DOI: 10.3901/JME.2021.06.106

铁道车辆车轮非圆化磨耗形成机理及控制措施研究进展*

陶功权 温泽峰 金学松

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 车轮非圆化磨耗是铁道车辆常见的一种车轮磨耗形式,对车辆的振动、噪声、乘坐舒适性和运行安全性均具有较大影响。介绍车轮非圆化的表现形式,总结国内外轮轨轨道交通车辆运营中出现的车轮非圆化磨耗现象。重点总结车轮非圆化磨耗的形成机理,根据车轮非圆化磨耗形成原因的不同将其分成三大类:由车轮初始缺陷引起的非圆化;由车辆-轨道固有振动引起的非圆化;由踏面制动时闸瓦与车轮间热弹性失稳引起的非圆化。回顾车轮非圆化磨耗仿真的研究历程,指出当前车轮非圆化磨耗研究面临的难点和挑战。对车轮非圆化磨耗的控制措施进行总结,重点讨论改善车轮镟修质量、利用闸瓦或研磨子修复车轮非圆化这两个最主要措施。探讨针对车轮非圆化磨耗亟需开展的研究,可为车轮非圆化磨耗机理的研究和控制措施的选用与实施提供参考。

关键词: 铁道车辆; 车轮非圆化; 磨耗机理; 减缓措施

中图分类号: U211

Advances in Formation Mechanism and Mitigation Measures of Out-of-round Railway Vehicle Wheels

TAO Gongquan WEN Zefeng JIN Xuesong

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

Abstract: Wheel out-of-roundness(OOR) is a common form of wheel wear in railway vehicles, which has a great impact on the vibration, noise, riding comfort and operation safety of vehicles. The feature of each type of OOR is introduced, and some phenomena of OOR in the railway transportation field around the world are summarized. The formation mechanism of wheel OOR is mainly summarized. According to the different causes of OOR, it can be divided into three categories: 1) OOR resulting from the initial defects of the wheel, 2) OOR resulting from the inherent vibration of the vehicle and track, and 3) OOR resulting from the thermos-elastic instability by tread braking. The research process of OOR wear simulation is reviewed, and the difficulties and challenges of current OOR simulation are pointed out. Moreover, the countermeasures of OOR are summarized, focusing on the improvement of wheel re-profiling quality and the repair of OOR with brake shoe or wheel tread cleaner. What still needs to be further carried out on the OOR is discussed. A reference is provided for the research of OOR mechanism and the selection and implementation of wheel OOR mitigation measures.

Key words: railway vehicle; wheel out-of-roundness; wear mechanism; mitigation measure

0 前言

轮轨作为铁道车辆系统和轨道系统之间的连

接子系统,车辆轨道之间的静态载荷、列车牵引/制动载荷、轮轨冲击引起的动态载荷等都需要通过轮轨之间极小的接触斑来传递至轨道。轮轨系统承受着巨大的载荷,这使得轮轨容易产生磨耗和疲劳问题。轮轨的磨耗和疲劳正是轮轨关系研究的核心问题之一。轮轨之间的磨耗可分为横向磨耗和纵向磨耗。横向磨耗将会改变轮轨接触几何关系,影响车辆轨道系统的低频动力相互作用,

* 国家自然科学基金(51875484, U1734201, U1434201, 51775455, 51475390, 52002342)、中国博士后科学基金(2020M673281)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2020TPL-T03, 2020TPL-T12)资助项目。20200314 收到初稿,20201014 收到修改稿

主要包括车辆的运动稳定性、运行平稳性、安全性和曲线通过性能等;纵向磨耗,尤其钢轨波磨和车轮高阶多边形磨耗,将会引起中高频的轮轨动力相互作用,增大车辆的振动和噪声,加剧车辆和轨道部件的疲劳破坏。据文献报道,存在非圆化磨耗的高速车轮在镟修前、后车内的噪声水平相差能达到 11 dBA^[1],而存在显著多边形磨耗的高速车轮轴箱振动加速度甚至能达到 800 g^[2]。此外,一些车辆和轨道部件的疲劳或断裂失效也与车轮非圆化有直接关系,比如某型高速列车轴箱端盖螺栓断裂^[3]、轮对提吊断裂^[4]、齿轮箱开裂^[5]、钢轨扣件弹条断裂^[6]等。车轮非圆化已严重影响车辆的运营安全和维修计划。

车轮非圆化是轮轨系统最难解决的问题之一。车轮非圆化会明显加剧轮轨动态作用力,这将对轨道和车辆部件的可靠性产生不利影响^[7],比如轨枕、扣件系统、钢轨、轮对和轴承等,进而威胁列车行车安全。德国 ICE1 高速列车投入运营不久便出现了车轮多边形化现象,车轮多边形化引起了 70~100 Hz 的噪声,并引发车体的中频结构振动,这对乘客的舒适度产生了负面影响。通过更换橡胶弹性车轮后,轮轨滚动噪声和车体结构振动有所减弱,但弹性车轮却酿成了 1998 年震惊世界的 ICE 列车脱轨撞桥事故^[8]。事故调查结果表明:弹性车轮的轮辋出现了多边形化特征,车轮不圆顺引起轮轨接触载荷剧烈波动,车轮轮辋在轮轨交变载荷作用下疲劳断裂,导致列车在通过道岔时出现脱轨。

从 20 世纪 90 年代末开始,国外已有较多学者开始对车轮失圆现象展开研究。随着我国高速铁路和城市轨道交的迅猛发展,车轮非圆化磨耗或多边形磨耗在我国铁路运输现场时常出现,国内很多研究者也开始对车轮非圆化磨耗开展相关的研究,且近 10 年国际上有关车轮非圆化磨耗研究的论文绝大多数也是由国内学者所发表。对于车轮非圆化的研究主要集中在以下几个方面:① 车轮非圆化对轮轨动力相互作用的影响;② 车轮非圆化对车辆振动和噪声的影响;③ 车轮非圆化对车辆和轨道部件疲劳可靠性的影响;④ 车轮非圆化的形成机理、影响因素和控制措施;⑤ 车轮非圆化磨耗仿真预测。BARKE 和 CHIU^[7]详细综述了车轮非圆化对轨道部件[包括钢轨、钢轨接头(鱼尾板钢轨接头、绝缘接头、焊接接头)、扣件、轨枕、道砟和路基)和车辆部件(车轮和轴承)的影响,以及对能耗和噪声的影响。NIELSEN 和 JOHANSSON^[9]对车轮非圆化磨耗

进行分类,简单总结了每种车轮非圆化磨耗的形成原因,车轮非圆化引起的冲击载荷检测与数值仿真方法,失圆车轮镟修与更换准则(主要是车轮扁疤)以及车轮非圆化磨耗仿真预测方法。NIELSEN 等^[10]在 2003 年撰写的综述文章中重点总结了车轮波磨和低阶多边形磨耗的形成原因以及减缓措施。金学松等^[11]总结了车轮非圆化对车辆/轨道系统动力学行为和车内噪声的影响,以及车轮多边形磨耗机理的试验研究,指出车轮多边形磨耗成因和控制措施的研究是将来的研究重点方向。李彦夫和门天立^[12]重点总结了车轮多边形磨耗与列车噪声之间的关系,以及多边形磨耗车轮的维修策略,指出由车轮多边形引起的噪声、通过噪声监测车轮多边形磨损、车轮多边形磨损的维修策略这三个方面有很多工作亟需开展。

随着测试技术和理论仿真的不断推进,以及逐渐积累的运用经验,很多学者、工程师和运营管理部门对车轮非圆化磨耗形成机理、仿真预测和控制措施都有了更加深入的认识。本文将总结过去在这三方面的研究成果,探讨车轮非圆化研究所面临的挑战以及亟需开展的研究工作。

