文章编号:1674-2974(2016)01-0053-08

轨道不平顺短波分量对列车-简支梁桥 耦合振动的影响^{*}

朱志辉^{1,2†},王力东¹,杨乐¹,余志武¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室,湖南 长沙 410075)

摘 要:轨道不平顺作为车-桥耦合振动的主要激励源,直接影响桥梁及高速列车运行 的安全性和舒适性.为研究轨道不平顺中短波分量对列车-简支梁桥耦合系统动力响应的影 响规律,以高速铁路 32 m 简支箱梁为例,采用德国高速低干扰轨道不平顺谱生成轨道不平 顺样本,建立了列车-轨道-桥梁耦合系统空间动力学分析模型.对比分析了 5 种不同最短截 止波长的轨道不平顺样本对耦合系统振动响应的影响规律.研究结果表明:轨道不平顺样本 中 1 m 左右的短波长分量会显著增加轮轨力、轮重减载率、脱轨系数和桥梁跨中加速度,但 对桥梁跨中位移、轮轨偏移量和车辆振动加速度的影响较小;1~2 m 的短波长成分是引起 轮重减载率超标的主要因素,减少轨道不平顺中 1~2 m 的短波长分量可以有效提高列车 行车安全性指标.

关键词:高速铁路;轨道不平顺;动力响应;车桥耦合系统;轮重减载率 中图分类号:U213 **文献标识码:**A

Effect of Short-wavelength Components in Rail Irregularity on the Coupled Dynamic Responses of Train and Simple-supported Bridge

ZHU Zhi-hui^{1,2†}, WANG Li-dong¹, YANG Le¹, YU Zhi-wu¹

(1. School of Civil Engineering, Central South Univ, Changsha, Hunan 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South Univ, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: As an important excitation source, track irregularities have a significant effect on the running safety and riding comfort of the high-speed train and bridge. A three-dimension train-track-bridge coupled dynamic model was established to study the effect of short-wavelength components of track irregularities on the dynamic responses of the train and 32 m simple supported box-girder bridge. Five different wavelength track irregularities were generated from German low interference track spectra in numerical method. The dynamic responses of train-track-bridge coupled system under different track irregularities were calculated. The results have shown that the 1 m short-wavelength component in track irregularities can signifi-

^{*} 收稿日期:2015-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378511,50808177), National Natural Science Foundation of China(51378511,50808177);湖南省自 然科学基金资助项目(13JJ5007);湖南省高校创新平台开放基金资助项目(13K006);牵引动力国家重点实验室开放课题资助项目(TPL1601) 作者简介:朱志辉(1979-),男,河南潢川人,中南大学副教授,工学博士

[†]通讯联系人, E-mail: zzhh0703@163.com

cantly amplify the wheel-rail force, offload coefficient, derailment coefficient and the mid-span acceleration of the bridge. The mid-span displacement of the bridge, the wheel-rail relative lateral displacement and the car-body acceleration are less affected by the short-wavelength component of track irregularities. The main reason for the offload coefficient exceeding the code limits is $1\sim2$ m short-wavelength components of track irregularities. The reduction of the short wavelength track irregularities component is effective in increasing the running safety.

Key words: high-speed railway; track irregularity; dynamic response; train-bridge coupled system; the offload coefficient

轨道几何不平顺是引起轮轨相互作用,并诱发 整个列车-轨道-桥梁耦合系统振动的主要激励源. 为提高列车运行安全性和乘车舒适性,高速铁路在 严格实行轨道不平顺峰值管理与均值管理基础上, 还必须考虑轨道不平顺峰值管理与均值管理基础上, 还必须考虑轨道不平顺峰值控制容易,但波长控制就 相对要复杂.针对高速铁路管理波长以及高速铁路 轨道不平顺敏感波长范围,很多学者做了大量研究 工作.周永健^[1]、林玉森^[2]、高建敏^[3]将轨道不平顺 描述成简单的确定性谐波函数,研究了车辆动力响 应的敏感波长.但实际线路上的轨道不平顺是由不 同波长、不同相位和不同幅值的不平顺随机叠加而 成,确定性的谐波激励难以真实体现轨道不平顺中 各种波长成分之间的相互影响^[4].

Au^[5]、徐庆元^[6]、李斌^[7]、魏冲锋^[8]、Neves^[9]、 雷晓燕^[10-11]采用车辆-轨道竖向耦合振动模型,分 析了车辆随机振动与轨道不平顺谱之间的关系.王 开云^[12]、Michal^[13]、朱志辉^[14]主要分析了车辆横向 振动响应与轨道不平顺之间的关系.高亮^[15]采用现 场实测轨道不平顺数据,分析了车体振动加速度所 对应的最不利波长.这些研究成果多集中在线路上 的列车运行不利波长分析,对桥上列车的走行性研 究较少.轨道不平顺作为轮轨之间的自激激励源,不 但会激起车辆系统振动,而且还会引起轨道以及下 部桥梁结构变形,加剧耦合系统振动响应.因此,在 研究时,需要建立列车-轨道-桥梁耦合大系统,开展 轨道不平顺对高速列车走行性能影响研究^[16].

基于上述原因,本文应用车-线-桥耦合动力学 分析软件 TRBF-DYNA 建立列车-轨道-桥梁空间 耦合动力学模型,采用 5 种不同最短截止波长的德 国低干扰随机不平顺时域样本作为激励源,分析 32 m 简支梁桥上高速列车走行安全性指标和桥梁振 动响应与轨道不平顺样本中不同波长成分之间的敏 感性关系.

1 列车-轨道-桥梁动力学分析模型

1.1 车辆模型

选用 ICE3 列车采用 8 车编组(1M+6T+ 1M);考虑了车体和前后转向架的沉浮、点头、横移、 侧滚和摇头运动,以及每一轮对的沉浮、横移、侧滚 和摇头运动,建立 31 个自由度车辆模型.当列车勾 速运行时,不考虑车辆之间的纵向相互作用,则车辆 系统运动方程如下式所示:

 $M_{\rm V}U_{\rm V}(t) + C_{\rm V}U_{\rm V}(t) + K_{\rm V}U_{\rm V} = F_{\rm V}(t)$ (1) 式中 $M_{\rm V}, C_{\rm V}, K_{\rm V}, U_{\rm V}$ 分别为车辆子系统的总体质量 矩阵、总体阻尼矩阵、总体刚度矩阵和位移矩阵; $F_{\rm V}$ 为车辆所受外力矩阵.

1.2 轨道-桥梁模型

以我国高速线路总里程中比例最大的 32 m 预应 力混凝土简支箱梁桥为研究对象,建立如图 1 所示的 无砟轨道-桥梁子系统有限元模型.无砟轨道中,轨道 通过扣件以点支撑的方式固定在无砟轨道板上,同时 在无砟轨道板和混凝土底座板之间设置 CA 砂浆层缓 冲列车动力荷载.在有限元模型中,钢轨采用三维空间 梁单元模拟;无砟轨道板和混凝土底座板采用空间壳 单元模拟;钢轨扣件、轨下橡胶垫以及 CA 砂浆垫层采 用弹簧-阻尼器单元模拟,其具体参数按文献[4]取值. 同时,主梁、桥墩均采用三维空间梁单元模拟,主梁截 面和桥墩截面尺寸如图 2 所示.



图 1 轨道-桥梁子系统有限元模型 Fig. 1 FE model of track-bridge subsystem



图 2 桥梁截面示意图(单位:mm) Fig. 2 Schematic diagram of bridge (Unit: mm)

在车-桥耦合系统相互作用研究中,为降低计算 工作量,常采用模态叠加法建立桥梁动力方程^[4].考 虑轨道结构时,通常在选取模态时难以全面考虑轨 道结构局部高频振动模态,从而无法准确计算钢轨 局部振动以及轮轨之间的相对位移^[17].采用直接有 限元法组装整体刚度矩阵时,由于不存在人为设定 分析截止频率问题,计算精度较高.因此,本文采用 有限元直接刚度方法建立如下所示的轨道-桥梁系 统动力方程:

 $M_{\rm B}U_{\rm B}(t) + C_{\rm B}U_{\rm B}(t) + K_{\rm B}U_{\rm B} = F_{\rm B}(t)$ (2) 式中: $M_{\rm B}, C_{\rm B}, K_{\rm B}, U_{\rm B}$ 分别为轨道-桥梁子系统的总 体质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和位移矩阵; $F_{\rm B}$ 为 轨道-桥梁子系统所受外力矩阵.

