

气动系统中管路的二维粘性流场计算

包钢, 李玉军, 李军, 王祖温

(哈尔滨工业大学 气动技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了更加深入地研究气动系统中管路流动特性和各个参数的变化规律, 作者运用 SIMPLE 算法对两端带有节流口的管路进行二维粘性流场计算。在管路的进口处, 给定总压力和总温度。根据管路的几何特性和流动特点, 对计算区域划分了五个区域, 并给出了相应的分区算法。数值计算结果表明本算法可以清晰地反映管路流动的特性以及相应的参数变化趋势。本方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。

关键词: SIMPLE 算法; 管路; 气动系统; 分区算法

中图分类号: TH138.1 文献标识码: A

1 引言

近年来随着气动系统的高速化和小型化及其在工业、能源中越来越广泛的应用, 人们对气动系统在运行过程中压缩空气的状态变化越来越关心。在气动控制系统的设计及很多课题的研究中, 例如气动系统的仿真研究和气动系统的结露研究, 都需要对气动系统(特别是管路)进行流场计算。以前的研究工作仅是对管路进行一维流场计算, 因此不能了解管路的径向参数分布以及节流口对管路流场的节流特性, 难于满足实际需要。作者运用区域分裂的 SIMPLE 算法计算管路的二维粘性流场^[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和出口处的气体流动的物理特性, 对计算区域分了五个区, 并给出了相应的算法。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, 为研究管路的节流特性及流场参数分布提供了详细的数据。

2 管路的数学模型

实际的气动系统包括气源、气缸、节流阀、电磁阀、负载和管路等。本文中主要研究管路的流场计算及节流口的节流特性, 因此可将实际的气动系统简

化为图1的形式: 气动系统中的节流阀和电磁阀分别简化成图中的节流口1、2。本文中计算的是图1中管路的二维粘性流场。管路的进口压力和温度为排气腔的滞止压力和温度。可以通过实验或者前期计算来得到。

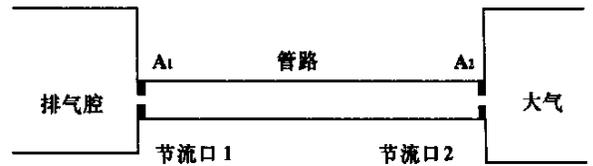


图1 气动系统简化示意图

2.1 管路的数学模型

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, 本文中选用 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型方程, 用 SIMPLE 算法进行计算。圆管属于轴对称, 文中给出管路的连续性方程、能量方程和运动方程的柱坐标形式^[5]。

连续性方程:

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

运动方程:

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

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

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

$$\tau_{zz} = (-p + \lambda \nabla V) + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\tau_{rz} = \tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right)$$

收稿日期: 2000-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59375183)

作者简介: 包钢(1960-)男, 上海人, 哈尔滨工业大学副教授。

$$\nabla V = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \tau_{rr} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \tau_{zz} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \tau_{rz} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \rho q \quad (5)$$

气体状态方程:

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

K - ε 两方程湍流模型:

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_z K)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r K)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial r} \right) + G - \rho \epsilon$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_z \epsilon)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r \epsilon)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{\epsilon}{\kappa} (c_1 G - c_2 \rho \epsilon)$$

$$\text{式中: } G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

2.2 管路计算的边界条件处理^[6]

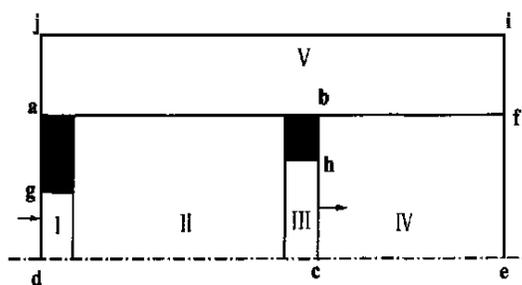


图2 计算分区图

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。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2中的ife面)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。本文中采用分

区算法对管路内部及射流区进行流场计算。根据管路实际的境况, 共划分了五个区域, 如图2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(如图2所示)。

轴线边界dc、ce面采用对称性条件给出。

I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;

II区为管路内区, 管路内表面(ab面)设为无滑移边界条件, 与I、II区的交接面用分区处理方法计算^[6-7];

