

# 明挖异形基坑下穿高架桥及近接航站楼施工的 影响与控制

罗贤民<sup>1</sup> 黄勇<sup>2</sup> 陆剑明<sup>2</sup> 徐前卫<sup>3</sup> 崔越榜<sup>3</sup>

(1. 广西南宁机场综合交通枢纽建设有限公司, 530048, 南宁; 2. 广西机场管理集团建设工程指挥部, 530048, 南宁;  
3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 为研究明挖异形基坑施工对近临既有结构的施工扰动影响与控制效果,以南宁空港枢纽联络通道基坑工程为例,针对明挖异形深基坑下穿机场出发层高架桥和近接航站楼的施工问题,采取有限元数值模拟和现场监测相结合的方法,研究了复杂环境下基坑开挖引起的围护结构及其周边建筑物的施工扰动效应及变形特征。在此基础上,提出了基坑非同步分层、分区和分块开挖的方案,以及采取人工挖孔桩作为局部围护结构的施工控制措施,最终使得明挖异形基坑顺利开挖并实现对周边建筑物变形的有效控制。研究结果显示:基坑开挖后的桥梁呈现东边沉、西边隆的形态;周边地面沉降量排序为中间段地面沉降量>基坑南端地面沉降量>基坑北端地面沉降量>基坑北端放坡段沉降量,与数值模拟结果中的桥梁桩基差异沉降规律一致。

**关键词** 明挖基坑; 桥梁; 航站楼; 近接施工影响

**中图分类号** TU753

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.05.022

## Construction Impact and Control of Open-excavation Irregular Shape Foundation Pit under-passing Viaduct Bridge and Adjoining Terminal Building

LUO Xianmin, HUANG Yong, LU Jianming, XU Qianwei, CUI Yuebang

**Abstract** The foundation pit engineering of Nanning Airport Hub connecting passage is taken as example to study the influence of open-excavation irregular shape foundation pit on the adjacent existing structure and control effect. Targeting the engineering problem in the open-excavation irregular shape deep foundation pit under-passing airport departure level viaduct and the construction adjoining terminal building, finite element numerical simulation and on-site monitoring are combined to study construction disturbance effect and deformation characteristics of the enclosure structure and the surrounding buildings caused by foundation pit excavation in complex environment. On this basis, the scheme of asynchronous layered excavation,

subdivision excavation and blocked excavation of the foundation pit, the construction control measures for using manually excavated piles as the local enclosure structure are proposed. The final open-excavation irregular shape foundation pit is constructed smoothly, and the deformation of surrounding buildings is effectively controlled. Research results show that the bridge after foundation pit excavation presents morphology of sinking in the east and heaving in the west, the surrounding land subsidence is sorted to be middle section > south end > north end > north end grading section. The differential settlement law of bridge pile foundation in the numerical simulation results is consistent.

**Key words** open-excavation foundation pit; bridge; terminal building; adjoining construction impact

**First-author's address** Guangxi Nanning Airport Comprehensive Transportation Hub Construction Co., Ltd., 530048, Nanning, China

随着城市轨道交通工程和地下空间开发规模的日益发展,出现了越来越多的基坑近接既有桥梁和建筑物等复杂工况下的施工案例。当邻近既有建(构)筑物施工时,应尽量控制和减小基坑开挖所造成的扰动影响,以保证既有结构和基坑自身的安全和稳定性。针对基坑近接既有结构的施工扰动问题,国内外学者已就此开展了不少相关研究。文献[1]采用数值模拟和现场实测相结合的方法,分析了基坑开挖对近临既有高架桥梁桩基影响的适用性。文献[2]建立了二维数值仿真模型,并结合现场监测结果分析,得到了基坑开挖过程中邻近桥墩的墩台沉降和桩基变形规律。文献[3]运用三维数值模拟的方法,研究了露天矿坑开挖顺序对既有结构的影响。

