

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0270-08

# 一种捕捉预示压气机失稳预警信号 的新方法的研究

张靖煊

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 本文旨在寻求预示压气机失稳发生的预警信号。通过对失稳产生的物理机制的分析可知, 压气机系统内脉动压力能量的积累有可能作为失稳先兆的外部表征。据此, 本文从能量的角度出发, 对多组压气机失稳的实验数据进行了频域, 时域分析。结果发现, 在压缩系统完全进入失稳以前, 动态压力的方差值有一明显的增长过程, 而且这一异常现象距失稳有 1~2 秒的时间间隔, 这对实现压气机失稳的在线预报有十分重要的意义。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 压气机失稳; 旋转失速; 失速先兆; 失稳预警信号

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

## Study of a New Method for Giving Warning Signals of Instability

ZHANG Jing-xuan

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

**Abstract:** A new method has been developed to give early warning signals just before a compressor runs into instability. Analyses based on prestall pressure signals of several axial compressors reveal that the dynamic pressure energy accumulation in a compressor just before the instability could be used as a precursor signature of the instability. It is illustrated that by using the appropriate RMS of the casing static pressure over the rotor tip an early warning could be obtained about 1~2 seconds before the onset of the instability. This is particularly important because the method is applicable to the spike type stall inceptions as well as the model type ones, the former usually appears abruptly and does not have a precursor.

**Key words:** aerospace propulsion system; compressor instability; rotating stall; stall precursor; stability early warning signals

## 1 引言

压气机失稳对其工作会造成极大的危害, 不但使压气机性能大为恶化, 而且更为严重的是会引起压气机叶片剧烈振动以致叶片断裂而造成部

件的损坏。随着现代控制技术的发展, 在实际的工业生产中, 人们更为关心的是失稳先兆的探测。如果能够获得恰当的、尽早地预示失稳发作的预警信号, 则就有可能对即将发生的失稳采取必要的防范措施。这对避免压气机因进入失稳而造成

收稿日期: 2003-04-29; 修订日期: 2003-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59525612)

作者简介: 张靖煊 (1978-), 男, 辽宁康平人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生。

破坏故障具有现实的意义。近年来，诸多学者在“主动控制”概念的推动下，在失稳先兆的研究方面做了大量的工作。文献 [1] 中将压力脉动周期性的亏损作为失稳先兆信号；文献 [2] 中将沿压气机周向传播的小尺度失速团作为失稳先兆信号。本文的工作并不是为主动控制寻求触发信号，而是通过对失稳先兆的分析处理寻求失稳的在线报警信号。现阶段的研究成果表明，轴流式压气机进入失稳一般循两条路径：尖脉冲型失稳<sup>[3]</sup>和模态波型失稳<sup>[4]</sup>。虽然 FFT 方法对判断经由模态波的失稳有效，但对尖脉冲型失稳却有其局限性。这是因为尖脉冲型失稳是突发性的，而不像模态波型失稳有一确定频率的动态压力的脉动幅值逐渐增长的过程。本文拟从能量的角度出发，寻求更为一般的探测失稳先兆信号的方法。最终的结果表明本文所采用的方法是可行性的。

2 寻求预警信号的方法及结果分析

2.1 理论根据

所谓失稳先兆是指在压气机完全进入失稳以前所表现出来与失稳有关的气流扰动现象，这种扰动有别于压气机稳态工作时气流的流动情况，一般表现为压力、速度的脉动幅值增大。有时从先兆产生到完全失稳有一相对较长的时间间隔，如模态波型先兆，这时可以在这段时间中选取某种信号作为预警信号，实现压气机失稳的在线预报。但是，对于尖脉冲型失稳，在系统进入失稳

以前几乎没有先兆可言，这就使得压气机失稳的在线预报很难实现。理想的能预示失稳产生的先兆信号应该具有这样的特征：该信号在稳态时的值与即将失稳时的值有明显的不同，而且从可以识别该信号到完全失稳的时间间隔越长越好。有观点认为：当压缩系统内由于局部流体扰动诱发的非稳定能量占主导位置时，失稳发作表现为尖脉冲型。反之，则表现为模态波型<sup>[5]</sup>。也就是说，两种类型的失稳发作路径都与系统内的压力脉动能量异常有关。所以，如果能通过对信号的频域及时域分析而发现这种异常，则就可以作为预示失稳发生的报警信号。本文将动态压力方差值作为非稳定能量的量度，来寻求这种异常。

2.2 实验数据的来源

本文所采用的实验数据均为中国科学院工程热物理研究所采集的不同压气机失稳的实验数据。其中包括两组该所两级低速轴流压气机的失稳数据，一组北航单级低速轴流压气机失稳数据，一组北航跨音风扇失稳数据。以上 4 组数据均以模拟信号的形式存储在磁带上，通过 A/D 转换器转换成离散的数字信号。

2.3 信号的处理

以对工程热物理研究所两级低速轴流压气机旋转失速的实验数据的分析为例，来具体说明处理数据的方法。在工程热物理研究所的原试验中使用了在转子前叶尖部微量喷气的方法来研究其

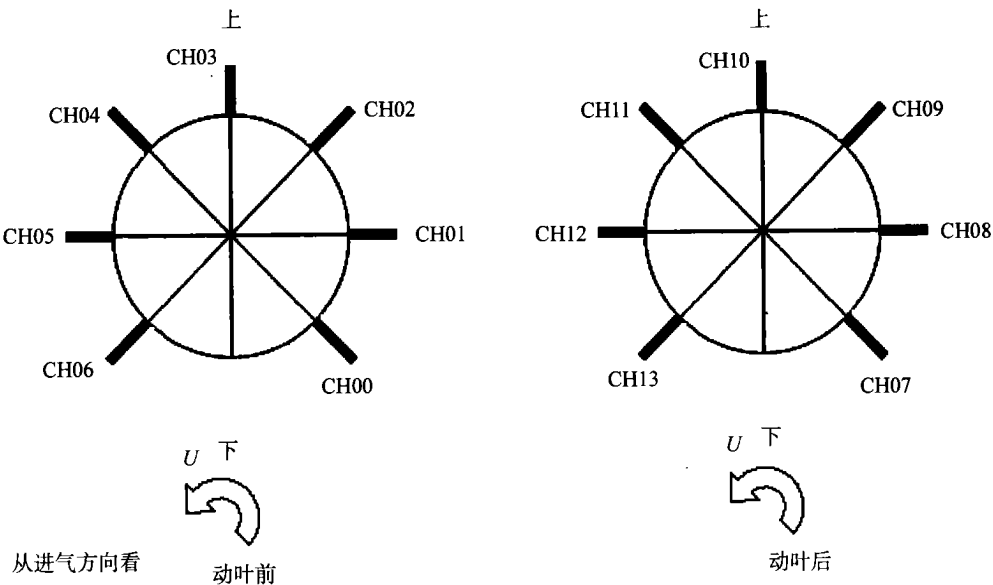


图 1 动态压力传感器的布置图

Fig. 1 Transducer Position on the case

对压气机稳定性能的影响。以下分析所采用的数据是在喷气角为 0 时,即喷嘴沿轴线方向时测得的。具体的试验设备及喷气方法的相关内容见文献 [6]。

2. 3. 1 原始数据的测量方法

动态压力传感器沿周向均布在一级动叶前后的机匣上。通过改变压气机节流阀的开度,进行特性线和壁面动态压力测量。压气机壁面动态压力数据由传感器传出记录在磁带上。动态压力传感器的布置如图 1 (注:“CH”为磁带记录通道标号)。

2. 3. 2 数据处理的步骤

本文选取 00 采样通道的失稳数据作为分析对象。其数据图如图 2。该图的横坐标为转子转数,且把失稳发生时间定为 0。

(1) 快速傅立叶变换: 通过对信号的快速傅立叶变换,可以了解信号的频率组成,从而得到失稳频率。对信号的变换结果如图 3。从图中可以看出,该信号主要由频率为 17 Hz 和频率为 2281 Hz 及其相应的倍频组成。其中 2281 Hz 为压气机叶片经过频率,17 Hz 即为压气机的失稳频率(旋转失速)。

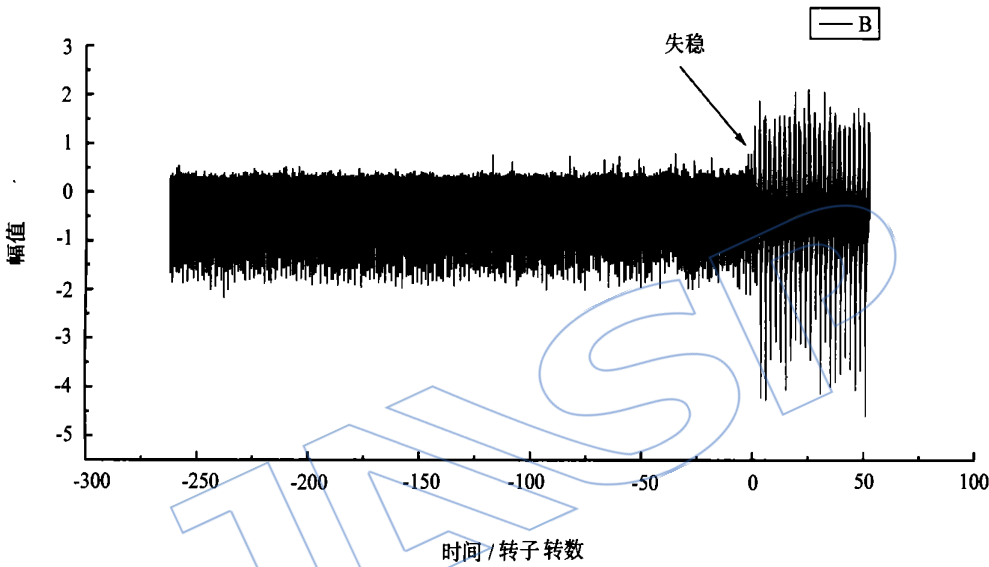


图 2 原始数据图  
Fig. 2 Time history of dynamic pressure (unfiltered)

