

基于模糊动态 Terminal 滑模的永磁同步电机控制研究

雷晓犇¹, 陈卓², 熊攀², 谭海军^{2,1}

(1. 西北工业大学自动化学院, 陕西西安, 710072; 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 针对永磁同步电机在工作过程中易受到外部干扰的问题, 设计了动态 Terminal 滑模控制的伺服控制系统。Terminal 滑模控制方法在滑动超平面的设计中引入了非线性函数, 使得在滑模面上跟踪误差能够在有限时间内收敛到零。动态滑模控制方法可以消除由控制器中切换函数的不连续性引起的抖振现象。在此基础上利用模糊系统良好的逼近性能对永磁同步电机中的不确定参数和外部干扰进行估计, 提出了基于模糊控制技术的动态 Terminal 滑模永磁同步电机控制方法, 该方法可以有效降低由系统不确定上界引起的抖振现象。仿真结果表明: 该控制方法具有良好的跟踪性能, 对参数变化不敏感且鲁棒性好。

关键词 永磁同步电机; 滑模变结构控制; 模糊控制; 抖振

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.002

中图分类号 V242.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0006-05

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有结构简单、体积小、效率高、运行可靠、调速性能好等优点^[1-2], 但在工作过程中易受外界的干扰, 如负载变化、电压电流变化等。随着 PMSM 应用范围的不断拓展, 对其控制性能要求也越来越高, 传统的 PID 控制方法虽然能使系统在此暂态过程中获得较好的稳态精度, 但系统的快速性、抗干扰能力和系统参数摄动的鲁棒性都不够理想^[3], 先进控制方法在 PMSM 控制系统的应用成为国内外的研究热点。

滑模变结构控制与 PID 控制相比, 具有良好的非线性跟踪特性, 使系统具备更强的鲁棒性和更为优良的动、静态性能^[4]。本文以六相永磁同步电机为研究对象, 设计的基于模糊动态 Terminal 滑模变结构的伺服控制器^[5]可以使系统的状态在“有限时间内”收敛至平衡点, 而模糊规则对未知上界的估计和动态滑模控制可以解决系统的控制输入存在抖振的问题^[6-7]。仿真结果表明该控制方法可以提高 PMSM 的控制效果。

1 六相永磁同步电机的数学模型和状态方程

1.1 数学模型

忽略电动机铁心饱和效应, 不计涡流和磁滞损耗, 六相绕组对称、均匀, 反电势波形为正弦波。六相永磁电机在转子磁场定向的 $d-q$ 旋转坐标系中的数学模型为^[8]:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + P\psi_d - \omega_s \psi_q \\ U_q = Ri_q + P\psi_q - \omega_s \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \sqrt{3} \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = \sqrt{3} n_p \psi_f i_q \quad (3)$$
$$T_e - T_L - K_f \omega_s = J \frac{d\omega_s}{dt} \quad (4)$$

式中: U_d 、 U_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 、 ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴定子电压分量、电流分量、电感分量和磁链分量; ω_s 为电机同步角速度; ψ_f 为转子永磁体磁链; K_f 为阻尼系数; J 为转子的转动惯量; P 为微分算子; n_p 为极对数; T_e 为电磁

¹ 收稿日期: 2012-01-04

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2009JM8014)

作者简介: 雷晓犇(1972-), 男, 陕西华阴人, 副教授, 主要从事智能电机控制研究. E-mail: 80800012@qq.com

转矩; T_L 为负载转矩。

1.2 状态方程

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方式使状态方程线性化, 可得到 PMSM 的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_s i_d - \frac{\sqrt{3}}{L_q} \psi_f \omega_s + \frac{U_q}{L_q} \\ \frac{d\omega_s}{dt} = -\frac{K_f}{J} \omega_s + \frac{\sqrt{3} n_p \psi_f}{J} i_q - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (5)$$

用 x_1 表示电机转角, x_2 表示电机转速, 则系统的状态为 $\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2]^T$; 用 $\Delta f(\mathbf{X}, t)$ 表示不确定参数项; $d(t)$ 表示电机的未知干扰; 控制输入 $u = i_q$; 电机输出 $y = x_1$ 。令: $f(\mathbf{X}, t) = f(\omega_s, t) = -\frac{K_f}{J} \omega_s$; $b(\mathbf{X}, t) = \frac{\sqrt{3} n_p \psi_f}{J}$ 则系统可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\mathbf{X}, t) + b(\mathbf{X}, t)u + \Delta f(\mathbf{X}, t) + d(t) \end{cases} \quad (6)$$

不确定参数和外部扰动满足 $|\Delta f(\mathbf{X}, t)| \leq F(\mathbf{X}, t)$ 和 $|d(t)| \leq D(t)$, 其中 $F(\mathbf{X}, t)$ 和 $D(t)$ 是 2 个非负的函数。在实际工作中电机的不确定项和未知干扰的上界很难准确获得。

2 基于模糊动态 Terminal 滑模控制器设计

2.1 动态 Terminal 滑模控制器设计

动态 Terminal 滑模变结构控制是通过控制律的设计, 使系统的状态 $\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2]^T$ 在有限的时间内实现对期望状态 $\mathbf{X}_d = [x_{1d} \quad x_{2d}]^T$ 的跟踪。定义控制系统的跟踪误差向量为 $\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d = [e_1 \quad e_2]^T$, 且 $e_2 = \dot{e}_1$, 则 Terminal 切换函数为 $s(\mathbf{X}, t) = \mathbf{C}^* \mathbf{E}(t) - \mathbf{W}(t)$ 。其中 $\mathbf{C}^* = [c_1 \quad c_2]$, c_1, c_2 为正常数, 且 $c_2 = 1$ 。 $\mathbf{W}(t) = \mathbf{C}^* \mathbf{P}(t)$, $\mathbf{P}(t)$ 为满足某一假设的矩阵, 其求解过程可参考文献[5]。

设 λ 为正的常数, 定义动态 Terminal 滑模面:

$$\sigma(\mathbf{X}, t) = \dot{s}(\mathbf{X}, t) + \lambda s(\mathbf{X}, t) \quad (7)$$

利用 Lyapunov 稳定性理论分析系统的稳定性, 定义 Lyapunov 函数:

$$V(t) = 1/2 \sigma^T \sigma \quad (8)$$

令:

$$\begin{cases} A = c_2 \dot{b}(\mathbf{X}, t) + (c_1 + \lambda c_2) b(\mathbf{X}, t) \\ B = c_2 [\dot{f}(\mathbf{X}, t) - \ddot{x}_{2d} - p_1^{(3)}] + (c_1 + \lambda c_2) [f(\mathbf{X}, t) \dot{x}_{2d} - \dot{p}_1] \\ C = \lambda c_1 (\dot{e}_1 - \dot{p}_1) \end{cases} \quad (9)$$

则:

$$\dot{\sigma} = Au + (c_1 + \lambda c_2) d(\mathbf{X}, t) + c_2 b(\mathbf{X}, t) \dot{u} + B + C \quad (10)$$

设计动态滑模控制律为:

$$\dot{u}(t) = [Au + B + C + (c_1 + \lambda c_2)(F + D + \eta) \text{sgn}(\sigma)] / c_2 b(\mathbf{X}, t) \quad (11)$$

其中 η 为大于零的正常数, 则 $\sigma(\mathbf{X}, t)$ 将在有限时间 T 趋近于零。将式(11)代入式(10), 可得在 $|\sigma| \neq 0$ 的情况下, $\dot{V} < 0$ 系统满足 Lyapunov 稳定性条件。

由假设知 $s(\mathbf{X}, 0) = \mathbf{C}^* \mathbf{E}(0) - \mathbf{W}(0) = 0$, 即系统的初始状态已经在滑模面上, 消除了滑模的到达阶段, 确保闭环系统的全局鲁棒性和稳定性。考虑到 $\sigma(\mathbf{X}, t) \rightarrow 0$ 时, 由式(7)知, 若 λ 取得大些, 可保证在所有时间内 $s(\mathbf{X}, t) \rightarrow 0$ 。若取 $\delta(t) = \mathbf{E}(t) - \mathbf{P}(t)$, 则 $s(\mathbf{X}, t) = \mathbf{C}^* [\mathbf{E}(t) - \mathbf{P}(t)] = \mathbf{C}^* \delta(t)$, 选择合适的 $\mathbf{P}(t) = 0, \forall t \geq T$, 跟踪误差在有限时间 T 内收敛为零。

