

# 阳极焙烧燃油供给温度的模糊预测函数控制

李晓斌, 孙海燕, 吴燕翔

LI Xiao-bin, SUN Hai-yan, WU Yan-xiang

上海海洋大学 工程学院, 上海 200090

College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China

E-mail: lixiaobin@163.com

LI Xiao-bin, SUN Hai-yan, WU Yan-xiang. Dynamic tracking F-PFC of fuel oil feeding temperature for anode baking. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(9): 200-203.

**Abstract:** The accurate control of fuel oil feeding temperature is a nonlinear dynamic tracking control problem. In practice, the fuel oil feeding temperature accurate dynamic tracking control is very difficult by traditional PID controller. It induces that it is very difficult to eject atomization and combine with air for fuel oil. So part of fuel oil have not get sufficient combustion. It always leads to waste of fuel oil and environmental pollution. These problems are solved by Fuzzy predictive functional control (F-PFC) for particle swarm optimization algorithm. These results of simulation and experiment show that the F-PFC has higher precision than the method of PID. It is proved that this method is effective in the fuel oil feeding temperature accurate dynamic tracking control for anode baking.

**Key words:** anode baking; fuel oil feeding temperature; particle swarm optimization identification and optimization; Fuzzy predictive functional control

**摘要:** 阳极焙烧燃油供给温度的精确控制是一个具有非线性特性的流体加热供给控制问题, 实际测试表明, 现有的 PID 控制很难实现对燃油供给温度的动态跟踪控制, 影响燃油的充分喷射、雾化及其与空气的混合, 使部分燃油得不到充分燃烧, 造成了能源浪费和环境污染。提出基于粒子群优化模糊预测函数控制 (PSO-F-PFC) 的油料燃烧供给温度控制方法, 通过与 PID 控制方法的比较, 以及对阳极焙烧炉重油燃烧供给温度的动态跟踪控制表明, 该方法优于原有燃油燃烧系统的 PID 控制, 实现了燃油供给温度的动态跟踪精确控制。

**关键词:** 阳极焙烧; 燃油供给温度; 粒子群优化辨识与优化; 模糊预测函数控制 (F-PFC)

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.09.058 **文章编号:** 1002-8331(2009)09-0200-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP273

## 1 引言

阳极焙烧过程是一个十分复杂的物理化学过程, 主要要求在满足阳极碳块最佳性能指标的前提下, 降低能源的消耗, 即首先必须保证重油在阳极焙烧炉中的充分燃烧; 而重油的燃烧过程主要包括喷射、雾化混合和燃烧, 在此过程中, 重油的温度、压力和流量的精确控制对于重油的喷射、雾化及其与空气的混合具有重要的影响, 是保证重油充分燃烧, 以及实现节能和净化的关键环节<sup>[1]</sup>。

对于阳极焙烧重油燃烧的供给过程而言, 重油供给温度的控制在燃烧架上进行, 受燃烧架移动, 炉室升温, 天气环境等因素的影响, 其过程工况复杂, 参数时变, 有许多随机扰动; 所以原有的 PID 控制很难实现重油供给温度的精确控制, 而当采用单纯的 PFC 控制时, 由于模型的失配<sup>[2]</sup>, 其控制效果也不是很好。提出了基于粒子群优化的模糊预测函数控制 (PSO-F-PFC)

方法, 对燃油供给温度进行精确控制, 系统模型采用 T-S 模糊模型, 利用 PSO 算法对 T-S 模糊模型进行模糊辨识与优化, 提高模型的准确性, 克服模型的失配, 然后再根据此模型对系统进行预测函数控制; 通过对重油供给温度的实际控制表明, 该方法可以实现重油供给温度的精确控制, 为重油的充分燃烧和阳极焙烧炉的节能降耗, 以及降低环境污染提供了前提保证。

## 2 T-S 模糊模型的系统辨识

在阳极焙烧炉重油输送过程中, 重油加热系统主要包括重油泵房内输送管路的内部加热系统和燃烧架上外部加热系统两部分; 由于其加热过程是一个移动式间断性加热, 受燃烧环境、天气、季节等的影响而变化, 因此是一个较难找到精确模型的典型非线性、时滞和不确定的控制对象。具体的重油供给部分工艺如图 1 所示。

**基金项目:** 国家科技攻关计划项目 (the Key Technologies R&D Program of China under Grant No.2002BA901A28); 上海海洋大学博士科研启动基金 (No.A-3605-08-0224)。

**作者简介:** 李晓斌 (1966-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能监测与预测控制研究; 孙海燕 (1975-), 女, 博士生, 讲师, 主要从事流体控制理论与应用方面的研究; 吴燕翔 (1963-), 女, 副教授, 主要从事工业自动化应用研究。

**收稿日期:** 2008-09-12 **修回日期:** 2008-11-14

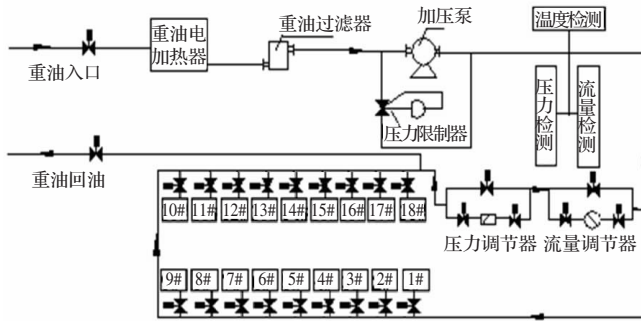


图1 重油供给系统工艺原理图

### 2.1 T-S 模糊模型

Takagi 和 Sugeno 于 1985 年提出了 T-S 模糊模型<sup>[3]</sup>,其主要思想就是把输入空间划分成若干个模糊子空间,对每个模糊子空间建立其输入-输出的线性关系模型,这样就可以将一个非线性问题化解为若干个线性问题的组合,从而提出了一种将非线性问题线性化的 T-S 模糊模型方法。

依据 T-S 模糊模型的原理,如果其模糊规则集包括  $M$  条规则,则其中的第  $i$  条规则可以表示为:

$$R_i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i,1} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{i,2} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_r \text{ is } A_{i,r},$$

$$\text{THEN } y_i(k) = \omega_{i,0} + \omega_{i,1}x_1 + \dots + \omega_{i,r}x_r, i=1, \dots, M \quad (1)$$

其中,  $x_j$  为第  $j$  个输入,  $A_{i,j}(j=1, \dots, r)$  为第  $j$  个输入对应的模糊子集,  $y_i$  为第  $i$  条规则的输出,  $\omega_{i,j}$  为结论参数。

当给定输入向量时,系统模型的输出由各条规则下输出的加权平均求得:

$$y = \sum_{i=1}^M G_i y_i / \sum_{i=1}^M G_i \quad (2)$$

其中,  $G_i$  为第  $i$  条规则的真值,由下式计算:

$$G_i = \prod_{j=1}^r A_{i,j}(x_j) \quad (3)$$

其中,  $\Pi$  为模糊化算子,通常采用取小运算。

### 2.2 模糊模型的辨识

T-S 模糊模型的辨识由前件结构辨识和后件参数辨识两部分组成。模糊模型的前件结构可以用模糊聚类<sup>[4]</sup>等方法确定,也可以通过对象的实际物理特性来确定。确定了系统模型的结构后,模型的参数辨识的方法有很多种,在 T-S 模糊模型的辨识中,对需要辨识和优化的参数通常采用启发式方法<sup>[5]</sup>和带遗忘因子最小二乘的方法<sup>[6]</sup>。本文采用粒子群优化算法(PSO)来辨识 T-S 模糊模型的后件参数。

#### 2.2.1 T-S 模糊模型的前件结构

对于燃油供给温度这一要求实时性较强、精度要求高的温度控制对象,通常都可以按照一阶惯性滞后系统来考虑,即有:

$$G(S) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{T+1} e^{-\tau s} \quad (4)$$

在采样时间为  $T_s$  的条件下将其离散化,则前件系统的结构可以表示为一阶惯性滞后系统的差分方程的形式:

$$y(k) = \alpha \cdot y(k-1) + K \cdot (1-\alpha) \cdot u(k-1-L) \quad (5)$$

式中  $\alpha = e^{-T/T_s}$ ,  $L = \tau/T_s$ ,  $u(k)$  为控制量输出,  $y(k)$  为重油温度。

在重油供给温度的精确控制中,影响供给温度控制模型的主要因素有加热功率、输送温度和流速,其中加热功率最大,输入温度次之,流速影响较小一些。所以,应用 T-S 模糊模型来描述重油供给温度精确控制过程的模糊规则模型为:

$$R_i: \text{if } TsP \text{ is } \mu^i, \text{ then } y_m^i(k) = a^i y_m^i(k-1) + b^i u(k) \quad (6)$$

其中,  $TsP$  为重油温度,  $\mu^i$  为第  $i$  条规则中的重油温度模糊子集的隶属度,  $y_m^i(k)$  为第  $i$  条规则的输出,规则输出用线性模型表示,  $a^i, b^i$  为模型参数。

选定隶属度函数的形状及其参数,进而确定模糊结构,建立完整的 T-S 模糊模型。

#### 2.2.2 辨识模糊模型的后件参数

采用粒子群优化算法辨识 T-S 模糊模型的后件参数,利用 PSO 算法对系统作参数辨识实质上是将要辨识的参数在解空间中寻优的过程,即优化模型中的未知参数,使之与所测系统模型数据拟合最好。具体步骤如下:

(1)参数编码及初始化:种群中粒子及其速度都采用实数编码。根据实际对象设定粒子的维数  $m$ ,种群大小  $n$ ,迭代次数  $iterMax$ 。初始化种群产生一个随机矩阵,包括粒子的位置及其速度。根据实际对象选取优化目标函数  $J$ ,定义适应度函数值  $f$ 。每个粒子的初始个体极值点  $pbest$  坐标设置为初始位置,且计算出每个个体粒子的适应度值,初始全局极值点  $gbest$  的适应度值就是个体极值中的最好的。

(2)自适应调节惯性权重:惯性权重  $w$  由最大惯性权重  $wMax$  线性减小到最小惯性权重  $wMin$ 。即:

$$w = wMax - iter \times \frac{wMax - wMin}{iterMax} \quad (7)$$

式中,  $iter$  为当前迭代数,而  $iterMax$  是总的迭代次数。

(3)粒子速度更新:根据下面的公式更新个体的速度:

$$v(k+1) = w \cdot v(k) + c1 \cdot rand() \cdot (pbest(k) - x(k)) + c2 \cdot rand() \cdot (gbest(k) - x(k)) \quad (8)$$

式中,  $v(k)$  为第  $k$  次迭代的速度,  $x(k)$  为第  $k$  次粒子当前的位置,  $rand()$  是(0,1)之间的随机数,  $c1$  和  $c2$  被称作学习因子,通常,  $c1=c2=2$ ,  $w$  是惯性权重。在更新过程中每个粒子每一维的最大速率被限制为  $vMax$ ,粒子每一维的最小速率被限制为  $vMin$ 。

(4)粒子位置更新:根据下面的公式更新个体的位置:

$$x(k+1) = x(k) + v(k+1) \quad (9)$$

在更新过程中每个粒子的每一维位置被限制在取值区间。

(5)评价每个粒子:计算更新后的粒子适应度,如果粒子适应度优于  $pbest$  的适应度,  $pbest$  设置为新位置;如果群体中最优粒子适应度优于  $gbest$  的适应度,  $gbest$  设置为新位置。

(6)如果满足结束条件,全局极值  $gbest$  就是所要求的最优解,算法结束;否则,转向(2)继续迭代运算。

### 3 模糊预测函数控制

模糊预测函数控制方法就是将模糊数学的方法引入到预测函数控制中,形成模糊预测函数控制(Fuzzy Predictive Functional Control, F-PFC)方法,解决预测函数控制(PFC)方法中由于模型失配严重而造成的控制无法稳定等问题。

#### 3.1 F-PFC 的基本原理

将模糊数学引入到 PFC 中基本有两种方式,一种是通过模糊建模,改进预测模型的预测输出,降低模型的失配度;另外一种是通过模糊预测对控制的偏差进行模糊补偿,以降低模型失配对系统控制性能的影响。

ŠKRJANC 和 MATKO 提出了 F-PFC 方法<sup>[7]</sup>,其主要是通过建立控制对象的全局线性 T-S 模糊模型和相应需要辨识和优

化的参数,然后通过 PFC 方法进行解决,从而将基本的 PFC 方法拓展到可以适用于非线性系统中的 F-PFC 方法。

### 3.2 F-PFC 控制方法

燃油供给温度的预测模型如式(5),对象的输出由两部分组成,即自由输出响应  $\alpha \cdot y(k-1)$  及函数输出响应  $K \cdot (1-\alpha) \cdot u(k-1-L)$ 。

参考史密斯预估控制的思想,用无时滞的过程模型来修正实际的测量值,则由式(5)的输出模型可得系统的实际过程输出值为:

$$y_p(k) = \alpha_p \cdot y_p(k-1) + K_p \cdot (1-\alpha_p) \cdot (k-1-L_p) \quad (10)$$

模型输出值为:

$$y_m(k) = \alpha_m \cdot y_m(k-1) + K_m \cdot (1-\alpha_m) \cdot u(k-1-L_m) \quad (11)$$

将模型去掉纯滞后后可得预测模型输出值为:

$$y_{ma}(k) = \alpha_m \cdot y_m(k-1) + K_m \cdot (1-\alpha_m) \cdot u(k-1) \quad (12)$$

因实际输出值  $y_p(k+L_p)$  在时刻  $k$  时未知,为此,对当前时刻的测量值  $y_p(k)$  进行修正,构造出包含未来预报信息的新过程输出值为:

$$y_{pa}(k) = y_p(k) + y_{ma}(k) - y_{ma}(k-L_m) \quad (13)$$

为适应多步预测控制算法的要求,取预测步长为  $H$ ,并且假定  $u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+H-1)$  时,根据预测模型,可由当前去掉纯滞后模型输出的值  $y_{ma}(k)$  和控制输入  $u(k)$  计算出未来  $H$  步过程输出的预测值为:

$$y_{pa}(k+H) = \alpha_m^H \cdot y_m(k) + K_m \cdot (1-\alpha_m^H) \cdot u(k) \quad (14)$$

在一阶对象和设定值作阶跃变化的情况下,只需选定一个基函数,即阶跃函数。假定参考轨迹采用时间常数为  $T_r$  的一阶曲线,则轨迹的值为:

$$y_r(k+H) = y_p(k) + [c - y_p(k)] \left[ 1 - \exp\left(-H \cdot \frac{T_s}{T_r}\right) \right] \quad (15)$$

式中,  $c$  为输出设定值,令  $\beta = \exp\left(-\frac{T_s}{T_r}\right)$ ,则式(15)可化为:

$$y_r(k+H) = \beta^H \cdot y_p(k) + (1-\beta^H) \cdot c \quad (16)$$

根据单值预测控制的思想,并引入误差反馈校正,以保证系统具有较强的鲁棒性。这样,最优化指标为:

$$J = \min [y_{ma}(k+H) + e(k) - y_r(k+H)]^2 \quad (17)$$

$$\text{则: } y_{ma}(k+H) + e(k) = y_r(k+H) \quad (18)$$

这里,  $e(k)$  为第  $k$  步实际过程值与模型输出值的偏差:

$$e(k) = y_{pa}(k) - y_{ma}(k) \quad (19)$$

将式(13)、(14)、(16)、(19)代入式(18)中,可得去掉纯滞后后的 PFC 算法的控制量为:

$$u(k) = \frac{[c - y_{pa}(k)] \cdot (1-\beta^H) + y_{ma}(k) \cdot (1-\alpha_m^H)}{K_m \cdot (1-\alpha_m^H)} \quad (20)$$

当应用于大纯滞后过程时,把对象和模型迭代过程的开始时段设定在第  $L$  步上,前  $L$  步视为滞后时间,其控制量为零。并将式(20)中的控制量在当前时刻实施应用,此后不断进行递归迭代计算。

通过上面 PFC 算法的控制量就可以计算出某一条模糊规则下 T-S 模糊模型的输出,再由各条模糊子集的隶属度函数,通过式(2),则系统模型的输出可由各条规则下输出的加权平均求得。

## 4 仿真及实验比较

### 4.1 仿真结果

仿真及实验以某一现场阳极焙烧炉燃油供给的温度为研

表 1 现场采集数据

时间/s	输出电流/mA	温度/(°C)	时间/s	输出电流/mA	温度/(°C)
0	12.5	50.82	240	17.3	90.35
30	16.3	56.12	270	18.2	91.38
60	16.8	62.79	300	17.8	92.21
90	17.0	71.08	330	17.6	92.90
120	17.2	74.91	360	17.2	93.46
150	17.3	78.15	420	16.3	94.30
180	17.1	82.21	500	15.2	94.86
210	17.5	87.36	550	13.5	94.90

究对象,以现场实际生产过程纪录的大量数据为基础,利用文中的建模和控制方法进行仿真,验证所给方法的有效性。

利用现场采集的数据对系统 T-S 模糊模型进行辨识,重油供给温度精确控制过程的模糊规则模型如式(6),重油温度隶属度函数定义如图 2 表示。

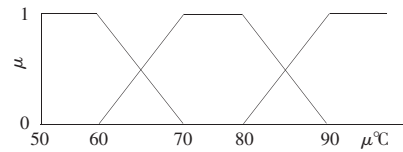


图 2 重油温度隶属度

利用 PSO 算法对 T-S 模糊模型的后件参数进行寻优,系统的输入为加热器的电功率 1.6 KW, PSO 算法的参数设置,最大惯性权重为 0.9,最小惯性权重  $w_{max}$  为 0.1,群体规模为 30,进化代数数为 100 次。利用 PSO 辨识的 T-S 模糊模型的后件参数结果如表 2 所示,仿真结果如图 3 所示。

表 2 模糊模型规则表

规则	重油温度模糊子集	$a^i$	$b^i$
1	$A_1$	0.996 1	0.255 9
2	$A_2$	0.994 3	0.342 4
3	$A_3$	0.993 2	0.407 8

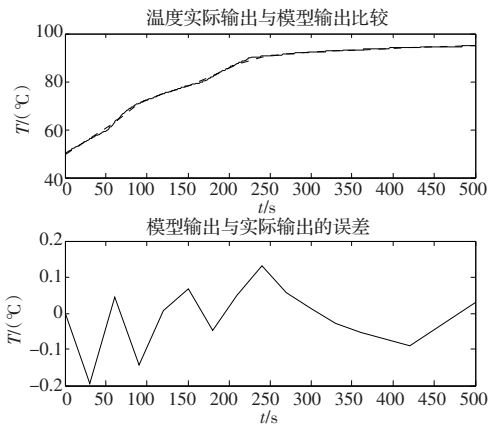


图 3 T-S 模型仿真图

从模型仿真的结果可以看出,模型仿真曲线和实际对象输出曲线拟合得比较好,模型可以反映控制对象的实际特性,满足工艺要求,可以作为预测模型使用。

运用上述建立的预测模型进行模糊预测函数控制,验证该算法的有效性。仿真参数选取预测时域  $H=10$ ,采样时间  $T_s=1$  s,参考轨迹时间常数  $T_r=1$ ,设定值为  $c=90$ 。从仿真结果可以看出,本文的控制方法具有很好的实时性,能够实现燃油供给



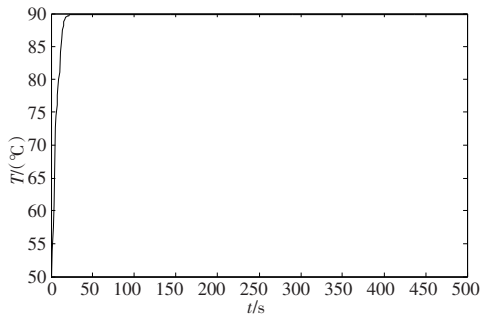


图4 F-PFC控制曲线

温度的精确解耦控制。

### 4.2 实验比较

实验和试运行均在铝电解阳极焙烧炉的燃油供给系统中进行,系统的控制目标主要是为三台燃烧架提供燃烧工艺所需要温度的重油,重油的温度对其充分喷射、雾化及其与空气的混合具有重要的影响,是保证重油充分燃烧的关键。

阳极焙烧过程是一个间歇式燃烧过程,焙烧工艺过程所造成的扰动主要是当三台燃烧架中的其中一台停燃移动时,对另外两台燃烧架的温度参数造成的影响;同时,由于每台燃烧架和每个燃烧器所处位置周围的环境温度等。

本文讨论的重油供给温度的控制范围为:0~100℃,控制绝对误差不大于±5℃;控制系统硬件主要包括:热电阻温度传感变送及测量;美国 Modicon 公司的 Quantum586 系列 DCS 硬件控制系统,以及通过 TCP/IP 协议的工业现场以太网络,实现该控制站与主控系统计算机及其它控制站之间的信息数据交换与控制等。控制系统软件主要由 Quantum586 系列 DCS 控制器专用软件 Concept2.5, Visual C, MATLAB 及 Schneider MonitorPro V7.0 软件结合实现 PSO-F-PFC 控制策略的仿真与实际控制。

图5和图6为阳极焙烧现场不移炉工作时,设定目标温度90℃,现场运行10分钟数据打印一次记录的两种控制结果比较。

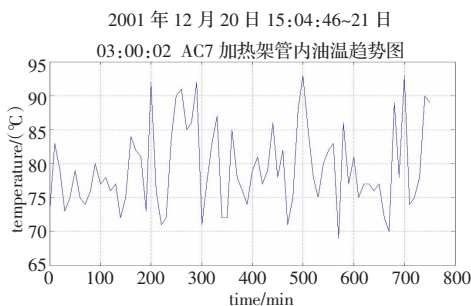


图5 原采用自整定PID控制结果

从图5、6的实验运行结果比较可以看出,原使用的基于常规改进PID控制的阳极焙烧炉重油供给温度控制,偏差在

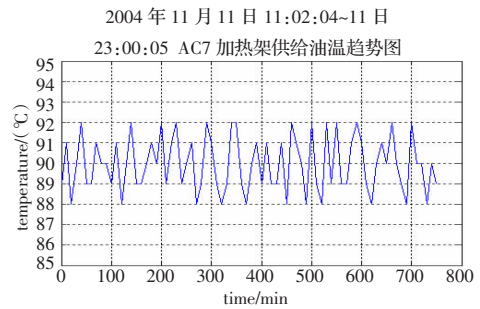


图6 F-PFC控制结果

±13℃左右,非常不利于重油的喷射、雾化、混合与燃烧;基于 PSO-F-PFC 控制的阳极焙烧炉重油温度控制系统,克服了工艺、环境等扰动造成的影响,设定与实际控制之间的温度偏差小于±2℃,实现了重油供给温度的精确控制,完全满足工艺要求控制偏差不大于±5℃的目标。

### 5 结论

提出的粒子群优化模糊预测函数控制方法,通过用 PSO 算法辨识和优化 T-S 模糊模型,采用模糊预测函数对重油供给温度进行控制,通过仿真和在铝电解阳极焙烧炉重油供给加热控制系统的试验运行表明,该控制方法优于原有的自整定 PID 控制方法,解决了重油供给温度的精确控制问题,为重油的充分燃烧和阳极焙烧炉的节能降耗提供了重要的前提保证条件。

### 参考文献:

- [1] de Moura R R, Mesquita A L A. Development and test in situ of a heavy oil burner for Alba's furnaces[J]. Light Metals, 2002, 73(5): 621-627.
- [2] Lepetic M, Skrjanc I, Chiacchiarini H G, et al. Predictive functional control based on fuzzy model: magnetic suspension system case study[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16: 425-430.
- [3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans SMC, 1985, 15(1): 116-132.
- [4] 邵青, 冯汝鹏. 非线性系统模糊辨识的新方法[J]. 控制与决策, 2001, 16(1): 83-89.
- [5] Nozaki K, Ishibuchi H, Tanaka H. A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data[J]. Fuzzy Sets and Fuzzy Systems, 1997, 86(3): 251-270.
- [6] 赵景波, 李瑞年. 基于模糊补偿的预测函数控制的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1325-1327.
- [7] Matko Š. Predictive functional control based on fuzzy model for heat-exchanger pilot plant[J]. IEEE Trans On Fuzzy Systems, 2000, 8(6): 705-712.

(上接 191 页)

- [3] Chandra T. A microarray image analysis system base on multiple-snake[R]. Video/Image Modeling and Synthesis Lab, 2004.
- [4] Angulo J, Serra J. Automatic analysis of DNA microarray images using mathematical morphology[J]. Bioinformatics, 2003, 19(5): 553-562.
- [5] Ho Jinn, Hwang Wen-Liang, Henry Horn-Shing Lu, et al. Gridding

spot centers of smoothly distorted microarray images[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(2).

- [6] Lonardi S, Luo Yu. Gridding and compression of microarray images[J]. Proc of Computational Systems Bioinformatics, 2004, 6(3): 48-65.
- [7] Bajcs P. Gridline: Automatic grid alignment in DNA microarray scans[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(1): 17-42.