

# 考虑回热系统影响的 汽包炉单元机组协调控制对象数学模型

韩忠旭, 周传心, 朱泽磊

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Mathematical Model of Coordinated Control Object for Drum-boiler Turbine Generator Unit Considering Regenerator System

HAN Zhong-xu, ZHOU Chuan-xin, ZHU Ze-lei

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** For the practical problems that need to be resolved in research work of the coordination controlled object's mathematical model for drum-boiler turbine generator unit, the mathematical analysis was carried out by the regenerator system integrated into heat balance of generator unit. Under the physical concept of the global heat balance of drum-boiler turbine generator unit, a novel type of simulation mathematical model for drum-boiler turbine generator unit with regenerator system was researched, which is characterized by: clear physical concept, describe method is diversified, specific parameters of the model are complete and objective, the overall operating mechanism of the controlled object is highlighted. Mathematical model was verified through the simulation test. Control system simulation object was set up, and the model provides a convenient and practical test platform and tools which closer to the actual objective for assessment of boiler-turbine coordinated control system.

**KEY WORDS:** mathematical model; drum-boiler; energy conservation; heat balance; dynamic character; regenerator system

**摘要:** 针对汽包炉单元机组协调控制对象的数学模型研究工作中需要解决的现实问题, 通过将回热系统纳入机组热平衡进行的数学分析, 在汽包炉单元机组全局热平衡的物理概念下, 给出一种新型的考虑回热系统影响的汽包炉单元机组实用仿真数学模型。其特点为: 物理概念明确; 表示方法多样化; 模型的具体参数完整并具有客观性; 突出受控对象整体的运行机制。同时通过仿真试验进行验证, 建立了一个较为客观的控制系统仿真对象, 为机炉协调控制系统的评估提供一个方便实用且更加接近客观实际的试验平台和工具。

**关键词:** 数学模型; 汽包炉; 能量守恒; 热平衡; 动态特性; 回热系统

## 0 引言

文献[1]阐述了建立数学模型的通用方法, 如机制建模法、经验建模法、混合建模法, 并以锅炉动态特性为研究对象, 采用机制建模法给出了相应的数学模型; 文献[2]针对热工控制系统的设计与调试, 重点分析了主蒸汽压力、温度和汽包水位等受控对象的动态特性, 并给出了数学模型; 文献[3-4]阐述了系统辨识与参数估计的各种方法, 对经验建模具有重要的指导意义。

在上述建模理论<sup>[1-4]</sup>的指导下, 文献[5]为单元机组计算机分散控制系统的仿真试验, 建立了一套实用的、针对控制系统设计与试验的单元机组数学模型; 文献[6]在借鉴文献[7-8]研究工作的基础上, 分析了汽包锅炉的动态模型结构, 并给出其负荷-压力增量预测模型。上述研究的后续工作还取得了一些实际的成果<sup>[9-14]</sup>, 但需进一步探索的是, 在其所建立的数学模型中是否应考虑运行过程中回热系统发生变化时的影响。

在汽轮机动态特性的研究工作中, 文献[15]介绍了一种汽轮机的长期动态模型, 并进行了仿真研究; 文献[16]研究了汽轮机动态特性与一次调频之间的相互联系, 给出一种用于长期动态仿真的汽轮机模型, 该模型计及了换热器的蓄热效应, 对单元机组协调控制对象整体建模具有重要的借鉴意义, 但如何与锅炉侧数学模型联系起来, 从而使研究工作的意义更加广阔, 仍是需研究解决的问题。

本文借鉴上述工作的研究成果,给出一种考虑回热影响的、汽包炉单元机组协调控制对象的数学模型,并通过仿真试验加以验证。

## 1 存在的问题

当代大型火力发电机组,均采用回热加热系统,即从汽轮机的中间级抽出一部分蒸汽,加热多级给水加热器中的凝结水,来提高朗肯循环效率。

研究过程中发现:锅炉产生的蒸汽没有全部做功,一部分能量通过回热加热系统传递至给水加热器<sup>[9]</sup>。但通常建立机炉协调受控对象的数学模型有如下3个假设<sup>[9]</sup>:给水控制系统可以保证锅炉工质平衡;过热汽温控制系统可以保证锅炉主蒸汽温度稳定;汽轮机回热加热系统稳定运行,给水温度不变。目前尚未就回热系统对数学模型的具体影响给出明确的结论。

文献[17]中列出了汽包炉动态特性的质量平衡方程:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}) = q_f - q_s \quad (1)$$

和热量平衡方程:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + m_i C_p t_m) = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (2)$$

并经过整理给出如下状态方程:

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s \quad (4)$$

$$e_{12} = V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \quad (5)$$

$$e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s \quad (6)$$

$$e_{22} = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) + V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_t + m_i C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \quad (7)$$

式(1)~(7)已作为汽包炉动态特性以及相关研究工作<sup>[18-20]</sup>的共同理论基础和依据,进一步的分析研究将给出汽包压力和汽包水位的数学模型,包括在某些假设前提条件下的简化的数学模型。同时也发现,由于对式(1)~(7)变量的物理概念理解上的差异(式中 $Q$ 在文献[19]中表示为 $Q_w$ ,在文献[20]中表示为 $Q_2$ ),导致了进一步的数学推导存在某些差异,

而从理论上对这些差异的探索和讨论将有助于研究工作的深化和完善。

文献[17]的作者Åström在其早期的研究工作<sup>[21-23]</sup>中给出了一种由非线性微分方程表示的数学模型,并在一些控制系统的设计与研究工作中作为仿真的受控对象<sup>[24-26]</sup>,可被表示为

$$\frac{dp}{dt} = -0.0018u_2 p^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (8)$$

$$\frac{dP_o}{dt} = (0.073u_2 - 0.016)p^{9/8} - 0.1P_o \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_f}{dt} = \frac{[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)p]}{85} \quad (10)$$

式中: $p$ 为汽包压力,  $\text{kg/cm}^2$ ;  $P_o$ 为功率输出,  $\text{MW}$ ;  $\rho_f$ 为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u_1$ 为燃油调节阀开度;  $u_2$ 为蒸汽调节阀开度;  $u_3$ 为给水调节阀开度。

系统的3个输出分别是: $p$ 、 $P_o$ 、 $X_w$ (以 $\text{m}$ 为单位的汽包水位),  $p$ 和 $P_o$ 恰好是前2个状态变量,而计算 $X_w$ 所需的3个代数方程如下:

$$X_w = 0.05(0.13073\rho_f + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67.975) \quad (11)$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8p - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304p)} \quad (12)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)p + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (13)$$

式中: $\alpha_{cs}$ 为蒸汽量;  $q_e$ 为蒸发率,  $\text{kg/s}$ 。

该模型中流体密度 $\rho_f$ 和汽包水位 $X_w$ 的关系与机组的实际情况之间存在矛盾<sup>[27]</sup>,特别是运用控制理论中系统的运动稳定性分析方法<sup>[28]</sup>对其所作的进一步剖析表明,还有重要的矛盾现象需要研究<sup>[29]</sup>,当令式(8)~(10)中的微分项为0,可以得到其稳态时的等效变换关系为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.0018u_2 & 0 \\ 0 & 0.073u_2 - 0.016 & -0.1 \\ 0 & (1.1u_2 - 0.19)^{9/8} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ p^{9/8} \\ P_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ 0 \\ (141u_3)^{9/8} \end{bmatrix} \quad (14)$$

于是可知,联立方程:

$$\begin{cases} 0.0018u_2 p^{9/8} = 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ p^{9/8} = [141u_3 / (1.1u_2 - 0.19)]^{9/8} \end{cases} \quad (15)$$

