

一种基于柔性逻辑的控制方法研究

付利华¹ 何华灿²

(北京工业大学计算机学院 北京 100022)¹ (西北工业大学计算机学院 西安 710072)²

摘要 模糊控制是基于领域专家所给出的模糊控制规则来实现对系统的控制,这些模糊控制规则粗略地描述了控制器输入和输出之间的关系。模糊控制采用的是一种分段逼近的思想,因此在对高阶和多输入等实际复杂系统控制过程中,模糊控制存在控制规则组合爆炸和控制精度不高两大问题。从常规二维模糊控制器的输入变量误差 E 和误差变化率 EC 的基本物理意义出发,深入分析它们之间所蕴含的逻辑关系,指出这种关系的本质就是泛逻辑学中的泛组合关系,可用简单的泛组合运算代替复杂的模糊规则推理过程。据此提出了一种柔性逻辑控制方法,可实现对复杂系统的精确控制。最后,一级倒立摆的实物实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词 泛逻辑,泛组合运算模型,柔性逻辑控制,模糊控制,倒立摆

Studies on Control Method Based on Flexible Logic

FU Li-hua¹ HE Hua-can²

(College of Computer Science, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)¹

(College of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)²

Abstract By analyzing thoroughly the essential relation between two input variables of the normal two-dimensional fuzzy controller, this paper proved that the essential relation is just universal combinatorial relation in Universal Logic. So the simple universal combinatorial operation can be used instead of complex fuzzy reasoning process. As a result, a flexible logic control method was proposed to realize the accurate control for complex system. Finally, the experimental result of single inverted-pendulum physical system has proved the correctness and effectiveness of the control method.

Keywords Universal logic, Universal combinatorial operation model, Flexible logic control, Fuzzy control, Inverted-pendulum

1 引言

模糊控制通过模仿人的思维方式,提供了基于模糊控制规则的控制方法,能够有效地解决许多复杂且无法建立精确数学模型的控制问题。近年来,模糊控制迅速发展并得到广泛应用,取得了一系列重要的理论和应用研究成果^[1-4]。然而,李洪兴教授从数学的角度揭示了模糊控制器的插值机理,指出目前常用的模糊控制器都是插值器^[5-7]。这是因为基于模糊控制规则的模糊控制方法采用的是一种分段逼近的思想,它是基于领域专家所给出的模糊控制规则来实现对系统的控制,控制显得比较粗糙。要使模糊控制器的输出充分逼近系统的真实响应,就需要相对较多的控制规则。因此,在对高阶和多输入等实际复杂系统控制过程中,模糊控制理论存在控制规则组合爆炸和控制精度不高两大问题^[8]。

为了解决模糊控制的这两大问题,国内外众多学者从不同的角度进行了多方面的研究。分层模糊控制^[9-11]是基于功能对系统的控制规则集进行分解,以达到降维的目的;复合控制是将模糊控制与其他相对成熟的控制方法结合起来,从而

获得理想的控制效果,如 Fuzzy-PID 复合控制^[12]、参变量模糊控制^[13]等;三维模糊控制器^[14]是在模糊控制器输入中引入误差 E 、误差变化率 EC 和误差变化率的变化率 ECC 三维变量,以提高控制的精度;变论域自适应模糊控制^[6]的核心思想是,保持控制规则不变,通过模糊论域随着输入变量的大小进行压缩或膨胀,从而达到增加规则的目的。尽管改善模糊控制性能的研究已经取得了许多成果,但是这些方法都没有跳出模糊控制分段逼近的基本思想,都是在这种思想约束下所进行的弥补性工作。

何华灿教授创立的泛逻辑学^[15],不仅考虑了命题真值的模糊性,而且考虑了命题之间关系的连续可变性(即关系柔性),提出了“广义相关性”和“广义自相关性”的概念,并将命题连接词运算模型定义为由命题间相关性所控制的算子簇,为复杂系统的精确控制提供了新的思路和方法。

