

建筑结构车致振动及减振降噪研究

张高明^{1,2*}, 刘枫^{1,2}, 颜锋^{1,2}, 何连华^{1,2}, 岳煜斐^{1,2}, 侯博文³, 申朝旭^{1,2}

(1. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013;

3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100091)

摘要: [目的] 针对日益严重的轨道交通振动与噪声污染的问题。[方法] 提出了一套建筑结构振动分析及振动控制的整体解决方案, 并结合现场实测与减振设计, 为轨道交通邻近建筑的振动分析与减振降噪提供依据。[结果] 建立了考虑多工况、启停车并考虑层间非线性的车-轨-道床列车振动激励模拟方法, 采用 CFD 模拟方法对列车高速突入封闭空间的压力波进行模拟, 以反映列车风对封闭建筑物的风压影响。在此基础上, 本文提出了车辆-轨道系统激励求解, 轨道-建筑系统振动分析的两步走数值振动分析方法, 大大提高了计算效率。另外, 本文提出了以简化列车噪声源模型结合噪声传播理论进行噪声远场传播计算的噪声评价方法, 并提出了一套列车振动现场实测的方法, 包括测试仪器的选型、测点的选择依据、测试工况的制定等, 为车致振动理论分析与实测数据的对比提供了数据基础。同时, 本文提出了轨道交通减振降噪的三类控制措施, 并给出了各类减振措施的应用场景和优缺点。[结论] 本文提出的建筑结构振动分析与控制的整体解决方案在多个高铁站房、地铁上盖、线路临建、机场枢纽的振动分析和减振降噪设计中得到应用, 取得了良好的经济效益与社会效益, 为轨道交通邻近建筑的减振降噪提供了依据。

关键词: 建筑结构; 列车振动; 列车振动激励; 振动响应; 振动评价; 舒适度

中图分类号: TU 311.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)04-0568-11

Research on vehicle induced vibration and vibration reduction and noise reduction of building structures

ZHANG Gaoming^{1,2*}, LIU Feng^{1,2}, YAN Feng^{1,2}, HE Lianhua^{1,2},
YUE Yufei^{1,2}, HOU Bowen³, SHEN Zhaoxu^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Since the beginning of the new century, the domestic rail transit industry has developed rapidly, and the increasingly serious problem of traffic vibration has gradually become prominent. The vibration amplitude and frequency bandwidth of rail transit become large, and the impact range is widened. With the expansion of urbanization, rail transit gradually penetrates into residential and office areas, resulting in a wider propagation range and greater impact of rail transit vibration. In addition, the people's demand for quality of life is increasing, and vibration pollution, as a unique urbanization product, is gradually entering the public eye. [Methods] The train wheel rail excitation simulation mentioned in this article mainly adopts the train simulation calculation method of considering multiple working conditions, starting and stopping, and taking into account inter story nonlinearity of the train-track-track bed. The simulation of train wind pressure mainly adopts CFD simulation methods that consider smooth start technology, tunnel truncation technology, and UDF dynamic grid technology. The calculation of vehicle induced vibration mainly adopts a two-step

收稿日期: 2024-09-24 录用日期: 2025-03-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2023YFC3805605); 国家重点研发计划(2024YFF050810203); 中国建筑科学研究院有限公司院士工作站科研基金项目(20220122330730021)

通信作者: zhanggaoming@cabrtech.com

引文格式: 张高明, 刘枫, 颜锋, 等. 建筑结构车致振动及减振降噪研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(4): 568-578.

Citation: ZHANG G M, LIU F, YAN F, et al. Research on vehicle induced vibration and vibration reduction and noise reduction of building structures[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(4): 568-578. (in Chinese)



numerical vibration analysis method of excitation solution for the vehicle-track system and vibration analysis for the track-building system. In the noise analysis, the aerodynamic noise evaluation method for high-speed railway crossing in complex scenarios is primarily adopted. [Results] Based on years of research on train induced vibration, this article establishes a train simulation calculation method that considers multiple operating conditions, start stop, and inter story nonlinearity for the train-track-track bed, greatly improving the accuracy and efficiency of train vibration load simulation. The CFD simulation method is used to simulate the multi scenario wind pressure time history of high-speed trains entering enclosed spaces. The innovative use of smooth start technology, tunnel truncation technology, and UDF dynamic mesh technology solves the problems of model boundaries and computational efficiency. On this basis, this article innovatively proposes a two-step numerical vibration analysis method for the excitation solution of the vehicle-track system and the vibration analysis of the track-building system, which efficiently decouples complex multi system dynamic problems and greatly improves computational efficiency. In addition, this article simplifies the train noise source model for far-field noise propagation calculation and innovatively proposes an aerodynamic noise evaluation method for high-speed rail crossing in complex scenarios. The system provides a complete set of methods for on-site measurement, data processing, comparison, and evaluation of train vibration, and systematically summarizes the vibration reduction and noise reduction technologies for buildings adjacent to the track, as well as their advantages and disadvantages, to better guide engineering practices. [Conclusions] The overall solution for vibration analysis and control of building structures proposed in this article has been applied in vibration analysis and vibration reduction and noise reduction design of multiple high-speed railway stations, subway overpasses, and airport hubs. It achieves good economic and social benefits, as well as provides a basis for vibration reduction and noise reduction of adjacent buildings in rail transit.

Keywords: building structure; train vibration; train vibration excitation; vibration response; vibration evaluation; vibration comfort

新世纪以来,国内轨道交通行业迅速发展,日益严重的交通振动问题也逐渐凸显出来^[1].轨道交通振动振幅大、振频宽^[2],影响范围广,且随着城市化的扩张,轨道交通逐渐深入居住区、办公区,造成轨道交通振动的传播范围更广,影响更大.另外,人民群众对生活质量的要求越来越高,振动污染作为一种特有的城市化产物逐渐进入公众视野.

轨道交通振动的轮轨激励和列车风激励模拟由来已久.潘昌实等^[3]采用能反映车致振动周期性的正弦叠加形式来模拟列车荷载.李军世等^[4]用傅里叶级数模拟车辆的每一组轮载,以含有振幅与频率的指数函数来模拟车辆竖向振动.夏禾^[5]系统地建立由列车模型、轨道模型及轮轨耦合关系组成的车轨系统动力模型,以较为完善的参数设置完成对列车振动激励的求解.在列车风模拟方面,梅元贵等^[6]将一维不可压缩非定常流动模型及广义黎曼特征线法应用于列车风问题的研究,取得了一定的成果.骆建军等^[7]通过三维数值模拟方法对高速行进的列车突入封闭空间形成压力波的过程进行了研究.张建伟等^[8]基于流体力学对武汉站等高铁站房的列车风问题进行数值模拟研究,得到了高速列车运行对邻近建筑的荷载作用.在车致振动计算方法方面,王逢朝等^[9]建立了钢轨-环境土体-建筑结构的二维有限元模型,在此基础上研究了车致振动对地面建筑的振动影响.张鹤年等^[10]采用车-轨-隧道-土层的三维有限元模型对车致振动的环境影响因素进行了探究.

