

基于智能传感的地铁接触网状态实时监测技术研究

胡鹏举

常州地铁集团有限公司运营分公司 江苏常州 213011

摘要：随着地铁系统的不断发展，接触网的稳定性与安全性成为保障地铁正常运行的关键因素。传统的人工巡检方法存在周期长、效率低等问题，难以满足现代化地铁系统对实时监测的需求。基于智能传感技术的地铁接触网状态实时监测系统，通过多源传感器的集成与数据融合，能够实时采集接触网各部件的状态信息，并通过智能分析模型对其健康状况进行评估。本研究探讨了基于智能传感技术的监测体系构建、数据融合与特征提取方法、实时状态识别与健康评估策略等，系统验证表明该技术在提高运维效率、降低成本、提高故障预警能力等方面具有显著优势。

关键词：地铁接触网；智能传感；实时监测；数据融合

引言

地铁接触网是地铁电力系统的重要构成要素，其状态直接关系到地铁的安全以及可靠性。传统的人工巡检方式无法满足高速、频繁运营的需求，无法及时发现潜在故障，伴随智能传感技术的快速发展，依据传感器的实时监测系统广泛应用于地铁接触网的维护跟管理。智能传感系统借助实时数据采集与分析，可以准确判断接触网的运行状态，提前发现故障隐患，增强地铁系统的运维能力与安全性，本研究意在探查智能传感技术在地铁接触网状态实时监测中的应用，分析建立方法与实行效果。

一、地铁接触网状态监测需求分析

（一）接触网关键部件失效模式与典型故障机理

地铁接触网的关键部件包含导线、支架、接触线、连接装置等，此类部件可能出现多种失效情况，导线长期运行后可能磨损或拉伸，发生松弛或断裂问题，严重时中断电力供应，支架与接触线容易发生腐蚀、老化或变形，恶劣天气时腐蚀更快，造成支撑不稳。接触线的接触力不均匀会使电流不稳定，威胁到列车运行安全，连接装置的松动也常引发接触网部分失效，故障发生多为逐渐积累性损伤，部分故障可能在不经意间爆发，导

致系统无法及时恢复，有效监测这些部件状态，能有效增加运行可靠性，减少故障发生^[1]。

（二）运行环境对接触网状态变化的影响因素与监测必要性

地铁接触网运行环境繁复，外部因素作用其状态变化十分明显，温度变化是最直接的作用因素。高温跟低温会让导线热胀冷缩，接着改变接触网的张力，造成电力不稳，湿度、雨雪等气象条件可能加快导线跟支架的腐蚀，关系接触网的使用寿命。城市轨道交通大多运行于冗杂地下环境，湿气较重，极端气候下的冰雪或盐分腐蚀问题特别突出，轨道的振动、车辆负荷的波动等因素，也可能波及接触网的稳定，面对这些繁复因素，实时监测接触网的状态很有必要，可以及时发现问题，采取有效防范措施。（见图1）

（三）智能监测系统的专业性能需求与技术挑战

智能监测系统的高效运行需要达到高精度、实时性和长时间稳定等性能标准，系统必须精确监测接触网各部件变化，保证数据可靠准确。但是地铁运行环境冗杂，设备大多面对高温、湿气、震动等极端条件，这对传感器稳定性提出了极高要求。传感器采集的数据量很大，怎样在保证实时性时有效传输与处理海量数据，变成系

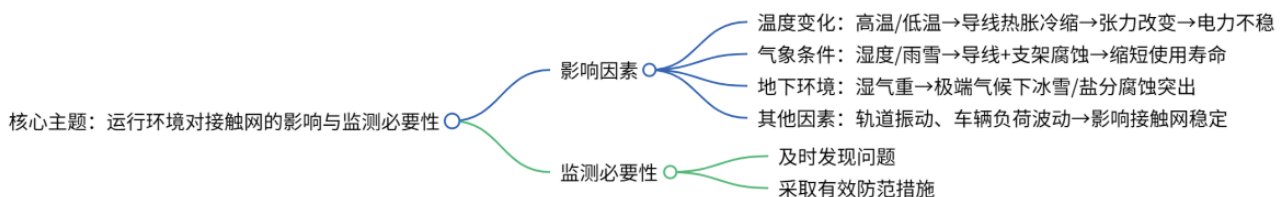


图1 接触网运行环境影响因素与监测必要性

统遇到的难题，地铁接触网包含区域广，数据采集链路的稳定性跟高效性必须保证，多源数据融合跟特征提取依赖强大算法，怎样从繁复数据里提取有效信息，建立准确的状态识别模型，仍旧是技术难题。技术不断进步，同样满足低功耗要求，让系统高效运行，就是现在要解决的一大难题^[2]。

二、基于智能传感的监测体系构建

(一) 多源智能传感器的选型原则与部署策略

地铁接触网监测系统里，传感器的选择以及部署特别重要，不同种类的传感器需要依照接触网部件的特性以及监测需求。合理选择类型，温度传感器能有效监测导线的热胀冷缩变化，位移传感器用来监测支架的位移跟形变，应变传感器可以实时检测接触网各部分的受力状态。振动监测时，使用加速度传感器能更好地捕捉列车运行引起的接触网部件振动，传感器部署方案也极为核心，必须考虑监测区域覆盖性与传感器工作环境，部署位置要保证传感器全面监测关键部件，避免盲区，根据环境条件，传感器必须有着抗干扰能力，保证数据采集稳定准确。

(二) 监测数据采集链路设计及关键参数同步技术

数据采集链路的设计要保证高效、实时的数据传输跟处理，接触网状态监测涉及多源传感器的数据采集。这些传感器数据的时效性和一致性要求系统可以在高负荷下稳定运行，为了保证数据采集的准确度，设计时需要考虑不同传感器彼此的数据同步情况。各传感器可能有采集时间不同步的情况，使用准确时间同步技术，比如网络时间协议（NTP）或自适应同步算法，保证所有传感器数据可以同步采集、及时传输，采集链路还需考虑数据传输的稳定性，尤其处于冗杂地下环境时，信号可能遭遇屏蔽或干扰，所以数据传输需选择抗干扰能力强的传输方式，借助冗余设计保证系统可靠。

(三) 监测系统总体架构构建与硬件集成实现

监测系统总体架构应该包含数据采集、处理、存储与传输等功能，构成完整数据链路，硬件集成部分。系统需包含传感器、数据采集单元、传输模块和处理平台，传感器实时监测接触网各部件状态，数据采集单元完成信号采集初步处理，传输模块用来把采集数据凭借有线或无线方式传至中央处理平台。中央处理平台须具备强大计算能力，分析处理数据，生成故障预警信息，保证系统稳定可靠，硬件集成要想到抗干扰能力、功耗控制与长期运行稳定性。所有硬件组件兼容性 & 集成性靠着准确设计跟测试，保证系统实际应用时高效运作^[3]。

三、接触网状态实时识别与健康评估方法

(一) 多传感数据融合与特征提取方法

地铁接触网监测系统涉及多种传感器，获取的数据类型多样，包括温度、湿度、应变、振动等。多源数据的有效融合和特征提取是实现高效监测和准确诊断的关键。由于各传感器采集的数据存在差异，其特征值在不同时间和不同环境下变化较大，如何将这些异构数据进行统一处理，提取出具有代表性的特征成为挑战。为此可采用基于数据融合的算法，如卡尔曼滤波、主成分分析（PCA）或小波变换等方法，将多维度数据转化为更具可比性的单一特征。在此基础上，通过特征提取技术，从数据中提取出关键信息，如接触网部件的应力波动、温度变化趋势等，来识别接触网的运行状态。这些提取的特征能够反映接触网的健康状况，结合算法模型进一步分析，能够提供精确的故障诊断与预测信息，为后续的健康评估提供可靠的数据支持。

表1 地铁接触网监测传感器数据处理与特征提取

传感器类型	采集的数据类型	数据处理方法	特征提取技术	应用
温度传感器	温度	卡尔曼滤波	温度变化趋势	识别接触网运行状态
湿度传感器	湿度	主成分分析 (PCA)	湿度波动	监测接触网环境条件
应变传感器	应变	小波变换	应力波动	识别接触网受力状态
振动传感器	振动	卡尔曼滤波	振动频率变化	检测接触网的振动特性

(二) 实时状态识别模型构建与在线处理机制

接触网状态的实时识别，需要准确的数据处理和高效的模型辅助，建立实时状态识别模型，第一步挑选适合接触网监测的算法，比如支持向量机（SVM）、决策树、神经网络等，这些算法利用多传感器数据，实时完成状态分类。该模型分析传感器采集的各种特征，可以快速识别接触网的正常运行状态以及异常变化，实时状态识别模型不只是数据分类工具，同样需要在线处理能力，可以对新接收数据即时处理跟反馈，所以系统要设计恰当的数据流转机制，把采集数据快速送到中央处理平台，利用高效计算资源完成分析输出结果。实现时改良数据流与模型训练环节很核心，实时识别系统不光要求高精度结果，还要高可靠、低延迟，当地铁系统运行时，任何状态变化都能及时响应，减少故障和事故发生。

(三) 基于趋势分析的健康评估与预警策略

健康判断与预警方针是接触网监测系统的重要部分，

为做到长期监控接触网状态，要使用趋势分析手段判断接触网健康情况，趋势分析使用历史数据跟实时监测数据，借助时间序列分析，找出接触网部件不同时段的健康变化规律。这一过程需要实时数据的变化，也要顾及环境改变、负荷波动等外部条件的改变，趋势分析能发现接触网健康衰退的形式，预测故障可能，温度与应力的异常变动可能显示接触网某些部位老化或损坏，提前预警帮助维修人员获得更精确的干预信息。融合趋势分析与机器学习算法，可以为每个部件制定个性化健康判断标准，给出预测性维护服务，预警系统融合健康判断模型，预判接触网可能发生的故障，按风险高低发送预警，帮助运维决策，该预警方略的实行，能大幅提高地铁系统的运营安全性和能力，减少接触网故障造成的系统中断或安全事故^[4]。

四、系统效能理论分析与工程应用验证

(一) 系统效能的理论分析

接触网实时监测系统的效能突出表现在准确性、实时性、稳定性和可扩展性，准确性指系统可以精确识别接触网的状态变化，保证故障的早期预警以及诊断，实时性衡量系统处理数据的响应速度，关系到故障能否被及时发现并采取措施。稳定性是指系统在繁复环境中长时间运行的可靠程度，特别是遇到环境变化、传感器故障等外界干扰，系统应当保持高效稳定的工作状态，为了全面检查系统的效能，要用理论方法实行量化分析，依据概率论跟统计学的效能检查方法可以帮助看看系统实际用起来怎么样，譬如监测准确程度、漏报率、误报率等。理论分析还能建立不同场景的仿真模型，预测系统多种异常条件的响应能力，为系统优化给予理论依据，这些分析能清晰识别关乎系统效能的关键因素，给后续改良指明方向。

(二) 应用效果评估：运维效率提升与成本效益分析

系统应用效果需要看运维能力和成本效益，运维能力增强特别折射在监测系统自动化水平以及预警能力，相比传统人工巡检，智能传感监测系统能做到全天候包含实时监测，大幅减少了人工巡检次数跟强度，凭借实时故障诊断与定位，运维人员能在问题刚出现时就获得准确的位置信息跟故障类型，马上采取措施，避免故障扩大，加快维修速度。智能监测还能利用历史数据预测趋势，给出设备维护周期的更好方案，减少不必要的检修成本，在成本效益分析中，智能监测系统虽然初期投入较大，长远看能明显减少由于设备故障引发的停运损失、维修费用以及运营中断的后果。计算监测系统的投资回报率（ROI）以及生命周期成本，可以量化系统带来的经济效益，证明对提升地铁运营能力、减少故障

率跟维护成本有着巨大价值^[5]。

(三) 存在问题与优化改进措施

虽然智能传感技术用于地铁接触网监测已有成效，使用期间依旧有些问题，传感器稳定性以及环境适应能力不够，地铁接触网多在地下或户外，湿度、温差、震动等可能让传感器失灵或数据不准，减少系统可靠性，数据采集跟传输时，信号干扰或网络不稳定可能造成数据丢失或延迟，拖慢实时处理。目前故障诊断模型和算法尚不完美，可能出现误报以及漏报，拖慢运维人员响应速度，为了解决此类问题，精进措施要特别注意这些地方：让传感器更耐用、抗干扰能力更强，找到更适应地铁繁复环境的传感器，传输数据时使用更可靠的通信协议，保证数据实时传送跟处理；让故障识别模型更精进，加入深度学习这类先进技术，使故障检测更准、预警能力更强。此类措施执行后，智能监测系统的整体性能力和稳定性会增进，能更好满足地铁接触网的监测需求。

五、结论与展望

基于智能感应的地铁接触网状态实时监测技术，通过多源传感器的集成与数据融合，有效提升了接触网运行状态监测的准确性和实时性。研究表明该系统能够实现对接触网关键部件的全面监控，实时识别运行异常，提供故障预警，极大提高了运维效率和安全性。在降低故障发生率、减少停运时间、优化维护成本方面也展现出了显著的优势。尽管系统已在实际应用中取得了良好的效果，但仍存在传感器稳定性、数据同步、故障识别精度等方面的挑战。未来随着传感技术、数据处理能力和人工智能算法的进一步发展，智能监测系统将更加精准、可靠，为地铁接触网的智能运维提供更加有力的技术支持。系统的可扩展性与普适性也将得到进一步提升，为其他铁路系统提供借鉴。

参考文献

- [1] 刘翔. 地铁接触网设备状态监测与故障预警研究[J]. 消费电子, 2025 (1): 212-214.
- [2] 刘三. 地铁接触网状态检测技术探析[J]. 人民公交, 2024 (22): 162-164.
- [3] 王朝明. 关于地铁接触网状态检测的探讨[J]. 科学大众, 2021, 000 (012): P.346-347.
- [4] 俞席元. 关于地铁接触网状态检测的探讨[J]. 市场周刊·理论版, 2020 (92): 0229-0229.
- [5] 黄焕辉. 地铁刚性接触网供电系统弓网状态在线检测装置[J]. 机械与电子控制工程, 2024, 6 (21): 189-191.