

文章编号: 1000 8055(2008)09 1689-06

压气机内有效滞止压力概念及其应用探索

侯安平, 阙晓斌, 熊劲松, 周 盛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 提出了有效滞止压力的概念来综合考虑流体微团速率与方向对其做功能力的影响, 并结合风扇/压气机内部流动的设计要求, 从工程应用层面给出了有效滞止压力和压差系数的定义. 初步结果表明, 有效滞止压力的应用可以更好地反映流动方向对叶轮机非定常流场的影响, 并使得流场性能参数对流场质量的变化更敏感, 对于合理分析非定常流场是有益的.

关 键 词: 非定常分离流; 滞止压力; 风扇/压气机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Investigation on the concept and application of available stagnation pressure in the compressor

HOU An ping, QUE Xiao bin, XIONG Jin song, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory on Aero-engine, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The aerodynamics design of compressor is definitely required for the flow direction, which, however, isn't considered in the definition of stagnation pressure. So, the limitation of stagnation pressure appears when describing the performance of unsteady flow in high load fan/compressor. In order to deal with this limitation, available stagnation pressure was presented to consider the influence on working capability of small flow volume caused by its velocity value and flow direction. And, according to the design demand of flowing in fan/compressor, the concepts of available stagnation pressure and pressure difference coefficient were defined at the level of engineering application. The application of available stagnation pressure can reflect more effectively the influence of flow direction on unsteady flow field in turbomachinery, making the performance characters of flow field change more sensitive to the change of quality of flow field. So the available stagnation pressure is useful to analyze the unsteady flow field.

Key words: unsteady separated flow; stagnation pressure; fan/compressor

由于现代高性能风扇/压气机的单级压比越来越高, 叶片负荷越来越大, 其内部的非定常分离流已经不可避免. 与之对应, 在内流领域, 目前正从定常附体流动研究转向非定常分离流的研究. 这就涉及到对原有描述定常附体流动的参数重新

认识的问题, 譬如滞止参数, 其传统的定义是否在分析风扇/压气机内非定常分离流时存在局限呢?

滞止参数体系在气动热力学发展中起到了重要的作用, 然而, 这套定义是建立在定常流动范畴之上的, 其完全适用的领域仅限于定常附体流动.

收稿日期: 2007 09 18; 修订日期: 2008 01 23

基金项目: 国家自然科学基金(10477002); 凡周基金(20060407)

作者简介: 侯安平(1975-), 男, 湖南常德人, 副教授, 研究方向: 叶轮机气动力学, 压气机气动设计.

与此形成鲜明反差的是,目前高负荷风扇/压气机内部的流动已经呈现出越来越强的非定常特性.于是,矛盾出现了:描述流场的滞止参数体系是建立在定常流动概念之上的,而所评价的流场却是非定常的.此时,传统的总压定义在非定常性较明显的工程应用中是否还具有原来的重要意义呢?本文首先从实验和数值模拟角度来分析这一矛盾.

1 传统滞止压力的测量与应用 存在局限

稳态三孔探针是一种广泛应用于二维流动参数(总静压、落后角和马赫数)测量的仪器.从三孔探针测量总压的过程来看,由于其为定常的测试仪器,只有流动是完全定常的,并且流动的方向和总压孔轴线完全平行的时候,才能得到符合定义的准确的总压值.当然,由于总压孔对流动方向具有一定的不敏感角,在流动方向与总压孔轴线存在较小角度时,测得的总压值与真实总压值的差值较小.

然而,现代高负荷风扇/压气机流动分离严重,非定常性很明显.这时,在叶片尾缘分离区内同一点,流动的方向是不断变化的,并且变化的幅度和频率都很大,因此对这种流场采用上述方法进行测量时,很难得到真正定义上的总压值.同样,在发动机测试中应用较广泛的总压梳、总压耙在实验时也会碰到类似的问题,即只有在定常流动情况下测量的总压值才比较准确,而在大尺度非定常分离流中所得的总压值则会严重失真.

在文献[1]中,对一稳态三孔探针得到了 $\pm 180^\circ$ 范围的校准曲线.从校准曲线上可以看到,当气流方向与总压孔的中心线偏离角大于 $\pm 50^\circ$ 后,总压孔的示数(表压)就开始低于当地静压(大气压),出现负值.

同样,在一平面叶栅吹风实验时发现^[2],在大攻角的扩压叶栅流动中,由于气流角的变化较大,在某些点总压孔的压力值甚至出现负值(表压).这表明扩压叶栅的吸力面上形成了严重的分离流,甚至倒流,使得此处流动超出了三孔探针的测量范围.

上述事实说明,在大尺度非定常分离流中,传统的测试方法很难得到当地流场准确的总压值.

由于数值模拟可以得到全流场的详细信息,因此也能得到每个时刻、各个点确切的滞止参数值.图1和图2是对一压气机平面叶栅数值模拟的结果,分别表示流向速度(U)和传统定义的总压(p^*)在尾缘处沿栅距方向(Y)的分布^[3,4].从图

1可以看出大攻角下在叶片尾缘吸力面处出现了倒流区,然而从图2总压的分布来看,倒流最明显区域的总压值却要高于其他倒流区的总压值,甚至高于某些没有倒流区域的总压值.从这一明显的背离中可以看出,利用传统的总压值来判断某些工况下流场分布的好坏是有局限的.

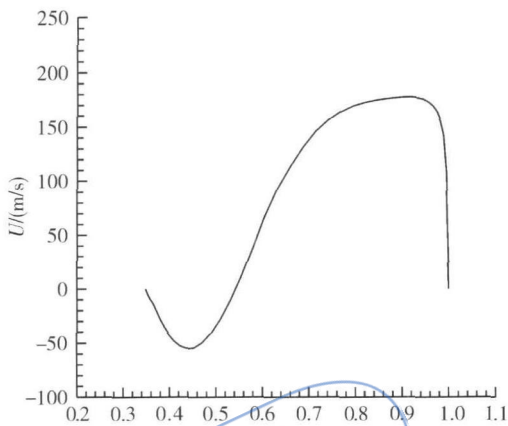


图1 攻角 20° ,马赫数0.5时栅后速度分布

Fig. 1 Downstream pitchwise velocity profile

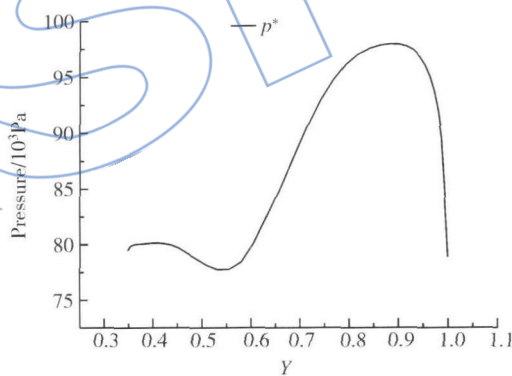


图2 攻角 20° ,马赫数0.5时栅后传统总压分布

Fig. 2 Downstream pitchwise total pressure profile

通过上面的分析发现,由于传统的总压是基于定常附体流动而定义的,这与目前日益普遍的非定常流动研究形成了反差.正是由于这个反差的存在,本文认为,在大尺度非定常分离流情况下:

由于是一种定常的测试仪器,并且没有建立合理的数据处理方法,稳态三孔针测量不能获得当地传统定义下的总压值.

在数值模拟中,基于定常附体流动定义的传统总压作为一个标量,很难恰当地描述一个对于流动方向很敏感的非定常流场(矢量场)的性能.

在研究中发现的上述疑问,促使探索一类适用于大尺度非定常分离流环境的参数,使之能够克服传统总压对流动方向考虑不足的特点,并探

索通过实验和数值模拟方法得到这类参数的方法. 这里将新参数称之为“有效滞止压力”.

2 有效滞止压力的定义和求解

本文提出有效滞止压力的概念来体现流体微团的方向对其做功能力的影响, 以期考虑流体微团的静压、速度大小和方向的影响.

在工程层面对有效滞止压力定义的主要依据是风扇/压气机中存在设计者期望的最佳流动方向, 实际流动趋近最佳方向的程度表征了流场性能的好坏. 定义的核心是根据风扇/压气机叶片几何构型及流动工况确定基准单位向量 $\mathbf{e}$. 确定基准向量后, 将流动参数, 主要是马赫数, 按照基准向量的方向分解, 从而推导定义有效滞止压力及其相关参数.

叶片前流场基准方向与对应的叶片前缘点基准方向一致, 叶片内各点的基准方向为对应处中弧线上的切线方向, 叶片后流场基准方向与叶片后缘点的基准方向一致. 下面是求解叶片尾缘处基准方向 $\mathbf{e}$ 的过程, 其它点基准方向求法与此类似.

建立如图 3 所示的三维直角坐标系 (x, y, z) , 其中 x 轴与转子转轴重合.

确定基准向量的原则是让流体按照叶轮机气动设计的理想方向流动, 因此, 根据叶片中弧线在后缘点的切线方向确定基准单位向量 $\mathbf{e}$. 该向量在流场中为分布量 $\mathbf{e}_{j,k}$.

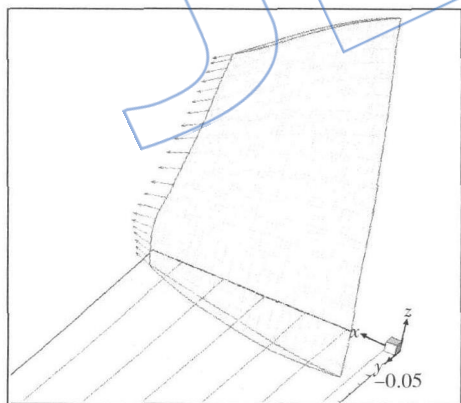


图 3 叶片尾缘型线 T 上点 P_k 处的基准方向向量

Fig. 3 Base direction of the trailing edge point

对给定叶型, 记尾缘型线为 T , 中弧线为 C .

对于任意某中弧线 $C_k(x, y, z)$, 在三维欧氏空间中为二阶连续可微的 C^2 类曲线, 与叶片尾缘型线 T 的交点为 P_k , 在点 P_k 处有一阶向量导数 $\mathbf{e}_{0,k}(e_x, e_y, e_z)$, 即为该点的基准向量.

其中

$$\mathbf{e}_x = \frac{\partial C_k}{\partial x}, \mathbf{e}_y = \frac{\partial C_k}{\partial y}, \mathbf{e}_z = \frac{\partial C_k}{\partial z} \quad (1)$$

在工程中, 由于中弧线方程 C 通常未知, 但其离散点坐标已知, 因此可以表示为

$$\mathbf{e}_x = \delta x_{P_k}, \mathbf{e}_y = \delta y_{P_k}, \mathbf{e}_z = \delta z_{P_k} \quad (2)$$

以中弧线 C_k 为母线绕 x 轴旋转生成 C_k , P_k 的对应点为 P'_k , 向量 $\mathbf{e}$ 在周向任意位置为 $\mathbf{e}_{j,k}$. $\mathbf{e}_{j,k}$ 由 $\mathbf{e}_{0,k}(e_x, e_y, e_z)$ 绕 x 轴旋转得到.

记 P'_k 与 P_k 所构造的圆心角为 θ , 则由坐标旋转变换可以得到 $\mathbf{e}_{j,k}(e_x, e_y, e_z)$.

其中

$$\begin{aligned} e'_x &= e_x, e'_y = e_y \cos \theta - e_z \sin \theta, \\ e'_z &= e_y \sin \theta + e_z \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

得到基准向量后, 则有效滞止压力可以定义如下:

低速不可压缩流动

$$p^*_{ef} = p + \frac{1}{2} \cdot \text{sign}(V_{ef}) \cdot \rho V_{ef}^2 \quad (4)$$

高速可压缩流动

$$p^*_{ef} = p \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot \text{sign}(V_{ef}) \cdot Ma_{ef}^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (5)$$

其中

$$\text{sign}(V_{ef}) = \begin{cases} +1, & \text{if: } \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} > 0 \\ -1, & \text{if: } \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} < 0 \end{cases}$$

$$Ma_{ef} = \frac{V_{ef}}{c}$$

$$V_{ef} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}$$

其中 Ma_{ef} , V_{ef} 分别称为直角坐标系内的基准马赫数、基准速度. 在二维空间中推导基准方向的原则与三维一致.

3 有效滞止压力应用的初步探讨

3.1 传统总压与有效滞止压力分布型的对比

图 4 是在图 1 和图 2 基础上处理出来的有效滞止压力和传统滞止压力的对比图. 可以看到, 有效滞止压力的总压性能比较准确地反映出倒流区的存在, 从其分布上能较合理地判断流场性能的好坏. 因此, 有效滞止压力对于分析非定常分离流具有一定的优势.

3.2 有效滞止压力应用于转子流场分析

对 Rotor 67 进行了三维非定常粘性数值模拟, 采用有效滞止压力对不同工况下的转子流场进行了分析.

从有效滞止压力的定义式可知, 有效总压值始终要比传统总压值小, 在流动方向偏离基准方向较大且流速较高的区域, 两类总压将表现出较

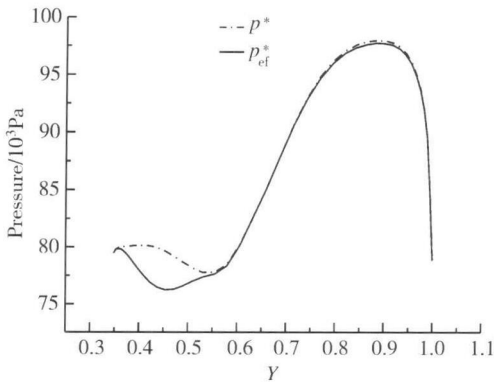
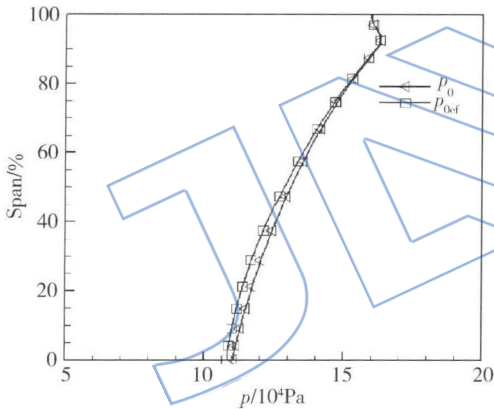


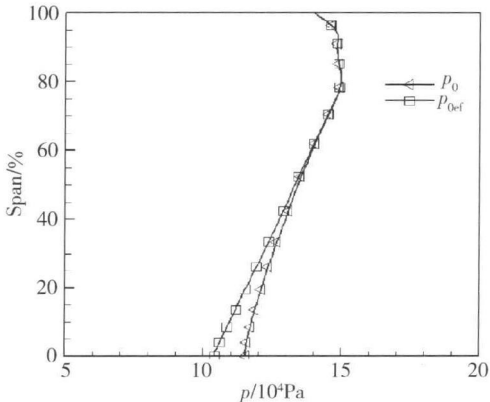
图 4 传统与有效滞止压力分布型对比

Fig. 4 Contrast of conventional and available stagnation pressure pitchwise profile

明显的差距. 图 5 是 Rotor 67 在近失速工况时叶片槽道中部沿展向两类总压的分布对比, 可以看出, 60% 叶高以上两者近乎相等, 表明流向与基准方向偏离很小. 靠近轮毂面时, 两者差距明显加大, 这说明在轮毂附近流向与叶片叶型中弧线方向的差距较大. 该转子的实验测量结果也表明其根部的分离比较明显, 恰好印证了这一点.



(a) 距前缘 7% 弦长

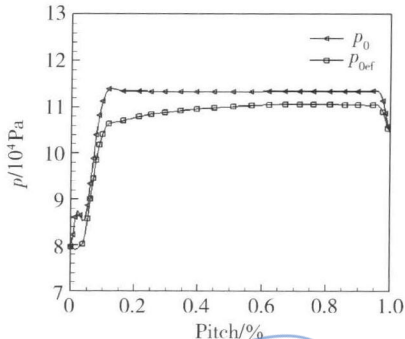


(b) 距前缘 85% 弦长

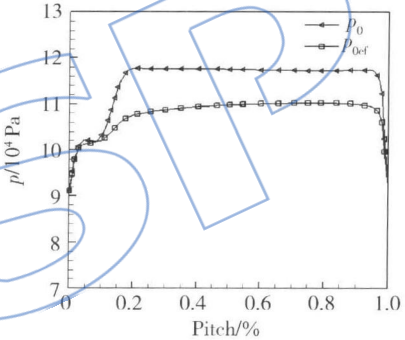
图 5 槽道中部传统滞止总压与有效滞止总压的展向分布

Fig. 5 Contrast of spanwise profile of conventional and available stagnation pressure at mid pitch

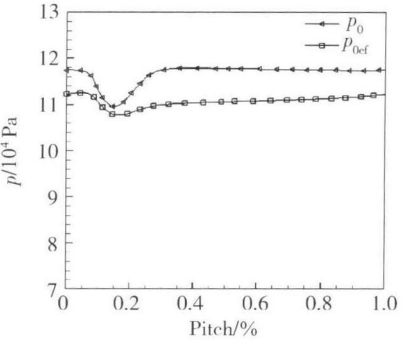
图 6 为 10% 叶高不同轴向位置处有效滞止压力与传统滞止压力沿栅向(叶背到叶盆)的分布. 由图可见, 在前缘附近, 两者差距较小, 在后缘附近由于出现了分离, 差距变大. 这可以认为是落后角增大而导致两者的差距变大, 反过来也可以认为, 二者差异大小反映了脱轨角或者落后角的大小.



(a) 距前缘 10% 弦长



(b) 尾缘



(c) 尾缘后 0.25 倍弦长

图 6 10% 叶高有效滞止压力与传统滞止压力的栅向分布

Fig. 6 Contrast of pitchwise profile of conventional and available stagnation pressure at 10% span

图 7 所示为 10% 叶高尾缘吸力面附近的总静压分布, 在分离区内就出现了有效总压比静压小的情况. 产生这种现象从本质来说是因为回流的出现, 这也是提出“有效滞止压力”的初衷之一. 按传统总压的定义, 其在数值上是不会小于静压的. 然而出现回流时, 传统总压的测量非常困难,

虽然总压仍然代表流体微团的机械能, 但与顺着主流的总压大小相同的流体微团的机械能相比, 回流流体总压无疑存在某种程度的“贬值”, 因为回流的流体微团最终将与主流区掺混造成机械能的耗散. 有效总压代表的是最有利于下游利用的机械能, 在叶轮机中则表现为叶片通道内气流落后角接近零时, 叶排的损失最小, 效率最高. 所以有效滞止压力的引入不仅可以使测量更为方便, 而且对叶轮机来说比传统总压能更敏感地衡量流动的品质.

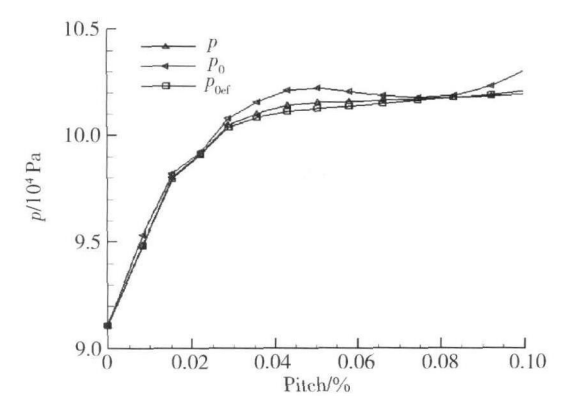


图 7 10% 叶高尾缘吸力面附近传统总压、有效总压及静压的栅向分布

Fig. 7 Pitchwise profile of conventional and available stagnation pressure and static pressure span near suction surface

3.3 有效滞止压力导出参数-压差系数的定义与应用

由上可以看出, 有效总压考虑了流向对具体叶轮机机械流场气动性能的影响. 但从图 6 所示, 在靠近吸力面处虽然出现了分离, 然而由于吸力面流速小, 两类总压的差异却不如主流区大, 可见仅仅根据有效总压与传统总压的绝对差距大小无法判断流向是否与基准方向有较大的偏离. 为了单独提取流向的信息, 利用有效滞止压力, 提出了压差系数的概念, 用 C_p 表示, 其表达式为 $C_p = (p^* - p)/(p^* - p)$. 当压差系数为 1 时, 流动方向与基准方向是一致的; 流向与基准方向垂直时, 其值为 0; 压差系数为 -1 时, 流向与基准方向恰好相反. 由图 8 可以看出, 根部各轴向位置气流流向与基准方向的偏离都比较大, 在距前缘弦长的吸力面附近还出现了压差系数小于零的情况, 表明这些区域存在回流现象. 应用表明, 压差系数能很好地反映流场内的流向分布, 与气流攻角或落后角类似, 但反映的信息更全面.

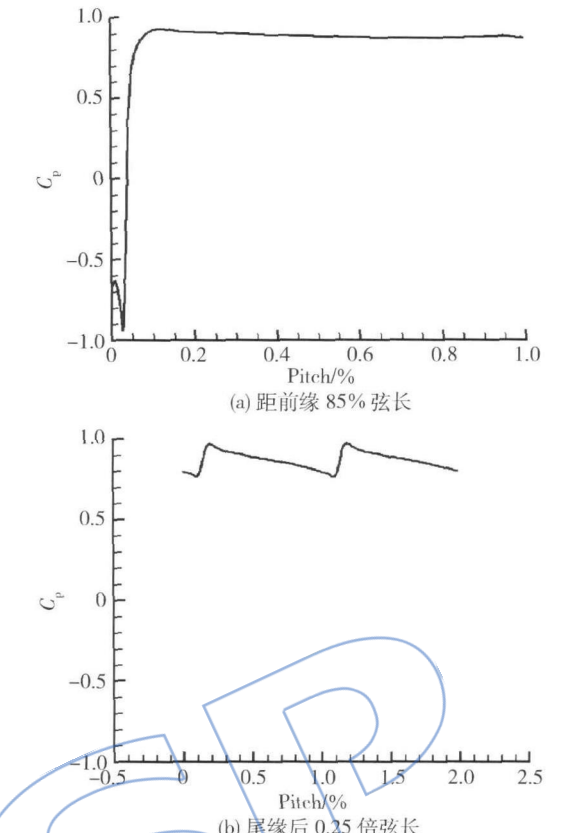


图 8 10% 叶高压差系数的栅向分布

Fig. 8 Pitchwise profile of pressure difference coefficient

3.4 不同工况有效滞止压力导出参数变化规律

上述分析体现了有效滞止压力描述流场细节特别是分离流的能力. 引入有效滞止参数后会对总体性能的评价带来怎样的变化呢, 下面通过转子压比及等熵效率来进一步讨论.

表 1 为不同反压下有效滞止参数与传统滞止参数的对比. 110.0 kPa 为近峰值效率点反压, 而 116.4 kPa 为近失速反压. 可以看到, 越靠近失速工况, 有效效率与传统效率的差距越大, 两种总压比的对比也有类似的变化规律. 这说明有效滞止参数体系得到的性能描述参数对流场的变化更敏感一些. 联系到叶轮机失速时传统效率、压比的急剧变化, 采用有效滞止参数应该能更合理地描述分离现象显著的流动.

表 1 不同工况有效滞止参数与传统滞止参数对比

Table 1 Contrast of available and conventional parameters at different operation points

反压/ kPa	传统 总压比	有效 总压比	差值/ %	传统 效率	有效 效率	差值/ %
110.0	1.26	1.25	0.27	0.884 5	0.873 7	1.22
112.4	1.27	1.27	0.39	0.877 1	0.862 4	1.67
116.4	1.30	1.29	0.87	0.848 4	0.801 1	3.44

4 小 结

传统定义的总压在叶轮机内非定常流动研究中具有一定的局限性. 本文通过考虑叶轮机内流动的设计方向, 提出了有效滞止压力的概念, 并从工程层面对其进行了定义. 通过初步的应用研究, 发现:

1) 在流场流速较高并且流向与基准方向有较大偏离的区域, 有效总压与传统总压差值比较大; 在低速分离区、尾迹区, 或是在流速高但流向与基准方向较一致的主流区, 两者的差距较小; 在回流区则会出现有效滞止压力比静压小的现象.

2) 通过有效滞止压力构造的一个参数——压差系数, 可以反映气流方向与基准方向间偏离的大小, 当其值为负时即预示着有回流现象的出现.

3) 有效滞止压力系统得到的流场参数对流动非定常的描述更敏感一些, 能够更深刻地反映非定常流动的本质. 在流动的非定常性越来越明显的研究领域, 考虑流动方向的影响, 引入有效滞止压力定义具有可行性.

有效滞止压力是针对大尺度分离流等现象提出的新的参数, 借助于新定义的参数, 希望有助于改进对于流体力学理论的理解, 加强非定常流场实验、数值模拟的数据分析及处理的有效性, 有助

于理解叶轮机非定常流动损失形成机理, 并找到新的开发非定常流动潜能的方法. 从理论层次上对有效滞止压力定义的阐述, 以及对其应用进行更深入的研究, 也将是下一步研究的内容.

参考文献:

- [1] 陈武, 侯安平, 郑新前, 等. 在大分离区内使用三孔探针测试的探索[J]. 流体力学实验与测量, 2003. (3): 84-87.
CHEN Wu, HOU Anping, ZHENG Xinqian, et al. Research of test by three hole pressure probe in large separated zone[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003(3): 84-87. (in Chinese)
- [2] 侯安平. 轴流压气机非定常两代流型理论的机理探索[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
HOU Anping. Exploration on two generations of unsteady flow pattern in axial compressor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [3] Schulte V, Hodson H P. Unsteady wake induced boundary layer transition in high lift LP turbines[R]. ASME 96-GT-486, 1996.
- [4] 陈少龙. 轴流压气机气动热力学滞止参数一个疑题的初步探索[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
CHEN Shaolong. Elementary exploration of a paradox on aerothermodynamic stagnation parameter in axial compressor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)