

# 接触网设备维护的智能化解决方案研究

秦 韬

国家能源集团新朔铁路有限责任公司供电分公司 内蒙古鄂尔多斯 010300

**摘 要：**随着电气化铁路的快速发展，接触网设备作为其重要的供电设施，其运行状态直接关系到铁路运输的安全与效率。然而，传统接触网设备维护方式存在效率低下、响应不及时等问题，难以满足现代铁路运输的需求。因此，研究接触网设备维护的智能化解决方案具有重要的现实意义。本文旨在探讨如何利用物联网技术、人工智能与大数据分析、无人机巡检技术等先进手段，构建接触网设备智能化维护体系，实现实时监测、预警、远程诊断与专家支持，提升接触网设备维护的智能化水平。

**关键词：**接触网设备维护；智能化；解决对策

## 引言

在电气化铁路迅猛发展的当下，接触网设备作为铁路运输的核心供电设施，其稳定性和可靠性对于保障铁路运输的安全与高效至关重要。然而，传统的接触网设备维护方式往往依赖于人工巡检和定期维护，这种方式不仅效率低下，而且难以实时发现和解决潜在问题，导致维护成本高昂且效果不佳。随着物联网技术、人工智能与大数据分析、无人机巡检技术等先进手段的不断发展，为接触网设备维护的智能化提供了可能。因此，本文旨在深入研究接触网设备维护的智能化解决方案，以期通过引入先进技术，构建智能化维护体系，提升接触网设备的维护效率和质量，为铁路运输的安全与高效提供有力保障。

## 一、电气化铁路运行的基础

电气化铁路作为现代交通运输体系的核心支柱，其运行基础高度依赖于接触网设备的稳定供电能力。接触网作为铁路系统的“电力动脉”，通过架空导线向列车持续输送25kV或27.5kV的高压电能，其供电可靠性直接决定着铁路运输的安全与效率。据国际铁路联盟（UIC）统计，全球电气化铁路里程已突破35万公里，占铁路总里程的38%，但承担着72%的客运量和65%的货运量，这种非对称分布凸显了接触网设备在能源传输中的战略价值。以我国京沪高铁为例，其接触网系统采用全补偿简单链形悬挂结构，通过张力自动补偿装置将接触线张力波动控制在 $\pm 5\%$ 以内，确保了列车在350km/h运行速度下受流质量的稳定性，实际运营中因接触网故障导致的

晚点率不足0.3%，远低于传统铁路1.2%的平均水平。

接触网设备的运行质量受多重因素制约，其中环境适应性是关键挑战之一。德国DB公司研究显示，接触线磨耗速率与运行速度呈指数关系，当速度从200km/h提升至300km/h时，磨耗系数从0.08mm/万列公里激增至0.23mm/万列公里。为应对这种挑战，日本新干线采用铜镁合金接触线，其抗拉强度达520MPa，导电率保持90%IACS以上，配合定期的激光检测技术，将接触线高度偏差控制在 $\pm 30\text{mm}$ 范围内，有效延长了设备使用寿命。法国TGV系统则通过建立三维接触力模型，量化分析弓网动态相互作用，发现当接触力超过120N时，电弧发生率呈指数级上升，据此优化了受电弓压力调节系统，使接触部件损耗降低40%。这些实践表明，接触网设备的维护必须建立在精确的力学分析和材料科学基础之上<sup>[1]</sup>。

从系统论视角看，接触网设备与铁路运输系统形成典型的“强耦合-弱冗余”结构。美国联邦铁路管理局（FRA）事故分析显示，接触网故障导致的系统瘫痪平均恢复时间达4.2小时，是信号系统故障的2.3倍。这种脆弱性促使行业向智能化维护转型，西门子交通集团开发的接触网健康管理系統（OCS-HMS），通过部署2000余个传感器节点，实时采集温度、张力、振动等12类参数，利用深度学习算法预测设备剩余寿命，准确率高达92%。

## 二、智能化技术在铁路检修中的应用趋势

### 2.1 物联网技术的引入

在智能时代下，电气化铁路接触网设备维护正经历

着前所未有的革新，其中物联网技术的引入成为推动这一变革的核心力量。物联网技术通过将接触网设备与传感器、通信网络深度融合，实现了设备状态的实时感知与数据传输，为接触网设备的智能化维护提供了坚实的数据基础。例如，通过在接触网关键部位部署温度传感器、振动传感器及电流传感器，构建覆盖全线的物联网监测系统。该系统能够实时采集设备运行数据，并通过无线通信技术将数据传输至中央监控平台。物联网技术在接触网设备维护中的应用，不仅限于数据采集与传输，更在于通过数据分析模型实现设备状态的精准预测与维护策略的优化。例如，基于历史运行数据和实时监测信息，系统可建立接触网设备健康状态评估模型，通过机器学习算法识别潜在故障模式。当监测到某区段接触线温度持续超过阈值时，系统会自动触发预警并生成包含维修优先级、备件清单的维护工单。

