

用小波变换对机匣处理 抑制旋转失速的机理研究

北京航空航天大学 张燕东* 王光华 陆亚钧

【摘要】 本文利用小波变换对轴流压气机旋转失速时的压力信号进行时频分析。通过 Morlet 连续小波变换,详细分析压气机失稳过程中非定常信号的变化,并研究旋转失速初始扰动信号在处理机匣气室中的局部行为。通过对比实壁机匣与处理机匣的失速初始信号相干波形的结构特性,发现不同机匣结构对相干波形结构中压力脉动信号的不同影响,提出处理机匣抑制旋转失速初始扰动发展的机理。

主题词: 轴流通风机 处理 机匣 相干检波
分类号: V231.3

1 引言

旋转失速的发生会引起压气机端壁区复杂的三维流动,这使得失速信号的测量和分析具有一定的难度。随着测试和计算机技术的迅速发展,以及对轴流压气机旋转失速流动结构认识的日渐深入,压气机流动过程中的一些新的物理现象得以发现。失速先兆波的发现和研究,为在一定条件下准确预测压气机的稳定性行为提供了必要的依据。文献[1]的研究发现,通过对“失速先兆波”这种初始弱扰动波的抑制,可以延迟旋转失速的发生。基于这样的认识,如何借助实验手段和信号分析技术,来处理并分析这种微弱的初始扰动波就显得尤为重要。小波变换作为一种信号分析方法,具有时间和频率尺度自适应的能力,十分适合于对旋转失速初始扰动信号的分析。本文借助小波分析方法,研究不同机匣结构在多种工况条件下对失速先兆波的影响。在此基础上,进一步研究导致压气机流动失稳的原因以及处理机匣对初始扰动波产生抑制作用的机理。

2 小波变换的定义和物理意义

一维信号 $s(t)$ 在小波函数 $g_{a,b}(t)$ 下的波流变换定义为:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) g_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

在本文中选择改进的 Morlet 小波作为小波母函数^[2]:

$$g(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} - e^{-\omega_0^2/2} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

其中 ω_0 为一常数, $g(t)$ 经平移和缩放变换得小波函数族 $g_{a,b}(t)$ 。

小波变换所采用的缩放参数 a 与信号的频率 f 之间的关系为:

$$f \approx 2\pi\omega/a \quad (3)$$

小波变换实际上是对原始信号进行有选择滤波的一种形式,具有自适应的分析特性以及适配带通滤波器的性质^[3]。如图 1 所示,通过改变参数 a ,就可以提高(或降低)时间分辨率,相应地降低(或提高)频率分辨率。随着位置 b 的变化,可以使信号逐步进入分析状态。另外,从相关分析的观点来看,小波变换可以被视为信号与小波函数在位置 $t = b$ 附近进行互相关分析,它描述了信号与小波函数在 $t = b$ 附近的相似程度。

小波变换可以在信号的任意位置对信号的频率成分进行局部化分析,将扰动波信号分解成能量有限的不同尺度的局部性分量的叠加,这种处理方式对于旋转失速初始扰动波的频谱分析具有十分重要的意义^[4]。在以往的研究工作中已经发现,旋转失速初始扰动波具有较宽的频带,因而扰动信号与 Fourier 级数的相关性较小。因此将失速初始扰动信号描述为没有间歇性的正弦波的叠加,用 Fourier 变换进行分析是不合适的。实验研究工作已经证明,失速先兆波的相干结构是一种小尺度的波形结构,表现为局部的突变性和一定间歇性的局域化振荡。借助合适尺度的小波结构辨识旋转失速的小尺度脉动信号的相干结构是一种符合物理规律的数学方法。

