

Comparative study on multi-methods for structure deformation monitoring of rail transit tunnels

Yubao Ma Tingrui Wang

PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

This paper focuses on deformation monitoring of rail transit tunnel structures. It provides a comprehensive comparison of various monitoring methods and explores their application strategies. After emphasizing the significance of tunnel structure deformation monitoring, the study details commonly used techniques including total station monitoring, GPS monitoring, automated monitoring systems, and radar monitoring. Comparative analyses are conducted across key dimensions such as operational principles, measurement accuracy, applicable scenarios, and cost-effectiveness. Based on these findings, targeted implementation strategies are proposed tailored to real-world engineering contexts. These strategies aim to enhance monitoring efficiency and precision, thereby ensuring safe and reliable operations for rail transit tunnels.

Keywords

rail transit; tunnel structure; deformation monitoring; method comparison; application

轨道交通隧道结构变形监测的多方法对比研究

马玉宝 王珽睿

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

本文主要聚焦于轨道交通隧道结构变形监测, 在文中对多种监测方法进行了全面的对比, 并探讨了其应用策略。在阐述隧道结构变形监测重要意义的基础上, 详细地介绍了常用的监测方法, 其中包括全站仪监测法、GPS监测法、自动化监测系统法、雷达监测法等, 再从原理、精度、适用场景、成本等几个方面进行了对比分析。在此基础上, 结合了不同工程的实际情况提出了具有针对性的应用策略, 有望助力监测效率和准确性的提升, 为轨道交通隧道的安全运营提供保障。

关键词

轨道交通; 隧道结构; 变形监测; 方法对比; 应用

1 引言

轨道交通是一种高效、便捷的公共交通方式, 目前随着城市化进程的不断加快, 它在城市交通体系中占据着越来越重要的地位。在轨道交通当中隧道是关键的重要组成部分, 其结构安全会直接关系到列车的正常运行和乘客的生命财产安全。可现阶段在隧道施工和运营的过程中, 由于受到地质条件、周边环境、列车荷载等多种因素的影响, 使得隧道结构不可避免地会发生变形。如果变形超过一定的限度, 就可能会导致隧道结构开裂、渗漏、轨道变形等问题, 甚至引发严重的安全事故。因此对轨道交通隧道结构进行有效的变形监测, 确保能够及时地掌握隧道结构的变形情况, 并预测变形发展的趋势, 为采取相应的加固措施提供依据, 具有至关重要的意义。

【作者简介】马玉宝(1983-), 男, 中国河南新乡人, 本科, 高级工程师, 从事工程项目管理研究。

2 轨道交通隧道结构变形监测的常用方法

2.1 全站仪监测法

全站仪监测法是一种传统的光学测量方法, 它集光、机、电于一体, 因此能够同时进行角度测量和距离测量。通常在隧道结构的变形监测当中, 需要在隧道内部布设一定数量的监测点, 再通过全站仪定期地对这些监测点进行观测, 进而获取监测点的三维坐标, 随后就能计算出隧道结构的变形量^[1]。该方法的优点是测量精度较高, 甚至能够达到毫米级、亚毫米级精度, 并且操作相对比较简单, 技术也比较成熟, 所以在工程实践之中得到了广泛的应用。可是它也存在一些不足之处, 比如受外界环境影响较大, 特别是在隧道内光线较暗、粉尘较多或有振动的情况下, 测量的精度会受到一定的影响。

2.2 GPS 监测法

GPS 监测法是一种利用全球定位系统(GPS)进行变形监测的方法。它通过在隧道结构上布设GPS接收机, 即

可接收卫星信号，然后就能计算出监测点的三维坐标，从而实现隧道结构变形的监测。GPS 监测法的优点是不受天气、时间等因素的限制，能够进行全天候、全天时地监测。它还可以实现远程监测，并不需要监测人员进入到隧道内部，有效地降低了监测的风险。同时该方法测量的范围也比较广，能够对隧道全线进行监测。然而其缺点也较为明显，就是测量精度相对较低，一般在厘米级，因此难以满足高精度监测的需求。

2.3 自动化监测系统法

当前有一种新型的监测方法——自动化监测系统法，它是一种基于传感器技术、数据传输技术和计算机技术的方法。该系统由传感器、数据采集模块、数据传输模块和数据处理与分析模块组成。其中传感器布设在隧道结构的关键部位，负责实时地采集隧道结构的变形数据，随后通过数据传输模块将数据传输到数据处理中心，再经过处理和分析之后生成变形监测报告。实践中自动化监测系统法的优点是能够实现实时地监测和自动化数据处理，它的监测效率高，能够帮助相关人员及时地发现隧道结构的变形异常，也可以实现对隧道结构的长期连续监测，助力相关人员获取完整的变形过程曲线。不过该方法的初期投资较大，因为需要布设大量的传感器和相关设备，且系统维护的成本较高。

