

# 模糊控制在非线性摩擦环节中的应用

## The application of Fuzzy controller in the nonlinear friction

(1.中国科学院研究生院 2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 汪永阳<sup>1,2</sup> 戴明<sup>2</sup> 宋悦铭<sup>2</sup>

WANG Yong-yang DAI Ming SONG Yue-ming

**摘要:** 在高精度、超低速伺服系统中,由于非线性摩擦环节的存在,使系统的动态及静态性能受到很大程度的影响,主要表现为低速时出现爬行现象,稳态时有较大的静差或出现极限环振荡;由于传统的 PID 控制很难解决伺服系统中的非线性问题,因而不能适用于高精度、超低速伺服系统;本文通过引入模糊自适应整定 PID 控制,利用模糊规则在线调整比例、积分、微分环节,使系统具有一定的智能,从而非常明显的改善伺服系统的静态及动态性能。

**关键词:** 模糊控制;非线性摩擦;自适应;PID

**中图分类号:** TP273+.4 **文献标识码:** A

**Abstract:** In the system of high precision and low speed, Because of the existence of the nonlinear friction, the static and dynamic performance of the servo system is very bad, such as stick slip, hunting, large error and so on, Because the traditional control of PID is hard to solve the nonlinear problem of the servo system, so this paper begins to introduce a new control method which is named adaptive fuzzy PID, It utilizes the rule of the fuzzy control to adjust the parameter of proportion, integral and differential on line, So this control method has some intelligence to improve the static and dynamic performance of the servo system.

**Key words:** fuzzy control; nonlinear friction; adaptive; PID

### 1 引言

摩擦现象是一种复杂的、非线性的、具有不确定性的自然现象,摩擦学的研究表明,人类目前对于摩擦的物理过程的了解还只停留在定性认识阶段,无法通过数学方法对摩擦过程给出精确描述,尤其是静态摩擦,正是由于摩擦的这种特性,给调试高精度、超低速伺服系统带来很大的困难。

由于模糊规则能够非常好的控制非线性被控对象,同时具有较好的鲁棒性,因此近几年来模糊控制被得到广泛的应用,包括在光电跟踪伺服系统中,人们同时也尝试着利用纯模糊规则来调试超低速伺服系统,但是纯模糊控制只是将误差、误差变化量及控制量分成有限个区间,很难克服模糊控制器本身的继电器特性,因而纯的模糊控制很难满足伺服系统的一些性能指标,特别是稳态误差以及稳态特性,它只能对伺服系统起到一个粗调的作用,若想既要克服伺服系统的非线性摩擦,又要保证伺服系统的动态及稳态性能,则必须将模糊控制与传统的 PID 控制结合起来,引入模糊自适应整定 PID 控制。

## 2 模糊控制及非线性摩擦环节对于伺服系统的影响

### 2.1 模糊控制

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制,其基本概念是由美国加利福尼亚大学著名教授查德(L.A.Zadeh)首先提出的。

模糊控制的基本原理框图如图 1a 所示。它的核心部分为模糊控制器,如图中点化线框中所示,模糊控制器的控制规律由计算机的程序实现。实现一步模糊控制算法的过程描述如下:微机经中断采样获取被控制量的精确值,然后将此量与给定值比较得到误差信号 E,一般选误差信号 E 作为模糊控制器的一个输入量。把误差信号 E 的精确量进行模糊化变成模糊量。误差 E 的模糊量可用相应的模糊语言表示,得到误差 E 的模糊语言集合的一个子集  $e$  ( $e$  是一个模糊矢量),再由  $e$  和模糊控制规则  $R$  (模糊算子)根据推理的合成规则进行模糊决策,得到模糊控制量  $u$  :

$$u = e \circ R \quad (1)$$

最后把模糊控制量  $u$  通过解模糊化转换成精确的控制量来驱动被控对象。

如图 1b 所示,为以误差 E、误差变化 EC 及控制量 U 为模糊变量,采用关系词 if A and B then C 构成的模糊规则,解模糊采用马丹尼(Mamdani)极小运算法所构成的模糊控制器仿真结果。

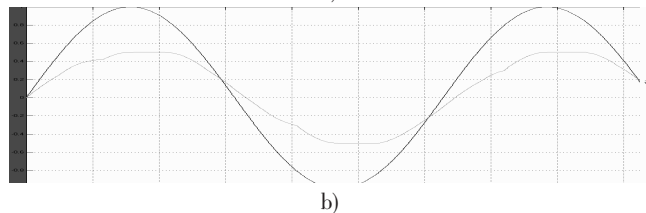
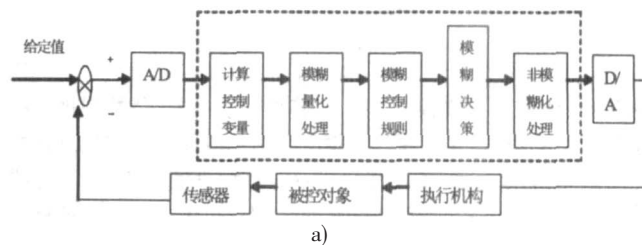


图 1

通过图 1b 比较理想正弦输入与示波器实际输出,可以看

出纯模糊控制虽然有比较好的跟随性能,但在其输出曲线的上升和下降阶段,分别各有一个陡坡,这就说明纯模糊控制的动态性能不是十分令人满意。

## 2.2 非线性摩擦环节对于伺服系统的影响

摩擦的非线性对于伺服系统的动态及静态性能有着很大程度的影响,为了研究非线性摩擦对于伺服系统的影响,人们尝试着用数学模型去定量的描述它形成的物理过程。目前,已提出的摩擦模型很多,主要有 Karnopp 模型、Lurje 模型及综合模型。其中,Lurje 模型是 Canudas 等在 1995 年提出的典型伺服系统的摩擦模型,该模型能够准确地描述摩擦过程的动态、静态特性,如爬行、极限共振、滑前变形、变静摩擦等。

Lurje 摩擦模型可描述如下:

对于带电流环的伺服系统,用下面的微分方程表示:

$$J\ddot{\theta} = u - F \quad (2)$$

式中, $J$ 为转动惯量, $\theta$ 为转角, $u$ 为控制力矩, $F$ 为摩擦力矩。设状态变量 $z$ 代表表面鬃毛的平均变形,则 $F$ 可由下面的 Lurje 模型来描述:

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \alpha \dot{\theta} \quad (3)$$

$$\dot{z} = \dot{\theta} - \frac{\sigma_0 |\dot{\theta}|}{g(\theta)} z \quad (4)$$

$$g(\theta) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\theta}{V_s}\right)^2} + \alpha \dot{\theta} \quad (5)$$

在式(3)~(5)中, $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 称为动态摩擦系数, $F_c$ 、 $F_s$ 、 $\alpha$ 、 $V_s$ 称为静态摩擦参数,其中 $F_c$ 为库仑摩擦, $F_s$ 为静摩擦, $\alpha$ 为粘性摩擦系数, $V_s$ 为切换速度。

如图 2 所示,为 $J=1.0$ , $\sigma_0=260$ , $\sigma_1=2.5$ , $\alpha=0.02$ , $F_c=0.28$ , $F_s=0.34$ , $V_s=0.01$ 。采用 PD 控制,取 $k_p=50$ ; $k_d=0.01$ ,输入为 $rin(k)=0.01 \cdot \pi \cdot \cos(0.2\pi \cdot k \cdot t)$ ,被控对象为 $1/s$ 时的仿真曲线,通过图 2 可以看出,速度输出曲线在低速时明显的出现失真即滑前变形的现象。

若想克服低速时出现的非线性摩擦环节,则必须使伺服系统具有一定的智能:在系统处于低速阶段时,通过判断输入、输出曲线的误差 $E$ 、误差变化量 $EC$ ,然后再利用模糊规则智能的选取合适的 $k_p$ 、 $k_d$ ,从而使系统的输出达到令人满意的效果。

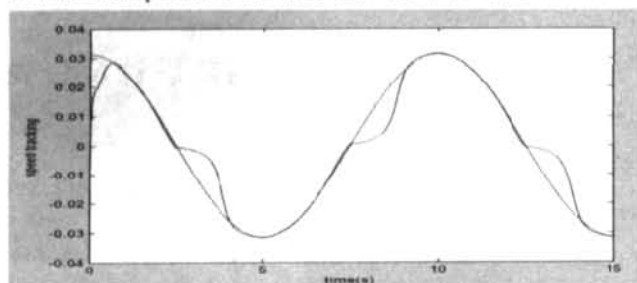


图 2

## 3 模糊自适应整定 PID 控制

在 2.2 中提到利用模糊规则智能的选取合适的 $k_p$ 、 $k_d$ ,这在控制上常被称作模糊自适应整定 PID 控制,由于这种方法能够在线地智能修改比例、积分、微分等参数,因此该方法具有非常好的鲁棒性, $k_p$ 的模糊控制规则如表 1 所示, $k_d$ 的模糊控制规则如表 2 所示,表 1、表 2 的制作规则主要是从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面考虑的, $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ 的选取规则如下:

$\Delta k_p$ $ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 1

$\Delta k_d$ $ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表 2

(1)比例系数 $k_p$ 的作用是加快系统的响应速度,提高系统的调节精度。 $k_p$ 越大,系统的响应速度越快,系统的调节精度越高,但易产生超调,甚至会导致系统不稳定,反之亦反。

(2)积分作用系数 $k_i$ 的作用是消除系统的稳态误差。 $k_i$ 越大,系统的静态误差消除越快,但 $k_i$ 过大,在响应过程的初期会产生积分饱和现象,从而引起响应过程的较大超调,反之亦反。

(3)微分作用系数 $k_d$ 的作用是改善系统的动态特性,其作用主要是响应过程中抑制偏差向任何方向的变化,对偏差变化进行提前预报。但 $k_d$ 过大,会使响应过程提前制动,从而延长调节时间,而且会降低系统的抗干扰性能。

由于带电流环的(电机+负载)模型可以简化为 $K/s$ ,其中已经附带一个积分环节,所以在模糊自适应整定 PID 控制中只引入比例、微分环节来改善系统的性能。选取输入正弦信号 $rin(k)=0.01 \cdot \pi \cdot \cos(0.2\pi \cdot k \cdot t)$ ,因而确定误差 $e$ 的论域为 $[-0.09, 0.09]$ ,同样误差变化 $ec$ 的论域也为 $[-0.09, 0.09]$ ;比例系数 $k_p$ 的论域选为 $[-100, 100]$ ,微分作用系数 $k_d$ 的论域选为 $[-0.09, 0.09]$ ,且初始值 $k_{p0}=50$ , $k_{d0}=0.01$ ;另外摩擦模型仍选用 Lurje 模型,摩擦模型中各个参数的选取仍与 2.2 一致,最后仿真得到的曲线如图 3 所示:

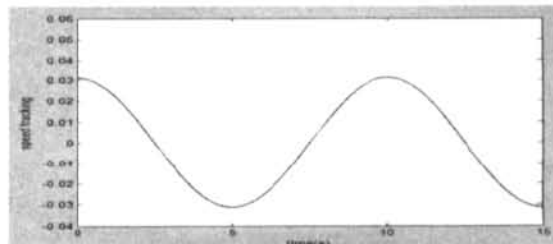


图 3

通过比较图 3 和图 2,可以看出在引入模糊自适应整定 PID 控制以后,伺服系统的低速特性得到明显的改善。

## 4 结论语

本文通过仿真比较传统 PID 控制与模糊自适应整定 PID 控制在超低速伺服系统中的应用,可以得出模糊控制不但可以

(下转第 283 页)



## 5.2 实际圆形回光反射圆形标志检验

对同一张图像来说,噪声量是固定的,我们通过对同一张图像取不同的高斯平滑参数 $\sigma$ 来检验系统对标志点中心的定位精确性与稳定性。实验采用数码相机(Cannon powershot A710)对圆形人工回光反射标志拍摄,产生椭圆形影像。下表二为实验数据:

(表二)对同一图像 $\sigma$ 取不同值计算的中心坐标 单位 pixels

$\sigma$ 值	X坐标	Y坐标
0.5	764.048	813.767
1.0	764.028	813.772
1.5	764.041	813.820
2.0	764.053	813.780
2.5	764.062	813.745
3.0	764.075	813.816
3.5	764.043	813.705
4.0	764.068	813.733

表二中标志点中心点定位精度为像素 0.038pixels,与表一比较定位精度稍低。均方根误差较大的原因是由于 $\sigma$ 不同,经过高斯滤波后得图像会产生不同程度的边界模糊。因此对提取的边缘会产生不同程度的影响,从而影响拟合后椭圆中心定位精度,在实际测量中图像的处理应当采用相同的 $\sigma$ 值进行计算,如取 $\sigma=2$ 。实验图像如图5所示:

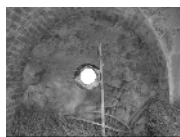
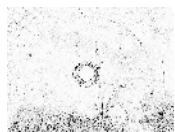


图5 (a)实际椭圆



(b)实际椭圆处理后=2

## 6 结束语

本文对隧道断面测量中人工标志点的设定与识别作了深入的研究。在细致地研究各种标志点提取算法的基础上,充分结合图像形态学的知识来对图像进行处理,提出了一套适合隧道断面检测的标志点及其测量算法,并用VC++进行编程实现,实验证明了该方法的可靠性和稳定性。该方法为实现隧道断面的近景摄影测量打下了基础。

本文作者创新点 本文提出的标志点提取算法有效地解决了 Canny 边缘检测算法中虚假边缘的问题,并非常适合用于隧道断面中测量人工标志点。同时,避免了采用昂贵的量测型相机,为普通相机测量隧道断面有了可靠性依据,为下一步利用直接线性变换法构造隧道断面开挖轮廓线奠定了基础。

## 参考文献

- [1](美)Milan sonka, Vaclav Hlavac, Boyle.图像处理、分析与机器视觉.第二版.北京:人民邮电出版社.2002.
- [2]贾刘强.数字图像处理技术在隧道围岩收敛量测中应用的初步研究.成都.西南交通大学硕士研究生学位论文.2005.
- [3]冯文灏.回光反射标志的性能与使用.测绘通报,1993 (4):12~14.
- [4]图像处理中几种边缘检测算法的比较.现代电力,2000,17(3).
- [5]吴集林.论数字图像的膨胀与腐蚀.广东广播电视大学学报.2007 (01).
- [6]王磊,莫玉龙,戚飞虎.基于 Canny 理论的边缘提取改善方法.中国图像图形学报,1996,(03).
- [7]徐慧等.Visual C++ 数字图像实用工程案例精选.北京:人民邮电出版社.2004.
- [8](美)Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods.数字图像处理(第二版).阮秋琦,阮宇智等译.北京:电子工业出版社.2004.
- [9]罗玉玲,唐贤英.基于阈值优化的图像模糊边缘检测算法.微机计算机信息,2007,23,2-3

作者简介:郑维学(1982-),男(汉族),山西朔州市人,中南大学硕士,主要研究方向:图像处理在隧道断面测量中的应用;李力争(1959-),男(汉族),湖南人,中南大学硕士导师,博士,教授,主要研究领域为图像处理与识别的应用。

**Biography:** ZHENG Wei-xue (1982-), male, (the Han nationality), Shanxi, Central South University, Master, Research area: Image processing in Tunnel section measurement.

(410083 湖南长沙 中南大学信息科学与工程学院)郑维学 李力争 (430074 湖北武汉 华中科技大学电子与信息工程系)李金洲 (School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

ZHENG Wei-xue LI Li-zheng

(Department of Electronic & Information Engineering, Hua Zhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)LI Jin-zhou

通讯地址:(410083 中南大学校本部和平楼 104 实验室)郑维学

(收稿日期:2008.9.15)(修稿日期:2008.10.25)

## (上接第 41 页)

被广泛应用于大时滞非线性被控对象,同时对于解决非线性扰动也是非常有用的。

本文作者创新点:在超低速伺服系统中为克服非线性摩擦力矩扰动,首次引入模糊自适应整定 PID 控制,并通过仿真说明其效果。

## 参考文献

- [1]诸静等著.模糊控制原理与应用.北京:机械工业出版社.1995
  - [2]徐湘元.自适应控制理论与应用.北京:电子工业出版社.2007
  - [3]C.Canudas de Wit, H. Olsson, K.J.Astrom, P.Lischinsk. A new model for control of systems with friction. IEEE trans. Automatic Control,1995,40(3):419~425
  - [4]徐开,陈长青.光电跟踪伺服系统中模糊控制器的设计与仿真.[J].微计算机信息,2006,22-10:102-104
- 作者简介:汪永阳,男,汉族,1982,中国科学院长春光机所研究生,主要从事光电稳定跟踪伺服控制技术的研究;戴明,男,汉族,1964,中国科学院长春光机所博士生导师,主要从事图像拾取技术的研究;宋悦铭,男,汉族,1981,中国科学院长春光机所实习研究员,主要从事光电稳定跟踪伺服控制技术的研究。

**Biography:** WANG Yong -yang, male,1982, The graduate student of Chang Chun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, profession is the research of optic-electronic platform servo system.

(100049 北京 中国科学院研究生院)汪永阳

(130022 吉林 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)汪永阳 戴明 宋悦铭

(The graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China) WANG Yong-yang

(ChangChun institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

WANG Yong-yang DAI Ming SONG Yue-ming

通讯地址:(130033 长春市经济技术开发区东南湖大路 16 号中科院长春光机所航测部)汪永阳

(收稿日期:2008.9.15)(修稿日期:2008.10.25)