

文章编号:1671-1637(2022)01-0042-16

轮轨系统的现状与展望

沈 钢¹, 毛 鑫¹, 毛文力², 董强强³, 尹相琴⁴

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 中国铁路上海局集团有限公司 上海大型养路机械运用检修段, 上海 200439; 3. 中国铁路上海局集团有限公司 上海动车段, 上海 201812; 4. 云南汇通成铁路设备有限公司, 云南 昆明 650220)

摘要:总结了现有传统钢轮钢轨式轮轨系统的工程问题、研究现状和工程处理方法;分析了钢轨波磨和车轮不圆的形成和发展机理,对困扰高铁的踏面凹磨问题提出了创新性治理设想;拟通过轮轨系统的廓形设计-磨损评价-磨损治理的系统化革新思路,获得既安全又经济的线路条件个性最优优化方案;总结和展望了目前轮轨系统的打磨和旋轮,讨论了轮轨系统的检测方法;提出了避免过度检测的新思路,并预测了轮轨系统的未来发展前景。分析结果表明:钢轨波磨和车轮失圆的机理都出于轮轨系统的参激振动与切向轮轨磨损的耦合,在交变正压力和切向磨损同相位作用下,使凸起区域的磨损低于凹下区域的磨损;高铁的凹磨问题是轮轨在高速直线上和超大半径曲线上,轮轨处于非常微小的横向扰动,又在非常平顺的线路下发生镶嵌磨损,即轮轨接触部分廓形发生相互拷贝式磨损;低速城轨系统轮缘侧面磨损是由于在较小曲线半径上运行时,在较大的横向蠕滑作用下引起轮缘的导向作用而为,其踏面不易发生凹磨;钢轨和道岔的各种病害与轴重和冲击载荷有关,其疲劳破坏以局部应力过大的低周疲劳为主;随着车辆速度和轴重的提高,轮轨系统仅在车辆侧和轨道侧进行优化已达到极限,只有相互联合优化才能深入发掘潜力,继续维持轮轨交通的应用价值。

关键词:轨道交通;轮轨系统;轮轨维护;踏面/钢轨外形设计;旋轮;打磨

中图分类号:U270.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.003

Status and future trend of wheel/rail system

SHEN Gang¹, MAO Xin¹, MAO Wen-li², DONG Qiang-qiang³, YIN Xiang-qin⁴

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Large Road Maintenance Machinery Operation and Maintenance Section, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200439, China; 3. Shanghai Depot for EMU, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 201812, China; 4. Yunnan Hui-Tong-Cheng Railway Equipment Co., Ltd., Kunming 650220, Yunnan, China)

Abstract: The current engineering problems, present progress in research, and engineering treatment methods of existed traditional steel wheel rail type wheel/rail system were summarized. The formation and propagation mechanisms of rail corrugation and wheel out-of-roundness were analyzed, and innovative suggestions for addressing the tread hollow wear problems of high-speed trains were made. A personalized optimal strategy was formulated based on the systematic novel idea of obtaining safe and economical railway conditions through the profile design, wear evaluation, and wear control of wheel/rail system. For current rail grinding and wheel

收稿日期:2021-10-10

基金项目:中国国家铁路集团有限公司重大项目(2017G003-A);“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAG19B02)

作者简介:沈 钢(1963-),男,浙江余姚人,同济大学教授,工学博士,从事轨道车辆动力学研究。

引用格式:沈 钢,毛 鑫,毛文力,等.轮轨系统的现状与展望[J].交通运输工程学报,2022,22(1):42-57.

Citation: SHEN Gang, MAO Xin, MAO Wen-li, et al. Status and future trend of wheel/rail system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 42-57.

reprofiling, a summary and a discussion of future trends were presented. Based on a discussion of wheel/rail system detection methods, suggestions were made to avoid excessive detections, and the future development trend of wheel/rail system was predicted. Analysis results show that the mechanisms of rail corrugation and wheel out-of-roundness are both the coupling of parametric excitation and wheel/rail tangential wear of wheel/rail system. The wear on the hump zone is higher than that of the concave zone together with the coupling phase of variable normal force and tangential wear. In the case of the tread hollow wear of high-speed trains, the trouble seems to be caused by the inlaying wear on the very small wheelset/track interaction on the straight track with high speed and super large-radius curved track, which can be based on the copy-type wear of wheel and rail treads during the highly stable wheelset/track lateral movement. The cause of wheel flange wear of low-speed trains appears to be the flange guiding action together with the large lateral creep force on the radius of the sharp curved track. The hollow wear of the tread does not easily form. Various rail and turnout problems are usually related to the load bearing and impact. Its fatigue failure is mainly the low-frequency high-stress fatigue failures. With the increase in the running speed and axle load, the limitation of optimization on the wheel and rail side reaches its maximum. Thus, only through systematic optimization between wheel and rail can their potential be realized and the application value of the rail system be maintained. 7 tabs, 14 figs, 60 refs.

Key words: rail transit; wheel/rail system; wheel/rail maintenance; tread/rail profile design; reprofiling; grinding

Author resume: SHEN Gang(1963-), male, professor, PhD, elsg163@163.com.

Foundation items: Major Projects of China National Railway Corporation (2017G003-A); “12th Five Year Plan” National Science and Technology Support Plan Project (2015BAG19B02)

0 引 言

钢轮和钢轨系统自发明至今已存在了上百年,使其能够存在并发展的直接原因是低运行阻力、大载重和专线网路运行的高效率,还有就是线路建设的低成本。任何事物都有其两面性,该系统也存在诸多缺陷,在上百年的运用中已充分暴露,并有相应的解决办法,使之得以持久存在和发展。随着铁路运行速度的提高、轴重的进一步提升和城市地区密集客运,也在不断地出现新的问题,寻求新的对策,因此,本文承前启后,将轮轨系统技术进行梳理和发展预测,并针对突出的核心技术难点,包括对钢轨波磨机理和车轮多边形激励进行深入理论分析,获得治本的方法与措施。

1 轮轨系统存在问题

对于轮轨系统的问题,按系统的物理属性可以分为车辆走行部本身的问题、属线路和钢轨本身的问题、车辆和线路相互作用和匹配的系统性问题。按问题的性质可以分为固有问题、设计不完善的问题、使用过度的问题、管理欠妥的问题和环境适应性

问题。首先对关键工程问题加以分类,结果见表 1;再对不同现象加以图片展示和描述、已知原因说明和相应对策的评价,见表 2。

表 1 轮轨系统存在问题分类

问题分类	问题描述
固有问题	轮对元件与轨道的匹配问题
	转向架与曲线运行不匹配问题
	车辆的连挂组成列车问题
	走行机构的多样化问题
车轮侧伤引发的	踏面沟状磨耗、轮缘磨耗、踏面剥离、踏面凹磨、踏面局部分离、踏面内裂纹、踏面表面粗糙、踏面擦伤、车轮失圆、车轮高阶多边形、轴承故障等
钢轨侧伤引发的	轨顶塌陷、低接头塌陷、曲线外轨侧磨、轨头核伤、轨顶疲劳起皮、轨顶塑留、轨角侧疲劳掉块、钢轨短波磨、钢轨极短波磨、钢轨长波磨、轨角塑流波磨、钢轨交替侧磨、纵向裂纹扩展、外轨内侧塑性掉边、轨角塑性掉边、工作面肥边、轨角鱼鳞纹、轨角剥离脱落、垂直轨裂、纵向轨裂、轨下鄂核伤、尖轨裂纹、辙岔芯轨磨耗、接头错差、辙岔翼轨肥边、护轨磨耗、道岔波磨


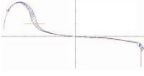

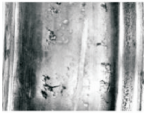
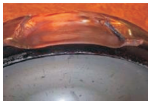



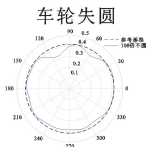
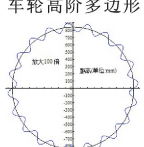
1.1 轮轨系统的固有问题

1.1.1 轮对元件与轨道的匹配问题

转向架的核心部件是轮对。由安装在一根轴上

表 2 轮踏面上的各种问题和部分成因及可行措施

Tab. 2 Various defects and some mechanism of tread and possible treatments

磨损问题与图片	特征成因	措施	磨损问题与图片	特征成因	措施
踏面沟状磨耗 	一条或多条下凹带状磨耗,制动过度;闸瓦材质不均	达到一定深度时旋轮	轮缘磨耗 	轮缘厚度磨耗大于踏面垂直磨耗;曲线半径较小;转向架导向不足;轮缘欠润滑	采用经济旋模板旋轮;优化转向架定位刚度等
踏面凹磨 	踏面部与钢轨顶部廓形接近,运行稳定产生集中磨耗于滚动圆附近	旋轮或其他措施减少集中磨耗	踏面剥离 	表面因浅层疲劳而掉块;浅层疲劳反复碾压	及时旋轮
踏面局部分离 	整块脱落,内部裂纹扩展	及时探伤及旋轮	踏面内裂纹 	探伤时发现踏面内部缺陷,旋轮后发现内部裂纹扩展;应力过于集中导致内部裂纹扩展	修正踏面外形;减小应力集中;及时旋轮
踏面表面粗糙 	表面粗糙有碾压颗粒;钢轨表面状态不佳,导致轮轨接触应力不均	打磨钢轨	踏面擦伤 	圆周接触面上有明显局部伤痕;制动力过大;轮轨黏着过小	检查防空高转抱死系统
车轮失圆 	测量结果呈现不规则状态,粗糙度大于 20 dB;制动不均,车轨耦合振动导致不均匀磨耗	旋轮,优化轮轨系统,有条件时施加踏面制动	车轮高阶多边形 	滚动圆测量结果呈现规则多边形,高阶粗糙度大于 20 dB re 1 μm;轮轨耦合高频振动	旋轮,采用踏面随车光滑器