### 2.2 人工智能与大数据分析

在智能时代下，电气化铁路接触网设备维护正经历着由人工智能与大数据分析驱动的深刻变革。传统维护模式依赖人工巡检与经验判断，存在效率低、响应慢、漏检率高等局限，而人工智能与大数据分析技术的引入，为接触网设备维护提供了精准化、实时化、智能化的解决方案。例如，通过在接触网关键部件部署传感器网络，可实时采集温度、振动、应力等多元数据，结合机器学习算法构建故障预测模型，实现对设备状态的动态评估与异常预警。人工智能在接触网设备维护中的核心价值体现在故障预测与健康管理（PHM）领域。通过构建深度学习模型，系统可自动识别设备运行数据中的异常模式，提前预测潜在故障。例如，某研究团队采用LSTM神经网络对接触网绝缘子污秽度进行预测，模型准确率达91%，较传统阈值法提升27%。大数据分析则进一步

强化了这一能力，通过整合历史维修记录、环境参数、设备参数等多源数据，构建覆盖全生命周期的设备健康档案。大数据分析在接触网设备维护中的另一个关键应用是优化巡检路径与资源分配。传统巡检依赖固定周期与路线，易导致资源浪费或覆盖不足。而通过分析设备历史故障数据、地理信息、天气条件等变量，可构建动态巡检模型，实现巡检任务的智能调度。例如，中国铁路总公司曾推动实施接触网设备智能监测项目，通过部署传感器网络实时采集设备振动、温度、电流等关键参数，结合边缘计算技术实现数据本地预处理，再经5G网络传输至云端平台。该项目利用机器学习算法对设备状态进行动态评估，成功将突发故障率降低。该系统通过深度学习算法识别设备运行中的异常模式，提前72小时预警潜在故障，为维护团队争取充足的响应窗口<sup>[2]</sup>。

### 2.3 无人机巡检技术

在智能时代下，电气化铁路接触网设备维护正经历着前所未有的革新，其中无人机巡检与自动化监测系统的进步尤为显著。无人机技术的引入，不仅极大地提升了巡检效率，还通过高清摄像、红外热成像等先进技术，实现了对接触网设备状态的全方位、高精度监测。无人机通过搭载多种高精度传感器，如激光雷达、可见光相机以及多光谱成像仪等，能够实现对接触网设备几何参数、表面缺陷及温度分布的精准测量。这些传感器采集的数据经无人机内置处理器初步处理后，通过无线通信模块实时回传至地面控制中心，为后续分析提供丰富数据源。同时，基于计算机视觉与深度学习算法的智能分析系统，可自动识别接触网支撑装置、绝缘子等关键部件的微小裂纹、锈蚀等缺陷，实现从数据采集到故障诊断的全流程自动化，大幅提升巡检效率与准确性。以下是典型案例与量化成效（按场景）表格（表1）。

表1 典型案例与量化成效（按场景）

单位/线路	场景/区段	量化成效	备注
昆明局玉溪供电段	全段电力/接触网	巡视效率提升约8倍；年省人工成本约200万元；累计飞行2096小时、1153+架次	无人机+喷火清除轻飘物，夜检照明
乌鲁木齐局库尔勒供电段	南疆/格库线等	1公里巡检由2小时→10分钟（提升10倍）；累计覆盖4820公里；图片2.7万张、隐患693项；缺陷识别算法280+类	红外+激光雷达，RTK/APP协同采集
昆明局玉溪供电段	玉河线等	人工6小时→无人机2小时；隐患40+处；效率提升>80%	4K+红外，建立“无人机巡检数据库”
哈尔滨局齐齐哈尔供电段	隔离开关单体	4人25分钟→2人5分钟（提升4倍）	高清回传，资料可追溯

