

区域分裂的 SIMPLE 算法用于 管路粘性流场计算*

李玉军¹, 包钢¹, 邵锦文², 王祖温¹

(1. 哈尔滨工业大学 气动技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘要: 为了研究气动系统中节流管的特性和计算节流管内部及尾部射流区的粘性流场, 利用 SIMPLE 算法对两端带有节流口的管路粘性流场进行了数值计算, 根据管路的几何形状和流动特点, 对计算区域共划分了 5 个区, 并给出了相应的分区算法和各种边界条件的处理方法, 通过计算得到节流管内各项参数。计算结果表明这种算法不仅可以计算出管路内部的流场, 而且可以计算出管路尾部射流区的流场, 并可以较好地描述通量的守恒性,

关键词: SIMPLE 算法; 管道; 管流; 粘性流; 数值计算

中图分类号: V434.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)06-0048-04

Application of SIMPLE algorithm with domain decomposition in tube viscous flow field

LI Yurjun¹, BAO Gang¹, SHAO Jirwen², WANG Zurwen¹

(1. Pneumatic Center, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China; 2. The 31st Research Inst., Beijing, 100074, China)

Abstract: A SIMPLE algorithm with domain decomposition was applied to analyze the characteristic of tube and calculate the viscous flow field of the tube and jet domain. Five domains were divided in calculation section according to the shape of tube and flow character and the decomposition method was given. The result of numerical simulation shows that the flow field can be calculated not only in the tube but also in the jet domain of tube.

Key words: SIMPLE algorithm; Pipeline; Pipe flow; Viscous flow; Numerical calculation

1 引言

在管路的结露问题和管路系统中节流管的特性研究中, 对管路内部及其尾部射流区流场的详细研究, 都有重要的意义。本文运用区域分裂的 SIMPLE 算法进行计算^[1,2], 湍流模型采用 $k-\epsilon$ 两方程模型^[3,4]。根据管路的结构特点出口处的气体流动的物理特性, 共分了 5 个区, 采用分区方式构造了高质量的网格系统, 提高了求解精度。该算法不仅解决了管路出口处的背压难以给定的问题, 而且可以计算出出口处的尾部射流区的流场, 为节流管的设计和计算提供了详细的数据。

2 管路的数学模型

圆管属于轴对称, 管路的连续性方程、能量方

程和运动方程的柱坐标形式^[5]为:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

运动学方程

$$\rho \left[\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right] = \rho F_r + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial t} + \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] = \rho F_z + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial t} + \frac{\partial(r \tau_{zz})}{\partial z} \right] \quad (3)$$

式中

$$\tau_{rr} = (-p + \lambda \cdot \nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r},$$

* 收稿日期: 2000-01-10; 修订日期: 2000-03-03。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59375183)。

作者简介: 李玉军 (1973—), 男, 博士生, 研究领域为气动系统流场与结露问题。

$$\tau_z = (-p + \lambda \cdot V) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$\tau_r = \mu \left| \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|, \therefore V = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4)$$

能量方程

$$\rho_p \left| \frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right| =$$

$$\tau_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \tau_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \tau_z \left| \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right| +$$

$$\frac{1}{r} \left| \frac{\partial}{\partial r} \right| kr \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left| kr \frac{\partial T}{\partial z} \right| + \rho q \quad (5)$$

气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (6)$$

为了能较好地模拟出进出口参数的剧烈变化, 及管内旋涡流动对流场气动参数的影响, 选用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型方程, 采用 SIMPLE 算法进行计算。

3 分区计算^[6,7]

目前多数文献对管路的流场计算时仅局限于管路内部, 仅能了解管路内部的流场, 而对射流部分无能为力。另外, 当求解区域仅局限于管内时, 其出口处的背压难于确定。因此若将射流区的流动同时计算时, 整个计算区域的出口背压 (如图 1 中的 f 面) 将可以直接取为环境压力, 这样就可以减少由于背压难于确定而造成的管路的计算误差。本文采用分区算法对管路内部及射流区进行流场计算, 根据管路实际境况, 划分了 5 个区域, 如图 1 所示。由于管路为轴对称流动, 因此仅计算了半个区域。管路的外轮廓线为 $abcd$, 气体流动方向如图中箭头所示, dg 面为进口截面, ch 面为管路出口截面。管路进出口各有一个节流口, 轴线边界 dc , ce 面采用对称性条件给出。

iv 区为进口节流区, 流体由此流入。对于进口边界条件 (dg 面), 需要给定进口的总压和总温及入射角。

㊟区为管路内区, 管路内表面 (ab 面) 设为无滑移边界条件, 与 iv、㊟区的交接面用分区处理方法计算。

㊟区为出口节流区, 节流口内表面设为无滑移边界条件, 与 ㊟、㊟区的交接面用分区处理方法计算。

㊟区 (cfb 所围成的区域) 为尾部射流区, 由于在管路出口处 (ch 截面) 气流速度可能达到或超

过声速, 背压可能大于环境压力, 背压难以给定, 因此引入尾部射流区。射流区长度 (即 g 面距 ch 面距离) 取为 2 倍的节流管长度, 由于 g 截面远离管路出口, 假设压力在该截面上已得到恢复, 因此可以给定为环境压力。 gf 面用分区处理方法计算。

㊟区 (fjk 所围成的区域) 为扩展区, 由于尾部射流区的 gf 面由于受到膨胀波与压缩波的影响较大, 此截面处的压力并不是环境压力, 因此必须给定一个扩展区。取 ij 面的半径为 3 倍的节流孔直径, ik 面距节流孔出口截面为 75% 节流管总长, 并假设压力在 fi , ij 和 jk 面上已得到恢复, 可以给定为环境压力。 kb 面设为无滑移边界条件, gf 面用分区处理法计算。

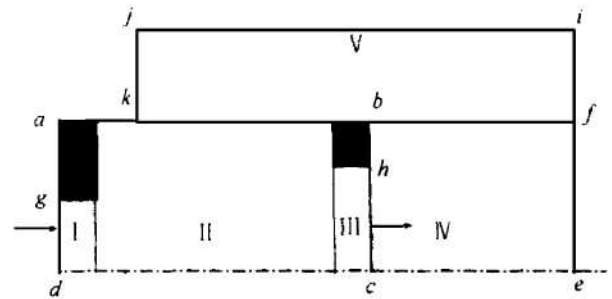


Fig. 1 Calculation zone

下面具体给出分区边界上的信息传递的处理方法, 这里以 2 区在 1 区内的交叠网格为例说明, 图 2 中 section 1 区中的虚线网格为 2 区的网格在 section 1 中的交叠部分, 交叠网格内的气动参数值通过如下方法确定: 由交叠网格 ($N-1$) 在 1 区的几何位置确定处于该网格附近的 1 区的网格单元, 他们分别为如下 3 个网格即单元 (L), ($L-1$) 和 ($L+1$), 并由这些单元的气动参数和交叠网格的几何位置构造 Riemann 问题, 零网格单元上的气动参数以 U 表示, 则网格单元 ($N-1$) 上的 Riemann 问题的初始条件为

$$U_{N-1}^k = U_{(L-1)}$$

$$U_{N-1}^R = U_{(L+1)} \quad (7)$$

通过此 Riemann 问题求出该交叠网格上的气动参数值。分区处理方法可以处理来自任意方向上的任意间断, 从而保证了分区计算中信息传递的准确性。

4 结果分析

为了验证该分区算法的有效性, 及节流管内部流动的一般特性, 本文给出了一个亚声速流场的算例。

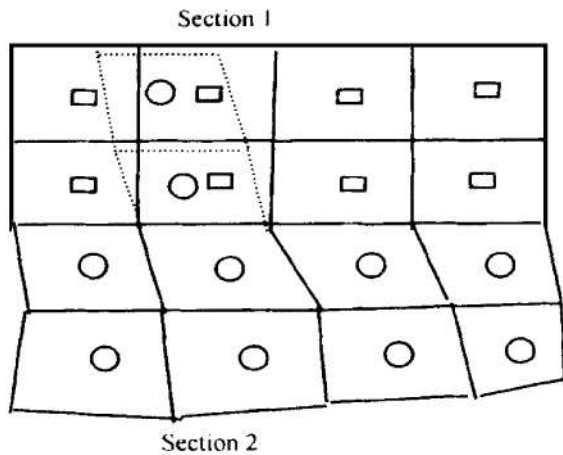


Fig. 2 Grid for domain decomposition

其中进口总压为 103 kPa, 总温为 298 K, 出口背压为 101.3 kPa, 轴向进气。两个节流孔的内径分别为 8 mm, 与 9 mm, 节流管内径为 15 mm。5 个分区中轴向与径向的网个数分别为 15×10 , 50×25 , 15×12 , 21×25 和 29×10 。

首先分析压力场的变化, 图 3 给出了整个计算区域压力场的分布。从图中可以看出在节流管内部的压力分布呈现出脉动的趋势。在进口节流口附近由于射流的作用使得射流区附近的压力有较大的径向梯度。另外由于第二个节流孔的存在, 即阻塞作用的存在使得流体在流出节流管之前的压力有所上升, 该压力的扰动向管内传播, 在管内中间位置处产生了压力的急剧变化区。在流出节流管后, 大约在一个节流管的长度位置附近压力恢复到外界环境值。值得注意的是管内的压力脉动与节流管的长度与半径的比值有较大的关系, 当该值较大时压力脉动相对较弱, 反之则较强。因此该值是研究管路节流特性的一个关键的几何参数。

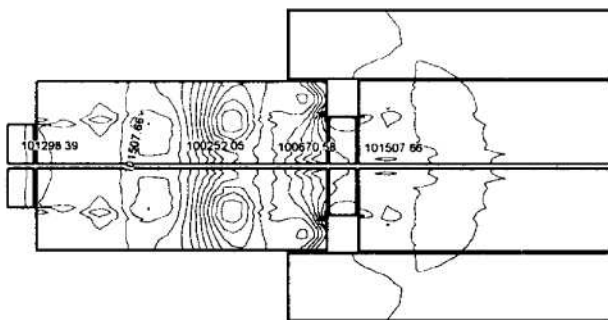


Fig. 3 Pressure field

图 4 给出了流场的马赫数等值线分布, 该图可以较清楚地反映出射流的发展过程, 流体在经过第

一个节流孔以较大的速度流入管内时, 在该节流孔附近形成了明显的射流区, 同时由于该区域的流动是在突扩段内完成的, 因此射流呈现出向外发散的趋势。当射流冲击到第二个节流孔时, 由于流动的堵塞作用使得管内近一半的区域呈现出较为紊乱的旋涡流动, 并影响到轴线附近。从马赫数等值线上可以看出此区域内的紊乱程度较大。当流体流出节流孔后, 由于是在自由空间内的发展, 因此流动较为有序, 在接近计算域的出口附近射流作用逐渐耗散掉, 马赫数分布区域均匀。由于在节流管内部靠近壁面附近为一回流区, 贴近壁面附近流速较低, 因此边界层较薄, 加之该区域网格点取得较少, 对附面层描述的不够详细, 因此从图 4 的马赫数等值线上基本上看不到附面层的存在。

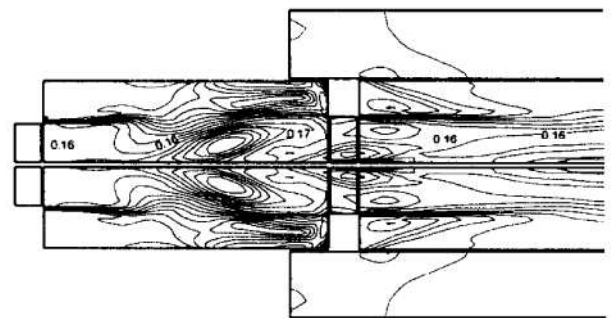


Fig. 4 Mach number contours

图 5 为进出口附近的速度矢量图。在进口附近由于是突扩段流动, 因此在管内的角区附近形成了两个较大的旋涡。此外从该图中可以明显地看出在射流边界线附近, 流体速度存在着较大的差异, 这是射流的典型特征。从图 5 (b) 的速度矢量图可看出, 当流体经节流孔流出时, 节流作用的存在对流动有较大的阻滞作用, 该现象的存在使得节流孔附近生成了两个较大的旋涡, 这是节流损失产生的一个主要原因, 也是影响节流效果的主要因素。另外一个产生节流损失的原因是流出节流孔后的突扩流动, 由于引射现象的存在使得外界环境的流体被带动而引射到射流区中, 从图中可以清楚地看到由于引射效应的存在而诱发的两个旋涡。当流体流出节流管后, 与周围大气进行强烈的掺混, 在较短的范围内时射流场逐渐被均化, 宏观上表现为速度矢量的一致。

图 6 给出了流场中的几条典型流线。正如前面所述, 由于管内旋涡的存在使得管内的流线呈现出波动的形式, 在出口后的自由射流区, 引射作用将

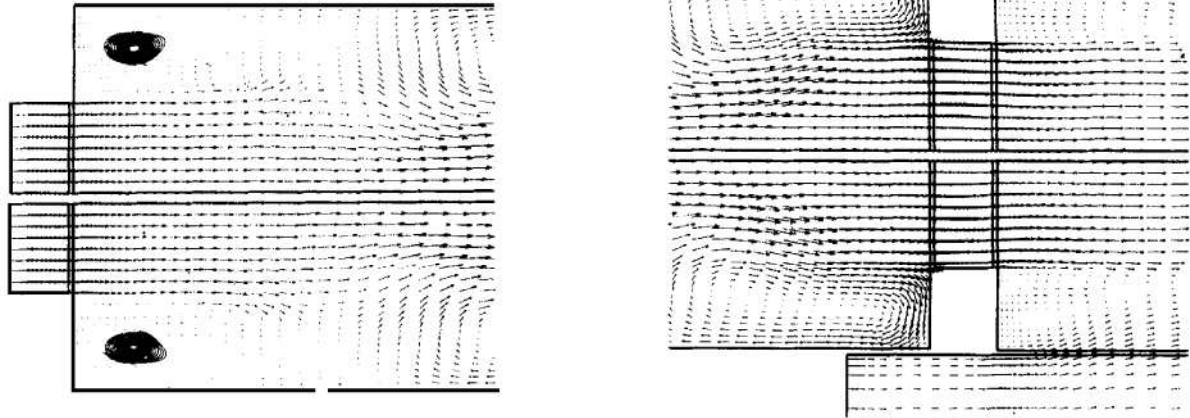


Fig. 5 Velocity Vector at inlet and outlet

(a) Inlet

(b) Outlet

周围环境流体抽向射流区。上述流动特征与典型的射流场分析是一致的，这说明本文所采用的算法可以较好地描述节流管内及其射流场的流动状况。

(尤其是压力脉动) 变化的主要原因，当进出口参数一定时，该脉动值的大小和管长与直径的比值有较大的关系。

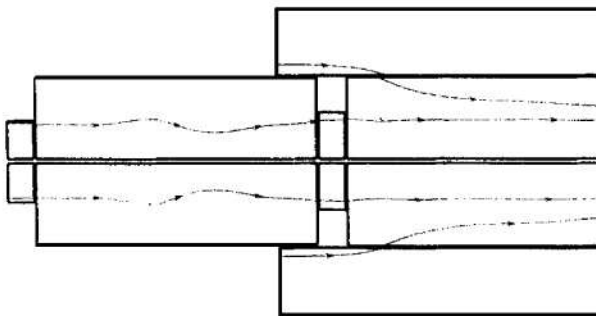


Fig. 6 Streamline

5 结 论

本文采用区域分裂的 SIMPLE 算法对典型的节流管内部及其射流流场的数值模拟，表明分区算法可以较好地描述通量的守恒性，对多块的复杂区域的求解具有较大的适应性。根据数值结果分析得出，突扩段与突缩段内产生的旋涡运动是节流损失产生的主要原因，另一个对节流损失影响的因素是节流管内由于旋涡运动所带来的复杂紊流流动。同时由于节流作用所产生的旋涡运动是引起管内气动参数

参 考 文 献

- [1] 帕坦卡 S 著. 传热与流体流动的数值计算 [M]. 张政译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 刘 东, 顾维藻, 刘文艳. 涡轮导向叶片变截面针肋通道内空气流动和传热过程数值模拟 [J]. 航空动力学报, 1998 (2).
- [3] Halupovich, Yulia, Natan, et al. Numerical solution of the turbulent supersonic flow over a backward facing step [J]. Fluid Dynamics Research 1999, 24 (5).
- [4] 袁 新. 可压缩 Navier-Stokes 方程中双方程湍流模型的选择 [C]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议文集, 1997.
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [6] Yeuan J J. Navier-Stokes computations for turbulent flow predictions in transonic turbine cascade using a zonal approach [R]. ASME 93-GT-240.
- [7] 王松涛. 叶轮机三维粘性流场数值方法与弯叶栅内涡系结构的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.

(责任编辑: 盛汉泉)