

# 基于逐级计算的汽轮机性能仿真模块的研究与应用

崔 凝, 王兵树, 宋立琴

(华北电力大学 仿真与控制技术研究所, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 在无法获得汽轮机级组详细的几何参数和气动特性的情况下, 根据流体网络中节点的计算方法, 提出了将所要求解的级作为压力节点, 根据质量平衡计算其排汽压力, 按照汽轮机级组做功原理计算其它状态参数和机械功的设计思想, 编制了相应的仿真算法, 并应用到多套电站仿真系统项目开发中。实践证明, 本文的汽轮机仿真模块能够正确反映仿真对象的全物理过程, 具有良好的静态精度和动态响应特性, 是具有实用价值的通用仿真模块。

**关 键 词:** 汽轮机; 级组; 仿真; 模块

中图分类号: TK262; TP391.1 文献标识码: A

## 1 前 言

汽轮机是一种以蒸汽为工质, 并将蒸汽的热能转换为机械功的旋转机械, 是现代火力发电厂中应用最广的原动机, 掌握其动静特性始终是电力系统研究人员不断追求的目标。随着计算机技术的迅速发展, 应用数字仿真技术对热力系统进行研究已成为解决实际问题的重要手段。

在众多关于汽轮机的数学模型中, 不少是静态模型, 如设计模型、校核模型、变工况计算模型等<sup>[1]</sup>; 也有一些动态模型, 如小偏差线性化模型、用于控制系统研究的传递函数模型、解决大扰动问题的非线性模型等<sup>[2]</sup>。但上述动态模型要么无法反映汽轮机全工况动态特性, 要么计算过程需要大量的迭代计算, 满足不了实时性的要求。本文根据流体网络中节点计算的思路开发的汽轮机动态仿真模块既能正确反映对象的全工况动态特性, 又能满足仿真系统实时性的要求。

## 2 级组算法模块

采用模块化建模的思想, 对系统进行模块化分解, 按照以系统的物理结构为主、功能特性作参考的

准则对系统进行模块划分。一个模块可以是系统中一个物理设备, 也可以是实现某种功能的子系统。模块之间的联结关系和实际部件间连接关系是一致的, 因而模块有明确的物理意义和清晰的边界, 具有数学独立性, 还使系统模块化分解和模块联接组合都容易进行。

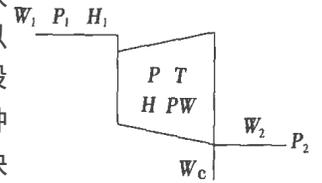


图 1 汽轮机级组示意图

如图 1 所示, 将汽轮机的每一级或级组视为控制体, 把所要求解的级作为压力节点, 根据质量平衡计算其排汽压力, 按照汽轮机级组做功原理计算其它状态参数和机械功, 其入口热力参数(如蒸汽流量、压力、焓值等)通过上一级模块传递过来, 具体求解过程如下:

动态质量平衡方程:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{V \cdot d\rho}{d\tau} = V \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{d\tau} + \frac{\partial \rho}{\partial h} \cdot \frac{dh}{d\tau} \right) = W_1 - W_2 - W_c \quad (1)$$

式(1)微分函数中  $\partial/\partial p$  和  $\partial/\partial h$  分别是流体密度对压力和焓的偏导数, 是状态变量  $p$  和  $h$  的函数, 由流体的物理性质决定。式中  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_c$  分别是本级入口流量、出口流量和抽汽流量(kg/h),  $d\tau$  积分步距,  $V$  是本级空间体积( $m^3$ ), 可根据机组设备资料估算。

由于级内工质热焓的变化相对压力的变化很小, 在此可忽略不计。

于是式(1)变为:

$$V \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{d\tau} \right) = W_1 - W_2 - W_c \quad (2)$$

利用一阶欧拉法将上式变换为:

$$p = p' + \frac{\partial p}{\partial \rho} \cdot (W_1 - W_2 - W_c) \cdot d\tau \quad (3)$$

式(3)中  $p'$  是压力  $p$  前一时刻的值,  $p$  为当前时刻的压力, 即本级排汽压力, 其余同前。

在模块化建模中, 模块的阻力特性对于建立各模块间进、出口压力和流量之间的关系十分重要。理论上, 阻力特性应由动量方程来描述, 但是大量计算和试验表明, 将模块之间以及模块内部的压力损失集中在模块进口端上的简化处理方式可以准确地描述阻力特性<sup>[3]</sup>。

质量流量的仿真是建立在上游与下游压力点之间压差和两点之间总等价流量导纳(即阻力系数的倒数)的基础上, 使用近似平方根关系, 流量导纳系数是固定或可变流阻综合的结果:

$$W = K \cdot \sqrt{p_i - p_0}$$

其中:  $p_i$ —上游压力点(入口);  $p_0$ —下游压力点(出口);  $K$ —上游与下游压力点之间流量导纳, 是与流道几何尺寸和粗糙程度有关的常数, 可根据设计工况下部件的进出口参数确定。经验表明, 在工况变动和动态过程中, 认为  $K$  为常数完全满足工程精度的要求<sup>[2]</sup>。

为计算方便, 将上式变换为:

$$W = C \cdot (p_i - p_0)$$

$C$  为准线性流量导纳 ( $C = K / \sqrt{p_i - p_0}$ ), 分别由对应的流量仿真模块计算得到。

针对本文所述的汽轮机级而言, 其进出本级的流量分为:

$$W_1 = C_1 \cdot (p_1 - p) \quad (4)$$

$$W_2 = C_2 \cdot (p - p_2) \quad (5)$$

$$W_c = C_3 \cdot (p - p_3) \quad (6)$$

其中:  $p_1, p_2, p_3$ —本级入口(即上一级排汽)、下一级出口和相应加热器汽侧入口压力(MPa);  $p$ —本级排汽压力(MPa);  $C_1, C_2, C_3$ —上一级至本级、本级至下一级和本级抽汽至加热器入口的准线性流阻导纳。

结合式(3)~式(6)即可计算出本级排汽压力  $P$ 。

通过调用相应的工质物性子程序, 可计算出:

$$\text{本级入口蒸汽焓: } s = f_s$$

$(p_1, h_1)^{[3]}$ , 其中:  $h_1$  为上一级排汽焓(kJ/kg);

理论排汽焓:  $H_s = f_h(p, s)^{[3]}$ ;

本级实际排汽焓:  $h = h_1 - (h_1 - h_s) \cdot \eta_e$ ;

本级排汽温度:  $T = f_t(p, h)^{[3]} (\text{ }^\circ\text{C})$ ;

本级功率:  $PW = W_1 \cdot (h_1 - h) / 3.6 \quad (\text{W})$ 。

由于无法直接从公开刊物或设备资料中得到汽轮机详细的几何参数和气动特性, 各级效率计算如下:

高中压缸级效率可根据实际机组在不同工况下的运行数据, 经过统计计算得出:

$$\eta_{hie} = F_{hi} \cdot f(G, N_e)$$

式中:  $\eta_{hie}$ —高中压缸效率;  $G$ —主蒸汽流量(kg/h);  $N_e$ —电功率(W);  $F_{hi}$ —考虑高中压缸各级效率的权系数。

低压缸由于后面几级中湿蒸汽的原因, 无法直

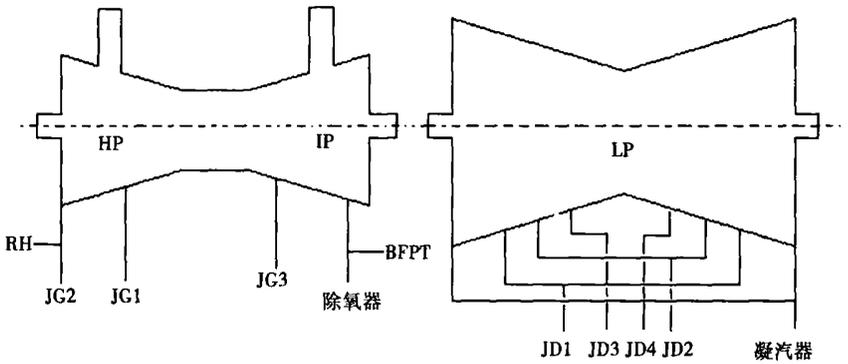
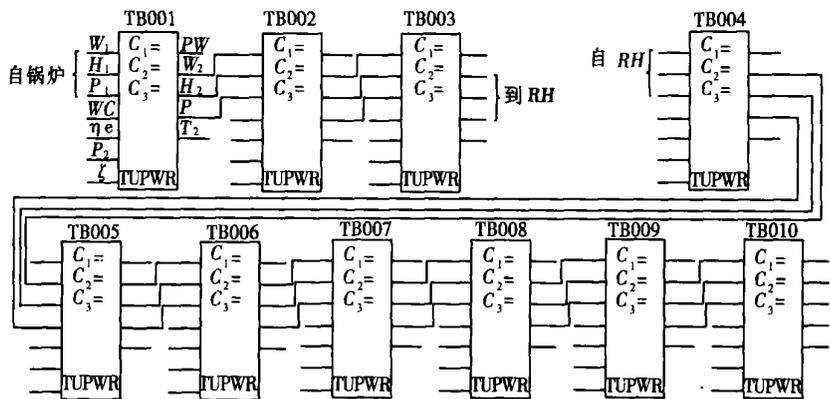


图 2 凝汽式汽轮机本体系统示意图



TB001—调节级; TB002—1号高加抽汽级组; TB003—2号高加抽汽级组; TB004—3号高加抽汽级组; TB005—除氧器与汽动给水泵抽汽级组; TB006—4号低加抽汽级组; TB007—3号低加抽汽级组; TB008—2号低加抽汽级组; TB009—1号低加抽汽级组; TB010—汽轮机排汽级组

图 3 凝汽式汽轮机本体系统仿真模型

接从运行数据计算得到, 在本文中运用反平衡的计算方法推算得到:

$$\eta_{le} = F_1 \cdot f(G, N_e)$$

式中:  $\eta_{le}$ —低压缸效率,  $G$ —低压缸蒸汽流量, kg/h;  $N_e$ —电功率, W;  $F_1$ —考虑低压缸各级效率的权系数。

上述效率的计算方法理论上存在一定的误差, 但完全满足工程精度的要求。

在级的排汽流量计算中, 考虑了临界状态下流量的修正, 并包含叶片结垢等影响级做功能力的因素。

本文开发的汽轮机级组算法模块由 7 个输入、5 个输出和 3 个系数组成。7 个输入变量分别是: 级组入口蒸汽流量  $W_1$ , 入口蒸汽焓  $h_1$ , 入口蒸汽压力  $p_1$ , 本级段回热抽汽量  $W_c$ , 本级段效率  $\eta_c$ , 下一级组排汽压力  $p_2$ , 本级组通流结垢系数  $\xi$ ; 5 个输出变量分别是: 本级组功率  $PW$ 、出口蒸汽流量  $W_2$ 、焓值  $h$ 、压力  $p$  和温度  $T$ ; 3 个系数分为级组体积  $V$ 、权系数  $F_{h1}$  和  $F_1$ 。

### 3 模型应用

本文所建立的级组仿真模块具有较强的通用性, 既能按照汽轮机的结构逐级计算各级的热力参数, 也可以各级加热器抽汽口为界限建立级组的性能仿真模块。图 2 所示的汽轮机热力系统是常规凝

汽式汽轮机本体结构布置。在综合考虑了模块的可连接性和通用性后, 可将该汽轮机本体分解成如图 3 所示的模块组合。

从图 3 可以看出, 以各级抽汽口为界限, 利用本文的仿真模块将汽轮机本体分成 10 个级组, 按照热力过程联接成一个汽轮机本体热力系统仿真模型。其中高压缸调节级与其它压力级相比焓降大, 其调节级后压力是重要的监控参数, 因而单独作为一级进行仿真计算。

各级组均采用同一种算法, 即汽轮机级组算法 (TUPWR), 生成 10 个模块名各不相同的仿真模块, 分别对应 10 个级段, 并用变量名将相关联的模块连接起来, 用一个加法算法模块 (SUM) 将所有级段的总功率相加后得到汽轮机总功率, 将该输出变量联接转动模块计算转子转速。本模型与其它系统的仿真模型 (锅炉系统、汽机辅助系统、电气系统及控制系统) 相结合, 形成一个完整的全工况电站仿真模型。

### 4 试验结果

作为电站机组全工况动态仿真模型的一部分, 本文的算法模块已成功应用在许多电站仿真系统中 (200 MW、300 MW、600 MW 等), 以下的图表是湛江电厂二期 300 MW 火电机组全工况动态仿真系统最终测试验收的部分资料。

表 1 湛江电厂二期 300 MW 机组全工况动态仿真模型部分关键静态参数

			第一级组	第二级组	第三级组	第四级组	第五级组	第六级组	第七级组	第八级组
75% 额定	设计值	压力/MPa	4.245	2.668	1.238	0.623	0.263	0.096	0.046	0.016
		温度/°C	352.2	293.3	437.6	342.7	239.7	139.3	79.5	56.2
工况 (定压)	仿真结果	压力/MPa	4.249	2.68	1.236	0.62	0.263	0.092	0.041	0.015
		温度/°C	354.3	295.4	436.4	341.1	239.4	139.3	78.4	55.1
40% 额定工况 (滑压)	设计值	压力/MPa	2.45	1.507	0.706	0.364	0.155	0.055	0.027	0.012
		温度/°C	366.6	203.7	397.9	310.3	213.5	118.1	66.7	46.3
	仿真结果	压力/MPa	2.39	1.495	0.711	0.369	0.158	0.056	0.027	0.012
		温度/°C	363.6	202.1	398.3	312.1	215.2	119.3	67.3	47.1

图 4 是湛江电厂二期 300 MW 火电机组全工况动态仿真模型的冷态启动曲线, 该曲线利用 DCS (INFI-90 系统) 仿真操作员站的趋势图功能实时绘

制。

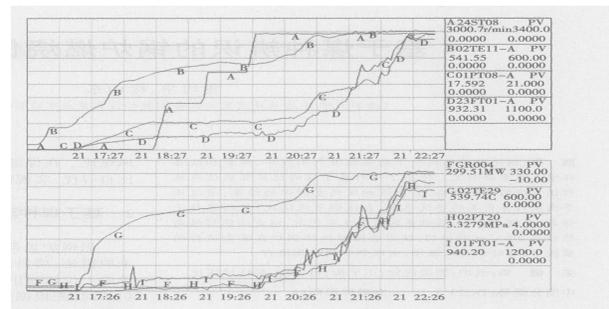
图 5 是该动态仿真模型汽泵 RB 后各主要参数的动态特性曲线, 曲线是利用 STAR-90 仿真支撑

系统的多变量曲线功能实时绘制。横轴为时间, 纵轴为各监控量与相应设计参数的相对值。

仿真结果表明: 在不同负荷工况下(100%、70%、60%、50%、40%等)各个模块输出的仿真稳态值与制造厂家提供的热平衡图计算结果基本一致, 误差均在±1%以内, 完全满足工程精度的要求; 其动态变化过程与实际机组的运行情况相符。经过多个电站仿真系统的检验, 证实本文所开发的基于逐级计算的汽轮机性能仿真模块能够正确反映仿真对象的全物理过程, 具有良好的静态精度, 正确的动态响应特性。

### 5 结 论

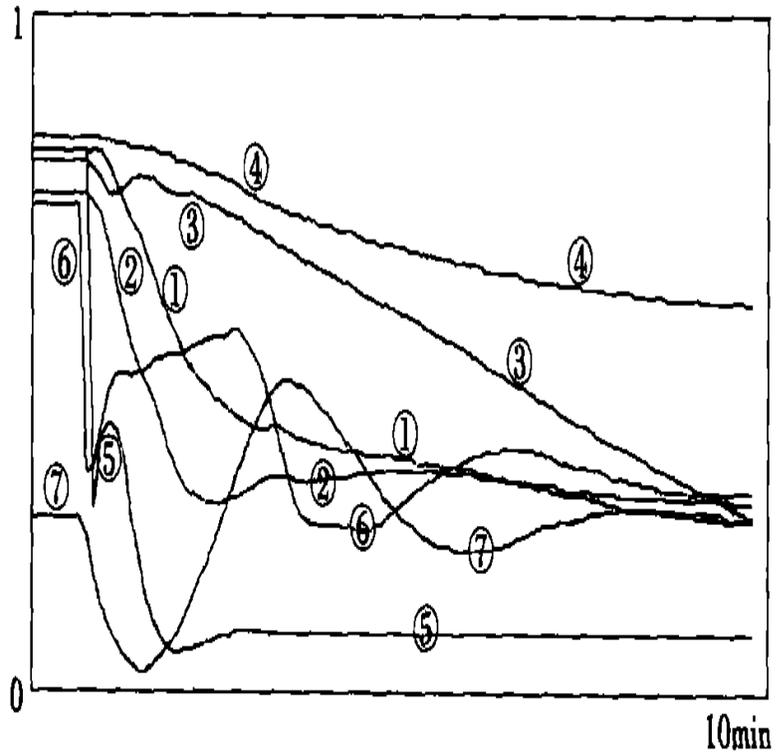
(1) 实践证明把每一级或级组作为控制体, 将所要求解的级作为压力节点, 根据质量平衡计算其排汽压力, 按照汽轮机级组做功原理计算其它状态参数和机械功的设计思想是正确的。



①—电功率; ②—主蒸汽流量; ③—机前压力; ④—主汽温度;  
⑤—燃煤量; ⑥—给水量; ⑦—汽包水位

图 5 300 MW 火电机组仿真系统汽泵 RB 监控曲线

(2) 基于逐级计算的汽轮机动态仿真算法模块能够正确反映仿真对象的全物理过程, 具有良好的静态精度, 正确的动态响应特性。



A—汽轮机转速(r/min); B—主蒸汽温度(°C); C—主蒸汽压力(MPa); D—主蒸汽流量(v/h); F—电功率(MW); G—再热器出口汽温(°C); H—再热器出口汽压(MPa); I—主给水量(v/h)

图 4 300 MW 火电机组仿真系统冷态启动监控曲线

(3) 仿真算法模块是通用化的仿真模块, 适合不同容量不同形式的汽轮机仿真模型计算, 这一结论已在多个仿真系统开发工程中得到验证。

(4) 对汽轮机按级进行分析处理, 既可以计算汽轮机各级状态参数, 又可计算汽轮机的整体状态参数; 既可以反映对象的动态特性, 又可用于变工况计算。

(5) 如能按照汽轮机详细的几何参数和气动特性计算各级效率, 则仿真结果将更加真实地反映实际机组的动静态特性。

### 参考文献:

[1] 翦天聪. 汽轮机原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
 [2] 倪维斗, 徐向东. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
 [3] 刘志刚. 工程热物理性质计算程序的编制及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

(何静芳 编辑)

utilized by a gas turbine, thus giving rise to a combined power generation system. The authors have set up computation models for the MCFC and a bottom layer cycle respectively. With the help of these models a detailed analysis was performed of the major parameters having an impact on the performance of the combined power generation system. The results of the analysis indicate that with the operating temperature of the MCFC set at 650 °C it is possible to obtain an optimum performance and a maximum galvanic-pile service life. A relatively low fuel gas utilization rate should be selected for the combined power generation system. At a definite turbine initial temperature there exists for a gas turbine an optimum compression ratio corresponding to a maximum power output. On the basis of the above results the optimal value of various parameters have been calculated. Finally, through a simulation of the optimized system the following results were obtained: when the MCFC and a gas turbine were grouped to form a combined power generating system, a power generation efficiency amounting to 57.0% (based on a low heating value of fuel) can be achieved; the use of a gas turbine can lead to an enhancement of the integral power-generation efficiency by about 10%. **Key words:** molten carbonate fuel cell (MCFC), gas turbine, combined power-generation

**基于逐级计算的汽轮机性能仿真模块的研究与应用 = Research and Applications of a Steam Turbine Performance Simulation Module Based on Stage-by-stage Calculations**[刊, 汉] / CUI Ning, WANG Bing-shu, SONG Li-qin (North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 124 ~ 127

Under certain circumstances when it is not possible to obtain detailed geometric parameters and aerodynamic characteristics for a steam turbine stage-group one can on the basis of the calculation method for nodes in a fluid network consider the stage to be solved as pressure nodes and based on mass equilibrium calculate steam exhaust discharge pressure. In accordance with the work-doing principle of the turbine stage-group other status-parameters can be computed, and according to the design philosophy of mechanical work a relevant simulation algorithm has been prepared. The latter was employed in the project development of several sets of power station simulation system. General practice has shown that the steam turbine simulation module under discussion can accurately reflect the whole physical process of the simulation object and features fine static precision as well as outstanding dynamic response characteristics. It is a general-purpose simulation module of high practical value. **Key words:** steam turbine, stage group, simulation, module

**基于煤种辨识的锅炉燃烧优化系统 = Boiler Combustion Optimization System Based on Coal Type Identification**[刊, 汉] / DONG Jun-hua, XU Xiang-dong (Key Laboratory of Control and Simulation of Electrical System and Power Generation Equipment under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 128 ~ 131

Boiler combustion optimization is of major significance for enhancing energy utilization efficiency and for the protection and improvement of environment. The authors have come up with an optimization strategy based on the online identification of coal low heating value. By using the results of coal low-heating value identification and through the use of a positive balance method optimization parameters can be calculated for the online adjustment of air-coal ratio. A simulation has been finally performed. In case of a change in such factors as boiler load, coal type, etc the method under discussion can enhance thermal efficiency by 2%. Tests have shown that the method can ensure a timely adjustment of air-coal ratio under the precondition of ensuring boiler safe operation, thereby resulting in an optimized operation of the boiler. **Key**