以上这些文献均未对航空、城际铁路、地铁及道路公交交汇的综合交通枢纽基坑施工扰动问题

进行研究,且这类基坑工程施工案例的报道也不多见。基于此,本文以南宁空港枢纽联络通道基坑工程(以下简称“联络通道基坑工程”)为例,针对复杂异形深基坑下穿送客平台高架桥及近接航站楼结构的施工影响问题,采用有限元数值模拟和现场监测相结合的方法,研究复杂周边环境下基坑非同步开挖情况下的围护结构,分析对周边环境和既有结构的扰动效应及其变形特征,并提出了相应的施工控制措施,最后结合现场实测数据对所提施工控制措施加以验证。本文研究可为类似工程提供借鉴与参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

南宁综合交通枢纽工程位于南宁市江南区南宁吴圩国际机场附近,北邻南友高速公路,南接南宁昆仑大道,与既有南宁吴圩国际机场 2 号航站楼相接。联络通道基坑工程地理位置示意图如图 1 所示。联络通道基坑工程所在区域北侧有航站楼和高架桥,航站楼以南的场地为林区,场地以平原为主,地面高程为 110~125 m。综合交通换乘中心采用明挖法施工,基坑长约 1 350 m,地下一层宽约 200 m,地下二层宽约 70 m。地下一层基坑深度约为 9.14~11.14 m,地下二层铁路部分基坑深度约为 18.70~23.20 m,地下二层地铁部分基坑深度约为 17.00~20.30 m。



图 1 联络通道基坑工程地理位置示意图

Fig. 1 Geological location diagram of link passge foundation pit engineering

联络通道基坑是南宁综合交通枢纽工程的一部分,其位于地下一层,主要用于满足现有 2 号航站楼地下人行通道乘客的换乘需求,其平面呈 L 形布置。联络通道基坑长边一侧长为 85.7 m,宽为 17.4 m,连通综合枢纽核心区;短边一侧

长为 54.8 m,宽为 7.1 m,连通 2 号航站楼。联络通道结构形式为单箱单孔箱形框架结构,联络通道结构底板厚度为 1.5 m,顶板厚度为 1.5 m,侧墙厚度为 1.2 m。联络通道结构采用 C40 混凝土,其基础埋深距离地面深度为 10 m,采用 1 道混凝土支撑和 1 道钢支撑。基坑周边环境平面示意图如图 2 所示。

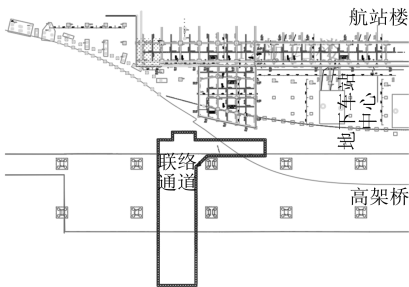


图 2 基坑周边环境平面示意图

Fig. 2 Plan diagram of foundation pit surrounding environment

### 1.2 工程地质条件

基坑所在区域主要为软黏土和不同程度风化岩层,场区地形较平坦;地表水是地下水的主要补给来源,地下水位在基底以下。基坑所在区域主要的土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 基坑所在区域主要土体物理力学参数

Tab. 1 Main soil physical and mechanical parameters in foundation pit location area

地层编号	岩土名称	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
<1-2>	素填土	20.1	5.7	15.0	15
<7-1>	黏土	19.0	9.7	13.0	57
<7-2>	黏土	18.1	5.4	11.3	24
<10-2>	白云质灰岩	24.5	40.0	35.0	300

### 1.3 工程难点分析

联络通道基坑工程的难点主要有:①基坑下穿高架桥梁且超近接桥梁桩基,基坑围护桩与其最近距离为 0.32 m;基坑近临航站楼附属结构和狭长段结构,基坑开挖施工对既有结构的影响较大。②工程场地条件严酷、施工作业空间狭小、来往旅客多,施工期间对于保证道路交通及机场的正常运营,以及作业安全的要求较高。③工程场区地质特殊,地质条件存在褶皱、断裂发育,下卧土层以粉质黏土、黏土为主,地下岩溶发育,存在溶洞、溶隙、溶孔及溶蚀破碎带等问题,地质条件复杂,基坑施工潜在危险高。

