

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0002.006

# 基于模糊滑模变结构的 PMSM 矢量控制的仿真研究

陈浩, 凌有铸\*, 陈孟元, 徐海东

(安徽工程大学 安徽省电气传动与控制重点实验室, 芜湖 241000)

**摘要:**为解决传统 PMSM 矢量控制系统稳定性不好,鲁棒性差以及容易受外界摄动和干扰等问题,提出一种基于模糊滑模变结构控制的 PMSM 矢量控制系统,以模糊滑模变结构控制方式来设计转速调节器,并在 Simulink 下进行仿真;仿真结果表明:基于模糊滑模变结构控制的 PMSM 矢量控制系统,在外界干扰下,具有良好的系统动态和稳态性能,鲁棒性更强。

**关键词:**模糊控制;滑模变结构;矢量控制;鲁棒性

**中图分类号:**TP23      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-058X(2015)02-0027-06

永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统大都采用 PID 控制作为其速度控制器,虽然其算法相对较为简单、易于实现、静态特性较好,但是在实际应用过程中,由于系统模型建立困难、系统参数随环境条件而变化、外界负载扰动的存在,导致系统的快速性、抗扰性以及参数改变的鲁棒性都不理想。根据被控对象的特征及 PID 控制策略的缺陷,提出了一种新型的模糊滑模变结构(FSCM)控制策略。变结构控制(SCM)是一种特殊的不连续的控制策略,此种控制策略控制算法简单,且对于外界摄动和干扰具有不变性,具有快速性好,超调量小,抗扰性强和鲁棒性高的特点<sup>[1]</sup>。SMC 控制的不连续性会造成系统抖振,使系统运行失真或不稳定,造成控制精度下降。现设计一种模糊滑模变结构控制的速度调节器,通过模糊规则改变系统相关参数,有效地抑制系统的抖振,并且保留并升了滑模变结构控制原有的优点。

## 1 PMSM 的数学模型

PMSM 和普通三相同步电动机的定子结构基本相似。在建模,设计及分析的过程中可以采用类似于普通三相电动机的假设:转子磁场以正弦波形式分布在气隙空间中,定子绕组里的感应电动势是正弦波,认为定子铁芯为线性磁路;忽略铁芯涡流和磁滞损耗;转子上无阻尼绕组。在经过 CLARK 和 PARK 变换后,得到  $d-q$  坐标系下 PMSM 数学模型,其电压方程为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} i_d' = \frac{1}{L}(-Ri_d + pwL_q i_q + u_d) \\ i_q' = \frac{1}{L}[-Ri_q - pw(L_d i_d + \psi_f) + u_q] \end{cases} \quad (1)$$

对表面示永磁同步电机有  $L_d = L_q = L$ ,其机械运动方程有

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - B\omega_r - T_L \quad (2)$$

收稿日期:2014-06-18;修回日期:2014-09-12.

作者简介:陈浩(1987-),男,安徽和县人,硕士研究生,从事运动控制系统的分析与设计.

\*通讯作者:凌有铸(1962-),男,安徽庐江人,教授,硕导,从事运动控制系统的分析与设计.

式(1)、(2)中  $L_q, L_d$  为交直流轴中的电感,  $R$  为定子绕组的相电阻的值,  $p$  为永磁电机的磁极对数,  $w$  为转子的角速度,  $u_d, u_q$  为定子  $d, q$  轴的电压,  $i_d, i_q$  为定子  $d, q$  轴的电流,  $\psi_f$  为 PMSM 的永磁体与定子的交链的磁链,  $J, B$  分别为永磁电机转动惯量和粘滞摩擦系数。

最大转矩/电流、最大输出功率以及  $i_d=0$  的均可作为 PMSM 的控制方式。使用  $i_d=0$  的控制方式, 经过整理得到永磁同步电机的解耦状态方程:

$$\begin{cases} i_q' = \frac{1}{L}(-Ri_q - pw\psi_f + u_q) \\ w' = \frac{1}{J}(\frac{3}{2}pi_q\psi_f - Bw - T_L) \end{cases} \quad (3)$$

## 2 基于模糊滑模变结构的 PMSM 矢量控制

### 2.1 矢量控制

矢量控制系统如图 1 所示<sup>[3]</sup>, 通过电流传感器检测出  $i_a, i_b$  和  $i_c$ , 通过 CLACK 和 PARK 变换得到  $q$  轴和  $d$  轴上的等效电流  $i_d$  和  $i_q$ , 作为内环的反馈, 外环通过传感器检测的转子实际转速值, 负反馈环节将转速的给定值和反馈的转速的差值送入 ASR, 控制输出转矩大小的电流  $i_q^*$ , 再将  $i_q^*$  和给定  $i_d^*$  和内环反馈的差值作用于  $q$  轴和  $d$  轴电流 PI 控制器中输出  $u_q$  和  $u_d$ , 最后通过逆变换得到静止坐标系下的系统的输出  $u_\alpha$  和  $u_\beta$ , 结合磁链跟踪控制模块计算选择得出相应的开关电压矢量, 进而控制 PMSM 的转速。

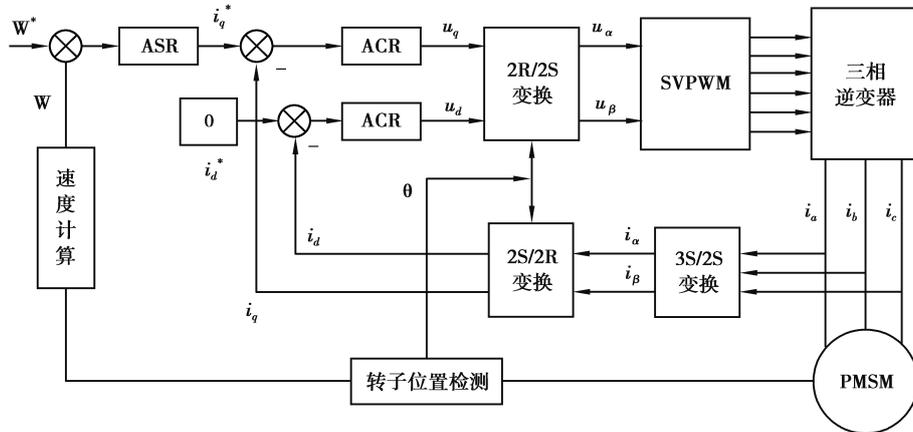


图 1 矢量控制系统结构

### 2.2 模糊滑模变结构控制的设计

变结构控制是一种切换反馈控制, 滑模变结构控制是变结构系统的一种控制策略, 控制与传统的控制策略的区别在于其控制的不连续性, 即系统随时间变化的开关特性。该控制可以是系统在满足一定条件下, 沿规定的状态做上下运动, 即所谓的滑动模态<sup>[4]</sup>。该滑动状态可以自行设计, 且与系统的参数摄动与扰动关系不大, 使得滑动变结构控制具有较好的鲁棒性。

#### 2.2.1 滑模变结构控制转速调节器的设计

令状态变量  $e_1 = w^* - w$ , 表示速度的误差值,  $e_1' = e_2$  作为速度调节器的输入, 交轴电流  $i_q^* = u$  作为输出, 依据  $i_d^* = 0$  控制条件下的 PMSM 的解耦方程式(2), 可得相空间上的数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} e_2 = e_1' \\ e_1 = w^* - w \end{cases} \quad (4)$$

将是式(2)代入式(4)可以得到式(5):

$$\begin{cases} e''_1 = -w' = e_2 = \frac{1}{L}(1.5p\Psi_f i_q - B_w - T_L) \\ e''_2 = -w'' = -\frac{1}{J}(-B_w' + 1.5p\Psi_f i_q) \end{cases} \quad (5)$$

令  $u=i_q^*$ , 的 PMSM 的状态空间表达式如式(6)所示:

$$\begin{pmatrix} e_1' \\ e_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{F}{J} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{3p\varphi_f}{2J} \end{pmatrix} u \quad (6)$$

切换函数  $s$  选取有线性函数和二次型函数两种形式,由于选择线性切换函数  $s=cx_1+x_2$ ,通过极点配置的方法容易确定  $c$  值,所以选择线性切换函数,函数如式(7):

$$s = ce_1 + e_2 \quad (7)$$

$$s' = ce_1' + e_2' = (c - \frac{B}{J})x_2 - \frac{3p\psi_f}{2J}u \quad (8)$$

由于滑模变结构存在的条件  $\lim_{s \rightarrow 0} s' < 0$  仅能保证系统在任何一个出发位置都能到达滑模面,但不能反映如何到达。通过指数趋近率的方法能够明确的解决系统如何到达滑模面的问题,滑模变结构指数趋近率如式(9)<sup>[5]</sup>:

$$s' = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks \quad (9)$$

式(9)中参数  $k$  是系统到达滑模面时间,  $\varepsilon$  决定了系统的抖动程度。结合式(8)和式(9),经过积分得到系统所需控制率:

$$i_q^* = \int u dt = \int i_q^{*'} dt = \frac{2J}{3p\psi_f} \int [(c - \frac{B}{J})x_2 + \varepsilon(s) + ks] dt \quad (10)$$

### 2.2.2 模糊滑模变结构转速调节器的设计

通常的所得到的式(10)控制率中的参数为固定值,会使得系统的动态性能较差,并且抖阵较大,对系统中的控制率通过模糊规则使式(10)中的参数  $k$  和  $\varepsilon$  随系统位置变化而变化,可以进一步提高系统的动态性能并能减弱系统的抖振<sup>[6]</sup>。

模糊控制器一般由模糊化,知识库,模糊推理和去模糊化这 4 部分组成。模糊化过程需要对参考的输入量,进行预先处理,即对式(7)、(8)中的  $s$  和  $s'$  进行预处理,将预处理后的值变换到论域范围  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$  上,并得到相应的模糊集合。取  $s, s', \varepsilon$  和  $k$  的模糊集合均为  $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。输入和数出的隶属度函数如图 2 所示。

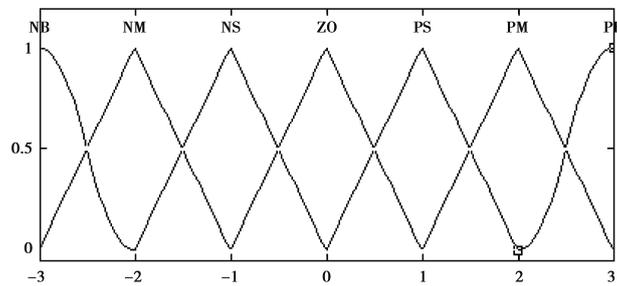


图 2 隶属度函数

知识库的基本形式为

$$R: \text{if } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^l \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n^l \text{ then } y \text{ is } B^l$$

由于  $k$  值得变化主要是由  $s$  引起,而  $\varepsilon$  的变化是由  $s$  和  $s'$  共同引起,结合控制规则的基本形式可得参数  $k$  和  $\varepsilon$  的模糊控制表(表 1、2):

表 1  $k$  的模糊控制

$s$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$k$	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB

表 2  $\varepsilon$  的模糊控制表

$\varepsilon$	S							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB							
NM	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB	
NS	PB	PM	PS	PS	PS	NM	NB	
ZO	PB	PM	PS	PS	PS	NM	NB	
PS	PS	PM	NS	NS	NS	NM	NB	
PM	NB	NB	NM	NM	NM	NB	NB	
PB	NB							

模糊推理是模糊控制的核心部分,这部分是知识库和模糊集合产生模糊集合的推理过程。模糊推理采用 mamdani 法。通过上述方式,构建的 FSMC 框图如图 3 所示。把图 1 的速度控制器设计为图 3 所示的模糊滑模变结构,构成模糊滑模变结构得到矢量控制系统。基于模糊滑模变结构的 PMSM 矢量控制系统仿真如图 4 所示。

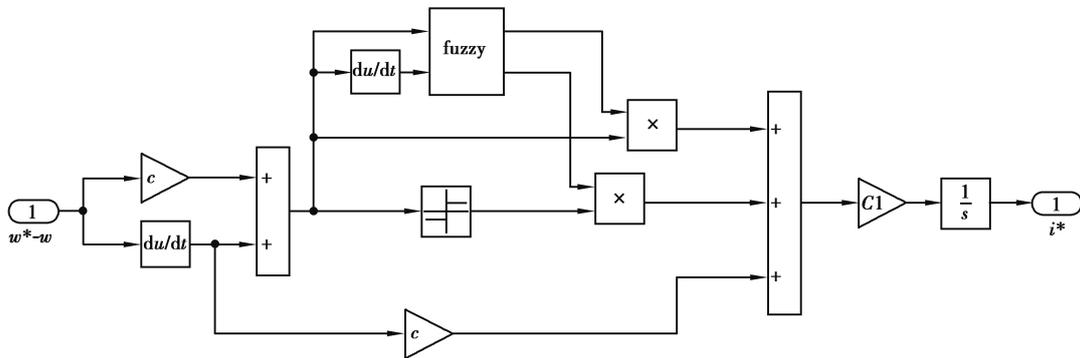


图 3 模糊滑模变结构控制系统结构图

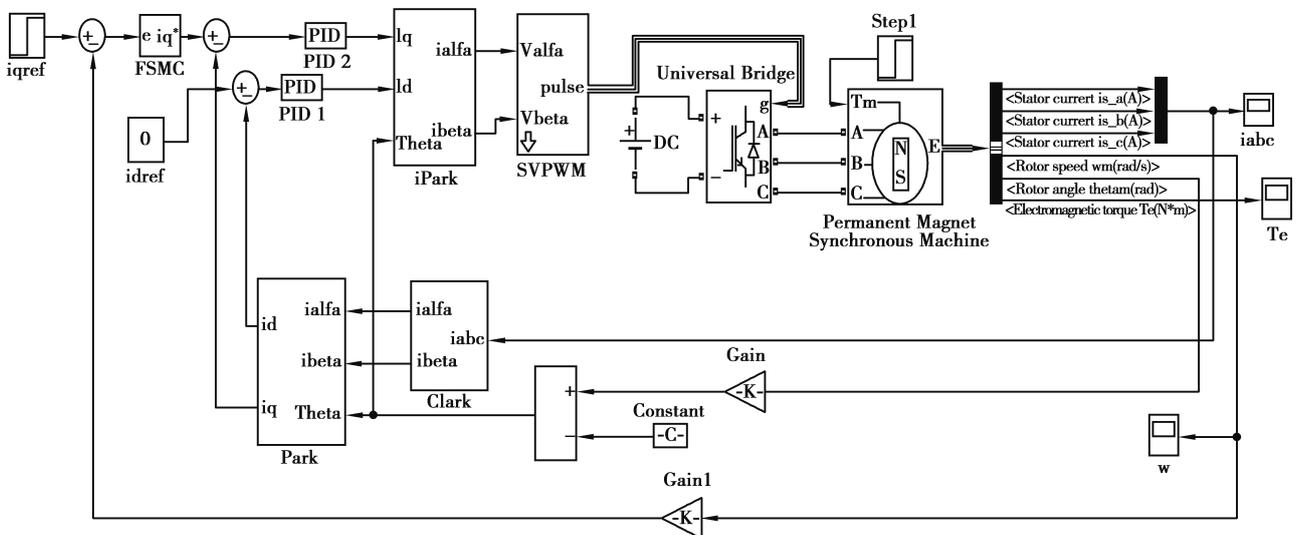


图 4 基于模糊滑模变结构的 PMSM 矢量控制的仿真模型

图 4 所示仿真模型包括几个部分:常值给定模块,用以提供给定速度和  $i_d^* = 0$  的初始值;转速调节器模块,通过模糊滑模变结构控制把给定转速与实际转子速度的差值变换为  $i_q^*$  的值;电流调节器模块,把交直轴的电

流转变为交直轴的电压;PARK 反变换模块,把交直轴电压转变为  $u_\alpha, u_\beta$ ;SVPWM 模块用以产生 PWM 波形;CLARK 模块和 PARK 模块,把检测到三相电流转变为交直轴电流;除此之外还包括测速模块和 PMSM 等。

### 3 仿真结果分析

采用经典的 Simulink 对基于模糊滑模变结构的 PMSM 矢量控制的仿真研究。仿真所选用的 PMSM 参数如下所示:极对数  $p=2$ ,  $d, q$  轴电  $L_d=L_q=0.0085$  H,电阻  $R=2.875 \Omega$ ,永磁磁通  $\psi_f=0.175$  Wb,永磁电机转动惯量  $J=0.0008$  kg.m<sup>2</sup>。

仿真时在 0.1 s 突加一个  $T_m=8$  N.m 的负载,通过模糊滑模变控制和 PI 控制以及滑模变结构控制分别得到仿真结果,如图 5-图 7 所示。结合图 5-图 7 可得以下结果(表 3):

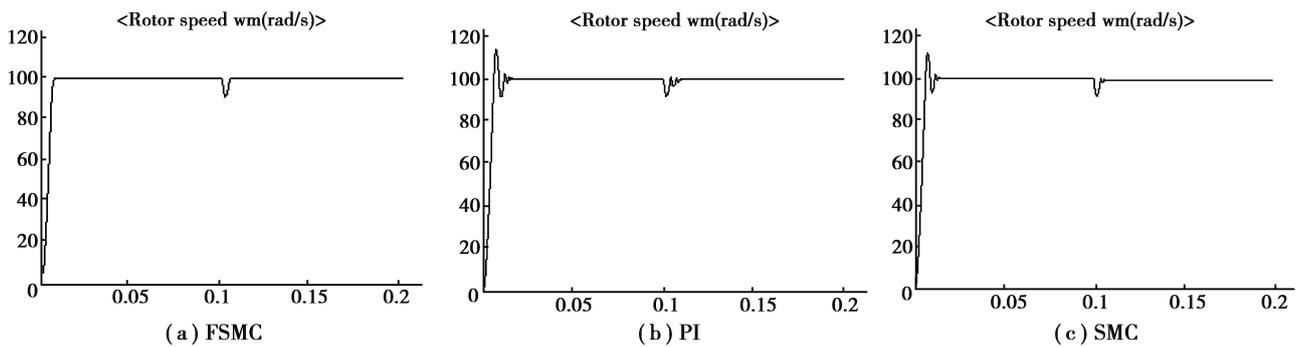


图 5 矢量控制转速

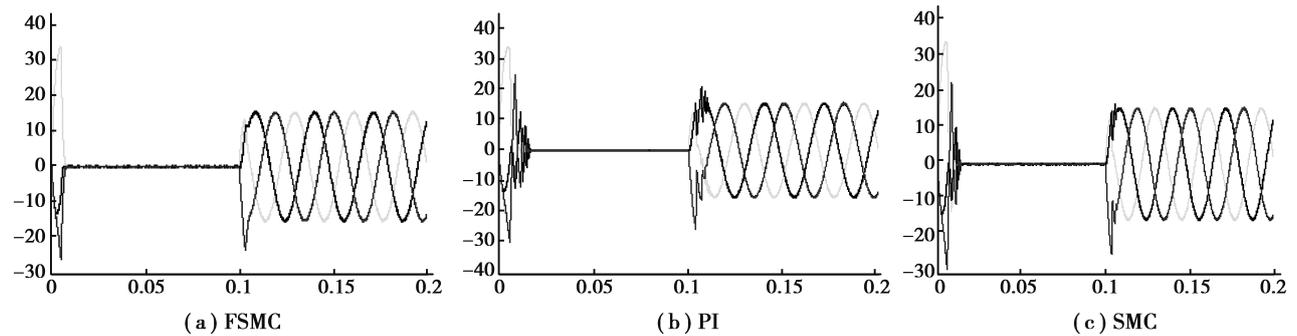


图 6 矢量控制三相电流

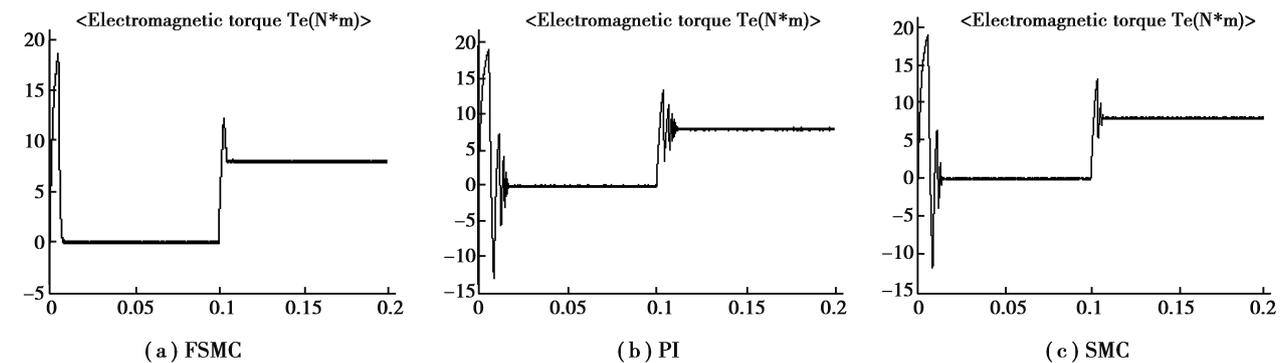


图 7 矢量控制转矩

表 3 3 种控制方式下的结果

速度控制器种类	上升时间/s	超调量%	扰动后回到平衡状态时间/s
PI 控制	0.017	14	0.011
SMC 控制	0.014	13	0.008
FSMC 控制	0.013	0	0.006

由实验仿真所得的结果,可以看出,采用模糊滑模变结构的永磁同步电机矢量控制比采用传统 PI 控制和滑模变结构控制的永磁同步电机矢量控制响应时间更快、无超调,对外加扰动具有更好的鲁棒性。同时由于通过模糊规则使用到控制量中,大大减弱系统中存在的抖动问题。

#### 4 结束语

针对永磁同步电机矢量控制,设计一种基于模糊滑模变结构控制器(FSMC),并进行了仿真实验研究。仿真结果表明通过 FSMC 控制,系统的上升时间从 0.017 s 降低为 0.013 s,超调量从原有的 14%降为 0,在突加负载以后回到平衡状态时间下降了 0.005 s。由此表明 FSMC 控制在外界扰动下和参数摄动具有较好的稳定性,提高了系统的动态和稳态性能,使系统的鲁棒性更强。

#### 参考文献:

- [1] 胡耀华,刘闯,宁银行.永磁同步电机改进型指数趋近率滑模控制[J].微电机,2012,45(8):54-57
- [2] 张成,王富东,李胜宁,等.基于 MATLAB/Simulink 的永磁同步电机矢量控制[J].苏州大学学报:工科版,2011,31(3):63-67
- [3] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2009
- [4] LIU Y, ZHOU B, WANG H. A New Sliding Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Based on Reaching law Control[C].Industrial Electronics and Application 4th IEEE Conference on Digital Object Identifier,2009
- [5] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996
- [6] 解晶,张丽香,张晶.模糊指数趋近率参数的二级倒立摆控制[J].电力学报,2012,27(1):44-46

## Research on the Simulation of PMSM Vector Control Based on Fuzzy Sliding Mode Variable Structure

**CHEN Hao, LING You-zhu, CHEN Meng-yuan, XU Hai-dong**

(Key Laboratory of Electrical Transmission and Control of Anhui Province,  
Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** In order to overcome the shortcomings of traditional PMSM vector control system such as poor stability, poor robustness and easily external perturbation and disturbance and so on, this paper proposes a PMSM vector control system based on fuzzy sliding mode variable structure, designing the rotating speed regulator by fuzzy sliding mode variable structure control method and makes simulating under Simulink. Simulation results show that PMSM vector control system based on fuzzy sliding mode variable structure control has good systematic dynamic and stability and stronger robustness under external perturbation.

**Key words:** fuzzy control; sliding mode variable structure; vector control; robustness