

# 低压离心叶轮小流量失速特性的实验观察\*

中科院工程热物理研究所 戴冀\*\* 陈静宜

**【摘要】** 在一离心压缩系统喘振实验台上, 对小流量工况下沿叶轮出口圆周的压力波动进行了动态测量。实验观测到离心叶轮在小流量工况下存在一种低于转速频率的、且非旋转类型的失速自激振荡, 观察到这种波动在局部及个别瞬间是不稳定的, 沿叶轮圆周波动强度的分布也不均衡。

主题词: 离心式叶轮 失速 动态试验

分类号: TK474.82 V231.3

## 1 前言

离心式压气机在失速方面较之于轴流压气机更为复杂。在文献[1]中除了观察到与转速方向一致的两失速团旋转失速及与转速方向相反的三失速团旋转失速外, 还观察到不沿圆周转动的失速类型, 其特点是以叶轮圆周的某一直径为对称轴在两个半圆内交替地发生压力波动。此外, 在文献[2]中还观察到另一种不旋转的失速脉动类型, 沿圆周压力脉动基本上不存在相位差, 即产生低频而同步的压力脉动。本文在一个离心风机的喘振台位上对小流量工况叶轮失速的周向波动进行了实验观察, 从而有助于加深对离心叶轮在小流量工况下失速现象的认识。

## 2 实验装置和测量方法

实验装置由进口导管, 风机本体和出口闸阀组成。离心风机叶轮的外径为 630 mm, 叶片数为 12, 设计风量为  $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 全压为 9000 Pa。由于本实验的重点在于观察离心叶轮本身的动态特性, 应避免系统中发生喘振, 因此风机的进出口都使用了很短的管道, 进口管道直径 275 mm, 长度 500 mm, 出口管道直径 190 mm, 长度 800 mm。对于如此短的进出口管道难以准确地测量流量, 故以下使用了阀门开度来表示流动工况, 且 0% 对应完全关闭的阀门状态, 而 100% 则是阀门全开的工况。在叶轮出口的周向均布了 8 只型号为 Kulite XCS-190 的高频动态压力传感器, 以此测量各工况下叶轮的周向压力脉

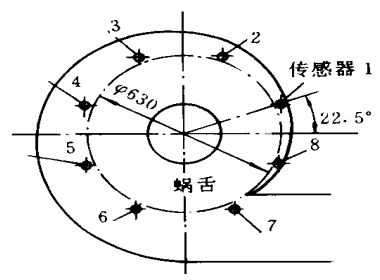


图1 实验测点示意图

1996 年 4 月收稿, 1996 年 7 月收到修改稿。 \* 本文系国家自然科学基金资助项目, 编号: 59576005

\*\* 北京中关村中科院工程热物理研究所 100080

动信号。各测点的布置如图 1 所示,蜗舌点与第 8 测点的夹角为  $35^\circ$ ,而与第 7 测点的夹角为  $10^\circ$ 。传感器信号经 Preston 8300AU 放大器进行放大,并由 Teac XR-7000 磁带记录仪记录,之后再使用动态信号采集板 EISA-A2000 以及相应的软件对磁带记录仪的结果进行分析处理。

### 3 动态压力波形的观察

当机器工作于小流量工况时,通过对压力信号的频谱分析,可观察到低于叶轮转速频率的波形出现,图 2 是在阀门开度为零情形下的功率谱。图中 50 Hz 频率的波形与叶轮转速的频率一致,同时测量系统交流电源的周期性波动也可引起这一信号的出现,不是本文所研究的内容,将在以下分析中采用 Butterworth 滤波器对信号进行滤波处理。图 2 还显示出在小流量工况时明显地产生了频率值为 35 Hz 左右的波形,这一频率与通常所观察到的叶轮中旋转失速的相对转速范围基本一致,且阀门开度越小其脉动强度越大,明显地具有叶轮失速的特征。观测各测点的压力信号,表明它并不是旋转失速,因对不同传感器信号之间的相位进行分析表明:各位置处的压力信号基本上是同相的,即所观察到的低频波形并未在整个圆周方向发生旋转,且难以找到某一固定的发生工况点,其频率也不稳定。故不能认为是发生了旋转失速,而与文献[2]中所介绍的 3.8 Hz 的低频无旋转型失速类似,只是这里的频率较高些,达到转速的约 70%,这种脉动可认为是失速所引起的气流自激振荡现象的一种。

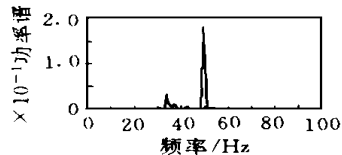


图 2 阀门开度为零时的功率谱

图 3 是在阀门全关的工况下,测点 2 与测点 4 在某一瞬时 35 Hz 波形的比较,且图中只取了滤波过程中后一时间段的波形,时间坐标是从 0.6 s 至 0.8 s。从图看有部分时刻某一路波动的频率发生了小的改变,从而使两路信号间出现了明显的相位关系,但与此同时在其他部位的测量并未发现其它信号间产生相位,另外这种明显的相位差别在很小的时间间隔后便又消失了。可见在小流量的个别瞬时,这种扰动沿周向已存在局部的旋转现象,但尚未在整个圆周上产生旋转失速,其基本的特征还是沿圆周各测点的压力不存在相位差,只发生同步的脉动。

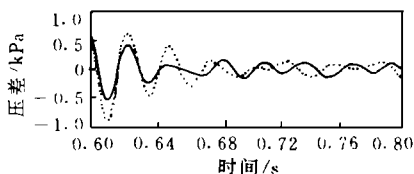


图 3 瞬时存在明显相位差

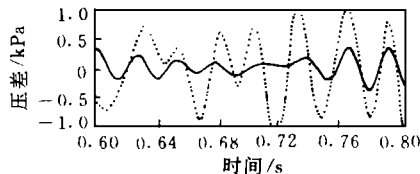


图 4 瞬时局部发生大幅波动

图 4 是在阀门开度为 0% 时,测点 2 与测点 6 两点间某一瞬时压力波形的比较,由图可知,其中一位置处的扰动振幅发生突增,而与此同时的其他位置非但没有测量到这种变化,反而有减小的趋势。因此在小流量工况下存在局部波幅的瞬时突增,这对于激励整个圆周位置上的不稳定流动显然有促进作用,同时也显示了这种失速诱发的自激振荡的不稳定性,相对于较为稳定的旋转失速来说有较为明显的差异。

#### 4 功率谱的周向分布随工况的变化

在各种阀门开度下测量了圆周各个位置处 35 Hz 信号的功率谱, 图 5 显示了 4 个位置处的结果。图中圈点表示在某工况下功率谱的最低值及最高值, 而其间的直线就是功率谱的变化区域。图中的最低值及最高值是能多次重复出现的数值, 而在个别的瞬时能达到更大或更小的值。从图中可清晰地看出自激振荡随流量的发展过程。在阀门开度大于 60% 时机器处于大流量工况, 这时没有自激振荡的低频波形存在( 叶轮压升曲线的最高点约对应于 65% 开度下); 而在阀门开度 60% 至 20% 范围内功率谱随流量的减小而有所增大, 但其数值并不很大; 而当阀门开度小于 20% 时, 自激振荡的强度很快地增大至一较高的值。

由图 5 还可得知在叶轮圆周的不同部位处, 其低频扰动的强度有很大的不同。靠近蜗舌处扰动的强度大大高于其它位置处, 尤其在图中接近风机出口管位置处测点 7 的功率谱值比远离蜗舌位置处的值最大能大到 16 倍, 而且在个别瞬时此位置波动的功率谱曾经达到 0. 045。以上现象说明: 在流量较低的工况下, 低频扰动成份在蜗舌附近明显强于其它部位, 即蜗舌有可能在小流量下对低频扰动成份的产生及发展有促进作用。在小流量工况下, 图 5 还显示出在蜗舌附近其低频扰动强度的变化区域大大高于其它部位, 即叶轮出口处低频波动强度时大时小地发生变化, 这表明蜗舌区域的动态工作过程不够稳定, 这也从另一个方面说明了蜗舌这一结构的不稳定性。

#### 5 实验结果的分析

对离心叶轮的测量表明在低流量工况下存在一种低频率的同步脉动, 虽然与旋转失速频率范围一致, 但它并不是旋转失速, 而总体上呈现一维的特征, 且在某一局部及某一瞬时显示出一定的不稳定性, 产生相位差关系, 同时也可观察到局部的大幅度波动。另外其脉动强度随流量的减小而增强。这些现象都表明这种脉动是与叶轮内的失速有关的, 且这种自激振荡以不同于旋转失速的形式表现出来, 失速引起整个叶轮压升以低于叶轮转速的频率振荡, 而在圆周方向不存在一定的相位差。由于叶轮内的局部失速现象不够稳定, 因此在本实验中观察到的自激振荡现象也呈现出不稳定性。类似的自激振荡现象在文献[ 2] 中已有所报道, 只是其频率较低, 同时伴随着旋转失速现象的发生, 而本实验中频率较高, 且未发现旋转失速的发生。

这种失速引起的同步自激振荡从表现上来说有些类似于喘振现象, 但又确实存在明显的区别, 主要表现在以下几方面: 喘振是整个系统的自激振荡现象, 与气流失速不存在直接的关系, 而本文的自激振荡呈现出与失速密切相关的关系; 喘振现象存在很清晰的发生工况点, 而这里的自激振荡难以准确地判断出这种发生点; 喘振所造成的气流脉动强度很大, 大大高于这里的同步自激振荡现象; 喘振现象一旦发生其脉动的规律性很强, 而本文中的自激振荡在局部的瞬时存在不稳定性。这种同步自激振荡看来是独立存在的一种失速表现形式, 虽然其本身并不是旋转失速, 但它有可能与旋转失速存在一定的关系。目前在旋转失速的先兆研究中发现的与旋转失速频率值不同的先兆波形有可能就与其它非旋转形式的自激脉动有关, 即这种扰动波引发了旋转失速的发生。对于高压比的机器来说, 很弱的扰动波就可能导致强烈旋转失速

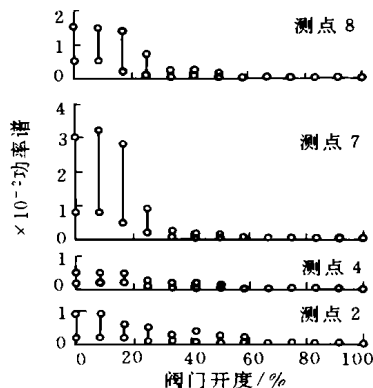


图 5 各测点及阀门开度下的功率谱

的立即发生, 因此有可能使得这种脉动被立即掩盖, 难以察觉; 但在旋转失速较弱时, 在其初始时刻有时可能多少会表现出这种扰动, 且存在与旋转失速频率不同的初始波形。在文献[3]中就观察到失速前存在同步振荡型失速的现象。当然, 由于机器的形式各异, 失速的表现形式也不会完全相同, 况且现有文献中对旋转失速的先兆观察也得到不同的结论, 例如在文献[3]中就观察到不同的工作条件下旋转失速发生前存在多种不同的扰动先兆现象, 因此对于这种非旋转类型的失速振荡与旋转失速的关系是值得进一步研究的问题。

离心式风机由于其结构较为粗糙, 沿叶轮圆周方向存在稳态压力的不均匀性, 尤其是由于蜗舌结构的存在, 使得叶轮出口的流动呈现复杂的分布现象<sup>[4,5]</sup>。本实验进一步从动态测量的角度观察了这一现象, 由于在每个流道内叶轮出口的边界条件差异较大, 因此使得某一瞬时各个叶轮流道流动不完全一致, 这样圆周上的某一点其动态压力也存在一定的不均匀性, 尤其是蜗舌附近的位置表现更加明显, 这也说明了蜗舌对于流动的不稳定性有较大的影响。

## 6 结 论

通过对离心叶轮进行动态压力测量, 观察到在小流量工况下存在着一种不同于旋转失速, 而由失速引起的不旋转型低频自激振荡现象, 其频率值与旋转失速相接近, 这种低频扰动在整体上具有一维脉动的特性, 但在局部的某一瞬间表现出一定的不稳定性, 沿圆周出现相位差关系、或发生大幅度的振荡。这种低频扰动的强度沿叶轮圆周的分布是不均匀的, 不仅在蜗舌附近的强度大大高于其它位置处, 而且其波动强度的变化范围也明显大于其它部位, 这显示出蜗舌这一结构对气流的动态不稳定性有较大的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Haupt U, Abdelhamid A N, Karmmer N, Rautenberg M. Excitation of Blade Vibration by Flow Instability in Centrifugal Compressors. ASME 86- GT- 283
- 2 Haupt U, Seidel A N, Abdelhamid A N, Rautenberg M. Unsteady Flow in a centrifugal Compressor with Different Types of Vaned Diffusers. ASME 88- GT- 22
- 3 Chen J, Shi L, Hasemann H, Rautenberg M. Stall Inception Behavior in a Centrifugal Compressor. ASME 94- GT- 159
- 4 胡胜利, 吴克启. 风机矩形蜗壳内部流动特性及其二次流的研究. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 151- 154
- 5 Wu K Q, etc. Research for the Internal Flow within a Volute of Centrifugal Fan. Proc. of the First International Symposium on Experimental and Computational Aerodynamics of Internal Flow, June, 1990: 571- 574

(责任编辑 魏星禄)

**Key Words** Neural networks Failure detection Modeling

## **MULTIPLE- SECTOR PARALLEL COMPRESSOR MODEL FOR FLOW FIELD CALCULATION UNDER DISTORTION**

**Song Wenyan, Li Ming, Fan Feida**

*(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)*

### **ABSTRACT**

This paper describes in some detail the method for computing an axial- flow compressor flow field under distortion. Based on the multiple- sector parallel compressor model and stream line curvature method, the stage distributions of the parameters of distorted flow field, such as total pressure, total temperature, static pressure, static temperature, air velocity and swirl angle, are obtained by solving the radial- equilibrium equation, then the details of compressor flow field under the given inlet distortion can be reached. As an example the flow field computation for a single stage compressor has been completed under the inlet circumferential distortion. The results demonstrate the practical value of the method.

**Key Words** Parallel compressors Distortion factors Flow field simulation

## **AN EXPERIMENTAL OBSERVATION ON STALL OSCILLATION AT LOW FLOWRATE IN A CENTRIFUGAL IMPELLER**

**Dai Ji and Chen Jingyi**

*(Institute of Engineering Thermophysics, CAS, Beijing 100080)*

### **ABSTRACT**

An experiment was conducted to investigate the self- excited flow oscillation in a centrifugal fan impeller. The unsteady dynamic pressures were measured around the periphery of the impeller outlet with 8 high- response transducers. The experimental observation shows the existence of a lower frequency, nonrotating oscillation in the low flowrate conditions. The measurements also indicate that the oscillation is unstable at a short duration and at a local position, and the peripheral distribution of oscillation strength is non- uniform. The analysis shows that there may be some relationship between the self excited flow oscillation and rotating stall, especially during inception behavior of rotating stall.

**Key Words** Centrifugal type Impeller Dynamic tests

## **EFFECTS OF SOLIDITY ON CHARACTERISTICS OF COMPRESSOR CASCADE WITH CURVED- BLADE**

**Zhong Jingjun, Wang Wei, Su Jiexian, Wang Zhongqi**

*(Energy Science and Engineering College, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)*

### **ABSTRACT**

The relationship between solidity and the characteristics of compressor cascades with curved blades is investigated. The experimental results show that with the increase of cascade solidity, the cascade loss increases at most incidences. The minimum loss incidence of the straight and positive curved blade cascade takes place at positive incidences, while the negative curved blade cascade appears at negative incidence. In order to reduce the loss, the solidity for the positive curved blade should be less than that of the straight blade. In the case of the same solidity, the secondary loss can be reduced and good incidence characteristics can be obtained with the negative curved blade, compared with the