阻尼矩阵包括桥梁本身的材料阻尼和轨下弹簧 -阻尼器单元阻尼,如式(3)所示:

$$\boldsymbol{C} = \alpha \boldsymbol{M}_{\mathrm{B}} + \beta \boldsymbol{K}_{\mathrm{B}} + \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{e}}} \boldsymbol{C}_{i}$$
(3)

式中: α , β 为 Rayleigh 阻尼系数,桥梁阻尼比取 2%; N_e 为具有单元阻尼的单元类型数; C_j 为第 j个弹簧-阻尼器单元的阻尼矩阵.

1.3 轮轨接触模型

轮轨动态接触关系是车桥耦合振动研究的基础,假设轮、轨均为刚体,可由轮轨型面匹配来确定 二者在接触点处的几何关系,并从代数学角度描述 车辆横向位移、侧滚角、摇头角坐标间的依赖关系和 相关参数.轮轨空间接触关系通过迹线法求解,再根 据赫兹非线性接触理论确定轮轨间法向接触力,轮 轨切向蠕滑力首先按 Kalker 线性理论计算,然后采 用 Johnson-Vermeulen 理论进行非线性修正^[4].由 赫兹非线性接触理论确定的轮轨关系模型的轮轨法 向接触力 *p*(*t*)可由式(4)计算:

式中: $p_i(t)$ 是第i位车轮的法向接触力,N;G为轮

轨接触常数,m/N^{2/3}; $Z_w(j,t)$ 为t 时刻第j 位车轮 的位移,m; $Z_r(j,t)$ 为t 时刻第j 位车轮下钢轨的 位移,m; $Z_0(t)$ 为轮轨界面存在的轨道不平顺,m.

2 轨道不平顺

轨道不平顺是指两根钢轨之间实际位置相对于 理想平顺状态的偏差.在我国高速列车总体技术条 件中建议使用德国低干扰轨道谱进行高速列车平稳 性分析.其表达式为^[4]:

$$S_{v}(\boldsymbol{\Omega}) = \frac{A_{v}\boldsymbol{\Omega}_{c}^{2}}{(\boldsymbol{\Omega}^{2} + \boldsymbol{\Omega}_{r}^{2})(\boldsymbol{\Omega}^{2} + \boldsymbol{\Omega}_{c}^{2})}$$
(5)

$$S_{a}(\boldsymbol{\Omega}) = \frac{A_{a}\boldsymbol{\Omega}_{c}^{2}}{(\boldsymbol{\Omega}^{2} + \boldsymbol{\Omega}_{r}^{2})(\boldsymbol{\Omega}^{2} + \boldsymbol{\Omega}^{2}\boldsymbol{0}_{c})}$$
(6)

$$S_{\rm c}(\Omega) = \frac{A_{\rm v}\Omega_{\rm c}^2 \Omega^2 / b^2}{(\Omega^2 + \Omega_{\rm r}^2)(\Omega^2 + \Omega_{\rm c}^2)(\Omega^2 + \Omega_{\rm s}^2)} \quad (7)$$

式中: $S_v(\Omega)$, $S_a(\Omega)$ 和 $S_c(\Omega)$ 分别是高低、方向和 水平不平顺概率密度函数,轨距不平顺功率谱密度 与水平不平顺具有相同的表达式.其中, Ω 为轨道 不平顺空间频率; Ω_c , Ω_r 和 Ω_s 均为截断频率常数; A_v , A_a 为粗糙度常数;b为左右滚动圆距离之半.

通常认为影响列车行车安全性指标的主要是不 平顺样本中的短波分量,长波分量影响车体振动响 应^[3].本文主要研究轨道随机不平顺样本中短波长 成分对桥梁动力响应及列车走行性指标的影响规 律.故采用三角级数法随机生成了最短截止波长分 别为1.0 m,1.5 m,2.0 m,2.5 m和3.0 m,最长截 止波长均为100 m的5种轨道不平顺样本.当车辆 匀速开行时,轨道不平顺在时间域的变化速度和加 速度可以由微分形式求得,以高低不平顺 y,为例:

$$\dot{y}_{v} = \lim_{t \to 0} \lim_{t \to 0} \frac{\Delta y_{v}}{\Delta t} = \lim_{t \to 0} \lim_{t \to 0} \frac{\Delta y_{v}}{\Delta X/V} = V \cdot \lim_{t \to 0} \lim_{t \to 0} \frac{\Delta y_{v}}{\Delta X} = V \cdot \frac{\partial y_{v}}{\partial X}$$
(8)
$$\dot{y}_{v} = \lim_{t \to 0} \lim_{t \to 0} \frac{\Delta \dot{y}_{v}}{\Delta t} = V \cdot \lim_{t \to 0} \lim_{t \to 0} \frac{\Delta \dot{y}_{v}}{\Delta X} = V^{2} \cdot \frac{\partial^{2} y_{v}}{\partial X}$$
(9)

其中 y_v 和 y_v 分别是轨道不平顺样本在时域内的变 化速度和加速度;V是列车运行速度.假定车速为 300 km/h,表1中分别给出了高低、方向、水平和轨 距不平顺样本在5种不同最短截止波长条件下的位 移和加速度幅值;图3中给出了波长范围在1~100 m和3~100 m的轨道高低不平顺的加速度时域样 本.从表1中可以看出,不同的最短截止波长对轨道 不平顺样本的位移影响很小;其中最短截止波长为 1 m和3 m的高低不平顺位移幅值相差仅为0.15 mm.相比轨道不平顺的位移时程曲线,最短截止波 长对轨道不平顺的加速度影响显著,加速度幅值随 着最短截止波长的增大而减小.从图3中可以看出, 波长范围在3~100 m时,轨道高低不平顺的加速 度样本中的高频部分显著减少,从而减小了样本的 加速度幅值.

	different wave length
Гаb. 1	Track irregularities parameters with
表 1	不同短波长范围轨道不平顺参数

不平顺	幅值	截止短波长/m					
类型		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
高低	位移/mm	7.94	7.91	7.89	7.83	7.79	
	加速度/(m・s ⁻²)	30.6	20.9	18.9	16.5	13.0	
方向	位移/mm	6.02	5.98	5.97	5.94	5.88	
	加速度/(m・s ⁻²)	23.6	15.6	13.9	12.5	10.7	
水平	位移/mm	4.28	4.24	4.20	4.15	4.24	
	加速度/(m・s ⁻²)	35.3	27.9	26.4	20.1	17.7	
轨距	位移/mm	1.01	1.00	1.00	0.96	0.96	
	加速度/($m \cdot s^{-2}$)	10.8	8.0	5.99	4.96	4.90	



图 3 300 km/h 时轨道不平顺加速度样本 Fig. 3 The acceleration samples of track irregularity under the train speed of 300 km/h

3 车-桥耦合振动响应分析

根据列车-轨道-桥梁耦合系统空间动力相互作 用模型,利用自主开发的振动分析软件 TRBF-DY-NA 开展车-桥耦合振动响应研究.主要对比分析了 最短截止波长分别为 1.0 m,1.5 m,2.0 m,2.5 m 和 3.0 m,最长截止波长均为 100 m 的 5 种轨道不 平顺样本下,列车以 300 km/h 通过 32 m 简支梁桥 时的列车及桥梁动力响应.

3.1 轮轨力

表 2 中给出了车速为 300 km/h 时,5 种轨道不 平顺样本条件下的轨力统计参数及主频特性;图 4 和图 5 中给出了 1~100 m,2~100 m,3~100 m 波 长工况下的轮轨力频谱曲线.从图表中可知:

1)随着最短截止波长的增大,轮轨力峰值和均 方根均逐渐减小,列车对钢轨的冲击作用减小;轮轨 力随短波长的变化趋势和轨道不平顺加速度幅值随 短波长的变化趋势一致.由此可知,轮轨力的变化主 要受轨道不平顺样本加速度的影响,受样本位移幅 值的影响较小.

2) 竖向及横向轮轨力主频基本上随着最短截止 波长的增大而逐渐减小,敏感波长则逐渐增加.由此 可知,轮轨力的频谱分布受到轨道不平顺波截止短 波长的控制.

表 2 不同轨道不平顺样本下的轮轨力特性 Tab. 2 The wheel – rail forces characteristics under different track irregularities

波	≿长范围/m	1.0~100	1.5~100	2.0~100	2.5~100	3.0~100
	峰值/kN	136.2	134.8	130.8	122.8	121.6
竖向	均方根/kN	17.67	15.66	14.49	12.31	11.65
	主频/Hz	40.4	40.4	40.4	32.0	32.0
	敏感 λ/m	2.06	2.06	2.06	2.60	2.60
横向	峰值/kN	12.8	11.8	10.1	9.6	8.7
	均方根/kN	3.12	3.05	2.86	2.78	2.74
	主频/Hz	32.0	32.0	32.0	16.8	16.8
	敏感 λ/m	2.60	2.60	2.60	4.96	4.96

3.2 脱轨系数

最短截止波长分别为1.0m,1.5m,2.0m,2.5 m和3.0m时,列车脱轨系数分别为0.106,0.104, 0.099,0.096,0.094.由此可以看出,脱轨系数随着 轨道不平顺最短截止波长的增加而减小.我国《高速 铁路设计规范(试行)》规定:车-桥动力分析评估采 用的脱轨系数标准是:Q/P≪0.8.因5种波长范围 条件下的脱轨系数均满足规范要求,表明列车的脱 轨系数相对减载率而言更容易满足行车安全性要 求.

3.3 轮重减载率

最短截止波长分别为 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m 和 3.0 m 时, 轮重减载率最大值分别为 0.867, 0.721, 0.710, 0.579, 0.459.图 6 中给出了 1~100 m, 3~100 m 波长工况所对应的轮重减载率时程曲线.对比计算结果可知:

1)随着轨道不平顺样本的最短截止波长从1m 提高到3m时,动态轮重减载率最大值逐渐减小, 短波长成分是影响轮重减载率的主要因素,控制短 波不平顺可以有效降低高速列车的轮重减载率 指标;



图 4 不同轨道不平顺条件下竖向轮轨力频谱曲线 Fig. 4 FFT of vertical wheel-rail forces under different track irregularities



图 5 不同轨道不平顺条件下横向轮轨力频谱曲线 Fig. 5 FFT of lateral wheel - rail forces under different track irregularities



2)波长范围在 1~100 m,1.5~100 m,2~100 m时,轮重减载率超过我国国家标准中关于车辆的 轮重减载率的安全标准,即:

$$\begin{cases} \Delta P/\bar{P} \leqslant 0.65 (危险限度) \\ \Delta P/\bar{P} \leqslant 0.6 (允许限度) \end{cases}$$
(10)

针对上述问题, 翟婉明^[4] 建议采用动态轮重减载 率判别准则,即当 $\Delta P/\bar{P} > 0.6$ 时,要求 $\Delta t < \Delta t_0$, Δt 是 轮重减载率超过目标值 0.60 的持续时间; Δt_0 是轮重 减载率超标时所允许的最大持续时间,且 $\Delta t_0 = 0.035$ s. 根据该评判准则,本文与 1~100 m, 1.5~100 m, 2~ 100 m 波长范围对应的 Δt_{max} 分别为: 0.001 1 s, 0.000 5 s, 0.001 0 s, 其中图 7 给出了 1~100 m 波长范围的动 态轮重减载率时程曲线进行局部放大图. 由此可知, 动 态轮重减载率超过 0.6 的最大持续时间远小于 0.035 s 的建议值.

