

# 基于密度聚类算法和广度优先搜索算法的道岔摩擦电流智能分析系统<sup>\*</sup>

邱晓莉<sup>1</sup> 韩思远<sup>2</sup> 熊庆<sup>1,3,4</sup> 余东<sup>1</sup>

(1. 成都工业职业技术学院智能制造与汽车学院, 610213, 成都; 2. 广西交控智维科技发展有限公司, 530219, 南宁; 3. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室, 610213, 成都; 4. 西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室, 610213, 成都)

**摘 要** [目的] 现场的道岔摩擦电流测试与调整存在流程繁琐且风险高、对检修人员专业水平要求高、测定数值的主观性占比大 3 个弊端, 为此需要基于各类智能算法及技术提升道岔的智能运维水平。[方法] 分析了道岔摩擦电流测试曲线 4 个阶段的特征, 提出建立道岔摩擦电流的智能分析系统。阐述了该系统的功能及工作原理, 设定了该系统的摩擦电流标准值及阈值范围。该系统可基于密度聚类算法和广度优先搜索算法自动获取道岔摩擦电流值。介绍了该系统的调试界面截图, 以说明系统在获取道岔摩擦电流值如何为现场检修人员提供操作建议。[结果及结论] 该智能系统具有良好的可用性, 实现了节约检修时间、降低维护成本和提高检修效率的既定目的。

**关键词** 城市轨道交通; 信号; 智能运维; 道岔转辙机; 摩擦电流; 密度聚类算法; 广度优先搜索算法

**中图分类号** TP3:U231.7

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.04.022

## Intelligent Analysis System for Turnout Friction Current Based on Density Clustering Algorithm and Breadth-first Search Algorithm

QIU Xiaoli<sup>1</sup>, HAN Siyuan<sup>2</sup>, XIONG Qing<sup>1,3,4</sup>, YU Dong<sup>1</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chengdu Industrial Vocational and Technical College, 610213, Chengdu, China; 2. Guangxi Traffic Control Intelligent Maintenance Technology Development Co., Ltd., 530219, Nanning, China; 3. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, 610213, Chengdu, China; 4. Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, 610213, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] The turnout friction current on-site

testing and adjustment involve three major unfavorable aspects of complex processes and high risks, high professional requirements for maintenance personnel, and significant subjective component in determining numerical values, calling for enhancement of the intelligent operation and maintenance level of turnout based on various intelligent algorithms and technologies. [Method] The characteristics of the four stages of turnout friction current testing curve are analyzed, and an intelligent analysis system for turnout friction current is proposed. The functionality and working principle of the system are elucidated, and standard values and threshold ranges for friction current are established. Based on density clustering algorithm and breadth-first search algorithm, the system can automatically retrieve the turnout friction current value. Screenshots of the system debugging interface are presented to illustrate how the system provides operational suggestions for on-site maintenance personnel in obtaining turnout frictional current values. [Result & Conclusion] This intelligent system demonstrates excellent usability and achieves the predefined goals of saving maintenance time, reducing maintenance costs, and increasing maintenance efficiency.

**Key words** urban rail transit; signal; intelligent operation and maintenance; turnout switch machine; friction current; density clustering algorithm; breadth-first search algorithm

转辙机性能的稳定性直接影响铁路和城市轨道交通线路的运行效率。按照铁总运[2015]283号《普速铁路信号维护规则(技术标准)》规定,转辙机的摩擦电流每个月都要测试和调整<sup>[1]</sup>。现有道岔摩擦电流调整方法存在 3 个方面的弊端: ①检修人员需在天窗点打开转辙机机箱, 使用万用表测量摩擦电流, 其流程繁琐、风险高; ②摩擦

<sup>\*</sup> 四川省自然科学基金面上项目(2022NSFSC0400); 西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室开放课题(QCCK2023-003); 成都工业职业技术学院 2022 年院级课题(2022YJ-38); 成都工业职业技术学院 2023 年院级课题(2023YJ-5); 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室开放课题(LTDL-2023010); 四川省教育厅项目(GZJG2022-048)

