

# 一类定性定量综合集成推理的模糊控制算法设计\*

郑 伟 李士勇 张福恩

(哈尔滨工业大学控制科学与工程系 150001)

**摘 要** 在控制系统中提出了定性变量及定量变量的新概念,并将二者的综合集成推理应用到模糊加权自调整控制算法的设计中。以倒立摆为被控对象的仿真结果表明,应用此控制算法的模糊控制器具有较好的控制效果,同时验证了该控制算法具有较好的鲁棒性和自适应性。

**关键词** 定性变量,定量变量,定性定量综合集成推理

**分类号** TP 18

## A Type of Fuzzy Control Algorithm Design with Synthetically Combined Reasoning of Quantitative and Qualitative Variables

Zheng Wei, Li Shiyong, Zhang Fuen

(Harbin Institute of Technology)

**Abstract** Quantitative and qualitative variables are introduced and synthetically combined reasoning is applied to the design of coefficient self-tuning control algorithm. The simulation result of the reverse pendulum indicates that the fuzzy controller using this control algorithm is effective and has robustness and self-adaptation.

**Key words** quantitative variable, qualitative variable, synthetically combined reasoning of quantitative and qualitative variables

### 1 引 言

智能控制系统与基于精确模型的传统控制系统的主要区别在于前者具有处理不确定性和复杂性的能力。近年来,理论研究和应用实践均表明,智能控制对于解决具有不确定性、复杂性的非线性系统的控制难题具有重要的意义和广阔的前景。

人脑是世界上最复杂、最高级的控制器,因此,模拟人脑的智能决策行为及其推理机制,无疑是实现智能控制的一种有效途径。大脑左右半球从功能上具有抽象思维和形象思维的分工,它们之间的胼胝体对两半球的功能加以协调,其结果是提高了信

息处理的效率和柔性。这种协调过程就是对抽象思维所表现出的定量推理和对形象思维所表现出的定性推理进行定性定量综合集成推理的过程<sup>[1]</sup>。

本文将控制系统中的控制变量选为误差  $e$  和误差变化  $ec$ ,并根据智能控制的需要将变量划分为两种形式:定量变量和定性变量<sup>[2~4]</sup>。

定量变量是指精确的纯数值量,其值在控制系统动态过程中往往随时间变化。定量变量集

$$\Phi = \{r(t), y(t), e(t), \dot{e}(t), \dots\}$$

定性变量是刻画与被控系统动态过程变化趋势、走向、动态有关的变量,定性变量集

$$\Psi = \left\{ \left| \frac{\dot{e}_n(t)}{e_n(t)} \right|, \left| \frac{e_n(t)}{(|e_n(t)| + |e_n(t)|)} \right|, \left| \frac{e_n}{e_n + |e_n|} \right|, \left| \frac{e_n + \dot{e}_n}{e_n + |e_n|} \right|, \dots \right\}$$

\* 国家自然科学基金项目(69674019)

1999-10-22 收稿, 1999-12-21 修回

本文应用定性定量综合集成推理设计了一类加权自调整模糊控制算法,并以倒立摆系统为被控对象进行仿真,同时分析了该控制算法的鲁棒性和自适应性。这类加权自调整模糊控制算法是智能权函数的一种推广方式。

## 2 加权自调整模糊控制算法的设计与分析

本文给出的模糊控制算法属于解析描述控制规则可调整的模糊控制算法,该算法是根据定性定量解析综合推理,并考虑到被控系统实时的动态特性,用误差和误差变化来调节系统自身控制规则的一类控制算法。

### 2.1 解析描述的加权自调整模糊控制算法

算法的设计原理如下:当被控制系统的误差较大时,控制系统的主要任务是消除误差,此时应使误差在控制规则中的加权大些;在误差逐渐变小的过程中,应使误差的加权逐渐减小,而误差变化的加权逐渐增大;当误差较小时,系统已接近稳态,需要减小超调,为此在控制规则中使误差变化起的作用大些,即对误差变化加权大些。

