

# 城市轨道交通工程运营期结构监测平台研发与应用

耿青松 李建军

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

**摘要：**本文深入探讨了城市轨道交通工程运营期结构监测平台的研发与应用。随着城市轨道交通的迅猛发展，其结构安全成为运营管理的核心要点。本文详细分析了运营期结构监测的重要性，全面阐述了监测平台的研发背景、技术架构、功能模块及应用实践，着重丰富了技术细节。通过整合多源数据、实现智能预警与决策支持，监测平台有效提升了城市轨道交通的运营安全性与效率，为类似系统的研发提供了极具价值的参考。

**关键词：**城市轨道交通；结构监测；监测平台；运营安全

## 1 引言

城市轨道交通作为现代城市公共交通的关键组成部分，其运营安全直接关系到广大市民的生命财产安全和社会稳定。随着城市轨道交通网络的持续扩展和运营时间的不断增长，隧道、桥梁、车站等结构在运营期间受到地质条件变化、周边环境扰动、列车荷载等多种因素的综合影响，可能出现变形、沉降等安全隐患。因此，开展城市轨道交通工程运营期结构监测，研发高效、准确的监测平台，对于保障轨道交通的安全运营具有至关重要的意义。

## 2 城市轨道交通工程运营期结构监测的重要性

### 2.1 地质条件复杂性的影响

城市轨道交通线路往往穿越多种地质区域，从软土（如淤泥、砂性土等）到硬岩（如中风化、微风化花岗岩等）均有涉及。这种复杂的地质条件使得线路结构在不同地段承受不同的地质应力，容易发生不均匀沉降或变形<sup>[1]</sup>。例如，在软土地层中，隧道结构可能因地基承载力不足而产生过大沉降；在硬岩地层中，则可能因岩石节理发育、岩体破碎等导致隧道开挖过程中的围岩变形。

### 2.2 周边环境扰动的因素

城市轨道交通线路沿线地面条件复杂，包括村庄、公路、小区、商铺、市政管线等。这些周边环境的变化，如土方工程施工、地下水位变动、周边建筑物加载等，都可能对线路结构产生扰动。例如，上方工程的基坑开挖可能引起下方隧道结构的变形；地下水位的变化可能导致隧道周围土体的物理力学性质发生改变，进而影响隧道结构的稳定性。

### 2.3 列车荷载的长期作用

城市轨道交通列车在运营过程中，对线路结构产生长期的动荷载作用。这种动荷载不仅会引起结构的振动，还可能导致结构疲劳损伤。随着运营时间的增长，列车荷载的累积效应会逐渐显现，使得线路结构的性能

逐渐下降，出现裂缝、变形等病害。

## 3 城市轨道交通工程运营期结构监测平台的研发

### 3.1 研发背景与目标

随着城市轨道交通网络的不断扩展和运营管理的日益复杂，传统的结构监测方法已经难以满足现代轨道交通运营的需求。传统的监测方法往往依赖于人工巡检和定期检测，存在监测频率低、数据获取不及时、处理效率低等问题。因此，研发一种高效、准确、智能的城市轨道交通工程运营期结构监测平台，实现实时监测、数据自动处理和分析、智能预警等功能，成为提升轨道交通运营安全性的迫切需求。

### 3.2 研发目标主要包括以下几个方面：

#### 3.2.1 实时监测

能够实现对城市轨道交通线路结构的实时监测，获取结构变形、沉降、应力等关键参数。

3.2.2数据自动处理与分析

对采集到的监测数据进行自动处理和分析，提取有用信息，为结构安全评估提供依据。

3.2.3智能预警

根据监测数据和分析结果，对结构安全状况进行智能预警，及时发现潜在的安全隐患。

#### 3.2.4决策支持

为运营管理部门提供决策支持，制定合理的维修和加固方案，确保轨道交通的安全运营。

### 3.3 技术架构

#### 3.3.1 感知层

根据监测对象的特点和监测需求，选择合适的传感器。例如，对于结构变形监测，可采用高精度的位移传感器，如激光位移传感器，其测量精度可达毫米级，能够实时、准确地测量结构的微小变形；对于应力监测，可选用应变片式应力传感器，通过测量结构的应变来间接获取应力值，应变片的灵敏度高，可精确反映结构的应力变化。在关键部位合理布置传感器，以确保能够全