本文将从常规二维模糊控制器的输入变量误差 E 和误差变化率 EC 的基本物理意义出发,深入分析它们之间所蕴含的逻辑关系,在揭示其关系本质的基础上,提出一种柔性逻辑控制方法,可以实现对复杂系统的精确控制。最后,一级倒

到稿日期:2008-03-23 本文受国家自然科学基金资助项目(60273087),北京市自然科学基金项目(4032009),北京工业大学博士科研启动基金项目(52007012200702),北京工业大学青年科研基金项目(97007012200701)资助。

付利华 女,讲师,博士,从事复杂系统的柔性逻辑推理等研究,E-mail:fulh1113@yahoo.com.cn;何华灿 男,教授,博士生导师,从事人工智能及其应用、泛逻辑学与不确定性推理等研究。

立摆的实物实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

2 泛组合运算模型

2.1 泛组合运算模型

在复杂系统的各因素之间往往存在着错综复杂的关系,或是相互冲突,或是相互协调,并且在系统的运行过程中,某些因素间的关系还会在相互冲突和相互协调之间动态变化。为了合理地处理这类既有冲突又有协调的关系,人们提出了许多不同的合成算子(Aggregation Operators),它们大部分是各种各样的与算子、或算子或是平均算子,这些算子被广泛地使用在多属性决策系统之中,取得了一定的应用效果。

但是,由于与算子、或算子和平均算子分别具有以下的属性:

性质 1 设映射 $T(x, y), S(x, y), M(x, y): [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 分别是与算子、或算子和平均算子,则有

$$0 \leq T(x, y) \leq \min(x, y) \quad (1)$$

$$\max(x, y) \leq S(x, y) \leq 1 \quad (2)$$

$$\min(x, y) \leq M(x, y) \leq \max(x, y) \quad (3)$$

即,与运算的结果不大于最小值,或运算的结果不小于最大值,它们在解决相互协调的关系时,可以得到满意的结果,而在解决相互冲突的关系时,则会显得很牵强,往往会得到一些违反常识的结果;而平均算子只能在最小值和最大值之间变化,采用的是“折衷”的思想,它在解决相互冲突的关系时,可以得到满意的结果,却不能有效地解决相互协调的关系。

通过上面的分析发现,这些合成算子的运算范围都有局限性,不能全面、准确地反映复杂系统中各因素间关系的不确定性,这就需要提出一种新的可在全局上取值的逻辑运算。而泛逻辑学对解决此问题提供了一条有效的途径^[15],它在对决策理论研究的基础上提出了基于“么元 e ”的柔性“泛组合”运算模型。

在本文中,我们仅考虑命题间的广义相关系数 h ,即仅考虑泛逻辑中的零级泛组合算子,其定义如下:

定义 1^[15] 设映射 $C^*: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$,且

$$C^*(x, y, h) = \text{ite}\{\Gamma^*[(x^m + y^m - e^m)^{1/m}] | x + y < 2e; 1 - (\Gamma^{1-e}[(1-x)^m + (1-y)^m - (1-e)^m])^{1/m} | x + y > 2e; e\} \quad (4)$$

则称 C^* 为零级泛组合运算,表示为 C_h^* ,其中 $m = (3-4h) /$

$$GC^{\bar{e}}(x, y, h) = \text{ite}\{\min(\bar{e}, (b-a) \left[\max\left(0, \frac{(x-a)^m + (y-a)^m - (\bar{e}-a)^m}{(b-a)^m}\right) \right]^{\frac{1}{m}} + a) | x + y < 2\bar{e}; b + a - \min(\bar{e}', (b-a) \left[\max\left(0, \frac{(b-x)^m + (b-y)^m - (b-\bar{e}')^m}{(b-a)^m}\right) \right]^{\frac{1}{m}} + a) | x + y > 2\bar{e}; \bar{e}'\} \quad (5)$$

则称 $GC^{\bar{e}}$ 为 $[a, b]$ 区间上的零级泛组合运算,表示为 $GC_h^{\bar{e}}$,其中 $m = \frac{(3-4h)}{(4h(1-h))}$, $h \in [0, 1]$, $m \in R$, $\bar{e}, \bar{e}' \in [a, b]$, $\bar{e}' = b + a - \bar{e}$ 。

