

文章编号: 1005-0523(2024)06-0035-08



有砟高铁清筛轨道质量分级控制指标研究

王有能

(中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071)

摘要:【目的】为了提高有砟高铁道床周期维修的效果,以及规范有砟高铁道床清筛的施工流程。【方法】基于沪蓉线合宁段2019年1月—2023年5月动态检测数据,绘制轨道质量指数(TQI)的时域曲线和TQI变化率散点图。【结果】研究发现轨道进入“损耗期”时距离上一次周期维修的最短时间为12个月;TQI变化率大于2.0%时对应的TQI值为 $TQI \geq 4.0$ mm。基于沪蓉线合宁段2022年10月—11月清筛施工过程中,道床在各工序作业前、后测量的TQI数据,整理得到各工序后轨道TQI下降的平均值,结合施工作业验收要求和有砟高铁线路清筛前的TQI值,提出有砟高铁道床清筛的轨道质量分级控制指标。轨道质量指数(TQI)时域曲线呈现“浴盆曲线”特征,应在轨道处于“损耗期”前进行道床周期性维修作业;有砟高铁道床周期维修的TQI指标: $TQI \geq 4.0$ mm,有砟高铁道床周期维修宜以12个月为周期;提出有砟高铁道床清筛的作业分级管控指标,施工后静态轨道质量需满足:清筛并三捣两稳后 $TQI \leq 5.0$ mm,五捣三稳后 $TQI \leq 4.5$ mm,七捣四稳后 $TQI \leq 4.0$ mm,1次精捣后 $TQI \leq 3.0$ mm,2次精捣后 $TQI \leq 2.5$ mm。【结论】轨道质量分级控制的研究为有砟高铁道床养护维修的管理和施工提供了参考。

关键词: 有砟高铁;轨道质量指数;道床清筛;道床捣固;修理周期

中图分类号: U238; TB535

文献标志码: A

本文引用格式: 王有能. 有砟高铁清筛轨道质量分级控制指标研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 35-42.

Research on Grading Evaluation of Track Quality for Cleaning of Ballasted High-Speed Railway

Wang Youneng

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

Abstract: 【Objective】In order to improve the effect of periodic maintenance for ballasted high-speed railway, and standardize the construction process for bed cleaning of ballasted high-speed railway. 【Method】Time-domain curves of Track Quality Index (TQI) and scatter plots of TQI were drawn Based on the dynamic monitoring data from January 2019 to May 2023 for Shanghai—Chengdu line Hefei—Nanjing section. 【Result】The shortest time from the last cycle of maintenance when the track enters the “wear and tear period” was 12 months, when the TQI change rate is greater than 2%, the corresponding TQI value was $TQI \geq 4.0$ mm. Based on the TQI data measured before and after each process during cleaning construction in Shanghai—Chengdu line Hefei-Nanjing section from October to November 2022, the average decrease of TQI by each process was calculated. Grading evaluation of track quality for ballasted high-speed railway was proposed, combining the acceptance requirements or construction and TQI value of track before bed cleaning. TQI time-frequency curve exhibits a “bathtub curve” characteristic. Maintenance of the bed should be carried out before the “aging phase”. The TQI criterion

收稿日期: 2024-06-15

基金项目: 中国铁路上海局集团有限公司科研课题(2022230)

for the periodic maintenance of ballasted high-speed railway was proposed: $TQI \geq 4.0$ mm, and periodic maintenance for ballasted high-speed railway track was recommended to be a 12 months cycle. A grading and control evaluation for ballasted high-speed railway bed cleaning operations was proposed, and the static track quality should meet the following criteria after construction: $TQI \leq 5.0$ mm after cleaning and three times tamping and two times stabilizing(3D2W), $TQI \leq 4.5$ mm after 5D3W, $TQI \leq 4.0$ mm after 7D4W, $TQI \leq 3.0$ mm after precise tamping 1, and $TQI \leq 2.5$ mm after precise tamping 2. **[Conclusion]** A reference is provided for the management and construction of ballasted high-speed railway bed cleaning.

Key words: ballasted high-speed railway; TQI; ballast cleaning; ballast tamping; maintenance cycle

Citation format: WANG Y N. Research on grading evaluation of track quality for cleaning of ballasted high-speed railway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 35–42.

【研究意义】有砟道床在我国 250 km/h 等级高铁线路中广泛应用。为保证高速铁路线路的高平顺性,需定期对道床进行养护维修,在道床病害严重时甚至需要进行道床清筛作业。如何确定有砟高铁的道床修理周期,以及如何确定道床清筛大修的作业流程和作业验收指标,是铁路工务部门亟待解决的一个重要问题。

我国部分有砟高铁线路运营时间较长,如沪蓉线运营时间近 15 年,其道床出现不同程度板结、粉化,并出现道砟磨损严重等现象,仅仅通过捣固维修已无法保证道床质量,需要进行道床清筛作业。然而现有规范没有对有砟高铁道床周期维修和道床清筛大修提出明确的规定。

【研究进展】关于有砟高铁道床的养护维修,国内外学者从维修管理和维修效果等不同角度进行了大量研究。宁国平^[1]基于金丽温铁路的轨道精调工作,总结出有砟高铁精调内容、精调流程相关注意事项。漆光凯等^[2]基于南昆客专线有砟高铁道床病害,对有砟高铁道床养护维修中存在的问题进行了分析,并从管理层面提出优化建议。戴宗林^[3]基于合宁高铁捣固维修施工经验,通过轨道动力学理论,分析了大机捣固、人工精调作业、钢轨打磨等方法对轨道矢高偏差的改善效果。时瑾等^[4]通过拨道效果对捣固作业效果影响的研究,发现拨道量过大或过小、拨道策略不利易导致作业效果不佳,并由此建立了考虑拨道影响因素的拨道方案优化模型。王英杰等^[5]通过分析新建有砟高铁线路的精捣数据,通过带通滤波及中点弦测法,分析波长对精

捣作业质量的影响。张雨潇^[6]梳理了五捣三稳作业流程,提出基于轨道平顺性的有砟轨道精捣方案,并实施于实际线路,轨道精捣后平顺性优于其他作业区段。Chen^[7]基于非线性离散元理论对高速铁路有砟轨道力学维修方法进行了探讨。Xiao 等^[8]基于新建有砟高铁捣固作业数据,分析了捣固模式、稳定频率和轨道抬升量对轨道质量的影响。这些研究多从高铁有砟道床的捣固、精捣作业出发,研究拨道、捣固参数等因素对捣固作业效果的影响,对何时需进行周期捣固这一问题没有给出解答,另外对道床的清筛大修流程和过程中的质量控制等,也鲜有涉及。

【创新特色】沪蓉线合宁段有砟高铁道床清筛大修作业,是我国第一次对高速铁路道床进行清筛大修施工。本文基于沪蓉线道床维修工程实例,确定了高铁有砟道床维修周期及 TQI 指标,对道床的状态评估提供了参考,有利于我国有砟高铁周期维修作业的规范化、标准化。**【关键问题】**提出的有砟高铁清筛作业分级管控指标,填补了铁路工务部门在有砟高铁清筛维修上管理与施工研究的空白,为有砟高铁清筛作业提供了依据,保障了有砟高铁设备质量。

1 道床周期维修的 TQI 指标

1.1 TQI 及其单项的时域特征

1.1.1 TQI 时域分析

本文所使用的 TQI 及其单项标准差数据,来源于沪蓉线综合检测列车 2019—2023 年对沪蓉线合

宁段上行(K383—K406)的检测结果。数据的时间跨度为4年5个月。沪蓉线上行合宁段TQI均值随时间变化的趋势如图1所示。2019年11月—2020年2月、2021年8月—9月、2022年10月—11月，TQI出现了突降，结合相关检修记录(表1)，得知这3个时段为大机维修过程，前两次突降为周期捣固维修，2022年10月—11月为道床清筛大修作业，与实际符合。

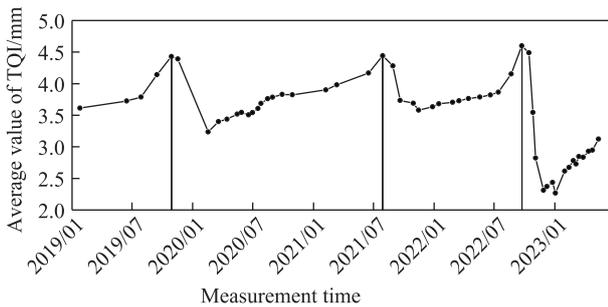


图1 合宁段上行TQI均值在2019—2023年间的变化情况
Fig. 1 Changes of the average TQI of Hefei—Nanjing Section upward from 2019 to 2023

表1 沪蓉线合宁段检修记录

Tab.1 Maintenance records of Hefei—Nanjing Section of Shanghai—Chengdu Line

Working time	Maintenance content
From October 2019 to February 2020	Periodic maintenance
From August 2021 to October 2021	Periodic maintenance
From October 2022 to November 2022	Major overhaul

从图1可以明显看到，2019年11月—2021年7月(共21个月)、2021年7月—2022年9月(共14个月)，TQI呈现出先急剧下降、后缓慢增大、再迅速上升的变化过程。在区段TQI均值趋近4.5 mm时，经过短期的维修施工使得区段TQI下降到一个较低的水平；轨道在施工作业后的12~15个月内保持较高的轨道几何平顺性，TQI缓慢增长；超过12~15个月之后，TQI迅速增大，轨道平顺性劣化速率加快，区段TQI迅速增加至4.5 mm左右。并且在2019年1月—11月、2022年9月—2023年5月，TQI的变化符合已有特征。这种“两边高、中间低”的变化规律类似于经典失效率曲线“浴盆曲线”^[9]，如图2所示。浴盆曲线以时间为横坐标，以设备失效率为纵坐标，呈现两边高、中间低的形状。失效率随着时间分为早期故障期、偶然故障期、损耗故障期3个阶段^[10]。

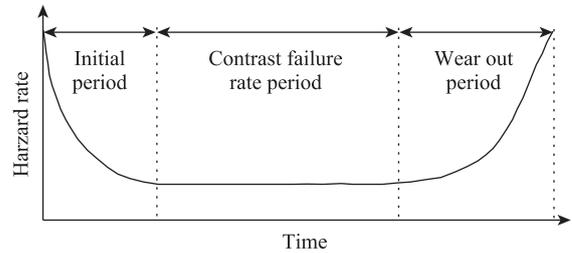


图2 浴盆曲线
Fig. 2 Bathtub curve

《高速铁路线路维修规则》(国铁设备监规[2023]15号)中规定：200~250 km/h线路轨道质量指数需满足 $TQI < 7.0$ ，250(不含)~300 km/h线路需满足 $TQI < 5.0$ mm。沪蓉线列车运行速度在250 km/h以下，清筛前其TQI值最高未超过5.0 mm，然而其道床病害已十分严重。因此规范中对于200~250 km/h线路的轨道质量指数要求已不适用于沪蓉线。

为保证轨道道床长期保持平顺和稳定状态，需确立一个有砟高铁路道床周期维修作业的轨道质量参考指标。为分析图1中TQI迅速上升的数据特征，引入TQI变化率的概念。TQI变化率，定义为相同时段(这里取1个月)TQI值的改变量与上一个月TQI值之比，即

$$\alpha_{TQI,j} = \frac{TQI_j - TQI_{j-1}}{TQI_{j-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： j 为时间序列； $\alpha_{TQI,j}$ 为第 j 次的TQI变化率； TQI_j 为第 j 次的TQI值，mm。

以TQI变化率为纵坐标、TQI值为横坐标绘制散点图(未计入施工时段的TQI变化率数据)，如图3所示。从图3中可以发现，当 $TQI \leq 3.0$ mm 和 $TQI \geq 4.0$ mm时，TQI变化率往往都大于2.0%，且出现峰值的情况较多。而当 $3.5 \text{ mm} < TQI < 4.0 \text{ mm}$ 时，TQI的变化率分布较为稳定，在2.0%上下起伏。为避免轨道质量迅速恶化，影响行车安全与稳定，选取 $TQI \geq 4.0$ mm 为有砟高铁路道床周期捣固维修轨道质量指数指标。

本文结合沪蓉线清筛前后的TQI数据和浴盆曲线概念模型，将1个检修周期中，轨道平顺性状态变化过程划分为3个不同的阶段。TQI从峰值经过维修后下降至最低点，为第1个阶段，为轨道的“维修期”。以 $TQI = 4.0$ mm 为分界点， $TQI < 4.0$ mm 代表轨道处于周期维修作业后的“有效寿命期”，为第2个阶段； $TQI > 4.0$ mm 代表轨道处于“损耗期”，为第3个阶段。那么沪蓉线上行区段

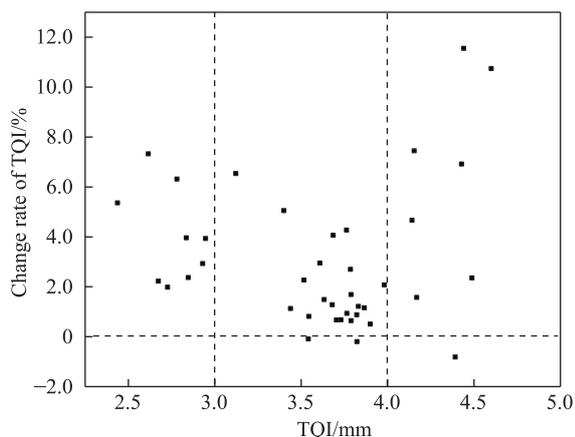


图3 TQI变化率随TQI值变化情况
Fig. 3 Change rate of TQI with TQI

TQI变化2段“浴盆曲线”的“有效寿命期”分别为15个月、12个月。将周期维修作业后轨道 $TQI <$

4.0 mm的状态(此段时间,线路保持较高的可靠性、稳定性、平顺性)定义为周期维修后的轨道质量保持时间。

综上分析可知,有砟高铁道床TQI指标从清筛施工至迅速增加的最短时间约12个月,即清筛后轨道质量迅速恶化的时间为12个月。因此建议以12个月为周期,对有砟高铁道床进行周期性捣固作业。

1.1.2 单项标准差时域分析

统计2019年1月—2023年5月沪蓉线合宁段上行TQI的7个单项,左轨向、右轨向、左高低、右高低、水平、轨距、三角坑的标准差数据,结果如图4所示。

由图4可知,TQI的7个单项分量,除轨距外,其余单项基本与TQI保持相同的变化趋势。捣固维修引起轨距的下降幅度小于其他单项的下降幅

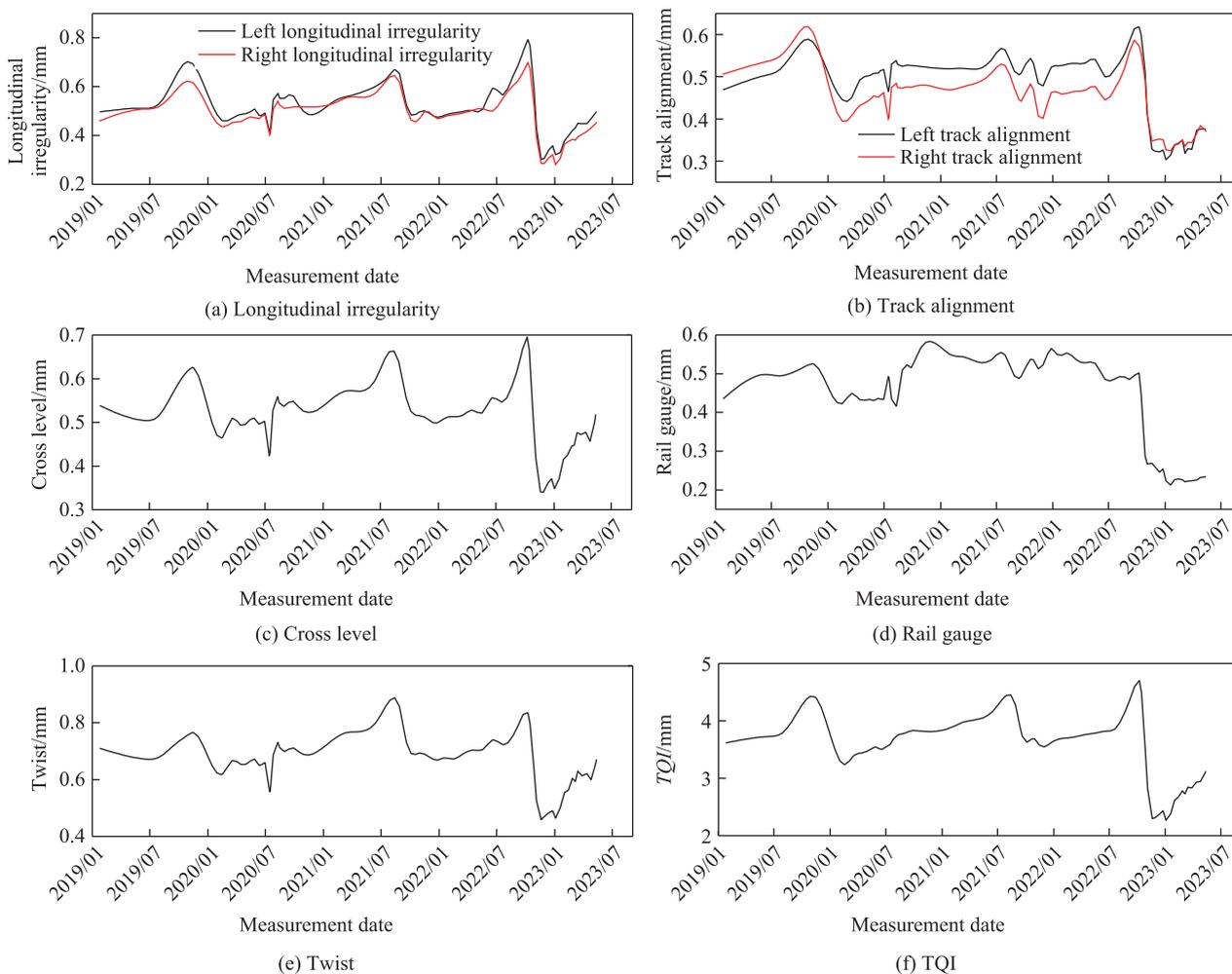


图4 TQI各单项标准差2019—2023年变化情况
Fig. 4 Changes of single standard deviation of TQI from 2019 to 2023

度,即轨距受周期捣固维修的影响较小,而清筛大修作业对轨距不平顺的改善较为明显。

轨道左右高低的数值接近,而在2019年1月—10月,左轨向比右轨向小0.3~0.5 mm,经历2019年10月的捣固维修后,左轨向略大于右轨向。

统计道床清筛作业前后各单项指标的变化幅值,与TQI变化值相比,得到各单项指标对TQI的贡献程度。2019—2023年中3次维修作业的单项指标贡献比结果如图5所示。

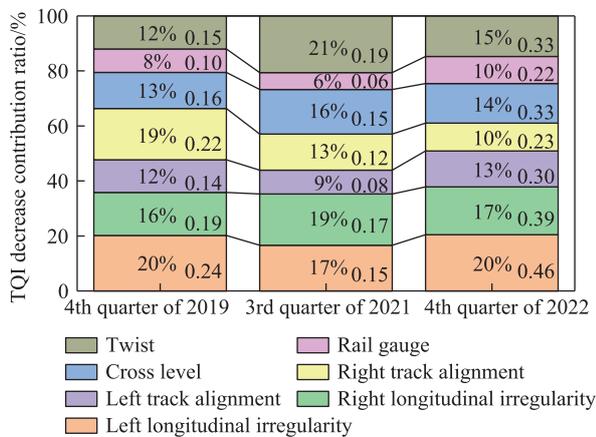


图5 单项指标贡献比
Fig. 5 Parameter contribution ratio

图5表明左高低、右高低对TQI下降的贡献程度最大,介于16%~20%。轨距不平顺由于本身数值较小,因此其对TQI下降的贡献程度也较小。

1.2 道床脏污率实验验证

我国铁路道床捣固周期的确认,以道床脏污率为重要参考依据^[11]。采用取样筛分的方法测量沪蓉线清筛后的道床脏污率,以判断周期捣固维修后约12个月道床的脏污情况(取样测试的时间为2022年8月21日,上一次周期维修时间为2021年8月—9月)。

按照道岔区每100 m至少测1处,同一道岔区至少测2处,区间路段每1 km至少1处的原则,将取回样本进行粒径筛分试验并进行脏污率分析。取样对应沪蓉线上行里程为:K396+025, K391+850, K389+275。取样过程中,将轨枕以下300 mm范围内的道砟和脏污全部装入编织袋,按实际挖出砟土量进行后续脏污率测试。分别依次用25, 16, 10 mm和5 mm 4种孔径规格的筛子对砟土进行筛

分。其中,25 mm粒径为我国《高速铁路线路维修规则》(国铁设备监规[2023]15号)中有砟道床脏污率计算的尺寸要求,16 mm和10 mm为国内外专家学者广泛推荐的粒径污染物尺寸,5 mm以下粒径则出于英国Zetica公司道床脏污指数模型。检测5个采样点的脏污数据如图6所示。