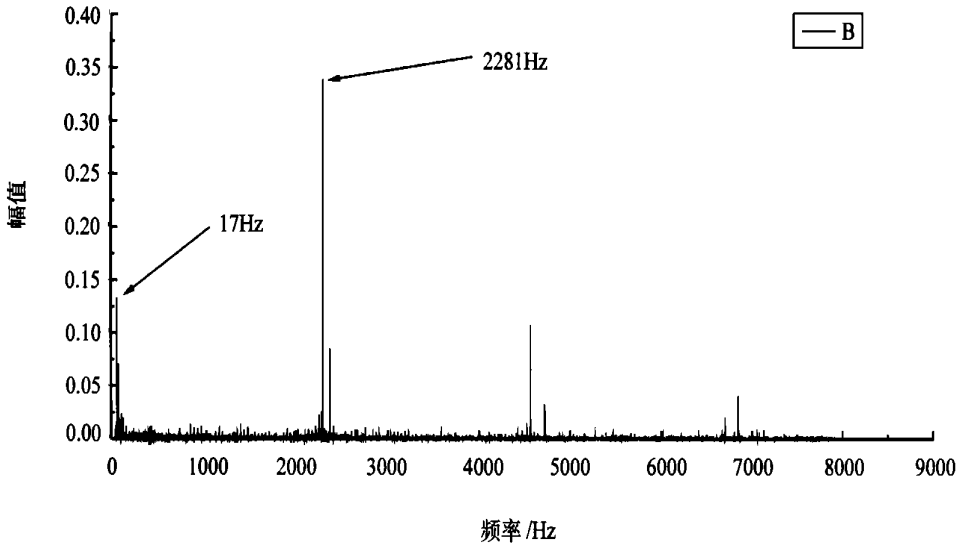


图 3 快速傅立叶变换图  
Fig. 3 Amplitude of the FFT of the data in Fig. 2

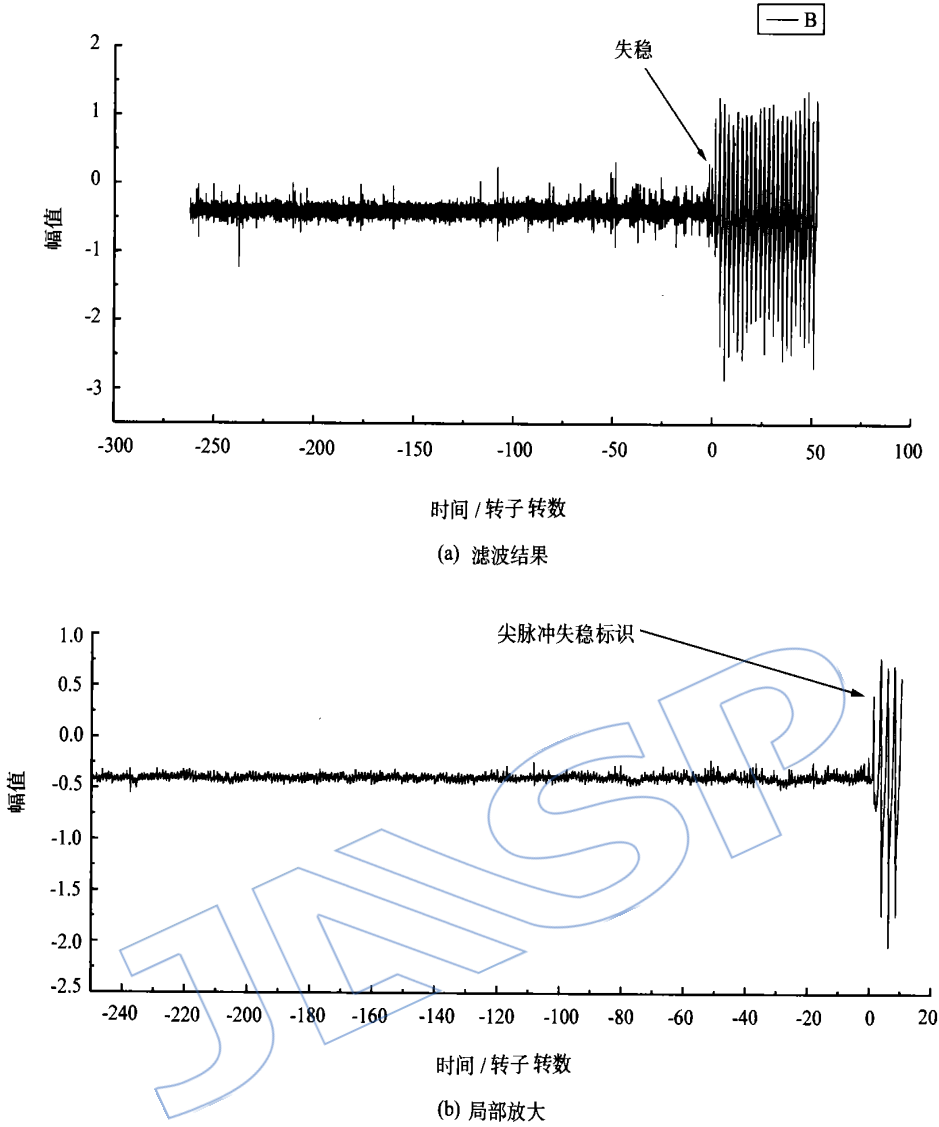


图 4 低通滤波图

Fig. 4 The Low Pass result of the data in Fig. 2

(2) 信号的低通滤波: 对信号的低通滤波可以得到便于分析的较为纯净的失稳信号。本着不丢失有用信号, 但又尽量去除高频干扰信号的原则, 本文选取滤波频率为 1000 Hz, 滤去了 2281 Hz 的叶片经过频率。结果如图 4 (a) 和 (b) 所示。图 4 (a) 是滤波结果, 图 4 (b) 是图 4 (a) 的局部放大。从这两张图可以看出, 在完全失稳产生前极短时间内压力脉动幅值迅速增大到最大, 压气机随即进入失稳状态, 这符合前面所提到的尖脉冲型失稳先兆的特征。

(3) 对信号的求方差处理: 对离散数据方差的计算公式为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \times \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N x_i$$

其中,  $N$  为数据点的个数,  $T$  为采集这些数据点所需要的时间。从该公式可以看出, 动态压力的方差值反映了单位时间内动态压力围绕其静态分量 (平均值) 波动量的大小。通过比较, 本文选取  $T$  值为 120 转, 并且每隔大约 0.02 转算一次。计算结果见图 5。

图 5 表明, 方差值从 -100 转左右开始逐渐增大, 这与压气机正常工作时其方差值波动较小是有区别的, 也就是说这可以看作失稳前的异常波动。不难想到, 如果将上图 -50 转左右的方差值作为预示失稳的阈值, 那么就可以给系统约 50 转左右 (大约 1.2 秒) 的响应时间来实现失稳的

避免。图 6 是图 5 的光滑曲线，目的是更加清楚的看到方差值的增长过程。

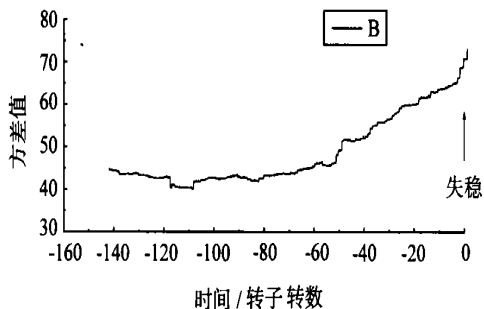


图 5 00 采样通道的方差图

Fig. 5 The RMS of the channel 00 data

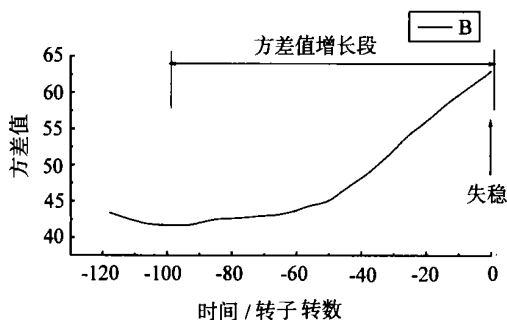


图 6 00 采样通道方差图的光滑曲线

Fig. 6 The RMS of the channel 00 data but smoothed

### 2. 3. 3 对其他采样通道数据的处理结果

图 7 给出了该组其他采样通道失稳数据处

理结果 (未光滑)。该图表明: 这些采样通道数据的处理结果基本上有相同的趋势, 即在完全失稳前方差值均有一明显的增长过程。

### 2. 3. 4 对方差值增长现象的解释

一般来讲, 压气机内部流场的压力脉动是由诸多因素造成的, 但由于叶盆、叶背压差对压力脉动的贡献远大于其他因素, 所以, 在原始数据中由其他因素产生的压力脉动并不明显。然而, 当对原始数据进行截止频率小于叶片经过频率的低通滤波后, 这类压力脉动就会显现出来, 如图 8 中很“密”的部分。这些很“密”的部分对应某种气流扰动, 姑且称作扰动团。这些扰动团和转子有相近的频率。随着临近失稳, 它们的幅值和相同时间内扰动团的数目发生了变化: 脉动幅值有所增高, 扰动团数目减少, 如图 8 (c) 和 (d)。对此较为合理的解释为: 扰动团在发展过程中相互“吞食”, 形成较大的扰动团, 从而造成其数目的减少。另外, 随着扰动团的聚集, 由其脉动而产生的能量也开始集中, 表现为脉动幅值的增加。这两种原因导致了动态方差值的增长, 即非稳定能量的增长。从图中可以看出, 这种扰动在稳态工作时是存在的, 说明其是压气机内的固有扰动, 很可能是由于压气机周向非对称所致。当流场由于节流发生变化接近失稳时, 就会对低频信号变得敏感, 从而表现出这种扰动的增强。

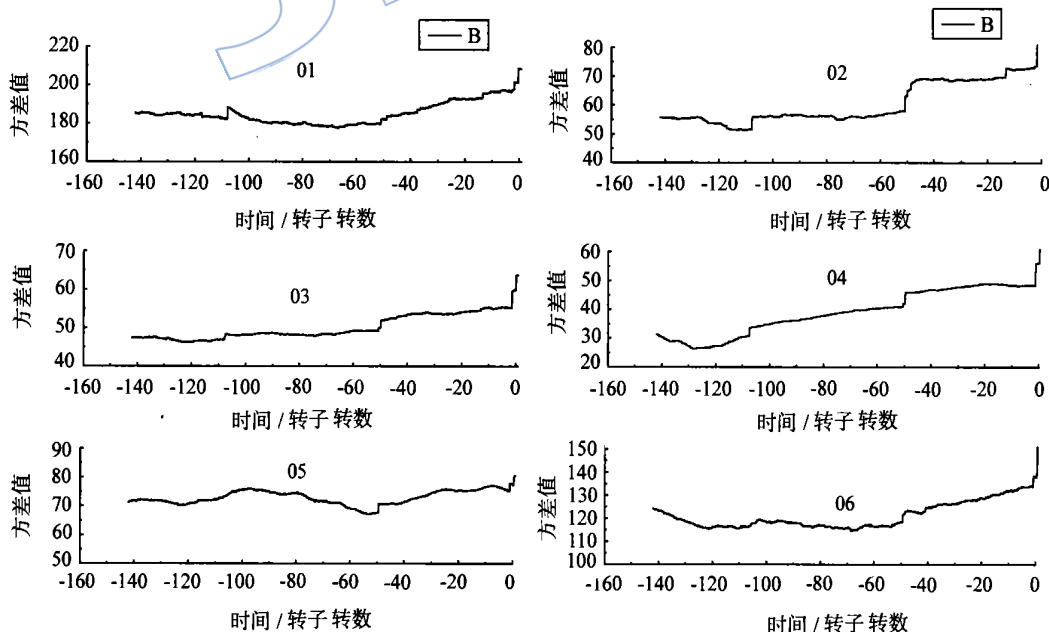


图 7 其他采样通道数据的处理结果

Fig. 7 The RMS of the other channels data

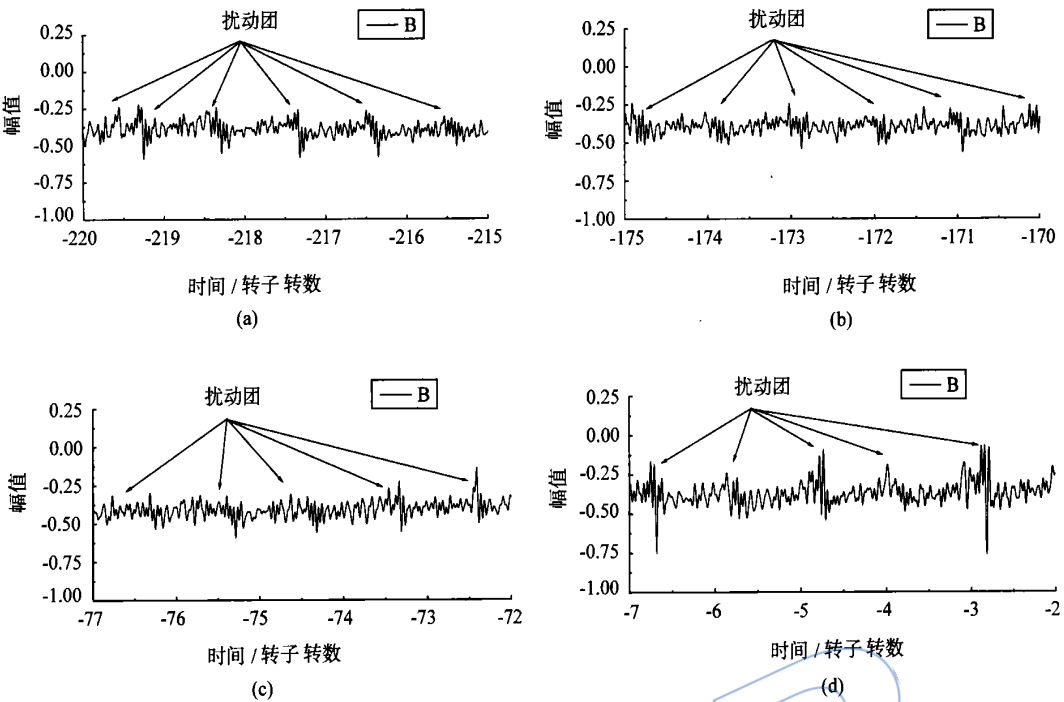


图 8 扰动团的发展变化  
Fig. 8 The Time history of perturbation

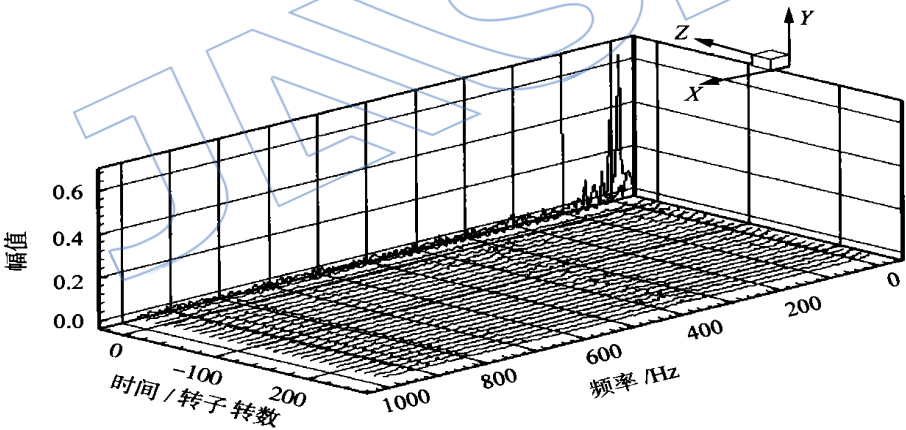


图 9 采用分段 FFT 处理结果图  
Fig. 9 The result of the method of segment FFT

2. 3. 5 与分段 FFT 方法的比较

分段 FFT 的方法顾名思义是指在时域上取若干时间段, 对每个时间段进行快速傅氏变换, 然后在频域内对比这些傅氏变换的结果, 从而能分析某种特定频率信号的发展。文献 [7] 运用此方法对模态波型失稳的发作过程进行了处理, 在实验室里很好地捕捉到了失稳先兆信号, 并实现了喘振的在线预报和自适应调节。但是, 正如本文前面所提及的, 分段 FFT 的方法在处理尖脉冲型失稳时却有其潜在的局限性。为了说明这一点, 本

文又对该组数据做了分段 FFT 处理。每段的数据点个数为 4096。结果如图 9。

显而易见, 在失稳以前, 频率为 17 Hz (失稳频率) 的信号幅值没有明显的逐渐增长的过程, 而是在失稳时幅值突然增大到最大, 如果这时才发出预警信号, 压气机将没有足够的响应时间来采取措施退出失稳状态。

3 对其他组数据的处理结果

以上只是对一台压气机某一种工况下失稳

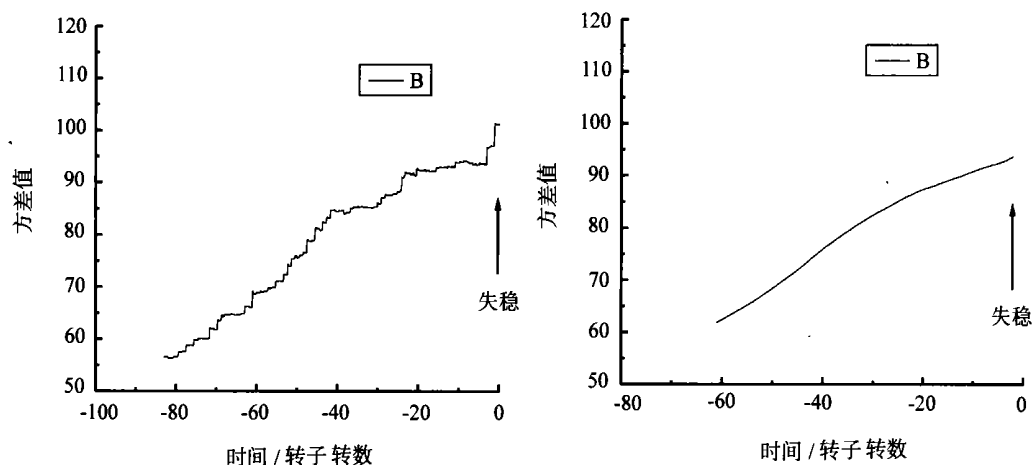


图 10 工热所另一组失稳数据方差图及其光滑曲线

Fig. 10 The RMS of another volume data of IET and the corresponding smoothing drawing

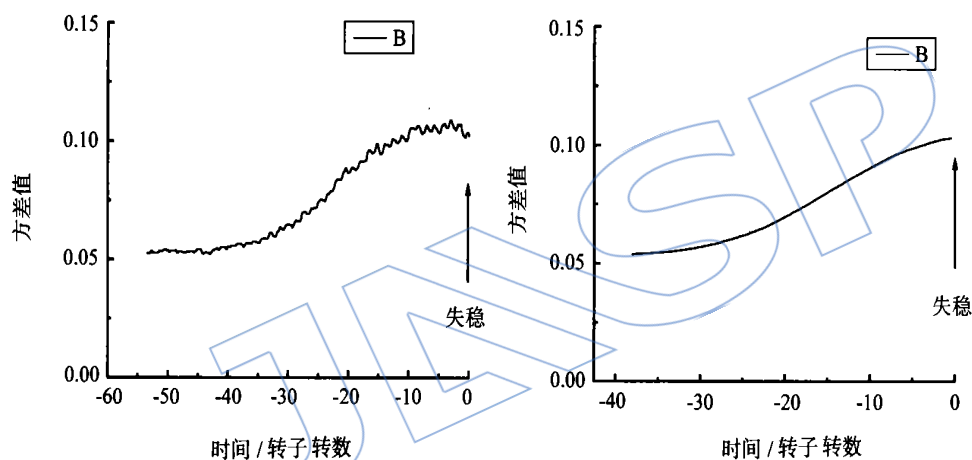


图 11 北航低速实验台失稳数据方差图及其光滑曲线图

Fig. 11 The RMS of the data of axial-flow compressor rotor in BUAA and the corresponding smoothing drawing

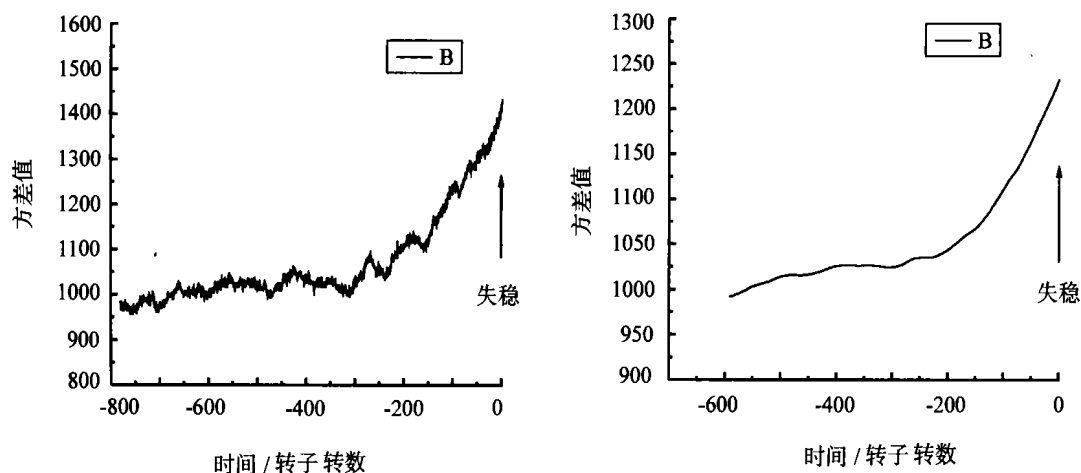


图 12 北航高速实验台跨音风扇转子失稳数据方差图及其光滑曲线图

Fig. 12 The RMS of the data of a single-stage transonic axial compressor in BUAA and the corresponding smoothing drawing

数据的分析。为验证本方法对该压气机的不同工况以及不同压气机是否也有类似的现象，本文又对其他组数据做了分析处理。

3. 1 对工程热物理研究所另一组失稳数据的处理结果

该组数据同第一组数据同出于一台压气机，所不同的是压气机的喷气角度不同。该组数据的喷气偏转角为 $-50^{\circ}$ 。

3. 2 北航低速实验台数据处理结果

该组实验数据经由尖脉冲型失速先兆进入失稳。实验台的实验装置可参考文献 [8]。

3. 3 北航高速实验台跨音风扇转子数据处理结果

该组实验数据经由尖脉冲型失速先兆进入失稳。实验台的实验装置可参考文献 [9]。

4 结 论

工业上失稳的在线预报问题一直是该领域研究的重点和难点。尤其对于 Spike 型旋转失速这类事先毫无征兆的失稳现象来说目前还没有有效的预警方法可采用。因此，如果对此类失稳现象能够定性地捕捉到进入失稳以前整个流场的某些异常波动，将对失稳的在线预报以至避免都有现实的意义。本文在对单点测量的压气机动态压力数据频域、时域分析的基础上发现：动态压力的方差值在系统进入失稳以前有逐渐增长的过程。这一发现表明在失稳前流场内的确存在与稳态工作时不同的异常波动，而且值得指出的是，其他实验台（北航低速大尺寸实验台、北航跨音转子风扇）的失稳数据的方差值也出现了类似的现象，即在失稳前方差值有一逐渐增大的过程，当增大到一定程度时，系统进入完全失稳。另外，处理结果还显示出从方差值开始明显增长到系统完全失稳一般有 1~2 秒的时间间隔（不同实验台的时间间隔不同）。这是十分重要的，因为由于失稳的复杂性，现阶段对其产生机理的认识还很不成熟，

失稳的在线预报尤其是这种 Spike 型旋转失速的在线预报很难实现，而本文的研究成果则表明可以把方差值增长这一发现应用到失稳的在线预报上，而且，方差值增长的时间相对较长（1~2 秒），系统可以有足够的响应时间来避免失稳的发生，利用方差值增长实现失稳在线预报是本文的创新之处。

致谢 作者对中国科学院工程热物理研究所聂超群研究员为本研究提供的悉心指导和实验数据表示衷心感谢。本研究由自然科学基金（项目编号：59525612）支持。研究指导教师徐力平教授。

参考文献：

[ 1 ] Inoue M, Kuroumaru M, Iwamoto T, et al. Detection of a Rotating Stall Precursor in Isolated Axial Flow Compressor Rotors [R]. ASME Paper 90- GT- 157.

[ 2 ] Garnier V H, Epstein A H, Greitzer E M. Rotating Waves as a Stall Inception Indication in Axial Compressors [R]. ASME Paper 90- GT- 156.

[ 3 ] Day I J. Stall Inception in Axial Flow Compressors[J]. ASME J of Turbomachinery, 1993, 115: 1- 9.

[ 4 ] Camp T R, Day I J. A Study of Spike and Modal Stall Inception Indication in Axial Compressor [R]. ASME Paper 97- GT- 526, 1997.

[ 5 ] 聂超群. 进口导叶预旋规律与失速先兆类型的关联 [A]. 中国工程热物理学会第十届年会 [C]. 山东 青岛: 2001: 311- 318.

[ 6 ] 徐刚, 程晓斌, 聂超群, 陈静宜. 两级低速轴流压气机的喷气实验的非定常响应 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (1): 27- 30.

[ 7 ] 蒋骏, 聂超群. 离心风机喘振自适应调节的实验研究 [A]. 中国工程热物理学会第十届年会 [C]. 山东 青岛: 2001: 324- 332

[ 8 ] 蒋浩康, 李雨春, 张洪, 等. 研究转子内流动的大尺寸轴流压气机实验装置和动态测量技术 [J]. 航空动力学报, 1992, 7 (1): 1- 8.

[ 9 ] 桂幸民, 王同庆, 于清, 李运敏. 跨音压气机转子叶尖流场试验与分析 [J]. 工程热物理学报, 1998, 19 (5): 553 - 558.