加权自调整控制算法的解析描述如下

$$U = \begin{cases} - \frac{(e^2 + \lambda e^2)E + (1 - \frac{|e|}{e^2 + \lambda(e)^2})EC, |E| > M}{\left[ \frac{|e|}{e^2 + \lambda(e)^2} \right]^2 E + \left[ \frac{|e|}{e^2 + \lambda(e)^2} \right]^2 EC, N < |E| < M} & (1a) \\ - R_1 \frac{e^2 + \lambda(e)^2 E + R_2(1 - \frac{|e|}{e^2 + \lambda(e)^2})EC, |E| < N}{\dots} & (1c) \end{cases}$$

其中  $E$  和  $EC$  为经过量化的模糊变量;  $M$  和  $N$  为设定值,且  $M > 0, N > 0$ ;  $R_1$  和  $R_2$  为调整值。下面对误差和误差变化的加权值的取法及算法中各个参数的设定原则进行定性分析。

首先选取一典型二阶系统  $1/s(2s + 1)$  为被控对象,采用常规的加权模糊控制,分别得到定量变量  $\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}$  和定性变量  $e \sqrt{\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}}$  的响应曲线,如图 1 所示。

在图(a)中,曲线①为定量变量  $\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}$  的变化轨迹,②为控制过程中误差  $e$  的变化轨迹,③

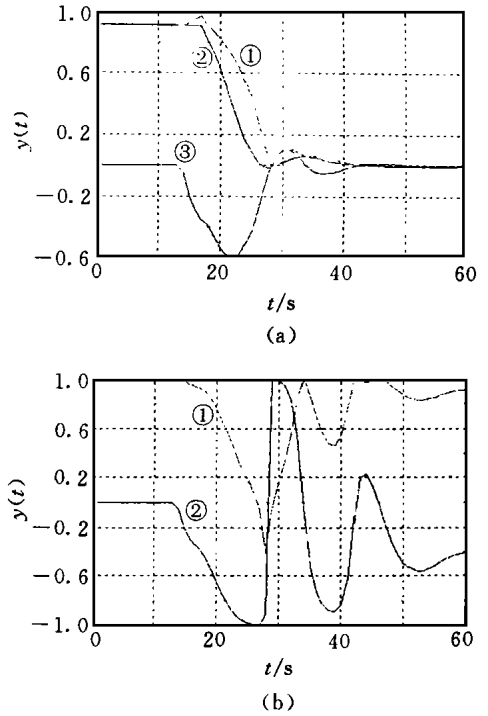


图 1 定量变量和定性变量的响应曲线  
(a) 定量变量的响应曲线  
(b) 定性变量的响应曲线

为误差变化  $ec$  的变化轨迹;在图(b)中,曲线①为定性变量  $e \sqrt{\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}}$  的变化轨迹,②为定性变量  $e \sqrt{\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}}$  的变化轨迹。

1) 对于控制算法规则(1a),由于此时系统有较大的误差,因此应使误差在控制规则中的加权大些。由图 1(a) 可以看出,定量变量  $\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}$  的响应曲线①在响应初期远离系统的平衡点,具有较大的值,因此,控制算法规则(1a) 等效于在误差较大时适时地使误差的加权较大,从而加快系统的响应速度,以达到预期的自调整效果。

2) 对于控制算法规则(1b),由于此时系统的误差在逐渐变小,所以应使误差的加权逐渐减小,而误差变化的加权则逐渐增大。此时误差的加权由定量变量  $\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}$  变为  $e \sqrt{\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}}$  的平方,这是由于图 1(b) 中的定性变量  $e \sqrt{\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}}$  的响应曲线①,在误差限定范围内的变化率应大于定量变量  $\frac{e^2 + \lambda(e)^2}{e^2 + \lambda(e)^2}$ ,且变化趋势是下降的。因此,算法规则(1b) 在减小误差加权的的同时,增大误差变化的加权,从而保持系统的响应速度并抑制系统的超调。

3) 对于控制算法规则(1c),此时系统的误差较小且已接近稳态,要求在控制规则中对误差变化加

表1 控制性能对比数据

对象参数	PID 控制器		常规加权模糊控制器		加权自调整模糊控制器	
	$t_s$ (s)	$\delta_p$ (%)	$t_s$ (s)	$\delta_p$ (%)	$t_s$ (s)	$\delta_p$ (%)
0.6	2.5	20	2	9	2	5
0.8	2.6	10	2.3	4.5	2.1	4
1	3.0	3	2.9	0	2.5	0
1.2	3.4	10	3	10	2.7	5
1.4	4.2	20	3.2	14	2.7	10

表2 控制算法自适应调节数据

参 数	算法调节数据											
	$T$	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
$\lambda$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	
$K$	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	

权大些。由图1(b)可知,系统的定性变量响应曲线①在误差趋于零时变化剧烈,所以不适用于最后的稳态调节。在误差趋于零时,误差、误差变化及定量变量  $\overline{e^2 + \lambda(e)^2}$  等变量值都变得很小。为便于对系统做进一步调节,采用带两个调整参数  $R_1$  和  $R_2$  的控制规则(1c)。如图1(a)所示,定量变量  $\overline{e^2 + \lambda(e)^2}$  在误差趋于零时变得很小,从而适当增加  $R_1$  来加大误差的加权,同时减小  $R_2$  来减小误差变化的加权,这样便可对系统在稳态时做更精确的调节。

4) 各个参数的设定原则:根据算法的原理分析以及大量的仿真实验可知,对于一般的一、二、三阶系统,  $M$  的经验值为系统的最大误差的  $1/3$ ,  $N$  的经验值为系统的最大误差的  $1/6$ ,  $R_1$  和  $R_2$  的经验值皆为  $0.5$ ,  $\lambda$  的经验值为  $1$ 。对于具体被控对象对响应速度及稳定性的不同要求,  $M$ ,  $N$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $\lambda$  的值可根据本算法原理做相应的调节。

## 2.2 加权自调整控制算法的仿真

倒立摆控制是智能控制的一个典型问题。本文采用基于语言模型求逆方法设计的模糊控制器,并应用所介绍的控制算法对倒立摆系统进行仿真<sup>[2]</sup>。图2给出了当倒立摆系统初始条件为  $(\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}) = (0, 0, 0, 0)$ , 跟踪幅值为  $1.5$  的方波信号时的仿真曲线。其中,曲线①是在模糊控制系统中采用常规加权模糊算法,曲线②是在模糊系统中加入本文介绍的改进加权自调整的模糊控制算法。可以看出,改进算法的控制曲线具有较快的速度和较小的超调,达到了预期的效果。

根据参数的设定原则,各参数取值如下:  $\lambda = 1$ ,  $R_1 = 0.8$ ,  $R_2 = 0.3$ ,  $M = 0.76$ ,  $N = 0.2$ 。这一组参

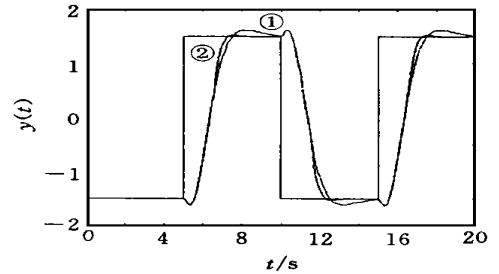


图2 被控系统的方波响应曲线

数是仿真过程中通过调整而得到的。

## 2.3 加权自调整控制算法的鲁棒性分析

这里以二阶系统  $2/s(Ts + 1)$  为被控对象,分别用PID算法、常规加权模糊控制算法及本文所设计的加权自调整模糊控制算法对其进行控制。

表1为采用3种控制器的性能对比数据。其中的仿真结果是用第3组对象参数分别调整3种控制器,以获得最佳阶跃响应特性;然后在固定3种控制器调整参数的情况下,分别改变对象参数,又获得4组阶跃响应数据。

比较3种控制器的控制性能可以看出,采用加权自调整因子模糊算法的控制器不仅响应快、超调小,而且对参数变化有较强的鲁棒性。

## 2.4 加权自调整控制算法的自适应分析

本控制算法的自适应性是指典型二阶被控对象而言。通过仿真分析可得到表2的调节数据。其中,  $T$  为被控对象可变参数,  $\lambda$  为本文设计的加权自调整控制算法的调节参数,  $K$  为被控系统的开环增益。初值  $T = 1$ ,  $\lambda = 1$ ,  $K = 1$ 。

采用上述 11 组参数中的 4 组对系统进行仿真, 结果如图 3 所示。在图 3 中,  $T$  分别取 0.6, 0.8, 1 和 1.4, 仿真结果为由上至下。可以看出, 4 组参数仿真所得到的曲线效果几乎一致, 而选择的参数之间也存在一定的规律:  $T$  由初值变化  $P\%$ , 只要  $\lambda$  在原值上增加  $2P\%$ , 同时  $K$  增加  $(P/2)\%$ , 即可得到相同的控制效果。可见, 加权自调整因子由于可随系统在线变化, 因而易于实现其自适应调节。这样, 通过在线识别被控系统参数的变化, 并相应调节控制算法的参数及开环增益, 即可实现对被控对象较好的控制。

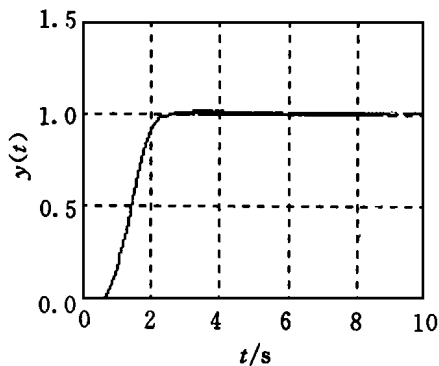


图 3 被控系统阶跃响应曲线

由表 2 可以看出, 被控对象惯性参数的增大会使系统的响应时间及超调增大, 而  $\lambda$  的增大使模糊控制器的输入  $E$  在第一条控制律的加权增大, 同时使第二条控制律的加权适当减小,  $K$  的少量增大相应地加快了响应速度。由此可见, 式(1b)中的  $|e| \sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$  的引入对本控制算法的自适应性有着重要的意义。

### 3 结 论

本文提出定量变量  $\sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$  和定性变量  $|e| \sqrt{e^2 + \lambda(e)^2}$  的概念, 并将二者的综合集成推理引入模糊加权自调整控制算法的设计, 从而提高了模糊控制算法的仿人智能性。本文工作为新型的模糊控制算法设计做出了有益的探索。

### 参 考 文 献

- 1 李士勇. 模糊控制、神经控制及智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996. 447~454, 531~541
- 2 Jan L. Stabilization of nonlinear systems by qualitative feedback controllers. *Int J Control*, 1995, 62(1): 109~128
- 3 J Lunze. Qualitative modeling of linear dynamical systems with quantized state measurements. *Automatica*, 1995, 30(3): 417~431
- 4 刘林运, 万百五. 定性控制综述. *信息与控制*, 1998, 27(1): 46~51

### 作 者 简 介

郑伟男, 1975年生。1999年获哈尔滨工业大学控制科学与工程系硕士学位, 现为控制科学与工程系博士研究生。主要研究方向为模糊控制, 智能控制。

李士勇男, 1943年生。现为中国自动化学会智能自动化专业委员会委员, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师。主要研究方向为模糊控制, 神经控制及智能控制理论及其在过程控制和高技术领域中的应用研究。

张福恩男, 1936年生。现为中国自动化学会控制理论与运动控制两个委员会委员, 美国数学学会会员, 哈尔滨工业大学控制科学与工程系教授, 博士生导师。主要研究方向为仿真转台技术与设备, 导航技术与设备, 计算机控制工程等。

(上接第 665 页)

### 参 考 文 献

- 1 Heath Hofmann, Seth R Sanders. Speed-sensorless vector torque control of induction machines using a two-time-scale approach. *IEEE Trans on Ind Application*, 1998, 34(1): 157~169
- 2 Tzuen-lin Chern, Jerome Chang, Kun-lin Tsai. Integral-variable-structure-control-based adaptive speed estimator and resistance identifier for induction motor. *Int J Control*, 1998, 69(1): 31~47
- 3 姬志艳. 异步电机直接转矩控制系统的研究. 清华大学博士学位论文, 1994
- 4 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1993

- 5 高宏程. 异步电机调速系统滑模控制器与滑模观测器设计研究. 清华大学博士学位论文, 1996

### 作 者 简 介

凌强男, 1975年生。1997年于中国科技大学获学士学位, 现为清华大学自动化系硕士研究生。研究方向为变结构控制及其它非线性鲁棒控制。

徐文立男, 1947年生。1990年于美国科罗拉多大学获博士学位, 现为清华大学自动化系教授。研究方向为自动控制, 计算机视觉。

陈峰男, 1971年生。1996年于俄罗斯圣彼得堡国立技术大学获硕士学位, 现为清华大学自动化系博士研究生。研究方向为电机非线性控制。