

钢轨廓形打磨关键环节及智能化实现

王军平^{1,2}, 沈 钢¹, 毛 鑫¹, 蒋 俊²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 中铁物总运维科技有限公司, 北京 100036)

摘要: 对钢轨廓形打磨的实施流程进行了阐述, 并对目标廓形设计、打磨模式设计和结果验收评价等关键环节进行了分析, 提出了各环节设计方法, 开发了相关计算机智能设计程序, 基于实际案例, 对现场实施效果进行了观测分析。结果表明, 对钢轨打磨各关键环节设计方法的优化可大幅提升钢轨打磨作业的针对性; 计算机智能化设计程序的开发可大幅提升钢轨打磨方案的设计效率和实施精度; 昆明铁路局广通至大理铁路线采用智能化设计方法打磨后, 小半径曲线钢轨和机车轮缘严重磨耗问题得到了有效解决, 现场试验与理论分析结果基本吻合。

关键词: 钢轨打磨; 现场试验; 廓形设计; 钢轨磨耗

中图分类号: U211.5

文献标志码: A

Key Links and Intelligent Realization of Rail Profile Grinding

WANG Junping^{1,2}, SHEN Gang¹, MAO Xin¹, JIANG Jun²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Railway Materials Operation and Maintenance Technology Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: The implementation process of rail profile grinding was described. The key links of target profile design, grinding mode design and result acceptance evaluation were analyzed. The design methods of each link were proposed and the relevant computer intelligent design program was developed. The on-site implementation effects were observed and analyzed based on actual cases. The results show that the optimization of the design methods for each key link of rail grinding can greatly improve the pertinence of rail grinding operation. The development of computer intelligent design program can greatly improve the design efficiency and implementation accuracy of rail grinding schemes. After the intelligent design methods were adopted in the Guangtong-Dali Line of Kunming Railway Bureau, the serious wear problems of small radius curve rail and

locomotive wheel flange were effectively solved, the results of field test and theoretical analysis are basically consistent. The application of this method can effectively control the wear of rail and wheel, prolong the service life of rail and delay the wheel turning cycle.

Key words: rail grinding; field test; profile design; rail wear

钢轨是轨道交通线路的重要组成部分之一, 轨道交通车辆全部载荷都通过钢轨传递到线路, 是线路中直接受力的元部件。钢轨在车辆运行过程中会逐渐出现磨耗、疲劳、波磨等多种形式的钢轨病害^[1-4]。当钢轨病害发展到一定程度时需要对其进行更换, 以确保车辆运行的安全。由于钢轨更换成本较高^[5], 因此钢轨的养护维修和病害日常预防显得非常重要。截至 2019 年底, 我国铁路营业里程已超 13.9 万 km, 其中高速铁路运营里程为 3.5 万 km 左右^[6]。铁路网的日益扩大对应着钢轨使用量的日益增加, 也意味着钢轨日常养护维修工作量的增加和换轨成本的提高。因此, 如何有效延长钢轨使用寿命是铁路系统需要迫切解决的问题之一。

随着铁路线路管理要求的日趋严格, 相关规范中对线路几何参数及其偏差做出了明确限定, 轨道几何参数调整、线路基础整治等传统工务维修手段继续优化的空间相对有限, 因此钢轨打磨等新兴钢轨运维方法逐渐成为铁路工务部门所重视和依赖的重要手段^[7-9]。近年来, 国内外学者专家对钢轨打磨进行了大量研究, 普遍认为打磨是钢轨上道使用后控制钢轨病害的产生和发展、改善轮轨作用关系的高效可行的手段之一, 其应用对钢轨使用寿命的延长具有重要意义。我国根据实际需要, 提出了个性化钢轨廓形打磨技术^[10]等针对性较强的精细化打磨方式方法, 对钢轨病害的控制、轮轨关系的优化和钢

收稿日期: 2020-11-24

第一作者: 王军平(1988—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为轮轨关系及钢轨打磨。

E-mail: wjp0938@163.com



论文
拓展
介绍

轨使用寿命的延长起到了较好的效果。

虽然钢轨打磨的应用已较为普遍,但其施工工艺等关键环节还缺乏可参考的规范,钢轨打磨的智能化程度也有待加强。本文基于个性化钢轨廓形打磨技术,对钢轨打磨的关键环节及其智能化进行研究。

1 钢轨打磨关键环节

钢轨廓形打磨的设计和实施流程如图1所示,首先通过对现场磨耗状态下车轮型面和钢轨廓形的

测量,确定轮轨接触的实际情况和存在的问题,再基于相关的设计方法,得到较为理想的钢轨打磨目标廓形,之后便可进行打磨作业。打磨主要依靠打磨车等设备进行,作业时需要将目标廓形转化为打磨设备可实施的方案,即打磨模式,完成打磨后,需要对打磨结果进行评判,以确定打磨目标廓形是否得到了较好的实现。在整个实施流程中,目标廓形设计、打磨模式设计和打磨结果的验收评价是最为关键的3个环节,直接影响到打磨作业的质量。同时由于线路运行车辆众多,不同区段钢轨廓形差异较大,因此设计中的智能化也是关键的环节之一。

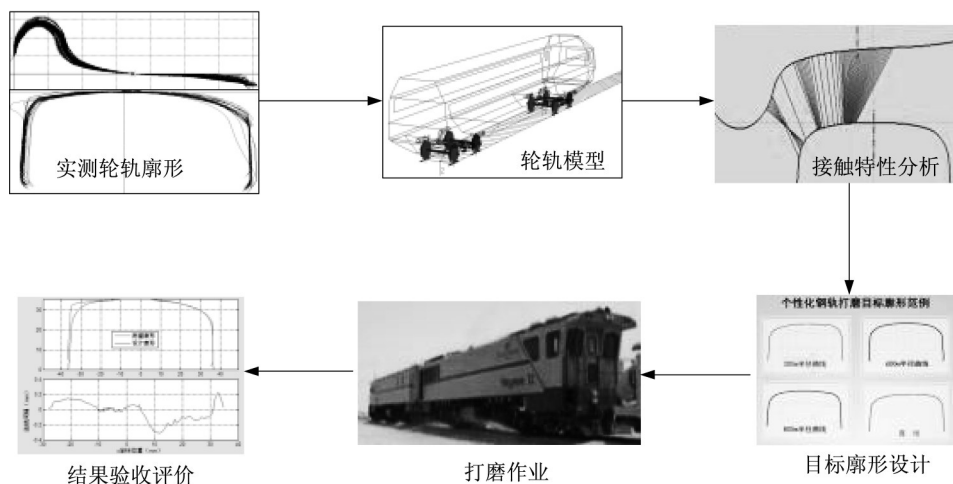


图1 钢轨廓形打磨实施流程

Fig. 1 Implementation process of rail profile grinding

2 打磨目标廓形设计

由于车轮磨耗状态不尽相同,导致其型面也差异较大,但对具体的铁路线路而言,如某条直线或曲线,每一股钢轨对应廓形只能有一个,因此打磨目标廓形的设计需要考虑如何让单一的钢轨廓形能够更大幅度地适应不同磨耗状态的车轮型面,这也是个性化钢轨打磨目标廓形设计方法与其他设计方法的主要区别之一。个性化钢轨打磨目标廓形设计流程如图2所示。

图2中目标廓形库可采用反推法等方法进行设计,即先将实测车轮型面按一定的偏差梯度(根据现场应用经验,普速铁路建议不大于0.3 mm,高速铁路建议不大于0.2 mm)进行分类,再参照文献[11]的方法比选出每一类中的代表廓形。车轮型面偏差梯度越小,所分类别越多,对应选择出的代表廓形的样本容量越大,误差也越小。当车轮型面分为 n 类

时,即产生 n 个车轮代表廓形,对应可反推出由 n 个钢轨目标廓形组成的廓形库;当车轮型面偏差无限小时, n 与车轮总数相同。

由车轮型面反推设计钢轨廓形时,先计算需要优化的轮轨接触几何特性。以轮径差函数为例,先计算实测车轮型面与实测钢轨廓形接触时的轮径差曲线,再对该曲线进行优化,优化后的曲线即可作为设计时的目标函数。采用相关算法^[12]进行反推计算,即可得到钢轨目标廓形。通过计算机程序实现上述设计过程,即可实现钢轨打磨目标廓形设计的智能化,如图3所示。

