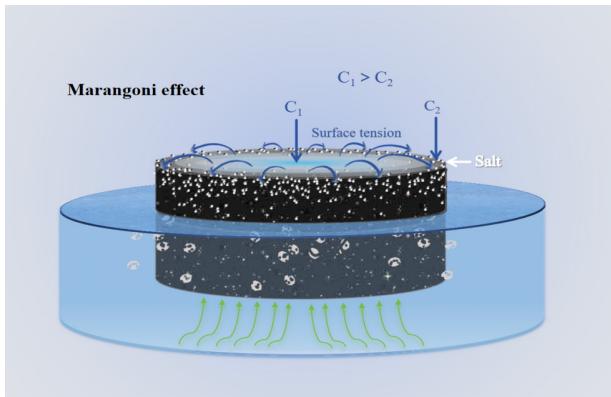


图 6 受马兰戈尼效应影响结晶盐向边缘移动

3 结语

本文综述界面太阳能水蒸发 (ISWE) 技术现状与进展，阐述核心原理，重点探讨光热转换效率提升与冷凝优化趋势，强调其对水资源可持续利用的重要性。尽管 ISWE 在能源联产、热管理、拒盐性及冷凝收集方面取得进展，但仍面临三大挑战：跨学科协作与技术集成不足，光伏 - 光热 - 光催化等多能利用方式尚未有效整合；实际应用适配性待突破，海水淡化受盐堆积制约、污染水体易沉积污染物，模块化设计欠缺限制规模化生产；抗盐堆积、热管理及冷凝收集协同优化难题，需开发动态抗盐机制、多级传热结构及高效冷凝协同方案。未来需构建多学科协同平台，强化材料动态设计与智能调控，突破模块化与低成本制造瓶颈，推动技术从实验室走向实际应用，为全球水资源可持续利用提供绿色解决方案。

参考文献

- [1] Meng, F. L.; Gao, M.; Ding, T.; Yilmaz, G.; Ong, W. L.; Ho, G. W. Modular Deformable Steam Electricity Cogeneration System with Photothermal, Water, and Electrochemical Tunable Multilayers. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30 (32), 2002867. <https://doi.org/10.1002/adfm.202002867>.
- [2] Ding, T.; Zhou, Y.; Ong, W. L.; Ho, G. W. Hybrid Solar-Driven Interfacial Evaporation Systems: Beyond Water Production towards High Solar Energy Utilization. *Mater. Today* 2021, 42, 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.10.022>.
- [3] Zhou, Y.; Ding, T.; Gao, M.; Chan, K. H.; Cheng, Y.; He, J.; Ho, G. W. Controlled Heterogeneous Water Distribution and Evaporation towards Enhanced Photothermal Water-Electricity-Hydrogen Production. *Nano Energy* 2020, 77, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105102>.
- [4] Shi, P.; Li, J.; Song, Y.; Xu, N.; Zhu, J. Cogeneration of Clean Water and Valuable Energy/Resources via Interfacial Solar Evaporation. *Nano Lett.* 2024, 24 (19), 5673–5682. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c00643>.
- [5] Cui, L.; Zhang, P.; Xiao, Y.; Liang, Y.; Liang, H.; Cheng, Z.; Qu, L. High Rate Production of Clean Water Based on the Combined Photo - Electro - Thermal Effect of Graphene Architecture. *Adv. Mater.* 2018, 30 (22), 1706805. <https://doi.org/10.1002/adma.201706805>.
- [6] Xu, N.; Zhu, P.; Sheng, Y.; Zhou, L.; Li, X.; Tan, H.; Zhu, S.; Zhu, J. Synergistic Tandem Solar Electricity-Water Generators. *Joule* 2020, 4 (2), 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.12.010>.
- [7] Wang, J.; Jiang, J.; Wang, X.; Liu, S.; Shen, X.; Cao, X.; Sun, Y.; Dong, L.; Meng, X.; Ragauskas, A. J.; Wang, Y. Polyethylene Upcycling to Fuels: Narrowing the Carbon Number Distribution in n-Alkanes by Tandem Hydropyrolysis/Hydrocracking. *Chem. Eng. J.* 2022, 444, 136360. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136360>.
- [8] Gao, Z.; Ma, B.; Chen, S.; Tian, J.; Zhao, C. Converting Waste PET Plastics into Automobile Fuels and Antifreeze Components. *Nat. Commun.* 2022, 13 (1), 3343. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31078-w>.
- [9] Bai, H.; He, P.; Hao, L.; Liu, N.; Fan, Z.; Chen, B.; Niu, R.; Gong, J. Engineering Self-Floating Fe2O3/N,O-Doped Carbon Foam as a Bifunctional Interfacial Solar Evaporator for Synergetic Freshwater Production and Advanced Oxidation Process. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022, 10 (5), 108338. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108338>.
- [10] Xu, Z.; Zhang, L.; Zhao, L.; Li, B.; Bhatia, B.; Wang, C.; Wilke, K. L.; Song, Y.; Labban, O.; Lienhard, J. H.; Wang, R.; Wang, E. N. Ultrahigh-Efficiency Desalination via a Thermally-Localized Multistage Solar Still. *Energy Environ. Sci.* 2020, 13 (3), 830–839. <https://doi.org/10.1039/C9EE04122B>.

