

文章编号: 1674—8247(2023)05—0088—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 05. 016

## 下穿高速铁路地铁列车振动对高速铁路的影响分析

崔光耀<sup>1</sup> 何子阳<sup>1</sup> 王明胜<sup>2</sup> 许崇庆<sup>1</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁城市发展投资集团有限公司, 成都 610000)

**摘要:** 依托北京地铁 19 号线草桥站—右安门外站区间下穿京沪高速铁路工程, 借助 FLAC3D 软件研究了地铁运营振动对上跨高速铁路线路及相关设施位移的影响, 结果表明: (1) 在该工程影响范围内的 8 处硬横跨接触网杆, 支柱横线路面偏差最大为 0.016°, 支柱倾斜率最大为 0.028‰, 接触网立柱沉降最大值为 1.9 mm, 差异沉降最大值为 0.3 mm; (2) 对于 6 处悬挑式接触网杆、2 处矩形横腹板柱、1 处信号灯及 1 处电线杆, 支柱横线路面偏差最大为 0.010°, 支柱倾斜率最大为 0.018‰, 接触网立柱沉降最大值为 2.1 mm; (3) 上跨高速铁路线路最大沉降为 1.61 mm; (4) 上跨高速铁路线路及相关设施位移均小于控制标准。研究结果可为类似下穿工程提供参考。

**关键词:** 高速铁路; 地铁隧道; 下穿; 列车振动; 位移响应

**中图分类号:** U213.1 **文献标志码:** A

## Analysis of the Impact of Vibrations from Metro Trains Passing Under High-speed Railways

CUI Guangyao<sup>1</sup> HE Ziyang<sup>1</sup> WANG Mingsheng<sup>2</sup> XU Chongqing<sup>1</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract:** The study investigated the impact of vibrations from metro train operation on the displacements of the above-laid high-speed railway tracks and related facilities by using FLAC3D based on a case study of the Beijing Subway Line 19, which passes under the Beijing-Shanghai High-speed Railway between Caoqiao Station and You'anmenwai Station. The results showed the following: (1) Within the affected area of the Caoqiao-You'anmenwai section, the maximum horizontal deviation of 8 rigid cross-contact wire poles was 0.016°, the maximum inclination of the supporting pillar was 0.028‰, the maximum settlement of the contact wire column was 1.9 mm, and the maximum differential settlement was 0.3 mm. (2) For 6 cantilevered contact wire poles, 2 rectangular transverse lateral brace columns, 1 signal light, and 1 power pole, the maximum horizontal deviation of the supporting pillar was 0.010°, the maximum inclination was 0.018‰, and the maximum settlement of the contact wire column was 2.1 mm. (3) The maximum settlement of the above-laid high-speed railway tracks was 1.61 mm. (4) The displacements of the above-laid high-speed railway tracks and related facilities were all within control standards. The research findings may provide a reference for similar underpass construction projects.

**Key words:** high-speed railway; metro tunnel; underpass; train vibration; displacement response

收稿日期: 2023-04-18

作者简介: 崔光耀(1983-), 男, 教授。

基金项目: 北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(23XN262-187)

引文格式: 崔光耀, 何子阳, 王明胜, 等. 下穿高速铁路地铁列车振动对高速铁路的影响分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 88-92.

CUI Guangyao, HE Ziyang, WANG Mingsheng, et al. Analysis of the Impact of Vibrations from Metro Trains Passing Under High-speed Railways [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 88-92.

