

文章编号: 1001-0920(2004)05-0577-05

自适应模糊神经控制器在 M M O 系统中的应用研究

王艳秋^{1,2}, 王建辉¹, 顾树生¹, 朱延枫²

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2 辽宁工学院 信息科学与工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 首先给出一种适用于 M M O 系统的自适应模糊控制器, 然后针对该控制器用于复杂系统时, 存在模糊规则过多且建立规则的时间随规则数增加呈指数增长的问题, 提出了另一种适用于 M M O 非线性系统的自适应模糊神经控制器. 该控制器采用“全逼近”的控制策略, 依据李亚普诺夫方法给出了模糊神经自适应输出反馈控制律和参数自适应律. 仿真研究证明了 M M O 非线性系统系统的稳定性以及跟踪误差的收敛性.

关键词: M M O 系统; 自适应模糊神经控制器; 控制量校正; 控制规则修正; 稳定性

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Application research of adaptive fuzzy neural controller for M M O system

WANG Yan-qiu^{1,2}, WANG Jian-hui¹, GU Shu-sheng¹, ZHU Yan-feng²

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China Correspondent: WANG Yan-qiu, E-mail: rurality06@sohu.com)

Abstract A fuzzy adaptive control is proposed for M M O system. For a complex system, because its fuzzy rules are too much and the time of founding rules increases exponentially with the increase in the number of rules, a fuzzy-neural adaptive control is proposed for M M O nonlinear system. The control scheme of “full approximation” is used in the controller design. The output feedback control law and parameter adaptive law are derived by Lyapunov function approach. The simulation results show that the closed-loop system is stable and the tracking error is convergence.

Key words: M M O system; fuzzy-neural adaptive controller; rectified control variable; corrected control rules; stability

1 引言

近年来, 国内外许多学者都致力于自适应模糊控制器的研究, 并取得了许多成果^[1~3]. 但在实际应用中, 对于那些具有非线性、大时滞的复杂系统, 模糊规则增多, 限制了自适应模糊控制的应用范围. 而神经网络是自适应的且可以训练的, 具有自学习能力; 又因其结构本身决定了它是大规模并行机制, 故其处理速度较自适应模糊控制器要快得多. 本文首

先给出一种适用于 M M O 系统的自适应模糊控制器, 然后针对该控制器在应用于复杂系统时, 模糊规则过多且建立规则的时间随规则数增加而以指数增长的问题, 提出了一种适用于 M M O 非线性系统的自适应模糊神经控制器. 本文将对这两种控制方法进行深入探讨.

2 自适应模糊控制器

自适应模糊控制系统如图 1 所示, 它比一般的

收稿日期: 2003-04-14; 修回日期: 2003-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60274024).

作者简介: 王艳秋 (1955—), 女, 辽宁锦县人, 教授, 博士生, 从事近代交流调速系统、智能控制的研究; 顾树生 (1939—), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师, 从事近代交流调速系统、智能控制等研究.

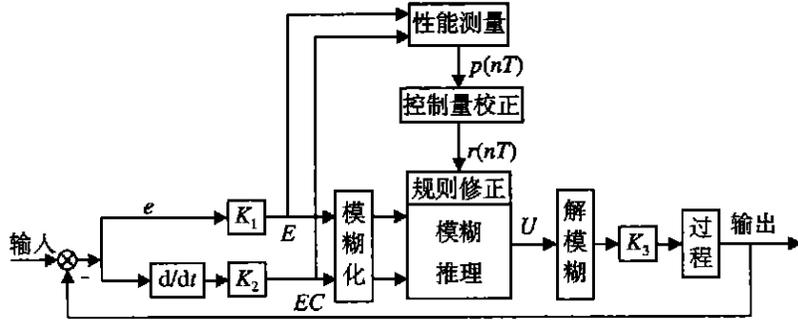


图1 自适应模糊控制系统

模糊控制器多3个环节:性能测量、控制量校正和控制规则修正。性能测量环节用于测量实际输出特性与希望特性的偏差,以确定输出响应的校正量;控制量校正环节将输出响应的校正量转换为对控制量的校正量;控制规则修正环节修改模糊控制器的控制规则,从而实现了控制量的校正。

