高速铁路多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力特性分析

陈美, 翟婉明*, 閻鑫, 孙宇

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

* 联系人, E-mail: wmzhai@home.swjtu.edu.cn

2018-12-24 收稿, 2019-01-27 修回, 2019-01-28 接受, 2019-08-22 网络版发表

国家自然科学基金(51735012)和国家重点研发计划(2016YFB1200401-102C)资助

摘要 车轮多边形磨耗和钢轨焊缝是轮轨界面重要的激振源, 会加剧轮轨动力相互作用, 严重时威胁行车安全。既有研究主要关注单一激励作用下的轮轨动力响应, 而多边形车轮通过钢轨焊接区普遍存在, 对于两种激励叠加作用下的轮轨动力特性的研究尚不充分。基于此, 本文采用高速车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型, 研究多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力响应特征, 分析高速行车条件下车轮多边形阶数和波深对钢轨焊接区轮轨动力响应的影响规律。分析结果表明: 车轮多边形不平顺变化率最大点与叠合型焊缝不平顺变化率最大点重合时, 引起的轮轨动力响应波动幅值最大。多边形车轮通过钢轨焊接区时, 在车轮多边形和焊缝不平顺的叠加作用下, 产生了更明显的轮轨冲击效应, 轮轨垂向力、轮重减载率、轮对垂向振动加速度、扣件力以及钢轨垂向振动加速度均显著增大, 而对车体垂向加速度影响较小。高速行车条件下, 轮轨垂向动力响应最大值整体上随着车轮多边形阶数和波深的增加而增大, 在钢轨焊接区易出现轮轨瞬时脱离现象。

关键词 高速铁路, 车轮多边形, 钢轨焊缝, 车辆-轨道耦合动力学, 轮轨相互作用

车轮多边形化是指车轮圆周在不均匀磨耗等因素作用下形成的周期性径向偏差, 属于车轮不圆的一种特殊形式, 时常发生在地铁、城轨和高速铁路车辆上。当车轮产生较严重的多边形不圆顺时, 轮轨动力作用和轮轨噪声会明显增大, 甚至可能出现跳轨现象, 对行车安全性及乘坐舒适性产生显著的影响。

车轮多边形的研究一直是铁路运输领域的重点和难点问题。近年来, 国内外部分学者已经开展了关于车轮多边形的研究, 其工作主要集中在车轮多边形的磨耗机理以及车轮多边形对车辆-轨道系统动力学性能的影响等方面。Nielsen和Johansson^[1]综述了车轮踏面长波长不平顺的分类、起因和结果。Morys^[2]针对德国ICE车辆, 分析了车轮多边形的起因和演变规律。结果

表明, 三阶多边形车轮的通过频率与轮对的一阶弯曲共振频率相近, 可以激发轮轴的弯曲振动。Meinke和Meinke^[3]认为静态和动态的不平衡会导致车轮多边形化。陈光雄等人^[4]利用有限单元弹性振动模型进行了研究, 表明轮轨系统的自激振动可能是造成铁路车轮多边形磨耗的机理。金学松等人^[5]详细综述了国内外对铁路车辆车轮非圆化磨耗的研究历史和现状, 认为对于车轮多边形磨耗发生和发展的机理仍然没有很明确的总结, 需要开展进一步的研究工作。此外, 车轮多边形对车辆-轨道系统动力学性能的影响也受到了学者们的广泛关注。吴越等人^[6]研究了高速车轮多边形对轮轨力和转向架振动行为的影响, 结果表明随着列车运行速度、车轮多边形磨耗幅值和阶数的增加, 轮轨垂

引用格式: 陈美, 翟婉明, 閻鑫, 等. 高速铁路多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力特性分析. 科学通报, 2019, 64: 2573–2582

Chen M, Zhai W M, Ge X, et al. Analysis of wheel-rail dynamic characteristics due to polygonal wheel passing through rail weld zone in high-speed railways (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2573–2582, doi: [10.1360/N972018-01288](https://doi.org/10.1360/N972018-01288)

向作用力波动范围和转向架振动响应均会显著增大. Wu等人^[7]考虑理想多边形磨耗和实测多边形磨耗,对车轮多边形引起的轮轴动应力进行了分析.结果表明,随着车速的提高,轮轨法向力和轮轴动应力均增大,并且由多边形磨耗引起的冲击载荷也能激发轮轴的共振. Liu等人^[8]采用高速车辆-有砟轨道垂向耦合模型,分析了车轮多边形对轮轨动力相互作用的影响.结果表明,车轮多边形中的短波成分会激发钢轨和道床的高频振动. Chen等人^[9]研究了车轮多边形对高速车辆-板式无砟轨道垂向耦合系统动力学性能的影响.研究发现,高阶车轮多边形会显著增大轮轨垂向力,并且产生高频轮轨动力作用,引起轨道部件的高频振动,对轨道结构造成较大破坏.

钢轨焊接接头在高速铁路普遍存在,是无缝线路最薄弱的环节之一^[10].当车辆通过钢轨焊接区时会引起轮轨冲击振动,导致轮轨动力作用加剧,影响行车安全性、乘坐舒适性以及轨道系统的长期服役性^[11].涂贵军^[12]对地铁线路实测焊接接头不平顺激励下的车辆-轨道系统动力响应进行了分析,并对比了实测不平顺与谐波不平顺下的系统动力响应.高建敏等人^[13]对高速铁路钢轨焊接区低塌不平顺对轮轨动力响应的影响进行了研究,结果表明钢轨焊接区的短波不平顺会导致明显的轮轨冲击效应,轮轨动力响应随焊接区不平顺波长的增大而减小,随车速和不平顺幅值的增大而增大.

存在多边形车轮的列车通过钢轨焊接区时,车轮

多边形与焊缝不平顺的叠加作用会显著加剧轮轨动态作用力,对轨道和车辆部件的可靠性产生不利影响,严重时将威胁行车安全.目前关于多边形车轮通过钢轨焊接区对轮轨动力相互作用的影响认识尚不充分,因此有必要针对该问题开展进一步的研究.

1 计算分析模型

车轮多边形和焊缝不平顺都可能引起轮轨高频振动,本文考虑轨道结构参振对轮轨高频振动的影响,采用车辆-轨道耦合动力学模型,研究多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力相互作用,并且考虑车轮多边形和焊缝不平顺两种激励对系统的影响.

1.1 高速车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型

车辆-轨道耦合动力学^[14-17]是从大系统角度,研究铁道车辆和轨道结构的动态行为,以及车辆与轨道系统之间的动态相互作用问题.基于车辆-轨道耦合动力学理论建立的高速车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型可以很好地反映本文研究的车轮多边形和钢轨焊缝引起的轮轨高频冲击效应,动力学模型如图1所示.图1中涉及的变量和详细的动力学方程参见文献^[14].

车辆子系统被简化为质量-弹簧-阻尼组成的多刚体系统,包括1个车体、2个转向架、4个轮对,共7个刚体,各刚体由一、二系悬挂装置相连接.考虑车体的浮沉和点头运动,前后转向架构架的沉浮和点头运动,以

图1 高速车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型

Figure 1 High-speed vehicle-slab track vertical coupled dynamics model

及1~4位轮对的垂向振动,共10个自由度。

本文采用板式无砟轨道模型,由钢轨、扣件系统、轨道板、CA砂浆层和混凝土底座组成,其中钢轨视为离散弹性点支承基础上的无限长Euler梁,轨道板视为支承在连续分布的线性弹簧与线性阻尼上的有限长自由梁,扣件系统和CA砂浆层模拟为弹簧-阻尼单元。

车辆-轨道垂向耦合动力学模型中,车辆系统和轨道系统通过轮轨垂向接触关系进行耦合,采用赫兹非线性接触理论求解轮轨垂向力^[14,15]。

$$p(t) = \begin{cases} \left[\frac{1}{G} \delta Z(t) \right]^{3/2}, & \delta Z(t) > 0, \\ 0, & \delta Z(t) \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, G 为轮轨接触常数, $Z(t)$ 为轮对的垂向弹性压缩量,可通过下式求解:

$$\delta Z(t) = Z_w(t) - Z_r(x_w, t) - Z_{po}(t) - Z_{weld}(t), \quad (2)$$

式中, $Z_w(t)$ 为 t 时刻车轮的位移; $Z_r(x_w, t)$ 为 t 时刻车轮下钢轨的位移; $Z_{po}(t)$ 为 t 时刻车轮多边形不圆顺幅值; $Z_{weld}(t)$ 为 t 时刻车轮下焊缝不平顺幅值。车轮多边形和焊缝不平顺均视为轨道不平顺输入轮轨界面。值得注意的是,在本文的研究中,为了突出钢轨焊接区焊缝不平顺的影响,不考虑其余轨道随机不平顺。

对于车辆-轨道耦合系统,其动力学方程可以表示为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\}, \quad (3)$$

其中 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为车辆-轨道耦合系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{X\}$, $\{\dot{X}\}$, $\{\ddot{X}\}$ 分别为系统位移、速度和加速度矢量; $\{P\}$ 为系统广义外力矢量,具体形式可参见文献^[14]。

为了求解大型非线性系统的动力学微分方程(3),本文采用新型快速显式数值积分方法(即翟方法)^[18],其积分格式为

$$\begin{cases} \{X\}_{n+1} = \{X\}_n + \{\dot{X}\}_n \Delta t + \left(\frac{1}{2} + \psi \right) \{\ddot{X}\}_n \Delta t^2 \\ \quad - \psi \{\ddot{X}\}_{n-1} \Delta t^2, \\ \{\dot{X}\}_{n+1} = \{\dot{X}\}_n + (1 + \varphi) \{\ddot{X}\}_n \Delta t - \varphi \{\ddot{X}\}_{n-1} \Delta t, \end{cases} \quad (4)$$

式中, Δt 为时间积分步长;下标 n , $n-1$, $n+1$ 分别代表当前步 $t=n\Delta t$ 时刻、上一步 $t=(n-1)\Delta t$ 时刻、下一步 $t=(n+1)\Delta t$ 时刻; φ , ψ 是控制积分方法特性的独立参数,一般可取 $\varphi=\psi=0.5$ ^[15]。

1.2 车轮多边形激励模型

车轮多边形激励是以车轮转动一圈的时间为周期的周期性输入,基于傅里叶级数可表示车轮多边形不圆顺幅值^[19]:

$$Z_{po}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin \left[i \left(\frac{v}{R} \right) t + \varphi_i \right], \quad (5)$$

式中, v 为车辆运行速度; R 为车轮半径; i 表示多边形阶数; A_i 表示第 i 阶谐波的幅值; φ_i 表示相应的相位。 A_i 和 φ_i 可以通过对测试得到的沿车轮圆周一圈的车轮径向偏差进行离散傅里叶变换得到,其中, A_0 表征测试数据整体偏离径向偏差0位置的程度,对车辆-轨道耦合动力学没有影响,在动力学计算中可以忽略。只考虑占主导成分的前 N 阶多边形,并且忽略 A_0 , (5)式可以简化为

$$Z_{po}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin \left[i \left(\frac{v}{R} \right) t + \varphi_i \right]. \quad (6)$$

车轮不圆在制造和运营过程中难以避免,当出现某一阶较为突出时,对动力学响应的影响较大。本文以单一阶次的车轮多边形作为研究对象,研究车轮多边形参量(阶数和波深)对钢轨焊接区轮轨动力响应的影响规律。针对单一阶次的车轮多边形,式(6)可表示为

$$Z_{po}(t) = A_i \sin \left[i \left(\frac{v}{R} \right) t + \varphi_i \right]. \quad (7)$$

1.3 焊缝不平顺激励模型

钢轨焊接区一般存在因凹陷或凸起的局部缺陷导致的局部焊缝不平顺。根据现场调研和文献^[13,14,20]等研究得出,图2所示的两个单一谐波叠加形成的凹陷型焊缝不平顺较为普遍,称之为叠合型焊缝不平顺,其特点是在波长1 m的长波上叠加有短波(波长在0.1~0.2 m之间)不平顺。

对于图2所示的叠合型焊缝不平顺,可以表示为

$$Z_{weld}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} a_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda_1} \right), & 0 \leq x < \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}, \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \leq x < \lambda_1, \\ \frac{1}{2} a_1 \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{2} a_2 \left[1 - \cos \frac{\pi}{\lambda_2} (2x - \lambda_1 + \lambda_2) \right], & \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \leq x < \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

其中, λ_1 为焊缝不平顺长波波长; λ_2 为焊缝不平顺短波

图2 叠合型焊缝不平顺模型
Figure 2 Complex rail weld irregularity model

波长; a_1 和 a_2 分别为长波和短波的波深.

2 多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力响应分析

分别以现场实测获得的车轮多边形和焊缝数据以及由式(7)和(8)模拟生成的车轮多边形和焊缝数据作为轮轨界面不平顺激励输入, 研究多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力响应特征以及车轮多边形参数(阶数和波深)对轮轨动力响应的影响规律.

2.1 不平顺与轮轨垂向力分布的关系分析

车轮多边形不平顺激励是以车轮滚动一周的时间为周期的周期性激励, 其引起的动力响应也呈现出周期性波动, 且波动周期与激励周期相同. 因此, 存在多边形的车轮运行在轨道不同位置时引起的轮轨动力相互作用可由车轮在该轨道位置时的相位($0^\circ \sim 360^\circ$)决定. 对于焊缝不平顺引起的轮轨动力相互作用是非周期的, 是由车轮在钢轨焊接区的具体位置决定. 当多边形车轮通过钢轨焊接区时, 轮轨系统动力学波动形式受车

轮多边形不平顺和焊缝不平顺综合影响. 考虑到车轮多边形激励和焊缝不平顺激励的具体施加形式, 对于特定的车轮多边形和钢轨焊缝, 车轮在焊缝区的相位决定了两种不平顺共同作用下的动力学特性. 首先分别研究车轮多边形不平顺和焊缝不平顺独立作用下的轮轨垂向力波动, 然后通过调整车轮的相位可使得两种不平顺叠加作用导致的动力学响应达到极值, 以研究两种不平顺在极端工况下的服役特征.

对于车轮多边形, 文献[6,21]指出在车轮多边形幅值变化率大的位置处, 轮轨力波动较大. 因此, 选取某高速动车组上一个实测车轮多边形进行分析, 如图3所示. 图3(a)为极坐标下车轮多边形的不圆顺幅值, 图3(b)为车轮多边形各谐波所占比例. 由图3可知, 该实测车轮多边形的不圆顺幅值达到0.05 mm, 23阶和24阶谐波占主导地位. 设置车辆运行速度为300 km/h, 计算该车轮多边形不平顺的变化率及其引起的轮轨垂向力, 分析多边形不平顺变化率与轮轨垂向力分布的关系, 如图4(a)所示. 可以看出, 不平顺变化率最大的点会引起轮轨垂向力最大值, 不平顺变化率最小的点会引起

图3 实测车轮多边形样本. (a) 极坐标; (b) 谐波分布
Figure 3 Measured wheel polygon sample. (a) Polar coordinate; (b) harmonic distribution

图4 (网络版彩色)车轮多边形不平顺与轮轨垂向力分布的关系。(a) 实测车轮多边形; (b) 模拟车轮多边形

Figure 4 (Color online) Relationship between wheel polygon and wheel-rail vertical force distribution. (a) Measured wheel polygon; (b) simulated wheel polygon

轮轨垂向力最小值。为排除实测车轮多边形的偶然因素影响,不失一般性,采用式(7)模拟的单一简谐多边形进行轮轨垂向力分布与多边形不平顺变化率的关系分析,以阶数为5阶,波深为0.2 mm的单一阶数车轮多边形为例,结果如图4(b)所示,引起轮轨垂向力最大(小)值的点同样也对应了该多边形不平顺变化率最大(小)点。

为了分析焊缝不平顺与轮轨垂向力分布的关系,首先选取实测焊缝不平顺进行说明。图5所示为我国高速铁路某线路上实测的叠合型焊缝不平顺,可以清楚地看见该焊缝由一个长波叠加一个短波组成,其中,长波波长 λ_1 约为1 m,长波波幅 a_1 约为0.251 mm,短波波长 λ_2 约为0.135 m,短波波幅 a_2 约为0.040 mm。

设置车辆运行速度为300 km/h,求解该实测焊缝不平顺的变化率及其引起的轮轨垂向力,然后分析焊缝不平顺变化率与轮轨垂向力分布的关系,如图6(a)所示。同样,为了不失一般性,采用式(8)模拟的叠合型焊缝不平顺($\lambda_1=1$ m, $a_1=0.3$ mm, $\lambda_2=0.1$ m, $a_2=0.06$ mm)进

行分析,如图6(b)所示。通过图6可知,对于叠合型焊缝不平顺,引起轮轨垂向力最大(小)值的点仍是处于焊缝不平顺变化率最大(小)值的点。

因此,为了获得动力响应最大值,应使多边形车轮运行在钢轨焊接区时,以多边形不平顺变化率最大点与焊缝不平顺变化率最大点重合;同样,为了获得动力响应最小值,以多边形不平顺变化率最小点与焊缝不平顺变化率最小点重合。以实测多边形不平顺变化率最大点与实测焊缝不平顺变化率最大点重合的工况为例,图7为车轮多边形与焊缝不平顺叠加效果。

2.2 轮轨动力响应特征分析

以CRH2型高速动车组通过钢轨焊接区为例,采用图3和5所示的实测车轮多边形和实测焊缝不平顺,分析两种不平顺叠加作用引起的轮轨动力响应特征。轨道选用高速铁路CRTS I型板式无砟轨道。仿真计算中,设置焊缝不平顺波峰位于两个相邻轨枕正中间的钢轨表面处。对于轮重减载率指标,使多边形不平顺变化率最小点与焊缝不平顺变化率最小点重合,以获得响应最小值。对于其他垂向指标,使多边形不平顺变化率最大点与焊缝不平顺变化率最大点重合以获得响应最大值。车轮多边形和焊缝不平顺主要会激起轮轨垂向振动,因此,在分析高速行车条件下多边形车轮通过钢轨焊接区时的动力响应时,选取垂向轮轨动力学响应作为评价指标,包括轮轨垂向力、轮重减载率、扣件力、车体垂向振动加速度、轮对垂向振动加速度和钢轨垂向振动加速度。

图8所示为多边形车轮以300 km/h的速度通过钢轨焊接区时的垂向动力学响应。由图8(a)可知,当不存在车轮多边形时,车轮从A点开始进入钢轨焊接区,A到B

图5 实测叠合型焊缝不平顺样本

Figure 5 Measured complex rail weld irregularity sample

图6 (网络版彩色)焊缝不平顺与轮轨垂向力分布的关系。(a) 实测焊缝; (b) 模拟焊缝

Figure 6 (Color online) Relationship between rail weld irregularity and wheel-rail vertical force distribution. (a) Measured rail weld irregularity; (b) simulated rail weld irregularity

图7 (网络版彩色)车轮多边形与焊缝不平顺叠加示意图

Figure 7 (Color online) Superposition of the wheel polygon and the rail weld irregularity

点是车轮经过焊缝长波不平顺的过程,接着从B点车轮进入焊缝短波控制区,轮轨力首先急剧下降到C点,之后迅速增加到D点,产生轮轨冲击,此时轮轨力达到最大值。D点以后,轮轨力慢慢衰减。当存在多边形的车轮在通过钢轨焊接区的过程中,轮轨垂向力同样呈现出焊缝不平顺引起的轮轨力响应特征,产生更为明显的轮轨冲击,并且伴有高频振动,轮轨垂向力波动显著增大。图8(b)表明在车轮多边形与焊缝不平顺的叠加作用下,轮重减载率也有所增大。图8(c)和(d)表明在钢轨焊接区车轮多边形会增大轮对垂向加速度,而对车体垂向加速度几乎无影响。对于该实测车轮多边形,占主导地位的23和24阶谐波引起的轮轨力激振频率可表示为^[19]

$$f_{23 \sim 24} = \frac{vN}{2\pi R} = \frac{(300/3.6)(23 \sim 24)}{2\pi \cdot 0.43} \approx 710 \sim 740 \text{ Hz}, \quad (9)$$

属于高频振动,对轮对部件作用较大,而从轮轨

界面向车体传递的过程中,高频成分被一系和二系悬挂装置逐渐衰减,因此对车体垂向振动影响较小。图8(d)~(f)表明多边形车轮通过钢轨焊接区时,在车轮多边形不平顺变化率最大点与焊缝不平顺变化率最大点重合的位置处,扣件力和钢轨垂向加速度显著增大,并且伴有车轮多边形引起的高频振动。因此,当多边形车轮通过钢轨焊接区时,车轮多边形会显著增大轮轨垂向力、轮重减载率、轮对垂向加速度、扣件力以及钢轨垂向加速度,而对车体垂向加速度影响较小。

2.3 车轮多边形参数影响分析

描述车轮多边形的主要特征参数为波深、阶数和相位等。由于车轮多边形对轮轨动态相互作用的影响主要受车轮多边形中占主导地位的阶数和波深控制,为了简化分析,采用单一阶数的车轮多边形,通过改变多边形的阶数和波深幅值,研究阶数和波深对动力学指标的影响规律。

分别考虑仅车轮多边形和车轮多边形与焊缝不平顺叠加两种激励。其中,钢轨焊接区焊缝不平顺设置 $\lambda_1=1 \text{ m}$, $a_1=0.3 \text{ mm}$, $\lambda_2=0.1 \text{ m}$, $a_2=0.06 \text{ mm}$ 。车辆运行速度为300 km/h。车轮多边形简化为1~25阶,幅值分别为0.1, 0.15和0.2 mm的单一简谐波模型。图9为多边形阶数和波深变化对垂向动力学指标的影响规律。

如图9所示,轮轨垂向力、轮重减载率、扣件力以及钢轨垂向加速度的最大值整体上均随着多边形阶数和波深的增加而增大,并且车轮多边形与焊缝不平顺叠加作用引起的垂向动力指标幅值明显大于仅有车轮多边形激励的工况。对于车轮多边形某些阶次,由于其引起的轮轨力激振频率与轨道结构固有频率接近,从而产生共振现象,会导致在这些阶次下引起的轮轨动

图8 (网络版彩色)多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力响应特征。(a) 轮轨垂向力; (b) 轮重减载率; (c) 车体垂向加速度; (d) 轮对垂向加速度; (e) 扣件力; (f) 钢轨垂向加速度

Figure 8 (Color online) Wheel-rail dynamic characteristics due to the polygonal wheel passing through the rail weld zone. (a) Wheel-rail vertical force; (b) wheel uploading rate; (c) carbody vertical acceleration; (d) wheelset vertical acceleration; (e) fastener force; (f) rail vertical acceleration

力响应较大。在1~7阶范围,动力响应最大值随着波深的增加变化的幅度较小,当阶数达到高阶时,随着波深的增加动力响应最大值变化的幅度明显增大。当只有车轮多边形激励,且多边形磨损幅值为0.2 mm时,多边形阶数达到13阶时轮重减载率达到限值0.8^[22]。而当多边形车轮经过钢轨焊接区时,多边形阶数达到9阶时轮重减载率超过安全限值,多边形阶数达到16阶及以上时,轮重减载率达到1,即发生轮轨瞬时脱离现象,对行

车安全非常不利。当在长期的高频载荷下,可能会发生钢轨裂纹、扣件断裂以及胶垫老化等轨道结构的疲劳损伤问题,同样威胁车辆运行安全。

3 结论

存在多边形车轮的列车通过钢轨焊接区时,车轮多边形与焊缝不平顺的叠加作用会显著加剧轮轨动态作用力,对轨道和车辆部件的可靠性产生不利影响,严

图9 (网络版彩色)垂向动力学指标随多边形阶数和波深变化规律。(a) 轮轨垂向力; (b) 轮重减载率; (c) 扣件力; (d) 钢轨垂向加速度
Figure 9 (Color online) Variation of vertical dynamic responses with the order and wave depth of wheel polygon. (a) Wheel-rail vertical force; (b) wheel uploading rate; (c) fastener force; (d) rail vertical acceleration

重时将威胁行车安全。目前关于多边形车轮通过钢轨焊接区对轮轨动力相互作用的影响认识尚不充分。基于此, 本文采用高速车辆-板式轨道垂向耦合动力学模型, 使用实测的车轮多边形和焊缝不平顺数据研究了多边形车轮通过钢轨焊接区的车辆-轨道系统动力学响应特征, 使用简谐波模拟的车轮多边形和焊缝不平顺数据分析了多边形阶数和波深对钢轨焊接区轮轨动力响应的影响规律。主要结论如下:

(1) 多边形车轮通过钢轨焊接区时, 垂向动力学响应随着车轮多边形与焊缝不平顺接触点的状态不同而改变。研究表明, 车轮多边形不平顺变化率最大(小)点与叠合型焊缝不平顺变化率最大(小)点重合时, 车辆通

过钢轨焊接区引起的垂向动力响应最大(小)。

(2) 多边形车轮通过钢轨焊接区时, 在车轮多边形和焊缝不平顺的叠加作用下, 产生了焊缝不平顺激励引起的轮轨动力响应特征, 并且导致了更明显的轮轨冲击效应, 轮轨垂向力、轮重减载率、轮对垂向加速度、扣件力以及钢轨垂向加速度均显著增大, 而对车体垂向加速度影响较小。

(3) 高速行车条件下, 轮轨垂向动力响应最大值整体上随着车轮多边形阶数和波深的增加而增大。多边形车轮在钢轨焊接区引起的轮重减载率更容易超过安全限值, 甚至出现轮轨瞬时脱离现象, 可能危及行车安全。

参考文献

- Nielsen J C O, Johansson A. Out-of-round railway wheels—A literature survey. *Proc Inst Mech Eng Part F-J Rail Rapid Transit*, 2000, 214: 79–91
- Morys B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains. *J Sound Vib*, 1999, 227: 965–978
- Meinke P, Meinke S. Polygonalization of wheel treads caused by static and dynamic imbalances. *J Sound Vib*, 1999, 227: 979–986

- 4 Chen G X, Jin X S, Wu P B, et al. Finite element study on the generation mechanism of polygonal wear of railway wheels (in Chinese). *J China Railway Soc*, 2011, 33: 14–18 [陈光雄, 金学松, 邬平波, 等. 车轮多边形磨耗机理的有限元研究. *铁道学报*, 2011, 33: 14–18]
- 5 Jin X S, Wu Y, Liang S L, et al. Mechanisms and countermeasures of out-of-roundness wear on railway vehicle wheels (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univer*, 2018, 53: 1–14 [金学松, 吴越, 梁树林, 等. 车轮非圆化磨耗问题研究进展. *西南交通大学学报*, 2018, 53: 1–14]
- 6 Wu Y, Han J, Liu J, et al. Effect of high-speed train polygonal wheels on wheel/rail contact force and bogie vibration (in Chinese). *J Mech Eng*, 2018, 54: 37–46 [吴越, 韩健, 刘佳, 等. 高速列车车轮多边形磨耗对轮轨力和转向架振动行为的影响. *机械工程学报*, 2018, 54: 37–46]
- 7 Wu X, Chi M, Wu P. Influence of polygonal wear of railway wheels on the wheel set axle stress. *Vehicle Syst Dyn*, 2015, 53: 1535–1554
- 8 Liu X, Zhai W. Analysis of vertical dynamic wheel/rail interaction caused by polygonal wheels on high-speed trains. *Wear*, 2014, 314: 282–290
- 9 Chen M, Sun Y, Zhai W M. Effect of polygonal wheel on dynamic performances of high-speed vehicle-slab track system. In: *First International Conference on Rail Transportation*. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017. 929–937
- 10 Frank N. New rail could solve rolling contact fatigue. *Int Railway J Rapid Transit Rev*, 2003, 43: 49–50
- 11 Zhai W M, Tu G J, Gao J M. Problem of wheel-rail dynamics in rail weld zone of subway line (in Chinese). *J Vib Mea Diag*, 2012, 32: 701–708 [翟婉明, 涂贵军, 高建敏. 地铁线路钢轨焊接区轮轨动力学问题. *振动、测试与诊断*, 2012, 32: 701–708]
- 12 Tu G J. Analysis of wheel-rail dynamic response under the excitation of rail weld irregularity (in Chinese). Master Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012 [涂贵军. 钢轨焊接接头不平顺激励下的轮轨动力响应分析. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2012]
- 13 Gao J M, Zhai W M. Dynamic effect and safety limits of rail weld irregularity on high-speed railways (in Chinese). *Sci China Tech Sci*, 2014, 44: 697–706 [高建敏, 翟婉明. 高速铁路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其安全限值研究. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 697–706]
- 14 Zhai W M. *Vehicle-Track Coupled Dynamics* (in Chinese). 4th ed. Beijing: Science Press, 2015 [翟婉明. *车辆-轨道耦合动力学*. 第四版. 北京: 科学出版社, 2015]
- 15 Zhai W, Sun X. A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track. *Vehicle Syst Dyn*, 1994, 23: 603–615
- 16 Zhai W, Wang K, Cai C. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics. *Vehicle Syst Dyn*, 2009, 47: 1349–1376
- 17 Wang K Y, Liu P F, Zhai W M, et al. Wheel/rail dynamic interaction due to excitation of rail corrugation in high-speed railway. *Sci China Technol Sci*, 2015, 58: 226–235
- 18 Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. *Int J Numer Meth Eng*, 1996, 39: 4199–4214
- 19 Johansson A, Andersson C. Out-of-round railway wheels—A study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear. *Vehicle Syst Dyn*, 2005, 43: 539–559
- 20 Gao J, Zhai W, Guo Y. Wheel-rail dynamic interaction due to rail weld irregularity in high-speed railways. *Proc Inst Mech Eng Part F-J Rail Rapid Transit*, 2018, 232: 249–261
- 21 Wang P, Zhang R H, Chen J Y, et al. Influence of polygonal wheels in high-speed trains on dynamic performance of turnout (in Chinese). *J Mech Eng*, 2018, 54: 47–56 [王平, 张荣鹤, 陈嘉胤, 等. 高速铁路列车车轮多边形化对道岔区动力学性能的影响. *机械工程学报*, 2018, 54: 47–56]
- 22 Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB 10761-2013. Code for Design of High Speed Railway (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing House, 2013 [中华人民共和国铁道部. TB 10761-2013高速铁路工程动态验收技术规范. 北京: 中国铁道出版社, 2013]

Summary for “高速铁路多边形车轮通过钢轨焊接区的轮轨动力特性分析”

Analysis of wheel-rail dynamic characteristics due to polygonal wheel passing through rail weld zone in high-speed railways

Mei Chen, Wanming Zhai^{*}, Xin Ge & Yu Sun

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

^{*} Corresponding author, E-mail: wmzhai@home.swjtu.edu.cn

Wheel polygonal wear and rail weld irregularity are important excitation sources of wheel-rail interface, which will intensify the wheel-rail dynamic interaction, posing threats to running safety. Most of the previous research is focused on wheel rail dynamic responses under a single excitation, while the research on the wheel rail dynamic characteristics caused by the superposition of two excitations is not sufficient considering polygonal wheels generally exist in rail weld zones. On the basis of this, a high-speed vehicle-slab track vertical coupled dynamic model was employed, in order to study the effect of polygonal wheels passing through the rail weld zone on the wheel-rail dynamic characteristics. The vehicle-track coupled dynamic model is divided into two subsystems based on the vehicle-track coupled dynamics theory, that is, vehicle subsystem and track subsystem. Originating from the multi-rigid-body dynamics theory, the vehicle is treated as a four-axle mass-spring-damper multi-rigid-body system by taking one car body, two bogies and four wheelsets into account. As a result, the total degrees of freedom of the vehicle are 10. The rail is simplified as a Bernoulli-Euler beam supported by rail pads. The interactions between the vehicle and rail are characterized by the wheel-rail contact. The dynamic equations of motion for the whole system are described by differential equations. In this dynamics simulation, the measured wheel polygonal wear and rail weld irregularity were used to reflect the real running conditions. It should be noted that the complex-wave rail weld irregularity occurring extensively in the rail weld zones was used. The basic feature of the complex-wave rail weld irregularity is that a main 1m wavelength cosine wave is superposed with a secondary short-wavelength wave. Moreover, the influences of the polygonal order and amplitude on wheel-rail dynamic responses were analyzed under the high-speed operation. In this matter, the simple harmonic model was applied to describe the wheel polygon of the single order. In addition, the superposition relationship of the wheel polygonal wear and rail weld irregularity was investigated. The results show that the maximum response occurs at the coincident point where the variation rates of the wheel polygon and the rail weld irregularity are both the maximum. When polygonal wheel passes through the rail weld zone, under the superposition of the wheel polygon and the rail weld irregularity, more obvious wheel-rail impact effect is induced, and the high-frequency vibration caused by the measured polygonal wheel is generated. In the rail weld zone, due to the wheel polygonal wear, the wheel-rail vertical force, wheel load rate, wheelset vertical acceleration, fastener force and rail vertical acceleration increase significantly, while the car body vertical acceleration is hardly affected. Under the high-speed operation, the maximum values of the wheel-rail dynamic responses are significantly exacerbated by the increased polygon order and amplitude. In the low orders, the maximum values of the dynamic responses varies slightly with the increase of wave depth, while in the high orders, the maximum values of the dynamic responses increase dramatically with the increased wave depth, which may easily cause instantaneous wheel rail separation.

high-speed railway, wheel polygon, rail weld irregularity, vehicle-track coupled dynamics, wheel-rail interaction

doi: [10.1360/N972018-01288](https://doi.org/10.1360/N972018-01288)