

监测技术在铁路四电施工质量控制中的应用研究

熊英

天津市先达铁路工程设计有限公司, 中国·天津 300143

摘要: 高速铁路的四电工程施工质量对于列车运行的安全和稳定会有决定性的影响, 传统四电施工监测通常会依赖人工开展巡检工作以及进行离散点检测, 造成数据滞后、覆盖的范围较窄、对潜在隐患进行预测也有困难。针对该现状, 本文构建了一套整合了物联网、大数据以及深度学习技术的智能监测与质控系统, 该体系会实时监测接触网张力、信号设备状态、电力电缆温度以及电气化参数, 并且还整合了 BP 神经网络、长短期记忆网络以及卷积神经网络模型, 实现故障的预测与识别。该系统能够将电缆接头温度的预测绝对误差控制在 0.3 °C 以内, 提高了铁路四电施工的数字化以及智能化方面的水平。

关键词: 智能监测; 铁路; 预警; 应用

Research on the Application of Monitoring Technology in Quality Control of Railway Four-Electric Construction

Xiong Ying

Tianjin Xianda Railway Engineering Design Co., Ltd., China Tianjin 300143

Abstract: The construction quality of the four-electricity systems has a decisive impact on the safety and stability of train operation. Traditional monitoring of the four-electricity construction relies on manual inspections and discrete point detections, resulting in data lag, narrow coverage, and difficulties in predicting potential hazards. In response to this situation, this paper has constructed an intelligent monitoring and quality control system. This system can monitor the tension of the catenary, the status of signal equipment, the temperature of power cables, and electrification parameters in real time. This system can control the prediction error of key parameters to be below 0.3 °C. It has improved the digitalization and intelligence level of the "four-electricity" construction in high-speed railways.

Keywords: Intelligent monitoring; Railway; Warning; Application

0 引言

高速铁路四电系统也就是通信、信号、电力以及电气化, 是列车安全运行的关键支撑。这个系统结构复杂, 包含了大量隐蔽工程。要是接触网弛度偏离了标准, 或者电缆接头有瑕疵, 会直接引发运行故障, 安全事件是很容易发生。施工质量管控依旧运用万用表测量以及人工巡检等传统方式来开展工作, 这些方法存在实时性不足, 主观判断明显, 很难察觉到潜在隐患, 没法实现全生命周期的有效管理。物联网以及人工智能技术开辟了智能监测方面的新途径, 然而当下大部分研究还集中在单一设备或者特定环节上, 没有构建起从感知到传输、分析、预警以及控制的完整闭环系统, 本文鉴于传统监测方式所存在的延迟以及分散方面的问题, 构建了一套把物联网、大数据以及人工智能技术整合起来的智能监测系统, 目的是对铁路四电施工的完整流程开展覆盖式的监控工作全天候动态地开展掌控工作以及进行智能化的管理工作。

1 铁路四电施工质量控制现状与问题分析

铁路四电工程囊括了开展电缆敷设、进行设备安装以及开展系统联调联试等方面的环节, 在现行规范的指导下所开展的质量控制手段, 在日趋复杂的工程环境当中, 它的局限性正日益凸显出来。

1.1 传统检测方法的局限性

目前, 铁路四电施工中常用的检测方法主要包括万用表 / 兆欧表测试、示波器观测、人工巡检等。这些方法的优缺点对比如表 1 所示。

传统的检测手段通常会在事情发生以后分析孤立的点状工作, 很难马上捕捉到施工中由于温湿度等环境因素所引发的参数漂移情况, 反馈方面存在着明显的滞后, 工艺调整方面存在滞后性, 会让质量隐患常常在运营阶段显现出来。

1.2 智能监测技术的发展需求

高速铁路技术不断演进, 提升四电系统可靠性要求,

表1 常用铁路四电质量检测方法对比

检测方法	检测指标	优点	缺点	适用范围
万用表/兆欧表	电阻、绝缘	成本低，操作简单	点状测量，无法连续	静态参数测试
人工目视/巡检	外观、接线	直观，无需复杂设备	易受人为经验影响，漏检率高	设备安装检查
示波器测试	信号波形	精度较高，能捕捉瞬态	需停机测试，难以实时在线	信号系统调试
静态几何测量	接触网参数	数据准确	无法反映动态受流性能	接触网冷滑试验

日本新干线以及欧洲铁路网络早就广泛开展了传感器在线监测系统的部署工作，实现对接触网以及轨道电路的实时监控。我国的高铁线路当中，有一部分安装监测设备，不过大多数只是进行数据的收集，还没有挖掘信息，也没有得以实现智能预警，施工阶段缺乏一个进行标准化的大数据智能质量控制工作的体系。

2 智能监测技术体系设计

铁路四电工程拥有独特的特性，本文实现了一种构建端边云协同的智能监测架构工作，构建监测、分析、反馈、优化循环机制，实现施工质量处于可控在控状态的目标。这个体系运用分层架构，有着数据贯通、闭环反馈的设计思路。

