

# 轨道交通通信系统中光纤光栅传感技术应用研究

王树欢

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

**【摘要】**：重庆轨道交通线路密度提升，通信系统承担列车调度、信号传输、视频监控和应急联动等关键任务，对设备状态感知和传输安全提出更高要求。传统监测方式存在感知点分散、抗干扰能力不足、故障定位滞后等问题，难以满足高频次运营环境下的精细化运维需求。光纤光栅传感技术可通过温度、应变、振动等参数采集，对通信光缆、机房设备和隧道环境进行连续监测，并结合分区布设、阈值预警和数据联动实现故障快速识别。该技术应用于重庆轨道交通通信系统后，可提升监测精度、缩短故障处置时间，提升通信系统运行稳定性。

**【关键词】**：重庆轨道交通；通信系统；光纤光栅传感技术；状态监测；故障预警

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.089

## 引言

重庆轨道交通依托山地城市复杂地形展开建设，线路穿越隧道、桥梁、地下车站等多种空间环境，通信系统长期处于高湿度、强振动、多设备耦合运行条件下。列车调度、乘客信息、视频监控、信号控制等业务均依赖稳定通信传输，一旦通信光缆或机房设备出现异常，容易影响运营组织效率。传统人工巡检和单点监测方式难以及时捕捉隐蔽故障，故障判断也容易受到环境干扰。光纤光栅传感技术具备抗电磁干扰、灵敏度高、适合长距离布设等特点，可为重庆轨道交通通信系统提供连续化、精细化的状态感知基础，使故障预警、定位和维护更加高效。

## 1 重庆轨道交通通信系统运行特征分析

### 1.1 山地城市轨道线路通信环境特征

重庆轨道交通线路受山地城市空间形态影响明显，通信系统分布在地下区间、高架桥梁、跨江通道、山体隧道和换乘枢纽等复杂场景中。不同区段温湿度、振动频率、电磁环境和结构受力状态差异较大，通信光缆、传输设备和接入节点长期承受多源环境影响。地下区间存在湿度积聚、温差变化和散热受限等情况，高架及桥梁区段则更容易受到风荷载、结构振动和外部温度变化影响。通信系统需在复杂工况环境下保障数据连续传输，传统单点检测难以覆盖线路环境变化全过程，光纤光栅传感技术适合嵌入光缆沿线、机房和关键节点，实现温度、应变和振动信息的连续采集。

### 1.2 通信系统设备运行负荷特征

重庆轨道交通通信系统承载列车调度、信号传输、视频监控、乘客信息、无线通信和应急指挥等多类业务，设备运行呈现高密度接入、高频次传输和长时间连续工作的特征<sup>[1]</sup>。车站通信机房、区间传输节点、控制中心和换乘站设备之间形成多层次通信链路，业务数据持续交互，对设备稳定性和链路可靠性要求较高。换乘站大客流时段，视频、广播、调度、运营多类数据同步传输，易造成通信设备温升超标、负载骤变、接口

过载。重庆轨道交通通信系统在绿色低碳、智慧运维理念下，需要从被动检修转向状态感知和精准维护，光纤光栅传感技术可对设备温度、光缆拉伸和结构振动进行实时监测，为负荷变化判断提供数据依据。

### 1.3 通信传输安全需求特征

重庆轨道交通通信传输安全直接关联列车运行组织、客运服务调度和突发事件处置，通信链路必须保持稳定、连续和可追溯。线路运行中，通信光缆弯折、接头松动、隧道渗水、机房温升和结构振动都可能影响传输质量，若异常信息不能及时识别，容易造成数据延迟、信号衰减或局部通信中断。重庆轨道交通网络化运营程度提升后，单点设备故障极易造成相邻区段通信联动失效。通信系统安全需求从事后维修转向提前预警、快速定位和分级处置。光纤光栅传感技术具有抗电磁干扰、传输距离长、灵敏度高和多点复用等特点，可在通信光缆、隧道结构和设备机柜中形成监测链路，提高异常识别速度和故障定位精度。

## 2 重庆轨道交通通信系统监测识别的短板

### 2.1 通信光缆状态感知不够连续

重庆轨道交通通信光缆分布于隧道、车站、区间管槽和设备夹层等位置，线路跨度长、敷设环境复杂，部分区段受温湿度变化、结构沉降、机械牵拉和施工扰动影响较明显。现有监测方式多依赖周期巡检、故障告警和人工排查，难以对光缆应变、微弯、接头松动和局部受压形成连续感知。光缆故障具备隐蔽、渐进发展特征，早期隐患不会直接引发通信中断。重庆轨道交通通信系统若缺少沿线分布式感知能力，故障定位会依赖经验判断，无法满足智慧运维对实时数据、精准定位和提前预警的要求。

### 2.2 机房设备温度异常识别滞后

重庆轨道交通通信机房承担传输、交换、无线、视频和电源等设备集中运行任务，设备密度高、散热通道复杂，局部温升具有突发性和累积性。传统温度监测通常布置在机房环境层

面,对机柜内部、板卡附近、电源模块和线缆密集区域的细微温差捕捉不足<sup>[2]</sup>。空调运行状态、设备负荷变化、风道遮挡和灰尘积聚都会造成局部热量堆积,依靠机房环境测温,无法精准定位设备局部高温隐患点位。重庆轨道交通通信系统在绿色低碳运维理念下,需要更精细的热状态识别方式,若温度异常识别滞后,容易造成设备老化加快、传输性能波动和维护响应被动。

### 2.3 隧道振动干扰影响故障判断

重庆轨道交通隧道区间受列车运行振动、轨道结构传递、通风设备运行和周边地质条件影响,通信光缆及附属设备长期处于动态扰动环境中。振动信号与通信设备异常之间存在交叉影响,普通告警系统难以区分结构振动、线缆松动和设备故障引起的状态变化。部分区段振动具有周期性和峰值突变特征,若缺少高灵敏度、多点位的传感数据支撑,故障判断容易停留在单一告警层面。重庆轨道交通通信系统需要将振动监测、温度监测和光缆应变监测进行关联分析,才能减少误判和漏判,提高故障识别的准确性。

## 3 光纤光栅传感技术适配路径设计

### 3.1 通信光缆应变监测布设方法

重庆轨道交通通信光缆应变监测应结合线路结构、敷设路径和运维风险点进行分层布设。区间隧道内可将光纤光栅应变传感单元布设在光缆固定支架、转弯半径变化处、接续盒附近和管槽连接部位,重点感知光缆受拉、受压、微弯和支撑松动等状态变化。高架区段和跨江通道可结合桥梁伸缩缝、支座附近和温度变形敏感区域设置监测点,通过应变数据判断通信光缆是否受到结构位移和外部荷载影响。车站设备夹层和综合管廊内可采用点式光纤光栅传感器与准分布式布设方式结合,形成从通信机房到区间线路的连续感知链条。数据采集端应按照线路区段建立编码规则,将传感点位置、光缆编号、接头信息和设备端口关联起来,杜绝监测告警点位与现场实际位置无法匹配的问题。面向重庆轨道交通智慧运维需求,应变监测不宜停留在单点告警层面,而应形成“传感采集—数据比对—趋势识别—定位派单”的闭环流程。

### 3.2 机房设备温度传感布设方法

重庆轨道交通通信机房温度传感布设应从环境监测转向设备级、模块级和线缆级精细感知。光纤光栅温度传感器可布设在传输设备机柜顶部、背部出风口、电源模块附近、光配线架密集区域和线缆汇聚槽内,对局部热量积聚进行连续采集。控制中心、换乘站和大客流车站通信机房设备密度较高,传感点应按照冷热通道、设备功率、散热方向和业务重要程度进行分区配置,避免仅依靠机房平均温度判断设备运行状态<sup>[3]</sup>。电源设备、核心交换设备和视频传输设备可设置较高监测优先级,通过温度变化速率、峰值温度和持续时间建立分级预警标

准。光纤光栅传感器抗电磁干扰能力强,适合布设在高密度通信设备和电源设备周边,不会对既有通信信号造成附加干扰。结合绿色低碳运维理念,温度数据还可与空调运行、设备负荷和机柜散热状态进行联动分析,规避空调过度制冷,降低机房无效能耗。数据平台应对不同机柜形成热状态画像,识别局部过热点、散热失衡点和设备老化趋势,使温度异常从事后报警转变为提前识别、精准调节和定向维护。

### 3.3 隧道区间振动传感布设方法

重庆轨道交通隧道区间振动传感布设应突出列车运行扰动、结构传递路径和通信光缆安全之间的关联。光纤光栅振动传感器可设置在隧道侧壁通信光缆支架、接续盒安装位置、轨旁设备箱附近和结构变形敏感段,对列车通过引起的周期性振动、异常冲击和局部松动进行持续采集。重庆山地地质复杂,隧道途经不同地层、富水区段时,振动传导规律差异显著。传感点布设应结合区间结构形式、轨道减振措施和通信设备安装方式进行优化。普通振动告警容易受到列车运行频次影响,光纤光栅振动数据需要建立基准波形,将正常运营振动、设备松动振动和外部扰动信号区分开来。数据处理环节可采用频率特征、峰值变化、持续时间和空间同步性进行多维判断,提高故障识别准确度。重庆轨道交通通信系统可将振动监测数据与应变、温度数据统一接入运维平台,形成多参数联合分析模式。该方式能够识别单一振动数据难以判断的隐蔽异常,减少误报和漏报,为通信光缆固定状态、设备箱安装稳定性和隧道环境变化提供实时依据。

## 4 重庆轨道交通通信系统故障预警应用方案

### 4.1 光缆异常信号分级识别方案

重庆轨道交通通信光缆异常信号识别应依据应变幅值、变化速率、持续时间和空间位置建立分级模型。光缆局部受压、支架松动、环境温变引发波长漂移,统一划为轻微异常。系统可通过连续采样和趋势比对进行跟踪,不立即触发高等级处置。中度异常通常表现为应变曲线持续偏离基准值、相邻传感点同步波动或接续盒附近信号不稳定,应推送至运维平台形成区段告警,并关联光缆编号、车站区间和设备端口。严重异常则对应光缆急剧拉伸、弯折加重、外力扰动和传输衰减风险,应触发高优先级预警,自动生成定位信息和处置工单。分级识别过程中,需要将重庆轨道交通不同线路、不同敷设环境和不同运营时段纳入阈值修正,避免单一阈值造成误报。通过动态基准和分级响应,可使光缆故障从被动排查转向提前识别。

### 4.2 设备温升数据阈值预警方案

重庆轨道交通通信机房设备温升预警应以设备类型、安装位置、运行负荷和散热条件为依据建立差异化阈值。核心传输设备、电源模块、交换设备和视频汇聚设备发热特征不同,温度阈值不能采用统一标准,应结合设备额定温度、历史运行曲

线和负荷变化形成分级预警区间。光纤光栅温度传感数据可按照正常波动、持续升温、快速升温和高温稳定四类状态进行识别，持续升温阶段重点判断散热通道是否受阻，快速升温阶段重点判断电源模块或板卡是否异常<sup>[4]</sup>。预警平台联动温度、空调工况、机柜点位、设备负载、供电参数多维度数据，形成精细化热风险判断。重庆轨道交通绿色低碳运维要求下，阈值预警不应单纯依赖提高制冷强度，而应通过局部散热优化、设备负荷调整和定点维护降低能耗与故障风险。

#### 4.3 多源传感数据联动定位方案

重庆轨道交通通信系统故障定位应将光缆应变、设备温度、隧道振动和传输告警数据统一接入同一运维平台，形成多源信息交叉验证机制。单一传感数据容易受环境波动影响，联动定位可通过时间同步、空间匹配和异常特征比对判断故障来源。光缆应变异常若同时伴随振动峰值升高，可优先判断为支架松动、外力扰动或结构传递影响；温度异常若伴随设备端口误码率上升，可优先定位到机柜散热或板卡运行问题。平台需要建立重庆轨道交通线路区段、通信设备、传感节点和业务链路之间的映射关系，使告警信息直接对应具体位置和维护对象。数据处理层可采用规则判断与趋势识别结合方式，抑制重复告警，减少无效运维工单派发。

### 5 光纤光栅传感技术应用效果评价

#### 5.1 通信系统状态感知精度提升

重庆轨道交通通信系统引入光纤光栅传感技术后，状态感知由单点巡检转向连续监测，通信光缆、机房设备和隧道区间的运行状态能够通过温度、应变、振动等参数形成数据化表达。传感节点与线路区段、设备编号和业务链路建立对应关系后，异常信息不再停留于笼统告警，而是能够指向具体位置、具体设备和具体变化趋势。光纤光栅传感器具有抗电磁干扰和灵敏度高的特点，适合重庆轨道交通通信机房高设备密度和隧道复

杂电磁环境，可降低环境噪声对监测结果的影响。连续数据积累还能形成状态基准，使轻微温升、应变漂移和振动异常得到更早识别，为智慧化、精细化运维提供可靠依据。

#### 5.2 故障定位处置效率提升

重庆轨道交通通信系统故障处置效率提升主要体现在异常发现、位置判断和维护响应三个环节。光纤光栅传感数据接入运维平台后，光缆受力变化、机柜温升异常和隧道振动突变可被快速捕捉，并与通信告警、设备端口和线路区段进行匹配，减少人工逐段排查时间<sup>[5]</sup>。故障定位由经验判断转向数据支撑，维护对象可直接锁定至接续盒、机柜、支架或区间节点，抢修路径和备品准备更加明确。重庆轨道交通网络化运营条件下，通信故障处置需要压缩响应链条，光纤光栅传感技术能够将隐蔽异常提前转化为可识别信号，降低故障扩散风险，提高工单派发、现场核查和恢复处理的协同效率。

#### 5.3 重庆轨道交通运维安全水平提升

重庆轨道交通运维安全水平提升依赖通信系统稳定运行和风险提前控制。光纤光栅传感技术将通信光缆、机房设备和隧道环境纳入统一监测框架，可对温度异常、结构振动、光缆应变和设备运行状态进行连续跟踪，增强安全风险前端识别能力。传感数据与运维平台融合后，故障预警、风险分级和维护处置能够形成闭环，避免通信链路异常发展为运营影响事件。该技术符合智慧轨道、绿色低碳和精细治理的发展理念，依托精细化监测缩减无效巡检与过剩维保，提升运维资源利用率。

### 6 结语

重庆轨道交通通信系统引入光纤光栅传感技术，可增强光缆应变、机房温度、隧道振动等关键状态的连续感知能力。分级预警、阈值判断和多源联动定位能够提升故障识别精度，压缩处置时间，推动通信运维由经验排查转向数据驱动，为重庆轨道交通安全、绿色、智慧运行提供可靠支撑。

#### 参考文献：

- [1] 刘牧源.基于 Wi-Fi6 的轨道交通车地无线方案研究[J].科技创新与应用,2025,15(16):152-155.
- [2] 李化.铁路与重庆市轨道交通概预算编制体系对比分析[J].铁路工程技术与经济,2025,40(05):30-36.
- [3] 吕彦涛.关于重庆轨道交通 3 号线的探索分析[J].中国储运,2025,(09):40.
- [4] 吴婉婧.京东集团与重庆轨道交通物资采购项目合作的管理学理论分析[J].销售与管理,2025,(15):114-116.
- [5] 陈立华,靖焱林,赵泽.光纤光栅传感技术在轨道交通轨道占用检查中应用研究[J].铁路通信信号工程技术,2019,16(09):15-18+36.