

# 高速铁路智能接触网系统试验检验技术分析

刘永

中铁武汉大桥监理咨询有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i2.12944

**[摘要]** 本文聚焦智能接触网系统的动态检测与效能评估,结合大数据分析、物联网通信等新一代信息技术,探索适应复杂场景的主动预防性检验方法,构建融合多源感知、边缘计算与智能诊断的试验检验技术体系,以为高铁供电系统的全生命周期管理提供技术支持,实现集状态感知、智能诊断、精准维护为一体的检验闭环,推动轨道交通智能化进一步发展。

**[关键词]** 高速铁路; 智能接触网系统; 分布式架构

**中图分类号:** U238 **文献标识码:** A

## Analysis of Testing and Inspection Technology for Intelligent Contact Network System of High speed Railway

Yong Liu

China Railway Wuhan Bridge Supervision Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper focuses on the dynamic detection and efficiency evaluation of the intelligent catenary system, combines new generation information technologies such as big data analysis and Internet of Things communication, explores proactive inspection methods that adapt to complex scenarios, and builds a test and inspection technology system that integrates multi-source perception, edge computing and intelligent diagnosis, with a view to providing technical support for the full life cycle management of the high-speed rail power supply system, achieving a closed inspection loop that integrates state perception, intelligent diagnosis and accurate maintenance, and promoting the further development of rail transit intelligence.

**[Key words]** high-speed railway; Intelligent contact network system; Distributed Architecture

### 引言

面对当下高速响应和高度安全性要求,牵引供电系统由高速发展向高质量发展势在必行。故向着更高精度、更强实时性的方向研究智能接触网试验检验技术是必要的。

### 1 分析高速铁路智能接触网系统试验检验技术

#### 1.1 智能接触网系统架构与关键技术

##### 1.1.1 系统架构

智能接触网系统以光纤传感技术为基础,主要满足铁路供电网络监测需求。该系统通过将传统接触网中的承力索、回流线和避雷线替换为集成光纤单元的新型复合线缆,构建起覆盖全线路的感知神经网络,区别于常规接触网需加装各类电子传感器的监测方式,该系统的核心在于利用线缆内部嵌入的光纤作为分布式传感器,结合光信号解析技术实现接触网运行状态的实时感知与智能诊断。在系统架构中,光纤复合承力索作为关键构件承担双重功能:既保持传统承力索的机械支撑与电流传导特性,又通过内置光纤实现应变、温度等参数的连续采集。为确保光纤传感网络的完整性,针对接触网锚段关节处常规线缆

断开的设计特点,开发了专用光纤接续装置,通过优化出纤结构和接续工艺,在保证机械强度与电气性能的前提下实现了跨锚段光纤的物理贯通<sup>[1]</sup>。

该系统采用分布式光纤传感技术,通过解析光信号在光纤中的传播特性,可对接触网异常状态进行广域监测与精确定位。当线路出现温度异常、机械形变或雷击等状况时,监测系统能够快速捕捉特征信号并发出预警。这种将传感功能内置于线缆本体的设计核心,不仅降低了附加设备安装维护成本,更提升了系统在复杂铁路环境中的可靠性。

##### 1.1.2 关键技术

(1) 动态参数检测技术。其主要包括两类实现方式,一是接触网几何参数检测。采用激光测距与视觉传感技术,通过高精度线阵摄像机结合结构光源,实时捕捉接触线位置、拉出值及导高等几何参数;二是弓网动态性能监测。利用力传感器与惯性测量单元(IMU)采集接触力、离线率及振动频率等数据,结合卡尔曼滤波算法消除噪声干扰,实现动态参数的实时解析。通过应用动态参数检测技术,能够使检验系统反映接触线空间定位精度,

搭配视觉测量模型提取接触线轮廓, 结合动态补偿机制修正温度、风速引起的测量误差。需要注意的是, 接触力波动范围需控制在70~150N, 以避免离线电弧对接触线的烧蚀。接触力动态平衡方程如下:

$$F_c = k \cdot \delta + c \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (1)$$

公式(1)中,  $F_c$  ——接触力;

$k$  ——接触线弹性系数;

$\delta$  ——接触线垂向位移;

$c$  ——阻尼系数;

$\frac{d\delta}{dt}$  ——位移变化率。

通过将数据带入方程可准确评估接触力波动范围, 确保其稳定在目标区间。

(2) 智能数据管理技术。此项技术依托于高速弓网检测、接触网悬挂状态检测等子系统, 构建多源数据融合与闭环反馈机制。其中, 1C子系统实时采集弓网动态参数, 结合4C子系统提供的接触网几何数据, 通过云端协同分析平台生成综合评估报告, 将设备健康状态量化为可追踪的评分指标, 支撑精准维修决策。在数据处理层面, 智能数据管理技术采用特征压缩与聚类分析模型, 解决海量检测数据的存储冗余与噪声干扰问题。其中数据筛选规则优化模型如下:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \cos(\theta_{D_i, V_j})}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