的左右轮组成的,一般是刚性固结的,不能相对于车轴转动,称为刚性轮对;另一类是可以相对于车轴转动的,称为独立旋转轮对。虽然在外形上相似,但其力学特性有很大不同。对于刚性轮对的问题,由于左右轮不能相互转动,仅适用于在直线轨道上完美运行,通过左右轮踏面的斜度,轮对还能在直线上自动对中,但在曲线轨道上运行时,仅靠有限的踏面斜度或轮径差是不够适应较小半径(小于 400 m)曲线的,会发生因内外轮实际滚动圆大小与内外曲线钢轨长度差不匹配,造成机械磨损挤压。另一方面,在直线上因踏面存在锥度,会产生轮对的蛇行运动,当车辆以较高速度运行时,这种运动随踏面锥度因磨耗而增大时,会导致蛇行运动失稳。对于独立旋转轮对,车轮踏面斜度的对中性能和曲线导向性能随之失去,因此,这种轮对在直线上是无法靠轮对自身运动对中的,只能靠部分踏面的横向重力刚度来抵抗部分横向外力。这种轮对在曲线上也无法靠轮径差导向,需要在其他辅助装置帮助下实现直线对中和曲线导向。可见刚性轮对是有限自适应匹配线路的,而独立旋转轮对是不匹配线路的。

进一步讨论转向架的组成。因为仅靠轮对是不能构成完整的走行部的,得需要一个构架和两个轮对组合的转向架。对于刚性轮对而言,核心的元件

是:踏面的外形决定了轮对在直线上的对中性 and 曲线的导向性,并且这个特性是由轮踏面和轨廓形相互达成的。即使轮和轨廓形的相互匹配的设计达到最佳状态,但随着轮轨的磨耗总是向着双方不利的方向发展。对于独立旋转轮对而言,踏面重力刚度与对中性也是一样的。

目前从工程角度出发解决这个问题的方法是在控制好轨道线路曲线半径的前提下,优化车轮踏面外形的设计和对钢轨进行个性化的打磨廓形设计^[1-3],在轮轨之间给予适当的润滑和摩擦控制^[4-5],使得轮轨的相互磨损和不利作用降低到经济和安全的允许水平。对于轮对的蛇行失稳问题,不仅在踏面锥度的控制上采取措施,还需要在上部转向架悬挂参数采取措施^[6-7]。

1.1.2 转向架与曲线运行不匹配问题

一个完整的走行机构是由 2 个轮对组成的转向架。但传统设计是被动弹性定位,把轮对并行弹性定位安置于构架内,前后轮对的距离称为轴距。这种设计本身也仅针对直线轨道最佳,对于曲线轨道这种设计是不合适的。前后轮对无法在曲线上处于较好的径向位置,会造成附加的不期望冲角。轴距越大这种冲角也越大,使轮缘贴靠钢轨引起侧面较大磨损和脱轨倾向,并且这个问题还与轮对回转定

位角刚度有关。对于曲线通过性能,定位角刚度大总是不利的;对于直线运行来说,较大的定位角刚度和横向定位刚度的匹配才能实现较高的临界速度。在定位刚度这个点上,传统的被动悬挂设计对于直线运行和曲线运行时是矛盾的,这导致了对于不同速度等级和不同曲线通过需求的转向架的悬挂参数在设计时采取折衷化处理,降低了车辆对运行条件和线路的适应性。具有 2 个轮对的转向架从力学上讲是最合理的,但由于需要增加机车转向架的牵引力,不得不添加轮对,出现了三轴转向架等,轴距将更大,这将导致转向架内部力学关系更不合理,曲线通过性能进一步恶化。

目前的工程处理方法是设计结构优化的转向架、减小轴距至最佳值、采用柔性一系定位、减小转向架与车体间的回转阻力和刚度、采用柔性横梁结构顺服线路、对货车三大件转向架采用高抗菱形装置提高蛇行运动稳定性,也有研究主动导向的转向架等^[8-9]。

1.1.3 车辆的连挂组成列车问题

转向架是车辆的核心部件,但对于一个列车来说,仍然存在多种选择。一种是将车辆前后铰接的铰接式列车;另一种是非铰接式编挂式列车。从机械设计角度看,铰接式是合理的选择,它使列车具有整体性和柔顺性,在意外撞击脱轨事故中具有优越性^[10]。而非铰接式列车具有拆编和维修方便性,但在撞击脱轨事故中是不利的^[11]。对于为了减小能通过的曲线半径而设计的城市有轨电车,其转向架和车体的布置有多种,有转向架置于车体铰接处,也有将转向架置于车体中部以及这 2 种布置的相互组合。这些列车级布置方案的合理与否是静力学平衡、动力学合理和车辆限界的优化。

目前工程化的处理方法是预设列车不脱轨前提下的列车结构选择,并严格保障列车不脱轨的安全性。

1.1.4 走行机构的多样化问题

由于存在 2 种轮对结构、轴重和牵引要求延伸出来的多车轴、不同轮对定位刚度和不同列车连挂形式,使得走行机构呈现多样化的问题。目前有单轴转向架、两轴转向架、三轴机车转向架、组合两轴后的更多轴货车转向架、柔性自导向转向架、主动导向转向架、独立轮转向架、多种三大件货车转向架、摆式列车转向架等。这已造成轨道车辆形式多样化带来的通用性问题。如高速列车不能运行在既有小半径曲线上,低速列车不能在高速线路上以更高的

速度运行,重载货物列车必须有专线,有轨电车也必须是特殊轨道钢轨才是安全的。

目前的现象是多种结构并存,以后的发展方向应该在多种结构的运行基础上,实现大类统型和淘汰。

1.2 轮轨系统伤损引发的问题与对策

轮轨接触面都是钢质的,钢材在 100 kN 左右的正压力下,同时在切向蠕动下必然产生磨损和塑性流动,从而改变轮踏面和钢轨的横向界面廓形和纵向平顺性,由此造成一系列问题,既与车辆动力学性能有关,也与车辆和轨道系统的强度和疲劳寿命有关。表 2~6 为发生在轮踏面上的各种问题、部分成因与措施。

1.2.1 轮轨曲线磨损机理

曲线上的轮轨磨损主要是因 1.1.2 和 1.1.3 节中的固有问引起,主要是小半径线路上轮缘和曲线外轨侧磨和曲线内轨顶面疲劳剥离。轮缘磨损主要与踏面外形、钢轨外形、轮对冲击角、一系定位刚度、转向架轴距、轮轨间摩擦因数等有关。内轨顶面疲劳剥离也与这些因素有关,只是因顶面切向力过大导致。目前可行的方法是轮缘和钢轨的合理润滑和保持钢轨外轨合理外形、采用柔性定位的径向性好的转向架和采用轴距较短的转向架,还可以采用定制化曲线廓形打磨方法来延长曲线钢轨的使用寿命。

1.2.2 钢轨波磨机理

钢轨波磨是指在轮轨接触的纵向断面上发生在钢轨上的垂向交替的周期磨损,一般会造成较大的高频振动和噪声,且有多种类型,有的发生在直线上,有的发生在曲线上,也有的发生在道岔曲线上。按其波长分有短波、中波和长波波磨。目前波磨成因机理基本明了^[12-13],已有部分试验证实。波磨大体上分为两大类:一是磨耗型波磨,二是塑性流变型波磨。对于磨耗型波磨,其成因是磨损的周期性,该周期性与波磨后正压力变化有关,即波磨萌生后的正压力交变与磨损达成周期性耦合,导致低谷处的磨损高于波峰处的磨损,并不断恶化。这里的磨损主要是切向磨损,包括持续性蠕滑或滑动,也包括高频黏滑振动。具体地,有轮轨在曲线上的横向蠕滑、大蠕滑区的黏滑振动、轮轴相对于钢轨在纵向的扭转振动、牵引和制动时的轮轨纵向蠕滑或滑动等。一旦钢轨上出现因各种原因引起的初始高低差,导致轮轨垂向失压,达到能使持续的切向磨损发生因失压的差异,则波磨就开始发展了。

表 3 钢轨表面的各种问题和部分成因及可行措施

Tab. 3 Various defects and some mechanism of rail surface and possible treatments

磨损问题和图片	特征成因	措施	磨损问题和图片	特征成因	措施
轨顶塌陷 	轨顶局部凹陷;车轮空转,局部意外冲击,钢轨材质	及时修复	低接头塌陷 	钢轨接头处出现塌陷;冲击振动	加强接头区刚度
曲线外轨侧磨 	外侧面严重磨损,趋向车轮轮缘外形;曲线半径较小,润滑不足	间隔地润滑侧面	轨角鱼鳞纹 	轨角呈现有一定角度的裂纹;轮轨处于轨角接触区,应力和切向蠕滑均较大	打磨
轨顶疲劳起皮 	轨顶浅层疲劳并剥离;轮轨长期过载碾压,垂直磨耗低	打磨	轨顶塑留 	轮轨横向蠕滑力过大;钢轨材质问题,接触切向力过大	打磨
轨角侧疲劳掉块 	轨角处发生异常疲劳剥离;轮轨接触点应力过大,轮轨廓形不良	打磨,校正钢轨廓形	钢轨短波磨 (100~300 mm) 	轨顶面出现周期性下凹区,波长固定;波磨生成条件具备时发生	及时打磨或轨顶摩擦控制
极短波波磨 (30~100 mm) 	轨顶面出现周期性下凹区,波长固定;波磨生成条件具备时发生	及时打磨或轨顶摩擦控制	长波波磨 (1 000~3 000 mm) 	轨顶面出现周期性下凹区,波长固定;波磨生成条件具备时发生	及时打磨
轨角塑流波磨 	轨角区出现周期性上凸区,波长固定;轮轨碾压塑性流动	及时打磨	钢轨交替侧磨 	直线或大半径曲线轨道上发生间隔性侧面磨耗,波长为 30~50 m;钢轨廓形异常激发列车低频运动;缓和曲线激励	控制打磨纵向横断面的一致性

