

基于数据驱动损伤档案的复杂杆系结构损伤识别方法

谭凯旋^{1,2}, 张光槟¹, 付伟庆^{1,*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 北交振安轨道科技(北京)有限公司, 北京 102600)

摘要:为实现复杂杆系结构损伤位置定位与损伤程度预测,提出了一种基于数据驱动损伤档案的损伤识别方法。通过识别指标、分区域两步识别和网络训练三方面介绍损伤档案的识别流程;通过数值模拟建立大型桁架桥结构的有限元模型,并利用均匀设计法建立区域损伤库和区域内构件损伤库;通过对网络进行训练,识别构件的损伤位置和损伤程度。桁架桥数值模拟结果表明,损伤位置定位准确,损伤程度识别误差在 5% 以内。

关键词:数据驱动;损伤档案;杆系结构;损伤识别

中图分类号:U323 文献标志码:A 文章编号:1673-4602(2025)06-0011-07

Damage identification method for complex truss structures based on data-driven damage files

TAN Kaixuan^{1,2}, ZHANG Guangbin¹, FU Weiqing^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Beijiao Zane Rail Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: In order to realize damage location and damage degree prediction of complex truss structures, a data-driven damage file-based damage identification method is proposed. The process of damage file recognition is introduced from three aspects: recognition index, two-step recognition by subregion and network training. The finite element model of large truss bridge structure is established through numerical simulation, and the regional damage reservoir and the regional internal component damage reservoir are established by using the uniform design method. By training the network, the damage location and damage degree of the component are identified. The numerical simulation results of truss bridge show that the damage is accurately located and the error of damage degree identification is less than 5%.

Key words: data-driven; damage file; truss structure; damage identification

城镇化高速发展,城市结构安全面临严峻挑战。随着时间的推移,结构性能持续劣化,其安全性和使用功能不足的问题日益凸显。但是结构复杂多变,尤其是复杂杆系结构构件众多、形式复杂,如何及时识别结构性能并根据收集的性态数据进行演化预测,目前还存在很多挑战^[1-4]。

收稿日期:2024-04-15

基金项目:国家自然科学基金(52178488);山东省自然科学基金(ZR2025MS932)

作者简介:谭凯旋(1997—),男,山东滨州人。硕士,研究方向为杆系结构损伤识别与健康监测。E-mail:863135424@qq.com。

* 通信作者:付伟庆(1976—),男,黑龙江哈尔滨人。博士,教授,主要从事结构振动控制与健康监测技术方面的研究。

E-mail:fuweiqing@qut.edu.cn。

结构性能档案是全面记录、分析结构和材料损伤的信息库。通过该信息库可以分析损伤发生原因、评估损伤影响、预测结构使用寿命以及指导维护和维修等工作。结构性能档案包括真实发生损伤后的记录以及根据经验和数值计算对可能发生的刚度退化和裂缝等损伤情况的模拟。近年来,智能感知、数字孪生和人工智能等技术快速发展,为结构损伤识别提供了新的理论方法^[5]。本文在岳清瑞等^[6]研究基础上提出了针对复杂杆系结构损伤识别的“库-网-流”数据框架。“库”是指损伤结构数据和信息库,是结构进行反演预测的基础。数据库的建立要能反映损伤结构的实际性态,数据库存储成本要小,且不能失去全面性。“网”是在“库”的基础上,定义、建立、挖掘、完善、表征和量化结构各个构件与损伤之间的关系^[7]。杆系结构中的构件关系复杂且数量庞大,特征模糊难以界定,因此利用高精度识别算法建立构件与损伤之间的逻辑和演化映射关系。“流”是三层,在“网”的基础上通过知识图谱、大数据、人工智能等多种新型技术实现结构损伤监测预警和损伤事件时空推演^[7]。在“流”的基础上根据数据驱动的智能方法可以实现荷载、材料与结构服役性能演化及寿命预测。数据驱动损伤检测方法是一种多方法融合的健康诊断方法,即通过多传感器融合、多元统计分析以及机器学习等方法,对结构运行过程中的大量数据进行获取和分析处理,将数据映射到损伤特征空间中,建立数据与损伤之间的映射关系,最终根据数据映射出结构的损伤结果^[8]。

基于数据驱动的损伤识别方法在结构健康监测领域展现出显著优势,包括能够实现实时监测与更新、高准确性的损伤定位、出色的抗噪声性能以及高精度的损伤量化^[9]。这些方法通过利用先进的数据处理技术、深度学习网络和复杂的算法模型有效地提取和分析从结构中收集的动态响应数据,从而识别出结构损伤的位置和程度。这种高度自动化和智能化的损伤识别过程不仅提高了监测的效率和准确性,还为结构的维护和修复提供了科学依据,极大地增强了结构的安全性和可靠性。通过上述“库-网-流”结构健康监测理论框架,结合数据驱动方法建立结构性能档案的识别流程。利用结构性能档案对结构进行损伤识别、损伤演化和寿命预测等多种结构性态信息的识别。

1 基于数据驱动复杂杆系结构损伤档案的建立

以结构性能档案思想为基础,运用数据驱动方法建立复杂杆系结构的损伤档案。当结构发生损伤时,将从实际结构采集的数据输入到损伤档案中进行比对,即可进行损伤识别。具体损伤档案建立与识别流程如图1所示。

1) 识别指标。应用曲率模态变化率识别指标,应用 ABAQUS 软件建立有限元模型,利用结构实测模态信息(频率和振型等)对有限元模型进行修正。根据不同的结构形式,将传感器布置在每个节点上,对结构进行激励获得传感器数据,并对数据降噪处理求得结构的模态振型,计算获得曲率模态变化率识别指标^[9]。

2) 两步识别。应用分区域两步损伤识别方法来进行识别,首先使用层次分析法,根据不同构件对频率变化率以及振型的影响计算结

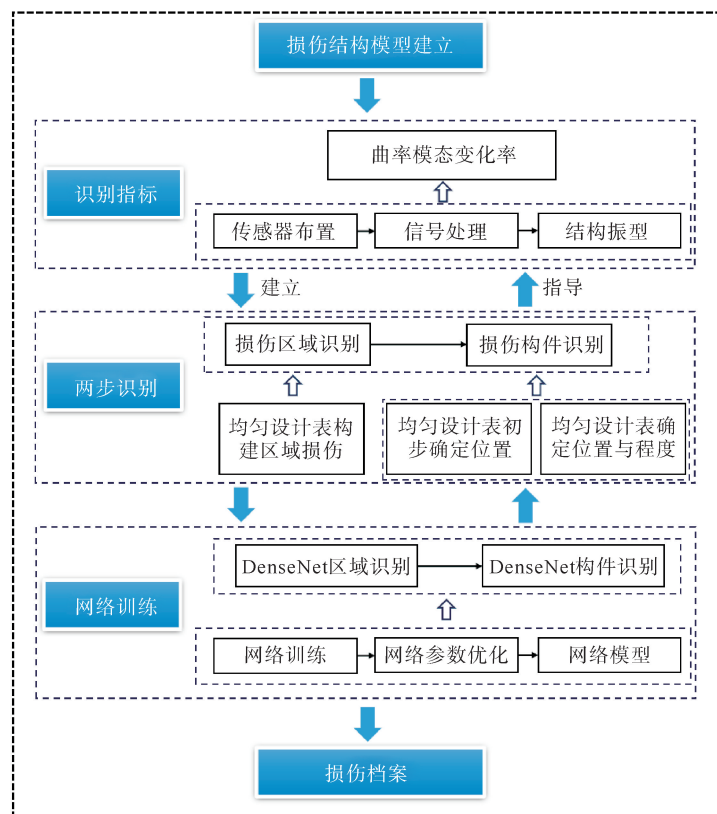


图1 损伤档案建立与识别流程

构构件的权重并划分区域;然后通过建立多因素均匀设计表构建区域损伤样本库和区域内构件损伤样本库;最后由分区域两步识别方法建立全面、特征显著的数据库,以此初步形成结构损伤档案。

3) 网络训练。分别使用区域损伤样本库和区域内构件损伤样本库训练密集连接网络,用来构建损伤档案的区域和构件识别。

其中,步骤1)建立的识别指标是步骤2)中损伤库建立的基础,在损伤模型中模拟不同节点传感器位置、采集数据和对损伤库进行丰富。损伤库也可反向指导传感器布设位置,对实际结构传感器布置具有指导意义。损伤库的数据特征通过神经网络进行关联和表达^[10],而网络训练识别结果数据可对损伤库进行优化,得到全面且完善的结构损伤数据信息。

通过以上3个步骤对结构损伤性态不断优化完善,最终可建立复杂杆系结构的损伤档案。当结构发生损伤时,将采回的传感器数据与所建立损伤档案中信息进行数据匹配,匹配一致识别成功后,可输出发生损伤杆件的位置和损伤程度。

2 基于数据驱动复杂杆系结构损伤档案的应用

2.1 识别模型结构介绍

2.1.1 有限元模型的建立

使用ABAQUS软件建立桁架桥数值模型,其中长、宽和高分别为10.620、0.354和0.354 m,如图2所示。由于节点为固结,杆件使用梁单元,杆件的截面为圆环,直径为0.01 m,壁厚为0.003 m。材料弹性模量 $E=210$ GPa,材料密度 $\rho=7800$ kg/m³。桁架桥一端为滚轮支撑,另一端为铰链支撑。数值模型中的杆件通过降低弹性模量来模拟结构的损伤。

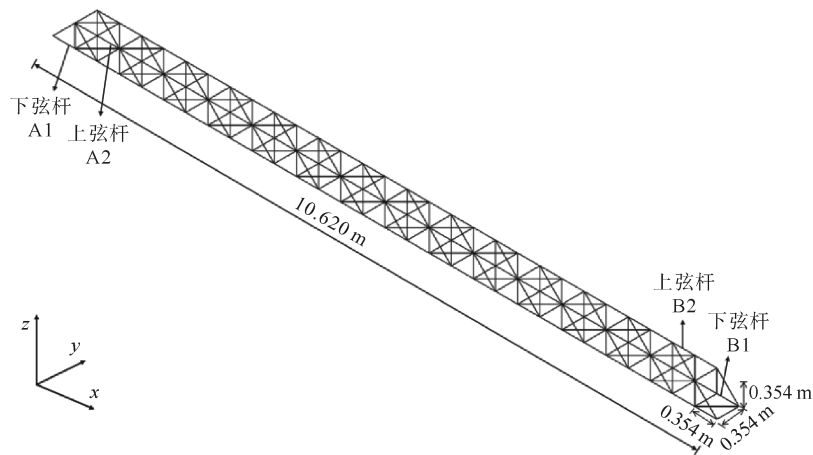


图2 桁架杆系数值模型

2.1.2 杆件权重计算

应用层次分析法,根据杆件对频率变化率的影响计算杆件权重系数,并进行归一化处理,得到沿 x 方向杆件归一化权重,如下式所示:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 \\ 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 & 2/46 \\ 2/46 & 2/46 & 2/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 & 1/46 \end{bmatrix}$$

2.2 损伤数据库的建立

2.2.1 区域损伤样本库的构建

首先将桁架结构沿 x - y 方向投影,然后根据权重系数划分区域,1—7号位置、8—15号位置、16—23

号位置和 24—30 号位置划分为区域 1—4,如图 3 所示。

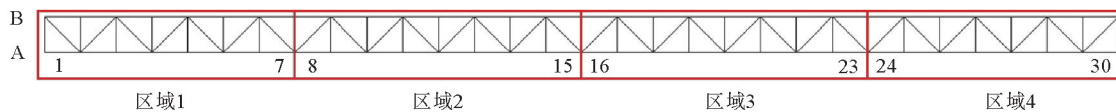


图 3 区域划分

根据图 3 对桁架结构进行区域损伤均匀设计表的设计。根据结构设置 8 种典型损伤类型,分别为:区域内最左侧单杆件损伤、区域内左侧 1/3 处单杆件损伤、区域内中间位置单杆件损伤、区域内右侧 1/3 处单杆件损伤、区域内最右侧单杆件损伤、区域最左侧连续 2 个杆件损伤、区域最中间位置连续 2 个杆件损伤、区域最右侧连续 2 个杆件损伤,分别用数字 1—8 表示。设置 4 种损伤位置分别为:A1、A2、B1 和 B2 (图 2)。设置 4 个损伤区域分别为:区域 1、区域 2、区域 3 和区域 4。以此设计三因素均匀设计表,如表 1 所示。

表 1 区域损伤均匀设计表

序号	损伤类型	损伤位置	损伤区域	序号	损伤类型	损伤位置	损伤区域
1	1	A2	3	17	5	A1	4
2	1	B1	2	18	5	A2	3
3	1	B2	1	19	5	B2	1
4	1	A1	4	20	5	A1	4
5	2	B1	2	21	6	A2	3
6	2	B2	1	22	6	B1	2
7	2	A1	4	23	6	B2	1
8	2	A2	3	24	6	A2	3
9	3	B1	2	25	7	B1	2
10	3	A1	4	26	7	B2	1
11	3	A2	3	27	7	A1	4
12	3	B1	2	28	7	A2	3
13	4	B2	1	29	8	B2	1
14	4	A1	4	30	8	A1	4
15	4	B1	2	31	8	A2	3
16	4	B2	1	32	8	B1	2

损伤程度共设置 6 种,分别为 5%、10%、20%、45%、60%和 80%,结合表 1 共确定 192 种(32×6)损伤工况作为区域损伤样本库。

对区域损伤样本计算曲率模态变化率,作为密集连接神经网络训练样本。通过使用不同节点数据的组合可以得到不同精度曲率模态变化率,从而构造更加丰富的损伤数据样本库^[11]。

2.2.2 区域内构件损伤样本库构建

1) 识别损伤区域。结合构件权重确定每个区域均匀设计表,区域 1: x 向水平数为 7,如图 3 的 1—7 所示; y 向水平数为 2,如图 3 的 A、B 所示,由好格子点法得出均匀设计表 2。区域 2: x 向水平数为 8,如图 3 的 8—15 所示; y 向水平数为 2,由好格子点法设置均匀设计表 3。区域 1 与 4 和区域 2 与 3,权重与水平数相同,因此区域 3 和区域 4 设计的均匀设计表同区域 2 和区域 1。

表 2 区域 1 均匀设计表

序号	x 向编号	y 向编号	序号	x 向编号	y 向编号
1	1	A	8	4	B
2	1	B	9	5	A
3	2	A	10	5	B
4	2	B	11	6	A
5	3	A	12	6	B
6	3	B	13	7	A
7	4	A	14	7	B

表 3 区域 2 均匀设计表

序号	x 向编号	y 向编号	序号	x 向编号	y 向编号
1	8	A	9	12	A
2	8	B	10	12	B
3	9	A	11	13	A
4	9	B	12	13	B
5	10	A	13	14	A
6	10	B	14	14	B
7	11	A	15	15	A
8	11	B	16	15	B

2) 具体损伤位置与损伤程度的确定。由图 2 的 $x-z$ 向可看到每个区域的杆件都由上下杆组成,并且损伤程度设置为 8 种,由好格子点法得出均匀设计表 4。

区域 1 与区域 4 的损伤工况由表 2 和表 4 相结合可确定共 112 种损伤数据样本。同理区域 2 与区域 3 的损伤工况由表 3 和表 4 相结合,可确定共 128 种损伤数据样本。以此构成区域内构件损伤样本库。

2.2.3 网络训练与测试

根据图 2 和图 3 所示,每个区域的杆件号从左到右进行编号,形成区域的杆件编号如表 5 所示。

表 4 均匀设计表

序号	损伤程度/%	损伤位置
1	5	下杆件
2	10	上杆件
3	15	下杆件
4	20	上杆件
5	30	下杆件
6	40	上杆件
7	50	下杆件
8	60	上杆件

表 5 区域杆件编号

	下杆件 A1	上杆件 A2	下杆件 B1	上杆件 B2
区域 1	1—7	8—13	14—20	21—26
区域 2	1—8	9—16	17—24	25—32
区域 3	1—8	9—16	17—24	25—32
区域 4	1—7	8—13	14—20	21—26

通过构建区域损伤和区域内构件损伤样本库,将数据按照 8 : 2 划分训练集和验证集,分别训练密集连接网络。根据验证集的结果,分别调整两样本库中均匀设计表的试验次数,使网络得到充分训练,以保证良好的识别效果^[12]。

1) 损伤区域识别。测试数据设置 4 种损伤工况,如表 6 所示。以曲率模态变化率为识别指标,密集连接网络的识别结果如表 7 所示。从表中可以看出识别结果准确,可以用于损伤数据档案对损伤区域进行识别。

表 6 测试数据工况

工况	损伤杆件号	损伤程度/%
工况 1	杆件 1(区域 1)	45
工况 2	杆件 4(区域 1)	45
工况 3	杆件 1(区域 2)	45
工况 4	杆件 8(区域 2)	45

表 7 网络测试结果

工况	实际损伤区域	预测损伤区域
工况 1	1	1
工况 2	1	1
工况 3	2	2
工况 4	2	2

2) 损伤区域内杆件识别。根据分区域两步识别法先对损伤区域进行识别后,再对区域内损伤构件进行识别。以杆件的曲率模态变化率为识别指标,对杆件损伤位置及程度的识别结果如图 4 所示。从图中可见,工况 1—4 损伤位置的识别结果准确,损伤程度识别误差在 5% 以内。因此可以用于损伤档案,对损伤杆件进行精确识别^[13]。

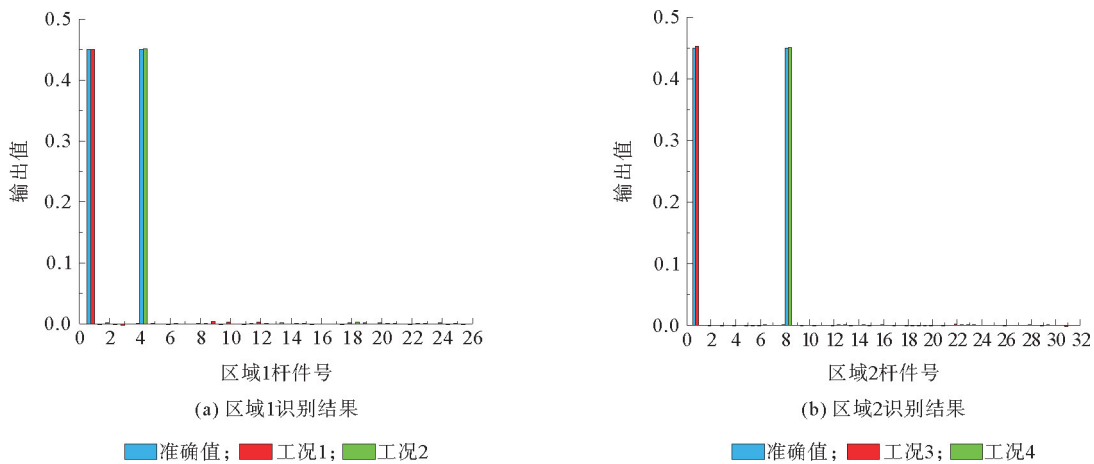


图4 工况1—4识别结果

通过建立的损伤模型,采用不同节点的数据计算识别指标,使损伤数据库更加丰富。分区域两步识别方法通过均匀设计表分别构建区域损伤库和构件损伤库,对密集连接网络进行训练,不断优化两步识别方法中均匀设计表的大小,使训练后的网络模型具有更优的识别效果。经过网络测试,证明档案对损伤反应敏感。基于以上3步的相互优化,最终建立结构基于数据驱动的损伤数据性能档案。

3 损伤识别档案应用

对构建的损伤档案进行应用,当结构发生损伤时,可以通过采集的数据与损伤档案进行匹配,进而输出构件损伤位置与损伤程度。

假设结构在区域1中的6号杆件发生25%损伤,同时区域2中的4号杆件发生35%损伤时,通过布置在节点4、8、12、16、20、24、28的加速度传感器采集数据,对数据进行降噪处理,并计算曲率模态变化率。将计算结果代入损伤数据档案中进行识别,输出的结果如表8所示,可见损伤数据档案对未知的损伤识别准确。

实际损伤区域	预测损伤区域
1	1
2	2

确定损伤区域后,分别在区域1和区域2布置加速度传感器,计算区域1内构件曲率模态变化率,并代入损伤档案中进行损伤构件的识别。同理,计算区域2内构件曲率模态变化率,代入损伤档案中进行损伤构件的识别,识别结果如图5所示。可见对损伤位置识别准确,损伤程度识别误差在5%以内。

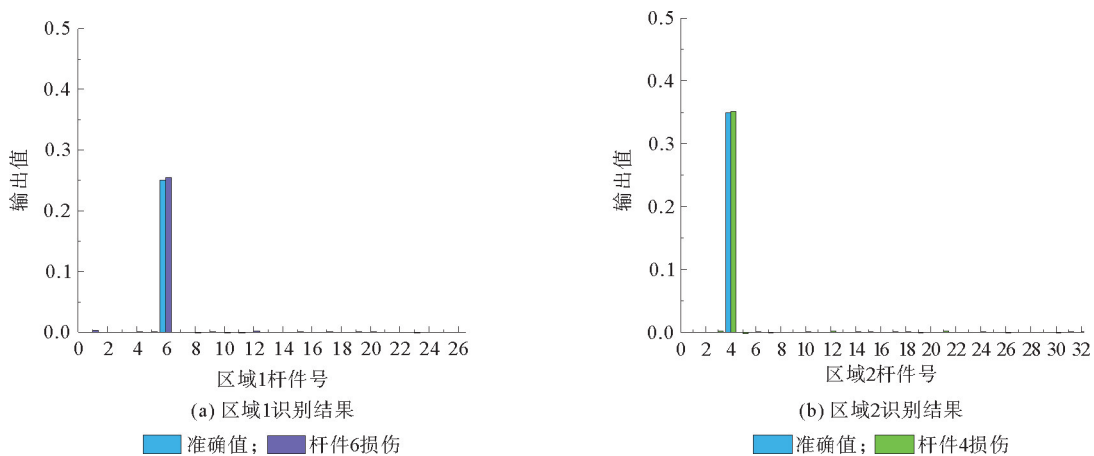


图5 识别结果

通过表8和图5识别结果可知,基于损伤档案可以准确识别结构的损伤位置和程度,验证了损伤档案应用对损伤识别的可靠性和准确性。

4 结论

建立大型桁架桥数值模型,通过数据驱动的方法构建损伤档案,并对其进行测试分析,主要得到以下结论:

1) 基于“库-网-流”思想框架,利用识别指标、两步识别方法和网络训练三方面,提出一种可适用于复杂杆件结构损伤识别的性能档案方法。性能档案通过数值模拟获得数据,驱动丰富损伤信息库,具有损伤识别、演化和寿命预测等多方面功能。

