

城市轨道交通车载综合里程同步系统 高精度里程赋值的关键技术^{*}

李 洋¹ 俞璞涵² 麻全周²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 100081, 北京;

2. 天津智能轨道交通研究院有限公司, 301700, 天津//第一作者, 副研究员)

摘 要 目的: 鉴于当前城市轨道交通综合检测车的里程定位能力, 难以满足多类检测系统的数据分析以及系统间数据耦合分析的需要, 因此设计了一种车载综合里程同步系统, 并对该系统高精度里程赋值技术进行研究。方法: 介绍了车载综合里程同步系统的架构, 包括轨枕计数模块、时空同步模块和车载综合管控系统内部的数据处理模块。简述了该系统的工作流程。从多源里程定位技术、里程信号优先级、里程修正和校准算法及里程赋值技术等方面阐述了该系统的关键技术。结果及结论: 城市轨道交通车载综合里程同步系统实现了里程高精度校准和赋值功能, 提升了综合检测车的采集数据在里程维度下关联分析的可靠性, 同时辅助病害的精确定位, 进而避免因病害定位精度不足而导致检修人员工作效率低、重复检修等情况, 有效节省了城市轨道交通基础设施运维成本。

关键词 城市轨道交通; 车载综合里程同步系统; 高精度里程赋值; 关键技术

中图分类号 U216.63

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.10.023

Key Technologies for High-precision Mileage Assignment in Urban Rail Transit On-board Integrated Mileage Synchronization System

LI Yang, YU Puhuan, MA Quanzhou

Abstract Objective: In view of the mileage positioning capabilities of current urban rail transit comprehensive inspection vehicles, the need of data analysis from various detection systems and inter-system data coupling analysis cannot be met, thus an OIMS (on-board integrated mileage synchronization system) is developed, and the high-precision mileage assignment technology of this system is studied. Method: The architecture of the OIMS is presented, encompassing rail sleeper counting module, space-time synchronization module, and data

processing module within the OIMS. The operational workflow of the system is briefly outlined. The key technologies of the system are elucidated, including multi-source mileage positioning, mileage signal priority, mileage correction and calibration algorithms, and mileage assignment techniques. Result & Conclusion: The urban rail transit OIMS achieves high-precision mileage calibration and assignment functionality, enhancing the reliability of data association analysis collected by comprehensive inspection vehicles in mileage dimension. It assists in precise defect localization, thus avoiding issues like low work efficiency and repetitive maintenance tasks due to inadequate defect positioning accuracy, and effectively reduces the operation-maintenance costs of urban rail infrastructure.

Key words urban rail transit; on-board integrated mileage synchronization system; high-precision mileage assignment; key technology

First-author's address Urban Rail Transit Center, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China

近年来,我国城市轨道交通(以下简称“城轨”)运营里程不断增加,针对基础设施综合、高效的检测需求愈加迫切^[1]。基础设施的技术指标反映列车行车安全与平稳能力,高精度的指标判别能力已成为相关技术服务、智能运维、装备制造行业的一致性追求。

在高速铁路领域,已经形成包括小型检测系统、固定监测系统、车载综合系统在内的基础设施综合检测技术体系,其中车载综合系统是实现在高速铁路基础设施动态检测的有效手段^[2-5]。

与高速铁路不同,城轨检测列车运行速度较

^{*} 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2021YJ190);北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L221001)

低,可将检测与巡检系统集成一体。由中国铁道科学研究院集团有限公司牵头研制的城轨综合检测车搭载了车辆、土建、线路、供电、通号等多专业检测与巡检系统。但随着检测装备的智能化、绿色化升级以及检测技术的突破进步,当前综合检测车的里程定位能力难以满足多类检测系统的数据分析以及系统间数据耦合分析的需要。为提升北京地铁 19 号线新型综合检测车的数据分析能力,研究了车载动态检测数据高精度里程赋值方法,设计了车载综合里程同步系统,为各系统检测数据提供了统一、精确的里程信息。

