

基于过程系统工程理论的热力系统性能模拟

(东南大学, 江苏 南京 210096) 丁艳军 王培红 吕震中 陈来九

摘 要: 在介绍了过程系统工程理论的基础上, 采用过程系统工程理论的序贯模块法建立了电站汽轮机热力系统的过程单元模拟和系统模型, 并采用回路断裂与收敛策略对热力系统进行了性能模拟, 验证了模型精度, 最后分析了过程系统工程理论在电站过程系统性能模拟、分析、优化和诊断中应用的可行性与重要性。

关 键 词: 过程系统工程; 序贯模块法; 热力系统; 性能模拟

中图分类号: TM74

文献标识码: A

1 引言

过程系统工程作为在系统工程、运筹学、数值计算方法、过程控制和化学工程等学科的基础上发展起来的一门新兴的边缘学科, 目前正在化工过程的性能模拟、分析、优化中得到广泛而深入的应用, 取得了巨大的社会和经济效益。过程系统工程实质上是一组抽象的数学方程式来建立各个工业过程单元的模型, 根据实际过程中质量、能量和动量的传递方向将这些单元模型互相连接, 形成实际过程系统抽象的模型网络, 并以系统工程的方法对之进行研究, 获取实际过程性能模拟、分析、优化结果^[1]。

火力发电厂, 作为一个能量转换系统, 其实质也是一个由大量单元或设备组成的过程系统。传统的电站性能模拟、分析、优化往往是针对具体问题进行具体分析, 缺乏一定的系统性和全面性。若以系统工程理论为基础, 建立整个电站包括锅炉系统、汽轮机热力系统和循环水系统等的系统模型, 从系统工程的角度出发, 对电站性能模拟、偏差分析、诊断优化等问题进行研究, 则是一个有益的尝试。本文采用系统工程中应用得最为成熟的序贯模块法, 建立了电站热力系统的性能模型, 采用回路断裂和迭代收敛理论, 对热力系统性能模拟进行了数值求解, 从系统工程角度完成了热力系统的性能模拟。

2 热力系统模型的建立

序贯模块主要用于过程的性能参数模拟, 其基本组成部分是单元模块, 通过模块之间的流股连接建立系统模型, 所以与实际过程系统连接关系很接近, 见图 2。单元模块由一组数学模型组成, 用于描述过程中某一设备或子系统, 建立完善的通用单元模块库, 对于生成和维护面向过程和设备的通用性

能模拟集成系统有一定的实际意义。图 1 表示了一个通用单元模块的结构, 其中参数表示过程单元的性能参数, 如换热器的传热系数、脏污系数, 汽轮机级组的相对内效率等等, 参数可以通过用户设定, 也可以通过过程实际设备的运行监测系统在线获取。

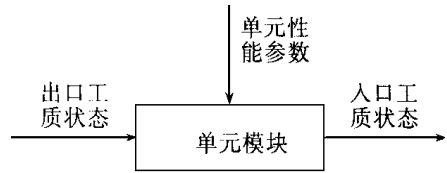


图 1 通用单元模块结构

2.1 电站热力系统单元模块的建立

为采用序贯模块法进行电站热力系统性能模拟, 首先必须建立热力系统中过程单元模块。

2.1.1 汽轮机组模块

对亚临界级组:

$$G = K_{Gi} \sqrt{P_1^2 - P_2^2} / \sqrt{T_1} \quad (1)$$

$$\Delta H_t = HH(p_1, h_1, p_2) \quad (2)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_i \times \Delta H_t \quad (3)$$

$$W = \eta_{mg} \times \eta_i \times \Delta H_t \times G \quad (4)$$

对临界级组:

$$G = K_{Gi} p_1 / \sqrt{T_1} \quad (5)$$

$$\Delta H_t = HH(p_1, h_1, p_2) \quad (6)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_i \times \Delta H_t \quad (7)$$

$$W = \eta_{mg} \times \eta_i \times \Delta H_t \times G \quad (8)$$

上式中下标 1、2 分别表示入口参数和出口参数, K_{Gi} 、 η_{mg} 、 η_i 为模块性能参数, 分别表示流量系数、级组的机电效率、级组相对内效率, G 为汽体质量流量, $HH(\cdot)$ 为求等熵膨胀焓降函数, 模块中水和水蒸气热物性方程, 如根据水蒸气压力与焓求取其它状态变量的方程未一一列出, 但实际应用中一个模块包含所有的方程。

2.1.2 汽水工质混合模块

可以将除氧器等混合式加热器看作汽水工质混合模块, 其单元模型主要根据出入口工质质量平衡、动量平衡和热量平衡确定。

$$m_2 = \sum m_{li} \quad (9)$$

$$m_2 h_2 = \sum m_{li} \times h_{li} \quad (10)$$

$$h_2 = H(P_d)$$

上式中 m_{1i}, H_{1i} 为各入口工质的质量流量和焓, m_2, H_2 为出口工质的质量流量和焓, P_d 为混合器内的压力, $H(\cdot)$ 为已知压力求饱和水焓函数。

2.1.3 水工质混合模块

低压疏水被凝结水泵打入主凝结水的入口等可以看作水工质混合模块, 其单元模型主要根据出入口工质质量平衡和热量平衡确定。

2.1.4 工质分割模块

工质分割模块是指对工质进行分流, 分流后各工质的状态与入口工质的状态相同, 汽轮机的抽汽口就是一个典型的工质分割模块。

$$m_1 = \sum m_{2i} \quad (11)$$

多个汽轮机级组模块和分割模块可以构成一个具有多级回热抽汽的汽轮机模型。

2.1.5 汽水换热模块

主要指回热系统的面式加热器和凝汽器。根据换热器的上下端差或传热系数等模块性能参数和放热侧、吸热侧工质进出口状态建立热量平衡、压力平衡方程式, 对模块进行定义。

2.1.6 绝热节能模块

热力系统中一些具有流动压降的管道以及调节阀门, 稳态时可以看作绝热节流单元, 工质出入口焓值不变, 仅压力变化。

2.1.7 工质压缩模块

热力系统中流体压缩单元主要指水泵, 其单元模块根据水泵的特性曲线建立。

2.2 电站热力系统模型的建立

应用上述建立的过程单元模型, 根据工质的流动方向, 对某电站 300 WM 机组原则性热力系统建立了过程系统模型, 如图 2 所示。与常规的热力系统图相比, 过程系统模型具有下列特点:

2.2.1 增加了绝热节流单元和工质分割单元, 从而保证了模型数学上的完整性和系统性。

2.2.2 过程系统图中每个模块实际代表的是描述过程单元稳态特性的一组方程, 对于软件实现来说也就是一个子程序。

3 热力系统性能模拟策略

序贯模块法的基本思想是从系统入口工质开始, 经过接受该工质的模块计算得到出口工质状态变量, 该输出变量就是下一相邻的模块入口参数。当系统模型呈无反馈的树形结构时, 则可以依照顺序计算, 当系统模型为具有反馈回路的复杂结构, 则需要应用大系统分解原理, 对系统模型进行分解, 并对环形回路进行适当的断裂和收敛计算, 以获取系统模拟结果。回路断裂与收敛对模拟计算效率有很大的影响, 过程系统工程理论对此有深入的研究。

对图 2 所示的系统模型, 尽管其系统规模不大, 尚不需要用到大系统分解原理对其进行分解, 但由于其中单元模块大多存在工质、热量和动量之间的交换和反馈, 系统的复杂程度却超过一般的化工过

程。从图 2 中可以看出, 热力系统模型至少具有 {1、2、42、43、34、35、36、29、30、31、32、33、1}, {1、2、...、18、19、56、57、41、22、23、...、33、1} 等 8 个回路, 当功率为决策变量时, 还存在外环大回路, 需要对系统进行合理的断裂与收敛计算。

3.1 回路断裂

以断裂变量数最少作为最佳断裂准则, 对图 2 建立回路矩阵, 应用 Upadhye-Greas 断裂法进行回路断裂, 结果为 8 级抽汽被断裂, 即断裂了 8 个变量, 在回路断裂处添加迭代收敛单元, 以保证系统模拟计算时的完整性。

当功率为决策变量, 即功率给定时, 主汽流量为状态变量, 则外环路也需要断裂。

3.2 断裂的收敛计算

当主汽流量和状态为决策变量, 即定流量计算时, 需对 8 级抽汽量进行迭代收敛计算。

(1) 对断裂变量初始化, 将 8 级抽汽量初始化为额定工况设计值。

(2) 完成主回路 {1、2、...、32、33} 的计算, 其中凝结水和给水通道只能计算出模块的工质焓值。

(3) 根据疏水通路 {34、35、...、39、40} 沿程模块计算出各级抽汽量。

(4) 如果计算抽汽量收敛, 则计算结束, 可以获取系统当前所有状态, 继而完成二次变量计算, 否则根据迭代策略得到新的断裂变量值, 返回 (2)。

当功率为决策变量, 即定功率计算时, 主汽流量也被断裂, 需要根据功率约束条件进行主汽流量的迭代, 对每一个主汽流量, 都需要完成上述 (1) ~ (4) 计算。

4 模型精度校验

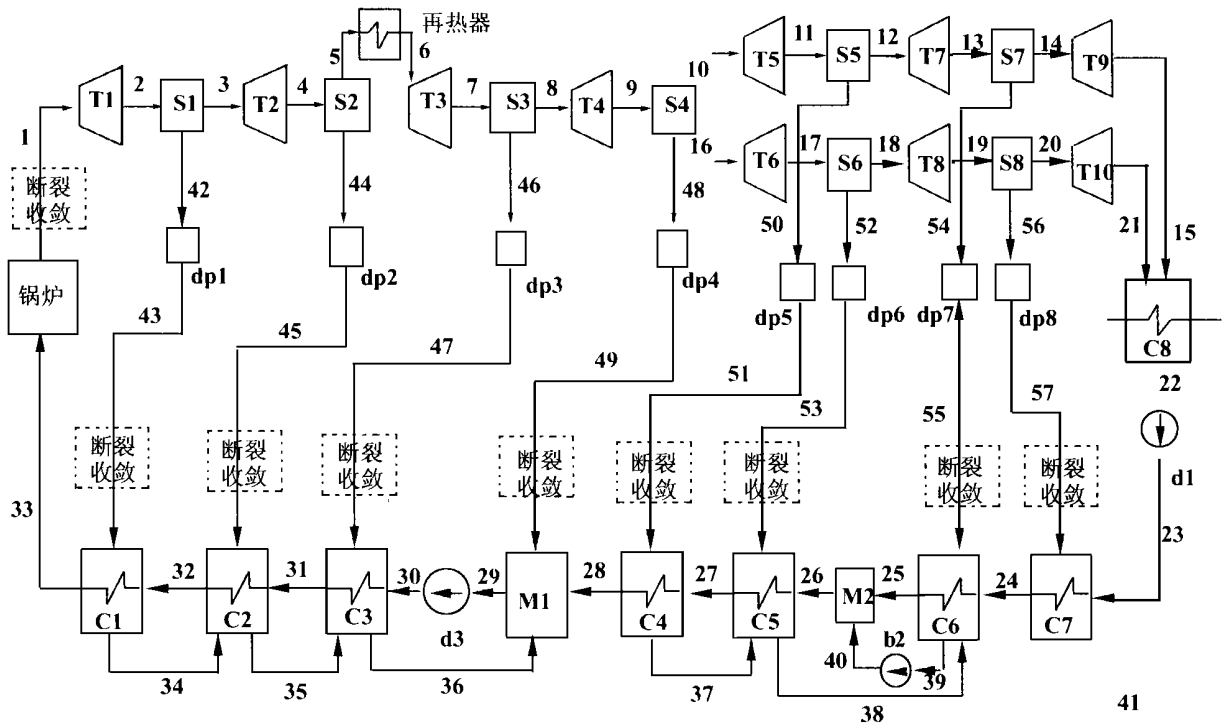
根据图 2 建立的汽轮机热力系统图, 对原机组三个设计工况进行模拟计算, 其中主要运行参数即决策变量如表 1 所示, 系统模拟结果如表 2 所示, 从表中可以看出, 系统模拟精度足以满足电站热力系统性能模拟、分析、诊断和优化的要求。

表 1 350 MW 机组热力系统主要运行参数表

主汽压力/MPa	主汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	再热汽温/ $^{\circ}\text{C}$	背压/MPa
16.66	538	538	0.004767

表 2 350 MW 机组热力系统性能模拟主要结果

项 目	工况 1		工况 2		工况 3	
	设计值	模拟值	设计值	模拟值	设计值	模拟值
功率/MW	350	350.0	262.5	262.5	175.0	175.0
热耗率/ $\text{kJ}^*(\text{kWh})^{-1}$	7990.47	7991.28	8013.48	8042.08	158.28	204.6
一级抽汽压力/MPa	6.653	9.665	4.947	5.247	3.085	3.305
二级抽汽压力/MPa	3.305	4.330	2.824	3.124	1.615	1.619
三级抽汽压力/MPa	1.767	2.176	1.296	1.712	0.860	0.859
四级抽汽压力/MPa	.832	1.032	0.613	0.814	0.408	0.409
五级抽汽压力/MPa	.400	0.500	0.296	0.396	0.198	0.200
六级抽汽压力/MPa	.182	0.232	0.135	0.185	0.090	0.091
七级抽汽压力/MPa	.071	0.091	0.053	0.073	0.035	0.036
八级抽汽压力/MPa	.030	0.036	0.022	0.029	0.015	0.015



T1~T10 表示汽轮机的级组, S1~S8 表示工质分割单元, C1~C8 表示面式换热器, M1 表示汽水工质混合, M2 表示水工质混合, dp1~dp8 表示绝热节流单元, b1~b3 表示水泵。

图 2 热力系统性能模拟图

5 结论

过程系统工程理论作为一种工程学的方法论,其重点在于研究解决系统问题的办法,而不在于探讨对象的基本原理和定理,因此本文对热力系统的性能模拟,其实质仍然是基于热力学第一定律和第二定律的热力计算,只是问题的分析和解决是以系统工程理论为基础的。

将化工行业中已普遍应用的过程系统工程理论应用到电站系统,对于解决规模逐渐庞大,系统日益复杂的电站的性能模拟、分析、诊断、优化具有重要的实际意义:

(1)过程系统工程目前已具有成熟的系统建模、分解、计算、优化和综合的理论可供使用,尽管主要是针对化工过程的,但对于电站过程也具有普遍的适用性。

(2)由于电站过程与化工过程的区别,将过程系

统理论用到电站过程,必然要根据电站的特点对某些理论进行适当修改。

(3)采用过程系统思想,易于开发面向过程和设备的电站通用性能分析软件包,易于生成通用的电站性能诊断与优化,设备状态维修和系统故障诊断集成系统。

目前笔者已将过程系统理论应用于课题研究中,开发了具有图形组态功能的电站通用性能诊断、优化软件包。

参考文献

- [1] 扬冀宏, 麻德贤. 过程系统工程导论. 北京: 烃加工出版社, 1989.
- [2] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 郑体宽. 热力发电厂. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] Pierce G F. Static Modeling of Coal Pulverized Systems. *Proceedings of Power Plant Dynamics, Control and Test Symposium*, 1977.

(复 编)

ent will be beneficial for decreasing transverse flow losses. The analysis of vorticity isolines shows that the horse-shoe vortex and passage vortex measure and strength in the positively-curved blades have been found to be smaller than those in the straight blades. Furthermore, from the distribution picture of energy loss factors one can see that the use of positively-curved blades can bring about a decrease in energy loss of a cascade inner-flow field.

Key words: positively-curved blade, energy loss, secondary flow

基于过程系统工程理论的热力系统性能模拟 = **Thermal System Performance Simulation Based on a Process System Engineering Theory** [刊, 汉] / Ding Yanjun, Wang Peihong, Lu Zhengzhong, et al (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 153 ~ 155

Based on the introduction of a process system engineering (PSE) theory this paper sets up a process unitary model and a system model for a power plant steam turbine thermodynamic system through the use of a sequential-module method of the PSE theory. A performance simulation has been conducted using a loop fracture and convergence algorithm, and the accuracy of the above-cited model verified. Finally, analyzed and discussed is the feasibility and importance of applying PSE theory for the power plant performance simulation, analysis, optimization and diagnosis. **Key words:** process system engineering, sequential-module method, thermodynamic system, performance simulation

浅析《统一建筑法规》地震荷载的计算与应用 = **A Preliminary Analysis of Seismic Load Calculation on the Basis of “Uniform Building Code of 1997” and its Practical Use** [刊, 汉] / Wang Jianhua, Yue Xue, Zhou Chengli (Harbin Boiler Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 156 ~ 159

This paper describes a seismic load calculation method as set forth in “Uniform Building Code of 1997”. The selection of various factors in the seismic load calculation is discussed and practical engineering-calculation examples given. **Key words:** seismic-proof design, basic seismic design, sole shear

过热器管束断裂分析 = **Superheater Tube-Bank Fracture Analysis** [刊, 汉] Li Ming, Wang Yanbin (Harbin No.703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 160 ~ 161

With the help of a finite-element method a thermal stress calculation and analysis was performed of a heat recovery boiler superheater tube-bank and an outer tube network system. It is noted that during a boiler start-up the superheater tube-bank is subjected to a most unfavorable load-bearing condition. Moreover, the layout rigidity of the outer tube network can influence the service life and safe operation of the superheater tube bank. **Key words:** superheater, thermal stress, outer tube network, rigidity

锅炉一次风通过节流孔板时的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Boiler Primary-Air Flow through a Throttle Orifice-plate** [刊, 汉] / Pan Weiguo, Shen Feng, Zheng Puyan, et al (Shanghai Electric Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 162 ~ 164

A numerical simulation was conducted of the air and pulverized-coal multi-phase flow pattern after an adjustable throttle orifice-plate was installed in the pulverized-coal horizontal feed-pipe of a boiler combustion system. It has been found through the above-mentioned simulation that an effective numerical simulation method consists in the following: a gas-phase turbulent flow model is first described by the use of a $K-\epsilon$ dual-equation model and with the help of SIMPLE algorithm the gas-phase speed field can be calculated. Then, a FSRT model and Lagrange method are employed to calculate the particle field characteristics. **Key words:** gas-solid multiple-phase flow, numerical simulation

利用一维热膜探针对旋流燃烧器出口冷态旋流流场的测量 = **Measurements of Cold-state Rotating Flow**