

文章编号: 1000-5013(2010)06 0615-05

带参数扰动的永磁同步电动机混沌系统的鲁棒自适应主动控制

李钟慎, 傅桂元

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于自适应主动控制, 提出一种鲁棒控制方法, 通过估计不确定性系统参数的上、下界限, 设计自适应主动控制器. 同时, 给出具体的理论推导及稳定性分析. 该方法可以有效消除系统参数扰动的影响, 从而实现使永磁同步电机各状态变量能被镇定到任意点, 以及输出能渐近跟踪任意期望轨道. 数值仿真结果验证了方法的有效性及其鲁棒性.

关键词: 永磁同步电动机; 自适应主动控制; 参数扰动; 混沌控制; 鲁棒性

中图分类号: TM 351.012; TP 273+.2; O 415.5

文献标识码: A

永磁同步电动机(PMSM)在一定条件下将呈现出混沌特性, 主要表现为转矩和转速的间歇振荡、控制性能的不稳定、系统不规则的电流噪声等^[1-2]. 这对于永磁同步电动机稳定运行极为不利, 甚至将引入整个驱动系统的损坏. 因此, 永磁同步电动机的混沌控制研究具有很大的实际意义. 目前, 实现对永磁同步电动机的混沌控制的方法, 主要有自适应反步法^[3]、主动反步法^[4]、无源控制方法^[5]、自适应动态面方法^[6]、Lyapunov 指数方法^[7]、基于模糊控制的自适应滑模控制^[8]、有限时间理论^[9]和 LaSalle 不变集原理^[10]等. 但是, 上述各方法中均没有考虑系统受到参数扰动或是外部不确定性因素的情况. 在实际应用中, 应避免受到各种干扰等不确定性因素的影响, 因此, 研究具有参数扰动不确定性的永磁同步电动机的混沌控制问题具有较大的实际应用价值. 文[11]提出一种基于线性反馈方法实现对永磁同步电动机的镇定及跟踪控制, 并且分析了系统存在模型误差及测量噪声情况下的鲁棒性. 但该方法将永磁同步电动机混沌模型中的两个状态量(分别 d, q 轴电流)用自定义的两个状态变量来表示, 显然在实际应用当中要受到很大的限制. 本文设计基于自适应主动控制的自适应鲁棒控制器, 实现对具有参数扰动的不确定性 PMSM 混沌系统的鲁棒控制.

1 永磁同步电动机的混沌模型

由文[1-2]可知, 永磁同步电动机混沌系统的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \alpha(i_q - \omega) - \tilde{T}_L, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - i_d\omega + \gamma\omega + \tilde{u}_q, \\ \frac{di_d}{dt} &= -i_d + i_q\omega + \tilde{u}_d. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: 状态变量 ω, i_d, i_q 分别表示电动机的转子角速度、定子 d, q 的轴电流; $\tilde{T}_L, \tilde{u}_q, \tilde{u}_d$ 分别为负载转矩、定子 d, q 的轴电压. 这里, 只考虑系统没有受到驱动负载的情况, 即 $\tilde{u}_d = \tilde{u}_q = \tilde{T}_L = 0$. 此时, 系统(1)

收稿日期: 2010-01-11

通信作者: 李钟慎(1971-), 男, 教授, 主要从事最优控制、时滞系统的控制、抗饱和控制的研究. E-mail: lzszyw@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(E0710018)

可以写成如下形式, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega), \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - i_d\omega + \gamma\omega, \\ \frac{di_d}{dt} &= -i_d + i_q\omega \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由文[2]可知, 当参数 $\sigma = 5.46$, $\gamma = 20$ 时, 系统(2)将呈现出混沌特性. 然而, 实际模型中的系统(2)的参数 σ, γ 将会受到各种环境因素的影响, 因而含有各种不确定性. 考虑被控系统(2)带有参数扰动情况时, 其表述为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= (\sigma + \Delta\sigma)(i_q - \omega) - u_1, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - i_d\omega + (\gamma + \Delta\gamma)\omega + u_2, \\ \frac{di_d}{dt} &= -i_d + i_q\omega + u_3, \\ y &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: $\Delta\sigma, \Delta\gamma$ 分别表示系统参数的扰动项; 变量 y 为系统(3)的输出量; $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ 为系统的控制输入. 控制目标首先是使带有参数扰动的被控系统(3)的各状态变量稳定到任一点, 其次是使系统的输出能快速跟踪到期望轨道.

2 控制器的设计

2.1 镇定问题

假定被控永磁同步电动机的各状态变量的期望值为 $[\omega_r, i_{qr}, i_{dr}]$, 则系统的各状态误差分别为 $e_1 = \omega - \omega_r, e_2 = i_q - i_{qr}, e_3 = i_d - i_{dr}$. 不失一般性, 为了便于分析, 取系统的状态原点作为各状态变量的期望值, 即 $[\omega_r, i_{qr}, i_{dr}] = [0, 0, 0]$. 则系统动态误差方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 &= (\sigma + \Delta\sigma)e_2 - (\sigma + \Delta\sigma)e_1 + u_1, \\ \dot{e}_2 &= (\gamma + \Delta\gamma)e_1 - e_2 - e_1e_3 + u_2, \\ \dot{e}_3 &= -e_3 + e_1e_2 + u_3. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

系统的控制目标是使式(4)中的各状态变量满足

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \|e\| = 0.$$

考虑带有扰动项的系统参数为时变, 即 $\sigma(t) = \sigma + \Delta\sigma, \gamma(t) = \gamma + \Delta\gamma$. 假定 $\sigma(t) \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}]$, $\gamma(t) \in [\underline{\gamma}, \bar{\gamma}]$. 将被控系统(4)写成矩阵形式, 则有

$$\dot{e} = (A + \Delta A)e + f(e) + u. \quad (5)$$

式(5)中: 矩阵 A 为系统确定性参数; ΔA 为系统参数扰动量; $f(x)$ 为系统的非线性向量函数, u 为系统的控制向量组, 其值分别如下

$$A = \begin{bmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \Delta A = \begin{bmatrix} -\Delta\sigma & \Delta\sigma & 0 \\ \Delta\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -e_1e_3 \\ e_1e_2 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}.$$

选取控制器 u 的形式为

$$u = -V - f(e). \quad (6)$$

即

$$\dot{e} = A(t)e + V. \quad (7)$$

此时, 系统(4)可以看成是一时变的线性系统. 不失一般性地, 可以假定 $V = Pe$, 其中 P 是一个 3×3 的矩阵. 则式(7)可改为

$$\dot{e} = (A(t) + P)e. \quad (8)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知,通过选取适当的 \boldsymbol{P} 值,使系统(8)渐近稳定. 这里选取 \boldsymbol{P} 为常数矩阵,即 $\boldsymbol{P}=\text{diag}(k_1, k_2, k_3)$. 其中:参数 $k_i(i=1,2,3)$ 为任意大于 0 的常数.

定理 1 对于被控系统(4),当采用如下控制律,即

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -k_1 e_1 + \hat{\sigma} e_1 - \dot{\bar{\sigma}} |e_2| \operatorname{sgn}(e_1), \\ u_2 &= -k_2 e_2 + e_2 - \dot{\bar{\gamma}} |e_1| \operatorname{sgn}(e_2) + e_1 e_3, \\ \dot{e}_2 &= (\gamma + \Delta \gamma) e_1 - e_2 - e_1 e_3 + u_2, \\ u_3 &= -k_3 + e_3 + e_3 - e_1 e_2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

系统参数界限的更新律为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{\sigma}} &= h_1 e_1^2, \\ \dot{\bar{\sigma}} &= h_2 |e_1| |e_2|, \\ \dot{\bar{\gamma}} &= h_3 |e_1| |e_2|. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(9),(10)中:参数 $k_i(i=1,2,3)$ 和 $h_i(i=1,2,3)$ 均为任意大于零的常数. 被控动态误差系统(4)的闭环特性渐近稳定,其各状态变量将稳定于零点,即系统(4)将稳定到期望点 $[\omega_r, i_{q,r}, i_{d,r}]$.

证明 定义系统的估计参数误差为 $\hat{\underline{\sigma}} = \underline{\sigma} - \hat{\underline{\sigma}}, \hat{\bar{\sigma}} = \bar{\sigma} - \hat{\bar{\sigma}}, \hat{\underline{\gamma}} = \underline{\gamma} - \hat{\underline{\gamma}}, \hat{\bar{\gamma}} = \bar{\gamma} - \hat{\bar{\gamma}}$. 选取系统(4)的 Lyapunov 函数为

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{2} \boldsymbol{e} \boldsymbol{e}^T + \boldsymbol{V} = \frac{1}{2 h_1} \hat{\underline{\sigma}}^2 + \frac{1}{2 h_2} \hat{\bar{\sigma}}^2 + \frac{1}{2 h_3} \hat{\bar{\gamma}}^2. \quad (11)$$

对 \boldsymbol{V} 沿着式(4)的轨道求导,并将式(9),(10)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{V}} &= \dot{\boldsymbol{e}} \boldsymbol{e}^T + \frac{1}{h_1} \hat{\underline{\sigma}} \dot{\hat{\underline{\sigma}}} + \frac{1}{h_2} \hat{\bar{\sigma}} \dot{\hat{\bar{\sigma}}} + \frac{1}{h_3} \hat{\bar{\gamma}} \dot{\hat{\bar{\gamma}}} = \\ &e_1(\sigma(t) e_2 - \sigma(t) e_1 + u_1) + \frac{1}{h_1}(\underline{\sigma} - \hat{\underline{\sigma}})(-\dot{\hat{\underline{\sigma}}}) + \frac{1}{h_2}(\bar{\sigma} - \hat{\bar{\sigma}})(-\dot{\hat{\bar{\sigma}}}) + \\ &e_2(\gamma(t) e_1 - e_2 - e_1 e_3 + u_2) + \frac{1}{h_3}(\bar{\gamma} - \hat{\bar{\gamma}})(-\dot{\hat{\bar{\gamma}}}) + e_3(-e_3 + e_1 e_2 + u_2) = \\ &-\sigma(t) e_1^2 + \sigma(t) e_1 e_2 + e_1 u_1) + \frac{1}{h_1}(\underline{\sigma} - \hat{\underline{\sigma}})(-\dot{\hat{\underline{\sigma}}}) + \frac{1}{h_2}(\bar{\sigma} - \hat{\bar{\sigma}})(-\dot{\hat{\bar{\sigma}}}) - e_2^2 + \\ &\gamma(t) e_1 e_2 - e_1 e_2 e_3 + u_2 e_2 + \frac{1}{h_3}(\bar{\gamma} - \hat{\bar{\gamma}})(-\dot{\hat{\bar{\gamma}}}) - k_3 e_3^2 \leq \\ &-\hat{\underline{\sigma}}^2 + \bar{\sigma} |e_1| |e_2| + e_1 u_2 + (\underline{\sigma} - \hat{\underline{\sigma}}) e_1^2 - (\bar{\sigma} - \hat{\bar{\sigma}}) |e_1| |e_2| - e_2^2 + \\ &\bar{\gamma} |e_1| |e_2| - e_1 e_2 e_3 + u_2 e_2 - (\bar{\gamma} - \hat{\bar{\gamma}}) |e_1| |e_2| - k_3 e_3^2 = \\ &e_1(-\hat{\underline{\sigma}} e_1 + \dot{\bar{\sigma}} |e_2| \operatorname{sgn}(e_1) + u_1) + e_2(-e_2 + \dot{\bar{\gamma}} |e_1| \operatorname{sgn}(e_2) - e_1 e_3 + u_2) - k_3 e_3^2 = \\ &-k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 = -\boldsymbol{e}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{e} \end{aligned} \quad (12)$$

由 \boldsymbol{V} 的定义可知,对所有非零点,均有 $\boldsymbol{V} > 0$. 根据 Lyapunov 稳定性理论可知,系统(4)将渐近稳定于原点,即被控永磁同步电动机(3)的各状态变量将被镇定到期望点. 证毕.

2.2 跟踪问题

假定系统的期望输出轨道为 y_d ,即 $\omega_r = y_d$,则系统(3)的各状态变量的误差可以定义为 $e_1 = \omega - \omega_r$, $e_2 = i_q - i_{q,r}$, $e_3 = i_d - i_{d,r}$,系统的动态误差方程可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 &= \sigma(t)(e_2 - e_1 - \omega_r) + u_1 - \dot{\omega}_r, \\ \dot{e}_2 &= -e_2 - e_3(e_1 + \omega_r) + \gamma(t)(e_1 + \omega_r) + u_2, \\ \dot{e}_3 &= -e_3 + e_3(e_1 + \omega_r) + u_3. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

定理 1 对于受控系统(13),当采用如下控制律,即

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -k_1 e_1 + \hat{\sigma} e_1 - \dot{\bar{\sigma}} |e_2 - \omega_r| \operatorname{sgn}(e_1) + \dot{\omega}_r, \\ u_2 &= -k_2 e_2 + e_2 - \dot{\bar{\gamma}} |e_1 - \omega_r| \operatorname{sgn}(e_2) + (e_1 + \omega_r) + e_3, \\ u_3 &= -k_3 e_3 + e_3 - (e_1 + \omega_r) + e_2. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(14)中, $\hat{\sigma}, \dot{\bar{\sigma}}, \dot{\bar{\gamma}}$ 分别为 $\underline{\sigma}, \bar{\sigma}, \bar{\gamma}$ 的估计值,其自适应更新律采用如下形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\sigma}} &= -h_1 e_1^2, \\ \dot{\bar{\sigma}} &= h_2 |e_1| |e_2 - \omega_r|, \\ \dot{\bar{\gamma}} &= h_3 |e_1 + \omega_r| |e_2|. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

则被控系统(3)的输出将渐近趋于期望轨道.

定理 2 的证明与定理 1 的证明类似,不再赘述.

3 数值仿真

3.1 镇定问题的仿真结果

假定系统参数的扰动量为 $\Delta\sigma=0.46 \sin(t)+0.1\delta(t)$, $\Delta\gamma=2 \cos(3t)+0.2\delta(t)$. 其中: $\delta(t)$ 表示系统的测量噪声. 选取系统(3)中各状态变量的初始值为 $\omega(0)=10, i_q(0)=10, i_d(0)=10$. 系统参数界限的估计初值为 $\hat{\sigma}(0)=1, \bar{\sigma}(0)=1, \bar{\gamma}=1$, 参数 $P=\operatorname{diag}(5,5,5), h_1=h_2=h_3=0.1$.

当 $t=5 \text{ s}$ 时,控制器(9)开始施加作用. 图 1 为系统(3)各状态变量的时间响应曲线. 从图 1 可看出,被控 PMSM(3)在控制器(9)的作用下,其各状态变量快速趋于原点.

3.2 跟踪问题的仿真结果

假定系统(3)的期望输出轨道 $y_d=2 \sin(0.25 \pi t)$, 各状态变量的初值为 $\omega(0)=10, i_d(0)=10, i_q(0)=10$, 则动态误差系统(13)的状态初值 $e(0)=[10, 10, 10]^T$. 不确定性系统参数为 $\sigma(t)=5.46+0.2 \sin(2t)+0.1\delta(t)$, $\gamma(t)=20+2 \cos(3t)+0.3\delta(t)$, 带有扰动量的系统参数界限的估计初值为 $\hat{\sigma}(0)=0.5, \bar{\sigma}(0)=0.5, \bar{\gamma}=0.5$.

选取矩阵 $P=\operatorname{diag}(2,2,2), h_1=h_2=h_3=0.1$. 当控制器(14)在 $t=0 \text{ s}$ 时,开始施加作用. 被控系统(3)的输出跟踪和跟踪误差曲线,如图 2,3 所示. 从图 3 可以看出,系统(3)在控制器(14)的作用下,其输出跟踪误差

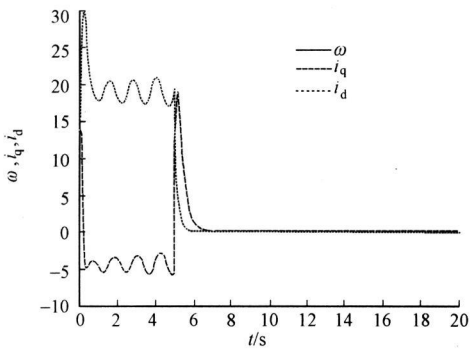


图 1 系统(3)各状态变量的时间响应曲线
Fig. 1 Curve about time response of each state of the system (3)

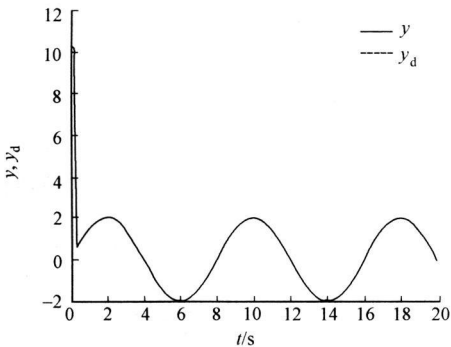


图 2 被控 PMSM(3)的输出跟踪曲线
Fig. 2 Curve of tracking outputs of the controlled PMSM (3)

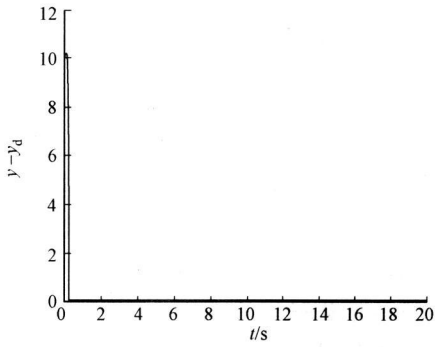


图 3 被控 PMSM(3)的跟踪误差曲线
Fig. 3 Curve of tracking errors of the controlled PMSM (3)

渐近趋于零.

4 结束语

提出一种鲁棒控制方法,实现对具有参数扰动的不确定性 *PMSM* 混沌系统的镇定及跟踪.采用自适应主动控制,通过估计不确定性参数的上、下限,设计鲁棒控制器,有效消除了被控系统中参数扰动的影响,并给出了具体的设计步骤及理论推导.该方法适应性广,设计的控制器简单易行.

参考文献:

- [1] LI Zhong, PARK J B, ZHANG Bo, et al. Bifurcations and chaos in a permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Trans Circ Sys (I), 2002, 49(3): 383-387.
- [2] 张波, 李忠, 毛宗源. 永磁同步电动机的混沌模型及其模糊建模[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(6): 841-844.
- [3] GE Xiao-hui, HUANG Jin. Chaos control of permanent magnet synchronous motor[C] // Proc of the 8th International Conf Electrical Machines and Systems Nanjing: [s. n.], 2005: 484-488.
- [4] 李钟慎, 魏剑林, 王永初. 利用 Backstepping 方法的 PM SM 混沌运动的控制[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3): 253-256.
- [5] QI Dong-lian, WANG Jia-jun, ZHAO Guang-zhou. Passive control of permanent magnet synchronous motor chaotic systems[J]. J Zhejiang Univ Sci (A), 2005, 6(7): 728-732.
- [6] WEI D Q, LUO X S, WANG B H, et al. Robust adaptive dynamic surface control of chaos in permanent magnet synchronous motor[J]. Phys Lett (A), 2007, 363(1/2): 71-77.
- [7] ZRIBI M, OTEAFY A, SMAOUI N. Controlling chaos in the permanent magnet synchronous motor[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 41(3): 1266-1276.
- [8] POURSAMAD A, MARKAZI A H D. Adaptive fuzzy sliding-mode control for multi-input multi-output chaotic systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 42(5): 3100-3109.
- [9] WEI Du-qu, ZHANG Bo. Controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on finite-time stability theory[J]. Chinese Physics (B), 2009, 18(4): 1399-1403.
- [10] 韦笃取, 罗晓曙, 丘东元, 等. 基于 LaSalle 不变集定理自适应控制永磁同步电动机的混沌运动[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6026-6029.
- [11] REN H, LIU D. Nonlinear feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Trans Circuits Syst (II), 2006, 53(1): 45-50.

Robust and Adaptive Active Control of the Chaotic System in Permanent Magnet Synchronous Motor with Parameters Perturbation

LI Zhong-shen, FU Gui-yuan

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: A robust control method is proposed and the bounds of the uncertain system parameters are estimated based on adaptive active control so that the adaptive active controller could be designed. Meanwhile, the detailed theoretical derivation and stability analysis is given. The control method can effectively eliminate the influence of the system parameters perturbation, and each state of PMSM can be driven to any user-defined point and the outputs can asymptotically track any desired orbit. The results of numerical simulation have shown that the effectiveness and robustness of the proposed control scheme.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; adaptive active control; parameters perturbation; chaotic control; robustness

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)