

基于物联网技术的地铁隧道自动化监测系统研究与应用

边俊杰

(深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心, 广东 深圳 518000)

摘要 地铁隧道是城市轨道交通的重要组成部分, 其结构安全与环境监测是确保地铁运营安全的关键。传统的隧道监测方法存在数据采集不全面、实时性差和人工成本高等问题。全站仪自动化技术的发展为隧道监测提供了新的解决方案。通过将自动化全站仪布置在隧道内, 并利用无线传输技术将数据传输到集中管理平台, 再通过大数据分析 & 故障预测技术, 能够实现隧道结构和环境的实时监测与预警。本研究旨在设计和验证一套基于物联网技术的地铁隧道自动化监测系统, 提升隧道安全管理的智能化水平。

关键词 物联网技术; 地铁隧道自动化监测系统; 传感器; 数据传输技术; 数据分析

中图分类号: U231; TP27

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0022-03

地铁作为一种高效便捷的城市交通方式, 已经在全球范围内得到广泛应用。地铁隧道的结构安全和运营环境的监测尤为重要。隧道结构的长期稳定性和环境条件的变化直接关系到地铁的运营安全和乘客的生命财产安全。因此, 地铁隧道的监测已成为保障地铁安全运营的关键环节。

1 基于物联网技术的地铁隧道自动化监测系统开发的必要性

地铁隧道作为城市公共交通的重要组成部分, 其安全性和稳定性对于保障城市居民的日常出行具有至关重要的意义。然而, 随着地铁网络的扩展和运营时间的增加, 地铁隧道的结构安全面临着日益复杂的挑战, 尤其是在地质条件复杂、施工质量参差不齐以及自然灾害频发的情况下, 地铁隧道的安全隐患不容忽视。因此, 开发基于物联网技术的地铁隧道自动化监测系统显得尤为必要。传统的地铁隧道监测方法主要依赖于人工巡检和简单的传感器系统。这些方法不仅效率低下, 而且存在较大的主观性和滞后性, 难以实时、准确地掌握隧道的安全状况。相比之下, 物联网技术可以实现对隧道结构的全方位、全天候监测, 通过部署各类传感器, 实时采集隧道的应力、位移、温度、湿度等数据, 并通过无线网络进行数据传输, 确保监测信息的实时性和准确性。通过引入大数据和人工智能技术, 可以对海量监测数据进行深入挖掘和分析, 及时发现潜在的安全隐患, 预测隧道结构的变化趋势, 提供科学的决策支持。例如, 利用完善可靠的算法对历

史监测数据进行建模和分析, 可以实现对隧道变形、渗漏等问题的早期预警, 有效降低安全事故的发生概率^[1]。

2 基于物联网的地铁隧道自动化监测系统设计

2.1 感知层: 传感器的选择与布置

感知层是物联网系统的基础, 其主要功能是实时采集地铁隧道的各种监测数据。为了实现地铁隧道结构和环境的全面监测, 感知层需要部署多种传感器设备。

首先, 全站仪作为高精度的线性位移测量工具, 能够检测隧道结构的水平位移和竖向位移, 其测角精度 $0.5''$, 测距精度 $0.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ 。全站仪一般安装在隧道结构的侧墙, 利用网络模块控制实时监测隧道的变形情况, 确保结构安全。

其次, 裂缝测宽计用于检测隧道结构裂缝的扩展情况, 能够精确测量微小裂缝的变化, 精度可达 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。此类设备通常安装在易发生裂缝的部位, 如拱顶和侧墙, 及时发现和评估裂缝发展状况, 有助于提前采取修复措施, 防止进一步恶化。

最后, 温度传感器通过 NTC 热敏电阻进行温度监测, 精度为 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 用于实时监测隧道内部的温度变化, 湿度传感器采用电容式湿度传感器, 监测精度为 $\pm 3\% \text{ RH}$, 用于实时监测隧道内部的湿度水平, 防止因温湿度异常导致的安全隐患。气体浓度传感器则使用电化学气体传感器, 监测气体浓度的精度可达 ppm 级, 用于检测隧道内部有害气体的浓度, 保障隧道内空气质量和作业人员的安全。

2.2 网络层: 数据传输技术

网络层的主要功能是实现全站仪及传感器数据的可靠传输;考虑到地铁隧道环境的特殊性,数据传输技术需要具备高可靠性和实时性。目前,主要的数据传输技术包括无线传感器网络和 5G 网络通信技术。第一,无线传感器网络(WSN)是物联网系统中常用的传输技术,其特点是低功耗、低成本和易于部署。WSN 由多个设备节点组成,这些节点通过自组织方式形成网络,并将采集到的数据传输到数据中心。为了确保数据传输的可靠性,WSN 通常采用多跳路由技术,通过多个中继节点将数据逐步传输到目的地。此外,WSN 还可以通过冗余节点和路径优化技术,提高数据传输的可靠性和抗干扰能力。第二,5G 网络通信技术以其高带宽、低延迟和广覆盖的特点,为物联网数据传输提供了新的解决方案。在地铁隧道监测系统中,5G 网络可以实现采集终端数据的实时传输,极大地提高系统的响应速度。通过 5G 网络,全站仪及传感器数据可以直接传输到云端服务器进行处理和分析,减少了中间环节,提高了数据传输的效率和稳定性^[2]。

2.3 应用层: 数据分析与处理平台

应用层是整个基于全站仪自动化技术的地铁隧道监测系统的核心,其主要功能是对全站仪采集的数据进行存储、处理、分析和展示。为了实现地铁隧道的全面监测和预测,应用层需要具备强大的数据处理和分析能力。第一,数据存储与管理。地铁隧道监测系统每天会产生大量的数据,这些数据需要可靠的存储和管理;为了满足大数据存储的需求,可以采用分布式数据库系统(如 Hadoop、HBase)进行数据存储。分布式数据库系统具有高可扩展性和高容错性,能够处理海量数据并保证数据的安全性和可靠性。第二,数据处理与分析。为了从海量数据中提取有用信息,需要对数据进行预处理、分析和建模。数据预处理包括数据清洗、数据归一化和异常值检测等步骤。数据分析和建模可以采用大数据分析工具(如 Spark)、机器学习算法(如随机森林、支持向量机)和平差解算方法进行。通过对历史数据的分析,可以发现隧道结构的变化规律和环境参数的变化趋势,从而实现隧道健康状态的评估和预测。第三,可视化与预警。为了帮助管理者直观了解隧道的健康状态,数据分析结果需要通过可视化平台进行展示,及时发现异常并自动化预警。可视化平台可以采用图表、仪表盘和地理信息系统(GIS)等方式,将监测数据和分析结果进行可视化展示^[3]。

3 基于物联网的地铁隧道自动化监测系统实现与部署

3.1 全站仪布置

感知层是物联网系统的基础,其主要功能是实时采集地铁隧道的各种监测数据。首先,变形监测是地铁隧道监测中的关键环节。全站仪作为高精度的线性位移测量工具,能够检测隧道结构的水平位移和竖向位移,其测角精度 0.5",测距精度 0.6 mm±1 ppm。根据相关规范和现场实际情况,一般把全站仪安装在隧道结构的侧墙,在监测范围内按相应断面布设监测点,断面间距按 5~10 m,每个断面 5 个监测点,分别布设在道床轨道两侧、拱腰、拱顶(根据实际条件,避开高压接触网线路),监测隧道结构的水平位移、竖向位移、相对收敛等参数。

3.2 数据采集与传输

监测设备采集的数据需通过稳定可靠的传输方式,把数据推送到控制中心进行处理分析,采集方式可分为实时采集和定时采集,传输方式主要采用无线传感器网络(WSN)和 5G 网络技术相结合。第一,实时采集。对于关键传感器,如应变类传感器和全站仪,数据需要实时采集,以监测隧道的即时状态。第二,定时采集。对于环境参数传感器,如温湿度传感器和气体传感器,数据可定时采集,频率根据具体需求设定^[4]。

3.3 数据传输与网络架构

数据传输的选择直接关系到系统的可靠性和实时性,考虑到地铁隧道的特殊环境,需要综合比较有线和无线传输技术。第一,有线传输技术。有线传输(如光纤通信)具有高带宽和低延迟的优势,适用于固定线路的部署。但其安装复杂、维护成本高,灵活性差,不适合隧道内部复杂多变的环境。第二,无线传输技术。无线传输技术(如 WSN 和 5G)具有部署灵活、安装便捷的特点。WSN 适用于隧道内部复杂环境中的短距离传输,而 5G 技术则适用于长距离、高速数据传输。无线传输的主要挑战在于信号干扰和传输可靠性,需要通过冗余节点和路径优化技术加以解决。综合考虑,地铁隧道监测系统推荐采用无线传输技术。

3.4 数据处理与分析

3.4.1 数据存储与管理

地铁隧道监测系统会生成大量的数据,这些数据需要一个高效且可靠的存储与管理。为此,分布式数据库系统(如 Hadoop、HBase)成为处理大数据的理想选择。一方面,分布式数据库系统以其高扩展性