### 三、接触网设备智能化维护的解决方案

#### 3.1 实时监测与预警系统设计

在智能时代下，接触网设备维护的革新离不开实时监测与预警系统的深度设计。该系统通过集成高精度传感器网络，实现对接触网关键参数如温度、张力、振动频率及绝缘子状态的全天候、无死角监测。例如，某铁路局在引入基于物联网的实时监测系统后，接触网故障率同比下降37%，这得益于系统对异常数据的秒级响应能力——当监测到某区段接触线温度超过85℃阈值时，系统立即触发三级预警，并自动推送至维护终端，使抢修人员得以在15分钟内抵达现场，避免了因过热导致的断线事故。预警系统的核心在于其智能分析模型的设计。某研究团队开发的基于LSTM神经网络的预测模型，通过历史故障数据与实时监测数据的融合训练，实现了对接触网部件剩余寿命的精准预测。该模型能够动态调整预测阈值，当监测数据偏离正常范围时，系统不仅会发出预警，还能结合部件历史更换记录、环境因素等，生成差异化的维护建议<sup>[3]</sup>。例如，针对绝缘子污秽度超标问题，系统可自动推荐清洗周期调整方案，而非简单触发更换流程。此外，通过与地理信息系统（GIS）的集成，预警信息能够精准定位至接触网杆塔坐标，并同步显示周边抢修资源分布，包括备用部件库存、最近维护班组位置及交通路线规划，显著提升了应急响应效率。

#### 3.2 预测性维护策略

预测性维护策略以设备运行数据为基础，通过机器学习算法构建故障预测模型，实现对接触网关键部件的寿命预估。该策略采用多维度数据融合技术，整合温度、张力、振动等传感器数据，结合环境温湿度、风速等外部因素，构建动态健康评估体系。当模型预测某部件剩余寿命低于阈值时，系统自动生成维护计划，并考虑部件重要性、停运影响等因素，优化维护窗口期。例如，针对承力索磨损问题，系统可结合历史断裂数据与当前磨损速率，提前30天预警并推荐更换方案，同时提供备用部件库存查询及施工班组调度功能，将被动维修转变为主动预防。在维护窗口期的规划上，该策略还具备智能调整能力。若预测到多个部件将同时进入维护临界状态，系统会综合考量各部件的关联性、维护复杂度以及线路运行图，自动调整维护顺序和时间，避免集中维护对铁路运营造成过大影响。而且，系统会根据实时天气数据，如遇恶劣天气可能影响户外作业时，提前重新规

划维护窗口期，确保维护工作的安全性和有效性<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 远程诊断与专家系统

远程诊断与专家系统作为接触网设备智能化维护的核心模块，通过集成多源数据与智能算法，实现了故障的快速定位与精准决策。该系统首先利用前端传感器网络实时采集接触网振动、张力、温度等参数，结合图像识别技术对绝缘子破损、金具锈蚀等典型故障进行特征提取。数据经边缘计算节点预处理后，上传至云端诊断平台，通过与历史故障库的匹配分析，系统可在3分钟内完成故障类型识别与严重程度分级。针对复杂故障场景，专家系统调用知识图谱中的维修案例与解决方案，结合实时环境参数（如风速、湿度）生成动态维修指南。例如，当系统诊断出补偿装置卡滞故障时，会同步推送该型号设备的常见故障点分布图、维修工具清单及安全操作规范。此外，系统支持多终端协同诊断，现场维护人员可通过AR眼镜获取三维模型标注的故障位置，并与远程专家进行实景交互，专家可通过标注、语音指导等方式辅助现场处置，显著缩短了故障排除时间<sup>[5]</sup>。

#### 结束语

综上所述，接触网设备维护的智能化解决方案通过引入物联网技术、人工智能与大数据分析以及无人机巡检技术，实现了对接触网设备的实时监测、预警、远程诊断与专家支持，显著提升了设备维护的效率和准确性，为电气化铁路的安全稳定运行提供了有力保障。未来，随着技术的不断进步，接触网设备智能化维护将迎来更加广阔的发展前景。

#### 参考文献

- [1] 王双双. 基于智能巡检的接触网维护策略优化[J]. 电气化铁道, 2024, 35(S1): 81-85+90.
- [2] 王永珩. 寒冷地区电气化铁路接触网的检修维护[J]. 产业创新研究, 2024, (22): 133-135.
- [3] 刘三. 地铁接触网状态检测技术探析[J]. 人民公交, 2024, (22): 162-164.
- [4] 钟彦, 黎仕强, 李取超, 代璐. 电气化铁路接触网供电线T接方式优化方案研究[J]. 铁道技术监督, 2024, 52(09): 44-48.
- [5] 许丁. 城市轨道交通接触网设备可视化运维管理[J]. 运输经理世界, 2024, (25): 4-6.