科学通报 2019 年 第 64 卷 第 25 期: 2600 ~ 2607
专题: 轨道交通系统振动与服役安全 论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

高速动车组轮轨载荷分布特征

任尊松[1*], 宋丹丹[1], 金新灿[1], 曹杰[1], 李秋泽[2]

1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;
2. 中车长春客车股份有限公司, 长春 130062
* 联系人, E-mail: zsren@bjtu.edu.cn

2018-12-20 收稿, 2018-01-27 修回, 2019-01-28 接受, 2019-08-22 网络版发表
国家自然科学基金(11790281, 51575036)资助

摘要 轮轨载荷对高速动车组/轨道系统动力学性能和结构可靠性有十分重要的影响. 目前研究主要给出了轮轨力峰值或者幅值, 对其载荷分布规律很少涉及. 本文制作了某型高速动车组测力轮对, 实际线路上测试并获得了该型高速动车组运行过程中轮轨力引起的应变信号, 最高测试速度368 km/h. 对测试数据进行处理和分析, 获得了列车高速直线和曲线运行工况下的轮轨力时间历程. 统计了轮轨载荷峰谷值和频次, 获得了不同速度等级下轮轨力分布规律. 结果表明, 轮轨垂向力总体上呈正态分布, 而横向力呈威布尔分布; 一般列车运行速度越高, 轮轨力波动范围越大; 列车350 km/h直线运行时的最大轮轨垂向力约为156.6 kN、最大轮轨横向力为26 kN; 曲线半径和列车曲线通过速度对轮轨力幅值有明显影响. 本文给出的轮轨载荷统计特征, 为高速轮轴结构设计和轨道系统结构损伤研究等提供了重要帮助.

关键词 高速动车组, 测力轮对, 线路试验, 轮轨力, 载荷分布

轮轨力是高速动车组/轨道系统的重要指标, 不仅对轮轨系统运行安全性、稳定性以及舒适性等有十分重要的影响, 而且是轮轴结构和轨道系统结构可靠性设计的重要参数. 随着列车运行速度不断提升, 轮轨动态相互作用越来越强, 引起的轮轨系统振动和结构损伤有逐渐增强的趋势. 为明晰轮轨载荷特点, 并为轮轨系统结构损伤和可靠性研究奠定基础, 需要研究轮轨力载荷分布及其规律, 尤其是统计分布规律.

目前已有诸多文献采用理论方法, 研究了轨道机车车辆系统振动及载荷特征. Garg[1]率先建立了较为完善的铁道车辆系统动力学模型, 分析了车辆系统的频域振动特性. Baeza等人[2]研究了车轮扁疤冲击作用下, 轮轨力与列车运行速度之间关系. Braghin等人[3]分析了轮轨垂向力和轮对冲角与脱轨安全性之间关系, 提出了一种可用于轮缘爬轨过程研究的轮轨接触模型. Thomas等人[4]研究了曲线通过时轨道激扰和风载引起车辆悬挂系统大偏移和车体大位移情况下的车辆倾覆安全性. 国外其他学者在轮轨接触、轮轨安全、车辆振动及舒适性等方面取得了突出成就[5~10]. 国内学者开展了大量与铁道机车车辆动力学及安全性有关的研究工作并取得了丰硕成果, 表现在对轮轨接触、脱轨机理、稳定性理论等有深刻认识, 并对车辆系统结构和参数等提出了合理的改进方案和优化措施[11~13]. 此外, 翟婉明[14]建立了车辆/轨道耦合动力学模型, 研究了车辆/轨道系统动态相互作用, 获得了轮轨载荷对轨道系统振动的影响特性. 任尊松[15]建立了车辆/道岔系统动力学模型, 研究了车辆道岔通过时轮岔接触关系、轮轨载荷分配和安全性特性等, 并提出了道岔截

引用格式: 任尊松, 宋丹丹, 金新灿, 等. 高速动车组轮轨载荷分布特征. 科学通报, 2019, 64: 2600–2607
Ren Z S, Song D D, Jin X C, et al. Wheel/rail load distribution characteristics of high speed EMU (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2600–2607, doi: 10.1360/N972018-01275

© 2019《中国科学》杂志社

面外形优化方法.

以上研究主要是在建立车辆/轨道动力学模型的基础上, 采用数值分析方法, 研究车辆系统振动特性. 截至目前, 少有文献从实际线路测试的角度, 深入研究轮轨载荷及分布特征. 虽然文献[16,17]在线路测试的基础上, 分析了车体、构架以及轮对的振动特性, 给出了多种工况下主要部件的振动加速度幅值和频次, 以及高速动车组轴箱载荷及特征等, 但未包含轮轨载荷.

