

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.211

引用格式:程晓东,罗辞勇,周晟,等.线性霍尔传感器应用于外转子永磁同步电机转子位置检测[J].重庆大学学报,2026,49(5):1-13.



线性霍尔传感器应用于外转子永磁同步电机转子位置检测

程晓东,罗辞勇,周晟,赵骏峰,罗子涵

(重庆大学输变电装备技术全国重点实验室,重庆 400044)

摘要:传统的转子位置检测方案是将霍尔传感器安装在电机定子上或底部,通过检测气隙磁场或永磁体漏磁来计算转子位置,但电枢反应对位置检测精度影响显著。文章提出将霍尔传感器安装在外转子永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)外的印刷电路板(printed circuit boards, PCB)上,电机的永磁体略高于转子磁轭,通过检测永磁体磁场获取转子位置,电机外的永磁体磁场几乎不受电枢反应的影响。理论与实验分析发现,霍尔传感器以 90° 的间隔安装在PCB上时,输出的两路霍尔信号基波相位非正交,导致转子位置出现误差。分析表明:当2个霍尔传感器以 $90^\circ \cdot P_r / (P_r + 1)$ 的间隔安装在PCB上时,基波相位相正交。最后,基于ANSYS Maxwell有限元仿真与电机实物实验,验证了理论分析的正确性及该位置检测方案的可行性。

关键词:线性霍尔传感器;永磁同步电机;印刷电路板;转子位置检测

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)05-001-13

Linear Hall sensors for rotor position detection in external rotor permanent magnet synchronous motors

CHENG Xiaodong, LUO Ciyong, ZHOU Sheng, ZHAO Junfeng, LUO Zihan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Traditional rotor position detection schemes typically mount Hall sensors on the stator or motor base to measure the air-gap magnetic field or permanent magnet leakage. However, armature reaction significantly influences detection accuracy. This study proposes mounting Hall sensors on printed circuit boards (PCBs) external to the rotor of an external rotor permanent magnet synchronous motor (PMSM). With the permanent magnet slightly extending beyond the rotor yoke, rotor position is determined by detecting the magnet's field, which is minimally influenced by armature reaction. Theoretical and experimental analyses reveal that when two Hall sensors are placed at a 90° interval on the PCB, the fundamental phases of their signals are not orthogonal, resulting in position errors. To resolve this, it is shown that orthogonal fundamental phases are achieved when the

收稿日期:2023-11-17 网络出版日期:2024-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607017)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51607017).

作者简介:程晓东(1998—),男,硕士研究生,主要从事电机驱动控制,(E-mail) chengxiaodong1115@163.com。

通信作者:罗辞勇,男,副教授,硕士生导师,主要从事直线电机设计和功率变换器控制,(E-mail) luociyong@cqu.edu.cn。

sensors are spaced at an interval of $90^\circ \cdot P_r / (P_r + 1)$. The theoretical predictions are validated through ANSYS Maxwell finite element simulations and physical motor experiments, confirming the feasibility of the proposed position detection scheme.

Keywords: linear Hall sensor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); printed circuit boards (PCB); rotor position detection

矢量控制是永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)常用的控制方式^[1-4],而转子位置的精确性直接决定了控制系统的性能^[5]。转子位置检测可分为有位置传感器和无位置传感器2种方法。传统的位置传感器包括光电编码器^[6]、旋转变压器^[7-8]和霍尔传感器^[9-11]。其中光电编码器和旋转变压器具有很高的精度,但其高成本、大体积及与电机的机械耦合限制了它们的适用性。而无位置传感器控制算法的复杂性导致控制系统的实时性降低,并且难以在低速域下启动^[12-15]。相比之下,利用线性霍尔传感器的位置检测方法具有体积小、成本低、位置采集简单等优点。

Jung等^[16]和Wang等^[17]对嵌入式霍尔传感器进行了广泛的分析和研究,线性霍尔传感器安装于PMSM的底部,通过检测永磁体的漏磁来确定转子位置。然而,大多数PMSM永磁体都是径向磁化的,这导致漏磁与径向磁场相比存在偏差。

Kim等^[18]和Song等^[19]将霍尔传感器安装在定子上,通过检测气隙磁场来确定转子位置。由于霍尔传感器需要以 90° 或 120° 的间隔安装,因此不可避免地要在定子铁芯上开槽,Wang等^[20]提出将霍尔传感器安装在定子绕组槽上。但是这些安装方法也有相应的缺点,首先,电枢反应会扭曲气隙磁场;其次,由于霍尔传感器安装在电枢绕组上方,安装和布线具有挑战性,这给工业生产带来了困难。

文中建议在外转子永磁同步电机(external rotor permanent magnet synchronous motor, EPMSM)外部的PCB上安装霍尔传感器,其结构如图1所示。电机的永磁体略高于转子磁轭,因此外部安装的霍尔传感器可以检测到永磁体的磁场。就信号质量而言,外部磁场几乎不受电枢反应的影响。霍尔传感器安装在PCB上,便于制造和放置,定位精度高。此外,由于霍尔传感器位于电机外部,其安装和维修都很方便。

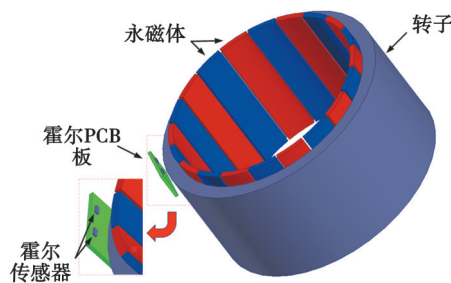


图1 霍尔传感器安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hall sensors installation

这种安装方式存在问题:当2个霍尔传感器按 90° 间隔安装在PCB上时,两路霍尔信号之间的基波相位差并非 90° ,从而导致位置信号存在2倍基频误差。文中旨在分析并解决这一问题,从而提高转子位置检测的准确性。

1 霍尔误差分析

根据霍尔效应原理,线性霍尔传感器的输出电压信号与磁场的磁通密度成正比。对于PMSM,永磁体会产生正弦径向磁场,该磁场随着转子的转动而变化。因此,需要将霍尔传感器正对转子中心安装,以检测永磁体径向磁场。 P_r 为电机极对数,图2是 $P_r=1$ 和 $P_r=10$ 时霍尔传感器的位置图。

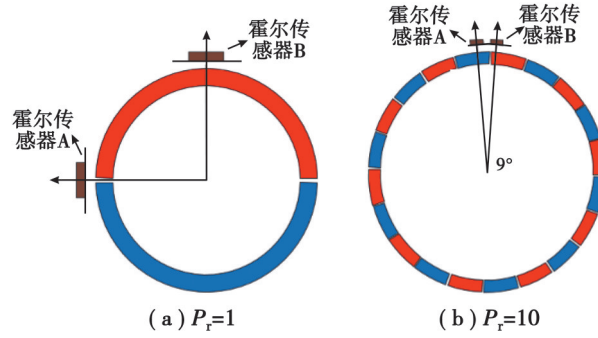


图2 霍尔传感器位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Hall sensor position

如图2所示,2个霍尔传感器之间的空间间隔为 90° 。理想情况下,霍尔传感器的输出电压信号分别对应转子位置的正弦值和余弦值,如式(1)所示。相应的霍尔电压信号如图3所示。

$$\begin{cases} u_a = u_1 \sin \theta, \\ u_b = u_1 \cos \theta, \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_1 为磁通密度振幅; θ 为实际转子位置角, θ 的范围为 $0 \sim 2\pi$ 。

通过对线性霍尔传感器的输出电压信号进行如式(2)所示的反正切运算^[21],可以确定转子的位置。相应的理想转子位置如图3所示。

$$\begin{cases} \theta = \arctan(u_a/u_b), & u_a \geq 0, u_b \geq 0; \\ \theta = \arctan(u_a/u_b) + \pi, & u_a < 0; \\ \theta = \arctan(u_a/u_b) + 2\pi, & u_a < 0, u_b \geq 0. \end{cases} \quad (2)$$

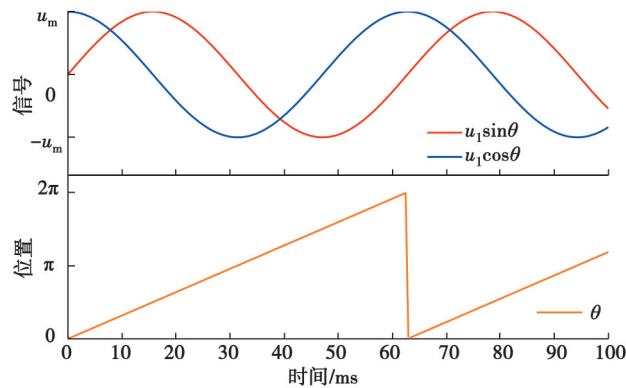


图3 理想的霍尔信号和转子位置

Fig. 3 Ideal Hall signal and rotor position

1.1 受基波相位非正交影响

霍尔传感器的安装很难确保2个霍尔传感器的间隔正好为 90° ^[22]。这会导致霍尔信号的基波相位非正交。这种情况下的霍尔信号可以表示为

$$\begin{cases} u_a = u_1 \sin \theta, \\ u_b = u_1 \cos(\theta + \beta). \end{cases} \quad (3)$$

其中, $90^\circ + \beta$ 为2个霍尔信号之间的相位差。对这2个信号进行反正切处理,就可以得到相应的位置。

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{u_1 \sin \theta}{u_1 \cos(\theta + \beta)}\right) \approx \arctan\left(\frac{\sin(\theta + \beta(1 - \cos 2\theta)/2)}{\cos(\theta + \beta(1 - \cos 2\theta)/2)}\right) = \theta + \beta(1 - \cos 2\theta)/2. \quad (4)$$

由式(4)可知,位置误差可表示为

$$\Delta\theta \approx \beta(1 - \cos 2\theta)/2. \quad (5)$$

从上述分析可以看出,2个霍尔信号的基波相位非正交会导致计算出的转子位置存在直流误差和2倍基频误差。相应的波形如图4(a)所示。

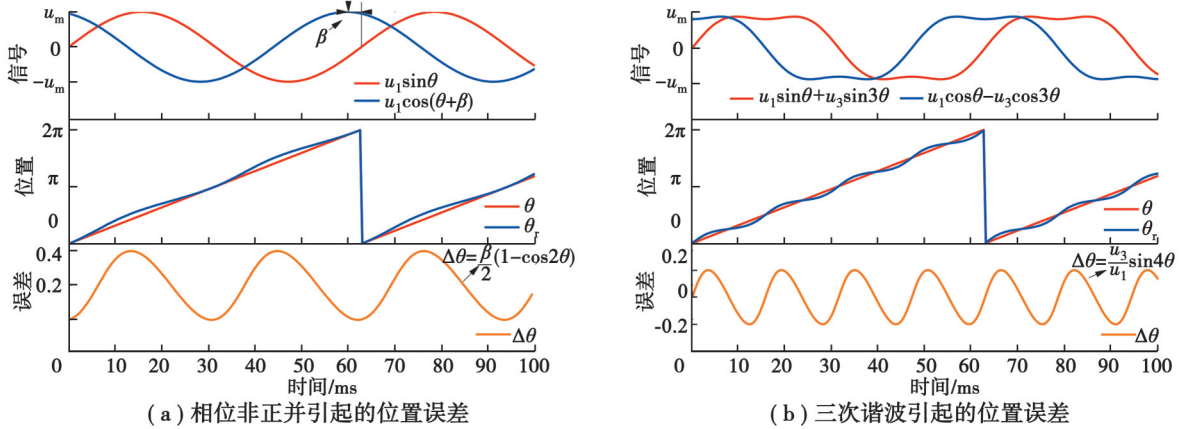


图4 霍尔信号中存在的误差

Fig. 4 Error in the Hall signal

1.2 受三次谐波影响

由于永磁体的饱和现象,永磁体产生的磁场存在谐波磁场,其中主要成分是三次谐波^[9]。只考虑三次谐波的情况下,霍尔信号可表示为

$$\begin{cases} u_a = u_1 \sin \theta + u_3 \sin 3\theta, \\ u_b = u_1 \cos \theta - u_3 \cos 3\theta, \end{cases} \quad (6)$$

式中, u_3 为三次谐波的振幅。如果对这2个信号进行反正切处理,就可以得到相应的位置信号。

$$\theta_r = \arctan \left(\frac{u_1 \sin \theta + u_3 \sin 3\theta}{u_1 \cos \theta - u_3 \cos 3\theta} \right) \approx \arctan \left(\frac{\sin \left(\theta + \frac{u_3}{u_1} \sin 4\theta \right)}{\cos \left(\theta + \frac{u_3}{u_1} \sin 4\theta \right)} \right) = \theta + \frac{u_3}{u_1} \sin 4\theta. \quad (7)$$

如式(7)所示,计算出的转子位置存在4倍频率误差。

$$\Delta\theta \approx \frac{u_3}{u_1} \sin 4\theta. \quad (8)$$

相应的波形如图4(b)所示。

此外,由于制造原因,永磁体的安装存在左右不对称的现象,这使霍尔信号中存在二次谐波。由于永磁体不对称现象是不规则的,因此进行统一分析具有挑战性。

2 PCB安装时转子位置检测分析

如图2(b)所示,当2个霍尔传感器安装在同一块PCB上时,这种安装方式会导致霍尔传感器与永磁体的径向磁场之间存在角度差,从而严重影响转子位置检测。

根据霍尔效应原理,霍尔传感器的输出信号与垂直于霍尔平面方向的磁通密度成正比。如图5所示,垂直于霍尔所在平面的方向称为y轴方向,2个霍尔传感器对称安装在y轴两侧,霍尔传感器测量y轴方向的磁场。该坐标系与电机的实际角度无关,是为了便于后续计算而建立的。

在不考虑三次谐波的情况下,永磁体径向磁场的磁通密度随电机转动呈正弦波动。当2个霍尔传感器以 90° 的间隔安装,2个霍尔传感器中心的径向磁场可表示为

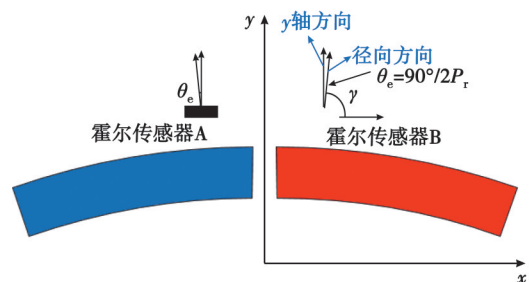


图5 霍尔安装和分析坐标系

Fig. 5 Hall installation and analysis coordinate system

$$\begin{cases} B_{RA} = B_1 \sin \theta, \\ B_{RB} = B_1 \cos \theta, \end{cases} \quad (9)$$

式中: B_{RA} 、 B_{RB} 是霍尔传感器A(HallA)与霍尔传感器B(HallB)对应的径向磁通密度; B_1 为磁通密度幅值; θ 为实际转子位置角。

径向磁场可通过 x 轴磁场与 y 轴磁场合成获得,可表示为

$$B_R = B_x \cdot \cos \gamma + B_y \cdot \sin \gamma, \quad (10)$$

式中: B_R 为径向磁通密度; B_x 和 B_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的磁通密度; γ 为径向磁场与 x 轴的夹角, $\gamma = 90^\circ \pm 90^\circ / (2P_r)$,设 $\theta_c = 90^\circ / (2P_r)$ 。与2个霍尔传感器位置相对应的径向磁通密度可表示为

$$\begin{cases} B_{RA} = B_{xA} \cdot \cos(90^\circ + \theta_c) + B_{yA} \cdot \sin(90^\circ + \theta_c) \\ \quad \approx -\sin \theta_c \cdot B_{xA} + B_{yA}, \\ B_{RB} = B_{xB} \cdot \cos(90^\circ - \theta_c) + B_{yB} \cdot \sin(90^\circ - \theta_c) \\ \quad \approx \sin \theta_c \cdot B_{xB} + B_{yB}, \end{cases} \quad (11)$$

式中: B_{xA} 、 B_{yA} 分别为HallA对应的径向磁通密度及 x 轴和 y 轴的磁通密度; B_{xB} 、 B_{yB} 分别为HallB对应的径向磁通密度及 x 轴和 y 轴的磁通密度。当 $\theta_c < 7^\circ$ 时, $\sin(90^\circ \pm \theta_c) \geq 0.9925 \approx 1$ 。

以HallB为例,在不考虑三次谐波的情况下,将式(9)代入式(11)。

$$B_{RB} = B_1 \cos(\theta) \approx \sin \theta_c B_{xB} + B_{yB} \circ \quad (12)$$

HallB所在位置的径向磁场及 x 轴和 y 轴的磁场如图6(a)所示。

如图5(b)所示,当 θ_c 接近0时,可以看出 $B_{xB} \approx B_1 \cos(\theta - 90^\circ)$ 。同时,由于 $\sin \theta_c$ 接近0, $\sin \theta_c B_{xB}$ 和 $\sin \theta_c B_1 \sin \theta$ 的值很小且相互接近,因此认为它们相似。二者的替换对最终值影响不大,也便于后面的计算。

将 $\sin \theta_c \cdot B_{xB} \approx \sin \theta_c \cdot B_1 \sin \theta$ 代入式(12),可以得到

$$\begin{aligned} B_{yB} &\approx B_1 \cos \theta - \sin \theta_c B_{xB} \\ &\approx B_1 \cos \theta \cdot \cos \theta_c - \sin \theta_c \cdot B_1 \sin \theta \\ &= B_1 \cos(\theta + \theta_c). \end{aligned} \quad (13)$$

同样,也可以计算HallA的 y 轴方向的磁通密度,但不同之处在于 $\sin \theta_c \cdot B_{xA}$ 近似为 $-\sin \theta_c \cdot B_1 \cos \theta$ 。因此,HallA的 y 轴方向上的磁通密度可以表示为

$$\begin{aligned} B_{yA} &\approx B_1 \sin \theta + \sin \theta_c B_{xA} \\ &\approx B_1 \sin \theta \cdot \cos \theta_c - \sin \theta_c \cdot B_1 \cos(\theta) \\ &= B_1 \sin(\theta - \theta_c). \end{aligned} \quad (14)$$

总之,霍尔传感器输出的霍尔信号可以表示为

$$\begin{cases} B_{yA} = B_1 \sin(\theta - \theta_c), \\ B_{yB} = B_1 \cos(\theta + \theta_c). \end{cases} \quad (15)$$

因此,当2个霍尔传感器以 90° 间隔安装在PCB上时,两路霍尔信号之间的基波相位差约为 $90^\circ + 2\theta_c$,这会导致位置信号出现2倍基波频率的误差。

如果试图使2个霍尔信号之间的基波相位差为 90° ,就必须将2个霍尔传感器以 φ 间隔安装,此时的径向磁通密度可表示为

$$\begin{cases} B_{RA} = B_1 \sin(\theta), \\ B_{RB} = B_1 \cos(\theta - 90^\circ + \varphi). \end{cases} \quad (16)$$

径向磁通密度仍可表示为式(11),不同之处在于此时 $\theta_c = \varphi / (2P_r)$ 。HallB处的径向和轴向磁通密度如图6(b)所示。

同理可得,当 θ_c 接近0时,可视为 $B_{xB} \approx B_1 \cos(\theta - 180^\circ - \varphi)$ 。另外,由于 $\sin \theta_c$ 接近0, $\sin \theta_c \cdot B_{xB}$ 和 $\sin \theta_c \cdot B_1 \sin \theta$ 的值很小且相互接近,因此认为 $\sin \theta_c \cdot B_{xB}$ 近似 $\sin \theta_c \cdot B_1 \sin(\theta - 90^\circ + \varphi)$ 。

将 $\sin \theta_c \cdot B_{xB} \approx \sin \theta_c \cdot B_1 \sin(\theta - 90^\circ + \varphi)$ 代入式(14),为

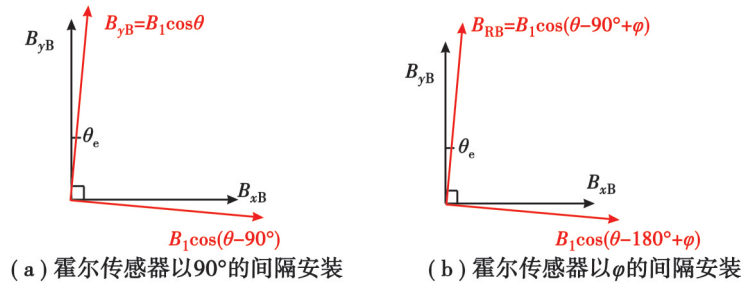


图6 径向磁场与x、y轴方向磁场

Fig. 6 Radial magnetic field and x-axis and y-axis magnetic field

$$\begin{aligned}
 B_{yB} &\approx u_1 \cos(\theta - 90^\circ + \varphi) - \sin\theta_c B_{xB} \\
 &\approx u_1 \cos(\theta - 90^\circ + \varphi) \cdot \cos(\theta_c) - \sin(\theta_c) \cdot u_1 \sin(\theta - 90^\circ + \varphi) \\
 &= u_1 \cos(\theta - 90^\circ + \varphi + \theta_c) \\
 &= u_1 \sin(\theta + \varphi + \theta_c)
 \end{aligned} \quad (17)$$

同样, HallA的y轴方向的磁通密度表示为

$$\begin{aligned}
 B_{yA} &\approx u_1 \sin(\theta) + \sin\theta_c B_{xA} \\
 &\approx u_1 \sin(\theta) \cdot \cos\theta_c - \sin\theta_c \cdot u_1 \cos(\theta) \\
 &= u_1 \sin(\theta - \theta_c)
 \end{aligned} \quad (18)$$

总之,霍尔传感器以 φ 的间隔安装时输出的2个霍尔信号表示为

$$\begin{cases} B_{yA} = u_1 \sin(\theta - \theta_c), \\ B_{yB} = u_1 \sin(\theta + \varphi + \theta_c). \end{cases} \quad (19)$$

可以看出,2个霍尔信号的基波相位差为 $\varphi + 2\theta_c$,如果基波相位差为 90° ,则可表示为

$$\varphi + 2\theta_c = \varphi + \varphi/P_r = 90^\circ. \quad (20)$$

因此,可以求解得:

$$\varphi = \frac{90^\circ \cdot P_r}{P_r + 1}. \quad (21)$$

综上所述,当2个霍尔传感器以 $\varphi = 90^\circ \cdot P_r / (P_r + 1)$ 间隔安装时,2个霍尔信号的基波相位差将接近 90° ,从而消除了2个霍尔信号相位非正交所导致的2倍基波频率误差。

但是,当电机尺寸相对较大,极对数相对较少时,以上分析还需要特别考虑。

3 仿真实证

为了验证上述理论分析的正确性,文中基于20极的外转子永磁同步电机进行了有限元仿真验证,该实验电机由本实验室设计。根据电机的结构参数,在ANSYS Maxwell中建立了电机仿真模型,模型结构如图7所示。在有限元仿真中,以霍尔传感器中心对应的磁通密度作为整体磁通密度。

3.1 霍尔传感器安装在定子上

当霍尔传感器安装在定子上时,通过检测气隙磁场计算转子位置,然而电枢磁场会扭曲气隙磁场。通过有限元仿真来验证电枢反应对转子位置检测的影响。其中安装在定子上的霍尔传感器对应的磁通密度和计算出的位置角如图8所示。

如图8所示,2个霍尔传感器对应的磁通密度与正弦相差很大,可以看出电枢磁场对主磁场产生了不同的增磁和去磁效应,

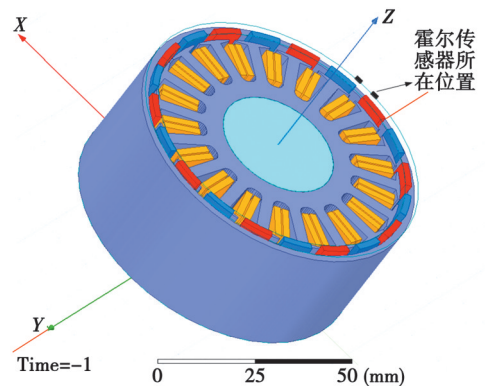


图7 有限元仿真模型图

Fig. 7 Finite element simulation model

这导致气隙磁场严重失真,同时计算出的转子位置偏差很大。

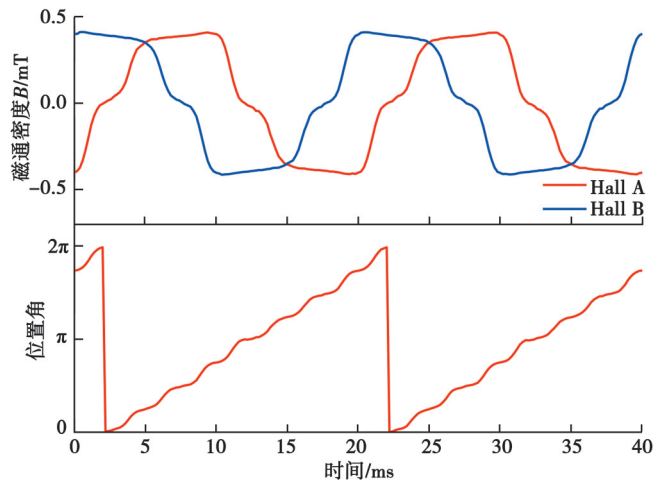


图 8 霍尔传感器安装在定子上

Fig. 8 Hall sensors mounted on the stator

3.2 霍尔传感器正对转子中心安装

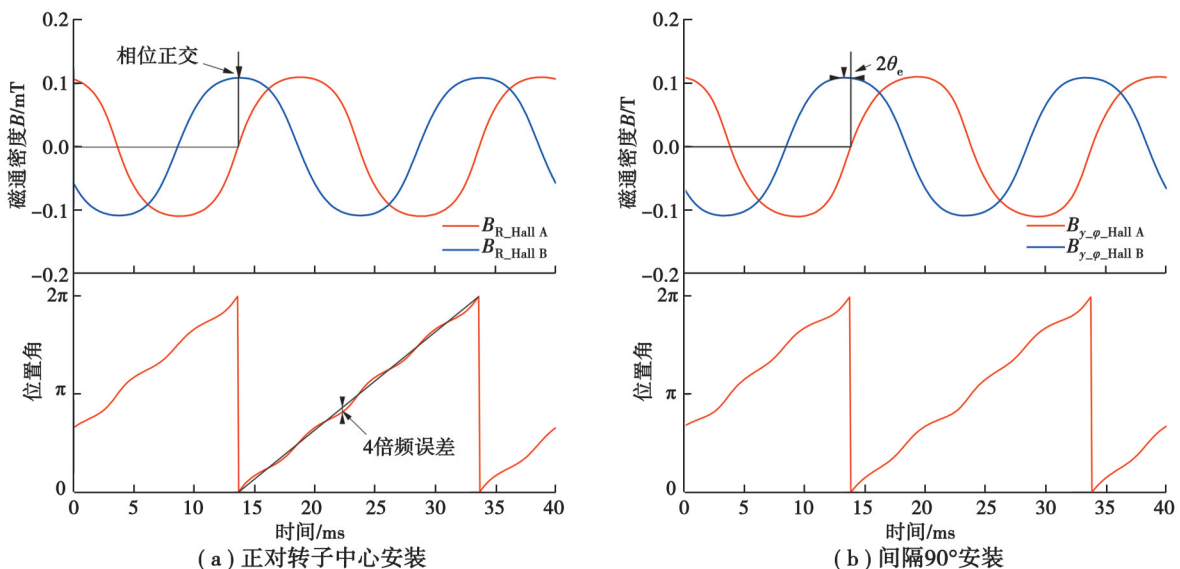
当 2 个霍尔传感器中心之间的空间电角度间隔为 90° 时,霍尔传感器中心的径向磁通密度与霍尔传感器正对转子中心安装时的霍尔信号输出相对应。图 8(a)为霍尔传感器中心的径向磁通密度和所计算的转子位置角。其中 B_{R_HallA} 表示 HallA 所在位置的径向磁通密度。

如图 8(a)所示,2 个霍尔信号的基波相位是相互正交的。其对应的位置信号不是一条直线,位置角中存在 4 倍基波频率误差,这一误差是由霍尔信号中的三次谐波引起的。

霍尔信号中的三次谐波是由永磁体饱和现象所引起的,这是永磁体磁场的固有特性。文中的研究重点是霍尔信号的基波,所以未对霍尔信号中的三次谐波进行补偿。在随后的仿真分析中,将包含三次谐波误差的位置曲线作为转子位置标准值进行误差分析。

3.3 霍尔传感器以 90° 间隔安装在 PCB 上

当 2 个霍尔传感器以 90° 间隔安装在 PCB 上时,霍尔传感器中心 y 轴方向的磁通密度及其计算的位置角如图 9(b)所示。其中, $B_{y_90^\circ_HallA}$ 表示 HallA 所在位置的 y 轴方向磁通密度。图 10(b)中红色曲线对应这种情况下的位置与标准位置之间的差值。如图 9(b)所示,2 个霍尔信号的基波相位非正交,相位差为 $90^\circ+2\theta_e$,这将导致计算位置出现 2 倍基波频率误差,位置误差的振幅为 $0.093(5.3^\circ)$ 。



(a) 正对转子中心安装

(b) 间隔 90° 安装

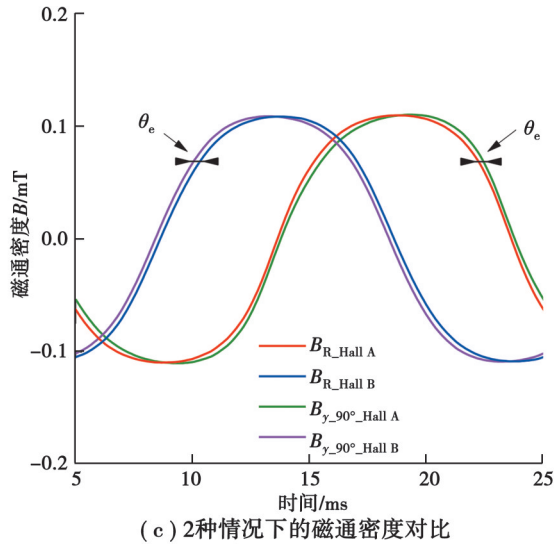


图9 磁通密度和对应的转子位置

Fig. 9 Magnetic flux density and corresponding rotor position

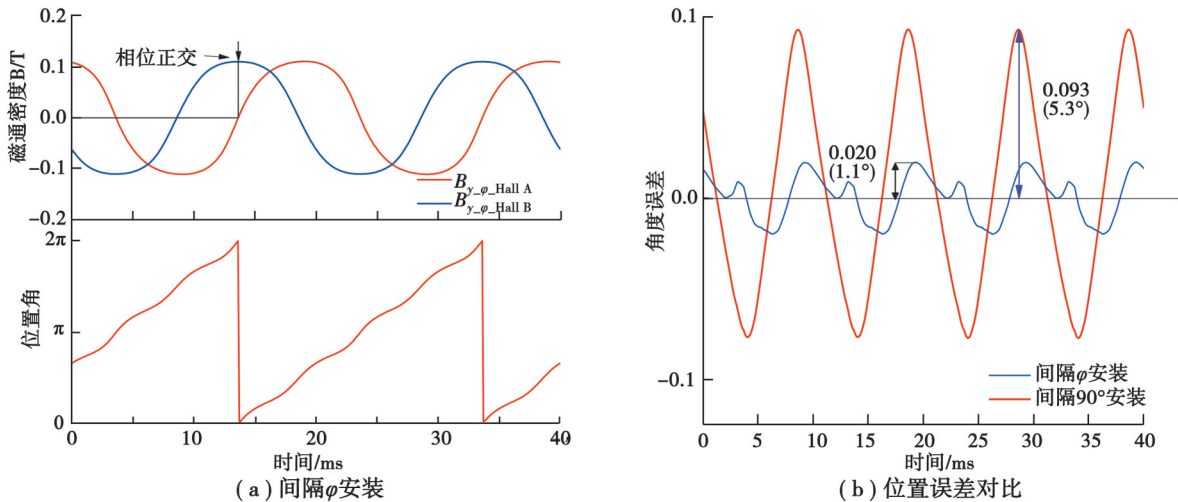


图10 霍尔信号、转子位置角和位置误差对比

Fig. 10 Hall signal, rotor position angle and position error comparison

3.4 霍尔传感器以 φ 间隔安装在PCB上

当2个霍尔传感器的中心相距 φ 时,这种情况下霍尔传感器中心y轴方向的磁通密度和所计算出的位置角如图9(a)所示。此时的两路霍尔信号的基波相位相正交,这与2个霍尔传感器正对转子中心安装时的现象一致。

图9(b)中的蓝色曲线为这种情况下的位置与标准位置之间的差值。当2个霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上时,其位置误差的峰值为0.02,明显小于2个霍尔传感器以 90° 间隔安装在PCB上时的峰值。

通过FFT谐波分析可以确定霍尔信号的谐波含量和基波的初始相位,进一步证实了理论分析的准确性。谐波分析结果如表1所示。

由表1可知,当霍尔传感器正对转子中心安装时,两路霍尔信号的基波相位差等于 90° 。当2个霍尔传感器以 90° 间隔安装在PCB上时,两路霍尔信号的基波相位差为 99° ,即等于 $90^\circ+2\theta_e$ 。同时,结合图8(c)和表1可以看出, $B_{y_{90^\circ}\text{HallA}}$ 超前于 $B_{R_{\text{HallA}}}$ 4.5° ,而 $B_{y_{90^\circ}\text{HallB}}$ 滞后于 $B_{R_{\text{HallB}}}$ 4.5° ,这与式(15)的分析结果一致。当2个霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上时,霍尔信号的基波相位差等于 90° ,与霍尔传感器正对转子中心安装时的结果相一致。综上分析,可以验证文中理论分析的正确性。

表 1 谐波分析结果

Table 1 Results of harmonic analysis

检测指标	正对转子中心安装		间隔 90°安装		间隔 φ 安装	
	HallA	HallB	HallA	HallB	HallA	HallB
基波相位/(°)	113.9	203.9	109.4	208.4	113.8	203.8
基波相位差/(°)	90	90	99	99	90	90
三次谐波含量/%	6.25	6.22	6.22	6.23	6.24	6.22
五次谐波含量/%	1.22	1.24	1.21	1.22	1.22	1.23

4 实验验证

由于有限元仿真更接近理想状态,因此进行实物实验以进一步验证理论分析的准确性是十分必要的,本实验选择 20 极 EPMSM 进行实验验证。对应的实验装置如图 11 所示,对应的参数如表 2 所示。如图 11 右下角所示,电机的永磁体略高于转子轭部,PCB 位于电机外侧,PCB 上的霍尔传感器正对着外露的永磁体。所使用的霍尔传感器不具备特殊性,如表 3 所示,在此比较了实验所使用的霍尔传感器和其他商用的霍尔传感器的主要性能指标。

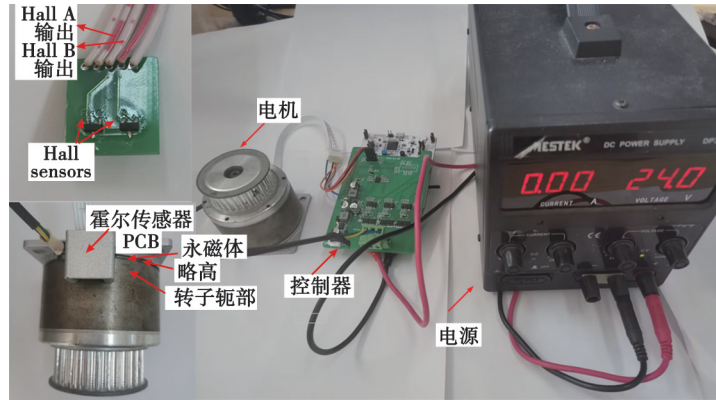


图 11 实验装置

Fig. 11 Experimental device

表 2 实验装置对应的参数

Table 2 Parameters of the experimental devices

参数	数值	参数	数值
传感器类型	MT9105ET	永磁体矫顽力/(kA·m ⁻¹)	938
传感器封装	SOT-23	电机外径/mm	63
PCB 尺寸/(mm×mm)	15×17	额定功率/W	100
永磁体类型	N45H	最大转速/(r·min ⁻¹)	400
永磁体厚度/mm	1.5	额定电压/V	24

表 3 商用霍尔传感器的比较

Table 3 Comparison of commercial Hall sensors (V_{cc}=5 V)

类型	灵敏度/(mV·Gs ⁻¹)	输出范围/V	成本/\$	封装
MT9105ET	5.0	0.3~4.7	0.178 0	SOT-23
SS39ET	1.5	1.0~4.0	0.183 5	SOT-23
GH49F	1.8	1.0~4.0	0.096 0	TO-92
DRV5055	1.25~10.00	0.2~4.8	0.539 0	SOT-23
JSM601	1.2	1.0~4.0	0.207 3	SOT-23

在实验验证过程中,电机控制算法采用矢量控制算法,通过将 I_d 和 I_q 保持在固定值使得电机匀速旋转。数据传输采用ST-Link V3仿真下载器,通信协议为JTAG/SWD协议。控制板为NUCLEO-G431RB开发板,MCU为STM32G431RB,ADC模块为12位逐次逼近型的模拟数字转换器,控制频率为10 kHz,霍尔传感器输出的0~5 V电压转换为-2 048~2 048,霍尔信号由Matlab进行分析。

4.1 霍尔传感器以 90° 间隔安装在PCB上

由于实验中选择的电机的极数为20,因此需要将2个霍尔传感器间隔 9° 的机械角度安装在PCB上。实验获得的霍尔信号如图12(a)所示。霍尔传感器的输出信号中没有电枢磁场所引起的增磁和去磁现象,此时电枢反应对转子位置检测的影响很小。

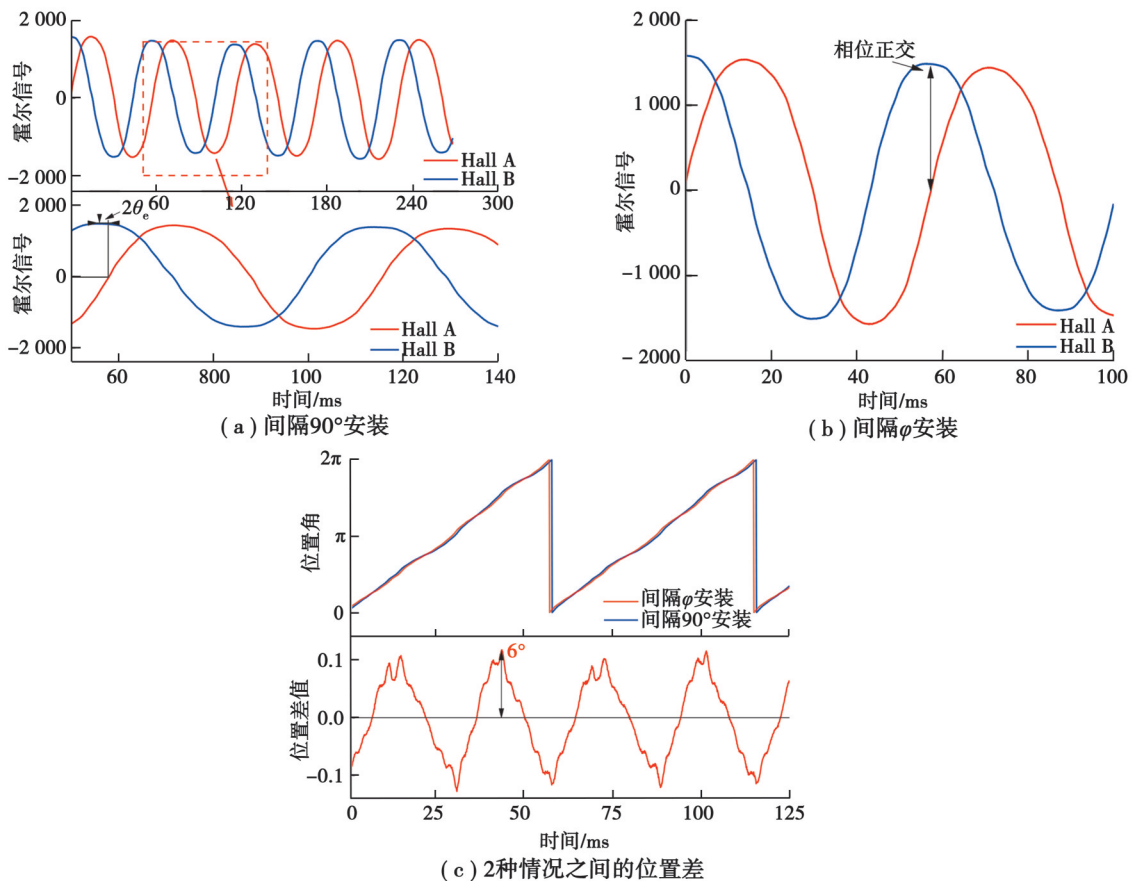


图12 霍尔信号及转子位置差

Fig. 12 Hall signal and rotor position difference

与模拟输出相比,实物实验中霍尔传感器的测量输出在不同极下的振幅不等,这是由于永磁体磁化的结果不同造成的,同时霍尔信号的正弦度较差,这是由于测量结果中存在二、三次谐波等其他谐波造成的。

如图12(a)所示,2个霍尔信号的基波相位确实非正交。为了计算霍尔信号之间的实际基波相位差,对2个霍尔信号进行了谐波分析,同时为了避免霍尔传感器焊接引起的误差,实验中焊接了多个霍尔PCB板,并进行了多次重复试验,如表2所示。两路霍尔信号的基波相位差为 98.6° ,这与理论分析和仿真验证的结果几乎一致。

4.2 霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上

当2个霍尔传感器以 $\varphi/10$ 的机械角度间隔安装在PCB上时。实验得到的霍尔信号如图12(b)所示。可以看出,2个霍尔信号的基波相位是相互正交的。对2个霍尔信号进行谐波分析,结果如表2所示。两路霍尔信号的基波相位差为 90.2° ,这与理论分析和仿真验证的结果几乎一致。

4.3 转子位置误差分析

如图12(c)所示,通过计算得到2种情况下的转子位置和两者转子位置的差值。与霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上时获得的位置相比,霍尔传感器以 90° 的间隔安装在PCB上时获得的位置波动更大。两者的转子位置的差值为峰值为 6° 的类正弦信号,其频率为转子位置角频率的2倍,也就是相位非正交导致的2倍基频误差。

电机始终保持匀速转动,因此相应的转子位置应该如图13(a)中的黑线所示,然而,如表4所示,霍尔信号中存在约2.5%的二次谐波和超过6%的三次谐波。由于二次谐波和三次谐波是永磁磁场的固有误差,实验也没有对霍尔信号中的谐波进行补偿,因此将含有固有误差的转子位置作为误差分析的标准位置,如图13(a)中的红色曲线所示。

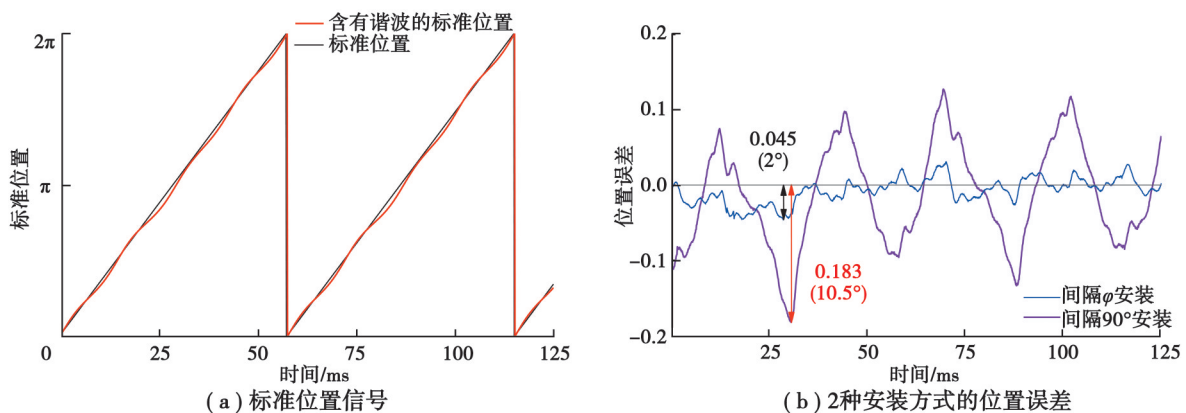


图13 转子位置误差分析

Fig. 13 Error analysis of rotor position

表4 2种安装方式下的FFT分析结果

Table 4 Results of FFT analysis in both cases

安装方式	基波相位/ $(^\circ)$	二次谐波含量/%	三次谐波含量/%
间隔 90° 安装	98.6	2.56	6.52
间隔 φ 安装	90.2	2.65	6.45

与标准位置相比,2种霍尔传感器安装方式的转子位置误差如图13(b)所示。图13(b)中的紫色曲线表示2个霍尔传感器以 90° 的间隔安装在PCB上时的转子位置误差。误差主要是2倍基波频率误差,误差峰值为0.183(10.5°)。图13(b)中的蓝色曲线显示了当2个霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上时的转子位置误差,其误差幅度小于0.045(2.5°),远小于霍尔传感器以 90° 间隔安装在PCB上时的误差,表明其与标准值更加接近,不存在2倍基频误差,即消除了因霍尔传感器安装在PCB上导致的相位非正交现象。如果将霍尔信号中的三次谐波和二次谐波滤除,霍尔传感器以 φ 的间隔安装在PCB上的转子位置信号将几乎是一条直线,与电机的实际位置相一致。

5 结论

文中将线性霍尔传感器安装在EPMSM外部的PCB上。其优点是霍尔传感器安装在转子外部,大大降低了电枢反应对转子位置检测的影响,且易于安装和维护。同时,霍尔传感器安装在PCB上,易于制造,定位精度也能得到保证。

理论分析表明,当2个霍尔传感器以 90° 的间隔安装在PCB上时,2个霍尔信号的基波相位将非正交,从而导致转子位置出现2倍基频误差。当2个霍尔传感器以 $\varphi=90^\circ \cdot P_r/(P_r+1)$ 的间隔安装在PCB上时,2个霍尔

信号之间的基波相位差为 90° ,从而消除了这一误差。然后,通过有限元仿真和实验验证了理论的正确性,指出这一转子位置检测方法很大程度上降低了电枢反应对位置检测的影响,同时转子位置检测的精度也能得到保障。

在模拟和实验中,霍尔信号的二次谐波和三次谐波被视为固有误差,可以通过引入滤波器来消除。同时,温度等因素也可能对测量产生影响,但限于篇幅,不在文中重点讨论之列。

参考文献

- [1] Foo G H B, Zhang X N, Vilathgamuwa D M. A sensor fault detection and isolation method in interior permanent-magnet synchronous motor drives based on an extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3485-3495.
- [2] Choi C, Lee W. Analysis and compensation of time delay effects in hardware-in-the-loop simulation for automotive PMSM drive system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3403-3410.
- [3] Tebaldi D. Efficiency map-based PMSM parameters estimation using power-oriented modeling[J]. IEEE Access, 2022, 10: 45954-45961.
- [4] Zhang X G, Zhao Z H. Multi-stage series model predictive control for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 6591-6600.
- [5] Hu C Y, Datlinger C, Zhong Z M, et al. Rotor position detection based on magnetically coupled resonant principle and its implementation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7402-7411.
- [6] Vázquez-Gutiérrez Y, O' Sullivan D L, Kavanagh R C. Small-signal modeling of the incremental optical encoder for motor control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3452-3461.
- [7] Ruviaro M, Runcos F, Sadowski N, et al. Analysis and test results of a brushless doubly fed induction machine with rotary transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2670-2677.
- [8] Trevisan R, Costanzo A. A 1-kW contactless energy transfer system based on a rotary transformer for sealing rollers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6337-6345.
- [9] 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): 26-32.
Yan L Y, Ye P Q, Zhang Y, et al. Error compensation of linear hall based position detection for tubular permanent magnetic linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 26-32. (in Chinese)
- [10] Zhang C L, Li B R, Ye P Q, et al. Analog-hall-sensor-based position detection method with temperature compensation for permanent-magnet linear motor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9512111.
- [11] Du S W, Hu J C, Zhu Y, et al. A hall sensor-based position measurement with on-line model parameters computation for permanent magnet synchronous linear motor[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(13): 5245-5255.
- [12] Paulus D, Stumper J F, Kennel R. Sensorless control of synchronous machines based on direct speed and position estimation in polar stator-current coordinates[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2503-2513.
- [13] Gaeta A, Scelba G, Consoli A. Sensorless vector control of PM synchronous motors during single-phase open-circuit faulted conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1968-1979.
- [14] Tang Y R, Xu W, Liu Y, et al. Dynamic performance enhancement method based on improved model reference adaptive system for SPMSM sensorless drives[J]. IEEE Access, 2021, 9: 135012-135023.
- [15] Liao K J, Xu W, Bai L L, et al. Improved position sensorless piston stroke control method for linear oscillatory machine via a hybrid terminal sliding-mode observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 14186-14197.
- [16] Jung S Y, Nam K. PMSM control based on edge-field hall sensor signals through ANF-PLL processing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5121-5129.
- [17] Wang Y Y, Hoole Y, Haran K. Position estimation of outer rotor PMSM using linear Hall effect sensors and neural networks [C]//2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). May 12-15, 2019, San Diego, CA, USA. IEEE, 2019: 895-900.

- [18] Kim J U, Jung S Y, Nam K H. PMSM angle detection based on the edge field measurements by hall sensors[J]. Journal of Power Electronics, 2010, 10(3): 300-305.
- [19] Song X D, Fang J C, Han B C. High-precision rotor position detection for high-speed surface PMSM drive based on linear Hall-effect sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4720-4731.
- [20] Wang Y C, Bao X G, Hua W, et al. Implementation of embedded magnetic encoder for rotor position detection based on arbitrary phase-shift phase-lock loop[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 2033-2043.
- [21] 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, 54.
Liu G, Xiao Y R, Song X D. Error compensation of rotor position detection for permanent magnetic synchronous motor based on linear hall sensors[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 36-42, 54. (in Chinese)
- [22] 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): 11-19.
Wang X L, Liu S H, Gu C. Rotor position detection for permanent magnetic synchronous motor based on error compensation of linear Hall sensors[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(7): 11-19. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)