DOI: 10.3901/JME.2020.14.152

B型地铁车轮失圆问题分析*

陶功权¹ 周小江² 周业明² 温泽峰¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111)

摘要: 车轮失圆是铁路轮轨列车较为常见的问题之一,对车辆运行安全和轮对维护具有较大影响。通过对80 km/h速度级B型地铁车辆车轮不圆度进行大量测试,发现测试的6条线路中有5条线路车轮主要表现为偏心磨损,且车轮失圆发展非常缓慢,仅1条线路的车轮失圆较为严重,主要表现为偏心和5~8边形。失圆严重的车轮存在明显凹形磨耗,并且闸瓦-车轮匹配关系较差,闸瓦不能起到圆度修形作用,导致车轮失圆发展较快。根据现场调研和试验结果分析,提出了降低列车启动加速度、改善闸瓦-车轮匹配关系和降低轮轨动力作用等措施减缓车轮失圆的发展。根据车轮失圆对车辆动力学性能影响的仿真分析,提出了车轮低阶多边形的镟修限值,建议采用径跳0.4 mm的统一限值对低阶失圆车轮进行镟修。

关键词: B型地铁列车; 车轮失圆; 车轮磨耗; 车轮镟修; 减缓措施

中图分类号: U211

Analysis of the Wheel Out-of-roundness of Type B Metro Train

TAO Gongquan¹ ZHOU Xiaojiao² ZHOU Yeming² WEN Zefeng¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract: Wheel out-of-roundness(OOR) is a common problem in railway industry, which has a great influence on vehicle running safety and wheelset maintenance. Wheel OOR of type B metro train has been investigated through extensive field measurement on six metro lines. The measurement results indicate that most of wheels on five of six metro lines exhibit eccentricity and the development of wheel OOR is very slow. However, wheels on the other one metro line suffer from serious OOR problems with eccentricity and orders 5-8. The wheels with serious OOR exhibits obvious hollow wear on the wheel tread, and the matching relationship between brake shoe and wheel tread is poor. The repairment function of brake shoe for wheel OOR is lost, which leads to rapid development of wheel OOR. According to field investigation and analysis of test results, three measures are proposed to reduce the development of wheel OOR, including reducing the starting acceleration, improving the matching relationship between brake shoe and wheel tread and reducing the dynamic wheel/rail interaction. Wheel re-profiling threshold value is proposed based on the influence of wheel OOR on vehicle dynamics performance. The recommendation maximum allowable value of the radial run-out of wheels is 0.4 mm for low order OOR.

Key words: type B metro train; wheel out-of-roundness; wheel wear; wheel re-profiling; mitigation measure

0 前言

目前我国城市轨道交通广泛采用时速80 km B型地铁列车。该型地铁车辆转向架总体运用良好,但个别地铁项目在运营初期出现较为恶劣的轮轨关系问题,主要表现为车轮失圆。

车轮失圆在我国铁路现场广泛存在,地铁、高铁和普速铁路均有出现。在2014至2016年期间,我国高速列车车轮失圆问题普遍发生^[1],部分车轮出现严重的高阶车轮多边形,主要表现为18~23边形^[2]。地铁车轮同样出现明显的多边形磨耗问题,如某线路直线电机地铁车辆车轮出现9边形磨耗^[3]。普速铁路25G客车车轮出现明显的5~8边形磨耗,径跳甚至超过2.5 mm,导致轴承保持架断裂^[4]。此外,HXD1和HXD1C型机车在部分机务段出现非常严重的车轮多边形磨耗,主要表现为18、19和

* 国家重点研发计划课题(2017YFB1201103-08)、牵引动力国家重点实验室自主课题(2020TPL_T03)和四川省区域创新合作(20QYCX0101)资助项目。20190601收到初稿,20200311收到修改稿

