

城市地下空间安全监测与预警指标研究

李守雷¹, 梁为群², 陈晓斌², 谢群勇¹, 肖亚子¹, 孙清峰¹

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

[摘要] 为保障城市地下空间开发利用的安全性, 促进城市可持续发展, 通过文献调研、现场调查和专家咨询等方法, 分析提出城市地下空间监测的五项原则, 将监测对象划分为三类: 工程结构本体、周围岩土体以及周边环境。将监测指标归纳为变形类、力学类、振动类和宏观状态类共四类, 其中变形类指标执行双控要求, 其他三种指标执行单控要求。监测趋势预测分析可采用公式法、回归分析法、时间序列分析法、灰色预测法、神经网络法和支持向量机等。全国各地监测控制值基本一致, 但预警分级标准存在地区差异, 其中北京市和广州市分级预警具有较大参考价值。目前城市地下空间安全监测存在七项不足: 预警分级标准不完善, 人工监测效率低, 监测参数单一, 监测信息缺少共享协同, 测量精度较低, 重监测轻预测以及缺乏数据融合和机器学习应用。针对这些问题, 可采取七项措施进行改进: 建立合理预警分级标准, 发展自动化与智能化监测, 多参数综合监测, 应用远程监测与云平台, 开发高精度测量设备, 监测和预测并重, 以及数据融合与机器学习应用。

[关键词] 地下工程 安全监测 监测指标 趋势预测 预警分级

[中图分类号] U231 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2024)01-0095-10

Li Shoulei, Liang Weiqun, Chen Xiaobin, Xie Qunyong, Xiao Yazi, Sun Qingfeng. Safety monitoring and early warning indexes of urban underground space[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(1): 0095-0104.

0 引言

近年来, 随着我国城市化进程的加速, 城市地下空间的开发力度不断加大, 其引发的安全问题也日益突出(代裕清, 2022)。比如, 2017年5月12日, 深圳地铁3号线南延工程发生了基坑坍塌事故, 造成3人遇难; 2018年2月7日, 佛山市轨道交通2号线隧道坍塌, 11人死亡, 8人受伤; 2018年8月8日, 贵阳地铁2号线一期工程发生了工地坍塌事故, 导致3人死亡; 2021年10月2日, 杭州地铁9号线一期工程某基坑坍塌事故, 造成2人死亡。这些安全事故不仅造成人员伤亡和巨大的经济损失(易荣和贾开国, 2020), 而且对城市的正常运行和市民的日常生活产生严重影响。

目前, 众多学者已经对城市地下空间安全监测预警进行研究, 并取得了显著成果。数值仿真分析方面, 采用Midsa GTS软件分析地铁深基坑的地表沉降、桩的侧向位移、支撑轴力、边桩和支撑弯矩等(卜飞, 2023); 采用ABAQUS软件分析软土基坑支护体系, 研究温度效应对支护轴力及围护墙水平位移的影响(陈林靖等, 2023)。地下工程穿越既有构筑物安全控制方面(胡朝阳等, 2021; 廖鹏等, 2022), 利用累计变形判据和变形速率判据评估近接施工的风险等级(李晓斌和白海军, 2022); 建立地铁、桥梁的三维仿真模型, 分析判断地铁施工过程中上部桥梁的最大变形量是否符合允许要求(安志刚和赵宝忠, 2022); 根据变形监测的控制值来提前判断盾构隧道的变化, 实时感知、传输与智能化

[收稿日期] 2023-11-17; **[改回日期]** 2024-01-19; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司科研课题“互联网+”城市地下工程安全监测快速采集发布预警系统(编号: YFHT-1832)和国家自然科学基金面上项目(编号: 51978674)联合资助。

[第一作者] 李守雷(1978年-), 男, 2005年毕业于中南大学, 防灾减灾工程及防护工程专业, 获硕士学位, 正高级工程师, 长期从事工程勘测相关工作。E-mail: 84493030@qq.com。

[通讯作者] 陈晓斌(1978年-), 男, 2007年毕业于中南大学, 道路与铁道工程专业, 获博士学位, 教授, 从事岩土工程领域研究研究工作。E-mail: chen_xiaobin@csu.edu.cn。

控制、优化控制盾构施工参数,有效控制盾构姿态,实现隧道盾构工程安全高效掘进(徐兴芃,2022);通过 Midas GTS NX 软件建立三维模型,模拟地铁工程开挖过程,分析保证隧道穿越输水管道工程的安全稳定性(唐远东,2022)。地下工程安全风险分级和预警方面(王烨晟等,2023),建立贝叶斯网络模型,评估风险概率并划分风险源预警控制等级(段鑫和李致,2022);利用极限位移准则对现状分级,通过递进优化思路构建隧道大变形预测模型并据此进行分级(赵东等,2022);基于沉降变形数据分解处理,对基坑危险性潜势进行分级(代长生,2022);综合运用熵权理论、区间数和危险度,构建了地铁基坑安全状态的评价体系,实现了多信息的融合评价(张浩等,2023)。地下工程安全管理方面,根据安全影响因素制定风险管理措施;建立地铁“五位一体”的安全管理体系(李旭东,2023)。地下工程数据的安全性方面,建立全生命周期安全保障体系,保障城轨企业生产经营数据和个人隐私数据(吴国仁等,2023)。地下工程自动化监测方面(杨彬林等,2021;董平等,2022),关键技术包含传感技术、网络通信技术和大数据处理技术(赵盈盈和涂中强,2022);可将无线传感器网络应用于地铁隧道安全监测系统(杨琦等,2022);通过徕卡全站仪可实现地铁安全自动化监测(韩昀等,2023);基于 SAAS 架构可建立地铁运营结构健康监测预警系统(杨超等,2023);基于 Python 编程语言和大数据,可建立隧道及地下工程的远程自动化监测预警系统(于建,2023)。然而,以往城市地下空间安全监测预警研究尚存在以下不足:一是监测指标较多,缺乏系统性分类;二是全国各地的预警分级不同,缺乏对比分析监测指标及其控制值的地区差异性;三是趋势预测方法也未进行系统性分类。

