

一种角度随动系统的模糊PID控制器设计与实现

角度随动系统是控制执行电动机对输入角度指令的准确跟踪,并保持误差在指定范围内的伺服控制系统。设计了一款角度随动系统的物理样机,包括两台电动机、驱动器、倾角传感器和嵌入式控制系统。一个8051单片机控制主动电动机做随机运动,角度传感器测量主动电动机的转动角度作为输入指令发送给Mini2440,控制器控制执行电动机做跟随运动。基于嵌入式Linux设计了角度随动系统的模糊PID控制器。模糊控制器以系统状态的变化为输入量,对输入数据进行模糊决策,计算出控制量并输出给执行电动机,使其输出角度保持在与输入电动机相对应的跟随状态。对该系统进行了计算机仿真实验,验证了所设计的角度随动系统模糊控制器的正确性。

宋 原 邢 斌/北京邮电大学自动化学院

0 引言

随动系统是一种反馈控制系统,其输出量一般是机械位移、速度或加速度。它的主要目的是使被控量按与输入信号同样的规律变化并与输入信号的误差保持在指定范围内。这种控制系统最先应用在军事领域,且在军事领域的应用最为广泛,如导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统等^[1-2]。

以微控制器为控制核心,在其基础上搭建高性能的数字伺服系统已经成为随动控制系统未来发展的必然趋势^[3]。与模拟伺服系统相比,数字伺服系统在许多性能指标上已远高于后者。此外,采用高性能的微控制器设计随动系统使各种复杂控制算法更加易于实现,如神经

网络算法和模糊控制算法^[4]。

角度随动系统中的角度指令是一个经常变化的随机变量,它要求输出量能够准确跟随给定量的变化,所以输出响应的快速性、灵活性和准确性成了角度随动系统的主要性能指标。

PID控制器(比例-积分-微分控制器)是一个在工业控制应用中常见的反馈回路部件,由比例单元P、积分单元I和微分单元D组成,作为最早实用化的控制器已有近百年历史,现在仍然是应用最广泛的工业控制器。

PID参数的整定方法很多,但大多数是以对象特性为基础的。专家PID控制器将常规PID控制与先进的专家系统相结合,能够实现系统的最优控制。由于操作者经验和控制中间量不易准确描述,专家PID方法受到局限。模糊控制理论为解决这个问题的一个有效途径,运用模糊推理自动实现对PID参数的最佳调整,这就是模糊自适应PID控制。

本文首先根据电动机的平衡方程推导出电动机的传递函数;然后设计模糊控制器以获得PID控制的参数;最后对设计的模糊PID控制器进行了计算机仿真,并基于嵌入式Linux设计了角度随动系统的模糊PID控制器。同时设计了角度随动系统的物理样机^[5],并对设计的控制器进行了仿真实验验证,实验结果证明了所设计的模糊PID控制器的正确性^[6]。

1 直流电动机数学模型

直流电动机是电能转换装置,能将



宋 原/工程师

关键词/Keywords

角度随动·
伺服系统·
模糊控制·

北京高等学校青年英才计划项目(YETP0452)。

电能转换为电动机转子的机械能。为了对电动机的控制系统参数进行定量分析,必须首先建立电动机的动态数学模型,因此直流电动机数学模型的建立是整个研究课题的基础。

为了建立电动机的动态数学模型,需要首先列出电动机的电气和机械平衡方程,然后对其进行拉普拉斯变换得到电动机的传递函数,再将其离散化转化为差分方程的形式。

在直流电动机与电源接通的情况下,当负载恒定时,直流电动机将以恒定的速度运动,即处于稳定运行状态。该状态下电动机的电枢电动势、功率以及转矩保持着平衡关系。

电动机的电压平衡方程和转矩平衡方程表达式为

$$\begin{cases} U_a = E_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \\ J_a \frac{d\omega}{dt} = T_a - T_L \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_a 为电动机的电枢电压; i_a 为电动机的电枢电流; L_a 为电枢电感; R_a 为电动机的电枢电阻; E_a 为电动机电枢绕组的感应电动势, $E_a = C_e \omega$, C_e 为电动机的电动势常数, ω 为电动机转速; J_a 为电动机转子的转动惯量; T_a 为电动机的电磁转矩, $T_a = C_T i_a$, C_T 为电磁转矩常数; T_L 为折算阻力矩,空载下阻力矩很小,可忽略不计。

将上述方程联立,得到空载下输入输出的二阶线性微分方程,即

$$\frac{J_a L_a}{C_T} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{J_a R_a}{C_T} \frac{d\omega}{dt} + C_e \omega = U_a \quad (2)$$

