

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.012

# 无刷直流电机模糊PI控制算法研究

林聪, 于跃

(广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东湛江 524088)

**摘要:**针对传统PI算法难以消除直流无刷电机控制系统中存在的系统超调和短时震荡的问题,提出将模糊控制技术融入到PI控制器参数整定过程,设计模糊PI自适应控制器,并搭建电机模糊控制系统的仿真模型。仿真实验结果表明,基于模糊PI控制的电机控制系统相比传统PI控制系统达到给定转速所需时间更短,抗干扰性更强,ITAE(时间乘绝对误差积分准则)值更低,表明在负载突变时模糊PI控制器能更有效抑制电机转矩脉动和提高控制系统的稳定性。

**关键词:**无刷直流电机;模糊控制技术;PI控制器;时间乘绝对误差积分准则(ITAE)

中图分类号:TM33 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)03-0052-04

## Research on Fuzzy PI Control Algorithm for BLDCM

LIN Cong, YU Yue

(College of Electrical and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

**Abstract:** Aiming at the traditional PI algorithm difficult to eliminate BLDCM control system overshoot and oscillation, the fuzzy control technology was proposed to be integrated into the parameter tuning process of PI controller. The fuzzy PI controller was designed and simulation model of motor was structured based on fuzzy PI algorithm. The result shows that the motor control system based on fuzzy PI uses less time from initial state to theoretic speed, and the rotation speed can maintain constant under disturbance. The ITAE is fewer than the PI control system which shows that the fuzzy PI controller can effectively restrain the motor torque ripple and improve the stability of the control system under abrupt load variation.

**Keywords:** brushless direct current motor; fuzzy control technology; PI controller; ITAE (integrated time absolute error)

在无刷直流电机控制算法中,PI控制策略容易实现并且控制过程可靠性高,应用较为广泛<sup>[1]</sup>。PI控制器设计原理是根据被控对象和系统要求以及确定采样周期后,调整比例系数 $K_p$ 和积分系数 $K_i$ 的值以实现期望的控制效果,但 $K_p$ 和 $K_i$ 的值确定后固定不变,只有应用在具有精确线性数学模型的被控对象中才能取得较好的控制效果<sup>[2]</sup>。由于直流无刷电机控制系统内部存在的变量具有时变和非线性,并且各个变量之间互相耦合,难以建立精确的数学模型,在不同时刻PI控制器最佳的比例系数 $K_p$ 和积分系数 $K_i$ 往往会发生改变,故采用恒定值会导致系统的工作效果不好。通过研究发现PI控制器中比例、积分系数与输入控制器的误差 $e(t)$ 及误差变化率 $de(t)/dt$ 的关系是可以用

模糊语言来阐述。因此可将传统的增量式PI控制算法跟模糊控制算法相结合,形成一种能在线自整定、对环境自适应的模糊PI控制算法<sup>[3]</sup>。

## 1 无刷直流电机模糊控制系统设计

### 1.1 模糊PI控制器

为了实现直流无刷电机在较大速度范围内良好的调速特性和稳定性,将传统的PI控制器与模糊算法相结合,设计出模糊PI控制器。模糊PI控制器通过观察系统的运行状态来得到过程状态的实时信号,并自动调整模糊控制器中的各个变量以适应当前的系统状态,从而提高控制系统的鲁棒性和稳定性<sup>[4]</sup>。

在传统的转速-电流双闭环控制系统中,模糊控制器通常作用于转换环,其中实际转速与给定转速的误

收稿日期:2016-11-02;修回日期:2017-02-19

基金项目:国家自然科学基金项目(61563005);广东海洋大学"创新强校工程"项目(Q14580)。

第一作者简介:林聪(1988),男,广东湛江人,硕士,主要研究方向为智能控制与控制工程。E-mail:lincong07@163.com

差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为模糊控制器的输入量,经过模糊化、模糊推理、解模糊化后输出调整量  $\Delta K_p, \Delta K_i$ 。在 PI 控制器中先用凑试法得到比例和积分系数  $K_p', K_i'$  的初始值,然后经过  $\Delta K_p, \Delta K_i$  的实时在线修正后,最终确定模糊 PI 控制器中的  $K_p$  和  $K_i$ ,误差  $e$  经过模糊 PI 控制器调节后的输出量被送入下一个环节去控制被控对象<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。

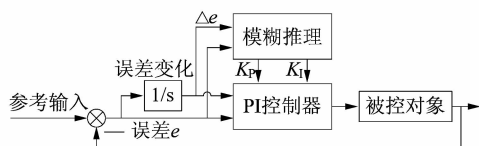


图 1 模糊 PI 控制器结构

Figure 1 Structure of fuzzy PI controller

### 1.2 隶属度函数的选取

一般采样得到的误差都是清晰量,涉及到模糊论域上的众多子集,因此需要计算该值隶属于各子集的隶属度然后对其进行模糊化。先求出分布于模糊论域上模糊子集的个数,让所有输入量的清晰值均可进行模糊化,再确定各个子集的隶属函数<sup>[6]</sup>。而在电机控制系统里,模糊子集数目选取 7 个,与之对应的模糊语言名称分别为:负大 (negative big, NB);负中 (negative medium, NM);负小 (negative small, NS);零 (Zero, ZE);正小 (positive small, PS);正中 (positive medium, PM);正大 (positive big, PB)。每个模糊子集对应一个隶属函数,根据模糊论语的离散性或连续性,隶属函数也可以取分离或连续函数的形式,没有统一的标准,主要取决于控制对象的不同情况和运算简便。通过在 MATLAB 上对电机控制系统模型的仿真分析,发现转速误差变化范围为  $[-6\ 000, 6\ 000]$   $r \cdot \min^{-1}$ ,误差变化率变化范围为  $[-1 \times 10^4; 1 \times 10^4]$ ,  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  变化范围分别为  $[-1, 1]$  和  $[-0.1, 0.1]$ ,并对每个参数分别选择了模糊语言名称及隶属函数。其中转速误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  选取相同的隶属函数,如图 2 所示;  $\Delta K_p, \Delta K_i$  选取相同的隶属函数,如图 3 所示<sup>[7-8]</sup>。

经过逻辑推理后输出的模糊集合需要对其进行解模糊化,即用模糊集合论域里某个具体值来表示。结合实际的情况,解模糊化方法采取重心法。

### 1.3 模糊控制规则

模糊控制规则可以用语言型、表格型和公式型模糊规则几种形式进行表述。文中采用语言型模糊规则,由模糊蕴含关系“if...then...”语句构成。条件语句的前半部分为输入和状态,后半部分为控制变量,反映

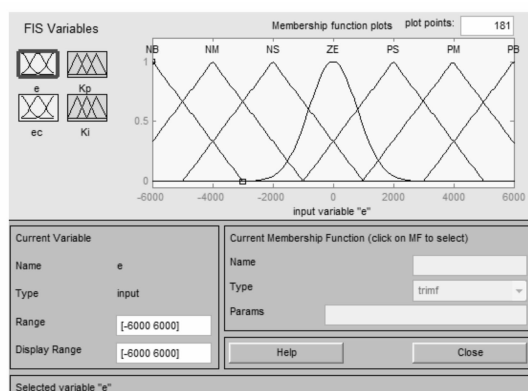


图 2 误差  $e$  的隶属函数

Figure 2 Membership function of error  $e$

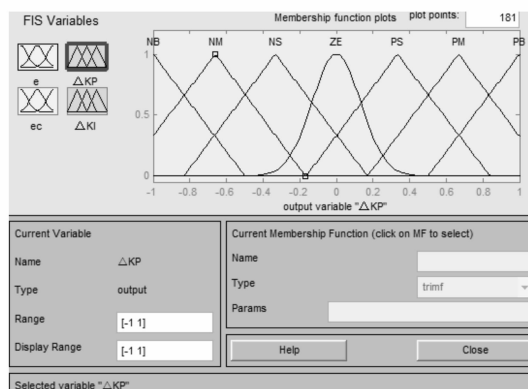


图 3  $\Delta K_p$  的隶属函数

Figure 3 Membership function of  $\Delta K_p$

输入变量和输出变量之间关系的一系列语句。基于输入量  $e, e_c$  与参数  $K_p, K_i$  之间的关系,综合得出调节修正 PI 控制器两个参数的模糊规则<sup>[9-10]</sup>如表 1 和表 2 所示。

## 2 ITAE 性能指标

在控制系统常用的动态性能指标中,超调量、调节时间和误差泛函积分评价指标得到了广泛的应用。其中 ITAE (时间乘绝对误差积分准则) 指标考虑了时间因素,可以减少初始的误差对系统性能指标的作用,响应快且超调小<sup>[11-12]</sup>,因此将其引入到控制系统的性能评价中以充当 PI 控制参数整定方法选择的一个重要衡量指标。

ITAE 指标是时间乘以误差绝对值积分的性能指标,即

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt.$$

式中:  $e(t)$  为转速环误差和电流环误差之和,  $t$  为仿真时间。

表1  $\Delta K_p$ 模糊控制表  
Table 1 Fuzzy control table of  $\Delta K_p$

误差 $e$	误差变化率 $e_c$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表2  $\Delta K_i$ 模糊控制表  
Table 2 Fuzzy control table of  $\Delta K_i$

误差 $e$	误差变化率 $e_c$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

### 3 基于模糊PI的电机控制系统仿真实验

通过运用 MATLAB/Simulink 软件自身带有的模糊逻辑工具箱,搭建了直流无刷电机模糊PI控制系统的仿真模型<sup>[13-14]</sup>。系统采用转速、电流双闭环方案,其中模糊PI控制器作用在速度环,其内部结构如图4所示。模糊逻辑控制器的输入量为控制系统的转速误差  $e$  和误差变化率  $e_c$ 。经过模糊化、近似推理和解模糊化后,输出的修正量  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  分别输入到PI控制器里,对用凑试法得到的比例系数  $K_p'$  和积分系数  $K_i'$  进行实时在线校正,最终转速误差  $e$  经过已校正的PI控制器调节后输出电流参考信号,送入到电流环作为输入信号。

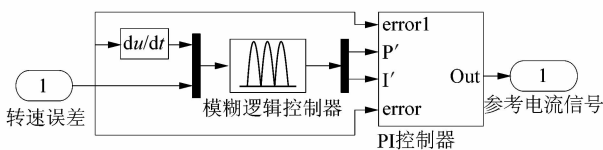


图4 模糊PI控制器结构

Figure 4 Structure of fuzzy PI controller

文中基于 MATLAB 对该模型进行了仿真,其中电机参数:额定电压  $U_N = 12\text{ V}$ ;额定转速  $n_N = 3\ 000\text{ r/min}$ ;额定转矩  $T_N = 0.03\text{ N}\cdot\text{m}$ ;转动惯量  $J = 9 \times 10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ;定子相绕组电感  $L = 0.21 \times 10^{-3}\text{ H}$ ;相绕组电阻  $R = 0.6\ \Omega$ ,极对数  $p = 8$ ;同时用凑试法得到的比例系数  $K_p' = 1$ ,积分系数  $K_i' = 0.15$ 。为更好分析基于模

糊PI的电机控制系统的静态和动态性能,首先对电机进行空载测试,给定初始转速  $1\ 000\text{ r/min}$ ,进入稳态  $0.1\text{ s}$ 时将负载转矩从  $0$  上升为  $0.03\text{ N}\cdot\text{m}$ ,并且在  $0.2\text{ s}$ 时使转速上升至  $2\ 000\text{ r/min}$ ,得到图5所示的模糊PI控制下的电机转速曲线。从图中可知在模糊PI控制器调节下,电机经过  $0.02\text{ s}$ 的响应时间后即达到给定初始转速  $1\ 000\text{ r/min}$ ,在  $t = 0.1\text{ s}$ 时由于突加负载,速度出现变化,但迅速稳定。

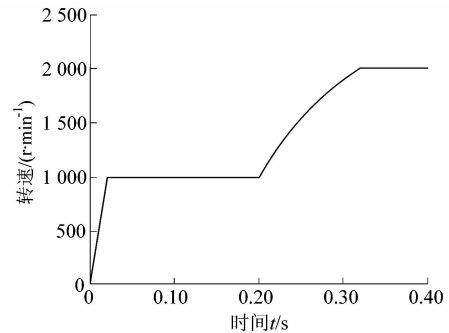


图5 模糊PI控制下的电机转速曲线

Figure 5 Speed curve by fuzzy PI control

为了分析系统的抗干扰性能,电机空载启动后  $0.1\text{ s}$ 加上负载,在  $0.2\text{ s}$ 时将电机转速由原来的  $1\ 000\text{ r/min}$  上升至  $2\ 000\text{ r/min}$ ,从电磁转矩曲线图6~7可以看到两种控制系统的电磁转矩都出现了一些波动,这是由于电流换向以及电流滞环控制器的重复作用所导致的。但与传统PID调节相比,模糊PI调节下的电机控制系统在电机启动时转矩波动较小,而在突加负载和转速上升时转矩波动现象明显弱于传统PI调节,并且能快速恢复到原来的转矩,这表明模糊PI控制器能更有效抑制电机的转矩脉动。

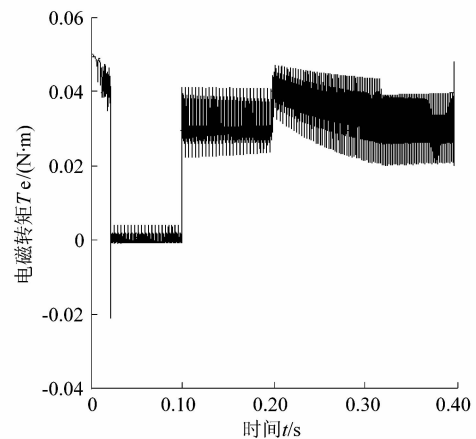


图6 传统PI控制的电磁转矩曲线

Figure 6 Electromagnetic torque curve by traditional PI control

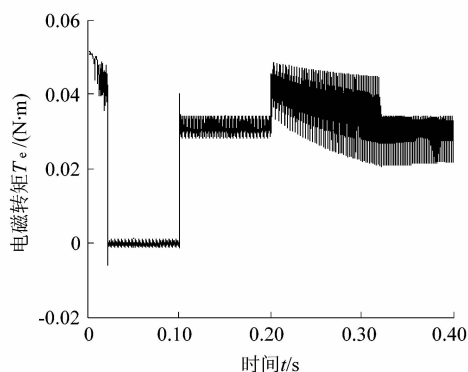


图 7 模糊 PI 控制的电磁转矩曲线

Figure 7 Electromagnetic torque curve by fuzzy PI control

电机空载状况下给定初始转速 1 000 r/min, 进入稳态以后于 0.2 s 使速度升到 2 000 r/min, 通过仿真, 得传统 PI 控制和模糊 PI 控制下系统的 ITAE 性能指标曲线如图 8 所示。从图 8 可知, 在 0 ~ 0.2 s 时间段里, 两种控制系统的 ITAE 值基本相同, 但在 0.2 s 时由于转速突变, 两者的 ITAE 值均有所增加, 但模糊 PI 控制系统的 ITAE 明显小于传统的 PI 控制系统, 并且在 0.34 s 以后逐渐趋于稳态, 在 0.4 s 时模糊 PI 控制 ITAE 指标值比传统 PI 控制 ITAE 指标值小 2.5% 左右。并且随着仿真时间的延长, 传统 PI 控制系统的 ITAE 值有增大的趋势, 这表明通过模糊自适应控制器校正的 PI 参数能有效提高系统的稳态特性。

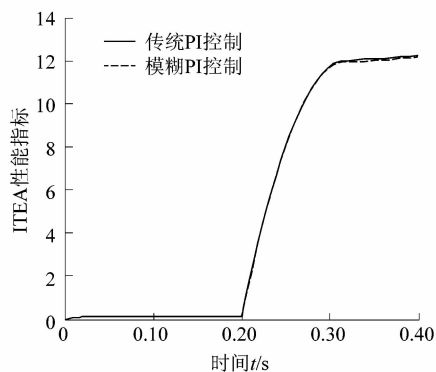


图 8 模糊 PI 和传统 PI 控制系统的 ITAE 曲线

Figure 8 ITAE curves of fuzzy PI and traditional PI control system

## 4 结语

文中建立了电机模糊控制系统的仿真模型, 采用传统的凑试法得到普通 PI 控制器的参数  $K_p'$ ,  $K_i'$  的值, 设计了模糊 PI 自适应控制器, 再运用模糊 PI 控制器对参数  $K_p'$ ,  $K_i'$  进行在线校正。通过对比不同工况下两种控制系统的转矩变化和 ITAE 指标可知, 基于参数自适应的模糊 PI 控制系统在受到外界干扰的时候能维持稳定, 并且其 ITAE 值比传统 PI 控制系统的有所减少, 表明在负载突变时模糊 PI 控制器能更有效抑制电机转矩脉动和提高控制系统的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 张浩. 无刷直流电机智能功能控制器的研究与仿真实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009, 3-8.
- [2] 张存吉, 宁爱民, 倪杰, 等. 基于增量式 PID 算法的帆板控制系统的设计[J]. 微计算机信息, 2012, 28(7): 67-69.
- [3] 周文权, 董维胜, 宋金德, 等. 基于模糊 PID 的余热锅炉蒸汽温度控制研究[J]. 才智, 2012(32): 67-68.
- [4] 陈忠华, 康立乾, 王洋. 直流调速系统中常规 PI 与模糊 PI 控制器的比较[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(8): 80-84.
- [5] 张松兰. 自适应模糊控制器设计[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(2): 12-14.
- [6] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 232-256.
- [7] 邱碧涛. 模糊 PID 控制器在轧机厚度控制系统的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008: 36-38.
- [8] 王成阁. 基于模糊 PID 的轧机厚度自动控制系统的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 44-45.
- [9] 王霞, 朱景伟. 基于模糊 PI 控制的无刷直流电机调速系统[J]. 电气传动, 2014, 44(1): 63-67.
- [10] 孙顺顺, 艾红. 基于 DSP 的模糊 PI 无刷直流电动机控制系统[J]. 微特电机, 2013, 41(6): 68-71.
- [11] 殷帅, 吕彩琴, 种尧尧. ITAE 在无刷直流电动机 PID 参数优化中的应用[J]. 微特电机, 2014, 42(9): 76-79.
- [12] AWOUDA A E A, MAMAT R B. New PID tuning rule using ITAE criteria[J]. International journal of engineering, 2010, 3(6): 597-608.
- [13] 杨向宇, 杨进, 邹利平. 直流无刷单机控制系统的建模与仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 2005, 33(8): 28-30.
- [14] 张鹏, 贾洪平, 王云财, 等. 模糊 PI 无刷直流电机矢量控制系统实现[J]. 机电工程, 2016, 33(2): 202-206.