

## 超超临界机组模型的非线性分析及控制

朱亚清<sup>1</sup>, 陈世和<sup>1</sup>, 张曼<sup>2</sup>, 曾德良<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 为了实现大型超超临界机组的大范围变负荷稳定运行, 引入了间隙测度概念, 分析了某3输入3输出的1 000 MW超超临界机组模型的非线性特性, 结合(K均值)聚类算法实现了机组负荷的划分和典型工况点的选定。采用小偏差线性化的方法得到每个典型工况点下的线性化模型, 然后基于 $H_\infty$ 回路成形设计出每个线性化模型对应的鲁棒控制器, 最后结合模糊监督控制给出了模糊多模型监督控制设计方案。实验仿真结果表明: 该控制器设计方案实现了超超临界机组负荷的快速跟踪, 为非线性系统的控制问题提供了一个新方法。

**关键词:** 间隙测度; 非线性分析;  $H_\infty$ 回路成形; 模糊多模型监督控制

中图分类号: TM611.1 文献标识码: A

## 引言

由于超超临界机组在汽水流程上具有一次通透性, 从省煤器入口开始, 给水就被持续加热、蒸发及过热, 各受热段之间没有明显的分界线。各受热段的长度同时受燃料量、给水流量及汽轮机阀门开度的影响。本研究的对象是闫姝等建立的适用于控制器设计的直流炉机组简化模型<sup>[1]</sup>。文献[1]主要是针对制粉系统和锅炉汽水系统、汽轮机系统, 利用质量平衡、能量平衡和动量平衡对上述各过程建立机理模型, 并以泰州1 000 MW超超临界直流炉机组运行在100%~50%负荷时实验数据为辨识模型中的参数, 最终得到超超临界机组非线性控制模型如式(1)所示。该模型忽略了一些次要因数的影响, 主要研究了汽轮机和锅炉之间的耦合现象, 反映了燃料量、给水流量及汽轮机阀门开度对主汽压力、主汽温度和机组输出功率的影响。通过对模型(1)的非线性特性分析, 根据该分析给出了非线性控制问题的控制器设计方案。

目前, 非线性问题已获得广泛关注, 对于非线性

系统的控制问题也提出了很多方法, 例如线性控制、增益调度控制、非线性控制和智能控制<sup>[2-5]</sup>。线性控制器设计只能保证在负荷很小的变化范围内控制效果良好。对于非线性控制设计, 为了满足控制要求, 控制器往往变得很复杂, 这在工程上不适用。智能控制主要在控制结构和控制行为两方面模仿人的一些特点和功能, 在控制策略设计的时候要求设计者具有一定的经验。

针对非线性问题中的控制难点, 本研究引入间隙测度概念分析模型(1)的非线性特性, 根据模型(1)的非线性特点, 合理的选择系统的工况点, 然后对不同工况点下的线性化模型分别设计出基于 $H_\infty$ 控制回路成形的鲁棒控制器。在多个控制器下, 构建模糊监督逻辑, 实现多个控制器在机组负荷大范围变化时的协调控制。

## 1 间隙测度和非线性分析

在式(1)中,  $x_1$ 是实际进入锅炉煤粉量, kg/s;  $x_2$ 是汽水分离器出口蒸汽压力, MPa;  $x_3$ 是中间点焓值, kJ/kg;  $u_1$ 是燃料量指令, kg/s;  $u_2$ 是给水流量, kg/s;  $u_3$ 是汽轮机调节阀位, %;  $y_1$ 是主蒸汽压力, MPa;  $y_3$ 是汽轮机实发功率, MW。

间隙测度是两个线性系统之间距离的一种度量, 文献[6]指出它具有4条重要性质: (1) 它可以计算任意两个线性系统(稳定或者不稳定系统)之间的距离, 并且它是两线性系统的无穷范数的一种延伸; (2) 值域范围是0到1; (3) 值的大小反映了两系统之间的距离, 当值趋近于0表示两个系统很“近”(即两个系统的动态和静态特性很相似), 同理, 当值趋近于1表示两个系统很“远”; (4) 如果两个系统之间的距离很“近”时, 那么至少存在一个控

收稿日期: 2013-09-05; 修订日期: 2014-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAA04B03)

