

文章编号: 1005-0523(2022)02-0102-08



高铁有砟线路几何状态维修效果动力学评估

戴宗林

(中国铁路上海局集团有限公司工务部, 上海 200071)

摘要:几何状态控制是高铁有砟线路日常运营维护的重点工作。以合宁高铁现场维修工作为背景,提出高铁有砟线路几何状态维修控制方法,对比分析了维修前后不平顺矢高偏差,并结合高速铁路车辆与轨道动力学分析评估了维修效果,研究结果表明:采用大机捣固、人工精调作业、钢轨打磨等控制方法可有效减小水平、三角坑、轨向、高低等矢高偏差,多数指标改善率均在40%以上,有效改善了高铁有砟线路的平顺性。车轨动力学分析表明,维修后脱轨系数、轮重减载率降低50%左右,车体垂向振动加速度降幅达到了66.67%,有效改善了运行舒适性和安全性。

关键词:高速铁路;有砟轨道;维修方法;轨道不平顺;车轨动力学

中图分类号:U216.4

文献标志码:A

本文引用格式:戴宗林. 高铁有砟线路几何状态维修效果动力学评估[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 102-109.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2022.02.005

Dynamic Evaluation on the Maintenance Effect of High-Speed Railway Ballasted Lines in Geometric Condition

Dai Zonglin

(Works Department, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: The geometric state control of high-speed railway ballasted lines is the key task of daily operation and maintenance. This paper takes the Hefei-Nanjing high-speed railway on-site maintenance work as the background, proposes a geometric state maintenance control method for high-speed railway ballasted lines, compares and analyzes the uneven vector height deviation before and after the maintenance, and evaluates the maintenance effect in combination with the high-speed railway vehicle and track dynamic analysis. The research results show that the use of large machine tamping, manual fine-tuning operation, rail grinding and other control methods can effectively reduce the deviation of level, triangle pit, orbit, vertical vector height, and the improvement rate of most indicators is more than 40%, which effectively improves the running comfort of high-speed railway ballasted lines. The analysis of vehicle-track dynamics shows that the derailment coefficient and wheel load reduction rate after maintenance are reduced by about 50%, and the vertical vibration acceleration of the vehicle body has decreased by 66.67%, which effectively improves the running comfort and safety. The proposed method may provide reference for the maintenance and repair of ballasted high-speed railway.

Key words: high-speed railway; ballasted track; maintenance method; track irregularity; vehicle track dynamics

Citation format: DAI Z L. Dynamic evaluation on the maintenance effect of high-speed railway ballasted lines in geometric condition[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 102-109.

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178430)

有砟轨道作为我国高速铁路轨道的主要类型之一,广泛应用于全国各地。有别于无砟轨道结构不易变形、维修量小的特点^[1-3],有砟轨道是依靠道砟相互挤压摩擦来实现钢轨的支撑功能,而道砟层状态多直接与列车通过总重关联^[4-5],在一定的通过总重下,需要铁路管理部门进行有砟轨道线路维修,以保持高速铁路优良的轨道几何平顺状态。如何进行切实有效地线路几何状态维修作业,保证高速列车安全平稳地运行,是高速铁路工务运维中亟待解决的重要问题。

对于高速铁路有砟轨道几何状态维修问题,国内外学者展开了大量的研究,取得了丰富的研究成果。在有砟高铁线路几何状态整体控制方面,谭社会等^[6]给出了新建高铁有砟轨道平顺性控制策略,并采用实例分析了所提方案的有效性;杨享荣^[7]提出了高铁有砟轨道运营初期轨道设备的维护整治原则;木东升等^[8]则从综合作业的角度,分析了综合作业对轨道不平顺的影响规律。在人工精调方面,申彦军等^[9]对高铁有砟轨道精调方案的评价方法进行分析,实现对轨道精调方案进行定量评价的目的;谭社会等^[10]对钢轨伸缩调节器的状态进行了分析,给出了高铁有砟线路养护钢轨伸缩调节器的要点。在大机捣固方面,文献[11-12]从有砟轨道维修中大机捣固作业的角度分析了控制捣固作业参数对线路轨道平顺性的影响;孙和金等^[13]从大机作业平纵断面优化的角度探讨了有砟轨道不平顺的控制方法;王卫东等^[14]分析了不同捣固次数下道床横纵向阻力变化规律以及横纵向阻力之间的相关性。除上述传统维修问题研究外,还有一些学者通过建立模型进行维修预测,An等^[15]提出了一种改进的轨道几何退化模型,以准确估计每个轨道段的维修周期;Jun等^[16]建立了不同轨道几何不平顺指标的捣固恢复测度模型,并验证了该模型的实用性;Cecilia等^[17]提出了一种车辆-轨道动态相互作用模型,用于预测轨道纵向不平顺的演变并评估沿退化过程的轨道响应。这些研究多是从单一的角度讨论高铁有砟轨道几何状态维修效果的影响因素,且以理论分析为主,较少地涉及具体的作业流程和方案,实践指导意义相对较小。所以,对如何切实有效地进行高铁有砟轨道几何状态控制,尚存在较大的研究空间。

