

双通道时间差采样——一种测定叶片振动频率的方法

李志钧

(南京航空航天大学电子工程系, 南京, 210016)

TWO CHANNEL TIME - DIFFERENCE SAMPLING —— A NEW METHOD FOR DETERMINATION OF COMPRESSOR BLADE VIBRATION FREQUENCY

Li Zhijun

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

摘要 提出了一种测定压气机叶片振动频率的方法——双通道时间差采样法。利用二路采样信号的相关性及相位差,通过内插搜索可有效克服由于采样频率过低而造成的混叠现象。等效地提高了实际采样频率,从而正确测定出叶片的振动频率。方法具有快速简单,检测精度高,测定频率范围广的特点。

关键词 叶片-振动测量, 频率测量, 频谱分析

中图分类号 V232

Abstract A 2-channel time-difference sampling method is proposed. It is a new method for determination of compressor blade vibration frequency. According to the correlation and the phase difference between the two sampled signals, and using interpolation and search, it can availably overcome the aliasing, which comes from the lower sampling frequency, and thus determine correctly the blade vibrative frequency. The method has been applied to blade vibration monitor system and achieves good results. It has advantages of being fast and simple, with high accuracy and wide frequency range.

Key words blades-vibration measurement, frequency measurement, spectrum analysis

航空发动机涡轮叶片、压气机叶片的振动监测是人们颇为关心的问题。近年来广泛采用非接触式叶片振动测量技术^[1~4],只需将传感器安装在压气机机匣上,便可同时测量出整盘叶片的振动,大大降低了监测的难度,为叶片振动的在线实时监测创造了有利条件。然而非接触式叶片振动测量,振动数据的采样频率完全由转速确定,常常低于叶片振动的频率。按常规的谱分析方法,因不满足采样定理会造成频谱混叠,不能正确测定叶片振动的频率。所以以往的叶片振动监测常局限于叶片振幅的监测^[3]。但正确的测定叶片振动频率对研究叶片振动特性及强度设计是十分有用的,已有人提出了一些测定方法,如通过改变转速来改变采样频率,从而根据谱特性的变化推算出确切的振动频率^[2];或是通过以相同的采样频率同时对标准正弦信号采样,比对二者频谱特性,改变正弦信号频率,使二者频谱特性相同,从而确定叶片的振动频率^[1]。显然,这将增加处理的复杂性,改变原有的振动外部条件,更不易定时在线监测。本文基于叶片振动是一个窄带简谐振动,提出一种测定叶片振动频率的新方法,采用双通道时间差采样,由两路安装位置有一定间隔的传感器进行叶片振动数据的采集和处理^[4]。利用两路传感器对各同一叶片采样数据存在一定的时间差(Δt)。使两路振动数据存在相位差,根据这相位差,通过分析计算,精确确定叶片的振动频率。

1993年5月3日收到,1993年10月29日收到修改稿
航空科学基金资助课题

1 基本原理⁽⁵⁾

下面的讨论均是针对某同号叶片而言的。设叶片振动的时间信号为 $x_a(t)$, 通常为一带信号, 其频谱为

$$X_a(j2\pi f) = \begin{cases} X_a(j2\pi f) & |f - f_0| < f_c \\ 0 & \text{其余 } f \end{cases} \quad (1)$$

其中 f_0 为叶片振动频率; $2f_c$ 为振动带宽。叶片旋转一周时间为 T , 采样频率为 $f_s = 1/T$; 时间差 $\Delta t = T/M$, M 为整数, 常等于叶片数。两传感器所采样得到的信号序列分别为

$$x_1(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT} = x_a(nT) \quad (2)$$

$$x_2(n) = x_a(t) \Big|_{t=nT+\Delta t} = x_a(nT + \Delta t) \quad (3)$$

$x_a(t)$ 及 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ 的波形分别如图 1(a)、图 1(b)、图 1(d) 所示, 频谱 $X_a(j2\pi f)$ 如图 2(a) 所示。设

$$f_{ms} = 1/\Delta t = M/T = Mf_s \quad (4)$$

且假定 $f_0 < \frac{1}{2}f_{ms}$, $f_s > 2f_0$ 。为讨论方便, 假设以 f_{ms} 为采样频率, 对 $x_a(t)$ 进行采样, 所得到的信号序列为 $x(n)$

$$x(n) = x_a(t) \Big|_{t=n\Delta t} = x_a(n\Delta t) \quad (5)$$

显然有 $x_1(n) = x(nM)$, $x_2(n) = x(nM+1)$ 。它们均为序列 $x(n)$ 的每 M 点抽取一点所构成的序列, 但两者抽取时间相隔一个单位间隔。抽取过程亦可表示为

$$y_1(n) = \begin{cases} x(n) & n = rM \quad r \text{ 为整数} \\ 0 & \text{其余 } n \end{cases} \quad (6)$$

$$y_2(n) = \begin{cases} x(n) & n = rM + 1 \\ 0 & \text{其余 } n \end{cases} \quad (7)$$

$$x_1(n) = y_1(nM) \quad (8)$$

$$x_2(n) = y_2(nM + 1) \quad (9)$$

$x(n)$ 、 $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$ 的图形如图 1(a)、图 1(c)、图 1(e) 所示。 $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$ 可表示为

$$y_1(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(n) \exp[j \frac{2\pi}{M} kn] \quad (10)$$

$$y_2(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(n) \exp[j \frac{2\pi}{M} k(n-1)] \quad (11)$$

它们的频谱有如下关系

$$X(e^{j2\pi f \Delta t}) = \frac{1}{\Delta t} \sum_m X_a[j2\pi(f + mf_{ms})] \quad (12)$$

它是原频谱 $X_a(j2\pi f)$ 以 f_{ms} 为周期的周期延拓。

$$Y_1(e^{j2\pi f \Delta t}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X[e^{j2\pi(f - kf_s) \Delta t}] \quad (13)$$

$$Y_2(e^{j2\pi f \Delta t}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X[e^{j2\pi(f - kf_s) \Delta t}] \exp[j \frac{2\pi}{M} k] \quad (14)$$

它们均是 $X(e^{j2\pi f \Delta t})$ 以 f_s 为间隔周期移位的结果。由于 $f_s > 2f_c$, 因此移位时频谱不发生混叠, 仍保持原来的幅度形状, 但幅度则为原来的

$1/M$, 而且 $Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})$ 在移位同时, 还需乘以相移因子 $\exp[j \frac{2\pi}{M} k]$ 。 $X(e^{j2\pi f \Delta t})$ 、 $Y_1(e^{j2\pi f \Delta t})$ 及 $Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})$ 分别见图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)。显然有

$$|Y_1(e^{j2\pi f \Delta t})| = |Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})| \quad (15)$$

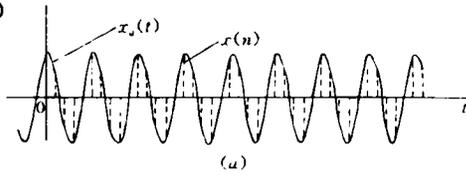
但两者存在一定的相位差。设

$$y(n) = y_1(n) + y_2(n) \quad (16)$$

则

$$Y(e^{j2\pi f \Delta t}) = Y_1(e^{j2\pi f \Delta t}) + Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(e^{j2\pi(f-kf_s)\Delta t}) \left[1 + \left\{ \exp \left(j \frac{2\pi k}{M} \right) \right\} \right]$$



$y(n)$ 及 $Y(e^{j2\pi f \Delta t})$ 的图形如图 1(f) 及图 2(g) 所示。对于 $k=0$ 的频段, 有

$$Y(e^{j2\pi f \Delta t}) = \frac{2}{M} X(e^{j2\pi f \Delta t}) \quad (18)$$

$$\text{即 } X(e^{j2\pi f \Delta t}) = \frac{M}{2} Y(e^{j2\pi f \Delta t}) \quad (19)$$

可见, 当满足 $f_s > 2f_c$ 时, 频谱延拓移位均不发生重叠现象, $X(e^{j2\pi f \Delta t})$ 可由对应于 $k=0$ 位置的 $Y(e^{j2\pi f \Delta t})$ 完全确定。其余的 $Y(e^{j2\pi f \Delta t})$ 是由于不完全采样而衍生出来的频谱成分。

由于 $f_s > 2f_c$, 且 $\left| 1 + \exp j \frac{2\pi k}{M} \right|_{k \neq 0} < \left| 1 + \exp j \frac{2\pi k}{M} \right|_{k=0} = 2$ 。即 $|Y(e^{j2\pi f \Delta t})|$ 在 $k=0$ 处有最大值。也即在 $(0 \sim f_{ms})$ 范围内,

$|Y(e^{j2\pi f \Delta t})|$ 为最大值的位置即对应于 $k=0$ 的位置, 也就是频谱 $X(e^{j2\pi f \Delta t})$ 所在位置。

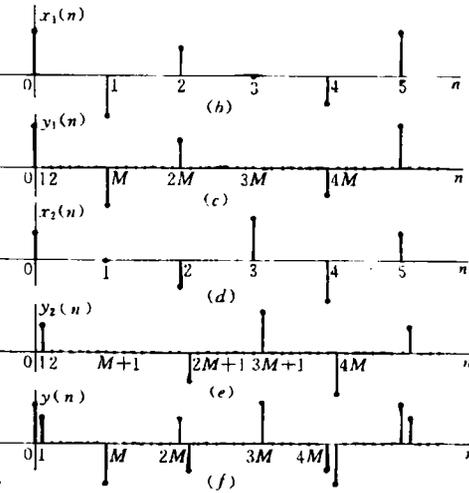


图 1

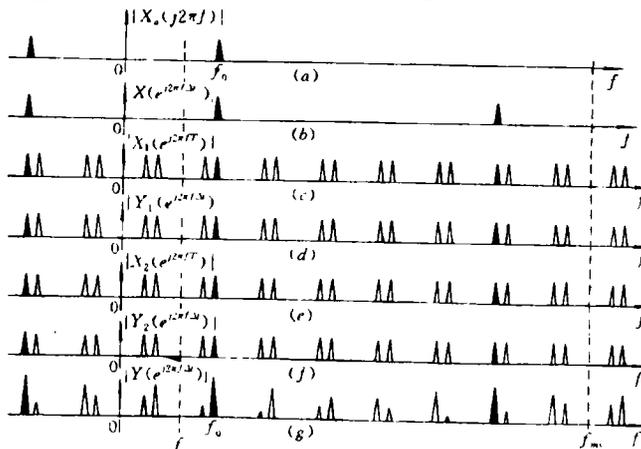


图 2

然而 $Y_1(e^{j2\pi f \Delta t})$ 及 $Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})$ 可以通过序列 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 的傅里叶变换求得, 即

$$Y_1(e^{j2\pi f \Delta t}) = X_1(e^{j2\pi f T}) \quad (20)$$

$$Y_2(e^{j2\pi f \Delta t}) = X_2(e^{j2\pi f T}) e^{-j2\pi f \Delta t} \quad (21)$$

通过上述分析, 便可根据二路采集所得的数据 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 计算其傅里叶变换 $X_1(e^{j2\pi f T})$ 及 $X_2(e^{j2\pi f T})$, 然后求得 $Y_1(e^{j2\pi f \Delta t})$ 、 $Y_2(e^{j2\pi f \Delta t})$ 及 $Y(e^{j2\pi f \Delta t})$, 再由 $|Y(e^{j2\pi f \Delta t})|$ 为最大值的位置确定 $X(e^{j2\pi f \Delta t})$, 从而确定叶片振动频率 f_0 。利用双通道时间差采样, 可使以 f_s 为采样频率进行采样的信号, 分析计算得等效于 $f_{ms} = Mf_s$ 为采样频率采样的频谱性能, 使实际采样频率等效提高了 M 倍, 从而满足 Nyquist 采样定理。有效地克服了因采样频率不足

而造成的混叠现象。

3 模拟验证与应用

设模拟振动信号为 $x_a(t) = A \sin(2\pi f_a t + \varphi_a)$, 则 $x_1(n) = A \sin(2\pi \frac{f_a}{f_s} n + \varphi_a)$, $x_2(n) = A \sin(2\pi \frac{f_a}{f_s} (n + \frac{1}{M}) + \varphi_a)$ 。对于不同的 A, f_a, φ_a, M 及 f_s 。只要满足前述条件 $f_a < \frac{1}{2} M f_s$, 均能得到正确结果。充分证明了该方法的有效性。在计算机模拟基础上, 已在叶片振动监测计算机处理系统中, 采用本方法测定叶片振动频率。实验室条件下的模拟测试结果如表 1 所示。测试误差基本上在 $\pm 1\text{Hz}$ 范围, 且在 $0 \sim \frac{1}{2} M f_s$ 范围内的振动频率都能有效地测定。

表 1 叶片振动频率模拟测试结果

测试条件: 信号幅度 0.6V(均方根)

输入模拟叶片振动信号频率/Hz	检测结果/Hz 叶片数 $M=26$ 采样频率 192.3Hz	检测结果/Hz 叶片数 $M=18$ 采样频率 280.3Hz	输入模拟叶片振动信号频率/Hz	检测结果/Hz 叶片数 $M=26$ 采样频率 192.3Hz	检测结果/Hz 叶片数 $M=18$ 采样频率 280.3Hz
11	10.97	11.02	641	640.95	641.36
16	16.41	16.23	733	732.63	732.49
48	47.76	47.96	933	932.98	932.89
92	91.76	91.65	1245	1244.06	1244.27
111	110.63	111.32	1420	1420.80	1420.54
167	166.33	166.57	1655	1654.71	1654.68
248	247.88	248.24	1977	1977.79	1977.42
329	328.39	328.20	2460	2461.38	2460.83
486	485.66	486.17			

由于该方法可以利用 FFT 技术, 大大地提高了运算速度, 采用 IBM-PC/286, 分析计算一个叶片振动频率的时间不足 40ms(不包括数据采集时间)。有利于实现在线实时监测。同时由于不必改变压气机转速, 或辅以附加标准正弦信号的采样频谱相对比, 使监测系统大为简化。当然, 转速的测定精度和传感器安装位置误差均会对振动频率的精确度造成影响, 但只要足够高的计时基准精度, 是比较容易控制在工程容许误差范围内的。采用双通道时间差法测定叶片振动频率具有设备简单、快捷、检测精度高、检测频率范围宽和实时性好的优点, 可以付诸工程应用。已用于压气机叶片振动检测系统, 实现压气机叶片振动频率的巡回监测。当然本方法还需经压气机叶片监测的实际检验。同时值得注意, 对于叶片振动频率是采样频率(转速)的整数倍时, 会失去有效性, 然而这情况在实际使用中出现的概率毕竟是比较小的。

参 考 文 献

- 1 Mecarty P E, Thompson J W. Development of a noninterference technique for measurement of turbine engine compressor blade stress, AEDC-TR-79-78, AD A086170, June 1980
- 2 Mecarty P E, Thompson J W. Noninterference technique for measurement of turbine engine compressor blade stress, AEDC-TR-80-5, AD A090566, October 1980
- 3 萨勃洛斯基 N E, 柯罗斯杰列夫 HA, 谢鲍夫 PA. 涡轮叶片振动的非接触测量. 北京: 国防工业出版社. 1986: 82-110
- 4 李志钧, 叶明, 伊立言. 压气机叶片振动监测计算机处理系统的研制. 中国航空学会第六届发动机结构强度振动学术会议论文集. 宁波: 1992, 308-312
- 5 奥本海姆 A V, 谢菲 R W. 数字信号处理. 北京: 科学出版社, 1983: 12-21