3 打磨模式设计

目前,国内外钢轨打磨车主要采用96磨头或48磨头打磨车,以杯型砂轮为打磨单元,打磨原理如图4所示。通过多个磨头的包络,可在去除金属的同时

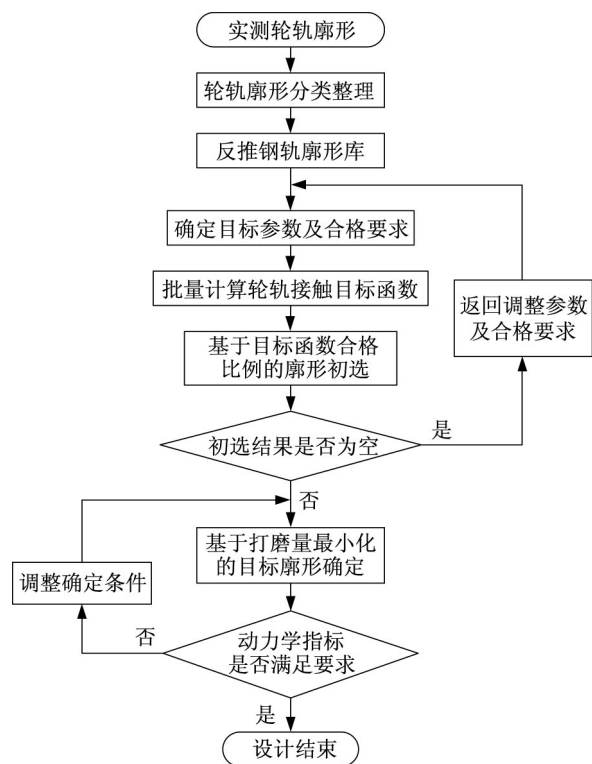


图2 设计流程

Fig. 2 Flowchart of design

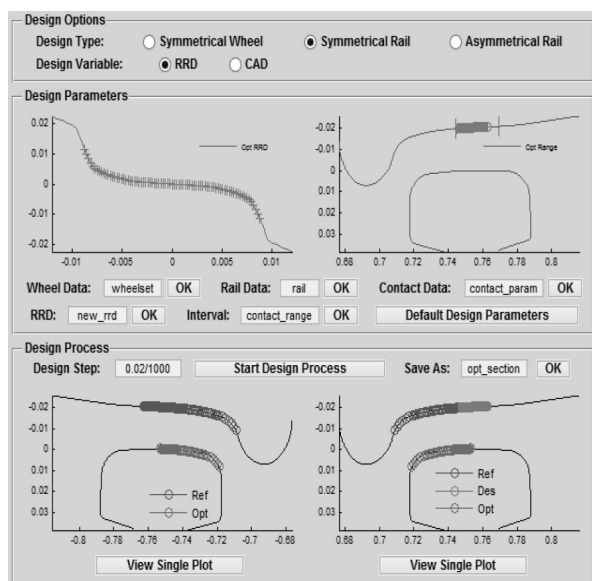


图3 廓形设计软件界面

Fig. 3 Software interface of profile design

将钢轨廓形修正至设计的目标廓形。打磨中轨头各区域的打磨量,打磨模式的排布等都会对打磨效果产生影响,因此在钢轨打磨实施阶段,需要根据目标廓形,将实测钢轨的打磨量精确转化为打磨车的输入参数,以确保打磨效果。

打磨车作业时的输入参数主要有打磨电机的功

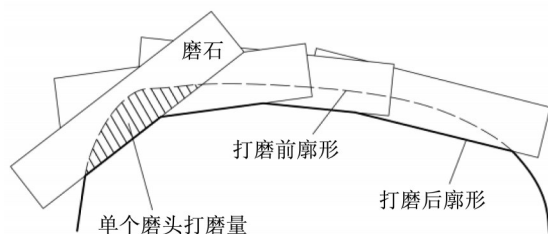


图4 钢轨打磨示意图

Fig. 4 Diagram of rail grinding

率 P (GMC-96x型打磨车)、打磨车运行速度 v 、磨头偏转角度 α 等。除此之外,影响打磨量的因素还有钢轨硬度、磨石性能、钢轨表面粗糙度等。通常情况下,打磨量与打磨速度、钢轨硬度成反比,与打磨功率成正比,因此单个磨头打磨量 M 可表示为

