

工程盾构施工地表沉降精准控制方法体系构建

张凯博

(中交天和西安装备制造有限公司, 陕西 西安 710200)

摘要 本研究为工程盾构施工期间地表沉降控制提出一套精准方法, 目的是以先进技术手段对沉降进行动态监测, 精准控制和快速响应。该方法体系由全过程动态监测预警机制、数据融合智能分析和精准控制能力提升等部分组成, 通过建立数字孪生模型, 引入人工智能算法对控制参数进行优化, 并结合物联网技术对其实时监控, 从而形成一个综合控制体系。云平台协同管理系统与虚拟现实技术结合使用, 可进一步提高操作培训与决策效率。结果表明, 该系统的建设有利于实现对施工期沉降的准确控制, 保障了施工安全和环境保护。

关键词 盾构施工; 地表沉降; 精准控制

中图分类号: U455.43; P642.26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.07.031

0 引言

我国城市地下工程快速发展, 盾构施工技术被广泛地应用于地铁、隧道及其他建设工程。但是在盾构施工中往往会伴随着地表沉降问题的出现, 这可能会给周边建筑物, 交通设施及环境等方面带来影响。所以, 如何准确地控制盾构施工所产生的地表沉降已经成为现阶段工程施工的重要任务。为解决这一难题, 本文提出一套以各种先进技术为基础, 以动态监测、数据融合、智能分析等为手段的地表沉降精准预测及有效管控方法体系。

1 工程盾构施工地表沉降精准控制方法体系的构建要求

1.1 全过程动态监测与预警机制

工程盾构施工期地表沉降控制既要实时监控施工期沉降情况, 又要建设有效预警机制。全过程动态监测预警机制需求通过地面沉降监测技术, 实时数据传输处理技术和报警机制的综合运用, 保证盾构施工各个环节均能有效跟踪地表沉降情况, 异常情况下及时报警, 以免地表沉降给周边环境及建筑物带来较大的影响。一是《城市轨道交通工程盾构法施工技术规范》等国内标准建议施工单位根据工程特点、地质条件等因素选用适宜的监测技术, 例如, 水平位移监测, 垂直沉降监测, 地面沉降差异监测等。为达到全过程监测的目的, 在工程项目中要布设若干个监测点, 通过无线传感器网络向监控中心进行实时数据传输。另外, 还应该通过对监测数据进行动态分析来预先确定潜在

沉降风险。二是预警机制建设需要基于沉降监测数据设定不同等级报警阈值。在地表的沉降值大于预设阈值的情况下, 由系统自动启动报警, 快速上报给有关人员。以《地铁施工沉降控制标准》(GB 50122-2019) 为例, 如果沉降量超出了规定的允许范围, 那么应当立刻采取紧急措施进行处理。预警机制应该由自动化报警、人工分析干预以及紧急响应操作三个层次组成, 确保及时应对并做出有效反应。

1.2 多源数据融合与智能分析

多源数据融合和智能分析, 是盾构施工过程中地表沉降准确控制的关键技术。实际建设中地表沉降监测数据通常来源于几种不同传感器及监测手段, 主要有激光雷达、光纤光栅、GPS、地面沉降点和地下水位监测。要精确地对地表沉降风险进行评价, 需要对这些不同传感器采集到的数据加以整合, 利用智能分析算法挖掘出可能存在的沉降规律以及风险预警信息。我国有关标准对施工期沉降监测有严格的技术规定, 例如我国《城市轨道交通建设施工技术规范》规定采用多点监测的方法以提高沉降预测的准确性。本研究通过与多源数据融合技术相结合, 能够实现不同种类传感器数据的实时整合, 通过机器学习与数据挖掘方法智能分析数据, 促进沉降控制准确性与效率的提高。例如, 利用卡尔曼滤波 (Kalman Filter) 等技术手段, 我们可以高效地处理来自多个传感器的误差, 并提高数据的稳健性^[1]。多源数据融合中数据时效性与空间覆盖率是两个关键要素。监测数据要能够实时地传送

到数据中心以便于及时地分析与处理。另外,增加空间覆盖率意味着要对施工现场进行综合监测,是防止沉降突发变化及大面积影响的关键。如结合地面沉降点和盾构机位置数据等,可对施工期盾构推进和地面沉降关系进行实时分析,并对盾构推进参数做进一步优化。

