

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.007

短定子磁浮列车基于悬浮间隙实现测速和定位的 算法仿真及应用

汤彪, 朱跃欧, 蒋毅, 乔若辉, 吴定鼎

(中车株洲电力机车有限公司 磁浮系统研究所, 湖南 株洲 412001)

摘要: 短定子磁浮列车测速和定位技术实现方式与传统轮轨不同, 目前有多种技术实现方式, 但都需要在磁浮列车上设置测速和定位设备或系统, 且与悬浮控制系统相互独立, 但悬浮控制系统对速度信号和位置信号又有一定的依赖性。因此, 设计了一种基于悬浮间隙实现测速和定位的算法, 并通过仿真达到算法设计预期目的, 最后通过编程将算法嵌入磁浮列车的悬浮控制系统硬件平台, 实现测速和定位的算法应用, 测速和定位信号完全集成于悬浮控制系统中, 摆脱悬浮控制系统对外置测速定位系统的依赖, 提升磁浮列车在轨道交通市场的竞争力。

关键词: 短定子磁浮列车; 悬浮间隙; 测速; 定位; 算法仿真

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0051-06

引文格式: 汤彪, 朱跃欧, 蒋毅, 等. 短定子磁浮列车基于悬浮间隙实现测速和定位的算法仿真及应用[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 51-56.

Algorithm Simulation and Its Application of Speed Measurement and Positioning Based on Suspension Gap for Short Stator Maglev Trains

TANG Biao, ZHU Yueou, JIANG Yi, QIAO Ruohui, WU Dingding

(Maglev System Institute, CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: The implementation method of speed measurement and positioning technology for short stator maglev trains is different from traditional wheel rail systems. Currently, there are multiple technical methods available, but all require the installation of positioning and speed measurement equipment or systems on maglev trains, which are independent of the suspension control system. However, due to the fact that the suspension control system also has dependence on speed and position signals, an algorithm has been designed for speed measurement and positioning based on suspension gap, with the expected purpose of algorithm design achieved through simulation. Finally, the algorithm is embedded into the hardware platform of the maglev train's suspension control system through programming, thus realizing the application of speed measurement and positioning algorithms. The speed measurement and positioning signals are fully integrated into the suspension control system, eliminating the dependence of the suspension control system on external speed measurement and positioning systems, and enhancing the competitiveness of maglev trains in the rail transit market.

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 湖南省科技创新计划基金资助项目(2021RC4071)

作者简介: 汤彪, 男, 中车株洲电力机车有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为磁浮列车悬浮控制技术,

E-mail: 1372424410@qq.com

Keywords: short stator maglev train; suspension gap; speed measurement; positioning; algorithm simulation

0 引言

近年来,短定子磁浮列车作为新型轨道交通的代表,得到了广泛关注^[1]。短定子磁浮列车没有车轮,运行时车辆悬浮于轨道上方,因此,其测速和定位的技术实现方式与传统轮轨有所不同,如正在运行的长沙磁浮快线列车采用了非接触轨枕计数方式实现测速。磁浮列车低速运行时,存在速度数据更新慢、测量精度较低、误差较大的缺点^[2]。交叉感应环线测速,虽然其精度可到厘米级,但需要铺设车载激励和地面环线,存在建设成本较高、维修难度较大等缺点。已有方法都需要在磁浮列车外置一整套测速和定位设备或系统,增大了施工成本要求和运营维护难度等,且悬浮控制系统对测速和定位系统存在一定的依赖性:外置测速和定位系统的信号用于悬浮控制系统,需要单独设置接口协议和传输通道,无疑增加了悬浮控制系统的应用风险^[3]。

本文立足于理论研究和工程实践经验,结合现有长沙磁浮工程车实际运行的悬浮数据,设计了一种基于悬浮间隙实现短定子磁浮列车定位和测速的算法,并且进行仿真分析,再利用可编程逻辑器件(field-programmable gate array, FPGA)实现算法,最后通过上位机实时显示列车位置和速度,直接应用于悬浮控制系统的控制程序,摆脱悬浮控制系统对外置测速定位系统的依赖,提高悬浮系统的可靠性,从而提升磁浮列车在轨道交通市场的竞争力^[4]。