2.4 雷达监测法

雷达监测法利用了电磁波的反射原理，即向隧道结构发射电磁波，再接收反射回来的电磁波信号，接着根据电磁波的传播时间和相位变化，就能计算出隧道结构的变形情况。该方法的优点是具有较强的穿透能力，能够对于隧道结构内部的变形进行监测，还不需要与隧道结构发生直接的接触，所以对隧道的正常运营影响较小。可是雷达监测法的测

量精度相对较低，它受电磁波传播路径上的介质影响较大，因此在复杂地质条件之下，该方法的监测效果可能会受到一定的影响。

2.5 惯性测量法

惯性测量法是基于惯性传感器（如加速度计和陀螺仪）来测量物体的运动状态和变形的一种方法。监测时首先要将惯性传感器安装在隧道结构上，经由测量隧道结构的加速度和角速度，积分得到位移和角度变化，从而实现对隧道结构变形的监测。其优点是不受外界环境的干扰，在隧道内部等复杂环境下依然能够进行监测，同时测量的频率也比较高，能够捕捉到隧道结构的动态变形。然而惯性测量法却存在着累积误差，甚至随着时间的推移，误差还会不断地增大，需要定期地进行校准。

3 多种监测方法的对比分析

3.1 精度对比

基于上述内容来看，不同的监测方法在测量精度上存在着较大的差异，具体阐述如下：全站仪监测法的精度最高，它能够达到毫米级甚至亚毫米级，比较适用于对精度要求较高的监测项目；自动化监测系统法的精度次之，一般在毫米级到厘米级之间，可以满足大多数隧道结构变形监测的需求；GPS 监测法的精度相对则较低，通常在厘米级；而雷达监测法和惯性测量法的精度最低，仅在厘米级及以上。在实际应用之中，监测人员应根据隧道结构的重要性、变形的允许范围等因素，选择出合适精度的监测方法。比如对于一些关键部位的监测，像隧道洞口、断层破碎带等，就需要采用全站仪监测法和自动化监测系统法这种高精度的监测方法，但对于一些对精度要求不高的区域，就可以采用 GPS 监测法、雷达监测法等方法。

监测方法的对比分析表

对比维度	全站仪监测法	GPS 监测法	自动化监测系统法	雷达监测法	惯性测量法
精度对比	精度最高，毫米级甚至亚毫米级	精度相对较低，通常在厘米级	精度次之，一般在毫米级到厘米级之间	精度较低，仅在厘米级及以上	精度较低，仅在厘米级及以上
适用场景对比	适用于隧道内部环境相对较好、监测点数量较少且需要高精度监测的场景	适用于隧道外部及隧道洞口附近等卫星信号接收良好的区域	适用于需要进行长期连续实时监测的场景	适用于对隧道结构内部缺陷和变形进行快速检测的场景	适用于隧道施工过程中的动态变形监测
成本对比	设备成本相对较低，但人工成本较高，长期监测总成本较高	设备成本适中，监测过程中不需要大量人工干预，长期监测成本相对较低	初期投资较大，包括传感器、数据采集设备、数据处理软件等，但长期运营成本较低	设备成本较高，且对操作人员技术要求高，总体监测成本较高	设备成本较高
效率对比	每次监测需花费大量时间，效率较低	监测效率较高	监测效率最高	监测速度快，效率较高	测量频率高

3.2 适用场景对比

全站仪监测法一般适用于隧道内部环境相对较好、监测点数量较少且需要高精度监测的场景,比如隧道施工阶段的断面监测、重要结构部位的监测等。结合GPS监测法的特点来看,它比较适用于隧道外部及隧道洞口附近等卫星信号接收良好的区域,也可以用于对隧道整体变形趋势的监测。自动化监测系统法则适用于需要进行长期连续实时监测的场景,像运营中的地铁隧道,该方法能够帮助相关人员及时地发现隧道结构的变形异常,可以为隧道的安全运营提供保障。而雷达监测法适用于对隧道结构内部缺陷和变形进行快速检测的场景,例如隧道衬砌厚度检测、空洞探测等。此外还有惯性测量法,它适用于隧道施工过程中的动态变形监测,像盾构机推进过程中的姿态监测等等。