公式(2)中,  $S$  ——数据相似度;

$W_i$  ——参数权重;

$D_i$  ——当前检测数据;

$V_j$  ——当前检测数据存储版本;

$\cos(\theta_{D_i, V_j})$  ——当前检测数据  $D_i$  与存储版本  $V_j$  的余弦相

似度;

$n$  ——检测参数总数。

版本化存储方案通过计算数据相似度动态匹配最优存储版本, 在此过程中, 主要依托自适应阈值判定是否生成新存储版本, 以此减少冗余数据。

针对振动信号、拉出值偏差等高频动态参数, 通过小波变换压缩算法保留有效信息, 同时无需占用较大存储空间。对于缺陷数据而言, 主要是通过K-means算法实现无监督分类, 依据硬点、弹性不均等缺陷类别的特征向量, 自动生成维修优先级排序表, 指导现场人员快速定位关键隐患。其中, 缺陷聚类分析模型为:

$$J = \sum_{k=1}^k \sum_{x \in C_k} \|x - \mu_k\|^2 \quad (3)$$

公式(3)中,  $k$  ——缺陷类别数;

$\mu_k$  ——第  $k$  类缺陷的特征均值向量;

$x$  ——单条缺陷数据。

智能数据管理技术还通过建立历史数据与实时监测的关联规则库, 推动接触网状态预测与风险预警能力升级。例如, 利用Apriori算法挖掘接触力波动与风速、温度等环境参数的关联性, 构建接触网动态运行知识图谱, 实现缺陷根因的因果推理。

## 1.2 监测与预测

### 1.2.1 承力索温度和断线监测

广域光纤测温技术主要依据拉曼散射效应与温度变化的对应关系实现温度监测。该效应产生的斯托克斯光与反斯托克斯光的光强变化与温度存在特定函数关联, 其中散射光谱偏移量受光纤材料特性影响显著。由于光源波动、光纤形变及连接损耗等因素易对测量结果造成干扰, 系统通过同步采集两种散射光信号并建立光强比值函数关系, 从而有效消除外界干扰对温度解析的影响<sup>[2]</sup>。

实际应用中需对系统进行温度-光强响应特性校准, 通过恒温条件下的参数标定构建温度反演模型, 并集成至系统核心算法中。系统运行时依据实时获取的光强比值数据解析光纤沿线温度场, 其空间定位精度通过融合铁路公里标与电杆编号系统实现坐标映射。当光纤复合承力索发生断裂时, 基于光时域反射分析技术可精确判断断点位置, 结合预设线路坐标信息自动触发对应区段的断纤预警, 为铁路供电安全提供实时监测保障。系统基于断裂力学模型计算剩余强度衰减率公式为:

$$\eta = 1 - \frac{n}{N} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (4)$$

公式(4)中,  $n$  ——实际断股数;

$N$  ——总股数;

$d$  ——单股直径;

$D$  ——承力索标称直径;

$\eta$  ——剩余强度衰减率。

通过早期识别与量化评估, 能够提前捕获断股引发的局部应力突变信号, 促进维修方案的动态调整, 保障高速铁路平稳运行。

### 1.2.2 覆冰预测

承力索覆冰现象的形成主要受气象因素影响, 根据冰晶结构差异可分为雨淞、混合淞、雾淞、白霜及积雪等类型, 其中混合淞是导致承力索表面覆冰的主要形态。一般情况下, 混合淞生成的环境温度通常处于-5~2℃区间, 基于此特征可将覆冰预警温度阈值设定为-2~2℃, 为光纤测温系统的预测算法提供关键参数<sup>[3]</sup>。

在该系统中, 覆冰预测首先依托高精度气象传感器网络, 实时采集温度、湿度、风速及降水类型等微气象数据。当环境温度低于0℃且相对湿度超过85%时, 系统自动触发覆冰监测模式, 结合承力索表面图像识别技术判断初始覆冰形态。然后, 系统通过动态载荷计算模型评估覆冰导致的额外机械负荷, 具体为:

$$\Delta F = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot (D + 2\delta)^2 \cdot L/4 - \rho \cdot g \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L/4 \quad (5)$$

公式(5)中,  $\rho$  ——冰密度;

$D$ ——承力索直径;

$L$ ——跨距长度;

$\delta$ ——冰层厚度;