2.1 体系总体架构

现场感知构成监测体系基础，信息处理承接数据流、处理相关工作，最终进行决策反馈形成闭环，现场感知层构成了整个体系所具有的触角。接触网智能传感器、光纤光栅传感器、信号设备状态采集模块以及高清巡检机器人，基于四电特性来部署工作，监测数据凭借 5G 通信、LoRa 以及工业以太网，形成高速低延时通道，并且向云端数据库汇集，数据的实时性以及完整性实现保障。信息处理层构成了这个体系的核心，原始数据借助大数据技术来开展清洗去噪以及标准化工作，接触网性能、信号设备状态以及电力电缆健康度，凭借 BP 神经网络、LSTM 以及 CNN 模型来实现构建分析。决策反馈环节：把分析成果以直观形式来进行呈现，并且凭借既定临界值开展警示机制的启动工作，当系统检测到施工偏差了，就会马上自动把调整方案发送给管理平台，引导现场的操作者去对工艺设置进行修正，从而来实现流程的闭环管理。

2.2 铁路四电智能监测系统流程设计

本文构建起了四层智能监测架构，借助端 - 边 - 云协同机制，实现了从监测、分析到预警以及调控的完整闭环，振动弦式传感器以及光纤光栅传感器、高清巡检机器人等装置，在现场感知层得以开展部署工作。接触网张力、电缆温度以及设备图像等多元数据，被这些设备进行实时捕获并汇集。数据传输层把 LoRa 以及 4G/5G 当作混合组网模式来使用，依靠边缘计算网关去处理数据汇聚、压缩

以及断网续传工作，这样来保障传输过程得以稳定且可靠，在数据清洗这个阶段，Z-Score 标准化和滑动窗口滤波会进行协同作用，接着，BP 神经网络、LSTM 以及 CNN 模型会被整合起来运用，分别对应去处理接触网参数的预测任务对电缆温度趋势的演变情况以及故障开展智能辨识工作。决策反馈层凭借 BIM 以及 GIS 融合平台，把数据进行转化，使其成为直观视图，并且启动黄、橙、红三级预警机制。优化方案马上推送至移动终端，这样就构建起完整的 PDCA 循环管控体系。这套机制，使得四电施工的完整过程，处在一种实时、智能并且形成闭环的质量管理状态当中。

3 基于大数据与 AI 的四电质量控制方法

在铁路四电施工中，接触网张力、电缆温度以及信号参数数据能够被实时开展采集工作，然而原始数据经常会混杂有噪声，并且伴有数值缺失以及不一致方面的问题。预测模型有可能会因为直接运用而出现偏差，数据需要凭借前沿算法模型来进行深度加工的工作。

3.1 数据预处理与标准化

环境干扰会显著地对原始监测数据产生影响，因此开展预处理的步骤是必不可少的，借助滑动窗口的中值滤波技术来开展消除高频噪声的工作，然后运用 Z-Score 标准化方法把不同量纲的数据转化成统一标准，这样便于进行多源信息融合。标准化公式如下：

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

式中：x' 为标准化后的无量纲值；x 为原始数据；μ 为均值；σ 为标准差。

3.2 基于 BP 神经网络的接触网施工质量预测

接触网开展施工工作时，精度方面的要求是最为严格的，温度变化对于接触网张力以及弛度会产生显著的作用，在施工的时候，开展紧线张力的操作以及悬挂方式会和温度变化构成非线性的关联。采用经验公式的传统方法没办法准确地对这种关联进行刻画，在施工阶段，利用 BP 神经网络建立环境温度—施工张力—最终弛度的预测模型：

$$h_j = f(\sum w_{ij}x_i + b_j)$$

$$y_k = f(\sum v_{jk}h_j + c_k)$$

通过该模型，可以在施工前预测不同温度下的接触网状态，指导施工人员预留适当的弛度，避免因热胀冷缩导致的断线或拉弧风险。

3.3 基于 LSTM 的电力电缆健康状态监测

电缆线路大多属于隐蔽工程，它的绝缘性能衰退以及接头温升呈现出一种持续演进的时序性现象。那么对于时间序列的长期依赖关系方面，传统回归分析通常会难以开展有效捕捉的工作，长短期记忆网络凭借输入、遗忘以及输出门控结构，极大程度上缓解了传统循环神经网络在处理长序列时所遇到的梯度消散问题。LSTM 模型开展电缆接头温度时序数据的训练工作，能够精准地预测未来温度的走势情况，尽早发现因接触不良所导致的温升风险，预测偏差会被约束在极其狭窄的区间当中。

3.4 基于 CNN 的信号设备与隐蔽工程病害识别

在四电施工中，信号设备的配线出现错误、继电器发生卡滞以及电缆沟槽产生破损，这些现象在四电施工当中构成了典型的视觉特征方面的问题。在图像识别任务当中，卷积神经网络展现出了独特的效能，高清巡检机器人开展施工图像数据的采集工作，CNN 模型会自动来提取边缘纹理等特征，这样就得以识别信号机灯位异常电缆的外皮出现了裂痕，螺栓的固定处产生了位移。这个模型拥有全天候监控的功能，其识别精度极大程度上超越了人工。

4 工程应用与效果分析

为了对智能监测以及质量控制体系的实际效能进行检验，本研究把一条在建高速铁路的四电集成项目当作实施方案案例来选用，线路的总长度接近 120 公里，囊括了特大桥梁、长大隧道以及复杂枢纽站场等方面，施工环境是多变的，质量管控工作会面临挑战。

4.1 接触网施工质量控制应用

传统接触网开展架设工作时，依靠人工去测量弛度，每一跨测量所耗费的时间大概是 15 min，并且受测量人员经验方面的影响非常显著，智能张力监测系统在这个项目当中开展了部署工作，传感器按照 5 m 的间距来进行布设，这样来实现全线的连续监测。开展跨距方面的一百个典型案例的对比工作，智能监测系统开展了样本的采集工作，采集的样本数超过了 20000 个，而传统人工测量所采集的样本数仅仅只有 100 个，智能监测系统借助 BP 神经网络预测来开展融合，能够去辨识传统手段很难捕捉到的细微张力变化。监测数据经过 BP 网络去处理之后，它的标准差有了明显的减小，这反映出监测结果变得更加稳定，离散程度有所降低，能够有效减少单点检测当中的随机误差。

表2 接触网张力检测方法对比

检测方法	样本数 (个)	平均张力 (kN)	标准差 (kN)	检测耗时 (跨/分)
人工拉尺/测力计	100	15.2	1.8	15
智能传感器+BP预测	20000	15.5	0.6	实时

4.2 电缆接头过热预警应用

在隧道当中的 10 处关键电缆接头，开展持续三个月的温度监测工作，传统的指数回归模型以及 LSTM 模型在预测效果方面是存在着差异的，监测后期的环境以及负载波动情况，传统指数回归预测的偏差会增大，最大绝对误差会超过 2.0 ℃，容易导致误判。LSTM 模型对于时间序列拥有优异的学习能力，把最大绝对误差控制在了 0.3 ℃ 以内，得以准确捕捉电缆接头的温升趋势，成功预警了一例由于接头压接不牢引发的潜在过热隐患。

表3 电缆接头温度预测方法对比

监测时间 (天)	实测温度 (℃)	指数回归预测 (℃)	LSTM预测 (℃)
10	35.2	35.0	35.1
30	36.8	36.2	36.7
60	38.5	36.0	38.2
90	39.2	35.5	39.0

4.3 隐蔽工程病害识别应用

巡检机器人搭载了 CNN 模型，对信号机械室以及室外电缆沟开展了检查任务的执行工作，对于配线出现松动、继电器存在缺失、电缆发生破损等这三类典型故障，卷积神经网络模型开展识别工作的准确率一直保持在 96% 以上。在光线不足的夜晚，把红外影像以及 CNN 进行结合，开展识别工作，准确率依然超过 93%，这远远高于人工巡检所达到的平均水平，机器人开展巡检工作仅需 1 小时，就可以完成对中型车站的检查工作，这传统人工巡检方式相比，效率得到了显著提升。传统方法需要两名工作人员花费四小时，而机器人不但缩短了时间，还得以实现不间断的全面覆盖。

5 结语

本文构建了智能监测体系，囊括现场感知、数据传输、信息处理以及决策反馈四个环节，其目的是应对传统铁路四电施工检测效率不高以及结果滞后的情形。这个体系凭借传感器以及巡检机器人来采集多源信息，融合 BP 神经网络、LSTM、CNN 模型，分别去处理接触网参数预测，评估电缆状态演变以及智能辨识电缆故障。铁路四电智能化管理得到了技术路径的支撑，在把数字孪生技术进行融合之后，监测向仿真推演的跨越得以实现，进而为智慧铁路建设提供了助力。

参考文献:

- [1] 凌达勇, 莫建兴, 禹兵兵. 物联网技术在公路路面路基沉降变形监测中的应用[J]. 信息记录材料, 2026, 27(04): 127-129.
- [2] 孙振斌. 路基冻融智能监测系统. 黑龙江省, 哈尔滨国铁科技集团股份有限公司, 2022-11-25.
- [3] 朱波, 侯明坤. 视觉监测系统在邻近铁路营业线施工中路基监测的应用研究[J]. 高速铁路技术, 2026, 17(01): 111-117.
- [4] 鲁康杰, 王邵东. 基于大数据与人工智能的高速公路路基施工智能监测[J]. 技术与市场, 2026, 33(02): 83-87.
- [5] 樊康鑫, 罗健林, 陶雪君. 水泥与混凝土路基材料性能的长期耐久性分析[J]. 水泥, 2026, (01): 102-104.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2025[J]. 中国公路学报, 2025, 38(12): 1-153.

作者简介: 熊英 (1983.06-), 女, 汉族, 吉林省, 本科, 助理工程师, 研究方向: 铁路工程监理。