鉴于此,本文以合宁高铁有砟线路维修为背景,提出相应的高铁有砟线路几何状态的控制方

法,对比分析维修前后不平顺指标矢高偏差,结合车辆与轨道动力分析对维修效果进行评估,以期为高铁有砟线路几何状态控制提供技术参考。

1 高铁有砟线路几何状态控制方法

通过对合宁高铁有砟线路生产实践分析,提出从人工精调、大机捣固和钢轨打磨等步骤控制高铁有砟线路几何平顺性。

1) 人工精调。主要包括轨距精调、道岔精调^[18]。轨距精调主要解决轨距不良及不平顺,进而弥补大机捣固无法改善轨距缺陷的缺点。为避免作业互相干扰,保证各组作业安全,大机捣固与人工精调作业可分区作业,轨距精调应在大机捣固前完成。轨距精调时,应结合短波轨向。轨距精调后,轨距单项 TQI 应在 0.25 mm 以内。

对道岔区段精调,应充分利用 CPⅢ 精测网,与前后 200 m 线路进行联测,通过绝对测量得出的轨向调整方案进行人工预拨道,可利用线间距控制拨道量。人工拨道后与设计线形的误差应控制在 5 mm 以内。道岔内轨距不良结合框架及其它部位尺寸进行同步调整。岔区如不采用大机捣固,可采用小型液压捣固机结合人工的方式进行捣固,采用该方式时,须进行逐根枕全断面捣固。起道量利用绝对测量的高程方案,控制起道量应利用电子水准仪。如采用大机捣固,也应采用自动化作业。

2) 大机捣固。目的是通过进行道床捣固,恢复轨道弹性和纵横向阻力,进行起道和拨道恢复轨道几何平顺度,特别是中长波的平顺性^[19]。大机捣固作业主要解决高低、水平、三角坑等主要病害^[20],采取一次插镐逐孔连续捣固方案,方式为第一遍精确法加稳定(标准频率)、第二遍顺平法共两遍的捣固作业模式。大机作业前应进行线路绝对测量,作业方案导入大机采用自动化作业。具体施工节点如图 1 所示(以 240 min 天窗为例)。

3) 钢轨打磨。目的是改善钢轨横断面廓形至设计廓形,提高钢轨纵向平顺度,消除轨面短波不平顺,减小滚动阻力,同时预防钢轨波磨及控制接触疲劳、裂纹扩展^[21]。打磨前应进行廓形设计,并利用作业方案进行自动化作业。对道岔打磨作业盲区和打磨作业的起终点应进行人工打磨顺接,钢轨打磨作业不得中途停机,作业后应立即利用廓形测量仪进行作业验收。具体施工流程如图 2 所示(以 240 min 天窗为例)。

