第19卷第12期 2007年6月

# 永磁交流位置伺服系统串级复合滑模控制

朱玉川<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 马大为<sup>1</sup>, 徐长江<sup>1,2</sup> (1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.海军兵种指挥学院三系, 广东 广州 510430)



摘 要:针对某永磁同步电动机位置伺服系统负载力矩和转动惯量变化大、干扰力矩强的特点,以 及统一滑模变结构控制速度限幅的难题,提出并设计了串级复合滑模变结构控制器。其中速度环通 过增加积分环节来消除滑模控制的力矩抖动,位置环通过复合滑模控制的设计来消除稳态滑模控制 的抖振。计算机仿真结果表明,该控制器不仅响应速度快、无超调、控制精度高,同时对负载扰动 和系统参数摄动具有较强的鲁棒性。

关键词:永磁同步电动机;滑模变结构控制;串级滑模控制;复合控制 中图分类号:TP13 文献标识码:A 文章编号:1004-731X (2007) 12-2779-04

# Cascaded Compound Sliding-mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo System

ZHU Yu-chuan<sup>1</sup>, LI Zhi-gang<sup>1</sup>, MA Da-wei<sup>1</sup>, XU Chang-jiang<sup>1,2</sup>
 (1.School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China;
 2.The Third Department, Guangzhou Naval Arms-commanding Academy, Guangzhou 510430, China)

**Abstract:** Aiming at wide variations in loads and moment of inertia, large disturbed moment of a permanent magnet synchronous motor position servo system, and the problem of velocity limit to uniform sliding mode control, *a cascaded compound slide mode controller was proposed and designed for permanent magnet synchronous motor position servo system.* In which integrate compensator was introduced in slide mode controller of velocity loop for reducing torque chattering, *and compound sliding controller was designed to avoid chatter in slide mode controller of position loop.* The computer simulation result shows that the controller enables the system to be of good fastness and no-overshoot and very high accuracy, especially it can enhance the ability of rejecting the load disturbance and varying of system parameters and takes on good robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode variable structure control; cascaded sliding-mode control; compound control

## 引 言

永磁同步伺服电动机较三相交流异步电动机更容易实 现矢量控制,且具有控制简单,效率高,受温度变化的干扰 影响小等优点,在交流位置伺服系统的应用更为普遍,其控 制结构一般是由电流环、速度环和位置环组成的三环串级结 构。其控制策略一般电流环采用滞环控制方式,保证电流环 的快速响应。速度环采用 PI 控制规律,以保证进行稳定的 速度控制,使其定位时不产生振荡。位置环通常采用比例控 制规律来保证位置控制的高精度和良好的跟踪性能<sup>[1]</sup>。由这 种经典控制组成的控制结构虽然具有结构简单、可靠性强, 稳态精度高,实现容易等诸多优点,但系统的快速性和抗干 扰能力及对系统参数摄动的鲁棒性都不够理想。滑模变结构 控制具有对系统参数变化适应性强、鲁棒性好等特点,在交 流伺服系统中的应用日益普遍<sup>[24]</sup>。国内学者赵金等人将滑 模控制应用于滑差频率型异步电机伺服系统之中<sup>[5]</sup>,取得了

收稿日期: 2006-05-15 **修回日期**: 2006-09-27 基金项目: "十五"国防预研项目(40404110301) 作者简介:朱玉川(1974-),男,安徽淮南人,博士生,研究方向为多管火 箭发射装置伺服控制技术;**李志刚**(1962-),男,博士,副研究员,研究方 向为兵器发射理论与技术,机电系统控制技术;**马大为**(1953-),男,博 士,教授,研究方向为兵器发射理论与技术;**徐长江**(1976-),男,博士生, 研究方向为新型引信装置设计。 较为理想的控制效果,但其对位置滑模的控制器的设计未能 有效消除抖振。而对于火箭炮位置伺服系统这样一种参数和 负载变化大,冲击扰动力矩强的系统,将会带来高幅抖振, 而经典控制也不能满足其位置控制的快速、高精度以及射击 精度的要求。因此本文提出将串级复合滑模变结构控制器策 略应用到火箭炮交流位置伺服系统。这种结构不仅可解决单 一滑模控制器控制位置和速度变量带来的系统限幅问题,而 且进一步增强了系统抗干扰能力,有效消除了强干扰力矩带 来的高幅抖振,具有良好的控制性能。

# 1 永磁同步电动机位置伺服系统组成

本文将永磁同步伺服电动机 (PMSM) 应用于多管火箭 炮位置伺服系统,构成多管火箭炮数字交流伺服系统,即以 交流永磁同步伺服电动机为执行元件,系统速度环和位置环 控制采用数字控制,其电气结构原理如图 1 所示。



图 1 火箭炮交流位置伺服系统结构原理图

• 2779 •

# 2 基于磁场定向控制的永磁同步电动机线 性化解耦数学模型

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,必须实现交直轴电流的解耦控制,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  $I_d \equiv 0$ ,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。

$$u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_r \Psi_f \tag{1}$$

$$u_d = -\omega_r L i_a \tag{2}$$

$$T_{em} = 1.5 p_n \Psi_f i_q = K_i i_q \tag{3}$$

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

式中,  $u_d$ ,  $u_q$ 为 dq 坐标系上的电枢电压分量;  $i_a$ ,  $i_q$ 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 ( $L=L_a=L_q$ ); R,  $\omega_r$ 为电枢绕组电阻和 dq 坐标系的电角速 度;  $\Psi_{c,D_a}$ 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<sup>[6]</sup>。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 $i_q, \omega_r$ 为状态变量,采用 $i_d \equiv 0$ 矢量控制方式可得速度闭环系统的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{q} \\ \dot{\omega}_{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -\psi_{f}/L \\ K_{t}p_{n}/J & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{q} \\ \omega_{t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{q}/L \\ -p_{n}T_{L}/J \end{bmatrix}$$
(5)

令状态量  $x_1 = \omega_{rer} - \omega_r$ ,  $x_2 = \dot{x}_1$ ,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:

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

不失一般性,取速度环滑模线性切换函数为[8]:

$$s_{\nu} = c_{\nu} x_1 + x_2 \tag{7}$$

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:

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

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

由滑模变结构控制到达条件 *s*<sub>v</sub>*s*<sub>v</sub><0,代入式(6)-(9)可以 得到速度环滑模变结构控制器参数为:

$$\alpha_{1\nu} > 0, \quad \beta_{1\nu} < 0, \quad \alpha_{2\nu} > \frac{c_{\nu}J - B}{K_{\nu}p_{n}}, \quad \beta_{2\nu} < \frac{c_{\nu}J - B}{K_{\nu}p_{n}} \quad (10)$$

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<sup>[7]</sup>。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, 同时又必须有效消弱滑模控制的抖振,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。

• 2780 •

#### 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,具体设计时可以将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<sup>[8]</sup>。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  $x_{1p} = \theta_{ref} - \theta_r (\theta_{ref} 为位置给定, \theta_r 为位置反馈),$  $e_2 = \dot{e}_1, 考虑位置给定为阶跃信号情况下可得状态方程:$ 

$$\begin{cases} \dot{e}_{1} = -\frac{1}{T}e_{2} - \frac{K}{T}u + \frac{1}{T}\dot{\theta}_{ref} \end{cases}$$
(11)

不失一般性,取位置环滑模线性切换函数为:  $s_p = c_p e_1 + e_2$ 

式中, c, 为常数, 且c,>0。

令位置环滑模变结构控制器输出为:

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

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

由滑模变结构控制到达条件 *s<sub>p</sub>s<sub>p</sub>*<0,代入式(11)-(14) 可以得到位置环滑模变结构控制器参数为:

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

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

(12)

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 $J = 8.627 \times 10^{-3}$ kg.m<sup>2</sup>;系统不平衡力矩和摩擦力矩经折算后为4.86N.m;系统外部燃气流冲击干扰力矩及未建模动态折算后为10N.m;电磁转矩系数 $K_t = 1.11$  N.m/A;阻尼系数 $B = 1.43 \times 10^{-4}$  N.m.s;定子电阻 $R_a = 2.6 \Omega$ ;绕组电感 $L_d = L_q = 50 \times 10^{-3}$  H;额定电流 $I_e = 6.4$  A;容许最大电流 $I_{max} = 12.8$  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 10N.m 的干扰力矩,图 8 和图 10 为



• 2781 •



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

\_\_\_\_

──★────★─
(上接第 2778 页)

- [5] J Henk, M Heijmans, John Goutsias. Nolinear Multiresolution Signal. Decomposition Schemes [J]. IEEE Transactions on Image Proocessing (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-prog ram. pdf, 2004-03-10.
- [8] HONG Lang. Multi resolution distributed filtering [J]. IEEE Transact ion 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):

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.

# 

- [10] Julier S J, Uhlman J K, Durran-Whyten H F. A new approach for filtering nonlinear system[C]//Proc of the American Control ConfWashington: 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.