$$M = k \frac{P}{v\alpha} \quad (1)$$

式中: k 为调整系数。

对于同一线路单次打磨而言,钢轨硬度、钢轨表面粗糙度、磨石性能等一般都保持不变,因此可通过打磨前的打磨试验将其影响确定为常数,在 k 值中进行体现,或根据打磨作业中打磨量的偏差情况及时进行调整。其他打磨参数对打磨量的影响可通过大量打磨试验确定。

以GMC-96x型打磨车为例,打磨磨头数为每侧48个,共计96个,打磨车作业时常用参数范围为:运行速度 $12 \sim 18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,打磨功率 $50\% \sim 100\%$ (22 kW),角度范围 $-20^\circ \sim 60^\circ$ (“-”表示钢轨外侧),因此设计结果需要满足上述打磨车作业条件,即需要将打磨模式设计为每侧48个不同的角度组合。设计模式以打磨遍数最少,打磨后轨面粗糙度、轨面残留磨头磨面宽度最小,打磨质量满足相关规范要求为宜。

为实现钢轨打磨作业的智能化,开发了钢轨打磨模式智能设计系统,如图5所示。设计系统可实现对不同目标廓形下大量实测廓形的打磨模式智能化设计,将设计结果输出为打磨车可直接执行的打磨方案,进而指导打磨车进行打磨作业。

4 打磨结果验收

打磨作业完成后,需要对作业质量进行评价,评估是否在偏差允许范围内将钢轨廓形打磨至设计的目标廓形。目前我国钢轨打磨相关验收标准中均以打磨后廓形和设计廓形的偏差值作为验收标准,以



图5 打磨模式设计软件界面

Fig. 5 Software interface for grinding patterns design

高速铁路验收标准为例,偏差值要求如表1所示

表1 廓形偏差验收标准

Tab. 1 Acceptance criteria for profile deviation

运行速度/(km·h ⁻¹)	轨头横向-25 mm~25 mm范围内偏差/mm	轨头横向25 mm~32 mm范围内偏差/mm
<200	+0.3/-0.3	+0.3/-0.6
≥200	+0.2/-0.2	+0.2/-0.6

现行验收标准虽然对打磨后廓形偏差提出了要求,但是在工程实施中仍存在如下问题:

(1)虽提出了廓形偏差容许偏差,但只能对是否满足要求进行定性评价,无法实现直观或量化评价。

(2)对偏差值未超过允许值的廓形无法进行进一步打磨质量的评价。

如图6所示,3个廓形为同一线路直线段(速度<200 km·h⁻¹)打磨后的实测廓形,0~25 mm范围内与设计廓形的偏差如图7所示。由图7可知,其偏差值均在标准要求的±0.3 mm范围内,因此按照现行验收标准,都将评定为“合格”,但可以明显看出,廓形1与目标廓形的偏差值整体较小,明显优于廓形2和廓形3。

为解决上述问题,本文提出基于GQI(grinding quality index)的验收方法。计算时,首先将钢轨轨头划分为 n 个区域,确定每个区域的偏差带限值,再计算各区域内实测廓形与目标廓形的法向偏差和面积偏差,具体计算公式为

