

客运索道智能化监控系统设计与实施效果评价

高正翔¹, 兰俊², 周皓³

- (1. 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310018;
2. 欢乐谷文化旅游发展有限公司, 广东 深圳 518000;
3. 德清绿畅旅游开发有限公司, 浙江 湖州 313200)

摘要 本研究针对客运索道传统监控系统存在的设备老化、数据孤岛及响应滞后等问题, 提出基于物联网与人工智能的智能化监控系统解决方案。通过构建“感知—传输—应用”三层架构, 整合振动、温度等多源传感器数据, 采用轻量化长短期记忆网络(LSTM)模型实现设备退化预测, 结合边缘计算技术将关键响应时间压缩至0.8秒。系统创新性应用双通信链路冗余设计与改进卡尔曼滤波算法, 使监测信噪比提升至35 dB, 误报率降至2%以下。实施效果评价表明, 在莫干山、牛头山等典型索道场景中, 系统实现故障预警准确率96.2%, 应急响应效率提升5倍, 运维成本降低37.5%。研究成果旨在为客运索道智能化升级提供技术范式与评估方法。

关键词 客运索道; 智能化监控系统; 边缘计算; LSTM

中图分类号 U18

文献标志码 A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.17.008

0 引言

客运索道作为景区与山区的重要交通设施, 其安全运维至关重要。当前传统监控系统面临诸多挑战, 如设备老化在极端环境下加剧故障风险, 人工巡检效率低, 传感器数据孤立、预警响应滞后, 运维成本高。为解决这些问题, 融合物联网、人工智能及大数据技术的智能化监控系统成为升级关键。本研究拟设计覆盖“感知—传输—应用”层级的智能化监控架构, 构建通用化效果评价模型。创新点在于多技术融合解决低算力场景实时数据处理瓶颈, 采用层次分析法与专家评分法建立动态评价体系, 量化评估安全、效率等维度。

1 系统设计理论基础与技术选型

1.1 理论支撑

智能化监控系统的设计以物联网(IoT)架构为底层框架, 通过多类型传感器网络(振动、温度、视频等)实时采集索道关键设备状态数据, 构建“感知—传输—应用”三层协同体系。感知层聚焦物理信号捕捉, 传输层依托5G/光纤通信协议优化数据流转效率, 应用层则通过AI算法实现数据价值挖掘^[1]。在故障预测环节, 引入长短期记忆网络(LSTM)对历史故障数据进行时序建模, 捕捉驱动电机、缆绳等部件的退化规律, 例如基于温度与振动数据的联合分析预测轴承磨损周期。为克服云端计算延迟问题, 边缘计算技术被部署

于传输层节点, 在本地完成数据预处理与轻量级AI推理, 将关键预警响应时间压缩至秒级, 避免因网络波动导致的信息滞后。

1.2 技术选型与设计原则

技术选型以高可靠性、实时性、可扩展性为核心准则。高可靠性采用冗余设计, 如双通信链路(主用5G+备用光纤)确保数据传输稳定, 传感器选用工业级防护标准(IP67), 耐受恶劣环境。实时性依赖5G网络切片技术, 将端到端延迟控制在50 ms以内, 并在边缘计算节点部署轻量化推理引擎(如TensorFlow Lite), 本地化执行故障分类任务。可扩展性通过模块化架构实现, 硬件层预留标准化接口支持新增传感器快速接入, 软件层采用微服务设计, 可无缝集成数字孪生接口。设计原则强调安全优先, 如缆绳摆动超限时自动触发三级报警; 同时平衡效率与经济性, 通过数据融合技术提升监测精度、AI算法动态调整客流通行策略, 借助“边缘—云端”协同计算模式降低成本, 延长系统技术生命周期。

