

面向电磁橇的直线电机定位测速系统

金玉鑫,李杰*,周丹峰,王连春,卜海珂
(国防科技大学智能科学学院,湖南长沙410073)

摘要:针对电磁橇对实时准确的位置和速度信息的需求与传统定位测速技术的局限性或高昂成本的矛盾,提出并设计了一种基于游标卡尺结构的新型定位测速系统。阐明了高精度定位的实现原理以及相应的位置解析方法,并设计了位置外推预测算法和卡尔曼滤波算法以提高定位测速系统的分辨率和实时性。设计了实现所提定位测速功能的硬件电路和软件程序,搭建了同步带导轨实验平台对所提的定位测速系统进行验证。测试结果表明,所设计的系统能够实现毫米级定位精度,具有良好的实时性、准确性和工程应用价值。给出了所提的定位测速系统在电磁悬浮推进平台上的工程应用实例。

关键词:电磁橇;游标卡尺原理;定位测速;位置预测算法;卡尔曼滤波算法

中图分类号:TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)06-296-11



论
文
拓
展

Positioning and speed measurement system of linear motor applied for electromagnetic sled

JIN Yuxin, LI Jie*, ZHOU Danfeng, WANG Lianchun, BU Haiko

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In view of the contradiction between the need of the electromagnetic sled for real-time accurate position and speed information and the limitation or high cost of traditional position and speed measurement methods, a new measurement system based on vernier caliper structure was proposed and designed. The principle of high precision positioning and the corresponding position analysis method was expounded, and the position prediction algorithm and Kalman filter algorithm were designed to improve the accuracy and real-time performance. The hardware circuit and software program were designed to realize the function, and a synchronous belt guide rail experimental platform was built to verify the designed system. The test results show that the system can achieve millimeter-level positioning accuracy, and performs well in terms of real-time capability, accuracy and engineering application. The positioning and speed measurement system was applied to the electromagnetic levitation propulsion platform.

Keywords: electromagnetic sled; vernier caliper principle; positioning and speed measurement; position prediction algorithm; Kalman filter algorithm

电磁橇利用直线电机提供牵引力和制动力,借助悬浮系统将车体悬浮于轨道之上,使得车体和轨道脱离接触实现“贴地飞行”,具有无接触磨损、可控性能好、发射频率高等优点,成为新型空气动力学地面飞行试验方案,在国防和军事领域等方面具有重要意义^[1-7]。

直线电机的闭环控制需要实时、准确的动子位置和速度信息反馈^[8-9],以实现定速巡航和定点停车等功能,而电磁橇是大加速度、室外长距

离、非接触运行且磁场环境复杂,传统机床上直线电机定位测速所采用的光栅尺或磁栅尺采用一体化安装结构,并且对平行度有较高要求,不适用于长行程工况。当下,以磁浮列车、电磁弹射、轨道交通为代表的长行程直线电机^[10-11]的定位测速系统主要包括加速度计、雷达、齿槽计数法^[12]、感应环线法^[13]和轨枕计数法^[14]。其中,加速度计积分和雷达定位测速方案精度较差,难以满足同步电机的定位精度需要。齿槽计数法和轨枕计数

收稿日期:2023-11-02

基金项目:十三五国家重点研发计划资助项目(202050KG0023)

第一作者:金玉鑫(1996—),女,山东临邑人,博士研究生,E-mail:jinyuxin18@nudt.edu.cn

*通信作者:李杰(1971—),男,山东济南人,教授,博士,博士生导师,E-mail:jieli@nudt.edu.cn

引用格式:金玉鑫,李杰,周丹峰,等.面向电磁橇的直线电机定位测速系统[J].国防科技大学学报,2025,47(6):296-306.

Citation: JIN Y X, LI J, ZHOU D F, et al. Positioning and speed measurement system of linear motor applied for electromagnetic sled[J].

Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(6): 296-306.

法由车载线圈产生高频信号,与硅钢片的齿槽结构或钢轨相互作用产生周期性感应信号,通过计数感应信号,实现位置测量,对位置进行微分求得速度。此类方法需要电机有硅钢片齿槽结构或者线路上铺设钢轨,存在原理上的局限性,不适用于空芯式电机。感应环线法是比较通用的方法,通过车载天线与沿线布置的交叉线圈相互作用,产生周期性位移信号,在此基础上,文献[12]基于“编码器结构”设计多组车载线圈并对信号处理手段进行改进,但是感应环线法要在轨面铺设大量感应回线和信号设备,造价和维护工作量较高^[15-16]。

因此,为了满足电磁橇对位置和速度信号的需求,借鉴游标卡尺结构^[17],本文提出并设计了一种新型定位测速系统,并研究位置外推预测算法和卡尔曼滤波算法,以进一步提高分辨率和实时性。

1 定位测速系统工作原理

本文所设计的定位测速系统结构如图1所示,该系统由车载子系统、地面子系统、齿槽板及PC端演示界面(或牵引控制器)四部分组成。

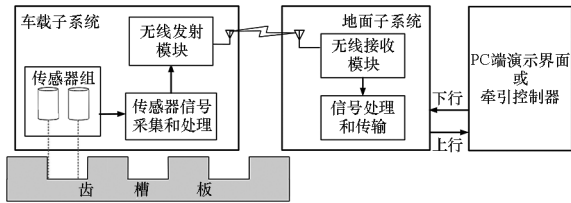


图1 定位测速系统结构

Fig.1 Structure of positioning and speed measurement system

1.1 高精度定位原理

实现高精度定位的设计灵感来源于游标卡尺,其采用主尺与副尺组合的结构,以副尺刻度等分主尺最小刻度,并通过主尺与副尺错位实现距离测量。相比于编码器等传统定位测速系统通过在一个主尺周期内布置多个传感器来提高精度的方法,游标卡尺结构采用较大的传感器间距即可实现高精度测量,具有定位精度高、传感器间隔较大、安装空间和结构精度限制小的优点。所提出的高精度定位结构如图2所示,其中齿槽板为“主尺”,传感器组作为“副尺”。

具体设计原理为: a_1 是齿槽板的齿或槽的长度, a_2 是传感器的间距,传感器等距安装,且 $a_1 > a_2$; K 是 a_1 和 a_2 的最小公倍数,满足 $K = a_1 \times (n - 1) = a_2 \times n$; n 为 a_2 的个数,也是有效传感器个数。

据此,可以得到 a_1 和 a_2 的关系:

$$a_2 = a_1 - a_1/n \quad (1)$$

进而,得到定位精度 u 的关系式为

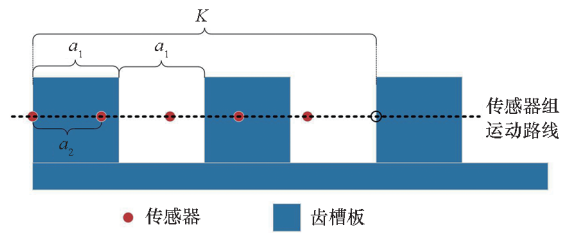


图2 高精度定位结构

Fig.2 Structure for high-accuracy positioning

$$u = a_1 - a_2 = a_1 - \left(a_1 - \frac{a_1}{n} \right) = \frac{a_1}{n} \quad (2)$$

