

研究简报

# 基于粗糙集的进化计算在 位置伺服系统中的应用<sup>1)</sup>

刘妹琴 廖晓昕

(华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)

(E-mail: liumeiqin@263.net)

刘健勤

(中南大学信息工程学院 长沙 410083)

**关键词** 粗糙集, 进化计算, 前馈控制器, 位置伺服系统.

## APPLICATION OF ROUGH-SET-BASED EVOLUTIONARY COMPUTATION TO POSITIONING SERVO SYSTEM

LIU Mei-Qin LIAO Xiao-Xin

(Department of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(E-mail: liumeiqin@263.net)

LIU Jian-Qin

(College of Information Engineering, Central South University, Changsha 410083)

**Key words** Rough set, evolutionary computation, feedforward controller, positioning servo system.

### 1 引言

在高速、精密的位置伺服控制系统中,位置环采用传统的P控制很难满足系统控制品质的要求.本文采用反馈-前馈控制算法,反馈控制器(FBC)为比例环节,前馈控制器(FFC)为对象的逆模型,利用基于粗糙集的进化计算(EC)<sup>[1]</sup>自适应地调整前馈控制器的参数,以补偿系统参数的变化,达到最佳控制效果.图1所示的控制系统是控制某一机械装置(机器人等)的运动,实现对目标设定值迅速、准确地跟踪<sup>[2]</sup>.图中前馈控制器的输出为

$$u_{ff} = \hat{W}_1 V_c \operatorname{sgn}\{\omega\} + \hat{W}_2 \alpha_p \theta_r + \hat{W}_3 \alpha_p \dot{\theta}_r, \quad \hat{W} = [\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3], \quad (1)$$

式中  $V_c$  为 ECFFC 的恒定输入,以补偿负载扰动.若前馈控制器为对象的逆模型,其参数为

1) 国家自然科学基金(69874016和60074008)和华中科技大学博士后专项基金资助课题.

$$W = [W_1, W_2, W_3] = \left[ \frac{-d}{K_c V_c}, \frac{1}{K_m K_c K_g \alpha_p}, \frac{\tau_m}{K_m K_c K_g \alpha_p} \right]. \quad (2)$$

如果  $\hat{W}$  收敛于  $W$ , 这时系统的恒定干扰就得以补偿, 系统具有很好的跟踪和抗扰性能.

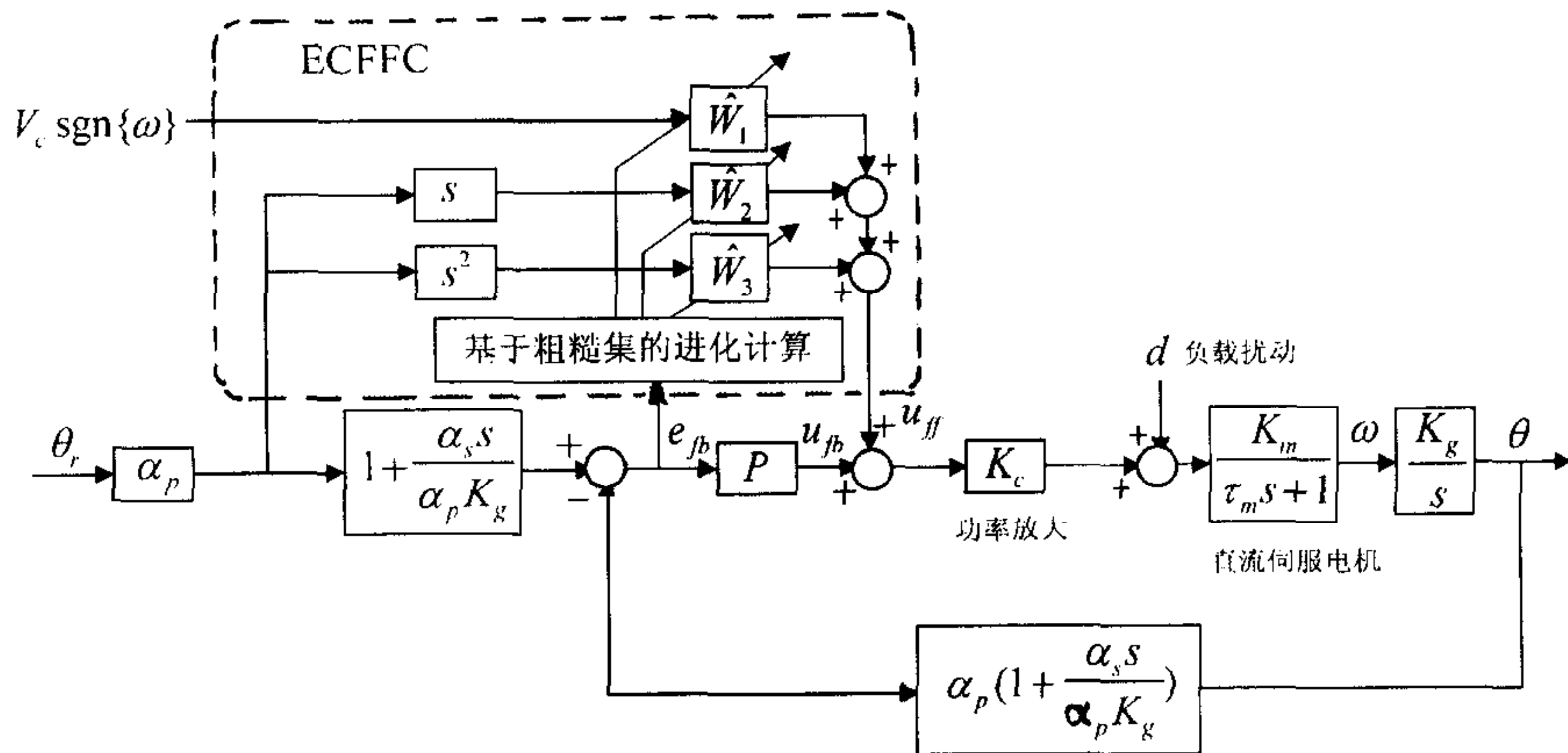


图1 ECFFC+FBC 控制的位置伺服系统框图

## 2 基于粗糙集的进化计算

### 2.1 基于粗糙集语义的候选参数约束

为了提高求解效率, 引入粗糙集手段来描述相关的语义约束, 这里是对进化计算中组成群体的个体进行一定的约束.

令个体  $\psi_i = (r_i, q_i, m_i)$ ,  $i$  为个体在群体中的序号,  $r_i$  为候选参数集  $S$  中元素的形式,  $q_i$  是反映统计特性的选择因子,  $m_i$  为该个体在  $S$  中所属子集类别. 这样群体集合  $\Psi$  可写为  $\Psi = \{\psi_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, N, N$  为群体规模).

候选参数集  $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3$ , 这里  $S_1, S_2, S_3$  分别为前馈控制器的三个参数  $\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3$  的所属集合.  $S_1 = \{K_1 X_1, X_1$  为  $0 \sim 255$  之间的整数;  $K_1$  为实数, 取经验值};  $S_2 = \{K_2 X_2, X_2$  为  $0 \sim 255$  之间的整数;  $K_2$  为实数, 取经验值};  $S_3$  由  $S_2$  所派生并动态地构造而成,  $S_3 = \tau_m S_2 = \{K_3 X_3, X_3$  为  $0 \sim 255$  之间的整数;  $K_3$  为实数, 取经验值}. 因此个体  $\psi_i$  是由  $S_1, S_2, S_3$  中各选一个元素复合而成. 选择策略采用某种概率分布(如泊松分布等)和适应度相结合的方法.

