

青藏铁路列车行驶引起的轨枕竖向作用力研究

朱占元^{1,2,3}, 凌贤长^{1,3}, 陈士军¹, 郑英杰⁴, 张 锋¹

(1. 哈尔滨工业大学 路基与防护工程研究所, 150090 哈尔滨, zhuzyuan910@163.com; 2. 四川农业大学 城乡建设学院, 611830 四川 都江堰; 3. 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 730000 兰州; 4. 山东大学 土建与水利学院, 250061 济南)

摘 要: 为了深入分析列车行驶引起冻土地基的振动反应, 并为青藏铁路运营安全性评价提供可靠的理论依据, 采用自编列车-轨道耦合动力学仿真程序, 研究了青藏铁路列车行驶引起的轨枕竖向作用力特性. 研究表明: 自编程序仿真结果与青藏铁路现场监测成果吻合良好, 程序理论正确结论可信; 轨枕竖向作用力随路基阻尼的增大而略微减小, 随路基模量、列车行驶速度的增大而增大, 随轨缝的增宽而线性增大; 轨枕竖向作用力优势频段主要在移动轴重作用率内, 转向架作用率处振动能量最大, 轨枕振动对轨枕竖向作用力影响较小; 路基的冻融状态、轨缝宽度与列车行驶速度对轨枕竖向作用力影响不能忽略; 并定量给出轨枕竖向作用力最大值与列车行驶速度之间的函数关系.

关键词: 冻土路基; 轨枕竖向作用力; 列车行驶; 青藏铁路

中图分类号: U21

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0006-05

Investigation of train-induced vertical applied force on sleeper along Qinghai-Tibet Railway

ZHU Zhan-yuan^{1,2,3}, LING Xian-zhang^{1,3}, CHEN Shi-jun¹, ZHENG Ying-jie⁴, ZHANG Feng¹

(1. Institute of Subgrade and Prevention Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, zhuzyuan910@163.com;

2. Urban and Rural Construction College, Sichuan Agricultural University, 611830 Dujiangyan, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, 730000 Lanzhou, China;

4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, 250061 Jinan, China)

Abstract: In order to survey the vibration response of permafrost subgrade induced by train traffic along Qinghai-Tibet Railway, and provide the rational theoretical foundation for the rail transit assessment, the self-programming software of the train-track coupled dynamic system was employed to investigate the characteristics of the vertical applied force on sleeper induced by passenger trains. The researches show that, the simulation results of the self-compiling program are in accord with the field monitoring data, and the theory of the procedure is proper; the train-induced vertical acting force exerted on sleeper is in inverse proportion to the subgrade damping, and increases with the raising of the subgrade modulus and vehicle velocity, at the same time increases linearly with the rise of the rail gap; the dominant frequency bands are mainly within the action rate of shifting axle load, the vibratory energy reaches the maximum at the bogie action rate, and the sleeper vibration makes little different to the sleeper vertical applied force induced by passing trains; the effects of the freeze thawing status, rail gap width, and the train speed can not be ignored on the vertical acting force. Moreover, the function relationship of the acting force maximum value versus train velocity is given quantificationally.

Key words: permafrost subgrade; vertical applied force on sleeper; passing train; Qinghai-Tibet Railway

收稿日期: 2010-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078111); 铁道部科技研究开发计划项目(2009G010-E); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFS201007); 四川省教育厅资助科研项目(08ZA065).

作者简介: 朱占元(1974—), 男, 博士, 副教授;
凌贤长(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

我国辽阔的冻土区广泛分布各种铁路线, 并正在实施高速与重载战略, 加之与列车行驶振动有关的冻土路基病害经常发生, 特别是青藏铁路通车初期冻土路基局部出现下沉与开裂, 致使轮

- 轨相互作用动力效应与冻土区路基列车行驶振动稳定性问题日益成为工程界关注的焦点和学术研究的热点. 尽管目前国内外有不少对轮轨关系的定性描述^[1-5],但对轨枕竖向作用力定量分析等方面的研究还较少,尤其是针对青藏铁路等冻土路基列车行驶引起的轨枕竖向作用力研究尚未见文献报道. 本文将建立列车-轨道垂向耦合动力学模型,并基于青藏铁路现场振动监测成果检验模型的正确性,针对青藏铁路特点研究客车行驶引起冻土地路路基振动的轨枕竖向作用力特性.

1 列车-轨道垂向耦合动力学分析模型

1.1 数值建模

列车-轨道垂向耦合动力学分析模型是由列车模型、轨道模型及轮轨间的耦合关系组成的体系(见图 1,图中符号名称见表 1、2). 列车模型为多节车体、转向架、轮对、二系弹簧和阻尼减振器组成的多自由度振动系统. 轨道模型为 3 层弹性点支承 Euler 梁模型,其中弹性长梁按无限长 Euler 梁处理,模拟钢轨;3 层质量-弹簧-阻尼器系统分别模拟轨枕、道床和路基. 车辆模型与轨道模型之间的耦合作用,通过轮轨接触面而实现,轮轨垂向作用力由著名的赫兹非线性弹性接触理论所确定. 轮轨系统激励模型有脉冲型激励、谐波型激励、动力型激励和随机型激励 4 类. 有关模型的详细理论见文献[6-7],将列车-轨道垂向耦合系统动力学方程表示成统一形式

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = P. \tag{1}$$

式中: M 、 C 、 K 分别为列车-轨道-路基耦合系统的质量、阻尼、刚度矩阵; $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 x 分别为耦合系统的广义加速度、速度、位移矢量; P 为耦合系统的广义载荷矢量,是与 $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 x 有关的非线性过程量. 采用 Wilson- θ 法求解动力学方程组,针对该模型编制完成动力学仿真程序 ZL-TNTLM,可以求

得列车行驶过程中多种激励模型耦合作用下任意时刻车辆与轨道结构各个部件的动力反应(位移、速度和加速度)和各个部件之间的相互作用力. 相对于已有的车辆-轨道垂向耦合系统动力学模型^[6],本列车-轨道垂向耦合系统动力学模型可以模拟整列车各车辆之间的耦合作用并考虑钢轨内阻尼对耦合系统振动的影响^[7].

1.2 青藏铁路的模型参数选取

参考已有研究成果^[6,8-9],我国青藏铁路客车机车与车辆具体计算参数按表 1 取用. 青藏铁路北麓河多年冻土工程试验段路基轨道结构采用 50 kg 有缝钢轨、II 型轨枕 1 800 根/km、450 mm 厚道碴,参数取值见表 2.

1.3 自编程序 ZL-TNTLM 可靠性检验

青藏铁路 DK1137+700 处 10 mm 宽轨缝和附近的轨枕布置与编号见图 2(轨缝位于轨枕 338、339 之间). 假定 K917 次列车动力编组的方式为 2 节 NJ2 型 6 轴机车+4 节 YZ25T 型 4 轴客车,输入某主干线实测里程高低不平顺曲线(见图 3)和 10 mm 宽轨缝脉冲性激励作为激励因素,基于自编 ZL-TNTLM 程序对 K917 次列车以 94 km/h 的速度通过该宽轨缝时的动力反应进行仿真分析,获得轨缝附近轨枕 338 的振动加速度时程曲线见图 4(a). 现场监测 K917 次列车以 94 km/h 的行驶速度通过轨枕 338 的加速度时程曲线^[10]如图 4(b)所示. 从图 4 对比模拟结果与监测结果可以看出加速度时程曲线总体波形一致,模拟结果中正的加速度幅值与监测值吻合良好,但负加速度值相差较大,分析其误差原因存在于监测时因加速度计量程限制而未能取得完整的负加速度时程曲线(图 4(b)中的放大下部任一峰值点均有 10~17 个数据点完全相同). 本程序的详细可靠性验证见文献[7],对比分析表明该程序原理正确,结论可信.

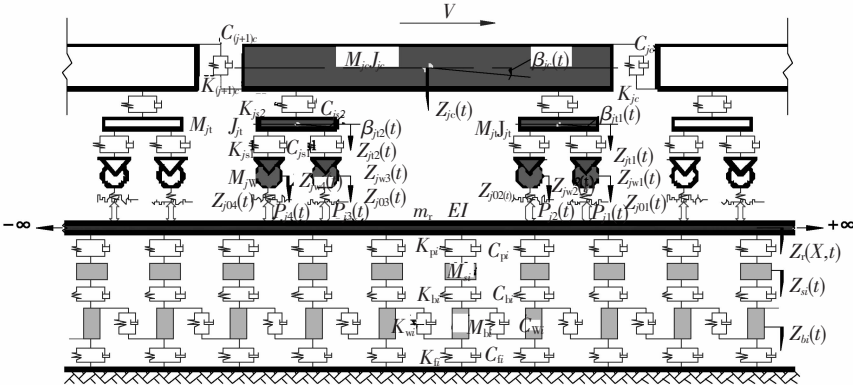


图 1 列车-轨道垂向耦合动力学模型

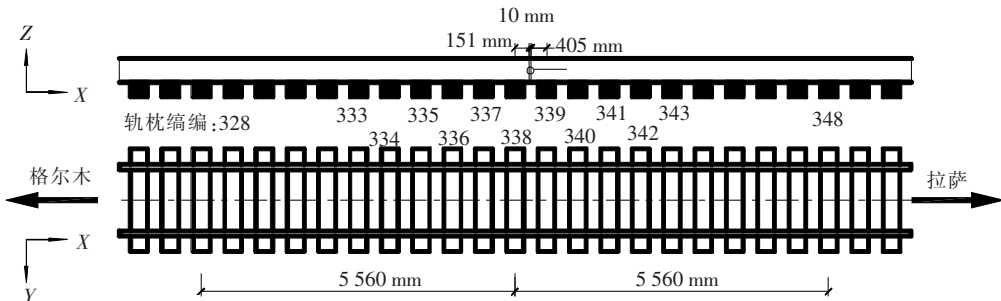


图 2 青藏铁路 DK1137 + 700 的宽轨缝与轨枕编号

表 1 青藏铁路列车车辆模型参数

符号	名称	单位	客车车辆 YZ25T	客车机车 NJ2
M_C	车体质量	kg	48 000	69 500
M_t	构架质量	kg	2 200	22 850
M_w	轮对(簧下)质量	kg	1 900	2 750
J_C	车体点头惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2 312 000	1 833 000
J_t	构架点头惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2 200	49 788
K_{S1}	一系悬挂刚度(每轴)	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	2 130 000	3 400 000
K_{S2}	二系悬挂刚度	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	800 000	3 350 000
C_{S1}	一系悬挂阻尼(每轴)	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	120 000	120 000
C_{S2}	二系悬挂阻尼	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	217 400	80 000
l_C	车辆定距之半	m	9	6
l_t	转向架轴距之半	m	1.2	2.15
l_{ex}	车箱长度之半	m	13.3	11
R	车轮滚动圆半径	m	0.457 5	0.625

表 2 青藏铁路轨道结构参数

符号	名称	参数取值
M_r	钢轨的单位长度质量	$51.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
I	钢轨的惯性矩	$2.037 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
E	钢轨的弹性模量	$2.059 \times 10^5 \text{ MPa}$
K_P	轨下垫层的刚度	$1.2 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
C_P	轨下垫层的阻尼	$124 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
M_S	轨枕质量	251 kg
l_S	轨枕间距	0.556 m
l_b	轨枕底面宽度	0.273 m
l_e	半轨枕有效支承长度	0.95 m
ρ_b	道床密度	$1\,950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
h_b	道床厚度	0.45 m
α	道床内摩擦角	35°
E_b	道床弹性模量	120 MPa
C_b	道床离散阻尼	$124 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
K_w	道床剪切刚度	$78\,400 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
C_w	道床剪切阻尼	$80 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
E_f	路基土的模量	$30 \sim 1\,000 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$
C_f	路基土的阻尼	$10 \sim 150 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

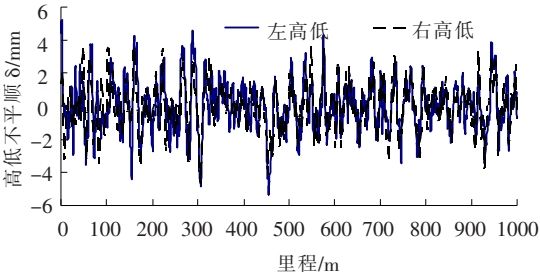
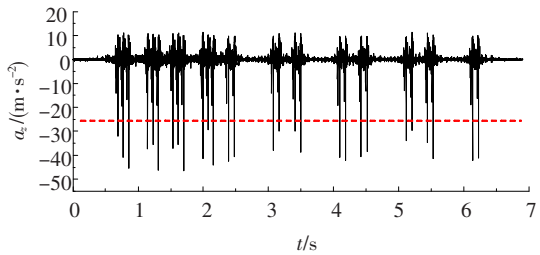
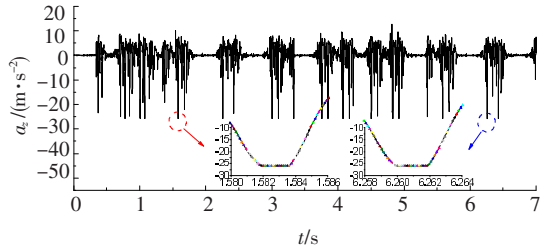


图 3 中国某主干线铁路里程高低不平顺曲线



(a) 枕木 338 仿真结果



(b) 枕木 338 现场监测结果

图 4 轨枕振动加速度波形及幅值对比

2 列车行驶引起的轨枕竖向作用力

对青藏铁路 DK1137 + 700 段进行了在里程高低不平顺(见图 3)与宽轨缝(缝宽 10 mm,见图 2)脉冲激励耦合条件下的动力仿真分析,获得列车行驶过程中任意轨枕上的作用力时程曲线,可以作为轨枕-道床-路基-场地动力有限元详细模型仿真分析时的振动荷载输入。K917 次列车以 94 km/h 的行驶速度通过时,作用于宽轨缝附近轨枕 338 上的轨枕竖向作用力时程曲线与频谱分析见图 5。可见,轨枕作用力的峰值与列车行驶通过该轨枕的轴重相对应,振动的优势频率分布在 10 Hz 以内。

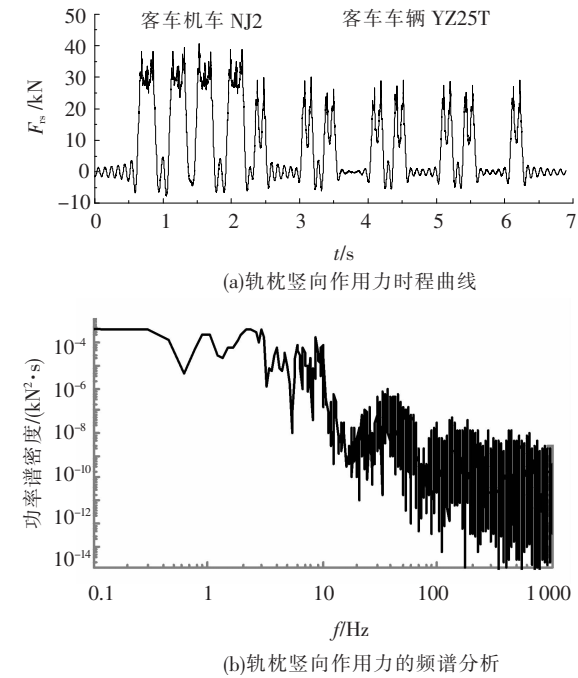


图5 青藏铁路列车行驶引起的轨枕竖向作用力

3 轨枕竖向作用力影响因素分析

3.1 冻土路基的冻融状态

青藏铁路地处多年冻土区,年内冻融变化对路基的阻尼和刚度有显著影响,随着冻结负温的降低,路基模量 E_t 将增大,阻尼 C_t 将减小;与此相反,随气温升高路基表层冻土融化,路基模量 E_t 将降低,阻尼 C_t 增大.列车通过DK1137+700时,轨枕作用力与路基阻尼 C_t 之间变化关系见图6.各轨枕的轨枕作用力均随路基阻尼 C_t 的增大而略微减少,但影响程度很小,数值模拟过程中可不考虑路基阻尼变化对轨枕竖向作用力的影响.

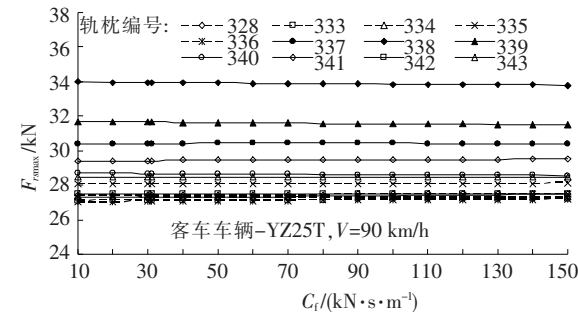


图6 路基阻尼系数对轨枕作用力最大值的影响

列车通过DK1137+700时,轨枕作用力与路基模量之间变化关系见图7.可以看出轨枕作用力均随路基模量的增大而增大,当路基模量 E_t 从30 MPa/m(融化状态)增大到300 MPa/m(冻结状态)时客车车辆振动荷载将增大5%~13%,路基模量 E_t 为300 MPa/m以上时模量增大对振动荷载影响较少.由此可知,数值模拟过程中应考虑路

基模量变化的影响,即路基的冻融状态对列车行驶引起的轨枕竖向作用力的影响不能忽略.

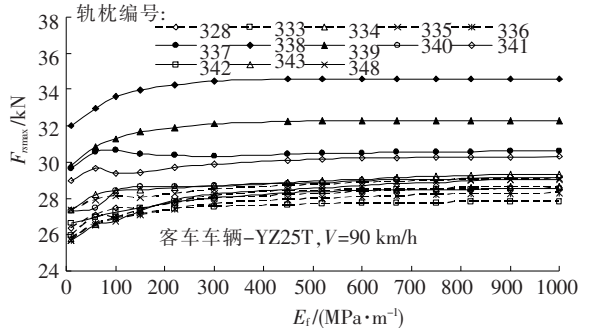


图7 路基模量对轨枕作用力最大值的影响

3.2 列车行驶速度

列车以不同速度通过DK1137+700时,轨枕作用力与速度之间关系见图8.可见,当列车行驶速度为40~160 km/h时,宽轨缝附近轨枕作用力随列车行驶速度增大而减小(见图8中轨枕338、339);其他轨枕的作用力随列车行驶速度增大而增大,无轨缝处轨枕作用力与客车车辆行驶速度之间的关系拟合见式(2).

$$F_{rmax} = 3.22 \times 10^{-5} V^2 + 0.0158 V + 26.6, \quad R^2 = 0.983. \quad (2)$$

式中: V 为列车行驶速度; R 为相关系数.

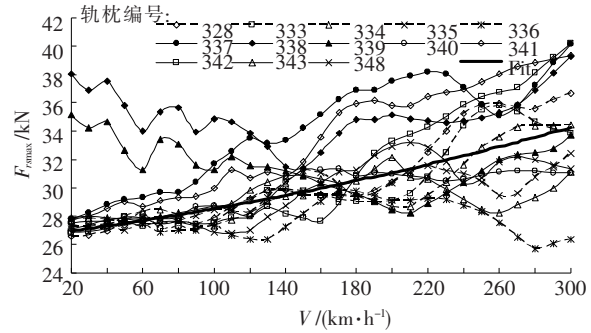


图8 列车行驶速度对轨枕作用力最大值的影响

不同行驶速度的青藏铁路客车引起的轨枕作用力时程曲线频谱关系对比见图9.可见,轨枕竖向作用力振动优势频段主要在移动轴重作用率(车速/固定轴距)内,在机车车辆转向架作用率(车速/转向架定距)及移动轴重作用率附近均出现峰值,且转向架作用率处振动能量最大;轨枕间隔作用率(车速/轨枕间距)对轨枕竖向作用力影响较小,见图9.

3.3 轨缝宽度

青藏客车K917次列车通过DK1137+700时,轨枕作用力与轨缝宽度之间的关系见图10.可见,轨缝附近轨枕的轨枕作用力均随着轨缝宽度的增大而线性增大.青藏铁路DK1137+700的10 mm宽轨缝脉冲性干扰使轨缝附近轨枕338的轨枕作

用力增大20%以上,振动加速度最大值增大3倍以上;宽轨缝脉冲性激扰影响范围在轨缝附近5个轨枕内,主要是附近的3个轨枕,见图11。

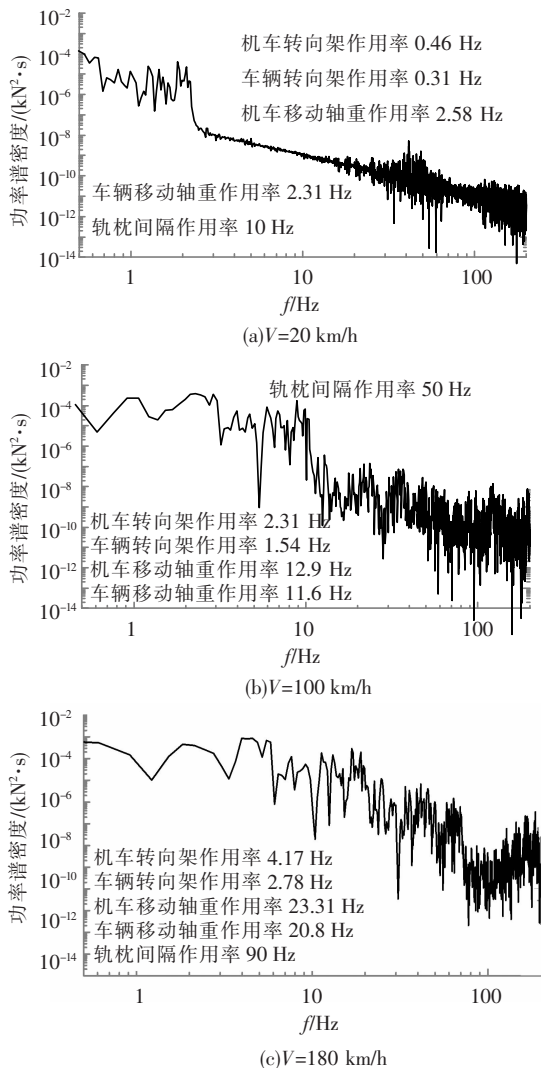


图9 列车行驶速度对轨枕作用力频率成份的影响

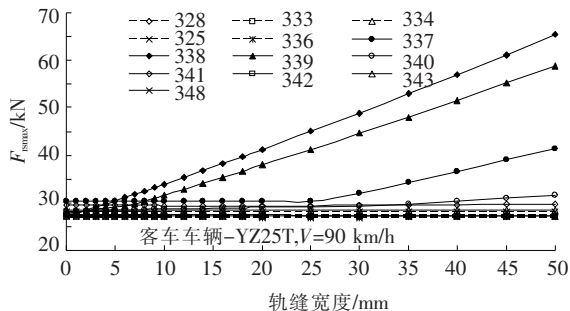


图10 钢轨轨缝宽度对轨枕作用力最大值的影响

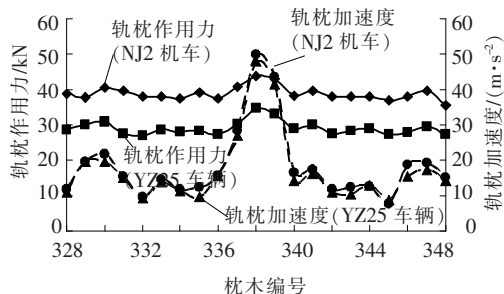


图11 宽轨缝10 mm对轨枕振动影响分布

4 结 论

1) 轨枕竖向作用力随路基阻尼的增大而略微减少,随路基模量的增大而增大;路基冻融状态对轨枕竖向作用力的影响不能忽略。

2) 当列车行驶速度为40~160 km/h时,宽轨缝附近轨枕作用力随列车行驶速度增大而减小;其他轨枕的作用力随列车行驶速度增大而增大;振动优势频段主要在移动轴重作用率内,机车、车辆转向架作用率与移动轴重作用率附近均出现峰值,且转向架作用率处振动能量最大;轨枕振动对轨枕竖向作用力的影响较小。

3) 轨缝附近轨枕的轨枕作用力均随着轨缝宽度的增大而线性增大;宽轨缝脉冲性激扰影响范围在轨缝附近5个轨枕内,主要是附近3个轨枕。

参考文献:

- [1] JENKINS H, STEPHENSON J E, CLAYTON G A, *et al.* The effect of track parameters on wheel/rail vertical dynamical forces[J]. The Railway Engineering J, 1974(1): 2-16.
- [2] WU T X, THOMPSON D J. On the parametric excitation of wheel/track system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 278: 725-747.
- [3] SHENG X, LI M, JONES C J C, *et al.* Using the Fourier-series approach to study interactions between moving wheels and a periodically supported rail[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303: 873-894.
- [4] 冯雅薇, 魏庆朝, 时瑾. 直线电机地铁车辆-轨道垂向耦合动力学模型[J]. 北京交通大学学报, 2006, 31(1): 51-54, 58.
- [5] 冯青松, 雷晓燕, 练松良. 不平顺条件下高速铁路轨道振动的解析研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 559-564.
- [6] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 朱占元. 青藏铁路列车行驶多年冻土地路基振动反应与振陷预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [8] 黄强. 青藏铁路(格拉段)机车车辆总体技术条件的研究[J]. 中国铁路, 2002(3): 41-47.
- [9] 李瑞淳, 朱彦. 青藏铁路客车研制方案的探讨[J]. 中国铁路, 2002(12): 57-59.
- [10] LING Xianzhang, CHEN Shijun, ZHU Zhan yuan, *et al.* Field monitoring on the train-induced vibration response of track structure in the Beiluhe permafrost region along Qinghai-Tibet railway in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(1): 75-83.

(编辑 赵丽莹)