1 国内外车轮非圆化磨耗问题概述

1.1 车轮非圆化分类及其特征

车轮非圆化是铁路现场常见的车轮磨耗问题。根据 NIELSEN 和 JOHANSSON^[9]对车轮踏面不平顺的分类,车轮非圆化可以分为 9 类:偏心、局部缺陷、周期性非圆化、非周期性非圆化、波磨、粗糙度、扁疤、剥落、剥离。现场发现的一些典型车轮非圆化磨耗测试结果和照片如图 1 和图 2 所示。

(1) 车轮偏心磨损表现为车轮的几何中心与车轮的旋转中心不重合(图 1a),如果不及时镟修,容易导致车轮径跳值超限。

(2) 车轮局部缺陷表现为车轮局部磨损过大(图 1b^[25]),通常局部缺陷的范围相对较长(与车轮扁疤存在明显区别),容易导致车轮径跳超限。

(3) 车轮周期性非圆化(也称为多边形化,9 阶以内通常称为低阶多边形,大于 9 阶则为高阶多边形),表现为相邻波峰的间距大致相等,车轮圆周的磨损呈现明显的波浪状(图 1c)。如果车轮镟修时进刀量较小,镟修一次之后车轮踏面会出现如图 2a 所示的明暗交替的光带^[25]。

图 1 典型车轮非圆化磨损测试结果

图 2 典型车轮非圆化磨损现场照片

(4) 车轮非周期性非圆化(也称随机非圆化), 表现为相邻波峰的间距无明显规律(图 1d), 通常容易导致车轮径跳过大, 在某些特殊的情况下能够在车轮踏面上观察到不规则的亮斑, 如图 2b 所示。

(5) 车轮波磨同样表现为相邻波峰间距大致相等, 但波长和幅值比多边形磨损要小得多, 通常波

长为 30~60 mm, 幅值为 10 μm 量级, 如图 1e 和图 2c 所示。

(6) 车轮粗糙度, 波长为毫米级, 幅值也为 10 μm 量级。

(7) 车轮扁疤, 由车轮打滑或空转所引起, 新形成的扁疤在车轮踏面上呈现扁平状(图 2d), 但经

过一段时间的运行后车轮扁疤边缘会发生锐化, 导致车轮扁疤不易被肉眼所见。

(8) 车轮踏面剥落, 由制动热疲劳引起的踏面剥离掉块(图 2e)。

(9) 车轮踏面剥离, 由滚动接触疲劳引起的踏面剥离掉块(图 2f)。

1.2 国内外车轮非圆化磨耗问题

车轮非圆化磨耗问题在我国铁路和城市轨道交通系统运用现场普遍存在。2014—2016 年期间, 我国高速列车车轮非圆化磨耗问题较大规模爆发^[11], 部分车轮出现严重的 18~23 边形^[13-16]。某些地铁线路车轮同样出现明显的多边形磨耗问题。例如: 某地铁线路直线电机车辆车轮出现 9 边形磨耗^[17-18]; 某地铁线路 B 型车辆车轮出现 5~8 边形磨耗, 径跳达到 1.2 mm^[19](通常径跳值超过 0.5 mm 即需要进行镟轮); 某地铁线路时速 80 km A 型车辆车轮出现 11~16 边形磨耗^[20]; 某地铁线路 B 型车辆车轮出现明显的 7 边形磨耗^[21]。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^[22]。此外, 和谐型大功率交流传动机车某些车型在部分机务段出现非常严重的车轮多边形磨耗问题^[23-26], 主要表现为 18~19 和 24 边形。

车轮非圆化问题不仅出现在我国, 世界其他国家也广泛存在。例如, 德国 ICE 列车车轮出现 1 阶(偏心)、3 阶和 4 阶谐波磨耗^[27]; 德国整体碾钢车轮和弹性车轮还分别出现 3 阶和 2 阶(椭圆)不圆^[28]; 加拿大温哥华轨道交通系统车轮出现波长为 36~73 mm 的波磨^[29]; 荷兰铁路装有铸铁闸瓦制动的车轮出现波长为 50~70 mm 的波磨^[30]; 瑞典斯德哥尔摩某地铁车轮出现 3 边形磨耗^[10]; 瑞典 X2 高速列车动车车轮出现主波长为 30~80 mm 的车轮波磨^[31]; 南非某型机车出现明显的 20 边形^[32]。

综上所述, 车轮非圆化磨耗广泛存在于国内外铁路运输现场, 且表现形式多样, 但国外车轮非圆化磨耗主要以低阶非圆化和短波长波磨为主, 仅南非有高阶车轮多边形磨耗报道。车轮多边形磨耗, 特别是高阶多边形磨耗, 对车辆的振动噪声、车辆或轨道部件的疲劳可靠性、运营的经济性影响更大, 是制约铁路可持续发展的重要因素。

2 车轮非圆化磨耗形成机理研究

最近 10 年, 由于车轮非圆化问题越来越突出, 特别是车轮多边形磨耗问题, 吸引了大量的研究者

对这一问题开展研究。到目前为止, 已经有较多学者对车轮非圆化磨耗的形成机理进行了研究。根据已有文献, 车轮非圆化磨耗的形成机理大致可以分为三类: ① 由车轮初始缺陷引起; ② 由车辆-轨道固有振动引起; ③ 由踏面制动时闸瓦与车轮间热弹性失稳引起。车轮非圆化磨耗形成机理研究的总结如表 1 所示。

2.1 由车轮初始缺陷引起的车轮非圆化

20 世纪末欧洲部分高速列车和地铁, 不管是运营后的车轮还是新轮均出现 3 边形磨损。RODE 等^[33]通过大量的试验调查发现, 3 边形的产生与制造或维修过程中(车轮镟修)机械工装的固定方式有关。选择轮辋内部等距的三个点固定, 在夹具作用点处轮辋沿径向产生弹性变形, 卸载之后变形将恢复, 但在轮周三个固定点处形成了微小的初始不圆顺, 并在随后的运行过程中不断发展, 形成显著的 3 边形。如果车辆运行过程中初始 3 边形的激振频率与轮对的固有频率一致, 车轮 3 边形磨耗将会迅速发展。MEINKE 等^[34]在 MORYS^[35]模型的基础上进一步考虑轮对的柔性和旋转效应, 分析了轮对静态和动态不平衡对车轮非圆化形成和发展的影响。研究发现轮对的静不平衡和动不平衡都会引起车轮非圆化。NIELSEN 和 JOHANSSON^[9]认为车轮材料非均匀对车轮局部缺陷和非周期性非圆化这两类车轮非圆化的形成有重要影响。叶小明^[36]报道地铁车轮镟修过程中有一条轮对出现了多边形问题, 分析可能的原因是有铁屑进入机床驱动轮与车轮踏面之间, 导致驱动轮带动车轮旋转时发生跳动, 呈现凸轮效应, 从而导致切削过程中车轮形成多边形。笔者团队通过现场调查和仿真分析发现, 采用不合理的镟修工艺和镟床驱动轮间距容易导致车轮镟修后残留严重的多边形磨耗^[37]。CUI 等^[38]和苏建等^[39]通过车轮镟修仿真发现镟床驱动轮的偏心容易导致车轮镟修后形成低阶多边形。

总而言之, 车轮镟修、静态和动态不平衡、车轮材料不均匀等车轮初始缺陷都是影响车轮非圆化形成和发展的重要因素。

2.2 由车辆-轨道固有振动引起的车轮非圆化

绝大部分研究是用这个观点来解释车轮多边形磨耗的形成机理, 主要包括: ① 轮轨系统黏滑振动; ② 轮轨系统 P2 共振; ③ 轮轨系统摩擦自激振动; ④ 轮对低阶弯曲或扭转振动; ⑤ 钢轨或轨道弯曲振动; ⑥ 转向架系统共振; ⑦ 转向架其他部件的振动。下面分别介绍以上七个机理。

