

文章编号:1005-0523(2022)04-0010-06



中低速磁浮交通低置路基动力特性三维数值分析

戴旺¹,李宏泉¹,李金光¹,周苏华²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙410082; 2. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室,湖南长沙410082)

摘要:运用 Abaqus 和 Fortran 联合仿真,建立基于无限元人工边界条件的磁悬浮列车-轨道梁-路基-地基耦合系统,研究中低速磁浮交通在中速行车状态下不同行车速度,基床刚度,基床阻尼对低置路基动应力分布和传递规律的影响。结果表明:路基动应力随着运行速度的增加而增加,但对 0.6 m 以下路基的动应力影响不大;不同的基床刚度,基床刚度越大,路基表层动应力越大,但增加幅度逐渐趋缓,当路基在 0.6 m 以下时,动应力随基床刚度的增大而减小;不同基床阻尼对路基表层的动应力没有影响,但对路基下不同深度处的动应力影响较大,基床阻尼越大,深度越大的路基动应力越小,动应力的衰减幅度越大。

关键词:中低速磁浮交通;低置路基;动应力;Abaqus;联合仿真

中图分类号:U231.1

文献标志码:A

本文引用格式:戴旺,李宏泉,李金光,等.中低速磁浮交通低置路基动力特性三维数值分析[J].华东交通大学学报,2022,39(4):10-15.

Dynamic Characteristics of Low Subgrade for Medium and Low Speed Maglev Based on the Three-dimensional Numerical Simulation

Dai Wang¹, Li Hongquan¹, Li Jinguang¹, Zhou Suhua²

(1. Hunan Traffic Planning Survey and Design Institute, Changsha 410000, China; 2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The joint simulation method of Abaqus and Fortran to build the three-dimensional finite element analysis model of maglev train-track beam-subgrade-foundation coupling system based on the artificial boundaries condition for infinite element. The effects of different driving speed, subgrade stiffness and damping of subgrade bed on dynamic stress distribution and transmission law of low subgrade for medium and low speed maglev under medium speed driving are studied. The results show that the subgrade dynamic stress increases with the increase of running speed, and has little effect on the subgrade below 0.6 m; Under the condition of different subgrade bed stiffness, the greater the stiffness of subgrade bed, the greater the dynamic stress on the surface of subgrade, but the increasing amplitude is gradually slowing down, the dynamic stress of subgrade decreases with the increase of subgrade stiffness when the subgrade below 0.6 m; Different subgrade damping has no effect on the dynamic stress of the surface of subgrade, but it has a great influence on the dynamic stress at different depths under the subgrade, the larger the subgrade damping is, the smaller the dynamic stress of subgrade is, the greater the attenuation amplitude of dynamic stress is.

Key words: low subgrade; dynamic response; medium and low speed maglev; Abaqus; hybrid simulation

Citation format: DAI W, LI H Q, LI J G, et al. Dynamic characteristics of low subgrade for medium and

收稿日期:2021-06-29

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1705201);贵州省科技支撑计划(2020-4Y047);创新平台与人才计划-湖湘高层次人才聚集工程-创新团队(2019RS1030)

low-speed maglev based on the three-dimensional numerical simulation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022,39(4):11-16.

目前,国内外学者重点关注的是中低速磁浮交通轨道技术、列车技术、高架桥轨道梁结构等^[1]。但对于线路结构的关注较少,尤其是对于介于高架桥和地下隧道之间的低置线路结构的动力反应的研究基本未见,主要是缺乏低置路基的设计和施工方面的实践经验。

丁兆锋^[2]研究了中低速磁浮低置结构路基基床动荷载影响深度,基床填料所需的最小变形模量。周飞^[3]分析了填土容重对中低速磁浮基床厚度影响。肖乾等^[4]对磁悬浮列车动力学研究进行了详细的综述。单春胜^[5]采用 Midas 建立了中低速磁悬浮桥梁的有限元分析模型,利用 Vimb 开展了列车-桥梁竖向耦合振动仿真分析。王党雄^[6]通过数值模拟揭示了中低速磁浮列车运行时车与轨道梁空间耦合振动特性。王亚明等^[7]则进一步研究了列车-F 轨-钢轨枕-轨道梁系统的动力特性。受限于计算效率和现有的数值计算理论,目前轨道-路基结构动力响应数值模拟普遍采用半无限平面应变方法进行分析,而且列车运行动荷载简化为点荷载,这与轨道-路基结构的动力学特性存在较大出入。