## 2 基坑整层开挖的环境影响分析

### 2.1 模型概况

建立联络通道基坑工程三维有限元模型,其尺寸为 200 m(长)×165 m(宽)×65 m(高),如图 3 所示。基坑岩溶水水位埋深约为 20 m,距坑底较远,故不考虑岩溶水的影响。三维有限元模型中的结构单元参数如表 2 所示。

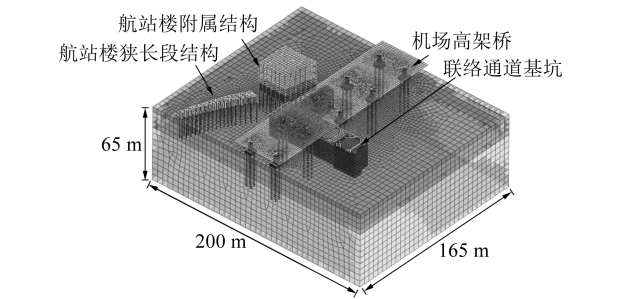


图 3 联络通道基坑工程三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model of link passage foundation pit engineering

表 2 三维有限元模型中的结构单元参数

Tab. 2 Structural unit parameter in 3D finite element model

结构部位	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	体积质量/ (kg/m <sup>3</sup> )
围护结构	C30 混凝土	30.0	0.2	2 400
混凝土支撑	C30 混凝土	30.0	0.2	2 400
钢支撑	钢材	250.0	0.2	7 600
桥梁板	C40 混凝土	32.5	0.2	2 400
桥桩基	C30 混凝土	30.0	0.2	2 400
建筑梁板	C35 混凝土	31.5	0.2	2 400
建筑柱	C35 混凝土	31.5	0.2	2 400

### 2.2 基坑整层开挖的影响性分析

模拟基坑开挖工况,分析整层大面积卸载工况下,基坑开挖对地层及周边建(构)筑物的影响。基坑整层开挖数值模拟结果如表 3 所示。由表 3 可知,坑外地面最大沉降量为 32.2 mm,坑底隆起量为 46.4 mm,周边既有结构均受到基坑开挖的扰动。

表 3 基坑整层开挖数值模拟结果

Tab. 3 Numerical simulation results of foundation pit whole layer excavation

项目指标	计算结果/mm
坑外地面沉降最大值	32.2
基坑底部隆起最大值	46.4
围护结构最大水平收敛值	17.1
高架桥墩最大差异沉降值	6.7
桥梁板最大差异沉降值	7.8
航站楼局部框架结构最大差异沉降值	7.1
航站楼狭长段结构最大差异沉降值	4.0

## 3 基坑分仓跳挖对环境的影响分析

### 3.1 基坑分仓跳挖工况

由于基坑大面积整层开挖会引起较大的坑底隆起与地面沉降问题,为进一步控制基坑开挖过程中产生的较大坑内外地层变形及对周边环境的扰动,结合实际施工条件对开挖工况采取分段、分仓跳挖的开挖方式。基坑开挖模拟分仓施工步骤如图 4 所示,按照实际工程采取的先开挖南北两侧①号区域,再开挖中间②号区域。

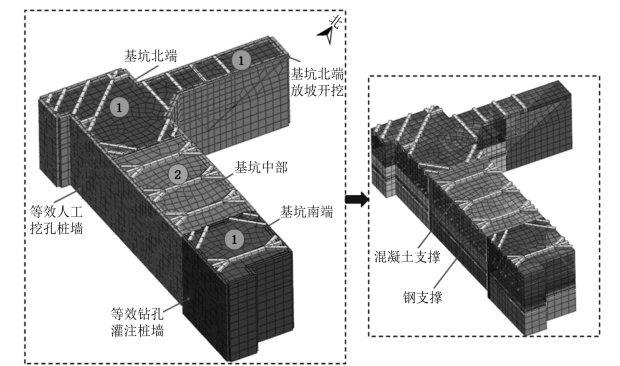


图 4 联络通道基坑分仓按序开挖示意图

Fig. 4 Diagram of the blocked and the sequential excavation of link passage foundation pit

