

锅炉单相受热面动、静态特性通用计算方法

(东北电力学院) 王广军 王巍然 吴景兴
(沈阳电力高等专科学校) 马金凤

[摘要] 在流体微元追踪计算方法的基础上,提出了锅炉单相受热面热力过程动、静态特性的通用计算方法。利用该算法模型既可以进行锅炉单相受热面的动态过程分析,又能够完成锅炉单相受热面热力特性的静态校核计算,并能十分方便地确定出锅炉单相受热面热力参数的动、静态分布情况。

关键词 锅炉 动态特性 静态特性 计算方法

中图分类号: TK222

1 前言

利用数学模型和系统仿真技术对锅炉等热力设备的动、静态特性进行深入分析,是实现火电机组及核电站蒸汽发生器等重大热力系统的优化设计、运行和控制的重要前提和基础。

本文基于流体微元追踪计算方法^[1,2],提出了锅炉单相受热面热力过程动、静态特性的通用计算模型。利用该模型,既可以进行单相受热面的静态变工况分析,也可以确定出对象的动态特性,同时还可以十分方便地确定出锅炉单相受热面热力参数的动、静态分布情况。

2 建模思想和基本方程

将锅炉的每级单相受热面简化为一根无轴向换热的受热管,如图 1 所示。管内工质温度及密度为 $t(f, z)$ 和 $d(f, z)$,流速为 $w(f, z)$;管壁金属温度为 $t_s(f, z)$;管外烟气温度为 $\theta(f, z)$;单位长度管壁吸收烟气的对流放热量和外部烟气辐射热分别为 $q_w(f, z)$ 和 $q_r(f, z)$;单位长度管内壁对工质的放热量为 $q_n(f, z)$,管外烟气流量为 $G(f)$,烟气、金属及工质的比热容分别为 c_w, c_s 和 c_p ,工质的通流面积为 F ,单位

长度管壁金属质量及内外侧换热面积分别为 m_s, f_n 和 f_w 。这里的 f 和 z 分别代表系统的时间坐标和空间长度坐标。

在 f 时刻,给定某一时间步长 Δf ,并在 Δf 内对受热面入口处 ($z = z_1 = 0$) 工质微元 1 进行追踪观察。该流体微元在 $f + \Delta f$ 时刻将到达 $z = z_2 = \Delta f \cdot w(f, z_1)$ 处。同理, f 时刻处于 z_2 位置的流体微元 2 在 $f + \Delta f$ 时刻将到达 $z = z_3 = z_2 + \Delta f \cdot w(f, z_2)$ 处。

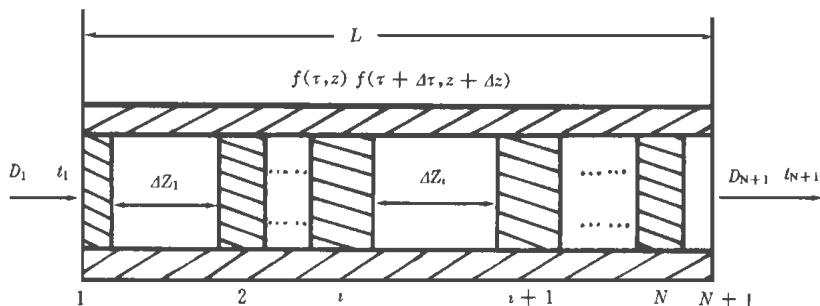


图 1 单相受热面通用计算物理模型

这样可由下式递推出在 f 时刻被同时追踪的流体微元在 $f + \Delta f$ 时刻所处的空间位置:

$$z_k = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta z_i \quad (k = 2, 3, \dots, N+1)$$

其中

$$\Delta z_i = \Delta f \cdot w(f, z_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

当 Δf 取定时,受热面所划分的子环节数 N 及各子环节所对应的金属管长 Δz_i 均为工质流速的函数,即 $N(f) = N[\Delta f, w(f, z)]$,对于给定管长 L 的受热面,显然 N 应满足

$$\left\{ \begin{array}{l} z_N < L \\ z_{N+1} \geq L \end{array} \right.$$

由于受热面压力——流量通道的变化过程要比其温度——焓通道的变化过程快得多,故在分析受热面的温度特性时,可以认为环节中的储质及压

收稿日期 1996-10-24 收修改稿 1997-10-28

本文联系人 王广军 男 1964年生 副教授 132012 吉林市长春路 169号 东北电力学院动力系

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力传递过程是瞬间完成的,此时,受热面中的每一个被追踪的流体微元,在其流动及吸热过程中均应满足以下几个基本的物理方程:

$$\begin{cases} Fd c_p \frac{Df}{Df} = q_n(f, z) & (1) \\ Fd(f, z) w(f, z) = D(f) & (2) \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} + ad(f, z) w^2(f, z) = 0 & (3) \\ d(f, z) = d[d(f, z), t(f, z)] & (4) \end{cases}$$

上式中的 $D(f)$ 为 f 时刻受热面内的工质流量; D/Df 为流体参数的随体导数; a 阻力系数。

受热面金属温度及管外烟气温度的瞬态分布可由下列关系式确定:

$$m_j c_j \frac{\partial t_j}{\partial f} = q_i(f, z) + q_w(f, z) - q_n(f, z) \quad (5)$$

$$Gc_p \frac{\partial \theta(f, z)}{\partial z} = q_w(f, z) \quad (6)$$

$$q_n(f, z) = T_n f_n [t_j(f, z) - t(f, z)] \quad (7)$$

$$q_w(f, z) = T_w f_w [\theta(f, z) - t_j(f, z)] \quad (8)$$

其中的 T_n 和 T_w 分别为受热管内、外两侧的对流换热系数

3 管内工质温度分布特性的通用计算方法

由式 (1) 和式 (7) 有

$$T(f, z) \frac{Df(f, z)}{Df} = [t_j(f, z) - t(f, z)] \quad (9)$$

其中的 $T(f, z) = Fd c_p / T_n f_n$, 为工质温度随流动时间 f 变化的时间常数。

记 $f(f, z) = f_k(f)$, $f(f + \Delta f, z + \Delta z) = f_{k+1}(f + \Delta f)$, $\Delta z = \Delta f w(f, z)$, 对式 (9) 中流体微元的温度在 $f \sim f + \Delta f$ 内追踪积分, 并认为 $T(f, z)$ 及 $t_j(f, z)$ 在 Δf 内不变, 有

$$t_{k+1}(f + \Delta f) = t_{jk}(f) + [t_k(f) - t_{jk}(f)] e^{-\Delta f / T_k(f)} \quad (K = 1, 2, \dots, N - 1) \quad (10)$$

对于管段出口侧的最后一段子环节, 由于工质在其中的流动时间 Δf_N 一般小于所采用的积分时间步长 Δf , 故应予以修正

令 $\Delta f = \Delta f - \Delta f_N$, 可以认为在 f 时刻位于 $z_N - \Delta f w_N(f)$ 处的流体微元将在 $f + \Delta f$ 时刻达到环节出口。设该流体微元的温度为 $t'(f)$, 则由式 (10) 知 $t'(f)$ 应近似满足

$$t'(f) = t_N(f) + [t_N(f + \Delta f') - t_N(f)] e^{\Delta f / T_N(f)}$$

从而可以求出 $f + \Delta f$ 时刻受热面出口工质温度

$$t_{N+1}(f + \Delta f) = t_N(f) + [t_N(f + \Delta f') - t_N(f)] e^{-(\Delta f - \Delta f_N) / T_N(f)} \quad (11)$$

其中的 $t_N(f + \Delta f')$ 按下式确定

$$t_N(f + \Delta f') = t_N(f) + \frac{\Delta f'}{\Delta f} [t_N(f + \Delta f) - t_N(f)]$$

为简化计算, 可近似取

$$e^{-\Delta f / T_k(f)} = 1 - \Delta f / T_k(f)$$

考虑到 $D_k(f) = Fd_k(f) k_k(f)$, 并记 $F_{nk} = \Delta z_k \cdot f_n$ 及 $q_{nk}(f) = F_{nk} T_n [t_k(f) - t_k(f)]$, 则可将式 (10) 改写为

$$t_{k+1}(f + \Delta f) = t_k(f) + q_{nk}(f) / c_p D_k(f) \quad (12)$$

式 (10) 及式 (12) 与常规的工质能量平衡方程间的差别在于, 环节出口处的位置 z_{k+1} 为变量, 即使 $t_k(f)$ 及 $q_{nk}(f)$ 恒定, 只要 $w_k(f)$ 或 $D_k(f)$ 非定常, 虽然 $t_{k+1}(f + \Delta f)$ 保持不变, 但对于 z_k 之后的任一固定的空间位置 z 处的工质温度 $t(f, z)$ 仍为 f 的函数。对于定常系统, 上述差别则不复存在, 即式 (10) 和式 (12) 变为静态能量平衡关系式

4 管壁温度及烟气温度的瞬态分布

将式 (7) (8) 代入式 (5), 并将 $t_{jk}(f)$ 在 $f \sim f + \Delta f$ 区间对 f 积分, 近似得

$$t_{jk}(f + \Delta f) = [t_{jk}(f) - B_k(f)] e^{-(H \Delta f) / T_k(f)} + B_k(f) \quad (13)$$

上式中 $T_{nk} = m_j c_j / a_n f_n$, $T_{wk} = m_j c_j / a_w f_w$, 分别为管内侧和外侧换热时间常数; $H = T_{nk} / T_{wk}$, 为受热面两侧换热时间常数之比; $\theta_i(f)$ 为 z_k 处的烟气温度;

$$B_k(f) = \frac{1}{1+H} [H \theta_i(f) + t_k(f) + q_i(f) / T_w f_w]$$

显然, 式 (13) 中等号右侧第一项 t_{jk} 的动态分量, 记为 $A_k(f)$; 第二项 $B_k(f)$ 为 t_{jk} 的静态分量。对于受热面的静态变工况计算, 为加快运算进程, 可直接取 $t_{jk} = B_k(f)$ 。

记烟气入口处的温度为 $\theta_1(f)$, 则沿烟气流程有递推计算公式

$$\theta_{i+1}(f) = \theta_i(f) - \frac{T_w F_w}{Gc_p} [\theta_i(f) - t_{jk}(f)] \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

$$\text{上式中 } F_w = \begin{cases} \Delta z_k f_w & (\text{顺流换热}) \\ \Delta z_{k-1} f_w & (\text{逆流换热}) \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} i & (\text{顺流换热}) \\ N - i + 2 & (\text{逆流换热}) \end{cases}$$

记 $X = \max [|t_k(f) - t_k(f + \Delta f)|]_{(k=1,2,\dots,N+1)}$, 给定某一误差 (或动态偏差) 控制指标 X_0 , 在静态计算时, 若 $X \leq X_0$, 表明静态迭代过程可以宣告结束; 在动态计算时, $X \leq X_0$ 则意味着环节已足够接近新的平衡工作点, 即可以认为环节的过渡过程结束。至于在不同应用场合下所要求的计算精度和计算速度, 可通过改变积分时间步长 Δf 的大小予以调节。

5 仿真实例

图 2~ 图 5 给出了某台 670 t/h 锅炉高温级过

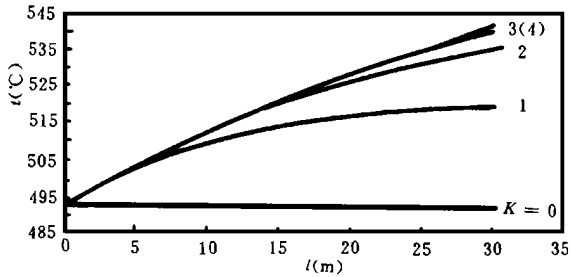


图 2 工质温度静态分布计算过程 ($\Delta f = 0.1s$)

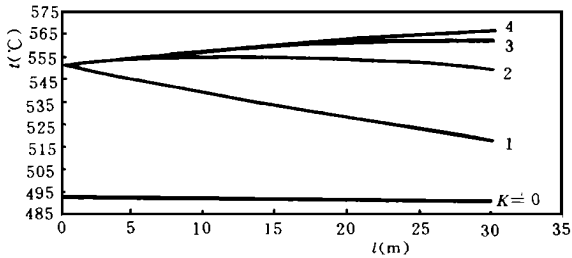


图 4 入口温度阶跃加大时出口温度的响应特性
1 - $\Delta f = 0.1s$; 2 - $\Delta f = 1s$; 3 - $\Delta f = 2.5s$

6 结束语

基于本文提出的单相受热面通用数值计算方法, 可将整个锅炉系统中的单相受热环节的动、静态过程分析由一个通用的一体化计算模块完成。这对于目前蓬勃发展着的电站运行过程仿真研究以及发电机组设计阶段的性能分析等均有一定的实用价

热器受热面动、静态计算的部分结果。在计算过程中取锅炉的额定工况^[3]为计算初始工况。图 2 为过热汽温沿受热管分布情况的迭代过程。其中的 k 为迭代次数。当 $k = 4$ 时, $X \leq 0.05^\circ C$, 图 3 为金属温度静态分布的迭代过程。在迭代开始之前 ($k = 0$), 认为沿管长方向金属温度不变且与入口工质温度相同。图 4 给出了工质入口温度阶跃上升 $1^\circ C$ 后, 受热面出口汽温的响应特性, 图 5 为在工质入口温度阶跃上升后的不同时刻, 工质温度沿流动方向的分布情况。

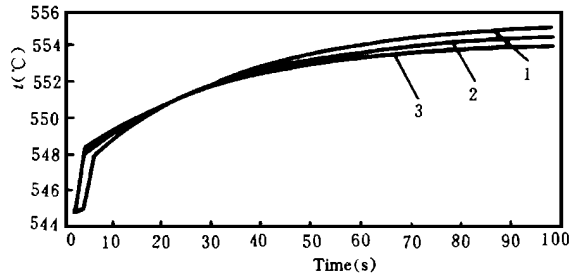


图 3 金属温度静态分布计算过程 ($\Delta f = 0.1s$)

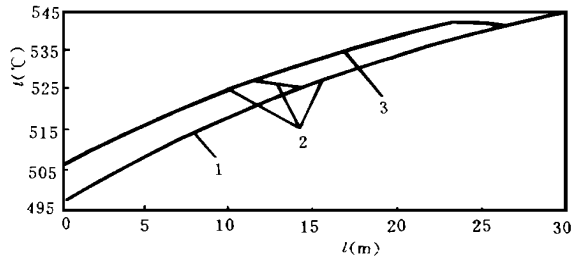


图 5 入口温度阶跃加大后工质温度的瞬态分布情况
1 - $f = 0s$; 2 - $f = 1.0s$; 3 - $f = 2.0s$

值

参考文献

- 1 王广军. 蒸汽发生系统通用动力学模型, 东南大学博士学位论文, 1995
- 2 王广军, 章臣樾. 单相受热面通用动态计算模型, 中国电机工程学报, 1993, 4
- 3 哈尔滨锅炉厂. HG-670/140-9 锅炉机组说明书, 1979

(复 编)

基于信息和知识集成的汽轮机智能诊断 = Intelligent Diagnosis of Steam Turbines Based on Information and Knowledge Integration [刊,中] / Ruan Yue, Sun Guobin, Xu Shichang (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). 280~ 281, 284

After an analysis of the types of symptoms in a steam turbine failure intelligent diagnostic system this paper presents the strategies of diagnostic information integration and a model for diagnostic knowledge integration. Expounded is a mixed reasoning method based on case examples, rules and models. Key words information integration, knowledge integration, intelligent diagnosis, steam turbine

中央空调蓄冷系统运行优化控制模式 = Optimized Control Mode of a Central Air-conditioning Cold Storage System Operation [刊,中] / Yu Guangbao, Liu Zhenyan, et al (China National University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 282~ 284

The authors present a brief description of the current technical operation level in cold-storage air-conditioning cold discharge process along with an analysis of its deficiencies. With the aid of systemized knowledge proposed is a new mathematical model for an optimized operation. A method for problem solving and also optimized results are given and the economics of an optimized operation control mode is analyzed. On this basis a more detailed analytical study is conducted of the possible approaches for the further improvement and development of the operation optimized model. Key words cold storage air conditioning, cold discharge operation, optimized control, mode

燃气轮机发电机组注蒸汽后温控系统的适应性研究 = A Study of the Adaptability of the Temperature Control system after Gas Turbine Generator Steam Injection [刊,中] / Li Weishun, Lin Feng, Hou Yuhui (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 285~ 287

In connection with a practical machinery unit and through theoretical analysis and off-design condition calculation an analytical study is performed of the adaptability of the gas turbine temperature control system after steam injection. The study results show that following the steam injection the original temperature control system can not only ensure the reliable operation of the gas turbine, but can also contribute to the lengthening of the gas turbine life. Key words steam injection, temperature control system, overtemperature

锅炉单相受热面动态静态特性通用计算方法 = A General Calculation Method for Dynamic and Static Characteristics of Boiler Single-phase Heating Surfaces [刊,中] / Wang Guangjun, Wang Weiran, et al (North-east China Institute of Electrical Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 288~ 290

Based on a fluid microelement tracking calculation method the authors have come up with a general method for calculating the dynamic and static characteristics of a boiler single-phase heating surface thermodynamic process. With the help of this calculation model it is possible to not only analyze the dynamic process of the boiler single-phase heating surfaces but also perform the static verification computation of the said heating surface thermodynamic characteristics. In addition, it can also very conveniently determine the dynamic and static distribution status of the boiler single-phase heating surface thermodynamic parameters. Key words boiler, dynamic characteristics, static characteristics, calculation method

采暖锅炉计算机监控、管理系统 = A Computer-based Monitoring and Management System for Heating Boilers [刊,中] / Lu Zehua, Xu Xiangdong, Cao Renfeng, et al (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 291~ 294

The present monitoring system features a convenient quick-action operating platform and a fair man-ma-