DOI: 10.3901/JME.2020.20.146

高速轨道结构振动及传递特性*

辛欣¹ 任尊松¹ 李响²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 江苏师范大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要: 高速列车的快速发展使板式无砟轨道得以广泛应用。利用有限元分析软件 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK, 建立车辆-弹性轨道耦合动力学模型, 分析车辆运行的安全性和平稳性, 研究轨道系统的位移、加速度、加速度功率谱密度、载荷特性, 以及不同速度对轨道系统的振动影响, 并对系统振动的主要影响因素进行初步探究。结果表明, 轨道结构的垂向振动位移、加速度及载荷在由上至下传递过程中呈递减趋势, 且钢轨到轨道板的衰减幅度大于轨道板到底座; 轨道系统的振动能量主要集中在 0~150 Hz 范围内, 大于 300 Hz 的钢轨振动能量经扣件衰减后基本未被向下传递, 且速度升高, 功率谱密度峰值出现的位置向右移动; 速度为 300 km/h 时, 钢轨垂向加速度功率谱密度小于 100 Hz 的峰值频率主要与钢轨固有模式有关, 大于 100 Hz 的峰值频率呈倍频关系, 且与轨道系统固有属性相关。联合仿真提高了研究效率, 揭示了车辆-轨道系统的垂向振动特性及传递规律, 为工程应用提供了参考依据。

关键词: 耦合模型; 弹性轨道; 振动特性; 联合仿真

中图分类号: TG156

Vibration Characteristics and Transmission of High-speed Track Structure

XIN Xin¹ REN Zunsong¹ LI Xiang²

(1. College of Mechanical and Electronic Control, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. School of Mechanic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116)

Abstract: With the rapid development of high-speed railway, ballastless slab track is widely used. By using finite element analysis software ANSYS and multi-body dynamics software SIMPACK, a vehicle-flexible track coupled dynamic model is established. The safety and stability of vehicle operation are analyzed and the displacement, acceleration, acceleration power spectral density, load characteristics of the track system are studied. The effects of different speeds on the track vibration and the main influencing factors of the system vibration are also studied. The results show that the vertical vibration displacement, acceleration and load of the track structure decrease from top to bottom, and the attenuation amplitude from rail to track plate is larger than that from slab to base; the vibration energy of the track system is mainly concentrated in the range of 0-150 Hz, while the rail vibration energy more than 300 Hz is basically not transmitted downward through the fastener attenuation, and peaks of power spectral density shift to the right with the speed increases; when the vehicle runs at the speed of 300 km/h, the peak frequencies of the rail vertical acceleration power spectral density less than 100 Hz are mainly related to the rail natural property, and peak frequencies greater than 100 Hz which present multiple relationship are related to the inherent property of track system. The co-simulation improves the research efficiency and the vertical vibration characteristics and transmission law of vehicle track system are revealed which provide a scientific evidence for engineering application.

Key words: coupled model; flexible track; vibration characteristics; co-simulation

0 前言

轮轨动态作用力随着列车运行速度的提高不断

增强, 既影响了列车运行的安全性和平稳性, 又影响了轨下结构的振动变形及传递规律。轨道系统作为列车行驶过程中的基础部件, 不仅要具有良好的减振性能, 承受来自车辆系统的振动与冲击, 还要为其安全可靠运行提供连续平稳的行车环境。板式无砟轨道由于具备稳定性好、平顺性高、维修周期长等优点, 因此在高速铁路轨道中得以广泛应用^[1]。

* 国家重点研发计划任务课题(2017YFB1201304-10)和国家自然科学基金(11790281, 51575036)资助项目。20191013 收到初稿, 20200429 收到修改稿