作者简介: 朱亚清(1975-), 男, 广东电白人, 广东电网公司电力科学研究院高级工程师。

制器使得这两个系统都稳定。文献 [7] 指出间隙测度比无穷范数更适用于计算两个线性系统之间的距

离, 并且它更适用于控制器设计。

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0056x_1 + 0.0056e^{-17s}u_1 \\ \dot{x}_2 &= \frac{(43.22x_2 - 5.62x_2^{0.882} - 31.84) \times (-8.96x_2 + 1.165x_2^{0.882} + 2512.4) \times (500 - 1.31x_3)}{1060000(1.31x_3 - 1205)}u_3 \\ &\quad + 0.0157(x_1)^{1.031} - 0.000665u_2 \\ \dot{x}_3 &= \frac{(43.22x_2 - 5.62x_2^{0.882} - 31.84) \times (-8.96x_2 + 1.165x_2^{0.882} + 2512.4) \times (3000 - 1.31x_3)}{59830(1.31x_3 - 1205)}u_3 \quad (1) \\ &\quad + 0.278(x_1)^{1.031} - 0.003u_2 \\ y_1 &= x_2 - 0.13x_2^{0.882} \\ y_2 &= x_3 \\ y_3 &= 0.00055u_3(43.22x_2 - 5.62x_2^{0.882} - 31.84) \times (-8.96x_2 + 1.165x_2^{0.882} + 2512.4) \end{aligned}$$

间隙测度的计算式为<sup>[8]</sup>:

$$\delta(P_1, P_2) = \max\{\vec{\delta}(P_1, P_2), \vec{\delta}(P_2, P_1)\} \quad (2)$$

其中  $P_1$  和  $P_2$  是两个线性系统, 两线性系统之间的距离  $\delta$  具有上所述 4 条重要性质。 $\vec{\delta}(P_1, P_2)$  和  $\vec{\delta}(P_2, P_1)$  是方向距离, 其定义为:

$$\vec{\delta}(P_1, P_2) = \inf_{Q \in H_\infty} \left\| \begin{matrix} M_1 \\ N_1 \end{matrix} \right\| - \left\| \begin{matrix} M_2 \\ N_2 \end{matrix} \right\|_Q \quad (3)$$

式中:  $(M_1, N_1)$  和  $(M_2, N_2)$  —  $P_1, P_2$  两线性系统的归一化互质分解因子, 对于式 (3) 计算可以参考文献 [8]。

为了分析模型 (1) 的非线性特性, 采用基于间隙测度系统的非线性度的度量<sup>[9]</sup>, 其定义为:

$$\nu_g = \sup_r \delta(L_r, N) \quad (4)$$

式中  $L_r$  — 非线性系统  $N$  (模型 (1)) 在任意操作点  $r$  处的线性化模型;  $L$  — 所有可行线性模型。在实际计算中, 通常将  $L$  固定为  $N$  在某一操作点的线性化模型 (称为标称模型), 因此  $\nu_g$  是两个线性系统之间的距离, 反映了非线性系统  $N$  与某一线性化模型  $L$  之间的距离。当操作点  $r$  取遍非线性系统  $N$  的可行域, 那么所有的  $\nu_g$  反映了非线性系统  $N$  的非线性特性。

对于模型 (1), 取额定工况 ( $y_1 = 25$  MPa,  $y_2 = 2737.8$  kJ/kg,  $y_3 = 1000$  MW) 下的线性化模型为标称模型, 由于模型 (1) 是一个 3 输入 3 输出并具有 3 个状态量的模型, 3 个输出变量的任意组合可以对应许多不同的工作点, 为简单起见, 在确定标称模型后只计算以下 3 种情形的非线性测度  $\nu_g$ :

(1) 固定主蒸汽压力 ( $y_1$ ) 不变: 主蒸汽压力  $y_1 = 20$  MPa, 中间点焓值  $y_2$  从 2600 kJ/kg 变化到 2800 kJ/kg, 汽机输出功率  $y_3$  从 500 MW 变化到 1000 MW;

(2) 固定中间点焓值 ( $y_2$ ) 不变: 主蒸汽压力  $y_1$  从 15 MPa 变化到 25 MPa, 中间点焓值  $y_2 = 2737$  kJ/kg, 汽机输出功率  $y_3$  从 500 MW 变化到 1000 MW;

(3) 固定输出功率 ( $y_3$ ) 不变: 主蒸汽压力  $y_1$  从 15 MPa 变化到 25 MPa, 中间点焓值  $y_2$  从 2600 kJ/kg 变化到 2800 kJ/kg, 汽机输出功率  $y_3 = 850$  MW。

模型 (1) 的 3 个输出变量 ( $y_1, y_2, y_3$ ) 的任意组合可能会对应着某些不可能的工况点 (即  $u_3 > 1$ ), 例如当  $y_1 = 15$  MPa,  $y_2 = 2737$  kJ/kg,  $y_3 = 900$  MW 时, 通过对模型 (1) 的求解, 可以算出此时对应的 3 个输入变量分别是  $u_1 = 86.07$  kg/s,  $u_2 = 691.49$  kg/s,  $u_3 = 1.12$  kg/s, 其中  $u_3 = 1.12$  kg/s 在物理上是不能实现的, 因为当汽机阀门全开时  $u_3 = 1$  (即  $u_3$  的取值范围是 0 到 1)。对于这类不可能的工况点 (如图 2 和图 3 中  $\nu_g$  为 0 对应的区域), 不计算  $\nu_g$  的值。

由上述的 3 个不同情形下的非线性测度曲面图, 可以得到结论: (1) 在主蒸汽压力恒定的情况下, 随着输出功率 ( $y_3$ ) 的不断减小, 非线性系统与标称模型之间的距离不断增大; (2) 在中间点焓值恒定的情况下, 非线性测度  $\nu_g$  的变化类似于压力恒定的情形也是随着功率的不断减小, 非线性系统与标称模型之间的距离不断增大; (3) 联合图 1 和图

2.可以看出在大功率( $y_3 > 800$  MW)输出时曲面的变化率比小功率( $y_3 < 800$  MW)输出时的曲面的变化率大,这表示在小功率输出时,功率的大小是影响系统非线性的主要因数,在大功率输出时,主蒸汽压力或中间点焓值可以在小范围内影响系统的非线性;(4)在(大)功率输出恒定时如图3所示 $\nu_g$ 变化范围大致为0.06-0.04,这验证了结论3。

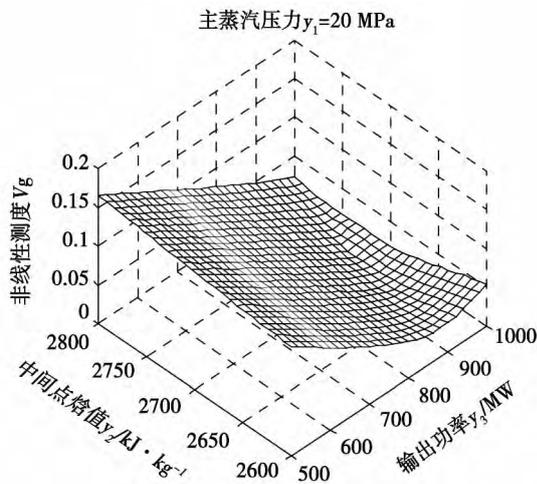


图1 情形1下的非线性测度  
Fig. 1 Non-linear measure  $\nu_g$  in the case No. 1

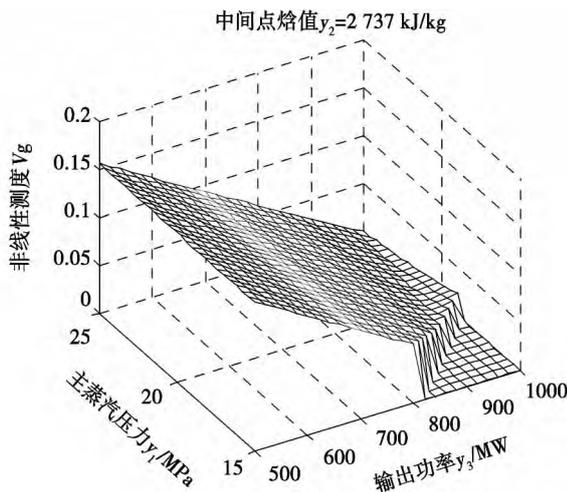


图2 情形2下的非线性测度  
Fig. 2 Non-linear measure  $\nu_g$  in the case No. 2

## 2 工况点的选择和控制器设计

在对非线性系统进行控制器设计时,通常考虑在非线性的基础之上,获取对象在某工况点下

的线性化模型,然后利用线性系统的控制器设计原理对系统进行设计。因为工况点的选择决定了控制器对原非线性模型的控制效果,所以工况点的选择至关重要。

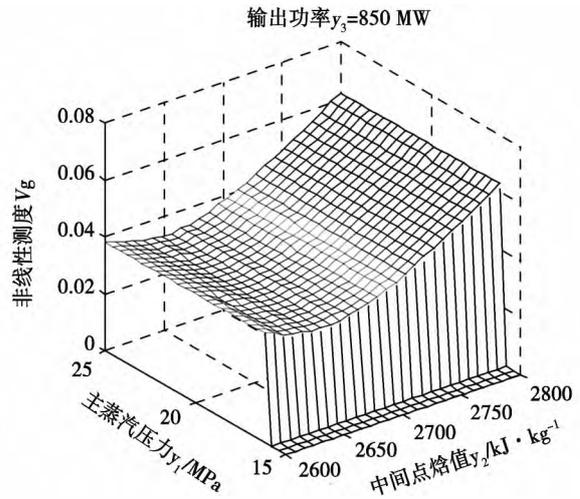


图3 情形3下的非线性测度  
Fig. 3 Non-linear measure  $\nu_g$  in the case No. 3

通常取100%、90%、80%、70%、60%等负荷作为典型工况点进行研究。但是在实际运行过程中,由于受环保、AGC查(发电厂并网运行管理实施细则)等约束条件的限制,所选的典型工况点可能只是机组过渡工况,并非机组经常运行的稳定工况<sup>[10]</sup>。

通过上面的分析可知,影响系统的非线性的主要因数是系统的输出功率,因此可以根据系统的非线性特性把系统的负荷进行合理的划分,然后进行分段线性控制。将图1中的曲面投影到ZOX面得到图4,以 $\nu_g$ 值变化0.06为一个阀位,观察 $\nu_g$ 值( $\nu_g = 0.06, \nu_g = 0.12$ )对应下的机组输出功率(以中间的曲线为基准),可将系统负荷500 MW到1 000 MW化分为[500 620], [620 800], [800 1 000]3段。

通过对系统的非线性特性分析将机组输出功率划分为3个区间段。为了实现分段控制,需要确定各区间段下的典型工况点下的线性化模型。为了避免选择的典型工况点是机组过渡工况点,采用K均值聚类算法对机组的实际运行数据进行聚类分析。通过计算得到各区间段下的聚类中心为547.56、728.33和901.49 MW,基于此可以选出各区间段下的典型工况点如表1所示。

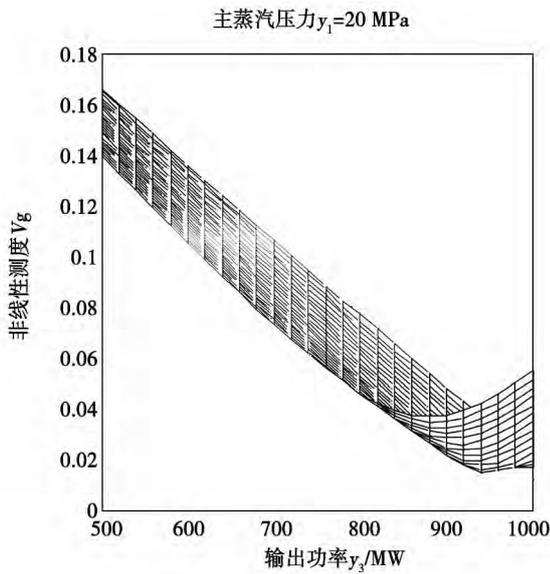


图 4 图 1 的 ZOx 面投影

Fig. 4 Projection of Fig. 1 on the ZOx plane

表 1 3 个典型工况点

Tab. 1 Three typical operating condition points

	1 号	2 号	3 号
$x_1 / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	86.219 2	70.103 4	53.149 0
$x_2 / \text{MPa}$	24.742 6	20.060 6	15.105 3
$u_1 / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	86.219 2	70.103 4	53.149 0
$u_2 / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	706.531 9	562.075 4	409.633 7
$u_3 / \%$	0.752 8	0.745 6	0.744 7
$y_1 / \text{MPa}$	22.54	18.23	13.68
$y_2(x_3) / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2 701.3	2 729.0	2 786.1
$y_3 / \text{MW}$	901.49	728.33	547.56

在确定工况点之后,对于上述的每个工况点,利用小偏差线性化的方法可以得到对应的 3 个线性化模型,然后对每个模型进行控制器的设计。首先利用小偏差线性化方法在典型工况下对系统进行线性化,假设某非线性系统

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X, U) \\ Y = G(X, U) \end{cases} \quad (5)$$

利用小偏差线性化后的系统模型为

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \\ \Delta Y = C \Delta X + D \Delta U \end{cases} \quad (6)$$

其中,系数矩阵  $A, B, C, D$  分别是  $F$  对  $X, F$  对  $U, G$

对  $X, G$  对  $U$  在工况点  $(X_0, U_0)$  处的雅可比矩阵。系数矩阵  $A$  的计算式为:

$$A = \frac{\partial F}{\partial X^T} = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \cdots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \vdots & & \vdots \\ \partial f_n / \partial x_1 & \cdots & \partial f_n / \partial x_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

利用上述方法对模型(1)在 1 号工况下进行线性化,可以算出系统的传递函数模型  $G_1$ , 见式(8)。

在求出系统线性化模型后,本研究选择基于  $H_\infty$  回路成形设计相应的鲁棒控制器<sup>[11]</sup>。 $H_\infty$  回路成形设计过程主要包括 3 个步骤。第一步:成形设计,在被控对象的前后分别设计一个合适的补偿器  $W_1, W_2$ ,用来改变被控对象  $G$  的奇异值,使得设计后的新对象  $G_s = W_2 G W_1$  的奇异值满足设计要求(即使得  $G_s$  的奇异值在低频段较大,在高频段较小,同时在中频段不能太大也不能太小);第二步:计算鲁棒稳定性指标  $\varepsilon_{\max}$ ,如果  $\varepsilon_{\max} < 1$ ,回到第一步重新选择  $W_1, W_2$ ,直到  $\varepsilon_{\max}$  满足要求(一般取值在 0.2 - 0.5 之间);第三步:计算  $H_\infty$  控制器  $K (K = W_1 G_s W_2)$ 。

在鲁棒控制器设计过程中,为了设计的简单,在补偿器  $W_1, W_2$  设计时,  $W_2$  取为单位矩阵,  $W_1$  取 PI (比例积分)的形式。按照上面的设计思路,对应于非线性模型(1)在工况点 1 号处线性化模型  $G_1$  的  $H_\infty$  控制器设计如下:

其中前置补偿器  $W_1$  如式(10)所示,对应的鲁棒稳定性指标  $\varepsilon_{\max} = 0.301$ 。线性化模型  $G_1$  和设计后系统  $(G_s = G_1 W_1)$  的奇异值如图 5 所示。

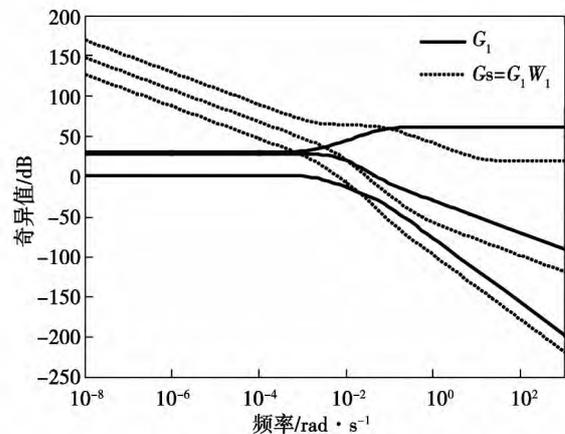


图 5  $G_1$  和  $G_s$  的奇异值

Fig. 5 Singular values of  $G_1$  and  $G_s$

$$\begin{cases}
 g_{11} = \frac{9.59e - 005s + 1.58e - 006}{s^3 + 0.09532s^2 + 0.001488s + 5.519e - 006} \\
 g_{21} = \frac{0.001843s + 0.0001181}{s^3 + 0.09532s^2 + 0.001488s + 5.519e - 006} \\
 g_{31} = \frac{0.00363s + 5.978e - 005}{s^3 + 0.09532s^2 + 0.001488s + 5.519e - 006} \\
 g_{12} = \frac{0.0006128s - 6.244e - 010}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854} & g_{13} = \frac{-2.464s - 0.3118}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854} \\
 g_{22} = \frac{-0.03s - 0.0025}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854} & g_{23} = \frac{-8.4s + 7.19e - 017}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854} \\
 g_{32} = \frac{0.02319s - 2.636e - 008}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854} & g_{33} = \frac{1197s^2 + 14.16s + 1.965e - 016}{s^2 + 0.08972s + 0.0009854}
 \end{cases} \quad (8)$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.001173/s & 0.2197 + 0.0007918/s + 6.767 & 0.06808 + 0.008034/s \\ -135.6 - 1.928/s & -54.99 - 2.196/s & 26.37 + 6.492/s \\ -16.27 - 0.2292/s & -6.51 - 0.2599/s & 3.173 + 0.7659/s \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.092 + \frac{0.01}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0.039 + \frac{0.02}{s} & 0 \\ 0 & 0 & 0.007 + \frac{0.095}{s} \end{bmatrix} \quad (10)$$

一般而言,基于  $H^\infty$  控制设计的控制器的阶次都较高,如上面设计的  $H^\infty$  控制器阶次为 11,这在工程上不便实现,所以  $H^\infty$  控制器都需要降阶处理。为此,本研究采用文献 [12] 中的方法,把  $H^\infty$  控制器降阶简化为工程上常用的 PID 控制器形式,简化的结果为  $K_1$  (公式(9))。

同理,对于非线性模型(1)在典型工况点 2 号、3 号,利用上面的基于  $H^\infty$  回路成形设计方法,我们也可以设计出对应的控制器  $K_2, K_3$ 。那么接下来的问题是:这些相应的子控制器( $K_1, K_2, K_3$ )如何协调控制,使系统在大范围变负荷运行时仍然能够实现快速跟踪。

### 3 模糊多模型监督控制设计

对于非线性模型(1),为了实现系统的控制效果更优,本研究采用模糊多模型控制的方法。文献 [13] 指出,多模型控制方法是一种基于线性理论设计的并且适用于非线性系统的控制设计方案。假设  $P_i$  是非线性模型在典型工况点下的线性化模型,  $K_i$  是对应的子控制器。为了使多个子控制器协同作用

构成全局控制器,设计了基于模糊监督的多模型控制方法,其控制结构如图 6 所示。其中模糊逻辑监督规则是:首先根据非线性系统模型的输出量,利用模糊隶属度函数计算非线性系统此时隶属于各个线性化模型  $P_i$  的隶属度  $\mu_{pi}$ ,然后根据隶属的大小分配各个子控制器输出权重  $w_i$ ,最后根据权重计算出全局控制器的输出量  $U(t)$ 。其中  $w_i$  和  $U(t)$  的计算式为:

$$w_i = \frac{\mu_{pi}}{\sum_{i=1}^m \mu_{pi}} \quad (11)$$

$$U(t) = \sum_{i=1}^m w_i \mu_i(t)$$

式中:  $m$ —线性化模型的个数;  $\mu_i(t)$ —子控制器  $K_i$  对应的输出。设计时  $m$  取值为 3,基于输出功率的隶属度函数采用常用的三角形隶属度函数如图 7 所示。

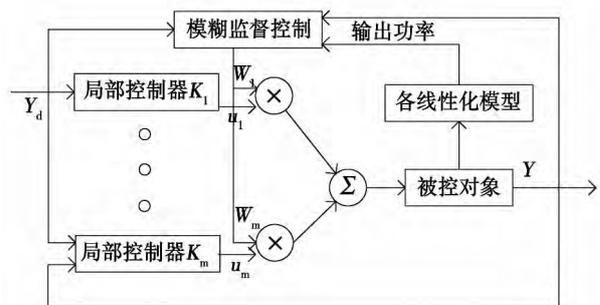


图 6 模糊多模型监督控制  
Fig. 6 Fuzzy multi-model-based supervision and control

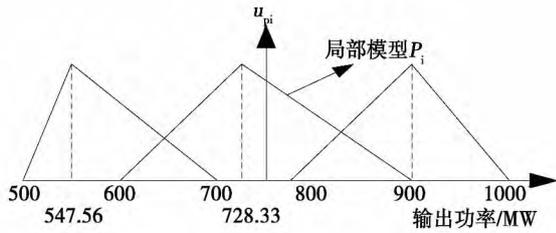


图 7 模型  $p_i$  的隶属度函数

Fig. 7 Membership function of the model  $p_i$

按照上面的设计思路进行了控制器的设计,图 8 给出了控制器控制效果的仿真数据。即分别进行了 3 种情形下的定值跟踪实验,并且仿真结果表明按照这种方案设计的控制器实现了非线性模型(1)在大范围变负荷运行下的快速定值跟踪。

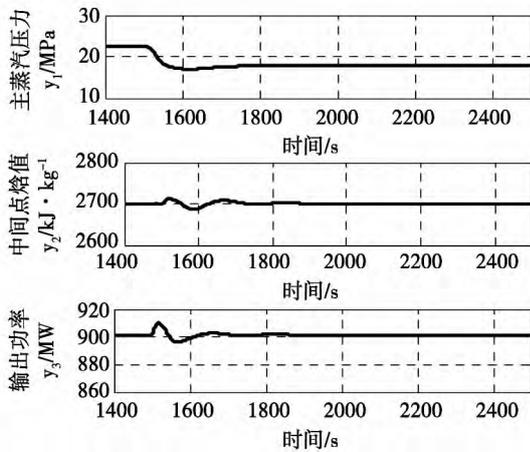


图 8 主蒸汽压力定值跟踪实验

Fig. 8 A tracking test at a constant main steam pressure

#### 4 实验仿真和结论

利用 Matlab 软件平台进行了非线性模型(1)的 simulink 仿真实验。当非线性模型(1)在工况点 1 号稳定的条件下,进行了 3 个定值跟踪实验:实验结果如图 8、图 9 和图 10 所示。

(1) 主蒸汽压力  $y_1$  从 22.54 MPa 下降到 18 MPa,中间点焓值  $y_2$  保持 2 701.3 kJ/kg 不变,汽机输出功率  $y_3$  维持 901.49 MW 恒定;

(2) 主蒸汽压力  $y_1$  保持 22.54 MPa 不变,中间点焓值  $y_2$  从 2 701.3 kJ/kg 上升到 2 800 kJ/kg,汽机输出功率  $y_3$  维持 901.49 MW 恒定;

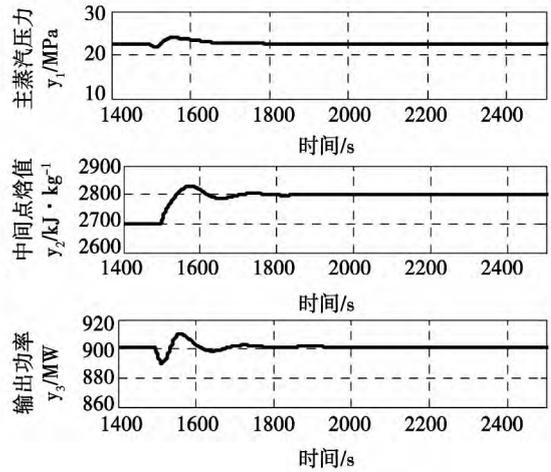


图 9 中间点焓值定值跟踪实验

Fig. 9 A tracking test at a constant intermediate enthalpy value

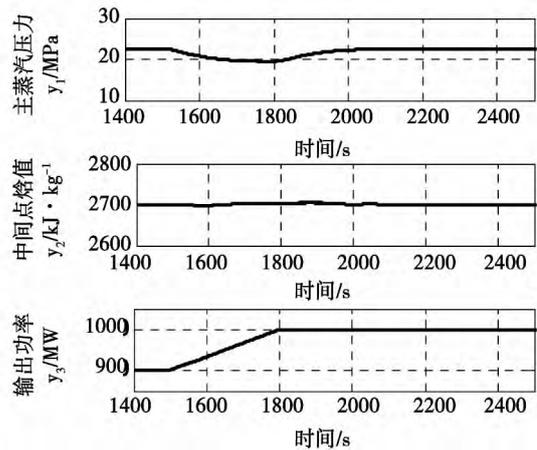


图 10 机组输出功率定值跟踪实验

Fig. 10 A tracking test at a constant output power of the unit

(3) 主蒸汽压力  $y_1$  保持 22.54 MPa 不变,中间点焓值  $y_2$  维持 2 701.3 kJ/kg 恒定,汽机输出功率  $y_3$  从 901.49 MW 上升到 1000 MW,功率上升速率限制在 20 MW/min;

为了验证所提出的模糊多模型监督控制方案的优势,对于模型(1)由工况点( $y_1 = 15$  MPa,  $y_2 =$

2 600 kJ/kg  $\gamma_3 = 600$  MW) 大范围变化到工况点 ( $\gamma_1 = 25$  MPa  $\gamma_2 = 2\ 737.8$  kJ/kg  $\gamma_3 = 1\ 000$  MW) 做定值跟踪实验: 在基于模糊多模型控制设计的控制器和基于单个控制器  $K_1$  两种控制条件下, 分别计算模型对应 3 个输出量的绝对误差积分指标, 计算结果如表 2 所示。其中误差积分计算式为:

$$IAE = \int_{t_1}^{t_2} |e(t)| dt \quad (12)$$

表 2 绝对误差积分指标

Tab. 2 Integral indexe of an absolute error

控制方案	$\gamma_1$ 的 IAE	$\gamma_2$ 的 IAE	$\gamma_3$ 的 IAE
模糊多模型监督	5 274	6 456	72 230
单一控制器 $K_1$	7 199	8 393	97 510

由上述 3 个定值跟踪实验仿真结果可知, 设计的模糊多模型监督控制方案很好的实现了非线性模型 (1) 在大范围变负荷运行的快速跟踪, 并且由表 2 可知所提出的控制方式较单一控制器具有一定的优势。

借助间隙测度概念分析了大型超超临界机组非线性模型的非线性特性, 通过对机组模型的非线性分析实现了对系统负荷的分段划分, 然后对每个划分分段利用成熟的线性控制器设计方法 ( $H_\infty$  回路成形设计) 进行控制器的分段设计, 最后结合模糊多模型控制方案, 实现了大型超超临界机组深度变负荷运行的快速跟踪。本研究提出的基于  $H_\infty$  回路成形设计的模糊多模型监督控制设计方案, 为非线性系统的控制问题提供了一种方法。

参考文献:

[1] 曾德良, 闫 姝, 刘吉臻, 等. 直流炉机组简化非线性模型及仿真应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 126 - 134.  
ZENG De-liang, YAN Shu, LIU Ji-zhen et al. A simplified nonlinear model for once-through boiler units and its simulation applications [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2012, 32(11): 126 - 134.

[2] Hwang C S, Kim D W. A design of robust two-degree of freedom boiler-turbine control system using  $H_\infty$  optimization method [C].

Proc. SICE\_95, Sapporo, 1995: 1263 - 1268.

[3] Chen P C, Shamma J S. Gain-scheduled  $H_\infty$ -optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation [J]. Process Control, 2004(14): 263 - 277.

[4] 房 方, 刘吉臻, 谭 文. 单元机组协调系统的非线性内模控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 195 - 199.  
FANG Fang, LIU Ji-zhen, TAN Wen. Nonlinear internal model control of a coordinated unit system [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2004, 24(4): 195 - 199.

[5] Dimeo R, Lee K Y. Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm, IEEE Trans [J]. Energy Convers, 1995, 10(4): 752 - 759.

[6] Du JJ, Song CY, Li P. Application of gap metric to model bank determination in multi-linear model approach [J]. Journal of Process Control, 2009, 19(2): 131 - 240.

[7] A. K. El-Sakkary, The gap metric: robustness of stabilization of feedback systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 30(3), 1985, 240 - 247.

[8] Georgiou T T, Smith M C. Optimal robustness in the gap metric [C]. IEEE Trans. Automat Control, 35, 1990, 673 - 686.

[9] Tan W, Marquez HJ, Chen T et al. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit [J]. Journal of Process Control, 2005(15): 883 - 891.

[10] 杨婷婷, 曾德良, 刘吉臻, 等. 基于工况划分的火电机组运行优化规则提取[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(6): 64 - 68.  
YANG Ting-ting, ZENG De-liang, LIU Ji-zhen et al. Extraction of the optimized law governing the operation of units in a thermal power plant based on the division of operating conditions [J]. Proceedings of North China University of Electric Power, 2009, 36(6): 64 - 68.

[11] McFarlane, Glover D, Keith, "A loop-shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis," Automatic Control [C]. IEEE Transactions, 1992: 759 - 769.

[12] Tan W, Chen T, Marquez H J. "Robust controller design and PID tuning for multivariable systems" [J]. Int. J. Control, 2002, 4(4): 439 - 451.

[13] O Galún, J Romagnoli, A Palazoglu et al. Gap metric concept and implication for multi-linear model-based controller design [J]. Industrial and Engineering Chemical Research, 2003, 42: 2189 - 2197.

( 陈 滨 编 辑 )

Baotou ,China ,Post Code: 014010) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2014 29(3) . – 284 – 289

With the laminar flow premixed flame of liquefied gas serving as the object of study ,set up was a combustion test rig with an electromagnetic field being applied at both sides of the flame to determine the intensity of the field ,measure the combustion temperature of the laminar flow premixed flame in the electromagnetic field and  $\text{NO}_x$  concentration and analyze the laminar flow premixed flame combustion characteristics at various intensities in the magnetic field and production characteristics of  $\text{NO}_x$ . It has been found that under the action of the electromagnetic field ,the flame temperature will rise ,the flame diameter will slightly increase ,its height will somewhat decrease and at the same time ,the electromagnetic field will reduce the possibility of N ,HCN and CN etc. ion and ion groups in the flame to collide with oxygen ,resulting in a decline of  $\text{NO}_x$  concentration ,maximally reduced by  $2.998 \text{ mg/m}^3$ . **Key words:** premixed flame ,laminar flow combustion ,electromagnetic field ,thermal type  $\text{NO}_x$

超超临界机组模型的非线性分析及控制 = **Non-linear Analysis and Control of the Model for Ultra-supercritical Units** [刊 ,汉] ZHU Ya-qing ,CHEN Shi-he ( Academy of Electric Power Sciences ,Guangdong Power Grid Company ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510080) ,ZHANG Man ,ZENG De-liang ( North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2014 29 (3) . – 290 – 296

To realize the stable operation of large-sized ultra-supercritical units in a wide range at a variable load ,adopted was a conception of the clearance measure. On this basis ,the non-linear characteristics of a model for 1 000 MW ultra-supercritical units with three inputs and three outputs were analyzed. By adopting the K-mean clustering algorithm ,the division of loads of the unit and the selection of its typical operating points were accomplished. By employing the small deviation linearization method ,the linear models at each typical operating point were obtained and then ,based on the  $H_\infty$  loop formation ,the corresponding robust controllers to each linearization models were designed. Finally ,in combination with the fuzzy supervision and control ,a fuzzy multi-model supervision and control version was given. The test and simulation results show that the design version of the controller under discussion can realize a quick tracking of the load of a ultra-supercritical unit ,thus offering a new method for controlling a non-linear system. **Key words:** clearance measure ,non-linear analysis , $H_\infty$  loop formation ,fuzzy multi-model supervision and control

根部风对增压锅炉气流特性影响的数值分析 = **Numerical Analysis of the Influence of the Root Air on the Air Flow Characteristics of a Supercharged Boiler** [刊 ,汉] ZHANG Liang ,LIU Ming-zhu ,HE Zhao-bin ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy