

文章编号:1000-8055(2012)11-2562-07

离心压气机级串列叶栅扩压器内流场的数值研究

周 莉, 韦 威, 蔡元虎

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 对某一带串列叶栅扩压器的离心压气机级进行了数值模拟, 分析了串列叶栅扩压器后排叶片不同周向位置对压气机级流动及性能的影响。结果表明: 串列叶栅扩压器性能优于单列叶栅扩压器, 其后排叶片在不同周向位置处效率和压比均优于单列叶栅扩压器, 效率提高幅度能达到 1.9%, 压比的提高幅度为 2.85%。串列扩压器分流叶片的周向位置对其内部流动情况有显著影响, 两排叶片之间存在一个最佳位置使扩压器损失最小。串列叶栅扩压器的主要损失集中在 50% 叶高以上的区域。

关 键 词: 离心压气机; 串列叶栅扩压器; 单列叶栅扩压器; 周向位置; 损失

中图分类号: V321.3

文献标志码: A

Numerical investigation on flowfield of centrifugal compressor with tandem cascade diffuser

ZHOU Li, WEI Wei, CAI Yuan-hu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The flowfield of the centrifugal compressor with tandem cascades diffuser was investigated numerically, the effects of varying circumferential position of tandem cascade diffuser on a high pressure ratio compressor performance and flowfield in the diffuser was discussed. The comparisons of the compressor stage performance and flow field of 5 tandem cascade diffusers with a conventional single row design of a similar duty were made. Results show that the performance of the stage with the tandem cascade diffuser is superior to the stage with single row diffuser, the efficiency and pressure ratio can increase 1.9% and 2.85% respectively. The circumferential position of the tandem cascade diffuser has an important effect on the stage performance; an optimum circumferential position exists to make the loss in the diffuser minimum. The loss in the tandem cascade diffuser mainly focuses on the region from the middle span to the shroud.

Key words: centrifugal compressor; tandem cascade diffuser; single row diffuser; circumferential position; loss

串列叶栅可以有效控制叶片附面层的生长, 阻止流动分离以及推迟旋转失速产生^[1-2]。研究者针对串列叶栅开展了大量的研究工作^[3-8]。串列叶栅的轴向间距和周向偏距是影响串列叶栅的 2 个

非常重要的数, 不同研究者对串列叶栅周向位置的布置进行了大量的研究, 获得了不同的结论。李绍斌等对串列叶栅后排静叶周向位置对压气机性能的影响进行了数值研究, 指出串列叶栅静叶周

收稿日期: 2011-11-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121115.1028.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50906071); 西北工业大学基础研究基金(JC201011); 西北工业大学翱翔之星

作者简介: 周莉(1978—), 女, 河南信阳人, 副教授, 博士, 主要从事热机气动热力学研究。

向位置改变会抑制流动分离,降低损失^[9]。吴东坡等对某高能头半开式离心压缩机的级在分别采用无叶扩压器和串列扩压器时进行了流动模拟和性能分析,结果表明在高能头系数的级中采用串列扩压器可以有效地改善叶轮出口流场,减少流动损失,提高压力恢复系数和级效率^[10]。王宝潼等对串列式离心叶轮周向相对位置对离心压气机级性能的影响进行了数值研究^[11],发现周向位置的变化对离心式压气机的性能影响显著。但胡良军等的计算却表明后排叶片位置变化对级性能和叶片表面载荷影响较小^[12]。邹刚则认为在性能要求越来越高的压气机设计中,串列叶栅的缝隙是朝着越来越小的方向发展的^[8]。

目前离心压气机正在向高负荷和宽工况范围的方向发展,这对扩压器也提出了更高的要求——不仅要增大扩压器中气流的折转角,并且要能有效地控制不同工况下扩压器中的流动损失。如果想在整个工况范围内继续提高叶片扩压器的性能,就需要进一步有效地控制扩压器中叶片表面边界层的生长,减少流动分离,降低损失。为了实现这一目标,人们做出了多种尝试,其中广泛应用的方法有采用可调叶片扩压器、串列叶栅扩压器和利用抽吸附面层技术等^[13-15]。但是到目前为止,串列叶栅扩压器设计参数及其对性能的影响尚未十分清楚,其完整系统的设计方法仍然缺乏。因此,有必要对串列叶栅扩压器进行更深入的研究,以开发其在离心压缩机中的气动潜能。

本文采用数值模拟的方法对一种单列叶栅扩压器的压气机级和串列叶栅扩压器的压气机级进行研究,详细分析了串列叶栅扩压器后排叶片不同周向位置对压气机级流动及性能的影响。以期找到一种合理的串列叶栅前后排叶片周向分布方式使得现有的扩压器性能得到提升。

1 数值方法

数值计算采用商用 Numeca 软件包,求解相对坐标系下的定常三维雷诺时均 N-S 方程,湍流模型为 Spalart-Allmaras 一方程模型,空间离散采用 1 阶迎风格式,时间推进采用 4 阶 Runge-Kutta 法。计算中使用全多重网格方法,结合隐式残差光顺方法及当地时间步长法,以获得最快的收敛速度。

为了给出扩压器的真实进口条件,对叶轮+扩压器的计算区域进行了级的计算,叶轮网格节点数为 69.8 万,串列扩压器网格约为 43.7 万。

在进口位置给定进口总压、总温和气流角。在出口位置给定出口静压。上下游延伸部分的周向边界采用周期性边界条件。固体壁面取不可渗透、无滑移及绝热壁面边界条件。采用混合平面在叶轮和扩压器交界面上对参数进行周向平均。

2 计算结果及分析

为了研究串列叶栅扩压器中 2 列叶片周向相对位置改变给流场及性能带来的影响,本文对 5 种不同相对位置下的扩压器进行了数值研究,串列叶栅扩压器周向位置示意图如图 1 所示,每个位置的周向间隔为 20% 栅距。

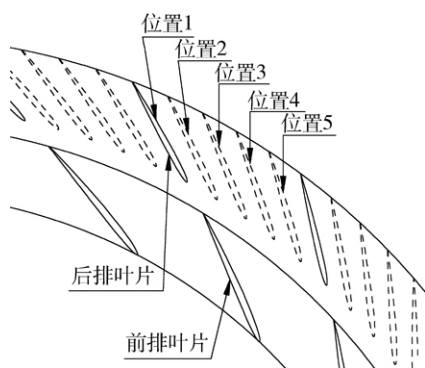


图 1 串列叶栅扩压器周向位置示意图

Fig. 1 Schematic of tandem cascades diffuser in varying circumferential position

图 2 给出了该压气机级在不同扩压器情况下的流量-效率和流量-压比特性线,其中 diffuser 指为压气机配置的单列扩压器,其他代表不同相对位置下的串列扩压器,相对位置的编号同图 1 一致。从图中可以看出,采用串列叶栅扩压器的级效率和压比均明显高于采用单列叶栅扩压器,效率提高幅度能达到 1.9%,压比的提高幅度为 2.85%,同时后排静叶周向位置对级性能的影响也十分显著,后排叶片在位置 1 时,级的效率和压比最高,整机具有最优的性能。后排叶片在位置 2 时,喘振流量最小,整机具有最宽的可运行工况。后排叶片在位置 4 时,喘振流量最大,此时可能是后排叶片的作用,使得前叶片附面层较早分离并扩展至整个扩压器叶栅通道,扩压器内流动恶化,导致压气机提前进入喘振状态所致。5 种串列扩压器和单列扩压器堵塞流量基本相同。

图 3 给出了在相同进出口边界条件下级的流量和等熵效率随周向位置的变化情况。从图 3(a) 可以看出,位置 1 时质量流量最大,此时扩压器流道面积最大,流路情况良好。位置 3 的质量流量最

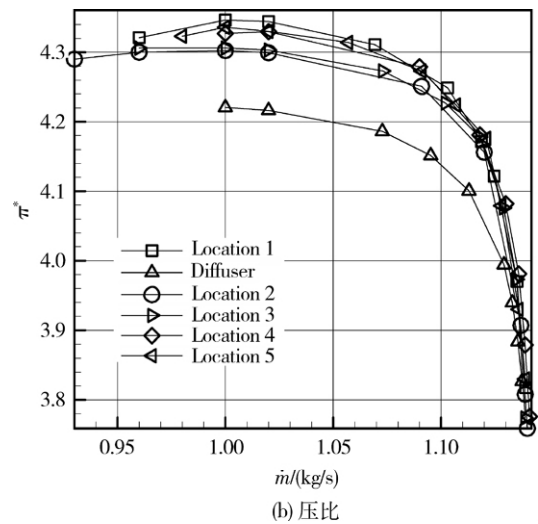
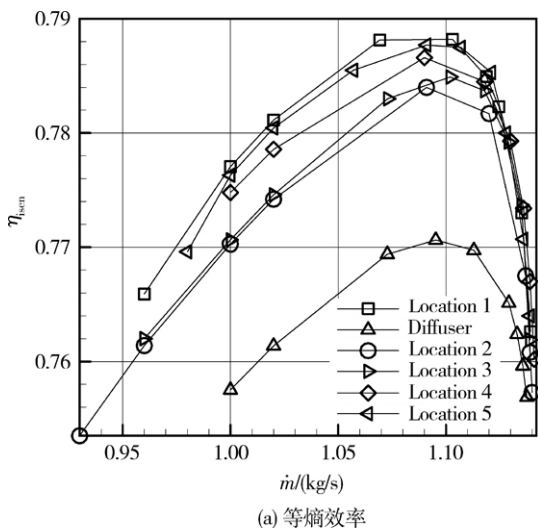


图 2 压气机性能曲线图

Fig. 2 Performances map of the centrifugal compressor

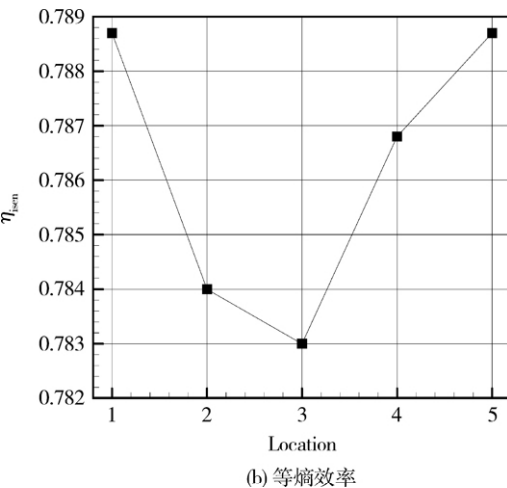
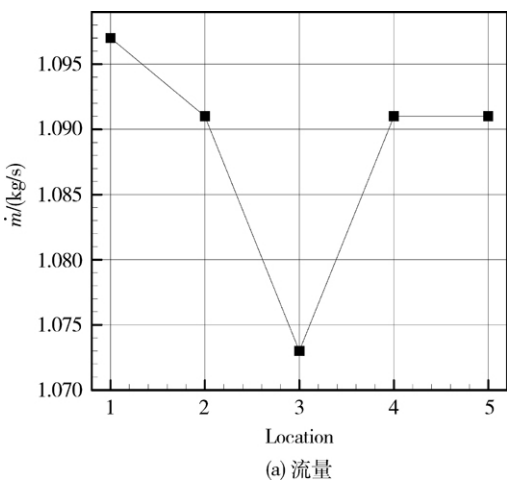


图 3 相同边界条件不同周向位置下变量的分布图
Fig. 3 Distribution of different variable under the same boundary condition

小,这是由于后排叶片对流通形成阻塞造成的.从图 3(b)中可以看出,位置 1 和位置 5 时级具有较高的等熵效率,从位置 1 到位置 5,效率先降低后升高,位置 3 时效率最低,可见,在此边界条件下,串联叶栅后排叶片在位置 1 和位置 5 时能够较好的抑制附面层分离,并控制叶栅通道内旋涡的发展,位置 3 效率最低,此时后排叶片恰好位于前排叶栅通道中间所对的位置,此时后排叶片虽然抑制了前排叶片叶背附面层的分离,但其对通道形成的堵塞作用使得前叶片叶盆附面层增厚,从而增加了损失.

图 4 给出了设计工点下串联叶栅不同周向位置的 50%叶高处叶片表面静压分布,从载荷分布来看,前排叶片具有比后排叶片更大的载荷分布.比较不同周向位置的载荷分布,可以看出位置 1

时的前排叶片载荷分布较其他位置均匀,其中 2 位置时,后排叶片载荷分布较好,但其前排叶片载荷分布情况很差,10%弦长以后区域压力面静压没有得到回升,压力回收能力很差,这可能是导致其性能最差的原因.位置 3 的前排片吸力面静压分布跟其他位置下相似,但压力面在约 50%弦长后静压开始急剧减小,直至尾缘,前排叶片产生了不良的性能,恶化了后排叶片的进气条件,进而使得整个压气机的性能较位置 1 下降.

图 5 给出了设计点下总压损失系数和静压恢复系数沿叶高的分布,可以看出:损失主要集中在叶根和叶顶区域,在 10%叶高至叶根区域以及 90%叶高至叶顶区域内,扩压器的总压损失系数均急剧增大.由于从叶轮出来的高速气流经过较短的无叶段,进入扩压器叶片区域时还没有发展均匀,沿扩压器叶高方向存在压力差,并且在壁面和轮毂附面层的共同作用下,流体沿叶高方向发

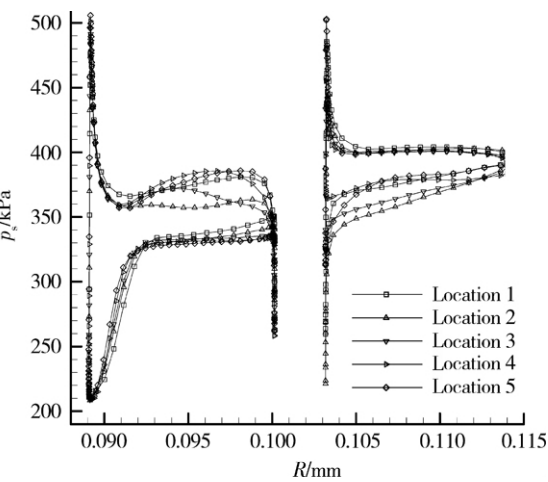


图 4 设计点下不同周向位置 50% 叶高叶片表面静压分布

Fig. 4 Static pressure distributions at the middle span for design point

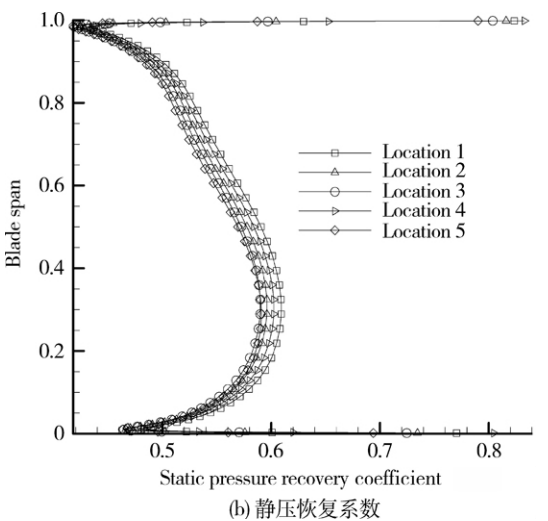
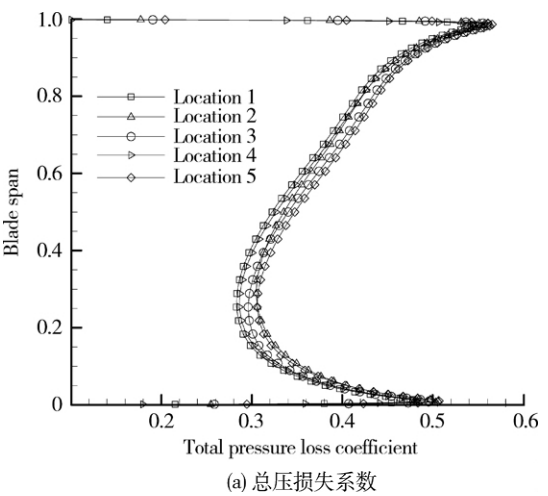


图 5 设计点下不同周向位置扩压器性能参数随叶高的变化图

Fig. 5 Distribution of the diffuser performance parameters at design point

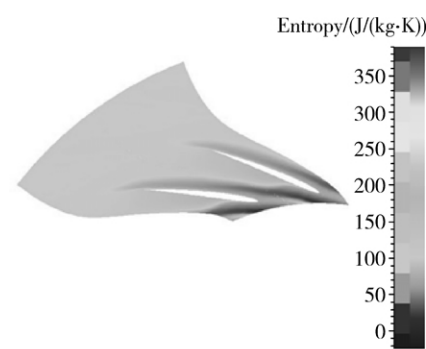
生掺混,这造成叶根和叶顶部分高能流体的聚集,使得叶根和叶顶的损失系数突变到很小的值,而在靠近叶根和叶顶的 10% 叶高区域内总压损失系数急剧增大.扩压器设计点下静压恢复系数反映了扩压器内相似的压力分布以及压力回收情况.静压恢复系数在叶根和叶顶区域变化较急剧.比较不同周向位置下的情况,均显示了位置 1 有较好的静压恢复系数和较小的损失.

图 6 给出了单列叶栅以及串联叶栅不同位置下的 50% 叶高上的熵增分布,通过比较可以看出:单列叶栅扩压器的损失比串联叶栅的大,单列叶栅的压力面以及尾迹区域损失均很高,在 50% 叶高以上区域,单列及串联损失均明显增大,这也验证了图 9 中 50% 叶高以上区域总压损失系数较高的情况.在 50% 叶高上,单列叶栅扩压器压力面上存在 1 个较大的高损失区域,此时压力面附面层已经发生分离.位置 1 的前排叶片压力面尾缘区域以及后排叶片压力面均是高损失区域,同时其高损失尾迹流发展到后方区域.位置 3 的前排叶片压力面尾缘区域以及后排叶片通道内有较大的高损失区,此位置下流动情况恶化,前排叶片附面层发生分离,同时向后扩展,影响了后排叶栅通道内的流动,导致了较高的损失.位置 5 则存在 1 个间隙流动,前排叶片压力面尾缘以及分流叶片尾缘区域均是高损失区域,可以看出,前排叶片压力面附面层首先发生分离,在间隙流的作用下,流向后排叶片吸力面尾缘,在此作用下,后排叶片压力面尾缘区域附面层发生分离.

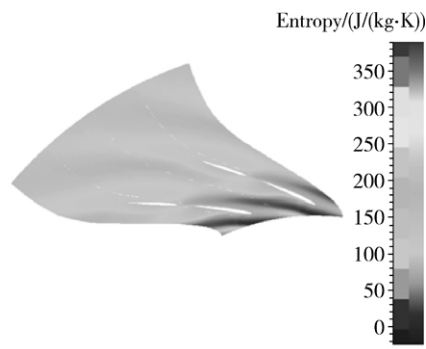
图 7 和图 8 给出了设计点下单列扩压器、串联扩压器的位置 1、位置 3、位置 5 的 50% 叶高和 90% 叶高处的流线分布图.从图中可以看出,在 50% 叶高处,四者均有明显的旋涡产生,其中单列扩压器 50% 弦长以后叶片压力面流速很快,在逆压梯度下附面层发生了分离,从图中可以看出在叶片压力面有很大的旋涡产生.对于串联扩压器,位置 1 的主流叶片流动情况良好,但在其压力面尾缘附近有低速区,在逆压梯度下有分离的危险,由于两叶片之间的间隙流动,使得分流叶片压力面形成较强的逆压梯度,分流叶片压力面附面层发生分离.位置 3 分流叶片流动情况良好,但由于其对流动通道形成的阻塞作用,在主叶片压力面形成逆压梯度,导致主叶片压力面尾缘区域的流动分离.位置 5 的流动情况较位置 1 和位置 3 均差,从图中可以看出,由于间隙流动,首先导致分流叶片压力面的附面层分离,在分流叶片 50% 弦

长后产生了巨大的旋涡,这导致主叶片的流道受阻,压力面尾缘区域附面层发生了较小的分离.在

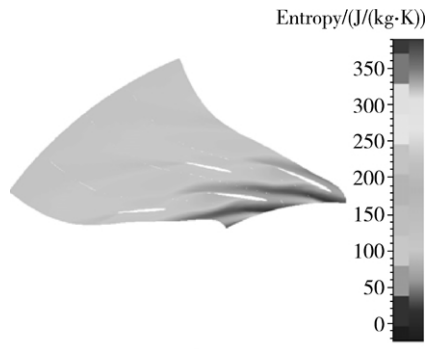
90%叶高处,四者的流动情况均急剧恶化,对于单列扩压器,尾缘区域以后的流动沿周向流动,巨大



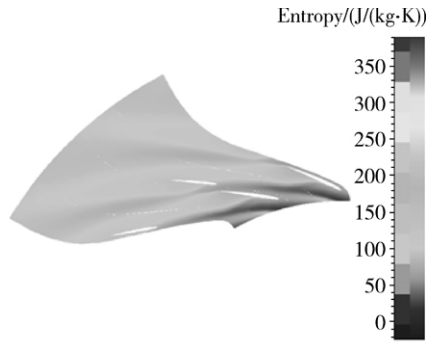
(a) 单列扩压器



(b) 位置1

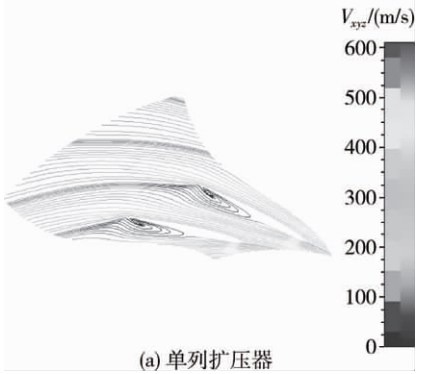


(c) 位置3

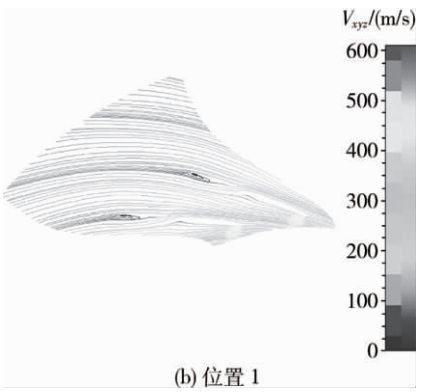


(d) 位置5

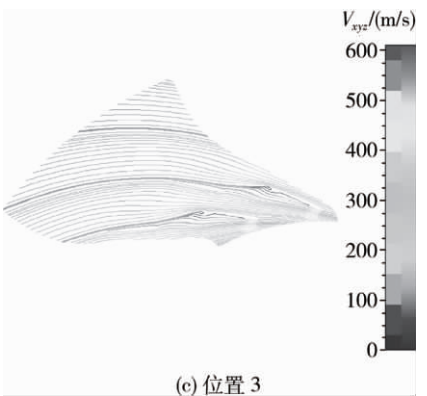
图 6 不同周向位置 50%叶高处熵增分布图
Fig. 6 Entropy distributions at the middle span



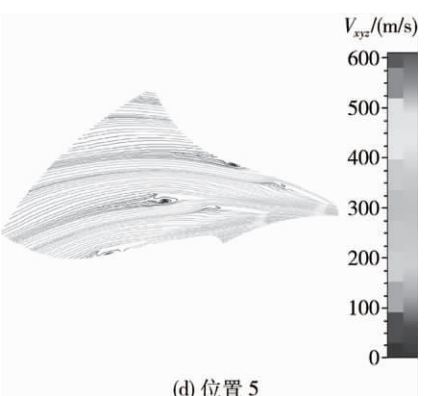
(a) 单列扩压器



(b) 位置 1



(c) 位置 3



(d) 位置 5

图 7 不同周向位置 50%叶高处流线分布图
Fig. 7 Streamlines distribution at the middle span

的逆压梯度使吸力面的高速流体回流至叶栅通道内,在通道内形成巨大的旋涡.对于串列扩压器的

3 个位置,在分流叶片后方,流体的流动同样沿周向流动,位置 1 的分流叶片在压力面前缘形成巨大的回流区,由此形成的逆压梯度使主叶片压力面的流动受阻,而吸力面的流体也在逆压梯度下卷入压力面,经过较短的回流之后卷入主流,沿下一通道的主叶片吸力面流出.此叶高下位置 3 的流动情况很差,在分流叶片后方区域的强逆压梯度下,分流叶片尾缘区域的流体回流至主叶片压力面,同时主叶片吸力面高速流体沿尾缘被卷入回流中,在叶栅通道间形成巨大的旋涡,分流叶片压力面前缘附近也形成旋涡.在位置 5,分流叶片对主叶片吸力面的流动形成阻塞,而其后的低速周向流动形成的逆压梯度使其压力面区域产生回流区,而主叶片吸力面流体在此回流区的作用下流入压力面,在叶栅通道内形成旋涡.

从图 7 和图 8 中可知,串列扩压器分流叶片的周向位置对其内部流动情况有显著影响,不同的周向位置不仅影响其自身的流动,还会使主叶片的流动重新分布.串列叶栅扩压器的高损失区域主要集中在 50% 叶高至叶顶区域的在叶片压力面及通道内形成的回流旋涡区域.

3 结 论

本文对一单列叶栅扩压器的压气机级和串列叶栅扩压器的压气机级进行了研究,详细分析了不同扩压器内的流动细节以及压气机级的整体性能.主要结论如下:

- 1) 串列叶栅扩压器性能优于单列叶栅扩压器,效率提高幅度能达到 1.9%,压比的提高幅度为 2.85%,其后排叶片在不同周向位置处效率和压比均优于单列叶栅扩压器.
- 2) 串列扩压器分流叶片的周向位置对其内部流动情况有显著影响,不同的周向位置不仅影响其自身的流动,还会使主叶片的流动重新分布,存在 1 个最佳位置使扩压器损失最小.
- 3) 串列叶栅扩压器的主要损失集中在 50% 叶高以上区域,叶片压力面附面层的分离及叶栅通道内形成的旋涡是损失的主要成因.

参考文献:

[1] Doulas A R,Suresh C K. Numerical investigation of tandem-impeller designs for a gas turbine compressor[J]. Journal of Turbomachinery,2002,124(1):36-44.
[2] 吴国训. 串列叶栅理论[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
[3] Hasegawa H,Matsuoka A. Development of highly loaded fan with tandem cascade[R]. AIAA-2003-1065,2003.

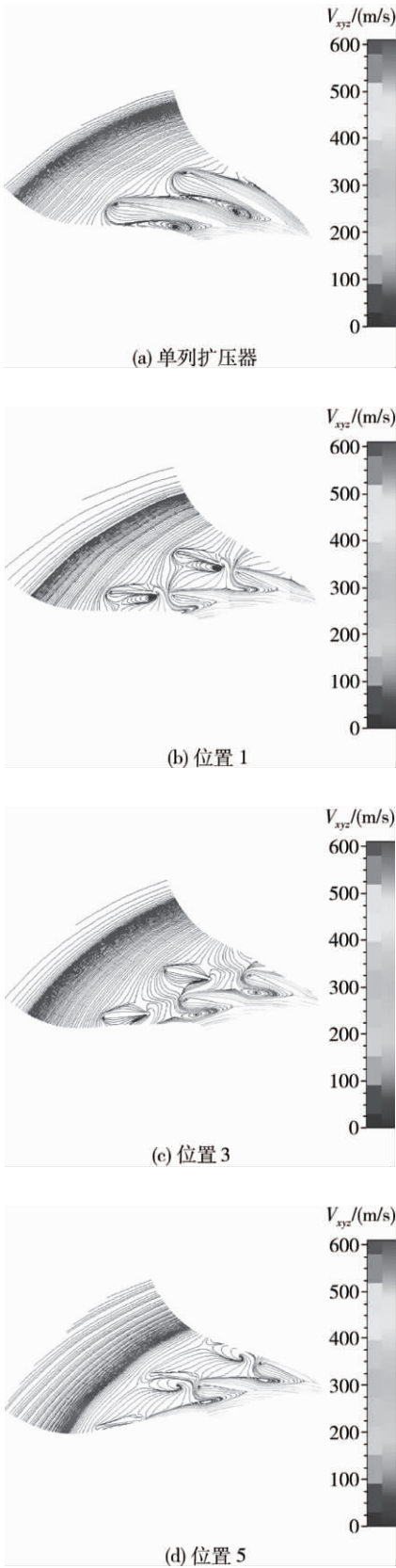


图 8 不同周向位置 90% 叶高处流线分布图

Fig. 8 Streamlines distribution at 90% span

[4] McGlumphy J,Ng W,Wellborn S,et al. Numerical investigation of tandem airfoils for subsonic axil-flow compressor blades[R]. ASME Paper,IMECE2007-43929,2007.

[5] McGlumphy J,Ng W,Wellborn S,et al. 3D numerical investigation of tandem airfoils for a core compressor rotor [R]. ASME Paper GT-2008-50427,2008.

[6] Josuhn K B. Flow field and performance of a centrifugal compressor rotor with tandem blades of adjustable geometry[R]. ASME Paper GT-1994-13,1994.

[7] Müller L,Kožulovic D,Wulff D,et al. High turning compressor tandem cascade for high subsonic flows;Part 2 numerical and experimental investigations[R]. AIAA-2011-5602,2011.

[8] 邹刚成. 串列叶栅三维流场数值计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2 0 0 2 .
ZOU Gangcheng. Numerical investigation on the three-dimensional flowfield of the tandem cascade[D]. Nanjing: Nanjing University of aeronautics and astronautics,2002. (in Chinese)

[9] 李绍斌,王松涛,冯国泰,等. 串列叶栅后排静叶周向位置对压气机性能影响的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2004,25(6):943-945.
LI Shaobin ,WANG Songtao,FENG Guotai,et al. Numerical investigation on the compressor performances under different circumferential positions of the rear blades of tandem stator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004,25(6):943-945 . (in Chinese)

[10] 吴东坡,刘长胜. 离心压缩机半开式叶轮采用无叶和串列扩压器的性能分析[J]. 风机技术,2009(3):8-10,14.
WU Dongpo,LIU Changsheng. Performance analysis of vaneless and tandem diffuser on unshrouded impeller of centrifugal compressor stage[J]. Compressor, Blower & Fan Technology,2009(3):8-10,14. (in Chinese)

[11] 王宝潼,张楚华,席光,等. 串列叶片式离心叶轮内流场的数值研究[J]. 西安交通大学学报,2007,41(11):1275-1278,1283.
WANG Baotong,ZHANG Chuhua,XI Guang,et al. Numerical study on internal flows in centrifugal tandem-blade impeller[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2007, 41(11):1275-1278,1283. (in Chinese)

[12] 胡良军,杨策,祈明旭. 带串列叶栅离心压气机内部流场数值研究[C]//中国工程热物理学会热机气动力学学术会议论文集. 重庆:中国工程热物理学会,2006:72-75.

[13] 席光,周莉,丁海萍,等. 叶片扩压器进口安装角对离心压缩机性能影响的数值与实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006,27(1):61-64.
XI Guang,ZHOU Li,DING Haiping,et al. Numerical and experimental study of the effects of the stagger angles of vane diffuser on the performance of centrifugal compressors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1):61-64. (in Chinese)

[14] 赵胜丰,罗建枫,卢新根,等. 吸附式叶栅代替串联叶栅气动可行性探索[J]. 工程热物理学报, 2009,30(7):1109-1112.
ZHAO Shengfeng,LUO Jianfeng,LU Xingen,et al. Exploring the aerodynamic feasibility of substituting aspirated cascade for tandem cascade[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2009,30(7):1109-1112. (in Chinese)

[15] 魏玲,葛宁. 串列叶栅静子粘性全三维流场的数值模拟[J]. 南京理工大学学报,2005,29(2):209-212.
WEI Ling,GE Ning. Numerical simulation for 3-dimensional viscous flowfield of stator with tandem cascade[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005,29(2):209-212. (in Chinese)