

# 汽轮机本体分段式通用模块化建模与仿真

(清华大学 热能工程系, 北京 100084) 朱 伟 蒋滋康 程芳真 赵 建

**摘 要:**介绍了一种汽轮机本体的分段式通用模块化建模方法,并以 C50-90/13 型汽轮机为例,给出其在各种运行工况下的仿真结果,同时进行了相应的分析。该模型目前已成功地应用于实际仿真对象,具有较高的精度和较强的实用性,可以适用于各种工况的仿真运行。

**关 键 词:**汽轮机; 仿真; 数学模型; 模块化建模

中图分类号: TK262; TP391.9 文献标识码: A

## 1 引言

目前国内外的大机组仿真机均采用各种型号的小型或超小型计算机工作站以满足实时多任务的要求,这对中、小型电厂来说价格偏贵。而随着微机性能的进一步提高以及网络的普及,使得我们研制的仿真机可以在满足实时多任务的前提下,采用 586 微机加网络的简单配置,从而大大降低了仿真机的成本。

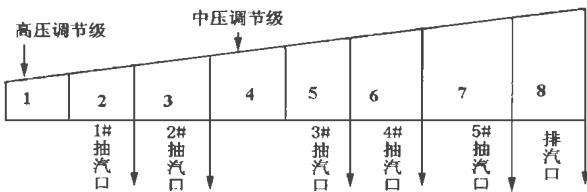


图 1 C50-90/13 型汽机本体分段示意图

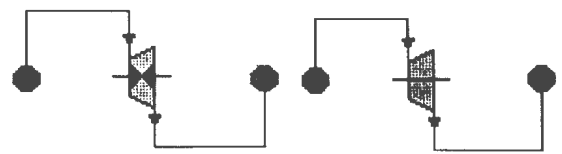
从 50 MW 仿真机的实时性和精度要求出发,对 C50-90/13 型汽轮机在自行开发的电站热力系统及流体网络建模系统的集成环境下,建立各设备和子系统的模块化模型。在仿真机上进行大量的仿真实验,按电厂生产现场数据修正模型,使其更能体现仿真机的全范围特点。由于设备和系统较为复杂,本文将着重对 C50-90/13 型汽轮机本体的建模进行较详细的论述。其仿真范围包括汽机本体及相关设备的有关参数;仿真程度主要针对主控室内操作和显示的内容进行仿真,顾及部分主要的就地操作,在各种工况、操作、扰动和事故的情况下,都能正确地反映系统各测点的参数,参数的数值和趋势与现场一

致。

## 2 模型的建立和求解

### 2.1 建模

本文所要建立模型的汽机汽缸由前、中、后三部分用垂直法兰连接而成,机组共有五段抽汽和高、中压缸两个调节级(其示意简图见图 1)。关于流量功率的计算,可以在计算出调节阀的流量后,逐级进行计算,这样就必须知道每一级的设计参数,虽然比较准确,但却复杂、耗时较多,而且模型的模块化功能不强,一旦汽机结构略有变化,模型就需重新建立和调试。采用按透平级进行分段,每一段为一个子模块(分为调节级和非调节级两种),分别以这些子模块为对象进行建模和调试工作,最后将这些子模块连接起来,得到整个汽机本体的仿真模型(其建模简图见图 2)。



(a) 调节级模块图

(b) 非调节级模块图

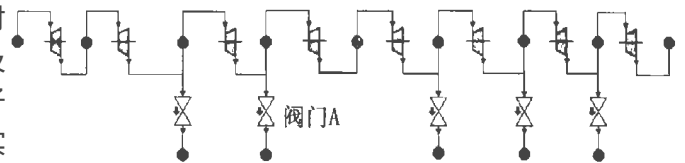


图 2 C50-90/13 型汽机本体分段式建模简图

在模型的建立过程中,将遵循以下原则:

- 模型内部采用集中参数进行计算;
- 对汽机流量功率等快变过程采用静态模型处理;
- 假设流体与环境间无能量交换。

2.1.1 调节级

调节级进汽流量方程:

$$D_{D1} = D_{D10} \beta_1 \frac{P_1/P_{10}}{(T_1/T_{10})^{1/2}} f_{D1}(\theta) \quad (1)$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 & r_{poi} \leq r_{cr} \\ \sqrt{1 - \left( \frac{r_{poi} - 0.546}{1 - 0.546} \right)^2} & r_{poi} > r_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

$$r_{poi} = P_2/P_1 \quad (3)$$

$$f_{D1}(\theta) = a_2 \theta_2 + a_1 \theta + a_0 \quad (4)$$

式中:  $D_{D1}$ — 在变工况下的流量, kg/s;

$D_{D10}$ — 在设计工况下的流量, kg/s;

$\beta_1$ — 流量修正系数;

$r_{poi}$ — 在变工况下出口和进口间的蒸汽压比;

$r_{cr}$ — 临界压比;

$P_1$ — 在变工况下的级进口蒸汽压力, Pa;

$P_2$ — 在变工况下的级出口蒸汽压力, Pa;

$P_{10}$ — 在设计工况下的级进口蒸汽压力, Pa;

$T_1$ — 在变工况下的级进口蒸汽温度, °C;

$T_{10}$ — 在设计工况下的级进口蒸汽温度, °C;

$\theta$ — 转角, Rad;

$f_{D1}(\theta)$ — 转角与流量间的二阶拟合关系式;

$a_2, a_1, a_0$ —  $f_{D1}(\theta)$  的各阶拟合因子

效率是转速的函数

$$\eta = f_{\eta}(x_1) \quad (5)$$

$$x_1 = u/c_1 \quad (6)$$

式中:  $\eta$ — 级效率;  $x_1$ — 级速度比;  $u$ — 级轮周速度,

m/s;  $c_1$ — 级焓降对应的气流速度, m/s。

理想膨胀做功按等熵过程求出

$$S_1 = f_{S1}(P_1, H_1) \quad (7)$$

$$S_2 = S_1 \quad (8)$$

$$H_{2s} = f_{H2s}(P_2, S_2) \quad (9)$$

式中:  $S_1$ — 级进口熵值, kJ/(kg · °C);

$H_1$ — 级进口焓值, kJ/kg;

$S_2$ — 级出口熵值, kJ/(kg · °C);

$H_{2s}$ — 级的理想出口蒸汽焓, kJ/kg;

$P_2$ — 级的出口蒸汽压力, Pa

最后可由调节级效率和流量求出调节级出功

$$H_2 = H_1 - \eta(H_1 - H_{2s}) \quad (10)$$

$$W = D_1(H_1 - H_2) \quad (11)$$

式中:  $W$ — 调节级出功, kJ/s;

$H_2$ — 调节级的出口蒸汽焓, kJ/kg。

2.1.2 非调节级

非调节级在变工况前后处于临界状态的进汽流量方程:

$$D'_{f1} = D'_{f10} \frac{P'_{f1}/P'_{f10}}{(T'_{f1}/T'_{f10})^{1/2}} \quad (12)$$

式中:  $D'_{f1}$ — 在变工况下的临界流量, kg/s;

$D'_{f10}$ — 在设计工况下的临界流量, kg/s;

$P'_{f1}$ — 在变工况下处于临界状态的进口蒸汽压力, Pa;

$P'_{f10}$ — 在设计工况下处于临界状态的进口蒸汽压力, Pa;

$T'_{f1}$ — 在变工况下处于临界状态的进口蒸汽温度, °C;

$T'_{f10}$ — 在设计工况下处于临界状态的进口蒸汽温度, °C。

非调节级在变工况前后未达临界状态的进汽流量方程:

$$D_{f1} = D_{f10} \sqrt{\frac{P_{f1}^2 - P_{f2}^2}{P_{f10}^2 - P_{f20}^2}} \sqrt{\frac{T_{f10}}{T_{f1}}} \quad (13)$$

式中:  $D_{f1}$ — 在变工况下处于亚临界状态的流量, kg/s;

$D_{f10}$ — 在设计工况下处于亚临界状态的流量, kg/s;

$P_{f1}$ — 在变工况下处于亚临界状态的进口蒸汽压力, Pa;

$P_{f10}$ — 在设计工况下处于亚临界状态的进口蒸汽压力, Pa;

$P_{f2}$ — 在变工况下处于亚临界状态的出口蒸汽压力, Pa;

$P_{f20}$ — 在设计工况下处于亚临界状态的出口蒸汽压力, Pa;

$T_{f1}$ — 在变工况下处于亚临界状态的进口蒸汽温度, °C;

$T_{f10}$ — 在设计工况下处于亚临界状态的进口蒸汽温度, °C。

其它求非调节级出口焓与出功的公式与调节级相同。

2.2 模型求解

°算法: 针对汽机的仿真模型, 为满足实时仿真的需要, 对文中提到的设备模型方程进行集总参数的处理后, 采用欧拉(EULER)算法。

°整个本体模块的处理: 整个模型是由八个子模块(两个调节级和六个非调节级模块)串联和五个抽

汽支路构成的简单流体网络(如图 2), 单个子模块的求解是独立完成的, 而总的流体网络系统是用节点压力法求解, 分别得到系统内各节点的压力和流量的具体数值。

### 3 仿真结果和分析

根据上面建立的数学模型, 利用计算机进行了仿真, 并将其应用在天津 50 MW 电站仿真中, 取得了与现场基本一致的结果。下面列出其中几种典型工况的动态仿真结果, 各图中曲线分别为各级出功和流量。

#### 3.1 高压调节级开度减小

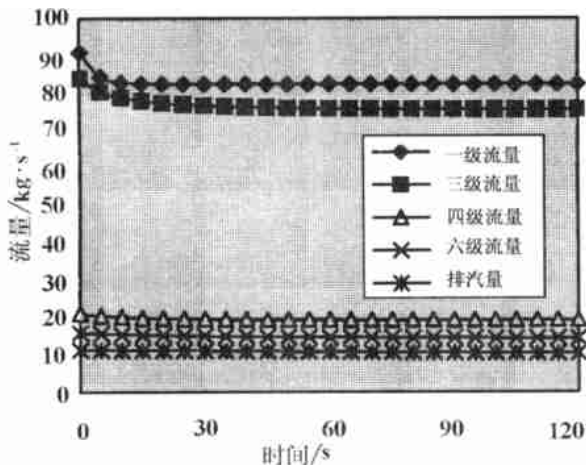


图 3 高压调节级开度减小 10% 各级流量变化曲线

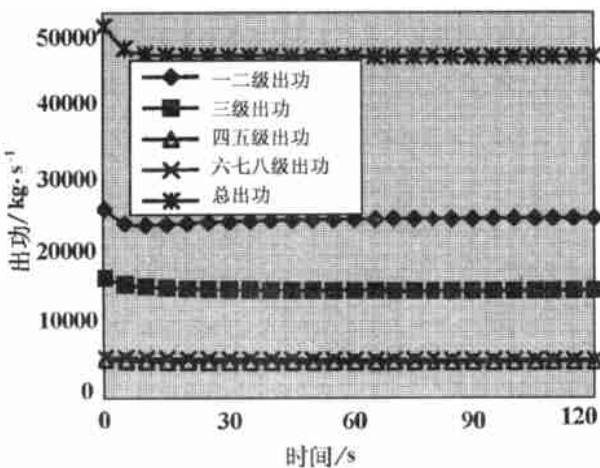


图 4 高压调节级开度减小 10% 后各级出功变化曲线

在正常运行时, 若高压调节级开度从零时刻起突然减小 10%, 各级流量变化的动态响应曲线如图 3 所示。由曲线可以看出, 从第一级到最后一级的

各级流量都略有下降, 只是后几级的流量变化与前几级相比相对小一些。这主要是因为高压调节级开度减小, 相当于减小其流通面积, 导致高压调节级流量下降, 而汽机内后几级的流量本身就少, 再加上几段抽汽口的影响, 使得它们的各级节点压比变化较小, 故流量变化也相对较少。

汽机内各级出功随高压调节级开度减小而变化的动态响应曲线如图 4 所示。其中, 各级出功均有所下降, 故总出功亦随之下降。这主要是因为各级流量都有所下降, 而各级压比却基本保持不变, 即各级焓降基本不随流量变化而变化, 故由式(7)可知, 各级出功和总出功量均随各级流量的下降而略有下降。只是前几级出功减少。

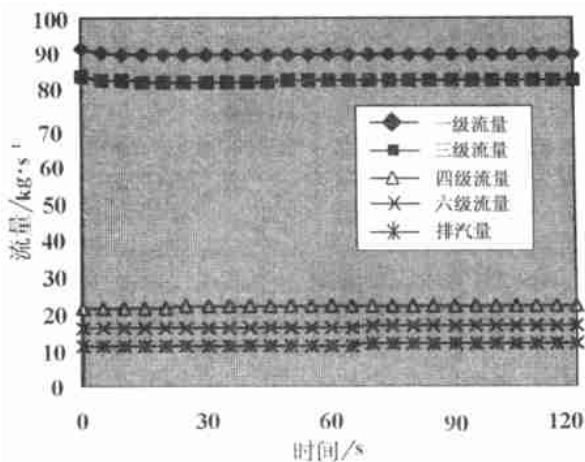


图 5 2 号抽汽口阀门关小 5% 后各级流量变化曲线

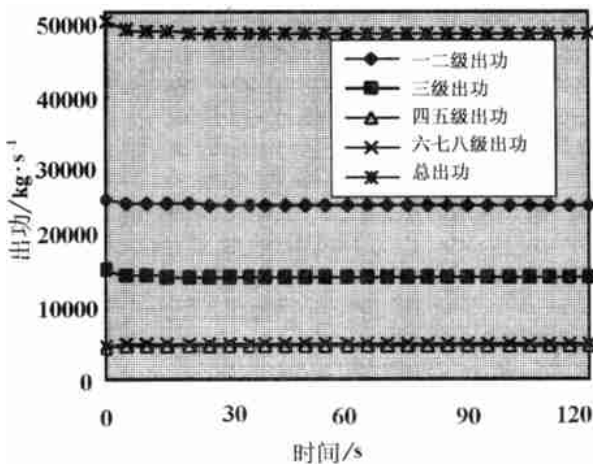


图 6 2 号抽汽口阀门关小 5% 后各级出功变化曲线

(下转 293 页)

表 4  $c_p^0$  与  $c_p$  的值

T/K	X = 0.2			X = 0.3		
	$c_p^0$	$C_p$	$ec_p/\%$	$c_p^0$	$C_p$	$ec_p/\%$
500	32.04883	35.87214	11.9296	32.32117	37.16622	14.9903
900	35.65333	35.85271	.5592	36.06534	36.29313	.6316
1300	38.44445	38.53464	.0023	39.03998	39.14194	.0026
1700	40.35629	40.40743	.0013	41.13964	41.19720	.0014

注:  $ec_p = 100 \times (c_p - c_p^0) / c_p^0$

热力性质;同时发现,注蒸汽量越大,气体的热力性质越偏离得越明显。本文的工作为燃煤气的 STIG 循环的进一步研究做了必要的工质热物性准备。

### 参考文献

- [1] 严家禄, 杨玉顺, 刘明. 烃类燃料的燃气热力性质表. 北京: 科学出版社, 1989.
- [2] 董景山. 流体的热物理性质. 北京: 中国石化出版社, 1996.

[3] 钟史明. 燃气—蒸汽联合循环发电. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[4] 焦树建. 整体煤气化燃气——蒸汽联合循环 (IGCC). 北京: 中国电力出版社, 1996.

[5] 陈安斌, 王永青, 尚德敏, 严安禄. 燃煤气的闭式 STIG 循环的热力学分析. 热能动力工程, 1998, 13(4): 254—256.

[6] U. S. Environmental characteristics of clean coal technologies. Department of Energy,

1992.

[7] Vargaftik N B. Table on the thermophysical properties of liquids and gases in normal and dissociated states. Hemisphere pub. Corp. 1975.

[8] Tsouopoulos C. An Empirical correlation of second virial coefficients. AIChE J, 1974, 20: 263 ~ 272.

(渠源 编辑)

(上接 280 页)

### 3.2 2 号抽汽口抽汽量减少

在正常运行过程中, 2 号抽汽口(可调整抽汽口, 即阀门 A, 见图 2)由于某种原因突然关小 5% 而低压调节阀门开度不变时, 各级流量的动态响应曲线如图 5 所示。由曲线可以看出, 可调整抽汽前的一、二、三级蒸汽流量略有下降, 而可调整抽汽后的四、五、六、七、八级蒸汽流量都略有上升。这主要是因为 2 号抽汽口关小, 导致该节点压力上升, 在非临界状况下, 前三级流量随着压比降低略有减少, 而后几级流量则随压比提高稍有增加。

汽机内各级出功随 2 号抽汽口关小而变化的动态响应曲线如图 6 所示。其中, 前三级由于流量、焓降均略有下降, 所以出功也随之减少; 后几级的流量和焓降则随级前压力的上升而都稍有增加, 使得其出功亦有一点提高。然而由于后几级的流量相对较少(只有高压级流量的 20% 左右), 焓降也比较低, 所以汽机的总出功量主要由前几级决定, 也即其总出功量将随前几级出功的变化而略有减少。

### 4 结束语

由以上仿真结果和分析可以看到, 对 C50-90/13 型汽轮机的分段式建模, 大大简化了建模过程, 并且完全可以达到对现场对象进行仿真的目的。考虑到仿真的实际需求, 如加入故障或应用于分析研究, 我们还可以以本模型为基础将调节级和非调节级等子模块进一步细化, 使得仿真结果更加逼真。

### 参考文献

- [1] 老大中. 大型火电厂汽轮机系统仿真研究. [博士后出站报告]. 北京: 清华大学热能系, 1997.
- [2] 史琳. 抽汽式热电联供机组实时仿真机汽轮机部分软件的研制. [博士后出站报告]. 北京: 清华大学热能系, 1994.
- [3] 蔡颐年. 蒸汽轮机. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性. 北京: 水利电力出版社, 1991.

(何静芳 编辑)

**words:** steam turbine, power output uprating

应用于PRSTIG循环化SIA-02燃气轮机组上的喷射器= **An Ejector Used for the Model SIA-02 Gas Turbine Unit of a Partial Regeneration Steam Injected Gas Turbine (PRSTIG) Cycle** [刊, 汉] / Wen Xueyou, Lu Ben (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —269 ~ 271

A major constituent element of a partial regeneration steam injected gas turbine (PRSTIG) cycle system, the ejector was designed in adaptation for a model SIA-02 small-sized gas turbine. An analysis of the ejector design is also presented in the paper. **Key words:** partial regeneration steam injected gas turbine cycle, steam injected gas turbine cycle, ejector

油田射孔器材试验装置加热系统的数学模型与仿真分析= **Mathematical Modeling and Simulation Analysis of the Heating System of an Oil Field Perforation Equipment Test Rig** [刊, 汉] / Liu Cuiling, Wang Zicai, Sun Xingbo *et al* (Simulation Technology Research Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —272 ~ 275, 283

Based on the technical requirements of a perforation equipment test rig concerning its ability to bear high-temperature and high-pressure, the authors have designed a well-type dual-circulation electric heating furnace. A mathematical model of the heating-furnace heat transfer process has been set up. By way of simulation an analysis was conducted of the effect of the heating system process parameters on the temperature field profile along the flow path of the furnace. Such an analysis plays a significant role in providing guidance for high-precision control and prediction of the oil temperature in the heating system. The validity of the mathematical model has been verified by the actually measured results. **Key words:** heat transfer, mathematical model, heating furnace, temperature field, simulation

锅炉过热器系统的动态仿真模型= **Dynamic Simulation Model for a Boiler Superheater System** [刊, 汉] / Chen Xiaodong, Wang Zicai (Simulation Technology Research Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —276 ~ 277, 297

As a mechanism model can hardly reproduce the complicated dynamic characteristics of a boiler superheater system, the authors have come up with a new modeling method. The proposed method consists in taking the mechanism model as a main guide and supplementing it with an on-line correction through the use of a dynamic neural network. The results of simulation indicate that such a model building method can provide an ideal approach for the dynamic simulation of a huge complicated system. **Key words:** boiler, superheater, simulation, model building method

汽轮机本体分段式通用模块化建模与仿真= **Modeling and Simulation of a Steam Turbine Proper through the Use of a Sectionalized General-modularization** [刊, 汉] / Zhu Wei, Jiang Zikang, Cheng Fangzhen, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —278 ~ 280, 293

Described in this paper is the modeling of a steam turbine proper with the help of a sectionalized general-modularization. Furthermore, with a model C50-90/13 steam turbine being selected as an example, simulation results are given of the steam turbine under various operating conditions and pertinent analyses were also performed. Currently, the above-cited model has been successfully employed for an actual simulation object. Featuring a relatively high precision and versatility in engineering applications, it is suited for simulating steam turbines under various operating conditions. **Key words:** steam turbine, simulation, general modularization, modeling

二次风喷射角度对切向燃烧炉膛出口烟气流量偏差的影响= **The Effect of a Secondary Air Injection Angle on the Deviation of Flue Gas Flow Rate at a Tangentially Fired Furnace Outlet** [刊, 汉] / Zhao Yuan, Dong Peng, Qin Yukun, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —281 ~ 283

In a tangentially fired large-sized boiler there generally occurs a common phenomenon of flue gas flow deviation on the