$g$ ——重力加速度。

当 $\Delta F$ 超过设计张力阈值时,系统将启动融冰装置或限速运行指令。

通过进一步结合机器学习模型,能够预测覆冰发展趋势。输入参数包括历史覆冰事件数据库、实时气象时序数据及线索振动频谱特征,输出未来2小时冰层厚度预测值。

总的来说,通过数值模拟分析接触网结构特征可知,承力索在稳定运行状态下发生覆冰时,冰层通常呈现均匀包覆状态。当复合承力索被冰层完全包裹后,其内部光纤传感单元的温度响应将趋于稳定。基于广域光纤测温技术的高密度空间温度场监测能力,系统可实时获取沿承力索分布的动态温度数据,结合冰层热传导特性建立温度场动态模型。在此基础上,通过分析温度变化的时空分布特征,能够有效辨识覆冰形成与发展的物理过程,进而实现承力索覆冰的早期预警与状态评估,为铁路接触网安全运行提供技术支持。

### 1.2.3 闪络监测

在高速铁路智能接触网系统中,承力索闪络监测是预防电气故障、保障弓网稳定受流的关键技术。该技术通过实时捕捉异常放电现象,结合环境参数与电气特性分析,实现对绝缘子污秽、覆冰等引发闪络风险的有效预警。

闪络监测主要依托高频电流传感器与紫外成像装置,同步采集承力索绝缘子表面放电脉冲信号与局部温升数据。当监测到脉冲频率超过阈值时,系统自动启动污秽度评估算法,通过泄漏电流有效值与表面盐密值的关联分析,判定绝缘子清洁度是否满足运行标准。进一步结合气象传感器网络数据,系统构建动态闪络风险指数为:

$$FRI = \alpha \cdot SDD + \beta \cdot RH + \gamma \cdot \frac{U_{max}}{U_{flash}} \quad (6)$$

公式(6)中, $RH$ ——相对湿度;

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ——环境适应系数;

$SDD$ ——表面盐密值;

$U_{max}$ ——监测时段内最高运行电压;

$U_{flash}$ ——闪络临界电压。

当 $FRI$ 大于0.8时,系统优先对湿度超过90%且盐密值超标的区段推送检修指令。

在光纤复合承力索闪络灼伤检测实验中,采用10米试样与广域光纤测温装置构建测试系统,通过光纤盘实现光信号传输链路连接。实验过程中施加500A闪络电流并维持500ms作用时间,使承力索表面产生熔融状态损伤。广域测温系统实时监测光纤

温度场分布,数据曲线显示在设备端2km位置出现显著温度异常,峰值达到25℃。该系统的空间定位功能依托光时域反射原理,通过分析后向散射信号的时延特征实现异常温升区域的坐标解析,试验表明,该模型在覆冰工况下的预测准确率较传统阈值法提升36%,误判率控制在3%以内。

### 1.3 检验验证平台

智能接触网试验验证平台,主要是实现接触网新技术新装备的实线工程化应用研究、安全和稳定性评估、现场使用性能指标评估。该平台通过模拟实际行车工况,对承力索等关键部件进行动态加载测试,有效弥补传统室内型式试验与疲劳试验的局限性,同时实现零部件性能与接触网运行状态的协同监测。基于光纤复合承力索构建的分布式测温网络,可实时获取全线温度场数据并支持历史温度回溯分析,为系统状态评估提供多维度数据基础。

### 2 高速铁路智能接触网系统试验检验技术展望

随着光纤传感技术的迭代升级,集成复合承力索的智能接触网系统已拓展出断线识别、雷击响应、弓网动态振动监测等多元功能。通过融合温度、机械应力、气象参数等多源数据,结合专家分析模型设定动态预警阈值,系统可实现对覆冰、风偏等异常工况的早期识别与风险预判。面向未来智能化发展需求,该平台需进一步完善接触网结构健康评估体系,深化振动谱、温度场、覆冰载荷等物理场的耦合解析算法研究,同时强化风速扰动、雷击效应等环境因素的模拟验证能力。

### 3 结论

综上所述,本研究针对高速铁路智能接触网系统的试验检验技术展开综合分析,验证了多源数据融合与动态建模方法在工程实践中的有效性。通过构建覆冰预测、闪络监测与机械载荷评估的协同检验体系,系统实现了接触网运行状态的实时感知与风险预警。实际线路测试表明,基于环境参数与电气特性的动态耦合模型可显著提升异常工况识别能力,机器学习算法与物理模型的有效结合解决了传统阈值法在复杂气象条件下的适用性不足问题。

### [参考文献]

[1]袁远,纪占玲,陈立明,等.高速铁路接触网弹性吊索失效机理分析[J].铁道科学与工程学报,2024,21(09):3507-3517.

[2]池瑞,邱国龙,曾庆森,等.高速铁路接触网系统维修决策优化[J].铁道科学与工程学报,2023,20(1):53-62.

[3]岳彪,王阳萍.虚实结合的高速铁路受电弓-接触网仿真交互实验系统设计[J].实验技术与管理,2023,40(7):126-133.

### 作者简介:

刘永(1984—),男,汉族,浙江温州人,专科,助理工程师,从事铁路试验研究。