

文章编号: 1001-0920(2011)05-0673-06

## 基于 T-S 模型和小世界优化算法的广义非线性预测控制

王爽心, 董 旻, 刘海瑞

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 提出一种新型的基于 T-S 模糊模型和小世界优化算法的广义非线性预测控制策略. 采用基于混沌遗传算法的 T-S 模糊模型描述复杂非线性系统的动态特性, 构成模糊多步预报器. 同时, 针对现有基于二进制和十进制编码小世界优化算法运行时间长等缺点, 提出一种新型的基于实数编码的小世界优化算法, 函数测试和应用用于非线性预测控制的滚动优化反映了其较强的寻优能力. 最后, 将其应用于基于实际数据的 T-S 模糊模型的广义非线性预测控制, 满足了系统实时性和快速稳定性的要求.

**关键词:** 小世界优化算法; 实数编码; T-S 模糊模型; 广义非线性预测控制; 过热汽温

**中图分类号:** TP319

**文献标识码:** A

## Generalized nonlinear predictive controller based on T-S fuzzy model and small-world optimization algorithm

WANG Shuang-xin, DONG Yang, LIU Hai-rui

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China.

Correspondent: WANG Shuang-xin, E-mail: shxwang1@bjtu.edu.cn)

**Abstract:** A novel generalized nonlinear predictive controller based on T-S fuzzy model and small-world algorithm is proposed. The dynamic of nonlinear system object is described by T-S fuzzy model based on chaos genetic algorithm, so a multi-step fuzzy predictor is derived. Furthermore, a novel small-world optimization algorithm with real-coding is proposed in order to avoid the deficiency of small-world optimization algorithm with binary and decimal coding or decoding, function tests and applying in moving horizon of nonlinear predictive control reflect the strong ability to optimize. Finally, generalized nonlinear predictive controller based on T-S fuzzy model of real data and a novel small-world optimization algorithm with real-coding meets the requirements of speed and real-time of control system well.

**Key words:** small-world optimization algorithm; real-coding; T-S fuzzy model; generalized nonlinear predictive control; overheated steam temperature

### 1 引言

自从 Clarke 提出广义预测控制算法(GPC)<sup>[1]</sup>以来, 以其鲁棒性、能够有效克服系统滞后、可应用于开环不稳定非最小相位系统的优越性, 深受控制人员重视, 在工业过程控制中获得了很多成功的应用. 但是, 该预测控制算法依然是基于线性系统, 对于非线性强的系统难以取得好的控制效果, 因此研究基于非线性系统的广义预测控制策略具有重要的意义.

非线性预测控制算法通常需要在线求解非线性规划问题, 计算量非常大, 而且无法保证收敛性. 文献[2]提出了反馈线性化方法, 将其非线性模型转化为一个线性模型, 但该方法局限于反馈可线性化系

统. [3]提出的 Newton 方法是将非线性模型在工作点附近线性化, 但该方法需要在线计算对象的雅可比矩阵, 工程实施较复杂. [4]采用 T-S 模糊模型描述对象的非线性动态特性, 引起了工程控制人员的重视, 并以其规则的直观性、易于检查的优点得到了大力发展. 同时神经网络<sup>[5]</sup>也在非线性系统的辨识和控制中发挥了很大的作用, 它们都已成为研究非线性预测控制的有效工具.

文献[6]提出了一种新的基于 T-S 模糊模型的非线性预测控制策略, 将其模糊预报器中的非线性优化问题转化为线性二次优化问题. 该算法机理简单, 但在解决带约束的非线性优化问题时, 可能会出现寻找

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776005).

作者简介: 王爽心(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统智能控制、过程建模与优化等研究; 董旻(1986-), 女, 硕士生, 从事混沌优化、预测控制的研究.

