

文章编号: 1005-0523(2021)03-0089-06

钢轨铣磨车 60D 廓形刀盘设计和验证研究

毛文力¹, 吴琰超², 许玉德², 钱海¹, 周宇²

(1. 上海铁路局上海大机运用检修段, 上海 200439; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 钢轨铣磨是一种有效修复钢轨廓形、消除轨面伤损的作业方法。铣磨对钢轨廓形的修复是通过将刀粒根据目标钢轨廓形排列在刀盘上, 再由铣磨车驱动刀盘沿轨面纵向铣削来实现的。钢轨铣磨的廓形依赖于铣磨刀盘上刀粒的排列布局。根据逆向工程设计原理, 采用 3D 扫描技术还原铣磨车刀盘及其刀粒组合特征; 结合钢轨打磨 60D 设计廓形对刀粒在刀盘上的布局进行调整; 之后对该刀粒布局与 60D 廓形的贴合度进行验证。对设计的 60D 廓形刀盘进行现场测试, 结果显示该刀盘铣磨效果较好, 轨头顶部 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 单次铣磨量在 1 mm 左右, 铣磨误差小于 0.3 mm。

关键词: 钢轨铣磨; 60D 廓形; 刀盘

中图分类号: U216

文献标志码: A

本文引用格式: 毛文力, 吴琰超, 许玉德, 等. 钢轨铣磨车 60D 廓形刀盘设计和验证研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 89-94.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.005

Design and Verification of 60D Profile Facing Cutter of Rail Milling Train

Mao Wenli¹, Wu Yanchao², Xu Yude², Qian Hai¹, Zhou Yu²

(1. Shanghai Checking and Repairing Depot of Large-Sized Machine Maintenance and Application, Shanghai 200439;
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Rail milling is an effective way to repair rail profile and eliminate rail surface damage. The repairment of rail profile through milling is realized by arranging the cutter grains on the facing cutter according to target rail profile, and then driving the rail milling train to mill longitudinally along rail surface. The profile of rail milling depends on the arrangement and layout of the cutter grains. The characteristics of facing cutter and its combination of cutter grains are restored using 3D scanning technology based on reverse engineering; The layout of cutter grains is adjusted according to the designed 60D rail profile and its fitting degree is verified. Finally, the field test of the designed 60D profile facing cutter shows that the single milling amount is about 1 mm in the range of $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ at the top of the rail head, and the milling error is less than 0.3 mm.

Key words: rail milling; 60D rail profile; facing cutter

Citation format: MAO W L, WU Y C, XU Y D, et al. Design and verification of 60D profile facing cutter of rail milling train[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 89-94.

收稿日期: 2021-02-02

作者简介: 毛文力(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为大型养路机械。E-mail: 342215548@qq.com。

通信作者: 许玉德(1965—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为轨道管理、轨道养护维修技术。E-mail: xuyude2000@163.com。

轮轨接触关系的匹配是影响列车平稳运行和轮轨材料损伤的重要因素之一,寻求合理的轮轨廓形匹配对提高列车平稳运行、延长轮轨使用寿命具有重要意义^[1]。世界各国铁路在改善轮轨关系、减少和控制钢轨伤损、延长钢轨使用寿命方面,分别提出适合各自线路特点的轮轨廓形^[2]。中国铁道科学研究院针对我国铁路 LMA、LMB、XP55、LM 车轮踏面在线路上混跑的实际情况,以直线线路钢轨上的轮轨接触光带居中、曲线线路上车轮轮缘贴靠钢轨时形成共形接触为预期目标,在 CHN60 廓形的基础上设计了 60N 廓形^[3],经过普速和高速铁路铺设使用考核,2017 年起在我国高速铁路全面推广使用^[4],此外从改善轮轨匹配关系和减少打磨量的角度设计研发了钢轨打磨设计廓形 60D,经过现场试验采用该设计打磨廓形可将打磨周期延长 4~5 a,且不易出现动车组构架横向加速度超限和晃车^[5]。

优化的钢轨廓形实施及其精度依赖于其实现的方法,主要包括钢轨打磨和铣磨两种办法^[6-7]。钢轨打磨是通过电机驱动分布在轨头不同位置的磨头进行旋转、平移、滚动等运动磨耗掉相应部位的表面材料,从而使轨头贴近目标廓形^[8]。但从其对轨头廓形的整修原理和伤损程度上来说,对于目标廓形和既有廓形相差较大、表面伤损较严重的情况下,打磨遍数多,效率较低,此外打磨还存在作业时容易产生飞溅的火花、金属粉尘等问题^[9]。钢轨铣磨技术包括铣削和磨削两种装置,是由镶嵌在铣削刀盘上的刀粒对钢轨顶面、轨距角和工作边同时进行铣削加工,而后磨削盘将铣削过的钢轨表面进行打磨,消除掉钢轨表面的棱角,从而获得目标廓形,相比打磨作业,铣磨作业具有效率高,受原始廓形影响很小,切削能力强精度高,表面平顺度恢复好、能用较少遍数来消除较大伤损等特点^[10]。但铣磨的廓形由刀盘和刀粒布局确定,一旦刀粒布局和刀盘确定则只能铣削出对应的廓形,灵活度不高。

为了扩展钢轨铣磨对不同钢轨廓形应用能力,发挥铣磨车的优势,弥补不足,本文根据逆向工程设计原理和方法,采用 3D 扫描技术,还原铣磨车刀盘及其上的刀粒组合特征,结合钢轨 60D 廓形,对铣磨车刀盘刀粒布局进行调整以实现廓形重构,制作了相应的刀盘,并进行现场试验验证其铣磨精度和效果。

1 打磨设计廓形 60D

对 CHN60,60N,60D 3 种廓形,分别取轨顶最高点和靠工作边一侧轨顶面以下 16 mm 轨距角处对齐,如图 1 所示。计算 CHN60 廓形与 60D 廓形,60D 廓形与 60N 廓形的垂向差值,如图 2 所示。

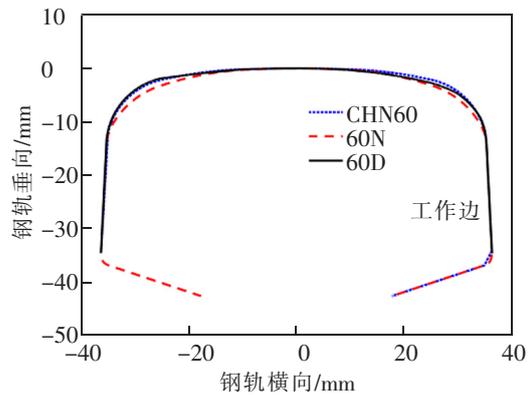


图 1 廓形对比

Fig.1 Comparison of rail profiles

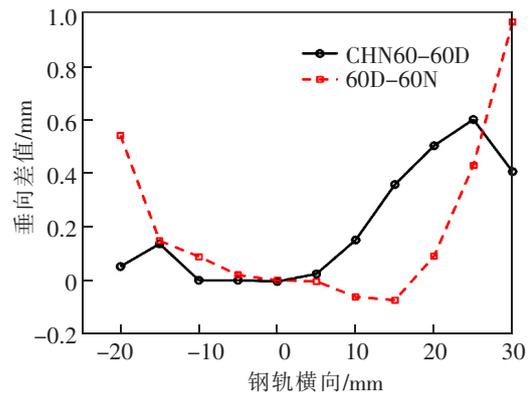


图 2 各廓形间垂向差值

Fig.2 Vertical difference between profiles

如图 1 所示,与 CHN60 和 60N 廓形相比,60D 廓形在非工作边和外侧角与 CHN60 保持一致,略平缓;在轨距角和轨肩区域介于 CHN60 和 60N 廓形之间,略低凹。如图 2 所示,在距离轨顶中心向工作边一侧 0~30 mm,60D 廓形与 60N 廓形的垂向差值在-0.07~0.97 mm,即在距离轨顶中心偏工作边 5 mm 处高凸 0.07 mm,在距离轨顶中心偏工作边 30 mm 处低凹近 0.97 mm;在同样范围内,CHN60 廓形与 60D 廓形的垂向差值在 0~0.6 mm,其中在距离轨顶中心偏工作边 25 mm 处高凸近 0.60 mm。

根据各廓形间差值以及考虑到 60N 廓形的设计初衷是直线光带居中和曲线共形接触,本文在基

于 60D 廓形进行铣磨车刀盘和刀粒布局设计时,轨肩轨距角处允许一定量的过铣磨,即考虑刀盘加工误差和现场作业误差的情况下,使得目标廓形与 60D 廓形贴合或略偏向 60N 廓形。

2 铣磨车刀盘测量

逆向工程^[11]是一种对既有实物进行技术再现的手段,来源于商业及军事领域中的硬件分析,即从目标产品的原型出发,将其转化为如 CAD 模型等相关的数字化模型,从而实现几何模型重建和产品制造,是对已有产品再设计、再创造的过程,其工作流程一般为三维数据测量、数据处理、三维模型重构和模型制造。

从逆向工程的思路出发,采用 3D 扫描仪^[12]测量既有刀盘,获得既有刀盘的三维点云数据,如图 3 所示。将测量数据导入 Rapidform XOR/Redesign 软件进行噪点和无效数据删除后,获得刀盘实测模型;进一步通过建立基准面、划分领域组、回转、拉伸等操作得到刀盘框架图,将其导入 CAM 软件测量各部分尺寸;最后对测量数据适当处理以满足加工以及铣磨车安装要求,刀盘的轮廓加工尺寸见表 1。

表 1 刀盘轮廓尺寸
Tab.1 Outline size of milling cutter

编号	名称	测量数据/mm	加工数据/mm
1	刀盘侧面外轮廓直径	644.78	645.00
2	刀盘侧面内轮廓直径	604.25	605.00
3	刀盘凹槽顶面直径	502.10	500.00
4	刀盘凹槽底面直径	441.36	441.00
5	刀盘内部小凸台直径	279.82	280.00
6	刀盘外环孔径	39.98	40.00
7	刀盘内环大孔径	47.56	48.00
8	刀盘内环小孔径	32.82	32.80
9	刀盘中孔外侧直径	80.01	80.00
10	刀盘中孔内侧直径	43.79	45.00

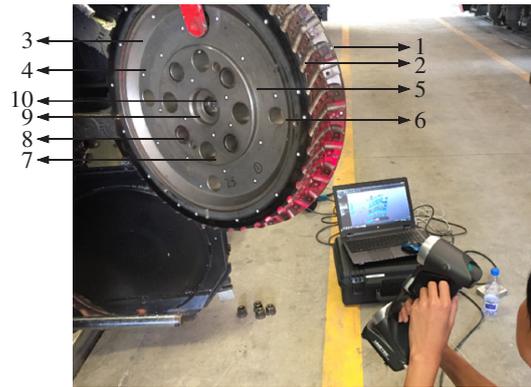


图 3 铣磨刀盘表面 3D 扫描
Fig.3 3D Scanning of facing cutter surface

3 铣磨车刀粒布局

目前国内普遍使用奥地利 LINSINGER 公司生产的 SF03-FFS 型铣磨车,该车左右两侧各装备 2 个铣盘和 1 套磨盘^[13]。铣盘用于切削钢轨,每个铣盘有 22 组铣削刀粒组合,每组包含 8 个刀粒,分 2 排排列;磨盘用于提高钢轨表面的光洁度。铣磨目标廓形由刀盘上的刀粒布局决定,而既有铣磨刀盘采用标准 60 轨廓形,因此需要根据钢轨打磨设计廓形 60D 对刀盘的刀粒布局进行调整,为实现轨头更凸的 60D 设计廓形,将每排刀粒槽增加 1 个,即每组增加 2 个刀粒。这样可以更加平缓地完成钢轨轨头廓形覆盖,避免出现台阶现象。

为考察本文设计的刀粒布局与 60D 廓形贴合状态,将相邻 2 排刀粒(1 组)投影到同一横断面上与 CHN60 廓形进行比较。第 1 排刀粒序号从轨距角到外侧角依次为 1,3,5,7,9;第 2 排刀粒序号从轨距角到外侧角依次为 2,4,6,8,10,如图 4 所示。

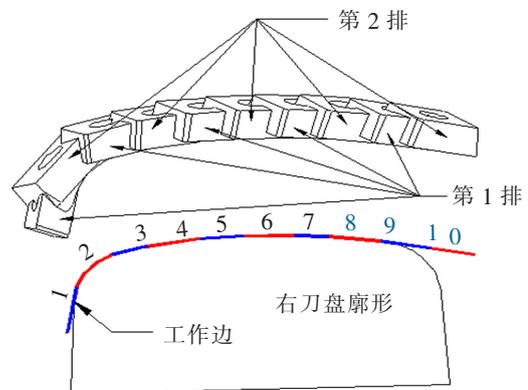


图 4 铣磨刀盘的刀粒布局
Fig.4 Grain layout of milling cutter

《高速铁路钢轨打磨管理办法》^[14] 第二十条要求,打磨平面宽度应符合:轨顶纵向中心线两侧 10 mm 区域为 10 mm,10~25 mm 区域为 7 mm,其余打磨区域为 5 mm,如图 5 所示。统计各刀粒切削出的棱面宽度,并与图 5 所示的打磨痕迹最大平面宽度对比;计算相邻两刀粒切削形成的棱面夹角和交点与目标廓形的径向距离,统计结果见表 2。

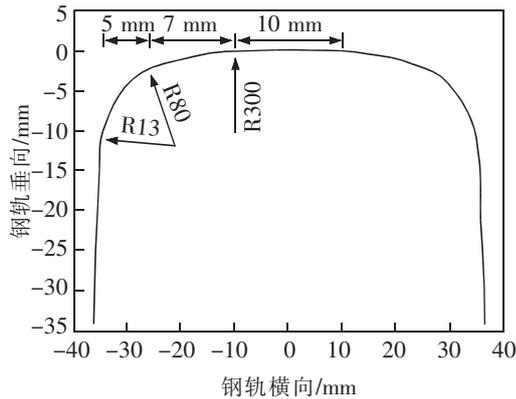


图 5 铣磨后最大平面宽度

Fig.5 Maximum plane width after milling

表 2 各刀粒切削线宽度实测值

Tab.2 Measured width of cutting line of each cutter grain

轨头区域	切削线宽度 允许值/ mm	刀粒 序号	切削线宽度实测值 (不含重合部分)/ mm
R13 外侧	-	1	6.01
R13	5	2	9.79
		3	3.17
		4	4.08
R80	7	3	3.91
		4	6.28
		5	8.35
R300	10	6	9.66
		7	6.83
		8	4.16
R80	7	8	5.86
		9	4.25

从表 2 中可以看出,除去刀粒 2 外,各刀粒切削出的棱面宽度均小于允许值;对于刀粒 2,虽然铣磨棱面较宽,但考虑到刀粒 2 切削线是大圆弧,其它刀粒切削线为直线,整个棱面仍比较平滑。可以

认为本文采取的刀粒布局符合铣磨后的最大平面宽度的要求。

从表 3 中可以看出,相邻两刀粒切削形成的棱面夹角接近 180°,交点与 60D 廓形的径向距离在 0.06~0.20 mm 范围内,贴合效果良好,在磨盘的作用下,可实现铣磨后廓形与 60D 廓形的进一步贴合。

表 3 相邻刀粒切削线组合特征

Tab.3 Characteristics of the combination of adjacent cutting lines

刀粒连接序号	相邻两刀粒形成的 切削线夹角/(°)	切削线交点与目标廓 形的径向距离/mm
1,2	168.7	0.12
2,3	173	0.2
3,4	172.3	0.19
4,5	175	0.1
5,6	177.1	0.08
6,7	176.8	0.08
7,8	176.7	0.1
8,9	176.6	0.06

4 铣磨车刀盘试验

将本文设计的 60D 廓形刀盘(分左右轨两个刀盘)安装到铣磨车上,在某线路曲线上进行现场试验。内、外股钢轨各布置测点 5 个,每个测点间距约 50 m,分别测量铣磨作业前、后各测点钢轨轨头廓形进行对比,以验证所制铣磨刀盘的铣磨效果。待铣钢轨为 60 kg/m 磨耗轨,目标廓形为 60D 钢轨,钢轨型面测量采用 RS2015-2W 型便携式钢轨外形测量装置,利用紧锁的伸缩杆将测量装置的测量截面垂直于钢轨,通过滑动滚轮读取廓形。

铣磨前后的钢轨廓形轨底坡与标准 60D 钢轨不一致。为了更准确的统计型面测量差异,首先将铣磨前后钢轨廓形进行旋转,至非工作边与 60D 钢轨廓形的非工作边斜率一致。按照《高速铁路钢轨打磨管理办法》要求,将铣磨后钢轨廓形和标准 60D 钢轨廓形“在轨顶最高点处上下对齐,在 Z-16 处左右对齐”,两者间的差值作为铣磨误差。铣磨前钢轨廓形按照“非工作边轨下颞固定点位置不变”原则与铣磨后廓形对齐,两者间的差值作为铣磨量。铣

磨前钢轨廓形, 铣磨后廓形, 60D 廓形三者对齐后的型面如图 6 所示。铣磨后轨头各角度相对于铣磨前廓形的铣磨量以及相对于 60D 廓形的铣磨误差

如表 4 所示(负值代表过铣磨), 铣磨量和铣磨误差的统计范围为轨头顶部 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。

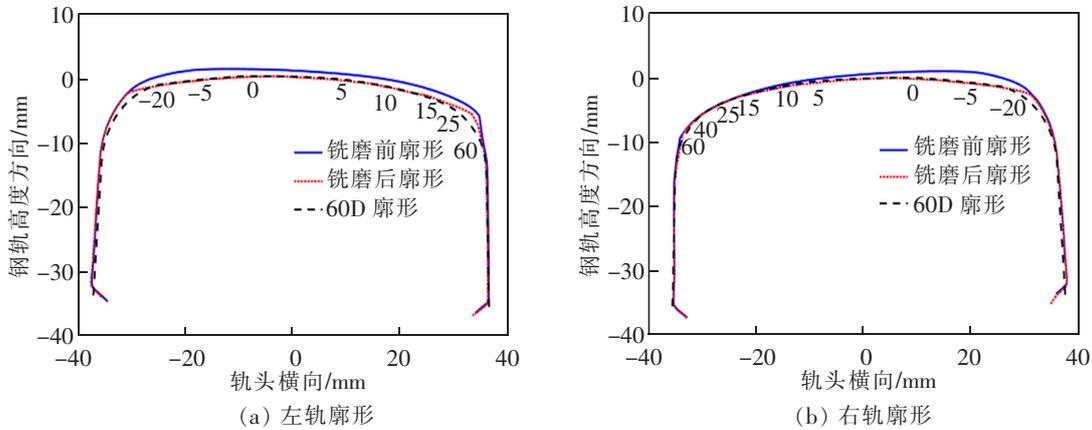


图 6 铣磨前后钢轨廓形与 60D 廓形对齐
Fig.6 Rail profile before and after milling aligned with the 60D profile

表 4 某测点轨头顶部各角度铣磨量和铣磨误差
Tab.4 Milling amount and milling error of each angle at the top of the rail head

轨头角度	左轨		右轨	
	铣磨量/mm	铣磨误差/mm	铣磨量/mm	铣磨误差/mm
-10°	1.37	-0.14	1.48	-0.14
-5°	1.68	-0.09	1.71	-0.13
-2°	1.26	-0.14	1.15	-0.16
-1°	1.26	-0.14	1.15	-0.16
0°	1.19	-0.10	1.06	-0.12
1°	0.98	0.02	0.77	-0.01
2°	1.00	-0.09	0.68	-0.09
3°	0.98	-0.11	0.65	-0.15
4°	0.98	-0.13	0.63	-0.21
5°	1.01	-0.15	0.60	-0.23
10°	1.15	-0.06	0.40	-0.12
最大绝对值	1.68	0.15	1.71	0.23
平均绝对值	1.17	0.11	0.93	0.14

从图 6 可以看出, 该测点左、右股钢轨廓形在 $-20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 均有铣磨。其中左股钢轨轨顶区域 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 铣磨效果较好, 铣磨后钢轨廓形与目标 60D 廓形基本贴合; 但是轨距角区域 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 未完全铣磨至目标 60D 廓形, 对于这种肥边较严重的钢轨, 工作边的铣削量仍需增加; 右股钢轨主要铣磨范围是轨头

顶部 $-20^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 区域, 轨头内侧 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 区域内铣磨量较小, 铣磨后钢轨廓形与目标 60D 廓形基本贴合。

从表 4 可以看出, 在轨头顶部 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 该测点左股钢轨廓形最大铣磨量为 1.68 mm, 平均铣磨量为 1.17 mm, 最大铣磨误差绝对值为 0.15 mm, 平均铣

磨误差为 0.11 mm; 右股钢轨廓形最大铣磨量为 1.71 mm, 平均铣磨量为 0.93 mm, 最大铣磨误差绝对值为 0.23 mm, 平均铣磨误差为 0.14 mm。因此, 该刀盘铣磨效果较好, 单次铣磨量在 1 mm 左右, 铣磨误差小于 0.3 mm。

5 结论

采用 3D 扫描技术以及逆向工程方法设计和制作了钢轨打磨设计廓形 60D 铣磨车刀盘, 并对其进行了现场试验, 验证了其铣磨精度, 主要结论如下:

1) 60D 廓形在轨肩和轨距角处位于 CHN60 廓形和 60N 廓形之间, 与 60N 廓形相比, 60D 廓形在轨肩处靠近 60N 廓形, 在轨距角处则高出 60N 廓形 0.8~1.0 mm; 根据 60D 廓形以及 60N 廓形相互位置及差值, 铣磨作业后廓形应贴近 60D 廓形或适当偏向 60N 廓形。

2) 通过 3D 扫描技术获取铣磨车刀盘点云数据, 利用逆向工程设计方法获取刀盘的几何参数, 并根据 60D 设计廓形调整刀粒布局, 检验刀粒切削出的棱面宽度、相邻两刀粒切削形成的棱面夹角和交点与 60D 廓形的径向距离等参数, 表明在磨削盘的配合下, 本文设计的铣磨刀盘刀粒布局与 60D 廓形贴合良好。

3) 对本文设计的 60D 廓形刀盘进行现场试验, 结果表明, 该刀盘对钢轨铣磨效果较好, 轨头顶面 -10° ~ 10° 单次铣磨量在 1 mm 左右, 铣磨精度小于 0.3 mm; 然而钢轨肥边对铣磨效果有一定的影响, 建议肥边严重区段进行多次铣磨。

参考文献:

- [1] 王健, 马晓川, 陈嘉胤, 等. 高速铁路 CHN60N 钢轨与不同车轮踏面匹配性能研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 94-101.
- [2] 周清跃, 张银花, 朱梅. 国内外钢轨标准制修订回顾[J]. 铁道技术监督, 2012, 40(8): 1-5.
- [3] 周清跃, 张银花, 田常海, 等. 60N 钢轨的廓形设计及试验研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(2): 128-135.
- [4] 周清跃, 田常海, 张银花, 等. 高速铁路钢轨打磨关键技术研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 66-70.
- [5] 周清跃, 刘丰收, 俞喆, 等. 我国铁路钢轨型面优化研究[J]. 中国铁路, 2017(12): 7-12.
- [6] 周宇, 许玉德, 曹亮. 城市轨道交通钢轨表面在线整修技术的应用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(11): 30-34.
- [7] HANS P B. Milling—the new dimension of rail profiling[J]. European Railway Review, 2008(3): 92.
- [8] 许玉德, 吴琰超, 余佳磊, 等. 基于高频率测量数据的钢轨精确打磨方法[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(3): 10-19.
- [9] 蔡永波. 钢轨铣磨车铁屑收集存储及排放装置设计[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(5): 158-160.
- [10] 朱克让. 高速铁路曲线地段钢轨铣磨技术探讨[J]. 铁道建筑, 2016(10): 125-127.
- [11] 金涛, 陈建良, 童水光. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2002, 13(16): 1430-1436.
- [12] 黄国权, 杨显惠. 采用逆向工程技术对叶轮建模的研究[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 227-229.
- [13] 尹民中. 钢轨铣磨车刀盘国产化的试验与研究[J]. 上海铁道, 2020(S2): 70-72.
- [14] 中国铁路总公司. 高速铁路钢轨打磨管理办法: 铁总运[2014]357号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.