相互不独立,平衡点的解集应满足:

$$0.0018u_2(141u_3)^{9/8} = (1.1u_2 - 0.19)^{9/8}(0.9u_1 - 0.15u_3) \quad (16)$$

文献[29]的数学分析和仿真试验表明:无论是表征锅炉热负荷的 $0.0018u_2 p^{9/8}$ ,还是发电机的有



$$D = 1879(p_b - p_T)^3 - 4138.7(p_b - p_T)^2 + 3276.8(p_b - p_T) \quad (30)$$

$$D_T = (2.3954p_T^2 + 23.567p_T)(0.01406\mu_T) \quad (31)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{T_1}(0.010532D_T - p_1) \quad (32)$$

$$\frac{dN_E}{dt} = \frac{-0.16488p_2^3 + 2.6071p_1^2 + 19.529p_1 - N_E}{T_2} \quad (33)$$

### 3 计及回热影响的汽包炉单元机组协调受控对象的数学模型

热力系统的广义数学模型中，将主热力循环作为一个整体建立数学模型，并将等效热降法中的抽汽效率拓展为能级效率(或称做功效率)，使之对锅炉、汽轮机、再热器和凝汽器均有意义<sup>[32]</sup>。

热力循环的标准模型<sup>[33]</sup>，则反映了多能级蒸汽循环的共性，实际热力循环可以看作是标准循环在结构和参数上的偏离。以此为基准，可以求出热力循环结构和参数变化对性能指标的影响。

汽轮机热力系统稳态设计计算已有较全面的热平衡数据，文献[16]的模型中充分利用了已有的热平衡计算中所获得的参数，反映回热系统静态特性的参数直接用热平衡计算得到的参数(如抽汽份额、压损等)表示，然后对反映回热系统动态特性的参数用机制建模的方法由原始数据推导。得到的模型结构物理概念清晰，对汽包炉单元机组协调受控对象的建模有重要的启发性和可借鉴性。

考虑回热影响的单元机组协调被控对象数学模型是在图1的基础上进行了如下改进：

$$D'_Q(s) = \frac{M_{f_1}(s)}{(1 + T_0s)^4} \quad (34)$$

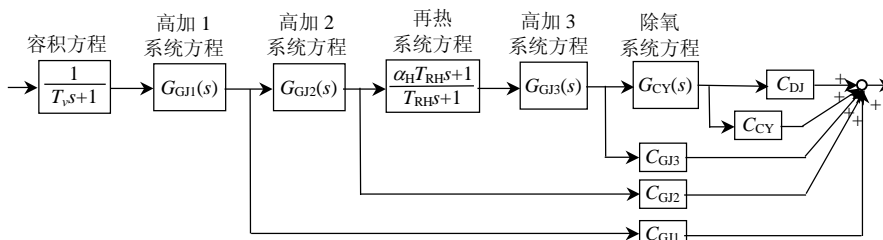


图3 再热式汽轮机回热器蓄热效应的数学模型

Fig. 3 Mathematical model of regenerator system of reheat turbine

表1 回热系统所对应的参数表

Tab. 1 Parameter list of regenerator system

回热系统	级组功率系数	抽汽份额系数 $a_{ri}$
高加1	0.200	0.077
高加2	0.064	0.080
高加3	0.100	0.038
除氧器	0.065	0.048
低加	0.571	—

$$D_Q = D'_Q \lambda f_8(\lambda) \quad (35)$$

$$\lambda(s) = \frac{\lambda'(s)}{(1 + T_\lambda s)^2} \quad (36)$$

$$\lambda' = D_T / D'_T \quad (37)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{T_1}(0.010532D'_T - p_1) \quad (38)$$

$$D'_T(s) = W_T(s)D_T(s) \quad (39)$$

式中： $D'_Q$ 为进炉燃料量所含的总热量； $D_Q$ 为锅炉考虑回热影响的汽水容积等效热量(本文中“等效热量”定义为：与总热量以及抽汽份额系数 $a_{ri}$ <sup>[16]</sup>、级组功率系数 $C_i$ <sup>[16]</sup>相关的热交换量)； $D$ 为锅炉蒸汽量所含的等效热量； $D_T$ 为汽机通汽量所含的等效热量； $D'_T$ 为考虑回热影响的汽机通汽量所含的热量； $f_8(\lambda)$ 为考虑回热影响的循环效率相对损耗。