电流的调整对检修人员专业水平和现场经验要求非常高,对有经验人员的依赖程度大;③测定的摩擦电流值主观性占比大,错误的调整会影响转辙机的使用寿命。

近几年,中国城市轨道交通协会提出应加快城市轨道交通信号智能运维的研究<sup>[2]</sup>,道岔作为信号系统的关键设备,也成为了信号智能运维的重点。

本文利用摩擦电流曲线特性,提出基于密度聚类算法及广度优先搜索算法的摩擦电流智能分析系统。该系统可以自动获取摩擦电流值,既可避免检修人员的高风险作业,排除人为因素对道岔摩擦电流的影响,也可大大减少运维成本。

### 1 道岔摩擦电流曲线划分

根据 ZD(直流转辙机)系列道岔转辙机的特性,道岔摩擦电流测试曲线大体分成 4 个阶段,如图 1 所示。图 1 中:整条电流曲线是 1 条道岔摩擦电流测试的模拟量曲线,经过模数转换后采集得到 269 个点,摩擦电流曲线的采样间隔是 0.04 s/次。其中: $T_1$  是道岔解锁阶段,用时为 0.52 s(约 13 个采样点,电流范围为 0~2.6 A); $T_2$  是道岔转换阶段,用时为 4.00 s(100 个采样点,电流范围为 0.9~1.2 A); $T_3$  是道岔锁闭阶段,用时为 0.24 s(6 个采样点,电流范围为 1.2~1.5 A); $T_4$  是摩擦电流测试阶段,用时为 6.00 s(150 个采样点,电流范围为 2.3~2.9 A)。 $T_1$  阶段和  $T_3$  阶段的采样时间之和约为 1.20 s<sup>[3]</sup>。

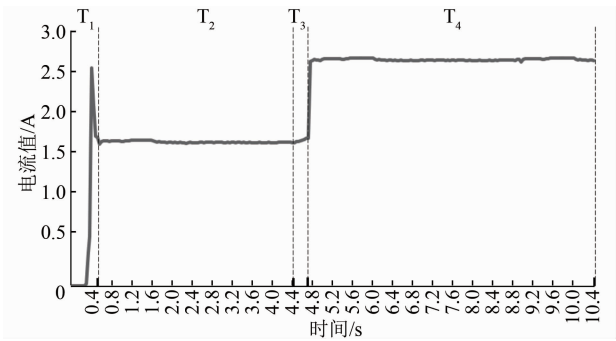


图 1 摩擦电流测试曲线  
Fig. 1 Friction current test curve

通常情况下,摩擦电流的检修调整是把夹板放置于道岔尖轨与基本轨之间,让转辙机电机空转,以获得摩擦电流。此时  $T_4$  阶段的电流值不为 0,且其采样时长会随着摩擦电流测试而不断增加, $T_4$  阶段的电流走势可体现出摩擦电流测试调整阶段的电流特性。

### 2 摩擦电流智能分析系统的功能及工作原理

摩擦电流智能分析系统可实现摩擦电流特征值筛选、最优摩擦电流值获取等功能。基于专家子系统的判断,最终给现场人员反馈调试意见,避免了检修人员打开转辙机测量摩擦电流的风险。此外,智能分析系统利用专家子系统进行自动对比分析,降低了对检修人员的专业能力要求。

摩擦电流智能分析系统的工作原理如图 2 所示:首先,检修人员登录智能分析系统,选取需要获取摩擦电流的转辙机;其次,智能分析系统实时获取微机监测系统提供的电流曲线离散点;再次,基于道岔摩擦电流曲线的特性,所有的离散点经过密度算法的筛选后对其进行归类处理;最后,经过专家子系统的判别,将调试意见反馈给现场调试人员。

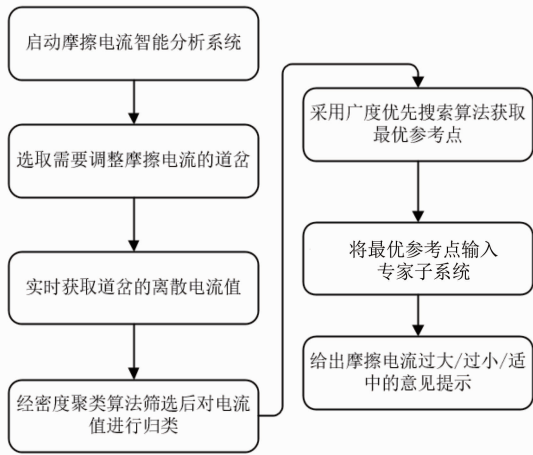


图 2 摩擦电流智能分析系统工作原理  
Fig. 2 Working principle of friction current intelligent analysis system

### 3 摩擦电流标准值及其阈值范围

除了机械设备硬件的故障和磨损外,道岔摩擦电流受温度和湿度的影响也比较大:不同温度下摩擦连接器的膨胀系数不一样;湿度直接影响摩擦片的摩擦系数,致使摩擦片生锈。

按照铁总运[2015]283 号的规定,每组转辙机每个月均需测试并调整其摩擦电流值,ZD6 系列直流转辙机的摩擦电流标准值为 2.3~2.9 A,定反位摩擦电流的偏差不能超过 0.3 A<sup>[1]</sup>。摩擦电流专家子系统相关要求遵照此规定。

### 4 基于密度聚类法提取摩擦电流

现场测试 ZD 系列转辙机的摩擦电流时,通过

图 1 所示的电流曲线特性可知,绝大多数的摩擦电流采样数据集中在  $T_2$  和  $T_4$  阶段, $T_1$  和  $T_3$  阶段采样得到的电流值较少。因此,可以通过密度聚类算法获得  $T_2$  阶段的电流值和摩擦电流值。此外,由《普速铁路信号维护规则(技术标准)》可知,道岔的摩擦电流有特定的标准值(2.6 A),该标准值的阈值范围为 2.3~2.9 A。上述的转辙机电流特征比较突出,可以满足密度聚类算法的计算特性要求。

#### 4.1 密度聚类算法

密度聚类算法<sup>[4-5]</sup>中,对以下内容进行了定义:

1) 点的密度:对选取  $T_2$  和  $T_4$  范围内的任意点  $O$ ,设  $O$  至其他点的空间向量差为  $r_d$ ;以  $O$  为中心、 $r_d$  为半径画圆,设圆内所有离散点的总数为  $P_s$ ;其密度阈值为  $t$ 。

2) 参考点:对于选取的  $O$  点、 $r_d$  及  $t$ ,若  $P_s \geq t$ ,则选取  $O$  作为密度聚类的参考点。

3) 代表区域:将以参考点  $O$  为圆心、 $r_d$  为半径的画圆范围称为以  $O$  点为参考点的代表区域。

密度聚类算法的计算流程如下:①确定一组数据,将该组数据作为密度聚类的输入原始值;②分析这组原始数据中的特性参考点,获得可供聚类算法计算的参考点;③根据已选参考点,建立对应的代表区域的映射关系;④根据映射关系对参考点进行分类,以形成初步的聚类信息;⑤同一类参考点范围的点形成集合;⑥输出集合参考点信息并提供给摩擦电流智能分析系统,用以进行下一步的计算分析。

#### 4.2 参考点集合分类

参考点的分类流程如图 3 所示。

如图 3 所示,假设选取的参考点为  $O_1$ 。以  $O_1$  为圆心、半径为  $r_{d,1}$  画圆,圆内包含的离散点总数为  $P_{s,1}$ 。参考点分类的步骤为:

步骤 1 把所有数据录入系统,按照选取的点  $O_1$  和  $r_{d,1}$  画圆,计算得到  $P_{s,1}$ 。

步骤 2 按照实际情况选取密度阈值  $t_1$ , $t_1$  用以初步判定选点  $O_1$  是否符合要求。若  $P_{s,1} < t_1$ ,则说明点  $O_1$  不符合要求。应重新选取,并把点  $O_1$  归入非参考点集合。

步骤 3 选取新的参考点,重复上述计算过程。直到以选取的参考点  $O_n$  为圆心、半径为  $r_{d,n}$  的圆内包含的离散点总数  $P_{s,n} \geq t_n$  (此时的密度阈值为  $t_n$ ),则  $O_n$  符合选取要求,将  $O_n$  归入参考点集合。

步骤 4 多次重复步骤 1—步骤 3,直至所有数

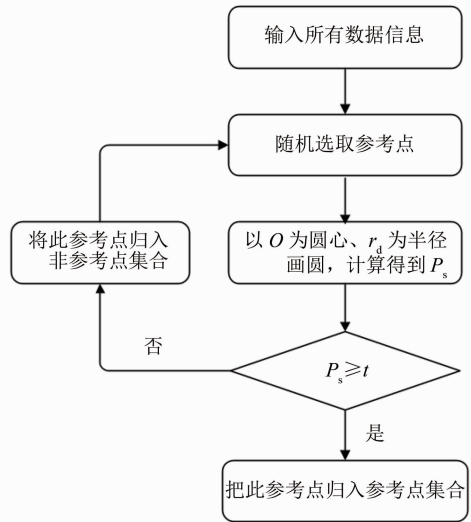


图 3 参考点分类流程

Fig. 3 Reference point classification process

据完成分析和聚类。

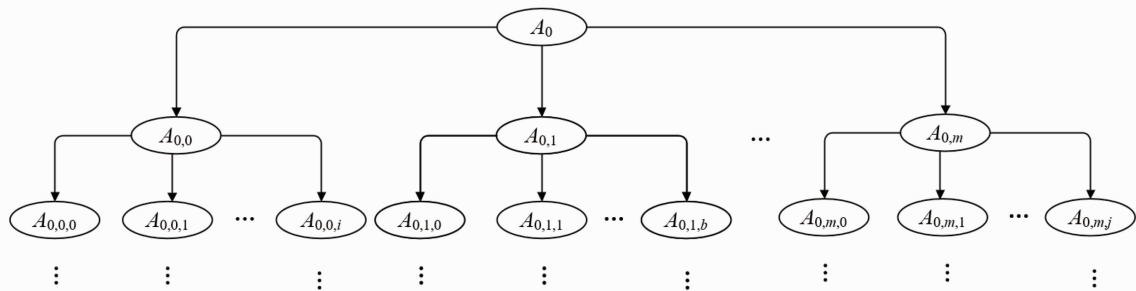
#### 4.3 最优参考点选取

广度优先搜索算法<sup>[6-7]</sup>可以通过寻找最短路径的方式,分析出参考点集合中的最优参考点。最优参考点可以作为提取的特征值输入到专家子系统中,专家子系统根据特征值判断当前的摩擦电流是否符合标准规定。

图 4 为广度优先搜索算法生成树的示意图,设 2 个任意点间的距离为  $k$ 。广度优先搜索算法的计算步骤为:①从参考点集合中选取任一点  $A_0$ ,以  $A_0$  为顶点访问所有与  $A_0$  相邻的节点  $A_{0,0}, A_{0,1}, \dots, A_{0,m}$ 。设  $k_0$  是第一层  $A_0$  至  $A_{0,0}, A_{0,1}, \dots, A_{0,m}$  各点距离的最小值。基于这  $m+1$  个点之间距离的变化,不断探寻参考点集合的边缘,直到所有的节点均被访问,进而得到  $k_0$  的数据。②分别以  $A_{0,0}, A_{0,1}, \dots, A_{0,m}$  作为新的节点,再次探索除  $A_0$  外的新节点,获得以  $A_0$  为顶点的最短路径  $L_0$ 。③按照以上步骤进行多次循环,获得一组以不同参考点为顶点的最短路径集合  $\{L_0, L_1, \dots, L_{m-1}, L_m\}$ 。④比较  $\{L_0, L_1, \dots, L_{m-1}, L_m\}$  中的数据,进而得到最短路径  $L_f, L_f$  对应的顶点  $A_f$  即为摩擦电流的最优参考点。

#### 5 智能分析系统可用性验证分析

选取  $r_d = 0.10$ ,设置了 3 个不同的  $t$  值,用以对不同  $t$  值下的参考点集合进行对比,如图 5 所示。对比图 5 的 3 个分图可以发现,在  $r_d$  值不变的情况下,随着  $t$  的不断增大,不符合密度阈值范围的参考点集将被智能分析系统剔除。



注: $A_{0,0}—A_{0,m}$  是以  $A_0$  为顶点、以  $k_0$  为距离的第  $m$  个点; $A_{0,0,0}—A_{0,0,i}$  是以  $A_{0,0}$  为顶点、以  $k_0$  为距离的第  $i$  个点; $A_{0,1,0}—A_{0,1,b}$  是以  $A_{0,1}$  为顶点、以  $k_0$  为距离的第  $b$  个点; $A_{0,m,0}—A_{0,m,j}$  是以  $A_{0,m}$  为顶点、以  $k_0$  为距离的第  $j$  个点。

图 4 广度优先搜索算法生成树示意图

Fig. 4 Schematic diagram of breadth-first search algorithm generating tree diagram

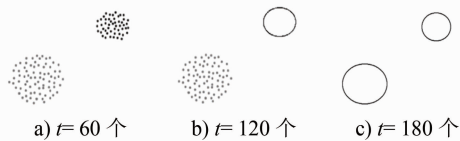


图 5 不同  $t$  值下的参考点集合对比

Fig. 5 Comparison of reference point sets with different  $t$  values

在  $t=60$  个情况下,进一步设置 3 个不同的  $r_d$  值,以对不同  $r_d$  值下的参考点集合进行对比,其结果如图 6 所示。对比图 6 的 3 个分图可以发现,在  $t$  值不变的情况下,随着  $r_d$  的增大,各集合的参考点总数持续增加。

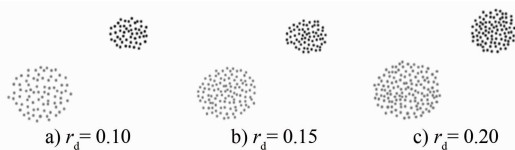


图 6 不同  $r_d$  值下的参考点集合对比

Fig. 6 Comparison of reference point sets with different  $r_d$  values

6 现场测试结果

道岔摩擦电流智能分析系统获得最优参考点后,根据最优参考点的时间维度及参考点集合的数量维度,综合判断此最优参考点是否是从  $T_4$  阶段获取的最优摩擦电流值。根据对现场多组转辙机的实际电流曲线进行分析和验证,当  $r_d=0.12$ 、 $t=76$  个时,道岔动作曲线和摩擦电流曲线识别度较好。

摩擦电流智能分析系统获取了  $T_4$  阶段的最优摩擦电流值后,输出到专家子系统进行标准值判断。如果获得的最优摩擦电流值大于 2.9 A,该系统将提示现场调试人员“摩擦电流过大,请调松摩擦连接器螺丝”;如果获取的最优摩擦电流值小于 2.3 A,

该系统将提示现场调试人员“摩擦电流过小,请调紧摩擦连接器螺丝”<sup>[8]</sup>,其调试界面截图如图 7 所示。经过反复几次的调整,直至摩擦电流处于 2.3~2.9 A 的标准阈值范围内,且定位和反位摩擦电流差不超过 0.3 A。



图 7 摩擦电流智能分析系统的调试界面截图

Fig. 7 Screenshot of debugging interface of friction current intelligent analysis system

7 结语

本文基于铁总运[2015]283 号的要求及多位业内专家的意见,形成了道岔摩擦电流智能分析系统的专家子系统,用以对道岔摩擦电流进行设定。同时,采用密度聚类算法及广度优先搜索算法选取最优参考点,将该参考点作为本次道岔摩擦电流曲线的输出结果,用以指导现场检修人员调试道岔摩擦电流。

现场测试和验证表明:该智能系统具有良好的可用性,不仅可以保护道岔机械设备不受损害,还可节约检修时间,降低维护成本,提高检修效率。

参考文献

[1] 中国铁路总公司. 普速铁路信号维护规则技术标准[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 1.

- China Railway Corporation. Technical standards for signal maintenance rules of ordinary speed railways[M]. Beijing: China Railway Press, 2019: 1.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[EB/OL]. (2020-03-12)[2023-06-01]. [https://m.163.com/dy/article\\_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html](https://m.163.com/dy/article_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html).
- China Association of Metros. Outline for the development of smart urban rail transit in China[EB/OL]. (2020-03-12)[2023-06-01]. [https://m.163.com/dy/article\\_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html](https://m.163.com/dy/article_cambrian/F89Q5FRN0511T04N.html).
- [3] 陈镭. 运用监测动作曲线实现 ZD6-D 道岔状态修[J]. 铁道运营技术, 2012, 18(2): 19.
- CHEN Mei. Using monitoring action curve to realize condition maintenance of ZD6-D turnout[J]. Railway Operation Technology, 2012, 18(2): 19.
- [4] 马帅, 王腾蛟, 唐世渭, 等. 一种基于参考点和密度的快速聚类算法[J]. 软件学报, 2003, 14(6): 1089.
- MA Shuai, WANG Tengjiao, TANG Shiwei, et al. A fast clustering algorithm based on reference and density[J]. Journal of Software, 2003, 14(6): 1089.
- [5] 王莉. 数据挖掘中聚类方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- WANG Li. Study on clustering algorithm in data mining[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [6] 匡桂娟. 广度优先搜索算法在互连网络通信中的应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2005.
- KUANG Guijuan. Application of breadth-first search algorithm in interconnection network communication[D]. Qingdao: Qingdao University, 2005.
- [7] WEISS M A. 数据结构与算法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 225.
- WEISS M A. Data structure and algorithms[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020: 225.
- [8] 于斌. 电动转辙机摩擦电流标调问题分析及处理方法[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(12): 45.
- YU Bin. Reason analysis and disposal of adjusting electric switch machines' triboelectric currents[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(12): 45.
- 收稿日期:2023-04-21 修回日期:2023-06-06 出版日期:2024-04-10  
Received:2023-04-21 Revised:2023-06-06 Published:2024-04-10  
• 第一作者:邱晓莉, 讲师, qiu Xiaoli\_nora@yeah.net  
通信作者:韩思远, 工程师, 931018167@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 113 页)

- LUO Xiangping, TIAN Shiqiao, WANG Xu, et al. A system and method for obtaining track curve and route information based on feature point triggering: 201610890261.4[P]. 2017-03-29.
- [2] PARK J H, KOH H I, HUR H M, et al. Design and analysis of an active steering bogie for urban trains[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(6): 1353.
- [3] SIM K S, HUR H M, SONG H S, et al. Study of the active radial steering of a railway vehicle using the curvature measuring method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(11): 4583.
- [4] 罗湘潭. 一种用于径向转向架的一体式轮对定位装置: 201610304174.6[P]. 2016-09-21.
- LUO Xiangping. An integrated wheelset positioning device for radial bogies: 201610304174.6[P]. 2016-09-21.
- [5] 田师崎, 罗湘潭, 任利惠, 等. 基于地铁车辆二系回转角的主动径向研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 147.
- TIAN Shiqiao, LUO Xiangping, REN Lihui, et al. Research on active radial of rail transit based on the yaw angle of second suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 147.
- [6] SCHNEIDER R. Actuator for controlling a wheelset of a rail vehicle: US20180273057[P]. 2018-09-27.
- [7] 毕鑫, 马卫华, 罗世辉. 机车转向架通过曲线的动态过程分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 150.
- BI Xin, MA Weihua, LUO Shihui. Dynamic process analysis of locomotive bogie curve negotiation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 150.
- [8] 刘慧斌, 倪文波, 马少明. 用于转臂式轴箱定位转向架的轮对主动导向装置研究[J]. 机电传动, 2022(4): 83.
- LIU Huibin, NI Wenbo, MA Shaoming. Research of wheelset active steering device for bogie with rocker type journal box positioning[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 83.
- [9] GONZÁLEZ F, PÉREZ J, VINOLAS J, et al. Use of active steering in railway bogies to reduce rail corrugation on curves [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(4): 509.
- 收稿日期:2021-10-28 修回日期:2022-01-17 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-10-28 Revised:2022-01-17 Published:2024-04-10  
• 第一作者:刘慧斌, 硕士研究生, 1845394709@qq.com  
通信作者:倪文波, 教授, nwb@home.swjtu.edu.cn  
• ©《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