文章编号:1005-0523(2022)01-0076-06

高速铁路设施管理单元区段动态划分方法

鲁思成[1,2],许玉德[1,2],乔 雨[1,2]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;
2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室,上海 201804)

摘要:基于不等长的单元区段划分思路,结合单元区段内基础设施的属性特征,以轨道质量指数(TQI)作为单元区段划分的标准,提出了一种考虑线路状态、基础设施属性、养护维修能力的单元区段动态划分方法。确定了单元区段划分的原则和优先级,按照两阶段实现单元区段的划分,第一阶段是不等长、固定的单元区段划分,可以反映线路基础设施的基本情况;第二阶段是利用自底向上算法进行不等长、动态的单元区段划分,可以反映线路基础设施质量状态较差的重点区段情况。利用提出的方法,对沪宁城际铁路基础设施单元区段划分进行了实践,结果表明该方法可以有效、多样地划分单元区段,划分的结果接近线路状态的真实情况。

关键词:高速铁路;基础设施;单元区段;动态划分

中图分类号:U216.4 **文献标志码**:A

本文引用格式:鲁思成,许玉德,乔雨. 高速铁路设施管理单元区段动态划分方法[J]. 华东交通大学学报,2021,38(6):76-81.

Dynamic Division Method of Unit Section for the High-Speed Railway Infrastructure Management

Lu Sicheng[1,2], Xu Yude[1,2], Qiao Yu[1,2]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the idea of the division of the unit section with unequal length, combined with the attribute characteristics of the infrastructure in the unit section, and taking the track quality index (TQI) as the standard of the division of the unit section, a dynamic division method for unit section considering line state, infrastructure attribute and maintenance capability was proposed. The principle and priority of the division of the unit section were determined. The division of unit section was realized in two stages. The first stage was the division of unequal length and fixed unit section, which could reflect the basic situation of the line infrastructure. In the second stage, the bottom-up algorithm was employed to divide the section with unequal length dynamically, which could reflect the key sections with poor quality of the line infrastructure. By using the proposed method, the division of the unit section of Shanghai-Nanjing intercity railway infrastructure was conducted, and the results show that the method could effectively and variously divide the unit section, and the division results were close to the real state of the line.

Key words: high speed railway; infrastructure; unit section; dynamic division

Citation format: LU S C, XU Y D, QIAO Y. Dynamic division method of unit section for the high-speed railway infrastructure management[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 76-81.

收稿日期:2021-04-17

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2017G003-B)

良好的基础设施质量状态是高速铁路行车安全的重要保障[1]，轨道不平顺会对列车的运行安全产生影响[2-3]。我国高速铁路养护维修部门采用单元区段对线路基础设施进行管理，通过将线路划分为等长的单元区段，掌握单元区段内基础设施的状态变化规律，针对性地进行养护维修作业[4]。学者对传统单元区段的划分进行了研究[5-6]。然而，我国高速铁路存在线路条件、结构形式、环境特征多样且复杂的特点，在运营阶段，传统单元区段划分方法的问题逐渐显现[7]。

在新的单元区段划分方法研究方面，仲春艳等[8]建立了单元区段选择模型，实现了结合线路状态、考虑养修能力的不等长、动态单元区段划分。刘明亮[9]通过对设备单元划分中影响因素的对比分析，提出了划分的主要参考依据，分析了具体方法流程，在此基础上探讨了设备单元动态划分方法。陶竑宇[10]探讨了将单元质量均衡管理思想运用于铁路轨道管理中的可行性，分析了铁路线路轨道单元划分的意义、原则以及划分的形式。然而，现有的研究多集中在铁路工务基础设施方面，没能将多专业综合维修[11]的理念考虑进来，使得提出的单元区段划分方法仍存在一定的专业局限性。

1　单元区段划分原则

我国铁路将200 m 作为线路管理的基本单元长度，高速铁路线路管理的单元区段则是由若干连续的基本单元组成。为实现单元区段自动划分，根据仲春燕等[8]的研究，给定划分原则及优先级。

1.1　第一原则

第一原则是单元区段最基本的原则，主要包括：① 基本单元的长度为 200 m；② 轨道质量指数(track quality index，TQI)计算长度与基本单元长度一致；③ 单元区段的最小长度为 200 m，最大长度为 2 000 m；④ 单元区段长度为基本单元区段最小长度 200 m 的整倍数。

1.2　第二原则

第二原则是指单元区段划分的优先级，根据高速铁路养护维修部门提供的台账信息，将不同类型的地段划为不等长、固定的单元区段。地段主要包括：① 车站；② 道岔；③ 桥梁；④ 隧道；⑤ 曲线；⑥ 坡道；⑦ 人为指定区段。

根据第一原则和第二原则，可将线路进行第一阶段的固定单元区段划分，将线路划分为不等长、不同属性、固定的单元区段。

1.3　第三原则

第三原则是为了重点掌握状态较差的地段，在划分单元区段时，将连续较差的基本单元划分在一起，这需要根据连续的线路检测数据进行筛选，该方法是不等长、动态的区段划分方法。该阶段也是单元区段划分的第二阶段，主要考虑：① TQI 值；② 接触线高度；③ 弓网接触力；④ 其他连续检测数据。结合实际，可选择上述检测数据的一种或多种对线路进行动态划分。

2　单元区段动态划分方法

以 TQI 作为单元区段划分的标准，如图 1 所示，将高速铁路 TQI 检测数据看作一个数据序列，对于单元区段的动态划分，找出数据序列中的特征点，基于特征点对数据序列进行分割。显然的，数据序列中最为直观的特征点为数据的极值点，但并非所有的极值点都是单元区段划分的特征点，这是因为当在某个区间 TQI 低于标准中的限值时，不管该区间的极值点情况如何，都不会影响该区间质量状态的评价结果；因此，必须从数据序列大量的极值点中筛选出有用的特征点。

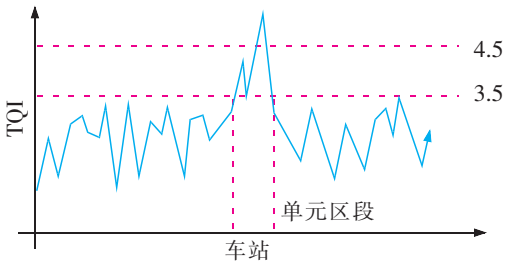


图 1　高速铁路 TQI 数据序列

Fig.1　TQI data sequence of the high speed railway

2.1　单元区段自动划分算法

为实现单元区段自动划分目的，本文采用自底向上分割算法[15](bottom-up)对 TQI 数据序列进行分割。自底向上算法是从最精细的分割方式(时间序列上相邻两点组成最小分割片段)出发，然后计算合并两个相邻分割片段所产生的分割误差，合并分割误差最小的两个邻接分割片段，直到分割误差超过某个指定门限值停止合并。对于数据序列分割时产生的误差，本文则采用最大误差标准。

单元区段自动划分的算法思路：

Step1 输入一段长度为 n，幅值为 A 的单维时间序列 $T=(t_1,t_2,\cdots,t_n)$，预定的合并代价阈值参数设为 p；

Step2 筛选序列中所有极值点，极值点为$\{e_1,e_2,\cdots,e_m\}$；

Step3 计算每个备选分割点与右临备选分割点的合并代价；

Step4 将当前具有最小合并代价的备选分割点 s 与其右临备选分割点合并，并从备选分割点集合 S 中删去 s；

Step5 更新 s 点左右临近备选分割点的合并代价；

Step6 如果最小合并代价大于预定阈值 p 时，输出序列分割点集合 Q；否则回到 Step4，继续求解。

合并代价阈值参数 p 为时间序列幅值的比例，确定幅值 A 前需对异常值进行剔除。

2.2 单元区段划分算法修正

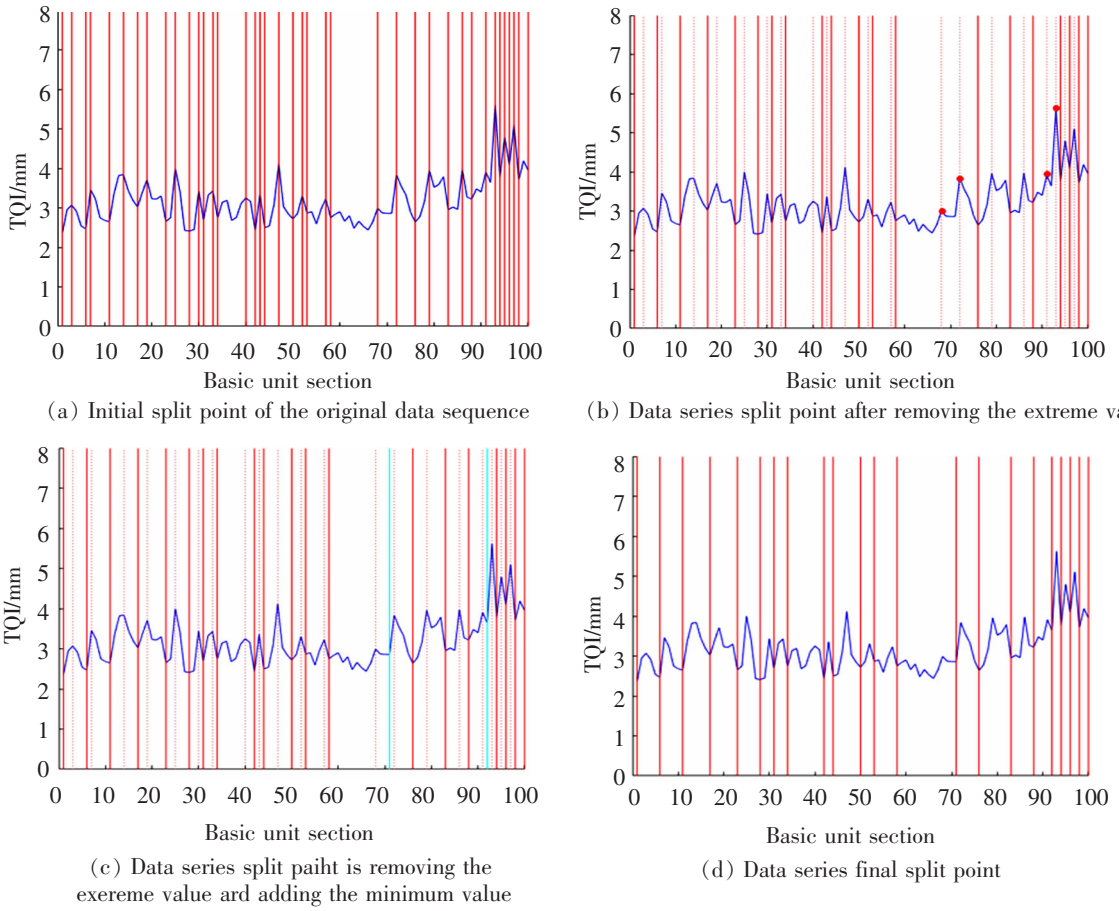
采用自底向上算法对沪宁城际铁路 100 个基本单元区段某次检测的 TQI 数据进行分割，经计算，参数 p 设置为 0.15。

数据序列初始分割如图 2(a)所示，可以看出，在所有的分割点中，有部分 TQI 的极大值被当作了分割点，这意味着状态最差的地段被分割在了两个连续的单元区段中，而分割的目的是把状态较差的区段(即 TQI 较大的区段)单独划分出来，而上述算法明显不能很好地解决这个问题，有必要对上述算法进行修正。

首先，如图 2(b)所示，将极大值点用红色虚线表示。可以看到，对于大部分区段来讲，直接删除极大值点没有问题，但是对于点 68、72 和点 91、93 这种连续极大值点(图中标出点)来说，直接将其从分段点中删除是不妥的，这样无法控制分段区间的合并代价。

如图 2(c)所示，在连续两个极大值中间寻找最小值，用蓝线表示，作为两极大值的分段点，可以保证极大值两侧的合并代价是不大于预定阈值的。

最终得到修正后该序列的分割点，如图 2(d)所示。



(a) Initial split point of the original data sequence

(b) Data series split point after removing the extreme value

(c) Data series split paiht is removing the exereme value ard adding the minimum value

(d) Data series final split point

图 2 数据序列的分割点

Fig.2 Segmentation points of data sequence

2.3　单元区段自动划分流程

由以上可以得出高速铁路基础设施管理单元区段自动划分流程,如图 3 所示。

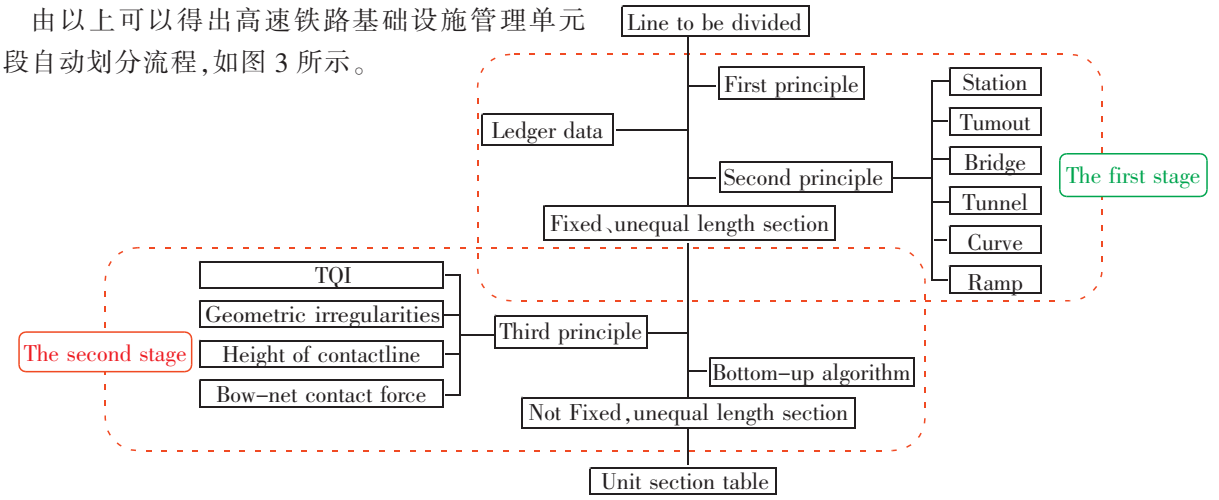


图 3　单元区段划分流程

Fig.3　Flow of unit section division

对于待划分线路,结合台账数据,依照第一原则和第二原则对线路进行第一阶段的固定单元区段划分。为进一步掌握状态较差的地段,在划分单元区段时,依照第三原则的 TQI、接触线高度等考虑因素对线路进行第二阶段的动态单元区段的划分,根据需要,可选择上述检测数据的一种或几种对线路进行动态划分,以沪宁城际铁路的 TQI 检测数据为例对其进行动态单元区段划分。

3　单元区段划分实例

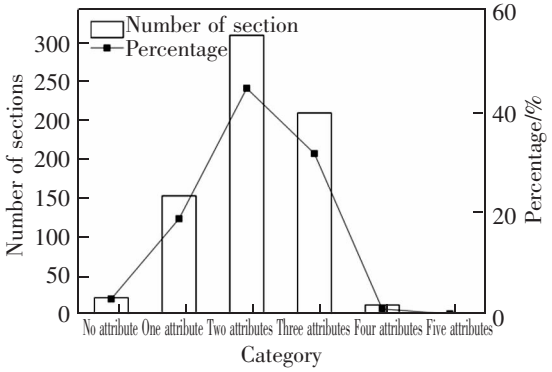
按照提出的单元区段自动划分方法,对沪宁城际铁路上行线进行基础设施管理单元区段划分。

3.1　第一阶段划分

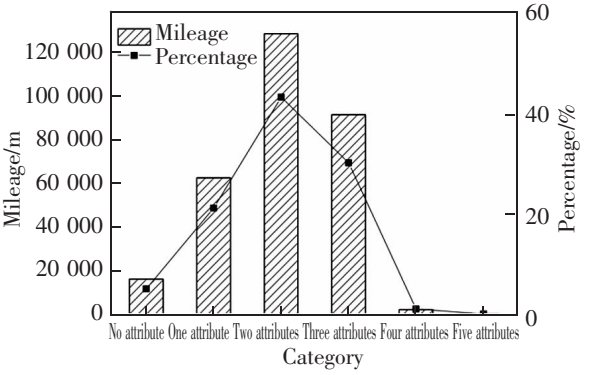
结合台账数据,按照第一原则和第二原则进行第一阶段的固定单元区段划分,得到沪宁城际铁路上行线 DK0+000~DK300+400 里程范围内线路共划分了 692 个单元区段。对于划分的 692 个单元区段,根据第二原则中的车站、道岔、桥梁、隧道、曲线、坡道 6 种属性进行自动分类统计,可以掌握线路基本结构情况,如图 4 所示。图 4 中无属性表示单元区段中没有车站、道岔、桥梁、隧道、曲线、坡道中任何一种结构,单属性表示单元区段中有其中一种结构,依此列推。沪宁城际高速铁路上行线所有单元区段中,具有 2 个属性的区段数最多,将近占 130 km,具有 3 个属性的区段数次之,超过 90 km,只具有一个属性的区段数排在第三位,超过 60 km,具有 4 个或 5 个属性的区段数最少;从对应的里程分布来看,基本上和区段数分布一致。

3.2　第二阶段划分

首先对算法参数进行确定。由单元区段动态划分算法可知,除了一个单维的时间序列 T,还需要输入预



(a) Distribution of number of sections by category



(b) Mileage distribation for each category uint segment

图 4　线路基本结构情况

Fig.4　Basic situation of the line structure

定的合并代价阈值参数 p，该参数直接关系到了区段划分的长度，为了确定合适的参数 p，利用沪宁城际铁路某个自然月的 TQI 检测数据，以不同长度的线路应用不同的参数 p 进行区段划分，如图 5 所示。

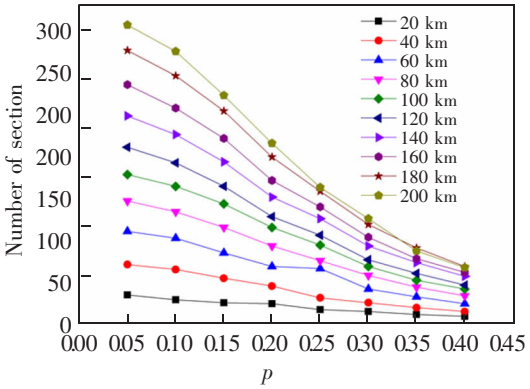


图 5 不同参数 p 下分段数

Fig.5 The number of segments under different parameters p

由图 5 可以看出，随着参数 p 的增大，不同长度线路划分出来的区段数越来越少。参数 p 越小，下降趋势越明显。当参数 p 小于 0.2，即融合阈值小于幅值的 0.2 的时候，参数 p 的变化对线路划分有着较大的影响；当参数 p 大于 0.3，即融合阈值大于幅值 0.3 的时候，参数 p 的变化对线路划分影响稍小。且线路越长，下降趋势越明显。当参数 p 小于 0.2 时，线路越长，参数 p 的变化对线路划分影响越大；当参数 p 大于 0.3 时，线路长度的改变随参数 p 的变化对线路划分的影响稍小。

为方便对线路进行养护维修管理以及把握线路整体状态，在对线路进行分析时不希望线路根据 TQI 划分的区段全部太长或者太短，若划分区段全部太长，即参数 p 越大，则无法识别线路状态较差地区；若划分区段全部太短，即参数 p 越小，则无法

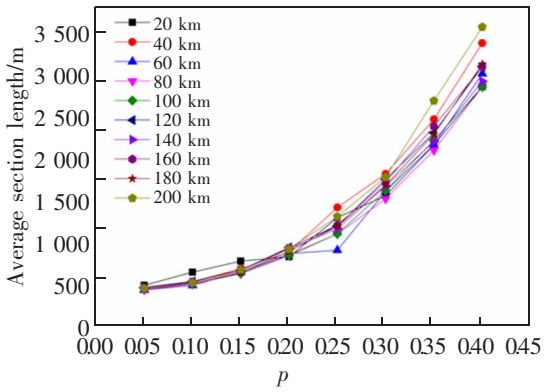


图 6 不同参数 p 下区段平均长度

Fig.6 Section average length under different parameters p

重点突出线路状态较差的地区。为此，计算不同线路长度及不同参数 p 下划分出区段的平均长度，如图 6 所示。所有不同长度线路划分出区段的平均区段长度随参数 p 的变化趋势均在参数 p 取 0.2 到 0.3 之间发生明显变化。

当参数 p 小于 0.2 时，除 20 km 线路外，其余不同长度线路随着参数 p 的增大，变化趋势基本一致，且平均区段长度在 1 200 m 以下；当参数 p 大于 0.3 时，不同长度线路随着参数 p 的增大，变化趋势基本一致，且平均区段长度即将超过区段划分第一原则规定的 2 000 m 的上限。当参数 p 在 0.2 和 0.3 之间时，是大部分线路变化趋势的拐点，同时也是不同长度各线路变化区别最大的区间，尤其当参数 p 取 0.25 时，平均区段长度浮动范围为 1 071 m 至 1 538 m。

当参数取 0.2~0.3 时，既能够保证线路按照 TQI 划分得到的区段长度不至于太长，使得绝大部分区段都能够处于区段划分第一原则规定的 2 000 m 上限之下，重点突出线路状态较差地区；也能够保证区段长度不至于太短，使得区段长度在 1 000 m 上下波动，有效识别线路状态较差地区；同时线路划分出的区段平均长度对参数 p 取 0.25 时最为敏感，也就是说，此时能够更加有效多样地按照线路状态划分线路，故推荐 p 取 0.25。

对沪宁城际铁路上行线进行第二阶段的动态单元区段划分，得到沪宁城际铁路上行线 DK0+000~DK300+400 里程范围内线路共划分了 172 个单元区段，按照第一原则、第二原则和第三原则对其进行第二阶段的动态划分后，共划分了 777 个单元区段，相较于第一阶段的固定单元区段划分，多划分出 85 个单元区段。以此法进行区段划分，可以重点掌握状态较差区段，并大大提高了划分效率与准确性。

4 结论

本文提出的高速铁路基础设施管理单元区段的自动划分方法，对掌握线路基本结构情况，把握基础设施状态变化规律，快速定位状态较差地段，针对性制定养护维修计划，提高养护维修效率和质量具有基础性作用。

1）针对人工划分单元区段效率低，易出错的问题，提出了单元区段自动划分第一原则、第二原和第三原则，并且利用 Matlab 编程实现了单元区段的自动划分，将其分为第一阶段的固定单元区段划分，用来掌握线路基本结构情况。

2）第二阶段采用改进的自底向上算法进行动

态单元区段划分，用来重点掌握状态较差区段，大大提高了划分效率与准确性。

3）以沪宁城际高速铁路上行线为例进行第一阶段的固定单元区段划分，掌握了沪宁城际高速铁路线路的基本结构情况；并根据 TQI 检测数据进行了第二阶段的动态单元区段划分。

参考文献：

[1] 张光远. 高速铁路行车安全机理及相关应用问题研究[D]. 成都：西南交通大学, 2010.
ZHANG G Y. Study on high-speed railway operation safety mechanism and related applications[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2010.

[2] 许玉德，刘一鸣，沈坚锋. 轨道不平顺预测随机模型的 SVM-MC 求解方法[J]. 华东交通大学学报，2018，35(3)：1-7.
XU Y D，LIU Y M，SHEN J F. SVM-MC method for solving stochastic model of track irregularity prediction[J]. Journal of East China Jiaotong University，2018，35(3)：1-7.

[3] 许玉德，赵梓含，乔雨，等. 大机捣固养修作业计划多目标决策模型[J]. 华东交通大学学报，2019，36(3)：55-63.
XU Y D，ZHAO Z H，QIAO Y，et al. Multi-objective decision model for tamping maintenance plan of ballast track[J]. Journal of East China Jiaotong University，2019，36(3)：55-63.

[4] 郭然. 铁路线路养护维修计划编制理论与方法[D]. 北京：北京交通大学，2015.
GUO R. Theory and method for railway track maintenance scheduling[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2015.

[5] 许玉德，李海峰，戴月辉. 轨道交通工务管理[M]. 上海：同济大学出版社，2007.
XU Y D，LI H F，DAI Y H. Rail transit public works management[M]. Shanghai：Tongji University Press，2007.

[6] 高建敏，翟婉明，徐涌，等. 既有干线轨道不平顺区段管理长度分析[J]. 铁道建筑，2009(5)：105-108.
GAO J M，ZHAI W M，XU Y，et al. Analysis of management length of irregular track section of existing trunk line [J]. Railway Engineering，2009(5)：105-108.

[7] 翟婉明，赵春发，夏禾，等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题[J]. 中国科学：技术科学，2014(7)：645-660.
ZHAI W M，ZHAO C F，XIA H，et al. Basic scientific issues on dynamic performance evolution of the high-speed railway infrastructure and its service safety[J]. Scientia Sinica Technologica，2014(7)：645-660.

[8] 仲春艳，许玉德，沈坚锋，等. 高速铁路无砟轨道线路管理单元划分方法研究[J]. 华东交通大学学报，2016，33(3)：7-12.
ZHONG C Y，XU Y D，SHEN J F，et al. Research on division method of management unit for high speed railway ballastless track[J]. Journal of East China Jiaotong University，2016，33(3)：7-12.

[9] 刘明亮. 高速铁路线路设备单元分级管理方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.
LIU M L. Research on line device unit hierarchical management methods of high-speed railway[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2016.

[10] 陶竑宇. 基于单元质量均衡的铁路轨道管理信息系统构建方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.
TAO H Y. Targeting the construction of the railway information management system based on the unit quality balancing theory[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2016.

[11] 徐伟昌，张家海. 基于流程再造的高速铁路基础设施综合维修管理模式[J]. 中国铁路，2019，682(4)：16-20.
XU W C，ZHANG J H. Comprehensive HSR maintenance management mode based on process reengineering[J]. China Railway，2019，682(4)：16-20.

[12] 黄炜平. 基于 EMD 和 BoF 模型的时间序列数据挖掘及应用[D]. 杭州：浙江大学，2018.
HUANG W P. EMD and BoF models based time series data miniming and applications[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2018.



第一作者：鲁思成（1997—），男，硕士研究生，研究方向为城市轨道与铁道工程。E-mail：1933367@tongji.edu.cn。



通信作者：许玉德（1965—），男，教授，博士，博士生导师，研究方向为高速铁路轨道管理与养护维修技术、城市轨道交通基础设施检测技术及安全评估。E-mail: xuyude2000@gmail.com。

（责任编辑：姜红贵）