

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311922

基于 Sage-Husa 预测算法的直流无刷电机 Hall 传感器位置信息校正*

王璐,程勇,尹伟,田杰

(山东大学能源与动力工程学院 济南 250016)

摘要:直流无刷电机控制需要转子位置信息,位置信息识别偏差会降低电机效率。本文以带有开关型 Hall 传感器的直流无刷电机为研究对象,基于最小偏差原则,估算了 Hall 传感器间的相对安装偏移,明确了基于 LBEMF 的电机理想换相位置识别方法,消除了 Hall 传感器安装位置偏差,采用预标定方法,推算了信号调理电路引入的延迟,并提出了一种转子位置信息校正策略;设计了一种基于 Sage-Husa 法的自适应位置信息预测算法,滤除预标定未能消除的位置信息偏差。在氢气循环泵实验平台的结果表明,采用预标定方法后,转速波动 MAPE 降低了 72.4%,平均相电流降低了 62.8%,系统效率明显提高;相对于传统 KF 预测算法,本文预测算法的匀速与调速阶段转速波动、转速曲线超调及全过程换相时间波动分别降低了 16.0%、19.4%、42.1% 及 35.0%,具有更高的抗扰动能力,对换相时刻的预测更准确稳定。

关键词:直流无刷电机;氢气循环泵;偏差校正;预标定;Sage-Husa;开关型 Hall 传感器。

中图分类号: TH 39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Correction of Hall sensor's position information in BLDCMs based on the Sage-Husa prediction algorithm

Wang Lu, Cheng Yong, Yin Wei, Tian Jie

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250016, China)

Abstract: Controlling a brushless direct current motor requires the position information of rotor, and deviation in position recognition can reduce motor efficiency. This study focuses on brushless direct current motor with switch-type Hall sensors and, and estimates the relative installation deviation of Hall sensors based on the minimum deviation principle. It clarifies the ideal commutation position recognition method based on LBEMF to eliminate the installation deviation between Hall sensors, and a pre-calibration method is used to calculate the delay introduced by the signal conditioning circuit. Additionally, a rotor position information correction strategy is proposed. An adaptive position information prediction algorithm based on the Sage-Husa method is designed to filter out the deviation of position information that pre-calibration cannot eliminate. The results of hydrogen circulation pump experimental platform show that, the MAPE of speed fluctuation and the average phase current are decreased by 72.4% and 62.8% with the pre-calibration method respectively, and it provides a significant improvement in system efficiency. Compared with the traditional KF prediction algorithm, the proposed algorithm reduces speed fluctuation, speed curve overshoot and commutation time fluctuation by 16.0%, 19.4%, 42.1%, and 35.0%, respectively, which demonstrates the higher disturbance resistance and more accurate and stable prediction of commutation timing.

Keywords: BLDCM; hydrogen circulation pump; deviation correction; pre-calibration; Sage-Husa; binary Hall sensor

0 引言

无刷直流电机具有高功率密度、结构紧凑、动态特性好的优势,在车辆各系统的自动化控制中被广泛应用,因

此成为一种氢气循环系统动力源的选择^[1]。相对于其他车用无刷直流电机 (brushless direct current motor, BLDCM),氢燃料电池系统中的 BLDCM 有转速高、工况稳定的特点。

收稿日期:2023-09-15 Received Date: 2023-09-15

* 基金项目:国家自然科学基金(51976107)、国家自然科学基金(52376118)项目资助

为对 BLDCM 进行控制需要准确的转子位置信息,位置信号不准确,会产生电流转矩波动,降低电机效率,导致机械振动及噪声^[2]。位置信息获取算法有两种,1)无位置传感器算法,其本质是通过检测电机运行过程中的电物理量及电机参数估算电机位置信息,因此受电机参数变化、电机温度、驱动系统非线性特征等因素影响,但相应系统更为简单,在适用的工况下获得的位置信息可靠性高^[3]。2)利用位置传感器提供转子位置信息,但传感器的存在增加了系统的成本和复杂程度,降低了系统稳定性及可靠性,对使用环境也有较高要求。其中开关型 Hall 传感器可根据信号中的边沿特征提供离散位置信号,配合合适的估算算法,可以得到满足精度要求的转子位置信息^[4]。因此有些氢气循环泵用 BLDCM 系统配有开关型 Hall 传感器,作为位置信息的主要获取途径。

在电机长期运行过程中,电机绕组会随使用时间增长而出现特性慢变,当受到温度变化及磁路饱和影响时,电机参数不再保持恒定^[5],同时由于位置传感器安装位置不可避免存在与理想位置的偏差,这些误差会影响电机的稳定运行^[6]。BLDCM 中的开关型 Hall 传感器在识别转子位置信息中,受到 3 方面的影响:1)与系统自身相关的偏差,如由于传感器安装过程、永磁体不均匀退磁、电机线圈参数变化及处理电路引入的偏移,在相同测试环境下,这些误差大小及方向不变,可通过原理性分析并获得;2)在时域中可分离的干扰,因该干扰在时域中不影响转子位置特征信号,可设置时间窗直接滤除,本文不对其进行讨论;3)与传感器特征信号混淆在一起的干扰,因具有一定的随机性,难以在时域上直接分离。本文主要围绕“3 相 Hall 传感器均可正常工作”时,对 Hall 传感器信号中存在的转子位置信息误差及干扰进行讨论,不考虑“某一相或多相的 Hall 传感器没有信号输出的情况”。对于由于系统自身引入的 Hall 传感器安装偏差、永磁体退磁引入的误差、由于电机长时间运行电机部分参数变化引入的误差等,很多专家进行过研究:Agarwal 等^[7]为判断带有 4 相 Hall 传感器的电梯用永磁同步电机中是否存在位置传感器安装偏差及永磁体正交偏差,基于 Simulink 搭建了可设置偏差的电机模型,研究传感器安装偏差及永磁体正交偏差对电机控制参数的影响,选取了 11 个特征参数,作为偏差的评价指标,并以此进行了数据分析。Zhao 等^[8]指出依据有位置偏差的 3 相 Hall 传感器提供的位置信息,对永磁同步电机进行控制时,电机相电流波形会出现某些阶次的谐波,并设计了一种 Luenberger observer,对传感器位置偏差进行校正,并在 1 200 rpm 较低转速工况下对校正方法进行了验证。Park 等^[9]统计了三相 Hall 传感器信号边沿间的角度差,获取了三相 Hall 传感器间的相对位置偏差,并基于端电压直接检测法获取反电动势过零点,将该点延迟 30°与 hall 传

感器信号边沿作比较,获取 hall 传感器的安装位置偏差,用以对三相 Hall 传感器信号与转子位置间的关系进行校正。Papathanasopoulos 等^[10]实验研究了 Hall 传感器中 B 相相对位置偏差的增加对电机母线电流的影响,利用母线电流三阶谐波特征表征偏差幅度,并据此对位置偏差进行估算。Seol 等^[11]在配有三相 Hall 传感器的 BLDCM 中,增加了一个与电机输出轴固连的存在一个缺口的附加磁环,模拟改变电机永磁体磁密均匀性。基于二维有限元分析法分析缺口大小对永磁体转子磁场分布的影响,确定不同永磁体磁密均匀性时 hall 传感器偏差大小,并设计了相应的偏差校正策略。Liu 等^[12]为解决对 hall 传感器间相对位置误差问题,将 hall 传感器位置信号进行了傅里变换,滤除了高频干扰,改善了位置信号的估算精度。

但存在如下一些问题:1)根据反电动势法原理,换相点滞后于反电动势过零点 30°电角度,但在应用中,由于转速波动等原因,30°的估计结果往往不准确,这里可利用线反电动势(line back electromotive force, LBEMF)法替代传统端电压法;2)在 Hall 传感器安装位置偏差估算过程中,往往需要对实测信号进行傅里叶级数滤波,运算过程较为复杂;3)需基于氢气循环泵直流无刷电机工况整理不可忽略的位置信息偏差种类。

上述研究中的电机转速范围大多不超过 3 000 RPM,远小于氢气循环泵工作的最大转速,例如罗茨式氢气循环泵工作最高转速通常为 5 000~8 000 RPM,常见的离心式氢气循环泵工作最高转速超过 8 000 RPM,部分特殊结构循环泵转速可超过 50 000 RPM,因此在氢气循环泵的使用中,对速度敏感的位置偏差通常不可忽略。氢气循环泵负载可认为仅有增压风扇,正常工况下相电流较小,可忽略由电枢反应引入的位置偏差,同时考虑到通常情况下磁极偏移较小,也可忽略^[13]。因此在电机正常工作前,可利用预标定实验对三相 Hall 传感器安装位置偏差、Hall 信号调理电路引起的延迟进行推算,用以校正传感器位置信息偏差。

对于与传感器信号混淆在一起的随机干扰,难以在时域上直接分离,影响转子位置信息获取^[14],因此需要采用有效的措施抑制转子位置信息噪声,并获取准确位置信息。相应算法主要有滑膜观测器、卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)、龙贝格观测器、人工神经网络、模糊控制等^[15],很多专家进行过研究讨论:Lund 等^[16]设计了一种基于龙贝格观测器的转矩观测器,并在 BLDCM 输出轴处使电机负载出现波动,模拟产生相电流噪声。实验结果表明设计的观测器估计结果较为稳定,并可对转矩波动做出快速响应。Gamazo-Real 等^[17]在 BLDCM 电机相电阻、电感未知的前提下,利用两个 3 层神经网络分别估计电机转子位置与电机转速,将估计结果与滑膜观测

器及扩展卡尔曼滤波法的估计结果进行了对比,证明神经网络方法的有效性与快速性。Li 等^[18]围绕随 BLDCM 系统运行时间增加,电源逆变器性能衰减以及电机参数发生变化的问题,提出了一种考虑电源逆变器影响的基于 KF 的电机参数辨识方法。实验结果表明,相较于不考虑电源逆变器影响的 KF 电机参数辨识方法及传统电机参数辨识方法,基于 KF 的电机参数辨识结果更为准确。Apte 等^[19]设计了一种包括滑模观测器及干扰观测器的两个级联观测器,滑模观测器用以估计速度,干扰观测器用以估计转矩,根据电机实时工况点,利用查表获取观系统方程用参数的参考值,用以增加级联观测器的收敛速度。实验结果表明,相较于传统控制器,该观测控制器的应用能够明显提高电机动态性能,同时由于两观测器的特点,该算法运算较为快速简便。

在实际应用中,电机参数随使用时间会发生变化,观测器的部分系统模型参数需随之调整。有研究者选择基于 KF 的自适应滤波法抑制转子位置信号噪声。自适应滤波法可以利用测量数据进行滤波的同时,对部分系统模型参数进行估计,利用有限的、不直接且包含噪声的测量信息去估计难以直接测量或确实的信息^[20]。自适应滤波法还包括输出相关法、新息相关法、Sage-Husa 法、强跟踪滤波法、自适应抗差及二阶互差法^[21]等,这些方法在工程应用领域也有较好的应用,若各算法的参数设置都最优,选择任一预测算法均可,但如果部分参数不确定性及存在难以滤除随机误差时,Sage-Husa 法是一种很好的选择,它可以对位置信息进行估计并同时系统噪声期望 q 、系统噪声方差 Q 、测量噪声期望 r 、测量噪声方差 R 进行估计,加快估计速度的同时减小估算波动^[22]。因此,在电机参数因使用时间变化时及在应用环境较为恶劣干扰较多的环境下,为保证控制方法及观测器的使用寿命,可以使用基于 Sage-Husa 法设计噪声抑制观测器。

为保证 Sage-Husa 能获得更准确的预测结果,需要尽量排除历史信息的偏差。因此可首先利用预标定结果对传感器位置信息进行校正,而后利用预测算法获得准确的电机换相位置信息。预标定校正的应用,可大幅降低电机由于多种换相位置偏差引起的母线电流及转速波动,提高电机效率;将 Sage-Husa 法引入电机控制系统,提出一种可对多系统噪声参数跟踪的换相位置信息预测算法,相对于传统预测算法相比,该方法具有更高的抗扰动能力,对换相时刻的预测更准确稳定。

1 传感器位置信号偏差的预标定

在配有三相开关型 Hall 传感器的 BLDCM 系统中,最基础的控制方法是将所有 Hall 传感器边沿作为电机

换相标志,控制电机运行。这些离散信号包含多种系统误差及干扰,其中主要包括 Hall 传感器安装位置偏差、磁极偏移、电枢反应引入的 Hall 传感器信号偏移、信号调理电路延迟。通过预标定,对相关偏移进行校正。

当电机匀速运行时,若三相 Hall 传感器间相差 120° 电角度安装,Hall 传感器信号占空比为 50%,由此获得的位置估算曲线是一条斜率恒定的一次函数。带偏差的及理想的 Hall 传感器信号边沿的相位关系及转角位置估算结果如图 1 所示。

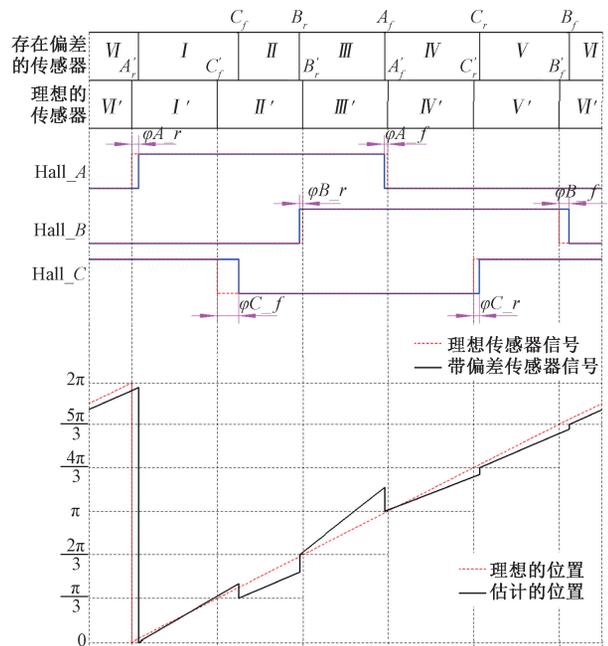


图 1 带偏差的及理想的 Hall 传感器信号边沿的相位关系及转角位置估算结果的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase relationship for the signal edges of Hall sensor with deviations and ideal conditions, as well as the angular position estimation

图 1 中, X_r 及 X_f 表示存在偏差的 Hall 传感器信号上升沿及下降沿, X 可取 A、B、C, 表示直流无刷电机三相的相关参数, X'_r 及 X'_f 表示理想 Hall 传感器信号边沿。存在偏差的边沿滞后于理想边沿的电角度差为 $\varphi_{X-r} = \theta_{X-r} - \theta'_{X-r}$ 与 $\varphi_{X-f} = \theta_{X-f} - \theta'_{X-f}$, 图中转子位置信号的估计值基于泰勒级数的 0 阶及 1 阶展开式, 并假设当前阶段的转速与上一阶段转速平均值相等。

1.1 Hall 传感器间相对安装位置偏差

假设三相 Hall 传感器安装只存在分布不均匀, 不存在偏心误差。假设在一个电角度循环中存在一组 6 个均匀分布的分隔线, 以此评价传感器安装偏差。这些分隔线可根据各传感器边沿相位差的平方和最小确定。不考

虑其他因素影响,有 $\varphi_X = \varphi_{X-r} = \varphi_{X-f}$, 可推得 $\varphi_B = \varphi_A + \theta_{B-f} - \theta_{A-f} - 2\pi/3$ 与 $\varphi_C = \varphi_A - \theta_{A-f} + \theta_{C-f} + 2\pi/3$, 偏差的平方和可表示为 $S = \varphi_A^2 + \varphi_B^2 + \varphi_C^2$, 当偏差的平方和取最小值时,有 $\delta S/\delta \varphi_A = 0$, 将结果代入式(4), 设此时各边沿角度偏差为 $\varphi_{\min X}$, 偏差值为正表示测量信号边沿滞后于理想边沿, 则有:

$$\begin{cases} \varphi_{\min A} = \frac{1}{3}(\theta_{A-r} - \theta_{C-r}) - \frac{1}{3}(\theta_{B-r} - \theta_{A-r}) \\ \varphi_{\min B} = \frac{1}{3}(\theta_{A-r} - \theta_{C-r}) + \frac{2}{3}(\theta_{B-r} - \theta_{A-r}) - \frac{2\pi}{3} \\ \varphi_{\min C} = \frac{2\pi}{3} - \frac{2}{3}(\theta_{A-r} - \theta_{C-r}) - \frac{1}{3}(\theta_{B-r} - \theta_{A-r}) \end{cases} \quad (1)$$

由此可得到假设的分隔线的最佳位置, 并可据传感器边沿各自的相对位置偏差 $\varphi_{\min X}$ 评价传感器安装偏差。此时若获得任意一相 Hall 传感器信号边沿的绝对位置偏差, 则可估算传感器各边沿的安装位置偏差。

1.2 Hall 传感器绝对位置偏差

由于 Hall 传感器信号 6 个理想边沿为 BLDCM 两两导通控制方式下的换相点, 可利用无位置传感器位置估计算法推算该换相点, 进而获得 Hall 传感器信号边沿安装位置偏差。忽略齿槽效应、磁路饱和及涡流和磁滞损耗, 不考虑电枢反应。在转子线圈反电动势信号可识别时, 将线反电动势过零点视为 BLDCM 电机换相点, 据相反电动势之差可求得各相间线反电动势:

$$\begin{bmatrix} e_{AB} \\ e_{BC} \\ e_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_A - u_B \\ u_B - u_C \\ u_C - u_A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_A & -R_B & 0 \\ 0 & R_B & -R_C \\ -R_A & 0 & R_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{MA} & -L_{MB} & 0 \\ 0 & L_{MB} & -L_{MC} \\ -L_{MA} & 0 & L_{MC} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: e_{XY} 为各相间线反电动势, 其中 $X \neq Y$, L_{MX} 为定子各相绕组的等效电感, i_X 为各相相电流, R_X 为各相电阻, p 为微分算子。假设以 Hall 传感器 A 相实测上升沿为参考边沿, 与之最近的线反电动势过零点为 e_{BC} 下降段过零点, 两者间的相位差即为 Hall 传感器 A 相上升沿的绝对位置偏差。在自线圈 AC 两相导通转换为线圈 AB 两相导通的过程中, A 相为不换相、B 相为待换相, C 相待不导通相。在临近换相时电流不发生变化, 即 $p(i_C) \approx 0$, B 相电流感生电流已近似为 0, 因此 e_{BC} 可简化为:

$$e_{BC} = u_B - u_C - R_B i_B \quad (3)$$

定义 e_{BC} 的下降段过零点角度为 θ_{LEMF} 。则 Hall 传感

器 A 相上升沿的安装位置误差由两部分组成: 1) 相对位置偏差; 2) 分隔线的偏移, 可利用 Hall 传感器 A 相上升沿对应分隔线与 θ_{LEMF} 相位差获得。设上升沿及下降沿安装位置偏差为 φ_{PosX-r} 、 φ_{PosX-f} , 该偏差为传感器边沿角度与理想换相角度的差, 可得:

$$\begin{cases} \varphi_{PosA-r} = \theta_{A-r} - \theta_{LEMF} \\ \varphi_{PosB-r} = \varphi_{\min B} + \varphi_{PosA-r} - \varphi_{\min A} \\ \varphi_{PosC-r} = \varphi_{\min C} + \varphi_{PosA-r} - \varphi_{\min A} \end{cases} \quad (4)$$

在仅考虑 Hall 传感器安装位置误差时, 由于 $\varphi_{PosX-r} = \varphi_{PosX-f}$, 可获得校正值 φ_{PosX-f} 。

1.3 Hall 信号调理电路延迟

在 Hall 传感器输出信号需进行滤波及转换, 以便于被微处理器读取, 一种通用的信号调理电路如图 2 所示, 电路的功能主要包括信号上拉、无源 RC 滤波及信号调压 3 部分。

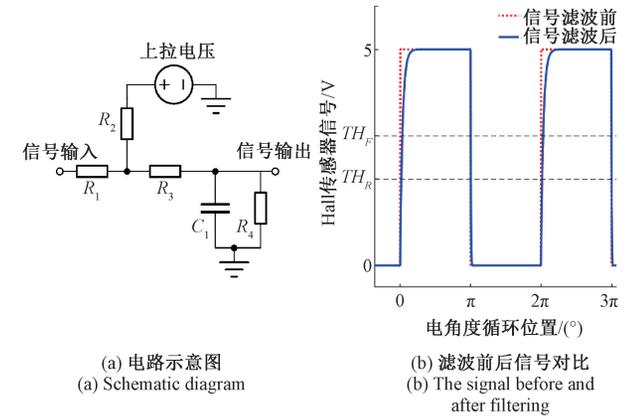


图 2 Hall 信号调理的电路
Fig. 2 Hall conditioning circuit

图 2(a) 中 $R_1 \sim R_4$ 分别为 Hall 传感器输出电阻、上拉电阻、限流电阻及分压电阻与微处理器输入捕捉口输入阻抗, C_1 为滤波电容, 当 Hall 传感器信号自高变为低时, 边沿对应的 RC 电路频率特性为 $\tau_{C1} = (R_1 + R_3) \times C_1$, 当 Hall 传感器信号自低变为高时, 边沿对应的 RC 电路频率特性为 $\tau_{C2} = R_2 \times C_1$, 后者频率远高于前者。Hall 信号近似为包含有丰富的高阶谐波一系列方波信号, 由于滤波电容的存在, 不同谐波均有相应的滞后, 且该滞后随转速增加而变大。可标定得到延迟角与转速的关系曲线 $\theta_{CKT-Rise}(n)$ 、 $\theta_{CKT-Fall}(n)$ 。电机运行时, 调理电路前后的 Hall 传感器信号如图 2(b) 所示。

1.4 传感器位置信息偏差校正策略

在实际应用中, 将各传感器信号偏差分别在离线阶段及电机启动阶段进行标定, 并提供给控制器, 在电机运行时对各偏差进行校正, 流程如图 3 所示。

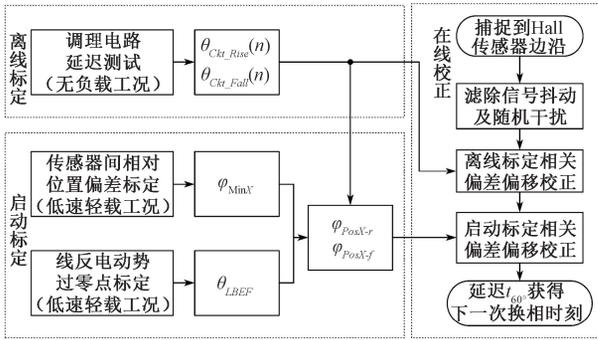


图3 Hall 传感器信号各误差校正策略流程

Fig. 3 Flow chart of various deviation correction strategy for the signal of Hall sensor

2 基于 Sage-Husa 的转子位置预测

在电机运行工作中, Hall 传感器信号中混杂着一些干扰信号, 这些信号具有一定的随机性, 难以在时域上直接分离。因此基于 Sage-Husa 法, 设计了一种电机换相位置预测算法, 对换相位置进行预测, 以降低上述干扰信号的影响。在母线电压、环境温度等参数不发生明显变化的前提下, 可以建立状态方程, 由经典牛顿运动方程及电机的机械运动方程, 定义一次换相为一个循环的开始, 则系统 k 循环时电机的运动状态可描述为 $X(k) = [\omega_k, \theta_k, I_k]^T$, 可建立系统状态方程:

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} \omega_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ I_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{K_T(n)}{J} \Delta T \\ \Delta T & 1 & \frac{K_T(n)}{2J} \Delta T^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_k \\ \theta_k \\ I_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta T \\ \frac{\Delta T^2}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \frac{M(n)(\bar{\omega})^2}{J} + W_k \quad (5)$$

其中, ω 为电气角速度, θ 为转子电角度, ΔT 为采样间隔, I_k 为最近一次采样间隔间的相电流平均值, W_k 为系统噪声矩阵, 设系统噪声为有色噪声。 J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩, 可用转矩系数 $K_T(n)$ 与平均电流 I 的乘积表示, 将 $K_T(n)$ 视为与转速相关的系数, 便于在某些工况下对方程进行校正; T_L 为负载转矩, 可描述为 $M(n) \cdot \omega^2$, 其中 $M(n)$ 为螺旋桨特性系数, 其与电机转速 n 有关, 由于电机转速不会突变, 因此可用某一段时间内电机角速度的平均值 $\bar{\omega}$ 代替 ω ; 由于在氢泵正常工作转速范围内, 电机摩擦阻力远小于风扇阻力, 可以忽略摩擦阻力。

电机系统配有间隔 120° 的三相 Hall 传感器及三相

电流传感器, 可建立观测方程:

$$Z_k = \begin{bmatrix} \omega_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_k \\ \theta_k \\ I_k \end{bmatrix} + V_k \quad (6)$$

式中: Z_k 为 k 循环时观测量, V_k 为测量噪声矩阵, 设测量噪声为有色噪声。

假设有色噪声 W_k, V_k 可表示为一个白噪声与一个偏移量的和, 系统噪声 W_k 的偏移量为 q_k , 方差为 Q_k , 观测噪声 V_k 的偏移量为 r_k , 方差为 R_k , 且两噪声不相关, 滤波方程组为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + \hat{q}_{k-1} \\ P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{Q}_{k-1} \\ K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + \hat{R}_k]^{-1} \\ \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1} - \hat{r}_k) \\ P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} \end{cases} \quad (7)$$

其中, 任意变量 A 增加上标 \hat{A} 表示为该变量的估计值; K_k 为卡尔曼增益系数, 是一个过渡变量; $P_{k,k-1}$ 为 k 循环最优估计时的后验误差协方差; P_k 为 k 循环最优估计时的先验误差协方差。为简化公式, 设 $X(k) = X_k, X(k+1, k) = X_{k+1,k}, Z(k+1, k) = Z_{k+1,k}, P(k|k-1) = P_{k,k-1}, P(k|k) = P_k$ 。在满足上述两个条件有:

$$\begin{cases} \hat{r}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{r}_k + d_k (Z_{k+1} - H_{k+1,k} \hat{X}_{k+1,k}) \\ \hat{R}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{R}_k + d_k (\bar{Z}_{k+1} \bar{Z}_{k+1}^T - H_{k+1,k} P_{k+1,k} H_{k+1,k}^T) \\ \hat{q}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{q}_k + d_k (\hat{X}_{k+1} - \Phi_{k+1,k} \hat{X}_k) \\ \hat{Q}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{Q}_k + d_k (K_{k+1} \bar{Z}_{k+1} \bar{Z}_{k+1}^T K_{k+1}^T + P_{k+1} - \Phi_{k+1,k} P_k \Phi_{k+1,k}^T) \\ d_k = (1 - b) / (1 - b^{k+1}), 0 < b < 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, 条件 A 为系统矩阵完全可控完全可观, 系统最终趋于稳定, 即满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} P_k \rightarrow P$, 条件 B 为各时刻的观测值白噪声不相关, 即满足 $C(i) = E[(Z_{k,k-1} - r_k)(Z_{k-i,k-i-1}^T - r_{k-i})] = 0, (0 < i < k)$ 。

理论上 Sage-Husa 法可对 q, Q, r, R 进行估计, 但在实际应用中 4 者并不能同时被准确跟踪, 多参数同时跟踪会导致系统不准确甚至发散, 也很难区分状态量预测值与观测量实际值的偏差是由哪种噪声参数导致的, 而且多参数调节会导致算法鲁棒性变差^[23], 仅调整 Q 的误差谱要比同时调整两值的误差谱平整^[24]。

考虑到系统噪声通常是由于应用环境决定的, 例如介质气体密度、电机输出轴摩擦等参数随应用场景、环境温度不同而变化, 因此直接准确获取 Q 是比较困难的, 但同时由于这些随机性, 可以假设系统误差偏移的初始值 $q_0 = 0$; 测量噪声通常是一个统计学意义上的参数, 可以根

据观测系统的信号对应的测量误差计算得到。因此本文拟对 R 与 r 进行理论分析,确定两噪声参数初值的参考值,而后使用自适应算法对 Q 进行跟踪,当多次跟踪使 Q 值稳定后,分别对 R 、 r 及 q 进行跟踪。

假定影响转速及电流的噪声呈不相关的有色高斯分布,设 R_A 为转速观测值 ω 的方差, R_B 为平均电流观测值 I 的方差。 ω 利用采样间隔内的平均角速度计算,其误差主要由安装偏差及调理电路延迟产生,且已通过预标定进行了处理,则设 R_A 初值为 0; 电流值通过电流传感器获得,取一次换相间隔内的平均值,数据在平均之前进行滤波。因此测量噪声方差初值可设为 $R_0 = \text{diag}(0, R_I)$, 其中 R_I 误差为电流传感器误差,另外由于需要考虑的测量噪声均为随机噪声,设 r 初值为 0。

3 实验及讨论

3.1 实验台及控制系统介绍

实验验证工作在一台离心式氢气循环泵测试平台上进行。测试平台主要由氢气循环泵系统、控制器、传感器、供电系统及信号观测采集系统组成。其中氢气循环泵系统包括 BLDCM 部分及增压用离心式风扇部分,为保证磁电传感器的使用,将 BLDCM 的输出段改为 1 个(30-2)码盘,并为其设计了密封罩。BLDCM 额定电压 80 V, 额定转速 15 000 rpm, 电机极对数为 2, 相电阻约为 65.5 m Ω , 电机配置三相 Hall 位置传感器。控制系统主要分为控制板及驱动板两部分,其中控制电路主芯片为 MC9S12XEP, 驱动电路主芯片为 IR2108, 驱动开关管为 IPB200N25, 为避免全桥电路热累计损坏控制器,设计了散热器。系统配置了用于测量电机转子位置的磁电传感器(SZMB-10, 量程 0~20 kHz), 并配置了用于测量相电流及母线电流的电流传感器(LA25-P, 量程为 25~25 A, 误差为 $\pm 0.65\%$)。供电系统主要有为驱动器供电的 VARIEO-RU60-10060 及为电流传感器供电的 RPB3003D。信号观测采集设备包括 Tektronix2014B 示波器及 ZTIC-EM9118 采集卡, 部分设备如图 4 所示。

氢气循环泵系统正常使用过程中目标转速比较平稳,可认为风扇负载转矩与转速二次方成比例关系,因此对电机转速采用 PID 算法通过调节驱动系统电流进行闭环控制。BLDCM 采用方波驱动,利用位置信息校正策略及换相时刻预测算法获取每一个 Hall 边沿的理想位置,并以该位置作为电机换相的标志。在 6 000~10 000 rpm 范围内进行了实验,用以验证本文算法的可行性。

3.2 相关偏差的识别及标定

在 360 $^\circ$ 机械角度内,三相 Hall 传感器信号各存在 4 个边沿,设两上升沿为 $HallXR_1$ 与 $HallXR_2$, 两下降沿分别为 $HallXF_1$ 与 $HallXF_2$, X 可取 A、B、C。

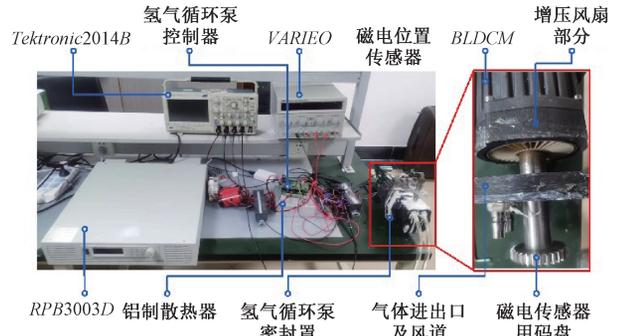


图 4 实验平台部分仪器及设备

Fig. 4 Some instruments and equipment of experimental bench

1) 三相 Hall 传感器间相对位置偏差矫正

根据图 3,进行三相 Hall 传感器间相对位置偏差识别,各边沿偏差设为 $\varphi_{\min X1}$ 与 $\varphi_{\min X2}$, 对 3 个转速下的测试结果也进行加权处理,结果如表 1 所示。

表 1 各上升沿相对误差校正值

Table 1 Correction of relative deviation for each rising edge

转速/rpm	A ₁ /($^\circ$)	B ₁ /($^\circ$)	C ₁ /($^\circ$)	A ₂ /($^\circ$)	B ₂ /($^\circ$)	C ₂ /($^\circ$)
960	-0.906	0.031	0.875	-0.772	-0.182	0.955
1 107	-0.935	0.028	0.933	-0.803	-0.193	0.996
1 330	-0.980	0.027	0.953	-0.819	-0.165	0.985
加权平均	-0.930	0.021	0.908	-0.791	-0.182	0.974

2) 绝对位置误差校正

选择 $HallA$ 作为参考信号,测量了 B、C 相端电压及 B 相实时相电流,基于线反电动势法,推导 E_{BC} 下降段过零点对应相位角。以标定阶段 1 107 rpm 工况为例, E_{BC} 线反电动势过零点与 $HallA$ 相对关系如图 5 所示。

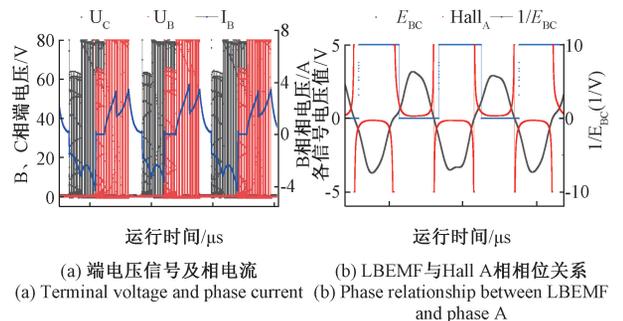


图 5 E_{BC} 相关的电信号

Fig. 5 The electrical signals associated with E_{BC}

由图 5(b) 可以看到,电机换相时刻存在一定的滞后,具体滞后角可通过是线反电动势下降沿过零点与

$HallAR$ 的相位差计算。为了更清晰的展示线反电动势过零点相位,在图中增加了 $1/E_{BC}$ 的计算数据。对三转速下的测试结果进行加权处理,结果如表 2 所示。

表 2 绝对位置偏差校正值

Table 2 The absolute positional deviation of $HallAR$

Speed/rpm	$HallAR_1/\%$	$HallAR_2/\%$
960	4.25	4.22
1 107	4.21	4.19
1 330	4.18	4.17
加权	4.22	4.20

3) 信号调理电路延迟

将电机转速从 6 000 rpm 逐渐升至 10 000 rpm,在不同转速下测量了调理电路输入和输出的 Hall 传感器信号,得到了相应阈值处信号调理电路的延迟时间,结果如图 6 所示。图中数据均为多次测量结果的平均值,在应用时,根据相应转速插值获得修正值。

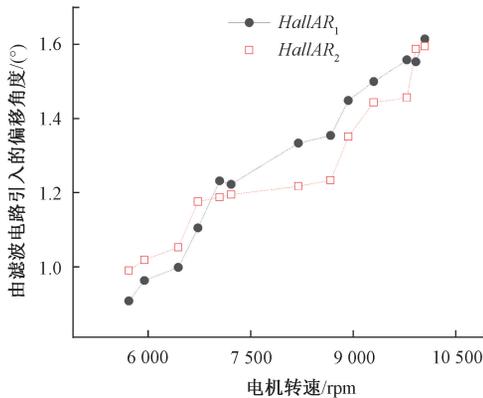


图 6 调理电路延迟角

Fig. 6 Delay angle of the conditioning circuit

3.3 在线校正阶段实验

为验证各误差校正方法的有效性,进行了对比实验:

1) BLDCM 使用方波驱动,全桥电路由两两导通控制方式驱动,每 360° 机械角度分 12 步控制,转速范围通过 PID 控制,控制量为全桥电路开关管占空比,换相点为 Hall 传感器各边沿。2) 仅改变换相点,由各误差校正后的 Hall 传感器边沿作为换相点。各转速下校正结果较为类似。约 6 000 rpm 的一段匀速工况时,转子 11 个机械循环内的转速估算对比如图 7 所示。

这里利用平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage Error, MAPE) 来表征瞬时转速及换相时间预测值与真实值之间的误差程度。未校正时 MAPE 约为 0.98, 预标定校正后的 MAPE 约为 0.27。分析结果表明,采用误差校正后,转速 MAPE 降为未校正

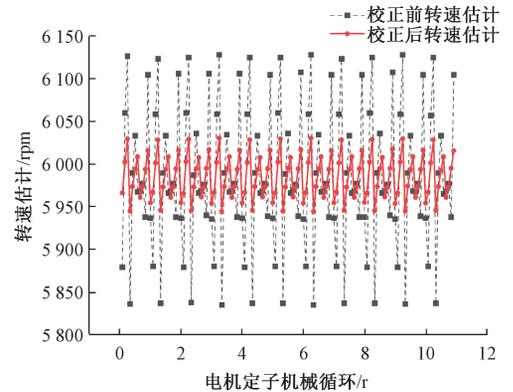


图 7 原始策略转速波动及校正策略转速波动对比

Fig. 7 Comparison of speed before and after pre-calibration correction

时的 27.6%, 转速波动明显减小,证明电机更为平稳。端电压信号 U_B 及相电流信号 I_B 的对比结果如图 8 所示。

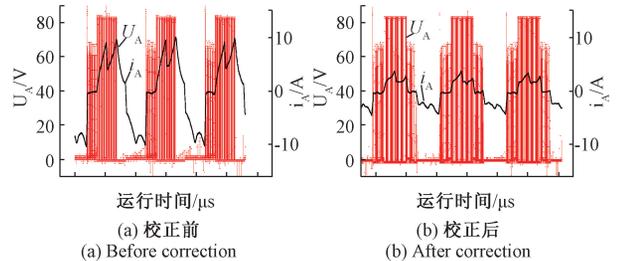


图 8 端电压信号与实时相电流信号对比

Fig. 8 Comparison of the terminal voltage and phase current

由图 8 可以看出,校正前端电压波形有明显滞后换相特征,校正后端电压信号波形更接近正时换相的信号;同转速下校正前电流峰值接近 10 A,校正后只有不超过 4 A,且平均电流后者仅为前者的约 37.2%, 功耗减低。由此证明了校正方法的有效性。

3.4 基于 Sage-Husa 换相时刻预测

据第 2 节的公式对换相时刻进行预测时,需确定系统模型中的有关参数,如转动惯量 J , 转矩系数 $K_T(n)$ 及螺旋桨特性系数 $M(n)$ 。利用实测的 800~3 000 rpm 范围内无风扇负载电机加速时实验中电压、电流及转速变化实验数据推求无风扇负载电机测试系统转动惯量,结合已知的附加齿轮码盘设计参数,可计算电机系统转动惯量 $J \approx 0.0039 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;并基于实测的 800~10 000 rpm 范围内有风扇负载电机运行中的电压、电流、转速变化及磁电传感器位置信号实验数据,对 $K_T(n)$ 、 $M(n)$ 两值进行回归。

在观测矩阵中,设参数 X 的初值为 X_0 , 其中取 $q_0 = 0, r_0 = 0$ 。参考电流传感器精度,取 $R_0 = \text{diag}[0, 0.02]$; 因氢气循环泵电机转速范围为 6 000~10 000 rpm, 随着追踪过程, P_k 迅速趋于稳定, 考虑到协方差矩阵 P_k 为对称矩阵, 可取一较大的初值, 这里取 $P_0 = \text{diag}[50\ 000, 50\ 000, 50\ 000]$ 。

由于 XEP100 芯片脉宽调制模块占空比最小调整步长为 1/240, 在保持电源设置参数不变的情况下, 在 6 000~10 000 rpm 范围内, 最多可获得 15 个转速调控点, 为便于展示, 从中选择了 7 个点, 在相应转速下, 以转速的均方差为评价参数, 考核了误差校正及预测算法效果, 实验中转速自 5 000 rpm 开始逐渐增加, 在每个测试点附近稳定 1 s。

为了评价 Sage_Husa 换相时刻预测算法的有效性, 引入基于 KF 及扩展卡尔曼滤波 (extended kalman filter, EKF) 的换相时刻预测算法作为对比。利用校正后的 Hall 传感器上升沿信号控制电机运行, 并在运行中分别利用 KF 算法、EKF 算法及 Sage_Husa 算法对下一次换相时刻进行预测, 得到了对应的转速及换相时刻, 其中预标定预测结果为位置信号经过预标定校正算法处理后, 延时 60°电角度对应换相结果。电机实际转速及两种算法的预测转速, 预测转速的稳定性可间接反映换相信息预测结果的准确性的对比结果如图 9 所示, 图中 SH 信号表示 Sage_Husa 算法预测结果, 如图 10。

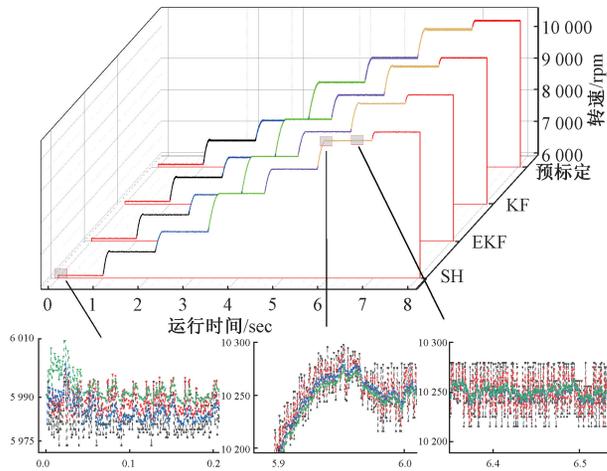


图 9 6 000~10 000 rpm 转速工况下基于 KF、EKF、Sage-Husa 及预标定转速预测对比

Fig. 9 The speed prediction results of KF, EKF, Sage-Husa and pre-calibration correction for the speed ranged between 6 000 rpm and 10 000 rpm

利用图 9 转速值推求得到了各换相位置时的换相时刻, 任选局部时间窗口, 并将各方法在此时间段内的换相时间如图 10 所示, 作为对比, 增加了由实测转速数据平

滑计算得到理想换相时刻数据。将图 9 及 10 中数据进行分析, 对 3 种方式预测的转速波动程度及预测的时间准确性进行评价, 选取调速阶段转速 MAPE、调速阶段最大超调、匀速阶段转速 MAPE 及全过程时间 MAPE 作为评价指标, 结果如表 3 所示。

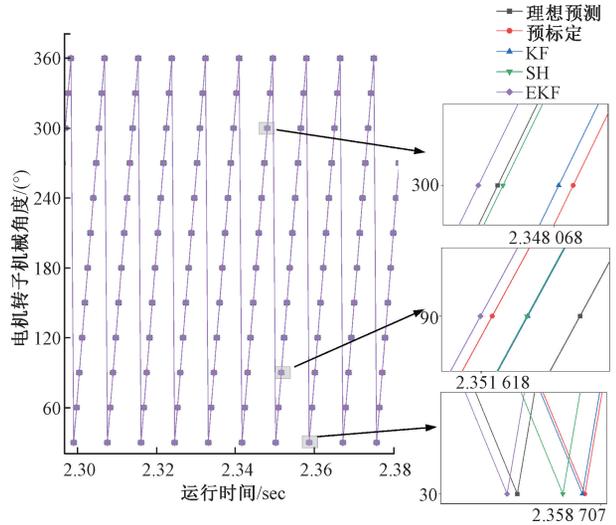


图 10 基于预标定、KF 预测、EKF 预测、Sage-Husa 法预测及理想换相时刻对比

Fig. 10 Comparison of phase shift time based on four prediction algorithms and ideal time

表 3 4 种方式预测结果对比

Table 3 Comparison of prediction results of four methods

MAPE / %	调速阶段转速	最大超调量	匀速阶段转速	换相时间
预标定预测	1.5×10^{-1}	14.32	1.2×10^{-1}	9.02×10^{-3}
KF 预测	9.56×10^{-2}	11.01	8.67×10^{-2}	6.38×10^{-3}
EKF 预测	7.99×10^{-2}	8.80	7.04×10^{-2}	5.83×10^{-3}
Sage-Husa 预测	8.03×10^{-2}	8.87	5.02×10^{-2}	4.15×10^{-3}

可以看出在全过程中, KF、EKF 及 Sage-Husa 法预测转速曲线波动均小于仅利用预标定校正的转速曲线, 可以认为 3 种预测算法均能跟踪电机转速。但多数情况下 KF 算法预测结果的波动均大于 Sage-Husa 算法及 EKF 的预测结果, 有些情况下转速波动甚至超过仅利用预标定算法的预测结果。

对预标定预测结果做平滑处理, 认为该结果为理想结果。由于 Sage-Husa 算法的 4 个系统方程偏差的跟踪需要时间, 从图 9 中可以看到, 自起始开始的很长时间内, Sage-Husa 法预测结果的偏移较大, 而从表 5 中可看到, Sage-Husa 算法预测结果及 EKF 算法预测结果的转速 MAPE 较为接近, 因此可认为当 Sage-Husa 算法的 4 个系统噪声跟踪的较好, 在该氢气循环泵系统中, Sage-Husa 算法的预测结果最优。

从4种方式预测结果的匀速运行阶段与调速阶段的转速波动、转速曲线超调量及全过程的换相时间结果可以看出,利用 Sage-husa 法预测结果较利用 KF 预测的结果分别降低了 16.0%、19.4%、42.1% 及 35.0%,前者预测准确率更高,受随机干扰的影响更小,更贴近理想换相结果。因此,基于 Sage-Husa 的位置信息预测算法是有效的,可以基于历史信息预测理想换相时刻。

4 结 论

配有 Hall 传感器的 BLDCM 根据传感器边沿换相,若 Hall 传感器信号存在偏差,将会产生电流转矩波动,降低电机效率,导致机械振动。本文将 Hall 信号偏差分为 3 类,一为 Hall 信号调理电路引起的延迟及不同负荷下电枢反应引起的传感器信号识别误差,二为传感器安装位置偏移及磁极偏移;三为运行过程中产生的混入 Hall 传感器信号中的干扰,分别对各误差进行了分析,提出了校正方法。

因调理电路延迟引入的延迟及 Hall 传感器安装偏差对电机转速敏感,因此在氢气循环泵的应用中不可忽略,本文分别采用离线标定及在线标定方法进行识别并对电机换相位置进行校正。实测结果表明,与直接采用 Hall 传感器边沿换相相比,利用换相位置校正后边沿进行换相,电机相电流降低为校正前的 37.2%,转速 MES 降低为校正前的 8.0%。

因传统反电动势法的估算在精度及运算速度均存在提升空间,本文采用线反电动势法估算了 Hall 传感器绝对安装位置偏差,减少运算次数的同时提高了位置信息估算精度。

因氢气循环泵的负载较为稳定,本文将 Sage-Husa 法引入氢气循环泵控制系统,提出了一种可对多系统噪声参数跟踪的换相时刻预测算法,用于在运行中估测换相位置,相对于传统 KF 预测算法,Sage-husa 自适应位置信息预测算法的匀速运行阶段与调速阶段转速波动、转速曲线超调量及全过程换相时间偏差分别降低了 16.0%、19.4%、42.1% 及 35.0%,具有更高的抗扰动能力,对换相时刻的预测更准确稳定。

参考文献

[1] ZHAO B, WEI H, ZHANG Z, et al. Effects of clearances size and fluid medium components on the thermodynamic performance of a claw pump for fuel cell vehicle [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(11): 15054-15065.

[2] CHEN S, HU M. Active torsional vibration suppression of integrated electric drive system based on optimal harmonic current instruction analytic calculation method [J].

Mechanism and Machine Theory, 2023, 180.

[3] 朱俊杰,黄海燕. 无位置传感器无刷直流电机换相误差校正系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 41-49.

ZHU J J, HUANG H Y. Study on the commutation error correction system of position sensorless brushless DC motor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 41-49.

[4] 张继华,王晓东. 改进的多霍尔传感器 BLDCM 转矩脉动抑制方法[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(7): 21-24.

ZHANG J H, WANG X D. Improved multi-Hall sensor BLDCM torque ripple suppression method[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(7): 21-24.

[5] RAFAQ M S, JUNG J W. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(7): 4747-4758.

[6] KRICHEN M, ELBOUCHIKHI E, BENHADJ N, et al. Motor current signature analysis-based permanent magnet synchronous motor demagnetization characterization and detection [J]. *Machines*, 2020, 8(3): 35.

[7] AGARWAL R, BHATTI G, SINGH R R, et al. Intelligent fault detection in Hall-effect rotary encoders for industry 4.0 applications [J]. *Electronics*, 2022, 11(21): 3633.

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

[9] PARK J S, CHOI J H, LEE J. Compensation method of position signal error with misaligned Hall-effect sensors of BLDC motor [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2016, 11(4): 889-897.

[10] PAPATHANASOPOULOS D A, SPYROPOULOS D V, MITRONIKAS E D. Fault diagnosis of misaligned hall-effect position sensors in brushless DC motor drives using a Goertzel algorithm [C]. 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), IEEE, 2019: 167-173.

[11] SEOL H S, LIM J, KANG D W, et al. Optimal design strategy for improved operation of IPM BLDC motors with low-resolution Hall sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(12): 9758-9766.

[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] WANG L, CHENG Y, YIN W. A sage-husa prediction algorithm-based approach for correcting the Hall sensor position in DC brushless motors [J]. Sensors, 2023, 23(14): 6604.
- [14] SABIR Z, RAJA M A Z, MAHMOUD S R, et al. A heuristic computing approach using sequential quadratic programming to solve the fifth kind of induction motor model[J]. Fractals, 2022, 30(10): 2240240.
- [15] 郭秋蕊, 李建良, 田焱, 等. 基于改进 KCF 算法和多特征融合的车辆跟踪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 231-240.
- GUO Q R, LI J L, TIAN Y, et al. Research on vehicle tracking based on improved KCF algorithm and multi-feature fusion [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 231-240.
- [16] LUND S H J, BILLESCHOU P, LARSEN L B. High-bandwidth active impedance control of the proprioceptive actuator design in dynamic compliant robotics [C]. Actuators, MDPI, 2019, 8(4): 71.
- [17] GAMAZO-REAL J C, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ V, GOMEZ-GIL J. ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors [J]. Measurement, 2022, 188: 110602.
- [18] LI X, KENNEL R. General formulation of Kalman-filter-based online parameter identification methods for VSI-fed PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(4): 2856-2864.
- [19] APTE A, JOSHI V A, MEHTA H, et al. Disturbance-observer-based sensorless control of PMSM using integral state feedback controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(6): 6082-6090.
- [20] 蔡崇文, 叶国永, 刘红忠. 基于 Vold-Kalman 滤波的光栅谐波动态抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 17-24.
- CAI CH W, YE G Y, LIU H ZH. Dynamic suppression of harmonic distortion for optical encoders via Vold-Kalman filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 17-24.
- [21] 陈志高, 柳锐, 吴子豪, 等. 基于改进 Sage-Husa 自适应滤波的 ADCP 船速基准精确获取[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报: 1-10 [2023-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20230731.1759.004.html>
- CHEN ZH G, LIU R, WU Z H, et al. Obtaining a reference velocity of ADCP measurement based on improved adaptive Sage-Husa algorithm[J/OL]. Journal of Harbin Engineering University: 1-10 [2023-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20230731.1759.004.html>
- [22] WANG Y, SUN Y, DINAHAHI V. Robust forecasting-aided state estimation for power system against uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 691-702.
- [23] SAGE A P, HUSA G W. Algorithms for sequential adaptive estimation of prior statistics [C]. 1969 IEEE Symposium on Adaptive Processes (8th) Decision and Control, IEEE, 1969: 61-61.
- [24] 黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- HUANG X P, WANG Y. The principle and application of kalman filtering [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2015.

作者简介



王璐, 2015 年于北京理工大学获得学士学位, 2018 年于山东大学获得硕士学位, 现于山东大学进修博士学位, 主要研究方向为电驱系统研究及快速压缩机设计。

E-mail: wang_sgd2017@foxmail.com

Wang Lu obtained a B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2015, a M. Sc. degree from Shandong University in 2018, and is currently pursuing a Doctoral degree at Shandong University. Their primary research focus is on the control of permanent magnet linear motors and the design of high-speed compressors.



程勇 (通信作者), 1983 年于河北工学院获得学士学位, 1986 年于山东工业大学获得硕士学位, 1997 年于天津大学获得博士学位, 现为山东大学教授, 主要研究方向为内燃机测控技、新能源车车辆关键部件设计及控制、等离子点火装置设计。

E-mail: cysgd@sdu.edu.cn

Cheng Yong (Corresponding author), obtained a B. Sc. degree from Hebei University of Engineering in 1983, M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 1986, and Ph. D degree from Tianjin University in 1997. Currently, he is a professor at Shandong University, specializing in research areas such as internal combustion engine measurement and control technology, design and control of key components for new energy vehicles, and design of plasma ignition systems.