2.2 模糊逻辑对滑模控制器的改进

在滑模控制设计中, 系统的参数扰动及扰动通常可以得到, 至少其不确定性的上、下限应是已知的。而

在实际应用中,想要预先了解这些不确定项非常困难,但 Terminal 滑模控制需要知道不确定项和未知干扰的上界。同时不确定项和未知干扰的上界是 Terminal 滑模控制产生抖振的重要原因。运用模糊逻辑控制可实现对系统不确定上界的估计,如果用滑模面条件作为模糊规则的输入就可以达到降低抖振的目的。与普通估计器不同的是,模糊估计运用的是专家知识和经验,能够更有效简捷地完成控制任务。因此可以设计基于模糊规则的滑模控制系统,该控制系统结构见图 1。

由式(11),令 $K = F(t) + D(t) + \eta$,为保证系统运动得以到达滑模面的增益,设计模糊规则见式(12),由模糊规则可以设计关于 $\sigma \dot{\sigma}$ 和 ΔK 之间关系的模糊系统,在该系统中, $\sigma \dot{\sigma}$ 为输入, ΔK 为输出。系统输入输出的模糊集如表 1 所示。其中 NB 为负大, NM 为负中, ZE 为零, PM 为正中, PB 为正大。

$$\begin{cases} \text{if } \sigma \dot{\sigma} > 0 & \text{then } K \uparrow \\ \text{if } \sigma \dot{\sigma} < 0 & \text{then } K \downarrow \end{cases} \quad (12)$$

为了提高模糊控制器的性能,各语言变量的隶属度函数采用不同的三角函数、s 函数和 z 函数。

$\sigma \dot{\sigma}$ 和 ΔK 的隶属度函数如图 2 所示。

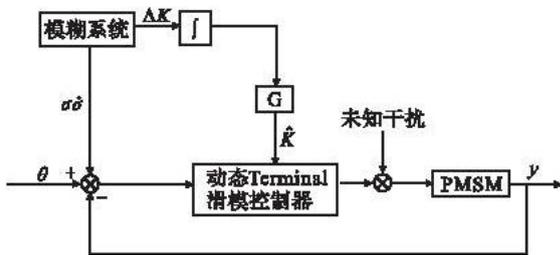


图 1 模糊估计的滑模控制系统结构

Fig. 1 Sliding mode control based on fuzzy estimation

表 1 模糊规则表
Tab. 1 Fuzzy rule table

$\sigma \dot{\sigma}$	NB	NM	ZE	PM	PB
ΔK	NB	NM	ZE	PM	PB

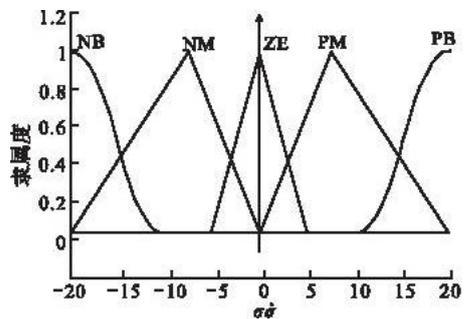


图 2 $\sigma \dot{\sigma}$ 和 ΔK 的隶属度函数

Fig. 2 Membership function $\sigma \dot{\sigma}$ and ΔK

采用不均匀分布的三角函数,各模糊变量的论域划分也不均匀;靠近零时,各变量的论域较小,远离零时较大。在 $\sigma \dot{\sigma}$ 和 ΔK 较大时,模糊控制器实行“粗调”,以加快模糊控制器的调节速度快速减小误差;当 $\sigma \dot{\sigma}$ 和 ΔK 较小时,实行“细调”,以增加控制器的调节精度,使误差更小,响应更精确。

采用加权平均法使 ΔK 清晰化,设 G 为正比例系数,采用积分的方法对 $\hat{K}(t)$ 的上界进行估计:

$$\hat{K}(t) = G \int_0^t \Delta K dt \quad (13)$$

将式(13)代入式(11),则控制律变为:

$$\dot{u}(t) = -\frac{1}{c_2 b(\mathbf{X}, t)} [A u + B + C + (c_1 + \lambda c_2) \hat{K} \text{sgn}(\sigma)] \quad (14)$$

3 仿真结果

采用 Matlab/Simulink 工具箱建立 PMSM 的模糊动态 Terminal 滑模变结构控制系统仿真模型,对该控制方法进行仿真,验证其可行性和有效性。本文选取 16 kW 六相八极 PMSM,该电机参数见表 2。