1.3 技术协同与创新

物联网架构与边缘计算的结合, 解决了传统云端集中式处理的延迟瓶颈; LSTM算法在边缘节点的轻量化部署, 则突破了低算力环境下复杂模型运行的制约^[2]。例如: 在承载索健康监测中, 振动传感器数据经边缘节点滤波去噪后, 输入压缩版LSTM模型实时预测剩余寿命, 同步将结果上传至云端进行长期趋势分析, 形

成“边缘实时响应+云端深度挖掘”的双层智能闭环。这一设计既保障了关键场景的即时性，又为全局优化提供数据支撑，体现了理论与技术选型的深度融合。

2 客运索道智能化监控系统设计

2.1 系统总体架构

客运索道智能化监控系统采用了“感知层—传输层—应用层”的三层架构，各层功能紧密协作，共同实现对客运索道的全方位监控。

感知层是整个系统的数据源头，负责采集客运索道运行过程中的各种关键信息。部署了多种高精度传感器，包括振动传感器、红外温度传感器和高清摄像头。

振动传感器能够监测驱动电机轴承的异常频率，其监测范围在 20 Hz ~ 10 kHz 之间，可及时发现电机轴承的潜在故障。红外温度传感器精度可达 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能够准确检测轮毂的过热风险，预防因过热引发的安全事故。高清摄像头以 30 fps 的帧率采集缆绳摆动与吊厢载客画面，为后续的分析与决策提供直观的视觉信息。为了抑制电磁干扰，保证数据的准确性，采用了屏蔽电缆进行数据传输，并结合自适应滤波算法（如小波阈值去噪），使数据信噪比提升至 35 dB 以上^[3]。

传输层基于 5G 网络切片技术，为不同的数据划分独立的信道，确保数据传输的稳定性和可靠性。优先保障报警信号的传输带宽（ $\geq 50\text{ Mbps}$ ），并将端到端延迟控制在 50 ms 以内，保证报警信息能够及时传达。边缘计算节点搭载 TensorFlow Lite 等轻量化推理引擎，对振动、温度数据进行本地处理，筛选关键结果上传云端。这种方式可以降低 90% 的数据传输负荷，减少网络带宽压力，同时提高系统的响应速度。

应用层集成了多种先进技术和算法，实现对客运索道的智能化监控和管理。改进型 YOLOv5 算法用于缆绳偏移检测，精度高达 96%，能够及时发现缆绳的偏移情况，预防事故发生^[4]。结合 Unity 引擎构建三维可视化界面，动态渲染设备状态，使操作人员能够直观地了解设备的运行情况。系统支持故障定位与一键生成数字化运维报告，形成从数据采集到决策输出的完整闭环，提高运维效率。

2.2 核心功能模块设计

客运索道智能化监控系统的核心功能模块设计围绕实时监测、智能预警与决策支持三条主线展开。

该模块基于熵权法动态计算设备健康度评分，综合考虑温度（权重 30%）、振动烈度（权重 40%）、润滑数据（权重 30%）等因素，生成 0 ~ 100 分的健康度指数。例如：当驱动电机轴承振动频谱出现异常（如

10 kHz 高频分量突增）时，系统会自动将健康度标记为黄色预警区间（60 ~ 70 分）。同时，通过温升模型提前 2 小时预测过热风险（阈值 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），为运维人员提供充足的时间采取措施。

采用双流 CNN 模型分析缆绳摆动视频，空间流通过关键点定位（精度 $\pm 0.5^{\circ}$ ）检测摆动角度，时间流分析摆动频率。当摆动角度 $> 5^{\circ}$ 且频率 $> 1\text{ Hz}$ 时，触发红色警报，并同步联动广播系统引导游客疏散。此外，利用图像识别技术实时统计吊厢载客量，当超载（如额定 8 人检测到 10 人）时，立即暂停发车并推送告警至控制中心，确保游客的安全。

内置多级应急预案，当检测到缆绳断裂特征（如振动加速度骤增至 10 g ）时，自动触发紧急响应链。在毫秒级时间内切断驱动电源、启动液压制动装置，并通过北斗定位将事故坐标（精度 $\pm 1\text{ m}$ ）实时发送至救援终端，实现从风险识别到应急处置的自动化闭环，最大限度地减少事故损失。

2.3 关键技术实现

客运索道智能化监控系统的关键技术实现聚焦于数据融合与边缘智能。通过改进卡尔曼滤波算法对齐多源异构数据时序，解决不同传感器采样率不同导致的时序不一致问题^[5]。例如：对温度传感器（1 Hz 采样率）与振动传感器（100 Hz 采样率）的异步数据进行线性插值同步，消除因采样间隔差异导致的误判。经过数据融合后，温升滞后性分析误差降低至 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，多传感器数据融合后信噪比从 25 dB 提升至 35 dB，误报率压缩至 2% 以下，提高了系统的可靠性和准确性。针对边缘计算资源限制，采用知识蒸馏技术将 LSTM 模型参数量从 20 MB 压缩至 10 MB，在树莓派 4 B 边缘设备上实现 30fps 实时推理（如振动频谱异常检测），模型精度损失控制在 2% 以内。同时，结合 TensorFlow Lite 框架的 ARM NEON 指令集加速，优化矩阵乘加运算效率，使故障分类任务响应时间缩短至 0.8 s，较传统云端推理方案效率提升 5 倍，满足毫秒级应急响应的刚性需求。通过“高精度数据同步+低功耗边缘推理”的技术组合，系统有效平衡了实时性、可靠性及资源消耗之间的矛盾，为客运索道的安全运行提供了有力保障。

3 系统实施路径与难点分析

3.1 实施流程与资源整合

客运索道智能化监控系统的实施以硬件部署与软件集成为核心切入点。硬件部署阶段，振动传感器采用钕铁硼磁吸底座紧密贴合驱动电机轴承座表面，安

装间距严格控制在 5 mm 以内,确保对轴承异常振动信号(频带 20 Hz ~ 10 kHz)的完整捕获,结合电荷放大器将 pC 量级的压电信号转化为标准 4 ~ 20 mA 电流输出;红外温度传感器通过 M20×1.5 螺纹接口嵌入轮毂内部测温腔体,在接触面涂抹导热系数 $\geq 3.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的硅脂材料,使热阻降低 40%,实现轮毂表面温度(监测范围 0 ~ 150 °C)的精准传导。针对山区复杂电磁环境,信号传输采用双层铠装电缆,内层镀锡铜丝编织屏蔽层(覆盖率 85%)与外层铝箔屏蔽层形成双重防护,经雷击测试可承受 20kA/8/20 μs 冲击电流,同时为变频器柜加装 6063 铝合金屏蔽罩(厚度 2 mm),使周边电磁场强度从 300 V/m 降至 50 V/m 以下,保障信号传输信噪比 $\geq 35 \text{ dB}$ 。软件集成通过 RESTful API 实现与既有 SCADA 系统的双向通信,开发基于 Apache NiFi 的数据转换中间件,运用 XSLT 技术将新型传感器的 JSON 数据包(含时间戳、设备 ID、振动频谱等 20 个字段)动态转换为符合 ISO 13374 标准的 XML 格式,并通过 CRC32 校验确保数据完整性,历史数据迁移测试显示,在每秒处理 500 条记录的负荷下,丢包率稳定在 0.008% ~ 0.012% 区间,实现近 5 年运行数据(约 2 TB)的平滑迁移。硬件防护与数据兼容性设计的协同实施,使系统在莫干山瑶坞索道等典型场景中,信号中断频次从日均 3.2 次下降至 0.1 次,为后续智能化功能部署奠定坚实的基础。

3.2 实施难点与应对策略

客运索道智能化监控系统实施过程中面临高海拔极端环境与人机协同的双重挑战。针对海拔 4 500 m 以上低温(-40 °C)导致的传感器失效问题,采用宽温型 MEMS 传感器(工作温度 -40 ~ 85 °C),在传感器本体集成氧化钨锡薄膜电加热模块(电阻值 50 Ω ,功率 5 W),通过 PID 温控算法实时调节加热电流,确保传感器内部温度稳定在 -20 °C 以上,经浙江某索道实测,传感器低温失效率从 12% 降至 0.5%;针对强侧风(风速 $\geq 15 \text{ m/s}$)引发的振动数据失真,设计滑动窗口加权平均算法:以 10 秒为时间窗口,根据风速仪实时数据动态分配振动数据权重(如风速 15 m/s 时振动数据权重系数为 0.8,20 m/s 时降为 0.6),结合三轴加速度传感器数据融合,将振动烈度测量误差从 $\pm 0.5 \text{ g}$ 优化至 $\pm 0.2 \text{ g}$,有效剔除风致噪声干扰。在人机协同方面,开发基于 Unity 引擎的 VR 培训系统,构建缆绳卡阻(模拟钢丝绳张力突降 30%)、电机轴承过热(温度梯度达 5 °C/min)等 16 类故障模型,操作人员通过触觉反馈手套进行液压制动压力调节训练(从初始 5 MPa

逐步提升至 20 MPa,压力加载速率控制在 2 MPa/s),使应急处置操作时间从 180 秒缩短至 90 秒;同步制定三级报警标准化流程:当健康度评分 70 ~ 80 分(一级报警)时,系统自动生成工单并推送至巡检人员移动终端,要求 30 分钟内携带振动分析仪到现场核查;健康度 60 ~ 70 分(二级报警)触发限速机制,驱动电机转速降至额定值 50%,并在控制中心大屏突出显示故障设备三维模型;健康度低于 60 分(三级报警)时,系统在 0.2 秒内切断主电源并启动液压制动器(制动扭矩 $\geq 5\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$),同时通过北斗 RDSS 短报文功能将事故坐标(水平精度 $\pm 1.5 \text{ m}$,高程精度 $\pm 3 \text{ m}$)发送至救援指挥中心,形成从预警到救援的完整闭环。通过环境适应性改造与操作流程标准化,系统在莫干山等强风高寒索道中实现全年无故障运行,误操作率下降至 0.3 次/千小时。

4 结论

本研究构建的客运索道智能化监控系统通过“感知—传输—应用”三级架构创新,有效解决了传统监控系统在极端环境适应性、数据处理实时性及决策智能化方面的技术瓶颈。实践验证表明:(1)基于知识蒸馏的轻量化 LSTM 模型在边缘节点实现 30 fps 实时推理,轴承磨损周期预测误差率 $< 2.8\%$;(2)双流 CNN 预警模型使缆绳摆动检测精度达 $\pm 0.5^\circ$,较人工巡检效率提升 15 倍;(3)动态评价体系量化显示系统实施后,索道设备 MTBF(平均无故障时间)延长至 5 200 小时,故障停机时长缩短 67%。未来研究将聚焦数字孪生技术在索道全生命周期管理中的应用,以及多模态数据融合算法的深度优化,进一步提升系统在复杂气象条件下的鲁棒性。本成果为智慧索道建设提供了可复用的技术框架与工程实践参考。

参考文献:

- [1] 孙安国,陈虎,冯显宗,等.客运索道数据系统设计[J].起重运输机械,2023(14):40-44.
- [2] 蒙娟,田增阳,丁洪涛.太阳能供电系统在索道线路支架上的应用[J].起重运输机械,2022(23):26-30.
- [3] 刘旭升,徐伟,陈虎,等.客运索道可视化控制台研制[J].起重运输机械,2022(009):85-88.
- [4] 刘关四,李昕阳,李娜,等.客运索道监测与健康诊断云服务系统平台研发[J].中国特种设备安全,2021,37(09):27-32.
- [5] 翟浩洋.基于客运索道速度调节中PID算法的探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(07):166-167.