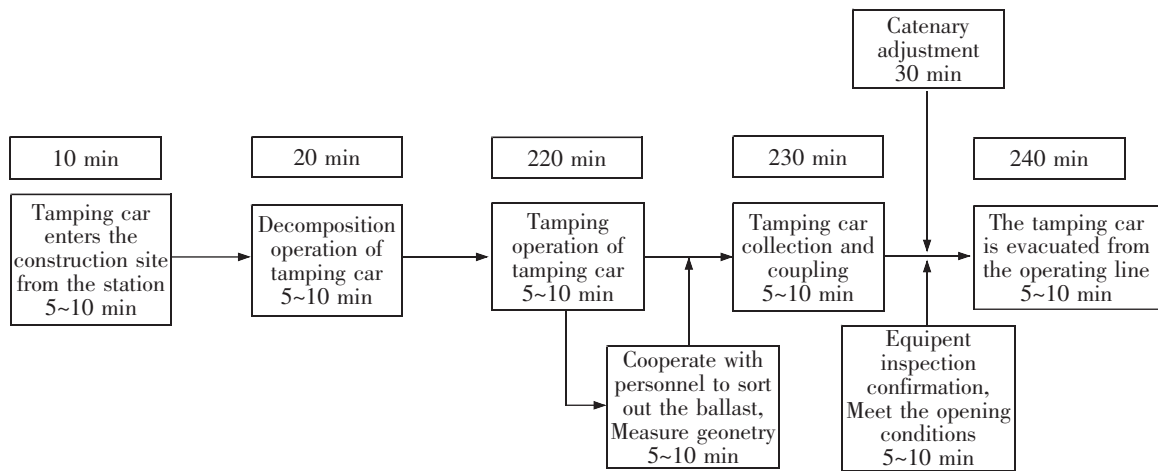


图 1 大机捣固施工节点图

Fig.1 Tamping construction node diagram

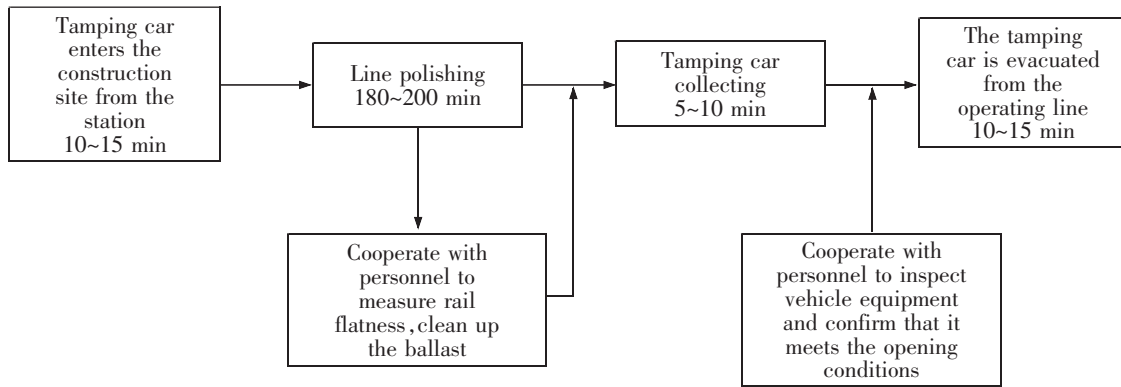


图 2 钢轨打磨施工流程

Fig.2 Rail grinding construction process

2 维修效果分析

2.1 工程概况

合宁有砟高铁位于沪汉蓉快速通道的东段,是国家规划的“八纵八横”快速客运网的重要组成部分。设计为以客为主、客货共线,旅客列车设计行车速度:200 km/h;正线间距(4.6 m)、限界、桥涵、隧道结构物预留提速 250 km/h 条件;货车设计速度 120 km/h。2008 年 1 月货车动态验收最高速度 132 km/h;2008 年 4 月上旬客车动态验收最高速度 282 km/h,2008 年 4 月 18 日正式开通运营。线路主要技术标准见表 1。

合宁有砟高铁线路维修主要根据《高速铁路有砟轨道线路维修规则(试行)》(铁运[2013]29 号)规定,分为线路设备大修和线路设备维修。

1) 线路设备大修。线路设备大修的基本任务是

表 1 合宁铁路主要技术标准

Tab.1 Main technical standards of the Hefei-Nanjing railway

Railway grade	Number of main lines	Minimum curve radius	Maximum gradient
Grade I	Double line	4 500 m	Not more than 6‰
Traction type	Locomotive type	Towing weight	Block type
Electricity	Electric locomotive	Freight 4 000 t	Automatic block

根据运输需要及线路设备损耗规律,有计划、按周期地对线路设备进行更新和修理,恢复和提高线路设备强度,增强轨道承载能力。线路设备大修应贯彻“运营条件匹配,轨道结构强,修理周期合理,线路质量均衡”的原则,坚持全面规划、适度超前、

区段配套的方针,并应采用无缝线路。

2) 线路设备维修。线路设备维修的基本任务是保持线路设备完整和质量均衡,使列车能以规定速度安全、平稳和不间断地运行,并尽量延长线路设备使用寿命。线路设备维修应贯彻“预防为主,防治结合,修养并重”的原则,按线路设备技术状态的变化规律和程度,相应地进行综合维修、经常保养和临时补修,有效地预防和整治线路病害,有计划地补偿线路设备损耗,以取得较好的技术经济效益。

