

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2019.1.11

# 无刷直流电机的模糊 PI-PD 控制

胡黄水<sup>1</sup>, 宋金洋<sup>2</sup>

(1.长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012;

2.吉林动画学院 游戏学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 模糊 PI-PD 控制器模块根据误差和误差变化率对电机的转速实时调整, 调整后的转速输入到电机模块中, 然后通过反馈与参考转速形成新的误差, 以控制电机转速, 最后进行了仿真实验。

**关键词:** 无刷直流电机; 模糊 PID; PI-PD; 转速控制

**中图分类号:** TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2019)01-0060-06

## Fuzzy PI-PD control algorithm for brushless DC motor

HU Huangshui<sup>1</sup>, SONG Jinyang<sup>2</sup>

(1.School of Computer Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2.Jilin Animation Institute, Game School, Changchun 130012, China)

**Abstract:** A fuzzy PI-PD controller adjusts the speed of the motor in real time based on the error and the rate of error change of the motor. The adjusted speed is input into the motor module and compared with the reference speed to get the new error. Simulation is carried to verify the algorithm.

**Key words:** brushless DC motor; fuzzy PID; PI-PD; speed control.

### 0 引言

无刷直流电机采用逆变器和转子位置传感器组成的电子换向器代替了传统直流电机的机械换向器, 克服了传统直流电机换向带来的噪音和火花等干扰问题, 不但保持了直流电机优良的调速特性, 而且具有交流电机运行可靠、维护方便等优点<sup>[1-3]</sup>。

因此, 无刷直流电机在运动控制系统中得到

了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。

目前, 在无刷直流电机调速控制系统中普遍采用 PID 控制, 然而无刷直流电机系统是一个非线性、多变量、强耦合的时变系统, 采用传统的 PID 控制对无刷直流电机调速时, 难以实现控制参数的优化, 而且抗干扰能力较差, 满足不了高精度伺服控制系统的要求<sup>[6-7]</sup>。对此有学者已经设计了多种不同的控制器<sup>[8-10]</sup>。文献[8]引用离线最小二乘逼近方法来识别无刷直流电机参数, 但

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20181013KJ)

作者简介: 胡黄水(1974—), 男, 汉族, 湖南隆回人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事无线传感器网络、列车通信网络方向研究, E-mail: huhs08@163.com.

算法造成的误差较大,无法应用到精确的电机速度控制中;文献[9]通过遗传算法来优化电机转速控制器中 PI 系数,但电机速度控制的瞬态过程中会出现较大的超调量,并且其稳态周期内的速度波动较大;文献[10]采用比例积分速度控制回路的无刷直流电机驱动系统,但其存在较大的稳态误差;文献[11]设计了一种新型自适应 PID 神经网络控制器,通过粒子群优化算法(PSO)对神经网络的权值进行初始化,并采用改进的梯度下降算法对 PID 神经网络参数进行调整,但需要较长的时间来初始化 PID 参数。随着智能控制算法的研究,模糊控制在无刷直流电机领域得到了广泛应用<sup>[12-15]</sup>。由于控制系统负载变化,还存在负载不确定性问题,文献[16]设计了基于粒子群优化算法的 PID 控制器,并用于直流电驱动系统,

相比传统 PID 控制器具有较快的收敛速度,但其速度响应在稳定状态下具有较大的超调量和较多的振荡。文献[17]针对直流电机系统开发了具有自整定功能的 PID 型模糊逻辑控制器,与传统 PI 控制器相比,控制性能较优,但输出超调量达到 710%。

针对上述问题提出一种模糊 PI-PD 型无刷直流电机转速控制算法,解决传统控制算法响应速度慢、抗干扰能力差、出现超调等现象。

## 1 无刷直流电机的状态空间建模

BLDC 电机在转子上有三个定子绕组和永磁体。无刷直流电动机变量的数学状态空间表示为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L-M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L-M} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

式中:  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  ——无刷直流电机的定子相电压;

$R$  ——定子绕组电阻;

$i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  ——在 AMPS 中,电机的相电流;

$L$  ——电机绕组的自感;

$M$  ——定子绕组之间的互感;

$e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  ——各相的梯形反电势;

$P$  ——转子中磁极的数目;

$\theta_r$  ——转子在弧度中的转子位置;

$J$  ——电机的转矩;

$B$  ——电机的摩擦系数;

$\omega_r$  ——电机的角速度;

$T_L$  ——电机的负载转矩。

电机转矩表示如下:

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

瞬时电转矩方程以及角速度与转子位置的关系为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (3)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

## 2 传统控制策略

传统 PID 控制器由比例 (proportion)、积分 (integral)、微分 (derivative) 三项组成,是目前使用最为广泛的工业控制器。随着我国电子技术的高速发展,PID 控制器也由最初的模拟器转变为数字信号控制器,具有提高系统设计灵活性的优势,并且还能极大地简化系统电路结构,其占据着工业生产控制器中极其重要的地位。传统 PID 控制器是一种线性控制器,它根据输入值  $x(t)$  与输出值  $y(t)$  构成控制偏差,并通过对该偏差量  $e(t)$  控制目标,其结构如图 1 所示。

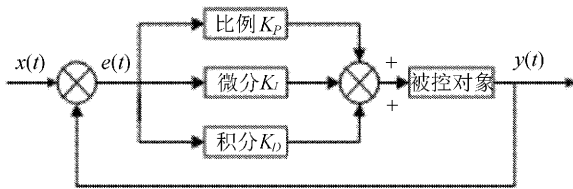


图 1 传统 PID 控制器结构图

由于传统 PID 的控制参数是固定的,所以在实际无刷直流电机控制中,传统 PID 控制时变性、稳定性、稳态精度效果差,且在非线性控制上效果不显著,尤其是传统 PID 控制的 3 个参数必须同时配合才能发挥其作用。

为了解决以上缺点,有学者提出了模糊 PID 控制系统。该控制器把偏差  $e(t)$  和偏差变化率  $e_c(t)$  输入到模糊系统中在线修改传统 PID 的系数,具体结构如图 2 所示。

模糊 PID 控制系统通过确定 PID 控制参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  与偏差  $e(t)$  和偏差变化率  $e_c(t)$  之间的模糊关系,依据模糊控制规则实时整定 3 个控制参数,以满足不同偏差下系统对控制参数的

需求,其整定规律为:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + K_{P'} \\ K_I = K_{I0} + K_{I'} \\ K_D = K_{D0} + K_{D'} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $K_{P0}$ 、 $K_{I0}$ 、 $K_{D0}$ ——传统 PID 控制器的初始设置值;

$K_{P'}$ 、 $K_{I'}$ 、 $K_{D'}$ ——模糊控制器的修正值。

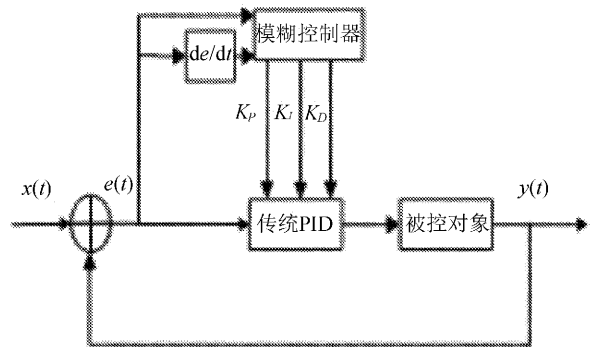


图 2 模糊 PID 控制系统结构图

模糊 PID 控制稳定性、时变性和自适应性等控制效果与传统 PID 控制相比有所提升,且在非线性控制上效果较为明显,但其在控制响应速度和抗干扰能力上表现差。

## 3 无刷直流电机转速控制算法 NFPI-PD 设计

在 MATLAB R2014a 的 Simulink 环境下,建立了无刷在直流电机速度控制系统的仿真模型。无刷直流电机控制系统包括两个控制回路,内环同步逆变器的门信号与电动势。外环通过改变直流母线电压来控制电机的速度。系统的仿真模型如图 3 所示。

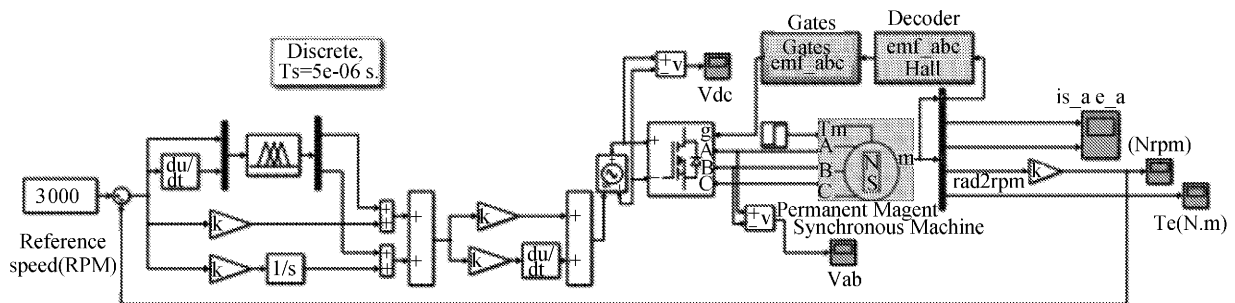


图 3 无刷直流电机速度控制系统仿真模型

无刷直流电机的速度调制模块包括模糊控制器和 PI-PD 型控制器。

当被控对象参数变化时,传统的 PID 控制参数无法相应做出调整;控制系统改变时,传统的 PID 控制性能往往无法达到标准。因此,将模糊控制应用到无刷直流电机速度控制系统的转速调节中,通过模糊控制器实时调整 PI 控制器的参数,设计了无刷直流电机的模糊 PI-PD 控制器。具体控制思路包括:

首先对电机实际转速与给定转速进行比较计算,得出最终偏差  $e$  以及偏差变化率  $e_c$ ,在模糊控制器中将这两项偏差进行模糊化,将经过模糊化之后的  $E$  与  $E_c$  交与模糊控制器开展推理工作,从而得到解模糊化后的  $K_p$  和  $K_I$ ,结果输入到 PI 控制器中,最后经过 PD 控制调节输入到电机模型中。

模糊控制器的输入变量为转速误差  $e$  和误差变化率  $e_c$ ,输出变量为  $K_p$  和  $K_I$ 。变量  $e$ 、 $e_c$ 、 $K_p$  和  $K_I$  模糊论域均为  $[-6, 6]$ ,量化等级为 13 级,即  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。取输入输出语言变量的模糊子集为负大、负

中、负小、零、正小、正中、正大,分别用  $NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB$  表示。 $e(t)$ 、 $e_c(t)$ 、 $K_p$  和  $K_I$  这 4 个输入输出变量选取相同的隶属函数。输入变量  $e(t)$  的隶属函数如图 4 所示。

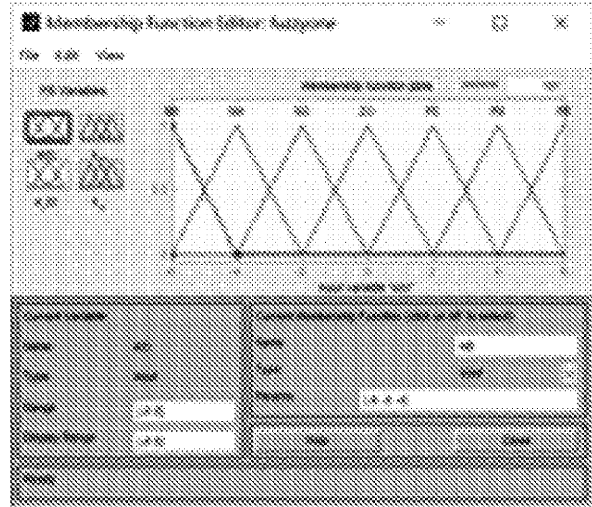


图 4 输入变量  $e(t)$  的隶属函数

其他 3 个变量的隶属函数与其相同。模糊控制规则见表 1。

表 1  $k_{IP}, k_{II}$  的模糊控制规则表

$K_p, K_I$	$E_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB NB	PB NB	PM NB	PM NM	PS NM	PS ZO	ZO ZO
NM	PB NB	PB NB	PM NM	PM NM	PS NS	ZO ZO	ZO ZO
NS	PM NM	PM NM	PM NS	PS NS	ZO ZO	NS ZO	NM PS
E	ZO	PM NM	PS NS	PS NS	ZO ZO	NS ZO	NM PS
PS	PS NS	PS NS	ZO ZO	NS ZO	NS PS	NM PM	NM PM
PM	ZO ZO	ZO ZO	NS ZO	NM PM	NM PM	NM PB	NM PB
PB	ZO ZO	NS ZO	NS PS	NM PM	NM PB	NM PB	NM PB

根据  $K_p$  和  $K_I$  的模糊规则、模糊变量及模糊论域,选择相应的隶属函数得出  $K_p$  和  $K_I$  的输出曲面,分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 得出,输出的空间曲面接近连续且较为平滑。

#### 4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境下设定电机的初始转速为 3 000 r/min,负载转矩初始值为 0 N·m,在 0.3 s 时保持转速不变,转矩突变为 3 N·m;在 0.4 s 时转矩保持不变,转速突变为 1 500 r/min。三种控制算法转速仿真如图 7 所示。

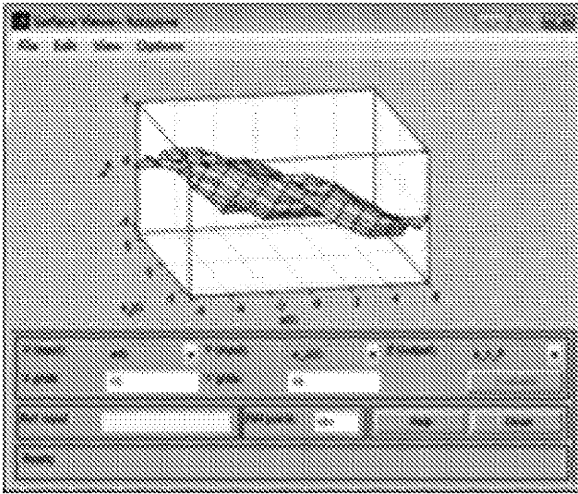
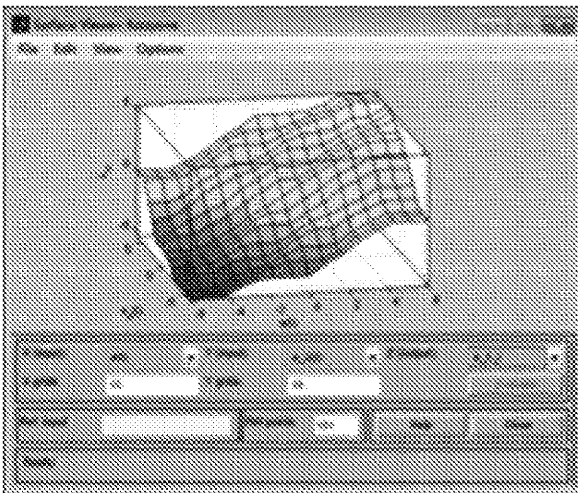
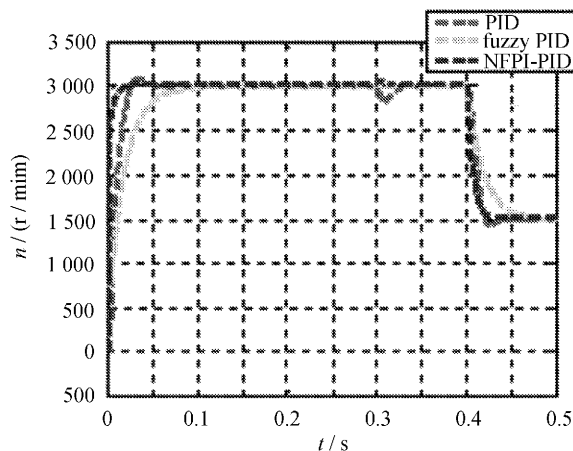
图 5  $K_p$  的输出空间曲面图 6  $K_i$  的输出空间曲面

图 7 三种控制算法转速仿真

0.3 s 转矩突变时转速仿真如图 8 所示。

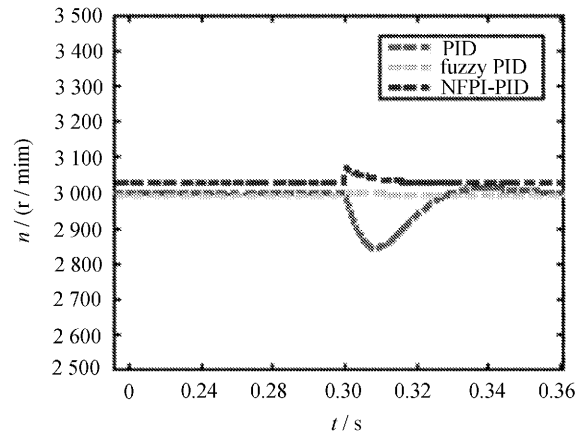


图 8 0.3 s 转矩突变时转速仿真

0.4 s 转速突变为 1 500 r/min 时转速仿真如图 9 所示。

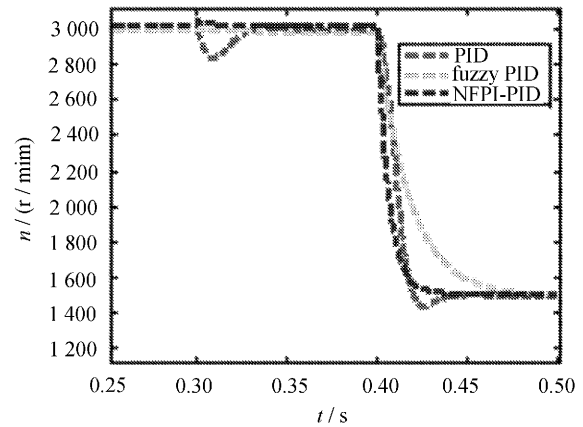


图 9 0.4 s 转速突变为 1 500 r/min 时转速仿真

通过上述仿真可以得出,无刷直流电机转速控制算法 NFPI-PD 与传统 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法相比,最先达到稳定状态,当被测试系统转矩发生改变时,NFPI-PD 控制算法变化的峰值较小,且最先恢复稳态,鲁棒性较强;当被测系统目标转速发生时,NFPI-PD 控制算法最先达到目标转速,响应速度最快。

## 5 结 语

针对传统无刷直流电机控制算法抗干扰能力差、响应速度慢等问题,提出了一种模糊 PI-PD 型无刷直流电机转速控制算法 NFPI-PD,应用于无刷直流电动机转速控制系统。设计了相应模糊控制器的模糊控制规则和隶属度函数,在 Matlab/Simulink 下进行了抗干扰能力和响应速度仿真

测试,并与传统 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法进行了转速仿真对比,结果表明,NFPI-PD 算法对被测系统扭矩变化具有较强的鲁棒性,对转速变化具有更快的响应速度。

#### 参考文献:

- [1] 李春峰.无位置传感器无刷直流电机控制策略的研究[D].长春:长春工业大学,2011.
- [2] 王洁涵.电动车辆用 BLDC 损耗机理及提高效率方法的研究[D].长春:长春工业大学,2018.
- [3] 张洋.无刷直流电机转矩脉动抑制技术研究[D].长春:长春工业大学,2010.
- [4] 武轲.永磁直线同步电机的建模及控制方法研究[D].长春:长春工业大学,2012.
- [5] 荆建立,王艳春,朱永庆.无刷直流电机模糊参数自适应 PID 控制[J].控制工程,2018(5):915-919.
- [6] 邓元望,高洋,尹会春,等.无刷直流电机稳定性能优化控制仿真研究[J].计算机仿真,2018(2):85-89.
- [7] 张国栋,祁瑞敏.无刷直流电机模糊 PID 控制系统设计与仿真[J].煤矿机械,2018(1):13-15.
- [8] Mamdani E H. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant[J]. Proc IEE,1974,121(12):1585.
- [9] Palm R. Sliding mode fuzzy control[C]//Proc Fuzz IEEE. San. Diego, CA:[s.n.],1992:519-526.
- [10] Industrial application of fuzzy technology[C]//Hirota K, Editor. Berlin, Germany: Springer-Verlag,1993.
- [11] Lee C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller[J]. IEEE Trans Syst. Man. Cybern., 1990,20:404-34.
- [12] 温嘉斌,麻宸伟.无刷直流电机模糊 PI 控制系统设计[J].电机与控制学报,2016,20(3):102-108.
- [13] 纪志成,沈艳霞,薛花.无刷直流电机自适应模糊控制的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5):104-109.
- [14] 王晓远,田亮,冯华.无刷直流电机直接转矩模糊控制研究[J].中国电机工程学报,2006,26(15):134-138.
- [15] 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,2005,25(11):129-133.
- [16] Meng D, Pei Z. Dynamic adaptive learning algorithm based on two-fuzzy neural-networks [J]. Neurocomputing,2014,125:88-94.
- [17] Malki H A, Li H, Chen G. New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems[J]. IEEE Trans Fuzzy Syst.,1994,2(4):245-254.