

文章编号:1000-8055(2012)06-1303-09

离心压气机管式扩压器设计与计算分析

王 博, 严 明

(北京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用程序化建模方法, 对离心压气机管式扩压器的三维几何造型进行参数化设计, 并采用定常数值模拟的方法分析管式扩压器内流场特性、攻角特性, 对影响管式扩压器性能的几何参数进行分析与优化, 同时对照某原型叶片式扩压器, 分析传统圆形进口管式扩压器的性能优劣, 提出类椭圆进口管式扩压器的概念, 并揭示其能够有效提高离心压气机性能的机理。

关 键 词: 离心压气机; 扩压器; 管式扩压器; 前掠; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Design and numerical simulation of pipe diffuser in centrifugal compressor

WANG BO, YAN Ming

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines Aero-thermodynamics,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: Parameterized design for three-dimensional geometry of the pipe diffuser was preformed based on programmed model-construct method. The flow field and attack angle characteristics were investigated using time-averaged numerical method, and design parameters of the pipe diffuser were analyzed and optimized subsequently. Compared with the prototype vane diffuser, the performance of a pipe diffuser with traditional circle inlet was evaluated. Further study initiated a pipe diffuser with ellipse-like inlet which would expand the working range of centrifugal compressor, and suggested the mechanism of the improvement.

Key words: centrifugal compressor; diffuser; pipe diffuser; forward-swept;
numerical simulation

航空发动机作为飞机的心脏一直是国内外科研机构的研究重点, 其重要意义不言而喻。而其中压气机是航空燃气涡轮发动机的核心部件之一, 技术含量高, 难度大, 常成为阻碍发动机研制成功的关键部件。

离心压气机在中小流量的航空发动机中得到广泛的应用, 为了追求航空发动机更高的推质比、功质比, 人们对离心压气机的性能提出了更高的

要求。为了减小压气机尺寸而又保证高的压比和高效率, 离心压气机从亚声速流的设计研究发展到跨声速流的设计研究^[1]。级压比在 2~6 之间的离心压气机, 其级效率在 $(85 \pm 2)\%$ 。对于这样的离心压气机, 在设计点左右, 扩压器总压恢复系数在 75%~85%, 而叶轮的效率可以达到 90% 以上, 然而在非设计点, 叶轮的效率大致不变而扩压器总压恢复系数则明显下降, 因此, 提高扩压器的

收稿日期: 2011-07-08

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120704.1152.201206.1303_015.html

作者简介: 王博(1987—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士生, 主要从事叶轮机气动热力研究。

性能对改善离心压气机级性能具有重要意义^[2-3]。

管式扩压器上世纪 60 年代出现以来,加拿大,前苏联和美国都先后对其进行了研究^[4-7],国内也作过一些对比试验研究^[8]。国内外的试验结果表明:这种扩压器不但具有结构简单、加工方便、成本低等优点,而且设计点效率超过了传统扩压器^[4]。加拿大科研机构首先将这种结构用于小型涡轮轴发动机,它的优点在于减小了离心式压气机的直径,使得结构更加紧凑,从而大幅度减轻了离心压气机质量^[9-10]。图 1 给出了管式扩压器的结构示意图,它由一系列圆柱(锥)形管道构成,在进口处,相邻圆柱(锥)面相贯,形成两端呈较大前掠的进口前缘,这种大掠角前缘对于接受超声速来流有显著优势,同时,它还有助于增加气流的稳定性,抑制下游边界层的分离。喉部下游的流道中,气流基本上是轴对称的,二次流损失小。上述诸因素,使管式扩压器具有独特的压力恢复特性,大多数试验表明,在转子出口压比较高时,管式扩压器具有设计点附近总压恢复系数高的优点^[11-13]。

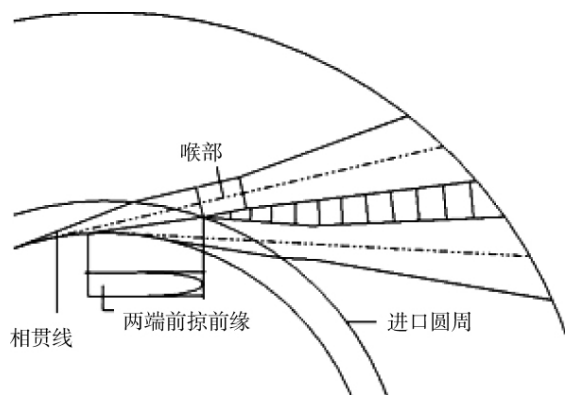


图 1 管式扩压器结构示意图

Fig. 1 Sketch map of pipe diffuser geometry

虽然美国和加拿大等国很早就航空发动机中应用了管式扩压器这一技术,但是公开发表的文献并不多,尤其在管式扩压器优化设计方面。国内同样没有较为详尽的研究资料,公开发表的资料有石建成等人^[14]对一种类似管式扩压器的混合式扩压器进口前缘的研究以及王毅等人^[15]对管式扩压器喉部的设计分析。因此发展管式扩压器几何建模技术并通过数值模拟和分析,深入研究管式扩压器的优化设计问题将有助于掌握管式扩压器设计技术和提高管式扩压器性能水平。

1 管式扩压器几何建模

在管式扩压器空间造型设计的过程中,为满足不同设计需求,应做到截面面积、截面形状、通道扩张比、径向和轴向长度、径-轴转换段中心线曲率等参数可独立变化与调节,因此需要进行参数化建模。首先,在子午平面内确定如图 2 所示的管道中心线,使得通道各截面面积沿中心线分布,中心线分三段设计,分别为径向直线段 l_0 、轴向直线段 l_1 和径-轴转换曲线段,径-轴转换曲线段的设计用一个曲率可调的圆弧曲线实现,圆弧曲率如式(1)所示,改变 R 的值,即改变了曲线的曲率, R 变大则圆弧曲率半径变大,径-轴转换段弧长相应变大,气流在径-轴转换段过渡平缓但沿程损失有所增加,反之 R 变小则气流在径-轴转换段过渡不平缓,容易造成分离,因此 R 值的选取需要综合考虑气流折转处的分离和在径-轴转换段的沿程损失。

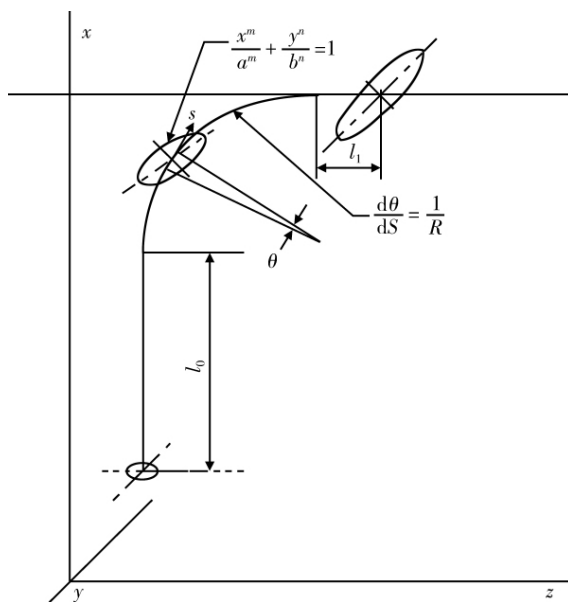


图 2 管式扩压器中心线子午面内投影

Fig. 2 Projection on meridian plane of pipe diffuser's center line

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{R} \quad (1)$$

管式扩压器沿流向各截面的形状基本是由开始的圆形逐步过渡到类似椭圆的形状,因此,可从椭圆型方程出发构造管式扩压器截面的类椭圆方程

$$\frac{x^m}{a^m} + \frac{y^n}{b^n} = 1 \quad (2)$$

此处 a 与 b 是类椭圆方程中的半长轴与半短轴,

用来控制截面形状的椭圆度, m 控制闭合图形的矩形度, n 控制转角处的光滑度. 由于只希望此方程提供一个描述截面形状的闭合图形, 因而参数 m 与 n 只能取正数. 由圆形截面向类椭圆截面转变也只需要调整 a 和 b 的相互关系.

中心线确定以后, 轴向段, 径向段等间距做一系列中间截面, 径-轴转换段等弧长做一系列过渡面, 如图 3 所示, 中间过渡截面尽可能多取, 以使得管式扩压器从径向到轴向过渡光滑. 通过类椭圆公式编程生成截面圆周所需一系列点, 在极坐标下均布, 对各截面对应点做插值, 找到中间各截面的所有对应点, 另外在轴向段截面的处理中需要引入一个沿管道中心线旋转的角度参数, 其与扩压器最大外径和安装角有关, 用这个参数控制所有管道出口的圆周形态.

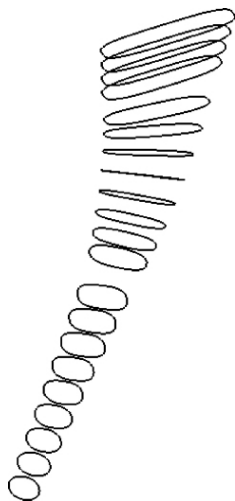


图 3 管式扩压器管道截面

Fig. 3 Passage cross-sections of pipe diffuser

单管实体建模完成后, 可用 Unigraphics 软件的布尔运算得到相邻管道相贯而形成的两端前掠前缘, 从而完成管式扩压器的几何建模, 如图 4

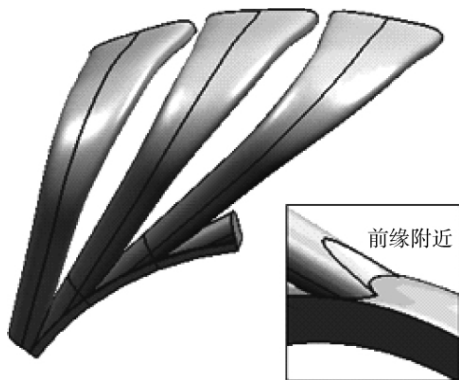


图 4 管式扩压器空间造型

Fig. 4 Spatial model of pipe diffuser

所示.

2 管式扩压器数值模拟研究方法

数值模拟研究分步完成, 首先对管式扩压器进行单独的数值模拟, 即在管式扩压器进口均匀进气条件下, 模拟管式扩压器进口前无叶扩压器、管式扩压器前缘附近以及管道内部流动特性, 根据数值模拟的结果优化管式扩压器的管道几何参数. 其次, 考虑到离心压气机转子叶轮出口的气流具有非均匀性并会对下游的扩压器产生一定影响, 用管式扩压器替代一台设计级压比为 5.0 一级的离心压气机的叶片式扩压器进行数值模拟.

数值模拟采用 CFX 软件, 采用基于有限元的有限体积法, 结合 $k-\epsilon$ 湍流模型对三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行计算求解, 采用全隐式多网格耦合求解技术以提高计算速度和稳定性.

网格划分在 ICEMCFD (integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics) 中完成, 由于管式扩压器前缘具有较为特殊的几何结构, 采用结构化网格需要对前缘几何形状进行简化处理, 然而管式扩压器前缘造型对管内流动的影响很大, 因此, 本文计算采用非结构化四面体网格, 并进行了局部加密处理, 单独计算管式扩压器的网格数量大约为 60 万, 叶片式扩压器和管式扩压器与转子叶轮联算的网格数量大约为 150 万, 计算网格见图 5.

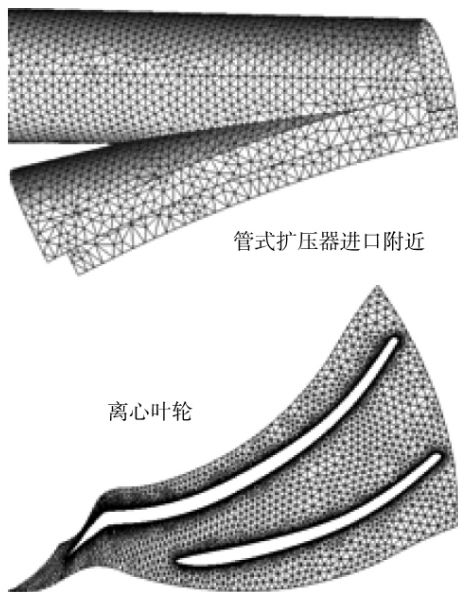


图 5 三维计算网格

Fig. 5 Three-dimensional computational grid

单独对管式扩压器计算的进口边界条件: 总温为 502 K, 总压为 607.95 kPa, 绝对速度方向. 离心压气机一级数值模拟的进口边界条件: 总温为 288 K, 总压为 101.325 kPa, 出口给定平均静压.

3 管式扩压器数值模拟结果分析

3.1 进口截面形状和面积的变化对管式扩压器攻角特性的影响

一般认为, 管式扩压器在设计工况下具有较好的性能, 一旦偏离了设计工况, 管式扩压器的性能下降很快. 本文作者认为, 这种现象可能是因为传统圆形进口截面的管式扩压器的直径必须与转子叶轮的出口宽度相一致, 在离心压气机设计增压比较高、流量较小时, 转子叶轮出口宽度较小, 导致进口为圆形截面的管式扩压器的管路数目会较多, 单个管路的喉部尺寸较小, 在来流偏离设计攻角时, 在管式扩压器喉部易产生较强的激波, 以致喉部附近的流动对来流方向较为敏感. 为改善传统管式扩压器的攻角特性以及实现管间相贯线的形状控制, 本文提出了一种截面形状接近于带圆角矩形的类椭圆截面管式扩压器, 其目的是扩大管式扩压器的喉部面积, 本文所采用的类椭圆形进口面积是圆形进口面积的 1.25 倍, 并由此决定了在相同的扩压器进出口几何尺寸条件下, 扩压器一整圈的类椭圆进口管式扩压器的管道数目是圆形进口管式扩压器管道数目的 $1/1.25$ 倍. 图 6 为两种进口形成的前缘造型, 类椭圆形进口形成的前缘在通道中间高度位置有一小段平直段(无前掠).

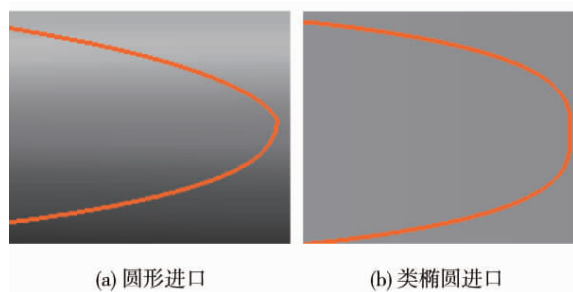


图 6 不同进口结构管式扩压器前缘几何造型

Fig. 6 Leading edges of pipe diffusers with different inlet geometries

图 7 为进气攻角定义, 以气流相对管式扩压器的流动确定其正负方向. 图 8 为圆形进口和类椭圆进口管式扩压器在来流 $Ma = 1.0$ 条件下的

攻角特性, 两种管式扩压器都在 $+2^\circ$ 攻角附近总压恢复系数最高, 此时来流方向与压力面一侧管壁接近平行. 圆形进口管式扩压器的峰值总压恢复系数高是因为在此攻角下其前缘产生了较弱的激波, 而类椭圆进口管式扩压器由于在通道中间高度有一平直段, 产生了较强的激波, 此外, 由于类椭圆进口管式扩压器的管道数目比圆形进口管式扩压器的管道数目少, 约束气流由周向向轴向偏转的能力较弱, 轴向段的流动分离略大, 如图 9. 在较大的正攻角下, 圆形进口管式扩压器前缘附近激波较强并在吸力面出现较大流动分离, 故总压恢复系数下降较快, 见图 10.

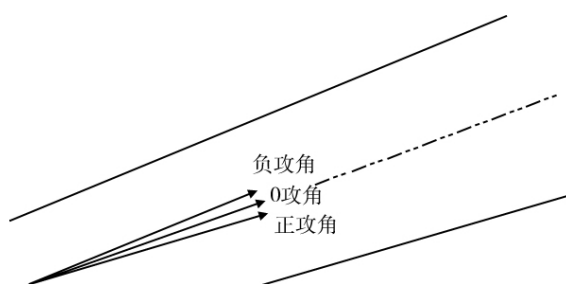


图 7 进气攻角定义

Fig. 7 Definition of attack angle

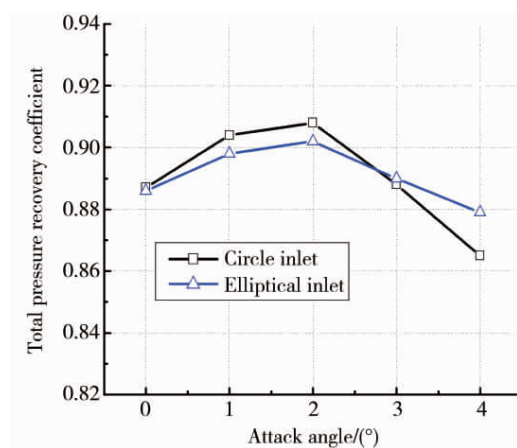


图 8 两种管扩在来流 $Ma = 1.0$ 下的攻角特性

Fig. 8 Attack angle characteristics of two kinds of pipe diffusers at $Ma = 1.0$

3.2 管路压力面一侧局部变形对流动的影响

通过数值模拟发现, 在管道由径向转为轴向后的一段管路内, 管道下壁面分离流动和管道压力面一侧的二次流现象较为严重. 在该部位, 通过改变截面形状控制方程(2)中 m 和 n 的数值, 局部

改变压力面半边的截面形状,减小压力面一侧的流通面积,见图 11,管道的扩张比减小,流速增加,静压降低,缓解了气流转向后下壁面的分离现象,见图 12,并且压力面一侧的二次流强度降低,见图 13,以上两方面原因使得压力面附近出口气流亏转现象得到改善,见图 14. 局部变形后,管式扩压器按质量平均后的出口气流角为 1.47° (与轴向夹角),相比于变形前的 2.28° ,整个管式扩压器出口气流角的亏转现象得到改善. 局部变形后,虽然管道压力面一侧的二次流强度减弱,下壁面分离有所改善,但局部加速会带来摩擦损失增加,两者综合的结果是管式扩压器的总压

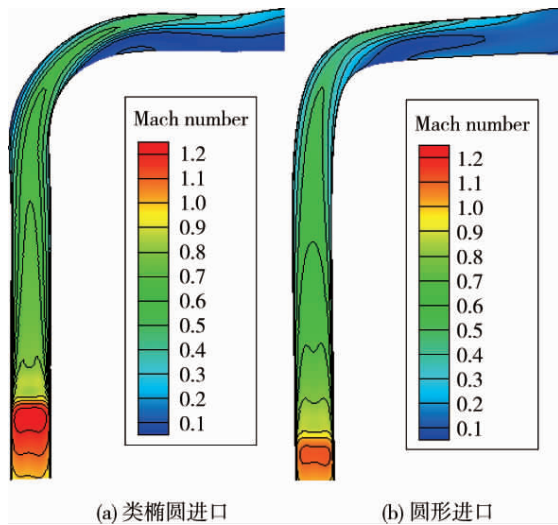


图 9 $+2^\circ$ 攻角下过管道中心线与轴向平行剖面总压分布

Fig. 9 Total pressure distribution on the cross-section which pass through passage center line and parallel to axial direction ($+2^\circ$ attack angle)

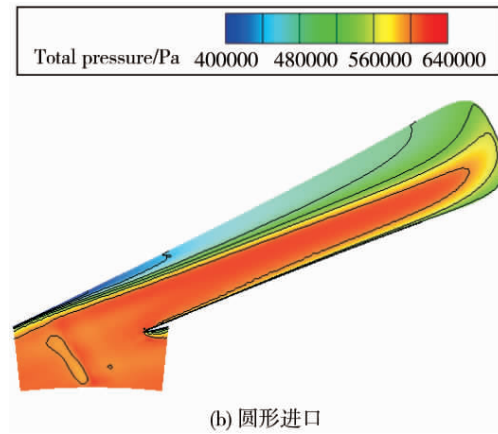
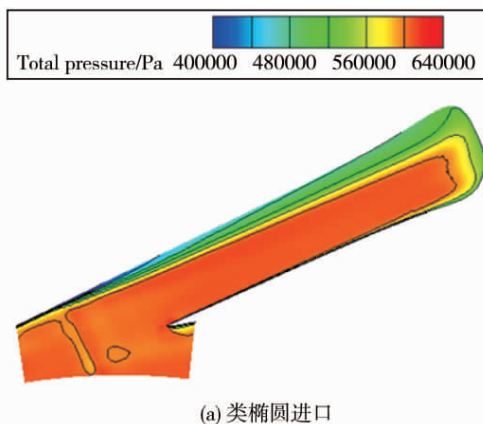


图 10 $+4^\circ$ 攻角下 50% 通道高度截面总压分布

Fig. 10 Total pressure distribution on 50% passage height cross-section ($+4^\circ$ attack angle)

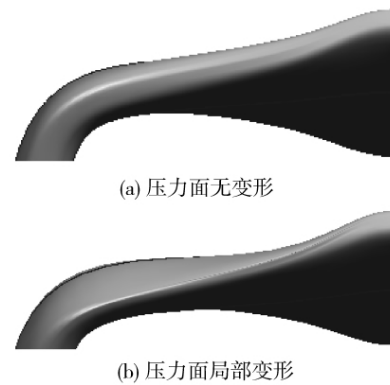


图 11 变形前后管式扩压器几何造型

Fig. 11 Geometry of pipe diffuser before and after deformation

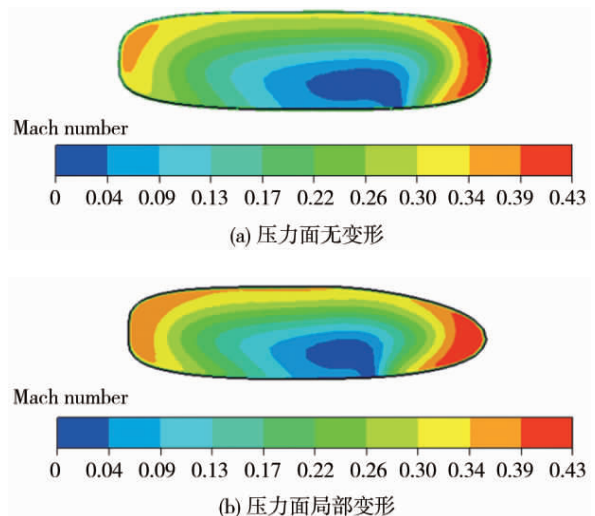


图 12 变形前后截面 Ma 分布

Fig. 12 Mach number distribution of cross-section before and after deformation

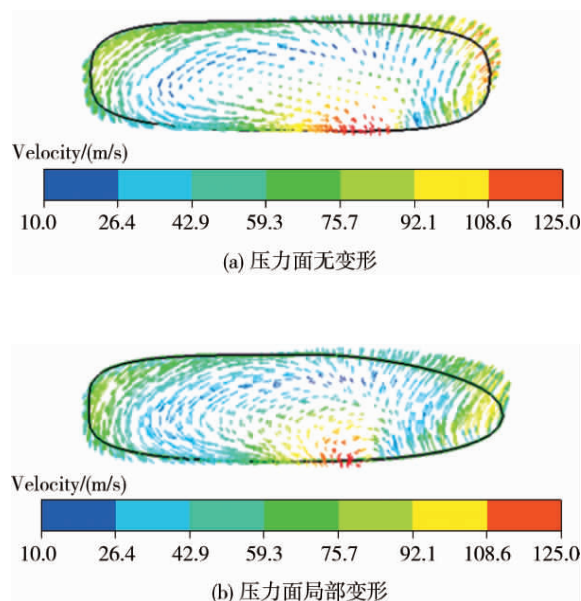


图 13 变形前后二次流速度矢量分布

Fig. 13 Secondary flow velocity vector distribution before and after deformation

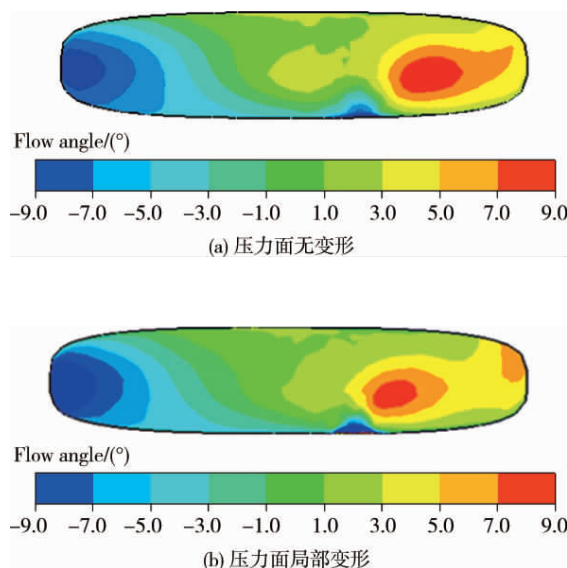


图 14 管式扩压器出口气流角分布

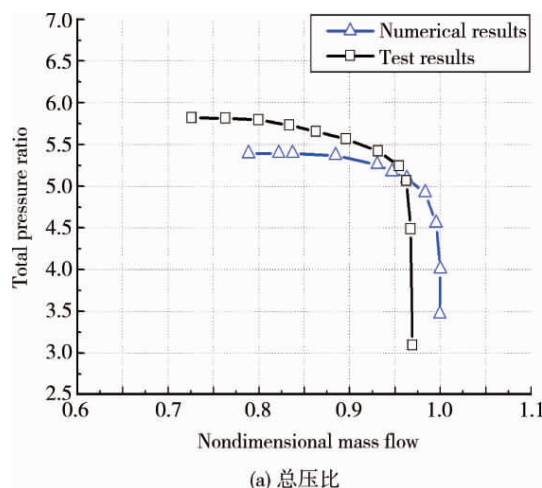
Fig. 14 Outlet flow angle distribution of pipe diffuser

恢复系数几乎无变化。

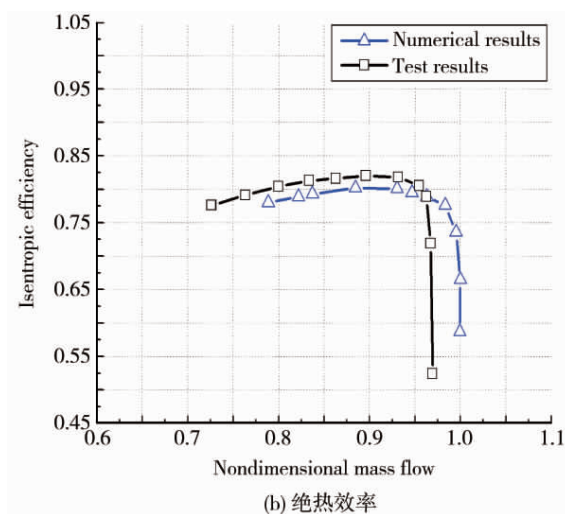
3.3 叶片式扩压器与管式扩压器对比

为检验所采用的计算程序和网格的计算精度,首先对配装叶片式扩压器的单级离心压气机进行了数值模拟,图 15 为该离心压气机在设计转速下的数值模拟特性与试验特性的对比,图中横坐标为无量纲流量(以数值结果的堵塞流量为参

考流量,各点流量与参考流量之比定义为无量纲流量)。对比结果显示,数值模拟得到的喘点压比比试验值偏低 7.3%,喘点流量偏大 7.9%,堵点流量偏大 3%,峰值效率偏低 2 个百分点,计算得到的压比和效率随流量的变化趋势与试验值一致。



(a) 总压比



(b) 绝热效率

图 15 设计转速下数值模拟和试验结果对比

Fig. 15 Numerical and experimental results at condition of design speed

3.4 管道截面形状对管式扩压器性能的影响

针对本文采用管式扩压器替代叶片式扩压器的算例,对公式(2)中控制截面形状的参数 m 和 n 进行调节,在相同的设计流量下针对不同 m , n 组合的管型进行数值计算,结果显示:当 $m=3$, $n=4$ 时,离心压气机具有较高的压比和效率。 $m>4$, $n>4$ 以后,截面的变化微乎其微,因此可以认为决定截面的 4 个转角处的光滑度的 n 值越

大(相当于4个转角处的过渡圆弧半径较大),其流动情况越好,而决定截面形状矩形度的 m 并非越大越好,存在一个与 n 值相匹配的最佳值。

图16给出了同一转子叶轮配装类椭圆形进口以及圆形进口管式扩压器与配装叶片式扩压器的计算特性对比,对三条特性线分别进行了流量无量纲化处理,两种管式扩压器都取 $m=3, n=4$,

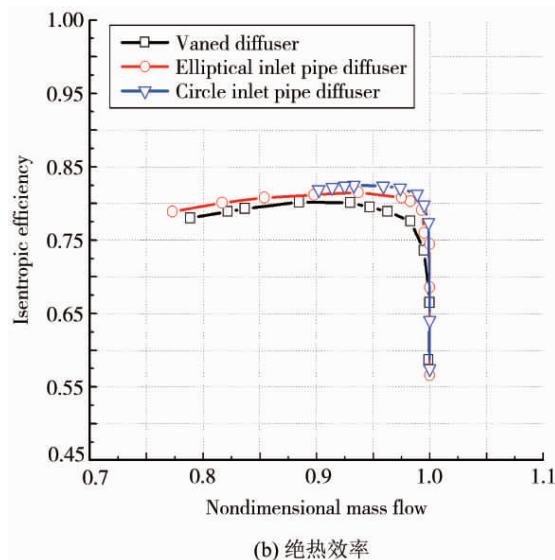
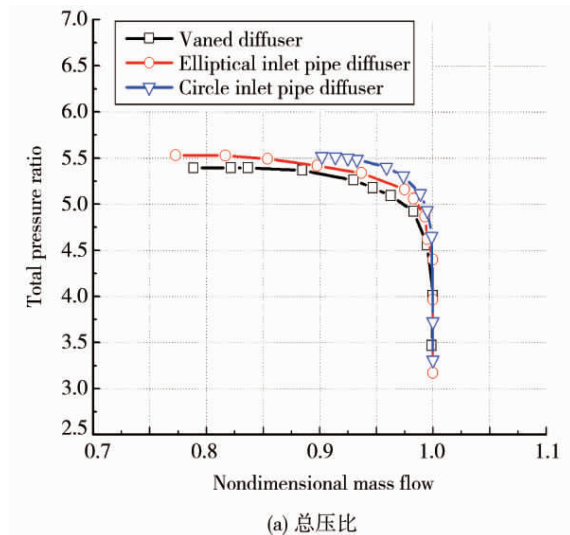


图16 三类扩压器结构的离心压气机特性

Fig. 16 Performance characteristics of the centrifugal compressor with three kinds of diffuser geometries

最大局部变形处取 $m=2, n=2$ 。圆形进口管式扩压器有30根扩压管,类椭圆进口管式扩压器有24根扩压管。从图中可以看到,配装圆形进口管式扩压器的压气机在设计点附近的效率最高,但

稳定工作范围变窄。配装类椭圆形进口管式扩压器的压气机在压比、效率和稳定工作范围方面都比配装叶片式扩压器的压气机有明显改善。除了管式扩压器特殊的前缘结构这一因素以外,管式扩压器弱化了叶片式扩压器气流通道中存在的4个角区对流动影响的作用。因此,用管式扩压器替代叶片式扩压器可使压气机的效率得到明显提高。

图17~图19给出了三种扩压器在近设计点50%通道高度处的 Ma 分布和近堵点50%通道高度处的 Ma 和静压分布。从图17中可以看到,圆形进口管式扩压器在前缘附近激波较弱,并且因其具有两端前掠的前缘几何形状,前缘附近压力梯度较小。以上原因使得配装圆形进口管式扩

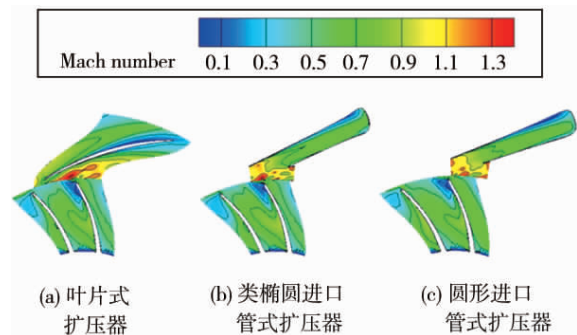


图17 近设计点50%通道高度处 Ma 分布

Fig. 17 Mach number distribution on 50% passage height cross-section (near design point)

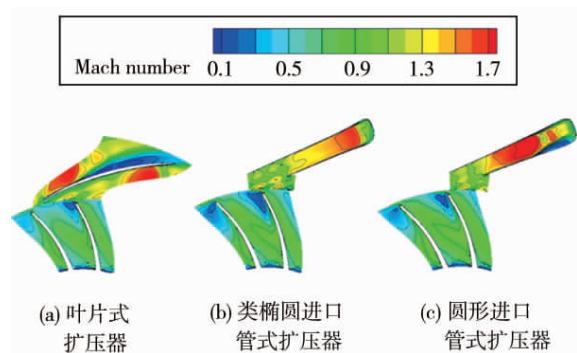


图18 近堵点50%通道高度处 Ma 分布

Fig. 18 Mach number distribution on 50% passage height cross-section (near choke)

压器的离心压气机在设计点的效率高于配装类椭圆进口管式扩压器的离心压气机。在近堵点附近,圆形进口管式扩压器和叶片式扩压器在压力面出现了分离,而类椭圆进口管式扩压器改善了负攻角下的分离情况,见图 18。在近堵点附近,叶片式扩压器进口区域沿径向的压力梯度较大,而管式扩压器由于具有特殊的前缘几何结构,在半无叶区(端区有叶,叶中无叶)沿径向的压力梯度相对减小,见图 19。

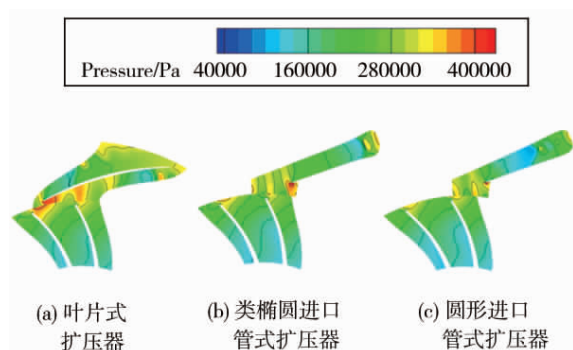


图 19 近堵点 50%通道高度处静压分布

Fig. 19 Static pressure distribution on 50% passage height cross-section (near choke)

图 20 对应于 0.93 无量纲流量下,三种扩压器在 50%通道高度处的 Ma 分布,此流量对应配装圆形进口管式扩压器的离心压气机的失速边界,可以看到,在正攻角下,圆形进口管式扩压器

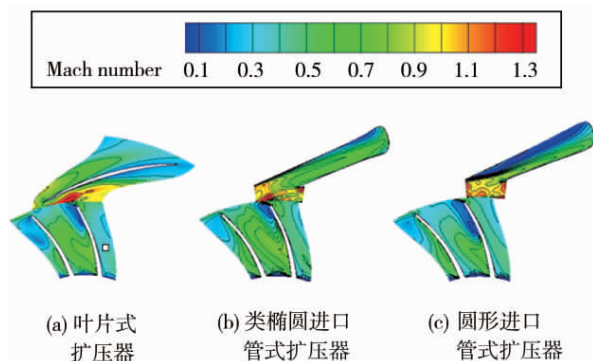


图 20 0.93 无量纲流量下 50%叶高截面 Ma 分布

Fig. 20 Mach number distribution on 50% passage height cross-section (nondimensional mass flow 0.93)

的吸力面产生了较大范围的低速和分离流动。而配装叶片式扩压器和类椭圆形进口的管式扩压器的压气机则无流动分离现象。此处验证了单独对管式扩压器数值模拟时得到的结果(图 8)。

4 结 论

本文通过对管式扩压器的几何造型研究,流场计算分析以及与某叶片式扩压器的对比计算研究,得到的具体结论如下:

1) 类椭圆形进口管式扩压器与圆形进口管式扩压器相比,前者的最高总压恢复系数低于后者,但前者的较低损失的攻角范围大于后者。

2) 对于本文所给出的类椭圆方程控制管式扩压器管道截面几何形状的方法,当 $m=3$ 和 $n=4$ 时,管式扩压器的性能达到最佳。

3) 管式扩压器径-轴转换段及部分轴向段的压力面局部变形,减小压力面一侧的流通面积,降低二次流强度,可以使管式扩压器出口的流场分布更加均匀。

4) 对一台级压比为 5.0 的离心压气机作对比计算的结果显示,在扩压器进出口几何尺寸不变的前提下,用类椭圆形进口的管式扩压器替代叶片式扩压器,可以使离心压气机的级压比、级效率和稳定工作范围都得到明显改善。

参考文献:

- [1] 华耀南,饶江,张国庆,等. 跨音速离心压气机的现状和发展[J]. 航空动力学报,1994,9(3),225-232.
HUA Yaonan, RAO Jiang, ZHANG Guoqing, et al. The present condition and development of transonic centrifugal compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(3), 225-232. (in Chinese)
- [2] Ziegler K Z, Gallus H E, Niehuis R. A study on impeller-diffuser interaction Part1: influence on the performance [R]. ASME 2002-GT-30381, 2002.
- [3] Shum Y K P, Tan C S, Cumpsty N A. Impeller-diffuser interaction in centrifugal stages [R]. ASME 2000-GT-426, 2000.
- [4] Filipenco V, Denizs, Johnston J, et al. Effects of inlet flow field conditions on the performance of centrifugal compressor diffusers Part I: discrete passage diffuser [R]. ASME 98-GT-473, 1998.
- [5] Deniz S, Greitzer E, Cumpsty N. Effects of inlet flow field conditions on the performance of centrifugal compressor diffusers Part 2: straight-channel diffuser [R]. ASME 98-GT-474, 1998.
- [6] Japikse D. Centrifugal compressor design and performance [M]. Wilder VT: Concepts ETI, Inc., 1996.

- [7] Kenny D P. A comparison of the predicted and measured performance of high pressure ratio centrifugal compressor diffusers[R]. ASME Paper 72-GT-54, 1972.
- [8] 刁正纲, 陈静宜. 高压比离心压气机发展的一些问题[J]. 力学进展, 1979, 9(1): 25-34.
DIAO Zhenggang, CHEN Jingyi. Some problems of high pressure ratio centrifugal compressors[J]. Advances in Mechanics, 1979, 9(1): 25-34. (in Chinese)
- [9] Krain H. Review of centrifugal compressor's application and development[R]. ASME 2003-GT-38971, 2003.
- [10] Vrana J C. Diffuser for centrifugal compressors: US, 3333762[P]. 1967-08-01.
- [11] Blair L W, Dr Russo C J. Compact diffusers for centrifugal compressors[R]. Lynn, Massachusetts: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980.
- [12] Rodgers C. The performance of centrifugal compressor channel diffusers[R]. ASME Paper 82-GT-1, 1982.
- [13] Rodgers C. Static pressure recovery characteristics of some radial vaneless diffusers[R]. Toronto, Canada: Canadian Aeronautics and Space Institute International Symposium on Centrifugal Compressor Design, 1982.
- [14] 石建成, 刘宝杰. 混合型扩压器流动特点分析[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 583-590.
SHI Jiancheng, LIU Baojie. Numerical investigation for a mixed type diffuser[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 583-590. (in Chinese)
- [15] 王毅, 赵胜丰, 卢新根, 等. 高负荷离心压气机管式扩压器特点及机理分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 649-655.
WANG Yi, ZHAO Shengfeng, LU Xingen, et al. Characteristics and mechanism analysis of high-load centrifugal compressor pipe diffuser[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 649-655. (in Chinese)