为此, 本文拟制作测力轮对, 实际线路测试高速动车组轮轨载荷, 分析不同工况下轮轨力规律, 获得轮轨载荷分布特征.

1 测力轮对制作及标定

随着测试技术不断进步, 获得轮轨力的技术也不断发展, 目前轮轨力连续测量法已较为完善. 相对于间接测量法, 轮轨力连续测量法在测试结果的连续性、准确性以及信号频率范围等方面均有明显优势. 为此, 本文采用连续测量法测试轮轨力.

制作测力轮对并获得轮轨力的总体方法是, 根据准静态法[18]原理和合理组桥的方式制作测力轮对, 通过台架标定实验获得载荷-应力传递系数. 实际线路采集车轮在外力作用下的应变信号, 该应变信号结合载荷-应力标定系数即可获得轮轨力.

用于轮轨力测试的车轮结构如图1(a)所示. 依据该车轮结构有限元法应力计算结果和分布特征, 选择的轮轨垂向力识别位置在车轮半径315 mm处. 以该位置为圆心沿圆周均匀制作8个圆孔, 在每一圆孔的厚度中心、距离车轮中心轴315 mm位置沿径向粘贴应变计, 组成轮轨垂向力测试桥路. 在车轮辐板内外两侧、距离车轮中心轴200 mm位置处, 沿周向每隔45°粘贴应变计(图1(b)), 每一应变计粘贴位置与孔心位置对齐, 构成轮轨横向力测试桥路. 两组应变计按照图1(c)所示电桥组成测试桥路后, 即可获得轮轨力作用下的应变信号. 由此可见, 用于轮对左、右侧车轮轮轨力测试的应变计数量均为16片. 这些应变计组成的测试桥路, 实现了轮轨力连续测试. 轮对各测试桥路名称如表1所示.

需要说明的是, 本文采用的轮轨力测试方法主要有以下特点. (1) 采用在车轮腹板孔中性层粘贴应变计的方式测试轮轨垂向力, 不仅可以得到更大的轮轨垂向力信号, 而且可以最大限度地消除轮轨横向力信号对垂向力信号的影响, 从而获得更为准确的轮轨垂向力. (2) 在车轮腹板上选择合理的应变计粘贴位置, 并

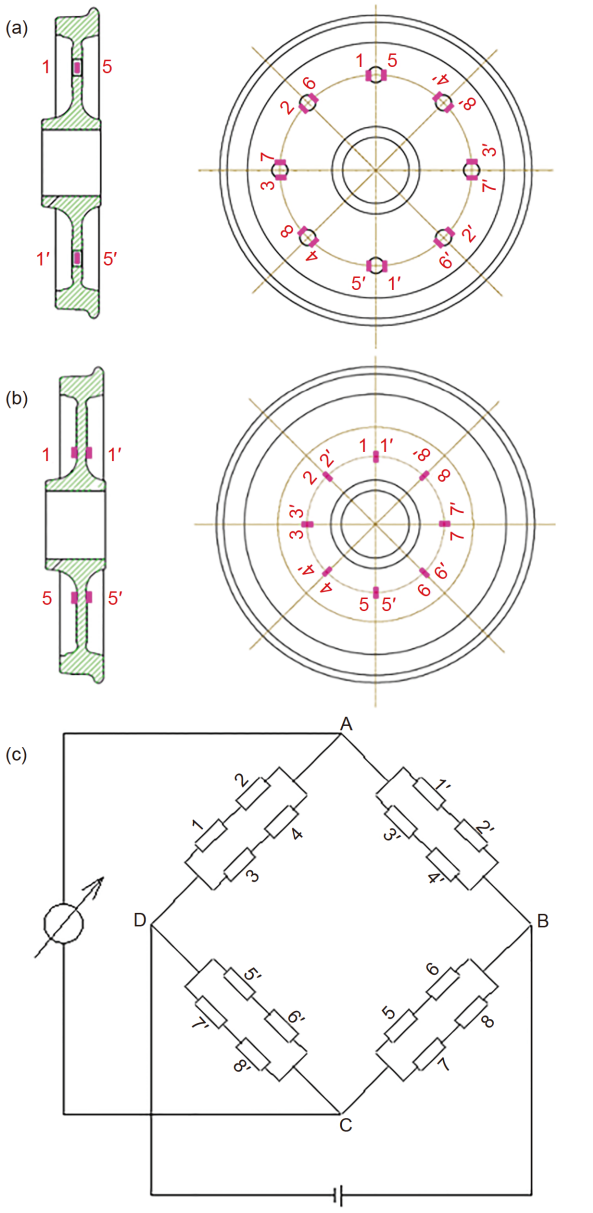


图 1 (网络版彩色)测力轮对贴片及测试电桥. (a) 轮轨垂向力测试应变计布置; (b) 轮轨横向力测试应变计布置; (c) 轮轨力测试桥路

Figure 1 (Color online) Strain gauge distribution and signal bridges implementation of wheel/rail forces measurement. (a) Strain gauges distribution of vertical wheel/rail force measurement; (b) strain gauges distribution of lateral wheel/rail force measurement; (c) signal bridge of wheel/rail forces measurement

在该腹板位置内外侧粘贴应变计, 可以最大限度地消除轮轨垂向力对轮轨横向力信号干扰, 从而获得质量更高的轮轨横向力信号. (3) 轮轨力测试电桥采用全桥方式, 各应变计组成的直流桥路输出, 可有效放大测试信号, 提高信噪比. (4) 车轮每转动一周可得到8个峰值点, 相对其他测试方法, 该方法获得的轮轨力连续性好,

表 1 轮轨载荷测试桥路名称

Table1 Signal bridge channels of wheel/rail loads measurement

序号	桥路名称	桥路测量位置	测量载荷
1	MLL	左轮辐板	左轮横向载荷
2	MLV	左轮辐板孔	左轮垂向载荷
3	MRL	右轮辐板	右轮横向载荷
4	MRV	右轮辐板孔	右轮垂向载荷

且输出信号的信噪比高. 数据处理过程中, 再通过求解轮轨垂向力信号的上下包络线, 可以得到高质量的轮轨力测试结果.

车辆线路运行过程中, 多种因素将引起轮轨接触点发生偏移, 为充分考虑轮轨接触点变化对轮轨载荷的影响, 这里设置了6种不同轮轨接触位置进行标定, 以获得最佳轮轨载荷标定系数. 本文获得的左、右侧车轮的垂向载荷-应力传递系数分别如式(1)和(2)所示:

$$K_{\mathrm{MLV}} = 18.28\ \mathrm{MPa/kN}, \tag{1}$$

$$K_{\mathrm{MRV}} = 18.17\ \mathrm{MPa/kN}. \tag{2}$$

获得的左、右侧车轮横向载荷-应力传递系数分别如式(3)和(4)所示:

$$K_{\mathrm{MLL}} = 12.69\ \mathrm{MPa/kN}, \tag{3}$$

$$K_{\mathrm{MRL}} = 14.06\ \mathrm{MPa/kN}. \tag{4}$$

式(1)~(4)的含义是, 将线路测试获得的应变信号转换为应力(MPa)信号后, 再除以这些标定系数, 即可得到对应的轮轨载荷(kN).

2 线路测试

试验列车采用八辆编组, 测力轮对安装于列车第4号车辆的第一位车轴位置. 列车运行于大西线的原平西站-忻州西站-阳曲西站区间, 单程约110 km. 测试期间, 列车多次往返, 最高速度368 km/h, 测试总里程约5666 km. 列车运行试验为重载往返试验. 为满足重载试验对轴重的要求, 试验运行前对列车进行了配重加载, 以达到要求的定员重量.

测试过程中, 数据采样频率为5000 Hz, 满足各测点动态响应频率范围要求. 完整采集了列车所有测试线路工况上的数据, 以保证测试数据的真实性和完整性, 这些数据主要涵盖了直线和曲线工况.

3 轮轨力时域特征

在轨道随机激扰、曲线以及道岔等线路不平顺以及车轮踏面缺陷等因素影响下, 轮轨系统将发生振动, 且列车运行速度越高, 振动越激烈. 这里对重车状态下列车匀速稳定运行时直线和曲线工况的载荷数据进行抽样, 分析其垂横向载荷时域特性. 由于测试用车轮为新用车轮, 不存在异常磨耗或擦伤等现象, 即车轮踏面为正常状态, 轮轨系统振动可认为主要由轨道激扰引起.

图2(a)和(b)分别给出了350 km/h直线工况下的轮轨垂向力和横向力时间历程. 由此可见, 在该高速直线区段, 轮轨垂向力最大值一般不超过120 kN, 最小值约为48 kN, 这与该区段轨道平顺性较好密切相关. 轮轨横向力主要在零位置附近波动, 最大值约为25 kN.

图2(c)给出了轮轨垂向力的功率谱密度. 由此可见, 轮轨垂向力的频率范围一般可超过1000 Hz, 但主要的功率谱密度成分在500 Hz以内, 尤其是10~400 Hz范围内较为明显. 这表明在该测试线路区段上, 轮轨力频率主要以该频率范围为主.

