

A型地铁车辆车轮多边形磨损成因初探

杨晓璇,李伟,陶功权,温泽峰

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:针对国内某A型地铁车辆振动噪声大的情况,对车轮表面状态进行了勘查,发现车轮普遍存在多边形磨损现象。为探寻车轮多边形磨损的形成机理,计算了轮对的自由模态,并开展了车辆零部件的振动试验。研究表明:轮对扭转和1阶弯曲共振模态是车轮多边形磨损形成的主要原因;车辆通过梯形轨枕轨道时极易激发轮对的1阶弯曲模态,该线路大量使用梯形轨枕轨道是车轮多边形磨损现象频发的环境诱因。

关键词:地铁车辆;车轮多边形磨损;模态;振动试验

中图分类号:U27 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0022-04

Preliminary Analysis of Mechanism of Wheel Polygon Wear of Type A Metro Vehicle

YANG Xiaoxuan, LI Wei, TAO Gongquan, WEN Zefeng

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

Abstract: Aiming at vibration and noise of type A metro vehicle in China, the surface condition of the wheel is investigated and it is found that the polygonal wear occurs on the wheels. To explore the mechanism of the polygon on wheels, the free motion of the wheelset is calculated and the vibration test of the vehicle components is carried out. The results show that the torsion and the first-order bending resonance modes of the wheelset are the main reason for the polygonal wear of the wheels. The first-order bending mode of the wheelset can be excited easily when the vehicle passes the ladder sleeper track, which is the environmental incentives to the polygonal wear of the wheels.

Keywords: metro vehicle; wheel polygonal wear; modal; vibration test

0 引言

地铁车轮多边形磨损现象是当前我国地铁运营过程中面临的突出问题。车轮多边形磨损会引起轮轨接触垂向作用力急剧增大,车辆通过时轮轨系统产生剧烈振动,进而缩短车辆和轨道零部件(轮对、轴箱、钢轨、扣件等)的疲劳寿命,危及行车安全;同时带来过大的噪声,影响乘坐舒适性。至今车轮多边形磨损问题尚未完全得到有效解决。

国内外学者通过大量现场试验,结合数值仿真分析,对车轮非圆化的产生机理做了相应的研究。Soua等^[1]建立机车车辆模型,仿真模拟了1阶、2阶和4阶3种不同谐波车轮多边形磨损的发生和发展,认为轮轴扭转振动和整体轮对的横向运动对车轮多边形磨损的产生和发展影响明显。Nielsen等^[2]综述了不同车轮多边形磨损形成的原因及其对轨道和车辆结构的影响,并针对1~5阶车轮多边形磨损现象,提出了相关的解决措施。Johansson等^[3]经过现场试验发现在装有盘形制动装置的ICE高速列车轮对存在多边形磨损,其基于数值方法研究了车轮非圆化现象与轮轨垂向接触力、轨道动态响应的关系,认为车轮多边形磨损形式与轨道动态特性有关。Muller等^[4]认为

车轮周期性多边形磨损是由圆周材料的各向异性所致。金学松等^[5]通过轮对有限元仿真和力锤敲击试验,计算并验证了轮对的模态频率,发现直线电机地铁列车车轮9边形磨损与轮对1阶弯曲共振频率相关。李伟等^[6]通过试验和数值仿真对直线电机地铁列车车轮9边形磨损的来源进行了调查研究,发现车辆运行时轮轨表面不平顺激发的轮对1阶弯曲共振是导致车轮多边形磨损的主要原因,提出轮轴加粗来减缓轮对1阶弯曲共振导致的车轮多边形磨损现象,并通过现场试验验证其有效性。马卫华等^[7]对国内某地铁车辆结构进行分析,认为直线电动机的振动可能是导致车轮多边形磨损的原因之一。陈光雄等^[8]通过建立轮对-钢轨-轨枕系统有限元模型,认为轮轨之间的饱和蠕滑力会引起车轮多边形磨损。

本文结合A型地铁列车车轮多边形磨损现场勘查,研究轮对模态与车轮多边形磨损的关系,并通过车辆关键部件的振动试验,进一步对车轮多边形磨损的成因进行分析。

1 某A型地铁列车车轮多边形现场测试结果

选定国内某地铁若干运营里程阶段的车辆,使用车轮粗糙度测量仪(图1a))对车轮周向不平顺进行现场勘查。

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1201103-08)

作者简介:杨晓璇(1992—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为轮轨关系。

测试时用机械式螺旋千斤顶抬升轴箱,使轮对与钢轨分离 3~5 mm,且测试轮对停放制动处于缓解状态,车轮可以自由旋转。测试前使用钢丝球或干抹布将车轮踏面清扫干净,以防止铁屑、油污等附着在踏面上的污染物对测试结果造成影响。仪器前部传感器 1 用于记录车轮周向不平顺信息,传感器 2 用于记录车轮周向长度信息,且二者均可以跟随车轮的不平顺前后移动,不会与踏面分离,保证了结果的连续性。测量质量会受到轮对振动、接触点高切向力和滑动的影响,故测量过程中需匀速缓慢旋转车轮。测试点位于车轮踏面(LM 标准型面)距轮缘内侧 70 mm 处,即名义滚动圆处。该地铁车辆为 A 型车,采用闸瓦制动方式,最大轴重 16 t,设计最高运行速度为 80 km/h。

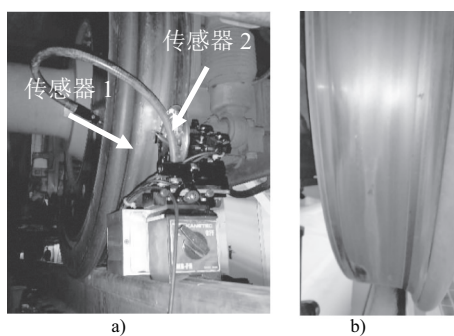


图1 车轮多边形现场测试

通过 BST 车轮粗糙度仪测量了 6 列不同运营里程车辆的车轮周向不平顺幅值,测试车轮数超过 300 个。测试发现,车轮踏面周向普遍存在多边形磨损现象,见图 1b)。

根据 ISO 3095:2005 国际标准,车轮粗糙度水平定义为:

$$L_r^k = 10 \times \log_{10}(r_k^2 / r_{ref}^2)$$

式中: r_k^2 是车轮不圆度外形粗糙度 $r(x)$ 的均方值在 1/3 倍频程 k 中进行量化; r_{ref}^2 为车轮粗糙度的参考值。频带中心波长为:

$$\lambda_k = 0.01 \times 10^{k/10}, k = -10, -9, \dots, 14, 15$$

在每个 1/3 倍频程中,将所得的窄带频谱幅值的平方再求和,并除以计算点数即可得到 r_k^2 。在粗糙度的定义中,10 μm 粗糙度的均方根值对应 20 dB 的粗糙度水平,1 μm 的粗糙度幅值对应 0 dB 的粗糙度水平。

图 2 为某一车轮多边形磨损的测试结果,图 2a) 为车轮不圆度幅值在极坐标中的表示,图 2b) 和图 2c) 分别为以阶次和 1/3 倍频程中心波长表示的车轮粗糙度水平。

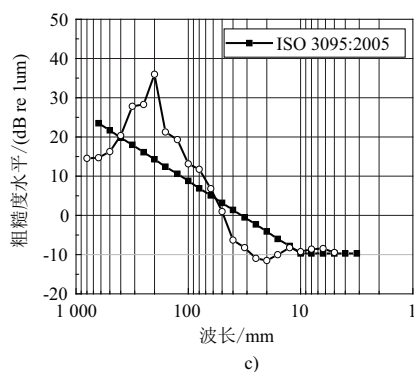
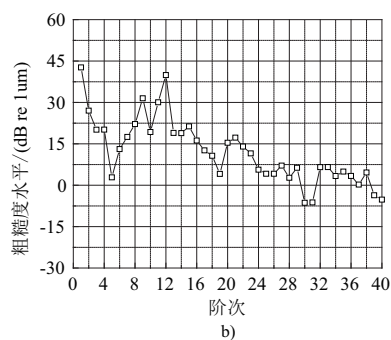
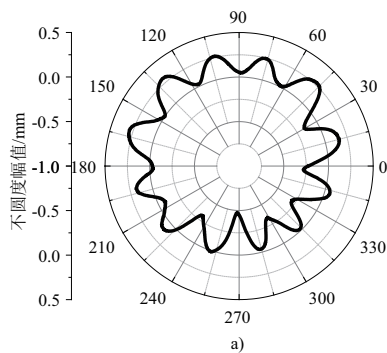


图2 车轮多边形测试结果

测试结果表明:车轮周向磨损形式主要为偏心、11~16 阶多边形磨损;多边形波长主要分布在 163~237 mm 范围,平均波长 200 mm。

图 3 给出了车轮偏心和 11~16 阶多边形磨损平均粗糙度水平随着车辆运营里程的变化规律。从图中可以看出,车轮偏心和 11~16 阶多边形磨损都有一个快速发展期,车轮偏心在 0~2 万公里期间发展迅速,而后发展平缓;车轮 11~16 阶多边形在 8~12 万公里期间相对发展较快,规律变化原因在下文给出。

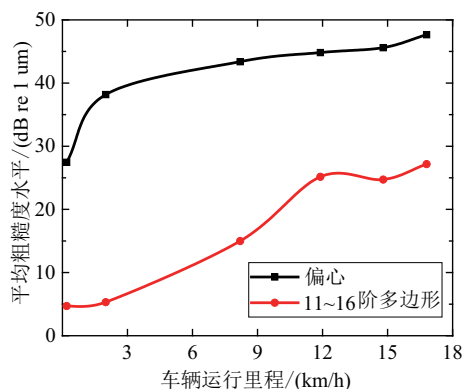


图3 偏心和 11~16 阶多边形平均粗糙度水平

2 车轮多边形磨损与轮对结构模态特征的相关性

利用有限元软件 ANSYS 建立轮对的有限元模型,见图 4a),模型包含 105 765 节点和 97 520 个单元。图 4b) 和图 4c) 给出了轮对在自由状态下的模态频率及其固有振

型结果。轮对1阶扭转模态频率为84.1 Hz,1阶弯曲模态频率为101.8 Hz。

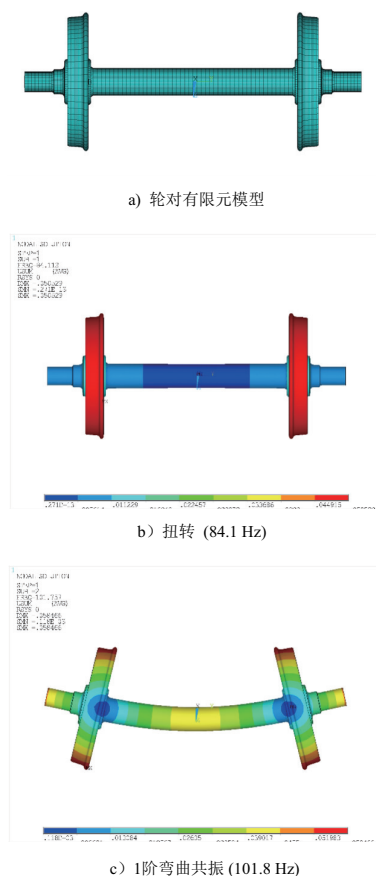


图4 轮对模态振动结果

通常,地铁车辆运行时的速度在55~75 km/h,若轮对的扭转或1阶弯曲模态被激发,则由其导致的波长为:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{(55 \sim 75) \text{ km/h}}{84.1} \approx 182 \sim 248 \text{ mm};$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{(55 \sim 75) \text{ km/h}}{101.8} \approx 150 \sim 205 \text{ mm}$$

式中: v 为列车运行速度; λ_1 和 λ_2 总的范围为150~248 mm。平均波长为199 mm。这与车轮11~16边形的平均波长200 mm基本一致,可见轮对扭转和1阶弯曲模态可能与车轮多边形磨损相关。轮对扭转或1阶弯曲振动模态被激发后会引起车轮与钢轨之间发生微小滑动,即分别产生轮轨纵向蠕滑率和横向蠕滑率。轮轨间蠕滑率的变化频率与扭转或1阶弯曲振动模态频率相同,其会引起周期性变化的轮轨蠕滑力。轮轨间周期性变化的蠕滑力会引起车轮表面材料的非均匀磨损,在车轮长时间运行过程中,非均匀磨损的积累最终导致车轮11~16边形磨损产生。

3 车轮多边形磨损的原因初步分析

若轮对扭转或1阶弯曲共振被激发,其频率会传递到轴箱等其他零部件,通过对轴箱振动加速度的测试,从而判断轮对的两种固有模态是否激发。选取镟轮前后各一列车作为实验车辆,在AW0状态下对其中一个拖车的轴

箱进行全线路振动测试,以得到车辆于正线线路运行时,在有无车轮多边形激励下轴箱的振动加速度响应。

测点处的测试车辆车轮表面磨损状态如图5所示,图中给出了车轮周向不平顺幅值和多边形阶次情况,镟前车轮圆周主要呈现偏心 and 12边形磨损(其粗糙度水平为34.16 dB re 1 μm)现象,多边形对应的1/3倍频谱波长为200 mm,镟后车轮圆周主要呈现偏心,其粗糙度水平为36.88 dB re 1 μm ,与镟前车轮相近。车轮各阶多边形对应的波长用 $\lambda = \pi d/n$ 表示,其中 d 为车轮直径(约832 mm), n 为多边形阶数。

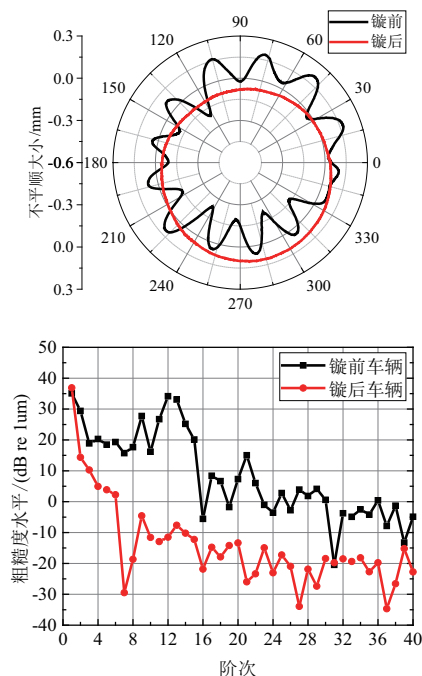


图5 测点处车轮表面磨损状态

图6给出了镟修后在某两个区间轴箱垂向振动加速度时频图,同时给出了速度随时间变化曲线。图6a)中区间大部分为梯形轨枕轨道,图6b)中区间全部为普通整体轨道。两图中存在多条随速度变化的频率亮线,其频率间隔与对应速度下的基频一致。车辆通过梯形轨枕轨道时,80~100 Hz频带固定不变,通过普通整体轨道时,50~65 Hz频带固定不变,可见此两个频带与轨道类型相关,这是由车辆簧下质量与轨道相互作用产生的P2力引起。另外,还存在83~95 Hz不随速度、轨道类型变化的频带,这与轮对扭转模态(84.1 Hz)或1阶弯曲共振模态(101.8 Hz)非常接近。图6a)中车辆与梯形轨枕轨道相互作用产生的P2力频率与轮对1阶弯曲共振频率相近,故车辆在通过梯形轨枕轨道时,P2力极易激发轮对1阶弯曲模态;而在图6b)中,83~95 Hz固定频带与车辆和普通整体道床相互作用产生的P2力频率不相关,但轮对1阶弯曲共振模态可由钢轨表面不平顺(如钢轨焊接接头不平顺)激发;轮对在通过曲线或在直线段因轨道不平顺引起横向晃动时,左右车轮产生方向相反的轮轨纵向蠕滑力,从而激发轮对的扭转模态。

图7给出了车轮镟修前后车辆以72 km/h速度通过梯形轨枕轨道时的轴箱垂向加速度频谱。由 $f=v/\lambda$ 可知,

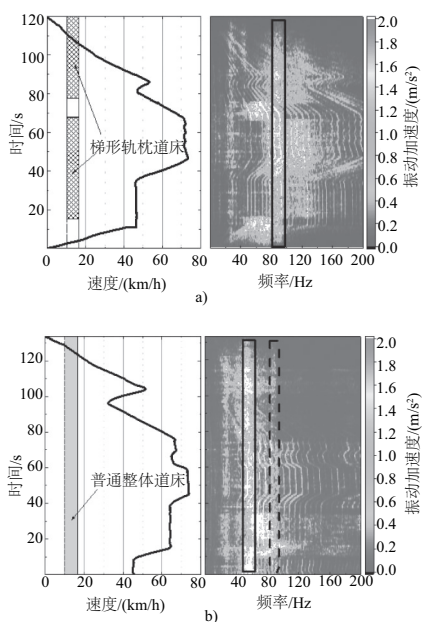


图6 某两个区间轴箱垂向振动加速度时频图

偏心车轮的通过频率为 7.6 Hz , 即基频 f_e 为 7.6 Hz 。在 72 km/h 速度下, n 阶多边形车轮通过频率可用 $7.6n\text{ Hz}$ 表示, 例如 12 阶多边形车轮的通过频率为 91.2 Hz 。从图 7 中可知, 车轮镟修前轴箱垂向振动加速度主要频率峰值为 61.5 、 69.5 和 92 Hz , 分别对应车轮 8、9 和 12 阶多边形的通过频率。车轮镟修后轴箱垂向振动加速度比镟前要小很多, 其主要频率峰值为 84 、 91 、 99 、 121 Hz , 其中 99 Hz 频率与轮对的 1 阶弯曲共振频率非常接近。

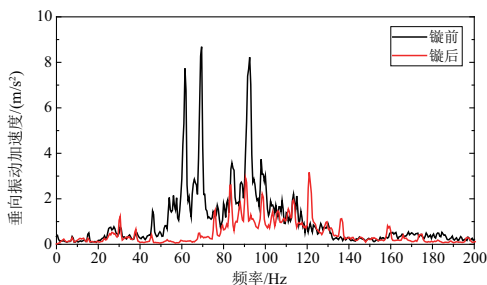


图7 车辆通过梯形轨枕轨道轴箱振动加速度

经调查, 梯形轨枕轨道在全线线路中占比为 39.1% 。由于车辆通过梯形轨枕轨道时产生的 P2 力频率范围与轮对 1 阶弯曲共振率相近, 持续的 P2 力会激发出轮对的 1 阶弯曲共振模态, 车辆长时间运营后, 车轮 11~16 边形磨损开始产生并逐渐恶化。

由于镟后车轮存在偏心磨损, 在图 7 中, 镟修后轴箱

垂向振动加速度在 $75\sim 120\text{ Hz}$ 范围存在一系列峰值, 峰值对应频率为 $n \times f_e$ ($n=10, 11, \dots, 16$), 即车轮偏心磨损在该速度下通过频率的整数倍。车轮偏心致使轮对在该系列频率的振动加剧, 这加速了车轮多边形磨损的形成。因而, 在车轮偏心磨损发展到一定程度后 (2 万公里后), 并在轮对 1 阶弯曲模态的共同作用下, 车轮多边形磨损逐渐产生; 到 8 万公里后, 车轮偏心、多边形磨损和轮对 1 阶弯曲模态三者共存, 车轮多边形磨损加剧, 这说明了多边形磨损的发展规律。

4 结语

本文针对国内某 A 型地铁线路车辆出现振动噪声过大的情况, 调查测试发现大部分车轮存在偏心 and 11~16 阶多边形磨损现象, 基于轮对模态仿真和车辆关键部件的振动试验研究可知: 轮对扭转和 1 阶弯曲共振模态是导致车轮 11~16 边形磨损形成的主要原因; 车辆通过梯形轨枕轨道时极易激发轮对 1 阶弯曲共振模态, 线路大量使用这种轨道是车轮多边形磨损频发的环境诱因。

参考文献:

- [1] Soua B, Pascal J P. Computation of the 3D wear of the wheels in a high speed bogie [M]. Report INRETS - LTN, Arcueil, France, 1995.
- [2] Nielsen J C. O., Lunden R, Johansson A, et al. Train-track interaction and mechanisms of irregular wear on wheel and rail surfaces [J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1/2/3): 3-54.
- [3] Johansson A, Nielsen J C O. Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2003, 217(2): 135-146.
- [4] Müller R, Diener B, Diener M. Wear phenomena on wheel treads of railway vehicles [J]. ZEV DET Glaser's Annals. Journal of Railway Engineering and Transport Technology, 1995, 119: 177-192.
- [5] JIN Xuesong, WU Lei, FANG Jianying, et al. An investigation into the mechanism of the polygonal wear of metro train wheels and its effect on the dynamic behavior of a wheel/rail system [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(12): 1817-1834.
- [6] 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.
- [7] 马卫华, 罗世辉, 宋荣荣. 地铁车辆车轮多边形磨损形成原因分析 [J]. 机械工程学报, 2012(24): 106-111.
- [8] 陈光雄, 金学松, 邬平波, 等. 车轮多边形磨损机理的有限元研究 [J]. 铁道学报, 2011(1): 14-18.

收稿日期: 2018-04-16