

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.011

永磁同步直线电机低成本霍尔位置检测装置研究

赵子昂, 张团善, 金家升, 华建兵

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710613)

摘要:为低成本检测永磁直线同步电机转子位置,课题组提出一种新型霍尔传感器检测装置。该装置由一个附加的辅助磁钢和霍尔传感器组成;通过霍尔元件检测电机转子磁场,利用磁场信息计算转子位置;分析霍尔元件检测过程中可能的误差影响,并使用JMAG进行有限元分析,依据分析结果选择最佳安装位置。结果表明:通过分析计算相邻传感器的检测结果可以检测电机转子位置。该装置可以满足低成本检测电机转子位置的需求。

关键词:永磁同步直线电机;霍尔传感器;位置检测;JMAG软件

中图分类号:TM351;TH122

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)05-0079-04

Low-Cost Hall Position Detection Device for Permanent Magnet Synchronous Linear Motor

ZHAO Ziang, ZHANG Tuanshan, JIN Jiasheng, HUA Jianbing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710613, China)

Abstract: In order to detect the rotor position of permanent magnet synchronous linear motor at low cost, a new Hall sensor detection device was proposed. The device was composed of an additional auxiliary magnetic steel and a Hall sensor; The rotor magnetic field of the motor was detected by the Hall element, and the rotor position was calculated using the magnetic field information; The possible error influence in the process of Hall element detection was analyzed, and JMAG was used to conduct finite element analysis. The best installation position was selected according to the analysis results. The results show that the position of the motor can be detected by analyzing and calculating the detection results of the adjacent sensors. The device can meet the need of low-cost detection of the rotor position of the motor.

Keywords: PMSLM (Permanent Magnet Synchronous Linear Motor); Hall sensor; position detection; JMAG

近年来,永磁同步直线电机 PMSLM 发展迅速,其应用领域已不再局限于高端设备。与传统的旋转电机相比,永磁同步直线电机的优势在于减少了中间传动机构,因此具有反应快、加速度大和控制精度高等优点^[1]。转子的位置检测是永磁同步直线电机伺服控制的关键技术之一,并且对推力控制和定位精度至关重要。在很多位置检测的应用中,光栅是最常用的位置传感器^[2]。光栅具有精度高、分辨率高和响应快等优点,但也存在成本高、体积大等缺点。此外,光栅还需要辅助导轨,限制了其应用的范围。而在位置控制

精度较高的场合,拉杆式位移传感器和线性可变差动变压器等附加直线位移传感器也被广泛应用,但是该类传感器也存在造价高的问题^[3]。

一些研究人员还采用了无传感器方法,即利用电压和电流信息,然后根据电机的模型估计转子位置。Cupertino 等^[4-5]提出通过在控制电压上叠加一个高频正弦电压信号,随后通过跟踪高频 q 轴电流分量的零条件来获得位置估计的方法;还提出通过检测高频电流来进行位置检测的方法,并使用 PI 控制器和谐振器相结合的方法来保证 d 轴电流的准确跟踪,使其精度

收稿日期:2023-02-02;修回日期:2023-06-02

基金项目:国家自然科学基金(51735010);西安现代智能纺织设备重点实验室(2019220614SYS021CG043)。

第一作者简介:赵子昂(1999),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为电机控制。E-mail:512381852@qq.com

比基于电压注入的方法高,灵敏度也大幅提高。以上 2 种方法虽然经过改进都可以实现位置的精确检测,但都存在过度依赖电机参数、计算量大和控制较为复杂等缺点。相比之下,通过线性霍尔元件检测电机动子位置的方法则具有结构简单、成本低等优点。张春雷等^[6]通过建立直线电机位置识别精度和电机推力解析模型,并用神经网络对其进行优化,从而提升传感器的位置检测精度。李炳燃等^[7]提出使用模糊-神经模型来实现对霍尔传感器的标定,并提出使用三轴霍尔代替线性霍尔元件来实现位置检测。课题组提出了一种小型霍尔检测装置,不仅具有成本低的优点,同时装置小巧、安装灵活且使用便捷。

1 霍尔传感器检测原理

当霍尔传感器受到外部磁场的作用时,其内部的电荷会发生偏转,进而形成一定的电势差,此时霍尔元件会产生一定的电压(霍尔电压),在一定的磁感强度范围内霍尔传感器的输出电压和检测处的磁感强度呈线性关系。为了检测直线电机动子位置,通常会把两个霍尔传感器按 90° 的相位差安装,随后通过反正切

函数计算出动子位置^[8]。霍尔元件工作电路如图 1 所示。

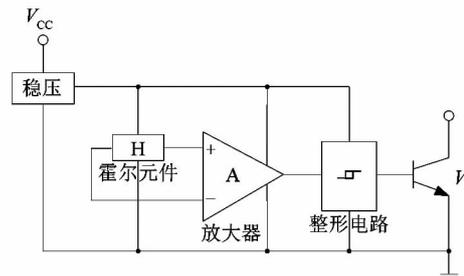


图 1 霍尔元件工作电路图

Figure 1 Working circuit diagram of Hall element

课题组所提出的霍尔元件及其检测装置安装位置如图 2 和 3 所示。7 块检测装置磁钢沿 y 轴方向进行充磁,并按照图中所示的排列方式进行安装。磁钢的下表面固定在导轨上,只有上表面对霍尔元件产生影响磁场,其材质为永磁材料 NdFeB。检测装置可以固定在电机动子的上方或两侧,课题组选择固定在电机动子的正上方,霍尔元件也同样安装在电机动子的上方位置。

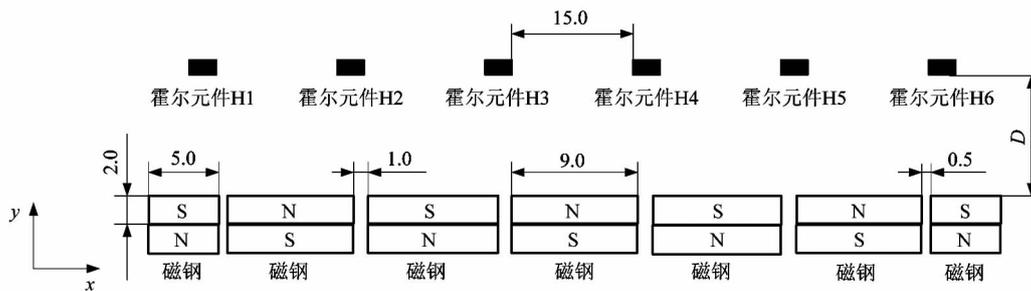


图 2 霍尔元件安装位置

Figure 2 Installation position of Hall Element

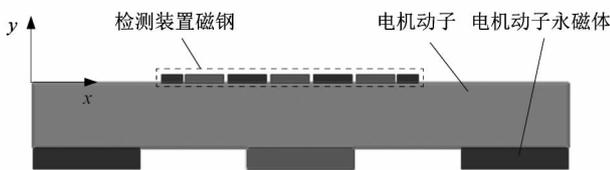


图 3 检测装置安装位置

Figure 3 Installation position of detection device

D 为霍尔元件到磁钢上表面的距离, D 的取值对霍尔元件的检测准确性至关重要。合适大小的 D 会使霍尔元件获得更好的信号质量,从而获得更加准确

的位置检测结果。因而需要对模型进行有限元分析,以获得最佳的位置信息。

2 霍尔元件安装位置

相邻的 2 个霍尔元件通过所检测到的磁感应强度来计算电角度,通过电角度进一步计算位移量。霍尔元件所处位置的电角度为:

$$\theta_0 = \arctan (B_1/B_2); \tag{1}$$

$$s = \left(\frac{\theta_0 + 180^\circ}{360^\circ} + 2n \right) \times \tau. \tag{2}$$

式中: θ_0 为电角度, B_1 为第 1 个霍尔元件处的磁感应

强度, B_2 为第 2 个霍尔元件处的磁感应强度, s 为相对位置, τ 为极距, n 为周期数。

文献[9]中提出导致检测精度降低的原因有环境温度的变化,磁钢充磁不均匀以及差分电路存在零点漂移等。同时由式(1)可知电机定子位置误差是由于霍尔元件所检测到的磁感应强度误差所导致的。霍尔元件所检测到的磁感应强度误差主要有 2 个方面:一是由于安装霍尔元件时位置不精确导致其不在同一水平面上,因而导致的安装误差;二是由于磁场的畸变和不稳定性所导致的误差。而磁场的畸变和不稳定性可能的原因为直线电机存在的端部效应以及安装在离辅助磁钢表面不同距离的磁场稳定性不同。为了降低磁场的畸变所造成的误差,霍尔元件安装位置的选择就极为重要,要选取稳定的正弦气隙磁场才能使检测结果更加准确。

利用 JMAG 软件对辅助磁钢进行有限元仿真分析,磁场仿真模型如图 4 所示。模型下方为辅助磁钢,上方的空气层是霍尔元件的安装位置,霍尔元件通过此处磁场的变化计算出相对位移。进一步对模型进行材料分配、网格划分和边界条件设置等,磁场分析结果如图 5 所示。

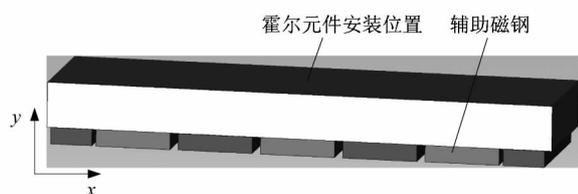


图 4 磁场仿真模型

Figure 4 Magnetic field simulation model

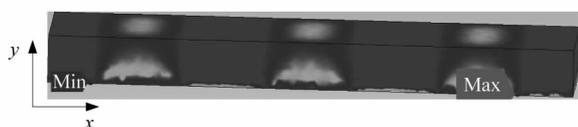


图 5 空气层磁感应强度云图

Figure 5 Cloud chart of magnetic induction intensity of air layer

通过磁感应强度云图可以看出磁场的正弦分布情况。进一步对结果进行处理分析,使用 JMAG 软件的设置参数的功能,在 y 轴方向距离磁钢表面 $0.0 \sim 5.0$

mm 的范围内每隔 0.5 mm 取一个参考线并绘制其磁感应强度曲线。位移方向为 x 轴方向,因此只需考虑磁感应强度在 y 方向的分量^[10]。对这些曲线以距离磁钢表面的距离进行命名并比较,其结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出距离磁钢表面越近磁场变形越严重,距离磁钢表面越远磁场越稳定同时磁场越弱。图 6 中距离磁钢表面为 4.0 mm 时曲线正弦性最好,即其磁场的畸变和不稳定性所导致的误差较小,故选定霍尔元件安装距离 D 为 4.0 mm 。

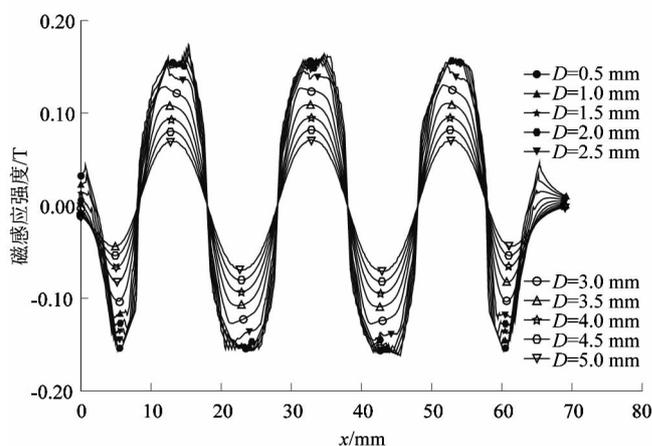


图 6 霍尔元件不同间距处磁场分布曲线

Figure 6 Magnetic field distribution curve at different spacing of Hall elements

3 实验结果

根据图 2 霍尔元件安装位置并按照间距 D 为 4.0 mm 进行仿真实验,实验模拟辅助磁钢在电机定子上运行时霍尔元件所检测到的磁场变化,结果如图 7 所示。图中 H1—H6 为霍尔元件编号。

将图 7 中 H1 和 H2, H2 和 H3 霍尔元件所测量的磁感应强度值代入式(1),计算得出其电角度结果如图 8 所示。

把电角度带入式(2)即可计算出电机定子的位置。实验结果表明此装置可以准确获得永磁同步直线电机定子位置信息。

4 结语

课题组设计了一种直线电机小型霍尔位移检测装置,通过有限元仿真分析,选择了霍尔元件的安装位置;通过对霍尔元件处的磁场变化进行分析计算得出

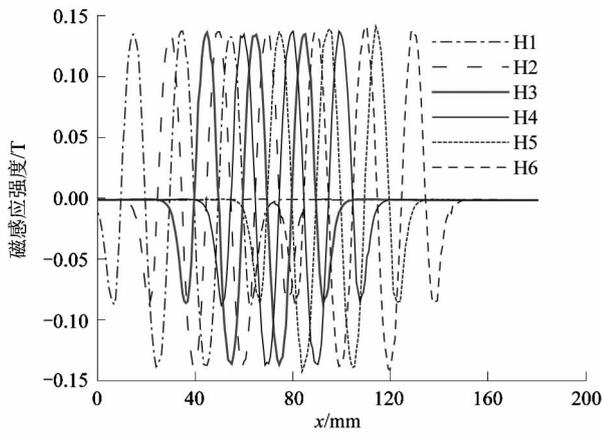


图7 霍尔元件磁感应强度变化
Figure 7 Magnetic induction intensity change of Hall element

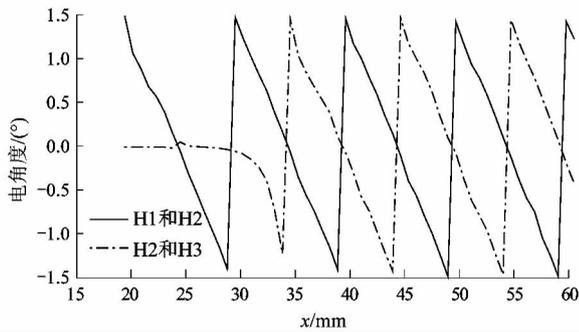


图8 相邻传感器的测量结果
Figure 8 Measurement results of adjacent sensors

电机的位移量。与光栅及拉杆式位移传感器相比此装置成本低、简单方便、应用灵活,适用于永磁同步直线

电机的系统中。但其不适用于精度要求较高的场所,之后需对装置进行进一步优化,使其满足高精度场合的使用要求。

参考文献:

[1] 王会永,周保华,李向男,等. 直线电机的应用现状及发展趋势研究[J]. 微电机,2016,49(9):86-89.

[2] YANL Y,ZHANG H,YEP Q. Mover position detection for PMTLM based on linear Hall sensors through EKF processing[J]. Sensors, 2017,17(4):782.

[3] 牛宇杰. 基于线性霍尔的永磁同步直线电机位置检测及控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020:1-2.

[4] CUPERTINO F, GIANGRANDE P, PELLEGRINO G, et al. End effects in linear tubular motors and compensated position sensorless control based on pulsating voltage injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,58(2):494-502.

[5] CUPERTINO F, PELLEGRINO G, GIANGRANDE P, et al. Sensorless position control of permanent-magnet motors with pulsating current injection and compensation of motor end effects [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2011,47(3):1371-1379.

[6] 张春雷,张辉,叶佩青. 高霍尔位置检测精度的圆筒型永磁同步直线电机设计[J]. 电工技术学报,2022,37(10):2481-2490.

[7] 李炳燃,张辉,叶佩青. 永磁同步直线电机霍尔位置检测传感器的优化[J]. 中国机械工程,2017,28(24):2913-2918.

[8] 刘晓,叶云岳,郑灼,等. 一种低成本的线性霍尔位置检测方法研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(7):1204-1207.

[9] 刘刚,肖焯然,宋欣达. 永磁同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿[J]. 电机与控制学报,2014,18(8):36-42.

[10] 王修文. 磁栅位移传感器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:10-25.