式(21)~(33)为不考虑回热系统影响的数学模型，若删除式(29)和式(32)之后，再与式(34)~(39)联立，构成考虑回热影响的单元机组协调被控对象的数学模型，见图2(参见图1)。

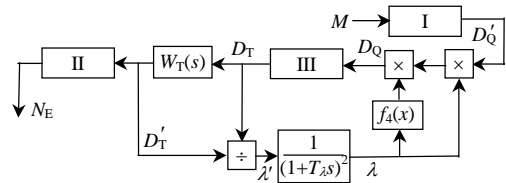


图2 考虑回热影响的单元机组协调被控对象数学模型

Fig. 2 Mathematical model of controlled object of coordinated control system for power unit with regenerator

图中 $W_T(s)$ 为考虑再热式汽轮机回热器蓄热效应的数学模型，见图3。其中， $T_V$ 为汽轮机容积时间常数， $T_{RH}$ 为再热容积时间常数， $\alpha_H$ 为高压缸功率占整个汽轮机功率的份额量。模型中各个点的物理量均为标么量，参数见表1<sup>[16]</sup>。

给水回热加热系统的数学模型见图4。回热器的投入与切除取决于逆止阀的动作，因此模型中应该体现逆止阀的作用，即逆止阀关闭后，逆止阀后的抽汽量为0。

由图4可以得到在逆止阀全开时的第*i*级给水回热加热系统的传递函数：

$$G_i(s) = (1 + \alpha_{ri}) / \{1 + (1 + 1/\beta_i)\alpha_{ri} / [1 + W_i(s)]\} = \frac{(1 + \alpha_{ri})[W_i(s) + \beta_i]}{W_i(s) + \beta_i + \alpha_{ri}(1 + \beta_i)} \quad (40)$$

式中： $\alpha_{ri}$ 为抽汽份额系数； $C_i$ 为级组功率系数； $W_i(s)$ 分别为高加 1、2、3、除氧器动态特性传递函数： $W_1(s) = 1/(20s + 1)$ ， $W_2(s) = 1/(20s + 1)$ ， $W_3(s) = 1/(20s + 1)$ ， $W_4(s) = 1/(30s + 1)$ ，于是各级回热系统所对应的传递函数分别为：

$$G_1(s) = (0.6464s + 1.1093) / (2.1862s + 1.1093) \quad (41)$$

$$G_2(s) = (0.6480s + 1.1124) / (2.2480s + 1.1124) \quad (42)$$

$$G_3(s) = (1.0380s + 1.0899) / (1.7980s + 1.0899) \quad (43)$$

$$G_4(s) = (1.5720s + 1.1004) / (3.0120s + 1.1004) \quad (44)$$

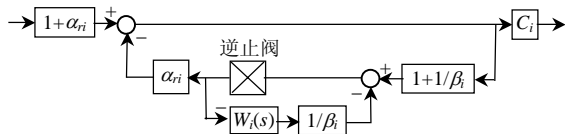


图 4 回热加热系统数学模型

Fig. 4 Mathematical model of regenerator system

### 4 仿真试验

将图 3、4 融入图 2，同时将表 1 中的参数代入图 2，仿真试验结果见图 5、6。

图 5 为机组进入稳定状态时，同时切除高加 1、2、3 的动态趋势图。从图中可以看出，在切除高加的瞬态过程中，部分回热系统停止抽汽，汽轮机做功蒸汽增加，机组功率也增加。高加切除后，抽汽量的减小影响到回热系统的凝结水加热，使锅炉汽水容积等效热量  $D_Q$  减少，由于进炉燃料量  $M$  不变， $D'_Q$  也不变，机组功率逐渐回降。切除高加后，朗肯循环效率降低，因此最终功率值略低于初始值。图 6 则表明：在投入高加 1、2、3 的瞬态过程中，抽汽增加，做功蒸汽减小，机组功率减小。高加投入后，锅炉汽水容积等效热量  $D_Q$  增加，同样若进炉燃料量  $M$  不变， $D'_Q$  不变，机组功率逐渐回升。同时，由于朗肯循环效率的升高，因此最终功率值

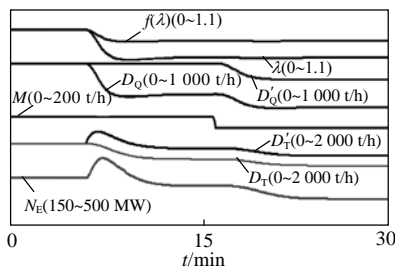


图 5 切除高加 1、2、3 的动态趋势图

Fig. 5 Trends of the model at non-return valves of all of high pressure regenerator from open to closed

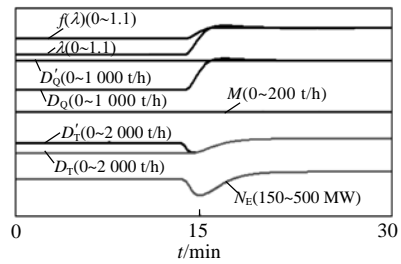


图 6 投入高加 1、2、3 的动态趋势图

Fig. 6 Trends of the model at non-return valves of all of high pressure regenerator from closed to open

略高于初始值。 $f_8(\lambda)$ 反映了朗肯循环效率的这种变化。

此外图 5 中还显示了进炉燃料量变化时的运行状况， $M$  减少后，经一段迟滞  $D'_Q$  和  $D_Q$  均减少，机组功率也逐渐下降到一个新的平衡点上。

回热抽汽量对汽轮机功率的影响十分显著<sup>[16]</sup>，通常切除高加抽汽会使汽轮机的功率在动态过程中变化 10% 左右。这也是机炉协调控制系统中，通常将高压加热器系统的投/切作为机组负荷能力计算的原因，并在高加切除后适当限制机组的负荷。

关于反映朗肯循环效率变化的  $f_8(\lambda)$ ，为说明问题起见，暂给出其定性的变化趋势，并不完善。分析表明，主循环效率的变化量与许多因素有关，定量计算尚需进一步详细研究。以标准循环为基准，可以求出热力循环结构和参数变化时对性能指标的影响<sup>[33]</sup>，同时还可以提出能级之间存在能量耦合时的处理方法。

在单元机组数学模型中计入回热抽汽的影响不仅具有理论意义：澄清汽包炉蒸发区热平衡与整个单元机组的全局热量平衡的关系，揭示并解释回热系统对汽包炉动态特性的本质影响；而且也具有现实意义：一方面可以考察协调控制系统对于抽汽逆止阀动作(切、投回热系统的加热器)时的调节品质，另一方面，也为研究单元机组动态特性与一次调频<sup>[34]</sup>之间、或者单元机组发生快速降负荷(fast cut back, FCB)<sup>[35]</sup>时机组与电网之间的相互联系和影响提供进一步研究的基础。

### 5 结论

综合汽包炉单元机组数学模型的研究工作，并融合若干成果，通过将回热系统纳入机组热平衡的数学分析，在汽包炉单元机组全局热平衡的物理概念下，给出了一种新型的汽包炉单元机组实用仿真数学模型，其特点如下：