为了讨论的方便,我们不妨设模糊变量 E 和 EC 的模糊论域为 $[-1, 1]$ 。则当 $a = -1, b = 1, e = 0$ 时,相应的零级泛组合运算为:

$$GC^0(x, y, h) = \text{ite}\{\min\left(0, 2 \left[\max\left(0, \frac{(x+1)^m + (y+1)^m - 1}{2^m}\right) \right]^{\frac{1}{m}} - 1\right) | x + y < 0; -\min\left(0, 2 \left[\max\left(0, \frac{(1-x)^m + (1-y)^m - 1}{2^m}\right) \right]^{\frac{1}{m}} - 1\right) | x + y > 0; 0\} \quad (6)$$

$(4h(1-h)), h \in [0, 1], m \in R, e \in [0, 1]$ 。

注:条件表达式 $\text{ite}\{\beta | \alpha; \gamma\}$ 表示:如果 α 为真,则 β ; 否则 γ 。 $\text{ite}\{\beta_1 | \alpha_1; \beta_2 | \alpha_2; \gamma\} = \text{ite}\{\beta_1 | \alpha_1; \text{ite}\{\beta_2 | \alpha_2; \gamma\}\}$ 。 $[0, 1]$ 上的限幅函数 $\Gamma^*[x] = \text{ite}\{1 | x > 1; 0 | x < 0 \text{ 或虚数}; x\}$ 。

零级泛组合运算是包括了了几种常用组合算子的一个连续可控的组合算子簇。在实际应用中,可根据命题间的广义相关性,在簇中选取相应的组合算子。下面给出几种特殊的组合算子:

1) $h = 1$, 表示两命题最大相吸, $C^*(x, y, 1) = \text{ite}\{\min(x, y) | x + y < 2e; \max(x, y) | x + y > 2e; e\}$ 为 Zadeh 组合 C_3^* 。

2) $h = 0.75$, 表示两命题独立相关, $C^*(x, y, 0.75) = \text{ite}\{xy/e | x + y < 2e; (x + y - xy - e)/(1 - e) | x + y > 2e; e\}$ 为概率组合 C_2^* 。

3) $h = 0.5$, 表示两命题最大相斥,也是最小相克, $C^*(x, y, 0.5) = \Gamma^*[x + y - e]$ 为有界组合 C_1^* 。

4) $h = 0$, 表示两命题最大相克, $C^*(x, y, 0) = \text{ite}\{0 | x, y < e; 1 | x, y > e; e\}$ 为突变组合 C_0^* 。

泛组合运算具有如下的性质^[15]:

I1 边界条件

当 $x, y < e$ 时, $C^*(x, y, h) \leq \min(x, y)$;

当 $x, y > e$ 时, $C^*(x, y, h) \geq \max(x, y)$;

当 $x + y = 2e$ 时, $C^*(x, y, h) = e$;

否则, $\min(x, y) \leq C^*(x, y, h) \leq \max(x, y)$ 。

I2 单调性

$C^*(x, y, h)$ 关于 x, y 单调递增。

I3 连续性

$h \in (0, 1)$ 时, $C^*(x, y, h)$ 关于 x, y 连续。

I4 交换律

$$C^*(x, y, h) = C^*(y, x, h)$$

2.2 任意区间 $[a, b]$ 上的泛组合运算模型

在实际的控制应用中,模糊变量 E 和 EC 的模糊论域大多是关于原点对称的,如 $[-6, 6]$,因此陈志成在其博士论文中给出了任意区间 $[a, b]$ 上的泛组合运算模型,其定义如下:

定义 2^[16] 设映射 $GC^{\bar{e}}: [a, b] \times [a, b] \rightarrow [a, b]$,且

3 柔性逻辑控制方法

3.1 一级倒立摆系统

倒立摆系统是控制领域中用来检验某种控制理论或方法的典型实验平台,其一级倒立摆的系统结构如图 1 所示。

倒立摆系统主要由小车和摆杆组成,它们之间自由链接,小车可以在水平导轨上左右平移,摆杆可以在铅垂平面内运动。导轨的一端固定有直流电机,直流电机通过传送带驱动小车沿导轨水平运动,在小车沿导轨左右运动的过程中将力传递到摆杆以实现整个系统的动态平衡。

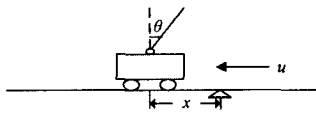


图1 一级倒立摆系统结构图

3.2 柔性逻辑控制方法

为了有效地减少多变量非线性系统中的模糊控制规则,肖军在其博士论文中提出了一种模糊组合变量的思想^[17],其核心是根据被控对象的特点及输入变量之间的内在联系,利用模糊逻辑系统构造一个模糊组合变量,来综合反映系统控制的偏差状态。

在论文中,她以一级倒立摆系统为研究对象阐述了模糊组合变量的形成。在一级倒立摆系统中,考虑4个输出变量,分别为小车位移 x 、小车速度 \dot{x} 、摆杆角度 θ 以及摆杆角速度 $\dot{\theta}$,而对模糊控制器来说,是4个输入变量。在控制系统的输入变量中,摆杆的角度 θ 和角速度 $\dot{\theta}$ 直接反映了摆杆的运动状态,因此可以根据摆杆的角度和角速度,按照如表1所列的语言规则,利用模糊逻辑系统,定义一个模糊组合变量——摆杆误差 GE_θ 来综合描述摆杆的运动状态。同样地,根据小车的位移 x 和速度 \dot{x} 可类似地定义一个综合描述小车运动状态的模糊组合变量——小车误差 GE_x 。对于多变量系统,不需要对每个模糊组合变量分别定义模糊逻辑系统,而可以采用一个统一的语言规则表,通过对量化因子的选择来定义不同的论域从而形成不同的模糊组合变量。

表1 定义摆杆误差 GE_θ 的语言规则

摆杆误差	摆杆角速度						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB				NM			
NM				NM			
NS				NS			
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS				PS			
PM				PM			
PB				PM			

注:本文中讨论的模糊控制器都是基本二维模糊控制器,输入为误差 e 和误差的变化率 ec ,输出为系统的控制量 u ,它们是清晰量,在实际系统的论域上取值。通过模糊化处理,分别用模糊语言变量 E, EC 和 U 来表示,它们的模糊论域统一取为 $[-1, 1]$,选择其模糊子集为{负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)}。

显然,表1所给出的语言规则其实是反映了所有误差 E 和误差变化率 EC 之间共同的内在关系。不妨将表1近似地分为如表所列的4个部分,其分别给出了“误差 E 和误差变化率 EC 同为负”、“误差 E 为负而误差变化率 EC 为正”、“误差 E 为正而误差变化率 EC 为负”及“误差 E 和误差变化率 EC 同为正”等4种情况下定义组合变量的语言规则。误差 E 和误差变化率 EC 都是对系统控制的偏差状态进行反映,那么可以根据它们之间的内在联系,定义一个组合变量 E_{cc} 来综合描述系统的控制偏差。

根据误差 E 和误差变化率 EC 的物理意义可知:当误差 E 和误差变化率 EC 同为正时,表示系统的控制偏差为正,且还有进一步向正方向增大的趋势。那么,此时组合变量 E_{cc} 的值应该不小于两者的最大值,且方向为正,其组合规则如表

1中右下角部分的语言规则所示;当误差 E 为正而误差变化率 EC 为负时,表示系统的控制偏差为正,但已经有向负方向变化的趋势。那么,此时组合变量 E_{cc} 的值应该在两者的最大值和最小值之间折衷,方向是根据两者的具体大小而定,其组合规则如表中左下角部分的语言规则所示。类似地可以得到其它两种情况下组合变量 E_{cc} 的值。