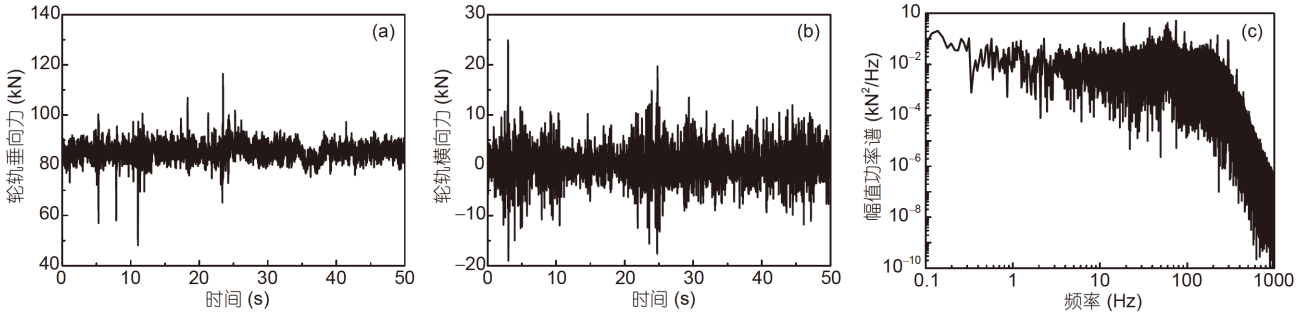


图 2 直线运行轮轨力时间历程. (a) 轮轨垂向力; (b) 轮轨横向力时间历程; (c) 轮轨垂向力功率谱

Figure 2 Wheel/rail force on straight section in time domain. (a) Vertical wheel/rail force in time domain; (b) lateral wheel/rail force in time domain; (c) power MSA of vertical wheel/rail force

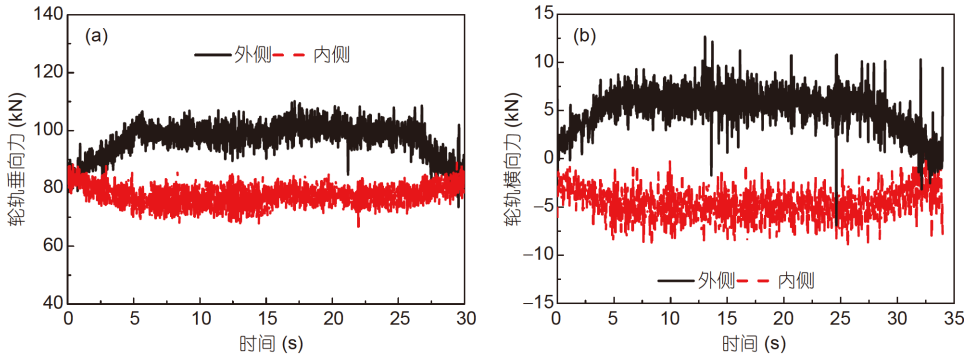


图 3 (网络版彩色)曲线通过轮轨力时间历程. (a) 轮轨垂向力; (b) 轮轨横向力
Figure 3 (Color online) Wheel/rail force on curve in time domain. (a) Vertical wheel/rail forces on curve; (b) lateral wheel/rail forces on curve

图3(a)和(b)分别给出了列车以350 km/h通过半径R=7000 m曲线的轮轨垂向力和横向力时间历程. 此时, 外、内侧车轮的轮轨垂向力发生了明显的增减载现象, 轮轨横向力也随之发生变化. 这里的曲线半径虽然较大, 但列车运行速度高, 因此轮轨力增减载现象较为明显. 此外, 由于曲线局部位置可能存在方向不平顺, 因而局部位置轮轨横向力变化较为明显.

对比图2和3轮轨力时间历程可知, 直线区段上, 轮轨垂向力和横向力有一定的相关性, 但不明显. 曲线区段, 轮对内外侧车轮的轮轨垂向力和横向力具有明显的相关性. 这是因为在直线区段上, 轨道激扰以随机不平顺为主. 在曲线区段, 轨道激扰不仅有随机不平顺, 还包括曲线这一激扰, 而后者对轮轨力影响明显.

4 轮轨载荷分布特征

为分析不同速度下的轮轨载荷特征, 这里以线路实测数据为样本, 选取典型直线和曲线工况下的轮轨垂向力和横向力数据进行统计, 编制不同速度等级下的64级载荷谱, 分析其载荷分布与列车运行速度、线路条件之间关系.

4.1 不同速度下轮轨载荷分布

这里对5种列车试验速度220, 260, 300, 300, 350 km/h对应的轮轨载荷数据进行抽样和统计. 对应的总里程约为12.2 km. 统计后, 轮轨垂向力和横向力分布如图4所示. 轮轨垂向力为抽样数据求解包络线后, 所有载荷数值的统计. 轮轨横向力为抽样数据所有载荷统计. 即这些统计值包含载荷历程中所有载荷.

