

文章编号: 1671- 251X( 2010) 07- 0045- 05

# 基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统

刘兴艳, 上官璇峰, 董洋洋, 张汉允

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 分析了无刷直流电动机的数学模型, 提出了一种新型的 P- 模糊自适应 PID 控制方法, 并在 Matlab/ Simulink 环境中建立了基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统仿真模型。在该调速系统中, 电流控制采用电流滞环, 转速控制采用 P 控制和模糊自适应 PID 控制相结合的方式, 实现了电流滞环和转速模糊控制的双闭环调速控制功能。仿真结果表明, 该系统与基于常规 PID 控制的调速系统相比, 系统响应时间缩短一半, 且超调减小, 具有较强的鲁棒性和自适应能力。

**关键词:** 无刷直流电动机; 调速; P 控制; 模糊自适应 PID 控制; 双闭环控制; 仿真

**中图分类号:** TD672

**文献标识码:** B

Speed regulation System of BLDC Motor Based on P-Fuzzy Self-adaptive PID Control

LIU Xingyan, SHANGGUAN Xuannfeng, DONG Yangyang, ZHANG Haixun

(School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University,

Jiaozuo 454003, China)

收稿日期: 2010- 03- 17

基金项目: 河南理工大学开放实验室基金项目(SKJA09040)

作者简介: 刘兴艳(1982- ), 女, 贵州贵阳人, 河南理工大学电气

工程与自动化学院在读硕士研究生, 主要研究方向为无刷直流电动机的控制。E-mail: luckyxing10@163.com

## 4 结语

根据以上理论分析和实验仿真可得出以下结论:

(1) 与傅里叶变换相比, 小波变换具有良好的时频局部化能力, 能够有效地分析非平稳信号, 因此, 非常适合输电线路故障暂态信号的检测。正是基于这样的考虑, 在用小波包分析时, 很好地获取到了故障瞬间的突变量发生的时刻和幅值, 为下一步配电网的故障定位研究提供了理论依据。

(2) 在故障瞬间的第一个周波内, 故障线路与健全线路的模电压、电流信息量有本质区别, 利用这一特点得到的零模功率可以和零模电压一起构成反时限保护元件, 可极大地提高配电网继电保护的可靠性。

## 参考文献:

[1] TIAN Shu, WANG Xiaowei, WANG Juanjuan,

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Research on Wavelet Neural Network for Fault Location in Power Distribution Network [C]// Proceeding of Chinese Intelligent Automation Conference, 2009, Nanjing: 21-28.

- [2] FAN Chunju, LI K K, CHAN W L, et al. Application of Wavelet Fuzzy Neural Network in Locating Single Line to Ground Fault (SLG) in Distribution Lines [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29(6): 497-503.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [4] SHU Hongchun, XIAO Bai. An Novel Fault Line Selection Algorithm of Single phase Ground Faults in Ungrounded Neutral System Using Wavelet Transform [C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology, 2002: 2532-2536.
- [5] 王艳松, 解飞. 配电网单相接地保护的研究[J]. 高压技术, 2008, 34(2): 303-307.

**Abstract:** The paper analyzed the mathematical model of BLDC motor, proposed a novel P-fuzzy self-adaptive PID control method and established a simulation model of speed regulation system of BLDC motor based on P-fuzzy self-adaptive PID control in Matlab/Simulink. In the system, a current hysteresis is applied in the current loop and a hybrid scheme of P and fuzzy self-adaptive PID control is applied in the speed loop, thus speed regulation control function of double close loops is realized. The simulation result showed that the speed regulation system of BLDC motor based on P-fuzzy self-adaptive PID control has half shortened response time, less overshoot, and stronger robustness and self-adapting ability compared with the speed regulation system based on normal PID control.

**Key words:** BLDC motor, speed regulation, P control, fuzzy self-adaptive PID control, double close loops control, simulation

## 0 引言

无刷直流电动机具备交流电动机结构简单、运行可靠、维护方便、寿命长等一系列优点,以及直流电动机良好的机械特性和调速性能,而且体积小、速度快、可靠性好,目前在高要求的电力驱动系统中得到了越来越广泛的应用。

传统的电动机调速系统采用常规 PID 控制。常规 PID 控制器算法简单、调节精度高、稳定性好、调整方便且可靠性高,但是实际上大多数工业过程存在不同程度的非线性、参数时变性和系统数学模型的不确定性, PID 控制参数整定非常困难,鲁棒性差,因而在实际生产现场条件下难以达到最优状态。模糊 PID 控制方式是一种比较好的控制方法,它能对复杂和模型不清楚的系统进行简单而有效的控制,发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小的特点,又具有 PID 控制器的动态跟踪品质和稳态精度。所以把这 2 种控制方法结合起来,就可以构成兼有二者优点的 P- 模糊自适应 PID 控制系统。本文利用 Matlab 中的 Fuzzy Toolbox 和 Simulink 对基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统进行建模仿真。仿真结果表明,该系统能够取得良好的控制效果。

## 1 无刷直流电动机的数学模型

无刷直流电动机由定子三相绕组、永磁转子、逆变器、转子磁极位置检测器等组成,其转子采用瓦形磁钢,对其进行特殊的磁路设计,可获得梯形波的气隙磁场;定子采用整距集中绕组,由逆变器供给方波电流。假定无刷直流电动机工作在两相导通星形三相六状态下,反电势是平顶宽度为 120° 电角度的梯形波。为了便于分析无刷直流电动机的数学模型

及电磁转矩等特性,假定:

- (1) 三相绕组完全对称,气隙磁场为方波,定子电流、转子磁场分布皆对称;
- (2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等的影响;
- (3) 电枢绕组在定子内表面均匀连续分布;
- (4) 磁路不饱和,不计涡流和磁滞损耗。

则根据无刷直流电动机的特性,可建立其电压、转矩方程。设  $u_a, u_b, u_c$  为定子相绕组电压,  $i_a, i_b, i_c$  为定子相绕组电流,  $e_a, e_b, e_c$  为定子相绕组电动势,  $r$  为定子相电阻,  $L$  为每相绕组的自感,  $M$  为每两相绕组间的互感,  $P$  为微分算子,  $P = d/dt$ 。则三相绕组的电压平衡方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

若三相绕组采用星形连接方式,且没有中线,则有

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

$$Mi_a + Mi_b = -Mi_c \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),经过简化,可得到电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \cdot P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

无刷直流电动机的电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子磁钢产生的磁场相互作用而产生的。因

此,电磁转矩方程式可表示为

$$T = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (5)$$

式中:  $T$  为电磁转矩;  $\omega$  为无刷直流电动机的角度速度, rad/s。

设  $T_L$  为负载转矩,  $J$  为电动机旋转系统的转动惯量,  $B$  为阻尼系数,  $\omega$  为转子机械角速度, 则无刷直流电动机电磁转矩  $T_e$  的运动方程式可表示为

$$T_e = T_L + B \omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

## 2 P-模糊自适应 PID 控制系统

要提高基本模糊控制系统的精度和跟踪性能, 就必须对语言变量取较多的语言值。但是分级越细, 规则数和系统的计算量也就越大, 导致调试困难或者不能满足实时控制的要求。要解决这个矛盾, 就要在论域内用不同的控制方式实行分段控制。P-模糊自适应 PID 控制系统分为 P 控制和模糊 PID 控制 2 个模态分段控制, 如图 1 所示。

P-模糊自适应 PID 控制系统首先选择阈值  $EP$ 。在系统运行过程中, 当偏差大于某一阈值时,

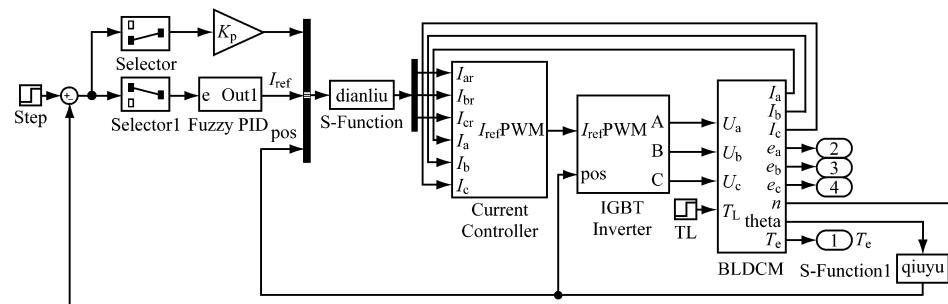


图 1 P-模糊自适应 PID 控制系统组成

根据模块化建模的思想, 将系统分为各个功能独立的子模块, 包括无刷直流电动机本体模块、速度 P-模糊自适应 PID 控制模块、电流滞环控制模块、三相电压逆变模块, 这些功能模块的有机结合, 组成了无刷直流电动机调速系统仿真模型。无刷直流电动机本体模块可以通过电压方程结合编写的 M 文件建立。

### 3.2 模糊自适应 PID 控制器设计

本文主要介绍模糊自适应 PID 控制器的实现过程。模糊自适应 PID 参数自整定的控制思想是先找出 PID 的 3 个参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  与偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  之间的模糊关系, 在控制器工作时通过不断检测  $e$  和  $ec$ , 再根据模糊控制原理在线调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ , 以满足不同  $e$  和  $ec$  对控制器参数的不同要求, 从而使被控对象有良好的动、静态性能。设计的模糊自适应 PID 控制器结构如图 3 所示。

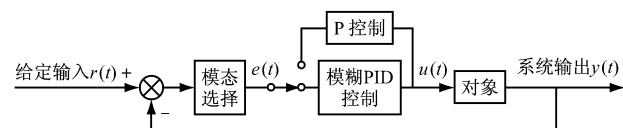


图 2 无刷直流电动机调速系统仿真模型

采用 P 控制方式, 以提高系统的响应速度, 加快响应过程; 当偏差小于某一阈值时, 切换到模糊 PID 控制方式, 以提高系统的阻尼性能, 减小响应过程中的超调。

## 3 无刷直流电动机 P- 模糊 PID 双闭环调速系统

### 3.1 无刷直流电动机调速系统结构

在 Matlab/Simulink 下, 利用仿真软件提供的丰富模块库, 在分析无刷直流电动机数学模型的基础上, 建立了基于 P- 模糊自适应 PID 控制的无刷直流电动机调速系统仿真模型, 如图 2 所示。该系统仿真模型采用双闭环控制方案: 转速环由 P 控制结合模糊自适应 PID 调节器控制, 电流环由电流滞环调节器控制, 根据系统的动态信息和模糊控制规则推理以获得合适的控制量。

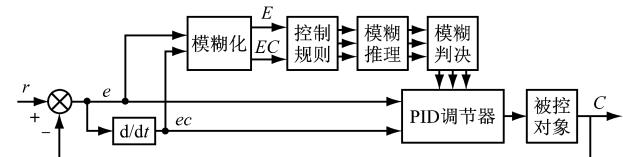


图 3 模糊自适应 PID 控制器结构

#### (1) 输入、输出变量的确定

将无刷直流电动机作为被控对象, 模糊自适应 PID 控制器输入变量为  $e$  和  $ec$ , 用模糊规则在线修改 PID 参数, 输出量为  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 。 $e$  和  $ec$  定义为

$$e(k) = n(k) - n(k-1) \quad (7)$$

$$ec(k) = [e(k) - e(k-1)]/T \quad (8)$$

式中:  $n(k)$  为  $k$  时刻的转子速度;  $T$  为采样时间。

输入变量要经过模糊化后才能作为模糊控制器的模糊量输入, 要把基本论域(测量值的实际变化范围)通过量化因子转换成模糊论域。量化因子的大

小对调速系统的动态性能影响很大,因此量化因子的选择要根据实际情况不断地调整。设  $E$  和  $EC$  分别为  $e$  和  $ec$  的语言变量,则有  $E = K_e \cdot e$ ,  $EC = K_{ec} \cdot ec$ ,  $K_e$  和  $K_{ec}$  分别为速度偏差和速度偏差变化的量化因子;模糊推理后的 3 个输出量  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  乘以各自对应的比例因子  $K_{pp}$ 、 $K_{ii}$  和  $K_{dd}$  就得到自适应模糊 PID 控制器的调整量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ :

$$\begin{cases} \Delta K_p = K_{pp} \cdot \Delta K'_p \\ \Delta K_i = K_{ii} \cdot \Delta K'_i \\ \Delta K_d = K_{dd} \cdot \Delta K'_d \end{cases} \quad (9)$$

### (2) 输入、输出变量的模糊语言描述和隶属度函数

模糊输入量  $E$  和  $EC$  和模糊输出量  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$  在模糊集上的论域都为  $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ , 考虑到精度要求, 其模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ , 子集中的元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

结合无刷直流电动机的调速特性, 各输入、输出变量的隶属度函数采用三角形隶属函数, 由此可得各模糊子集的隶属度函数, 如图 4 所示。

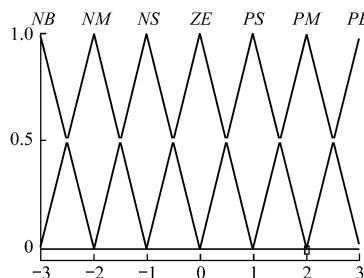


图 4 各模糊子集的隶属度函数

### (3) 模糊规则的确定

在无刷直流电动机调速系统中, 要求系统对各种扰动反应迅速, 对参数的调节也要尽可能快, 因此, 对实际操作经验进行总结, 得出模糊控制规则表, 如表 1 所示。本文只列出一个输出  $\Delta K'_p$  的控制规则表, 其余 2 个输出模糊控制规则表的制作方法与之相同。

表 1  $\Delta K'_p$  的模糊控制规则表

$e$	$ec$							
	PB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB	NB

根据表 1 可得出 49 条控制规则的模糊条件语句, 模糊条件语句的形式为

if  $ec$  is  $PB$  and  $e$  is  $NB$  then  $\Delta K'_p$  is  $PB$

本文模糊推理采用的是 Mamdani 推理算法, 解模糊采用的是重心法。解模糊就可以得到输出量  $\Delta K'_p$ 、 $\Delta K'_i$ 、 $\Delta K'_d$ 。在 Matlab 命令窗口中运行 Fuzzy 函数, 进入模糊逻辑编辑器, 根据以上分析得到的输入、输出的量化区间及隶属度函数, 利用模糊规则库和解模糊方法建立一个 FIS 系统文件, 在 Simulink 仿真时输入对应的文件名(本文为 lxy2)即可进行调用。将模糊控制器和 PID 控制器组合在一起构成的模糊自适应 PID 控制器如图 5 所示。

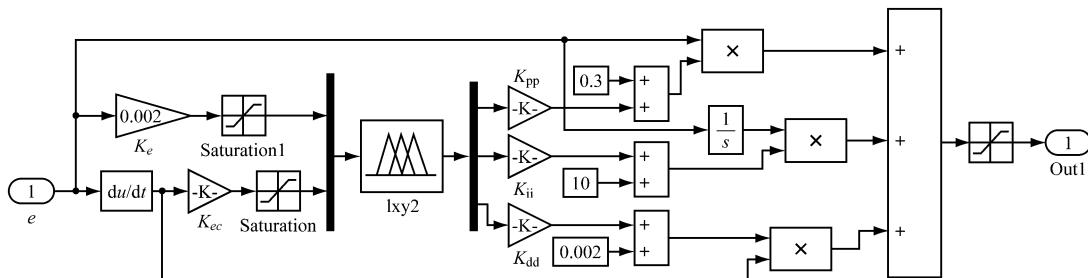


图 5 模糊自适应 PID 控制器结构

### 4 系统仿真及结果分析

仿真实验中直流无刷电动机参数设置: 极对数  $p = 1$ , 额定转速为  $1500 \text{ r/min}$ , 额定电压  $U = 300 \text{ V}$ , 定子相绕组  $r = 1 \Omega$ , 定子相绕组自感与互感之差  $L_M - M = 0.0267 \text{ H}$ , 阻尼系数  $B = 0$ , 反电动势系数

$$K = 0.418 \text{ V} \cdot \text{s/rad}, \text{ 转动惯量 } J = 0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

图 6、图 7 分别为无刷直流电动机在常规 PID 控制和 P- 模糊自适应 PID 控制下的转速曲线。从图 6、图 7 可看出, 常规 PID 控制下的无刷直流电动机转速虽精度高、振荡小, 但超调不理想, 为 12%; P- 模糊自适应 PID 控制下的无刷直流电动机转速

响应快、精度高,超调降到5%。

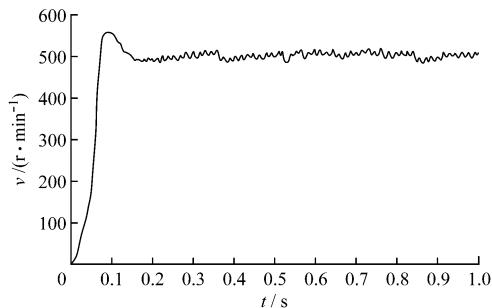


图6 常规PID控制下的无刷直流电动机转速曲线

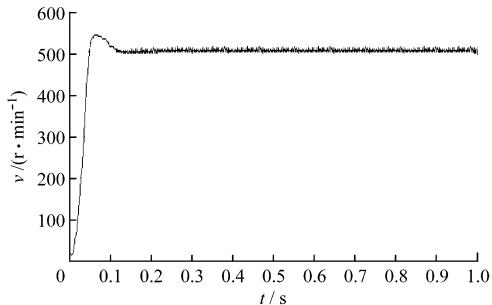


图7 P-模糊自适应PID控制下的无刷直流电动机转速曲线

图8、图9分别为在0.5 s突加负载时无刷直流电动机在常规PID控制和P-模糊自适应PID控制下的转速曲线。从图8、图9可看出,在常规PID控制下,无刷直流电动机在突加负载时转速曲线波动稍大,而在P-模糊自适应PID控制下无刷直流电动机的转速曲线波动很小,说明此时无刷直流电动机调速系统抑制扰动的能力较强,能够达到比较满意的控制效果。

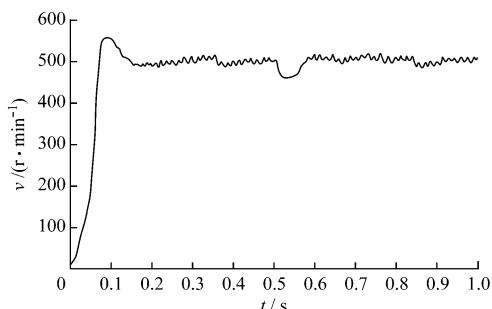


图8 常规PID控制下突加负载时的无刷直流电动机转速曲线

## 5 结语

以无刷直流电动机的数学模型为基础,提出一种基于P-模糊自适应PID控制的无刷直流电动机调速系统,在Matlab/Simulink环境下建立了电流滞环、转速P-模糊自适应PID控制的双闭环调速系统仿真模型。仿真结果和分析表明,该系统的

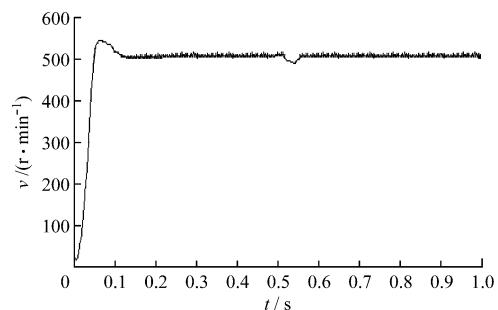


图9 P-模糊自适应PID控制下突加负载时的无刷直流电动机转速曲线

输出波形符合理论分析,系统响应时间快,调节精度高,抑制扰动的能力强,稳态性能好,几乎没有超调和振荡;系统在模糊自适应PID控制器的调节下具有很强的自适应能力和鲁棒性,这在实际的过程控制中有重大的意义。该系统仿真模型充分发挥了P控制和模糊自适应PID控制的优点,可以方便地进行功能模块的修改和替换,为今后研究分析该类电动机及其控制策略提供了新的方法。

## 参考文献:

- [1] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 郭庆鼎, 赵希梅. 直流无刷电动机原理与技术应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 基于Matlab无刷直流电机系统仿真实建模的新方法[J]. 系统仿真学报, 2003(12): 1745-1749, 1758.
- [4] 胡双, 马志云, 周理兵, 等. 永磁无刷直流电机系统建模研究[J]. 电工技术, 2003(8): 56-59.
- [5] 王君艳. 交流调速[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 史浩. 基于DSP的无刷直流电机的模糊控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] 杨杰, 潘再平. 基于模糊控制技术的无刷直流电机系统[J]. 电机与控制应用, 2008(3): 15-17, 44.
- [8] 赵亮, 刘星桥, 韩彬, 等. 基于DSP的无刷直流电机模糊控制系统的设计[J]. 电力电子技术, 2009(5): 40-41, 50.
- [9] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005(11): 129-133.
- [10] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 一种新型的无刷直流电机调速系统的模糊PI智能控制[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(3): 248-254.
- [11] 杨咏梅. 无刷直流电机的DSP调速控制的设计与模糊控制的仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [12] 蔡磊. 基于DSP的无位置传感器BLDCM模糊控制系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.