DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.313 中图分类号：TM341 文献标志码：A

基于最小二乘和滑模观测器的霍尔传感器永磁同步电机转速估计方法

曾岁程[1]，但汉兵[2](中国电源学会会员)，李鼎文[3]，粟 梅[2]
(1.国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，长沙 410007；2.中南大学自动化学院，长沙 410083；3.中国航发南方工业有限公司，株洲 412000)

摘要：永磁同步电机以其高功率密度、高可靠性和易于维护的优势在工业电动车辆领域得到了广泛应用。与配置高精度编码器和无速度传感器算法的永磁同步电机相比，配置霍尔传感器的永磁同步电机兼顾了系统成本和控制性能。然而，在矢量控制方法中，低分辨率的霍尔传感器输出的位置和速度信息精度较差，从而造成电流和电磁转矩的脉动。因此提出1种融合的速度估计方法，采用最小二乘法不依赖于电机参数输出连续平滑的角度，并基于电机机械运动方程设计滑模观测器实时估计转速，采用方波启动以解决离散位置信息缺失的问题，并对设计的观测器进行李雅普诺夫稳定性证明。最后实验结果验证了所提转速估计方法的正确性和可行性。

关键词：永磁同步电机；霍尔传感器；位置和速度估计；滑模观测器；最小二乘法

Speed Estimation Method for Permanent Magnet Synchronous Motor with Hall Sensors Based on Least Squares Algorithm and Sliding Mode Observer

ZENG Suicheng[1], DAN Hanbing[2], *Member*, *CPSS*, LI Dingwen[3], SU Mei[2]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China; 3. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have been widely applied in the field of industrial electric vehicles owing to their advantages of high power density, high reliability and easy maintenance. Compared with the PMSM equipped with a high-precision encoder and a speed sensorless algorithm, the PMSM equipped with Hall sensors can guarantee the system's low cost, as well as its control performance. However, the output information about the position and velocity from low-resolution Hall sensors is of low accuracy when using the vector control method, resulting in motor current ripple and electromagnetic torque pulsation. Therefore, a fusion speed estimation method is proposed, in which the least squares method independent of motor parameters is used to output a continuous smooth angle, and a sliding mode observer based on the motor's mechanical motion equation is designed to estimate the speed in real time. The motor is started by square wave to solve the problem of missing discrete position, and the designed observer is also proved by the Lyapunov stability method. Finally, experimental results verify the correctness and feasibility of the proposed speed estimation method.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor (PMSM); Hall sensor; position and velocity estimation; sliding mode observer; least squares method

收稿日期：2023-04-23；**修回日期：**2023-10-23；**录用日期：**2023-12-04；**网络首发日期：**2024-04-24
基金项目：国网公司科技资助项目(5216A5220023)；国家自然科学基金面上资助项目(52277071)
This work is supported by the Technology Project of State Grid Corporation of China under the grant 5216A5220023; National Natural Science Foundation of China under the grant 52277071

永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous motor)有诸多优势，如功率因数高、体积小、效率高、成本低、易于维护等[1-3]。因此，永

磁同步电机被应用于工业电动车辆领域，通过控制永磁同步电机的转速从而控制油泵的液压流量进而驱动工业电动车辆行驶。

主流的永磁同步电机矢量控制策略，其高性能控制需要精确的转子位置及转速信息，以便转速和电流的闭环控制，实现正弦波驱动[4]。高精度的位置传感器，如光电编码器和旋转变压器，通常安装在电机转子的轴端，但其结构复杂，容易受到恶劣环境的干扰，这会降低驱动系统的可靠性，并受到系统规模和成本的限制[5]。无速度传感器算法实现复杂且依赖电机参数，在电机启动过程中存在不可靠性，主要用于印染、纺机和钢铁生产线等对安全性要求不高的领域[6-8]。因此为了适用于要求低成本和高安全性的应用场合，通常采用基于开关霍尔位置传感器的永磁同步电机[9-11]。

为了通过霍尔位置传感器获得矢量控制所需的连续位置信号和精确速度信息，已有文献提出了 2 类位置和速度估计方法。一类是依赖低分辨率的霍尔位置信号进行位置信号的估算[12-15]；另一类是基于电机模型来处理低分辨率位置信号[16-18]。

文献[12]于 1996 年提出了利用平均速度估计法处理离散霍尔信号的硬件电路实现方法，1998 年美国学者 Xu 在此基础上进行了简化，提出了平均速度法的软件实现方式。平均速度法把上一扇区的平均速度作为当前转子所在霍尔扇区的速度，结合转子所在霍尔扇区已经运行的时间实时地估算出转子位置，此方法不依赖任何电机参数来处理离散的霍尔信号。然而，当电机处于加速或减速等非匀速运行状态时，位置和速度的估计误差会变大[13]。针对此问题，在平均速度法的基础上，意大利 Capponi 研究团队将加速度引入霍尔信号处理中，假定其在相邻霍尔扇区是不变的，提出了平均加速度法，进而提高估算精度[14]。此外，众多学者对平均速度法和平均加速度法进行了一系列改进[15]。随着估计阶次的增加，不仅位置估计精度提升不明显，还会使计算复杂化，增加处理器的运算负担。此外，上述速度估计方法噪声大，存在速度估计时间滞后的问题。

低分辨率霍尔信号通过合适的变换转变成霍尔旋转矢量，构成的霍尔旋转矢量中存在转子位置和速度的有效信息，对旋转矢量进行傅里叶分解，所得信号包括基波信号和其他谐波噪声信号。然后通过低通滤波的方式将除了基波的谐波信号滤除，进而得到理想的基波频率，实现转子信息的提取[16]。随着转子的转动，基波频率会随着转速的变化而改变，滤波参数复杂且难以实时确定，低通滤波器固定的增益和截止频率不能有效去除高频干扰，特别是当电机处于低速运行工况时，需设置极低的滤波带宽，这对霍尔信号滤波的动态响应是不利的。状态观测器将电机模型和闭环控制相结合，考虑了电机参数的影响，提高了转速和位置估计的瞬时精度，通过设置合适的观测器带宽，保证转速环的控制性能。因此，基于观测器法的低分辨率霍尔传感器位置速度估算策略引起了国内外学者的广泛关注，主要分为基于电机机械运动方程的观测器和基于反电动势的观测器 2 种，但观测器输入角度的误差会影响状态观测器的估计精度[17-19]。

综合上述分析，本文针对配置低精度霍尔传感器的永磁同步电机，提出了 1 种基于最小二乘和滑模观测器的转子速度估计方法，实现了高精度的速度和位置估计。该方法结合了基于电机模型的滑模观测器方法和不依赖于电机模型的最小二乘方法的优点，可以平滑地输出角度，并提高速度估计的鲁棒性和动态性能。

本文首先介绍了永磁同步电机的数学模型，在介绍霍尔传感器原理的基础上详细分析了传统平均速度法在应用中存在的问题。然后针对这些问题，阐述了最小二乘法处理霍尔信号的具体方法和滑模观测器的参数设计及稳定性证明。最后通过实验结果验证了所提基于最小二乘和滑模观测器的速度估计方法的正确性。

1 永磁同步电机的数学模型

对于采用“$i_d=0$”矢量控制策略的三相表贴

式永磁同步电机，假设三相电机电流是对称的正弦电流，忽略铁心饱和、涡流和磁滞损耗等，选择基于转子电角速度的两相正交旋转坐标系 *d-q*，其电机定子电压方程和电磁转矩方程的表达式[20]分别为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \dfrac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \tag{1}$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \tag{2}$$

式中：u_d、u_q 分别为定子电压直轴、交轴分量；R_s 为电机定子电阻；i_d、i_q 分别为定子电流直轴、交轴分量；L_d、L_q 分别为定子电感直轴、交轴分量，且 L_d=L_q；ω 为转子的瞬时电角速度，也是同步旋转坐标系 *d-q* 的旋转速度；ψ_f 为电机转子的永磁体磁链；n_p、T_e 分别为电机的极对数和电磁转矩；ψ_d、ψ_q 分别为定子磁链直轴、交轴分量。

2　基于霍尔传感器的传统转子位置估计方法

2.1　基于霍尔传感器的工作原理

图 1 是 1 对极的永磁同步电机示意图，其中 Ha、Hb、Hc 均为三相霍尔传感器，相差 2π/3 夹角安装于电机三相定子中，三相定子绕组的轴线构成三相静止坐标系 *ABC*。霍尔传感器 Ha 滞后于 A 相定子 π/3 电角度。当电机转子以某一速度旋转时，

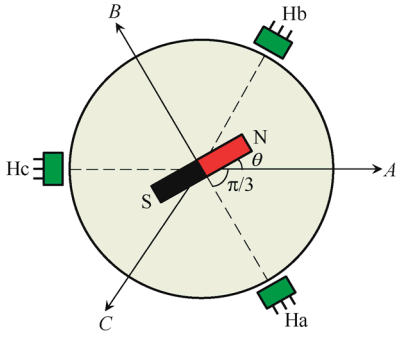


图 1　永磁同步电机中霍尔传感器的安装示意

Fig. 1 Schematic of installation of Hall sensors in PMSM

3 个霍尔位置传感器将输出不同的方波波形，彼此之间存在相位差。

霍尔传感器的输出信号和霍尔扇区划分如图 2 所示，1 个 2π 电角度周期被分成 6 个 π/3 电角度的霍尔扇区，XOR 是 3 个霍尔传感器输出信号的异或运算。因此，通过检测 3 个霍尔位置传感器的高、低电平，可以区分转子此刻处于哪个霍尔扇区，从而获得分辨率为 π/3 电角度的位置信号。

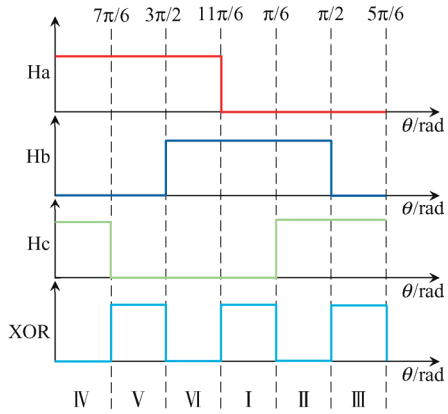


图 2　霍尔传感器的输出信号和霍尔扇区划分

Fig. 2 Output signal and sector division of Hall sensors

2.2　传统平均速度法

在平均速度估计算法中，由于机械时间常数远大于电气时间常数，每个扇区内的平均电角速度的估计公式为

$$\omega_i = \frac{\pi / 3}{\Delta t_i} \tag{3}$$

式中：ω_i 为转子在第 i 个扇区内的平均电角速度；π/3 是 2 个霍尔扇区之间的位置间隔；Δt_i 为转子穿过第 i 个扇区所需的时间。

对式(3)得到的电角速度进行数值积分，可以得到转子电角度位置，且其值限制在相邻的 2 个霍尔扇区之间，电角度表达式为

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_i + kT_s\omega_i \\ \theta_i \leqslant \theta(t) \leqslant \theta_i + \dfrac{\pi}{3} \end{cases} \tag{4}$$

式中：θ_i 为第 i 个霍尔扇区的电角度起点；k 为控制周期序列数；T_s 为系统的控制周期。

当电机以恒定速度运行时，式(4)的转子电角度位置估计方法是可行的，但电机加减速运行时，实

际电角速度与平均电角速度 ω_i 存在偏差，转子电角度位置估计会产生误差，造成电流波动和转矩脉动，从而削弱了驱动系统的性能。

同时，由于扇区时间间隔采用控制周期量化，当前扇区时间可能会产生$\pm T_s$ 的误差，影响速度估计的精度。特别是随着电机转速的增大，估计转速波动会变大，影响转速闭环控制和转子位置估计。转速估计误差可以表示为

$$\omega_{\text{error}} = \frac{T_s}{\Delta t_i} \times 100\% = \frac{3T_s\omega_i}{\pi} \times 100\% \tag{5}$$

3 改进的位置和速度估计方法

为了克服传统估计方法的不足，本文提出了 1 种改进的转子位置和速度估计方法。图 3 为基于最小二乘和滑模观测器的带霍尔传感器的永磁同步电机矢量控制框图。图中：ω^*为转速参考值；$\hat{\omega}$ 为转速估计值；i_d^*、i_q^*分别为定子电流给定直轴、交轴分量；u_α、u_β分别为定子电压 α、β 轴分量；i_α、i_β分别为定子电流 α、β 轴分量；i_A、i_B、i_C均为三相定子电流；U_{dc} 为直流电压；$\hat{\theta}$ 为电角度估计值。控制方法采用双闭环矢量控制，内环是电流环，采用电流调节器 ACR(automatic current regulator)；外环是转速环，采用转速调节器 ASR(automatic speed regulator)。最小二乘法可以在不需要任何电机参数的情况下平稳地处理霍尔信号。观测器不仅能准确地估计电机的转速，而且具有良好的动态特性和较强的鲁棒性。

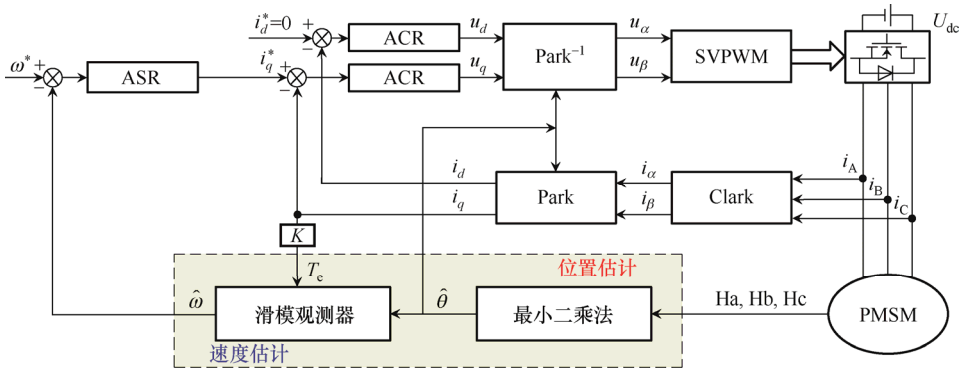


图 3 基于改进方法的永磁同步电机矢量控制框图

Fig. 3 Block diagram of vector control for PMSM based on improved method

3.1 最小二乘位置估计

在 1 个电周期中，3 个霍尔传感器的输出具有 6 个离散的霍尔状态 $\theta_i(i = 1, 2, \cdots, 6)$，构成了低分辨率的位置信息，如图 4 所示，采用最小二乘法获得高分辨率位置信息，输出的估计位置也作为滑模观测器的输入来估计负载转矩和转子速度。

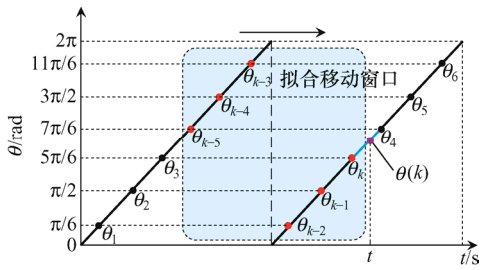


图 4 离散霍尔状态的最小二乘估计

Fig. 4 Least squares estimation of discrete Hall states

最小二乘法是指曲线误差的总体大小由误差平方和的大小来衡量，利用这种方法较易求出多项式的系数。选取 6 个连续的霍尔状态作为数据拟合点。该法能够估计出下一个霍尔状态出现之前的连续位置。拟合窗口随着霍尔状态的更新而移动，长度为 6 个霍尔状态。此外，估计的连续位置值限制在 2 个相邻的霍尔状态之间。

考虑到拟合效率和估计精度的要求，拟合的阶次选定为 2 次，拟合表达式为

$$\theta(t) = a_2t^2 + a_1t + a_0 \tag{6}$$

式中：a_0、a_1、a_2 为未知系数，计算式[21]为

$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{B} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 6 & \sum_{k=1}^{6}t_k & \sum_{k=1}^{6}t_k^2 \\ \sum_{k=1}^{6}t_k & \sum_{k=1}^{6}t_k^2 & \sum_{k=1}^{6}t_k^3 \\ \sum_{k=1}^{6}t_k^2 & \sum_{k=1}^{6}t_k^3 & \sum_{k=1}^{6}t_k^4 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{6}\theta_k \\ \sum_{k=1}^{6}t_k\theta_k \\ \sum_{k=1}^{6}t_k^2\theta_k \end{bmatrix}$，

t_k为 θ_k对应的时刻，θ_k为离散的霍尔状态值。

由式(7)可知，在启动时的前几拍缺乏位置信息。为应对这一问题，电机采用 180° 方波启动[22]。此时角度近似表示为

$$\theta(t)=\theta_k+\frac{\pi}{6}\qquad k\leqslant 6 \tag{8}$$

3.2 基于滑模观测器的速度估计

基于滑模观测器的速度估计方法，具有零滞后跟踪能力、鲁棒性强、估计效果好等优点[23]。相对于负载转矩的变化，控制器的采样频率远高于它，因此负载转矩在 1 个控制期间可以视为恒定值。忽略机械摩擦的影响，运动方程表达式为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega \\ \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{T_\mathrm{e}-T_\mathrm{L}}{J}n_\mathrm{p} \\ \dfrac{\mathrm{d}T_\mathrm{L}}{\mathrm{d}t}=0 \end{cases} \tag{9}$$

式中，θ、T_L、J 分别为永磁同步电机的电角度、负载转矩和机械转动惯量。

所设计的滑模观测器可表示为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\hat{\theta}}{\mathrm{d}t}=\hat{\omega}+P \\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{\omega}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{T_\mathrm{e}-\hat{T}_\mathrm{L}}{J}n_\mathrm{p}+R \\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{T}_L}{\mathrm{d}t}=gR \end{cases} \tag{10}$$

式中：^表示估计值；P 和 R 均为所设计的滑模观测器的控制律；g 为反馈系数。

式(9)和式(10)相减得到系统的状态观测误差方程为

$$\begin{cases} e_1=\hat{\theta}-\theta \\ e_2=\hat{T}_\mathrm{L}-T_\mathrm{L} \\ \dot{e}_1=\dot{\hat{\theta}}-\dot{\theta}=\hat{\omega}-\omega+P \\ \ddot{e}_1=\dot{\hat{\omega}}-\dot{\omega}+\dot{P}=-\dfrac{e_2}{J}n_\mathrm{p}+R+\dot{P} \\ \dot{e}_2=\dot{\hat{T}}_\mathrm{L}-\dot{T}_\mathrm{L}=gR \end{cases} \tag{11}$$

式中：e_1为转子电角度位置观测误差；e_2为负载转矩的观测误差。

为了实现有限时间的收敛并且保证稳定收敛的精度，选择观测器的滑模面为

$$s=ce_1+\dot{e}_1 \tag{12}$$

式中，c 为固定常数。

对式(12)两边分别进行求导得到

$$\dot{s}=c\dot{e}_1+\ddot{e}_1=c\dot{e}_1-\frac{e_2}{J}n_\mathrm{p}+\frac{\dot{e}_2}{g}+\dot{P} \tag{13}$$

滑模观测器的控制律 P 设计为

$$\dot{P}=-c\dot{e}_1+fR \tag{14}$$

式中，f为常数。

观测器的滑模趋近律设计为

$$\begin{cases} \dot{s}=-k_1\mathrm{sigmoid}(s)-\dfrac{e_2}{J}n_\mathrm{p} & k_1>0 \\ \mathrm{sigmoid}(s)=\dfrac{2}{1+\mathrm{e}^{-hs}}-1 & h>0 \end{cases} \tag{15}$$

式中：k_1为观测器增益，是常数；h 为正常数。

h 取值越大，系统收敛速度越快，但系统抖振越大；h 取值越小，系统收敛速度越慢，但系统抖振越小。综上分析，取 h=4。结合式(13)~式(15)，求得滑模控制律 R 的表达式为

$$R=\frac{-k_1}{f+1}\mathrm{sigmoid}(s) \tag{16}$$

对设计的滑模观测器进行稳定性和鲁棒性分析，假设转动惯量 J 存在 ξ 的误差，且误差是有界的，即 $|\xi|<\varepsilon$，其中 $\varepsilon>0$，选择李雅普诺夫方程为

$$V=\frac{1}{2}s^2 \tag{17}$$

对式(17)求导可得

$$\dot{V}=s\dot{s}=s\left(-k_1\mathrm{sigmoid}(s)-\frac{e_2}{J+\xi}\right) \tag{18}$$

为了保证式(18)恒小于 0，常数 k_1 应该满足

$$k_1 > \frac{|e_2|}{J-\varepsilon} > \frac{|e_2|}{J+\xi} \tag{19}$$

因此，当 $s>0$ 时，$\dot{V}<0$；当 $s<0$ 时，$\dot{V}<0$。当系统进入滑动状态时，$s=0$ 且 $\dot{s}=0$。在转动惯量 J 存在误差时，由式(13)和式(14)推导得到

$$e_2 = C_1 \mathrm{e}^{\frac{gn_\mathrm{p}}{(J+\Delta J)(f+1)}t} \tag{20}$$

式中，C_1 为常数。

通过合理设计相关系统参数，使 $f>-1$ 且足够小、$g<0$ 且 $|g|$ 足够大，从而使式(20)的指数项迅速收敛到 0，保证李雅普诺夫方程的导数小于 0。基于上述分析，所设计的滑模观测器是稳定的且具有一定的鲁棒性。本文所设计的滑模观测器的具体框图如图 5 所示。

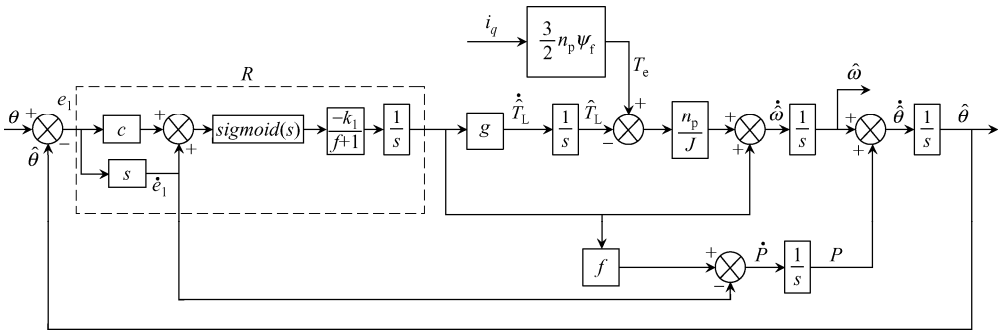
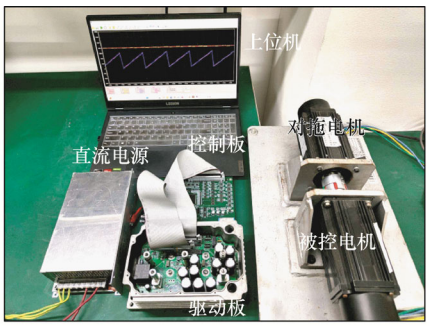


图 5 滑模观测器的框图

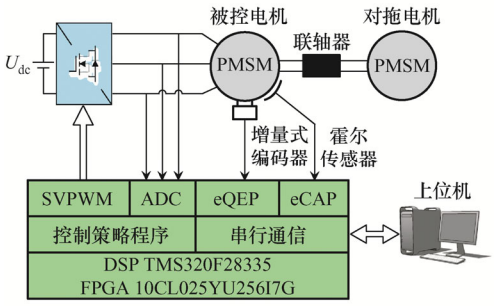
Fig. 5 Block diagram of sliding mode observer

4 实验验证

为了验证所提方法的正确性和有效性，搭建永磁同步电机驱动系统实验平台，如图 6 所示。实验平台包括电机控制器、电脑监控通用软件、2 台功率为 750 W 的三相永磁同步电机，其中一台是被控电机，另一台是对拖电机，通过对拖电机加星形电阻负载实现加载。控制主芯片采用德州仪器 TMS320F2 8335 芯片，控制周期和开关周期均为 100 μs，24 V 的直流电源作为电机控制器的直流母线输入，主芯片产生的开关管占空比信号经 FPGA 芯片产生对应的开关管信号，控制三相电压型逆变器驱动三相交流永磁同步电机。电机的运行状态信号经过串口通信存储于电脑中，并导入到 MATLAB 分析处理。



(a) 实物



(b) 系统框图

图 6 永磁同步电机实验平台

Fig. 6 Experimental platform of PMSM

电机定子上安装了 3 个呈 2π/3 夹角的霍尔传感器。电机的转子轴端安装 2 500 线的高精度增量式编码器，测量电机转子的实际位置和速度。三相交流永磁同步电机的具体参数见表 1。

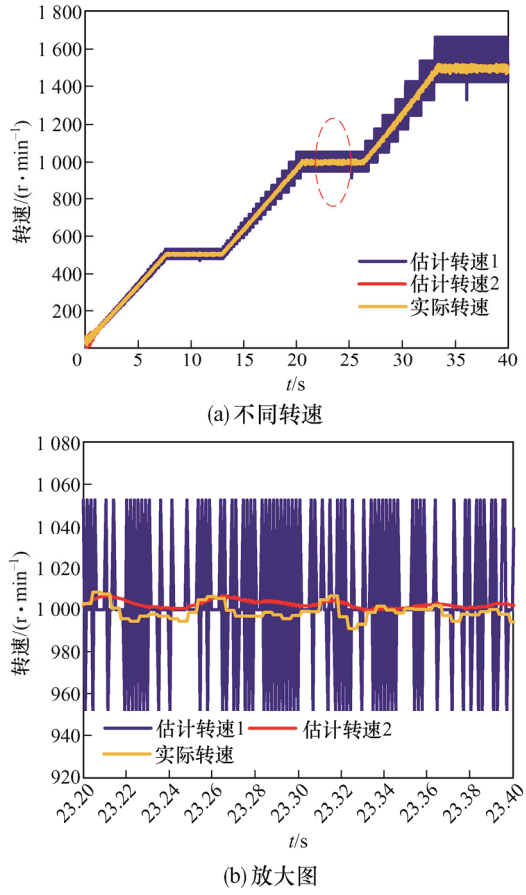
图 7 为永磁同步电机不同转速下的速度估计效果实验波形。估计转速 1 采用平均速度法计算，在 1 000 r/min 时，估计转速 1 有±50 r/min 的持续波动，且波动随转速的升高而变大。估计转速 2 利用改进的最小二乘和滑模观测方法估计转速，与实际速度基本重合，在 1 000 r/min 时，估计转速 2 与实际转速的偏差在 5 r/min 内。因此，所提转速估计

方法相对于平均速度法的稳态精度有较大提高。

表 1　永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of PMSM

参数	数值
定子电阻/Ω	0.017
d 轴电感/μH	15
q 轴电感/μH	15
额定电压/V	24
额定电流/A	32
极对数	5
额定转矩 /(N·m)	1.25
永磁体磁链/Wb	0.007 235



(a) 不同转速

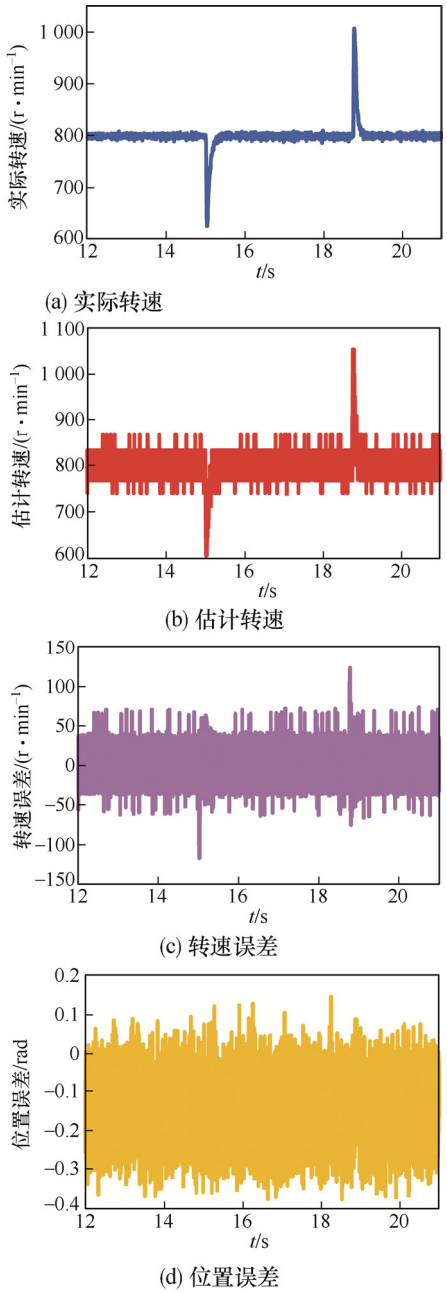
(b) 放大图

图 7　不同转速下的实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms at different speeds

图 8 和图 9 对比了传统转速估计方法和改进转速估计方法的动态性能。控制电机转速达到 800 r/min，转速达到稳态后切入电阻负载，转速会有 180 r/min 的短暂跌落，随后恢复至稳态转速，然后将电阻负载切除，瞬时转速达到 1 000 r/min，通过转速环调节降至稳态转速。

从图 8 可以看出，采用传统方法电机带载时，估计瞬时转速的偏差达到 120 r/min，电机切载时，估计瞬时转速的偏差为 130 r/min，转子估计位置误差在−0.38~0.17 rad 范围之间。



(a) 实际转速

(b) 估计转速

(c) 转速误差

(d) 位置误差

图 8　平均速度法负载突变实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms of average velocity method under changes in load

采用改进估计方法时，如图 9 所示，电机带载的转速估计误差在 28 r/min 内，切载时的转速估计误差在 40 r/min 内，具有较好的动态性能，

稳态运行和负载突变时的位置估计误差为−0.22~0.07 rad。

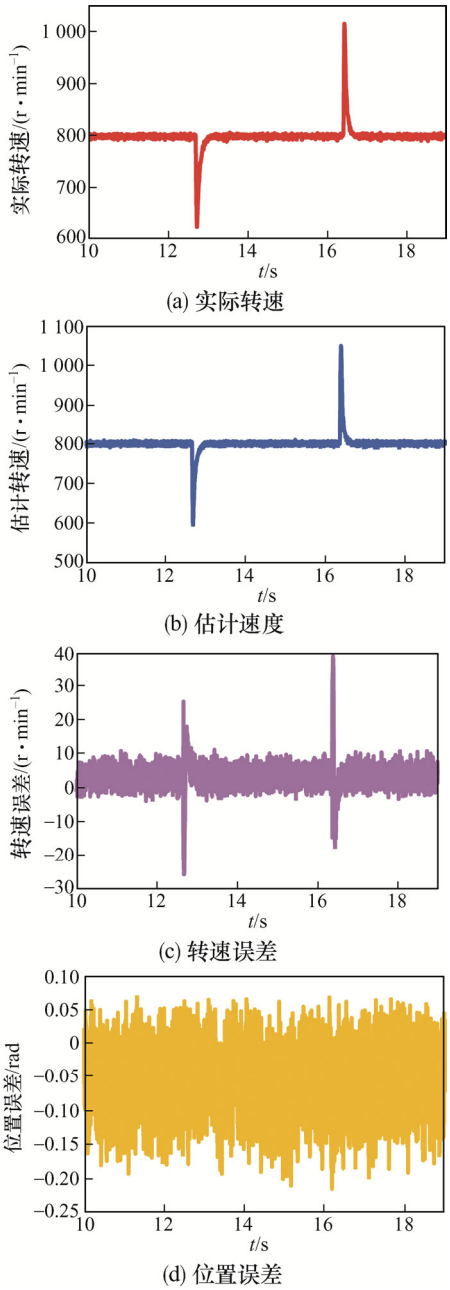


图 9 改进方法负载突变实验波形

Fig. 9 Experimental waveforms of improved method under changes in load

闭环稳态实验，以估计的转速、位置替代高精度增量式编码器测量的电机转速、位置，按照双闭环“i_d=0”矢量控制方法控制三相交流永磁同步电机。给定转速为 500 r/min，对拖电机接星形电阻负载，负载转矩为 0.7 N·m。

图 10 为传统方法和改进方法下的电机相电流闭环实验波形。由图可见，改进方法下的相电流畸变程度明显更小，总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)为 16.48%；而采用传统估计方法的相电流畸变程度更大，THD=36.00%。

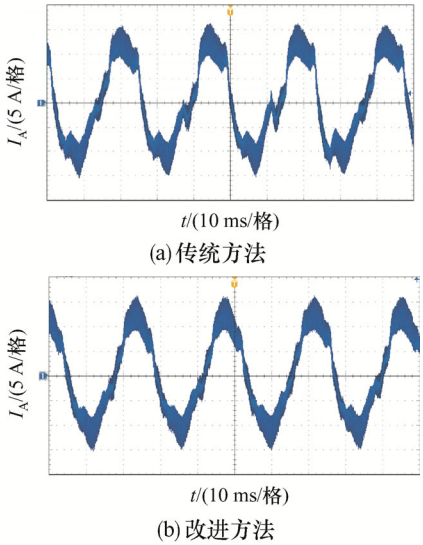


图 10 带载相电流波形

Fig. 10 Waveforms of phase current under load

5 结语

本文首先针对霍尔传感器精度较低的问题，详细分析了其工作原理，提出了 1 种改进的带有霍尔传感器的永磁同步电机位置和速度估计方案。然后采用最小二乘法进行位置估计，设计滑模观测器观测转速。最后通过实验验证了所提方法的正确性。与传统的平均速度估计法相比，改进方法提供了精确的位置和速度信息，降低了电流的谐波分量，从而降低了转速波动。该优化方法在基于低成本霍尔传感器的永磁同步电机油泵液压控制中具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 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.

Ni Qinan, Yang Ming, Xu Dianguo, et al. Review of

precise position estimation method of PMSM with low-resolution position sensor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 70-81. (in Chinese)

[2] 李佳耀, 刘碧, 夏文婧, 等. 基于开关序列的永磁同步电机模型预测磁链控制[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 146-154.
Li Jiayao, Liu Bi, Xia Wenjing, et al. Model predictive flux control for permanent magnet synchronous machine based on switching sequence [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(4): 146-154. (in Chinese)

[3] 康劲松, 蒋飞, 钟再敏, 等. 电动汽车用永磁同步电机弱磁控制策略综述[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 15-22.
Kang Jinsong, Jiang Fei, Zhong Zaimin, et al. Overviews of flux weakening control schemes with permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1): 15-22. (in Chinese)

[4] Chen Zhe, Gao Jianbo, Wang Fengxiang, et al. Sensorless control for SPMSM with concentrated windings using multisignal injection method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6624-6634.

[5] 莫会成, 闵琳. 现代高性能永磁交流伺服系统综述: 传感装置与技术篇[J]. 电工技术学报, 2015, 30 (6): 10-21.
Mo Huicheng, Min Lin. Summary of modern high performance permanent magnet AC servo system—Sensor device and technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 10-21. (in Chinese)

[6] Wang Gaolin, Valla M, Solsona J. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives—A review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5830-5842.

[7] Nguyen A T, Rafaq M S, Choi H H, et al. A model reference adaptive control based speed controller for a surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9399-9409.

[8] Lin T C, Zhu Z Q. Sensorless operation capability of surface-mounted permanent-magnet machine based on high-frequency signal injection methods [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2161-2171.

[9] 张涵, 王凯, 李健, 等. 基于开关型霍尔的交替极永磁电机位置估算策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2377-2384.
Zhang Han, Wang Kai, Li Jian, et al. Position estimation strategy of consequent-pole PM machine based on binary hall sensor [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2377-2384. (in Chinese)

[10] 刘细平, 胡卫平, 丁卫中, 等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1198-1207.
Liu Xiping, Hu Weiping, Ding Weizhong, et al. Research on multi-parameter identification method of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1198-1207. (in Chinese)

[11] Manyala J O, Fritz T, Atashbar M Z. Integration of triaxial Hall-effect sensor technology for gear position sensing in commercial vehicle transmissions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(3): 664-672.

[12] Morimoto S, Sanada M, Takeda Y. Sinusoidal current drive system of permanent magnet synchronous motor with low resolution position sensor [C]// IAS'96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. San Diego, CA, USA, 2002: 9-14.

[13] Ni Qinan, Yang Ming, Odhano S A, et al. A new position and speed estimation scheme for position control of PMSM drives using low-resolution position sensors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3747-3758.

[14] Capponi F G, De Donato G, Del Ferraro L. Brushless AC drive using an axial flux synchronous PM motor with low resolution position sensors [C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany, 2004: 2287-2292.

[15] 张璞汝, 张千帆, 宋双成, 等. 一种采用霍尔传感器的永磁电机矢量控制[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 81-86.
Zhang Puru, Zhang Qianfan, Song Shuangcheng, et al. Permanent magnet motor vector control using Hall effect position sensor [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1): 81-86. (in Chinese)

[16] 李垣江, 苗奎星, 魏海峰, 等. 基于带通频率跟踪滤波器的永磁同步电机转子位置与速度估算[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5402-5413.
Li Yuanjiang, Miao Kuixing, Wei Haifeng, et al. Permanent magnet synchronous motor rotor position and speed estimation methodology based on band-pass frequency tracking filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5402-5413. (in Chinese)

[17] De Donato G, Scelba G, Pulvirenti M, et al. Low-cost, high-resolution, fault-robust position and speed estimation for PMSM drives operating in safety-critical systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 550-564.

[18] 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.

[19] Harke M C, De Donato G, Giulii Capponi 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.

[20] 章回炫, 范涛, 宁圃奇, 等. 车用永磁同步电机高性能弱磁控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 378-385.
Zhang Huixuan, Fan Tao, Ning Puqi, et al. Flux-weakening control strategy for permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles with high performance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 378-385. (in Chinese)

[21] Feng Zhaodong, Acarnley P P. Extrapolation technique for improving the effective resolution of position encoders in permanent-magnet motor drives [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(4): 410-415.

[22] 钟逸飞, 孔武斌, 易磊, 等. 基于霍尔位置传感器的永磁同步电机方波启动问题研究[J]. 船电技术, 2018, 38(1): 26-29, 32.
Zhong Yifei, Kong Wubin, Yi Lei, et al. Square wave start-up control of permanent magnet synchronous motor with Hall-effect sensors [J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2018, 38(1): 26-29, 32. (in Chinese)

[23] Zhang Xiaoguang, Li Zhengxi. Sliding-mode observer-based mechanical parameter estimation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5732-5745.



曾岁程

作者简介：

曾岁程(1998—)，男，硕士。研究方向：电力牵引与传动控制。E-mail：zeng_suicheng@163.com。

但汉兵(1991—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：矩阵变换器，电机驱动控制和三维无线电能传输。E-mail：danie l698@sina.cn。

李鼎文(1988—)，男，本科，工程师。研究方向：电力电子与电机驱动。E-mail：dingwen_li@sina.com。

粟梅(1967—)，女，博士，教授。研究方向：新能源发电与现代电力电子系统建模、优化与控制。E-mail：sumeicsu@mail.csu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)