

文章编号: 1000-8055(2009)09-2101-06

翼尖喷流引流管道内流数值模拟

黄礼铿, 高正红

(西北工业大学 航空学院 翼型叶栅空气动力学国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 数值模拟计算了为实现旋翼翼尖喷流驱动的引流管道内部流动, 分析了管道出口形状对引流管道流动的影响. 通过对比不同入口压力以及不同管道出口形状对引流管道的总压损失的影响, 分析不同情形下对引流管道的出口流量、流动的出口速度的影响, 综合得出对产生的转动力矩的影响, 以此验证了通过内置管道引流实现翼尖喷流驱动的可行性, 以找到一种实用的使引流管道的损失最小的引流管道设计方法.

关 键 词: 旋翼; 翼尖喷流; 引流管道; 数值模拟

中图分类号: V211

文献标识码: A

Numerical simulation of conductive pipe's inner flow

HUANG Li-keng, GAO Zheng-hong

(National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To implement the jet driving rotor which jets at the rotor tip, the flows inside the conductive pipe were numerically simulated, and the effect of the flows inside the conductive pipe by outlet shape was analyzed. The influences of different inlet pressures and different outlet shapes were compared, the mass flow rate and outlet velocity of the conductive pipe were analyzed, and then the effect of the turning moment was gained through integrative analysis. Thus, the validity of the jet driving rotor was confirmed, and an applicable optimized design method was found out to minimize the total loss of the conductive pipe.

Key words: rotor; jet driving rotor; conductive pipe; numerical simulation

旋翼/机翼飞机是一种新概念飞行器, 是旋翼飞行器和固定翼飞行器相结合的一种飞行器^[1]. 它的最大特点是有一副既可以高速旋转作为旋翼, 又可以锁定作为固定翼的旋转机翼, 使其既可以像直升机那样垂直起降和定点悬停, 又具有喷气式固定翼飞机的高速巡航能力, 波音公司制造的 X-50A (图 1) “蜻蜓” 无人飞行器 (unmanned aerial vehicle, 简称 UAV) 技术验证机就是这样一种飞行器. 不同于轴驱动旋翼, X-50A 采用桨尖喷气驱动来旋翼旋转, 这样便取消了传统轴驱动直升飞机的机械传动机构和反扭矩装置, 因而减轻了系统的质量, 也使得结构更为简单, 这是未来旋翼飞机发展的趋势.

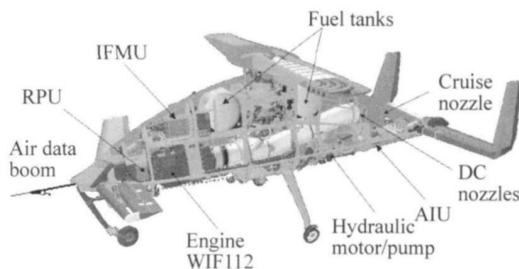


图 1 X-50A

Fig. 1 X-50A

翼尖喷气驱动旋翼需将发动机喷流通过引流管道从翼尖喷出, 流体在弯曲管道中的流动, 由于曲率的影响, 其内部的流动特性不同于一般的长

收稿日期: 2008-09-03; 修订日期: 2009-03-02

作者简介: 黄礼铿 (1985 -), 男, 四川绵阳人, 硕士生, 研究方向为飞行器总体设计.

直管道.当管道的弯曲曲率超过一定值时,管内流场会出现分离,横截面会产生二次流动即旋流现象^[2].近年来,计算机技术的飞速发展以及湍流数值模拟理论的不断改进,通过数值仿真逐步代替物理试验来提供流场信息有了希望.本文通过数值模拟计算验证了通过内置管道引流实现翼尖喷流驱动旋翼的可行性以及管道形状对引流损失的影响,期望找到一种可行的使引流损失最小的管道形状设计方案.

