

文章编号: 1001-0920(2002)04-0465-04

基于分层模糊系统的直接自适应控制

孙多青, 霍伟

(北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100083)

摘要: 为解决模糊控制器中规则数目随系统变量呈指数增长的问题, 利用分层模糊系统设计了一类非线性系统的直接自适应模糊控制器, 并证明了所提出的设计方法不但能保证闭环系统的一致有界性, 而且可使跟踪误差收敛到原点的小邻域内。通过对倒立摆控制的仿真研究验证了该方法的有效性。
关键词: 分层模糊系统; 自适应控制; 一致最终有界

中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

Direct adaptive control based on hierarchical fuzzy systems

SUN Duo-qing, HUO Wei

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that the number of rules in a fuzzy controller increases exponentially with the number of variables involved, a direct adaptive fuzzy control scheme for a class of nonlinear systems is proposed based on hierarchical fuzzy systems. It is proved that the proposed scheme not only guarantees the uniformly ultimate boundedness of the closed-loop system, but also makes the tracking error converge to the origin or its small neighbourhood. The simulation research on controlling an inverted pendulum verifies the efficiency of the hierarchical adaptive fuzzy controller.

Key words: hierarchical fuzzy system; adaptive control; uniformly ultimate boundedness

1 引言

模糊控制是当前智能控制理论与应用研究领域中最活跃的分支之一。文献[1]提出一种模糊自适应控制方案, 为研究未知非线性系统的控制问题提供了有效的工具。其后, 又有不少文献对[1]的模糊自适应控制方案做了改进。然而, 当处理多输入系统时, 存在模糊控制器中规则数目随系统变量呈指数增长, 使得模糊控制难以应用的问题。文献[2]提出了分层模糊系统, 它具有规则数目随输入变量的个

数呈线性增长的良好特性, 因而提供了解决这一问题的有效途径。文献[3]研究了分层模糊系统对连续可微函数的逼近性能, 为分层模糊系统的应用提供了理论依据。

将分层模糊系统用于控制问题尚处于尝试阶段, 例如文献[2, 4]对分层模糊系统的应用做了初探。迄今, 利用分层模糊系统设计自适应模糊控制器的理论性结果尚未见文献报道。为此, 本文旨在利用分层模糊系统设计一类非线性系统的模糊直接自适应控制器, 并对所设计的控制方案做出理论分析。

收稿日期: 2001-04-30; 修回日期: 2001-07-16

基金项目: 教育部博士点基金项目(1999000602)

作者简介: 孙多青(1964—), 男, 河北昌黎人, 博士生, 从事智能控制等研究; 霍伟(1951—), 男, 湖北武昌人, 教授, 博士生导师, 从事非线性动力学系统控制、智能控制等研究。

2 分层模糊系统

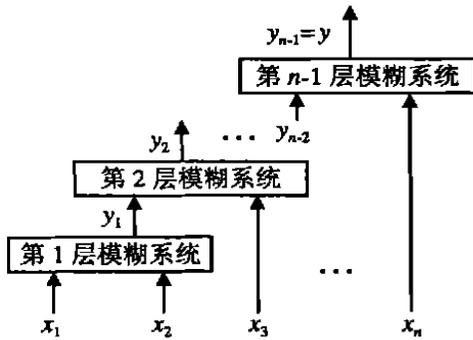


图1 n个输入变量的分层模糊系统结构

图1给出一个具有n个输入变量的特殊分层模糊系统的结构。它将变量 x_1 和 x_2 输入到第1层模糊系统,将其输出 y_1 和另一个变量 x_3 输入到第2层模糊系统,如此进行下去。虽然它是一个特殊的分层模糊系统,但可证明它在规则数最小的意义下是最优的^[2]。

第1层模糊系统的规则为

$$\text{If } \bar{x}_1 \text{ is } A^1_1 \text{ and } \bar{x}_2 \text{ is } A^1_2 \text{ Then } y_1 = h^1_1(x_1, x_2) \quad (1)$$

其中, \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 是将 x_1 和 x_2 模糊化后得到的模糊变量, A^1_1 和 A^1_2 是模糊集, $l = 1, 2, \dots, L_1, L_1$ 为第1层模糊规则库中所含模糊规则的个数。若采用模糊单值产生器、乘积推理规则、加权平均去模糊化方法, 则该层模糊系统输出为

$$y_1 = \frac{\sum_{l=1}^{L_1} h^1_1(x_1, x_2) \mu_{A^1_1}(x_1) \mu_{A^1_2}(x_2)}{\sum_{l=1}^{L_1} \mu_{A^1_1}(x_1) \mu_{A^1_2}(x_2)} \quad (2)$$

式中 $\mu_{A^1_1}(x_1)$ 和 $\mu_{A^1_2}(x_2)$ 为 A^1_1 和 A^1_2 相应的隶属函数。

第 $i (i = 2, 3, \dots, n - 1)$ 层模糊系统的规则为

$$\text{If } \bar{x}_{i+1} \text{ is } A^i_{i+1} \text{ and } \bar{y}_{i-1} \text{ is } B^i_{i-1} \text{ Then } y_i = h^i_i(x_{i+1}, y_{i-1}) \quad (3)$$

其中, \bar{x}_{i+1} 和 \bar{y}_{i-1} 是将 x_{i+1} 和 y_{i-1} 模糊化后得到的模糊变量, A^i_{i+1} 和 B^i_{i-1} 是模糊集, $l = 1, 2, \dots, L_i, L_i$ 为第 i 层模糊规则库中所含模糊规则的个数。若采用模糊单值产生器、乘积推理规则、加权平均去模糊化方法, 则第 i 层模糊系统输出为

$$y_i = \frac{\sum_{l=1}^{L_i} h^i_i(x_{i+1}, y_{i-1}) \mu_{A^i_{i+1}}(x_{i+1}) \mu_{B^i_{i-1}}(y_{i-1})}{\sum_{l=1}^{L_i} \mu_{A^i_{i+1}}(x_{i+1}) \mu_{B^i_{i-1}}(y_{i-1})} \quad (4)$$

式中 $\mu_{A^i_{i+1}}(x_{i+1})$ 和 $\mu_{B^i_{i-1}}(y_{i-1})$ 为 A^i_{i+1} 和 B^i_{i-1} 相应的隶属函数。

记 $y_0 = x_1, B^l_0 = A^l_1, l = 1, 2, \dots, L_1$ 。仿照文献[1], 定义模糊基函数

$$\xi^i_l(y_{i-1}, x_{i+1}) = \frac{\mu_{A^i_{i+1}}(x_{i+1}) \mu_{B^i_{i-1}}(y_{i-1})}{\sum_{l=1}^{L_i} \mu_{A^i_{i+1}}(x_{i+1}) \mu_{B^i_{i-1}}(y_{i-1})} \quad (5)$$

则有

$$y_i = \sum_{l=1}^{L_i} \theta^i_l \xi^i_l = \Theta^i \xi^i, \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (6)$$

其中, $\Theta = h^i_l(x_{i+1}, y_{i-1}), l = 1, 2, \dots, L_i; \theta = (\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^{i-1})^T, \xi = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^{i-1})^T, i = 1, 2, \dots, n - 1$ 。于是各层模糊系统总的输出为

$$y_{n-1} = \Theta^{n-1} \xi_{n-1}(y_{n-2}, x_n) \quad (7)$$

式中 y_{n-2} 由式(1)确定。

3 控制任务与模糊控制器的设计

考虑文献[1]研究的非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n - 1 \\ \dot{x}_n = f(x_1, \dots, x_n) + bu, & n = 3 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, f 为未知的连续函数, b 为未知正常数, $u \in R$ 和 $y \in R$ 分别为系统的输入和输出。设状态 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是可测的, 控制任务是使 y 跟踪给定的有界光滑参考信号 $y_d(t)$ 。与文献[1]一样, 对系统(2)作如下假设:

假设1 能找到函数 $f^U(x)$ 和常数 b_L, b_0 , 使得 $|f(x)| \leq f^U(x), 0 < b_L \leq b_0$ 其中 $x \in U_c, U_c$ 为可控区域。

定义跟踪误差 $e = y_d(t) - y$, 选取常数 $s_0 < 0$, 令 $s_k = h_k s_0 (k = 1, 2, \dots, n - 1), 1 = h_1 < h_2 < \dots < h_{n-1}$, 作霍尔维茨多项式

$$h(s) = \sum_{k=1}^{n-1} (s - s_k) \triangleq s^{n-1} + \lambda_{n-1} s^{n-2} + \dots + \lambda_1 \quad (9)$$

取滤波误差

$$r = e^{(n-1)} + \lambda_{n-1} e^{(n-2)} + \dots + \lambda_1 e \quad (10)$$

记

$$u^* = \frac{1}{b} (y_d^{(n)} - f + \lambda_{n-1} e^{(n-1)} + \dots + \lambda_1 e + Kr) \quad (11)$$

式中常数 $K > 0$ 为设计参数。由系统(8)知

$$\dot{r} = -Kr - b(u - u^*) \quad (12)$$

设计控制为

$$u = u_c + u_h + u_s \quad (13)$$

式中分层模糊控制器的输出

$$u_c = u_c(x | \theta) = \theta_{i-1}^T \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) \quad (14)$$

其中, $\theta = (\theta^1, \dots, \theta^{n-1})^T$, $y_{n-2} = \theta_{i-2}^T \xi_{i-2}(y_{n-3}, x_{n-1})$, $y_{n-3} = \theta_{i-3}^T \xi_{i-3}(y_{n-4}, x_{n-2})$, ..., $y_1 = \theta_i^T \xi_1(x_1, x_2)$, u_h 为中间各层模糊系统输出之和, 即

$$u_h = y_1 + y_2 + \dots + y_{n-2} \quad (15)$$

监督控制 u_s 取为

$$u_s = I \operatorname{sgn}(r) \left[|u_c + u_h| + \frac{1}{bL} (f^U + |y_d^{(n)} + \lambda_{n-1} e^{(n-1)} + \dots + \lambda_1 e + Kr) \right] \quad (16)$$

式中, 当 $V_r \triangleq \frac{1}{2} r^2 > \bar{V}$ (\bar{V} 为设计者取定的常量) 时 $I = 1$, 当 $V_r \leq \bar{V}$ 时 $I = 0$.

由式(12) ~ (16) 知, 当 $V_r > \bar{V}$ 时 $\dot{V}_r < 0$. 故存在有限时刻 t_1 , 当 $t > t_1$ 时 $V_r(t) \leq \bar{V}$. 故

$$|r(t)| \leq \max\{\max_{0 \leq t_1} |r(t)|, \sqrt{2\bar{V}}\} \triangleq q, \quad \forall t \geq 0$$

于是诸 $e^{(i)}$ 有界, 故 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 也有界.

定理 1 对控制对象(8), 采用模糊控制器(13) ~ (18), 参数向量 $\theta (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 由下列自适应律来调节.

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \alpha r \xi_i, & |\theta| \leq M_i, r \theta^T \xi_i \leq 0 \\ \alpha r (\xi_i - \frac{\theta \theta^T \xi_i}{|\theta|^2}), & |\theta| = M_i, r \theta^T \xi_i > 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\alpha (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 为正常数, $M_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 为设计参数. 于是:

1) 参数 θ 满足

$$|\theta(i)| \leq M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (18)$$

2) 误差 e 一致最终有界, 且 $\forall \epsilon > 0$, 同时增大 K 和 $|s_0|$ 或仅增大 $|s_0|$ 的值可使稳态误差 $|e| < \epsilon$.

证明 1) 式(18) 的证明与文献[1] 类似, 此略.

2) 先定义

$$\theta^* = (\theta^{*T}, \dots, \theta^{*T}) =$$

$$\arg \min_{|\theta|} \max_{i=1, \dots, n-1} \left[\sup_{|x| \leq M_x} |u - u^*| \right]$$

M_x 为设计参数. 再定义模糊最小近似误差 $w = u_c(x | \theta^*) - u^*$.

将式(12) 改写成

$$\dot{r} = -Kr + b(\theta^* - \theta)^T \xi_1(x_1, x_2) + \dots +$$

$$b(\theta_{i-1}^* - \theta_{i-1})^T \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) -$$

$$b\theta^{*T} \xi_1(x_1, x_2) - \dots -$$

$$b\theta_{i-2}^{*T} \xi_{i-2}(y_{n-3}, x_{n-1}) -$$

$$b(\theta_{i-1}^{*T} \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) - u^*) - bu_s$$

取李亚普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} r^2 + \frac{b}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\alpha_i} (\theta^* - \theta)^T (\theta^* - \theta)$$

则

$$\dot{V} = -Kr^2 + b|r| \left| \sum_{i=1}^{n-2} \theta^{*T} \xi_i \right| +$$

$$b|r| \left| (\theta_{i-1}^{*T} \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) - u^*) \right|$$

由于已证诸 $|\theta^*| \leq M_i$, 从而 $|\theta^{*T} \xi_i| \leq M_i$. 故

可设 $\left| \sum_{i=1}^{n-2} \theta^{*T} \xi_i \right| \leq N_1$, N_1 为正常数. 同理,

$|u_c(x | \theta^*)| \leq M_{n-1}$. 注意到

$$|\theta_{i-1}^{*T} \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) - u^*| =$$

$$|\theta_{i-1}^{*T} \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) - u_c(x | \theta^*) + w|$$

$$\leq M_{n-1} + M_{n-1} + |w|$$

因为诸 x_i 和 y_i 均有界, 从而 w 也有界. 故可设

$|\theta_{i-1}^{*T} \xi_{i-1}(y_{n-2}, x_n) - u^*| \leq N_2$, N_2 为正常数. 于是

当 $|r| > b(N_1 + N_2)/K \triangleq \delta$ 时, $\dot{V} < 0$. 因为诸 θ 有界, 可设 $|\theta^* - \theta| \leq M_i^*$, M_i^* 为一正常数, $i = 1,$

$\dots, n-1$. 记 $E = [r, (\theta - \theta^*)^T]^T$, 定义

$$B = \{E: |r| \leq \delta, |\theta^* - \theta| \leq M_i^*,$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1\}$$

$$S(p) = \{E: V \leq p, |\theta^* - \theta| \leq M_i^*,$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1\}$$

取包含闭集 B 的形如上式的最小闭集

$$S(p_1) = \{E: V \leq p_1, |\theta^* - \theta| \leq M_i^*,$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1\}$$

其中 $p_1 = \frac{1}{2} \delta^2 + \frac{b}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\alpha_i} M_i^{*2}$. 任取 $p_2 > p_1$, 令

$$V(t_0) = \frac{1}{2} r^2(t_0) + \frac{b}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\alpha_i} (\theta^* - \theta(t_0))^T (\theta^* - \theta(t_0)) \triangleq p_0$$

当 $E(t_0) \in S(p_2)$ 时, 令 $c_0 \triangleq \min\{Kr^2 - b|r|(N_1 + N_2): E \in S(p_0) \cap \text{Int}S(p_2)\}$, $\text{Int}S(p_2)$

表示 $S(p_2)$ 的内部,

$$T \triangleq \begin{cases} 0, & E(t_0) \in S(p_2) \\ \frac{p_0 - p_2}{c_0}, & E(t_0) \notin S(p_2) \end{cases}$$

由文献[5] 知, 当 $t > t_0 + T$ 时, $E(t) \in S(p_2)$. 由

$$\frac{1}{2} r^2 + \frac{b}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\alpha_i} (\theta^* - \theta)^T (\theta^* - \theta) < p_2$$

糊控制的作用下, 总能有 $|r| < \sqrt{2p_2}$, 且增大 K 的值可使 δ 减小, 进而可使 p_2 减小。易知

$$e(t) = \sum_{k=1}^{n-1} c_k e^{h_k s_0 t} + \int_0^t e^{-h_k s_0 \tau} r(\tau) d\tau + \sum_{k=1}^{n-1} d_k e^{h_k s_0 t}$$

其中

$$c_k = \frac{1}{s_0^{n-2} \prod_{i=1, i \neq k}^{n-1} (h_k - h_i)}$$

$$d_k = c_k \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_{n-i} (h_k s_0)^{n-i-j-1} e^{(j)}(0)$$

$$\lambda_n \triangleq 1, \quad k = 1, 2, \dots, n-1$$

故有

$$|e(t)| \leq \sqrt{2p_2} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{|c_k|}{|h_k s_0|} + \sum_{k=1}^{n-1} d_k e^{h_k s_0 t}$$

由上式知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时

$$|e| \leq \frac{\sqrt{2p_2}}{|s_0|^{n-1}} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{|h_k| \prod_{i=1, i \neq k}^{n-1} |h_k - h_i|}, \quad \forall \epsilon > 0$$

由上式知同时增大 K 和 $|s_0|$ 或仅增大 $|s_0|$ 的值, 可使稳态误差 $|e| < \epsilon$

4 仿真研究

考虑由直流电动机驱动的倒立摆的动态方程^[6]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = K_1 \sin x_1 + K_2 x_3 \\ \dot{x}_3 = K_3 x_2 + K_4 x_3 + K_5 u \\ y = x_1 \end{cases}$$

式中状态变量 x_1, x_2, x_3 以及常数 $K_1 = 9.8, K_2 = 1, K_3 = -10, K_4 = -10, K_5 = 10$ 的意义参见文献[6]。

作变换 $\bar{x}_1 = x_1, \bar{x}_2 = x_2, \bar{x}_3 = K_1 \sin x_1 + K_2 x_3$, 则原动态方程变为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2, \quad \dot{\bar{x}}_2 = \bar{x}_3 \\ \dot{\bar{x}}_3 = (K_1 \cos \bar{x}_1 + K_2 K_3) \bar{x}_2 + K_4 (\bar{x}_3 - K_1 \sin \bar{x}_1) + K_2 K_5 u \\ y = \bar{x}_1 \end{cases}$$

控制目标是使倒立摆呈垂直倒立状态, 即让 y 跟踪 $y_d = 0$ 。

已知 $b_1 = 5, |f| = -K_1 K_4 + (K_1 - K_2 K_3) |\bar{x}_2| - K_4 |\bar{x}_3|$ 。假设 $|\bar{x}_i| \leq M_{\bar{x}_i} = \pi/3 (i = 1, 2), |\bar{x}_3| \leq M_{\bar{x}_3} = 4$, 要求稳态误差 $|e| < 0.01$ 。取 $M_1 = 1, M_2 = 3$ 。采用两层模糊系统构成模糊控制器, 第1层的输入为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 , 其输出(即内层状态变

量) $y_1 = 0$, 在 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 的论域上定义5个模糊集合, 在 y_1 的论域上定义6个模糊集合, 其隶属函数为

$$\mu_{A_i^k} = \exp\left[-\left(\frac{\bar{x}_i + (3-k)\pi/6}{\pi/5}\right)^2\right]$$

$$i = 1, 2, \quad k = 1, 2, \dots, 5$$

$$\mu_{B^k} = \exp[-20(y_1 - (k-1) \cdot 0.2)^2]$$

$$k = 1, 2, \dots, 6$$

第2层的输入为 y_1 和 \bar{x}_3 , 在 \bar{x}_3 的论域上定义8个模糊集合, 其隶属函数分别为

$$\mu_{A_3^1} = 1/(1 + \exp[5(\bar{x}_3 + 3)^2])$$

$$\mu_{A_3^8} = 1/(1 + \exp[-5(\bar{x}_3 - 3)^2])$$

$$\mu_{A_3^k} = \exp[-(\bar{x}_3 + 4.5 - k)^2]$$

$$k = 2, 3, \dots, 7$$

两层模糊系统中总的模糊规则数目为73。若采用传统的模糊系统, 则需200条模糊规则。将 θ 和 θ 各分量的初值分别取为 $[0, 1]$ 和 $[-2, 2]$ 上的随机数, 设初始条件 $\bar{x}_1(0) = \pi/18, \bar{x}_2(0) = 0, \bar{x}_3(0) = 0$ 。取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.1, \bar{V} = 3, K = 100, s_0 = -2, h_2 = h_1 = 1$ 即可。若取 $s_0 = -3$, 则在 \bar{V} 增至5而其它参数不变时, 仍可使 $|e|$ 减小。仿真结果分别如图2中曲线和 所示。

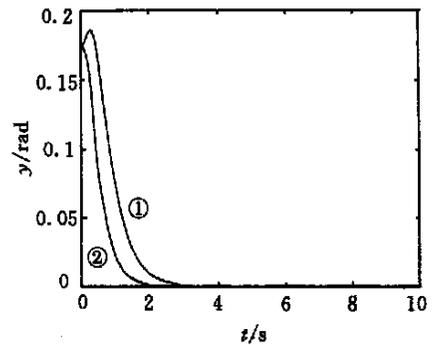


图2 系统仿真结果

另外, 对于分层模糊间接自适应控制也进行了研究, 将另文给出。

参考文献 (References):

[1] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 164-180

[2] G V S Raju, Jun Zhou, Roger A Kisner. Hierarchical fuzzy control [J]. *Int J Control*, 1991, 54(5): 1201-1216

[3] Chen Wei, Li Xin Wang. A note on universal approximation by hierarchical fuzzy systems [J]. *Inforsci*, 2000, 123(3/4): 241-248

(下转第472页)

水蓄能电厂1号机组水导轴承的 x 方向摆度,包括从1998年11月16日到1999年2月12日的历史数据,共有6000个样本。应用本文提出的算法进行特征选取和样本优化。特征量系数采用实数取值方式,范围为 $[0, 10]$,采用实数编码,其变异操作式(5)中进化率 α 取0.5;样本控制基因的变异概率取0.01,适应度函数式(3)中的比例系数 a 取0.67, b 取0.33,初始群体个数为128,经过60次迭代,算法的分类结果如表2所示。为使特征量系数之间具有可比性,将基频特征量系数固定为1.0,因为特征量系数的同比增加不影响分类结果。特征量系数列于表3。

表2 样本分类结果

原始样本 正确分类 数 P	$P/\text{总}$ 样本数	选择后 样本数 S	样本优化 后正确分 类数 P	P/S	特征优化 后正确分 类数 Q	Q/S
5 056	82.27%	5 904	5 071	85.89%	5 405	91.55%

表3 特征量系数

编号	名称	系数
1	水头压差	2.28
2	导叶开度	3.66
3	平均值	4.20
4	平均峰峰值	3.41
5	最大值	2.78
6	最小值	4.31
7	基频	1.0
8	磁极频率	0.25
9	转轮叶片频率	3.01
10	尾水涡带频率	2.14
11	电磁振动频率	1.12
12	2倍基频	5.46
13	推力轴承频率	3.73
14	其它频率1	1.45
15	其它频率2	1.13

表2中,原始样本的分类准确率为82.27%,经过样本优化后分类准确率为85.89%,而同时进行特征选取和样本优化的分类准确率为91.55%。这说明样本优化和特征选取均能提高样本最近邻聚类的分类精度,并且二者结合的效果更好。因此,基于遗传算法的最近邻聚类算法能大大提高机组工况分

类识别的效果。

由表3可以看出,在时域特征量和频率特征量中,机械因素和水力因素特征量所含的信息量较多,而电磁因素的特征量所含信息量相对较少。从系统的角度看,这些特征量的系数在很大程度上反映了作为系统的机组的内在特性,系统在相同激励下的响应特征相同,机组在不同负荷激励下的响应特征应具有分类特性。因此,考察特征量系数和数据分类分布规律以及它们随时间的变化情况,可以发现机组的运行状态是否发生变化。

4 结 语

应用实例说明,基于遗传算法的最近邻聚类算法,可通过放大有用的特征量,抑制去除无用的特征量以及优化样本等手段,有效地提高样本的分类识别精度,从模式识别的角度找出大量数据所包含的有用信息。基于遗传算法的最近邻聚类算法,不仅可作为一种独立的聚类算法应用于模式识别,而且其优化选取的特征量及系数和数据样本可供其它数据处理方法使用。

参考文献(References):

- [1] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 冯辅周,褚福磊,丁汉哲. KL-Bayes方法在故障模式识别中的应用[J]. 振动工程学报,1999,12(4):499-504.
(Feng Fuzhou, Chu Fulei, Ding Hanzhe. Application of KL-Bayes method to the fault pattern diagnosis[J]. *J of Vibration Eng*, 1999, 12(4): 499-504.)
- [3] P R Krishnaiah, L N Kanal. *Classification, Pattern Recognition and Reduction of Dimensionality* [M]. New York: North-Holland, 1982.
- [4] 陈国良,王熙法,庄镇泉,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.
- [5] K Miettinen, P Neittaanmaki, M M Mäkelä. *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science* [M]. New York: Wiley, 1999.

(上接第468页)

- [4] G V S Raju, Jun Zhou. Adaptive hierarchical fuzzy controller[J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1993, 23(4): 973-980.
- [5] Spong M W, Thorp J S, Kleinwaks J M. Robust micro-processor control of robot[J]. *Automatica*, 1987, 23(3):

373-379.

- [6] Stanislaw H Zak, Carl A Mallerly. State-feedback control of non-linear systems[J]. *Int J Control*, 1986, 43(4): 1497-1519.