

多分支管道若干流动特性研究

吴 玮,严忠民

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过数值计算对多分支管道的若干流动特性进行研究.在拼片式块结构化网格系统下,采用 $k-\epsilon$ 紊流模型对多分支管道中的流场进行二维计算,发现对于具有相同尺寸、相同几何型式的多分支管道而言,支管距主管入口端的位置越靠前,通过该支管的流量越小.结合计算结果与实验结果认为,流线弯曲程度对流动的影响是产生这种流量分布趋势的原因.在其他条件不变的情况下,支管流量与主管入口流量近似呈线性关系,支管间的流量差随主管入口流量的增大而增大,随支管间距的增大而减小.

关键词 多分支管道 块结构化网格 $k-\epsilon$ 紊流模型 数值解

中图分类号 TV134 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)03-0272-04

多分支管道在流体工程中有着极为广泛的应用,常见于市政、环境以及能源工程等领域,管道中水的流动特性研究对工程设计具有重要的指导意义.数值计算方法包括特征分析法以及采用正交网格和非正交网格的有限差分方法^[1,2]等.计算的难点在于主支管交界处 T 型管的流场模拟,交界处由于截面面积和流向突然改变,可能出现流动分离和漩涡等现象,局部流场较为复杂.为准确模拟局部流场,本文采用块结构化网格,对主支管交界处的网格进行局部加密,利用 $k-\epsilon$ 紊流模型,采用有限体积法对多分支管道中的二维不可压缩流动进行数值计算,并对影响流量分配的因素进行了讨论.

1 数值计算模型及原理

1.1 计算模型

控制方程的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中: ρ ——流体质量密度; V ——流速; Γ ——通用扩散系数; S ——通用源项; ϕ ——任一物理量的通用变量.采用 $k-\epsilon$ 紊流模型,模型中 k 和 ϵ 的方程均具有下述一般形式:

k (或 ϵ)的变化率项 + 对流项 = 扩散项 + 时均流产生项 + 耗散项

1.2 块结构化网格系统中计算原理

块结构化网格是根据问题的条件把整个求解区域划分为若干个小区域,每一块中都用结构化网格来离散,各块中的离散方程也各自分别求解,块与块之间的耦合通过交界区域中信息的传递来实现.可分为拼片式和搭接式两种.拼片式网格块与块之间通过一个界面相接,交界处网格信息传递通常采用 D-N 型信息传递方法^[1],一个块在交界处给出第一类边界条件,另一块在交界处给出第二类边界条件.

以图 1 所示两块网格的公共边界 AB 上信息传递方法为例,为了求解密网格块(块 1)中的离散方程,需要有一个东侧邻点之值(如图 1(a)),为此将密网格块的 ξ 方向的网格线延伸一格,与疏网格区的 CD 相交于 N 点. N 上的 ϕ_1 可以由块 2 中 CD 线上各结点的 ϕ_2 线性插值而得(ϕ 下标 1,2 表示块的编号),以获得所需的变量值 u, v, p' 等.

类似地将粗网格块 2 的 ξ 网格线延伸一格(如图 1(b)),交块 1 中的网格线于 Q, P 两点,对于粗网格的这条延伸边界采用由密网格的通量插值以获得相应的粗网格边界上的通量.同时,为保证界面上的守恒性,

对密网格在 CD 线上得到的值根据界面上的通量守恒条件进行修正.

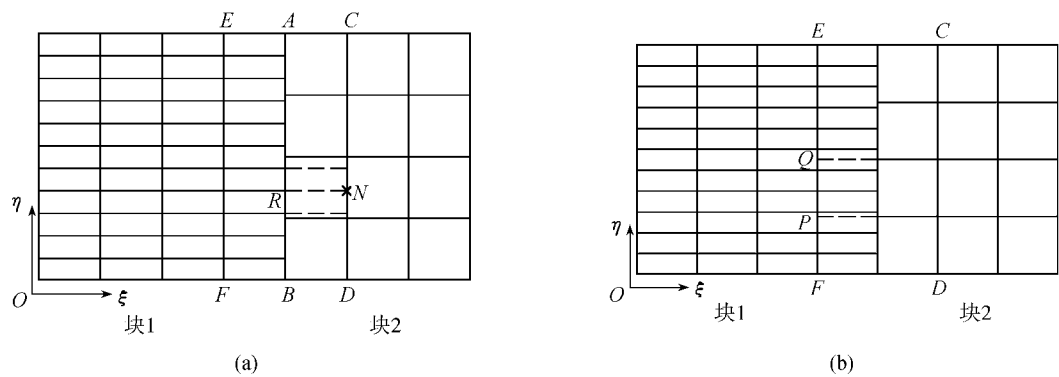


图 1 拼片式块结构化网格界面信息传递

Fig.1 Information transmission in the interface of patched block-structured grids

2 多分支管道流场计算

2.1 网格布置

计算模型包括 1 根主管和 4 根支管,主管及支管截面均为正方形,主管截面 $50.8\text{ mm} \times 50.8\text{ mm}$,支管截面 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,相邻支管轴线距离为 100 mm ,支管出口距主管轴线距离为 100 mm ,支管与主管垂直相交,主管左侧开敞,为水流进口端,右侧封闭.

由于支管与主管处流向及流速突然发生变化,局部流态较为复杂,为了更好地模拟主管交叉处的流动特性,提高计算精度,同时要求节省机时,提高计算效率,采用拼片式块结构化网格,在支管与主管交叉区域布置较细密的网格,其余区域网格相对粗疏,密网格区网格密度是粗网格区的 2 倍,网格总数为 7 190. 如图 2 所示.

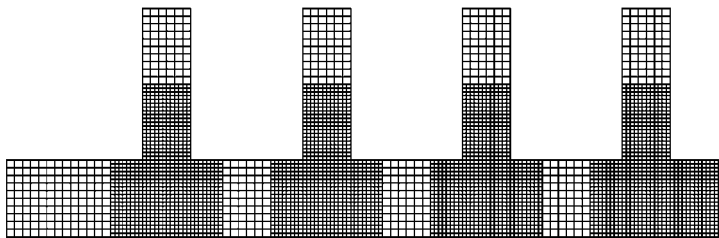


图 2 数值计算网格分布

Fig.2 CFD grid system for manifolds

在计算区域上对控制方程采用迎风格式进行离散,为避免压力与速度之间的失耦,计算中采用交错网格,速度分量及除压力以外的其他变量均在网格结点上求解,压力在控制体角点上求解.

2.2 边界条件及求解步骤

多分支管道紊流流动二维问题的边界条件如下:

a. 主管左侧为入口边界,入口流量为 $1.3 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$. 入口给定流速边界条件和紊动边界条件是流速 $u = 0.5\text{ m/s}$, $v = 0$ 由于在管流中,紊流漩涡的特征尺度受管道断面特征尺度的限制,因此在初步计算中,根据管道断面尺寸,取紊动特征尺度为 0.03 m . 相对紊动强度要通过实验测定,利用经验公式对入口边界的相对紊动强度作近似估计:

$$\mu_t = 0.16 \left(\frac{UL}{\nu} \right)^{\frac{1}{8}} \tag{2}$$

式中: μ_t ——相对紊动强度; U ——时均流速; L ——紊流特征长度; ν ——运动粘性系数.

b. 各支管出口边界给定压力边界条件,相对压强 $p = 0$.

c. 主管右侧封闭,为壁面边界,服从壁面定律.

对离散后的方程组采用 SIMPLE 算法迭代求解,具体求解步骤如下:

a. 假设初始速度场和压力场.

b. 求解速度场.

c. 求解压力修正值方程. 由于采用块结构化网格,在疏、密网格块交界面上对压力修正值 p' 方程需作修正如图 3 所示. (a)对于密网格的界面控制容积 P_f , 压力修正方程的边界条件按常规方法处理,即令压力修正方程中的系数 $A_s = 0$, 同时界面流量 ρV^* 则从相邻的粗网格区的北界面流速插值而得,然后对获得的界面流速作总体质量守恒修正;(b)对于粗网格界面控制容积 P_c ,在密网格中取一虚拟点 N ,该处的 p' 值由密网格中的邻点(N 的邻点)上的 p' 插值而得,并以此作为粗网格北界面压力修正方程的第一类边界条件.

d. 根据压力修正值改进速度值. 为保证收敛,对压力修正值和速度修正值均作亚松弛处理,压力亚松弛因子取 0.2,速度亚松弛因子取 0.7.

e. 利用改进后的速度场重新计算动量离散方程的系数,并用改进后的压力场作为下一层次迭代计算的初值,重复上述步骤,直到获得收敛的解.

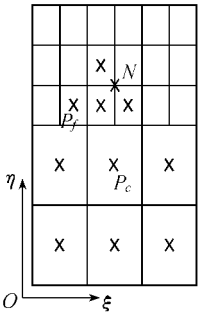


图 3 块结构化网格上的 SIMPLE 算法

Fig.3 SIMPLE algorithm for patched block-structured grids

2.3 计算结果及讨论

2.3.1 计算结果

从计算所得的图 4 可以看出,随着水流进入分支管道,主管中的流速逐渐减小,由于主管右侧封闭,因此在主管右侧近壁区存在一明显的滞止回流区.各支管中流速分布及变化趋势大致相似,水平流入主管的流体在进入竖直的支管时,由于流向突然变化和锐缘效应,在紧随锐缘后支管左侧壁处发生分离,支管断面右侧流速较大,向左侧逐渐减小,并在支管左侧壁面处形成一回流区,支管距主管入口端的位置越近,回流区范围越大,从距主管入口端最近的支管开始编号,沿程依次为支管 1、支管 2、支管 3、支管 4.

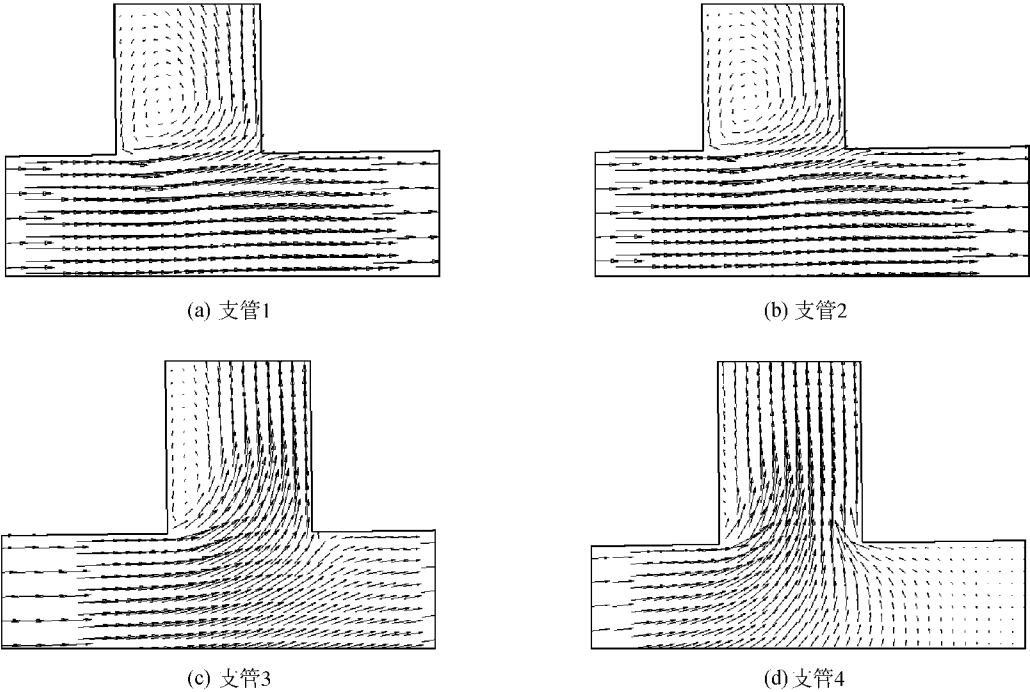


图 4 各支管入口处流速分布

Fig.4 Flow field at inlets of each branch of manifolds

随着水流在支管中的流动推进,支管断面流速分布渐趋均匀,支管距主管入口端的位置越近,支管出口平均流速越小,即出流量越小.在廖振强实验^[2]中,采用与算例中相同的多分支管道结构型式及断面尺寸,对不同流量和不同支管数目时各支管中恒定流状态下的流量分配进行了测量.结果表明,计算结果显示的这种流量分布趋势与实验实测结果保持一致.

对于支管中这种流量分布趋势的形成原因,宏观上解释为:尽管管道中的流动是紊流,但是流体质点仍大致沿着流线方向前进,以支管 1 和支管 2 为例进行比较,流体在进入支管时,由于流向突然改变,流线弯曲,支管 1 相对于支管 2 来说,所在位置相应的主管流速较大,流动的惯性作用较强,流体进入支管 1 时流线

弯曲程度较高,流线较不光滑,从计算所得的流速分布图可明显看出这一趋势.因此相对来说流体较难进入支管 1,支管 1 中的分离回流区范围比支管 2 中的大,进入支管 1 的流量相对较小,依此类推,支管中的流量分配就呈现了沿程增大的现象.

2.3.2 流量分配的影响因素讨论

多分支管道中影响流量分配特征的因素很多,对于支管截面型式相同的多分支管道而言,支管间距、支管长度、主管入流流量以及支管与主管的截面面积之比都有可能影响各支管中的流量分配.

a. 主管入流流量对支管流量分配的影响.在上述其他边界条件不变的情况下,改变主管入口边界条件,分别对入口流量为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $3.75 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时该多分支管道中的流动进行计算,从计算结果可以看出,主管入流流量对支管流量分配有明显影响,各支管流量与主管入口流量近似呈线性关系,随着主管入口流量增大,支管间的流量差增大,在支管流量与主管流量关系曲线图上表现为直线的斜率随主管流量的增大而增大.如图 5 所示.

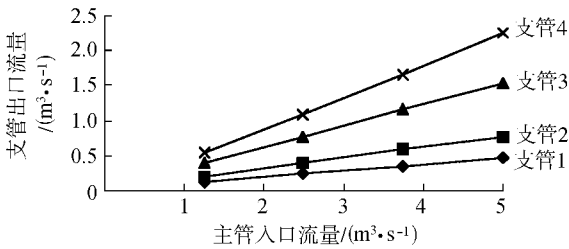


图 5 支管流量与主管流量关系曲线

Fig.5 Linear relationship between flows of branches and main duct

b. 支管间距对支管流量分配的影响.保持主管及支管截面型式不变,增大支管间距,在流量为 $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时对该多分支管道中的流动进行计算,结果表明,随着支管间距增大,各分支管道中的流量差值有所减小,但流量分布趋势仍保持不变,即距主管入口端位置越近的支管流量越小.

3 结 论

对于具有相同尺寸、相同几何型式的多分支管道而言,流动具有下述特征:支管距主管入口端的位置顺序越靠前,通过该支管的流量越小;支管流量与主管流量的关系近似为线性,并且随着主管入口流量增大,支管间的流量差增大.增大支管间距,支管间的流量差值减小.

参考文献:

[1] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 46—52.
[2] 廖振强. 多分支管道若干流动现象和特性的探讨[J]. 气动实验与测量控制, 1996, 10(3): 31—39.

Investigation on flow characteristics in manifolds

WU Wei, YAN Zhong-min

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: A 2-D patched block-structured grid system is generated for study of the flow characteristics in manifolds. By use of the $k-\epsilon$ turbulent model, the 2-D numerical calculation of the flow field in manifolds is performed with the grid system, and it is indicated that, for the manifolds with the same size and geometric shape, the shorter the distance of a branch away from the inlet of the main duct, the smaller the flow rate through the branch. According to the calculated result and experimental data, this flow rate distribution is mainly caused by the influence of the curvature of streamline on the flow field. Without changes of other conditions, the flow rate through branches is of a linear relationship with that at the inlet of the main duct, and the flow rate difference between branches increases along with the increase of the flow rate at the inlet of the main duct and the decrease of the distance between branches.

Key words: manifolds; block-structured grid; $k-\epsilon$ turbulent model; numerical solution