令初始条件为零,对式(2)两边进行拉普拉斯变换,得到传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{1/C_e}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1} \quad (3)$$

式中, T_a 为电动机的电磁时间常数, $T_a = L_a/R_a$; T_m 为电动机的机电时间常数, $T_m = J_a R_a / (C_e C_T)$ 。

角度随动系统选择冯哈勃2342空心杯减速电动机,该电动机自带精密行星减速箱和光电编码器,准确度满足角度随动系统的要求。首先实际测量得到电动机的电枢电阻、电枢电感和转子转

动惯量,而电动势常数、电磁转矩常数等参数从电动机数据手册上查得。

代入电动机的具体参数之后得到冯哈勃2342电动机的传递函数为

$$H(s) = \frac{7.463}{0.0002202s^2 + 0.006s + 1} \quad (4)$$

在实际工程中,计算机实时控制均为离散系统,因此需要将传递函数转化为差分方程的形式。使用Matlab软件对式(4)进行 z 变换,得到电动机的差分方程为

$$y(k) = 1.969y(k-1) - 0.9731y(k-2) + 0.01679u(k) + 0.01663u(k-1) \quad (5)$$

式中, $y(k)$ 、 $y(k-1)$ 和 $y(k-2)$ 分别是电动机当前、上一时刻和上上一时刻的角度; $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 分别为控制器当前输出和上一时刻的输出。

2 模糊PID控制器的设计

2.1 PID控制器设计

常规的PID控制器具有算法简单、鲁棒性好以及可靠性高的优点,因此被广泛应用在工业控制中。PID控制是一种基于误差的反馈控制,其控制框图如图1所示。图中, θ_d 为电动机理想转角; θ 为电动机实际转角; e 为角度误差, $e = \theta_d - \theta$; u 为控制器输出。

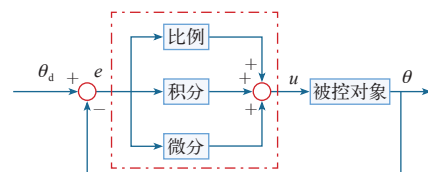


图1 PID控制系统结构

PID控制器输出 u 可表示为

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

k_p 是比例环节的放大系数,可加快系统的响应速度,提高系统的调节准确度,比例系数越大,调整速度越快,但是太大会造成系统不稳定,太小会导致系统调节时间过长。

k_i 是积分环节的时间常数,最主要作用是消除

系统的稳态误差，积分常数越大，稳态误差消除的越快，但是过大会产生积分饱和现象，过小将难以消除稳态误差，影响系统调节准确度。

k_D 是微分环节的时间常数，合适的微分系数可以减少超调和调节时间，但是过大会降低系统的抗干扰能力。

式(6)为连续系统PID控制器，而在计算机控制中，一般必须将模拟信号转变为数字量方可进行下一步的计算与处理，即转变为数字PID控制器。数字PID控制器中，控制率采用数值逼近的方法，假设采样周期足够小，则用求和代替积分，用差分代替微分，即式(6)转化为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_D [e(k) - e(k-1)] \quad (7)$$

2.2 模糊PID控制器

PID控制系统中， k_p 、 k_i 和 k_D 三个参数的整定对系统的反应速度、稳态误差和稳定性有很大的影响，因此选择合适的参数至关重要，这也是PID控制系统设计的核心。三个参数需要根据被控对象的自身特性来确定，其参数整定较为复杂，通常由经验丰富的技术人员在线整定。但是如果被控系统具有较大的非线性或时变性，则固定的PID参数无法满足系统的控制要求，因此需要引入自适应模糊PID控制。

自适应模糊PID控制器以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入，利用模糊控制规则对PID参数进行在线修改，以满足不同时刻 e 和 ec 对PID参数自整定的要求。

PID参数模糊自整定是找出PID的三个参数 k_p 、 k_i 、 k_D 和 e 、 ec 之间的模糊关系，在程序运行中根据模糊控制规则通过不断检查 e 、 ec 对其进行在线修改，以满足不同的 e 和 ec 对控制参数的要求，从而使被控对象有更好的动态和静态性能。

下面针对角度随动系统设计模糊PID控制系统，在该系统中，将误差通过模糊控制器为PID控制器整定出相应的参数，从而控制从动电动机的转动。控制系统的结构如图2所示。

图中， θ_d 为输入电动机的转角，由角度传感器

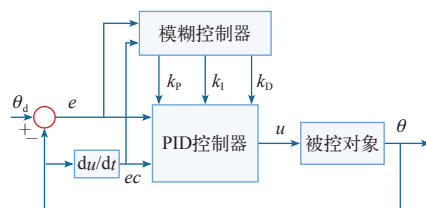


图2 控制系统结构

测得； θ 为从动电动机的实际转角； $e = \theta_d - \theta$ 为角度误差， e 经过微分后得到误差变化率 ec ； k_p 、 k_i 和 k_D 为模糊控制器的输出； u 为作用于从动电动机的转角指令。

在模糊控制器中，输入和输出的论域都定义为 $[-3, 3]$ ，在该论域中定义7个语言词集，即{“正大”，“正中”，“正小”，“零”，“负小”，“负中”，“负大”} = {PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB}，每个词语对应一个隶属函数，隶属函数采用高斯基函数，即

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-a_i)^2}{b_i^2}} \quad (8)$$

式中， a_i 为函数的中心值； b_i 为函数的宽度； e 、 ec 、 k_p 、 k_i 和 k_D 的论域为 $c_i \times [-3, 3]$ ；对应的高斯基函数的 a_i 值为 $c_i \times \{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$ ，对应的 b_i 值为 $\{4, 4, 3, 2, 1, 2, 4\}$ ，其中 $c_i = \{2, 1, 0.8, 0.3, 1\}$ 。模糊隶属函数的形状和分布如图3所示。

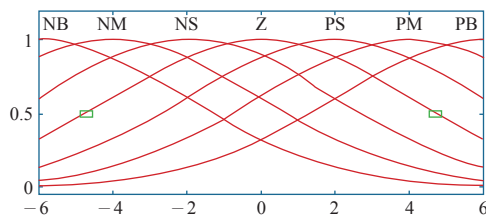


图3 隶属度函数的形状和分布

k_p 、 k_i 和 k_D 的模糊控制规则如表1~表3所示。

3 计算机仿真

设置仿真步长为0.1 s，仿真时间为10 s。设置PID三个参数初值分别为 $k_p = 0.06$ ， $k_i = 0.05$ ， $k_D = 0.07$ ，进行控制器阶跃响应仿真实验。

首先对常规PID控制器进行仿真，其仿真曲线如图4所示。由图4可以看出，PID控制器在系统运行初期有一定的振荡，在0.8 s时最大超调量为

表1 k_p 模糊控制规则表

<div>ec</div> <div>k_p</div>								
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e								
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2 k_i 模糊控制规则表

<div><div>ec</div><div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div><div></div><div></div><div></div></div></div></div></div></div></div></div></div></div>								
		k_i	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表3 k_D 模糊控制规则表

<div>ec</div> <div><div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div>		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
e	k_D	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NB	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	ZE	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	PB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB

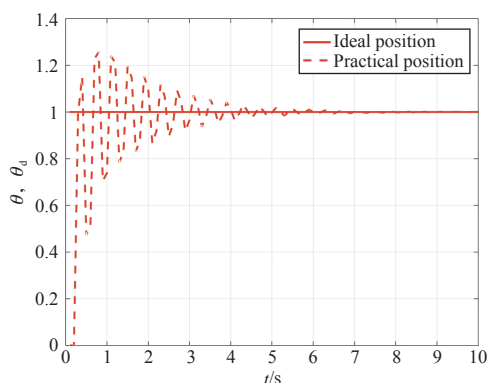


图4 常规PID控制器仿真曲线

25.73%，并在5 s后输出结果接近于1，但其后也有微小振动。

然后对自适应模糊PID控制器进行仿真，其仿真曲线如图5所示。由图5可以看出，自适应模糊PID控制器在系统运行初期振荡较少，在0.5 s时最大超调量为8.75%，并在1.5 s后输出结果稳定于1。

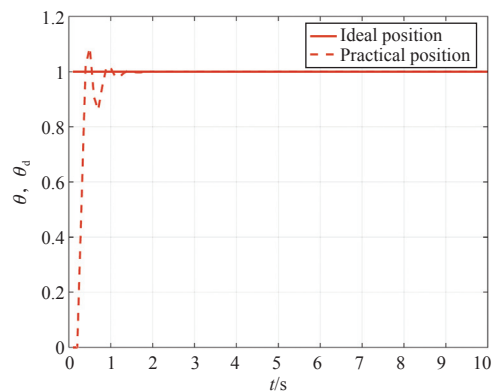


图5 自适应模糊PID控制器仿真曲线

由以上仿真对比可以看出，在设计合适的模糊规则之后，自适应模糊PID控制器较常规的PID控制器收敛速度更快，超调量更小。当系统具有较大的非线性和时变性时，自适应模糊PID控制器的优势会更加明显。

为了验证控制算法的有效性，对该自适应模糊PID控制器进行正弦曲线跟踪仿真，其仿真结果如图6所示。

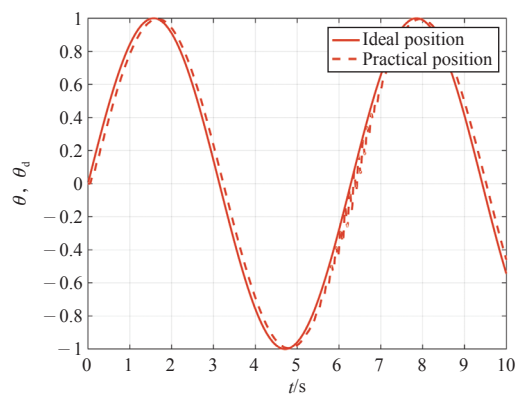


图6 跟踪正弦运动仿真

4 角度随动系统实验

设计了一种角度随动实验平台，系统由C8051单片机向其传输一个未知的输入信号，作为角度

随动的输入，通过固定在电动机上的倾角传感器对角度转动情况进行测量，测量的数据传输给带有模糊控制程序的Mini2440嵌入式开发板，由其对数据进行处理，再将自适应模糊PID控制器输出发送给执行电动机驱动器进行控制，以期达到角度随动的目的。其测控系统如图7所示。

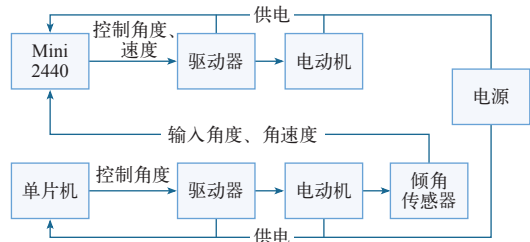


图7 角度随动系统结构

为了实现上述测控系统，本文选用了直流电动机、直流电动机驱动器、C8051F040和Mini2440等来构建该测控系统。其选型如表4所示。

表4 测控系统选型表

器件名称	型号
控制器	C8051F040
控制器	Mini2440
驱动器	TB6600
直流电动机	Faulhaber2342
倾角传感器	Mpu6050
电源	NES-100-24

将上表中选型器件按照图7中所述原理进行搭建，获得整体物理样机如图8所示。



图8 角度随动实验平台

基于设计的自适应模糊PID控制器编写

Mini2440嵌入式Linux程序，定时读取MPU6050传感器的角度值和从动电动机的当前角度值，经控制器处理后将控制输出发送给从动电动机驱动器。从上位机及物理样机上可以观察到从动电动机能够跟随主动电动机的角度，完成随动动作。

5 结束语

设计了角度随动系统实验平台，实验平台由嵌入式Linux开发板、单片机控制器、MPU6050倾角传感器、电动机和驱动器等组成。

首先计算得到所选电动机的传递函数，然后离散化得到用于控制系统的差分方程。针对常规PID控制器参数整定较为复杂的问题，基于模糊控制原理设计了自适应模糊PID控制器。对设计的自适应模糊PID控制器和常规的PID控制器进行了Matlab仿真对比，仿真结果表明自适应模糊PID控制器较常规PID控制器收敛速度更快，超调量更小，验证了设计的自适应模糊PID控制器的正确性。

参考文献

[1] 张维威. 基于模糊控制的直流调速系统仿真研究[J]. 企业技术开发, 2010 (17): 18-19.

[2] 赵修平, 王天辉, 林琨山, 等. 导弹发射装置伺服系统模糊PID控制研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40 (3): 63-66.

[3] 雷金莉. 无刷直流电机模糊PI控制系统建模与仿真[J]. 现代电子技术, 2012, 18 (6): 161-163.

[4] 李勇, 王益龙, 李社伟, 等. 应用于角度随动系统的同步相敏解调电路[J]. 微特电机, 2007 (2): 18-19.

[5] 孙健, 张国玉, 刘大勇. 基于C8051单片机的步进电机控制系统[J]. 仪器仪表用户, 2009 (2): 29-30.

[6] 崔鹏. 基于模糊控制算法的PLC直流电动机调速系统研究[J]. 电气应用, 2015 (16): 126-131.

(收稿日期: 2016-03-11) EA