1 算法设计和仿真分析

1.1 悬浮传感器过轨缝情况介绍

短定子磁浮列车悬浮控制系统主要包括悬浮电磁铁、悬浮控制器和悬浮传感器。其中,悬浮传感器主要为悬浮系统提供悬浮间隙和悬浮加速度信号,目前一般采用4探头电涡流式悬浮传感器测量悬浮间隙,即悬浮传感器为悬浮控制提供4路相互独立的悬浮间隙信号^[5]。悬浮传感器探头与轨道轨缝的结构示意如图1所示,当磁浮列车降落在轨道上时,4路悬浮间隙值一般在14~18 mm范围内,但个别探头在轨缝位置时,其对应的悬浮间隙值会超出此范围。当磁浮列车在轨道上悬浮并运行时,4路悬浮间隙值一般在7~11 mm范围内波动。当间隙探头通过轨道

的轨缝位置时,由于涡流效应,间隙值从端部探头往里部探头的值会陆续变大,且从探头边缘靠近轨缝时开始变大,在探头中线与轨缝中线重合时达最大值。随后,探头边缘远离轨缝时,间隙值开始变小直到正常,对应的悬浮间隙值会依次呈现出如图2所示的悬浮传感器过轨缝间隙信号图。

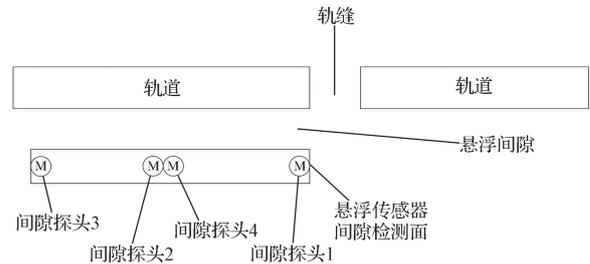


图1 悬浮传感器探头与轨道轨缝的结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of the suspension sensor probe and the rail gap

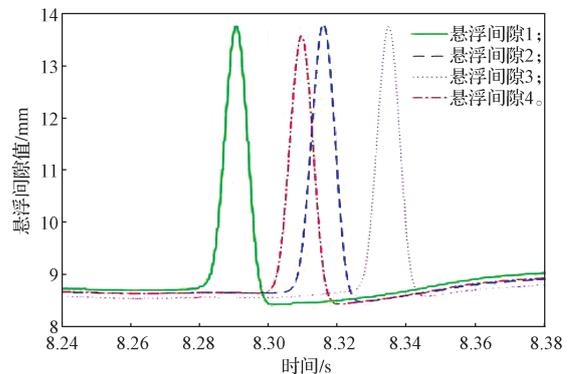


图2 悬浮传感器过轨缝间隙信号图

Fig. 2 Signal diagram of the gap between the suspension sensor and the rail gap

1.2 算法设计

短定子磁浮列车基于悬浮间隙实现测速和定位的功能,包括测速和定位两个部分。其中,测速的功能定义是基于悬浮间隙计算磁浮列车的运行速度,定位的功能定义是基于悬浮间隙计算磁浮列车的位置信号。所以基于悬浮间隙实现测速和定位的算法包含测速算法和定位算法两个部分,其中定位算法需要用到测速算法的结果。

1.2.1 测速算法设计原理

基于悬浮间隙实现测速功能,首先是进行测速算法设计,测速算法的基本原理如下:悬浮传感器的4个间隙探头的中心间距由传感器机械结构确定,即

间隙探头的中心间距是已知量;结合悬浮传感器过轨缝间隙信号图,可提取间隙信号过轨缝的信号特征量;将信号特征量与4个间隙探头的中心间距一一对应,用间距除以对应时间即可计算出悬浮传感器过轨缝时刻的速度。需要指出的是,轨缝的宽度一般为10~40 mm,所以悬浮传感器过轨缝的时间一般是毫秒级,可默认过轨缝时刻短定子磁浮列车为匀速运行状态。

