

复杂换热器系统的动态特性计算

李 政 孙 倪维斗

(清华大学)

[摘要]介绍了在国产 200 t/h 循环流化床锅炉建模与仿真工作中开发的复杂换热器系统动态特性的计算方法。该方法以近似解析解方法为基础,大大提高了运算速度,并解决了计算的不收敛问题。解耦算法的采用,令冷、热工质的平衡计算得以分离,从根本上避免了迭代计算。借助近似解析解方法和解耦算法,建立了一套通用的换热器动态特性模块化计算方法,从而为复杂换热器系统的动态特性计算提供了一个通用性强而且高效、简便的方法。

关键词 自然循环锅炉 换热器 动态特性 计算

分类号 TK233.3 0242

0 前言

管式换热器是热力系统中的常见设备,其动态特性计算办法在许多文献中均有论述。目前,管式换热器动态特性的研究方法通常是将管道沿流动方向分段,分别建立各个管段的质量、动量和能量平衡方程,然后采用微分方程数值解或简化传递函数的办法计算换热器的动态特性。尽管这些常规办法经常被使用,但在某些场合应用时仍然会受到一些限制,主要表现在:一是当一个复杂结构的换热器同时有逆、顺流及其它复杂形式的布置时,常规方法难以胜任;二是研究一个包含许多换热器,而且在同一个热工质截面上同时布置有多个换热器的换热器系统的动态特性时,常规办法会显得力不从心,而且大规模的迭代计算需耗用大量的计算机时间,并往往出现结果不收敛的情况。

据此,有必要建立一种通用的、适于复杂换热器系统的动态特性计算的办法。

清华大学热能工程系承担了国家攀登 B 项目“循环流化床锅炉精细数学模型的研究”子课题,作为该课题的一部分,本文以清华大学 220 t/h 循环流化床锅炉为对象,研究蒸汽发生器系统的建模的求解。

220 t/h 循环流化床锅炉为有汽包的自然循环锅炉。蒸汽发生器的构成除汽包和蒸发器(水冷壁)外,还有高温、屏式和低温过热器以及省煤器等。其高温过热器又分为冷段和热段,平等布置在烟道内。另外,系统中还有两级喷水减温器。蒸汽发生器的系统简图示于图 1 中。

显然,这是一个复杂换热器系统。为计算其动态特性,我们参考了国内外的文献,建立了自己的一套复杂换热器的算法及软件包^[1]。本文将介绍这方面的情况。

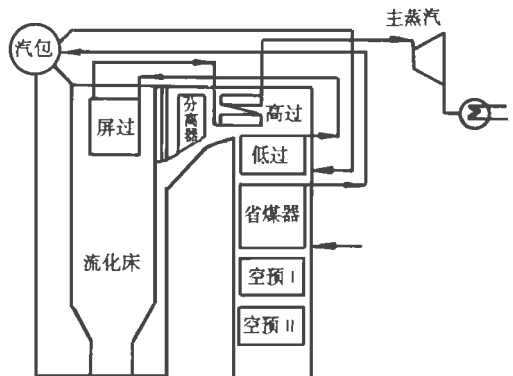


图 1 220 t/h 循环流化床锅炉蒸汽发生器系统

1 换热器的数学模型及求解

1.1 管段模型

图 2 为一个双流换热器微元管段的热平衡示意图,冷工质在管内流动,其热、冷工质及管壁的能量平衡方程可表达为^[2]

$$T_1 \frac{\partial t_1}{\partial f} + X_1 \frac{\partial t_1}{\partial l} + t_1 = t_w$$

$$T_2 \frac{\partial t_2}{\partial f} + X_2 \frac{\partial t_2}{\partial l} + t_2 = t_w$$

$$T_w \frac{\partial t_w}{\partial f} + t_w = \frac{T_1 U_1 t_1 + T_2 U_2 t_2}{T_1 U_1 + T_2 U_2}$$

其中:

$$T_i = \frac{d C_i A_i}{T_i U_i} \quad X_i = \frac{C_i G}{T_i U_i}$$

$$T_w = \frac{d_w C_w A_w}{T_1 U_1 + T_2 U_2} \quad (i = 1, 2)$$

t -温度, f -时间, l -管段度, T -换热系数, U -管段周长, G -工质流量, d -密度, C -比热, A -截面积; 下标 1-热侧工质, 2-热侧工质, w -管壁

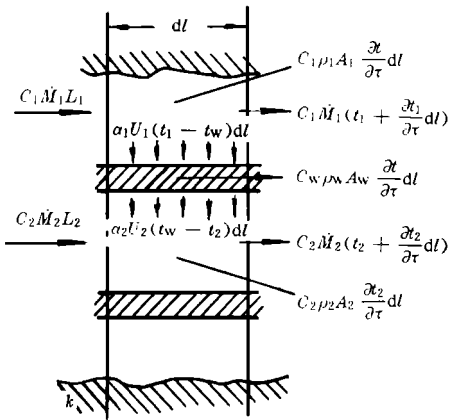


图 2 双流换热器微元管段热平衡示意图

此外,在每个管段上,还有冷、热流体的质量及动量守恒方程,因篇幅关系,就不一一列出。在每个管段上计有七个非线性偏微分方程。

1.2 近似解析解方法

在时间及空间的解平面上,可以按时间及空间步长将解平面划分为一系列的网格。近似解析解方法的思想就是在每个时间及空间的局部网格上将前

述偏微分方程组线性化,得到常系数偏微分方程。结果,尽管在整个解平面上方程组依然为非线性,但它在局部网格上已经线性化,因此有可能得到解析解。图 3 所示的就是时间及空间平面上的一个典型局部网格。 $Z(l, f)$ 代表任何与时间及空间相关的变量^[3]。在获得解析解的表达式后,如果已知管段各处参数的初始条件及管段入口参数随时间变化的边界条件,就可很方便地求解出下一时刻管段出口的参数 $Z(l_{0+} \Delta l, f_{0+} \Delta f)$ 。

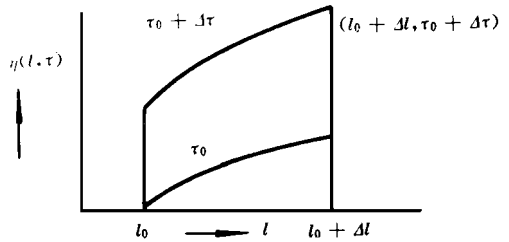


图 3 时间与空间平面上的典型局部网格

假定质量流量及压力在考虑的网络内线性分布时,可以得到管段出口的流量及压力的计算公式:

$$G(l_{0+} \Delta l, f_{0+} \Delta f) = G(l_0, f_0 \Delta f) + \Delta l \left[\frac{A}{V^2} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial V}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial f} \right) \right]_M$$

$$P(l_{0+} \Delta l, f_{0+} \Delta f) = P(l_0, f_{0+} \Delta f) + \Delta l \left[\frac{- \left| \frac{dP}{dl} \right|_R - \frac{1}{A} \left(\frac{\partial G}{\partial f} + 2k \frac{\partial G}{\partial f} + \frac{G}{A} \frac{\partial V}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial f} \right)}{1 + \frac{G}{A} \frac{\partial V}{\partial P}} \right]_M$$

式中, P -压力, V -比容, k -工质流速,下标 M 表示括号中所有的状态参量及物性值均取网格内平均值,下标 R 代表摩擦阻力。

壁温的计算公式为:

$$t_w(l_m, f) = t_w(l_m, f_0) + T_w k (1 - \exp(-f/T_w))$$

式中, k 为壁温暂态函数,求取办法见文献^[1-3]

从前面冷、热工质的能量平衡方程看,它们的方程形式是相同的,而且彼此间是通过壁温耦合的。因此,方程解的表达可以写作统一形式。将壁温的表达式代入参量方程,借助于双重拉氏变换及反变换,并经过移项整理等,便可得到考虑网格内冷、热工质能量平衡方程的统一解析表达式:

$$Z(l, f) = Z(l_M, f_0) e^{-\frac{l}{T}} \{ 1 - (f_s) \} + \{ Z(l_0, f_0) + Z(l_0, f_M) f_s \} e^{-\frac{l}{X}} (f_s) \\ + B \{ D - C + t_w(l_M, f_0) \} \{ 1 - e^{-\frac{l}{T}} - e^{-\frac{l}{X}} (1 - e^{-\frac{l}{T} + \frac{l}{X}}) (f_s) \} \\ + \frac{B T_w k}{T_w} \left[\frac{T}{T_w} (1 - e^{-\frac{l}{T}}) - (1 - e^{-\frac{l}{T_w}}) - e^{-\frac{l}{X}} \left\{ \frac{T}{T_w} (1 - e^{-\frac{l}{T} + \frac{l}{X}}) - (1 - e^{-\frac{l}{T_w} + \frac{l}{X}}) \right\} \right] (f_s)$$

式中, B, C, D 均为系数, 求取办法见文献 [1~3], (f_s) 是一个值, 分别为 0 和 1 的分段函数。其物理意义是, 在任意时刻, 任意位置, 如果温度波的前沿尚未传到此位置, 则其为 0, 反之则为 1 Z 是一个通用形式的变量, 在工质为单相时, 它代表温度; 双相时, 代表工质的干度。

在来流条件和初始时刻参数已知时, 应用上述质量、压力和温度 (干度) 计算公式, 就可以确定出工质的出口参数。值得说明的是, 由于采用了近似解析解, 运算速度可以大大提高, 同时, 还避免了数值解法中常见的不收敛问题, 使得时间及空间步长的选取有较大的自由度。

1.3 解耦算法

在计算顺流布置的换热器动态特性时, 由于冷、热工质的入口位置相同且入口参数已知, 直接应用 1.2 中的近似解析解, 不需迭代就可求得换热器出口处的参数。然而当换热器为逆流或混合形式布置时, 冷、热工质的入口位置不再一致, 这时如果要确定出口处的参数, 则不得不进行迭代计算。对复杂换热器系统而言, 迭代意味着大量的计算机内存需求和计算时间耗费。

冷却周期的耦合可以通过管壁温度, 也可通过管壁的吸、放热量进行, 本文采用了相对准确的后者。图 4 是解耦算法的图解示意图。图的左半部分代表加热周期, 在计算热工质向管壁放热时, 考虑了管壁同时也在向冷工质放热, 其数值采用上一个冷却周期时管壁的放热值。这样做的目的当然是为了使计算更符合实际情况。图的右半部分是冷却周期, 出于同样考虑, 在计算管壁向冷工质放热时, 考虑了管壁也在接受自热工质的加热量, 其数值等于上一个加热周期热工质向管壁的放热量。

解耦算法的采用使得冷、热工质的计算完全分离。这样, 无论换热器的结构多复杂, 冷热工质的入口是否一致, 热平衡计算均无需迭代。这为复杂换热器系统计算的模块创造了条件。应用前述压力、流量及温度的算法, 可以编制出加热周期和冷却周期的通用标准计算模块。通过交替调用加热和冷却周期模块, 就可以进行单个换热器的动态计算。

2 初步模块化的复杂换热器系统的动态特性计算

图 1 所示的循环流化床蒸汽发生器系统是一个复杂换热器系统。如果用常规方法计算其动态特性, 编程难度及工作量都非常大。然而在采用本文介绍方法后, 整个系统的动态特性计算就简单多了。除汽包、喷水减温器等的计算是专用模块外, 其余管式换热器的计算均可采用标准模块。例如, 计算冷却周期时, 只需按冷侧工质流动的实际顺序 (如图中示), 用各个换热器的实际参数和上个周期热工质给管壁的传热量依次调用标准模块即可算出本时间步长内的新参数; 热侧工质参数的计算则是在加热周期中, 按照热工质的流动顺序及实际入口参数, 使用上一周期冷侧工质的吸热量进行的。这样, 研究者需要做的只是提供各换热器的结构参数和彼此间的接口情况, 而不再象以往那样要做大量的细节工作。理论上讲, 本方法可以适用于任意复杂的换热器系统的动态特性计算。图 5 所示为 220 t/h 循环流化床锅炉蒸

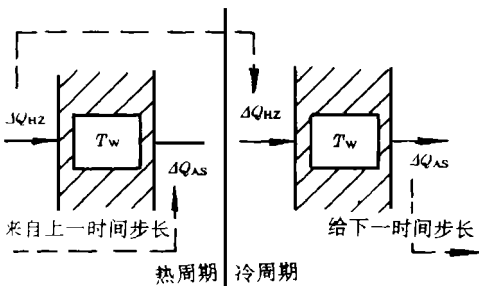


图 4 解耦算法图解示意图

如何才能避免繁杂的迭代计算呢? 文献 [2, 3] 提出了一个巧妙的方法: 它把连续换热的管式换热器看作为循环周期无限短的回转式换热器。这样, 连续的换热过程可以分解为两个交替进行的子过程, 即热工质向管壁放热和管壁向冷工质放热过程, 本文中将其分别称为加热周期和冷却周期。加热周期和

汽发生器系统动态计算程序框图

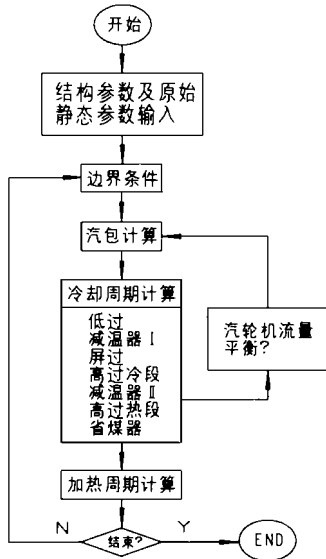


图 5 220 t/h 循环流化床锅炉蒸汽发生器系统动态计算框图

3 仿真示例

图 6 和图 7 分别为汽轮机主汽阀开度阶跃增加 10% 和锅炉给煤量阶跃减少 10% 时, 汽包压力及主蒸气参数的动态变化过程。仿真实践表明, 应用上述近似解析解和解耦算法以及模块化编程方法, 描述象 220 t/h 流化床锅炉这样复杂的蒸汽发生器系统是非常方便和简捷的。

4 结束语

本文在近似解析解和解耦算法的基础上, 建立一套复杂换热器系统动态特性计算的方法, 该方法的主要优点可归纳如下:

- (1) 速度快, 主要归功于解析解的应用及解耦算法避免了迭代。
- (2) 收敛性好, 解析解的采用大大减弱了计算对时间及空间步长的敏感度。

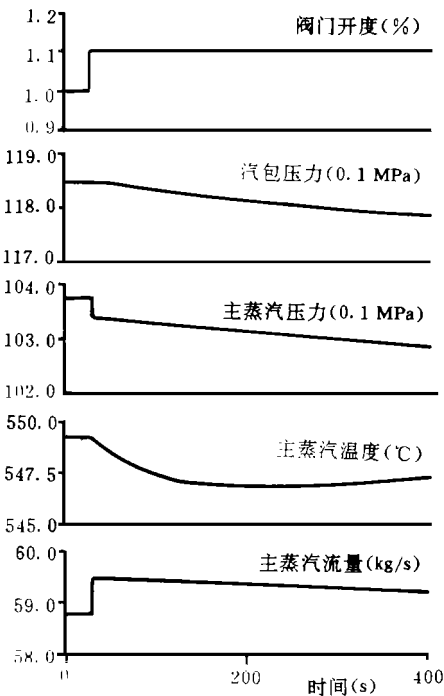


图 6 汽轮机主汽阀突开 10% 时, 主蒸汽参数的动态变化过程

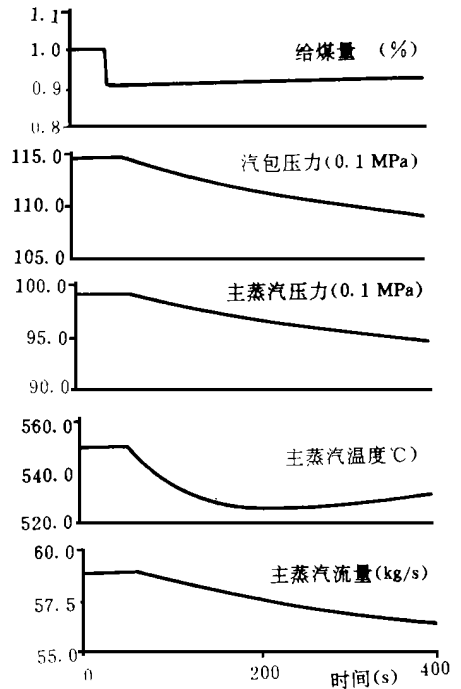


图 7 锅炉给煤量突减 10% 时, 主蒸汽参数的动态变化过程

(3)应用面广,可以方便地应用于任意复杂的换热器系统

(4)应用简单、方便,模块化的方式使编程简单,而且规范化。

此方法已成功地在清华大学的热力系统图形化建模系统中。

参 考 文 献

- 1 李 政. 循环流化床锅炉通用整体数学模型、仿真与性能预测. 清华大学博士学位论文, 1994
- 2 Dolezal R. Simulation of large state variations in steam

- power plants. Lecture notes in engineering, Edited by C. A. Brebbia and S. A. Orszag, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo 1987
- 3 Rolf A. Simulation des nichtlinearen, dynamischen Verhaltens von warmetauschem sowie ihrer komplexen schaltungen im kraftwerksbau mit einem semianalytischen berechnungsverfahren. Fortschritt-berichte V DIZ eitschriften, Reihd 6 Nr. 141. VDI-Verlag GmbH Dusseldorf, 1984

(显辉 编辑)

作者简介 李 政 清华大学热能系副教授,分别于 1986年 9月和 1988年 11月本科和硕士毕业于清华大学热能系,其后曾在哈尔滨汽轮机厂设计研究所自动化科工作三年,任助理工程师和工程师,1994年底于清华大学热能系获工学博士学位后留校任教,现主要从事循环流化床以及其它热力设备的数学模型与仿真研究工作。(100084 北京 清华大学热能工程系)

联合循环的高效汽轮机

据“Gas Turbine World”1996年 5-6月号报道,直到现在,为使联合循环热效率突破 60%的努力主要集中在燃机更高的燃烧温度。但是,一些动力装置工程技术人员的探索表明,完善汽轮机设计,改进汽轮机性能同样是达到上述目标的一个有效途径,并不需要把涡轮进口温度提高到超过 1427°C。

鉴于汽轮机排汽的流量远比烧煤系统的大,所以研制更长的末级叶片对于联合循环尤为重要。尤其是在 F 系统中,需研制用于 50 Hz 3600 r/min 运行的 40 英寸 (1016 mm) 叶片和用于 3000 r/min 运行的 42 英寸 (1067 mm) 叶片。今后几年将继续研制新的甚至更长的钛制末级叶片。

移植先进的航空技术,采用先进的可控涡设计概念,优化涡轮设计,使之更高效、可靠和费用有效。使用先进的软件把二次流动损失减到最小。

采用带复合倾斜(弯扭联合)的喷嘴叶片,改进径向流动分布,以便优化总的级效率;并采用新的叶尖密封结构,减少顶部漏泄损失。使用三维软件分析改进叶片性能。

低压涡轮前几级采用整体围带叶片设计,可使级组效率增加 1%—1.5%。在静叶和动叶上应用双带级间密封,使漏泄损失减到最小。这种方法可使效率提高约 0.5%。

(思娟 供稿)

enhanced circulating rate of particles and the decrease in particle diameter will be beneficial to the gas/solid interphase heat transfer. Also obtained is a corresponding dimensionless equation. **Key words** circulating fluidized bed, gas phase, solid phase, heat transfer

隔膜式气压给水设备的节能研究 = **A Study on the Energy-saving of Diaphragm Air-pressure Water Supply Installation** [刊, 中] / Wu Xifu (Zhejiang Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 289- 291

On the basis of energy consumption test of a diaphragm variable-pressure and constant-pressure water supply installation energy-saving analyses are performed with respect to the air feeding of air compressors, the utilization of exhaust gas, the selection of water pumps and the number of times of water pump startups. Energy-saving measures are proposed. All the above can serve as a guide for design and operation management. **Key words** diaphragm type, water supply installation, energy-saving

复杂换热器系统的动态特性计算 = **Calculation of the Dynamic Characteristics of a Complex Heat Exchanger System** [刊, 中] / Li Zheng, Sun Xin, Ni Weidou (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 292- 296

This paper deals with a method for calculating the dynamic characteristics of a complex heat exchanger system, which was developed during the modelling and simulation of a 220 t/h home-made CFB boiler. Based on an approximate analytical solution the said method significantly enhances the calculation speed and solves the problem of non-convergence during calculations. A decoupling method has been adopted, which separates the balance calculation of cold and hot working mediums, making it possible to completely avoid iterative computations. By combining the approximate analytical solutions and the decoupling calculation method established is a set of generalized method for calculating the dynamic behavior of heat exchanger systems, thereby providing a general-purpose, high-efficient and simple calculation method for complex heat exchangers. **Key words** natural circulation boiler, heat exchanger, dynamic characteristics, calculation

再热抽汽式汽轮机中压缸末级叶片压差保护控制 = **Differential-pressure Security Control of the Last-stage Blades of a Reheat Extraction Steam Turbine Intermediate-pressure Cylinder** [刊, 中] / Yu Daren, Wang Xitian, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 297- 299

Discussed in this paper is the differential-pressure security control of the last-stage blades of a reheat extraction steam turbine intermediate-pressure cylinder. Through an analysis of the simulation results of a mathematical model basic measures for the blade differential-pressure security control have been summed up. **Key words** reheat extraction steam turbine, blade, differential-pressure security control

螺旋板稳定性分析和计算 = **The Analysis and Calculation of a Spiral Plate Stability** [刊, 中] / Zhou Chuanyue, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4) - 300- 303

Based on a classical linear elastic stability theory the authors have set up a mechanics model for stability analysis of a spacing column-supported spiral plate. A theoretical formula for calculating the theoretical pressure of a critical pressure has been derived with some engineering calculation examples being presented. Some conclusions helpful for performing engineering design are also proposed. **Key words** spiral plate, stability, critical pressure

综合似然率 (GLR) 试验在传感器故障检测中的应用 = **Application of a Generalized Likelihood Ratio (GLR) Test in Sensor Failure Detection** [刊, 中] / Huang Shanheng, Zhu Qiaobin, et al (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 304- 306