面获取结构的安全信息。

### 3.3.2 传输层

有线传输采用光纤传输技术,具有传输速度快、稳定性高、抗干扰能力强的优点。光纤传输的带宽大,能够同时传输大量的监测数据,适用于对数据传输要求较高的场景。但光纤布线复杂,成本较高,需要在建设阶段进行规划和铺设。无线传输运用ZigBee、LoRa等物联网技术。ZigBee技术具有低功耗、自组网的特点,适用于短距离、小数据量的传输;LoRa技术则具有远距离、低功耗的优势,能够在较广的范围内实现数据传输。无线传输布线简单,成本较低,但可能受到环境干扰影响传输质量,如建筑物遮挡、电磁干扰等<sup>[2]</sup>。在实际应用中,可根据监测现场的条件和需求选择合适的传输方式,也可采用有线和无线相结合的方式,以提高数据传输的可靠性和灵活性。

### 3.3.3 平台层

数据存储采用分布式存储系统,如Hadoop Distributed File System (HDFS),能够存储海量的监测数据,并具备高容错性和可扩展性。同时,为了保证数据的安全性,采用数据备份和恢复机制,定期对数据进行备份,防止数据丢失。对采集到的原始数据进行清洗,去除异常值和错误数据。例如,采用统计学方法,如 $3\sigma$ 原则,判断数据是否为异常值,若数据超出正常范围,则进行剔除或修正。运用时间序列分析、回归分析、神经网络等多种数据处理和分析方法。时间序列分析可用于分析结构变形、应力等参数随时间的变化趋势;回归分析可建立监测数据与结构安全状况之间的数学模型;神经网络则可用于处理复杂的非线性关系,提高预测的准确性。根据处理和分析结果,设置合理的预警阈值和预警规则。例如,当结构变形量超过设计允许值的80%时,发出黄色预警;当超过设计允许值时,发出红色预警。采用基于规则推理和模型推理相结合的预警算法,提高预警的准确性和及时性。

### 3.3.4 应用层

为运营管理部门提供直观的可视化界面,以图表、曲线等形式展示监测数据和分析结果。例如,通过GIS(地理信息系统)技术,将监测数据与地理信息相结合,实现结构安全状况的地图可视化展示。根据监测数据和分析结果,生成结构安全评估报告,提出合理的维修和加固建议。例如,利用专家系统,结合历史数据和专家经验,为运营管理部门提供决策参考。

## 3.4 功能模块

### 3.4.1 数据采集模块

支持多种类型的传感器和数据格式,如模拟信号、数

字信号等。通过数据采集卡将传感器采集到的模拟信号转换为数字信号,并进行初步的处理和校验。在数据采集过程中,对数据进行缓存,防止数据丢失。当缓存数据达到一定量或满足一定条件时,将数据传输到平台层。

### 3.4.2 数据处理与分析模块

对采集到的数据进行实时处理,如滤波、降噪等,提高数据的质量。采用数据挖掘和机器学习算法,对处理后的数据进行深度分析,提取有用信息,如结构变形趋势、应力分布规律等。

### 3.4.3 智能预警模块

允许用户根据实际情况设置和调整预警阈值。当监测数据超过预警阈值时,自动触发预警机制,通过短信、邮件等方式向运营管理部门发送预警信息。

### 3.4.4 决策支持模块

根据监测数据和分析结果,自动生成结构安全评估报告,包括结构现状、存在的问题、发展趋势等内容。结合历史数据和专家经验,为运营管理部门提供合理的维修和加固方案。

### 3.4.5 用户管理模块

提供用户注册和登录功能,确保用户信息的安全性<sup>[3]</sup>。根据用户的角色和职责,设置不同的操作权限,如管理员可以进行系统配置和数据管理,普通用户只能查看监测数据和预警信息。

## 3.5 关键技术

### 3.5.1 多源数据融合技术

由于不同传感器的精度和测量范围可能存在差异,需要对采集到的多源数据进行校准,确保数据的一致性和准确性。例如,采用最小二乘法对不同传感器的测量数据进行拟合校准。采用卡尔曼滤波、D-S证据理论等数据融合算法,将来自不同传感器的数据进行融合处理,提高监测数据的准确性和可靠性。卡尔曼滤波可用于对动态数据进行滤波和预测,D-S证据理论则可用于处理不确定性和模糊性信息。

### 3.5.2 大数据处理技术

采用Spark等分布式计算框架,对海量的监测数据进行并行处理,提高数据处理效率。Spark具有内存计算的优势,能够快速处理大规模数据。运用关联规则挖掘、聚类分析等数据挖掘算法,从海量数据中提取有价值的信息。例如,通过关联规则挖掘,发现结构变形与周边环境因素之间的关联关系。