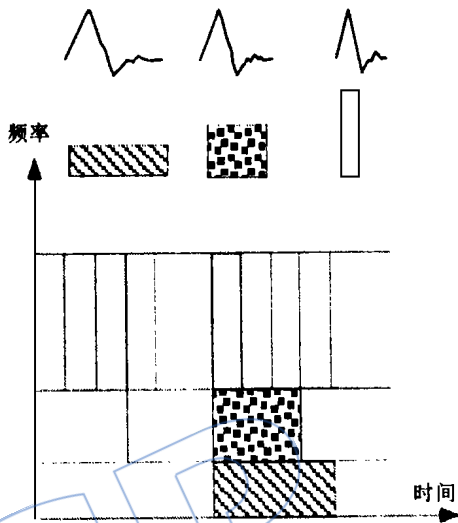


图 1 模拟信号的小波变换

3 实验设备与信号采集

实验设备选用一台高性能的轴流风机,采用单转子工作方式,转子叶尖直径为 450 mm,叶尖切线速度为 66.9 m/s,轮毂比为 0.49。风机转子采用 C4 叶型,共有 7 个工作叶片,由一台功率为 2.2 kw 的三相交流电机驱动。该风机的早期实验已经表明,旋转失速通常发生在转子叶尖,适用于对处理机匣抑制失速的实验研究。流量测量由稳态测量设备完成,采用皮托管测量试验风筒出口附近不同径向位置上的动压,计算出风机的流量,并通过尾锥的位置变化实现不同的流量工况。另外,为测量转子叶尖壁面的动态静压,采用了频响为 100 KHz 的高频压力传感器,该传感器由美国 Kulite 公司提供,具有较高的测量精度和较好的测量重复性。测量过程由一台微机控制,通过内置的高速数据采集器进行数据采集,数据采集前还要经过 8900AU 放大器进行放大和滤波,以消除噪声对真实信号的影响。

4 旋转失速初始信号脉动的时频分析

4.1 圆弧斜槽处理机匣的壁面静压信号的时频分析

图 2 给出了采用圆弧斜槽处理机匣时,失速过程中壁面静压的分段信号及其小波变换结果。图中 Φ 表示流量系数: $\Phi = V_x / U_m$, V_x 表示出口气流速度的轴向速度分量, U_m 表示转子叶中切线速度。图 2 中的 330 Hz 频率是压气机工作叶片的通过频率, 48.5 Hz 频率是电机转动

引起的信号波动。从图 2 可以清楚地看到,当流量系数 $\Phi > 0.34$ 时,在频谱图 2(b) 上只呈现出二个明显的频率特征,即由中心频率分别为 330 Hz 和 48.5 Hz 的二条由变量模构成的增亮的色带,这二条色带贯串了各分段信号时域的始终;在相位图 2(c) 上,可以清楚地分辨出三簇恒

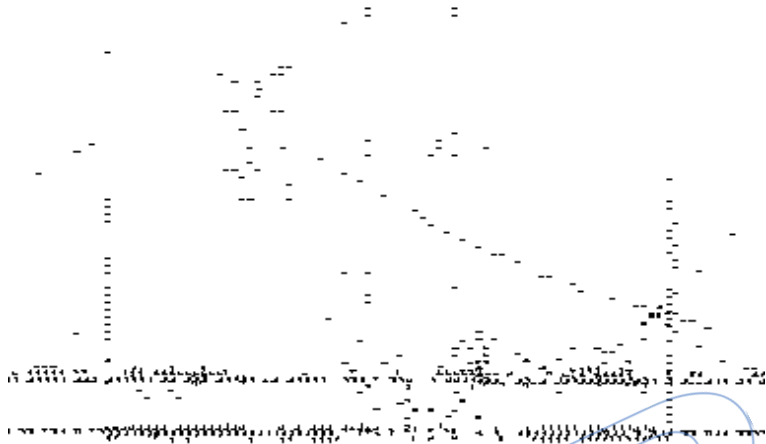


图 2 圆弧斜槽处理机匣分段采样信号的小波变换

定的相位线,分别表示了三个不同频率信号的峰值;在能量—频率图 2(d) 上,可以判读出三个频率峰值对应的频率大小。从频谱图 2(b) 上,进一步发现流量系数 $\Phi < 0.34$ 时,随着流量系数的减小,频率在 50 Hz 至 230 Hz 之间的低频信号特征逐渐增强,表现为图中出现的一些细小的亮点。随着流量的进一步降低,亮点的强度逐渐增大,尺度也逐渐扩大,出现的次数逐渐增多,这说明流量的降低,使叶背区气流分离加剧,脱落涡逐渐使转子叶片通道内产生了一些低频振荡的流体微团。根据文献[5]的研究可以断定,在某一时域出现的亮点所代表的低频脉动信号就是失速先兆波的一种表现,亮区的发展代表了这种扰动逐渐增强的趋势。当流量系数 $\Phi = 0.26$ 时,上述低频信号发展到全部时间域内,此时压气机流量突降,由稳定工作点过渡到不稳定工作点。压气机的性能急剧恶化,出现沿周向发展的气流堵塞现象,即发生旋转失速。观察该流量的相位图 2(c),可以发现在相位图 2(c) 上有一些锥形结构,表明信号在该处出现阶跃,这与由旋转失速引起的压力信号突变相对应。根据上述这些特征,可以判断压气机旋转失速的发生。

4.2 不同机匣结构的壁面静压信号的对比分析

在以上分析基础上,进一步对比不同机匣结构对失速先兆波发展的影响,以期研究处理机匣扩大稳定工作范围的机理。图 3 和图 4 分别给出了在 $\Phi = 0.32$ 时实壁机匣和轴向斜槽处理机匣压力信号的脉动情况及其小波变换结果,初始脉动在不同的壁面条件下都出现并有所发展,从图 3(b) 实壁机匣的频谱图中可以发现,实壁机匣的低频特征信号已经发展到整个时间域内,并且这种低频信号的频带较宽,表现为在 50 Hz 到 230 Hz 的频率范围内出现许多增亮的区域,说明叶片通道内的气流分离已经十分严重,并伴随大尺度分离团的出现,继续发展将会影响到压气机的稳定工况。性能实验结果已经表明,当流量系数 $\Phi = 0.31$ 时,采用实壁机匣的压气机发生旋转失速。在相同工况下,采用圆弧斜槽处理机匣的压气机仍处在稳定工作状

态。对处理机匣压力信号的小波分析证实了这一点,从处理机匣的频谱图 4(b)上可以发现,处理机匣的低频特征信号在相同的工况下,还只存在于一些局部的时间区域内,并且频带较窄。换句话说,由轴向速度扰动导致的叶背分离区的涡脱落现象还不十分严重,对压气机的稳定工况没有构成威胁。从小流变换的能量—频率图 3(d)和图 4(d)上可以看出,实壁机匣和处理机匣的压力信号除具有相同的基频 330 Hz 以及电机频率 48.5 Hz 外,实壁机匣的能量—频率图 3(d)包含更加丰富的低频信息,并且伴随 19 Hz 的频率峰值,说明旋转失速的征兆已经出现,进一步降低流量将会使压气机进入不稳定工况,这与频谱分析得到的结论是一致的。相比之下,图 4(d)除了明显具有 330 Hz 的基频,48.5 Hz 的电机频率及其倍频等三个频率峰值外,几乎没有其它低频的频率峰值出现,这进一步说明了处理机匣对分离扰动的抑制能力。

通过以上分析不难发现,尽管在同一流量条件下,两种机匣的压力信号都出现初始脉动现象,即都由于进口速度扰动在叶片通道产生了一些分离微团;但随着流量系数的逐步减小,不同机匣的壁面条件导致不同分离程度并使分离边界发生不同形式的波动。对实壁机匣而言,分离区的加大以及分离边界波动的加剧使更多的大尺度分离团出现,并导致转子叶片通道内现出大面积的气流堵塞,造成压气机的性能急剧下降,进入不稳定工作状态。处理机匣的应用,则改善了转子叶片通道的壁面环境,特别是处理机匣气室内的回流以及气流沿周向及径向运动的影响,耗散了进入气室的分离团的能量,抑制了由于分离产生的低频速度脉动的进一步发展,延迟了大尺度分离团的出现,从而扩大压气机的稳定工作范围。

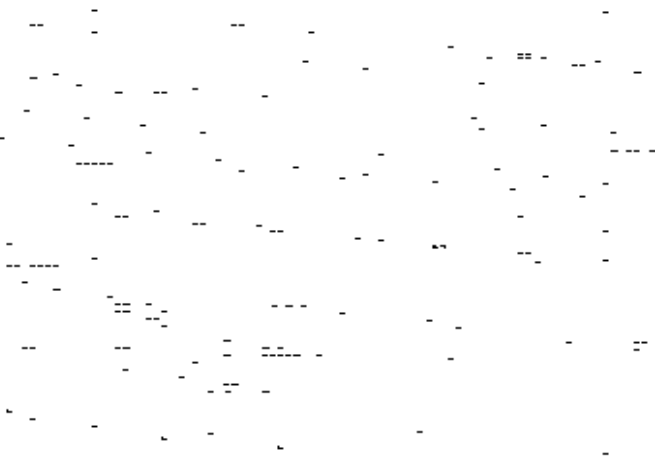


图 3 实壁机匣压力信号的小波变换

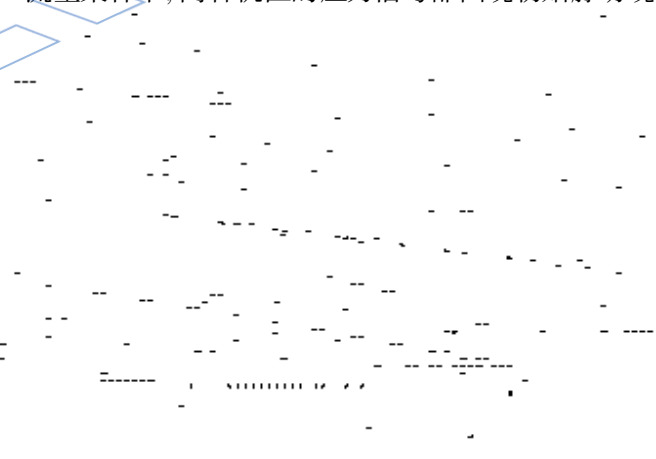


图 4 圆弧斜槽处理机匣压力信号的小波变换

4.3 处理机匣结构对气流扰动的抑制作用

为了进一步说明处理机匣抑制初始失速脉动的原因,图 5 给出了圆弧斜槽处理机匣气室沿转子弦长分布的四个压力传感器测量信号的小波分析结果。这四个压力传感器沿轴向分布在转子进口到转子弦长中部之间,第一个压力传感器位于转子叶片的上游,距叶片前缘 20 mm,向后间隔 10 mm 均匀分布序号为 1, 2, 3, 和 4 的四个压力传感器。图 5(a) 是四个压力传感器的同步采用信号,图 5(b) 是经小波变换的频谱图。通过同时采样的四个同步采样信号的小波分析结果对比,可以看到低频脉动信号沿转子叶片通道轴向发展的特征。从图 5(b) 的频谱图可以看出,受到处理机匣气室内回流的影响,对应于位置 1, 2, 3, 4 的四个压力传感器,信号的低频信息从处理机匣气室中部至上游的某一位置处强度逐渐减弱,尺度减小,表现为亮区的减少及亮度减弱。如第 4 号压力传感器位于转子叶尖弦长 50% 位置处,所测量压力信号的小波变换频谱图如图 5(b) — 4 所示,在时刻 0.0, 0.026, 0.064, 0.092, 0.122, 0.162 等时间局部位置上出现的中心频率约为 150 Hz 及 230 Hz 的频带。随着气流在处理机匣气室内回流,依次经过 3 号, 2 号, 1 号压力传感器,低频信息的数目和尺度均有所减弱,图 5(b) — 1 表明 1 号压力传感器测量信号的小波分析结果仅在时刻 0.0, 0.058, 0.082, 0.120, 0.16 等时间局部位置上出现具有相干结构特征的低频信息,并且频带较窄,尺度较小。这说明处理机匣及其气室内的三维流动机制将回流中大尺度低频脉动的分离团破碎,使其分解为较小尺度的流体微团并耗散掉

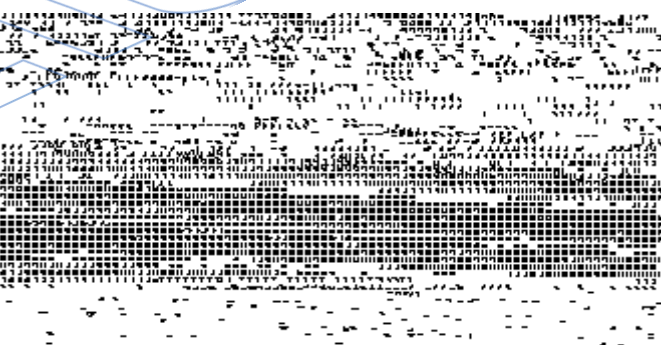
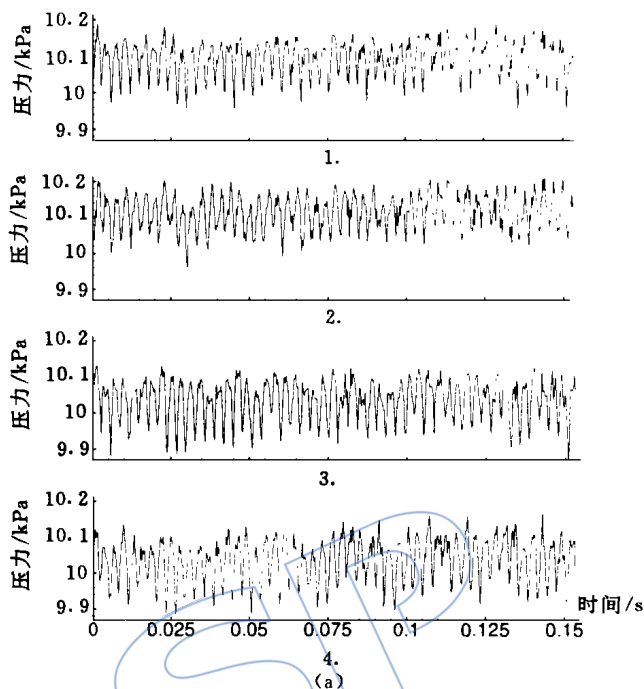


图 5 圆弧斜槽处理机匣的四个轴向位置采样信号的时频分析

一部分分离团的能量。同时,来自处理机匣气室的回流与转子叶尖区主流的掺混使叶背区分离边界波动得到了很好的控制,从而抑制了大尺度分离团的产生和发展,有效地改善了转子叶尖通道的流动环境,达到延迟失速发生的目的。

5 结 论

通过不同机匣结构在同一个工况下压力信号的对比研究、处理机匣在不同工况下分段采样信号分析以及处理机匣沿轴向分布的压力传感器同步采样信号的时分析,对旋转失速的产生和处理机匣抑制旋转失速的机理有了一些新的认识,随着流量的降低,轴向速度减小,来流沿周向和径向的脉动增强,使叶背区的气流分离边界产生波动,导致分离区内旋涡的脱落,在叶片通道内形成低能分离团,造成某叶栅通道的局部堵塞。从压力信号中分解出的不同尺度的低频信息,可以看出脱落涡形成的低能团在叶片通道内的迁移。基于这种认识,可以把失速由分离边界波动和旋涡局部脱落造成压力信号中低频成分的局部突变性和一定间歇性的局域化振荡,看作失速初始扰动的影响。从处理机匣小波变换的频谱图上,可以看到具有相干结构特征的一些低频脉动信号在处理机匣气室内的变化情况,说明气室内的三维流动机制耗散了被引入气室的分离团的能量,通过改变分离边界的波动情况,抑制大尺度分离团的产生,从而有效地延迟了旋转失速的发展。

对失速信号的时频双局部分析,加深了对叶轮机匣中不同尺度的分离流动的发生及其发展的认识,从频谱图上可以看到发生失速前后不同尺度分离团引起的低频压力脉动在时频双局部的信息,同时还可以通过相位图的锥形结构来确定失速是否发生。所有这些都表明了小波分析方法在研究包含多种频率和尺度成分的复杂流动上的分析能力。因此,小波变换在诸如“旋转失速”和“流动分离”等非定常的流动的信号分析上具有十分诱人的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Epstein A H, J E Ffowes Williams, Greitzer E M. Active Suppression of Aerodynamic Instabilities in Turbomachines. AIAA 86- 1994, 1986
- 2 Walker S H, Gordeyev S V, Thomas F O. A Wavelet Transform Analysis Applied to Unsteady Aspects of Supersonic Jet Screech Resonance. Experiments in Fluids 22, 1997: 229- 238
- 3 秦前清, 扬宗凯. 实用小波分析. 西安电子科技大学出版社, 1993
- 4 Shengfang Liao, Jingyi Chen. Time- Frequency Analysis of Compressor Rotating Stall By Means of Wavelet Transform. ASME 96- GT- 57, 1996
- 5 Garnier V H, Epstein A H, Greitzer E M. Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors. ASME 90- GT- 156, 1990

(责任编辑 王震华)

MECHANISM INVESTIGATION ON CASING TREATMENT FOR RESTRAINING ROTATING STALL BY MEANS OF WAVELET TRANSFORM

Zhang Yandong, Wang Guanghua, Lu Yajun

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

ABSTRACT

Wavelet transform, as a tool for signal analysis, is applied to analysis of compressor rotating stall signals. With the Morlet wavelet transform, the time-evolution of the unsteady signals during the stall inception and the local behavior in the casing treatment plenum are investigated. By comparison with structure characteristics of the coherent waves in the casing without treatment, it is shown that the casing treatment does have different influences on pressure impulse signals. A mechanism for restraining perturbations of stall inception via casing treatment is proposed.

Key Words Axial fan Treatment Casing Coherent detection

NUMERICAL PREDICTION OF SECONDARY FLOW LOSS IN A TURBINE CASCADE BY USING TVD SCHEME TO SOLVE N-S EQUATIONS

Chang Jianzhong, Feng Zhenping, Li Guojun, Shen Zuda

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

ABSTRACT

Harten's TVD scheme and Baldwin-Lomax turbulence model are applied to solving 3D N-S Equations for simulation of emergence and development of secondary flow and its loss in a rectilinear turbine cascade at a 8° incidence. The computation simulates successfully the vortex structure of the secondary flow and its loss distribution in the cascade passage. The predicted pitch averaged cascade distribution along blade height is consistent with the experimental data well. The mechanism of secondary flow loss emergence and development is revealed. It is found out that the incoming endwall boundary layer, the horse shoe vortex and its induced separation, and the shear motion of the horse shoe vortex with that of passage vortex are the major sources of the loss production, and the cascade boundary layer development and the passage vortex play an important role in the cascade loss development and redistribution. As a result, the numerical technique developed by the authors has a high accuracy and resolution, and can be adopted in the engineering application.

Key Words Turbomachines cascades Secondary flow Losses numerical Simulation