

快速磁浮交通运营安全智能监测技术研究与应用

高尚康

湖南轨道交通应用研究中心有限公司 湖南 长沙 411103

摘要：由于主要面向旅游景区及市域交通等复杂地形地势条件，快速磁浮交通在运营过程中面临边坡滑塌、路基坍塌、桥隧和车站结构损伤等风险。本文以具体磁浮交通项目为依托，针对其线路所属结构物及运营环境等风险，基于北斗+多传感器实现多源数据感知和融合，利用大数据分析技术构建磁浮交通运营安全智能监测平台，实现运营安全监测的智能化管理、决策和发布，提升运营效率和出行人员安全保障。

关键词：快速磁浮交通；结构物；运营环境；智能监测

快速磁浮交通是指时速不超过200公里的短定子常导磁浮交通运输系统^[1]。由于速度快、噪音低、爬坡能力强、科技属性强等特点，快速磁浮交通近年来引起了社会广泛关注，正被加快应用到市域交通、旅游风景区、交通枢纽连接等范围领域。尤其是湖南省，正加快促进磁浮交通产业高质量发展和工程化应用。长沙磁浮快线作为国内首条投入商业运营的快速磁浮线路，已稳定运行9年。凤凰磁浮观光快线作为国内首条旅游观光磁浮线路，开通3年来已经实现交通与文旅的深度融合，成为我国智慧旅游交通的典范。此外，已正式开工建设的长流磁浮快线将成为全国首条快速磁浮交通市域快线。

快速磁浮交通线路结构物在运营过程中，容易出现诸如桥隧、车站、路基、边坡等结构本身损伤或影响列车运营的环境风险。近年来随着智能运维技术的发展，物联网、大数据、人工智能等数智化技术已广泛应用于轨道交通运营中^[2-7]，但在磁浮交通领域相关研究还比较欠缺。因

此，探索并实现快速磁浮交通运营安全智能监测技术，对于保障磁浮交通线路长期安全运营有着重要意义。

1 系统架构

磁浮交通安全运营智能监测平台是典型的交通基础设施+物联网平台，平台针对轨道、桥梁、隧道、沿线边坡、道岔、车站建筑结构等磁浮交通基础设施以及超限、结冰等环境进行监测。应用卫星定位技术、视频智能检测技术以及传感器技术等物联感知技术，构建相应的物联体系。利用互联网、4G、5G以及局域网，搭建数据传输网络；将数据库划分为基础数据、监测数据以及外接数据三个部分，外接数据库可以通过相应的接口系统，与道岔监控系统、车辆巡检系统数据以及机电设备运行管控系统进行数据交换，同时开发数据整合与交换软件，对数据进行整合与分析。开发相应的用户软件平台（PC端及APP端），构建磁浮交通安全运营监测平台。系统架构如图1所示。



图1 磁浮交通运营安全智能监测平台系统架构

磁浮交通安全运营智能监测平台的应用功能主要分为5个功能模块，分别为管理驾驶舱（即信息面板）、基础数据、安全运营智能监测、道岔监控以及车辆巡检。其中：

管理驾驶舱具体包括磁浮交通设施资产信息统计、安全智能监测预警信息实时报警展示、道岔实时监控信息、设施数字化模型以及其他重要监管信息。

基础数据管理主要针对磁浮交通区间交通基础设施及沿线边坡及附属设施等，建立相应的基础数据库，主要包括磁浮交通设施基础属性管理、档案资料管理、数字化模型、资产管理等。

安全运营智能监测模块是核心内容，在结构监测方面包括轨道、边坡、隧道、桥梁等重要磁浮交通基础设施，在环境监测上包括侵限监测及结冰监测等。

道岔监控及车辆巡检通过从数据整合及交换平台中调用相关数据，对其中重要信息进行展示和管理。

2 监测内容

2.1 轨道检测

轨道检测重点是螺栓松动监测。人工监测需对每个扣件进行细致检查，费事费力，检测效率低。利用安装在螺栓上的非侵入式传感器，实时或间隔性地获取传感信号，结合先进的无线信号处理技术与智能分析算法，测量螺栓的松动旋出角度并计算螺栓松动趋势，发出预警和报警信息。螺栓松动监测如图2所示。