1 车载综合里程同步系统设计

1.1 系统架构

城轨综合检测车通过搭载综合里程同步系统实现高精度里程赋值。车载综合里程同步系统由轨枕计数模块、时空同步模块和车载综合管控系统内部的数据处理模块组成。车载综合里程同步系统整体架构如图 1 所示。其中:轨枕计数模块采集轨枕编号信息,并发送至时空同步模块;时空同步模块接收车下轴端编码器信息、电子标签阅读器信息和轨枕编号信息,结合轨枕台账和偏移校准算法自动计算当前里程,并将里程信息和由 NTP(网络时间协议)定时获取的时间信息一并发送至车载综合管控系统中的数据处理模块;数据处理模块具有预处理功能,将接收到的检测任务数据与当前时间里程进行结合与校准。此外,编码器在当前城轨综合检测车上为轮轨力、轨道几何等系统提供脉冲触发信号,控制采集装置的启动,因此同步将脉冲信号差分至各检测专业。

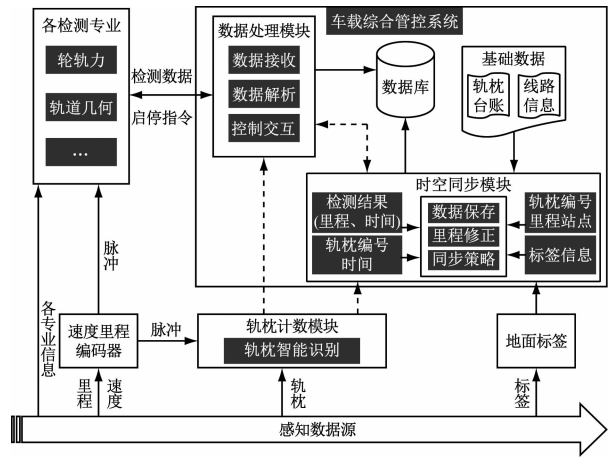


图 1 车载综合里程同步系统整体架构图
Fig. 1 Diagram of OIMS overall architecture

1.2 系统工作流程

车载综合里程同步系统的整体工作流程如图 2 所示。在系统刚启动时,数据处理模块检测并发送统一对时指令,全列综合检测车检测系统自动校准系统时间为当前北京时间,校准后在单次采集中保持超低时间误差。当时空同步模块扫描到始发站电子标签或数据处理模块的里程值达到预设里程时,车辆开始采集数据。时空同步模块将轨枕计数模块的轨枕编号等信息换算为里程值,结合从编码器、电子标签阅读器等设备获取的多类里程信息进行校准,得到精确里程、时间等信息。同时,数据处理模块接收检测系统的检测数据、时间、原有里程等信息,利用线性差分将精确里程覆盖原有里程,实时获得数据与精确里程的映射关系,达到里程赋值的效果。数据处理模块对标记后的里程进行统一存储管理,以支撑后续的数据关联分析。

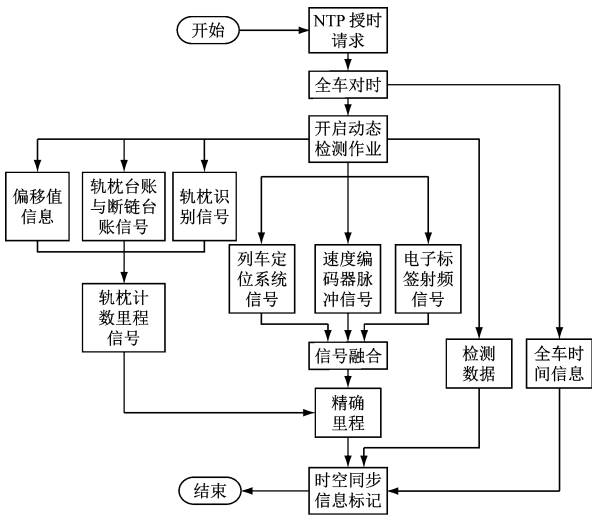


图 2 车载综合里程同步系统工作流程图
Fig. 2 Work flow chart of OIMS

2 车载综合里程同步系统的关键技术

2.1 多源里程定位技术

2.1.1 基于编码器的定位技术

编码器的本质为速度传感器,当其做定位信号源时,可将角位移换算为电信号进行脉冲计数^[6]。城轨领域通常使用结构简单、体积小、每秒脉冲数高的增量式编码器,该类编码器安装在综合检测车的车轮轴端位置,其换算里程的原理为将编码器提供的脉冲信号换算为车轮转角和转数,结合车轮轮径计算出车轮累积转动的距离,进而实现列车定位。但由于增量式编码器仅在启动时单次寻零,且

车轮在转动时会出现不同程度的磨损导致轮径值发生变化,编码器里程在每转中均存在极小的记录偏差且会持续累积;同时在列车运行过程中,车轮可能出现空转或滑行等情况^[7]。上述情况将导致脉冲数换算里程的方法出现偏差,且该偏差随列车运行里程的增加而增加,因此仅采用基于速度编码器的定位方法在较长段线路上进行采集作业时定位精度较低。

2.1.2 地面标签识别技术

地面标签识别技术基于非接触式射频识别,通过射频信号自动读取目标对象的唯一编码,并解析相关数据实现通信。整个过程无须人工干预,且可工作于恶劣环境^[8]。车载综合里程同步系统通过连通车下安装的阅读器天线,对包含绝对里程信息的地面电子标签信息进行读写,以达到定位目的。

阅读器天线在列车行驶中扫描到定位点标签时,得到绝对里程信息并在数据处理模块进行处理。然而,电子标签能否布置及其布置数量需符合城轨线路运营公司要求,通常其布置的密度很低。此外,标签信息读取的灵敏度容易受特殊天气与环境影响。因此,里程精确定位的实现需将地面标签识别技术与其他方法结合使用。

2.1.3 点式应答器定位技术

点式应答器定位技术通常用于高速铁路,在城轨列车上使用情况偏少。应用该技术时需要在车上安装应答器感应天线,实时读取点式应答器数据并联合数据库导出里程值。但该技术在城轨线路联调联试阶段无法使用^[9]。

应答器将按照一定间隔安装于轨道之间,当列车通过应答器上方时,通过应答器接收天线完成对应答器内信息的读取,通过相关里程信息完成对列车的定位。基于点式应答器的定位方法具有在应答器附近定位精度高、自动区分车辆上下行、使用寿命长等优点,但定位频率低,安装和维护成本高,使用限制条件较多。

2.1.4 车辆信号系统定位转接技术

城轨车辆本身是具有多类承载定位信息的系统,如 TCMS(列车控制和管理系统)、ATC(列车自动控制)系统等。以 TCMS 为例,该系统记录车辆设备状态和故障数据,并在综合检测车司机室的屏幕上显示,辅助司机实时掌握车辆运行状况^[10],同时感应列车自身速度并将其实时转换为里程信息。现有城轨综合检测车选用 TCMS 控制和管理列车

运行。在不影响列控系统网络工作的情况下,可由 TCMS 分发一路带有里程数据的信息至车载综合里程同步系统所在的交换网络,由里程同步系统抓取 TCMS 报文并提取里程信息实现定位感知。TCMS 可提供实时、连续且无累计误差的里程信息,但整体精度较低,只能作为备用定位方式。

2.1.5 轨枕识别技术

轨枕计数模块通过距离传感器获取开始检测后的轨道部件状态信息,如轨枕、扣件、道床、排水沟等。综合检测车行驶过程中,轨枕计数模块每检测到 1 根轨枕的扣件,即向时空同步模块发送 1 个“1”信号,且信号将连续、稳定发送直到检测任务停止。

时空同步模块接收轨枕计数模块的信号并自动转换为轨枕编号,以确定列车自有效检测开启后经过的轨枕数量,结合线路轨枕台账信息、轨枕数量及其相应里程的映射关系和校准偏移值,计算出列车距地面触发电子标签后的超高精度里程,如图 3 所示。

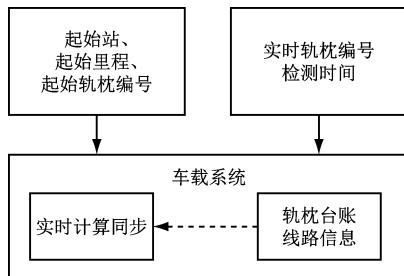


图3 轨枕里程计算原理框图

Fig.3 Block diagram of sleeper mileage calculation principle

城轨综合检测车轨枕计数模块传感器采样频率约为 32 kHz,纵轴方向分辨率达到 0.001 5 mm。图 4 为列车运行速度为 120 km/h 时我国 5 类常用型号扣件高度随里程变化曲线。由图 4 可见:该模块能够明显区分数据点采集时是否对应轨枕扣件,并同时可将采集数据换算成高度曲线;WJ2 型和 WJ5 型扣件的高度曲线在低谷处波动较大,究其原因这两种型号的轨道扣件为有砟轨道扣件。

相较电子标签、应答器等定位方法,基于轨枕识别技术的定位方法具有信号密度高的优势。相较编码器的定位方法,后者不产生累积里程误差,保证里程偏差始终不超过相邻两根轨枕的间距。

2.2 里程信号优先级

鉴于车载综合里程同步系统需要整合统一的

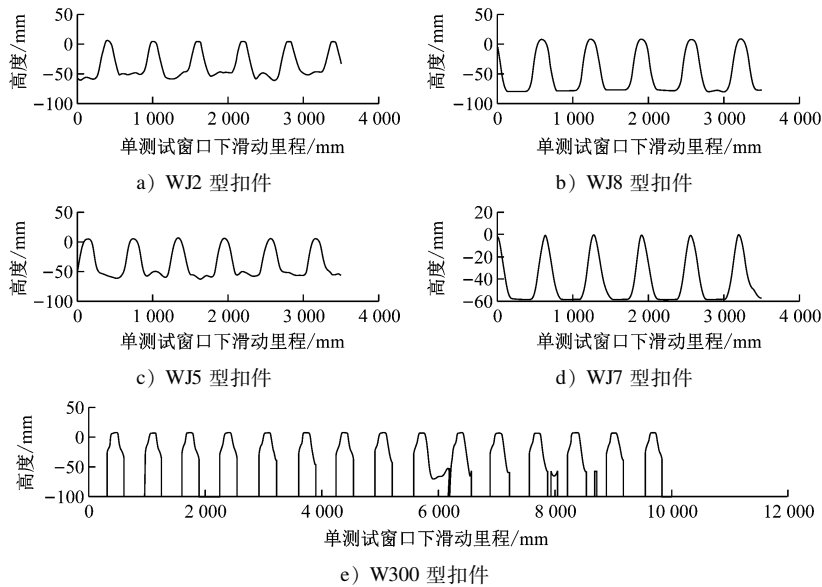


图4 5类常用型号扣件的高度随里程变化曲线

Fig. 4 Curves of the height of 5 common type fasteners changing with mileage

里程信息,通过对不同定位信号源进行优先级排列,确定主信号源,并利用次信号源对主信号源进行校准。

按照城轨综合检测车长距离行车下的定位精度排序,从高到低依次是点式应答器定位信息和电子标签信息(并列)、轨枕识别得到的里程信息、编码器计算得到的里程信息、TCMS 等车辆信号系统提供的里程信息。各类定位方式的优先级分析如下:

1) 点式应答器和电子标签定位方式提供的里程信息代表绝对位置,精度极高,但密度很低,用于在特定位置校准其他定位信号。

2) 轨枕识别方法提供的里程数据精度和密度均很高,可作为综合检测车里程赋值的主要方式。

3) 编码器提供的里程数据精度略低于轨枕识别方法,但密度极高且含有速度信息,可作为综合检测车里程标记赋值的辅助方法。

4) 车辆信号系统提供的里程数据精度一般,密度较高,相比其他定位方式无明显优势。

因此,车载综合里程同步系统的里程校准算法应围绕轨枕识别得到的里程展开修正,在点式应答器或电子标签位置利用绝对位置信息进行里程校准,同时在两根轨枕之间的位置利用编码器的极高密度和速度信息进行校准。

2.3 里程修正和校准算法

轨枕计数信号作为主要里程信号源,直接影响

综合检测车的数据同步精度。可从识别误差补偿、细化相邻轨枕间距等方向提升该定位技术的准确性。

2.3.1 结合轨枕台账修正里程

轨枕台账包含轨枕根数与线路里程的关联信息。为减少轨枕扣件丢失、漏检造成的误差,提出如下修正思路:

1) 我国城轨常用混凝土枕的配置标准为 1 667 根/km,相邻轨枕间距约为 0.6 m。设定轨枕间距范围为 0.5 ~ 0.7 m,若超过 1.0 m 未检测出轨枕扣件的,默认中间扣件丢失或漏检,应实现自动插入 1 根轨枕的功能。

2) 将不足 0.35 m 的间隔视为检测误差,应实现自动减去 1 根轨枕的功能。

3) 两站之间的轨枕采集数量与轨枕台账具有偏差的,应实现在站点处自动同步里程的功能。

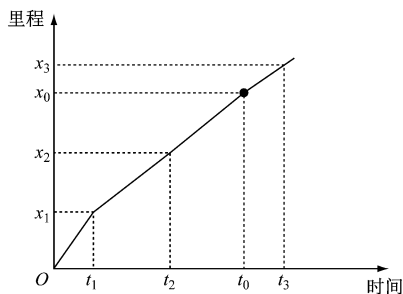
2.3.2 结合断链台账修正里程

断链台账可关联城轨线路图纸上具有的所有长短链及其里程信息,不连续的里程表示可能在轨枕数量换算里程时引起误差。车载综合里程同步系统在里程换算时将里程全部转换为浮点数,避免长短链里程标造成的误差,实现断链处智能换算里程功能。

2.3.3 里程校准算法

由于轨枕计数模块与检测数据产生点之间存在位置差异,且部分检测系统数据的产生频率高于

轨枕计数模块定位数据的产生频率,因此提出轨枕里程修正思路:通过位置标定消除各系统检测数据源与轨枕计数模块数据源的位置差;利用频率更高的编码器速度值,对每两根轨枕之间的距离进行线性差分计算,得到区间内检测数据点的精确里程。基于轨枕计数方法的里程校准算法示意图如图5所示。



注: x_2 为某一采集到的轨枕里程, x_1 为 x_2 对应采集点前 1 根的轨枕里程, x_3 为 x_2 对应采集点后 1 根的轨枕里程; t_1 、 t_2 、 t_3 分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 处轨枕采集时间; t_0 为欲校准的高频率检测数据的产生时间; x_0 为 t_0 处产生数据的里程。

图5 基于轨枕计数方法的里程校准算法示意图

Fig.5 Diagram of mileage calibration algorithm based on sleeper counting method

则校准里程 x_0 的计算公式如下:

$$x_0 = x_2 + v(t_0 - t_2) - l$$

式中:

v —— t_0 处编码器上报速度;

l ——轨枕计数模块传感器与检测系统采集装置的间距。

2.4 里程赋值技术研究

通过对里程信号优先级的研究,以及对精确里程的修正校准,多类定位信号可实现整合与统一输出,并作为里程值标记的基准。

里程赋值技术可用于数据综合分析展示前的预处理阶段。该技术的原理为车载综合里程同步系统解析每条动态检测数据后,将信息准确、格式统一的里程值替换检测数据上报时自带的低精度、具有格式差异的里程值。

该技术的应用需要对车载综合里程同步系统具有将各类里程值的格式统一为浮点数里程戳的程序。在检测作业开始前,车载综合里程同步系统应发送“校正所有系统的时间”指令到检测系统,由于车上各系统均有主机设备,采用精度超高的电子时钟,保证时间在校准后 2 h 内与标准时间差在毫秒级,此时认为车载综合里程同步系统与各检测系

统内部的时钟保持对齐状态。因此,在里程赋值进程中,可通过查询“检测数据采集的瞬时时间”,并使用该时刻下车载综合里程同步系统的“已校准里程”覆盖原有检测数据里程,完成里程标记赋值。

3 结语

本文利用轨枕识别、多源里程定位及里程赋值等技术,提出了一种适用于城轨综合检测车的精确里程赋值方法。该方法兼容车辆信号系统定位信号、编码器脉冲信号、电子标签信号、轨枕计数模块信号等多通道信号输入,达到统一、高精度的里程信息输出赋值效果,实现了高精度、高密度、抗干扰、成本可控的车载动态综合检测里程数据同步功能,满足了同里程断面下多类检测数据的综合分析,进而可有效指导城轨基础设施病害溯源及日常维保工作。

参考文献

- [1] 靳守杰,魏志恒,王文斌,等.城市轨道交通综合检测车应用分析[J].现代城市轨道交通,2021(11):69.
JIN Shoujie, WEI Zhiheng, WANG Wenbin, et al. Application analysis of comprehensive inspection trainset for urban rail transit [J]. Modern Urban Transit, 2021(11): 69.
- [2] 魏志恒,徐栋,陈万里,等.城市轨道交通基础设施综合检测技术应用研究[J].现代城市轨道交通,2021(11):81.
WEI Zhiheng, XU Dong, CHEN Wanli, et al. Research on application of comprehensive inspection technology for urban rail transit infrastructure [J]. Modern Urban Transit, 2021(11): 81.
- [3] 李红艳,赵隽,刘丙强,等.高速铁路基础设施检测监测体系技术路线研究[J].中国铁路,2021(1):98.
LI Hongyan, ZHAO Jun, LIU Bingqiang, et al. Research on technical route of inspection and monitoring system for high-speed railway infrastructure [J]. Chinese Railways, 2021(1): 98.
- [4] 王卫东,顾世平,高利民,等.高速铁路基础设施综合检测技术[J].铁路技术创新,2015(2):11.
WANG Weidong, GU Shiping, GAO Limin, et al. Comprehensive detection technology of high-speed railway infrastructure [J]. Railway Technical Innovation, 2015(2): 11.
- [5] 张亚军,苟云涛.160 km/h 液力传动综合巡检车研制[J].铁路技术创新,2020(2):84.
ZHANG Yajun, GOU Yuntao. Development of 160 km/h hydraulic transmission comprehensive inspection vehicle [J]. Railway Technical Innovation, 2020(2): 84.
- [6] 王登阳,杨超.高速综合检测时空同步技术[J].铁路技术创新,2012(1):16.

(下转第142页)

并可针对性地优化轮对的检修策略,有效提高轮对使用寿命,降低人工作业成本,真正做到降本增效。未来,可通过 RFID 电子标签等现代化感知手段在轮对检修作业中自动更新车辆履历,并配合信息化平台实现自动追踪部件级走行公里,真正实现轮对全生命周期内的自动化、数字化及智慧化管理。

参考文献

- [1] 戴勇平. 上海轨道交通 4 号线列车轮对轮缘异常磨损分析与对策[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 95.
DAI Yongping. Analysis of wheel flange abnormal wear for Shanghai Metro Line 4 vehicles and countermeasures[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 95.
- [2] 邓志刚, 孙纲. 地铁车辆车轮异常磨损测试分析[J]. 现代城市轨道交通, 2009(1): 17.
DENG Zhigang, SUN Gang. Analysis of abnormal wear tests for metro vehicle wheels[J]. Modern Urban Transit, 2009(1): 17.
- [3] 周浩, 李彦武. 地铁车辆轮对异常磨损原因及控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 63.
ZHOU Hao, LI Yanwu. Causes of metro vehicle wheel set abnormal abrasion and countermeasures[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 63.
- [4] 刘丙林, 李忠山, 陈磊, 等. 地铁车辆轮对不圆度规律及成因分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(7): 22.
LIU Binglin, LI Zhongshan, CHEN Lei, et al. Analysis on the wheel roundness of metro vehicle and causes of its irregularities

- [J]. Modern Urban Transit, 2019(7): 22.
- [5] 郭燕辉. 城轨车辆车轮轮缘异常磨损原因及措施分析[J]. 中国铁路, 2016(6): 98.
GUO Yanhui. Analysis of reasons and measures for urban rail vehicle wheel flange abnormal wear[J]. China Railway, 2016(6): 98.
- [6] 顾正隆, 葛亦凡. 基于轮对磨损数据数理统计的轮对镟修策略多目标优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 21.
GU Zhenglong, GE Yifan. Multi-objective optimization of wheelset rotation repair strategy based on mathematical statistics of wheelset wear data[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 21.
- [7] 赵峰, 殷鸿鑫. 轮对尺寸动态在线检测系统现场运用与管理建议[J]. 哈尔滨铁道科技, 2017(4): 11.
ZHAO Feng, YIN Hongxin. Field application and management suggestions of wheelset dimension dynamic online detection system[J]. Harbin Railway Technology, 2017(4): 11.
- [8] 苏靖棋. 轮对数字化维修管理[J]. 现代城市轨道交通, 2020(6): 125.
SU Jingqi. Digitalized maintenance management of wheelset[J]. Modern Urban Transit, 2020(6): 125.
- [9] 张文耀. 动车组轮对全生命周期信息管理系统建设[J]. 铁道运营技术, 2021, 27(3): 50.
ZHANG Wenyao. Construction of EMU wheelset life cycle information management system[J]. Railway Operation Technology, 2021, 27(3): 50.

(收稿日期:2022-12-26)

(上接第 137 页)

- WANG Dengyang, YANG Chao. Space-time synchronization technology of high-speed comprehensive detection[J]. Railway Technical Innovation, 2012(1): 16.
- [7] 陶汉卿. 一种低成本的城市轨道交通列车组合定位方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 138.
TAO Hanqing. A low-cost urban rail transit train combination positioning scheme[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 138.
- [8] 曹盘勋, 潘喜武. 浅析电务轨旁设备巡检系统的里程定位校正方法[J]. 哈尔滨铁道科技, 2020(2): 31.
CAO Panxun, PAN Xiwu. Analysis on the mileage positioning correction method of the patrol system of the equipment beside the railway in electric service[J]. Harbin Railway Science & Technology, 2020(2): 31.

- [9] 刘水平, 杨寿智, 杨吉钊. 基于无线测距模式的地铁列车精确定位系统研究[J]. 电子世界, 2019(8): 134.
LIU Shuiping, YANG Shouzhi, YANG Jizhao. Research on subway train precise positioning system based on wireless ranging mode[J]. Electronics World, 2019(8): 134.
- [10] 李宗亮, 徐东超, 彭兴伟, 等. 列车信号系统与 TCMS 一体化显示软件的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(11): 23.
LI Zongliang, XU Dongchao, PENG Xingwei, et al. Design and implementation of integrated display software for train signal system and TCMS[J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(11): 23.

(收稿日期:2023-03-08)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com