### 2.2 适应度函数

由于必须在线调整  $\hat{W}$ , 所以每个个体的适应度只能由  $u_{ff}(k)$  信号作用时下一个采样周期跟随误差  $e_{fb}(k+1)$  确定. 如果对象的时间常数比采样周期大得多, 必须在误差增加时, 加入罚函数  $f_p(k)$ . 所以第  $k$  个采样周期的适应度

$$f_n(k) = \frac{1}{e_{fb}^2(k+1) + f_p(k)},$$

$$f_p(k) = \begin{cases} 2e_{fb}(k)[e_{fb}(k+1) - e_{fb}(k)], & e_{fb}(k+1) > e_{fb}(k), \\ 0, & e_{fb}(k+1) \leq e_{fb}(k). \end{cases} \quad (3)$$

### 2.3 进化算子操作



如果对象的参数不发生波动,那么  $\hat{W}$  必须趋于稳定值,这时进化算子的操作会阻碍  $\hat{W}$  的收敛;另一方面,当参数波动时,进化算子的操作又有利于  $\hat{W}$  的收敛.所以进化算子的操作只能在一定的范围内,由跟踪误差  $e_{fb}$  决定,如图2的阴影部分.

若实施进化算子操作概率为  $P_m$ ,选中第  $n$  个个体的  $X_{1n}, X_{2n}, X_{3n}$  经进化算子操作后为  $X'_{1n}, X'_{2n}, X'_{3n}$ ,其中

$$X'_{in} = \begin{cases} X_{in} + (U_X - X_{in})rR_d, & \lambda = 0, \\ X_{in} - X_{in}rR_d, & \lambda = 1, \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3).$$

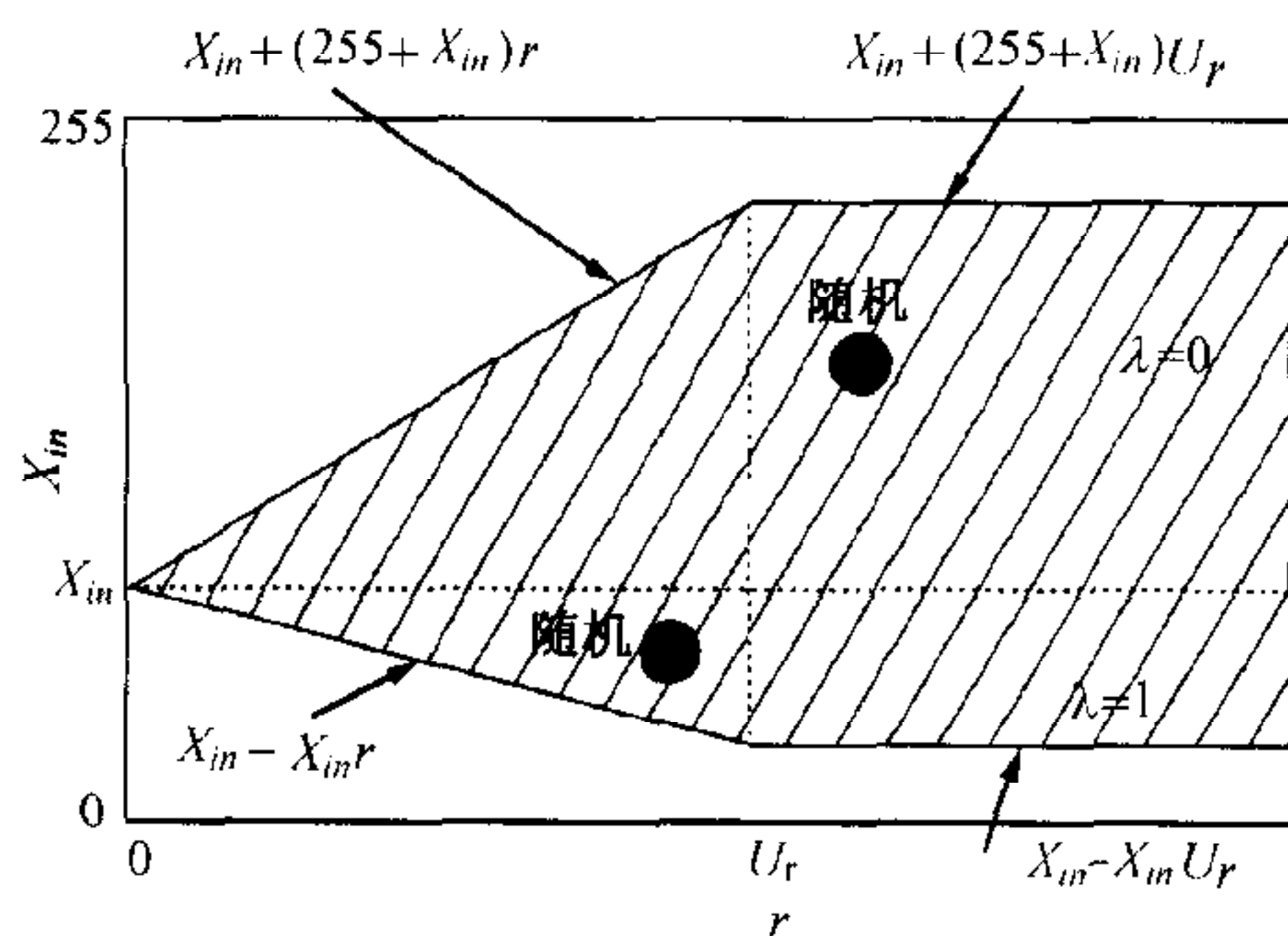


图2 进化算子操作范围

上式中  $\lambda$  为随机数( $\lambda=0$ 或 $\lambda=1$ ),当  $\lambda=0$ 时,  $X_{in}$  增加,当  $\lambda=1$ ,  $X_{in}$  减小;  $U_X (=255)$  为  $X_{in}$  的最大值;  $R_d$  为  $0 \sim 1$  之间均匀分布的随机数;参数  $r$  正比于跟踪误差  $e_{fb}$  的绝对值,如式

$$r = k_r \frac{1}{T_g} \sum_{k=1}^{T_g} |e_{fb}(k)|, \text{ 式中 } k_r \text{ 为预定义常数, } T_g \text{ 为代数周期.}$$

由此可看出,  $X_{in}$  通过  $R_d$  在搜索空间内随机地改变.

如果  $r$  大于上限值  $U_r$ ,则  $r=U_r$ ,参数  $k_r, U_r$  决定了进化算子操作的范围.  $X'_{in}$  变化范围随  $e_{fb}$  的减小而减小,这样就可以保证  $\hat{W}$  的收敛.

### 2.4 算法实现

图3为实时进化计算的流程图.为了说明方便,图中群体规模为5个,有1个优秀个体被保护.