图2 螺栓松动监测示意

2.2 边坡监测

以某土石混合边坡为例，其裸露岩体的岩性为泥质条带灰岩，边坡防护为挡墙加锚索框架防护。岩土体发

作者简介：高尚康，男，中南大学硕士，现从事磁浮交通技术研究相关工作。

生滑移时，挡土墙会承受墙后岩土体压力，需对挡土墙变形进行检测。检测内容包括地表位移、变形发展情况和边坡实时状态。边坡监测如图3所示。



图3 边坡监测

2.3 隧道进出口监测

以某隧道为例，其出口段岩性为泥质粉砂岩，洞口永久仰坡采用骨架护坡，骨架内采用人字型灌草护坡。隧道出口为偏压段，隧道进口地标位移和隧道进口段的洞身衬砌变形（收敛及沉降）均应进行监测，对隧道入口的地表变形布置2个地表位移监测点，洞身砌衬变形布置两个监测断面进行监测。测点布置如图4所示。



图4 隧道进出口监测

2.4 隧道内结构监测

隧道若产生结构变形、开裂、掉块、渗漏水等病害，会给隧道及过往车辆造成了严重的安全隐患，直接危及隧道的使用功能，威胁列车运营安全。为解决人工检测时效差、周期长、风险高等弊端，采用三维激光扫描、云计算、边缘计算、大数据、物联网、移动互联网和人工智能、4G等技术与运营隧道的全生命周期的深度融合，建立隧道构件级、精细化、智能化的数字孪生

体,实现对运营隧道掉块、渗水的自动化监测。隧道内部的监控系统架构如图5所示:

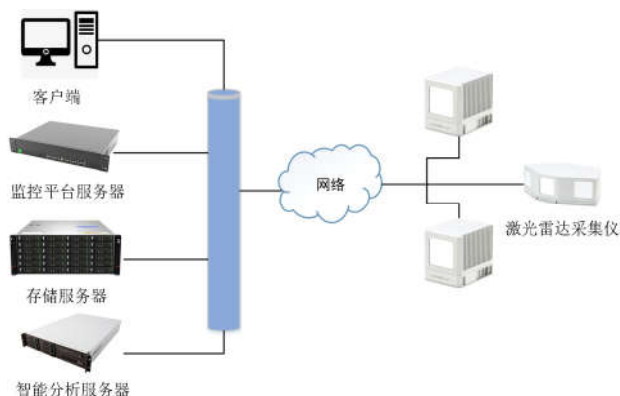


图5 隧道内部结构监测系统架构

2.5 侵限监测

通过红外热成像和图像检测等技术手段,同时利用声、光等技术发出报警信号,从而做到防止人员或动物靠近磁浮轨道设施。采用雷达视频融合分析系统建设方案。周界雷达基于多普勒原理,能够对检测区域内的各类活动目标物体进行探测和发现,通过AI算法,能够较好的区分人体活动或树枝晃动、列车开行等行为,具有无漏报、不受天气环境因素影响、施工简便、成本相对较低等优点。

2.6 冻雨监测

冻雨是初冬或冬末春初时常见的一种灾害性天气,对交通安全和电力通讯的损害较大,因此冻雨监测是地面气象业务观测中重要的组成部分,用于监测和预报冻雨。本项目采用遥感式结冰传感器是专门为交通监测而设计的,它采用遥感技术,避免了对基础设施的破坏,从而不会因为安装设备引起的对磁浮运营的干扰。多光谱测量技术使得能准确检测出轨道表面结冰、积雪和积水的厚度。

3 数据处理及预警机制

3.1 数据采集

作为一套在线安全监测系统,在完成初始数据的采集后,系统即可按照指定的周期,频率对监测点进行不间断的量测,获取其准确的变形监测数据。采集回的所有原始数据均直接自动存储到数据库中,保证了在用户界面的所有数据均是真实的原始数。系统自身会根据数据的属性以及对应的观测关系将观测数据进行妥善存储,任何时候均可以将整个监测周期的数据进行调阅。

3.2 数据处理与优化

对于监测大量的数据都通过传感器感应出来,由于传感器品种多、数量大,整个采集形成了巨大的数据库。

在海量的数据中,绝大部分数据有效可靠,偶尔会有异常数据的出现。异常数据的加入对数据的评估带来很大的麻烦,对结构的安全预警毫无意义。通过统计和滤波的方法可以处理异常数据,把无效数据从数据库中剔除掉,提高评估效率。

