

大型锅炉炉膛三维流场微机 数值模拟计算

朱 青 庞丽君 董 秦裕琨 (哈尔滨工业大学)
俞斌根 (哈尔滨锅炉厂)

[摘要]本文在研究了 300 MW 锅炉炉内流场计算的基础上,提出了适合中、小规模计算机的三维流场计算方法,为大型数值模拟计算在微机上应用提供了方便。

关键词 锅炉 数值模拟 三维流场 计算机
分类号 TK222 TP301.6

0 引言

近年来,对大型锅炉炉膛内流场的研究十分广泛、深入。这主要是因为随着锅炉大型化发展,不仅要求锅炉高效节能,同时也要求运行安全可靠,即要求锅炉同时满足高效、稳燃、低污染和防止结渣的性能,因此对燃烧的控制就显得十分突出。炉内气体流动的动力特性对于燃烧过程和达到上述四方面性能要求有着极重要的影响。为了同时满足上述四方面要求,必须合理地组织炉内空气动力工况。目前研究人员一方面通过不断完善试验方法来研究炉内的复杂的空气动力特性,另一方面根据理论模型进行数值模拟计算来研究炉内流动。后者对炉内燃烧和传热过程的研究将有重要意义。

计算机性能的逐步提高和计算方法的迅速发展,给炉膛三维流场数值模拟计算带来了方便条件。在近似程序上,数值模拟方法可以给出整个流场的面貌,从而避免了大量繁

重的实验工作。无论是改变炉膛结构或燃烧器形状,或者改变锅炉运行工况,数值模拟的计算成本远低于用实验方法得出结果的费用,而且可以在整个范围内给出流场的信息。

国内外各研究机构、高等学校在炉内流场数值模拟计算方面进行了大量工作。本文在研究了这些工作的基础上,提出了适合中、小规模计算机的三维流场计算方法,效果较好。

1 数学模型

为了简化计算,炉内介质仅考虑为单一介质流动,不考虑颗粒相对气流的影响。同时只进行冷态空气动力场计算,燃烧、传热过程的影响忽略,因此只需解两种方程:

1.1 连续性方程(张量形式)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\text{对于定常流动 } \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, j = 1, 2, 3$$

收稿日期 1995-04-11 收修改稿 1995-06-06

1.2 动量方程(张量形式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{Z}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \times (\mu_{eff} \frac{\partial u_j}{\partial x_j}) + g_i + f_i$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

式中 ρ —气体密度(kg/m³)

u_i, u_j —气流流速(m/s)

μ_{eff} —有效粘性系数(Pa·S),

按下式计算

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (3)$$

其中 μ_t 为湍流粘性系数, μ 是层流粘性系数, μ_t 由双方程模型给出, 即

$$\mu_t = C_\mu \rho K^2 / \epsilon \quad (4)$$

式中的 C_μ 取 0.09, K 和 ϵ 由下面微分方程给出。

1.3 K、ε 方程

以湍流脉动动能 K 和湍流脉动动能的平均耗散率 ϵ 为参数, 由纳维斯托克斯方程变换推导得到 K, ϵ 方程(张量形式):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \cdot k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k \cdot eff} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \mu_{eff}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \cdot \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \cdot \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon \cdot eff} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + \frac{\epsilon}{k} [C_1 \mu_{eff}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \epsilon] \quad (6)$$

式(5)和式(6)中各通用常数可取 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.33$ 。

2 数值解法

对微分方程组式(1)、(2)、(5)、(6)离散化后得到统一形式:

$$A_p \cdot \Phi_p = A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N$$

$$+ A_S \Phi_S + A_T \Phi_T + A_b \Phi_b + b \quad (7)$$

其中 Φ 为变量, S 为系数, b 为质源; E, W, N, S, T, b 下标分别表示相邻的几个控制体 E(east)、W(west)、N(north)、S(south)、T(top)、b(bottom), 见图 1。

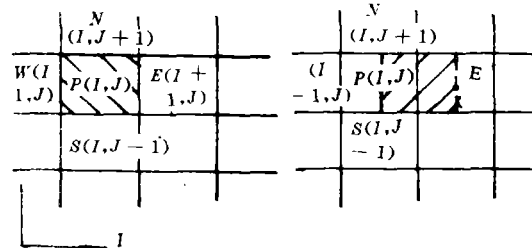


图 1 标量、矢量控制体

将式(7)中源项 b 线性化得出下式

$$(A_p - S_p) \Phi_p = \sum_i A_i \Phi_i + S_c \quad (8)$$

其中下标 i 表示相邻的控制体, S_c 为常数, S_p 为系数。

采用逐线校正法, 则式(8)写成如下形式, 然后求解:

$$(A_p - S_p) \Phi_p = A_s \cdot \Phi_s + A_n \cdot \Phi_n + [\sum_{i \neq s, n} A_i \Phi_i + S_c] \quad (9)$$

3 计算实例

以一台 300 MW、四角切圆燃烧方式锅炉为实例, 进行了炉膛三维流场的计算。该锅炉为亚临界压力、中间再热、单炉膛布置、固态排渣直流煤粉锅炉。

锅炉的主要设计参数: 主蒸汽流量 $D = 1025$ t/h, 主蒸汽压力 $P_{gr} = 16.72$ MPa, 主蒸汽温度 $t_{gr} = 540$ C, 给水温度 $t_{gs} = 262$ C。

锅炉炉膛结构布置和基本几何尺寸见图 2, 炉膛顶部布置有前屏、后屏和高温过热器。直流式燃烧器四角切圆布置, 每角燃烧器设置五层一次风喷口和七层二次风喷口。一、二次风喷口间隔布置。四股一二次风气流在

炉内形成不等切圆, 见图 3。二次风直径为 $\Phi 1180$ mm, 一次风切圆直径为 $\Phi 730$ mm。燃烧器一二次风风率分别为 $r_1 = 18\%$, $r_2 = 82\%$, 一二次风风温分别为 110°C 和 329°C , 一二次风速分别为 20.9 m/s 和 40 m/s。

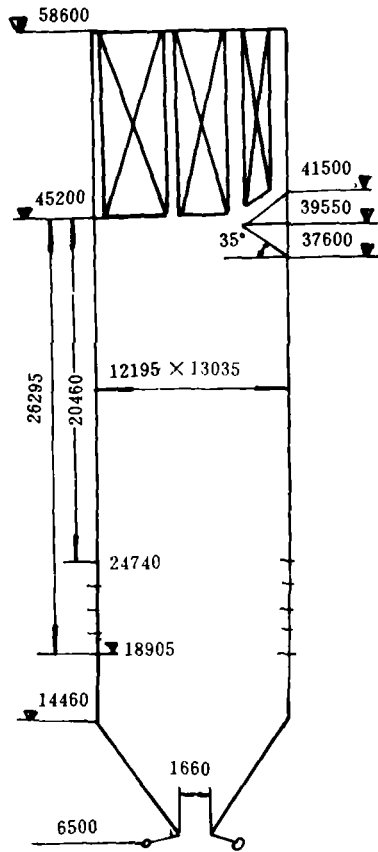


图 2 300 MW 锅炉炉膛结构简图

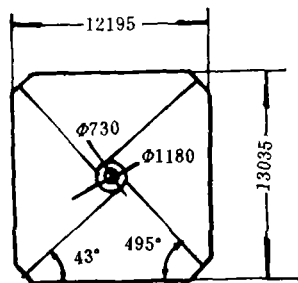


图 3 燃烧器切圆布置示意图

为了简化计算, 本文未考虑屏区影响。根据炉膛外形结构尺寸, 将炉膛划分成许多控制体, 见图 4。每个控制体的相应坐标用 I 、 J 、 K 表示, 化分的网格数为 $12 \times 13 \times 51$, 网格长边与短边之比小于等于 2。

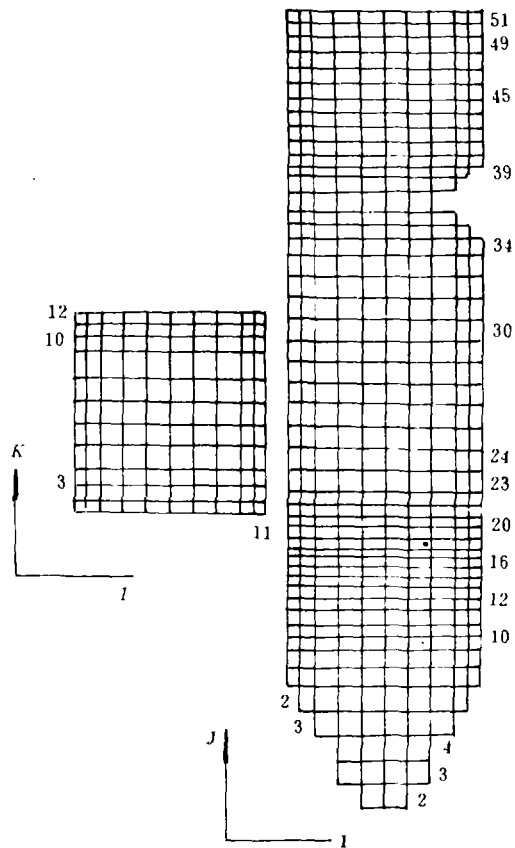


图 4 炉膛网格划分

按着上述模型求解方程组, 其边界条件如下:

(1) 燃烧器区域出口边界条件:

$$UVW(11) = UVW(13) = UVW(15) = UVW(17) = UVW(19) = UVW(20) = UVW(21) = 40.0 \text{ m/s}$$

$$U^*W(12) = U^*W(14) = U^*W(16) = U^*W(18) = 20.9 \text{ m/s}$$

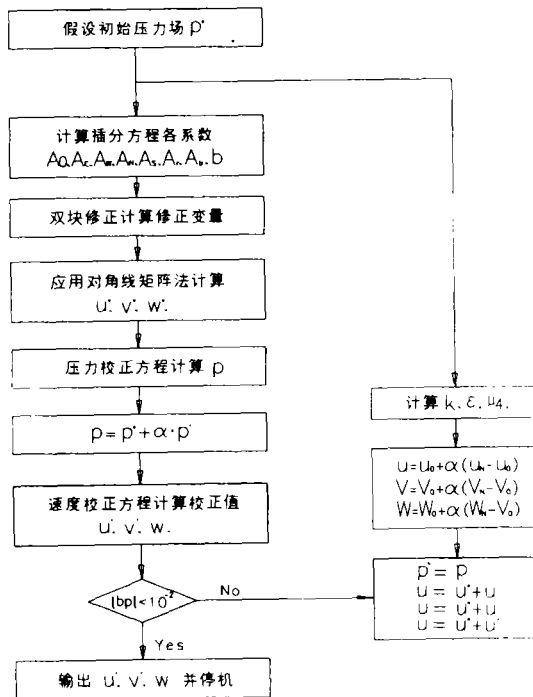
(2) 出口窗边界条件:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$$

(3) 壁面条件:

$U = V = W = 0, k = \varepsilon = 0$ (燃烧器喷口区域除外)。

(4) SIMPLE 迭代计算框图见图 5。



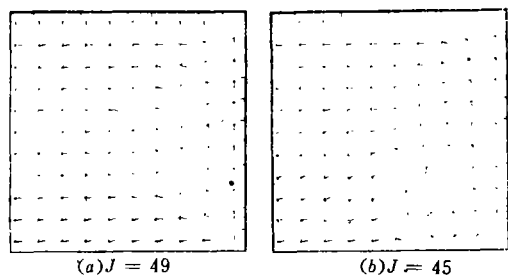


图 7 炉膛顶部与炉膛出口俯视图
流场计算结果

其中图 6(a)(b)(c) 是燃烧器区域俯视图,由此可明显看出在燃烧器区域各截面的流场分布是一个旋转流场,其分布规律基本相似。图 7(a) 为炉膛上部俯视图;图 7(b) 是炉膛出口处的俯视图。比较图 6 看,在炉膛出口各截面流场已不是旋转流场,完全符合炉膛内流场的流向。

图 8(a)(b)(c) 是流场的正视图。

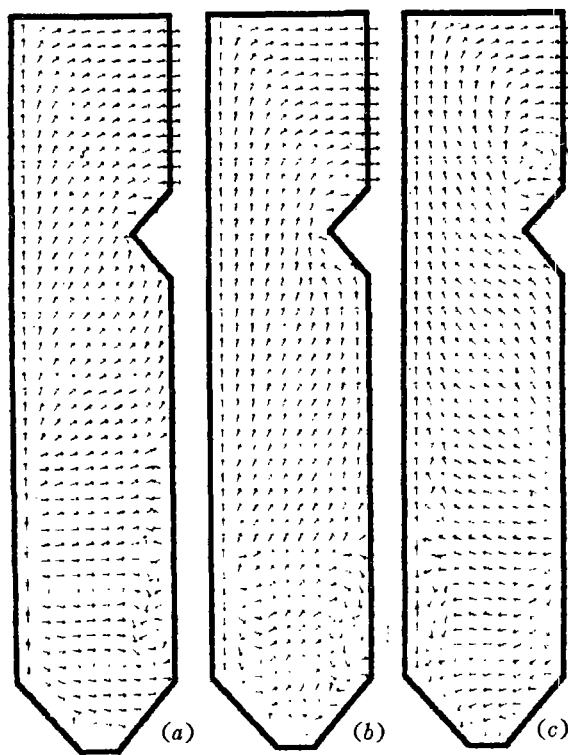


图 8 炉膛正视流场计算结果
(a)K = 3 立面 (b)K = 6 立面 (c)K = 10 立面

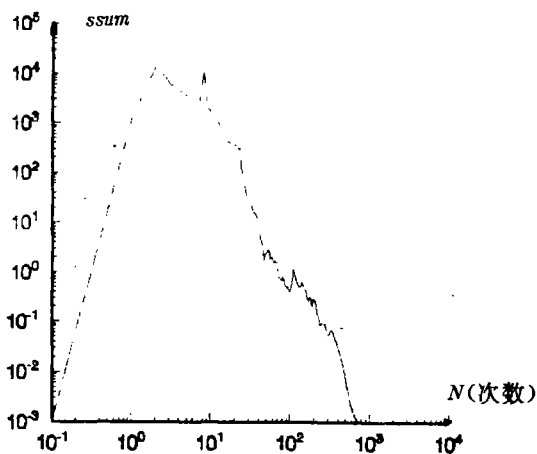


图 9 控制体的源项和 SSUM 随迭代次数的变化规律

图 9 是控制体的源项和 SSUM 随迭代次数的变化规律。因为收敛精度由压力校正方程中标量控制体的源项和最大源项所决定,所以由图 9 可看出,迭代 100 次后基本上已经有了较好的初始流场。

图 10 给出了 $j = 9, j = 18, j = 30$ 截面切向速度分布图。从图中可看出,气流进入炉膛后以螺旋式上升。在中心处它的轴向速度最高,并且随着气流的上升,切圆变得越来越大,同时切向速度逐渐降低。在炉膛最顶部,仍然保持有旋转残余,从而引起炉膛出口两侧气流分布不均。

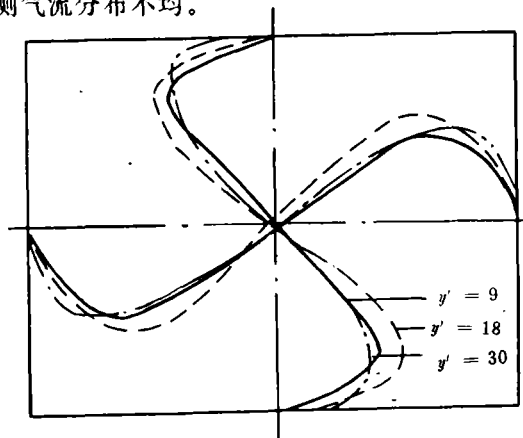


图 10 切向速度分布图

本文的计算最初是在计算中心的 SUN3 机上进行。SUN3 是一种小型机，用 UNIX 操作系统。如果没有其它终端同时工作，单个终端运算速度为 4 分钟迭代一次，速度较慢。按迭代所用的时间为 CPU74 小时计算，则费用近千元（不包括程序编译、调试所花的时间）。若再加上终端使用费、打印纸费，则费用大大提高。

针对上述情况，作者在 NOVELL 网上的终端和一台 386 微机进行了运算实验，计算速度明显提高，半分钟迭代一次。曾分别在这两台机器上连续迭代 1200 次，10 个小时即可完成，计算效果非常好。由于使用的都是 DOS 操作系统，程序编译、调试以及最后的图形处理非常方便，而且大大降低了课题所需费用。在 NOVELL 网上编译、连接本程序用的软件是 OS386，也可用 NDP。

当然计算速度也取决于流量设置的边界条件和压力修正方程中的松弛因子。有关技巧已在 3 - (5) 中叙述。

5 结 论

本文是以一台 300 MW 实际锅炉为例，分别在小型机、微机上进行了复杂的三维流场计算比较，发现大型锅炉炉膛的三维流场

数值模拟计算可在中、小规模微机上使用。这样既可以省时省力，而且计算精度提高。这为大型计算在微机上的应用提供了方便。

微机得出的计算结果可以量化炉膛空气动力场的特点，比较真实地反映出炉膛空气动力场的组织及其影响。空气动力场的数值模化为改变燃烧器结构，风量配比后探求其流场分布提供了比较可信的手段。

该计算能够提供在一般条件下难以取得的数据，与仅从试验取得的数据相比，具有明显的特点。

参 考 文 献

- 1 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算. 张政译. 科学出版社, 1987 年
- 2 王应时, 范维澄, 周力行, 徐旭常. 燃烧过程数值计算. 科学出版社, 1989 年
- 3 Fiveland W A, Wessel R A. Numerical model for predicting performance of three-dimensional pulverized-fuel fired furnaces. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1988, 110: 117-126
- 4 Wang Yaqin, Li Wenyan, Sun Zhaoxing. The numerical calculation of combustion process in Utility boiler furnace. 2nd Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization.

(渠源 编辑)

作者简介 庞丽君 女 1942 年生。现为哈工大热能工程教研室教授。长期从事教学与科研工作。多年来从事流化床燃烧、火床燃烧和煤粉燃烧等项目的研究。并多次获省部级科学进步奖。出版有“锅炉燃烧技术与设备”及“工业锅炉手册”等专著。

读者朋友 新年好!

this paper a comprehensive review is given for the various empirical formulas for calculating helical-ribbed tubes in order to identify a relatively suitable empirical formula for helical-ribbed tubes when flue gas is used as a heat exchange medium. Key words: helical-ribbed tube, heat exchange

镇海石化总厂 200 t/h 燃油锅炉过热器管壁温度的测试分析=The Measurement and Analysis of Superheater Tube Wall Temperatures of a 200 t/h Oilfired Boiler at Zhenhai Petrochemical Works [刊,中]/Liu Linhua, Yu Qizhong (Harbin Institute of Technology), Liu Zhi (Shangfang Grain Depot of Harbin City)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996,11(6):375~378
The superheater tube wall temperature of two units of high-pressure natural-circulation D-shaped boilers was measured. An analysis and comparison were performed of the thermal excursion along the width of the superheater and metal temperatures along its tube length for both a radiation type and convection type superheater. Key words: boiler, superheater, wall temperature, test, calculation

汽轮机实时仿真数学模型=A Mathematical Model for Steam Turbine Real-Time Simulation [刊,中]/Xu Jianqun, Cao Zuqing (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996,11(6):379~384

Taking a home-made 125 MW steam turbine as an example, the authors described a method for setting up a model for real-time simulation during its start-up, shut-down, malfunctions and normal operation. The simulation results being basically in agreement with on-site test results, the model setting-up method proposed in this paper is suited for general application and can be used to other types of steam turbine units. Key words: steam turbine, simulation, mathematical model

大型锅炉炉膛三维流场微机数值模拟计算=Numerical Simulation Calculation of Three-dimensional Flow Field of a Large-sized Boiler Furnace by the Use of Microcomputers [刊,中]/Zhu Qing, Pang Lijun (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996,11(6):385~390

Based on the study of the internal flow field of a 300 MW boiler, the authors have proposed a three-dimensional flow field calculation method suitable for small and medium-sized computers, which makes it easy to conduct large-scale numerical simulation calculation by using microcomputers. Key words: boiler, numerical simulation, three dimensional flow field, computer

Windows 环境下热网监控系统的设计=Design of a Heating Network Monitoring System Under "Windows" Environment [刊,中]/Qian Danyang, Shi Tingjin (Zhejiang University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1996,11(6):391~394

On the basis of an in-depth study of the existing computer-based monitoring system for heating networks this paper proposes a software and hardware design philosophy for a heating network monitoring system under a "Windows" environment. Described is a system configuration with basic framework for system software being given. In this regard some progress has been made in the study of application