定位测速系统的设计需要满足式(1)和式(2),通过设计 a_1 和 n 的比例关系,可以达到定位精度需求;同时从精度公式(1)可以看出,传感器仅需要以比齿槽板的半周期长度略小的间距部署,即可达到较高的测量精度,并且 a_1 和 n 有多种选择,这有利于根据安装空间灵活设计,因此在工程应用中具有更高的兼容性。

1.2 位置解析原理

传感器随动子运动并对轨道上的齿槽板进行检测,假设传感器检测到齿则输出“1”,传感器在槽位置则输出“0”,当 n 个传感器随动子运动,同一时刻输出数值形成 n 位的编码,且 n 位编码周期性出现。

电磁橇采用长定子直线同步电机牵引,需要达到 3° 的检测精度,根据极距换算对应9 mm定位精度。以此为例,详细介绍传感器组输出编码规律和相应的位置解析原理。

设计齿或槽长度 $a_1 = 45$ mm,即齿槽周期是90 mm,5个传感器间隔为 $a_2 = a_1 - u = 45$ mm - 9 mm = 36 mm。当传感器组在运动中对齿槽板“扫描”时,输出5路方波信号(每个传感器输出1路),各路方波信号之间形成相位上的滞后。5路方波信号及相位关系如图3所示。

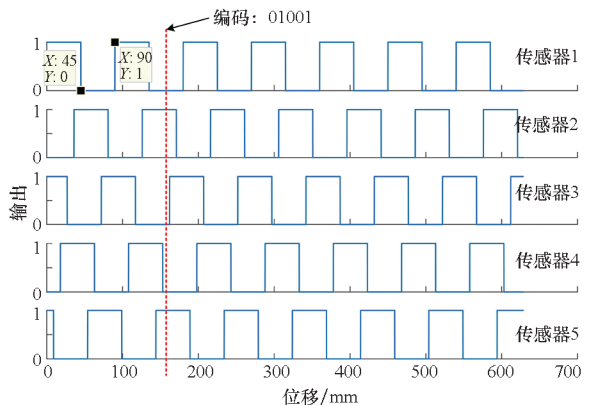


图3 传感器组输出5路方波信号

Fig.3 5-way square wave signals output by the sensor group

具体而言,5 个传感器随动子运动时,输出编码具有以下特点:

1) 传感器沿齿槽板运动输出周期性编码,且编码周期为主尺单位长度,即 90 mm。

2) 编码以定位精度为变化步长,即 9 mm 变化一次,周期性的编码如表 1 所示。

3) 周期内编码是唯一且有序的,可以根据编码变化判断动子运动方向。需要注意的是,表 1 中编码是顺序出现的,且首次出现的编码和传感器所在齿槽的位置相关。例如,传感器组在齿槽板周期内运动的位置顺序可以是 1→2→…→9→10→1,也可以是 3→4→…→9→10→1→2→3 等。

表 1 传感器组周期性编码真值

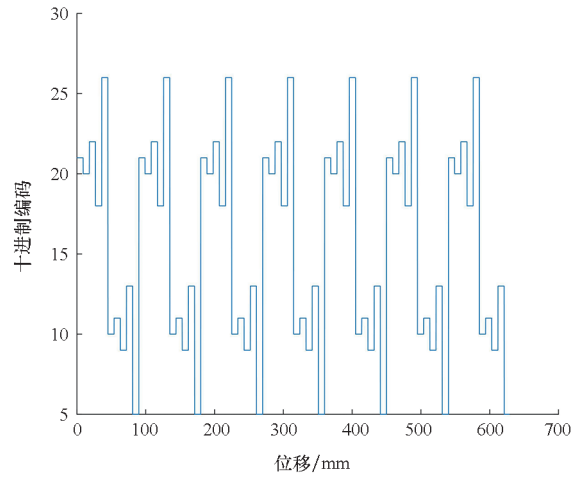
Tab. 1 Truth value for periodic encoding of sensor group					
周期位置	探头编码	十进制	周期位置	探头编码	十进制
1	10101	21	6	01010	10
2	10100	20	7	01011	11
3	10110	22	8	01001	9
4	10010	18	9	01101	13
5	11010	26	10	00101	5

据此,得到车体运动位置和方向信息,从原理上证明了以“主尺+副尺”结构设计定位方案具有可行性。将 5 路传感器信号据表 1 规律进行融合处理,得到周期性编码和解析位置如图 4 所示。

1.3 位置外推预测算法

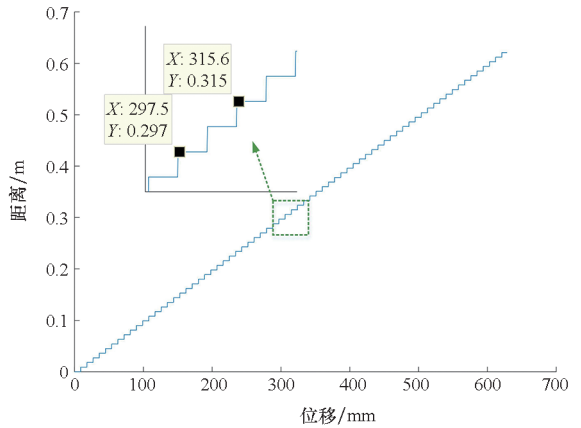
由图 4 可以看出,尽管本方案的定位精度已经达到 9 mm,但在较低的运动速度或较高的传感器采样频率下,位置曲线会呈现明显的台阶状。为了缓解这一问题,进一步提高位置分辨率和准确性,设计低复杂度的位置外推预测算法,由当前时刻的位置预测下一时刻的位置。预测算法流程如图 5 所示,其中 Δt 表示采样时间间隔, x_{n-1} 、 v_{n-1} 、 a_{n-1} 分别表示上一时刻的位置、速度和加速度, x_n 、 v_n 、 a_n 分别表示当前时刻的位置、速度和加速度。

首先由当前台阶的位置和前一个台阶的位置预测得到当前台阶的速度和加速度,然后结合前一时刻的预测位置得到当前时刻的预测位置,按此方法迭代执行,就可以实现更加精细的实时位置曲线。



(a) 周期性编码

(a) Periodic encoding



(b) 位置信号

(b) Position signal

图 4 传感器组输出周期性编码和所得位置信号

Fig. 4 The periodic encoding and position signal output by the sensor group

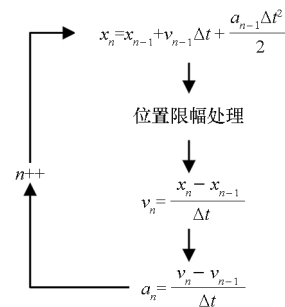


图 5 位置外推预测算法流程

Fig. 5 Flow chart of the position prediction algorithm

1.4 基于卡尔曼滤波算法求解速度

传统测速方法多是通过计算一定时间内输出的脉冲数^[18],但是高速直线电机对定位测速系统的精度有着很高的要求,使用传统微分算法求取的速度信号往往具有较大的噪声,并且存在延时、速度精度较低的问题。而卡尔曼滤波器可以获取

输入信号的微分信号,在工程中广泛应用。

卡尔曼滤波算法只需要当前时刻的测量值和前一时刻的估计值就能够进行状态估计。由于这种递归方法不需要大量的存储空间,每一步的计算量小,计算步骤清晰,非常适合计算机处理。

1.4.1 卡尔曼滤波原理

状态方程:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (3)$$

系统方程:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{R}(k) \quad (4)$$

其中, \mathbf{A} 为状态转移矩阵, \mathbf{B} 为系统输入矩阵, \mathbf{C} 为测量矩阵, \mathbf{u} 为控制输入, \mathbf{z} 为测量值, $\mathbf{Q}(k)$ 和 $\mathbf{R}(k)$ 分别是系统过程噪声和测量噪声, $\mathbf{x}(k+1)$ 和 $\mathbf{x}(k)$ 分别是时刻 $k+1$ 和时刻 k 的状态变量。

卡尔曼滤波分为预测和校正两个步骤,卡尔曼滤波器的滤波方程如下:

分别以电机动子位置 S 、速度 V 为状态向量: $\mathbf{x} = [S \ V]^T$,电机的 q 轴电流为输入变量: $\mathbf{u} = [i_q]$,电机的位置 S 为观测输出变量: $\mathbf{z} = [S]$ 。代入电机状态空间方程(3)和方程(4)。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}(k) \\ \mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T}{\mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k)} \\ \mathbf{x}(k+1|k+1) = \mathbf{x}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}\mathbf{x}(k+1|k)] \\ \mathbf{P}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}]\mathbf{P}(k+1|k) \end{cases}$$

式中: $\mathbf{x}(k+1|k)$ 为 k 时刻的先验状态估计值,是中间计算结果; $\mathbf{x}(k+1|k+1)$ 表示 $k+1$ 时刻卡尔曼滤波器给出的系统状态最优估计; $\mathbf{P}(k|k)$ 和 $\mathbf{P}(k+1|k+1)$ 分别表示 k 时刻和 $k+1$ 时刻的后验估计协方差; $\mathbf{P}(k+1|k)$ 为 k 时刻的先验估计协方差,是中间计算结果; \mathbf{K} 为卡尔曼增益矩阵;

\mathbf{H} 为量测矩阵; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_1 \times T/m \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = [1 \ 0]$, T 为采样时间, m 表示动子质量, K_1 为 q 轴电流到牵引力的转换系数。

1.4.2 仿真分析

为了验证卡尔曼滤波速度算法的有效性,在仿真软件中仿真了整个控制系统并模拟动子前进生成了运动轨迹,对位置信息分别采用了卡尔曼滤波方法和滑动平均滤波方法求解速度并进行对比。各项初始值设置如下:采样时间 T 取0.000 25 s,测量噪声矩阵 \mathbf{R} 取0.1,初始状态协方差 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$,系统噪声矩阵 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}$ 。所获得

的速度估计结果如图6所示。

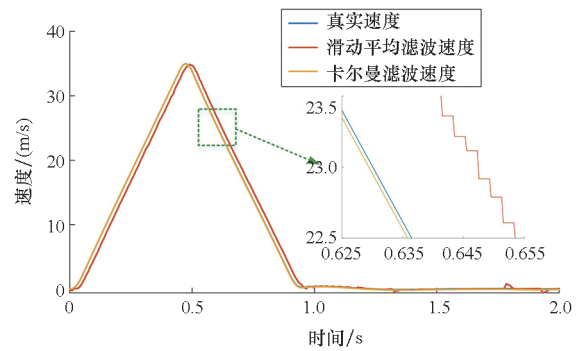


图6 速度仿真结果对比

Fig. 6 Simulation results of speed measurement

由图6仿真结果可以看出,卡尔曼滤波速度较常见的滑动平均滤波速度更接近真实速度,具有更好的实时性。因此卡尔曼滤波算法可以在本定位测速系统中用于速度解算。

2 定位测速系统设计

2.1 设计指标

电磁橇需要位置和速度信号以实现直线电机的实时控制,同时考虑电磁橇复杂的磁场环境和悬浮运行状态,因此,定位测速系统要求具有定位精度高、传输延迟低、传输可靠、强磁场环境适用等特点^[19-20]。结合电磁橇运行工况,对定位测速系统提出以下设计指标:适用速度满足0~30 m/s,检测间距为0~80 mm,定位精度为9 mm,传输延迟小于280 μs 。

2.2 传感器选型

考虑车体悬浮高度、运行速度、定位精度、安装空间等,在调研了超声波传感器、电涡流传感器、光电传感器,以及对比了模拟传感器和数字传感器的性能指标后,选用光电型数字传感器,生成“0/1”信号,并搭配光纤传输。通过光纤将传感器产生的光束发射出去并接收反射光,可以在振动、强磁环境下正常使用。传感器的关键性能参数有:检测距离满足0~80 mm,输出为PNP开路,响应时间为50 μs ,输出数字型信号。

2.3 车地无线通信方案

电磁橇采用地面部署的控制器,为了提高定位测速系统的部署自由度和适用性,设计无线传输方式实现车地通信。所设计的车地无线通信系统用于将车载子系统获得的位置等信号传输到地面牵引控制器,因此对无线传输的延迟、传输距离、可靠性提出了较高要求。在调研了蓝牙、Wi-Fi、漏泄电缆和德国38G车地无线通信系

统^[21-22]后,选用协议较为简单的 nRF24L01 无线射频模块,并搭载胶棒天线以提高传输增益、增加传输距离。

nRF24L01 无线射频芯片工作在 2.4 GHz 频段且有多个传输信道,可以避免蓝牙和 Wi-Fi 等的同频干扰。经测试,该模块搭配胶棒天线,在 50 m 范围内可以实现可靠传输,且传输延迟小于 0.25 ms,满足定位测速的指标要求。

2.4 硬件架构

2.4.1 车载子系统硬件架构

车载子系统由传感器组和配套电路组成,实现对传感器信号的采集和预处理,并将数据经 nRF24L01 模块以射频形式发送出去;采用主频 72 MHz 的 STM32F103C8T6 微控制器作为处理芯片。