本文综合运用文献调研、现场调查、案例分析和专家咨询等方法,针对当前城市地下工程安全监测与预警评估的现状,分析安全监测原则,将监测对象和监测指标进行分类,对比分析各地区的监测指标及其控制值,对预测方法进行总结分类,探讨目前研究存在的不足,并提出针对性改进措施,为后续地下空间安全性研究提供参考。

1 城市地下空间监测目标与原则

1.1 监测目标

城市地下工程安全监测评估的目标包括:(1)

对工程本体及其附属结构的变化情况进行实时监测,及时发现异常并采取纠正措施,以确保工程结构的安全稳定(江中华,2022);(2)对周围岩土体的变化进行监控,保障岩土体的稳定性和承载能力;(3)监测周边环境的变化状况,以确保周边重要建筑物的安全(张献恒,2021)。

1.2 监测原则

城市地下工程安全监测基于以下五项原则。

(1)风险可控原则。在城市地下工程建设和运营过程中,应建立有效的安全监测和预警纠偏机制,将安全问题发生的概率和后果降低到可接受的范围内(马梓凯,2021)。

(2)全面性原则。在实施安全监测时,应遵循全面性原则,对所有可能影响工程安全的因素进行全面监测。这包括地质条件、施工工艺、材料性能、结构变形以及渗漏水等方面。通过对各方面数据的综合分析,能够全面了解工程的安全状况,及时发现并解决潜在的安全隐患。

(3)重点性原则。在全面监测的基础上,应对重要部位和关键施工环节加强监测。例如,对隧道、基坑、地下管线等重要部位,应加强监测力度;同时,对于可能影响工程安全的关键环节,如深基坑支护、盾构推进、地下管线更换等,也应重点监测。

(4)预防性原则。城市地下工程安全监测应坚持预防性原则,通过实时监测及时发现并解决潜在的安全隐患,从而有效预防事故的发生。在监测过程中,应重视对危险源的辨识、风险评估和预警预报,并采取针对性措施,确保城市地下工程的安全稳定(马梓凯,2021)。

(5)协同性原则。城市地下工程安全监测需要各方的协同合作。建设单位、设计单位、施工单位、监理单位以及监测单位等应密切配合,政府相关部门也应协同管理,保证安全监测严格按方案执行。

2 城市地下空间监测指标

2.1 监测对象分类

通过文献调研和专家咨询,分析全国各省市地下工程安全监测相关规范,将监测对象归纳为三类:工程结构本体、周围岩土体及周边环境(张献恒,2021;李传军和吴迎雷,2022)。

(1)工程结构本体,通常包括工程结构本体及其附属结构(江中华,2022)。例如:基坑工程中的

支护桩、围护墙、立柱、支撑、锚杆和土钉等;矿山法隧道工程中的初期支护、临时支护和二次衬砌;盾构法隧道工程中的管片结构等。

(2)周围岩土体,一般指工程影响范围内周围的自然岩土体。比如:工程周围的岩体、土体、地下水以及地表等。

(3)周边环境,通常指工程影响范围内的人工建构筑物环境。例如:地下工程周边建构筑物、地下管线、高速公路、城市道路、桥梁、既有轨道交通、其他城市基础设施等。

2.2 监测指标分类

目前,我国已经建立了一套完善的地下工程安全监测规范,确保施工和运营过程中的安全性和稳定性(马梓凯,2021)。全国范围适用的规范,例如:《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)、《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)、《爆破安全规程》(GB6722-2014)。此外,各省市也根据实际情况制定了相应的基坑、城市轨道交通工程的施工监测技术规范,例如:北京、上海、广东、浙江、福建、武汉、重庆、西安、大连等地。这些规范的制定和实施,为地下工程建设提供了有力保障。

根据上述规范标准,分析地下工程安全监测指标类型,主要包含四类:变形类、应力类、振动类和宏观状态类(张献恒,2021;李怀玉和程维敬,2022),其中前三类需采用专用仪器开展监测,第四类则进行目视观察判断。

(1)变形类指标。变形类指标是关于工程结构本体、周围岩土体和周边环境的变形与位移,包括隧道结构的拱顶沉降、拱底沉降、净空收敛和中柱竖向位移,以及地表沉降、坑底隆起等。此外,还包括周边环境的管线位移、邻近建筑物位移和建筑物倾斜等。

(2)应力类指标。应力类指标是指工程结构自身的内力、周围岩土体和周边环境的应力。例如,基坑围护结构的内力和水平支撑轴力,以及锚杆拉力等。同时,还包括基坑周围岩土体的土压力和孔隙水压力等。

