文章编号：0253-374X(2026)01-0107-11

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24335

基于层次分析法的有砟轨道精测精捣作业效果综合评价

曲建军[1]，张晓阳[2]，刘　攀[1]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 基础设施检测研究所，北京 100081；2. 中国国家铁路集团有限公司 工电部，北京 100844）

摘要：为构建全面而科学的有砟轨道精测精捣作业效果综合评估体系，综合考虑轨道质量改善、轨道质量追踪、轨道波长能量改善和车辆动态响应4个方面，建立了精测精捣作业效果综合评估体系；结合当前检测手段和精测精捣作业特点，提出了9项评价指标；基于大量的轨道几何检测数据及车体响应数据统计分析，结合现有管理标准，针对不同的评价指标将其划分成6个等级；采用层次分析法，结合专家打分和评议，明确了不同评价模块和评价指标的权重，提出了一种基于层次分析法的精测精捣作业效果综合评价方法。通过实例分析，对比了3个工务段的不同精测精捣模式作业效果。分析结果表明，工务段1作业效果最好，其次为工务段3和工务段2。该方法能够应用于不同精测精捣维修区段的效果评价、不同维修作业模式的效果对比分析，科学指导现场作业模式的选择，为科学、系统地评价精测精捣作业效果提供依据。

关键词：铁道工程；效果综合评价；层次分析法；精测精捣；轨道质量指数

中图分类号：U216.4　　**文献标志码**：A

Comprehensive Evaluation of Ballast Track Precise Measurement and Precise Tamping Performance Based on the Analytic Hierarchy Process

QU Jianjun[1], *ZHANG Xiaoyang*[2], *LIU Pan*[1]

(1. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Department of Track, Communication and Signaling, and Power Supply, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: To establish a comprehensive and scientific evaluation system for the operational performance of precise measurement and precise tamping (PMPT) on ballasted tracks, taking into account four aspects: track quality improvement, track quality tracking, track wavelength energy improvement, and vehicle dynamic response, a comprehensive evaluation system for the operational performance of PMPT is established. Considering current inspection methods and the characteristics of PMPT operation, nine evaluation indicators are proposed. Based on extensive statistical analysis of track geometry inspection data and vehicle response data, and in accordance with existing management standards, these indicators were classified into six grades. Using the analytic hierarchy process (AHP) combined with expert scoring and evaluation, the weights for different evaluation modules and indicators are determined. A comprehensive evaluation method based on AHP is proposed for assessing the operational performance of PMPT. Through a case study, the operational performance of different PMPT modes from three track maintenance divisions is compared. The analysis results indicate that the operational performance of track maintenance division 1 is the best, followed by track maintenance divisions 3 and 2. This method can be applied to evaluate the performance of different PMPT sections, compare and analyze the performance of different maintenance operation modes, scientifically guide the selection of on-site operation modes, and provide a foundation for the scientific and systematic evaluation of the operational performance of PMPT.

Keywords: railway engineering; comprehensive performance evaluation; analytic hierarchy process (AHP); precise measurement and precise tamping (PMPT); track quality index

收稿日期：2024-11-02

基金项目：国家重点研发计划(2022YFB2602905)；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划“揭榜挂帅”课题[N2024G022(JB)]；中国铁道科学研究院集团有限公司基金(2023YJ099)

第一作者：曲建军，研究员，工学博士，主要研究方向为轨道管理与维修决策分析技术。E-mail：qujianjun0801@126.com

通信作者：刘　攀，助理研究员，工学硕士，主要研究方向为轨道管理与检测分析技术。E-mail：liupanrail@163.com

论文拓展介绍

精测精捣是基于轨道控制网、精测技术对有砟轨道进行测量,利用测量成果开展线形优化并制定捣固作业方案,大型养路机械根据捣固作业方案实施数字化精捣作业[1],能够有效地改善轨道几何不平顺,是用于有砟轨道养护维修、提升线路设备质量的重要手段[2-4]。相比传统大机捣固作业方式,精测精捣技术的推广和应用使得普速铁路有砟轨道线路设备质量得到了明显提升。精测精捣作业效果评价和质量验收是线路设备状态评定和考核现场作业质量的重要工作内容,国铁集团工电线路函〔2021〕4号文《运营普速铁路轨道精测精捣指导意见》明确指出,应建立大机捣固作业质量评价制度,定期对每台捣固车作业前后质量变化情况进行分析,同时对不同测量方式、不同作业模式、不同机组的作业效果进行跟踪分析,以全面、准确掌握不同维修条件下的设备质量变化规律,为科学制定维修策略提供支撑。

基于动态检测数据的轨道区段状态评价方法已经成为各国铁路养护维修决策及效果评价的基础,铁路维修部门利用单元区段的轨道几何不平顺标准差,直接或间接评判轨道质量[5-6],例如:美国的轨道粗糙度指数、日本的P值、法国的平均偏差指数TL、荷兰的N指数、奥地利的五参数模型w_5等等。文献[7-9]采用捣固前后高低不平顺标准差改善量来评价捣固作业效果,建立了捣固前高低和改善量两者的关联模型,研究表明捣固后高低改善量与捣固前高低不平顺存在明显正相关;文献[10-11]采用UIC的捣固效果评价标准[12],将瑞典某重载铁路捣固作业前后高低不平顺值分为了优、好和差3个等级。我国大机捣固作业效果分析以轨道质量指数TQI(Track Quality Index)评价为主,对捣固作业前后轨道质量进行评价。木东升等[13]利用轨道几何改善率,研究了大机捣固对高速铁路有砟轨道几何不平不顺的改善效果;邱俊兴等[14]提出捣固前后单位垂向不平顺改善率,来评价捣固作业效果。曲建军[15]研究了评价大机捣固效果的敏感性指标,剔除单项轨距,提出了适用于评价大机捣固作业效果的轨道质量指数MTQI(Machine Tamping Quality Index)。杨飞等[16]分析了捣固前后各项轨道几何参数的变化情况,提出了捣固指数和拨道指数,分别用于评价大机捣固在轨道垂向和横向方面的作业水平。李仕毅等[17-18]综合考虑捣固后的即时效果和维持效果,提出了由改善率和发展率组成的捣固作业改善系数,作为捣固作业效果的评价参数。时瑾等[19-20]针对新建有砟高速铁路,采用时频特征方法分析了精捣作业效果;张皓然等[21]研究了捣固作业前后的轨道几何形位变化,基于时频域分布特征研究了对捣固作业前后波长改善情况,指出高低不平顺的改善效果明显优于轨向不平顺;孙宪夫[22]对新建线路精捣作业效果从时频域特征2个方面进行评价,时域特征统计捣固前后不同范围TQI个数,频域特征采用轨道不平顺谱对高程偏差和平面偏差进行频谱分析。

目前相比于传统大机捣固,精测精捣技术的运用不仅能够改善轨道几何不平顺,还可以起到改善轨道长波线形的作用,并延长轨道质量保质期。我国精测精捣作业效果评价主要依靠对比分析捣固前后动态检测数据TQI降幅和改善率,评价方式较为单一。对轨道线形的改善、捣固后轨道质量劣化发展及捣固保质期关注较少,缺乏系统全面的综合评价手段。因此,需要综合考虑不同评价指标,建立精测精捣作业效果评估体系,对不同测量方式、不同捣固模式、不同机型的捣固作业效果进行科学的分析和评估。本文综合考虑轨道质量改善、轨道质量追踪、轨道波长能量改善和车辆动态响应4个方面,建立精测精捣作业效果综合评估体系;采用层次分析法,结合专家打分和评议,提出一种有砟轨道精测精捣作业效果综合评价方法。通过实例分析,对比不同单位、不同模式的作业效果,为现场的精测精捣作业效果评价和质量验收提供依据。

1 精测精捣作业效果综合评估体系

1.1 构建综合评估体系

轨道精测精捣能够成段有效地改善线路轨道几何状态,同时兼顾恢复既有线轨道线形线位[23],提高线路设备质量。为有效和全面评价其作业效果,建立精测精捣作业效果综合评估体系,如图1所示。

精测精捣作业效果综合评估体系构建思路为:轨道质量改善评价是根据捣固后当下的轨道质量状态,反映精测精捣作业的直接作用效果,也是目前工务部门最为重视的一部分;通过长期轨道质量追踪,反映精测精捣后轨道质量的保持效果;轨道波长能量改善通过对比捣固前后高低、轨向在不同波长范围的能量改善程度,反映精测精捣对线形改善效果;车辆动态响应通过捣固后车体加速度峰值偏差超限情况,反映精测精捣后线路平稳性和舒适性。根据精测精捣作业原理及当前检测数据的特征,提出评价精测精捣作业效果的指标,建立了综合全面的精测精捣作业效果评估体系。

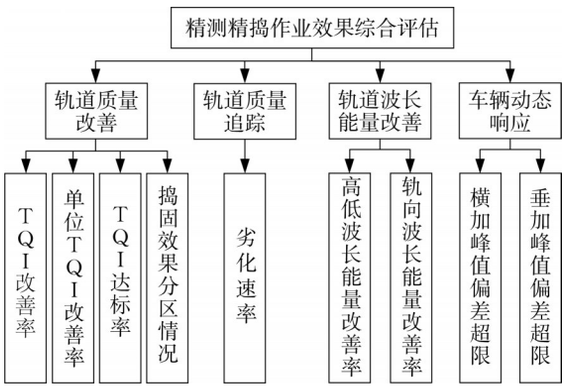

图1　精测精捣作业效果综合评估体系

Fig. 1　Comprehensive evaluation system for PMPT operation performance

1.2　评价指标及等级划分

结合现场轨道管理经验和现行标准，将上述综合评估体系中多项评价指标采用评价等级赋分方法。应用大量的实际检测数据统计分析，将各自的评价指标划分成a—f共6个管理等级，进行不同等级的赋分，见表1所示。对每个轨道单元进行赋分后，求取平均值作为某作业区段或作业模式在该项目的得分。

表1　不同评价等级赋分

Tab. 1　Scoring for different evaluation levels

a级	b级	c级	d级	e级	f级
100	80	60	40	20	0

1.2.1　轨道质量改善

1.2.1.1　TQI改善率

TQI是描述铁路线路上区段轨道质量状态的评价指标，以200 m为单元计算左右高低、左右轨向、轨距、水平、三角坑7项轨道不平顺幅值标准差之和[24]，是用于评价大机捣固作业区段作业效果的重要指标。大型捣固机械对线路实施数字化捣固维修，能够成段消除有砟轨道高低、轨向等不平顺病害，轨道质量得到明显提升。根据2022年全路普速铁路精测精捣报告统计，平均TQI改善率可达20.4%[25]。可以看出，捣固作业前后TQI有明显改善。因此，定义TQI改善率来评价大机捣固作业效果，计算公式为

$$R=\frac{Q_{\mathrm{bf}}-Q_{\mathrm{af}}}{Q_{\mathrm{bf}}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：R为TQI改善率；Q_{bf}为捣固前TQI；Q_{af}为捣固后TQI。

利用2021—2023年全路普速铁路精测精捣作业区段的轨道几何检测数据，统计出TQI改善率累计分布图，如图2所示。按照80%、60%、40%、20%、0%对应的值进行等级划分，见表2所示。

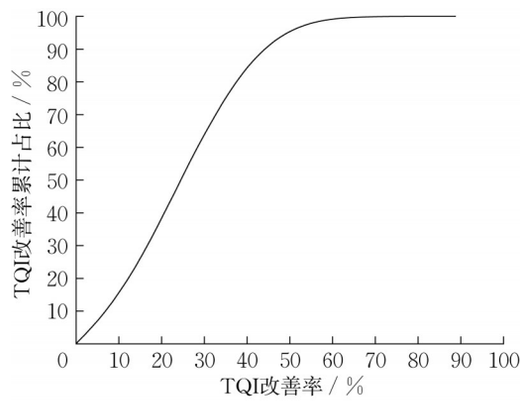

图2　TQI改善率累计分布

Fig. 2　Cumulative distribution of TQI improvement rate

表2　TQI改善率评价指标等级划分标准

Tab. 2　Grading criteria for TQI improvement rate evaluation index

评价等级	TQI改善率/%	评价等级	TQI改善率/%
a级	不小于38	d级	[10,20)
b级	[28,38)	e级	[0,10)
c级	[20,28)	f级	小于0

1.2.1.2　单位TQI改善率

结合大量的应用经验发现，TQI改善率的大小与捣固前线路初始质量有关[26-27]，在相同的捣固模式下，轨道质量越差的线路捣固后越容易获得更高的TQI改善率，相反，轨道质量稍好的线路的TQI改善率相对较低。为了尽可能消除捣固前线路质量对捣固效果评估的影响，提出了单位TQI改善率作为辅助评价指标，计算公式为

$$R_{\mathrm{u}}=\frac{R}{Q_{\mathrm{bf}}} \tag{2}$$

式中：R_{u}为单位TQI改善率。

根据单位TQI改善率累计分布图，如图3所示。按照80%、60%、40%、20%、0对应的值进行等级划分，见表3所示。

1.2.1.3　TQI达标率

在《关于公布普速铁路轨道质量指数分级管理值的通知》中，细化了TQI评价和管理标准，对普速铁路线路TQI按照80、120、160 km·h^{-1}速度等级制定了大型养路机械维修捣固和工程施工作业验收控制标准[28]（见表4）。为验收大机捣固作业质量提出TQI达标率作为评价指标，见式(3)所示。根据2022年全路普速铁路精测精捣报告统计，平均TQI达标

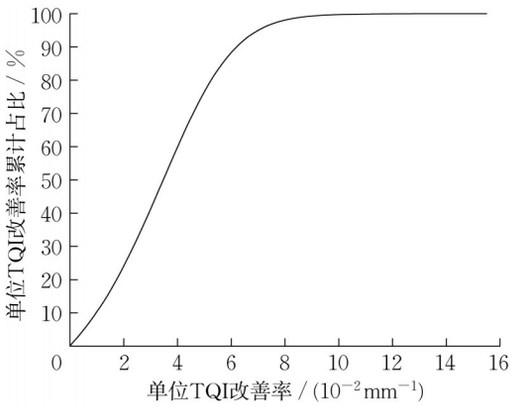

图3 单位TQI改善率累计分布

Fig. 3 Cumulative distribution of unit TQI improvement rate

率可达75%[25]。TQI达标率评分标准见表5所示。

$$R_c=\frac{m}{M}\times 100\% \tag{3}$$

式中:R_c为TQI达标率;m为捣固后TQI小于验收管理值的单元个数;M为维修区段中总单元个数。

1.2.1.4 捣固作业效果分区

捣固作业效果的分区主要是在捣固区段中将不同作业效果的单元区段以分级形式表示出来。根据2021—2023年大量精测精捣作业前后的轨道几何检测数据统计分析,采用四分位法将捣固前后TQI分布情况划分成4个区域,方法如下:①将捣固前TQI划分成等间距的不同区段范围,对落在不同区段范围内的捣固后TQI,确定上四分位数和下四分位数对应的捣固后TQI。②分别对捣固后TQI上四分位数和下四分位数进行线性拟合,作为Ⅰ区和Ⅱ区、Ⅱ区和Ⅲ区分界线,如图4所示。其中,Ⅰ区和Ⅱ区分界线为$y=0.5x+1.0$;Ⅱ区和Ⅲ区分界线为$y=0.8x+0.3$。不同区域评价等级为:Ⅰ区:优秀;Ⅱ区:良好;Ⅲ区:合格;Ⅳ区:不合格。③采用上述方法,建立大机精测精捣作业效果评价图。根据统计捣固前后TQI散点值落在不同区域的占比,将各个区域内的占比转化成相应分数,赋以权重求和为该项目得分,见式(4)所示:

$$G=\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

式中:G为捣固作业效果分区评价得分;$\boldsymbol{\gamma}$为优秀、良好、合格、不合格区域得分的比例系数矩阵,定义为$\boldsymbol{\gamma}=[1.0,0.8,0.6,0]$;$\boldsymbol{Z}$为优秀、良好、合格、不合格区域占比矩阵。

1.2.2 轨道质量追踪

不同作业模式维修后,线路轨道几何、道床力学性能改善存在一定差异,线路质量状态的保持能力不同,通过轨道质量劣化速率反应轨道几何状态的保持能力。该能力是工务部门重点关注的内容,道床保持较长的捣固周期,可减少维修工作量。轨道质量的劣化速率是关于时间的函数,其含义为2次捣固之间动态轨道几何的变化速率[29-30],单位mm/月。计算捣固周期内每个200 m区段的轨道质量劣化速率,见式(5)所示:

$$k=\frac{\sum_{i=1}^{l-1}\frac{x_{i+1}-x_i}{t_{i+1}-t_i}}{l-1} \tag{5}$$

式中:k为同一捣固周期内某200 m单元区段的轨道质量劣化速率;x_i为第i次动态轨道几何不平顺检测值;t_i为第i次检测的时间;l为有效检测次数。

针对不同速度等级线路的轨道质量劣化速率绘制累计分布图,如图5所示,不同线路速度等级之间轨道质量劣化速率分布差异较大,因此对轨道质量按照不同速度等级的线路划分等级标准,见表6所示。

表3 单位TQI改善率评价指标等级划分标准

Tab. 3 Grading criteria for unit TQI improvement rate evaluation index

评价等级	单位TQI改善率/(10^{-2}mm^{-1})	评价等级	单位TQI改善率/(10^{-2}mm^{-1})
a级	不小于5.2	d级	[1.5,3.0)
b级	[4.0,5.2)	e级	[0,1.5)
c级	[3.0,4.0)	f级	小于0

表4 普速铁路线路TQI验收值

Tab. 4 TQI acceptance value of conventional railway lines

速度等级/(km·h^{-1})	作业验收管理值/mm
$v_{max}\leqslant 80$	9
$80<v_{max}\leqslant 120$	7
$120<v_{max}\leqslant 160$	5

表5 TQI达标率评价指标等级划分标准

Tab. 5 Grading criteria for TQI compliance rate evaluation index

评价等级	TQI达标率/%	评价等级	TQI达标率/%
a级	不小于90	d级	[50,70)
b级	[80,90)	e级	[30,50)
c级	[70,80)	f级	小于30

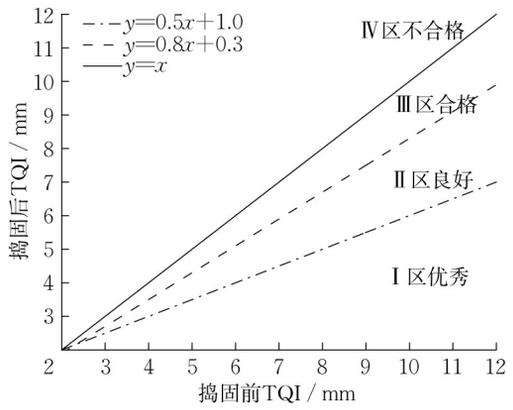

图4　捣固作业效果分区评价

Fig. 4　Zoning evaluation of tamping operation performance

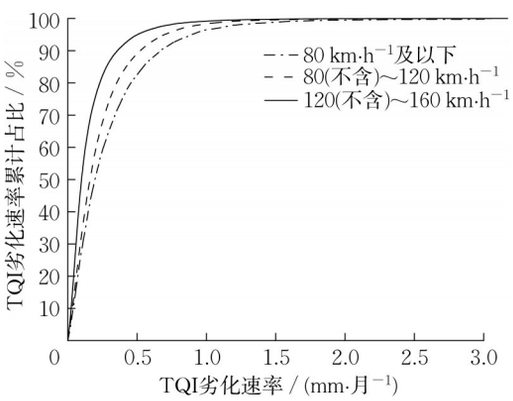

图5　不同速度等级线路TQI劣化速率分布

Fig. 5　Distribution of TQI degradation rates lines of different speed grades

1.2.3　轨道波长能量改善

精测精捣通过绝对线形精确测量指导大机捣固，能够有效控制有砟轨道长波不平顺，因此不能仅仅局限于中波评价TQI指标，还要考虑到轨道波长改善方面的影响。

为了量化大机捣固作业对轨道不平顺波长改善程度，以小波分析理论为基础，提出了考虑波长因素的大机捣固作业评价指标——波长能量改善率(Energy Improvement Rate，EIR)，并利用其分析了不同精测精捣作业模式对轨道线形的改善效果。参照当前普速铁路轨道检测能力范围，利用70 m左右高低、70 m左右轨向不平顺信号进行评估。按照波长范围划分为5层，其对应波段分别为4～8 m、8～16 m、16～32 m、32～64 m、64～128 m，然后利用小波分析理论提取左右高低和左右轨向的能量谱，并将能量信号均值作为各波长分段所对应的不平顺能量值。在获得各波段的不平顺能量后，结合频域评价指标EIR，对大机捣固作业前后左右高低、左右轨向的频域谱进行分析，从而获得不同作业模式下相应轨道不平顺能量的改善情况。EIR评价指标的计算公式见式(6)所示。经过对不同维修区段波长能量改善率统计和分析，高低、轨向波长能量改善率评价指标等级划分标准见表7所示。

$$R_e=\frac{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\omega_{ij}\Delta\lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\omega_{ij}\lambda_{ij}} \tag{6}$$

式中：R_e为轨道不平顺波长能量改善率；$\Delta\lambda_{ij}$为大机捣固作业前后各波长分段内不平顺能量的差值；λ_{ij}为大机捣固作业前各波长分段上的不平顺能量值；ω_{ij}为不同波长分段对应的权数；p为波长分段数；q为参与计算的轨道不平顺项数。

1.2.4　车辆动态响应

根据《普速铁路线路修理规则》(TG/GW102—2019)规定，车体加速度峰值超限管理动态评价采用4级管理：Ⅰ级为日常保持标准、Ⅱ级为计划维修标准、Ⅲ级为临时补修标准、Ⅲ级为限速标准。各级容许偏差管理值如表8所示。通过对捣固后车体垂向加速度和横向加速度峰值偏差超限统计情况来看，Ⅲ级、Ⅳ级超限属于较为严重的超限，出现Ⅱ级以上超限很少，因此对其按照超限等级及个数进行不同记分等级划分，如表9所示。

2　层次分析模型的建立

层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标层、准则层、方案层(指标层)等层次的一种定性、定

表6　TQI劣化速率评价指标等级划分标准

Tab. 6　Grading criteria for TQI deterioration rate evaluation index

单位：mm/月

速度等级/(km·h^{-1})	a级	b级	c级	d级	e级	f级
$v_{max}\leqslant 80$	小于0.04	[0.04,0.10)	[0.10,0.20)	[0.20,0.35)	[0.35,0.65)	不小于0.65
$80<v_{max}\leqslant 120$	小于0.03	[0.03,0.10)	[0.10,0.15)	[0.15,0.25)	[0.25,0.50)	不小于0.50
$120<v_{max}\leqslant 160$	小于0.02	[0.02,0.05)	[0.05,0.10)	[0.10,0.20)	[0.20,0.35)	不小于0.35

表7 波长能量改善率评价指标等级划分标准

Tab. 7 Grading criteria for wavelength energy improvement rate evaluation index

评价等级	高低改善率/%	轨向改善率/%	评价等级	高低改善率/%	轨向改善率/%
a级	不小于60	不小于45	d级	[15,30)	[10,20)
b级	[45,60)	[30,45)	e级	[0,15)	[0,10)
c级	[30,45)	[20,30)	f级	小于0	小于0

表8 车辆动态响应容许偏差管理值

Tab. 8 Allowable deviation management value of vehicle dynamic response

评价等级	车体垂向振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)	车体横向振动加速度/($m \cdot s^{-2}$)
Ⅰ	1.0	0.6
Ⅱ	1.5	0.9
Ⅲ	2.0	1.5
Ⅳ	2.5	2.0

表9 车辆动态响应评价指标等级划分标准

Tab. 9 Grading criteria for vehicle dynamic response evaluation index

评价等级	加速度峰值超限个数	评价等级	加速度峰值超限个数
a级	无Ⅰ级及以上超限	d级	出现Ⅱ级超限1~2个
b级	Ⅰ级超限个数在1~5个	e级	出现Ⅱ级超限2个以上
c级	Ⅰ级超限个数5个以上	f级	出现Ⅲ级或Ⅳ级超限

量分析相结合,且具有系统化、层次化特点的决策分析方法[31]。其主要被应用于多层次、多要素、多准则、多目标的复杂决策问题,可以较好地处理对研究目标的主要影响因素分析,以及可以解决多要素的复杂系统的评价,能够确定评价指标的权重。在建立了精测精捣作业效果综合评估体系的基础上,根据专家打分确定不同元素的权重,结合现场作业经验,利用层次分析法对精测精捣作业效果进行综合评价,主要技术流程如图6所示。

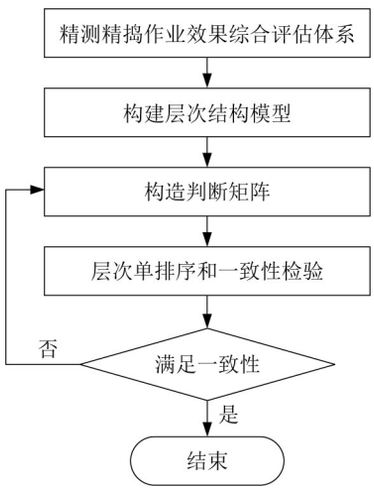

图6 层次分析法技术流程

Fig. 6 Technical process of AHP

2.1 构建层次结构模型

基于层次分析法的精测精捣作业效果综合评价模型结构,第1层为目标层,即精测精捣作业效果综合评价A;第2层为准则层,包含了4项内容分别为轨道质量改善B_1、轨道质量追踪B_2、轨道波长能量改善B_3和车辆动态响应B_4;第3层为指标层,包含了9项评价指标,见表10所示。

表10 精测精捣作业效果综合评价模型结构

Tab. 10 Model structural for comprehensive evaluation of PMPT operation performance

目标层	准则层	指标层
精测精捣作业效果综合评价A	轨道质量改善B_1	TQI改善率C_1
		单位TQI改善率C_2
		TQI达标率C_3
		捣固作业效果分区C_4
	轨道质量追踪B_2	TQI劣化速率C_5
	轨道波长能量改善B_3	高低波长能量改善率C_6
		轨向波长能量改善率C_7
	车辆动态响应B_4	横加峰值偏差超限C_8
		垂加峰值偏差超限C_9

2.2 构建判断矩阵

运用层次分析法确定准则层B、指标层C各元素的权重值。构造判断矩阵采用两两比较法和9点标度法,比较同一层上的2个元素对上一层某元素的影响程度,即$\boldsymbol{A}=(b_{ij})_{n\times n}$表示准则层与目标层之间的判断矩阵,见式(7)所示;$\boldsymbol{B}=(c_{ij})_{n\times n}$表示指标层与准则层之间的判断矩阵,见式(8)所示。

$$\boldsymbol{A}=(b_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{B}=(c_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：b_{ij}为准则层B中第i个元素较第j个元素对目标层A的重要程度；c_{ij}为指标层C中第i个元素较第j个元素对准则层B中某元素的重要程度。

可以看出，若b_i和b_j对准则层A的影响之比为b_{ij}，则b_j和b_i对准则层A的影响之比为$b_{ji}=1/b_{ij}$，见表11所示。

表11　9点标度法

Tab. 11　9 Point scale method

标度$b_{ij}=b_i/b_j$	含义
1	b_i元素较b_j元素影响相同重要
3	b_i元素较b_j元素影响稍微重要
5	b_i元素较b_j元素影响明显重要
7	b_i元素较b_j元素影响强烈重要
9	b_i元素较b_j元素影响极端重要
2、4、6、8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	b_j元素较b_i元素影响的重要程度

在考虑精测精捣作业目的的基础上，结合该领域专家对准则层B各元素对目标层A影响程度的打分，构造判断矩阵$\boldsymbol{A}$，其中判断矩阵$\boldsymbol{A}$对角上的元素全为1，表示同一指标对精测精捣作业效果的影响程度相同，如式(9)所示：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 9/7 & 9/4 & 9/2\\ 7/9 & 1 & 5/2 & 7/2\\ 4/9 & 2/5 & 1 & 3/2\\ 2/9 & 2/7 & 2/3 & 1\end{bmatrix} \tag{9}$$

结合该领域专家打分对指标层C各元素对准则层B各元素影响程度进行两两比较的结果，根据9点标度法构造判断矩阵$\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_3$、$\boldsymbol{B}_4$，如式(10)—(12)所示：

$$\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}1 & 7/2 & 1 & 3/2\\ 2/7 & 1 & 2/7 & 1/2\\ 1 & 7/2 & 1 & 3/2\\ 2/3 & 2/1 & 2/3 & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{B}_3=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B}_4=\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix} \tag{12}$$

2.3　层次单排序和一致性检验

层次单排序是计算判断矩阵特征向量，得到权重向量，明确各元素的权重。采用方根法[32]对判断矩阵的特征向量进行求解。

以判断矩阵$\boldsymbol{A}$为例，假设准则层B_1～B_n的权重向量为$\boldsymbol{W}_1$～$\boldsymbol{W}_n$，则判断矩阵$\boldsymbol{A}$的权重值为

$$\boldsymbol{W}=[\boldsymbol{W}_1,\boldsymbol{W}_2,\cdots,\boldsymbol{W}_n] \tag{13}$$

首先，将判断矩阵$\boldsymbol{A}$中所有元素进行连乘运算，并求其n次方根，计算公式为

$$\overline{W}_i=\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n}b_{ij}}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{14}$$

其次，将$\overline{W}_i$进行向量归一化得到W_i，见式(15)所示。最终，得到判断矩阵$\boldsymbol{A}$的特征向量$\boldsymbol{W}$。

$$W_i=\frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^{n}\overline{W}_i}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{15}$$

判断矩阵$\boldsymbol{A}$的最大特征值为$\lambda_{\max}$，计算公式为

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}})_i}{W_i} \tag{16}$$

式中：$(\boldsymbol{A}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}})_i$为$\boldsymbol{A}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}$的第$i$个分量。

在构造判断矩阵过程，可能会出现元素1比元素2重要，元素2比元素3重要，而元素3又比元素1重要，则违背了权重分配的合理性，需要进行一致性检验。首先，计算一致性指标C_{I}，见式(17)所示。

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{17}$$

若$C_{\mathrm{I}}\neq 0$，则计算一致性比率C_{R}，见式(18)所示。不同阶平均随机一致性指标R_{I}值见表12所示。

$$C_{\mathrm{R}}=\frac{C_{\mathrm{I}}}{R_{\mathrm{I}}} \tag{18}$$

表12　平均随机一致性指标取值

Tab. 12　Average random consistency index $\boldsymbol{R}_{\mathrm{I}}$ values

阶数	R_{I}	阶数	R_{I}
1	0	5	1.12
2	0	6	1.24
3	0.58	7	1.32
4	0.90	8	1.41

当判断矩阵的$C_{\mathrm{R}}<0.1$时，或当$\lambda_{\max}$与矩阵阶数n一致时，认为判断矩阵具有良好的一致性，否则需要调整判断矩阵以满足一致性。采用上述方法，对判断矩阵$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_3$、$\boldsymbol{B}_4$求取特征向量，见表13所示。

对矩阵$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}_1$进行一致性检验，结果如表14所

表13　判断矩阵的特征向量

Tab. 13　Eigenvector of judgment matrix

判断矩阵	权重向量
$\boldsymbol{A}$	[0.41, 0.34, 0.15, 0.10]
$\boldsymbol{B}_1$	[0.34, 0.10, 0.34, 0.22]
$\boldsymbol{B}_3$	[0.5, 0.5]
$\boldsymbol{B}_4$	[0.5, 0.5]

示。B_3、B_4为二阶判断矩阵,不需要进行一致性检验,可以看出各判断矩阵均满足一致性要求。

表14 判断矩阵一致性检验结果

Tab. 14 Consistency test result of judgment matrix

判断矩阵	阶数	λ_{max}	C_I	R_I	C_R
A	4	4.013 5	0.004 5	0.9	0.005
B_1	4	4.003 0	0.001 0	0.9	0.001

综上所述,通过了对准则层和指标层的权重向量计算和一致性检验。召开专家咨询会,经专家评议对上述精测精捣作业效果综合评价关系式中权重进行了调整,综合评估体系中准则层、指标层权重,见表15所示。普速铁路精测精捣作业效果综合评价关系式F见式(19)所示。将各项指标根据评价等级,求取平均得分代入精测精捣作业效果综合评价关系式,能够得到综合得分,对不同精测精捣作业区段或维修作业模式之间进行综合评价和对比分析。

表15 精测精捣作业效果综合评价模型各层次权重

Tab. 15 Weight of each level in the comprehensive evaluation model for PMPT operation performance

目标层	准则层	权重	指标层	单项权重
精测精捣作业效果综合评价A	轨道质量改善B_1	0.40	TQI改善率C_1	0.35
			单位TQI改善率C_2	0.10
			TQI达标率C_3	0.35
			捣固作业效果分区C_4	0.20
	轨道质量追踪B_2	0.35	TQI劣化速率C_5	1.00
	轨道波长能量改善B_3	0.15	高低波长能量改善率C_6	0.50
			轨向波长能量改善率C_7	0.50
	车辆动态响应B_4	0.10	横加峰值偏差超限C_8	0.50
			垂加峰值偏差超限C_9	0.50

$$F=\boldsymbol{W}_A\times\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}_{B_1}\times F_1^{\mathrm{T}}\\ F_2\\ \boldsymbol{W}_{B_3}\times F_3^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{W}_{B_4}\times F_4^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}=$$
$$0.40\times(0.35C_1+0.10C_2+0.35C_3+0.20C_4)+0.35C_5+0.15\times(0.5C_6+0.5C_7)+0.10\times(0.5C_8+0.5C_9) \tag{19}$$

式中:F_1、F_2、F_3和F_4分别为准则层轨道质量改善、轨道质量追踪、轨道波长能量改善、车辆动态响应中各项指标评分组成的矩阵。

3 实例分析

选取某普速铁路线路3个工务段精测精捣作业区段各20.0 km,线路速度等级均为120(不含)~160 km·h^{-1}。其中,工务段1捣固前TQI为4.5 mm,测量方式为惯导小车+CPⅢ控制网,捣固模式为单捣+单捣+稳定;工务段2捣固前TQI为5.5 mm,测量方式为惯导小车,捣固模式为单捣+稳定;工务段3捣固前TQI为5.7 mm,测量方式为惯导小车,捣固模式为单捣+稳定+单捣+稳定,捣固车型均采用DWL-48,其中单捣是大型捣固机械完成一次起道、捣入、夹持和撤出作业,用于改善轨道几何质量;稳定是稳定车对道床施加垂向压力和水平激振力,用于提高道床密实度。利用精测精捣作业效果综合评价方法,对比和评价其作业效果。

3.1 轨道质量改善

各工务段精测精捣区段TQI改善率、单位TQI改善率如图7所示。可以看出,工务段1平均TQI改善率最高为29.0%,其次为工务段3、工务段2。工务段1平均单位TQI改善率最高为6.05×10^{-2}mm^{-1},其次为工务段3、工务段2。工务段1达标率最高为95.0%,其次为工务段3、工务段2。

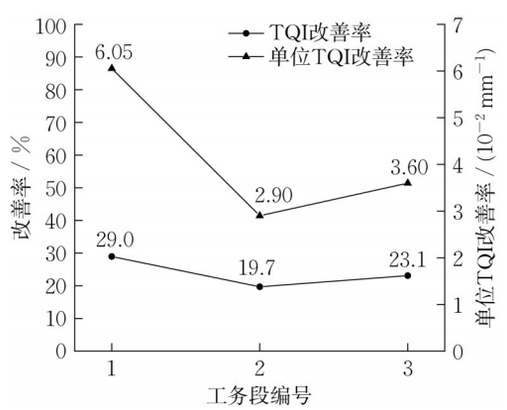

图7 各工务段精测精捣轨道质量分析

Fig. 7 Track quality analysis of PMPT in each track maintenance division

对各工务段捣固前后检测数据开展捣固效果分区统计评价,发现工务段1优秀占比最高,工务段2优秀占比最小。通过将各区域占比按照权重求和,

得到工务段1得分最高,整体效果最好,见表16所示。

表16　各工务段精测精捣效果分区评价情况

Tab.16　Zoning evaluation of PMPT in each track maintenance division

工务段	优秀占比/%	良好占比/%	合格占比/%	不合格占比/%	得分
工务段1	59	22	15	4	85.6
工务段2	12	62	21	5	74.2
工务段3	14	66	18	2	77.6

3.2　轨道质量追踪

结合捣固后3个月内检测数据,分别计算了各工务段精测精捣区段捣固后轨道质量劣化速率平均值,见表17所示。可以看出,工务段1平均劣化速率最小,轨道质量保持能力较好,其次是工务段3、工务段2。

表17　各工务段精测精捣后轨道质量劣化情况

Tab. 17　Deterioration of track quality after PMPT in each track maintenance division

工务段	每月平均劣化速率/mm	得分
工务段1	0.010 4	76.8
工务段2	0.102 6	57.6
工务段3	0.049 9	69.6

3.3　轨道波长能量改善

基于波长能量改善率R_e指标,计算了各工务段精测精捣前后各区段高低、轨向波长能量改善率,根据评价等级进行评分,见表18所示。可以看出,工务段1和工务段3在高低波长能量改善上效果较好,工务段2和工务段1在轨向波长能量改善上效果较好。

3.4　车辆动态响应

根据捣固后1个月内车辆动态响应数据,分别统计了横向加速度超限与垂向加速度超限情况,并根据评价等级进行评分,见表19所示。其中,垂向加速度峰值均未有超限情况,横向加速度峰值均有不同程度的Ⅰ、Ⅱ级超限情况。

表18　各工务段轨道波长能量改善情况

Tab. 18　Improvement of track wavelength energy in each track maintenance division

工务段	高低波长		轨向波长	
	能量改善率/%	得分	能量改善率/%	得分
工务段1	63.6	100	36.5	80
工务段2	45.4	80	44.5	80
工务段3	61.0	100	16.5	40

表19　各工务段精测精捣后车辆响应情况

Tab. 19　Response of vehicles after PMPT in each track maintenance division

工务段	横向加速度		垂向加速度	
	峰值超限情况	得分	峰值超限情况	得分
工务段1	Ⅱ级超限1个	40	无Ⅰ级及以上超限	100
工务段2	Ⅰ级超限6个	60	无Ⅰ级及以上超限	100
工务段3	Ⅰ级超限5个	60	无Ⅰ级及以上超限	100

3.5　效果综合评价

工务段1采用的测量方式在作业精度上高于工务段2、工务段3,捣固模式中工务段1采用2捣1稳、工务段2采用1捣1稳、工务段3采用2捣2稳的作业模式,在作业效果上也存在一定差异。通过计算不同评价指标平均得分,并将其代入精测精捣作业效果综合评价关系式,得到各工务段的综合得分,见表20所示。可以看出,作业效果由好到差,分别为工务段1、工务段3、工务段2。由于精测精捣作业效果受到各个作业环节的影响,该方法能够对精测精捣组合作业效果进行综合评价,科学指导现场作业模式的选择。

表20　各工务段精测精捣作业效果综合评价结果

Tab. 20　Comprehensive evaluation result of PMPT operation in each track maintenance division

工务段	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	总分
工务段1	80.0	100.0	100.0	85.6	76.8	100.0	80.0	40.0	100.0	83.4
工务段2	40.0	40.0	60.0	74.2	57.6	80.0	80.0	60.0	100.0	61.7
工务段3	60.0	60.0	60.0	77.6	69.6	100.0	40.0	60.0	100.0	68.3

4　结语

(1)结合有砟轨道精测精捣作业技术特点,综合考虑了轨道质量改善、轨道质量追踪、轨道波长能量改善和车辆动态响应4个方面及9项评价指标,建立了精测精捣作业效果综合评估体系。

(2)基于大量的轨道几何检测数据及车体动态响应数据的统计和分析,结合现有管理标准,针对不同的评价指标将其划分成6个评价等级。结合专家打分和评议,提出了一种基于层次分析法的精测精捣作业效果综合评价方法。

(3)通过实例分析,利用精测精捣作业效果综合

评价方法对不同工务段精测精捣作业效果进行了综合分析和评价。结果表明:采用惯导小车+CPⅢ控制网测量、单捣+单捣+稳定模式的工务段1作业效果最好,综合得分为83.4;其次为采用惯导小车测量、单捣+稳定+单捣+稳定模式的工务段3,综合得分为68.3;最后为采用惯导小车测量、单捣+稳定模式的工务段2,综合得分为61.7。

(4)提出的普速铁路精测精捣作业效果综合评价方法可应用于不同精测精捣维修区段效果的科学评价,填补了对精测精捣作业效果系统性评价的空白,可推广至高速铁路、重载铁路有砟轨道精测精捣作业效果评价。未来随着检测技术的不断进步、检测项目的不断完善,将增加新的评价指标元素,进一步完善精测精捣作业效果综合评估体系。

作者贡献声明:

曲建军:构建整体思路,提出综合评估体系,指导论文撰写与修改。

张晓阳:数据收集、处理及分析,指导论文修改。

刘 攀:数据分析,提出综合评价方法,论文撰写与修改。

参考文献:

[1] QU Jianjun, LIU Pan, LONG Yiyu, *et al*. Main factors on effect of precise measurement and precise tamping based on BP neural network[J]. Applied Sciences, 2023; 13(7):4273.

[2] 曲建军, 郭战伟, 杨飞,等. 基于块坐标下降法的有砟轨道大机捣固维修经济决策模型及算法[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 32.
QU Jianjun, GUO Zhanwei, YANG Fei, *et al*. Economic decision model and algorithm for large machine tamping maintenance of ballasted track based on block coordinate descent method[J]. China Railway Science, 2023, 44(2):32.

[3] AUDLEY M, ANDREWS J D. The effects of tamping on railway track geometry degradation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013,227(4):376.

[4] GUO Y, MARKINE V, JING G. Review of ballast track tamping: mechanism, challenges and solutions [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 123940.

[5] ESVELD C. Modern railway track [M]. 2nd ed. Duisburg: MRT-Productions, 2001.

[6] 龙亦语. 基于轨道检测数据的朔黄铁路大机捣固作业评估与经济维修决策方法[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.
LONG Yiyu. Evaluation and economic maintenance decision-making method of large machine tamping of shuohuang railway based on track inspection data[D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2022.

[7] VALE C, RIBEIRO I M, CALCADA R. Integer programming to optimize tamping in railway tracks as preventive maintenance [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(1): 123.

[8] LETOT C, SOLEIMANMEIGOUNI I, AHMADI A, *et al*. An adaptive opportunistic maintenance model based on railway track condition prediction[J]. IFAC-Papers on Line, 2016, 49(28): 120.

[9] SOLEIMANMEIGOUNI I, AHMADI A, ARASTEH-KHOUY I, *et al*. Evaluation of the effect of tamping on the track geometry condition: A case study[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(2): 408.

[10] KHOUY I A, LARSSON-KRAIK P, NISSEN A, *et al*. Optimization of track geometry inspection interval [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(5): 546.

[11] ARASTEH KHOUY I, SCHUNNESSON H, JUNTTI U, *et al*. Evaluation of track geometry maintenance for a heavy haul railroad in Sweden: A case study [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(5): 496.

[12] UIC-Infrastructure Department . Best practice guide for optimum track geometry durability[M]. Paris: ETF Railway Technical Publications, 2008.

[13] 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.
MU Dongsheng, ZHOU Yu, HAN Yanbin, *et al*. Effect of track comprehensive maintenance on geometry irregularity improvement of ballast track in high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 90.

[14] 邱俊兴, 许玉德, 李海锋, 等. 捣固与打磨复合作业质量评价方法[J]. 兰州交通大学学报, 2017, 36(1): 29.
QIU Junxing, XU Yude, LI Haifeng, *et al*. Quality evaluation method of ballast tamping and rail grinding compound operation [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2017, 36(1): 29.

[15] 曲建军. 基于大机捣固模式的轨道质量保质期预测方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(8): 117.
QU Jianjun. Research on prediction method of warranty period of track quality based on tamping modes using large tamping machine[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(8): 117.

[16] 杨飞, 钟进军, 尤明熙, 等. 大型养护机械捣固作业效果评价指标及方法研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 28.
YANG Fei, ZHONG Jinjun, YOU Mingxi, *et al*. Research on the effect evaluation index and method for large maintenance machine operation [J]. Railway standard design, 2018, 62(12): 28.

[17] 李仕毅, 刘仍奎, 王福田. 轨道不平顺指标与线路捣固作业质量的相关性分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 114.
LI Shiyi, LIU Rengkui, WANG Futian, *et al*. Correlation analysis between track irregularity indexes and quality of ballast

tamping operation [J]. Railway Engineering, 2019, 59(11): 114.

[18] LI S, LIU R, LI C, *et al*. Recovery measure of tamping on different track geometry irregularity indexes [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(11): 05019005.

[19] 时瑾，张雨潇，楼梁伟，等. 新建高速铁路有砟轨道精捣作业环节改进及效果[J]. 中国铁道科学，2021，42(6)：8.
SHI Jin, ZHANG Yuxiao, LOU Liangwei, *et al*. Optimization and effect of accurate tamping operation link for ballasted track in newly-built high-speed railway [J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 8.

[20] 张雨潇，时瑾，倪国华，等. 有砟轨道捣固作业起道方案的综合修正方法[J]. 西南交通大学学报，2023，58(6)：1347.
ZHANG Yuxiao, SHI Jin, NI Guohua, *et al*. Comprehensive correction method of lifting scheme for tamping operation of ballasted track [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(6): 1374.

[21] 张皓然，何越磊，李再帏，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.
ZHANG Haoran, HE Yuelei, LI Zaiwei, *et al*. Research on quality evaluation method of ballast tamping operation for raising speed railway considering the factor of wavelength [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 653.

[22] 孙宪夫. 既有线提速改造线形优化及动力学评估研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.
SUN Xianfu. Research on line optimization of existing railway upgrading and dynamic evaluation [D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2020.

[23] 刘攀，曲建军，文煦，等. 基于大型捣固车作业兑现率的精捣方案优化方法[J]. 铁道建筑，2023，63(3)：30.
LIU Pan, QU Jianjun, WEN Xu, *et al*. Optimization method of precise tamping scheme based on operation fulfillment rate of large tamping machine [J]. Railway Engineering, 2023, 63(3):30.

[24] 中国铁路总公司. 普速铁路线路维修规则：TG/GW 102—2019[S]. 北京：中国铁道出版社，2019.
China Railway Corporation. Maintenance rule for conventional railway lines: TG/GW 102—2019[S]. Beijing: China Railway Press, 2019.

[25] 曲建军，刘攀，徐菲，等. 2022年普速铁路有砟轨道精测精捣作业情况及效果分析[R]. 北京：中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施检测研究所，2022.
QU Jianjun, LIU Pan, XU Fei, *et al*. Analysis of the situation and effect of precise measurement and precise tamping of ballasted track for the conventional speed lines in 2022 [R]. Beijing: Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2022.

[26] OFFENBACHER S, KOCZWARA C, LANDGRAF M, *et al*. A methodology linking tamping processes and railway track behaviour[J]. Applied Sciences, 2023; 13(4): 2137.

[27] MARTEY EN, ATTOH-OKINE N. Modeling tamping recovery of track geometry using the copula-based approach[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018; 232(8): 2079.

[28] 中国国家铁路集团有限公司工电部. 关于印发普速铁路线路TQI分级管理值的通知：工电线路函〔2021〕10号[Z]. 北京：中国国家铁路集团有限公司，2021.
Department of Track, Communication & Signaling and Power Supply, China State Railway Group Corporation Limited. Notice on issuing the grading management values of track quality index for the conventional speed lines: gong-dian line letter〔2021〕No. 10 [Z]. Beijing: China State Railway Group Corporation Limited, 2021.

[29] 龙亦语，曲建军，刘攀，等. 基于轨检数据的捣固指数计算及决策应用[J]. 铁道建筑，2022，62(5)：42.
LONG Yiyu, QU Jianjun, LIU Pan, *et al*. Calculation and decision application of tamping index based on track inspection data [J]. Railway Engineering, 2022, 62(5): 42.

[30] 常艳艳，刘仍奎，王福田，等. 兰新线铁路轨道几何状态劣化短期预测模型研究[J]. 铁道学报，2020，42(11)：124.
CHANG Yanyan, LIU Rengkui, WANG Futian, *et al*. Short-term prediction model for track geometry degradation on Lanzhou-Xinjiang railway [J]. Journal of the China railway society, 2020, 42(11): 124.

[31] 朱勇，杨睿，李德生，等. 京沪高速铁路建设项目区域环境影响综合评价[J]. 铁道学报，2015，37(11)：117.
ZHU Yong, YANG Rui, LI Desheng, *et al*. Comprehensive assessment of regional environment impact of Beijing-shanghai high speed railway construction project[J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(11): 117.

[32] 王登攀，黄铂清. 基于层次分析法的南亚某环线铁路选线设计[J]. 铁道工程学报，2022，39(12)：35.
WANG Dengpan, HUANG Boqing. Alignment design of a south Asian circular railway based on analytic hierarchy process [J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(12): 35.