

# 基于振动传递率的地铁车辆振动传递特性研究

巩延庆 张云富

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

**摘要** [目的] 为确保地铁车辆在运营时其振动水平满足设计标准, 有必要以振动传递率为关键指标来评估地铁车辆隔振性能, 并引入相干函数评价振动传递函数的质量。[方法] 在地铁车辆的关键部位布置振动加速度传感器, 采集各部件的振动加速度信号。基于此, 计算了不同传递路径下的振动传递函数及相干函数, 以此来量化振动从激励点到目标点的传递情况, 以及两者之间的关联程度。此外, 还对一系悬挂、二系悬挂, 以及车体底架至车内地板的振动传递路径进行了分析。[结果及结论] 轴箱至构架端部的平均隔振率约为 60%, 而构架中部至车体底架的平均隔振率达到了 80%, 这说明一系和二系悬挂系统均具有良好的减振效果。对于特定频率范围内的振动 (例如 10 ~ 20 Hz, 40 ~ 60 Hz), 构架端部和车体底架的振动特性分别与轴箱和构架中部之间存在显著的相关性。然而, 车体底架至车内地板的振动传递关系并不显著, 这是因为地板位置的振动受到多方面因素的影响。

**关键词** 地铁车辆; 振动传递率; 振动传递函数; 相干函数; 振动传递路径

**中图分类号** U260.11<sup>+1</sup>

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.04.033

## Research on Vibration Transmission Characteristics of Subway Vehicles Based on Vibration Transmissibility

GONG Yanqing, ZHANG Yunfu

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] To ensure that the vibration level of subway vehicles meets design standards during operation, it is necessary to evaluate the vibration isolation performance of subway vehicles using the vibration transmissibility as a key indicator, and introduce a coherence function to assess the quality of the vibration transfer function. [Method] Acceleration sensors are installed at critical locations on the subway vehicle to collect acceleration signals from various components. Based on these data, the vibration transfer functions and coherence functions for different transmission paths are calculated to quantify the vibration transmission from the excitation point to the target point and the correlation between the two. Additionally, the vibration transmission paths of the primary suspension, second-

ary suspension, and from the car body underframe to the interior floor are analyzed. [Result & Conclusion] The average vibration isolation rate from the axle box to the frame end is approximately 60%, while it reached 80% from the middle frame to the car body underframe, indicating that both the primary and secondary suspension systems exhibit excellent vibration reduction effects. For specific frequency ranges (e. g. 10 ~ 20 Hz, 40 ~ 60 Hz), the vibration characteristics of the frame end and car body underframe show significant correlations with the axle box and the middle frame, respectively. However, the vibration transmission relationship from the car body underframe to the interior floor is not significant, as the vibration at the floor location is influenced by multiple factors.

**Key words** subway vehicle; vibration transmissibility; vibration transfer function; coherence function; vibration transfer path

随着地铁车辆的轻量化和高速化发展, 对其运行平稳性和乘坐舒适性的要求显著提升<sup>[1-2]</sup>。车辆设计中必须采用有效的振动控制方法, 以确保运营时的振动水平符合设计标准。常见的振动控制措施包括消振、隔振、吸振和阻振<sup>[3]</sup>。复杂的线路工况会不可避免地引发整车振动, 无法完全消除这些振动源, 而采用基础的隔振和阻振方法能有效减少传递至关键部件和乘客区域的振动能量。在实际的振动测试中, 振动在物体结构上传递时, 可以将整个系统简化为激励源和响应点, 通常两者通过隔振或减振元件连接<sup>[4]</sup>。对于复杂的多自由度结构系统, 目标点的振动可能受到多个激励源的影响, 形成多条传递路径的叠加效应。分析不同传递路径的能量贡献一般有经典 TPA (传递路径分析) 法、运行工况 OPA (运行路径分析) 法、OPAX (带激励的运行路径分析) 法、OTPA (优化路径分析) 法等。文献[5]以 OTPA 法量化分析高速列车转向架对车内地板的传递路径。文献[6]基于 TPA 分析了牵引电机是导致某动车组出现的异常振动的主要部件。诸多学者都是从能量贡献的角度去区分不同传递