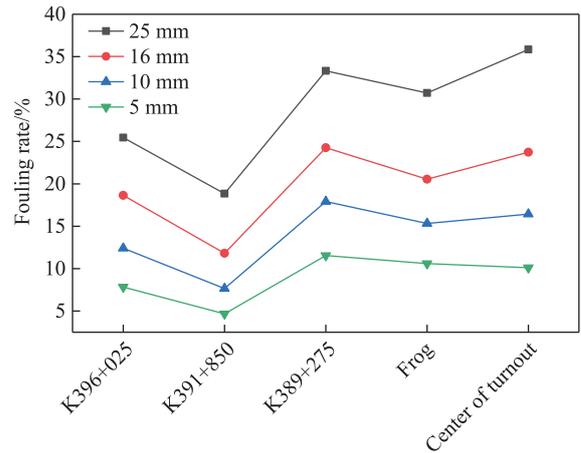


图6 2022年8月21日道床脏污率
Fig. 6 Ballast foul rate on August 21, 2022

以25 mm为筛分孔径对应的脏污率为例,5个采样点的脏污率分别为25.46%, 18.83%, 33.24%, 35.84%, 30.71%,所有采样点均已经达到严重脏污标准。因此,从道床脏污率的角度来看,以12个月为道床捣固周期是合理的。

2 清筛作业轨道质量分级评价指标

2.1 沪蓉线道床清筛作业流程

使用大型养路机械进行线路清筛作业,是一个庞大复杂的作业过程,通常包含多个施工工序^[12-13]。本文以2023年4月12日沪蓉线下行合宁段的现场清筛施工流程为例,说明有砟高铁道床清筛作业的具体施工流程,见图7。

2023年沪蓉线下行区段,采用滚动施工制,每个工序的施工长度为1 000~1 200 m。实际施工的单个完整周期为5个天窗,捣固总次数11次,稳定次数6次。通常在精捣1工序作业结束后,若该区段的轨道质量已达到既定目标,则该区段无需进行精捣2工序。施工机组配备清筛机(Q)2台、捣固车(D)8台、稳定车(W)4台、配砟车(P)3台,物料运输车(WY)6台,平板车(N)、(K)车若干。

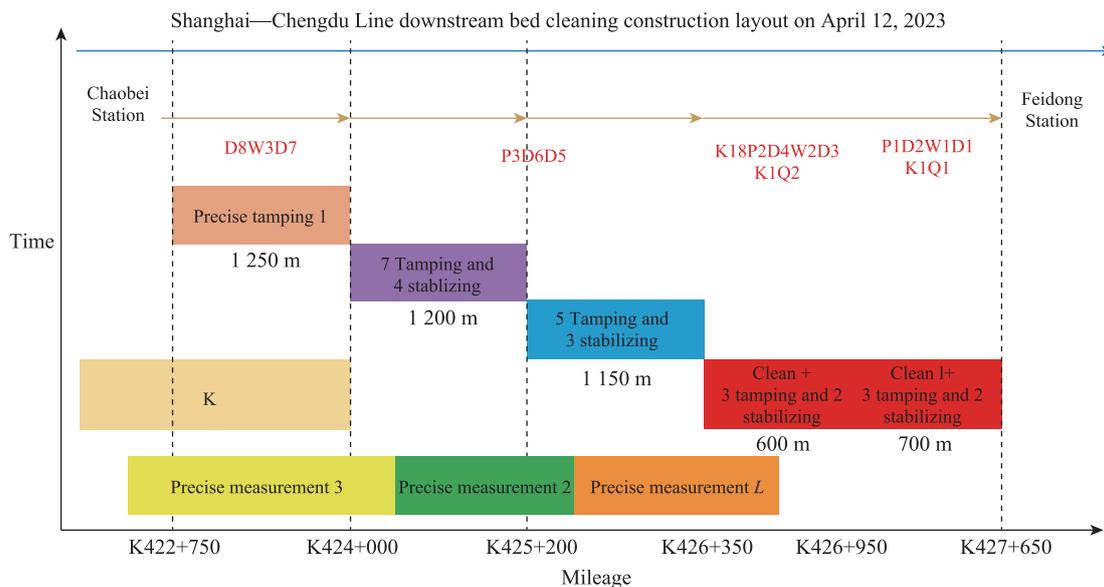


图7 2023年4月12日沪蓉线下行合宁段现场施工示意图
 Fig. 7 Schematic diagram of the on-site construction of Shanghai—Chengdu Line downward Hefei—Najing Section on April 12, 2023

2.2 轨道质量分级评价指标

以沪蓉线上行K382+900—K406+670区域(长23.770 km,共包含28个作业区段)为例,剖析清筛作业过程中的TQI变化。

清筛施工作业流程包含5个工况,见表2。在每个工况的作业前、作业后分别进行一次测量,获取该区段的TQI数据。使用Matlab提取TQI各单项标准差数据,并将同一工序作业前后的TQI取平均值,汇总结果如图8所示。

表2 清筛作业流程
 Tab.2 Process of bed cleaning

Contents	Process	Responsible crew
Clean, 3D2W	Clean+tamping 1	P1D2W1D1
2D1W	Tamping + stabilizing 2	K18P2D4W2D3
2D1W, Precision measurement	Tamping + stabilizing 3	P3D6D5
Precision tamping, precision measurement	Precise tamping 1	D8W3D7
Precision tamping	Precise tamping 2	D8W3D7

从图8中可以看到,经清筛+捣固1工序,区段TQI平均值下降0.5 mm;经捣稳2、捣稳3工序,TQI平均值降低总和为1.2 mm;精捣1工序对轨道质量

改善明显,TQI值降低达0.7 mm;由于精捣1工序后道床平顺性较高,精捣2工序后TQI值降低较小。另外,目前我国有砟高铁线路大多运营时间较长,且未进行过道床清筛大修,多为1~3年1次的周期修,轨道质量难以保证,TQI值可能高于5.0 mm。为保证清筛大修作业效果,保证高铁路床的高平顺性,使得轨道质量达到作业验收标准,最后一次精捣作业后轨道TQI值需满足条件: $TQI \leq 2.5$ mm。本文基于沪蓉线施工经验,提出有砟高铁路床清筛作业分级管控指标,施工后静态轨道质量需满足:清筛并三捣两稳后 $TQI \leq 5.0$ mm,五捣三稳后 $TQI \leq 4.5$ mm,七捣四稳后 $TQI \leq 4.0$ mm,精捣1后 $TQI \leq 3.0$ mm,精捣2后 $TQI \leq 2.5$ mm。分级管控指标示意如图7所示。

图9中,不同工序使用不同颜色的梯形表示,梯形长边代表该工序作业前的TQI值,梯形的短边代表该工序作业后的TQI值。各工序作业前后测得的TQI值应在图7中颜色区域范围内。以第二道工序(黄色区域)为例,黄色梯形的长边为5.0 mm,代表作业前道床TQI值须在5.0 mm以下;黄色梯形的短边为4.5 mm,代表作业后道床TQI值须在4.5 mm以下。因此五捣三稳工序作业前、后测得的TQI值,应处在黄色区域内。其余工序以此类推。

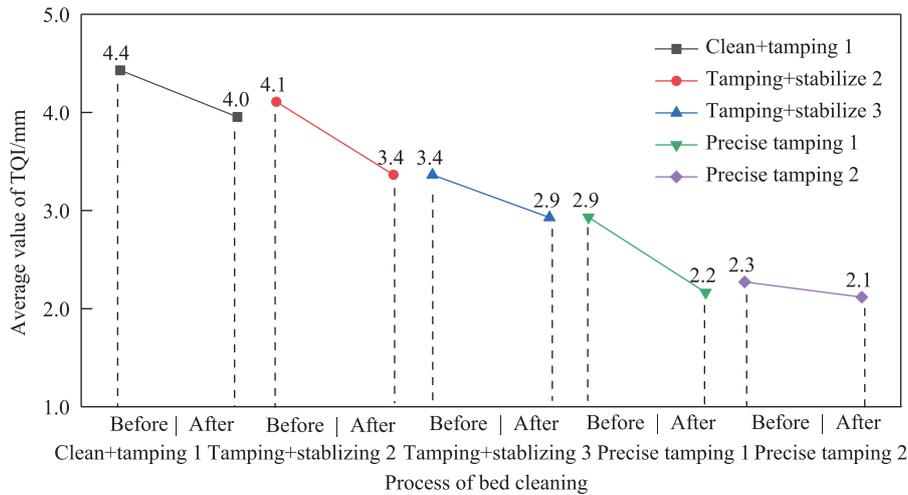


图8 沪蓉线上行K382+900—K406+670区域施工过程TQI变化

Fig.8 Changes of TQI in the construction process of K382+900—K406+670 area on the Shanghai—Chengdu Line upward

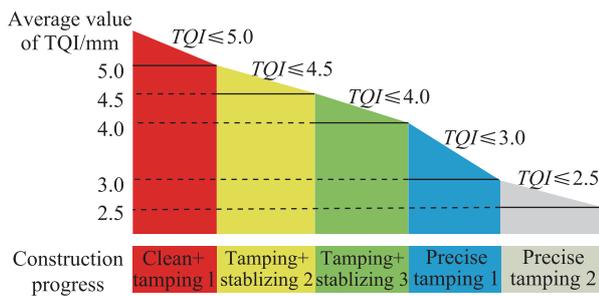


图9 有砟高铁道床清筛作业分级管控指标

Fig.9 Ballast railway bed cleaning classification control index

3 结论

结合我国首次有砟高铁道床清筛大修作业工程,基于沪蓉线合宁段综合检测车的动态检测数据,以及清筛施工过程中,各工序前、后测量的TQI数据,经过筛选整理,并结合工程实践经验进行分析,得到以下结论。

