

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108098

开关霍尔安装相位偏差对 PMSM 性能影响实验研究*

张彬 李震 李垣江 魏海峰 张懿
(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要: 为了提高 PMSM 矢量控制系统的稳定性并减少硬件成本,采用具有高稳定性和低成本的双极性开关霍尔传感器代替控制系统中的高分辨率传感器,来实现对永磁同步电机的精确控制。首先介绍了霍尔传感器的工作原理,并结合永磁同步电机结构介绍双极性开关霍尔传感器在电机上的应用;然后针对霍尔传感器的安装相位偏差进行分析,给出相位偏差的校准方法;再利用构建霍尔位置观测器,实现对电机转子位置和转速的检测和估算;最后通过构建系统仿真和电机测试平台实验验证了所提出的霍尔安装相位偏差校准方法可行性和优越性。所提出的方法可以降低电机转子位置估算误差至 0.33%、速度的估算误差在 0.5% 以内,同时在带载情况下也可以保持估算稳定性;提高了永磁同步电机控制系统的鲁棒性和可靠性。

关键词: 永磁同步电机;双极性开关霍尔;矢量控制;转子位置估算;安装相位偏差
中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Experimental research on the influence of switch hall installation phase deviation on PMSM performance

Zhang Bin Li Zhen Li Yuanjiang Wei Haifeng Zhang Yi

(School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to improve the stability of the permanent magnet synchronous motor(PMSM) vector control system and reduce the hardware cost, a bipolar switch Hall sensor with high stability and low cost is used to replace the high-resolution sensor in the control system to achieve precise control of the permanent magnet synchronous motor. The article first introduces the working principle of the Hall sensor, combined with the structure of the permanent magnet synchronous motor, introduces the application of the bipolar switch Hall sensor in the motor. Then, analyzes the installation phase deviation of the Hall sensor, and gives the calibration of the phase deviation method; reuse the construction of a Hall position observer to realize the detection and estimation of the motor rotor position and speed. Finally, the feasibility and superiority of the proposed Hall installation phase deviation calibration method are verified through the construction of system simulation and motor test platform experiments. The method proposed can reduce the estimation error of the rotor position of the motor to 0.33% and the estimation error of the speed within 0.5%. At the same time, the estimation stability can also be maintained under load. Improved the robustness and reliability of the permanent magnet synchronous motor control system.

Keywords: PMSM; bipolar switch Hall; vector control; rotor position estimation; installation phase deviation

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)是利用永磁体建立励磁磁场的同步电机,其定子产生旋转磁场,转子用永磁材料制成。具有体积小和能量效率密度高的特点,在家电、新能源汽车、船舶等领域运用广泛^[1]。相比于无刷直流电机在运行中的不足之

处,永磁同步电机具有转矩更加平滑,电机运行系统噪音更低等优点。目前在高精度的 PMSM 矢量控制系统中转子位置与速度信息,是通过一些高精度位置传感器(如光电编码器、旋转编码器等)获取的,但由于传感器的体积、成本和结构复杂度等原因,不适合在成本比较敏感、体积有限、安装结构简单的电单车电机系统中运用^[2]。为了解决电机转子的位置和速度反馈问题,许多学者进行了永磁同步电机

收稿日期:2021-10-15

* 基金项目:国家自然科学基金科学基金(51977101)、江苏省省重点研发计划产业前瞻性与共性关键技术重点项目(BE2018007)资助

无位置传感器矢量控制研究,提出一些基于无位置传感器控制方法,如定子磁链估计法、高频信号注入法^[3]、状态观测器、扩展卡尔曼滤波器、滑膜观测器^[4]、龙伯格观测器^[5]、神经网络辨识等。从当前的技术研究深度来看,无位置传感器的研究方法只停留在理论研究阶段,现阶段无法满足工程应用行业成本和性能的要求^[6]。采用双极性霍尔开关作为永磁同步电机位置传感器不仅可以降低系统成本,还可以降低系统复杂性,提高系统鲁棒性和可靠性,减少噪声对系统的影响,减少系统维护和使用成本等。

但采用霍尔元件作为位置传感器,会存在位置分辨率低和误差等问题^[7-10],研究中许多学者也提出一些相应误差补偿和解决方法,然而大多是直接从电机运行角度去分析,方法难度高且降低了运用的可行性^[11-15]。文献[16]从霍尔元件在电机中安装方式出发,详细分析了霍尔传感器检测误差来源,最终研究出霍尔元件安装存在相位偏差的情况下对误差影响最大这一特点,但遗憾的是作者未能给出相位偏差问题的解决方案。

为此本文提出基于开关霍尔安装相位偏差校准的永磁同步电机霍尔位置观测器控制研究方法,提出霍尔安装相位偏差的校准方法,构建霍尔位置观测器,来实现电机的转子位置观测和速度提取,实现电机的高性能矢量控制,并设计 MATLAB 仿真和实验验证了所提方法的正确性和实用性。

1 永磁同步电机霍尔传感器信号分析

1.1 霍尔传感器原理

霍尔传感器是有源元件的磁电转换器。它基于霍尔效应工作原理,可以将磁矢量信号转换为电平信号。如图 1 所示,有一个半导体(d)水平放置,给半导体施加垂直向下的磁场(B)和水平向右的电流(I),则会在垂直于磁场和电流的方向产生霍尔电压(U_H)。这种现象就被称为霍尔效应。根据霍尔效应的原理,霍尔电动势的大小取决于西普电气接近开关光电开关:

$$U_H = \frac{R_H IB}{d} \quad (1)$$

式中: R_H 为霍尔参数(m^3C^{-1}),与半导体的材质有关; I 为霍尔传感器的控制电流(A); B 磁场强度(T); d 半导体材料的厚度(m)。

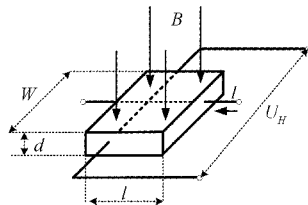


图 1 霍尔传感器工作原理

1.2 开关型霍尔传感器的工作状态

在永磁同步电机霍尔位置信号传感器常采用双极性霍

尔效应开关。如图 2 所示是双极性霍尔效应开关传感器的输出曲线, B 为磁场强度, B_{OPN} 为北极动作点,当 $B > B_{OPN}$ 时,霍尔开关处于输出状态, B_{RPN} 为北极释放点,当 $B < B_{RPN}$ 时,霍尔开关处于停止输出状态, B_{OPS} 为南极动作点,当 $B > B_{OPS}$ 时,霍尔开关处于输出状态, B_{RPS} 为南极释放点,当 $B < B_{RPS}$ 时,霍尔开关处于停止输出状态。

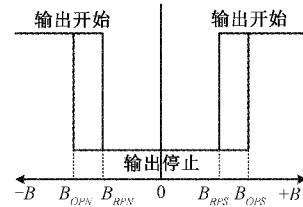


图 2 双极性霍尔输出状态

1.3 双极性开关型霍尔传感器在永磁同步电机中的应用

永磁同步电机要实现矢量控制需要以转子位置连续信号作为输入,通过开关型霍尔输出的开关量获取转子位置信息,再进一步通过转子位置估算方法得出转子位置的连续信号,所以需要研究转子位置和开关霍尔输出信号之间的联系。在永磁同步电机内部构造中,采用 3 个双极性开关型霍尔作为位置传感器,将其在同一平面按 120° 电角度间隔对称安装在电机的定子上,以极对数为 1 的电机为例,安装示意图如图 3 所示。由 OA 、 OB 、 OC 三条线构成的坐标系与 A 、 B 、 C 三相定子绕组轴线相重合, $Hall_A$ 、 $Hall_B$ 、 $Hall_C$ 为 3 个开关霍尔传感器, N 、 S 为转子上的永磁体。以 OA 轴为初始位置,转子逆时针旋转一周,3 个开关霍尔传感器输出三路相位间隔 120° 的矩形波电信号,每一路的信号中逻辑 0 和逻辑 1 各占 180° ,一个周期被平均划分成 6 个霍尔扇区,由此可以得出利用开关霍尔传感器可以检测出电子转子的 6 个位置。

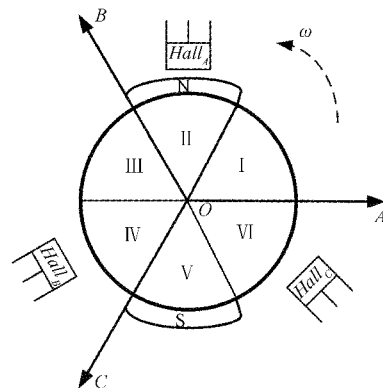


图 3 霍尔安装示意图

2 开关霍尔安装相位偏差分析和校准方法

2.1 霍尔安装相位偏差对位置估算影响分析

在理想情况下,三路开关霍尔传感器在永磁同步电机内部是以标准的 120° 间隔安装,在一些中低端永磁同步电

机生产线,由于电机生产线设备精度的偏差,会导致电机上霍尔存在安装相位偏差,实际的电机应用控制中的表现为,在电机的矢量控制中扇区不是严格的 60° ,进而使得在电机转子转速和转子位置估算时造成较大的误差,导致更大的转矩脉动和电流波动,会降低电机的运行效率,缩短电机的使用寿命。因此有必要对电机的开关霍尔传感器安装相位偏差进行研究。在理论分析中,通常需要选取一路霍尔为位置参考标准,来分析开关霍尔传感器的安装相位偏差,这样就只需要考虑两种安装相位偏差:1)一路霍尔安装相位偏差;2)两路霍尔安装相位偏差。

虽然在理论分析中常以电机少数对极数作分析,但在实际的工程应用中电机极对数一般较多,存在霍尔安装偏差的电机对电机的转子位置估算和速度估算产生的误差将会被放大,对电机的平稳控制会产生较大影响。对于电机磁极安装正确,只考虑霍尔安装相位偏差的情况下,三路霍尔的输出信号相位差不是 120° ,而是会有一定的相位偏差 θ_e 。

在确定电机转子的初始位置时,一般会以某一路的开关霍尔器件输出位置信号作为参考标准,可以认为这一路的输出位置信号是标准信号。选择 $Hall_A$ 为参考标准,如图 4 所示,给出了 $Hall_B$ 安装相位偏差对电机转子位置估算的影响示意图,由图 4 可知, $Hall_B$ 路开关霍尔传感器的实际位置与理想位置安装相位偏差为 θ_{ob} , $\theta_{ob} > 0$ 表示实际位置滞后于理想位置, $\theta_{ob} < 0$ 表示实际位置超前于理想位置。

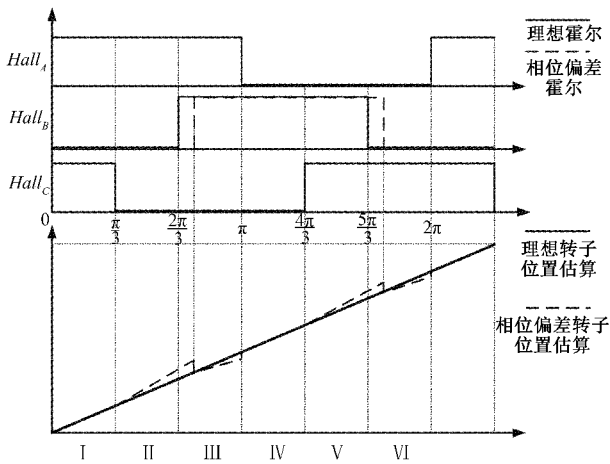


图 4 $Hall_B$ 相位偏差时对转子位置估算影响

由图 4 可知,在 $Hall_B$ 开关霍尔存在安装相位安装偏差时,在扇区 I 和扇区 IV 电角度都是 60° ,开关霍尔传感器输出准确,估算电机转子速度准确,估算电机转子位置准确。在扇区 II 和扇区 V 中电角度为 $60^\circ + \theta_{ob}$,在 $\theta_{ob} > 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置滞后于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值正确;在 $\theta_{ob} < 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置超前于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏大,位置更新值正确。在扇区 III 和扇区

VI 中电角度为 $60^\circ - \theta_{ob}$,在 $\theta_{ob} > 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置超前于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏大,位置更新值偏小;在 $\theta_{ob} < 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置滞后于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值偏大。

下面考虑有两路霍尔存在安装相位偏差的情况,同样选择 $Hall_A$ 为参考标准,在上面分析只存在一路霍尔 $Hall_B$ 安装偏差的情况下,同时 $Hall_C$ 存在 θ_{ec} 安装偏差,如图 5 所示,给出了 $Hall_B$ 和 $Hall_C$ 安装相位偏差对电机转子位置估算的影响示意图。

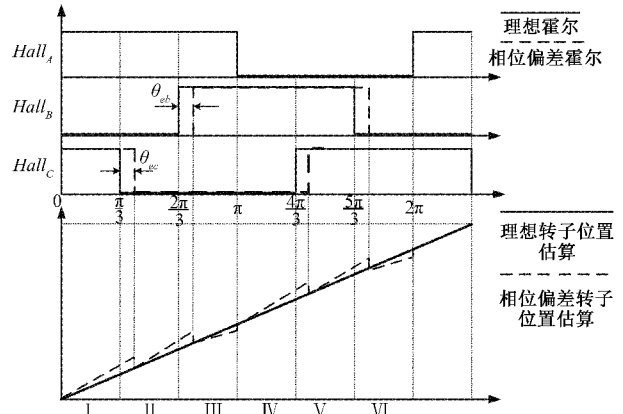


图 5 $Hall_B$ 和 $Hall_C$ 相位偏差时对转子位置估算影响

在 $Hall_B$ 和 $Hall_C$ 存在安装相位偏差时,在扇区 I 和扇区 IV 中电角度为 $60^\circ + \theta_{ec}$,在 $\theta_{ec} > 0$ 的情况下,安装相位偏差霍尔输出位置滞后于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值偏大;在 $\theta_{ec} < 0$ 的情况下,安装相位偏差霍尔输出位置超前于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏大,位置更新值偏小。在扇区 II 和扇区 V 电角度为 $60^\circ + \theta_{ob} - \theta_{ec}$,在 $\theta_{ob} - \theta_{ec} > 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置滞后于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值偏大;在 $\theta_{ob} - \theta_{ec} < 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置超前于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值偏大。在扇区 III 和扇区 VI 中电角度为 $60^\circ - \theta_{ob}$,在 $\theta_{ob} > 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置超前于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏大,位置更新值偏小;在 $\theta_{ob} < 0$ 情况下,安装相位偏差霍尔输出位置滞后于理想霍尔输出位置,导致估算的速度偏小,位置更新值偏大。

2.2 霍尔安装相位偏差的校准

由上面分析可知,霍尔安装相位偏差对电机转子位置估算的精度会产生很大的影响,如果仅仅从电机转子估算的误差分析,不足以实现电机的平稳控制,所以需要电机霍尔安装相位偏差进行校准分析,可以采用基于扇区的初始相位校正法,来实现转子位置更新和校正,其方法示意图如图 6 所示。

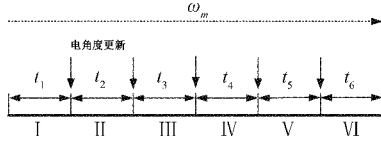


图 6 扇区初始相位校正示意图

电机以角速度 ω 匀速运转,霍尔安装相位在未校准前,可以测得电机在霍尔扇区 I、II、III 运行时间分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 。

$$\begin{cases} \phi_1 = \omega t_1 \\ \phi_2 = \omega t_2 \\ \phi_3 = \omega t_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \pi \\ t_1 + t_2 + t_3 = T \end{cases} \quad (3)$$

可以推导出霍尔扇区 I、II、III 的电角度为 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 ：

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{\pi t_1}{T} \\ \phi_2 = \frac{\pi t_2}{T} \\ \phi_3 = \frac{\pi t_3}{T} \end{cases} \quad (4)$$

在霍尔安装相位偏差对电机转子位置估算影响的分析中可知,在 $Hall_B$ 存在安装相位偏差时,扇区 II 的电角度 $\phi_2 = 60^\circ + \theta_{cb}$, 由此可以推导 $Hall_B$ 出安装相位偏差:

$$\theta_{cb} = \phi_2 - 60^\circ \quad (5)$$

再考虑有两路霍尔同时存在安装相位偏差的情况, $Hall_B$ 和 $Hall_C$ 同时存在相位偏差:

$$\begin{cases} \phi_2 = 60^\circ + \theta_{cb} \\ \phi_3 = 60^\circ + \theta_{cc} - \theta_{cb} \end{cases} \quad (6)$$

可以推导出 $Hall_B$ 和 $Hall_C$ 的安装相位偏差:

$$\begin{cases} \theta_{cb} = \phi_2 - 60^\circ \\ \theta_{cc} = \phi_2 + \phi_3 - 120^\circ \end{cases} \quad (7)$$

对于以上两种情况下的霍尔安装相位偏差,可以计算出各扇区电角度更新值如表 1 所示。

表 1 霍尔扇区校准和更新值

扇区划分	$Hall_B$ 相位偏差 θ_{cb}		$Hall_B$ 相位偏差 θ_{cb} 、 $Hall_C$ 相位偏差 θ_{cc}	
	扇区电角度	扇区更新电角度	扇区电角度	扇区更新电角度
II	$60^\circ + \theta_{cb}$	0°	$60^\circ + \theta_{cb} - \theta_{cc}$	0°
III	$60^\circ - \theta_{cb}$	$60^\circ + \theta_{cb}$	$60^\circ - \theta_{cb}$	$60^\circ + \theta_{cb}$
IV	60°	120°	$60^\circ + \theta_{cc}$	$120^\circ + \theta_{cc}$
V	$60^\circ + \theta_{cb}$	180°	$60^\circ + \theta_{cb} - \theta_{cc}$	180°
VI	$60^\circ - \theta_{cb}$	$210^\circ + \theta_{cb}$	$60^\circ - \theta_{cb}$	$210^\circ + \theta_{cb}$
I	60°	270°	$60^\circ + \theta_{cc}$	$270^\circ + \theta_{cc}$

根据上面的分析,在实际的电机运用控制中,如果电机存在霍尔安装相位偏差,在未知某路霍尔存在安装相位偏差时,只需要任选一路作为参考就可以实现安装相位偏差的校准,这样在电机的控制程序设计中也非常便于算法实现。

2.3 霍尔扇区安装相位偏差校准的转子位置估算方法

在永磁同步电机矢量控制系统中,需要以连续且平滑的转子位置信号作为输入,而直接从电机上获取 3 个开关霍尔传感器的位置信号是离散的位置信号,为此提出霍尔安装相位偏差校准的霍尔位置观测器法,更好地实现对电机转子位置的观测。对于表贴式电机,永磁同步电机在 $d-q$ 坐标系下的机械运动模型为:

$$\begin{cases} T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_r \omega_m + T_l \\ \frac{d\theta_e}{dt} = P_n \omega_m \end{cases} \quad (8)$$

其中, T_e 是电磁转矩, T_l 是负载扰动转矩, J 是转动惯量, B_r 是粘滞摩擦系数, θ_e 是电角度, ω_m 是转子角速度,它和电角速度 $\omega_e = P_n \omega_m$, P_n 是电机极对数。如图 7 所示为永磁同步电机机械运动模型。

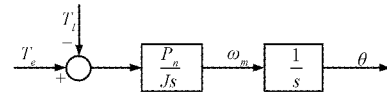


图 7 永磁同步电机机械运动模型

永磁同步电机控制系统的输入量电磁转矩 $T_e = i_q K_t$, 交轴的电流 i_q 和永磁同步电机的电磁转矩常数 K_t 是已知的常量,可知负载扰动转矩 T_l 是恒定值,则:

$$\frac{dT_l}{dt} = 0 \quad (9)$$

电机动力学状态方程:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & p_n & 0 \\ 0 & -\frac{B_r}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \theta_e \\ \omega_m \\ T_l \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], u = T_e, y = \theta_e$$

经过上面的方程分析知,能构建一个输入量为电磁转矩的系统,电机的负载转矩、转子位置和速度作为状态量,新建成一个系统来进行分析:

$$\begin{cases} \hat{\tilde{x}} = \hat{\tilde{x}} + Bu + K(y - Cx) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\hat{x} = [\hat{\theta} \ \hat{\omega} \ \hat{T}_L]^T$, $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$ 为状态反馈增益矩阵。将原系统和新系统之间的状态变量差值记为 $e = \hat{x} - x$, 把误差变量记为 $\dot{e} = (A - KC)e$ 。选取合适

的反馈增益矩阵 K , 当 $A - KC$ 稳定时就有 e 趋近于 0, 从而使观察测量 \hat{x} 趋近于 x , 上述基于开关霍尔传感器的位置观测器原理如图 8 所示。

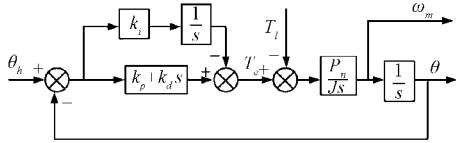


图 8 开关霍尔传感器的位置观测器原理

由观测器可得估算位置 θ_{rh} 与霍尔位置 θ_h 的传递函数为:

$$\phi_r(s) = \frac{\theta_{rh}(s)}{\theta_h(s)} = \frac{\frac{p_n}{J}(k_d s^2 + k_p s + k_i)}{s^3 + \frac{p_n}{J}(k_d s^2 + k_p s + k_i)} \quad (12)$$

闭环系统的特征多项式为:

$$\lambda(s) = s^3 + \frac{p_n}{J}(k_d s^2 + k_p s + k_i) \quad (13)$$

式(13)中满足代数稳定性判据时, 霍尔位置观测器趋于稳定且误差变量趋近于 0。选取 k_d, k_p, k_i 值为:

$$\begin{cases} k_d = 3\omega_n \frac{J}{p_n} \\ k_p = 3\omega_n^2 \frac{J}{p_n} \\ k_i = \omega_n^3 \frac{J}{p_n} \end{cases} \quad (14)$$

最终系统只在霍尔位置输入情况下的传递函数可以表示如式(15)所示。

$$\phi_r(s) = \frac{\theta_r(s)}{H(s)} = \frac{\frac{3}{\omega_m} s^2 + \frac{3}{\omega_m} s + 1}{\frac{1}{\omega_m^3} s^3 + \frac{3}{\omega_m^2} s^2 + \frac{3}{\omega_m} s + 1} \quad (15)$$

在系统中的带宽设置不能设置太高, 否者会影响开关霍尔位置信号的输入, 也不能起到抑制噪声和误差信号, 带宽也不能设置太低, 否者影响系统的跟踪速度, 造成系统反应延时加大, 设置的电机转速为 1 000 r/min, 上述的霍尔位置观测器在不用的带宽值得波特图如图 9 所示, 根据波特图可知, 系统的响应速度随着带宽 ω_m 的增大而变快, 但对高频的抗干扰能力下降。

3 仿真与实验

结合本文提出的方法, 构建永磁同步电机矢量控制系统如图 10 所示。

3.1 仿真结果分析

在研究中, 永磁同步电机上采用的是 3 个双极性开关霍尔传感器, 利用霍尔位置观测器的仿真角度输出如下所示, 从仿真结果可知, 在霍尔安装相位偏差未校准时如图 11 所示, 观测器的误差波动为 0.40 rad, 在霍尔安装相位偏差校准时如图 12 所示, 观测器的误差波动为 0.15 rad。

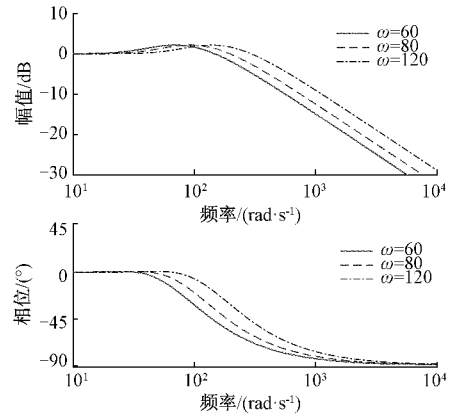


图 9 霍尔位置观测器波特图

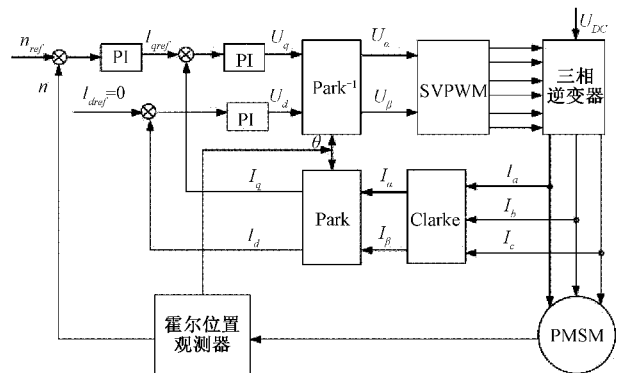


图 10 永磁同步电机矢量控制系统框图

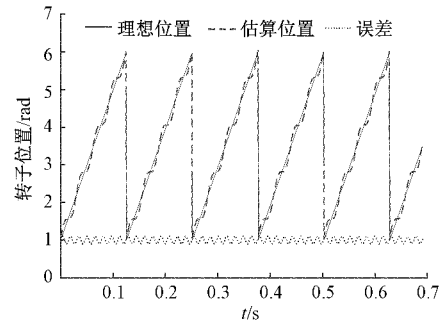


图 11 霍尔安装相位偏差未校准

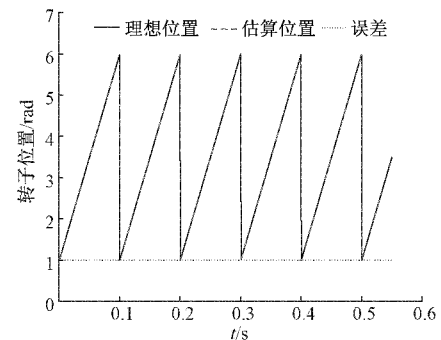


图 12 霍尔安装相位偏差已校准

3.2 实验结果分析

在实验中基于霍尔位置观测器在有霍尔安装相位偏差的电机控制系统中测试,分别在霍尔安装相位偏差未校准和校准的情况下获取电机的转子位置、速度、电流等信息,得出如下测试波形,下面测试结果中,图(a)为霍尔安装相位偏差未校准时测试结果,图(b)为霍尔安装相位偏差已校准时的测试结果。

如图 13 所示为测得在 1 000 r/min 下的转子位置估算结果,(a)为安装相位偏差未校准时,估算误差为 0.7%(0.046 rad),(b)为安装相位偏差校准时,估算误差为 0.33%(0.022 rad),可以看出霍尔安装相位偏差校准对位置估算信号精确性有显著提高。

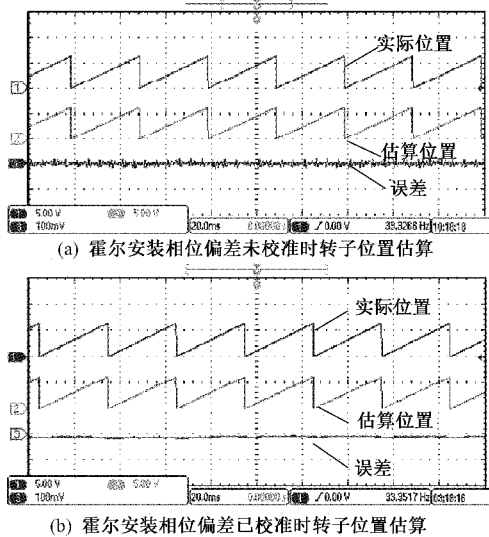


图 13 电机匀速运行时转子位置估算

在额定转速为 1 000 r/min 时,测得两种情况下的速度估算波形如图 14 所示,(a)为安装相位偏差未校准时速度估算波形

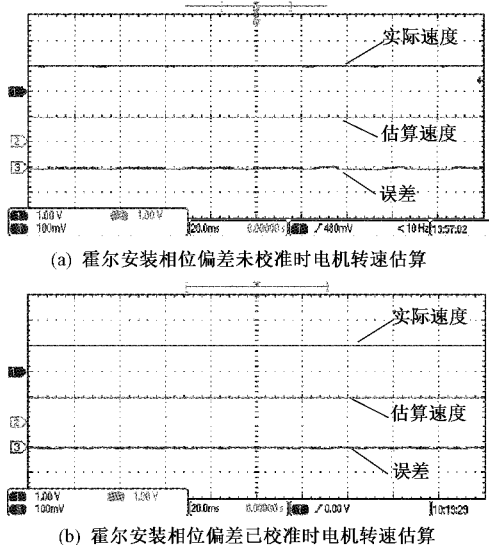


图 14 电机转速估算

估算误差为 1%(10 r/min),(b)安装相位偏差已校准时速度估算误差为 0.5%(5 r/min)。

在带载 5 N 的情况下,测得转子位置估算结果和 A 相电流如图 15 所示,实验结果表明在霍尔安装相位偏差已校准时,位置估算误差更小,电流波动更小。

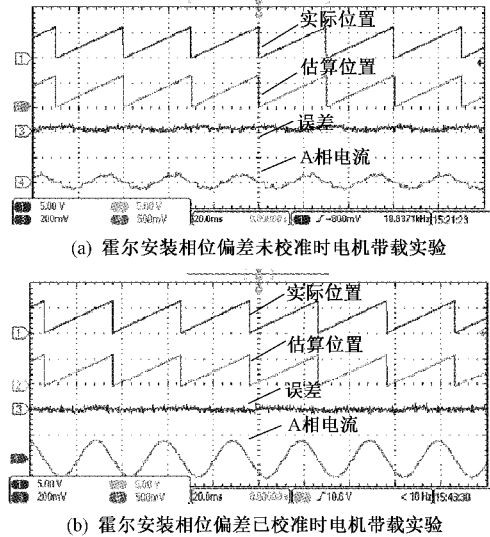


图 15 电机带载实验

4 结 论

本文以双极性霍尔开关传感器的工作原理为基础,分析了其在永磁同步电机上的安装相位偏差,并结合霍尔传感器安装特点给出了安装相位偏差的校准方法,再通过构建霍尔位置观测器对电机转子位置和速度进行估算,经过 MATLAB 仿真和实验平台验证,实验研究得出结论:研究提出的霍尔安装相位偏差校准方法能使得转子位置估算更加平滑,使得估算误差更小,在电机平稳运行时,电机转速估算误差可以控制在 0.5% 以内。研究提出的霍尔位置观测器法对系统的噪声和误差能够很好地抑制,抗干扰能力强,对电机转子位置和转速估算具有很好的跟随性和稳定性。同时,实验研究提出的安装相位偏差校准方法具有很好的适用性,不仅使用于 3 个开关霍尔的电机,同时也适用于 2 个开关霍尔、2 个线性霍尔等场合。

参考文献

- [1] 张丽,朱孝勇,左月飞.电动汽车用转子永磁型无刷电机与控制系统容错技术综述[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1792-1803.
- [2] 刘计龙,肖飞,沈洋,等.永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J].电工技术学报,2017,32(16):76-88.
- [3] 许颖,朱焜秋.无轴承永磁同步电机系统及其关键技术发展综述[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2994-3007.

- [4] 中永鹏,郑竹风,王耀南.基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J].电子测量与仪器学报,2020,34(8):22-29.
- [5] 殷海双,朱哲.基于双 Luenberger 观测器的永磁同步电机预测控制研究[J].国外电子测量技术,2020,39(4):26-31.
- [6] 王大志,李汶浚,袁天清,等.基于高频信号注入的永磁同步电机转子位置估计[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(9):1234-1239.
- [7] 倪启南,杨明,徐殿国,等.低分辨率位置传感器永磁同步电机精确位置估计方法综述[J].电工技术学报,2017,32(22):70-81.
- [8] 张懿,张明明,魏海峰,等.基于霍尔传感器的永磁同步电机高精度转子位置观测[J].电工技术学报,2019,34(22):4642-4650.
- [9] 王立强,余晓帆,雷美珍.永磁直线伺服系统定子初始位置检测新方法[J].电子测量技术,2021,44(8):130-134.
- [10] 王要强,冯玉涛,马小勇,等.永磁同步电机转子位置复合检测及起动运行策略[J].仪器仪表学报,2019,40(8):230-238.
- [11] 刘刚,肖烨然,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.
- [12] LIU G, CHEN B, SONG X. High-precision speed and position estimation based on Hall vector frequency tracking for PMSM with bipolar Hall-effect sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2019,19(6):2347-2355.
- [13] 倪启南,杨明,董翔,等.基于霍尔位置传感器的 PMSM 转速观测器状态估算误差抑制方法[J].电工技术学报,2017,32(17):189-198.
- [14] 赵远洋,韩邦成,陈宝栋,等.基于霍尔矢量相位跟踪的永磁同步电机转子位置与速度估算方法[J].电工技术学报,2019,34(15):3147-3157.
- [15] 王凯,王之赞,宗兆伦,等.基于霍尔位置传感器的永磁同步电机速度估计方法研究[J].电机与控制学报,2019,23(7):46-52.
- [16] 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.

作者简介

张彬(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电机驱动和控制。

E-mail: bingezhang@qq.com

李震,工学博士,副教授,主要研究方向为电机驱动和控制、系统可靠性、嵌入式系统。

E-mail: justlz@163.com

李垣江,工学博士,副教授,主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: liyuanjiang@just.edu.cn

魏海峰,工学博士,副教授,主要研究方向为电机驱动控制和复杂控制系统研究。

E-mail: 106368664@qq.com

张懿,工学博士,教授,主要研究方向为非线性智能控制和电机控制研究。

E-mail: zyi82@126.com