### 3.2 基坑内外地层变形情况

基坑土体开挖完成后的地层竖向变形云图如图 5 所示。由图 5 可知:地层最大沉降量为 13.2 mm,小于整层开挖阶段的地层最大沉降量 32.2 mm,其主要分布在短边基坑,即基坑北段的放坡段;开挖完成后,整个基底出现上隆,基底部位最大隆起量为 26.8 mm,小于整层开挖的基底部位最大隆起量 46.4 mm。

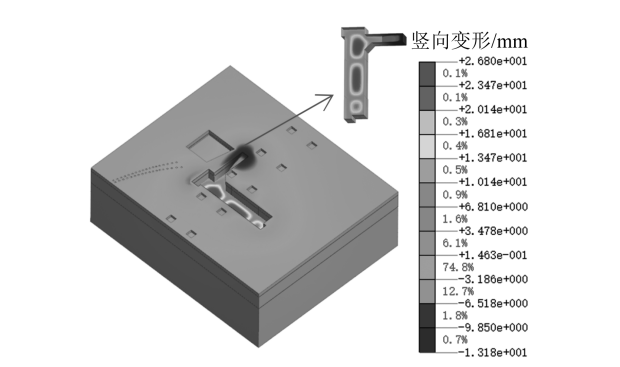


图 5 基坑土体开挖完成后的地层竖向变形云图

Fig. 5 Stratum vertical deformation nephogram after completing foundation pit soil excavation

### 3.3 围护结构水平变形情况

基坑土体开挖完成后,围护结构  $x$  向水平变形云图如图 6 所示。由图 6 可知:沿  $x$  向的围护结构最大水平变形为 4.4 mm,发生在中间区域西侧,沿  $x$  反方向的围护结构最大变形约为 4.9 mm,发生在中间区域东侧;中间区域东西两侧的相对收敛量为 9.3 mm,小于整层开挖的东西两侧相对收敛量 17.1 mm。

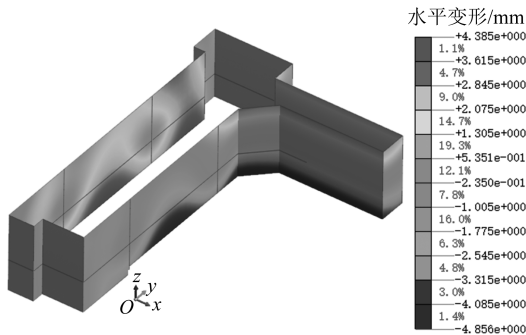


图 6 基坑土体开挖完成后围护结构  $x$  向水平变形云图  
Fig. 6 Enclosure structure of  $x$ -direction horizontal deformation nephogram after completing foundation pit soil excavation

### 3.4 对高架桥梁的扰动分析

基坑土体开挖完成后,高架桥桥墩竖向变形云图如图 7 所示。由图 7 可知:最大沉降量出现在基坑东侧的第 2 个桥墩,其最大沉降值为 4.1 mm;位于基坑西侧的桥墩局部出现上抬,最大上抬量为 0.4 mm,这 2 个桥墩的最大差异沉降量为 4.5 mm,小于整层开挖的 2 个桥墩最大差异沉降量 6.7 mm。

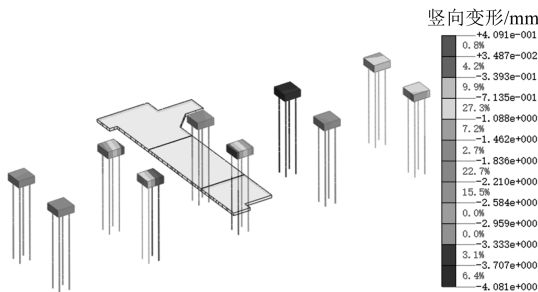


图 7 基坑土体开挖完成后高架桥桥墩竖向变形云图  
Fig. 7 Vertical deformation nephogram of the viaduct pier after completing foundation pit soil excavation

