

文章编号: 1001-0920(2001)02-0191-04

基于模糊组合变量的自适应加权控制

肖 军, 张 石, 徐心和

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 针对多变量非线性系统, 提出一种基于模糊组合变量的自适应加权控制方法。首先利用模糊逻辑系统构造模糊组合变量, 通过赋予各个模糊组合变量不同的权重来形成多变量非线性系统的加权控制; 然后利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行学习, 从而有效地解决了多变量模糊控制系统难以设计和实现多维控制器的问题。最后通过仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词: 非线性; 多变量; 模糊控制

中图分类号: TP 13

文献标识码: A

Self-adaptive Weighted Control Based on Fuzzy Composed Variables

XIAO Jun, ZHANG Shi, XU Xin-he

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A self-adaptive fuzzy controller for multivariable nonlinear system is designed. The fuzzy logic system is used to constitute fuzzy composed variables. A weighted control method is formed by giving each fuzzy composed variable a different weight according to the fuzzy composed variable's effect on the final decision. After that, the back propagation algorithm is used to rectify quantized parameters and weighted parameters which effectively solved the problem for design and realization of high dimension fuzzy controller. Simulation results show its validity.

Key words: nonlinear; multivariable; fuzzy control

1 引 言

自从 Mamdani 成功地将模糊控制应用于锅炉和蒸汽机控制以来, 模糊控制得到了广泛的发展。特别是对于难以建立数学模型的复杂系统、强非线性系统以及输入和定义具有结构不确定性的系统, 模糊控制由于能综合利用由传感器获得的数据信息和由专家提供的语言模糊信息而得到了成功应用。然而对于多变量系统, 由于可能的控制规则集的数目

是输入变量的指数^[1], 要设计一个完整的模糊控制规则集并非易事, 而要在工程上实现这样庞大的规则库几乎是不可能的。因此, 如何有效地减少多变量非线性系统中控制规则的数目, 这对于理论设计和工程实现具有非常重要的意义。

本文提出一种基于模糊组合变量的自适应加权控制方法, 其基本思路是: 首先根据系统的特点和输入变量之间的内在联系, 利用模糊逻辑系统构造模

收稿日期: 2000-05-19; 修回日期: 2000-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(69875003)

作者简介: 肖军(1967—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 硕士, 从事模糊控制、神经网络和非线性系统研究; 徐心和(1940—),

男, 河北山海关人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人学和离散系统等研究。 <http://www.cnki.net>

糊组合变量; 然后根据各个模糊组合变量在控制决策中的地位和作用分配权值, 并利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行学习, 从而有效地降低了模糊控制系统的维数。最后以二级倒立摆系统为例进行了仿真实验, 实验结果证明该方法是可行而有效的。

2 模糊加权控制系统

设模糊控制规则库由具有如下形式的若干模糊“if-then”规则的综合组成, 即

$$R^{(l)}: \text{if } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \\ \text{then } y \text{ is } G^l$$

当采用单值模糊发生器、乘积推理规则和中心平均反模糊化方法时, 模糊逻辑系统具有如下形式

$$f(x) = \frac{\bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right]} \quad (1)$$

式中, M 为控制规则库中包含模糊“if-then”规则的总数, n 为模糊逻辑系统输入变量的个数, x 和 y 为模糊逻辑系统的输入和输出变量, F 和 G 为输入和输出变量的模糊集合, \bar{y}^l 为 μ_{G^l} 取最大值时所对应的点。

式(1)描述的模糊逻辑系统是万能逼近器^[2], 理论上可以完成任何非线性控制任务。因此, 如能准确地选择模糊逻辑系统的参数, 就可能设计出一个适合被控非线性系统的模糊逻辑系统。

本文以二级倒立摆系统作为研究对象。倒立摆装置是一个典型的快速、非线性、多变量和绝对不稳定系统, 人们常用它来检验控制方法对不稳定、非线性和快速变化系统的控制处理能力。其数学模型为

$$M(\theta, \theta_2) \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + F(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2) \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = G(u, \theta_1, \theta_2) \quad (2)$$

式中, $M(\theta, \theta_2)$, $F(\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)$ 和 $G(u, \theta_1, \theta_2)$ 的具体内容及其参数的物理意义参见文献[3]。

设 $X_1 = (r, \theta, \theta_2)^T$, $X_2 = (\dot{r}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2)^T$, 则上述倒立摆模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = F(X_1, X_2) + G(X_2) \times U \end{cases} \quad (3)$$

其中 $F = -M^{-1}F$, $G = M^{-1}G$

上述倒立摆系统中有 6 个输入变量, 分别为 $r, \theta, \theta_2, \dot{r}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 。若采用单级模糊控制方法, 则可能的控制规则数将是输入变量数的指数。从人类思维的角度看, 制定超过三维以上的模糊规则库并不容易, 而在快速变化的系统中实时实现这样庞大的规则库也是不可能的。为此, 文献[4]将最优控制理论与模糊控制理论相结合, 将倒立摆系统在平衡点附近进行线性化, 利用推导出的状态反馈系数构成综合误差和综合误差变化率, 在此基础上构造模糊控制器, 从而降低了模糊控制器的维数, 解决了二级倒立摆系统的多变量问题。该方法中的综合系数是在平衡点附近对二级倒立摆系统进行线性化得到的, 当二级倒立摆系统的运动偏离平衡点较大时, 控制结果难以令人满意。本文根据二级倒立摆系统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模糊组合变量, 提出一种基于模糊组合变量的自适应加权控制方法。

倒立摆系统是一个快速变化系统, 由于量测误差、信号传送、转换误差和信号处理带来的时延等, 不能及时准确地获得系统的状态变量值, 所以采用模糊规则描述的语言变量来描述系统的状态。在系统的输入变量中, 下摆角度和角速度反映了下摆的运动状态, 因此可按表 1 所示的语言规则定义模糊组合变量——下摆误差 E_{θ_1} 。

表 1 定义下摆误差 E_{θ_1} 的语言规则

		摆体角速度						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
摆体角度	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

类似地, 根据上摆角度 θ_2 和角速度 $\dot{\theta}_2$ 定义上摆误差 E_{θ_2} ; 根据小车的位移 r 和速度 \dot{r} 定义小车误差 E_r 。对于多变量系统, 并不需要对各个模糊组合变量分别定义模糊逻辑系统, 可采用一个统一的语言规则表来形成模糊组合变量, 通过对量化系数的选择来定义不同的论域和语言规则, 从而形成不同的模糊组合变量。

考虑到倒立摆系统的控制目标是“摆体不倒, 小车停住”, 其中“摆体不倒”是前提, 满足此前提“小

车停住”才有意义,所以“摆体不倒”是主要目标。运行过程以稳定摆体为主,然后考虑小车的水平位移。在对摆体的控制中,稳定上摆是第一位的,稳定下摆是第二位的。为此,本文利用加权控制方法,综合考虑摆体和小车的模糊误差信息,赋予模糊组合变量上摆误差、下摆误差和小车误差以不同的权重,并综合各方面的作用得到最后的控制量

$$u = K_1 E_r + K_2 E_{\theta_1} + K_3 E_{\theta_2} \quad (4)$$

其中 $K_1 < K_2 < K_3$ 。从而有效地降低了控制器的维数,且易于实时实现。

3 基于反向传播算法的量化系数和加权系数的自学习

模糊化中的量化系数和控制器中的加权系数反映了各个状态变量在控制决策中的作用,它直接影响到模糊控制的效果。

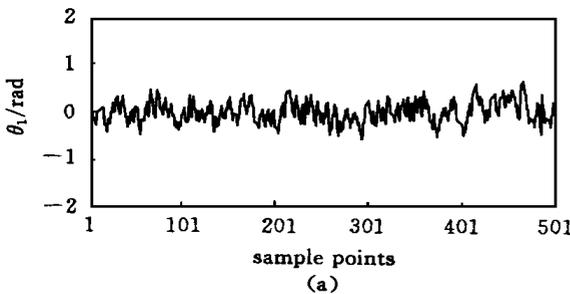
为进一步改善模糊控制的动态特性,可根据被控对象的响应过程调整量化系数和加权系数,这里采用反向传播算法来实现。以 600 步为一阶段,在教

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{600} (\theta_1^2(k) + \theta_2^2(k)) \quad (5)$$

的监督下,对量化系数和加权系数进行训练。

设 K_1, K_2, \dots, K_{10} 分别为 3 个模糊组合变量的加权系数、控制变量的系数,以及输入变量 $r, \theta_1, \theta_2, \dot{r}, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 的量化系数; E_1, E_2, E_3 分别表示模糊组合变量 $E_r, E_{\theta_1}, E_{\theta_2}$, 则训练算法如下

$$K_i = K_i - \alpha \sum_{k=1}^{598} \frac{\partial E(k+2)}{\partial K_i} = K_i - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[\frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_1(k+2)} \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial K_i} + \frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_2(k+2)} \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial K_i} \right]$$



$$K_i = K_i - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[\left(\theta_1(k+2) \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial u(k)} + \theta_2(k+2) \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial u(k)} \right) K_u E_i(k) \right] \quad (6)$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$K_4 = K_4 - \alpha \sum_{k=1}^{598} \frac{\partial E(k+2)}{\partial K_4} = K_4 - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[\frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_1(k+2)} \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial K_4} + \frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_2(k+2)} \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial K_4} \right]$$

$$K_4 - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[\left(\theta_1(k+2) \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial u(k)} + \theta_2(k+2) \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial u(k)} \right) U(k) \right] \quad (7)$$

$$K_j = K_j - \alpha \sum_{k=1}^{598} \frac{\partial E(k+2)}{\partial K_j} = K_j - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[\frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_1(k+2)} \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial E_i(k)} \frac{\partial E_i(k)}{\partial K_j} + \frac{\partial E(k+2)}{\partial \theta_2(k+2)} \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial E_i(k)} \frac{\partial E_i(k)}{\partial K_j} \right]$$

$$K_j - \alpha \sum_{k=1}^{598} \left[K_i K_u \left(\theta_1(k+2) \frac{\partial \theta_1(k+2)}{\partial u(k)} + \theta_2(k+2) \frac{\partial \theta_2(k+2)}{\partial u(k)} \right) \frac{\partial E_i(k)}{\partial K_j} \right]$$

$$i = 1, 2, 3, \quad j = 5, \dots, 10 \quad (8)$$

$$\partial X_1(k+2) / \partial u(k) = T^2 G \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_r(k)}{\partial K_r} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 [E_r(i,j) - E_r(k)] \times e^{-\left(\frac{rK_r - r(i)}{\sigma} \right)^2} e^{-\left(\frac{rK_r - r(j)}{\sigma} \right)^2} \times \left(- \frac{2r(rK_r - r(i))}{\sigma^2} \right) \left(- \frac{2r(rK_r - r(j))}{\sigma^2} \right) e^{-\left(\frac{rK_r - r(i)}{\sigma} \right)^2} e^{-\left(\frac{rK_r - r(j)}{\sigma} \right)^2} \quad (10)$$

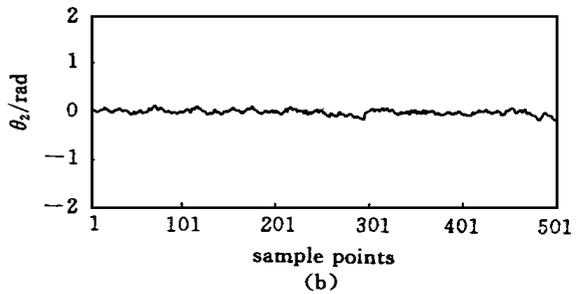


图 1 仿真结果

类似地,可得出 $\frac{\partial E_r(k)}{\partial K_r}$, $\frac{\partial E_{\theta_1}(k)}{\partial K_{\theta_1}}$, $\frac{\partial E_{\theta_2}(k)}{\partial K_{\theta_2}}$, $\frac{\partial E_{\theta_e}(k)}{\partial K_{\theta_e}}$ 。

4 仿真实验

以二级倒立摆系统为对象,对上述基于模糊组合变量的自适应加权控制方法,在初始摆角为 10° 的条件下进行仿真实验,仿真结果如图 1 所示。

仿真结果表明,本文算法可使二级倒立摆系统稳定,具有良好的鲁棒性。与文献[4]的方法相比,当摆角度大于 5° 时,文献[4]的方法不能使二级倒立摆系统稳定,显然本文算法优于文献[4]的算法。

5 结论

本文针对多变量非线性系统,提出一种基于模糊组合变量的自适应加权控制方法。根据输入变量之间的内在联系,利用模糊逻辑系统构造模糊组合变量,利用模糊组合变量降低模糊逻辑系统的维数,并根据模糊组合变量对控制决策的贡献大小赋予不同的权重,实现对多变量非线性系统的控制。为进一

步改善模糊控制方法的动态特性,利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行学习,有效地解决了多变量模糊控制系统难以设计和实现多维控制器的问题。对所提出的方法进行了仿真实验,实验结果证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Furuta K, Hiroyuki K, Kosuge K. Digital control of double inverted pendulum on an inclined rail[J]. Int J Contr, 1980, 32(5): 907-924.
- [2] 王立新. 自适应模糊系统与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] Xiao Jun, Zhang Shi, Xu Xinhe. A weighted fuzzy control of double inverted pendulum [A]. The 3rd Asian Control Conf[C]. Shanghai, 2000. 1160-1163.
- [4] Fuyan Cheng, Guomin Zhong, Youshan Li *et al.* Fuzzy control of a double-inverted pendulum[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 315-321.
- [5] G V S Raju, Jun Zhou. Adaptive hierarchical fuzzy controller[J]. IEEE Trans on Syst, Man & Cyb, 1993, 23(4): 973-980.

(上接第 176 页)

参考文献:

- [1] Q Lu. Stabilization of large scale power system by means of decentralized optimal control [A]. Cigre/IFAC Sym[C]. Florence, 1983. 38-83.
- [2] Q Lu. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.
- [3] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of homogeneous systems[A]. Proc of ACC [C]. Albuquerque, 1997. 2513-2514.
- [4] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translation and rotational double integrators[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1998, 43(5): 678-682.
- [5] Y Hong, J Huang, Y Xu. On an output feedback finite-time stabilization problem[A]. Proc of IEEE CDC[C]. Phoenix, 1999. 1302-1307.
- [6] L Rosier. Homogeneous Lyapunov function for homogeneous continuous vector field[J]. Syst Contr Lett, 1992, 19(4): 467-473.
- [7] D Cheng, T J Tarn, A Isidori. Global external linearization of nonlinear systems via feedback[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1985, 30(8): 808-811.