列车高速运行产生的剧烈轮轨作用力在向下传递的过程中,对轨道结构产生显著的影响甚至破坏。为了研究轨道系统在列车通过时的振动特性以及振动在钢轨及轨下各层之间的传递关系,国内外诸多专家学者将轨道结构建立为弹性模型,并对此做了相关研究与分析。VERBIC^[2]通过边界有限元法建立了无砟轨道垂向动力学计算模型,分析了系统的垂向动力学振动特性。ADAM 等^[3]提出了一种设计模型,将钢轨考虑成置于连续弹簧阻尼单元上的无限长柔性梁模型,用于确定不同轨道系统在恒速移动荷载作用下的动力响应。翟婉明^[4-5]率先提出了车辆-轨道耦合动力学理论,并且首次比较了传统模型与耦合模型得到的振动形态,分析了两种模型的不同适用范围。王开云等^[6]开发了 TTISIM(Train and track interaction simulation)仿真系统,研究了车辆在弹性轨道上运行时的动力学性能。蔡成标等^[7]将轨道板考虑成弹性薄板结构,利用 TTBSIM 仿真软件建立了车-线-桥耦合动力分析模型,能够准确评估系统的动力学性能。陈果等^[8]对比分析了传统车辆模型和车辆-轨道耦合动力学模型得到的振动响应,说明了耦合模型对于研究高频振动的必要性。李宇翔^[9]将轨道板考虑成板单元,利用动力学和有限元分析软件联合仿真建立了车辆-弹性轨道耦合模型,得到了轨道系统部分结构的垂向动态响应。向俊等^[10]提出横向有限条法结合板段单元建立了车辆-轨道垂向振动模型,分析了耦合系统的垂向振动特性。徐庆元等^[11]考虑了无砟轨道结构之间的动力系数,建立了车辆-轨道-路基耦合模型,分析不同工况下轨道结构及车辆部件之间的动态响应。YANG 等^[12]利用复合轨道单元法结合总势能守恒原理建立了板式轨道系统有限元方程,分析了轨道随机不平顺和车辆速度对轨道动力响应的影响。AGGESTAM 等^[13]利用态叠加法和扩展状态空间矢量方法,对车辆与轨道的相互作用进行了建模,并计算了系统的垂直动态响应。TANG 等^[14]使用 GPMBS 软件建立车辆模型,研究车辆动力学性能,充分利用成熟软件的功能,提高了研究效率。YANG 等^[15]建立了车辆/无砟轨道空间耦合动力学模型,并采用混合显式隐式时间积分法对其进行了有效求解,证明了模型的可靠性和优越性。

传统的轨道系统振动特性研究中,通常将轨道板、混凝土底座等结构等效为板壳单元,钢轨简化为空间梁单元,最终形成梁-板-板振动模型。相比梁单元和板壳单元,三维实体单元模拟轨道结构更贴近系统的真实结构和受力状态。因此本文以 CRTS I 型板式无砟轨道为研究对象,通过网格划分软件

Hypermesh 建立了轨道系统有限元模型,考虑一定频率范围内轨道结构的全部模态信息,利用有限元分析软件 ANSYS 和多体动力学软件 SIMPACK,建立了车辆-弹性轨道-路基耦合动力学模型,实现了模型的可视化,得出了轨道系统动态振动特性及基本传递规律。

1 车辆-轨道系统动力学模型

1.1 弹性轨道模型的建立

CRTS I 型板式无砟轨道主要包括钢轨、扣件系统、轨道板、砂浆层、混凝土底座、凸型挡台、环形树脂层及路基结构,目前已被应用在我国投入运营的多条高速铁路,其实体结构图如图 1 所示。

图 1 CRTS I 型板式轨道三维模型图

为了提高有限元模型的网格质量,在保证计算精度的前提下缩短计算时间,建模时忽略了凸形挡台和环形树脂层对系统垂向振动特性的影响,并将路基以下视为刚性体。由于砂浆层和路基材料的弹性模量要远小于轨道板和混凝土底座,因此将砂浆层、路基和扣件系统均等效为线性弹簧阻尼单元,考虑其纵、横、垂三向刚度和阻尼特性,在 SIMPACK 软件中用力元模拟。该处理方法既符合结构特点又能降低模型单元数量,缩短计算时间。轨道系统部分有限元模型如图 2 所示。

(a) 钢轨有限元模型

(b) 轨道板和混凝土底座有限元模型

图 2 轨道系统有限元模型

轨道线路设为直线, 钢轨为 CHN60 轨, 轨距 1.435 m, 轨底坡为 1/40, 扣件纵向间距为 0.625 m。车辆及轨道系统模型的其他主要参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 车辆系统主要参数

结构	参数名	量值
车体	车辆定距 L_c/m	17.375
	质量 M_c/t	38.884
	转动惯量 $I_{cx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.125×10^6
	转动惯量 $I_{cy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.905×10^6
	转动惯量 $I_{cz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.797×10^6
转向架	轴距 L_b/m	2.5
	质量 M_b/kg	2 200
	转动惯量 $I_{bx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.236×10^3
	转动惯量 $I_{by}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.236×10^3
	转动惯量 $I_{bz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.336×10^3
轮对	质量 M_w/t	1 517
	转动惯量 $I_{wx}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	693
	转动惯量 $I_{wy}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	118
	转动惯量 $I_{wz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	693
一系悬挂	垂向刚度 $K_{pz}/(\text{kN}/\text{m})$	886
二系悬挂	垂向刚度 $K_{sz}/(\text{kN}/\text{m})$	203