1) 物理概念明确，突出显现了受控对象整体

的运行机制。

2) 表示方法多样化,既可以采用方块图,又可以运用微分或差分方程。

3) 给出了模型的具体参数,其来源:核心部分取自实际运行的机组;回热部分主要取自汽轮机热力系统静态计算;少数可以调整的参数为动态特性的时间或机组的热效率。

本文建立了一个较为客观的控制系统仿真对象,为机炉协调控制系统的评估提供了一个方便实用且更加接近客观实际的试验平台和工具。

## 参考文献

- [1] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 5-8, 22-31, 54-74, 81-97.
- [2] 张玉铎, 王满稼. 热工自动控制系统[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 65-79, 108-111, 137-147, 184-201.
- [3] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 1-20, 71-126, 332-360, 397-481.
- [4] 张承乾, 张国强. 系统辨识与参数估计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 1-58, 157-276.
- [5] 韩忠旭. 单元机组计算机分散控制系统的仿真试验与建模[J]. 电网技术, 1996, 20(6): 49-51.  
Han Zhongxu. Simulation and modeling of distributed control system for thermal generation unit[J]. Power System Technology, 1996, 20(6): 49-51(in Chinese).
- [6] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 75-79.  
Zeng Deliang, Liu Jizhen. Drum boiler dynamic model and load/pressure increment predict model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 75-79(in Chinese).
- [7] De Mello F P. Boiler models for system dynamic performance studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 66-74.
- [8] De Mello F P. Dynamic models for fossil fueled system units in power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 753-761.
- [9] 田亮, 曾德良, 刘鑫屏, 等. 500 MW机组简化的非线性动态模型[J]. 动力工程, 2004, 24(4): 522-525.  
Tian Liang, Zeng Deliang, Liu Xinping, et al. A simplified non-linear dynamic model of 500 MW unit[J]. Power Engineering, 2004, 24(4): 522-525(in Chinese).
- [10] 田亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的 330 MW机组非线性动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 180-184.  
Tian Liang, Zeng Deliang, Liu Jizhen, et al. A simplified non-linear dynamic model of 330 MW unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 180-184(in Chinese).
- [11] 刘吉臻, 田亮, 曾德良, 等. 660 MW机组负荷压力非线性特性的分析[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 534-540.  
Liu Jizhen, Tian Liang, Zeng Deliang, et al. A analysis on the non-linearity of load-pressure characteristics of a 660 MW unit [J]. Power Engineering, 2005, 25(4): 534-540(in Chinese).
- [12] 韩忠旭, 齐小红, 刘敏. 单元机组一种实用非线性数学模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 58-65.  
Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Liu Min. A practical non-linear mathematical model of unit power plant and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 58-65(in Chinese).
- [13] 韩忠旭, 齐小红, 刘敏, 等. 姚孟 2 号 300 MW 单元机组机炉协调受控对象的数学模型[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 47-50.  
Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Liu Min, et al. The mathematical model of yaomeng unit 300 MW boiler-turbine coordinated control system [J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 47-50(in Chinese).
- [14] 韩忠旭, 张智, 刘敏, 等. 北仑 1 和 2 号 600 MW 单元机组协调控制系统的设计与应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 126-132.  
Han Zhongxu, Zhang Zhi, Liu Min, et al. Application and design of coordinated control system for No. 1&2 600 MW unit of Beilun power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 126-132(in Chinese).
- [15] 李运泽, 杨献勇. 汽轮机的长期动态模型与仿真[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(2): 281-284.  
Li Yunze, Yang Xianyong. Long-term dynamic model and simulation of steam turbines[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(2): 281-284(in Chinese).
- [16] 于达仁, 郭钰锋, 王晓娟, 等. 计及回热器蓄热效应的汽轮机动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 84-88.  
Yu Daren, Guo Yufeng, Wang Xiaojuan, et al. Dynamic turbine model with regenerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 84-88 (in Chinese).
- [17] Åström K J, Bell R D. Drum-boiler dynamics[J]. Automatica, 2000(36): 363-378.
- [18] 卓旭升, 周怀春, 文忠林, 等. 火电机组过热器压力和温度的动态研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 72-76.  
Zhuo Xusheng, Zhou Huaichun, Wen Zhonglin, et al. Pressure and temperature dynamics in power plant superheater[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 72-76(in Chinese).
- [19] 卓旭升, 周怀春, 杨超, 等. 燃煤汽包炉发电机组的动态建模及其运行数据验证[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 26-31.  
Zhuo Xusheng, Zhou Huaichun, Yang Chao, et al. Dynamic modeling for a coal-fired drum boiler power unit and validation through using actual plant data[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 26-31 (in Chinese).
- [20] 韩忠旭, 李丹, 高春雨. 汽包炉单元机组协调受控对象的动态特性剖析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 105-110.  
Han Zhongxu, Li Dan, Gao Chunyu. Analysis on dynamic characteristic of coordinated control object for drum-boiler turbine generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 105-110(in Chinese).
- [21] Åström K J, Eklund K. A simplified non-linear model of a drum-boiler-turbine unit[J]. International Journal of Control, 1972(1): 146-169.
- [22] Morton A J, Price P H. The controllability of steam output, pressure and water level in drum boiler[R]. Steam at Work: Industrial and Marine Steam Plant, 1977.
- [23] Bell R D, Åström K J. Dynamic models for boiler-turbine- alternator units: data logs and parameter estimation for a 160 MW unit [R]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1987.
- [24] Dimeo R, Lee K Y. Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(4): 752-759.
- [25] Ben-Abdenour A, Lee K Y. A decentralized controller design for a