长沙磁悬浮连接长沙高铁南站到黄花机场,全长 18.225 km,部分区段采用了低置线路,即在填筑路基结构上架设轨道梁。中低速磁悬浮采用低置路基可以有效降低线下结构自重,对减少差异沉降及工后沉降、维持轨道高平顺性、降低工程造价意义重大。本文根据长沙磁悬浮列车的实际运行情况,借助 Abaqus 和 Fortran 联合仿真,建立基于无限元人工边界条件^[8-10]的磁悬浮列车-轨道梁-路基-地基三维有限元耦合系统模型,在 Abaqus 中建立了磁浮轨道梁-路基-地基耦合模型,使用 Fortran 建立磁悬浮列车运行荷载 Vdload 子程序,将荷载施加到磁浮轨道梁上研究磁悬浮中低速行车状态下低置路基动力特性。

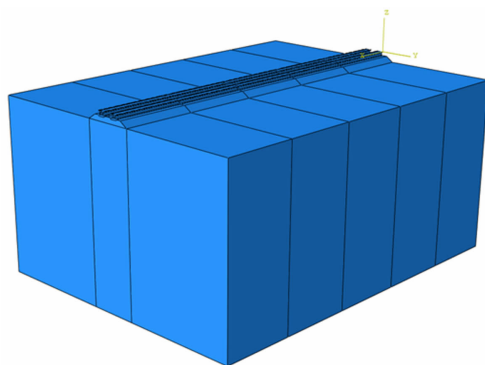
1 耦合系统动力特性分析模型

1.1 轨道梁-路基-地基耦合系统模型

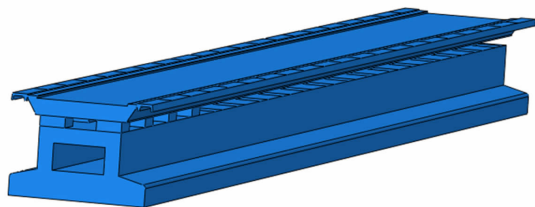
1.1.1 几何分析模型

轨道-路基-地基耦合系统的三维几何模型,模

型从上向下分别为轨道梁、垫块、路基、地基土等。为兼顾仿真计算效率和科学性,本文构建的模型的结构尺寸与实际一致,同时对部分工艺和电气结构尺寸进行了简化。如图 1 所示,计算模型的长宽尺寸分为 105,80 m 和 50 m。



(a) Geometric model



(b) Rail beam

图 1 几何分析模型图

Fig.1 Geometric Analysis Model

1.1.2 计算参数

在模型分析中,轨道梁、垫块以及路基均假定为弹性体,其中轨道梁和垫块的弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.17,密度为 2 500 kg/m³。路基的弹性模量为 160 MPa,泊松比为 0.3,密度为 2 400 kg/m³。地基土采用摩尔-库伦模型,弹性模量为 20 MPa,泊松比为 0.3,密度为 1 800 kg/m³,粘聚力为 30 kPa,内摩擦角为 20°。为更有效地反映轨道结构、地基土等材料的动力特性,有限元分析模型中采用瑞利阻尼(Rayleigh damping)^[11-12],轨道梁和垫块、地基土、路基的质量阻尼 Alpha 分别等于 0.9,0.85,0.4。

1.1.3 边界条件

采用图 1(a)所示的全局坐标系,并规定如下:沿线路方向为 X 轴,平面上垂直于路线方向为 Y 轴,Z

轴垂直于地面。本研究将模型的四周单元设置为无限元以避免振动波在边界单元处造成的反射。

1.1.4 网格划分

轨道梁、路基以及周围地基土体划分密集网格,网格尺寸在 0.2~0.96 m 之间。地基其它区域按照离隧道距离网格尺寸逐渐加大,网格尺寸在 0.96~4.8 m 之间,网格划分如图 2 所示。有限元单元使用 C3D6R 单元(6 节点 3 棱柱单元),无限单元采用 CIN3D8,共划分 462 540 个网格单元。

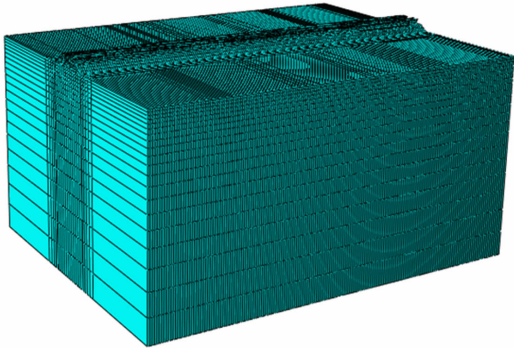


图 2 网格划分图

Fig.2 Grid segmentation

1.2 计算荷载

采用沿轨道方向钢轨表面内 5 个区域的均布荷载来简化代替作用于路基上的移动荷载。简化后的荷载,每个区域为一段,每段 2.72 m,荷载大小为 25.8 kN/m。

长沙中低速磁悬浮车辆采用 3 节车体组合型式,含梁端挂钩车体总长 46.75 m。轨道梁受荷简图如图 3 所示。

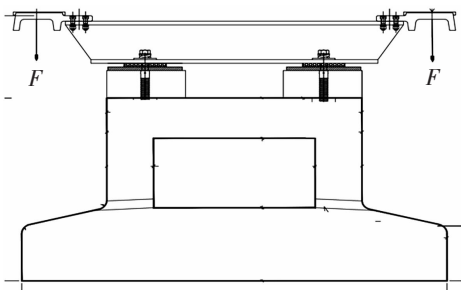


图 3 轨道梁受荷简图

Fig.3 Charged diagram of track beam

对于轨道不平顺引起的动荷载,为简化起见并参照已有的研究^[13-14],本文将其简化为一个包含振幅值和频率的正弦函数形式如下

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega t \quad (1)$$

式中: P_0 为单个车轮静载,kN; P_1 为对应于动力附加

荷载的振动荷载,kN。 m_0 为列车簧下质量。根据文献^[15-17],振动荷载幅值 $P_1 = m_0 a \omega^2$,其中 a 为波幅, ω 为圆频率。对于长沙磁悬浮列车, $P_0 = 35$ kN, $P_1 = 3.68$ kN($v = 140$ km/s), $P_1 = 4.8$ kN($v = 160$ km/s), $\omega = 17.5$ s⁻¹ ($v = 140$ km/s), $\omega = 20$ s⁻¹ ($v = 160$ km/s)。

此外,由于 Abaqus 没有预置移动荷载的设置程序,本研究通过 Fortran 编写了 Vdload 子程序模拟磁悬浮列车运行产生的荷载。

1.3 分析过程

本文分析软件采用 Abaqus,模型单元采用 6 节点三棱柱的实体。本文数值模拟研究磁悬浮列车提速至 140,160 km/h 情况下,低置路基的动力响应情况,使用 Fortran 编写 Vdload 子程序模拟磁悬浮列车运行产生的荷载,本文有限元动力分析采用显示积分算法进行求解^[11]。

2 模拟结果及讨论

现有研究表明^[5-7],行车荷载作用下路基的动力反应与列车运行速度、基床刚度和基床阻尼等因素密切相关。本文着重探讨不同列车速度,基床刚度,基床阻尼对低置路基动应力分布和传递规律的影响。

2.1 行车激励下路基动应力研究

线路中心处混凝土垫层下路基动应力 P_d 随时间 t 的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可知,当 0.75 s 时,磁悬浮列车正好运行到模型的中心位置。运行磁悬浮的轨道梁底垫层 A 点下不同深处 D 处路基的动应力见图 5 所示。由图 5 可知,垫层下路基动应力分布不均匀,最大动应力位于轨道梁垫层内侧(右侧轨道,见图 5 中 A 点),

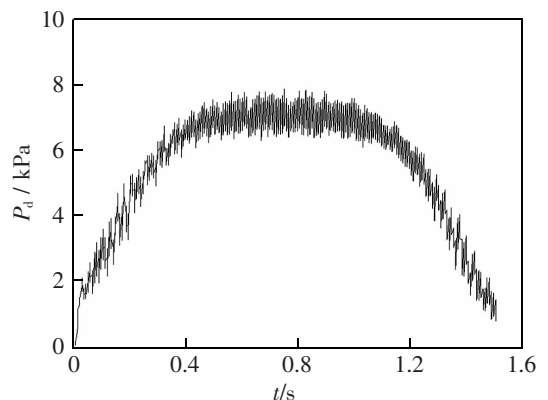


图 4 140 km/h 运行时混凝土垫层下路基动应力随时间的变化规律

Fig.4 140 km/h dynamic stress under concrete cushion at any time

点),向轨道梁垫层外侧逐渐减小,最大、最小动应力相差 1.7 kPa。

调取图 5 中 A 点以下路基不同深度 D 处的动应力,见图 6 所示。由图 5 可知,A 点以下路基的动应力沿深度逐渐减小,0~0.6 m 减小幅度较大,0.6~1.4 m 减小幅度趋缓;磁悬浮列车运行速度 140 km/h 引起的路基动应力最大不超过 9 kPa。

同样可以得到磁悬浮列车运行速度为 160 km/h 时,不同时间点路基动应力云图和 160 km/h 运行时混凝土垫层下路基动应力和轨道梁底垫层下不同位置处路基的动应力随时间的变化规律。

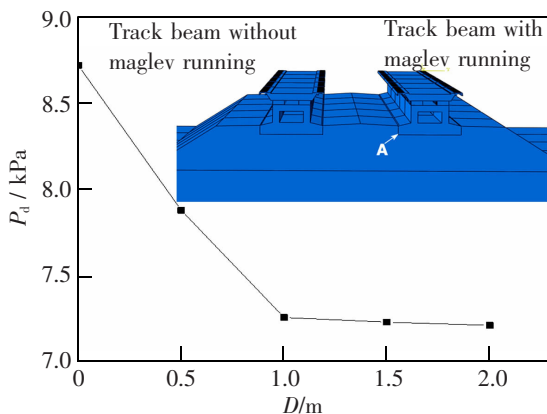


图 5 磁悬浮 140 km/h 运行时轨道梁底垫层下不同位置处路基的动应力

Fig.5 Stress of subgrade at different positions under the bottom cushion of track beam during operation of magnetic levitation 140 km/h

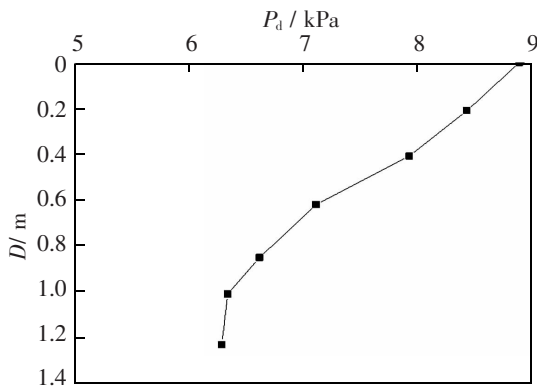


图 6 垫层下路基动应力沿深度的分布规律

Fig.6 Distribution of stress along depth of subgrade under cushion

2.2 行车速度对路基动应力响应的影响

图 7 为不同速度下路基动应力沿深度的分布规律,当列车运行速度为 160 km/h 时产生的路基表层动应力为 9.2 kPa,比 140 km/h 运行时产生的路

基动应力大 3.6%;路基 0.6 m 以下列车速度对路基动应力基本没有影响。

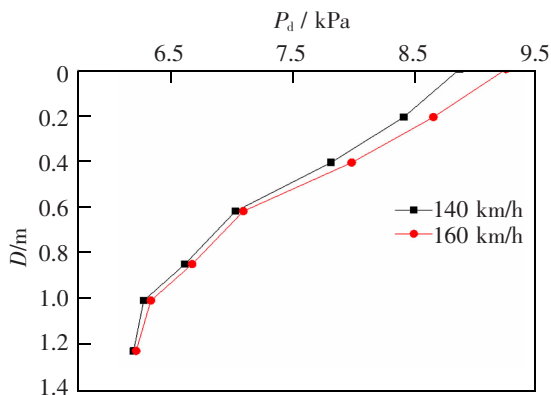


图 7 不同速度下路基动应力沿深度的分布规律

Fig.7 Distribution of dynamic stress along depth of subgrade at different velocity

2.3 基床刚度对路基动应力响应的影响

图 8 为磁悬浮列车以设计时速 140 km/h 运行时,路基刚度分别取 80,120,160 MPa 和 200 MPa 时不同深度处的路基动应力图。从图中可以看出,基床刚度越大,路基表层动应力越大,但增加幅度逐渐趋缓,路基 0.6 m 以下动应力随基床刚度的增大而减小。基床刚度的变化对路基加速度和弹性变形的影响不大。

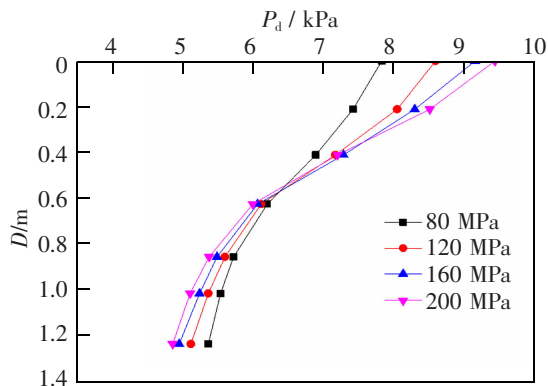


图 8 不同基床刚度下路基不同深度处的动应力

Fig.8 Distribution law of dynamic stress along depth of subgrade at different velocity

2.4 基床的阻尼对路基动应力响应的影响

图 9 为磁悬浮列车以设计时速 140 km/h 运行时,路基的瑞利阻尼 Alpha 分别取 0.75,0.8,0.85 和 0.9 时不同深度处路基的动应力分布规律图,其中瑞利阻尼 Alpha 与磁悬浮路基材料的阻尼比及自振频率相关,详见文献[18-20]。

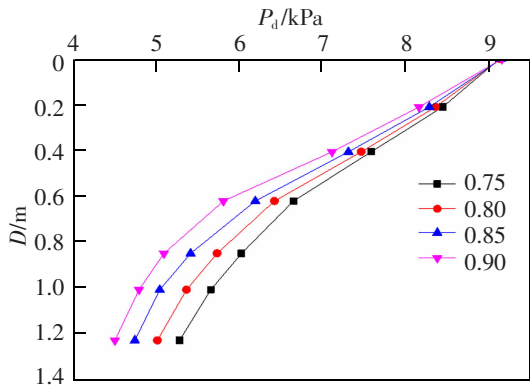


图9 不同基床阻尼下路基不同深度处的动应力
Fig.9 Dynamic stress at different depth of subgrade under different bed damping

由图9可知,基床阻尼对路基表层的动应力没有影响,但对路基下方深处的动应力影响较大。基床阻尼越大,深度越大的路基动应力越小,动应力的衰减幅度越大。基床阻尼的变化对路基加速度和弹性变形的影响基本可忽略不计。

3 结论

本文为了考虑中低速磁浮交通在中速行车状态下低置路基的动应力分布和传递规律,建立了基于无限元人工边界条件的磁悬浮轨道梁-路基-地基耦合系统。探究了不同行车速度,基床刚度,基床阻尼对低置路基动应力分布和传递规律的影响,主要结论如下。

1) 列车车速越大,路基动应力响应越大,不过对0.6 m以下路基的动应力影响不大。

2) 随着基床刚度的增大,路基表层动应力出现明显的增大,但增加幅度逐渐趋缓,但当路基在0.6 m以下时,动应力随基床刚度的增大而减小。

3) 不同基床阻尼对路基表层的动应力没有影响,但对路基下方深处的动应力影响较大,基床阻尼越大,深度越大的路基动应力越小,动应力的衰减幅度越大。

参考文献:

[1] 高柏松,肖飞知. 中低速磁浮交通低置线路结构动力特性分析[J]. 高速铁路技术,2015(4):36-39.
GAO B S,XIAO F Z. Dynamic characteristics analysis of low set line structure of medium and low speed maglev transit[J]. High Speed Railway Technology,2015(4):36-39.

[2] 丁兆锋. 中低速磁浮低置结构路基基床关键技术研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(8):11-15.
DING Z F. Research on key technologies for subgrade bed of ground structure of medium and low speed maglev[J]. Railway Standard Design,2020,64(8):11-15.

[3] 肖乾,许旭,陈光圆. 磁悬浮列车动力学研究方法综述[J]. 华东交通大学学报,2019,36(1):25-32.
XIAO Q,XU X,CHEN G Y. Research on vehicle-mounted hybrid energy storage system for urban rail transit[J]. Journal of East China Jiaotong University,2019,36(1):25-32.

[4] 周飞. 填土容重对中低速磁浮基床厚度影响分析[J]. 铁道建筑技术,2021,(4):5-8.
ZHOU F. Analysis of the influence of filling bulk density on the subgrade bed thickness of medium and low speed maglev[J]. Railway Construction Technology,2021(4):5-8.

[5] 单春胜. 中低速磁浮列车-桥梁系统竖向耦合振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
SHAN C S. Study on vertical coupling vibration of low-medium speed maglev train-bridge system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2014.

[6] 王党雄. 中低速磁浮列车-低置结构空间耦合振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
WANG D X. Study on space coupling vibration of low-medium speed maglev train and at-ground structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2015.

[7] 王亚朋,蔺鹏臻. 中低速磁悬浮双线筒支轨道梁的冲击效应研究[J]. 铁道学报,2021,43(4):77-84.
WANG Y P,LING P Z. Study on impact effect of double-track simply supported track beams for medium and low speed maglev[J]. Journal of the China Railway Society,2021,43(4):77-84.

[8] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
ZHUANG Z,YOU X C,LIAO J H,et al. Finite Element Analysis and Application Based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2009.

[9] 庄茁. ABAQUS非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.
ZHUANG Z. ABAQUS Nonlinear Finite Element Analysis and Examples[M]. Beijing: Science Press,2005.

[10] 方志. 土-结构相互作用体系人工边界的动力反应与分析[J]. 力学季刊,2009,30(3):475-480.
FANG Z. Dynamic response and artificial boundary analysis in soil structure interaction system[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2009,30(3):475-480.

[11] MOHAMMAD S,PETROS S. Enhanced rayleigh damping

- model for dynamic analysis of inelastic structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(10): 04020216.
- [12] YU D H, LI G, LI H N. Implementation of rayleigh damping for local nonlinear dynamic analysis based on a matrix perturbation approach[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 04021130.
- [13] JENKING H, STEPHENSON J, CLAYTON G, et al. The effect track and vehicle parameters on wheel rail vertical dynamic forces[J]. Railway Engineering Journal, 1974, 3(1): 2-16.
- [14] 邱延峻, 方明镜, 张晓靖, 等. 高速铁路无砟轨道路基结构适应性动力分析[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 183-188.
QIU Y J, FANG M J, ZHANG X J, et al. Dynamic analysis of structural adaptivity of ballastless track substructure of high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(2): 183-188.
- [15] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84-88.
LIANG P, CAI Y. Dynamic analysis on subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84-88.
- [16] 李强, 王明年. 地铁重叠隧道的列车动荷载响应分析[J]. 铁道建筑技术, 2004(3): 21-23.
LI Q, WANG M N. Analysis of train dynamic load response in subway overlapping tunnels[J]. Railway Construction Technology, 2004(3): 21-23.
- [17] 于鹤然, 周晓军. 高速列车动荷载作用下立体交叉铁路隧道动力响应研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 103-111.
YU H R, ZHOU X J. Study on dynamic response of grade-separated railway tunnels under high-speed train induced dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 103-111.
- [18] 易旭鹏. 中低速磁悬浮试运线路基轨道梁结构性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YI X P. Performance study on subgrade-beam structure in medium and low speed maglev test line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [19] MAHDL F, FAHJAN Y, DOGANGUN A. Critical remarks on Rayleigh damping model considering the explicit scheme for the dynamic response analysis of high rise buildings[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(9): 1955-1971.
- [20] SMYROU E, PRIESTLEY M, NIGEL C, et al. Modelling of elastic damping in nonlinear time-history analyses of cantilever RC walls[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2011, 9(5): 1559-1578.



第一作者: 戴旺(1979—), 男, 硕士, 研究方向为新型轨道交通线路设计。E-mail: 496067362@qq.com。



通信作者: 周苏华(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为岩土工程风险。E-mail: zhousuhua@hnu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)