

标准动车组轮轨载荷特征及影响因素研究^{*}

宋韦哲[†] 任尊松 魏雪 李俊杰

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要 随着列车速度的不断提高,轮轨与线路之间的作用力加剧,轮轴的工作状况愈加恶劣,而轮轨载荷与高速轨道交通系统的安全性和可靠性紧密相关.本文以国内某型动车组轮轨载荷为研究对象,制作了测力轮对,在大西线上完成了线路测试.对获得的轮轨力时间历程进行数据处理,并按不同速度等级、线路区段、每一趟往返等不同工况进行抽样和统计,编制 64 级时域载荷值谱和峰谷值谱,分析其变化趋势及原因.结果表明,轮轨垂向载荷一般为正态分布,波动中心为静轮重;横向力一般围绕零值波动.列车运行速度对轮轨垂向力和横向力波动范围影响明显,且速度越高,波动范围越大.列车上下行工况对轮轨力几乎无影响.曲线半径越小,轮轨力变化越大.车辆空载和满载状态对轮轨垂向力有影响,对横向力影响不明显.本文得出的载荷特征及影响因素为后续轮轨疲劳及动力学研究提供试验和理论基础.

关键词 轮轨力, 线路试验, 载荷谱, 载荷特征, 影响因素

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-021

引言

轮轨关系是轨道交通系统最重要和最基本的关系.轮轨力作用在车轮和钢轨上,引导列车在钢轨上稳定运行.不合理的轮轨力不仅引起车辆脱轨、倾覆甚至部件断裂,而且还会造成轨道变形和磨损,影响轨道使用寿命.

目前,国内高速动车组最高运营速度为 350km/h.列车高速运行时,轮轨力不仅进一步影响其安全性和舒适性,而且对车辆结构的可靠性提出了更高的要求,尤其是必须保证轮轴可靠性.为此,需要深入研究轮轨载荷特征,获得其峰值、幅值、频次以及分布范围等规律,为确保列车运行安全性和可靠性奠定坚实的基础.

目前已有诸多文献对轨道机车车辆动力学及轮轨载荷进行了理论研究.Xia^[1]通过货车系统性模型,利用车体加速度进行了轮轨力反演识别.Barke^[2]通过模拟车辆椭圆化数学模型分析了高速车轮椭圆化与车辆稳定性的关系.国内,翟婉明^[3,4]提出并开展了车辆-轨道垂向耦合动力学模型的研究,并将其应用于高速铁路的轮轨动力作用分析.王开云^[5]等人运用铁道机车车辆-轨道耦合动

力学理论,研究了高速条件下曲线轨道上的轮轨动态接触几何关系.张冰冰^[6]基于 Hermite 插值的离散变分方法,建立了适用于长时间仿真情况的离散变分数学模型,可在步长较大时仍精确保持约束方程且系统总能量总为有界变化,计算结果精确度较高.

既有文献侧重采用相关理论,研究轨道车辆系统的振动和安全性,少有文献从实际线路测试的角度,深入研究轮轨载荷及其分布特征.载荷谱研究最先开始于航天领域,铁路方面虽起步较晚,但仍取得了一定成果^[7,8].日本相关机构通过对新干线运行列车进行轮轴动应力试验,提出了轮轴在过弯道时所受应力的变化主要是由轮缘与轨道接触所产生的横向载荷所引起的.德国 DB Systemtechnik 公司^[9]生产连续式测力轮对,并且成立了运行试验组承担车辆在线运行和振动试验来全面评估车辆动力学性能.国内方面,张曙光^[10]给出了实测载荷谱的建立方法,并基于实测载荷谱进行了损伤一致性校准.相关高校研究室^[11-14]也开展了一系列载荷谱研究工作,对国内通用线路载荷谱进行实测试验,研究其载荷响应特征.但对高速动车组轮轴载荷特征的研究还相对较少.

2019-08-22 收到第 1 稿,2020-03-16 收到修改稿.

^{*} 国家重点研发计划任务课题(2017YFB1201304-10)和国家自然科学基金资助项目(11790281)

[†] 通讯作者 E-mail: 17121324@bjtu.edu.cn

因此,本文以国内某型高速动车组轮轨载荷作为研究对象,制作可以连续测量的测力轮对,依托在大西线上测试试验得到的轮轨数据,分不同速度等级以及直线曲线、空载满载、上行下行等多种典型工况,统计轮轨垂向载荷和横向载荷的峰谷值、时域载荷值等多种特征量,编制64级载荷谱,从而对轮轨力载荷特征进行分析,开展标准动车组轮轨载荷特征的研究。

1 轮轨载荷识别方法

1.1 轮轨载荷测试方法

本文采用直接测量法测试轮轨力.相对于间接测量法,轮轨力直接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。

根据准静态法原理和惠斯登全桥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.将实际线路采集到的车轮在外力作用下的应变信号,结合载荷-应力传递系数计算获得轮轨力。

基于自扰大、互扰小的载荷识别点选取原则,确定测力位置.测力轮对横向力识别位置为车轮辐板半径 $R=200\text{mm}$ 处,沿周向从 0° 开始,每隔 45° 在辐板的内外侧沿同一圆周共计粘贴16个应变计,如图2(a)所示.轮轨横向力测试电桥如图2(b)所示。

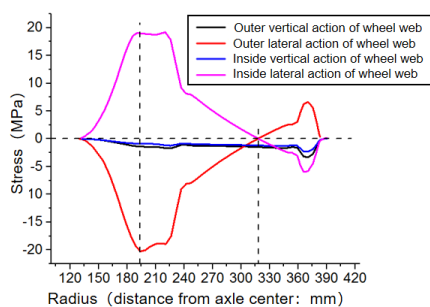
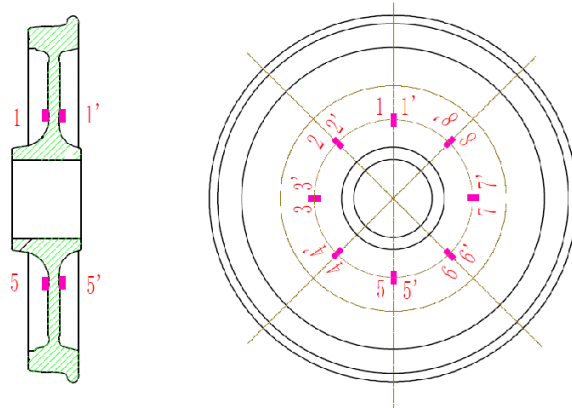