文献[4]在对比分析轮重减载率实测值与理论 计算值时指出:轮重减载率计算值通常要大于测试 值,这是因为线路测试只能测得频率较低的准静态 减载率,而理论计算的动态轮重减载率则包含高频 成分,要对理论计算值进行低频滤波,才能使二者吻 合.鉴于此,本文对 1~100 m 波长范围下的动态轮 重减载率时程曲线进行 40 Hz 低通滤波,结果如图 8 所示.从图 6(b)中可以看出,低通滤波后的轮重减 载率最大值仅 0.44,小于我国规范规定限值 0.6,满 足规范要求.



图 7 动态轮重减载率大于 0.6 的最大超越时间 Fig.7 The maximum duration of the offload coefficient exceed 0.6



图 8 40 HZ 低週滤波后列念轮里風氣平內在回到 Fig. 8 The time history of the dynamic offload coefficient after low pass filtering 40 Hz

3.4 轮轨相对偏移量

表 3 给出了车速为 300 km/h 时,5 种轨道不平 顺样本条件下车辆轮轨横向相对偏移量.从表中可知,轮轨相对横向偏移量受不平顺样本中短波长成分的影响较小,均在 3 mm 左右.

	under different track irregularities
Tab. 3	The wheel-rail relative lateral displacements
表 3	不同短波长条件下轮轨横向相对偏移量

	轮轨相对横向偏移量/mm						
车辆编号	1~	1.5~	$2\sim$	2.5~	3~		
	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m		
动车1	2.6	3.1	2.5	2.9	3.0		
拖车 2	2.4	3.2	2.7	3.1	2.6		
拖车3	2.4	3.0	3.4	2.6	2.3		
拖车 4	2.4	3.2	2.7	3.1	2.5		
拖车5	2.4	3.0	3.5	2.6	2.4		
拖车 6	2.4	3.2	2.7	3.1	2.5		
拖车 7	2.4	3.0	3.5	2.6	2.4		
动车 8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1		

3.5 车体振动加速度

车速 300 km/h 条件下车体垂向和横向加速度 峰值和均方根(RMS)如表 4 所示.从表中可以看 出,5 种轨道不平顺样本条件下车体竖向和横向振 动加速度峰值均满足规范要求.其中车体竖向振动 加速度基本呈现减小的趋势,但变化不大,表明车体 振动加速度对短波长成分的变化不敏感.

表 4 车体振动加速度峰值和均方根								
Та	Tab. 4 The maximum and RMS of car-body vibration							
acce	leration	under di	fferent tra	ack irregu	larities	(m/s^2)		
波长	范围/m	1.0~100	1.5~100	2.0~100	2.5~100	3.0~100		
竖向	峰值	0.380	0.371	0.377	0.362	0.352		
	均方根	0.196	0.194	0.194	0.192	0.193		
横向	峰值	0.258	0.287	0.245	0.288	0.263		
	均方根	0.107	0.121	0.103	0.118	0.112		

3.6 桥梁跨中动力响应

在 5 种轨道不平顺激扰下,桥梁跨中竖向和横 向位移及加速度最大值和均方根列于表 5. 限于篇 幅,图 9~图 12 中分别给出了桥梁跨中位移、加速 度时程曲线及频谱特性曲线. 从结果可以看出:

表 5 桥梁跨中动力响应比较 Tab. 5 Mid-span dynamic responses of bridge under different track irregularities

波长范围/m	1.0~ 100	1.5~ 100	2.0∼ 100	2.5∼ 100	3.0∼ 100		
竖向位移峰值/mm	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
竖向位移均方根/mm	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34		
横向位移峰值/mm	0.44	0.43	0.44	0.42	0.44		
横向位移均方根/mm	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13		
竖向加速度峰值/(m•s ⁻²)	0.551	0.500	0.506	0.498	0.494		
竖向加速度均方根/(m•s ⁻²)	0.128	0.118	0.116	0.116	0.109		
横向加速度峰值/(m•s ⁻²)	0.146	0.128	0.115	0.109	0.110		
横向加速度均方根/(m・s ⁻²)	0.032	0.031	0.030	0.029	0.030		
竖向加速度主频/Hz	67.3	34.3	34.3	30.9	30.9		
横向加速度主频/Hz	43.6	43.6	3.48	3.48	3.48		