以往车致振动分析过程中参数取值多依靠经验取值,本文在多年车致振动研究的基础上,建立了考虑多工况、启停车及层间非线性的车-轨-道床的列车模拟计算方法,大大提高了列车振动荷载模拟的精度及效率;采用CFD模拟方法对列车高速突入封闭空间的多场景转换列车风压时程进行模拟,创新性地采用光滑启动技术、隧道截断技术及UDF动网格技术解决了模型边界及计算效率的问题;在此基础上,本文提出了车体-轨道系统激励求解,轨道-建筑系统振动分析的两步走数值振动分析方法^[11-12],将复杂的多系统动力问题高效解耦,大大提高了计算效率;另外,本文以简化列车噪声源模型进行噪声远场传播计算,提出了复杂场景下高铁穿越的气动噪声评价方法;系统给出了列车振动现场实测及数据处理、实测对比和振动评价的一整套方法,并对轨道邻近建筑的减振降噪技术及其优缺点进行系统归纳,以便更好地指导工程实践.本文的主要研究思路如图1所示.

1 车致振动激励模拟

早期的列车振动荷载采用激振力函数来模拟^[13],该激振力函数包含静载和多个正弦函数叠加而成的动载,用以反映轨道不平顺、附加动载和轨面波磨效应,其形式如下,其中 P_0 为车轮静载, P_1, P_2, P_3 分别对应不同控制条件的振动荷载. $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别对应钢轨振动圆频率.

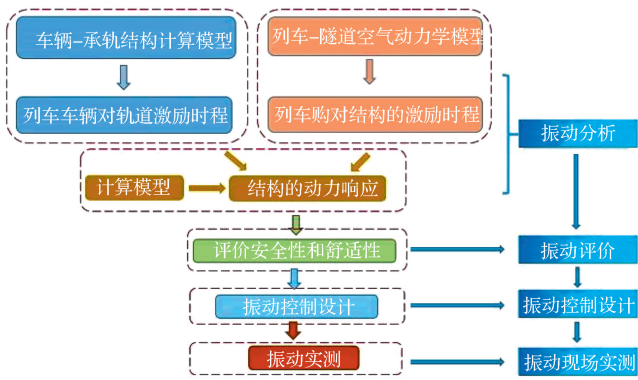


图 1 车致振动及减振降噪研究思路

Fig. 1 Research ideas on vehicle induced vibration and vibration reduction and noise reduction

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t.$$

目前的列车轮轨激励主要基于列车-轨道结构耦合动力学模型的求解得到,需要分别建立车辆子系统和轨道结构子系统,然后通过求解各子系统的空间耦合关系并进行数值求解得到列车轮轨激励。

车辆子系统和轨道结构子系统的运动平衡方程如式(1)所示,求解即可得到列车对轨道各节点的振动激励。其中, M_v 是车辆子系统的整体质量阵, C_v 是车辆子系统的整体阻尼阵, K_v 是车辆子系统的整体刚度阵, X_v 、 \dot{X}_v 和 \ddot{X}_v 分别表示车辆子系统的位移、速度和加速度。下标 B 对应轨道结构子系统。

$$\begin{cases} M_v \ddot{X}_v + C_v \dot{X}_v + K_v X_v = F_v, \\ M_B \ddot{X}_B + C_B \dot{X}_B + K_B X_B = F_B. \end{cases} \quad (1)$$

车辆子系统的结构形式如图 2 所示,目前主流的车辆单元均具有二系悬挂四轮对。一系悬挂设置在机车转向架与轴箱之间,二系悬挂设置在车体底架与转向架之间^[15]。车辆模型一般为理想化的刚体模型,整

车分为 7 个部分,每部分包括沉浮、横移、侧滚、点头及摇头 5 个自由度,共计 35 个自由度。

列车单个车体单元的质量矩阵 M_{Vi} 以下列方式组成车辆子系统的整体质量阵 M_V , 阻尼阵和刚度阵采用相同的形式。

$$M_V = \begin{bmatrix} M_{V1} & & & & & & 0 \\ & M_{V2} & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ 0 & & & & & & M_{V7i} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

伴随着列车行驶速度的大幅提高,列车轮轨振动激励逐渐具有振动强度大、频率高及非线性等特点,现有的振动激励分析方法不够精细,无法充分考虑车-轨道床的细部影响及层间非线性,因此本文提出充分考虑多线列车、岔道口、启停车等运行工况,道床结构精细化建模并考虑层间、接触、材料等的非线性作用的精细化分析方法^[14]。车桥耦合模型可以采用 MATLAB 进行数值仿真,也可以采用 ANSYS 或 ABAQUS 等通用有限元软件,一般采用 BEAM、SOLID 和 SHELL 等单元类型,材料根据实际情况建模,一般仅考虑弹性。典型的车轨耦合计算模型如图 3 所示。

通过车载、轨道动检等手段得到的轮轨振动监测数据,对基于数据驱动的轮轨作用关键力学参数取值模型进行自适应修正,提出了一套轮轨相互作用智能建模和振源数据精确评估的方法,如图 4 所示。这套数据驱动的轮轨激励参数修正和评估模型采用的是神经网络算法模型。该方法摒弃了以往车致振动建模中参数取值主要依靠经验的做法,在现场原位实验的基础上,将无砟轨道的结构材料、层间非线性等关键力学参数的取值准确性提高了一个等级。

