

面向永磁同步电机无传感器控制的新型 已知回归项有效磁链全阶模型

林起联, 刘凌, 刘思源

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对内嵌式永磁同步电机(IPMSM)全阶模型未知转速回归项导致的转速自适应观测器局部稳定问题,提出一种具有已知转速回归项特性的IPMSM有效磁链全阶模型。首先,重新定义IPMSM有效磁链全阶模型的状态变量,并根据新状态变量推导IPMSM动态方程以满足Brunovsky标准型,同时使新型模型的转速回归项仅由已知量构成。然后,提出针对该模型的非线性高增益观测器算法,以实现全局稳定的转子位置和转速估计。最后,通过0.75 kW IPMSM加载测试平台,验证了所提无传感器控制算法的有效性和实用性。实验结果表明:新型全阶模型提升了IPMSM无传感器控制系统的动态性能,扩展了全阶观测器的稳定运行区间;全阶观测器克服了降阶观测器的局部稳定缺陷,同时便于系数整定;相比于传统方案,所提观测器算法的角度估计误差收敛速度提高约42%,误差幅值减小约44.4%;在稳态时,交轴电流波动幅值减小约35%;所提出的无传感器控制算法实现了5 r/min转速下的额定负载扰动抑制。

关键词: 永磁同步电机;无传感器控制;有效磁链;自适应观测器;全局稳定性

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202411014 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0147-09

Novel Known Regressor Active Flux Full-Order Model for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors

LIN Qilian, LIU Ling, LIU Siyuan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the issue of local stability in the speed-adaptive observer stemming from unknown speed regressors in the full-order model of interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM), a novel active flux full-order model incorporating known speed regressors for IPMSM is proposed. Initially, this paper redefines the state variables of the active flux full-order model of IPMSM and formulates the dynamic equations of IPMSM based on these new state variables to conform to the Brunovsky canonical form, ensuring that the speed regressors in the new model are solely comprised of known measured values. Subsequently, a tailored nonlinear high-gain observer algorithm is introduced for this model to achieve globally stable rotor position and speed estimation. The effectiveness and practicality of the proposed sensorless control algorithm are then validated through experimentation on a 0.75 kW IPMSM test platform. The results indicate that the new full-order model enhances the dynamic performance of the sensorless control system for IPMSM, extending the stable operational range of the full-order observer. The

收稿日期: 2024-04-09。 作者简介: 林起联(1997—),男,博士生;刘凌(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(51977173)。

网络出版时间: 2024-07-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240725.1810.006>

structure of the full-order observer overcomes the local stability limitations of reduced-order observers while simplifying coefficient tuning. In fast reversing test, compared to conventional methods, the proposed observer achieves approximately a 42% faster convergence speed in position estimation errors and reduces error magnitudes by about 44.4%. In steady-state conditions, the fluctuation amplitude of the quadrature current decreases by roughly 35%. Notably, the proposed sensorless control method successfully suppresses disturbances under rated load at 0.15% of rated speed (5 r/min).

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sensorless control; active flux; adaptive observer; global stability

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)受益于永磁体制作工艺的突破,有着功率密度高、调速范围广等优点,在电动汽车、电梯与船舶推进等高可靠要求场合愈发获得广泛关注和应用^[1-2]。PMSM 无传感器控制旨在消除对机械机构复杂、易受干扰的机械式位置传感器的依赖。无传感器控制算法则大大增强了 PMSM 驱动的系统鲁棒性,降低了安装与维护成本,精简了线路连接,促进了 PMSM 的应用推广^[3]。

根据电机控制系统动态方程的不同,无传感器控制算法可分为降阶传感器和全阶传感器。全阶观测器是指基于 PMSM 电流-反电势全阶模型设计的状态观测器,与降阶观测器相对应。目前,PMSM 无传感器控制方案中,转速自适应观测器方案多为降阶观测器设计^[4],即以观测器输出的估计电流或估计反电动势为输出矢量,直接产生部分状态变量,从而降低转速观测器的阶数^[5-7]。同时,存在另一种采用混合无传感器控制的解决方案,结合基于电机凸极性质和基于电机基频模型的方法,将两个局部稳定的方案结合以达到全速域转速观测稳定的效果^[8-9]。降阶观测器只需对一个二阶微分方程实施数值积分,但该设计无法直接获取估计转速,且无法设计转速自适应的降阶观测器^[10]。这意味着对于转速降阶观测器而言,不存在全局稳定的设计。文献^[11]指出,由于转速误差的 Lyapunov 函数中不可避免地包含未知的不可测量值(转子磁链),因此转速降阶观测器能稳定的必要条件为:磁链降阶观测器的估计误差必须为 0。基于传统 PMSM 模型的全阶转速自适应观测器在基于 Lyapunov 稳定性理论分析时需提前假设转子磁链的估计误差始终为 0^[1],而基于 Popov 超稳定性分析需要假设转子磁链的估计误差收敛速度快于定子电流^[12]。然而,在实际控制过程中,以上两个假设皆无法严格实现,故而极大程度限制了转速降阶观测器的动态性能和应用范围。

由于未知转速回归项的存在,基于传统电机模型的全阶转速观测器设计无法被证明全局稳定,因此文献^[13]采用降阶转速观测器重构转速回归项。文献^[14]首先提出在单输出非线性系统中,线性参数化的未知回归项严重影响了全局稳定的转速自适应观测器设计,正是该未知回归项导致转速误差对应的 Lyapunov 函数不存在。从非线性系统扩展至传统感应电机模型,文献^[15]首次验证了全局稳定的全阶转速自适应观测器受限于未知的转速回归项,同时指出,对传统感应电机模型引入全局微分同胚可以转换电机模型的状态,从而变换转速回归项的结构^[10,15-16]。

目前,对于永磁同步电机的传统全阶模型(包括有效磁链模型和扩展反电动势模型),缺乏关于改变永磁同步电机模型转速回归项结构,从而设计全局稳定的全阶转速观测器的讨论。为此,针对内嵌式永磁同步电机(IPMSM)的有效磁链全阶模型,本文通过引入基于已知参数的新状态变量,建立一类以电流-等效反电势为状态的新型 IPMSM 有效磁链全阶模型。该模型中的转速回归项仅由已知量构成,从而满足实现全局稳定的全阶转速自适应观测器的必要条件。进而,通过设计高增益非线性观测器,构建了全局稳定的全阶自适应观测器。所提出的全阶自适应观测器摆脱了传统 IPMSM 模型中的未知转速回归项,能够满足 Lyapunov 稳定性与持续激励条件的约束。最后,对所提 IPMSM 全阶观测器进行了参数敏感性数值仿真,量化分析了转速观测的收敛区间。实验结果验证了所提模型和所提非线性算法的有效性,表明控制系统在极低速区间、宽速域工况下都对负载扰动、参数扰动具有优异的鲁棒性。

1 IPMSM 数学模型

1.1 有效磁链全阶模型

在 $\alpha\beta$ 静态坐标系下,IPMSM 的有效磁链四阶模型可被写为

$$\begin{cases} L_q \frac{di_s}{dt} = u_s - Ri_s - e_{\text{active}} \\ \frac{de_{\text{active}}}{dt} = K_{\text{active}} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos \theta_d \\ \sin \theta_d \end{bmatrix} = \omega J e_{\text{active}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_s = [u_{sa} \ u_{s\beta}]^T$, $i_s = [i_{sa} \ i_{s\beta}]^T$ 分别表示定子电压、定子电流; $e_{\text{active}} = [e_{ac_\alpha} \ e_{ac_\beta}]^T$ 表示有效反电动势在 α, β 轴上的分量; K_{active} 为有效磁链幅值; θ_d 为转子位置; t 为时间; R 为定子电阻; L_q 为交轴电感; ω 为电机的电角频率。定义 $\mathbf{I} = \mathbf{I}_{2 \times 2} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \text{则式(1)可改写为矩阵形式} \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} -R\mathbf{I} & -\mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_C} \mathbf{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_s \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Phi}_C} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ J e_{\text{active}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Phi}_C} \omega \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x} = [L_q i_s \ e_{\text{active}}]^T$ 为状态矢量; $\mathbf{A}_C = \begin{bmatrix} -R\mathbf{I} & -\mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 为同质项矩阵; $\mathbf{\Phi}_C = [0 \ J e_{\text{active}}]^T$ 为转速参数的回归项矩阵。应注意到式(2)中的转速回归项中含有不可测状态 e_{active} 。

1.2 局部稳定性问题

未知转速回归项所引起的稳定性问题,体现在 Lyapunov 稳定性证明过程中。假设存在任一正定对称矩阵 $\mathbf{P}$, 使得 $\mathbf{A}_C^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_C < 0$, 则可以选择一个 Lyapunov 函数为

$$V = \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} + \gamma_\omega \tilde{\omega}^2 \quad (3)$$

式中: 上标 $\sim$ 表示估计误差, 定义为真实值减去估计值, 如 $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$ ($\hat{\omega}$ 表示估计值); γ_ω 为正定的转速自适应增益。式(3)的时间导数为

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{\mathbf{x}}^T (\mathbf{A}_C^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_C) \tilde{\mathbf{x}} + 2 \left[\tilde{\omega} \mathbf{\Phi}_C^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\omega} \gamma_\omega^{-1} \left(\frac{d\hat{\omega}}{dt} \right) \right] \quad (4)$$

由式(4)可知, 转速自适应律设计应为

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\gamma_\omega \mathbf{\Phi}_C^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} \quad (5)$$

然而, 由于式(5)依赖于未知回归项 $\mathbf{\Phi}_C$, 该转速自适应律严格意义上是不可用的。因此, 所有基于传统 IPMSM 全阶模型的转速自适应观测器都不能被证明全局稳定。为了在实验中实现该方案, 现有的转速观测器算法通常采用 3 种改进方法: 证明特定工况下的局部稳定^[12,17-19], 强行假设回归项已知^[1,20], 采用降阶观测器设计^[4,21]。以上 3 种稳定性补救方法只能称得上是妥协方案, 只有将传统 IPMSM 全阶模型转换为转速回归项已知的形式才能从根本上解决不可用的转速自适应律问题。

1.3 新型已知回归项有效磁链全阶模型

为了将传统模型转化为能够满足全局稳定必要

条件的形式, 重新定义模型的状态变量为 $\zeta(i_s, e_{\text{active}}, \omega)$, 可得

$$\zeta = \begin{cases} \psi_\sigma = L_q i_s \\ \chi = -e_{\text{active}} - \omega J L_q i_s \end{cases} \quad (6)$$

假设 IPMSM 模型中的电阻 R 、交轴电感 L_q 和直轴电感 L_d 已知。式(6)中, $\psi_\sigma = [\psi_{a\sigma} \ \psi_{\beta\sigma}]^T$, $\chi = [\chi_\alpha \ \chi_\beta]^T$ 为新模型中定义的状态矢量, 分别被定义为等效转子磁链矢量和等效反电动势矢量。由此, 新的 IPMSM 模型可被写为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_\sigma}{dt} = u_s - Ri_s + \chi + \omega J L_q i_s \\ \frac{d\chi}{dt} = -\omega J (u_s - Ri_s) \end{cases} \quad (7)$$

同时, 在计算估计转子位置过程中, 需要推导状态变量的反变换 $\zeta^{-1}(\psi_\sigma, \chi, \omega)$, 有如下形式

$$\zeta^{-1} = \begin{cases} i_s = L_q^{-1} \psi_\sigma \\ e_{\text{active}} = -\chi - \omega J L_q i_s \end{cases} \quad (8)$$

式(7)的矩阵形式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\sigma \\ \chi \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_C} \begin{bmatrix} \psi_\sigma \\ \chi \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_s \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Phi}_C} + \underbrace{\begin{bmatrix} J L_q i_s \\ -J(u_s - Ri_s) \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Phi}_C} \omega \quad (9)$$

由式(9)可知, 在所提出的 IPMSM 模型中, 转速回归项 $\mathbf{\Phi}_C$ 仅由可测量的电压矢量 u_s 和电流矢量 i_s 组成。由于模型具有已知转速回归项的特性, 根据 Lyapunov 稳定性分析过程(式(4)), 本文所提的 IPMSM 全阶模型可组成可用的转速自适应律。

2 转速自适应全阶观测器设计

2.1 自适应全阶观测器

定义输出误差 $\varepsilon = \psi_\sigma - \hat{\psi}_\sigma$, 根据所提出的 IPMSM 全阶模型, 设计的非线性自适应观测器为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\psi}_\sigma}{dt} = u_s - Ri_s + \hat{\chi} + \hat{\omega} J L_q i_s + \lambda_1 \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T \varepsilon + \mathbf{v}_1 \left(\frac{d\hat{\omega}}{dt} \right) \\ \frac{d\hat{\chi}}{dt} = -\hat{\omega} J (u_s - Ri_s) + \lambda_2 \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T \varepsilon + \mathbf{v}_2 \left(\frac{d\hat{\omega}}{dt} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_1, λ_2 为正定的反馈补偿系数; 增益矩阵 $\mathbf{S}$ 为对称正定阵, 由以下 Riccati 方程的特解得到

$$\mathbf{S}^{-1} + \mathbf{A}_C^T \mathbf{S}^{-1} + \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A}_C - \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{S}^{-1} = 0 \quad (11)$$

在本文中, 令 $\mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T = [2\mathbf{I} \ \mathbf{I}]^T$; $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \in \mathbb{R}^2$ 可被定义为滤波后的回归项矩阵, 其动态方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{A}_C - \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_q J i_s \\ -J(u_s - Ri_s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}{dt} = -\tilde{R}\boldsymbol{i}_s + \tilde{\boldsymbol{\chi}} + \tilde{L}_q\hat{\omega}\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s + \tilde{L}_q\tilde{\omega}\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s - \boldsymbol{v}^{\psi} \\ \frac{d\tilde{\boldsymbol{\chi}}}{dt} = -\tilde{\omega}\boldsymbol{J}\boldsymbol{u}_s + \hat{\omega}\tilde{R}\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s + \tilde{\omega}\hat{R}\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s - \boldsymbol{v}^{\chi} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\psi}_r - \hat{\boldsymbol{\psi}}_r$ ， $\tilde{\boldsymbol{\chi}} = \boldsymbol{\chi} - \hat{\boldsymbol{\chi}}$ 。由此，对应的归一化参数误差的敏感性分析结果可表示为

$$\boldsymbol{\varphi}_N(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{\Psi}) \tilde{\boldsymbol{\Psi}}_N = \begin{bmatrix} (-\boldsymbol{i}_s)R \\ (\hat{\omega}\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s)L_q \\ (\hat{L}_q\boldsymbol{J}\boldsymbol{i}_s)\omega \\ \boldsymbol{\chi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{R}/R \\ \tilde{L}_q/L_q \\ \tilde{\omega}/\omega \\ \tilde{\boldsymbol{\chi}}/\boldsymbol{\chi} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中： $\boldsymbol{\Psi}$ 是模型中的扩展参数向量(包括未知状态

$\boldsymbol{\chi}$)； $\tilde{\boldsymbol{\Psi}}_N$ 为归一化的参数误差向量； $\boldsymbol{\varphi}_N$ 是对应于 $\tilde{\boldsymbol{\Psi}}_N$ 的回归矩阵的一阶等效形式。 $\boldsymbol{\varphi}_N$ 中每一列的范数反映了对应的参数误差在观测误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中的占比，由此体现观测器算法输出的观测误差对该参数误差变化的敏感程度。在对应的工况下，参数误差敏感性越低表示越难以对该参数进行观测。图 2 中，横纵坐标为归一化相对值的百分比(横坐标为额定转速的百分比，纵坐标为额定负荷的百分比)，额定转速和额定转矩分别为 3 000 r/min 与 2.39 N·m。由图 2 可知，在低速区域，由线性反馈项设计得到的算法对于 $\tilde{\omega}$ 的敏感性极低，且与 $\tilde{L}_q$ 相近。

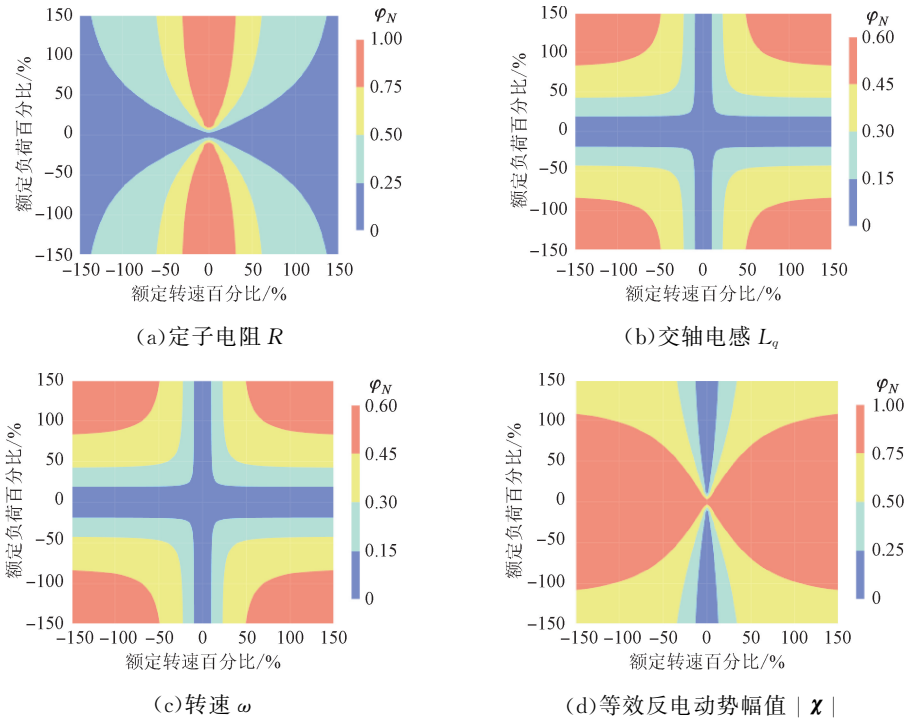
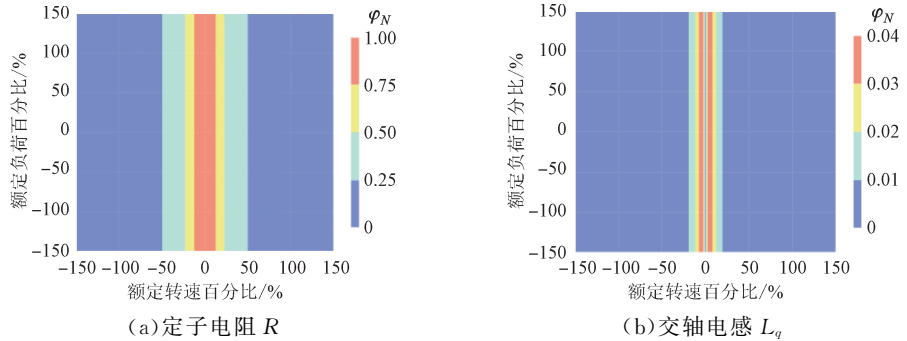


图 2 线性反馈归一化参数误差敏感性分析

Fig. 2 Normalized sensitivity analysis of linear-parameterized feedback error vectors

如图 3 所示，在非线性反馈设计中，由于电机全阶模型的动态方程已知，未知状态 $\boldsymbol{\chi}$ 在充分收敛后可从观测误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 中提取后消除，从而其模量在观测误差中占比很低。将系数矩阵设置为

$\boldsymbol{v}_1 = [100 \ 500]^T$ 后，以降低其余参数敏感性的代价提升了转速观测的敏感性。图 3 表明非线性反馈项设计可通过改变转速的参数敏感性以增强转速观测效果。



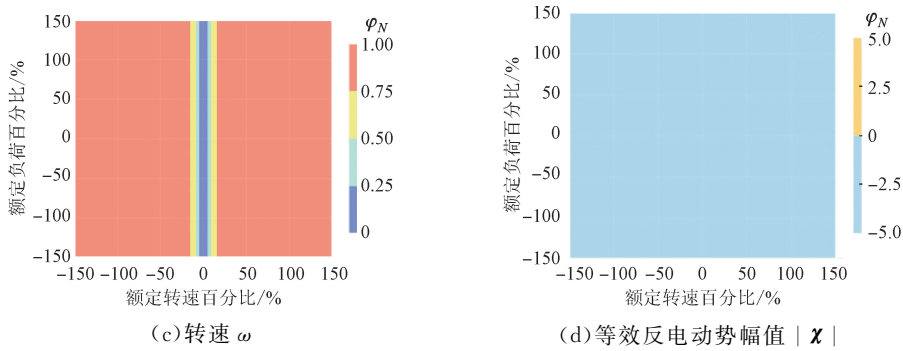


图 3 非线性反馈设计的归一化参数误差敏感性分析

Fig. 3 Normalized sensitivity analysis of nonlinear-parameterized feedback error vectors

3 实验结果

3.1 实验平台配置

为验证所提出的基于已知回归项有效磁链全阶模型的转速自适应观测器在各种工况下的有效性,在某 IPMSM 加载测试平台上进行测试,实验平台配置方式如图 4 所示。被测 IPMSM 的额定值为:功率 0.75 kW,转速 3 000 r/min,电压 220 V,电流 3 A,该电机通过一个电压源逆变器驱动,其电参数见表 1。通过离散参数辨识算法,获取了电机驱动系统整体结构(电机本体、逆变器、导线)的参数,所得数值更符合电机实际工况。实验过程中,转速环的执行频率为 2 kHz,脉宽调制的载波频率为 10 kHz,脉宽调制方法为空间矢量脉宽调制(SVPWM)。电机驱动的采样频率为 10 kHz,远大于电机运行频率。因此,所提出算法的稳定性分析结果能被直接推广至离散模型中。同时,数值求解采用四阶龙格-库塔法,并与欧拉法进行对比,发现在很大程度上消除了截断误差,并且在数字信号处理(DSP)芯片中断中仅增加 33.3%的计算量。本文所采用的转速/电流控制策略为传统最大转矩电流比控制(MTPA)方案,即 $i_d \neq 0$ 。

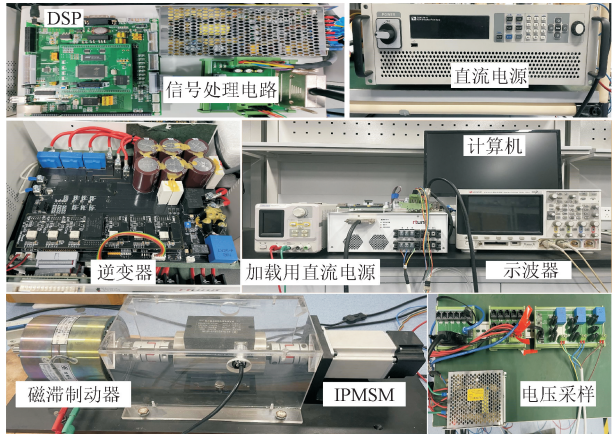


图 4 实验平台配置图

Fig. 4 Configuration of the experimental platform

表 1 被测电机参数

Table 1 Data of tested motor

参数	数值
定子电阻 R/Ω	2.022
直轴电感 L_d/mH	11.72
交轴电感 L_q/mH	15.22
极对数 n_{pp}	5
永磁体磁链 ϕ_t/Wb	0.063

3.2 宽速域无传感器控制验证

在实验开始前,通过电机强制角定位的方式,向给定的电机 d 轴注入 50%额定电压,将电机转子的初始位置与给定的 0° 相匹配,保证电机的初始位置确定^[23]。在实验过程中,同时采样了电机的三相定子电流与定子电压,这样可以避免由逆变器非线性导致的相关问题。图 5 为本文所提 IPMSM 无传感器控制方案在宽速域范围内的实验结果。在空载状态下,被测电机由静止加速至 2 000 r/min,在大约 $t=3\text{ s}$ 时进行突加额定负载的抗扰实验。由实验结果可知,所提出方案对负载扰动有较强的鲁棒性。

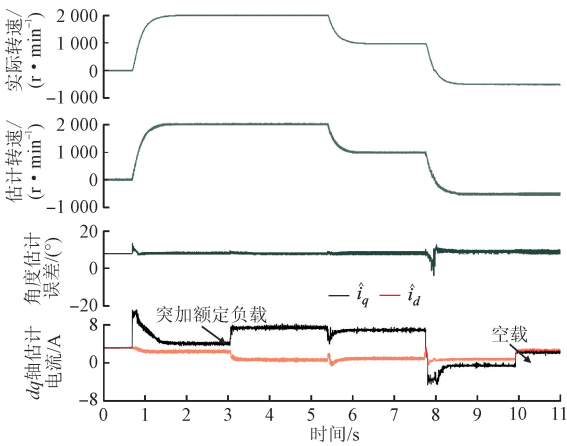


图 5 本文所提方案的宽速域运行实验结果

Fig. 5 Experimental results in wide-speed region based on the proposed method

在约 $t = 10\text{ s}$ 时额定负载被移除,本文方案在 -500 r/min 面对阶跃的负载扰动依然有良好的鲁棒性。同时,空载时 q 轴电流不为 0,该现象可归因于电机转轴的黏性摩擦和转子位置估计误差。

图 6(a)中为采用文献[24]提出的基于扩展反电动势模型的降阶反电动势观测器算法的实验结果,其估计位置由观测的扩展反电动势得出,其转速自适应律由降阶扰动观测器补偿得到。可以看出,扩展反电动势降阶观测器方案在中高速工况下动态性能与所提出全阶观测器方案相当,但其局部稳定的特性使得系数整定过程必须与估计转速相关,从而实现电机的快速反转。

图 6(b)是基于传统 IPMSM 模型的全滑模观测器算法的实验结果,其观测的反电动势由滑模观测器重构,转速自适应律由 Lyapunov 稳定性证明推导得到。由于该方案采用不稳定的转速自适应律,因此在零速附近运行时能直接观测到估计转速的发散。

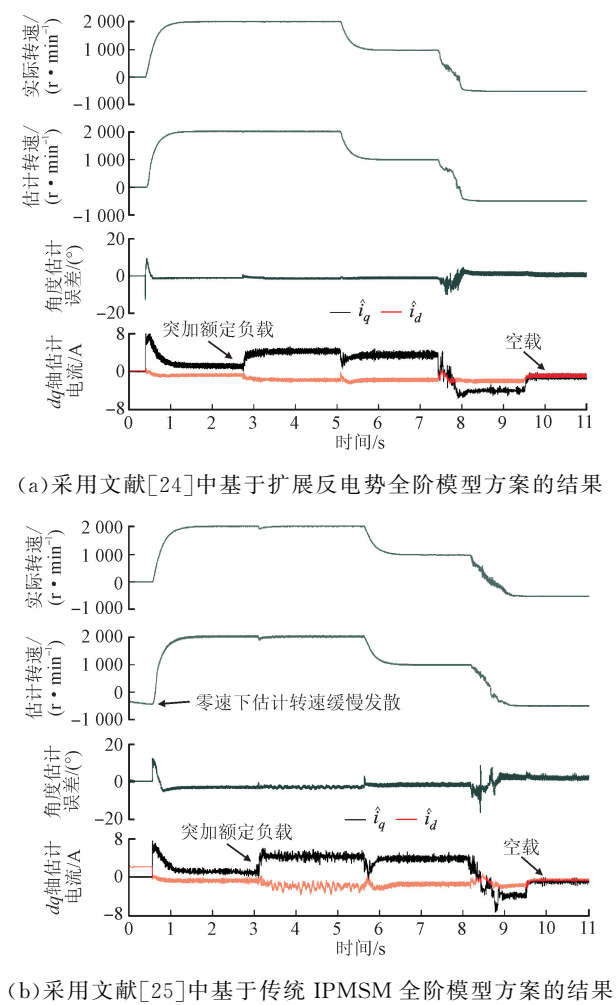


图 6 宽速域无传感器控制的对比实验结果
Fig. 6 Comparative experimental results during wide-speed operations

3.3 低速域运行性能验证

图 6 中,由于转速指令由 $1\,000\text{ r/min}$ 阶跃至 -500 r/min ,快速的反转指令使得无传感器控制方案能勉强保持稳定,然而在慢反转实验以及低速域实验中以上两种方案皆无法稳定运行。正是由于传统全阶模型的未知回归项导致了该稳定性缺陷,而强行引入不可用的转速自适应律极大恶化了全阶观测器的动态性能。通过量化分析实验数据,得到以下结论:相比于传统方案,当电机转速指令阶跃变化(由 $1\,000\text{ r/min}$ 突变至 -500 r/min)时,本文所提观测器算法的角度估计误差收敛速度提高约 42% ,角度估计误差尖峰的幅值减小约 44.4% ;当电机运行在稳态时,交轴电流波动幅值减小约 35% 。

图 7 为 IPMSM 在阶跃额定负载扰动下,给定转速区间为 $\pm 200\text{ r/min}$ 时的实验结果。值得强调的是,该结果中包括了极低转速无传感器驱动运行的情况。在给定转速由 -200 r/min 阶跃至 5 r/min 时,虽然无传感器驱动中出现了较大幅度的低频抖动现象,但整体动态性能良好,且当额定负载转矩突然被移除时能够保持稳定。

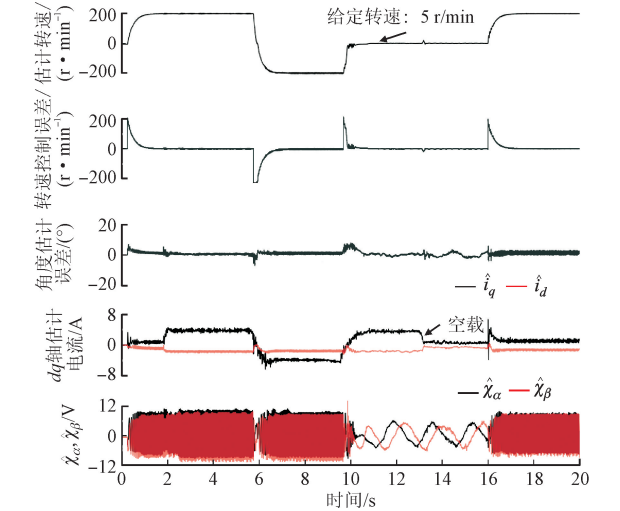


图 7 本文所提方案的低速域运行实验结果
Fig. 7 Experimental results in low-speed region based on the proposed method

4 结 论

本文针对 IPMSM 有效磁链全阶模型,消除了该模型中存在的未知回归项问题,建立了一个全局稳定的转速自适应全阶观测器方案。不同于基于传统 IPMSM 模型的降阶观测器方案,所提出的新型全阶模型提升了 IPMSM 无传感器控制系统的动态性能,同时提出了全局稳定的系数整定过程。在新型全

阶模型中,估计位置与估计转速可在同一观测器设计中得到,大大减少了无传感器控制算法的复杂度。

本文的主要结论如下。

(1)针对有效磁链模型中转速辨识的局部稳定问题,通过改变系统状态消除了不可测量状态(反电动势),使新型 IPMSM 全阶模型满足已知转速回归项的形式。该形式解决了传统有效磁链全阶观测器的全局稳定性证明缺陷,有利于一系列成熟的现有全阶观测器算法的引入。

(2)依据归一化参数敏感性分析结果,对本文提出的 IPMSM 全阶模型以及非线性观测器算法的参数可辨识性进行了可视化分析。指出该模型对于多参数在线辨识的可行性:在满足一定约束条件时,通过整定所提出的非线性观测器系数,可以保证定子电阻 R 、转速 ω 和等效反电动势 χ 三者联合辨识的指数收敛。

(3)在实验过程中,本文所提无传感器控制方案在全速域范围下实现了突加、突减负载实验和快速反转实验;在低速域范围运行时,实现了 5 r/min 极低速工况下的抗扰动实验。通过重新定义 IPMSM 有效磁链全阶模型的状态变量,消除模型的未知状态量,可以改善 IPMSM 无传感器控制驱动的动态性能,扩展全阶观测器的稳定区间。

参考文献:

- [1] 尹忠刚,张延庆,杜超,等. 基于双辨识参数全阶自适应观测器的感应电机低速性能 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 111-121.
YIN Zhonggang, ZHANG Yanqing, DU Chao, et al. Low-speed performance of sensorless vector control for induction motor based on two-parameter identified adaptive full-order observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 111-121.
- [2] 张航,梁文睿,陈哲,等. 基于定子磁链间接计算的内置式永磁同步电机无位置传感器鲁棒性提升控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2723-2732.
ZHANG Hang, LIANG Wenrui, CHEN Zhe, et al. Sensorless robustness improvement control for IPMSM drive based on stator flux indirect calculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2723-2732.
- [3] 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): 1792-1802.
ZHANG Li, ZHU Xiaoyong, ZUO Yuefei. Overview of fault-tolerant technologies of rotor permanent magnet brushless machine and its control system for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1792-1802.
- [4] 刘计龙,肖飞,沈洋,等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 76-88.
LIU Jilong, XIAO Fei, SHEN Yang, et al. Position-sensorless control technology of permanent-magnet synchronous motor: a review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 76-88.
- [5] 葛扬,宋卫章,杨洋. 基于扩张式主从自适应陷波滤波器与动态频率跟踪的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3824-3835.
GE Yang, SONG Weizhang, YANG Yang. PMSM sensorless control based on extended master-slave adaptive notch filter and dynamic frequency tracking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3824-3835.
- [6] 张立伟,李行,宋佩佩,等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 70-78.
ZHANG Liwei, LI Xing, SONG Peipei, et al. Sensorless vector control using a new sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor speed control system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 70-78.
- [7] 陈卓易,邱建琪,金孟加. 内置式永磁同步电机无位置传感器自适应集总电动势模型预测控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5659-5669.
CHEN Zhuoyi, QIU Jianqi, JIN Mengjia. Sensorless adaptive lumped electromotive-force model predictive control of interior permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5659-5669.
- [8] 吴春,傅子俊,孙明轩,等. 基于扩张状态观测器负载转矩补偿的永磁同步电机全速范围无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 172-181.
WU Chun, FU Zijun, SUN Mingxuan, et al. Sensorless control of PMSM in all speed range based on extended state observer for load torque compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 172-181.
- [9] 朱良红,张国强,李宇欣,等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4614-4624.
ZHU Lianghong, ZHANG Guoqiang, LI Yuxin, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer [J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4614-4624.
- [10] 陈嘉豪. 无速度传感器感应电机系统的自适应观测器设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [11] HARNEFORS L. Instability phenomena and remedies in sensorless indirect field oriented control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 733-743.
- [12] 张兴, 郭磊磊, 杨淑英, 等. 永磁同步发电机无速度传感器控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3440-3447.
- ZHANG Xing, GUO Leilei, YANG Shuying, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3440-3447.
- [13] HARNEFORS L, HINKKANEN M. Stabilization methods for sensorless induction motor drives; a survey [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 132-142.
- [14] MARINO R, TOMEI P. Global adaptive observers for nonlinear systems via filtered transformations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(8): 1239-1245.
- [15] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(5): 967-983.
- [16] HARNEFORS L. Globally stable speed-adaptive observers for sensorless induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1243-1245.
- [17] KIM M W, LEE J, BISWAS M, et al. New acoustic noise reduction method for signal-injection-based IPMSM sensorless drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3180-3190.
- [18] 顾聪, 王晓琳, 邓智泉. 一种基于双重锁相环的高速永磁同步电机转子位置估计误差全补偿方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 962-969.
- GU Cong, WANG Xiaolin, DENG Zhiqian. A rotor position estimated error correction method for high-speed permanent magnet synchronous motor based on dual-phase-locked-loop [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 962-969.
- [19] 张国强, 项润华, 王高林, 等. 基于静止轴系脉冲信号注入的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4297-4305.
- ZHANG Guoqiang, XIANG Runhua, WANG Gaolin, et al. Pulse signal injection in stationary reference frame for sensorless PMSM drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4297-4305.
- [20] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.
- WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.
- [21] 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91.
- CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91.
- [22] ZHANG Qinghua. Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(3): 525-529.
- [23] LIN Qilian, LIU Ling, LIANG Deliang, et al. A dual-level adaptive law design for super-twisting algorithm in sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(5): 5945-5956.
- [24] CHEN Zhiqian, TOMITA M, DOKI S, et al. An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(2): 288-295.
- [25] QIAO Zhaowei, SHI Tingna, WANG Yindong, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 710-719.

(编辑 亢列梅)