表 2 CRTS I 轨道模型主要参数

结构	参数名	量值
扣件	横向刚度 $K_x/(\text{MN}/\text{m})$	30
	垂向刚度 $K_z/(\text{MN}/\text{m})$	55
	横向阻尼 $C_x/(\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m})$	10
	垂向阻尼 $C_z/(\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m})$	25
轨道板	长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $\frac{a}{\text{m}} \times \frac{b}{\text{m}} \times \frac{h}{\text{m}}$	$4.95 \times 2.4 \times 0.19$
	弹性模量 E_s/Pa	3.6×10^{10}
	密度 $\rho_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 500
	泊松比 μ_s	0.3
混凝土底座	弹性模量 E_b/Pa	3.3×10^{10}
	密度 $\rho_b/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 500
	泊松比 μ_b	0.2

本文利用有限元软件将轨道结构处理成弹性体, 结合动力学软件建立车辆-弹性轨道-路基耦合动力学模型, 通过提取弹性轨道主节点的位移、速度以及加速度等动力学结果来研究轨道整体振动特性。其具体建模流程如下^[16]。

利用有限元分析软件 ANSYS 建立轨道三维有限元模型, 并基于 Guyan 缩减理论对其进行子结构分析^[17], 生成包含轨道结构信息和模态信息的*.Sub 和*.Tcms 文件, 将其导入动力学软件 SIMPACK,

重新定义轮对和弹性轨道之间约束关系。

1.2 车辆-弹性轨道耦合系统动力学模型的建立

本文基于车辆-轨道耦合动力学理论, 将考虑了一定范围内频率和模态信息的弹性轨道模型导入 SIMPACK 软件, 建立了车辆-弹性轨道-路基耦合动力学模型。模型中车辆子系统包含一节车体、两个转向架和四位轮对, 车体与转向架之间以及转向架与轮对之间的悬挂系统均简化为线性弹簧阻尼单元。轮轨之间通过 Hertz 非线性接触理论定义约束关系, 使车辆子系统和轨道子系统联结成一个有机整体, 其耦合模型如图 3 所示。

图 3 车辆-弹性轨道耦合模型

弹性轨道纵向长度对结果精度和计算时长均有影响, 较长的弹性轨道可以有效地降低边界效应, 同时也延长了计算时间。根据文献[18]可知, 通常建立三块板弹性轨道, 取中间板计算结果作为分析对象。本文在平衡计算精度与时长之后, 建立了 5 块板长(24.95 m)弹性钢轨和弹性轨道模型, 通过增加扣件等连接件的刚度值来模拟刚性轨道, 实现车辆在刚性和弹性轨道上运行结果的对比。

为了缩短车辆在弹性轨道不平稳运行时间, 因此在弹性轨道之前设置 50 m 长刚性轨道。最终完成的车辆-弹性轨道-路基耦合动力学模型如图 4 所示。

图 4 车辆-弹性轨道-路基耦合动力学模型

2 耦合模型运行安全性及平稳性分析

由于轨道系统的振动响应与观测点位置有关, 如钢轨扣件处和两扣件中间位置处振动结果不同, 轨道板和底座位于钢轨正下方位置处节点振动响应与中间位置处存在差异, 此处对文中选取结果的位置加以说明。图 5 为结果选取段及结构观测点位置示意图, 图中实心圆点代表观测点。图 5a 显示车辆

在弹性轨道上运行时选取中间三块轨道板处稳定值进行分析, 观测点均位于弹性轨道左轨纵向中间位置处, 与扣件系统处于同一垂直面内; 图 5b 中 1、2 和 3 点分别为钢轨、轨道板及底座结果观测点。

图 5 稳定结果选取段及观测点位置示意图

车辆运行安全性和平稳性是车辆-轨道耦合系统应该满足的基本要求, 脱轨系数和轮重减载率是评估安全性的关键指标, 车体振动加速度是判断平稳性的最直接依据^[19]。我国高速铁路客运动车组动力学性能评价体系规定, 脱轨系数和轮重减载率的安全限值分别为 0.8 和 0.6, 车体的垂向振动加速度最大值应小于 0.13 g。本节主要分析了 300 km/h 速度下车辆-弹性轨道-路基模型的安全性及平稳性。