$$I_{GQ} = K_1 G_D + K_2 G_A \quad (2)$$

式中: I_{GQ} 为GQI值; K_1 和 K_2 为权重系数,满足 $K_1 + K_2 = 1$; G_D 为廓形法向偏差指数; G_A 为面积偏差

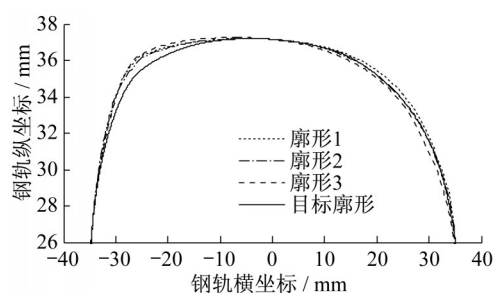


图6 钢轨廓形实例

Fig. 6 Example of rail profile

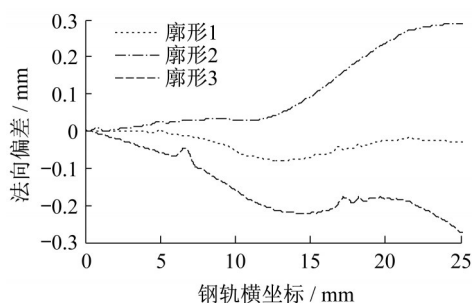


图7 廓形偏差

Fig. 7 Profile deviation

指数。

G_D 和 G_A 的计算方法分别为

$$G_D = \frac{\sum k_i d_i}{\sum k_i D_i} \times 100 \quad (3)$$

$$G_A = \begin{cases} 0 & A_{\text{real}} > A_{\text{max}} \\ (1 - \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{max}}}) \times 100 & A_{\text{real}} \leq A_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: d_i 为区域内未超过偏差限值的数据点数; D_i 为各区域偏差计算的总点数; k_i 为各区域的权重系数,有 $\sum k_i=1$; A_{\max} 为各区域偏差带限值形成的面积, mm^2 ; A_{real} 为各区域实测廓形与设计廓形偏差曲线形成的实际面积, mm^2 。

由上述GQI算法可知,计算时设置了偏差指数 G_D 和面积指数 G_A ,考虑了打磨后实测廓形与目标廓形的法向偏差值和二者所围成的面积,只有当打磨

后实测廓形和设计廓形完全重合时, I_{GQ} 才能达到满分;否则,即使廓形偏差值满足偏差限值的要求,即偏差指数 $G_D=100$,由于面积偏差的存在, G_A 无法达到满分状态,则 I_{GQ} 也无法达到满分状态,此时便能较好地地区别实测廓形与设计廓形之间的差异。

开发的计算机智能化计算程序如图8所示。对图6中所示廓形进行GQI计算,结果如表2所示。由表2可知,3个廓形的打磨质量得到了较好的区分。

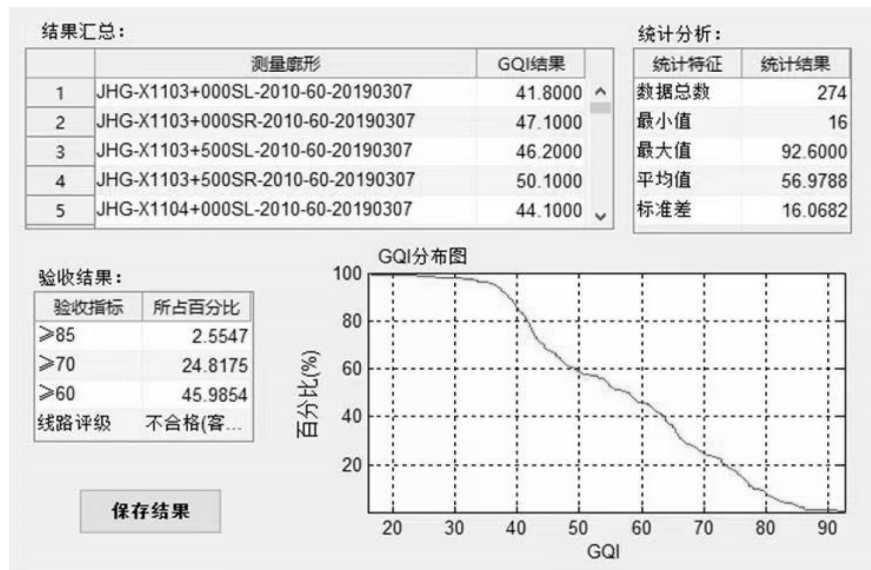


图8 打磨结果验收软件界面

Fig. 8 Acceptance software interface for grinding results

表2 GQI计算结果

Tab. 2 GQI calculation results

廓形编号	1	2	3
I_{GQ}	95.9	83.5	70.7

5 应用实例

以中国铁路昆明局集团有限公司所属的广(通)大(理)铁路为例,对上述钢轨打磨方法实施效果进行分析。广大线为客货混运单行山区铁路,线路中隧道、桥梁较多,允许运行速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,试验区段铺设 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 标准廓形钢轨,年通过总重约 40.4 Mt 。实施廓形打磨前,线路存在小半径曲线上股钢轨侧磨严重和所运行HXN5型机车车轮轮缘磨耗速率较快的问题。