在上述基本规定基础上,采用提出的大机捣固、人工精调和钢轨打磨等线路几何状态维修控制方法。捣固作业前需对有砟线路几何位置进行绝对测量,保证测量数据的精确性。根据精测数据制定捣固方案,并将方案导入捣固大机进行自动化作业。合宁有砟高铁线路捣固采取一次插镐逐孔连续捣固方案,方式为第一遍精确法加稳定(标准频率)、第二遍顺平法共两遍的捣固作业模式,对轨道几何形位进行大幅度调整,将轨道几何形位基本调至设计位置,并满足轨道平顺性验收要求。配砟车在捣固后跟进作业,对道床进行配砟、整形和清扫轨枕面等。动力稳定车可压实捣固后的道床,增加道床横向阻力,提高道床稳定性。全线捣固作业结束后,根据动态轨检车检测数据,分析有砟线路几何状态平顺性,在不良地段进行人工精调以及钢轨打磨作业,有效解决高低、水平、三角坑等主要病害,确保有砟高速铁路的高平顺性运行条件。

2.2 平顺性指标对比

选取合宁铁路上行 K352+800-K354+800 里程段共 2 km 直线有砟线路作为维修效果分析及车轨动力分析研究区段。在车轨动力分析前,对维修前后水平、三角坑等偏差进行对比统计,分析该研究区段维修效果。维修前后水平、三角坑等指标偏差对比如图 3~图 6 所示。

由图 3~图 6 可知,经过维修后该区段线路水平、三角坑等指标偏差显著降低。水平偏差最大值由 2 mm 降为 1.2 mm,改善率达到 40%;水平偏差平均值由 0.69 mm 降为 0.36 mm,改善率达到 47.83%。三角坑偏差最大值由 1.9 mm 降为 1.1 mm,改善率达到 42.11%;三角坑偏差平均值由 0.42 mm 降为 0.22 mm,改善率达到 47.62%。轨向矢高偏差

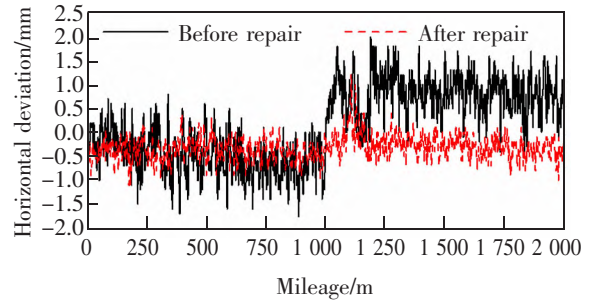


图 3 水平偏差对比图

Fig.3 Horizontal deviation comparison

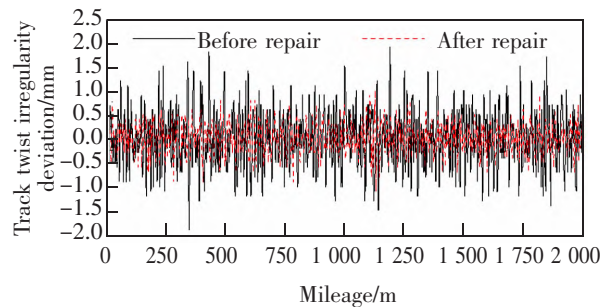


图 4 三角坑偏差对比图

Fig.4 Track twist irregularity deviation comparison

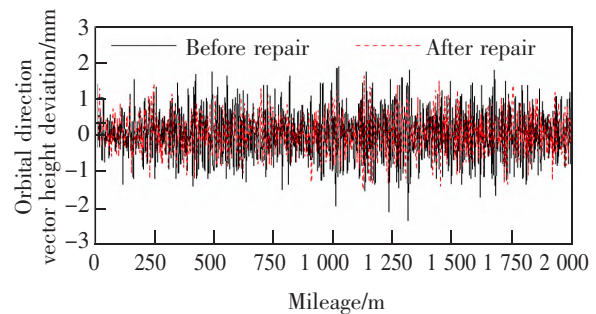


图 5 轨向矢高偏差对比图

Fig.5 Orbital direction vector height deviation comparison

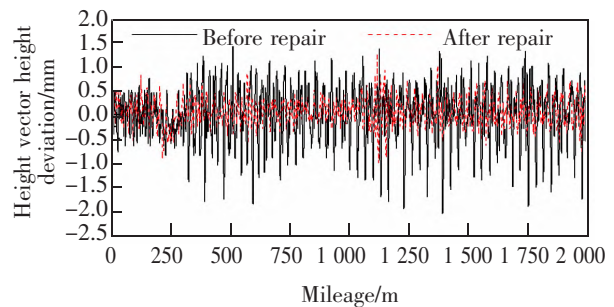
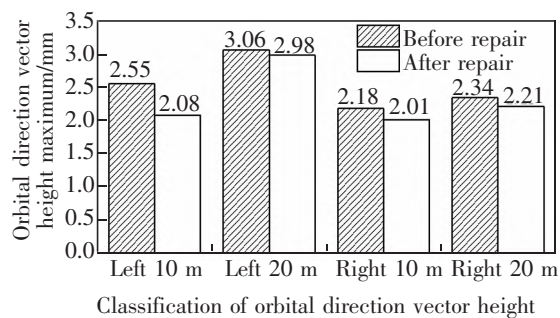


图 6 高低矢高偏差对比图

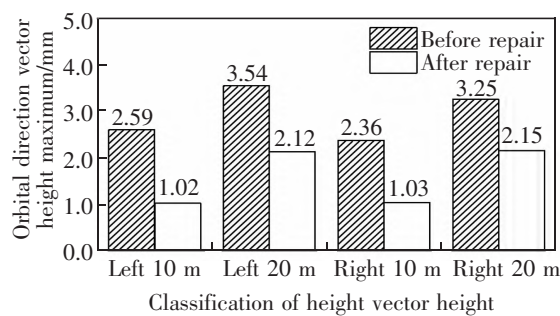
Fig.6 Height vector height deviation comparison

最大值由 2.35 mm 降为 1.6 mm, 改善率达到 31.91%; 轨向矢高偏差平均值由 0.47 mm 降为 0.36 mm, 改善率达到 23.40%。高低矢高偏差最大值由 2.07 mm 降为 1.24 mm, 改善率达到 40.10%; 高低矢高偏差平均值由 0.43 mm 降为 0.21 mm, 改善率达到 51.16%。

通过上述统计对比可以得出, 轨向矢高偏差改善率在 30% 左右, 除轨向矢高偏差外, 其余指标偏差改善率均在 40% 以上。为了进一步探究轨向、高低矢高偏差的变化规律, 分别统计左右轨向、高低的 10 m 弦、20 m 弦正矢偏差最大值, 统计结果如图 7 所示。



(a) Orbital direction irregularities contrast



(b) Height irregularity contrast

图 7 线路维修前后不平顺对比

Fig.7 Comparison of irregularities before and after line maintenance

从图 7 可知, 该区段轨向、高低不平顺经过捣固后都有不同程度的改善。其中轨向不平顺中左轨向 10 m 弦正矢偏差峰值由 2.55 降为 2.08, 改善率 18.43%; 高低不平顺整体改善效果明显, 左高低 10 m 弦正矢偏差峰值由 2.59 降为 1.02, 改善率达到 60.62%。

综上所述, 通过本文高铁有砟线路维修方法可以明显改善线路不平顺偏差, 优化高铁有砟线路的平顺性。

3 维修效果动力学评估

3.1 车轨动力分析模型

建立高速铁路车辆与轨道动力分析模型。车辆模型由车体、构架、轮对、轴箱多个刚体组成。该车辆模型共有 50 个自由度, 见表 2。其中带头的为非独立自由度, 各刚体通过一系悬挂、二系悬挂相连, 此外设置抗蛇形减振器以及抗侧滚扭杆装置, 有效抑制转向架高速蛇行失稳, 提高列车临界速度。车轮采用 LMA 型车轮踏面, 钢轨采用 60D 廓形, 轮轨接触力采用 Kalker 简化滚动接触理论计算轮轨蠕滑力和蠕滑力矩, FASTSIM 算法计算轮轨作用力。重点分析高铁有砟线路维修方法对列车运行安全性和乘坐舒适性指标的影响, 未考虑轨道结构、基础结构的影响^[22]。

表 2 车轨动力分析模型自由度
Tab.2 Vehicle dynamics model degree of freedom

Part	Longitudinal vibration	Lateral vibration	Vertical vibration	Rolling vibration	Yawing hunting	Pitching nodding
Body	x_c	y_c	z_c	ϕ_c	φ_c	θ_c
Bogie	x_s	y_s	z_s	ϕ_s	φ_s	θ_s
Wheel	x_w	y_w	z_w^*	ϕ_w^*	φ_w	θ_w
Swing	-	-	-	-	-	θ_t

3.2 动力学指标分析

车辆模型以 250 km/h 速度通过仿真线路区段, 采用维修前后线路不平顺作为激励分别进行仿真, 从列车运行安全性和舒适性指标进行分析, 安全性指标采用脱轨系数和轮重减载率, 对两项指标进行 20 Hz 低通滤波处理; 舒适性指标采用车体振动加速度, 其中车体垂向振动加速度进行 20 Hz 低通滤波, 车体横向振动加速度进行 0.5~10 Hz 带通滤波或 10 Hz 低通滤波, 0.5 Hz 的截止频率是为了消除车辆通过平面曲线产生的未被平衡加速度对评价结果的影响。相应的计算结果如图 8~图 10 所示。

从图 8 可知, 在维修作业前后, 该区段脱轨系数均小于 0.6, 并且经过维修作业, 该区段脱轨系数整体呈现下降趋势, 其中脱轨系数峰值由维修作业前的 0.14~0.28 下降为 0.08~0.14, 下降率将近 50%。

从图 9 可知, 在维修作业前后, 该区段轮重减载率的最大值集中在 0.06~0.18, 满足轮重减载率安

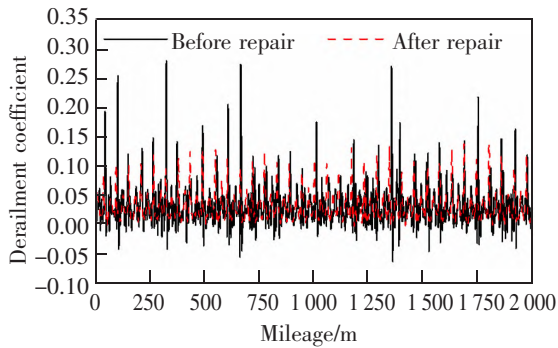


图 8 脱轨系数对比图

Fig.8 Derailment coefficient comparison

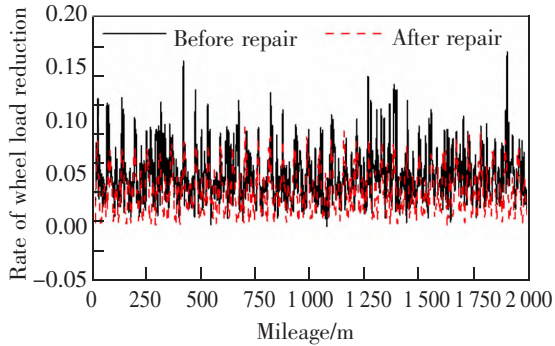
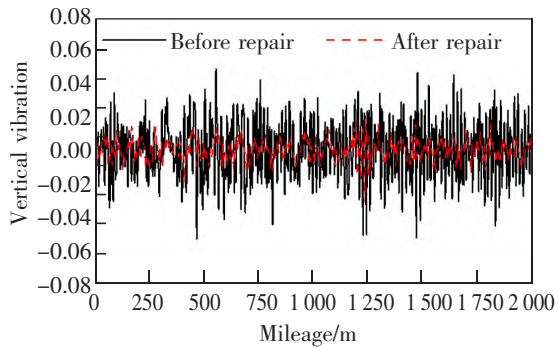
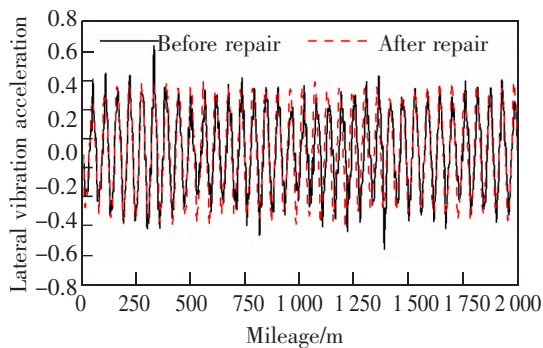


图 9 轮重减载率对比图

Fig.9 Wheel load reduction rate comparison



(a) Vertical vibration acceleration comparison



(b) Lateral vibration acceleration comparison

图 10 车体振动加速度对比

Fig.10 Vehicle body vibration acceleration comparison

全指标允许限度不大于 0.6 的要求, 其中该区段在维修作业前轮重减载率最大值集中在 0.10~0.18, 在维修作业后轮重减载率最大值集中在 0.06~0.09, 下降率将近 50%, 轮重减载率的整体幅值较维修作业前有所降低。

从图 10 可知, 对于车体垂向振动加速度而言, 在维修作业前, 该区段车体垂向加速度绝对值的最大值集中在 0.03~0.06 m/s^2 ; 在维修作业后, 该曲线段车体垂向加速度绝对值的最大值集中在 0.01~0.03 m/s^2 , 下降率将近 66.67%, 经过维修作业, 车体垂向加速度幅值整体降低。对于车体横向振动加速度而言, 该曲线段车体横向加速度绝对值的最大值集中在 0.40~0.65 m/s^2 , 在维修作业后, 该曲线段车体横向加速度绝对值的最大值集中在 0.35~0.46 m/s^2 , 下降率将近 30%, 经过维修作业, 车体横向加速度幅值整体降低。

综上所述, 高铁有砟线路经过本文提出的几何状态控制方法维修后列车运行动态响应汇总对比见表 3。

表 3 维修作业前后列车动态响应最大值

Tab.3 Maximum value of train dynamic response before and after maintenance

Type	Before repair	After repair
Derailment coefficient	0.14~0.28	0.08~0.14
Rate of wheel load reduction	0.10~0.18	0.06~0.09
Lateral vibration acceleration/(m/s^2)	0.40~0.65	0.35~0.46
Vertical vibration acceleration/(m/s^2)	0.03~0.06	0.01~0.03

4 结论

以合宁高铁现场维修工作为背景, 分析了有砟高铁维修方法及效果, 研究得到以下结论。

1) 有砟高铁线路可采用人工精调、大机捣固和钢轨打磨的顺序及方法改善线路几何状态, 维修效果表明: 轨向矢高偏差改善率在 30% 左右, 水平、三角坑、高低矢高偏差改善率均在 40% 以上。

2) 运用车辆与轨道动力分析对维修效果进行了动力学评估, 研究表明: 维修后脱轨系数、轮重减载率降低 50% 左右, 车体垂向振动加速度降低 66.67%, 车体横向振动加速度降低 30%, 有效改善了列车运行安全性和舒适性。

参考文献:

- [1] 翟婉明,赵春发,夏禾,等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. 中国科学:技术科学, 2014,44(7):645-660.
ZHAI W M,ZHAO C F,XIA H,et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety[J]. Science in China:Technical Sciences, 2014,44(7):645-660.
- [2] 李再伟,雷晓燕,高亮. 无砟轨道不平顺对行车安全性影响的可靠性分析[J]. 铁道学报, 2020,42(10):101-105.
LI Z W,LEI X Y,GAO L. Reliability analysis of Impact of ballastless track irregularity on train operation safety[J]. Journal of the China Railway Society, 2020,42(10):101-105.
- [3] 姚力,朱胜阳,韦强文,等. 400 km/h 高速铁路无砟轨道列车竖向设计荷载动力学研究[J]. 高速铁路技术, 2021,12(2):73-78.
YAO L,ZHU S Y,WEI Q W,et al. Study on dynamics of vertical design load for trains on ballastless track of 400 km/h high-speed railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021,12(2):73-78.
- [4] 陈成,孙建,芮瑞,等. 基于有限元的土工格室加固有砟轨道沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019,16(10):2427-2433.
CHEN C,SUN J,RUI R,et al. Numerical study of geocell-reinforced railway ballast under cyclic loading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019,16(10):2427-2433.
- [5] 刘卫星,赵坪锐,毕澜潇,等. 高速铁路有砟轨道轮轨附加动荷载取值研究[J]. 铁道标准设计, 2020,64(5):50-56.
LIU W X,ZHAO P R,BI L X,et al. Study on the value of additional dynamic load of ballast track on high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2020,64(5):50-56.
- [6] 谭社会,毛晓君. 新建高速铁路有砟轨道线路平顺性控制技术[J]. 铁道标准设计, 2019,63(12):1-4.
TAN S H,MAO X J. Newly-built high-speed railway ballastless track line comfort control technology[J]. Railway Standard Design, 2019,63(12):1-4.
- [7] 杨享荣. 高速铁路有砟轨道维护技术研究[J]. 高速铁路技术, 2019,10(2):55-59.
YANG X R. Research on maintenance technology of ballastless track of high-speed railway[J]. High-Speed Railway Technology, 2019,10(2):55-59.
- [8] 木东升,周宇,韩延彬,等. 轨道综合作业对高速铁路有砟轨道几何不平顺改善效果[J]. 交通运输工程学报, 2018,18(5):90-99.
MU D S,ZHOU Y,HAN Y B,et al. Improving the geometric irregularities of ballasted tracks of high-speed railway by comprehensive track operations[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018,18(5):90-99.
- [9] 申彦军,岑敏仪,江来伟,等. 高速铁路有砟轨道精调方案评价方法探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2020,43(5):131-135.
SHEN Y J,CEN M Y,JIANG L W,et al. Discussion on the evaluation method of high-speed railway ballastless track fine adjustment scheme[J]. Surveying and Spatial Information Technology, 2020,43(5):131-135.
- [10] 谭社会,林超,梅琴. 高速铁路有砟轨道钢轨伸缩调节器运营状态研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021,18(4):837-843.
TAN S H,LIN C,MEI Q. Research on the operating status of ballastless track rail expansion regulators of high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18(4):837-843.
- [11] 张皓然,何越磊,李再伟,等. 考虑波长因素的提速线路捣固作业质量评价方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021,18(3):653-661.
ZHANG H R,HE Y L,LI Z W,et al. Research on the quality evaluation method of speed-up line tamping operation considering wavelength factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18(3):653-661.
- [12] 王英杰,楚杭,时瑾等. 有砟高铁大机捣固质量相关性及其敏感波长研究[J]. 铁道工程学报, 2021,38(1):37-41.
WANG Y J,CHU H,SHI J,et al. Research on the relevance of tamping quality and sensitive wavelength of ballastless high speed railway large machine[J]. Chinese Journal of Railway Engineering Society, 2021,38(1):37-41.
- [13] 孙和金,张杰. 高速铁路有砟轨道不平顺的解决方法[J]. 中国铁路, 2017(9):47-51.
SUN H J,ZHANG J. Solutions to the irregularities of ballastless track of high-speed railway[J]. China Railway, 2017(9):47-51.
- [14] 王卫东,宋善义,颜海建,等. 不同捣固阶段有砟道床阻力特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,49(8):2003-2008.
WANG W D,SONG S Y,YAN H J,et al. Experimental study on resistance characteristics of ballastless beds in different tamping stages[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2018,49(8):2003-2008.
- [15] AN R,SUN Q X,WANG F T,et al. Improved railway track geometry degradation modeling for tamping cycle prediction[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A:Systems, 2018,144(7):1-11.

- [16] JUN S LEE, YOON CHOI, KYUM KIM, et al. Tamping and renewal optimization of ballasted track using track measurement data and genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2018, 144(3): 1-8.
- [17] CECILIA VALE, RUI CALADA. A dynamic vehicle-track interaction model for predicting the track degradation process[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20(3): 1-13.
- [18] 魏晖, 吴仕凤, 朱洪涛. 基于相对测量调轨的高速铁路有砟线路整道技术研究[J]. 铁道标准设计, 2013(8): 11-15.
WEI H, WU S F, ZHU H T. Research on ballast trimming technology based on relative measurement method for ballast track of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2013(8): 11-15.
- [19] 许玉德, 赵梓含, 乔雨, 等. 大机捣固养修作业计划多目标决策模型[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(3): 55-63.
XU Y D, ZHAO Z H, QIAO YU, et al. Multi-objective decision model for tamping maintenance plan of ballast track[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(3): 55-63.
- [20] 杨飞. 基于高低不平顺的线路捣固作业维修标准及决策技术研究[J]. 铁道建筑, 2017(7): 131-135.
YANG F. Research on maintenance standard and decision-making technique for tamping operation based on longitudinal irregularity[J]. Railway Engineering, 2017(7): 131-135.
- [21] 樊文刚, 刘月明, 李建勇. 高速铁路钢轨打磨技术的发展现状与展望[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 184-193.
FAN W G, LIU Y M, LI J Y. Development status and prospect of rail grinding technology for high-speed railway[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 184-193.
- [22] 时瑾, 孙征南, 孙宪夫, 等. 现行 350 km/h 高铁线路技术条件运营 400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2171-2180.
SHI J, SUN Z N, SUN X F, et al. Research on the adaptability of 400 km/h high-speed train operating under current technical conditions of 350 km/h high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2171-2180.



第一作者:戴宗林(1977—),男,高级工程师,研究方向为高速铁路线路维护、精密工程测量。中国铁路上海局集团有限公司工务部副主任,铁道部火车头奖章获得者。2009年本科毕业于安徽建筑工程学院,2018年工程硕士毕业于同济大学交通运输学院。E-mail:zonln39@163.com。

(责任编辑:刘棉玲)