1.2.2 测速算法设计

基于悬浮间隙的测速算法设计流程见图3。

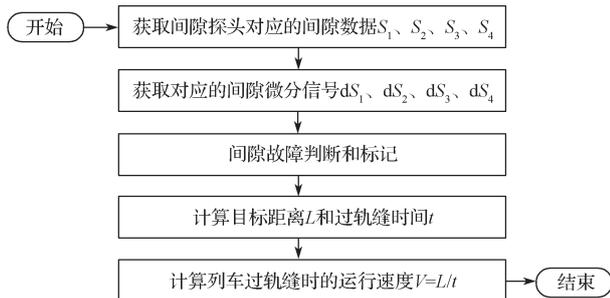


图3 基于悬浮间隙的测速算法流程图

Fig. 3 Flow chart of speed measurement algorithm based on the suspension gap

基于悬浮间隙的测速算法具体步骤如下:

步骤1 获取悬浮传感器各路间隙探头采集的间隙数据,对每路间隙数据进行解码和滤波,得到各路间隙探头对应的间隙数据 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 。

步骤2 对各路间隙数据进行微分运算,得到对应的间隙微分信号 dS_1 、 dS_2 、 dS_3 、 dS_4 。

步骤3 对各路间隙数据进行故障判断和标记,输出悬浮传感器各路间隙探头是否故障以及对应的故障标记^[3]。

步骤4 计算目标距离和过轨缝时间。根据各路间隙微分信号,判断各路间隙探头是否过轨缝,并确定过轨缝时刻;根据各路间隙探头过轨缝时刻和故障标记,计算出悬浮传感器各路间隙探头过轨缝时间。分别记录第1、第2、第3、第4路间隙探头过轨缝时刻为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 。当各路间隙探头的故障标记均为无故障时,以第1路间隙探头与第3路间隙探头间的间隔为目标距离 L_{13} ,该目标距离对应的过轨缝时间 $t = (t_3 - t_1)$;当第1路间隙或第2路探头的故障标记为有故障时,以第3路间隙探头与第4路间隙探头间的间隔作为目标距离 L_{34} ,该目标距离对应过轨缝时间 $t = (t_4 - t_3)$;当第3或第4路间隙探头的故障标记为有故障时,以第1路间隙探头与第2路间隙探头间的间隔为目标距离 L_{12} ,该目标距离对应的过轨缝时间 $t = (t_2 - t_1)$ 。需要指出的是,当第1路和第3路探头同时故障或出现3路以上间隙故障时,退出运

行速度计算程序,并向悬浮控制系统发出故障报警。

步骤5 计算列车过轨缝时的运行速度。运行速度 V 的计算依据是速度等于目标距离 L 除以经过该目标距离所需的时间 t ,即 $V=L/t$;其中,目标距离 L 和对应时间 t 的取值参见步骤4。

1.2.3 定位算法设计原理

基于悬浮间隙实现定位功能,首先要进行定位算法设计。定位算法的基本原理如下:利用测速算法的结果作为触发信号,在通过每个轨缝位置时会更新一个速度信号,理论上将速度对时间进行积分可得到离站距离,即完成车辆定位。但需要指出的是,速度在轨缝之间并不是一成不变的,积分结果会有偏差,但正常轨排的长度是固定规格,即轨缝之间的间距也是固定的间距^[6-7]。将轨排间距作为已知量可对积分结果进行校正,最后,对校正后的结果进行累加运算,得到列车位置结果,完成车辆定位。

