

测量转子叶片振动的脉冲处理技术

南京航空学院动力工程系 张益松 伊立言

一、引言

为解决转子运行状态下叶片振动的测量问题，本文发展了多个探头组合的光电脉冲处理技术，并进行了误差估计。对于呈钟形分布而非尖型的单个脉冲，提出了新的信号计时基准，同时作了理论考证和实验分析。

在转子运行时，叶片受到离心力作用和旋转气流的影响，其振动特性与非运转状态有显著不同。本文所讨论的脉冲处理技术是解决这一振动测量问题的非接触式方法，其基本思想参见图1^[1]。

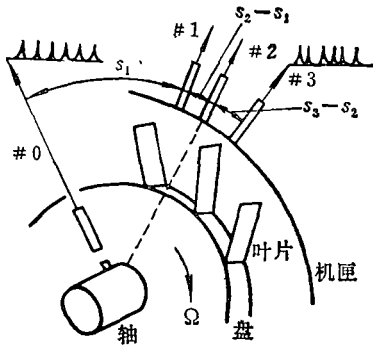


图1 脉冲信号测量

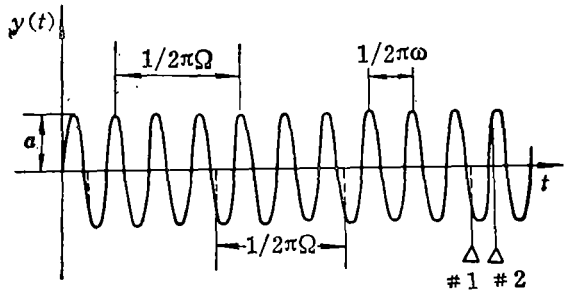


图2 信号波形及采样

图中数个工作探头安装在叶片顶端的机匣上，当每个叶片顶端经过时感应(或反射)一个脉冲。另有一参考探头装在叶片根部，给出叶轮转速和叶片不振动时的信息。一旦叶片出现振动而产生变形，直接影响到其顶端经过工作探头的时刻，各转脉冲序列的间隔发生变化，而这变化量也正是对应叶片的某振动参量。

已经证明^[2]叶顶的振幅 a 和速度幅值 $a\omega$ 以及振动频率 ω ，可以通过测量工作探头和参考探头的时刻差值的最大值推得。这些公式适用于振动频率 ω 与运转频率 Ω 不成整数倍的情况。但在叶轮机运行时，其强迫振动频率往往与转速成整数倍关系，即

$$\frac{\omega}{\Omega} = K \quad (K \text{ 为整数}) \quad (1)$$

显然探头的取样频率与 Ω 一致，如图2。这时各转出现的脉冲总在叶片振动周期的同一相位，于是前述时间间隔不存在最大值，计算公式不能适用，有时甚至误认为此时不存在振动。

1986年12月26日收到

文献[3]利用两个工作探头的瞬时脉冲信息计算振幅,但引入了 $b \propto (t_2 - t_1)$ 的假设,与前提是相悖的。需附加两个参考探头才能测定 y_1 和 y_2 的值,而且 $\frac{\omega}{\Omega}$ 的值预先并不知道,所以公式在使用上有一定问题。这促使我们探求新的实用公式。

二、 $\frac{\omega}{\Omega} = K$ 时振动频率的确定

在图1中,机匣上同一平面内周向相邻布置三个探头#1、#2、#3,与参考探头#0的周向距离分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 ,某叶片顶端经过三探头的时刻为 t_1 、 t_2 、 t_3 。

叶片作简谐振动时,叶尖的位移可表示为

$$s_i = ut_i + a \sin(\omega t_i + \varphi) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

由于

$$\sin(\omega t_1 + \varphi) = \sin(\omega t_2 + \varphi) \cos(\omega(t_2 - t_1)) - \cos(\omega t_2 + \varphi) \sin \omega(t_2 - t_1)$$

所以可推知

$$a \cos(\omega t_2 + \varphi) = - \frac{(s_1 - ut_1) - (s_2 - ut_2) \cos \omega(t_2 - t_1)}{\sin \omega(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

和

$$a \cos(\omega t_2 + \varphi) = \frac{(s_3 - ut_3) - (s_2 - ut_2) \cos \omega(t_3 - t_2)}{\sin \omega(t_3 - t_2)} \quad (4)$$

由(3)式和(4)式消去 a ,得

$$\begin{aligned} & (s_1 - ut_1) \sin \omega(t_3 - t_2) - (s_2 - ut_2) \sin \omega(t_3 - t_1) \\ & + (s_3 - ut_3) \sin \omega(t_2 - t_1) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

根据泰勒展开定理

$$\sin \omega \tau = \omega \tau - \frac{1}{6} \omega^3 \tau^3 + 0 (\omega^5 \tau^5)$$

忽略与 $(\omega \tau)^6$ 同阶的无穷小量,将上式代入式(5),解得

$$\begin{aligned} \frac{\omega^2}{6} = & [(s_3 - s_2)/(t_3 - t_2) - (s_2 - s_1)/(t_2 - t_1)] \{ [(s_3 - s_2)/(t_3 - t_2) - u](t_2 - t_1)^2 \\ & - [(s_2 - s_1)/(t_2 - t_1) - u](t_3 - t_2)^2 - 3(s_2 - ut_2)(t_3 - t_1) \} \end{aligned} \quad (6)$$

据此,确定了叶片的振动频率。从而可确定振动幅值 a

$$\begin{aligned} a = & [(s_1 - ut_1)^2 + (s_2 - ut_2)^2 - 2(s_1 - ut_1)(s_2 - ut_2) \cos \omega \\ & \cdot (t_2 - t_1)]^{1/2} / \sin \omega(t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (7a)$$

或

$$\begin{aligned} a = & [(s_3 - ut_3)^2 + (s_2 - ut_2)^2 - 2(s_3 - ut_3)(s_2 - ut_2) \cos \omega \\ & \cdot (t_3 - t_2)]^{1/2} / \sin \omega(t_3 - t_2) \end{aligned} \quad (7b)$$

进而得到叶片经参考探头时的初相位

$$(\omega t_2 + \varphi) = \sin^{-1} \frac{s_2 - ut_2}{a} \quad (8)$$

至此,几个主要振动参数都已求出。这种方法有较好的通用性,对于振动频率与转

动频率成非整数倍的一般情况以及成整数倍的特殊情况都适用。

三、计算公式的误差分析

在上面讨论的 ω 的计算公式中, 所用的一组原始数据, 取自叶片在任一转经过三个探头的信息。考虑到测量时的偶然性数据出入, 采用统计平均法来消除这一偏差。设叶轮转过某转时, 第 i 次测量的脉冲时刻为 $t_1^{(i)}$ 、 $t_2^{(i)}$ 、 $t_3^{(i)}$ 。对于叶片振动频率与运转频率成整数倍的情况, 可取 m 次采样的平均值, 即

$$t_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_j^{(i)} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (9)$$

然后利用 (6) 式求得 ω_j 。对于两者不成整数倍的情况, 可利用每一组测量数据代入 (6) 式计算得到 $\omega^{(i)}$, 最后结果取均值

$$\omega = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega^{(i)} \quad (10)$$

估计一下前面讨论中的 $(\omega\tau)^5$ 的大小。取 $\tau = t_3 - t_1$, 于是

$$\omega\tau = \omega(t_3 - t_1) \approx \omega \frac{s_3 - s_1}{u} = \frac{\omega}{\Omega} \frac{s_3 - s_1}{2\pi R} \quad (11)$$

若转速 $N = 12000 \text{ r/min}$, $\Omega = N/60 = 200 \text{ (Hz)}$, $R = 20 \text{ cm}$, 振动频率 $\omega = 100 \pi \text{ (Hz)}$, 探头周向距离较近 $s_3 - s_1 = 10 \text{ cm}$, 于是由 (11) 式得

$$\frac{(\omega\tau)^5}{(\omega\tau)^3} = (\omega\tau)^2 = \left(\frac{100\pi}{200} \times \frac{10}{2\pi \times 20} \right)^2 = 0.016 \ll 1$$

所以 (6) 式中对于 $O(\omega^5\tau^5)$ 忽略不计是合理的。转速越高, (6) 式的估计值越接近真值。前面的计算, 很大程度上取决于原始测量数据的精度, 这要求我们能合适地选取探测传感器及有效地确定脉冲信号出现的时刻。这就是以下我们所要讨论的问题。

四、脉冲计时基准的确定

无论用哪种传感器, 都应使脉冲具有尽可能短的延续时间, 并保证信号传输的质量。采用光导纤维来发送照明光并接收反射脉冲, 效果较好。因为光脉冲的响应最快, 光缆能抗电磁干扰。光纤传感器的发射束和接收束各有上千根极细的玻璃纤维, 在传感头部并成一束, 如图 3(a)。对半型和同心型会使脉冲波形上出现马鞍点, 随机型若能使之大体均布, 则脉冲特性最佳。

我们对光纤探头进行了性能试验。探头有效直径 2.5 mm , 照射法向距离 3 mm , 光源为 300 mV 的指示灯泡。试件端面尺寸 $17 \times 1.5 \text{ mm}^2$, 经粗砂纸磨平。测得时间轴上的光强分布, 经光电线性转换显示, 单个脉冲的电压波形呈钟形 (图 3(b))。它启示我们, 应将计时基准定在脉冲波峰处, 也就是其一阶导数为零的位置, 只要求附接一微分电路, 取零电平处为脉冲出现的时刻。而以前人们大多以脉冲的前后沿达到某高电平作为脉冲计时, 并不恰当。

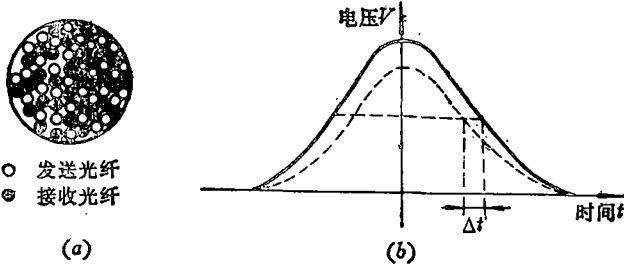


图 3

(a) 传感头的随机型分布;
(b) 单个脉冲的钟形分布。

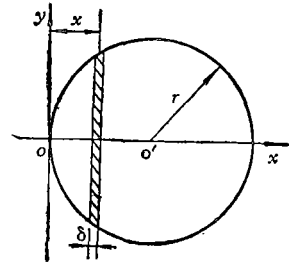


图 4 光纤的照射和接收区域

入射光在朗伯型反射面上的照射区域为圆形，设半径为 r ，如图 4。光纤所能接收区域也一样大，其接收光强在 x 轴上的分布设为

$$I(x) = I_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x-r}{r}\right)^2} \frac{x(2r-x)}{r^2} \quad 0 \leq x \leq 2r \quad (12)$$

顶端厚度为 δ 的叶片经过探照区域时，端面漫反射光经光纤接收得到光强(相对值)为

$$A(x) = \int_{x-\frac{\delta}{2}}^{x+\frac{\delta}{2}} I(Z) dZ = \frac{I_0 r}{4} [3(\sin^{-1} X - \sin^{-1} Y) + 5(X\sqrt{1-X^2} - Y\sqrt{1-Y^2}) - 2(X^3\sqrt{1-X^2} - Y^3\sqrt{1-Y^2})] \quad (13)$$

其中, $X = \left(x + \frac{\delta}{2} - R\right) / R, Y = \left(x - \frac{\delta}{2} - R\right) / R \quad (14)$

由三角函数公式，当 $XY \geq 0$ 或 $X^2 + Y^2 \leq 1$ 时，有

$$\sin^{-1} X - \sin^{-1} Y = \sin^{-1}(X\sqrt{1-Y^2} - Y\sqrt{1-X^2})$$

可以证明上式右边括号中的量较小，从而得

$$\sin^{-1}(X\sqrt{1-Y^2} - Y\sqrt{1-X^2}) = X\sqrt{1-Y^2} - Y\sqrt{1-X^2}$$

于是代入 (13) 式得到

$$A(x) = \frac{I_0 r}{4} [3\delta(\sqrt{1-X^2} + \sqrt{1-Y^2}) + 2(X(\sqrt{1-X^2})^3 - Y(\sqrt{1-Y^2})^3)]$$

将 (14) 式代入上式，并注意到 $\delta \ll 2r, x = ut$ ，则

$$A_1(t) = \frac{3}{2} I_0 \delta \sqrt{2r ut - u^2 t^2} \quad (15)$$

这就从理论上证明了图 3 (b) 所示的脉冲形状为钟形曲线。

参 考 文 献

[1] Hohenberg, R., Detection and Study of Compressor-blade Vibration, Experimental Mechanics, Vol. 7, No. 6, (1967).
[2] Roth, H., Vibration Measurements on Turbomachine Rotor Blades with Optical Probes, Measurement Methods in Rotating Components of Turbomachinery, ASME, (1980).
[3] Zablotskii, I. E., et al, Contactless Measuring of Vibrations in the Rotor Blades of Turbines,

FTD-HT-23-673-64, (1974).

- [4] Lagace, L. J. and Kissinger, C. D., Non-Contactless Displacement and Vibration Measurement Systems Employing Fiber Optic and Capacitance Transducers, ISA 23rd Int. Instrumentation Symposium, (1977).

PULSE TECHNIQUE FOR MEASURING THE VIBRATION OF ROTOR BLADES

Zhang Yisong and Yi Liyan

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

To measure the vibration of rotor blades in motion, this paper develops photoelectric pulse technique with multi-probes system and forms an error estimate of the calculating formulas. For a single pulse of bell shape but not sharp type, a new datum of signal instantaneous is proposed and checked through theory as well as experiment.