和高容错性著称，能够处理和存储海量数据，同时确保数据的安全性。分布式存储不仅提升了数据的存储效率，还增强了系统的可靠性。数据通过分布在不同节点的方式存储，即使某个节点出现故障，系统仍能保持正常运行。另外，为了确保数据能够被有效地管理，需要对数据进行分类和索引。

3.4.2 数据分析与故障预测

数据分析与故障预测是地铁隧道监测系统的核心功能，通过对采集数据的处理和分析，系统能够对隧道的健康状况进行实时评估，并对潜在故障进行预测和预警。首先，数据预处理是数据分析的基础，包括数据清洗、数据归一化和异常值检测。数据清洗是指去除数据中的噪声和错误值，确保数据的准确性。数据归一化则将不同量纲的数据转换为统一的尺度，以便进行比较和分析。异常值检测用于识别和处理数据中的异常点，防止其对分析结果造成误导^[5]。

4 系统测试与应用

4.1 实验环境与条件

为了确保测试结果的可靠性和全面性，需要在模拟实验和实际应用环境中进行测试。在实验室环境下搭建模拟隧道结构，布置全站仪节点和其他辅助传感器节点，包括位移传感器、温湿度传感器等。模拟隧道的结构参数与实际隧道相仿，以便测试结果具有较高的可参考性。通过施加已知应力和环境变化，测试全站仪系统在不同条件下的性能。接下来，将系统部署在实际地铁隧道环境中进行测试。选择一个运营中的地铁隧道段，布置与实验室相同类型的全站仪和辅助传感器，确保测试数据的代表性。实际隧道测试的目的是验证全站仪系统在真实运营环境中的性能和稳定性。

4.2 测试内容与方法

数据采集精度测试主要关注各类传感器在不同环境条件下的数据采集准确性。通过在模拟实验环境中施加已知应力、温度和湿度等参数，对比传感器采集的数据与标准值，计算监测设备的精度和误差。数据传输稳定性测试评估系统在不同网络条件下的数据传输性能，通过在模拟实验环境中设置不同的网络干扰场景（如信号阻隔、干扰源等），测试数据包的丢失率和传输延迟。采用丢包率和延迟时间作为评估指标，丢包率应低于0.1%，传输延迟应控制在100ms以内。

4.3 测试结果分析

通过数据采集精度测试，评估全站仪系统的准确

性和可靠性。实验结果表明，全站仪系统的测量误差均在可接受范围内，其中位移测量的误差控制在 ± 0.5 mm内，应变测量的误差控制在 $\pm 1 \mu\epsilon$ 内，温湿度测量的误差分别在 ± 0.5 °C和 $\pm 3\%$ RH以内。这表明全站仪节点具备较高的数据采集精度和可靠性。数据传输稳定性测试结果显示，在模拟干扰条件下，系统的数据丢包率低于0.1%，传输延迟均匀分布在50ms到100ms之间，表现出较强的抗干扰能力和传输稳定性。实际应用环境测试进一步验证了全站仪系统在复杂隧道环境中的稳定性。系统响应速度与处理能力测试表明，在高频率数据采集条件下，系统的处理时间均在1秒以内，满足实时监测的需求。（见表1）

表1 测试结果

测试项目	测试结果	备注
位移测量误差	± 0.5 mm以内	符合精度要求
应变测量误差	$\pm 1 \mu\epsilon$ 以内	符合精度要求
温度测量误差	± 0.5 °C以内	符合精度要求
湿度测量误差	$\pm 3\%$ RH以内	符合精度要求
数据丢包率	低于0.1%	高抗干扰能力
传输延迟	50 ms到100 ms之间	传输稳定
系统处理时间	1秒以内	满足实时监测需求

5 结束语

通过本研究设计与实现的地铁隧道自动化监测系统，验证了物联网技术在隧道监测领域的应用价值。系统集成了高精度的全站仪、监测传感器、稳定的无线传输网络和先进的数据分析方法，实现了对隧道结构位移、裂缝、温湿度和有害气体浓度的实时监测。

参考文献：

- [1] 张文静. 静力水准自动化监测在运营地铁隧道的应用研究[J]. 天津建设科技, 2024, 34(02): 1-4.
- [2] 张磊, 徐敏, 毕爽爽, 等. 长距离地铁隧道自动化监测技术工程实践与应用[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(02): 187-195.
- [3] 郇小龙. 自动化监测系统在地铁隧道变形监测中的运用[J]. 华东科技, 2024(04): 35-37.
- [4] 张文静. 测量机器人自动化监测在隧道工程中的应用[J]. 天津建设科技, 2024, 34(01): 22-24.
- [5] 高胜奎. 测量机器人在地铁隧道自动化变形监测中的应用[J]. 江苏建材, 2024(01): 132-133.