### 3.5.3 智能预警算法

构建基于支持向量机(SVM)、随机森林等机器学习模型的预警算法。通过对历史监测数据的学习和

训练,建立结构安全状况与监测数据之间的映射关系,实现对结构安全状况的准确预警。采用卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)等深度学习模型,处理复杂的非线性监测数据。

#### 4 应用案例:运营轨道交通结构安全立体感知信息服务平台

##### 4.1 背景

针对郑州市轨道交通运营期监测数据目前呈现“信息碎片化、数据集成难、大数据挖掘与智能预警不足”的问题,黄河勘测规划设计研究院有限公司主导研发了“城市轨道交通运营期结构监测平台”

##### 4.2 实施过程

平台集成了工后监测、运营期隧道监测、运营期高架桥梁监测、地保区监测等多源数据。按照基础层、数据层、支撑层和应用层的架构进行系统部署,确保平台的稳定性和可靠性。实现了结构安全状态评估和风险预测功能,为轨道交通运营维护保障行业提供便捷可靠的数据管理和信息化服务。

##### 4.3 应用效果

通过自动化监测和数据分析,大大提高了监测效率,减少了人工巡检的工作量。基于大数据算法的风险预测功能,能够及时发现潜在的安全隐患,为提前采取措施提供依据。平台提供的结构安全状态评估报告和决策支持工具,帮助运营管理部门制定了更加合理和有效的管理方案。

#### 5 城市轨道交通工程运营期结构监测平台面临的挑战与展望

##### 5.1 面临的挑战

###### 5.1.1 数据质量与准确性

尽管监测平台采用了多种技术手段来提高数据质量和准确性,但在实际应用中仍可能受到传感器故障、环境干扰等因素的影响。例如,传感器可能会因长期使用而出现老化、漂移等问题,导致测量数据不准确。

###### 5.1.2 预警阈值与规则的设定

预警阈值与规则的设定直接影响预警的准确性和有效性。然而,由于城市轨道交通线路结构复杂多样,不同地段、不同结构类型的预警阈值与规则可能存在差异。如何科学地设定预警阈值与规则是监测平台需要解决的问题<sup>[4]</sup>。

###### 5.1.3 系统集成与兼容性

监测平台需要与城市轨道交通的其他系统进行集成和兼容,如信号系统、供电系统等。然而,不同系统之间的数据格式、通信协议等可能存在差异,这给系统集

成和兼容性带来了挑战。

##### 5.2 未来展望

###### 5.2.1 智能化与自动化程度提升

随着人工智能、物联网等技术的不断发展,城市轨道交通工程运营期结构监测平台的智能化和自动化程度将进一步提升。例如,采用更加先进的传感器和监测设备,实现数据的自动采集和校准;同时,采用更加智能的预警算法和决策支持工具,提高预警的准确性和有效性。

###### 5.2.2 多源数据融合与挖掘

未来监测平台将更加注重多源数据的融合与挖掘。通过整合来自不同传感器、不同系统的数据资源,可以更加全面地评估结构的安全状况;同时,采用数据挖掘技术从海量数据中提取有用信息,为运营管理部门提供更加科学的决策依据。

###### 5.2.3 系统集成与协同管理

随着城市轨道交通系统的不断发展和完善,监测平台将与其他系统进行更加紧密地集成和协同管理。例如,与信号系统、供电系统等进行集成,实现数据的共享和交互;同时,与应急管理系统进行协同管理,提高应对突发事件的能力。

##### 结语

城市轨道交通工程运营期结构监测平台的研发与应用对于保障轨道交通的安全运营具有重要意义。通过实时监测、数据自动处理与分析、智能预警等功能模块的实现,监测平台大大提高了监测效率和预警能力;同时,通过决策支持模块为运营管理部门提供了科学的决策依据。尽管监测平台在实际应用中仍面临一些挑战,但随着技术的不断发展和完善,其智能化、自动化程度将进一步提升,多源数据融合与挖掘能力将不断增强,系统集成与协同管理能力将得到加强,成本效益也将得到优化。因此,城市轨道交通工程运营期结构监测平台具有广阔的应用前景和发展空间。

##### 参考文献

- [1]林作忠城市轨道交通地下车站与区间结构健康监测及智能预警关键技术研究。湖北省中铁第四勘察设计院集团有限公司2023,(06):26-30.
- [2]陈磊城市轨道交通高架桥结构监测预警系统研发与应用。安徽省通控研究院(安徽)有限公司2023,(03):30-38.
- [3]赵旭城市轨道交通既有结构保护监测关键技术研究。广东省广东省重工建筑设计院有限公司2022,(05):13-15.