

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106368

基于虚拟应答器的三裕度数据处理设备研制*

马银鸿 范正吉 何鑫 洪应平 张会新

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要:针对当前地铁定位系统定位严重依赖于地面应答器的技术难题,提出了一种利用二维码定位的虚拟应答器的测试方法。在高精度时钟同步的基础上,设计了新型数据融合算法,制作了数据解调电路,构建了作对称三备份高可用性系统,对该测试系统进行了验证。试验结果表明,该测试方法可借助二维码实现列车的自主定位与启停,实时显示列车状态,定位精度可达厘米,且无需后继的地面应答器的人工维修,节省大量成本。同时,为实现列车自动驾驶的测试提供了可靠解决方案。

关键词:自主定位;数据融合算法;三裕度;数据处理;虚拟应答器

中图分类号: TN919.34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Development of three margin data processing equipment based on virtual transponder

Ma Yinhong Fan Zhengji He Xin Hong Yingping Zhang Huixin

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem that the positioning system of subway relies heavily on the ground transponder, a using two-dimensional codes positioning method is proposed. Based on the high precision clock synchronization, a new data fusion algorithm was designed, the data demodulation circuit was fabricated, a high availability system with symmetric three backups was constructed, and the test method was verified. The experimental results show that the system can realize the autonomous positioning, start and stop of the train with the help of QR code, and display the train status in real time. The positioning accuracy can reach up to cm, and there is no need for the subsequent manual maintenance of the ground transponder, which saves a lot of costs. At the same time, it provides a reliable solution for the test of automatic train driving.

Keywords: self-localization; data fusion algorithm; three margin; data processing; virtual transponder

0 引言

在列车控制领域,随着列车速度的不断提高,对控制系统的实时性和安全性有了更高的要求,列车的稳定运行逐渐成为大家关注的问题^[1-2]。目前,列车的启停,开关车门以及站台停靠均通过依靠轨旁的地面应答器来实现定位^[3-5],地面应答器虽满足列车控制的基本要求,但一方面铺设以及维修成本昂贵^[6],另一方面定位精度只可达米级,当累计行程较大时容易出现定位误差^[7-9]。当前国内的虚拟应答器多数运用 GNSS 的卫星定位,但未链接信息点的数量对测试结果的影响很大。

为解决上述问题,本文提出了利用二维码定位的虚拟

应答器来实现定位的测试方法,用于实现列车的进出站以及增减速控制。本系统的主要功能是利用虚拟应答器来实现精确定位。结果表明,该系统可完成列车自主精确定位,定位精度可达厘米,不仅大大降低了列车运营成本,而且为列车自动驾驶提供了可靠的方案,具有实用性强的特点。

1 总体设计

如图1所示,地铁列车自主定位系统中对高精度时钟同步算法和硬件数据处理模块的需求,采用时钟同步数据处理设备三裕度设计。内部包括3个独立的CPU,每个CPU负责接收1套定位传感器的定位参数。每套定位传

收稿日期:2021-04-12

* 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51705475)项目资助

感器包括 1 个惯导、1 个视觉设备、1 个雷达和 1 个速传。3 个独立 CPU 之间需通过内部 RS-485 总线实现系统时间同步、信息交互和定位数据,在数据处理设备中进行“3 取 2”

操作、时间同步、信息共享等处理,最终通过数据处理设备将列车位置信息上报 ATP(列车自主定位系统)。其中任意设备出现故障,则列车降级使用。

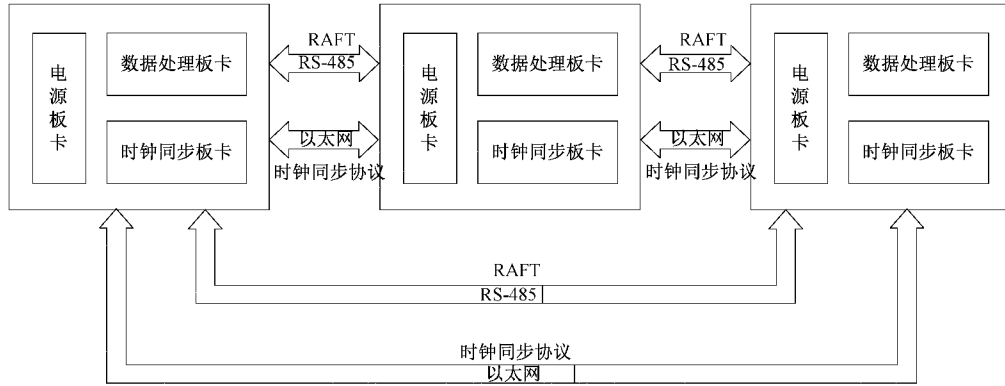


图 1 总体设计

2 硬件设计

系统由 3 个相同的数据处理设备组成三裕度的可靠系统,如图 2 所示。单个数据处理设备由时钟同步控制单元、中央数据处理单元以及电源管理单元组成,其中时钟同步控制单元负责提供高精度的时钟源,选举三

冗余设备并输出同步后的标准时钟源;中央数据处理单元负责 CAN 总线通信模块负责来自于惯导、视觉以及雷达的数据包进行解析,并将其处理再次通过 CAN 总线发往 ATP。时钟同步控制单元主要负责控制 DP83640 完成高精度时间同步并输出同步后的标准时钟脉冲。

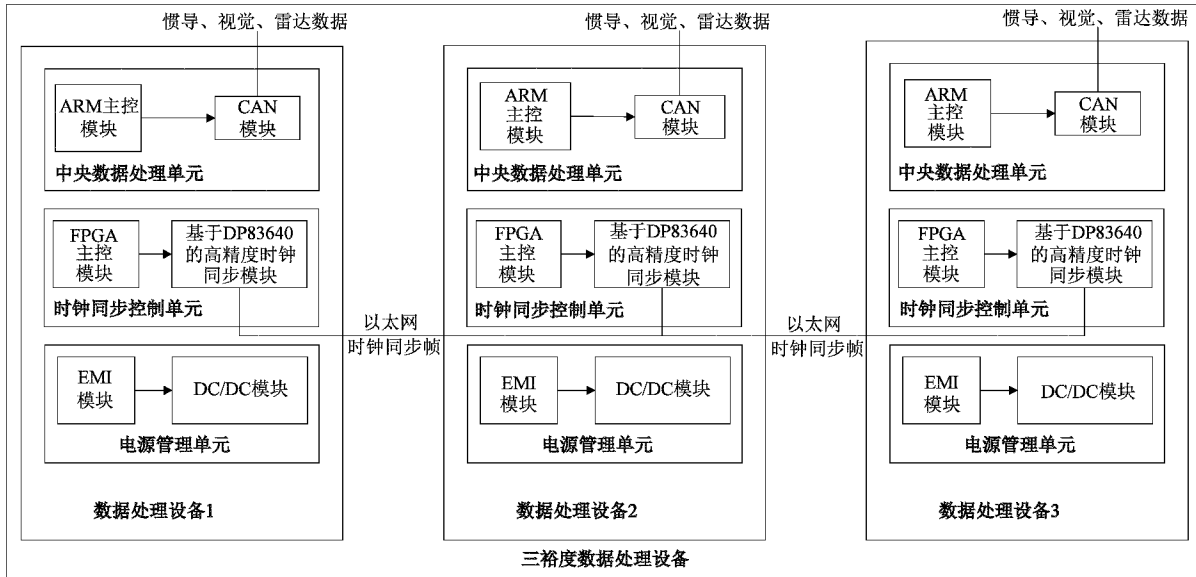


图 2 硬件设计框架

2.1 中央数据处理单元

中央数据处理硬件单元的主控模块使用了 Exynos 4412 ARM 处理器。Exynos 4412 又称为 Exynos 4 Quad, 采用了三星 32 nm HKMG 工艺,是三星的第一款四核处理器。该嵌入式平台适合于准实时处理应用,其平台框架如图 3 所示。

其中 NAND FLASH 模块采用 RAID 1 阵列构成双备份高可用性系统,系统采用三星 SDK 移植的嵌入式 Linux

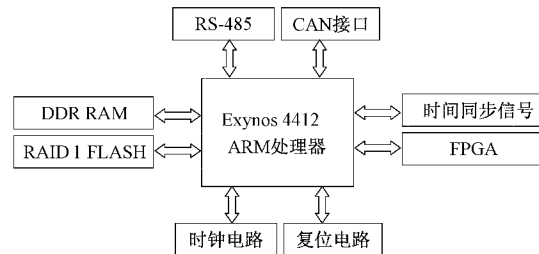


图 3 中央控制数据处理板卡框架

操作系统,提供系统资源调度及分配服务。CAN接口是基于CAN协议来设计,主要由控制器和收发器组成。CAN控制器负责将主控发出的数据进行处理,转换为CAN_H和CAN_L信号,CAN收发器将CAN控制器处理的信号发送给其他单元。

2.2 时钟同步控制单元

时钟同步单元的主控选用的是XC3S1400AN芯片,该芯片具有片内的16M片内缓存,提供了额外的保护功能,可以降低PCB面积并提高可靠性。在系统中FPGA主要用于控制DP83640完成高精度时间同步、选举三裕度冗余设备主机、数据收发功能,并输出同步后的标准时钟脉冲。

IEEE1588 PTP协议可以在以太网介质中提供精确的时间同步,目前最新的版本是IEEE1588v2^[10]。其主要是通过软硬件配合,记录同步时钟信息的发出时间和接收时间,并且给每一条信息加上时间标签,有了时间记录,接收方就可以计算出自己在网络中的时钟误差和延迟,从而实现网络上的时钟同步。

DP83640是德州仪器的IEEE1588精确实践协议收发器,它通过以太网实现精确的时间同步功能。以太网可通过IEEE1588 PTP以纳秒精度同步时间。IEEE1588 PTP标准为分布式系统中的现有以太网网络提供高精度和具有成本效益的网络时间协议(NTP)^[11-13]。DP83640的独特性能可通过标准的以太网来实现高精度的时间同步,即100 Mb/s下的同步以太网技术,可在用以太网连接的IEEE1588精密时间协议(PTP)系统之间实现非常精确的同步。采用这种特性,便可工作在要求的网络拓扑约束内,实现PTP应用达到次纳秒级的主从同步精度。同时也能产生一个与主PTP时钟锁定和校准的从结点时钟输出。DP83640的硬件控制电路模块结构如图4所示。

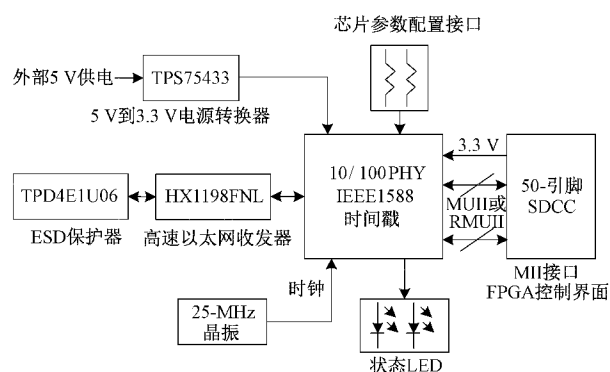


图4 时钟同步硬件电路模块结构

2.3 电源管理单元

电源板卡由EMI模块与DC/DC模块组成EMI电源滤波器起到两个低通滤波器的作用:一个是衰减共模干扰,另一个是衰减差模干扰。EMI电源滤波器能在阻带范围内衰减射频能量,让工频无衰减,或者很少的衰减,就能通过EMI电源滤波^[14]。EMI电源滤波器可以很有效地控

制传导电磁干扰和辐射电磁干扰。由于系统是DC/DC电源拓扑,EMI滤波器可以选用LC低通滤波器,防止开关电源的高频干扰串扰到其他设备影响运行。

3 软件设计

3.1 整体工作流程

数据处理设备工作流程如图5所示,数据处理设备以时间片划分,其中T为三裕度数据处理设备上电初始化、自检、时间同步等占用时间。此后,三裕度数据处理设备将分别通过485总线以100ms时间为周期分别查询各冗余支路中的雷达、视觉,以20ms时间为周期分别查询各冗余支路中的惯导,以80ms为周期上报ATP定位参数,其中对多次采集的传感器信息进行平滑滤波。

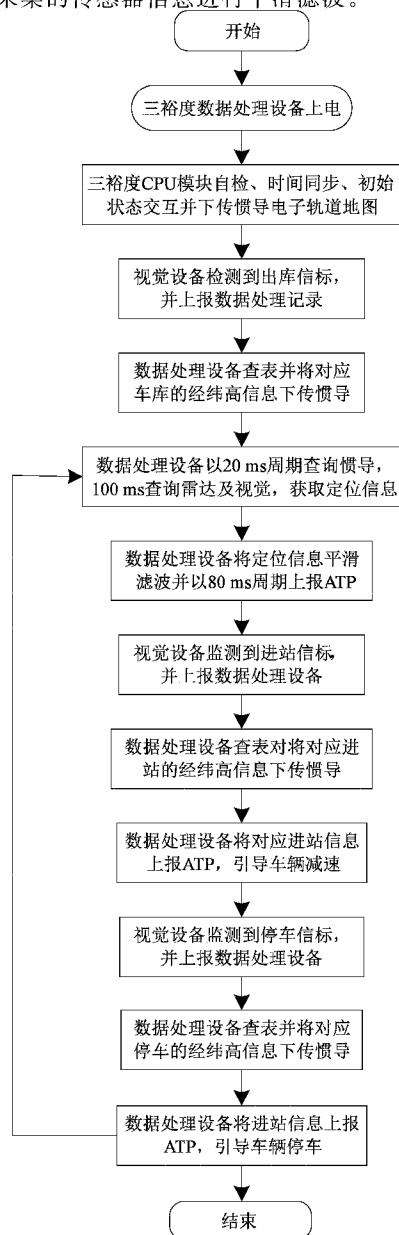


图5 数据处理设备工作流程

3.2 数据融合算法设计

本系统接收的是来自惯导、视觉传感器回传的数据。二者的数据在不经处理时,会出现数据不可靠的情况。对于惯导,当列车运行速度较快时,其返回的位置信息准确度较高,但是当列车运行速度缓慢时,其返回的位置信息准确度下降,当速度下降到一定的范围时,其返回的位置信息甚至是不可信的^[15-16]。对于视觉设备返回的距离信息,与惯导相反,当列车运行速度快时,其返回的距离准确度低,当速度上升到一定的范围时,其返回的数据甚至不可信,但是当列车运行缓慢时,其数据的准确度将大幅提高,当列车静止时其数据可以说是完全可信的。

由上面的分析可以看出,惯导数据与视觉数据呈现出一种互补的关系,因此可以采用互补滤波的思想,将惯导数据与视觉数据融合起来。整个算法的流程如图 6 所示。

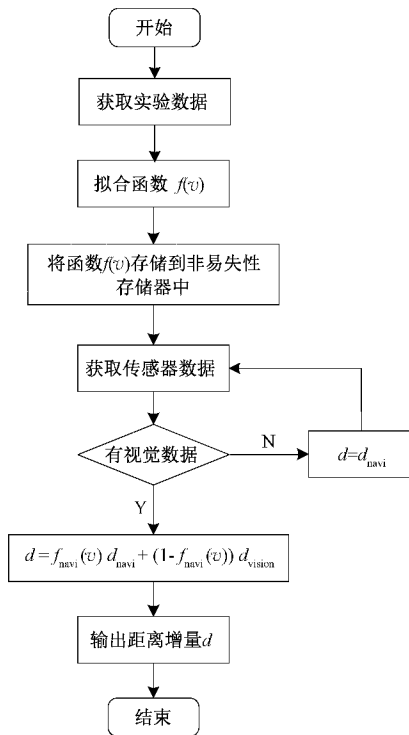


图 6 算法流程

首先假设惯导的互补滤波系数为 W_{navi} , 视觉设备的互补滤波系数为 W_{vision} , 距离增量为 d 则有:

$$d = W_{navi} d_{navi} + W_{vision} d_{vision} \quad (1)$$

$$W_{navi} + W_{vision} = 1 \quad (2)$$

又由于惯导设备、视觉设备的数据准确度都与速度有关,因此两个设备的滤波系数又有如下关系:

$$W_{navi} = f_{navi}(v) \quad (3)$$

$$W_{vision} = f_{vis}(v) \quad (4)$$

$f_{navi}(v)$ 与 $f_{vis}(v)$ 可以通过具体实验数据拟合, 简易可取一次 $y = \kappa v$ 关系, 且只需要取两个函数中的一个进行校准就行。惯导数据较多, 因此可以对惯导设备进行标定,

拟合出 $f_{navi}(v)$, 所以最终距离 d 可通过式(5)求得:

$$d = f_{navi}(v) d_{navi} + (1 - f_{navi}(v)) d_{vision} \quad (5)$$

但是在列车运行过程中并不会一直有视觉设备的数据, 因此在没有视觉设备数据的时候, 其值完全信任惯导, 此时 $f_{navi}(v)$ 与 d 的值如下:

$$f_{navi}(v) = 1 \quad (6)$$

$$d = d_{navi} \quad (7)$$

3.3 基于 CAN 的数据包设计

视觉模块的上报报文结构如图 7 所示。上报消息一共分为 4 个部分, 分别是时间戳、信标 ID、距离及和校验码。时间戳是指生成该上报报文时的时间, 包含年、月、日、时、分、秒、毫秒。一共 4 Byte。信标 ID 是读取的二维码中的内容。

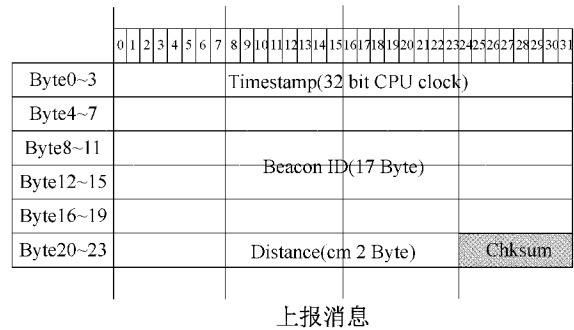
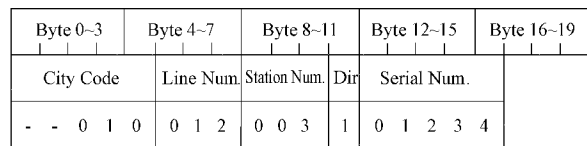


图 7 视觉模块的上报报文结构

图 8 为视觉模块信标 ID 报文结构。第 1~5 Byte 存储城市编码, 6~8 Byte 存储地铁线路编码, 9~11 Byte 存储车站编码, 第 12 Byte 存储列车行进方向编码, 13~17 Byte 存储信标序列编码。一共 17 Byte。距离指二维码信标与列车头之间的距离, 单位是 cm。一共 2 Byte。校验码即用来校验得到的报文是否完整、真实的编码, 占 1 Byte。



Beacon ID 文本编码 (上报的 ID 文本, 也是基本的 ID 编码定义)

图 8 视觉模块信标 ID 报文

惯导模块的上报报文结构如图 9 所示。上传数据采用 8 Byte 数据包, 数据包中包含时间戳、距离、速度、校验和。校验和、时间戳和视觉模块的格式一样, 距离数据为待测物到列车头之间的距离, 单位为 cm, 取值范围为 0~655.35 m, 使用 2 Byte 表示。速度数据表示待测物与列车之间的相对速度, 单位为 dm/s (或称 0.36 km/h), 取值范围为 0~91.8 km/h, 使用 1 Byte 表示。

4 系统测试

本文所作的实物如图 10 所示。为验证三裕度设备的可行性, 在某地铁试运营期间对本文所设计的设备进行了

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Byte 0~3	Timestamp																															
Byte 4~7	Distance(cm)															Speed(dm/s)						CheckSum										

图 9 惯导模块的上报报文结构

验证。测试平台由供电设备、惯导、视觉、雷达数据采集设备、三裕度数据处理设备组成。表 1 为本三裕度数据处理设备测试的部分原始数据。其中,运动方向显示 2 为反方向运动,1 为正方向运动;惯导与视觉传感器数据状态定义为传感器未准备好:0x55,传感器已准备好:0xAA;雷达状态数据定义为检测到障碍物:0x3C,未检测到障碍物:0xC5;二维码状态数据定义为检测成功:0x31,未检测成功:0x21。表 1 中显示 10 进制数据,测试过程中后台实时记录相关数据,便于数据监控与后期查看。

图 11 为做试验时的实验图,图中显示了列车当前行驶状态以及惯导、视觉传感器、雷达的相关信息。本次测



图 10 整体设备测试图

表 1 测试数据

处理单元 ID	惯导相对里程/cm	惯导速度/(cm·s ⁻¹)	运动方向	惯导状态	雷达状态	二维码状态	视觉传感器状态	时间戳
1	0	0	2	170	60	49	170	637401319386602
2	3	0	2	170	0	33	170	637401319386602
3	1	1	1	170	0	49	170	637401319386602
1	3 080	531	1	170	60	49	170	637401319386602
2	3 095	533	1	170	0	49	170	637401319386602
3	3 115	534	1	170	0	49	170	637401319386602
1	163 028	1 052	1	170	60	49	170	637401319386602
2	162 449	1 039	1	170	0	49	170	637401319386602
3	161 196	1 018	1	170	0	49	170	637401319386602

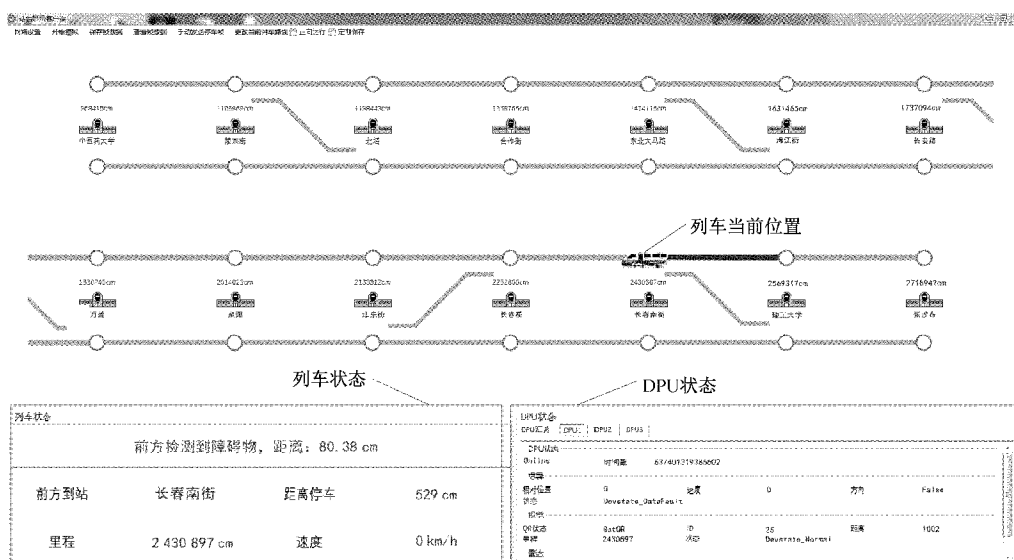


图 11 试验结果

试由中医药大学站至张沙布站,全程 27 km,当前列车行驶至长春南街站并进站停车,速度降为 0 km/h,距离停车点 5.29 m。为测试雷达灵敏度在列车前 8 m 处放置障碍物,结果显示检测障碍物成功并发出警报。右下角显示当前 DPU 状态,时间戳、惯导相对位置、相对速度、视觉传感器状态、雷达状态等信息,与表 1 中完整原始数据相比对结果一致。

多次实验结果表明,该设备在长时间工作时可以准确的读出总里程以及距离前一站的距离,同时提醒列车的到站时间,对前方有无障碍物进行判断并作出反应,有较强的实用性。

5 结 论

本文从列车精确定位的测试需求出发,设计了基于虚拟应答器的三冗余数据处理设备,为车辆的无人化行驶提供基础的定位信息,代替目前轨道运输车辆定位严重依赖于区域性地面设备和轨旁设备车辆定位方案,实现车车信号系统互连,在系统同步状态下,同步时间差 $\Delta t < 1 \mu s$ 。不仅使定位精度有所提高,节省成本,对于列车无人驾驶的普及提供了一个可靠的解决办法。

参考文献

- [1] 路通. 地铁智能巡检车高精度自主定位技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [2] 蒋敏建. 基于多传感器信息融合的列车组合定位[J]. 科技风,2019(18):85.
- [3] 杨荣伟,王剑. 虚拟应答器测试方法研究[J]. 铁道通信信号,2016,52(4):81-85.
- [4] 刘射德,陈光武,王迪,等. 基于 MCKF 容错算法的列车多源信息融合定位技术研究[J]. 铁道学报,2019,41(8):74-83.
- [5] 黄晓荣. CBTC 信号系统下列车定位丢失原因探究[J].

城市轨道交通研究,2020,23(S2):100-103,118.

- [6] 王剑,陆德彪,唐一哲,等. 基于虚拟应答器的 GNSS 列车安全定位及风险分析[J]. 铁道学报,2016,38(6):53-58.
- [7] 吴文艾,杜巧玲,巨子琪. 基于通信的列车定位系统安全性研究[J]. 自动化与仪器仪表,2020(9):24-28.
- [8] 王妍,陈永刚. GPS 信号失锁下的列车组合定位方法[J]. 导航定位学报,2020,8(4):50-57.
- [9] 罗杨. 基于 GNSS 的虚拟应答器设计与测试[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [10] 卓兰,张弛,韩丽. 基于 ISO/IEC/IEEE 8802-1AS 广义精确时间协议的时间同步仿真方法[J]. 电子测量技术,2020,43(8):129-137,142.
- [11] 薛子刚,陈红涛,张文渊. 基于 IEEE1588 的时钟同步技术在分布式测量系统中的应用[J]. 信息工程大学学报,2020,21(4):422-426,432.
- [12] 黄鹤飞,陈印锋,冯建武. 基于 mini C-RAN 的 IEEE1588 时间同步方案[J]. 电子测量技术,2017,40(6):34-37.
- [13] 罗峰,徐金鹏. 基于车载环境的时间同步协议优化[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):96-104.
- [14] 郑真福. 开关电源 EMI 滤波器的设计[J]. 通信电源技术,2020,37(10):111-113.
- [15] 杨梦佳. 惯导-视觉 SLAM 技术综述[J]. 信息技术与信息化,2019(7):213-215.
- [16] 雷皓玮,林晓煊. 一种混合单目视觉 SLAM 系统研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(9):90-96.

作者简介

马银鸿,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术与仪器。

E-mail: 596696316@qq.com

张会新,博士,副教授,主要研究方向为动态测试技术与仪器。

E-mail: zhanghx@nuc.edu.cn