(3)振动类指标。振动类指标主要用于衡量爆破施工对周边环境产生的振动影响,通常采用质点振动速度作为衡量标准。例如,学校、住宅、工业和商业建筑物、电站、水工隧道、交通隧道以及新浇筑的大体积混凝土的质点振动速度等。

(4)宏观状态类指标。宏观状态类指标,指通过目视观察监测对象的外表宏观状态判断其稳定性。例如,基坑支护结构的开裂和渗漏情况,基坑的超载和涌水突泥现象,建筑物的新增裂缝和既有裂缝加宽问题,以及隧道岩土体的掉块、裂缝等。此外,还包括地表开裂和下沉等问题。

2.3 监测指标分析

统计《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)、《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)监测指标类型、数量和比例,见表1、2。

表1 《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)监测指标统计表

Table 1 Statistics of monitoring indicators of 《Technical standard for monitoring of building excavation engineering》 (GB 50497-2019)

指标类型	土质基坑		岩质基坑	
	数量	比例	数量	比例
变形	34	56%	27	79%
应力	18	30%	3	9%
其他	9	15%	4	12%
汇总	61	100%	34	100%

由表1、2可知,地下工程安全监测以变形类指标为主,应力和其他类指标等为辅。变形类指标与地下工程稳定情况紧密相关,可综合反映安全状态,布点测量简单易行,具有很高的可靠性和稳定性。因此,在地下工程安全监测中,变形类指标监测被视为一种主要的手段。相比之下,应力监测虽然也能反映地下工程的安全状态,但其测量较为麻烦,容易受到多种

因素干扰,可能导致结果出现较大偏差。因此,应力类指标监测仅作为一种辅助手段。

2.4 监测频率

在城市地下工程中,安全监测的频率很重要,其受到多种因素的影响,例如:监测等级、监测数据、周边环境和工程进度等。在特别重要的工程、监测数据出现异常、周边环境发生不利变化或工程

表2 《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)监测指标统计表

Table 2 Statistics of monitoring indicators of 《Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering》(GB 50911-2013)

监测对象		指标类型	数量	比例
支护结构和 周围岩土体	明挖盖挖基坑	变形	30	53%
		应力	24	42%
		其他	3	5%
	盾构隧道	变形	18	60%
		应力	12	40%
		其他	0	0%
	矿山法隧道	变形	27	69%
		应力	9	23%
		其他	3	38%
周边环境	建构筑物	变形	6	75%
		应力	0	0%
		其他	2	25%
	地下管线	变形	6	100%
		应力	0	0%
		其他	0	0%
	高速公路与城市道路	位移	3	100%
		应力	0	0%
		其他	0	0%
	桥梁	变形	6	60%
		应力	2	20%
		其他	2	20%
	既有城市轨道交通	变形	12	75%
		应力	0	0%
		其他	4	25%

进度导致风险增大时,必须提高监测频率以确保工程安全。

(1)工程监测等级

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)的规定,监测等级的划分主要根据工程的风险等级确定。工程的风险等级,综合分析基坑和隧道工程的自身风险等级、周边环境风险等级以及地质条件的复杂程度。根据风险由大到小,监测等级可划分为一级、二级和三级,相应监测频率应由高到低。明挖及盖挖法施工,根据开挖深度不同,监测频率一般取2次/d~1次/3 d。盾构法及矿山法施工,根据开挖面至监测点或监测断面的距离不同,监测频率一般取1次/d~1次/(3~7 d)。地下水位监测频率宜取1次/(1~2 d)。

(2)监测数据

监测数据出现异常情况,往往需要增加监测的

频率。例如,监测的累计数值超过预期,变化速率过快,甚至超过了预警的阈值,则应提高监测的频率,密切关注工程的安全状况变化。

(3)周边环境

当周边环境条件发生不利变化时,也需要提高监测频率。例如,邻近工程施工超载、振动加剧,或现场长时间连续降雨等,现场安全风险增大,均应提高监测频率;此外,对穿越既有轨道交通和重要建构筑物等情况,应加大监测频率,并对关键监测项目实施实时监测。

(4)工程进度

工程进展的不同阶段也会影响监测频率高低。随着工程施工推进,安全风险可能发生变化,监测频率也相应调整。例如,基坑设计深度20 m,当开挖深度0~5 m时,监测频率1次/3 d;当开挖深度5~10 m时,监测频率1次/2 d;当开挖深度10~15 m时,

监测频率1次/d;当开挖深度15~20 m时,监测频率1次~2次/d。此外,现场加快施工进度时,也应增大监测频率。

3 监测控制值

3.1 监测控制值定义

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013),监测项目控制值定义:为满足工程支护结构安全及环境保护要求,控制监测对象的状态变化,针对各监测项目的监测数据变化量所设定的受力或变形的设计允许值的限值。《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)则对监测预警值进行定义:针对基坑及周边环境的保护要求,对监测项目所设定的警戒值,具体数值由设计单位确定。因此,监测项目控制值与监测预警值,本质上都是设计单位基于工程风险进行综合分析得出的允许值,它们是监测评估的重要依据。

3.2 监测控制值分类

地下工程安全监测控制值,可划分为两种类型:累计控制值、变化速率控制值。

累计控制值,是指监测指标的累计值,用于反映某一参数变化的累计量。在基坑和隧道施工中,对于变形、应力和振动等类别的监测评估,通常采用这种方法(代裕清,2022)。例如,在支护结构及周围岩土体的位移控制中,一般将控制值设定在10~70 mm的范围内;对于支护结构的应力控制,通常将其设定在60%~80%的构件承载能力设计值之间;对于支撑或锚杆的应力,通常将其设定在80%~100%的预应力设计值之间;对于位移控制,一般将其设定在0.1%~1.0%的基坑深度范围内;对于建筑物的差异沉降控制,通常将其设定在0.1%~0.2%的相邻基础中心距离范围内;对于地下管线的差异沉降控制,通常将其设定在0.15%~0.3%的管节长度范围内;对于爆破振动的质点振动速度控制,一般将其设定在0.1~12 cm/s的范围内。

变化速率控制值,是指对一段时间内的变化速率进行限制的值,时间周期通常取为一天。例如,对于基坑支护结构及周围的岩土体,位移变化率的阈值被设定为2~6 mm/d;对于隧道,位移变化率的阈值是1~5 mm/d;而对于建筑物,倾斜率的变化率被限制在0.1% H /d。

在《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)、《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)中,变形类指标是主要的控制项目,通常执行“双控”要求,既要累计值进行控制,也要对变化速率进行控制。相比之下,非关键的变形类指标、应力类指标、振动类指标,只作为辅助项目,一般执行“单控”,仅设置累计控制值。此外,宏观状态类指标属于非数值类指标,通常根据状态特征的有无来进行判断。例如,在一级土质基坑中,复合土钉墙的深层水平位移的累计控制值是40~60 mm,而变化速率控制值则为3~4 mm/d。对于明挖一级基坑,支护结构的轴力控制值的最大值取(60%~70%)构件承载能力设计值,而最小值则是(80%~100%)支撑或锚杆的预应力设计值。对于交通隧道,爆破振动的质点振动速度控制值设定为10~20 cm/s。

3.3 控制值地域差异

调查发现,全国以及各省市均制定了与地下工程相关的安全监测规范和标准,这些规范和标准中的监测控制值数值存在较小差别。各地区在全国规范和标准的基础上,结合本地区地质条件差异,只做了微小调整。总之,监测控制值的地域差异较小,调整后的控制值更符合本地区实际情况。此外,全国性的标准规范通用性强于地区规范,一般作为设计人员的主要参考标准。

下面以基坑的地下连续墙安全监测为例,梳理对比深层水平位移指标阈值,见表3。可知,指标的差异大小排序:相对基坑深度 H 控制值>绝对值>变化速率。

表3 深层水平位移指标阈值对比

Table 3 Comparison of deep horizontal displacement index thresholds

地区	监测等级	绝对值 (mm)	相对基坑深度 H 控制值	变化速率 (mm/d)	规范、标准
全国	一级	30~50	0.3%~0.4%	2~3	《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)
全国	一级	20~30	0.15%~0.3%	2~4	《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)
上海	一级	30~50	0.4%~0.5%	2~3	《基坑工程施工监测规程》(DGTJ 08-2001-2016)
浙江	特级	20~50	/	2	《城市地下工程施工与运营监测技术规程》(DB33_T 1266-2021)
乌鲁木齐	一级	30~50	0.3%~0.4%	2~3	《乌鲁木齐地区建筑基坑支护技术规程(试行)》(T_WKSX 001-2022)

4 评估预警

4.1 趋势预测分析方法

趋势预测分析,是指根据已有监测的数据,运用统计分析方法和计算机技术,对未来的趋势进行预测分析。它可以帮助地下工程参建各方了解未来的趋势和变化,做出更加科学、合理的决策。目前,地下工程安全监测的预测分析主要有六种方法:公式法、回归分析法、时间序列分析法、灰色预测法、神经网络法和支持向量机法。

(1)公式法,是指基于大量的实测数据和统计分析方法,制定预测经验公式。法国数学家 Boussinesq(1885)提出 Boussinesq 解,该解在假定半无限空间条件下,可以计算单个圆形荷载引起的地表沉降。美国工程力学学家 Mindlin(1936)提出了 Mindlin 解,该解用于计算地表上均匀荷载引起的沉降。Peck(1969)归纳总结了沉降数据,认为地表沉降曲线呈正态分布,并提出经典的横向沉降公式。这三种方法至今仍然是地下工程领域中计算地表沉降的重要方法。

(2)回归分析法,是指对历史数据的分析和建模,通过最小二乘法估计回归方程的系数,从而确定自变量和因变量之间关系。回归分析还可以分析数据的结构和特征,研究数据背后的规律和趋势(代裕清,2022)。

(3)时间序列分析法是通过对历史数据进行深入分析,预测地下工程未来的安全趋势。由于地下工程的施工过程会随着时间的推移而发生变化,因此这种方法能够更准确地反映实际情况。

(4)灰色预测法,是一种在数据量较小、信息不完全的情况下使用的预测方法。该方法运用灰色系统理论,对地下工程安全监测数据进行预测(郝付军和黄阿岗,2022)。尽管信息不完全,但灰色预测法仍能提供相对准确的预测结果。

(5)神经网络法,是一种利用神经网络模型进

行预测的方法,通过对历史数据的学习,神经网络模型能够掌握地下工程安全状况的变化规律,并预测未来的安全状况(代裕清,2022)。由于其能够处理复杂的非线性关系,因此具有较高的预测精度。

