

2 基于磁场定向控制的永磁同步电动机线化解耦数学模型

永磁同步伺服电动机的模型是一个多变量非线性的状态模型,为使伺服系统控制灵活、方便,响应快,控制精度高,必须实现交直流电流的解耦控制,电流解耦控制虽然得到的是近似的线性化解耦模型,但却容易实现,只要采用比较好的处理方式,该方法不仅能够获得快速高精度的力矩控制,而且控制电路简单,实现较方便,且使三相永磁同步伺服电机在动、静态均能得到近似解耦控制。采用按转子磁极位置定向的矢量控制可以认为定子电流励磁分量 $I_d=0$,为分析简化,作如下建模假设: 1.忽略饱和效应。2.电动机气隙磁场均匀分布,感应反电动势呈正弦波状。3.磁滞及涡流损耗不计。4.励磁电流无动态响应。5.转子上无励磁绕组。

根据如上假设,可写出转子坐标系即 dq 坐标系下系统的线性化数学模型。

$$u_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_r \Psi_f \quad (1)$$

$$u_d = -\omega_r L i_q \quad (2)$$

$$T_{em} = 1.5 p_n \Psi_f i_q = K_t i_q \quad (3)$$

$$T_{em} = T_l + B \frac{\omega_r}{p_n} + \frac{J}{p_n} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中, u_d, u_q 为 dq 坐标系上的电枢电压分量; i_d, i_q 为 dq 坐标系上的电枢电流分量; L 为 dq 坐标系上的等效电枢电感 ($L=L_d=L_q$); R, ω_r 为电枢绕组电阻和 dq 坐标系上的电角速度; Ψ_f, p_n 为永久磁铁对应的转子磁链和电机极对数。

3 控制器设计

3.1 电流环设计

电流控制是提高伺服系统控制精度和响应速度、改善控制性能的关键。考虑到快速频率响应是电流控制的主要性能指标以及根据交流位置伺服系统的要求和特点,电流环采用模拟电流滞环比较控制方式,通过相电压的开关切换来保持相电流在滞环范围内变化。这种控制方式具有硬件简单和响应速度快的特点,从而为速度和位置环控制器设计提供保障。

3.2 速度环滑模控制器设计

速度环控制器设计的目标是在保证系统稳定的前提下尽量扩展速度调节范围,加快动态响应,消除稳态误差,同时要抑制负载和参数变化引起的扰动。传统的速度环控制器采用 PI 控制器,这种控制器不能很好的适应负载和参数的大范围变化,引入滑模变结构控制可有效提高速度控制器的抗扰能力,同时为了削弱滑模控制的抖振,使转矩平滑,提高稳态精度,在滑模变结构控制器与控制对象之间引入积分补偿环节,将滑模变结构控制器输出的开关信号转化为平均转矩指令信号,从而避免将控制直接作用对象而导致大的转矩脉动甚至激发机械共振^[6]。图 2 是速度控制系统的简化结构图。

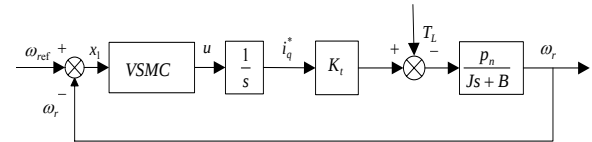


图 2 速度控制系统简化结构图

由式(1)-(4),以 i_q, ω_r 为状态变量,采用 $i_d=0$ 矢量控制方式可得速度闭环系统的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -\psi_f/L \\ K_t p_n/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_q/L \\ -p_n T_l/J \end{bmatrix} \quad (5)$$

令状态量 $x_1 = \omega_{ref} - \omega_r$, $x_2 = \dot{x}_1$, 考虑到多管火箭炮燃气流冲击干扰力矩可抽象为阶跃变化,并假定速度给定二阶导数为零的情况下可得到系统在相空间上的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_t p_n}{J} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{B}{J} \end{bmatrix} \dot{\omega}_{ref} \quad (6)$$

不失一般性,取速度环滑模线性切换函数为^[8]:

$$s_v = c_v x_1 + x_2 \quad (7)$$

式中, c_v 为常数,且 $c_v > 0$ 。

令速度环滑模变结构控制器的输出为:

$$u = \psi_{1v} x_1 + \psi_{2v} x_2 + \frac{B}{K_t p_n} \dot{\omega}_{ref} \quad (8)$$

$$\psi_{1v} = \begin{cases} \alpha_{1v}, & x_1 s_v > 0 \\ \beta_{1v}, & x_1 s_v < 0 \end{cases}, \quad \psi_{2v} = \begin{cases} \alpha_{2v}, & x_2 s_v > 0 \\ \beta_{2v}, & x_2 s_v < 0 \end{cases} \quad (9)$$

由滑模变结构控制到达条件 $s_v \dot{s}_v < 0$,代入式(6)-(9)可以得到速度环滑模变结构控制器参数为:

$$\alpha_{1v} > 0, \beta_{1v} < 0, \alpha_{2v} > \frac{c_v J - B}{K_t p_n}, \beta_{2v} < \frac{c_v J - B}{K_t p_n} \quad (10)$$

则速度环滑模变结构控制器结构如图 3 所示。

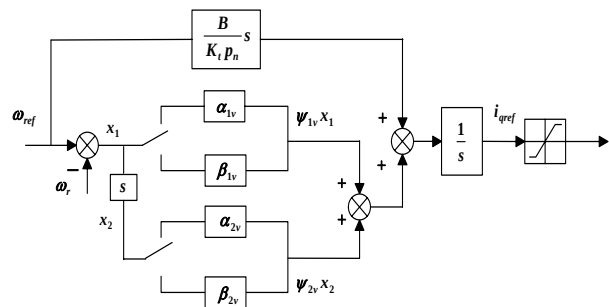


图 3 速度环滑模变结构控制器结构图

3.3 位置环复合滑模控制器设计

位置控制要求具有稳定平滑无超调的瞬态响应以及较小的位置跟踪误差^[7]。为了实现位置的高精度控制,充分利用滑模控制的响应快速,对参数和外界干扰不灵敏的特点,同时又必须有效削弱滑模控制的抖振,本文位置控制器采用复合滑模控制器,即在位置误差较大时采用滑模变结构控制,提高系统的抗干扰性能,在小误差时采用复合前馈控制,从而从根本上消除滑模控制在小误差时出现的抖振现象,保证位置伺服的高精度控制。

3.3.1 滑模变结构控制器设计

采用滑模变结构控制策略的位置环可以进一步提高系统抗扰动性能同时容易实现速度限幅问题, 具体设计时可以以上设计的速度环系统等价为一阶惯性环节, 基于此设计位置环滑模变结构控制器^[8]。这样处理不仅在理论上和实际中均能真实地反映速度环的特性, 同时可以使位置控制器的设计大为简化并更易于分析伺服系统的稳定性。其结构如图 4 所示。

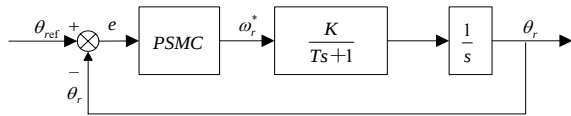


图 4 位置控制系统简化结构图

令 $x_{1p} = \theta_{ref} - \theta_r$ (θ_{ref} 为位置给定, θ_r 为位置反馈), $e_2 = \dot{e}_1$, 考虑位置给定为阶跃信号情况下可得状态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -\frac{1}{T}e_2 - \frac{K}{T}u + \frac{1}{T}\dot{\theta}_{ref} \end{cases} \quad (11)$$

不失一般性, 取位置环滑模线性切换函数为:

$$s_p = c_p e_1 + e_2 \quad (12)$$

式中, c_p 为常数, 且 $c_p > 0$ 。

令位置环滑模变结构控制器输出为:

$$u = \psi_{1p}e_1 + \psi_{2p}e_2 + \frac{1}{K}\dot{\theta}_{ref} \quad (13)$$

$$\psi_{1p} = \begin{cases} \alpha_{1p}, & e_1 s_p > 0 \\ \beta_{1p}, & e_1 s_p < 0 \end{cases}, \quad \psi_{2p} = \begin{cases} \alpha_{2p}, & e_2 s_p > 0 \\ \beta_{2p}, & e_2 s_p < 0 \end{cases} \quad (14)$$

由滑模变结构控制到达条件 $s_p \dot{s}_p < 0$, 代入式(11)-(14)可以得到位置环滑模变结构控制器参数为:

$$\alpha_{1p} > 0, \beta_{1p} < 0, \alpha_{2p} > \frac{c_p T - 1}{K}, \beta_{2p} < \frac{c_p T - 1}{K} \quad (15)$$

则位置环滑模变结构控制器结构如图 5 所示。

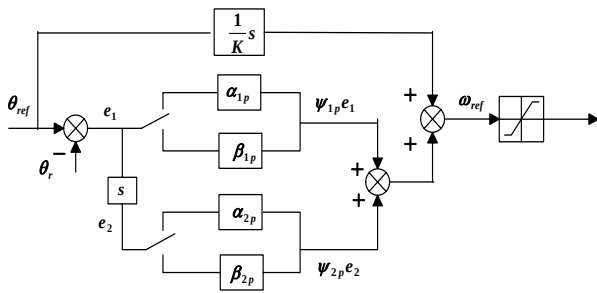


图 5 位置环滑模变结构控制器结构图

3.3.2 复合前馈控制器设计

位置控制器采用滑模控制可以大大提高位置控制的鲁棒性, 但系统进入滑动模态后, 由于控制滞后和切换频率的有限性决定了滑模控制不可避免的出现抖振, 这种由于滑模控制本身产生的抖振将会使系统稳态时产生振荡, 从而会影响系统控制的精确性, 这对于火箭炮位置伺服系统的高精度控制是不允许的, 本文通过在小误差时将滑模控制切换为复

合前馈控制从而避免滑模控制的抖振。其控制结构图如图 6 所示。

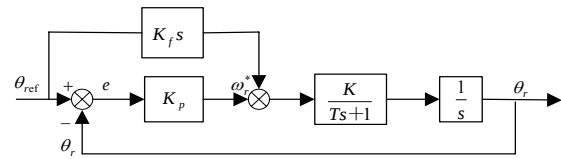


图 6 复合前馈控制系统结构图

复合前馈控制律为:

$$u = K_f \theta_{ref} s + K_p e(s) \quad (16)$$

式中, K_f 为前馈增益, 一般将前馈控制器设计为欠补偿状态, 这时有 $K_f = (0.7 \sim 0.9) \frac{1}{K}$, K_p 为比例放大系数, 为了保证位置伺服系统快速无超调, 应使位置伺服系统处于过阻尼状态, 根据过阻尼条件可以计算出 $K_p < \frac{1}{4KT}$, 其选择原则是在系统不产生振荡的前提下尽量选取一个较大的值。

4 仿真研究

根据以上控制器设计结果进行计算机仿真, 系统主要参数如下: 系统电机及负载转动惯量经折算后为 $J = 8.627 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 系统不平衡力矩和摩擦力矩经折算后为 $4.86 \text{N} \cdot \text{m}$; 系统外部燃气流冲击干扰力矩及未建模动态折算后为 $10 \text{N} \cdot \text{m}$; 电磁转矩系数 $K_t = 1.11 \text{N} \cdot \text{m/A}$; 阻尼系数 $B = 1.43 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$; 定子电阻 $R_a = 2.6 \Omega$; 绕组电感 $L_a = L_q = 50 \times 10^{-3} \text{H}$; 额定电流 $I_e = 6.4 \text{A}$; 容许最大电流 $I_{\max} = 12.8 \text{A}$; 磁极对数 $P_n = 4$ 。根据以上参数分别进行复合滑模控制器和 PID 控制器设计。

考虑火箭炮伺服系统机械减速比, 当系统参考输入为 100rad 时响应曲线如图 7-10 所示。其中 1 为 PID 控制器响应曲线, 2 为串级复合滑模变结构控制响应曲线。其中图 7 和图 9 在 0.2s 负载突加 $10 \text{N} \cdot \text{m}$ 的干扰力矩, 图 8 和图 10 为

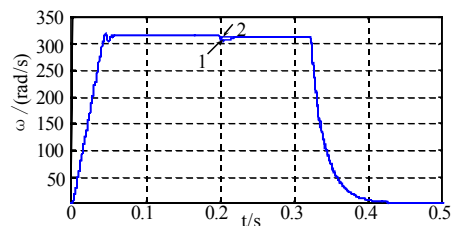


图 7 突加负载扰动时的速度响应曲线

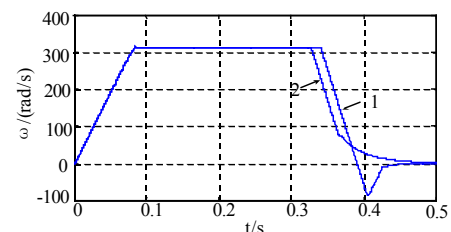


图 8 转动惯量变化 2 倍时的速度响应曲线

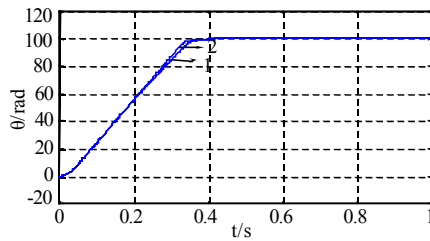


图 9 突加负载扰动时的位置响应曲线

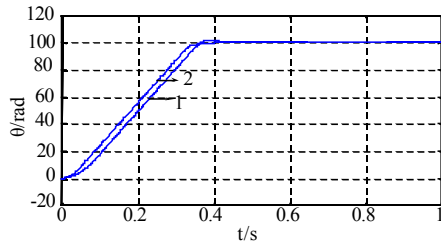


图 10 转动惯量变化 2 倍时的位置响应曲线

系统转动惯量变化 2 倍时的响应曲线。由图 7 和图 9 可以看出, 经典控制对系统扰动敏感, 突加负载使系统响应变慢。串级复合滑模变结构控制器对系统负载扰动不敏感, 具有较强的鲁棒性, 且响应较经典控制迅速。由图 8 和图 10 可以看出, 经典控制对系统惯量变化十分敏感, 使系统阶跃响应产生超调, 同时响应速度慢, 而串级复合滑模变结构控制不仅对系统参数摄动具有较强的鲁棒性, 而且系统响应快速、无振荡、无超调, 同时滑模控制稳态的抖振现象基本消除, 该控制器具有明显的优势和应用价值。

5 结论

本文对火箭炮位置伺服系统这样一种参数和负载变化

大以及具有强干扰力矩的系统, 提出了数字永磁同步电动机位置伺服系统的结构方案, 同时将滑模变结构控制理论应用于系统速度环和位置环设计从而组成串级滑模变结构控制。其中速度环滑模控制器通过在滑模控制器与控制对象之间增加积分环节来消除速度滑模控制抖振, 位置环控制器通过复合滑模控制设计来消除位置滑模控制抖振。计算机仿真结果表明, 该控制策略对于系统参数摄动、负载力矩和外干扰力矩变化不敏感, 具有较强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 秦忆. 现代交流伺服系统[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [2] Utkin V I, Asif Sabanovic. Sliding Modes Applications in Power Electronics and Motion Control Systems[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bled, 1999: 22-31.
- [3] Liu Jinkun, Er Lianjie. Sliding Mode Controller Design for Position and Speed Control of Flight Simulator Servo System with Large Friction. Systems [J]. Engineering and Electronics (S1004- 4132), 2003, 14(3): 59-62.
- [4] Kuo-Kai Shyu, Chiu-Keng Lai, Yao-Wen Tsai, et al. A newly robust controller design for the position control of permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic (S0278-0046). 2002, 49(3): 558-565.
- [5] 赵金, 万淑芸, 王离九. 交流伺服系统串级滑模控制[J]. 电工技术学报, 1996, 11(3): 32-36.
- [6] 谢成详, 曾庆军, 许德. 交流伺服系统串级滑模变结构控制仿真研究[J]. 华东船舶工业学院学报, 2001, 15(1): 43-47.
- [7] 李三东, 沈艳霞, 纪志成. 永磁同步电机位置伺服控制器及其 Backstepping 设计[J]. 电机与控制学报, 2004, 4(8): 353-356.
- [8] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

(上接第 2778 页)

- [5] J Henk, M Heijmans, John Goutsias. Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes [J]. IEEE Transactions on Image Processing (S1057-7149). 2000, 11(9): 1898-1912.
- [6] Huang X Y, Cui H T, Cui P Y. A n autonomous optical navigation and guidance for soft landing on asteroids [J]. Acta Astronautica (S0094-5765). 2004, 54(10): 763-771.
- [7] Van Dyke M C, Schwartz J L, Hall C D. Unscented Kalman filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation [DB/OL]. http://www.Space-flight.org/AAS_meetings/2004_winter/w2004-program.pdf, 2004-03-10.
- [8] HONG Lang. Multi resolution distributed filtering [J]. IEEE Transaction on Automatic Control (S0278-0046). 1994, 39(4): 853-856.
- [9] HONG Lang, CHEN Guanrong, CHUI C K. A filter bank base-d Kalman filtering technique for wavelet estimation and decomposition of random signal [J]. IEEE Transactions On Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing (S1057-7130). 1998, 45(2):

237-241.

- [10] Julier S J, Uhlman J K, Durrant-Whyten H F. A new approach for filtering nonlinear system[C]//Proc of the American Control Conf/Washington: Seattle: IEEE Press, 1995: 1628-1632.
- [11] Julier S J, Uhlmann J K. A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems[C]//The proc of AeroSense: 11th Int Symposium Aerospace/Defense Sensing, Simulation and controls Orlando: IEEE Press, 1997, 54-65.
- [12] Merwe Rudolph vander, Wan Eric A. The Square-Root Unscented Kalman Filter for State and Parameter Estimation [C]//ICA SSP, IEEE International Conference on A coustics, Speech and Signal Processing Proceedings, Piscataway: IEEE Press, 2001, 3461-3464.
- [13] Cody A Mac. Wavelet Transforms as Applied to Financial Market Analysis[C]//Presented at the Conference. Evolving Complexity Challenges to Society, Economy and the Individual, The University of Texas at Dallas, Dallas: Senge Press, 1994.