A compact design of a vertically polarized short wave antenna

Yanzhao Wang

China Institute of Radio Propagation, Qingdao, Shandong, 266107, China

Abstract

Due to the longer wavelength of shortwave antennas, full-scale designs result in large footprint sizes that conflict with the increasingly scarce land resources. This paper proposes a miniaturized design scheme for vertically polarized shortwave antennas. By adopting a single-dipole configuration and implementing optimized design principles, the proposed antenna effectively reduces spatial requirements. It proves suitable for deployment in special environments such as rooftops and mountaintops. Optimization results demonstrate that the antenna's diameter, height, and configuration significantly influence performance and footprint dimensions. The design achieves compact size and simplified structure without compromising performance metrics, making it adaptable to diverse scenarios. This approach facilitates the deployment of shortwave antennas and station upgrades.

Keywords

Miniaturization; Shortwave antenna; Vertical polarization

一种垂直极化短波天线的小型化设计

王彦召

中国电波传播研究所, 中国·山东 青岛 266107

摘要

由于短波天线波长较长, 按照全尺寸设计时, 天线占地面积较大, 与目前日益紧张的用地相矛盾。本文提出了一种垂直极化短波天线小型化设计方案, 该天线以单极子的形式, 通过对天线进行合理设计, 可有效减少天线占地尺寸。可适用于楼顶、山顶等特殊环境种使用。优化设计结果表明, 天线的直径、高度以及天线形式, 对天线的性能、占地尺寸影响较大。在大幅降低天线性能指标的前提下, 设计一种占地较小、结构简单, 可适用于多种场景的小型化天线, 有利于短波天线的部署及台站改造。

关键词

小型化 短波天线 垂直极化

1 引言

短波天线的频率范围为 2 ~ 30MHz, 对应的波长为 10 ~ 150m, 要想获得辐射效果较好的天线, 一般将天线设计为对应频率的半波长, 并采用加粗振子直径的方法来降低天线的特性阻抗, 改善输入阻抗特性, 展宽工作波段。这种方式设计的天线, 虽然性能优越, 但是尺寸过大, 或者带宽满足不了使用要求。简单的单极天线是一种窄频带天线, 需要配置天调才能在宽带使用。为了展宽数字单极天线, 应用了许多展宽数字的办法, 也有的在简单单极天线上采用分布加载或宽带匹配网络技术得到宽频带特性, 但这些办法离不了加电阻, 以牺牲辐射功率、降低效率, 来得到宽带、小尺寸性能。

本文提出了一种基于单极子天线增大等效半径的方法,

增大天线带宽, 并通过合理设计, 保证天线辐射性能的前提下, 得到宽带化、小型化的天线。

2 天线原理分析与设计

2.1 设计原理

单极天线, 原理示意图如下图。它的特点是在水平面内无方向性, 垂直面内低仰角辐射。

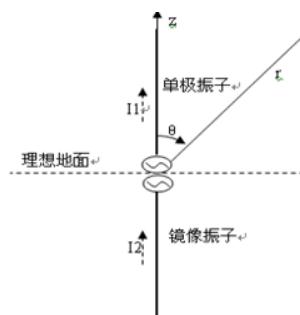


图 1 单极天线原理图

【作者简介】王彦召 (1989-), 中国山东枣庄人, 硕士, 工程师, 从事天线计算研究。

设地面为无限大理想导电平面，单极天线与其镜像构成一对称振子，因此，它的辐射场可直接用自由空间对称振子的场的表示式来计算。只是场的表示式仅对上半空间有效，下半空间的场为零。