近年来,随着交通科技的迅速发展,交通隧道建设大幅推进,城市地下空间集约化开发利用十分迫切,地铁下穿既有构筑物不可避免<sup>[1-3]</sup>。运营地铁列车振动对地面建/构筑物的影响越来越突出。

目前,专家学者对地铁运营振动对周围环境及建筑物的影响进行了大量研究。袁庆利<sup>[4-5]</sup>通过三维有限元模型和水-土耦合有限单元-有限差分数值模型,研究了地铁列车振动时隧道周围软土的力学响应和变形响应;朱正国<sup>[6-8]</sup>通过傅里叶变换法和数值模拟研究了地铁运营振动对既有建筑的影响;刘一文<sup>[9-11]</sup>通过数值模拟和地面振动测试等方法对地铁运营振动引起的地面沉降进行了研究;蔡袁强<sup>[12-15]</sup>等借助 ANSYS 等软件研究了振动响应机理以及防振隔振措施。综上所述,既有文献中对于地铁运营对周围建筑物的影响以及防振措施已有了较为深入的研究,但对于地铁运营振动对上方高速铁路以及信号灯等高速铁路配套设施影响的研究较少。因此,本文以北京地铁 19 号线草桥站—右安门外站区间下穿京沪高速铁路工程为研究对象,借助 FLAC3D 计算软件对草右区间地铁列车运营振动对上方高速铁路线路及高速铁路设备的影响进行分析。研究成果可以为类似城市下穿工程设计提供参考。

1 工程概况

1.1 草桥站—右安门外站区间工程概况

草桥站—右安门外站区间下穿京沪高速铁路段,下穿京沪高速铁路段的起始右线里程为 K 37+600,终点右线里程为 K 37+880,该段落总长 280.0 m,为双线双洞区间,洞间距约 11.0 m。该段区间斜向下穿京沪高速铁路,高速铁路下方建有框构桥,隧道与框构桥交角为 61°。

1.2 地质情况

该段区间隧道下穿高速铁路区域沿着 6‰下坡,拱顶与框构桥底垂直净距约 11.1 m,与轨底垂直净距约 21.29 m。该区间主要穿越卵石层,卵石粒径一般为 5.0~10.0 cm,最大粒径 21 cm。结构上部局部位位于卵石~圆砾,圆砾粒径一般为 0.5~2.0 cm,最大粒径为 4 cm,充填物为细中砂约占 30%,卵石粒径一般为 2.0~5.0 cm,最大粒径为 10 cm,充填物为细中砂约占 30%。下部局部位位于粉细砂层及卵石,粒径一般为 5.0~10.0 cm,最大粒径大于 22 cm,充填物为细中砂约占 30%。详细地质情况如图 1 所示。

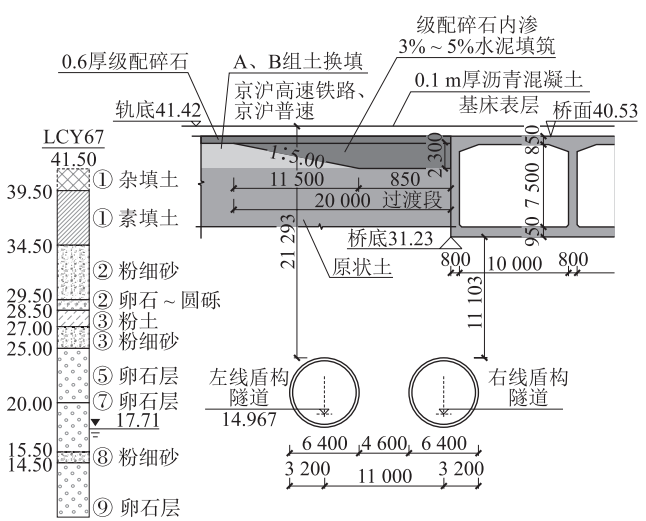


图1 地质情况图

2 计算情况

2.1 计算模型

以草桥站—右安门外站区间隧道下穿京沪高速铁路为研究背景建立计算模型。模型隧道洞宽 6.4 m,隧道洞口间距 4.6 m,框构桥设计跨度分别为 10 m、12.5 m、12.5 m、10 m,桥体总高度 9.3 m。隧道洞口至左侧边界均为 40 m,至右侧边界均为 80 m。围岩采用摩尔-库伦模型,混凝土采用弹性模型,地表铁路、接触网杆、信号灯、电线杆和矩形横腹板柱采用 Beam 单元模拟。静力计算时,模型上部不设约束面,底部和四周设置约束面;动力计算时,模型底部设置约束面,四周为自由场边界。