通过上面的分析,不难看出,误差 E 、误差变化率 EC 和组合变量 E_{cc} 之间的内在关系正是泛逻辑学中的泛组合关系,即有

$$E_{cc} = GC^{\tilde{e}}(E, EC, h) \quad (7)$$

显然,此时的么元 \tilde{e} 为0。

并且,根据负反馈控制的思想,描述系统控制偏差的组合变量 E_{cc} 和控制器的控制量 U 之间只是相差一个符号,即有:

$$U = -E_{cc} \quad (8)$$

因此,可得误差 E 、误差变化率 EC 和控制量 U 间的关系为

$$U = -GC^{\tilde{e}}(E, EC, h) \quad (9)$$

其中, $E, EC, U \in [-1, 1], \tilde{e} = 0, h \in [0, 1]$ 。本文称这种控制方法为柔性逻辑控制方法。

同时,为了适应不同被控对象的要求,引入一个加权因子 $\alpha, \alpha \in [0, 1]$,通过调整 α 值的大小,可以改变对误差 E 和误差变化率 EC 的不同加权程度。则当广义相关系数 h 为0.5时,有:

$$U = -GC^{\tilde{e}}(\alpha E, (1-\alpha)EC, 0.5) = \Gamma_{-1}^{\tilde{e}}[\alpha E + (1-\alpha)EC - \tilde{e}] = \alpha E + (1-\alpha)EC \quad (10)$$

而式(10)正是龙升照^[18]等人提出的解析描述控制规则的模糊控制方法。用泛组合描述的误差 E 、误差变化率 EC 和控制量 U 之间的关系不仅仅是一种线性相加关系,而是一个由广义相关系数 h 控制的算子簇。线性相加关系仅是算子簇中当 h 为0.5时的一个特殊算子,并且这里的模糊变量 E, EC 和 U 的模糊论域是连续的区间,相当于模糊量的分档无限细。

4 实验研究

4.1 控制器的设计

一级倒立摆系统的控制目标是“摆杆垂直稳定,小车停止在指定位置”,且这两个目标受系统的同一控制量控制。在该系统中选取4个系统变量进行反馈控制,分别为:小车位移 x 、小车速度 \dot{x} 、摆杆角度 θ 以及摆杆角速度 $\dot{\theta}$ 。其中摆杆角度 θ 和角速度 $\dot{\theta}$ 直接反映了摆杆的运动状态,与子目标“摆杆垂直稳定”对应;而小车位移 x 和小车速度 \dot{x} 则直接反映了小车的运动状态,与子目标“小车停止在指定位置”对应。它们经过量化后分别为模糊论域 $[-1, 1]$ 上的模糊变量: E_x, EC_x, E_θ 和 EC_θ ,则设计两个子目标控制器分别为稳摆控制器和定位控制器。稳摆控制器用于稳定摆杆在铅垂线位置,其输入为模糊变量 E_θ 和 EC_θ ;定位控制器用于保证小车停止在目标位置,其输入为模糊变量 E_x 和 EC_x 。

稳摆和定位控制器均采用柔性逻辑控制方法进行实现,因此它们可采用相同的设计方法,通过对量化因子的选择来定义不同的论域,从而实现不同的控制。同时,为了反映控制系统在不同的状态下对误差和误差变化率具有不同的加权程度,引入了加权因子 α ,其调整函数为常用的如式(12),式

(14)所示的线性函数,实现在控制过程中随着误差的大小自动调整误差对控制作用的权重。因此,得到稳摆控制器的结构为

$$U_\theta = -GC^\circ(\alpha_\theta E_\theta, (1-\alpha_\theta)EC_\theta, h_\theta) \quad (11)$$

$$\alpha_\theta = (\alpha_{s,\theta} - \alpha_{0,\theta}) |E_\theta| + \alpha_{0,\theta} \quad (12)$$

定位控制器的结构为

$$U_x = -GC^\circ(\alpha_x E_x, (1-\alpha_x)EC_x, h_x) \quad (13)$$

$$\alpha_x = (\alpha_{s,x} - \alpha_{0,x}) |E_x| + \alpha_{0,x} \quad (14)$$

同时,在合成最后的控制量时,赋予各子目标控制器输出控制量不同的权重: $k_x, k_\theta, k_x, k_\theta \in [-1, 1]$,则由式(11),式(13)可得控制器的输出,即系统的控制量 U 为

$$U = k_x U_x + k_\theta U_\theta = k_x (-GC^\circ(\alpha_x E_x, (1-\alpha_x)EC_x, h_x)) + k_\theta (-GC^\circ(\alpha_\theta E_\theta, (1-\alpha_\theta)EC_\theta, h_\theta)) \quad (15)$$

其中, $E_x, EC_x, U_x, E_\theta, EC_\theta, U_\theta, U \in [-1, 1]$; $GC^\circ(x, y, h)$ 为 2.2 节所给出的任意区间 $[a, b]$ 上的泛组合算子; h_x, h_θ 分别为衡量 E_x 和 EC_x, E_θ 和 EC_θ 之间广义相关性大小的广义相关系数; $h_x, h_\theta \in [0, 1]$, α_x, α_θ 分别表示误差 E_x, E_θ 权重大小的加权因子, $\alpha_x, \alpha_\theta \in [0, 1], 0 \leq \alpha_{0,x} \leq \alpha_{s,x} \leq 1, 0 \leq \alpha_{0,\theta} \leq \alpha_{s,\theta} \leq 1$ 。

综上所述,一级倒立摆系统的控制模型如图 2 所示。

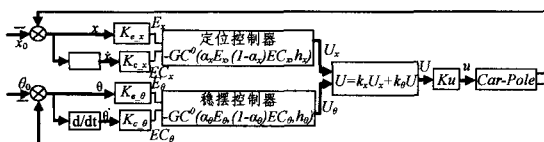


图 2 一级倒立摆系统的控制模型

4.2 实验结果

将上述柔性逻辑控制方法应用到某一一级倒立摆实物系统中,其各系统参数如表 2 所列。

表 2 一级倒立摆系统的物理参数表

参数	参数值	意义
m_0	0.924kg	小车及驱动系统的等效质量
m_1	0.04933kg	摆杆质量
l_1	0.177m	摆杆质心至轴心距离
f_0	0.1N·s/m	小车系统的摩擦系数
f_1	0.007056N·s·m	摆杆摩擦阻力系数

由于倒立摆系统的快速性和绝对不稳定性,对系统的实时处理频率要求很高,因此本系统的采样周期为 5ms,在系统运行 8s 过程中,进行控制效果分析。通过仿真寻优和重复试验相结合的方法,得到系统的控制参数如表 3 所列。

表 3 系统的控制参数

参数	参数值	意义
$K_{e,x}$	23.5294	定位控制器误差的量化因子
$K_{c,x}$	9.4118	定位控制器误差变化率的量化因子
h_x	0.2118	定位控制器的广义相关系数
$\alpha_{0,x}$	0.1725	定位控制器中误差权值的最小值
$\alpha_{s,x}$	0.4683	定位控制器中误差权值的最大值
$K_{e,\theta}$	50.5882	稳摆控制器误差的量化因子
$K_{c,\theta}$	3.1765	稳摆控制器误差变化率的量化因子
h_θ	0.9490	稳摆控制器的广义相关系数
$\alpha_{0,\theta}$	0.2510	稳摆控制器中误差权值的最小值
$\alpha_{s,\theta}$	0.5953	稳摆控制器中误差权值的最大值
k_x	-0.2235	定位控制器的权值
k_θ	0.4902	稳摆控制器的权值
K_u	8.7843	系统控制量的比例因子

将这些控制参数所构成的控制器,对上述一级倒立摆实物系统进行了系统的稳定控制。在初始状态 ($x(0) = 0m, \theta(0) = 0.05rad$) 下,实现了一级倒立摆实物系统的稳定控制,其实验结果如图 3—图 5 所示(运行时间:8s)。

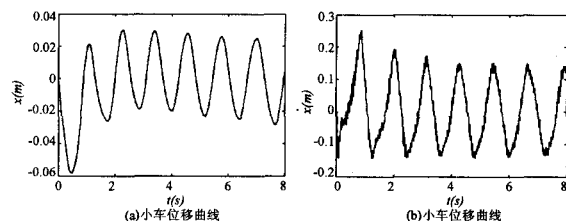


图 3 系统稳定时小车位移和速度曲线图

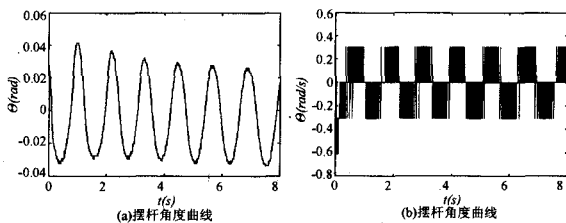


图 4 系统稳定时摆杆角度和角速度曲线图

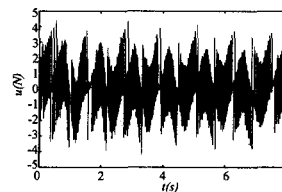


图 5 系统稳定时控制量曲线图

从上面的实验结果可以看出,当系统达到稳态时,小车位移的偏差约为 0.002m,摆杆转角的偏差约为 0.004rad,稳定控制效果好。

4.3 传统的解析描述控制规则的模糊控制方法

在传统的解析描述控制规则的模糊控制方法中,简单地认为误差 E 、误差变化率 EC 和控制量 U 间是一种加权平均的关系,如式(16)所示:

$$U = -(\alpha E + (1-\alpha)EC) \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{1}{N}(\alpha_s - \alpha_0) |E| + \alpha_0$$

其中, α 为误差 E 的权值, $\alpha \in [0, 1]$, N 为误差 E 的模糊论域的量化等级, $0 \leq \alpha_0, \alpha_s \leq 1, \alpha \in [\alpha_0, \alpha_s]$ 。并且,对于各子目标控制器的输出控制量间的合成,常采用加权求和的方法^[17]。

将传统的解析描述控制规则的模糊控制方法应用到上述一级倒立摆实物系统中进行稳定控制。当系统的初始状态为 $x(0) = 0m, \theta(0) = 0.05rad$ 时,其实验结果如图 6—图 8 所示(运行时间:8s)。

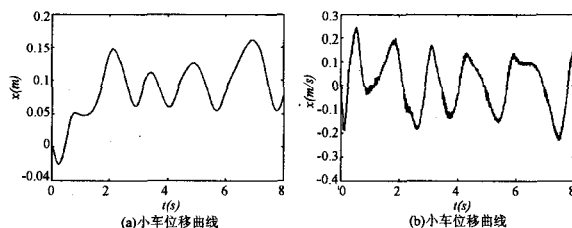


图 6 系统稳定时小车位移和速度曲线图

(下转第 189 页)

structured multiple-record Web documents//Proceedings of the Third International Workshop on the Web and Databases (Web-DB2000). Dallas, Texas, May 2000: 123-128

- [6] Hu J, Kashi R, Lopresti D, et al. Why table ground - ruting is hard// Proceedings of the Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition. seattle, Washington, September 2001:129-133
- [7] Liddle S W, Embley D W, Scott D T, et al. Extracting data behind Web forms//Proceedings of the Joint workshop on Conceptual Modeling Approaches for E-business, A Web Service Perspective(eCOMO 2002). Tampere, Finland, October 2002:38-49
- [8] Liddle S W, Yau S H, Embley D W. On the automatic extraction of data from the hidden Web//Proceedings of the International

Workshop on Data Semantics in Web Information Systems (DASWIS-2001). Yokohama, Japan, November 2001:106-119

- [9] Madhavan J, Bernstein P A, Raham E. Generic schema matching with Cupid//Proceedings of the 27th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB' 01). Rome, Italy, September 2001:49-58
- [10] Miller R, Haas L, Hernandez M A. Schema mapping as query discovery//Proceedings of the 26th International Conference on very Large Databases (VLDB' 00). Cairo, Egypt, September 2000:77-88
- [11] Raghavan S, Garcia-Molina H. Crawling the hidden Web// Proceedings of the 27th International Conference on Very Large Data Bases(VLDB'01). Rome, Italy, September 2001

(上接第 161 页)

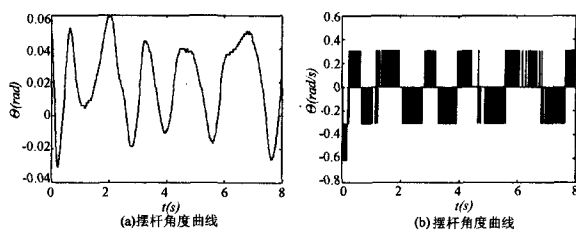


图 7 系统稳定时摆杆角度和角速度曲线图

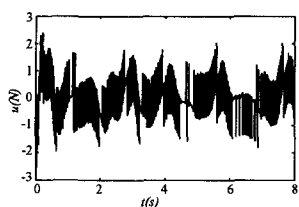


图 8 系统稳定时控制量曲线图

结束语 本文从常规模糊控制器的输入变量 E 和 EC 的基本物理意义出发,分析它们之间内在关系的本质特征,发现这种内在关系的本质是一种泛组合关系,并引入泛逻辑学中“关系柔性”的思想,将控制运算模型定义为由命题间相关性控制的算子簇,据此提出了一种柔性逻辑控制方法,可实现对复杂系统的精确控制。最后,一级倒立摆实物实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Lee C C. Fuzzy Logic in Control System; Fuzzy Logic Controller, Part I, II[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2): 404-435
- [2] Zadeh L A, Zimmermann H J. On Computation of the Compositional Rule of Inference under Triangular Norms[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 51: 267-275
- [3] 李士勇. 模糊控制、神经控制与智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨

工业大学出版社, 1996

- [4] 张思勤, 施颂椒, 高卫华, 等. 模糊控制系统近年来的研究与发展[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 7-11
- [5] 李洪兴. 从模糊控制的数学本质看模糊逻辑的成功[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(4): 1-14
- [6] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868-872
- [7] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学(E 辑), 1998, 28(3): 259-267
- [8] 付利华. 复杂系统的柔性逻辑控制理论及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005
- [9] 戴忠达, 张曾科, 汤俭. 一种改进的模糊控制器及其应用[J]. 自动化学报, 1990, 16(3): 258-261
- [10] Raju G V S, Zhou Jun, Kisner R A. Hierarchical Fuzzy Control[J]. International Journal of Control, 1991, 54(5): 1201-1216
- [11] Raju G V S, Zhou Jun. Adaptive Hierarchical Fuzzy Controller[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(4): 973-980
- [12] 胡绳荪, 候文考, 秦宝忠. 焊缝跟踪系统中的自调整比例因子 Fuzzy-P 控制器的研究[J]. 天津大学学报, 1999, 32(2): 181-185
- [13] Cheng Fuyan, Zhong Guomin, Li Youshan. Fuzzy Control of a Double-inverted Pendulum[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 315-321
- [14] 甄敏, 袁艳, 张泰山. 三维控制规则自修正模糊算法的研究[J]. 计算技术与自动化, 2000, 19(1): 16-18
- [15] 何华灿, 王华, 刘永怀, 等. 泛逻辑学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [16] 陈志成. 复杂系统中分形混沌与逻辑的相关性推理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004
- [17] 肖军. 模糊控制在多变量非线性系统中的应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2001
- [18] 龙升照, 汪培庄. 模糊控制规则的自调整问题[J]. 模糊数学, 1982, 3(3): 105-112
- [19] 付利华, 何华灿. 模糊推理中相异因子的研究[J]. 计算机科学, 2004, 31(2): 98-100
- [20] 付利华, 何华灿. 模糊推理中零级泛蕴涵的信息度约束研究. 计算机科学, 2005, 32(1): 162-164