单极天线比同等臂长自由空间对称振子的方向系数提高一倍。这是由于单极天线辐射的能量经地面反射仅存在于上半空间，因而在上半空间某点的功率密度增大一倍所致。

为了使其带宽增大，将其变形为单极锥形天线。由理论可知，锥形天线的锥顶角和锥高的值，影响天线的阻抗特性。为了获得较好的宽带特性，可以将椎体做适当改变。让其沿纵轴旋转一圈，得到圆锥形天线。

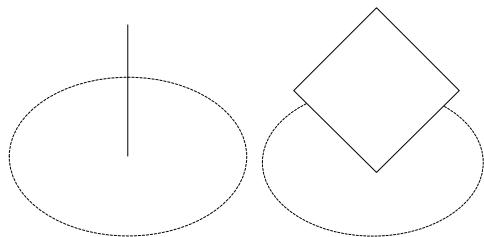


图 2 天线展宽带宽原理图

该天线由于其等效半径增大，使得其阻抗在一定频率范围内比较平稳，阻抗带宽和方向图带宽变宽。

2.2 天线设计

若想要更宽的带宽，其等效半径会较大，增加了天线占地尺寸。较大的占地面积，限制了其应用范围，且由于天线尺寸较大，天线在较平缓的场地架设，才能保证其结构成型，不利于多场景的推广应用。

根据单极天线展宽带宽的原理，可通过抬高“腹部”、缩小等效半径的方式，缩小天线的尺寸。天线的带宽与等效半径有关，等效半径缩小太多，不利于展宽天线的带宽，天线与馈线之间的匹配并不十分良好，随着等效半径的减小，特性阻抗较大，需在馈线与天线之间加入阻抗变换器。因此，根据使用带宽要求，合理设计天线等效半径。

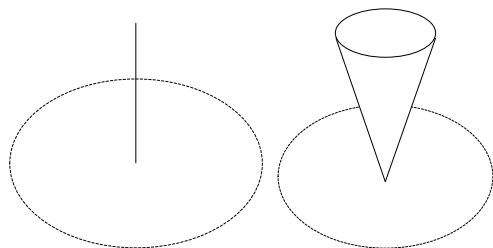


图 3 天线小型化设计原理图

为了减轻天线重量及易于工程制作，可以用导线栅代替导体面。当导线数量达到一定程度时，两者性能相近，导线数量越多，差别就越小，但加工制作和架设也越复杂。在设计天线时，根据所需的带宽特性，选择合适的导线数量。