2.2 计算参数

计算模型的物理力学参数如表 1 所示。

表1 模型计算参数表

名称	重度 (KN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	粘聚力 /kPa
①粉土素填土	17	0.02	0.36	8	5
②粉土	17	0.03	0.31	8	0
②3粉细砂	19	0.05	0.31	29	0
②5圆砾	20	0.1	0.28	38	0
③3粉细砂	190	0.06	0.28	35	0
⑤卵石	20	0.13	0.22	40	0
⑦卵石	20	0.15	0.22	45	0
⑨卵石	20	0.16	0.22	45	0
注浆加固圈	21	0.2	0.21	50	10
管片	24.9	29.39	0.2	-	-
衬砌	23.85	19	0.2	-	-

2.3 动力参数

选用常规动力加载方式加载地铁列车运行实测波,列车波时程曲线如图 2 所示。

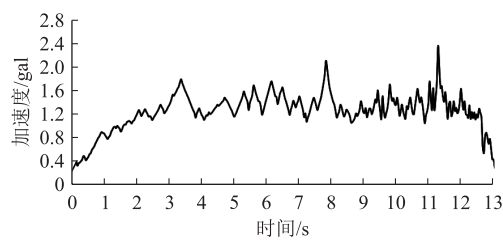


图 2 地铁列车运营实测波时程曲线图

2.4 测点布置

下穿影响线范围内,共 8 处硬横跨接触网杆,其中 4 处位于桥面,均为等径圆钢柱;6 处悬挑式接触网杆,其中 3 处位于桥面,均为等径圆钢柱;2 处为矩形横腹板柱,均位于路基;路基段还存在 1 处信号灯及 1 处电线杆。桥面接触网与桥梁结构连接为一体,路基处接触网杆钢柱采用扩大基础。具体分布如图 3 所示。

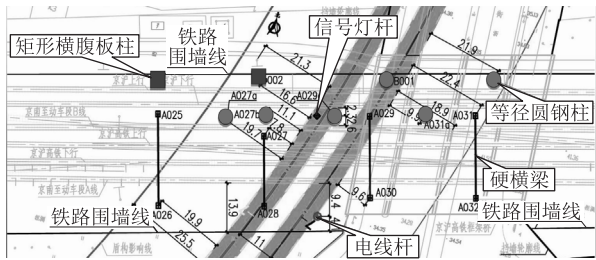


图 3 网杆、信号灯等分布图

将监测点布置在模型所建网杆的顶部及底部,共 34 个测点,如图 4 所示。8 处硬横跨接触网杆(杆标 1~8 号)、6 处悬挑式接触网杆(杆标 9~14 号)、2 处矩形横腹板柱(杆标 15~16 号)、1 处信号灯(杆标 17 号)及 1 处电线杆(杆标 18 号)。

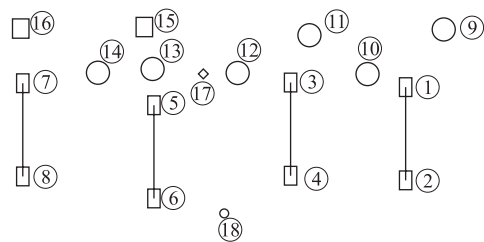


图 4 网杆编号图

根据铁总运〔2015〕362 号《高速铁路接触网运行维修规则》规范要求,结合工程实际情况及既有设计施工经验,接触网支柱位移控制标准如表 2 所示。

3 计算结果分析

3.1 硬横跨接触网杆位移分析

提取 8 处硬横跨接触网杆的横向和竖向位移云

表 2 接触网支柱控制标准表

项目	控制值	备注
支柱横线路面允许偏差/(°)	≤ 2	—
支柱倾斜率/‰	< 3	以垂直于线路中心线为基准
接触网立柱沉降/mm	4	不得向线路侧和受力方向倾斜
硬横跨立柱差异沉降/mm	2	—
高速铁路变形指标/mm	4	—

