

公路机电工程中光纤通信传输稳定性提升技术研究

郭雷

江西方兴科技股份有限公司, 中国·江西 南昌 331000

摘要: 公路机电工程中, 光纤通信是核心数据传输载体, 其稳定性对保证公路收费监控、指挥调度等业务稳定运行有积极作用。由于公路沿线存在温差大、环境复杂、机械振动强、施工维护难等缺陷, 造成光缆损耗增加、链路中断问题频发, 无法满足公路系统运行可靠性。本文分析公路机电工程光纤通信传输稳定性影响因素, 具体从光缆选型与结构设计、路由与敷设工艺优化、网络架构冗余与运维监测体系建设等方面出发, 从而提高公路机电工程光纤通信传输可靠性。

关键词: 公路机电; 光纤通信; 传输稳定性; 环网保护; 智能运维; 光缆选型

Research on Improving the Stability of Fiber Optic Communication Transmission in Highway Mechanical and Electrical Engineering

Guo Lei

Jiangxi Fangxing Technology Co., Ltd., China Jiangxi Nanchang 331000

Abstract: In highway electromechanical engineering, fiber optic communication is the core data transmission carrier, and its stability plays a positive role in ensuring the stable operation of highway toll monitoring, command and dispatch and other businesses. Due to defects such as large temperature differences, complex environments, strong mechanical vibrations, and difficult construction and maintenance along the highway, there is an increase in fiber optic cable losses and frequent link interruptions, which cannot meet the operational reliability of the highway system. This article analyzes the factors affecting the stability of fiber optic communication transmission in highway electromechanical engineering, specifically from the aspects of fiber optic cable selection and structural design, routing and laying process optimization, network architecture redundancy, and operation and maintenance monitoring system construction, in order to improve the reliability of fiber optic communication transmission in highway electromechanical engineering.

Keywords: Highway electromechanical; Fiber optic communication; Transmission stability; Ring network protection; Intelligent operation and maintenance; Fiber optic cable selection

0 引言

在我国道路交通事业不断发展背景下, 特别是交通强国战略逐步深入实施, 现代公路工程成为综合性系统, 其融合高清监控、ETC 自由流收费、气象监测、应急指挥、车路协同的多项功能。在该系统中, 光纤通信传输是保证系统稳定运行的关键, 其具备传输距离远、带宽大、抗干扰能力强等特点, 已经成为公路运行的重要神经中枢系统。因此, 深入研究公路机电工程光纤通信传输稳定性影响因素, 再制定针对性策略, 以提高公路工程运行水平。

1 公路机电工程光纤通信传输影响因素

1.1 复杂多变的环境应力影响

公路项目运营沿线的环境差异较大, 这导致光纤传输稳定性严重不足。由于公路沿线中温度差异极为明显, 特别是高海拔或纬度较高地区, 昼夜温差较大, 进而导致光

纤材料出现热胀冷缩现象。如果在光缆材料选择过程中, 未考虑到环境因素变化, 导致信号传输存在中断或强度变弱的情况, 无法保证信号传输的可靠性与稳定性。而在公路机电工程光纤通信系统传输中, 受到机械振动与应力作用, 特别是重载货车行驶时, 持续产生地面振动, 桥梁伸缩缝周期性位移, 极易造成光纤通信系统损坏。

1.2 施工工艺缺陷与材料老化

公路机电工程光纤通信设施安装中, 其施工质量和材料, 对整个通信链路的寿命造成影响。光纤通信链路在敷设中, 如果牵引力控制不当, 导致牵引力超出光缆的允许张力, 或者弯曲半径小于规范值, 极易造成光纤通信链路内部裂纹, 且在运行一段时间内才会表现出故障。而在光纤通信链路接续施工, 因为参数设置不当或者端面平整度较差, 造成熔接点损耗过高或机械强度不足, 导致光纤通

信传输存在中断现象。

1.3 网络架构脆弱性与色散非线性效应

早期公路通信系统设计受限于当时的技术与投资，多采用链型拓扑结构，缺乏有效的物理路由保护。一旦某处光缆因施工挖断或自然灾害中断，后续所有站点的业务将全部瘫痪，系统容错能力极低。此外，随着传输速率向 10G、100G 演进，光纤自身的物理特性限制日益凸显。长距离传输中，色散会导致光脉冲展宽，引起码间干扰；而非线性效应在高入纤功率下会进一步恶化信号质量。若未在设计阶段进行合理的色散补偿与非线性抑制，高速率下的误码率将大幅上升，严重影响传输稳定性。

为了更直观地说明不同网络架构对传输稳定性的影响，下表对比了传统链型架构与优化后的环网架构在关键性能指标上的差异，见表 1。

2 光纤通信传输稳定性提升技术

2.1 优化光缆选型与精细化敷设工艺

通过对公路沿线环境特点分析，在光纤通信施工中，从源头上提高物理介质的适应性。光纤通信链路材料选择中，优先选择高密度聚乙烯外保护套光缆，并在套管制作中加入抗紫外线剂和防鼠咬剂；对于白蚁多发区或岩石地段，需选择使用不锈钢带铠装或尼龙护套的结构形式；隧道内部的光纤通信线缆，使用低烟无卤阻燃材料。而在光纤通信设施敷设过程中，需严格按照标准化流程进行，通过张力计监测光缆牵引力，防止因为超负荷作业造成内部断裂现象。而在光缆过桥时设置专用伸缩节，能有效适应桥梁变形，防止因为伸缩缝持续周期性变化导致光缆断裂。