2.3 天线结构设计

设计出来的天线结构如图所示。天线面采用 12 根导线，

在天线顶端有一个金属圆环，所有的导线通过圆环汇聚在支撑塔上，支撑塔底部与地绝缘。

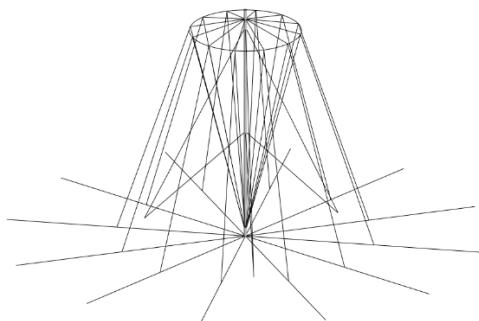


图 4 小型化天线示意图

天线架高 13 米，占地面积为直径 14 米的圆形区域（不含地网），天线面等效半径为 3 米，天线尺寸图如下所示。

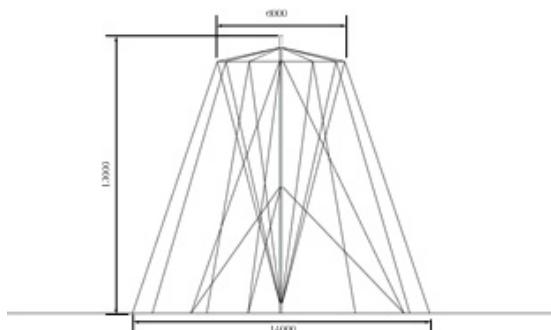


图 5 小型化天线尺寸图

这种结构设计，极大缩小了天线占地尺寸。

3 天线性能分析

利用电磁仿真软件对天线进行建模分析，通过优化设计，使得天线在工作频率为 4 ~ 30MHz 时，可实现较高的性能、较小的尺寸。天线仿真模型如下图所示：

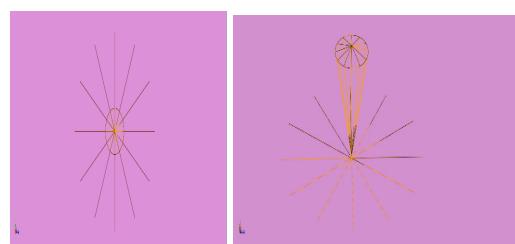


图 6 小型化天线仿真模型

3.1 天线电压驻波比特性分析

天线的电压驻波比是与天线输入阻抗紧密相关的电参数，它反映了天线输入阻抗与馈线特性阻抗（一般与发射机输入阻抗相同）的匹配程度，其数值越小匹配效率越高。由于天线输入阻抗随频率变化产生较大的起伏，一般与馈线特性阻抗不完全匹配，从而在天线输入端存在入射波和反射

波，入射波和反射波的叠加产生电压的行驻波分布，电压驻波比定义：

$$\text{VSWR} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$$

其中为反射系数。

通过电磁仿真软件对天线进行优化设计计算，天线的驻波比仿真结果，如图所示。

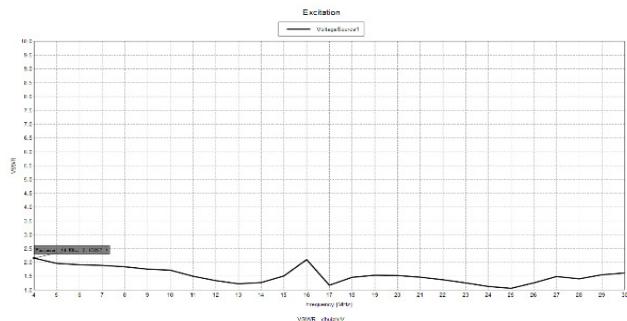


图 7 天线电压驻波比

通过仿真结果可以看出，天线在 4 ~ 30MHz 驻波比满足 ≤ 2.0 (不大于 10% 频点 ≤ 2.5)。

3.2 天线辐射特性分析

天线增益可以有效提高天线发射信号的能量集中程度，这对发射天线来说至关重要，在其它指标满足的情况下最大增益越大越好，增益越大可覆盖的距离越远。通过仿真计算，天线方向图如下图所示。

从仿真结果可以看出，经小型化设计的天线，其辐射特性保持了很好的性能，整体性能保持在 0 ~ 5dB 之间。

4 结语

基于单极子增大等效半径、提高“腹部”位置的方式，保证辐射功率、效率的前提下，获得宽带、小尺寸性能的天线。天线电压驻波比可满足工作频段 4 ~ 30MHz ≤ 2.0 (不

超过 10% 频点 ≤ 2.5)，天线增益 ≥ 0 dB。整体天线尺寸 \leq ，可满足多种场景安装架设，有利于此类型天线的推广应用。

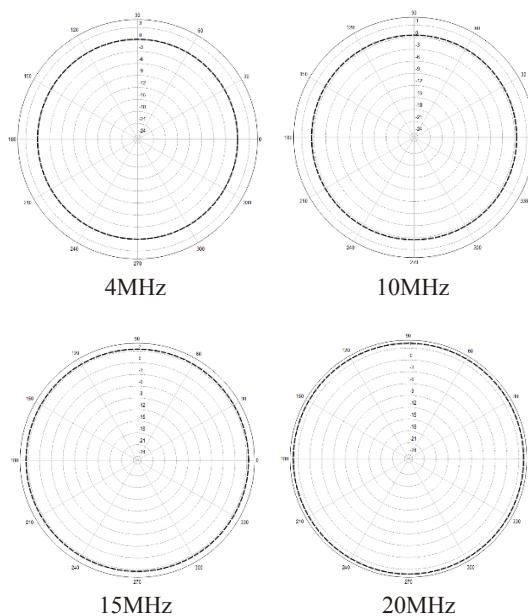


图 8 天线仿真方向图

参考文献

- [1] 辛琦. 移动通信天线及短波天线关键技术研究 [D]. 西安: 电子科技大学, 2013.
- [2] 向春清,胡修林,陈海涛.短波宽带天线及匹配网络的 优化设计[J].华中科技大学学报(自然科学版),2002, 30(8):7-9.
- [3] 陈轶鸿,孙琰等.宽带匹配网络的现代设计方法 [J].电波科学学报,1996, 11(2):102-109. Chen Y H, Sun Y, et al ..Modern methods for the design of broadband matching networks[J] .Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(2):102-109.
- [4] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社, 2002.
- [5] 蔡英仪.短波天线工程建设与维护[M] .北京:解放军出版社, 2003.