第 17 卷 第 5 期 航空动力学报 Vol. 17 No. 5
2002 年 12 月 Journal of Aerospace Power Dec 2002

文章编号: 1000-8055(2002)05-0561-06

对环形叶栅内非定常流动特征参数的实验研究

闻 学, 李志平, 周 海, 葛敬东
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 通过环形叶栅实验, 测出叶排后流场速度分布, 捕捉叶排后流动分离的特征频率, 观测气流攻角和流量的影响, 分析出环形叶栅后的旋涡脱落频率及与其他气动参数之间的相互关系。在大的负攻角下, 分离区范围广阔, 旋涡强度也较大, 分离区衰减慢, 但它是收敛型的分离旋涡; 在大的正攻角下也存在类似的现象, 但其旋涡强度更大, 是扩散型的, 这意味着大的正攻角造成的分离更为危险, 而叶轮机械中的不稳定流动现象(旋转失速、喘振等)又往往是由此引起; 而当攻角接近设计攻角时, 分离明显减小, 且很快被主流区掺混而逐渐消失。在环形叶栅试验中, 发现在不同测量状态下(不同攻角和流量)都存在值为 723 Hz 左右的特征频率, 然而幅值(气流分离强度)却有相应变化。

关 键 词: 环形叶栅; 非定常流动; 速度分布; 实验
中图分类号: V 211.1+5 **文献标识码**: A

Research of the Unsteady-Fluid Characteristic Parameter in an Annular Cascade

WEN Xue, LI Zhi-ping, ZHOU Hai, GE Jing-dong
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In the annular cascade test, we aim to observe the fluid field behind the annulus blades, focusing on the velocity field and the vortex shedding frequency in particular, and to investigate the effect of fluid incidence and flux on them. In comparison with the cascade with high positive incidene, the high negative incidence cascade has wider separating section, stronger vortex, and slower wake delay, but weaker vortex intensity. As the incidence approaches the designed value, it can be seen obviously that the separation diminishes and dissipates as the vortices quickly blend with the main flow. Additionally, there is a characteristic frequency valued at 723 Hz in the diverse cases.

Key words: annular cascade; non-steady flow; velocity distribution; experiment

1 引 言

对于叶轮机械, 流动本质在于流动固有非定常性[1]。在外流研究中, 已经对非定常流动效应加以控制和利用, 从而达到增加升力, 减小阻力并提高气动效益的目的[2]; 但在叶轮机内流动研究方面, 由于其复杂性和试验测试的困难还没有较大的进展。迄今为止, 对于叶轮机内流的非定常性研究较多且有一定成效的主要有叶排间距和时序效应两方面[3]。另外, 对于圆柱及压气机叶型在平面叶栅风洞中的漩涡脱落也做了试验研究, 圆柱尾流中有类似外流的卡门涡街脱落现象, 压气机叶

