DOI: 10.3901/JME.2015.14.115

轮径差对机车惰行和电制动轮轨作用的影响*

马卫华 邹瑞明 罗世辉

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 在分析轮径差类型的基础上, 探讨轮径差对轮对受力状态和运动形态的影响。建立八轴重载机车+详细 C₈₀ 型运煤专用敞车+简化 C₈₀ 型运煤专用敞车的列车模型, 仿真分析机车在惰行和电制动工况下, 不同类型轮径差对轮轨相互作用的影响。结果表明, 轮径差会改变轮对的运动形态, 从而引起轮轨相互作用的变化, 加剧轮轨之间的磨耗; 由于摇头角会引起轮对的横向蠕滑, 因此反相轮径差对轮轨横向力和轮轨磨耗的影响要大于同相轮径差; 电制动工况相对惰行工况而言, 横向蠕滑力有所减小, 因此电制动工况下轮径差对轮轨横向力的影响要小于惰行工况, 并且轮轴横向力相对惰行工况总体也有所减小; 由于制动力会降低轮对左右轮滚动圆半径的调整能力, 因此电制动工况下的稳态轮径差要大于惰行工况下的稳态轮径差, 轮轨磨耗也要远大于惰行工况, 在电制动工况下, 轮径差还会引发轮对偏磨的出现, 进一步加大轮径差。

关键词: 机车; 动力学; 轮径差; 轮轨作用; 电制动

中图分类号: U260

Influence of Wheel Diameter Difference on Wheel/Rail Interaction of Locomotive under Coasting and Electric Braking Conditions

MA Weihua ZOU Ruiming LUO Shihui

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Influence of wheel diameter difference on the stress and movement of wheelset is discussed based on the analysis on wheel diameter difference types. A train dynamic model which consists of an eight axle heavy haul locomotive+a detailed C₈₀ gondola car +a simplified C₈₀ gondola car has built up, the effect of different type of wheel diameter difference on the wheel/rail interaction under coasting and breaking condition is simulated. The results show that the movement of wheelset will changed for the reason of wheel diameter difference, thus affect the wheel/rail interaction and aggravate the wear between wheel and rail; Because the yaw angle of wheelset caused lateral creep, so the influence of wheel diameter difference in anti-phase on the wheel/rail lateral force and wear is larger than wheel diameter difference in same-phase. Breaking condition decrease lateral creepage force compare with coasting condition, so the influence of wheel diameter difference on wheel rail lateral force under electric braking condition should be less than coasting condition, and decrease lateral wheelset force as well. Due to the braking force can reduce the adjustment ability of wheelset on its rolling diameter between left and right wheel, the steady wheel diameter difference under electric braking condition should be larger than the steady wheel diameter difference under coasting condition, the wear between wheel and rail would overweigh the coasting condition too, wheel diameter difference also leads to eccentrically-wearing under breaking condition, further increase wheel diameter difference.

Key words: locomotive; dynamics; wheel diameter difference; wheel/rail interaction; electric breaking

0 前言

随着列车运量与速度的不断提升, 轮轨磨耗也逐渐加剧^[1], 为使机车车辆保持较好的动力学性能,

需要经常对轮轨系统进行镟修和打磨^[2]。大秦铁路部分车轮磨耗数据如图 1 所示^[3], 从中可知大部分重载列车都存在非对称磨耗, 部分车辆出现严重偏磨现象。轮轨磨耗将影响到轮轨接触几何关系, 导致轮轨非对称接触现象的产生^[4], 不仅影响机车车辆动力学性能, 而且会对机车车辆的部件和轨道寿命产生一定的影响^[5-8]。轮轨磨耗容易导致轮径差的产生, 轮径差是指在同一机车中, 各轮对车轮滚动

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0712)、四川省科技计划(2012GZ0103)、西南交通大学 2011 年落实之星计划和西南交通大学研究生创新实验实践(YC201421240)资助项目。20140724 收到初稿, 20150329 收到修改稿

圆直径的差值。在直线上, 轮径差的存在将会导致左右轮滚动圆半径的不同, 进而引起同一轮对左右轮纵向蠕滑力的差别、以及垂向力分配不均等问题^[9], 因此, 轮径差的存在对机车车辆运行稳定性和安全性有较大的影响。

图 1 不同位车轮踏面每 10^5 km 平均垂直磨耗量

SAWLEY 等^[10]研究分析了踏面凹形磨耗对轮径差的影响规律, 分析了凹形磨耗造成的左右轮径差与车辆失稳之间的关系, 并在此基础上制定了北美货车踏面镟修准则; SPINOLA 等^[11]利用有限元法研究了车轮直径对车轮振动频率的影响, 认为车轮直径会影响车轮的振动特性, 并改变某些特定振型的振动频率; 池茂儒等^[12-13]通过受力分析, 发现轮径差会改变轮轨接触关系, 从而影响车辆系统的稳定性和安全性; 韩鹏等^[14]分析了高速列车磨耗型面与轮径差对滚动半径差函数形状与位置变化的影响规律及其对动力学性能的影响, 认为轮对磨耗与轮径差会引起轮轨动态接触点变化, 导致高速列车动力学性能的大幅改变。

上述研究明确了轮径差对轨道车辆的部分影响, 但是针对由轮径差所引起的轮轨间相互作用的研究较少, 并且现有研究大多都是针对车辆系统而言的, 没有详细考虑其牵引或制动工况。机车相对车辆而言, 还需要承担列车的牵引与部分制动作用, 在牵引或制动工况下, 轮轨之间相互作用与惰行工况有所不同。因此本文首先分析惰行工况下不同类型轮径差对机车轮轨相互作用的影响, 并以此为基础, 深入研究电制动工况下机车轮轨间相互作用与惰行工况下的不同之处。

1 轮径差的类型

以两轴转向架为例, 包括两个轮对共四个车轮相互之间的轮径差。仅以最简单的两个车轮之间存

在轮径差考虑, 就有 6 种不同的轮径差形式, 根据存在位置的不同, 这 6 种不同的轮径差又可以划分为以下 4 种类型, 如图 2 所示。

图 2 轮径差的类型

而对于 3 轴转向架来说, 同一转向架就有 15 种不同的轮径差表现形式, 而且这还不包括各种轮径差同时存在的复合情况。

2 轮径差的标准

轮径差有一定的限制标准, 我国在内燃机车中修规程中规定的机车轮径差如表 1 所示^[15]。

表 1 中修规程中规定的轮径差限值			mm
类别	同轴左右	同转向架	同机车
设计	1.0	2.0	2.0
中修	1.0	2.0	4.0
小、辅修	1.0	5.0	10.0

从表 1 也可以看到, 到辅修的时候, 同机车内各车轮轮径差的值可以达到 10 mm, 而同一转向架之内的轮径差则最大只能是 5 mm, 至于同一轮对的左右轮, 其最大轮径差则只能为 1 mm。因此, 实际轮径差的值, 尤其是同一转向架内轮径差的值并不会太大, 但为明确轮径差对轮轨相互作用的影响, 以同一转向架内轮径差不大于 3 mm 进行研究。

3 轮径差状态下的轮对状态分析

以转向架前轮对的右轮轮径小于正常轮径为例进行受力分析, 机车在进行过程中轮对主要受到如下几种力: 轮轨间的蠕滑力 T_{ij} ; 来自悬挂系统的悬挂力 F_{sij} ; 由重力刚度产生的横向复原力 F_g 和牵引力或制动力 F_j , 如图 3 所示, 其中角标 i 为 x 表

对设定不同的初始参数, 实现不同的轮径差设置。

5 仿真结果

5.1 惰行工况

为排除线路不平顺对轮轨动态接触关系的影响, 设定列车以 70 km/h 的速度匀速运行在理想平直轨道上, 分别给第四位转向架前后轮对设定不同的轮径差值。

轮轨横向力主要由轮轨接触法向力的横向分力和横向蠕滑力组成, 轮径差的存在将导致轮轨接触角的变化, 从而对轮轨横向力也造成一定的影响。

当第七位轮对轮径差值 $D_7 < 0$, 即左轮小于正常轮径时, 第七位轮对左右轮将产生负的横向蠕滑力, 促使轮对向 y 轴负方向横移, 从而通过悬挂系统带动第八位轮对也向 y 轴负方向横移, 第八位轮对左右轮都将产生正的横向蠕滑力, 该蠕滑力方向与左轮轮轨接触法向力的横向分力同向, 与右轮轮轨接触法向力的横向分力反向, 因此在 $D_7 < 0$ 的情况下左轮轮轨横向力随 ΔD_7 的增大而增大, 当右轮横向蠕滑力大于轮轨接触法向力的横向分力后, 便开始向正方向增大; 当 $D_7 > 0$ 后, 情况则与之相反; 当 $D_8 < 0$ 时, 第八位轮对左右轮都将产生负的横向蠕滑力, 因此右轮的轨横向力随 ΔD_8 的增大而增大, 当左轮的横向蠕滑力大于轮轨接触法向力的横向分力后便开始向负方向增大; 当 $D_8 > 0$ 时的情况与 $D_8 < 0$ 时相反, 如图 5 所示。从图 5 中还可知反相轮径差对轮轨横向力的影响要大于同相轮径差, 这主要是由于同相轮径差将引起前后轮对共同带动构架向轮径较小的方向横移, 因此轮对横移量较大, 但是轮对的冲角较小; 反相轮径差使转向架前后轮对分别向反方向横移, 造成构架产生较大摇头, 轮对的摇头角也随之增大, 同时产生较大的横向蠕滑力。

图 6 所示为第八轮对磨损功随轮径差值的变化情况, 其中颜色越深表示磨损功越大, 颜色越浅则表示磨损功越小。从中能够看出车轮磨损功在图中几乎呈角对称分布, 反相轮径差的磨损功大于同相轮径差的磨损功, 其中左轮磨损功最大值出现在 $D_7=3$ 、 $D_8=3$ 处, 为 $1\,002.96\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小值为标准轮对, 几乎为 0; 右轮磨损功最大值出现在 $D_7=-3$ 、 $D_8=3$ 处, 为 $1\,005.9\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小值也为标准轮对。因此反相轮径差会加剧轮轨间的磨损, 而等值同相轮径差的磨损功则一直处于较低水平, 这主要是由于转向架前后轮对向同一方向横移, 能够有效减小机车直线稳态运行时的轮径差, 同时减小轮对的摇头和蠕滑, 因此磨损也较小。

图 5 惰行工况下第八轮对轮轨横向力

图 6 惰行工况下第八轮对车轮磨损功

5.2 制动工况

由于制动力的施加, 列车的运行速度会不断减小, 为了排除机车运行速度与轨道不平顺对仿真结果的影响, 因此将简化 C₈₀ 敞车设定为匀速状态, 因此在仿真过程中列车始终以 70 km/h 的速度运行在理想平直轨道上。

制动力以力矩的形式施加在机车的轮对上, 在仿真中设定制动力矩从第 5 s 开始施加, 经过 10 s 线性增大后达到最大值并保持。该型机车的最大电制动力 $F_{B\max}=461$ kN, 换算为轴制动力矩

$$T_{B\max}=F_{B\max}R_0/8=461\text{ kN}\times0.625\text{ m}/8=36\text{ kN}\cdot\text{m} \quad (6)$$

机车电制动的施加将增大车轮的纵向蠕滑, 使纵向蠕滑力成为总蠕滑力的主要组成部分, 从而减小轮对的摇头角和横向蠕滑力, 因此, 若只考虑第八位轮对自身轮径差的影响, 当 $D_8\leq0$ 时, 左右轮的轮轨横向力相对惰行工况都将出现不同程度向正方向偏移的现象; 但当 $D_8>0$ 时, 情况则与之相反, 轮轨横向力都向负方向偏移; 制动工况下的轮轴横向力相对惰行工况而言总体有所减小, 这里列出制动工况下第八位轮对横向力与惰行工况的对比情况, 如图 7 所示。

(a) 轮轨横向力

(b) 轮轴横向力

图 7 第八位轮对横向力对比

通过分析可知制动力会降低轮对对左右轮滚

动圆半径的调整能力, 因而在机车达到稳态后的轮径差要大于惰行工况下的稳态轮径差, 进一步加剧轮轨间的磨耗。

第八位轮对左右轮在制动工况下的磨耗功如图 8 所示, 左轮磨耗功随 D_7 的增大而增大, 随 D_8 的增大而减小, 而右轮磨耗功随前后轮对轮径差值的变化规律则与之相反, 左轮磨耗功最大值出现在 $D_7=3$ 、 $D_8=-3$ 处, 为 $3\,717.23\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小值出现在 $D_7=-3$ 、 $D_8=3$ 处, 为 $110.68\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 右轮磨耗功最大值出现在 $D_7=-3$ 、 $D_8=3$ 处, 为 $3\,670.69\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最小值出现在 $D_7=3$ 、 $D_8=-3$ 处, 为 $103.14\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于在制动工况下轮径较小的车轮其纵向蠕滑有所增大, 反相轮径差又会引起较大的横向蠕滑, 因此反相轮径差状态下, 轮径较小的车轮磨耗功最大。

(a) 左轮

(b) 右轮

图 8 制动工况下第八位轮对车轮磨耗功

图 9 所示为惰行和制动工况下第八位轮对车轮磨耗功的对比情况, 从中能够看出惰行和电制动工况下车轮磨耗功的变化规律有所不同, 惰行工况下左右轮的磨耗功随轮径差值的增大同时呈现出先减小后增大的变化趋势, 而制动工况下, 左轮磨耗功则随着轮径差值的增大而减小, 右轮的变化规律与之相反, 这主要是由于电制动工况下车轮的纵向蠕

滑对磨损影响较大,由此也能够看出,在电制动工况下,轮径差还将引发轮对偏磨的出现,进一步加大轮径差。

图 9 第八轮对车轮磨损功对比

6 结论

(1) 轮径差会改变轮对的运动形态,并导致左右轮非对称接触现象的产生,从而引起轮轨横向力的变化,同时加剧轮轨之间的磨损。

(2) 电制动工况下轮径差对轮轨横向力的影响要小于惰行工况,电制动工况下左右轮的轮轨横向力相对惰行工况会向轮径较大一侧发生不同程度的偏移,轮轴横向力则总体有所减小。

(3) 惰行工况下左右轮的磨损功随轮径差值的增大同时呈现先减小后增大的变化趋势,电制动工况下的轮轨磨损要远大于惰行工况,左轮的磨损功随轮径差值的增大而减小,右轮的变化趋势与之相反,因此电制动工况下,轮径差还将引发轮对偏磨的出现,进一步加大轮径差。

参 考 文 献

- [1] FRÖLING R D. Analysis of asymmetric wheel profile wear and its consequences[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(Suppl.): 590-600.
- [2] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 接触应力对轮轨材料滚动摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(4): 352-356. WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Effect of contact stress on rolling friction and wear behavior of wheel-rail materials[J]. Tribology, 2011, 31(4): 352-356.
- [3] 胡海滨, 吕可维, 邵文东, 等. 大秦铁路货车车轮磨损问题的调查与研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 30-37. HU Haibin, LÜ Kewei, SHAO Wendong, et al. Research on wheel wear of freight cars on Datong-Qinhuangdao railway line[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 30-37.
- [4] MA W H, LUO S H. Analyses of wheel/rail unsymmetrical contact problem[C]//International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: Central South University, 2008, 344-347.
- [5] FRÖLING R, EKBERG A, KABO E. The detrimental effects of hollow wear-field experiences and numerical simulations [J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1283-1291.
- [6] MUELLER R. Veränderungen von radlaufflächen im betriebseinsatz und deren auswirkungen auf das fahrzeugverhalten: teil 1[J]. ZEV+DET Glasers Annalen, 1998, 122(11): 502-516. MUELLER R. The influence of tread profile changes on vehicle performance: Part 1[J]. ZEV+DET Glasers Annalen, 1998, 122(11): 502-516.
- [7] BOGACZ R, KOWALSKA Z. Computer simulation of the interaction between a wheel and a corrugated rail[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2001, 20(4): 673-684.
- [8] POLACH O. Influence of wheel/rail contact geometry on the behaviour of a railway vehicle at stability limit[C]//ENOC, August 7-12, 2005, Eindhoven, Netherlands: 2005: 2203-2210.
- [9] SWENSON C A, SCOTT R T. The effect of locomotive radial steering bogies on wheel and rail wear[C]//ASME/IEEE Joint Railroad Conference. Oak Brook: ASME, 1996, 91-100.
- [10] SAWLEY K, WU H M. The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1179-1186.
- [11] SPINOLA E C, GLOCKER C, STEFANELLI R, et al. Influence of wheel diameter on the curve squealing of railway vehicles[C]//Proceedings of the Fifth International Congress on Sound and Vibration. South Australia: University of Adelaide, 1997, 1-6.
- [12] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 轮径差对车辆系统稳定性的影响[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 65-69. CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Influence of wheel diameter difference on the stability of vehicle system[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 65-69.
- [13] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 轮径差对行车安全性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(5): 19-22. CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Influence of wheel-diameter difference on running

- security of vehicle system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 19-22.
- [14] 韩鹏, 张卫华, 李艳, 等. 轮对磨损与轮径差对高速列车动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 47-53.
- HAN Peng, ZHANG Weihua, LI Yan, et al. Influence of wheelset wear and wheel radius difference on dynamics performances of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 47-53.
- [15] 周新胜. C_0-C_0 轴式机车轮径差的研究[J]. 内燃机车, 2007(5): 18-22.
- ZHOU Xinsheng. Study of wheel diameter mismatch of C_0-C_0 locomotive[J]. Railway-Locomotive and Motor Car, 2007(5): 18-22.
-
- 作者简介: 马卫华, 男, 1979 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为机车车辆动力学。
E-mail: maweihua2008@gmail.com
- 邹瑞明(通信作者), 男, 1991 年出生。主要研究方向为机车车辆动力学。
E-mail: ming9110@gmail.com

第 4 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

超声珩齿振动系统的非谐振设计理论与实验研究

作者: 秦慧斌

毕业学校: 太原理工大学

指导教师: 吕明

论文重点研究了齿轮超声精密加工谐振系统的设计理论及其超声珩齿工艺试验。主要研究工作如下。

将齿轮等效为与其分度圆等径的中厚环盘, 利用 Mindlin 中厚板振动求解理论, 通过齿轮轮毂、辐板、轮缘三个环盘单元的耦合振动连续条件和边界条件, 并结合三个环盘单元的厚度尺寸关系, 建立了圆柱齿轮的横向弯曲振动求解的统一模型, 为齿轮超声加工振动系统的设计奠定了理论基础。

提出了齿轮与变幅杆两非谐振单元超声加工振动系统的非谐振设计理论。其实质是根据齿轮结构特点, 合理简化其振动模型, 联合建立齿轮和变幅杆的振动系统模型, 通过耦合振动连续条件和边界条件建立系统的振动频率方程, 进而确定满足谐振频率和振动模态的系统形状尺寸参数。

对不同振动方式齿轮变幅杆所适应齿轮参数范围给出定量描述。推导出各类型纵向、纵弯谐振变幅器的频率方程, 通过多种变幅器的设计、有限元分析验证、谐振特性试验, 表明: 对于分度圆直径一定, 不同的中小模数、齿数圆柱齿轮的变幅器设计, 非谐振设计理论是正确的。

应用三维振动里兹数值求解方法, 统一了圆锥、指数形和悬链线形变幅杆的扭转、纵向、弯曲振动的求解方法; 结果表明: 三维振动里兹数值法求解比一维振动理论求解准确, 方便了大截面变幅杆的设计。统一了径向变厚度环盘横向弯曲和径向振动的求解方法, 为变厚度齿轮动态分析建模、振动特性分析提供了一种新的求解分析方法。为超声珩齿振动系统的精确建模和三维振动求解分析提供了研究基础。

应用上述设计理论研制了高速超声珩齿装置, 在 Y4650 珩齿机上构建了超声珩齿试验系统, 实现了超声珩齿。与传统珩齿相比, 超声珩齿的工艺优势在于: 可以获得更理想的齿面质量、更高的珩削效率, 且齿面加工纹理复杂, 齿轮的齿形、齿向、径向跳动、周节累积偏差有不同程度的减小, 尤其齿向偏差减小更明显。为利用超声振动增大珩齿的修形能力, 提高齿轮加工精度, 提供了试验依据。

振动系统的全谐振设计是非谐振设计的特例, 非谐振设计涵盖了全谐振设计。非谐振设计方法同样适合于其他齿轮超声加工振动系统的设计, 为超声加工在齿轮精密制造中的发展与应用奠定了理论和试验基础。