

轴流压气机失速初始扰动形式的实验研究

西北工业大学 李 军* * 徐 纲 朱俊强 刘志伟

【摘要】 对一单级轴流压气机的旋转失速发展过程进行了实验研究。应用 SFC 分析方法识别出失速的初始扰动有旋转波和小失速团两种形式,并且发现,压气机结构型式对失速的初始扰动形式有很大的影响。单级压气机与弧立转子相比,其失速初始扰动形式更为明显地表现为旋转波扰动;进口导叶作负预旋调节时可使旋转波加强,并且明显增长了失速预报时间。

主题词: 轴流压气机 旋转失速 初始条件 扰动

分类号: V231.3

1 前 言

McDougall^[1]和 Garnier^[2]通过对压气机旋转失速起始过程的测量,证实了失速团是由“旋转波”(即具有周向大尺度、能量主要集中于低阶特征且沿周向传播的小振幅扰动)逐渐发展形成的。因此,在失速团出现之前,通过抑制旋转波,就可以实现对压气机失速的主动控制。Paduano^[3]、Haynes^[4]等依此进行了失速主动控制的尝试,取得了成功。但是,是否压气机在临近失速时都必将出现旋转波呢? Day^[5]通过实验发现,在某些条件下(如径向间隙不同),失速团发生之前并没有旋转波,而是直接出现周向小尺度(一般仅局限于几个叶片通道的范围)、较大振幅的局部扰动,并且在很短的时间内发展为大的失速团。我们将这种扰动称为“小失速团”扰动形式。Day 在文献[6]中采用不同的方法对旋转波和小失速团进行控制,使失速边界左移了 4%~6%。显然,发展为失速的初始扰动形式不同,就要求有不同的控制方法,因此,压气机旋转失速初始扰动形式就成为压气机失速主动控制的一个关键问题。

本文通过对一单级压气机转子进口壁面静压的测量分析,研究了该压气机旋转失速的发展过程,分析了压气机在 4 种结构形式(即带与不带进口导叶的弧立转子和单级压气机)、2 种稠度、3 种转速以及不同进口预旋角度等共计 55 种组合下的失速初始扰动,发现该压气机也具有 2 种初始扰动形式:大尺度的旋转波扰动和小尺度的小失速团扰动。

2 实验设备与信号分析方法

实验是在西北工业大学热工程信息处理实验室的单级轴流压气机实验台上完成的。压气机设计转速为 15200 r/min,轮毂比 0.61,转子叶片平均半径和稠度分别为 0.12 m、1.165,设计安装角为 41.5°;进口可变弯度导流叶片数为 27,稠度为 0.87。

测试系统如图 1 所示。以前对该压气机进行的多次失速流场测试结果表明,失速团首先在叶尖区域出现,失速型式是突变型,失速团数最多 2 团。因此,本文选取壁面静压来捕捉失速初

始扰动特征。为获得扰动的一二阶谐波,在压气机转子进口前 $1/4$ 弦长处的机匣内壁上都布了 8 只 Kulit XCW-093-5G 动态压力传感器,后接 8 路 PRE-STON8300B 浮地式高精度隔离放大器。数据的采集由 KETHLEY DAS-58 高速采集板(最大采样频率为 1 MHz)、SSH-58 采样保持器和 486 计算机所组成的数采系统完成。实验中系统的采样频率根据转速的不同设计为 10 kHz 和 5 kHz,模拟低通滤波器的截止频率设为 10 kHz。

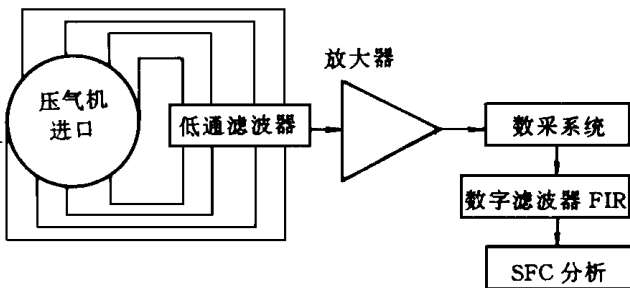


图 1 测试系统简图

离线进行数字信息处理时,首先对所采信号进行功率谱分析,确定特征信号的频率范围,而后再应用一加 Hamming 窗的 FIR 数字滤波器进行滤波处理,以突出所要分析的信号,最后对信号进行 SFC(Spatial Fourier Coefficient)分析。SFC 分析方法是通过分析压气机周向采样信号的相位随时间变化的线性度来判别旋转波的。由周向均布的 8 个传感器,在每一时刻就得到了空域的 8 个采样值,对采样进行离散 Fourier 变换(DFT)后可得: $C_k = \frac{1}{8} \sum_{i=0}^7 p(\theta_i, t) \exp\left[-j \frac{2\pi k i}{8}\right]$, 其中 $k=1,2$, 作出 C_k 的相位随时间的变化曲线。如果在压气机失速以前周向压力信号的一阶或二阶相位随时间基本成线性增加,就说明有一定沿压气机周向旋转的大尺度扰动(即所说的旋转波)存在,有斜率就是旋转波的传播速度;否则,压气机的失速是由发展很快的小失速团引起的。

3 实验结果

3.1 无进口导叶的压气机

研究了孤立转子这一结构形式的压气机在 $\bar{n}=0.235, 0.33, 0.512$ ($\bar{n}=n/n_d$) 3 种转速下的失速初始扰动信号。实验结果表明,在 $\bar{n}=0.235$ 时,压气机的失速初始扰动形式是小失速团,其 SFC 分析结果如图 2 所示(图中:虚线表示一阶谐波,实线表示二阶谐波下同)。可以看出,在失速之前 $t < 0$ (时间以转子旋转一转为单位,且将压气机失速时定为 $t=0$),周向扰动的一二阶谐波相位几乎不随时间而变化,说明没有沿周向旋转旋大尺度周向扰动,即不存在旋转波。当 $t=0$ 时,一阶相位开始线性增加,说明出现了周向扰动,但从时域信号可看出,此时失速团已形成,压气机进入失

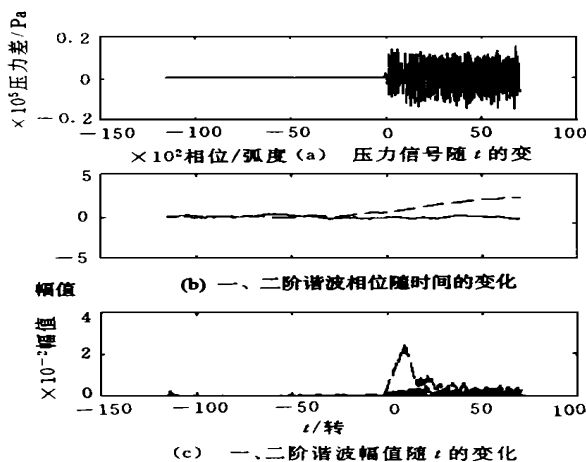


图 2 $\bar{n}=0.235$ 时的 SFC 分析结果

速状态。与文献[5]的结论类似,这时压气机的失速并不是由旋转波逐渐发展起来的,而是由突然出现的小失速团形成的,这也和旋转失速的传统解释(即气流首先在某一个或某几个叶片上分离,而后沿周向传播)相同。

而在 $\bar{n}=0.33$ 的条件下,从图3的SFC分析结果可知失速初始扰动形式为旋转波。从失速前 $t=-75$ (转)开始,一阶相位随时间是线性增长,而且斜率直至失速状态都保持不变,这说明有大尺度的周向扰动存在,而且逐渐发展成为失速团。旋转波的传播速度与失速团的传播速度基本上一致,这与文献[1,2]的结果相同。二阶相位则是在 $t=-40$ (转)才开始线性增大。 $\bar{n}=0.512$ 时,失速初始扰动形式也为旋转波。且随着转速的增大,二阶谐波相位随时间的变化趋势也更加明显,说明初始扰动的波形也更加复杂一些。

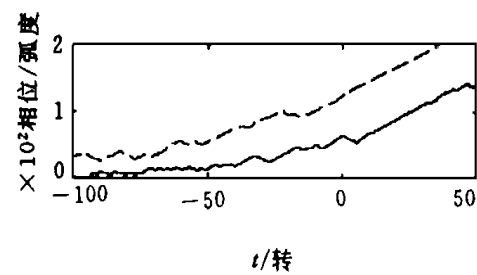


图3 $\bar{n}=0.33$ 时的SFC分析结果

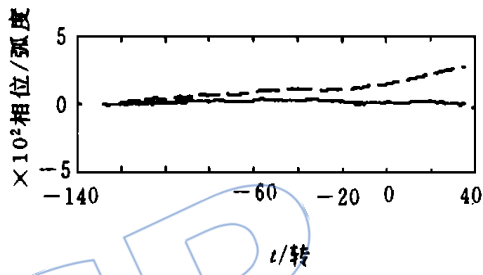


图4 $\bar{n}=0.235$ 时的SFC分析结果

在所实验的3个转速下,单级压气机的初始扰动形式都是旋转波。图4表示了 $\bar{n}=0.235$ 时的初始扰动信号的SFC分析结果,可以看出,在 $t=-120$ (转)时其一阶谐波相位开始随时间线性增加,说明有旋转波存在,但值得注意的是,当进入失速后失速团的传播速度明显地高于旋转波的传播速度,即存在传播速度上的突变。在 $\bar{n}=0.33$ 和 $\bar{n}=0.512$ 其一二阶谐波相位的斜率也存在着突变。这可能预示着在临近失速时出现了传播速度较快的小失速团。可见,由于静子的加入使得压气机的失速过程变得复杂了。

3.2 带进口导叶的压气机

研究了进口导叶在正预旋角(+12°, +20°, +30°)和负预旋角(-12°, -20°, -30°)时上述3个转速下的失速发展过程。信号分析结果表明,在相同的转速下,进口导叶片角度的变化对压气机的失速初始扰动有明显的影响。其影响规律是:当导叶为负预旋角时,压气机的初始扰动形式均是旋转波,而且旋转波发展成为失速团的时间也有所增长;当进口导叶为正预旋角时,在+12°和+20°的预旋角度,压气机的旋转波非常微弱,其失速初始扰动形式是小失速团

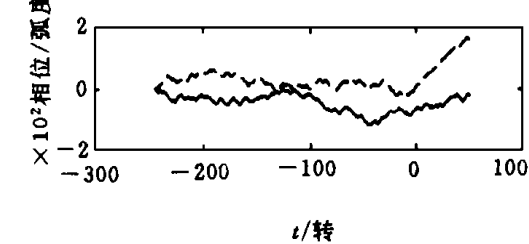


图5 进口导叶+20°时的SFC分析结果

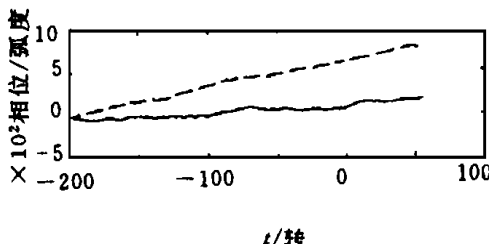


图6 进口导叶-30°时的SFC分析结果

(见图 5, $\bar{n}=0.33$, 单级压气机)。但在+30 时在压气机失速前可以明显地看到旋转波的发展。对于弧立转子而言, 当 $\bar{n}=0.235$ 时, 进口导叶作负预旋调节时, 其失速初始扰动形式成为旋转波, 见图 6($\bar{n}=0.235$ 弧立转子), 这与不带进口导叶的弧立转子是完全不同的。

3.3 稠度变化对失速初始扰动的影响

分析了转子稠度减小为 0.563 时压气机的失速发展过程。实验结果表明, 稠度减小对转子的失速初始扰动形式几乎没有影响。

4 结 论

本文通过对一单级轴流压气机的失速发展过程的分析可得如下结论:

(1) 压气机的初始扰动具有两种形式, 即旋转波和小失速团。

(2) 对于不带进口导叶的压气机而言, 随着转速的增加, 旋转波逐渐发展为失速是其失速过程的主要形式。进口导叶的加入对失速初始扰动有明显的影响, 负预旋角可使旋转波加强, 且增加失速预报时间。减小转子稠度对失速初始扰动形式几乎没有影响。

参 考 文 献

- 1 McDougall N M, Cumpsty N A, Hynes T P. Stall Inception in Axial Flow Compressors. Transactions of ASME, Turbomachinery, 1990, 112: 116-125
- 2 Garnier V H, Epstein A H, Greitzer E M. Rotating Stall as a Stall Inception Indication in Axial Compressors. ASME Paper 90- GT- 156
- 3 Paduano J D. Active Control of Rotating Stall in a Low Speed Compressor. Journal of turbomachinery, 1993, 115(1): 48-56
- 4 Haynes J M, Hendrichs G J, Epstein A H. Active Stabilization of Rotating Stall in a Three- Stage Axial Compressor. ASME Paper 93- GT- 346
- 5 Day I J. Stall Inception in Axial Flow Compressors. ASME Paper 91- GT- 86
- 6 Day I J. Active Suppression of Rotating Stall and Surge in Axial Compressors. ASME Paper 91- GT- 87

(责任编辑 魏星禄)

cell in the mean flow with an ensemble averaging technique and instantaneous flow measurement with hot-wire and flow visualisation technique. The mean flow field measurement indicates that the stall cell appears mainly in the front of the rotor, while the flow field in the tip region of the rotor features essentially the cross blockage of the tip clearance flow. The instantaneous flow measurement shows that the kinetics of the stall cell can be described by using two fundamental concepts of dipole.

Key Words Fans Rotating stall Dipoles

A 3D AERODYNAMIC STABILITY ACTIVE CONTROL MODEL FOR AXIAL FLOW COMPRESSOR

Cao Renjing

(Institute of Energy and Environmental Science, Shantou University, Shantou 515063)

Zhou Sheng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A new three-dimensional aerodynamic stability model for an axial flow compressor to study the effects of radial disturbance on the rotating stall is presented. The calculated results show that the stalling characteristics of the compressor is closely related with its cascade characteristics including total pressure rise versus the flow rate and inlet flow angle. Based on the 3D aerodynamic stability model, the related active control technique and the open-loop transfer function have been provided, in which the three dimensional flow effects are involved. The response analyses of the open loop systems for the 3D stability active control model with step impulse were conducted in different flow ranges.

Key Words Axial flow compressors Non-steady flow Rotating stall

INITIAL DISTURBANCE FORMS OF ROTATING STALL IN AXIAL FLOW COMPRESSOR

Li Jun, Xu Gang, Zhu Junqiang, Liu Zhiwei

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

ABSTRACT

The process of rotating stall developing in a single-stage axial-flow compressor was investigated experimentally. By means of eight dynamic pressure transducers equally located circumferentially in the inlet section of the compressor, the dynamic pressure signals of the rotating stall developing process were measured. The data have been analyzed with the SFC (Spatial Fourier Coefficient) method and the variation of the circumferential phase of initial disturbance signals with time have been obtained. So, it was found that there are two initial disturbance forms of rotating stall, rotating waves and small stall cells. In order to study the factors influencing the initial disturbance forms, the compressor was tested under 55 conditions combining four types of compressor configuration, two solidities of rotor, three rotation speeds, different IGV outlet angles. According to the experimental results, the initial disturbance form of single-stage compressor without IGV was rotating waves. For the isolated rotor without IGV, the forms were rotating waves at high rotor speeds, and small stall cells at low rotor speed. For the compressor with IGV, negative prewhirl angles of IGV enhanced the rotating waves, and increased the pretelling time of stall. Decreasing the solidity of rotor almost did not affect the form of stall initial disturbance.

Key Words Rotating stall Initial conditions Disturbances