由图4(a)和(b)可见, 轮轨垂向力总体上呈正态分布, 且左侧和右侧车轮的轮轨垂向力的波动中心在84 kN附近, 总体上接近轴重之半(83.4 kN), 这表明实际线路运行过程中, 轮轨垂向力主要围绕静轮重波动. 列车运行速度越高, 轮轨垂向力最大值也越大、轮轨垂向力最小值也越小. 左侧车轮的轮轨垂向力最大值和最小值分别为156.6和27.1 kN, 右侧车轮的轮轨垂向力最大值和最小值分别为130.0和21.5 kN, 这种差异可能与轮轴上齿轮箱安装位置为非对称有关.

由图4(c)和(d)可见, 不同速度级下左右侧轮轨横向力分布规律基本一致, 都以小载荷为主, 这是由于直线运行时, 线路条件好且列车运行稳定, 轮对受到的轮轨横向力较低. 随着列车运行速度增加, 横向载荷最值逐渐增大, 这表明轮对横向振动激烈程度随之增大. 但是, 速度越接近350 km/h, 轮轨横向力增大速率越低. 或者说, 当车辆速度低于260 km/h时, 其轮轨横向力与350 km/h速度对应的横向力有明显差异. 如220 km/h速度下的轮轨横向力, 约为350 km/h速度下横向力的三分之二. 当速度介于300和350 km/h时, 轮轨横向力差异不明显, 这一现象在轮轨垂向力值上也有所体现.

图5给出了上述抽样数据段对应的轮轨垂向力和横向力峰谷值统计结果. 这种统计方式只计及每一载荷循环的峰值和谷值, 不包含峰值和谷值之间的中间值. 这种统计方式可以准确反映载荷峰谷值与载荷频次之间关系, 从而有利于车轮结构可靠性计算和试验. 图5中, 左侧纵坐标和下部横坐标分别表示轮轨垂向力对应的频次和载荷值, 右侧纵坐标和上部横坐标分别表示轮轨横向力对应的频次和载荷值, 且实心标记代表垂向力, 虚心标记代表横向力. 图6与此类似, 不再赘述.

图5表现出来的规律与图4表现出来的一致, 但频次明显减少. 此外, 随着列车运行速度增加, 轮轨横向

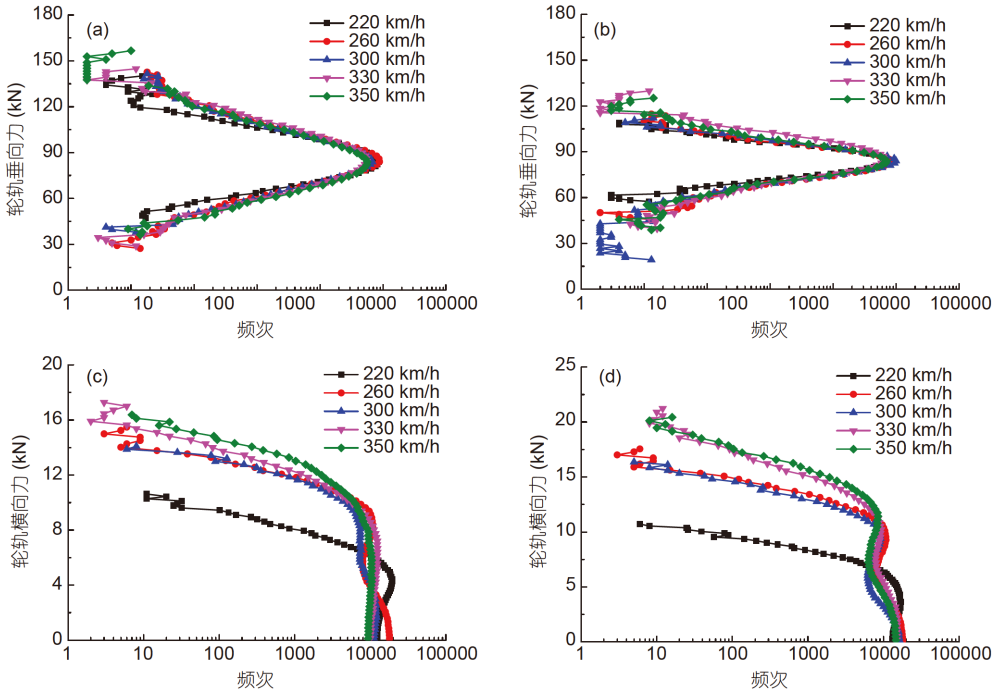


图 4 不同速度下轮轨力载荷谱. (a) 左侧车轮垂向力; (b) 右侧车轮垂向力; (c) 左侧车轮横向力; (d) 右侧车轮横向力

Figure 4 Wheel/rail forces distribution with different operation speed. (a) Vertical wheel/rail forces distribution of left wheel; (b) vertical wheel/rail forces distribution of right wheel; (c) lateral wheel/rail forces distribution of left wheel; (d) lateral wheel/rail forces distribution of right wheel