- power plant using robust local controllers and function mapping [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1996, 11(2): 394-400.
- [26] Huang Zuyi, Li Donghai, Jiang Xuezi, et al. Gain scheduled servo system for boiler-turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 191-198.
- [27] 韩忠旭, 高春雨, 齐小红, 等. 对一种火电机组数学模型的剖析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 125-130.  
Han Zhongxu, Gao Chunyu, Qi Xiaohong, et al. Analysis on a type of mathematical model of thermal power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 125-130(in Chinese).
- [28] 段广仁. 线性系统理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996: 144-167.
- [29] 韩忠旭, 李丹, 周传心. 对一种火电机组数学模型的数理分析与仿真研究[C]. 第七届全国智能控制与自动化大会, 重庆, 2008.
- [30] 东北电管局元宝山发电厂, 总工程师新技术研究班讲义—30 万千瓦机组设备特点汇编[G]. 1982.
- [31] Han Zhongxu, Gao Chunyu, Li Dan. The parameter estimation for a non-linear mathematical model of boiler-turbine-generator unit [C]. The 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China, 2007.
- [32] 闫水保. 热力系统广义数学模型[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 804-808.  
Yan Shuibao. Universal mathematical model of thermodynamic system[J]. Power Engineering, 2000, 20(4): 804-808(in Chinese).
- [33] 闫水保, 魏新利. 能级效率显式矩阵算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 58-61.  
Yan Shuibao, Wei Xinli. Explicit matrix algorithm of energy level efficiencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 58-61(in Chinese).
- [34] 于达仁, 郭钰锋, 徐基豫. 发电机组并网运行一次调频的稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 59-63.  
Yu Daren, Guo Yufeng, Xu Jiyu. The primary frequency regulation stability of parallel turbo-generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 59-63(in Chinese).
- [35] 韩忠旭. 浅谈FCB 功能应用过程中的若干问题[J]. 中国电力, 1994, 27(8): 52-56.  
Han Zhongxu. Some problems about application of FCB function [J]. China Electric Power, 1994, 27(8): 52-56(in Chinese).



韩忠旭

收稿日期: 2009-07-30。

作者简介:

韩忠旭(1957—), 男, 教授级高级工程师, 中国自动化学会过程控制专业委员会委员, 中国电机工程学会高级会员, 曾在电站技术研究所(北京国电智深控制技术有限公司)从事计算机控制系统的应用与研究, 现在电网数字仿真技术研究所从事电力系统数字仿真技术的研究与应用, zhongxuh@epri.ac.cn;

周传心(1978—), 男, 硕士, 工程师, 从事计算机控制系统的应用与研究;

朱泽磊(1982—), 男, 硕士研究生, 从事计算机控制系统的研究。

(编辑 张媛媛)