表 4 钢轨内部各种疲劳问题和部分成因及可行措施

Table 4 Various rail internal fatigue and some mechanism and possible treatments

磨损问题和图片	特征成因	措施	磨损问题和图片	特征成因	措施
纵向裂纹扩展 	轮轨接触应力过大,反复碾压导致;垂直磨耗小,疲劳裂纹扩展	及时探伤打磨	轨下颞核伤 	轨下颞出现内部裂纹并扩展;横向力协同作用使轨下颞处应力最大	更换钢轨
轨头核伤 	内部裂纹扩展;轮轨接触应力大	及时探伤更换	轨角剥离脱落 	轨角处疲劳扩展区发生掉块;鱼鳞裂纹后反复碾压导致金属剥离	检查裂纹是否向内发展,有则需要更换钢轨
垂直轨裂 	垂向裂纹扩展并断裂;轮轨垂横向作用过大,疲劳扩展	及时检查更换钢轨	纵向轨裂 	钢轨焊接区出现垂向裂纹向纵向发展直至断裂;焊接区应力问题引起疲劳裂纹扩展	更换钢轨
辙岔芯轨磨耗 	辙岔芯轨顶部至顶宽 30 mm 以下;因几何尺寸或者接头错差等	调整几何尺寸,轻度损害打磨,中度焊补与重度更换联合	尖轨裂纹 	尖轨尖端至顶宽 30 mm 以下;较大冲击;工作边未倒角;过度打磨	联合通号专业调整几何尺寸,再对该处进行打磨处理与倒角打磨
道岔波磨 	道岔区段钢轨顶面波浪形磨耗	钢轨打磨	接头错差(死缝) 	平侧面与顶面平直度差异,侧面或顶面形成 1 mm 以上的成为错差;因扣件扣压力不足导致钢轨爬移产生	用钢轨拉伸器来调整
辙岔翼轨肥边 	辙岔翼轨作用边一侧钢轨顶面扩宽;不良受力导致的钢轨表面金属塑性流动与堆积	打磨	护轨磨耗 	护轨上的一种侧向磨耗;几何尺寸(尤其是查照间隔、护背距离、护轨与基本轨距离)不良导致	调整几何尺寸,打磨

表 5 道岔区各种问题和部分成因及可行措施

Table 5 Various turnout zone defects and some mechanism and possible treatments




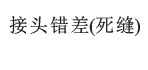



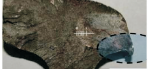


磨损问题及图片	特征成因	措施	磨损问题及图片	特征成因	措施
 <p>辙岔芯轨磨耗</p>	辙岔芯轨顶部至顶宽 30 mm 以下;因几何尺寸或接头错差等	调整几何尺寸,轻度损害打磨,中度焊补,重度更换联合	 <p>尖轨裂纹</p>	尖轨尖端至顶宽 30 mm 以下;较大冲击;工作边未倒角;过度打磨	联合通号专业调整几何尺寸,再对该处进行打磨处理与倒角打磨
 <p>道岔波磨</p>	道岔区段钢轨顶面波浪形磨耗	钢轨打磨	 <p>接头错差(死缝)</p>	平侧面与顶面平直度差异,侧面或顶面形成 1 mm 以上的成为错差;因扣件扣压力不足导致钢轨爬移产生	用钢轨拉伸器来调整
 <p>辙岔翼轨肥边</p>	辙岔翼轨作用边一侧钢轨顶面扩宽;不良受力导致钢轨表面金属塑性流动与堆积	打磨	 <p>护轨磨耗</p>	护轨上的一种侧向磨耗;几何尺寸(尤其是查照间隔、护背距离、护轨与基本轨距离)不良导致	调整几何尺寸,打磨

表 6 钢轨材质塑性流动问题和部分成因及可行措施

Table 6 Various rail surface plastic deformation and some mechanism and possible treatments

磨损问题和图片	特征成因	措施	磨损问题和图片	特征成因	措施
 <p>轨角塑性掉边</p>	工作边塑性纵向条状剥离;轮轨接触不良	及时廓形打磨	 <p>外轨内侧塑性掉边</p>	外轨侧面下部塑性流动并脱落;轮轨横向作用力过大	及时打磨
 <p>轨距拉杆处塑变</p>	轨距拉杆的局部受力过大引起轨底局部塑性边形和横向裂纹	局部更换	 <p>工作面肥边</p>	顶面明显塑性流动挤出金属材料;轮轨垂向作用力过大	打磨

进一步从机械振动的理论上讲,起始轮或轨表面的几何不平顺达到一定幅度时会发生轮轨间正压力交变,引发轮轨系统内部参数变化的激励,即所谓的参激振动,当这个参激振动与轮轨切向磨耗型振动耦合时,就可能发生周期性磨耗,因此,轮轨间的任何周期性磨损都可以表达为参激振动与切向磨耗振动的耦合。一般这 2 个振动的频率不可能相同。当这个耦合在相位上加刷,低点磨损高于高点磨损时,周期磨耗就扩展了;反之,周期磨耗不可能形成。

影响因素因车辆和运行线路条件不同有很多,有不同的组合可能,造成目前对钢轨波磨成因的众说纷纭。若从以上微观分析钢轨磨耗型波磨的机理还是清晰单一的,即垂向正压力的交变协同切向黏滑磨耗造成定点周期性磨损。影响因素有轨道钢轨的垂向弹性、道床的垂向特性、轮轴的弹性体振动模态、曲线半径、是否处于起止动区域以及轮轨间的摩擦副特性等。

以在城轨中出现最多的曲线内侧轨顶波磨为例,如图 1 所示^[12],其中: ξ 和 T 分别为轮轨切向蠕滑率与切向蠕滑力; s 和 N 分别为沿波磨方向的长

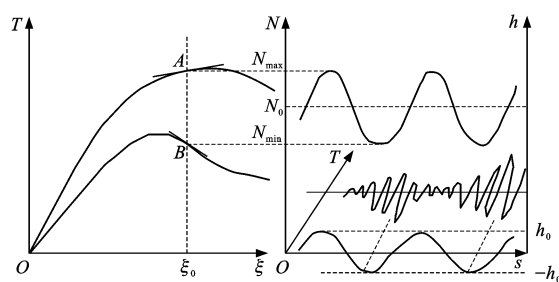


图 1 磨耗型波磨的波长锁定机制示意

Fig. 1 Illustration of wavelength locking mechanism of wear type corrugation

度和正压力; h 为波磨幅度。假设此时轮轨工作点在 ξ_0 处,由于冲击作用,推测高点的正压力会大于低点,均值为轮重 N_0 ,振幅为 $N_{\min} \sim N_{\max}$,2 条线与工作点的交点分别为 A 和 B,假定 A 点的变化斜率为正,B 点的变化斜率为负,当出现负刚度时将发生黏滑振动,会导致横向切向力曲线的周期颤振,颤振较大处位于波磨低谷区,较小的颤振处于波磨的峰值区,这样就会使波磨不断加深发展。小比率试验台也证明了以上判断。

目前对于波磨的治理方法有及时打磨钢轨和控制界面摩擦等。常见的波磨会产生于较小半径的曲线上,尤其是内轨轨顶,也会产生于车站区间的直线线路道岔曲线和钢轨局部不平顺处,如钢轨接头或轨顶局部塌陷区后段等。

有时在直线上也有波磨,也可以采用参激振动与切向磨损振动的耦合来解释。直线上的参激振动仍然是初始的轨面几何不平顺,切向磨损振动是车辆在直线上的制动和牵引磨损。当上下刚度阻尼条件巧合时,发生低点纵向磨耗大于高点纵向磨耗。一般在起止动计算机自动控制运行的城轨线路上容易发生。

表7为某地铁线路上测量的波磨关键特征。图2为测点4处9号道岔导曲线入口处的波磨测量结果。

表7 某地铁线路上测量的波磨关键特征
Table 7 Basic features of rail corrugation measured on a metro line

测量点序号	测量轨道特征	波长/mm	平均波深/mm
1	400 m 半径曲线	200	0.70
2	400 m 半径曲线	200	0.50
3	400 m 半径曲线	160~200	0.20
4	9号道岔导曲线	100~120	0.30
5	9号道岔导曲线	70~80	0.80
6	400 m 半径曲线	160~220	0.20
7	400 m 半径曲线	150~160	0.10
8	400 m 半径曲线	100~120	0.15
9	400 m 半径曲线	100	0.10

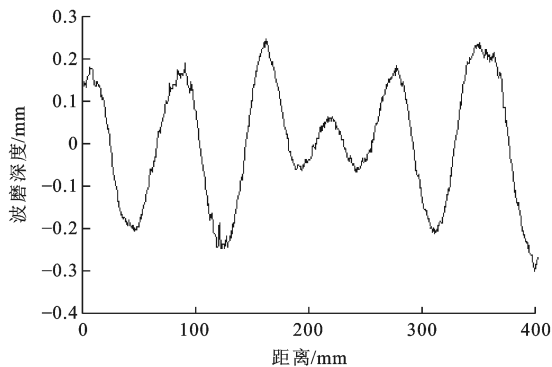


图2 测点4处9号道岔导曲线入口处波磨
Fig 2 Measured corrugation of No 4 on turnout 9

为证明以上波磨与黏滑振动的理论推论,进行了验证试验。图3为轨道振动测试布置。设置了直线比较点、曲线测点1和曲线测点2,每个测点都包含3个方向的加速度测点。曲线测点2与1不同的是在内轨顶喷涂了摩擦控制剂,这样就能获得正常波磨区段与无波磨(直线)区段的振动差异,也能获

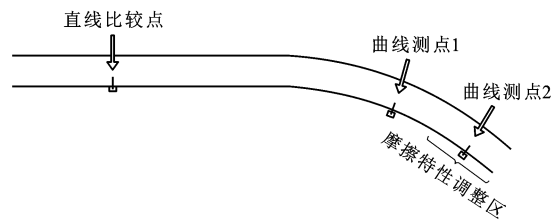


图3 波磨测试方案平面布置
Fig. 3 Layout of test measurements of corrugation
得在内轨采取摩擦控制后的振动差异。

图4~6分别为直线无波磨处和曲线测点1和2处的横向振动加速度频谱,可见:在直线上振动能量分布基本均匀,在有波磨处发现在70~80 Hz和150 Hz处有2个较大的周期性振动,而有摩擦控制的测点2处150 Hz的能量基本消除,因此,可以认为当车辆经过曲线时,轮对与轨道存在周期性剧烈振动,当对内轨施加摩擦控制后,能部分消减这种振动。由此可见,在内轨上存在横向黏滑振动,在垂向力协同作用下扩展了波磨。

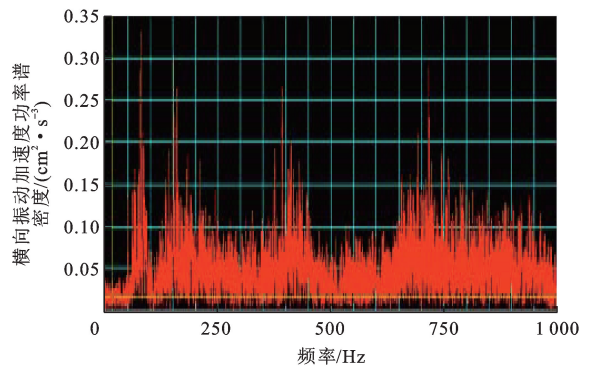


图4 无波磨处直线上的横向振动加速度频谱
Fig. 4 Spectrum of lateral acceleration on tangent track without corrugation

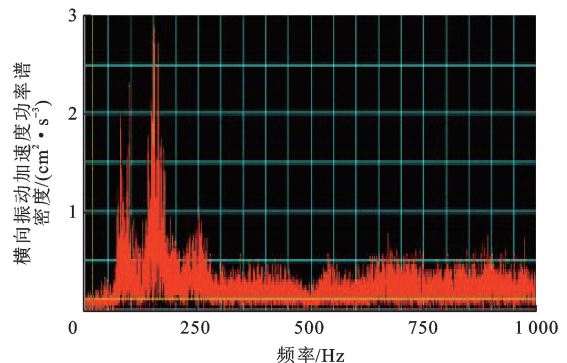


图5 曲线上有波磨处的横向振动加速度频谱(曲线测点1)
Fig. 5 Spectrum of lateral acceleration at point 1 on curved track with corrugation

1.2.3 车轮多边形磨耗机理

车轮多边形磨耗或失圆性磨耗是指车轮在径向出现较大偏差,尤其是当这个偏差呈现周期性起伏

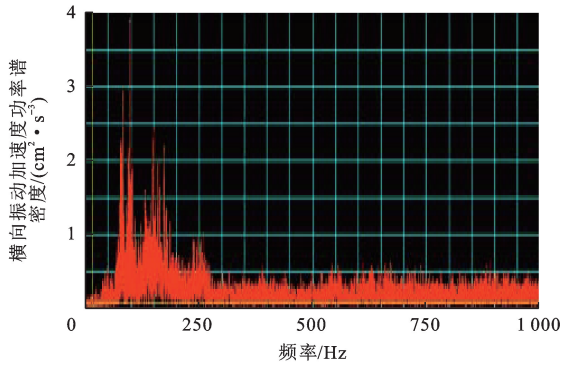


图 6 曲线上有波磨处的横向振动加速度频谱(曲线测点 2)
Fig. 6 Spectrum of lateral acceleration at point 2 on curved track with corrugation

时,车辆的垂向振动将非常大,同时也激起轨道及其下部结构的高频振动。低速地铁和有轨电车的多边形边数低些,一般为 3~10;高速的会高些,高速列车车轮出现 20 边形的,虽然相对于低速的幅值不大,但其振动加速度以边数的平方放大。其成因机理与钢轨磨耗型波磨相当,即发生了周期性因纵向滑动为主的摩擦振动,协同垂向振动,并不断在低点发生大于高点黏滑振动。如图 7 所示,车轮在运行过程中因多种因素(车轮制造偏心、线路周期激励等)会萌生局部不平顺,这些局部不平顺会造成轮轨垂向作用力的起伏变化,假定产生局部不平顺的车轮运行在轨道上,运行速度为 V ,轮轨间的正压力为 P ,当在车轮上施加牵引力 T_q 或制动力 T_b 时,车轮与钢轨在接触点上的纵向蠕滑力 T_x 会有图 8(其中: t 为时间; ξ 为纵向蠕滑率; ξ_0 为工作点纵向蠕滑率)所示的关系:假定牵引/制动力不变,则当轮轨间的正压力

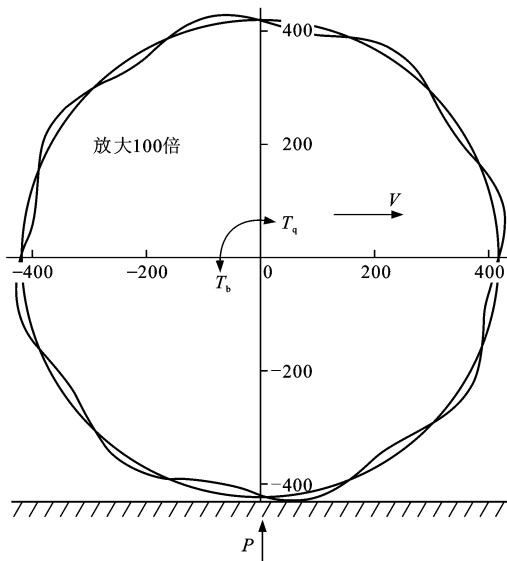
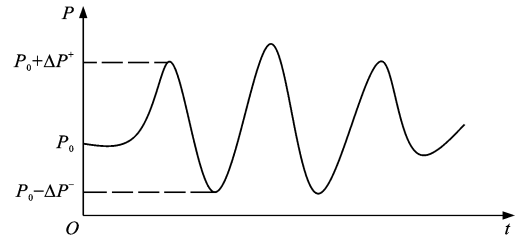
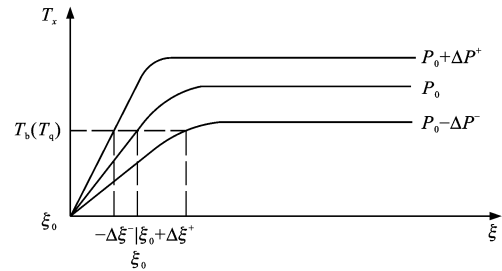


图 7 有局部不圆顺的车轮
Fig. 7 Wheel with polygon shape



(a) 轮轨正压力变化



(b) 制动牵引时不同正压力下纵向蠕滑力随蠕滑率的变化

图 8 轮轨正压力和蠕滑力的关系

Fig. 8 Contact and creep forces

因振动由 P_0 变为 $P_0 + \Delta P^+$ 或 $P_0 - \Delta P^-$ 时,对应的纵向蠕滑率会由 ξ_0 变为 $\xi_0 - \Delta \xi^-$ 和 $\xi_0 + \Delta \xi^+$ 。由图 7 可知:踏面凸起处轮轨正压力大于踏面凹陷处,因此,踏面凹陷处的蠕滑率大于凸起处,凹陷处磨损速率更快。由轮轨蠕滑接触理论易知,当轮轨间正压力增大时,轮轨蠕滑系数会增大,蠕滑率-蠕滑力曲线在线性区段的斜率会增大(图 8(b)中高位曲线),此时轮轨接触斑上的黏着区增大,滑动区减小,磨损速率降低;当轮轨间的正压力减小时,轮轨蠕滑系数会减小,蠕滑率-蠕滑力曲线在线性区段的斜率会减小,对应图 8(b)的低位曲线,此时轮轨接触斑上的黏着区减小,滑动区增大,磨损速率增加。

图 9 为一地铁车轮实测的车轮不圆形状,存在局部的径向跳动异常。图 10 为采用由上海铁院轨

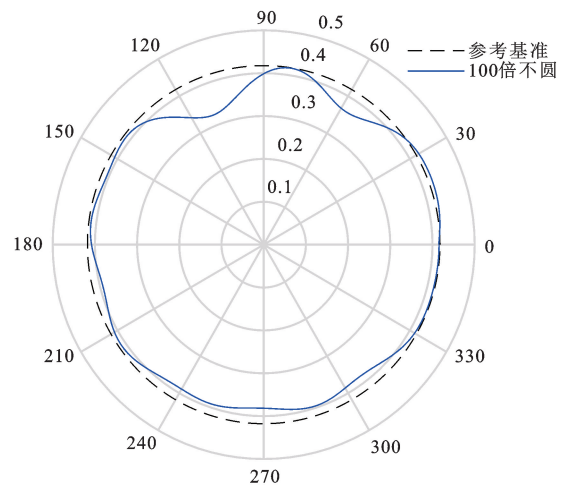


图 9 测量剖面

Fig. 9 Measured profile

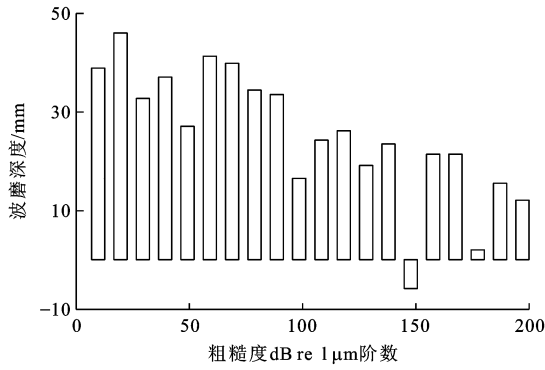


图 10 粗糙度分析结果

Fig. 10 Roughness analysis result

道交通公司生产的 BYD-2020 型仪器软件对其进行粗糙度分析结果的结果。可见该轮子的最大径跳并不大,但其含有较高阶(5~9 阶)的不圆度成分。

图 11 为仿真实际车辆与轨道参数下车轮转动一圈,轮轨间法向力随圆周里程的变化规律。图 12 和 13 分别为车轮旋转一周内蠕滑率和磨耗功率的变化。

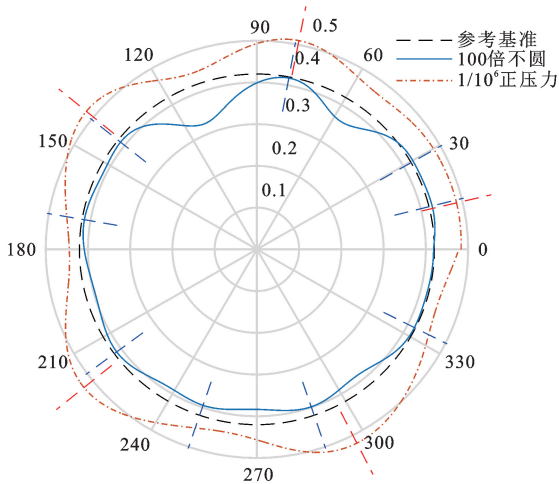


图 11 轮轨接触法向力变化

Fig. 11 Wheel/rail contact force around

可见原先下凹处的正压力较小,而蠕滑率和磨耗功率较大。这个现象说明了为何车轮不圆会从一个局部的擦伤开始,不断加剧。圆周 30°~150°部分和圆周 150°~360°部分虽然失圆相差较大,但仍然表现出相同周期和量级的磨耗功率,这是因为车轮在较大下凹处激起的振荡未能及时衰减,正压力的波动传递到了之后的轮周导致。这个现象将会引起整个轮周的不圆,最终将形成多边型的车轮不圆顺。

图 14 为该车轮失圆发展的仿真结果,分别是 50 万次、100 万次、150 万次和 200 万次滚动后的轮周廓形。

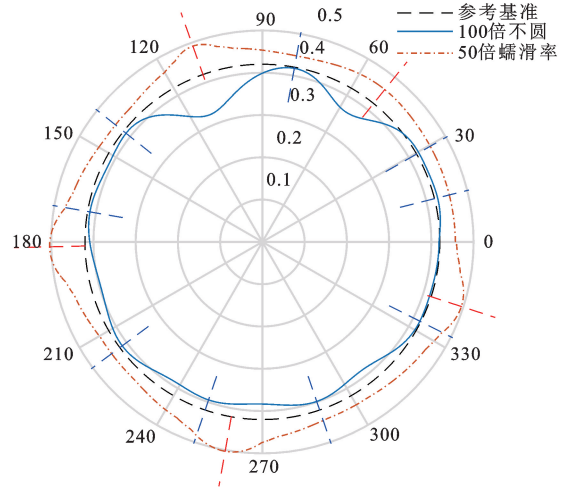


图 12 蠕滑率变化

Fig. 12 Creep force around

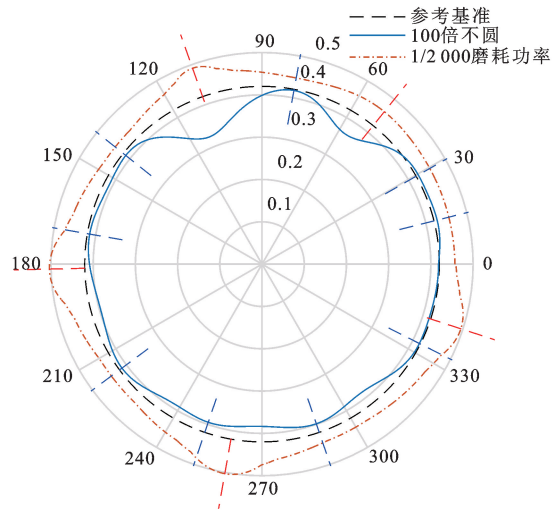


图 13 磨耗功率变化

Fig. 13 Friction work around

由以上仿真结果可见,车轮失圆的发展与轮周磨耗功率分布相对应,因此,可以用轮周磨耗功率分布作为车轮磨耗趋势检验的指标,也可以用它来研究车辆和轨道参数对轮周磨耗的影响。

影响车轮多边形发展的因素很多,对于轮轨存在较大垂向振动的环境容易产生。与钢轨波磨不同的是,车轮除了轮轨接触以外,还与踏面制动、轮盘制动和电制动引起的纵向磨损有关。当以踏面制动为主时,制动的均匀磨损一般不会萌生径向高低差,非踏面制动形式容易发生踏面接触区的轴向径向跳动偏差,对于易磨损的踏面材料反而不容易发生径向偏差,因而也不容易发生失圆。对于安装了轨下隔振垫或采用浮置板道床的结构,会促进轮轨间垂向振动趋向低频周期振动,就更容易发生车轮失圆。治理的有效方法是在车辆端增加踏面制动的作用或

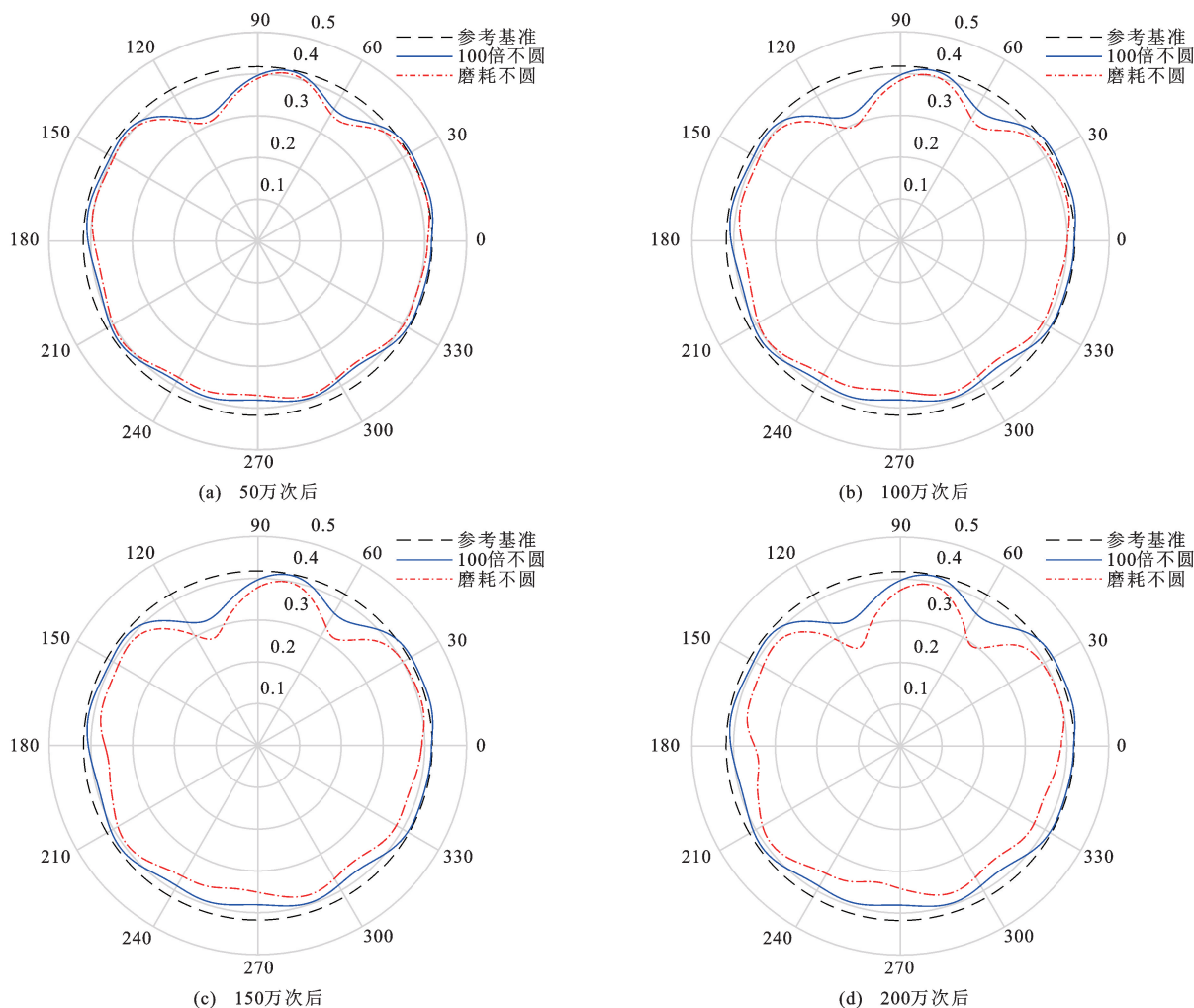


图 14 车轮失圆外形的变化历程仿真结果

Fig. 14 Simulation results of variation of wheel unroundness

类似的碾磨子,将踏面在运行中间隔圆顺。超过一定径跳限度后应及时采取旋轮措施。在轨道端的治理措施应该是复合验证。如对隧道减振而设计的低刚度道床的结构是否对车辆振动合理,如弹性较低的垫板扣件和浮置板结构,一般较硬刚度的轨道和道床结构不容易发生车轮多边形。

1.2.4 高速踏面的凹型磨耗机理分析

高速踏面的凹型磨耗普遍出现在高速车辆上,其机理很简单,就是轮轨磨耗是轮和轨廓形的相互拷贝。当高速线路以直线为主,且廓形和线路很平直,车辆运行很稳定时,这种拷贝就更有规律,即踏面外形将快速趋向钢轨顶面外形。一旦上下外形发生局部接触点的共形,或踏面接触点曲率半径小于钢轨接触点曲率时,轮轨等效锥度就会增大,从而发生蛇行失稳。目前的治理措施是踏面旋轮和钢轨廓形打磨,但高速转向架对凹磨敏感造成频繁旋轮,大大降低了高速列车的经济性。有待进一步研究系统

治理措施,减缓凹磨轮踏面发生。

1.2.5 轮轨疲劳磨损机理分析

轮轨疲劳属于 2 个金属滚动体之间的滚动接触疲劳问题,轮轨接触面上不仅有巨大的正压力,也有纵横向蠕滑力。纵横向蠕滑力的产生及其大小与曲线线路条件、制动与牵引工况、轮轨廓形和车辆特性等有关^[14]。这些力的作用必然会在车轮和钢轨表面及其内部产生各种类型金属材料的疲劳破坏问题。这些疲劳在车轮踏面上的表现有踏面内部裂纹扩展、踏面表面掉块剥离、轮缘根部疲劳裂纹等。在钢轨上的表现有内部核伤、轨距角鱼鳞纹和掉块、轨顶面浅层剥离掉块、轨腰垂向裂纹、各种补焊区裂纹等。原因是在滚动体频繁的外力作用下使金属材料浅表面产生裂纹,并在疲劳与磨耗竞争下疲劳占主导,从而引起裂纹扩展。破坏形式和程度与金属材料本身的疲劳特性关系重大,这属于金属材料力学范畴,这里不再赘述。

有效的控制方法是针对不同的疲劳问题采取针对措施。因润滑过度引起的轨角疲劳掉块应控制润滑频度,使磨耗与疲劳达到一个合理的状态;因轴重过大引起的轨顶疲劳则应检查钢轨轨头廓形,通过修正廓形降低接触应力。诸如此类问题都应从微观轮轨滚动接触体出发消除疲劳萌生,延缓疲劳裂纹扩展。

1.3 轮轨系统横截面廓形问题

轮轨系统横截面廓形严重影响车辆与轨道的动力学性能,包括曲线导向性和直线稳定性。不良的截面廓形又影响轮轨接触应力水平,从而影响轮轨疲劳和磨损特性。由于轮轨横截面廓形磨耗变化又反过来促使其动力学性能变化。不幸的是在特定线路上特定车辆组合下,这种相互的变化是向不断恶化的方向发展的。

1.3.1 踏面廓形问题

踏面廓形经历了不断的变革式发展,早期踏面是锥型的,锥度决定了曲线通过能力,也决定了其蛇行运动的波长和临界速度。轮缘是用来导向和限制车轮脱离钢轨的,这种设计必然导致在小半径曲线上的轮轨两点接触现象,造成轮缘的过度磨损。后期提出了蠕滑导向和磨耗型踏面廓形设计的概念,即在中等半径曲线上,车辆轮对可以利用磨耗型踏面外形足够的内外轮径差和接触面的蠕滑力自行导向,不以轮缘贴靠钢轨侧面的方式通过曲线。如何设计磨耗型踏面外形也由早期的对磨耗后的统计发展到人为的科学理论设计上来。早期采用试凑法和分析法来逐步现场试用优化踏面外形,目标是减少两点接触,减小接触应力,优化曲线通过性能,但周期很长,难以达到优化目标。近期随着高速铁路的发展,对踏面外形提出了新的设计要求,即保证合理的等效锥度,避免一次和二次蛇行失稳,延长因蛇行失稳的旋轮公里数。一种新的以钢轨廓形和轮径差曲线为目标的踏面外形设计方法被提出^[15-16],并应用于高速车辆的踏面设计。对于独立轮的踏面设计问题,设计目标与刚性轮踏面完全不同,独立轮的踏面设计是如何提高在直线上的重力刚度对中能力,又期望减小轮轨接触应力水平。以往的踏面是锥形的,其横向重力刚度接近于0,若提高等效锥度也不能起到大的作用,反而会使接触点移至轮缘根部和轨角处,产生更大的接触应力,造成踏面的过度磨损和疲劳。后期采用基于接触角曲线重力角刚度优化目标的设计方法使该问题得以解决^[17-18],同时也保证了接触点的合理位置和较低的接触应力水平。

1.3.2 钢轨廓形问题

钢轨廓形设计长期落后于踏面廓形设计。仅关注钢轨轨角曲率半径对踏面廓形的匹配和轨顶的轮轨接触应力水平。随着钢轨廓形打磨的技术成熟和高速铁路要求的提高,钢轨廓形设计在需求的推动下发展并逐步成熟。目前采用个性化设计的方法,即针对不同线路区段、不同车辆的运行要求以及不同打磨目的进行基于车辆统计踏面外形的个性化钢轨廓形设计^[19-31],目的是在满足动力学性能的前提下尽可能减少钢轨打磨量,达到最佳的经济性。对于不同型号的干线新钢轨,原则上在轮轨几何接口上应是相对统一的,即保证钢轨内侧工作面的一致性,以便于车轮踏面的设计。用于有轨电车的槽型轨有它的特殊性,目前也有多种型号,具有不同的槽宽,需要适当时候给予一并解决。

1.3.3 踏面旋修

踏面旋修是恢复踏面廓形和去除表面材料缺陷的有效手段,但需要落轮或采用不落轮镟床。地铁车辆因轮缘磨耗较大,在恢复轮缘时会牺牲较大的轮径尺寸,目前可以采用经济型旋修方法,即不完全恢复轮缘厚度,而是恢复重要的轮缘根部廓形。这种踏面廓形被称为经济旋修廓形,其踏面和轮缘根部外形与标准的廓形完全一致。轮缘厚度等级有以0.5 mm为等级的^[32]。至于何时旋修,与综合经济性因素有关,可以从轮轨的磨耗速率和旋轮的成本这2个综合指标决定旋轮的合理间隔。有时还应综合考虑曲线钢轨的侧面磨损程度,恶化的轮缘廓形也会造成钢轨侧面磨损加剧,从而反过来加速正常轮缘的磨损。高速铁路一般以踏面凹磨为主,轮径的减少有限,但若发生踏面内部疲劳裂纹扩展,则由于修程技术规范要求去除裂纹,则可能导致大量轮径损失。踏面多边形磨耗也是旋轮的一个因素,多边形磨耗根据边数多少会造成巨大的振动,需要采用旋轮予以解决,踏面的沟状磨耗也会导致踏面的旋修。

1.3.4 钢轨打磨

钢轨打磨分为3种类型:预防性打磨、修理性打磨和廓形打磨。预防性打磨可减缓表面的疲劳萌生、去除表面的缺陷和脱碳层等,不对钢轨廓形给予修正;修理性打磨或廓形打磨是为了修理钢轨表面缺陷和廓形畸形,如各种波浪型磨耗、剥离掉块、曲线过度磨损、压溃等对车辆运行会造成不安全的因素,打磨量可能较大;廓形打磨可优化钢轨廓形,打磨的目标廓形是一个较高技术的问题,涉及到车辆

动力学性能、轮轨接触疲劳和轮轨磨耗问题。由于不同运输模式和不同线路的打磨要求不尽相同,因采取定制化的打磨廓形设计为最佳选择,以便降低钢轨打磨的工作量^[33]。

打磨的关键技术有硬件和软件,硬件是指各种打磨列车,目前有多磨头打磨列车、高速打磨车、铣磨列车、单磨头打磨机等。

1.3.5 轮对维护问题

轮对承载了整个列车,是列车牵引和制动的主要部件,也是保证列车安全的重要部件,尤其在高速动车组轮对,运行时速可以达到 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,轮对在运行中面临各种极端天气和各种外部环境的影响。以上因素导致轮对在日常运行中需要重点维护,目前高速动车组轮对维护工作有轮对日常外观、尺寸检查,车轮踏面定期旋修,空心车轴和轮辋轮辐定期探伤,齿轮箱定期换油化验,轴端接地装置定期检查,轮对整体定期大修,轮饼、制动盘磨耗到限更换等。以上轮对维护工作周期短,检修频率高,需要专业检修人员进行作业。轮对维修、保养需要投入大量人员、设备、资金,以达到安全、平稳运行的目的。

1.3.6 轮对检测设备问题

轮对作为保证列车安全运行不脱轨的关键部件,也是各主体单位重点维护的对象,针对轮对的设备投入很多,尤其在高速动车组轮对检测设备,目前有轮对故障动态检测系统,空心车轴探伤设备,轮辋轮辐探伤设备,磁粉探伤设备,镟轮设备,THDS、TFDS、TADS、TPDS、TCDS 等检测设备,故障轨边检测 TEDS 设备,轮对更换设备等。以上设备的投入大大提高了列车的自动检测水平,同时收集了大量列车轮对运行数据,通过数据整合分析可以总结出轮对运行规律,为未来轮对设计、更新升级提供运营技术数据支持。

2 轮轨系统的未来展望

轨道交通的未来社会需求决定了传统轮轨系统具有市场选择性优势。首先在承载能力与经济性上,高速铁路的速度提升也使得传统轮轨系统跻身高速客运交通,虽然付出的代价与传统速度相比巨大,但基于现有铁道行业产业基础也是一个市场的选择,因此,对于中国地大客流集中的发展中国家,交通运输依赖已有轨道交通已成定局,只能在此基础上优化发展才能满足社会的新要求。重点应该对现有的走行部进行局部改造,使得其安全性和经济

性进一步提高。同时注重轮轨系统的整体维护,避免过度检测和维护,达到精准维护、有效维护,大大降低高速铁路轮轨系统的维护成本,实现与新型高速交通系统在速度和经济性上的综合优势。

而轮轨系统是个系统,是相互影响的,因此,未来的发展方向是既需要在技术层面进行更新换代,也要在既有结构上进行相互配合或折衷处理,还要在运维层面进行优化。

2.1 走行系统技术提升

传统走行系统存在固有缺陷,首先是曲线线路的不适应性,体现在三角坡的轮重增减载和曲线轨道上的非径向通过。如果能采用简单的机械层面的革新设计解决以上 2 个问题,将大大提升走行系统的安全性和曲线通过性能,减少轮轨磨损。其次是机械传动系统的复杂性,质量较大的电机与轮对之间不仅存在较大的相对位移,也存在较大的冲击力,造成构架的强度问题和牵引齿轮箱系统的设计问题。若能从电气牵引和机械传动系统的改型设计达到大功率低质量,直接将力矩传输至轮对,可以大大简化走行部的驱动系统。走行部是一个承载巨大载荷的装置,本身应该具有足够的强度可靠性,应该在材料和结构上实行革新,大大提高了抗疲劳性和承载能力与自身质量比。

2.2 轨道结构的提升

轨道结构是轮轨系统的重要组成部分,尤其在系统设计上应该兼顾走行部的改革设计,但轨道结构是个基础设施,不可能做大的变化,但可以在可能的范围内配合上部结构的优化,比如在钢轨垫板上部分进行优化。对于目前高速铁路的问题可以进行钢轨廓形组合设计优化来解决踏面的凹磨问题,长车轮的旋修里程。

2.3 轮轨系统的相互匹配

轮轨系统的相互匹配是一个系统问题,涉及到轮轨界面几何廓形匹配、轮轨材质匹配、轮轨上下刚度和阻尼的匹配。首先是轮轨界面几何廓形匹配,这对于高速铁路尤其重要,踏面外形钢轨廓形和打磨廓形应该在最优化动力学性能和接触应力协调的前提下达到最佳状态。由于线路廓形是纵向三维延伸的,而车轮踏面是单一圆周向的,因此,存在巨大的可变性。不应该把三维问题两维简单化。

2.3.1 轮轨界面的纵横廓形匹配

轮轨系统横截面匹配是一个两维问题,但纵向轨道的廓形长期以来一直是统一的,如果能够利用其纵向的可变性,在影响列车运行动力学振动的前

提下可以采取多种措施达到因传统规则阻碍而无法做到的事。

2.3.2 轮轨界面的第三介质

轮轨界面的第三介质对轮轨运行影响巨大,轮轨系统就像一个开放的轴承,因此,它的条件远差于封闭的轴承。轮轨润滑或摩擦控制是必须的,尤其在曲线和道岔上。目前采取的方法是可行的,但由于摩擦与疲劳的竞争性,应根据不同运行环境个性化,这方面需要经验的积累也需要智能化的专家系统^[34-36]。

2.3.3 轮轨系统的检测、数据提取与智能维护

目前已投入能大量自动检测车轮踏面外形的激光检测设备,积累了大量数据,但由于前期研究不充分,导致大量数据的积压而未能被利用,因此,有必要也有可能在基于大量踏面廓形和钢轨廓形的基础上对数据进行深度挖掘,为现场提供更加智能和精细化的诊断报告。按维度大小,首先可以开展列车层面的数据分析,获得有否个别车轮有异常;也可以开展不同线路间的数据分析,获得同一车辆型号下在不同线路上的区别;还可以在同一线路上对比分析不同型号的车辆;再进一步可以纳入运行公里数和线路条件的变化信息,给出整个轨道交通系统的轮轨异常信息。

2.4 钢轨在线处理设备的提升

钢轨在线处理设备指的是不需将钢轨拆卸、回送钢轨基地,直接在线路上利用封锁天窗修理钢轨的大型设备,目前主要是打磨车和铣磨车。总体而言,2种设备有其各自的优缺点。

打磨车具有磨头布置灵活、可便捷实现多种廓形、作业速度快、效率高等优点,但作业精度不高,处理波磨尤其是中长波的波磨效果差,在作业起始段(磨头下刀区段)会产生“疑是波磨”。

铣磨车作业装置有垂向和纵向定位机构,具有作业精度高、质量好、污染小、环境友好等优势,但对于小切削量地段作业效率低,另外使用成本偏高,廓形单一欠灵活,需更换刀盘才能实现不同轮廓。

为了更好应对高速增长的钢轨在线处理需求,铣磨车应注重提高作业速度,降低作业成本。打磨车应注重提高作业装置控制精度,提高作业质量,尤其是下刀区段的质量;目前国内有关单位已在开展提高打磨头转速、研发新型高效砂轮、增加打磨装置强度、进一步提高作业速度等方面的研究工作。

2.5 钢轨在线处理技术的提升

为了经济、高效、优质地完成钢轨状态控制,在

确保列车运行安全的基础上降低列车运行噪声,提高列车运行品质,减少车辆、线路维护费用,需大力提升钢轨在线处理技术水平。

(1)针对不同线路的钢轨病害情况,选择最适宜的在线处理设备。比如小半径曲线钢轨病害严重地段修复性打磨与隧道、山区铁路等宜选择钢轨铣磨车;新线开通前预打磨、长大区间且钢轨状态良好的预防性打磨宜选择钢轨打磨车。

(2)钢轨铣磨车使用成型刀盘,因此,对于铣磨车的作业技术更多的是针对不同线路钢轨的情况结合运行车辆轮对踏面的情况选择最适宜的刀盘,设置恰当的切削量。

(3)打磨车装配有8~120个磨头,磨头角度的组合、功率、速度、遍数是构成打磨方案的主要要素,各要素稍作修改,最终打磨效果就会发生变化。打磨技术的水平主要体现在2个方面:一是根据线路参数、运量、车辆轮对等情况制定定制化目标轮廓,优化轮轨关系;二是打磨方案的合理性、经济性,直观地说就是以最小的切削量实现预设钢轨目标轮廓和钢轨对面平顺性。制定打磨方案的研究趋势是智能打磨,即在全面测量的基础上软件自动生成最优打磨方案。

2.6 机器人智能检查设备的应用

为提高轮对检查智能化水平,部分单位开发了智能机器人检查设备,目前智能机器人在不断学习收集轮对相关故障,不断提高智能检测水平,轮对故障检出率越来越高。未来智能机器人将实现轮对故障自动检测,工程师根据检测故障有针对性地处理发现的故障^[37-40]。

3 结 语

(1)现有传统钢轮钢轨式铁路轮轨系统已有大量成熟的运用经验^[41-60],是在既有条件下轮轨技术相互磨合的结果。随着速度和轴重的提高,轮轨系统还会产生更多新的问题,但也在不断改进和完善中,有些可以在车辆或轨道的专业领域内独立进行,但有些改进必须靠车辆与轨道的协同配合,以免产生系统性相互影响。

(2)本文重点阐述和分析了钢轨波磨和车轮多边形的发生机理,在正确认识问题源头的基础上进行合理的轮轨系统优化。对于轮轨系统的一般磨损和疲劳问题,属于金属材料的研究范畴,仅给予现象的归纳和工程处理方法上的收集。

(3)轮轨作为一个经济和可靠的系统,在未来

的干线、高速和城市大众交通系统中仍将承担主要角色,并可以通过走行部结构的优化、革新和维护技术水平的升级换代继续提升其在交通领域的应用价值。

参考文献:

References:

- [1] 沈钢,钟晓波. 铁路车轮踏面外形的逆向设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 41-47.
SHEN Gang, ZHONG Xiao-bo, Inverse method for design of wheel profiles for railway vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 41-47. (in Chinese)
- [2] 毛鑫,沈钢. 基于轮径差函数的曲线钢轨打磨廓形设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 253-259.
MAO Xin, SHEN Gang. Curved rail grinding profile design based on rolling radii difference function [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(2): 253-259. (in Chinese)
- [3] 周清跃,刘丰收,张银花,等. 高速铁路轮轨匹配存在问题及对策[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(5): 78-84.
ZHOU Qing-yue, LIU Feng-shou, ZHANG Yin-hua, et al. Solutions for problems at wheel-rail interface in high speed railway[J]. China Railway Science, 2017, 38(5): 78-84. (in Chinese)
- [4] 王令朝. 轮轨润滑技术及应用分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(5): 92-95.
WANG Ling-chao. Wheel rail lubrication technology and application analysis[J]. Modern Urban Transit, 2020(5): 92-95. (in Chinese)
- [5] TEMPLE P D, HARMON M, LEWIS R, et al. Optimisation of grease application to railway tracks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(5): 1514-1527.
- [6] 黄立,曾京,李大地,等. 高速动车组晃车现象的主动控制[J]. 机械, 2019, 46(9): 7-10, 69.
HUANG Li, ZENG Jing, LI Da-di, et al. Active control for coach shaking of high-speed EMU[J]. Machinery, 2019, 46(9): 7-10, 69. (in Chinese)
- [7] UYULAN C, GOKASAN M, SETA BOGOSYAN S. Hunting stability and derailment analysis of the high-speed railway vehicle moving on curved tracks[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2019, 26(6): 824-853.
- [8] WANG Shu-shu, SHEN Xiao-meng, TU Xiao-jian. A novel energy-harvesting active radial bogie for railway vehicles: design, simulation and HIL test[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 733: 695-698.
- [9] MATSUMOTO A, SATO Y, OHNO H, et al. Curving performance evaluation for active-bogie-steering bogie with multibody dynamics simulation and experiment on test stand[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S1): 191-199.
- [10] 罗湘萍,田师屹. 主副构架铰接的主动径向转向架曲线通过性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 1-5.
LUO Xiang-ping, TIAN Shi-qiao. Curving performance of active radial bogie with main frame and sub-frame[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(12): 1-5. (in Chinese)
- [11] DI GIALLEONARDO E, CAZZULANI G, STEFANO MELZI S, et al. The effect of train composition on the running safety of low-flatcar wagons in braking and curving manoeuvres[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231(6): 666-677.
- [12] 尧辉明,沈钢,高利君. 基于试验验证的磨耗型钢轨波磨形成机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1427-1432.
YAO Hui-ming, SHEN Gang, GAO Li-jun. Formation mechanism of worn profile rail corrugation based on experimental verification [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(10): 1427-1432. (in Chinese)
- [13] GRASSIE S L, KALOUSEK J. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6): 581-596.
- [14] DANG VAN K D, MAITOURNAM M H, MOUMNI Z, et al. A comprehensive approach for modeling fatigue and fracture of rails[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(17): 2626-2636.
- [15] 钟晓波,沈钢. 高速列车车轮踏面外形优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 710-715.
ZHONG Xiao-bo, SHEN Gang. Optimization for high-speed wheel profiles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 710-715. (in Chinese)
- [16] SHEN Gang, ZHONG Xiao-bo. A design method for wheel profiles according to the rolling radius difference function[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(5): 457-462.
- [17] 沈钢,钟晓波. 铁路车轮踏面外形的逆向设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 41-47.
SHEN Gang, ZHONG Xiao-bo. Inverse method for design of wheel profiles for railway vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 41-47. (in Chinese)
- [18] 叶志森,沈钢. 独立轮踏面外形的设计[J]. 铁道车辆, 2003, 41(1): 19-21.
YE Zhi-sen, SHEN Gang. Design of independently rotating wheel tread shape[J]. Journal of Rolling Stock, 2003, 41(1): 19-21. (in Chinese)
- [19] MAO Xin, SHEN Gang. A design method for rail profiles based on the geometric characteristics of wheel-rail contact[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(5): 1255-1265.
- [20] MAO Xin, SHEN Gang. An inverse design method for rail grinding profiles[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(7): 1029-1044.
- [21] 徐凯,李芾,李东宇,等. 动车组的轮轨型面匹配关系[J].

- 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 389-399.
- XU Kai, LI Fu, LI Dong-yu, et al. Wheel-rail profile matching relationship of EMU train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 389-399. (in Chinese)
- [22] SAWLEY K, WU Hui-min. The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1179-1186.
- [23] 张 斌, 付秀琴. 铁路车轮、轮箍踏面剥离的类型及形成机理[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(2): 76-81.
- ZHANG Bin, FU Xiu-qin. Type and formation mechanism of railway wheel and tire tread spall[J]. China Railway Science, 2001, 22(2): 76-81. (in Chinese)
- [24] ZHAO Xin, WEN Ze-feng, ZHU Min-hao, et al. A study on high-speed rolling contact between a wheel and a contaminated rail[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(10): 1270-1287.
- [25] 张 洪. 准高速客车转向架轮缘磨损原因及改进措施[J]. 铁道车辆, 2000, 38(5): 8-11, 1.
- ZHANG Hong. Causes to the wheel flange wear on quasi-high speed passenger car bogies and the improvement measures[J]. Journal of Rolling Stock, 2000, 38(5): 8-11, 1. (in Chinese)
- [26] XIAO Qian, LUO Zhi-xiang, XU Xu, et al. Research on influence of harmonic wear wheel on wheel/rail contact geometry of high-speed train[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(2): 537-544.
- [27] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements[J]. Wear, 2002, 253(1/2): 89-99.
- [28] 周 宇, 张 杰, 王少锋, 等. 考虑磨损的钢轨疲劳裂纹萌生寿命预测仿真[J]. 铁道学报, 2016, 38(7): 91-97.
- ZHOU Yu, ZHANG Jie, WANG Shao-feng, et al. Simulation on rail head crack initiation life prediction considering rail wear[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(7): 91-97. (in Chinese)
- [29] 周清跃, 张建峰, 郭战伟, 等. 重载铁路钢轨的伤损及预防对策研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 27-31.
- ZHOU Qing-yue, ZHANG Jian-feng, GUO Zhan-wei, et al. Research on the rail damages and the preventive countermeasures in heavy haul railways[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 27-31. (in Chinese)
- [30] CANNON D F, EDEL K O, GRASSIE S, et al. Rail defects: an overview[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2003, 26(10): 865-886.
- [31] YOU R L, GOTO K, NGAMKHANDONG C, et al. Nonlinear finite element analysis for structural capacity of railway prestressed concrete sleepers with rail seat abrasion[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 47-65.
- [32] 董孝卿, 朱韶光, 钱 卿, 等. LMD 车轮外形的直径旋修量影响因素及对应措施研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(5): 12-16.
- DONG Xiao-qing, ZHU Shao-guang, QIAN Qing, et al. Analysis of reprofiling strategy for the LMD wheel tread profile[J]. Railway Locomotive and Car, 2017, 37(5): 12-16. (in Chinese)
- [33] 龚继军, 郭猛刚, 侯 博, 等. 钢轨打磨技术发展现状及打磨策略探讨[J]. 机车电传动, 2020(3): 23-29, 34.
- GONG Ji-jun, GUO Meng-gang, HOU Bo, et al. Discussion on rail grinding technology development situation and grind strategies[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 23-29, 34. (in Chinese)
- [34] 刘彦军, 杨涛存, 武 威, 等. 基于大数据技术的高铁运营安全规律分析系统设计与应用[J]. 中国铁路, 2020(9): 28-33.
- LIU Yan-jun, YANG Tao-cun, WU Wei, et al. Design and application of safety rules analysis system for high speed railway operation based on big data technology[J]. China Railway, 2020(9): 28-33. (in Chinese)
- [35] 张振先, 谭 江, 黄双超, 等. 复杂运行环境下高速轮轨最佳撒砂增黏策略试验[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2): 123-130.
- ZHANG Zhen-xian, TAN Jiang, HUANG Shuang-chao, et al. Experimental study on optimum sanding and adhesion enhancement strategy for high speed wheel and rail under complicated operation environments[J]. China Railway Science, 2020, 41(2): 123-130. (in Chinese)
- [36] 吴 兵, 温泽峰, 王衡禹, 等. 高速轮轨黏着特性影响因素研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(3): 18-22.
- WU Bing, WEN Ze-feng, WANG Heng-yu, et al. Study on factors affecting high-speed wheel-rail adhesion characteristics[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(3): 18-22. (in Chinese)
- [37] WANG Sheng-chun, LUO Si-wei, HUANG Ya-ping, et al. Railroad online: acquiring and visualizing route panoramas of rail scenes[J]. The Visual Computer, 2014, 30(9): 1045-1057.
- [38] 邹文俊. 钢轨打磨技术及磨具研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(2): 1-4.
- ZOU Wen-jun. Research progress of rail grinding technology and abrasives [J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2020, 40(2): 1-4. (in Chinese)
- [39] WANG Meng-Jie, WANG Xi-fu, ZHANG Wen-ying, et al. Research on the special railway intelligence transportation hierarchy and system integration methodology[J]. Sensors and Transducers, 2013, 152(5): 89-97.
- [40] 谢佳奇, 朱家诚, 魏俊杰, 等. 铁路牵引变电所智能巡检机器人的研制[J]. 机床与液压, 2020, 48(15): 12-16.
- XIE Jia-qi, ZHU Jia-cheng, WEI Jun-jie, et al. Development of intelligent inspection robot for railway traction substation[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48(15): 12-16. (in Chinese)
- [41] YANG Yun-fan, LING Liang, WANG Chao, et al. Wheel/rail dynamic interaction induced by polygonal wear of locomotive wheels[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(1): 211-235.
- [42] LEE H W. Generation of airborne wear particles from the wheel-rail contact under wet conditions using a twin-disk rig[J]. Wear, 2020, 448/449: 203236.
- [43] SUN Qi, CHEN Chun-jun, KEMP A H, et al. An on-board detection framework for polygon wear of railway wheel based on vibration acceleration of axle-box[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153: 107540.
- [44] SONG Ying, SUN B C. Recognition of wheel polygon based

- on W/R force measurement by piezoelectric sensors in GSM-R network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 102(2): 1283-1291.
- [45] PENG Bo, IWNICKI S, SHACKLETON P, et al. Comparison of wear models for simulation of railway wheel polygonization[J]. *Wear*, 2019, 436/437: 203010.
- [46] CHI Zhe-xiang, LIN Jing, CHEN Ruo-ran, et al. Data-driven approach to study the polygonization of high-speed railway train wheel-sets using field data of China's HSR train[J]. *Measurement*, 2020, 149: 107022.
- [47] PENG Bo, IWNICKI S, SHACKLETON P, et al. General conditions for railway wheel polygonal wear to evolve[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2021, 59(4): 568-587.
- [48] WANG Jian, LUO Long-fu, YE Wei, et al. A defect-detection method of split pins in the catenary fastening devices of high-speed railway based on deep learning[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9517-9525.
- [49] ALAWAD H, KAEWUNRUEN S, AN Min. A deep learning approach towards railway safety risk assessment[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 102811-102832.
- [50] WEI Xiu-kun, YANG Zi-ming, LIU Yu-xin, et al. Railway track fastener defect detection based on image processing and deep learning techniques: a comparative study[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2019, 80: 66-81.
- [51] MA Shuai, GAO Liang, LIU Xiu-bo, et al. Deep learning for track quality evaluation of high-speed railway based on vehicle-body vibration prediction[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 185099-185107.
- [52] PING Huang, WEN Chao, FU Li-ping, et al. A deep learning approach for multi-attribute data: a study of train delay prediction in railway systems[J]. *Information Sciences*, 2020, 516: 234-253.
- [53] RAGEH A, EFTEKHAR AZAM S, LINZELL D G. Steel railway bridge fatigue damage detection using numerical models and machine learning: mitigating influence of modeling uncertainty[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105458.
- [54] HUANG Xiao-ya, WANG Hao, XUE Wei-hua, et al. Study on time-temperature-transformation diagrams of stainless steel using machine-learning approach [J]. *Computational Materials Science*, 2020, 171: 109282.
- [55] NADARAJAH N, SHAMDANI A, HARDIE G, et al. Prediction of railway vehicles' dynamic behavior with machine learning algorithms[J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2018, 18(1): 38-46.
- [56] GROSSONI I, HUGHES P, BEZIN Y, et al. Observed failures at railway turnouts: failure analysis, possible causes and links to current and future research [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 119: 104987.
- [57] JING Guo-qing, SIAHKOUHI M, EDWARDS J R, et al. Smart railway sleepers—a review of recent developments, challenges, and future prospects[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121533.
- [58] SERRANO-JIMÉNEZ D, ABRAHAMSSON L, CASTAÑO-SOLÍS S, et al. Electrical railway power supply systems: current situation and future trends[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, 92: 181-192.
- [59] VAGNOLI M, REMENYTE-PRESCOTT R, ANDREWS J. Railway bridge structural health monitoring and fault detection: state-of-the-art methods and future challenges[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(4): 971-1007.
- [60] ROTHBAUM D. 5G for the future railway mobile communication system[J]. *ITU News*, 2019, 2019(4): 49-52.