

接触网技术状态实时监测感知和数智化运维现状及构想

苏建国¹ 高 厦²

1.中国铁路上海局集团有限公司 上海 200071

2.上海交通大学职业技术学院 上海 200233

摘要: 本文深入分析既有接触网检测运维现状与短板,针对检测数据实时性差、数据连续性差等问题,提出了接触网技术状态实时监测感知与智慧运维系统解决方案,结合国内外技术发展现状与趋势,研究了系统功能项点和总体设计构想。

关键词: 接触网; 状态实时感知; 数字化; 智慧运维

一、引言

(一) 接触网检测运维现状与挑战

随着我国高铁事业的迅猛发展,运营里程持续增长,对供电系统安全性和可靠性提出了更高要求。高铁接触网设备沿铁路线布置,是动车组的唯一供电力来源,设备结构复杂且无冗余配置,接触网长期暴露在复杂的户外环境中,受气候变化、机械振动、电气老化等因素影响,容易出现各类故障隐患。

既有接触网6C检测及人工巡检方式存在以下不足:一是实时性差,接触网6C检测及人工巡检依靠移动检测设备或人工巡视线路得到单次的图像、波形等数据,是无法实时掌握接触网设备运行状态;二是覆盖面存在盲区,既有接触网1C、2C、3C、4C等检测路径只能检测覆盖到正线设备,无法覆盖车站枢纽站、联络线、动车所等非正线设备,存在大量检测盲区;三是数据连续性差,分析接触网运行服役规律需要积累大量连续数据,既有接触网6C检测只能记录单次数据,无法提供连续性数据;四是受环境因素影响大,恶劣天气下巡检难度和风险增加。因此,构建一套接触网智能化、实时化监测系统迫在眉睫。

(二) 接触网技术状态实时监测感知与智慧运维系统的必要性

研究接触网技术状态实时感知与智慧运维系统,能够对补偿装置AB值、隔开引线弛度、电缆头及隔开温度、腕臂偏移量、接触线动态抬升、附加线舞动、轻飘异物侵入等接触网运行安全关键点实现多方面、全天候实时监测,实时掌握设备运行状态,提前发现潜在故障,减少突发故障对铁路运营的影响。通过智能化分析和诊断,提高运维效率,降低运维成本,保障铁路供电系统的安全稳定运行,对于促进我国铁路供电事业的持续健康发展、满足人民群众日益增长的出行需求以及推动经济社会发展具有重要意义。

行需求以及推动经济社会发展具有重要意义。

二、国内外技术发展现状与趋势

(一) 国内方面

京张高速铁路“数字孪生”智能化运维总体技术框架,采用系统论方法,将空中和地上空间场景中所有组成部分作为一个生命共同体,形成一个可持续发展的数字生态系统;通过数据—模型—知识有机集成,具备对历史问题诊断、当前状态评估以及未来趋势预测的能力,实现京张高速铁路数字孪生智能化与信息化建设运维共管共用。

主要功能包含设备设施基本信息管理、设备设施运行监控、动车故障预警、维修管理、灾害预警与生产管控及智能调度分析。可以有效提高京张高速铁路生产运输安全并在运行维护上降本增效,突破由传统的事后运维向事前预警的运维技术提升。

(二) 国外方面

国外发达国家十分重视铁路领域的智能化发展。2016年德国提出“铁路数字化战略”(铁路4.0),旨在实现智能化运营系统,形成以客户为中心的服务体系等目标;欧洲“铁路4.0”战略:德国、瑞士等国推动多源数据融合的设备状态分析体系。例如瑞士SmartRail4.0利用大数据技术解决多源检测数据治理难题;荷兰铁路基于物联网构建基础设施监测网络,实现故障风险评估与预测性维护。

(三) 技术发展趋势

边缘-云协同计算: 边缘端实时预处理,云端深度分析(如缺陷预测模型),提升响应速度。

多模态数据融合: 结合红外热像、位移传感、图像识别等多传感器数据,构建多模态数据融合的接触网“健康谱带”。

预防性维护模型: 综合安全性与乘坐舒适性指标,推动运维从“故障修”转向“预测修”。

三、系统组成及功能构想

(一) 感知层: 传感器网络

感知层由各类传感器和摄像头组成, 将传感器部署在铁路沿线接触网设备单元上, 负责实时采集接触网设备的运行数据和图像信息。具体包括:

力学传感器: 如角度传感器、加速度传感器等, 用于监测接触网补偿装置a/b值、附加线舞动、锚段补偿张力等。

红外传感器: 红外摄像头用于监测电缆头及隔离开关的温度, 实现过热预警。

图像传感器: 高清摄像头用于捕捉接触网设备的图像, 支持隔离开关引线驰度、受电弓通过架次、接触网抬升量、轻飘异物侵入等项目的监测。

(二) 传输层: 铁路专网或者无线传输

传输层采用铁路专网或者无线传输设备(如4G/5G通信模块、无线网桥), 将感知层采集的数据安全、稳定地传输至应用层。无线传输设备具备高速数据传输能力, 适应铁路复杂环境, 确保数据的完整性和准确性。通信协议采用TCP/IP等标准协议, 传输加密, 保障数据安全。

(三) 系统层: 边缘计算+云计算协同处理

系统层部署边缘端处理器和云计算中心, 实现边缘计算与云计算的协同处理。边缘端处理器对感知层采集的数据进行本地预处理和初步分析, 实现数据过滤、特征提取和简单的异常判断, 减少数据传输压力, 提高系统响应速度。云计算中心提供强大的计算和存储能力, 支持大规模数据的深度分析和处理, 为智能诊断、预警和决策支持提供有力保障。

边缘端处理器: 部署在靠近感知层的位置, 对采集的数据进行本地预处理和初步分析, 如数据过滤、特征提取和简单的异常判断等。这有助于减少数据传输压力, 提高系统响应速度。

云计算中心: 提供强大的数据处理和分析能力, 对边缘端处理器上传的数据进行深度挖掘和分析, 实现更复杂的异常模式识别、故障预测等功能。

(四) 应用层: 智能分析、预警、决策支持

应用层搭建统一的监测管理系统, 具备以下功能:

智能分析: 运用先进的算法模型对监测数据进行深度分析, 实现对接触网设备状态的智能评估和故障诊断。引入深度学习算法, 如卷积神经网络(CNN), 对图像、时序数据深度挖掘, 精准判断设备状态。

预警: 根据预设的阈值和规则, 对监测数据进行实时分析, 一旦发现异常立即通过声光报警、短信、邮件等方式发出预警信息, 通知相关运维人员及时处理。预警阈值依据设备运行标准和历史数据动态调整, 提高预警准确性。

决策支持: 提供历史数据查询、统计分析、报表生成等功能, 为运维人员制定维护策略和优化方案提供数据支持。数据可视化展示, 以图表、曲线等形式直观呈现设备运行趋势和故障规律, 辅助决策制定。

四、系统功能项点构想

(一) 补偿装置a/b值实时监测

通过激光测距方式直接测量接触网补偿装置a/b值或在棘轮转轴上安装高精度角度传感器, 通过实时采集棘轮转动角度, 结合棘轮半径参数, 精确测算补偿绳活动轨迹, 进而换算出补偿装置a/b值, 实时掌握补偿装置运行状态。将采集数据发到后台服务器, 通过计算可以判断出接触网a/b值过小过大, 在云计算中心设置a/b值的正常范围, 当监测值超出设计范围时, 报警信息可通过手机和PC端查看。

(二) 隔离开关引线驰度实时监测

通过高清摄像头捕捉隔离开关引线的图像, 利用先进的图像识别技术, 对引线形态进行实时分析, 通过视觉算法精准计算引线驰度数值。边缘端处理器运用图像识别算法对引线图像进行分析, 计算引线驰度数值, 并将结果上传至云计算中心。算法采用先进的深度学习模型, 对不同环境下的引线驰度识别准确。在云计算中心设置引线驰度的设计运行曲线, 当监测值超出设计范围时, 系统自动发出预警信息。

(三) 电缆头及隔离开关等设备温度监测

采用红外摄像头对电缆头及隔离开关的温度实时监测, 另外电缆可在生产制造时放置测温光纤。红外摄像头通过热成像技术检测电缆头温度分布, 根据《带电设备红外诊断规范》, 在云计算中心主导电回路设备温度上限阈值和温差阈值, 实现导电设备温度过热预警。

(四) 重污区段电缆头及绝缘子放电监测

采用紫外摄像头或者超声波探头, 对重污区段电缆头及绝缘子等绝缘设备进行监测, 在云计算中心预设绝缘设备放电紫外光子数或者超声波上限阈值, 当监测值超出设计范围时, 系统自动发出预警信息, 实现绝缘设备的绝缘缺陷预警监测。

五、系统特点及需研究的关键技术

(一) 系统特点

1. 精准监测, 洞察设备细微变化

系统采用先进的传感器技术。红外传感器可以实现对电缆头、隔离开关等设备温度的非接触式测量, 精准检测设备的发热状况; 图像传感器搭配高分辨率摄像头, 能够清晰捕捉设备的外观细节, 识别设备抬升量, 振幅等参数。

2. 实时预警, 异常状态及时处理

基于深度学习算法, 系统构建强大的智能预警功能。当监测数据出现异常时, 迅速与正常模式进行比对分析,

精准判断故障类型和严重程度，并在第一时间发出预警信号。预警信息通过多种渠道传达给运维人员，如短信、电话、系统消息推送等，确保运维人员能够及时收到并采取相应措施。这种实时预警机制使铁路供电部门能够最大争取处理的时间，将故障消除在萌芽状态。

3. 智能诊断，提供科学维护依据

传统的接触网设备运维主要依赖人工巡检，这种方式不仅效率低下，而且在恶劣天气或复杂地形条件下，巡检工作难度大、风险高。通过实时监测和智能预警，系统大大减少人工巡检的工作量和频率，降低人力成本和安全风险。系统的智能诊断系统能够对故障设备进行深入分析，结合设备的运行历史、设计参数、环境因素等多维度信息，迅速定位故障根源，并为运维人员提供详细的维修建议和解决方案。此外，系统通过对设备运行数据的长期监测记录和智能分析，真正实现对设备生命周期的服役数据不间断统计，为摸索设备服役运行规律、优化设计标准、细化零部件更新改造周期提供科学依据，降低铁路供电设备运营的总体成本。

4. 运用灵活，可视化展示

系统提供多样化的可视化界面，满足不同用户的需求。关键指标卡片组以简洁明了的方式展示了设备运行总览、预警统计、运行效率和能耗指标等核心数据，让用户在第一时间掌握关键信息。铁路沿线供电设备分布地图采用矢量电子地图技术，支持缩放、平移、热力图模式切换等互动功能，能够清晰地了解设备的地理分布和运行状态。多

指标融合图表和趋势洞察小卡片则以直观的柱状图、曲线图等形式展示供电设备的各项运行参数和趋势变化，帮助深入分析设备的运行规律和潜在问题。

(二) 需研究的关键技术

1. 结合物联网、大数据、人工智能、可视化等先进技术，研究边缘端实时处理、云端深度分析的边缘-云协同接触网智慧感知平台体系。

2. 研究接触网关键技术参数多源数据融合与边缘计算。

3. 研究基于AI的接触网运行状态异常模式识别。

4. 研究强电磁干扰工况下温度、距离、震动等高精度传感器抗干扰技术。

5. 研究接触网运行状态自适应阈值动态调整算法。

6. 研究弱信号下监测数据的传输技术。

六、结束语

接触网技术状态实时监测感知和数智化运维系统在建设顺序上应与接触网工程做到“同时设计、同时施工、同时验收”，在设备选型上应选择具有良好的抗电磁干扰性能传感器，确保数据可靠性和检测精度。另外，接触网技术状态实时监测感知和数智化运维系统，围绕影响接触网运行安全的重大风险源，对接触网关键设备和结构运行状态实时感知和智能管理，但接触网设备本身结构复杂、数量庞大，该系统无法对沿线零部件设备的“松脱卡磨断裂烧锈”等惯性缺陷全覆盖监测管控，因此不能替代既有的接触网6C检测和运维手段，功能定位上可作为现代化接触网智慧运维有力支撑。

参考文献：

[1]王凯,周黎明.基于物联网技术的高压电气结点温度监测系统研究[J].长江信息通信,2024,37(4):165-167.

[2]罗毅,黄毅文.电气自动化系统中状态监测与故障诊断的实现方法研究[J].中国新技术新产品,2024(6):31-34.

[3]王帅,姜敏,李江林,等.全维度智能变电站设备状态监测关键技术研究[J].电测与仪表,2020,57(7):82-86.

[4]宋玉涛,辛昂倍,王自平.基于人工智能的电力设备故障诊断研究[J].光源与照明,2024(4):80-82.

[5]蒲天骄,乔骥,韩笑,等.人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J].高电压技术,2020,46(2):369-383.

[6]邵俊松.基于物联网技术的电力设备远程监控与故障诊断系统研究[J].中国设备工程,2025(6):199-201.

[7]许婧,王晶,高峰,等.电力设备状态检修技术研究综述[J].电网技术,2000,24(8):48-52.

作者简介：

苏建国（一作），（1986.4—），男，汉，山西绛县，本科，高级工程师，研究方向：供电检测。

高厦（二作），（2007.6—），女，汉，江西赣州，大专，研究方向：接触网设备。