

文章编号: 2095—0411 (2012) 01—0082—04

# 基于 DSP 他励直流电机模糊 PID 控制器仿真研究<sup>\*</sup>

张小鸣, 龙仕玉

(常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 针对他励直流电机调速系统参数模型的非线性、时变性, 常规 PID 控制器参数离线整定带来的非优化的问题, 提出一种基于 DSP 的模糊 PID 控制器算法, 以电流反馈误差及误差的变化率作为模糊控制器的输入变量, 采用参数自整定的模糊 PID 控制器实现 PID 参数在线优化。以 DSP 开发系统作为仿真平台, 将他励直流电机传递函数转换为差分方程, 构成基于模糊 PID 控制器的数字闭环他励直流电机仿真系统。利用 DSP 高速运算能力进行在线仿真, 观察常规 PID 控制器和模糊 PID 控制器产生的系统输出波形。CCS2. 0 和 MATLAB 仿真实验表明: 模糊 PID 控制器基本实现输出无超调, 系统阶跃响应的上升时间和调整时间均比常规的 PID 控制器阶跃响应的小。模糊 PID 控制器应用于他励直流电机调速系统中, 控制性能明显高于基于常规 PID 的调速系统。

**关键词:** 模糊比例积分微分; 数字信号处理器; 调速系统; 参数整定

**中图分类号:** TP 272

**文献标识码:** A

## Simulation Research of Fuzzy PID Controller for Separately Excited DC—Motor Based on DSP

ZHANG Xiao—ming, LONG Shi—yu

(School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** For the nonlinearity and time—varying model of separately excited DC motor speed control system, the non—optimum problems are brought by offline setting parameters of traditional PID controller, a fuzzy PID controller algorithm based on DSP is proposed. With current feedback error and error change rate as input variables of fuzzy controller, PID parameters are optimized online using self—setting parameters fuzzy PID controller. With DSP development system as simulation platform, separately excited DC motor transfer function transformation as difference equation, a digital closed—loop simulation system of separately excited DC motor based on fuzzy PID controller is set up. Online simulation is carried out by DSP high speed operation ability. The system output waveforms generated by traditional PID controller and fuzzy PID controller are observed. CCS 2. 0 and Matlab simulation tests show that fuzzy PID controller realizes zero overshoot basically, the rise time and adjusted time of system step response is smaller than traditional PID controller's. System performances are markedly higher than based on traditional PID controller by applying a fuzzy PID controller to separately excited DC motor speed system.

**Key words:** fuzzy PID; digital signal processing; speed governing system; parameter setting

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2011—12—21

作者简介: 张小鸣 (1958—), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 研究方向为电机智能控制。

在数字直流电机调速系统中广泛采用数字 PID 控制器,但常规数字 PID 控制器的参数选择大都采用试凑法,导致了 PID 控制器整定困难、性能非优化,控制精度难以提高<sup>[1,2]</sup>。基于神经网络 PID 控制器具有自学习和自适应能力,可在线寻优调整 PID 参数,解决了 PID 控制器参数优化的问题<sup>[3,4]</sup>,但是控制算法较复杂,需要大量的训练样本,难以在嵌入式系统上实现<sup>[5,6]</sup>。采用模糊推理的 PID 控制器适用于数学模型不确定的被控制对象,控制简单,可靠性高,易于工程实现<sup>[7,8]</sup>。模糊 PID 控制器的参数在线整定要依靠专家的经验建立的模糊查询表<sup>[9-11]</sup>。

为此,设计出易于嵌入式实现的参数自整定模糊 PID 控制器,以电流反馈误差及误差的变化率作为模糊控制器的输入变量,根据不同的误差和误差变化率对 PID 参数进行在线自整定。利用 DSP 强大的计算能力快速计算出控制量。一旦被控对象特性发生变化时,模糊 PID 控制器参数也随之发生变化。以 DSP 开发系统作为仿真平台,构建模糊 PID 控制模块,实验表明系统的控制品质具有良好的动态指标,基本实现无超调输出。

## 1 直流他励调速系统控制模型

以 TI 公司的 TMS320LF2407 为基础构建基于模糊 PID 控制器的他励直流电机调速系统如图 1 所示。

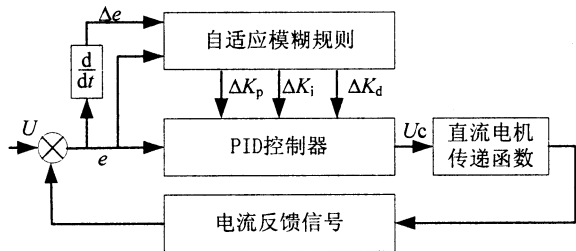


图 1 基于 Fuzzy-PID 控制器他励直流电机调速系统框图  
Fig. 1 Separately excited DC motor speed regulating system diagram based on Fuzzy-PID controller

模糊 PID 控制器以电流反馈的误差  $e$  和误差变化  $\Delta e$  作为模糊控制器输入量,模糊化后变成模糊量  $E$  和  $E_c$ ,经过模糊推理和模糊决策得到决策后的控制输出量,再经过反模糊化后,得到 PID 控制器的输出量  $U_c$ ,去控制他励直流电机。对于不同的  $e$  和  $\Delta e$ ,利用模糊规则在线自整定 PID 参数,可以获得很好的动态性能。

## 2 模糊 PID 控制器设计原理

模糊 PID 控制器的设计原理是根据误差信号

大小来调用模糊推理规则,动态确定 PID 控制器参数,达到改善控制性能的目标。

假设模糊 PID 控制器的输入偏差  $e$ ,偏差变化率  $\Delta e$ ,PID 控制器的比例系数  $K_p$ ,积分系数  $K_i$ ,微分系数  $K_d$ 。为了把这些连续变量模糊化为离散变量,采用公式 (1)、(2) 将连续论域离散化到整数论域。

$$b = q \left[ a - \frac{1}{2} \cdot (x_L + x_H) \right] \quad (1)$$

$$q = \frac{2n}{x_H - x_L} \quad (2)$$

其中  $a$  为连续论域  $X = [x_L, x_H]$  中的某一个数, $b$  是与  $a$  对应的整数论域  $N$  中的某个数, $q$  为模糊控制中对精确量进行模糊化时所用的量化因子。

整数论域为:  $N = \{\pm 6, \pm 5, \pm 4, \pm 3, \pm 2, \pm 1, 0\}$ ,在此论域上取模糊语言变量为:即为 {负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}。且设  $e, \Delta e, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  均服从三角形隶属函数曲线分布,则对应的曲线如图 2 所示。

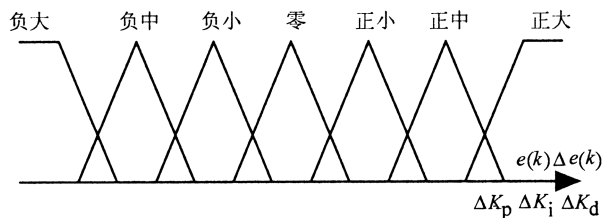


图 2 三角形隶属函数曲线图

Fig. 2 Triangle Membership function graph

为了在实时控制中避免进行关系矩阵合成运算,先在离线状态下,将所有可能的输入和输出计算出来,形成一张以整数的形式表示控制表,其中正大取值范围为 5 到 6,正中取取值范围为 3 到 4,正小取取值范围在 1 到 2,零取值为 0。负大,负中,负小取值范围相同。

由于从控制表模糊推理得到的控制量也是一个模糊量,输出必须解模糊化(反模糊化)。当整数论域为  $N = [-n, +n]$ ,连续论域  $X = [x_L, x_H]$ ,反模糊化参考计算公式如式 (3) 所示。

$$a = k \left[ b \frac{n (x_L + x_H)}{x_H - x_L} \right] \quad (3)$$

其中  $a$  是连续论域  $X = [x_L, x_H]$  中的某个数, $b$  为与  $a$  对应的整数论域为  $N = [-n, +n]$  某个数, $k$  为对模糊量进行反模糊化时所用的比例因子<sup>[12]</sup>,参考计算公式如式 (4) 所示。

$$k = \frac{x_H - x_L}{2n} \quad (4)$$

在实际应用中，为了使系统动静态性能达到最佳，模糊 PID 控制器输入偏差  $e$ ，偏差变化率  $\Delta e$  的反模糊化比例因子需要实验反复凑试确定。模糊控制规则设计原则介绍如下：当误差较大时，为了消除偏差，提高响应速度，应取较大的  $K_p$ 、较小的  $K_d$ ，同时为避免系统出现超调，应对积分作用加以限制，一般取  $K_i$  为零。当误差中等大小时，为使系统响应时超调较小， $K_p$  应取得小一些，同时要取适当的  $K_i$  和  $K_d$ 。当误差较小时，为使系统具有良好的稳态性能，应取较小的  $K_p$ 、较大的  $K_i$ 。同时为避免系统在平衡点附近出现震荡， $K_d$  的取值要适当。

### 3 模糊 PID 控制器仿真设计

实验所用的他励直流电机参数如下：额定功率为 1.2kW，额定电压为 24V，额定电流为 62A，额定转速为 2 600r/min.。由此可计算出转动惯量为 0.003 2kg·m<sup>2</sup>，电枢电感为 0.015H，电机电枢内阻为 0.037 5Ω，电气时间常数为 0.007 6s，转矩系数为 0.079 6N·m/A，电势系数为 0.008 3 V·s/rad，机械时间常数为 0.018 9s，其中忽略粘性系数。

在最大超调量不超过 7%，调整时间在 50ms 以内条件下，用 MATLAB/Simulink 仿真图可试探得到一个较好的 PID 参数整定值为： $K_p=0.9$ ， $K_i=0.1$ ， $K_d=0.01$ 。考虑到动态优化，将 PID 参数变化范围设定在  $K_p \in [0, 1]$ ， $K_i \in [0, 0.5]$ ， $K_d \in [0, 0.09]$ 。

DSP 仿真平台实现模糊 PID 算法，主程序调用模糊 PID 控制算法子程序运算得出控制量  $U_c$ ，把  $U_c$  作为他励直流电机差分方程的输入，最后调用他励直流电机差分方程产生系统输出响应。程序流程图如图 3 所示。

### 4 仿真实验

#### 4.1 模糊 PID 控制器 MATLAB 仿真

利用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型，模糊 PID 控制算法借助 S-function 函数来实现调用，具体参数与 DSP 仿真试验一致，根据他励直流电机调速系统数学模型建立电机仿真模型，得到速度响应曲线图如图 4。

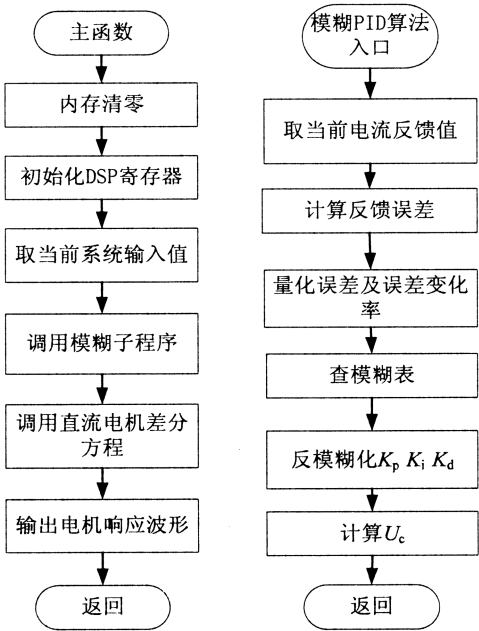


图 3 模糊 PID 算法流程图  
Fig. 3 Fuzzy PID control algorithm flow chart

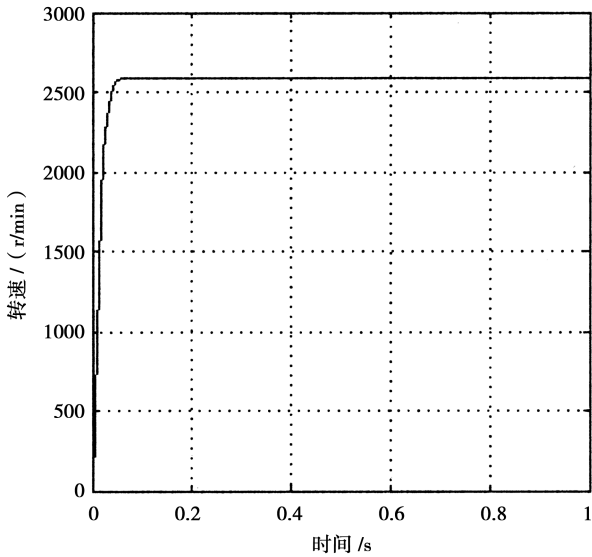


图 4 MATLAB/Simulink 下基于模糊 PID 控制器系统阶跃响应曲线  
Fig. 4 The step response graph based on of Fuzzy PID controller under MATLAB/Simulink

#### 4.2 模糊 PID 控制器 DSP 仿真

在 DSP 仿真平台即 DSP 仿真器加 TMS320LF2407 用户板上仿真设计模糊 PID 控制器。当 DSP 主频为 40MHz，输入阶跃为 31，DSP 运行常规 PID 算法和模糊 PID 算法产生的输出波形在 CCS 2.0 下利用观察命令 view->graph->time/frequency 显示效果分别如图 5、图 6 所示。

由图 5 和图 6 可见由于电机的时间常数小、惯

性小, 在电机启动时出现较大的振荡和一定的超调量。虽然常规 PID 控制器微分环节能有效的改善系统的动态特性, 加快系统响应速度, 但积分环节自适应差, 当积分项减弱时系统输出就会出现静差。而模糊 PID 控制器能在系统进入稳态后很快消除静差, 实现输出无超调, 系统阶跃响应的上升时间和调整时间比常规的 PID 控制器的小, 具有更好的控制品质。

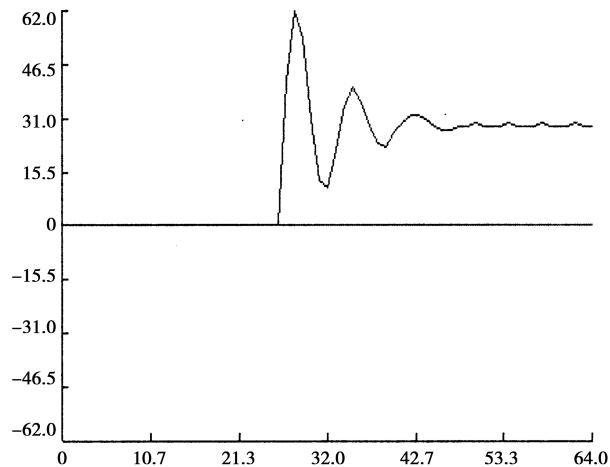


图 5 常规 PID 控制器下的系统阶跃响应曲线

Fig. 5 The step response of the PID controller system

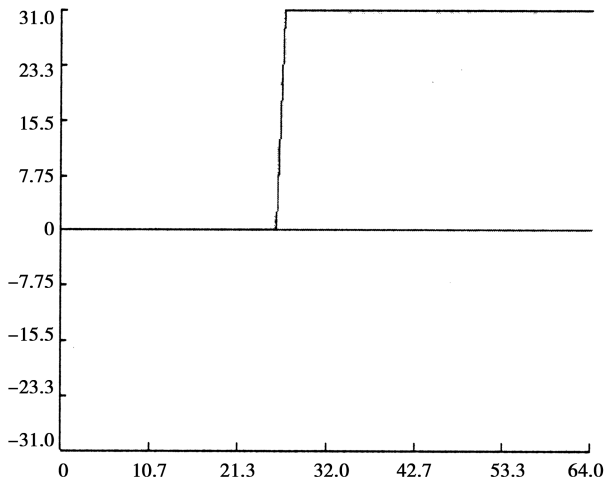


图 6 模糊 PID 控制器下的系统阶跃响应曲线

Fig. 6 The step response of fuzzy PID controller system

## 5 结 论

基于 DSP 的模糊 PID 控制器算法在 DSP 仿真平台上结合他励直流电机传递函数实现了 PID 参数的在线优化, 具有运算精度高、响应速度快等特点。CCS 2.0 和 MATLAB 仿真实验表明: 系统阶跃响应调节时间短、无超调, 较好的实现了对他励直流电机的速度控制。基于 DSP 的数字模糊 PID 控制器具有工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 符晓玲, 姜波. 基于 DSP 的数字 PID 控制器设计 [J]. 现代电子技术, 2007, 30 (7): 129—131.
- [2] 林周雄, 梁杰申. 采用 ECN3607 实现对无刷直流电机的控制 [J]. 微计算机信息, 2005, 21 (2): 31—32.
- [3] Hany M Hasanien. FPGA implementation of adaptive ANN controller for speed regulation of permanent magnet stepper motor drives [J]. Energy Conversion and Management, Energy Conversion and Management, 2011, 52 (2): 1 252—1 257.
- [4] 欧阳磊, 黄友锐. 基于模糊 RBF 神经网络的 PID 及其应用 [J]. 计算机工程, 2008, 34 (22): 231—233.
- [5] 张咏军, 王航宇. 基于 BP 神经网络的温度模糊 PID 控制器设计 [J]. 现代电子技术, 2008, 31 (7): 133—135.
- [6] 张彩霞, 张志飞. 模糊神经网络 PID 在三容水箱中的应用 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (10): 137—139.
- [7] 牛培峰, 任娟, 王帅. PID 型自适应模糊控制在锅炉主蒸汽温度控制中的仿真研究 [J]. 热力发电, 2008, 37 (6): 24—27.
- [8] 李全福, 万彦辉, 郭华. 模糊 PID 控制算法在电动舵机控制中的应用 [J]. 微电机, 2007, 40 (12): 28—30, 47.
- [9] 马宁. 自适应神经模糊 PID 控制在电厂过热器温度控制中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2008, 27 (4): 31—33.
- [10] 张宗宝, 周宏甫. 基于 DSP 直流电机速度的模糊控制系统研究 [J]. 现代电子技术, 2008, 31 (10): 57—60.
- [11] 于晶晶. 基于 DSP 交流电机模糊 PID 控制系统的设计 [J]. 大众科技, 2010 (12): 99—100.
- [12] 董丽荣, 董文智. 基于模糊 PID 复合控制算法的电机转速控制 [J]. 包头职业技术学院学报, 2010, 9 (3): 12—13.