

基于观测器的异步电机随机系统 模糊反步位置跟踪控制*

赵恩亮¹, 于金飞², 程 帅¹, 于金鹏¹
(1. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071;
2. 淄博市技师学院, 山东 淄博 255013)

摘 要: 提出了一种基于观测器的异步电机随机系统模糊反步位置跟踪控制方法: 通过构造降维观测器估计转子角速度; 采用模糊逻辑系统逼近系统模型中的未知随机非线性函数。利用动态面控制技术解决传统反步设计中存在的“计算爆炸”问题。仿真结果表明: 所提出的控制方法可以克服随机扰动的影响, 并且确保跟踪误差收敛到足够小的原点邻域内。

关键词: 异步电机随机系统; 自适应模糊控制; 动态面控制; 降维观测器

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0008-07

doi: 10.12177/emca.2019.139

Observer-Based Fuzzy Backstepping Position Tracking Control for Asynchronous Motor Stochastic System*

ZHAO Enliang¹, YU Jinfei², CHENG Shuai¹, YU Jinpeng¹
(1. College of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2. Zibo Technician College, Zibo 255013, China)

Abstract: An observer-based adaptive fuzzy backstepping position tracking control method for asynchronous motor stochastic system is designed. The reduced-order observer is constructed to estimate the angular speed. The unknown stochastic nonlinear function in the motor model is approximated by fuzzy logic systems. The problem of "explosion of complexity" in traditional backstepping design is solved by using dynamic surface control technique. Simulation results show that the proposed control method can overcome the influence of stochastic disturbance and ensure the adequately small tracking error.

Key words: asynchronous motor stochastic system; adaptive fuzzy control; dynamic surface control; reduced-order observer

0 引 言

异步电机因结构简单、运行可靠且保养维护方便等优点, 广泛地应用于化工、建筑等工业领域。异步电机系统是具有复杂耦合、高阶、多变

量的非线性被控对象, 且受随机扰动的影响, 因此如何在克服随机扰动的情况下设计新型有效控制方案成为研究热点之一。近年来, 相关研究者针对异步电机非线性系统已经提出了许多有效的控制方法, 如反馈线性化控制^[1]、滑模变

收稿日期: 2019-10-22; 收到修改稿日期: 2019-11-28

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1303503); 国家自然科学基金项目(61973179, 61573204); 泰山学者工程专项项目(TSQN20161026)

作者简介: 赵恩亮(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

于金鹏(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机控制和非线性控制。(通信作者)

结构控制^[2-5]等。

文献[6]提出一种针对异步电机的自适应模糊动态面控制方法,但是没有考虑电机运行中会存在随机扰动的问题。在工业实际应用中,异步电动机系统存在随机扰动,例如电压随机浪涌、电动机温度变化等;阻尼转矩、扭转弹性转矩以及磁路饱和等会使电机转矩、自感互感以及绕组电阻等参数发生变化,对异步电机系统的各项控制性能产生不利影响。同时,在传统的控制方法设计中,需要使用传感器直接测量异步电机系统中的一些状态变量,但是传感器的使用不仅会使系统的成本增加,而且测量误差会影响异步电机的控制效果。观测器相关理论的提出解决了系统某些状态变量无法直接获得的问题,其中降维观测器因为设计结构简单、易于实现、维数较低^[7],所以受到广泛的关注。

本文针对异步电机随机系统,设计了降维观测器来估计转子角速度,结合自适应模糊反步控制方法^[5-6,8],有效地克服随机扰动问题;同时引入动态面控制技术^[9],避免了反步设计过程对虚拟控制函数的反复求导,简化了控制器设计。通过稳定性分析,证明了跟踪误差能够渐近收敛到原点邻域内。与文献[6]相比,本文方法,考虑了电机运行中存在的随机扰动,使控制器设计更符合工程实际;设计了降维观测器,无需传感器测量异步电机的转子角速度,提高了系统的机械鲁棒性,降低了系统成本;通过模糊逻辑系统处理了异步电机随机系统中的非线性函数;结合动态面技术,降低了控制律的复杂性。通过仿真结果验证了本文设计的针对异步电机随机系统的控制器的有效性和可行性。

1 异步电机系统模型

在按转子磁链定向的同步旋转坐标系下,异步电机动态模型^[10]可表示为

$$Z \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{pL_m}{L_r J} \varphi_d i_q - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_s L_r^2} i_q - \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} \omega \varphi_d -$$

$$p\omega i_d - \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{i_q i_d}{\varphi_d} + \frac{1}{\sigma L_s} u_q \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_d}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \varphi_d + \frac{L_m R_r}{L_r} i_d \quad (4)$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_s L_r^2} i_d + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} \varphi_d + p\omega i_q + \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{i_q^2}{\varphi_d} + \frac{1}{\sigma L_s} u_d \quad (5)$$

式中: θ 为转子角位置; ω 为转子角速度; p 为极对数; L_m 为互感; L_s 、 L_r 分别为定、转子漏感; J 为转动惯量; φ_d 为转子磁链; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴定子电流; T_L 为负载转矩; R_s 、 R_r 分别为定、转子等效电阻; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴定子电压。

为了简化控制器的设计过程和计算步骤,将各变量重新表示为: $x_1 = \theta, x_2 = \omega, x_3 = i_q, x_4 = \varphi_d, x_5 = i_d, a_1 = \frac{pL_m}{L_r}, b_1 = -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_s L_r^2}, b_2 = -\frac{pL_m}{\sigma L_s L_r}, b_3 = p, b_4 = \frac{L_m R_r}{L_r}, b_5 = \frac{1}{\sigma L_s}, c_1 = -\frac{R_r}{L_r}, d_2 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}$ 。

引理1^[8]:已知 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 是系统状态变量, \mathbf{w} 为独立增量随机过程,随机系统可以表示为 $d\mathbf{x} = f(\mathbf{x})dt + h(\mathbf{x})d\mathbf{w}$,其中 $f(\cdot)$ 和 $h(\cdot)$ 是在 \mathbf{x} 上的局部Lipschitz函数且 $f(0) = 0$ 和 $h(0) = 0$ 。对于任意的给定函数 $V(x) \in C^2, C^2$ 表示复数集,由Ito微分法则定义差分运算 L ,可知 $L V = \frac{\partial V}{\partial x} f + \frac{1}{2} \text{Tr} \left(h^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} h \right)$ 。

引理2^[11]:设 $f(\mathbf{Z})$ 是定义在紧集 Ω_Z 上的连续函数,对于任意的 $\varepsilon > 0$,存在一个模糊逻辑系统 $\mathbf{W}^T \mathbf{S}(\mathbf{Z})$,使得 $f(\mathbf{Z}) = \mathbf{W}^T \mathbf{S}(\mathbf{Z}) + \delta(\mathbf{Z})$,其中 $\mathbf{Z} \in \Omega_Z, \delta(\mathbf{Z})$ 为逼近误差且 $|\delta(\mathbf{Z})| \leq \varepsilon$ 。

考虑到随机因素的影响,异步电机随机系统模型表示如下:

$$dx_1 = x_2 dt + \psi_1^T d\mathbf{w} \quad (6)$$

$$dx_2 = \left(\frac{a_1}{J} x_3 x_4 - \frac{T_L}{J} \right) dt + \psi_2^T d\mathbf{w} \quad (7)$$

$$dx_3 = \left(b_1 x_3 + b_2 x_2 x_4 + b_3 u_q - b_4 \frac{x_3 x_5}{x_4} - b_3 x_2 x_5 \right) dt + \psi_3^T dw \quad (8)$$

$$dx_4 = (c_1 x_4 + b_4 x_5) dt + \psi_4^T dw \quad (9)$$

$$dx_5 = \left(b_1 x_5 + d_2 x_4 + b_3 x_2 x_3 + b_4 \frac{x_3^2}{x_4} + b_5 u_d \right) dt + \psi_5^T dw \quad (10)$$

式中: $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$ 为未知的平滑的非线性函数。

2 降维观测器设计

为了解决使用传感器所带来的问题, 本文选择设计一个降维观测器获取电机转子位置和转子角速度的估计值。

基于式(6)~式(10), 令 $f_0(\mathbf{Z}_0) = \frac{a_1}{J} x_3 x_4 - \frac{T_L}{J} x_3$, 通过引理 2 可得: 对于任意小的常数 $\tilde{\omega} > 0$, 存在一个模糊逻辑系统 $\tilde{\mathbf{W}}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0)$, 使得 $f_0(\mathbf{Z}_0) = \tilde{\mathbf{W}}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0) + \delta_0(\mathbf{Z}_0)$, $\delta_0(\mathbf{Z}_0)$ 表示逼近误差, 其中 $\mathbf{Z}_0 = [x_3 \ x_4]^T$, 并满足 $|\delta_0(\mathbf{Z}_0)| \leq \varepsilon_0$ 。由文献[12]可设计观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{G}\mathbf{y} + \mathbf{B}x_3 + \boldsymbol{\beta} \\ \mathbf{y}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C}^T \hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -g_1 & 1 \\ -g_2 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{G} = [g_1 \ g_2]^T$; $\mathbf{C} = [1 \ 0]^T$; $\boldsymbol{\beta} = [0 \ \tilde{\mathbf{W}}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0)]^T$; $\tilde{\mathbf{W}}_0 = \mathbf{W}_0 - \hat{\mathbf{W}}_0$; $\hat{\mathbf{W}}_0$ 为 \mathbf{W}_0 的估计值; $\hat{\mathbf{x}}$ 为 \mathbf{x} 的估计值; g_1, g_2 为所设计的观测器增益以保证 \mathbf{A} 为严格的 Hurwitz 矩阵。

给定矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$, 存在 $\mathbf{P}^T = \mathbf{P}$, 使 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} = -\mathbf{Q}$ 。

定义误差 $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2]^T = [x_1 - \hat{x}_1 \ x_2 - \hat{x}_2]^T$, 误差表达式为 $d\mathbf{e} = (\mathbf{A}\mathbf{e} + \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta}) dt + \boldsymbol{\psi}^T d\mathbf{w}$, 其中 $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = [0 \ \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0)]^T$, $\boldsymbol{\psi}^T = [\psi_1 \ \psi_2]^T$ 。取 Lyapunov 函数 $V_0 = \frac{1}{2} (\mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e})^2$, 求导得:

$$LV_0 = \mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e} [\mathbf{e}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}) \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}_0 + 2\mathbf{e}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\beta}] + 2\text{Tr}[\boldsymbol{\psi}^T(\mathbf{y}) (2\mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{e}^T \mathbf{P} +$$

$$\mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{P}) \boldsymbol{\psi}(\mathbf{y})] \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}(\mathbf{y})$ 为已知的光滑函数。

$$\text{由杨氏不等式可得: } 2\mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{e}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}_0 \leq \frac{3}{2} \eta_0^{\frac{4}{3}}$$

$$\|\mathbf{P}\|^{\frac{8}{3}} \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{1}{2\eta_0^4} \|\boldsymbol{\varepsilon}_0\|^4, 2\mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{e}^T \mathbf{P}\boldsymbol{\beta} \leq \frac{3}{2} \eta_0^{\frac{4}{3}}$$

$$\|\mathbf{P}\|^{\frac{8}{3}} \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{1}{2\eta_0^4} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0, \text{Tr}[\boldsymbol{\psi}^T(\mathbf{y})$$

$$(2\mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{e}^T \mathbf{P} + \mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e}\mathbf{P}) \boldsymbol{\psi}(\mathbf{y})] \leq 3\sqrt{2} \eta_0^2 \|\mathbf{P}\|^4 \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{3\sqrt{2}}{\eta_0^2} y^4 \|\boldsymbol{\psi}(\mathbf{y})\|^4, \eta_0 \text{ 是一个常数且 } \eta_0 > 0。$$

令 $P_0 = \lambda - 3\eta_0^{\frac{4}{3}} \|\mathbf{P}\|^{\frac{8}{3}} - 6\sqrt{2} \eta_0^2 \|\mathbf{P}\|^4 > 0$, 其中 $\lambda = \lambda_{\min}(\mathbf{P}) \lambda_{\min}(\mathbf{Q})$, $\lambda_{\min}(\mathbf{P})$, $\lambda_{\min}(\mathbf{Q})$ 分别为 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 的最小特征值, 可得:

$$LV_0 \leq -P_0 \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{1}{2\eta_0^4} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 + \frac{1}{2\eta_0^4} \|\boldsymbol{\varepsilon}_0\|^4 + \frac{6\sqrt{2}}{\eta_0^2} y^4 \|\boldsymbol{\psi}(\mathbf{y})\|^4 \quad (13)$$

3 自适应模糊反步控制器设计

根据动态面技术^[9], 定义一个新的状态变量 α_{jd} 和一个时间常数 $\zeta_j, j=1, 2, 4$, 将虚拟控制函数 α_j 经一阶低通滤波处理得到状态变量 α_{jd} , 其中 $\zeta_j \dot{\alpha}_{jd} + \alpha_{jd} = \alpha_j, \alpha_{jd}(0) = \alpha_j(0), \alpha_{jd}(0)$ 表示 α_{jd} 的初始值, $\alpha_j(0)$ 表示 α_j 的初始值。

定义正设计参数 $\varepsilon_i, l_i, h_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$, 由文献[10]可知:

$$\frac{3}{2} z_i^2 \boldsymbol{\psi}_i^T \boldsymbol{\psi}_i \leq \frac{3}{4} l_i^2 + \frac{3}{4} l_i^{-2} z_i^4 \|\boldsymbol{\psi}_i\|^4 \quad (14)$$

$$z_i^3 f_i(\mathbf{Z}_i) \leq \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 + \frac{3}{4} z_i^4 +$$

$$\frac{1}{2h_i^2} z_i^6 \|\mathbf{W}_i\|^2 S_i^T(\mathbf{Z}_i) S_i(\mathbf{Z}_i) \quad (15)$$

(1) 定义误差变量 $z_1 = x_1 - x_{1d}, x_{1d}$ 为目标位置跟踪信号; 选择 Lyapunov 函数 $V_1 = V_0 + \frac{1}{4} z_1^4$, 对其求导可得:

$$LV_1 = LV_0 + z_1^3 (z_2 + \alpha_{1d} + e_2 - \dot{x}_{1d}) + \frac{3}{2} z_1^2 \boldsymbol{\psi}_1^T \boldsymbol{\psi}_1 \quad (16)$$

$$\text{由杨氏不等式可得: } z_1^3 e_2 \leq \frac{3}{4} z_1^4 + \frac{1}{4} \|\mathbf{e}\|^4,$$

$z_1^3 z_2 \leq \frac{3}{4} z_1^4 + \frac{1}{4} z_2^4$ 。令 $f_1(\mathbf{Z}_1) = \frac{3}{4} l_1^{-2} z_1 \|\psi_1\|^4, \mathbf{Z}_1 = [x_1, x_{1d}, \dot{x}_{1d}]^T$, 应用引理 2 和式(14)、式(15), 且选取虚拟控制函数 $\alpha_1 = -k_1 z_1 - \frac{9}{4} z_1 + \dot{x}_{1d} - \frac{1}{2h_1^2} z_1^3 \hat{\vartheta}_1^T \mathbf{S}_1^T(\mathbf{Z}_1) \mathbf{S}_1(\mathbf{Z}_1)$, 将 α_1 代入式(16)可得:

$$LV_1 \leq LV_0 - k_1 z_1^4 + z_1^3(\alpha_{1d} - \alpha_1) + \frac{1}{4} \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{3}{4} l_1^2 + \frac{1}{2} h_1^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_1^4 + \frac{1}{4} z_2^4 + \frac{1}{2h_1^2} z_1^6 (\|\mathbf{W}_1\|^2 - \hat{\vartheta}_1) \mathbf{S}_1^T(\mathbf{Z}_1) \mathbf{S}_1(\mathbf{Z}_1) \quad (17)$$

(2) 定义误差变量 $z_2 = \hat{x}_2 - \alpha_{1d}$, 选择 Lyapunov

函数 $V_2 = V_1 + \frac{1}{4} z_2^4 + \frac{1}{2\lambda_1} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0$, 对其求导可得:

$$LV_2 = z_2^3 (\mathbf{W}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0) + z_3 + \alpha_{2d} + g_2 e_1 - \dot{\alpha}_{1d}) + \frac{3}{2} z_2^2 \psi_2^T \psi_2 + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_0 + LV_1 \quad (18)$$

由杨氏不等式可得: $z_2^3 z_3 \leq \frac{3}{4} z_2^4 + \frac{1}{4} z_3^4$,

$z_2^3 \mathbf{W}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0) \leq \frac{3}{4} z_2^4 + \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0$ 。令 $f_2(\mathbf{Z}_2) = -\dot{\alpha}_{1d} + \frac{3}{4} l_2^{-2} z_2 \|\psi_2\|^4, \mathbf{Z}_2 = [x_1, x_2, \dot{\alpha}_{1d}]^T$, 应用引理 2 和式(14)、式(15) 并且选取虚拟控制函数 $\alpha_2 = -k_2 z_2 - \frac{1}{2h_2^2} z_2^3 \hat{\vartheta}_2^T \mathbf{S}_2^T(\mathbf{Z}_2) \mathbf{S}_2(\mathbf{Z}_2) - \frac{5}{2} z_2 - g_2 e_1 - \tilde{\mathbf{W}}_0^T \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0)$ 和自适应律 $\dot{\tilde{\mathbf{W}}}_0 = \lambda_1 z_2^3 \mathbf{S}_0(\mathbf{Z}_0) - m_0 \tilde{\mathbf{W}}_0$, 其中 λ_1, m_0 皆为正数, 将 $\alpha_2, \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_0$ 代入式(18) 可得:

$$LV_2 \leq - \sum_{i=1}^2 (k_i z_i^4) + LV_0 + z_1^3(\alpha_{1d} - \alpha_1) + z_2^3(\alpha_{2d} - \alpha_2) + \sum_{i=1}^2 \left[\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 + \frac{1}{2h_i^2} z_i^6 (\|\mathbf{W}_i\|^2 - \hat{\vartheta}_i) \mathbf{S}_i^T(\mathbf{Z}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{Z}_i) \right] + E + \frac{1}{4} z_3^4 \quad (19)$$

其中: $E = \frac{1}{4} \|\mathbf{e}\|^4 + \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 + \frac{m_0}{\lambda_1} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \hat{\mathbf{W}}_0$ 。

(3) 定义误差变量 $z_3 = x_3 - \alpha_{2d}$, 选择 Lyapunov

函数 $V_3 = V_2 + \frac{1}{4} z_3^4$, 对其求导可得:

$$LV_3 = LV_2 + z_3^3 (b_1 x_3 + b_2 x_2 x_4 - b_3 x_2 x_5 - b_4 \frac{x_3 x_5}{x_4} + b_5 u_q - \dot{\alpha}_{2d}) + \frac{3}{2} z_3^2 \psi_3^T \psi_3 \quad (20)$$

令 $f_3(\mathbf{Z}_3) = b_1 x_3 + b_2 x_2 x_4 - b_3 x_2 x_5 - \dot{\alpha}_{2d} - b_4 \frac{x_3 x_5}{x_4} + \frac{3}{4} l_3^{-2} z_3 \|\psi_3\|^4, \mathbf{Z}_3 = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dot{\alpha}_{2d}]^T$,

应用引理 2 和式(14)、式(15) 并取真实控制律 $u_q = -k_3 z_3 - z_3 - \frac{1}{2h_3^2} z_3^3 \hat{\vartheta}_3^T \mathbf{S}_3^T(\mathbf{Z}_3) \mathbf{S}_3(\mathbf{Z}_3)$, 将 u_q 代入式(18), 得:

$$LV_3 \leq - \sum_{i=1}^3 (k_i z_i^4) + LV_0 + z_1^3(\alpha_{1d} - \alpha_1) + z_2^3(\alpha_{2d} - \alpha_2) + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 + \frac{1}{2h_i^2} z_i^6 (\|\mathbf{W}_i\|^2 - \hat{\vartheta}_i) \mathbf{S}_i^T(\mathbf{Z}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{Z}_i) \right] + E \quad (21)$$

(4) 定义误差变量 $z_4 = x_4 - \alpha_{3d}$, 选择 Lyapunov

函数 $V_4 = V_3 + \frac{1}{4} z_4^4$, 对其求导可得:

$$LV_4 = LV_3 + z_4^3 (c_1 x_4 + b_4 x_5 - \dot{x}_{4d}) + \frac{3}{2} z_4^2 \psi_4^T \psi_4 \quad (22)$$

由杨氏不等式可得: $b_4 z_4^3 z_5 \leq \frac{3b_4}{4} z_4^4 + \frac{b_4}{4} z_5^4$ 。令

$f_4(\mathbf{Z}_4) = c_1 x_4 + \frac{3}{4} l_4^{-2} z_4 \|\psi_4\|^4, \mathbf{Z}_4 = [x_1, x_2, x_3, x_4, \dot{x}_{4d}]^T$, 应用引理 2 和式(14)、式(15), 并且取虚拟控制函数

$\alpha_4 = \frac{1}{b_4} \left[-k_4 z_4 - \frac{3}{4} z_4 + \frac{3b_4}{4} z_4 - \frac{1}{2h_4^2} z_4^3 \hat{\vartheta}_4^T \mathbf{S}_4^T(\mathbf{Z}_4) \mathbf{S}_4(\mathbf{Z}_4) \right]$, 将 α_4 代入式(20), 可得:

$$LV_4 \leq - \sum_{i=1}^4 (k_i z_i^4) + z_1^3(\alpha_{1d} - \alpha_1) + z_2^3(\alpha_{2d} - \alpha_2) + LV_0 + \sum_{i=1}^4 \left[\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 + \frac{1}{2h_i^2} z_i^6 (\|\mathbf{W}_i\|^2 - \hat{\vartheta}_i) \mathbf{S}_i^T(\mathbf{Z}_i) \mathbf{S}_i(\mathbf{Z}_i) \right] + b_4 z_4^3 (\alpha_{4d} - \alpha_4) + \frac{b_4}{4} z_5^4 + E \quad (23)$$

(5) 定义误差变量 $z_5 = x_5 - \alpha_{4d}$, 选择 Lyapunov 函数 $V_5 = V_4 + \frac{1}{4}z_5^4$, 对其求导可得:

$$LV_5 = LV_4 + z_5^3 \left(b_1 x_5 + d_2 x_4 + b_5 u_d + b_3 x_2 x_3 + b_4 \frac{x_3^2}{x_4} - \dot{\alpha}_{4d} \right) + \frac{3}{2} z_5^2 \psi_5^T \psi_5 \quad (24)$$

令 $f_5(\mathbf{Z}_5) = b_1 x_5 + d_2 x_4 + b_3 x_2 x_3 + b_4 \frac{x_3^2}{x_4} - \dot{\alpha}_{4d} + \frac{3}{4} l_5^{-2} z_5 \|\psi_5\|^4$, $\mathbf{Z}_5 = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \dot{\alpha}_{4d}]^T$, 应用引理 2 和式(14)、式(15), 并且取真实控制律 $u_d = \frac{1}{b_5} \left[-k_5 z_5 - \frac{1}{2h_5^2 z_5^3} \hat{\vartheta}_5^T S_5^T(\mathbf{Z}_5) S_5(\mathbf{Z}_5) - \frac{3 + b_4}{4} z_5 \right]$, 将 u_d 代入式(14) 可得:

$$LV_5 \leq - \sum_{i=1}^5 (k_i z_i^4) + z_1^3 (\alpha_{1d} - \alpha_1) + LV_0 + z_2^3 (\alpha_{2d} - \alpha_2) + \sum_{i=1}^5 \left[\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 + \frac{1}{2h_i^2 z_i^6} \cdot (\|\mathbf{W}_i\|^2 - \hat{\vartheta}_i) S_i^T(\mathbf{Z}_i) S_i(\mathbf{Z}_i) \right] + b_4 z_4^3 (\alpha_{4d} - \alpha_4) + E \quad (25)$$

4 稳定性分析

定义 $v_j = \alpha_{jd} - \alpha_j (j = 1, 2, 4)$, 求导得: $\dot{v}_j = -\frac{\dot{\alpha}_{jd} - \dot{\alpha}_j}{\zeta_j} - \dot{\alpha}_j = -\frac{v_j}{\zeta_j} + B_j$; 定义 $\vartheta_i = \|\mathbf{W}_i\|^2$, $\|\mathbf{W}_i\|$ 为 \mathbf{W}_i 的范数, $\hat{\vartheta}_i$ 是 ϑ_i 的估计值, $\hat{\vartheta}_i = \vartheta_i - \hat{\vartheta}_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 。选择系统的 Lyapunov 函数 $V = V_5 + \sum_{j=1,2,4} \frac{1}{4} v_j^4 + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{2r_i} \hat{\vartheta}_i^2$ 。

定义 $r_i > 0, m_i > 0 (i = 1, 2, 3, 4, 5)$, 构造自适应律 $\dot{\hat{\vartheta}}_i = -m_i \hat{\vartheta}_i + \frac{r_i}{2h_i^2 z_i^6} S_i^T(\mathbf{Z}_i) S_i(\mathbf{Z}_i)$ 。根据文献[9 - 10], 在紧集范围 $|\Omega_i| (j = 1, 2, 4), B_j \leq B_{jM}$, 可得不等式 $v_j^3 \dot{v}_j \leq -\frac{v_j^4}{\zeta_j} + \frac{3\tau}{4} v_j^4 + \frac{B_{jM}^4}{4\tau}$, 其中 $\tau > 0$ 。同理: $\tilde{\mathbf{W}}_0^T \hat{\mathbf{W}}_0 \leq -\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \hat{\mathbf{W}}_0 + \frac{1}{2} \mathbf{W}_0^T \mathbf{W}_0, z_1^3 v_1 \leq$

$$\begin{aligned} & \frac{3}{4} z_1^4 + \frac{1}{4} v_1^4, z_2^3 v_2 \leq \frac{3}{4} z_2^4 + \frac{1}{4} v_2^4, b_4 z_4^3 v_4 \leq \frac{3b_4}{4} z_4^4 + \\ & \frac{b_4}{4} v_4^4, -\tilde{\vartheta}_i \hat{\vartheta}_i \leq -\frac{1}{2} \hat{\vartheta}_i^2 + \frac{1}{2} \vartheta_i^2. \text{ 进而, 得:} \\ & LV \leq \sum_{i=1}^5 \left(-\bar{k}_i z_i^4 - \frac{m_i}{2r_i} \hat{\vartheta}_i^2 \right) - \frac{m_0}{2\lambda_1} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 - \\ & \frac{4 - 3\tau - 1}{4\zeta_1} v_1^4 - \frac{4 - 3\tau - 1}{4\zeta_2} v_2^4 - \\ & \frac{4 - 3\tau - b_4}{4\zeta_4} v_4^4 + \frac{B_{1M}^4}{4\tau} + \frac{B_{2M}^4}{4\tau} + \frac{B_{4M}^4}{4\tau} + \\ & \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2\eta_0^4} \right) \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 + \frac{1}{2\eta_0^4} \|\varepsilon_0\|^4 + \\ & \sum_{i=1}^5 \left(\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 \right) - \left(P_0 - \frac{1}{4} \right) \cdot \\ & \|e\|^4 + \frac{6\sqrt{2}}{\eta_0^2} y^4 \|\psi(y)\|^4 + \frac{m_0}{2\lambda_1} \tilde{\mathbf{W}}_0^T \tilde{\mathbf{W}}_0 + \\ & \sum_{i=1}^5 \left(\frac{m_i}{2r_i} \vartheta_i^2 \right) \leq -a_0 V + b_0 \quad (26) \end{aligned}$$

其中: $a_0 = \min \left\{ 2\bar{k}_i, \frac{m_0}{\lambda_i}, \frac{m_i}{r_i}, \frac{4 - 3\tau - 1}{2\zeta_1}, \frac{4 - 3\tau - 1}{2\zeta_2}, \frac{4 - 3\tau - b_4}{2\zeta_4}, \left(P_0 - \frac{1}{4} \right), \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2\eta_0^4} \right) \right\}$; $b_0 = \sum_{j=1,2,4} \left(\frac{B_{jM}^4}{4\tau} \right) + \frac{6\sqrt{2}}{\eta_0^2} y^4 \|\psi(y)\|^4 + \frac{m_0}{2\lambda_1} \mathbf{W}_0^T \mathbf{W}_0 + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{m_i}{2r_i} \vartheta_i^2 \right) + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{3}{4} l_i^2 + \frac{1}{2} h_i^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_i^4 \right) + \frac{1}{2\eta_0^4} \cdot \|\varepsilon_0\|^4$; $i = 1, 2, 3, 4, 5; \bar{k}_1 = k_1 - \frac{3}{4}; \bar{k}_2 = k_2 - \frac{3}{4}, \bar{k}_3 = k_3; \bar{k}_4 = k_4 - \frac{3b_4}{4}; \bar{k}_5 = k_5$ 。

由文献[10 - 13] 可知, $\tilde{\mathbf{W}}_0, \hat{\vartheta}_i, z_i$ 是随机有界的, 因此 α_i 也是有界的, 进而闭环系统所有信号都是有界的。由式(24) 和文献[14] 可得: $\frac{dE[V(t)]}{dt} \leq -a_0 E[V(t)] + b_0$, 则 $E(|z_1|^4) \leq \frac{8b_0}{a_0}$ 。由以上分析可知, 选择合适的 a_0 和 b_0 就能使系统跟踪误差在四阶矩意义下收敛于一个充分小的原点邻域内。

5 系统仿真试验及结果分析

5.1 仿真试验参数设定

为了验证本文所提控制方法的有效性,采用 MATLAB 软件进行仿真试验分析。电机参数为 $R_s = 0.1 \Omega, J = 0.0586 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, R_r = 0.15 \Omega, L_s = L_r = 0.0699 \text{ H}, L_m = 0.068 \text{ H}$ 。选取的模糊集为 $\mu_{F_i^l} = \exp \{[-(\hat{x}_i + l)^2/2]\} (i=1,2); \mu_{F_j^l} = \exp \{[-(x_j + l)^2/2]\} (j=3,4,5); l \in N; l \in [-5,5]$ 。选取控制器参数: $\bar{k}_1 = 5, \bar{k}_2 = 20, \bar{k}_3 = 8000, \bar{k}_4 = 700, \bar{k}_5 = 1000, \lambda_1 = 0.02, r_i = 0.02, h_i = 2, m_0 = 0.05, m_i = 0.05 (i=1,2,3,4,5), \zeta_1 = 0.022, \zeta_2 = 0.0006, \zeta_4 = 0.0001$, 负载转矩 $T_L = \begin{cases} 1.0 \text{ N} \cdot \text{m}, & 0 \leq t \leq 15 \\ 2.0 \text{ N} \cdot \text{m}, & t > 15 \end{cases}$ 。

选择期望的位置跟踪信号 $x_{1d} = 0.5 \sin(t) + 0.3 \sin(0.5t), x_{4d} = 1$, 选择观测器增益矢量 $\mathbf{G} = [250, 30000]^T$, 使得 \mathbf{A} 是一个 Hurwitz 矩阵。假设正定矩阵 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$, 由 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}$ 可以得到正定对称矩阵 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 6000.2 & -50 \\ -50 & 0.61667 \end{bmatrix}$ 。

5.2 仿真结果分析

使用动态面技术控制和传统反步法控制进行仿真,结果如图 1~图 7 所示。通过对比可以看出,使用动态面技术同样能达到较好的控制效果。

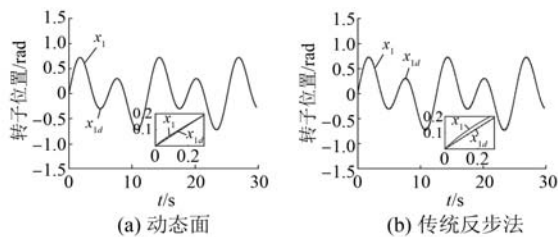


图 1 转子位置 x_1 和期望位置 x_{1d}

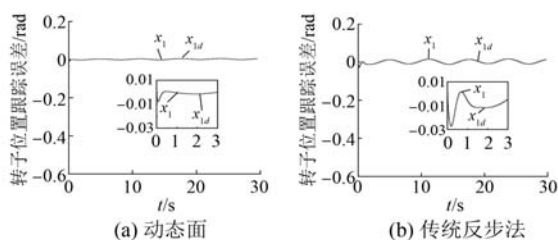


图 2 转子位置跟踪误差曲线

图 1~图 3 表明,在考虑随机扰动的情况下,本文所设计的控制器可以使系统快速跟踪期望信号,并且保证跟踪误差足够小。

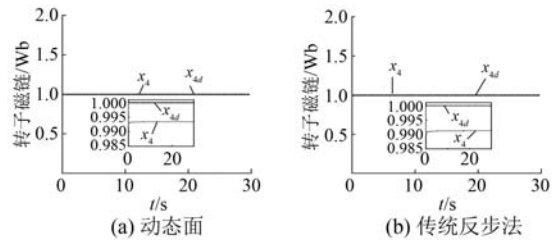


图 3 转子磁链 x_4 和期望磁链 x_{4d}

在 $t = 15 \text{ s}$ 时,外部负载 T_L 由 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 变为 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$,由图 4 和图 5 可知,控制器输入 u_d 和 u_q 均稳定在一个有界的区域内。图 5 中 q 轴定子电压在 $t = 15 \text{ s}$ 时的较小波动是负载转矩 T_L 变动引起的。

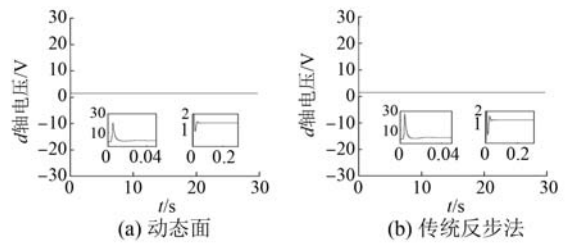


图 4 d 轴定子电压 u_d

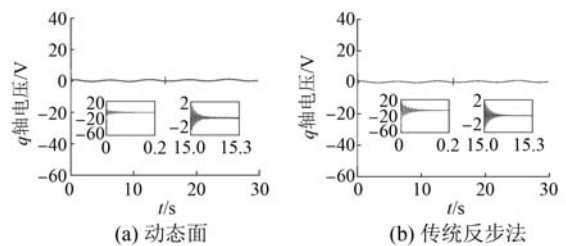


图 5 q 轴定子电压 u_q

图 6 和图 7 表明,本文设计的观测器可以有效地估计所要获取的位置和角速度信号。

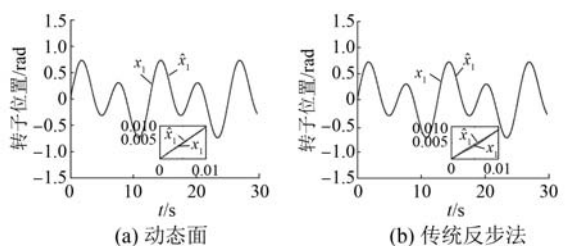
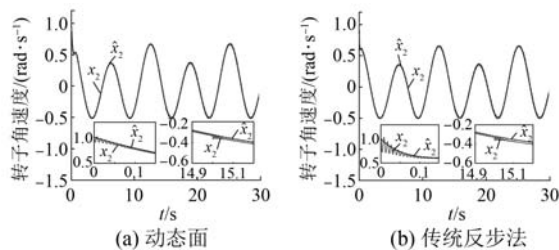


图 6 转子位置 x_1 和观测位置 \hat{x}_1

图7 角速度 x_2 和观测角速度 \hat{x}_2

6 结 语

针对存在随机扰动问题的异步电机系统,本文结合降维观测器和动态面技术,设计了一种基于自适应模糊反步法的位置跟踪控制器。在考虑随机扰动的情况下,本文设计的控制器可以达到满意的控制效果,具有一定的理论与实际应用意义。

【参考文献】

[1] 张文秀,武新芳,孙娟. 基于反馈线性化的直驱风力发电机组控制系统[J]. 电机与控制应用,2014,41(8): 46.

[2] 袁亮,张斌,张增华. 基于滑模变结构的异步电机转速控制系统[J]. 电机与控制应用,2017,44(1): 34.

[3] 于海生,赵克友,郭雷,等. 基于端口受控哈密顿方法的PMSM最大转矩/电流控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8): 82.

[4] LASCU C, BOLDEA I, BLAABJERG F. A modified direct torque control for induction motorsensorless drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,36(1): 122.

[5] 于金鹏,于海生,林崇. 考虑铁损的异步电动机模糊自适应命令滤波反步控制[J]. 控制与决策,2016,31(12): 2189.

[6] YU J, MA Y, YU H, et al. Adaptive fuzzy dynamic surface control for induction motors with iron losses in electric vehicle drive systems via backstepping [J]. Information Sciences,2017,376: 172.

[7] TONG S, LI Y, FENG G, et al. Observer-based adaptive fuzzy backstepping dynamic surface control for a class of non-linear systems with unknown time delays[J]. IET Control Theory & Applications,2011,5(12): 1426.

[8] WANG H, CHEN B, LIN C. Adaptive neural tracking control for a class of stochastic nonlinear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control,2014,24(7): 1262.

[9] 张天平,施泉铖,沈启坤,等. 具有未建模动态的自适应神经网络动态面控制[J]. 控制理论与应用,2013,30(4): 475.

[10] ZHAO Z, YU J, ZHAO L, et al. Adaptive fuzzy control for induction motors stochastic nonlinear systems with input saturation based on command filtering [J]. Information Sciences,2018,463: 186.

[11] 于金鹏,陈兵,于海生,等. 基于自适应模糊反步法的永磁同步电机位置跟踪控制[J]. 控制与决策,2010,25(10): 1547.

[12] NIU H, YU J, YU H, et al. Adaptive fuzzy output feedback and command filtering error compensation control for permanent magnet synchronous motors in electric vehicle drive systems [J]. Journal of the Franklin Institute,2017,354(15): 6610.

[13] FLORCHINGER P. Lyapunov-like techniques for stochastic stability [C]// Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control,1994.

[14] CUI G, XU S, ZHANG B, et al. Adaptive tracking control for uncertain switched stochastic nonlinear pure-feedback systems with unknown backlash-like hysteresis[J]. Journal of the Franklin Institute,2017,354(4): 1801.

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用