图,如图 5、图 6 所示。

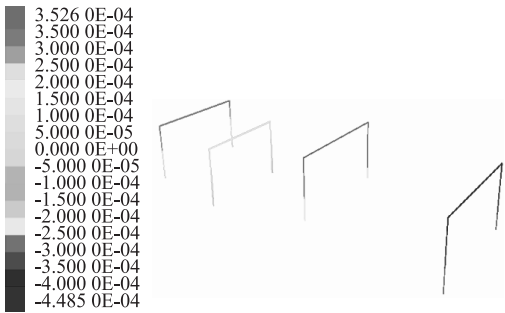


图 5 硬横跨接触网杆横向位移云图(m)

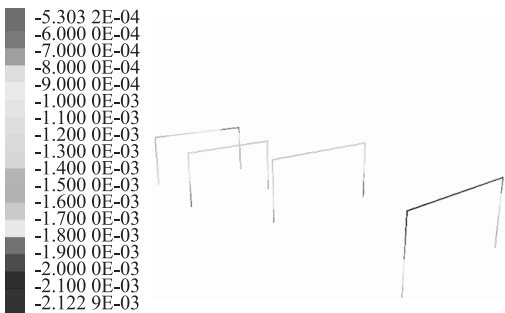


图 6 硬横跨接触网杆竖向位移云图(m)

提取 8 处硬横跨接触网杆杆顶杆底以及最大沉降位移,并计算各杆的偏差、倾斜率和差异沉降,如表 3 所示。

表 3 硬横跨接触网杆位移汇总表

杆标	顶部水平位移/mm	底部水平位移/mm	偏差/(°)	倾斜率/‰	立柱沉降/mm	差异沉降/mm
1	0.45	0.19	0.016	0.028	1.9	0.3
2	0.46	0.21	0.016	0.027	1.6	
3	0.31	0.11	0.012	0.021	1.3	0.2
4	0.32	0.15	0.010	0.018	1.1	
5	0.15	0.12	0.002	0.003	0.9	0.1
6	0.14	0.10	0.003	0.004	1.0	
7	0.35	0.22	0.009	0.014	1.2	0.2
8	0.35	0.17	0.010	0.019	1.4	

由图 7、图 8 和表 3 可知,施加振动波后,8 处硬横跨接触网杆最大偏差为 0.016°,最大倾斜率为 0.028‰,立柱最大沉降为 1.9 mm,最大差异沉降为

0.3 mm,各项指标均小于控制指标。

3.2 悬挑式接触网杆位移分析

提取 6 处硬横跨接触网杆的横向、竖向位移云图,如图 7 所示(以竖向位移云图为例)。

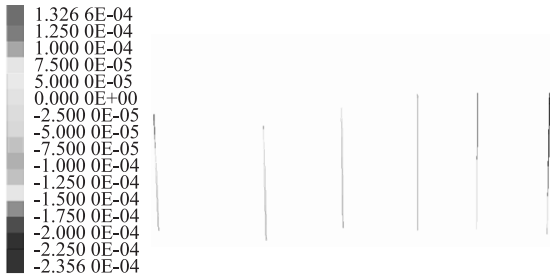


图 7 悬挑式接触网杆竖向位移云图(m)

提取 6 处悬挑式接触网杆杆顶杆底以及最大沉降位移,并计算各杆的偏差和倾斜率,如表 4 所示。

表 4 悬挑式接触网杆位移汇总表

杆标	顶部水平 位移/mm	底部水平 位移/mm	偏差 /(°)	倾斜率 /‰	立柱沉降 /mm
9	0.23	0.06	0.010	0.018	2.1
10	0.18	0.03	0.009	0.016	1.7
11	0.15	0.01	0.009	0.015	1.4
12	0.07	0.01	0.004	0.006	1.3
13	0.06	0.01	0.004	0.005	0.9
14	0.09	0.03	0.004	0.006	1.1

由图 7 和表 4 可知,6 处悬挑式接触网杆最大偏差为 0.010°,最大倾斜率为 0.018‰,远小于控制值;最大立柱沉降为 2.1 mm,小于控制标准值(4 mm)。

3.3 矩形横腹板柱、信号灯和电线杆位移分析

提取矩形横腹板柱、信号灯和电线杆的横向和竖向位移云图,如图 8、图 9 所示(以竖向位移云图为例)。

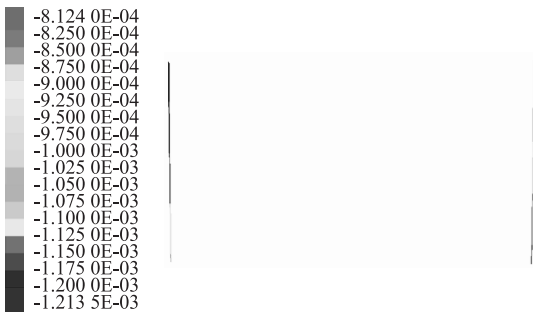


图 8 矩形横腹板柱竖向位移云图(m)

提取各杆柱顶柱底以及最大沉降位移,并计算两柱的偏差和倾斜率,结果如表 5 所示。

由图 8、图 9 和表 5 可知,草右区间下穿京沪高

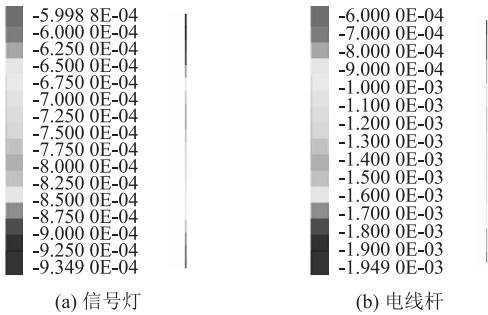


图 9 信号灯和电线杆竖向位移云图(m)

表 5 矩形横腹板柱、电线杆、信号灯位移汇总表

杆标	顶部水平 位移/mm	底部水平 位移/mm	偏差 /(°)	倾斜率 /‰	立柱沉降 /mm
15	0.04	0.01	0.002	0.003	0.9
16	0.05	0.01	0.003	0.004	1.2
17	0.05	0.03	0.002	0.002	0.9
18	0.03	0.02	0.001	0.001	1.0

速铁路影响范围内的矩形横腹板柱、电线杆和信号灯,在施加振动波后,最大偏差为 0.002°,最大倾斜率为 0.004‰,最大立柱沉降为 1.2 mm,均小于控制标准值。

3.4 高速铁路线路位移分析

提取高速铁路线路的沉降云图,如图 10 所示。



图 10 高速铁路线路沉降云图(m)

由图 10 可知,高速铁路线路较大沉降发生在地铁隧道上方部分,在振动影响范围内,两条高速铁路线路的最大沉降为 1.61 mm,小于控制标准 4 mm。

4 结论

本文分析了草右区间下穿京沪高速铁路对高速铁路线路及设备的影响,得到主要结论如下:

- (1)影响范围内的 8 处硬横跨接触网杆(杆标 1~8 号),支柱横线路面偏差最大值为 0.016°,远小于控制标准(2°);支柱倾斜率最大值为 0.028‰,远小于



控制标准(3‰);接触网立柱沉降最大值为1.9 mm,小于控制标准(4 mm);差异沉降最大值为0.3 mm,小于控制标准(2 mm)。

(2)影响范围内的6处悬挑式接触网杆(杆标9~14号)、2处矩形横腹板柱(杆标15~16号)、1处信号灯(杆标17号)及1处电线杆(杆标18号),支柱横线路面偏差最大值为0.010°,远小于控制标准(2°);支柱倾斜率最大值为0.018‰,远小于控制标准(3‰);接触网立柱沉降最大值为2.1 mm,小于控制标准(4 mm)。

(3)影响范围内的高速铁路线路最大沉降为1.61 mm,小于控制标准4 mm。

(4)综上所述,北京地铁19号线草右区间列车运营振动对上跨京沪高速铁路线路以及相关设备设施造成的位移变化均小于规范控制标准,因此不会对既有上跨京沪高速铁路的正常安全运营造成不利影响。