表 1 车轮非圆化磨损形成机理分类

大类	子类	参考文献
1. 由车轮初始缺陷引起	1) 车轮镟修	RODE 等 ^[33] , 叶小明 ^[36] , 任德祥等 ^[37] , CUI 等 ^[38] 和苏建等 ^[39]
	2) 轮对静不平衡和动不平衡	MEINKE 和 MEINKE ^[34]
	3) 车轮材料不均匀	NIELSEN 和 JOHANSSON ^[9]
2. 由车辆-轨道固有振动引起	1) 轮轨系统黏滑振动	KALOUSEK 和 JOHNSON ^[29]
	2) 轮轨系统 P2 共振	NIELSEN 等 ^[10] , JOHANSSON 和 ANDERSSON ^[42] , TAO 等 ^[19] , LI 等 ^[21] , CAI 等 ^[43]
	3) 轮轨系统摩擦自激振动	陈光雄等 ^[44,46] , WU 等 ^[47] , 赵晓男等 ^[46,48]
	4) 轮对低阶弯曲或扭转振动	MORYS ^[35] , JIN 等 ^[17] , 李伟等 ^[18] , 杨晓璇 ^[20] , TAO 等 ^[49] , FRÖHLING 等 ^[50] , SPANGENBERG ^[51]
	5) 钢轨或轨道弯曲振动	JOHANSSON 和 ANDERSSON ^[42] , CAI 等 ^[52] , WU 等 ^[53] , DAI 等 ^[54]
	6) 转向架系统共振	WU 等 ^[15] , 郭涛等 ^[55]
	7) 转向架其他部件的振动	马卫华等 ^[56,57] , LIU 等 ^[58] , FU 等 ^[59]
3. 由热弹性失稳引起		NIELSEN 等 ^[10] (总结)

(1) 由轮轨系统黏滑振动引起的车轮非圆化。KALOUSEK 和 JOHNSON^[29]对温哥华轨道交通车轮波磨(波长通常为 30~60 mm)问题进行了研究。调查发现轮对安装误差对车轮波磨有非常重大的影响。当轮对存在较大安装误差时,容易导致车辆在直线上运行时出现较大的摇头角,从而增大轮轨之间的横向蠕滑率和横向蠕滑力,加剧轮轨磨损。同时,车轮和钢轨表面观察到了很多划痕,这表明轮轨系统出现黏滑振动,认为轮轨系统之间的黏滑振动是导致车轮波磨的关键因素。

(2) 由轮轨系统 P2 共振引起的车轮非圆化。叶小明等^[36]报道了轮轨系统的 P2 共振现象。P2 共振表现为轮对、钢轨、轨枕或轨道板在地基刚度上出现的相同相位的振动,主要受轨道刚度和簧下质量(轮对)的影响。GRASSIE^[41]将钢轨波磨的成因分为了六类,其中三类与 P2 共振相关。一些文献同样报道 P2 共振也是引起车轮失圆的重要因素,通常情况下 P2 共振会引起低阶车轮失圆。NIELSEN 等^[10]总结发现轮对低阶弯曲和扭转模式以及 P2 共振是车轮形成 1~5 边形的波长固定机理。JOHANSSON 和 ANDERSSON^[42]仿真了车轮多边形化的演变过程,发现 P2 共振和轨枕参数激振是 5~7 阶车轮谐波磨耗的形成机理。笔者通过现场试验调查和理论仿真发现轮轨系统 P2 共振是导致地铁车轮 5~8 边形磨耗的形成原因^[19],关键测试结果如图 3 所示。该线路钢轨状态良好,极少出现钢轨波磨,但车轮出现严重的 5~8 边形。通过系统地调查分析,发现车辆在线路上运行时轴箱加速度主频均在 50~80 Hz 范围内,与车轮多边形磨耗通过频率一致。车辆在不同形式轨道

上运行时 P2 共振频率也均在 50~80 Hz 范围内。CAI 等^[43]采用数值仿真的方法进一步验证了文献^[19]中报道的车轮失圆形成机理。LI 等^[21]通过现场试验指出,某地铁车轮 7 阶多边形磨耗的形成与 50~80 Hz 的 P2 共振相关。通过上述文献调研可知,轮轨系统 P2 共振往往仅会引起车轮低阶非圆化磨耗。

图 3 P2 共振引起的地铁车轮低阶非圆化

(3) 由轮轨系统摩擦自激振动引起的车轮非圆化。陈光雄等^[44]通过建立轮对-轨道系统模型,利用摩擦自激振动理论研究了地铁车轮多边形磨耗的形成机理。这个模型被进一步发展来研究高速车轮多边形磨耗的形成机理^[45-46]。此外,高速列车盘形制动系统不稳定的振动被认为是高速车轮多边形磨耗形成的可能原因^[47]。赵晓男等^[48]通过仿真认为动车组列车在直线线路上轮轨间蠕滑力饱和引起的摩擦自激振动容易导致车轮形成

15、16 阶多边形磨耗。然而, 摩擦自激振动的前提条件是摩擦力达到饱和, 这在列车实际运营过程中很少能达到, 尤其是对于动力分散的列车和直线线路。此外, 摩擦自激振动是否会发生很难通过试验进行验证。

(4) 由轮对低阶弯曲或扭转振动引起的车轮非圆化。轮对低阶弯曲或扭转振动模式在车轮多边形磨耗形成过程中扮演了非常重要的角色。MORYS^[35]通过车轮磨耗仿真发现, ICE-1 高速列车车轮初始 3 边形磨耗在列车常运行的速度下会激励起轮对的一阶弯曲振动, 导致车轮初始 3 边形迅速发展。轮对一阶弯曲振动时轮轨之间横向蠕滑率对车轮多边形磨耗的发展起到至关重要的作用, 然而纵向和自旋蠕滑的作用微乎其微。笔者团队^[17-18]开展大量的现场试验, 包括车轮不圆度、钢轨短波不平顺、构架频响、轮对频响、直线电机频响、车辆振动等测试, 揭示了直线电机地铁车辆车轮 9 阶多边形磨耗的形成机理, 认为轮对一阶弯曲振动是导致车轮形成 9 边形磨耗的根本原因, 关键的试验测试及结果如图 4 所示^[17]。杨晓璇^[20]调查了某 A 型地铁车轮多边形磨耗现象, 发现占主导的车轮多边形磨耗阶次为 11~16 阶, 对应的波长为 165~240 mm。现场试验和数值仿真结果表明轮对一阶弯曲振动是车轮高阶多边形磨耗形成的频率固定机理。此外, 轮轨系统 P2 共振和钢轨波磨对车轮多边形磨耗的发展也起到很大的促进作用。笔者^[24]报道了两种货运机车出现严重的车轮多边形磨耗, 其主波长为 200 mm。针对货运机车的车轮多边形问题, 笔者团队开展了车轮不圆度普查、车轮镟修质量调查、机车线路振动试验、轮对数值模态和试验模态分析, 分析和总结了机车车轮多边形磨耗的形成原因和发展过程, 如图 5 所示^[26]。轮对一阶弯曲振动很容易被线路激励所激发, 导致车轮形成 1/3 倍频程中心波长 160~315 mm 的非圆化磨耗; 车轮镟修时由于某型镟床结构的特殊性, 不但不能镟除波长约为 200 mm 的多边形, 而且还会将波长分散分布的车轮非圆化磨耗镟为单一波长的多边形, 即镟床存在滤波效应; 镟修后残留的波长约为 200 mm 的车轮多边形在机车正常运行速度范围内(70~75 km/h)通过频率与轮对一阶弯曲振动频率极为接近, 容易激励起轮对的一阶弯曲振动, 最终导致车轮形成非常规则且很严重的多边形磨耗。也就是说, 机车运行过程中轮对一阶弯曲振动很容易被激励起来, 是导致车轮形成主波长为 200 mm 多

边形磨耗的根本原因^[49]。

图 4 某直线电机地铁车轮多边形磨耗形成机理分析

图 5 某型机车车轮多边形磨耗形成过程

REITMANN 等^[32]报道了南非某型机车出现 20 阶车轮多边形磨耗。随后他们通过测量车轴的切向应变, 发现轮对在某些条件下发生了明显的扭转振动, 轮对扭转振动是车轮 20 阶多边形的频率固定机理^[50]。此外, 他们还发现由变频驱动所产生的谐波和间谐波对激励起轮对的一阶扭转振动也具有非常重要的作用^[51]。