基坑土体开挖完成后,高架桥面板竖向变形云图如图 8 所示。由图 8 可知:靠近基坑东侧的局部桥面发生了 4.6 mm 的沉降,而西侧桥面向上隆起约 0.4 mm,这是由于南端基坑卸载相对较多导致了

土体有所上浮,而北端的基坑采取局部放坡开挖,故隆起较少;开挖结束后的整个桥面最大差异沉降量为 5.0 mm,小于整层开挖的整个桥面最大差异沉降量 7.8 mm。



图 8 基坑土体开挖完成后高架桥面板竖向变形云图  
Fig. 8 Vertical deformation nephogram of the viaduct bridge panel after completing foundation pit soil excavation

### 3.5 对航站楼局部框架结构物的影响分析

基坑土体开挖完成后,航站楼局部框架结构物竖向变形云图如图 9 所示。由图 9 可知,航站楼局部框架结构南部近端最大沉降量为 6.0 mm,北部远端沉降量为 0.7 mm,两者最大差异沉降量为 5.3 mm,小于整层开挖的两者最大差异沉降量 7.1 mm。航站楼局部框架结构物倾斜率为 0.000 2,根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》,其倾斜率在安全要求范围内。

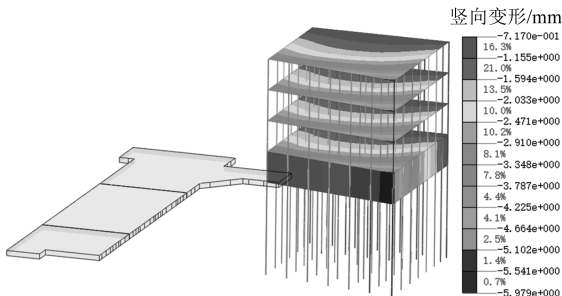


图 9 基坑土体开挖完成后航站楼局部框架结构物竖向变形云图  
Fig. 9 Vertical deformation nephogram of the terminal building local frame structure after completing foundation pit soil excavation

### 3.6 对航站楼狭长段结构的影响分析

基坑土体开挖完成后,航站楼狭长段结构物竖向变形云图如图 10 所示。由图 10 可知,距基坑最近端的最大沉降量为 3.1 mm,远离基坑一端的最大沉降量为 0.8 mm,两者最大差异沉降量为 2.3 mm,小于整层开挖的两者最大差异沉降量 4.0 mm。航站楼狭长段结构倾斜率为 0.000 3,根据 GB



50007—2011《建筑地基基础设计规范》,其倾斜率在安全要求范围内。

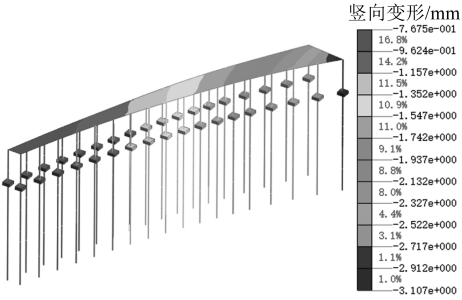


图 10 基坑土体开挖完成后航站楼狭长段结构竖向变形云图

Fig. 10 Vertical deformation nephogram of the terminal building long and narrow structure section after completing foundation pit soil excavation

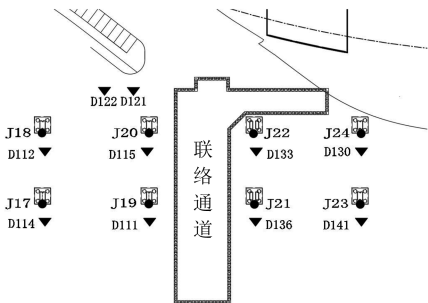
## 4 施工控制措施及监测数据分析

### 4.1 施工控制措施

基坑采取分段、分仓跳挖的开挖方式可以有效降低周边建筑物的沉降变形和基坑自身变形。此外,考虑到基坑邻近既有结构施工的空间条件困难,以及异形基坑邻近高架桥梁与航站楼引起的施工扰动较大等因素,在高架桥底及邻近航站楼区域采用较适用于狭小空间成桩作业的人工挖孔桩<sup>[4]</sup>来作为基坑开挖的围护墙。人工挖孔桩桩顶标高为 123.0 m,桩长为 11.5~21.1 m,数量共 88 根,桩径与桩间距为  $\varphi 1\,200\text{ mm} @ 1\,800\text{ mm}$ ,桩身混凝土强度等级为水下 C30,对孔周进行混凝土护壁,采用最小厚度为 20 cm 的 C25 混凝土。

### 4.2 监测分析

对基坑周边环境进行监测,基坑监测布置示意图如图 11 所示。基坑北侧狭长段既有结构测点 D121 和 D122 的地面沉降曲线如图 12 所示。由图 12 可



注: J 为桥墩测点; D 为地面测点。

图 11 基坑监测布置示意图

知:在基坑开挖早期存在沉降累积,测点 D121 的沉降量约为 5.0 mm,测点 D122 沉降量约为 6.7 mm;在围护结构施工期间,周边土体发生了一定的沉降现象,在之后的土方开挖阶段,其沉降量有所减小。

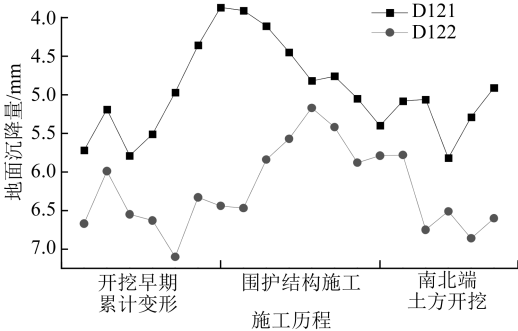


图 12 基坑北侧狭长段既有结构监测点 D121 和 D122 的地面沉降曲线

Fig. 12 Land subsidence curve at existing structure measuring points D121 and D122 of in the long and narrow section on foundation pit north side

基坑两侧高架桥墩的竖向变形曲线如图 13 所示。由图 13 a)可知,在施工围护结构期间,桥墩沉降量主要集中在 0.5~1.5 mm,说明西侧桥墩在施工阶段受到的影响相对不大,而且测点 J19 出现了上抬 0.2 mm 的现象,这与数值模拟结果中的桥梁桩基差异沉降规律一致。由图 13 b)可知:测点 J22 所在桥墩距离围护结构最近,在施工围护结构期间其

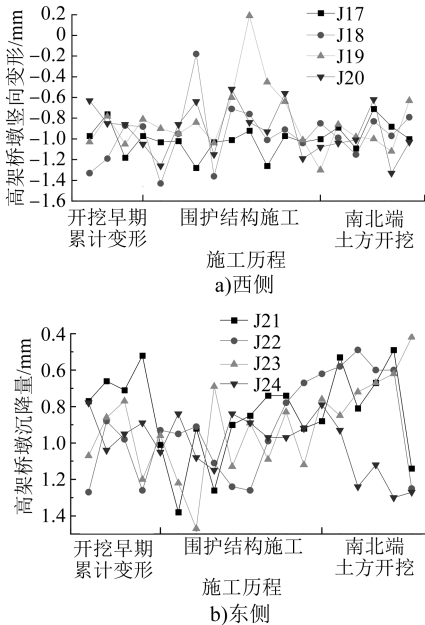


图 13 基坑两侧高架桥墩竖向变形曲线

Fig. 11 Layout diagram of foundation pit monitoring

Fig. 13 Vertical deformation curve of viaduct pier on foundation pit both sides

沉降量先减小然后增大;测点 J23 出现先增大后减小的情况,而测点 J24 出现下沉情况,且其最大沉降量为 1.3 mm,大于靠近围护结构的桥梁桩体,这与数值模拟结果中的桥梁桩基差异沉降规律一致。