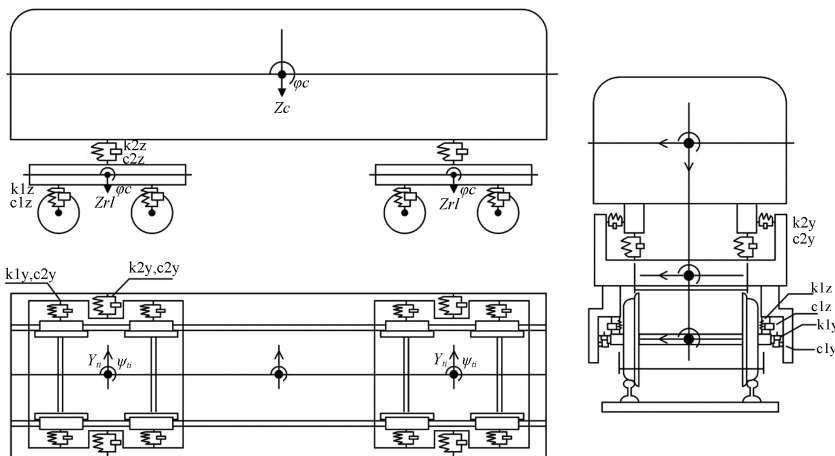


图 2 二系悬挂四轮对车辆模型

Fig. 2 Two series suspension four wheel vehicle model

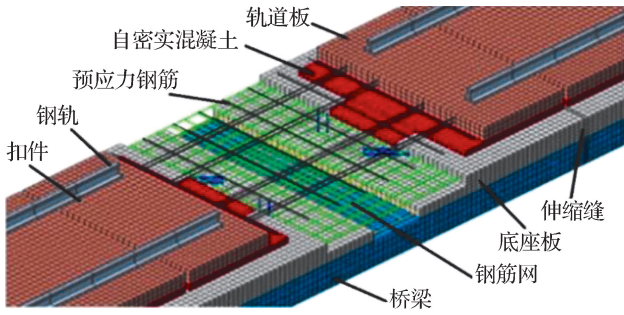


图 3 无砟道床精细化模型

Fig. 3 Fine tuned model of ballastless track bed

选取莞惠城际铁路云山站附近进行现场动态测试, 将采用轮轨激励模型修正方法得到的激励与现场实测激励进行对比, 结果如图 5 所示. 仿真计算的钢轨加速度与对应的实测数据基本保持一致, 证明了本方法的准确性和先进性.

2 列车风压时程模拟

列车通过地下封闭空间的列车风压问题理论上需模拟列车从封闭入口外远端, 以匀速进入封闭空间,

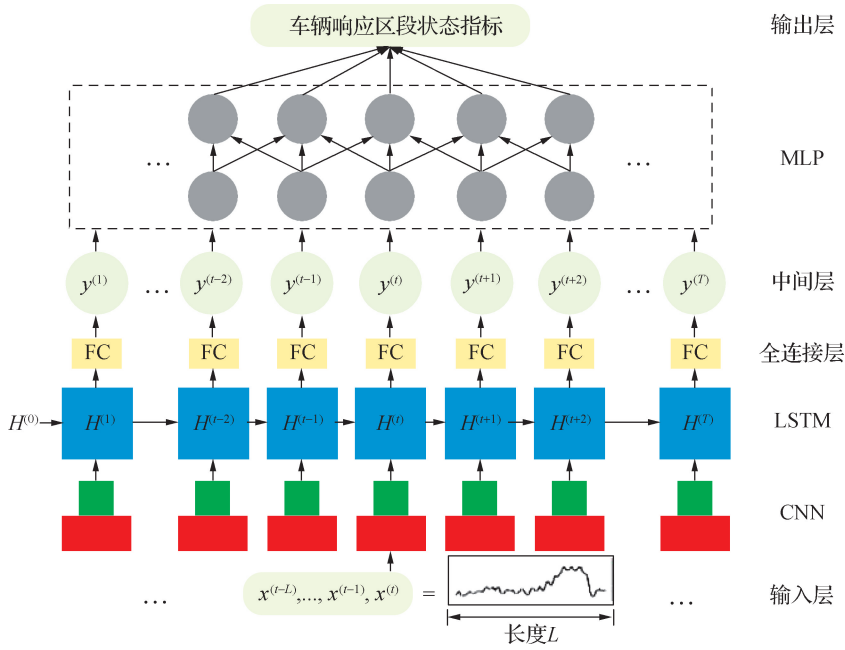


图 4 轮轨激励模型修正方法

Fig. 4 Correction method for wheel excitation model

高速穿越, 再穿出至封闭出口, 直至全部通过的过程, 但计算域过长将会导致计算效率低下. 计算域设定如图 6 所示.

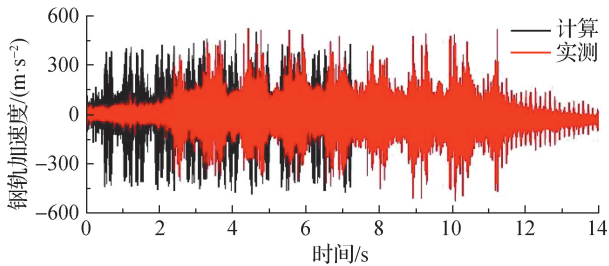


图 5 计算钢轨加速度计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated rail acceleration and measured values

模拟过程中几个问题需要做一些理想化处理, 包括列车运行初始化问题、隧道计算长度问题. 列车运

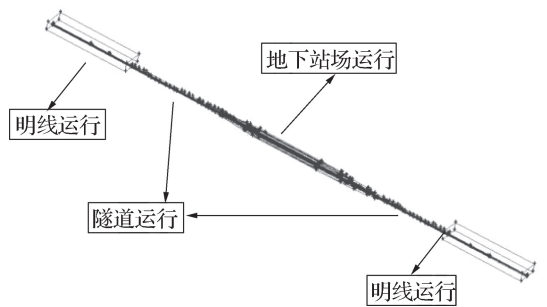


图 6 列车风压计算域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of train wind pressure calculation domain

行初始化影响计算域长度和计算效率, 如果从初速为零开始计算则计算域过长, 如果直接将初速设为额定速度, 则会存在压力波动问题, 因此采用光滑启动技术来消除非物理现象^[16]. 隧道长度截取技术主要用于

解决隧道计算长度问题,为了研究截取长度对隧道风压的影响,在隧道内壁顶部分别选取距离隧道入口 5 m、15 m、25 m、55 m、105 m、155 m、205 m 的测点,如图 7 所示.列车高速进入隧道时,隧道长度方向上各测点的压力变化曲线如图 8 所示.

