

文章编号: 1007-3124(2003)02-0054-05

环形叶栅分离旋涡频谱特性研究

葛敬东, 周海, 陆亚钧

(北京航空航天大学 407 教研室, 北京 100083)

摘要: 施加非定常气流脉动激励将大幅度减少叶栅分离损失。而激励的效果与本身的气流脉动频率以及强度等因素有关。为了考察非定常气流脉动激励对叶栅气流分离的作用, 以及激励作用效果最佳时激励脉动频率与叶栅分离旋涡脱落频率之间的关系, 进行了叶栅分离旋涡脱落频率的测量。实验在环形叶栅实验台上进行, 利用 IFA300 热线风速仪等测试仪器进行实验, 分析了不同实验条件下环形扩压叶栅后流动脉动的分布情况。结果表明, 在不同迎角以及不同测量位置处(叶中和端壁压), 所测环形扩压叶栅后的流动分离均存在某一特征频率。此外对导流叶栅后和环形扩压叶栅后的流动情况的对比说明了在叶轮机非定常流中流动分离频率的锁定(lock on)现象^[1]。

关键词: 环形扩压叶栅; 流动分离; 特征频率; 锁定

* 中图分类号: V211.6 文献标识码: A

Research of the vortex-shedding frequency characteristics in the annular cascade

GE Jing-dong, ZHOU Hai, LU Ya-jun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The pressure loss of shedding flow in impeller will be decreased amazingly by employing unsteady airstream excitation. The excitation effect is related to the frequency and the intensity of the vibrated unsteady airstream. For study of the relationship between the frequency of the vibrated unsteady airstream and the vortex shedding frequency of the cascade, the vortex shedding frequency of the annular cascade should be measured first. Our experiment surveyed the shedding flow of annular cascade by IFA300 hot wire anemoscope and studied the distributing status of flow vibration behind the annular cascade under several different circumstances. It is demonstrated that some specific frequency exists in the shedding flow of the annular cascade. Occurrence of the lock-on in unsteady fluid in the turbine is also surveyed.

Key words: annular cascade; flow separation; characteristic frequency; lock-on

0 引言

目前, 在外流研究中, 已经可以对非定常流动效应加以控制和利用, 从而达到增加升力, 减小气动阻力并提高气动效益的目的^[2]。对外流的实验研究结果表明: 非定常流的尾迹分离是有一定频率的^[3], 对

于非定常脱体涡流型来说, 如果能找到合适的非定常激发的位置和频率, 探索涡层对外层激发的感受性(即最敏感的位置和最有效的激发频率), 从而实现涡层演化过程对于特定的外界非定常激发做出最优的响应, 这样将可以实现对非定常尾迹分离的控制。

为了增加发动机的可用迎角范围, 提高发动机的

* 收稿日期: 2002-09-02

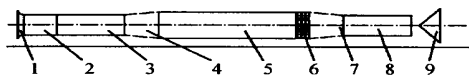
基金项目: 国家自然科学基金项目(50176001)

作者简介: 葛敬东(1979-), 女, 河北省衡水市人, 研究生。研究方向: 叶轮机内的非定常流控制。

效率,受外流场中利用涡动升力来增加机翼升力的原理的启发^[4],在叶轮机械中,如果也可以利用非定常效应来增强流动对分离旋涡的抑制,就可以增强叶轮的作功能力,减少损失^[5]。掌握分离流的运动规律,了解分离流动的频谱特性对叶机械性能的进一步提高,将是至关重要的内容之一。通过实验手段测定了环形扩压叶栅后的分离旋涡频率及其与几何气动参数的关系。

1 实验设备与测量仪器

实验在如图1所示的环形扩压叶栅实验台上进行。



1. 双扭线喇叭进气集气装置 2. 实验段 3. 铝筒
4. 转接段 5. 长筒形流动稳定段 6. 叶栅隔板
7. 转接段 8. 对旋风机 9. 出口堵锥

图1 环形叶栅实验台

Fig.1 Annular cascade test bed

1.1 实验段

实验段及其分解视图分别示于图2、图3。实验段中设计了5片可调角度的扩压叶片,可以实现气流迎角的变化,目前可以满足实验的需要,在四种迎角状态进行变化。环形扩压叶栅与导流叶栅间配备3组不同轴向长度的调整环,可以用以改变两个叶片排之间的轴向距离;导流叶栅的叶片可以沿周向整体旋转,从而可以调整相邻叶片排间的周向位置。

叶片参数如表1所示。

表1 叶栅参数

Table 1 Cascade parameter

| | 导流叶片 | 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° | 50.02° |
| 叶型弯角 | 59.82° | 18.4° |

1.2 实验动力设备

实验采用对旋风机作为动力源,由其提供气源。

其具体参数如下:设计流量:11817m³/h;设计总压升: $P = 1323\text{Pa}$;叶轮外径: $Rt = 225\text{mm}$;轮毂比: $v = 0.4889$;前后级电机转速 $n_1, n_2 = 2950\text{rpm}$;前级电机

功率:2.2kW;后级电机功率:3.0kW;前级转子叶片数:7;后级转子叶片数:8;前后级加工比:0.733 1;前后级电机支杆数:3。

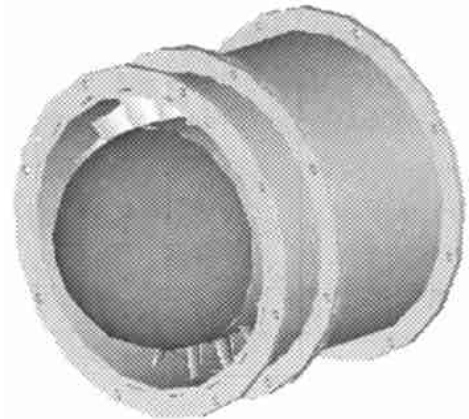


图2 环形叶栅实验台测试段整体视图

Fig.2 Whole view of annular cascade



图3 环形叶栅实验台测试段分解视图

Fig.3 Analytical view of annular cascade

1.3 测量仪器

实验的稳态测量主要采用大气压力水排、压力传感器、PCL-818HD 采集板以及配套的 PCLD-789/889 扩展采集板、P 微机以及相应的数据采集和分析软件等测量系统;动态测量则主要采用 YYF-200B 倾斜式微压计和 IFA300 热线/热膜风速仪及相应的 IFA300 软件^[6]。

2 实验内容及结果

2.1 实验方案

实验主要是通过实验观察环形叶栅后的流动情况,捕捉导流叶栅和扩压叶栅尾迹分离频率并考察气流迎角、流动速度等参数对尾迹分离的影响。实验控制不同的迎角,在设计流量下对不同几何位置的点进行测量,具体情况如下。

(1) 迎角状态:四个迎角,分别是 -18.59° 、 -8.59° 、 $+1.41^\circ$ 和 $+11.41^\circ$ 。

(2) 测量截面位置:轴向有三个位置,分别为距扩压叶片尾缘 20%、30%、50%弦长处。每个位置沿周向(栅距方向)有 7 个点,中点正对叶片尾流方向(仅指几何流方向,不考虑叶栅滞后角和分离)。沿径向分别在叶中和叶根(距轮毂约 10mm)进行测量。测量点的分布如图 4 所示。

为方便起见,将各点编号,由上而下,依次为 1, 2, 3 排,各排由右至左,编号依次为 1~7。(例如 1, 2 点表示为第一排右边第二点;1~7 点表示为第一排右边第七点;3~6 点表示为第三排右边第六点)

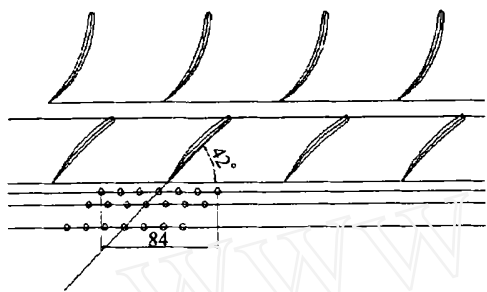


图 4 测量点分布图

Fig. 4 Distributing of probe

具体测量方案和步骤如下:

(1) 将扩压叶栅排拆除,探针头位于叶中位置,测量第一排测点的数据。

(2) 迎角为 $+1.41^\circ$,探针头位于叶中位置,测量 21 个测点的数据。

(3) 迎角 -8.59° ,探针头位于叶中位置,测量 21 个测点的数据。

(4) 迎角 -8.59° ,探针头位于叶根位置(距轮毂约 10mm),测量 21 个测点的数据。

(5) 迎角 -18.59° ,探针头位于叶中位置,测量 21 个测点的数据。

(6) 迎角 $+11.41^\circ$,探针头位于叶中位置,测量 21 个测点的数据。

2.2 实验结果的分析处理

观察 IFA300 软件所采集到的实验数据和速度脉动的功率频谱图,发现在不同的流动状态(流量、迎角)、不同的测点处,频率在 723Hz 左右时,有一个很明显的脉动峰值。根据测得的数据,分析不同流动状态下具有 723Hz 频率特征的脉动在流场中的分布情况,如果满足流动特性,则可以证明 723Hz 即为所测环形叶栅后的流动分离频率。

2.2.1 叶中情况的脉动强度分析

根据所有迎角下叶中的相对脉动幅值可得到如图 5~9 所示的脉动峰值的空间分布图。

由图 5~9 的不同测量位置的脉动情况分析可以看出:

(1) -8.59° 迎角时,在第三点和第五点的脉动都比较大,第四点的脉动则很小。结合测点与叶排的相对位置,可知在第三点处流动受到叶片尾缘处的分离的影响;而第五点,则处于叶盆分离的边界;比较第三点和第五点的相对脉动幅值,可知叶片尾缘处的分离的影响引起的流动的脉动幅度大于叶盆分离引起的流动脉动。第四点位于叶片尾缘处,正处于叶盆分离和尾缘分离的反向旋涡分界处,由于这两种反向旋涡的共同作用,使得此处的脉动较小。第二点、第一点以及第六点、第七点的相对脉动幅值变得很小,由测点与叶排的相对位置可知,这四点分别处于叶片尾缘分离和叶盆分离的分离区域之外,故受到分离的影响较小,脉动较弱。

(2) -18.95° 迎角时,第一排流动情况与 -8.59° 时相类似,由测点与叶排的相对位置分析也可得知两种状态的流动情况应该是基本相似的,故在此不再重

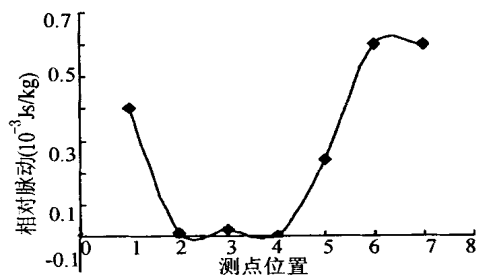


图 5 导流叶栅后相对脉动情况

Fig. 5 Relative fluctuation behind the leading cascade

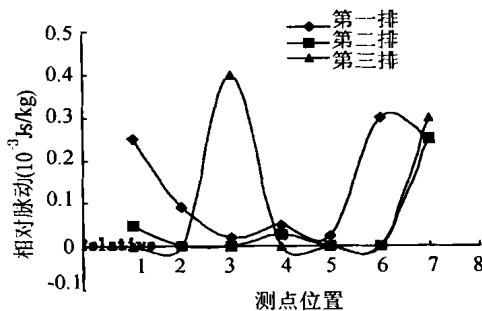


图 6 1.41° 迎角叶中截面相对脉动情况

Fig. 6 Relative fluctuation on the section in the middle of the annular cascade chord with 1.41° incidence angle

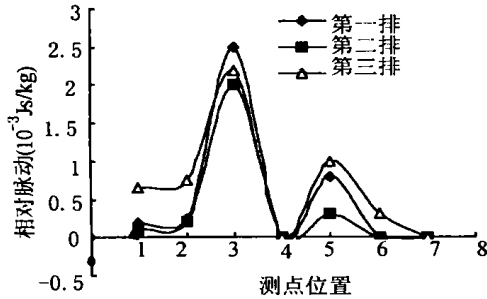


图 7 - 8.59 迎角叶中截面相对脉动情况

Fig. 7 Relative fluctuation on the section in the middle of the annular cascade chord with - 8.59° incidence angle

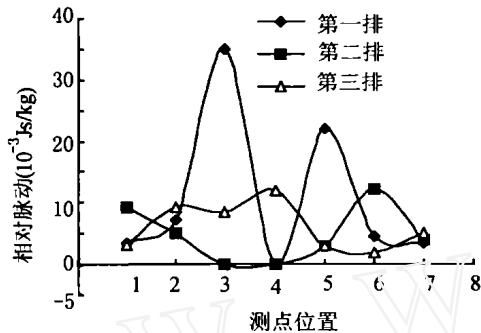


图 8 - 18.59 迎角叶中截面相对脉动情况

Fig. 8 Relative fluctuation on the section in the middle of the annular cascade chord with - 18.59° incidence angle

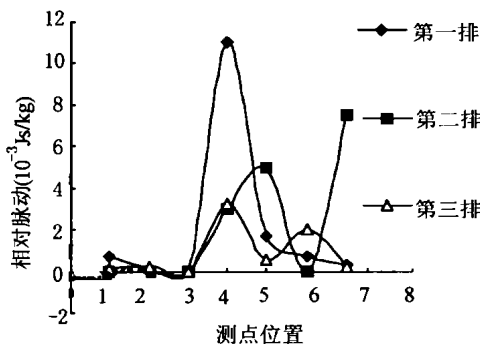


图 9 11.41 迎角叶中截面相对脉动情况

Fig. 9 Relative fluctuation on the section in the middle of the annular cascade chord with 11.41° incidence angle

述。观察 - 8.59 迎角与 - 18.59 迎角时的脉动图，可以发现 - 8.59 情况的一、二、三排流动情况在不同位置的分布基本上是相似的；而 - 18.59 迎角时，第三排的最大脉动发生在第四点，与前者正好相反，分析原因主要是由于测点与叶排的相对位置在 - 18.59° 迎角情况下，第二、四点更接近叶盆分离的边界，而第三点和第五点相对第四点则离分离边界更远一些，故受尾迹分离影响较小，流动脉动较弱。

(3) 11.41 迎角时，在第一排的第四点、第三排的

第四点和第六点以及第二排的第五点脉动较强，由测点与叶排的相对位置，可知第一排和第三排的第四点处于叶背分离的边界附近，而第二排的第五点和第三排的第六点则处于叶背分离旋涡的扩散区附近，所以这四点的流动产生了较大的脉动。

(4) 根据相同迎角下，轴向距离对脉动强度的影响可分析出：在第一排处，七个测点的脉动强度的波动总是最剧烈的，第二排的七个测点的脉动强度波动相对缓和一些，而第三排的波动，则更加缓和；同时还可以发现，第三排的七个测点的脉动强度波动相对的第二排，虽然缓和了一些，但第三排的脉动强度，总起来说，大于第二排，综合考虑上述现象，可以推测这种现象是由于叶排的尾迹分离随着距离叶排尾缘越来越远，流动区域不断掺混，到第三排时，分离区与主流区的界限已变得模糊了。

由以上分析可得出：

(1) 导流叶栅和环形扩压叶栅后都存在特征频率为 723Hz 的脉动。

(2) 对于不同的测量状态，最强脉动发生的位置不同。

1.41 迎角下在叶中测量情况的第三排测量点处脉动最强。对于 - 8.59°、- 18.59° 以及 11.41 迎角设计流量叶中测量情况，第一排测点处脉动最强。

那么，不同测量情况下的最强脉动之间又有什么关系呢？对比这些不同测量的最强脉动，可以得到各种测量情况下流动分离脉动情况的相互关系。

对比 1.41 迎角下叶中测量情况的第三排测点处、- 8.59 迎角下叶中测量情况的第一排测点处、- 18.59 迎角下叶中测量情况的第一排测点处以及 11.41 迎角下测量叶中情况的第一排测点处的相对脉动幅值，可以得到如图 10 所示的不同情况下最强脉动间的对比图。由图 10 可以看出不同测量情况下最强脉动间的相互关系：

(1) 在涡轮叶栅后和 1.41 迎角情况下的脉动强度最强，与 - 8.59°、- 18.59° 和 11.41 迎角下的情况相比较，可认为没有发生旋涡分离（或分离旋涡很弱），测量结果符合附体流型的情况。

(2) 相对而言，- 18.59 迎角情况的脉动最强，其次是 11.41 迎角情况，- 8.59 迎角情况下的脉动强度则比前两者都要小。

(3) 对比环形扩压叶栅后的流动脉动情况和导流叶栅后的流动脉动情况，可以发现导流叶栅后的流动脉动经扩压叶栅后，在扩压叶栅处于大的正迎角或

负迎角时气流的脉动被加强了,由此,可以认为扩压叶栅后的分离涡存在 723Hz 的特征频率;同时,也在一定程度上说明了在叶轮机械中的非定常流中会存在流动分离频率的锁定(lock on)现象。

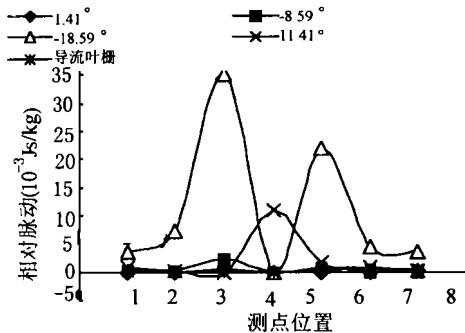


图 10 不同情况下最强脉动幅值对比

Fig. 10 The strongest relative fluctuation

2.2.2 对分离流动情况的径向测量分析

图 11 展示了迎角为 -8.59° 在叶根截面的脉动测量情况。

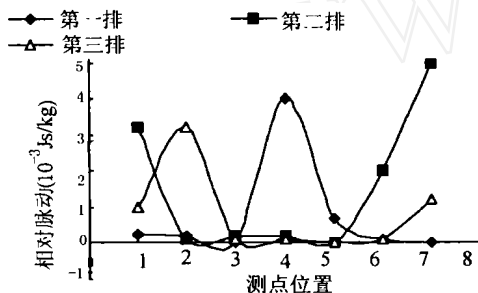


图 11 迎角为 -8.59° 在叶根截面测量情况

Fig. 11 Relative fluctuation on the section at the root of the annular cascade chord with -8.59° incidence angle

对比 -8.59° 迎角时叶中测量(图 7)和叶根测量(图 11)的结果,不难看出,在叶根时的流动脉动较在叶中的脉动更剧烈,而且,在叶根的脉动一二三排的脉动情况也不似叶中那样相似了,这是由于流体粘性和内机匣的影响。

由相同迎角下变流量测量的实验数据分析发现栅后的流动脉动受来流速度变动的影响较小。

3 结论

在环形扩压叶栅实验台上,采用 IFA300 热线风速仪等测试仪器对不同测试情况的流动脉动强度进行测量,对比实验所测得的流动脉动的分布情况与理论知识分析所得的叶栅后的流动脉动分布情况,发现所测得的具有 723Hz 特征频率的脉动分布基本符合理论的脉动分布情况,所以可以认为 723Hz 即为所测环形扩压叶栅后的分离频率。

同时,对导流叶栅后和环形扩压叶栅后的脉动情况的对比也说明了在叶轮机械非定常流中会存在流动分离频率的锁定现象。锁定现象的实验确认对今后叶轮机械中建立抑制分离的非定常激励效应是非常有意义的^[7]。

参考文献:

- [1] BARBI C, FAVIER D P, MARESCA C A et al. Vortex shedding and lock-on of a circular cylinder in oscillatory flow. *J. Fluid Mech* (1986), vol. 170. 527 ~ 544.
- [2] 季路成. 轴流叶轮机械转子/静子干扰非定常流动探索: [博士学位论文]. 北京:北京航空航天大学研究生院, 1998.
- [3] 邓学莹, 夏雪渝. 工程分离流动力学. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991.
- [4] 吴介之, 马晖杨, 周明德. 涡动力学引论, 北京:高等教育出版社, 1993.
- [5] 陆亚钧. 叶轮机械非定常流动理论. 北京:北京航空航天大学出版社, 1991.
- [6] 盛森芝, 许月亭, 袁辉靖. 日新月异的现代流动测量技术(修订稿), 北京大学特赛流动测量研究中心, 2000.
- [7] WALKER G J, HUGHES J D, SOLOMON W J. Periodic transition on an axial compressor stator incidence and clocking effects (Part I experimental data). *ASME* 98-GF-363.