3.3 信息反馈与预警

面向磁浮交通极端气候条件下应用场景实际需求,基于正常行为分析的工业人工智能技术进行研究,建立关键监测及应急设备各种工况下的分析模型。以安全运营要求为基础,在实测数据、试验结果分析基础上,以结构可靠性为核心开展监控状态—应急处理映射模型研究,对基于自主数据的磁浮交通线路安全监测、自动预警及应急处理进行体系化研究。预警模型根据对对应结构的力学计算及现场监测数据信息,通过核查、综合分析和专家咨询等,判定工程风险大小,设定阈值,确定相应预警级别。

4 应用实践及效果

4.1 工程应用

基于上述设计,湖南轨道技术中心已经实现运营安全智能监测平台的研发,并在凤凰磁浮文旅线路开展工程应用实践。系统主要运行界面如图6所示。



图6 磁浮交通运营安全智能监测平台主要界面

系统通过搭建磁浮智能监测技术体系,建立起磁浮监测预警和快速应急体系,解决传统监测方法效率低、成本高、时效差等问题,实现了结构物状态实时监测、综合态势预知、实时预警、监测报告编写等功能。

4.2 效果评估

目前磁浮交通运营安全智能监测系统已经在凤凰磁浮文旅项目顺利运行近3年,有效保障了磁浮运营效率和出行人员安全保障,并实现了以下功能:

4.2.1 提升信息化管理能力

整合了车辆远程监控与巡检系统等信息数据,搭建统一平台,最大化提高数据的利用率。通过三维实景模型和自动化监测,实时掌握交通基础设施健康状况,提高决策支持力度。同时,结合移动互联网技术优势,进

行系统性、可视化的管理,实现了数据的精细化、智慧化管理。

4.2.2 增加健康安全指数

系统可监测结构整体响应、局部响应及环境参数,及时发现并处理病害,保证基础设施的安全,为维护管理提供科学依据,使养护方案更加合理,运营维护成本更低。通过及时发现异常交通事件,并进行预警引导,降低了安全事故发生的可能性和事故的影响范围,提高了磁浮轨道设施运营安全水平。

4.2.3 提升应急处置能力

通过强化资源共享、空间共用、互联互通,形成磁浮交通运营风险“防控一张图”,建立起磁浮基础设施监测预警和快速应急体系。一方面加强和规范突发事件的应急处置能力,最大程度地预防和减少突发事件及其造成的损害。另一方面精准治理应急风险,实现磁浮运行状态全天候、全天时可视、可测、可控,全面提升磁浮基础设施安全监管、预测预警预报和防灾减灾能力。

5 结束语

本研究所构建的磁浮交通运营安全智能监测系统,通过高精度感知、三维可视化和智能分析决策的有机融合,不仅显著提升了磁浮交通基础设施的安全保障能力和运营管理水平,也为轨道交通行业的数字化转型和智慧化升级提供了具有重要参考价值的实践案例。系统的成功应用,标志着磁浮交通在智能化安全监测与运维领域迈出了坚实一步,为未来磁浮交通乃至更广泛轨道交通领域的安全、高效、可持续发展奠定了坚实基础。随

着物联网、人工智能、数字孪生等技术的持续发展,该系统的功能与性能仍有广阔的优化与拓展空间,如更深层次的预测性维护、更广泛的系统集成、更智能的决策支持等,将是下一步研究的重点方向。

参考文献

- [1]湖南省工业和信息化厅等四部门关于印发《湖南省加快磁浮交通产业高质量发展若干政策措施》的通知[J].湖南省人民政府公报,2025,(04):16-18+29.
- [2]潘佳鹏,迟宝全.城市轨道交通信号系统智能运维平台研究[J].现代城市轨道交通,2024,(11):21-25.DOI:10.20151/j.cnki.1672-7533.2024.11.004.
- [3]石勇,易佳,熊桂开,等.基于多源监测传感设备的运营轨道隧道安全分析[J].测绘通报,2024,(S2):7-11.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2024.S202.
- [4]陈波.多监测技术在地下轨道交通工程中的应用研究[J].测绘通报,2024,(S2):115-121.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2024.S224.
- [5]张潇帅.基于Zabbix的城市轨道交通智能运维体系集中监控平台建设[J].城市轨道交通研究,2024,27(S1):110-115. DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.S1.023.
- [6]王隆龙,袁涛,汪宇昕.物联网技术在轨道交通车辆的应用场景分析及试验验证[J].铁道机车车辆,2024,44(03):113-118.
- [7]余祖俊,唐涛,李开成,等.智慧高速铁路运行控制系统发展趋势综述[J].铁道学报,2024,46(01):1-12.