

【引用格式】苏锦智, 张继鹏, 安群涛, 等. 基于霍尔传感器的低噪声推进电机驱动系统[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(1): 106-110.

# 基于霍尔传感器的低噪声推进电机驱动系统

苏锦智<sup>1,3</sup>, 张继鹏<sup>1,3</sup>, 安群涛<sup>2,3,\*</sup>, 肖峰<sup>1,3</sup>, 张伟峰<sup>1,3</sup>

- (1. 包头长安永磁电机有限公司, 内蒙古 包头 014030;  
2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
3. 内蒙古自治区先进永磁电机及其控制技术企业重点实验室, 内蒙古 包头 014030)

**摘要** 潜航器电推进系统广泛采用高效率和高功率密度的永磁同步电机, 需要结合转子位置传感器实现其高性能控制。采用霍尔磁极位置传感器可以节省体积, 但低分辨率的位置信号不能满足电机的高性能控制需要。基于霍尔位置信号和平均速度采用线性插值方法估算转子实时位置, 用于永磁同步电机矢量控制。针对霍尔信号偏差导致估算位置在修正处发生突变的问题, 通过改进平均速度计算和位置修正方法平滑位置估算值, 抑制了因估算位置突变导致的电流畸变, 实现了潜航器推进用永磁同步电机的低噪运行。实验结果验证了方案的可行性和有效性。

**关键词** 潜航器; 电推进; 永磁同步电机; 霍尔位置传感器; 低噪声

中图分类号 TM351

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)01-0106-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.01.013

## Low-noise Propulsion Motor Drive System Based on Hall-effect Position Sensors

SU Jinzhi<sup>1,3</sup>, ZHANG Jipeng<sup>1,3</sup>, An Quntao<sup>2,3,\*</sup>, XIAO Feng<sup>1,3</sup>, ZHANG Weifeng<sup>1,3</sup>

- (1. Baotou Changan Permanent Magnet Machine Co., Ltd, Baotou 014030, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Advanced Permanent Magnet Machine & Its Control Technology, Baotou 014030, China)

**Abstract** The permanent magnet synchronous motor with high-efficiency and high-power density is widely used in the electric propulsion system of underwater vehicles, and the rotor position sensor is required to achieve its high performance control. The adoption of Hall-effect position sensor can save the volume, but the low-resolution position signal cannot meet the high-performance control needs of the motor. In this paper, the real-time rotor position is estimated by linear interpolation method based on Hall position signals and average speed, and used in the vector control of permanent magnetic synchronous motor. Aiming at the sudden change of the estimated position at the correction point caused by Hall signal deviation, by improving the smooth position estimation value of the average speed calculation and position correction method, the current distortion caused by the sudden change of the estimated position is suppressed, and the low-noise operation of the permanent magnet synchronous motor for propulsion of the underwater vehicles is realized. The experimental results verify the feasibility and effectiveness of this method.

**Key words** underwater vehicle; electric propulsion; permanent magnet synchronous motor; Hall-effect sensor; low noise

收稿日期: 2022-10-14

作者简介: 苏锦智 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事稀土永磁电机及其控制技术研究。

\*通信作者: 安群涛 (1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事为电机容错控制、逆变器故障诊断技术研究。

基金项目: 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目“低速高精度交流永磁伺服电机系统研发”(2022YFXM0007)。

## 0 引言

永磁同步电机 (PMSM) 具有高功率密度、高效率、良好控制性能等优点, 广泛应用于航空航天、船舶、汽车等领域<sup>[1]</sup>。为实现 PMSM 的高性能运行控制, 获取准确的转子位置和速度至关重要, 通常由安装在电机轴上的光电编码器或旋转变压器等高分辨率位置传感器检测, 但这些传感器会显著增加系统的体积和重量。在低成本或体积要求苛刻的应用中, 低分辨率的霍尔磁极位置传感器因成本低、占用体积小等优点被广泛采用。由于霍尔位置传感器提供的位置信号远不能满足矢量控制所需的精度, 基于低分辨率霍尔信号对转子位置进行估算, 使之达到与高精度传感器相当的检测效果是实现 PMSM 高性能控制的关键。

针对基于低分辨率位置传感器的转子位置和速度估算, 学者们进行了广泛的研究。文献[2]和[3]分别提出了基于平均速度、平均加速度与最小二乘法的插值估算策略, 利用多个霍尔状态信息估算电机的转速与转子位置。在理想的霍尔信号条件下, 霍尔状态数越多, 上述方法拟合的速度与转子位置就越接近真实值。但在实际系统中, 霍尔传感器通常安装于电机端部靠近铁心的位置, 由于端部磁场影响、霍尔元件参数不一致、安装偏差等因素影响, 导致输出的三相霍尔信号存在正交误差, 即 1 个电周期内的 6 个状态相位不等, 这将导致估算速度和位置误差增大, 引起电流波形畸变, 致使系统性能下降。文献[4]分析了霍尔位置的检测误差, 采用 3D 有限元分析方法评价并确定霍尔传感器的安装位置, 抑制位置检测误差。

霍尔信号的基波成分承载着连续的位置信息, 但其频率随电机转速而变化, 研究者分别提出低通滤波器<sup>[5]</sup>、自适应同步频率跟踪滤波器<sup>[6]</sup>、扩展卡尔曼滤波器<sup>[7]</sup>等来提取霍尔信号的基波, 滤波器增加了算法的复杂性, 降低了位置估算的响应时间。为简化滤波器设计, 文献[8]将两相正交霍尔信号低通滤波后由锁相环提取转子角度, 该方案降低了电机动态过程中的估计误差。文献[9]提出将霍尔信号计算转速前馈到反电势观测器中, 提升了位置

估算的精度。在此基础上, 文献[10]采用位置矢量跟踪观测器, 文献[11]提出级联双观测器抑制霍尔信号中的低次谐波。针对霍尔位置偏差问题, 文献[12]将级联观测器与解耦控制相结合, 提高了位置估算精度; 文献[13]采用变参数的锁相环在较宽的转速范围内提高了估算位置的精度。

针对霍尔信号偏差导致估算位置在修正处发生突变的问题, 上述的滤波器法、观测器法存在算法复杂、对控制器配置要求高、动态响应差等问题。为简化算法、降低对控制器的要求, 本文对平均速度插值法进行改进, 低速段和高速段分别基于三路和单路霍尔信号进行平均速度计算和位置修正, 能够有效抑制估算位置突变导致的电流畸变, 改善电机电流的正弦度, 具有算法简单、容易实现的优点, 其有效性得到了实验验证。

## 1 永磁同步电机矢量控制系统

### 1.1 永磁同步电机的数学模型

永磁同步电机在  $dq$  坐标系下数学模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} P_n [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  和  $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压和电流;  $R$  为绕组相电阻;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感;  $\omega$  为转子电角频率;  $\psi_f$  为永磁磁链;  $T_e$  为电磁转矩;  $P_n$  为电机极对数。

对于交、直轴电感相等的表面磁钢永磁同步电机, 电磁转矩方程可以得到进一步简化, 其大小与  $q$  轴电流成正比, 且  $d$  轴电流为零时可以实现最大转矩电流比控制。

### 1.2 基于霍尔传感器的驱动系统组成

采用  $i_d=0$  矢量控制的永磁同步电机驱动系统如图 1 所示, 它由逆变器、电机、霍尔磁极位置传感器、电流传感器和控制器构成, 其中控制器采用 DSP 芯片实现矢量控制的软件算法。不同于传统采用编码器或旋转变压器进行获取转子位置和速度, 这里用到的转子速度和位置信息由 3 个霍尔位置

传感器的信号  $H_a$ 、 $H_b$ 、 $H_c$  并结合 DSP 中的软件估计算法得到。

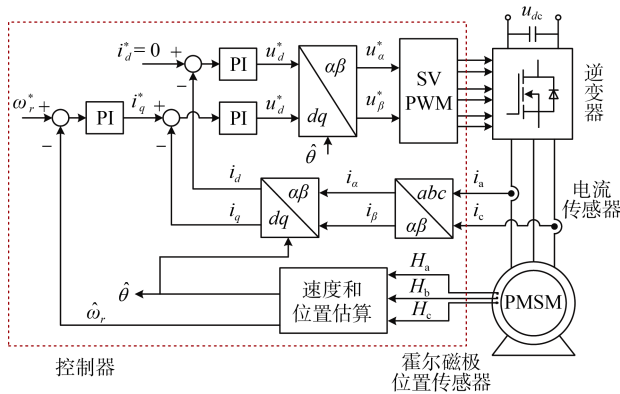


图 1 永磁同步电机驱动系统组成  
Fig. 1 Drive system of PMSM

## 2 基于霍尔信号的速度和位置估算

### 2.1 平均速度及位置估算

三路霍尔位置传感器输出信号如图 2 所示，1 个周期具有 6 个绝对位置点，把霍尔信号分成 6 个扇区，扇区内的角度可以根据电机的平均速度结合线性插值法来估算。假设电机稳速运行，由三路霍尔异或得到的  $H_{XOR}$  信号 2 个跳沿之间的电角度为  $\pi/3$ ，结合其持续时间计算该扇区内的平均速度，用于估算下一个霍尔扇区的实时角度，算法如下：

$$\begin{cases} \omega_{k-1} = \frac{\pi}{3(t_k - t_{k-1})}, & (t_k < t < t_{k+1}) \\ \theta(t) = \theta_k + \omega_{k-1}\Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\omega_{k-1}$  为  $k-1$  扇区内的平均电角速度 (rad/s)； $t_{k-1}$ 、 $t_k$  分别为  $k-1$  的起始和结束时间； $\Delta t$  为扇区  $k$  中的运行时间； $\theta(t)$  为扇区  $k$  中的实时位置； $\theta_k$ 、 $\theta_{k+1}$  为扇区  $k$  的边界角度。

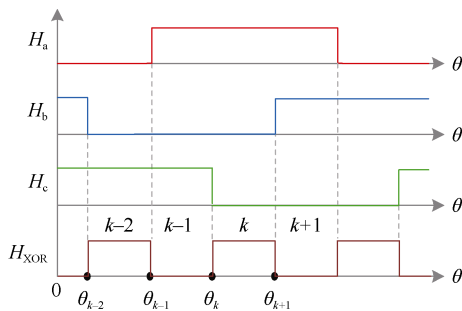


图 2 霍尔信号  
Fig. 2 Signals of Hall-effect sensor

平均速度方法是利用前一个霍尔扇区的速度积分得到当前霍尔扇区的位置估算值。当电机运行平稳时，估算位置能够如实反映实际位置；但在转速动态变化时，上一个霍尔扇区的平均速度法与当前速度不相等，将导致估算位置与实际位置出现偏差。这时可以利用霍尔跳沿对估算位置进行及时修正，避免估算误差累积到下一个扇区，如图 3 所示。

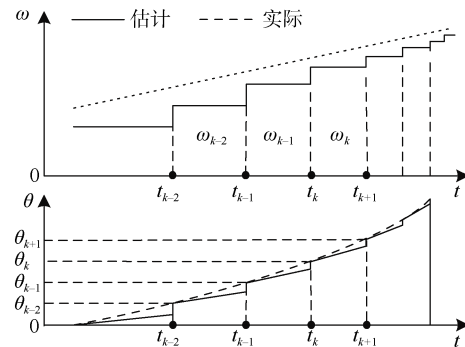


图 3 位置估算与修正  
Fig. 3 Position estimation and correction

### 2.2 位置传感器偏差的影响及算法优化

理想情况下每一个霍尔信号扇区为  $\pi/3$  电角度，但受到霍尔传感器参数不一致、安装误差等因素的影响，霍尔扇区所占角度并非均匀。在利用平均速度估算电机转速和位置时，即使电机转速平稳，由于霍尔信号的偏差也会导致计算转速在扇区间跳动，如图 4 所示，引起估算位置出现误差且在修正处发生跳变，这将导致电机电流发生畸变。

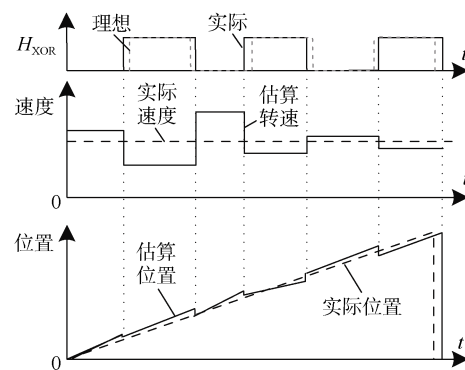


图 4 霍尔信号偏差导致的估算误差  
Fig. 4 Estimation errors produced by biased Hall signals

为平滑估算的位置进而提高电机电流的正弦度，将基于平均速度的位置估算方法进行改进，具体做法为：在电机起动和低速运行阶段，基于三路霍尔信号

进行速度计算、位置估算和修正; 在高速运行阶段, 基于一路霍尔进行上述计算, 能够使计算的平均速度更接近实际速度, 估算位置更平滑。

### 3 实验结果

针对潜航器主推进永磁同步电机, 设计基于霍尔传感器的矢量控制系统对算法进行验证。电机驱动器采用 STM32F407 作为控制芯片, 逆变器由 MOSFET 器件构成, 与电流传感器、通讯芯片、辅助电源电路等集成在 1 块电路板上, 为评估位置估算精度, 电机轴系安装光电编码器用于检测转子位置, 实验平台如图 5 所示。

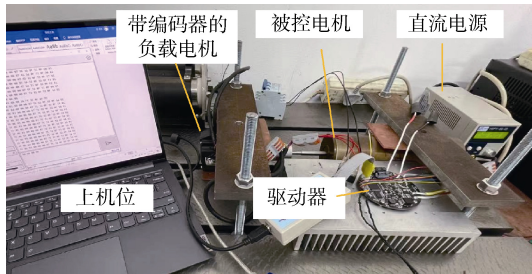


图 5 电机驱动系统实验平台

Fig. 5 Experimental platform of motor drive system

电机起动和正反转过程中的位置估算结果如图 6 和图 7 所示。在电机起动过程中, 由于转速不断变化, 采用上一霍尔扇区的平均速度进行当前扇区位置估算时, 平均速度计算值小于实际值导致位置估算值偏小, 需要在扇区跳沿处进行及时修正, 从而限制了转速动态过程中的位置估算误差。从图 7 可以看出, 采用三霍尔计算平均转速和位置修正也能够保障电机正反转切换过程的平稳运行。

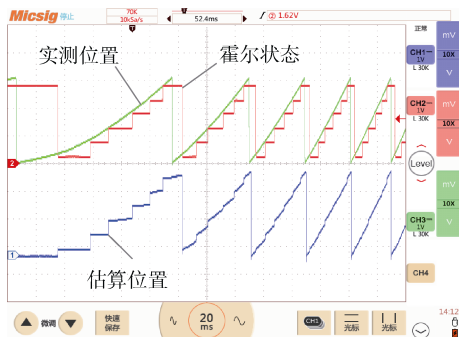


图 6 电机起动过程中的估算和实测位置

Fig. 6 Estimated and measured positions during motor start

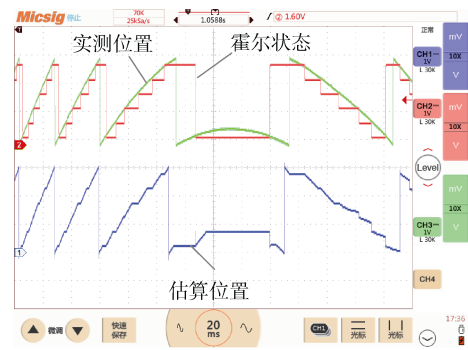


图 7 电机正反转切换过程中的估算和实测位置

Fig. 7 Estimated and measured positions during motor switching direction

该电机为 5 对极, 转子外径为 35 mm, 霍尔检测的永磁磁条安装偏差容易导致霍尔信号出现偏差, 如图 8 所示, 每个霍尔状态所占的角度并不均匀。例如, 对霍尔状态 2 所占电角度明显小于霍尔状态 3, 导致所用时间偏小, 平均速度计算值偏大, 用此速度进行霍尔状态 3 内的位置估算时位置斜率增大, 到达霍尔状态 3 和 4 的边沿处时估算位置比实际值偏大, 位置出现向下修正的跳变。

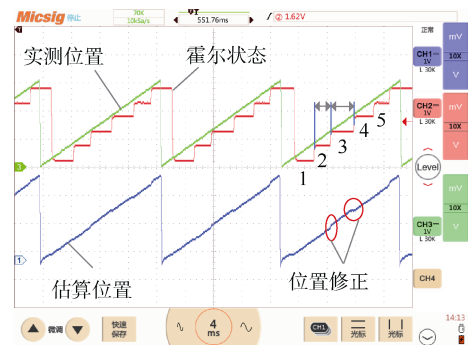


图 8 霍尔信号偏差带来的位置跳变

Fig. 8 Estimated position jump caused by Hall signal deviation

图 9 为采用三路霍尔进行速度计算和位置估算时的电流波形, 由于霍尔状态的不均匀导致在霍尔跳沿处的估算位置发生跳变, 电机电流出现畸变, 导致电机振动和噪声增大。为改善电流波形, 采用单霍尔信号进行平均速度计算和位置估算, 且每 1 周期仅修正 1 次位置, 实验结果如图 10 所示。由于每周期的霍尔均对应 180°电角度, 平均速度计算值更接近真实速度, 估算位置更精确和平滑, 电流正弦度较好, 从而降低了电机噪声。

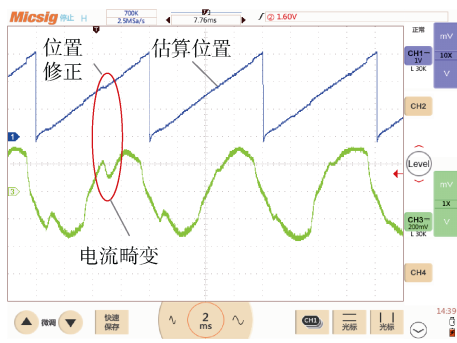


图 9 三霍尔估算方法下的电流波形

Fig. 9 Current waveform with three Hall-effect sensors

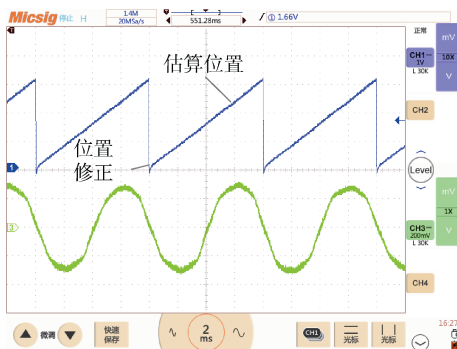


图 10 单霍尔估算方法下的电流波形

Fig. 10 Current waveform with single Hall-effect sensor

### 4 结束语

低分辨率的霍尔磁极位置传感器结合位置估算方法能够实现永磁同步电机的高性能矢量控制,但霍尔传感器参数不一致、安装误差等因素导致了输出的霍尔信号各扇区角度不等,增大了速度和位置估算的误差。本文结合三霍尔和单霍尔的平均速度插值的位置估算方法,解决了霍尔信号偏差导致的电流畸变问题,同时保障了电机起动和正反转切换等动态过程的稳定性。该方法具有算法简单、容易实现的优点,实验结果验证了其有效性。

### 参考文献

[1] 马伟明,王东,程思为,等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 ( 8 ): 2025-2035.

[2] CAPPONI F G, DONATO G D, FERRARO L D. Brushless AC drive using an axial flux synchronous PM motor with low resolution position sensors[C]// Power

Electronics Specialists Conference. Aachen: IEEE, 2004.

[3] 邵定国,杨泽众. 基于 HallFOC 的永磁同步电动机控制方法研究[J]. 微特电机, 2018, 46 ( 9 ): 28-32.

[4] 徐征,李铁才. 准无位置传感器永磁同步电动机驱动系统中霍尔传感器位置检测误差的分析及解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 ( 1 ): 168-173.

[5] DALALA Z M, CHO Y, LAI J S. Enhanced vector tracking observer for rotor position estimation for PMSM drives with low resolution Hall-effect position sensors[C]// Electric Machines & Drives Conference. Chicago: IEEE, 2013.

[6] 赵远洋,韩邦成,陈宝栋. 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.

[7] BOLOGNANI S, TUBIANA L, ZIGLIOTTO M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 ( 6 ): 1741-1747.

[8] 蒋新柱,翟涌. 基于霍尔和锁相环的改进型 PMSM 转子位置估计[J]. 微特电机, 2019, 47 ( 3 ): 10-14.

[9] KIM S Y , CHOI C , LEE K, et al. An improved rotor position estimation with vector-tracking observer in PMSM drives with low-resolution Hall-effect sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 ( 9 ): 4078-4086.

[10] HARKE M C, DONATO G, GIULII C F, et al. Implementation issues and performance evaluation of sinusoidal, surface-mounted PM machine drives with Hall-effect position sensors and a vector-tracking observer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44 ( 1 ): 161-173.

[11] YOO A, SUL S K, LEE D C, et al. Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low-resolution position sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 ( 12 ): 2897-2906.

[12] ZHAO M J, AN Q T, CHEN C Q, et al. Observer based improved position estimation in field-oriented controlled PMSM with misplaced Hall-effect sensors[J]. Energies, 2022, 15 ( 16 ): 5985

[13] 廖勇,李蓬威,林豪,等. 一种变参数 N-PI 型 PLL 的霍尔位置传感器 PMSM 转子位置估计方法[J].电机与控制学报, 2020, 24 ( 11 ): 27-36, 47.

(责任编辑:曹晓霖)