图1 点应力值沿半径方向的分布图

Fig.1 Joint stress value distribution along the radius direction

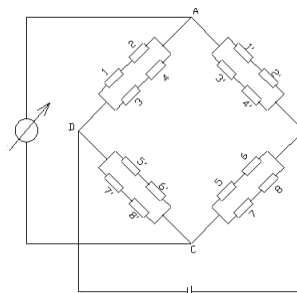
垂向测力点与横向力测试点位置不同,在车轴处.根据车轮内外侧测点应力值径向分布图(即图1),发现车轮辐板处测得的垂向力响应最大、横向力相应最小处($R=320\text{mm}$),两者差距并不显著,且若要放大轮轨垂向力测试信号,需要对辐板打孔,

耗时且费用较高,因此,轮轨垂向力测试点桥贴片的位置设置位置如图2(c)和图2(d)所示,再利用材料力学中载荷、弯矩及应变三者之间关系,获得轮轨垂向力.其测试电桥如图2(e)所示.左右车轮各桥路命名见表1。



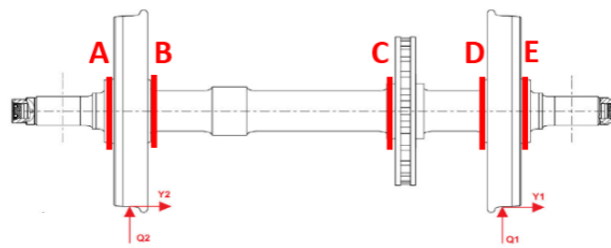
(a) 辐板面贴片位置

(a) Patch position on the web



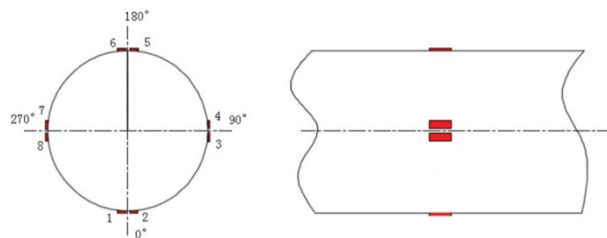
(b) 轮轨横向力测试桥路

(b) Signal bridge of wheel/rail lateral forces measurement



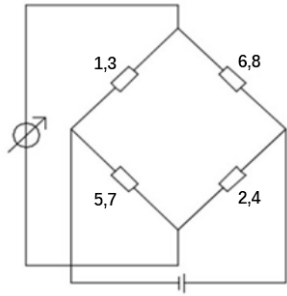
(c) 车轴贴片方案

(c) Patch position on the web axle



(d) A、E断面贴片方式

(d) Patch method on A, E section



(e) 轮轨垂向力测试桥路

(e) Signal bridge of wheel/rail vertical forces measurement

图2 测力轮对贴片及测试桥路

Fig.2 Strain gauge distribution and signal bridges implementation of wheel/rail forces measurement

表1 轮轨载荷测试桥路命名

Table1 Name of test bridge for wheel/rail force

| Name of bridge | Location of test bridge | Form of test force |
|----------------|-------------------------|-------------------------------|
| MLL | Left wheel spoke | Lateral force of left wheel |
| MVA | Left axle | Vertical force of left wheel |
| MRL | Right wheel spoke | Lateral force of right wheel |
| MVE | Right axle | Vertical force of right wheel |

根据轮轨接触点的位置变化,垂向进行4种标定方案,横向进行2种标定方案.均在轮对两侧进行线性台阶式的加载,加载角度 0° 到 360° ,每 15° 加载一次.选取靠中间位置的接触点作为数据处理的标准工况,进行加载试验,对其载荷及对应的应力作最小二乘拟合,拟合直线的斜率即为应力-载荷传递系数:

$$K_{MVA} = 17.2043 \text{ MPa/t} \quad K_{MVE} = 15.7456 \text{ MPa/t}$$

$$K_{MLL} = 13.9450 \text{ MPa/t}$$

$$K_{MRL} = 14.0278 \text{ MPa/t}$$

1.2 轮轨载荷线路测试

试验车型为国内某A型动车组,采用八节编组形式,测力轮对安装在列车第四节车厢第一轴.测试线路为大西线,里程为9098km,其中单程为110km;测试速度级为160km/h-350km/h,每个速度级往返4-8次不等;采样频率为5000Hz.测试由重载和空载试验两部分组成,重载轴重为16.8t,空载轴重为14t.试验运行前对列车进行了配重加载为以满足重载试验对轴重的要求.具体的线路测试工况如表2所示.

2 轮轨载荷特征

2.1 轮轨载荷时域特征分析

对所有测试信号进行处理,获得了轮轨力时间

表2 线路实测记录

Table 2 Records of route test

| Running section | Time condition | Speed class(km/h) |
|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 3-21 | Heavy load | 160, 180, 200, 220 |
| 3-22 | Heavy load | 240, 260, 280, 300 |
| 3-23 | Heavy load | 300, 320, 330 |
| Yuanping-Yangqu | 3-26 Heavy load | 340, 350 |
| 3-27 | No-load | 160, 180, 200, 220 |
| 3-28 | No-load | 240, 260, 300, 310, 320, 330 |
| 3-29 | No-load | 340, 350 |

历程.对时间历程数据进行抽样和分析,得到了多种运行速度和线路工况下的轮轨力特性.这里以直线和曲线、低速度(160km/h)和高速度(340km/h)为例,分析轮轨垂向力和横向力的时域特征.

图3给出了340km/h直线工况下轮轨垂向力和横向力时间历程.由此可见,直线条件下满载车辆轮轨垂向力最大值不大于115kN,最小值不低于66kN,幅值变化范围约为50kN.左右侧车轮的轮轨垂向力值基本一致,波动中心均为83kN,此值约为满载轴重(16.8t)一半.直线工况下轮轨横向载荷围绕0kN附近波动,变化范围一般在 $-20\text{kN} \sim 20\text{kN}$,左侧(齿轮箱侧)车轮的轮轨横向力略大于右侧(非齿轮箱侧)车轮的轮轨横向力.

图4给出了列车以340km/h和160km/h两种速度通过同一曲线A时的轮轨垂向力.这里的曲线半径 $R=10000\text{m}$,超高量 $h=50\text{mm}$,全长 $s=4.4\text{km}$.由此可见,曲线工况下,轮对内外侧车轮的轮轨垂向力产生了明显变化,表现为一侧轮轨垂向力增加、另一侧轮轨垂向力减小.内侧车轮不断增载,外侧车轮不断减载.对比图4(a)和4(b)可见,当列车曲线速度为340km/h时,曲线外侧轮轨力增载、内侧轮轨力减载,当列车曲线速度为160km/h时,曲线内外侧轮轨力减增载与之相反.

依据式(1),该曲线对应的平衡速度约为206.1km/h.因此当列车运行速度高于平衡速度时,列车曲线通过引起的离心力大于外轨超高引起的重力分力,形成欠超高,使得轮对向曲线外侧偏移,致使外侧轮轨垂向力增加、内侧轮轨垂向力减载.当列车运行速度低于曲线平衡速度时,外轨超高引起的重力分力大于曲线通过引起的离心力,形成过超高,轮对向内侧偏移,使得内侧轮轨垂向力增加、外侧轮轨力减载.

$$v_{\text{平衡}} = \sqrt{\frac{ghR}{s}} \quad (1)$$

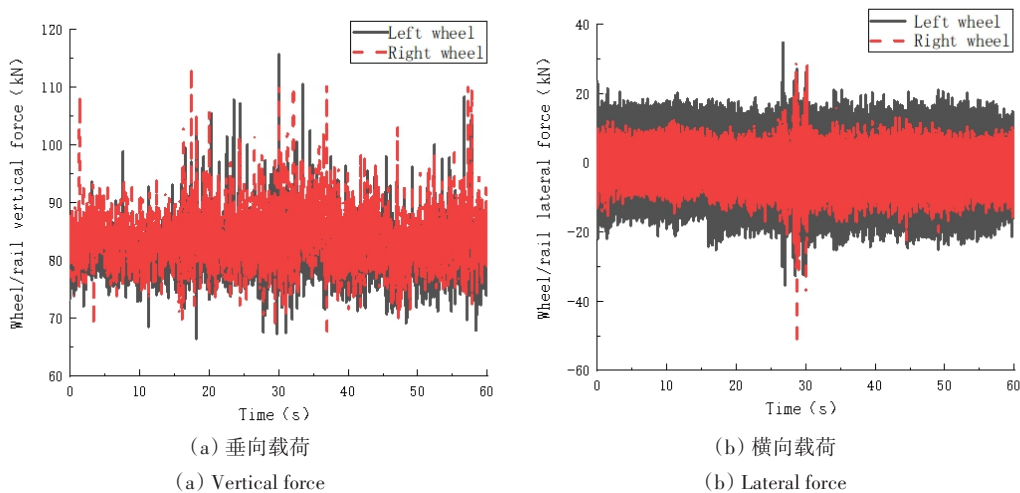


图3 直线工况下轮轨载荷时间历程(340k/h)

Fig.3 Time history of wheel/rail force in straight line(340k/h)

式(1)中, v 平衡为列车曲线通过的平衡速度, g 为重力加速度, h 为外轨超高, R 为曲线半径, s 为轮对滚动圆跨距.另外,340km/h速度下的外侧轮轨

垂向力的最大值和均值,均大于160km/h速度下的轮轨垂向力最大值和均值,这与两者平衡速度之间的差值大小密切相关.

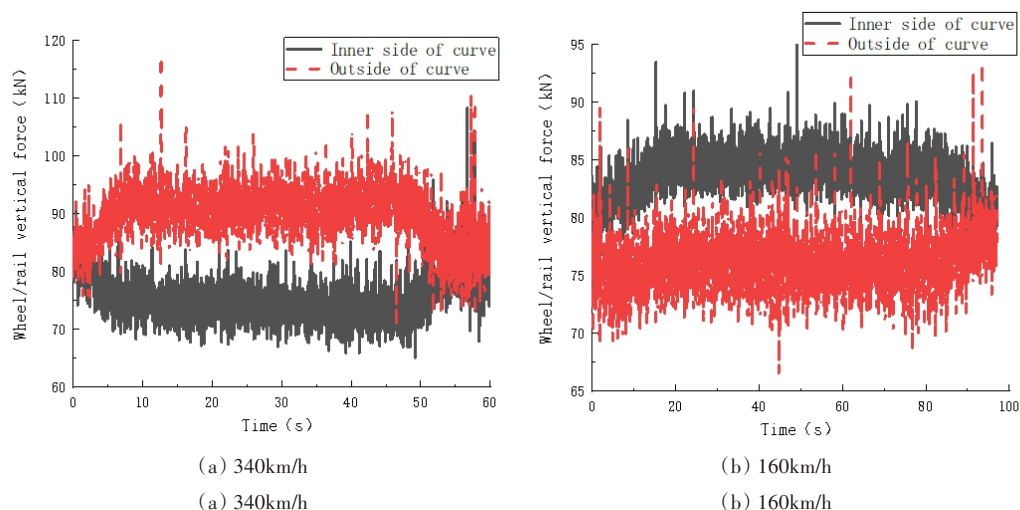


图4 曲线工况下垂向载荷时间历程

Fig.4 Time history of wheel/rail force in curve

图5给出与图4对应的轮轨横向力时间历程.该图表现出来的特性与轮轨垂向力基本一致,且仍有列车曲线通过速度越高,轮轨横向力越大.

2.2 轮轨载荷频域特征分析

对轮轨载荷时域信号进行傅里叶变换,将振动信号从时域转变到频域,分析实测数据振动能量变化规律,得到轮轨载荷的主要振动频率.

图6给出了轮轨垂向力和轮轨横向力的功率谱能量值.轮轨垂向力频率范围大概集中分布在32Hz左右,能量“尖峰”与车轮的转动频率有关.车轮的转动频率可由公式(2)求得,当车速为340km/

h时,车轮转动频率约为33Hz,与频谱图分析一致.横向力主要的功率谱能量值分布在100Hz以内,在10~50Hz区段较为明显.不同速度能量“尖峰”的位置不同,均与车轮的转动频率相关.

$$f_{\text{转}} = \frac{v}{2\pi r} \quad (2)$$

式(2)中, $f_{\text{转}}$ 为车轮的转动频率, v 为列车的运行速度, r 为车轮的转动圆半径.

3 轮轨载荷谱及分布规律

为了充分利用轮轨载荷时间特征,得到更多的

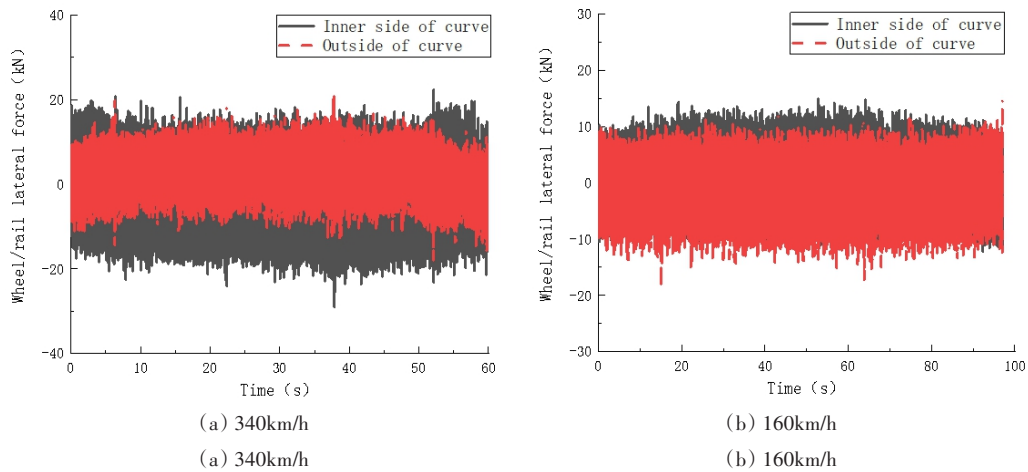


图 5 曲线工况下横向载荷时间历程

Fig.5 Time history of wheel/rail lateral force in curve

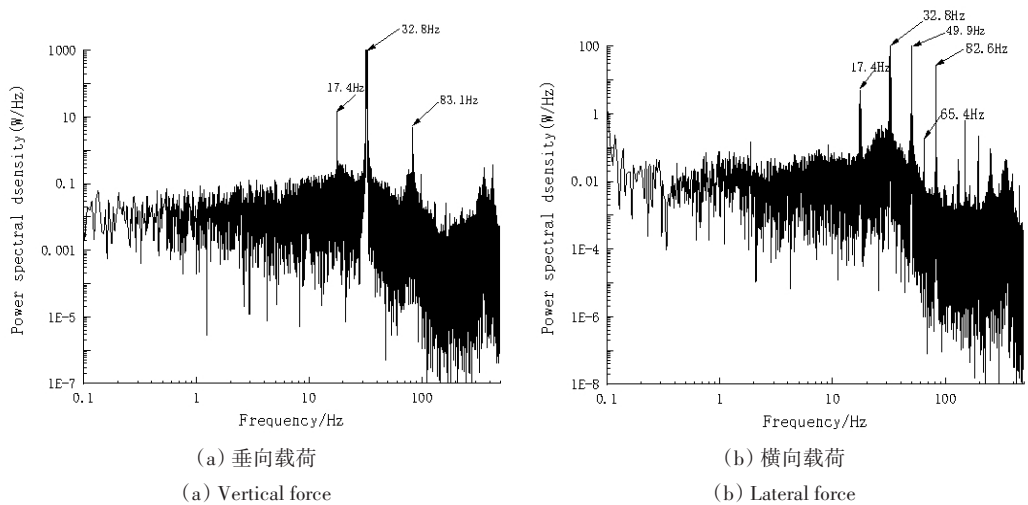


图 6 轮轨力载荷频谱图(340km/h)

Fig.6 Spectrogram of wheel/rail force(340km/h)

轮轨载荷信息和分布特征,本节提取了轮轨载荷时间历程中所有的载荷值和峰谷值作为特征量,对其进行频次统计,得到了轮轨垂向力和轮轨横向力 64 级载荷谱。

需要说明的是,横向载荷的处理方式为直接对抽样数据进行统计.垂向载荷(因为不可能为负值且波动中心在 0kN 附近,故其求取方式与横向载荷不同)为对抽样的时间载荷历程利用 Origin 软件进行上包络线拟合的方式获得,得到类似正弦(余弦)的波形,我们近似认为是真实的轮轨垂向载荷时间历程。

3.1 速度对轮轨载荷分布规律影响

图 7 和图 8 给出了抽样选取列车上行的 6 种不同速度等级(160km/h、200km/h、240km/h、280km/h、320km/h、350km/h)下轮轨载荷数据的频次统计情

况.图 7 中,下方横坐标表示轮轨垂向力载荷值,上方横坐标表示轮轨横向力载荷值,左侧纵坐标则表示垂向力和横向力对应的频次,且实心图标表示垂向力,空心图标表示横向力.图 8 与此类似,不再重复。

图 7 给出了直线工况下轮轨垂向力和轮轨横向力对应的载荷谱和峰谷值谱.其中,图 7(a)和图 7(b)为载荷谱图.直线工况下,轮轨垂向力总体呈正态分布,左右轮轮轨垂向力都围绕静轮重值波动.并且随着列车运行速度的提高,轮轨垂向力波动幅度变大.以左轮为例,低速 160km/h 时轮轨垂向力幅值仅为 36kN,而高速 350km/h 则达到 67kN,增长近一倍.对于轮轨横向力,其分布不再是正态分布,而是由两个很小的峰组合而成,并且连接两个小峰的谷(约为 0kN)频次很高.并且,不同速度

等级下,横向力分布均以小载荷为主.直线运行时,列车运行稳定且测试线路条件良好,致使轮对受到的横向力不高.

载荷值统计中将轮轨载荷历程中的所有点都进行了统计,这种统计方法虽然可以看到载荷的总体分布范围,对于后续运动学研究有所帮助,但为了研究更真实的轮轨载荷情况,又对其进行了峰谷值载荷特征的提取.

图7(c)和图7(d)则为上述抽样数据段对应的轮轨垂向力和横向力的峰谷值统计结果.这种统计方法只包括载荷时间历程中的峰值和谷值,即只计入最大值点和最小值点,体现了载荷的波动范围,与疲劳损伤密切相关,有利于车轮可靠性的计算和试验.

峰谷值图表现出的统计规律与载荷值图基本

一致,只不过频次明显减少,约100倍.采样频率5000Hz,即每0.0002s采样一次,假设车轮直径 $R=0.9\text{m}$,取列车运行速度中间值 $v=250\text{km/h}$,则车轮转动一周所需的时间约为 $t=0.04\text{s}$,期间采样点个数为200个,而峰谷值谱只计入波形中的峰值与谷值点为2个,正好相差100倍.

轮轨横向力峰谷值同样包含两个峰,近似为两个正态分布数据拟合后的情况,两个峰一个为正值,一个为负值,分布在0kN两侧.并且,随着列车运行速度的增加,横向力也有增大的趋势,但不如垂向力明显.峰谷值统计分布不同于载荷统计分布的是0kN的频次接近于0.因为车辆蛇形运动和蠕滑作用,导致车辆运行过程中出现摇摆现象,从而横向力出现有正有负的情况.

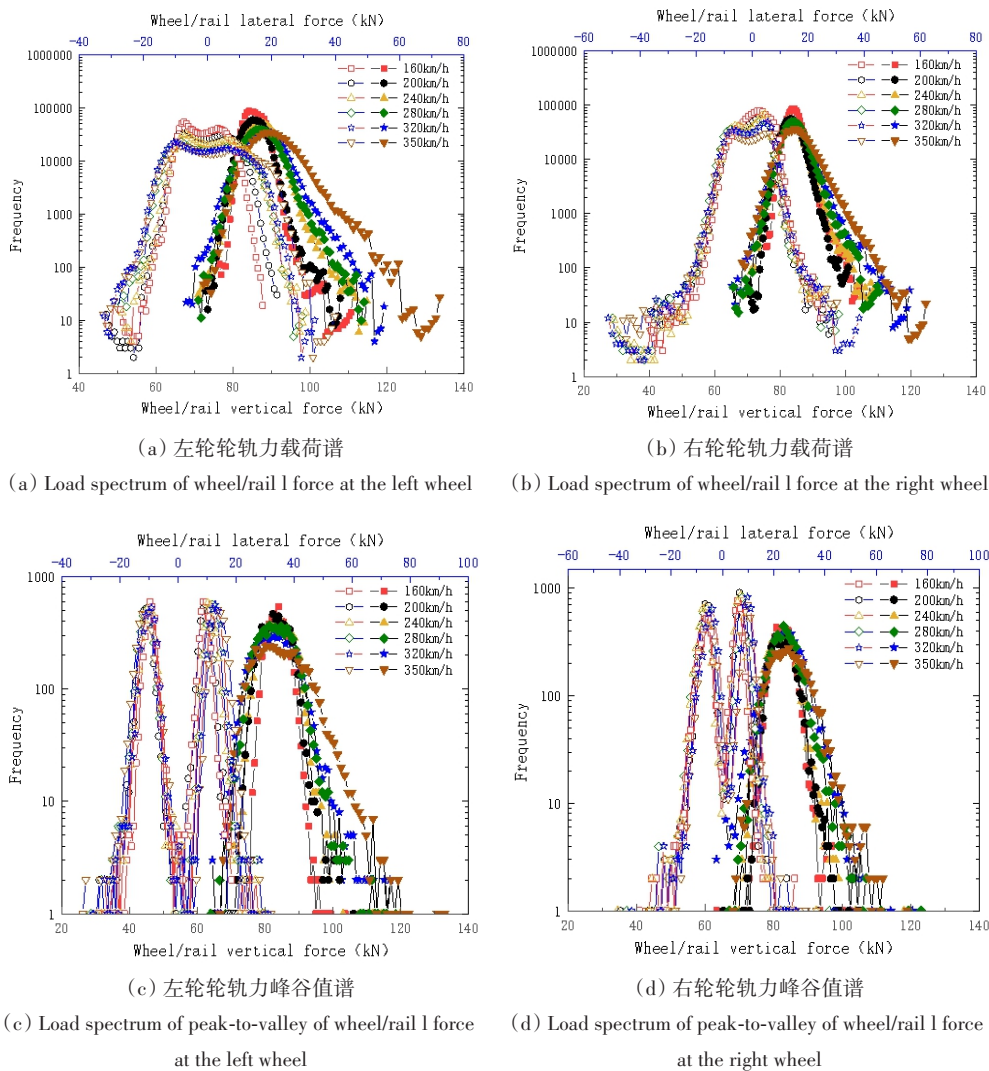


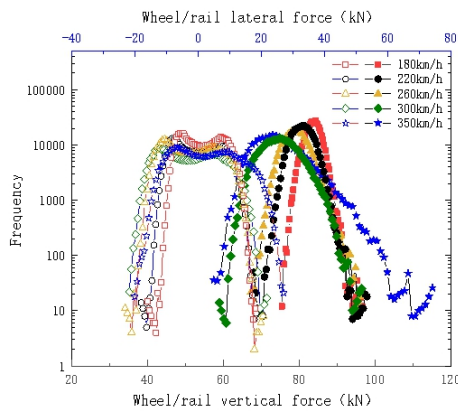
图7 直线工况不同速度级轮轨力
Fig.7 Wheel/rail force at different speeds in straight line

图 8 为列车匀速通过半径 $R=10000\text{m}$, 超高量 $h=50\text{mm}$ 的 A 曲线时得到的载荷分布特征. 进入曲线工况, 随着列车运行速度的增加, 左右侧轮轨垂向力的波动中心都发生了偏移, 其中左轮(内侧)垂向力逐渐减小, 右轮(外侧)垂向力逐渐增大, 且左右侧垂向力幅值差异越来越明显. 平衡速度前文已求得为 206.1km/h , 运行速度小于 206.1km/h 时, 左轮增载右轮减载; 运行速度大于 206.1km/h 时, 左轮减载右轮增载, 这与图片基本一致, 验证了上文结论的正确性.

对于轮轨横向力, 可以看到两个峰值不再均匀分布在 0kN 两端, 而是出现一个偏差, 一端峰值在 0kN 附近波动, 另一端峰值绝对值大于 0 . 产生这种

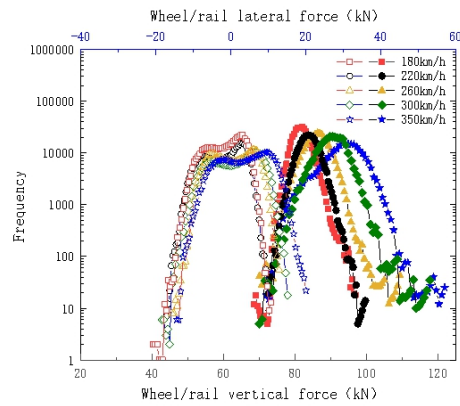
现象的原因是列车通过曲线时会向一端偏移, 偏移端车轮轮缘会对该段钢轨产生一个挤压力, 造成钢轨与车轮间形成两点接触, 使得横向力明显增加; 远离端车轮轮缘无此挤压力, 与钢轨还是一点接触, 在蠕滑与摩擦的作用下, 横向力比直线时稍微增加. 此外, 可以明显看出轮轨横向力随速度的增加, 波动程度愈加剧烈, 与垂向力规律一致, 表明速度是影响轮轨力的一个主导因素.

综上, 直线工况下, 轮轨垂向力总体上围绕静轮重值呈正态分布, 轮轨横向力围绕 0kN 左右分布有两个峰; 曲线工况下, 轮轨垂向力发生偏载现象, 轮轨横向力均增大. 轮轨力分布范围与波动程度均随列车运行速度增加而增加.



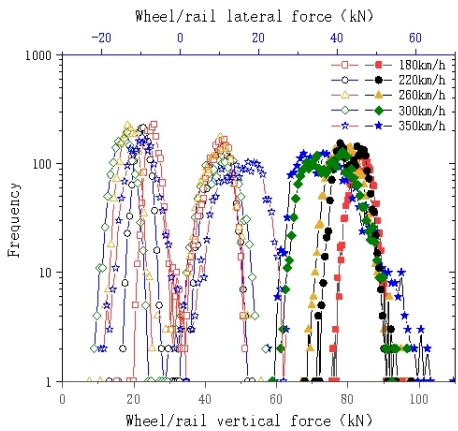
(a) 左轮轮轨力载荷谱

(a) Load spectrum of wheel/rail l force at the left wheel



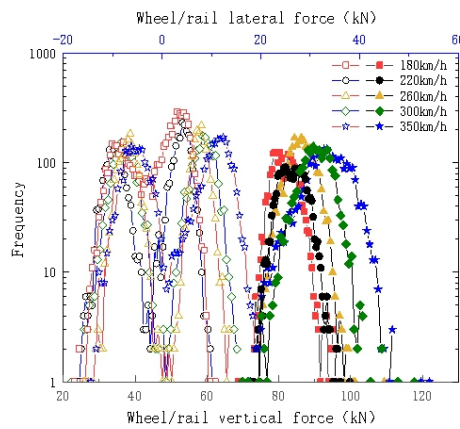
(b) 右轮轮轨力载荷谱

(b) Load spectrum of wheel/rail l force at the right wheel



(c) 左轮轮轨力峰谷值谱

(c) Load spectrum of peak-to-valley of wheel/rail l force at the left wheel



(d) 右轮轮轨力峰谷值谱

(d) Load spectrum of peak-to-valley of wheel/rail l force at the right wheel

图 8 曲线工况不同速度级轮轨力

Fig.8 Wheel/Rail force at different speeds in curve line

3.2 线路工况对轮轨载荷分布规律的影响

图 9 为相同直线或曲线路段下, 轮轨垂向力和轮轨横向力分别在上行(去程)和下行(返程)工况

的分布情况. 直线工况下, 左右轮上下行载荷值几乎可以完全拟合; 但在曲线工况下, 左右车轮上下行载荷值虽然分布规律一致但并不能完全拟合. 主

要是受上下行线路不平顺等扰动因素的影响,另外根据大西线线路信息,直线线路条件未有太大差

异;但上下行轨道曲线半径会略有不同,即线路条件会对轮轨力大小产生一定影响.

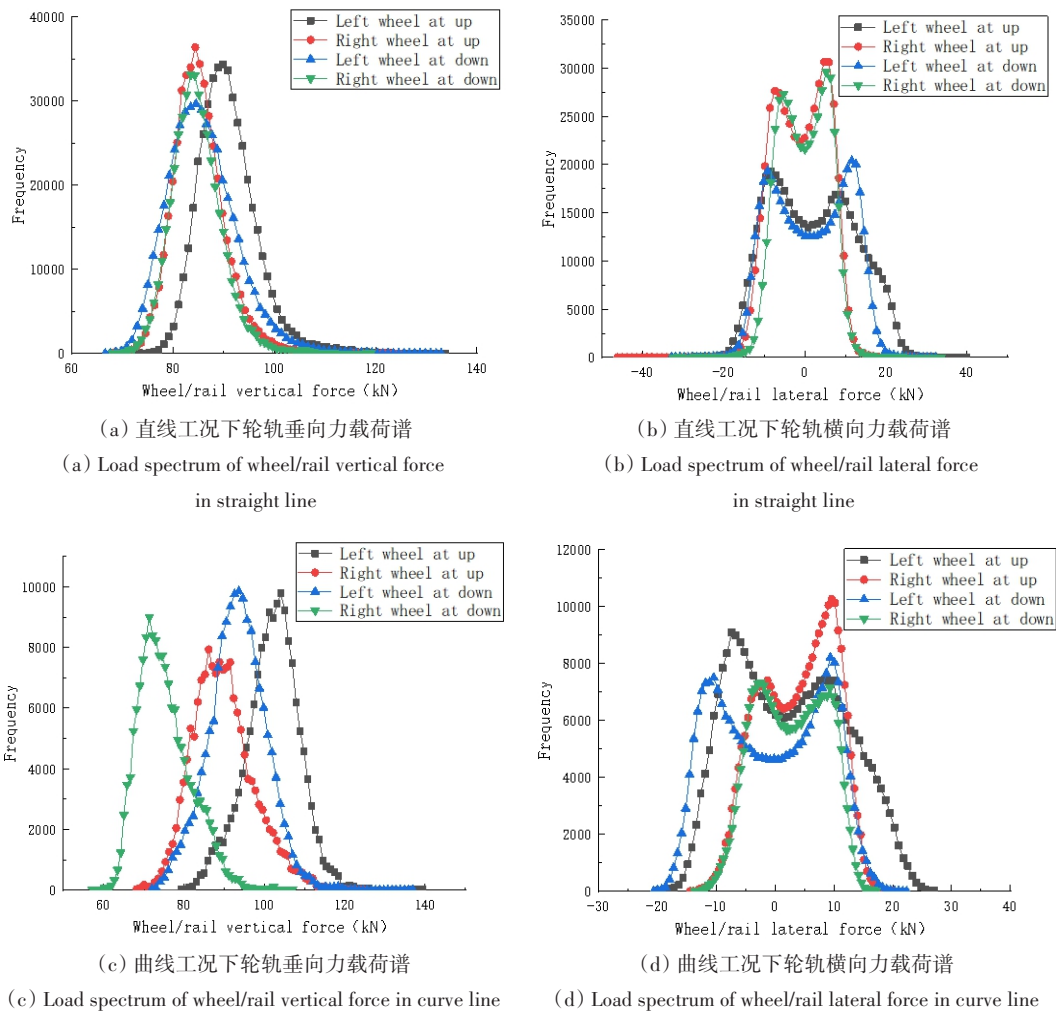


图9 上下行轮轨力载荷谱(350km/h)

Fig.9 Load spectrum of wheel/rail force at up and down (350km/h)

3.3 曲线半径对轮轨载荷分布规律的影响

图10给出了列车以350km/h的速度通过半径 $R=10000\text{m}$,超高 $h=50\text{mm}$ 的曲线A以及半径 $R=8000\text{m}$,超高 $h=60\text{mm}$ 的曲线B时的轮轨力分布情况.两种半径曲线下,轮对左轮和右轮的轮轨垂向力波动中心均发生明显偏移,但小半径曲线下波动中心偏移程度和幅值变化范围更大,这与曲线半径以及线路超高等因素密切相关,具体表现为列车运行速度与平衡速度差值越大,偏移程度越大.轮轨横向力表现出了同样规律.列车在通过小半径曲线时,轮对偏移程度更大,所受的轮轨横向力也就越大.表明曲线半径也是影响轮轨力的一个因素.

3.4 车辆载重对轮轨载荷分布规律的影响

图11为为列车在空车和重车状态下,以 $v=350\text{km/h}$ 均速通过同一直线和曲线时的轮轨载荷

分布情况.轮轨垂向力大小随车辆载重状态的变化而变化.直线工况下,空载时左右侧车轮垂向力围绕68kN波动,满载时左右侧车轮垂向力围绕84kN波动,均接近轮重;曲线工况下,空载与满载时轮轨垂向力均出现偏载,但满载情况下的偏载程度更大.值得注意的是,载重状态对轮轨横向力影响不大,无论是直线工况还是曲线工况,空重载情况下轮轨横向力均保持基本一致状态.

3.5 全里程轮轨载荷分布规律

为了体现数据的全全面性,本文又对满载试验的全里程数据进行统计.线路测试共计7天,前4天为满载试验,后3天为空载试验,试验线路均为大西线原平—阳曲之间.7天全里程轮轨载荷统计分析如表3和表4所示.

由此可见,轮轨垂向力以大于99%的概率分布

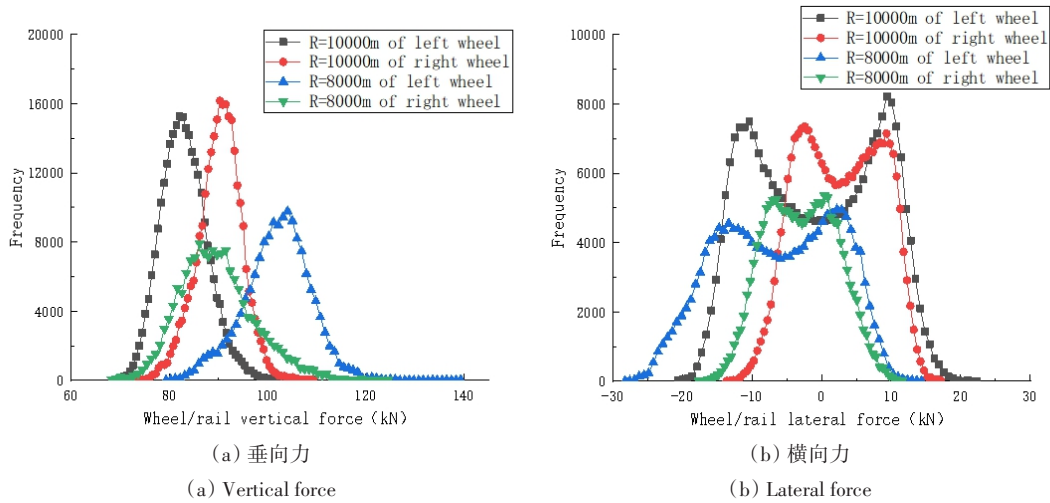


图 10 不同半径曲线的轮轨力载荷谱
Fig.10 Load spectrum of wheel/rail force in different radius curves

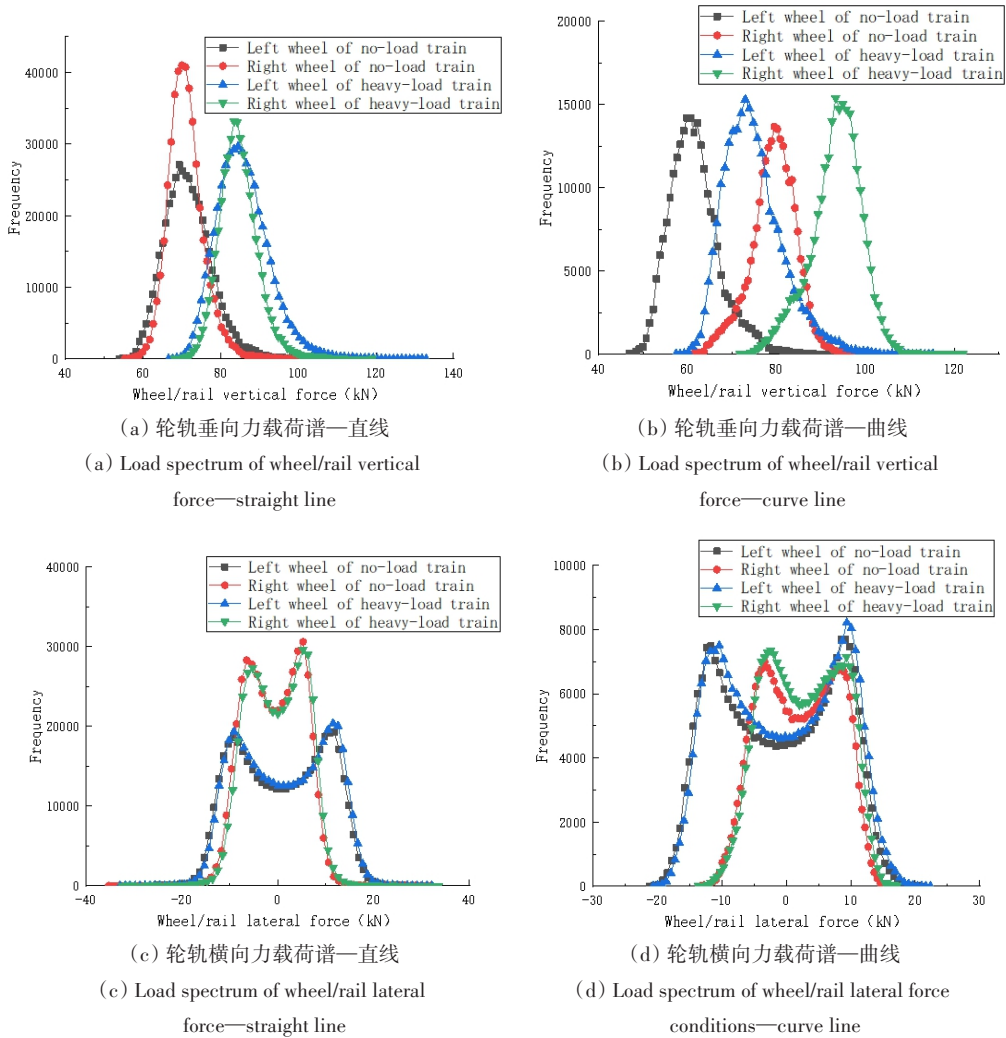


图 11 不同载重状态轮轨力载荷谱
Fig.11 Load spectrum of wheel/rail force in different load conditions

表3 满载工况下轮轨垂向力统计结果(%)

Table 3 Statistical results of wheel/rail vertical force under loaded condition

| Force Speed class | 35~145kN | 40~130kN | 50~115kN | 60~100kN |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| 160~220km/h | 99.86 | 99.64 | 98.56 | 92.55 |
| 240~300km/h | 99.81 | 99.58 | 98.23 | 91.14 |
| 300~330km/h | 99.75 | 99.50 | 97.37 | 89.56 |
| 340~350km/h | 99.72 | 99.48 | 97.21 | 88.43 |

表4 满载工况下轮轨横向力统计结果(%)

Table 4 Statistical results of wheel/rail lateral force under loaded condition

| Force Speed class | 0~40kN | 0~30kN | 0~20kN | 0~10kN |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| 160~220km/h | 100 | 99.99 | 99.97 | 85.50 |
| 240~300km/h | 100 | 99.99 | 99.80 | 71.65 |
| 300~330km/h | 99.99 | 99.98 | 99.64 | 64.13 |
| 340~350km/h | 99.99 | 99.98 | 99.22 | 50.53 |

在40kN~130kN区间内,即重车工况下的垂向力主要在静轮重 ± 45 kN的范围内波动;轮轨横向力以大于99%的概率分布在0kN~20kN区间内.另外,同一范围内的轮轨垂向力与轮轨横向力分布比例均随列车速度等级的提高而降低,说明轮轨力分布范围随着车速提升而加大,轮轨力最大值有增大趋势.

4 结论

本文通过对国内某动车组在不同运行速度下直线和曲线工况的轮轨载荷特征进行分析,得到以下阶段性结论:

(1)实测轮轨载荷所有数据点的统计显示,直线工况下,轮轨垂向力总体上呈正态分布,主要围绕静轮重值波动,轮轨横向力的分布有两个峰,围绕0kN波动.曲线工况,垂向力发生偏载,横向力均增大,但增大程度不同.

(2)轮轨峰谷值谱和载荷值谱规律性基本一致,区别在于峰谷值谱频次减少约100倍,且规律性更加明显.

(3)列车运行速度、线路条件以及载重状态对轮轨力有一定的影响,即速度越高,轮轨垂向力和横向力的分布范围越大;通过曲线时,曲线半径越小,列车运行速度与平衡速度的差值越大,轮轨力波动中心的偏移程度更大.车辆载重越大,轮轨垂向力偏载程度越明显,但横向力影响不大.

(4)列车上下行工况对轮轨力几乎无影响,虽然不同线路的轮轨力具体数值可能会有差异,但分

布规律基本相同.

参 考 文 献

- Xia F, Cole C, Wolfs P. An inverse railway wagon model and its applications. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(6):583~605
- Barke D W, Chiu W K. A Review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components. In: Proceedings of the institution of mechanical engineers part F *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2005, 219(3):151~175
- 翟婉明. 车辆-轨道垂向系统的统一模型及其耦合动力学原理. 铁道学报, 1992, 3:10~21 (Zhai W M. The first mock exam principle of vehicle-track vertical system and its coupled dynamic principle. *Journal of the China Railway Society*, 1992, 3:10~21 (in Chinese))
- 孙宇, 翟婉明. 基于格林函数法的车辆-轨道垂向耦合动力学分析. 工程力学, 2017, 34(3):219~226 (Sun Y, Zhai W M. Analysis of the vehicle-track vertical coupled dynamics based on the green's function method. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3):219~226 (in Chinese))
- 閻鑫, 王开云, 袁玄成. 高速铁路不同结构类型曲线轨道的轮轨动态相互作用特征分析. 交通信息与安全, 2018, 36(4):66~73 (Ge X, Wang K Y, Yuan X C. Characteristics of wheel-rail dynamic interaction of high-speed railway curve with different track structures. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(4):66~73 (in Chinese))
- 张冰冰, 王刚, 丁洁玉. 基于 Hermite 插值的多体系统动力学离散变分方法. 动力学与控制学报, 2018, 16(2):102~107 (Zhang B B, Wang G, Ding J Y. Discrete variational method of multibody system dynamics based on hermite interpolation. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(2):102~107 (in Chinese))
- Wang B J, Li Q, Ren Z S, et al. Improving the fatigue reliability of metro vehicle bogie frame based on load spectrum. *International Journal of Fatigue*, 2020, 132
- 朱涛, 肖守讷, 阳光武. 载荷识别研究进展及其运用于铁道轮-轨载荷研究概述. 铁道学报, 2011, 33(10):29~36 (Zhu T, Xiao S N, Yang G W. State-of-the-art development of load identification and its application in study on wheel-rail force. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(10):29~36 (in Chinese))
- 赴德国西班牙信号系统安全认证及产品认证报. 中国铁道科学研究院标准所(中铁检验认证中心), 2013 (Safety certification and product certification report of signal system to Germany and Spain. Standards Institute of China Academy of Railway Sciences (CR Railway Inspec-

- tion and Certification Center), 2013(in Chinese))
- 10 张曙光. 高速列车转向架载荷谱测试与建立方法的研究. 中国科学(E辑:技术科学), 2008(11): 1805~1814 (Zhang S G. Research on load spectrum test and establishment method of high speed train bogie. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2008(11): 1805~1814 (in Chinese))
 - 11 金新灿, 张世强. 基于高速轮轴实测载荷的非参数拟合外推研究. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 97~103, 130 (Jin X C, Zhang S Q. Non-parametric fitting extrapolation based on measured load of high-speed axle. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(6): 97~103, 130 (in Chinese))
 - 12 陈道云, 孙守光, 李强. 一种新的高速列车动应力谱分布估计方法. 机械工程学报, 2017, 53(8): 109~114 (Chen D Y, Sun S G, Li Q. A new dynamic stress spectrum distribution estimation method of high-speed train. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 109~114 (in Chinese))
 - 13 李凡松, 邹平波, 曾京. 车下设备承载结构疲劳试验载荷谱编制方法. 机械工程学报, 2016, 52(24): 99~106 (Li F S, Wu P B, Zeng J. Compilation method of fatigue test load spectrum for underfloor equipment bearing structure. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 99~106 (in Chinese))
 - 14 王斌杰, 孙守光, 李强, 等. 基于载荷谱提升转向架构架疲劳可靠性研究. 铁道学报, 2019, 41(2): 23~30 (Wang B J, Sun S G, Li Q, et al. Research on the Improvement of speed increased passenger car bogie frame reliability based on load spectrum. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(2): 23~30 (in Chinese))

WHEEL/RAIL LOAD CHARACTERISTICS AND INFLUENCING FACTORS OF STANDARD ELECTRIC MULTIPLE UNITS *

Song Weizhe[†] Ren Zunsong Wei Xue Li Junjie

(School of Mechanical, Electrical & Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract As the speed of the train continues to increase, the force between the wheel-rail and the line is intensified, and the working condition of the axle gets worse. The wheel-rail load is closely related to the safety and reliability of the high-speed rail transit system. In this paper, taking the wheel-rail load of a type of electric multiple units (EMU) in China as the research object, the force-measuring wheel pair was fabricated, and the on-line test was completed on the Daxi line. The data processing of the obtained wheel-rail force time histories for different speed grades, line sections, round-trips and working conditions was carried out, and 64-level time domain load value spectrum and peak-to-valley spectrum were compiled and analyzed. The results showed that the vertical load between the wheel and rail is generally normal distribution, and the center of the fluctuation is the static weight of the wheel, and the lateral force generally fluctuates around zero. The running speed of the train has an obvious influence on the fluctuation range of both the vertical and horizontal forces, and the higher the speed is, the larger the fluctuation range is. The up and down conditions of the train have almost no effect on the wheel-rail force. The smaller the radius of the curve is, the greater the wheel-rail force change is. The no-load and full-load states of the vehicle have an influence on the vertical force, and the influence on the lateral force is not obvious. The load characteristics and influencing factors obtained in this paper provide theoretical and experimental basis for subsequent wheel-rail fatigue and dynamics studies..

Key words wheel/rail force, field experiment, load spectrum, load characteristic, influencing factors

Received 22 August 2019, revised 16 March 2020.

* The project supported by the National Key Research and Development Project(2017YFB1201304-10), the National Natural Science Foundation of China(11790281)

[†] Corresponding author E-mail: 17121324@bjtu.edu.cn