1.3 精准控制与快速响应能力

精准控制和快速响应能力,是确保盾构施工对地表沉降进行有效控制的关键。控制地表沉降既要实时地调整施工参数,又要快速地应对施工中出现的异常现象,从而降低或者避免沉降给周围环境及建筑物带来的影响。我国《地铁施工安全规程》明确规定,施工时盾构机推进参数必须依据监测数据及现场条件进行动态调整。例如,在监测到地面沉降异常时,可通过调节盾构机推进速度和注浆量来控制沉降幅度大小。推进速度过快可能导致土体来不及稳定而产生较大沉降,此时适当降低推进速度,能让土体有足够时间适应盾构机的掘进,减少沉降风险;而注浆量的精准控制也至关重要,注浆量不足无法有效填充盾构机掘进后留下的空隙,会引发地面沉降,注浆量过多则可能造成地面隆起等其他问题。要做到精准控制,就必须针对不同地质条件与施工环境制定合理控制范围并进行实时监测与调节。不同的地质构造,如软土地层、砂土地层、岩石地层等,其力学性质和变形特性差异巨大,这就要求施工方根据具体地质情况,科学设定盾构机的各项施工参数,如土仓压力、刀盘扭矩等。同时,借助高精度的传感器和先进的监测系统,对这些参数进行实时监测,一旦发现参数偏离设定范围,立即采取相应措施进行调整。精准控制中的一个核心需求,是通过构建数字化施工模型与动态反馈机制来实现对不同地质与施工环境下的个性化控制方案。在我国,数字孪生技术近年来逐渐被引入盾构施工期间地表沉降模拟与预测中,并与实时监测资料相结合,可实现盾构推进期间控制策略的动态调整。

2 工程盾构施工地表沉降精准控制方法体系构建策略

2.1 构建数字孪生模型辅助决策

数字孪生技术集物理实体和虚拟模型于一体,利用实时传感器数据实现施工现场精确建模并构成虚拟“数字副本”。盾构施工时,数字孪生模型可以实时地反映出施工过程的变化情况,从而对决策者进行有效的辅助。它的构建需求包括高精度的数据采集、系统集成、实时反馈机制等。在我国,数字孪生技术已

被许多地铁项目广泛使用,例如北京市地铁建设所使用的“智慧盾构”系统。系统将盾构机监测数据与地面沉降监测数据进行整合,构建施工期间数字孪生模型。该模型既可以对盾构机推进过程进行实时监测,又可以针对不同地质环境改变对盾构机推进速度、注浆压力等工作参数进行实时调节,以规避地表沉降风险。建立数字孪生模型的核心技术是如何融合各种传感器和数据来源,例如GPS监测、激光扫描仪、压力传感器等,并通过数据融合平台将这些信息实时反馈到虚拟模型中。根据我国的《城市轨道交通建设施工技术规范》,沉降监测和模型建设都有明确的规定,并建议采用多传感器数据来进行三维建模,与施工参数调整策略相结合,达到动态控制施工期间沉降。数字孪生模型的核心价值在于它能够“提供沉降趋势预测等”,即通过历史数据和现场数据对盾构施工过程中沉降进行模拟与预判^[2]。当该模型预测出某个环节有可能出现过度沉降的情况后,系统将自动提醒决策者做出调整以避免因沉降超标而带来的损失。

2.2 应用人工智能优化控制参数

AI技术利用机器学习及数据挖掘等技术,可根据施工期实时获取的多维数据对盾构机推进速度、注浆压力等推进参数进行自动整定、刀盘的转速等,以对地质变化及沉降问题进行实时处理。在我国,上海地铁项目引入AI技术对盾构机参数进行优化控制并取得良好效果。在项目实施过程中,AI系统通过对数十万条历史施工数据的分析,筛选出了在不同地质条件下最能有效控制沉降的参数组合。盾构机实际施工中监测地面沉降或者位移超出设定范围后,AI系统将根据实时数据反馈自动调节推进速度、注浆量乃至盾构机前进方向。该自动调整机制使施工团队在不需要人工干预的情况下就能实现最优调整,显著提高了沉降控制精确度及施工效率。另外,AI可以深度学习并通过对施工过程异常沉降数据分析构建沉降预警模型。例如,利用深度神经网络学习盾构推进过程中的数据,AI系统可以准确地预测可能出现异常沉降的环节,并提前发出预警,从而为施工人员提供紧急的决策支持。这类AI应用不只是控制参数优化,还可以前瞻性地预测风险。AI技术应用需要在施工现场安装充足的传感器设备以及优质的数据采集与处理。