(5) 由钢轨或轨道弯曲振动引起的车轮非圆化。JOHANSSON 和 ANDERSSON^[42]仿真了车轮多边形化的演变过程, 指出轨道 165 Hz 的垂向反共振是车轮 14~20 阶多边形粗糙度水平逐渐增加的主要原因。CAI 等^[52]和 WU 等^[53]通过仿真研究了高速列车车轮多边形磨耗的形成过程, 发现同一转向架两轮对之间钢轨的三阶弯曲振动是导致车轮高阶多边形磨耗形成的原因。DAI 等^[54]统计了中国不同类型高速列车在不同轨道上运行时车轮多边形磨耗的通过频率, 发现多边形通过频率与轨枕间距和转向架轴距密切相关。通过仿真和室内试验对激振频率进行了确认, 发现钢轨的三阶弯曲振动频率与车轮多边形磨耗的通过频率一致。然而转向架两轮对间

钢轨三阶弯曲模态在车辆运行状态下能否被激发还有待进一步验证。

(6) 由转向架系统共振引起的车轮非圆化。笔者团队^[15]通过科学的现场试验调查了中国某新型高速列车车轮高阶多边形磨耗的形成机理(图 6)。车轮多边形磨耗测试结果表明动力轮对和非动力轮对均出现 23 阶多边形磨耗。为了找到与车轮多边形磨耗相关的关键频率,开展了车辆和轨道振动和动力学特性测试。调查发现转向架系统在 600 Hz 附近隔振较弱,通过模态分析发现构架和轮对均在该频率附近存在固有模态,并且列车运行过程中轮对和构架在该频段内的响应非常显著(如图 6 中右上图虚线框区域 A 所示),推断转向架系统在列车运行过程中发生了模态耦合振动,这是导致该型高速列车车轮多边形磨耗的形成原因。现场实践表明,通过频繁变化列车的运行速度能够有效抑制高阶车轮多边形磨耗的形成。郭涛等^[55]通过转向架高频模态试验发现转向架系统在 580 Hz 左右存在固有模态频率,且阻尼比非常低,该模态的振动容易导致高速列车形成 18、19 阶多边形磨耗。

图 6 某型高速列车车轮多边形磨耗形成原因

(7) 转向架其他部件的振动引起的车轮非圆化。马卫华等^[56-57]研究了某直线电机车辆车轮 9 边形的形成原因,提出车轮多边形化现象至少由车轮 2 周的滚动所导致,低频轮轨力亦能导致车轮多边形化的产生。通过仿真认为直线电机的垂向振动是导致车轮形成 9 边形的原因。LIU 等^[58]也研究了某直线电机车辆车轮 9 边形的形成原因,认为轮对弯曲模态和直线电机垂向振动的耦合振动导致了车轮形成 9 边形磨耗,并且要车轮至少 2 周的滚动才能形成 9 边形。FU 等^[59]仿真分析了直线电机车辆车轮 8、9 边形的形成原因,认为车轮 8、9 边形的形成包括两个阶段:首先是车轮镟修后残留的 4 边形在车辆常运行的速度下(85 km/h)激励起直线电

机的垂向振动,导致车轮 4 边形演变为 8、9 边形;然后 8、9 边形在车辆常运行的速度下又激励起了轮对的一阶弯曲振动,8、9 边形演变过程中保持相位不变,进而导致 8、9 边形磨耗进一步恶化。

2.3 由踏面制动时闸瓦与车轮间热弹性失稳引起的非圆化

20 世纪后期,车轮波磨问题普遍出现在安装有铸铁闸瓦制动的车辆上。然而,盘形制动车辆车轮粗糙度水平和噪声辐射水平要远低于铸铁闸瓦制动的车辆,这表明踏面制动系统在车轮粗糙度形成过程中扮演了非常重要的角色。NIELSEN 等^[10]总结到车轮波磨的形成与踏面制动有关,并且指出在制动过程中铸铁闸瓦与车轮踏面之间的热弹性失稳是主要原因,但是这类波长为 30~60 mm 车轮波磨的波长固定机理仍不明确。在 20 世纪末期,铸铁闸瓦逐渐被复合闸瓦所代替,这类型的车轮波磨几乎不再出现。

综上所述,车轮多边形磨耗的形成机理非常复杂,不同车型车轮多边形磨耗形成机理不同,即便是同一车型不同研究者也提出了不同的观点来解释车轮多边形磨耗的形成。例如直线电机地铁车辆车轮出现的 9 边形磨耗,这是国内最早报道的车轮多边形磨耗问题。JIN 等^[17]认为是由轮对一阶弯曲振动所致,陈光雄等^[44]认为是由车辆通过小半径曲线时轮轨摩擦自激振动所致,马卫华等^[56-57]认为是由直线电机垂向振动引起的低频轮轨力所致,LIU^[58]认为是由直线电机垂向振动与轮对弯曲振动的耦合所致,FU 等^[59]认为 9 边形的形成包含两个阶段,第一阶段主要受直线电机垂向振动的影响,第二阶段主要是受轮对一阶弯曲振动的影响。对于我国高速列车出现的高阶多边形磨耗问题,不同的研究者同样持有不同的观点,包括转向架系统耦合振动^[15,55]、钢轨弯曲振动^[52-54]和轮轨摩擦自激振动^[45-48]等。

车轮多边形磨耗机理的研究是一个逐渐深化、逐渐认识的过程。车辆动力学领域国际著名学者 NIELSEN 等^[10]2003 年撰写的综述文章认为 P2 振动、轮对低阶弯曲或扭转振动是引起车轮 1~5 边形的波长固定机理,但笔者的研究表明轮对一阶弯曲振动也能引起车轮高阶多边形磨耗(18、19 边形)^[49],南非某型机车出现的车轮 20 阶多边形磨耗是由轮对一阶扭转振动引起^[50]。随着试验手段的升级和理论模型的推进,研究者对车轮多边形磨耗形成和发展机理的理解和认识也在逐渐加深。

3 车轮非圆化磨耗仿真预测

车轮非圆化磨耗的研究非常复杂, 很多影响因素不易通过试验研究进行辨识, 还需借助理论分析和数值仿真开展研究。车轮磨耗数值仿真通常包括车辆动力学仿真和车轮磨耗计算两个主要模块。根据研究问题的不同, 车辆动力学仿真模型和车轮磨耗计算模型的侧重点会有所差别。车轮非圆化磨耗数值仿真的一般流程如图 7 所示。首先, 根据研究的对象建立相应的车辆-轨道动力学仿真模型, 以车辆参数、轨道参数、轮轨不平顺、车辆运行参数和车辆控制参数等作为输入进行车辆-轨道动力学仿真。其次, 将车辆-轨道动力学仿真中得到的全局接触参数(如轮轨法向力、蠕滑率、接触点位置等)作为轮轨局部接触计算的输入, 计算接触斑内切向应力分布、蠕滑分布等, KALKER 简化理论(FASTSIM 算法)常用于轮轨局部接触计算。接着, 将局部接触模型计算得到轮轨局部接触参数作为车轮磨耗计算的输入, 磨耗模型主要包括 ARCHARD 磨耗模型和基于摩擦功的磨耗函数两类。最后, 将接触斑内的磨耗沿纵向方向进行叠加, 得到车轮每个横断面上的磨耗, 提取每个横断面上的磨耗得到车轮圆周的粗糙度, 如果仿真计算达到设定的终止条件(通常为车辆运行里程或迭代次数)则输出最终的车轮非圆化仿真结果, 否则将车轮粗糙度进行滤波和平滑处理后返回给动力学仿真模型, 重新进入下一次迭代计算。

