



时变修正因子二级自寻优模糊控制器¹⁾

胡劲松 郑启伦 吴捷

(华南理工大学计算机系 广州 510641)

(E-mail: hjs21@sina.com)

摘要 首先给出一种实时性好精度高的局部连续模糊算法,并与已有的方法相结合,构造了一个时变修正因子的模糊控制器;其次给出了一种可快速精确逼近最优解的模拟退火算法,融合这两种方法构成了自寻优模糊控制器.仿真结果表明这种自寻优控制器对大时滞对象,非线性不稳定且模型未知对象都有良好的控制效果.该方法最大的优点是无需对象的数学模型和人的经验,这为非线性模型不确定且不稳定对象的最优控制提供了一条途径.

关键词 模糊控制,局部连续模糊算法,模拟退火,非线性

中图分类号 TP273

FACTOR TWO LEVEL SELF-OPTIMIZING FUZZY CONTROLLER WITH TIME-VARYING MODIFYING

HU Jing-Song Zheng Qi-Lun Wu Jie

(Computer Engineering and Science Department, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

(E-mail: hjs21@sina.com)

Abstract The paper proposes a partly continuous fuzzy algorithm that is combined with the existing method to improve the real time ability and the precision of fuzzy controller obviously. A time-varying modifying factor fuzzy controller is constructed by the method. Then a novel simulated annealing algorithm is presented to rapidly achieve the optimal result. The self-optimizing fuzzy controller is made of the two algorithms. The simulation results illustrate that the self-optimizing fuzzy controller has fine performances for dead-time plants and non-stable nonlinear plants whose mathematical models are not known. It is the main advantage that the self-optimizing fuzzy controller is independent of human experience and the mathematical models of plants. The paper tries to provide a way for controlling non-linear plants of unknown mathematical models.

1) 国家自然科学基金(69783008)和广东自然科学基金(970525)资助

收稿日期 2000-10-31 收修改稿日期 2001-05-14

Key words Fuzzy control, partly continuous fuzzy algorithm, simulated annealing, nonlinear

1 引言

基本模糊控制算法主要有查表法、公式法、规则推理法。规则推理法时间长,占内存大,实时性差。查表法、公式法精度不高,但实时性好,占内存少,公式法还有一个突出的优点:容易调整规则。文献[1]给出了一种在线递推调整规则的公式法控制器,性能有所提高。但该方法有静差和振荡,且不能根据对象参数的变化调整控制器自身的参数,还不能称为自适应模糊控制器。为此本文提出了一种自寻优模糊控制器。

2 递推调整规则的公式法

假设模糊控制器有 2 个输入 x, y , 1 个输出 u_f , 都是精确值。其语言变量取值分别为 A, B, C , 其论域为 X, Y, U , 如图 1 所示。

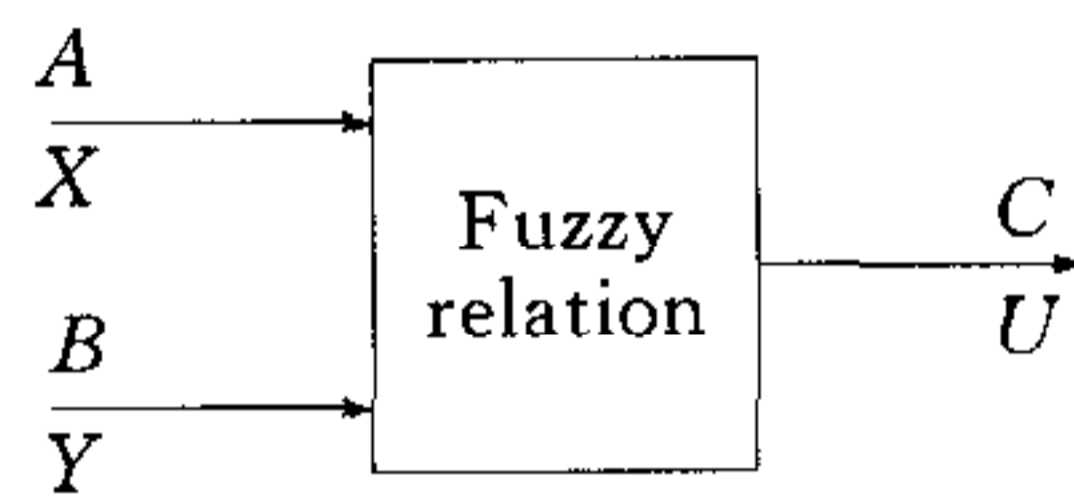


图 1 模糊关系

定义 1. 与 A, B, C 相关的语言变量的子集分别为

$$A = \{A_i\}_{i \in I} \subset \tilde{F}(X), \quad B = \{B_j\}_{j \in J} \subset \tilde{F}(Y), \quad C = \{C_k\}_{k \in K} \subset \tilde{F}(U),$$

$$A_\Sigma = \bigcup_{i \in I} A_i, \quad B_\Sigma = \bigcup_{j \in J} B_j,$$

其中 $I = \{-m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m\}, J = \{-n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n\}, K = \{-h, \dots, -1, 0, 1, \dots, h\}$, $\tilde{F}(X)$ 表示 X 的模糊幂集。 $A_\Sigma(x)$ 的隶属函数如图 2 所示。图中 bx_i 为 $A_i(x)$ 与 $A_{i+1}(x)$ 的交叉点, cx_i 为 $A_i(x)$ 的核。同样对变量 y 有 by_j, cy_j 。不论隶属函数形状如何, 总可以用以下方法对 x 进行模糊化: 若 $x \in (bx_{i-1}, bx_i)$ 则 $A(x) = i \in I$ 。此处 $A(x)$ 不是隶属函数, 它表示 x 的模糊化值, 代表 x 对应的“档”或“级”。这种方法无需计算隶属函数, 速度快。

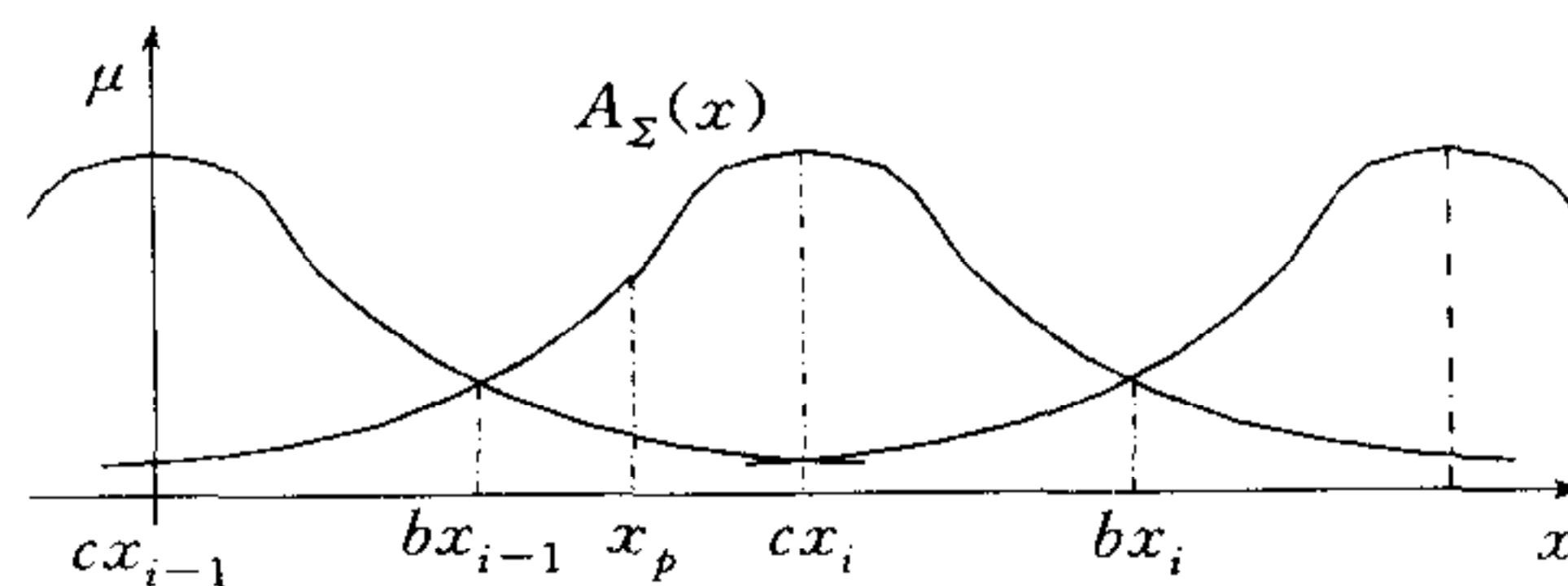


图 2 隶属函数

定义 2. 定义函数

$$\langle\langle x \rangle\rangle = \text{sgn}(x) \cdot \text{int}(|x| + 0.5) \tag{1}$$

其中 $\text{sgn}(x)$ 是一个符号函数, $\text{int}(x)$ 表示最接近 x 的整数。控制器的输出的精确值 u_f 可以用一个简单的表达式计算

$$u_f = \langle \langle \alpha i + (1 - \alpha)j \rangle \rangle \quad (2)$$

式中 α 是一个实数,称为修正因子,通过改变 α 就可以改变模糊规则.文献[1]提出用递推的方式不断修正 α ,公式如下

$$\alpha(t+1) = \begin{cases} \alpha(t) + \beta \cdot h(t) \cdot [1 - \alpha(t)], & \alpha(t) > 0.5 \\ \alpha(t) + \beta \cdot h(t) \cdot \alpha(t), & \alpha(t) \leq 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

$h(t)$ 是一个与误差 e 和误差变化率 Δe 有关的系数,通过查模糊表获得^[1].

2.1 公式法的性能分析

设 $bx_{-1} = -0.5$, $bx_0 = 0.5$, $by_{-1} = -0.5$, $by_0 = 0.5$, 则 $-0.5 < x < 0.5$ 时 $A(x) = 0$, $i=0$, 同理有 $-0.5 < y < 0.5$, $B(y) = 0$, $j=0$, 所以 $u_f = \langle \langle \alpha i + (1 - \alpha)j \rangle \rangle = 0$. 因此在区域 $\{(x, y) | -0.5 < x < 0.5 \text{ and } -0.5 < y < 0.5\}$ 系统是失控的,此时 x 不一定为 0,也即 $e \neq 0$, 这正是公式法存在静差和容易振荡的原因.

2.2 局部连续化算法

设系统偏差的实际值为 e ,变化范围 $[h_1, g_1]$,偏差的变化率 Δe 的范围 $[h_2, g_2]$.先对偏差及其变化率的论域进行变换.

定义 3. 论域变换函数

$$x = D_1(e) = \frac{2m}{g_1 - h_1} \left(e - \frac{h_1 + g_1}{2} \right) \quad (4)$$

定义 4. 论域变换函数

$$y = D_2(\Delta e) = \frac{2n}{g_2 - h_2} \left(\Delta e - \frac{h_2 + g_2}{2} \right) \quad (5)$$

其中 m, n 的定义见定义 1.

在大多数情况下,对论域的划分是均匀的,如图 2, $bx_{i-1} - cx_{i-1} = cx_i - bx_{i-1}$, 于是可以用定义 1 中的 $\langle \langle x \rangle \rangle$ 函数对 x, y 进行模糊化.即

$$A(x) = \langle \langle x \rangle \rangle, \quad B(y) = \langle \langle y \rangle \rangle \quad (6)$$

当模糊控制器的输入 x 为某一子集 $A_{i-1}(x)$ 的核值 cx_{i-1} , y 也为 $B_{j-1}(y)$ 的核值 cy_{j-1} , 且 $t=t_1$ 时,直接采用式(2)计算输出

$$u_f(cx_{i-1}, cy_{j-1}, t_1) = \langle \langle \alpha(t_1) \cdot (i-1) + [1 - \alpha(t_1)] \cdot (j-1) \rangle \rangle \quad (7)$$

其中 t_1 为时间.因为 α 是一个与时间有关的递推量.当输入 x_p 不为任何核值时,如图 2 所示,有 $cx_{i-1} \leq x_p \leq cx_i$ 且 $cy_{j-1} \leq y_p \leq cy_j$,先计算连续化因子.

定义 5.

$$\begin{aligned} r_1(x_p) &= 1 - (x_p - cx_{i-1}), & r_2(x_p) &= x_p - cx_{i-1}, \\ r_3(y_p) &= 1 - (y_p - cy_{j-1}), & r_4(y_p) &= y_p - cy_{j-1}, \end{aligned}$$

连续化因子

$$\begin{aligned} R_1(x_p, y_p) &= r_1 \times r_3, & R_2(x_p, y_p) &= r_2 \times r_3, \\ R_3(x_p, y_p) &= r_2 \times r_4, & R_4(x_p, y_p) &= r_1 \times r_4, \\ u_f(x_p, y_p, t) &= \frac{R_1 \cdot u_1 + R_2 \cdot u_2 + R_3 \cdot u_3 + R_4 \cdot u_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$u_1 = \langle \langle \alpha(t) \cdot (i-1) + [1 - \alpha(t)] \cdot (j-1) \rangle \rangle, \quad u_2 = \langle \langle \alpha(t) \cdot i + [1 - \alpha(t)] \cdot (j-1) \rangle \rangle,$$

$$u_3 = \langle \langle \alpha(t) \cdot i + [1 - \alpha(t)] \cdot j \rangle \rangle, \quad u_4 = \langle \langle \alpha(t) \cdot (i - 1) + [1 - \alpha(t)] \cdot j \rangle \rangle,$$

式(8)所表示的函数 $u_f(x_p, y_p, t)$ 是一个连续函数,证明参见文献[2].

考虑到系统性能变坏的原因是在平衡点附近的区域 $\{(x, y, t) | -0.5 < x < 0.5 \text{ and } -0.5 < y < 0.5 \text{ and } t > 0\}$ 无控制量造成的,所以只需在该区域或比该区域大一点的区域内进行局部连续化就行了,这样可大大减少计算量提高速度,称之为局部连续法.

3 能精确逼近最优解的模拟退火算法

模拟退火算法^[3]很适于求解组合优化问题,尤其对目标函数不可导、离散的情况.改进的模拟退火算法^[4]是一种快速有效的方法,但只能较快地接近最优解,很难达到最优解.设当前解为 S ,下一个候选解为 S^* ,根据改进的模拟退火算法,由 S 产生 S^* , S 中的每个元素 x_i 都可以产生变化,引起目标函数的变化太大,在搜索时“跨过”了最优解.如果每次随机从 S 中抽出部分元素变化之,其它元素不变,则目标函数变化小.显然这种方法更能精确逼近最优解.在程序中, S 中的可变元素的个数逐渐减少,直至只允许一个元素变化,称之为部分元素可变法.先用改进的模拟退火算法获得一个次优解,再用部分元素可变法精确逼近,合称为双程退火法.

4 基于模拟退火算法的自寻优调节器

在定义 2 中,采用查模糊表的方式修改 $h(t)$,进而修改 α . 用一个 $V_1 \times V_2$ 的矩阵 M 表示该模糊表.该表不直接用来控制对象,很难由人的经验得到,用模拟退火法优化是很合适的.此外还有一些关键的参数如积分常数 k_i , α 的初始值 $\alpha(0)$,式(3)中的 β 值,模糊控制器 1 和 2 的量化因子 k_e, k_{ce}, k_h (见图 3). 将上述 6 个参数的整数化值和模糊表矩阵 M 一起组成一个

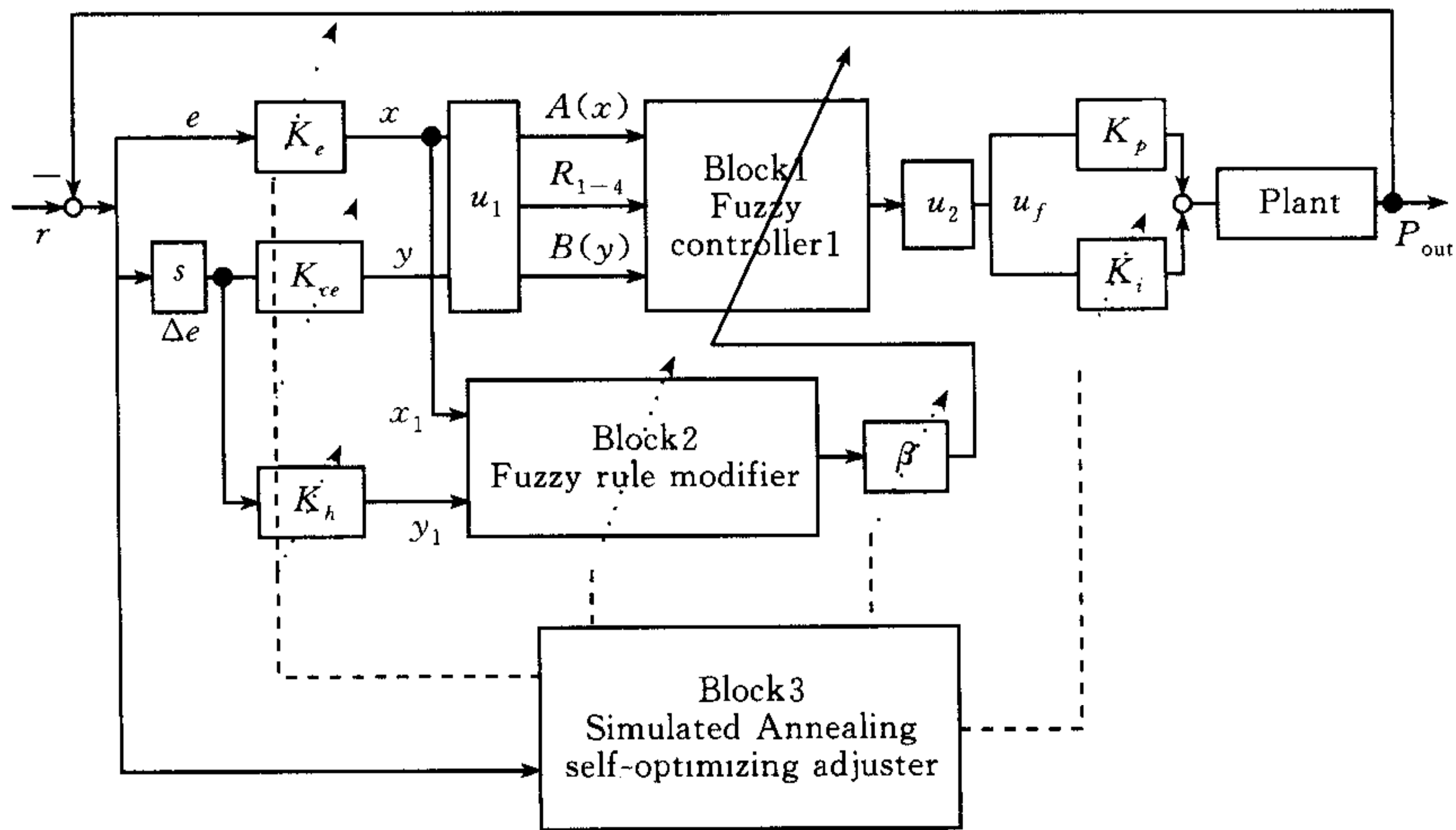


图 3 自寻优模糊控制器

$(V_1+1) \times V_2$ 的增广矩阵 M^* 如下

$$M^* = \begin{bmatrix} & & & M & & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_e & k_i & \alpha(0) & \beta & k_{ce} & k_h & \times & \end{bmatrix}$$

其中最后一位 \times 不起作用. 将 M^* 作可行解, 用模拟退火法优化. T_s 为采样周期, i 是采样序号. 目标函数 $J = \int_0^{+\infty} t \cdot |e| \cdot dt$ 离散化

$$J = \sum_{i=1}^n i \cdot T_s^2 |e(i)| \quad (9)$$

5 二级自寻优模糊控制器

如图 3, Block1 是采用局部连续的公式法模糊控制器 1. μ_1 模块对输入进行模糊化并计算出连续因子 R_1, R_2, R_3, R_4 . μ_2 模块进行反模糊化, s 表示对时间求导. $e, \Delta e$ 经论域变换后产生量化值 x, y, x_1, y_1 . Block2 是用查表方式调整 α 的模糊规则调整器. Block3 是基于模拟退火法的自寻优调整器. 以往的方法或是对比例参数 k_p 、积分参数 k_i 等进行优化, 或是对模糊规则进行优化. 因为控制系统是一个整体, 所以对各参数的调整优化, 及对模糊规则的调整优化是相互牵制的, 分别调整时无法获得最佳效果, 本文提出的二级模糊自寻优控制器对它们进行同步优化.

1) 大时滞对象 $\frac{e^{-100 \cdot T_s \cdot s}}{(s+1)(3s+1)}$, 输入 $r=1$, 采样周期 $T_s=0.1s$, 在 $t=60s$ 突加干扰, 图 4 中的实线是用自寻优模糊控制器得到的. 图 4 中一条带方框的虚线是用文献[1]的方法得到的, 另一条较好的有圆环标记的虚线是采用文献[1]的模糊表 1, 用局部连续法得到的. 普通模糊控制器缺乏控制大时滞对象的能力, 通常要加入 smith 预估器, 本文采用了自适应的方法, 通过模拟退火调节模糊表和参数, 控制器逐步适应对象的特性, 具有自学习的能力, 对于大时滞对象, 控制器的预估能力蕴含在优化后的模糊表中, 所以无需 smith 预估器.

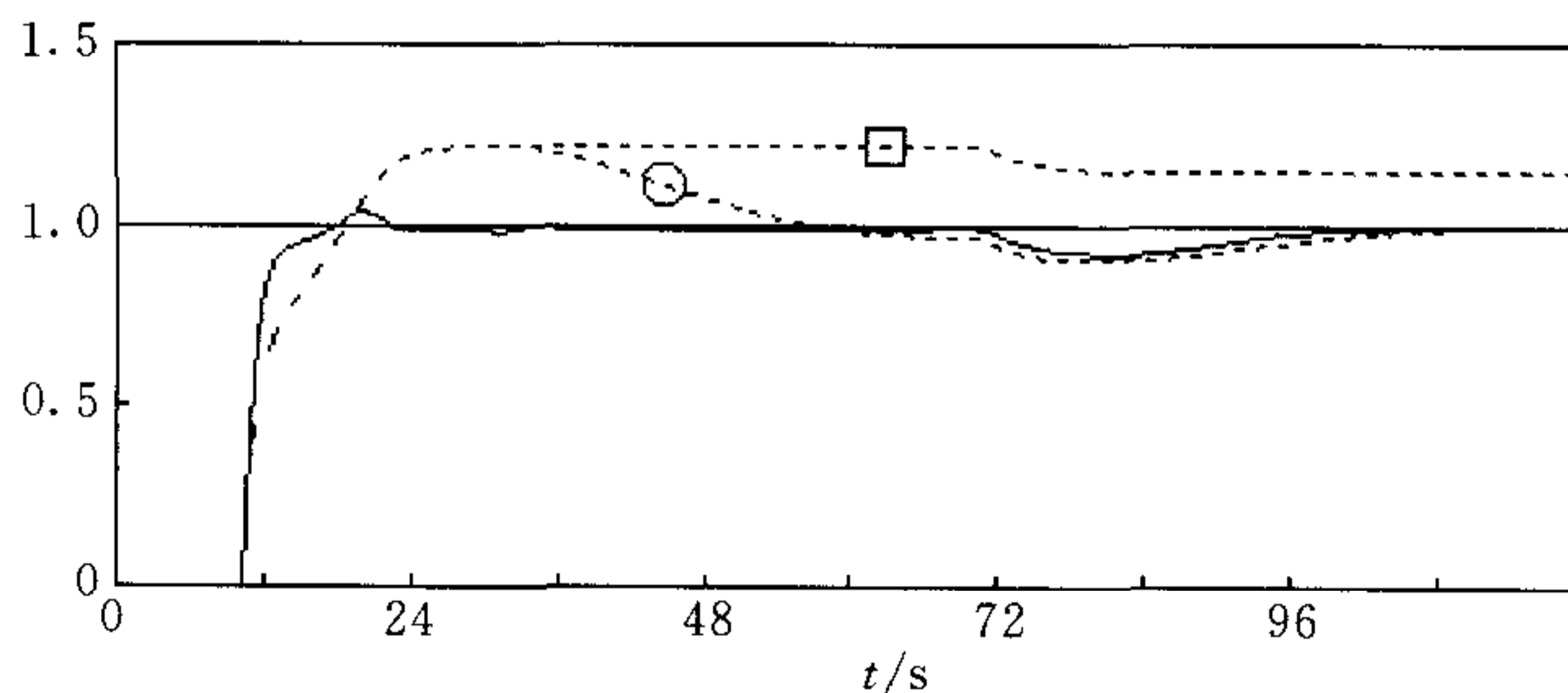


图 4 时滞对象的响应曲线

2) 非线性对象 $\ddot{y} - \sin y + (m_1 + m_2 \cdot \dot{y}) \cdot y^2 - (m_3 + m_4 \cdot y) \cdot u = 0$, 当 $m_1 = -0.1$, $m_2 = 1.5$, $m_3 = 1$, $m_4 = 0.2$ 时给定 $r=1$, 对象的阶跃响应如图 5 中的虚线, 是发散的. 假定不知其数学模型且没有任何经验, 用自寻优控制器对其进行控制, 得图 5 中的实线. 采样周期 $T_s=0.02s$, 在 $0.3s$ 突加 100% 的干扰, 曲线波动小, 抗干扰性强. 即使自寻优调节器不调整参数, 对象参数 m_1, m_2, m_3, m_4 也可在 $\pm 10\%$ 内变化, 系统仍是稳定可控的, 所以鲁棒性

好. 从仿真结果可以看出, 经过优化的曲线都有上升时间短, 超调量很小的特点. 超调量和上升时间是一对矛盾, 一般的控制方法很难解决. 对非线性对象的控制目前还没有普遍适应的方法, 一般要知道对象的数学模型, 而非线性数学模型往往很难获得, 还要满足各种约束条件. 至于对非线性模型不确定且不稳定对象的最优控制目前还未见报道.

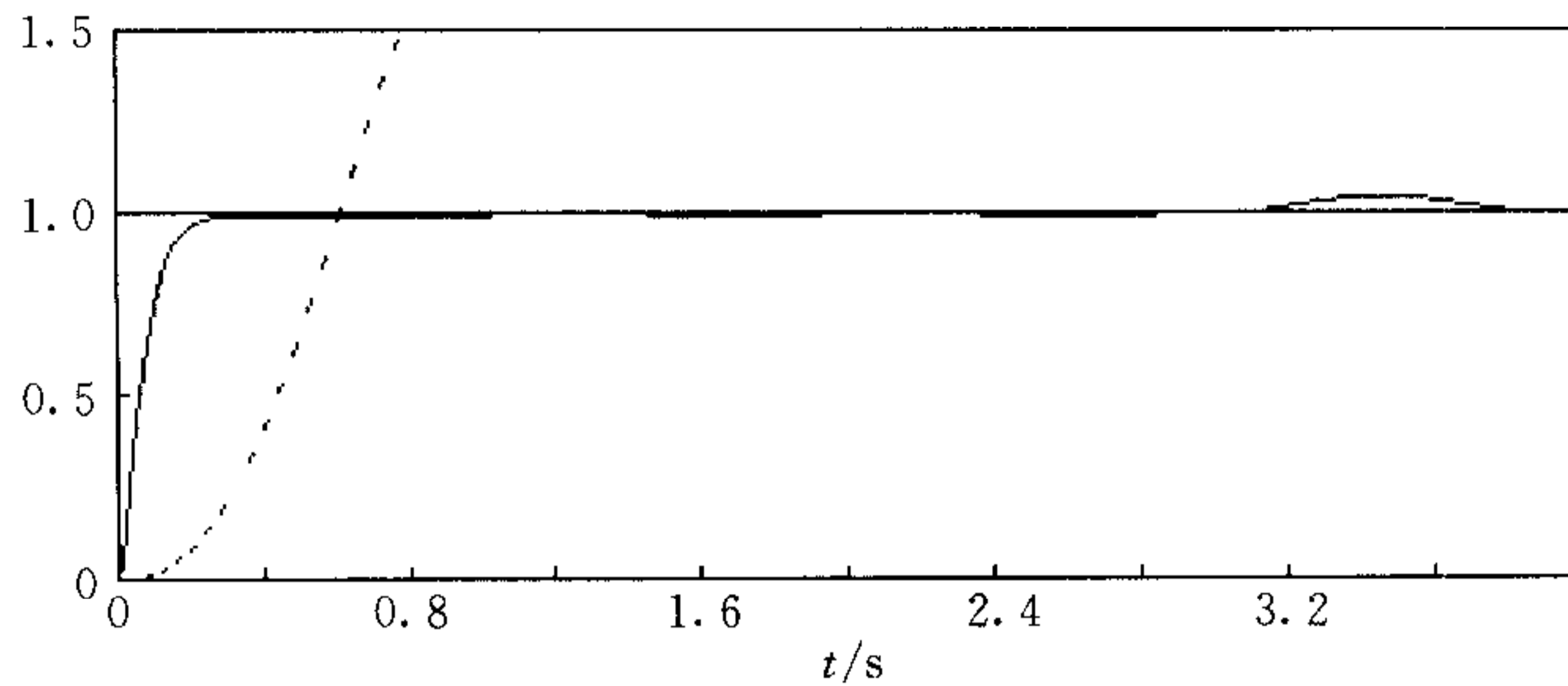


图 5 不稳定非线性对象

6 结束语

时变修正因子二级自寻优模糊控制器具有许多优点: 无需对象的数学模型, 无需经验, 上升时间短, 超调量很小, 抗干扰性强, 鲁棒性好, 有广泛的适应性, 不仅适于线性稳定对象, 还适于非线性模型不确定且不稳定对象. 时变修正因子二级自寻优模糊控制器本质上是强非线性的, 其响应曲线有时出人意料(如图 4 的曲线), 其机理还需要进一步研究.

参 考 文 献

- 1 He S Z, Tan S H. Control of dynamic processes using an on-line rule-adaptive fuzzy control system. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, **54**(1):11~22
- 2 胡劲松, 郑启伦. Realizing fine quality real time fuzzy control by a simple algorithm. *Cybernetics and Systems*, 2000, **31**(7): 787~802
- 3 Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, **220**(4598):671~680
- 4 徐 雷. 一种改进的模拟退火组合法. *信息与控制*, 1990, **19**(3):1~7

胡劲松 1999 年开始于华南理工大学计算机系攻读博士学位. 研究兴趣为模糊控制、人工智能、自适应控制.

郑启伦 博士生导师. 研究领域为智能计算机、人工智能、神经网络与模糊逻辑及其硬件实现.

吴 捷 博士生导师,《控制理论与应用》主编. 研究方向为自适应控制、计算机控制系统.