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

IV区(cefb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音速, 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, 文中取射流区长度(即ef面距ch面距离)为0.5倍的节流管长度, 由于ef截面远离管路出口, 假设压力在该截面上已得到恢复, 因此可以给定环境压力。bf面用分区处理方法计算;

V区(fija所围成的区域)为扩展区, 尾部射流区的bf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。笔者取ij面的直径为1.2倍于管路的直径, ie面距节流孔出口截面为50%节流管总长, 并假设压力在fi、ij、ja面上已得到恢复, 可以给定环境压力。ab面设为无滑移边界条件, bf面用分区处理方法计算。

3 计算结果分析

为了验证本计算方法的正确性, 以及管路内部及尾部射流区的二维流场的一般特性, 文中给出一个接近于音速范围的流场算例。其中管路进口总压为 4.0×10^5 Pa, 温度为 273 K。出口处的背压为 1.0135×10^5 Pa, 轴向进气。管路为一直管, 其几何尺寸: 长度为 1.5 m, 直径为 6 mm 的细管。进口处的节流口尺寸为 7.07 mm^2 , 出口处的节流口尺寸为 15.19 mm^2 。五个分区中轴向与径向的网格数分别为 $20 \times 10, 10000 \times 28, 20 \times 18, 250 \times 28$ 和 1290×8 。

首先分析压力场的变化, 图3a与图3b分别给

出了进、出口边界处的压力场的分布。从图中可以看出在管路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。气体进入管路后压力在轴向方向上有所回升, 在距入口处大约 10~15 倍管径处达到一个最大值(由于尺寸关系, 在图 3a 中并未画出), 之后压力再逐渐降低, 直到管路出口处, 这与文献[8]的结论基本一致。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产生波动, 该压力的扰动向管内传播, 在管路的出口处产生了压力的变化波动区。在流出节流管后, 大约在一个 15 倍管径长度的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管路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。

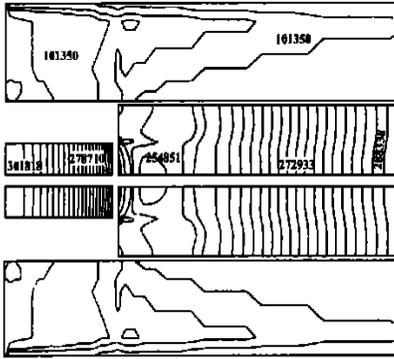


图 3a 管路进口段压力分布图

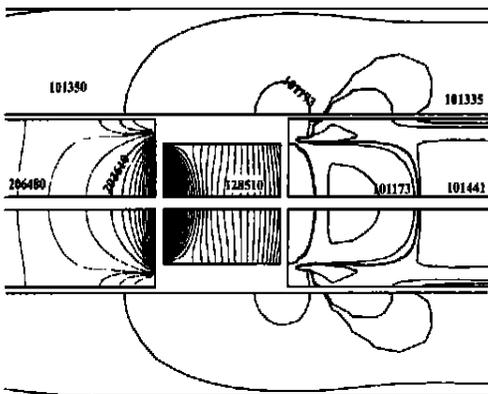


图 3b 管路出口段压力分布图

图 4a 和图 4b 给出了流场的马赫数等值线在进、出口节流口处的分布, 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(如图 4a 所示), 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。达到第二个节流口后, 由于流动的堵塞作用使得管路出口处出现较为紊乱的旋涡流动。当流体流出节流孔后, 由于是在自由空间内的发展, 而且节流口尺寸要大于第一个节流口的尺寸, 因此射流程度要小于第一个节流出口处。另外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 4a 和 4b 的马赫数等值线上基本上看不到附面层的存在。

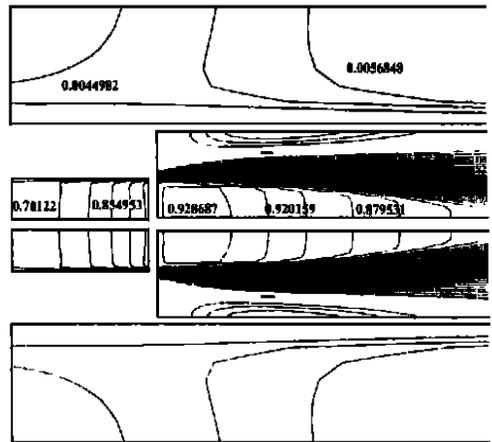


图 4a 管路进口段马赫线分布图

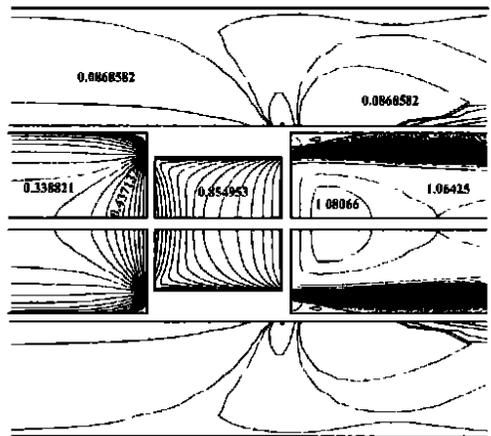


图 4b 管路出口段马赫线分布图

图 5a 和图 5b 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 5b 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, 这是出口节流损失产生

的一个重要原因。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,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。

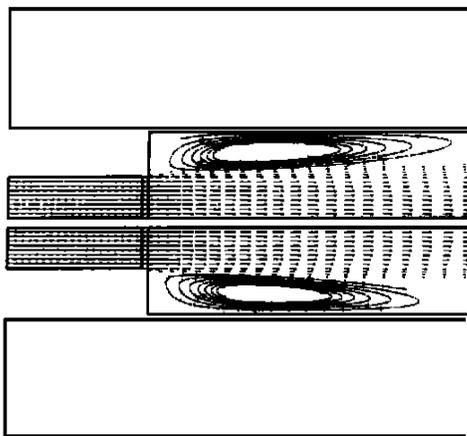


图 5a 管路进口段速度矢量分布图

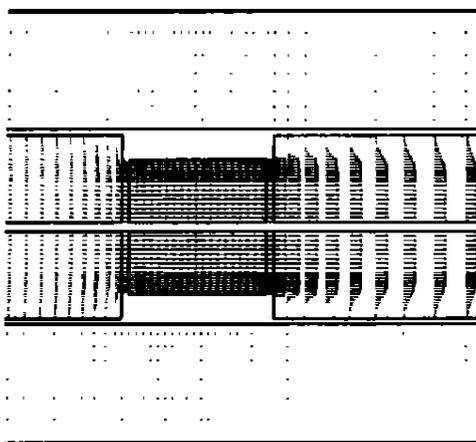


图 5b 管路出口段速度矢量分布图

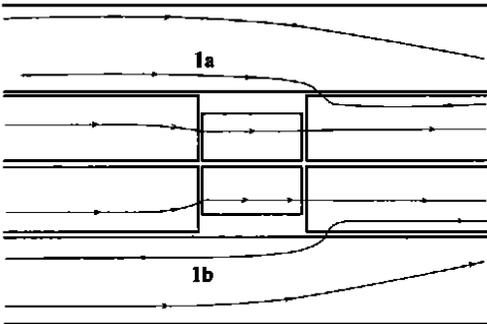


图 6 管路出口处的流线图

图 6 给出了管路出口处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,

引射作用将扩展区域的流体抽向射流区(如流线 1a 和 1b)。使尾部射流区的边界点的压力产生波动,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分区算法可以较好地满足管路的流场计算和边界条件的处理。

4 结论

本文采用区域分裂的 SIMPLE 算法对气动系统的管路及其射流区进行了二维粘性流场计算,数值结果表明文中给出的分区算法可以较好地处理管路的边界条件,对多块的复杂区域的求解具有较大的适应性;气体进入管路后压力在轴向方向上有所回升,在距入口处大约 10~15 倍管径处达到一个最大值,这与实际物理意义相符,并且为在管路一维计算中将进口处的边界条件设为压力回复模型提供了依据^[8];此外,笔者详细地分析了节流管内部的复杂流动,根据数值结果分析而得知突扩段与突缩段内产生的旋涡运动是节流损失产生的两个主要原因。由于文中所计算的管路的直径很小,仅为 6 mm,因此很难用实验测量管路的径向压力分布,所以不能使理论计算与实验结果进行定量的对比。但从物理分析角度以及与相关文献的对比仍可以说明本文所作的流场计算的正确性。

参考文献:

- [1] 帕坦卡 S. 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叶尖通道内空气流动和传热过程数值模拟[J]. 航空动力学报, 1998, 13(2): 189-194.
- [3] HALUPOVICH YULIA, NATAN BENVENISTE. Numerical solution of the turbulent supersonic flow over a backward facing step[J]. *Fluid Dynamics Research*, 1999, 24(5): 251-273.
- [4] 袁新. 可压缩 Navier-Stokes 方程中双方程湍流模型的选择[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议文集[C]. 洛阳: 中国工程热物理学会, 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]. USA: ASME (93-GT-240), 1993.
- [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.
- [8] 顾宏中. 内燃机中的气体流动及数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

(何静芳 编辑)

spray technique both the steam humidification activation and spray-water humidification activation can contribute to an enhancement of desulfurization efficiency. However, the spray-water activation is much more effective than steam activation. Moreover, there will be an enhancement in desulfurization efficiency in case of an increase in Ca/S ratio and a decrease in saturation approach temperature, SO₂ concentration and flue gas speed. As regards desulfurization by spray-water humidification activation the desulfurizer droplets play a by far greater role in desulfurization than the desulfurizer moisture sorbent. **Key words:** desulfurization, humidification activation, experimental investigation

油焦浆、水焦浆燃烧特性的试验研究 = **An Experimental Study of the Combustion Characteristics of Oil-coke Slurry and Water-coke Slurry** [刊, 汉] / XIONG Yuan-quan, SHEN Xiang-lin (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), ZHENG Shou-zhong (materials Bureau of National Electric Power Co., Beijing, China, Post Code: 100016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 494 ~ 496

Under low-speed heating conditions the combustion characteristics of oil-coke slurry (mixture of petrol-coke powder and heavy oil) and water-coke slurry (mixture of petrol-coke powder and water) were studied through the use of a thermogravimetric analytical method. These combustion characteristics are compared with those of petrol-coke and pulverized coal. Furthermore, the above results were analyzed from the perspective of a work mechanism. **Key words:** oil-coke slurry, water-coke slurry, combustion characteristics, thermogravimetric analytical method

利用电厂粉煤灰再生劣化抗燃油的试验研究 = **An Experimental Study on the Utilization of Power Plant Pulverized Coal Ash for Regeneration of Deteriorated Fire-resistant Oils** [刊, 汉] / LI Zhi (Testing Research Institute of Guangdong Electric Power Industrial Bureau, Guangzhou, China, Post Code: 510600) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 497 ~ 498

A contrast analysis was conducted of pulverized coal ash and several kinds of commonly used adsorbent. Optimum technological conditions were explored through an orthogonal test of regeneration by the use of a contact method. Moreover, a quality contrast analysis has also been performed of the fire-resistant oil prior to and after the regeneration. **Key words:** pulverized coal ash, regeneration, fire-resistant oil, test

气动系统中管路的二维粘性流场计算 = **Calculation of a Two-dimensional Viscous Flow Field in the Pipe of a Pneumatic System** [刊, 汉] / BAO Gang, LI Yu-jun, LI Jun, WANG Zu-wen (Pneumatic Technology Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 499 ~ 502

With the help of an algorithm SIMPLE a two-dimensional viscous flow field was calculated with respect to a pipe, which has its two ends fitted with a throttle orifice. This is performed for facilitating an in-depth study of pipe flow characteristics in a pneumatic system and the law of variation of various parameters. A stagnation pressure and stagnation temperature were set at the pipe inlet. On the basis of the pipe geometric characteristics and flow features a calculation zone has been divided into five domains with corresponding domain algorithm being given. The results of numerical calculation indicate that the algorithms provided can clearly reflect the flow characteristics in the pipe and the variation trend of relevant parameters. With the method under discussion it is possible to calculate not only the flow field within the pipe but also the flow field of the jet flow zone at the end of the pipe. **Key words:** algorithm SIMPLE, pipe, pneumatic system, sub-domain algorithm

恒热流时污垢对管内对流换热过程热力学性能影响的分析 = **An Analysis of the Effect of Fouling on the Thermodynamic Performance of Convection Heat Exchange Process in a Tube under Constant Heat Flux Conditions** [刊, 汉] / WU Suang-yin, ZENG Dan-ling, LI You-rong (Power Engineering Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). —