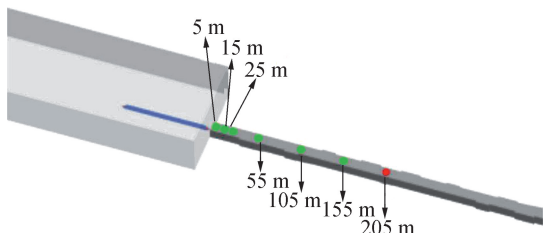


图 7 隧道内压力测点位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of pressure measuring points in the tunnel

在距离隧道入口 55 m、105 m、155 m、205 m 测点的压力变化曲线中,都可以看到一个压力平台区,而 5 m、15 m、25 m 这几个测点则没有.这个平台区就是列车驶入隧道引起的入口压缩波对隧道内压力影响的体现.列车进入隧道口后,前方隧道内空气受挤压形成入口压缩波,并以近似声速沿隧道向列车行进前方传播.由于入口压缩波速度大于列车运行速度,因此,在列车前方远处隧道内测点的压力在列车到来之前受到入口压缩波影响先行升高.如果隧道截取长度过短,则无法形成完整的压缩波平台段,导致列车风压模拟不准确.隧道内测点存在压缩波的平台段,这一特点可以作为截取隧道长度的依据.

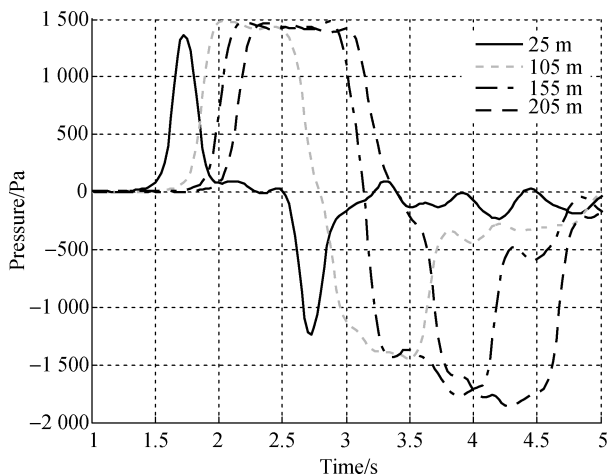


图 8 封闭空间内测点压力时程

Fig. 8 Time history of pressure measurement points in enclosed spaces

采用流体力学通用软件 Fluent 计算列车通过地下空间的列车风效应.计算模型包括从入口到出口的

整个空间,将整个空间分为两个部分:动区域和非动区域,动区域部分选取为高速列车通过的轨道空间部分,动区域采用动网格,非动区域采用固定网格.动网格通过判断网格层间距离来确定网格节点是否增减,从而实现网格的动态变化,并可对列车表面网格进行动态加密,在控制网格数量、提高计算精度上优势明显.求解非定常可压缩流动的 RANS 方程和 Realizable $\kappa-\epsilon$ 方程湍流模型,对地下空间的列车风压时程进行计算.列车高速进入封闭空间后,空间内压力场变化复杂,从模拟结果可以看到沿着行车方向竖向剖面的列车风压变化过程,如图 9 所示.计算模型中仅空气为计算域,建筑物及列车表面均为边界,空气一般采用三维单元,可根据需要采用结构化网格或非结构化网格.

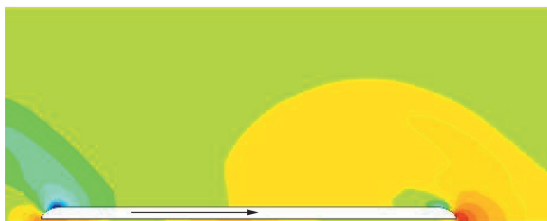


图 9 列车进入封闭空间的压力变化

Fig. 9 Pressure changes of trains entering enclosed spaces

本文中列车进入隧道过程中入口压缩波的波形、幅值与相关文献^[17]的研究结果进行对比,结果显示波形相似,幅值变化与其研究规律基本一致,验证了模拟结果的可靠性.

3 列车振动分析计算

车致振动计算十分复杂,在本研究中,将整个车-轨-建筑的动力相互作用分析,分解成以下两部分工作,两部分相辅相成,作为整个车-轨-建筑动力相互作用问题的处理方法^[18].

1) 建立车辆-轨道结构力学计算模型,对车辆-轨道系统进行动力相互作用分析,获得列车通过时轨道各节点的振动激励;采用流体计算软件,模拟列车高速通过地下封闭空间时的空气流场,根据流场的运动特性,得到列车通过时封闭空间各点的风压分布,以此作为列车对建筑结构的风压激励作用.

2) 建立轨道-建筑结构力学计算模型,对整个建筑结构相关范围内的上部结构、下部基础、环境土体进行精确建模,在列车行进的轨道节点输入第一步计算得到的轮轨振动激励时程及列车风压激励时程,进

行轨道-建筑结构系统的瞬态时程分析,得到建筑各部位的振动响应。

基于通用有限元软件 ANSYS 进行轨道-建筑动力相互作用计算,同时建立上部建筑、下部基础和环境土体模型,其中建筑结构和列车隧道根据设计图纸精确建模,上部结构的梁柱采用 BEAM44 单元,墙板采用 SHELL181 单元,隧道墙体及环境土体采用 SOLID45 单元^[19],典型的计算模型如图 10 和图 11 所示,该模型总的单元数量为 253 775。模型材料一般为混凝土、钢材及土体,均考虑弹性,材料重度、刚度根据现行规范选取,环境土体的属性参考地勘报告。模型的网格尺寸在行车位置附近采用 1.0 m,远离行车位置可逐步增大至 4.0 m。

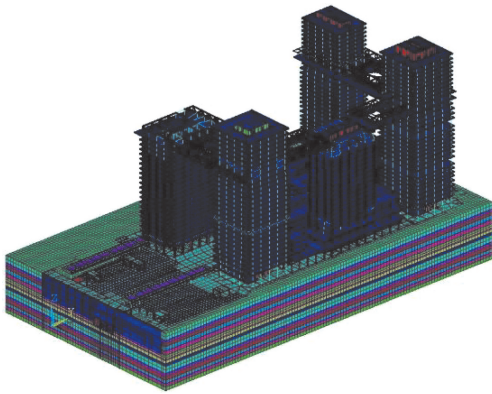


图 10 列车振动整体计算模型

Fig. 10 Overall calculation model for train vibration

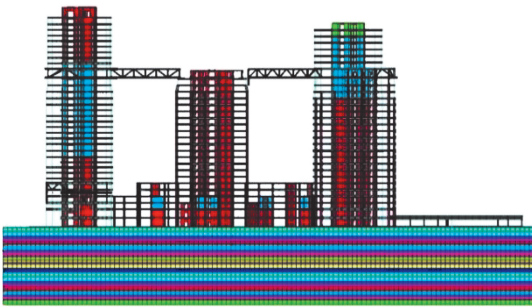


图 11 列车振动计算模型剖面情况

Fig. 11 Sectional situation of train vibration calculation model

在列车轨道节点上施加前述车辆-轨道相互作用计算得到的轮轨激励时程,在列车通行的封闭空间的内壁施加流体计算得到的列车风压激励时程,进行建筑结构在列车通过时的瞬态时程分析,得到建筑各关键位置的振动响应,在此基础上进行振动舒适度评价。