路径的重要程度,未对特定传递路径进行频率特性分析。为更好地量化车辆系统的隔振性能,保证地铁车辆在运行时具有良好的平稳性和舒适性,本文以振动传递路径为研究路线,采用试验测试的方法,通过引入振动传递率作为评估隔振性能的关键指标,并结合相干函数来评价振动传递函数的质量,通过对不同减振环节下的隔振性能进行分析,明确其是否具备良好的隔振性,以期为整车系统的隔振优化设计提供参考。

## 1 理论基础

振动传递路径示意图如图 1 所示。

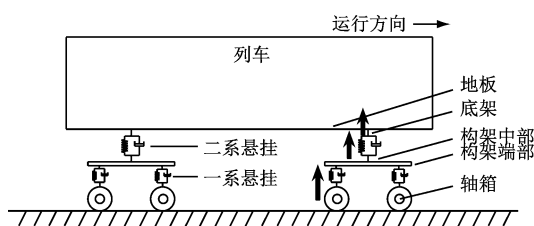


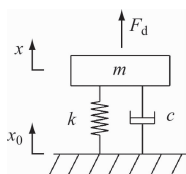
图 1 振动传递路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration transmission path

为了更好地衡量某一传递路径中从激励点到目标点的振动传递情况,一般会计算两者间的振动传递率用于评价振动传递性能,此外还会引入相干函数用于评价振动传递的关联程度,便于分析振动传递频率特性。

### 1.1 振动传递率

目前,地铁车辆隔振系统一般为被动隔振。以轴箱到对轴箱上构架端部的振动传递为例,其简化为单自由度的隔振系统动力学模型如图 2 所示。



注: $m$ 、 $k$ 、 $c$  分别为目标点系统的质量、等效刚度系数与黏性阻尼系数; $x$  为目标点的振动位移; $x_0$  为激励源的振动位移; $F_d$  为作用在目标点结构上的外部干扰力。

图 2 单自由度隔振系统动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of the single degree of freedom vibration isolation system

在基础干扰作用下的被动隔振系统,有  $F_d = 0$ , 此时该被动隔振系统的动力学方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{x}_0 + kx_0 \quad (1)$$

采用拉氏变换可得被动隔振系统的传递函数为:

$$\frac{s^2 X}{s^2 X_0} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} \quad (2)$$

该被动隔振系统的振动传递率  $T$  为:

$$T = \left| \frac{X(j\omega)}{X_0(j\omega)} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (3)$$

式(1)一式(3)中:

$\xi$ ——阻尼比,  $\xi = c/(2\sqrt{mk})$ ;

$\omega$ ——激励频率;

$\lambda$ ——频率比,  $\lambda = \omega/\omega_n$ , 其中  $\omega_n$  为隔振系统固有频率;

$s$ ——拉普拉斯变换复频域中的复数变量;

$X_0$ ——激励源的振动位移幅值;

$X$ ——目标点的振动位移幅值;

$\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ ——目标点的振动速度、振动加速度;

$j$ ——虚部。

对于多自由度系统,在求解系统的传递函数时可采用试验测试的方法,一般可以通过激励点和目标点的振动信号自谱互谱确定其传递函数,即:

$$H_{x_0x}(f) = \frac{P_{x_0x}(f)}{P_{x_0x_0}(f)} \quad (4)$$

式中:

$H_{x_0x}(f)$ ——振动频率为  $f$  时的传递函数;

$P_{x_0x}(f)$ ——振动频率为  $f$  时,激励点振动信号与目标点振动信号的互功率谱;

$P_{x_0x_0}(f)$ ——振动频率为  $f$  时,激励点信号的自功率谱。

### 1.2 相干函数

考虑测试过程中存在噪声等干扰,可以采用相干函数来评价传递函数的质量,说明目标点振动情况与激励点的相关程度,其计算公式为:

$$\lambda_{x_0x}^2(f) = \frac{|P_{x_0x}(f)|^2}{P_{x_0x_0}(f)P_{xx}(f)} \quad (5)$$

式中:

$\lambda_{x_0x}^2(f)$ ——振动频率为  $f$  时的相干函数或平方相干函数,  $0 \leq \lambda_{x_0x}^2(f) \leq 1.0$ ;

$P_{xx}(f)$ ——振动频率为  $f$  时,目标点信号的自功率谱。

$\lambda_{x_0x}^2(f) = 0$ , 表明目标点和激励点之间不存在关系;  $\lambda_{x_0x}^2(f) = 1.0$ , 表明目标点的振动情况完全由激励点引起。由于实际测试存在噪声等干扰,故只要

$\lambda_{x_0}^2(f) > 0.9^{[7]}$ , 就可认为目标点和激励点的测试数据有足够的信噪比, 两者存在振动传递关系。

## 2 振动试验

本次试验以某型地铁车辆为研究对象, 在轴箱、轴箱上构架端部、空气弹簧(以下简称“空簧”)下构架中部、空簧上车体底架、地板、座椅等关键部位布置加速度传感器, 采集各部件振动加速度信号, 采样频率为 1 000 Hz。通过计算, 得到轴箱至轴箱上构架端部、空簧下构架中部至空簧上车体底架、车体底架至车内地板等传递路径的振动关系。转向架上的测点布置如图 3 所示。车内测点位置为偏离被测转向架上方车体地板位置 1 m 处, 与转向架上其他测点位于同侧。

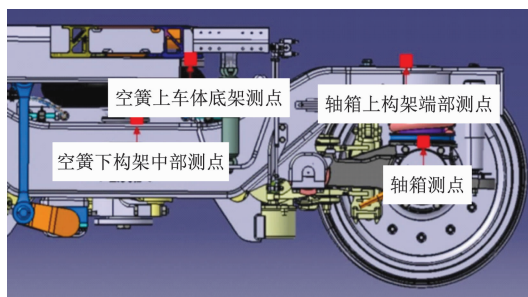


图 3 转向架上的测点布置图

Fig. 3 Layout diagram of measuring points on the bogie

各测点的横向和垂向振动时域数据如图 4—图 8 所示, 振动加速度均方根值见表 1。

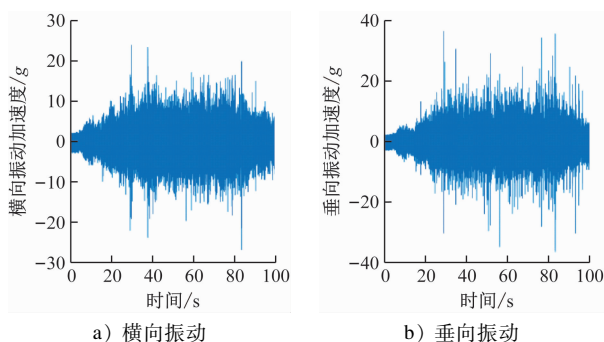


图 4 轴箱测点振动时域数据

Fig. 4 Vibration time-domain data of axle box measuring points

## 3 振动传递分析

根据试验设计的振动传递路径, 依次分析不同路径下的振动传递关系。

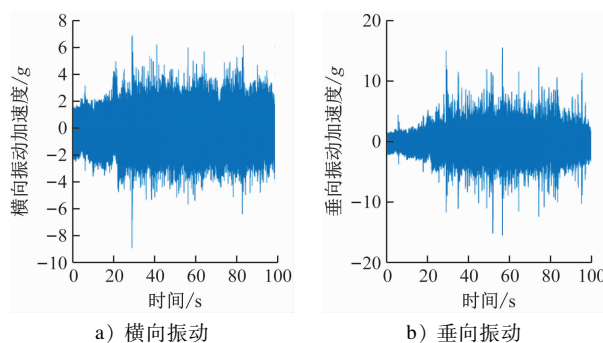


图 5 构架端部测点振动时域数据

Fig. 5 Vibration time-domain data of frame end measuring points

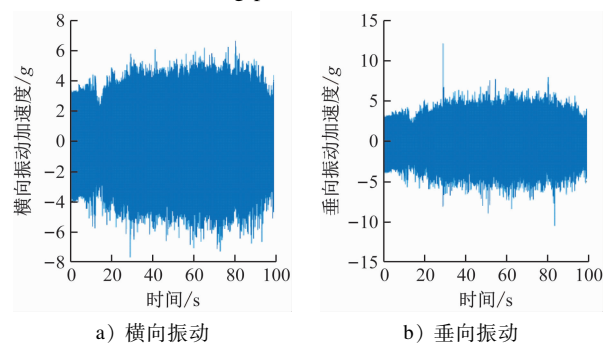


图 6 构架中部测点振动时域数据

Fig. 6 Vibration time-domain data of measuring points in the middle of the frame

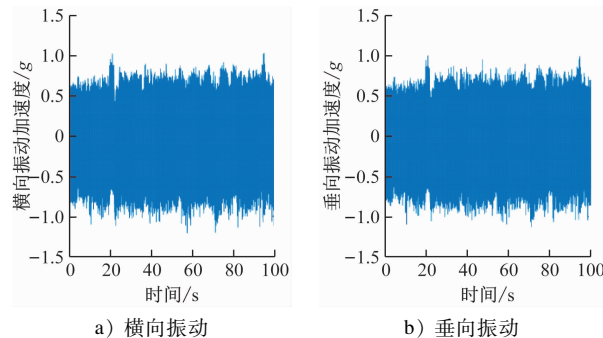


图 7 车体底架测点振动时域数据

Fig. 7 Vibration time-domain data of car body underframe measuring points

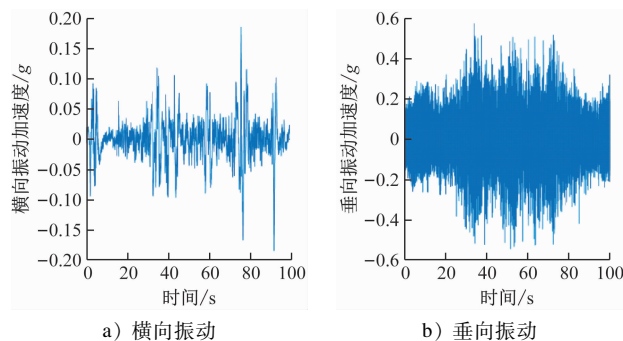


图 8 车体地板测点振动时域数据

Fig. 8 Vibration time-domain data of car body floor measuring points



表 1 各测点的振动加速度均方根值

Tab.1 Vibration acceleration RMS values at each measurement points

测点	振动加速度均方根/g	
	横向	垂向
轴箱测点	3.705 3	4.420 5
构架端部测点	1.414 2	2.099 7
构架中部测点	2.380 2	2.307 4
车体底架测点	0.385 0	0.369 7
车体地板测点	0.031 2	0.047 4

### 3.1 轴箱至轴箱上构架端部

将采集到的轴箱和构架端部振动数据代入式(4)和式(5),计算轴箱至构架端部横向及垂向振动传递函数,以及相干函数,结果如图9及图10所示。

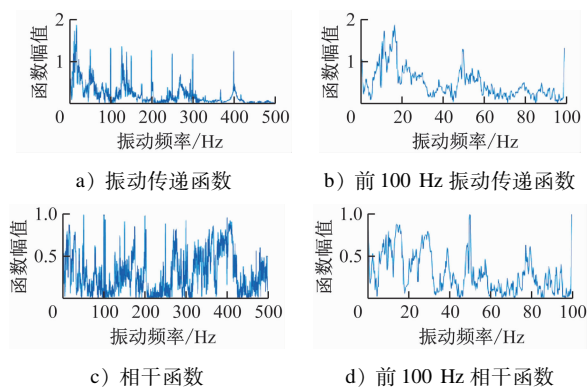


图9 轴箱至构架端部横向振动传递函数及相干函数

Fig. 9 Transverse vibration transfer functions and coherence functions from axle box to frame end

