

# 基于面包形磁钢的直线电机位置检测技术应用\*

乔海, 高云鹏, 陈进华, 张驰, 周杰  
(中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201)

**摘要:** 针对传统直线电机位置检测精度严重依赖于光栅、磁栅、容栅等传感器本身精度且传感器的安装精度要求高、成本高等问题。基于磁场解析法对不同永磁体形状对线性霍尔的影响进行磁场分析, 得出在不同检测距离磁场电角度与位置的关系。在此基础上提出能够实现精准位置检测的面包形永磁体结构, 且基于复杂可编程逻辑器件(CPLD)搭建直线电机位置反馈试验平台, 以实现直线电机的高精度位置检测。结果表明, 利用霍尔传感器感应所设计的面包形磁钢实现直线电机位置检测, 具有安装方式影响小, 系统可靠性高的优点, 测试直线电机速度波动在 5% 以内, 重复精度 1.54  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 直线电机; 永磁体; 面包形; 线性霍尔; 位置检测

中图分类号: TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0046-06

doi: 10.12177/emca.2023.089

## Application of Linear Motor Position Detection Technology Based on Bread Shaped Magnet Steel\*

QIAO Hai, GAO Yunpeng, CHEN Jinhua, ZHANG Chi, ZHOU Jie

(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

**Abstract:** The traditional linear motor position detection accuracy heavily relies on the accuracy of sensors such as gratings, magnetic grids, and capacitive grids, and the installation accuracy and cost of sensors are also high. Based on the magnetic field analysis method, the influence of different permanent magnet shapes on linear Hall is analyzed, and the relationship between the magnetic field electrical angle and position at different detection distances is obtained. On this basis, a bread shaped permanent magnet structure that can achieve precise position detection is proposed, and a linear motor position feedback experimental platform is built based on complex programmable logic devices (CPLD) to achieve high-precision position detection of linear motors. The experimental results show that the use of Hall sensor induction designed bread shaped magnetic steel for linear motor position detection has the advantages of small installation method impact and high system reliability. The speed fluctuation of the linear motor during testing is within 5%, and the repeatability accuracy is 1.54  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** linear motor; permanent magnet; bread shaped; linear Hall; position detection

## 0 引言

近年来直线电机驱动技术发展越来越成熟,

由于直线电机具有精度高、无磨损、响应快、空间节省等优点,其在数控加工制造、半导体设备、交通运输等领域获得了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。直线电机的

收稿日期: 2023-03-11; 收到修改稿日期: 2023-04-18

\* 基金项目: 浙江省自然科学基金重大项目(LD21E070002); 浙江省科技计划项目(2023C01179); 宁波市科技创新 2025 重大专项(2020Z068)

作者简介: 乔海(1988—),男,高级工程师,研究方向为驱动控制技术、传感检测技术。

高云鹏(1987—),男,工程师,研究方向为永磁电机设计分析、振动噪声抑制。(通信作者)

位置传感器是控制系统中的核心组成部分,其位置精度和可靠性直接影响到直线驱动系统的响应性能<sup>[3]</sup>。

在高端数控装备、工业自动化领域普遍采用光栅、磁栅等高精度位置传感器。与光栅传感器相比,磁栅传感器以低成本的优势,特别适用于非高精直线电机长距离行程的应用。但是与采用线性霍尔作为位置传感器相比,磁栅尺以及配套的传感读数头的价格仍然较高,并且霍尔传感器还具有可靠性高,不易受到元器件精度、安装公差、磁场强度影响等优点<sup>[4-5]</sup>。因此在非高精的工程应用领域,霍尔传感器仍是编码器市场主体选择。但是目前应用线性霍尔检测直线电机定子位置的磁钢均采用方形磁钢,磁场的正弦性不够,导致检测精度低,线性霍尔检测输出的模拟量信号会影响直线电机的推力以及速度波动。因此,如何通过优化线性霍尔传感器检测磁体结构,输出近似标准的正弦位置信号、降低安装误差对位置解算的影响,具有重要意义<sup>[6-9]</sup>。

针对上述问题,本文在分析线性霍尔传感器位置检测误差来源的基础上,采用磁场解析法对永磁体的磁场进行建模,分析了霍尔安装位置对测试精度的影响,提出能够实现精准位置检测的面包形永磁体结构,利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)实现线性霍尔信号细分。经试验验证,采用面包形永磁体结构的霍尔位置传感器的直线电机,位置精度达到磁栅传感器的精度,但成本却远低于磁栅传感器,该面包形永磁体结构的霍尔位置传感器直线电机可应用于工程实践中。

## 1 位置检测原理

### 1.1 线性霍尔的基本原理

基于磁信号的位置检测方法是在直线电机上安装两个线性霍尔传感器,两个传感器输出的磁场信号相差 $90^\circ$ ,得到一组正余弦信号,如图1所示。

这两路正交电压信号可表示为

$$U_{\sin} = U_{\max} \sin \theta \quad (1)$$

$$U_{\cos} = U_{\max} \cos \theta \quad (2)$$

式中: $U_{\max}$ 为霍尔传感器输出的最大值, $U_{\sin}$ 、 $U_{\cos}$ 分别为两路传感器输出磁信号, $\theta$ 为直线电机一对极对应的电角度。

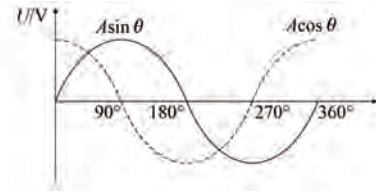


图1 线性霍尔正弦检测信号

两组输出信号经过反正切计算,可以得到:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \quad (3)$$

根据 $\theta$ 值可以反映磁体的位置,再通过细分计算可得到电机动子的位置反馈信号。

### 1.2 位置误差分析

对磁体所在位置角度进行分析,从式(3)中可以看出电机动子位置检测精度取决于两路霍尔信号 $U_{\sin}$ 、 $U_{\cos}$ 的精度。由于霍尔信号存在零点偏置以及非标准正弦等现象,计算出的磁体位置也会存在偏差。

标准的正余弦信号换算成角度信息如图2(a)所示,磁角度对应的 $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ 是圆形轨迹。实际应用中线性霍尔检测的正余弦信号和磁角度信息关系会出现正弦( $U_{\sin}$ )偏差,如图2(b)所示;余弦( $U_{\cos}$ )偏差,如图2(c)所示;放大比例偏差,如图2(d)所示。

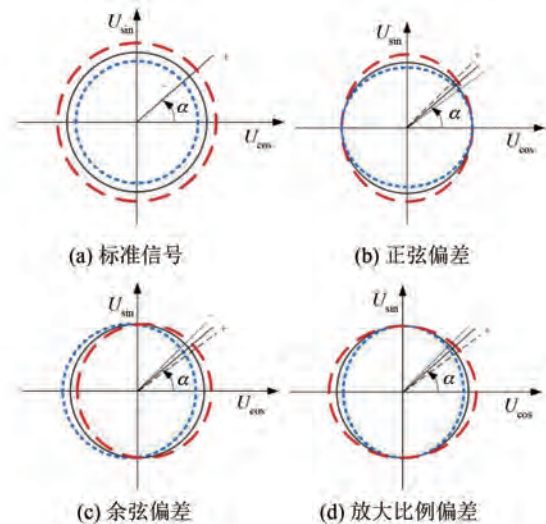


图2 标准位置信号对应角度信息

若磁信号偏差较大,解算得到的磁体位置信息也会有偏差,进而经过驱动器内部的电机电角度计算也会随之带来误差,以此作为位置反馈系统会造成电机速度、位置波动较大。

### 1.3 磁场模型

为快速厘清永磁体不同尺寸下开路磁场随位置的变化关系,首先对永磁体进行磁场解析计算,其永磁体磁场模型示意图如图3所示。对于磁场解析,作如下合理假设:

- (1) 磁场沿  $Z$  轴方向无变化;
- (2) 铁心磁导率为无穷大;
- (3) 退磁磁导率近似等于  $\mu_0$ ;
- (4) 永磁体均匀磁化,其磁化强度  $M$  分布如图4所示。

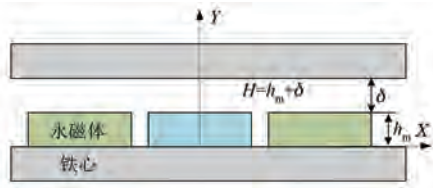


图3 多极永磁体磁场模型示意图

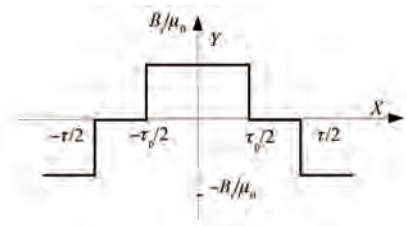


图4 永磁体磁化强度的径向分量

根据以上假设,首先采用傅里叶级数表示永磁体的磁化强度,将磁化强度  $M(x)$  按照傅里叶变换展开各次谐波,如式(4)所示。永磁体的等效磁化电流密度  $J_m(x)$  如式(5)所示。

$$M(x) = \frac{4B_r}{\pi\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi\tau_p}{2\tau} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2\tau} \quad (4)$$

$$B_{1y} = -\frac{\partial A_1}{\partial x} = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi\tau_p}{2\tau} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{\tau} \frac{sh \left[ \frac{(2n-1)\pi h_m}{\tau} \right]}{sh \left[ \frac{(2n-1)\pi H}{\tau} \right]} ch \left[ \frac{(2n-1)\pi}{\tau} (H-y) \right] \quad (11)$$

$$B_{1x} = -\frac{\partial A_1}{\partial y} = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi\tau_p}{2\tau} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{\tau} \frac{sh \left[ \frac{(2n-1)\pi h_m}{\tau} \right]}{sh \left[ \frac{(2n-1)\pi H}{\tau} \right]}$$

$$J_m(x) = \nabla \times M = \frac{4B_r}{\tau\mu_0} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi\tau_p}{2\tau} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{\tau} \quad (5)$$

通过麦克斯韦静磁场方程,得出在空载时永磁体区域的泊松方程和空气区域中的拉普拉斯方程分别为

$$\text{空气区域: } \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{永磁体区域: } \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} = -\mu_0 J_m \quad (7)$$

相应的边界条件如下。

在永磁体区域中:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_2}{\partial y} \Big|_{x=0} = 0 \\ \frac{\partial A_2}{\partial x} \Big|_{x=\tau/2} = 0 \\ \frac{\partial A_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

在气隙磁场区域中:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial y} \Big|_{x=0} = 0 \\ \frac{\partial A_1}{\partial x} \Big|_{x=\tau/2} = 0 \\ \frac{\partial A_1}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

在气隙与永磁体交界面上有:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_1}{\partial y} \Big|_{y=h_m} = \frac{\partial A_2}{\partial y} \Big|_{y=h_m} \\ \frac{\partial A_1}{\partial x} \Big|_{y=h_m} = \frac{\partial A_2}{\partial x} \Big|_{y=h_m} \end{cases} \quad (10)$$

联合以上公式可得:

$$sh \left[ \frac{(2n - 1)\pi}{\tau} (H - y) \right] \tag{12}$$

## 2 永磁体磁场与位置信号分析

为了计算永磁体产生的开路磁场,假设整体求解域气隙远大于永磁体的磁化厚度,采用磁化方向为  $y$  方向的永磁体(假设永磁体相对磁导率为 1)进行计算,永磁体极距为 13 mm。图 5 为采用矩形永磁体距离永磁体表面为 1~5 mm 时的垂直磁场  $B_y$  分布,可以看出,离永磁体表面越远,磁场逐渐从马鞍波向正弦波变化,且幅值逐渐变小。

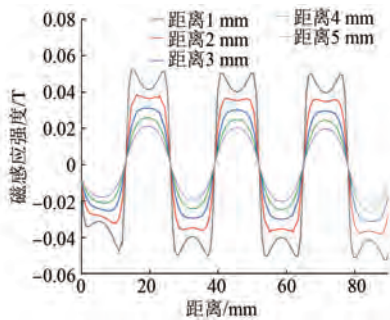


图 5 矩形永磁体垂直磁场  $B_y$  分布

按式(3)解算上述矩形永磁体表表征的位置信息,可以得到如图 6 所示的磁场电角度与位置关系。

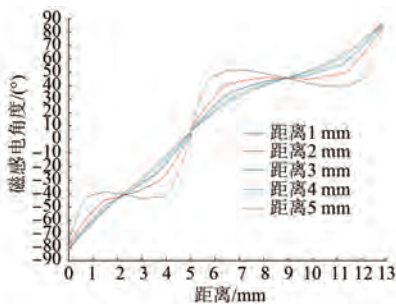


图 6 矩形永磁体位置解算

由图 6 可知,采用矩形永磁体产生的磁场得到的位置信号,随着传感器安装距离的增大,磁场正弦度提高,得到的位置信息线性度也大幅提高,但同时也说明了实际应用中的安装误差对检测精度会带来较大影响。通过非标准的正弦波磁场进行位置检测解算,位置误差较大,因此提出采用面包形的永磁体来提供正弦磁场,如图 7 所示。

在距永磁体底面  $R_{ri} - h_m$  处画一半径为  $R_{ri}$  的

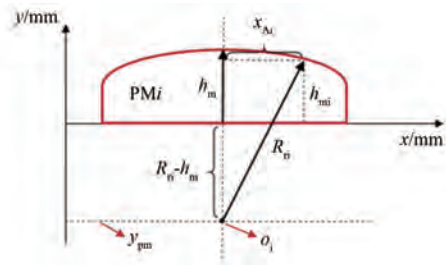


图 7 面包形永磁体示意图

圆弧对永磁体表面进行修形处理,永磁体不同位置的厚度  $h_{mi}$  表达式如下:

$$h_{mi} = \sqrt{R_{ri}^2 - x_{\Delta i}^2} - (R_{ri} - h_m) \tag{13}$$

当  $R_{ri}$  为 10.7 mm 时,距离永磁体表面距离为 1~5 mm 的垂直磁场  $B_y$  分布如图 8 所示。

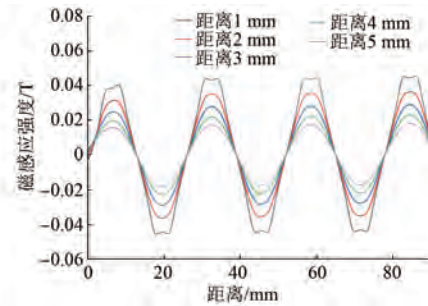


图 8 面包形永磁体切向磁场  $B_y$  分布

按式(3)解算上述面包形永磁体表表征的位置信息,可以得到如图 9 所示的磁场电角度与位置关系。

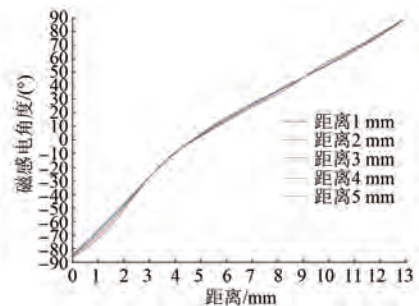


图 9 面包形永磁体位置解算

通过对比图 6 和图 9 可以看出采用面包形永磁体检测的磁场电角度与电机运行位置线性度更高,同时霍尔安装距离对磁场信号影响较小。

通过两种不同形状的磁钢及霍尔安装距离进行分析,得到霍尔检测磁力线与标准正弦信号的

曲线拟合度如表 1 所示。

表 1 不同磁钢形状曲线拟合度

磁钢形状	安装距离/mm	曲线拟合度
方形磁钢	1	0.76
	2	0.89
	3	0.93
	4	0.95
	5	0.96
面包形磁钢	1	0.96
	2	0.97
	3	0.97
	4	0.97
	5	0.97

曲线拟合度衡量的是回归方程整体的拟合度,是表达因变量与所有自变量之间的总体关系,值越接近 1 说明回归直线对观测值的拟合程度越好。

上述结果表明了:(1) 经过设计的面包形磁钢曲线拟合度在 1~5 mm 距离内均达到 96% 以上,较常规矩形磁钢明显提高;(2) 面包形磁钢同霍尔安装距离磁场检测信号线性度误差在 1%,而矩形磁钢的线性度误差高达 20%,面包形磁钢降低了对安装误差的敏感度。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验平台

基于 CPLD 的传感信号处理系统如图 10 所示,相位相差 90° 的两路霍尔信号通过传感信号处理电路和高速模数转换电路转换成两路数字量信号,利用高云 GW1N-9 系列 CPLD 对传感信号进行细分,得到用于测试位置的增量信号及速度信号。电机位置\速度信号反馈到电机驱动器用于控制电机运行。

#### 3.2 电机速度波动测试

直线电机测试平台如图 11 所示,在动子的侧盖上安装面包形磁钢。传感信号处理电路、霍尔电路及面包形磁钢如图 12 所示。

根据电机壳体内部安装限制,线性霍尔安装距离磁钢 1.5 mm。当电机运行时,霍尔检测矩形磁钢磁场信号,在模拟量编码器接口实时采集传感信号,通过 CPLD 对传感信号进行细分,转换成

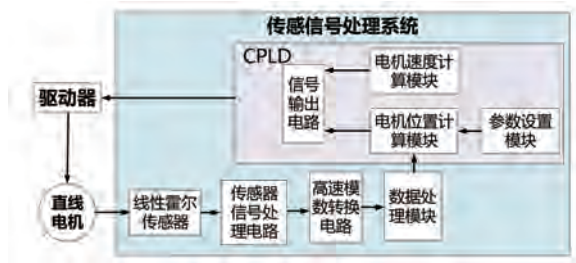


图 10 基于 CPLD 的传感信号处理系统



图 11 直线电机

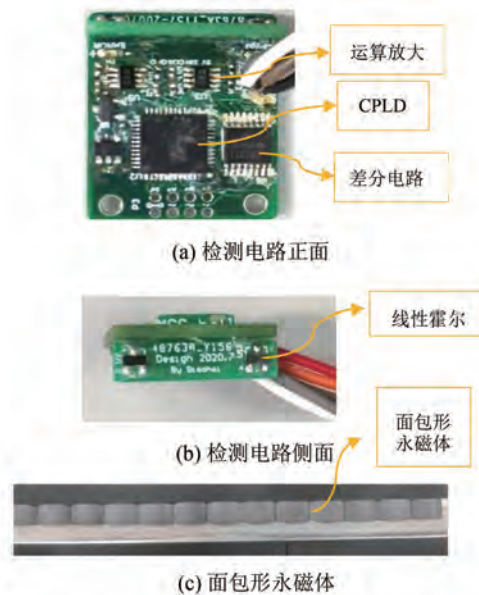


图 12 霍尔传感系统实物

电机位置信号,再由驱动器解算成电机动子位置信息。电机位置闭环控制,位置和速度反馈图如图 13 所示。

由图 13 可知直线电机在运行周期中进行往复运动,运行最大速度设置 100 mm/s,但驱动器检测到电机实际速度波动超过 50%。

采用面包形磁钢后,电机闭环控制时,位置和速度反馈图如图 14 所示。电机正向运行最大速度设定为 240 mm/s,反向运行最大速度设定为 270 mm/s,检测到的直线电机实际速度波动小于

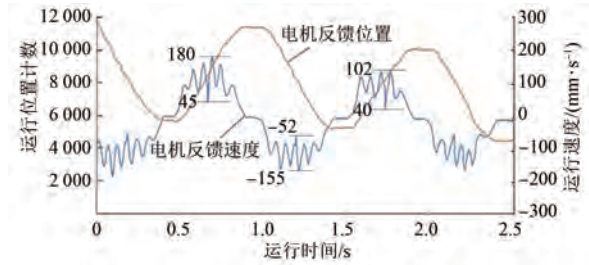


图 13 矩形磁钢的位置反馈运行位置及运行速度

5%,与矩形磁钢相比速度波动大幅减小。电机速度波动对比结果如表 2 所示。

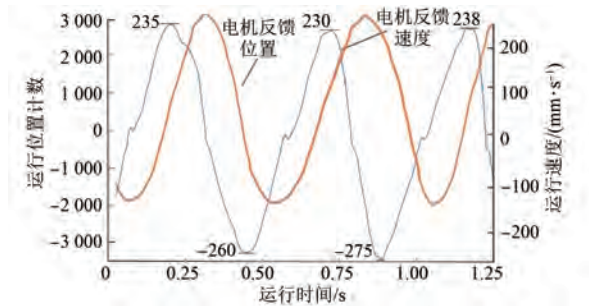


图 14 面包形磁钢的位置反馈运行位置及运行速度

表 2 速度波动对比

磁体类型	速度波动
矩形磁钢	≥50%
面包形磁钢	≤5%

### 3.3 重复精度验证

通过激光干涉仪测试,电机反馈装置采用线性霍尔检测面包形磁钢,电机重复精度为 1.54 μm,如图 15 所示,能够达到与磁栅传感器相当的定位精度。

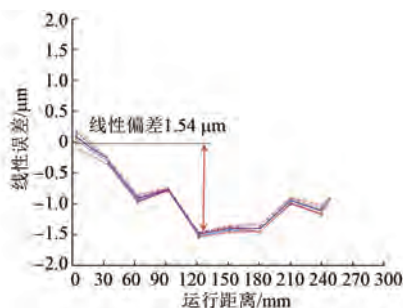


图 15 电机重复位置精度

## 4 结 语

针对传统直线电机位置检测采用的光栅、磁栅、容栅等传感器存在的对安装精度要求高、成本高及装配可靠性低的问题,提出一种采用面包形永磁体结构的霍尔位置检测传感器,实现近似正弦的传感信号,在降低成本的同时能够实现与磁栅传感器相当的位置检测精度。试验结果表明,采用霍尔传感器感应所设计的面包形永磁体实现直线电机位置检测的方法可实现直线电机速度波动在 5% 以内,重复精度达到 1.54 μm,相比矩形磁钢,电机控制性能和可靠性有大幅度提升。

### 【参考文献】

[ 1 ] ZHU Z Q, HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review [ J ]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148 ( 4 ): 299.

[ 2 ] 严乐阳,叶佩青,张勇,等. 圆筒型永磁直线同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿[J]. 电工技术学报,2017,32(5):26.

[ 3 ] 于非,赵继敏,罗响. 磁编码器算法分析与研究 [ J ]. 微特电机,2011,39( 10 ):20.

[ 4 ] 董万健,张德志,王冬. 永磁同步电机线性霍尔编码器角度处理方法 [ J ]. 微电机,2023,56( 1 ):86.

[ 5 ] 龙遐令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法 [ M ]. 北京:科学出版社,2006.

[ 6 ] 李勇,胡建辉,陈影. 用于线性 Hall 检测的正弦化气隙磁场优化设计 [ J ]. 微电机,2011,44( 9 ):1.

[ 7 ] 王晓琳,刘思豪,顾聪. 基于线性霍尔误差补偿的高速永磁同步电机转子位置检测技术 [ J ]. 电机与控制学报,2021,25( 7 ):11.

[ 8 ] 朱孟美,张云,解兆延,等. 基于霍尔位置传感器的电动汽车用永磁同步电机的控制 [ J ]. 电机与控制应用,2016,43( 11 ):23.

[ 9 ] 胡冰,陈茂胜,孔令波,等. 应用线性霍尔的小卫星飞轮高精度速度测量算法 [ J ]. 测试技术学报,2022,36( 6 ):513.