

文章编号: 1671-6612 (2013) 04-319-06

网格划分对叉排管束摩擦阻力系数的影响

霍海娥¹ 敬成君¹ 霍海波² 李凯³

(1. 四川大学建筑与环境学院 成都 610065;
2. 上海海洋大学海洋工程研究所 上海 201306;
3. 中国科学院力学所国家微重力实验室 北京 100190)

【摘要】 应用流体计算软件 FLUENT, 对受限空间内烟气冲刷叉排管束(横竖均为 5 排, 间距比均为 1.25) 的流动进行了数值模拟研究, 主要研究了三角形和四边形非结构化网格及四边形结构化网格划分对流动摩擦阻力系数 f 的影响。结果表明: 结构化网格相对于非结构化网格, 虽然建模时间较长, 但网格生成速度快, 计算耗时短, 易收敛且精度高; 对于同类型网格, 网格边界层底层厚度及圆周节点数的选取均对模拟结果存在较大影响。

【关键词】 网格划分; 叉排管束; 摩擦阻力系数 f ; 数值模拟
中图分类号 TB1 文献标识码 A

Effect of Mesh form on the Friction Coefficient of Flow Transversely Eroding Staggered Tube Bundles

Huo Haie¹ Jing Chengjun¹ Huo Haibo² Li Kai³

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065;
2. Ocean Engineering Research Institute, Shanghai Ocean University, Shanghai, 201306;
3. National Microgravity Laboratory, IMCAS, Beijing, 100190)

【Abstract】 Computational fluid dynamics software FLUENT was used to numerically simulate the exhaust gas flow crossing staggered tube bundles (number of rows in the horizontal and vertical direction is 5, and the transverse and longitudinal spacing ratio is 1.25, respectively). The focal point was directed at the effect of mesh form on the friction coefficient of flow in a limited space. The whole flow field was gridded by using triangular and quadrilateral unstructured mesh, and quadrilateral structured mesh. The friction coefficient f was calculated and compared with the experimental value. It is found that much time was needed to generate a structured mesh, however, the numerical simulation on the structured mesh was easily convergent and the accuracy of simulation was good comparing with the unstructured mesh. Furthermore, the grid boundary layer thickness and grid number in the circumference direction of tube gave large influence on the results of simulation.

【Keywords】 mesh; staggered tube bundles; friction coefficient; numerical simulation

0 引言

数值模拟广泛用于换热器的设计。数值模拟中网格的形状决定着网格的边界适应性、网格节点的密度、聚集度、光滑性, 单元的形状决定网格的质量, 从而影响模拟计算结果的精度^[1]。黄德斌等^[2]对类似问题进行了数值模拟, 在近壁处设置了网格

边界底层, 最小尺寸为 0.16, 圆周节点数取为 100, 其余地方采用三角形非结构化网格, 模拟结果与经验值吻合较好; 喻晶等^[3]对单侧受限管排自然对流进行了数值模拟研究, 同样在近壁处设置了网格边界底层, 其余采用四边形非结构化网格, 但文中没有说明采用这样网格划分的原因; 刘敏珊等^[4]对流

作者简介: 霍海娥 (1974.2-), 女, 在读博士, 副教授, E-mail: huoyufan_2@163.com

通讯作者: 敬成君 (1965.1-), 男, 博士, 教授, E-mail: chengjunjing@126.com

收稿日期: 2013-01-14

体横掠管束模拟中壁面函数的影响进行了研究,计算时网格间距取 0.5,在网格无关性验证中指出了采用三角形网格和四边形网格对计算结果影响不大,但没有分析边界层底层厚度及圆周节点数对模拟计算结果的影响;潘维等^[5]对匀速流体横掠管束做了模拟研究,指出了不同的网格边界层数和不同的渐变率对计算结果没有太大影响。为了进一步探究网格边界底层厚度、圆周节点数、网格间距及网格形式(结构化和非结构化)对模拟计算结果的影响程度,本文以适用于夏热冬冷地区新型分室采暖系统中烟气-水小型换热器(烟气冲刷叉排管束)为研究对象,探究受限空间内网格划分对模拟计算结果的影响,为今后对换热器进行大型数值模拟计算做前期准备工作。

流体横掠叉排管束的绕流流动比较复杂。雷诺数 Re 是影响管束绕流的关键因素。在不同 Re 下,粘性不可压缩流体绕圆管管束的流动会呈现不同的流态。在低雷诺数下,管束中的主流为层流状态。本文中 $Re < 1 \times 10^3$,是以层流为主的绕流工况。对于层流扰流,其流动特性主要采用实验数据和实验关联式进行预测。在众多的实验关联中,茹卡乌斯卡斯公式应用最为广泛。本文将摩擦阻力系数的数值模拟结果与采用茹卡乌斯卡斯公式的计算值相比较,分析不同网格划分形式对数值计算结果的影响。

1 模型的建立

1.1 物理模型

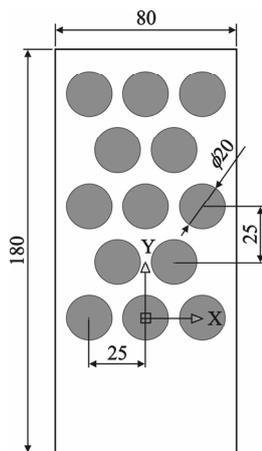


图1 换热器侧面图 (mm)

Fig.1 Side view of heat exchanger (mm)

本文以一种新型的烟气-水换热器为研究对象,其侧面图示见图1。烟气由换热器的下方进入,

横掠由 5 排管组成的叉排管束,加热各圆管内的冷水,冷却后的烟气从换热器上方排出。圆管外径 $d=20\text{mm}$,管束横向间距 $S_T=25\text{mm}$,纵向间距 $S_L=25\text{mm}$,换热器侧面尺寸为 $80\text{mm} \times 180\text{mm}$ 。

1.2 数学模型

基于物理模型的结构特点,考虑到计算精度的要求,计算区域的选取见图2所示。计算区域的大小为 $40\text{mm} \times 500\text{mm}$,入口至第一排管(定义为最下面的一排管)的距离为 $10d=200\text{mm}$,出口至最后一排管(定义为最上面的一排管)的距离也为 $10d=200\text{mm}$,之所以取这样的长度,主要是为了消除出入口处的不均匀性对数值求解的影响^[6]。流动介质为烟气,均匀来流速度为 0.03m/s ,管壁的温度为 80°C ,入口处的烟气温度 t_f' 为 850°C ,出口处的烟气温度 t_f'' 为 150°C ,则流体定性温度 $t_f = \frac{1}{2}(t_f' + t_f'') = 500^\circ\text{C}$ 。定性温度下烟气的热物性参数见表1。

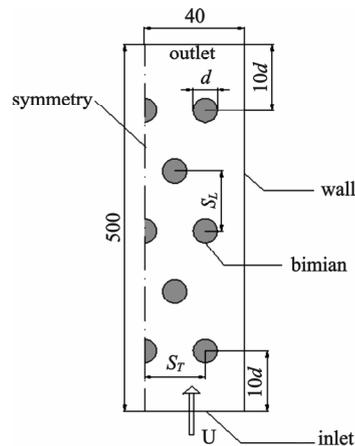


图2 计算区域 (mm)

Fig.2 Calculation region (mm)

表1 定性温度下烟气的热物理性质 ($P=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)

Table 1 Thermo physical properties of exhaust gas at characteristic temperature

ρ kg/m ³	c_p kJ/(kg·K)	λ W/m·K	ν m ² /s	Pr
0.457	1.185	0.0656	76.3×10^{-6}	0.64

如已知未进入管束时的流体速度为 u_0 ,则叉排时管束最窄流通截面处的最大流速 u_{max} ^[7]为:

$$u_{\text{max}} = \max \left\{ \frac{u_0 S_T}{S_T - d}, \frac{u_0 S_L}{2(S' - d)} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$S' = \sqrt{\left(\frac{S_T}{2}\right)^2 + S_L^2} \quad (2)$$

将数值代入上式, 可得:

$$S' = \sqrt{\left(\frac{S_T}{2}\right)^2 + S_L^2} = \sqrt{\left(\frac{25}{2}\right)^2 + 25^2} = 28\text{mm}$$

$$\begin{aligned} u_{\max} &= \max \left\{ \frac{u_0 S_T}{S_T - d}, \frac{u_0 S_L}{2(S' - d)} \right\} \\ &= \max \left\{ \frac{0.03 \times 25}{25 - 20}, \frac{0.03 \times 25}{2(28 - 20)} \right\} \\ &= \max \{ 0.15, 0.05 \} = 0.15\text{m/s} \end{aligned}$$

由此, 可计算得流体雷诺数:

$$\text{Re}_f = \frac{u_{\max} d}{\nu} = \frac{0.15 \times 0.02}{76.3 \times 10^{-6}} = 39.32$$

则流体流动的摩擦阻力系数:

$$f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_{\max}^2} \quad (3)$$

式中: τ_w 为剪切应力, 由速度场求得:

$$\tau_w = \oint_L \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

式中, L 为所有固体壁面。

又根据经验公式^[8], 对于叉排管束有:

$$f_0 = 0.75 \text{Re}^{-0.2} = 0.36$$

在后面的分析计算中, 将以由经验公式得到的值 $f_0 = 0.36$ 为基准, 与由公式 (3) 算得的值相比较, 并且定义相对误差为 $\frac{f - f_0}{f_0} \times 100\%$ 。

1.3 基本控制方程

对于二维单相不可压缩粘性流体非定常层流流动, 其基本控制方程为:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

(2) 动量方程

x 方向:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5)$$

y 方向:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (6)$$

1.4 边界条件

定义流动方向与垂直到流动方向上的均匀速度分别为 u, v_0 。

(1) 入口处设置为速度进口

$$u = u_0 \quad v = 0 \quad (7)$$

(2) 出口处设置为自由流出

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad v = 0 \quad (8)$$

(3) 右边界和各管壁设置为固体壁面

$$u = 0 \quad v = 0 \quad (9)$$

(4) 左边界设置为对称边界

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

1.5 计算方法^[9]

本流动的雷诺数 $\text{Re}_f = 39.32 < 1000$, 属层流范围, 故选用 Lamminar 层流模型, 采用有限体积法对控制方程进行离散, 采用基于压力的分离式求解器进行求解, 计算中采用具有二阶隐式时间格式的非定常流动进行计算, 时间步长取 0.1s ^[10]。压力项与速度项的耦合采用 SIMPLE 算法, 压力项采用具有二阶精度的格式离散, 动量方程和能量方程采用二阶迎风格式离散。

2 网格划分方案

各方案的网格底层厚度分别取 $0.03, 0.1, 0.3$, 增长率 1.2, 层数为 5 层, 圆周节点数分别取 60, 90, 180, 网格间距分别取 $0.1, 0.5, 1, 2, 5\text{mm}$ 进行比较。

方案一: 采用三角形非结构化网格, 边界层设在管壁圆周面, 网格生成结果局部见图 3, 网格划分部分结果见表 2。

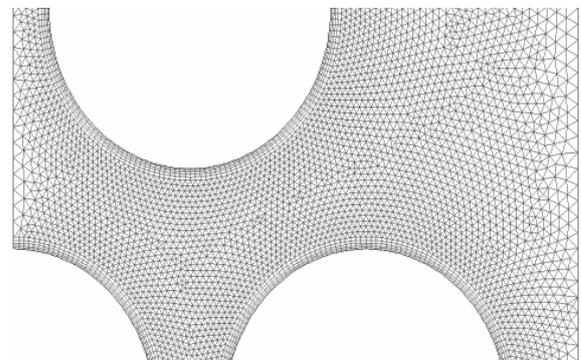


图 3 三角形非结构化网格

Fig.3 Triangular unstructured mesh

方案二：采用四边形非结构化网格，边界层设在管壁圆周面和固体壁面，网格生成结果局部见图 4，网格划分部分结果见表 2。

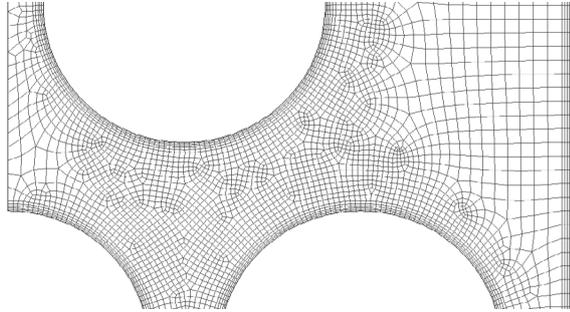


图 4 四边形非结构化网格

Fig.4 Quadrilateral unstructured mesh

方案三：采用结构化网格，将区域用六边形分块划分网格，边界层设在管壁圆周面和固体壁面，网格生成结果局部见图 5，网格划分结果见表 3。

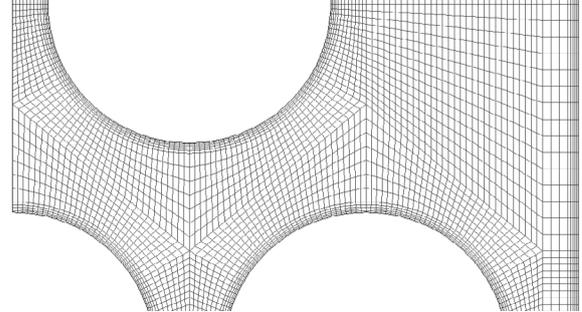


图 5 四边形结构化网格

Fig.5 Quadrilateral structured mesh

表 2 方案一和方案二网格划分部分结果及摩擦阻力系数 f 与经验公式值的相对误差

Table 2 Mesh, friction coefficient and relative error with the experimental value under scheme 1 and scheme 2

边界层底层厚度 0.1mm，圆周节点数为 180		方案一			方案二		
网格间距	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差	
0.1	—	—	—	—	—	—	
0.5	—	—	—	86799	0.35	2.78%	
1	77534	0.3497	2.86%	35384	0.3516	2.32%	
2	49680	0.348	3.33%	—	—	—	
5	38894	0.341	5.28%	—	—	—	

注：—表示不能生成网格

表 3 方案三网格划分结果及摩擦阻力系数 f 与经验公式值的比较

Table 3 Mesh, friction coefficient and relative error with the experimental value under scheme 3

圆周节点数为 60	边界层底层厚度 0.03mm			边界底层厚度 0.1mm			边界底层厚度 0.3mm		
网格间距	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差
0.1	65398	0.354	1.67%	89274	0.352	2.22%	—	—	—
0.5	20300	0.35	2.78%	16784	0.352	2.22%	14876	0.354	1.67%
1	15314	0.348	3.33%	11968	0.35	2.78%	19547	0.35	2.78%
2	8372	0.34	5.56%	9886	0.346	3.89%	7260	0.348	3.33%
5	6968	0.311	13.61%	8454	0.307	15.61%	—	—	—

圆周节点数为 90	边界层底层厚度 0.03mm			边界底层厚度 0.1mm			边界底层厚度 0.3mm		
网格间距	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差
0.1	92573	0.354	1.67%	88618	0.354	1.67%	—	—	—
0.5	25330	0.352	2.22%	24444	0.352	2.22%	21786	0.35	2.78%
1	16484	0.346	3.89%	16302	0.35	2.78%	19547	0.35	2.78%
2	11856	0.338	6.11%	11157	0.346	3.89%	11088	0.346	3.89%
5	9854	0.309	14.17%	9158	0.305	16.87%	—	—	—

续表 3 方案三网格划分结果及摩擦阻力系数 f 与经验公式值的比较

Table 3 Mesh, friction coefficient and relative error with the experimental value under scheme 3

圆周节点数为 180	边界层底层厚度 0.03mm			边界层底层厚度 0.1mm			边界层底层厚度 0.3mm		
	网格间距	网格数	f	相对误差	网格数	f	相对误差	网格数	f
0.1	174638	0.354	1.67%	163738	0.351	2.32%	—	—	—
0.5	49300	0.352	2.22%	24444	0.354	1.67%	43116	0.35	2.78%
1	33408	0.35	2.78%	31936	0.352	2.22%	30162	0.35	2.78%
2	23856	0.338	6.11%	23856	0.346	3.89%	21372	0.498	38.3%
5	19722	0.303	15.8%	18522	0.30	16.7%	—	—	—

注: —表示不能生成网格

由于在划分网格时建了大量的模型, 本文仅将部分划分结果显示在表 2 和表 3 中。从大量的划分结果比较来看, 对于方案一 (三角形非结构网格), 只能在管壁设置网格边界层, 而不能在内壁设置网格边界层, 网格间距取 0.1mm 和 0.5mm 均不能或难以生成网格, 见表 2 左列; 对于方案二 (四边形非结构网格), 可以同时 在管壁和内壁设置网格边界层, 网格间距取 0.1mm 和 5mm 时均不能或难以生成网格, 见表 2 右列; 对于方案三 (结构化网格), 可以同时 在管壁和内壁设置网格边界层, 当边界底层厚度取 0.3mm 时, 网格间距取 0.1mm 和 5mm 时均不能或难以生成网格, 见表 3 右列; 当边界底层取 0.03mm 和 0.1mm 时, 无论取多大的网格间距均可顺利生成网格, 见表 3 前两列。在三种方案中, 方案三生成网格速度最快, 但建模耗时最长, 方案二生成网格速度最慢, 方案一和方案二建模耗时均较短。

3 计算结果分析

3.1 模拟结果的速度场

针对网格边界层底层厚度取 0.1mm, 圆周节点数取 180, 网格间距取 1mm 的情况, 分别对三种方案生成的模型进行模拟计算, 发现三种网格划分方案都能很好地模拟气流横向冲刷管束的流动, 速度场分布的局部放大图见图 6。表 2 和表 3 中的流动阻力系数 f 就是由模拟得到的各速度场计算得到。

3.2 各因素对计算结果的影响

各因素对计算结果的影响见图 7。

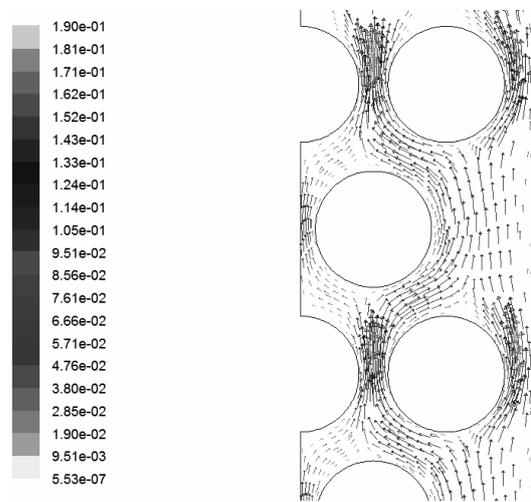


图 6 模拟结果的速度场

Fig.6 A snapshot of the calculated velocity field

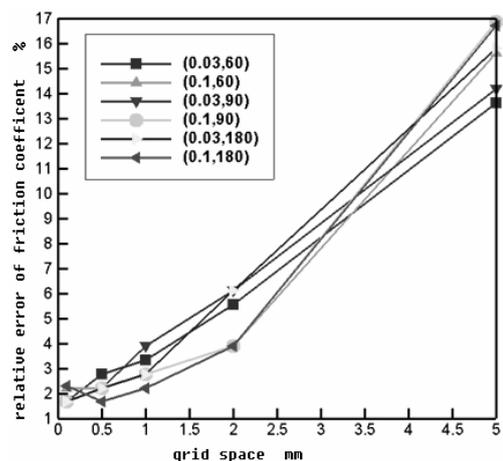


图 7 各因素对计算结果相对误差的影响

Fig.7 The effect of various factors on relative error of friction coefficient

图 7 中图例后括号中的数字如 (0.03, 60), 前一个数字代表网格边界底层的厚度为 0.03mm,

后一个数字代表圆管的圆周节点数为 60。从图中可以看出,在网格间距为 0.5mm-2mm 区域内,对于相同的圆周节点数(即括号内后面的数字相同),网格边界底层厚度取 0.03mm 的误差值均大于边界底层厚度为 0.1mm 的误差值;对于相同的网格边界底层厚度(即括号内前面的数字相同),圆周节点数越大(即括号内后面的数字)则相对误差值越小。另外,随着网格间距的增大,相对误差值呈增大趋势,尤其当网格间距取 5mm 时,误差值均在 10%以上,模拟结果变得不可信。

4 结论

根据以上数值模拟结果及分析可以得到以下结论:

(1) 网格边界层底层厚度的大小对计算结果有影响,太大和太小都使得误差加大,对于本模型,取 0.1mm 比较合理。

(2) 圆周节点数的多少对计算结果有影响,误差随着节点数的增加而减小。但过多的圆周节点数将造成网格数量的增大,延长计算时间,对于本模型,圆周节点数取 180 比较合理。

(3) 结构化网格相对于非结构化网格计算耗时少,易收敛,网格生成速度快,但建模时间长。

参考文献:

- [1] 张鸿清,腾丽娟,刘嘉伟.网格划分形式对双圆柱串列绕流模拟的影响[J].黑龙江科技信息,2011,(5):63.
- [2] 黄德斌,邓先和.气流横向冲刷圆壳管束换热的数值模拟[J].化学工程,2005,33(4):12-14,25.
- [3] 喻晶,翁文兵,张太康.单侧受限管排自然对流的数值模拟[J].制冷与空调,2011,25(2):124-128.
- [4] 刘敏珊,杨帆,董其伍,等.流体横掠管束模拟中壁面函数影响研究[J].热能动力工程,2010,25(5):497-500.
- [5] 潘维,池作和,斯东波,等.匀速流体横掠管束的流场数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2004,38(8):1043-1046.
- [6] S S Paul et al. Experimental and numerical investigation of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008,(29): 387-414.
- [7] 翁中杰,程惠尔,戴华金.传热学[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- [8] [苏]A.A.茹卡乌斯卡斯.换热器内的对流换热[M].北京:科学出版社,1986.
- [9] 张立.小雷诺数下圆柱绕流的数值模拟[J].力学季刊,2010,31(4):543-547.
- [10] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞.精通CFD工程仿真与案例实战[M].北京:人民邮电出版社,2011.