人工挖孔桩施工过程中位于基坑东侧桥墩的测点 J22 和地面测点 D133 的最大沉降量分别为 1.3 mm 和 7.1 mm,西侧桥墩的测点 J20 和地面测点 D115 的最大沉降量分别为 1.3 mm 和 7.3 mm。由此可见,采用人工挖孔桩的施工控制措施可以有效避免高架桥和地面的变形。

## 5 结语

本文研究了基坑下穿高架桥梁且近临既有建(构)筑物结构的施工影响,主要获得以下结论:

1) 在基坑非同步分仓开挖后,坑底上隆区域也呈现出分区域隆起极值的特性,但北端放坡段由于地层不完全揭露,其表现为沉降特性。

2) 在基坑南北端土体开挖完成后,其沉降量大小排序为北端放坡段沉降量>中间段沉降量>南端沉降量>北端沉降量。在基坑开挖完成后,其沉降量大小排序为中间段沉降量>南端沉降量>北端沉降量>北端放坡段沉降量。

3) 基坑下穿桥梁施工会导致梁板出现翘曲变形,由南北端开挖后的两端高、中间低变为开挖完成后的东边沉、西边隆形态。

4) 有限元数值模拟参数取值偏保守,导致其计算结果较监测数据略大,但整体变化趋势与地下工程实际监测值一致。

## 参考文献

- [1] 孟繁增. 基坑开挖引起邻近高铁桥墩隆起变形实例分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 98.  
MENG Fanzeng. Case study on foundation-pit-excavation-induced uplift deformation of adjacent high-speed railway bridge piers[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4): 98.
- [2] 陈祉阳, 王文柱. 地铁车站明挖基坑下穿互通立交桥基础的施工关键技术及变形影响分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 1): 1952.  
CHEN Zhiyang, WANG Wenzhu. Key construction technology and deformation influence analysis of subway station open cut foundation pit underpass interchange foundation[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 1952.
- [3] 李文胜. 岩溶地区大直径人工挖孔桩下溶洞处理[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊 2): 782.  
LI Wensheng. Treatment of Karst cavity below large diameter hand-excavated piles in Karst area[J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 782.
- [4] 李文胜. 岩溶地区大直径人工挖孔桩下溶洞处理[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊 2): 782.  
LI Wensheng. Treatment of Karst cavity below large diameter hand-excavated piles in Karst area[J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 782.

(收稿日期:2020-09-06)

(上接第 112 页)

小型化网络模型参数规模小、检测速度快但定位精度低的问题,本文提出一种利用网络模型蒸馏技术实现复杂网络模型训练小型化网络模型的方法,提高小型化网络模型的检测精度,以实现轻量化检测设备上的模型高效部署。试验结果表明,在保留接触网零部件定位精度的前提下,所提模型蒸馏方法能够大幅提高接触网零部件的定位计算性能,同时有效减少模型文件大小。本文研究对丰富智能化接触网检测设备的设计制造具有一定的应用参考价值。

## 参考文献

- [1] KANG G, GAO S, YU L, et al. Deep architecture for high-speed railway insulator surface defect detection: denoising autoencoder with multitask learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2679.
- [2] ZHONG J, LIU Z, HAN Z, et al. A CNN-based defect inspec-

tion method for catenary split pins in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2849.

- [3] CHEN J, LIU Z, WANG H, et al. Automatic defect detection of fasteners on the catenary support device using deep convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(2): 257.
- [4] LIU Z, ZHONG J, LYU Y, et al. Location and fault detection of catenary support components based on deep learning[C]// 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Houston, TX: IEEE, 2018: 1.
- [5] LIU Z, LIU K, ZHONG J, et al. A high-precision positioning approach for catenary support components with multiscale difference[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(3): 700.
- [6] LIU W, LIU Z, NÚÑEZ A, et al. Unified deep learning architecture for the detection of all catenary support components[J]. IEEE Access, 2020, 8: 17049.

(收稿日期:2022-06-22)