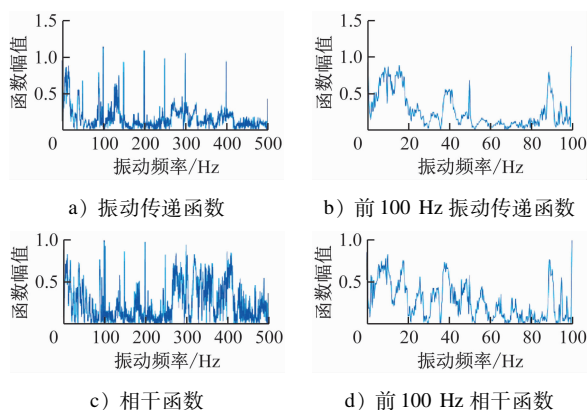


图10 轴箱至构架端部垂向振动传递函数及相干函数

Fig. 10 Vertical vibration transfer functions and coherence functions from axle box to frame end

由试验结果,对于轴箱至构架端部这一传递路径,在频率10~20 Hz附近,转向架横向与垂向振动加速度传递函数的相干函数整体趋近于1,对应传递函数幅值较大的频率附近,说明构架端部在该频

段的振动特性与轴箱密切相关。此外,在频率50 Hz附近,构架端部横向振动加速度传递函数的相干函数也趋近于1,对应传递函数幅值较大的频率附近,说明构架端部在该频段的振动特性与轴箱密切相关。在频率40 Hz附近,构架端部垂向振动加速度传递函数的相干函数也趋近于1,对应传递函数幅值较大的频率附近,说明构架端部在该频段的振动特性与轴箱密切相关。其平均隔振率约为60%,说明一系悬挂系统具有良好的减振设计。

### 3.2 空簧下构架中部至空簧上车体底架

将采集到的构架中部和车体底架振动数据代入式(4)和式(5),计算相应的横向、垂向振动传递函数及相干函数,结果如图11及图12所示。

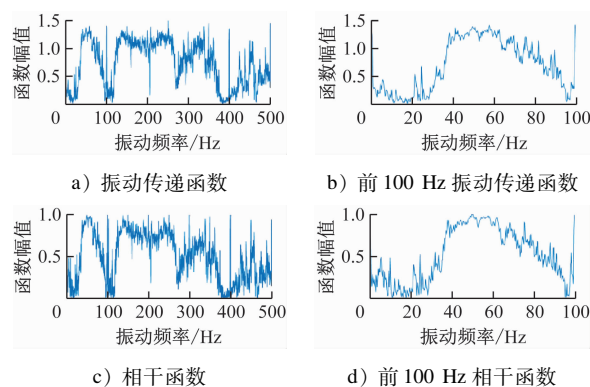


图11 构架中部至车体底架横向振动传递函数及相干函数

Fig. 11 Transverse vibration transfer functions and coherence functions from the middle of the frame to car body underframe

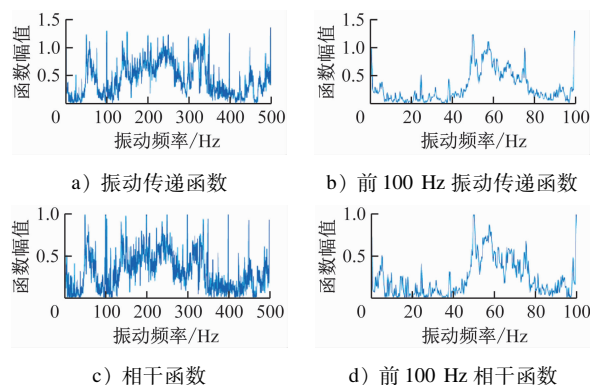


图12 构架中部至车体底架垂向振动传递函数及相干函数

Fig. 12 Vertical vibration transfer functions and coherence functions from the middle of the frame to car body underframe

对于构架中部至车体底架这一传递路径,在频率50~60 Hz附近,传递路径横向和垂向振动加速度传递函数的相干函数趋近于1,对应传递函数幅

值较大的频率附近,说明车体底架在该频段的振动特性与构架中部密切相关;在频率40~50 Hz附近,传递路径的横向振动加速度传递函数的相干函数也趋近于1,对应传递函数幅值较大的频率附近,说明车体底架在该频段的振动特性与构架中部密切相关。其平均隔振率在80%附近,说明二系悬挂系统具有良好的减振设计。

### 3.3 车体底架至车内地板

将采集到的车体底架和车内地板振动数据代入式(4)和式(5),计算相应的横向、垂向振动传递函数及相干函数,结果如图13及图14所示。

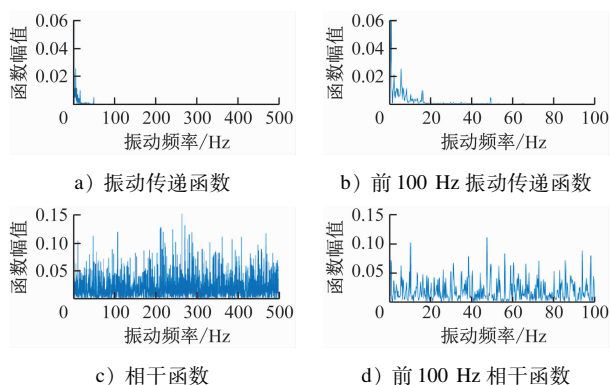


图13 车体底架至车内地板横向振动传递函数及相干函数  
Fig. 13 Transverse vibration transfer functions and coherence functions from car body underframe to interior floor

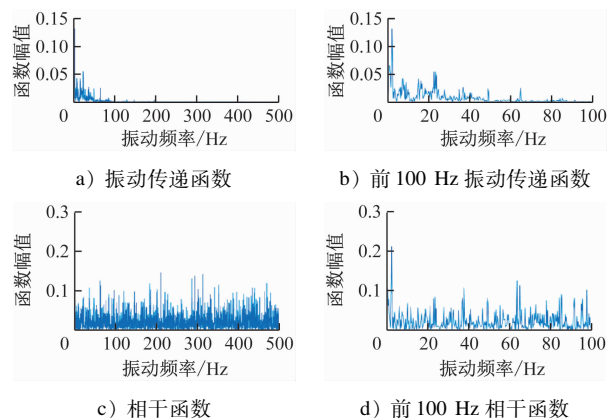


图14 车体底架至车内地板垂向振动传递函数及相干函数  
Fig. 14 Vertical vibration transfer functions and coherence functions from car body underframe to interior floor

对于车体底架至车内地板这一传递路径,被测地板与车体底架的横向与垂向振动加速度传递函数的相干函数整体低于0.5水平,这说明,地板位置的振动,并非唯一从轮轨转向架传递,是由多激励引起。

## 4 结语

该地铁车辆在轴箱至构架端部这一传递路径中,其平均隔振率在60%附近,说明一系悬挂系统具有良好的减振设计;在构架中部至车体底架这一传递路径中,其平均隔振率在80%附近,说明二系悬挂系统具有良好的减振设计。

对地铁车辆振动传递路径的传递函数和相干函数分析中可得到如下结论:

1) 对于轴箱至构架端部这一传递路径,构架端部的横向振动在10~20 Hz附近和50 Hz附近的振动频域特性与轴箱横向振动密切相关,构架端部的垂向振动在10~20 Hz附近和40 Hz附近的振动频域特性与轴箱垂向振动密切相关。

2) 对于构架中部至车体底架这一传递路径,车体底架的横向振动在40~60 Hz附近的振动频域特性与构架中部横向振动密切相关,车体底架的垂向振动在50~60 Hz附近的振动频域特性与构架中部垂向振动密切相关。

3) 对于车体底架至车内地板这一传递路径,两者构成的横向与垂向振动加速度传递函数相干函数整体水平较低,这说明两者振动传递关系不显著。

根据振动传递的频域特性影响,可以在振动控制时寻找出特定频域下的优化对象,为整车隔振优化提供思路。

## 参考文献

- [1] 戴军. 城市轨道交通可持续发展的思考[J]. 建设科技, 2022(16): 74.  
DAI Jun. Research on sustainable development of urban rail transit [J]. Construction Science and Technology, 2022(16): 74.
- [2] 顾保南, 杨照, 徐雷, 等. 1997—2017年中国城市轨道交通发展统计分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 85.  
GU Baonan, YANG Zhao, XU Lei, et al. Statistical analysis of urban rail transit lines in China from 1997 to 2017 [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 85.
- [3] 周劲松. 轨道车辆振动与控制[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2020.  
ZHOU Jinsong. Vibration and control on railway vehicles [M]. Shanghai: Fudan Press, 2020.
- [4] 官岛, 周劲松, 杜帅妹, 等. 高速动车组车下设备对车体振动传递与模态频率的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 126.

