

叶尖间隙对离心叶轮偏置分流叶片 工作机理的影响

陈杰, 何敏祥, 黄国平

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 采用计算流体力学方法研究了不同叶尖间隙情况下偏置分流叶片提升离心叶轮性能的机理。叶尖间隙较小时,主叶片吸力面附近分离区导致主要损失,分流叶片偏向于主叶片吸力面利于削弱损失、提升叶轮性能;随着叶尖间隙的增加,泄漏流的影响增加以至损失集中于分流叶片和主叶片压力之间的通道,分流叶片宜向主叶片压力面偏置,以减少泄漏流在同一通道的聚集。叶尖间隙和分流叶片周向位置对间隙泄漏流、叶片吸力面分离形成的损失及相互关系有着耦合影响,分流叶片周向位置的改变可以调整通道的横向压力梯度、泄漏流掺混入主流的位置,改善分流叶片两侧通道的损失的分配,分流叶片最佳偏置方向随叶尖间隙的大小而发生改变。

关 键 词: 离心压气机; 偏置分流叶片; 叶尖间隙; 数值模拟; 工作机理

中图分类号: V231.3; TH452

文献标志码: A

Effect of tip clearance on the operating mechanism of offset splitter blades in a centrifugal compressor

CHEN Jie, HE Min-xiang, HUANG Guo-ping

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The good circumferential position of offset splitter blades and its mechanism were studied in small centrifugal impellers, which operated with different tip clearances by the computational fluid dynamics. When the impeller worked with the small tip clearance, the main loss was attributable to the separation near the main suction surfaces, and then the offset splitter bias toward the main suction surface can suppress this loss and enhance the impeller performance. The tip leakages increased with the tip clearance, so the loss concentrated in the passage between the main pressure surface and splitter, therefore the splitters tended to the main pressure surface, and then the offset splitters can reduce the concentration of the tip leakage and the loss. The tip clearance and the circumferential position of the splitter affected together the tip leakage, the separation near the suction surface and their interrelation. The design of the splitter circumferential position can adjust the crosswise pressure gradient in the blade passage and the location where the tip leakage mixes in the main flow, and then improve the ratio of the losses in the passages at both sides of splitter, therefore the best circumferential position of the splitter changes with the tip clearance.

收稿日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51206078)

作者简介: 陈杰(1980—),男,江苏姜堰人,讲师,博士,主要从事叶轮机械气体动力学研究。E-mail: chenjie@nuaa.edu.cn

Key words: centrifugal compressor; offset splitter blade; tip clearance; numerical simulation; operating mechanism

离心压气机作为一种动力机械,具有体积小、质量轻、结构简单、单级压比高、工作范围广等优点,在各行各业都得到了广泛的应用^[1],但同时也消耗大量能源.因此,提高离心压气机的研究和设计水平,对节约能源具有重要影响^[2].但是离心叶轮内部流动结构复杂,存在多种损失^[3].离心叶轮出口处尾迹结构是叶片通道内总体流动损失的一个重要表征,Farge 等^[4]通过实验发现通道尾迹内的低动量流体的来源有该通道的吸力面附面层和叶尖泄漏流.叶尖泄漏流将相邻通道的机匣和压力面的附面层带进了尾迹,同时改变了通道内的二次流结构.数值模拟结果给出的更为细致的流动分析表明,有些离心叶轮叶尖泄漏流跨过间隙后,会有一大部分由相邻叶片的叶顶间隙流出,在间隔流道的下游吸力面形成旋涡区^[5],甚至在从堵塞到近失速的全工况范围内分流叶片泄漏涡与主叶片的泄漏涡均在同一通道流出叶轮^[6].叶尖泄漏涡流强度及通道涡的产生与发展与叶尖间隙的大小的密切关联^[7],所以叶尖间隙的大小可能会造成泄漏涡流及其与主流相互掺混引起的损失在总损失中的比例发生质的改变.

分流叶片技术可以抑制离心压气机叶轮内部二次流的发展,降低通道扩压程度,同时还能减小叶轮出口尾迹的强度与范围,对提高叶轮效率具有重要作用^[8].分流叶片在20世纪后期用于离心泵,随后在通风机、压气机等方面得到了应用及发展,现在已成为了高性能离心叶轮不可或缺的组成部分和细致设计的因素^[9].

压气机叶片通道内流动从压力面到吸力面不均匀,将分流叶片设置于通道中间后,其两侧通道内流动存在较大差异,所以分流叶片的周向位置和偏转角度对离心叶轮内流动及性能有明显影响^[10].很多研究人员通过偏置分流叶片改善两侧通道的流动及叶轮出口流动的均匀性,从而改进离心压气机性能.但文献中使得叶轮性能提高的分流叶偏置方向却不一致,文献[11-12]通过数值模拟及实验发现分流叶片偏向主叶片压力面一侧时比分流叶片处于正中间时离心压气机叶轮性能高;而文献[13-15]的研究却表明分流叶片偏向主叶片吸力面时叶轮性能最佳.

研究人员从分流叶片在离心叶轮通道中周向位置的方向研究分流叶片对叶轮性能的影响所得

到的结论不一致,可见仅仅针对几何参数与性能的关系进行分析,并不能充分理解分流叶片对离心叶轮性能的影响.为了更加充分的理解分流叶片偏置位置最佳化的机理,需要从离心叶轮内部流动损失产生及受分流叶片抑制的气动原理方面着手研究.

1 研究方法

1.1 所研究微型离心叶轮简介

本文的研究对象是自主研发的半开式离心叶轮^[16-17],叶轮直径为84 mm,有10对大小叶片,叶片出口后弯角为 30° ,设计转速为118 000 r/min,轴向进气,本课题组已在微型涡轮发动机实验平台中对其进行实验测试,并应用在工程上.为便于论述,以叶轮旋转方向作为参考将分流叶片两侧通道划分为前通道和后通道(如图1所示),其中前通道为从分流叶片指向叶轮旋转方向的一侧通道,即主叶片吸力面与分流叶片压力面之间通道;反之,后通道为指向叶轮旋转反方向的一侧通道,即主叶片压力面与分流叶片吸力面之间通道.将前通道的两侧叶片角向差表示为 θ_1 ,后通道两侧叶片角向差表示为 θ_2 ,其数值由分流叶片与相邻主叶片叶根尾缘点角向坐标之差确定.分流叶片在通道中周向位置用周向位置系数 $\bar{\theta}$ 表示: $\bar{\theta} = \theta_2 / (\theta_1 + \theta_2)$.

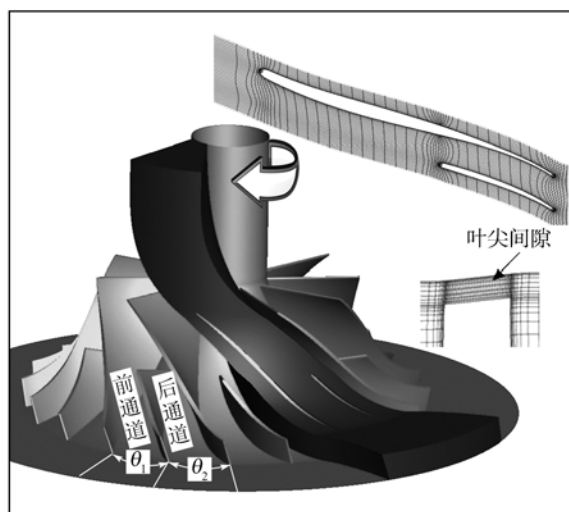


图1 离心叶轮及计算网格示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain and mesh

为了研究叶尖间隙与分流叶片周向位置对微型离心叶轮内流动及性能的耦合影响,本文分别在相对叶尖间隙 0%, 1.75%, 3.5% 以及 5.26% 的情况下,通过在 $\bar{\theta}=0.30\sim 0.75$ 间调整分流叶片周向位置得到如表 1 所示的 10 个离心叶轮方案。

表 1 各离心叶轮方案分流叶片周向位置

Table 1 Circumferential position of the splitter blade

方案	$\bar{\theta}$	方案	$\bar{\theta}$
Case 1	0.30	Case 6	0.55
Case 2	0.35	Case 7	0.60
Case 3	0.40	Case 8	0.65
Case 4	0.45	Case 9	0.70
Case 5	0.50	Case 10	0.75

1.2 数值计算方法的校核

经过几十年的发展,数值模拟方法已经成为了流动分析的重要手段,并在获得丰富流场信息方面具有绝对的优势。本文选用了叶轮机械中广泛使用的计算流体力学软件之一 NUMECA 作为分析工具。控制方程采用 2 阶中心差分格式离散,并结合当地时间步长、隐式残差光滑技术和多重网格法加速收敛。计算域由进口段、大小叶片通道和出口延伸段构成(如图 1 所示),其进口给定总压、总温及入流方向,出口给定静压,两侧处于叶片通道内的边界采用柱坐标下周期边界。所计算叶轮方案具有叶尖间隙时将机匣设定为绝对静止;而当叶尖间隙为零时,离心叶轮成为闭式结构,所以设定机匣为随叶片一起旋转。计算采用结构化网格,叶片周边采用 O 型网格,其余部分为 H 型网格。根据采用不同网格所得计算结果,对比选定了总量约 86 万的网格。

为了确定与校核计算方法,本文计算分析了德国宇航院 2002 年公开几何及实验数据^[18]的高压比跨声速离心叶轮。该叶轮后弯式主、分流叶片的结构特点及进口叶尖相对马赫数约为 1.3 的气动特征与本文所研究的微型离心叶轮相近。本文分别采用 Spalart-Allmaras(S-A)一方程模型和 Baldwin-Lomax(B-L)代数模型对 Krain 叶轮进行数值模拟,并与文献^[16]给出的实验值进行对比。图 2 给出了总压比(π^*)-流量($\dot{m}/\dot{m}_{\text{choke}}$)曲线的对比情况,采用 S-A 模型计算获得曲线偏高与实验结果,而采用 B-L 模型获得的曲线偏低与实

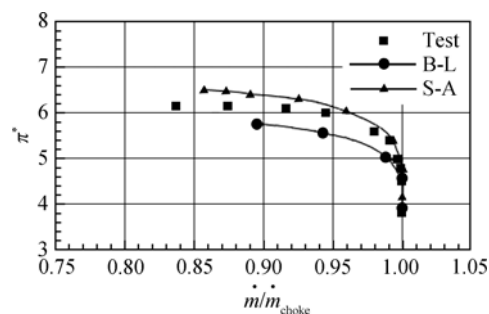


图 2 计算与实验获得的压比曲线对比

Fig. 2 Calculated and measured total pressure ratio as a function of normalized flow rate

验结果。相比较而言,前者在更大范围内与实验结果相吻合,且其最大误差略小些,所以本文采用了 S-A 模型。

2 结果与讨论

2.1 叶尖间隙对分流叶片最佳周向位置的影响

通过改变计算域出口压力的方式,本文计算获得了第 1.1 节所述 4 种不同相对叶尖间隙情况下表 1 所列各叶轮的特性曲线,图 3、图 4 给出了其中相对叶尖间隙 0% 和 5.26% 两种情况下的特性曲线(图中 η 为效率)。在同一相对叶尖间隙下,随着 $\bar{\theta}$ 的增加,分流叶片从主叶片压力面向吸力面偏移,可以获得性能最优的叶轮方案,即存在分流叶片的最佳周向位置,这与前言所述文献结果一致。

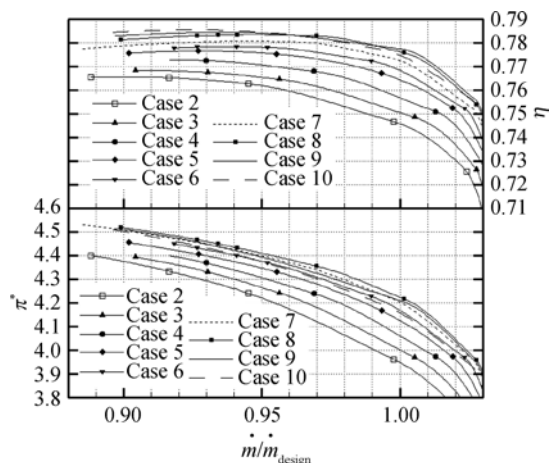


图 3 相对叶尖间隙 0% 时叶轮效率、压比曲线

Fig. 3 Performance curves of the impeller, relative tip clearance 0%

不考虑相对叶尖间隙 0% 时(图 3),方案 9 的叶轮性能接近最佳,此时分流叶片最佳周向位置系数 $\bar{\theta}$ 为 0.65~0.70,靠近主叶片的吸力面。图 4

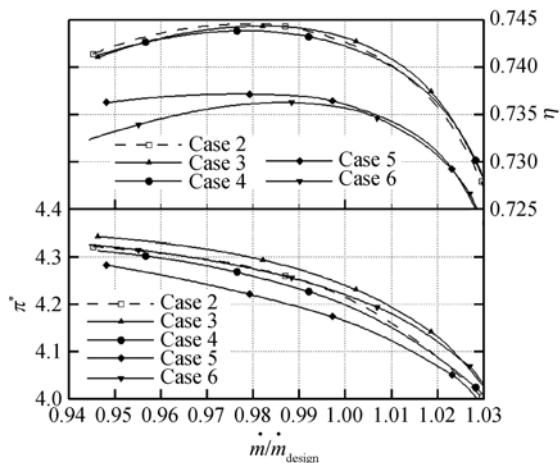


图 4 相对叶尖间隙 5.26% 时叶轮效率、压比曲线

Fig. 4 Performance curves of the impeller,
relative tip clearance 5.26%

所示相对叶尖间隙增大至 5.26% 时,方案 3 的叶轮性能最佳,此时分流叶片最佳周向位置跨过了中间位置,靠近了主叶片的压力面, $\bar{\theta}$ 减小到了 0.40. 鉴于篇幅所限,这里没有给出所计算的另外两种间隙时各分流叶片偏置方案的特性曲线,所获得的最佳分流叶片位置分别是:相对叶尖间隙 1.75% 时,分流叶片最佳位置接近于通道中间;相对叶尖间隙 3.5% 时,分流叶片最佳位置偏向于压力面. 所以,叶尖间隙的大小对分流叶片最佳周向位置有着较大的影响,可达到定性影响分流叶片偏置方向的程度,进而会导致对特定条件下的叶轮进行优化时所获得的分流叶片最佳偏置方向如不同文献中结果间差异一样大相径庭.

2.2 叶轮通道内流动的首要损失源

非封闭式叶轮工作时存在有叶尖的泄漏流动,且随着相对间隙的增大,泄漏流动加强,从而对叶片通道内的流动形成不同程度的影响. 本文所研究叶轮相对叶尖间隙 5.26% 时叶顶附近的三维流线如图 5 所示(图中 ω 为转速),主叶片压力面附近的低能流体向尖部汇集后跨过叶顶流向相邻的前通道,这股流体周向速度在分流叶片压力面与主叶片吸力面间的横向压力梯度下减小,但很大比例流体的周向分运动未能减速至零,从而横贯整个前通道到达分流叶片压力面,随后与分流叶片压力面附近汇聚的流体一起再次跨过分流叶片进入后通道. 源于主叶片和分流叶片压力面的两股泄漏流在主叶片压力面与分流叶片吸力面之间的横向压力梯度作用下,汇入后通道的流动中,从而在后通道中形成了一个涡流,并造成很大的损失,相应形成了图 5 后通道中的高熵增区. 相比

之下,前通道的熵增小很多,所以当叶尖间隙较大时泄漏流是损失形成的更重要因素.

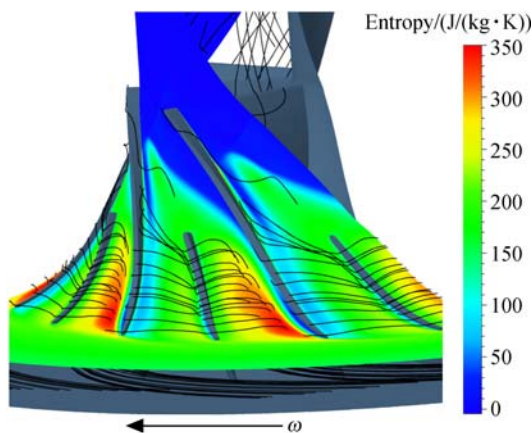
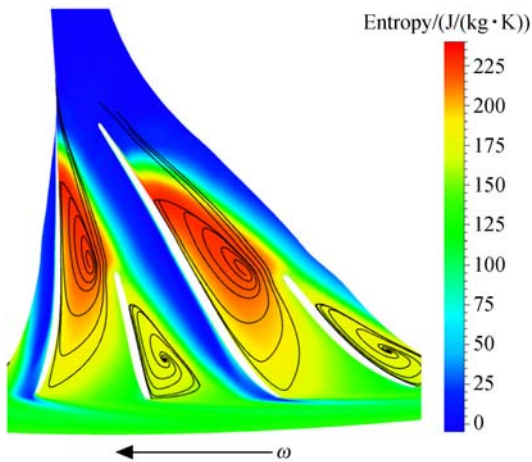
图 5 相对叶尖间隙 5.26%, $\bar{\theta}=0.50$ 时 90% 叶高处
熵增及顶部流动Fig. 5 Entropy rise and streamline near the blade tip,
90% span from hub, relative tip clearance
5.26%, $\bar{\theta}=0.50$

图 6 给出了相对叶尖间隙 0% 时,分流叶片处于通道正中间的叶轮 90% 叶高处的熵增及面流线. 在主叶片吸力面和分流叶片吸力面附近各有一个涡流及高熵增区,是损失产生的主要区域. 由于没有叶尖间隙,所以也就不存在间隙泄漏流对通道内部流场的影响,主叶片吸力面处涡流及损失产生的主要因素是吸力面附近气流在逆压力梯度作用下产生的分离以及展向压力不平衡引发的二次流. 在这个涡流的推挤下,主流向压力面偏

图 6 相对叶尖间隙 0%, $\bar{\theta}=0.50$ 时 90% 叶高处
熵增及面流线Fig. 6 Entropy rise and streamline on surface, 90%
span from hub, relative tip clearance
0%, $\bar{\theta}=0.50$

折,在分流叶片前缘形成了攻角增大的趋势.由图 6 可以发现主叶片吸力面上这个高损失涡区周向范围很大,所以其中少部分的低能流体直接泄入了后通道.攻角的增大、低能流的流入以及流向的逆压力梯度造成了分流叶片吸力面上的分离及损失.相比较而言,主叶片吸力面附近的熵增数值更大、范围更宽,损失最为严重,是相对叶尖间隙 0% 时的首要损失源.

2.3 分流叶片最佳位置的形成机理

相对叶尖间隙 5.26% 时,分流叶片偏向主叶片压力面的方案 3 性能接近最佳($\bar{\theta}=0.40$),相较于分流叶片居中时(图 5 所示),由于分流叶片偏向主叶片压力面,叶轮前通道变宽,主叶片间隙泄漏流流到后通道的流程变长.同时,由叶轮主叶片、分流叶片叶尖静压分布(图 7,图中 M 为相对子午弧长)可知,主叶片叶尖载荷随着分流叶片往主叶片压力面偏移不断减小,可使主叶片处泄漏流减弱,而主叶片吸力面与分流叶片压力面叶尖静压变化很小,也即叶轮前通道的横向压差变化不大.所以,主叶片叶尖泄漏流周向运动能量在前通道内减小量增大,最终在前通道与主流混合,形成了如图 8 所示的前通道熵增区域.

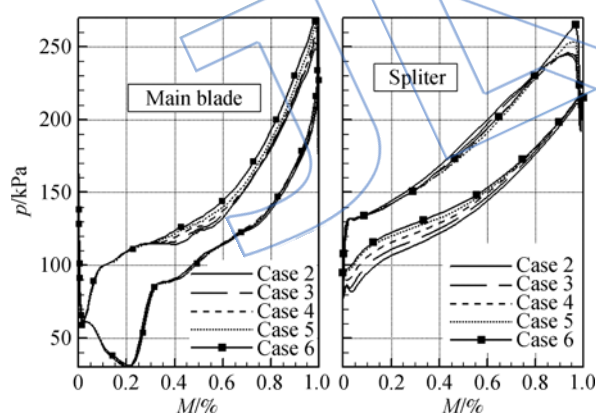


图 7 相对叶尖间隙 5.26% 时主、分流叶片尖部静压分布
Fig. 7 Static pressure distribution on the main and splitter blade surface, 100% span from the hub, relative tip clearance 5.26%

由图 7 可知,方案 3 分流叶片叶尖载荷增加,会加强分流叶片尖部的泄漏流,但由于主叶片泄漏流跨过前通道经分流叶片二次泄漏到后通道中流量明显减少,流入后通道的泄漏流总量也因而大幅减少.同时,由于分流叶片偏向主叶片压力面,叶轮后通道扩张角减小,通道内逆压力梯度因而减小,削弱了后通道中涡流的发展.所以,如图

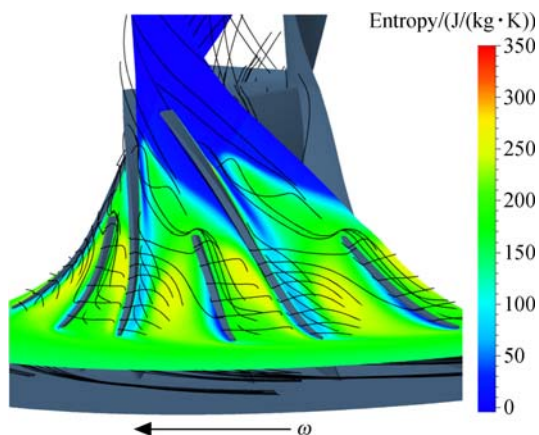


图 8 相对叶尖间隙 5.26%, $\bar{\theta}=0.40$ 时 90% 叶高处熵增及顶部流动

Fig. 8 Entropy rise and streamline near the blade tip, 90% span from hub, relative tip clearance 5.26%, $\bar{\theta}=0.40$

8 中熵增和三维流线所示,后通道的涡流所含能量减小,发展得到减弱,损失减小,叶轮性能因而得到提高.

相对叶尖间隙 1.75% 时,分流叶片居中($\bar{\theta}=0.50$)的叶轮性能几乎最佳,图 9 给出了该方案 90% 叶高处熵增分布及叶顶附近三维流线,主叶片中段吸力面处及叶轮后通道内均有高熵增区.主叶片叶尖泄漏流是前通道中高损失区流体的重要来源,而后通道主损失区内流体主要来源于分流叶片尖部的泄漏流.由于叶尖间隙小,泄漏流能量小,周向速度易在叶片间横向压力梯度的作用下减小至零,进而随主流区流体流出叶轮,极少流

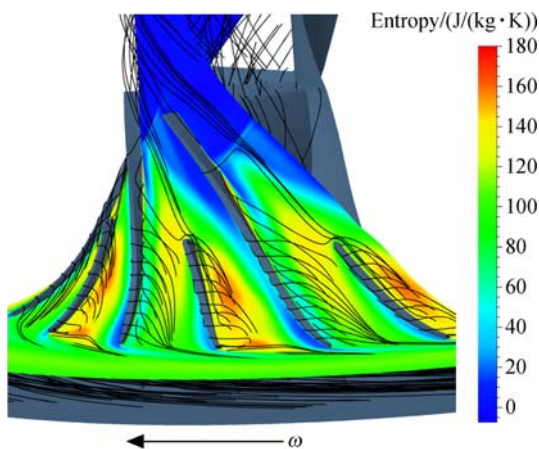


图 9 相对叶尖间隙 1.75%, $\bar{\theta}=0.50$ 时 90% 叶高处熵增及顶部流动

Fig. 9 Entropy rise and streamline near the blade tip, 90% span from hub, relative tip clearance 1.75%, $\bar{\theta}=0.50$

入相邻通道, $\bar{\theta}$ 更大的其他方案中, 随分流叶片向主叶片吸力面偏移, 主叶片尖部泄漏流越来越多地跨过前通道及分流叶片进入后通道, 使得损失集中于后通道; 而在 $\bar{\theta}$ 更小的其他方案中, 随分流叶片向主叶片压力面偏移, 对前通道气流的约束作用减弱, 前通道的扩张度增加, 前通道高损失区周向范围增大、损失加大。

图 10 给出的是相对叶尖间隙 0% 时, 本文所分析方案中性能最佳的叶轮 90% 叶高处的流动图谱。其分流叶片偏近于主叶片的吸力面, 主叶片前通道夹角减小, 流道的扩张角及流向逆压力梯度减小, 利于延缓分离的发生。由于分流叶片更靠近主叶片吸力面, 对前通道内部气体的约束作用加强, 压制了前通道中涡流区, 减小了前通道中高熵区及其在整个叶轮通道中所占的比重, 同时最大熵增也得到降低, 所以叶轮整体损失下降。与此同时, 后通道的损失有所上升, 所以无叶尖间隙时分流叶片的最佳位置只是偏向而不是无限靠近于主叶片的压力面。

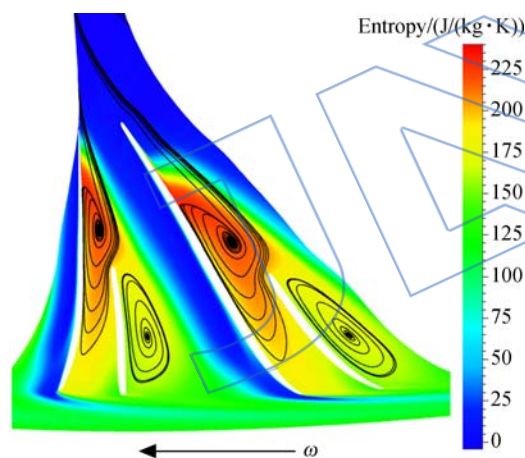


图 10 相对叶尖间隙 0%, $\bar{\theta}=0.70$ 时 90% 叶高处熵增及面流线

Fig. 10 Entropy rise and streamline on surface, 90% span from hub, relative tip clearance 0%, $\bar{\theta}=0.70$

3 结论

偏置分流叶片可以降低离心叶轮内流动损失、提升性能, 但文献中公布的最佳分流叶片周向位置的偏置方向却不一致, 有些偏向主叶片压力面, 有些偏向主叶片吸力面。根据上文对不同叶尖间隙情况下若干分流叶片偏置离心叶轮内流动数值模拟与分析, 可知叶尖间隙大小会改变叶轮流

动的首要损失源, 进而对分流叶片最佳周向位置及其提升性能的机理存在影响。

叶尖间隙较大时, 主叶片叶尖间隙泄漏流能够跨过前通道与分流叶片叶尖泄漏流一起进入后通道, 形成最大的损失。此时, 分流叶片偏向于主叶片压力面较好, 可以减弱主叶片的泄漏流、避免泄漏流及损失聚集于后通道, 从而降低综合损失、提高性能。

叶尖间隙较小时, 主叶片吸力面上附面层及二次流发展出的低能区是损失主要来源。此时, 分流叶片宜偏向于主叶片的吸力面, 可以抑制吸力面表面的分离, 减小分流叶片两侧通道综合的流动损失, 提升性能。

叶尖间隙适中时, 分流叶片前后通道内损失均由叶片吸力面的分离及叶尖泄漏共同构成, 零偏置的分流叶片亦可获得较好的性能。

不同叶尖间隙下最佳分流叶片偏置方案均重新分配了分流叶片两侧通道内损失, 使得两个通道内综合损失降低、叶轮性能提高。

参考文献:

- [1] Krain H. Review of centrifugal compressor's application and development[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1):25-34.
- [2] 张金凤, 袁野, 叶丽婷, 等. 带分流叶片离心叶轮机械研究进展[J]. 流体机械, 2011, 39(11):38-44.
ZHANG Jinfeng, YUAN Ye, YE Liting, et al. Research state of the centrifugal machineries with impeller adding splitter blades[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(11):38-44. (in Chinese)
- [3] 李学臣, 席光. 离心叶轮出口流动分离区影响因素的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9):16-22.
LI Xuechen, XI Guang. Numerical research on influence factors of flow separation near centrifugal impeller outlet[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9):16-22. (in Chinese)
- [4] Farge T Z, Johnson M W, Maksoud T M A. Tip leakage in a centrifugal impeller[J]. Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3):244-249.
- [5] 刘正先, 陈丽英. 半开式离心叶轮变工况间隙流动特征[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(3):415-418.
LIU Zhengxian, CHEN Liying. On nature of tip clearance flow in unshroud impeller of centrifugal compressor at different flow rate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(3):415-418. (in Chinese)
- [6] 郭宫达, 张扬军, 郑新前, 等. 跨声速离心压气机叶尖区旋涡流动特征[J]. 清华大学学报, 2008, 48(11):1980-1984.
GUO Gongda, ZHANG Yangjun, ZHENG Xinqian, et al. Vortex flows in the blade tip region of a transonic centrifugal

- gal compressor[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(11):1980-1984. (in Chinese)
- [7] 彭森, 杨策, 马朝臣. 离心压气机叶尖间隙泄漏流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6):935-937.
PENG Sen, YANG Ce, MA Chaochen. Numerical simulation of centrifugal compressor with tip clearance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6):935-937. (in Chinese)
- [8] 戴韧, 陈康民, 王企鲲. 离心压气机叶轮内部流动的数值研究: 分流叶片的作用[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(增刊):47-50.
DAI Ren, CHEN Kangmin, WANG Qikun. Numerical study of flow inside centrifugal impeller: effect of splitter [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(Suppl.):47-50. (in Chinese)
- [9] Oana M, Kawamoto O, Ohtani H, et al. Approach to high performance transonic centrifugal compressor[R] AIAA-2002-3536, 2002.
- [10] GUI Lichuan, GU Chuangang, CHANG Hongshou. Influences of splitter blades on the centrifugal fan performances [R]. ASME Paper 89-GT-33, 1989.
- [11] 朱士灿, 陈正德. 一种分流叶片偏置的径流式压气机的研制[J]. 内燃机学报, 1986, 4(1):40-55.
ZHU Shican, CHEN Zhengde. The development of a radial flow compressor with offset splitter blades[J]. Transactions of CSICE, 1986, 4(1):40-55. (in Chinese)
- [12] 谢蓉, 海洋, 王晓放. 分流叶片周向位置设计及其对离心叶轮内部流动的影响[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(2):37-40.
XIE Rong, HAI Yang, WANG Xiaofang. Design of the splitter blade circumferential position and its effect on the internal flow of centrifugal impeller[J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(2):37-40. (in Chinese)
- [13] 刘瑞韬, 徐忠. 分流叶片位置对高转速离心压气机性能的影响[J]. 空气动力学报, 2005, 23(1):129-135.
LIU Ruitao, XU Zhong. Effect of the splitter blade position on the characteristic of high-speed centrifugal compressor[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(1):129-135. (in Chinese)
- [14] 卜远远, 楚武利. 分流叶片周向位置对离心叶轮性能及内部流动的影响[J]. 流体机械, 2011, 39(9):16-20.
BU Yuanyuan, CHU Wuli. Effect of the splitter blade position on the performance and the internal flow of centrifugal impeller[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(9):16-20. (in Chinese)
- [15] 刘飞, 蔡兆麟. 含分流叶片的离心压缩机级的数值分析[J]. 风机技术, 2005(2):1-4.
LIU Fei, CAI Zhaolin. Numerical analysis of centerifugal compressor stage with short blade[J]. Compressor Blower & Fan Technology, 2005(2):1-4. (in Chinese)
- [16] 陈杰, 黄国平, 梁德旺, 等. 叶片数对微型斜流叶轮性能的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9):1707-1712.
CHEN Jie, HUANG Guoping, LIANG Dewang, et al. Effects of blade number on performance of transonic micro slope impeller[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9):1707-1712. (in Chinese)
- [17] 陈杰, 钟桐, 黄国平. 微型离心叶轮流动损失分析与削弱[J]. 推进技术, 2013, 34(7):904-910.
CHEN Jie, ZHONG Lü, HUANG Guoping. Analysis and reduction of the flow loss in a micro centrifugal impeller [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(7):904-910. (in Chinese)
- [18] Krain H. Investigation of the flow through a high pressure ratio centrifugal impeller[R]. ASME Paper GT-30394, 2002.

(编辑:秦理曼、叶 青)