

· 电路与控制 ·

## 光电跟踪伺服系统中的模糊PID控制器设计

胡大军<sup>1,2</sup>, 吴晗平<sup>1,2</sup>, 黄璐<sup>1,2</sup>

(1. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**针对光电跟踪伺服系统性能指标要求提高以及传统控制方法的不足,在系统位置控制环路中采用一种参数可在线整定的模糊PID(比例、积分和微分)控制器。分析其结构和设计原理,介绍参数自整定模糊PID算法的实现。基于Samsung公司推出的ARM7TDMI核的16/32位RISC S3C44B0X平台从硬件和软件方面对控制器进行构建,控制器的自适应能力、控制品质和鲁棒性较好,使光电跟踪伺服系统具有响应快、过渡过程平滑且调节时间短等优点,并且为其在光电领域实际应用中提供了一些参考。

**关键词:**光电跟踪;伺服系统;模糊控制;S3C44B0X处理器

中图分类号:TN710.6

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)05-0072-05

## Design of Fuzzy PID Controller for Electro-Optical Tracking Servo-System

HU Da-jun<sup>1,2</sup>, WU Han-ping<sup>1,2</sup>, HUANG Lu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Aiming at performance requirements of electro-optical tracking servo-system increasing and the lack of traditional control method, the parameter self-regulation fuzzy PID (proportion, integral and differential) controller is used in the position control loop for servo-system. The structure and design principle are analyzed, and the parameter self-tuning fuzzy PID algorithm is also introduced. Based on the ARM7TDMI 16/32 bit RISC S3C44B0X processor platform produced by Samsung company, the controller is build from hardware and software. The controller has adaptive capacity, better control quality and robustness, so that the electro-optical tracking servo-system has the advantages including the quick response, smooth transition process and short conditioning time. It provides some references for the practical application in the field of optoelectronic.

**Key words:** electro-optical tracking; servo-system; fuzzy control; S3C44B0X processor

由于被测目标机动性强及背景复杂等特点,对光电跟踪设备的响应时间、过渡过程、跟踪精度都提出了更高的要求。目前,国内外主要的控制方法还多以经典控制方法为主,各种改进的方法都在此基础上针对系统中影响较大的因素加以补偿<sup>[1]</sup>。然而光电跟踪系统中存在较大的延迟环节、功放饱和、电机死区等,是一个强非线性、不确定性和难于精确建

模的机电控制系统<sup>[2]</sup>。光电跟踪伺服系统工程实践中使用的经典PID控制技术难以满足要求。近年来出现了许多将智能控制和PID控制相结合的控制方法,尤其是将模糊控制引入到常规PID控制中。这些方法大多通过MATLAB建立模型进行仿真分析,在理论上证明了模糊PID控制器的可行性,但很少真正将其应用在工程实践中。文中将讨论应用于光电跟踪

收稿日期:2011-07-31

作者简介:胡大军(1985-),男,湖北云梦县人,硕士研究生,主要研究方向为光电控制与检测技术;吴晗平(1964-),男,湖南澧县人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。

伺服系统的参数自整定模糊PID控制器设计。

### 1 光电跟踪伺服系统结构

光电跟踪控制系统的工作原理是利用跟踪传感器确定目标的位置,将目标相对于光轴的角度偏差送至伺服控制部分,伺服控制部分根据偏差的大小和方

向驱动伺服电机使跟踪架转动,最终使偏差为零,实现对目标的光电自动跟踪。其伺服控制部分是一个位置跟随系统,一般由方位和俯仰2套独立的跟踪伺服系统组成。2套系统结构基本相同,一般是由电流环、速度环及位置环构成三环调节系统。其结构如图1所示。

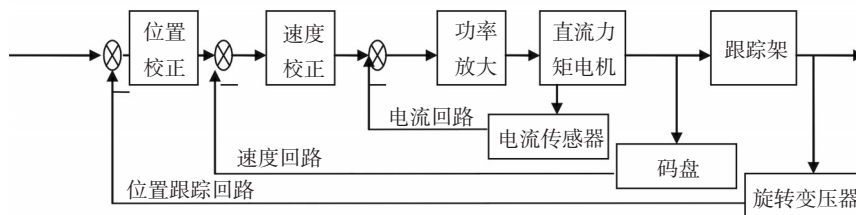


图1 光电跟踪伺服系统结构框图

3个环节性能的最优化是整个伺服系统高性能的基础,而外环性能的发挥依赖于系统内环的优化。内部为电流环,它是高性能伺服系统构成的根本,直接影响整个系统的动态性能<sup>[3]</sup>。随着光学、电子、计算机等技术的发展,环路中测量、功率放大以及执行部件基本都很成熟,精度已达到很高要求<sup>[4]</sup>。各个环路的优化主要是控制器的设计:电流环和速度环采用模拟控制方法,其控制器利用超前-滞后补偿方法设计;位置环采用数字控制方法,即模糊自整定PID控制来校正。在具体实现模糊自整定PID控制器时,光电跟踪伺服系统结构框图中需要增加A/D以及D/A转换环节。

### 2 模糊自整定PID参数控制系统结构及分析

#### 2.1 模糊自整定PID参数控制系统结构

模糊自整定PID参数控制系统结构主要由参数可调整PID和模糊控制系统两部分组成,其结构如图2所示<sup>[5,6]</sup>。

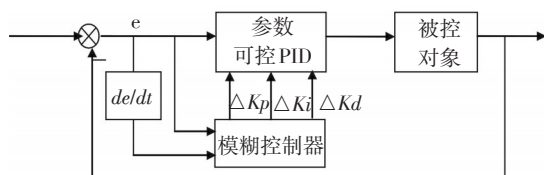


图2 模糊自整定PID参数控制系统结构

参数可调整PID完成对系统的控制,模糊控制系统实现对PID的3个参数进行在线自动调整。通常采用计算机实现的PID控制算法可以用以下函数表示

$$U(n) = K_p \{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \} \quad (1)$$

式中,  $U(n)$ 、 $e(n)$  分别为第  $n$  个采样时刻控制器输出量和输入量;  $T$  为采样周期;  $T_i$ 、 $T_d$  分别是积分和微分时间常数;  $K_p$  为比例增益。由式(1)可以得到控制器输出第  $n$  个周期时刻控制量的  $U(n)$  和第  $n-1$  个周期时刻的控制量  $U(n-1)$  之间的增量为

$$\begin{aligned} \Delta U(n) &= U(n) - U(n-1) = \\ & K_p \{ e(n) - e(n-1) + (T/T_i) [e(n) - e(n-1)] + (T_d/T) \times \\ & [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \} = \\ & C_1 e(n) + C_2 e(n-1) + C_3 e(n-2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $C_1 = K_p(1 + T_d/T)$ ;  $C_2 = K_p(T/T_i - 2T_d/T - 1)$ ;  $C_3 = K_p T_d/T$ 。

式(2)是一个增量式,计算量少而实时性强。但它不能实时在线调整参数,修改也不方便,并且在非线性范围内和扰动较大的情况下控制效果不理想。应用模糊集合原理建立3个参数与系统误差绝对值  $|e|$  和误差变化绝对值  $|ec|$  之间的模糊关系,并用模糊控制器根据不同的  $|e|$  和  $|ec|$  在线自整定PID参数,以满足不同时刻偏差和偏差变化对PID参数整定的要求,从而使被控对象具有良好的动态和静态特性。

## 2.2 模糊控制输入变量的选择和设计

由光电跟踪伺服系统的结构可以看出,模糊控制器的原始输入只有一个,那就是跟踪传感器输出的目标瞄准误差角,利用数字微分的方法求出误差角的变化率作为模糊控制器的第二个输入变量。模糊控制器的输出量为PID控制器3个参数的修正值 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。

将模糊控制器的输入语言变量 $e$ 、 $ec$ 和输出语言变量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 对应的语言值模糊子集均选取为{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},并简记为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。基本论域是根据模糊控制器输入输出变量的实际范围确定的,其选取可以通过仿真过程进行调整。隶属函数一般选为三角函数,其特点是灵敏度高且在论域范围内等距离、均匀分布<sup>[7]</sup>。

## 2.3 PID参数自整定原则及模糊控制规则的建立

有关的文献归纳了系统在被控制过程中对于不同的 $|e|$ 和 $|ec|$ ,PID参数 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 的整定原则<sup>[2,7-9]</sup>。

(1) 当 $|e|$ 较大时,为使系统具有较好的快速跟踪性能,应取较大的 $\Delta K_p$ 与较小的 $\Delta K_d$ ,同时为避免系统响应出现较大的超调,应对积分作用加以限制,通常取 $\Delta K_i = 0$ 。

(2) 当 $|e|$ 处于中等大小时,为使系统响应具有较小的超调, $\Delta K_p$ 应取得小些。在这种情况下, $\Delta K_d$ 的取值对系统响应的影响较大, $\Delta K_i$ 的取值要适当。

(3) 当 $|e|$ 较小时,为使系统具有较好的稳定性,  $\Delta K_p$ 与 $\Delta K_i$ 均应取得大些。

同时为避免系统在设定值附近出现振荡, $\Delta K_d$ 值的选择根据 $|ec|$ 来确定:当 $|ec|$ 值较小时, $\Delta K_d$ 取大一些;当 $|ec|$ 值较大时, $\Delta K_d$ 取较小值,通常 $\Delta K_d$ 为中等大小。

模糊控制器的控制规则就是对参数 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 调节规则。根据上述的参数整定原则及工程设计人员的技术知识和实际操作经验,可列出相应的参数调节规则,如表1~表3所示<sup>[6,8,10-12]</sup>。在实际系统调试时,控制规则可进行进一步的修正。

表1  $\Delta K_p$ 的模糊调整规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PM	PM	PS	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
ZO	PS	PS	ZO	ZO	ZO	NM	NB
PS	NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB	PB	PB

表2  $\Delta K_i$ 的模糊调整规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NS
PM	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS	NM
PB	ZO	NS	NS	NS	NM	NM	NB

表3  $\Delta K_d$ 的模糊调整规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	PM	PB	NS	NB	NB	NB
NM	PM	PM	PM	PM	NB	NS	ZO
NS	PS	PS	PS	PS	PS	PM	PB
ZO	PB	PM	PS	ZO	PS	PM	PB
PS	PB	PM	PS	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	NS	NM	NS	ZO	PS	PM
PB	NB	NB	NB	NS	PS	PM	PB

## 2.4 参数自整定模糊PID算法

某一时刻系统采样得到误差值 $e(n)$ ,并计算出误差变化率 $ec(n)$ ,经过模糊量化后,求出各模糊子集的隶属度,再按照模糊控制规则,应用最大最小合成法进行推理得出相应的输出。通过式(3)得出模糊子集的隶属度。

$$\begin{cases} \min\{\mu(e), \mu(ec)\} = \mu(\Delta K_{pj}) \\ \min\{\mu(e), \mu(ec)\} = \mu(\Delta K_{ij}) \\ \min\{\mu(e), \mu(ec)\} = \mu(\Delta K_{dj}) \end{cases} \quad (3)$$

模糊系统输出值是3个模糊推理结果,需要进行反模糊化,得到精确的推理结果。一般采用重心法进行解模糊运算,计算输出范围内整个采样点的重心。在不同  $e$  和  $ec$  时,PID 控制器修正参数的输出值计算如下<sup>[13,14]</sup>

$$\begin{cases} \Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} \Delta K_{pj} \mu(\Delta K_{pj})}{\sum_{j=1}^{49} \mu(\Delta K_{pj})} \\ \Delta K_i = \frac{\sum_{j=1}^{49} \Delta K_{ij} \mu(\Delta K_{ij})}{\sum_{j=1}^{49} \mu(\Delta K_{ij})} \\ \Delta K_d = \frac{\sum_{j=1}^{49} \Delta K_{dj} \mu(\Delta K_{dj})}{\sum_{j=1}^{49} \mu(\Delta K_{dj})} \end{cases} \quad (4)$$

因上述输出值是模糊量,还需要分别乘以各自的比例因子  $K_{up}$ 、 $K_{ui}$  及  $K_{ud}$ ,得到PID 控制器修正参数的精确值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。将其代入式(5)计算即可实现对PID 控制器参数的一次调整,即

$$\begin{cases} K_p(n) = K_p(n-1) + \Delta K_p \\ K_i(n) = K_i(n-1) + \Delta K_i \\ K_d(n) = K_d(n-1) + \Delta K_d \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $K_p(n)$ 、 $K_i(n)$  和  $K_d(n)$  均是  $n$  时刻PID 控制器的参数值;  $K_p(n-1)$ 、 $K_i(n-1)$  和  $K_d(n-1)$  均是  $n-1$  时刻PID 控制器的参数值。

### 3 参数自整定模糊PID 控制器设计

#### 3.1 控制器的硬件设计

伺服控制器功能的实现是整个控制系统的核心,除了主要完成系统所需要的参数自整定模糊PID 控制算法,还要负责与上位机进行实时通讯及完成系统所需的其他各项控制功能。伺服控制器选择了 Samsung 公司推出的基于 ARM7TDMI 核的 16/32 位 RISC 处理器 S3C44B0X。该款芯片有高达 66 MHz 的工作频率和充足的运算能力。其片上资源也很丰富,比较有利于系统的模块化设计。各种功能模块硬件

设计主要包括 S3C44B0X 最小系统(存储器系统、JTAG 接口、晶振电路、复位电路、电路)以及串口通信模块、IIC 总线的 EEPROM 模块、双口 RAM、键盘模块等。控制器硬件结构图如图 3 所示。

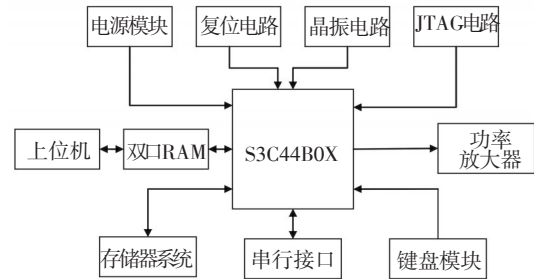


图3 控制器硬件结构图

S3C44B0X 最小系统结构保证系统的基本运行所需要,是其他扩展功能实现的前提条件。双口 RAM 是上位机和 S3C44B0X 实时通信的桥梁,能够进行大量数据传输。图像传感器所形成的图像借助它在上位机上面实时显示。串口一般采用 RS232,用于 S3C44B0X 系统与其他设备短距离双向串行通讯。在要求抗干扰性较高及远距离传输的情况下,可以采用 RS422/RS485 串行接口。存储器系统包括 SDRAM、Flash 及 EEPROM。SDRAM 内存作为系统运行时的主要区域;Flash 内存可存放调试好的用户程序或其他在系统掉电后需要保存的用户数据等;EEPROM 则存储少量的需要长期保存的用户数据。控制量经参数自调整模糊PID 控制器获得后通过 S3C44B0X 内部的 PWM 模块输出,再经过功率放大器驱动电机。

#### 3.2 控制器的软件设计

控制系统的软件设计分为上位机和下位机两部分。控制系统上位机交互界面采用 VC++ 编写,利用双口 RAM 实时与下位机进行通讯,使方位、俯仰电机的运行状态及控制命令都通过该通道与 S3C44B0X 处理器进行通信,可对电机运行时的各种参数进行调整和显示。

下位机程序按照模块化的程序思想进行设计,可以分为几个不同的功能模块:主程序模块,主要完成系统的各项初始化工作,包括芯片初始化,中断初始化等;模糊PID 控制算法子程序模块;转速、方位检测模块;串行通讯模块;故障处理模块等。

模糊PID 控制算法程序模块是整个控制系统软

件设计的重点和关键部分。其在一个周期内的流程图如图4所示。

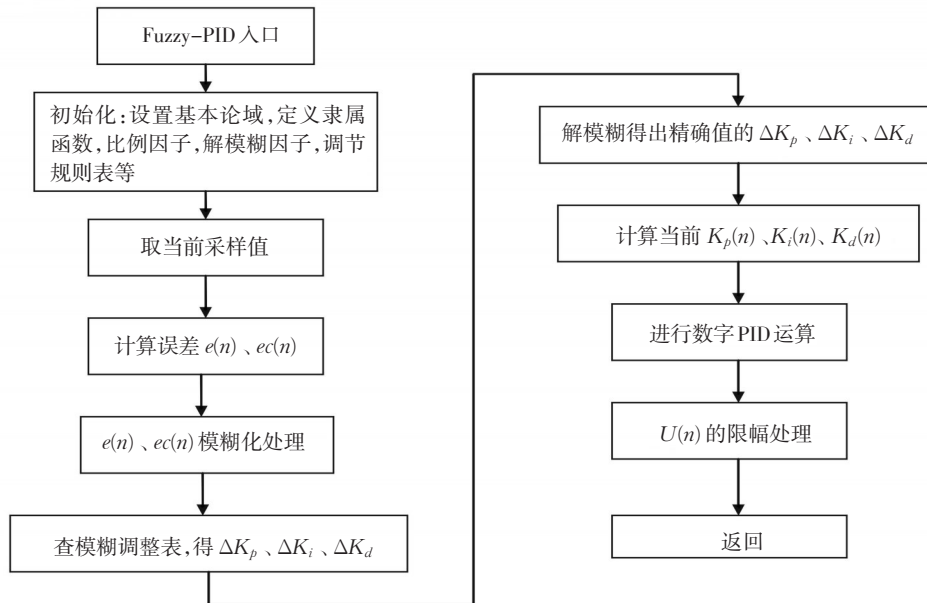


图4 Fuzzy-PID子程序流程图

#### 4 结束语

随着光电跟踪系统响应速度和跟踪精度的要求不断地提高,经典的PID控制技术已不能满足要求,采用新型的控制算法是解决问题的有效途径之一。随着高性能处理器的发展,基于嵌入式系统设计的参数自调整模糊PID控制器的实现也较容易,使其应用到光电跟踪伺服领域变得更多。在对这种控制算法的稳定性和可靠性进一步完善后,具有较好的应用价值前景,使光电跟踪系统具有低成本、智能化、轻型化特点。

#### 参考文献

- [1] 吴晗平.光电系统设计基础[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 陈益,薄煜明,邹卫军.模糊自适应PID控制在高精度光电跟踪伺服系统中的应用[J].火炮发射与控制学报,2008(4):33-36.
- [3] 庞新良,范大鹏,滕旭东,等.数字式机载光电伺服系统的实现[J].光电工程,2007,34(3):10-15.
- [4] 胡大军,吴晗平,张焱.基于PLC和无线传感器网络的光电监测系统构建[J].应用光学,2010,31(2):198-202.
- [5] 陶永华.新型PID控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [6] 张化光,何希勤.模糊自适应控制理论及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [7] 王志明,龚振邦,袁晶,等.基于模糊PID位置控制的气伺服系统[J].机电工程,2009,26(10):93-95,108.
- [8] 石辛民,郝整清.模糊控制及其MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [9] 黄峰,汪岳峰,顾军,等.模糊参数自整定PID控制器的设计与仿真研究[J].光学精密工程,2004,12(2):235-239.
- [10] 侯宏录,周德云,王伟,等.模糊PID控制在光电跟踪控制系统中的应用[J].光电工程,2006,33(5):12-16.
- [11] 席爱民.模糊控制技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [12] 乔志杰,王维庆.模糊自适应控制器的设计及其仿真[J].自动化与仪表,2008,(1):26-29.
- [13] 王朝宁,姜学东,马立刚.ARM7参数自整定模糊PID控制器的仿真及设计[J].机械与电子,2010,(4):65-69.
- [14] 姬伟,李奇.自适应模糊PID控制器在跟踪器瞄准线稳定系统中的应用[J].控制理论与应用,2008,25(2):278-282.