

基于劣化趋势模型的轨道病害识别方法研究

王 猛¹, 戚志刚², 赵文博^{3*}

¹国家铁路局安全技术中心, 北京

²中国铁路兰州局集团公司工务部, 甘肃 兰州

³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

收稿日期: 2023年10月23日; 录用日期: 2023年11月21日; 发布日期: 2023年11月29日

摘 要

道床病害是引起有砟轨道线路轨道平顺状态恶化的重要原因。针对这一问题, 本文基于有砟铁路大量轨检车历史检测数据构成的非等距时间序列, 提出一种BP时间序列分段法, 并在此基础上建立轨道高低不平顺标准差劣化率模型, 通过轨道高低不平顺劣化速率间接筛选道床劣化严重区段, 并通过现场复核对进行了验证。结果表明: 轨道高低不平顺标准差随维修呈周期性劣化趋势, 同一区段捣固等维修作业前后劣化率变化不大, 且在同一劣化周期内, 轨道高低不平顺近似线性趋势劣化; 但当道床发生病害时, 轨道高低不平顺标准差劣化率急剧增加, 并可能与相邻区段劣化率有所差异。本文通过对轨检车动态检测轨道不平顺数据进行挖掘可以快速有效识别道床病害区段, 对现场道床养护维修具有指导意义。

关键词

道床病害, BP时间序列分段法, 劣化率, 轨道质量指数

Research on Track Disease Identification Method Based on Deterioration Trend Model

Meng Wang¹, Zhigang Qi², Wenbo Zhao^{3*}

¹National Railway Administration Safety Technology Center, Beijing

²Works Department, China Railway Lanzhou Bureau Group Company, Lanzhou Gansu

³Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing

Received: Oct. 23rd, 2023; accepted: Nov. 21st, 2023; published: Nov. 29th, 2023

*通讯作者。

Abstract

The ballast-bed disease is an important cause of track smoothness deterioration of ballasted track lines. To solve this problem, this paper proposes a BP time series segmentation method based on a non-equal interval time series constructed from a large amount of historical detection data from railway inspection vehicles. On this basis, a standard deviation degradation rate model for track unevenness is established. The severely degraded section of the ballast-bed is indirectly screened by the deterioration rate of the track, and verified by on-site review. The results show that the standard deviation of track irregularity tends to deteriorate periodically with maintenance, and the deterioration rate does not change much before and after maintenance operations such as tamping in the same section, and the track irregularity tends to deteriorate approximately linearly within the same deterioration period. However, when the ballast-bed disease occurs, the deterioration rate of the standard deviation of track irregularity increases sharply and may be different from that of adjacent sections. By mining the data of the track irregularity detected by track inspection car, the paper can quickly and effectively identify the diseased section of the ballast-bed, which has guiding significance for the maintenance and maintenance of the ballast-bed on site.

Keywords

Ballast-Bed Disease, BP Time Series Segmentation Method, Deterioration Rate, TQI

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

有砟轨道具有建设费用低、建设周期短、养护维修方便等优点, 在世界各国得到了广泛应用[1]。道床作为支撑轨枕、传递列车荷载与缓和轮轨冲击的结构部件, 是有砟轨道的重要组成部分, 也是线路设备中的薄弱环节。据统计, 与道床有关的病害, 如道床不均匀沉降、道床脏污、道床板结、道床翻浆冒泥等[2], 占有砟轨道病害的 50%~70% [3], 不仅消耗了大量养护维修成本, 还对列车的安全平稳运行造成不良影响。

道床病害降低了道床的承载能力, 减弱了道床弹性, 引起道床排水不畅、冬季冻胀等问题, 降低轨道部件的使用寿命。道床病害区段在列车荷载冲击下会产生不均匀变形, 反过来道床不均匀变形又会反映到轨道不平顺, 严重影响了行车安全和轨道服役性能[4]。随着列车运行速度的提高, 轨道不平顺导致轨道结构与列车之间的耦合振动更为剧烈[5]。因此快速发现道床病害并及时进行养护维修是铁路工务部门亟待解决的重要问题。

瑞典通过对某重载铁路长期轨道几何和轨道刚度测量数据跟踪分析, 验证了轨道支撑参数与轨道几何退化率之间具有一定的关系[6], 日本研究表明, 道床变形与轨道不平顺大致呈正比关系[7], 随时间推移, 道床变形对轨道不平顺的影响越来越大[8]。国际铁路联盟技术研究所(ORE)通过观测试验表明, 轨道不平顺在相邻两次维修期间表现为线性恶化趋势[9], 加拿大学者及中国学者也分别采用线性模型预测轨道质量指数的发展[10]。综上研究主要关注道床病害区段轨道质量指数的演变规律[11], 然而鲜有关于通过动态检测数据快速识别道床病害区段的报道。

随着轨检车、综合检测列车等移动线路检测设备的推广应用,铁路部门已积累了大量的轨道几何检测数据,如何利用这些数据识别道床病害区段进而科学指导养护维修已成为铁路工务领域的重要研究方向。因此,本文基于连续多次轨道不平顺检测数据,研究有砟轨道线路轨道几何发展规律,并在基础上提出轨道不平顺劣化率模型。本文研究成果可以快速识别定位道床病害区段,方便工务部门准确判断道床层问题,及时采取捣固、清筛等道床养护维修手段,避免道床状态的进一步恶化,延长道床服役寿命,为有砟轨道科学、经济的养护维修提供了技术支持。

2. 轨道不平顺高低标准差劣化趋势

2.1. 道床状态评价指标

当前,轨道不平顺的评价主要采用局部幅值和区段质量管理相结合的模式[12],其中,轨道质量指数(TQI)作为一种能够反映轨道区段整体不平顺状态及轨道劣化程度[13]的指标,在我国铁路工务部门中得到了广泛应用。

传统的 TQI 以 200 m 长度轨道区段作为计量单元,对单元区段内的轨道几何进行统计,用标准差来表示单项轨道几何不平顺状态,而 TQI 则为一个单元区段内高低(左高低、右高低)、轨向(左轨向、右轨向)、轨距、水平和三角坑等七个单项几何不平顺标准差之和,计算方法如下列公式(1)~(3)。

$$TQI = \sum_{i=1}^7 \sigma_i \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

式中, σ_i 为各单项标准差; n 为采样点个数; x 为不平顺幅值; \bar{x}_i 为第 i 单项的算术平均值; x_{ij} 为第 i 单项第 j 个采样点的不平顺幅值。

2.2. 轨道不平顺劣化模型

本节介绍使用轨道不平顺检测数据计算劣化率的方法。1.2.1 节详细阐述了 BP 时间序列分段方法;为衡量高低标准差在一个周期内的劣化程度,本文引入了劣化率,具体方法见 1.2.2 节。

2.2.1. 时间序列分段处理

轨道不平顺经过一定时期的发展,可能超过维修标准限值,经过现场维修后,轨道不平顺峰值会出现突变并再次缓慢变化。分析检测数据随时间的变化(即劣化率)需要对高低标准差时间序列进行分段,传统分段公式如公式(4),

$$f(t) = \begin{cases} a_1 t + b_1 & t < t_0 \\ a_2 t + b_2 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为自变量, t_0 为分段点, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为线性回归系数。

然而实际时间序列分段点并不固定,为了批量处理不同时间序列的分段问题本文提出了逆向传播分段法(BP 分段法),具体步骤如下:

① 每一个分段包含左端点、右端点,时间序列就是找出一一对应的左端点集合 LE 和右端点集合 RE。查找时间序列所有极值点集合 E, LE、RE 为所有极值点 E 的子集,自集合 E 第一个元素 E [1]开始作为

左端点 L 。

② 寻找满足分段条件的右端点集合 R ，分段条件包含幅值限值、时间长度限值等。若 R 为空集，更新下一个极值点为左端点，重复②，直至 R 为非空集合。

③ 取 R 中最大元素作为右端点，寻找检测时间早于右端点、幅值低于右端点且分段长度满足一定条件的极值点为左端点，更新 LE 和 RE 。以本区段右端点后一个极值点作为下一个左端点，更新左端点。

④ 重复②、③。

⑤ 为了精确定位每一个端点，针对左端点集合 LE 、右端点集合 RE 中每一个元素，判断是否为极值点，进行更新。

具体流程如图 1 所示。

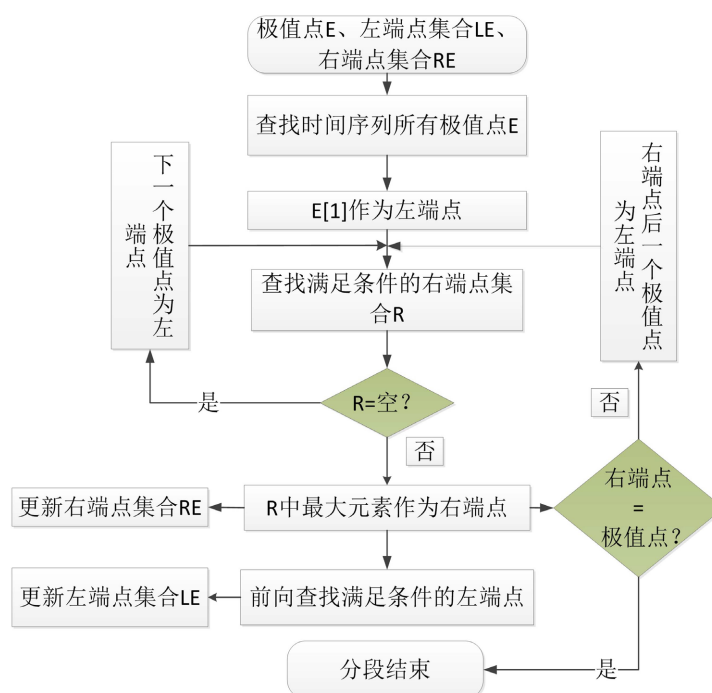


Figure 1. BP sectional flow chart

图 1. BP 分段流程图

2.2.2. 轨道不平顺劣化指标

综合检测列车检测周期为 2 次/月，利用长期检测数据可以构建同一区段高低标准差时间序列，高低标准差数值的上升代表轨道平顺性变差，其变化速率用劣化率(DR)表示，由于每月检测时间并不固定，时间序列为非等距，为便于计量与应用，劣化率以每月为单位，表示为(mm/月)，计算见公式(5)。

$$DR = \frac{\sum_{q=1}^{ns} (t_q - \bar{t})(s_q - \bar{s})}{\sum_{q=1}^{ns} (t_q - \bar{t})^2} \times 30 \quad (5)$$

式中 ns 为分段内检测数据个数， t 、 s 为检测日期和相应日期的高低标准差值， \bar{t} 、 \bar{s} 为检测日期平均值和相应的高低标准差平均值。

3. 基于劣化模型的轨道状态评价方法

3.1. 轨道不平顺劣化特征

选取多条时速 120~160 km/h 的有砟线路轨道区段, 收集自 2015 年 1 月至 2019 年 9 月的综合检测列车轨道不平顺检测数据, 根据图 1 建立轨道不平顺劣化模型。模型包含三部分, 分为输入部分、处理部分、输出部分, 其中输入部分主要包括时间序列整理、数据清洗等, 处理部分主要为时间序列分段处理和劣化率计算, 输出部分为输出劣化率以及分类。

部分区段结果如图 2 所示, 可以看出, 高低标准差在维修作业及其他外部环境因素影响下呈现周期性变化, 同一周期内高低标准差呈近似线性增长, 且相邻两个周期内劣化趋势基本一致。

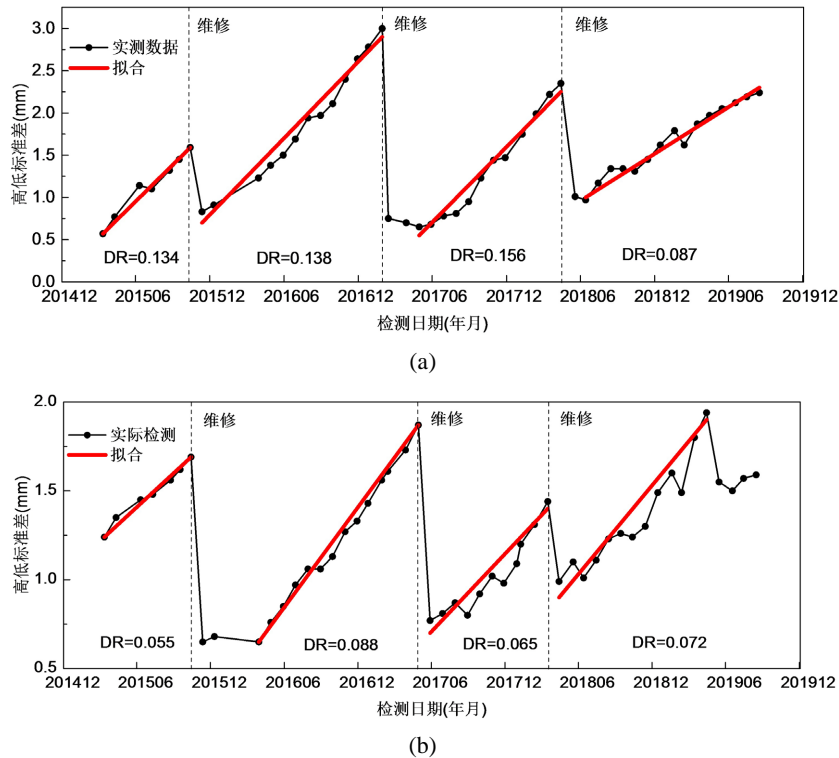


Figure 2. Historical trend of standard deviations. (a) Section 1; (b) Section 2
图 2. 高低标准差历史变化趋势。(a) 区段 1; (b) 区段 2

遍历近 5000 个线路区段, 根据同一区段不同周期或同一时期不同区段高低标准差劣化情况, 获得了五种典型的高低标准差劣化趋势如图 3 所示, 图中 P 代表位置, t 代表检测时间, T 代表周期, 具体劣化趋势分类如下: (a) 高低标准差呈周期性劣化, 劣化率变化不大, 如 P1 区段; (b) 高低标准差在某时间段劣化率突变增大, 如 P2 区段; (c) 经过维修后, 高低标准差保持稳定, 劣化率较小, 如 P3 区段; (d) 高低标准差持续劣化, 如 P4 区段; (e) 在某个劣化周期或多个周期, 某区段劣化率明显比周围其他区段大, 如 P5 区段, 假设 P1~P4 区段与 P5 相邻, 可以看出在 T1 和 T2 周期内, P5 区段都有明显劣化趋势。

3.2. 劣化率分布规律及评价方法

由以上结果可得, 不同区段、不同周期高低标准差劣化率不尽相同, 当然不同线路劣化率也不相同, 选取多条运营线路, 对所有可能出现的劣化率进行统计, 用以掌握劣化率的分布情况, 由于劣化模型要

求高低标准差呈增大趋势，劣化率需大于 0，因此用对数正态分布函数对劣化率概率密度进行拟合，拟合公式见公式(6)，采用拟合优度 R^2 对拟合效果进行评价，见公式(7)。

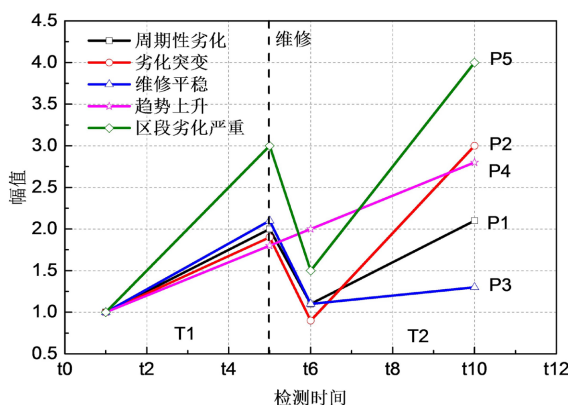


Figure 3. Deterioration characteristics diagram
图 3. 劣化特征示意图

$$f(DR, \mu_{DR}, \sigma_{DR}) = c_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi DR \sigma_{DR}}} e^{-\frac{(\ln DR - \mu_{DR})^2}{2\sigma_{DR}^2}} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^B (P\hat{O}D_i - P\bar{O}D)^2}{\sum_{i=1}^B (P\hat{O}D_i - P\bar{O}D)^2} \quad (7)$$

其中， c_0 、 A 为常数， μ_{DR} 、 σ_{DR} 分别为变量对数的平均值和标准差， POD_i 为实际概率密度， $P\bar{O}D$ 为概率密度均值， $P\hat{O}D_i$ 为概率密度拟合值， R^2 为拟合优度。

劣化率概率密度分布结果如图 4 所示，图中所示劣化率主要集中在 0.02~0.08 mm/月之间，拟合优度 R^2 达到 0.997，呈现明显对数正态分布特性，具体拟合参数见表 1。对于劣化率超出正常范围的区段需要重点关注，通过日常养护维修经验，采用 90% 置信区间，得出劣化率正常范围为 0~0.13 mm/月，考虑到不同线路道床质量的差异引起的劣化率的不同，防止遗漏道床病害区段，将劣化率正常范围限定为 0~0.1 mm/月，因此对于劣化率超过 0.1 mm/月的区段需要引起重视。

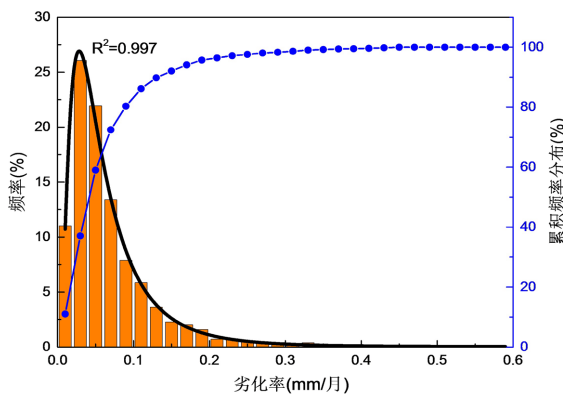


Figure 4. Statistical chart of standard deviation deterioration rate
图 4. 高低标准差劣化率统计图

Table 1. Degradation rate distribution fitting parameters**表 1.** 劣化率分布拟合参数

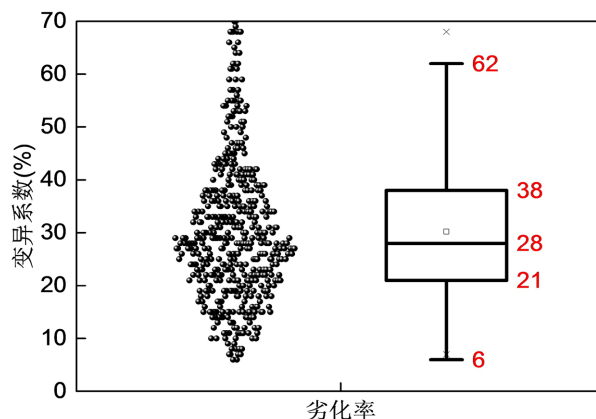
参数	c_0	A	μ_{DR}	σ_{DR}	R^2
拟合值	0.027	1.98	0.051	0.769	0.997

为了衡量同一区段不同周期内劣化率的变异程度，需要引入离散性指标进行定量分析，引进变异系数(Coefficient of Variation, CV)进行衡量。变异系数为标准差与均值的比值，可以消除因均值不同对多个变异程度比较的影响，变异系数越小，表示离散程度越小，计算见公式(8)。

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (8)$$

其中 σ 为标准差， μ 为均值。

计算各个区段劣化率变异系数进行统计分析，作箱型图如图 5 所示。图中所示变异系数中位数为 28%，样本中一半的变异系数集中在 21%~38% 之间，说明各区段劣化率离散程度近似且离散性相对较小。

**Figure 5.** Deterioration rate variation coefficient box diagram**图 5.** 劣化率变异系数箱型图

同一区段劣化率离散性较小，但相邻周期的劣化率仍有一定的差异，为了定量分析相邻两个相邻周期劣化率变化量，对线路所有区段相邻两个周期劣化率改变量进行统计，结果如图 6 所示，图中所示劣化率变化量呈正态分布，拟合公式见公式(9)，其中 R^2 达到 0.986，表明正态分布假设显著，劣化率变化量波动呈正态分布，根据累计频率分布可以看出，90%置信区间下劣化率变化量最大值为 0.05 mm/月(表 2)。

$$f(\mu_{\Delta DR}, \sigma_{\Delta DR}) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta DR}} e^{-\frac{(\Delta DR - \mu_{\Delta DR})^2}{2\sigma_{\Delta DR}^2}} \quad (9)$$

基于劣化率变化特征，利用上述劣化模型将线路各单元区段自动分类并评价道床状态，用以快速识别病害区段，具体分类原则见表 3。当同时出现 C = 2 和 C = 5 类别时，道床发生病害的准确性将大幅提高。

4. 分析模型验证——案例分析

利用所建立的高低标准差劣化率模型对某有砟线路进行实例分析，计算劣化率并分类，并通过现场复核进行检验。

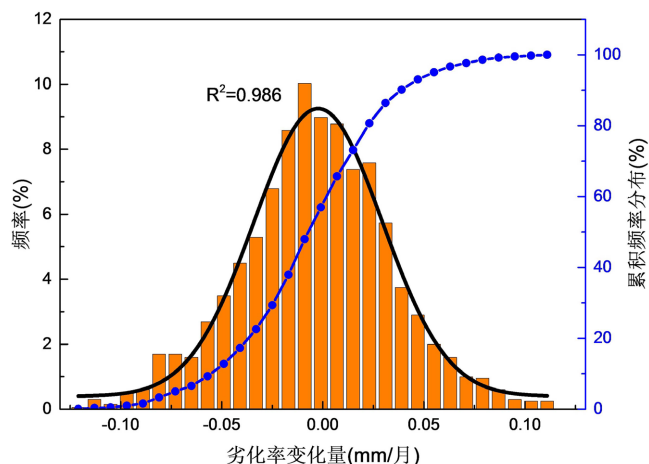


Figure 6. Statistical chart of deterioration rate change
图 6. 劣化率变化量统计图

Table 2. Degradation rate variation distribution fitting parameters
表 2. 劣化率变化量分布拟合参数

参数	μ_{ADR}	σ_{ADR}	R^2
拟合值	0	0.028	0.986

Table 3. Classification of circuit deterioration characteristics
表 3. 线路劣化特征分类

类别	特征	线路状况
C = 1	劣化率相比前期无明显变化，且整体较小	线路质量状态良好
C = 2	时间序列有多个分段，近期分段劣化率相较早期劣化率发生突变，且超过 0.05 mm/月	道床近期可能发生病害
C = 3	时间序列有多个分段，经过维修后，高低标准差保持稳定，劣化率较小	线路质量状态良好
C = 4	时间序列划分为一个整体区段，高低标准差持续上升或波动上升， $DR > 0$	道床可能持续弱化
C = 5	同一劣化周期，本区段劣化率远大于相邻区段劣化率，且劣化率超过 0.1 mm/月。	道床近期可能发生病害

1) 本案例分析了疑似出现道床病害的区段 3，通过劣化率模型将其分类为 C = 2、C = 5，劣化模型如图 7 所示，相邻劣化率从 0.051 mm/月增大到 0.213 mm/月，变化 0.162 mm/月，明显超过阈值 0.05 mm/月，且劣化率 0.213 mm/月超过阈值 0.1 mm/月。

对区段 3 检测车连续多次轨道波形进行对比如图 8 所示，可以看出该区段轨道高低不平顺变化显著，且现场在区段 3 附近有明显道床翻浆冒泥病害。

2) 本案例分析了疑似出现道床病害的区段 4，通过劣化率模型将其分类为 C = 5，高低标准差劣化模型见图 9，而相邻的区段 4-1 和区段 4-2 高低标准差劣化模型分别见图 10 和图 11。可以看出自 2017 年 2 月维修后，区段 4 劣化率达到 0.3 mm/月，超过阈值 0.1 mm/月，且明显大于相邻两个区段。

基于劣化模型识别结果对现场进行复核，发现道砟粉碎严重，因此道床承载力及轨道平顺性受到严重影响，需要及时更换道砟。从图 9~11 可以看出道床病害区段轨道高低标准差劣化率往往呈现明显变化，

而在道床病害临近其他区段，劣化率变化量相对较小，比较稳定，充分说明了利用高低标准差劣化率的变化可以有效识别道床病害。

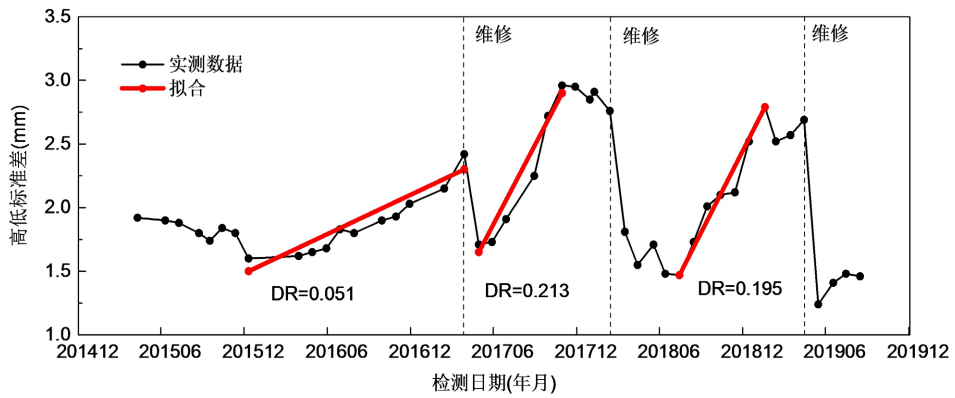


Figure 7. Degradation rate model of segment 3

图 7. 区段 3 劣化率模型

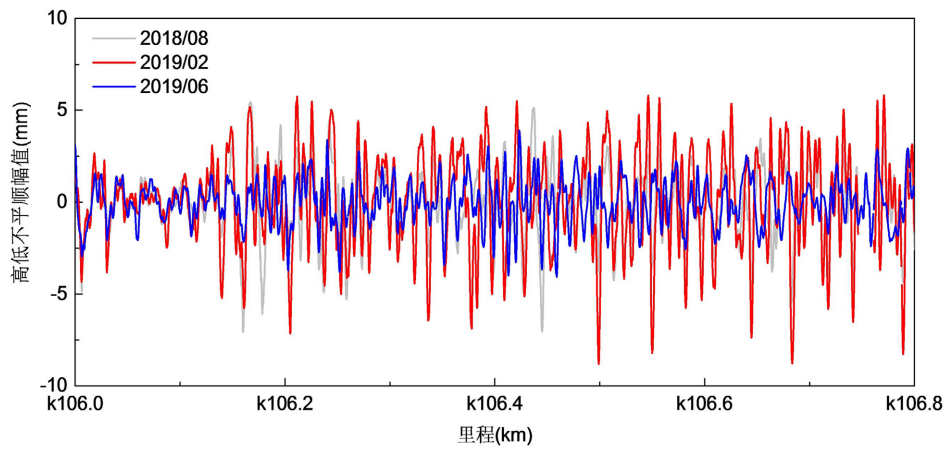


Figure 8. Waveform diagrams of segment 3

图 8. 区段 3 检测波形图

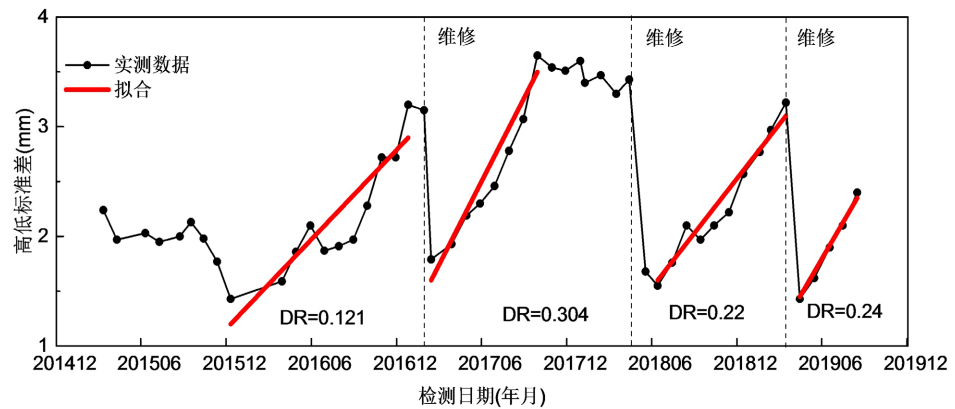


Figure 9. Degradation rate model of segment 4

图 9. 区段 4 劣化率模型

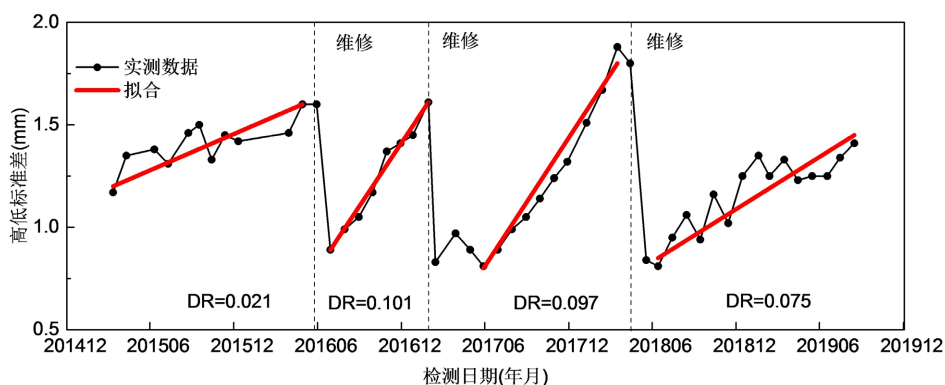


Figure 10. Degradation rate model of segment 4-1

图 10. 相邻的区段 4-1 区段恶化率模型

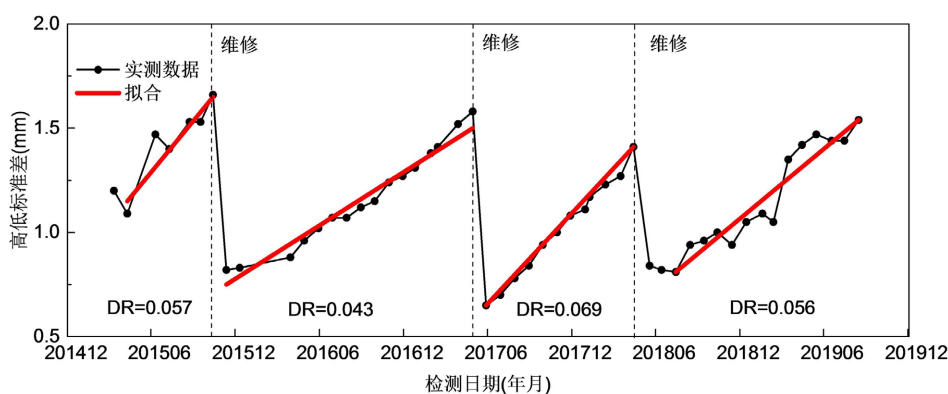


Figure 11. Degradation rate model of segment 4-2

图 11. 相邻的区段 4-2 恶化率模型

5. 结论

本文提出了一种 BP 时间序列分段法，建立了轨道不平顺高低标准差劣化率模型，用以计算轨道不平顺劣化率，并通过对劣化率的统计分析进行道床状态评价。模型计算结果与现场实测的对比表明，该模型能够有效识别道床劣化严重区段。主要结论如下：

1) 高低标准差时间序列呈周期性变化趋势，同一周期内，劣化近似呈线性趋势，采用 BP 分段方法可以对时间序列进行有效分段，并对各分段进行线性回归分析，利用回归系数构建劣化率评价指标得出相邻周期内高低标准差劣化具有“记忆性”，同一区段多个周期劣化率变异系数基本在 30% 以内；90% 置信区间下劣化率最大值为 0.1 mm/月，相邻周期劣化率变化量最大为 0.05 mm/月。

2) 基于劣化率变化特征，将轨道不平顺劣化归纳为周期性劣化、突变劣化、维修平稳、趋势上升和重度劣化五类。通过对突变劣化、重度劣化的区段进行复核，验证了模型的有效性。

3) 本文提出的高低标准差劣化率计算模型可实现道床状态的分级评价，可为道床养护维修决策提供技术支持。下一步研究将结合工务部门的现场养护维修实践，细化道床状态分级评价方法，使其更加精确、合理。

基金项目

中国铁路兰州局集团公司科技研究开发计划课题(LZJKY2023034-1)。

参考文献

- [1] 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): 117-122.
- [2] 李坚. 铁路线路道床病害成因及整治策略[J]. 江西建材, 2017(22): 145.
- [3] Selig, E.T. and Waters, J.M. (1994) Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford, London. <https://doi.org/10.1680/tgasm.20139>
- [4] Mishra, D., Boler, H., Tutumluer, E., Hou, W.T. and Hyslip, J.P. (2017) Deformation and Dynamic Load Amplification Trends at Railroad Bridge Approaches Effects Caused by High-Speed Passenger Trains. *Transportation Research Record*, **2607**, 43-53. <https://doi.org/10.3141/2607-07>
- [5] Lamas-Lopez, F. (2016) Track-Bed Mechanical Behaviour under the Impact of Train at Different Speeds. *Soils and Foundations*, **56**, 627-639. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.07.004>
- [6] Nielsen, J.C.O. and Berggren, E.G. (2017) Track Geometry Degradation on the Swedish Heavy Haul Line Correlation between Measured Support Stiffness Gradients and Differential Settlement. *Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference (IHHA 2017)*, Cape Town, 542-549.
- [7] 乔成, 李得军, 蒋富根, 等. 动态检测数据在高铁有砟轨道线路维修中的应用[J]. 铁道技术监督, 2023, 51(8): 30-33+39.
- [8] 张紫菱. 基于轨道质量状态的高速铁路轨道维修周期的预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013. <https://doi.org/10.7666/d.Y2427915>
- [9] 高亮, 徐昉, 杨国涛, 等. 铁路有砟道床劣化研究进展综述[J]. 铁道学报, 2022, 44(8): 78-92.
- [10] 许玉德, 吴纪才. 利用线性预测模型分析轨道不平顺发展[J]. 石家庄铁道学院学报, 2005, 18(1): 6-9.
- [11] Vale, C., Ribeiro, I.M. and Calcada, R. (2012) Integer Programming to Optimize Tamping in Railway Tracks as Preventive Maintenance. *Journal of Transportation Engineering*, **138**, 123-131. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000296)
- [12] 罗微. 高低和 TQI 的轨道不平顺预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013. <https://doi.org/10.7666/d.Y2319826>
- [13] 王英杰, 楚杭, 时瑾, 等. 世界各国铁路轨道质量指数对比研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(7): 30-35.