图 7 车轮非圆化磨耗仿真预测一般流程

基于上述仿真流程国内外很多研究者开展了车轮非圆化磨耗仿真研究。法国学者 SOUA 等^[60]最早采用车轮磨耗仿真的手段来研究车轮非圆化磨耗问题。之后 BROMMUNDT^[61]、MEYWERK^[62]、MORYS^[35]、MEINKE 和 MEINKE^[34]等均利用仿真的手段研究了车轮非圆化磨耗的演变过程和影响因素。

20 世纪由于计算机水平的限制, 以及车轮磨耗

模型并不完善, 很多研究者只能采用一些简单的动力学模型结合摩擦功来仿真车轮非圆化磨耗。进入 21 世纪, 随着计算机能力的提升、动力学建模和材料摩擦磨损研究的完善, 能够采用更为复杂和完善的模型来研究车轮非圆化磨耗问题。

JOHANSSON 和 ANDERSSON^[42]建立了一个考虑轮轨三维动态相互作用和磨耗预测的车轮非圆化磨耗仿真模型。轨道采用钢轨和轨枕离散支撑的双层模型, 为了考虑轨道高频振动的影响, 钢轨采用 TIMOSHENKO 梁模拟, 但车辆模型较为简单, 仅考虑了一个三维的转向架模型, 并且转向架的各个部件均模拟为刚体。通过联合 HERTZ 理论和沈氏蠕滑理论来仿真轮轨动力相互作用。车轮磨耗计算则采用经典的 ARCHARD 磨耗模型, 通过车轮磨耗的迭代更新来实现车轮非圆化磨耗发展预测。后来大多车轮非圆化磨耗仿真研究都是基于 JOHANSSON 和 ANDERSSON 这一思路开展的, 包括以下内容: WU^[16, 53]和 CAI^[52]开展的高速铁路车轮多边形磨耗仿真研究; CAI 等^[43]和 FU 等^[59]开展的地铁车轮低阶多边形磨耗仿真研究; 陶功权^[26]在博士论文工作中开展的机车车轮多边形磨耗仿真研究; PENG 等^[63-64]研究的轮对柔性和材料摩擦磨损模型对车轮非圆化磨耗的影响; YE 等^[65]研究的货车车轮扁疤对车轮非圆化发展的影响。

虽然已经有很多研究者通过车轮非圆化磨耗仿真的方法来研究了车轮非圆化磨耗的演变, 但车轮非圆化磨耗仿真涉及到很多方面的知识, 且很多因素对车轮非圆化仿真结果具有较大影响。FU 等^[59]发现车轮非圆化型面平滑对仿真结果有较大影响, 当平滑方法不当时会导致车轮不圆度首尾不连续, 在动力学仿真中会引起异常的冲击振动, 这显然不符合物理实际。另外, 车轮非圆化磨耗更新的尺度对仿真结果也有较大影响, 需要根据实际仿真情况选取合适的更新尺度。PENG 等^[64]研究了 BRR^[66]、KTH^[67-68]、USFD^[69-70]和 ZOBORY^[71]磨耗函数在车轮多边形磨耗预测中的影响, 发现这些模型都能预测到相同的多边形特征, 但不同磨耗模型预测得到的多边形幅值会有所差异。此外, 他们认为全局法不适合用于车轮多边形磨耗仿真。FU 等^[59]和 PENG 等^[64]的研究结果为车轮非圆化磨耗预测中磨耗函数、型面平滑方法和更新尺度的选取提供了很好的参考。

车轮非圆化磨耗, 特别是高阶多边形磨耗的形成过程非常复杂。通过仿真准确地重现车轮多边形磨耗的发展过程具有非常大的难度。在研究高阶多边形磨耗时需要考虑车辆和轨道结构的高频弹性振动, 以及轮轨高频弹性振动对轮轨关系的影响, 对

于高速列车还需要考虑轮对的高速旋转效应。另外, 车轮多边形磨耗发展过程中磨耗如何累积, 在什么条件下才会使得波谷磨损加快, 而波峰磨损变缓, 多边形形成过程中磨耗的相位是固定不变还是动态变化, 这些问题都还需要进一步揭示。

4 车轮非圆化磨耗控制措施

车轮非圆化磨耗的形成机理非常复杂, 当完全掌握车轮非圆化磨耗形成机理和关键影响因素后再采取对应的措施, 这显然是最理想的状态。由第 2 部分的文献综述可知, 车轮非圆化磨耗, 特别是车轮多边形磨耗, 通常是由车辆-轨道系统的固有振动所引起。与钢轨波磨^[41]一样, 车轮多边形磨耗的形成过程可用图 8 所示的反馈图表示, 即车轮多边形形成机理包括固定频率机理和损伤机理(通常为磨耗)。线路开通之前轮轨表面不是绝对的平顺, 存在初始不平顺(如车轮几何或质量偏心、钢轨焊接接头不平顺等), 轮轨初始不平顺和轮轨间牵引力、制动力、蠕滑等其他因素可以导致轮轨力、蠕滑率/力与接触斑尺寸的动态变化, 然后通过磨耗损伤可以改变车轮初始不平顺, 不平顺的变化反过来又会作用于车辆轨道系统。车辆轨道动态相互作用将逐渐表现为轮轨力和磨耗功在某特定频率更为突出, 对于某个特定速度, 这就意味着车轮磨耗在某个特定波长下更显著。因此, 要控制车轮多边形磨耗的形成和发展, 可以从固定频率机理和损伤机理以下几个方面入手, 包括: ① 控制系统的激励源; ② 避开或抑制系统中与车轮多边形磨耗形成相关的固有振动; ③ 降低车轮磨耗。车轮多边形磨耗控制措施的总结如表 2 所示。很显然, 对于已投入运营的线路或车辆, 要改变系统的振动特性几乎不再可能。因此, 采用一些被动的措施来控制车轮非圆化磨耗是

十分可行的, 其中车轮镟修就是最常用的方法之一。另外, 现场应用经验表明闸瓦制动、研磨子或踏面清扫器也能起到控制车轮非圆化磨耗的作用。

图 8 车轮多边形磨耗形成过程

4.1 改善车轮镟修质量

车轮镟修过程中有很多工艺参数和镟床结构特性会影响车轮非圆化的镟修质量。笔者^[25]在调查机车车轮多边形磨耗问题时发现, 多边形磨耗严重的机务段普遍采用踏面定位镟修的镟床, 而采用轴箱定位的镟床镟修质量要比采用踏面定位的镟床好得多。若镟修后多边形残留明显, 会导致多边形磨耗迅速发展。另外, 镟床驱动轮的间距对镟修质量也有非常大的影响。当镟床两驱动轮与车轮接触点间的弧长约为多边形波长的整数倍时, 车轮镟修会出现严重的仿形现象, 导致不能有效镟除多边形磨耗^[26], 任德祥等^[37]和 CUI 等^[38]通过仿真重现了这一现象, 并且提出如果能够根据多边形波长调整镟床驱动轮间距至合适的值, 车轮镟修质量将会显著提升。叶小明^[36]通过总结现场的运用经验发现, 降低车轮镟修速度, 并且增大车轮镟修量能有效镟除车轮波磨。笔者^[72]通过设计三种镟修方案调查了车轮多边形磨耗的镟修效果, 发现增加进刀次数并且降低镟修速度, 车轮多边形磨耗的镟修质量能显著提升。此外, CUI 等^[38]和苏建等^[39]还发现镟床驱动轮的偏心磨损在镟修时能引起车轮低阶非圆化。

表 2 车轮非圆化磨耗控制措施总结

机理	控制措施
频率固定机理	1) 改善车轮镟修质量, 控制车轮初始不圆 ^[26,36-39,72] 2) 改善闸瓦-车轮匹配关系 ^[19,20] , 利用研磨子或闸瓦修复车轮失圆 ^[73-78] 3) 控制钢轨波磨不平顺 ^[72] 和焊接接头不平顺 ^[19] 4) 降低扣件刚度 ^[19] 或增加扣件阻尼 ^[45,53] , 降低轮轨动力相互作用
	1) 改变列车运行速度或运行交路 ^[15,83] 2) 改变轮对固有振动特性 ^[18,26,50] 3) 该变变频驱动特性, 避免激发轮对扭转振动 ^[84] 4) 主动振动控制 ^[50]
损伤机理(磨耗)	1) 提高车轮硬度 ^[79-82] 2) 降低轮对安装误差 ^[29] 3) 使用摩擦调节剂, 控制轮轨摩擦因数 ^[29,72] 4) 降低列车启动或制动加速度 ^[19]

综上所述,对于存在多边形磨耗的车轮,采用轴箱定位的镟床镟修、增大镟修量和进刀次数、降低镟修速度、根据多边形波长调整驱动轮间距均能有效提升车轮镟修质量。另外,控制镟床驱动轮的偏心,能有效避免由镟修导致的低阶非圆化。

4.2 利用闸瓦或研磨子修复车轮非圆化

速度 80 km/h 以内的列车空气制动普遍采用车轮踏面制动形式,而速度高于 80 km/h 的列车空气制动大多采用盘形制动形式。为了保证车轮踏面的清洁,提高轮轨之间的黏着利用率,很多型号的列车安装有踏面清扫器或研磨子。虽然闸瓦或研磨子最初的目的并不是修复车轮非圆化,但在实际应用过程中发现它们对车轮非圆化修复作用十分显著^[73-77]。如何更好地利用闸瓦或研磨子来修复车轮非圆化,目前主要依赖于运用经验。如果闸瓦或研磨子与车轮踏面匹配不佳,两者不能有效贴合,或贴合时接触面积太小,也不能起到较好的修形作用^[19-20]。如图 9 所示^[19],该线路车轮非圆化磨耗严重,与车轮-闸瓦匹配关系不佳有一定关系。另外,闸瓦或研磨子与车轮贴合时,如果施加的压力太小,或者作用时间太短,也不能起到较好的修形作用。相反,如果施加的压力太大,或作用时间太长,则会增加车轮和闸瓦或研磨子的磨损,增加不必要的运营维护费用。因此,需要根据实际运用情况来调整控制参数和控制逻辑。同时,建议采用盘形制动方式的车辆安装研磨子。此外,对于踏面制动方式的车辆,电制动已基本能满足列车的制动需求,闸瓦制动仅在列车低速(通常 8 km/h 以下)阶段时才发挥作用。由于进站时车辆速度低,闸瓦作用时间短,闸瓦修形作用的发挥可能会受到限制。因此,建议可以考虑增加踏面清扫制动控制模式,提高闸瓦的修形作用。现有运用经验表明,采用踏面清扫制动控制后车轮的圆度得到明显改善^[78]。

图9 典型车轮-闸瓦匹配不佳

4.3 提高车轮硬度

20 世纪 90 年代德国高速列车频繁出现车轮失圆问题,但同时期日本新干线高速列车并没有出现

车轮失圆问题。通过对比德国和日本所分别使用的 ER7 和 C64 车轮材料,发现 C64 车轮材料的含碳量更高,车轮硬度也更高。德铁利用全比例的轮对对滚试验台研究了 C64 车轮材料的磨损和疲劳性能,发现 C64 车轮使用寿命比 ER7 车轮高出一倍多,并且车轮不会出现失圆问题^[79]。基于上述试验结果,德国开展了小批量的车轮装车试验,试验结果表明 C64 车轮的镟修频率几乎只有 ER7 车轮的 1/3,车轮使用寿命至少比 ER7 车轮高出 40%。由于 C64 车轮的优良性能,截止 2012 年德国几乎一半的 ICE1 和 ICE2 列车车轮都替换为了 C64 车轮。国内也开展过相关研究。常崇义等^[80]通过小比例磨损试验机研究了轮轨材料硬度匹配对车轮多边形磨耗的影响,发现当轮轨材料硬度比大于 1.36 时,车轮材料试样几乎不发生多边形磨耗。我国高铁的运用经验也表明,提高车轮踏面硬度能降低车轮多边形磨耗的发生^[81-82]。因此,提高车轮材料的硬度能有效控制车轮多边形磨耗的形成。

4.4 其他措施

除了上述提到的三个措施,NIELSEN 等^[10]对降低车轮多边形磨耗的措施也做过相关的总结,包括以下内容:① 采用更高屈服强度的车轮材料;② 改善车轮材料的均匀性;③ 通过降低簧下质量和降低轨道垂向刚度等办法来降低轮轨动态垂向力;④ 通过轮轨摩擦调节和改善车辆曲线通过性能来降低轮轨切向力。很显然,上述措施对于任意车型的车轮多边形磨耗都是通用的。

车轮多边形磨耗的形成通常都满足固定频率机理,即车辆-轨道系统存在某一固有振动模态,列车以特定范围内的速度运行时,在某些外部激励的作用下导致系统出现固定频率的振动,最终引起车轮多边形磨耗。要改变系统的固有振动模态可操作性不强,而调整列车运行速度、控制外部激励的可行性更高。WU 等^[15]通过现场试验发现高速列车长时间匀速运行容易出现多边形磨耗,而经常变速运行则不容易出现多边形磨耗。此外,现场运用经验表明,对于高速列车采用换交路运行也能有效控制车轮多边形磨耗的形成和发展^[83]。

5 研究展望

铁道车辆车轮非圆化磨耗问题普遍存在于铁路运输现场。虽然车轮非圆化的表现形式多样,但每种类型的车轮非圆化对车辆轨道系统的影响不同,其中车轮多边形磨耗影响最大,也最受到研究者、

车辆制造单位和铁路运输部门的关注。

金学松等^[1]指出对于车轮多边形磨耗机理的研究需要依赖于现场紧密的跟踪试验和车辆-轨道高频刚柔耦合动力学仿真;抑制车轮多边形磨耗的发展需要从4个方面进一步开展研究:①破坏车轮多边形形成和发展的基本条件(主要是使运营速度多变);②智能踏面修形器技术;③车轮镟修;④控制钢轨平顺度。很多车轮多边形磨耗机理和控制措施的研究基本是在上述范围内开展。高速铁路车辆、普速铁路车辆、机车和地铁车辆,在车辆结构、运营模式、线路条件、服役环境、运营维护水平等诸多方面都存在较大差异。不同车辆车轮多边形磨耗机理和控制措施研究时需要根据实际情况开展针对的研究。

虽然车轮非圆化磨耗方面已经开展了大量的研究,但仍有很多工作需要进一步开展。

(1) 车轮多边形磨耗实验室内重现研究。目前还少有相关研究的文献报道。重现车轮多边形磨耗之后,进一步精准控制不同的轮轨接触参数,识别对车轮多边形磨耗影响最关键的参数。虽然轮轨滚动室内试验通常采用轮轮对滚(轨道采用滚轮模拟)实现,无法很好地再现轨道参数激振,但是可以较好地掌握轮对与转向架结构特性、轮对横移与冲角(模拟曲线通过)、轮轨润滑剂等对车轮多边形磨耗形成的影响。

(2) 轮对振动行为试验研究。已有多篇文献报道车轮多边形磨耗的形成与轮对的低阶弯曲或扭转振动有关。由轮对的模态分析可知,轮对发生弯曲振动时车轮主要以横向振动为主,轮轨之间的横向滑动会导致横向蠕滑率/力产生周期性的波动,从而使车轮形成多边形磨耗。轮对的弯曲振动,特别是二阶弯曲振动,轴箱处的变形较小,车辆线路运行时不易通过轴箱振动加速度识别轮对的弯曲振动,但车轮的变形要比轴箱处大。通过采用遥感测量技术测量车轮和车轴的振动行为,可能更有利于研究由轮对低阶弯曲或扭转振动引起的多边形磨耗的机理。

(3) 车轮非圆化磨耗预测模型研究。车轮非圆化磨耗预测普遍采用如试验7所示的流程,但对于多边形磨耗的预测研究,特别是高阶多边形磨耗,在仿真模型上还有许多工作需要开展:①中高频激励下轮轨接触建模,在动力学仿真中普遍采用Hertz非线性接触弹簧求解法向载荷,中高频激励下其准确性值得探讨;②建立闸瓦或研磨子与车轮的相互作用模型,考虑其对车轮圆度修形的作用;③研究

外部激励、系统耦合振动、轮轨接触响应、车轮多边形磨耗增长之间的相位关系,探明车轮多边形磨耗的累积规律和演变过程;④考虑车轮表面材料在轮轨滚动接触作用下产生的工作硬化对车轮多边形磨耗速率的影响;⑤仿真模型的试验验证。

(4) 车轮非圆化磨耗在线监测技术研究。目前车轮非圆化磨耗主要依赖于车轮不圆度测量仪或镟床测量,这种离线测量的方式虽然测量精度很高,但测量效率低下,不利于对车轮非圆化磨耗的发展进行监测。因此,开发基于车载的或道旁的车轮非圆化磨耗测试技术十分必要,这能为车辆的状态修提供技术支撑,确保铁路车辆的运行安全。

(5) 车轮非圆化磨耗维护标准的制定。目前车轮非圆化的维护准则基本是由车辆运营部门根据运营经验制定,缺乏科学地论证。车轮非圆化磨耗的影响与车辆运行速度、非圆化磨耗的阶次和幅值密切相关,需要考虑以上因素,并且充分考虑车轮非圆化对轮轨冲击、车辆振动、噪声、车辆和轨道部件的疲劳可靠性的影响,制定科学合理的维护标准。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] QU Sheng, WANG Jianbin, ZHANG Dafu, et al. Field investigation on the higher-order polygon wear on wheel of high speed trains[C]//Proceedings CM2018, 2018, 818-823.
- [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] 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.
- [5] WANG Zhiwei, MEI Guiming, ZHANG Weihua, et al. Effects of polygonal wear of wheels on the dynamic performance of the gearbox housing of a high-speed

- train[J]. *ProcI MechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(6): 1852-1863.
- [6] XIAO Junheng, HU Huafeng, YAN Ziquan, et al. The influence of wheel/rail vibration on the damage of rail fastening system of high speed railway in China[C]// *Proceedings CM2018*, 2018, 1122-1127.
- [7] BARKE D W, CHIU W K. A review of the effects of out-of-round wheels on track and vehicle components[J]. *ProcIMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2005, 219(3): 151-175.
- [8] KNOTHE K, GRASSIE S L. Workshop on rail corrugations and out-of-round wheels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 227(5): 895-897.
- [9] NIELSEN J C O, JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels—a literature survey[J]. *Proc. IMechE. Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2000, 214(2): 79-91.
- [10] NIELSEN J C O, 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.
- [11] 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 Shuliang, 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.
- [12] 李彦夫, 门天立. 列车车轮多边形磨损及其噪音研究综述[J]. *振动、测试与诊断*, 2019, 39(6): 1144-1152.
LI Yanfu, MEN Tianli. An overview of polygonal wear and generated noise of train wheels[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(6): 1144-1152.
- [13] 韩光旭. 高速列车车轮非圆化对振动噪声的影响及演变规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
HAN Guangxu. Influence of wheel's out-of-round on vibration & noise and their evolution based on high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [14] 刘佳. 高速车轮非圆化磨耗发生机理及转向架高频减振设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LIU Jia. The wear mechanism of high-speed wheel out-of-round and bogie's vibration insulation design in mid-high frequency[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [15] WU Yue, DU Xing, ZHANG Heji, et al. Experimental analysis of the mechanism of high-order polygonal wear of wheels of a high-speed train[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 2017, 18(8): 579-592.
- [16] WU Xingwen. An investigation of high-order polygonal wheel wear in high-speed rail vehicles[D]. Montreal: Concordia University, 2018.
- [17] 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 behaviour of a wheel/rail system[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(12): 1817-1834.
- [18] 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*, 2014, 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.
- [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] 杨晓璇. A 型地铁车辆车轮多边形形成机理初步研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
YANG Xiaoxuan. Preliminary study on mechanism of wheel polygon of type A metro vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] LI Dadi, DAI Huanyun, JIA Xiaoping, et al. Out-of-round of subway wheel caused by rail flexibility[C]// *Proceedings CM2018*, 2018: 529-535.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 汪林峰, 陈清明, 陈国胜, 等. HXD1 型机车车轮不圆度试验研究[J]. *中国铁路*, 2019, 12: 69-76.
WANG Linfeng, CHEN Qingming, CHEN Guosheng, et al. Test on the non-circularity of wheels of HXD1 locomotive[J]. *China Railway*, 2019, 12: 69-76.
- [25] TAO Gongquan, WANG Linfeng, WEN Zefeng, et al. Measurement and assessment of out-of-round electric locomotive wheels[J]. *ProcIMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(1): 275-287.
- [26] 陶功权. 和谐型电力机车车轮多边形磨耗形成机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
TAO Gongquan. Investigation into the formation mechanism of the polygonal wear of HXD electric

- locomotive wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [27] ZACHER M. Unrunderäder und oberbausteifigkeit[J]. Eisenbahntechnische Rundschau, 1990, 45(10): 605-610.
- [28] PALLGEN G. Unrunderäder an eisenbahnfahrzeugen[J]. Eisenbahningenieur, 1998, 49(1): 56-60.
- [29] KALOUSEK J, JOHNSON K L. An investigation of short pitch wheel and rail corrugations on the Vancouver mass transit system[J]. ProcIMEchE Part F: J.Rail and Rapid Transit, 1992, 206(2): 127-135.
- [30] DINGS P C, DITTRICH M G. Roughness on Dutch railway wheels and rails[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 103-112.
- [31] JOHANSSON A. Out-of-round railway wheels—assessment of wheel tread irregularities in train traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 795-806.
- [32] REITMANN E, FRÖHLING R D, HETTASCH G. Identification and monitoring of polygonised railway wheels using existing wheel impact monitoring measurement data[C]//Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference, 2017, 826-833.
- [33] RODE W, MÜLLER D, VILLMAN J. Results of DB AG investigations-out-of-round wheels[C]// Proceedings Corrugation Symposium-Extended Abstracts, IFV Bahntechnik, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 1997.
- [34] MEINKE P, MEINKE S. Polygonalization of wheel treads caused by static and dynamic imbalances[J]. Journal of Sound Vibration, 1999, 227(5): 979-986.
- [35] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. Journal of Sound Vibration, 1999, 227(5): 965-978.
- [36] 叶小明. 地铁车辆车轮多边形问题分析及处理措施探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2018(4): 35-38.
- YE Xiaoming. Analysis and measures of metro vehicle wheel polygon problem[J]. Modern Urban Transit, 2018(4): 35-38.
- [37] 任德祥, 陶功权, 刘欢, 等. 机车车轮多边形磨耗车轮镟修异常原因分析及改进措施[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2317-2326.
- RENDexiang, TAO Gongquan, LIU Huan, et al. Analysis of abnormal turning repair for locomotive wheels with polygonal wear and improvement measures[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2317-2326.
- [38] CUI Dabin, AN Boyang, ALLEN P, et al. Effect of the turning characteristics of underfloor wheel lathes on the evolution of wheel polygonisation[J]. ProcIMEchE Part F: J Rail and Rapid Transit, 2019, 233(5): 479-488.
- [39] 苏建, 李立, 崔大宾. 不落轮旋修工艺对初始车轮多边形的影响研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(5): 57-61.
- SU Jian, LI Li, CUI Dabin. Study on influence of turning repair operations on wheels with initial polygonal state[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(5): 57-61.
- [40] JENKINS H H, STEPHENSON J E, CLAYTON G A, et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamics forces[J]. Rail Engineering Journal, 1974, 3: 2-16.
- [41] GRASSIE G L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments[J]. ProcIMEchE Part F: J Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6): 581-596.
- [42] 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.
- [43] CAI Wubin, CHI Maoru, TAO Gongquan, et al. Experimental and numerical investigation into the formation of metro wheel polygonalization[J]. Shock and Vibration, 2019, Article ID 1538273: 1-18.
- [44] 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.
- [45] 陈光雄, 崔晓璐, 王科. 高速列车车轮踏面非圆磨耗机理[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 243-250.
- CHEN Guangxiong, CUI Xiaolu, WANG Ke. Generation mechanism for polygonalization of wheel treads of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 243-250.
- [46] ZHAO X N, CHEN G X, LÜ J Z, et al. Study on the mechanism for the wheel polygonal wear of high-speed trains in terms of the frictional self-excited vibration theory[J]. Wear, 2019, 426-427: 1820-1827.
- [47] WU B W, QIAO Q F, CHEN G X, et al. Effect of the unstable vibration of the disc brake system of high-speed trains on wheel polygonalization[J]. ProcIMEchE Part F: J Rail and Rapid Transit, 2020, 234(1): 80-95.
- [48] 赵晓男, 陈光雄, 康熙, 等. 兰新客运专线动车组车轮多边形磨耗的机理[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(2): 364-371.
- ZHAO Xiaonan, CHEN Guangxiong, KANG Xi, et al. Mechanism of polygonal wear on wheels of electric multiple units on Lanzhou-Xinjiang passenger dedicated line[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(2): 364-371.

- [49] TAO Gongquan, WANG Linfeng, WEN Zefeng, et al. Experimental investigation into the mechanism of the polygonal wear of electric locomotive wheels[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2018, 56(6): 883-899.
- [50] FRÖHLING R, SPANGENBERG U, REITMANN E. Root cause analysis of locomotive wheel tread polygonisation[J]. *Wear*, 2019, 432-433(102911): 1-12.
- [51] SPANGENBERG U. Variable frequency drive harmonics and interharmonics exciting axle torsional vibration resulting in railway wheel polygonisation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(3): 404-424.
- [52] CAI Wubin, CHI Maoru, WU Xingwen, et al. Experimental and numerical analysis of the polygonal wear of high-speed trains[J]. *Wear*, 2019, 440-441(203079): 1-12.
- [53] WU Xingwen, RAKHEJA S, CAI Wubin, et al. A study of formation of high order wheel polygonalization[J]. *Wear*, 2019, 424-425: 1-14.
- [54] DAI Huanyun, LI Dali, WANG Jianbin, et al. Study on the mechanism of high order out of round roughness of high speed railway train's wheel[C]// *Proceedings CM2018*, 2018, 189-195.
- [55] 郭涛, 高峰, 张晓军, 等. 高速列车车轮多边形试验研究[J]. *铁道机车车辆*, 2019, 39(1): 64-67.
- GUO Tao, GAO Feng, ZHANG Xiaojun, et al. Experimental study on polygon wear of wheel tread on high-speed train[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2019, 39(1): 64-67.
- [56] 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.
- [57] MA Weihua, SONG Rongrong, LUO Shihui. Study on the mechanism of the formation of polygon-shaped wheels on subway vehicles[J]. *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(1): 129-137.
- [58] LIU Wei, ZONG Lingxiao, LUO Shihui, et al. Research into the problem of wear creating a polygon-shaped wheel on metro trains[J]. *Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(1): 43-55.
- [59] FU Bin, BRUNI S, LUO Shihui. Study on wheel polygonization of a metro vehicle based on polygonal wear simulation[J]. *Wear*, 2019, 438-439(203071): 1-16.
- [60] SOUA B, PASCAL JP. Computation of the 3D wear of the wheels in a high speed bogie[R]. Report INRETS-LTN, Arcueil, France, 1995: 21-40.
- [61] BROMMUNDT E. A simple mechanism for the polygonalization of railway wheels by wear[J]. *Mechanics Research Communications*, 1997, 24(2): 435-442.
- [62] MEYWERK M. Polygonalization of railway wheels[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69: 105-120.
- [63] PENG Bo, IWNICKI S, SHACKLETON P, et al. The influence of wheelset flexibility on polygonal wear of locomotive wheels[J]. *Wear*, 2019, 432-433(102917): 1-11.
- [64] PENG Bo, IWNICKI S, SHACKLETON P, et al. Comparison of wear models for simulation of railway wheel polygonization[J]. *Wear*, 2019, 436-437(203010): 1-13.
- [65] YE Yunguang, SHI Dachuan, KRAUSE P, et al. Wheel flat can cause or exacerbate wheel polygonization[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(10): 1575-1604.
- [66] PEARCE T G, SHERRATT N D. Prediction of wheel profile wear[J]. *Wear*, 1991, 144: 343-351.
- [67] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements[J]. *Wear*, 2002, 253(1-2): 89-99.
- [68] ENBLOM R, BERG M. Simulation of railway wheel profile development due to wear—influence of disc braking and contact environment[J]. *Wear*, 2005, 258(7-8): 1055-1063.
- [69] LEWIS R, DWYER-JOYCE R S. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels[J]. *Proc IMechE Part J: Journal Engineering Tribology*, 2004, 218(6): 467-478.
- [70] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, et al. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear[J]. *Wear*, 2006, 261(11-12): 1253-1264.
- [71] ZOBORY I. Prediction of wheel/rail profile wear[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1997, 28: 221-259.
- [72] TAO Gongquan, XIE Chenxi, WANG Hengyu, et al. An investigation into the mechanism of high-order polygonal wear of metro train wheels and its mitigation measures[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, doi: 10.1080/00423114.2020.1770810.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 李国栋, 刘涛, 韩庆利, 等. 高速动车组车轮踏面修形

- 器的试验与应用研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(12): 6-8.
- LI Guodong, LIU Tao, HAN Qingli, et al. Research on test and application of modifier for wheel treads of high-speed multiple units[J]. Railway Vehicle, 2019, 57(12): 6-8.
- [76] 伍安旭, 冯畅, 吴波, 等. 基于研磨子的车轮多边形抑制机理与跟踪试验[J]. 城市轨道交通研究, 2019(5): 143-146.
- WU Anxu, FENG Chang, WU Bo, et al. Suppression mechanism of wheel polygon and tracing test based on abrasive block[J]. Urban Mass Transit, 2019(5): 143-146.
- [77] 乔青峰, 李明星, 赵晓男, 等. 研磨子抑制高速列车车轮多边形磨耗的机理研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(2): 234-239.
- QIAO Qingfeng, LI Mingxing, ZHAO Xiaonan, et al. Study on the mechanism of the abrasive block suppressing wheel polygonal wear of high-speed trains[J]. Tribology, 2020, 40(2): 234-239.
- [78] 陈林, 何小军. 城轨车辆清洁制动实施效果分析[J]. 市场与技术, 2018, 25(8): 102-103.
- CHEN Lin, HE Xiaojun. Analysis of the implementation effect of clean braking on urban rail vehicles[J]. Tehnology and Market, 2018, 25(8): 102-103.
- [79] MÄDLER K, BETTAC H, GEIDEL D, et al. Material solution for wheels in high-speed trains to solve un-roundness problems[C]//Proceedings CM2012, 2012, 188-189.
- [80] 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.
- [81] 沈文林, 宋春元, 李国栋, 等. 高速动车组车轮硬度与车轮多边形形成关系及解决措施研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(4): 18-23.
- SHEN Wenling, SONG Chunyuan, LI Guodong, et al. Research on high-speed EMU wheel hardness and polygon-form relationships with solutions[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(4): 18-23.
- [82] 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): 33-40.
- 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): 33-40.
- [83] 钱卿. 武广高铁车轮多边形综合整治研究. 铁道机车车辆, 2019, 39(2): 50-54.
- QIAN Qing. Study on wheel polygon comprehensive improvement of Wuguang high-speed line[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(2): 50-54.
-
- 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。
E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn