

三种离心叶轮超声扩压器性能对比分析

夏树丹*, 张霞妹, 刘志远

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 采用数值模拟方法对匹配三种扩压器的离心压气机性能进行分析和对比, 分别是楔形扩压器、单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器。研究结果显示, 对于进口超声和叶片较短的扩压器, 串列叶栅扩压器性能表现最优, 其次是单圆弧扩压器, 楔形扩压器性能最差。

关键词: 超声速; 楔形扩压器; 单圆弧型扩压器; 串列叶栅扩压器

中图分类号: V211; **文献标识码:** A **DOI:** 10.19452/j.issn1007-5453.2018.04.009

离心叶轮出口的气流仍然具有较高的速度, 气流在扩压器内部继续减速, 进一步转化为压力能。扩压器可分为无叶扩压器和有叶扩压器两种。

Seiichi Ibaraki^[1]以某跨声速离心叶轮匹配扩压器为研究对象, 使用 PIV 技术和数值模拟方法, 详细分析了压气机内部流场, 得出扩压器进口气流受叶轮影响, 而且分布极度不均匀。T. Ch Siva Reddy^[2]通过试验研究了三种扩压器叶片形状对离心压气机性能的影响。结果表明, 翼型叶片与其他两种叶片相比, 表现出了更优的性能。Hong-Won Kim^[3]采用数值模拟手段研究了翼型扩压器、楔形扩压器和 NACA65 型扩压器对离心压气机性能的影响, 研究结果表明, NACA65 型扩压器的喘振边界更陡, 喘振裕度相对较大。

初雷哲^[4-8]等对某离心压气机进行数值模拟, 研究了叶轮前缘几何形状、叶轮叶顶间隙、叶片数、分流叶片周向位置对压气机性能的影响。同时, 对扩压器叶片倾角、扩压器无叶段长度对扩压器和叶轮动静干涉的影响进行了非定常计算。柳阳威^[9]等以某跨声速离心压气机为研究对象, 对其内部流动进行了定常和非定常计算, 详细分析了叶轮和扩压器之间的相互干涉。周莉^[10]等以某离心叶轮匹配串列叶栅扩压器为对象进行数值模拟, 结果表明与单列扩压器相比, 串列叶栅扩压器的性能表现更好, 效率和压比均有提高。周向位置对压气机性能影响, 对其性能曲线、熵增分布和载荷

分配进行分析, 压气机流道中气流的速度和马赫数提高, 从而导致超声速气流在叶轮前缘叶顶部位形成, 同时出现于扩压器进口区域。多数情况下, 超声速气流的出现总是伴随着效率降低和流量范围变窄。因此, 对进口超声扩压器的研究具有深远的意义, 而国内外学者对此方面专项研究较少, 所以, 本文以进口超声的有叶扩压器为研究对象。

1 研究对象

与本文叶轮匹配的叶片扩压器进口为超声。该叶轮有 15 个主叶片和 15 个分流叶片。该叶轮的设计参数见表 1, 三维效果图如图 1 所示, 离心叶轮子午流道如图 2 所示。

表 1 离心叶轮设计参数
Table 1 Design parameters of centrifugal impeller

参数名称	参数值
设计流量 / (kg/s)	4.537
设计转速 / (r/min)	45000
设计压比	3.8
叶轮叶片数	15+15
叶轮出口半径 r_2 /m	0.12

本文采用基于 ANSYS BladeGen 的造型原理, 分别为该叶轮设计了楔形扩压器和单圆弧扩压器, 两种扩压器三维效果图如图 3 所示。在扩压器造型过程中进行了多次改进, 如楔形扩压器中进口几何角和叶片扩张角的搭配, 单圆弧扩

收稿日期: 2017-12-22; 退修日期: 2018-01-26; 录用日期: 2018-03-26

* 通信作者: Tel.: 18729542815 E-mail: 916101797@qq.com

引用格式: Xia Shudan, Zhang Xiamei, Liu Zhiyuan. Performance analysis of three types of supersonic diffuser[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (04): 09-17. 夏树丹, 张霞妹, 刘志远. 三种离心叶轮超声扩压器性能对比分析[J]. 航空科学技术, 2018, 29 (04): 09-17.

压器进口几何气流角与圆弧对应圆心角的搭配,最终在多次尝试后选取性能表现较好的楔形、单圆弧扩压器为研究对象。

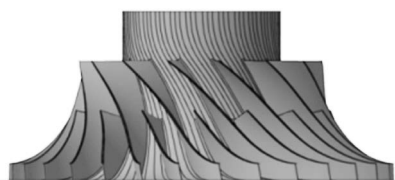


图 1 离心叶轮三维效果图
Fig.1 3D graph of centrifugal impeller

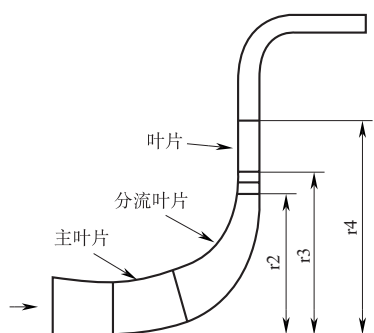


图 2 离心叶轮子午流道
Fig.2 Meridional channel of centrifugal impeller

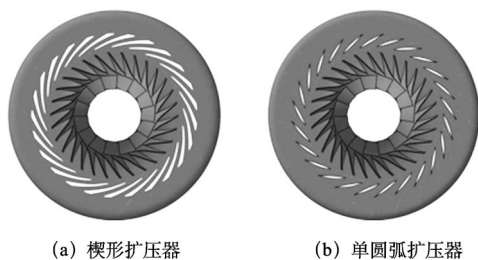


图 3 两种扩压器三维效果图
Fig.3 3D graph of two kinds of diffuser

本文叶轮匹配有串联叶栅扩压器,该串联叶栅前后排均采用单圆弧叶型。该串联叶栅扩压器的基本设计参数见表 2,串联叶栅扩压器三维效果图如图 4 所示,子午流道如图 5 所示。

表 2 串联叶栅扩压器设计参数

Table 2 Design parameters of tandem cascade diffuser

参数名称		参数值
前排叶片	进口半径 /m	0.134
	出口半径 /m	0.155
	叶片数	25
后排叶片	进口半径 /m	0.156
	出口半径 /m	0.191
	叶片数	50

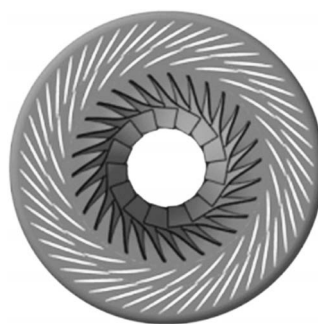


图 4 串联叶栅扩压器三维效果图
Fig.4 3D graph of tandem cascade diffuser

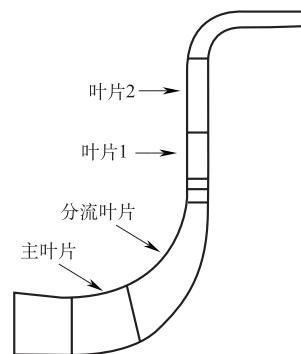


图 5 串联叶栅扩压器子午流道图
Fig.5 Meridional channel of tandem cascade diffuser

2 网格生成及数值模拟方法

将 ANSYS BladeGen 造型得来的扩压器几何文件导入 AutoGrid5 中,与 CC3 离心叶轮组合生成单通道网格,离心叶轮和扩压器均采用 O4H 网格结构,离心叶轮存在叶顶间隙,叶顶间隙则采用蝶形网格结构。生成网格时,网格质量必须满足如下要求:(1) 最小网格正交性角度 $>5^\circ$,越接近 90° 越好。(2) 最大网格宽度比 <5000 ,越接近 1 越好。(3) 最大网格延展比 <10 ,越接近 1 越好。

本文以默认拓扑结构为基础,通过在 AutoGrid5 中调整部分节点数目,在满足上述要求的基础上,仍然多次调整以期得到质量较优的网格结构。

本文数值模拟介质为真实气体,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型,进口边界条件给定气流角,湍流黏度为 0.0001,出口边界条件给定背压,通过改变背压计算不同工况。

3 匹配不同叶型扩压器的性能分析

图 6 给出了该叶轮分别匹配楔形扩压器、单圆弧扩压器和串联叶栅扩压器的压气机特性线对比。从图中可以看

出：

(1) 单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器的流量范围较窄，同时喘振裕度比较接近；与单圆弧和串列叶栅扩压器相比，楔形扩压器的稳定工作范围靠左，工作在流量偏小的工况，而且楔形扩压器稳定工况范围最宽。

(2) 设计点附近三种扩压器的压比表现差距较小，其中串列叶栅扩压器的压比略高，其次是楔形扩压器。

(3) 楔形扩压器整体效率和峰值效率均低于单圆弧和串列叶栅扩压器；与单圆弧扩压器相比，串列叶栅扩压器的效率表现更优。

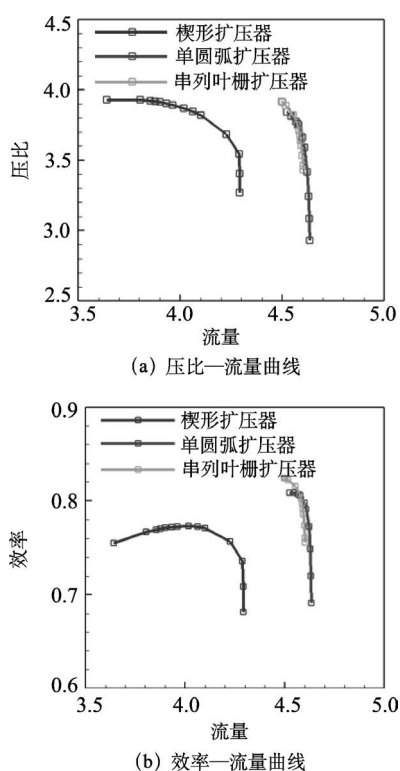


图6 叶轮与不同扩压器性能曲线

Fig.6 Characteristic curve of impeller with different diffusers

图7和图8分别给出了三种扩压器的总压损失系数和静压恢复系数对比曲线。从图中可以看出，楔形扩压器的总压损失系数高于单圆弧和串列扩压器，静压恢复系数偏低，因此，楔形扩压器性能相对较差；同一流量下，单圆弧扩压器的总压损失系数低于串列叶栅扩压器，静压恢复系数基本持平。

图9~图11分别给出了楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器与叶轮匹配后，沿展向10%、50%、90%叶高的相对马赫数云图。径向扩压器和离心叶轮互相干涉，因此，扩压器叶型改变对离心叶轮和扩压器内部流动均会产生影响。

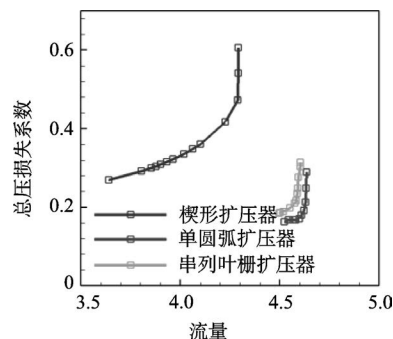


图7 总压损失系数

Fig.7 Total pressure loss coefficient

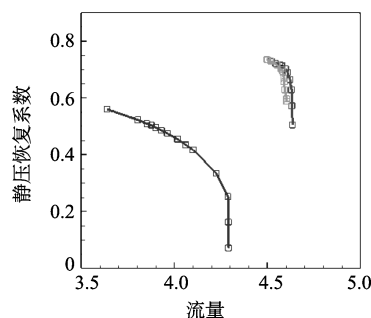


图8 静压恢复系数

Fig.8 Static pressure recovery coefficient

从图中可以看出，有叶扩压器的叶型对叶轮通道内的流动会产生很大影响。对比图中离心叶轮相对马赫数分布，可以得出：从90%叶高可以看出，匹配单圆弧扩压器的离心叶轮叶尖激波区域最大，串列叶栅扩压器次之，楔形扩压器最小；气流经过激波后与边界层相互作用，损失增加，主叶片和分流叶片的通道内形成大范围的低速区。观察50%叶高位置，匹配楔形扩压器的离心叶轮通道后部低速区要比其他两种扩压器范围大，单圆弧扩压器的叶轮吸力面前缘附近形成一道弱激波。10%叶高位置，楔形扩压器的离心叶轮通道内低速流动相对明显。

叶型不同，扩压器内部流动不同。对比分析三种扩压器相对马赫数分布可以发现：无论叶根、叶中还是叶尖截面，楔形扩压器尾缘形成明显低速区；所有扩压器叶片吸力面前缘出现高马赫数区；单圆弧叶片通道内存在大面积的低速区，串列叶栅中前排叶片流道内低速区得到了有力的改善。

图12(a)~图12(c)分别给出了匹配楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器的离心压气机50%叶高截面的压力分布图。 P_t 代表叶片表面静压与叶轮进口总压之比。

从图中可以看出,单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器静压分布都比较均匀,基本沿着流线的方向,而楔形扩压器静压分布较为混乱。总体来看,整个叶片扩压器静压升高主要发生在

叶片扩压器进口到喉道部位之间的半无叶区,在喉部之后三种扩压器均有一定的静压升。

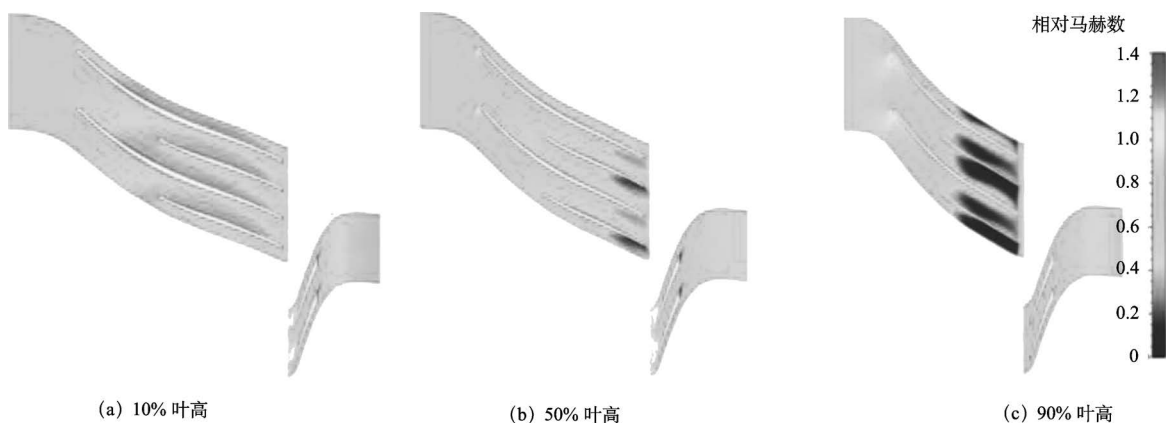


图 9 楔形扩压器相对马赫数图
Fig. 9 Relative Mach number of wedge diffuser

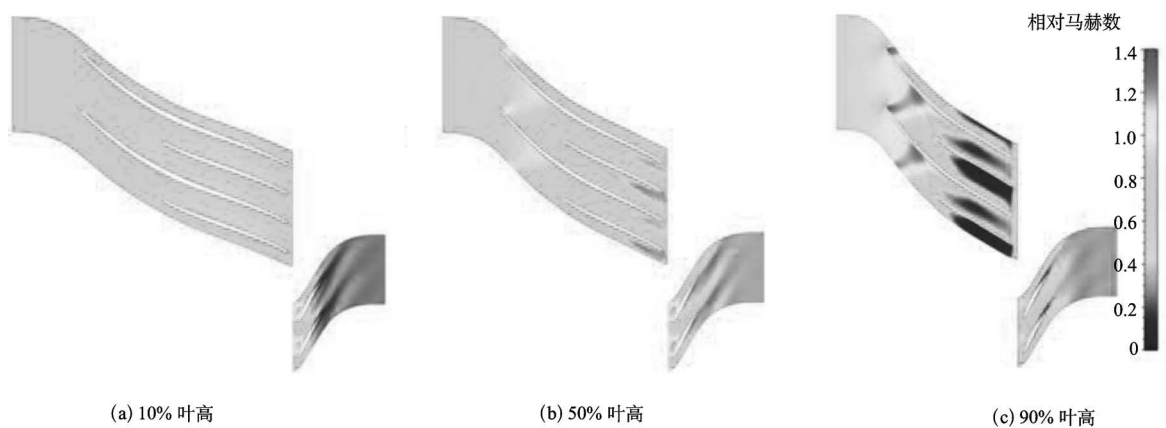


图 10 单圆弧扩压器相对马赫数图
Fig. 10 Relative Mach number of single circle diffuser



图 11 串列叶栅扩压器相对马赫数图
Fig.11 Relative Mach number of tandem cascade diffuser

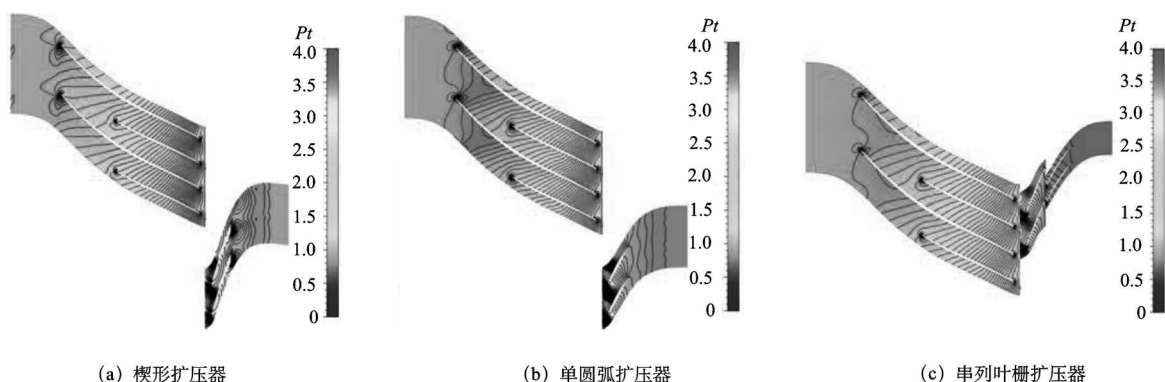


图 12 离心叶轮与扩压器 50% 叶高压力分布图

Fig.12 Pressure distribution of centrifugal impeller and diffuser of 50% of blade height

图 13~图 15 分别为楔形扩压器、单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器叶根、中、尖压力分布曲线。 P_t 代表叶片表面静压与叶轮进口总压之比, 0 为叶片前缘, 1 为叶片尾缘。可以发现, 楔形扩压器叶片从 35% 弦长位置吸力面压力高于压力面, 压力面在 80% 弦长位置出现明显的下降, 导致叶片载荷出现中断, 单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器载荷分布连续; 串列叶栅前排叶片相对于单圆弧扩压器, 吸力面静压

明显升高, 压力分布曲线更加平滑, 而压力面静压降低, 吸、压力面面积差减小, 前排叶片负荷降低; 而后排叶片仍然存在静压升, 保证了串列叶栅扩压器的扩压能力, 承受了部分负荷。

综上所述, 单圆弧扩压器叶片负荷分布不均匀, 应用串列叶栅后, 叶片负荷分配到前后两排叶片, 使得载荷分布更加均匀, 增加其气动性能。

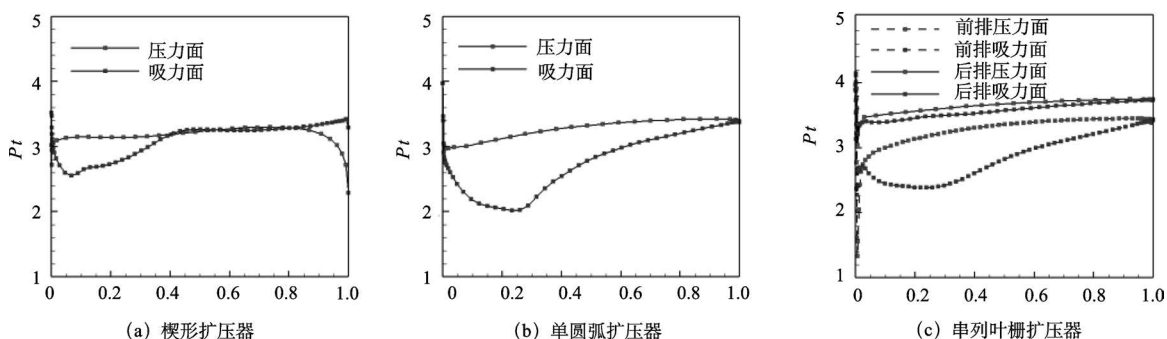


图 13 扩压器叶片 10% 叶高表面压力分布

Fig.13 Pressure distribution of 10% of blade height of diffuser

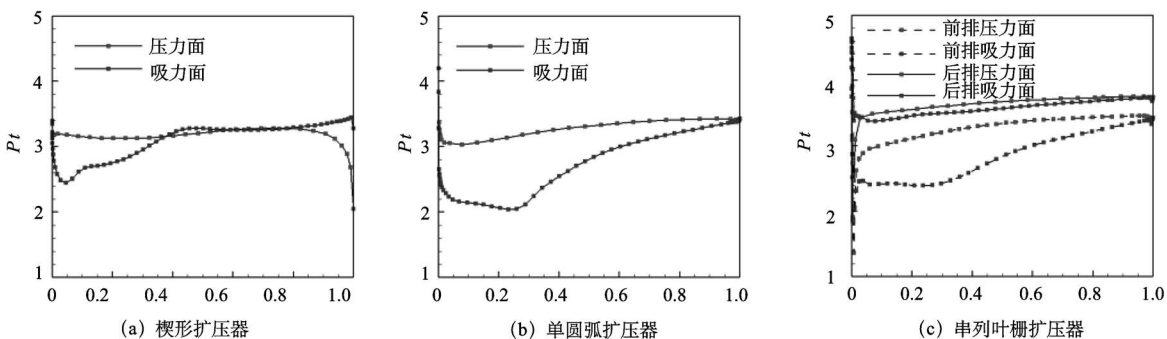


图 14 扩压器叶片 50% 叶高表面压力分布

Fig.14 Pressure distribution of 50% of blade height of diffuser

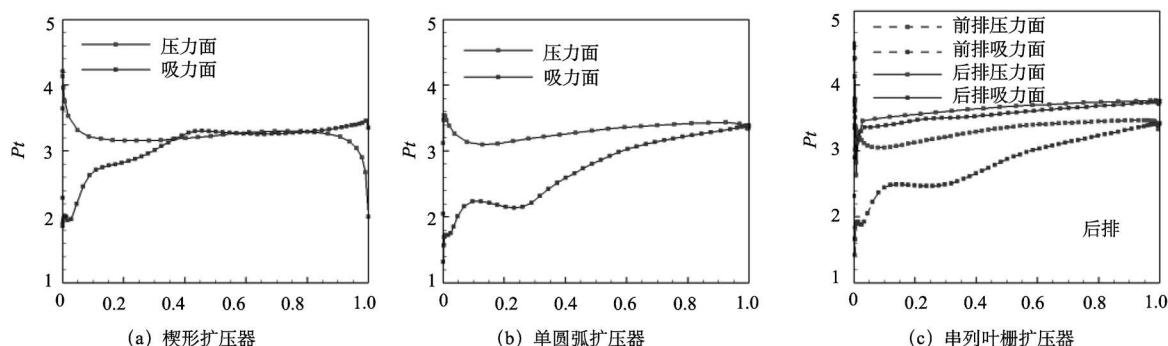


图 15 扩压器叶片 90% 叶高表面压力分布

Fig.15 Pressure distribution of 90% of blade height of diffuser

图 16 (a) ~ 图 16 (c) 给出了匹配楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器的离心叶轮 S3 截面的熵增分布云图。从图中可以看出,叶轮尾迹区的低能流体是离心叶轮熵增的主要来源。对比匹配三种扩压器的叶轮 5 个截面熵增图,发现叶片扩压器叶型对叶轮通道内的熵增有一定的影响。主叶片压力面和分流叶片吸力面之间的通道内,熵增较大的区域靠近于分流叶片吸力面,其中匹配单圆弧扩压器的离心叶轮熵增范围最大;主叶片吸力面和分流叶片压力面之间的通道内,熵增较大的区域靠近分流叶片压力面,其中单圆弧扩压器的熵增范围最大。

图 17 (a) ~ 图 17 (c) 分别给出了 10% 叶高楔形扩压

器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器熵增分布云图。对比图 17 可以发现,扩压器进口段,整个扩压器中沿展向越靠近机匣侧,损失越小,靠近轮毂侧损失较大。在 10% 叶高中,楔形扩压器叶片进口段熵增最为不明显,损失相对较小;叶片通道内,单圆弧叶片在 50% 弦长位置由于附面层的发展,吸力面出现明显的熵增,一直延伸到叶片尾缘区域,尾迹熵增区域明显,损失增加,而串列叶栅扩压器有效地控制了附面层的发展,进而改善了尾迹区的高熵情况。楔形扩压器尾缘由于尾迹涡系和回流,出现局部高熵区,尾迹同样存在熵增。匹配楔形扩压器的离心压气机的轴向无叶扩压器中熵增显著。

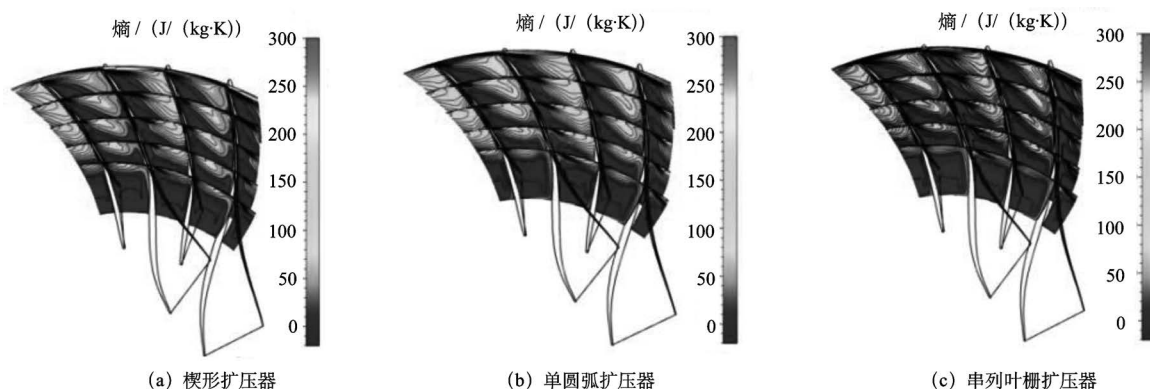


图 16 匹配不同扩压器的离心叶轮 S3 截面的熵增分布云图

Fig.16 Entropy of S3 of impeller with different diffusers

图 18 (a) ~ 图 18 (c) 分别给出了 50% 叶高楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器熵增分布云图。可以发现,扩压器叶片进口段,单圆弧扩压器熵增显著,楔形和串列扩压器的进口损失较小。叶片通道内,单圆弧叶片和串列叶栅前排叶片从 20% 弦长位置压力面出现明显的熵增,损失增加,其中单圆弧熵增较大,而且熵增区域一直延续到尾缘,楔形扩压器尾缘仍然存在局部高熵。与 10% 叶高相同,串列叶栅的设计改善了单圆弧扩压器的尾迹高熵区,降低了

损失。

图 19 (a) ~ 图 19 (c) 分别给出了 90% 叶高楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器熵增分布云图。三个扩压器的进口段被高熵区覆盖,而叶片吸力面前缘局部出现熵增较大的高熵区,三种扩压器中楔形扩压器的前缘高熵区域最大。叶片通道内,单圆弧扩压器中叶片压力面附近存在几乎占据全部流道的熵增区,串列叶栅扩压器对其起到了改善作用,前排叶片压力面尾缘附近熵增减弱。

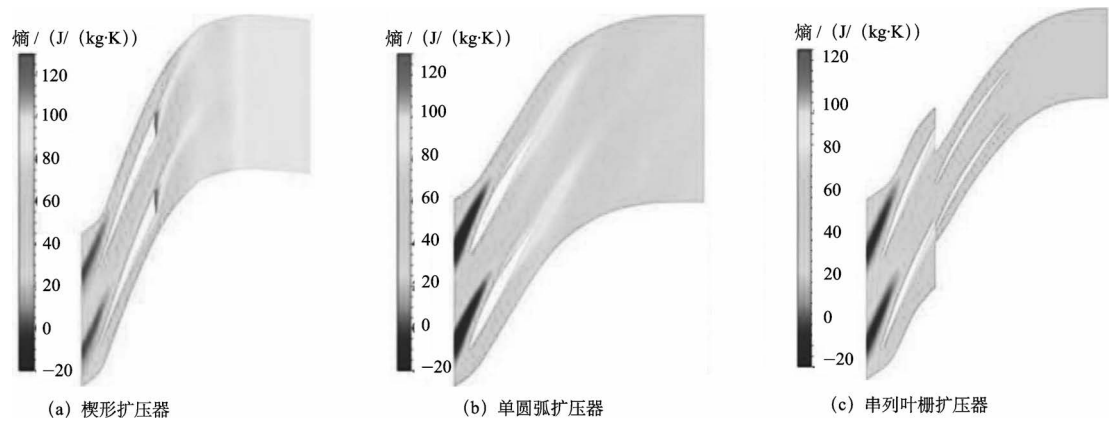


图 17 扩压器 10% 叶高熵增云图
Fig.17 Entropy of 10% of blade height of diffuser

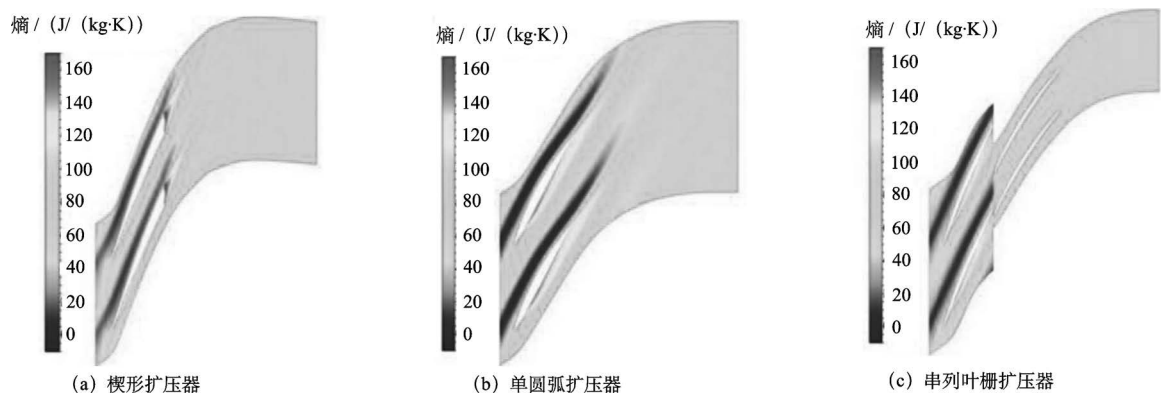


图 18 扩压器 50% 叶高熵增云图
Fig.18 Entropy of 50% of blade height of diffuser

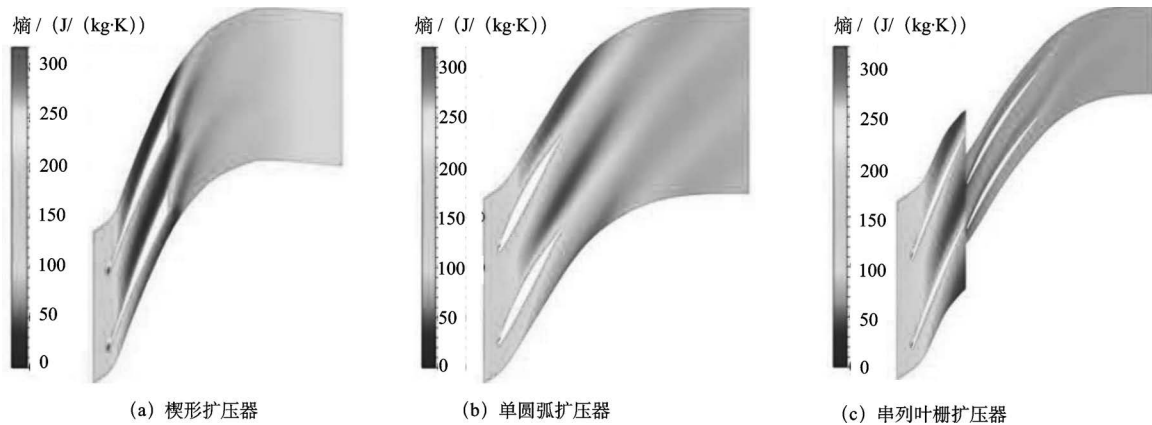


图 19 扩压器 90% 叶高熵增云图
Fig.19 Entropy of 90% of blade height of diffuser

图 20 给出了楔形扩压器、单圆弧扩压器、串列叶栅扩压器叶片吸力面极限流线图,左端为叶片前缘,右端为叶片尾缘。从图中可以看出,三种扩压器中气流在叶片前缘与机匣之间的角区均出现明显的分离。单圆弧扩压器中气流在

叶片后半段与机匣之间出现很大程度的分离,分离区域占整个叶片通道的将近 $2/3$, 占全叶高的 $1/3$, 与此同时,单圆弧扩压器中叶片与轮毂之间也出现很大程度的气流分离,约占整个叶片通道的 50% , 占全叶高的 $1/4$, 这些分离将对单圆

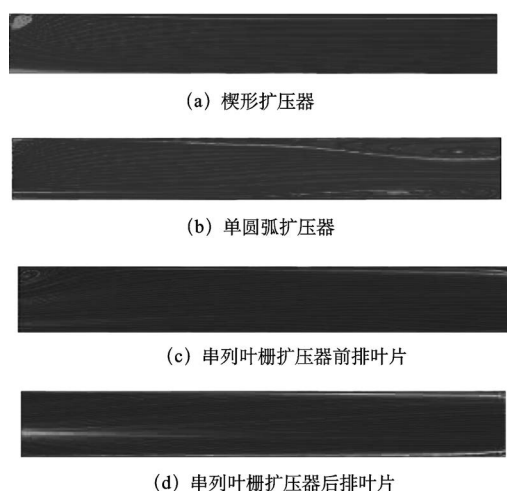


图 20 吸力面极限流线图

Fig.20 Limiting streamline of suction surface

弧扩压器的性能产生很大影响。串列叶栅扩压器前排叶片尾缘与机匣之间的角区出现程度非常小的气流分离现象,后排叶片尾缘靠近轮毂和机匣位置都出现不同程度的分离,其中轮毂处分离较为严重。总体而言,相比于单圆弧扩压器,串列叶栅总叶片分离均得到缓解。

图 21 给出了匹配三种扩压器离心压气机的叶轮出口和扩压器进口周向平均的绝对马赫数分布,图中横坐标从 0 到 1 代表沿叶展从轮毂到机匣的分布。总体来看,叶轮出口的气流呈现高度复杂的三维特性,而叶片扩压器叶型的改变微弱地影响沿叶展方向前 40% 段,对其余部位的气流影响较小,楔形、单圆弧、串列扩压器前 40% 叶展处绝对马赫数按顺序依次提高。叶片扩压器前的无叶段实现了其价值,扩压器进口的气流基本实现了掺混均匀,其中单圆弧扩压器气流掺混最为均匀,楔形扩压器最差,气流掺混不均主要体现在扩压器进口前 40% 叶展处,这与上述极限流线图中叶片前缘近轮毂角区的分离现象一致。

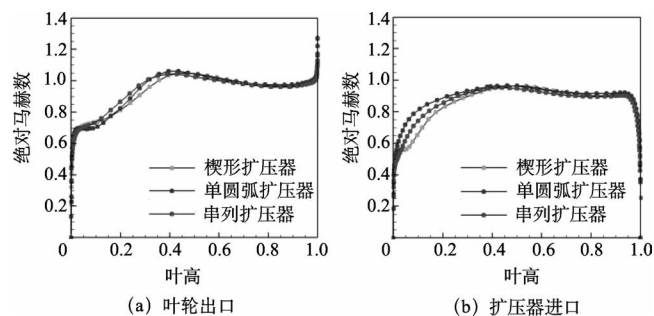


图 21 匹配三种扩压器的叶轮出口和扩压器进口绝对马赫数分布
Fig.21 Absolute Mach number of impeller outlet and diffuser inlet of three diffusers

4 结论

本文以某叶轮为研究对象,采用造型方法,经过多次改型优化后,完整设计出了与该叶轮匹配的楔形扩压器、单圆弧扩压器。将三种扩压器同时进行数值模拟,并对其性能进行对比分析。得到如下结论:

(1) 分析性能曲线,可以得出串列叶栅扩压器性能最好,楔形扩压器性能最差。

(2) 匹配单圆弧扩压器的离心叶轮激波区域最大;由于气流分离楔形扩压器尾缘沿全叶高出现低速区,单圆弧扩压器通道内出现部分低速区影响流动,串列叶栅的应用,改善了叶片通道内的低速流动。

(3) 单圆弧扩压器和串列叶栅扩压器的扩压能力高于楔形扩压器。

(4) 楔形扩压器的载荷分布不连续,单圆弧扩压器载荷分布不均匀,串列叶栅扩压器中后排叶片分担了前排叶片部分载荷,载荷分布更加均匀。

(5) 匹配三种扩压器的离心叶轮中,带单圆弧扩压器的叶轮熵增区域偏大,损失偏大。三种扩压器流道内部,楔形扩压器叶根和叶中截面的熵增最大;相比于单圆弧扩压器,串列叶栅扩压器熵增区域均有所减缓,损失降低。

(6) 三种扩压器进口吸力面前缘与轮毂的角区都出现不同程度的流动分离。除此之外,单圆弧叶片吸力面后半段与轮毂和机匣之间出现很大程度的气流分离;串列叶栅中,前排叶片前缘与轮毂间的气流分离没有减弱,但是叶片后半段与上下壁面之间的分离均得到改善。

(7) 三种扩压器进口气流与叶轮出口气流相比都变得更加均匀,体现出了叶片扩压器前无叶段的价值。总体来说,对于超声和叶片较短的扩压器,串列叶栅扩压器性能最优,其次是单圆弧扩压器,最后是楔形扩压器。

AST

参考文献

- [1] Ibaraki S, Matsuo T, Yokoyama T. Investigation of unsteady flow field in vanned diffuser of a transonic centrifugal compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 129 (4): 686-693.
- [2] Reddy T C S, Murty G R, Prasad M. Effect of diffuser vane shape on the performance of a centrifugal compressor stage[J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23 (2): 127-132.
- [3] Kim H W, Park J I, Ryu S H. The performance evaluation with diffuser geometry variations of the centrifugal compressor in a

- marine engine (70MW) turbocharger[R]. ASME Paper GT2009-012201, 2009.
- [4] 初雷哲, 杜建一, 汤华, 等. 设计几何参数变化的离心压气机特性分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27 (3): 405-407.
Chu Leizhe, Du Jianyi, Tang Hua, et al. Characteristic analysis of a centrifugal compressor with different geometry parameters[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27 (3): 405-407. (in Chinese)
- [5] 初雷哲, 杜建一. 离心压气机叶片前缘几何形状对性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29 (5): 767-769.
Chu Leizhe, Du Jianyi. Effect of the blade leading edge on the performance of a centrifugal compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29 (5): 767-769. (in Chinese)
- [6] 初雷哲, 杜建一, 赵晓路, 等. 叶片倾角变化对扩压器中非定常流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28 (5): 759-762.
Chu Leizhe, Du Jianyi, Zhao Xiaolu, et al. The effect of different vane incline angle on the unsteady flow in vaned diffuser[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 (5): 759-762. (in Chinese)
- [7] 杜建一, 祁志国, 汤华, 等. 高比转速离心压气机叶轮的设计及其三维流场分析[J]. 工程热物理学报, 2005, 26 (3): 420-422.
Du Jianyi, Qi Zhiguo, Tang Hua, et al. Design and analysis of high specific speed centrifugal compressor impellers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26 (3): 420-422. (in Chinese)
- [8] 杜建一, 李雪松, 初雷哲, 等. 有叶扩压器的流场分析[J]. 工程热物理学报, 2005, 26 (1): 43-46.
Du Jianyi, Li Xuesong, Chu Leizhe, et al. Investigation analysis on vaned diffusers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26 (1): 43-46. (in Chinese)
- [9] 柳阳威, 刘宝杰. 离心叶轮和扩压器相互作用[J]. 航空动力学报, 2009, 24 (12): 2695-2702.
Liu Yangwei, Liu Baojie. Numerical investigation of impeller-diffuser interaction in a centrifugal compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (12): 2695-2702. (in Chinese)
- [10] 周莉, 韦威, 蔡元虎. 离心压气机级串联叶栅扩压器内流场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27 (11): 2562-2568.
Zhou Li, Wei Wei, Cai YuanHu. Numerical investigation on flowfield of centrifugal compressor with tandem cascade diffuser[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27 (11): 2562-2568. (in Chinese)

作者简介

夏树丹(1991—)女, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 飞机燃油系统试飞以及动力装置试飞。

Tel: 18729542815

E-mail: 916101797@qq.com

Performance Analysis of Three Types of Supersonic Diffuser

Xia Shudan*, Zhang Xiamei, Liu Zhiyuan

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: The performance of three diffusers for a centrifugal compressor were analysed by Computational Fluid Dynamics (CFD), such as wedge diffuser, single arc diffuser and tandem cascade diffuser. Result shows that, for short vane of supersonic diffuser, the performance of the tandem cascade diffuser behaves best, followed by single arc diffuser, the performance of the wedge diffuser behaves worst.

Key Words: supersonic; wedge diffuser; single arc diffuser; tandem cascade diffuser

Received: 2017-12-22;

Revised: 2018-01-26;

Accepted: 2018-03-26

*Corresponding author. Tel.: 18729542815 E-mail: 916101797@qq.com