

一种基于工况分解的热工过程非线性控制模型建立方法及应用

刘红波¹, 李少远¹, 柴天佑²

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030; 2. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 充分考虑大多数复杂热工控制对象非线性特性与运行工况密切相关的实际特点, 采用基于工况分解的多模型建模思路, 提出一种面向控制的非线性过程建模方法. 将该方法应用于某电厂 300 MW 机组锅炉过热汽温对象, 实际考核结果表明采用该方法建立的模型, 即使在运行工况大范围变化时也具有满意的动态预测效果, 验证了提出的方法的有效性.

关键词: 工况分解; 面向控制的建模; 非线性系统; 系统辨识; 热工过程.

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Regime-decomposing-oriented modeling approach to nonlinear thermal processes and its application

LIU Hong-bo¹, LI Shao-yuan¹, CHAI Tian-you²

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110006, China)

Abstract: By taking into account the fact that most thermal processes have nonlinear characteristics dependent closely on operating regime, a nonlinear control oriented modeling method for thermal processes is proposed using a multiple model modeling approach based on operating regime decomposition. The proposed method was applied to build the nonlinear model of a 300 MW unit boiler superheater controlled process. The practical application results showed the nonlinear process model built by the proposed method remained valid over a wide range of operating conditions and the dynamic response of the model agreed well with that of the real plant, and proved the effectiveness of the method.

Key words: regime decomposition; control oriented modeling; nonlinear systems; system identification; thermal processes

1 引言 (Introduction)

电力系统不断增加的复杂性及对其可靠和经济运行要求的提高, 推动着电厂控制对象建模和优化控制技术的改进. 单元制大容量火电机组在电网中所占比例的增大, 使机组参与调峰调频成为必需. 机组经常工作在负荷大范围变化的条件下, 特别是在广泛应用的滑压运行工况, 蒸汽压力的设定值按照与电负荷对应的蒸汽流量成比例变化, 这使得锅炉侧被控过程呈现与负荷水平密切相关的明显的非线性特性. 为确保电能质量, 急需机组提高负荷跟随能力, 即使在负荷连续或快速变化时, 也要将蒸汽温度和压力的波动控制在允许界限内.

常规的热工控制系统都是基于在某一特定工作点附近的线性化模型, 设计的控制器只有在工作点附近才能获得最佳的控制品质, 难以适应对象特性

的非线性变化. 为此近年来的研究焦点之一是探索电厂对象的非线性建模和控制方法^[1-3]. 这些研究较多地采用机理建模的方法, 许多关于对象的符合实际的经验和测量数据无法结合与集成到这个方法的框架中, 不利于消除或减小机理分析中假设或简化带来的问题. 这些模型更适合于用来建立机组对象的非线性仿真模型, 用于面向控制的模型则过于复杂.

作者充分考虑大多数复杂热工控制对象非线性特性与运行工况密切相关的实际特点, 采用基于工况分解的多模型建模思路^[4], 提出了一种面向控制的非线性过程建模方法, 将该方法应用于某电厂 300 MW 机组锅炉过热汽温对象^[5], 实际考核结果表明采用提出的方法建立的模型, 即使在运行工况大范围变化时也具有满意的动态预测效果, 从而验

证了提出的方法的有效性。

2 基于工况分解的面向控制的非线性过程建模方法(Control oriented nonlinear process modeling method based on regime decomposition)

2.1 建模方法要求满足的假设条件(Assumptions requisite for the modeling method)

考虑到许多过程控制对象特别是复杂热工控制对象的非线性特性具有与运行工况密切相关的实际特点,并且虽然对象从全局看来具有复杂的非线性,但在对象运行的某个工况附近,其特性常可以采用线性模型足够精确地近似.因此本文中提出的非线性过程建模方法适用于满足下列假设条件的控制对象:

1) 在每个运行工作点附近,对于控制输入信号 u_c 的小范围变化,过程具有一个足够精确的线性模型,此模型可采用常规建模方法获得;

2) 对于划分的过程的每个运行工况,可用相应的工况参数 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_h)$ 来描述,这些参数是可观测的,并且与过程密切相关。

2.2 建模方法选用的非线性模型结构(Nonlinear model structure used by the modeling method)

目前火电机组大多数都已采用 DCS 进行控制,所以本文中选用的非线性模型为其离散时间形式.在离散时间形式的非线性模型结构中考虑如下广义双线性系统模型^[6]:

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ (A + \sum_{i=1}^p f_i(u_1(k), u_2(k), \dots, u_q(k)) N_i) x(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x \in \mathbb{R}^n$, $x(0)$ 是给定的; $y \in \mathbb{R}^m$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $N_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ($i = 1, 2, \dots, p$), $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$; $f_i(u(k)) = f_i(u_1(k), u_2(k), \dots, u_q(k))$ ($i = 1, 2, \dots, p$) 是输入分量 $u_1(k), u_2(k), \dots, u_q(k)$ 的单项式.当离散时间间隔为有限值并且系统输入有界时,任意的连续输入-输出系统可用有限维的式(1)描述的系统任意好地逼近^[6],同时该广义双线性系统模型又兼有一般双线性系统模型所具有的结构简单、便于数学处理和特别适合于工程应用的特点^[7]。

2.3 各运行工况线性模型辨识(Linear model identification in each operating regime)

对于满足 2.1 节假设条件的非线性过程,在对其划分的每个运行工况范围内,可利用常规建模方

法获得其局部线性模型,根据过程的特点和知识可确定此线性模型的结构,由过程的输入输出数据可对具有特定结构的线性模型参数进行估计.若这样建立各运行工况线性模型是输入输出模型,可采用几种实现算法将输入输出模型转换为标准型状态空间模型。

为了区分各运行工况线性模型,同时使模型中包含各运行工况的信息,用上标 j 表示每个运行工况,同时模型中的输入 $u(k)$ 的分量 $u_1(k), u_2(k), \dots, u_q(k)$ 除了代表控制输入向量 $u_c(k) = (u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k))$ ($r < q$) 外,其它分量则用来表示工况参数 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_h)$. 于是辨识获得的各运行工况标准型状态空间模型为

$$\begin{cases} x^j(k+1) = E(u^j(k))x^j(k) + F(u^j(k)) \cdot u_c^j(k), \\ y^j(k) = G(u^j(k))x^j(k). \end{cases} \quad (2)$$

式中 $x^j \in \mathbb{R}^n$, $x^j(0)$ 是给定的;具有适当维数的矩阵 $E(u^j(k))$, $F(u^j(k))$ 和 $G(u^j(k))$ 取决于各运行工况广义输入 $u^j(k) = (u_c^j(k), \theta)$ 。

2.4 非线性过程全局广义双线性系统模型的构造(Global generalized bilinear model construction of the nonlinear processes)

根据参考文献[8]的研究结果,可知有下述结论:当控制输入向量 $u_c(k)$ 为标量时,任何 n 维线性系统(2)与形式(3)描述的双线性系统具有相同的输入输出特性:

$$\begin{cases} x_A^j(k+1) = [E_A(u^j(k)) + F_A(u^j(k)) \cdot u_c^j(k)] x_A^j(k), \\ y^j(k) = H(u^j(k)) x_A^j(k). \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} x_A^j(k) &= \begin{bmatrix} x^j(k) \\ 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n+1}, x_A^j(0) = \begin{bmatrix} x^j(0) \\ 1 \end{bmatrix}, \\ E_A(u^j(k)) &= \begin{bmatrix} E(u^j(k)) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}, \\ F_A(u^j(k)) &= \begin{bmatrix} 0 & F(u^j(k)) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}. \end{aligned}$$

由于本文中主要讨论 SISO 非线性过程的建模,所以 $H(u^j(k)) = [G(u^j(k)) \quad 0] \in \mathbb{R}^{1 \times (n+1)}$. 将这些向量和矩阵代入式(3)立即就可证明上述结论的正确性。

为把过程各运行工况的线性模型(2)合成为一个具有式(1)形式的全局非线性模型,可先将线性模型(2)转换成与其输入输出特性等价的表达形式如式(3)所示的双线性模型.并令

$$W(u^j(k)) = E_A(u^j(k)) + F_A(u^j(k)) \cdot u_c^j(k) = \begin{bmatrix} E(u^j(k)) & F(u^j(k)) \cdot u_c^j(k) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

然后用以 $u(k) = (u_c(k), \theta)$ 的分量乘积单项式为系数的矩阵多项式近似矩阵 $W(u(k))$ ，即使得下式成立：

$$A + \sum_{i=1}^p f_i(u_1^i(k), u_2^i(k), \dots, u_q^i(k)) N_i = W(u^j(k)). \quad (5)$$

于是便可用 2.5 节的计算方法获得全局非线性模型中矩阵 A 和 N_i 的元素，并最终构造出过程的全局广义双线性系统模型。

2.5 矩阵 A 和 N_i 元素的计算方法 (Algorithm of matrices A and N_i)

要通过上述方法建立式(1)形式的全局非线性模型，必须由式(5)计算出矩阵 A 和 N_i 的元素。这些矩阵的总个数为 $p + 1$ 。设过程划分的运行工况的总个数为 L ，对于每个运行工况首先按式(4) 计算出矩阵 $W(u^j(k))$ 的元素 $(W(u^j(k)))_{ab}$ ($a, b = 1, 2, \dots, n + 1$)。其次引入矩阵和向量记号

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ f_1(u^1(k)) & f_1(u^2(k)) & \dots & f_1(u^L(k)) \\ f_2(u^1(k)) & f_2(u^2(k)) & \dots & f_2(u^L(k)) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_p(u^1(k)) & f_p(u^2(k)) & \dots & f_p(u^L(k)) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(p+1) \times L},$$

$$W = [W(u^1(k)) \quad W(u^2(k)) \quad \dots \quad W(u^L(k))] \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1) \cdot L},$$

$$W_{ab} = [(W(u^1(k)))_{ab} \quad (W(u^2(k)))_{ab} \quad \dots \quad (W(u^L(k)))_{ab}] \in \mathbb{R}^{1 \times L},$$

$$U = [A \quad N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_p] \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1) \cdot (p+1)},$$

$$U_{ab} = [(A)_{ab} \quad (N_1)_{ab} \quad (N_2)_{ab} \quad \dots \quad (N_p)_{ab}] \in \mathbb{R}^{1 \times (p+1)}.$$

采用上述记号后，可将等式(5)等价地改写为

$$U_{ab}V = W_{ab}, (a, b = 1, 2, \dots, n + 1).$$

于是可用最小二乘法计算出矩阵 A 和 N_i 的元素 ($i = 1, 2, \dots, p$)，若 $p + 1 < L$ ，则有

$$U_{ab}^T = (VV^T)^{-1}V W_{ab}^T, (a, b = 1, 2, \dots, n + 1). \quad (6)$$

式中上标 T 表示矩阵或向量的转置。

3 应用实例 (Practical application example)

下面讨论本文中提出的基于工况分解的面向控制的非线性过程建模方法在某火电厂 300 MW 机组锅炉过热汽温对象建模中的实际应用。

3.1 过程描述 (Process description)

某电厂 300 MW 机组亚临界低倍率复合循环锅炉的过热汽温控制系统调节各级过热器汽温的主要方法是喷水减温。该机组有三级过热器，在每级过热器前依次设有零级喷水、一级喷水和二级喷水减温器。零级喷水只设计了远方手动操作，以保证启、停机时一级过热器出口温度不致过高。一级喷水和二级喷水均为自动调节。一级喷水控制系统只能对整个过热汽温调节系统的控制目标主蒸汽温度起粗调作用，最终对主汽温控制质量起关键作用的是二级喷水调节系统。因此本文中以二级喷水调节对象(包括二级喷水减温器和第三级过热器)为例说明本文中所提建模方法的应用。

3.2 不同负荷工况下二级喷水调节对象线性模型的辨识 (Identification of the secondary spray controlled plant linear models of different load regimes)

通过开环减温水阀位阶跃扰动实验和被控对象降阶模型辨识方法，建立了某电厂 300 MW 机组典型运行条件下不同负荷工况工作点二级喷水调节对象调节通道的线性化动态模型。通过大量研究发现，当对象模型的结构采用三阶惯性模型时，模型的动态响应与对象实测动态响应的拟合结果较好且结构最简单。

表 1 是二级喷水控制对象调节通道 4 个负荷工况的降阶模型的辨识结果，模型的输入 u_c 是二级喷水减温水流量 (kg/s)，输出 y 为第三级过热器出口汽温测量电压信号 (V)，是由实验数据通过最小二乘拟合直接得到的整个广义对象的降阶模型，其中过热汽温的量程为 200 °C ~ 600 °C 对应电压信号 0 V 至 10 V。

表 1 二级喷水控制对象调节通道 4 个负荷工况的降阶模型

Table 1 Reduced order models of the secondary spray controlled plant regulation channel at four load regimes

工况	降阶模型
270 MW	$-0.196/(1 + 52.12s)^3$
240 MW	$-0.351/(1 + 60.45s)^3$
210 MW	$-0.475/(1 + 71.34s)^3$
180 MW	$-0.420/(1 + 96.87s)^3$

3.3 对象非线性全局模型的建立 (Establishing the global nonlinear model of the plant)

首先将3.2节给出的不同负荷工况下二级喷水调节对象的连续时间线性降阶模型采用零阶保持器法离散化,得到其相应的离散时间传递函数模型 $P(z)$, $P(z)$ 的表达式为

$$P(z) = \frac{y(z)}{u_c(z)} = K \left(\frac{d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3}} \right). \quad (7)$$

式中, $d_1 = 1 - (1 + \alpha + 0.5\alpha^2)e^{-\alpha}$, $d_2 = (2 + \alpha - 0.5\alpha^2)e^{-2\alpha} + (-2 + \alpha + 0.5\alpha^2)e^{-\alpha}$, $d_3 = -e^{-3\alpha} + (1 - \alpha + 0.5\alpha^2)e^{-2\alpha}$, $c_1 = -3e^{-\alpha}$, $c_2 = 3e^{-2\alpha}$, $c_3 = -e^{-3\alpha}$, $\alpha = T_0/T$, T_0 是采样周期, T 是连续时间线性降阶模型惯性环节的惯性时间常数, K 为连续时间线性降阶模型的稳态增益。

通过利用实现算法可将 $P(z)$ 转化为离散时间标准型状态空间模型,在转换时有几种实现算法可以应用,但经过比较研究可知, Jordan 块形式的实现可使我们能获得动态特性最接近实际过程动态特性的模型,同时模型的结构也最简单。

$P(z)$ 的 Jordan 块形式的标准型状态空间实现形式如式(2)所示,式中

$$E(u^j(k)) = \begin{bmatrix} e^{-\alpha} & 1 & 0 \\ 0 & e^{-\alpha} & 1 \\ 0 & 0 & e^{-\alpha} \end{bmatrix},$$

$$F(u^j(k)) = \begin{bmatrix} d_1 - d_2 - 2d_1 e^{-\alpha} \\ (d_2 - d_3) + (2d_1 - d_2)e^{-\alpha} - d_1 e^{-2\alpha} \\ d_3 + d_2 e^{-\alpha} + d_1 e^{-2\alpha} \end{bmatrix},$$

$$G(u^j(k)) = K(u^j(k)) \cdot [1 \ 1 \ 1].$$

此线性模型只有当二级喷水调节对象工作于某一特定负荷 $\theta = \theta_1$ 附近,且控制输入量二级喷水减温水流量 u_c 在小范围变化时,才是有效的.因此为构造对象全局有效的非线性模型,要先将此线性模型转

换成与其输入输出特性等价的表达形式如式(3)所示的双线性模型,并按式(4)计算出4个负荷工况的 $W(u^j(k))$.

其次由表1给出的二级喷水控制对象调节通道4个负荷工况的降阶模型的辨识结果,可以计算出对象稳态增益 K 和惯性时间常数 T 随负荷 θ_1 (MW)的变化规律:

$$K(u^j(k)) =$$

$$K(\theta_1) = -9.136 \times 10^{-7} \theta_1^3 + 6.750 \times 10^{-4} \theta_1^2 -$$

$$1.607 \times 10^{-1} \theta_1 + 11.957,$$

$$1/T(\theta_1) = 7.949 \times 10^{-9} \theta_1^3 - 5.657 \times 10^{-6} \theta_1^2 +$$

$$1.421 \times 10^{-3} \theta_1 - 1.085 \times 10^{-1}.$$

将 $e^{-\alpha} = e^{-T_0/T}$ 展开为有限项幂级数,可知对象模型的系数 c_i 和 d_i ($i = 1, 2, 3$)都可用 θ_1 的有限项多项式近似.经过凑试可确定式(1)表达的对象广义双线性模型中对应 $f_i(u(k))$ 的各个单项式分别为1, θ_1 和 $\theta_1^2 \cdot u_c$,于是最后建立的二级喷水控制对象非线性全局模型的形式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ 1 \end{bmatrix} = [A + N_1 \cdot \theta_1(k) + N_2 \cdot \theta_1^2(k) \cdot u_c(k)] \begin{bmatrix} x(k) \\ 1 \end{bmatrix}, \\ y(k) = K(\theta_1(k)) [1 \ 1 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ 1 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (8)$$

式中 $x \in \mathbb{R}^3$,矩阵 A , N_1 和 N_2 皆为 4×4 矩阵,它们的元素可根据式(6)进行计算.由于这些矩阵的元素与 u_c 有关,下面给出当 $u_c = 1 \text{ kg/s}$ 时,矩阵 A , N_1 和 N_2 的元素有效数字取到小数点后三位的计算结果,其中采样周期 T_0 取为5 s.

$$A = \begin{bmatrix} 1.102 & 1 & 0 & 4.061 \times 10^{-5} \\ 0 & 1.102 & 1 & 8.445 \times 10^{-5} \\ 0 & 0 & 1.102 & -1.150 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} -1.112 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 2.419 \times 10^{-6} \\ 0 & -1.112 \times 10^{-3} & 0 & -1.149 \times 10^{-6} \\ 0 & 0 & -1.112 \times 10^{-3} & -1.995 \times 10^{-6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} 1.470 \times 10^{-6} & 0 & 0 & -1.801 \times 10^{-8} \\ 0 & 1.470 \times 10^{-6} & 0 & 3.969 \times 10^{-9} \\ 0 & 0 & 1.470 \times 10^{-6} & 1.846 \times 10^{-8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3.4 模型验证 (Model validation)

为了验证本文中所提出的过程非线性模型建立方法的有效性,利用未用于上述对象非线性全局模型(8)辨识的动态试验获得的对象实测数据,对模型(8)进行了有效性的检验.图 1~3 显示了当机组负荷处于 160~300 MW 之间时,在减温水流量幅度为 1 kg/s 阶跃扰动下,对象输出实测阶跃响应曲线与模型(8)在相同的条件下的输出阶跃响应的仿真曲线的比较情况.图形显示的比较结果表明,当机组负荷处于 160~300 MW 之间时,在某一负荷工况附近,建立的对象非线性全局模型(8)能以相当高的精度预测实际对象的动态特性.这在一定程度上说明了用本文方法建立的过程非线性模型在运行工况大范围变化时也均能较好地反映实际过程的非线性动态行为.

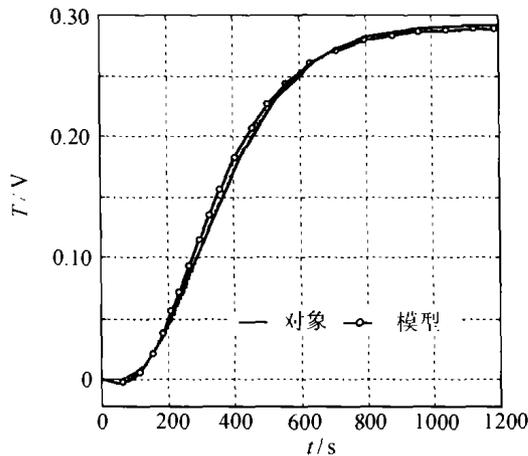


图 1 168 MW 附近模型(8)与对象阶跃响应比较
Fig. 1 Comparison of step responses for model (8) and the plant around 168 MW

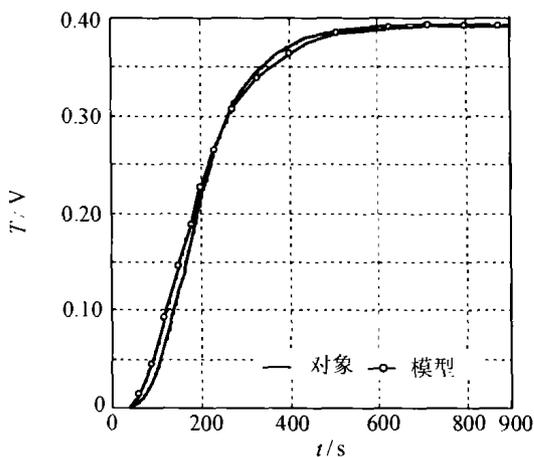


图 2 232 MW 附近模型(8)与对象阶跃响应比较
Fig. 2 Comparison of step responses for model (8) and the plant around 232 MW

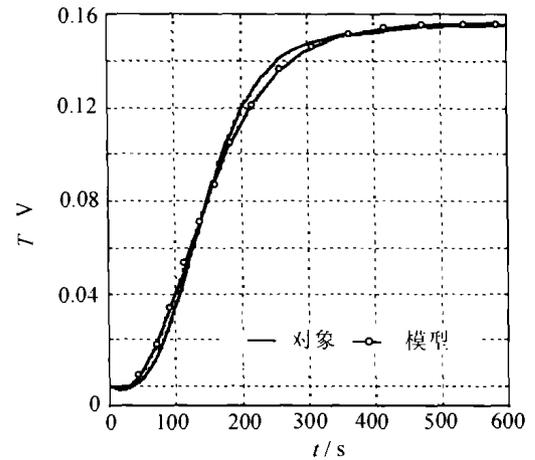


图 3 284 MW 附近模型(8)与对象阶跃响应比较
Fig. 3 Comparison of step responses for model (8) and the plant around 284 MW

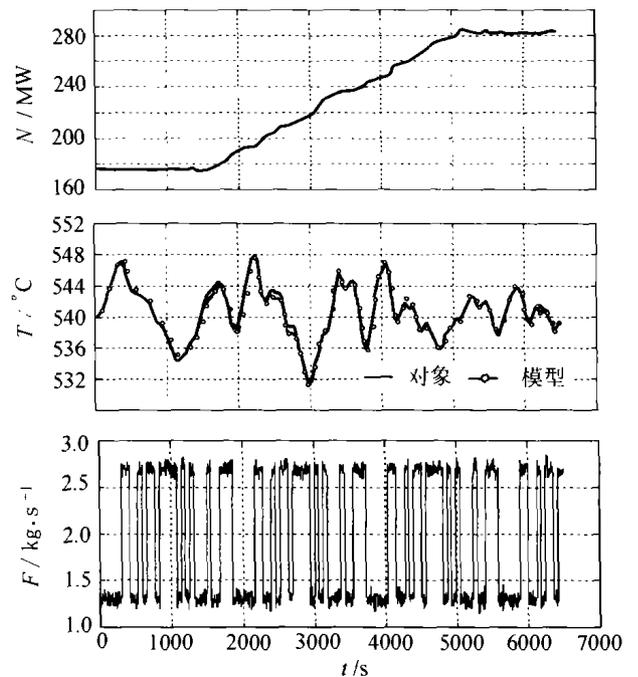


图 4 机组负荷大范围变动时模型(8)与实际对象的动态响应比较
Fig. 4 Comparison of dynamic response for model (8) and the real plant as the unit load changes over a wide range

为了进一步全面地验证本文方法建立的过程非线性模型在运行工况大范围变化时的适用性,提出了一种通过现场动态试验获得机组过热汽温非线性对象在机组负荷大范围变化时的动态特性实测数据的方法.该方法是在机组按一定速率升降负荷的同时,在减温水调节阀门的控制信号上叠加 PRBS 激励信号.通过多次现场试验,确定了保证机组过热器安全运行的合理的动态试验方案,获取了验证模型(8)的可靠的现场数据.图 4 是机组电负荷 N_E 以联合变压运行方式按 1.8 MW/min 的升降负荷速率由 176 MW 变化到 282 MW,同时在二级减温水调节阀

门的恒定控制信号上叠加能产生幅度为 $\pm 0.7 \text{ kg/s}$ 喷水流量 F 的 PRBS 激励信号的条件下,获得的对象输出 T 实测动态响应曲线以及在模拟现场条件下模型(8)输出的动态响应仿真曲线.由图4可以看出,尽管在现场进行动态试验时,被实验对象不可避免地会受到其它扰动的影响,模型(8)仍满意地预测了运行工况大范围变化时实际对象的动态特征,这充分说明了当机组负荷在 160 ~ 300 MW 大范围变化时,用本文方法建立的机组过热汽温非线性对象模型的有效性.

4 结论(Conclusion)

随着电网综合自动化对大型火电机组自动控制品质要求的提高,热工控制系统呈现出工况范围广、非线性等特点,人们提出了急需解决的复杂热工过程建模与控制问题.本文作者研究适应这种需要,针对大多数复杂热工控制对象的实际特点,提出了一种基于工况分解的非线性过程建模方法,该方法由于充分借鉴了人们解决复杂问题的分解合成法则以及适合于工程应用的建模理论和方法,使得与其它非线性过程建模方法相比,具有计算复杂程度大大降低,模型结构更适于灵活的在线调整和学习算法等优点.在某火电厂 300 MW 机组锅炉过热汽温对象建模中的实际应用证实了本文中所提方法的有效性和实用性.该方法的提出为设计高性能的热工控制系统和实现大型火电机组的优化控制打下了基础.

参考文献(References):

[1] 范永胜, 睦喆, 姜学智, 等. 一种高精度的锅炉单相区段集总参数动态修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 50 - 54.

(FAN Yongsheng, SHUI Zhe, JIANG Xuezi, et al. A high-precision modified lumped-parameter dynamic model applied to uniphase boiler sections [J]. *Proc of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2000, 20(1): 50 - 54.)

- [2] WENG C, RAY A. Robust wide-range control of steam-electric power plants [J]. *IEEE Trans on Control System Technology*, 1997, 5(1): 74 - 88.
- [3] ASTROM K J, BELL R D. A nonlinear model for steam generation processes[C]// *Proc 12th IFAC World Congress*, New York: Pergamon, 1993, 3: 395 - 398.
- [4] JOHANSEN T A, MURRAY-SMITH R. The operating regime approach to nonlinear modeling and control [M]// MURRAY-SMITH R, JOHANSEN T A. *Multiple Model Approaches to Modeling and Control*. London: Taylor and Francis, 1997: 3 - 72.
- [5] LIU H, LI S, CHAI T. Intelligent decoupling control of power plant main steam pressure and power output [J]. *Int J Electrical Power and Energy Systems*, 2003, 25(10): 809 - 819.
- [6] MOHLER R R. *Nonlinear System - Applications to Bilinear Control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [7] 华向明. 双线性系统建模与控制[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.
(HUA Xiangming. *Modeling and Control for Bilinear Systems* [M]. Shanghai: the East China Chemical Engineering College Press, 1990.)
- [8] MOHLER R R, RUBERTI A. *Theory and Applications of Variable Structure Systems* [M]. New Jersey: Academic Press, 1972.

作者简介:

刘红波 (1964 —), 男, 山东大学副教授, 现为上海交通大学博士后研究人员, 从事复杂工业过程建模与控制、模糊控制和自适应控制等研究, E-mail: hbliu@sdu.edu.cn;

李少远 (1965 —), 男, 上海交通大学教授, 博士生导师, 从事模糊智能控制、非线性系统多模型建模和满意优化控制等研究, E-mail: syli@sju.edu.cn;

柴天佑 (1947 —), 男, 中国工程院院士, 东北大学教授, 博士生导师, 从事工业过程综合自动化、多变量智能解耦控制等研究, E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn.