

# 双闭环直流调速系统模糊 PID 控制研究<sup>\*</sup>

杨祖元<sup>1</sup>, 杨华芬<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044; 2. 曲靖师范学院 计算机科学与工程学院, 云南 曲靖 655011)

**摘 要:** 针对电压和负载扰动导致传统 PID 控制双闭环直流调速系统性能下降的问题, 提出一种模糊 PID 控制方法。控制方法根据调速系统的转速偏差  $e$  和偏差变化率  $e_c$ , 经过模糊逻辑推理, 动态自适应调整 PID 控制器的三个参数, 能够有效提高系统抗扰动能力。为了对两种控制方法的性能进行比较分析, 文中对系统在理想空载状态、负载扰动和电压波动三种情况下进行仿真实验。结果表明两种控制方法在理想空载状态下的稳态性能基本相同。在负载扰动和电压波动的情况下, 本方法能使系统更快恢复到平衡状态, 且具有更小的转速降。因此, 本控制方法能够保证系统具有较好的动态性能和抗扰性能。

**关键词:** 双闭环直流调速系统; 模糊逻辑; 比例—积分—微分控制

**中图分类号:** TP13      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2011)03-0921-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.03.036

## Research on fuzzy PID control of double closed-loop DC speed tuning system

YANG Zu-yuan<sup>1</sup>, YANG Hua-fen<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Dept. of Computer Science & Engineering, Qujing Normal College, Qujing Yunnan 655011, China)

**Abstract:** In connection with the problem that disturbance of voltage and load change lead to the performance deterioration of the conventional PID controller in a DC speed tuning system, presented a two closed-loop fuzzy PID control method. Through fuzzy logic reference, this method dynamically tuned the parameters of PID controller adaptively according to the speed error  $e$  and its variety rate  $e_c$ . Comparison of performance between this method and the conventional one was carried out by simulations in ideal idling state, load disturbance and voltage disturbance respectively. The results indicate that two methods enjoy same stable performance in ideal idling state. In the situation of load disturbance and voltage disturbance, the fuzzy PID control method enjoyed a less drop in speed and takes less time to return to the equilibrium condition. Therefore, fuzzy PID control method guarantees tracking and anti-jamming performance of a DC speed regulation system.

**Key words:** double closed-loop DC speed regulation system; fuzzy logic; PID control

## 0 引言

虽然直流电动机存在结构复杂、使用及维护成本较高的缺点, 但具有调速范围广、静差率小、稳定性好、过载能力大、能承受频繁的冲击负载、可实现频繁的无级快速起制动和反转等良好的动态性能, 因此得到广泛的应用。广大研究工作者一直致力于各种控制方法的研究, 以期进一步提高直流调速系统的性能<sup>[1,2]</sup>。

传统 PID 控制是一种简单而有效的控制方法, 广泛应用于直流调速系统。然而, PID 控制在本质上是一种线性控制方法, 其控制性能取决于被控对象的数学模型精度<sup>[3]</sup>。直流调速系统具有一定的非线性、时变性和不确定性, 难以建立精确的数学模型, 系统性能易受参数变化及外部扰动的影响。传统 PID 控制器在系统运行过程中参数保持不变, 其控制性能易受负载变化的扰动以及电压波动的影响<sup>[4,5]</sup>。因此, 迫切需要一种控制方法, 能够动态调整 PID 控制器的参数, 以适应系统运行的变化情况。

模糊控制是一种具有适应性的智能控制方法, 不依赖于被控对象精确的数学模型, 是处理不确定性和非线性问题的有力

工具。模糊逻辑与人类的某些思维特征相一致, 嵌入到推理技术中具有良好的效果<sup>[6]</sup>。Gui Yu-long 等人<sup>[1]</sup>提出了一种级联模糊 PID 控制方法, 能有效提高直流调速系统的抗扰性能, 但是这种控制方法对 PID 三个参数的初始值比较敏感。Wang<sup>[4]</sup>提出一种免疫 PI 控制方法, 也能够提高直流调速系统的抗扰性能, 但是动态性能并不理想。

本文针对双闭环直流调速系统, 根据系统运行的实际情况, 利用模糊逻辑实现 PID 控制器参数的实时动态整定, 并利用仿真实验对系统的动态性能、稳态性能和抗扰性能进行研究。

## 1 直流调速系统建模

### 1.1 直流电动机建模

本文以他励直流电动机为控制对象, 其等效电路如图 1 所示。系统的输入量为电动机电枢电压  $u_a$ , 输出量为电动机的转速  $n$ 。根据电压定律, 可以得到电枢回路的微分方程式:

$$e + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} = u_a \quad (1)$$

其中:  $u_a$  为输入电压,  $i_a$  为电枢电流,  $R_a$  为电枢回路电阻,  $L_a$  为

收稿日期: 2010-09-06; 修回日期: 2010-10-08      基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(2009ZC128M)

作者简介: 杨祖元(1974-), 男, 云南宣威人, 讲师, 博士, 主要研究方向为智能控制、运动控制(yzy7704@163.com); 杨华芬(1979-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能计算。

电枢回路电感,  $e$  为电动机电枢反电动势, 且有

$$e = C_e n \quad (2)$$

其中:  $C_e$  为电动机电势常数,  $n$  为电动机转速。

系统的机械运动方程式为

$$J \frac{dn}{dt} + \lambda n + T_L = T_e \quad (3)$$

$$T_L = C_m i_{aL} \quad (4)$$

$$T_e = C_m i_a \quad (5)$$

其中:  $J$  为系统转惯量,  $\lambda$  为粘滞摩擦系数,  $T_L$  为负载转矩,  $T_e$  为电磁转矩,  $C_m$  为转矩常数,  $i_{aL}$  为对应于负载转矩的负载电流。

把  $i_{aL}$  看成扰动输入, 如果直流电动机处于理想空载状态, 则  $i_{aL} = 0$ 。于是, 对上述方程进行拉普拉斯变换可以得到传递函数:

$$G(s) = \frac{1/C_e}{T_l T_m s^2 + T_m s + 1} \quad (6)$$

$$T_l = \frac{L_a}{R_a} \quad (7)$$

$$T_m = \frac{GD^2}{375} \frac{R_a}{C_m C_e} \quad (8)$$

其中:  $T_l$  为电枢回路的电磁时间常数,  $T_m$  为直流调速系统的机电时间常数。

## 1.2 双闭环直流调速系统的数学模型

双闭环直流调速系统的动态结构如图 2 所示。图中,  $G_n(s)$  为速度调节器的传递函数,  $G_i(s)$  为电枢电流调节器的传递函数,  $K_s/(T_s s + 1)$  为直流动电动机驱动器的传递函数,  $T_s$  为驱动器的时间周期。

双闭环直流调速系统含有两个控制环。一个是速度环, 其作用是保证输出转速跟随输入命令的变化, 并抑制负载的扰动。另外一个电流环, 其作用是使电流跟随给定值的变化而变化, 保证直流电动机的最大起动转矩, 并抑制电压扰动造成的转矩波动。

## 2 控制器设计

### 2.1 传统 PID 控制器

传统 PID 控制器结构如图 3 所示, 其时域模型为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (9)$$

其中:  $K_p$  为比例系数,  $K_i = K_p/T_i$  为积分系数,  $K_d = K_p T_d$  为微分系数。增大  $K_p$  可以提高系统响应速度和控制精度, 但是过大的  $K_p$  将导致系统的不稳定。  $K_i$  有助于消除系统的稳态误差。  $K_d$  则有助于减小系统的超调量, 缩短系统调节时间。

传统 PID 控制的问题是其控制性能依赖于控制对象精确的数学模型, 且在系统运行过程中这三个参数始终保持不变。然而, 直流调速系统具有一定程度的非线性。系统的参数在运行过程中会发生变化。直流调速系统的非线性和时变特性决定了传统 PID 控制的性能。另外, 这三个参数的整定也是一个难题。传统的整定方法是反复试凑, 费时费力, 因此, 有必要寻求一种新的方法, 能够根据负载和扰动的变化动态自适应整定这些参数, 保证系统的各种性能。

### 2.2 模糊 PID 控制器结构

模糊逻辑定义具有模糊边界的集合, 并用隶属度函数来刻画一个元素对一个模糊集合的隶属程度。本文在速度环采用模糊 PID 控制, 电流环采用传统 PI 控制。利用模糊逻辑整定 PID 控制器参数的结构如图 4 所示。双闭环直流调速系统模糊 PID 控制器结构如图 5 所示。

### 2.3 速度环模糊 PID 控制器设计

速度环模糊 PID 控制器中, 误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  是模糊推理单元的输入变量,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  是输出变量, 分别为比例系数、积分系数和微分系数的调节值, 在图 4 中用  $u$  表示。

#### 2.3.1 输入输出变量的隶属度函数

用  $E$  表示误差  $e$  的基本论域, 其论域为  $X_e = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , 比例因子为  $K_e = X_e/E$ 。在该论域上定义七个模糊集合  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ , 对应的隶属度函数如图 6 所示。用  $EC$  表示误差变化率的基本论域, 其论域为  $X_{ec} = \{-10, -8, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, 10\}$ , 比例因子为  $K_{ec} = X_{ec}/EC$ 。在该论域上定义七个模糊集合  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ , 对应的隶属度函数如图 7 所示。

用  $U$  表示输出变量  $u$  的基本论域, 其论域为  $X_u = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , 比例因子为  $K_u = X_u/U$ 。在该论域上定义七个模糊集合  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ , 对应的隶属度函数如图 8 所示。

#### 2.3.2 模糊规则

模糊 PID 控制器有三个模糊规则库, 分别对应于三个参数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。本文采用广义假言推理<sup>[7]</sup>, 得到由 49 条模糊规则构成的模糊规则库, 如表 1~3 所示。

表 1 比例系数调节值  $\Delta K_p$  的模糊规则

$\Delta K_p$	$ec$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z
	NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS
	Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM
	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB
	PB	Z	Z	NM	NM	NB	NB

表 2 积分系数调节值  $\Delta K_i$  的模糊规则

$\Delta K_i$	$ec$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e$	NB	NB	NB	NM	NS	Z	Z
	NM	NB	NB	NM	NS	Z	Z
	NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB
	PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB

表 3 微分系数调节值  $\Delta K_d$  的模糊规则

$\Delta K_d$	$ec$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$e$	NB	PS	NS	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NS	Z
	NS	Z	NS	NM	NS	NS	Z
	Z	Z	NS	NS	NS	NS	Z
	PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PM	PB	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

2.3.3 模糊推理机及解模糊

在各种模糊推理机中,乘积推理机和最小推理机具有直观、计算简便的特点<sup>[8]</sup>。本文采用乘积推理机得到三个参数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的隶属度函数,然后利用中心平均解模糊器得到三个参数的清晰值。PID 控制器的参数调节根据下式进行:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (10)$$

其中: $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 及  $K_{d0}$  分别为  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  微分系数的初始值。

3 仿真分析

3.1 仿真参数设置

本文采用仿真实验来测试模糊 PID 控制器的性能。在相同条件下建立传统的双闭环直流调速系统 PID 控制和双闭环模糊 PID 控制的仿真模型。他励直流电动机参数如下:额定功率为  $P_N = 150\text{ kW}$ ,额定转速为  $n_N = 1000\text{ r/min}$ ,额定电流为  $I_N = 700\text{ A}$ ,电枢电阻为  $R_a = 0.8\text{ }\Omega$ ,电枢电感为  $L_a = 20\text{ mH}$ 。

3.2 理想空载状态仿真分析

在理想空载状态下对系统进行仿真,结果如图 9 所示。仿真结果表明,传统 PID 控制和模糊 PID 控制都能使系统在 1 s 内达到期望的转速,甚至传统 PID 控制的收敛速度还快一些。

3.3 负载扰动下的仿真分析

对采用两种控制方式的系统施加持续 0.5 s 的相同负载扰动,负载电流  $i_{al}$  的变化代表了负载扰动,仿真结果如图 10 所示。仿真结果表明,在负载扰动期间,传统 PID 控制比模糊 PID 控制产生更大的转速降。

3.4 电压波动情况下的仿真分析

对采用两种控制方式的系统施加持续 0.5 s 的相同电压扰动,仿真结果如图 11 所示。与传统 PID 控制相比,模糊 PID 控制的系统能够在第 4 s 恢复到原来的平衡状态,且电压波动期间具有较小的转速降。

上述仿真表明,采用传统 PID 控制的调速系统在理想空载状态下具有较短的调整时间。当系统受到扰动时,采用模糊 PID 控制的调速系统具有更好的抗扰性能和动态性能,且扰动消除后,能更快恢复到平衡状态。

4 结束语

本文提出了一种双闭环直流调速系统模糊 PID 控制方法,利用模糊逻辑推理,根据系统运行时的转速误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  实时动态整定 PID 控制器的三个参数。对一个直流调速系统在理想空载状态、负载扰动和电压波动下进行仿真实验,比较了本文的控制方法和传统 PID 控制方法的性能。结果表明,两种控制方法在理想空载状态下具有相同的稳态性能,传统 PID 控制具有更好的动态性能。在扰动消除后,模糊 PID 控制能够在较短的时间内恢复到平衡状态,且在扰动期间具有较小的转速降。

参考文献:

[1] GUI Yu-long, LU Hai-long, FAN Jian-bo. Design and simulation of cascade fuzzy self-adaptive PID speed control of a thyristor-driven DC motor[C]//Proc of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Dalian: IEEE, 2006:655-660.

[2] LACHKAR I, EIRI F, HALOUA M, *et al.* DC motor speed control through AC/DC converter[C]//Proc of IEEE International Conference on Control Applications. Munich: IEEE, 2006:2450-2455.

[3] THEPSATORN P, NUMSOMRAN A, TIPSUWANPORN V, *et al.* DC motor speed control using fuzzy logic based on LabVIEW[C]//Proc of International Joint Conference. Busan: IEEE, 2006:3617-3620.

[4] WANG Sue. Application studies of immune PI controller in double closed-loop DC speed regulation system[C]//Proc of International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA). Wuhai: IEEE, 2010:1-4.

[5] PEREZ C, STREFEZZA M. Speed control of a DC motor by using fuzzy variable structure controller[C]//Proc of Control Conference. Kunming: IEEE, 2008:311-315.

[6] YANG Zu-yuan, HUANG Xi-yue, DU Chang-hai, *et al.* Hierarchical fuzzy logic traffic controller for urban signalized intersections[C]//Proc of the 7th World Congress on WCICA. Chongqing: IEEE, 2008:5197-5202.

[7] ABOU E E, BISHR M A. An emergency power system control based on the multi-stage fuzzy based procedure[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5):421-429.

[8] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 王迎军,译.北京:清华大学出版社, 2003:123-124.