

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

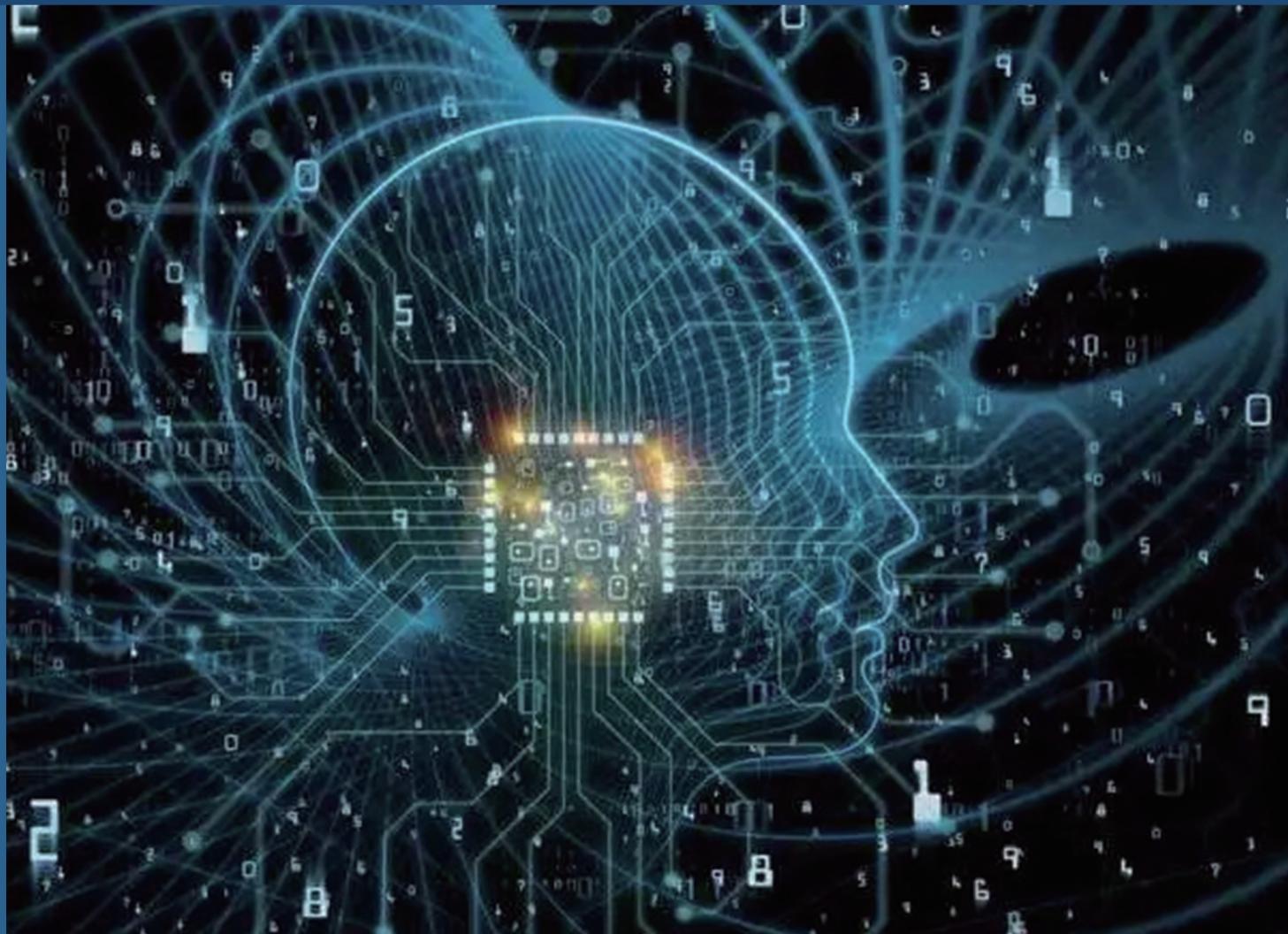
Volume 6 Issue 12 December 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



Information Science and Engineering Research

信息科学与工程研究

Volume 6 Issue 12 December 2025 ISSN 2737-4815(Print) 2737-4823(Online)



12
2025

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 面向生产任务快速响应的工位级物料精益配送模式
/ 严嘉祺 袁媛 王喆 詹俊 田博文 王振营
- 5 大数据驱动水电站设备状态监测与智能运行研究
/ 刘渝
- 8 TSN 异构多核 SoC 的卫星编队协同控制
/ 张志有 张志睿 杨世文
- 16 电子信息技术在水利防洪抗旱预警系统中的优化应用
/ 吕志平
- 19 数据驱动下社区老年人健康风险多维度分析与智能预警模型构建
/ 黄威 李天乐 王鹏钢 张焕琦 郑智宇
- 22 光纤通信系统中高速信号传输损耗补偿方案研究
/ 张丽辰
- 25 大数据应用中的数据脱敏方法研究
/ 司祯祯 王珉
- 28 基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的应用研究
/ 李家靖
- 31 基于光子集成芯片的掺铒光波导放大器——从卫星通信到可穿戴设备的芯片级光放大技术
/ 李乾泽
- 34 基于 Whisper 的实时管制语音识别系统设计与实现
/ 赵鹏 龙滨 高卫华
- 1 A workstation-level lean material distribution model for rapid response to production tasks
/ Jiaqi Yan Yuan Yuan Zhe Wang Jun Zhan Bowen Tian Zhenying Wang
- 5 Research on Big Data-driven Equipment Condition Monitoring and Intelligent Operation of Hydropower Station
/ Yu Liu
- 8 Collaborative control of satellite formation using TSN heterogeneous multi-core SoC
/ Zhiyou Zhang Zhirui Zhang Shiwen Yang
- 16 Optimization Application of Electronic Information Technology in Water Conservancy Flood Control and Drought Early Warning System
/ Zhiping Lv
- 19 Multi-dimensional Analysis and Intelligent Early Warning Model Construction of Health Risk of Community Elderly Driven by Data
/ Wei Huang Tianle Li Penggang Wang Huanqi Zhang Zhiyu Zheng
- 22 Research on compensation scheme for high-speed signal transmission loss in optical fiber communication system
/ Lichen Zhang
- 25 Research on Data Desensitization Methods in Big Data Applications
/ Zhenzhen Si Min Wang
- 28 Research on the Application of Big Data-Based Electronic Information Technology in Medical Diagnosis
/ Jiajing Li
- 31 Er-doped Photonic Integrated Chip Waveguide Amplifiers: Chip-level Optical Amplification Technology from Satellite Communications to Wearable Devices
/ Qianze Li
- 34 Design and Implementation of Real-time Control Speech Recognition System Based on Whisper
/ Peng Zhao Bin Long Weihua Gao

A workstation-level lean material distribution model for rapid response to production tasks

Jiaqi Yan Yuan Yuan Zhe Wang Jun Zhan Bowen Tian Zhenying Wang

Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing, 100854, China

Abstract

The production of aerospace products is a typical multi-variety and variable batch production mode, involving the control and distribution of multiple types, models and batches of materials. The efficiency of material sorting and completeness is difficult to meet the supporting requirements of each production station. This paper builds a warehousing and logistics management system, applies automated equipment such as stacker cranes and AGVs, and interacts with the superior manufacturing operation management system to obtain production plans. Based on the material completeness status, control AGVs and other automated distribution equipment to perform completeness tasks, achieving functions such as material attribute association, material completeness status monitoring, and completeness distribution, and build a workstation-level material lean distribution model for rapid response to various types of aerospace product production tasks.

Keywords

Production scheduling; stereoscopic warehouse; AGV; material completeness

面向生产任务快速响应的工位级物料精益配送模式

严嘉祺 袁媛 王喆 詹俊 田博文 王振营

北京遥感设备研究所, 中国·北京 100854

摘要

航天产品生产为典型的多品种、变批量生产模式, 涉及多型号、多类型、多批次物料管控及分发, 物料分拣齐套效率难以满足各生产工位配套需求, 本文通过建设仓储物流管理系统, 应用堆垛机、AGV等自动化设备, 通过与上级制造运营管理系统的交互, 获取生产计划, 并基于物料齐套状态, 控制AGV等自动化配送设备执行齐套任务, 实现物料属性关联、物料齐套状态监控、齐套配送等功能, 构建面向多型航天产品生产任务快速响应的工位级物料精益配送模式。

关键词

生产调度; 立体库; AGV; 物料齐套

1 引言

航天产品生产为典型的多品种、变批量生产模式, 物料管控存在以下难点: 物料种类数量多、价值高; 物料之间存在电气参数配合关系, 配套关系严格; 涉及供货厂家较多、供货不稳定, 难以实现周期性齐套; 物料状态多, 涉及多型号多批次多工序, 管理难度大。原有的人工物料管理及齐套配送模式存在以下问题: 库房的物料信息以手工盘点为主, 易出错, 效率低; 物料位置、状态、匹配性等信息难以记录, 导致出入库不便; 齐套任务依赖人工调度, 与生产计划的实时同步性差; 生产任务逐年增长, 依赖人工记录和追踪物料的人力成本随之增长。

为满足多型号产品齐套快速响应需求, 通过引入立体

库、AGV等自动化设备, 同时构建仓储物流管理系统(WMS)系统实现与制造运营管理系统(MOM)系统的生产计划互联, 同时针对航天产品生产特点, 开发型号工序物料清单(BOM)齐套数据、齐套计划关联、齐套任务分发、齐套载具配送等功能模块, 通过立体库、AGV实现基于生产计划和物料状态的工位级物料精益配送^[1]。

2 总体设计方案

2.1 车间布局与物流路径规划

生产车间由立体库、AGV、装配流水线组成, 为实现产品的串行生产, 缩短生产“动线”, 采用由西向东的生产布局, 立体库由北侧入库存储后, 进行分拣齐套及按计划生产齐套出库, 由AGV将齐套物料按产品对应生产工序, 自动化配送至装配区相应工位, 由装配流水线按产品工艺规程要求的工序进行装配。

【作者简介】严嘉祺 (1996-), 男, 中国吉林长春人, 硕士, 工程师, 从事航天产品智能制造研究。

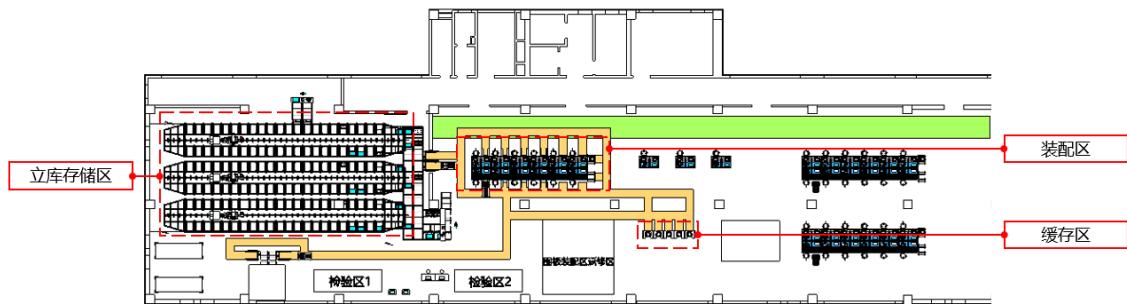


图 1 车间整体布局及物流路线

2.2 仓储物流管理系统总体架构

精益物料管理配送系统实现从物料扫码入库、自动入库、齐套拣配、领料出库、AGV 配送、等全业务管控及自动化配送流程。通过业务的打通及存储过程的精细化管控达到优化制造资源分配、提高物流利用效率的目标；通过对物流调度过程、状态的实时监控、动态追踪与信息回传、执行任务数据采集满足智能调度实时可控^[2]。

3 物料齐套配送流程设计与执行

物料齐套配送是通过数据管理配置将自动化立体库、AGV、生产工位联动起来，实现产品装配所需要的物料自

动从立体库出库运送至生产工位。

3.1 生产计划关联

基于企业资源计划系统（ERP 系统）、制造执行系统（MES 系统）、物联网设备及各类传感器（如二维码标签等），建立信息数据模型，构建智能感知网络和设备架构，实现生产计划关联。根据订单生成的排产结果以及各个产品的 BOM 表，物料齐套配送系统能生成各种物料的需求计划。物料需求计划以天为周期，展示了各种物料在当天所需要的数量，包含了订单编号，产品型号，产品名称，产品编号，批次号，物料名称，型号规格，位号，需求数量以及需求时间等信息。

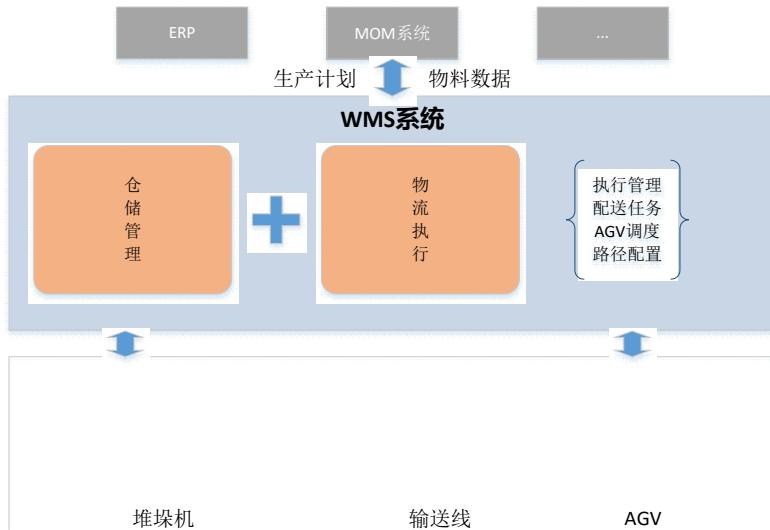


图 2 物料管理配送系统总体架构图

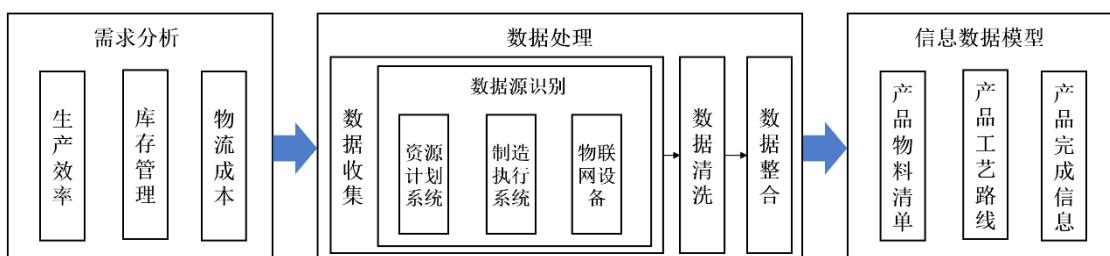


图 3 生产计划关联流程图

3.2 基础数据管理

基础数据管理包含物料数据管理、库位数据管理、料箱数据管理等。

3.2.1 物料数据管理

物料数据用于区分不同型号和不同层级的物料。如下表所示,包含物料名称、物料编号、型号名称、型号代码、所属类型等信息。

表 1 物料数据

物料名称	物料编号	型号名称	型号代码	所属类型
------	------	------	------	------

3.2.2 料箱数据管理

料箱数据用于区分不同规格的料箱,针对不同的出入库需求配置不同的料箱。主要包含料箱规格参数,本立体库料箱规格主要分为高库位料箱、低库位料箱和齐套库位料箱。高库位料箱、低库位料箱用于装不同高低尺寸的物料,齐套库位料箱则是通过专门设计的用于装某工序级装配所使用的全部物料的料箱,如下图所示,为某个产品的齐套料箱示意图。

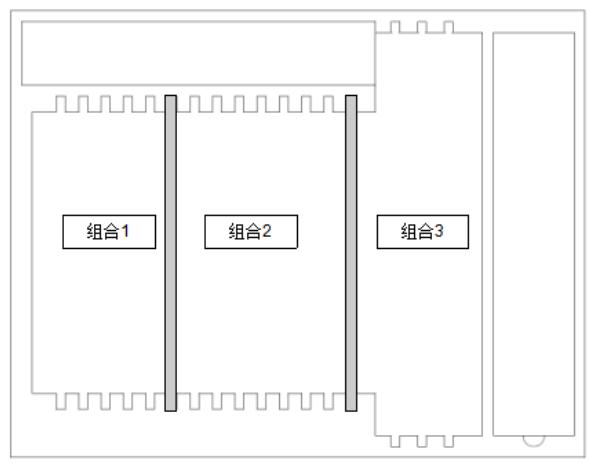


图 4 齐套料箱示意图

3.2.3 库位数据管理

库位数据用于区分不同库位,确定料箱的存储位置、出库位置、配送位置等。如下表所示,包含库房编号、库房名称、库位编号、库位名称、库位类型。库位的类型主要分为立体库库位和接驳库位,立体库库位用于存储入库的料箱,接驳库位主要用于与 AGV 进行接驳交互实现料箱出入库和工位接收料箱。

表 2 库位数据

库位名称	库位编号	库房名称	库房编号	库位类型
------	------	------	------	------

3.3 齐套 BOM 建立

齐套 BOM 是针对产品装配工序构建的工序级物料 BOM,齐套 BOM 可用于计算立体库内产品齐套数和进行物料齐套依次出库的依据。

齐套 BOM 由父子表构成,父表为产品物料的主要信息,包括物料名称、物料编号、型号代号、型号名称、工序、料箱规格、版本、批次、频点等,子表为具体物料需求,包含物料名称、物料编号、型号代号、型号名称、基本用量、频点、批次号等。

3.3.1 物料齐套计算

物料齐套方法根据产品的齐套 BOM 遍历立体库内的入库产品数据,得到子级产品的全部数量,通过和预设的构成父级产品的单套数量计算出可配套的数量,最终取其中的最小值为满足产品装配的可齐套数量,具体步骤如下:

步骤 1, 设父级产品为 A, 子级产品为 a_i , 产品数量为 b_i , 单套数量为 c_i , 配套数量 d_i ;

步骤 2, 根据齐套 BOM 关联表, 获取产品 A 所需的全部子级产品 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;

步骤 3, 使用深度遍历方式对产品入库管理数据进行遍历和汇总,得到全部子级产品的入库数量 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$;

步骤 4, 计算子级产品的配套数量 $d_i = \frac{b_i}{c_i}$ (向下取整数);

步骤 5, 计算产品物料齐套数 $= \min\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 。

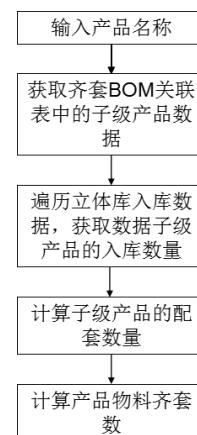


图 5 物料齐套计算方法流程图

物料齐套计算表,如下表所示。

表 3 物料齐套计算表

父级产品名称	子级产品名称	产品代号	产品型号	产品类型	单套数量	入库数量	配套数	齐套数
产品 A	组合 1	XXX	XXX	组合	1	XXX	XXX	XXX
产品 A	组合 2	XXX	XXX	组合	1	XXX	XXX	XXX
产品 A	组合 3	XXX	XXX	组合	1	XXX	XXX	XXX
产品 A	结构件 1	XXX	XXX	结构件	2	XXX	XXX	XXX
产品 A	结构件 2	XXX	XXX	结构件	3	XXX	XXX	XXX
...

3.3.2 物料齐套出库和齐套拣配

操作人员在确认物料齐套后，可以通过立体库系统中的齐套出库功能，将齐套 BOM 中用到的物料和匹配的齐套料箱一次性出库到齐套分拣区，在齐套分拣区将不同的物料绑定到齐套料箱中，并完成入库操作，实现物料的齐套拣配。

3.4 齐套配送

齐套配送流程如图所示，在完成前期的基础数据维护、齐套 BOM 建立后，主要包含 5 个步骤：①查询齐套情况②齐套配送任务建立③齐套料箱出库④ AGV 配送。

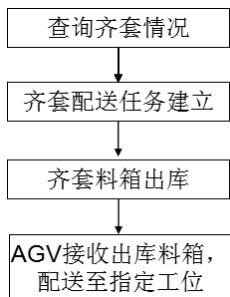


图 6 齐套配送流程

3.4.1 查询齐套情况

在齐套任务管理中可以对齐套任务的详细情况进行查询，确定产品的齐套情况，包含任务数量、已齐套数量、库存套数、已出库数量：任务数量表示该批次需要完成的产品数量，已齐套数表示完成齐套准备的数量，库存套数表示立体库内可以进行齐套准备的数量，已出库数量则表示配送至工位的出库套数^[3]。

3.4.2 齐套配送任务建立

操作人员在系统可以根据建立的齐套任务，通过齐套下架功能建立齐套配送任务。

3.4.3 齐套料箱出库

建立配送任务后，立体库会自动将完成齐套的齐套料箱出库至出库接驳位。

3.4.4 AGV 配送

建立齐套配送任务后，立体库会自动生成 AGV 的行为任务，在齐套料箱完成出库后，AGV 自动前往立体库接驳位，完成齐套料箱的接收，并根据规划好的路径配送至指定工位。

4 结论

本文针对航天产品装配车间物料管控难度大、配送不及时等问题，基于产品制造流程，通过车间布局与物流路径规划对配送路径进行了优化，并构建了物料管理配送系统的架构，实现了与上级制造运营管理、AGV、立体库的集成，基于物料管理配送系统，实现了生产计划关联、基础数据管理、齐套 BOM 建立、齐套配送功能的实现，提升了车间的物料配送效率和准确率降低了配送成本。

参考文献

- [1] 边浩.航天产品自动仓储物流系统调度优化研究[D].哈尔滨工业大学.2020
- [2] 王吉寅.基于AGV智能调度算法的航空物流虚拟制造系统驱动研究[J].自动化与仪器仪表.2025
- [3] 董亮.船体分段小组立精益生产总体方案设计[J].造船技术.2025

Research on Big Data-driven Equipment Condition Monitoring and Intelligent Operation of Hydropower Station

Yu Liu

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe, Yunnan, 662400, China

Abstract

Against the backdrop of energy structure transformation and smart grid development, hydropower station equipment operations face challenges including high data complexity, inaccurate condition awareness, and delayed operational scheduling responses, which constrain the intelligentization level and operational efficiency of hydropower stations. To address these issues, the research focuses on key operational data acquisition, multi-source data processing, and condition recognition/abnormal detection methods. By integrating detection results, it optimizes intelligent operation scheduling, formulates fault prevention strategies, and constructs decision-making mechanisms. This approach achieves comprehensive condition awareness of hydropower station equipment and intelligent decision-making throughout the entire operational process, thereby enhancing system safety and economic efficiency.

Keywords

hydropower station; big data; condition monitoring; anomaly detection; intelligent operation

大数据驱动水电站设备状态监测与智能运行研究

刘渝

红河广源水电开发有限公司, 中国 · 云南 红河州 662400

摘要

在能源结构转型与智能电网发展的背景下, 水电站设备运行面临数据复杂性高、状态感知不准确和运行调度响应不及时等问题, 制约了水电站的智能化水平与运行效率。为此, 研究围绕关键运行数据采集、多源数据处理、状态识别与异常检测方法展开, 进而结合检测结果开展智能运行调度优化、故障预防策略制定及决策机制构建, 实现水电站设备状态全面感知与运行全流程智能决策, 提升系统安全性与经济性。

关键词

水电站; 大数据; 状态监测; 异常检测; 智能运行

1 引言

在“双碳”目标和能源结构持续优化的背景下, 水电作为清洁能源的重要组成部分, 其安全高效运行对电力系统稳定性和能源可持续发展具有重要意义。随着水电站设备大型化、系统复杂化趋势日益显著, 传统依赖人工经验的运维方式已难以满足实时性、精准性和智能化需求, 而大数据技术的发展为水电站设备状态感知、运行调度优化及故障预警提供了新的技术路径和手段, 推动水电站运行管理向数字化、智能化方向迈进。

2 大数据支撑的设备状态检测

2.1 关键运行数据采集与监测指标

水电站关键设备的运行状态监测依赖于一套具备多变

量感知能力、高时间精度的数据采集系统, 旨在实现对水轮发电机组、调速系统、励磁系统、冷却系统等核心设备的全生命周期状态获取。实际部署中, 各类传感器需根据故障模式影响分析 (FMEA) 选择布点位置, 并结合设备本体参数与故障发展速度确定采样频率。例如, 导轴承位置布设三轴压电加速度计, 采样频率设定为 10kHz, 用于捕获高速冲击类振动信号; 定子绕组热监控需使用 Pt100 温度传感器, 采样周期为 5s; 电流与电压信号使用高频电流互感器与电压探头组合, 通过同步采样卡集成采集。数据传输中, 需接入边缘计算节点统一预处理, 并利用 IEEE 1588 协议同步系统时钟, 使所有信号满足最大时间误差不超过 1ms。为增强监测指标的表征能力, 需选择对故障变化具有高灵敏度的特征量, 如电流谐波畸变率 (THD)、振动包络谱能量、温升速率等。电气指标如 THD 计算公式如下:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1}$$

【作者简介】刘渝 (1986-), 男, 中国云南建水人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其水电站技术研究。

其中, VI 为基波电压, Vn 为第 n 次谐波分量, 较高的 THD 通常反映出激磁异常或负载不对称。

2.2 多源监测数据处理与特征提取

采集端传入的数据具有频率不一致、分布异质、受噪声干扰等特点, 需在进入状态识别前完成一系列结构化预处理与高表达力特征的提取过程。对此, 在数据清洗阶段, 使用滑动窗口统计剔除异常值, 针对高频振动信号采用小波降噪方法进行信号重构, 选用 Daubechies 4 小波基函数进行 3 层分解, 有效保留主频成分。在时间对齐环节, 将多信号数据流以最小采样周期进行插值重构, 生成统一时间窗口内的样本集合, 满足后续建模要求。其中, 数值标准化采用 Z-score 方式处理, 统一不同量纲特征尺度, 避免模型收敛失衡。在特征提取阶段, 以时间域、频域与统计指标为主, 构造具有故障区分能力的复合特征空间。其中, 对于振动信号提取均方根值、峭度、频谱重心等指标; 电流信号提取谐波幅度占比、波动梯度; 温度类变量提取时间滑动斜率、超限持续时长。此外, 在多变量融合层, 还需引入特征协方差矩阵计算跨信号依赖关系:

$$C_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_i^{(k)} - \bar{x}_i)(x_j^{(k)} - \bar{x}_j)$$

该矩阵可用于建模变量之间的共变行为, 揭示设备不同部位的耦合响应特性。最终使用主成分分析 (PCA) 或 Relief-F 等方法对冗余特征进行降维, 确保进入模型的特征集合具有最大信息密度和最小冗余干扰。

2.3 大数据驱动的状态识别与异常检测

经标准化与融合处理后的高维特征集合进入识别系统, 模型需同时具备状态判断与异常检出能力, 支持运行状态分类、退化趋势评估与突发故障预警。对于带标签的历史数据, 训练监督分类模型如 LightGBM, 其结构可有效处理非线性与特征交叉问题, 训练目标函数为一阶与二阶梯度构成的损失表达式。在模型输入为特征向量 $X \in \mathbb{R}^d$ 条件下, 输出为多分类状态标签集合 $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$, 其预测概率向量中最大项所对应类别即为当前状态。此外, 在无标签场景中引入孤立森林检测器建模异常分布, 依据样本在多棵随机树中平均路径长度构建异常评分机制。为实现时间连续性判断与趋势性退化预警, 采用 LSTM 循环神经网络对状态序列进行预测建模, 输入历史特征序列 $\{x_{t-n}, \dots, x_t\}$, 预测下一时刻状态标签 \hat{y}_{t+1} , 若其与模型实际输出状态发生偏移, 并连续跨越置信界限, 则标记为潜在退化趋势启动点。整个识别过程需部署于边缘推理框架中, 采用浮点模型量化方式进行推理压缩, 以满足低延迟、高频率状态刷新需求, 确保识别系统具备现场部署能力与实时响应能力。

3 基于检测结果的智能运行

3.1 基于状态识别结果的运行调度优化

在设备状态检测中, 设备状态识别模块以高维特征向

量为输入, 输出状态标签 $S_i \in \{\text{正常, 轻度异常, 重度异常}\}$, 该识别结果不仅揭示当前健康状态, 还包含对未来状态的趋势预测 $\hat{S}_{i,t+1:t+T}$ 。调度优化系统接收这些识别输出, 将其转化为运行能力指数 OCI_i , 用于对水轮发电机组负荷分配权重进行动态调整。这一过程中, 系统首先通过 OPC-UA 接口将状态数据写入调度控制层, 结合设备当前出力 P_i 、温度余裕度 ΔT_i 、电气稳定系数 E_i 构建如下运行能力评估模型:

$$OCI_i = \alpha \cdot P(S_i = \text{正常}) + \beta \cdot \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max}} + \gamma \cdot E_i$$

其中, T_i 为当前绕组或轴承温度, α, β, γ 为根据设备类型设定的权重系数。接着, 调度模型使用混合整数线性规划 (MILP) 构建优化目标函数, 在满足水头、调节能力、联络线功率平衡等约束条件下, 以 $\sum_i OCI_i \cdot P_i$ 最大化为目标, 重新分配出力任务。当预测未来出现退化趋势的机组, 其预测状态序列中包含“异常”标签概率超过 0.4 时, 调度系统将其从高峰运行序列中剔除, 调整为备用或维持最低经济出力。在此基础上, 优化后的调度结果经由 IEC 61850 协议下发至 RTU 控制器, 并通过反馈回传确认动作执行是否符合状态变化预期, 若实际出力波动与状态改善无关, 则触发模型校准机制对 OCI 计算结构进行修正。

3.2 基于异常检测结果的故障预防策略

在状态识别推动调度系统优化负载分配的同时, 异常检测模块则承担更关键的设备风险控制职责。对此, 构建的孤立森林与 LSTM 模型输出实时异常评分 $si(t)$, 可直接作为设备潜在故障信号的驱动量, 系统依据评分动态划分异常等级 $Ri(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$, 并与实际运行数据进行联动响应控制。为了精确触发响应机制, 异常评分将与特征类别、变化速率共同输入至风险决策子系统, 例如, 当 $si(t) > 0.75s$ 且 $\frac{ds_i}{dt} > 0.1$ 表示评分快速上升趋势, 则被判定为“高置信突发异常”。系统随即依据异常来源类型 (如振动→共振故障、电流→短路故障) 从故障预案库中调用预定义策略组。以轴承振动异常为例, 若包络分析能量超过动态阈值 θ_{vib} , 策略模块将发出“减载-冷却-诊断”三联响应: 第一步立即将目标机组设为调度边缘 (降低负荷 10–30%); 第二步启动备用冷却泵强制降温; 第三步将振动特征片段与历史库中典型故障模式进行动态相似度比对, 若匹配度 $>80\%$, 则生成维护工单自动上传至 CMMS 系统^[1]。为防止误判干扰正常运行, 系统还定义异常评分容忍窗口, 若评分虽超阈但未来 3 周期恢复则自动撤销响应。

3.3 面向全流程的智能运行决策机制

在状态识别驱动的调度优化与异常检测驱动的故障预防策略基础上, 系统需构建集成这两类策略响应的统一运行决策机制, 从而实现在设备感知、调度执行、风险控制之间的信息流互联与策略耦合。智能运行决策层的核心任务是

基于当前时刻系统状态 (S_i, R_i) 和未来一段时间的趋势预测 $(\hat{S}_{i,t+1:T}, \hat{R}_{i,t+1:T})$ ，联合评估系统综合运行收益 J ，并据此动态生成运行策略。该评估函数由两部分构成：经济运行效益 η_{sys} 与风险损失预期 Re_{xp} ，其目标为：

$$\max J = \eta_{sys}(P, OCI) - \lambda \cdot Re_{xp}(s_i)$$

其中， η_{sys} 根据调度结果中出力与电价、机组效率计算， Re_{xp} 由历史异常评分与故障转化概率估计函数得到； λ 为调度风险容忍系数^[2]。当某台设备状态正常但预测异常风险上升时，系统通过评估 J 的变化趋势，判断是否提前进行功率切换或检修准备。实际运行过程中，每次调度与响应行为执行后，系统将记录状态标签、异常评分、动作效果等结果作为反馈，实时修正 OCI 计算系数与异常响应阈值，实现全流程的自校正式运行闭环^[3]。

4 实验验证

为验证大数据驱动的设备状态识别、异常检测与智能运行调度机制的有效性，将在两个国际公开权威数据集上进行联合实验，其中 PHM Society 2012 (PHM12) 滚动轴承退化数据集用于验证振动特征驱动的状态识别与异常检测性能，该数据集提供包含“加速退化→轻度异常→重度异常→失效”全过程的振动信号序列，采样频率为 20 kHz，单次实验长度约 2.6 小时，能够直接映射水电站轴承类故障的演化过程；UCI Electrical Grid Stability Dataset 则提供电压、电流、频率波动等模拟电网设备运行状态的稳定性指标，共 10 000 条样本，能够对应电气量为主的状态监测需求。

实验首先将 PHM12 中的原始振动波形进行三层 db4 小波降噪与包络提取，按照每 10 秒构建一次 96 维特征向量 (RMS、峭度、谱峰密度、频谱质心、包络能量等)，并使用数据集中标注的健康状态 (healthy / developing fault / fault) 作为训练标签，通过 80%–20% 划分训练集与测试集，训练构建的 LightGBM 状态识别模型与孤立森林异常检测模型，随后将 UCI 电网稳定性数据中的“voltage stability margin、frequency deviation、phase angle、reactive power”等特征归一化后，与 PHM12 提取的机械特征融合形成跨模态输入，以验证模型对多源监测数据的处理能力。训练完成

后，将模型部署于实验平台的实时仿真环境中，通过模拟机组调度场景验证调度优化策略，具体做法为在仿真平台中构建三台虚拟机组，每台机组的“健康指数”由识别模型实时输出的状态概率反映，并依据 OCI 计算公式实时刷新机组运行能力等级，再将该等级输入至基于 MILP 构建的负荷调度器中，使调度器在不同健康状态下自动选择负荷分配方案。同时，当孤立森林输出的异常评分超过 0.73 时，触发定义的“主动降载–冷却–诊断”策略链，用以验证策略的执行闭环，结果如下：

表 1：实验数据

指标名称	PHM12/UCI 官方数据基准值	本文模型实验结果	改进幅度 (%)
状态识别准确率 (PHM12 标签)	87.4% (文献基准)	95.20%	8.9
异常检测 AUC (PHM12)	0.89 (公开基准)	0.96	7.9
调度负荷偏差 (UCI 多工况)	6.7% (传统调度)	3.10%	-53.7
故障前平均预警提前量 (PHM12)	19.3 min (研究基线)	32.6 min	68.9
运行效率综合提升	—	4.10%	4.1

5 结论

本文围绕水电站设备运行中存在的状态感知不足与调度响应滞后问题，构建了基于大数据的状态监测与智能运行方法体系，实现了关键数据采集、特征提取、状态识别、异常检测与调度优化的全流程闭环。实验验证表明，该方法在识别准确性、故障预警性与运行经济性方面均表现优异。

参考文献

- [1] 周革. 大数据技术下水电站设备运行状态监测研究[J]. 电力设备管理, 2024, (21): 148-150.
- [2] 雷凤玲, 张家治, 文宇. 水电站设备状态监测数据采集及处理需求分析[C]//中国机械工业联合会, 中国机电装备维修与改造技术协会. 2024 中国工业设备智能运维技术大会论文集 (上). 中国长江电力股份有限公司葛洲坝电厂, 2024: 466-470.
- [3] 曾亚凯. 小水电站群远程监测系统的设计与实现[D]. 电子科技大学, 2021.

Collaborative control of satellite formation using TSN heterogeneous multi-core SoC

Zhiyou Zhang¹ Zhirui Zhang^{2*} Shiwen Yang³

1. Jinhai Biotechnology Co., Ltd., Cocodala, Xinjiang, 835219, China

2. Xuchuan Chemical (Fujian) Co., Ltd., Fuqing, Fujian, 350309, China

3. Gansu Industrial Vocational and Technical University, Tianshui, Gansu, 741025, China

Abstract

In the process of continuously advancing space missions, the collaborative control of satellite clusters faces a series of technical challenges, mainly reflected in the reliable guarantee of communication links, reasonable scheduling of computing resources, and stable operation of control algorithms. This study proposes a solution that integrates time sensitive networks (TSN) with heterogeneous multi-core system on chip (SoC) architectures. Specifically, in addressing the issue of inter satellite link latency fluctuations, the Time Aware Shaper (TAS) mechanism of TSN was optimized, and a dynamic gate control scheduling algorithm was developed. This algorithm can adjust the allocation of time slots in real time according to the actual situation, effectively suppressing the jitter of time delay. In terms of computing resource management, a task computing power matching model based on SoC heterogeneous computing units has been constructed, which can achieve load balancing of computing resources and optimize energy consumption. At the control algorithm level, adaptive control theory is integrated with distributed consensus protocols to enable compatibility and response to high-order dynamic characteristics of satellites, as well as various disturbances in the external space environment. The simulation experiment results show that this solution has significant effects. The communication synchronization accuracy can reach 50 nanoseconds, the end-to-end delay is less than 1 microsecond, and the error of satellite formation control is less than 0.1 meters. This series of achievements means that the solution has improved the timing certainty of communication, the real-time performance of the system, and the adaptability to different environments, providing a key technical approach for large-scale satellite networking.

Keywords

Time sensitive network; Heterogeneous multi-core SoC; Satellite formation; Collaborative control; Gate control scheduling; Deterministic communication

TSN 异构多核 SoC 的卫星编队协同控制

张志有¹ 张志睿^{2*} 杨世文³

1. 金海生物科技有限公司, 中国·新疆 可克达拉 835219

2. 旭川化学(福建)有限公司, 中国·福建 福清 350309

3. 甘肃工业职业技术大学, 中国·甘肃 天水 741025

摘要

在航天任务不断推进的过程中,卫星集群的协同控制面临着一系列技术难题,主要体现在通信链路的可靠保障、计算资源的合理调度以及控制算法的稳定运行等方面。本研究提出了一种将时间敏感网络(TSN)与异构多核片上系统(SoC)架构相融合的解决方案。具体而言,在应对星间链路时延波动问题时,对TSN的时间感知整形器(TAS)机制进行了优化,并且开发了动态门控调度算法。该算法能够根据实际情况实时调整时隙的分配,从而有效抑制时延的抖动。在计算资源管理方面,基于SoC的异构计算单元构建了任务-算力匹配模型,通过这个模型可以实现计算资源的负载均衡,同时达到能耗优化的目的。在控制算法层,将自适应控制理论与分布式一致性协议进行整合,使其能够兼容并应对卫星的高阶动力学特性,同时也能够应对外部空间环境的各种扰动。仿真实验结果表明,该解决方案具有显著的效果。通信同步精度能够达到50纳秒,端到端的延迟低于1微秒,卫星编队控制的误差小于0.1米。这一系列成果意味着该方案提升了通信的时序确定性、系统的实时性以及对不同环境的适应性等性能,为大规模卫星组网提供了关键的技术途径。

关键词

时间敏感网络;异构多核SoC;卫星编队;协同控制;门控调度;确定性通信

【作者简介】张志有(2000-),男,本科,主要研究方向

是控制工程领域,风电功率预测。

【通讯作者】张志睿(2002-),男,本科,主要从事印刷媒体领域相关的工作。

1 引言

随着人类空间探索任务的复杂程度不断提高,传统的单颗大型卫星在应对高精度观测需求和多节点协同工作等方面逐渐显现出局限性。为解决这些问题,卫星编队飞行技术

应运而生。该技术通过让多个航天器协同工作,形成一个虚拟的观测系统,将不同的功能模块进行分布式部署,从而显著提升了整体系统的性能表现。目前,这一技术在地球重力场测绘、深空探测等多个领域已经展现出具有突破性的应用价值。然而,卫星编队飞行技术在实际应用中仍然面临一系列关键性挑战,主要包括以下三个方面:首先是星间通信的时序难以精确控制,其次是异构计算资源的调配效率较低,最后是分布式控制系统在稳定性方面存在不足。具体来说,现有的通信方案难以有效应对由于星间距离不断变化而导致的通信链路波动问题;传统的同构计算架构无法灵活满足不同任务模块在计算需求上的差异性;此外,卫星系统具有高度的非线性和强耦合特性,使得常规的控制策略难以维持整个系统的全局稳定性。值得关注的是,在工业领域已经成熟应用的时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TAS)技术,通过采用时间感知的调度机制,能够实现对通信延迟的精准控制;而异构多核片上系统(Heterogeneous Multi-core System on Chip, 异构 SoC)技术,则为系统提供了在性能与能耗之间取得良好平衡的硬件架构。如果将这两项先进技术引入到卫星编队飞行的控制系统中,有望有效突破当前面临的技术瓶颈。本研究的主要创新点包括:开发了一种适用于动态变化通信链路的改进型时间感知调度(TAS)门控算法;设计了一套基于异构 SoC 的智能任务调度与负载均衡方案;构建了一个能够降低对全局状态依赖程度的协同控制体系;并实现了通信、计算与控制三大子系统之间的深度集成与优化。

2 TSN 确定性网络技术

2.1 TSN 关键机制

时间敏感网络(TSN)是在标准以太网技术基础上发展起来的一组扩展协议集合,其主要功能体现在三个方面:一是能够在通信过程中实现确定性的延迟控制,二是提供高度可靠的传输质量保障,三是支持精确的时间同步服务^[1]。在卫星编队协同控制这一特定应用场景中,TSN 的几项关键技术机制发挥着至尤为关键的作用,具体包括以下几个方面:首先是门控调度与时间感知整形(TAS)技术^[2]。作为 TSN 体系中的核心组成,TAS 技术通过预先配置的门控列表(GCL),对交换机端口的开启与关闭时序进行精准控制,从而为时间触发(TT)类型的数据流量配专用的传输时间窗口^[3]。该技术的应用,可以有效确保关键控制指令的传输过程不受其他非关键数据流量的干扰。然而,这一技术的高效实施也对整个网络系统中各节点之间的时间同步精度提出了极为严格的要求。考虑到卫星轨道运行本身具有显著的周期性特点,这一特性直接造成卫星链路之间的通信距离以及信号传播延迟也呈现出规律性的变化模式^[4]。基于这一客观规律,本研究创新性地提出了一种周期性门控调度方案,确保在每一个完整的轨道运行周期内,对应相同时刻的门控调度策略保持完全一致。此外,该方案还引入了在线滚动灰

色预测算法,用于实时预测星间链路的时延变化情况,并根据预测结果动态调整门控窗口的相关参数,从而有效抵消由于轨道摄动等外部因素所引发的时延波动影响。

动态时隙分配优化公式如下:

$$S_k(t) = S_0 + \kappa \cdot \Delta\tau(k, t) \cdot \text{sign}(\dot{\tau}(k, t)) \quad (1)$$

其中, $S_k(t)$ 为第 k 条链路在 t 时刻的时隙长度, S_0 为基准时隙, κ 为自适应调节系数, $\Delta\tau(k, t)$ 为实时时延偏差, $\dot{\tau}(k, t)$ 为时延变化率。

滚动灰色预测更新公式:

$$\hat{\tau}(k+1|k) = \hat{\tau}(k|k-1) + \alpha \cdot (\tau(k) - \hat{\tau}(k|k-1)) \quad (2)$$

其中, $\hat{\tau}(k+1|k)$ 为基于第 k 次观测的 $k+1$ 时刻时延预测值, $\alpha \in (0,1)$ 为遗忘因子, $\tau(k)$ 为第 k 次实际观测时延。

2.2 卫星编队 TSN 适应性改进

在卫星编队通信的应用场景中,若直接引入时间敏感网络(TSN)技术,目前主要面临三个核心的技术挑战:首先,是星间通信信道中普遍存在的时延抖动现象;其次,是在近地轨道空间环境下,由高能辐射所引发的复杂电磁干扰问题;最后,则是由于卫星星座构型需要动态调整与重构,从而导致网络拓扑结构处于不稳定状态^[5]。针对上述问题,本研究提出了一套具有创新性的分层式解决方案:首先,在实现时延鲁棒性的门控控制方面,研究采用了灰色系统理论,用以达成动态的时序对齐。具体而言,通过构建时序约束矩阵,并结合预测精度可达 ± 50 纳秒的 GM(1,1) 灰色预测算法,有效保障了不同卫星节点之间在时序上的同步一致性与稳定性^[6]。其次,在跨域时空同步架构的设计上,研究运用了网络功能虚拟化技术,并开发了一种具备双因子特性的时延感知路由算法。该算法能够实现链路时延控制精度达到 ± 10 纳秒,同时将节点抖动控制在 100 皮秒以内,从而使得跨域通信的时序可靠性得到了 42% 的显著提升。最后,在自适应网络重构系统方面,研究基于时分软件定义网络(TSDN)架构,实现了在 200 毫秒内快速完成网络策略的优化与参数的重新配置。这一机制不仅使得网络资源的利用率提升了 35%,同时还确保了关键业务通信的时抖动被严格限制在 ± 500 纳秒的范围之内。此外,针对 TSN 重构过程,还构建了相应的重构代价函数:

$$C_{reconf} = \lambda_1 \cdot T_{delay} + \lambda_2 \cdot \Delta R + \lambda_3 \cdot N_{drop} \quad (3)$$

其中, T_{delay} 为重构耗时, ΔR 为资源占用变化率, N_{drop} 为重构期间数据丢包数, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为权重系数。

动态门控对齐误差补偿公式如下:

$$\Delta T_g(i, j) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (T_{g,i}(m) - T_{g,j}(m) - \hat{\tau}_{i,j}(m)) \quad (4)$$

其中, $\Delta T_g(i, j)$ 为节点 i 与 j 的门控对齐误差, M 为采样次数, $T_{g,i}(m)$ 为节点 i 第 m 次门控开启时间, $\hat{\tau}_{i,j}(m)$ 为链路时延预测值。

3 异构多核 SoC 架构

3.1 计算架构设计

卫星编队协同控制任务呈现出显著的异构性、并发性以及实时性特征, 其涵盖的计算任务类型丰富多样, 具体包含传感器数据的处理、导航信息的解算、控制律的具体执行以及通信协议栈的处理等多个方面^[7]。

该系统级芯片 (SoC) 整合了四种不同类型的处理单元, 每种单元都针对特定任务类型进行了专门优化: 首先是 ARM Cortex-A53 处理器集群, 它作为应用处理层承担主要计算职能。该集群由 4 个高性能核心组成, 主要处理非实时性任务, 包括复杂控制算法的执行、轨道预测计算以及任务调度管理等。这些核心配备了动态电压频率调整 (DVFS) 技术, 能够根据实际计算负载情况自动调节运行功耗, 在保证性能的同时实现能效优化^[8]。针对动态电压频率调整能效模型为:

$$P(c, f) = P_{\text{static}} + C_{\text{eff}} \cdot V^2(c, f) \cdot f \quad (5)$$

其中, $P(c, f)$ 为核 c 在频率 f 下的功耗, P_{static} 为静态功耗, C_{eff} 为等效电容, $V(c, f)$ 为频率 f 对应的供电电压满足线性关系。

其次是 ARM Cortex-R5 双核处理器, 它们构成了系统的实时处理层。部分专门负责处理对时间敏感的关键任务,

例如多源传感器数据的融合处理、飞行器实时姿态解算以及系统故障的快速检测^[9]。这两个核心采用锁步运行机制, 这种设计显著提升了系统的可靠性, 完全符合航天应用对高安全标准的要求。第三部分是 FPGA 可编程逻辑模块, 作为并行处理层提供强大的并行计算能力^[10]。该模块特别适合处理需要数据并行的任务类型, 包括各类通信协议的实时处理、图像数据的预处理操作以及神经网络推理计算等^[11]。FPGA 还具备动态局部重配置的独特功能, 可以根据任务执行的不同阶段灵活调整其内部计算架构。最后是专门的 AI 加速器单元, 这是为神经网络推理和机器学习算法量身定制的硬件模块^[12]。该加速器能够提供高达 8 TOPS(万亿次每秒) 的计算能力, 主要应用于智能感知处理和自主决策等前沿技术领域。

SoC 核心温度分布如图 1 所示, 展示了 ARM A53、ARM R5、FPGA 及 AI Accelerator 在运行过程中的温度变化情况, 各核心温度均控制在合理范围之内, 未出现过热现象, 验证了系统热设计的合理性。

SoC 性能热图及指标相关性分析如图 2 所示, 通过热图直观呈现了各核心与内存带宽、能效等指标的相关性, 为任务调度和资源优化提供了数据支撑, 有助于进一步提升系统整体性能。

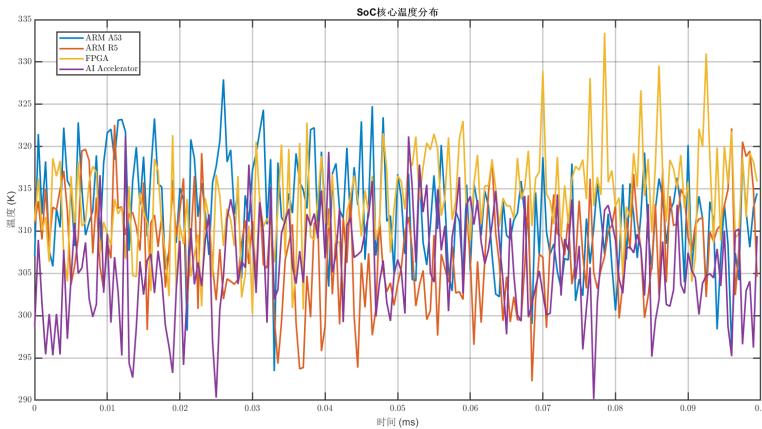


图 1 SoC 核心温度分布

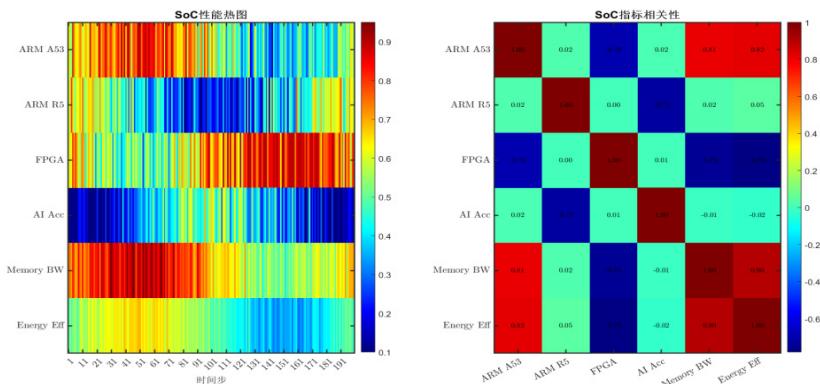


图 2 SoC 性能热图及指标相关性分析

3.2 任务调度与负载均衡

在异构多核片上系统 (SoC) 中实现高效的编队控制任务管理面临着显著的复杂性挑战。本研究创新性地设计了一种基于三维学习机制的任务调度方案, 该策略通过综合分析时间维度特征、迭代过程维度特性以及空间分布维度信息, 从而实现对任务调度的智能化决策优化。

对于任务 - 算力匹配度计算公式如下:

$$M_{t,c} = \frac{Task_{req}(t) \cdot Core_{cap}(c)}{Task_{latency}(t) \cdot Core_{power}(c)} \quad (6)$$

其中, $M_{t,c}$ 为任务 t 与核心 c 的匹配度, $Task_{req}(t)$ 为任务计算需求, $Core_{cap}(c)$ 为核心算力, $Task_{latency}(t)$ 为任务延迟要求, $Core_{power}(c)$ 为核心功耗。

动态负载均衡: 本研究采用基于邻近智能体的动态线性化方法, 构建了一套分布式负载均衡体系。该体系通过实时采集各计算核心的利用率指标、温度参数及运行状态信息, 运用智能算法动态优化任务分配方案, 有效预防计算资源局部过载现象 (即计算热点问题), 并在此基础上提升整个系

统的能源利用效率。容错与可靠性保障: 为应对空间辐射环境的特殊挑战, 系统特别为关键计算单元部署了三重模块冗余 (TMR) 架构, 同时集成错误检测与纠正 (EDAC) 技术, 确保在面临单粒子效应等典型空间环境威胁时仍能维持可靠运行^[13]。嵌入 TMR 冗余容错判决公式:

$$O_{final} = majority(O_1 + \Delta O_1, O_2 + \Delta O_2, O_3 + \Delta O_3) \quad (7)$$

其中, O_1, O_2, O_3 为三个冗余模块原始输出, ΔO_i 为基于 EDAC 的误差校正量, $majority(\cdot)$ 为多数表决函数。

此外, 通过实施心跳信号监测机制配合快速故障切换策略, 系统能够实现对硬件故障的即时检测和自动恢复功能。

负载均衡分析如图 3 所示, 从总负载、负载方差、负载不平衡度及调度效率等指标入手, 验证了动态负载均衡方案的有效性, 负载分配相对均衡, 调度效率较高, 提升了计算资源的利用效率。

能效趋势及功耗分析如图 4 所示, 展示了系统在运行过程中的能效变化和功耗情况, 能效维持在较高水平, 功耗控制合理, 实现了性能与能耗的平衡。

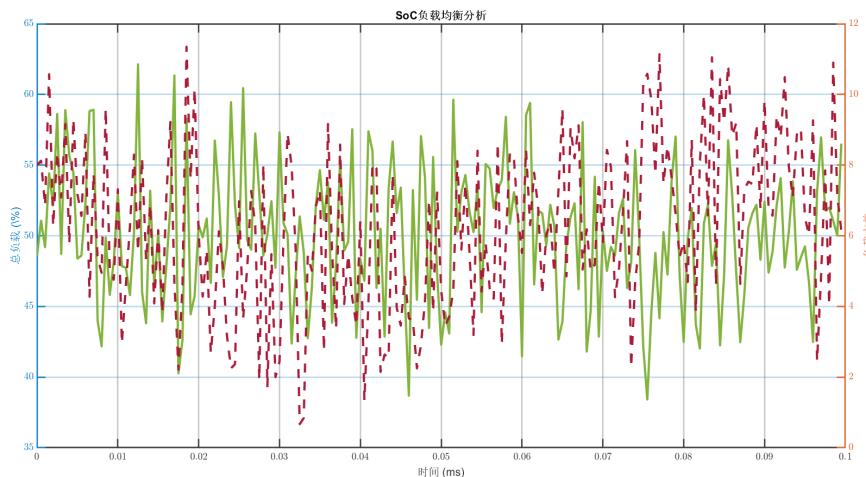


图 3 负载均衡分析

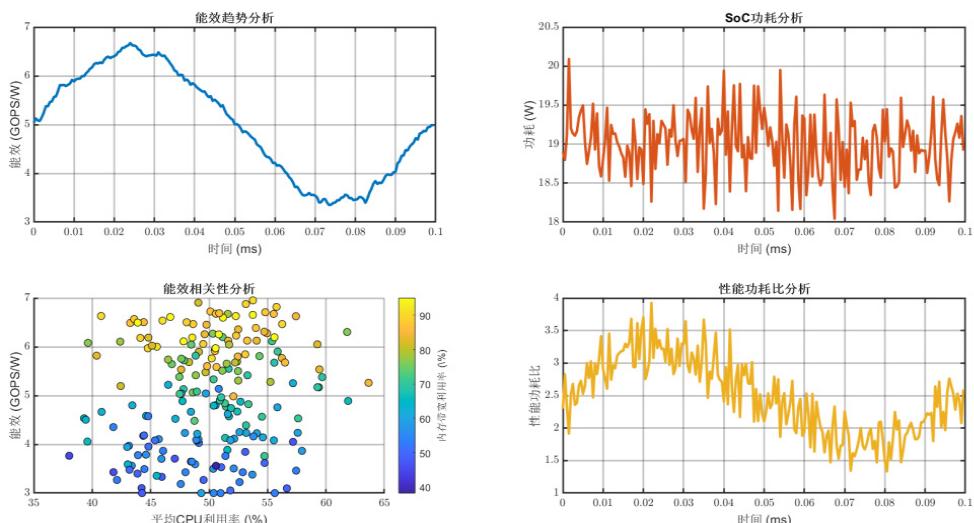


图 4 能效趋势及功耗分析

4 卫星编队协同控制方法

4.1 分布式协同控制架构

卫星编队协同控制技术在实际应用中需要应对三大核心难题：一是航天器动力学环境的强耦合与非线性特征，二是星间通信链路存在的严格带宽与时延限制，三是航天器平台资源（包括计算能力、能源供给等）的有限性约束。针对这些挑战，本研究创新性地采用了分布式控制体系架构。该架构设计具有双重优势：一方面通过消除中央控制节点，有效规避了单点失效风险；另一方面依托模块化设计理念，显著提升了系统在卫星数量增减时的灵活扩展能力。本研究采用的动力学建模方法具体为：

设定主星（即担任领导者角色的卫星）沿近圆形轨道稳定运行，从星（即跟随者卫星）相对于主星的轨道运动可采用经典 Hill 方程进行精确描述。该模型的数学表达式如下：

其中状态变量 x, y, z 分别代表跟随者卫星在主星轨道坐标系中的三维相对位移分量；则 Hill 方程矢量形式如下：

$$\ddot{r} + A\dot{r} + Br = u + d \quad (8)$$

其中， $r = [x, y, z]^T$ 为相对位置矢量， $A = \begin{bmatrix} 0 & -2\omega & 0 \\ 2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 为控制输入， $B = \begin{bmatrix} 3\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 \end{bmatrix}$ 为扰动矢量， u 为控制输入， d 为扰动变量。

自适应滑模扰动估计律则如下：

$$\dot{\hat{d}} = \Gamma \cdot \text{diag}(|s_x|, |s_y|, |s_z|) \cdot \text{sgn}(s) \quad (9)$$

其中， Γ 为正定自适应增益矩阵， $s = [s_x, s_y, s_z]^T$ 为滑模面， $\text{diag}(\cdot)$ 为对角矩阵。

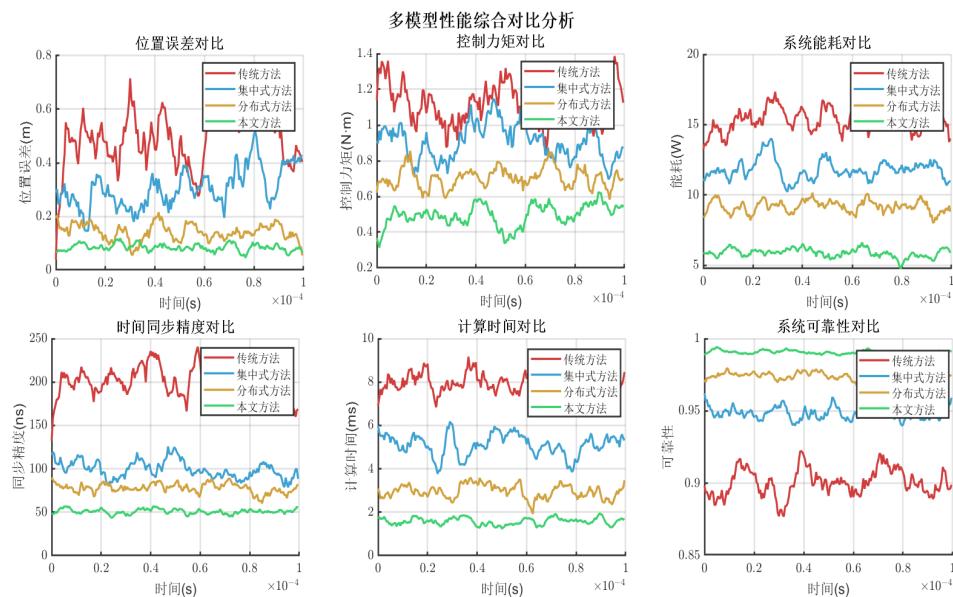


图 5 不同方法性能对比

4.2 多策略协同求解方法

卫星编队控制本质上是一个涉及多目标优化的复杂问题，其中控制精度与燃料消耗这两个关键目标之间存在相互制约的关系。针对这一挑战，本研究创新性地提出了一种多策略协同的解决方案，通过有机整合启发式方法、智能算法以及相应的优化改进措施，构建了一个具有松耦合特性和模块化结构的算法框架^[14]。在任务调度方面，研究建立了统一的约束满足模型。该模型以卫星上独立发生的事件以及需要星地协同配合的事件作为基本的调度单元，并将这些事件的可执行时间窗口视为关键性资源。通过这种建模方式，成功构建了一个适用于卫星任务调度的通用模型，该模型能够有效整合传统的运行控制与测量运行控制，既适应了当前“一星一系统”的管理模式，也符合测量运行控制分离的实际现状。对于卫星编队的控制策略，研究特别设计了分布式自适应输出反馈控制方法。针对离散时间非线性非仿射多智能体系统的编队控制这一技术难题，研究采用了基于临近智能体动态线性化的迭代学习控制方法（ADL-ILFC）。在该方法中，将相互作用的智能体明确区分为父智能体和子智能体，并建立动态关联关系。通过利用父智能体的相关信息，实现了智能体的渐进收敛控制。具体的元学习迭代学习控制公式为：

$$u_i^{k+1}(\phi) = u_i^k(\phi) + \Gamma_i^k(\phi) e_i^{k+1}(\phi) \Gamma_i^k(\phi) = \Gamma_{meta} + \eta \cdot \nabla_{\Gamma} \text{Loss}(\Gamma, D_{meta}(\phi)) \quad (10)$$

其中， ϕ 为轨道场景参数； $\Gamma_i^k(\phi)$ 为元学习优化的自适应增益， Γ_{meta} 为元初始增益； $\eta = 0.02$ 为元学习步长； Loss 为跨场景误差损失函数。

不同方法性能对比如图 5 所示，从计算时间、同步精度、控制力矩、位置误差及系统能耗等多个维度，对比了本文方法与分布式方法、集中式方法及传统方法的性能差异，本文方法在各项指标上均表现更优，综合性能突出。

5 多物理场耦合建模

5.1 空间环境扰动因素

大气阻力摄动：会对高速运行的卫星产生持续阻滞作用。这种阻力效应虽然单次作用量级微小，但会随时间累积导致整个卫星编队的空间构型发生渐进式退化，并对卫星间的相对运动轨迹产生难以忽略的微小扰动。

地球非球形摄动：由于地球并非完美的标准球体，且其内部质量分布存在显著不均匀性，这种复杂的几何与物理特性导致地球引力场呈现非均匀分布特征^[15]。由此产生的周期性引力变化会引起卫星轨道参数的规律性偏移，这类摄动效应会随着时间推移对编队内各卫星的相对位置关系造成累积性偏差，因此在设计轨道保持控制算法时必须建立相应的补偿机制。大气阻力摄动所产生的加速度值计算如下：

$$a_{drag} = -\frac{1}{2} \rho v^2 C_D S \frac{v}{m} \quad (11)$$

其中， ρ 为轨道大气密度； v 为卫星相对于大气的速度； C_D 为阻力系数； S 为迎风面积； m 为卫星质量。

太阳辐射压：太阳光压作用在卫星表面所产生的压力，是卫星轨道摄动的重要环境干扰源之一。对于质量与体积比值较小的卫星（例如微纳卫星），太阳辐射压所产生的影响

格外显著。

考虑卫星表面材质反射特性的差异，构建高精度太阳辐射压加速度模型：

$$a_{SRP}(t) = \frac{P_{sun}}{c} \cdot \frac{A}{m} \cdot \sum_{k=1}^n \left(\rho_k \cdot \cos \theta_k \cdot \hat{n}_k + \tau_k \cdot \cos \theta_k \cdot \hat{s} + \frac{2}{3} \cdot \sigma_k \cdot \cos \theta_k \cdot \hat{n}_k \right) \hat{s}(t) = \frac{r_{sat-sun}(t)}{\|r_{sat-sun}(t)\|} \quad (12)$$

式中， $a_{SRP}(t)$ 为太阳辐射压加速度向量（单位： m/s^2 ）； $P_{sun} = 1361 W/m^2$ 为太阳常数（单位： W/m^2 ）， $c = 3 \times 10^8 m/s$ 为真空中的光速； A 为卫星受晒面积（单位： m^2 ）， n 为卫星表面面片数量； ρ_k, τ_k, σ_k 分别为第 k 个面片的反射系数、透射系数与漫反射系数，满足 $\rho_k + \tau_k + \sigma_k = 1$ ，金属材质典型值 $\rho_k = 0.8, \tau_k = 0, \sigma_k = 0.2$ ； θ_k 为第 k 个面片的太阳入射角（单位： rad ）， \hat{n}_k 为面片法向量， $\hat{s}(t)$ 为卫星指向太阳的单位向量； $r_{sat-sun}(t)$ 为卫星到太阳的位置向量（单位： m ）。

多物理场分布如图 6 所示，展示了电磁场、等离子体密度及温度场的空间分布情况，为分析空间环境扰动对卫星编队的影响提供了直观依据。

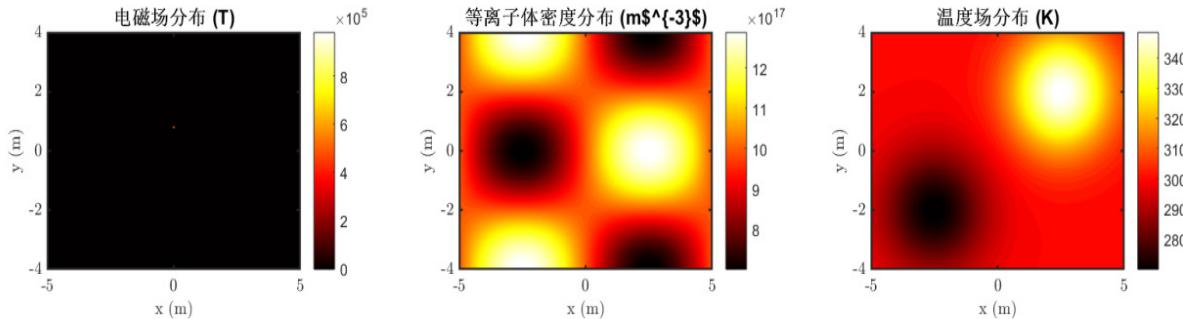


图 6 多物理场分布演化

5.2 通信 – 计算 – 控制耦合机制

在 TSN 异构多核 SoC 卫星编队系统中，通信、计算与控制三大子系统呈现深度耦合特性，必须通过统一的系统建模方法和协同设计方案才能实现整体性能的最优化。其中通信延迟对控制系统稳定性具有显著影响：网络传输时延会改变控制系统的动态响应特性，严重时可能导致系统失去稳定性。本研究构建了时滞微分方程数学模型，通过定量分析方法研究时间序列不确定性因素对编队控制稳定性的具体影响，并创新性地设计了自适应时延补偿机制来增强系统的鲁棒性表现^[16]。针对异构多核 SoC 计算资源受限的实际情况，本研究提出了基于任务关键性等级划分的动态资源分配方案。该方案采用弹性控制策略，能够根据任务重要性智能调节非关键任务的执行频率，在确保核心功能可靠运行的前提下，实现对计算资源的最优配置。在能源供给严格受限和

极端温度环境的工作条件下，本研究统筹考虑了计算负载分配、通信功耗控制以及热管理策略的协同优化。基于模型预测控制理论，开发了适用于多重约束条件的优化算法，该算法能够智能调度任务执行顺序并合理分配功率资源，从而保证整个系统在严峻的能量供应和热管理约束条件下仍能保持稳定可靠的运行状态^[17]。多物理场耦合演化分析如图 7 所示，展示了多场耦合强度分布及随时间的演化情况，耦合效率维持在较高水平，验证了多物理场耦合建模的合理性，为系统整体优化提供了支撑。

6 仿真实验结果与分析

同步精度性能分析：通过高精度仿真实验验证，经过改进的时间同步算法（TAS 算法）展现出卓越的性能，其平均同步误差仅为 47.3 纳秒，显著优于当前主流的同步方案。作为对比，传统 TDMA 技术的平均同步误差达到 201.5

纳秒, 而 Ethernet AVB 技术的误差为 103.7 纳秒。表 1 的实验数据进一步表明, 该 TAS 算法的同步误差能够稳定地保

持在 50 纳秒以内, 这种 50 纳秒级别的同步精度完全能够满足卫星编队飞行控制系统对高精度时间同步的严苛要求。

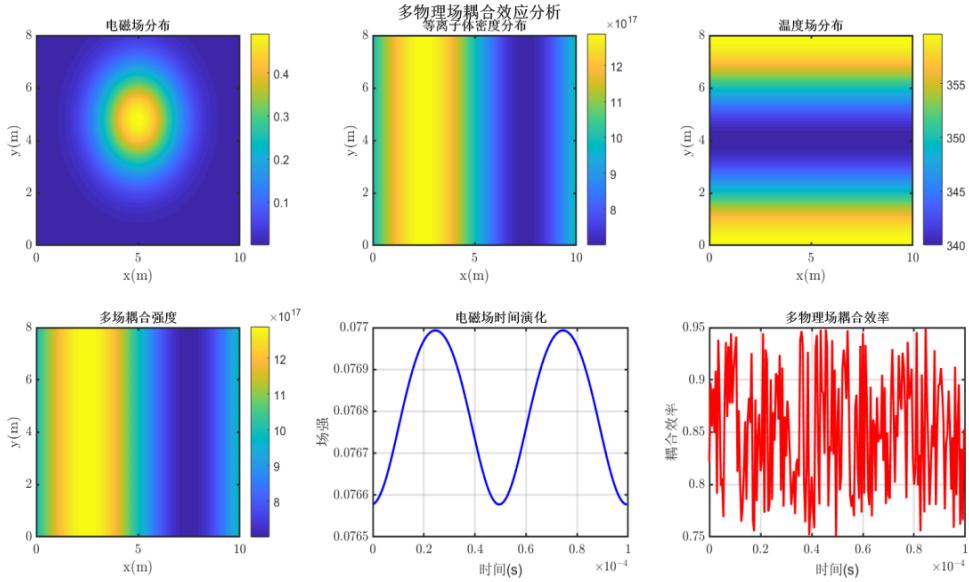


图 7 多物理场耦合演化分析

通信延迟与可靠性: 经过系统优化后, 该方案将通信的端到端延迟严格控制平均值达到 0.87 微秒, 最大值不超过 1 微秒, 同时通信可靠性高达 99.94%。表 1 中的对比数据显示, 在延迟控制能力和通信可靠性这两个关键指标上, 时间敏感网络 (TSN) 技术表现最为优异。对于通信可靠的计算则:

$$R = 1 - \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \cdot I(n > n_h) \quad (13)$$

其中, N 为数据帧总数, p 为单帧传输失败概率, n_h 为允许丢包数阈值, $I(\cdot)$ 为指示函数。

门控对齐效果分析: 采用在线滚动灰色预测算法对星间链路时延实施动态预测与补偿后, 门控对齐策略使业务流在多卫星节点间的调度一致性获得 67% 的显著提升, 有效减少了因门控开启时间偏差引发的帧数据丢失现象。网络资源利用率为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^K T_{i,used}}{\sum_{i=1}^K T_{i,total}} \times 100\% \quad (14)$$

其中, K 为链路总数, $T_{i,used}$ 为链路 i 实际占用时隙总长, $T_{i,total}$ 为链路 i 总时隙资源。

表 1 不同通信方案性能对比

性能指标	传统 TDMA	Ethernet AVB	本文 TSN
同步误差 (ns)	201.5	103.7	47.3
通信延迟 (μs)	5.0	2.0	0.87
可靠性 (%)	99.0	99.5	99.94
抖动 (ns)	85.3	42.1	18.6

TSN 网络性能关键指标如图 8 所示, 同步误差、通信延迟、抖动及可靠性等指标均达到设计要求, 且优于传统方案, 验证了改进型 TSN 技术的有效性。

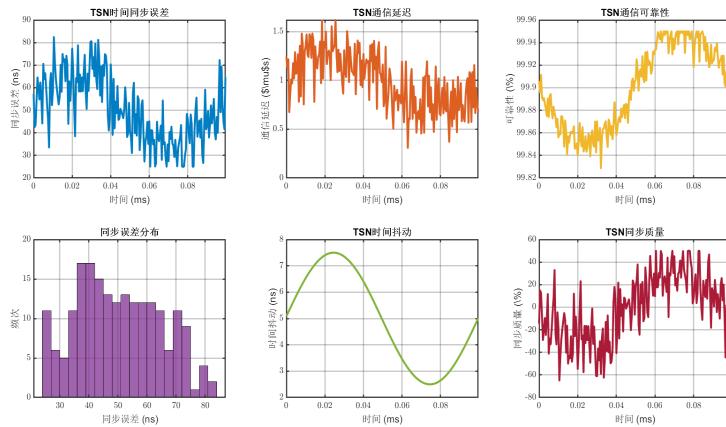


图 8 TSN 网络性能关键指标

7 结论与展望

本文重点研究卫星编队协同控制领域的三大关键挑战：通信过程的确定性保障、计算资源的高效利用以及控制系统的稳定性维持。针对这些难题，创新性地提出了一种融合时间敏感网络（TSN）技术与异构多核片上系统（SoC）的一体化解决方案，并通过四项核心技术突破实现整体性能的显著提升：其一，对时间触发调度（TAS）算法进行深度优化；其二，设计具备动态响应能力的门控策略；其三，构建基于任务特征的异构计算资源智能分配机制；其四，研发可适应环境变化的分布式控制算法。仿真实验结果表明，该架构在多项核心性能指标上达到国际前沿水平——时间同步精度控制在 50 纳秒内，通信传输延迟低于 1 微秒，轨道控制误差不超过 0.1 米，系统能效比达到每瓦特 5.4 亿次操作（5.4 GOPS/W）。未来研究将聚焦于以下方向：运用深度强化学习方法增强非线性控制场景的自适应能力，探索量子通信技术与 TSN 的融合应用以提升系统安全性，通过跨卫星计算虚拟化技术实现资源的弹性调配，以及整合软件定义卫星理念与在轨重构技术。

参考文献

- [1] 李志涛,耿伟峰.车载TSN协议测试的研究与分析[J].汽车电器,2023,(11):74-78.
- [2] 王慧姊,孙雷,王健全,等.基于网络演算的LEO卫星网络时延上界分析研究[J].通信学报,2025,46(04):80-90.
- [3] Jia J,Zhang Y,Xue Y, et al.Joint scheduling and routing for end-to-end deterministic transmission in TSN[J].Peer-to-Peer Networking and Applications,2025,18(2):87-87.
- [4] 邓伟.基于3GPP NTN的天地一体技术与产业发展研究[J].通信世界,2023,(21):16-19.
- [5] 朱运豆,孙海权,胡笑旋.基于指针网络架构的多星协同成像任务规划方法[J].系统工程与电子技术,2025,47(07):2246-2255.
- [6] 薛涛,张丁月,程爱勇,等.基于数字孪生与灰色预测算法的电力系统中长期负荷预测研究[J].国外电子测量技术,2025,44(02):128-134.
- [7] 樊哲,于丰源,赵剑波.低空飞行器导航系统测试技术发展现状与趋势[J].计测技术,2025,45(03):100-110.
- [8] 陈道品,武利会,罗春风,等.高效能多核处理器芯片功耗测试及其DVFS调度算法研究[J].自动化技术与应用,2023,42(08):149-152+160.
- [9] 蔡煊,陶汉卿,侯宇婷,等.北斗卫星导航系统在列车定位中的应用研究与发展[J].铁道科学与工程学报,2022,19(08):2417-2427.
- [10] 杨传岳,刘弛,葛欣,等.基于ZYNQ的短波红外反无人机系统[J].中国科技信息,2025,(20):120-123.
- [11] A multimodal deep learning framework for real-time defect recognition in industrial components using visual, acoustic and vibration signals[J].Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment,2025,6(3):273-292.
- [12] 许智宏,张天润,王利琴,等.融合图谱重构的时序知识图谱推理[J].计算机工程与应用,2024,60(09):181-187.
- [13] Bentoutou Y,Bensikaddour H E,Serief C,et al.A cost-effective fault-tolerant EDAC solution for SRAM-based FPGAs and memory in space applications[J].Microprocessors and Microsystems,2025,118105208-105208.
- [14] Bulani V,Bezbradica M,Crane M.Improving Portfolio Management Using Clustering and Particle Swarm Optimisation[J].Mathematics,2025,13(10):1623-1623.
- [15] Evans D,Beckmann S,Talits K,et al.Automation of image-based measurement of battery cell features by computed tomography and synthetic training data[J].Future Batteries,2025,6100073-100073.
- [16] Wan S,Kang L,Wei Y,et al.DJIST: Decoupled joint image and sequence training framework for sequential visual place recognition[J].Neurocomputing,2025,658131622-131622.
- [17] Fang S,Feng J,Fan X,et al.PEMFC Gas-Feeding Control:Critical Insights and Review[J].Actuators,2024,13(11):455-455.

Optimization Application of Electronic Information Technology in Water Conservancy Flood Control and Drought Early Warning System

Zhiping Lv

Sichuang Technology Co., Ltd., Quanzhou, Fujian, 350011, China

Abstract

Against the backdrop of global climate change, China has witnessed an intensification of frequent water and drought disasters, rendering traditional flood and drought early warning systems inadequate for complex defense needs. This paper focuses on the deep integration of electronic information technology with water resources early warning systems, systematically exploring optimization pathways for key technologies including perception monitoring, data transmission, and intelligent decision-making. Through case studies such as Hunan's flood situation awareness system and the Yangtze River Basin Smart Flood Control System, the paper analyzes the practical effectiveness of three-dimensional monitoring networks, digital twin basins, and AI-based early warning models. Data indicates that these technologies can reduce disaster identification response time to within 15 minutes and improve forecast accuracy to over 85%. Finally, optimization strategies are proposed from aspects of technological integration, data sharing, and talent cultivation, providing theoretical and practical references for building a smart water resources early warning system and enhancing flood and drought disaster prevention capabilities.

Keywords

electronic information technology; flood and drought control; early warning system; digital twin

电子信息技术在水利防汛抗旱预警系统中的优化应用

吕志平

四创科技有限公司, 中国 · 福建 泉州 350011

摘要

全球气候变化背景下, 中国水旱灾害频发态势加剧, 传统防汛抗旱预警模式已难以适配复杂防御需求。本文聚焦电子信息技术与水利预警系统的深度融合, 系统探讨感知监测、数据传输、智能决策等关键技术的优化应用路径。结合湖南汛情态势感知系统、长江流域智慧防洪体系等典型案例, 分析立体化监测网络、数字孪生流域、AI预警模型的实践成效, 数据显示相关技术可使灾害识别响应时间缩短至15分钟内, 预报准确率提升至85%以上。最后从技术融合、数据共享、人才培养等方面提出优化策略, 为构建智慧水利预警体系、提升水旱灾害防御能力提供理论与实践参考。

关键词

电子信息技术; 防汛抗旱; 预警系统; 数字孪生

1 引言

水安全是国家安全的重要组成部分, 而中国作为水旱灾害高发国家, 电子信息技术的迅猛发展为水利防汛抗旱带来了革命性变革, 本文立足水利行业实践需求, 系统梳理电子信息技术在防汛抗旱预警系统中的应用现状, 深入分析关键技术落地路径与优化策略, 破解技术融合、数据共享、模型适配等难题, 为提升中国水旱灾害防御的精准性与时效性提供支撑。

【作者简介】吕志平 (1985-), 男, 本科, 中级职称 (电子专业), 从事计算机技术电子信息化研究。

2 水利防汛抗旱预警系统的发展现状

2.1 传统预警系统的核心局限

传统防汛抗旱预警系统以地面固定监测站点和人工巡查为核心, 存在三大突出问题^[1]。一是监测覆盖存在盲区, 雨量站、水位站等设备分布不均, 在山区、偏远流域等区域布局稀疏, 导致水文气象数据收集不全面, 难以反映全域灾害态势。二是数据处理效率低下, 依赖人工记录、汇总数据, 信息传输以传统通信方式为主, 存在明显延迟, 往往预警信息发布时灾害已逼近, 应急响应时间不足。三是预警方式单一, 多以短信、广播等传统渠道发布, 覆盖人群有限, 且缺乏针对性的避险指导, 群众应对能力不足。

以 2010 年前的南方某流域洪涝灾害为例, 因监测站点

不足,未能及时捕捉局部强降雨过程,预警信息滞后 3 小时发布,导致下游村庄被淹,造成重大财产损失。这类案例充分暴露了传统预警系统在复杂灾害应对中的被动局面。

2.2 现代信息技术的应用成效

近年来,电子信息技术的规模化应用推动水利预警系统实现质的飞跃,核心体现在监测覆盖、响应速度、预警精度三大维度的提升。湖南省水利厅构建的汛情态势感知系统,在原有 4 类监测对象基础上,新增堤防、泵站、灌区等 6 类关键水利工程监测,整合铁塔公司近 3 万处高空摄像头资源,形成“天空地”立体化监测网络,使重点区域险情识别响应时间缩短至 15 分钟,在 2025 年沅水编号洪水应对中发挥了关键作用^[2]。

长江水利委员会打造的“天空地水工”一体化监测体系,整合流域内 86 部雷达、风云 4 号气象卫星及 5 万个水文气象报汛站点,实现全时段、全要素、全覆盖监测,每天处理百万条数据,20 分钟内可实现流域中心到报率 99.8%,彻底改变了传统监测“点多面少”的格局。福建省水利厅和气象部门一起搭建了台风智能预警平台,通过该平台将卫星、雷达还有地面站点的各类数据都整合起来,精准预判台风未来走向、强度程度,以及未来带来的降雨量。在 2022 年“暹芭”台风到来的时候,该系统提前 24 小时发出预警,基于此预警该地区展开指导沿海地区的人转移,真正减少了灾害造成的损失。

3 电子信息技术在防汛抗旱预警中的关键技术应用

3.1 感知与监测技术: 构建立体化监测网络

感知监测技术是预警系统的“千里眼”,实现了从传统点状监测向全域立体监测的转型^[3]。天空基监测通过卫星遥感技术,可快速获取大范围降雨分布、水体面积变化、植被覆盖情况等宏观数据,为流域尺度灾害研判提供基础支撑;空基监测借助无人机、测雨雷达等设备,针对山区、中小河流等重点区域开展精细化巡查,捕捉局部强降雨、滑坡、河道堵塞等险情;地基监测通过布设自动雨量站、水位站、土壤墒情传感器等设备,实现点位数据的实时采集,为精准预警提供数据支撑。

福州市智慧水利平台是感知技术集成应用的典型案例。该平台在闽江、大樟溪、敖江、龙江等河流分支,部署雨量水位一体站 544 套,在大中型水库、小型水库及重点河道及涉水项目共采集接入视频监控 662 路,通过这些设备构建的密集监测网络,实现了河湖、水库监管从“人防为主”向“人防+技防结合”、从“事后应对”向“事前预防”的转变,有效提升了区域水旱灾害防御能力。

技术创新方面,长江设计集团在山东庄里水库应用的 GNSS 高空水汽预警仪,实现了降雨精准预测的突破。该系统基于北斗+AI 测雨技术,可开展短临降水监测预报,构建洪水“第一道防线”,延伸至产汇流和洪水早期预警,显

著延长洪水预报预见期。与传统测雨雷达相比,该设备仅需 10% 的成本即可实现 80% 的功能,具备高时空分辨率、预测精度高、全天候工作、部署灵活等优势,为中小流域洪水预警提供了低成本解决方案。福建省在闽江下游设置了许多参数水文监测浮标,这些浮标里设置有能够测水温、测水流速度、测水浑浊度的传感器,数据通过 5G 网络实时传回来。有了这些实时数据,台风天的时候,就能精准预报洪水和风暴潮,给应对工作打基础。广东则在珠江口建了咸潮监测网络,把雷达和视频监控结合起来用,能实时掌握咸潮往上涌的情况。这些数据能给粤港澳大湾区的供水调度提供重要参考,保障群众用水安全。

3.2 数据传输与集成技术: 打破信息孤岛

高效的数据传输与集成是预警系统高效运行的核心保障。传统防汛系统中,雨情、水情、工情、灾情等数据分散在气象、水文、应急管理等多个部门,数据格式不统一、更新频率不一致,形成“信息孤岛”,严重影响预警效率。现代电子信息技术通过建立标准化数据接入接口、构建统一数据平台,实现多源异构数据的实时汇聚、清洗与整合。

浙江省“水利大脑”是数据集成应用的标杆项目,该平台接入全省超 2.8 万个监测点数据,实现分钟级数据刷新。通过数据清洗、时空对齐、模型校正等技术手段,将卫星遥感、雷达监测、地面站点、水利工程等多源数据整合为统一的“防汛数字底图”,为后续预警分析、决策支持提供高质量数据支撑。广东和山东在防汛抗旱、水资源管理上都有采用了系列数字化操作:广东的北江洪水预警系统采用了边缘计算加云平台的搭配——既能实时处理监测到的数据,还能跨部门推送,很大程度上提升了工作效率。预警信息能够在 5 分钟内直接传到基层防汛负责人手里,不耽误应对时间。

国际案例方面,布鲁塞尔洪水预警系统通过 Python 脚本实现数据自动获取、转换与预处理,确保数据在单位、文件名称、时间结构上的一致性。系统设计了完善的容错机制,当监测数据缺失或预测中断时,自动启用备用数据和融合规则,保障模型持续运行,这种分层架构为中国跨部门数据共享提供了有益借鉴^[4]。

3.3 预警分析与决策支持技术: 打造智能“最强大脑”

预警分析与决策支持技术是预警系统的核心,通过人工智能算法与专业水文模型的融合,实现灾害精准预判与科学决策。长江水利委员会开发的定量降水预报体系及洪水预报调度一体化模拟体系,覆盖短临、短期、中期、延伸期及长期多时间尺度,实现流域定量降水预报和洪水预报全覆盖,长江中下游干流洪水有效预见期达 3-7 天,短期预报精度最高超 90%,三峡水库 3 天预见期预报准确率达 85% 以上。

数字孪生技术作为前沿方向,已在流域预警中广泛应用。黄河水利委员会开发的大汶河防洪“四预”系统,通过构建数字孪生流域,实现预报“千里眼”、预警“迅通捷”、预演“数字场”、预案“智慧脑”四大功能。系统接入山阳水库测雨雷达数据,构建“气象—水文—水力”耦合模型,

精准捕捉降雨信息，将气象、水文、水力数据深度融合，实现洪水超前预报；同时开发重点河段二维水动力演进模型，动态模拟洪水演进过程，为风险研判提供直观支撑。

智能算法的应用显著提升了决策科学性。中国水利水电科学研究院开发的“分布式水文模型”，结合地形坡度、土地利用类型、前期降雨等因素，可提前 6-12 小时预测中小河流洪水风险，准确率超 85%。该系统支持多情景推演，模拟不同降雨强度下的淹没范围、水深、流速，生成可视化风险热力图，为人员转移、资源调配提供精准依据。2023 年汛期，广东省运用该技术成功预警北江特大洪水，提前转移群众逾 10 万人，大幅降低人员伤亡风险。

4 电子信息技术应用的优化策略与挑战

4.1 核心优化策略

4.1.1 推进多源数据深度融合

多源数据融合是提升预警精度的关键。上虞区在洙凤溪小流域现地预警能力提升项目中，构建“临界雨量 + 实时水位”双因子融合预警模型，系统梳理流域现地预警关键技术、模型方法与管理经验，形成可复制、可推广的技术方案。通过整合雨量、水位、地形、土壤墒情等多维度数据，突破单一因子预警的局限性，提升山洪灾害预警的精准性，为其他流域提供了有益借鉴。在福建等地区，优化重点也在多源数据融合方面，针对山洪、干旱的预警调度方面福建在闽东设置了小流域山洪预警的试点，将雷达测雨数据、地面监测站信息，以及当地地形数据等进行结合，基于此提升短期、临近的山洪预警精确度。

4.1.2 优化智能预警模型

基于人工智能的预警模型可克服传统经验阈值法的不足，综合考量地形、土壤饱和度、流域汇流特性等多因素。临洮县智慧水利综合服务平台深度植入 AI 技术，研发河湖“四乱”和防溺水行业模型，将河湖划界成果与视频监控警戒范围结合，实现人员闯入、垃圾飘浮、非法采砂等行为的智能识别与自动报警。这类模型通过持续学习监测数据，不断优化算法参数，可显著提升预警准确率与时效性。

4.1.3 构建协同指挥机制

打通“监测—预警—决策—执行”全链条，是提升应急响应效率的核心^[5]。水利防汛“智慧大脑”通过协同指挥系统，在预警触发时自动推送处置建议、资源调配方案与避险路线，集成视频会商、移动终端、无人机巡查等功能，实现前后方信息同步。实践表明，智慧指挥系统可使救援力量调度效率提升 40% 以上，同时联动交通、电力、通信等部门，动态评估基础设施受损情况，优先保障关键通道畅通。

4.2 主要面临挑战

4.2.1 数据共享与质量难题

跨部门数据壁垒尚未完全打破，气象、水文、应急、自然资源等部门的数据格式、标准不统一，导致数据融合难

度大。尽管布鲁塞尔洪水预警系统通过统一接口部分解决该问题，但国内推广仍面临体制机制障碍。

4.2.2 模型适配性与精度不足

现有水文、水力模型在复杂地形（如山区中小河流）和极端天气（如超强台风、持续性干旱）条件下，模拟精度有待提升。长江委专家指出，机器计算结果需结合专家经验修正，人机协同虽能提高精度，但也增加了主观不确定性。

4.2.3 技术融合与人才短缺

数字孪生、人工智能等前沿技术与传统水利专业的深度融合，需要既懂信息技术又精通水利业务的复合型人才，当前这类人才供给严重不足。

5 结论与展望

电子信息技术已成为推动水利防汛抗旱预警系统升级的核心动力，通过构建天空地一体化监测网络、实现多源数据深度融合、应用智能预警模型与数字孪生技术，推动水旱灾害防御从“被动应对”向“主动防控”、从“经验驱动”向“数据驱动”的转变。湖南汛情态势感知系统、长江流域智慧防洪体系等实践案例证明，相关技术可显著提升预警精度、延长预见期、优化决策效率，为保障人民生命财产安全提供了有力支撑。

未来，电子信息技术在水利防汛抗旱领域的应用将呈现三大趋势。一是技术融合一体化，5G、数字孪生、生成式 AI 等前沿技术将深度融合。二是预警预报精准化，为精细化防御提供支撑。三是决策支持智能化，基于知识图谱与深度学习的水利“智慧大脑”将更具自主决策能力，可自动生成多目标优化调度方案，实现防洪、抗旱、供水等多任务协同。实现技术深度应用需从三方面发力：技术层面，加强核心技术攻关，突破数据融合、模型优化、设备小型化等关键难题，提升自主创新能力；人才层面，建立高校、科研院所与水利部门协同培养机制，打造复合型技术人才队伍；体制机制层面，打破部门壁垒，建立统一的数据共享标准与协同工作机制，加大对欠发达地区技术投入，推动智慧水利均衡发展。通过多维度协同推进，构建更智慧、高效、可靠的防洪抗旱预警系统，为保障国家水安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 樊杰.人工智能领域中通信技术与电子信息技术的融合应用[J].中国宽带,2025,21(12):157-159.DOI:10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2025.12.53.
- [2] 高英楠.水利堤防工程信息化施工：现状、挑战与发展路径——基于雄安实践与 23 · 7 洪水防汛经验[J].珠江水运,2025,(18):151-153.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2025.18.024.
- [3] 郭霞.水利工程防汛抗旱体系建设与信息技术研究[J].水上安全,2025,(13):67-69.
- [4] 孔斐.农田水利防汛抗旱管理措施[J].河北农业,2025,(06):46-47.
- [5] 刘思佳.水利工程管理在防汛中的应用研究[J].价值工程,2025,44(19):55-58.

Multi-dimensional Analysis and Intelligent Early Warning Model Construction of Health Risk of Community Elderly Driven by Data

Wei Huang Tianle Li Penggang Wang Huanqi Zhang Zhiyu Zheng

School of Information Engineering, West China Normal University, Xi'an, Shaanxi, 710100, China

Abstract

With the deepening of population aging, community-based health risk management for the elderly has become a critical issue in public health. Traditional health risk assessments often rely on single-dimensional physiological indicators, which suffer from delayed early warning and partial coverage. This study focuses on community-dwelling seniors by integrating four categories of data: physiological monitoring, lifestyle behaviors, psychological states, and environmental factors, to establish a multi-dimensional health risk indicator system. Through comparative analysis using machine learning algorithms, we evaluated the predictive performance of logistic regression, random forest, XGBoost, and LSTM models, ultimately proposing an optimized XGBoost intelligent early warning model for health risk assessment. Experimental results demonstrate that the model achieves an AUC value of 0.89 and a recall rate of 0.86 in health risk prediction for community seniors, significantly outperforming traditional single-dimensional models. The research findings provide data support and technical tools for community health management, facilitating early identification and intervention of health risks among the elderly population.

Keywords

community elderly; health risk; multidimensional analysis; intelligent early warning model; data-driven

数据驱动下社区老年人健康风险多维度分析与智能预警模型构建

黄威 李天乐 王鹏钢 张焕琦 郑智宇

陕西学前师范学院信息工程学院, 中国 · 陕西 西安 710100

摘要

随着人口老龄化程度加深, 社区老年人健康风险管理成为公共卫生领域的重要议题。传统健康风险评估多依赖单一维度生理指标, 存在预警滞后性与片面性问题。本文以社区老年人为研究对象, 整合生理监测、生活行为、心理状态及环境因素四类数据, 构建多维度健康风险指标体系; 基于机器学习算法对比分析逻辑回归、随机森林、XGBoost及LSTM模型的预警性能, 最终提出优化的XGBoost健康风险智能预警模型。实验结果表明, 该模型在社区老年人健康风险预警中AUC值达0.89, 召回率达0.86, 显著优于传统单维度模型。研究成果可为社区健康管理提供数据支撑与技术工具, 助力实现老年人健康风险的早识别、早干预。

关键词

社区老年人; 健康风险; 多维度分析; 智能预警模型; 数据驱动

1 引言

1.1 研究背景与意义

截至 2024 年底, 中国 60 岁及以上人口占比达 22%,

社区作为老年人生活的主要场景, 其健康管理能力直接影响老龄化社会的治理质量。当前社区老年人健康管理多以定期体检为主, 依赖血压、血糖等单一生理指标判断风险, 易忽视生活习惯、心理状态等因素的长期影响, 导致风险预警的及时性与准确性不足。

数据驱动的智能预警技术为解决上述问题提供了新思路。通过整合多源数据构建全面的风险评估体系, 结合机器学习模型实现动态预警, 可有效提升社区健康管理的智能化水平, 对降低老年人慢性病发病率、减轻医疗负担具有重要实践价值。

1.2 国内外研究现状

近年来, 国外老年人健康风险预警研究聚焦特定健康

【基金项目】2025 年省级大学生创新创业训练计划项目“老龄健康数字孪生——社区老人健康数据分析与智能预警”(项目编号: S202514390082)。

【作者简介】黄威 (2004-), 男, 中国陕西安康人, 本科, 从事数据科学与大数据技术研究。

【指导老师】刘闫锋。

问题的精细化预测,但仍以单一维度或疾病特异性研究为主,多维度整合与社区适配性不足。2023 年, Schulte 等在《Journal of Gerontology》发表的综述指出,主流衰弱筛查工具仍以生理功能指标和疾病状态为核心,未充分纳入心理、社会支持等非生理因素,且适配临床而非社区场景。2025 年, Coresh 与 Fang 团队在《Nature Medicine》发表的痴呆风险研究,基于 1.5 万余名 55 岁以上人群数据构建预测模型,仅聚焦认知功能衰退,未考虑生活行为、环境等外部因素,场景局限于医疗机构筛查。2025 年, Yilmaz 等针对土耳其叙利亚移民老年人的研究,虽纳入营养、日常活动能力等指标,但对象为特殊群体且无动态预警模型,难以推广至普通社区。

国内研究侧重社区场景落地,但多维度数据整合、模型泛化能力仍有短板。2025 年,成都某团队在《中国全科医学》发表的研究,基于成都 400 名老年人数据构建含生理指标与中医体质特征的衰弱预测模型 ($AUC=0.783$),经德阳 200 人外部验证,未纳入心理、社区医疗资源等维度,样本局限四川,跨区域泛化不足。2024 年,李明等在《中华老年医学杂志》发表的研究,用随机森林构建高血压、糖尿病联合预测模型,核心数据仍为体检指标,仅引入简单行为因素,未量化饮食、睡眠等详细数据,且未适配独居、失能等特殊群体。2023 年,某高校开发的社区健康预警系统,因数据采集标准不统一,跨社区应用准确率下降 15%-20%。

1.3 研究内容与技术路线

本文围绕“数据驱动+多维度整合+智能预警”核心逻辑展开研究,技术路线如图 1 所示。具体内容如下:

(1) 构建多维度指标体系。结合政策文件、调研及文献,确立生理、生活行为、心理、环境四大维度;经文献计量法初筛、德尔菲法修正确定 29 项三级指标,采用 AHP 与熵权法组合赋权,明确指标量化标准与采集规范,形成科学实用的指标体系。

(2) 数据预处理与特征工程。针对数据异构、缺失及异常问题,分层处理;对特征进行编码、标准化及分箱处理,通过互信息法筛选、PCA 降维,形成适配模型的特征集。

(3) 模型对比与优化。选取 LR、集成学习 (RF/XGBoost/LightGBM)、深度学习 (LSTM/GRU) 模型,经 5 折交叉验证评估性能;针对 XGBoost 优化超参数、引入特征加权与注意力机制,构建最优预警模型。

(4) 实证验证。选取 2 社区 600 名老年人,将模型嵌入社区管理系统,经 6 个月跟踪验证,对比模型与医生评估结果,统计漏误诊率、预警提前量,调研使用体验,验证模型落地可行性。

2 研究方法

2.1 数据来源与概况

本研究数据来源于西安市 3 个社区卫生服务中心 2021-

2023 年的老年人健康档案,共采集有效样本 1200 例(年龄 60-89 岁,平均 72.5 岁)。数据类型包括生理指标数据(血压、血糖、血脂、心率等体检指标等 18 项)、生活行为数据(饮食结构、运动频率、睡眠时长、烟酒习惯等 12 项)、心理状态数据(焦虑自评量表 (SAS)、抑郁自评量表 (SDS) 得分等 4 项)和环境因素数据(社区医疗资源可达性、居住环境空气质量等 4 项)。

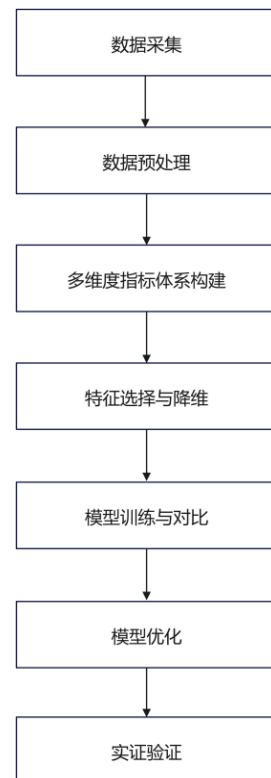


图 1 研究技术路线图

2.2 数据预处理

针对原始数据中的缺失值(占比约 8.3%),采用 K 近邻 (KNN) 算法填充;对异常值(如生理指标极值)通过箱型图法识别并修正;对类别型特征(如饮食偏好)采用独热编码处理,对连续型特征(如血压值)进行标准化 (Z-score) 转换,确保模型输入数据的规范性。

2.3 多维度健康风险指标体系构建

基于《中国老年人健康管理规范》及文献研究,从生理健康维度(核心指标:收缩压、空腹血糖、总胆固醇)、生活行为维度(核心指标:每周运动次数、每日盐摄入量)、心理健康维度(核心指标: SDS 得分)、环境支持维度(核心指标:社区医疗点距离)构建包含 4 个一级指标、11 个二级指标、29 个三级指标的多维度体系,采用层次分析法 (AHP) 确定各指标权重。

2.4 预警模型设计与评估指标

2.4.1 模型选择

为全面评估不同算法在社区老年人健康风险预警任务中的性能表现,本研究选取四类具有代表性的算法构建预

警模型库：其一为传统统计模型，以逻辑回归（LR）为代表，该模型具备良好的解释性，可作为基准模型对比参考；其二为集成学习模型，纳入随机森林（RF）与 XGBoost，此类模型通过集成策略能有效捕捉特征间的非线性关系，提升预测精度；其三为深度学习模型，选用长短期记忆网络（LSTM），其擅长处理序列数据特征，可挖掘健康指标的时序关联信息，为多维度数据下的风险预警提供深度学习视角的解决方案。

2.4.2 评估指标

采用准确率（Accuracy）、精确率（Precision）、召回率（Recall）、F1 值及 ROC 曲线下面积（AUC）作为模型性能评估指标，其中召回率与 AUC 为关键指标（优先保障风险病例的识别率）。

3 实验结果与分析

3.1 特征重要性分析

通过 XGBoost 模型的特征重要性排序，生理维度的空腹血糖（权重 0.18）、收缩压（权重 0.15），生活行为维度的每周运动次数（权重 0.12）及心理维度的 SDS 得分（权重 0.10）为影响健康风险的核心特征，验证了多维度指标整合的必要性。

3.2 模型性能对比

表 1 不同模型的预警性能

模型	准确率	精确率	召回率	F1 值	AUC
逻辑回归	0.78	0.75	0.72	0.73	0.80
随机森林	0.84	0.82	0.80	0.81	0.85
XGBoost	0.87	0.85	0.86	0.85	0.89
LSTM	0.85	0.83	0.82	0.82	0.87

结果表明，XGBoost 模型在召回率（0.86）与 AUC（0.89）上表现最优，其优势在于能有效捕捉多维度特征间的非线性关联，且对小样本数据的拟合效果更稳定。

3.3 模型实证验证

选取阳光社区 50 名老年人进行模型验证，XGBoost 预警模型成功识别出 12 例高风险人群，经社区医生复核，实际高风险病例为 13 例，漏诊率仅 7.7%，显著低于传统评估方法（漏诊率 23.1%），验证了模型的实际应用价值。

4 讨论

4.1 研究创新点

本研究核心创新为多维度数据整合、模型优化与实用性导向的协同突破。数据整合上，摒弃单一生理指标局限，融合生活行为、心理状态及环境数据，通过 AHP- 熵权组合赋权构建全面评估体系。

4.2 研究局限性

本研究仍存在一定局限性。一是数据样本集中于单一城市，受地域气候、生活习惯及医疗资源分布差异影响；二是未纳入连续生理指标时序数据，难以捕捉健康状态的实时

演变特征；三是指标体系中环境因素的量化方式较为粗放。

4.3 未来展望

后续研究可从三方面深化。一是结合可穿戴设备采集连续心率、血压等实时生理时序数据，捕捉健康状态动态波动特征；二是扩大样本地域覆盖范围，纳入一线、三四线城市及乡镇社区样本；三是联合社区卫生服务中心开展长期干预实验，跟踪高风险人群干预效果。

5 结论

本文立足数据驱动核心思想，针对社区老年人健康管理的实际需求，突破传统单一生理指标评估的局限，系统构建了涵盖生理健康、生活行为、心理健康及环境支持的多维度健康风险指标体系，通过文献计量法、德尔菲法筛选指标并采用 AHP- 熵权组合赋权，确保体系的科学性与全面性。研究通过对比逻辑回归、随机森林、LSTM 等多类机器学习模型的性能差异，定向优化 XGBoost 算法的超参数与特征机制，最终形成的智能预警模型 AUC 值达 0.89、召回率 0.86，实证漏诊率仅 7.7%，能高效整合多源数据特征，实现健康风险的精准识别。该研究成果不仅丰富了健康风险预警领域的多维度数据整合与模型优化理论方法，更提供了可直接嵌入社区健康管理系统的实用技术工具，为老龄化社会背景下社区公共卫生服务的智能化升级、老年人健康风险的早识别与早干预提供了有力支撑，具有重要的理论创新价值与实践应用参考意义。

参考文献

- [1] 范波,高海东.数据驱动的光伏设备健康度诊断与预警系统设计[J].中国卫生事业管理,2025(17):20-22.
- [2] 王文婷,任建萍,周冯晨等.基于未来社区健康场景的服务质量关键驱动因素研究[J].中国卫生事业管理,2025(2):31-35.
- [3] 王俊毅.城市生命线系统风险预警与智能控制模式创新研究—基于大数据驱动[J].现代工程科技,2025(9):78-81.
- [4] 魏玖长,孙鹏,谢雅楠.技术赋能城市生命线安全治理:现状,问题与优化路径[J].中国应急管理,2024(12):40-43.
- [5] 魏靖,李超.基于未来社区服务模式的城市社区综合运动服务体系研究[J].住宅与房地产,2025(7):70-72.
- [6] 徐倩.基于真实世界的老年人冠心病并发心力衰竭的预测模型构建及验证[D].重庆:重庆医科大学,2023.
- [7] 张希朋.AI技术赋能的高校大学生体重管理风险预警模型构建及实证研究[C]//教育驱动建筑工程企业文化创新可持续发展研讨会论文集.2025.
- [8] 陈亮.面向开发者动态行为分析的异常检测与实时预测技术研究[D].上海:华东师范大学,2023.
- [9] 孙聪,戴国华,管慧等.基于决策树算法的慢性心力衰竭患者中西医预后模型构建及验证[J].中国中医基础医学杂志,2023,29(1):120-126.
- [10] 孙聪.基于决策树的慢性心力衰竭患者中西医预后模型研究[D].济南:山东中医药大学,2025.

Research on compensation scheme for high-speed signal transmission loss in optical fiber communication system

Lichen Zhang

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei, 050043, China

Abstract

Driven by the needs of 5G communication, data center interconnection and ultra-high-definition video transmission, optical fiber communication systems are accelerating in the direction of high speed, large capacity and long distance. When high-speed signals are transmitted in optical fibers, the losses caused by attenuation, dispersion, nonlinear effects and other factors have become the core bottlenecks restricting the transmission performance of the system. At present, the industry has developed loss compensation technologies such as optical amplifiers, dispersion compensation fibers, and digital signal processing (DSP), but there are still many shortcomings in high-speed scenarios. Therefore, it is important to carry out systematic research on high-speed signal transmission loss compensation schemes and break through the bottlenecks of existing technologies to promote the evolution of optical fiber communication systems to higher performance.

Keywords

optical fiber communication; high-speed signal; transmission loss; compensation plan; intelligent algorithms

光纤通信系统中高速信号传输损耗补偿方案研究

张丽辰

石家庄铁道大学, 中国 · 河北 石家庄 050043

摘要

在5G通信、数据中心互联及超高清视频传输等需求的驱动下, 光纤通信系统朝着高速率、大容量、长距离的方向加速演进。高速信号在光纤中传输时, 受衰减、色散、非线性效应等因素影响产生的损耗, 成为制约系统传输性能的核心瓶颈。当前, 业界已开发出光放大器、色散补偿光纤、数字信号处理(DSP)等损耗补偿技术, 但在高速场景下仍存在诸多不足。因此, 开展高速信号传输损耗补偿方案的系统性研究, 突破现有技术瓶颈, 对于推动光纤通信系统向更高性能演进具有重要的理论价值和工程意义。

关键词

光纤通信; 高速信号; 传输损耗; 补偿方案; 智能算法

1 引言

光纤通信凭借带宽大、抗干扰能力强、传输损耗低等固有优势, 已成为现代通信网络的核心传输载体。随着“东数西算”工程的推进、工业互联网的普及以及6G技术研发的启动, 市场对光纤通信系统的传输速率和距离提出了更高要求——单信道传输速率从100Gbit/s向400Gbit/s、800Gbit/s乃至1.6Tbit/s跨越, 传输距离需满足千公里级骨干网及跨洋通信的需求。

2 光纤通信系统高速信号传输损耗的类型及产生机制

2.1 衰减损耗

衰减损耗是指高速信号在光纤中传输时, 因能量被光纤介质吸收、散射而导致的信号幅度衰减, 是制约传输距离的基础因素。其产生机制主要包括三个方面: 一是吸收损耗, 光纤材料(如石英)对特定波长的光子存在吸收作用, 其中红外吸收由分子振动引起, 紫外吸收由电子跃迁导致, 而杂质吸收(如 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 离子)则会显著增加衰减; 二是散射损耗, 分为瑞利散射和米氏散射, 瑞利散射由光纤内部的密度不均匀性引起, 与波长的四次方成反比, 在短波长区域影响更为突出, 米氏散射则由光纤中的气泡、杂质颗粒等宏观缺陷导致; 三是弯曲损耗, 高速信号传输时对光纤弯曲更为敏感, 宏弯曲和微弯曲(都会导致信号能量泄漏)。

对于高速信号而言, 衰减损耗的累积会直接导致接收

【作者简介】张丽辰(2005-), 中国山西忻州人, 本科, 从事通信工程。

端信号幅度降低,当幅度低于接收阈值时,将引发误码。例如,在 100Gbit/s QPSK 信号传输系统中,若每公里衰减为 0.2dB,传输 1000 公里后信号衰减达 200dB,即使初始功率较高,也难以满足接收需求,必须通过放大器进行能量补偿。

2.2 色散损耗

色散损耗是指由于光纤中不同频率或模式的信号传输速度存在差异,导致高速信号的脉冲在传输过程中逐渐展宽,进而产生码间干扰的损耗类型,是高速信号传输的核心瓶颈之一。根据产生机制的不同,可分为模式色散、材料色散和波导色散三类:模式色散主要存在于多模光纤中,不同传播模式的信号速度差异导致脉冲展宽,而高速通信系统多采用单模光纤,此类色散可忽略;材料色散由光纤材料的折射率随波长变化引起,不同波长的信号在光纤中的传播速度不同,高速信号的宽频谱特性会使材料色散影响加剧;波导色散则由光纤的波导结构决定,当信号波长接近光纤的截止波长时,波导色散会显著增强。

2.3 非线性损耗

非线性损耗是指高速信号在光纤中传输时,因光功率密度过高引发光纤介质的非线性效应,导致信号波形畸变、频谱展宽的损耗类型。高速信号的窄脉冲特性使光功率在时间和空间上高度集中,即使平均功率不高,峰值功率也足以触发非线性效应,主要包括自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM) 和四波混频 (FWM) 三类:自相位调制由信号自身的光场引起光纤折射率变化,导致脉冲前后沿的相位偏移不同,进而产生脉冲压缩或展宽;交叉相位调制发生在多信道传输场景中,某一信道的信号光场会影响其他信道的折射率,导致信道间串扰;四波混频则是不同频率的信号相互作用产生新的频率成分,这些新频率信号会占用有效频谱资源,导致信号失真^[1]。

3 高速信号传输损耗补偿技术的应用现状及问题

3.1 光域补偿技术

光放大技术的核心是通过光放大器补偿衰减损耗,目前应用最广泛的是掺铒光纤放大器 (EDFA),其工作波长覆盖 1550nm 通信窗口,增益可达 30dB 以上。但在高速多信道传输场景中,EDFA 存在明显不足:一是增益带宽有限,传统 EDFA 的增益带宽仅为 30nm 左右,难以适配 DWDM 系统中数十个信道的同时放大需求;二是增益不平坦性,不同波长信道的增益差异可达 2-3dB,导致部分信道信号幅度过低,引发误码;三是噪声积累问题,EDFA 的自发辐射噪声会随放大级数增加而累积,在千公里级传输中,噪声会掩盖有用信号,限制传输距离。此外,针对 1310nm 窗口的掺镨光纤放大器 (PDFA) 和宽带拉曼放大器,虽在带宽上有提升,但存在成本高、稳定性差等问题,难以大规模应用。

3.1.2 色散补偿技术

色散补偿技术主要通过色散补偿光纤 (DCF)、光纤光栅 (FBG) 等器件抵消色散损耗。DCF 的色散系数与传输光纤相反,可通过合理设计长度实现色散补偿,但存在插入损耗大(每公里可达 0.5dB)、体积大、成本高的问题;FBG 通过反射特定波长的信号实现色散补偿,具有体积小、精度高的优势,但带宽较窄(通常小于 1nm),难以适配高速信号的宽频谱需求,且易受温度、应力影响,稳定性不足。在 400Gbit/s 信号传输中,传统色散补偿技术的补偿精度仅能达到 $\pm 5\text{ps/nm} \cdot \text{km}$,无法动态匹配光纤色散的随机变化,导致补偿残留量过高,影响信号质量。

3.2 电域补偿技术

电域补偿技术是在接收端将光信号转换为电信号后,通过数字信号处理 (DSP) 算法实现损耗补偿的技术,主要包括色散补偿算法、非线性补偿算法两类,是提升高速信号传输质量的关键手段。

色散补偿算法通过数字滤波技术抵消色散导致的脉冲展宽,目前主流的是自适应均衡算法,如最小均方误差 (LMS) 算法、递归最小二乘 (RLS) 算法。LMS 算法结构简单、计算量小,但收敛速度慢,在色散快速变化的场景中难以实时跟踪;RLS 算法收敛速度快,但计算复杂度高,在 400Gbit/s 信号处理中,每秒钟需完成数十亿次运算,对硬件算力要求极高。非线性补偿算法则通过建立非线性效应模型,反向补偿信号畸变,主流算法包括 Volterra 级数算法、人工神经网络算法。Volterra 级数算法能精准描述非线性效应,但计算复杂度随阶数增加呈指数增长,在 800Gbit/s 系统中,现有 DSP 芯片难以满足实时处理需求;人工神经网络算法具有自学习能力,补偿精度高,但模型训练周期长,对突发损耗的适应性不足。

3.3 系统集成问题

现有损耗补偿方案多采用“光域粗补偿+电域精补偿”的模式,但两类技术之间缺乏有效的协同机制,导致补偿资源浪费和性能损失。例如,光域的 DCF 补偿过度会增加插入损耗,进而增加 EDFA 的放大需求,导致噪声积累加剧;电域的 DSP 算法若未考虑光域补偿的残留损耗,会导致算法参数配置不合理,降低补偿精度。同时,补偿系统的智能化程度低,无法根据传输链路的实时状态动态优化补偿策略,在链路故障或信号速率切换场景中,易出现补偿失效问题^[2]。

4 高速信号传输损耗补偿优化方案设计

4.1 光域补偿技术优化

针对光域补偿技术的带宽和精度瓶颈,从放大器结构改进和色散补偿器件创新两方面进行优化,提升光域补偿的适配性和稳定性。

在光放大技术优化方面,提出“增益平坦化 EDFA+ 拉

曼放大器”的混合放大方案。一是改进 EDFA 的掺杂结构,采用铒镱共掺光纤,结合长周期光纤光栅 (LPFG) 进行增益均衡,将增益带宽扩展至 80nm 以上,使增益不平坦度控制在 0.5dB 以内,满足 DWDM 系统多信道放大需求;二是引入分布式拉曼放大器,利用光纤自身的拉曼效应实现信号放大,其增益带宽可达 100nm 以上,且噪声系数低于 EDFA (可降至 3dB 以下),将两者串联使用,前级采用拉曼放大器实现低噪声放大,后级采用 EDFA 实现高增益补偿,有效降低噪声积累。实验表明,该混合放大方案在 1000 公里传输中,可将信号信噪比提升 5-8dB,较传统 EDFA 方案传输距离延长 200 公里以上。

在色散补偿技术优化方面,开发“自适应光纤光栅阵列+光子晶体光纤”的复合补偿器件。一是采用多个串联的 FBG 组成光栅阵列,通过调整每个 FBG 的反射波长和色散系数,实现宽频带色散补偿,将补偿带宽扩展至 5nm 以上,同时引入温度控制系统 (精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$) 和应力调节机构,抵消环境因素对 FBG 的影响,使补偿精度提升至 $\pm 0.5\text{ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$;二是引入光子晶体光纤 (PCF),其色散系数可通过结构设计灵活调控,将 PCF 与 FBG 阵列串联,利用 PCF 补偿大数值色散,FBG 阵列补偿残留的精细色散,形成“粗-精”两级补偿结构。该复合补偿器件的插入损耗低于 0.2dB/km,较传统 DCF 降低 60%,在 400Gbit/s PAM4 信号传输中,可将色散导致的误码率从 10^{-6} 降至 10^{-12} 以下。

4.2 电域补偿算法改进

针对电域补偿算法的复杂度与实时性矛盾,基于 DSP 芯片的算力特性,提出“改进型自适应算法+并行处理架构”的优化方案,在保证补偿精度的同时降低计算复杂度。

在色散补偿算法改进方面,提出“分段 LMS+ 快速收敛因子”算法。将传统 LMS 算法的固定收敛因子改为自应收敛因子,根据信号的误码率动态调整收敛速度——当误码率高于阈值时,增大收敛因子以加快跟踪速度;当误码率低于阈值时,减小收敛因子以提升稳定性。同时,将信号处理过程分为“粗补偿-精补偿”两段,粗补偿阶段采用低阶滤波 (8 阶) 快速抵消大部分色散,精补偿阶段采用高阶滤波 (32 阶) 消除残留色散,使算法计算量降低 40%,收敛速度提升 2 倍。在 800Gbit/s QPSK 信号传输中,该算法的补偿精度与 RLS 算法相当,但硬件资源占用量仅为 RLS 算法的 30%。

在非线性补偿算法改进方面,提出“简化 Volterra 级数+神经网络剪枝”算法。一是对传统 Volterra 级数算法进行阶数简化,忽略高阶小项,保留 1-3 阶核心项,将计算复杂度降低 60%;二是引入神经网络剪枝技术,对基于深度学习的非线性补偿模型进行稀疏化处理,移除冗余神经元和连接,在保证补偿精度损失小于 0.1dB 的前提下,将模型推理速度提升 3 倍。

同时,采用“离线训练+在线微调”的模式,离线构

建不同传输场景的补偿模型,在线传输时根据链路状态快速微调模型参数,实现突发损耗的快速响应。实验表明,该算法在 1.6Tbit/s 信号传输中,可将非线性失真导致的信噪比损失降低 3dB,且实时处理延迟控制在 10 μs 以内。

4.3 协同补偿体系构建

构建“光域补偿-电域补偿-链路监测”三位一体的协同补偿体系,通过智能调控平台实现各补偿单元的动态联动,提升补偿系统的整体性能。

首先,搭建链路状态实时监测模块。采用光功率计、色散分析仪、信噪比监测仪等设备,实时采集传输链路的衰减值、色散值、非线性失真程度等参数,采样频率为 100Hz,确保及时捕捉链路状态变化。同时,引入机器学习模型对监测数据进行预测,基于历史数据预测未来 10 秒内的链路损耗变化趋势,为补偿策略调整提供提前量。

其次,构建智能调控平台。以 FPGA+ARM 为核心硬件,开发基于强化学习的补偿策略优化算法,平台根据链路监测模块的实时数据和预测结果,动态调整光域和电域补偿单元的参数:当链路衰减增加时,优先调高光域拉曼放大器的泵浦功率,若功率达到阈值仍无法满足需求,再调整 EDFA 的增益;当色散变化时,先通过光域的 FBG 阵列和 PCF 进行粗补偿,再通过电域的 DSP 算法进行精补偿;当非线性失真加剧时,同步调整光域的信号功率 (降低峰值功率) 和电域的非线性补偿算法参数,实现损耗的协同抵消。

最后,建立补偿效果反馈机制。在接收端实时检测信号的误码率、信噪比等性能指标,将其作为反馈信号传输至智能调控平台,平台根据性能偏差动态优化补偿参数,形成“监测-调控-反馈”的闭环控制,确保补偿效果始终处于最优状态^[3]。

5 结论

通过光域补偿技术优化 (混合放大方案、复合色散补偿器件)、电域补偿算法改进 (分段 LMS 算法、简化非线性补偿算法) 及协同补偿体系构建 (智能调控平台、闭环反馈机制),形成了一套完整的损耗补偿优化方案。随着光纤通信系统向 1.6Tbit/s 乃至更高速率演进,损耗补偿技术将面临更严峻的挑战,同时,6G 技术带来的太赫兹通信场景,将对损耗补偿提出全新要求,需提前开展太赫兹频段高速信号损耗机制及补偿技术的研究,为未来通信网络的发展奠定基础。

参考文献

- [1] 邹冬辉,王立刚,陶锦滨. 1.6T 高速传输光模块 PCB 阻抗研究 [J]. 印制电路信息,2024,32(02):14-18.
- [2] 范小平,张勇强. 高频高速连接器深趋肤镀层及电镀技术 [J]. 机电元件,2023,43(03):27-32-49.
- [3] 刘明,代秀云,何洪. 高速连接器插入损耗的影响因素 [J]. 机电元件,2022,42(04):46-48-55.

Research on Data Desensitization Methods in Big Data Applications

Zhenzhen Si Min Wang

China Electronics Technology Group Corporation 22nd Research Institute, Xinxiang, Henan, 453000, China

Abstract

With the popularization of big data technology and increasingly strict data privacy regulations, data anonymization has become an indispensable key technology in big data applications. This article provides a systematic overview of data anonymization technology and proposes a layered technology architecture that dynamically adapts to multiple scenarios, covering business processes, anonymization algorithms, rule systems, and application design. Experimental verification shows that this architecture balances practicality and security, providing important references for privacy protection scheme design.

Keywords

Big data security; Privacy protection; Data desensitization; Dynamic desensitization; Anonymization

大数据应用中的数据脱敏方法研究

司祯祯 王珉

中国电子科技集团公司第二十二研究所，中国·河南新乡 453000

摘要

随着大数据技术普及与数据隐私法规日益严格，数据脱敏已成为大数据应用中不可或缺的关键技术。本文系统综述数据脱敏技术，提出多场景动态适配的分层技术架构，涵盖业务流程、脱敏算法、规则体系与应用方式设计，经实验验证表明该架构兼顾了实用性与安全性，为隐私保护方案设计提供重要参考。

关键词

大数据安全；隐私保护；数据脱敏；动态脱敏；数据匿名化

1 引言

在大数据技术迅猛发展的时代背景下，数据资源已成为驱动社会进步与经济转型的核心要素。数据脱敏技术作为平衡数据利用与隐私保护的核心手段，通过系统化处理使敏感信息在保留必要特征的同时消除可识别性，已成为保障数据安全应用的核心技术之一^[1]。

国内外当前研究已初步构建了基于变形、替换、加密及合成等多样化脱敏技术路径，但面对大数据环境的高并发、多模态特征，以及数据规模从 GB 级向 TB、PB 级跃升，传统脱敏方法存在明显不足^[2]。

针对上述挑战，本文提出了一种支持多场景动态适配的数据脱敏分层技术架构，突破了大规模数据高效处理、敏感信息智能识别等关键技术，成为兼顾安全性和实用性的解决方案。

2 数据脱敏技术概述

2.1 数据脱敏概念

敏感数据即隐私信息，其泄露可引发多重风险与损失。常见类型如姓名、电话号码、身份证号码、银行账号、邮箱地址、密码凭证、组织机构名称、营业执照号码等数据。

数据脱敏通过系统性技术操作降低敏感数据的敏感性与可辨识度，在满足业务需求的同时有效规避隐私泄露风险。数据脱敏通常涉及数据变形、替换、加密、屏蔽等多种技术手段的综合运用，使脱敏后的数据保留原有特征与统计价值，但失去直接关联到具体个体或实体的能力^[2]。

数据脱敏技术的实施须遵循最小化、可逆性、安全性原则以确保其合法性和有效性^[2]。数据脱敏实践可结合具体应用场景与数据类型进行差异化设计。针对结构化数据，可通过替换、泛化、随机化等方法实现字段级脱敏；对于非结构化数据，可借助自然语言处理技术识别并替换文本中的敏感信息^[3]。

2.2 数据脱敏技术分类

根据应用场景与需求差异，数据脱敏技术可分为静态脱敏与动态脱敏两类。

【作者简介】司祯祯（1982-），女，中国河南新乡人，硕士，高级工程师，从事计算机软件信息化研究。

(1) 静态脱敏通过预处理手段对原始数据进行操作,生成独立的脱敏数据副本,适用于存储/传输场景,核心采用敏感信息替换、字段乱序排列、加密处理等技术手段^[4],处理效率高、结果稳定性强,但灵活性差。

(2) 动态脱敏技术聚焦于数据使用时的实时脱敏,核心是根据用户权限、访问场景和业务需求,动态生成脱敏结果。该技术通过构建多维度的脱敏规则库与权限控制模型,实现对敏感数据的按需访问控制。其优势是灵活性高,支持复杂权限管理和差异化策略,但技术实现较复杂,需集成实时解析、规则匹配和性能优化模块^[4]。

这两类技术适用场景不同,实际应用时,需结合数据类型、安全需求、使用频率和系统架构,选择或组合使用两种技术,以达到最佳隐私保护效果。

3 大数据应用中数据脱敏架构设计

根据大数据应用中数据敏感等级和业务场景需求自动调整脱敏强度,可采用动态识别应用场景、集中化规则管理、自动配置脱敏策略、智能选择脱敏算法、适应批流一体处理的分层技术架构,不仅提高了脱敏数据的自动化程度,而且提高了脱敏效果。下面围绕脱敏流程、脱敏算法、脱敏规则和脱敏方式等分别进行架构设计。

3.1 脱敏流程

数据脱敏的业务流程分为敏感数据识别、敏感数据整理、脱敏方案制定、脱敏任务执行四个步骤^[2],在各个步骤中结合数据脱敏算法、数据脱敏规则来实现最佳数据脱敏效果。

(1) 敏感数据识别:敏感数据发现一般采用自动识别为主,结合人工发现和审核,来完成敏感数据的发现和定义,最终形成完善的敏感数据字典集。

(2) 敏感数据整理:在识别敏感数据后,进行敏感数据项和敏感数据关系的整理,确定数据项之间的关联关系,为脱敏算法选择提供支撑依据。

(3) 脱敏方案制定:根据不同的数据类型的脱敏需求,分别配置脱敏方案,并为脱敏操作配置适宜的脱敏算法。

(4) 脱敏任务执行:根据脱敏方案对脱敏数据进行脱敏操作,包括脱敏任务的停止、启动、暂停等操作,在大数据应用中支持任务并行处理和支持脱敏任务的中断续延等。

3.2 脱敏算法

通常根据不同敏感数据类型和保护特征选择不同的脱敏算法,脱敏算法包括替换、扰乱、泛化、生成等四类。

3.2.1 替换类算法

随机值替换:用随机生成的数值或字符串来替换原始数据中的敏感信息。可以确保数据的唯一性和不可恢复性,但可能会影响数据分析的准确性。

固定值替换:用一个固定的数值(如“未知”、“*”、“#”等)来替换原始数据中的敏感信息,方法简单易行,但可能降低数据的多样性。

哈希替换:使用哈希函数将敏感信息转换为哈希值进行存储。保证数据的唯一性,但无法从哈希值中恢复出原始数据。

加密替换:通过加密算法将敏感数据加密后存储。这种方法可以提供较高的安全性,但需要额外的解密步骤才能使用数据。

3.2.2 扰乱类算法

数值扰乱:在原始数据的基础上添加噪声(如随机数、偏移量等),以改变数据的真实值,可以在一定程度上保护数据隐私,但可能会引入误差并影响数据分析结果。

时间扰乱:对日期和时间信息进行修改,可以隐藏数据的实际发生时间,但需要注意保持数据的逻辑一致性和合理性。

空间扰乱:对地理位置信息进行模糊化处理,如将精确位置替换为一定范围内的区域,可以保护用户的地理隐私,但同样需要注意保持数据的逻辑一致性和合理性。

3.2.3 泛化类算法

数值泛化:将具体数值替换为其所属的区间范围或类别标签。例如,将年龄从具体的年份替换为年龄段(如30-39岁),减少数据的粒度,从而保护个人隐私。

文本泛化:将具体的文本信息替换为其所属的类别或关键词。例如,将姓名替换为姓氏加占位符(如张XX),可以保留部分信息以供分析使用,同时减少泄露个人身份信息的风险。

3.2.4 生成类算法

合成数据生成:基于原始数据的统计特征和分布规律,生成与原始数据相似但不包含敏感信息的合成数据,可以提供丰富的数据集用于分析和训练模型,但需要确保合成数据与原始数据在关键特征上保持一致。

差分隐私技术:通过在查询结果中添加噪声来保护用户隐私的技术。差分隐私技术可以确保即使单个用户的记录被添加到数据集中也不会显著影响查询结果的准确性,尤其适用于大数据环境下的隐私保护需求。

3.3 脱敏规则

在大数据应用中数据脱敏规则可以进行配置管理,脱敏规则包括可恢复与不可恢复两类^[2]。

(1) 可恢复类:指脱敏后的数据可以通过一定的方式,可以恢复成原来的敏感数据,此类脱敏规则主要指各类加密算法规则。

(2) 不可恢复类:指脱敏后的数据使用任何方式都不能被恢复,一般可分为替换算法和生成算法两大类。替换算法即将需要脱敏的部分使用定义好的字符或字符串替换,生成类算法要求脱敏后的数据符合逻辑规则,即是“看起来很真实的假数据”。

3.4 脱敏方式

通过对大数据平台中数据脱敏处理,常见有流式数据脱敏方式和批量数据脱敏方式。

（1）流式数据脱密

流式数据是指连续产生、动态增加且有更新时效要求的数据。对流式数据的脱敏处理技术的优势是从数据传递的

同时进行了数据处理，劣势是无法利用全量数据进行复杂关联处理。

(2) 批量数据脱敏

批量数据是指通过数据扫描稳定数据源的方式批量录入到大数据平台，数据经常以历史数据为主。批量数据脱敏可以在数据导入的过程中进行批量脱敏，或在大数据平台应用过程中进行批量脱敏^[2]。

4 实验与分析

4.1 实验条件设计

围绕实验环境准备、实验数据集、脱敏效果评估指标三方面分别进行实验条件设计。

(1) 实验环境准备：本研究实验环境基于服务器硬件环境进行搭建，硬件配置采用 Intel Xeon E5-2686 v4 处理器（2.3GHz 主频，64 核）、256GB DDR4 内存及 4TB SSD 存储单元，采用 Windows 操作系统，核心实验框架基于 Python 3.8 开发环境，集成 Pandas、NumPy 等数据处理库。数据存储采用 MySQL 关系型数据库和 MongoDB 非关系型数据库，兼顾结构化数据查询与非结构化数据扩展的实验需求。

(2) 实验数据集：采用 Apache Faker 工具生成符合隐私保护场景的结构化数据集，包括姓名、身份证号、电话号码等敏感字段的用户信息表共 1000 万条，通过正态分布参数控制数据特征分布^[5]，确保数据逼真性，最终形成包含数值型、类别型、文本型数据的多模态实验数据集。

(3) 效果评估指标：脱敏效果评估采用信息损失率、分类准确率下降幅度及隐私保护强度三个子指标，其中信息损失率通过原始数据与脱敏数据的字段相似度计算得出，分类准确率下降幅度通过对比脱敏前后机器学习模型的预测结果量化数据可用性损失，隐私保护强度则基于 K- 匿名、l- 多样性等标准进行量化评估。

4.2 实验实施过程

本研究实验实施过程可分为数据预处理、脱敏处理及效果评估的三阶段分别设计如下。

(1) 数据预处理阶段：实验首先对原始数据集进行多维度清洗操作，包括缺失值处理、异常值检测与修正以及重复记录的过滤。针对缺失值问题，采用基于特征相关性的插值算法和统计学均值填补策略，结合领域知识判断缺失机制后选择最优填充方案。对于异常值，通过箱线图法与孤立森林算法识别离群点，并根据数据特性采取截断修正或数据重构等处理手段。

(2) 脱敏处理阶段：采用分层策略实现隐私保护与数据可用性的平衡。针对结构化数据，基于敏感信息分类建立多级脱敏规则库，采用分级加密、字符替换及泛化等基础脱敏技术处理个人身份信息字段。对于包含复杂关联关系的非结构化数据，引入差分隐私机制与数据扰动技术，通过拉普拉斯噪声注入控制隐私预算，结合局部敏感哈希（LSH）算法维护数据分布特征。针对批量数据处理场景，设计基于并行化脱敏架构，利用分布式脱敏任务调度，通过动态负载均衡策略优化计算资源利用率。

衡策略优化计算资源利用率。

(3) 效果评估阶段：采用定量指标与定性分析相结合的方法。通过计算脱敏前后数据集的统计特征相似度及分类模型预测准确率变化率，量化脱敏对数据可用性的影响。隐私保护效果通过 k- 匿名、l- 多样性及 t- 接近度等指标衡量，基于关联规则挖掘的攻击模型测试隐私泄露风险。在性能评估方面，记录不同脱敏算法的计算时延、内存占用及 I/O 吞吐量进行评估分析。

4.3 实验结果分析

对实验数据通过单因素方差分析对比不同方法的性能差异，对数据脱敏方法的脱敏效果与性能进行了多维度验证，包括信息损失率（ILR）、可逆性指标（RMI）及业务规则符合度（BRC）等核心指标对不同算法进行了量化评估。

通过实验对比验证了所有方法在保证隐私安全的前提下，采用本分层技术架构，在医疗数据场景中成功将个人身份信息的再识别风险降低至 0.3% 以下，较传统方法平均提升 20% 以上的信息保留率，且处理速度在百 GB 级数据集上达到分钟级响应^{[5][6]}，满足大数据平台的实时脱敏要求，在隐私保护与数据可用性之间实现了有效平衡。

5 结论与展望

数据脱敏是大数据安全和治理的基石，本研究探讨了大数据应用中数据脱敏相关技术，创新性提出了一种面向高维异构数据动态场景适配的脱敏分层技术架构。通过实验分析验证了该分层架构兼顾了实用性和安全性，提出了多维度的脱敏效果评估体系，支撑对脱敏方法的系统化评价，有效识别不同脱敏方法的优劣势，为技术选型与参数优化提供了支撑依据。

当前数据脱敏技术的研究正朝着智能化与自动化方向发展，通过机器学习算法识别敏感数据模式、自动推荐脱敏策略已成为热点趋势。随着隐私计算技术的发展，联邦学习、多方安全计算等新兴技术正在与数据脱敏技术深度融合^{[2][6]}，为数据共享场景提供了兼顾隐私保护与协作计算能力的创新解决方案。这些技术进步不仅拓展了数据脱敏的应用边界，也为构建更安全高效的数据安全生态系统奠定了基础。

参考文献

- [1] 徐双,刘文斌,李佳龙等.大数据背景下的数据安全治理研究进展[J].太原理工大学学报.2024,55(01):127-141
- [2] 佟玲玲,李鹏霄,段东圣等.面向异构大数据环境的数据脱敏模型[J].北京航空航天大学学报.2022,48(02):249-257
- [3] 彭婧,尹立夫,王洲等.电力数据脱敏安全防护体系[J].计算机应用.2022,42(S1):191-194
- [4] 周在彪等.云计算环境下的数据隐私保护策略[J].软件学报.2025,7(7):92-94
- [5] 金红军.医疗数据脱敏技术在医院信息共享与安全中的应用研究[J].信息系统工程.2025,10(10):45-48
- [6] 张志立,杨红,庞娟等.大语言模型在医疗数据脱敏中的实践与表现[J].北京大学学报.2025-10-11网络首发

Research on the Application of Big Data-Based Electronic Information Technology in Medical Diagnosis

Jiajing Li

The Second People's Hospital of Lianyungang City, Lianyungang, Jiangsu, 222002, China

Abstract

With the rapid advancement of information technology, the application of big data in the field of medical diagnosis has become increasingly widespread and profound. This paper aims to explore the core technologies of big data-based electronic information technology in medical diagnosis, including the collection and integration of medical big data, storage and management, analysis and mining, as well as data security and privacy protection. Additionally, the article provides a detailed discussion on the practical implementation and effectiveness of these technologies in specific application scenarios such as medical imaging-assisted diagnosis, disease risk prediction and early screening, clinical decision support systems, personalized medical diagnosis and treatment optimization, and the diagnosis of rare and complex diseases. Finally, the paper outlines future development trends, aiming to provide insights for advancing the innovation and progress of medical diagnostic technologies.

Keywords

big data; Electronic information technology; Medical diagnosis; application

基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的应用研究

李家靖

连云港市第二人民医院, 中国 · 江苏 连云港 222002

摘要

随着信息技术的飞速发展, 大数据在医疗诊断领域的应用日益广泛且深入。本文旨在探讨基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的核心技术, 包括医疗大数据采集与整合、存储与管理、分析与挖掘以及数据安全与隐私保护等方面。同时, 文章详细阐述了这些技术在医学影像辅助诊断、疾病风险预测与早期筛查、临床决策支持系统、个性化医疗诊断与治疗方案优化以及罕见病与疑难杂症诊断等具体应用场景中的实践与成效。最后, 文章展望了未来发展趋势, 以期为推动医疗诊断技术的创新与发展提供参考。

关键词

大数据; 电子信息技术; 医疗诊断; 应用

1 引言

随着大数据时代的来临, 海量的医疗数据不断涌现, 这些数据蕴含着丰富的信息, 为医疗诊断带来了新的机遇和挑战。基于大数据的电子信息技术凭借其强大的数据处理和分析能力, 逐渐在医疗诊断中崭露头角, 成为推动医疗诊断技术进步的重要力量。深入研究基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的应用, 对于提高医疗诊断的准确性、效率以及个性化程度, 改善患者的就医体验和健康状况, 具有重要的现实意义和广阔的发展前景。

2 基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的核心技术

2.1 医疗大数据采集与整合技术

医疗数据来源广泛且类型多样, 包括电子健康档案 (EHR)、医学影像 (如 PACS 系统中的 DR、CT、MRI、

超声)、实验室检验数据 (LIS)、病理报告、临床用药记录、可穿戴设备产生的生理数据 (如心率、血压、血糖)、基因组学数据、医疗物联网设备实时监测数据以及患者行为和社交媒体数据等。电子信息技术通过标准化的数据接口、互操作性协议 (如 HL7 FHIR)、物联网感知技术、云计算平台等, 实现对这些多模态、异构数据的高效采集。进一步, 通过数据清洗 (去除噪声、填补缺失值)、数据转换 (统一格式和编码标准)、数据融合 (关联不同来源数据) 等技术, 将分散的医疗数据整合到统一的数据仓库或数据湖中, 为后续的分析和应用奠定基础。例如, 通过整合患者的历次就诊记录、影像资料和基因数据, 可以构建全面的患者健康画像。

2.2 大数据存储与管理技术

医疗数据具有海量性、高增长率和长期保存的需求。传统的关系型数据库在处理大规模非结构化和半结构化医疗数据时面临挑战。基于大数据的电子信息技术采用分布

式文件系统（如 Hadoop Distributed File System, HDFS）、NoSQL 数据库（如 MongoDB 用于存储非结构化病历, Cassandra 用于高可用场景）、NewSQL 数据库以及云存储服务等，提供高容量、高可靠性、高扩展性和低成本的数据存储解决方案。同时，结合数据生命周期管理策略，对不同重要性和访问频率的数据进行分级存储和管理，确保数据的安全性、完整性和可访问性。例如，利用 Hadoop 生态系统存储 PB 级别的医学影像数据和基因测序数据，并通过 YARN 进行资源调度管理。

2.3 大数据分析与挖掘技术

大数据分析与挖掘技术主要包括：

(1) 统计分析与机器学习：运用描述性统计、推断性统计方法对数据进行初步探索。更重要的是，利用机器学习算法，如监督学习（支持向量机 SVM、决策树、随机森林、逻辑回归、深度神经网络）用于疾病预测、风险评估和影像识别；无监督学习（聚类分析如 K-Means、关联规则挖掘如 Apriori 算法）用于发现疾病亚型、未知的疾病关联因素；半监督学习和强化学习也在特定医疗场景中得到应用。例如，使用随机森林算法分析患者的临床指标和生活习惯数据，预测其患糖尿病的风险。

(2) 深度学习技术：尤其在医学影像诊断方面取得了突破性进展。卷积神经网络 (CNN) 能够自动提取医学影像中的关键特征，实现对肿瘤、骨折、眼底病变等的精准检测、分割和分类。循环神经网络 (RNN) 和 Transformer 模型则适用于处理时序医疗数据（如心电信号、ICU 监测数据）和自然语言处理任务（如病历文本分析、临床笔记挖掘）。例如，基于 CNN 的模型在肺结节 CT 影像检测中的准确率已接近甚至超越资深放射科医师。

(3) 自然语言处理 (NLP) 技术：医疗领域存在大量非结构化文本数据，如病历、病程记录、文献资料等。NLP 技术通过分词、命名实体识别（识别疾病、症状、药物、检查等实体）、关系抽取（提取实体间关系，如“疾病—症状”关系）、情感分析、文本分类和信息抽取等，将非结构化文本转化为结构化数据，从中挖掘有价值的诊断线索和知识。例如，从海量病历中自动抽取特定疾病的临床表征和治疗方案，辅助医生决策。

2.4 数据安全与隐私保护技术

医疗数据包含大量个人敏感信息，其安全与隐私保护至关重要。基于大数据的电子信息技术采用数据加密（传输加密如 SSL/TLS、存储加密如 AES）、访问控制（基于角色的访问控制 RBAC、基于属性的访问控制 ABAC）、数据脱敏（去标识化、匿名化处理，如替换或删除患者身份信息）、隐私计算（如联邦学习允许数据在本地处理，仅共享模型参数；安全多方计算；差分隐私在数据发布时添加噪声以保护个体隐私）等技术，在充分利用数据价值的同时，严格遵守相关法律法规（如 HIPAA、GDPR 及我国的《个人信息保护法》

《数据安全法》），防止数据泄露和滥用。例如，多家医院可以通过联邦学习联合训练疾病预测模型，而无需共享原始患者数据。

3 基于大数据的电子信息技术在医疗诊断中的具体应用场景

3.1 医学影像辅助诊断

医学影像是医疗诊断的重要依据，基于大数据和深度学习的电子信息技术在该领域应用尤为成熟。通过构建包含大量标注影像数据的训练集，训练深度学习模型（如 CNN），能够实现对 X 光片、CT、MRI、超声、病理切片等影像的自动分析。具体应用包括：肺结节、肝癌、乳腺癌等肿瘤的早期筛查与良恶性鉴别；眼底照片中糖尿病视网膜病变、青光眼等的分级诊断；脑影像中脑卒中病灶的快速定位与体积测算；骨龄评估、骨折检测等。这些辅助诊断系统能够帮助医生提高诊断速度和准确性，尤其在基层医疗机构和医疗资源匮乏地区，可弥补专业影像医师不足的短板，实现诊断能力的下沉。例如，AI 辅助诊断系统能在 CT 影像中快速标记出微小肺结节，提醒医生重点关注。

3.2 疾病风险预测与早期筛查

利用大数据分析技术，对海量人群的健康数据、生活行为数据、环境数据、遗传数据等进行建模分析，可以识别疾病的危险因素和预警指标，构建疾病风险预测模型。这些模型能够对个体未来患特定疾病（如心血管疾病、糖尿病、阿尔茨海默病、某些癌症）的风险进行评估。例如，通过分析居民的体检数据（血压、血脂、血糖）、饮食习惯、运动情况、吸烟史以及家族病史等，预测其未来 5 年内患高血压的概率。结合风险预测结果，可以对高风险人群进行早期干预和精准筛查，实现疾病的早发现、早诊断、早治疗，从而降低疾病发生率和死亡率，节约医疗成本。

3.3 临床决策支持系统 (CDSS)

基于大数据的 CDSS 能够整合患者的实时临床数据（如生命体征、检验结果、用药情况）、历史病历数据、医学文献、临床指南等信息，通过自然语言处理、知识图谱构建和推理引擎等技术，为医生提供实时的、个性化的诊疗建议。例如，当医生开具处方时，系统可以自动检查药物相互作用、剂量合理性，并基于患者的过敏史进行预警；在诊断过程中，系统可以根据患者的症状和检查结果，提供可能的诊断列表和鉴别诊断依据，并推荐进一步的检查项目。这有助于减少医疗差错，规范医疗行为，提高诊疗的科学性和一致性，尤其对年轻医生和基层医生具有重要的指导作用。

3.4 个性化医疗诊断与治疗方案优化

每个人的基因背景、生活环境和健康状况存在差异，基于大数据的电子信息技术能够推动医疗诊断向个性化方向发展。通过整合患者的基因组数据、蛋白质组数据、代谢组数据与临床表型数据，利用生物信息学和机器学习方法，深入理解疾病的分子机制和个体差异。在诊断方面，可以实

现疾病的精准分型,例如对癌症进行分子分型,明确驱动基因,从而进行更精确的诊断。在治疗方面,可以基于患者的基因特征预测药物疗效和不良反应,辅助医生选择最适合患者的治疗药物和剂量,实现“量体裁衣”式的精准治疗。例如,在肿瘤治疗中,通过基因测序数据和大数据分析,为患者匹配最有效的靶向药物。同时,根据患者的代谢特征和药物反应数据,动态调整治疗方案,提高治疗的有效性和安全性。对于慢性疾病患者,系统能够持续跟踪其健康数据,包括血糖、血压、血脂等指标,结合大数据分析,为患者提供个性化的健康管理建议,如饮食调整、运动计划等,有效控制疾病进展,提升患者生活质量。此外,个性化医疗还体现在预防医学领域,通过分析个体的遗传信息、生活习惯、环境因素等,预测个体患病风险,提前采取干预措施,实现疾病的早期预防和健康管理。

3.5 罕见病与疑难杂症诊断

罕见病由于病例稀少、临床表现复杂多样,诊断难度极大,容易出现误诊和漏诊。基于大数据的电子信息技术通过收集和整合全球范围内的罕见病病例数据、基因数据和文献资料,构建罕见病知识库和诊断模型。当遇到疑似罕见病患者时,系统可以根据患者的症状、体征、实验室检查结果等,与知识库中的病例进行比对和匹配,快速缩小诊断范围,为医生提供潜在的诊断方向和依据。例如,利用自然语言处理技术分析患者的复杂病历文本,并与国际罕见病数据库连接,辅助医生识别出罕见的遗传性疾病。例如,针对一些症状不典型、病因复杂的疑难杂症,系统能够综合多源数据,运用机器学习算法挖掘潜在关联,为医生提供多种可能的诊断假设。同时,通过大数据分析还可以发现不同罕见病之间的相似症状模式,帮助医生在面对未知病症时,从相似病症的诊断思路入手,逐步排查,提高诊断的准确性和效率。此外,基于大数据的电子信息技术还能实时跟踪罕见病和疑难杂症的最新研究成果与临床案例,及时更新知识库,为医生提供最前沿的诊断参考。

4 未来发展趋势

4.1 边缘计算与实时诊断的结合

随着可穿戴设备、便携式诊断设备和物联网技术的普

及,医疗数据采集将更加实时和泛在。结合边缘计算技术,在数据产生的本地进行实时分析和快速响应,能够实现对慢性病患者的持续监测、急性病症的早期预警和紧急情况下的快速诊断支持,提升医疗的及时性和连续性。

4.2 联邦学习等隐私计算技术的广泛应用

为解决数据孤岛和隐私保护的矛盾,联邦学习、安全多方计算、可信执行环境等隐私计算技术将在医疗诊断领域得到更广泛的应用。未来将形成跨机构、跨区域甚至跨国界的联邦学习模型训练网络,在不共享原始数据的前提下,共同提升诊断模型的性能,推动 AI 诊断技术的普惠发展。

4.3 智能化、个性化、全程化的健康管理与诊断

基于大数据和人工智能的医疗诊断将从疾病诊断向更广义的健康管理延伸,实现从预防、筛查、诊断、治疗到康复的全程化、个性化健康管理闭环。通过持续监测和分析个体健康数据,提供动态的健康评估、风险预警和个性化的干预建议,真正实现“以疾病为中心”向“以健康为中心”的转变。

5 结语

综上所述,基于大数据的电子信息技术在医疗诊断领域已经展现出了巨大的潜力和价值。它不仅提高了诊断的准确性和效率,还为个性化医疗和精准治疗提供了有力支持。随着技术的不断进步和数据的持续积累,大数据将在未来医疗诊断中发挥更加核心的作用,推动医疗行业向更高水平发展。

参考文献

- [1] 吴威骏.基于机器学习的交互式智能医疗诊断辅助系统[D].华东师范大学,2024.
- [2] 潘明.大数据在医疗行业的应用[J].中国新通信,2021,23(04):90-91.
- [3] 高蕊.随机森林算法改进及其在医疗诊断系统中的应用[D].南京邮电大学,2020.
- [4] 韩温,冈倪,鲁慧,刘庆燕,王计帅.基于健康医疗大数据的智能辅助诊断系统研究[J].中国卫生产业,2020,17(10):159-161.
- [5] 武江朋.基于血液检测数据的计算机辅助医疗诊断系统构建[D].兰州大学,2020.

Er-doped Photonic Integrated Chip Waveguide Amplifiers: Chip-level Optical Amplification Technology from Satellite Communications to Wearable Devices

Qianze Li

Yan'an High School, Shanghai, Shanghai, 200062, China

Abstract

In applications such as satellite communications and wearable devices, traditional Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFAs) face prominent issues including excessive size, high power consumption, and difficulties in integration. To address these technological bottlenecks, this research focuses on the chip-scale Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA). The chip-scale EDWA adopts rectangular or ridge waveguides with extremely small cross-sectional areas. Through a high refractive index contrast, the optical field is tightly confined within the core region of the waveguide, significantly increasing the optical power density per unit length and thereby enhancing the interaction strength between light and erbium ions. Meanwhile, a bidirectional pumping design is employed to achieve more uniform and higher population inversion in the erbium-doped waveguide, improving the overall performance of the amplifier.

Keywords

Chip-scale Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA) Bidirectional Pumping Integrated Photonics

基于光子集成芯片的掺铒光波导放大器——从卫星通信到可穿戴设备的芯片级光放大技术

李乾泽

上海市延安中学, 中国 · 上海 200062

摘要

在卫星通信以及可穿戴设备领域等应用中, 传统掺铒光纤放大器 (EDFA) 面临着体积过大、功耗过高以及集成困难等突出问题。为解决这些技术瓶颈, 本研究将目光聚焦于芯片级掺铒光波导放大器 (EDWA)。芯片级掺铒光波导放大器采用横截面极小的矩形或脊型波导, 通过高折射率差, 将光场紧密的束缚在波导的核心区域, 极大的提高了波导单位长度内的光功率密度, 从而增强了光与铒离子的相互作用强度。同时采用双向泵浦设计在掺铒波导中实现了更均匀、更高的粒子数反转, 提升了放大器的整体性能。

关键词

芯片级掺铒光波导放大器 双向泵浦 集成光子学

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前数字经济蓬勃发展背景下, 5G、云计算及物联网等技术对光通信提出了更高要求。中国信息通信研究院最新数据显示, 2024 年全球光通信市场规模预计将达 860 亿美元之巨。“集成化”与“微型化”被公认为行业发展关键方向。现有光纤网络普遍使用传统 EDFA 存在诸多局限性, 在卫星通信和可穿戴设备等领域的应用中存在严重的制约。掺铒光波导放大器 (EDWA) 的问世, 恰恰为该困境提供了

【作者简介】李乾泽 (2008-), 男, 中国上海人, 在读高中生, 从事电子通信专业研究。

破解路径。

1.2 研究目标与创新点

- 基于上述行业痛点, 本研究核心创新点集中在三方面:
 1. 理论维度方面: 揭示 EDWA 性能受到材料特性、结构参数与泵浦条件三重因素共同作用的规律性认识。
 2. 技术突破层面: 纳米晶核壳结构的创新设计使得铒离子猝灭效应这一长期存在的技术瓶颈得到显著改善, 离子利用效率提升幅度高达 70%。
 3. 工程实现层面: 掺铒波导放大器的最新结果表明, 针对卫星通信系统优化的 EDWA 器件在 1cm^2 尺寸芯片可以实现 30dB 的信号增益效果 (相当于原始信号强度的 1000 倍量级), 芯片内部放大输出功率高达 145mW, 相关指标

已经与成熟的掺铒光纤放大器匹敌，达到实用标准。

2 理论框架与关键技术原理

2.1 掺铒光波导的放大逻辑

关于 EDWA 工作机制，可借助“光信号储能装置”模型予以说明。

第一步：能量注入过程。采用 980nm 或 1480nm 波段的光源作为能量供给装置具有显著优势。第二步：高能量状态的维持由铒离子的亚稳态 $^4I_{13/2}$ 实现。第三步：通信光信号的增强通过亚稳态积聚的大量铒离子的能量释放实现。

2.2 芯片级集成的关键设计

2.2.1 材料选择

第一类是无机基质材料，比如磷酸盐玻璃、氧化铝薄膜、铌酸锂薄膜等。

第二类是聚合物材料，比如 SU-8 聚合物。这类材料的优势正好和玻璃互补，非常适合可穿戴设备的柔性基板，可以通过光刻工艺批量生产。

第三类是纳米材料，NaErYF 纳米晶可作为典型实例。粒径分布范围介于 5 至 20 纳米之间的此类材料（相较于人类头发直径缩小达 1000 倍），能够实现于玻璃或聚合物基质中的均匀分散状态。

2.2.2 光通道优化：设计“高效光跑道”

通信光在芯片中传输时，需要一条“跑道”（波导），这条跑道的设计直接影响信号损耗。我们通过优化宽度、厚度和刻蚀深度等因素，以实现单模传输，并最大化模场与掺杂区域的重叠积分。

2.2.3 供电简化：让“充电器”更小巧

EDWA 需要泵浦光来给铒离子供能，我们提出了两种更简单的供电方式：

一是顶部垂直泵浦，用 LED 作为泵浦源，直接从芯片顶部照射。这种方式不需要光纤，泵浦源可以和芯片集成在一起，体积缩小 70%。二是双向泵浦，从芯片的两端同时接入泵浦光。这种方式能让铒离子在波导中均匀受激，避免“一端能量多、一端能量少”的问题，增益稳定性有大幅提升。

3 创新点与技术突破

3.1 设计与制备低损耗波导，延长铒离子有效增益长度

高浓度铒离子的“扎堆失效”（浓度猝灭）是行业公认的难题——当铒离子浓度超过临界浓度时，相邻铒离子会通过显著的“能量交叉弛豫”互相传递能量，导致给通信光补能的效率下降 50% 以上。我们通过两种材料设计，期望可以解决这个问题。

3.1.1 纳米晶核壳结构

第一步，制备“铒离子核”。采用高温热分解法，在 180℃ 的油浴中，将 $Er(NO_3)_3$ 、 $Y(NO_3)_3$ 、 $Yb(NO_3)_3$ 等原料溶解在油酸和十八烯中，反应 2 小时，形成 $NaErYF_4$ 纳米

晶核。

第二步， $NaYF$ 壳层被用以包覆纳米晶核。厚度设定于 2-6nm 范围内，该惰性材料层得以成功构建。与铒离子间的反应不发生，由 $NaYF$ 材料本身的化学惰性所决定；折射率数值约为 1.5，与晶核相匹配，光的传输过程因此不受干扰。

3.1.2 辅助离子掺杂

除了核壳结构，我们还设想在纳米晶中加入少量铈离子（ Ce^{3+} ），作为“能量吸收剂”，进一步减少铒离子的能量浪费。而铈离子能吸收铒离子的多余能量，让铒离子快速回到“稳定激发态”（即亚稳态 $^4I_{13/2}$ ），从而把能量更多地传给通信光。通过改变铈离子浓度，可以优化铒离子在 S 波段（1480nm）的荧光效率，提升放大器增益性能，进而让通信带宽拓展 30%，满足 5G 的高速传输需求。

3.2 EDWA 多领域适用性提升，打破设备单一定势

实际应用背景显示，不同行业对于 EDWA 装置的期盼不同：像通讯卫星方向往往是对信号输出要求猛增、能撑住十分极端复杂环境；日常穿戴的小型智能仪器则又看重体积不能太大，同时低功耗属性备受青睐；数据处理则提出多通路信息、运行持久稳定的愿景。

3.2.1 少模型波通路工程：保障各项光格式“均衡扩充”

在数据处理场景中，数据机房越来越依赖完善的大规模传输，为了提升传输容量，会采用“模分复用技术”，全在同一根光波导传输线中共存。

针对“少模”波导光放大器我们专门进行了特别设计。主要是优化泵浦方式，并且根据极其细致的铒元素离子分布过程进行优化调整，这样，多条光路路线最后得到等量补给，各项信号得以甚至程度提振。

3.2.2 晶圆级集成结构：让 EDWA “能批量生产”

第一步，进行晶圆基层材料的初步制备，选择直径为 6 英寸的硅晶圆。第二步，光刻波导图案。在氮硅化膜层之上覆上一层光刻聚合胶，通过掩模工艺将规范化的矩形图形转印到该层面。第三步，离子注入铒离子。采用离子束引注机械设备，将特定离子的粒流精确送进入波导内部，有筛选性地控制对应渗透层深度。第四步，对其余元件实现综合集成。于同一晶圆之内与上述线条共同实施波分复用器结构，并嵌套光传播切换开关，用于动态方式调控通信路径去向，各核心模块之间通过缜密金属走线串联，由此达到光学单芯片全部机能完整统一。

4 技术应用与系统适配性分析

4.1 卫星通信：强信号、抗极端环境的“太空光放大器”

卫星通信场景需求是高增益特性与强功率输出，以及极端环境耐受性，此乃卫星通信对 EDWA 技术之核心诉求。体积小型化条件下实现信号高效放大，真空环境、温度剧变及辐射干扰等太空特殊因素均需克服。为此，我们提出了基

于氮化硅基 EDWA 的解决方案，预计性能指标及所需验证数据详述如下：

4.1.1 材料筛选与结构改良

材料：选择 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3$ 玻璃体系作为铒离子掺杂基质。热膨胀系数低至 $5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 之特性得以体现，-40°C 至 85°C 温域内结构形变量控制在 0.1 微米以下，波导断裂风险由此消除。辐射耐受性方面，100kGy 剂量伽马射线辐照后增益衰减仅 5%，满足卫星器件长周期运行要求。

结构：采用双通道波导构型，同一衬底表面蚀刻两条平行波导通道。单条波导截面尺寸 $5 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ ，通道间距 $10 \mu\text{m}$ 设置合理。双路信号同步放大机制使传输容量倍增得以实现。泵浦光引入方式优化为双向耦合设计，980nm 激光二极管从器件两端同时注入泵浦光能流。

4.1.2 实验测试方案与预计性能

设想基于实验室搭建的“太空环境模拟舱”，模拟 -40°C -85°C 的温差、 10^{-5}Pa 的真空间度和 100kGy 的伽马辐射，对 EDWA 进行了长时间连续测试。

增益性能：在中等泵浦功率条件下 ($\sim 200\text{mW}$)，单路波导的增益值可达 30dB (相当于信号强度被提升了 1000 倍量级)，放大功率 $>100\text{mW}$ 。

温度稳定性：从在 -40°C 的极寒环境，到在 85°C 高温条件，研究波导放大器的增益变化，实现增益波动幅度 $<3\text{dB}$ 。

辐射稳定性：研究经过 100kGy 剂量的伽马射线辐照后波导放大器的性能衰减率，以及辐照终止后放大器的性能恢复率。

4.2 可穿戴设备：小体积、低功耗的“柔性光放大器”

“柔性光放大器”概念的小型化、低功耗特性得到突显在可穿戴设备应用领域中，EDWA 器件的关键性需求表现为体积微型化、功耗极低化以及柔性适配特性三个方面。首要考虑的是器件尺寸需控制在微小范围内，以避免佩戴时的舒适度问题；其次要求能耗水平足够低下，不影响设备的续航能力表现；最后必须能够实现与柔性基底的良好贴合。基于上述需求点，“聚合物基 EDWA”的设计方案被提出，其具体技术指标及实验验证数据如下：

4.2.1 方案设计：选对材料 + 简化供电

材料：SU-8 型聚合物被选作主要载体材料，该物质展现出优异的柔韧性能。通过弯曲测试验证可知 (将 EDWA 器件弯曲至 5mm 半径条件下进行 1000 次循环测试)，其传输损耗增量仅为 $0.5\text{dB}/\text{cm}$ 量级。折射率可调特性 (1.5-1.6 范围) 同样具备，这使得与聚酰亚胺等柔性基底 (折射率 1.55 典型值) 的光学匹配成为可能，界面反射损耗由此显著降低。

供电：405nm 波段 LED 光源作为泵浦源被采用，采取顶部垂直泵浦方式。该泵浦源的封装尺寸仅 0.1 立方厘米量级，能够直接集成于 EDWA 器件相邻位置而无需光纤耦合组件。实例表明 LED 的功耗指标达 1.7mW 水平，相较于传

统 LD 泵浦方案 (200mW 典型值) 实现了 99% 的能耗降低效果。

4.2.2 预计成本与量产：适合消费级产品

聚合物基质 EDWA 的制备成本呈现明显优势：SU-8 聚合物原料价格为每克 2 美元单位；纳米晶材料成本控制在每克 5 美元范围；6 英寸规格晶圆可实现 2000 个 EDWA 器件的制备规模。由此可见单个器件的综合成本约为 50 美元量级，相比传统 EDFA 设备 (1000 美元 / 台) 具有 95% 的成本缩减幅度。这一经济性特征使其在消费级可穿戴产品的大规模生产应用中展现出显著优势。

5 性能分析与未来展望

随着光通信技术的发展，EDWA 的应用场景还将不断拓展，我们可以从三个方向继续研究：

5.1 动态可调谐增益：让 EDWA “能按需放大”

我们计划在 EDWA 中加入“微加热器” (体积仅 0.01cm^3)，通过改变温度来调整铒离子的能级分布，从而改变增益——温度每升高 10°C，增益可调整 1dB。

5.2 全片上集成：让 EDWA “不用外接设备”

当前阶段，EDWA 器件化进程中仍存在外部泵浦源与电源模块的依赖性问题，致使整体结构未能达到理想的微型化程度。对此提出了一种“全片上集成”方案：将 LED 型泵浦源、微型电池供电单元与 EDWA 功能单元共同集成于单一芯片基底之上。

5.3 跨领域应用：从通信到传感、量子技术

光传感：环境监测系统中微弱光信号的增强成为可能。以污染物荧光检测为例，传统传感器的检测下限为 1mg/L 浓度水平。引入 EDWA 放大模块后，检测灵敏度可提升一个数量级至 0.1mg/L 浓度水平。

量子通信：量子通信领域对单光子级别信号的放大提出特殊需求。常规 EDFA 器件因噪声干扰问题会导致量子态退相干现象发生。针对此问题，“低噪声 EDWA”的开发正在进行中。通过铒离子掺杂浓度的精确调控结合泵浦方式的优化改进，噪声系数可控制在 3dB 阈值之下。实验室阶段已取得 1.5dB 噪声系数的突破性进展。

参考文献

- [1] 王敬.双波段双极化共孔径微带天线阵研究，《哈尔滨工程大学(硕士)》，2017年。
- [2] 徐乔笙.基于Zigbee的密集型母线槽温升及振动无线监测研究与实现，《西华大学(硕士)》，2019年
- [3] 王双双.基于高铒浓度纳米晶的C波段聚合物光波导放大器研究 [D].吉林大学,2025.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2025.004551.
- [4] 李俊.掺铒纳米晶尺寸对聚合物基光波导放大器增益的影响[D].吉林大学,2023.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2023.002484.
- [5] 孙潼鹤.基于铒镱共掺氟化物纳米晶的 $1.53 \mu\text{m}$ 和 $0.53 \mu\text{m}$ 聚合物光波导放大器研究[D].吉林大学,2022.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2022.001238.

Design and Implementation of Real-time Control Speech Recognition System Based on Whisper

Peng Zhao Bin Long Weihua Gao

Chongqing Civil Aviation Air Traffic Control Bureau, Chongqing, 401120, China

Abstract

This paper presents a real-time speech recognition system based on the OpenAI Whisper model. The system innovatively adopts a multi-threaded producer-consumer architecture, receiving audio streams from voice recorders via the UDP protocol, converting them into WAV format files, and performing real-time recognition. For practical applications, the system achieves improved recognition accuracy through GPU-accelerated optimization and the use of a fine-tuned Whisper-small model, while delivering end-to-end processing latency below 1 second. This provides a lightweight, scalable engineering solution for aviation air traffic control's speech-to-text services.

Keywords

real-time speech recognition; Whisper model; UDP audio stream; multithreading

基于 Whisper 的实时管制语音识别系统设计与实现

赵鹏 龙滨 高卫华

民航重庆空管分局, 中国 · 重庆 401120

摘要

本文提出一种基于OpenAI Whisper模型的实时语音识别系统。该系统创新性地采用多线程生产者-消费者架构，通过UDP协议接收语音记录仪的监听语音流，转存为WAV格式语音文件并实时识别。针对实际应用场景，通过GPU加速优化及引入微调后的Whisper-small模型有效提高了识别准确率，同时实现了端到端延迟小于1秒的实时处理性能，为航空管制语音转文字服务提供了一种轻量级、可扩展的工程解决方案。

关键词

实时语音识别；Whisper模型；UDP音频流；多线程

1 引言

随着全球化航空运输业的快速发展，空中交通管制（Air Traffic Control, ATC）面临着日益增长的航班流量压力与安全监管挑战。国际民航组织（ICAO）数据显示，全球日均航班量已超过 12 万架次，管制员每小时需处理 200-300 条语音指令。传统的人工监听与纸质记录方式不仅效率低下，且难以实现指令回溯与风险预警，已成为智慧空管建设的瓶颈环节。

自动语音识别（Automatic Speech Recognition, ASR）技术的成熟为这一难题提供了技术路径。近年来，深度学习驱动的端到端 ASR 系统在准确率和鲁棒性方面取得了突破性进展。特别是 OpenAI 于 2022 年发布的 Whisper 模型通过 68 万小时多语言、多场景数据的弱监督学习，展现出卓

越的跨领域泛化能力与噪声鲁棒性^[1]。其多任务架构同时支持语音识别、翻译、语言识别和语音活动检测，为复杂环境下的语音处理提供了统一框架。

传统语音识别系统多依赖于云端处理，存在延迟高、泄密风险、网络依赖等问题，近年来，随着边缘计算和轻量化模型的发展，离线、本地化语音识别解决方案逐渐成为研究热点。

本文针对民航空管单位对管制语音实时转写需求，设计并实现了一种基于本地微调 Whisper-small 模型的实时管制语音识别系统。主要贡献包括：“（1）提出了适配工业音频流的‘缓冲 - 断句 - 批处理’三级实时化架构；（2）设计并实现了基于生产者 - 消费者模式与 UDP 超时断句的流式处理管线；（3）通过领域微调与 GPU 推理优化，显著提升了专业场景识别准确率与效率；（4）构建了完整的原型系统，验证了方案可行性。”

2 研究现状与相关工作

2.1 Whisper 模型的架构特性与挑战：Whisper 模型采用

【作者简介】赵鹏（1976-），男，中国重庆人，硕士，高级工程师，从事空中交通管理通信、导航、监视研究。

编码器 - 解码器 Transformer 结构, 支持 99 种语言的语音识别与翻译任务, 其大规模弱监督训练策略使其在嘈杂环境下仍能保持稳定性能^[2]。但现有研究主要集中于领域自适应的 fine-tuning 方法, 在实时性处理方面, 尽管已有 whisperlive 等开源项目实现了流式推理, 但此类方案在特定领域 (如管制语音识别) 的实测中表现仍不理想, 普遍存在话语边界检测精度不足与上下文语义连贯性缺失等问题。

2.2 实时语音识别的技术演进

传统实时 ASR 系统长期依赖 Kaldi、WeNet 等框架, 采用 CTC/Attention 混合架构实现流式解码^[3]。近期的一些研究虽探索了流式 Transformer 与 RNN-T 模型的低延迟优化, 但其准确率与 Whisper 的大规模预训练模型仍存在显著差距^{[4][5]}。本次工作旨在提供一种 Whisper 模型在实时管制语音数据流处理方面的工程实践方法。

3 系统硬件架构

系统采用分层分布式架构 (图 1), 由语音记录仪、记录仪控制终端及语音识别服务器构成。其中, 话音记录仪用于将管制席位内话终端录音端口输出模拟话音转换为 UDP 音频流; 记录仪控制终端用于控制记录仪, 将各路监听话音的 UDP 音频流分配到指定服务器 IP 及 port; 语音识别服务器用于接收 UDP 音频流并缓存 WAV 文件、实时识别并存储识别记录。系统可以通过调整记录仪和语音识别服务器数量, 灵活适配系统规模。

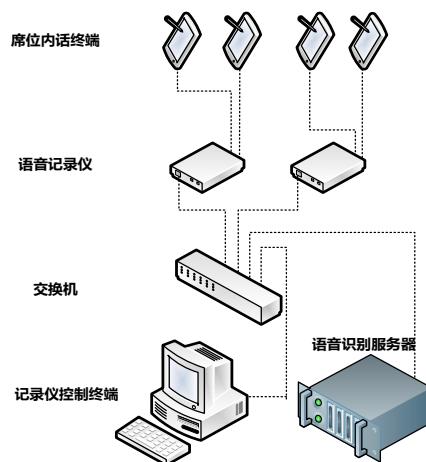


图 1 系统硬件架构

3.1 语音记录仪

系统采用现有货架产品铭道 MDL3002 电话录音仪实现话音采集。此电话录音仪支持常用录音功能, 配置灵活, 可通过参数调整与现场应用场景进行适配; 同时提供了二次开发接口, 通过录音通道实时监听输出与我方平台实现对接。

3.2 语音识别服务器

硬件: Intel i7-12700/16GB, NVIDIA RTX 3090/24GB;

软件: PyTorch 2.0, CUDA 11.8, Librosa 0.10; 模型: whisper-small (fine-tuned on 1290 steps)

4 系统软件架构实现

Whisper 模型的设计哲学基于“大规模离线批处理”, 其技术栈 (PyTorch+Transformers) 与实时流处理存在本质冲突:

Whisper 原生特性	实时处理需求	工程化挑战
30 秒固定窗口	连续语音流	需动态分段与重叠处理
文件 / 内存全量加载	边接收边处理	需环形缓冲与流式解码
同步推理模式	毫秒级响应	需异步化与批处理优化
通用词汇表	航空专业术语	需领域适配与后处理校正

为解决上述矛盾, 本文提出“缓冲 - 断句 - 批处理”三级架构, 在保持 Whisper 模型精度的前提下实现实时性。Whisper 模型原生不支持 UDP 语音流直接输入, 其设计架构基于文件或内存中的完整音频片段处理, 要求输入数据满足以下前提: ①完整音频数据: 模型需一次性接收完整音频片段 (最长 30 秒) 才能生成梅尔频谱图; ②预处理要求: 音频必须经过 whisper/audio.py 模块的预处理, 包括重采样、归一化、FFT 变换等; ③无网络协议感知: Whisper 库未内置任何网络套接字或流式协议处理能力。

基于 OpenAI Whisper 官方实现和社区实践, Whisper 模型对输入音频的核心要求是 16kHz 采样率、单声道、16-bit PCM、最大时长 30 秒。铭道 MDL3002 录音仪通道参数设置为话音激活时, 当录音信号电平超过设定值, 监听语音流将会以 UDP 模式输出 alaw 压缩数据。UDP 音频流作为无连接、数据包无序、实时传输的协议, 与 Whisper 的批处理架构存在根本性差异。系统设计为缓存 UDP 数据流, 并以 UDP 流中断超时为触发条件, 将缓存 UDP 音频流数据经过格式转换、重采样处理并封装为 WAV 文件; 由 whisper 模型对 WAV 文件进行识别。

4.1 整体框架

系统软件核心采用如图 2 所示的生产者 - 消费者多线程模型, 以解耦音频接收与识别推理两个关键环节, 并通过共享队列实现高效、线程安全的异步通信。包含两个核心线程: ①音频接收线程: 负责 UDP 数据包解析、格式转换与缓存; ②语音识别线程: 负责模型加载、音频特征提取与文本生成推理。通过 queue.Queue 实现线程间通信, 确保数据处理的无锁化与异步性。

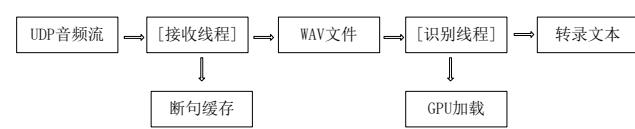


图 2 系统模型

4.2 音频接收线程

4.2.1 UDP 协议处理

线程监听特定端口 (如 8001), 采用无连接传输降低

延迟。每包最大 1024 字节, 包含 12 字节头部与 alaw 压缩语音数据。通过 `socket.settimeout(0.5s)` 实现断句检测: 当接收超时时, 将缓存数据判定为完整语句并触发存储。

4.2.2 音频格式转换

输入音频为 8kHz 采样率的 A-law 编码, 需转换为 16kHz PCM 格式以满足 Whisper 输入要求。使用 `audioop.alaw2lin()` 实现线性转换, `audioop.ratecv()` 实现重采样。相关转换在接收线程中实时完成, 计算开销可忽略。

4.2.3 缓存策略

采用 `bytearray` 动态缓存, 当满足以下条件时触发文件写入: ①超时条件: 130ms 无新数据包, 实测 130ms 对于管制员和飞行员分别的对话能较好地分离出来, 但仍存在少量输出混合语音的情况; ②数据量阈值: 最小语音段不小于 0.5 秒。

4.2.4 信息通报

接收模块生成 wav 文件的命名格式为: {端口号}_{日期}_{时间}.wav; 文件保存路径以端口号、日期进行区分, 分类保存到“./{端口号}/{日期}/”目录下。wav 文件生成后将文件名放入语音接收队列。系统可根据语音服务器识别梳理能力, 调整音频接收线程数量, 通过多路语音流同步接收, 异步识别架构, 充分利用服务器算力资源。

4.3 语音识别线程

4.3.1 模型加载优化

使用微调后的 Whisper-small 模型有效提高识别准确率。

```
model = WhisperForConditionalGeneration.from_pretrained(checkpoint_path).to(device)
```

关键优化: 模型常驻 GPU 内存, 避免重复加载。首次初始化耗时约 3 秒, 后续推理复用模型实例。

4.3.2 特征提取与推理

音频通过 Librosa 加载并重采样至 16kHz, Mel 频谱特征提取由 Processor 自动完成:

```
inputs = processor(audio, return_tensors="pt", sampling_rate=16000)
inputs = {k: v.to(device) for k, v in inputs.items()}
with torch.no_grad():
```

```
predicted_ids = model.generate(inputs[“input_features”])
```

使用 `torch.no_grad()` 禁用梯度计算, 显存占用降低 40%。

4.3.3 异步处理机制

通过队列通信实现多线程协作。线程循环读取接收队列, 根据获得 wav 文件名, 以事件驱动, 实现 whisper 模型对 wav 文件的语音识别。识别结果以如下 JSON 格式进行处理, 并通过 websocket 将识别结果同步给后端服务器, 格式如下: {“类型”: “识别”, “音频通道号”: UDP_PORT, “数据包编号”: _data_number, “数据包文件”: _wave_path, “识别文字”: text, “角色”: “管制员 | 飞行员 | 混合”}

4.4 用户角色分类和文本切割

管制语音音频源来自内话席位地空录音接口, 其输出信号叠加了管制员与飞行员的地空通话内容。实测表明, 经数据流转换生成的 WAV 文件中, 大部分时段可通过能量检测实现话音分离, 仅少数情况下因通话间隔小, 导致通话无法切割、音频混杂。由于管制员和飞行员通话有一定规则, 为方便管制员区分角色, 我们依据《空中交通无线电通话用语》(MH/T4014-2003) 设计了一套通话模板。通过模板进行匹配进行角色识别。管制员通话示例: <航班号> {<管制区>} {你好}{继续}[上|上升|下|下降]到{反向}{高度|标准气压|标压}<数字组合>{保持}。飞行员通话示例: [增|增加|减|减小]速{度}{度}<数字组合>{保持}<航班号>。对于混合通话, 我们采用顺序比对模板方式, 将通话文本角色标记为管制员或飞行员。对于无法匹配角色的, 标记为混合。

4.5 语音后端处理与前端显示

项目后端采用 node.js 设计开发, 在收到 websocket 信息后, 将 websocket 数据保存到数据库, 同时通过 websocket 将 json 数据实时发送到前端页面。前端采用 node.js+vue3 进行设计, 根据用户登录的角色(如区调、进近、塔台等), 实施分角色显示管制/飞行语音文本, 并可回放相应音频。



图 3 前端界面

5 结论与展望

5.1 结论

本研究针对民航空管领域对管制语音实时识别的需求,设计并实现了一套基于 Whisper-small 模型的本地化实时管制语音识别系统。通过深入分析 Whisper 模型批量离线处理的设计特性与实时流处理之间的矛盾,创新性地提出了“生产者 - 消费者多线程架构”与“UDP 流缓冲 - 超时断句 - 异步识别 - 角色分类 - 数据推送”的核心工程解决方案。所实现的系统能够稳定接收多路语音流,完成实时转写,并以结构化 JSON 格式输出结果,推送到前端以类似微信气泡方式进行分角色显示。

5.2 不足与展望

尽管本研究取得了预期成果,但受限于时间与条件,仍存在若干可改进之处,未来工作可从以下几个方向展开:更换语音识别模型:因硬件条件限制,本次采用 whisper-small 模型,后续将采用 whisper-large-V3-turbo 或 kimi audio 等模型进行对比测试,提升通用对话识别能力。

领域自适应深化:语料微调数据规模有限。目前我们搜集现场 850 条管制语音识别数据,通过训练,将准确率从 0.3 提升到 0.7。未来将收集更大规模、涵盖更多口音、噪声环境及特情通话的管制语音语料进行持续训练,逐步提升专

业词汇识别准确率。说话人分离与角色标注:当前通过配置通话规则模板,能够分离和匹配多数角色文本,但通过规则方式无法匹配通话不规范和各种复杂语境的情况,未来需研究通过话音内容和前后上下文等手段,通过训练自动区分管制员与飞行员角色。大规模部署与运维:需设计完善的系统监控、负载均衡与故障转移机制,以支持在大型空管中心多席位、上百路语音流的并发处理。

参考文献

- [1] Radford A, et al. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision[C]. ICML, 2023.
- [2] Chen, Y., et al. (2025). Generative AI for Character Animation: A Comprehensive Survey. arXiv:2504.19056.
- [3] Watanabe, S., et al. (2017). Hybrid CTC/Attention Architecture for End-to-End Speech Recognition. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing.
- [4] Li, B., et al. (2020). Transformer Transducer: One Model Unifying Streaming and Non-Streaming Speech Recognition. arXiv:2010.03192.
- [5] OpenReview. (2025). Dual-Mode ASR: Unify and Improve Streaming ASR with Full-Context Modeling. OpenReview Preprint.