

基于 MATLAB 的旋风分离器内流场模拟

朱 会 王京刚*

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要: 借助 MATLAB 软件, 采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 基于同位网格的 SIMPLEC 方法, 对切向入口旋风分离器内的气相流场进行了数值模拟研究。直接调用其内置函数, 对旋风分离器进行网格划分, 生成插值计算、三对角追赶法以及交替方向迭代法 (ADI) 等求解过程的函数文件以供调用, 采用 while 循环语句组成内迭代和外迭代运算。直接调用 MATLAB 绘图指令, 能方便地生成旋风分离器内流场的速度分布图和 uv 速度矢量图。

关键词: MATLAB; 旋风分离器; 湍流模型; SIMPLEC

中图分类号: TQ018

引 言

旋风分离器内流场的模拟计算过程中涉及到许多的数学运算问题, 如: 网格划分、线性插值、三对角追赶法 (TDMA)、代数方程的迭代解法以及速度分布的可视化等。解决这些数学问题的数学过程比较繁琐, 因此选择合适的程序设计语言和数值处理软件就显得非常重要。

在以前计算的过程中, 我们大部分采用的是 FORTRAN、BASIC 等语言, 采用这些语言编程, 最大的缺点是程序控制不灵活, 语言功能不强大, 尤其是涉及到矩阵计算或是图形绘制时, 更显其不足^[1]。而以矩阵和数组为基本数据单元的高效的工程计算语言——MATLAB 语言的出现, 降低了在流场模拟中软件开发的难度。利用 MATLAB 语言, 即使不善精通数值计算方法和其他高级编程语言的化学工作者也可以完全设计出功能强大, 稳定可靠的高质量流场数值模拟程序, 并且可方便地实现数值结果的可视化。

本文结合旋风分离器内流场模拟过程, 着重介绍 MATLAB 在流场数值模拟计算及结果的可视化方面优于其它计算机语言的功能与应用。

1 数学模型及边界条件

计算采用的旋风分离器结构尺寸与文献 [2] 中

的旋风分离器模型相同, 其基本的几何结构和尺寸如图 1 所示。

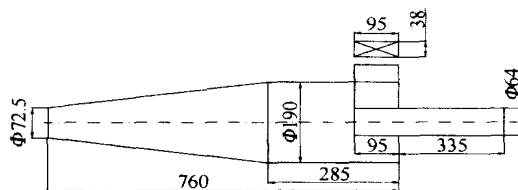


图 1 旋风分离器结构 (单位: mm)

Fig. 1 Configuration of the cyclone

1.1 湍流模型

为简化计算, 假设旋风分离器内流动为轴对称稳定流动。在该假设条件下, 采用标准 $k-\epsilon$ 模型的通用控制方程有以下通用形式 (定常流动)

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (u\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v \phi) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] + S_\phi \quad (1)$$

式中 ϕ 为通用因变量; x 、 r 分别为轴向和径向坐标; ρ 为流体密度; u 、 v 、 w 分别为轴向、径向、切向速度分量; ϕ 为通用扩散系数; S_ϕ 为方程的通用源项, 其具体表达式参见文献 [3]。

1.2 边界条件

数值计算采用的边界条件:

- (1) 入口根据流量给定切向速度和径向速度, 轴向速度为 0;
- (2) 排气管出口按局部单向化方式处理;
- (3) 假设排出口气流量为 0, 即没有气流从此处流出^[4];
- (4) 轴线上切向速度和径向速度均为 0, 其他变

收稿日期: 2006-11-30

第一作者: 女, 1983 年生, 硕士生

*通讯联系人

E-mail: jingg-wang@163.com

量的法向一阶导数为 0;

(5) 固体壁面采用为无滑移边界条件, 湍流时采用壁面函数法^[5]进行相应的修正。

2 数值解法

2.1 数值计算

控制方程的求解采用同位网格下的 SIMPLEC 算法, 对流项的离散采用延迟修正的方式来纳入二阶精度的 QUICK 格式, 扩散项的离散采用中心差分。离散化的方程组采用 ADI(交替方向块迭代)法求解, 各变量采用欠松弛迭代直至收敛。采用同位网格算法时, 所有的求解变量都位于控制体的中心, 利用动量插值算法来计算界面上的流速来保证压力与速度不失耦^[5]。

$$u_E = \tilde{u}_E - \frac{A_P}{a_{P,E}} (p_e - p_w)_E \quad (2)$$

$$u_e = \tilde{u}_e - \frac{A_P}{a_{P,e}} (p_E - p_P) \quad (3)$$

(2) 式中的界面压力 p_e 、 p_w 以及 (3) 式中的 \tilde{u}_e 、 $\frac{A_P}{a_{P,e}}$ 之值都需要通过线性插值由节点上的值来表示。

对于圆锥段, 采取了台阶近似, 在台阶以外的部分, 采用大系数法处理, 即

$$a_P \phi_P = a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4)$$

式中 $a_P = A$, $b = A \phi_g$, 其中 ϕ_g 为给定值, A 为一大数 10^{30} 。

2.2 MATLAB 求解

本文采用 MATLAB 语言, 可以很方便的进行程序的编写和语句的循环控制:

(1) $[X,R] = \text{meshgrid}(x, r)$ 用于生成二维轴对称 83×12 (轴向 \times 径向) 的网格划分体系;

(2) $Z1 = \text{interp2}(X,R,Z,X1,R1)$ 用于界面压力、界面速度等的线性插值计算;

(3) 将 SIMPLEC 算法中的每一步求解过程创建成为一个函数文件以供调用;

(4) 利用 while 语句来控制流场求解过程中的内迭代及外迭代的循环;

(5) $\text{pcolor}(X,R,Z)$ 用于绘制流场的轴向、径向以及切向的速度分布图;

(6) $\text{quiver}(X,R,u,v)$ 用于绘制流场的 $u-v$ 速度矢量图;

(7) 另外 MATLAB 语言最大的好处就是在矩

阵的赋值和运算时优于其他计算语言, 使得可以进行大量的数据模拟计算。

3 数值模拟结果与讨论

旋风分离器内的流场比较典型, 基本特征也比较明显。大量文献^[3,6]中的实测结构都表明: 旋风分离器内的切向速度分布呈双涡结构, 以最大切向速度之为界, 外部是准自由涡, 中心是准强制涡; 轴向速度分布以零包络面为界, 外部是下行流, 中心是上行流。本文以文献^[6]中实测的数据为依据来判断所编制的程序的可行性和准确性。

3.1 宏观流动场

图 2 是 $u-v$ 速度矢量图, 模拟的结果定性的反映了旋风分离器内气相的流动形式。由图可以看出, 旋风分离内的主流是双层旋流。外旋流外侧的轴向速度向排尘口方向, 内旋流内侧的轴向速度向排气口方向, 径向速度均有向圆心偏向的趋势。这与文献中的结论大致相符。圆锥段以外部分的速度矢量都为 0, 表明模型计算采用台阶近似以及大系数法处理是成功的。

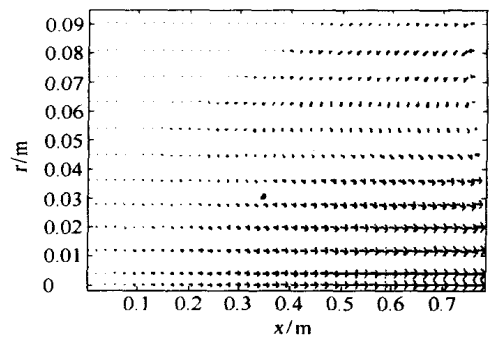


图 2 $u-v$ 速度矢量图

Fig. 2 Velocity vector graph in the $u-v$ direction

3.2 速度分布

图 3 为旋风分离器内各节点的轴向速度、径向速度以及切向速度分布图。在内旋流中, 随着气流的不断上升, 轴向速度不断增大, 在排出管附近达到最大值, 而切向速度则不断减小。在外旋流中, 随着气流向圆锥底部的运动, 轴向速度不断减小, 切向速度则不断增大, 在圆锥底部达到最大值。在某一断面上, 外旋流的切向速度随着半径的减小而增加, 在内外旋流的交界处达到最大值, 内旋流的切向速度随着半径的减小而减小。相对于轴向速度和切向速度, 径向速度小的多, 且沿半径方向。这与文献中实

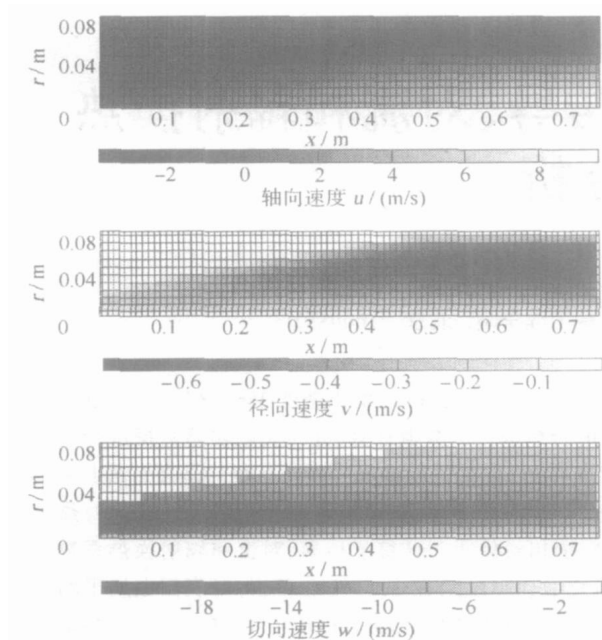


图 3 旋风分离器内速度分布情况

Fig. 3 Velocity distribution in the cyclone

测的数据基本吻合。

参考文献:

- [1] 李志博, 林麒, 胡国清, 等. MATLAB 在计算流体力学中的简单应用[J]. 机床与液压, 2002, 4:140 - 142.
- [2] FRASER S M, ABDEL R A M, ABDULLAH M Z. Computation and experimental investigation in a cyclone dust separator[J]. Proceedings of the Institution of the Mechanical Engineers: Part E, 1997, 211(4): 247 - 257.
- [3] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [4] 魏新利, 张海红, 王定标. 旋风分离器流场的数值计算方法研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(1): 57 - 60.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [6] 时钧, 汪家鼎, 余国宗, 等. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.

MATLAB-based simulation of the flow field in a cyclone separator

ZHU Hui WANG Jing Gang

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: As the discrete control equations for the flow field in a cyclone are very large and nonlinear, it is necessary to constitute iterations in order to calculate them, and since interpolation and TDMA arithmetic are used repeatedly in the calculation procedure, professional software is needed for rigorous simulation of the flow field. In this work, the flow field in a cyclone has been simulated based on MATLAB, and the standard $k-\epsilon$ turbulent model and SIMPLEC method with collocated grid were used to simulate the gas phase. Functions which are built-in or programmed into MATLAB were directly invoked. Within a *while* expression, inner and outer iterations were readily constituted and it was found to be easy to invoke the plot commands to plot figures of the velocity distribution and the $u-v$ vector graph in a cyclone. This shows that using MATLAB, even knowing relatively little about numerical methods and higher program languages, chemical engineers can design stable, reliable and high quality programs for flow field simulation with graphical display.

Key words: MATLAB; cyclone; turbulent model; SIMPLEC