

通信光缆线路智能巡视装置多模块协同设计与关键技术研究

徐文虎 练海晴 顾焕之 方珂翔 黄鹏
国网昌吉供电公司 新疆 昌吉 831100

摘要: 针对传统通信光缆线路巡视人工依赖度高、效率低下、故障响应滞后等痛点, 本文开展智能巡视装置多模块协同设计与关键技术研究。通过梳理光缆运维实际需求, 构建检测、定位、通信、控制多模块协同架构, 完成装置硬件选型与核心模块开发, 重点突破协同控制算法、数据融合处理及故障诊断决策等关键技术。性能测试验证表明, 该装置可实现光缆线路状态精准检测与故障点定位, 巡视效率较人工提升50%以上, 故障识别准确率达94%, 有效弥补传统运维短板。本研究为通信光缆线路智能化运维提供技术支持, 对保障信息传输网络稳定运行具有重要实践意义。

关键词: 通信光缆线路; 智能巡视装置; 多模块协同设计; 关键技术

引言: 通信光缆作为信息传输的核心基础设施, 广泛服务于金融、交通、能源等关键领域, 其运行稳定性直接关乎社会信息安全。传统光缆巡视以人工步巡、车巡为主, 存在作业强度大、覆盖范围有限、恶劣环境适应性差等弊端, 难以匹配当前大规模光缆网络的运维需求。随着物联网、人工智能、卫星定位技术的发展, 智能巡视成为光缆运维升级的核心方向。但现有装置普遍存在模块功能割裂、协同性差、数据处理效率低等问题, 制约应用效果。基于此, 本文聚焦多模块协同设计, 深入研究核心关键技术, 研发高效智能巡视装置, 助力光缆运维智能化转型。

1 通信光缆线路智能巡视装置总体设计

1.1 装置功能需求分析

基于光缆线路运维全流程需求, 装置核心功能需覆盖三大维度: 一是线路状态检测, 需精准识别光缆外皮破损、断纤、接头松动及周边施工干扰、植被遮挡等异常, 支持可见光与红外双模成像, 适配昼夜及雨雾等复杂环境; 二是精准定位, 融合卫星定位与惯性导航, 在隧道、山区等卫星信号遮挡区域保持定位精度, 误差控制在1米内, 实现故障点精准标注; 三是数据交互与协同控制, 具备4G/5G公网与本地无线双重通信能力, 实时上传数据并接收远程指令, 实现各模块动态调度与协同运行; 同时需满足8小时以上续航及IP67级防水防尘要求, 适配户外复杂工况。

1.2 多模块协同架构设计

采用“分层架构+总线协同”设计思路, 构建感知层、传输层、控制层、应用层四级协同架构。感知层由检测模块与定位模块组成, 负责采集线路状态数据与位置信

息, 为后续处理提供数据基础; 传输层即通信模块, 承担各层级数据传输与指令反馈, 采用多协议兼容设计保障传输稳定; 控制层为核心决策单元, 通过控制模块实现各模块时序调度与数据初步处理; 应用层含本地终端与远程运维平台, 实现数据存储、故障预警与报表生成。各模块通过CAN总线与以太网总线交互, 控制模块作为主节点统筹协调, 避免数据冲突, 同时预留扩展接口, 提升架构兼容性^[1]。

1.3 装置硬件设计

硬件设计遵循轻量化、低功耗、高可靠性原则, 采用模块化选型与集成。控制模块选用STM32H743微控制器, 具备高性能内核与丰富外设, 满足多模块协同控制与实时数据处理需求; 检测模块搭载高清工业相机与红外热成像仪, 配套光纤损耗传感器, 实现图像与光纤参数同步采集; 定位模块采用北斗/GPS双模定位与MEMS惯性导航组合, 保障复杂环境定位连续性; 通信模块集成工业级4G/5G与WiFi模块, 实现公网远程传输与本地近距离调试; 电源模块选用20Ah锂电池组, 配备充电管理与太阳能补充电路, 保障长效续航, 关键电路添加屏蔽层提升抗干扰能力。

2 通信光缆线路智能巡视装置关键模块设计与实现

2.1 检测模块设计

采用“图像采集+光纤参数检测”双方案设计, 提升异常识别全面性。图像采集单元通过FPGA实现可见光与红外相机同步触发, 预处理阶段采用中值滤波降噪与直方图均衡化增强图像对比度, 便于目标特征提取; 光纤参数检测单元基于光时域反射(OTDR)原理, 选用高精度传感器, 检测范围0~100km, 损耗精度 $\pm 0.01\text{dB/km}$,

支持多芯光缆分时检测。模块内置自适应算法,可根据线路长度调整检测参数,通过SPI接口与控制模块交互,检测到异常时自动触发高清抓拍与局部放大,为故障识别提供精准数据支撑。

2.2 定位模块设计

采用北斗/GPS双模定位与惯性导航融合设计,解决复杂环境定位难题。定位单元选用UM220-IV N双模模块,支持多系统联合定位,输出经纬度、海拔等信息,更新频率10Hz;惯性导航单元采用MPU9250九轴传感器,采集运动姿态与加速度数据,经卡尔曼滤波平滑处理。设计自适应权重融合算法,卫星信号良好时以卫星定位为主、惯性导航辅助修正,信号遮挡时切换为惯性导航主导,利用历史数据推算位置^[2]。模块通过UART接口上传定位数据,与检测异常数据关联存储,实现故障点精准标注。

2.3 通信模块设计

采用“公网+本地”双链路设计,保障数据传输连续灵活。公网通信选用工业级EC20 4G/5G模块,支持多网络制式,实现数据向远程平台实时上传与指令接收;本地通信选用ESP8266 WiFi模块,用于现场数据导出、设备调试与参数配置。模块内置链路切换机制,实时监测公网质量,信号中断时自动暂存数据,恢复后补传;采用AES加密处理传输数据,防止篡改泄露。通过CAN总线与控制模块连接,控制模块对数据格式标准化处理,保障各模块交互兼容性。

2.4 控制模块设计

采用“主控制器+辅助处理单元”架构,承担模块调度、数据处理核心任务。主控制器选用STM32H743微控制器,统筹各模块时序调度,避免数据冲突,接收并整合各模块数据完成初步分析;辅助处理单元选用FPGA芯片,负责图像快速预处理与并行计算,减轻主控制器负载。内置FreeRTOS操作系统,采用任务优先级调度,故障处理任务优先级最高,确保异常快速响应。具备模块故障自诊断功能,实时监测各模块状态,故障时记录信息并触发声光报警,切换备用模式保障基本巡视功能。

3 多模块协同控制关键技术研究

3.1 协同控制算法设计

设计基于有限状态机(FSM)的协同控制算法,将装置运行划分为待机、初始化、巡视检测、数据传输、故障处理五种状态,通过逻辑规则实现动态调度。待机时各模块低功耗休眠,仅控制模块唤醒;初始化阶段完成模块自检与参数配置;巡视检测阶段按预设路线调度各模块同步采集、传输数据,通过时序同步保障数据时

间戳一致;数据传输阶段优先完成上传与备份;故障处理阶段暂停常规任务,优先定位上传故障信息。引入自适应机制,根据环境与传输质量动态调整参数,提升运行效率。

3.2 数据融合与处理技术

针对多模块数据冗余、含噪问题,采用分层数据融合策略。预处理阶段:图像数据经降噪增强处理,定位数据通过卡尔曼滤波平滑,光纤损耗数据采用滑动平均去噪。底层数据级融合对同类型数据加权融合,权重按可信度动态分配;中层特征级融合提取图像故障特征与光纤异常特征,构建多维度向量;顶层决策级融合结合定位信息,通过模糊综合评价判断线路状态,提升故障识别准确性。处理后数据按标准格式存储,生成巡视报告,为故障诊断提供支撑^[3]。

3.3 故障诊断与决策技术

构建“特征匹配+智能推理”故障诊断体系,先建立故障特征库,提取断纤、外皮破损等典型故障的图像、光纤损耗及环境特征,形成标准化模板。诊断时计算实时融合特征与模板的余弦相似度,匹配度 $\geq 85\%$ 判定故障类型; $< 70\%$ 时启动贝叶斯推理,结合位置环境与历史数据推算故障类型。决策模块根据诊断结果划分故障等级,生成针对性处理建议,紧急故障立即推送运维平台派单维修,一般故障标记跟踪。实现故障“精准识别-等级划分-快速响应”闭环管理。

4 装置性能测试与验证

4.1 测试环境搭建

为全面验证装置的功能与性能,搭建涵盖实验室模拟测试与现场实地测试的双重测试环境。实验室模拟测试环境搭建:构建光缆故障模拟平台,模拟断纤、外皮破损、接头松动等常见故障场景;搭建环境模拟舱,可模拟雨雾、高温、低温等不同气象条件;配置高精度定位校准设备、光功率计、示波器等测试仪器,用于验证定位精度、检测精度与模块通信性能。现场实地测试环境选取某运营商10km长的野外光缆线路,该线路涵盖山区、平原、隧道等多种地形,存在植被遮挡、施工区域等复杂场景,符合实际巡视需求。测试前对装置进行参数初始化配置,预设巡视路线与检测频率,远程运维平台部署数据接收与分析系统,确保测试数据的实时采集与存储。同时安排人工巡视团队同步开展巡视工作,用于对比验证装置的巡视效率与故障识别准确率。

4.2 功能测试

功能测试围绕装置各核心功能展开,验证其是否满足设计需求。一是检测功能测试:在实验室模拟平台中

设置不同故障类型,启动装置进行检测,记录故障识别情况;在实地测试中,重点检测装置对植被遮挡、施工干扰等现场异常的识别能力。测试结果显示,装置可精准识别断纤、外皮破损等故障,对现场施工机械、植被遮挡等异常场景的识别无遗漏。二是定位功能测试:在实验室通过定位校准设备验证定位精度,在实地测试中选取隧道、山区等卫星信号复杂区域,记录定位数据。测试表明,卫星信号良好区域定位误差 $\leq 0.8\text{m}$,隧道内卫星信号遮挡时,惯性导航定位误差 $\leq 2\text{m}$,满足故障定位需求。三是通信功能测试:分别测试公网通信与本地通信的稳定性,模拟公网中断场景验证链路切换功能。结果显示,公网通信数据传输速率 $\geq 5\text{Mbps}$,本地通信距离 $\leq 100\text{m}$,公网中断时可实现数据暂存与恢复上传^[4]。四是协同控制功能测试:验证各模块时序调度与状态转换的准确性,测试表明装置可按预设策略实现各模块协同运行,状态转换响应时间 $\leq 100\text{ms}$ 。

4.3 性能测试

性能测试重点评估装置的巡视效率、续航能力、环境适应性与可靠性。巡视效率测试:在实地10km光缆线路中,分别采用装置巡视与人工巡视,记录完成巡视任务的时间。测试结果显示,装置完成10km线路巡视耗时40分钟,人工巡视耗时100分钟,装置巡视效率较人工提升60%。续航能力测试:在连续巡视模式下,记录装置从满电到电量耗尽的工作时间,测试表明装置单次充电可连续工作8.5小时,满足单日巡视需求;配备太阳能充电板后,可实现全天候连续工作。环境适应性测试:在环境模拟舱中模拟 -20°C 低温、 60°C 高温、85%湿度及雨雾环境,测试装置工作状态。结果显示,装置在各极端环境下均能正常工作,检测精度与通信稳定性无明显下降。可靠性测试:连续运行装置72小时,记录模块故障情况,测试期间装置无模块故障,数据传输成功率达99.8%,具备良好的可靠性。

4.4 测试结果分析与改进

测试结果综合分析表明,该通信光缆线路智能巡视装置的功能与性能基本达到设计要求,可有效提升光缆

巡视效率与故障识别能力,但仍存在部分优化空间。一是在隧道等卫星信号严重遮挡区域,惯性导航定位误差随时间累积会逐渐增大,连续遮挡30分钟后定位误差可达3m;二是在暴雨天气下,图像采集单元的清晰度会受影响,导致部分轻微破损故障识别准确率下降至88%;三是装置数据处理效率有待提升,海量图像数据传输与处理存在1~2秒延迟。针对上述问题,提出改进措施:优化定位融合算法,引入地图匹配技术,利用预先存储的光缆线路地图修正惯性导航数据;升级图像采集单元,配备防雨镜头与自适应补光模块,提升复杂天气下的图像质量;增加专用数据处理芯片,采用边缘计算技术,在装置本地完成部分图像数据的特征提取与分析,降低数据传输压力与延迟。改进后可进一步提升装置的适应能力与运行性能。

结束语

本文完成通信光缆线路智能巡视装置多模块协同设计与关键技术研究,通过需求分析构建四级协同架构,实现四大核心模块开发,突破协同控制、数据融合、故障诊断等关键技术。测试验证表明,装置可高效完成线路巡视与故障处置,较传统人工优势显著,为光缆智能化运维提供技术支撑。未来可进一步优化协同策略,融合人工智能提升故障识别精度;探索多装置集群化应用,实现全域覆盖巡视,推动光缆运维向更高效、智能的方向发展,保障信息传输网络长期稳定运行。

参考文献

- [1]王彬.浅谈智能化技术在通信光缆线路工程及维护中的应用[J].广东通信技术,2025,45(10):64-68.
- [2]马国平.通信光缆线路中的故障点智能定位检测技术分析[J].电子技术,2024,53(7):332-333.
- [3]游兆阳,沈聪,冯晨,等.基于GIS技术的电力通信光缆线路故障智能定位系统[J].自动化技术与应用,2024,43(7):121-124.
- [4]杨帆.基于智能优化算法的通信光缆网络线路规划设计[J].信息系统工程,2023(11):74-77.