## 参考文献:

- [1] 王乃勇. 双线盾构隧道斜交下穿对高速公路的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13919-13925.  
WANG Naiyong. Influence of a Double Line Shield Tunnelling Obliquely Underpass Expressway [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13919-13925.
- [2] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.  
HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and Prospects on Constructing Technologies of Metro Tunnels Using Shield Tunnelling Method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.
- [3] 杜宇本, 蒋良文, 陈明浩, 等. 中国铁路隧道勘察技术的发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1943-1952.  
DU Yuben, JIANG Liangwen, CHEN Minghao, et al. Development and Prospect of Geological Surveying Technology for Railway Tunnels in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1943-1952.
- [4] 袁庆利. 运营期地铁列车振动下软黏土的动力响应及变形研究[J]. 国防交通工程与技术, 2021, 19(4): 25-30.  
YUAN Qingli. Study on Dynamic Response and Deformations of Soft Clay Caused by Subway Vibration during Operation [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2021, 19(4): 25-30.
- [5] 包小华, 李攀, 崔宏志, 等. 地铁隧道运营中复杂软土地层的动力响应[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 53-60.  
BAO Xiaohua, LI Pan, CUI Hongzhi, et al. Dynamic Response of Complex Soft Clay Due to Metro Tunnel Operation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 53-60.
- [6] 朱正国, 陈信宇, 陈自飞, 等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6-11.  
ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on Deformation Control of Shield Tunneling under Subway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6-11.
- [7] 高愈辉. 地铁运营对古建筑木结构的振动影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
GAO Yuhui. Study on Influence of Vibration Induced by Metro Operation on Ancient Wooden Structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [8] 毛顺茂, 熊超华, 雷晓燕. 地铁运营对古建筑振动响应影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 13-17.  
MAO Shunmao, XIONG Chaozhua, LEI Xiaoyan. Vibration Impact on Ancient Architecture Induced by Subway Running [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 13-17.
- [9] 刘一文, 巴振宁, 高愈辉, 等. 天津Z2线地铁运营对沿线地面振动的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 193-196.  
LIU Yiwen, BA Zhenning, GAO Yuhui, et al. Influences of Metro Operation on Ground Vibration along Tianjin Z2 Line [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 193-196.
- [10] 李震宇, 牟军东, 张昊泽, 等. 地铁运营振动引起的地面沉降环境效应研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(11): 111-114.  
LI Zhenyu, MU Jundong, ZHANG Haoze, et al. Study on the Environmental Effect of Ground Subsidence Caused by Subway Operation Vibration [J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(11): 111-114.
- [11] 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 133-138.  
YUAN Yang, LIU Weining, LIU Weifeng. Propagation Law of Ground Vibration in the Curve Section of Metro Based on In-situ Measurement [J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 133-138.
- [12] 蔡袁强, 江乾明, 曹志刚, 等. 填充沟对地铁运营引起地基振动隔振效果研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1384-1392.  
CAI Yuanqiang, JIANG Qianming, CAO Zhigang, et al. Vibration-isolation Effectiveness of In-filled Trench on Ground Vibration Induced by Subway Operation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1384-1392.
- [13] 曹浩. 地铁列车运行引起邻近建筑物振动响应及隔振措施研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.  
CAO Hao. Research on Response to Vibrations of Neighboring Buildings Caused and Vibration Isolation Measures by the Operation of the Metro [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [14] 蒋崇达, 雷晓燕. 地铁运营下钢弹簧浮置板轨道减振分析[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(5): 23-28.  
JIANG Chongda, LEI Xiaoyan. The Vibration Damping Analysis of Steel Spring Floating Slab Tracks in Subway Operations [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2012, 29(5): 23-28.
- [15] 丁智, 林若涵, 陈雷越. 双圆地铁运营动力响应及隔振研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 85-91.  
DING Zhi, LIN Ruohan, CHEN Leiye. Research on the Dynamic Response and Vibration Isolation of Double-circle Subway Operation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(11): 85-91.