不到全局最优解的情况. [7] 提出了一种基于在线模糊建模和离散优化的非线性预测控制算法, 应用分支定界法对控制量进行离散寻优, 从而实现对象的非线性预测控制. [8] 采用 T-S 模型进行非线性建模, 应用遗传算法优化求解预测控制律. [9] 也将遗传算法引入模型预测控制来处理非线性系统优化问题, 但遗传算法在函数寻优时存在容易陷入局部最小值、早熟以及进化训练代数多等缺点. [10] 将混沌优化算法应用于离散时间非线性系统, 以解决非线性优化问题, 但对初值比较敏感, 对初值的选择具有很强的依赖性, 有可能导致寻优搜索效率低.

小世界优化算法是近几年才出现的新型优化方法<sup>[11-13]</sup>, 它是一个“仿社会”的编码优化算法, 具有逃离局部极小、收敛速度快、实现全局优化的能力. 其基本思想是把变量从混沌空间变换到解空间, 然后利用小世界优化算法的短距离连接和随机长连接, 由候选节点以最快的速度向最优节点转移. 对此领域的研究刚刚起步, 现有成果基本都采用二进制和十进制编码, 不可避免地用到了编码和解码, 所以存在编码串长、解码和编码计算繁琐等问题. 针对这些不足, 本文提出了一种基于实数编码的小世界优化算法. 基于国际通用测试函数的仿真实验表明, 该算法能够有效地克服现有小世界优化算法的不足.

本文将 T-S 模糊模型、小世界优化算法和非线性预测控制的思想相结合, 提出一种新型的基于 T-S 模糊模型和小世界优化算法的广义非线性预测控制策略. 该控制器将 T-S 模糊模型作为预测模型, 将小世界优化算法作为滚动优化策略, 不仅避免了非线性预测控制中复杂的梯度计算和矩阵求逆问题, 而且较以往应用的优化算法更加满足了滚动优化快速性的要求. 仿真结果表明, 本文提出的预测控制策略具有较好的实时性和快速稳定性.

## 2 非线性预测控制的基本思想

设非线性控制对象用如下离散时间模型描述为:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-n), u(t-d), \dots, u(t-d-m)). \quad (1)$$

其中:  $n$  和  $m$  分别为输出  $y(t)$  和输入  $u(t)$  的阶次,  $d$  为非线性系统的时滞,  $f(\cdot)$  为未知非线性函数. 由式 (1) 可得  $t+1$  时刻系统的预测输出为

$$\hat{y}(t) = f(y(t), \dots, y(t-n+1), u(t-d+1), \dots, u(t-d-m+1)). \quad (2)$$

利用式 (2) 可得到提前  $d$  步的超前预测为

$$\hat{y}(t+d) = f(\hat{y}(t+d-1), \dots, \hat{y}(t+d-n), u(t), \dots, u(t-m)). \quad (3)$$

为增强系统的鲁棒性, 在目标函数中考虑了现在时刻  $u(t)$  对未来时刻的影响, 非线性预测控制的目的在于在控制量区间内寻找一组最优控制量序列, 使得目标函数

$$J = \sum_{j=1}^n [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (4)$$

最小. 其中:  $n$  为最大预测长度,  $m$  为控制长度 ( $m \leq n$ ),  $\lambda(j)$  为大于零的控制加权系数. 为简单起见, 取  $\lambda(j) = \lambda$  (常数),  $w(k+j)$  为参考轨迹.

## 3 基于混沌遗传算法的 T-S 模糊多步预测模型

在非线性系统的建模与控制中, 模糊系统对非线性系统具有良好的逼近特性, 因而模糊建模越来越受到人们的重视. 文献 [14] 提出了著名的 T-S 模糊模型, 算法中模糊规则前件是模糊变量, 而规则后件的结论是输入输出的线性函数, 因此它是以局部线性化为基础, 通过模糊规则实现了全局的非线性, 不仅能克服以往模糊模型的高维问题, 而且解决了非线性系统在建模时的困难, 已成为一种被广泛使用的模糊模型.