图 6 为 1 位轮对脱轨系数时程图。由图可知, 刚性段和弹性段脱轨系数的最大值分别为 0.09 和 0.07, 前者约为后者 1.29 倍, 轨道结构弹性化处理对脱轨系数的影响较小。

图 6 脱轨系数时程图

脱轨系数在判断判断车辆运行是否安全时并不充分, 因此通过式(1)计算出轮重减载率加以补充

$$D = \Delta P / P \quad (1)$$

式中 D ——轮重减载率;
 ΔP ——轮重减载量;
 P ——平均轮重。

图 7 为轮重减载率时程曲线, 图中刚性段和弹性段轮重减载率的最大瞬时值分别达到 1.0 和 0.44, 刚性段结果已超过安全限值, 而弹性段结果仍小于安全值, 前者约为后者的 2.27 倍, 相比脱轨系数, 弹性轨道对轮重减载率的影响较大。

图 7 轮重减载率时程图

由图 6 和图 7 结果可知, 车辆在弹性轨道阶段稳定运行时, 脱轨系数和轮重减载率均小于安全限值, 满足运行安全性要求, 但考虑弹性轨道的影响可以提高车辆运行安全性评估的准确性。

为对比两种轨道模型下车辆运行平稳性差异, 图 8 给出了车体垂向振动加速度时间历程。结果显示车体垂向最大加速度在刚性及弹性段分别为 0.26 m/s^2 和 0.46 m/s^2 , 后者为前者的 1.77 倍, 均小于规定限值, 满足车体运行平稳性要求。

图 8 车体垂向加速度时程图

车辆运行速度的提高增大了轮轨动态作用力, 严重威胁了轨道系统的结构健康, 因此相关标准将轮轨垂向和横向力作为衡量轨道结构动力作用的重要指标。我国铁路方面车辆系统动力学标准规定, 动车组在运行过程中轮轨垂向作用力的最大值不得超过 170 kN, 轮轨横向力限值由式(2)确定

$$Q \leq 0.4 \times (P_1 + P_2) \quad (2)$$

式中 Q ——轮轨横向力;

P_1 , P_2 ——左、右轮静载荷。

图9和图10为轮轨力时程曲线,图中结果显示刚性段及弹性段的轮轨动态作用力均小于标准规定的安全限定值,符合轨道结构动力评价标准。其中轮轨垂向力的弹性段结果较刚性段相对稳定、幅值变化较小,主要因为弹性轨道在一定程度上衰减了轮轨之间的动态冲击作用。对于轮轨横向力而言,弹性段结果变化幅值略微大于刚性段,这与文献[20]提出的弹性段钢轨对轮对的约束作用要小于刚性钢轨相符。

图9 轮轨垂向力时程曲线

图10 轮轨横向力时程曲线

3 轨道系统振动传递规律

本文主要研究了车辆高速通过弹性轨道时,在武广线实测轨道激励条件下,轨道各部分结构的动态响应,即速度300 km/h时,钢轨、轨道板和底座的位移、加速度、加速度功率谱密度响应特征及垂向传递规律,扣件、砂浆和路基等效动应力的变化情况;同时比较了车辆不同运行速度对轨道结构振动特性的影响。

3.1 轨道系统位移及加速度变化特征

图11为钢轨、轨道板和混凝土底座观测点垂向振动位移时程曲线,其结果与文献[21]结果一致。

由图可见,曲线出现两次较大、两次较小峰值,即2、4位峰值较1、3位更为明显。经计算知1、3位间距17.33 m,1、2位间距2.41 m,近似于车辆定距和转向架轴距,与车辆实际运行中四位轮对通过某点造成响应剧增情况相符。下文中扣件支反力以及扣件、砂浆、路基动应力时程曲线出现的峰值情况可做类似解释。钢轨、轨道板以及混凝土底座的节点垂向位移的峰值依次分别为0.91、0.27、0.20 mm,振动位移从钢轨到轨道板和从轨道板到底座的减少百分比分别为70.33%和25.93%。

图11 轨道结构观测点垂向位移图

图12为钢轨、轨道板和底座观测点垂向振动加速度时程曲线,结果显示,钢轨、轨道板以及混凝土底座的节点垂向加速度的峰值依次为47.82、7.06和7.01 m/s^2 ,振动加速度从钢轨到轨道板和从轨道板到底座的衰减百分比分别为85.24%和0.71%。