(6)支持向量机法,适用于处理高维数据和复杂分类问题。它利用支持向量机理论,建立预测模型,对地下工程安全监测数据进行分类和预测。这种方法能够准确地对不同的安全状况进行分类,并给出准确的预测结果。

4.2 预警分级

预警分级标准在地下工程安全监测中具有重要意义,但其设计理论尚不完善。由于地下工程所处地质和环境条件的差异性和复杂性,制定统一的预警分级标准存在较大困难。在《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)和《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)中,虽然提出了预警等级的概念,但未给出明确的划分标准。因此,预警等级的划分应根据工程所在城市的特性和施工经验进行,并视工程的实际需求而定。

一般地,地下工程的安全监测管理按照分级管理原则进行(李传军和吴迎雷,2022)。在制定管理方案时,主要参考三个方面的资料:(1)设计成果:包括结构设计的计算分析结果,这是制定管理方案的重要依据。(2)地下工程相关标准规范:例如,基坑工程可参考《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB50292-2015)等。(3)工程经验类比:通过参考以往类似工程项目,制定出更加合理的预警分级标准,从而提高地下工程的安全性。

北京市轨道交通工程的安全监测预警,按照监测控制值的 70%、85% 和 100% 来划分三个预警等级,详见表 4。

广州市轨道交通工程的监测预警,以监测控制值的 70%、80%、100%、150% 和 200% 划分为五个预警等级,详见表 5。

表 4 北京市轨道交通工程监测预警分级表

Table 4 Monitoring and early warning classification of Beijing municipal rail transit engineering

分级	预警级别	双控指标 (绝对值与速率值)	单控指标 (绝对值或速率值)
一级	红色预警	均达到 100% 控制值	——
二级	橙色预警	均达到 85% 控制值	单个指标达到 100% 控制值
三级	黄色预警	均达到 70% 控制值	单个指标达到 85% 控制值

表5 广州市轨道交通工程监测预警分级表

Table 5 Monitoring and early warning classification of Guangzhou rail transit engineering

监测预警级别	双控指标 均超过监控量测控制值	单控指标 超过监测量测控制值
红色预警Ⅰ级	200%	300%
红色预警Ⅱ级	150%	200%
红色预警Ⅲ级	100%	150%
橙色预警	80%	100%
黄色预警	70%	80%

5 讨论

5.1 城市地下空间安全监测的不足

(1) 预警分级标准不完善。当前,全国及各地区尚未形成一套统一的预警分级标准,通常各项目由设计单位根据自身经验制定相应的分级标准。这种做法在很大程度上受限于设计人员的经验,可能引发分级与实际情况存在较大的差异,从而导致预警发生漏报或误报。

(2) 人工监测效率低。在地下工程安全领域,长期通过手工操作和传统监测方法进行安全监测,这种方法既费时又费力,还引入了大量的人工误差。传统的数据采集与处理主要依赖人工完成,缺乏专门软件辅助数据处理,导致处理过程复杂且低效,缺乏自动化和智能化。

(3) 监测参数单一。目前,地下工程安全监测通常只做必测项目,大多数指标为变形、位移类指标。虽然这种方法能够提供一些信息,但缺乏综合考虑多个参数的能力,无法全面、准确地了解地下工程的安全状态。此外,还可能遗漏一些重要的安全信息,对地下工程的安全评估产生不利影响。

(4) 监测信息缺少共享协同。目前,地下工程安全监测数据主要存储在本地,未实施远程传输和云平台应用。这种状况限制了数据的共享和协同工作,使得数据共享和协同工作变得困难,对地下工程的安全管理产生一定的制约。

(5) 测量精度较低。目前,监测设备在精度和时间空间分辨率上存在不足,导致测量系统整体精度、空间分辨率均较低(张伟和孙伯娜,2021)。此外,仪器自身的不稳定性和现场环境的干扰,导致监测数据存在波动性。这些问题,可能会造成一些重要的细节信息被忽略。

(6) 重监测轻预测。虽然安全监测可以发现地下工程当前存在的问题,但是其无法预测未来的问题。目前,地下工程的监测和预测工作之间尚未形

成有效的互动,导致监测结果无法为预测提供有力的支持。

(7) 缺乏数据融合和机器学习应用。城市地下工程安全监测存在数据融合和机器学习应用的不足。目前,多源监测数据尚未实现有效整合。同时,机器学习和智能分析技术在地下工程安全监测领域的应用也较为有限。因此,无法对监测数据进行综合分析和预测,制约了对地下工程安全状态的全面了解。

5.2 城市地下空间安全监测的改进措施

(1) 建立明确合理的预警分级标准。应根据理论分析和实践经验,制定一套明确的预警分级标准,以便各项目在设计阶段就有一个明确的参考依据。这套标准应考虑到各种可能的风险因素,并且应尽可能客观、定量,避免主观臆断。

(2) 发展自动化与智能化监测。随着传感器技术、通信技术和计算机技术的发展,地下工程安全监测逐渐向自动化与智能化方向发展(赵盈盈和涂中强,2022)。自动化监测系统可以实时采集、传输和处理监测数据,通过数据分析和预警功能提供及时的安全状态评估和预测,省时省力,并减少人为干扰。

(3) 多参数综合监测。地下工程安全监测涉及多个参数,如沉降、位移、应力、温度、湿度等。发展趋势是构建多参数综合监测系统,将不同类型的传感器和监测设备进行整合,实现对多个参数的实时监测和综合分析,更全面地掌握地下工程的安全状况。