1)桥梁跨中竖向和横向位移受不平顺样本中短 波长成分变化的影响较小,轨道短波不平顺导致的 轮轨间高频冲击作用对桥梁跨中动位移影响较小, 可以忽略不计.

2)桥梁跨中竖向和横向加速度及加速度均方根 均随着轨道不平顺中短波长成分的减少而减小,受 不平顺样本中短波长成分变化的影响较为显著;该 变化规律与表2中提供的轮轨力变化规律一致,因 此桥梁加速度主频受轮轨力主频影响.

3)对比不同波长范围的跨中竖向和横向加速度 主频可知,1~100 m下的竖向加速度主频和 1~ 100 m,1.5~100 m下的横向加速度主频均远大于 其他波长范围的主频;由此可知,轨道不平顺样本中 1~1.5 m的短波长成分引起的高频激励决定桥梁 的加速度主频;当最短波长大于 2 m时,桥梁加速 度主频是由列车固定间距的轴重控制.



图 9 桥梁跨中位移时程曲线 Fig. 9 The time history of displacements at midpoint







图 11 桥梁跨中竖向加速度频谱曲线 Fig. 11 PSD of vertical accelerations at midpoint



Fig. 12 PSD of lateral accelerations at midpoint

4 结 论

由于影响桥上列车走行性能的因素较为复杂, 本文仅分析了轨道不平顺截止短波长对轮轨力、轮 重减载率、脱轨系数、车体振动加速度和桥梁振动位 移、加速度等指标的影响规律,并得到以下结论:

1)列车走行性能中的轮轨力、轮重减载率和脱 轨系数受轨道不平顺中较短波长成分的影响较为显 著,其中轨道不平顺中最短截止波长越短,轮轨力和 轮重减载率增加越快;其变化趋势和轨道不平顺加 速度随短波长的变化趋势一致.

2)5种波长范围条件下的车体振动加速度峰值 均满足规范要求,车体振动加速度对短波长成分的 变化不敏感;虽然车体竖向振动加速度随轨道不平 顺最短截止波长的增加而减小,但变化量不大.

3)桥梁跨中竖向和横向位移受不平顺激扰的影响很小,车辆轴重对桥梁跨中竖向变形起控制作用; 桥梁跨中竖向和横向加速度受轨道不平顺的影响显著,随着轨道不平顺短波长成分的减少而降低.

4)对于不同列车类型、线路类型以及不同桥梁 结构,轨道不平顺波长对耦合系统动力响应的影响 规律会有一定的差异,仍需要做进一步深入研究.

参考文献

- 周永健,练松良,杨文忠. 轨面短波不平顺对轮轨力影响的研究
 [J]. 华东交通大学学报,2009,26(4):6-12.
 ZHOU Yong-jian, LIAN Song-liang, YANG Wen-zhong. Research of the impact of short wave track irregularity on the wheel-rail force
 [J]. Journal of East China Jiaotong University,2009,26(4):6-12.
 (In Chinese)
- [2] 林玉森,李小珍,强士中.轨道不平顺激励下高速铁路桥上列车走行性研究[J].铁道学报,2005,27(6):96-100.
 LIN Yu-sen,LI Xiao-zhen, QIANG Shi-zhong. Studies on run ability of train excited by the irregularity of track on the high-speed railway bridge[J]. Journal of the China Railway Society,2005,27(6):96-100. (In Chinese)
- [3] 高建敏,翟婉明,王开云.高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波 长研究[J].铁道学报,2012,34(7):83-88.
 GAO Jian-min,ZHAI Wan-ming,WANG Kai-yun. Study on sensitive wavelengths of track irregularities in high-speed operation[J].
 Journal of the China Railway Society,2012,34(7):83-88. (In Chinese)
- [4] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第 3 版. 北京:科学出版社, 2007:217-218,397-398.

ZHAI Wan-ming. Vehicle-track coupling dynamics [M]. 3rd Edition. Beijing: Science Press,2007:212-213,397-398. (In Chinese)

[5] AU F T K, WANG J J, CHEUNG Y K. Impact study of cablestayed railway bridges with random rail irregularities [J]. Engineering Structures, 2002, 24:529-541. XU Qing-yuan, CAO Yang-feng, ZHOU Xiao-lin. Influence of short-wave random irregularity on vibration characteristic of train-slab track-subgrade system [J]. Journal of Central South University, 2011,42(4):1105-1110. (In Chinese)

- [7] 李斌,刘学毅.客运专线铁道车辆随机振动特性[J].西南交通大学 学报,2010,45(2):191-196.
 LI Bin,LIU Xue-yi. Random vibration property of high-speed railway vehicle in passenger dedicated line[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2010,45(2):191-196. (In Chinese)
- [8] 魏冲锋,罗世辉,孟政,等.不同截止频率下轨道不平顺对车辆垂向振动的影响[J].铁道车辆,2011,49(12):5-7.
 WEI Chong-feng,LUO Shi-hui,MENG Zheng, et al. Effect of track irregularity with different cut-off frequencies on vertical vibration of vehicles[J]. Rolling Stock,2011,49(12):5-7. (In Chinese)
- [9] NEVES S G M , AZEVEDO A F M , CALCADA R. A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction[J]. Engineering Structures, 2012, 34:414-420.
- [10] LEI X Y, NODA N A. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(1):147-165.
- [11] 房建,雷晓燕,练松良. 轨道不平顺波长对桥上 CRTS II 型板式轨 道振动特性的影响[J]. 华东交通大学学报,2014,31(1):1-6. FANG Jian, LEI Xiao-yan, LIAN Song-liang. Impacts of track irregularity wavelength on vibration characteristics of elevated CRTSII slab track [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31 (1):1-6. (In Chinese)
- [12] 王开云,翟婉明,刘建新,等.线路不平顺波长对提速列车横向舒适 性影响[J]. 交通运输工程学报,2007,7(1):1-5.
 WANG Kai-yun, ZHAI Wan-ming, LIU Jian-xin, *et al.* Effect of rail irregularity wavelength on lateral runningcomfort of speed-raised train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7 (1):1-5. (In Chinese)
- [13] MICHAL Majka, MICHAEL Hartnett. Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness [J]. Computers and Structures, 2009, 87:1233 -1252.
- [14] 朱志辉,朱玉龙,余志武,等. 96m 钢箱系杆拱桥动力响应及行车 安全性分析[J]. 中国铁道科学,2013,34(6):21-29.
 ZHU Zhi-hui, ZHU Yu-long, YU Zhi-wu,*et al*. Analysison the dynamic response and running safety of96msteel box tied arch Bridge
 [J]. China Railway Science, 2013, 34(6):21-29. (In Chinese)
- [15] 辛涛,高亮,曲建军.提速线路轨道不平顺波长的动力仿真[J].北 京交通大学学报,2010,34(6):21-25.
 XIN Tao, GAO Liang, QU Jian-jun. Dynamic simulation study on wavelength of track irregularities in raising speed railway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010,34(6):21-25. (In Chinese)
- [16] 黄志堂,崔圣爱,窦胜谭,等. 基于不同轨道谱的车桥动力相互作用 指标对比分析[J]. 振动与冲击,2012,31(21):163-167.
 HUANG Zhi-tang, CUI Sheng-ai, DOU Sheng-tan, et al. Comparative analysis for train-bridge interaction indicators based on different track spectra [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 163-167. (In Chinese)
- [17] GUO W W, XIA H, ROECK G De, et al. Integral model for traintrack-bridge interaction on the Sesia viaduct: Dynamic simulation and critical assessment [J]. Computers and Structures, 2012:205-216.