2.3 整合物联网技术实时监测

物联网技术是现代施工不可缺少的组成部分,它可以实现盾构施工时地表沉降实时监测和报警。通过在施工现场布设多种传感器(例如位移传感器、压力

传感器和加速度传感器), 将采集到的数据实时传输至云平台进行处理, 施工团队能够时刻了解沉降变化最新动向, 及时采取措施进行调整。以我国某市轨道交通项目为例, 施工方采用布设数百个无线传感器的方式对地表沉降、地下水位和盾构机运行状态进行了数据监测。这些传感器利用物联网技术把数据实时传送到云平台上, 数据平台可以对实时图表进行快速的处理和生成, 有助于管理人员及时作出决策。借助物联网技术, 施工人员可通过手机或者电脑端查看各监测点实时数据信息, 当有异常沉降时系统将即时报警并提醒施工人员及时调整^[3]。该物联网技术应用在促进监测效率的同时, 也大大提高了沉降控制精度。传统施工对地表沉降监测一般靠人工巡检进行, 数据采集与分析时效性较差且易产生误差。而采用物联网技术能保证数据实时传输、及时响应, 把沉降风险降到最低。在构建物联网系统时, 需兼顾不同传感器间数据同步, 保证数据可靠一致。同时, 施工团队需要定期标定传感器以保证监测数据精确性。设备及系统选型时还要考虑场地复杂、长期稳定等因素, 特别是地下施工环境中传感器抗干扰能力强、数据传输稳定非常关键。

2.4 开发云平台协同管理系统

云平台协同管理系统通过对施工现场数据、信息及资源的统一管理与协同操作, 实现了信息共享、数据互通及任务分配等功能, 增强了施工过程的协调性与效率。盾构施工地表沉降控制中云平台协同管理系统可对多个监测点数据进行整合, 实时推送到各施工部门以保证沉降控制时各环节协同和及时反应。比如在一些城市的地铁项目当中, 使用云平台协同管理系统就成为一种标配。本系统可在云端平台上整合沉降监测数据、盾构机推进状态和地下水位多维信息, 并通过大数据分析和云计算处理辅助项目经理掌握施工状态的真实情况。施工期间, 当监测到某地区发生沉降异常时, 该系统通过云平台快速向有关部门发送警报信息, 有关人员可以通过云平台时刻调取施工现场的数据, 快速采取应急措施。云平台协同管理系统可以对施工数据进行集中管理, 从而避免传统分散管理存在的信息孤岛现象。同时, 项目团队可以通过云平台进行远程管理与实时调整^[4]。比如在远程监控中, 工程师可通过分析沉降异常情况, 基于云端数据来调节盾构机的参数, 比如注浆量和推进速度。该远程协同工作方式大大提高了工程管理的效率与精度, 特别是当面临复杂施工环境时能迅速做出反应, 对施工过程进行优化。

2.5 引入虚拟现实技术培训操作

虚拟现实技术引入盾构施工主要是为了训练和操作模拟。利用虚拟现实技术可使施工人员在模拟的环境下进行沉降监测和盾构机运行的实际操作培训, 从而使施工人员既可以直观地了解地表沉降控制方法, 又可以不受实际施工风险的影响开展复杂情境应急演练工作。我国部分地铁项目的施工单位已开始采用虚拟现实技术开展操作培训工作。借助 VR 系统, 施工人员可在各种地质条件下模拟盾构机运行情况, 并实时查看地表沉降趋势, 以便更深入地了解并掌握沉降控制技术。特别对盾构机操作员而言, VR 模拟训练使其能够预先感知和处理可能发生沉降的风险, 从而避免在实际工作中误操作或者耽误工作。虚拟现实技术具有能提供身临其境训练环境、有助于施工人员在非实际作业环境中熟练操作技能、增强应急反应能力等优点。以虚拟环境为例, 操作人员可以查看地下土层、盾构机的推进状态以及实时沉降数据变化情况, 当发生不正常沉降时, 系统会模拟如何通过调整推进参数进行沉降控制^[5]。该训练方式极大地减少了施工现场实际操作过程中出现的失误, 同时增强了施工人员操作自信及应急处理能力。

3 结束语

本文所构建的盾构施工地表沉降精准控制方法体系, 通过多源数据融合及智能技术应用, 有效地提升了施工期沉降监测准确性及控制响应速度。这一方法体系的应用不仅具有显著的工程实际意义, 也为类似地下工程施工的沉降控制提供了可借鉴的参考。未来, 在科技持续发展的背景下, 数字孪生模型、人工智能以及物联网将会进一步提高施工安全性与施工效率, 促进盾构施工领域不断创新与发展。

参考文献:

- [1] 张箭, 邓添铭, 易骏飞, 等. 基于 ABC-BP 神经网络的盾构掘进速度及地表沉降预测 [J]. 科技通报, 2024, 40(10): 40-47.
- [2] 钱家志. 盾构下穿既有铁路地表沉降分析及控制研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [3] 韩义哲. 全风化闪长岩地层泥水平衡盾构泥膜形成机制与地面沉降预测方法 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [4] 张虔. 软土地层盾构隧道施工效应及风险控制研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [5] 潘亦杨. 基于深度学习的盾构隧道施工力学响应分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023.