由于建立了一定范围的环境土体,需要设定合理的模型边界来模拟半无限空间,基于三维粘弹性人工

边界推导三维一致粘弹性边界,并在此基础上采用更适于有限元计算、效率更高的等效三维粘弹性边界单元来模拟列车振动问题中的环境土体半无限空间边界^[20]。

用于模拟三维一致粘弹性边界的等效边界单元一般采用八节点六面体单元,如图 12 所示。其中 h 为边界单元的法向厚度,其等效剪切和弹性模量 \tilde{G} 、 \tilde{E} 如式(3)所示。

$$\tilde{G} = hK_{BT} = \alpha_T h \frac{G}{R}, \quad (3)$$

$$\tilde{E} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} hK_{BN} =$$

$$\alpha_N h \frac{G}{R} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)},$$

其中: α_T 与 α_N 分别为切向及法向粘弹性人工边界修正系数, G 为介质的剪切模量, R 为波源至人工边界点的距离, ν 为等效泊松比, K_{BN} 和 K_{BT} 为人工边界弹簧的法向和切向刚度。

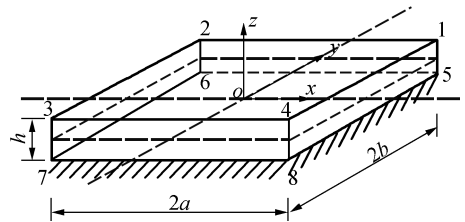


图 12 三维六面体单元示意

Fig. 12 Schematic diagram of three-dimensional hexahedral element

4 振动舒适度评价标准

振动舒适度的评价可采用测试点的峰值加速度来进行评价,或对测试点的竖向 Z 振级或分频振动加速度级进行评价,也可对测试点的四次方振动剂量值进行评价^[21-22]。

峰值加速度评价标准可参考《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)、《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)和 AISC 标准《Steel Design Guide Series 11—Floor Vibrations Due to Human Activity》。竖向 Z 振级或分频振动加速度级目前可采用《城市区域环境振动标准》(GB10070—88)、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)、《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T170—2009)。四次方振动剂量值可采用国家标准《建

筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)来进行评价。

《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)和《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)中对 Z 振级计算的计权因子不同,限值也不一样。《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)采用的是分频计权后加和的单值评价量 Z 振级;而《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T170-2009)为各 1/3 倍频程的铅垂向振动加速度级,二者的对比如表 1 所示。

表 1 GB 10070—88 和 JGJ/T 170—2009 各类区域 Z 振级限值
Tab. 1 GB 10070—88 and JGJ/T 170—2009 Z-vibration level limits for various regions

适用地带范围	GB 10070—88	JGJ/T 170—2009
	昼/夜/dB	昼/夜/dB
特殊住宅区	65/65	65/62
居民、文教区	70/67	65/62
混合区、商业中心区	75/72	70/67
工业集中区	75/72	75/72
交通干线道路两侧	75/72	75/72
铁路干线两侧	80/80	/

建筑中人员对二次结构噪声的感知程度远高于空气噪声。《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》(JGJ/T170—2009)中对城市轨道交通沿线居住建筑内部二次结构噪声的限值标准如表 2 所示,评价指标为等效 A 计权声级。

表 2 建筑物室内二次辐射噪声限值

Tab. 2 Indoor secondary radiation noise limit for buildings

区域分类	时段	
	昼间/dB	夜间/dB
	0 类 特殊住宅区	38
1 类 居住、文教区	38	35
2 类 商业混合区,商业中心	41	38
3 类 工业集中区	45	42
4 类 交通干线两侧	45	42

5 列车振动计算结果

列车振动的计算结果一般会给出以下内容,包括各层楼板竖向振动加速度峰值的统计,最大竖向 Z

振级统计,位移分布情况,加速度分布情况,以及各关心位置的加速度时程,加速度的频谱分析及主频分布。

各层楼板的竖向振动加速度峰值及最大竖向 Z 振级的统计主要为了进行舒适度评价。根据多年来的车致振动研究成果,典型高铁站房关键区域的竖向振动加速度峰值及最大竖向 Z 振级统计如表 3 所示,根据统计结果可进行舒适度评价及减振降噪措施的选取。

表 3 典型高铁站房振动加速度峰值及竖向 Z 振级统计

Tab. 3 Statistics of peak vibration acceleration and vertical Z-vibration level of typical high-speed railway station buildings

线路	峰值加速度/ Z 振级/		峰值加速度/ Z 振级/	
	(mm · s ⁻²)	dB	(mm · s ⁻²)	dB
惠环 CRH2 200 km/h	候车层		轨道层	
	28.73	57.85	380.8	79.16
佛山西客专 CRH2 160 km/h	站台层		承轨层	
	114.4	55.9	167.7	/
佛山西城际 CRH6 80 km/h	站台层		承轨层	
	146.2	62.5	204.7	/
昆明南 CRH2 140 km/h	站台层		候车层	
	116.6	51.4	26.43	66.6
丰台站 RH380 60 km/h 进出站	候车层(普)		候车层(高)	
	—	76.8	—	70.2
清河站 CRH2 140 km/h	候车层		候车层(减振)	
	—	76.7	—	74.4
广州站 ICE3/CRH2 200 km/h	候车层			
	—	51.1		
南京南 CRH2 250 km/h	地下一层		候车层	
	44.1	71.7	16.9	67.7
合肥西 CRH3 120 km/h	承轨层		候车层	
	359.9	89.1	72.83	78.8

位移及加速度分布情况主要为了了解列车行进过程中,振动响应在楼板范围内的分布及衰减情况,据此可对采取减振降噪措施的范围进行界定,典型的楼层竖向位移响应分布云图如图 13 所示。

关键位置的加速度时程、频谱分析及主频分布主要为了了解车致振动响应的时域特征及频域特征,据此可为减振降噪措施提供计算参数,包括减振弹簧的频率和阻尼、减振垫的厚度、刚度等。典型位置的加速度时程及频谱分析结果如图 14 和图 15 所示。

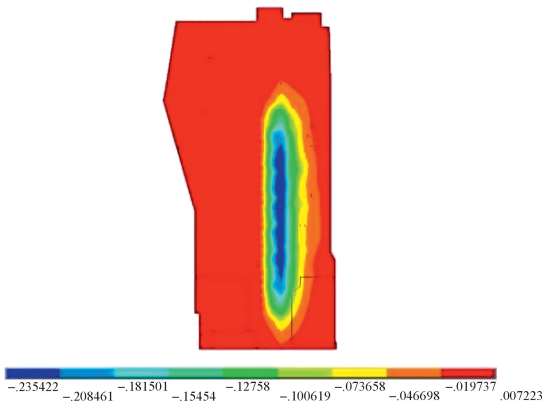


图 13 列车振动楼层竖向位移响应分布云图

Fig. 13 Cloud map of vertical displacement response of train vibration floors

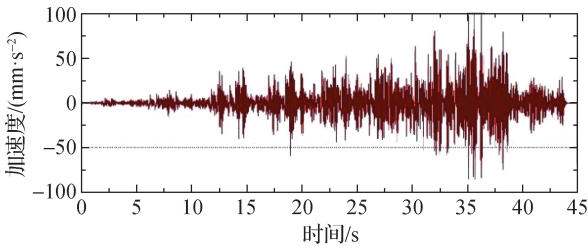


图 14 典型竖向加速度时程

Fig. 14 Typical vertical acceleration time history

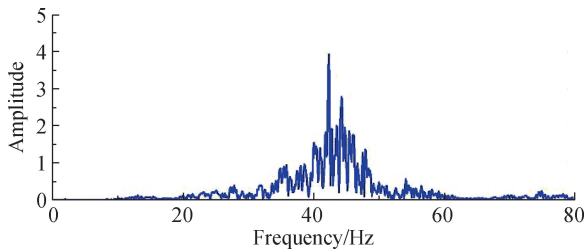


图 15 典型竖向加速度频谱

Fig. 15 Typical vertical acceleration spectrum

6 列车噪声影响评价

传统气动噪声的预测距离近,远场噪声计算软件(如 Cadna/A)虽有改善但是忽视了噪声传播的瞬时性.两者结合后,本研究采用传统 CFD 法计算列车周边气动噪声分布,组合点线面声源构建可移动列车噪声源,然后利用远场噪声软件计算列车对附近建筑的噪声影响^[23].

列车脉动压力的主频集中在 300 Hz~1 300 Hz,且无明显主频,属宽频噪声,因此采用宽频噪声模型计算列车周围气动噪声分布.模型网格采用变网格技

术,列车及周围采用动态网格,其他区域采用固定网格,如图 16 及图 17 所示.计算结果显示,车头表面噪声级约为 96 dB,车身周围噪声级约为 82 dB 左右,车尾噪声级约为 68 dB 左右.

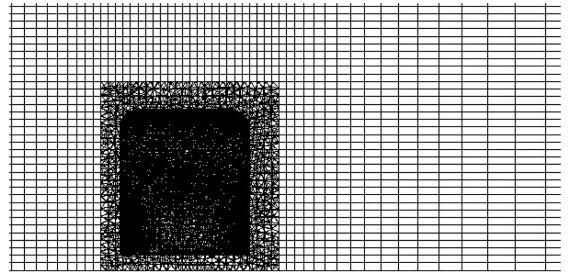


图 16 气动噪声计算模型及网格划分

Fig. 16 Aerodynamic noise calculation model and Grid division

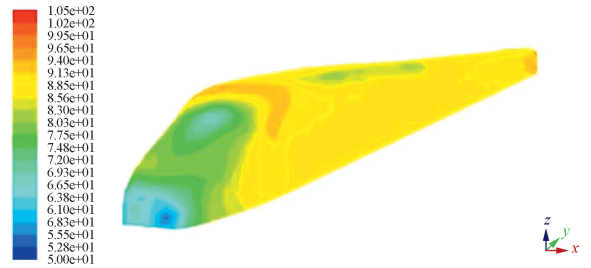


图 17 列车表面声压级分布

Fig. 17 Distribution of surface sound pressure levels on trains

建立列车噪声源计算模型,向关心位置移动该噪声源模型,可对其附近噪声传播情况进行模拟分析,如图 18 所示.

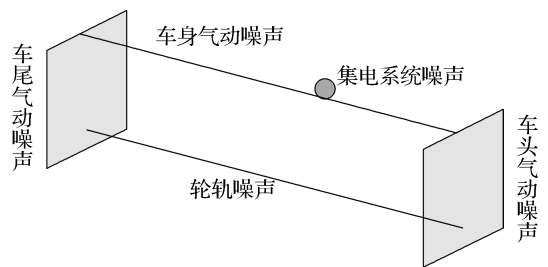


图 18 列车噪声源简化模型

Fig. 18 Simplified model of train noise source

将集电系统噪声作为点声源,将轮轨和气动噪声作为有限长线声源考虑,将车头和车尾处的声源定义为竖向面声源^[24],声源取值见表 4.

列车高速通过监测区域时,噪声在空气中传播且迅速衰减.为计算列车通过对建筑物的噪声影响,建立局部区域的噪声模型,对噪声传播介质空气进行网格划分,并考虑实际建筑做法的吸声和透声系数,建立的噪声计算模型如图 19 所示.

表 4 列车噪声源模型参数

Tab. 4 Parameters of train noise source model

噪声源	噪声源类型	噪声源高度/m	声级/dB
轮轨噪声	线声源	0.5	96
集电系统噪声	点声源	4.2	99
车身气动噪声	线声源	4.2	82
车头气动噪声	垂向面声源	2.35	96
车尾气动噪声	垂向面声源	2.35	68

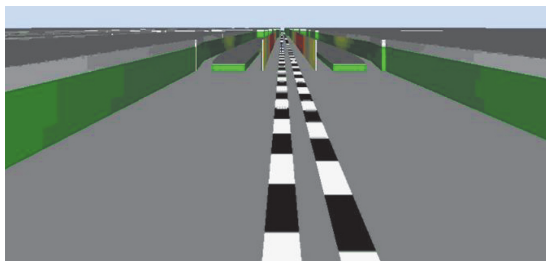


图 19 噪声传播的空间模型

Fig. 19 Spatial model of noise propagation

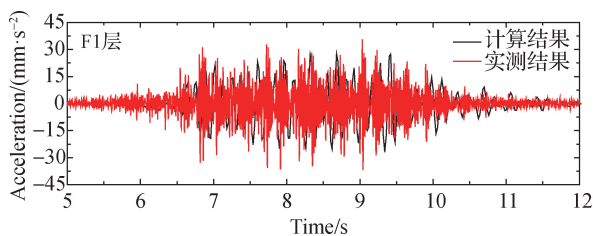
当位置点间隔距离较大时,时间间隔长,噪声瞬时值为离散值,以单车运行至每个位置点的瞬时噪声值与对应标准相比较来进行噪声评价.如条件许可,可缩短噪声位置的取值间隔,在此基础上得到更加连续的瞬时值,进而可以更加精确地计算暴露声级,计算方法如下所示.

$$T_{EL} = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \left[\int_0^T 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \right], \quad (4)$$

其中, T_{EL} (dB) 为列车行进过程中的噪声暴露声级; T_r (s) 为参考时间; T 为测量时段, $L_A(t)$ 为时间 t 的 A 声级.

7 振动测试方法及实例

列车运行引起的轮轨振动为低频振动,人体较为敏感的舒适频带约在 4 Hz~8 Hz 之间,因此在进行现场振动实测时应选用低频性能好的传感器.



现场实测时的振动测点根据有限元模拟结果进行选择^[25],选择的原则是将实测测点放在有限元计算结果中结构竖向振动加速度响应较大的位置,在相应的轴线上实测列车通过引起的竖向振动响应.一般情况下,测点围绕行车位置来进行布置,可由远及近布置测点,研究衰减规律.测试工况根据列车时刻表及测点布置方案进行设置,一方面要考虑布设仪器的方便性,另一方面也要考虑有限元计算中相同车次的对应性.

可采用两套测试仪器分别测试 Z 振级和加速度响应,两者相互校核.其中振级测量采用 AWA 6256B+ 环境振动分析仪,加速度测量采用 INV9500 系列无线数据采集器.

如果各测点各测次竖向加速度、卓越频率、竖向 Z 振级峰值一致性较好,没有出现偏差较大的数据,则可认为各测次的数据是有效的.测试数据主要和列车当时载荷情况、列车通过速度、列车加减速状态、该区域的轨道不平顺情况、隧道结构、土层特性等因素有关.

测量和计算竖向 Z 振级时,振动加速度有效值 a 采用计权均方根加速度,计算方法如下,时间记权常数为 1 s.

$$a = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中: $a_w(t)$ 作为时间函数的计权加速度,单位为 m/s^2 ; T 为测量时间长度,单位为 s.

振动加速度有效值 a 与基准加速度 a_0 之比的以 10 为底的对数乘以 20 记为竖向 Z 振级 VL_z , 单位为 dB.

$$VL_z = 20 \lg \left(\frac{a}{a_0} \right), \quad (6)$$

其中: a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} m/s^2$.

某项目计算加速度时程与实测加速度时程对比如图 20 所示.实测竖向加速度与有限元分析结果存在一定差别,但基本满足工程应用的精度要求.引起差别的原因主要在以下几个方面.

1) 有限元分析模型中由于对楼板、节点刚度的简

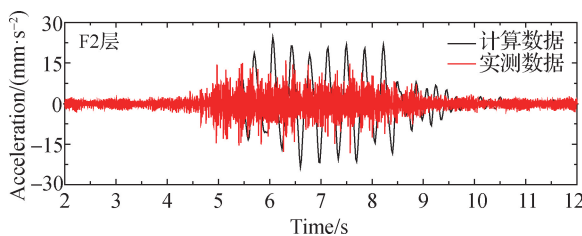


图 20 某项目结构竖向加速度时程对比

Fig. 20 Comparison of vertical acceleration time history of a project structure

化等因素,与实际情况存在一定偏差。

2) 结构成品状态与图纸存在一定的差异。

3) 振动分析的各种假定,如轨道不平顺状态、车辆的载重等都会按照最不利方式设置,造成列车振源输入的差别。

4) 受现场条件及有限元网格划分限制,现场实测点位与有限元响应提取点位不完全一致。

8 车致振动减振降噪

车致振动减振降噪的措施可分为振源控制、传播途径控制和受振体控制三大类^[26],每一类中可采取的减振降噪技术如图 21 所示。

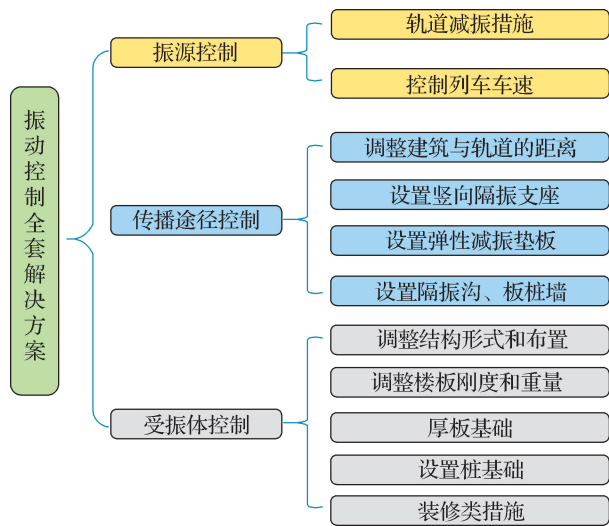


图 21 车致振动减振降噪措施

Fig. 21 Vehicle induced vibration reduction and noise reduction measures

已有研究表明,调整建筑与地铁线路的距离是减振的有效手段之一,随着距离的增加,振动峰值加速度下降非常明显,大概 30 m 以外认为地铁对建筑的振动可忽略不计. 隔振沟、板桩墙等措施可有效对振动的传播进行部分阻断,起到减小建筑振动响应的效果,隔振沟的效果主要取决于沟深与表面波的波长之比,沟深须大于振动波波长的 1/4 隔振效果才较为明显;隔振墙对水平方向的振动具有隔振效果,对垂向振动的隔振效果有限。

列车运行时建筑物的振动以竖向振动为主,因此可设置竖向隔振支座,包括弹簧支座和厚层橡胶支座等形式,如图 22 所示. 但是弹簧支座和厚层橡胶支座鲜见于高层建筑,因高层建筑在 seismic 作用下基础产生较大拉力,厚层橡胶支座承受拉力的能力较差,抗拉

承载力不满足要求;且竖向弹簧支座水平向刚度较小,导致结构水平位移过大。

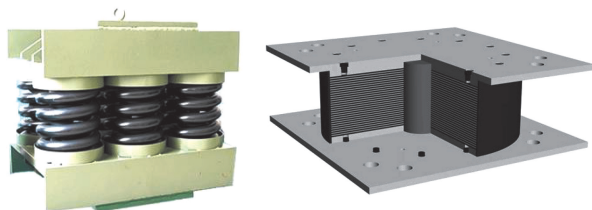


图 22 橡胶隔振支座示意图

Fig. 22 Schematic diagram of rubber vibration isolation support

隔振垫由高弹性聚氨酯或橡胶粘合纤维制成,其减振原理与隔振支座相似,铺设在基础底面和侧壁,降低建筑系统的竖向自振频率,减小高频共振响应. 但隔振垫板在 10 层以上高层建筑中的应用也较少,主要受限于基础压力及抗震构造的倾覆验算及基础受拉等要求。

另外,从结构设计角度,可通过调整结构形式、房间布置、楼板跨度等,调整楼板厚度、次梁高度,增大筏板厚度,设置桩基础或加大桩长等措施来减小振动响应,但是结构措施代价小的同时,减振效果也比较一般. 房屋装修措施是进行减振降噪的最后一道防线,例如采用浮筑楼板,隔音吊顶,墙面采用多层隔音结构等,可在一定程度上减小噪声影响. 轨道减振措施是减振效果较好的振源控制措施,包括浮置板道床、高级扣件及降低列车行驶速度等,虽然振源控制的减振效果最好,但是由于涉及到轨道交通运营,沟通及协调成本较高。

9 结 论

1) 以往车致振动分析过程中参数取值多依靠经验取值,本文在现场检测和有限元精确建模的基础上提出一套轮轨相互作用智能建模和振源数据精确评估的方法,大大提高了列车振动荷载模拟的精度及效率。

2) 本文采用流体力学软件,创新地通过光滑启动技术、动网格技术、隧道长度截取技术等对列车风压激励时程进行数值模拟,为车致振动分析的激励完备性提供了研究基础。

3) 本文提出了采用车辆-轨道系统模型计算列车激励和采用轨道-建筑系统计算建筑振动响应的两步走数值振动分析方法,并在此基础上进行了大量高铁站房的振动分析,取得了一手数据,从模型网格的划分、振源激励的模拟到振动响应数据的处理,为后续的振动分析与减振研究提供了依据。

4) 本文将 CFD 数值模拟与远场噪声传播计算相结合,实现了对列车行进至不同位置产生的瞬时噪声的模拟计算,提出了复杂场景下高铁穿越地下空间的气动噪声评价方法。

5) 本文在振动响应模拟分析的基础上,提出了一整套列车振动现场实测的方法,包括测试仪器的选型、测点的选择依据、测试工况的制定等,为车致振动理论分析与实测数据的对比提供了数据基础,并在多个高铁站房和机场枢纽得到应用,为本文主要创新内容提供了工程验证的方法。

6) 本文在以往多个高铁站房、地铁上盖、线路临建、机场枢纽振动分析和减振降噪的基础上,提出了轨道交通减振降噪的三类控制措施及各类减振措施的应用场景和优缺点,为实际工程项目确定合适的减振降噪技术提供了依据。

参考文献:

- [1] 刘枫,束伟农,高亮,等.大型交通枢纽建筑在高速列车运行影响下的振动控制关键技术研究与应用[J].建设科技,2022(7):78-82.
- [2] 张高明,赵鹏飞,唐虎,等.丰台站双层车场车致振动研究[J].建筑科学,2020,36(9):175-181.
- [3] 潘昌实,PANDE G N.黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J].土木工程学报,1984,17(4):19-28,18.
- [4] 李军世,李克钊.高速铁路路基动力反应的有限元分析[J].铁道学报,1995(1):66-75.
- [5] 夏禾.交通环境振动工程[M].北京:科学出版社,2010.
- [6] 梅元贵,赵海恒,刘应清.高速铁路隧道压力波数值分析[J].西南交通大学学报,1995,30(6):667-672.
- [7] 骆建军,高波,王梦恕.高速列车突入隧道时的三维非定常流的数值模拟[J].中国铁道科学,2005,26(1):15-19.
- [8] 张健伟,张高明,颜锋,等.北京新机场酒店建筑列车振动及列车风研究[J].建筑科学,2020,36(11):138-144.
- [9] 王逢朝,夏禾,张鸿儒.地铁列车振动对邻近建筑物的影响[J].北京交通大学学报,1999(5):45-48.
- [10] 张鹤年,阳建强,孙广俊,等.地铁运行诱发的环境振动数值模拟与模型预测[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(5):988-993.
- [11] 张高明,钱基宏,郭向荣,等.新广州站站房结构在列车高速通过时的振动舒适度研究[J].工程抗震与加固改造,2010,32(6):121-127.
- [12] 张高明.火车站站房结构在人行和列车激励作用下的振动舒适度问题研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2008.
- [13] 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):93-97.
- [14] 侯博文.地铁-房建联合体系耦合动力学及振动控制技术[D].北京:北京交通大学,2015.
- [15] 夏禾,张楠,曹艳梅.列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J].铁道学报,2004,26(4):93-98.
- [16] 何连华,符龙彪,陈凯,等.武汉火车站高速列车列车风数值模拟研究[J].建筑结构,2009,39(1):23-24,53.
- [17] 周丹.长大隧道、隧道群空气动力效应算法研究及应用[D].长沙:中南大学,2007.
- [18] 颜锋,祁跃,何连华,等.北京大兴国际机场的列车振动影响研究[J].建筑科学,2017,33(5):8-13.
- [19] 颜锋,张楠,张高明,等.南京南站高速列车对建筑结构振动影响实测及分析[J].建筑科学,2017,33(11):92-98.
- [20] 谷音,刘晶波,杜义欣.三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J].工程力学,2007,24(12):31-37.
- [21] International Standard. Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—Part 1: general requirements: ISO2631-1 (1997) [S]. Chicago International Standard Organization,1997.
- [22] American National Standard. Floor vibrations due to human activity:Steel design guide series 11[S]. [S. l.]: America Institute of Steel Construction,1997.
- [23] 国家环境保护局.城市区域环境振动标准:GB 10070—1988[S].北京:中国标准出版社,1988.
- [24] TALOTTE C,GAUTIER P E,THOMPSON D J,et al. Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey [J]. Journal of Sound and Vibration,2003,267(3):447-468.
- [25] 尹国高,张高明,李敬学,等.京沪高铁徐州东站旅客人行天桥振动研究[J].建筑结构,2014,44(1):53-57.
- [26] 颜锋,钱基宏,赵鹏飞,等.武汉火车站高速列车对建筑结构的振动影响研究[J].建筑结构,2009,39(1):25-27,58.

(责任编辑:汪 军)