24 边形, 导致转向架部件出现断裂和轴箱轴承、电机轴承失效^[5-7]。

车轮失圆是铁路轮轨关系研究中的难点问题之一, 近年来已有较多研究者对该问题展开了研究。马卫华等^[8]提出低频振动的轮轨力能导致车轮形成多边形磨损。通过数值仿真研究了某地铁车轮 9 边形磨损的形成原因, 认为直线电机的垂向振动引起轮轨垂向力振动是车轮形成 9 边形的根源。李伟等^[9]通过车轮多边形磨损测试以及车辆部件和轨道系统固有振动特性测试, 从频率固定机理的角度对某地铁车辆车轮 9 边形磨损的形成机理进行了研究。研究表明轮对一阶弯曲共振是车轮多边形磨损的主要原因。常崇义等^[10]利用 AMSLER 磨损试验机研究了高速轮轨材料硬度匹配对车轮多边形的影响。研究结果表明, 当轮轨材料硬度比小于 1.05 时车轮试样容易出现多边形, 而轮轨材料硬度比大于 1.36 时不易产生多边形。宋春元等^[11]对我国高速动车组车轮多边形磨损测试数据进行了详细地统计分析, 从车轮多边形与运行速度、运行线路条件、车辆结构等方面分析了易形成车轮多边形的影响因素, 推断车轮多边形与车辆/轨道系统固有振动特性相关, 但具体形成机理尚不明确。通过相关现场试验或台架试验研究, 认为改善镟修工艺、采用机械滚压提高车轮表面硬度、采用踏面修形装置均能有效控制车轮多边形的形成和发展, 在车轮多边形形成机理尚未明确前具有非常重要的工程意义。高速列车由于运行速度高, 部分车辆车轮出现严重高阶多边形, 在特定运行速度下可能会导致轴箱端盖和垂向止挡等非承载部件出现异常振动, 甚至出现疲劳断裂^[12-13], 并且车轮非圆化对高速列车车内异常噪声具有非常显著的贡献^[14-15]。除此之外, 车轮多边形对轮轨力以及道岔区的动力学性能也具有较大影响^[16-18]。

本文对不同地铁线路的时速 80 km B 型地铁车辆(下文简称 B 型地铁车辆)车轮不圆度进行测试分析, 研究车轮失圆的关键影响因素及对策, 采用数值仿真方法从车轮失圆对车辆动力学性能影响的角度对车轮失圆镟修限值进行研究。

1 车轮不圆度测试及分析

1.1 车轮不圆度测试过程及数据处理

采用铁道车辆车轮不圆度测量仪对 B 型地铁车辆进行了大量的车轮不圆度测试, 现场测试照片如图 1 所示。测试之前通过专用工装和千斤顶将轮对顶起, 使车轮与钢轨保持 3~5 mm 的间距。测试设备的位移传感器和旋转编码器与车轮踏面接触, 分

别记录车轮的径向偏差和周向距离。这两个传感器通过滑块固定在设备底座上, 可以通过横向滑动来测量车轮踏面不同横向位置处的车轮不圆度。测试设备还装有磁性传感器, 测试时将专用磁铁吸附在车轮上, 缓慢手动转动车轮, 当设备的磁性传感器被触发时开始采集数据, 再次被触发时立即自动停止采集。车轮不圆度测试设备的采样间隔为 0.629 mm, 测试精度为 0.1 μm 。测试之前需要将车轮踏面清理干净, 避免因车轮表面存在附着物而对影响测试结果。

测试得到的原始数据需要剔除其中的毛刺, 并且进行曲率平滑, 得到更加真实的数据。然后进行窄带粗糙度谱分析(或阶次分析)和 1/3 倍频程粗糙度谱分析, 得到测试车轮的不圆度阶次和车轮不圆度对应的 1/3 倍频程中心波长。详细的车轮不圆度数据处理方法可参见文献[7]。为了方便处理大量的测试数据, 开发了专门的后处理软件, 可以对车轮不圆度测试数据进行批量化处理, 并自动形成数据分析报告。

图 1 车轮不圆度测试现场照片

1.2 不同线路 B 型地铁车轮不圆度对比分析

本小节对 6 条地铁线路使用 B 型地铁车辆的车轮不圆度进行了测试和统计分析。不圆度测试信息如表 1 所示。本文调查的 B 型地铁采用 4 动 2 拖编组(Tc1+M1+M2+M3+M4+Tc2)。测试的车轮涵盖不同的运行里程, 每条地铁线路至少测量了 60 个车轮, 且至少分布于 3 列不同的车辆。

图 2 给出了 6 条地铁线路车轮不圆度测试的阶次分析结果。不同地铁线路 B 型地铁车辆车轮均未出现明显高阶多边形现象, 主要表现为偏心或低阶磨损。地铁 2 号线、地铁 3 号线、地铁 5 号线和地铁 6 号线车轮圆度状态较好, 且车轮粗糙度水平非常低, 即便是运行里程超过 45 万 km(未镟过轮)车轮圆度仍然非常好, 如地铁 2 号线和地铁 3 号线。地铁 1 号线个别车轮存在明显低阶多边形, 测试的 66 个车轮中仅 4 个车轮出现明显多边形现象, 主要

表现为5~8边形,车轮总体运用状态良好。但是地铁4号线车轮圆度状态相对较差,即便是运行里程仅7.1万公里的列车,车轮粗糙度水平整体较高。通过对车轮不圆度的典型阶次进行统计,发现地铁4号线约66%的车轮存在明显的5~8边形。典型车轮失圆表现形式如图3所示,主要为偏心和5~8边形。该线路车轮失圆的形成机理为轮轨系统P2共振^[19]。车轮存在明显的多边形现象,且车轮粗糙度水平较高,这将会显著增加车辆的振动,使得车内噪声明显增大,对车辆的运行可靠性和乘坐舒适性都将产生不利影响。

表1 车轮不圆度测试信息汇总

地铁线路	走行里程/万 km	测试车轮个数
地铁1号线	7.3~29.1	66
地铁2号线	21.4~49.2	146
地铁3号线	3.2~46.5	93
地铁4号线	7.1~14.7	180
地铁5号线	6.4~18.5	61
地铁6号线	1.7~26.3	94

图2 不同地铁线路车轮不圆度阶次测试结果

图3 典型车轮不圆度表现形式

由于不同地铁线路测试的车轮走行里程不同,且相差较大,不好直接对比不同线路车轮不圆度状态。为此,采用粗糙度发展速率来进行对比。将每个车轮测试得到的粗糙度水平除以该车轮的运行里

程,得到车轮的粗糙度发展速率,然后将同一条线路所有测试车轮的粗糙度发展速率进行平均,将平均后的结果定义为该条线路车轮粗糙度发展速率。图4给出了不同地铁线路车轮粗糙度发展速率对比。由对比结果可知,地铁4号线车轮粗糙度水平发展最快,并且在6边形处存在局部峰值,说明有较多车轮出现6边形磨损;地铁6号线车轮1阶偏心对应的粗糙水平发展速率仅次于地铁4号线,但其他阶次对应的粗糙度水平发展速率基本为6条线路中最小,说明该线路车轮主要以偏心磨损为主,虽然在7阶处也存在局部峰值,但其对应的粗糙度速率为负值,表明该阶不圆不会在车轮运行过程中明显发展,从图2f中也可以看出在7阶处粗糙度水平较低;其他4条线路车轮粗糙度速率除偏心处较大外,其他阶次对应的粗糙度速率普遍较低。

地铁运营部门通常采用径跳值作为车轮失圆的镟修依据。车轮径跳值定义为车轮最大半径与最小半径之差。图5对比了不同地铁线路车轮径跳发展速率。由对比结果可知,地铁4号线车轮径跳发展速率显著高于其他线路,径跳速率约为0.05 mm/

万 km, 即车辆运行 10 万 km 车轮的径跳值将普遍达到 0.5 mm。EN 15313: 2016 标准^[20]中规定对于速度低于 120 km/h 的车辆当车轮径跳值超过 0.5 mm 时建议进行镟修处理。因此, 对于地铁 4 号线由于车轮径跳发展较快, 必然会导致车轮镟修频繁, 增加车辆的运营维护成本。此外, 由于径跳值较大, 对车辆的振动噪声和转向架部件的疲劳寿命也极为不利。对于车轮径跳发展较快的原因将在下一节进行分析讨论。

图4 不同地铁线路车轮粗糙度发展速率对比

图5 不同地铁线路车轮径跳发展速率对比

2 车轮失圆关键影响因素及对策分析

2.1 降低列车启动加速度

地铁线路通常具有站点多、站间距短、小半径曲线多和列车启动/制动频繁等特点, 轮轨磨损和疲劳等问题较为突出, 轮轨关系较为复杂。列车牵引电机输出的牵引和电制动扭矩最终都要传递至轮轨界面, 转换为轮轨切向力, 从而达到使列车加速或减速的目的。轮轨界面的切向力对轮轨磨损贡献较大。GB/T 7928—2003 标准^[21]中规定地铁列车从 0 至 40 km/h 的平均启动加速度应高于 0.83 m/s^2 。通常地铁列车的实际平均启动加速度普遍高于 1 m/s^2 。然而, 地铁 4 号线的列车平均启动加速度

高达 1.5 m/s^2 , 在我们调查的几条线路中处于最高值, 如图 6 所示。较高的启动加速度意味着轮轨切向力也更高, 这必然会使得车轮磨损速率提高。

图 7 对比了 6 条地铁线路车轮踏面磨损速率, 这 6 条线路的 B 型地铁列车车轮均采用 CL60 材质。由对比结果可知, 地铁 3 号线、地铁 5 号线和地铁 6 号线车轮踏面磨损速率相对较低, 在 $0.050 \sim 0.065 \text{ mm/万 km}$ 范围内, 而地铁 4 号线车轮踏面磨损速率高达 0.143 mm/万 km , 显著高于其他地铁线路。地铁 1 号线和 2 号线车轮踏面磨损速率也较高, 这除了与一线城市地铁客流量大(列车载客后的轴重较大)有关外, 与闸瓦对车轮的磨损也有一定关系, 将在下一节进行讨论。地铁 4 号线的列车启动加速度约为地铁 3 号线的 1.36 倍, 如图 6 所示, 在牵引重量相同时地铁 4 号线的列车牵引力将是地铁 3 号线的 1.36 倍。地铁 4 号线踏面磨损速率为地铁 3 号线的 2.22 倍, 如图 7 所示, 这也进一步反映列车启动加速度对车轮磨损速率有较大影响。车轮的失圆实际是车轮周向不同横断面处的踏面磨损深度不一致所致, 降低列车启动加速度能够降低车轮踏面磨损速率, 这也能有效降低车轮失圆发展速率。

图6 不同地铁线路启动加速度对比

图7 不同地铁线路踏面磨损速率对比

2.2 改善闸瓦-车轮匹配关系

文献[22-23]通过 1:1 台架试验研究了研磨子对车轮多边形的消除效果。试验结果表明, 研磨子具有较好的圆度修形作用。与研磨子类似, 闸瓦也具有圆度修形作用。由于闸瓦制动时制动压力较大,

正常情况下闸瓦圆度修形效果应优于研磨子。本文研究的B型地铁的空气制动均采用闸瓦制动。由车轮不圆度测试结果可知,地铁4号线车轮圆度较差,因此,怀疑闸瓦修形效果不理想。为此,进一步分析了闸瓦-车轮匹配关系。

图8为地铁4号线某一车轮和闸瓦廓形测试结果。由测试结果可知,闸瓦和车轮廓形似乎贴合较好。通过利用闸瓦廓形减去车轮廓形,得到闸瓦-车轮间隙,其间隙在踏面尾部处几乎接近于零,但在踏面中部存在明显的间隙,其值约为0.2 mm左右。由于闸瓦和车轮之间的间隙呈现图8中所示的形状,在列车施加制动时闸瓦只能与踏面尾部贴合,而不能与车轮踏面中部接触,从而导致闸瓦不能起到较好的圆度修形作用。

图8 地铁4号线闸瓦-车轮匹配结果

在现场调研时,发现车轮踏面尾部普遍存在明显的闸瓦制动留下的痕迹,如图9所示,制动痕迹的宽度为25~35 mm,与图8中闸瓦-车轮间隙约为零的宽度一致。为了进一步验证空气制动时闸瓦是否能够完全贴合车轮,做了一个闸瓦喷漆的小试验。将1个动车转向架和1个拖车转向架的闸瓦表面喷上白色油漆,试验列车正线正常运行一个往返,然后将喷漆的闸瓦拆卸下来,查看闸瓦表面的油漆是否被磨损掉。图9给出了试验后其中1个闸瓦的踏面形貌照片。从图中可以看出,闸瓦在与车轮踏面尾部接触的位置油漆被完全磨损掉,磨损宽度约为35 mm,而与踏面中部接触的位置油漆还保持试验前的状态。通过这一小试验再次验证了列车空气制动时闸瓦不能完全贴合车轮,闸瓦-车轮匹配不佳,闸瓦圆度修形效果较差,从而导致车轮失圆发展较快。

改善闸瓦-车轮匹配关系,充分利用闸瓦的修形作用是减缓车轮失圆发展的有效措施之一。为了达到这一目的,最直接的方式就是增加闸瓦使用频次,可以通过修改列车的制动控制来实现,将列车的电制动和空气制动转换点的速度提高。其次,通过更换硬度略低的闸瓦在理论上也能改善闸瓦-车轮匹

图9 地铁4号线车轮和闸瓦踏面形貌照片

配关系。通过降低闸瓦硬度使闸瓦磨损速率提升,从而达到闸瓦与车轮踏面贴合更好的目的。另外,避免车轮出现凹形磨耗也能改善闸瓦-车轮匹配关系,从而增强闸瓦的圆度修形作用。由第1.2节车轮不圆度测试结果可知,地铁2号线即便是运行里程接近50万km的车辆,车轮圆度状态仍然较好,而地铁4号线运行不到10万km的车辆,车轮圆度就已经较差,其主要原因在于闸瓦-车轮匹配关系的差异。图10给出了地铁2号线运行约20万km的车轮踏面廓形和地铁4号线运行约14万km车轮踏面廓形。从图中可以看出,两者踏面磨耗深度相当,但地铁4号线的车轮存在明显的踏面凹形磨耗,而地铁2号线的车轮整个踏面磨耗较为均匀,即便在踏面尾部也存在明显的磨耗现象。车辆正线运行时踏面尾部基本不会与钢轨接触,主要靠闸瓦制动时磨损。当踏面不存在凹形磨耗时,闸瓦能与车轮踏面完全贴合,从而起到圆度修形的作用,但同时由于闸瓦对车轮踏面中部的磨损,也会使得车轮磨耗速率有所加快,这正如图7所测试的结果所示。闸瓦对车轮的磨耗相比于车轮因失圆镟修时镟除的车轮材料要小得多。

图10 地铁2号线和地铁4号线车轮磨耗对比

2.3 降低轮轨动力作用

由1.2节的测试结果可知,地铁4号线车轮失圆主要表现为偏心和5~8边形,属于低阶多边形。

5~8 边形的波长为 0.33~0.53 m, 该地铁线路车辆的运行速度普遍在 60~75 km/h。车轮多边形的通过频率在 31~63 Hz 范围内 ($f=v/\lambda$)。根据 NIELSEN 等^[24]的研究结果, 车轮低阶失圆通常是由轮对的低阶弯曲或扭转振动, 或轮轨系统 P2 振动所导致(频率通常为 30~100 Hz)。通过计算轮对的模态可知, 轮对最低阶的固有频率在 75 Hz 左右, 与车轮多边形的通过频率不相符。因此, 轮轨系统 P2 振动极有可能是车轮失圆的根本原因, 但这需要进一步研究。

图 11 给出了地铁 4 号线某区间轴箱垂向振动加速度测试, 对测试数据进行了 30~100 Hz 的带通滤波, 目的在于将 P2 振动频率涵盖在内。振动测试时车轮经过镟修处理, 车轮圆度恢复正常。通过轨道状态现场调研, 发现该区间也不存在钢轨波磨。该区间包含 DTVI2 普通扣件轨道和 GJ-III 减振扣件轨道两种轨道形式。由振动测试结果可知, 车辆匀速运行在这两种轨道上时轴箱加速度存在较大差异, GJ-III 减振扣件上的振动要小得多, 这也说明该种轨道形式上轮轨动力作用要小得多。因此, 适当降低扣件刚度, 降低轮轨动力作用也是缓解车轮失圆发展的一个有效措施。但相关研究结果表明, 低刚度扣件容易导致钢轨波磨的形成^[25]。

图 11 地铁 4 号线某区间轴箱垂向振动加速度

分别对图 11 中 22~46 s 范围内普通扣件区段和减振扣件区段轴箱垂向振动加速度进行频谱分析, 结果如图 12 所示。由频谱分析结果可知, 两种轨道结构上轴箱振动加速均在 30~100 Hz 频率范围内存在振动峰值, 减振扣件和普通扣件段振动主频分别为 49 Hz 和 64 Hz, 与 P2 振动频率范围一致, 也与车轮 5~8 边形形成频率 31~63 Hz 一致。30~100 Hz 范围内普通扣件区段轴箱振动加速度峰值约为减振扣件的 4.4 倍。从频谱分析的角度再次说明采用减振扣件降低轮轨动力作用是缓解车轮失圆发展的一个有效措施。

图 12 减振扣件和普通扣件区段轴箱垂向振动加速度频谱

3 车轮失圆维修限值数值仿真研究

处理车轮失圆最有效和最直接的方式就是车轮镟修。当车轮失圆发展到什么程度时需要进行镟修仍值得深入研究。为此, 本文建立了 B 型地铁车辆刚柔耦合动力学模型, 从车轮失圆对车辆动力学性能影响的角度对车轮失圆维修限值进行了研究。在多体动力学软件 SIMPACK 中建立的动力学模型如图 13 所示。模型中考虑真实的车辆结构尺寸和悬挂参数。轮对处理为柔性体, 构架和车轮均为刚体。

图 13 刚柔耦合动力学模型

通过现场测试的轴箱振动加速度对仿真模型进行了验证。试验和仿真的速度均为 75 km/h。仿真中将试验车辆的车轮不圆度测试数据作为输入, 试验车辆车轮存在明显的 5~8 边形。图 14 对比了仿真和实测轴箱垂向振动加速度时域结果和频域结果。由图 14 可知, 两者具有较好地吻合, 说明仿真模型准确可靠。

利用验证后的动力学模型对车轮失圆的维修限值进行了研究。计算时考虑车轮 1~10 阶不圆, 以谐波形式描述不同阶次的车轮多边形。根据车轮多

边形对轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数以及轮重减载率这四项行车安全性指标的影响来确定车轮多边形的维修限值。

图14 车辆动力学模型验证

图15给出了最大轮重减载率随多边形阶次及径跳值的变化规律。由图15可知,在相同多边形阶次下随着径跳值的增大最大轮重减载率基本呈线性增加,当径跳值达到某一值时最大轮重减载率将会超过对应的安全限值,此时若不及时进行车轮镟修,将会对车辆的运行安全构成威胁。

图15 最大轮重减载率随多边形阶次及径跳值的变化规律

以轮轴横向力、轮轨垂向力和脱轨系数为安全界限均能计算得到如图15所示的安全界限。以不同指标计算得到的安全界限的下限作为车轮多边形的安全限值,得到如图16所示的车轮多边形镟修限值。当车轮多边形的径跳幅值位于图中的安全区域时车轮能够继续运行,而当车轮多边形的径跳值超

过镟修限值时需要及时对车轮进行镟修,避免因车轮失圆而带来的行车安全问题。不同阶次下车轮多边形镟修安全限值总结于表2当中。鉴于B型地铁车辆车轮失圆主要表现为偏心 and 5~8边形,建议车轮镟修限值定为0.4 mm,其依据有两点:①目前地铁部门能够通过镟床测量车轮的径跳,但不能得到车轮多边形的波形和阶次,采用与阶次相关的限值实施上存在困难;②为了保证即便车轮出现8边形也不会出现因径跳过大而带来的安全隐患,将8边形的限值作为低阶多边形的镟修限值,该值较为保守,对大部分失圆车轮还预留一定的安全余量。

图16 不同阶次下车轮径跳安全限值

本文中提出的安全限值仅从车轮失圆对车辆动力学性能的角度出发,而车轮失圆会使得车辆转向架部件的振动显著增加,从而影响转向架部件的疲劳寿命,此外,还会显著增加车内噪声水平。更真实和更严格的镟修安全限值还应该考虑车轮失圆对转向架部件疲劳寿命和车内噪声的影响,而这两部分的研究已超出了本文的研究范畴。

表2 车轮多边形镟修安全限值

阶次	1~3	4	5	6	7	8	9	10
限值/mm	2.0	1.8	1.3	1.0	0.6	0.4	0.3	0.2

4 结论

通过对6条地铁线路B型地铁车辆车轮不圆度进行大量测试,掌握了该型地铁车辆车轮失圆的表现形式。根据现场调研和试验结果,分析了车轮失圆关键影响因素,提出了相应的对策。根据车轮失圆对车辆动力学性能影响的仿真分析,提出了车轮低阶多边形的镟修限值。主要结论如下。

(1) B型地铁车辆车轮圆度普遍较好,测试的6条线路中有5条线路车轮主要表现为偏心磨损,且车轮失圆发展非常缓慢,仅1条线车轮失圆较为

严重,主要表现为偏心 and 5~8 边形。

(2) 降低列车启动加速度、改善闸瓦-车轮匹配关系和降低轮轨动力作用均能有效减缓车轮失圆的发展。

(3) 针对车轮低阶失圆问题,最好采用与车轮阶次相关的镟修限值,既能保证车辆的运行安全,又不至于频繁对车轮进行镟修,但考虑到目前检测手段的限制,建议采用 0.4 mm 的统一限值对低阶失圆车轮进行镟修。

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] 吴越. 高速列车车轮多边形磨耗机理初探及影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
WU Yue. Investigation into mechanism of polygonal wear on high-speed train wheel and its influence analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [3] 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.
- [4] 陶功权. KKD 客车车轮踏面剥离成因初探[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
TAO Gongquan. Preliminary study on the cause of wheel tread shelling of KKD passenger car[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [5] 柳炜, 颜宁, 蒲全卫, 等. HXD1 型机车车轮多边形发展趋势探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40(6): 55-59.
LIU Wei, YAN Ning, PU Quanwei, et al. Development trend of wheel set polygon on type HXD1 locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2017, 40(6): 55-59.
- [6] 程雄, 陈晓. HXD1C 机车异常振动分析与控制[J]. 技术与市场, 2014, 21(4): 5-8.
CHENG Xiong, CHEN Xiao. Abnormal vibration analysis and regulation of HXD1C locomotive[J]. Technology and Market, 2014, 21(4): 5-8.
- [7] TAO Gongquan, WANG Linfeng, WEN Zefeng, et al. Measurement and assessment of out-of-round electric locomotive wheels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(1): 275-287.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 常崇义, 李果, 张银花, 等. 轮轨材料硬度匹配对车轮多边形磨耗影响的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 87-93.
CHANG Chongyi, LI GUO, ZHANG Yinhua, et al. Experimental study on influence of wheel-rail material hardness matching on wheel polygonal wear[J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 87-93.
- [11] 宋春元, 沈文林, 李晓峰, 等. 高速动车组车轮多边形影响因素及抑制措施研究[J]. 中国铁路, 2017(11): 34-40.
SONG Chunyuan, SHEN Wenlin, LI Xiaofeng, et al. On the influencing factors and inhibiting measures of wheel polygons of high-speed EMUs[J]. China Railway, 2017(11): 34-40.
- [12] 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.
- [13] 彭来先, 韩健, 初东博, 等. 高速动车组垂向止挡异常振动特性及成因分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 121-127.
PENG Laixian, HAN Jian, CHU Dongbo, et al. Analysis of abnormal vibration characteristics and causes of vertical block in high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 121-127.
- [14] 韩光旭, 张捷, 肖新标, 等. 高速动车组车内异常振动噪声特性与车轮非圆化关系研究[J]. 机械工程学报,

- 2014, 50(22): 113-121.
- HAN Guangxu, ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, et al. Study on high-speed train abnormal interior vibration and noise related to wheel roughness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 113-121.
- [15] ZHANG Jie, HAN Guangxu, XIAO Xinbiao, et al. Influence of wheel polygonal wear on interior noise of high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2014, 15(12): 1002-1018.
- [16] 崔大宾, 梁树林, 宋春元, 等. 高速车轮非圆化现象及其对轮轨行为的影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 8-16.
- CUI Dabin, LIANG Shulin, SONG Chunyuan, et al. Out of round high-speed wheel and its influence on wheel/rail behavior[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(18): 8-16.
- [17] 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[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 37-46.
- WU Yue, HAN Jian, LIU Jia, et al. Effect of high-speed train polygonal wheels on wheel/rail contact force and bogie vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 37-46.
- [18] 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[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 47-56.
- WANG Ping, ZHANG Ronghe, CHEN Jiayin, et al. Influence of polygonal wheels in high-speed trains on dynamic performance of turnout[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 47-56.
- [19] TAO Gongquan, WEN Zefeng, LIANG Xiren, et al. An investigation into the mechanism of the out-of-round wheels of metro train and its mitigation measures[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(1): 1-16.
- [20] European committee for standardization. EN 15313-2016, Railway applications—In-service wheelset operation requirements—In-service and off-vehicle wheelset maintenance[S]. London: British Standards Institution Publications, 2016.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7928—2003 地铁车辆通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 7928—2003 General technical specification of metro vehicles[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [22] 张志波. 研磨子对车轮不圆的修形作用[J]. 中国铁路, 2018(1): 37-40.
- ZHANG Zhibo. Influence of grinder application to profile adjustment of wheel polygon[J]. China Railway, 2018(1): 37-40.
- [23] 李果, 常崇义, 陈波, 等. 踏面清扫器研磨子消除车轮多边形现象的试验研究[J]. 铁道车辆, 2018, 56(5): 4-6.
- LI Guo, CHANG Chongyi, CHEN Bo, et al. Test and research on eliminating polygon phenomenon of wheels with abrasive block of tread cleaner[J]. Rolling Stock, 2018, 56(5): 4-6.
- [24] NIELSEN JCO, LUNDÉN R, JOHANSSON A, et al. Train-track interaction and mechanisms of irregular wear on wheel and rail surfaces[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1-3): 3-54.
- [25] LI Wei, WANG Hengyu, WEN Zefeng, et al. An investigation into the mechanism of metro rail corrugation using experimental and theoretical methods[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(4): 1025-1039.
-
- 作者简介: 陶功权, 男, 1989 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为轮轨关系。
E-mail: taogongquan@swjtu.edu.cn
温泽峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为轮轨关系及振动噪声。
E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn