

# 基于射频识别的高温超导磁浮列车定位方法<sup>\*</sup>

王一坚<sup>1,2</sup> 张辉波<sup>1</sup> 黄莉娟<sup>1,2</sup> 梁 乐<sup>3</sup> 邓自刚<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 611756, 成都; 2. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 3. 西南交通大学轨道交通国家实验室, 610031, 成都)

**摘 要** [目的]为解决目前传统列车定位技术不适用于高温超导磁浮列车,以及高温超导磁浮列车现有定位技术具有局限性的问题,提出一种基于RFID(射频识别)技术的列车定位监测方法。[方法]介绍了RFID定位技术,提出该定位技术在系统应用中的理论误差模型,设计并搭建完成定位软件及硬件系统。为提高系统的定位精度,分析了列车运行速度、读写器响应时间、读写器信标距离等参数对定位误差的影响。在此基础上,结合高温超导磁浮列车具体运行环境搭建试验平台,验证所提RFID定位方法的可行性。[结果及结论]所设计的基于RFID的高温超导磁浮列车定位方法,能够对环形试验线中运行的磁浮列车进行较高精度的定位,所提RFID系统具有可靠性高、成本低、易于维护等优点。

**关键词** 磁浮列车; 高温超导; 射频识别

**中图分类号** U266.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.07.018

## RFID-based High-temperature Superconducting Maglev Train Positioning Method

WANG Yijian<sup>1,2</sup>, ZHANG Huibo<sup>1</sup>, HUANG Lijuan<sup>1,2</sup>, LIANG Le<sup>3</sup>, DENG Zigang<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. National Laboratory of Rail Transit, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Targeting the inapplicability of conventional train positioning technologies to HTS (high-temperature superconducting) maglev trains, as well as the limitations of existing positioning technologies for such trains, a method based on RFID (radio frequency identification) technology for monitoring train position is proposed. [Method] The RFID positioning technology is introduced, and a theoretical error model for this technology in system application are proposed. The positioning software and hardware systems are designed and constructed. To improve positioning accuracy of the sys-

tem, the influence of train operating speed, reader response time, and reader-tag distance on positioning errors are analyzed. On this basis, an experimental platform is established in consideration of the specific operating environment of HTS maglev trains, and the feasibility of the proposed RFID positioning method is verified. [Result & Conclusion] The designed RFID-based positioning method for HTS maglev trains can achieve relatively high precision positioning of maglev trains running on circular test tracks. The proposed RFID system exhibits advantages such as high reliability, low cost, and easy maintenance.

**Key words** maglev train; high-temperature superconductivity; RFID

磁浮列车因其速度区间广、噪声污染小、动力环保、设备易维护等优点,在轨道交通领域有着越来越高的地位<sup>[1]</sup>。高温超导磁浮列车由于其兼有常导磁浮列车和低温超导磁浮列车的优点,开始受到国内外研究人员的重视,并成为了磁浮交通领域的研究热点。目前,真空管道高温超导磁浮列车试验平台已经建成,首台高温超导高速磁浮列车已在成都正式启用<sup>[2-3]</sup>。

磁浮列车的定位系统对于其安全运行至关重要,国内外研究人员针对不同制式磁浮列车的实际情况,采取了多种技术方案。日本山梨县磁浮试验线利用电动悬浮的轨道制式特点,通过在轨道中铺设感应回线产生周期信号来计算得到磁浮列车的位置和速度,并研究了无线电机对其定位系统的影响<sup>[4]</sup>。在我国对磁浮列车测速定位技术的研究中,较为成熟的是国防科技大学团队研制的基于长定子齿槽的测速定位方案<sup>[5]</sup>。文献[6]尝试用基于卫星导航与惯性导航组合的定位方案实现磁浮列车的定位。文献[7]研制了一种基于阵列光纤光栅的磁浮定位系统,其在实验室环境中可以实现10 cm

<sup>\*</sup> 西南交通大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682023ZTPY039, 2682023ZTPY043)

的定位精度。在真空管道高温超导磁浮列车试验平台上,根据线路轨道特点,研究人员曾采用红外计数来实现简单定位,但长期运行后,轨旁的红外感应条纹会出现磨损翻折,导致出现定位失准甚至无法定位的问题。

为解决该问题,本文提出了一种基于 RFID(射频识别)的列车定位监测方法,并设计了一套基于 RFID 的高温超导磁浮列车定位系统。在完成软硬件设计的同时,为提高定位精度,本文还仿真分析了多个因素对定位误差的影响,并在此基础上,搭建了试验平台,开展了实际线路测试。本文研究可为磁浮列车控制系统研究提供理论基础。

## 1 RFID 系统定位原理

### 1.1 定位系统结构及工作流程

RFID 定位系统由信标、RFID 读写器、微型控制器及上位机组成,RFID 通过信标与读写器之间的传输实现轨旁设备和车载设备的信息交互。基于 RFID 的高温超导磁浮列车定位系统结构示意图如图 1 所示。

1) 轨旁设备:本定位系统选用无源信标来存储信标距离轨道起点的绝对位置信息。为便于试验数据采集和实时系统工作情况监控,轨旁上位机通过无线信号与车载控制器实现通信。无源信标的存储信息在系统工作前可通过上位机进行配置。

2) 车载设备:车载设备由 RFID 读写器和微型控制器组成,两者通过 RS232 串口进行通信。读写器通过射频天线模块来收发信号,编码模块和时钟同步模块完成有效信息的编解码。微型控制器通过串口模块接收编码信息,按键模块用于调整定位系统的工作模式。LED 界面显示定位信息,以实现人机交互功能。

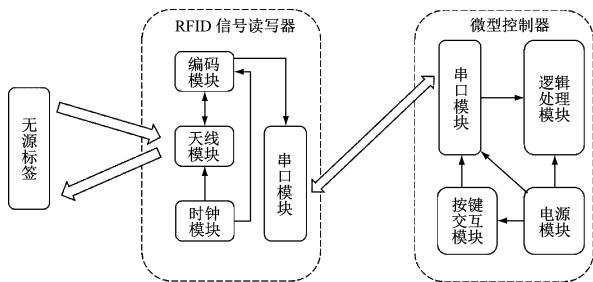


图 1 基于 RFID 的高温超导磁浮列车定位系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of RFID-based HTS maglev vehicle positioning system structure

基于 RFID 的高温超导磁浮列车定位系统流程图如图 2 所示。当信标处于 RFID 信号读写器的可识别范围时,信标发出带有绝对位置信息的反馈信号。读写器中的天线模块捕获信号后,经过解码得到存储在信标中的绝对定位信息,随后对信息进行编码并传输至微型控制器。微型控制器对该信息进行格式化并判断其有效性,随后经过数据处理得到列车的当前位置。同时,微型控制器通过无线模块将数据传输至上位机,上位机存储试验数据并完成轨旁设备的人机交互。

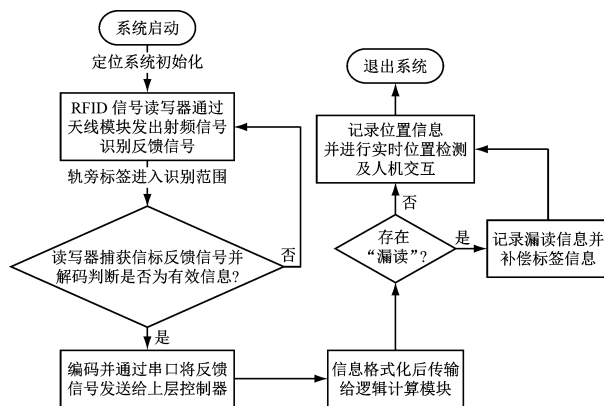


图 2 基于 RFID 的高温超导磁浮列车定位系统流程图

Fig. 2 Diagram of RFID-based HTS maglev train positioning system flow

### 1.2 RFID 技术定位方法

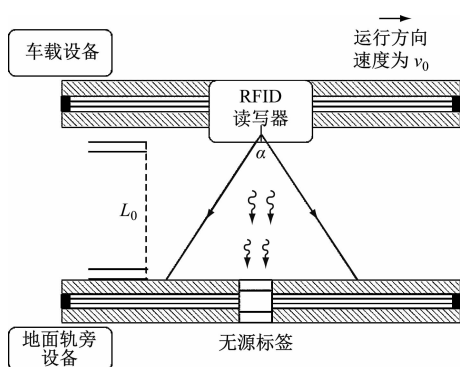
基于 RFID 技术的定位方法有到达时间差法、指纹库识别法、信号强度法等<sup>[8]</sup>。考虑到上述方法对信号强度和响应时延的检测精度要求较高,与高温超导磁浮列车定位系统的实际需求不符,本文采用响应检测方法来实现定位功能。文献[9-10]已在研究中验证了 RFID 系统基于响应检测定位方案的有效性。该方法在不考虑固有定位误差的情况下,将读写器接收到射频信号的時刻记录为读写器经过信标的時刻,在运行管道内按一定间隔设置带有固定坐标信息的信标,通过天线模块接收信标反馈信号,并根据其坐标信息和信号响应时间实现列车的定位功能。

## 2 定位误差模型建立与仿真分析

### 2.1 RFID 信号定位误差模型

RFID 读写器位置示意图如图 3 所示。读写器控制天线模块向固定角度范围发射射频信号。定义信号在介质中的传播时间为  $t_1$ ,无源信标的响应

时间为  $t_2$ , 读写器收到信号的协议匹配时延为  $t_3$ , RFID 芯片响应时延为  $t_4$ , 则读写器读取信标所需的时间  $t$  为  $t_1, t_2, t_3, t_4$  之和。由于  $t_1$  和  $t_4$  在近场环境下的数量级较小, 可以忽略不计, 因此  $t$  主要由  $t_2$  和  $t_3$  决定。文献[11]对不同制式的信标进行了测试, 确定响应时延为毫秒级, 常用无源信标的响应时延为 10.4 ~ 17.4 ms。



注:  $L_0$  为信标与读写器之间的垂向距离;  $\alpha$  为读写器的射频信号发射接收范围角;  $v_0$  为列车运行速度。

图3 RFID读写器位置示意图

Fig. 3 Diagram of RFID reader position

车载 RFID 读写器跟随列车经过信标时, 在保证读写器可以识别信标的前提下, 列车运行速度理论最大值  $v_{\max}$  可以表示为:

$$v_{\max} = \frac{2L_0 \tan \frac{\alpha}{2}}{t_{\max}} \quad (1)$$

式中:

$t_{\max}$  —— 信标响应时间的上界, 单位 ms。

定位固有误差最大值  $E_{\max}$  可以表示为:

$$E_{\max} = v_0 \max \left\{ \left| \frac{L_0 \tan \frac{\alpha}{2}}{v_0} - t_{\min} \right|, \left| \frac{L_0 \tan \frac{\alpha}{2}}{v_0} - t_{\max} \right| \right\} \quad (2)$$

式中:

$t_{\min}$  —— 信标响应时间的下界, 单位 ms;

$\text{abs}(\cdot)$  —— 绝对值函数, 若括号内运算结果小于 0, 则取其负数。

## 2.2 蒙特卡罗定位误差仿真分析

对 RFID 读写器识别信标的范围进行研究, 结果表明当发射天线的信号辐射角度  $\alpha$  约为  $120^\circ$ , 信标与读写器的垂向距离小于 50 cm 时, 信标反馈信号较为理想。由于高温超导磁浮环形试验线路的

设计速度为 50 km/h, 因此在仿真中, 信标与读写器的垂向距离及列车运行速度的变化范围分别为 0 ~ 50 cm 及 0 ~ 50 km/h, 将  $t$  设置为随机参数。随机响应时延蒙特卡罗仿真试验结果如图 4 所示。定位误差绝对值小于 80 cm 的情况占 98.75%, 定位误差与  $L_0$  存在明显关联。当  $v_0$  保持不变的情况下, 随着  $L_0$  的增大, 定位误差绝对值先逐渐减小至 0 后又逐渐增大, 存在使得理论误差较小的垂向距离极值  $L_{0, \lim}$ 。

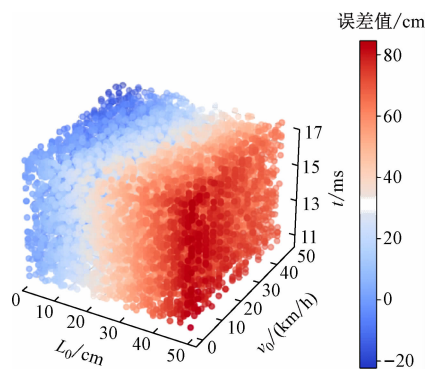


图4 随机响应时延蒙特卡罗仿真试验结果

Fig. 4 Test results of random response time-delay Monte Carlo simulation

为了进一步确定适合试验线路设计速度的信标与读写器垂向距离, 从图 4 中选取定位误差最接近 0 的垂向距离区间, 即 5 ~ 10 cm。在该区间内, 计算不同垂向距离条件下, 定位误差小于 15 cm 的概率  $P$ , 计算结果如表 1 所示。由表 1 可知: 当信标与读写器的垂向距离为 8 cm 时, 系统的定位误差能够控制在较小的范围内。

表1 不同垂向距离条件下定位误差小于 15 cm 的概率

Tab.1 Probability of positioning error within 15 cm under different vertical distance conditions

信标与读写器的垂向距离/cm	$P/\%$
5	88.9
6	92.8
7	95.6
8	97.8
9	93.2
10	88.3

## 3 线路试验及结果分析

### 3.1 射频信号有效传播空间及干扰试验

在永磁轨道等特殊磁场环境中, 射频信号的传



播过程可能存在信号干扰的情况,若直接进行线路试验,轨旁因素可能干扰测试结果的有效性。因此,在线路试验前先进行射频信号有效传播空间研究,以及在管道空间内是否会产生串扰互调等现象的测试。用于测试的射频信号工作频段为 865 ~ 868 MHz,发射天线输出功率为 10 ~ 1 858 mW。研究表明,天线增益从 10 mW 增大至 1 858 mW 过程中,管道内的信号串扰及射频信号间的互调谐波均未对信标反馈信号产生明显的干扰。当信标间距设置过小时,可能会出现信标信息的“重读”现象,即读写器在识别到下一个信标完成信标信息刷新后,出现重新识别到前一个信标的现象。因此,相邻两个信标之间需要保持足够的距离。

运动环境中单个信标的响应测试表明,射频信号在永磁轨道磁场环境中的有效传播距离大于仿真结果中的系统理想垂向距离。因此,读写器与信标的垂向距离采用仿真结果的最优值 8 cm,考虑到试验线路高温超导磁浮列车运行时的悬浮间隙为 2 cm,在车体悬浮前需将车载信号读写器和信标的垂向距离设置为 6 cm。由式(1)可以估算出,读写器可识别的列车运行速度上限值约为 57.3 km/h,满足试验线路的设计速度要求。

### 3.2 环形轨道线路试验

高温超导磁浮环形试验线中,永磁轨道全长 45.3 m,由两段半圆轨道和两段直线轨道拼接而成。测试系统实物图如图 5 所示。读写器固定在支架中心处,微型控制器和电源则固定在其侧面。信标固定在永磁轨道中间的金属支架上,同时对齐车载读写器支架的中心位置。将直线轨道部分的信标间距设置为 3.705 m,弯轨处的信标间距设置为 3.810 m,轨道中共设置 12 个存储绝对位置信息的信标。

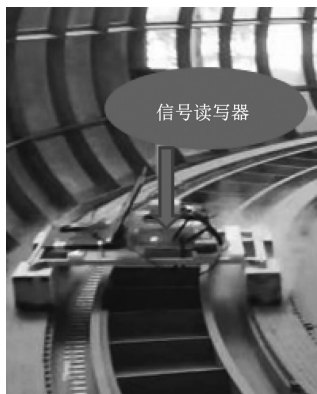
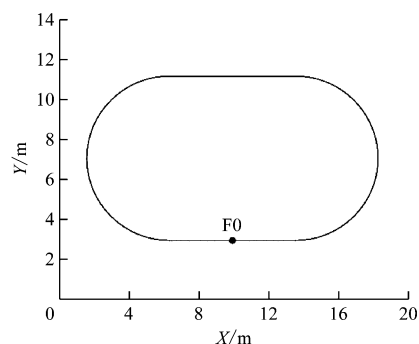


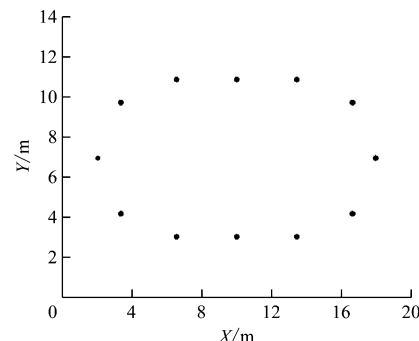
图 5 测试系统实物图

Fig. 5 Photo of test system prototype

永磁轨道线路示意图如图 6 a) 所示。磁浮列车从轨道起点,即 F0 位置处出发。在列车运行过程中,信标按照设置顺序进入车载读写器的识别范围内并被采集,均未出现信标的“漏读”和“重读”现象。每当读写器捕获到有效的信标信息时,就发送至微型控制器,微型控制器对信息进行处理得到定位坐标结果并记录数据,用实心圆点符号标记,如图 6 b) 所示。



a) 永磁轨道线路示意图



b) 系统定位坐标试验结果

注: X 为环形轨道横向长度; Y 为环形轨道纵向长度。

图 6 RFID 系统定位结果

Fig. 6 Results of RFID system positioning

结合误差仿真模型,考虑到列车运行速度小于 50 km/h,可以估算出其理论平均定位误差约为 6.3 cm,其中单个信标的定位误差绝对值可控制在 13.0 cm 以内。由此可知,本文所提定位方法具有较高的定位精度,可满足目前试验环境下高温超导磁浮列车系统的定位需求。

## 4 结语

本文针对高温超导磁浮列车环形管道试验线,提出一种基于 RFID 技术的磁浮列车定位方法,设计并组建完成软硬件系统。通过对定位误差的仿真分析,结合具体试验环境,搭建定位测试平台。试验结果表明,所提 RFID 系统具有可靠性高、成本

低、易于维护等优点。后续将引入相关算法,进一步提高定位精度,为开展环形管道高温超导磁浮列车的测速及控制研究提供参考。

## 参考文献

- [1] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177.  
XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177.
- [2] DENG Z, ZHANG W, ZHENG J, et al. A high-temperature superconducting maglev ring test line developed in Chengdu, China[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 3602408.
- [3] 徐飞, 罗世辉, 邓自刚. 磁悬浮轨道交通关键技术及全速度域应用研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 40.  
XU Fei, LUO Shihui, DENG Zigang. Study on key technologies and whole speed range application of maglev rail transport[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 40.
- [4] DAI C, DOU F, SONG X, et al. Analysis and design of a speed and position system for maglev vehicles[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8526.
- [5] 何宁. 高速磁浮列车相对位置传感器的优化设计与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
HE Ning. Optimal design and realization of relative position detection sensor for high-speed maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [6] 顾诚, 王帅, 沈石秀, 等. 基于 GNSS 和 INS 的磁浮列车组合测速定位理论研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2756.  
GU Cheng, WANG Shuai, SHEN Shixiu, et al. Theoretical research on combined speed measurement and positioning of maglev train based on GNSS and INS[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2756.
- [7] 童杏林, 许欧阳, 邓承伟, 等. 一种基于阵列光纤光栅传感测量的高速磁悬浮列车定位测速系统与方法: CN110758475B[P]. 2021-11-16.  
TONG Xinglin, XU Ouyang, DENG Chengwei, et al. High-speed maglev train positioning and speed measurement system and method based on array fiber Bragg grating sensor measurement: CN110758475B[P]. 2021-11-16.
- [8] 周俊儒. 基于 RFID 的室内定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
ZHOU Junru. Research on indoor localization using RFID system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [9] 张辰东, 王兆瑞, 金声震, 等. 基于 SINS/RFID 的隧道列车高精度定位方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 632.  
ZHANG Chendong, WANG Zhaorui, JIN Shengzhen, et al. High-precision positioning method based on SINS/RFID for trains in tunnel[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4): 632.
- [10] 刘正曦. 基于无线射频识别技术的列车位置识别系统[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(3): 130.  
LIU Zhengxi. Train location identification system based on RFID technology[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(3): 130.
- [11] EL MATBOULY H, ZANNAS K, DUROC Y, et al. Analysis and assessments of time delay constrains for passive RFID tag-sensor communication link: application for rotation speed sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 2174.
- 收稿日期:2022-01-18 修回日期:2022-03-23 出版日期:2024-07-10  
Received:2022-01-18 Revised:2022-03-23 Published:2024-07-10  
· 第一作者:王一坚,硕士研究生,ysfyuan@163.com  
通信作者:张辉波,讲师,hbzhang4@163.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

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