图12 轨道各结构观测点垂向加速度图

综合轨道结构的位移及加速度分析可知,振动向下传递的过程中呈现出明显的递减趋势。钢轨到轨道板振动位移及加速度的衰减百分比要远大于轨道板到底座的衰减百分比,表明扣件对振动的衰减作用要远大于砂浆,且振动传递到路基时其破坏作用已被削弱。

3.2 轨道系统加速度功率谱密度变化特征

时域分析结果不能全面反映轨道系统振动传递

特性, 因此对轨道各结构垂向振动加速度以及轮轨和扣件垂向力进行功率谱密度分析。图 13 为钢轨、轨道板和混凝土底座观测点垂向振动加速度功率谱密度图。结果表明, 轨道结构的振动能量主要集中在 0~150 Hz 范围内, 且钢轨的振动能量远大于轨道板和底座, 后两者在数值上只存在微小差异, 钢轨的高频振动经扣件系统衰减作用基本未被向下传递。三者低频段能量峰值出现的频率较为一致, 钢轨垂向加速度功率谱密度峰值频率(以下均简称钢轨峰值频率)分别为 43.44 Hz、71.68 Hz、91.23 Hz、341.03 Hz、671.20 Hz 及 1 007.88 Hz。

图 13 轨道各结构垂向加速度功率谱密度图

图 14 为钢轨部分垂向弯曲振型图, 可知钢轨在固有频率 46.45 Hz、73.99 Hz、90.01 Hz 处出现 7、9、10 阶垂向弯曲振型, 十分接近钢轨 100 Hz 范围内的峰值频率。因此钢轨垂向加速度功率谱密度在 100 Hz 以下的峰值频率主要与钢轨固有模态有关。

图 14 钢轨垂向弯曲振型图

从数值上看, 340.67 Hz、671.33 Hz 和 1 007.88 Hz

呈倍频关系。为进一步确认这些频率是否与轨道激励相关, 本文计算了无轨道激励时钢轨加速度和轮轨力功率谱密度。由图 15、16 可见, 无轮轨激励工况下, 这三个频率依然存在。由此可见, 这三种频率与轨道激励无关, 与轨道系统结构相关。

图 15 钢轨加速度无激励功率谱密度图

图 16 轮轨垂向力功率谱密度图

3.3 轨道系统载荷变化特征

为了分析载荷在轨道系统中的传递规律, 利用式(3)计算出扣件、砂浆和路基力元作用力。通过作用力计算由该力元造成的应力变化, 比较扣件动应力、CA 砂浆动应力以及路基动应力之间的关系

$$F = K_v \times \Delta Z + C_v \times \Delta \dot{Z} \quad (3)$$

式中 K_v ——连接件的等效垂向刚度;

C_v ——等效垂向阻尼;

ΔZ ——力元两端位移差;

$\Delta \dot{Z}$ ——力元两端速度差。

图 17 和图 18 分别为车辆通过弹性轨道时, 同一观测点位置处扣件支反力时程曲线以及扣件、砂浆、路基等效动应力时程曲线, 其总体规律与文献[22]结果一致。

由图 18 可知, 扣件动应力最大值为 0.38 MPa, 砂浆与路基动应力最大值为 0.05 MPa 和 0.01 MPa, 分别小于其容许应力 1.0 MPa 和 0.18 MPa。钢轨动

图17 钢轨支点反力时程曲线

图18 钢轨、砂浆及路基动应力时程曲线

应力最大值约为砂浆动应力最大值的 7.6 倍, 砂浆动应力最大值约为路基动应力最大值的 5 倍。可知载荷的传递规律与位移和加速度相似, 经过弹性阻尼元件的衰减作用逐渐减小, 且钢轨到轨道板的衰减百分比要大于轨道板到路基的衰减百分比。

3.4 不同速度对轨道系统振动特性的影响

为了探究车辆运行速度对轨道系统振动特性及传递规律的影响, 图 19 和图 20 给出了钢轨、轨道板以及底座在车辆运行速度在 200~400 km/h(间隔 25 km/h)区间内垂向振动位移及加速度最大值, 表 3 和表 4 对比了轨道结构在不同速度区间内位移和加速度峰值变化速率。