3.3 成本对比

从成本的角度来看,全站仪监测法的设备成本相对较低,但该方法的人工成本却比较高,若进行长期监测的话总成本就会比较高。相比而言,GPS监测法的设备成本则比较适中,由于该方法在监测的过程中不需要大量的人工干预,因此长期监测的成本相对较低。虽然自动化监测系统法的初期投资较大,其中包括了传感器、数据采集设备、数据处理软件等,但长期运营的成本较低,较为适合进行大规模、长期的监测项目。而雷达监测法不仅设备的成本较高,并且对操作人员的技术要求也比较高,总体的监测成本都较高。然而成本最高的还属惯性测量法,因为该方法的设备成本较高,尤其是高精度的惯性传感器,成本异常昂贵,使得该方法仅适用于一些特殊的监测场景。

4 轨道交通隧道结构变形监测的应用策略

4.1 根据隧道所处阶段选择监测方法

隧道施工阶段的隧道结构尚未稳定,此时变形的速度较快,所以需要进行高频次的监测^[2]。据此,监测人员可以采用全站仪监测法对隧道断面进行定期地监测,即可及时地掌握隧道的开挖变形情况;同时结合自动化监测系统法,对于隧道施工过程中的关键部位进行实时地监测,如盾构机的姿态、管片的变形等,即可全面的确保施工安全^[3]。若在隧道运营阶段,尽管该阶段隧道的结构相对稳定,但仍然需要进行长期的变形监测,以保障列车的安全运行。此时应采用自动化监测系统法进行长期连续的实时监测,保障能够及时地发现隧道结构的变形异常,也可以辅以GPS监测法对隧道整体变形趋势进行监测,旨在为隧道的维护和管理提供依据。

4.2 根据监测精度要求选择监测方法

对于一些对监测精度要求较高的部位,像隧道与其他结构的连接部位、隧道穿越断层破碎带等区域,应该选择高精度的监测方法,如全站仪监测法和自动化监测系统法。而

对于一些对精度要求相对较低的区域,如隧道的一般地段,就可以采用GPS监测法、雷达监测法等。就实际监测来说,监测人员也可以采用多种监测方法相结合的方式,进而提高监测精度和可靠性^[4]。

4.3 考虑环境因素选择监测方法

因为在隧道内部光线较暗、粉尘较多或有振动的环境下,全站仪监测法的测量精度会受到较大的影响,所以此时需要优先选择自动化监测系统法或者惯性测量法。如果在隧道外部及洞口附近,由于卫星信号接收良好,因此可以采用GPS监测法进行监测。但面对一些复杂地质条件下的隧道,如富含地下水、岩层破碎等,雷达监测法则具有较强的适应性,它能够对隧道结构内部的变形进行有效的监测^[5]。

5 结语

一直以来,轨道交通隧道结构变形监测都是保障隧道安全运营的重要手段。本文当中对全站仪监测法、GPS监测法、自动化监测系统法、雷达监测法和惯性测量法等常用监测方法进行了对比分析,还从精度、适用场景、成本和效率等方面总结了各方法的特点。在此基础上还提出在实际监测工作当中,监测人员应根据隧道所处的阶段、监测精度要求、环境因素和经济成本等,来选择合适的监测方法,并配合综合监测体系,最终才能全面、准确地掌握隧道结构的变形情况。

未来随着科学技术的不断发展,轨道交通隧道结构变形监测技术也将得到不断地创新和完善。往后的监测方法将朝着更高精度、更高效率、更自动化、更智能化的方向发展。例如,基于物联网技术的智能监测系统将得到广泛地应用,实现对于隧道结构变形的实时感知、数据传输和智能分析;无人机监测技术在隧道外部变形监测中的应用也将变得更加成熟,可以提高监测的灵活性和效率;新型传感器的研发将进一步地提高监测精度和可靠性,有助于降低监测的成本。但是还需要加强对于监测数据的深度挖掘和分析,只有建立了更加精准的变形预测模型,才能为隧道结构的安全评估和维护决策提供更加科学的依据。

参考文献

- [1] 邱国庆.基于全站扫描仪的地铁隧道变形监测方法研究[D].湖北省:武汉大学,2017.
- [2] 王智辉.隧道施工过程围岩变形监测可视化与塌方风险评价方法研究[D].重庆市:重庆大学,2022.
- [3] 张轩.盾构隧道施工对地表及高层建筑物基础沉降与受力特性的影响研究[D].四川省:四川大学,2021.
- [4] 陈华.沈阳某公路隧道深基坑围护结构变形监测与受力性能研究[D].辽宁省:沈阳工业大学,2018.
- [5] 李燕隆.徐州轨道交通隧道施工现场监测及沉降智能预测方法研究[D].安徽省:安徽理工大学,2022.