DOI: 10.3901/JME.2020.22.184

高速列车车轮多边形磨耗演变行为*

丁军君¹ 杨九河² 胡静涛¹ 李 芾¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中国铁路成都局集团有限公司 成都 610082)

摘要: 车轮多边形不仅会严重影响高速列车的运行性能,同时会随着车轮的磨耗发生不断演变,因此其演变行为值得关注。对高速列车车轮多边形磨耗的演变过程进行数值模拟,并分析相位差对多边形磨耗的影响。结果表明,车轮初始3阶多边形会演变成多阶混合多边形,其中3的整数倍阶多边形占主要地位;车轮多边形发展过程中,存在一个磨耗急剧增大的“转折里程”,应在“转折里程”之前对车轮多边形进行处理;车轮多边形使轮轨垂向力和轮对构架垂向振动加速度增大,同时导致跳轨现象,影响车辆运行安全;多边形相位差会导致车轮的磨耗迅速增加,磨耗率在轮相位差为1/2周期时达到最大。研究成果为车轮多边形的控制手段及现场镟修策略提供了理论依据。

关键词: 高速列车; 车轮多边形; 磨耗; 动力学性能; 相位差

中图分类号: U271

Evolution of the Polygonal Wear of High-speed Train Wheels

DING Junjun¹ YANG Jiuhe² HU Jingtao¹ LI Fu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. China Railway Chengdu Group, Chengdu 610082)

Abstract: The wheel polygons will not only seriously affect the running performance of high-speed trains, but also continue to evolve with the wear of the wheels, so its evolutionary behavior deserves attention. The wheel polygonal wear evolution behaviour and the effects of phase difference on polygonal wear are researched by simulation method. The simulation results show that the initial 3rd order polygon will evolve to mixed orders, and the integer multiple of 3 orders still in the main position. In the polygonal wear evolution, there is a turning mileage which the wave depth suddenly and sharply increased, so the wheel polygonal must be treating before the turning mileage. The results also show that the wheel polygonal wear evolution will cause an increase in vertical acceleration of wheelset and frame, and also increase the risk of the wheel jumping the rail. Compared with no phase difference, the maximum wave depth of the polygonal wheel rapidly increases when the phase difference exist, and the wear rate reach the peak when the phase difference is 1/2 cycle. The research provides a certain theoretical basis for the control methods and repair strategies of wheel polygons.

Key words: high-speed trains; wheel polygonalization; wear; dynamic performance; phase difference

0 前言

车轮多边形是车轮不圆的一种,又常称为车轮波磨或车轮谐波磨耗,在国内外高速列车和地铁车辆上频繁出现。车轮多边形肉眼难以观测,但是会带来严重的后果,如关键部件疲劳破坏加剧、轮轨噪声大幅提升和轮轨垂向力剧烈变化等^[1-3]。车轮多

边形的形成机理比较复杂,目前普遍认为其形成与轮轨黏滑振动、轮对共振、车轮滚动多周累积和轮轨共振等有关。

针对车轮多边形磨耗的形成机理及演变,国内外学者开展了理论分析、现场试验和数值模拟等研究工作。MORYS^[4]基于ICE-1高速列车建立车轮多边形磨耗演变预测模型,仿真结果表明车轮多边形化会导致轮轨垂向力剧烈变化和轮对的弯曲共振。MEYWERK^[5]建立了考虑弹性轨道和轮对的车辆动力学模型,在长期迭代磨耗模型中考虑了车轮磨耗对其表面材料硬度的影响。BARKE等^[6]认为车轮多边

* 国家自然科学基金(51965016)和四川省重点研发(2019YFG0042)资助项目。20191123收到初稿,20200318收到修改稿

形化会导致车辆能耗和运行噪声增加。JOHANSSON 等^[7-8]引入一种车轮粗糙度的计算方法, 并通过瑞典铁路的大量现场测试, 认为车轮在新造和镟修过程中使用的三爪卡盘会导致车轮初始三阶不圆。DEKKER^[9]发现垂向力的主频与轮对的某阶固有频率接近导致发生共振, 引起轨道波磨和车轮多边形磨耗加剧。FRISCHMUTH 等^[10]基于多时间尺度的计算方法, 通过引入磨损密度概念研究了车辆运行速度对车轮多边形磨耗演变的影响。BROMMUNDT 等^[11]采用摄动法和多时间尺度法计算了轮对多边形磨耗, 认为车轮不圆和轮对转动惯量之间的相互作用导致了车轮不圆的程度加深, 同时车辆运行速度越快, 车轮越容易发展成低阶多边形。陈光雄等^[12]利用有限元方法研究了车轮多边形的磨耗机理。马卫华等^[13]提出了车轮滚动多周形成多边形的理论。李伟等^[14]认为轮对的弯曲固有频率与车轮激励频率所产生的共振是车轮多边形磨耗的主要原因。WU 等^[15]认为多边形磨耗引起的冲击载荷会激发轮轴共振, 导致轴箱加速度和动应力增加, 同时对轮对初始裂纹的扩展有很大的影响。

在国内外学者的研究成果中, 普遍认为车轮初始不圆是车轮多边形化的源头之一。本文基于此观点, 针对中国某型高速动车组, 研究初始不圆条件下车轮多边形磨耗的演变行为, 为车轮多边形控制策略提供理论依据。

1 车轮多边形磨耗演变预测模型

1.1 多边形磨耗演变仿真流程

车轮多边形磨耗的演变是一个渐进的过程, 与车辆-轨道系统参数、运营条件和轮轨材料特性等有关。为了对车轮多边形磨耗的演变过程进行预测, 建立车辆-轨道动力学模型, 输入车轮初始不圆数据, 结合轮轨滚动接触理论和车轮材料磨耗模型, 获取车轮圆周磨耗深度分布并进行平滑处理, 选择合适的更新策略获取新的圆周型面, 重新导入到车辆-轨道动力学模型中进行迭代计算。车轮多边形磨耗演变的仿真流程如图 1 所示。

1.2 车辆-轨道动力学模型

以中国某型高速动车组为例, 在 SIMPACK 软件中建立多刚体动力学模型, 车轮直径为 860 mm, 车辆运行速度为 200 km/h, 如图 2 所示。

轮轨滚动接触采用基于 KALKER 简化理论的 FASTSIM 算法^[16]。具体步骤如下: 轮轨接触斑为椭圆形并划分为多个单元格, 单元格中心的坐标为 (x, y) ,

图1 车轮多边形的磨耗演变仿真流程

图2 车辆多刚体动力学模型

同时每个单元格纵向和横向长度分别为 Δx 和 Δy 。接触斑内材料的表面弹性剪切变形量 u 与面力 p 和柔度系数 L 的关系为

$$u(x, y) = L \cdot p(x, y) \quad (1)$$

如果该单元格处于黏着区内, 该单元格内的面力为

$$p_A(x, y) = p(x - \Delta x, y) - w \frac{\Delta x}{L} \quad (2)$$

式中, w 为刚性滑动量。

单元格内的面力的极限为

$$p_L(x, y) = \mu \cdot \frac{2P}{\pi ab} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (3)$$

式中, μ 为摩擦因数; P 为接触斑法向正压力; a 和 b 分别为椭圆接触斑的长半轴和短半轴。

如果 $|p_A| < p_L$, 则该单元格位于黏着区, 否则处在滑动区。滑动区内的面力为

$$p_S(x, y) = p_L(x, y) \frac{p_A(x, y)}{|p_A(x, y)|} \quad (4)$$

1.3 车轮材料磨耗模型

在车轮多边形磨耗预测中, 通常采用的车轮材料磨耗模型有 Archard 模型^[17]和磨耗功模型^[4]。在 Archard 模型中, 车轮材料的磨耗体积 V_w 采用式(5)计算

$$V_w = k_A \frac{Nd}{H} \quad (5)$$

式中, k_A 为 Archard 磨耗系数, 与轮轨接触法向力和相对滑动速度有关; N 为法向力; H 为材料硬度; d 为相对滑动距离。

在磨耗功模型中, 车轮材料的磨耗质量 m_w 采用式(6)计算

$$m_w = k_P \cdot W_P \quad (6)$$

式中, k_P 为磨耗功系数; W_P 为接触斑内的磨耗功, 其计算公式为

$$W_P = v \times (|T_x \gamma_x| + |T_y \gamma_y| + |M_z \phi_z|) \quad (7)$$

式中, v 为车辆运行速度; T_x 、 T_y 和 M_z 分别为纵向、横向和自旋蠕滑力; γ_x 、 γ_y 和 ϕ_z 分别为纵向、横向和自旋蠕滑率。

本文通过计算对比, 发现 Archard 模型和磨耗功模型对应的车轮多边形演变趋势基本相同, 但磨耗功模型的计算效率较高。同时, 对国内高速列车车轮的磨耗进行数值模拟时, Archard 模型中的磨耗系数偏大, 而磨耗功模型的结果与现场实测数据更为接近^[18]。因此, 本文中的车轮材料磨耗计算采用磨耗功模型。

1.4 平滑滤波及更新策略

在仿真过程中车轮圆周磨耗深度的分布会出现锯齿形跳跃, 与实际情况不符, 需要进行平滑处理。由于车轮圆周磨耗的特殊性, 在避免锯齿形跳跃的同时, 还需要兼顾磨耗深度数据首尾的连续可导。

本文首先采用滑动平均滤波法对数据中较小的波动进行平滑。磨耗深度 H 为长度为 N 的一维数组, $H = \{h_j, j=1, 2, \dots, N\}$, 认为每 m 个相邻数据区间是接近平稳的, 计算该区间所有数据的平均值, 代替该区间内第 n 个数据的值, 其中 $n=(m-1)/2$ 。具体计算方法如下

$$H' = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n h_{k+1} \quad (8)$$

式中, H' 为滑动平滑后的数据, $k=n+1, n+2, \dots, N-n$ 。

对滑动平均处理后的数据, 采用傅里叶拟合平滑滤波的方法来实现数据首尾的连续可导。傅里叶拟合的平滑效果与展开级数 F 有关, F 越大, 平滑后的数据与原始数据越接近, 但平滑效果越差。傅里叶级数展开式如式

$$H''(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^F (a_i \cos \theta + b_i \sin \theta) \quad (9)$$

式中, θ 为车轮圆周角; $H''(\theta)$ 为傅里叶拟合平滑滤波后的数据; $a_0 \sim a_F$ 及 $b_1 \sim b_F$ 为系数, 与原始数据相关。

在车辆实际运行过程中, 车轮的多边形磨耗是连续发生的, 但在仿真中只能通过圆周廓形更新来实现。更新越频繁, 越能准确反映车轮的连续磨耗过程, 但也会导致仿真工作量增大, 因此需要选择合适的车轮圆周更新策略。

目前常用的两种车轮廓形更新策略分别是控制最大运行里程和控制最大磨耗量。由于不同阶段车轮的磨耗速率相差较大, 因此采用控制最大运行里程的更新策略会导致车轮圆周廓形在不同阶段的变化不均匀。控制最大磨耗量的更新策略可以使车轮圆周廓形变化均匀, 同时选用较小的磨耗限值可以使车轮多边形磨耗变化过渡更加平滑。通过比较分析, 本文选用控制最大磨耗量的廓形更新策略, 且磨耗限值取 0.02 mm。

2 车轮多边形磨耗演变及其对动力学性能的影响

RODE 和 JOHANSSON 等^[8,19]通过现场的大量测试发现, 由于车轮在新造和镟修过程中通常采用三爪卡盘定位, 在夹具作用点形成的弹性变形会导致车轮形成微小的 3 阶不圆, 并随着车辆运行逐渐形成显著的 3 阶多边形。

以初始波深为 0.05 mm 的 3 阶多边形为例, 根据图 1 中的流程对多边形磨耗的演变过程进行仿真。车轮圆周轮径的演变过程如图 3 所示, 多边形磨耗的深度变化过程如图 4 所示。在车辆运行初期, 车轮多边形的波峰和波谷磨耗较慢, 磨耗主要发生在波峰两侧, 并逐渐形成新的波谷; 随着车辆运行里程的不断增加, 波谷的磨耗速度明显加快, 而波峰及其两侧的磨耗速度减慢, 最终导致车轮出现不同的多边形阶数, 且波深远大于初始波深。

图 3 车轮多边形磨耗演变过程

图4 多边形磨耗深度变化过程

以图4中的仿真结果为例,当多边形磨耗波深最大值达到0.375 mm时,对车轮不圆偏移值进行频谱分析,然后根据车轮多边形阶数与振动频率的转换公式,获取车轮多边形阶数及其对应波深的功率谱密度,如图5所示。结果表明,当车轮初始不圆为3阶多边形时,车轮会逐渐演变成以3的整数倍阶为主的多阶混合多边形,其中初始的3阶多边形仍占主导地位。

图5 车轮多边形阶数组成

在多边形磨耗演变过程中,波深最大值随运营里程的变化趋势如图6所示。当车辆运营里程在20万 km以内时,车轮多边形最大波深并无明显变化,甚至略有减小,这段区域称之为“平缓过渡区”;当运营里程

图6 多边形波深演变趋势

超过20万 km时,车轮多边形的最大波深急剧增大,本文将这个磨耗速率突变的点称之为“转折里程”。更多的仿真结果表明,初始多边形阶数和多边形初始波深越小,“转折里程”越长。因此,车轮新造或者镟修时,应严格控制车轮初始多边形的阶数和波深。

车轮多边形在演变过程中,不仅会影响车轮的磨耗速率,同时也会影响车辆的运行动力学性能。以轮轨垂向作用力和车辆关键部件的垂向振动加速度为例,其随车轮多边形演变过程的变化趋势如图7和图8所示。随着车辆运行里程的增加,最大轮轨垂向力的增长速度逐渐加快,同时最小轮轨垂向力的减小速度也逐渐加快;当运营里程达到25万 km时,最小轮轨垂向力甚至降至0,即出现了跳轨的情况,将严重影响车辆运行安全。

图7 多边形磨耗演变对轮轨垂向力的影响

图8 多边形磨耗演变对垂向振动加速度的影响

轮对和构架的垂向振动加速度均随车轮多边形磨耗的加深而迅速增加,但构架的增加幅度不及轮对。车辆运行25万 km后,轮对和构架的垂向振动加速度最大值分别增加251%和13.4%。

3 相位差对车轮多边形磨耗的影响

目前的研究大部分是假设同一轮对左右车轮的多边形完全一致,但是在实际运用过程中,会出现左右车轮阶数相同但有一定相位差的情况。为分析相

位差对车轮多边形磨耗演变的影响,以车轮初始为3阶多边形且相位差为 15° 为例,其左右车轮的圆周轮径演变过程如图9所示。结果表明,当轮对左右车轮相位不同时,会导致其中一个车轮(右轮)的圆周轮径变化剧烈,意味着该车轮的多边形磨耗迅速增加,而另一个车轮(左轮)的圆周轮径变化不大;当多边形波深由初始的 0.05 mm 发展到 0.15 mm 时,多边形相位差为 0° 时需要运行 31.84 万 km ,而相位差为 15° 时仅需要运行 8.78 万 km ,减小了 72.4% 。

图9 车轮多边形磨耗演变过程(相位差 $=15^\circ$)

不同相位差条件下的车轮磨耗率如图10所示。

图10 相位差对磨耗速率的影响

随着左右车轮相位差的逐渐增加,车轮的多边形磨耗速率快速增大,在轮相位差为 60° ($1/2$ 周期)时磨耗率达到最大;相位差再继续增大时,车轮的多边形磨耗速率逐渐减小。因此,高速列车在运用过程中,应控制轮对左右车轮的多边形相位差,尤其要避免 $1/2$ 周期左右的相位差。

4 结论

(1) 当车轮初始不圆为3阶多边形时,车轮会逐渐演变成以3的整数倍阶为主的多阶混合多边形,其中3阶多边形仍占主导地位。

(2) 在多边形磨耗演变过程中,存在一个“转折里程”,当车辆运营里程超过“转折里程”,车轮磨耗急剧增大。应严格控制车轮初始多边形的阶数和波深,同时在“转折里程”之前对多边形车轮进行处理。

(3) 最大轮轨垂向力的增长速度和最小轮轨垂向力的减小速度均会随着多边形磨耗的演变逐渐加快,甚至出现跳轨现象,影响车辆运行安全;轮对和构架的垂向振动加速度均明显增加,轮对的增加幅值远超构架。

(4) 车轮多边形存在相位差时,会导致其中一个车轮的多边形磨耗迅速增加,而另一个车轮的圆周轮径变化不大。应控制轮对的多边形相位差,特别要避免相位差在 $1/2$ 周期左右。

参考文献

- [1] 金学松, 吴越, 梁树林, 等. 车轮非圆化磨耗问题研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 1-14.
JIN Xuesong, WU Yue, LIANG Shulin, et al. Mechanisms and countermeasures of out-of-roundness wear on railway vehicle wheels [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 1-14.
- [2] 韩光旭, 温泽峰, 张捷, 等. 车轮非圆化对高速列车振动噪声的影响[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 10-13, 23.
HAN Guangxu, WEN Zefeng, ZHANG Jie, et al. Influence of out-of-roundness of wheels of high-speed trains on interior vibration and noise [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 10-13, 23.
- [3] 刘佳, 韩健, 肖新标, 等. 高速车轮非圆化磨耗对轴箱端盖异常振动影响初探[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 98-105.
LIU Jia, HAN Jian, XIAO Xinbiao, et al. Influence of wheel non-circular wear on axle box cover abnormal

- vibration in high-speed train[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 98-105.
- [4] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. Journal of Sound & Vibration, 1999, 227(5): 965-978.
- [5] MEYWERK M. Polygonalization of railway wheels[J]. Archive of Applied Mechanics (IngenieurArchiv), 1999, 69(2): 105-120.
- [6] BARKE D W, CHIU W K. A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2005, 219(3): 151-175.
- [7] JOHANSSON A, ANDERSSON C. Out-of-round railway wheels—A study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(8): 539-559.
- [8] JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels—assessment of wheel tread irregularities in train traffic[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 293(3): 795-806.
- [9] DEKKER H. Vibrational resonances of nonrigid vehicles: Polygonization and ripple patterns[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(3): 1349-1355.
- [10] FRISCHMUTH K, LANGEMANN D. Numerical calculation of wear in mechanical systems[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2011, 81(12): 2688-2701.
- [11] BROMMUNDT E. A simple mechanism for the polygonalization of railway wheels by wear[J]. Mechanics Research Communications, 2012, 24(4): 435-442.
- [12] 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[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 14-18.
- CHEN Guangxiong, JIN Xuesong, WU Pingbo, et al. Finite element study on the generation mechanism of polygonal wear of railway wheels[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 14-18.
- [13] 马卫华, 罗世辉, 宋荣荣. 地铁车辆车轮多边形化形成原因分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 106-111.
- MA Weihua, LUO Shihui, SONG Rongrong. Analyses of the form reason of wheel polygonization of subway vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 106-111.
- [14] 李伟, 李言义, 张雄飞, 等. 地铁车辆车轮多边形的机理分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 17-22.
- LI Wei, LI Yanyi, ZHANG Xiongfei, et al. Mechanism of the polygonal wear of metro train wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 17-22.
- [15] WU X, CHI M. Study on stress states of a wheelset axle due to a defective wheel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(11): 4845-4857.
- [16] KALKER J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1): 1-13.
- [17] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.
- [18] 罗仁, 曾京, 戴焕云, 等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 551-558.
- LUO Ren, ZENG Jing, DAI Huanyun, et al. Simulation on wheel wear prediction of high-speed train[J]. Tribology, 2009, 29(6): 551-558.
- [19] RODE W, MULLER D, VILLMAN J. Results of DBAG investigations “out-of-round wheels” in proceedings of corrugation symposium—extended abstracts[C]// IFV Bahntechnik, Berlin, 1997: 39-55.
-
- 作者简介: 丁军君, 男, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机车车辆设计理论、轮轨关系及磨耗。
E-mail: dingjunjun@swjtu.edu.cn
- 杨九河, 男, 1986 年出生, 工程师。主要研究方向为动车组检修、运用及应急处置。
E-mail: tanacota@163.com
- 胡静涛, 男, 1993 年出生。主要研究方向为机车车辆系统动力学。
E-mail: 1129518030@qq.com
- 李芾, 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机车车辆设计理论。
E-mail: lifu@swjtu.edu.cn