

文章编号: 1000-8055(2008)08-1498-06

BVF 在吹气控制压气机叶栅分离流中的应用

郭 明, 郑晓宇, 周 盛, 李秋实

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 结合边界涡量流(BVF), 对叶片开缝吹气的方法控制扩压叶栅流动分离进行了数值模拟. 结果表明, 叶片开缝可有效的吹除附面层内的低速气流, 从而弱化或消除流动分离, 提升性能. 对叶栅开缝位置、开缝角度及缝隙宽度等影响因素的组合研究, 获得了最佳开缝方案. BVF 气动分析显示, 叶片吸力面上高的 BVF 正峰值是大尺度分离发生的预兆, 最佳开缝位置在 BVF 正峰值之后, 分离点前后的一段区域, 通过选择合适的位置, 可取得在最大工况范围的最佳效果.

关 键 词: 压气机叶栅; 分离流控制; 叶片开缝; 边界涡量流

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

BVF application on blowing control of flow separation of a compressor cascade

GUO Ming, ZHENG Xiaoyu, ZHOU Sheng, LI Qiushi

(National Key Laboratory on Aero-Engines,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Controlling flow separation with blowing slot was simulated numerically on a 2-D cascade in collaboration with boundary vorticity flux (BVF). The results show that steady blowing can take away the slow airflow of the boundary layer, the separated flow is controlled and the performance of cascade is greatly improved. By means of investigation on the cascade performance variation with slot position, blowing angle and slot width, the best slot scheme is obtained. BVF aerodynamics analysis indicates that the high positive peak of BVF is a sign of large scale flow separation, BVF distribution and cascade performance are interrelated, the blowing can adjust BVF distribution well to improve the performance. The best slot position is located behind the positive BVF peak and in a small zone near separation point. By selecting an appropriate slot position, the best effect could be obtained in a wide operating range.

Key words: compressor cascade; separated flow control; slot; boundary vorticity flux

现代航空发动机的发展要求风扇/压气机在保持高效率的同时, 减少压气机级数及增加单级动力载荷, 以提高推重比, 获得发动机性能的进一步提升. 而随着压气机负荷的增加, 流场内逆压梯度也相应增强, 流动分离现象进一步加剧, 进而导致加功能力和效率的下降. 如何解决这一矛盾?

一方面, 可从源头上入手, 探索在原始设计中如何尽量减弱流动分离; 另一方面, 采用合理的工程措施, 主动的控制流动分离尤其是大尺度的流动分离, 也是一个重要的研究方向. 这方面, 利用吹吸气来控制物面产生的大尺度分离有着实际的工程意义, 如美国麻省理工学院燃气轮机实验室 Ker-

收稿日期: 2007-07-26; 修订日期: 2007-10-22

作者简介: 郭明(1977-), 男, 江西万载人, 博士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究.

rebrock, Schuler, Merchant^[14] 等人在高负荷压气机叶片、机匣、轮毂表面抽吸气, 以及 Suder^[5] 等利用周向离散点的定常吹气控制跨声速轴流压气机转子叶尖区域流动, 均取得了很好的效果。

流动分离与旋涡的生成与发展是密不可分的, 研究分离流离不开研究涡结构。因此, 从研究物面上的涡量产生过程及其对性能的影响入手, 来探索如何控制分离以提升性能, 是自然的选择。

80 年代中期以来, 在涡量动力学研究方法的基础上, 吴介之和吴建民^[67] 等建立了一套完整的边界涡量动力学理论。该理论表明, 复杂分离流源于物面上产生的涡量及其离开物面后形成的自由剪切层, 任意形状的物体所受的力和力矩可以严格地用边界涡量流 (Boundary vorticity flux, 缩写为 BVF) 的积分来表示, 从而建立了涡量生成与翼型性能间的直接联系。如果能够很好地控制 BVF 在物面上的分布, 就能在升力和阻力之间获得很好的动态平衡, 最大限度地抑制流动分离, 获得较高的效率。吴等运用此理论, 在外流翼型气动诊断及设计优化上取得了很大的成功^[89]。

本文工作将 BVF 引入内流压气机叶栅的气动分析, 与利用叶片开缝吹气控制流动分离的数值模拟相结合, 研究 BVF 与叶栅气动性能间的关系, 以及它对气动分析的指导意义。

1 BVF 气动分析原理

涡量场与边界的交互作用是涡量动力学所关心的核心问题之一, 而边界涡量动力学即是应运而生的这样一门学科。它研究有界的旋涡流, 是处理涡量-边界交互作用所不可或缺的基本工具和必要前提条件。边界涡量动力学的先行者是英国的 Lighthill^[10], 他将涡量在固壁 ∂B 法向上的扩散率:

$$\sigma \equiv v \partial \omega / \partial n \tag{1}$$

定义为“涡量源强度” (Vorticity source strength)。现在我们一般称为边界涡量生成率, 它是单位时间内通过单位面积进入流体的旋涡的多少的量度, 是边界涡量动力学的最核心概念。这里, $\omega = \Delta \times \mathbf{u}$ 是涡量, v 是运动粘性系数, $\mathbf{n}$ 是指向流体的壁面单位法向矢量。其动力学描述可表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_a + \sigma_{\Pi} + \sigma_{\tau}, \quad \sigma_a \equiv \mathbf{n} \times \mathbf{a}_B \\ \sigma_{\Pi} &\equiv \frac{1}{\rho} \mathbf{n} \times \Delta \Pi, \quad \Pi \equiv p - (\lambda + 2\mu) \vartheta \\ \sigma_{\tau} &\equiv v (\mathbf{n} \times \Delta) \times \omega \end{aligned}$$

$\sigma_a, \sigma_{\Pi}, \sigma_{\tau}$ 分别是指在附体条件下, 由壁面加速度, 法向应力 Π 的切向梯度以及由边界涡 (剪切应力) 所引起的 BVF。通常, 在雷诺数较大的情况下, σ_{τ} 比 σ_{Π} 小的多, 通常可忽略。

任意形状的物体所受的力和力矩可以严格地用 BVF 的积分来表示, 对于封闭曲线 C 包围的任意开壁面 ∂B , 所受合力 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_l$

其中:

$$\mathbf{F}_s = - \int_{\partial B} \rho \mathbf{x} \times \left(\frac{1}{2} \sigma_{\Pi} + \sigma_{\tau} \right) ds \tag{2a}$$

$$\mathbf{F}_l = \oint_C \mathbf{x} \times \left(\frac{1}{2} \Pi d\mathbf{x} + \mu \omega \times d\mathbf{x} \right) \tag{2b}$$

$\mathbf{x}$ 是位置矢量。

这样, 就将合力与壁面的 BVF 和涡量建立了直接的联系。

对于二维流动, σ_{τ} 不存在, 如果忽略表面摩擦力对合力的小贡献, 那么对于一个二维翼型, 在定常流的情况下, 其升力 F_L 和阻力 F_D 可用 BVF 简单的表示为

$$F_L = \oint_C \rho x \sigma_p ds \tag{3a}$$

$$F_D = - \oint_C \rho y \sigma_p ds \tag{3b}$$

其中 $\sigma_p \equiv \frac{1}{\rho} \mathbf{n} \times \varphi$

从 BVF 的动力学描述来看, 由于直接与物面 (几何构型) 相关联, 因此, BVF 不仅仅通过其作为基本物理量的导数所起到对流场不良的放大作用, 也直接揭示了几何构型上存在的问题。而通过方程 (2) 和 (3), 我们又建立了 BVF 与翼型性能参数 (升力、阻力) 的直接联系, 结合 BVF 的物理含义, 可以追踪到制约性能的最本质根源旋涡 (涡量) 究竟诞生于何处, 由于什么原因产生, 其究竟如何影响制约性能, 并且通过优化 BVF 分布进而优化设计。

通常, 可以根据以下原则判定一个二维翼型表面的 BVF 分布是否合理:

从物理机理上讲, BVF 所表征的是单位时间内通过单位面积进入流体的旋涡的多少。过高的 BVF 峰值将带来过大的涡量生成从而最终导致大尺度分离, 所以, 应尽量避免, 即便无法避免也应尽量使峰值区域过渡平缓。尤其是在翼型上表面, 陡峭的 BVF 正峰值将直接导致后续的分离。

从翼型性能的 BVF 数学描述上说, 为便于分析, 将坐标原点选取在翼型弦线中点 (坐标原点的不同, 将导致 x, y 的数值变化, 但不影响我们的

分析结果). 根据方程(3), 若要获得高的升力, 应使高的 BVF 负峰值区域尽量靠近前缘, 而高的 BVF 正峰值区域尽量靠近尾缘, 以增大峰值所在区域对升力的正贡献. 这同时会引起阻力的变化, 但是, 由于翼型 Y 方向变化不大, 因此可以将重点集中在升力的提升上.

压气机叶栅的流动与外流二维翼型流动很类似. 尽管关注的性能指标不一样, 但是, 外流翼型所追求的是在减小阻力的同时, 尽量增加升力, 即最大升阻比. 而众所周知, 二维平面叶栅的性能评价指标, 如损失系数、静压升等, 它们的提升一般也伴随着升阻比的提升.

本文通过对叶栅开缝吹气控制流动分离的 BVF 分析, 将讨论上述关于 BVF 的分布规律是否适用于二维平面叶栅, 以及对吹气控制分离的指导价值.

2 吹气方案及数值模拟结果

本文所采用的吹气控制流动分离的数值模拟研究是与具体的工程实验相结合.

某型高负荷风扇级静子叶中截面因转角过大, 存在严重的叶背大尺度分离现象, 拟采用叶片表面吹气的方式来控制分离. 见图 1 的叶片开缝方案示意, 取静子叶中截面为原型, 开一条从压力面到吸力面的缝, 利用压差形成的气流吹除叶背低速附面层, 以达到控制分离, 改善流场的目的. 与从其它地方引气的方式不同, 该种方式利用自身气流达到对流场自我改善的目的, 结构简单, 易于实现. 其缺点在于, 吹气速度是由压力面和吸力面的压力差决定的, 无法主动控制. 因而, 可控因素主要是开缝的位置、角度以及缝隙的大小. 本文所作的数值模拟工作, 通过研究叶栅性能指标分别随这三个参数的变化规律, 从而确定出各项性能指标均达到最佳的开缝方案以便对后期实验作出指导.

为模拟真实流动状况, 进口参数根据实际上叶排出口参数设定: 进口总温 $T_i^* = 400\text{ K}$, 进口总压 $p_i^* = 3.1 \times 10^5\text{ Pa}$, 来流轴向速度与绝对速度的比值 $V_x/|V| = 0.5313$ (即攻角 $i = 0^\circ$). 出口亚声, 给定均匀一致的静压 $p_2 = 2.6 \times 10^5\text{ Pa}$.

数值模拟软件: Numeca
湍流模型: Spalart-Allmaras
网格: 未开缝时 197×57 ;
开缝时主流区 245×57
缝隙处 21×37

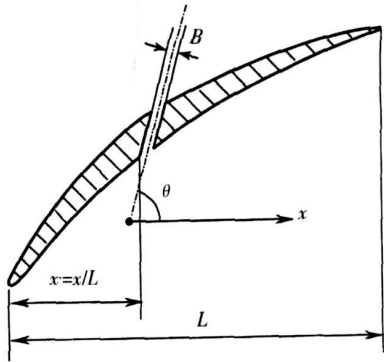


图 1 叶片开缝示意图
Fig. 1 Blowing slot sketch

性能评价指标: 静压比 p_2/p_1 、损失系数 ω
影响参数: 开缝相对位置 x' ($x' = x/L$)、开缝角度 θ 以及缝隙宽度 B .

最后得到最佳开缝方案: $x' = 0.25$, $\theta = 50^\circ$, $B = 1\text{ mm}$. 表 1 是未开缝和最佳开缝方案下叶栅性能参数的对比, 可见, 开缝吹气使得叶栅性能有了很大提高.

表 1 无缝和最佳开缝方案的性能参数对比

Table 1 Performance comparison			
	总压恢复系数 σ	静压增压比 p_2/p_1	损失系数 ω
无缝	0.932	1.332	0.183
最佳方案	0.935	1.499	0.147

3 叶片开缝的 BVF 气动分析

3.1 最佳方案

最佳开缝角度 $\theta = 50^\circ$, 而进口气流与轴线的夹角 $\alpha = 57.9^\circ$, θ 比 α 略小. 考虑到在开缝位置处, 气流已转过一定的角度, 事实上此开缝角度已非常接近主流区的流线方向. 此时, 缝隙中冲出的气流对附面层的吹除作用强, 且对主流区的气流干扰小.

缝隙宽度太小时对附面层的吹除作用不强, 太大时, 缝隙中出现旋涡, 而且出流对吸力面上的附面层干扰作用大, 流动损失增大.

而开缝位置的影响是我们关注重点, 在后面将展开论述.

图 2 是未开缝情况下的流线分布, 从图中我们可以看出明显的叶片吸力面大尺度分离. 对应的叶片吸力面 BVF 及涡量分布图(图 3)上, 可以清楚的看到在前缘附件的 BVF 负峰值及其后的

正峰值. 负峰值来源于前缘气流的急剧转折, 无法避免. 而其后的高而陡峭的 BVF 正峰值意味着此时的涡量生成率急剧增大, 它在空间上的累积效应最终导致了后面的大尺度分离. 因而, 高的陡峭的 BVF 峰值是大尺度分离发生的先兆.

图 4 是最佳方案下的流线分布, 可以看到, 大尺度的分离已经完全消失, 只在尾缘处出现很小的回流区. 这是由于开缝导致的缝后壁面高 BVF 正峰值以及压力面和吸力面的掺混效应的共同效果. 这是难以避免的. 此时, 叶片吸力面的 BVF 分布(图 5)清晰的表明, BVF 高的正峰值已经得到了很好的抑制, 涡量生成率的降低导致了大尺度分离区消失.

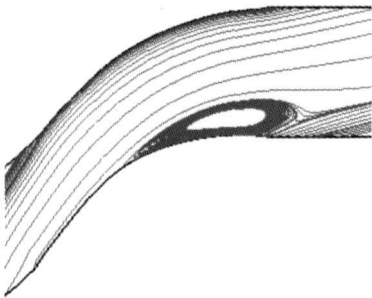


图 2 未开缝时流线分布
Fig. 2 Streamline without slot

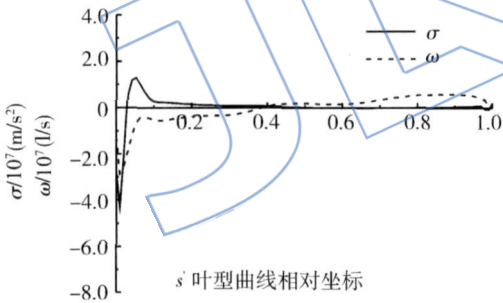


图 3 未开缝时吸力面 BVF、涡量分布
Fig. 2 BVF & vorticity distribution on suction surface without slot

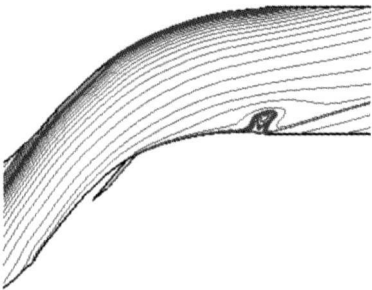


图 4 最佳开缝时流线分布
Fig. 4 Streamline with best slot

此外, BVF 负峰值加大, 并更为靠近前缘, 正

峰值减小并向尾缘靠近, 从前面的分析, 这种更优的 BVF 分布, 将带来升阻比的增加, 也意味着叶栅性能的提升. 事实上, 最佳开缝方案中的 BVF 正峰值是所有方案中得到最大消弱的, 且最为靠近尾缘, 这与其性能得到最大提升相吻合.

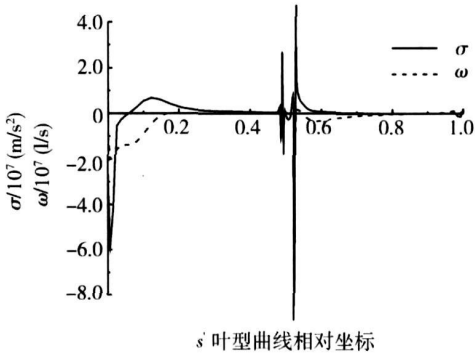


图 5 最佳开缝时吸力面 BVF、涡量分布
Fig. 5 BVF & vorticity distribution on suction surface with best slot

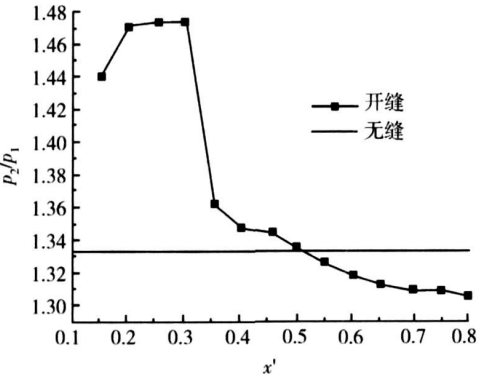
3.2 不同开缝位置的比较

图 6 是开缝角度 $\theta = 60^\circ$, 缝隙宽度 $B = 1\text{ mm}$ 时, p_2/p_1 和 ω 随着开缝相对位置 x' 的变化规律. 尽管开缝角度并非最佳, 但揭示的规律是一致的. 图中可见, 在一定的范围内, 增压比都能获得了不同程度的提升, 相应的损失系数也降低. 值得注意的是, 在相对位置 $x' = 0.2 \sim 0.3$ 之间, 有一段最佳性能平台, 最佳相对位置 0.25 即位于其间. 联系图 3, 我们发现, 该位置即未开缝时 $\omega = 0$ 的点. 根据普朗特的分离模式理论, 固定壁面上的二维粘性附着流, 在某点 O 突然离开物面, 其后出现回流区. 在分离点 O , 涡量 $\omega = 0$; 分离点之后, 流线离开物面向外, $\omega > 0$. 因此, $x' = 0.25$ 的位置即分离点.

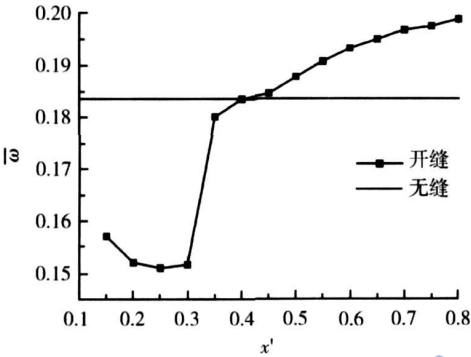
由于叶型本身的限制, 无法将开缝位置前推至 BVF 正峰值处, 以检查是否可以直接控制 BVF 正峰值, 以达到减小分离的效果. 但是从图 6 的趋势上来看, 该处吹气效果应该不好. BVF 出现高的峰值表明此处的涡量急剧加速生成, 如同加速度对速度的作用, 其效果需要一定时间的累积. 当累积到一定程度, 才是对其进行控制的最佳时机. 图 6 中开缝高性能平台的存在反映了这一点.

而高性能开缝位置平台的存在对工程应用的价值在于: 真实压气机的工况是变化的, 通过选择不同工况下高性能开缝位置平台的交集作为最终开缝位置, 可以获得最大工况范围的最佳吹气效果. 这个位置应该在 BVF 大的正峰值后, 位于分

离点前后的一段区域.



(a) 静压增压比



(b) 损失系数

图 6 性能参数随开缝相对位置的变化规律
Fig. 6 Performance variation with slot position

下面讨论不同开缝位置时, BVF 分布与性能提升间的关系. 对比未开缝时(图 3), 以及分别位于 0.15, 0.25, 0.6 ($\theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$) 的 BVF 分布图(图 7~ 图 9), 可以看到: $x'=0.25$ 时, 性能提升最大, 其 BVF 正峰值也最大程度的被抑制, 且最为靠向尾缘, BVF 负峰值也大大增强, 并更靠近前缘, 因而其性能提升最大. $x'=0.15$ 时的正峰值也得到一定程度抑制, 但是相比较 $x'=0.25$ 而言, 更为陡峭且离尾缘更远, 而 BVF 负峰值分布基本类似, 因而其性能提升次之. $x'=0.60$ 时的正峰值不仅未得到抑制, 且更为陡峭, 并靠近前缘. 尽管负峰值与原型相比也得到增强, 但是与 $x'=0.15, x'=0.25$ 时相比, 不仅位置更远离前缘, 其峰值也更小, 因而其性能不仅没有得到提升, 反而有所下降.

从图 7~ 图 9 的涡量分布上看, 尤其在 $x'=0.15$ 及 $x'=0.25$ 时, 很明显, $\omega=0$ 的点提前了, 这是由于从缝隙流出的高速流体阻滞了缝隙前壁面上的流动. 尽管如此, 工质以很高的速度流入叶栅通道, 壁面上极薄的倒流对主流区几乎没有影

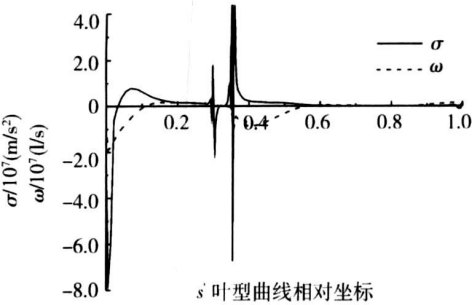


图 7 开缝时吸力面 BVF、涡量分布
(开缝方案 $x'=0.15, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

Fig. 7 BVF & vorticity distribution on suction surface with slot ($x'=0.15, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

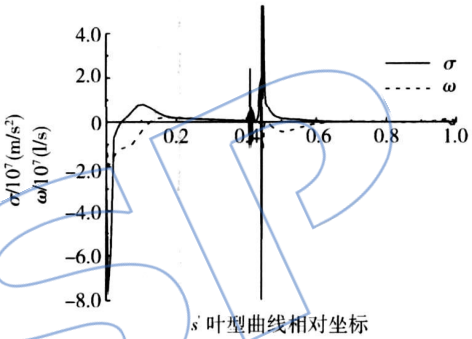


图 8 开缝时吸力面 BVF、涡量分布
(开缝方案 $x'=0.25, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

Fig. 8 BVF & vorticity distribution on suction surface with slot ($x'=0.25, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

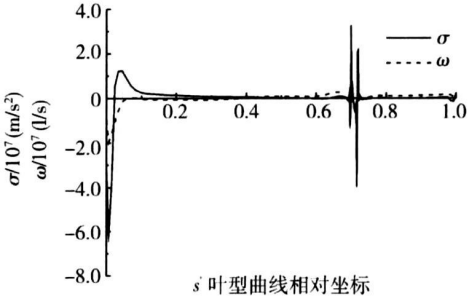


图 9 开缝时吸力面 BVF、涡量分布
(开缝方案 $x'=0.60, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

Fig. 9 BVF & vorticity distribution on suction surface with slot ($x'=0.60, \theta=60^\circ, B=1\text{ mm}$)

响. 此时, BVF 的较小而平坦的峰值也说明此为极小的分离. 与此不同, $x'=0.60$ 时, 见图 10, 在开缝位置前后均形成了较大分离. 这充分说明了吸力面上高而陡峭的 BVF 正峰值可作为大尺度分离的先兆.

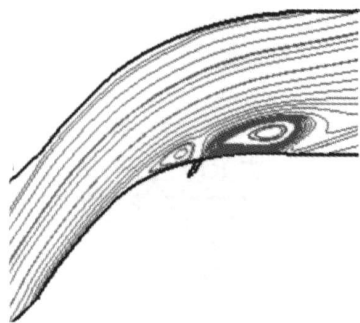


图 10 开缝时流线分布

(开缝方案 $x' = 0.60, \theta = 60^\circ, B = 1 \text{ mm}$)

Fig. 10 Streamline with slot

($x' = 0.60, \theta = 60^\circ, B = 1 \text{ mm}$)

4 结 论

通过上述分析可以得出如下结论:

1) 在平面叶栅叶片的吸力面和压力面之间开缝, 利用流场自身压差形成的气流可以有效的吹除附面层内的低速气流, 从而弱化或消除流动分离, 实现流场的自我修复; 得到的最佳开缝方案, 使静子叶栅的扩压能力提高了 12.5%, 同时损失减少了 19.7%.

2) BVF 作为单位时间内通过单位面积进入流体的旋涡的多少的量度, 吸力面高而陡峭的正峰值意味着后续的大尺度分离, 应尽力避免. BVF 分布与叶栅性能有明确的相关性, 好的 BVF 分布在避免吸力面高而陡峭的正峰值的同时, 应使负峰值靠近前缘而正峰值靠近尾缘.

3) 通过叶片开缝吹气的方法能获得好的 BVF 分布, 从而提升性能. BVF 是通过其空间累

积作用而最终导致大尺度的分离, 因而最佳开缝位置 BVF 峰值区域之后, 在分离点及其前后一段区域. 该现象工程上的价值在于, 可以选择不同工况下高性能开缝位置区域的交集作为最终开缝位置, 以获得在最大工况范围的最佳效果.

参考文献:

- [1] Kerrebrock J L, Reijnen D P, Ziminsky W S, et al. Aspirated compressors[R]. ASME 97 GT-525.
- [2] Kerrebrock J L, Drela M, Merchant A A, et al. Family of designs for aspirated compressors[R]. ASME 98 GT-196.
- [3] Schuler B J, Kerrebrock J L, Merchant A, et al. Design, analysis, fabrication, and test of an aspirated fan stage[R]. ASME 2000 GT-618.
- [4] Merchant A A, Kerrebrock J L, Drela M. Aerodynamic design and analysis of a high pressure ratio aspirated compressor stage[R]. ASME 2000 GT-649.
- [5] Suder K L, Hathaway M D, Thorp S A, et al. Compressor stability enhancement using discrete tip injection[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123: 14-23.
- [6] Wu J Z, Wu J M. Vorticity dynamics on boundaries[J]. Advanced Applied Mechanics, 1996, 32: 119-275.
- [7] Wu J Z, Wu J M. Boundary vorticity dynamics since light hills 1963 article[J]. Theoretical & Computational Fluid Dynamics, 1998, 10: 459-474.
- [8] Wu J M, Ondrusek B, Wu J Z. Exact force diagnostics of vehicles based on wake plane data[R]. AIAA-96-0559, 1996.
- [9] Wu J Z, Roach R L, Lo C F, et al. Aerodynamic diagnostics and design based on boundary vorticity dynamics[R]. AIAA-99-3103.
- [10] Lighthill M J. Laminar boundary layer[M]. Oxford: Oxford University Press, 1963: 46-113.