1) 提出有砟高铁道床清筛的轨道质量指数指标: $TQI \geq 4.0$ mm,建议以12个月为周期对有砟高铁线路进行周期维修,并通过道床脏污率进行了验证。

2) 基于沪蓉线清筛成功经验,建议有砟高铁清筛采用以下流程:第1天,清筛后三捣两稳作业;第2天,两捣一稳作业;第3天,两捣一稳作业,精测网测量;第4天,大机精捣两捣一稳作业,同步精测网测量;第5天,大机精捣两捣一稳作业。

3) 提出有砟高铁道床清筛作业的分级管控

指标,施工后静态轨道质量需满足:清筛后 $TQI \leq 5.0$ mm,三捣两稳后 $TQI \leq 4.5$ mm,五捣三稳后 $TQI \leq 4.0$ mm,精捣1工序后 $TQI \leq 3.0$ mm,精捣2工序后 $TQI \leq 2.5$ mm。

参考文献:

[1] 宁国平. 优化有砟高铁轨道精调流程的实践[J]. 上海铁道科技, 2016(4): 163-164.
 NING G P. Practice of optimizing the fine adjustment process of ballasted high-speed railway track[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2016(4): 163-164.
 [2] 漆光凯, 李国昌. 高速铁路有砟轨道维修管理与作业质量控制[J]. 铁道运营技术, 2020, 26(4): 5-7.
 QI G K, LI G C. Maintenance management and quality control of high speed railway ballast track[J]. Railway Operation Technology, 2020, 26(4): 5-7.
 [3] 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.
 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.
 [4] 时瑾, 张雨潇, 陈云峰, 等. 有砟高铁捣固作业轨向平顺性控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2): 76-86.
 SHI J, ZHANG Y X, CHEN Y F, et al. Track alignment irregularity control method for tamping operation of ballasted high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 76-86.
 [5] 王英杰, 楚杭, 时瑾, 等. 有砟高铁大机捣固质量相关性

- 及敏感波长研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 37-41.
WANG Y J, CHU H, SHI J, et al. Research on the machine tamping quality correlation and sensitive wavelengths of high-speed railway ballasted track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 37-41.
- [6] 张雨潇. 基于平顺性的有砟轨道精捣方案优化及效果评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHANG Y X. Optimization and effect evaluation of ballasted track precise tamping scheme based on track smoothness[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [7] CHEN L N. Study on mechanical maintenance method of ballasted track of high-speed railway based on nonlinear discrete element theory[J]. Nonlinear Engineering, 2022, 11(1): 447-454.
- [8] XIAO H, ZHANG Z H, ZHU Y J, et al. Experimental analysis of ballast bed state in newly constructed railways after tamping and stabilizing operation[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363(2): 129772.
- [9] 陈瑞, 杨嘉玺, 林杨杰, 等. 基于浴盆曲线的机械加工设备维护策略[J]. 设备管理与维修, 2022(18): 15-17.
CHEN R, YANG J X, LIN Y J, et al. Maintenance S strategy of machining equipment based on bathtub curve[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(18): 15-17.
- [10] 王风. 朔黄重载铁路线路设备合理修理周期研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 29-32.
WANG F. Research on reasonable maintenance cycle of Shuozhou-Huanghuagang heavy haul railway line equipment[J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 29-32.
- [11] 支洋. 高速铁路线路设备大修周期管理技术研究[J]. 中国铁路, 2024 (9): 136-143.
ZHI Y. Research on overhaul cycle management technology for HSR line equipment[J]. China Railway, 2024 (9): 136-143.
- [12] 王新平. 重载线路道床清筛后捣稳作业模式研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(7): 61-64.
WANG X P. Study on tamping modes after ballast bed cleaning of heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2022, 62(7): 61-64.
- [13] 李计民, 杜文. 浅谈煤炭铁路专用线人工清筛施工技术[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(S1): 161-164.
LI J M, DU W. Discussion on manual cleaning technology of coal railway special line[J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(S1): 161-164.



通信作者:王有能(1981—),男,高级工程师,研究方向为轨道养护维修。E-mail:wangyouneng@163.com。

(责任编辑:李根)