1 数值计算模型

为实现翼尖喷流驱动旋翼,在旋翼内部设置引流管道.由于旋翼尺寸的限制,为得到足够驱动旋翼旋转的出口流量,旋翼轴内管道设计为圆形,而旋翼内管道则设计为椭圆形,以尽量增大管道横截面积.为减小拐角处的流动损失,使拐角处流动更平滑,对管道各拐角处内侧倒圆(半径 $R = 5\text{ mm}$).

计算管道外形如图 2.

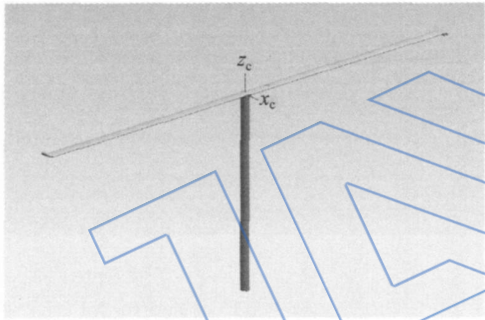


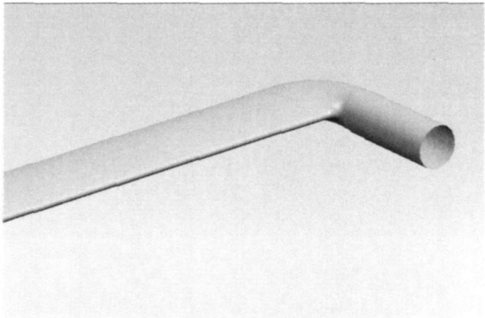
图 2 管道整体外型
Fig. 2 Tube's overall shape

中间圆管直径 $D = 35\text{ mm}$, 长度 $L_1 = 760\text{ mm}$. 两边椭圆管长径 $A = 40\text{ mm}$, 短径 $B = 10\text{ mm}$, 长度 $L_2 = 942\text{ mm}$, 出口段长度 $L_3 = 58.5\text{ mm}$.

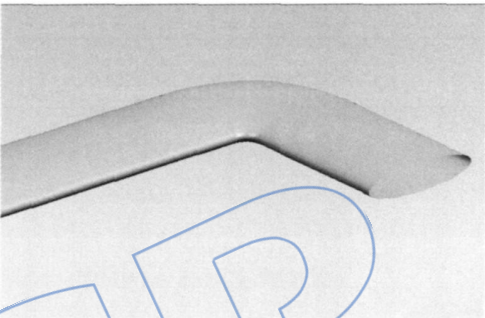
为了尽可能的减小引流管道造成的流动损失,找出影响流动损失的各种因素.对圆形、椭圆形以及分为四个小圆的三种出口外形在不同入口总压下的流动情况进行了数值模拟.

三种出口外形为:圆形出口直径 $d = 20\text{ mm}$; 椭圆出口长径 $a = 40\text{ mm}$, 短径 $b = 10\text{ mm}$; 四小圆出口小圆直径 $d_1 = 10\text{ mm}$.

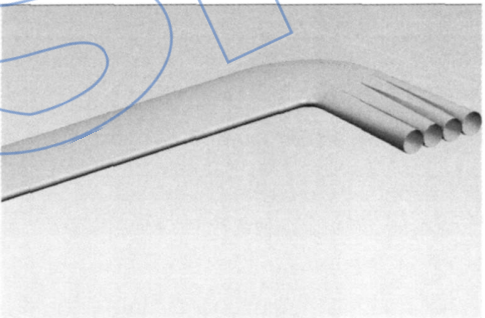
为了揭示引流管道内部的流动特性,准确评估各种因素对引流管道损失的影响,用雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程进行三维引流管道内流的数值模拟,湍流模型为 Spalart-Allmaras (S-A) 模型. S-A 模型是由 P. Spalart 和 S. Allmaras 于