本文针对具有强非线性和不确定性的对象, 采用一种基于混沌遗传算法的 T-S 模糊模型建模方法<sup>[15]</sup>. 该方法将具有自适应性的广义高斯函数作为隶属度函数, 引入混沌移民算子的遗传算法优化前件参数, 并将混沌遗传算法和最小二乘算法相结合, 分别优化模型的前件参数和结论参数, 大大简化了模糊辨识的复杂性, 提高了辨识精度.

基于混沌遗传算法的辨识步骤如下:

**Step 1:** 基于输入空间的模糊划分, 对隶属函数中的参数用十进制进行编码, 根据输入空间的变化范围和有关经验, 确定出各个参数的取值范围.

**Step 2:** 确定 GA 参数. 确定种群数、进化终止代数、选择概率、变异概率、移民率和初始化种群.

**Step 3:** 根据每个种群所确定的隶属函数的形状以及输入空间的模糊划分, 利用递推最小二乘算法求出模型的结论参数.

**Step 4:** 利用下式确定评价函数:

$$\text{MSE} = F(X) = \sum_{j=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / N. \quad (5)$$

**Step 5:** 执行选择、交叉、变异、混沌移民操作.

**Step 6:** 若满足算法终止要求, 则停止; 否则, 转 Step 3.

T-S 模糊模型的后件结论都是线性系统, 所以可

将其后件的输出结论作为模型的输出, 通过将模糊模型的输出反馈回来作为模型输入, 得到模糊多步预报器, 预测未来时刻的系统输出值  $y(+j)$ , 以便对非线性、大滞后系统进行提前控制, 满足控制要求。

## 4 基于小世界优化算法的预测控制滚动优化

### 4.1 基于实数编码的小世界优化算法

小世界网络优化问题可以描述为在搜索空间中从候选解向最优解的信息传递过程. 将优化过程视为在寻优搜索空间中从候选节点向最优节点转移的一种信息传递过程, 同时在转移过程中考虑了小世界效应. 即一个候选节点通过短距离连接和随机长距离连接向最优节点转移, 在该过程中传递的信息是优化模型的解。

所谓实数编码, 即被优化参数变量直接采用实数表示, 而非采用二进制或者十进制编码串表示. 这样避免了编码和解码计算繁琐等问题, 尤其对于多参数的优化问题, 应用二进制和十进制编码法更加繁琐。

本文提出应用  $n$  维球面来构造小世界网络邻域和非邻域节点集, 即

$$r^2 = \sum_{i=1}^{n+1} (x_i - C_i)^2. \quad (6)$$

假设被优化对象的适应度函数为  $f(X)$ , 表达式中的  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . 如果设第  $k$  代的第  $i$  个节点为当前节点  $v_i(k)$ ,  $C_i$  为  $n$  维球面的中心点, 则  $d(\phi_j - C_i) = \|\phi_j - C_i\|$  为邻域或非邻域节点  $\phi_j$  与  $n$  维球面中心  $C_i$  之间的距离. 设  $l$  为  $n$  维球面方程 (6) 中的半径, 则  $v_i(k)$  的  $l$  邻域的节点集合记为

$$\xi^l(v_i(k)) = \{\phi_j | 0 < \|\phi_j - C_i\| < l, \phi_j \in V_n^i\}, \quad (7)$$

非邻域的节点集合记为

$$\bar{\xi}^l(v_i(k)) = \{\phi_j | l < \|\phi_j - C_i\|, \phi_j \in V_n^i\}. \quad (8)$$

其中小世界网络节点  $v_i(k)$  的邻域和非邻域节点集合记为  $V_n^i = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{2n_0}\}$ ,  $2n_0$  为邻域节点和非邻域节点总数, 即邻域节点为  $n_0$  个, 非邻域节点为  $n_0$  个。

下面以二维网络为例, 具体描述小世界网络当前节点邻域和非邻域节点集构造过程. 在二维网络中, 能被算法优化的参数个数为两个, 形成二维坐标的坐标点. 设当前节点  $v_i(k) = X_i = [x_1, x_2] = [0, 0]$ , 邻域  $l$  为 0.2, 当前节点的邻域和非邻域节点集构造关系如图 1 所示。

基于实数编码的小世界优化算法是通过对实数编码搜索算子进行邻域构造, 并将优化搜索空间中候选节点通过短距离连接和随机长距离连接向最优节点转移. 算法的基本流程为:

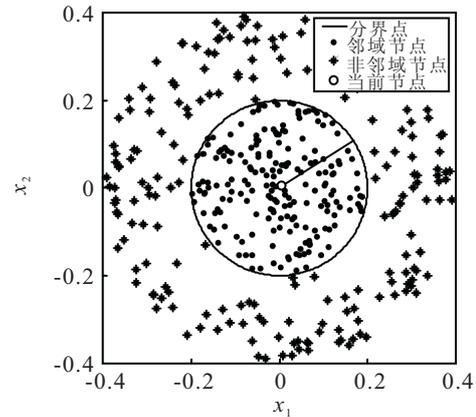


图 1 当前节点邻域和非邻域节点集构造

**Step 1:** 初始化. 设置节点个数为  $m$ , 最大搜索代数为  $K_{\max}$ , 临时局部网络的大小为  $N_i$ , 短连接搜索概率为  $P_s$ , 节点邻域大小为  $l$ , 搜索代数初值  $k = 0$ , 给出理论最优值  $f^*$ , 精度  $\varepsilon$  以及与随机产生初始值的个数有关的  $M$  值。

**Step 2:** 确定适应度函数, 随机产生  $M$  个实数编码的初始节点, 计算每一个节点的适应度值。

**Step 3:** 找出其中  $m$  个较优的节点, 作为小世界算法的优化空间的初始节点集, 并找出初始最优值, 即与被优化对象最优值最接近的值, 记为  $f(x)$ 。

**Step 4:** 进行 While 循环, 当代数大于  $K_{\max}$  或者达到寻优精度时, 则终止搜索, 输出最优值和最优节点 (当  $k > K_{\max}$  时, 但还未达到所设定的高的寻优精度时, 最优值则选取  $k$  代寻优中搜索到的与被优化对象最优值最接近的较优值); 否则, 继续。

**Step 5:** 对每一代节点集的每一个节点  $v_i(k)$  进行共  $N_i$  次小世界局部短连接搜索和随机长连接搜索. 利用搜索得到的  $N_i$  个结果构造每一个节点的临时局部网络, 并将该网络的最优节点作为下一代 (即第  $k + 1$  代) 的第  $i$  个节点  $v_i(k + 1)$ 。

**Step 6:** 每一代节点集基于 Step 5 进行  $m$  次小世界搜索, 便会产生第  $k + 1$  代的具有  $m$  个节点的节点集合; 然后将第  $k + 1$  代  $m$  个节点大小进行比较, 找出最优值和最优节点, 重新回到 Step 4, 根据终止条件判断是否需要进行下一代搜索。

### 4.2 寻优性能比较

为了验证新的实数编码小世界优化算法的优越性, 本文将其与遗传算法、基于二进制编码的小世界算法<sup>[11]</sup>分别用于对 4 个二维函数的测试寻优, 并且对各自运行时间、适应值精度以及收敛率 3 个方面的效果进行比较. 其中测试函数分别为: Rosenbrock 函数 (记为  $f_1$ ), Camel 函数 (记为  $f_2$ ), Rastrigrin 函数 (记为  $f_3$ ), Schaffer 的  $f_6$  函数 (记为  $f_4$ ). 这些函数具有多个局部极小值或者具有典型的欺骗性。

表 1 3种算法的寻优性能比较

Fun	SGOV	GOV			ST/s			CR/%		
		R-SWA	B-SWA	GA	R-SWA	B-SWA	GA	R-SWA	B-SWA	GA
$f_1$	0	0.0007279	0.004	0.012	0.52	1.55	0.84	100	100	100
$f_2$	-1.03162	-1.0316	-1.0312	-1.0292	0.52	1.39	0.87	100	100	100
$f_3$	0	0.0076	0.0810	0.0290	0.54	1.90	0.84	100	100	80
$f_4$	0	0.00034	0.0028	0.0082	0.52	1.36	0.88	100	100	50

在仿真实验中,对每个函数寻优时,参数均设置如下:初始节点集  $m=30$ ,最大搜索代数选取  $K_{\max}=30$ ,短距离连接概率  $P_s=0.8$ ,临时局部网络大小  $N_i=4$ ,与随机产生初始值的个数有关的  $M=500$ .但是邻域  $l$  取值不同,  $f_1$  的  $l=0.25$ ,  $f_2$  的  $l=0.25$ ,  $f_3$  的  $l=0.25$ ,  $f_4$  的  $l=0.50$ .

采用上述算法分别对每一个测试函数进行 50 次测试,终止条件相同(即达到最大寻优代数或寻优精度,则停止搜索).取 50 次搜索到的最优值的平均值作为实验结果最优值,50 次平均仿真时间作为最终仿真时间.具体结果见表 1,其中:“Fun”表示测试函数,“SGOV”表示函数标准全局最优值,“R-SWA”表示实数编码小世界算法,“B-SWA”表示二进制编码小世界算法,“GA”表示遗传算法,“GOV”表示算法搜索到的最优值,“ST”表示仿真运行时间,“CR”表示收敛率.

### 4.3 基于小世界优化算法的滚动优化预测控制

鉴于小世界优化算法在函数寻优时的快速性和准确性,本文将小世界优化算法作为非线性预测控制的滚动优化策略时,预测控制步骤如下:

Step 1: 设置预测控制初始参数,小世界优化算法的初始参数,T-S 模型辨识的初始参数;

Step 2: 通过 T-S 模糊模型辨识得到系统的多步预测结果;

Step 3: 由系统多步预测输出及参考输出值,计算式(4)的目标函数;

Step 4: 进行小世界邻域寻优,使  $J$  达到最小,并输出使  $J$  最小的  $u(t)$  的值;

Step 5: 返回 Step 2,将得到的  $u(t)$  作用于系统,重新得到后多步的预测值,进入下一个控制周期.

以 T-S 模糊模型为预测模型,以基于实数编码的

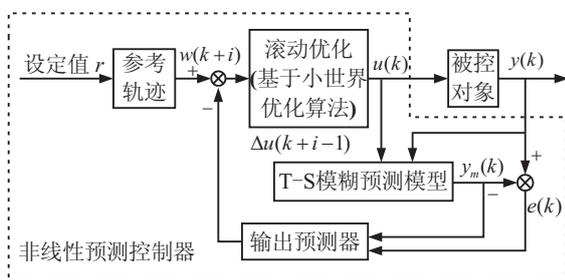


图 2 基于 T-S 模糊模型的非线性预测控制器

小世界优化算法作为滚动优化策略的非线性预测控制器,其结构如图 2 所示.

### 4.4 滚动优化效果比较

以非最小相位对象

$$\begin{aligned} y(t) - 1.5y(t-1) + 0.7y(t-2) = \\ u(t-1) + 1.5u(t-2) \end{aligned} \quad (9)$$

为例,验证小世界优化算法作为预测控制滚动优化策略的实用性和优越性.分别应用最小二乘法(LSA),混沌优化算法(COA)以及本文采用的小世界优化算法(R-SWA)作为滚动优化策略,得到仿真测试结果如图 3 所示.

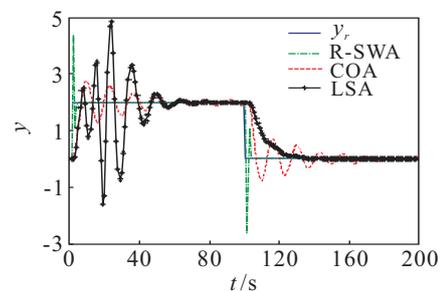


图 3 小世界、混沌和最小二乘仿真比较

图 3 中:  $y_r$  为系统的理想输出值; R-SWA, COA 和 LSA 分别是应用小世界优化算法、混沌优化算法以及最小二乘法作为滚动优化策略所得到的预测控制输出值.从图 3 中可以看到,小世界优化算法超调最小,调节时间最短,稳态误差几乎为零,快速稳定地跟随系统给定输出,作为预测控制中的滚动优化策略,达到了很好的控制效果.

## 5 实例仿真研究

以某电厂 200 MW 机组过热汽温为被控对象,考查广义非线性预测控制策略的实时控制效果.

### 5.1 实际过热汽温系统的 T-S 模糊建模

过热蒸汽温度是火力发电厂锅炉设备的重要参数,属于大滞后对象.同时,影响过热汽温的因素很多,运行中呈现出复杂的非线性特征,这给过热汽温的建模及控制带来了很大的困难.

采集 300 组过热汽温实时数据作为测量数据,辨识考虑的影响因素包括饱和和蒸汽温度  $t/^\circ\text{C}$ ,一次减温水流量  $f_1/(T/H)$ ,二次减温水流量  $f_2/(T/H)$  和机组负

荷 load/MW, 输出为过热蒸汽温度  $c/^{\circ}\text{C}$ .

T-S 模糊模型的输入变量为:  $t(k-1)$ ,  $f_1(k-2)$ ,  $f_2(k-2)$ ,  $\text{load}(k-2)$ ,  $c(k-1)$ ,  $c(k-3)$ , 规则数为 2. 应用广义高斯隶属函数将以上输入变量模糊化, 函数式为

$$\mu_F(x) = \exp\left(-\left|\frac{x-b}{a}\right|^c\right). \quad (10)$$

其中:  $a > 0, b \in R, c \geq 0$ . 当选择合适的  $c$  值, 广义隶属函数便可近似为三角形、梯形、高斯形等隶属函数.

将输入变量模糊化后的广义高斯隶属度函数的参数为

$$a = \begin{bmatrix} 11.85 & 4.501 & 4.226 & 7.143 & 12.63 & 6.911 \\ 10.63 & 5.8177 & 5.033 & 6.920 & 10.962 & 8.212 \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} 413.62 & 2.07 & 5.06 & 165.84 & 415.58 & 529.47 \\ 443.26 & 2.19 & 4.60 & 159.32 & 414.68 & 520.10 \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} 2.91 & 1.97 & 2.60 & 1.28 & 1.84 & 2.83 \\ 2.58 & 2.31 & 2.70 & 1.07 & 1.78 & 2.92 \end{bmatrix}.$$

应用递推最小二乘法辨识 T-S 模型后件参数, 即得到过热汽温对象的 T-S 模糊模型<sup>[16]</sup>, 图 4 为实际输出与 T-S 模糊模型输出的对比.

从图 4 可以看出, 该方法对于热工时滞对象有很好的辨识能力. 该模型不但满足精度要求, 与传统的建模方法相比, T-S 模糊模型建立的是一个全局的非线性模型, 而不是特定工作点下的固定模型. 鉴于此项优点, 将其作为预测模型, 能解决目前对于非线性系统进行预测控制的难点问题.

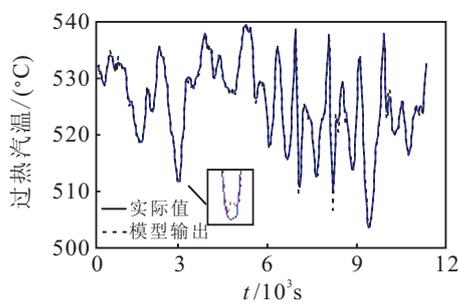


图 4 模型输出值与实际输出值的对比值

### 5.2 过热汽温的非线性预测控制

将上述得到的 T-S 模糊模型作为预测模型, 基于实数编码的小世界优化算法作为滚动优化策略, 构成了实际的过热汽温非线性预测控制系统 (参见图 2). 在此选用预测长度  $n = 3$ , 控制长度  $m = 2$ , 控制加权系数  $\lambda = 0.8$ , 柔化系数  $\alpha = 0.3$ . 小世界优化算法的参数选择为进化代数  $K_{\max} = 30$ , 长连接概率  $P_s = 0.8$ . 得到过热汽温的实时控制效果仿真曲线如图 5 所示.

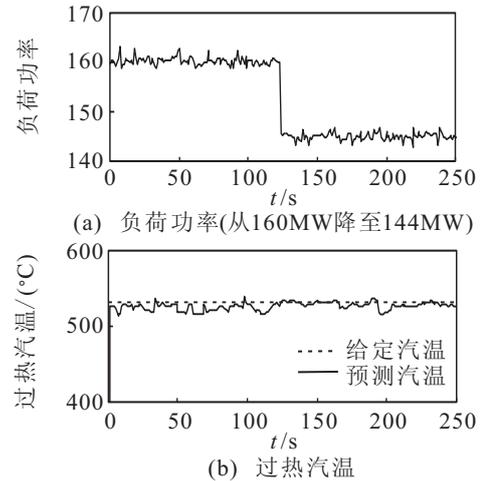


图 5 过热汽温的非线性预测控制

仿真结果表明, 当机组负荷功率发生较大波动时, 如由 160 MW 降至 144 MW 时, 机组过热汽温在本文提出的广义预测控制策略下得到了快速及时的控制, 波动很小, 满足了锅炉炉温实时控制的要求.

## 6 结 论

针对目前非线性系统建模和实时控制的难点问题, 本文提出了一种新型的基于 T-S 模型和小世界优化算法的广义预测控制策略. 在该预测控制策略中, 预测模型是基于 T-S 模糊建模方法而建立, 更能精确地逼近实际的非线性模型, 并且为预测控制形成了很好的模型基础; 在滚动优化设计中, 本文提出了一种新型的实数编码小世界优化算法, 并成功将其与预测控制相结合. 鉴于新型优化方法的快速性、实时性、稳定性等多重优点, 使得预测控制的快速滚动寻优得以实现, 达到了控制的实时性和快速性要求. 最后, 针对实际大滞后对象过热汽温非线性系统的预测控制仿真实例, 也证明了该控制方法的有效性.

### 参考文献(References)

- [1] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-160.
- [2] Nevistic V, Morari M. Constrained control of feedback linearizable systems[C]. Proc of the European Control Conf. Rome: IEEE Press, 1995: 1726-1731.
- [3] Li W C, Biegler L T. Multistep, Newton-type control strategies for constrained, nonlinear processes[J]. Chemical Engineering Research & Design, 1989, 67(3): 562-577.
- [4] 王书斌, 胡品慧, 林立. 基于T-S模糊模型的状态反馈预测控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 819-824. (Wang S B, Hu P H, Lin L. State feedback predictive control based on T-S fuzzy model[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(5): 819-824.)

- [5] 候志祥,吴义虎,袁松贵. 基于AEPSO优化的神经网络多步预测控制[J]. 中南大学学报, 2007, 38(6): 1162-1168.  
(Hou Z X, Wu Y H, Yuan S G. Multi-steps predictive control of neural networks based on AEPSO optimization[J]. J of Central South University of Technology, 2007, 38(6): 1162-1168.)
- [6] 王寅, 荣冈, 王树青. 基于T-S模糊模型的非线性预测控制策略[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 599-603.  
(Wang Y, Rong G, Wang S Q. Nonlinear predictive control strategy based on T-S fuzzy model[J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(4): 599-603.)
- [7] Liu B, Shen Q, Su H Y. A nonlinear predictive control algorithm based on fuzzy on-line modeling and discrete optimization[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Washington DC, 2003: 816-822.
- [8] Sarimveis H, Bafas G. Fuzzy model predictive control of non-linear process using genetic algorithms[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 139(1): 59-80.
- [9] Yuzgec Ugur, Becerikli Yasar, Turker Mustafa. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms[J]. ISA Trans, 2006, 45(4): 589-602.
- [10] Polyak B T. Stabilizing chaos with predictive control[J]. Automation and Remote Control, 2005, 66(11): 1791-1804.
- [11] 杜海峰, 庄健, 张进华, 等. 用于函数优化的小世界优化算法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 1011-1015.  
(Du H F, Zhuang J, Zhang J H, et al. Small-world phenomenon for function optimization[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 1011-1015.)
- [12] 李小虎, 杜海峰, 庄健, 等. 基于小世界原理的模型降阶优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 108-113.  
(Li X H, Du H F, Zhuang J, et al. Model reduction optimization based on small-world principle[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 108-113.)
- [13] 杨斌, 杜海峰, 庄健. 一种具有跟踪替代特征的小世界算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1360-1363.  
(Yang B, Du H F, Zhuang J. Small-world algorithm with the replacing and tracking characters[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1360-1363.)
- [14] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans on SMC, 1985, 15(1): 116-132.
- [15] Wang Shuangxin, Wang Zhiqin, Li Zhaoxia. Fuzzy modeling of thermal process based on chaos genetic algorithm[C]. Proc of the 8th WCICA. Ji'nan, 2010: 5851-5855.
- [16] Wang Shuangxin, Zhang Xiuxia, Wang Zhiqin, et al. On-line fuzzy identification of thermal systems based on an improved T-S model[C]. Proc of Int Conf on Modeling, Identification and Control. Okayama, 2010: 47-52.

~~~~~

(上接第672页)

- [18] Shao H Y. New delay-dependent stability criteria for systems with interval delay[J]. Automatica, 2009, 45(3): 744-749.
- [19] Gao H, Lam J, Wang C. Delay-dependent output-feedback stabilisation of discrete-time systems with time-varying state delay[J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2004, 151(6): 691-698.
- [20] Liu X, Martin R, Tang M. Delay-dependent robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delay[J]. IET Control Theory and Applications, 2006, 153(6): 689-702.
- [21] Zhang X, Han Q. A new finite sum inequality approach to delay-dependent  $H_\infty$  control of discrete-time systems with time-varying delay[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2008, 18(6): 630-647.
- [22] Jiang X, Han, Yu X. Stability criteria for linear discrete-time systems with interval-like time-varying delay[C]. Proc of the American Control Conf. Portland: IEEE Press, 2005: 2817-2822.
- [23] Gao H, Chen T. New results on stability of discrete-time systems with time-varying state delay[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(2): 328-334.
- [24] 刘健辰, 章兢. 具有区间时变时滞的离散Markov跳变系统鲁棒 $H_\infty$ 控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(11): 1647-1651.  
(Liu J, Zhang J. Robust  $H_\infty$  control for discrete-time Markov jump systems with interval time-varying delays[J]. Control and decision, 2009, 24(11): 1647-1651.)
- [25] Zhu X, Yang G. Jensen inequality approach to stability analysis of discrete-time systems with time-varying delay[C]. Proc of the American Control Conf. Seattle: IEEE Press, 2008: 1644-1649.
- [26] He Y, Wu M, Liu G, et al. Output feedback stabilization for a discrete-time system with a time-varying delay[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2008, 53(8): 2372-2377.