(下转第190页)

- around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(1): 78.
- [15] 杨会军, 王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92.
- YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis on construction factors of surrounding rock deformation in tunneling works[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 92.
- [16] 张朝强, 田乐, 刘博. 深埋软岩隧道开挖地应力场与围岩破坏机制分析[J]. 公路, 2016, 61(1): 228.
- ZHANG Chaoqiang, TIAN Le, LIU Bo. Analysis of deformation and failure mechanism of the high geotectonic stress soft rock tunnel during construction[J]. Highway, 2016, 61(1): 228.
- [17] 黄才华. 山区地铁隧道围岩开挖应力场及开挖方法研究[J]. 施工技术, 2014, 43(10): 131.
- HUANG Caihua. Research on excavation stress field and excavation method of subway tunnel surrounding rock in mountain area[J]. Construction Technology, 2014, 43(10): 131.
- [18] 李策, 王士民, 王承震, 等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103.
- LI Ce, WANG Shimin, WANG Chengzhen, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 103.
- 收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-10-03 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-02-06 Revised:2023-10-03 Published:2025-04-10  
• 第一作者:何林根,无, helingen1997@163.com  
通信作者:王士民,教授, wangshimin@swjtu.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 176 页)

- [7] 黄海林, 吴方伯, 祝明桥, 等. 板肋形式对预制带肋底板混凝土叠合板受弯性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 66.
- HUANG Hailin, WU Fangbo, ZHU Mingqiao, et al. Influence of rib details on flexural behavior of concrete composite slab with precast prestressed ribbed panel[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 66.
- [8] 金凌志, 廉德铭, 李丽, 等. 钢筋桁架超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 69.
- JIN Lingzhi, LIAN Deming, LI Li, et al. Experimental research on flexural behavior of UHPC composite slabs with steel truss[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3): 69.
- [9] 赵广军, 赵雷, 李文杰, 等. 预应力混凝土带肋叠合板受弯性能试验与设计关键问题研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 171.
- ZHAO Guangjun, ZHAO Lei, LI Wenjie, et al. Experimental and design key problems study on bending behavior of prestressed concrete composite slab with concrete rib[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 171.
- [10] 曹任辉, 彭波, 任靖, 等. 双面叠合剪力墙水平接缝传力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 19.
- CAO Renhui, PENG Bo, REN Jing, et al. Experimental study on force transmission performance of double-sided superposed shear walls with horizontal joints[J]. Building Structure, 2023, 53(14): 19.
- 收稿日期:2024-06-21 修回日期:2024-11-06 出版日期:2025-04-10  
Received:2024-06-21 Revised:2024-11-06 Published:2025-04-10  
• 通信作者:颜慧, 硕士研究生, 2233413@tongji.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 181 页)

- GONG Dao, ZHOU Jinsong, DU Shuaimi, et al. Study on the effect of the underframe equipment on vibration transmissibility and modal frequency of the car body for high-speed emu trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 126.
- [5] 周立群. 基于 OSPA 方法的客室地板振动传递路径分析及控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHOU Liqun. Transfer path analysis and control of floor vibration based on OSPA method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 姜旭东, 刘金龙, 史史, 等. 基于传递路径分析方法的动车组异常振动研究[J]. 铁道车辆, 2020, 58(5): 39.
- JIANG Xudong, LIU Jinlong, SHI Li, et al. Research on abnormal vibration of multiple units based upon the transfer path analysis method[J]. Rolling Stock, 2020, 58(5): 39.
- [7] 杨旭, 李冰, 陈少江. 传递路径分析方法用于农用车振动控制的研究[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 33.
- YANG Xu, LI Bing, CHEN Shaojiang. Research on transfer path analysis method on vibration control of agricultural vehicles[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 33.
- 收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-04-21 出版日期:2025-04-10  
Received:2023-03-01 Revised:2023-04-21 Published:2025-04-10  
• 通信作者:巩延庆, 高级工程师, 13814162048@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license