

文章编号: 1001-0920(2003)03-0375-03

## 多模型预测函数控制及其应用研究

韩 璞, 王东风, 王国玉, 董 泽  
(华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 提出了多模型预测函数控制策略, 并给出了模型平滑切换方法。将多模型预测函数控制策略应用于主汽温控制系统, 仿真结果表明, 采用多模型预测函数控制策略的主汽温控制系统的动态品质明显优于采用单一模型的系统。

**关键词:** 多模型; 预测函数控制; 主汽温控制系统

中图分类号: TP13

文献标识码: A

## Multi-model predictive functional control and its application

HAN Pu, WANG Dongfeng, WANG Guoyu, DONG Ze

(Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Multi-model predictive functional control strategy is presented with the method of smooth switching. The new strategy is applied to main steam temperature control system. Simulation results show that the new control strategy has more favorable dynamic characteristic than predictive functional control system with single model.

**Key words:** Multi-model; Predictive functional control; Main steam temperature control system

### 1 引 言

模型预测控制在经历了模型预测启发控制(MPHC)或称模型算法控制(MAC)、动态矩阵控制(DMC)、广义预测控制(GPC)等控制算法后,发展到预测函数控制(PFC)。PFC是由Richalet和Kuntze等人在20世纪80年代提出<sup>[1,2]</sup>,并成功地应用于工业机器人的快速高精度控制。它将控制输入的结构作为关键问题,克服了其他模型预测控制时所出现的不规律的控制输入问题,同时具有良好的跟踪能力及较强的鲁棒性,但对对象特性变化过大时,系统性能明显变差。对于时变对象,在若干典型的工作点建立多个固定模型,在运行过程中根据系统工况变换,利用相应的模型调整控制输出,有利于进一步改善预测函数控制的品质。文中给出了多模

型PFC算法的平滑切换方法。

火电厂热工对象的动态特性与整个机组的运行工况密切相关。当负荷变化时,机组的对象特性有明显变化,特别是对于调峰机组,这种现象更为严重。影响主汽温对象特性的工况参数主要有主蒸汽流量、主蒸汽压力及主蒸汽温度,其中主蒸汽流量的影响最为明显。当负荷上升时,由于过热蒸汽流量和流速增大,静态增益、时间常数和迟延时间随之减小<sup>[3]</sup>。目前,虽然经常采用串级PID系统对其进行控制,但当工况参数发生较大变化时,很难取得满意的控制效果。因此,本文将多模型PFC应用于主汽温控制系统,仿真结果表明,控制系统的品质得到了明显改善。

收稿日期: 2002-02-24; 修回日期: 2002-04-11。

基金项目: 华北电力大学博士学位教师专项基金资助项目(060106)。

作者简介: 韩璞(1959—),男,河北平泉人,教授,博士生导师,从事智能控制理论及应用、计算机辅助工程的研究;王东风(1971—),男,安徽潜山人,讲师,博士,从事模糊控制、预测控制等研究。

## 2 预测函数控制的基本原理

### 2.1 预测函数控制的特征

预测函数控制属于预测控制的范畴,因此它具有预测控制的 3 个基本特征:预测模型、滚动优化和反馈校正。

#### 2.1.1 预测模型

预测模型输出  $y_m(k)$  由两部分组成:一部分为自由项  $y_l(k)$ , 相当于零输入响应,它仅依赖于过去时刻的控制量及输出量,与当前时刻及将来的控制量无关;另一部分为强迫项  $y_f(k)$ , 相当于零状态响应,它是从当前时刻起加入控制作用后新增加的模型响应。

与其他预测控制不同,预测函数控制认为控制输入的结构是确保控制性能的关键。在预测函数控制中,新加入的控制作用表示为若干已知函数  $f_n(n = 1, 2, \dots, N)$  的线性组合,即

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i) \quad (1)$$

$$i = 0, 1, \dots, P-1$$

其中:  $f_n(n = 1, 2, \dots, N)$  为基函数,  $f_n(i)$  表示基函数在  $t = iT_s$  时的值,  $T_s$  为采样周期,  $\mu_n$  为线性组合系数,  $P$  为预测优化时域长度。基函数的选择取决于受控对象和设定值的特性,如可取阶跃、斜坡和指数函数等。

$$y_f(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n g_n(i), \quad i = 1, 2, \dots, P \quad (2)$$

其中:  $g_n(i)$  为在  $f_n(i)$  作用下的模型输出,可离线计算。因此,模型输出

$$y_m(k) = y_l(k) + y_f(k) \quad (3)$$

#### 2.1.2 滚动优化

预测函数控制的参考轨迹可取多种形式,对于一个稳定的系统,通常采用一阶指数形式

$$y_r(k+i) = c(k+i) - \beta^i (c(k) - y(k)) \quad (4)$$

其中:  $y_r$  为参考轨迹,  $c$  为设定值,  $\beta = e^{(-T_s/T_r)}$ ,  $T_s$  为采样周期,  $T_r$  为参考轨迹时间常数,  $y$  为过程输出。

预测函数控制的优化目标函数,是使在选定的预测时域  $P$  的拟合点上预测过程输出与参考轨迹差值的平方和最小,最小化的标准式可取

$$J^P = \min_{i=P_1}^{P_2} (y_r(k+i) - y^P(k+i))^2 \quad (5)$$

$$y^P(k+i) = y_m(k+i) + e(k+i) \quad (6)$$

其中:  $P_1$  和  $P_2$  为优化时域的下限和上限,  $y^P(k+i)$  为过程输出预测,  $y_m(k+i)$  为  $k+i$  时刻的模型输出,  $e(k+i)$  为未来误差。

### 2.1.3 反馈校正

在实际应用中,由于模型失配、二次输入及噪声等的影响,预测模型输出与过程输出之间常存在误差。为此,应对未来优化时域中的误差进行预测,预测的方法有多种,其中可取未来误差为

$$e(k+i) = y(k) - y_m(k) \quad (7)$$

其中:  $y(k)$  为  $k$  时刻的对象输出,  $y_m(k)$  为  $k$  时刻的预测模型输出。

### 2.2 一阶加纯滞后系统的预测函数控制算法

一阶加纯滞后系统是工业过程中较为典型的一类系统,对于高阶渐近稳定对象,可通过拟合简化得到一阶加纯滞后对象,或采用 PID 控制构成控制回路,并将此回路看作需要控制的广义对象,调节 PID 的参数使其成为一阶加纯滞后的广义对象。因此,研究一阶加纯滞后系统的预测函数控制具有广泛的实用价值。

预测函数控制器的预测模型为

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-T_d s} \quad (8)$$

当采用一个基函数(阶跃函数)时,有

$$u(k+i) = u(k), \quad i = 1, 2, \dots, P-1 \quad (9)$$

此时,  $k$  时刻控制量为<sup>[4]</sup>

$$u(k) = \frac{c(k+P) - \beta^P c(k) - y_{pav}(k)(1 - \beta^P)}{K_m(1 - \alpha_m^P)} + \frac{y_m(k)}{K_m} \quad (10)$$

其中

$$\alpha_m = e^{(-T_s/T_m)}$$

$$y_{pav}(k) = y(k) + y_m(k) - y_m(k-D)$$

$$D = T_d/T_s$$

## 3 多模型 PFC 算法的平滑切换

假设系统在  $k_0$  时进行模型切换,当  $k < k_0$  时,系统模型为  $M_1$ , 相应的预测模型为

$$G_{m1}(s) = \frac{K_{m1}}{T_{m1}s + 1} e^{-T_{d1}s}$$

当  $k > k_0$  时,系统模型为  $M_2$ , 相应的预测模型为

$$G_{m2}(s) = \frac{K_{m2}}{T_{m2}s + 1} e^{-T_{d2}s}$$

根据式(8),当采用一个基函数(阶跃函数)时,模型预测输出为<sup>[4]</sup>

$$y_m(k+P) = \alpha_m^P y_m(k) + K_m(1 - \alpha_m^P) u(k) \quad (11)$$

采用多模型控制策略时,如果在  $P$  步导前预测

过程中, 预测模型发生了改变, 则要根据不同的模型进行输出预测。因此,  $k$  时刻  $P$  步导前模型预测值  $y_m(k + P)$  可分为 3 种情况求解, 得到相应的控制输出值分别为:

1) 当  $k + P = k_0$  时

$$y_m(k + P) = \alpha_{m1}^P y_m(k) + K_{m1}(1 - \alpha_{m1}^P) u(k) \quad (12)$$

其中  $\alpha_{m1} = e^{(-T_s/T_{m1})}$ 。此时, 控制输出值为

$$u(k) = \frac{c(k + P) - \beta^P c(k) - \gamma_{\text{paw}}(k)(1 - \beta^P)}{K_{m1}(1 - \alpha_{m1}^P)} + \frac{y_m(k)}{K_{m1}} \quad (13)$$

2) 当  $k_0 < k + P < k_0 + P$  时, 令  $k + P_0 = k_0$ ,

根据模型的差分方程可得

$$y_m(k + P_0) = \alpha_{m1}^{P_0} y_m(k) + K_{m1}(1 - \alpha_{m1}^{P_0}) u(k) \quad (14)$$

$k + P_0 + 1$  及其以后时刻, 模型预测输出需要采用  $G_{m2}(s)$  计算

$$y_m(k + P_0 + 1) = \alpha_{m2} y_m(k + P_0) + K_{m2}(1 - \alpha_{m2}) u(k) \quad (15)$$

其中  $\alpha_{m2} = e^{(-T_s/T_{m2})}$ 。

利用数学归纳法可得到

$$y_m(k + P) = \alpha_{m2}^{P-P_0} \alpha_{m1}^{P_0} y_m(k) + (K_{m1} \alpha_{m2}^{P-P_0} (1 - \alpha_{m1}^{P_0}) + K_{m2}(1 - \alpha_{m2}^{P-P_0})) u(k) \quad (16)$$

此时, 控制输出值为

$$u(k) = \frac{c(k + P) - \beta^P c(k) - \gamma_{\text{paw}}(k)(1 - \beta^P)}{K_{m1} \alpha_{m2}^{P-P_0} (1 - \alpha_{m1}^{P_0}) + K_{m2}(1 - \alpha_{m2}^{P-P_0})} + \frac{(1 - \alpha_{m2}^{P-P_0} \alpha_{m1}^{P_0}) y_m(k)}{K_{m1} \alpha_{m2}^{P-P_0} (1 - \alpha_{m1}^{P_0}) + K_{m2}(1 - \alpha_{m2}^{P-P_0})} \quad (17)$$

3) 当  $k + P > k_0 + P$  时

$$y_m(k + P) = \alpha_{m2}^P y_m(k) + K_{m2}(1 - \alpha_{m2}^P) u(k) \quad (18)$$

此时, 控制输出值为

$$u(k) = \frac{c(k + P) - \beta^P c(k) - \gamma_{\text{paw}}(k)(1 - \beta^P)}{K_{m2}(1 - \alpha_{m2}^P)} + \frac{y_m(k)}{K_{m2}} \quad (19)$$

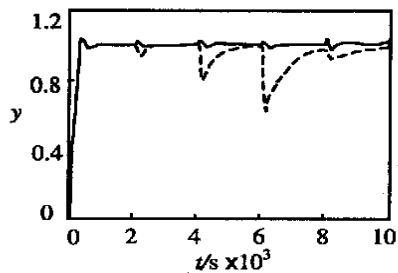
### 4 多模型 PFC 在主汽温控制系统中的应用研究

某锅炉在 5 个局部工作点的主汽温对象模型如表 1 所示, 经拟合简化后得到相应的一阶加纯滞后模型。

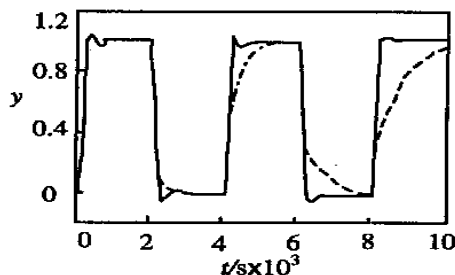
表 1 主汽温对象模型及其等价一阶加纯滞后模型

负荷 / %	主汽温对象模型		等价的一阶加纯滞后模型
	导前区	惰性区	
30	$-\frac{8.07}{(24s + 1)^2}$	$\frac{1.48}{(46.6s + 1)^4}$	$-\frac{12.04}{108.50s + 1} e^{-1.30.86s}$
44	$-\frac{6.62}{(21s + 1)^2}$	$\frac{1.66}{(39.5s + 1)^4}$	$-\frac{11.05}{93.02s + 1} e^{-1.10.46s}$
62	$-\frac{4.35}{(19s + 1)^2}$	$\frac{1.83}{(28.2s + 1)^4}$	$-\frac{7.98}{67.81s + 1} e^{-84.49s}$
88	$-\frac{2.01}{(16s + 1)^2}$	$\frac{2.09}{(22.3s + 1)^4}$	$-\frac{4.21}{48.91s + 1} e^{-72.54s}$
100	$-\frac{1.58}{(14s + 1)^2}$	$\frac{2.45}{(15.8s + 1)^4}$	$-\frac{3.87}{38.41s + 1} e^{-52.83s}$

采用上述多模型 PFC 算法对该主汽温对象进行仿真研究, 仿真结果见图 1。在 2 000 s, 4 000 s, 6 000 s 和 8 000 s 时, 对象特性根据负荷由低向高发生改变, 虚线为采用 30% 负荷时的单一模型的系统响应, 实线为采用多模型 PFC 算法的系统响应。从仿真结果可以看出, 采用多模型 PFC 算法的主汽温控制系统动态品质明显优于采用单一模型的系统。



(a) 采用阶跃信号时曲线



(b) 采用方波信号时曲线

图 1 仿真结果

(下转第 381 页)

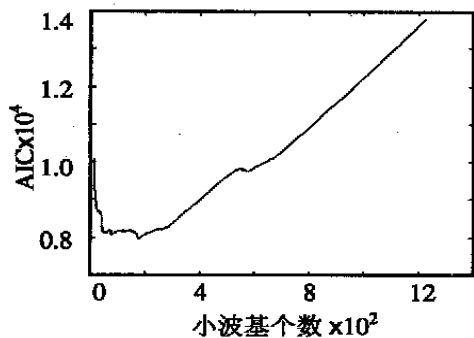


图 2 AIC 曲线

## 6 结 论

本文利用单尺度小波框架理论,建立了候选小波集合。在此基础上,运用 ROLS 算法进行 QR 分解,实现小波基的正交化,进而能够计算每个小波基对网络输出的贡献,可实现参数的在线辨识。利用从复杂到简单的思想,删除对输出影响小的小波基,引入 AIC 准则,在网络的结构复杂性和精度之间找到一平衡点,实现小波网络的结构辨识。实验结果表明,本文方法计算量小且不用因网络结构的改变而重复训练网络,对高维非线性系统的辨识具有一定的指导意义。

## 参考文献(References):

- [1] Zhang Qinghua, Albert Benveniste. Wavelet networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1992, 3(6): 889-898.
- [2] Chen S, Billings S A, Luo W. Orthogonal least squares methods and their application to non-linear system identification [J]. *Int J Control*, 1989, 50(5): 1873-1896.
- [3] Chen S, Billings S A. Neural networks for nonlinear dynamic system modeling and identification [J]. *Int J Control*, 1992, 56(2): 319-346.
- [4] Zhang Qinghua. Using wavelet network in nonparametric estimation [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1997, 8(2): 227-236.
- [5] Gomm J B. Selecting radial basis function network centers with recursive orthogonal least squares training [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2000, 11(2): 306-314.
- [6] Kugarajah K, Zhang Q. Multidimensional wavelets frame [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1995, 6(6): 1552-1556.
- [7] Leontaritis I J, Billings S A. Model selection and validation methods for nonlinear systems [J]. *Int J Control*, 1987, 45(1): 311-341.

(上接第 377 页)

## 5 结 论

本文提出了多模型预测函数控制策略,并给出了模型平滑切换方法,有效地解决了对对象特性变化过大时,预测函数控制品质变差的问题。火电厂主汽温对象是典型的时变对象,与采用单一模型预测函数控制的主汽温系统相比,采用多模型预测函数控制策略的系统动态品质得到了明显改善。

## 参考文献(References):

- [1] Kuntze H B, Jacubasch A, Richalet J. On the predictive functional control of an elastic industrial robot [A]. *Proc of 25th CDC* [C]. Athens, 1986. 1877-1881.
- [2] Richalet J, Abu el Ata-Doss S, Arber D, et al. Predictive functional control: Application to fast and accurate robots [A]. *Proc of IFAC 10th World Congress* [C].

Munich, 1987. 251-258.

- [3] 范永胜,徐治皋,陈来九. 基于动态机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究 [J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(1): 23-28.  
(Fan Yongsheng, Xu Zhigao, Chen Laijiu. Study of adaptive fuzzy control of boiler superheated steam temperature of based on dynamic mechanism analysis [J]. *Proc of the CSEE*, 1997, 17(1): 23-28.)
- [4] 张泉灵,王树青. 化学反应器温度跟踪预测函数控制的研究及应用 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(4): 559-563.  
(Zhang Quanling, Wang Shuqing. Studies and applications of predictive functional control in temperature tracking of chemical reactors [J]. *Control Theory and Applications*, 2001, 18(4): 559-563.)