

文章编号: 1000-8055(2004) 04-0490-05

基于时频—小波分析的 压气机失速过程研究

吕建伟, 李 军
(空军工程大学 推进系统实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 采用时频—小波分析的方法, 针对某型发动机的八级轴流压气机级间压力信号, 提取失速先兆及发展信息。结果表明, 在失速前的阶段, 不同的频率段表现出不同的失速先兆成分; 并检验了失速时刻信号的奇异性, 最后确定了最先失速级。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 时频—小波分析; 失速先兆; 压气机

中图分类号: V 231. 3 文献标识码: A

Study of Stall in the Compressor Based on the Time-Frequency and Wavelet

LU Jian-wei, LI Jun
(Propulsion System Lab., The Air force University of Engineering,
Xi'an 710038, China)

Abstract: By means of the pressure signals of a certain research engine which has an eight axial stage compressor. A method of time-frequency analysis is presented in the paper. Information on the stall inception and development, which has some correlations with the onset frequency and stall frequency can be obtained during the engine operations. Therefore, the two main frequencies at the stall inception can be observed in the time-frequency plots. In order to identify the signal of the onset of stall accurately, this paper introduces the technique of the wavelet analysis, and provides an example of the 1st-6th compressor stage signals which are decomposed by Daubechies wavelets. The result indicates that different frequencies show different stall inception prior to the stage stall, and proves the singularity of the signal of stall. The stage of the first stall is ascertained by this method in the paper.

Key words: aerospace propulsion system; time-frequency and wavelet analysis;
stall inception; compressor

确定压气机失速发生的时机, 对于及时抑制或延缓失速的继续发展具有重要的意义。目前研究压气机失速过程多为试验法^[1]。在压气机工作中, 流动复杂, 测量信号复杂, 对有用信号干扰较

强。
时频分析旨在构造时间和频率的密度函数, 以揭示信号中所包含的频率成分及其演化特性。随着小波分析工具的发展, 小波变换对信号的处理

理,具有多分辨率的特点,可以由粗及细地逐步观察信号;适当选取基本小波,可以使小波变换在时频两域都具有表征信号局部特性的能力。因此,有利于检测信号的瞬态或奇异点。在文献[2]中对单级、轴流压气机的失速过程进行了试验研究。本文利用时频—小波为工具,在多次重复试验的基础上,从时频、小波两个方面对压气机压力信号进行分析。结果发现,不同的频率段表现出不同的失速信息成分。

1 失速先兆信号的分析

以某型单转子 8 级轴流式涡喷发动机的试验数据进行分析,具体试验过程见文献[1]。首先,通过对压气机级间压力信号分析,确定失速发生及发展频率的范围,试验数据以第 3 级的采集数据为例子,进行时频域分析,见图 1。

图 1(b) 横轴表征失速发展的时间,纵轴表征测量信号包含的频率。通过对压气机级间压力信号分析,可以得到失速的发生、发展过程。前 10 s,气流的压力信号成分十分复杂,压气机叶片间的气流处于稳定流动状态。随着向失速时刻的发展,在压气机叶片内形成几个主要的气流分离失速

团;图 1(b) 表明,在 13 Hz 和 30 Hz 左右出现两条频率集中的压力信号成分;其中,以 27 Hz 左右集中了主要的压力信号成分;随失速分离区扩展,扰动频率下降。从图 1 中也可以看出上述两条频率集中的信号成分的频率均随着时间推移有所下降。在 37.9 s 时,在 9 Hz、27 Hz 分别出现一个明显的突变,时间很短暂,即约持续 3 s 的失速过程;在这个过程中,可以看出 5~9 Hz、20 Hz、28~30 Hz、34 Hz、43 Hz 等几个稳定的失速频率。经分析,各级的失速表现虽然不完全相同,但都有相类似的过程。表明失速的出现影响压气机的转速,说明该压力信号成分与试验观察是一致的,检测到的成分是有用的。现象一直持续到失速的完全发生。

另外值得注意的是,图 1(b) 中较集中的压力信号成分大多为 9 的倍数;不仅预示该频率与失速先兆频率大小具有一定相关性,更为有意义的是为信号的细节进行小波分析提供了依据。

经过压气机各个级压力信号的时频分析,可以得到两个主要的失速先兆频率,结果如下:

第 3 个失速先兆频率以 81 Hz 为主。但是,它仅仅出现在第 1 级压气级,并且振幅小于第 1、第

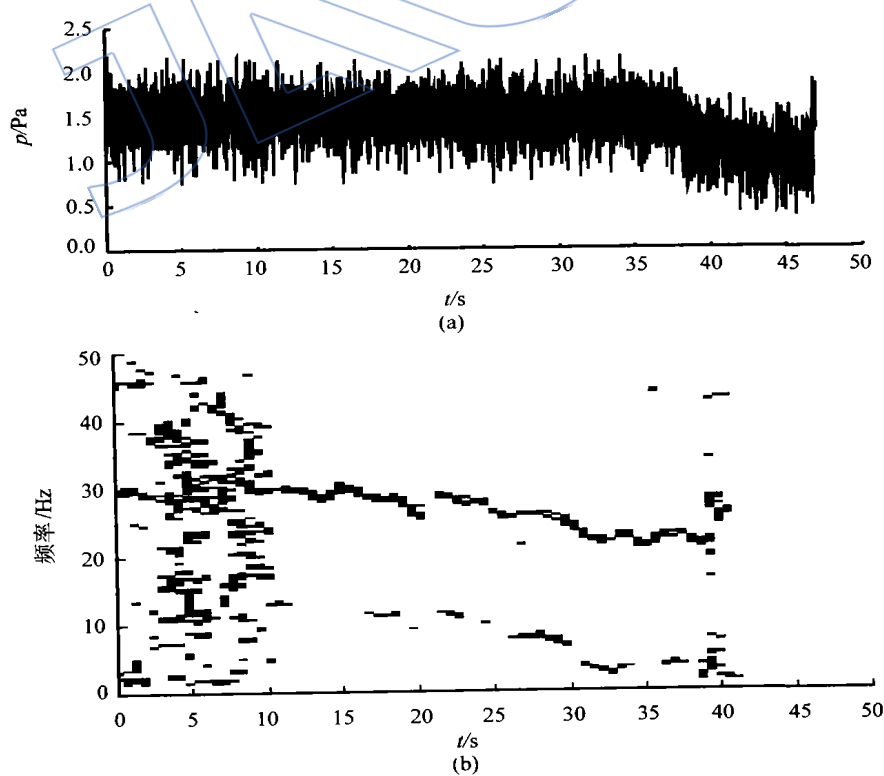


图 1 (a) 第 3 级压力原始采集信号; (b) 第 3 级压力信号时频分析结果[时频域]

Fig. 1 (a) The original pressure signal on 3rd stage;
(b) The result of be time–frequency analysis of the pressure signal on 3rd stage

表 1 第 1 个失速先兆频率(以 27 Hz 为主)
Table 1 The first stall frequency (Mainly 27 Hz)

级数	失速发展时间(起~止)/s	振幅/dB	频率/Hz
1	8.704 1~37.921 5	22.042 0	22.245 8~30.720 3
2	8.964 1~37.921 5	16.100 9	22.245 8~30.720 3
3	8.577 1~37.921 5	16.572 1	22.458~30.720 3
4	27.150 2~38.057 6	17.873 3	24.364 4~32.839 0
5	26.892 2~38.057 6	18.997 7	24.364 4~30.720 8
6	26.892 3~38.057 6	19.023 3	22.245 8~38.33

表 2 第 2 个失速先兆频率 (以 54 Hz 为主)
Table 2 The second stall frequency (mainly 54 Hz)

级数	失速发展时间(起~止)/s	振幅/dB	频率/Hz
1	10.640 8~38.33	16.214 0	58.262 7~47.669 5
2	8.835 1~38.33	5.521 9	54.02 5~54.030
3	8.964 1~38.193 8	4.851 5	49.788 1~58.262 7
4	10.124 9~38.33	7.550 2	54.025 4~64.618 6
5	15.284 1~38.33	7.365 6	51.906 8~64.618 6
6	38.33~38.874 6	8.557 6	47.669 5~75.211 9

2 失速先兆频率, 时间也落后于第 1、第 2 失速先兆频率的出现。

从表 1、表 2 可以看出, 存在一强(表 1)一弱(表 2) 2 个失速先兆频率。在判断最先失速级时, 由于第 1 级与 2、3 级失速发生及发展的时间上一致, 所以, 1 至 3 级同时进入失速状态。并且, 相比于根据失速前压力上升的失速级判断准则, 所得结果基本一致。

从表 1、表 2 还可以看出, 在失速时, 越是压气机两端失速先兆频率的振幅越大, 而中间最小。反映了失速对该压气机两端的影响较大。对此规律在多级压气机中是否具有普遍性, 仍有待进一步深入研究。

2 级间压力信号小波分析

依据时频分析所确定的失速先兆频率范围, 应用 Daubechies 小波工具^[3], 对各级压气机信号进行 MRA 分析, 检验压气机失速信号奇异值。第 1、3 级压气机压力信号为例进行小波分解结果见

图 2。
图 2(a) 的低频部分横轴表征失速过程发展的时间, 其纵轴表征压力升降的量值; 图 2(b) 高频部分横轴表征失速过程发展的时间, 其纵轴表征压力发生脉动的量值。0~39.06 Hz 频率段的压力信号分量包含了图 1(b) 的 27 Hz、35 Hz 的频率; 经分析, 越是级数靠前越是有少量干扰。典型的是: 从图 2(a) 的低频部分可以准确检验失速发生时刻。该频率段表现信号的细节, 从压气机开始工作时, 一直十分稳定, 直到出现失速时, 可以清晰的观察到压力急剧下降。图 2(b) 高频部分在失速发生时刻可以相应的观察到压力的脉动, 由于失速时刻信号是一冲击响应, 所在小波分解的每一层的高频部分均存在。进一步, 对压气机 1~6 级的低频部分的 37.6~40.6 s 秒和 37.6~38.6 s 进行局部放大, 可以通过小波分解的低、高频部分确定压气级的最先失速级。见图 3(a), (b), 依据低频部分的压力下降、高频部分的压力脉动, 可以得出最先失速级为第 3 级。

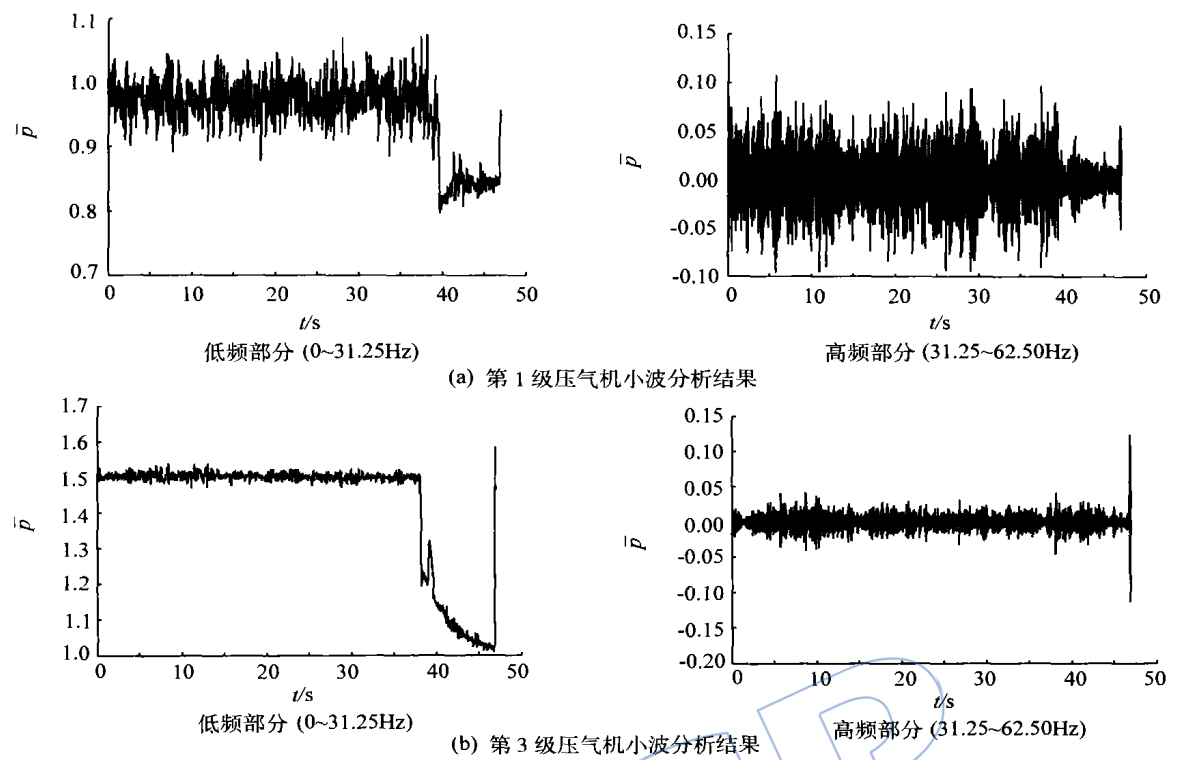


图 2 第 1, 3 级失速信号奇异值小波分析结果

Fig. 2 The result of the wavelet analysis of the stall signal on 1st, 3rd compressor stage

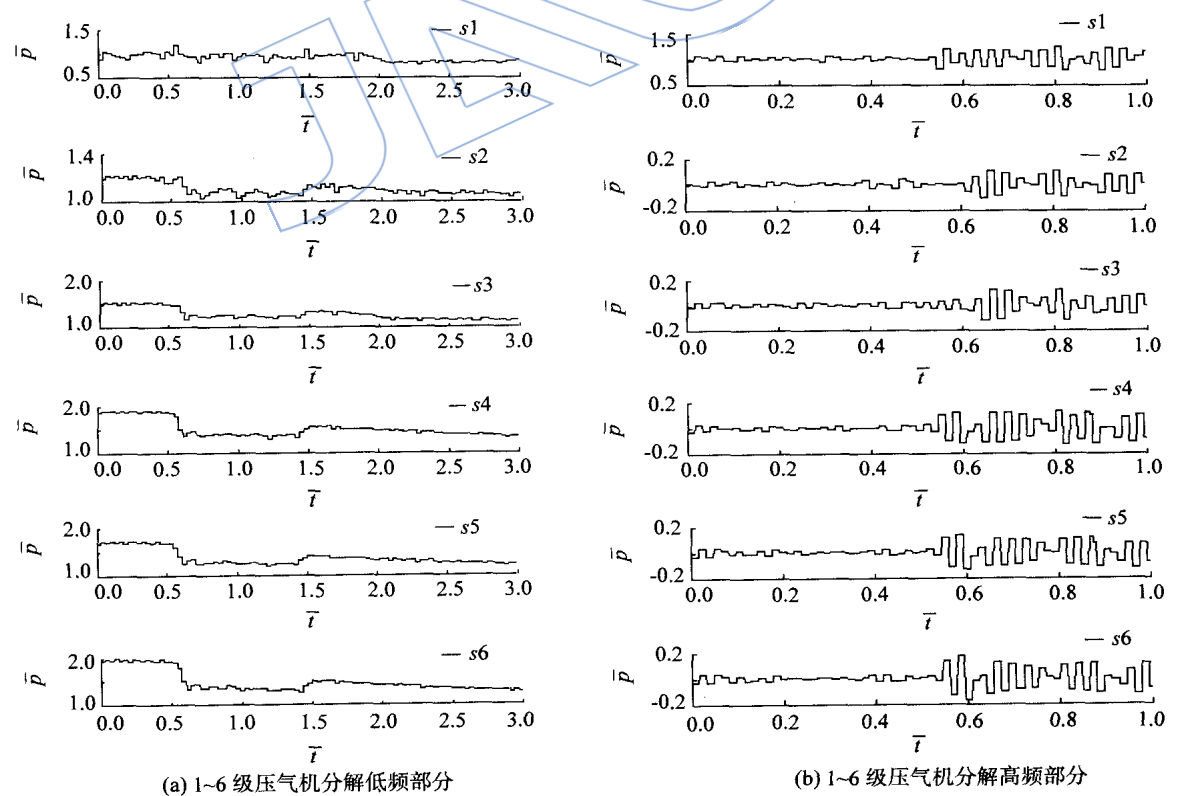


图 3 1~6 级压气机 Daubechies 小波分解结果

Fig. 3 The decompose result of Daubechies wavelet on 1st~6th

3 结 论

- (1) 经过小波变换后,可以发现在 0 Hz~39 Hz,能够准确检验信号奇异性发生的时刻,在失速发生时刻压力开始下降,即失速发生的时机;并确定了最先失速级。该方法达到了很好的效果。
- (2) 频率 27 Hz 是失速前的主要频率。压气机失速的压力信号成分中存在不同的先兆频率,它们与某一个频率数值形成倍数关系。
- (3) 时频分析与小波分析方法互补。应用时频分析确定信号粗略的概况,利用小波检验信号的奇异点。可以对动态数据的各种信息在不同频带上进行联合分析,是一种非常理想的时频工具。

参考文献:

[1] 姜涛,李应红,李军.某型发动机压气机最先失速级判定的试验研究[J].航空动力学报,2002,17(1):80-82.
JIANG Tao, LI Ying-hong, LI Jun. An Experimental Research on Identification of the First Stall Stage of a Certain Engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(1): 80-82.

[2] 聂超群,陈静宜,蒋浩康,等.低速轴流压气机旋转失速先兆特征的实验分析[J].工程热物理学报,1998,19(3):293-298.

[3] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[Z].北京:科学出版社,2001.