

# 电厂旋风分离器计算机仿真与优化

(中南工业大学) 杨卫宏 萧泽强

**摘要:** 利用计算流体力学 CFX4.2 软件对经改造后的电厂细粉旋风分离器的气固两相流进行了三维数值模拟, 其气相流场采用差分雷诺应力模型计算旋转流动, 在拉格朗日坐标中计算粒子运动。为优化求解, 采用多块结构适体网络, 利用 SIMPLE 算法解离散方程, 给出了经改造后的细粉旋风分离器内不同截面的速度分布和粒子轨迹, 证明了经改造后的旋风分离器比常规的旋风分离器分离效果要好。

**关键词:** 旋风分离器; 数值计算; 旋流

中图分类号: TK212

## 1 前言

旋风分离器有很多优点, 如制造维护费用较低, 无运动部件, 具有较好的自适应性等等。更重要的是, 它能适用于高温高压的大流量气固分离而维持较低的压头损失, 因此应用相当广泛。但是, 在大容量机组火电厂中普遍存在旋风分离器效率低, 乏气带粉量过多, 影响锅炉燃烧工况等现象, 造成排粉机 (或三次风机) 磨损严重等问题。为了解决这一问题, 可以提高细粉旋风分离器的分离效率, 其方案是将旋风分离器的内筒 (即排气管) 延长至和外筒长度齐平; 并在此基础上, 设计二次分离元件, 这种设备称为双级旋风分离器。此方案具有投资少、节省能源等特点, 并能保证阻力不明显增加而尽可能提高细粉旋风分离效率, 是大容量细粉旋风分离器的发展趋势。

本文从工程角度出发, 探索使用计算机来模拟双级型细粉旋风分离器的流动和气固分离问题。使用计算流体力学软件包 CFX4.2, 在 DEC266 工作站上进行计算。由于存在较大的旋流, 故模型采用差分雷诺应力模型来描述, 采用拉格朗日型方程模拟煤粉颗粒的运动, 对某电厂的一台双级的细粉旋风分离器 (结构见图 1) 进行了计算机预示性仿真模拟研究。得到了改造后的双级细粉旋风分离器的流场分布、煤粉颗粒运动轨迹等信息。这直接为工程实际改造现有气固分离器提供了许多参考数值和建议, 对克服过去设计周期长, 实验费用昂贵, 计算公式多依靠经验, 半经验公式, 其可靠程度因设计条件和现场

资料波动的弊病有一定意义。也为相类似的工业装置的结构改造提供了一种新的高技术分析手段。

## 2 基本方程和边界条件

### 2.1 基本方程

细粉旋风分离器中, 带粉的气体从圆柱体部分的顶部切向射入, 形成旋转运动。气体流动的计算采用差分雷诺应力 (DSM) 模型, 在拉格朗日坐标描述颗粒运动, 使用颗粒轨道模型, 考虑气相与颗粒间的相互作用。其模型简介如下。

差分雷诺应力模型:

$$\frac{dU}{dt} + \nabla \cdot (dU) = 0$$

$$\frac{dU}{dt} + \nabla \cdot (dU \otimes U) - \nabla \cdot (\nabla U) = -\nabla P'' - \nabla \cdot (d\overline{u \otimes u}) + B$$

式中  $P''$  是修正的压力,  $B$  是体积力。修正的压力  $P''$  与真实压力的关系为:

$$P'' = P + \left[ \frac{2}{3} - \gamma \right] \nabla \cdot U - d_0$$

在模型中,  $u \otimes u$  满足下式:

$$\frac{d\overline{u \otimes u}}{dt} + \nabla \cdot (d\overline{u \otimes u} \otimes U) - \nabla \cdot \left[ d \frac{C_s}{e_{Ds}} \frac{k}{X} \nabla \overline{u \otimes u} (\nabla \overline{u \otimes u}) \right] = P + G + \frac{2}{3} dX$$

式中  $C_s$  为模型常数,  $e_{Ds}$  为湍流普朗特数,  $l$  为边界层厚度 (下同),  $P$ 、 $G$  分别是切应力张量和浮力

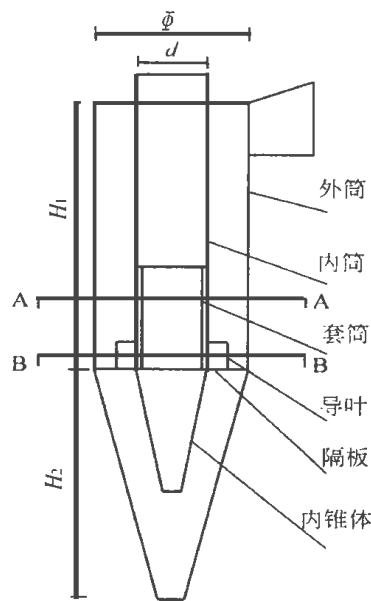


图 1 双级旋风分离器结构简图

收稿日期: 1998-10-06; 修订日期: 1999-03-07

作者简介: 杨卫宏 (1968-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 讲师, 主要从事热工设备仿真与优化研究。通讯处: 410083 长沙市, 中南工业大学物热系热能工程教研室

应力张量  $P$  由下式给出:

$$P = - d(u \otimes u \nabla U)^T + (\nabla U) \overline{u \otimes u}$$

对不可压缩流用 Balssinesq 近似法,  $G$  可写为:

$$G = - dU(g \otimes uh + (g \otimes uh)^T) + d\Gamma(g \otimes us + (g \otimes us)^T)$$

$\Gamma$  为体积膨胀系数, 未知的雷诺通量  $uh, us$  近似为:

$$\overline{uh} = - C_s \frac{k}{X} \overline{u \otimes u} (\nabla H)^T$$

$$\overline{us} = - C_s \frac{k}{X} \overline{u \otimes u} (\nabla S)^T$$

$O$  是压力应变关联式, 为:

$$O = Q + Q + Q$$

$$Q = - dC_{1s} \frac{X}{k} (\overline{u \otimes u} - \frac{2}{3} kI)$$

$$Q = - C_{2s} (P - \frac{2}{3} P_1 I)$$

$$Q = - C_{3s} (G - \frac{2}{3} G_1 I)$$

式中  $C_{1s}, C_{2s}, C_{3s}$  为模型常数,  $P, G$  是紊流动能的剪切生成项和浮力生成项

由于耗散出现在各个应力方程中, 故仍需要一个求  $X$  的方程, 这就有以下形式:

$$\frac{dX}{dt} + \nabla \cdot (dUX) - \nabla \cdot (d \frac{C_s}{\epsilon} \frac{k}{X} \overline{u \otimes u} \nabla X) =$$

$$C_1 \frac{X}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - C_2 d \frac{X}{k}$$

式中  $C_s, C_1, C_2, C_3$  为模型常数,  $\epsilon$  为普兰特数 而雷诺应力分量由它们的微分方程计算, 紊流动能直接

由  $k = \frac{1}{2} \overline{u^2}$  得到.

煤颗粒轨道模型为: 首先考虑颗粒的位置方程 为了更容易地追踪颗粒和它所经过的控制体积边界位置, 在拉格朗日坐标的计算空间中进行追踪 在这一空间里, 位置方程为:

$$d^2 a / dt^2 = C$$

式中  $a$  为计算位置,  $t$  是时间,  $C$  是计算速度

计算速度通过计算控制体积顶点的雅可比坐标变换以及使用方程:

$$C = (\partial x / \partial a)^{-1} u$$

由颗粒的自然速度  $u$  得到, 式中  $x$  是颗粒的位置

其次, 考虑动量方程, 颗粒速度变化速率的方程直接来自于牛顿第二定律:

$$m \cdot du / dt = F$$

式中  $F = F_D + F_P + F_B + F_A$  是作用在颗粒上的力,  $m$  是它的质量

力  $F$  的主要分量是连续相施加的曳力  $F_D$ , 它有以下形式:

$$F_D = \frac{1}{8} c_d^2 d_C |V_R| V_R$$

式中曳力因子由下式给出<sup>[1]</sup>:

$$C_D = 24(1 + 0.15Re^{0.687}) / Re$$

由于颗粒的密度比连续流体的密度高, 压力梯度较小, 从而忽略压力附加力, 即  $F_P = 0$  在计算中主要考虑颗粒附加的质量力和浮力.

浮力为:

$$F_B = \frac{1}{6} c_d^3 (d_p - d)g$$

$d_p$  是颗粒的密度,  $g$  是重力加速度

附加的质量力为:

$$F_A = - \frac{1}{12} c_d^3 d \frac{du}{dt}$$

在颗粒传输模型中应包含紊流的影响 为此, 动量方程中以平均速度加紊流的影响项代替连续速度, 假设紊流是由任意方向的旋涡汇集而成, 旋涡速度的方差是紊流动能的两倍, 旋涡存留时间  $t_E$  为:

$$t_E = 1.5^{1/2} C_{\epsilon}^{3/4} \cdot K / X$$

旋涡长度  $I_E$  为:

$$I_E = C^{3/4} \cdot k^{3/2} / X$$

式中  $C$  是紊流模型常数,  $X$  为能量耗散速率.

在连续相和颗粒相中传输的质量的每一个分量满足下式:

$$dm_c / dt = - c_d D Sh (m_F - m_{FC})$$

在方程中  $m_c$  是颗粒中组份 (颗粒群按初始尺寸分布分组) 的质量,  $m_F$  和  $m_{FC}$  是颗粒相和连续相各自的质量分数,  $D$  是连续相 (气体) 质量分数的扩散系数,  $Sh$  是谢伍德数, 由下式给出:

$$Sh = 2 + 0.6Re^{0.5} (\epsilon / D)^{1/3}$$

上述模型详见文献 [5]

### 2.2 边界条件

进口条件: 进口采用 Dirichlet 条件, 直接设定进口速度 (或流量) 进口湍动能  $k$  和动能耗散系数  $X$  的值对于进口均匀截面可以作如下假设:

$$k_{int} = C_{p1} u_{int}^2 \tag{8}$$

$$X_{int} = C_{p2} k_{int}^{1.5} / C_{p2} D_h \tag{9}$$

这里,  $u_{int}$  为进口平均速度,  $C_{p1}$  和  $C_{p2}$  为经验数据, 均为  $0.03^{[1]}$ ,  $C_{\epsilon}$  为  $0.09^{[1]}$ .  $D_h$  为水力直径,  $D_h = 4A / L$ ,  $A$  为进口截面面积,  $L$  为进口截面周长.

出口条件: 出口采用压力边界.

壁面条件: 由于紊流传输方程只适用于全紊流区, 对于近壁面, 我们可以选择对数律来处理底层区域

## 3 数值模拟和计算结果

### 3.1 数值模拟

计算对象: 细粉旋风分离器在 HW - XB 型的

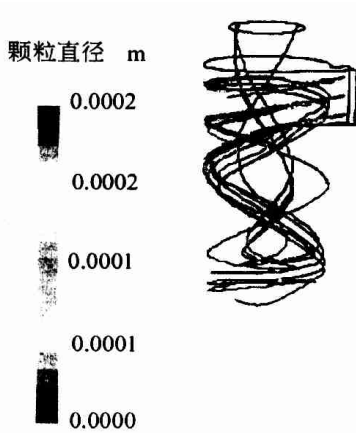


图 2 双级旋风分离器粒子 (60 个) 运动轨迹

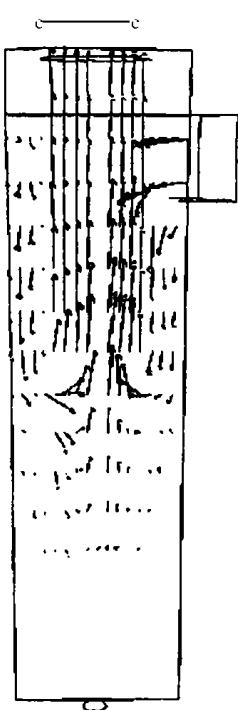


图 3 双级细粉分离器沿导叶进口方向轴向速度分布

基础上进行改造基本结构如图 1 所示 其中  $H = 3500$  mm,  $d = 1950$  mm,  $H_1 = 7474$  mm,  $H_2 = 7000$  mm 在内筒下部设置四个离心导叶, 以增加内筒悬度. 离心导叶由底板和隔板组成. 在套筒下部不设置隔板. 内筒上部设置四个狭缝作为二次分离粉尘的出口. 为了保证狭缝内分离的固体落下, 将内锥体下端封闭. 分离器进口速度为  $18$  m/s, 并向下倾斜  $15$  度. 由于内筒和其内的套筒壁厚相对于直径较小, 为网络划分方便, 忽略其壁厚. 同时不考虑传热. 煤粉的粒径分布, 考虑到计算机内存、硬盘空间和计算时间的限制, 取五种具有代表性的粒径:  $200\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ . 每种粒径颗粒的质量占整个气固混合流质量的百分比分别为:  $5.0$   $5.0$   $5.0$   $5.0$  和  $12.0$ .

网格生成: 采用圆柱坐标  $(x, r, N)$ , 多块结构适体网格, 总网格数为  $47\ 828$  个. 数值求解: 采用 SIMPLE 算法解离散方程, 考虑收敛, 对速度三个分量  $u$   $v$   $w$  采用欠松弛因子方法处理. 对求解颗粒运动方程的三个分量  $u$   $v$   $w$  也采用欠松弛因子方法处理.

3.2 计算结果及分析 通过计算, 给出了旋风分离器有套筒处横截面 A-A 导叶进口横截面 B-B 等的速度分布, 给出了沿导叶进口

垂直截面 C-C, 同时还计算了 60 个不同粒径、位置分布均匀的具有代表性的粒子的运动轨迹.

从预报结果可以看到, 当夹带有粒子的气流沿切向进入旋风分离器时, 冲向壁面, 因极强的离心力而形成外层向下的旋涡流动, 见图 2. 大部分固体被分离, 沿外筒内壁面落下; 当气体到达导叶处, 则沿导叶方向进入内筒如图 5 所示. 和不带离心导叶的常规分离器流场<sup>[6]</sup>相比, 导叶更进一步增加了内筒的旋度. 气流在内筒内向上旋涡流动, 进一步起到分离作用 (即第二次分离). 另外, 狭缝中还有一少部分

气体流出, 由于上下压差大, 气流很快流下并重新进入内筒. 内筒和套筒之间的狭缝中的气流形成四个小气柱, 有利于二次分离出的颗粒下降.

和不带离心导叶的常规分离器流场<sup>[6]</sup>相比, 从内筒出口的粒子明显少, 说明双级分离器分离效果要好. 同时内筒中气流的偏心或不均匀度更大. 这是由于增加了离心导叶, 内筒进口有一部分为筒壁, 内筒进口截面 (和常规一样, 指整个截面) 速度分布不均而造成的.

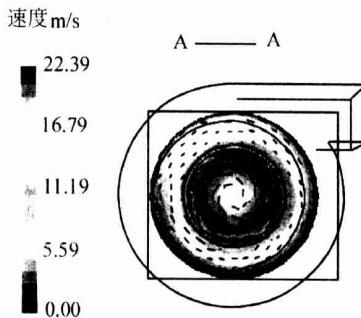


图 4 双级细粉分离器上部截面处速度分布

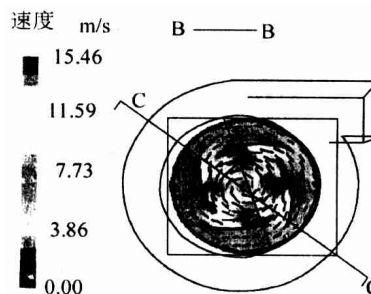


图 5 双级分离器导叶进口横截面速度分布

### 4 结论

(1) 由计算结果可以看出, 细粉旋风分离器改造为二次分离后, 分离效率有显著的提高; 从计算的流场和粒子轨迹来看, 离心导叶的进口设计应尽量与流线一致, 以减少湍流损失.

(2) 计算机模拟可为细粉旋风分离器的设计、节能改造提供详细的数据和建议. 它能替代不少实验, 并提供许多实验难以提供的数据, 并降低实验费用, 缩短设计周期. 这种通过计算机仿真计算得到的改造方案已用于工厂实际, 得到了令人满意的

效果. 证明所用方法具有可靠性、收敛性和稳定性, 并具有解决工程实际问题的能力.

### 参考文献

- [1] CFX4.1 FLOW SOLVER USER GUIDE, United Kingdom, 1995.
- [2] Hoffmann Klaus A, Chiang Steve T. Computational fluid dynamics for engineers. Volume I II, USA, A Publication of Engineering Education System, 1993.
- [3] Soo S L. Fluid dynamics of multiphase systems. Blaisdell Pub. Co. Waltham, 1967.
- [4] 岑可法, 樊建人 著. 工程气固多相流动的理论及计算. 浙江大学出版社, 1990.
- [5] 周力行 著. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值仿真. 科学出版社, 1994.
- [6] 杨卫宏, 萧泽强 等. 电厂细粉旋风分离器气固两相流三维数值模拟. 中国工程热物理学会 1998 两相流学术会议论文集, 上海, 1998.

(复 编)

itability. The foregoing can be conducive to an enhancement of the failure diagnosis automation level. **Key words** symptom acquisition, vibration, fault diagnosis

风机转子的振动与临界转速计算分析 = **Calculation and Analysis of Fan Rotor Vibrations and Critical Speeds** [刊,中] / Gao Chunshan, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 385~ 386

The forced draft fans of a certain power station suffered repeated failures because of blade ruptures, seriously disrupting the normal operation of the power station. Calculations were conducted of the fan rotor natural frequency, vibration modes and critical speeds. On the basis of a contrast analysis of the calculation results, the assumption that an irrational rotor construction caused the failure has been ruled out. This made it possible to avoid the unnecessary work relating to the modification of the fan rotor structure. **Key words** fan rotor, vibration, critical speed, calculation

电厂旋风分离器计算机仿真与优化 = **Computer-based Simulation and Optimization of a Power Plant Cyclone Separator** [刊,中] / Yang Weihong, Xiao Zeqiang (South China Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 387~ 389

With the help of a computational fluid mechanics CFX4.2 software a three-dimensional numerical simulation was performed of the gas-solid two-phase flow of a power plant cyclone separator for pulverized-coal following its modification. The rotational flow of its gas-phase flow field was calculated by the use of a differential Reynolds stress model with the particle movement being computed in Lagrangian coordinates. To attain an optimized solution, employed is a multi-block grid with appropriate-shaped meshes. Discrete equations were solved by a SIMPLE algorithm. The velocity distribution at various sections and particle trajectory within the modified cyclone separator were presented. It is demonstrated that the modified cyclone separator enjoys a higher efficiency as compared with conventional cyclone separators. **Key words** cyclone separator, numerical calculation, rotational flow

基于知识与模糊神经网络的故障诊断技术 = **Knowledge and Fuzzy Neural Network-Based Fault Diagnostic Techniques** [刊,中] / Qiu Zhongyu, et al, (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 390~ 392

Discussed in this paper are the theory and method of constructing a rule-based fuzzy neural network (FNN). With respect to a large-sized rotating machine the authors have come up with a fault diagnostic technique, which employs a multi-layer rule base and intelligent reasoning approach. With the rule-type fuzzy association memory device serving as a classification and synthesis algorithm of the diagnostic system the knowledge-based symbol processing method is organically integrated with the FNN. Discussed are the issues of FNN input and output vectors. This paper has provided a new approach for setting up a fault-diagnosis expert system suitable for power plant turbogenerators. **Key words** rotating machinery, fault diagnosis, fuzzy neural network, expert system

承担冷负荷的热水网水力工况模拟计算及应用 = **Simulated Calculation on an Hourly Basis of Hydraulic Operating Conditions for a District Heating and Cooling water Network and its Applications** [刊,中] / Fu Lin, Jiang Yi (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 393~ 396

The basic principles are described of a simulated calculation on an hourly basis of the hydraulic operating conditions for a district heating and cooling (DHC) water network. The method for determining heat loads of this kind of network is given and specific examples of calculating pump working points and energy consumption in the DHC project are provided to explain the above-mentioned principles. **Key words** DHC network, hydraulic operating conditions, heat load, pump, simulated calculation

供热机组特性分析的循环函数法 = **Cycle Function Method for the Analysis of Heat Supply Unit Character-**