

文章编号:1000-8055(2011)03-0649-07

高负荷离心压气机管式扩压器特点及机理分析

王 毅^{1,2}, 赵胜丰^{1,2}, 卢新根¹, 朱俊强¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘 要: 以某高负荷离心压气机为研究对象, 进行管式扩压器设计, 借助于数值模拟的方法, 对影响扩压器性能的重要参数——喉部面积进行参数化研究, 并详细分析了管式扩压器特殊的进口结构对压气机内部流场的影响, 初步探讨了管式扩压器喉部设计准则, 摸清其提高效率扩大稳定工作范围的机理。

关 键 词: 离心压气机; 管式扩压器; 高负荷; 喉部面积; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Analysis of characteristic and mechanism of pipe diffuser for a highly loaded centrifugal compressor

WANG Yi^{1,2}, ZHAO Sheng-feng^{1,2}, LU Xin-gen¹, ZHU Jun-qiang¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Pipe diffuser was designed for a highly loaded centrifugal compressor in this paper. Parametric studies on the throat area of pipe diffuser were completed through numerical simulation. And detailed analyses of the flow visualization in the compressor have exposed the different radial diffuser blade flow topologies between channel diffuser and pipe diffuser. Furthermore, this paper made some preliminary conclusions as for the design criteria of pipe diffuser throat and the flow physics involved in the stall margin improvements afforded by the use of pipe diffuser.

Key words: centrifugal compressor; pipe diffuser; highly loaded; throat area; numerical simulation

基于离心压缩系统的燃气涡轮发动机具有推质比大、结构紧凑、加速性能好等特点, 因此一直是中小型航空发动机的首选, 广泛应用于无人机、巡航导弹和武装直升机等的动力装置。基于对结构布局和质量考虑, 中小型航空发动机一般采用单级离心、轴流离心组合或斜流离心组合压气机等三种结构形式, 多数情况下离心压气机已成为中小型航空发动机不可分割的部分。为满足未

来无人机、直升机和巡航导弹对推进动力装置的需求, 进一步提高中小型航空发动机的推质比/功质比和降低耗油率, 迫切需要进行高负荷、高效率且宽跨稳定工作范围的离心压气机设计。目前, 单级压比高达 8 以上的离心压气机已经应用到了航空发动机型号上, 高压比离心压气机使得离心叶轮出口气流速度高且很不均匀, 再加上离心叶轮出口宽度很小, 扩压器入口与离心叶轮出口非常

收稿日期: 2010-01-23; 修订日期: 2010-03-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA050503); 国际科技合作项目(2010DFB70620)

作者简介: 王毅(1980—), 男, 四川广安人, 博士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究。

近,两者之间存在强烈的非定常相互作用,同时高压比使得径向扩压器进口马赫数增加,甚至出现超声,进一步恶化了叶轮与扩压器之间的匹配,大大降低了离心压气机的效率和工作范围,成为制约高负荷离心压气机应用于工程实际的主要技术障碍,这使得紧凑高效的扩压器设计非常具有挑战性^[1-4]。

目前其解决途径主要包括低稠度扩压器和管式扩压器。管式扩压器和叶片式扩压器在通道结构上相似,如图1所示,都存在半无叶区、扩压器喉部和扩压通道,区别在于管式扩压器还有一个独特的结构,相邻管式扩压器相贯形成燕尾形前缘,此结构位于叶轮后的无叶区与扩压器的半无叶区之间,该区域常称之为伪无叶区。

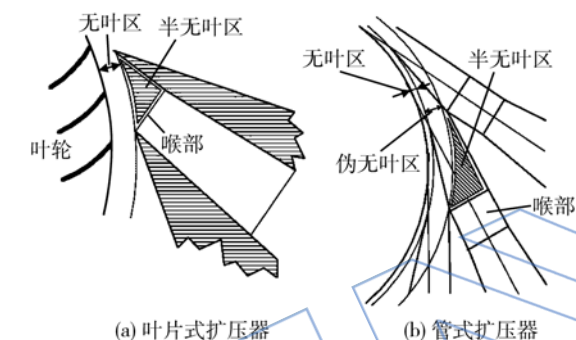


图1 叶片式扩压器和管式扩压器结构示意图

Fig. 1 Sketch map of channel and pipe diffuser geometries

较之常规楔形扩压器,管式扩压器能取得更高的压气机效率,尤其是在高压比工况^[5-6]。管式扩压器已经成功应用到了工程领域,如普惠公司(Pratt & Whitney Group)的PW600系列涡扇发动机和PT6系列涡轴发动机的离心压气机,其径向扩压器和轴向扩压器设计成连成一体的管式扩压器,然而其设计理论和方法并未公开发表;国内鲜有管式扩压器应用于型号的相关报道,相关研究资料也较少,仅石建成等人^[7]对类似管式扩压器进口结构的混合型扩压器进行了研究,得到了许多有益的结论。

本文以某高压比离心压气机为研究对象,进行管式扩压器设计,借助数值模拟手段,对影响扩压器性能的重要参数——喉部面积进行参数化研究,并详细分析了管式扩压器特殊的进口结构对压气机内部流场的影响机理,初步建立了管式扩压器的设计准则。

1 管式扩压器设计

表1列出了所研究的德国Radiver高压比离心压气机^[8]详细的几何和气动设计参数。

表1 Radiver离心压气机几何和气动设计参数

Table 1 Centrifugal compressor geometry and aerodynamic design parameters

参数	数值
流量/(kg/s)	2.50
压比	4.07
效率/%	83.4
转速/(r/min)	35200
比转速	0.69
叶轮出口切线速度/(m/s)	498
扩压器进口绝对马赫数	0.94
叶轮出口半径/mm	135
叶轮后弯角/(°)	38
叶轮叶片数	15
扩压器叶片数	23
扩压器宽度/mm	11.1
扩压器进口角/(°)	16.5
扩压器进口半径/叶轮出口半径	1.14
扩压器出口半径/扩压器进口半径	2.049

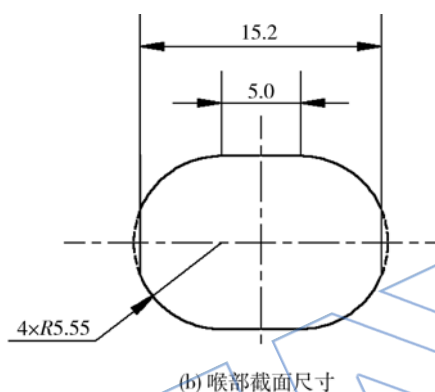
与传统楔形扩压器一样,管式扩压器设计参数主要包括入口气流角,通道数,喉部面积,进出口半径比,扩压面积比等,特别之处在于需要保证其喉部中轴线与叶轮出口圆相切。为方便与原型扩压器对比,除喉部面积外,其他设计参数取值与原型相同。

喉部面积是叶片式和管式扩压器设计的重要参数,对扩压器性能具有重大影响,就目前来看,叶片式扩压器喉部面积一般按照压气机设计流量与扩压器堵塞流量之比为0.9以上进行选取,但对管式扩压器的喉部面积设计是否具有参考价值,还是一个未知数。本文参考该设计理论,设计了四种喉部面积的扩压器,满足压气机设计流量/扩压器堵塞流量分别为0.92,0.94,0.96和0.98,相应工况分别标记为MR_0.92,MR_0.94,MR_0.96和MR_0.98。设计的管式扩压器三维渲染图及流量比为0.98的喉部截面见图2;如图2(b)所示,为便于后续数值计算网格划分,提高

网格质量,在保证喉部设计面积的前提下,对扩压器横截面进行削边处理.设计四种工况喉部截面时,都保证其高度为 11.1 mm,且削边厚度相同.



(a) 管式扩压器三维渲染图



(b) 喉部截面尺寸

图2 管式扩压器结构图

Fig. 2 Geometry of pipe diffuser

2 数值计算方法

数值计算采用了 Numeca 商业 CFD(计算流体力学)软件,采用 Jameson 的有限体积差分格式并结合 Spalart-Allmaras 湍流模型相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,为提高计算效率,采用了多重网格法、局部时间步长和残差光滑等加速收敛措施.

计算采用了分区网格技术,分别在叶轮通道和扩压器通道内生成各自的结构化网格,叶轮通道与扩压器通道之间采用动静干涉面连接.叶轮和楔形扩压器通道内采用贴体 HOH 网格拓扑结构,管式扩压器通道内采用纯 H 网格拓扑结构,并对壁面和管式扩压器相贯线附近进行了局部加密,在扩压器进口区域建立辅助拓扑结构以提高网格正交性.本文在生成网格过程中,壁面附近的网格沿壁面法向方向按几何级数的规律加密,主流区网格则均匀分布,并保证所有固壁附近的无

量纲化第一层网格高度 $y^+ < 5$.图3给出了管式扩压器通道内的计算网格,离心压气机级总网格数约 140 万.

边界条件给定如下:进口边界给定总压、总温和绝对气流角;出口边界条件只给定平均静压;壁面采用了绝热无滑移边界条件,与转子叶片连接的轮毂壁和叶片壁转动,而轮毂壁的其他部分以及机匣壁则定义为静止,在叶轮和扩压器通道交接面采用混合平面法进行信息传递.

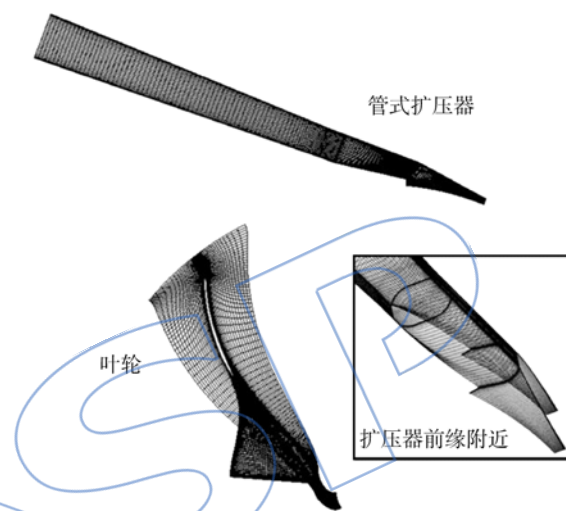


图3 三维计算网格

Fig. 3 Three-dimensional computational grid

3 计算结果及分析

3.1 管式扩压器喉部面积对压气机性能影响

图4为不同管式扩压器喉部设计面积的 Radiver 离心压气机特性,图中可以清楚地看到,当设计流量与扩压器堵塞流量之比为 0.98 时,压气机获得最佳性能;随着流量比值减小,即管式扩压器喉部面积的增加,压气机特性将向大流量方向移动,裕度减小,同时压气机性能将会恶化,且其喉部面积越大,性能恶化越快;由图中可以看到,MR_0.92 和 MR_0.94 具有相同的堵塞流量,而比 MR_0.96 略小,这是由于随着扩压器喉部面积增大,压气机的气动喉部已经从扩压器转移至叶轮中,压气机堵塞流量不再是扩压器喉部面积的函数.

3.2 楔形、管式扩压器对比分析

为深入研究管式扩压器对压气机流场的影响,取 MR_0.98 管式扩压器与原型扩压器进行对比分析.图5是配有楔形扩压器的离心压气机

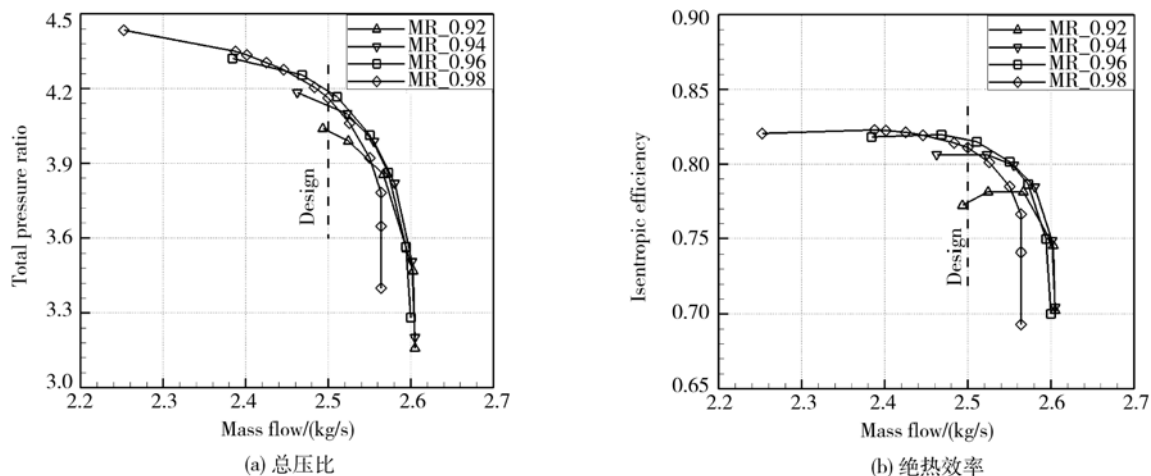


图4 不同管式扩压器喉部面积的离心压气机性能特性

Fig. 4 Performance characteristics of the centrifugal compressors with different pipe diffuser throat areas

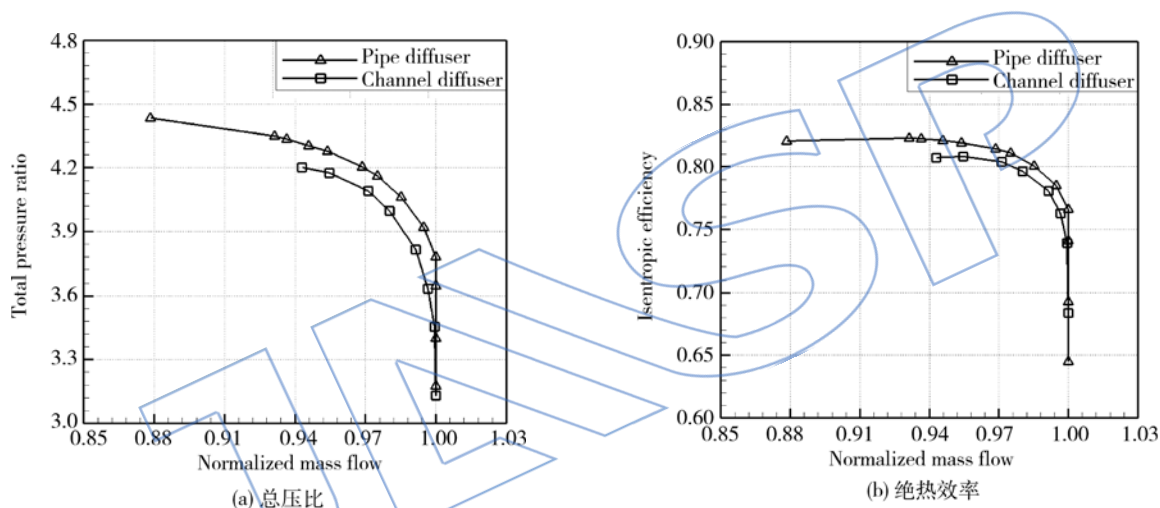


图5 不同扩压器结构的离心压气机性能特性

Fig. 5 Performance characteristics of the centrifugal compressor with different diffuser geometries

原型与配有管式扩压器的离心压气机在设计转速下的特性,横坐标为无量纲化流量,定义为实际流量和堵塞流量之比.表2给出了管式扩压器与原型扩压器的特征点性能对比;由图5和表2中可以清楚地看到,配有管式扩压器的离心压气机性

表2 管式扩压器与原型扩压器性能对比

Table 2 Performance comparison of pipe diffuser and channel diffuser

	原型扩压器	管式扩压器
堵塞流量/(kg/s)	2.605	2.564
峰值效率/%	80.84	82.29
峰值压比	4.201	4.435
失速流量/(kg/s)	2.456	2.252

能明显优于原型,总压比和绝热效率均有提高,其中最大总压比提高0.234,峰值效率增加了1.45%;管式扩压器并具有更宽的流量范围,失速点流量减少8.3%,表明管式扩压器前缘特殊的燕尾形结构能够更好地适应叶轮出口的非均匀流动。

流场信息的区别源自结构的差异,带管式扩压器的压气机和原型压气机具有相同的叶轮,不同之处仅是扩压器的结构形式,根据文献[3-4]的论述结果,下游扩压器结构的改变对上游离心叶轮内部流场的影响极小,可忽略不计,本文不再赘述,主要讨论不同扩压器结构形式的影响.管式扩压器和楔形扩压器结构的差异主要表现在燕尾形前缘和弯曲的壁面,从结构形式来看,燕尾形前缘同时具有大前掠和弯叶片的特征,前掠结构将在

叶片吸力面形成两端压力高,中间压力低的反“C”型压力分布^[9];管式扩压器前缘的弯曲结构都是内凹的,也将有助于在扩压器吸力面和压力面形成两边压力高、中间压力低的“C”型分布;如图6给出了峰值效率工况下管式扩压器和楔形扩压器前缘的静压分布对比,两者分布截然不同,在管式扩压器压力面和吸力面燕尾形前缘附近都形成典型的两端压力高,中间压力低的反“C”型压力分布;在此压力分布作用下,叶轮出口的顶部低

能流体沿着扩压器叶片向中部移动,并被吸入主流区,减少附面层在端壁区的堆积,改善扩压器通道内部的通流状况;同时,管式扩压器对上游无叶扩压器的流动具有重要影响,从图7可以清楚地看出,管式扩压器明显地减小了叶轮出口无叶扩压段的低速分离流动区域;故管式扩压器将大大改善扩压器与离心叶轮的匹配关系,这是其效率高于传统扩压器的其中一个重要原因。

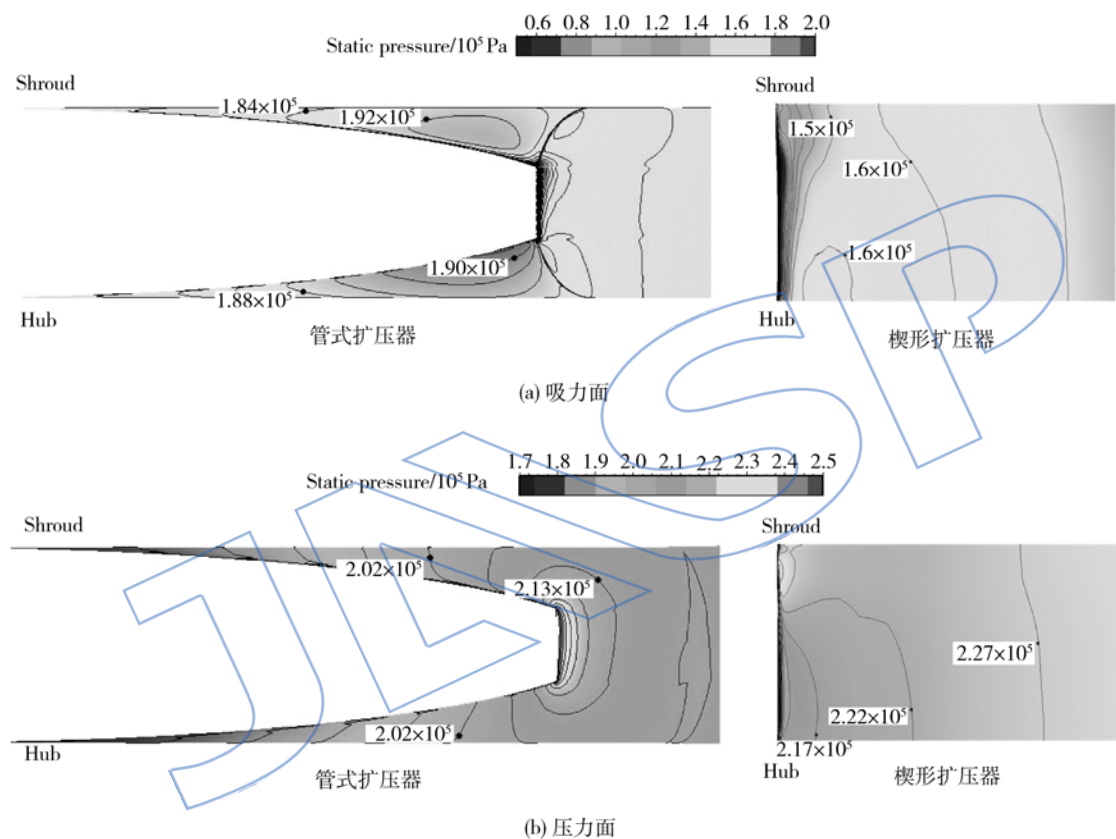


图6 扩压器前缘附近的静压分布

Fig. 6 Static pressure contours near the leading-edge of diffuser

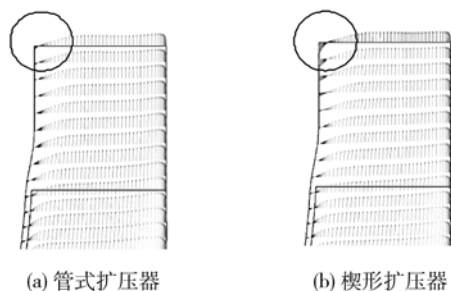


图7 叶轮出口无叶扩压区速度矢量周向平均分布

Fig. 7 Average distribution of velocity vector near impeller exit

由于管式扩压器特殊的大前掠前缘结构,不同径向位置的流体将在不同的流向位置进入扩压器通道,避免了所有流体在相同的叶片前缘进行急剧地压缩增压,如图6所示,与传统楔形扩压器相比,大前掠前缘增大了前缘附近的扩压段,降低其压力梯度。

扩压器前缘附近的压力变化是离心压气机非常重要的参数,与扩压器能否正常工作息息相关;Kenny, Came 和 Japikse 等人^[10-12]一致认为扩压器失稳是由半无叶区流动分离导致的,并将半无叶区临界静压升系数等于0.5作为衡量扩压器失

稳的标准;也即是说,只要能够降低半无叶区静压升系数,就能实现扩稳.图8给出了两种扩压器根、中、尖截面的静压分布,可以清楚地看到,在吸

力面半无叶区,楔形扩压器压力梯度比较大,而管式扩压器由于大前掠前缘结构降低了该区域的压力梯度,从而降低其静压升系数,实现扩稳.

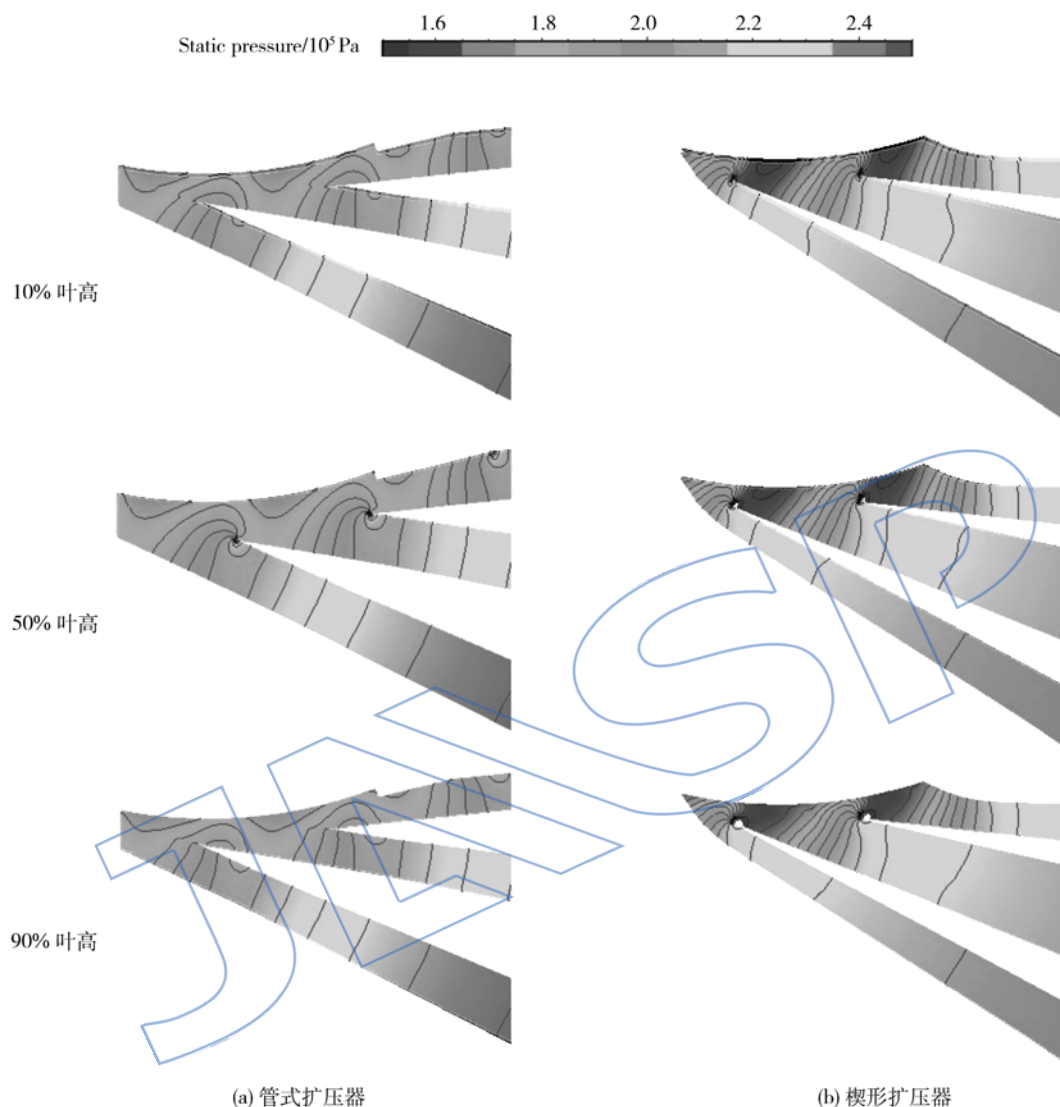


图8 扩压器根、中、尖截面静压分布

Fig. 8 Static pressure contours at root, mid and tip span of diffuser

4 结 论

以某高压比离心压气机为研究对象,设计了与之匹配的管式扩压器,利用数值模拟的方法分析了管式扩压器对离心压气机性能的影响,探讨了管式扩压器提高离心压气机效率和稳定工作裕度的机理,通过研究,获得了以下结论:

1) 管式扩压器喉部面积对性能具有重要影响,当喉部面积满足设计流量与扩压器堵塞流量之比为0.98附近时,压气机获得最佳性能;随着

流量比值减小,即管式扩压器喉部面积的增加,压气机特性将向大流量方向移动,裕度减小,同时压气机性能将会恶化,且其喉部面积越大,性能恶化越快.

2) 管式扩压器特殊的大前掠前缘结构,同时具有前掠和弯曲叶片的几何特征;在该区域沿径向形成两端压力高、中部压力低的反“C”型分布,有助于减少尖部低能流体的积聚,改善扩压器的通流状况;同时影响上游无叶扩压器流场,减小其尖部的低速回流区,优化了扩压器进口条件,使燕

尾形前缘能更好适应转子出口的非均匀流动。

3) 管式扩压器大前掠进口降低了扩压器半无叶区的静压升系数,从而提高了离心压气机的稳定工作裕度。

参考文献:

- [1] Ferrara G, Ferrari L, Mengoni C P, et al. Experimental investigation and characterization of the rotating stall in a high pressure centrifugal compressor Part I: influence of diffuser geometry on stall inception [R]. ASME Paper 2002-GT-30389, 2002.
- [2] Ferrara G, Ferrari L, Mengoni C P, et al. Experimental investigation and characterization of the rotating stall in a high pressure centrifugal compressor Part II: influence of diffuser geometry on stage performance [R]. ASME Paper 2002-GT-30390, 2002.
- [3] Baldassarre L, Cellai A, Ferrara G, et al. Experimental investigation and characterization of the rotating stall in a high pressure centrifugal compressor Part III: influence of diffuser geometry on stall inception and performance [R]. ASME Paper 2003-GT-38390, 2003.
- [4] Mohler S R Jr. Wind-US unstructured flow solutions for a transonic diffuser [R]. NASA CR-2005-213417, 2005.
- [5] Bennett I, Toulidakis A, Elder R L. The design and analysis of pipe diffusers for centrifugal compressors [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2000, 214(1): 87-96.
- [6] Zachau U, Buescher C, Niehuis R, et al. Experimental investigation of a centrifugal compressor stage with focus on the flow in the pipe diffuser supported by particle image velocimetry (PIV) measurements [R]. ASME Paper 2008-GT-51538, 2008.
- [7] 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)
- [8] Ziegler K U, Gallus H E, Niehuis R. A study on impeller-diffuser interaction Part I: influence on the performance [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 173-182.
- [9] 陈浮, 宋彦萍, 冯国泰. 掠叶片对压气机叶栅流场性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 586-588.
- CHEN Fu, SONG Yanping, FENG Guotai. The sweep effect on compressor cascade performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 586-588. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] Came P M, Herbert M V. Design and experimental performance of some high pressure ratio centrifugal compressors [R]. AGARD Centrifugal Compressors, Flow Phenomena and Performance 31 p (SEE N81-17447 08-37), 1980.
- [12] Japikse D. The influence of diffuser inlet pressure fields on the range and durability of centrifugal compressor stages [R]. AGARD Centrifugal Compressors, Flow Phenomena and Performance 11 p (SEE N81-17447 08-37), 1980.