打磨前试验曲线(半径 500 m ,超高 70 mm ,曲线长 429.33 m ,缓和曲线长 80 m ,坡度 2.13%)上股轨面状态如图9a所示,由图9a可知,打磨前钢轨轨距角(钢轨光带下沿)存在明显的轮轨接触痕迹,同时

还存在疲劳掉块现象,可见轮轨轨距角接触较为明显,也正因如此,钢轨侧磨和车轮轮缘磨耗现象较为严重。图9b所示为廓形打磨后1个月时的轨面状态,由图9b可知,打磨后钢轨轨距角处的接触光带“消失”,取而代之的是黑色的机车涂油痕迹,而该线路打磨前后曲线均存在机车涂油现象,只是打磨前的涂油痕迹因机车后方车辆的轮轨接触而消失。图9c所示为打磨后5个月时的轨面状态,由图9c可见,打磨后5个月时轨面状态和轨距角接触现象与打磨后1个月时基本保持不变,打磨效果得到了较好的保持。由此可见,通过钢轨廓形打磨,钢轨轨距角轮轨接触现象得到了有效控制。

图10所示为实测磨耗状态车轮(512对)通过曲线上股时轮轨接触位置分布仿真分析结果。由图10a可知,打磨前轮轨接触位置主要分布在轨顶至钢轨内侧轨侧区域,其中轨顶和轨侧出现了两个主要接触区域,说明在打磨前,有大量车轮通过曲线时轮轨接触主要发生在钢轨内侧和轨顶,形成两点接触

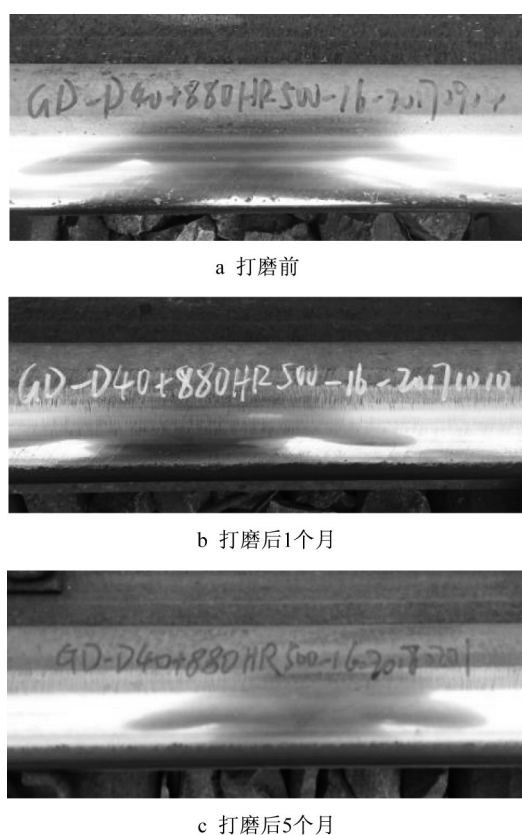


图9 轨距角接触情况对比

Fig. 9 Comparison of gauge corner contact

现象,根据轮轨两点接触机理可知^[13],此时便会出现较为严重的钢轨侧磨和对应车轮轮缘磨耗现象。

由图10b可知,钢轨廓形打磨后,轮轨接触位置分布向钢轨工作边进行了移动,轨侧接触概率明显下降,主接触位置分布在了钢轨内侧。由相关轮轨接触理论可知,此时较易出现轮轨贴合式两点接触,在消除了两点接触引起的严重侧磨的同时可避免轮轨接触应力过大导致的疲劳问题。可见基于实测车轮的轮轨接触位置分布仿真分析结果与图9中现场观测结果相吻合。

图11所示为廓形打磨前后钢轨和车轮磨耗速率对比情况,打磨前曲线上股侧磨、上股垂磨、下股垂磨速率分别为0.186、0.131和0.086 mm·月⁻¹,打磨后分别下降为0.051、0.058和0.038 mm·月⁻¹,下降幅度分别为71.8%、55.4%和56.1%。HXN5型机车轮缘磨耗速率从打磨前的0.59 mm·月⁻¹下降至打磨后的0.12 mm·月⁻¹,下降幅度为79.7%。可见通过钢轨廓形打磨,钢轨和车轮磨耗情况均得到了大幅改善,尤其是曲线上股钢轨侧磨和机车轮缘磨耗速率,均下降70%以上,打磨后线路中存在的钢轨侧磨和机车轮缘磨耗过快问题得到了有效

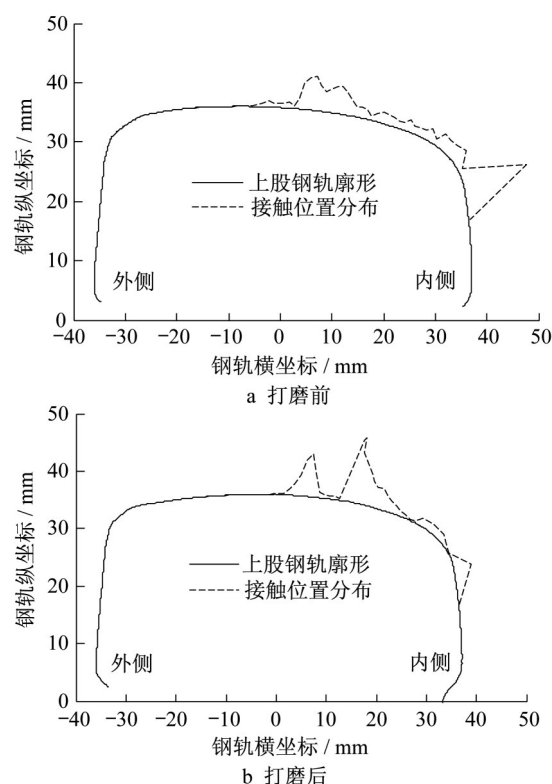


图10 轮轨接触位置分布

Fig. 10 Distribution of wheel-rail contact position

改善。

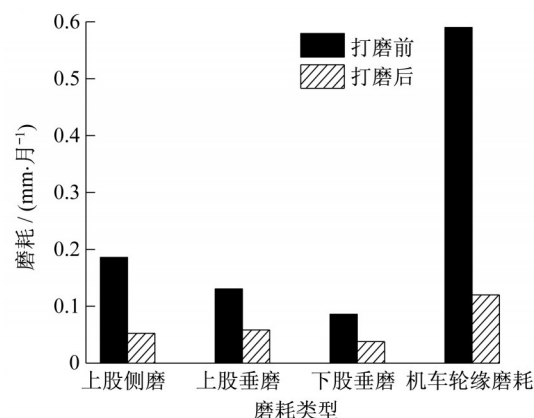


图11 轮轨磨耗速率对比

Fig. 11 Comparison of wheel-rail wear rates

6 结论

基于个性化钢轨廓形打磨技术,结合实际应用案例,对钢轨廓形打磨过程中的关键环节进行了介绍,同时针对打磨实施中的大数据量问题,开发了各个环节的计算机智能化设计系统,并对现场实施效果进行了观测分析,可得出如下结论:

(1)钢轨打磨目标廓形设计、打磨模式设计、打

磨结果验收是钢轨打磨工作中最主要的3个环节,对各个环节的设计、计算方法的优化可大幅提升钢轨打磨作业的针对性。

(2)由于现场磨耗车轮廓形差异较大,根据单个代表性车轮设计目标廓形的方法无法满足实际需求,因此需要在设计钢轨打磨目标廓形时,先设计钢轨廓形库,再通过仿真计算比选出与实测车轮匹配时轮轨接触特性合格比例最高的钢轨廓形,并以此作为钢轨打磨目标廓形,可有效提升设计目标廓形的适用性。

(3)进行打磨结果验收时,通过以实测廓形与目标廓形的偏差值和偏差面积的综合加权得到的GQI指标可较好反映打磨质量,且能对打磨允许偏差范围内的廓形质量进行量化评价,具有较强的工程实用性。

(4)由于钢轨打磨时数据量巨大,本文对打磨目标廓形设计、打磨模式设计和打磨结果验收等关键环节进行优化,并开发了计算机智能实施系统,有效提升了钢轨打磨方案设计的效率。

作者贡献说明:

王军平:主体研究,文稿撰写。

沈 钢:研究指导,文稿确定。

毛 鑫:算法优化,文稿修改。

蒋 俊:现场试验,文稿修改。

参考文献:

- [1] XU Lei, ZHAI Wanming, GAO Jianmin. Global sensitivity analysis for vehicle-track interactions: special attention on track irregularities [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2018, 13(3): 031007.
- [2] 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.
ZHOU Qingyue, ZHANG Jianfeng, GUO Zhanwei, *et al.* Research on the rail damages and the preventive countermeasures in heavy haul railways [J]. *China Railway Science*, 2010, 31(1): 27.
- [3] 任利平. 曲线钢轨侧磨原因及预防措施[J]. *铁道建筑*, 2004 (12): 47.
REN Liping. Cause of side-wear of rails in curves and preventive measures [J]. *Railway Engineering*, 2004(12): 47.
- [4] 刘学文, 邹定强, 邢丽贤, 等. 钢轨踏面斜裂纹伤损原因及对策的研究[J]. *中国铁道科学*, 2004, 35(2): 83.
LIU Xuewen, ZOU Dingqiang, XING Lixian, *et al.* Causes of rail tread oblique crack and countermeasures [J]. *China Railway Science*, 2004, 35(2): 83.
- [5] 田常海, 张金, 俞喆, 等. 普速铁路钢轨服役状态评估方法及应用效果[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(2): 127.
TIAN Changhai, ZHANG Jin, YU Zhe, *et al.* Assessment method of rail service state for common speed railway and its application effect [J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(2): 127.
- [6] 牛道安, 柯在田, 刘维桢, 等. 高速铁路基础设施检测监测体系框架研究[J]. *中国铁路*, 2020 (10): 9.
NIU Daoan, KE Zaitian, LIU Weizhen, *et al.* Research on the inspection and monitoring system framework of high speed railway infrastructure [J]. *China Railway*, 2020(10): 9.
- [7] 金学松, 杜星, 郭俊, 等. 钢轨打磨技术研究进展[J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(1): 1.
JIN Xuesong, DU Xing, GUO Jun, *et al.* State of arts of research on rail grinding [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(1): 1.
- [8] JUDE T. To grind or not to grind? [J]. *Railway Age*, 2002, 203(11): 33.
- [9] MAGEL E, RONEY M, KLOUSEK J, *et al.* The Blending of theory and practice in modern rail grinding [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26 (10): 921.
- [10] 王军平, 单连琨, 丁军君, 等. 个性化钢轨廓形打磨方法分析[J]. *铁道建筑*, 2015(11): 131.
WANG Junping, SHAN Liankun, DING Junjun, *et al.* Analysis on method of personalized rail profile grinding [J]. *Railway Engineering*, 2015(11): 131.
- [11] 丁军君, 吴朋朋, 王军平, 等. 基于轮轨关系的钢轨打磨代表廓形计算方法研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(7): 135.
DING Junjun, WU Pengpeng, WANG Junping, *et al.* Study on algorithm of representative profile for rail grinding based on wheel-rail relationship [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(7): 135.
- [12] 王军平, 沈钢, 毛鑫, 等. 基于轮径差的直线钢轨廓形优化设计方法[J]. *中国铁路*, 2018(11): 80.
WANG Junping, SHEN Gang, MAO Xin, *et al.* The optimized design method of straight rail profile based on rolling radii difference [J]. *China Railway*, 2018(11): 80.
- [13] 金鼎昌, 罗赞, 孙翔. 轮轨两点接触的简易计算方法[J]. *西南交通大学学报*, 1988, 3(3): 51.
JIN Dingchang, LUO Yun, SUN Xiang. A simplified method for calculating wheel/rail two-point contact [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1988, 3(3): 51.