2.2 构建高可靠冗余网络架构

公路机电工程光缆通信设施安装中，需构建可靠、冗余的网络架构，这是提高通信系统运行稳定性的关键。光缆通信系统骨干层摒弃单一的链型结构，采用公路两侧分离的管道资源，并铺设双路由光缆，建设双纤双向复用段保护或子网连接保护环网。如果主通信链路出现中断，系统在 50ms 内自动切换到备用路由，从而达到系统稳定传输的效果。而在光缆传输关键节点上，核心传输设备使用主控板、电源板、交叉板的 1+1 热备份方式，并且支持在

线热插拔，从而能快速清除单点故障。

2.3 实施智能化运维监测与主动预防

公路机电工程光纤通信传输稳定性提升中，需利用智能化运维监测与主动预防措施，以构建完善运维管理体系。在该体系运行过程中，在光缆通信设施中配置自带数字诊断功能的监测装置，能及时获取光模块的发射 / 接收频率、温度、偏置电流等参数，并设置预警阈值，以便及时掌握光缆线路运行状况。在该系统中集成 OTDR（光时域反射仪）功能的智能监测系统，对光缆各部分全面监控和扫描，及时识别信号传输、断点、弯折点以及高衰减点，并且使其故障定位精度达到米级。

3 工程案例分析

3.1 项目概况

某山区高速公路全长 120 公里，桥隧比高达 65%，地处亚热带季风气候区，温差大、雨水多，地质条件复杂。原通信系统建设于十年前，采用单路由链型拓扑结构，光缆为普通层绞式。运行三年后，受山体滑坡、雨水侵蚀及设备老化影响，频繁出现视频丢帧、收费数据中断现象，年均故障次数达 20 余次，平均修复时间长达 4 小时，严重影响了运营效率与安全。

3.2 改造措施

针对上述问题，本项目实施系统性的升级改造：（1）光缆更换：通过将原有普通光缆更换为 GYTA53 型双层钢带铠装阻燃光缆，能使光缆具备较高的抗压、抗拉、防鼠咬能力，并使其能有效应对环境变化影响。（2）架构重构：通过新建第二管道铺设备用光缆，并将原有链型拓扑结构升级为双纤双向复用段保护环网，使物理路由具备双重冗余效果。（3）接头整治：对于光纤通信设施所有接头箱开箱检查，重新熔接衰减超标点，并且更换密封胶条、安装防盗锁，还要确保盘纤半径达到最适宜状态。（4）智能监测：光纤通信系统内布置新一代网管系统，其利用光功率实时监测、OTDR 自动巡检等功能，监测光纤通信系统运行状况。

3.3 实施效果

改造完成后，系统连续运行两年未发生因传输链路导

表1 传统链型架构与优化环网架构性能对比

对比维度	传统链型拓扑架构	优化双纤双向复用段保护环网	提升效果
物理路由冗余	无（单路由）	有（双路由物理隔离）	消除单点故障风险
故障倒换时间	需人工抢修（小时级）	自动保护倒换（< 50ms）	业务实现“零感知”
生存性	任意节点中断，后半段全瘫	任意单点中断，业务自动绕行	系统可靠性显著提升
维护难度	故障定位难，影响范围大	故障自动隔离，影响范围小	运维效率大幅提高
适用场景	早期低等级公路	现代高等级/智慧高速	适应高带宽高可靠需求

表2 改造前后光纤传输关键性能指标实测对比

性能指标	改造前（链型/普通光缆）	改造后（环网/铠装光缆）	改善幅度/结果
平均链路衰耗	0.35 dB/km	0.22 dB/km	降低 37%，信号质量显著提升
系统误码率 (BER)	$10^{-8} \sim 1 \times 10^{-9}$ (波动大)	$< 10^{-12}$ (稳定)	达到国标优级，数据传输极可靠
年均故障次数	20+ 次	0 次	实现连续两年零中断
故障恢复时间	平均 240 分钟 (人工抢修)	< 40 毫秒 (自动倒换)	业务连续性得到根本保障
视频丢帧率	高峰期 $> 5\%$	$< 0.01\%$	监控画面流畅清晰

致的业务中断。通过对关键传输指标的实测，改造前后的数据对比见表 2 所示。

数据显示，光链路平均衰耗从改造前的 0.35dB/km 降至 0.22dB/km，系统误码率稳定低于 10^{-12} ，远优于国家标准。特别是在改造期间遭遇的两次山体滑坡突发事件中，单侧光缆被切断，但保护倒换机制均在 40ms 内自动完成，业务全程零感知，未造成任何数据丢失或视频卡顿。

4 结语

公路机电工程光纤通信传输稳定性，关系到公路项目运行效果，其属于复杂性的工程，需结合公路项目运行实际情况进行方案调整，从而保证其运行功能性不受影响。

在该理念设计下，遵循预防为主、技管结合的基本原则，选择高适应性光缆，并严格把控工艺方案，再构建双路由冗余保护网络以及智能化监测体系，以提高光纤通信运行安全性。

参考文献：

[1] 郑斌. 高速公路光纤传输网络优化与安全防护技术研究[J]. 中国信息化, 2023(11): 84-85.

[2] 蔡捷, 袁卫宁. 黄河下游光纤通信技术及布局研究[J]. 河南科技, 2019(17): 14-16.

[3] 金育蘅. 基于光纤通信的高速公路机电设备健康状态远程监测方法探究[J]. 中国交通信息化, 2025(01): 88-90.