2.1 性能测量

如图1所示,通常选取偏差 E 和偏差变化率 EC 作为两个参量,用以衡量输出特性与希望特性的偏差情况,并根据偏差调整输出特性所需要的校正量 P 。文献[4]给出了输出量校正规则表,用该表可以根据偏差 E 和偏差变化率 EC 决定校正输出量 P 。

若将偏差 E 的论域分成14档: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 将偏差变化率 EC 和校正量的论域都分成13档: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 这样就可以构造一个输出量校正量表。

2.2 控制量的校正

由性能测量得到的输出响应校正量 $p(nT)$, 需要转化为对过程输入即控制器输出的校正量,使系统朝着期望的方向变化。设过程的输入校正量为 $r(nT)$, 则需要建立 $p(nT)$ 和 $r(nT)$ 之间的关系。对于时滞不大的M/MO系统, $r(nT)$ 可以按下述方法求得。考虑一个M/MO系统,其状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = F_1(X_1, U_1, U_2, \dots, U_n), \\ \dot{X}_2 = F_2(X_2, U_1, U_2, \dots, U_n), \\ \vdots \\ \dot{X}_n = F_n(X_n, U_1, U_2, \dots, U_n), \end{cases} \quad (1)$$

其中 U_1, U_2, \dots, U_n 为输入。当输入变化很小时,其输出的变化为

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{X}_1 \\ \delta \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \delta \dot{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial U_1} & \frac{\partial F_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial U_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial U_1} & \frac{\partial F_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial U_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial U_1} & \frac{\partial F_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial U_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta U_1 \\ \delta U_2 \\ \vdots \\ \delta U_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

在采样周期 T 足够短时,当输入变化为 $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$ 时,输出变化 $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ 可近似表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \delta \dot{X}_1 \\ T \delta \dot{X}_2 \\ \vdots \\ T \delta \dot{X}_n \end{bmatrix} = TJ \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 J 为 Jacobian 矩阵,即

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial U_1} & \frac{\partial F_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial U_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial U_1} & \frac{\partial F_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial U_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial U_1} & \frac{\partial F_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial U_n} \end{bmatrix},$$

M 为输出矩阵

如果输出所需的校正量是 $p_1(nT), p_2(nT), \dots, p_n(nT)$, 输入校正量是 $r_1(nT), r_2(nT), \dots, r_n(nT)$, 则对于一般的M/MO系统,其输入与输出之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} p_1(nT) \\ p_2(nT) \\ \vdots \\ p_n(nT) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} r_1(nT) \\ r_2(nT) \\ \vdots \\ r_n(nT) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 M 表示了某一输出量和哪些输入量有增量关系。若控制量与输出量都归一化,则 M 矩阵内的每个元素均在 -1 和 $+1$ 之间,即 M 为一模糊矩阵。

2.3 智能积分

由于模糊控制器不能消除稳态误差,且在接近稳态时容易振荡,而采用积分控制作用则可减少稳态误差,但通常的积分可能会使系统快速性变差,而且若积分参数选择不当还会导致系统振荡或发散。为此,采用智能积分(即只在某些状态下施加积分控制,并且积分方向根据当前的需要有所不同)可有效地减小系统误差。智能积分的控制算法为:1)当 $e^*ec < 0$ 或 $e = 0$ 时,对偏差进行积分;2)当 $e^*ec > 0$ 或 $e^*c = 0$ 且 $e = 0$ 时,不进行积分。

对模糊控制系统附加智能积分策略,仿真结果发现:积分因子的大小对系统的动态品质有较大的影响,如果合理选择积分因子,则能消除零点振荡现象,显著提高系统的控制品质^[4]。

3 自适应模糊神经控制器设计

鉴于系统关系矩阵维数太高,计算机难以计算和存储,因此采用自适应模糊神经控制器,即在控制规则修正的基础上增加神经网络结构

考虑 M M O 模糊神经系统为

$$\begin{aligned} \hat{f}_i(x|\theta_i) &= \mathbf{G}^T \xi(x), \\ \hat{g}_{ij}(x|\theta_j) &= \mathbf{G}_j^T \xi(x), \quad i, j = 1, 2, \dots, p. \end{aligned} \quad (5)$$

设计模糊神经控制器为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{g}_{11}(x|\theta_1) & \dots & \hat{g}_{1p}(x|\theta_p) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{g}_{p1}(x|\theta_1) & \dots & \hat{g}_{pp}(x|\theta_p) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \hat{f}_1(x|\theta) \\ \vdots \\ \hat{f}_p(x|\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{f1} \\ \vdots \\ u_{fp} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} v_1 &= y_{m1}^{(r_1)} + K_{c1r_1} \hat{e}_1^{(r_1-1)} + \dots + K_{c11} \hat{e}_1, \\ &\vdots \\ v_p &= y_{mp}^{(r_p)} + K_{c1r_p} \hat{e}_p^{(r_p-1)} + \dots + K_{cp1} \hat{e}_p. \end{aligned}$$

根据方程(6)系统输出可写为

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_p^{(r_p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1(x) \\ \vdots \\ \hat{f}_p(x) \end{bmatrix} + (G(x) + \hat{G}(\hat{x}) - \hat{G}(\hat{x})) \hat{G}^{-1}(\hat{x}) \times \begin{bmatrix} \hat{f}_1(x) \\ \vdots \\ \hat{f}_p(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{f1} \\ \vdots \\ u_{fp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f_1 - \hat{f}_1 \\ \vdots \\ f_p - \hat{f}_p \end{bmatrix} + (G(x) - \hat{G}(\hat{x})) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{f1} \\ \vdots \\ u_{fp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix}.$$

由式(6),上式可写成

$$\begin{bmatrix} e_1^{(r_1)} + K_{c1r_1} \hat{e}_1^{(r_1-1)} + \dots + K_{c11} \hat{e}_1 \\ \vdots \\ e_p^{(r_p)} + K_{c1r_p} \hat{e}_p^{(r_p-1)} + \dots + K_{cp1} \hat{e}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 - \hat{f}_1 \\ \vdots \\ \hat{f}_p - \hat{f}_p \end{bmatrix} + (\hat{G}(\hat{x}) - G(x)) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{f1} \\ \vdots \\ u_{fp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix}.$$

写成如下状态空间的形式:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= A_i e_i - B_i K_{ci}^T e_i + B_i [\hat{f}_i(x|\theta) - f_i + \sum (\hat{g}_{ij}(x|\theta_j) - g_{ij}(x) u_j) + B_i u_{fi} - B_i d_i], \\ e_i &= C_i^T e_i. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \\ C_i^T &= [1 \ 0 \ \dots \ 0], \\ K_{ci} &= [K_{ci1} \ K_{ci2} \ \dots \ K_{cir_i}]^T. \end{aligned}$$

假设 1 x 和 \hat{x} 分别属于如下的紧集 U_x 和 $U_{\hat{x}}$:

$$\begin{aligned} U_x &= \{ x \in R^n: x, m_x < \}, \\ U_{\hat{x}} &= \{ \hat{x} \in R^n: \hat{x}, m_{\hat{x}} < \}. \end{aligned}$$

假设 2 矩阵 $\hat{G}(x|\theta_j)$ 是可逆的,且 P_{is}, λ 是下面方程的正定解,且 $P_{is} > 0$:

$$\begin{aligned} A_i^T P_{is} + P_{is} A_i + Q_i - \left(\frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\rho^2} \right) P_{is} B_i B_i^T P_{is} &= 0, \\ P_{is} B_i &= C_i \end{aligned}$$

定义最优参数估计值为

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i^* &= \arg \min_{\theta_j} \sup_{x \in U_x, \hat{x} \in U_{\hat{x}}} [\hat{f}_i(x|\theta) - f_i(x)], \\ &\quad i, j = 1, 2, \dots, p; \\ \hat{\theta}_j^* &= \arg \min_{\theta_j} \sup_{x \in U_x, \hat{x} \in U_{\hat{x}}} [\hat{g}_{ij}(x|\theta_j) - g_{ij}(x)], \\ &\quad i, j = 1, 2, \dots, p. \end{aligned}$$

式中 Ω_i 和 Ω_{ij} 分别代表具有适当边界的闭子集

定义最小逼近误差为

$$w_{ii} = (f_i(\hat{x}|\hat{\theta}^*) - f_i(x)) + \sum_{j=1}^p (g_{ij}(\hat{x}|\hat{\theta}_j^*) - g_{ij}(x))u_j,$$

将 w_{ii} 代入误差状态方程,得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= A_i e_i - B_i K_{ci}^T e_i + B_i [(f_i(\hat{x}|\hat{\theta}) - \\ & f_i(\hat{x}_i|\hat{\theta}^*) + \sum_{j=1}^p (g_{ij}(\hat{x}|\hat{\theta}_j) - \\ & g_{ij}(\hat{x}|\hat{\theta}_j^*))u_j] + B_i u_{fi} + B_i w_{ii} - B_i d_i = \\ & A_i e_i - B_i K_{ci}^T e_i + B_i \Theta^T \zeta(x) + \\ & B_i \sum_{j=1}^p \Theta_j^T \zeta(x) u_j + B_i w_i + B_i u_{fi}, \\ e_i &= C_i^T e_i \end{aligned}$$

设计误差观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_i = A_i e_i - B_i K_{ci}^T e_i + K_{oi}(e_i - \hat{e}_i), \\ \hat{e}_i = C_i^T \hat{e}_i \end{cases}$$

选择 K_{oi} 使得 $A_i - K_{oi}C_i^T$ 是稳定的矩阵 定义观测误差为 $\tilde{e}_i = e_i - \hat{e}_i$, 则有

$$\begin{cases} \dot{\tilde{e}}_i = (A_i - K_{oi}C_i^T)\tilde{e}_i + B_i [\Theta^T \zeta(x) + \\ \sum_{j=1}^p \Theta_j^T \zeta(x) u_j + u_{fi} + w_i], \\ \tilde{e}_i = C_i^T \tilde{e}_i \end{cases}$$

设计模糊 H 控制 u_{fi} 和参数的自适应调节律为

$$\begin{cases} u_{fi} = -\frac{1}{\lambda} B_i^T P_{is} \tilde{e}_i = -\frac{1}{\lambda} \tilde{e}_i, \\ \dot{\hat{\theta}}_i = -\eta_i \tilde{e}_i^T P_{is} B_i \xi(x) = -\eta_i \tilde{e}_i \xi(x), \\ \dot{\hat{\theta}}_{ij} = -\eta_{ij} \tilde{e}_i^T P_{is} B_i \xi(x) u_j = -\eta_{ij} \tilde{e}_i \xi(x) u_j. \end{cases} \quad (7)$$

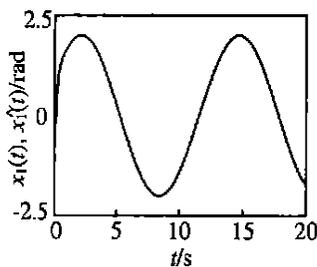


图2 状态 x_1 及其估计 \hat{x}_1

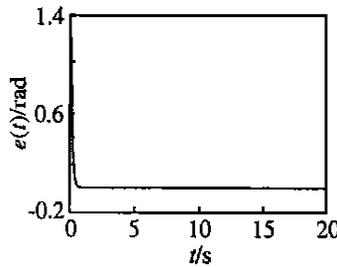


图3 跟踪误差 e_1 的曲线

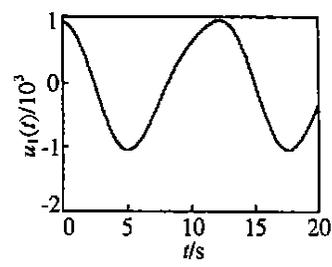


图4 控制信号 u_1 的变化曲线

5 结论

自适应模糊控制器具有两个功能: 1) 根据被控过程的运行状态给出合适的控制量, 即控制功能; 2) 根据给出的控制量的控制效果, 对控制器的控制决

其中: $\eta_i > 0, \eta_{ij} > 0, 2\rho^2 < \lambda$

于是, 对于非线性系统, 若满足假设 1 和假设 2, 且控制律及参数自适应律取式(7), 则对于给定的抑制水平 ρ , 取得跟踪性能, 且闭环系统的所有信号都是有界的, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_i(t)$ 收敛于 0

4 仿真研究

考虑如下双输入双输出系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 + x_2^2 + x_3 \\ x_1 + 2x_2 + 2x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3u_1 + u_2 \\ u_1 + 2(2 + 0.5 \sin x_1)u_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5e^{-t} \sin t \\ 0.5e^{-t} \sin t \end{bmatrix},$$

输出为

$$y_1 = x_1, y_2 = x_3$$

参考输出信号为

$$\begin{aligned} y_{m1} &= 2 \sin(0.5t + 0.5), \\ y_{m2} &= \sin t \end{aligned}$$

外界干扰为

$$d = [0 \quad 0.5e^{-t} \sin t \quad 0.5e^{-t} \sin t]$$

取初始条件为

$$\begin{aligned} x_1(0) &= x_2(0) = x_3(0) = 0, \\ \hat{x}_1(0) &= 2 \sin t, x_2(0) = \cos(0.5), \\ x_3(0) &= 0, \hat{\theta} = \hat{\theta}_j = 0, \end{aligned}$$

$\hat{\theta}_j(0)$ 在 $[-3, 3]$ 内随机选取

采用 Matlab 对其进行仿真, 积分步长为 0.001, 仿真结果如图 2~ 4 所示(仅以 x_1, e_1 和 u_1 为例)。由图可见, 所设计的控制策略能取得良好的跟踪性能

策进一步改进, 以获得更好的控制效果, 即学习功能 自适应模糊神经控制器与自适应模糊控制器的区别是: 1) 自适应且可以被训练, 具有自学习能力, 如果最后的输出不正确, 系统可以调整权值加到每

个输入上以产生一个新的结果,如此反复直至达到所期望的输出; 2) 神经网络结构本身决定了它是大规模并行机制, 由于是数据驱动的, 其处理速度比自适应模糊控制器要快得多。然而, 前一方法存在一个突出的缺点, 即对于M MO 系统其关系矩阵过大, 计算机较难存储; 而后者则弥补了前者的不足

参考文献(References):

- [1] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Syeten*, 1993, 1(2): 146-155
- [2] Sue C Y, Stepanenko Y. A daptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic[J]. *IEEE Trans on Fuzzy System s*, 1994, 2(4): 285-294
- [3] Tong S C, Tang J T, Wang T. Fuzzy adaptive output

tracking control of nonlinear systems[J]. *Fuzzy Sets and System s*, 2000, 111(2): 169-182

- [4] 刘晓霞, 田兆福, 孙金根, 等. 时滞系统的自适应模糊控制器的研究[J]. *信息与控制*, 2003, 32(2): 285-288
(Liu X X, Tian Z F, Sun J G, et al. Research on self-adaptive fuzzy controller for time-delay system [J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 285-288)
- [5] Cen J, Xu D, Sha F B. On sufficient condition for stability independent of delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 40(9): 1675-1680
- [6] Sun Y J, Hsieh J G, Yang H C. On the stability of uncertain systems with multiple time varying delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(1): 101-105.

(上接第 556 页)

6 结 语

本文基于模式定理的推广形式, 给出了含有选择、交叉操作遗传算法一致交叉概率的上限; 同时给出了含有选择、交叉和变异操作遗传算法单点变异和一致变异概率的上限。所得结果可用于指导遗传操作与控制参数的设计, 以保证期望模式随进化而增长

需要说明的是, 本文在交叉和变异概率上限的推导中, 只考虑了交叉和变异操作对模式的破坏作用, 而没有考虑这些操作对模式的积极作用。如果考虑了这种积极作用, 即使不满足本文所给出的上限要求, 种群中优良模式所含的个体数量也有可能增加。关于交叉操作与变异操作对模式增长的积极影响以及与交叉概率和变异概率之间的定量关系等问题是进一步要研究的课题

参考文献(References):

- [1] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交

通大学出版社, 2000. 1-4

- [2] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 13-14
- [3] Lobo F G. The parameter-less genetic algorithm: Rational and automated parameter selection for simplified genetic algorithm operation[D]. L isben: Pella University of L isben, 2000. 27-30
- [4] Goldberg D E, Sastry K. A practical schema theorem for genetic algorithms design and tuning[R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
- [5] Holland J H. *A daption in Natural and Artificial System s: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*[M]. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975
- [6] Goldberg D E, Deb K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms [A]. *Foundations of Genetic Algorithms* [C]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1991. 69-93