传感器是集电极开路型且采用 12 V 直流供电,因此输出是 0/12 V 的开关量信号,不能直接送入单片机。为此,设计了比较器电路,将传感器输出信号转换成满足单机电平要求的 0/5 V 电平信号,再送入单片机中;设计滤波电路,并保证 R1 和电容 C1 的低通特性带来的电平翻转延迟远小于系统整体延迟要求。设计的预处理电路如图 7 所示。所设计的车载子系统电路主要包含电源管理电路、采样电路、微处理器和接口电路。

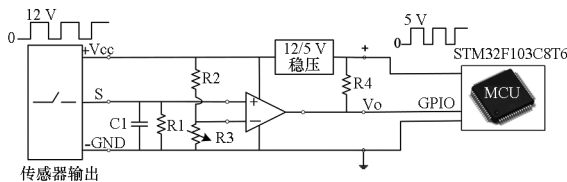


图 7 传感器预处理电路

Fig. 7 Sensor preprocessing circuit

2.4.2 地面子系统硬件架构

地面子系统接收无线射频信号,将接收到的位置和速度等信息串行传输到牵引控制器和上位机,同时可以接收上位机的下行指令。地面子系统电路设计包括电源管理电路、微处理器、接口电路和光模块电路,如图 8 所示。其中光模块电路是为了满足工程中所用光纤通信协议而设计,可以支持接收处理单元到地面控制器的光纤拉远。

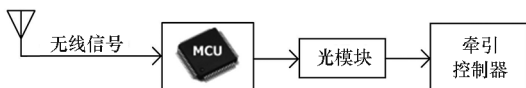


图 8 地面子系统架构

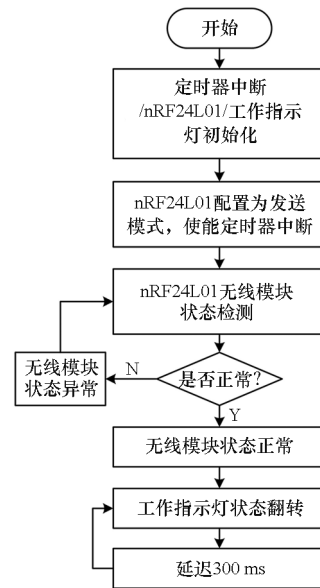
Fig. 8 Architecture of ground subsystem

2.5 软件设计与流程

本定位测速系统的软硬件开发基于微控制器开发平台 Keil5 和图形化编程软件 LabVIEW 实现。其中,车载子系统和地面子系统的主要功能通过单片机开发实现;PC 端演示界面采用 LabVIEW 开发,实现对定位测速系统的实时监测和用户控制指令下发。

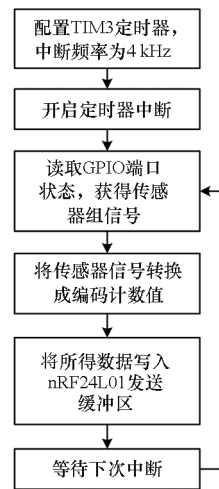
2.5.1 车载子系统实现流程

车载子系统主要实现对传感器信号的采集和预处理,以及数据的无线传输。具体的程序设计流程如图 9 所示。



(a) 主流程

(a) Main flow chart



(b) 定时中断流程

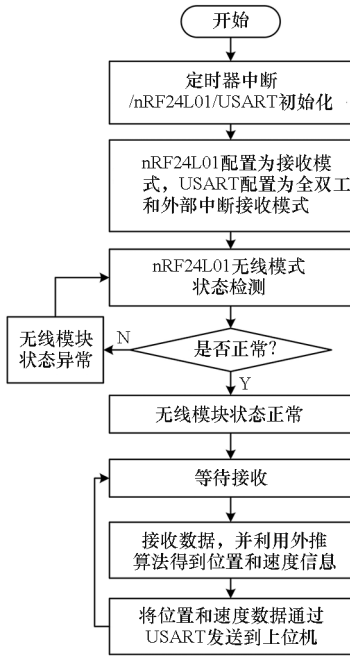
(b) Flow chart of the timer interrupt

图 9 车载子系统软件设计流程

Fig. 9 Flow chart of software design for the on-board subsystem

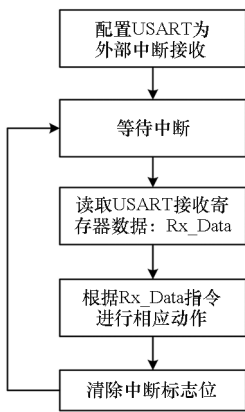
2.5.2 地面子系统实现流程

地面子系统同样由一块 STM32F103C8T6 单片机进行运算,主要实现的功能有:接收 nRF24L01 无线信号,并完成速度和位置信息的实时解算;同时接收 PC 端指令,将位置和速度实时解算结果发送到 PC 端和控制器。具体程序的实现流程如图 10 所示。



(a) 主流程

(a) Main flow chart



(b) 外部中断流程

(b) Flow chart of the external interrupt

图 10 地面子系统软件设计流程

Fig. 10 Flow chart of software design for the ground subsystem

3 系统测试与分析

3.1 验证平台

为了验证本设计的可行性,搭建了定位测速系统验证平台,如图 11 所示。搭建直线同步带模

组,以步进电机牵引滑块做直线运动模拟电磁橇的运动状态,其中,滑块相当于动子车体,同步带导轨相当于长定子。

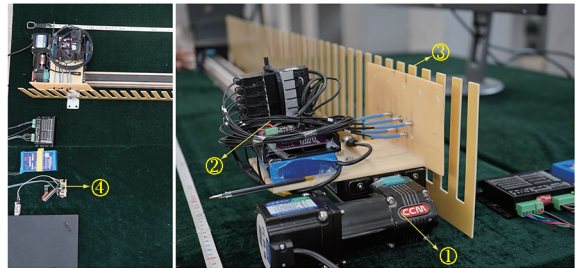
图 11 中各构成部分为:

1)直线同步带模组。由步进电机驱动同步带带动滑块在直线滑轨上运动,用于模拟直线电机驱动的动子车体。

2)车载子系统。搭载在滑块上,完成光电传感器信号的采集、预处理以及无线发送。

3)齿槽板。沿滑轨布设,作为“游标卡尺”的主尺,与车载子系统的光电传感器(作为副尺)组合生成用于定位测距的传感器信号。

4)地面子系统。无线接收传感器数据,完成对位置和速度的实时解算并上传到上位机,同时根据上位机指令控制步进电机的运动模式。



① 直线同步带模组;② 车载子系统;③ 齿槽板;④ 地面子系统。

图 11 演示验证平台

Fig. 11 Demonstration and verification platform

3.2 定位测速系统性能测试

为了测试所设计的定位测速系统性能是否满足设计指标要求,进行了系统测试,主要包括定位测速功能、传输延迟和无线传输丢包率三种关键指标。

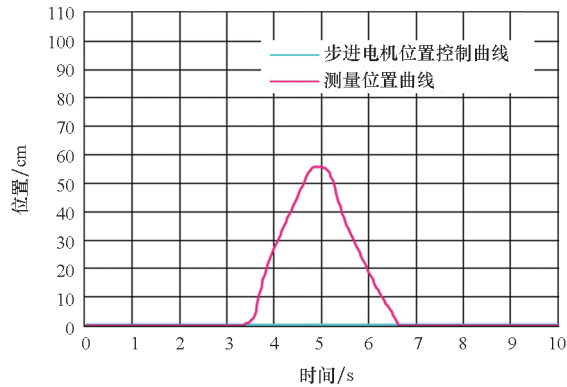
3.2.1 定位测速功能测试

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件,在理想工况下,电机的转速取决于脉冲信号的频率,电机运动的位置只取决于输出脉冲个数,即给电机加一个脉冲信号,电机则转过一个步距角。因此,步进电机的位置准确性较高,可以用来作为动态的参考位置。通过测量步进电机输出脉冲和走过的直线距离,可以得到步进电机单脉冲对应的直线长度。

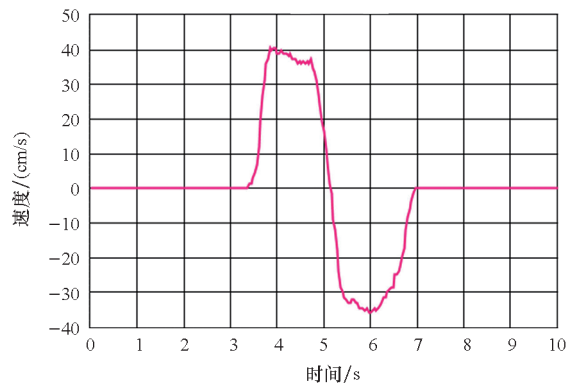
设计步进电机作往复运动,将步进电机期望位置和定位测速系统位置与真实位置对比,并将所获得的步进电机和系统解算的位置和速度信号在演示界面上实时显示。所设计的实验包括三部分:

1)实时性。手推滑块作往复运动,得到定位测速系统的位置和速度曲线如图 12 所示。由于

没有控制输出,步进电机的位置保持为 0。该组实验证明了定位测速系统所获得的位置数据是独立于步进电机控制的,且位置和速度信号能够随滑块运动快速响应。



(a) 位置曲线
(a) Position curve

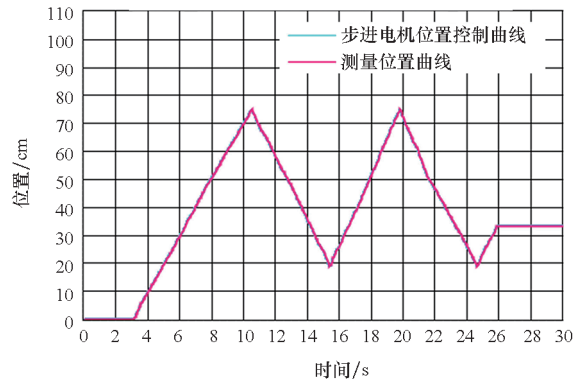


(b) 速度曲线
(b) Speed curve

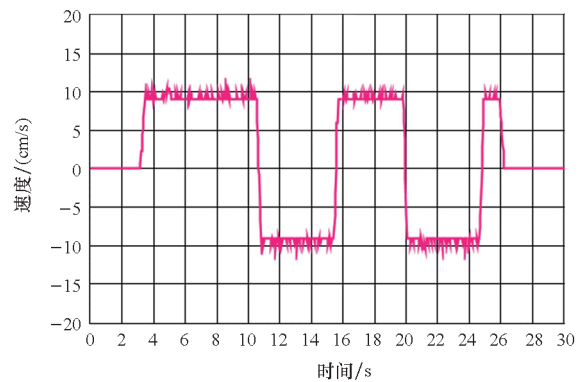
图 12 手推滑块运动得到的位置和速度曲线
Fig. 12 Position and speed of manually pushing slider

2) 准确性。步进电机驱动滑块作低速往复运动,进行位置和速度信号对比,如图 13 所示。从曲线可以看出,步进电机往复运动运行稳定,其位置控制曲线可以视为真实位置,并且系统测得的位置与步进电机的位置重合,说明运行过程中定位测速系统所获得的位置信号准确。

3) 有效性。步进电机驱动滑块作高速运动,进行位置和速度信号对比,如图 14 所示。步进电机提速后扭矩降低,高速下会出现失步现象,步进电机真实位置应当小于步进电机期望位置。图 14 中蓝线表示步进电机期望位置,红线表示定位测速系统的位置,从图中可以看出,26 ~ 36 s 区间内(绿色虚线框)定位测速系统测量的位移小于步进电机的设定位移,且测量结果与真实位置一致,说明定位测速系统所获得的位置信号有效,可以为牵引系统提供准确的位置和速度信息。



(a) 位置曲线
(a) Position curve



(b) 速度曲线
(b) Speed curve

图 13 低速往复运动得到的位置和速度曲线
Fig. 13 Position and speed in low-speed motion

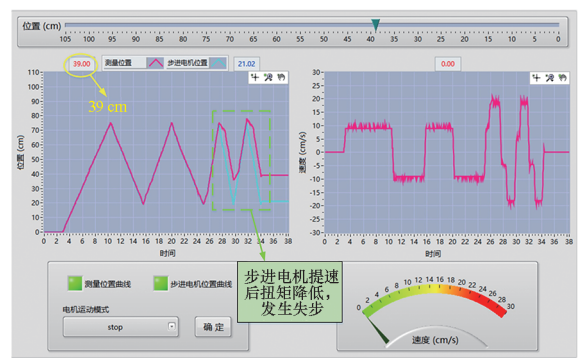


图 14 高速运动得到的位置和速度曲线
Fig. 14 Position and speed in high-speed motion

3.2.2 传输延迟

整个定位测速系统的延迟主要包括:传感器信号采集、无线传输、程序处理和硬件传输延迟。设计车载子系统完成无线信号发送,输出电平翻转信号;牵引控制器接收到地面子系统的串行信号,也输出电平翻转信号。因此整个测量过程包含了无线传输延迟、程序处理和硬件传输延迟。将两路信号送入示波器中进行观测,测量结果如图 15 所示。

图 15 中黄色 CH1 信号表示车载子系统端信号,绿色 CH2 信号表示地面子系统端信号,比较信号的上升沿,可以看出两者时间差小于 200 μs ,这主要来自 nRF24L01 内部 130 μs 的准备时间。综合传感器响应时间,整个定位测速系统的传输延迟约 250 μs ,可以满足应用需求。

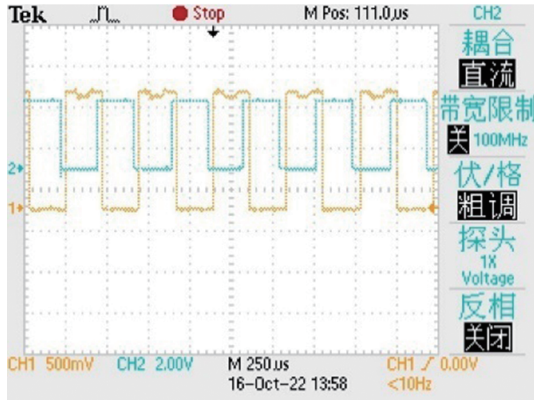


图 15 采集与接收信号对比

Fig. 15 Comparison of collected and received signals

3.2.3 无线传输可靠性

无线传输的可靠性主要体现在传输距离和丢包率上。设计实验测试传输距离和丢包率,具体实施方案:发送端循环发送带有编号的数据包,编号从 0 到 255 循环,接收端接收信号并保存。实际测量数据结果如表 2 所示。

表 2 无线传输丢包率测试结果

Tab. 2 Test results of packet loss rate for wireless transmission

距离/ m	数据 量	丢包率	距离/ m	数据 量	丢包率
	10^5	9.7×10^{-5}		10^5	3.4×10^{-3}
10	10^5	3.1×10^{-4}	50	10^5	5.3×10^{-4}
	10^5	4.6×10^{-4}		10^5	1.2×10^{-3}

实际测量显示,在 50 m 范围内,无线传输丢包率在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$,丢包率较小。另外,由于在低速段存在过采样,因此丢包率在可以接受的范围。

3.2.4 方案对比

将所设计的定位测速方案性能与当前典型工程应用中的定位测速方案进行对比,对比结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,本系统在实现较高定位精度的同时,其成本远低于现有方案,具有显著的成本效应优势。

表 3 磁浮线路定位测速方案性能对比

Tab. 3 Performance comparison of positioning and speed measurement schemes of maglev train

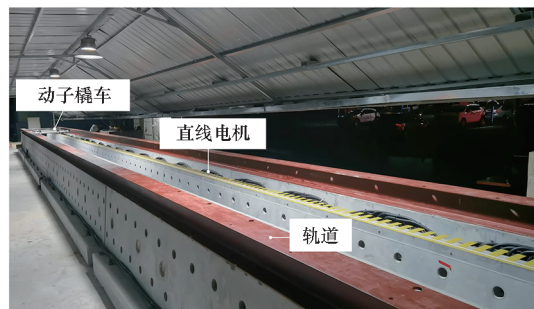
磁浮线路	定位测速方案	定位精度/cm	成本
上海磁浮列车示范运营线	齿槽计数 + 涡流传感器 + 车地无线通信	0.43	较高
长沙磁浮快线/北京 S1 线/韩国仁川机场线	轨枕计数 + 感应环线	10	高
山梨试验线	感应环线	3	高
本系统	游标卡尺原理	0.9	极低

3.3 工程应用及可靠性

为了进一步说明定位测速系统理论和设计的正确性与可行性,验证位置外推预测算法和卡尔曼滤波算法的有效性,通过大型实验测试平台对研究方法进行实验测试,平台整体如图 16(a)所示。电磁悬浮推进平台全长 32.4 m,整个系统由空芯直线同步电机提供牵引力、依靠动子与零磁通线圈作用提供悬浮和导向力,是用来验证悬浮方案、牵引方案以及控制策略等设计方法的实验平台。目前将此定位测速系统用于电磁悬浮推进平台上提供牵引控制所需的位置和速度信号,定位测速系统的安装如图 16(b)所示。

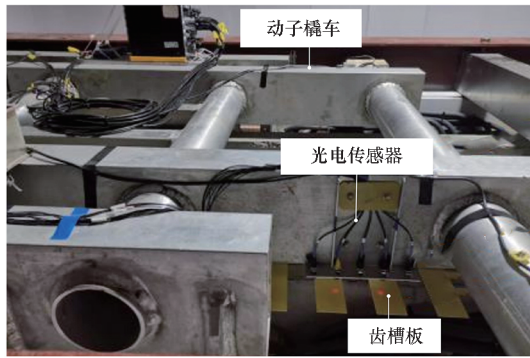
基于该平台进行了强磁场环境、动子振动和姿态变化、室外强光环境、安装精度和工件加工误差影响、长时间工作等测试,测试结果均能满足设计指标要求,说明所设计定位测速系统具有良好的工程应用前景。

在控制器中,以 4 kHz 频率对位置信息进行采集和算法处理,获得实时的位置和速度用于电



(a) 平台整体图

(a) Overall platform



(b) 定位测速系统局部

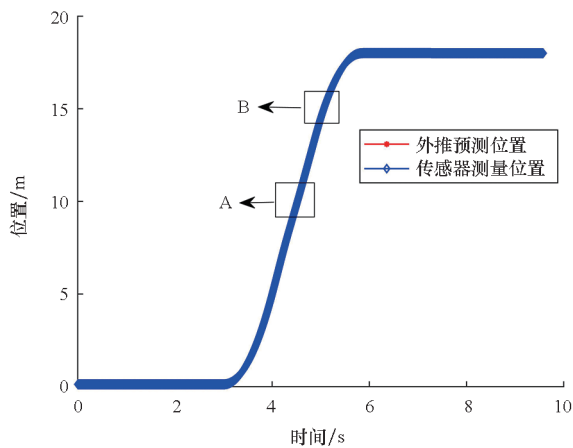
(b) Partial positioning and speed measurement system

图 16 电磁悬浮推进试验平台

Fig. 16 Electromagnetic boost experimental platform

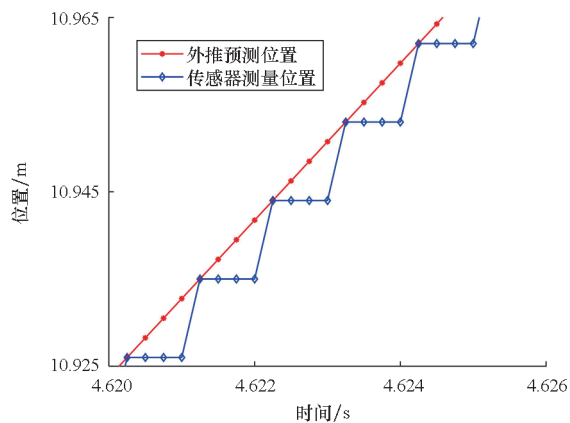
机实时控制,并以 500 Hz 的频率回传和记录。实验结果如图 17 ~ 19 所示。

图 17 中,传感器测量位置是定位测速系统累加得到的位置,外推预测位置是采用外推法预测两点间位置,两者对比说明采用位置外推算法可以进一步减小位置误差,算法效果明显。



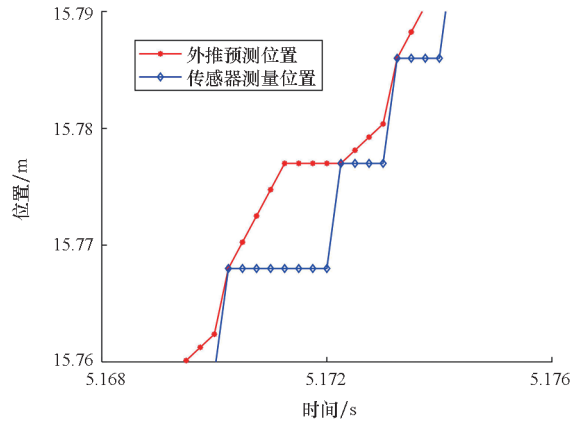
(a) 全局轮廓

(a) Global profile



(b) 局部特征 A

(b) Local feature A



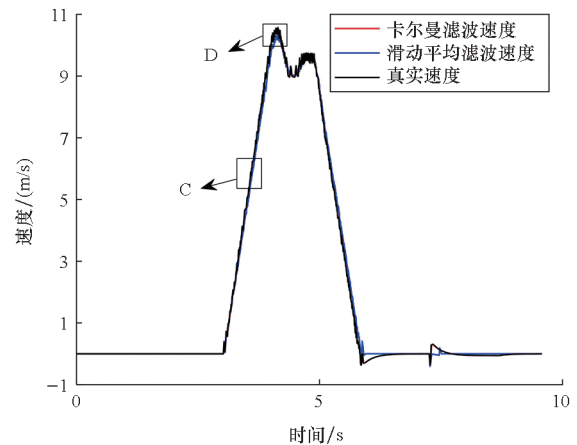
(c) 局部特征 B

(c) Local feature B

图 17 传感器测量位置与外推预测位置对比

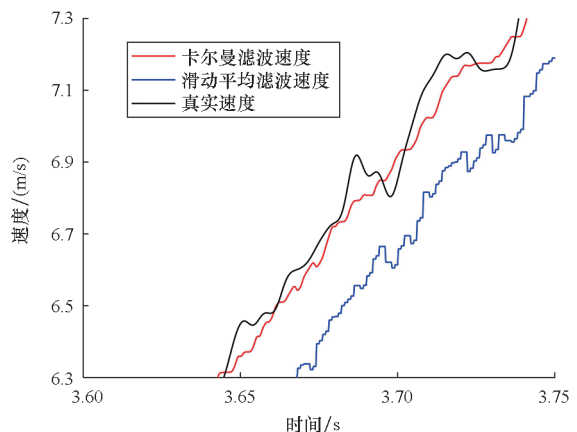
Fig. 17 Comparison of measured and predicted position

图 18 和图 19 中,真实速度是通过传感器测量位置离线拟合并微分得到。根据 3.2.1 节实验结果,传感器测量位置反映真实位置,因此对该位置拟合并微分得到的就是真实速度。滑动平均滤波速度和卡尔曼滤波速度均是在外推位置基础



(a) 全局轮廓

(a) Global profile



(b) 局部特征 C

(b) Local features C

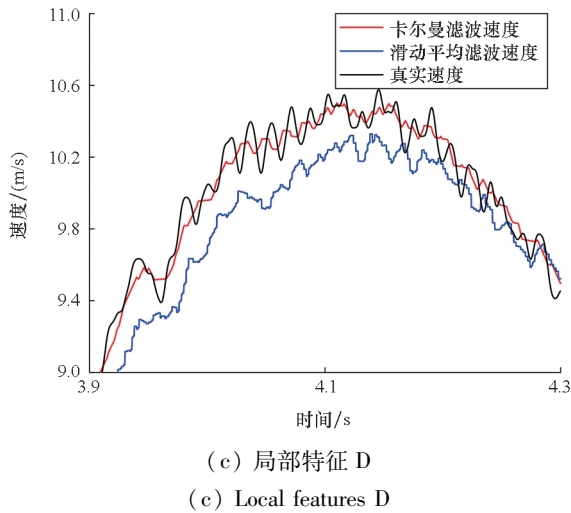


图 18 差分速度与卡尔曼滤波速度对比(匀加速工况)
Fig. 18 Comparison between the differentiation speeds obtained by differential and Kalman filtering (uniform acceleration condition)

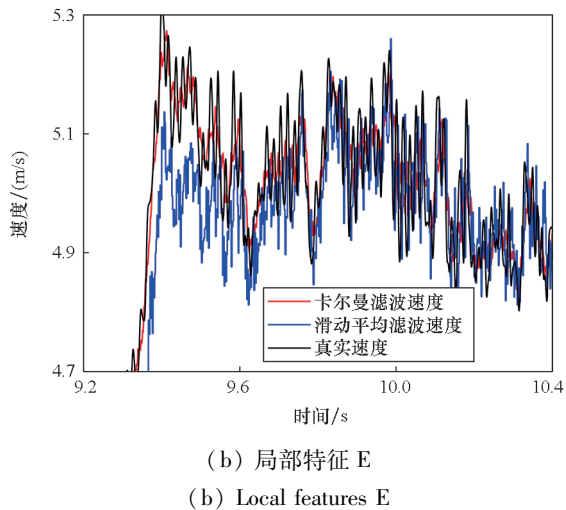
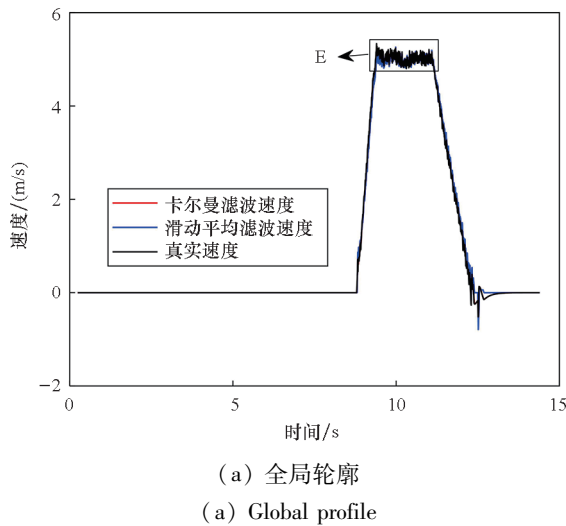


图 19 差分速度与卡尔曼滤波速度对比(匀速工况)
Fig. 19 Comparison between the differentiation speeds obtained by differential and Kalman filtering (uniform speed condition)

上得到的,可以看出相较于滑动平均滤波求解速度,卡尔曼滤波求解算法具有更低的延迟、速度更接近真实速度,并且在匀速和匀加速工况下均正常工作。综上,所设计的硬件设计和算法设计均在实际工程中得到检验,所设计定位测速系统运行可靠。目前,所设计定位测速系统在 56 m/s 工况下工作良好。

值得注意的是,车载子系统具备独立求解位置和速度的能力,可用于车载的牵引控制器;所用光电传感器支持高采样,因此,当定位精度为 9 mm 时,所设计的定位测速系统理论上最高支持 180 m/s 的运行速度,但在百米级线路中,还需要考虑到无线传输延迟和无线传输距离等影响,需要根据实际情况进行测定。所提方案仍有较大改进空间。

4 结论

为了解决以电磁橇为代表的长行程直线电机的定位测速问题,借鉴游标卡尺结构,设计了一种高精度定位测速方案,并设计了位置外推预测算法和卡尔曼滤波算法,进一步提高了位置和速度信号的准确性和实时性;设计并搭建定位测速系统和直线同步带模组,进行系统实时性、准确性和可靠性验证,所设计定位测速系统定位精度 9 mm,传输延迟低于 250 μ s;最后系统通过了室外环境、强磁场环境下测试,并成功应用于电磁悬浮推进试验线。

参考文献 (References)

[1] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959.
MA W M, LU J Y. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959. (in Chinese)

[2] 范满义,史黎明,李子欣,等. 一种高速直线电机定位测速系统硬件在环仿真[J]. 电工技术学报, 2023, 38(增刊1): 80-90.
FAN M Y, SHI L M, LI Z X, et al. A hardware-in-the-loop simulation for position and speed measurement system of high-speed linear motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(Suppl 1): 80-90. (in Chinese)

[3] 郭鹏辉,芮万智,肖飞,等. 一种电磁发射用直线电机智能位置检测系统[J]. 海军工程大学学报, 2020, 32(5): 32-37.
GUO P H, RUI W Z, XIAO F, et al. An intelligent position measurement system for linear induction motor applied in electromagnetic emission system [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2020, 32(5): 32-37. (in Chinese)

[4] 王擎宇,何娜,芮万智. 电磁发射用直线感应电机位置检

- 测系统关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1413-1420.
- WANG Q Y, HE N, RUI W Z. Study on key technology of position measurement system for linear induction motor applied in electromagnetic emission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1413-1420. (in Chinese)
- [5] LI J, CAO R G, LI S Z. The development of EML technology in China[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1029-1033.
- [6] SONG M X, ZHOU D F, YU P C, et al. Analytical calculation and experimental verification of superconducting electrodynamic suspension system using null-flux ground coils[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 14978-14989.
- [7] 秦伟, 马育华, 吕刚, 等. 一种可用于低真空管道的高温超导无铁心直线感应磁悬浮电机[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4038-4046.
- QIN W, MA Y H, LYU G, et al. Analyzing and designing a novel coreless linear induction maglev motor for low vacuum pipeline[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4038-4046. (in Chinese)
- [8] 李冠醇. 超高速大推力直线电机及其控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- LI G C. Theoretical study and control methods of super high speed and large thrust linear motor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 赵牧天, 葛琼璇, 朱进权, 等. 中速磁悬浮列车分段式长定子永磁直线同步电机牵引控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2491-2502.
- ZHAO M T, GE Q X, ZHU J Q, et al. Traction control strategy of segmented long stator permanent magnet linear synchronous motor for medium-speed maglev train[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2491-2502. (in Chinese)
- [10] 刘武斌, 王泉. 弹性轨道磁悬浮控制系统模型降阶研究[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(2): 206-210.
- LIU W B, WANG Q. Research on model reduction of maglev control system under elastic track[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(2): 206-210. (in Chinese)
- [11] 曾德林, 鲁军勇, 郑宇锋. 电磁发射系统改进 FAHP-神经网络健康评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(6): 67-76.
- ZENG D L, LU J Y, ZHENG Y F. Improved FAHP-neural network health evaluation method for electromagnetic launch system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(6): 67-76. (in Chinese)
- [12] 戴春辉, 薛松, 龙志强. 基于长定子齿槽的磁浮列车测速定位传感器信号处理[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6): 822-826.
- DAI C H, XUE S, LONG Z Q. The signal disposal of position and speed detection sensors based upon long stators for maglev train[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(6): 822-826. (in Chinese)
- [13] 王旭, 李壮, 龙志强. 基于新型感应回线的磁浮列车车地通信及测速定位[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(7): 26-30.
- WANG X, LI Z, LONG Z Q. Communication and speed measurement locating of maglev on a new inductive looped-cable[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(7): 26-30. (in Chinese)
- [14] 贾云光, 石晶, 崔俊锋, 等. 中低速磁浮车站区域轨枕布置方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(4): 54-57.
- JIA Y G, SHI J, CUI J F, et al. Sleeper layout plans for medium and low speed maglev station areas[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 54-57. (in Chinese)
- [15] 祝贺, 张今朝, 董睿, 等. 绕组分段永磁直线同步电机无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 65-76.
- ZHU H, ZHANG J Z, DONG R, et al. Sensorless control of winding segmented permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 65-76. (in Chinese)
- [16] 张明远, 史黎明, 范满义, 等. 长初级双边直线感应电动机分段推力协同控制和测速算法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 659-669.
- ZHANG M Y, SHI L M, FAN M Y, et al. Thrust cooperative control and speed measurement algorithm of segmented long primary double-sided linear induction motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 659-669. (in Chinese)
- [17] JIN Y X, CUI P, TAN Y Q, et al. The position and speed detection of linear synchronous motor based on vernier caliper principle[C]// Proceedings of 2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020: 3955-3960.
- [18] 徐张旗. 基于卡尔曼滤波的增量式光电编码器测速方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- XU Z Q. Research on the velocity measurement method of incremental encoder based on Kalman filter[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [19] 倪章松, 张军, 符澄, 等. 磁浮飞行风洞试验技术及应用需求分析[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 95-110.
- NI Z S, ZHANG J, FU C, et al. Analyses of the test techniques and applications of maglev flight tunnels[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(5): 95-110. (in Chinese)
- [20] 于馨凝, 姜欣彤, 张军, 等. 典型磁悬浮技术在磁浮飞行风洞中的应用分析[J]. 实验流体力学, 2023, 37(3): 27-36.
- YU X N, JIANG X T, ZHANG J, et al. Application of typical magnetic suspension system in maglev flight wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(3): 27-36. (in Chinese)
- [21] 张仿琪. 毫米波无线通信系统在高速磁浮交通中的应用[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- ZHANG F Q. The application of millimeter wave wireless communication system in high-speed maglev transportation[D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [22] 周民立. 上海磁浮线车地无线通信技术特点分析[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(12): 26-29, 34.
- ZHOU M L. Analysis on characteristics of Shanghai maglev train radio communication technology[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(12): 26-29, 34. (in Chinese)