

文章编号: 1000-8055(2006)05-0909-05

高速风扇噪声的频谱分析中 带宽的影响

金 鹏, 王同庆

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 叶片通过频率分量是风扇噪声的主要成分,但在对噪声测量信号进行频谱分析中发现选择不同带宽可导致显著不同的叶片通过频率分量谱值。讨论了使用不同带宽对相同风扇噪声记录进行的快速傅里叶变换(FFT)分析过程,由于 FFT 分析得到的频谱声压级是带宽内谱能量和,当由于转速波动引起的叶片通过频率波动范围超过分析带宽时带宽的变化将引起声压级的差异,本文提出了获得确定声压级频谱的方法。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 频谱分析; 带宽; 风扇噪声

中图分类号: V219

文献标识码: A

Bandwidth influence on frequency spectrum analysis of high speed fan noise

JIN Peng, WANG Tong-qing

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: Components of Blade Passing Frequency (BPF) are the important elements of fan noise. In the spectrum analysis of noise signal, it was discovered that different analysis bandwidth made a significant difference in the BPF component value. In this paper, the Fast Fourier Transform (FFT) processes with different bandwidth for the same record of noise were discussed. Because the result of SPL is the energy sum within a bandwidth, while the range of BPF variation due to the varying rotating speed exceeds the bandwidth, the variation of bandwidth will make the SPL different. Finally, a method for determining the fan noise spectrum was introduced.

Key words: aerospace propulsion system; frequency spectrum analysis; bandwidth; fan noise

风扇/压气机噪声是涡扇发动机的主要噪声源,对其噪声进行频谱分析是研究其产生和传播的重要手段,由此可诊断风扇及管道的声学工作状态^[1-3]。超音风扇噪声频谱中叶片通过频率(Blade Passing Frequency,简称 BPF)分量占主

导地位,其频率为转子转频与叶片数乘积。本文研究了在风扇转子的台架实验中利用安装在风管道壁面的传声器阵列进行噪声测量和数据采集,并使用 Labwindow 的函数库对采集结果进行的 FFT 分析。

收稿日期: 2005 - 08 - 30; **修订日期:** 2005 - 12 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助(10272015)

作者简介: 金鹏(1981 -),男,北京人,北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生,主要从事旋转声模态实验的研究。

在频谱分析中发现,分析带宽对 BPF 分量声压级的测量结果影响很大。图 1 和图 2 为对同样的时域采样信号(采样频率为 54 375 Hz)使用不同分析带宽(即采样点数不同)进行相同的频率分析(即都使用海宁窗,重叠 2/3,平均 20 次)获得的结果。图 1 中频谱分析带宽为 13 Hz(每个数据块的采样点数为 4 096),图 2 中频谱分析带宽为 1.6 Hz(每个数据块扩大 8 倍)。从这两个频谱中看出最大的频率分量均为一阶叶片通过频率(图 1 和图 2 中 BPF 箭头所指),频率为 3 466

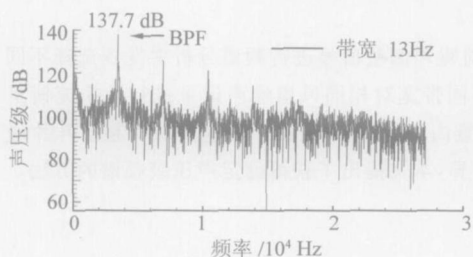


图 1 带宽为 13 Hz 的声压级频谱图

Fig. 1 Sound pressure level frequency spectrum with bandwidth 13 Hz

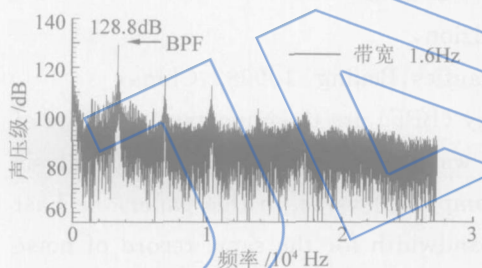


图 2 带宽为 1.6 Hz 的声压级频谱图

Fig. 2 Sound pressure level frequency spectrum with bandwidth 1.6 Hz

Hz,但图 1 频谱中(即 13 Hz 带宽)BPF 分量声压级为 137.7 dB;图 2 频谱中(即 1.6 Hz 频率带宽)BPF 分量声压级为 128.8 dB。小了约 9 dB,相当于声压幅值减小一倍多,研究这种差异的机理对噪声频率成分的理解和定量分析至关重要,本文研究了差别的原因,并提出了解决的办法。

1 频谱分析基本原理

1.1 频谱分辨率和带宽

对最高频率为 f_c ,持续时间为 T_p 的连续信号 $x_a(t)$ 进行采样,满足香农采样定理的采样频率为 $f_s = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_c$ (即采样间隔 $\Delta t \leq \frac{1}{2f_c}$),采样

总点数为 N ,由离散傅里叶分析得到 $[0, f_s]$ 上 N 个等间隔频域分析点,其频率间隔为 Δf ,未发生迭混的为前面 $N/2$ 个频率^[4]。

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_s}{N} \quad (1)$$

我们称为频谱的带宽,使用傅里叶分析得到的频谱是等带宽频谱,每条谱线代表了带宽中的声能量。在相同采样率情况下带宽与分析点数成反比。如果较小,则带宽较大,相应频谱的频率分辨率较低;反之,如果较大,则带宽较小,相应频谱的频率分辨率较高。对每个带宽谱的度量有两种方法,谱密度是带宽内单位 Hz 的声能量,通常称为谱级,声压级是指带宽内的总声能量,本文使用的函数库计算得到的是声压级,一般应用于研究离散频率分量。

1.2 窗与频率泄漏

频率分析中所谓的窗是指对有限采样的加权,如果不加权,或权为单位 1 的窗称为方窗,工程实际中经常使用海宁窗。使用窗函数对采样信号进行分析从而得到离散频谱的过程是先在时域中将采样信号与窗函数相乘得到加权(加窗)后的时域信号,然后再对其进行傅里叶变换得到离散频谱。根据傅里叶分析的理论,采样信号加窗后的频谱相当于在频域中将真实信号谱函数与窗频谱函数卷积:

$$F^*(f_k) = F(f_k) \cdot W(f_k) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) W(f_k - u) du \quad (2)$$

其中, $F(u)$ 表示信号复值谱密度函数, $W(u)$ 表示窗函数的频谱密度函数, $F^*(f_k)$ 相当于傅里叶分析后得到的 f_k 处的复值频谱,它表示离散频率 f_k 处单位带宽上的复数谱,其谱值为复数的幅值。对频率 f_i 为其复值为 F_p 的单频信号,其谱密度表示为: $F(u) = F_p(u) \delta(u - f_i)$,代入公式(2)得到:

$$F^*(f_k) = \int_{-\infty}^{\infty} F_p(u) \delta(u - f_i) W(f_k - u) du = F_p(f_i) W(f_k - f_i) \quad (3)$$

方窗与海宁窗是两种典型的窗函数,其频谱见图 3,由于窗函数对与频率零点对称,故只画一半。方窗的主瓣为两个带宽,海宁窗的主瓣为 4 个带宽,旁瓣都为 1 个带宽,但是海宁窗旁瓣的每 10 个带宽衰减为 60 dB,大大高于方窗的 20 dB^[5]。从公式(3)看出对于一个单频谐波信号得

到的频谱通常不是单频谱,而会在各离散频率分量上都有幅值,这就是与窗函数及带宽相关联的频率泄漏。单频信号 f_i 的频谱可以有 1~2 条峰值谱线,峰值频率最靠近信号频率 f_i , 设其为 f_{k0} , 则: $|f_{k0} - f_i| \leq \frac{\Delta f}{2}$ 。峰值谱线的幅值由谱线在窗函数频谱主瓣中的位置,即 $W(f_{k0} - f_i)$ 决定,对海宁窗进行的频率泄漏分析参见文献[5]。当窗函数不同,带宽不同时,单频分量由于频率泄漏产生的频谱会有不同,但不同带宽条件下峰值谱线的幅值相差很小,不会超过 $F_P(f_i) \left[1 - W\left(\frac{\Delta f}{2}\right) \right]$ 。

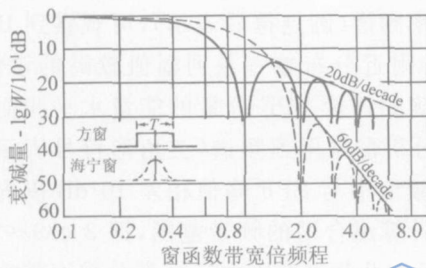


图3 方窗与海宁窗谱图
(“dB/decade”表示每 10 倍带宽衰减的分贝量)
Fig. 3 Spectrum of rectangle window and hanning window

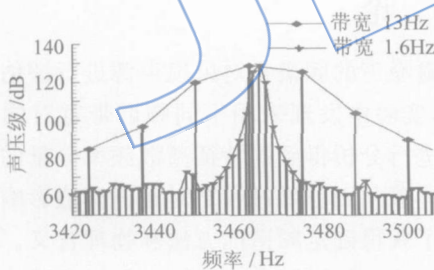


图4 对 3466 Hz 单频信号用相同采样频率、相同海宁窗,采用 2 种带宽分析得到的谱图
Fig. 4 Frequency spectrum of a 3466 Hz single frequency signal analyzed with same sample frequency, same Hanning window but two different bandwidth

图4是对 3466 Hz 单频信号用相同采样频率、相同海宁窗,采用 13 Hz 和 1.6 Hz 两种带宽分析得到的谱图,菱形符号代表使用分析带宽 13 Hz,倒三角形符号代表使用分析带宽 1.6 Hz。2 种带宽分析得到的频谱形状尽管不同,但峰值声压级是相近的,这说明对单频信号带宽和频率泄漏都不

会显著影响声压级幅值。

2 带宽对高速风扇噪声频谱影响的原因及改进方法

2.1 转速波动对通过频率分量幅值的影响

根据上节的分析对单频分量使用不同带宽得到的峰值声压级将相差很小,如果转速恒定,则 BPF 分量应是单频分量,但是目前使用相同的海宁窗和不同的带宽得到的通过频率分量的声压级有很大差别,这说明它不是单频分量。其原因在于使用自由燃气涡轮驱动的实验台转子转速不可能十分稳定,而会在一个小范围波动,于是产生的旋转噪声是周期有小范围波动的周期信号。它的 BPF 也会有波动。将图 1 和图 2 的频谱图中 BPF 分量附近的谱线放大,并绘于图 5 中,圆点符号代表使用 1.6 Hz 带宽,三角形符号代表使用 13 Hz 带宽。从带宽为 1.6 Hz 的谱图中可以看出:在峰值频率(也是名义叶片通过频率)附近有多个频率间隔很近幅值相差较小的离散频率分量,这说明风扇转速波动使 BPF 分量产生频率波动,从而形成有一定频率带宽的信号,可以将其简化为 M 个紧密相邻的、互不相关的单频信号,它们的幅值分布应该是围着中心频率向两边衰减,表示为:

$$F(u) = \sum_{i=1}^M F_P(u) \delta(u - f_i) \quad (4)$$

这里 $F_P(u)$ 是复数,频率分析后得到的 f_k 分量的声压为:

$$F^*(f_k) = \sum_{i=1}^M F_P(u) \delta(u - f_i) W(f_k - u) du = \sum_{i=1}^M F_P(f_i) W(f_k - f_i) \quad (5)$$

其 L 次平均声压的幅值平方值为:

$$|\bar{F}_L^*(f_k)|^2 = \left\{ \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^M F_P(f_i) W(f_k - f_i) \right\}_j \cdot \left\{ \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^M F_P(f_i) W(f_k - f_i) \right\}_j^* = \left[\sum_{i=1}^M |\bar{F}_P(f_i) W(f_k - f_i)|^2 \right] \quad (6)$$

若带宽大到能包括了通过频率的主要波动范围,则由公式(6)和上节的分析可知每个单频分量

主要产生 1~2 条峰值谱线,若 f_k 的主瓣频率范围包括了通过频率波动的主要范围,由于主瓣成分对幅值影响最大,因此得到的谱线将包括各个单频信号幅值计权的平方和,即仅有 1 条或 2 条幅值最大的峰值谱线;若带宽小到只包括一部分频率波动范围,则在通过频率波动范围内将有多条分析谱线,由于每个谱线主瓣内只包含了一部分频率波动范围内的声能量,因此幅值将小于大带宽情况。如果带宽增大到大于通过频率波动的主要范围,则幅值将不再加大,图 5 中列出了 26 Hz 带宽声压级频谱(方形符号表示),其峰值与 13 Hz 带宽情况的通过频率峰值相近,这说明通过频率波动的主要范围在 13 Hz 左右。

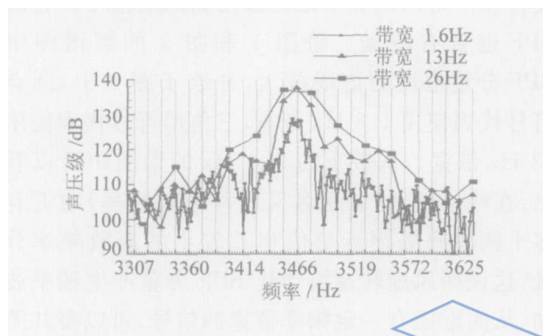


图 5 分别采用 1.6,13,26 Hz 带宽分析得到的声压级频谱图

Fig. 5 Sound pressure level spectrum analyzed with 1.6,13,26 Hz respectively

2.2 获得确定频谱的分析方法

如果采样点较少,频谱分辨率较低,谱线可以代表较宽频带内的声能量,但无法分辨声压级频谱的细节;如果采样点数越多,频谱分辨率越高,可以得到声压级频谱的细节,但无法得到一个有代表性频段内的总能量。在本实验中低分辨率无法观察到由于转速波动引起的 BPF 分量频率波动的细节,高分辨率无法考察由于转速波动引起的分布在一段频率内的通过频率分量的总体能量。在实际实验的频谱处理中,为了能得到细致的频谱特征和有效估计频谱能量,我们先选择高分辨率带宽进行分析,得到比较细致的可用于观察声源特征的频谱,然后再对这个频谱作组合谱处理。作频谱组合就是将所关心频带内的每个离散频率分量上的声压级幅值转换成能量,然后进行能量叠加,最后再将叠加的能量转化成声压级,作为此频带的声压级。在本实验中,我们关心的是 BPF 分量的能量,于是在用高分辨率带宽(1.6 Hz)分析得到频谱后对 BPF 分量附近的一个频

带作组合谱;作组合谱的频带范围可根据使用低分辨率带宽(13 Hz)对同一信号分析得到的频谱来确定,将围绕峰值频率附近幅值下降 10 dB 以内的频带作为计算组合谱的频带范围。这样确定的依据是由于相同频带范围内低分辨率与高分辨率谱线的能量水平相近,故可由此可确定通过频率主要波动范围。用这种方法确定的通过频率组合谱幅值包含了高分辨率频谱中由于转子转速不稳定带来的分布在一定频率范围内谱线能量的总和。这样我们不但得到在频率波动范围内的频谱细节,也得到了总能量谱级。

以图 5 中对同一时域信号使用不同分析带宽得到的频谱为例:首先使用 1.6 Hz 分析带宽得到高分辨率频谱(圆点符号表示),可观察到 BPF(3466 Hz)附近分布着一系列幅值较高的谱线,为了较精确的评价 BPF 分量的能量水平我们使用 13 Hz 分析带宽得到频谱(三角形符号表示),然后将此频谱中与 BPF 峰值相差 10 dB 以内的频带作为计算组合谱的频带范围,即 3439~3492 Hz,最后在此频带范围内计算高分辨率带宽(1.6 Hz)谱线的组合谱结果为 138.1 dB(计算使用 13 Hz 和 26 Hz 带宽谱线组合谱结果分别为 140.1 dB 和 139.7 dB);同时认为 3439~3492 Hz 是 BPF 的主要波动范围。

3 结 论

风扇噪声的频谱是对风扇声源进行评估的重要手段,实验中发现采用不同频谱带宽对同样时域信号进行分析得到的特征离散频率分量的幅值会产生显著差别。通过带宽对频谱幅值影响的分析提出了获得确定频谱的方法和物理含义。

(1) 对于单频信号带宽的大小不会对峰值产生显著影响。

(2) 对于在一定频率范围内波动的叶片通过频率分量分析带宽对其频谱幅值会产生显著影响,在带宽小于主要频率波动范围时带宽越大谱线幅值越大。

(3) 用高分辨率谱分析和组合谱计算既能得到频率波动范围,又能得到该分量确定的能量水平。

参考文献:

- [1] Bill Schuster, Honeywell Engines, Systems Services. Axial fan tone noise induced by separated tip flow, flutter and forced response[R]. AIAA 2005 - 2876.

[2] John Premo ,Paul Joppa ,The Boeing Company. Fan noise source diagnostic test-wall measured circumferential array mode results[R]. AIAA 2002 - 2429.

[3] LIU J M,Holste F ,Neise W. On the azimuthal mode structure of rotating blade flow instability in axial turbomachines [R]. AIAA/ CEAS 96 - 1741.

[4] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2000.

[5] Randall R B. Frequency analysis [M]. Denmark:Bruel & Kjaer,1987.