收稿日期: 2001-10-24; **修订日期**: 2002-01-16
作者简介: 闻学(1976-), 男, 辽宁丹东人, 北京航空航天大学动力系硕士生

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

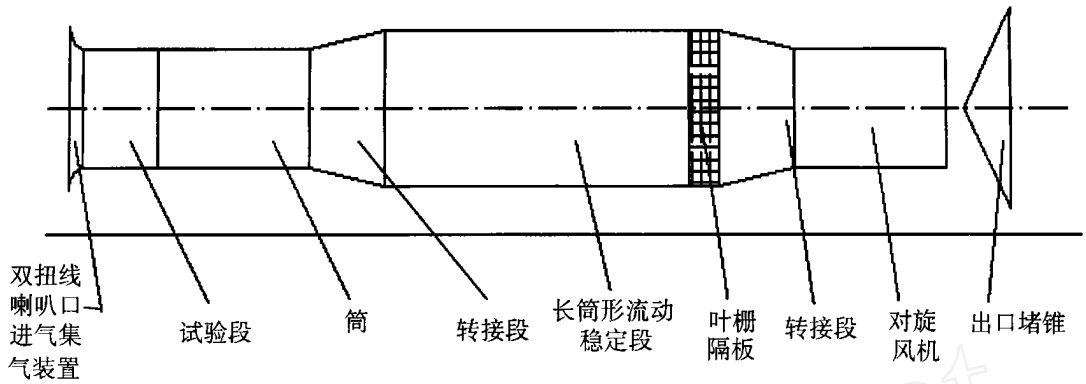


图 1 环形叶栅实验台

Fig. 1 Annular cascade wind-tunnel

型后存在明显的旋涡脱落特征频率[4]。而真实压气机为多级叶排交错排列、高速大负荷, 其非定常性影响更突出, 诱导因素也更复杂[5]。还需要在环形叶栅台上进行试验, 验证叶型后旋涡脱落特征频率的存在性和规律性, 以对叶排后分离区做更深入的研究。为了捕捉叶栅后气流分离的特征频率(主要是涡脱频率), 考察其与各气动参数(攻角和流量)之间的关系, 设计加工了一套环形叶栅, 在此实验台上进行详细测量, 得到大量试验数据, 并进行了分析整理。

2 实验设备、测量手段及试验方案

2.1 环形叶栅实验台

本实验台的整体结构如图 1 所示, 叶片参数见表 1。

表 1 叶片参数

	导向叶片	扩压叶片
叶片数目	19	19
稠度	1.0	0.817
弦长/mm	65.11	56
叶型进口角/(°)	90	30.18
叶型出口角/(°)	30.18	52.02
叶型弯角/(°)	59.82	21.84

导流叶片和扩压叶片均为平板有机玻璃弯曲而成, 再进行前缘打圆, 后缘打薄。气源由后部的对旋风机提供, 流量 3.3 m^3/s, 转速 2950 r/min, 功率 5.5 kW。试验段由导向叶栅环和扩压叶栅环组成, 见图 2 所示。

2.2 测试仪器

(1) 稳态测量: 测量进口和扩压叶片后静压, 采用测试仪器有: 大气气压计, 压力传感器, PCL-818HD 采集板, PCLD-789/889 扩展板, PⅡ微机, 数据采集和分析软件。

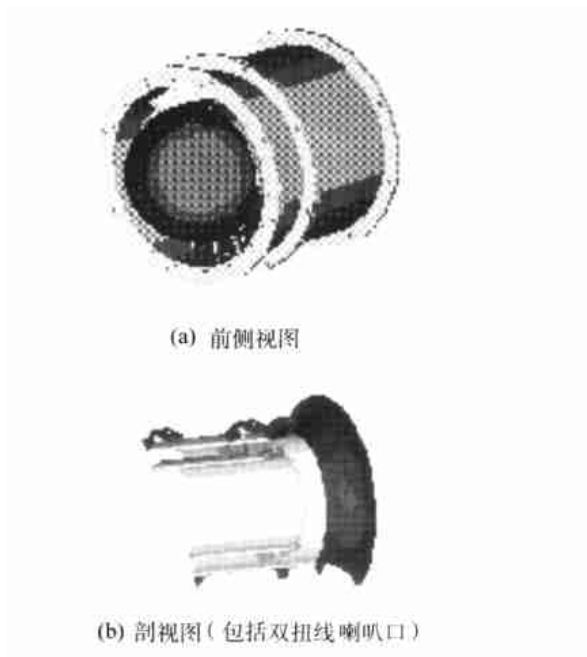


图 2 试验段组成

Fig. 2 Elements of wind-tunnel

(2) 动态测量: 测量环形叶栅后的流动速度, 主要是速度分布, 捕捉特征频率。考察攻角和流量对分离区的影响。采用测试仪器为 IFA 300 热线风速仪及 IFA 300 软件。

(3) 流量测量: 因为 $p + (1/2)\rho V^2 = p^*$, 在进口处以大气压近似代替总压, 再测得进口静压, 可由 $G = VA = V\pi(R_1^2 - R_2^2)$ 算出体积流量。R_1 为进口处外机匣半径, R_2 为进口处内机匣半径。

2.3 测试方案

流量状态: 流量从正常状态逐渐减小到失速

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

状态, 5 个流量工况。

几何位置:

轴向: 距离扩压叶片尾缘 20%, 30%, 50% 弦长处。

周向: 7 点, 中点正对叶片尾缘(指几何流动方向, 不考虑落后角) 方向。

径向: 叶中(50% 叶高) 和叶根(15% 叶高)。

测量点的分布如图 3。

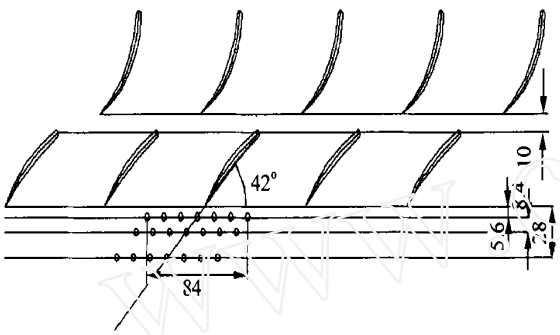


图 3　测点分布图

Fig. 3　Distribution of test point

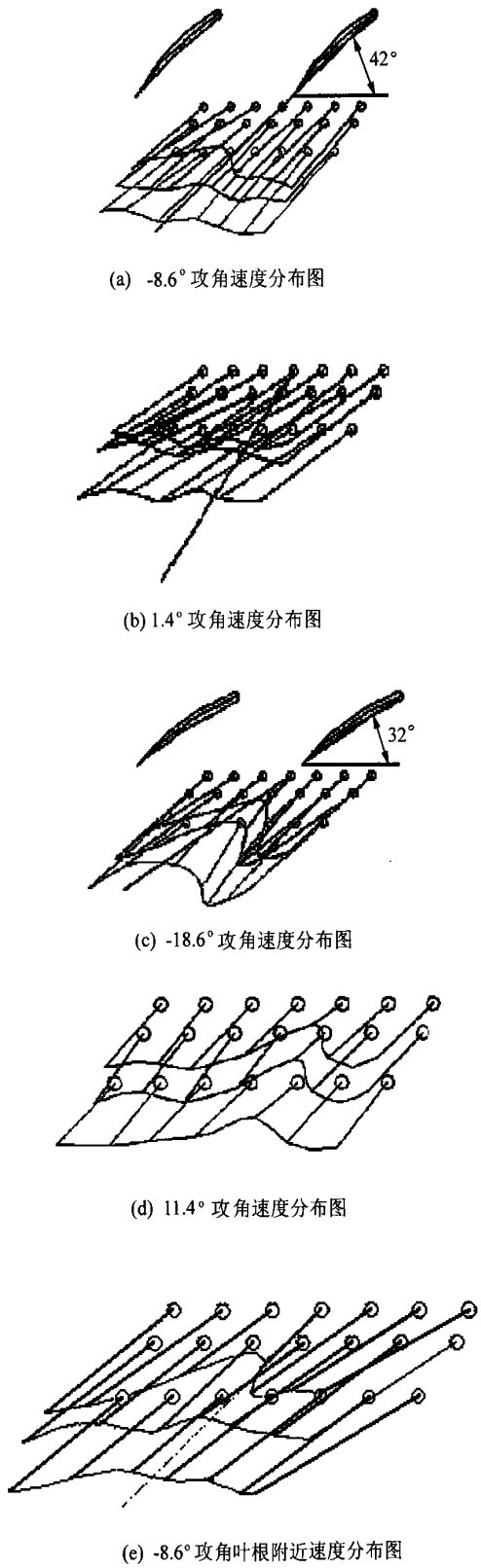
将各点编号, 由上而下, 依次为 1、2、3 排, 由右至左, 编号依次为 1 至 7。测量方案和步骤如下: (1) 实际攻角- 8.6°, 叶中位置, 正常流量, 测量 21 点数据; (2) 实际攻角+ 1.4°, 叶中位置, 正常流量, 测量 21 点数据; (3) 实际攻角- 18.6°, 叶中位置, 正常流量, 测量 21 点数据; (4) 实际攻角+ 11.4°, 叶中位置, 正常流量, 测量 21 点数据; (5) 实际攻角- 8.6°, 叶根位置(距轮毂约 15% 叶高), 正常流量, 测量 21 点数据; (6) 实际攻角+ 1.4°, 变流量直到失速, 测 1- 2, 1- 4 点; (7) 实际攻角- 8.6°, 变流量直到失速, 测 1- 2, 1- 4 点。

3　测量结果及分析

3.1　叶栅后的速度场分布

实验的采样频率为 20 kHz, 持续时间 3 s, 即对每个测量点, 在 60000 个时间步长上进行。

- 8.6 攻角和 1.4 攻角: 从图 4(a) 中可看出, 分离区基本处在叶盆方向, 与实际情况一致。由于采样点少, 做出的拟合速度图不一定代表实际情况。但仍然可以观察到分离区的存在, 也可以大致判定分离区的位置。还可以看到, 分离区在离叶片尾缘较近的地方, 其速度亏损大宽度小(分离强度较大); 离尾缘越远, 由于参混作用速度亏损变小宽度变大(分离强度减小)。在 0.5 倍弦长处, 基本上掺混成均匀速度场。这些特点在以后各个速度图中也将得到体现。将不再赘述。



(a) -8.6° 攻角速度分布图

(b) 1.4° 攻角速度分布图

(c) -18.6° 攻角速度分布图

(d) 11.4° 攻角速度分布图

(e) -8.6° 攻角叶根附近速度分布图

图 4　攻角速度分布图

Fig. 4　Velocity distribution at different incidence

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 静压损失情况

1- 1	1- 2	1- 3	1- 4	1- 5	1- 6	1- 7
- 122.4	- 126.9	- 114.5	- 130.0	- 125.2	- 122.5	- 114.7
2- 1	2- 2	2- 3	2- 4	2- 5	2- 6	2- 7
- 117.4	- 122.1	- 115.5	- 123.4	- 127.3	- 119.5	- 123.4
3- 1	3- 2	3- 3	3- 4	3- 5	3- 6	3- 7
- 114.0	- 108.5	- 115.5	- 116.5	- 111.6	- 125.4	- 110.4

从图 4(b) 中可看出, 没有明显的分离区, 比较接近叶型的设计工况。此外, 特征频率也不明显。在主流区, 各点速度比较接近, 但该速度分布图并不如此, 原因可能是: 每个点的速度测量并不是严格在同一工况下进行的, 进口气流的流量不会完全相同; 温度和大气压也有少量变动。另一重要因素是探针安装角度的问题。

- 18.6 攻角和 11.4 攻角: 从图 4(c) 中可看出, 分离发生在叶盆部分。与上面情况不同, 分离区耗散不明显, 即使在距叶片尾缘 0.5 倍弦长的地方, 还存在明显的速度亏损区; 分离区也远远大于前两种工况。

在图 4(d) 中, 叶背出现了明显分离, 与实际情况吻合; 而且速度亏损大, 分离区耗散慢。在 11.4 攻角状态下, 各次测量时静压损失情况如表 2。

取平均值 119.36, 由于进出口面积相等, 实验过程中气流速度较低, 可近似为不可压流动, 则可认为进口速度与出口速度相等。可以算出叶片排后的总压, 从而得出压力损失系数:

$$p_1 - p_2 = 119.36 \text{ Pa}$$

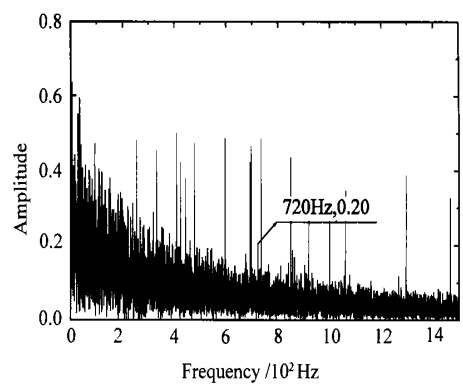
$$\bar{\omega} = \frac{p_1^* - p_2^*}{p_1^* - p_1} = \frac{p_1 - p_2}{0.5 \times 1.29 \times \left(\frac{2.37}{0.06932}\right)^2} = 0.158$$

- 8.6 攻角时叶根附近的流场: 叶根附近的速度分布与叶中的相似(图 4(e)), 但由于靠近端壁区, 影响流动的因素复杂; 受热线风速仪探头的制约, 不能离端壁区太近(本实验热丝与机匣壁相距 15% 叶高), 因而测得的速度不是严格的端壁区速度。但可以这样认为: 沿径向, 速度分布是较一致的, 径向速度分量较小。当然, 为了获得端区流动的真实数据, 还需对实验台以及测试手段进行改进。

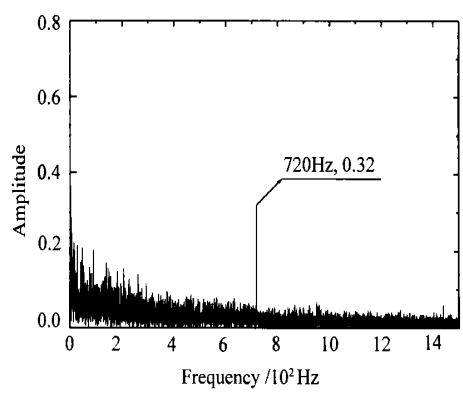
从以上可以得出: 攻角从负变化到正, 分离区也从叶盆移动到叶背方向; 攻角越接近设计状态, 分离区越小, 衰减快; 大的正/负攻角将引起大的分离, 衰减慢; 叶背分离强度大, 而且不容易耗散; 叶盆分离强度相对小, 分离区宽度大, 阻塞面积大。

3.2 叶栅后非定常流动的特征频率

分别应用 Origin6.1 和 IFV 300 软件分析得到不同测量工况下各测点的特征频率和脉动幅值。



(a) 1—4 点频谱图



(b) 1— 3 点频谱图

图 5 1- 4, 1- 3 点频谱图

Fig. 5 Frequency Fig. of point 1- 4 and point 1- 3

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　- 8.6 攻角叶中定流量(上为特征频率, 下为脉动幅值)

	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	719.91 Hz	719.91 Hz	719.91 Hz	——	720.52 Hz	——	719.60 Hz
(幅值)	0.0617	0.0942	0.3198	——	0.1586	——	0.0861
第二排	719.60 Hz	719.51 Hz	718.99 Hz	——	718.38 Hz	——	——
(幅值)	0.0743	0.0695	0.2318	——	0.1217	——	——
第三排	719.91 Hz	720.21 Hz	720.21 Hz	——	718.38 Hz	718.90 Hz	——
(幅值)	0.1100	0.1137	0.2632	——	0.2160	0.1140	——

表 4　- 8.6°,1.4°,- 18.6°,11.4°,- 8.6 攻角—叶根—定流量脉动幅值

- 8.6 攻角—叶中—定流量—脉动幅值							
脉动幅值	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	0.19	0.25	2.5	——	0.8	——	——
第二排	0.1	0.2	2	——	0.3	——	——
第三排	0.65	0.75	2.2	——	1.0	0.3	——
1.4 攻角—叶中—定流量—脉动幅值							
脉动幅值	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	0.25	0.09	0.02	0.05	0.025	0.3	0.25
第二排	0.05	——	——	0.03	——	——	0.25
第三排	——	——	0.4	——	——	——	0.3
- 18.6 攻角—叶中—定流量—脉动幅值							
脉动幅值	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	3.48	7.29	35	——	22	4.4	3.44
第二排	9.3	5	——	——	3	12.1	3.94
第三排	3.15	9.4	8.4	11.96	3	2	5
11.4 攻角—叶中—定流量—脉动幅值							
脉动幅值	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	0.7	0.1	——	11	1.66	0.7	0.28
第二排	——	——	——	3	5	——	7.5
第三排	0.1	0.2	——	3.2	0.5	2	0.8
- 8.6 攻角—叶根—定流量—脉动幅值							
脉动幅值	第 1 点	第 2 点	第 3 点	第 4 点	第 5 点	第 6 点	第 7 点
第一排	0.225	1.2	——	4.0	——	——	——
第二排	3.2	0.1	0.2	0.2	——	——	——
第三排	1.0	3.2	——	——	——	——	——

3.2.1　采用 Origin6.1 软件分析一种工况下的数据

由表 3 中数据可看出, 存在值为 720 Hz 左右的特征频率, 其脉动幅值在栅距方向和轴向呈一定规律变换。在 1- 4 点(第一排第 4 点)的频谱图中(图 5(a)), 脉动幅值普遍较大, 但没有明显的特征频率, 应该处于分离区的中心, 从结构位置也

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 第一排第 2 和 4 点测量 5 个流量下的脉动幅值

脉动幅值	流量 G1	流量 G2	流量 G3	流量 G4	流量 G5
1.4 攻角第 2 点	——	0.1	——	——	——
1.4 攻角第 4 点	0.04	——	——	——	0.02
- 8.6 攻角第 2 点	0.3	0.49	0.27	0.11	0.1
- 8.6 攻角第 4 点	1.5	1.0	2.0	3.2	0.3

比较符合: 在 1- 3(图 5(b)) 和 1- 5 处, 特征频率比较明显, 处在分离区边缘附近; 在第二、三排, 分离区脉动幅值减小, 宽度变大, 这也符合前面的速度分布图。

3.2.2 采用 IFV 300 软件分析

采用 IFV 300 软件的傅立叶变换分析工具得到速度脉动频谱图, 发现在不同测量工况(攻角和流量)、不同的测点处, 基本都存在 723 Hz 左右特征频率, 且有明显的脉动幅值见表 4、表 5。

得出结果如下:

(1) 在不同工况(攻角和流量) 下, 以及不同测量位置处(叶中和叶根), 在叶栅后的分离区基本都存在特征频率(值为 723 Hz 左右), 然而脉动幅值却有差别; 从物理意义上分析其根源, 在低雷诺数下, 对于较大进气攻角, 在叶片表面靠近尾缘将卷起大尺度分离涡, 并向下游脱落, 类似于卡门涡街脱落现象; 对于外流中的钝体绕流, 在一定雷诺数下的斯特劳哈数变化不大, 而 $St = f \cdot D / U$, 在本试验中, 来流速度 U 相差不大, 以叶片轴向弦长为特征尺度 D, 这样特征频率也就基本不变, 但其幅值会有很大差别。

(2) 对比叶根和叶中测量的结果, 在叶根时的分离气流脉动更剧烈, 且各测点的脉动幅值分布情况与叶中不同, 没有明显的规律性; 这时, 除了叶片表面上的脱落涡, 还有内机匣壁面上卷起的分离涡, 以及由于壁面的不光滑引起的干扰等, 在频谱图中特征频率不很明显。

4 结 论

经过试验, 我们发现在不同测量状态下都存在值为 723 Hz 左右的特征频率, 但其脉动幅值却有所差别。另外, 在叶根区域, 特征频率幅值差值相对不明显。

在平面叶栅试验中, 压气机叶型的旋涡脱落有以下特性: (1) 尾迹中的特征频率随马赫数增加而变大; (2) $Ma > 0.6$ 时, 频率不随攻角变化; $Ma < 0.6$ 时, 随攻角增加而变小; (3) 在分离较小的区域, 频谱图中的特征频率较明显, 但幅值相对小; 在分离较大的区域, 频谱图则比较杂乱, 但幅值普遍偏高。

而在本次环形叶栅试验中, 进口马赫数在 0.15 左右, 且变化不大, 特征频率值随攻角基本没有变化, 而对于平面叶栅试验得出的第三点结论则完全符合。由于问题的复杂性和时间的局限, 对 723 Hz 即为环形扩压叶栅后涡脱落频率的问题, 还有待于进一步的实验验证, 但应该认为它是环形叶栅通道内旋涡脱落的特征频率, 这将有助于整个研究工作的进一步开展。

参考文献:

[1] 任汝根, 周盛. 叶轮机械中的非定常流动[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1991, 4(4): 1- 24.

[2] 夏雪湍, 邓学蓥. 工程分离流动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 1991.

[3] Walker G J, Hughes J D, Solomon W J. Periodic Transition on an Axial Compressor Stator-Incidence and Clocking Effects [R]. ASME 98- GT- 363.

[4] 侯安平, 周盛, 闻学. 圆柱及压气机叶型在平面叶栅风洞中旋涡脱落的试验研究[R]. 浙江湖州: 第七届全国空气弹性学术交流会论文, 2001.

[5] 陆亚钧. 叶轮机非定常流动理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 1990.

(责任编辑 杨再荣)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net