图19 不同速度下轨道各层节点垂向位移峰值图

图20 不同速度下轨道各层节点垂向加速度峰值图

结合图表可知, 车辆运行速度从 200 km/h 增加至 400 km/h 时, 轨道系统各结构位移和加速度峰值虽未与运行速度呈现正相关性, 但总体呈增大趋势, 且钢轨、轨道板和底座的变化情况基本一致。在 350~400 km/h 速度区间内, 轨道结构的速度和加速度峰值变化速率较低速阶段更为明显。

表3 不同速度区间位移峰值增幅对比表

	速度区间/(km/h)							
	200~225	225~250	250~275	275~300	300~325	325~350	350~375	375~400
钢轨(%)	0.64	4.65	6.03	-0.92	-6.17	-2.09	22.40	3.92
轨道板(%)	-1.09	0.49	3.41	1.77	-5.40	0.85	22.27	7.13
底座(%)	4.00	-0.18	1.89	-3.03	2.85	-3.25	23.30	0.10

表4 不同速度区间加速度峰值增幅对比表

	速度区间/(km/h)							
	200~225	225~250	250~275	275~300	300~325	325~350	350~375	375~400
钢轨(%)	17.03	40.78	18.49	14.65	-8.17	0.87	42.90	19.91
轨道板(%)	0.79	30.75	13.74	10.33	-6.25	-24.26	20.41	46.18
底座(%)	0.72	31.68	29.11	14.10	-4.57	-8.29	21.22	15.04

由于钢轨的动态响应较轨道板和底座更为明显, 且三者具有相似的频域变化特征, 因此将钢轨功率谱密度作为研究对象, 进一步分析钢轨振动特性与列车运行速度之间的关系。

图 21 为不同运行速度下钢轨观测点振动加速

图21 不同速度下钢轨垂向加速度功率谱密度图

度功率谱密度图。结果显示随着运行速度的提高, 功率谱密度值不断增大; 同时在 300~1 350 Hz 范围内, 功率谱密度峰值随着速度的升高出现明显的向高频段移动的趋势。

4 结论

(1) 经过扣件系统和砂浆结构的减振作用, 轮轨力激起的钢轨、轨道板和底座观测点的垂向振动位移、加速度及动应力载荷依次递减。且钢轨到轨道板的位移及加速度的衰减百分比大于轨道板到底座, 说明扣件系统的隔振能力要大于砂浆结构。

(2) 轨道结构的振动能量主要集中在 0~150 Hz 范围内, 振动峰值出现的频率较为一致, 钢轨高频振动能量经扣件系统衰减作用基本未被向下传递。速度为 300 km/h 时, 钢轨垂向加速度功率谱密度小于 100 Hz 的峰值频率主要与钢轨固有振动模态有关, 大于 100 Hz 的峰值频率呈倍频关系, 且与轨道系统结构相关。

(3) 随着列车运行速度的提高, 钢轨、轨道板以及混凝土底座结构的垂向振动位移及加速度整体呈递增趋势; 钢轨垂向振动加速度功率谱密度值不断增大, 同时在 300~1 350 Hz 范围内功率谱密度峰值有向更高频移动的倾向。

由于轮轨力功率谱密度在 341.03 Hz、671.20 Hz 及 1 007.88 Hz 处出现峰值, 目前尚无法确定该现象是由扣件约束和轨道固有属性引起还是由其他因素造成, 因此需要在后续研究中进一步深入。

