

# 模糊 PID 控制在基于 DSP 的伺服控制系统中的应用

## Application of Fuzzy PID Control in DSP – Based Servo Control System

刘玉成 周亚军 (杭州电子科技大学 自动化学院 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对伺服系统的非线性因素及时变性的影响,模糊控制和 PID 控制的各自特点,提出了在基于 DSP 的运动控制器构建的伺服系统中采用模糊 PID 控制算法,来实现对伺服系统的位置进行实时控制,改善系统控制过程的静态、动态性能,最后通过 MATLAB 仿真,结果证明采用该方法使系统达到了较为满意的效果。

**关键词:** 伺服系统 运动控制器 模糊控制 PID 控制 MATLAB

智能化是当前一切工业控制设备的流行趋势,伺服系统作为一种高级的工业控制装置当然也不例外。伺服电机自身具有一定的非线性、强耦合性及及时变性,同时伺服对象也存在较强的不确定性和非线性,加之系统运行时受到不同程度的干扰,因此按照常规 PID 控制策略很难满足高性能伺服系统的要求。近年来,随着控制理论新的发展,尤其是智能控制的先进控制策略和基于传统控制理论的传统控制策略的集成得以实现,加之高速 DSP 处理器运算能力的提高,将先进控制策略和传统的 PID 控制相结合是解决上述问题的一种很好的途径<sup>[1]</sup>。

本文基于自行设计的 DSP 运动控制器,设计了位置、速度伺服控制系统。充分考虑伺服系统的非线性因素及时变性的影响,模糊控制和 PID 控制的各自特点,采用模糊 PID 控制算法,来实现对伺服系统的位置进行实时控制,使该运动控制器在应用中,其控制过程的静态、动态性能得到了改善。

### 1 伺服驱动控制系统

高性能的伺服系统具有位置反馈、速度反馈和电流反馈的三闭环结构形式。其中,电流环和速度环为内环。电流环的作用是:(1)改造内环控制对象的传递函数,提高系统快速性;(2)及时抑制电流环内部的干扰;(3)限制最大电流,使系统具有足够大的加速转矩,并且保障系统安全运行。速度环的作用是增强系

统抗负载扰动的能力,抑制速度波动。位置环的作用是保障系统静态精度和动态跟踪的性能,直接关系到伺服系统的稳定与高性能运行,而且它是反馈主通道<sup>[2]</sup>。从三相伺服电动机的磁链方程和转矩方程的分析可以看出,它具有极强耦合性和严重非线性。图 1 为常见的数控机床进给伺服驱动系统,使用了位置反馈、速度反馈和电流反馈的三闭环结构。

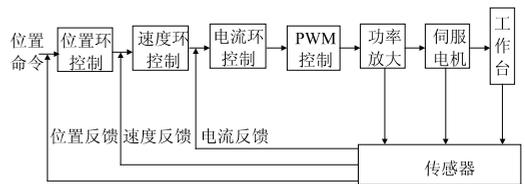


图 1 伺服驱动控制系统图

本系统中使用电机驱动器完成电流环和速度环的控制,外层位置环由运动控制器完成,位置反馈由电机光电编码器给出。

### 2 运动控制器的系统结构

运动控制器采用了 DSP + PCI 的硬件实现形式。DSPTMS320F2812 为主控芯片,该芯片性能优越,比起 TMS320LF2407A 来讲,各项性能指标都有了显著的提高。该芯片资源非常丰富,可大大简化外围电路设计。它强大的运算功能和快速的运算能力,为我们实时完成复杂的控制算法提供了硬件的保证<sup>[3]</sup>。因此,我们在设计算法时,在实时性一定能够满足的条件下,只需

要考虑运动控制的精度,把大量复杂的控制算法固化在 DSP 的 Flash ROM 里面,这样不但提高了系统的控制精度,还使运动控制器具有良好的开放性。运动控制器系统原理图如图 2 所示:

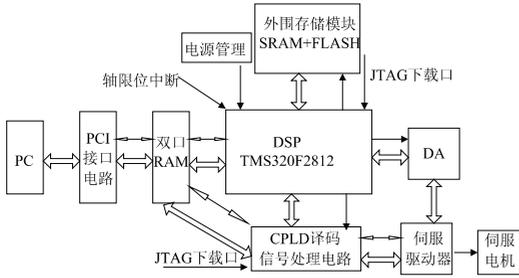


图 2 运动控制器系统原理图

### 3 伺服控制算法<sup>[4,5]</sup>

传统的 PID 控制系统虽然具有稳定、结构简单等优点,但是当被控对象参数发生改变或者受非线性因素影响发生变化时不能随之改变,无法满足高性能、高精度的要求。模糊 PID 控制,是将模糊控制和传统的 PID 控制相结合,在常规 PID 调节器的基础上加上模糊控制环节,是基于模糊推理的 PID 参数自整定。它将传统 PID 控制经验的优点和模糊控制的灵活性、自适应性相结合,可以满足对运动控制系统的变参数、非线性等不利因素的要求。

#### 3.1 PID 控制器结构

在传统 PID 控制的基础上,将控制规则条件和操作用模糊集表示,并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始 PID 参数等)作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应情况,运用模糊推理,即可自动实现对 PID 参数的最佳调整。

模糊 PID 控制器以偏差 e 和偏差变化率 ec 作为输入,可以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求,利用模糊规则在线对 PID 参数进行修改,便构成了模糊 PID 控制器,其结构如图 3。

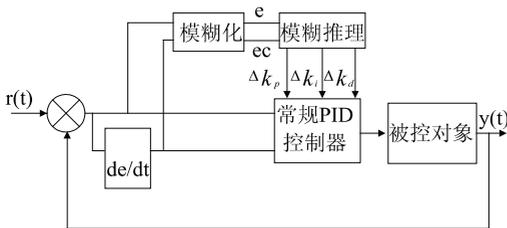


图 3 模糊 PID 控制结构

### 3.2 模糊 PID 参数的自整定原则

传统 PID 控制器的控制规律为:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=0}^k e(k) + k_d ec(k) \quad (1)$$

式中:  $k_p$ ——比例系数

$k_i$ ——积分系数

$k_d$ ——微分系数

PID 参数模糊自整定是找出 PID 的 3 个参数  $k_p, k_i, k_d$  与 e 和 ec 之间的模糊关系,在运行中通过不断检测 e 和 ec,根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改,以满足不同 e 和 ec 时对控制参数的要求,从而被控对象有良好的动、静态性能。

根据参数  $k_p, k_i, k_d$  对系统输出特性的影响情况,可归纳出系统在被控过程中对于不同的偏差 e 和偏差变化率 ec,参数  $k_p, k_i, k_d$  的自整定原则如下:

(1) 当偏差 e 较大时,为了加快系统的响应速度,并防止因开始时偏差 e 的瞬间变大可能引起的微分过饱和而使控制作用超出许可范围,应取较大的  $k_p$  和较小的  $k_d$ ,通常取  $k_i = 0$ 。

(2) 当偏差 e 和偏差变化率 ec 为中等大小时,为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度,  $k_p$  应取小一些;在这种情况下,  $k_d$  的取值对系统影响很大,也应取小一些;  $k_i$  的取值要适当。

(3) 当偏差 e 较小时,为了使系统具有较好的稳态性能,应增大  $k_p, k_i$  值,同时为避免输出响应在设定值附近振荡,以及考虑系统的抗干扰能力,应适当选取  $k_d$ 。其原则是:当偏差变化率 ec 较小时,  $k_d$  取大一些;当偏差变化率 ec 较大时,  $k_d$  取较小的值;通常  $k_d$  为中等大小。

### 3.3 模糊控制器控制规则表的建立及隶属度函数的确定

模糊控制的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验,建立合适的模糊规则表。根据上述 PID 参数  $k_p, k_i$  和  $k_d$  对系统输出特性的影响情况、PID 参数整定原则及专家经验,得到针对  $k_p, k_i, k_d$  三个参数分别整定的模糊规则表。如表 1 所示:

表 1  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的模糊规则

ec							
e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZP	PM/NM/NS	PM/NS/MN	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZP
ZO	PM/NM/ZP	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

在这里我们记  $e$ 、 $ec$ 、 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的模糊子集均为： $\{NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB\}$  七个等级，并将其量化到  $(-5, 5)$  内。 $NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB$  分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。设  $e$ 、 $ec$  和  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  均服从三角形隶属函数曲线分布，因此可得出各模糊子集的隶属度函数曲线。

### 3.4 精确化

模糊控制量的精确化又称解模糊，目前常用的方法有最大隶属度法、中位数法、加权平均法等。其中加权平均法较适合于输出模糊集的隶属度函数是对称的情况，因此，在模糊控制系统中应用较广泛。该法针对论域中的每个元素  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，以它作为待判决输出模糊集合的隶属度的加权系数，即取乘积  $x_i \mu(i)$ ，再计算该乘积和  $\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)$  对于隶属度和的平均值  $x_0$ ，即：

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (2)$$

平均值  $x_0$  便是应用加权平均法为模糊集合求得的判决结果。最后，用输出量化因子乘以  $x_0$  以适应控制要求，从而可得实际量的实际值。

根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型，应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表，查出修正参数代入下式计算：

$$\begin{aligned} k_p &= k_p' + e_i, e_{cip} \\ k_i &= k_i' + e_i, e_{cii} \\ k_d &= k_d' + e_i, e_{cid} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $k_p'$ 、 $k_i'$ 、 $k_d'$  分别为采用常规整定方法得到的  $k_p$ 、

$k_i$ 、 $k_d$  的预整定值。在线运行过程中，控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算，完成对 PID 参数的在线自校正，其工作流程为：入口  $\rightarrow$  取当前采样值  $\rightarrow e(k) = r(k) - y(k) \rightarrow ec(k) = e(k) - e(k-1) \rightarrow e(k-1) = e(k) \rightarrow ec(k)$  模糊化  $\rightarrow$  模糊整定  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d \rightarrow$  计算当前  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d \rightarrow$  PID 控制器输出。

## 4 仿真研究

用于实验的电机参数，我们选取了较为简单的直流电动机参数：220V，136A，1500r/min， $C_e = 0.132V \cdot \text{min}/r$ ，允许过载倍数  $\lambda = 1.5$ ；晶闸管装置放大系数  $K_s = 40$ ；电枢回路总电阻  $R = 0.5\Omega$ ，时间常数  $T_l = 0.03S$ ， $T_m = 0.18$ ；转速给定信号  $U^*_{mn} = 10V$ 。

用 MATLAB 在单位阶跃下分别采用传统的 PID 控制和模糊 PID 控制算法对系统进行仿真<sup>[6]</sup>，仿真结果如图 4、图 5 所示：

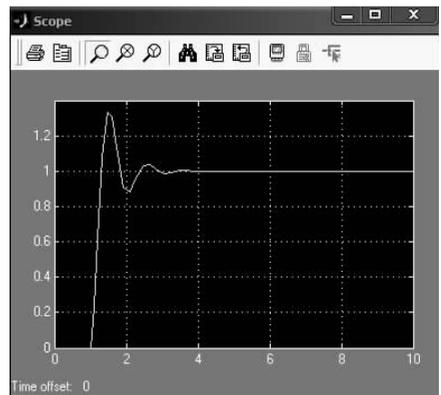


图 4 传统 PID 控制

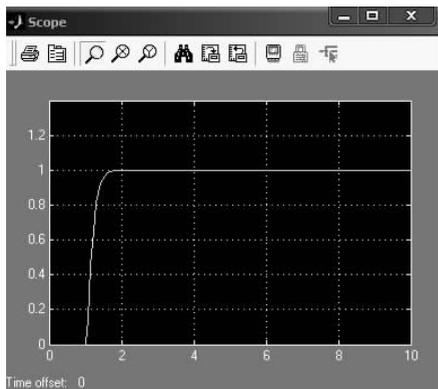


图 5 模糊 PID 控制

## 5 结束语

仿真结果证明了模糊 PID 控制算法较常规 PID 控制有更好的动态特性、控制精度、抗干扰能力,而且具有自适应功能。

虽然模糊 PID 控制用于伺服控制系统的研究已经取得了一些成果,然而,我们也看到先进的设计理论与

落后的设计实践的差距,因为实际生产遇到的非线性及时变性以及不确定性因素将更为复杂,还有不少问题需要解决,控制算法上还有很多地方需要进一步的研究。

## 参考文献

- 1 陈鹏. 基于 DSP 的运动控制器开发及其运动控制算法研究[硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2007.
- 2 韩利群, 王志新, 叶斌. 智能控制理论及应用. 北京: 机械工业出版社, 2008: 85 - 86.
- 3 曾义芳. DSP 基础知识及系列芯片. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 214 - 215.
- 4 刘曙光, 魏俊民, 竺志超. 模糊控制技术. 北京: 中国纺织出版社, 2001: 55 - 72.
- 5 Misir D, Malki H, Chen G. Design and analysis of fuzzy proportional integral derivative controller. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 297 - 314.
- 6 闻新, 周露, 李东江, 等. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用. 北京: 科学出版社, 2001: 10 - 83.