

热电厂过热器建模与适应控制器

袁著祉等*

(南开大学)

摘 要

本文用多种方法建立了热电厂过热器的数学模型,还设计了过热蒸汽温度的适应控制器。仿真结果表明,用适应控制器控制过热蒸汽温度是可行的。

一、前 言

过热蒸汽温度是热电厂安全、经济运行的主要参数,过高不安全,过低影响热效率,用减温水作为控制手段。目前,我国采用人工或PID控制,不能有效地克服随机干扰影响,控制误差较大。

我们用现代控制理论,设计了适应控制器,以便克服随机干扰,适应动态特性的变化。为了安全起见,用数字仿真来检验适应控制器的有效性。为此,建立了过热蒸汽的数学模型,在天津大港电厂做实验采集了一批数据,进行建模,得到了一个满足工艺要求的数学模型。

用这个数学模型,进行了适应控制器的计算机辅助设计,比较了不同的方法,仿真结果表明:基于近似递推极大似然法的自校正调节器比基于最小二乘法的自校正调节器控制精度高,两者都比PID调节器效果好。这说明了用适应调节器控制过热蒸汽温度是可行的。

二、过热蒸汽温度系统工艺简介

从锅炉产生的蒸汽通过过热器后达到 540°C ,再进入汽轮机发电。如果超过 540°C 将影响设备的寿命,反之,低于 540°C 则可能造成汽带水,把汽轮机叶片打穿造成重大事故,因此必须保证温度稳定在 540°C ,用喷水来降温。影响温度的干扰很多,如蒸汽量、减温水流量和温度随机变化、发电量负荷的变化等。

*作者还有王永胜(铁道部第三设计院)、裘汝吉(天津纺织学院)、张家祥(天津大港电厂)、王富来(天津有色金属压延厂)、周吉庆(天津业余纺织学院)、
本文于1984年1月5日收到,1984年5月16日收到修改稿。

由于过热蒸汽温度系统的动态特性随时间变化, 受到多种大的干扰, 因此, 用固定参数的 PID 调节器不能很好的把温度控制在 540 °C, 有必要设计新型控制器, 以便克服干扰, 适应动态特性的变化. 为了用计算机辅助设计, 我们建立了过热蒸汽温度系统的数学模型.

三、过热蒸汽温度系统建模

在电厂的实际装置上进行的动态试验表明, 过热蒸汽温度系统可以用一个二阶加纯滞后系统来近似描述:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + e(k), \quad (1)$$

其中 $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别表示 k 时刻的过热蒸汽温度和减温水流量, $\{e(k)\}$ 是噪声序列.

在电厂采集了三百组实测数据, 采样间隔为 1 分钟, 这些数据反映了机组负荷从 160MW 到 320MW 的变化过程, 也反映了其他干扰.

分别用递推最小二乘法 (RLS)^[1]、增广最小二乘法 (RELS) 和近似递推极大似然法 (RML)^[2] 估计模型 (1) 的参数, 结果见表 1.

表 1

辨识方法	a_1	a_2	b_1	b_2	拟合误差
RLS	0.9999	0.415×10^{-8}	0.234×10^{-9}	0.325×10^{-9}	0.745×10^{-8}
RELS	0.75	0.25	-0.24×10^{-9}	-0.915×10^{-10}	0.2183
RML	0.2637	0.7367	-0.0046	-0.00113	0.5689

由表 1 可见, 虽然递推最小二乘法的精度最高 (误差最小), 但是 a_1 近似为 1, 其他参数接近 0, 这不符合工艺要求; 增广最小二乘法估计的 b_1 和 b_2 也接近 0, 这意味着减温水不影响温度, 这也不符合实际情况; 由近似递推极大似然法得到的模型, 虽然拟合误差稍大一些, 约 0.5 °C, 但是满足精度要求, 更重要的是 $|b_1|$ 、 $|b_2|$ 比另两个方法得到的大得多, 即减温水对温度的影响比其他两个方法都大. 因此, 选择近似递推极大似然法估计的模型

$$y(k+1) = 0.2637y(k) + 0.7367y(k-1) - 0.0046u(k) - 0.00113u(k-1) + e(k+1) \quad (2)$$

作为过热蒸汽温度的数学模型.

近似递推极大似然法的公式是

$$\hat{\beta}_k = \hat{\beta}_{k-1} + \frac{p_{k-1} \tilde{x}_{k-1}}{1 + \tilde{x}_{k-1}^T p_{k-1} \tilde{x}_{k-1}} [y(k) - \hat{x}_{k-1}^T \hat{\beta}_{k-1}], \quad (3)$$

$$p_h = p_{h-1} - \frac{p_{h-1} \tilde{x}_{h-1}^T \tilde{x}_{h-1}^T p_{h-1}}{1 + \tilde{x}_{h-1}^T p_{h-1} \tilde{x}_{h-1}} \quad (4)$$

其中 $\hat{x}_{h-1}^T = [y(k-1), y(k-2), u(k-1), u(k-2), \hat{\varepsilon}(k-1), \hat{\varepsilon}(k-2)]$, (5)

$$\tilde{x}_{h-1}^T = [\tilde{y}(k-1), \tilde{y}(k-2), \tilde{u}(k-1), \tilde{u}(k-2), \tilde{\varepsilon}(k-1), \tilde{\varepsilon}(k-2)], \quad (6)$$

$$\hat{\beta}^T = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{c}_1, \hat{c}_2], \quad (7)$$

$$\hat{\varepsilon}(k-1) = y(k-1) - \hat{x}_{h-2}^T \hat{\beta}_{h-1}. \quad (8)$$

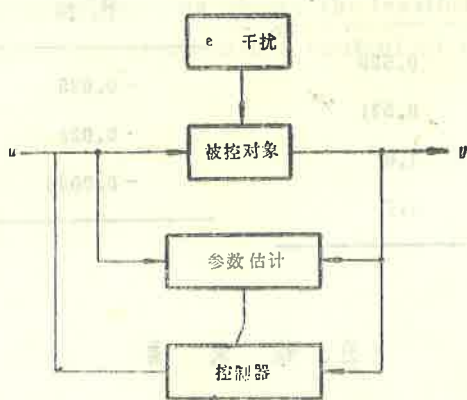
(6) 式中 $\tilde{y}$ 、 $\tilde{u}$ 和 $\tilde{\varepsilon}$ 由下列递推公式计算

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k) + \hat{c}_1 \tilde{y}(k-1) + \hat{c}_2 \tilde{y}(k-2) &= y(k), \\ \tilde{u}(k) + \hat{c}_1 \tilde{u}(k-1) + \hat{c}_2 \tilde{u}(k-2) &= u(k), \\ \tilde{\varepsilon}(k) + \hat{c}_1 \tilde{\varepsilon}(k-1) + \hat{c}_2 \tilde{\varepsilon}(k-2) &= \hat{\varepsilon}(k). \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式中的 $\hat{c}_1$ 与 $\hat{c}_2$ 是上一个时刻的估计值。

四、蒸汽温度适应控制器

用文[3]中 Astrom 和 Wittenmark 提出的自校正调节器控制过热蒸汽温度, 可以在线估计参数, 适应动态特性的变化, 克服随机干扰, 如图所示。



自校正调节器

自校正调节器分两步: 先估计参数, 再计算控制律。估计参数的模型为

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \alpha_2 y(k-2) + \beta_0 u(k-1) + \beta_2 u(k-2) + e(k). \quad (10)$$

控制的目标函数

$$J(u) = E[y(k+1) - y_r]^2 \quad (11)$$

为最小, 得到最小方差控制律为

$$u(k) = \frac{1}{\beta_0} [y_r - \hat{\alpha}_1 y(k) - \hat{\alpha}_2 y(k-1) - \hat{\beta}_1 u(k-1)]. \quad (12)$$

这里 $y(k)$ 和 $u(k)$ 表示蒸汽温度和减温水流量, y_r 为蒸汽温度的理想值 (540°C), $\hat{\alpha}_1$ 、 $\hat{\alpha}_2$ 和 $\hat{\beta}_1$ 是递推参数估计值, β_0 是按试验确定的, 不参加辨识, 这是为了保证闭环的可辨识性^[3].

在用计算机辅助设计适应控制器时, 用模型 (2) 代表过热器系统 (即图中的被控对象); 在估计 (10) 的参数时, 使用了递推最小二乘法 (RLS)、近似递推极大似然法 (RML)、广义最小二乘法 (GLS) 和递推辅助变量法 (RIV).

仿真结果表明, 用不同的参数估计方法得到不同的控制精度 (即过热蒸汽温度与理想值 y_r 偏离的方差). 由表 2 可见, 递推极大似然法参数估计的自校正调节器, 控制效果最好 (方差最小), 用递推最小二乘法得到的结果也差不多, 其他方法得到的方差较大.

表 3 中表示了 β_0 的不同选择对控制性能的影响. 从表 3 中可见, 当 $\beta_0 = -0.0046$ 时, 控制效果最好, 当 β_0 取另外两个值时, 控制精度也是可以接受的.

表 2 ($\beta_0 = -0.0046$)

辨 识 方 法	方 差
RML	0.529
RLS	0.531
RIV	1.5
GLS	1.7

表 3

β_0^* 值	方 差
-0.025	1.1
-0.028	1.271
-0.0046	0.529

五、结 束 语

建立过热器蒸汽温度系统数学模型, 以近似递推极大似然方法的精度较高并且符合工艺要求, 得到的模型可以作为计算机辅助设计自校正调节器的基础. 仿真表明, 自校正调节器可以用于控制过热蒸汽的温度, 使其与理想值 y_r (540°C) 的偏离的方差达到 0.5°C 多, 比固定参数的 PID 调节器的精度 (方差大于 5°C) 高得多.

致 谢 作者们感谢天津大港电厂和天津科技进修学院对本工作的大力支持.

参 考 文 献

- [1] 哥德温, G. C., 潘恩, R. L., 动态系统辨识, 科学出版社(1983)。
[2] Strejc, V., Least Squares Parameter Estimation, Automatica, 16 (1980), 535—550。
[3] Astrom, K. J. and Wittenmark, B., On Self-Tuning Regulators, Automatica, 9 (1973), 185—199。

MODELING AND ADAPTIVE CONTROL OF THE SUPERHEATER IN A THERMAL POWER PLANT

Yuan Zhuzhi et al

(Nankai University, Tianjin)

Abstract

The paper describes the modeling and adaptive control of a superheater. Digital simulation shows the feasibility of the adaptive controller for the steam temperature control of a superheater.