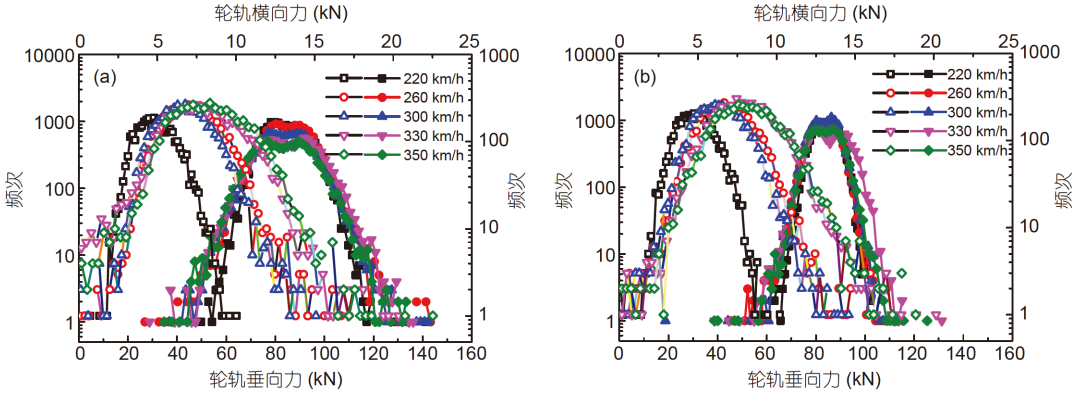


图 5 直线工况不同速度级轮轨载荷谱(峰谷值). (a) 左轮轮轨力分布; (b) 右轮轮轨力分布

Figure 5 Wheel/rail loads distribution on straight section with peak-valley value. (a) Peak-valley loads distribution of left wheel; (b) peak-valley loads distribution of right wheel

力随之增大的现象更为直观、明显. 轮轨横向力分布不对称, 更接近呈威布尔分布. 而且, 虽然图6中轮轨横向力载荷谱对应的最大频次较垂向力载荷谱对应的最大频次低, 但每一速度级的轮轨横向力载荷谱和垂向力载荷谱对应的总频次几乎完全一致.

需要说明的是, 这里的轮轨垂向力和横向力最大值和最小值, 与图2中对应的值有所偏差, 这与两种图示对应的抽样数据段和数据量、载荷统计后被分成64级且每一级数值取其上下级值的平均值有关.

4.2 曲线通过轮轨载荷分布

列车5种速度220, 260, 300, 300, 350 km/h曲线通过工况下, 左、右侧车轮的轮轨垂向力和横向力如图6所示, 对应的曲线半径包括R=7000, 8000和10000 m三种

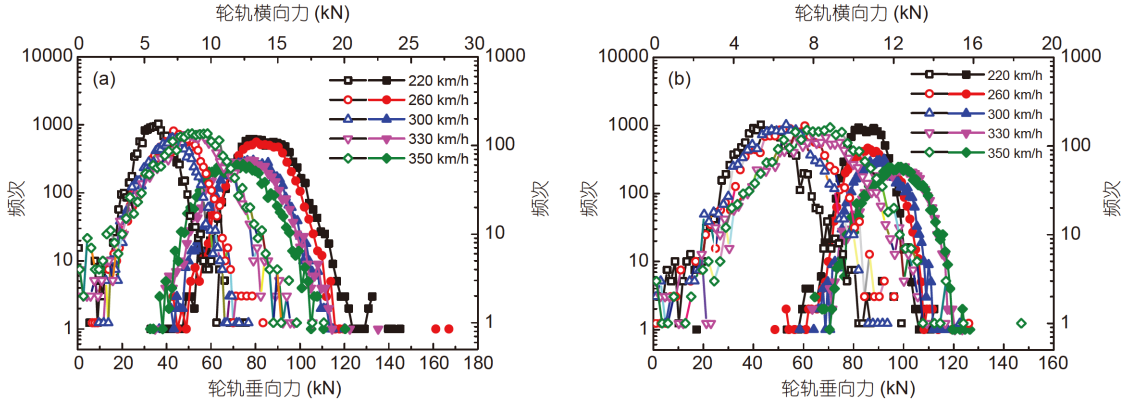


图 6 曲线通过轮轨载荷谱. (a) 左轮轮轨力分布; (b) 右轮轮轨力分布

Figure 6 Wheel/rail loads spectrum with different operation speed on curve. (a) Wheel/rail forces distribution of left wheel; (b) wheel/rail forces distribution of right wheel

曲线, 对应的总里程约为7 km.

由此可知, 随着列车运行速度变化, 左右侧车轮轮轨垂向力的波动中心发生偏移, 其中左侧垂向力逐渐增大、右侧垂向力相应减小, 且随速度增加左右侧车轮的轮轨垂向力幅值差异越来越明显. 此外, 当列车通过曲线的速度高于或低于曲线对应的平衡速度时, 轮轨横向力的峰值均有所增大, 这表明列车曲线通过时, 通过速度对轮轨横向力的影响起主导作用.

4.3 曲线半径对轮轨载荷影响

为进一步对比曲线半径对轮轨载荷分布的影响, 这里给出了列车以350 km/h通过半径为R=7000 m和R=8000 m曲线时轮轨力分布.

由图7可见, 两种半径曲线下, 轮对左右侧车轮的轮轨垂向力差异明显, 表现在波动中心发生了明显偏移, 这种偏移程度与曲线半径、线路超高以及欠超高等因素密切相关. 需要说明的是, 这里的载荷包含了抽样数据的所有采样点.

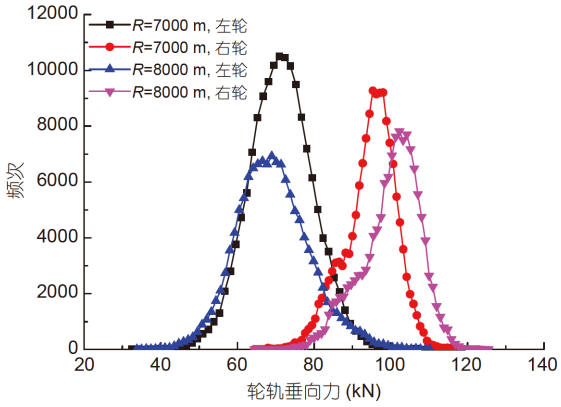


图 7 不同正曲线半径轮垂向力载荷谱

Figure 7 Vertical wheel/rail load spectrum with different operation speed on curve R=7000 m and R=8000 m

5 结论

本文制作了测力轮对, 实际线路测试了某型高速动车组的轮轨力, 分析了轮轨垂向力和横向力的载荷特征, 抽样了典型工况下的载荷数据, 给出了轮轨垂向和横向载荷分布规律. 结论如下:

(1) 由于线路条件和车轮踏面状态良好, 列车350 km/h直线运行较为稳定, 最大轮轨垂向力约为156.6 kN, 最大轮轨横向力为26 kN.

(2) 直线工况下, 轮轨垂向力一般围绕静轮重值波动, 且有列车运行速度越高, 轮轨力极值越大. 轮轨横向力以小载荷为主, 且速度越高, 波动范围越大.

(3) 曲线通过时, 左右侧车轮轮轨垂向力发生偏载, 一侧载荷增加(减小), 另一侧载荷减小(增加), 而且随速度的增加, 偏载更加严重.

需要补充的是, 轮轨高速动车组轮轨载荷及分布特征, 虽然可通过建立车辆动力学模型并借助数值计算等理论方式获得, 但是实际线路测试获得轮轨力, 并进一步分析轮轨载荷的分布特征, 能够为轮轨系统结构可靠性理论和试验研究奠定良好基础.

参考文献

1 Garg V J, Dukkipati R V. Dynamics of Railway Vehicle System. Olando: Academic Press, 1984
2 Baeza L, Roda A, Carballeira J, et al. Railway train-track dynamics for wheelflats with improved contact models. Nonlinear Dyn, 2006, 45: 385–397
3 Braghin F, Bruni S, Diana G. Experimental and numerical investigation on the derailment of a railway wheelset with solid axle. Vehicle Syst Dyn, 2006, 44: 305–325
4 Thomas D, Berg M, Stichel S. Measurements and simulations of rail vehicle dynamics with respect to overturning risk. Vehicle Syst Dyn, 2010, 48: 97–112
5 Zastrau B W, Knothe K, Wille R. Advanced contact mechanics? Road and rail. Vehicle Syst Dyn, 2001, 35: 361–407
6 Ayasse J B, Chollet H. Determination of the wheel rail contact patch for semi-Hertzian conditions. Veh Syst Dyn, 2005, 43: 157–170
7 Piotrowski J, Chollet H. Wheel-rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact. Vehicle Syst Dyn, 2005, 43: 455–483
8 Kargarnovin M, Younesian D, Thompson D, et al. Ride comfort of high-speed trains travelling over railway bridges. Vehicle Syst Dyn, 2005, 43: 173–197
9 Elkins J A. Prediction of wheel/rail interaction: The state-of-the-art. Vehicle Syst Dyn, 1992, 20: 1–27
10 Endlicher K O, Lugner P. Computer-simulation of the dynamical curving behaviour of a railway-bogie. Vehicle Syst Dyn, 1990, 19: 71–95
11 Jin X S. Wheel/rail creep theory and test research (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999 [金学松. 轮轨蠕滑理论及其试验研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 1999]
12 Zhang W H. Dynamic operation simulation of railway vehicle (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1996 [张卫华. 机车车辆运行动态模拟. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 1996]
13 Yao J W. Locomotive Dynamics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [姚建伟. 机车车辆动力学. 北京: 科学出版社, 2014]
14 Zhai W M. Vehicle-track vertical copuling dynamics (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1992 [翟婉明. 车辆-轨道垂向耦合动力学. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 1992]
15 Ren Z S. Wheel/Rail Multi-Point Contact and Vehicle-Turnout System Dynamic Interactions (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [任尊松. 轮轨多点接触及车辆-道岔系统动态相互作用. 北京: 科学出版社, 2014]
16 Ren Z, Sun S, Li Q, et al. Experimental studies of load characteristics of bogie frames for 350 km/h EMUs. P I Mech Eng F-J Rai, 2012, 226: 216–227
17 Ren Z, Liu Z M. Vibration and frequency domain characteristics of high speed EMU (in Chinese). J Mech Eng, 2013, 49: 1–7 [[任尊松, 刘志明. 高速动车组振动传递与频率分布规律研究. 机械工程学报, 2013, 49: 1–7]
18 Zeng Y Q, Wang W D, Gan D W, et al. Theory of high accuracy load measuring wheelset (in Chinese). J China Railway Soc, 1998, 20: 28–34 [曾宇清, 王卫东, 甘敦文, 等. 测力轮对连续测量的理论与实践. 铁道学报, 1998, 20: 28–34]

Summary for “高速动车组轮轨载荷分布特征”

Wheel/rail load distribution characteristics of high speed EMU

Zunsong Ren[1*], Dandan Song[1], Xincan Jin[1], Jie Cao[1] & Qiuze Li[2]

[1] *School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*
[2] *CRRC Changchun Railway Vehicles Company Limited, Changchun 130062, China*
* Corresponding author, E-mail: zsren@bjtu.edu.cn

Wheel/rail forces have a large effect on the dynamics and the structural reliability of the high-speed vehicle/track system. Many studies present peak values and amplitudes of the wheel/rail forces in the time domain, but the statistical distribution characteristics of the wheel/rail, i.e. so-called load collectives are rarely found. One type of Chinese standard high speed electric multiple-unit (EMU) is designed and manufactured in China in 2015. In order to obtain load collectives for this high-speed EMU, some components of the vehicle such as the wheelset, bogie frame and anti-roll bar are modified to measure the wheel/rail forces, primary suspension loads, motor loads, dampers loads and the loads in the anti-roll bar. The method how to measure the wheel/rail vertical and lateral forces is presented with strain gauge fixing schedule on the wheel web, test bridge constitution and force/strain calibration coefficient in this paper. The wheel/rail forces are measured during field experiments on the Datong-Xi’an high speed railway line in 2016. The single way distance of the field experiment is approximately 110 km. The total running distance in the tests is 5666 km with a top speed of 368 km/h. The typical field test speed of the train includes 220, 260, 300, 330 and 350 km/h. After processing the measured data, the wheel/rail vertical and lateral forces are obtained in time domain. The dynamic characteristics of the wheel/rail forces are analyzed when the train operates at a speed of 350 km/h in straight sections and during curve negotiation. The Envelope Method and the Peak Value Selection Method are introduced for cycle counting and to evaluate the statistical load distribution. The wheel/rail load distributions are presented for different operation speeds of the train and different curve radii. The results show that the vertical wheel/rail forces are nearly normally distributed. The lateral wheel/rail forces approximately show a Weibull distribution. The operation speed of the train has a large influence on the wheel/rail forces on the straight section of the track. The fluctuation range of the wheel/rail vertical force is approximately from 60 to 110 kN as the operation speed is 220 km/h. The vertical maximum force is 156.6 kN and the lateral maximum force is 26 kN when the train operates with 350 km/h on the straight section. Compared with the lateral maximum force with speed 220 km/h, the lateral maximum force increases one time as the operation speed is 350 km/h. The curve radius and the curve passing speed of the EMU have effect on the wheel/rail loads too. The load collectives shift as the train negotiates curves. The knowledge of the load spectra is very helpful to study the operation safety and the risk for structural damages of the high-speed train wheelset and the track.

high speed EMU, force measuring wheelset, field experiment, wheel/rail force, load distributions

doi: 10.1360/N972018-01275