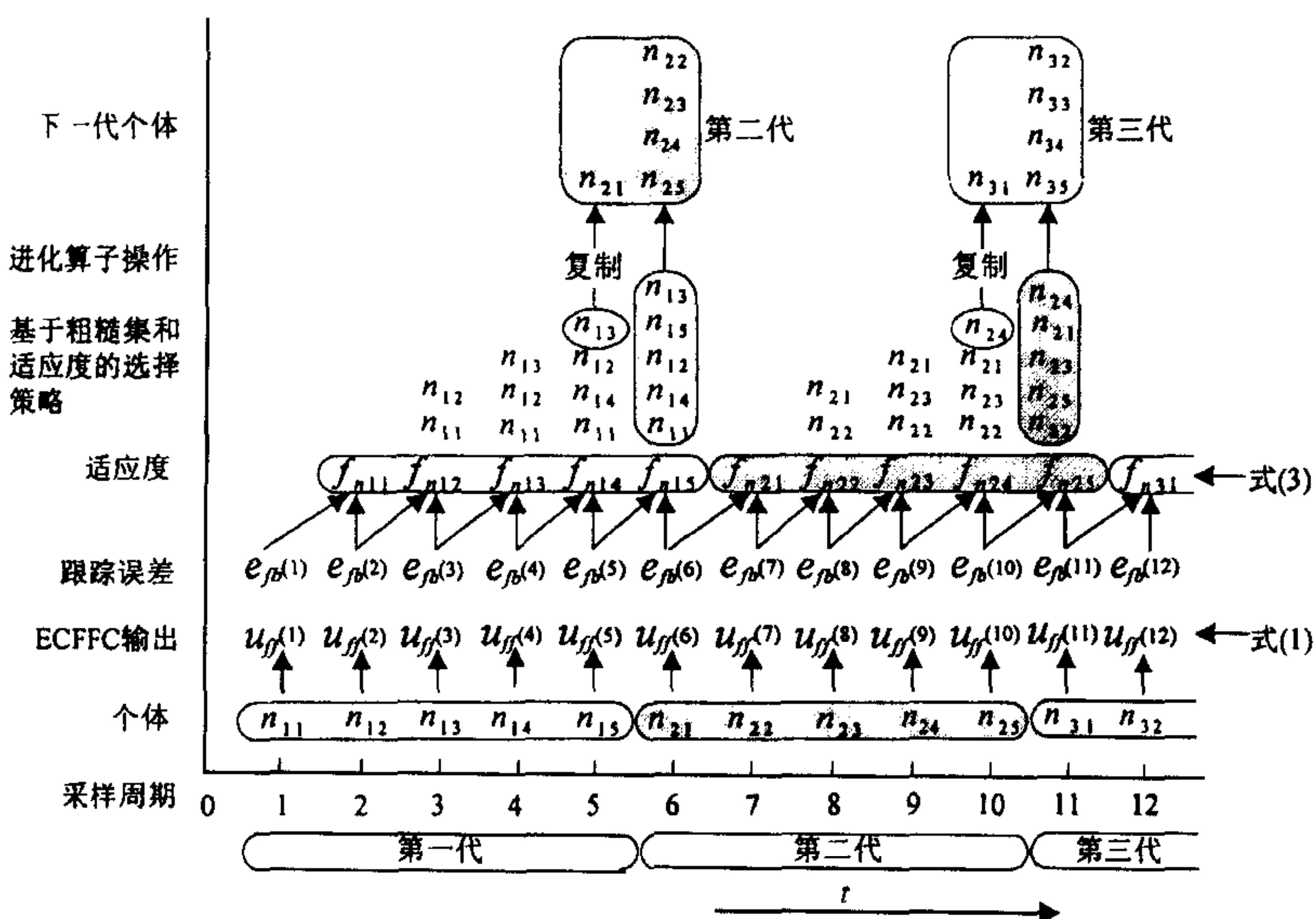
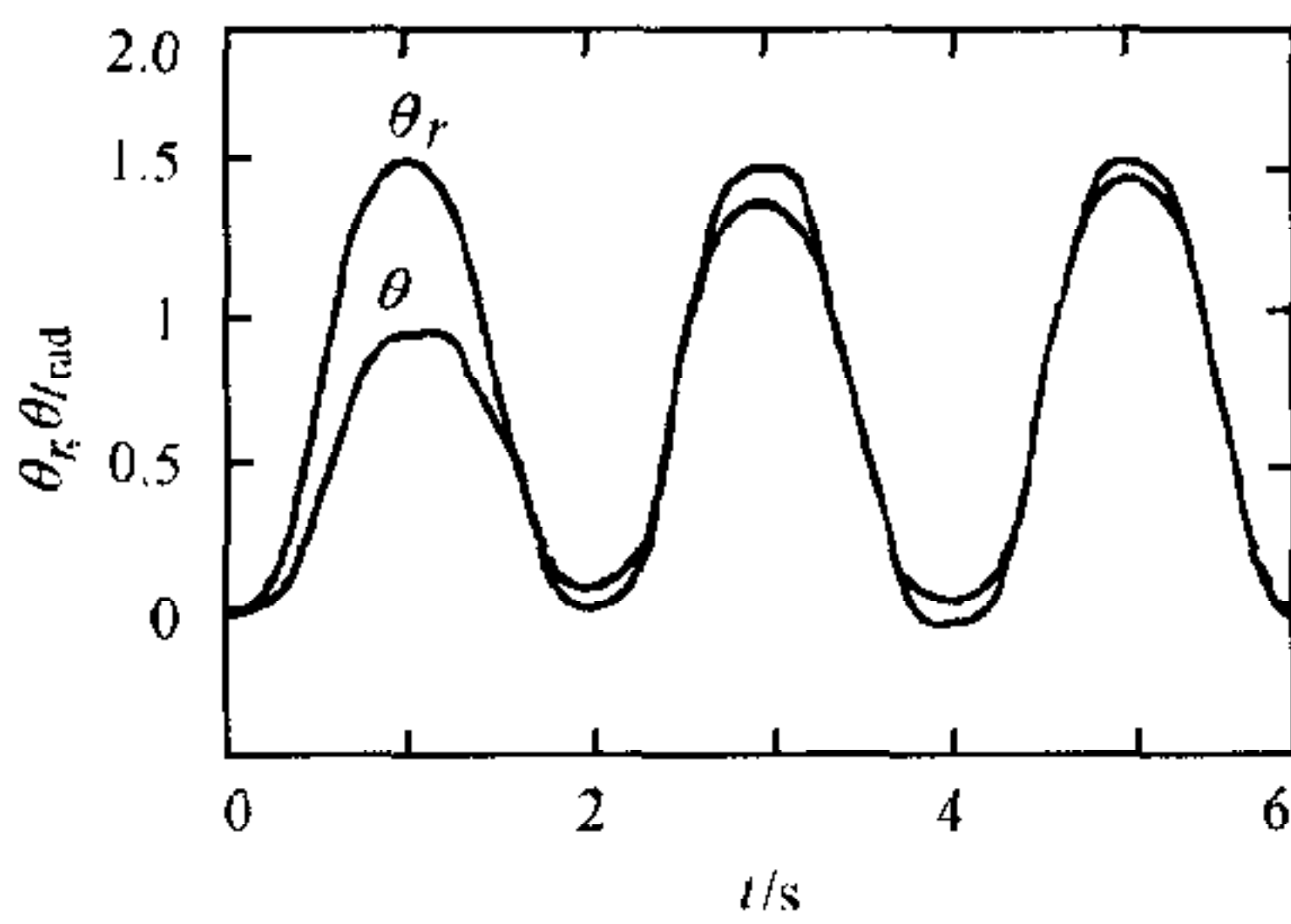


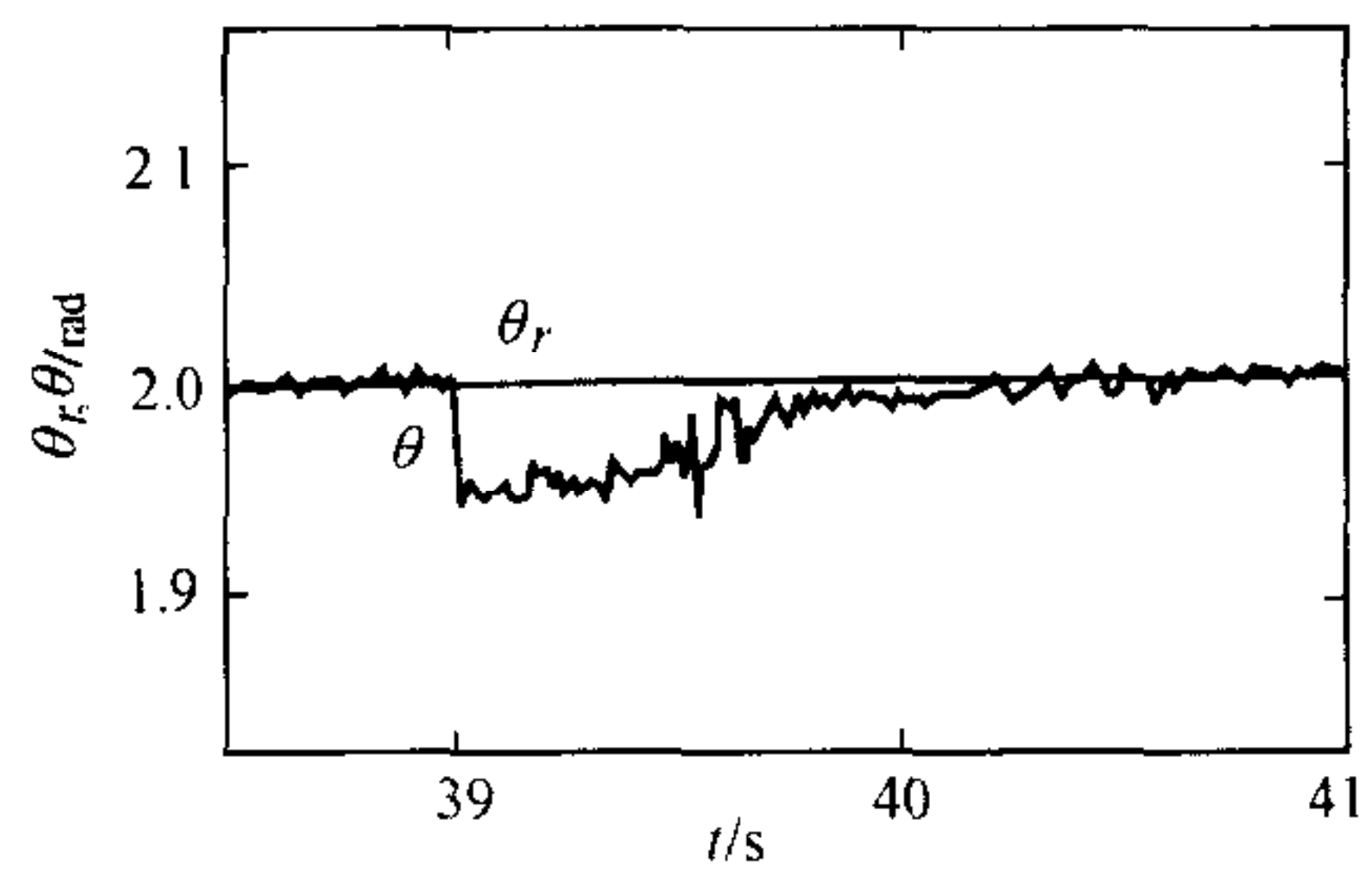
图3 实时进化计算示意图

### 3 实验结果

图1位置伺服系统中,  $\alpha_s = 0.0239 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$ ,  $\alpha_p = 1.55 \text{ (V/rad)}$ ,  $K_g = 0.01$ ,  $K_c = 4$ , 比例控制器  $P = 1$ , 群体规模  $N = 20$ , 初始群体中每个个体均设为0,  $K = [K_1, K_2, K_3] = [0.002, 0.001, 0.005]$ , 采样周期  $T = 5 \text{ ms}$ , 因此更新一代需20个采样周期(100 ms), 代数周期为  $T_g = 20$ , 进化算子操作概率  $P_m = 0.90$ , 操作范围参数  $k_r = 1.36$ ,  $U_r = 0.734$ . 图4是位置伺服系统的响应曲线. 从图4(a)可以看出, 在调节开始, 由于个体初始值为0, 所以前馈作用为0, 而位置主要由反馈控制完成, 而P控制存在固有跟踪误差, 进化计算根据误差调整前馈控制器的参数; 随着时间的推移, 前馈作用增强, 而反馈作用减弱, 输出  $\theta$  逐渐逼近  $\theta_r$ ; 当反馈作用接近于0, 系统几乎完全由前馈控制器控制, 此时  $\hat{W}$  逼近真实值  $W = [0.35, 0.854, 0.047]$  (由式(2)计算). 图4(b)是系统在恒定输出2rad时, 突加阶跃扰动  $d = 0.058 \text{ N}\cdot\text{m}$  的情况, 可以看出输出经短暂的回落后, 很快又恢复了.



(a) 跟踪特性



(b) 在突加阶跃扰动  $d = 0.058 \text{ N}\cdot\text{m}$  的响应

图4 位置伺服系统响应

### 参 考 文 献

- 1 刘健勤. 人工生命理论及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 190~197
- 2 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(第二版). 北京: 机械工业出版社, 1992. 151~187

**刘妹琴** 1972年生, 1999年毕业于中南工业大学, 获工学博士学位. 现在华中科技大学控制科学与工程系从事博士后研究工作, 研究方向为计算机控制系统、神经网络和信号处理等.

**廖晓昕** 简介见本刊1999年25卷第4期.

**刘健勤** 1964年生, 博士, 中南大学副教授. 研究方向为人工生命、粗糙集理论和进化计算等.