参 考 文 献

- [1] 蔡成标, 颜华, 姚力. 遂渝线无砟轨道动力学性能研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 107(8): 39-44.
CAI Chengbiao, YAN Hua, YAO Li. Study on dynamic performance of ballastless Track of Suining-Chongqing railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 107(8): 39-44.
- [2] VEBIC B. Investigating the dynamic behavior of rigid track[J]. Railway Gazette International, 1997, 153(9): 585-586.
- [3] ADAM D, BRANDL H, PAULMICHL I. Dynamic aspects of rail tracks for high-speed railways[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(4): 281-291.
- [4] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics[M]. 4th ed.Beijing: Science Press, 2015.
- [5] 翟婉明. 铁道车辆在刚性及弹性轨道模型上的振动模拟分析[J]. 铁道车辆, 1994(1): 15-20.
ZHAI Wanming. Vibration simulation analysis of railway vehicles on rigid and elastic track models[J]. Railway Vehicle, 1994(1): 15-20.
- [6] 王开云, 丁国富, 翟婉明. 机车车辆-轨道空间耦合动力学性能仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2737-2740.
WANG Kaiyun, DING Guofu, ZHAI Wanming. Simulation system of vehicle-track spatial coupling dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2737-2740.
- [7] 蔡成标, 翟婉明, 王开云. 高速列车与桥上板式轨道动力学仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 57-60.
CAI Chengbiao, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Dynamics simulation of interactions between high-speed train and slab track laid on bridge[J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 57-60.
- [8] 陈果, 翟婉明, 蔡成标, 等. 传统车辆模型与车辆-轨道耦合模型的垂向随机振动响应分析及比较[J]. 铁道学报, 1999, 21(5): 70-74.
CHEN Guo, ZHAI Wanming, CAI Chengbiao, et al. Comparison on vertical random vibration responses of traditional vehicle model with vehicle-track coupling model[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(5): 70-74.
- [9] 李宇翔. 基于 SIMPACK 和 ANSYS 路基上 CRTS I 板式轨道列车运行安全性和舒适性的可靠度分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LI Yuxiang. Based on the SIMPACK and ANSYS subgrade CRTS I slab track train running safety and comfort in reliability analysis[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [10] 向俊, 赫丹. 高速列车与博格板式轨道系统竖向振动分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 1-5.
XIANG Jun, HE Dan. Analysis model of vertical vibration of high-speed train and Bögle slab track system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 1-5.
- [11] 徐庆元, 李斌, 周智辉. CRTS I 型板式无砟轨道线路路基不均匀沉降限值研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 1-6.
XU Qingyuan, LI Bin, ZHOU Zhihui. Study on the

- limited value for the uneven settlement of subgrade under CRTSI type slab track[J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 1-6.
- [12] YANG Xinwen, GU Shaojie, ZHOU Shunhua. Effect of track irregularity on the dynamic response of a slab track under high-speed train based on the composite track element method[J]. Applied Acoustics, 2015, 153(9): 72-84.
- [13] AGGESTAM E, NIELSEN J, BOLMSVIK R. Simulation of vertical dynamic vehicle-track interaction using a two-dimensional slab track model[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(11): 1633-1657.
- [14] TANG Zhao, YUAN Xiaolin, XIE Xin, et al. Implementing railway vehicle dynamics simulation in general-purpose multibody simulation software packages[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 131: 153-165.
- [15] YANG Jianjin, ZHU Shengyang, ZHAI Wanming. A novel dynamics model for railway ballastless track with medium-thick slabs[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 78: 907-931.
- [16] 孙刚, 任尊松, 辛欣, 等. 高速动车组齿轮传动系统振动特性[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 104-111.
- SUN Gang, REN Zunsong, XIN Xin, et al. Dynamics of gear transmission system of high-speed vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 104-111.
- [17] 郭利康, 张四放, 杨荣山, 等. CRTS I 型板式无砟轨道脱空状态对结构模态的影响[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 29-32.
- GUO Likang, ZHANG Sifang, YANG Rongshan, et al. The influence of CRTS I slab track disengaging on structural modal[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(9): 29-32.
- [18] 李响, 任尊松, 徐宁. 地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道的钢轨波磨研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 70-76.
- LI Xiang, REN Zunsong, XU Ning. Study on rail corrugation of steel spring floating slab track on subway with small radius curve track[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 70-76.
- [19] 任尊松. 车辆动力学基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- REN Zunsong. Foundation of railway vehicle dynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [20] 王开云, 翟婉明, 蔡成标. 车辆在弹性轨道结构上的横向稳定性分析[J]. 铁道车辆, 2001, 39(7): 1-5.
- WANG Kaiyun, ZHAI Wanming. Lateral stability analysis of cars on resilient track structure[J]. Railway Vehicle, 2001, 39(7): 1-5.
- [21] LEI Xiaoyan. Analysis of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vehicle profile [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258 (1): 147-165.
- [22] 蔡成标, 徐鹏. 高速铁路框架型板式轨道动力学分析[J]. 振动工程学报, 2011, 24(2): 164-169.
- CAI Chengbiao, XU Peng. Dynamic analysis for frame slab track of high-speed railway[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(2): 164-169.
-
- 作者简介: 辛欣, 女, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为轨道车辆系统动力学。
E-mail: 17116389@bjtu.edu.cn
- 任尊松(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轨道车辆动力学、结构强度及可靠性。
E-mail: zsren@bjtu.edu.cn