

基于置信水平的钢轨焊接接头设备状态评定方法

马国祥

(浙江省轨道交通运营管理集团有限公司, 310005, 杭州)

摘 要 [目的]为解决我国无缝线路钢轨设备状态评定体系不完善的问题,需要建立基于置信水平的钢轨焊接接头设备状态评定方法。[方法]阐述了目前我国规定的高速铁路钢轨平直度允许偏差、焊接接头平直度允许偏差。以我国某条已开通运营 13 年的高速铁路为案例,对该线钢轨焊接接头平直度数据进行分析,认为钢轨接头平直度检测数据总体服从正态分布。根据正态分布及置信区间原理,对均值和标准差评定法、置信水平评定法进行对比,提出了基于置信水平的钢轨焊接接头设备状态评定方法,得到高速铁路钢轨设备状态的评定标准。[结果及结论]该方法能够客观、直观地反映出钢轨焊接接头的设备状态,可以准确地掌握钢轨设备状态。该方法可为分析钢轨设备变化规律,以及制定大中修的标准、计划及方案等提供很好的理论依据。

关键词 城市轨道交通;无缝钢轨;焊接接头;平直度;设备状态评定;正态分布;置信水平

中图分类号 U213.9⁺²

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.037

Condition Assessment Method of Rail Welded Joint Equipment Based on Confidence Level

MA Guoxiang

(Zhejiang Rail Transit Operation Management Group Co., Ltd., 310005, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] To address the incomplete assessment system for seamless rail equipment conditions in China, it is necessary to establish an equipment condition assessment method for rail welded joints. [Method] The allowable deviations for the flatness of high-speed rail and welded joints specified by current Chinese regulations are elucidated. Taking a high-speed railway line for 13 years running in China as study case, the flatness data of the line rail welded joints is analyzed, and it is observed that the rail joint flatness detection data generally conforms to normal distribution. Based on the principles of normal distribution and confidence intervals, the mean value/standard deviation assessment and confidence level assessment two methods are compared. The rail welded joint equipment condition assessment method based on confidence level is proposed, along with the corresponding assessment criteria for

high-speed railway rail equipment. [Result & Conclusion]

This method can objectively and intuitively reflect rail welded joint equipment conditions, allowing accurate understanding of rail equipment conditions. The method can serve as a good theoretical basis for analyzing the law of changes in rail equipment, as well as formulating standards, plans, and strategies for major and medium maintenance.

Key words urban rail transit; seamless rail; welded joint; flatness; equipment condition assessment; normal distribution; confidence level

目前,我国对无缝线路钢轨及钢轨焊接接头设备状态的评定以是否有伤损作为主要评定内容。但研究表明,钢轨的不平顺幅值及波长变化均会引起车辆-轨道系统振动响应,其中,钢轨的不平顺幅值对振动的影响程度最大^[1-2]。在钢轨焊接接头不平顺严重处,轮轨间作用力最大可达静轮载的 3 倍,这不仅会恶化钢轨的工作状态,缩短其寿命,对行车安全构成威胁,还会对不平顺位置附近 2~3 处钢轨支点的钢轨-轨枕反力产生较大影响,导致支点反力增大,进而加速轨下胶垫老化^[3]。

近几年,多条高速铁路、地铁线路出现了因钢轨焊接接头低塌造成列车运行异响的情况。本文以我国钢轨焊接接头平直度的控制标准为依据,分析研究了我国不同服役时间的无缝线路钢轨焊接接头的平直度检测数据,提出了基于置信水平的钢轨焊接接头设备状态评定方法。

1 理论依据

中国国家铁路集团有限公司发布的铁工电[2023]106号《高速铁路线路维修规则》规定:高速铁路钢轨平直度、焊接接头平直度的允许偏差需分别满足表1、表2的要求。

由表1、表2可以看出,对钢轨焊接接头平直度的管理类似于对轨道几何尺寸的管理,既要保证钢轨焊接接头平直度的整体平顺性,又要控制

其幅值不超限。当钢轨焊接接头平直度在控制范围内时,钢轨的整体平顺性越好,其设备状态就越好。

表1 高速铁路钢轨平直度的允许偏差

Tab. 1 Allowable deviation of high-speed railway rail flatness

钢轨位置	平直度方向	允许偏差
距轨端 0~1.5 m 处	垂直方向(向上)	$\leq 0.35 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$
	垂直方向(向下)	$\leq 0.20 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$
距轨端 1.0~2.5 m 处	水平方向	$\leq 0.50 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$
	垂直方向	$\leq 0.30 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$
轨身	水平方向	$\leq 0.50 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$
	垂直方向	$\leq 0.20 \text{ mm}/\text{m}$
	水平方向	$\leq 0.45 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$

表2 高速铁路焊接接头平直度的允许偏差

Tab. 2 Allowable deviation of high-speed railway welded joint flatness

接头类型	平直度方向	允许偏差/ (mm/m)
铝热焊接作业后的接头	垂直方向(“+”表示凸出)	0.10~0.30
	水平方向(“+”表示凹进)	0~0.30
闪光/气压焊接作业后的接头	垂直方向(“+”表示凸出)	0~0.20
	水平方向(“+”表示凹进)	0~0.30

2 钢轨焊接接头设备状态的评定方法

2.1 平直度数据分析

高速铁路钢轨不平顺主要表现为距轨端 2.0~3.0 m 处钢轨的低塌不平顺,或伤损钢轨轨顶面不平顺值大于 $0.3 \text{ mm}/\text{m}$ ^[4],因此,本文采集与钢轨焊接接头的距离在 0~3 m 内的钢轨的平直度,每隔 0.5 m 采集 1 组数据。由于采集的钢轨焊接接头平直度数据量较大,可认为钢轨焊接接头平直度是服从正态分布的连续型随机变量。

以我国某条已开通运营 13 年的高速铁路为研究案例,对该线进行检测,将检测得到的钢轨焊接接头平直度数据进行正态性检验,其结果如图 1 所示。通过图 1 的正态性检验直方图和 Q-Q 图(全称为 Quantile-Quantile 图)可以看出,直方图呈钟形(中间高、两端低),Q-Q 图中散点与直线的重合度较高,可以认为检测数据总体服从正态分布。

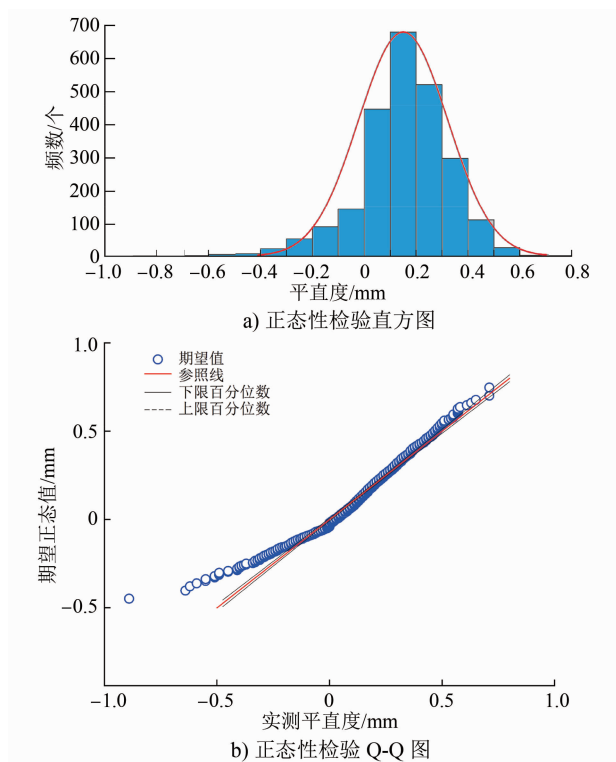


图1 已开通运营 13 年的高速铁路钢轨焊接接头平直度数据的正态性检验结果

Fig. 1 Normality test results of rail welded joint flatness data of high-speed railway in operation for 13 years

2.2 评定方法的比选

2.2.1 均值和标准差评定法

鉴于平直度数据接受为正态分布,可采用数学标准差的统计方法来描述钢轨焊接接头平直度的平顺性指标。根据采集到的钢轨焊接接头平直度检测数据,分别计算左、右股钢轨焊接接头在垂直方向、水平方向钢轨上的标准差。设 x_{ij} 为钢轨焊接接头在垂直/水平方向的平直度,其中: $i=1, 2, 3, 4$, 分别为左股垂直方向、左股水平方向、右股垂直方向、右股水平方向; $j=1, 2, 3, \dots, N$, N 为采样点个数,则有:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \mu_i)^2} \quad (2)$$

式中:

μ_i ——钢轨焊接接头在垂直/水平方向平直度的算术平均值;

σ_i ——钢轨焊接接头在垂直/水平方向平直度的标准差。

选取我国 5 条不同运营年限的高速铁路线路,

输入这些线路的钢轨焊接接头平直度数据,分别计算 μ_i 和 σ_i ,其计算结果如表 3 所示。

根据表 3,分别绘制不同运营年限高速铁路线路钢轨焊接接头的平直度指标曲线(见图 2),以及

表 3 不同运营年限线路的钢轨焊接接头平直度指标计算结果

Tab. 3 Calculation results of rail welded joint flatness index for lines with different operating years

不同运营年限的线路	平直度的算术平均值/mm				平直度标准差/mm			
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
开通前	0.11	0.15	0.10	0.15	0.06	0.09	0.06	0.09
运营 1 年	0.04	-0.01	0.04	0	0.05	0.07	0.06	0.07
运营 2 年	0.10	-0.08	0.11	-0.09	0.09	0.14	0.07	0.13
运营 7 年	0.02	-0.08	0.03	-0.04	0.17	0.21	0.16	0.23
运营 13 年	0.15	-0.05	0.15	-0.14	0.31	0.21	0.18	0.20

注:开通前数据为钢轨预打磨前的测量数据。

钢轨焊接接头左右股 2 个方向的平直度正态分布曲线(见图 3)。从图 2 及图 3 可以看出, μ_i 和 σ_i 虽在一定程度上反映出钢轨焊接接头的设备状态,但指标单一,不能准确、直观地反映钢轨焊接接头的设备状态。

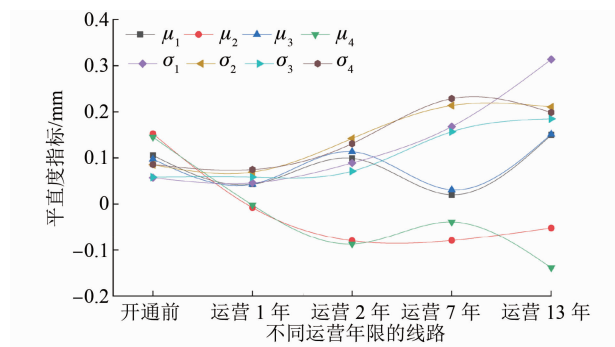


图 2 不同运营年限线路钢轨焊接接头的平直度指标曲线
Fig. 2 Flatness index curves of rail welded joints for lines with different operating years

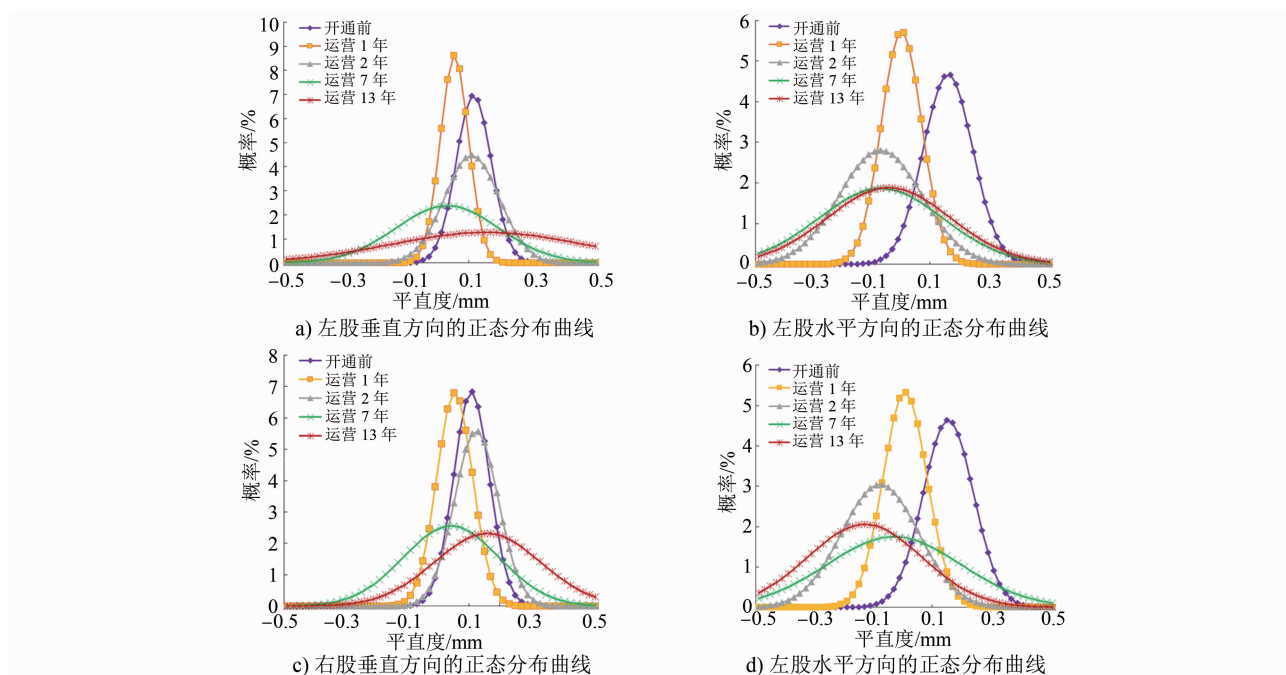


图 3 不同运营年限线路钢轨焊接接头左右股两个方向的平直度正态分布曲线

Fig. 3 Normal distribution curves of rail welded joint flatness for lines with different operating years in two directions of left and right strands

2.2.2 置信水平评定法

在统计学中,一个概率样本的置信区间是对这个样本某个总体参数的区间估计。置信区间展现出这个参数的真实值以一定概率落在测量结果周围的程度,将其给出的被测量参数测量值的可信程度称为置信水平。设 C_i 为 x_{ij} 的置信水平值,其计算式为:

$$C_i = f(x_{ij,\max}) - f(x_{ij,\min}) \quad (3)$$

式中:

$f(\cdot)$ ——概率密度函数;

$x_{ij,\max}$ —— x_{ij} 的上限值;

$x_{ij,\min}$ —— x_{ij} 的下限值。

由于 x_{ij} 接受正态分布,可计算使用一维高斯函数计算其概率密度:

$$f(x_{ij}) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_{ij}-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (4)$$

设置信水平权重系数为 k_i ($\sum_{i=1}^4 k_i = 1$), 可计算得到 RWFQI (钢轨焊接接头平直度设备状态评定指标) 的综合置信水平 R_w , 其计算式为:

$$R_w = 100 \sum_{i=1}^4 k_i C_i \quad (5)$$

式(5)中, 单独计算左股的评定指标 R_w 时, i 取 1、2; 单独计算右股的评定指标 R_w 时, i 取 3、4。

根据《高速铁路线路维修规则》及高速铁路养修经验, 钢轨焊接接头平直度适宜的控制范围为: $-0.2 \text{ mm/m} \leq x_{1j} \leq 0.2 \text{ mm/m}$ 、 $-0.2 \text{ mm/m} \leq x_{3j} \leq 0.2 \text{ mm/m}$ 、 $-0.4 \text{ mm/m} \leq x_{2j} \leq 0.4 \text{ mm/m}$ 、 $-0.4 \text{ mm/m} \leq x_{4j} \leq 0.4 \text{ mm/m}$, 则 $x_{1j,\max} = x_{3j,\max} = 0.2 \text{ mm/m}$ 、 $x_{1j,\min} = x_{3j,\min} = -0.2 \text{ mm/m}$ 、 $x_{2j,\max} = x_{4j,\max} = 0.4 \text{ mm/m}$ 、 $x_{2j,\min} = x_{4j,\min} = -0.4 \text{ mm/m}$ 。在置信区间确定的情况下, 计算得到评定指标 R_w , 即可反映钢轨焊接接头的设备状态。

根据式(3)和式(4)可计算得到: 垂直方向钢轨焊接接头平直度的置信水平为 $C_1 = C_3 = f(0.2) - f(-0.2)$; 水平方向钢轨焊接接头平直度的置信水平为 $C_2 = C_4 = f(0.4) - f(-0.4)$ 。

通过计算得知, 对于同一组平直度数据, k_i 的取值不同, R_w 值将有小幅变化, 因此, 可调整 k_i 的取值, 以体现出不同方向平顺性的重要程度。对于多组平直度数据, 当 k_i 取值确定时, R_w 值能够直观地反映出不同钢轨焊接接头的设备状态。鉴于高速铁路钢轨应重点关注重叠区垂向的平顺性状态^[4], 为便于计算, 凸显钢轨垂向平顺性的重要程度, 可作如下设置: $k_1 = 0.4$ 、 $k_2 = 0.1$ 、 $k_3 = 0.4$ 、 $k_4 = 0.1$ 。仍以上文选取的 5 条不同运营年限高速铁路线路为例, 计算这些线路钢轨焊接接头的 R_w 值, 计算结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 随着运营年限的增加, R_w 不断降低 (开通前采集的钢轨平直度数据为钢轨预打磨前的数据, 因此 R_w 值偏低)。此结论符合钢轨设备状态随运营年限增加而不断降低的客观规律, 且 R_w 能较为直观地反映钢轨焊接接头的设备状态。

2.3 评定方法的确定

通过对比均值和标准差评定法、置信水平评定法可知, 置信水平评定法计算得到的 R_w 值能够客

观、直观地反映钢轨焊接接头设备状态。因此, 检测无缝线路钢轨焊接接头平直度并计算 R_w 值, 可以作为评定钢轨焊接接头设备状态的有效方法。

表 4 钢轨焊接接头 R_w 值的计算结果

Tab. 4 Calculation results of rail welded joints R_w

不同运营年限的线路	钢轨位置	μ_i/mm		σ_i/mm		$C_i/\%$		$R_w/\%$
		垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	
开通前	左股	0.11	0.15	0.06	0.09	0.95	1.00	48.00
	右股	0.10	0.15	0.06	0.09	0.96	1.00	48.40
运营 1 年	左股	0.04	-0.01	0.05	0.07	1.00	1.00	49.99
	右股	0.04	0.00	0.06	0.07	1.00	1.00	49.85
运营 2 年	左股	0.10	-0.08	0.09	0.14	0.87	0.99	44.70
	右股	0.11	-0.09	0.07	0.13	0.89	0.99	45.50
运营 7 年	左股	0.02	-0.08	0.17	0.21	0.76	0.92	39.60
	右股	0.03	-0.04	0.16	0.23	0.79	0.92	40.80
运营 13 年	左股	0.15	-0.05	0.31	0.21	0.43	0.93	26.50
	右股	0.15	-0.14	0.18	0.20	0.57	0.90	31.80

3 高速铁路钢轨设备状态评定标准

3.1 钢轨焊接接头整治依据

根据 R_w 值, 可以准确地掌握每段钢轨焊接接头的设备状态, 这为安排接头的修理计划、选择接头的修理方式及制定接头的修理方案提供了很好的参考依据, 便于精细化管理和设备检修, 提高检修的效果和效益。

3.2 钢轨设备状态评定依据

结合《高速铁路线路维修规则》中对钢轨的评定标准, 将 R_w 值纳入无缝线路钢轨设备状态评定中, 以每千米钢轨的伤损情况和 R_w 值作为评定依据, 可形成钢轨设备状态的评定标准, 如表 5 所示。

4 结语

将 R_w 值纳入钢轨设备状态评定体系中, 能够直观地体现出钢轨的设备状态, 准确掌握每千米钢轨的设备状态, 这可为分析钢轨设备变化规律, 以及制定大中修标准、计划、方案等提供理论依据。本文所提方法可进一步拓展为无缝线路钢轨设备状态的评定方法, 以期为城市轨道交通和高速铁路钢轨的检修及修程修制更新提供参考。

(下转第 205 页)

对其信号制式选型,分析了国铁与城轨两种轨道交通制式信号系统的架构及能力,并对二者在市域(郊)铁路上的适应性进行了分析。以无锡市域 S2 线为例,为满足其线路运营需求,提出该线采用以城轨 CBTC 系统为基础、兼容 CTCS 系统的信号系统方案。

对兼容方案进行分析后认为,一体化车载方案在技术上是完全可行的,该方案的自动化程度高,网络化运营适应性强,但还需考虑一体化车载设备在国铁线路上的准入许可问题,目前该方案也尚无成熟的应用案例。从技术发展趋势和轨道交通高质量发展角度看,为应对不同场景下的市域(郊)铁路需求,采用一体化车载兼容或双套车载方案,对于提升市域(郊)铁路高密度下的安全性、高效性及互联互通能力而言,是一个较优的选择。

参考文献

- [1] 王伟立. 市域铁路与国铁互联互通的技术条件研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(6): 92.

- WANG Weili. Analysis of technical condition of interconnection and interoperability between city regional railway and national railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(6): 92.
- [2] 王跃辉, 黄晓宇, 梁青槐, 等. 城际铁路与市域铁路过轨运行适应性分析[J]. 建设科技, 2020(7): 82.
- WANG Yuehui, HUANG Xiaoyu, LIANG Qinghuai, et al. Adaptability analysis of through operation of inter-city railway and suburban railway[J]. Construction Science and Technology, 2020(7): 82.
- [3] 李乾社. 市域铁路信号列控制制式的研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(2): 10.
- LI Qianshe. Research on signal train control system for regional railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 10.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received: 2022-09-29 Revised: 2022-12-30 Published: 2024-04-10
· 作者: 邓翔飞, 工程师, guanghere@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 199 页)

表 5 钢轨设备状态评定标准
Tab. 5 Evaluation standard of rail equipment status

扣分项目	计算单位	扣分值	说明
1 年内新生轻伤钢轨(不含曲线磨耗)	根	2	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
现存曲线磨耗轻伤钢轨	根	4	按单股计算,每延长 100 m 计为 1 根
1 年内新生重伤钢轨(不含焊接接头)	根	20	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
无缝线路现存重伤钢轨(不含焊接接头)	根	20	长轨中 2 个焊接接头间钢轨计为 1 根
无缝线路现存重伤焊接接头	个	20	
$R_w \leq 90$		10	R_w 值每降低 10%, 加扣 10 分

参考文献

- [1] 邓小军, 曹源, 张玉琢, 等. 改进希尔伯特-黄变换分析波磨对列车时频特征的影响[J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2294.
- DENG Xiaojun, CAO Yuan, ZHANG Yuzhuo, et al. Influence of corrugation on time-frequency characteristics of a train based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(10): 2294.
- [2] 牛留斌, 刘金朝, 孙善超, 等. 钢轨波磨指数与轨道短波不平顺关系研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 46.
- NIU Liubin, LIU Jinzhao, SUN Shanchao, et al. Relationship between rail corrugation index and track short wave irregularity [J]. China Railway Science, 2020, 41(5): 46.
- [3] 翟婉明, 涂贵军, 高建敏. 地铁线路钢轨焊接区轮轨动力学问题[J]. 振动. 测试与诊断, 2012, 32(5): 701.

- ZHAI Wanming, TU Guijun, GAO Jianmin. Investigation into wheel-rail dynamics in rail weld joint zone of metro line[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5): 701.
- [4] 石彤, 杨光, 王宗新, 等. 高速铁路钢轨平顺性现状及控制参数[J]. 铁道建筑, 2022, 62(5): 47.
- SHI Tong, YANG Guang, WANG Zongxin, et al. Current situation and control parameters of rail regularity of high-speed railway [J]. Railway Engineering, 2022, 62(5): 47.

· 收稿日期:2023-02-21 修回日期:2023-04-15 出版日期:2024-04-10
Received: 2023-02-21 Revised: 2023-04-15 Published: 2024-04-10
· 作者: 马国祥, 工程师, 470514078@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license