

基于 CAN 总线的列车头尾端冗余测速测距系统

何浩洋 孟旭瑶 吴敏东

(国睿科技股份有限公司, 211151, 南京)

摘要 [目的] 既有的列车测速测距技术大多经由 ATP (列车自动防护) 系统进行数据互联互通及交互, 其实现过程较为复杂, 且容易因时序问题造成列车定位失效, 需要研究更为可靠、有效的技术方法, 以实现列车的实时、精确定位。[方法] 介绍了列车单端测速测距系统功能的实现流程, 以及基于 CAN (控制局域网) 总线的列车头尾端冗余测速测距系统功能的实现流程, 进一步对比了二者在数据处理流程上的不同。针对列车头尾端冗余测速测距系统, 建立了列车运行速度计算模型及列车运行距离计算模型。在此基础上, 考虑了列车车长及头尾端数据传输和处理过程存在延时等因素, 进一步建立了列车运行速度校正模型及列车运行距离校正模型。搭建了列车运行仿真系统, 用以模拟列车头端定位设备故障工况, 分析该工况下列车头尾端冗余测速测距系统头尾端切换后数据的有效性。[结果及结论] 在列车头端定位设备故障情况下, 该系统可以持续输出有效的测速测距数据, 准确描述列车的速度位置信息。

关键词 城市轨道交通; 列车; 列车定位技术; 控制局域网; 列车测速测距系统

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.042

Redundant Speed and Distance Measuring System at Train Head and End Based on CAN Bus

HE Haoyang, MENG Xuyao, WU Mindong

(Glarun Technology Co., Ltd., 211151, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Data interconnection and interaction are realized through ATP (automatic train protection) system in most of the existing train speed and distance measuring technologies. However, the implementation process is complicated, and the train positioning is failure prone caused by timing sequence problems. It is necessary to explore a more reliable and effective technical method to realize real-time and accurate train positioning. [Method] The function realization flows of the speed and distance measuring system at single end of the train, and the redundant speed and distance measuring system at both ends of the train based on CAN (control LAN) bus are introduced. The differences of the data processing flow between the above two systems are further compared. Calculation

models for train running speed and distance are established in terms of the redundant speed and distance measuring system at both ends of the train. On this basis, the train speed and distance correction models are also established considering the train length factors and the delay in data transmission and processing process between the train ends. A train operation simulation system is built to simulate the fault condition of the train head-end positioning equipment, and analyze the validity of the data under the above fault condition after switching between redundant speed and distance measuring systems at train head-end and tail-end. [Result & Conclusion] The system can continuously output valid speed and distance measuring data in the event of train head-end positioning equipment failure, accurately describing the train speed and position information.

Key words urban rail transit; train; train positioning technology; CAN; train speed and distance measuring system

目前,城市轨道交通列车定位技术大致可分为轨旁定位和列车定位两类^[1-2]。轨旁定位指轨道电路、应答器等装置与列车测速测距系统进行通信,进而确定列车位置^[3-5]。列车定位指在列车上安装测速传感器(如雷达、里程计、红外测速传感器等),基于速度积分实现列车的实时定位^[6-7]。在已有的城市轨道交通列车运行系统中,为了实现更精确的列车测速测距功能,列车定位系统大多采用轨旁定位和列车定位相结合的方案^[8-10]。

列车定位技术不仅能提升列车定位的精确度,其冗余保护设置(在列车的头尾两端分别安装 1 套测速测距系统)也是提升列车运行安全性的有效措施^[11]。列车头尾端的 ATP (列车自动防护) 系统互联互通,当头端测速测距系统发生故障时,可使用尾端 ATP 系统的数据^[12-13]。但经由 ATP 进行数据互联互通及交互,其实现过程较为复杂,且容易因时序问题造成列车定位失效。相对而言,列车测速测距系统的头尾端数据交互更为简单易控。

CAN (控制局域网) 总线是一种串行通信协议,采用 CRC (循环冗余校验) 方式保证传输数据的可

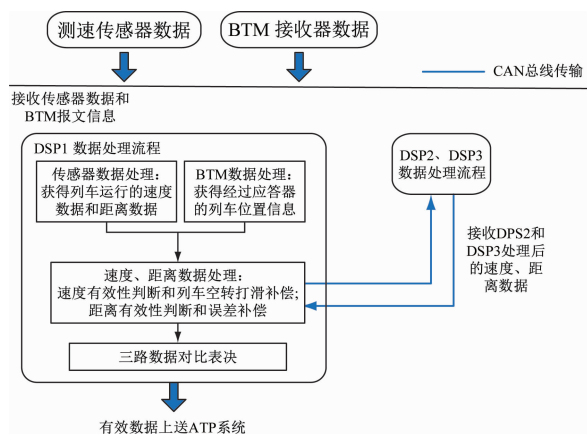
靠性,具有较高的通信速率和较强的抗干扰能力。本文提出基于CAN总线的列车头尾端冗余测速测距系统,该系统可实现列车头尾端测速测距模块数据交互,解决列车单端测速测距系统故障时难以判断数据有效性的问题。

1 列车头尾端冗余测速测距系统设计

列车头尾端冗余测速测距系统基于微处理器接收数据,处理测速测距传感器数据及BTM(应答器传输模块)报文信息,计算列车运行速度和列车运行距离。同时,该系统使用双绞线连接头尾端,基于CAN总线协议定时传输列车两端的速度数据和距离数据。正常状态下,列车头尾端均会将测速测距数据上送ATP。当头端定位设备故障时,列车头端测速测距系统将尾端数据(已进行补偿校验处理)上送ATP。

1.1 列车单端测速测距系统

图1为列车单端测速测距系统功能实现示意图。如图1所示,为保证列车定位功能的精确性和安全性,列车单端测速测距系统采用测速传感器和BTM结合的方式确定列车的速度及距离,同时采用三路微处理器分别采集传感器和应答器的信息。每块微处理器均可获取到三路微处理器的数据,三路微处理器通过CAN总线通信。每块处理器在获得另外2块处理器的测速测距数据后,会进行数据的对比表决,以去除可能存在的因不确定性因素导致的错误数据,进而得到符合安全要求的速度数据



注: DSP1、DSP2、DSP3 为采用数字信号处理技术的芯片编号。

DSP2、DSP3 内部的数据处理流程同 DSP1, 图内不再赘述。

图1 列车单端测速测距系统功能实现示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the function realization of the speed and distance measuring system at train single end

及距离数据。

列车单端测速测距系统的数据处理流程如下:

1) 每块微处理器均基于测速传感器的采集信息,结合列车行驶特性对列车运行速度数据(以下简称“速度数据”)的有效性、列车是否处于空转打滑状态进行判断,并对列车速度进行补偿修正。

2) 每块微处理器基于速度数据计算列车运行距离,并根据应答器报文得到的列车当前位置信息对列车运行距离数据(以下简称“距离数据”)进行有效性判断及累计误差修正。

3) 每块微处理器将本端经过修正后的速度数据及距离数据发送至CAN总线,并从CAN总线接收另外2块微处理器的速度数据及距离数据。

4) 每块微处理器对获取的三路微处理器的速度数据及距离数据进行对比和表决,将表决后的速度数据及距离数据上送到ATP系统。

5) 列车单端定位设备(即测速传感器或应答器报文接收器)发生故障时,需切除ATP工作。

1.2 列车头尾端冗余测速测距系统

图2为列车头尾端冗余测速测距系统功能实现示意图。如图2所示,为实现列车头尾端测速测距的冗余功能,将列车头尾端测速测距单元的微处理器通过双绞线连接,测速测距系统基于CAN总线接收端微处理器数据。此时由于头尾端共有6块微处理器同时通信,需要为每块微处理器配置不同的标识符。

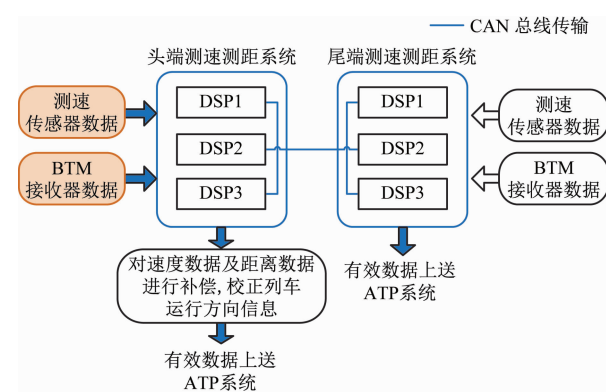


图2 列车头尾端冗余测速测距系统功能实现示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the function realization of the redundant speed and distance measuring system at train both ends

在列车头端定位设备发生故障时,本端三路微处理器的传感器数据或应答器报文数据不可用,无法完成列车测速测距及定位功能。此时可按照以

下操作对尾端三路微处理器的数据进行处理:

1) 列车头尾端冗余测速测距系统的每块微处理器在接收本端另外 2 块微处理器数据的同时,也接收对端 3 块微处理器的数据。列车头端定位设备发生故障时,接收尾端三路微处理器的速度、距离等列车运行状态数据,并对数据进行对比和表决,得到表决后尾端的速度数据及距离数据。

2) 考虑到列车头尾端冗余测速测距系统在测速测距上存在通信延时,在方向检测上存在物理差异,须对表决后的尾端数据进行补偿和校正,并进行有效性检测,以确保列车的速度数据、距离数据不发生跳变。速度数据及距离数据经过一致性校验后,列车头尾端冗余测速测距系统将得到的有效数据上送 ATP 系统。

列车头尾端冗余测速测距系统逻辑流程图如图 3 所示。

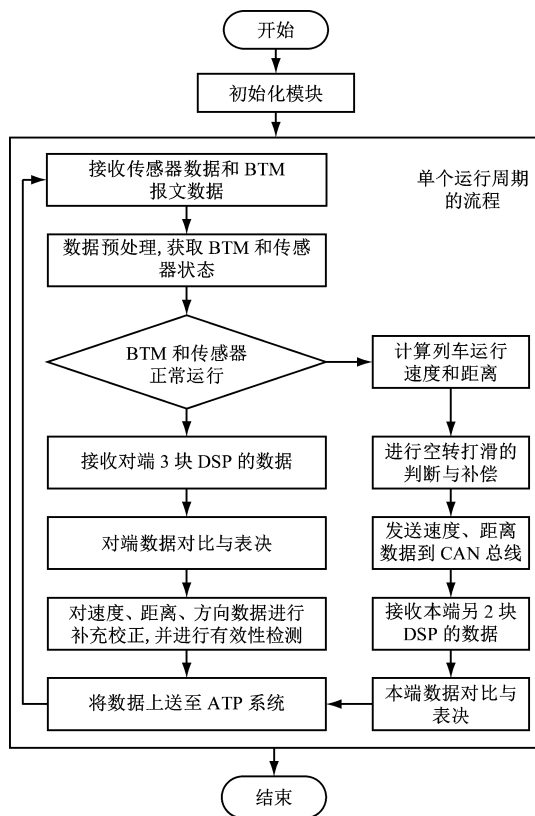


图3 列车头尾端冗余测速测距系统单个运行周期逻辑流程图

Fig. 3 Logical flowchart of the redundant speed and distance measuring system at train both ends in one operation cycle

2 列车速度、距离数据的补偿计算模型

考虑到列车车长引起的头尾端数据传输延时

及数据处理耗时,需要对速度数据及距离数据进行补偿,并校验补偿后数据的有效性。

2.1 列车运行速度计算模型

当前周期的列车运行速度与前 1 个周期的列车运行速度之差应与加速度累计结果一致。当列车头端定位设备发生故障时,列车头尾端冗余测速测距系统接收尾端三路处理器的测速数据。此时若列车为匀速运行,则头尾端的运行速度一致;若列车处于加速或减速过程中,则头端接收到的尾端速度与头端实际速度之差应保持在合理范围内。设三路处理器中第 k 路 DSP 的 CRC 有效, v_k 为该路 DSP 的列车运行速度,则对列车运行速度数据有效性的判断依据为:

$$\begin{cases} v_{\text{now}} = \min v_k \\ |v_{\text{now}} - v_{\text{last}}| < \Delta v_{\text{tole}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

v_{now} ——当前周期的列车运行速度;
 v_{last} ——前 1 个周期的列车运行速度;
 Δv_{tole} ——列车运行速度计算容差。

在三路处理器的速度数据三取二无效的情况下,使用 v_{last} 对 v_{now} 进行合理推算:

$$v_{\text{now}} = v_{\text{last}} + at_{\text{cycle}} \quad (2)$$

式中:

a ——列车运行加速度;
 t_{cycle} ——列车头尾端冗余测速测距系统的周期运行时间。

在列车头端进入故障态后的第 1 个周期, v_{last} 、 a 的取值分别为头端在正常态下最后 1 个周期的列车运行速度、列车运行加速度。

2.2 列车运行距离计算模型

本文定义列车运行距离为当前所处的应答器与线路上前 1 个应答器之间的距离。该距离每经过 1 个应答器,清零 1 次。在列车未经过应答器的周期,列车运行距离的周期增长值应小于一定的范围,且与前 1 个周期距离的差值应与列车运行速度计算结果相匹配。基于此,对列车运行距离数据的有效性判断依据为:

$$\begin{cases} d_{\text{now}} = d_k \\ |d_{\text{now}} - d_{\text{last}}| < \Delta d_{\text{tole},1} \\ |d_{\text{now}} - d_{\text{last}}| < v_{\text{now}} t_{\text{cycle}} \Delta d_{\text{tole},2} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

d_{now} ——当前周期的列车运行距离;

d_k ——列车尾端第 k 块处理器(已通过有效性检验)计算的列车运行距离;

d_{last} ——前 1 个周期的列车运行距离;

$\Delta d_{\text{tole},1}$ ——列车运行距离计算容差 1;

$\Delta d_{\text{tole},2}$ ——列车运行距离计算容差 2。

在三路处理器距离数据三取二无效的情况下,使用 d_{last} 和 v_{now} 对 d_{now} 进行合理推算:

$$d_{\text{now}} = d_{\text{last}} + v_{\text{now}} t_{\text{cycle}} \quad (4)$$

在列车头端进入故障态后的第 1 个周期, d_{last} 取头端在正常态下最后 1 个周期的运行距离, d_{now} 取此时列车头端接收到的尾端运行距离, v_{now} 取补偿校正后的列车尾端运行速度。

2.3 列车运行速度校正模型

考虑到列车运行过程中变速情况,尾端数据传输到头端时,传输和处理均有一定的延时,需要对表决后的尾端速度进行补偿。基于此,列车头端故障态下列车运行速度的补偿校正模型为:

$$v_{\text{head}} = v_{\text{tail}} + at_{\text{diff}} \quad (5)$$

$$t_{\text{diff}} = t_{\text{trans}} + t_{\text{handle}} \quad (6)$$

式中:

v_{head} ——列车头端运行速度,即补偿后的列车运行速度;

v_{tail} ——表决后的列车尾端运行速度;

t_{diff} ——列车尾端数据传输到头端时的传输和处理补偿时差;

t_{trans} ——列车尾端数据传输到头端所需的通信时间;

t_{handle} ——列车头端处理尾端传来的速度和距离数据的时间。

在列车头端进入故障态后的第 1 个周期, a 取列车头端在正常态下最后 1 个周期的加速度。

在本文设计的列车头尾端冗余测速测距系统中, CAN 总线以每个数据帧包含 8 字节帧头帧尾和 8 字节数据的形式进行数据传输,而头尾两端各配置了 3 块微处理器,因此可得到 t_{trans} 和 t_{handle} 的计算式:

$$t_{\text{trans}} = 216 l_{\text{data}} / r_{\text{baud}} \quad (7)$$

$$t_{\text{handle}} = t_{\text{comp}} - t_{\text{rec}} \quad (8)$$

式中:

l_{data} ——传输数据的长度,单位 B;

r_{baud} ——CAN 传输使用的波特率,单位 bit/s;

t_{comp} ——列车头端进行速度补偿计算的时刻;

t_{rec} ——列车头端接收到尾端数据的时刻。

2.4 列车运行距离校正模型

由于列车头尾两端存在距离差(即列车长度),且列车头端测速测距系统接收和处理尾端数据过程中存在时间差,因此在列车头端定位设备发生故障时,需要对表决后的尾端距离数据进行补偿校正。

列车尾端经过应答器前,列车运行距离的校正计算模型为:

$$d_{\text{head}} = d_{\text{balise}} + v_{\text{tail}} t_{\text{diff}} + \frac{1}{2} at_{\text{diff}}^2 + \sum_i \Delta d_{\text{cycle},i} \quad (9)$$

式中:

d_{head} ——补偿校正后的列车头端应答器距离;

d_{balise} ——列车头端正常态下最后 1 个周期的应答器距离;

$\Delta d_{\text{cycle},i}$ ——运行周期 i 的列车运行距离(其值由尾端测速测距系统计算获得并传输至头端设备)。

列车尾端经过应答器后,列车运行距离的校正计算模型为:

$$d_{\text{head}} = d_{\text{tail}} + v_{\text{tail}} t_{\text{diff}} + \frac{1}{2} at_{\text{diff}}^2 + l_{\text{train}} \quad (10)$$

式中:

d_{tail} ——表决后的列车尾端走行距离;

l_{train} ——列车车长。

3 试验结果分析

列车头尾端冗余测速测距系统可靠运行的关键在于头端故障态下切换使用尾端测速测距数据的有效性,具体表现为:①切换前后周期的测速测距数据不能发生跳变;②头端设备切换使用尾端数据后的较长持续时间内(约 10 h)尾端测速测距数据与头端设备测速测距原数据的偏差应尽可能小。

进一步对列车头尾端切换后的暂态数据和稳态数据有效性进行测试。在实验室环境中搭建列车运行仿真系统,配置头尾端测速测距系统,把安装在头端和尾端的微处理器(共 6 块)数据处理流程写入列车头尾端冗余测速测距功能程序中。上位机模拟列车在规定线路上的运行状态,通过串口持续获取头端测速测距系统上送 ATP 的列车速度数据及距离数据。

3.1 列车头尾端切换的暂态数据对比测试

针对列车头尾端冗余切换瞬间前后周期的暂态测速测距数据是否发生跳变问题,在列车运行速度为 5 m/s 及 13 m/s 时分别对以下 2 个场景进行

测试:①头端 BTM 接收器故障;②头端测速传感器故障。

选取典型数据,整理得到列车头端定位设备故障下头尾端暂态数据试验结果,如表 1 所示。

表 1 列车头端定位设备故障下头尾端暂态数据试验结果

Tab.1 Temporal data test results of the head-end and tail-end under head-end positioning equipment failure

列车运行速度/(m/s)	运行周期	数据获取端	BTM 故障下的试验数据			传感器故障下的试验数据		
			距离/m	距离增量/m	速度/(m/s)	距离/m	距离增量/m	速度/(m/s)
5	切换前 1 个周期	头端	41.13		4.98	31.37		4.98
	切换后第 1 个周期	尾端	41.63	0.50	4.98	31.87	0.50	4.98
	切换后第 2 个周期	尾端	42.13	0.50	4.98	32.37	0.50	4.98
	切换后第 3 个周期	尾端	42.63	0.50	4.98	32.87	50.00	4.98
13	切换前 1 个周期	头端	11.47		12.99	136.93		12.99
	切换后第 1 个周期	尾端	12.84	1.37	12.99	138.30	1.37	12.99
	切换后第 2 个周期	尾端	14.21	1.37	12.99	139.67	1.37	12.99
	切换后第 3 个周期	尾端	15.58	1.37	12.99	141.04	1.37	12.99

注:距离增量为当前周期列车运行距离与上 1 个周期列车运行距离的差值。

由表 1 可看出,与切换前 1 个周期的列车速度数据及距离数据相比,切换后 1 个周期的尾端列车速度数据及距离数据经表决补偿后,保持了与切换前相同的增长速率:列车运行速度为 5 m/s 时,BTM 故障、传感器故障下的距离增量均为 0.50 m;列车运行速度为 13 m/s 时,BTM 故障、传感器故障下的距离增量均为 1.37 m。由此可认为,切换后的数据可满足列车的速度、距离一致性检测的要求,列车在头尾端切换瞬间暂态的测速测距数据具有有效性。

3.2 列车头尾端切换的稳态数据同端对比测试

针对头端设备切换使用尾端数据后稳态测速测距数据的有效性问题,本文进一步修改了测试代码逻辑,即:列车单端测速测距系统在处理头端测速测距数据时,同步接收尾端测速测距数据,并对数据进行表决和补偿处理。通过串口同时输出头端测速测距数据和补偿修正后的尾端测速测距数据。选取典型数据,整理得到列车头端定位设备故障下头尾端稳态数据试验结果。图 4 为头端距离数据与补偿后尾端距离数据的对比情况。由图 4 可知:头端距离数据曲线与补偿后尾端距离数据曲线在走向上基本重合,头尾两端距离数据的最大差值为 6 cm,基本满足列车定位的准确性要求。

图 5 为头端速度数据与补偿后尾端速度数据的对比。由图 5 可知:头端速度数据曲线与补偿后尾端速度数据曲线在走向上基本重合,头尾两端速度数据的最大差值为 3 cm/s,基本满足列车定位的准

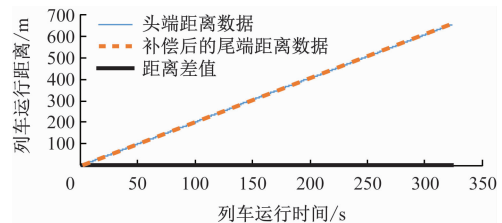


图 4 头端距离数据与补偿后尾端距离数据的对比

Fig. 4 Comparison of the head-end distance measuring data and the compensated tail-end data

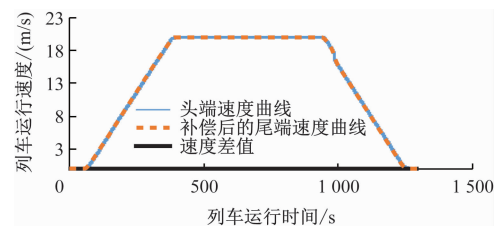


图 5 头端速度数据与补偿后尾端速度数据的对比

Fig. 5 Comparison of the head-end speed data and the compensated tail-end data

确性要求。

基于上文的试验数据分析,在列车头端定位设备故障情况下,切换使用补偿修正后的尾端速度数据及距离数据,在切换瞬间和切换后较长持续时间内均可准确输出列车的速度信息和位置信息,即:列车头尾端冗余测速测距系统可以有效保证列车测速测距的连续性和稳定性。

4 结语

本文提出了一种基于 CAN 总线通信协议的列

车头尾端冗余定位测试测距系统。该系统具有通信速率高、抗干扰能力强的特点,且具备仲裁和校验功能。试验模拟列车运行故障场景,所得的数据分析结果表明:该系统可以在列车头端定位设备发生故障的情况下接收尾端定位设备的测速测距数据,并对数据进行表决和补偿;补偿后数据具有有效性,可以准确描述列车的速度及位置信息。

参考文献

- [1] 陈春辉. 城市轨道交通全自动运行列车的需求分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 10.
CHEN Chunhui. Requirement analysis of urban rail transit fully automatic operation train[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 10.
- [2] 马若声, 罗育桑, 陈泽武. 列车辅助定位技术在ATS系统中的应用研究[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(4): 76.
MA Ruosheng, LUO Yushen, CHEN Zewu. Study on application of auxiliary train positioning technology in ATS system[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(4): 76.
- [3] 刘可心. 浅谈城市轨道交通列车定位系统[J]. 科技信息, 2013(10): 382.
LIU Kexin. Discussion on train positioning system of urban rail transit[J]. Science & Technology Information, 2013(10): 382.
- [4] 田斌. 基于无线感应技术的城市轨道交通高精度列车定位系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 122.
TIAN Bin. Design of high precision positioning system for urban rail transit train based on wireless induction technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 122.
- [5] 马钰昕, 周庭梁, 欧阳玲萍, 等. 基于LTE系统的轨道交通辅助定位方法[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(1): 89.
MA Yuxin, ZHOU Tingliang, OUYANG Lingping, et al. LTE-based auxiliary train positioning approach for urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(1): 89.
- [6] 蔡焯, 王长林, 林颖. 基于轮轴速度传感器和加速度传感器的混合测速测距算法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(3): 32.
CAI Xuan, WANG Changlin, LIN Ying. Mixed speed and distance ranging algorithm based on odometer and accelerometer[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(3): 32.
- [7] 杨岗, 林颖. 基于多传感器的信息融合列车定位算法研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(5): 42.
YANG Gang, LIN Ying. Train positioning method based on multi-sensor information fusion[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(5): 42.
- [8] 王任文. 基于无线信号强度的城轨列车组合定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Renwen. A train integrated positioning method based on received signal strength for urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [9] 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.
- [10] 李杰. 基于组合定位的下一代列车自主定位系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 93.
LI Jie. Research on the next generation train autonomous positioning system based on combined positioning[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 93.
- [11] 严冬, 田卫刚. 列车定位后备系统模型研究[J]. 铁路技术创新, 2017(5): 61.
YAN Dong, TIAN Weigang. Research on the model of train positioning backup system[J]. Railway Technical Innovation, 2017(5): 61.
- [12] 杨建成, 郭飞, 刘键, 等. 一种城轨列车定位设备首尾冗余设计方法:201811497972.0[P]. 2020-09-22.
YANG Chengjian, GUO Fei, LIU Jian, et al. Urban rail train positioning equipment head-tail redundancy design method: 201811497972.0[P]. 2020-09-22.
- [13] 张宁, 韩松, 何铁军, 等. 故障环境下城市轨道交通列车的辅助定位系统及其方法:201811162492.9[P]. 2019-01-04.
ZHANG Ning, HAN Song, HE Tiejun, et al. Auxiliary positioning system and method for urban rail transit train under fault environment:201811162492.9[P]. 2019-01-04.
- 收稿日期:2022-02-17 修回日期:2022-03-21 出版日期:2024-09-10
Received:2022-02-17 Revised:2022-03-21 Published:2024-09-10
• 通信作者:何浩洋,高级工程师, hehaoyang@glarun.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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umat1998.tongji.edu.cn