(4) 应用远程监测与云平台。利用互联网和云计算技术,将地下工程安全监测数据远程传输和存储,实现数据的集中管理和共享(张献恒,2021)。云平台应用可以提供数据的实时可视化、分析和共享,方便不同部门和利益相关方的实时监测和决策支持(李振兴等,2021)。比如,中国电建集团中南勘测设计研究院开发的“城市地下工程安全监测信

息系统”可实施远程监测、实时可视化、数据共享、警情发布等功能。

(5)开发高精度测量设备。地下工程安全监测,需要高精度的数据和高时空分辨率的监测能力。未来发展趋势是引入高精度的传感器和测量技术,提高监测数据的准确性和可靠性((赵盈盈和涂中强,2022))。

(6)监测和预测并重。城市地下工程的安全评估需要监测和预测并重,其中,监测是基础,预测则是关键,两者相辅相成。通过监测,可以获取实时数据,了解地下工程的安全状态;通过预测,可以对未来地下工程的安全状况进行预测,从而提前采取措施。只有将监测和预测结合起来,双向反馈形成良性循环,才能保障城市地下工程安全。

(7)数据融合与机器学习。地下工程的监测数据通常是大量、多源、复杂等特点。因此,通过数据融合和机器学习技术,将监测数据与其他相关数据进行整合,可构建统一的数据模型和分析框架,实现对监测数据的智能分析和预测。

6 结论

(1)监测指标可划分为四类:变形类、力学类、振动类和宏观状态类。通常,变形类指标为主控项目,执行累计值和变化速率双控要求;力学和振动类指标为辅助项目,执行累计值单控要求;宏观状态类指标属非数值类数据,需控制不产生特征状态变化。

(2)预警分级标准是安全监测评估的重要依据,全国各地因地制宜制定不同的标准。其中,北京市的三级预警和广州市的五级预警具有较高参考价值。

(3)在地下工程安全预测中,一般可采用公式法、回归分析法、时间序列分析法、灰色预测法、神经网络法和支撑向量机法进行预测分析。监测频率应结合监测等级、监测数据、周边环境和工程进度综合确定,对于发生异常变化时,需要提高监测频率。

(4)当前城市地下工程安全监测存在主要问题:预警分级标准不健全、人工监测效率低下、监测参数单一、监测信息缺少共享协同、测量精度较低、重监测轻预测、缺乏数据融合和机器学习应用。针对这些问题,可制定明确的预警分级标准,推动自动化和智能化监测技术的发展,实现多参数综合分

析与预测,利用远程监测和云平台提高监测效率,提升设备精度,同时重视预测的作用,并将数据融合与机器学习技术应用到监测工作中,可有效提升城市地下工程安全监测的效率和准确性。

[References]

- An Zhigang, Zhao Baozhong. 2022. Safety assessment of subway tunnel crossing existing bridge structure [J]. Railway Construction Technology, (6): 196-199, 205 (in Chinese with English abstract).
- Bu Fei. 2023. Safety monitoring and finite element analysis [J]. Sichuan Cement, (7): 215-217, 258 (in Chinese with English abstract).
- Chen Linjing, Luo Yiming, Dai Zihang. 2023. Numerical analysis of temperature effect on retaining system for pit-in-pit excavation engineering in soft soil ground [J]. Geology and Exploration, 59(3): 637-646 (in Chinese with English abstract).
- Dai Changsheng. 2022. Study on foundation pit risk potential classification based on deformation data decomposition treatment [J]. Geology and Exploration, 58(6): 1271-1280 (in Chinese with English abstract).
- Dai Yuqing. 2022. Construction safety monitoring and control of urban rail transit [J]. Engineering Construction and Design, (11): 113-115 (in Chinese with English abstract).
- Dong Ping, Ju Lin, Liu Jinfei, Zhang Junchao. 2022. Development and application of intelligent construction safety and quality control system for large-scale underground engineering [J]. Hydroelectric Power Generation, 48(2): 88-91, 95 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xin, Li Zhi. 2022. Research on construction safety management of urban rail transit to control risk sources [J]. Construction Machinery, (10): 17-21 (in Chinese with English abstract).
- Han Yun, Wang Xin'an, Liu Xin. 2023. Application of Leica TM50 in automatic monitoring of urban rail transit safety protection zone [J]. Shanxi Architecture, 49(11): 141-144 (in Chinese with English abstract).
- Hao Fujun, Huang Agang. 2022. Treatment effects of tunnel entrance collapse section based on field monitoring results [J]. Geology and Exploration, 58(5): 1099-1107 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chaoyang, Wang Lele, Huang Meiqiong, Liang Yue, Wang Xinqiang, He Chengnong. 2021. Monitoring and analysis of riverway conditions during the construction and operation of river-crossing metro tunnels [J]. Modern Tunnel technology, 58(3): 190-195, 222 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhonghua. 2022. Safety analysis and safety monitoring scheme design of large metro station main structure during operational period [J]. Research on Urban Rail Transit, 25(1): 63-69, 74 (in Chinese with English abstract).
- Li Chuanjun, Wu Yinglei. 2022. Research on the monitoring scheme and early warning mechanism of Hefei metro station [J]. Engineering and Construction, 36(1): 215-216, 233 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaiyu, Cheng Weijing. 2022. Research on subway construction

