

# 无刷直流电机双闭环模糊自适应控制方法研究

李实求,郝帅,马旭,程咏梅

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**在分析无刷直流电机数学模型的基础上,提出了一种双闭环模糊自适应控制方法。该控制系统是以电流环作为内环,采用传统的 PI 控制;转速环作为外环,采用 PI 控制与模糊控制相结合的方法,即模糊自适应控制方法。以速度误差及速度误差变化率作为模糊控制器的输入,大偏差时采用模糊控制,以增强系统的响应速度和鲁棒性;小偏差时采用传统的 PI 控制,使系统稳态无误差。仿真实验结果表明,相比于传统的 PI 控制系统,模糊双闭环自适应控制系统具有良好的动、静态特性,以及较强的鲁棒性。

**关键词:**无刷直流电机;双闭环系统;模糊自适应控制

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

## Study of Double Closed Loops Fuzzy Adaptive Control Method of Brushless Direct Current Motor

LI Shi-qiu, HAO Shuai, MA Xu, CHENG Yong-mei

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the mathematical model of brushless direct current motor, double closed loops control method was proposed. Current loop is the inner loop of system and PI control is adopted. Speed loop is the outer loop and PI control combined with fuzzy control is adopted, that is fuzzy adaptive control. Take speed error and speed error derivative as the input of fuzzy controller. Fuzzy control strategy is adopted to enhance the system response speed and robustness when the speed error is big. PI strategy is adopted to make the system have no steady-state error when the speed error is small. Simulation and experimental results show that double closed loops fuzzy adaptive control system has good dynamic and static performance, and strong robustness compared with traditional PI control system.

**Key words:** brushless direct current motor(BLDCM); double closed loops system; fuzzy adaptive control

## 1 引言

无刷直流电机是随着电力电子技术、微电子技术、控制理论以及稀土永磁材料的发展而出现的一种新型电机。它不仅具有直流电机运行效率高、调速性能好以及控制方法简单的优点,还具有交流电机结构简单、运行可靠以及维护方便等特点。目前,它广泛应用于航空航天、工业机器人、医疗器械、仪器仪表及家用电器等领域<sup>[1-3]</sup>。

传统的 BLDCM 调速系统通常采用双闭环 PI 控制。虽然 PI 控制具有结构简单、稳定性好以及控制方法简单等优点,但是该方法也存在局

限性。可归纳为以下 2 点:一是 PI 控制是一种线性控制,对于非线性系统来说该方法的控制效果无法令人满意;二是 PI 控制抗干扰能力差,鲁棒性不强。在 BLDCM 调速系统,由于各种扰动的存在,电机参数和负载都可能随时发生变化,而且系统中存在着非线性环节,因此使用传统的 PI 控制无法得到很好的静、动态控制效果。

针对传统 BLDCM 所使用 PI 控制的问题,本文提出了模糊双闭环自适应控制方法。并利用 Matlab 仿真软件搭建了整个调速系统的仿真模型,仿真实验表明,本文提出的控制方法比传统的 PI 控制有着更强的鲁棒性,以及良好的动、静态特性。

**基金项目:**航空科学基金资助项目(20100853010)

**作者简介:**李实求(1963—),男,博士,Email:lishiqiu000@163.com

## 2 BLDCM 的数学模型及控制原理

### 2.1 数学模型

以两相导通星型三相绕组的 BLDCM 为例,定子三相绕组的电压方程可以表示为<sup>[4-5]</sup>

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

式中:  $u_a, u_b, u_c$  为定子相绕组电压;  $i_a, i_b, i_c$  为定子相绕组电流;  $e_a, e_b, e_c$  为定子相绕组反电动势;  $r$  为定子相绕组电阻;  $L$  为定子相绕组自感;  $M$  为定子相绕组间互感。

电磁转矩方程为

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (2)$$

转子运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - B\omega \quad (3)$$

式中:  $T_e$  为电磁转矩;  $T_l$  为负载转矩;  $\omega$  为电机机械角速度;  $B$  为阻尼系数;  $J$  为电机的转动惯量。

### 2.2 控制原理

BLDCM 采用双闭环系统,其内环采用电流环,外环为转速环,其整体结构框图如图 1 所示。

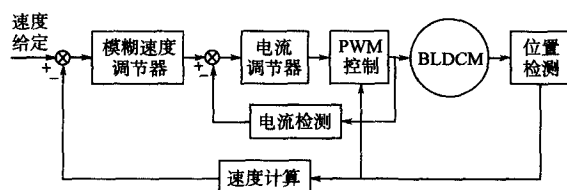


图 1 控制系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of the control system

图 1 中, BLDCM 主要由模糊速度调节器、电流调节器、PWM 驱动电路、BLDCM 以及位置检测装置等部分组成。

1) 速度环作为外环, 采用自适应模糊控制方法进行调节。当转速误差大于额定转速 1% 时, 采用模糊控制方式, 来提高系统的响应速度, 增强鲁棒性; 当转速误差小于额定转速 1% 时, 采用传统的 PI 控制, 使系统静态无静差, 从而实现速度环模糊自适应控制。

2) 电流环作为内环, 采用 PI 调节方式。当电流给定值发生变化时, PI 控制方式可以做出迅速

响应, 使输出电流跟踪给定电流的变化, 保证其电流的快速跟随性。

3) 驱动电路部分采用 PWM 调制方式, 通过给定电流值与检测电流值的偏差作为 PWM 的输入控制信号, 从而驱动电机。

## 3 BLDCM 模糊自适应控制系统设计

### 3.1 模糊变量

本模糊控制系统采用 2 个输入变量和 1 个输出控制量。2 个模糊输入变量分别为速度误差以及速度误差变化率, 用  $E$  和  $EC$  表示; 输出变量为电流环的参考电流值, 用  $U$  表示。它们都包含 7 个模糊子集, 相应的语言变量为: 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZE)、正小 (PS)、正中 (PM) 和正大 (PB), 设定论域为  $[-6 \ 6]$ 。隶属度函数分布如图 2 所示。

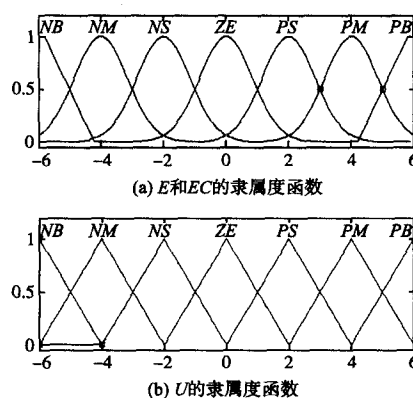


图 2 隶属度函数分布图

Fig. 2 Distribution of membership function

### 3.2 模糊控制规则

根据转速偏差及转速偏差变化率可得到输出参考电流值, 其模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 转矩模糊控制规则表

Tab. 1 Torque fuzzy control rule

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
NM	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PM	PM
ZE	NB	NM	NM	ZE	PM	PB	PB
PS	NB	NS	ZE	PM	PB	PB	PB
PM	NB	ZE	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB	PB	PB

模糊推理采用 Mamdani 的 max-min 算法, 此时控制器的输出为模糊量, 将其经过重心法解模糊, 即可得到精确的控制输出变量。

### 3.3 模糊自适应控制策略

为了使控制系统有较为精确的控制效果,采用了模糊自适应控制方式,即模糊控制与PI控制相结合的方式。当反馈转速与给定转速差小于额定转速1%时,选择PI控制方式,使得控制系统无静差;当转速差大于额定转速1%时,采用模糊控制方式,能够克服电机数学模型难以精确确定而导致控制参数不易确定的问题,增强系统的鲁棒性<sup>[6]</sup>。

## 4 仿真结果及分析

根据上述控制策略,在Matlab仿真环境下建立仿真模型。所选用的BLDCM相关参数为:额定转速1000 r/min,电压48 V,电机相电阻1.5  $\Omega$ ,相电感5.1 mH,转动惯量0.2  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,极对数为2。

开始时,给定电机转速为1000 r/min,电机运行0.5 s后,给定电机转速为800 r/min。仿真结果如图3和图4所示。

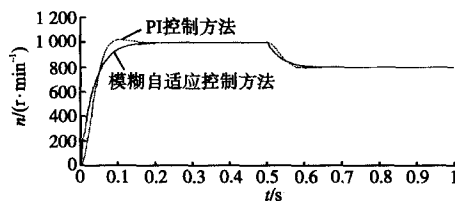


图3 速度响应曲线

Fig. 3 Velocity response curves

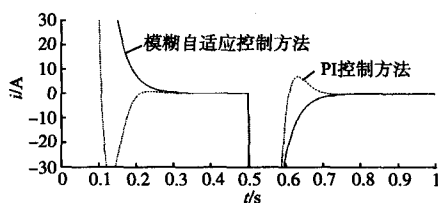


图4 电流响应曲线

Fig. 4 Current response curves

通过转速仿真结果可以看出,采用模糊自适应控制的系统速度曲线相比传统的PI控制方法基本

没有超调,而且具有较快的响应速度。当给定转速发生变化时,采用模糊自适应方法系统可以很快并且平稳地达到给定转速值,说明其具有很好的稳态和静态特性以及较强的鲁棒性;而使用PI控制的系统转速超调较大,且调节时间也较长。

## 5 结论

本文基于Matlab/Simulink搭建了转速环、电流环双闭环调速系统。由于直流无刷电机调速系统中存在的非线性环节,而且电机参数易受外界影响发生变化,所以采用模糊控制方法可以很好地解决这个问题,但是该控制策略存在有稳态误差这个缺点。因此,文中采用了模糊自适应控制方式,即大偏差时采用模糊控制,以克服系统参数难以精确确定的缺点;小偏差时采用PI控制,以消除模糊控制带来的静差。仿真结果表明,相比于传统的PI控制系统,模糊自适应控制系统具有良好的动态性能以及较强的鲁棒性,并且克服了模糊控制存在的静差,系统超调量小。

### 参考文献

- [1] 曹少泳. 无刷直流电机的双闭环调速系统的设计与仿真[J]. 防爆电机, 2008, 43(142): 22-26.
- [2] Liu Dan, Xia Changling, Zhang Maohua, et al. Control of Brushless DC Motor Using Fuzzy Set Based Immune Feedback PID Controller[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007: 1045-1049.
- [3] 晁盛远, 王凯, 刘富勇. 直流无刷电机系统的建模与仿真[J]. 计算机技术与自动化, 2008, 27(2): 39-43.
- [4] 张会林, 胡爱军, 李静, 等. 直流无刷电机的模糊PI速度控制[J]. 昆明理工大学学报, 2007, 32(2): 52-55.
- [5] 殷云华, 郑宾, 郑浩鑫. 一种基于Matlab的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 293-298.
- [6] 李实求, 郝帅, 马旭, 等. 异步电动机三闭环模糊PI矢量控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(5): 60-61.

收稿日期: 2011-07-22

修改稿日期: 2012-02-16

## 《电气传动》 欢迎订阅 投稿 刊登广告

全国各地邮局征订, 订阅代号 6-85, 全年定价: 72 元

地址: 天津市河东区津塘路 174 号(300180)

编辑部电话: 022-84376191 84376124 E-mail: mdc@tried.com.cn

广告部电话: 022-84376192 24955574 E-mail: ad@tried.com.cn

传真: 022-24955574