1.2.4 定位算法设计

基于悬浮间隙的定位算法设计流程见图4。

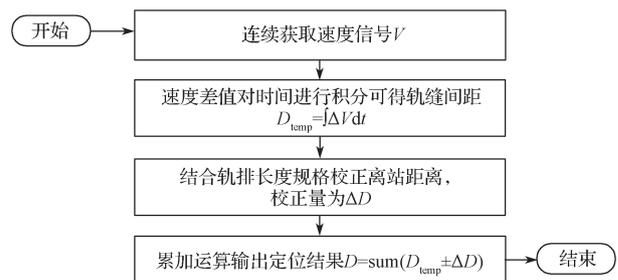


图4 基于悬浮间隙的定位算法流程图

Fig. 4 Flow chart of positioning algorithm based on the suspension gap

基于悬浮间隙的定位算法设计具体描述如下。

步骤1 综合利用测速算法的结果,连续获取速度信号 V 。

步骤2 将速度差值对时间进行积分,可得到轨缝间距 $D_{temp} = \int \Delta V dt$,注意将速度信号 V 作为触发条件, ΔV 为连续两个速度信号的差值。

步骤3 结合轨排长度规格校正离站距离,校正量为 ΔD 。 ΔD 的计算原理如下:轨排的长度是固定的 n 种规格,分别记为 D_1, D_2, \dots, D_n (n 的取值与具体线路相关),速度信号 V 作为触发条件,即每次速度信号更新时,得到一个离站距离 D_{temp} ,最新更新的 D_{temp} 与上一个更新的 D_{temp} 的差值记为 ΔD_{temp} ;则校正量 ΔD 取 ΔD_{temp} 与轨排长度规格差值的绝对值的最小值,即 $\Delta D = \min(|\Delta D_{temp} - D_1|, |\Delta D_{temp} - D_2|, \dots, |\Delta D_{temp} - D_n|)$ 。

步骤4 对轨缝间距进行累加运算,得到计算磁浮列车定位结果,即 $D = \sum(D_{temp} \pm \Delta D)$ 。其中加减

的选取与差值相关： $\Delta D_{\text{temp}1}$ 比轨排长度规格值偏大取减法， $\Delta D_{\text{temp}1}$ 比轨排长度规格值偏小取加法。

1.3 算法仿真分析

1.3.1 测速算法仿真

基于悬浮间隙的测速算法仿真结果中，速度信号定义为计算速度，磁浮列车外置的测速系统得到的速度信号定义为反馈速度。选取某段短定子磁浮线路的实际悬浮间隙数据作为仿真算法的输入测试信号，计算速度与反馈速度的对比结果见图 5。

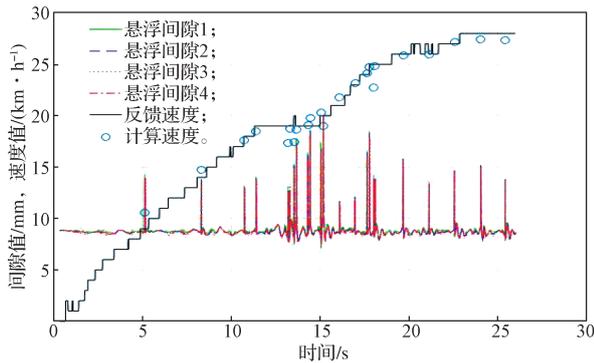


图 5 计算速度与反馈速度对比图

Fig. 5 Comparison of calculation speed and feedback speeds

结合图 2 和图 5 可知，磁浮列车在悬浮运行工况下，共有 4 路悬浮间隙值，分别为悬浮间隙 1、悬浮间隙 2、悬浮间隙 3 和悬浮间隙 4。不经过轨缝时，4 路悬浮间隙值基本重合，且在 8~10 mm 范围内波动；经过轨缝时，4 路悬浮间隙值会依次出现 10~20 mm 的波动。波动值的峰值主要与轨缝宽度和运行速度正相关，即轨缝宽度越大、速度越高则峰值越大。需要指出的是，正是由于过轨缝时，悬浮间隙值会发生 10~20 mm 范围的波动，明显这种“突变”不能反映磁浮列车的真实悬浮间隙，若使用“突变”的悬浮间隙错误信号会导致悬浮失稳，目前工程上考虑到冗余设计和故障判断，使用的悬浮传感器均采用 4 路悬浮间隙值。

图 5 中纵坐标对应值介于 0~30 km/h 之间的实线线条表示磁浮列车外置测速系统下的反馈速度，圆圈纵坐标对应值代表过轨缝时测速算法的计算结果，即计算速度，每次通过轨缝时，会更新一个计算速度值。通过和反馈速度对比，可知基于悬浮间隙的测速算法计算得到的运行速度值与磁浮列车外置的测速系统^[8]得到的运行速度值基本一致，即测速算法理论上可实现测速功能，误差值在允许范围内，达到测速算法仿真的预期效果。

1.3.2 定位算法仿真

基于悬浮间隙定位算法仿真结果中的位置信号定义为计算位置，磁浮列车外置的定位系统得到的

位置信号定义为反馈位置，选取某段短定子磁浮线路的实际悬浮间隙数据为仿真算法的输入测试信号，计算位置与反馈位置对比结果见图 6。由图可知，纵坐标对应值介于 0~120 m 之间的实线线条表示磁浮列车外置定位系统下的反馈位置，圆圈纵坐标对应值代表过轨缝时定位算法的计算结果，即反馈位置，每次通过轨缝时，会更新计算位置。需指出的是，定位算法的输入需测速算法的输出结果进行触发，即利用计算速度值进行积分运算得到计算位置值，再根据具体轨排长度规格进行结果校正得到最终值。

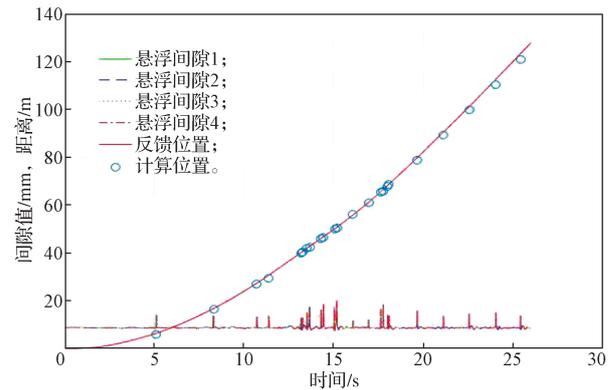


图 6 计算位置与反馈位置对比图

Fig. 6 Comparison of the calculation position and the feedback position

通过计算位置和反馈位置对比可知，基于悬浮间隙的定位算法计算得到的列车位置值与磁浮列车外置的定位系统^[9]得到的列车位置值基本一致，即定位算法理论上可实现定位功能，误差值在允许范围内，达到定位算法仿真的预期效果。

2 算法实现与应用

结合磁浮列车过轨缝的间隙信号特点和上文提到的各种仿真结果，利用 Verilog 编程语言^[10]等，可将算法基于悬浮控制系统硬件平台进行实现，测速和定位算法的实现结构框图如图 7 所示。其先通过 FPGA 芯片编程，实现信号解码与测速定位算法；再通过 DSP (digital signal process) 芯片编程，实现 CAN (controller area network) 网络通讯与数据交互；最后，开发上位机 (人机交互界面)，进行测速与定位信号显示与保存。



图 7 测速和定位算法实现结构框图

Fig. 7 Implementation structure block diagram of speed and location algorithms

基于 FPGA 芯片编程实现测速和定位算法顶层主程序结构如图 8 所示, 包括真实信号解码模块、模

拟信号生成模块、算法实现模块、FPGA 与 DSP 信息交互模块 [11]。

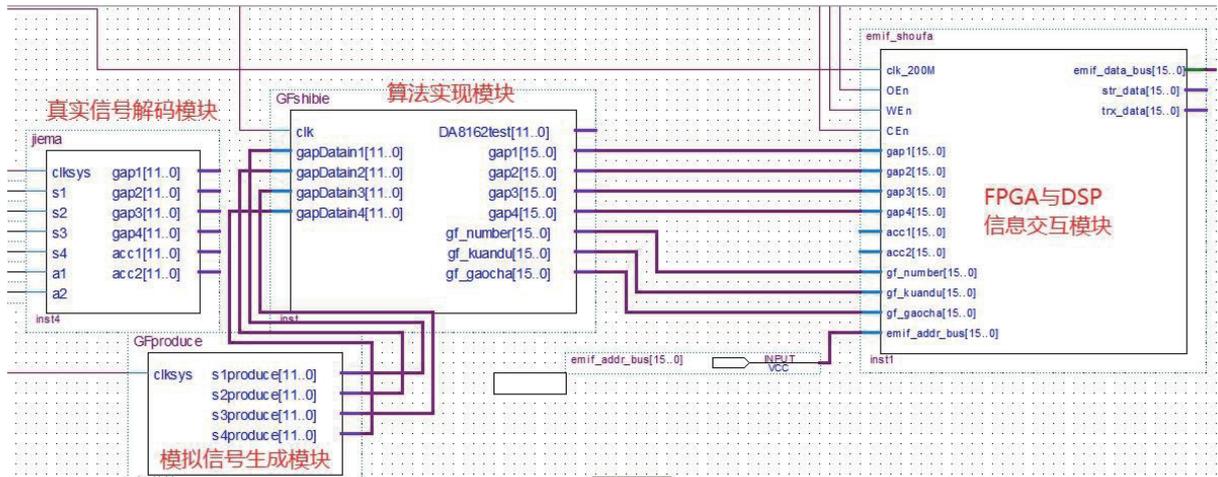


图 8 基于 FPGA 芯片实现测速和定位算法顶层主程序框图

Fig. 8 Main program block diagram for implementing speed measurement and positioning algorithms based on FPGA chips

图 8 中, 真实信号解码模块用于对磁浮列车的悬浮传感器悬浮间隙原始信号进行解码和滤波处理; 模拟信号发生模块用于将校正数据和仿真测试数据导入硬件平台; 算法实现模块用于实现测速和定位算法, 输出计算速度和计算位置结果; FPGA 与 DSP 信息交互模块, 一方面发送测速和定位算法结果到 DSP 芯片至人机交互界面进行显示, 另一方面接收 DSP 芯片通过人机交互界面下发的指令。

基于 Windows 平台开发上位机 (人机交互界面) 进行测速和定位信息显示与保存, 如图 9 所示, 人机交互界面显示值包含 4 路悬浮间隙、轨缝离站距离 (定位信息)、轨缝计算速度 (测速信息)。由图可知, 界面显示值达到程序算法设计的预期目标, 也与算法仿真值保持一致, 验证了其应用效果。

	S1	S2	S3	S4	轨道编号	轨道宽度	轨缝离站距离	轨缝计算速度
1	8.79	8.72	8.64	8.73	174	19.79	0.21	713.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00

图 9 上位机显示界面

Fig. 9 Upper computer display interface

3 结语

随着磁浮列车悬浮控制技术的发展, 磁浮列车的运行速度和位置信息对提升磁浮列车的悬浮控制性能越来越重要。现有磁浮列车都是单独安装定位测速

系统, 将位置和速度信号通过列车控制网络发送至悬浮控制器协助悬浮控制, 但这种方式存在网络时延以及易受干扰等问题。本文描述的短定子磁浮列车基于悬浮间隙实现测速和定位的算法仿真和应用, 先通过仿真达到算法设计的预期目的, 再通过编程将算法嵌入磁浮列车的悬浮控制系统硬件平台, 实现测速和定位算法的应用, 测速和定位算法的实现均基于悬浮传感器的 4 路悬浮间隙值。而悬浮传感器是悬浮系统的固有结构, 4 路悬浮间隙值的冗余和抗干扰设计得到工程应用的充分检验, 算法结果可直接应用于悬浮控制系统, 可以解决现有技术存在的网络时延以及抗干扰能力差导致的测量数据不准确的问题 [12], 摆脱对外置测速定位系统的依赖, 已在长沙磁浮部分工程车上进行应用。但算法的实现与悬浮传感器的悬浮间隙值密切相关, 测速算法与轨道的轨缝存在强关联性。定位算法的准确性也与轨道轨排的规格参数相关, 无法完全取代磁浮列车的外置测速定位系统, 适用性存在一定的局限。

本文只描述基于单个悬浮控制点的悬浮间隙实现测速和定位的算法仿真和应用, 实际上短定子磁浮列车的悬浮控制点遍布在整列车底, 每个单独的悬浮点位都可以进行测速和定位运算, 后续将考虑在整车层面利用全部悬浮点进行测速和定位的拓展应用, 以进一步提升算法应用效果。

参考文献:

[1] 王欢芳, 钟志敏. “两型”视角下长株潭公共交通建设问题研究 [J]. 湖南工业大学学报 (社会科学版),

- 2014, 19(1): 8-12.
WANG Huanfang, ZHONG Zhimin. Research on Public Transportation Problem of Changzhutan Urban Agglomeration Based on "Two-Oriented" Society Perspectives[J]. Journal of Hunan University of Technology (Social Science Edition), 2014, 19(1): 8-12.
- [2] 张文会. 中低速磁浮F轨轨缝动态检测方法研究[J]. 仪器仪表与检测技术, 2018, 37(11): 114, 119
ZHANG Wenhui. Research on Dynamic Detection Method for Medium and Low Speed Maglev F Rail Gaps[J]. Instrumentation and Detection Technology, 2018, 37(11): 114, 119.
- [3] 佟来生, 张文跃, 汤彪, 等. 磁浮列车运行速度计算系统、方法、悬浮控制系统及列车: CN113602322B[P]. 2023-04-07.
TONG Laisheng, ZHANG Wenyue, TANG Biao, et al. System and Method for Calculating Running Speed of Maglev Train, Suspension Control System and Train: CN113602322B[P]. 2023-04-07.
- [4] 吴志会, 佟来生, 罗华军, 等. 中低速磁浮线路轨道轨缝对车辆悬浮的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 49-52, 57.
WU Zhihui, TONG Laisheng, LUO Huajun, et al. Research on the Influence of Track Gap on Vehicle Suspension of Medium and Low Speed Maglev Transit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 49-52, 57.
- [5] 汤彪, 张皎, 佟来生, 等. 中低速磁浮列车过轨缝的间隙信号处理算法及实现[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(3): 56-61.
TANG Biao, ZHANG Jiao, TONG Laisheng, et al. Algorithm and Implementation of Signal Processing for Medium-Low Speed Maglev Train Crossing Rail Gaps[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2020, 34(3): 56-61.
- [6] 曾颖丰. 基于控制器局域网的悬浮控制器调试监测系统[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(4): 55-60.
ZENG Yingfeng. Magnetic Levitation Controller Debugging and Monitoring System Based on Controller Area Network[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(4): 55-60.
- [7] 翟毅涛, 吴峻. 抑制轨道台阶干扰的磁浮传感器间隙补偿算法[J]. 铁道学报, 2016, 38(7): 77-83.
ZHAI Yitao, WU Jun. Algorithm for Gap Compensating Signal of Maglev Levitation Sensor to Suppress Disturbance from Guide Way Step[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(7): 77-83.
- [8] 刘斌, 邹今检, 龚文忠, 等. 一种多传感器融合磁浮列车地面测速方法和系统: CN116476897A[P]. 2023-07-25.
LIU Bin, ZOU Jinjian, GONG Wenzhong, et al. Multi-Sensor Fusion Maglev Train Ground Speed Measurement Method and System: CN116476897A[P]. 2023-07-25.
- [9] 崔杰. 中低速磁浮列车运行速度曲线的计算[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
CUI Jie. Calculation of Operating Speed Curve on Medium-Low Speed Maglev Train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [10] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 20-75.
XIA Yuwen. Digital System Design Tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2003: 20-75.
- [11] 侯佰康. 高速磁浮列车悬浮间隙测量模块的FPGA实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
HOU Baikang. Implementation of Gap Determination Module for High-Speed Maglev Vehicle Based on FPGA[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [12] 佟来生, 罗京, 朱琳. 一种磁浮列车运行速度的测量方法和装置: CN104049103A[P]. 2014-09-17.
TONG Laisheng, LUO Jing, ZHU Lin. Method and Device for Measuring Running Speed of Magnetic-Levitation Train: CN104049103A[P]. 2014-09-17.

(责任编辑: 廖友媛)