- monitoring and safety risk management [J]. Transportation Manager World, (22): 59-61 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaobin, Bai Haijun. 2022. A method for assessing risk levels of close-spaced construction of subway shield tunnels [J]. Geology and Exploration, 58 (5): 1108-1116 (in Chinese with English abstract).
- Li Xudong, Ruan Kai Yi, Li Zhi, Jia Baohong, Xu Guiyang, Jiao Shaoni. 2023. Construction of Taiyuan metro all-area-safety system [J]. Value Engineering, 42 (15): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenxing, Li Tianfu, Dong Development, Zhang Jun, Chen Yaogang, Feng Feng. 2021. Research and application of intelligent safety monitoring system for deep foundation pit adjacent to subway [J]. Building Technology, 52 (1): 78-80 (in Chinese with English abstract).
- Liao Peng, Lin Jing, Wang Jianfu. 2022. Structural safety evaluation and monitoring analysis of bridge pile construction in gravel stratum adjacent to subway tunnel [J]. Building Technology Development, 49 (6): 100-102 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zikai. 2021. Analysis of metro construction monitoring technology and safety risk management [J]. Transportation Manager World, (30): 1-3 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yuandong. 2022. Comprehensive application of safety monitoring and numerical analysis in tunnel crossing water pipeline engineering [J]. Water Conservancy Technical Supervision, (12): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yesheng, Wu Yong, Zhao Liangyun, Li Wei, Jiang Yijie, Zhao Huan, Ding Zhi. 2023. Research & development and application analysis of risk ranking management and control platform for shield construction of urban underground works [J]. Modern Tunnel Technology, 60 (1): 76-89, 106 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guoren, Zhou Guangjun, Xing Junwei, Li Qi, Shen Jie, Liu Xueqian. 2023. Research on data security guarantee system for urban rail transit enterprises [J]. Urban Rail Transit, (7): 53-57 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingpeng. 2022. Safety monitoring analysis of Chengmenun station of metro line 1 in Fuzhou power tunnel project [J]. Straits Science, (10): 66-70 (in Chinese with English abstract).
- Yang Binlin, Zhong Wei, Lin Kaisheng, Liu Jinfei, Liao Hongjiang. 2021. Research and application on real-time monitoring intelligent system for security and quality of underground engineering [J]. Water Conservancy and Hydropower Express, 42 (3): 74-78, 84 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chao, Ding Jifeng, Liao Dongjun, Wang Ting. 2023. Research of health monitoring and early warning system for running subway structures [J]. Engineering Survey, 51 (2): 60-63 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qi, Xiong Zhijin, Chen Yongfeng, Yang Jin. 2022. On the design of the metro tunnel safety monitoring system based on wireless sensor network [J]. The Journal of Southern Vocational Education, 12 (2): 103-109 (in Chinese with English abstract).
- Yi Rong, Jia Kaiguo. 2020. Discussion on the safety of urban underground space in China [J]. Geology and Exploration, 56 (5): 1072-1079 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jian. 2023. Study on construction of remote automatic monitoring and early warning system for tunnel and underground works [J]. Modern Tunnel Technology, 60 (2): 62-72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hao, Lu Peiyin, Zhang Xiaoyang. 2023. Evaluation method for safety status of subway foundation pit based on multi-information fusion [J]. Urban Express Rail Transit, 36 (3): 16-21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Sun Bona. 2021. Study on the safety monitoring of steel pipe columns in subway underground excavation stations [J]. Engineering and Construction, 35 (6): 1273-1275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xianheng. 2021. Rail transit safety monitoring system based on internet of things [J]. Building Technology Development, 48 (14): 148-150 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dong, Tian Qian, Hao Fujun. 2022. Study on large deformation classification of deep buried carbonaceous slate tunnels [J]. Geology and Exploration, 58 (6): 1261-1270 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yingying, Tu Zhongqiang. 2022. Research on key technologies of underground space safety monitoring in metro area [J]. Scientific and Technological Innovation and Productivity, (8): 53-55, 63 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 安志刚, 赵宝忠. 2022. 地铁隧道穿越既有桥梁施工安全评估 [J]. 铁道建筑技术, (6): 196-199, 205.
- 卜飞. 2023. 地铁深基坑支护安全监测及有限元分析 [J]. 四川水泥, (7): 215-217, 258.
- 陈林靖, 罗一鸣, 戴自航. 2023. 软土地基坑中坑支护体系温度效应的数值分析 [J]. 地质与勘探, 59 (3): 637-646.
- 代裕清. 2022. 城市轨道交通施工安全监测与控制 [J]. 工程建设与设计, (11): 113-115.
- 代长生. 2022. 基于变形数据分解处理的基坑危险性潜势分级研究 [J]. 地质与勘探, 58 (6): 1271-1280.
- 董平, 鞠琳, 刘金飞, 张竣朝. 2022. 大型地下工程施工智能管控系统的研发与应用 [J]. 水力发电, 48 (2): 88-91, 95.
- 段鑫, 李致. 2022. 控制风险源的城市轨道交通施工安全管理研究 [J]. 建筑机械, (10): 17-21.
- 韩昀, 王新安, 刘欣. 2023. TM50 在地铁安全保护区自动化监测中的应用 [J]. 山西建筑, 49 (11): 141-144.
- 郝付军, 黄阿岗. 2022. 基于现场监测成果的隧道洞口塌方段处理效果分析 [J]. 地质与勘探, 58 (5): 1099-1107.
- 胡朝阳, 王乐乐, 黄梅琼, 梁越, 王新强, 何承农. 2021. 穿江地铁隧道施工及运营期河道监测分析 [J]. 现代隧道技术, 58 (3): 190-195, 222.
- 江中华. 2022. 大型地铁车站主体结构运营期安全分析与安全监测方案设计 [J]. 城市轨道交通研究, 25 (1): 63-69, 74.
- 李传军, 吴迎雷. 2022. 合肥市地铁车站监测方案与预警机制研究 [J]. 工程与建设, 36 (1): 215-216, 233.

- 李怀玉,程维敬.2022.地铁施工监测与安全风险管理研究[J].运输经理世界,(22):59-61.
- 李晓斌,白海军.2022.地铁盾构隧道近接施工风险等级评估方法研究[J].地质与勘探,58(5):1108-1116.
- 李旭东,阮锴燊,李智,贾宝宏,许贵阳,焦少妮.2023.太原地铁全域安全体系建设[J].价值工程,42(15):47-52.
- 李振兴,李天福,董开发,张军,陈耀钢,冯峰.2021.邻近地铁的深基坑智能化安全监测系统研究及应用[J].建筑技术,52(1):78-80.
- 廖鹏,林静,王健福.2022.圆砾地层桥桩施工邻近地铁隧道结构安全评估与监测实例分析[J].建筑技术开发,49(6):100-102.
- 马梓凯.2021.地铁施工监测技术与安全风险管理分析[J].运输经理世界,(30):1-3.
- 唐远东.2022.安全监测及数值分析在隧道穿越输水管道工程的综合应用[J].水利技术监督,(12):32-35.
- 王烨晟,吴勇,赵良云,李伟,姜宜杰,赵焕,丁智.2023.城市地下工程盾构施工风险分级管控平台研发与应用分析[J].现代隧道技术,60(1):76-89,106.
- 吴国仁,周光军,邢军伟,李琦,沈杰,刘学谦.2023.城市轨道交通企业数据安全保障体系研究[J].城市轨道交通,(7):53-57.
- 徐兴芃.2022.福州电力隧道工程穿越地铁1号线城门站安全监测分析[J].海峡科学,(10):66-70.
- 杨彬林,钟为,林开盛,刘金飞,廖鸿江.2021.地下工程智能施工信息管理系统研发与应用[J].水利水电快报,42(3):74-78,84.
- 杨超,丁吉峰,廖东军,王婷.2023.地铁运营结构健康监测预警系统研究[J].工程勘察,51(2):60-63.
- 杨琦,熊志金,陈永丰,杨进.2022.基于无线传感器网络的地铁隧道安全监测系统设计[J].南方职业教育学刊,12(2):103-109.
- 易荣,贾开国.2020.我国城市地下空间安全问题探讨[J].地质与勘探,56(5):1072-1079.
- 于建.2023.隧道及地下工程远程自动化监测与预警系统构建研究[J].现代隧道技术,60(2):62-72.
- 张浩,吕培印,张晓阳.2023.多信息融合的地铁基坑安全状态评价方法[J].都市快轨交通,36(3):16-21.
- 张伟,孙伯娜.2021.地铁暗挖车站钢管柱安全监测研究[J].工程与建设,35(6):1273-1275.
- 张献恒.2021.基于物联网的轨道交通安全监测系统[J].建筑技术开发,48(14):148-150.
- 赵东,田倩,郝付军.2022.深埋炭质板岩隧道的大变形分级研究[J].地质与勘探,58(6):1261-1270.
- 赵盈盈,涂中强.2022.地铁域地下空间安全监测关键技术探究[J].科技创新与生产力,(8):53-55,63.

Safety Monitoring and Early Warning Indexes of Urban Underground Space

LI Shoulei¹, LIANG Weiqun², CHEN Xiaobin², XIE Qunyong¹, XIAO Yazi¹, SUN Qingfeng¹

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075)

Abstract: In order to ensure the safety of the development and utilization of urban underground space and promote the sustainable development of cities, this work proposed five principles of urban underground space monitoring by means of literature investigation, field investigation and expert consultation. The monitoring objects were divided into three categories, i.e., engineering structure, surrounding rock and soil mass, and surrounding environment. The monitoring indexes were summarized into four categories of deformation, mechanics, vibration and macrostate, among which the deformation indexes implemented double control requirements, and the other three indexes implemented single control requirements. The prediction of monitoring trends adopted the formula method, regression analysis method, time series analysis method, gray prediction method, neural network method and support vector machine method. The monitoring control values were basically the same throughout the country, but the early warning classification standards varied between different cities. The graded early warning of Beijing and Guangzhou cities provides significant reference for other areas. Seven deficiencies have been proposed for the safety monitoring of urban underground space, i.e., imperfect standards of warning classification, low efficiency of manual monitoring, single monitoring parameters, lack of monitoring information sharing, poor measurement accuracy, emphasis on monitoring rather than prediction, and lack of data fusion and machine learning applications. In view of these problems, seven measures were recommended, i.e., the establishment of reasonable early warning classification standards, the development of automation and intelligent monitoring, multi-parameter comprehensive monitoring, the application of remote monitoring and cloud platform, the development of high-precision measurement equipment, equal emphasis on monitoring and prediction, and data fusion and machine learning.

Key words: underground engineering, safety monitoring, monitoring indicators, trend prediction, early warning and classification