基于动态滑模控制的永磁同步电机位置速度一 体化设计

许叙遥 ,林辉

西北工业大学自动化学院 西安 710072

摘要 为解决永磁同步电机伺服系统中传统位置滑模变结构控制中的速度控制问题,提出了 基于动态滑模控制的位置速度一体控制方法。分析了现有四段式位置滑模变结构伺服控制方法以 及存在的问题,设计了动态滑模控制律,通过简单切换就能实现精确位置定位和速度控制,最后 给出了参数调整策略。该方法具有结构简单、原理清晰且滑模抖振小等特点,有利于数字控制实 现。仿真和实验结果表明基于动态滑模的位置速度一体化控制方法可行和有效。

关键词:永磁同步电机 动态滑模控制 位置伺服系统

中图分类号: TM301.2

Integrated Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Servo Systems based on Dynamic Sliding Mode Control

Xu Xuyao ,Lin Hui

Northwestern Polytechnical University Xian 710072 China

Abstract To solve the speed control problem associated with conventional position sliding mode control of permanent magnet synchronous motor(PMSM) servo systems, a new integrated control method for position and speed based on dynamic sliding mode control is proposed. The approach and problems of conventional four-stage position sliding mode control are introduced. A dynamic sliding mode control law is developed. Location tracking and speed control are realized by simple switch- control. At last the parameter adjustment strategy is given. The method has the advantages of compact structure, clear control principle and less chattering, which is favorable to achieve digital control. The results of simulation and experiment show that the integrated control method for position and speed based on - dynamic sliding mode control is feasible and effective.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor(PMSM), dynamic sliding mode control, position servo system

1 引言

由于 PID 控制器结构简单、容易数字实现等优 点,目前工程上交流伺服系统的控制多采用三环 PID 控制。但 PID 控制的系统鲁棒性差,其伺服系 统性能极易受参数变化及外部扰动的影响,因此提 出许多 PID 改进方法,取得了一定控制效果 ^[1-4]。 近年来,诸如神经网络控制、滑模变结构控制以及 模糊控制等先进控制方法被不断引入到交流伺服控 制系统中^[5-12],其中具有参数变化及扰动不敏感、 响应快和容易物理实现等优点的滑模变结构控制方 法引起越来越多研究人员的注意,主要集中于滑模 面和控制率改进优化、抖振抑制以及离散滑模控制 等方面^[13-15]。

在传统位置伺服滑模控制中,存在速度不可控 问题,而过大的转速会产生过大的电枢电流,这对 电机安全产生很大危害。针对这一问题,国内外研 究人员也陆续提出了一些解决方案,取得了一定控 制效果[16-19]。文献[16,17]对交流电机位置滑模控 制器提出一种速度控制方案,将位置逼近过程中细 分为加速、恒速、减速以及位置逼近四个阶段并设 计相应的速度和位置滑模控制器,这一方案解决了 位置滑模控制器中速度控制问题同时能够保证精确

作者简介:许叙遥 男,1978年生,博士,研究方向伺服系统及其控制。 林 辉 男,1957年生,教授,博士生导师,研究方向为电机系统及其控制。

定位及速度跟踪,但存在滑模面多、需要采集加速 度信号以及抖振等问题。文献 [18]将文献[16,17]提 出的四段式位置滑模控制思想成功地运用到永磁同 步电机位置伺服系统中,在上升和下降阶段实行最 大电流控制,而仅在恒速阶段和位置接近段,采用 滑模变结构控制。这减少滑模面个数,也无需采集 加速度信号。但该方案在小位置控制时速度未达到 最大速度,电机将从最大加速阶段直接进入最大减 速阶段,导致电机冲击电流过大;同时过多控制切 换也易使系统产生振荡。文献 [19]在文献[16-18]基 础上,将位置逼近过程只划分为速度和位置两段, 速度段采用全局滑模变结构控制,位置阶段采用传 统位置滑模控制,从而实现位置跟踪和速度控制, 但依然存在小角度时电流冲击以及恒速阶段抖振严 重等问题。

本文在文献[16-19]的基础上,提出了一种基于 动态滑模的位置速度一体化滑模控制方法,进行了 有关稳定性理论分析以及参数整定分析,最后进行 了仿真和实验研究。

2 PMSM 数学模型

假设空间磁场呈正弦分布,磁路不饱和且不计 磁滞和涡流损耗影响,伺服系统采用 *i*_d=0 的磁场 定向矢量控制,转矩的大小仅当定子电流幅值成正 比,实现了 PMSM 完全解耦控制,因此永磁同步电 机控制模型有

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{q}^{\mathbf{a}} = -\frac{R}{L}i_{q} - \frac{P_{n}\psi_{f}}{L}\omega + \frac{u_{q}}{L} \\ \mathbf{a}_{e}^{\mathbf{a}} = \frac{3p_{n}\psi_{f}}{2J}i_{q} - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_{L}}{J} \end{cases}$$
(1)

PMSM 的电磁转矩方程为

$$T_{\rm e} = \frac{3}{2} p_{\rm n} \psi_{\rm f} i_{\rm q} \tag{2}$$

运动方程为

$$T_{\rm e} - T_{\rm L} = \frac{J}{p_{\rm n}} \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中
$$i_q$$
 — q 轴电流;
 R — 定子相电阻;
 L — d、q 轴等效电感;
 p_n — 极对数;

- ψ_f——转子永磁体产生的磁链;
- ω——机械角速度;
- *u*_q——q 轴电压;
- J——折算到电机轴上的总转动惯量;
- B---粘滞摩擦;
- T_L——折算到电机轴上的总负载转矩。

3 位置速度一体化动态滑模控制

3.1 位置速度一体化滑模控制器简介

位置速度一体化滑模控制设计最先由国外学者 提出^[16,17],其控制原理框图与传统位置滑模控制相 同,如图 1 所示。电流内环采用 *i*d=0 矢量解耦 PID 控制,外环为位置速度一体化滑模变结构调节 器,采用先速度控制后位置控制思想,将位置响应 过程分为四阶段:加速段、恒速段、减速段及位置 接近段,如图 2 所示。针对上述四段式位置滑模, 文献[17]设计了相应四个阶段的滑模控制器,保证 系统按照预设加速度、减速度和匀速曲线快速到达 给定位置;文献[18]在减速和加速阶段采用电机限 定的最大速度运行,而仅在恒速阶段和位置接近段, 采









上述控制方法均存在一定的缺陷,且至少要在两段 以上滑模控制律之间做切换控制,控制结构复杂。

本文在上述基础上利用动态滑模技术将速度控 制和位置控制统一成一个控制律,简单切换就能实 现位置定位和速度控制,控制简单且滑模抖振小。

3.2 基于动态滑模位置速度一体控制设计

基于动态滑模控制的位置速度一体控制原理框 图如图 1 所示。其角度收敛过程的速度曲线如图 3 所示,加、减速和位置逼近三个阶段采用位置动 态滑模控制,使得位置能够收敛。而在恒速阶段采 用恒速动态滑模控制,使得电机的速度不超过限速。 在小角度电机速度没有超过限制速度时,采用位置 动态滑模控制,因此彻底解决了文献 [18,19]小角度 时由于滑模面的切换带来的切换电流以及抖振问题。



Fig.3 Servo system speed profile

根据图 1,设位置状态变量为

$$\begin{cases} e = \theta^* - \theta \\ e_1 = \theta^* - \omega \end{cases}$$
(4)

式中 *θ**——位置给定值,通常为固定值,因此其 各阶导数均为零;

 θ ——位置反馈值;

ω——电机转速。

本文提出的恒速和位置动态滑模面为

-限速值;

$$x_1 = K + e_1 \tag{5}$$

$$S = x_2 + cx_1 \tag{6}$$

式中 x₂ = **炎**

 $\omega_{\rm max}$

其中

$$K = \begin{cases} K_{\rm p}e & |\omega| < \omega_{\rm max} \mathbb{I} \quad e < \Delta\theta \\ \omega_{\rm max} & |\omega| \ge \omega_{\rm max} \end{cases}$$
(7)

定理一对于状态(4)表示的系统,取滑模面式(5)和式(6),并设计如下控制律,则系统将收敛。

$$i_{\rm q} = i_{\rm qeq} + i_{\rm qn} \tag{8}$$

$$i_{\text{qeq}} = -\frac{1}{a}(b\omega + k^{\text{B}}) \tag{9}$$

$$i_{qn} = -\frac{1}{a} \int (cx_2 + kS + \varepsilon \operatorname{sgn}(S))$$
(10)

$$\vec{x} \oplus, \quad a = -\frac{1.5 p_{n} \varphi_{f}}{J}, \quad b = \frac{B}{J}, \quad d = \frac{T_{L}}{J}$$
$$\varepsilon \ge \left| a_{1}^{B}, k_{1} > 0 \right|$$

为设计参数。

证明:取李雅普诺夫(Lyapunov)稳定函数 $V = S^2/2$,对时间求导得

$$I^{\&} = S^{\&} = S(aI^{\&}_{q} + ba^{\&} + A^{\&} + a^{\&} + cx_{2})$$
$$= a^{\&} - kS^{2} - \varepsilon \operatorname{sgn} |S| \leq 0$$

则系统收敛,证毕。

为进一步削弱滑模抖振,将式(10)中的符号 函数作如下平滑处理

$$\operatorname{sgn}(S) = \frac{S}{S + \sigma} \tag{11}$$

式中, σ为一个数值较小的正常数。

结合式(4)~式(7)可得,动态滑模控制原 理框图如图 4 所示。





Fig.4 Block diagram of ddynamic sliding mode controller

由图 4 可知,动态滑模控制器由动态滑模 面 *S* 和滑模变量 *x*₁ 两部分构成。由式(7)可知,滑 模变量 x₁ 根据状态不同有两种取值: 当速度小于限 速

或者在恒速状态下角度逼近时,有 $x_1 = e_1 + K_p e$, 又

由图 4 可知,位置动态滑模可视为位置环为比例控制的速度滑模控制,定理一证明位置是收敛的;即 对应实现了图 3 的位置动态滑模功能;当速度达到

限速时,有 $x_1 = e_1 + \omega_{max}$,此时系统为一个恒速动态滑模控制,系统速度将不会超过限速值。即对应实现了图 3 的恒速动态滑模功能。

当位置较小时,速度达不到限速值,此时系统 运行在位置动态滑模控制中,不需要滑模面切换, 也就不存在切换电流冲击问题;当位置较大,速度 达到限速值,系统会经历二次切换,因此会存在切 换电流冲击问题。切换电流冲击主要是由于切换时 控制器输出变化大导致的。由式(7)和式(8)可 知,由于恒速动态滑模和位置动态滑模共用部分控 制律表达式,其切换控制时控制器输出变化量仅由 与参数 *K*_p成正比例部分表达式决定。因此,将参数 *K*_n取小值能够降低切换时电流冲击。

当控制进入位置动态滑模面时,有 S=0,结合 式(1)、式(4)和式(5),拉普拉斯变换得

$$\theta(s) = \frac{cK_{\rm p}}{s^2 + (c + K_{\rm p})s + cK_{\rm p}}\theta^*(s) \tag{12}$$

则位置动态滑模控制的角度收敛过程可用式 (12)表示二阶系统描述。由于 c>0, $K_p>0$, 根 据二阶系统控制特性 ^[20],式(12)有两个负实根: $s_1 = -c$, $s_2 = -K_p$,进一步说明了位置动态滑模控 制下位置收敛,其收敛速度由两负根与原点的距离 决定。而参数 c为速度滑模面参数,因此参数 c尽 量大,提高的收敛速度。

综上,控制参数 c 取较大值,而 K_p取值较小。 由于恒速和位置滑模控制器的共用部分表达式,两 种滑模控制状态转换仅需要简单切换就可以实现, 因此,该动态滑模控制方法非常利于数字控制器实 现。

4 实验与仿真

4.1 仿真

永磁同步电机参数为:额定电压 24V,额定电

流为 4.2A, 定子相绕组电阻为 0.153Ω; d、q 轴 相绕组 电感 0.094mH; 极对数为 7; 额定转速为 3 600r/min; 额定负载 0.22N·m。

在 Matlab/Simulink 软件环境下建立图 1 所示的控制模型进行仿真。图 5 为给定小位置时的位置响应、速度曲线以及滑模控制器输出曲线;图 6 为给定大位置时所对应位置跟踪和速度曲线以及控制输出曲线,取速度限幅值 1 000r/min。





图 5 和图 6 显示,电机给定角度无论大小,本 文提出的方法实现了位置收敛和速度控制。在大角 度 240°时,电机的转速在达到设定转速并稳定运 行。从控制量输出来看,大角度时两个速度滑模之 间的切换电流平滑,系统动态性能好。

4.2 实验

试验使用的伺服控制系统硬件结构如图 7 所示。 DSP 控制器采用 TI 公司的 TMS320F2812 芯片; 伺 服编码器的光电码盘每转输出 4 096 个脉冲; 系统 采用 *i*_d=0 矢量控制,电流环采样时间为 0.1ms,速 度环采样时间 为1ms,速度限幅 取400r/min,对本 文提出的方法进行实验验证。上位机将采样的数据 保存,再用 Matlab 画出实验曲线图。







图 8 为给定位置较小时(108°)系统的位置响 应和速度曲线,在本文提出的方法下,系统实现了 位置逼近,实验结果与仿真结果基本一致。





图 9 为给定位置较大时(252°)系统的位置响 应和速度曲线,本文所提出控制方法,保证了系统 在快速定位同时实现速度控制。系统速度限制为 400r/min。伺服系统的速度在经历加速、恒速、减 速及低速趋近四个阶段后,位置实现了精确定位, 整个启动过程中位置响应无超调,滑模振动较小。



5 结论

针对位置滑模伺服控制中速度不可控问题,本 文提出的基于动态滑模的位置速度一体控制的滑模 控制方法能够实现大小位置的精确定位和速度控制。 该方法具有结构简单、参数调整容易、切换电流冲 击小以及滑模抖振小等优点。在永磁同步电机上的 仿真和实验结果均表明该位置伺服控制方法的正确 和有效。

参考文献

[1] 王春民,孙淑琴,安海忠,等.基于 DSP 永磁同步 电动机矢量控制系统的设计 [J]. 吉林大学学报(信 息科学版), 2008, 26(4): 343-346.

Wang Chunmin, Sun Shuqin, An Haizhong, et al. Design of PMSM vector control system based on DSP[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2008, 26(4): 343-346.

[2] 夏长亮,王明超.基于 RBF 神经网络的开关磁阻电 机单神经元 PID 控制[J].中国电机工程学报,2005, 25(15):161-165.

Xia Changliang, Wang Mingchao. Single neuron PID control for switched reluctance motors bases on RBF neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 161-165.

- [3] 李兵强,林辉.新型永磁同步电机高精度调速系统
 [J].中国电机工程学报,2009,29(15):61-66.
 Li Bingqiang, Lin Hui. Novel high-precision speed regulation system for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15):61-66.
- [4] Zhu X M, Panda S K, Dash P K, et al. Experimental investigation of variable structural PID control for switched reluctance motordrives[C]. IEEE Proceeding of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1997, 1: 205-210.
- [5] Berger M. Self-tuning of a PI controller using fuzzy logic for a construction unit testing apparatus[J]. IFAC Journal of Control Engineering Practice, 1996, 4(6): 785-790.
- [6] 黄佳佳,周波,李丹,等. 滑模控制永磁同步电动机 位置伺服系统抖振 [J]. 电工技术学报,2009,24(11): 41-47.
 Huang Jiajia, Zhou Bo, Li Dan, et al. Sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 41-47.
- [7] 梁骄雁,胡育文,鲁文其.永磁交流伺服系统的抗 扰动自适应控制[J].电工技术学报,2011,26(10): 174-180.
 Liang Jiaoyan, Hu Yuwen, Lu Wenqi. Antidisturbance adaptive control of permanent magnet AC servo system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 174-180.
- [8] 汪海波,周波,方斯琛. 永磁同步单机调速系统的 滑模控制[J]. 电工技术学报,2009,24(9):71-76.
 Wang Haibo, Zhou Bo, Fang Sichen. A PMSM

sliding mode control system based on exponential reaching law[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 71-76.

- [9] Mainali K, Panda S K, Xu J X. Position tracking of linear piezoelectric motor using sliding mode control with closed-loop filtering[J]. Industrial Electronics Society, 2004, 3(2): 2406-2411.
- [10] 袁庆庆,符晓,伍小杰,等.一种新颖的电励磁同步 电动机解耦调节器 [J]. 电工技术学报,2011,26(1): 292-296.
 Yuan Qingqing, Fu Xiao, Wu Xiaojie, et al. A novel decoupling regulator for electrically excited synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 292-296.
 [111] 王耀南,张细政,杨民生,永磁同步电机的 T-S 模
- [11] 工雇用, 派知政, 彻民主. 水磁向少电机时 1-3 模型模糊变结构鲁棒控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 75-82.
 Wang Yaonan, Zhang Xizheng, Yang Minsheng.
 Robust fuzzy variable structure control of T-S model based for permanent magnet synchronous motor[J].
 Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 75-82.
- [12] Zadeh, Yazdian, Mohamadian. Robust position control in DC motor by fuzzy sliding mode control[J]. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006, 23(26): 1413-1418.
- [13] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端 滑模控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 697-700.
 Zheng Jianfei, Feng Yong, Lu Qiliang. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 697-700.
- [14] 张晓光,孙力,赵克.基于负载转矩滑模观测的永磁 同步电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3):111-116.
 Zhang Xiaoguang, Sun Li, Zhao Ke. Sliding mode control of PMSM based on a novel load torque sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 111-116.
- [15] 葛宝明,郑琼林,蒋静坪.基于离散时间趋近率控制与内模控制的永磁同步电动机传动系统(英文)[J]. 中国电机工程学报,2004,24(11):106-111.
 Ge Baoming, Zheng Qionglin, Jiang Jingping. PM synchronous motor drives based on discrete-time

reaching law and internal-model controls[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 106-111.

- [16] Chou W D, Lin F J, Shyu K K. Incremental motion control of an induction motor servo drive via a genetic-algorithm-based sliding mode controller[J]. Proceedings of Control Theory and Applications, 2003, 150(3): 209-220.
- [17] Lai C, Shyu K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(2): 499-507.
- [18] 方斯琛,周波.滑模控制的永磁同步电机伺服系统
 一体化设计[J].中国电机工程学报,2009,29(3): 96-101.

Fang Sichen, Zhou Bo. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 96-101.

- [19] 胡强晖,胡勤丰.全局滑模控制在永磁同步电机位置伺服中的应用[J]. 中共电机工程学报, 2011, 31(18):61-66.
 Hu Qianghui, Hu Qinfeng. Global sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18):61-66.
- [20] 陈祥光,黄聪明,何恩智.自动控制原理[M].北京 高等教育出版社,2009.