2) 设计一大型桁架数值模型,通过识别指标、两步识别方法和网络训练三方面的综合应用和相互优化,对该结构构建了数据驱动损伤性能档案。将特定损伤带入档案库进行信息匹配和损伤识别,结果表明损伤位置定位准确,损伤程度识别误差在5%以内。

参考文献(References):

- [1] 岳清瑞,刘晓刚,陈洪兵. 结构服役安全智能诊断研究与应用进展[J]. 建筑结构学报,2022,43(10):41-49.
YUE Qingrui, LIU Xiaogang, CHEN Hongbing. Research and application progress of intelligent diagnosis for structural service safety[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 41-49.
- [2] 杨铄,许清风,王卓琳. 基于卷积神经网络的结构损伤识别研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(4):38-57.
YANG Shuo, XU Qingfeng, WANG Zhuolin. Research progress on structural damage detection based on convolutional neural networks[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 38-57.
- [3] 赵一男,公茂盛,杨游. 结构损伤识别方法研究综述[J]. 世界地震工程,2020,36(2):73-84.
ZHAO Yinan, GONG Maosheng, YANG You. A review of structural damage identification methods[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 73-84.
- [4] 唐礼平,曹益,章蓓蓓,等. 结构健康监测在土木工程中的研究状况与进展[J]. 兰州工业学院学报,2022,29(4):21-26.
TANG Liping, CAO Yi, ZHANG Beibei, et al. Research status and progress of structural health monitoring in civil engineering[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2022, 29(4): 21-26.
- [5] 邓兴瑞,张芙蓉,许镇,等. 数字孪生在城市安全中的应用研究综述[J]. 工业建筑,2024,54(2):35-42.
DENG Xingrui, ZHANG Furong, XU Zhen, et al. A review on the applications of digital twin technology in urban safety[J]. Industrial Construction, 2024, 54(2): 35-42.
- [6] 岳清瑞,陆新征,许镇,等. 基于“风险源+承灾体+减灾体”的城市安全表征“库-网-流-谱-法”理论框架[J]. 工程力学,2022,39(11):52-62.
YUE Qingrui, LU Xinzheng, XU Zhen, et al. The “database-network-flow-spectrum-law” theoretical framework for urban safety characterization based on “risk source”+“risk exposure”+“mitigation factor”[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(11): 52-62.
- [7] 李昊青,郭其云,夏一雪. 构建公共危机应急救援力量体系的理论支撑[J]. 中国应急救援,2011(4):11-14.
LI Haoqing, GUO Qiyun, XIA Yixue. Theoretical support for constructing emergency rescue force system for public crisis[J]. China Emergency Rescue, 2011(4): 11-14.
- [8] 田依林. 城市公共安全应急管理信息系统建设模型[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2007(3):68-71.
TIAN Yilin. Modeling of urban community information management system for public security emergencies [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2007(3): 68-71.
- [9] 周凯,王焯捷. 外滩踩踏事件写入上海市政府工作报告[N]. 中国青年报,2015-01-26(3).
ZHOU Kai, WANG Yejie. Bund stampede is written into Shanghai government work report[N]. China Youth Daily, 2015-01-26(3).
- [10] 冯俏彬,韩博. 新冠肺炎疫情对我国财政经济的影响及其应对之策[J]. 财政研究,2020(4):15-21.
FENG Qiaobin, HAN Bo. The effects of COVID-19 epidemic on China's finance and economy and relevant counter measures[J]. Public Finance Research, 2020(4): 15-21.
- [11] IMRAN M, ALNUEM M A, ALSALIH W, et al. A novel wireless sensor and actor network framework for autonomous monitoring and maintenance of lifeline infrastructures[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2012: 6484-6488.
- [12] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, 2012: 1818.
- [13] KRITZINGER W, KARNER M, TRAAAR G, et al. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(11): 1016-1022.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)