

大型锅炉长期动态特性研究中的烟气计算模型

李运泽, 杨献勇

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 为了简便、准确、快速地解决大容量锅炉汽轮机组长期动态特性研究中的烟气放热计算问题, 本文针对现有仿真用烟气放热模型的主要不足, 由大容量锅炉热力计算的杜卜斯基-卜劳赫公式推导出新的仿真与动态特性分析用炉膛烟气放热模型; 并通过简要的分析、简化和推导, 得出了动态过程中各种锅炉换热面烟气出口温度和放热量计算方法, 这些烟气计算模型能够较为准确、简单地反映动态过程中高温烟气在大容量锅炉的炉膛和各烟道换热面的烟温及放热量的变化规律, 应用十分方便。最后将本文的烟气计算模型应用于某 600 MW 超临界机组的动态特性仿真, 仿真结果合理、正确。

关键词: 大容量锅炉; 长期动态特性; 仿真; 烟气计算模型

中图分类号: TM621 文献标识码: A

1 引言

锅炉汽轮机组的动态特性分析与仿真离不开锅炉的烟气放热量计算^[1~3]。目前烟气计算使用的炉膛模型有两种: 一种是文献[2~3]中介绍的基于四次方定律的四次方模型, 这种模型存在难以合理确定炉膛烟气代表温度, 计算结果也不能较为精确地反映炉膛放热量随燃料量变化的变化规律; 另一种是

基于前苏联锅炉热力计算标准中古尔维奇公式^[3]的非四次方模型, 这一模型能较为简便、准确地反映中小型锅炉炉膛出口烟温和放热量的变化规律, 但由于古尔维奇公式应用在大容量锅炉上会出现较大误差^[4~5], 因而在大容量锅炉动态特性分析和计算中采用这一模型会产生较大的误差。

文献[4~5]中研究表明大容量锅炉的炉膛尺寸较大, 炉膛内烟气温度分布的不均匀度加大, 在其炉膛出口烟温的热力计算中采用充分考虑上述因素并拟合了大量实际机组统计数据的杜卜斯基-卜劳赫公式较古尔维奇公式和四次方定律更为准确合理。因而推导出基于杜卜斯基-卜劳赫公式的仿真用炉膛烟气模型会提高大容量锅炉动态特性计算的精度。

本文在总结前人研究^[1~5]的基础上, 由大容量锅炉炉膛热力计算的新方法(杜卜斯基-卜劳赫公式^[4~5])推导出新的仿真与动态特性分析用炉膛烟气放热模型, 其仿真实验和分析表明这一新的非四次方模型能较为全面、合理地反映动态过程中大容量锅炉炉膛出口烟温与放热量的变化规律, 应用也十分简单。

收稿日期: 2002-03-20; 修订日期: 2002-06-02

作者简介: 李运泽(1972-), 男, 河北邢台人, 清华大学博士研究生。

参考文献:

- [1] BOSE J E, PARKER J D, MCQUISTON F C. Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump system[M]. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1985.
- [2] 柳晓雷, 王德林, 方肇洪. 竖直埋管地热换热器的传热模型与计算[J]. 建筑热能通风空调, 2001, 21(2): 1-3.
- [3] 崔萍, 刁乃仁, 方肇洪. 地热换热器间歇运行工况分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 16(1): 52-57.
- [4] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 竖直埋管地热换热器的稳态温度场分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1): 1-6.

- [5] ECKER E R G, DRAKE R M. Analysis of heat and mass transfer[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1972. 104-106.
- [6] ROHSENOW W M. Handbook of heat transfer[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1973.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [8] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [9] 钱滨江. 简明传热手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.
- [10] PHETTEPLACE G, SULLIVAN W. Performance of a hybrid ground-coupled heat pump system[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(1B): 763-770.

(何静芳 编辑)

2 机理分析与简化

虽然锅炉的动态过程包括几十甚至上百个快慢不一的储质及蓄热过程, 但整个机组的长期动态特性(long term dynamics)主要由变化比较缓慢的几个过程所决定^[1-3], 据此可对锅炉的烟气放热模型做如下分析和简化:

(1) 由于炉膛和烟道内烟气密度及温度变化的时间常数远小于工质侧水与水蒸气主要动态过程的时间常数, 故近似认为炉膛和烟道内烟气密度与温度变化可在瞬间内达到新的平衡状态。

(2) 近似认为省煤器只接受烟气的对流放热、水冷壁只接受烟气的辐射放热、过热器和再热器既接受烟气的辐射放热又接受其对流放热, 并假定各锅炉换热面受到的烟气辐射放热量均来自炉膛内的火焰中心, 且其占烟气总辐射放热量的份额不变。

3 炉膛的出口烟温与烟气的辐射放热量

记炉膛的烟气辐射放热参数:

$$k_f = \left[\frac{\alpha_1 \phi_a^2 A}{10800 \varphi V_{Cp}} \right]^{0.6} \quad (1)$$

式中: α_1 、 ϕ 分别为炉膛黑度和热有效系数, φ 、 V_{Cp} 分别为炉膛的保热系数及炉内烟气相对每 1 kg 燃料的平均比热容, A 为炉膛的水冷壁面积。由于动态过程中水冷壁面积 A 不变, 炉膛的黑度、热有效系数及保热系数的变化不大, 可近似忽略, 因此 k_f 的数值可近似从稳态数据求出。

根据在大容量锅炉热力计算的杜卜斯基-卜劳赫公式^[4-5]:

$$\frac{T_f}{T_a} = 1 - M \left[\frac{\alpha_1 \varphi T_a^2}{10800 q_f} \right] \quad (2)$$

式中: T_a 为绝热燃烧温度。记单位时间投入的燃烧量为 B , 燃烧器的相对高度及其向上的倾斜角度分别为 X_r 、 β , 式中水冷壁的面积热负荷:

$$q_f = \frac{\varphi B V_{Cp} T_a}{A} \quad (3)$$

由火焰中心相对位置决定的经验系数:

$$M = \alpha - b(X_r + 0.005\beta) \quad (4)$$

α 、 b 为文献[5]中给出的由燃料种类决定的常数。

得炉膛出口烟温:

$$T_f = T_a - k_f M \frac{T_a^{1.6}}{B^{0.6}} \quad (5)$$

此时烟气在炉膛的辐射放热量为:

$$Q_f = BV_{Cp}(T_a - T_f) = k_f V_{Cp} MB^{0.4} T_a^{1.6} \\ = k_f V_{Cp} [a - b(X_r + 0.05\beta_b)] B^{0.4} T_a^{1.6} \quad (6)$$

记换热面“ X ”的烟气辐射放热参数:

$$k_{grx} = \frac{Q_{grx0}}{M_0 B_0^{0.4} T_{a0}^{1.6}} \quad (7)$$

式中: Q_{grx0} 为稳定工况下锅炉换热面“ X ”受到的烟气辐射放热量, M_0 、 T_{a0} 、 B_0 稳定工况下炉膛的火焰中心系数、绝热燃烧温度及此时单位时间内投入燃烧的燃料量。

根据上文分析与简化中的第 2 条, 锅炉各换热面所受到的烟气辐射放热量为:

$$Q_{grx} = Q_{grx0} \frac{M}{M_0} \left(\frac{B}{B_0} \right)^{0.4} \left(\frac{T_a}{T_{a0}} \right)^{1.6} = k_{grx} MB^{0.4} T_a^{1.6} \quad (8)$$

式中: 烟气辐射放热参数 k_{grx} 可由式(7)获得。

4 对流换热面的出口烟温与换热量

以烟气进出口温度的平均值作为锅炉换热面“ X ”的烟气平均温度, 由上文分析与简化中的第 1、2 条得烟气对流放热的热平衡方程:

$$Q_{gxc} = \varphi B C_{Cp} (T_{gix} - T_{gox}) = k_{gxc} B^n \left(\frac{T_{gix} + T_{gox}}{2} - T_m \right) \quad (9)$$

式中: T_{gix} 、 T_{gox} 、 T_m 分别为各烟气放热面进出口处的绝对温度和金属的平均绝对温度; φ 为烟道的保热系数; 对于顺列管束 $n = 0.65$, 否则 $n = 0.6$; 烟气对流放热参数 k_{gxc} 可由稳态数据求得。

对应的出口烟温:

$$T_{gox} = \frac{(\varphi B V_{Cp} - 0.5 k_{gxc} B^n) T_{gix} + k_{gxc} B^n T_m}{\varphi B V_{Cp} + 0.5 k_{gxc} B^n} \quad (10)$$

5 应用示例

仿真实验表明: 应用本文建立的烟气计算模型可以满足燃料量、燃烧器倾斜角度变化时各种大型锅炉汽轮机组的动态特性分析与仿真的需要, 模型

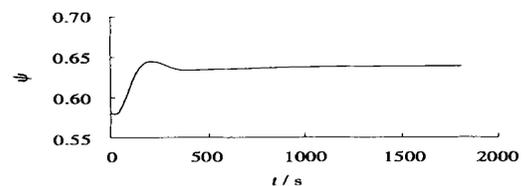


图 1 水冷壁容积储水率变化

简单、结果合理、编程容易。这里仅以额定工况下某 600 MW 超临界机组锅炉的燃烧器倾斜角度突然向上增大 20° 对汽水系统的作用和影响为例进行研究说明。主要仿真结果见图 1~图 6。

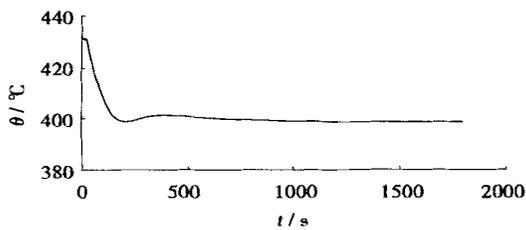


图 2 水冷壁出口汽温变化

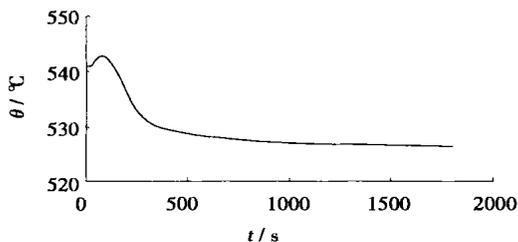


图 3 新蒸汽温度变化

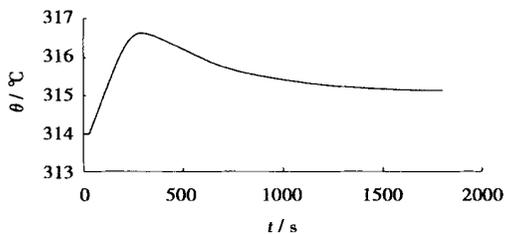


图 4 省煤器出口水温变化

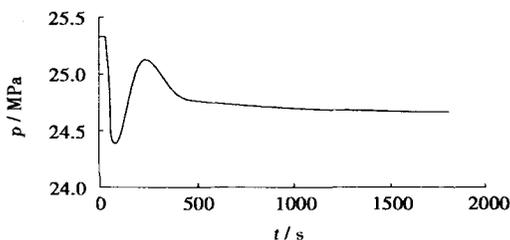


图 5 新蒸汽压力变化

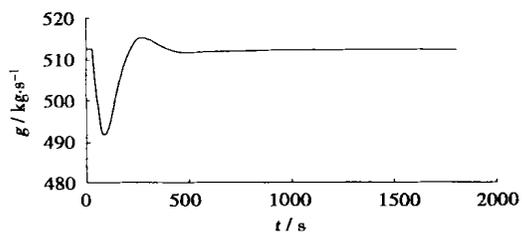


图 6 新蒸流量变化

燃烧器摆角突然向上倾斜 20° 后, 烟气的辐射放热量减小、对流放热量增大, 水冷壁的储水率(热水段体积与水冷壁水容积之比)随之增加(见图 1)、水冷壁出口汽温随之减小(见图 2); 新蒸汽温度先随炉膛出口烟温的增大而略有增大, 而后受水冷壁出口汽温随之减小和新蒸汽流量反弹的影响而逐渐减小至一个低于初始值的稳定值(见图 3); 省煤器出口水温随其烟气侧进口烟温的变化呈现出先增加后减小的趋势, 最后稳定在一个高于初始值的稳定值(见图 4); 新蒸汽压力在水冷壁烟气放热量及水冷壁进出口工质温度的综合作用下先出现一个向下的波谷, 而后又较快地回升, 最后随新蒸汽温度的减小而逐渐降低至一个低于初始值的稳定值(见图 5); 新蒸汽流量随其压力的变化先快速下降, 后快速攀升至高于初始值的水平, 最后在其压力与温度的综合作用下降低至其初始值(见图 6)。仿真结果表明应用本文烟气模型的锅炉动态特性计算结果是合理的。

6 结 论

通过简要的机理分析和简化, 由大容量锅炉炉膛热力计算的杜卜斯基-卜劳赫公式推导出新的仿真与动态特性分析用炉膛烟气放热模型, 并给出了炉膛和烟道内各种换热面出口烟温与烟气放热量简化计算模型。这些烟气侧数学模型能较为合理、全面、准确的反映动态过程中大容量锅炉烟气侧烟温与放热量的变化规律, 应用也十分简单、方便。本文的研究为包括超临界机组的容量锅炉汽轮机的长期动态特性分析与仿真提供了更加简便、准确的烟气计算模型。

参考文献:

- [1] DIECK-ASSAD G. Development of a state space boiler model for process optimization[J] . *Simulation*, 1990, 55(4): 201-203.
- [2] ORDYS A. Modelling and simulation of power generation plants[M] . London: Springer-Verlag London Limited, 1994.
- [3] 章臣樾. 锅炉的动态特性及其数学模型[M] . 北京: 水利电力出版社, 1987. 81-112.
- [4] 秦裕琨. 炉内传热[M] . 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [5] 樊泉桂. 亚临界与超临界参数锅炉[M] . 北京: 中国电力出版社 2000.

(何静芳 编辑)

neering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2003, 18(2). 163—165

A numerical simulation was conducted of the particle movement in a fluidized bed with two-dimensional non-uniformly distributed air. In addition to dealing with a gas-phase field by the use of Euler method a Lagrangian method is employed to treat a discrete particle field, directly keeping track of each particle in the particle field. The results of simulation indicate that there exists in the fluidized bed with non-uniformly distributed air an inner circulation movement of the particles. Hence, the mixing characteristics of the particles in the fluidized bed under discussion are superior to those in a conventional fluidized bed with uniformly distributed air. **Key words:** non-uniformly distributed air, fluidized bed, discrete element method

地源热泵竖直埋管的有限长线热源模型 = A Model of Finite-length Linear Heat-source for the Vertical Embedded Pipe of a Ground-source Heat Pump [刊, 汉] /ZENG He-yi, DIAO Nai-ren, FANG Zhao-hong (Research Institute of Ground-source Heat Pumps under the Shandong Institute of Architectural Engineering, Jinan, China, Post Code: 250014) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2003, 18(2). 166—169

Analyses and discussions were conducted of a non-steady heat transfer model for the vertical embedded pipe of a geothermal heat exchanger. With the use of a virtual heat source and Green function method obtained is an analytical solution expression for the non-steady temperature field generated by a finite-length linear heat source in semi-infinite large media. By way of comparison with a steady-state temperature field solution discussed is the time required for the temperature field to attain a nominal "steady state". Meanwhile, an analysis is performed of the temperature field when it has reached a steady state. In this connection a mistake that appeared in current textbooks was indicated. Two representative steady-state borehole wall temperatures, i. e., the temperature at the middle of the borehole and the integral mean temperature along the borehole, are defined. A comparison of the difference between these two temperatures has led to a simplified calculation formula, suitable for engineering applications. On the basis of the above analyses discussed further is the impact of the annual imbalance between heating and cooling loads of geothermal heat exchangers on their long-term performance. **Key words:** ground-source heat pump, geothermal heat exchanger, heat conduction, heat transfer model

大型锅炉长期动态特性研究中的烟气计算模型 = Flue-gas Calculation Model Used in the Study of Long-term Dynamic Characteristics of a Large-sized Boiler [刊, 汉] /LI Yun-ze, YANG Xian-yong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2003, 18(2). 170—172

The study of long-term dynamic characteristics of a large-sized turbogenerator set requires a simplified, accurate and rapid calculation of flue-gas heat release rate. To eliminate the main deficiency of currently used flue-gas heat release simulation models the authors have deduced from Dybosky-Broch formula of large-sized boiler thermodynamic calculation a new flue-gas heat release model for the simulation and analysis of dynamic characteristics. Moreover, through a concise analysis, simplification and deduction obtained was a method for calculating flue-gas outlet temperatures and heat release rates in a dynamic process for various boiler heat exchange surfaces. The recommended easy-to-use flue-gas calculation model offers a relatively accurate and simple expression of the variation mechanism of flue gas temperature and heat release rate of high-temperature gases in the furnace and various gas-pass heat exchange surfaces of a large-sized boiler during a dynamic process. The flue-gas calculation model has been used to simulate the dynamic characteristics of a 600MW super-critical power generation unit with rational and accurate simulation results being obtained. **Key words:** large-sized boiler, long-term dynamic characteristics, simulation, flue-gas calculation model

膜式水冷壁壁温影响因素的数值分析 = Numerical Analysis of Factors Having an Impact on the Wall Tempera-