(a) 圆形出口



(b) 椭圆出口



(c) 四小圆出口

图 3 不同管道出口段外形

Fig. 3 Shape of different tube's outlet section

1992 年提出的,是一种相对简单的通过求解输运方程而得到湍流黏度的单方程模型. S-A 模型不同于其他一些单方程模型,不是从 $k-\varepsilon$ 方程经过简化得到的,而是从经验和量纲分析出发,由针对简单流动再逐渐补充发展而适用于带有层流流动的固壁湍流流动的单方程模型.该模型相对于两方程模型计算量小、稳定性好,同时又有较高的精度^[3-5].另外,模型是当地型的,方程中没有诸如 $y^+ \left[y^+ = \frac{y}{\mu} \sqrt{\rho \tau_w} \right]$ 这类非当地型的项在内,所以在有多个物理面的复杂流场中不需要特殊处理,使用方便.

S-A 模型的变量中 $\tilde{\nu}$ 是湍流动黏滞率,方程是

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_v \quad (1)$$

这里 G_v 是湍流黏度生成的, Y_v 是被湍流黏度消去的, 发生在近壁区域。

CFD (computational fluid dynamics) 计算对计算网格有特殊的要求: 第一, 考虑到近壁面黏性效应采用较密的贴体网格; 第二, 网格的疏密程度与流场参数的变化梯度大体一致; 第三, 进行黏性计算最好在物面附近的网格长宽比比较大, 这样有利于附面层的捕捉。对于面网格, 可以设置平行于给定边的边界层网格, 可以指定第二层与第一层的间距比, 及总的层数。对于体网格, 也可以设置垂直于壁面方向的边界层, 从而可以划分出高质量的贴体网格。

根据若干次对不同模型的计算, 得到以下网

格生成和流场计算经验:

流场大小、模型在流场中的位置、流场的初始划分、自适应次数等均要根据具体的计算模型、计算状态而定。流场过小, 计算结果不可靠; 流场过大, 使用的网格数量较多, 计算耗时较大。模型在流场中的合理放置可有效降低使用流场的大小。流场的初始划分, 决定着远离模型的网格的大小, 并在一定程度上影响着网格的密度分布。自适应次数的增大, 会使网格数量增加很快, 增大计算耗时; 适当选定自适应次数, 能够使用少量网格的情况下, 有效捕获流场特征。

本文中数值模拟求解定常可压缩流动的质量加权平均 N-S 方程和 S-A 湍流模型, 用有限体积法在同位网格上离散上述方程, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式, 采用 Reo-FDS (flux difference splitting) 方法进行时间推进。在整个计算域中布置结构网格 (如图 4)。使用压力入口边界条件和压力出口边界进行计算。

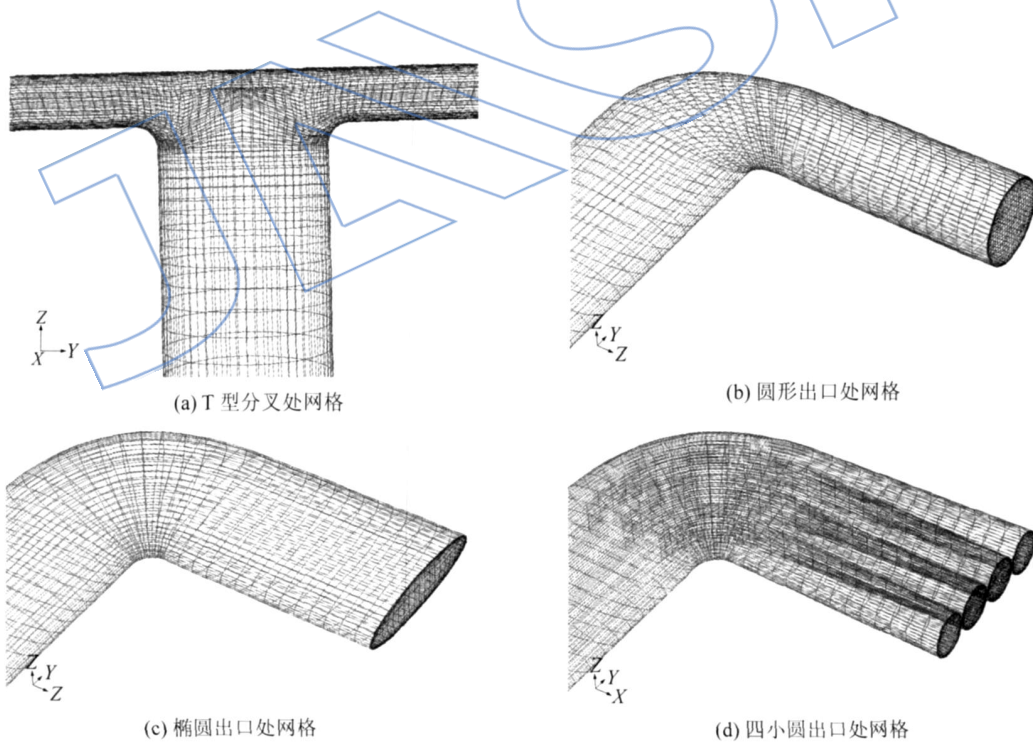


图4 计算管道网格分布

Fig. 4 Computational grid of the tube

2 数值计算结果与分析

弯曲管道中黏性流体的流动, 由于曲率的影响, 黏性作用使管壁附近的流动速度低于内部。速度之差将造成中心与外侧离心力的不同, 其结果

是在离心力差值的作用下将流体质点压向外侧, 形成自中心向外侧的二次流。通过压力图和流线图 (图 5), 这种二次流的影响能够很明显的看出来, 但是, 由于中段管道为椭圆形, 二次流并没有得到充分的发展^[6]。

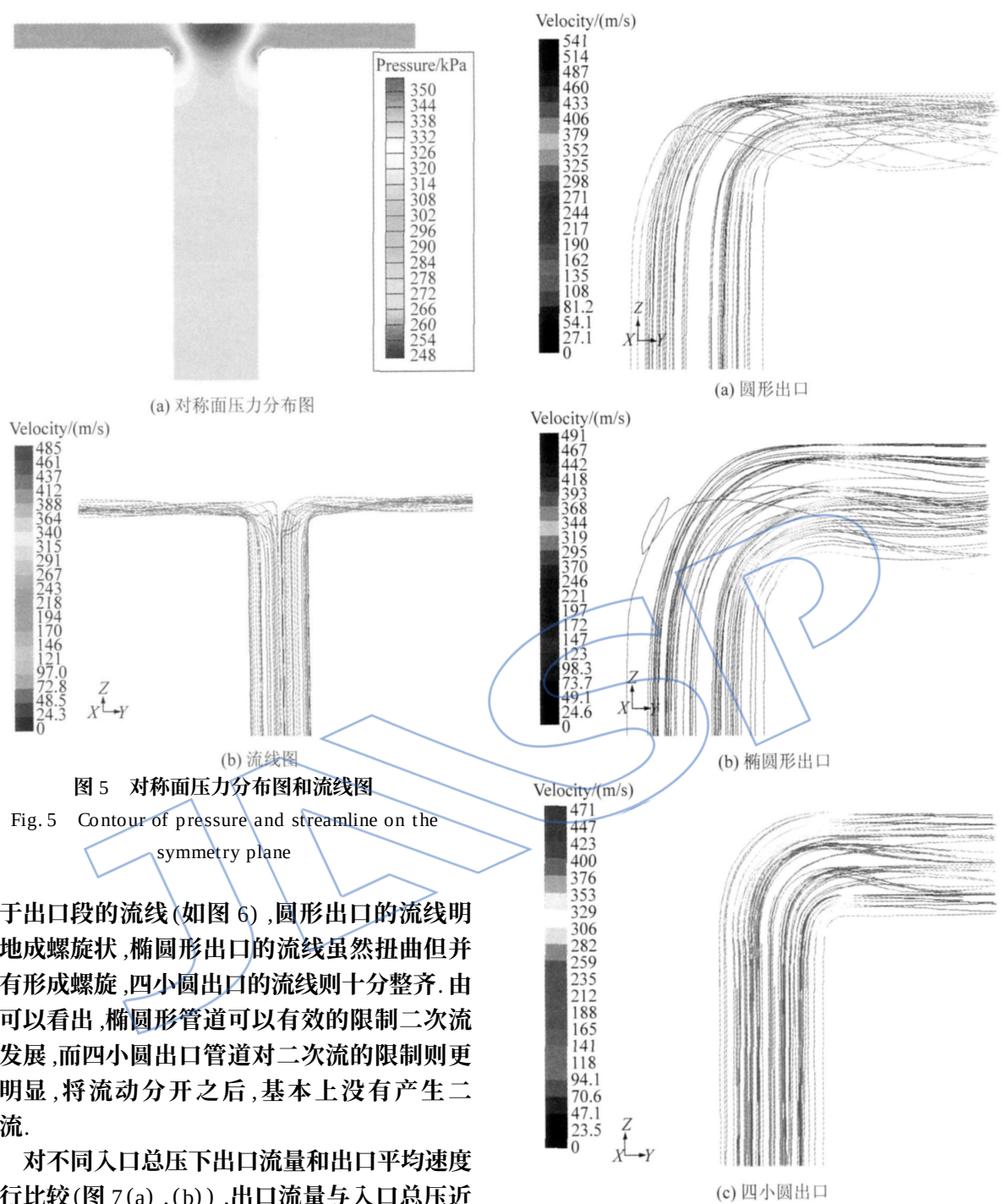


图 5 对称面压力分布图和流线图

Fig. 5 Contour of pressure and streamline on the symmetry plane

对于出口段的流线(如图 6),圆形出口的流线明显地成螺旋状,椭圆形出口的流线虽然扭曲但并没有形成螺旋,四小圆出口的流线则十分整齐.由此可以看出,椭圆形管道可以有效的限制二次流的发展,而四小圆出口管道对二次流的限制则更加明显,将流动分开之后,基本上没有产生二次流.

对不同入口总压下出口流量和出口平均速度进行比较(图 7(a),(b)),出口流量与入口总压近似成正比.椭圆出口和四小圆出口的出口流量在任何入口总压下都比圆形出口的大,且四小圆出口的出口流量在入口总压较低时和椭圆出口基本一致,随着入口总压的增大,其增幅超过了椭圆出口.这是由于椭圆出口和四小圆出口限制了二次流的发展,四小圆出口的限制作用尤其明显^[7].

由于二次流和壁面黏性摩擦阻力的影响,出口速度先是随入口总压增大而增大,达到最大值后趋于稳定.椭圆出口的二次流和壁面黏性摩擦阻力的影响都最小,所以椭圆出口的出口速度增加最快且最大值最大.四小圆出口的二次流影响

图 6 不同形状管道出口段流线图

Fig. 6 Streamlines of different tube's outlet shape

虽然最小但壁面黏性摩擦阻力的影响最大,四小圆出口的出口速度增加虽比圆形出口的快但最大值却小于圆形出口.可见出口速度增加的快慢受二次流的影响较大,而出口速度的最大值受壁面黏性摩擦阻力的影响较大^[8].

各管道流动所产生的转动力矩与出口流量和出口平均速度有关,由图 7(c)可知,各管道流动所产生的转动力矩与入口总压成正比,且比例相同,在入口总压较低时产生的转动力矩基本一致.

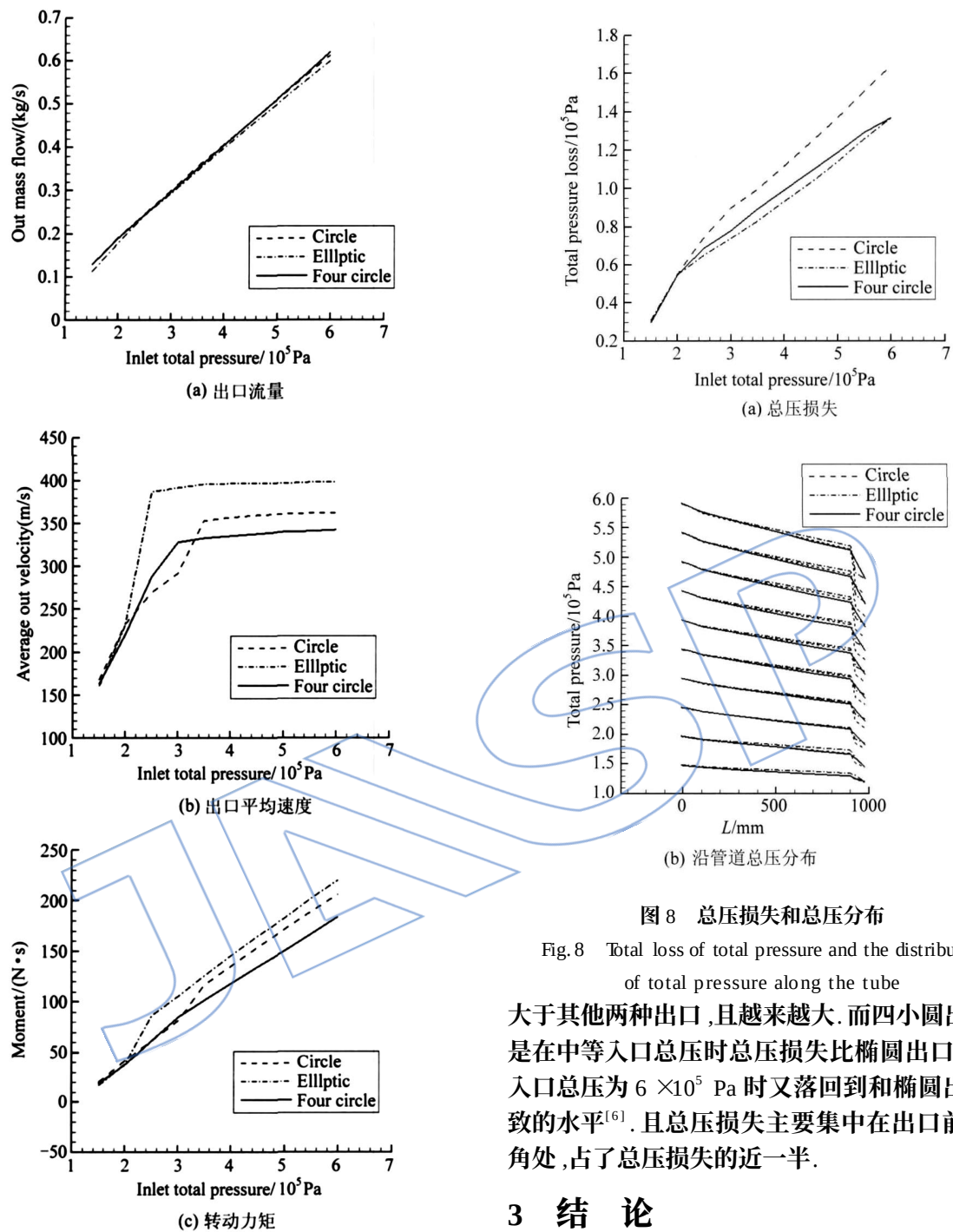


图 7 不同管道不同入口总压下的出口流量、出口速度、转动力矩

Fig. 7 Massflow , outlet velocity , rotative moment of different tubes at different inlet total pressures

椭圆出口的在入口总压为 2.5×10^5 Pa 时有一跃升,圆形出口的在入口总压为 3.5×10^5 Pa 时也有一个跃升,但比椭圆出口小.由总压损失图和总压分布图(图 8)可以看出,总压损失随着入口总压的增大而增大.入口总压较低时总压损失基本一样,入口总压较大时,圆形出口的总压损失远远

图 8 总压损失和总压分布

Fig.8 Total loss of total pressure and the distribution of total pressure along the tube

大于其他两种出口,且越来越大.而四小圆出口只是在中等入口总压时总压损失比椭圆出口大,在入口总压为 6×10^5 Pa 时又落回到和椭圆出口一致的水平^[6].且总压损失主要集中在出口前的拐角处,占了总压损失的近一半.

3 结 论

对不同出口形状的引流管道内流的数值模拟表明:

- 1) 弯曲管道造成的二次流动会产生的耗散损失,椭圆形管道可以有效的抑制二次流动,耗散损失明显减小,用几个小管道将流动分成几部分可以取得比椭圆形管道更好的抑制二次流动效果,但同时也增加了一定壁面黏性摩擦损失;
- 2) 引流管道的损失主要集中在第二次拐弯后的出口段,第一次拐弯后的长直段因为长度很大壁面黏性摩擦损失很大,不能采用小管分流的方式抑制二次流的发展,而应使用椭圆管道,其在

限制二次流发展同时也不会增加太多的壁面黏性摩擦损失;

3) 引流管道的损失与入口总压近似成正比. 虽然出口速度在入口总压较小时与其成正比, 在达到最大值后就不再随入口总压的增大而增大, 但得到的出口流量一直与入口总压成正比.

由此可见, 为了尽量减少引流管道的流动损失, 在设计时应尽可能限制出口段二次流的发展, 减小二次流造成的流动损失, 同时在管道较长时要充分考虑壁面黏性摩擦损失. 所以, 在设计翼尖喷流的引流管道时, 应采用椭圆形管道结合分成几个小管道的形式, 在第一拐弯后的长段采用椭圆管, 在第二拐弯后的出口段采用小管分流, 以便尽量减小引流管道的流动损失.

总之, 应用数值模拟引流管道的内流流场成功预测了二次流的发生, 各流场参数也与理论相符. 数值模拟结果对于开展引流管道的优化设计有很大的指导意义.

参考文献:

- [1] 邓阳平, 高正红, 詹浩. 鸭翼旋翼/机翼飞机的技术发展及其关键技术[J]. 飞行力学, 2006, 24(1): 1-4.
DENG Yangping, GAO Zhenghong, ZHAN Hao. Development and key technologies of CRW[J]. Flight Dynamics, 2006, 24(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] 丁珏, 翁培奋. 三种湍流模式数值模拟直角弯管内三维分离流动的比较[J]. 计算物理, 2003, 20(5): 386-390.
DING Jue, WENG Peifen. Numerical study on three dimensional turbulent separated flow in right-angled curved duct by three turbulent models[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2003, 20(5): 386-390. (in Chinese)
- [3] 梁德旺, 王国庆, 吕兵. 低速高湍流度 90°弯管流动数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(4): 381-387.
LIANG Dewang, WANG Guoqing, LÜ Bing. Numerical simulation in a 90° curved duct with low velocity and high turbulence level[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 32(4): 381-387. (in Chinese)
- [4] Zagarola M V, Smits A J, Orszag S A, et al. Experiment in high Reynolds number turbulent pipe flow[R]. AIAA 96-0654, 1996.
- [5] 钱炜祺, 符松. 弯曲管道内湍流流动的数值模拟[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 129-132.
QIAN Weiqi, FU Song. Numerical simulation of turbulent flow in a turn-around duct[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(2): 129-132. (in Chinese)
- [6] Bass S M, Thompson T L, Rutherford J W. Low-speed wing tunnel test of the canard rotor/wing concept [R]. AIAA 93-3412, 1993.
- [7] Rusak Z, Meyerholz J. On the mean velocity of fully developed turbulent pipe flows[R]. AIAA-2005-5322.
- [8] Smits A J, Shockling M. Turbulent flow in smooth and rough pipes [R]. AIAA-2005-4807.