

· 专题一:双清论坛“电磁空间信息资源的认知与利用” ·

基于时空大数据的城市地下空间结构安全 服役智慧感知与性态演化预测*

杜彦良^{1,2} 杜博文^{3**} 徐 飞² 孙磊磊³ 叶俊辰³ 李林超¹

1. 深圳大学 城市智慧交通与安全运维研究院,深圳 518060

2. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制实验室,石家庄 050043

3. 北京航空航天大学 软件开发环境国家重点实验室,北京 100191

[摘 要] 基于时空大数据的城市地下空间结构安全服役智慧感知与性态演化预测,是提升地下工程全生命周期安全保障的重要手段,是基础设施由信息化向智能化发展的基础理论与核心技术。目前,我国地下空间开发迅速,已历经三个发展阶段并逐步形成了网络化,未来将形成立体化的城市布局。但地下空间结构安全感知与演化预测技术在实际应用中还存在诸多问题,地下空间结构建设与安全运营依然面临诸多挑战。本文立足于地下空间安全管理中的实际问题,分析了现有地下空间结构安全感知与演化预测技术的优缺点以及未来面临的挑战,在深入分析现有地下空间结构安全感知与演化预测技术发展趋势基础上,提出了所面临的关键科学问题,并针对地下空间结构安全感知与演化预测提出了相应的研究思路与对策。

[关键词] 地下空间结构;时空大数据;状态感知;演化预测

1 背景和战略意义

近年来,随着我国经济持续快速发展与城镇化水平的提高,包括地下管网、地下综合体及地下隧道在内的城市地下空间开发利用得到了迅猛发展并呈现出巨大的社会需求。

从发展过程来看,我国地下空间的开发利用起步较晚。自 20 世纪 90 年代以来,城市地下空间利用率有限,主要集中在轨道交通与地下停车场建设等方面。但是,从“十二五”开始,随着我国城镇化步伐的推进,地上空间的开发利用逐渐趋于饱和,城市地下空间开发速度开始加快^[1]。例如,上海、广州、深圳等 7 个城市的开发规模增量均在 $2 \times 10^7 \text{ m}^2$ 以上。特别是“十三五”以来,新增地下空间建筑面积达到 $8.44 \times 10^8 \text{ m}^2$,我国已然成为世界上地下空间规模最大的国家^[2]。以上海正在建设中的北横通道



杜彦良 中国工程院院士,石家庄铁道大学教授,深圳大学特聘教授,第十三届全国人民代表大会代表,大型工程结构状态监测与安全控制专家,国家级教学名师。任国家铁路局和中国铁路总公司科学技术专家委员会副主任、京津冀协同发展河北省专家咨询委员会交通组组长、雄安新区发展建设河北省专家咨询委员会先行开发组组长、中国工程院土木、建筑与水利学部常委等,带领团队获国家科技进步奖特等奖 2 项、一等奖 1 项、二等奖 3 项。



杜博文 北京航空航天大学教授,博士生导师,国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金获得者。主要研究方向为时空大数据挖掘、人工智能与工程大数据和智能结构监测。近年来围绕人工智能、智能交通、基础设施健康监测等多学科交叉方向,共发表信息、交通、土木等多个领域国际顶级期刊/会议学术论文 80 余篇,荣获

国家科技发明奖二等奖 1 项(排名 3)、国家技术科技进步奖二等奖 1 项(排名 3)和省部级科技奖项 5 项。

收稿日期:2021-02-10;修回日期:2021-04-06

* 本文根据第 273 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: dubowen@buaa.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51822802, 51991395, 71901011)、国家重点研发计划(2018YFB2101003)、深圳市海外高层次人才创新创业专项资金团队项目(KQTD20180412181337494)和河北省自然科学基金项目(E2019210356)的资助。

工程以及南京市江北新区中心区地下空间为例,地下空间功能不再单一,地铁站、商场、火车站等功能相结合的一体化、综合化的地下空间群式发展已成为当前设计、建造的主要趋势。其中上海北横通道工程地下空间的深度最大已达 48 m,南京市江北新区中心区地下空间总规模约在 $4.5 \times 10^6 \sim 4.8 \times 10^6 \text{ m}^2$ ^[3, 4],这意味着多层次、立体化的城市地下空间发展格局已初步体现,“深、大、群”三大特点逐步凸显。

地下空间结构病害及劣化趋势与地上建筑、桥梁等其它大型构筑物相比,呈现“隐蔽性强”的特点。由于其作业空间受限,对检/监测作业带来不便,结构安全性态感知难^[5]、病害辨识难、突发事件应急救援难。地下空间结构主要体现在渐进性病害、突发灾害和自然灾害三个方面。从渐进性病害方面来看,由于城市地质条件复杂,多数沿江、沿海城市为软土或填海地质,地面沉降严重,加之地表建筑施工与外部荷载扰动等多因素影响^[6, 7],致使城市地下空间结构病害频发^[8, 9],短寿命凸显。另外,在突发性灾害方面,由于工程建设非同步施工侵限,以及爆炸、火灾、交通事故等地下空间结构突发性破坏时,事故链研判时间长,疏散救援时效差,结构损伤劣化加剧。最后,在自然灾害方面,当发生台风、暴雨、地震等自然灾害时,地下空间洪涝、塌陷、结构破坏显著,特别是在隐蔽环境下,结构损坏评估及预警时延大、粒度粗,一旦发生事故,后果严重。

结合地下空间发展特点及面临的主要问题可以看出,由于地下空间“深、大、群、隐”的特点,一旦发生事故,极易造成灾难性影响,地下空间结构建设与运营安全成为亟待解决的重大问题。因此,为保证地下空间结构建设与运营安全,城市地下空间结构安全服役智慧感知与性态演化预测方法需求日益增强^[10]。实际上,在我国物联网建设不断深入,监测手段持续丰富环境下,“十四五”重点专项规划所提出的新方向、以粤港澳大湾区城市群发展为代表的新机遇以及新基建与老基建相结合为特色的新场景,为实现上述需求建立了坚实基础。当前,我国计算机科学发展迅速且逐步处于国际领先地位,人工智能已经大范围应用在各个不同的领域,这也为地下空间结构安全保障智能化提供了一个新的思路。以机器学习方法为例,通过对监测数据质量进行增强,可从大数据的角度挖掘灾害、病害的前兆特征,从时间维度和空间维度分析整体结构的变化趋势和相关性,从领域知识和数据科学层面双驱动研究风险评估与预测预警,全方面为地下空间结构保

驾护航。进而通过地下空间结构安全保障智能化,提高城市地下空间结构防灾能力^[11, 12]、城市地下空间安全服务品质、城市风险管控能力和安全预警效能、城市综合承载能力,为韧性城市发展提供基础保障,同时也有助于“新型基础设施建设”中 5G 基站建设、城际高速铁路和城市轨道交通、大数据中心、人工智能领域交叉应用,推动多领域融合发展。

2 地下空间结构安全感知与演化预测技术现状

现阶段我国地下空间结构正处于飞速发展阶段,更深、更大、更复杂的地下空间结构是未来地下空间发展的趋势^[13]。但是,现有的地下空间结构安全感知与演化预测技术并不能保证地下空间结构建设与运营安全所需,尤其在状态感知、病害识别和机理分析方面仍存在亟需解决的难题^[14]。

虽然我国现有的状态感知设备已经实现了从人工式向自动式的发展,同时在物联网环境下,通过布设大规模检测器所获取的数据,已构建出具有数据规模大、类型多的大数据环境,通过数据对比可获得结构变形、温度场、表面病害、内部损伤等关键信息。但如图 1 所示,大多状态感知设备主要采用声学、光学等从单一角度感知地下结构局部区域的安全服役状态。这些感知手段具有迟滞性、单一性、适用性、局限性等缺陷,再加上地下空间检测设备工作环境复杂。由于通讯延迟、光照不足、维修困难等原因,时空监测数据异常多样、质量参差不齐,往往造成地下结构“探不清、测不精、判不准”等问题,进而导致对地下结构安全状态错误估计,严重的可能危害结构安全^[15]。因此在地下结构全局感知能力以及数据质量方面还有待提升。

通过将传感器搜集到的监测数据分类预测,并对可见光图像进行语义分割,可以实现对地上建筑、

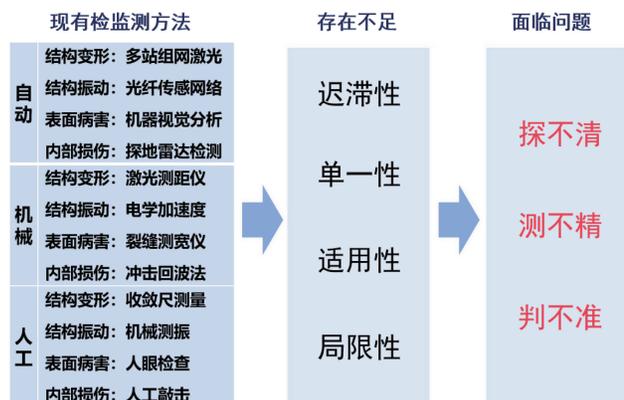


图 1 现有地下空间结构检测监测方法与不足

桥梁结构表观病害识别,但地下空间结构形式和环境更加复杂,很多病害发生在隐蔽区域,现有的数据融合手段很难将监测数据有效融合,更难获取地下空间隐蔽异常性态特征,造成病害检测精度较大损失影响病害识别。因此,对隐蔽病害识别的能力还有待提升。

目前,对病害损伤机理的研究主要采用仿真模型和现场实验方法。但是,由于地下空间结构庞大、特性复杂,缺乏对实测数据的认知,导致精度偏差大。与此同时,尽管数据驱动模型可以发现异常现象,但在缺乏领域知识环境下,属于黑箱模型,对结构力学性能、材料耐久性认识不足,导致病害机理演化分析或结构性态劣化规律方面受限。特别需要注意的是,由于城市地下结构受多种因素复合影响,性态演化规律复杂,大多呈非线性趋势。而我国现阶段预测预警方式更多依靠项目安全管理人员以往工作经验,缺乏系统科学的结构灾变预警理论与安全信息管理方法,造成了追溯地下空间结构病害源头的难度大,灾变及风险预警不及时。因此在机理分析方面,模型和仿真实验研究应与实测数据相互佐证,灾变及风险预警指标应随着形态演化规律与地下空间结构的运营实时调整,从而追溯病害源头,得出城市地下结构形态演化规律,并最终实现地下空间结构病害或灾变的智能诊断、劣化趋势精准预测与动态预警。

3 关键科学问题

基于时空大数据的城市地下空间结构安全服役智慧感知与性态演化预测是保障地下空间结构建设与安全运营的重要手段^[16, 17]。但是,由于地下空间“深、大、群、隐”四大特点,使其还面临着感知能力弱、数据质量低、病害特征隐、病害溯源及预测预警难等问题与挑战。

基于此,为有效保障地下工程全生命周期安全,还需围绕以下科学问题开展研究:(1)在复杂地下空间环境下,如何协同利用多源异构传感器数据,通过多视角、多维度、多尺度感知地下空间结构运行状态,进而实现全时、全域空间性态推演;(2)如何完成时空监测数据自修复与特征提取,保证高维特征空间下数据关联与一致性表达,达到分布式多模式异构时空数据融合重构的目的,实现分布式多模式跨域时空监测数据特征聚合与融合重构;(3)如何挖掘基础设施异常性态险兆特征,实现城市地下空间结构早期微损伤与隐性缺陷智能识别;(4)如何

基建立领域知识约束的评估模型与智能诊断方法,实现数据与知识双驱动病害诱因溯源与智能诊断;(5)如何基于深度学习的结构病害演化模式解析与大数据的灾变风险评估与预测预警,实现多智能体信息协同的关键参数联合优化与预测预警。

4 研究思路与对策

为解决现阶段我国地下空间结构建设与运营安全所面临的问题,针对城市地下空间结构特有的快变环境、多变环境以及未知环境,建立具有动态性、预知性以及自学习能力的灾变认知与预测理论方法体系,形成大数据驱动的结构群全生命周期智能感知、健康诊断与安全预警安全保障体系。

4.1 多维度多层次泛在感知装备与方法研究

如图 2 所示,针对地下空间结构安全感之技术弱的缺点,考虑城市地下空间结构灾变特征,研究基于泛在物联感知的全域实时智能监测方法与装备^[18],构建感知设备协同优化布设模型,建立多层次(隐蔽—微观—局部—全域)检测方法,以此实现全时全域智能化网络化的地下空间结构全息感知。

4.2 基于隐因子分析的灾变特征挖掘方法研究

研究面向地下空间结构性态分析的隐性特征提取方法,基于张量分解和深度自编码等人工智能方法,实现从海量异质监测数据中提取深层隐性特征。如图 3 所示,引入领域知识,并通过将挖掘出的隐性特征、大数据统计分析得到的显性特征相结合,研究

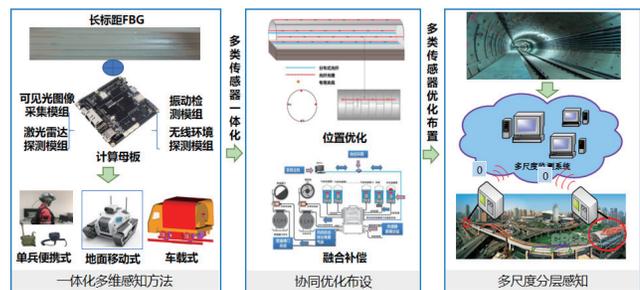


图 2 地下空间结构全息感知示意图

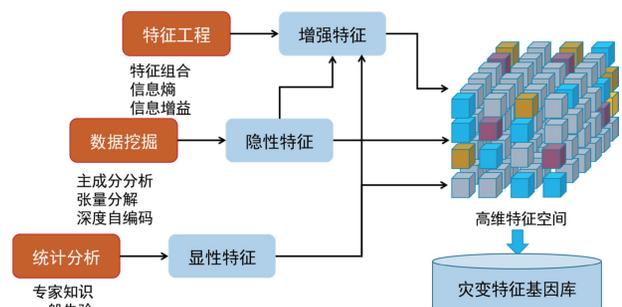


图 3 监测数据特征聚合与融合重构示意图

面向地下空间结构灾变分析的特征增强方法,得到大规模组合特征集。研究基于信息熵与灵敏度分析的特征评价方法,挖掘显性特征、隐性特征、以及组合特征与各类地下空间结构灾变之间的关联关系,形成“数据—特征—灾害”之间的关系图谱,为构建可主动协同的病害或灾变“感知—认知—预知—控制”体系奠定基础。

4.3 微损伤及隐性缺陷识别方法研究

相比于传统的基于有限元的分析方法,数据驱动的方法受结构外部环境的变化影响较小,能更为准确地辨识地下空间结构微损伤和隐性缺陷。因此,在解决病害识别难的问题上,利用诸如度量学习,非线性融合等人工智能方法,从不同视角度量结构性态相似性,构建早期微损伤与隐性缺陷的特征集合。通过对于特征的深度挖掘和分析,提出具备自适应能力的异常性态标识方法。如图4所示,通过对于源数据的降维分析得到病害和正常数据不同的基底,以无监督的机器学习方法,解决异常数据样本数量少、异常特征隐的问题^[19, 20],进而实现城市地下空间结构早期微损伤与隐性缺陷智能识别。

4.4 基于时空关系的结构性态劣化趋势预测方法研究

尽管现有的线性回归等方法利用最小二乘法可求解出劣化性态与各自变量的关系^[21, 22],但是尚不能对不同传感器之间相关性的进行深入挖掘与分析。实际上,实时监测数据中隐含的特征能够精准反应结构的劣化趋势。年来不断发展的深度学习方法,就可以有效建立监测数据之间的时序依赖关系^[23]。如图5所示,利用目前流行的循环神经网络方法,可以持续获取长短时关系,并且消除序列过长带来的梯度消失的影响。利用图卷积神经网络^[24],自适应构建邻接矩阵,通过传感器空间关系的自动学习方法,实现地下空间结构的长期劣化趋势的精准预测。

4.5 多源监测数据的时空关系推演方法研究

针对传感器在布设位置上局限性,不能全方位

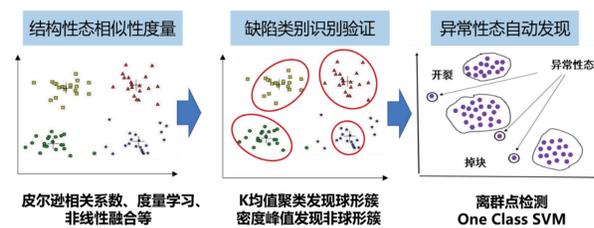


图4 城市地下空间结构早期微损伤与隐性缺陷智能识别示意图

精准监测地下空间结构的所有位置性态信息的问题,研究在低维数据空间中重构出高维数据的空间推演方法。当前,下游的推演方法多基于模型结构,采用力学分析方法和分解方法^[25-27],如卡尔曼滤波,小波分解等。但这些方法多受到经验影响,无法在地下空间结构所处的极端环境准确模拟,无法解决环境变化的不规律性影响,难以精准且实时掌握结构性态。而数据驱动方法利用数据之间的低秩性,在重构短期缺失数据上具有优势。如图6所示,可利用主成分分析,自编码器机器学习方法将数据压缩^[28]。进一步地,在Lasso的框架下,融合临近约束,引入力学行为、材料劣化行为等领域知识,实现全方位结构性态空间推演。

4.6 研究数据知识双驱动智能诊断与预警方法

基于现有信息领域人工智能理论基础,研究地下空间结构的病害因子挖掘方法,并结合土木领域的结构力学理论,是解析病害形成及其演化机理新思路。如图7所示,利用机器学习中集成学习思想,构建领域知识与时空数据集成的双驱动模型,来提升病害诊断精准性,实现地下空间结构的病害诱因溯源与智能诊断。利用深度学习方法,研究地下空间结构病害的演化模式,协同多源异构数据和多智能体建模,分析病害演化的时序关系和空间关系,构建基于多源异构时空监测数据联合的预测预警模型,在动态评估结构灾变的风险基础上,可实现多智

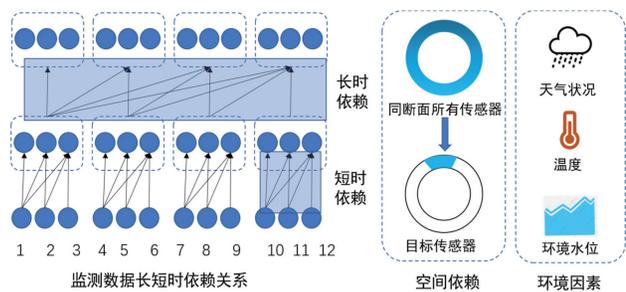


图5 性态劣化趋势预测示意图

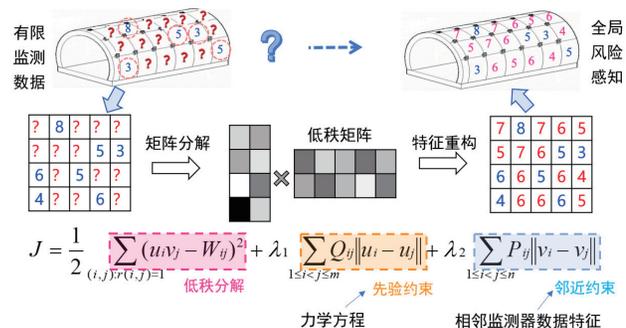


图6 多源监测数据时空推演示意图

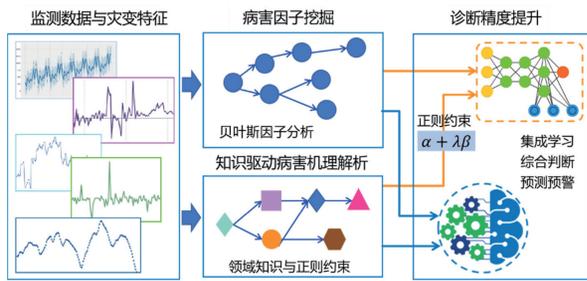


图 7 地下空间结构的病害诱因溯源与智能诊断示意图

能体信息协同的地下空间结构安全状态预测预警^[29]。

5 核心技术与行业发展的若干建议

地下空间的开发利用是城市发展的必经之路。在我国当前物联网建设不断深入、新型基础设施发展持续推进、大数据与人工智能技术飞速发展的背景下,为建立国家“十四五”规划提出的“构建系统完备、高效实用、智能绿色、安全可靠的现代化基础设施体系”,为推进城市基础设施智能化变革,在基础理论和关键技术研究上提出以下建议:

(1) 研制基础设施智能协同与性态全息感知装备,提出多层次(隐蔽—微观—局部—全域)检测、监测方法,在实现地下空间结构进行全方位精准感知能力基础上,构建安全可信数据共享平台,建立数据、知识间的深度关联。

(2) 通过构建智能基础设施性态认知与险兆辨识理论方法及技术体系,推进新型基础设施与交通基础设施深度融合,利用大数据与领域知识相结合方法对地下空间进行建模。建立具有动态性、预知性以及自学习能力的病害、灾变认知与预测理论方法,形成大数据驱动的结构群全生命周期智能感知、健康诊断与安全预警安全保障体系,显著提升传统感知与性态演化预测方法准确性和实时性。

(3) 以基础设施可持续发展为导向,以经济耐久、绿色节能、安全可靠、健康长寿为目标,以智能化、精细化与标准化为切入点,以新型智慧城市发展为牵引,在重大经济区域、特大中城市、特色城市(镇)和国家新区开展不同应用场景驱动集中应用示范,为建立灾前一灾中一灾后一体化决策技术与智能服务,实现城市运行效率与安全的双保障。

参 考 文 献

[1] 朱合华, 骆晓, 彭芳乐, 等. 我国城市地下空间规划发展战略研究. 中国工程科学, 2017, 19(6): 12—17.

- [2] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况. 隧道建设, 2010, 30(4): 351—364.
- [3] 油新华, 何光尧, 王强勋, 等. 我国城市地下空间利用现状及发展趋势. 隧道建设(中英文), 2019, 39(02): 173—188.
- [4] 张景娥, 杨玉修, 高志宏, 等. 地铁车站与综合管廊结合设计研究. 铁道工程学报, 2019, 36(6): 80—85.
- [5] 黄强兵, 彭建兵, 王飞永, 等. 特殊地质城市地下空间开发利用面临的问题与挑战. 地学前缘, 2019, 26(3): 85—94.
- [6] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战. 地学前缘, 2019, 26(3): 22—31.
- [7] Ping HZ, Xiao WM, Bing PJ, et al. A proposed solution to the ground fissure encountered in urban metro construction in Xi'an, China. Tunnelling Underground Space Technology, 2017, 61: 12—25.
- [8] 孙钧. 国内外城市地下空间资源开发利用的发展和问题. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 699—709.
- [9] Zhang XN, Wu XQ, Park Y, et al. Perspectives of big experimental database and artificial intelligence in tunnel fire research. Tunnelling Underground Space Technology, 2020, 108: 1—40.
- [10] 蔡方, 吉久明, 蒋志强, 等. 2018 年全球工程前沿简介. Engineering, 2018, 4(6): 18—29.
- [11] Wei ZG, Su Y, Qing ZG, et al. Smart firefighting construction in China: status, problems, and reflections. Fire and Materials, 2020, 44(7): 479—486.
- [12] Gholami R, Rasouli V, Alimoradi A. Improved RMR rock mass classification using artificial intelligence algorithms. Rock Mechanics Rock Engineering, 2013, 46(5): 1199—1209.
- [13] Bobylev N. Underground space as an urban indicator: measuring use of subsurface. Tunnelling Underground Space Technology, 2016, 55(55): 40—51.
- [14] Xie HP, Zhang YH, Chen YY, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Tunnelling Underground Space Technology, 2021, 107: 103651.
- [15] 李利平, 成帅, 张延欢, 等. 地下工程安全建设面临的机遇与挑战. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 1—13.
- [16] Wang ZF, Xu JW, He XQ, et al. Analysis of spatiotemporal influence patterns of toxic gas monitoring concentrations in an urban drainage network based on IoT and GIS. Pattern Recognition Letters, 2020, 138: 237—246.
- [17] Du BW, Du YL, Xu F, et al. Conception and exploration of using data as a service in tunnel construction with the NATM. Engineering, 2018, 4(1): 123—130.
- [18] 龚健雅, 张翔, 向隆刚, 等. 智慧城市综合感知与智能决策的进展及应用. 测绘学报, 2019, 48(12): 1482—1497.
- [19] Yang WX, Peter WT. Development of an advanced noise reduction method for vibration analysis based on singular value decomposition. Ndt & E International, 2003, 36(6): 419—432.

- [20] Jiang X, Mahadevan S, Adeli H. Bayesian wavelet packet denoising for structural system identification. *Structural Control and Health Monitoring: the Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 2007, 14(2): 333–356.
- [21] Mei L, Mita A, Zhou J. An improved substructural damage detection approach of shear structure based on ARMAX model residual. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(2): 218–236.
- [22] Fugate ML, Sohn H, Farrar CR. Vibration-based damage detection using statistical process control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, 15(4): 707–721.
- [23] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735–1780.
- [24] Kip FTN, Welling M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks. (2017-02-22)/[2021-01-10]. <https://arxiv.org/abs/1609.02907>.
- [25] Zhang XH, Wu ZB. Dual-type structural response reconstruction based on moving-window kalman filter with unknown measurement noise. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(4): 04019029.
- [26] Wan Z, Li S, Huang Q, et al. Structural response reconstruction based on the modal superposition method in the presence of closely spaced modes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 42(1–2): 14–30.
- [27] Kammer DC. Estimation of structural response using remote sensor locations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1997, 20(3): 501–508.
- [28] Kerschen G, Poncelet F, Golinval JC. Physical interpretation of independent component analysis in structural dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(4): 1561–1575.
- [29] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向. *隧道建设*, 2017, 37(3): 251–263.

Intelligent Perception and Behavior Evolution Prediction of Urban Underground Structures based on the Big Spatio-temporal Data Analysis

Du Yanliang^{1,2} Du Bowen^{3*} Xu Fei² Sun Leilei³ Ye Junchen³ Li Linchao¹

1. *Institute of Urban Smart Transportation and Safety Maintenance, Shenzhen University, Shenzhen 518060*

2. *Key Laboratory of Large Structure Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043*

3. *The State Key Laboratory of Software Development Environment, Beihang University, Beijing 100191*

Abstract The intelligent perception and prediction of behavior evolution based on spatio-temporal big data analysis of urban underground space structure have not only played an important role in guaranteeing the lifelong security of underground engineering, but also contributed a lot to the new infrastructure construction in China. In recent years, the rapidly exploitation of underground space in our country has gone through three stages and has gradually formed a network. In the future, the underground space of the city will be developed to deeper area and form a three-dimensional urban layout. However, there are still plentiful problems and challenges in the application of intelligent perception and evolution prediction technology. In addition, the underground space construction as well as safely structure still face many challenges. Based on the partial problem in underground space security management, this paper summarizes the advantages and disadvantages of current researches as well as the corresponding research ideas and countermeasures for the intelligent perception and evolution prediction for urban underground space structure to fill this gap.

Keywords underground space structures; spatio-temporal data; state awareness; evolution prediction

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: dubowen@buaa.edu.cn