

文章编号: 1005- 8893 (2006) 04- 0028- 04

# 基于 DCS 一体化的电站风烟系统仿真建模<sup>\*</sup>

肖 洪<sup>1</sup>, 胡爱萍<sup>2</sup>

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

**摘要:** 基于 DCS 一体化的新型培训仿真机平台, 利用图形组态方法, 对电站风烟系统进行实时仿真建模, 仿真结果表明, 静态仿真数据满足仿真机精度要求, 动态响应曲线和实际机组特性相符合, 该仿真系统能够正确反映风烟系统运行过程特性。

**关键词:** 仿真; 电站; 风烟系统; DCS 一体化

中图分类号: TP 391. 9

文献标识码: A

## Establishment of Simulation Model for Wind and Smoke System in Power Plant Based on DCS Integration

XIAO Hong<sup>1</sup>, HU Ai- ping<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Real- time simulation model is established for wind and smoke system in power plant by use of figure configuration method, which is based on the platform of new training simulation equipment integrated with DCS. It is proved by the simulation results that the statistic simulation data can meet the need of the precision, and the dynamic response curve can accord with the characteristics of real mechanical module, the simulation system can reflect the characteristics correctly in the running process of wind and smoke system.

**Key words:** simulation; power plant; wind and smoke system; DCS integration

DCS 一体化的电站仿真系统反映控制对象的实际特性<sup>[1]</sup>。本文采用模块化建模的方法, 建立了电站风烟系统的动态数学模型, 对部分常见操作进行了动态模拟, 并对结果进行了分析。风烟系统与制粉系统共同维系燃烧系统的正常工作, 系统的结构如图 1。

### 1 风烟系统数学模型的建立

仿真中的数学模型应建立引、送风机的特性方程, 调节阀的调节特性方程, 以及空预器等各设备和部件段的质量、动量、能量方程<sup>[2]</sup>。并将风烟

系统作为一个流体网络来求解各处的压力、流量和温度等参数。

#### 1. 1 管道阻力及调节阀特性方程

流网中每个设备或管道等都存在流动阻力, 其中一条支路的特性方程为:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} = \frac{\zeta W^2}{\rho} = R \cdot W^2 \quad (1)$$

式中  $p_{in}$ ,  $p_{out}$ —管道进出口压力 (Pa);  $W$ —流过流道的工质流量 (kg/s);  $\zeta$ —工质的阻力系数;  $\rho$ —工质的密度 (kg/m<sup>3</sup>); 其中管道阻力因子  $R$  根

\* 收稿日期: 2006- 09- 25

作者简介: 肖洪 (1968- ), 女, 四川资中县人, 讲师, 硕士, 从事电厂热能动力工程方向的教学和研究。

据流道和流体参数进行实时计算。

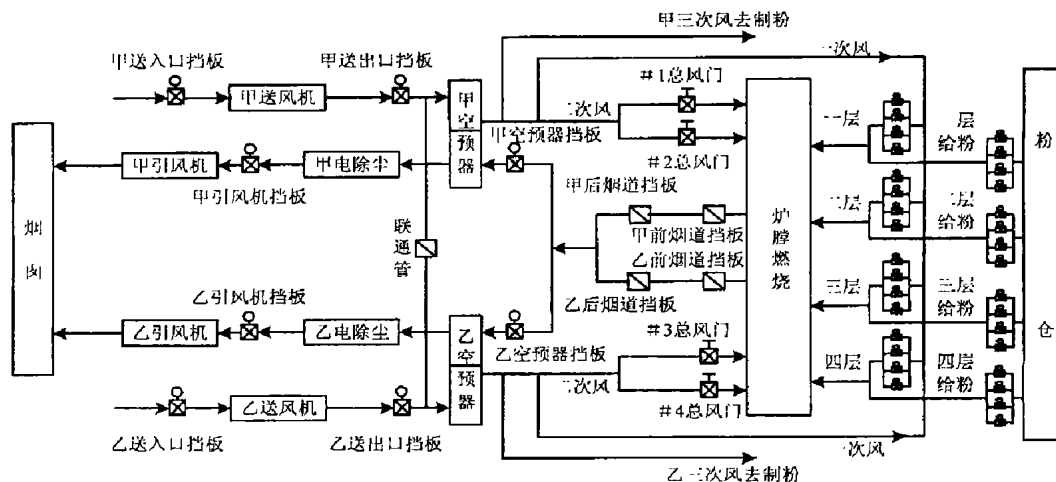


图1 风烟系统的主要结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of air flue system

风阀调节过程是流体的节流过程, 其数学模型为:

$$G = \varepsilon A \sqrt{\frac{1}{\phi(C_k)}} \sqrt{2g\rho\Delta p} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$  为流体的可压缩系数, 当风阀的开度  $C_k$  (%) 变化时, 风阀的有效流通面积  $A$  ( $\text{m}^2$ )、风阀阻力  $\phi(C_k)$  函数等都会改变, 因而流体流量  $G$  将发生变化。

## 1.2 流体网络节点压力方程

由于流体网络系统较其它热工对象动态响应快, 因此, 可将其容积惯性、质量平衡方程转化为代数方程<sup>[3, 4]</sup>。依质量守恒方程:

$$V \frac{d\rho}{dt} = \sum_{i=1}^n W_i - \sum_{i=n+1}^{n+m} W_i + w \quad (3)$$

式中,  $V$ —管系容积 (假定为定值) ( $\text{m}^3$ );  $W_i$ —流入、流出压力节点的流量;  $w$ —微小流量之和。

对于液体,  $\frac{d\rho}{dt} = 0$ ; 对于气体,  $\rho = f(h, p)$ , 流体网络中一般焓值 ( $h$ — $\text{J/kg}$ ) 的变化要比压力  $p$  的变化速度慢得多, 即  $\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial h} \cdot \frac{dh}{dt} \approx \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt}$ , 且将式 (1) 代到式 (3) 中, 最终整理得式如下:

$$K \cdot \frac{dp}{dt} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{|\Delta p_i|}{R_i}} - \sum_{i=n+1}^{n+m} \sqrt{\frac{|\Delta p_i|}{R_i}} + w \quad (4)$$

其中  $K = V \frac{\partial \rho}{\partial p}$  表示工质的可压缩能力。

对于流体网络的每一个节点, 均可按照式 (4) 写出节点压力方程。然后采用隐式欧拉方法将微分

方程转化为差分代数方程<sup>[5]</sup>, 通过迭代求解节点压力, 再利用管道阻力方程就可求出各个支路的质量流量, 从而最终确定整个系统的流动状态。

## 1.3 混合工质温度求解方程

风烟系统中存在热风与冷风相混合的现象, 混合工质温度方程求解如下 (质量求解如式 (3)):

$$\frac{dmT}{dt} = \sum_{i=1}^n W_i T_i - \sum_{i=n+1}^{n+m} W_i T + \frac{Q}{C_{\text{air}}} \quad (5)$$

式中  $m$ —控制体内工质质量 ( $\text{kg}$ );  $T$ —控制体工质的温度 ( $\text{K}$ );  $Q$ —散热量 ( $\text{W}$ );  $C_{\text{air}}$ —空气的定压比热 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )。

## 1.4 风机特性方程

风机是流体流动的动力源, 其特性可用无因次压力  $\bar{p}$  和无因次流量  $\bar{Q}$  之间的数学方程描述:

$$\bar{p} = a_0 + a_1 \bar{Q} + a_2 \bar{Q}^2 \quad (6)$$

其中  $\bar{p} = \frac{p}{\rho \cdot u_2^2}$ ,  $\bar{Q} = \frac{W_v}{u_2^2 \cdot F_2}$ ;  $u_2$ —圆周速度 ( $\text{m/s}$ );  $W_v$ —风机容积流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $F_2$ —叶轮通流面积 ( $\text{m}^2$ ); 当风机转速一定时, 式中系数  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  是入口调节挡板开度的函数, 可以用最小二乘法等方法拟合得到。

## 1.5 多段式二分仓回转式空气预热器方程

由于回转式空预器的工质状态参数随时间和位置变化, 具有典型的分布参数特性, 为使模型具有良好的动态特性和精确度, 需将其划分为若干段, 每一段采用集总参数法进行计算。分段后各段形式

相同，以下只列出单段的数学模型<sup>[6]</sup>。

1. 5. 1 空气区和烟气区数学模型

空气区能量方程:

$$m_{air}C_{air}\frac{dT_{air}}{dt}=Q_{air}-W_{air2}C_{air}(T_{air2}-T_{air1})-C_{air}W_{lek}T_{air}\tag{7}$$

其中  $C_{air}=f(T_{air1},T_{air2})$ ;  $m_{air}$ —空气区中气体的质量 (kg);  $W_{lk}$ —空气侧向烟气侧漏入的工质质量 (kg/s)。

根据牛顿冷却定律，空气与金属的换热量的计算如下:

$$Q_{air}=\mu_{air}\cdot k_{air}\cdot W_{air}^{\zeta}\left[\frac{T_{airm}+T_{gm}}{2}-\frac{T_{air1}+T_{air2}}{2}\right]\tag{8}$$

其中  $W_{air}=\frac{W_{air1}+W_{air2}}{2}$ ，为空气的平均流量 (kg/s);  $\zeta$ —空气与金属换热修正指数;  $\mu_{air}$ —空气吸热修正系数;  $k_{air}$ —空气与金属的换热系数 (W/K);  $T_{airm}$ ,  $T_{gm}$ —空气区和烟气区金属温度 (K)。

烟气区能量方程:

$$m_gC_g\frac{dT_g}{dt}=Q_g-W_{g2}C_g(T_{g2}-T_{g1})-C_{air}W_{lek}T_{air}\tag{9}$$

其中  $C_g=f(T_{g1},T_{g2})$ ，为烟气的定压比热 (J/(kg·K));  $m_g$ —烟气区中气体的质量 (kg)。

根据牛顿冷却定律，烟气与金属的换热量的计算如下:

$$Q_g=\mu_g\cdot k_g\cdot W_g^{\zeta}\left[\frac{T_{aim}+T_{gm}}{2}-\frac{T_{g1}+T_{g2}}{2}\right]\tag{10}$$

表 1 100%、70% 负荷时静态仿真结果与实际测量值比较

Table 1 The comparison between static simulation value and measured value with 70% and 100% load

参数/℃	测量值 <sup>1)</sup>	仿真值	误差/%	测量值 <sup>2)</sup>	仿真值	误差/%
省煤器后烟温	421. 89	419. 8	0. 5	368. 96	370. 0	0. 3
甲空预器出口风温	371. 68	368. 7	0. 8	352. 68	350. 0	0. 8
乙空预器出口风温	367. 88	368. 7	0. 2	348. 01	350. 0	0. 6
甲送风机出口温度	23. 50	23. 4	0. 5	22. 27	22. 1	0. 7
乙送风机出口温度	22. 57	22. 7	0. 6	21. 86	22. 0	0. 6
甲送风机入口温度	23. 75	23. 9	0. 6	22. 75	22. 6	0. 8
乙送风机入口温度	23. 67	23. 9	1. 0	22. 26	22. 4	0. 6
甲排粉机入口风温	71. 59	71. 2	0. 5	64. 96	64. 5	0. 8
乙排粉机入口风温	71. 22	71. 1	0. 2	65. 06	65. 2	0. 2
甲侧排烟温度	133. 54	134. 5	0. 7	147. 92	149. 8	1. 2
乙侧排烟温度	130. 61	131. 8	0. 9	146. 61	147. 8	0. 8

注: 1) 100% 负荷比较结果; 2) 70% 负荷比较结果。

2. 2 动态仿真结果

根据电站风烟系统的动态数学模型，对电站风

其中  $W_g=\frac{W_{g1}+W_{g2}}{2}$ ，为烟气的平均流量 (kg/s);  $\mu_g$ —烟气吸热修正系数;  $k_g$ —烟气与金属的换热系数 (W/K)。

1. 5. 2 金属温度数学模型

引入金属流量的概念，把转动的金属换热面按“流体”处理，计算如下:

$$W_m=m_m\cdot n\tag{11}$$

空气区金属温度:

$$m_{airm}C_m\frac{dT_{airm}}{dt}=W_mC_m(T_{gm}-T_{airm})-Q_{air}\tag{12}$$

烟气区金属温度:

$$m_{g m}C_m\frac{dT_{gm}}{dt}=Q_g-W_mC_m(T_{gm}-T_{airm})\tag{13}$$

2 风烟系统仿真结果与分析

采用图形化组态技术<sup>[7]</sup>，建立了 200 MW 火电机组的风烟系统仿真模型。

2. 1 静态仿真结果

表 1 列出了 100%、70% 负荷下锅炉实际测量值与仿真模型的计算结果，与电厂实际测量值进行对照比较。比较结果可看出，在 70% 和 100% 负荷工况下，仿真结果与实际试验值的误差保持在 1% 以内，能够满足仿真的静态精度要求。

烟系统中部分常见操作的进行了动态模拟。

2. 2. 1 空预器转子转速突然下降

在运行中，若空预器电动马达出现故障导致转

子转速由 100% 转速降低到 30% 转速, 动态响应曲线如图 2 所示。从图中可看到, 转速降低后, 排烟温度升高至 442 K 左右, 空预器出口风温降低到 620 K 左右。根据金属壁温方程可知, 当转速降低时, 将意味着由烟气侧转移到空气侧的转子能量转移速度降低, 从而导致烟气侧金属温度升高, 排烟温度上升; 对于空气侧来说, 开始时由于高温烟气侧带来的能量减少, 空气侧金属温度和空气出口温度有所下降, 但随着烟气侧金属温度的升高, 空气侧的金属温度会有所上升, 同时将能量传给空气导致空气出口温度也会有所升高。

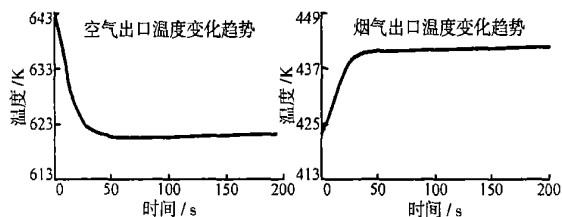


图 2 空预器转子转速由 100% 降低到 30% 时温度动态变化趋势

Fig. 2 The temperature dynamic trend at the speed of Air Preheater Rotor decreasing from 100% to 30%

### 2.2.2 吹灰器投入前后

空气预热器中积灰现象对空气侧和烟气侧各主要温度的影响如图 3 所示。趋势图中拐点以后的后半段是吹灰器投入阶段温度的变化情况。从动态变化趋势图可以看出, 当吹灰器没有投入之前, 积灰状况严重, 从而导致热交换系数减小, 空预器烟气侧金属温度逐渐降低, 出口烟气的温度逐渐增大。对于空气侧, 由于金属所带来的能量减小, 空气与金属的换热量减少, 空预器出口空气温度相应降低。当吹灰器投入进行吹扫, 换热面逐渐清洁从而使得金属与气体之间的换热系数增大, 金属温度、烟气温度和空气温度逐渐恢复到正常状况。

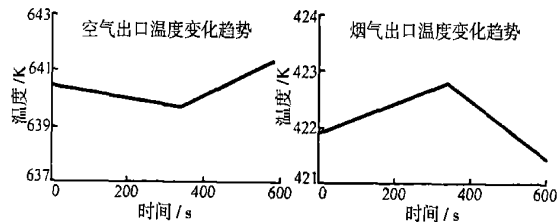


图 3 吹灰器投入前后温度动态变化趋势

Fig. 3 The temperature dynamic trend before and after soot blower running

### 2.2.3 送风机转速下降

当送风机转速由 100% 降低到 60%, 送风量随之减少, 动态变化趋势如图 4 所示。动态响应曲线

表明当送风机负荷降低, 送风机所提供的空气量减少, 此时, 烟气侧的烟气体量并不会瞬间减少, 而具有滞后效应。此时, 空预器中空气量减少, 空气侧的热交换量减少, 由于烟气侧的能量不能转移, 烟气出口温度升高, 烟气加热烟气侧金属从而导致烟气侧金属温度升高。由于空气侧空气量减少, 空气所带走的热量减少, 空气侧金属温度升高, 进而加热空气使其温度升高。当烟气体量减少后, 各部分的温度逐渐趋于稳定。

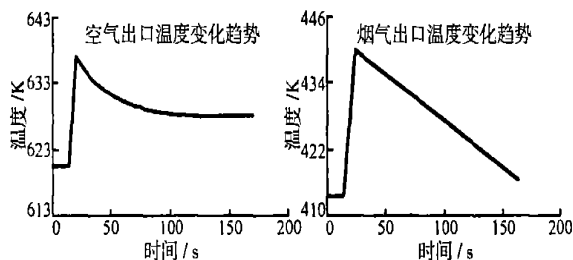


图 4 送风机转速下降空预器各参数动态变化趋势

Fig. 4 The dynamic trend of parameters after Forced Draught Blower stops running

## 3 结 论

本文针对某 200 MW 机组, 组态了风烟系统仿真模型。仿真结果表明, 100% 和 70% 负荷工况下静态仿真数据与实际测量值误差小于 1%, 满足仿真机精度要求, 而且负荷变化时, 仿真动态响应曲线和实际机组特性相符合, 该仿真系统能够正确反映风烟系统运行过程特性。

### 参考文献:

- [1] 史小平, 许天舒. 汽轮发电机密封油系统的仿真数学模型 [J]. 热能动力工程, 2001, 1 (16): 51-54.
- [2] 赵建, 索沂生, 顾旭斌, 等. 循环双流化床锅炉平衡通风风烟系统建模与仿真 [J]. 锅炉技术, 1999, 12 (30): 2, 3, 8.
- [3] 吕崇德, 任挺进, 姜学智, 等. 大型火电机组系统仿真与建模 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 36, 152.
- [4] 王伟哲. 基于图形组态的电站风烟系统动态仿真模型研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [5] 宋杨, 程芳真, 蔡瑞忠, 等. 蒸汽供热管网的动态仿真建模 [J]. 清华大学学报, 2001, 41 (10): 101-104.
- [6] 程芳真, 蒋滋康. 三分仓回转式空气预热器的建模与仿真 [J]. 发电设备, 1998, 10: 9-12, 29.
- [7] 韩璞, 刘长良, 李长青. 火电站仿真机原理及应用 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998. 8.