首先在不加入模糊规则的情况下对动态 Terminal 滑模控制系统进行仿真,假设不确定上界 $K = 50$,取 $C = [5 \ 1]$, $\lambda = 15$, Terminal 时间 $T = 0.3 \text{ s}$,仿真时间为 3 s。设位置指令 $x_d = 10 \sin(\pi t) - 5 \sin(2\pi t)$ 系统的初始状态为 $\mathbf{X} = [8 \ 0]^T$ 。图 3 为位置跟踪图,图 4 为相应的控制输入。由仿真结果可见,系统在时间 0.3 s 内准确跟踪指令信号,跟踪误差接近于 0,但控制输入抖振较严重,有待改进。

表2 PMSM 的参数表

Tab.2 PMSM parameters table

名称	数值	名称	数值
极数	8	相电阻	0.156 Ω
每相匝数	50 匝	铁心计算长度	80 mm
相数	6	定子内径	88 mm
转速	1 300 r/min	气隙长度	0.6 mm
相自感	1 725 mH	额定电压	270 V
相互感	0.028 mH	槽数	12

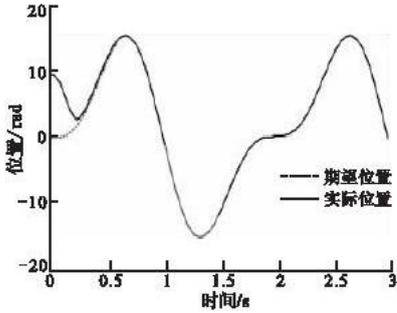


图3 位置跟踪 ($T=0.3\text{ s}$)

Fig.3 Position tracking ($T=0.3\text{ s}$)

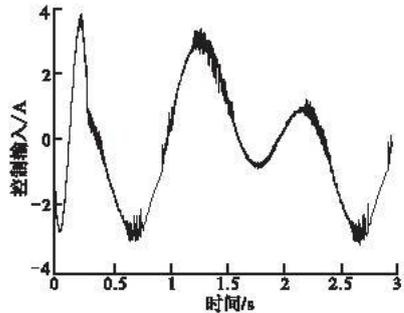


图4 控制输入 ($T=0.3\text{ s}$)

Fig.4 Control input ($T=0.3\text{ s}$)

采用模糊规则对不确定上界进行估计,通过式(12)计算出不确定上界的估计值 K 。设不确定上界的实际值为 $H = 200e^{-2(t-1.5)^2}$, Terminal 时间取 $T = 0.6\text{ s}$, 仿真时间为 5 s ,其他仿真参数保持不变。采用模糊规则的动态 Terminal 滑模控制器时其位置跟踪结果见图5,由图可见系统能在指定的时间 T 内准确的跟踪上指定的目标,在 1.5 s 左右系统跟踪指令信号有一定偏差,这是由于不确定上界在 1.5 s 左右幅值达到最大,产生了一定的干扰。控制输入如图6所示,可以明显的看到系统与没有加入模糊控制时相比抖振现象大大降低。图7为采用模糊规则对不确定项上界估计的值与不确定项真实值之间的比较,用模糊规则估计的波形基本能够跟踪上实际假设的波形,但仍存在一定的偏差,有待进一步研究。

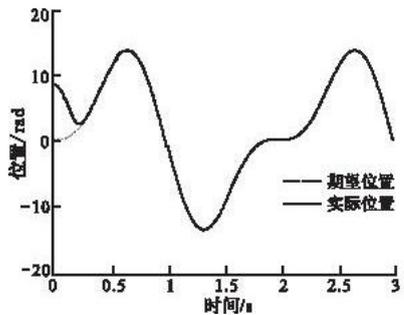


图5 位置跟踪 ($T=0.6\text{ s}$)

Fig.5 Position tracking ($T=0.6\text{ s}$)

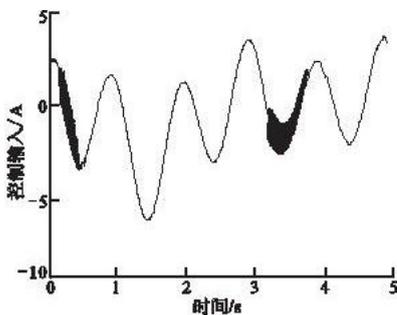


图6 控制输入 $u(T=0.6\text{ s})$

Fig.6 Control input $u(T=0.6\text{ s})$

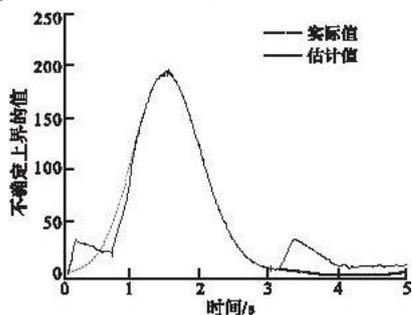


图7 不确定项上界的估计 ($T=0.6\text{ s}$)

Fig.7 The upper bound estimation of uncertain parameters ($T=0.6\text{ s}$)

4 结论

本文综合了 Terminal 滑模的快速收敛性,动态滑模可消除切换函数不连续性引起的抖振,模糊系统良好的逼近性可消除不确定上界引起的抖振,设计了模糊动态 Terminal 滑模变的六相 PMSM 伺服控制系统。仿真结果表明,该方法能确保跟踪误差在有限时间内收敛至零和闭环系统良好的全局鲁棒性,能消除不连续控制项和系统的不确定上界引起的抖振,但不确定项估计值的精确性有待进一步提升。

参考文献(References):

- [1] 齐蓉,陈明. 永磁容错电机及容错驱动结构研究[J]. 西北工业大学学报,2005,23(4):475-478.
QI Rong, CHEN Ming. A better fault tolerant permanent magnet (PM) drive configuration for aircraft[J]. Journal of northwestern polytechnical university,2005,23(4):475-478. (in Chinese)
- [2] Jeong Yuseok, Sul Seungki, Schulz S, et al. Fault detection and fault tolerant control of interior permanent magnet motor drive system for electric vehicle[J]. 38th IAS annual conference,2003,3(12):1458-1463.
- [3] 樊立萍,樊后世,刘欢. 基于滑模变结构的异步电机矢量控制研究[J]. 微计算机信息,2007,23(4):36-38.
FAN Liping, FAN Houshi, LIU huan. Study on the induction motor vector control based on the sliding mode variable structure [J]. Microcomputer information,2007,23(4):36-38. (in Chinese)
- [4] LIN F J, SHYUK K, LINY S. Variable structure adaptive control for PM synchronous servo motor drive[J]. IEE proceedings electric power application,1999,146(1):173-185.
- [5] 刘金焜. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005:333-335.
LIU Jinkun. Matlab simulation for sliding mode control[M]. Beijing:Tsinghua university press,2005:333-335. (in Chinese)
- [6] 彭书华,李华德,苏中,等. 不确定参数电动舵机滑模变结构控制[J]. 电机与控制学报,2009,13(1):128-132.
PENG Shuhua, LI Huade, SU Zhong, et al. Sliding mode variable structure control of electric steering engine with uncertain parameters[J]. Electric machines and control,2009,13(1):128-132. (in Chinese)
- [7] WAIR J, LIU CM, HSU C F. Adaptive fuzzy sliding - mode control for electrical servo drive[J]. Fuzzy sets and systems,2004,143:295-310.
- [8] 齐蓉,陈峥,林辉. 永磁容错电机解耦控制研究[J]. 西北工业大学学报,2007,25(6):809-813.
QI Rong, CHEN Zheng, LIN Hui. A method for implementing torque decoupling control in fault tolerant permanent magnet motor for aircraft[J]. Journal of northwestern polytechnical university,2007,25(6):809-813. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fuzzy Dynamic Terminal Sliding Mode Control

LEI Xiao - ben¹, CHEN Zhuo², XIONG Pan², TAN Hai - jun²

(1. Institute of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A dynamic terminal sliding mode control system designed as to the problem that permanent magnet synchronous motor (PMSM) is vulnerable to external interference in the process of operation. Nonlinear function is introduced into the terminal sliding mode control in the design of sliding hyper - plane, thus making the tracking error in sliding surface in the limited time converge to zero. Dynamic sliding mode control method can be used to eliminate the chattering phenomena caused by the discontinuity of controller switch function. Based on this, using good approximation of fuzzy system to estimate the uncertainties and external disturbances of PMSM a fuzzy technique dynamic Terminal Sliding Mode Control method is proposed. The use of the method can effectively reduce the chattering phenomena caused by upper bounds of uncertainties. Simulation result demonstrates that the system is good in tracking performance, non - sensitive to the parameter changes and of strong robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode control; fuzzy control; chattering