

文章编号 :0253-2239(2002)11-1358-04

孔径旋转频闪散斑照相法测量物体的固有频率

陈炳泉

(苏州大学物理系,苏州 215006)

摘要: 提出了一种测量物体固有频率的新方法——孔径旋转频闪散斑照相法。该方法能方便地测量振动物体的固有频率,具有精度高、全场显示、条纹可见度好等优点,给出了理论分析和实验结果。

关键词: 孔径旋转;频闪散斑照相;固有频率

中图分类号:O438 文献标识码:A

1 引 言

文献 [1] 介绍了用时间平均散斑照相法测定振动物体的固有频率的实验方法。由于时间平均散斑照相法不能得到在给定相位下的位移(面内振动)和位移方向导数(离面振动)的振幅分布,而且得到的等值条纹图的可见度较差,给振动物体的大振幅测量带来一定的困难。

本文提出了用孔径旋转频闪散斑照相法测量振动物体固有频率的新方法。该方法不仅能方便地测量振动物体的固有频率,而且还能记录振动物体在不同相位下的振型分布。因为该方法将周期性振动问题简化为准静态问题进行研究,所以获得的等值条纹图像清晰,有利于定量分析。该方法的另一特点,就是将振动物体随时间连续变化的振动信息存储在一张散斑图上,在实时分析时,可方便地提取任意时刻的振动信息。该方法最显著的优点,就是对

振动物体的大振幅测量显示出独特之处。本文给出了实验结果,并与理论值进行了比较,两者误差较小。

2 实验方法和原理

孔径旋转频闪散斑照相法测量振动物体固有频率的记录光路如图 1 所示。它是在一般的时间平均散斑照相法的基础上,在照相机前放置一架动态散斑照相扫描器^[2];另外在激光器出射的光路中放置了“LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪”的频闪光调制器^[3]。仪器工作时,输出激振电信号传送给激振器(或扬声器),由激振器使振动物体按所要求的频率进行振动;同时频闪光调制器将连续激光调制成与物体振动同步的脉冲激光,以该脉冲激光照明振动物体。另外,频闪光调制器还可调节脉冲激光照明振动物体的振动相位。

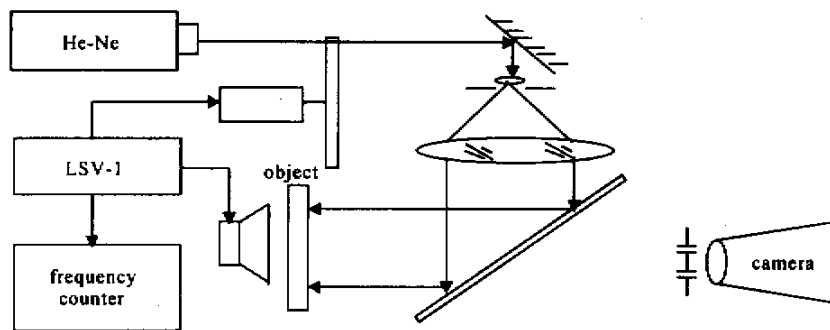


Fig.1 The experimental plan for testing resonant frequencies of objects

2.1 散斑图的记录

为了讨论简单,设成像系统的放大率 $M = 1$ 。

在记录散斑图时,调节“LSV-1 型激光频闪振动控制测量仪”,使激振频率由低到高进行连续变化,同时使照相机前的动态散斑照相扫描器(即双小圆孔)匀速旋转半圈(180°)。这样,孔径的位置与物体振动的某一频率有着——对应的关系。如果采用图 2 所

示的同步曝光方法,其中图 2(a)为振动信号曲线,图 2(b)为激光照明脉冲波形,在每个振动周期中,振动物体两次受脉冲激光照射,两次相差 $1/2$ 周期,即对振动物体的某两个瞬态进行长时间的曝光。由于脉冲激光所持续的时间相对于振动周期来讲非常小(实验中取 $T_0/20$)。这样就可将动态问题简化为准静态问题来讨论。

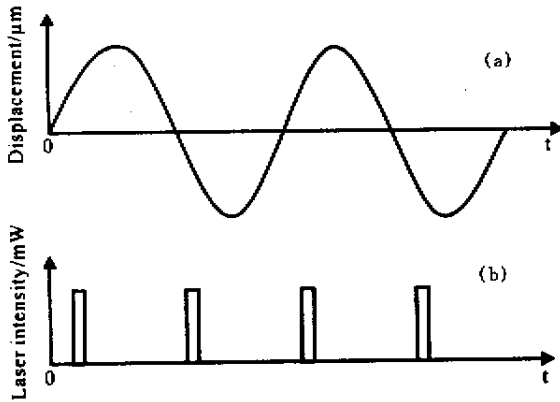


Fig.2 (a) Vibration signal ;(b) Laser pulse waveform

在散斑图记录时,当动态散斑照相扫描器的旋转小孔径的中心位于某一特定位置时,这时就记录了振动物体在某一特定频率的两个相位下的散斑图,像平面上的光强分别以 $I_{1i}(x_1, y_1, t)$ 和 $I_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)$ 表示。则 t 时刻的瞬态曝光量为 $(I_{1i} + I'_{1i})dt$, 其散斑图的复振幅透射率可简写成

$$t(x_1, y_1) = \int_0^T (I_{1i} + I'_{1i}) dt, \quad (1)$$

式中 T 为每次曝光的时间。设 $t_i = I_{1i} + I'_{1i}$, t_i 可理解为瞬态双曝光散斑图。于是(1)式代表的散斑图为一系列瞬态双曝光散斑图的线性叠加,即全场滤波成为对一系列瞬态双曝光散斑图进行滤波。

2.2 全场滤波分析

1) 物体作面内振动的情况

记录的散斑图底片经处理后,置于 $4f$ 系统中进行全场滤波分析,散斑图置于物平面上,在相干照明之下,散斑图的空间频谱,略去常数因子可用其振幅透射率的傅里叶变换表示,则频谱面 (x_2, y_2) 上的光场为

$$U_2(x_2, y_2) = \mathcal{R}\{t(x_1, y_1)\} = \int_0^T \mathcal{R}\{I_{1i}(x_1, y_1, t) + I'_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)\} dt, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{R}\{\}$ 为傅里叶变换算符。该式表示频谱面上的光场,为各瞬态双曝光散斑图频谱的线性叠加。由前面分析知道,对应于物体振动频率的某一瞬时 t ,旋转孔径中心在 (x, y) 平面上的某一位置时,所记录的散斑图的衍射晕中心,在频谱面上有一确定的位置。综上所述,可见衍射晕上的某一点,不仅含有对应于 t 瞬时振动物体上各点的振动信息,而且还含有 $t - r/v$ 到 $t + r/v$ (r 为旋转小圆孔的半径, v 为

孔径的旋转速度)时的振动信息,所以像平面上的等值条纹图反映了 $t - r/v$ 到 $t + r/v$ 时间内,振动物体各点的平均振动信息。如果旋转小圆孔的半径 r 取得较小,则平均效果不明显。实验中选择 $r = 1.5 \text{ mm}$ 。

将滤波孔中心放在 (x_{20}, y_{20}) 处,此时就选取 $t - r/v$ 到 $t + r/v$ 内各瞬态散斑图,则散斑图的复振幅透射率可简写为

$$T_p = \int_{t-r/v}^{t+r/v} [I_{1i}(x_1, y_1, t) + I'_{1i}(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1, t)] dt, \quad (3)$$

如物体作简谐振动,采用图 2 的曝光方式,由文献 4 可得像平面上光强分布的平均值,可近似写为

$$I_3(x_3, y_3) = 2C \left\{ s_0 + s_1 + (s_0 + s_2) \text{sinc}^2 \left[\frac{2\pi^2}{\lambda f} (x_{20} v_x + y_{20} v_y) \Delta \right] + 2s_0 \text{sinc} \left[\frac{2\pi^2}{\lambda f} (x_{20} v_x + y_{20} v_y) \Delta \right] \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda f} (x_{20} d_x + y_{20} d_y) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $\Delta = 2r/v$ 在 t 瞬时, v_x, v_y 分别为物点 (x_1, y_1) 位移速度的 x, y 分量; d_x, d_y 分别为像点 (x_3, y_3) 的共轭物点位移的 x, y 分量, C 为常数。对 t 时刻瞬态

散斑图滤波时,像平面坐标 (x_3, y_3) 处光波复振幅是以振动物体两个相位下的物点 (x_1, y_1) 为中心的艾里斑 S_1 和物点 $(x_1 + dx_1, y_1 + dy_1)$ 为中心的艾里斑

S_2 所贡献, S_0 为这两个艾里斑的相关面积。

当滤波孔取在 x_2 (或 y_2) 轴上, 可获得给定相位下的振幅(峰峰值)在 x (或 y) 方向分量的等值线。此时亮条纹对应的振幅分量为 $d_x = N\lambda f/2x_{20}$ (或 $d_y = N\lambda f/2y_{20}$), N 为亮条纹的序数。两条亮条纹的振幅分量相差 $\lambda f/2x_{20}$ (或 $\lambda f/2y_{20}$) 即为灵敏度。

2) 物体作离面振动的情况。

$$I(x_3, y_3) = 2C \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{4\pi^2 A}{\lambda f} \left[x_{20} \frac{\partial W}{\partial x} + y_{20} \frac{\partial W}{\partial y} \right] \Delta \right\} + \left\{ 2S_0 \left[1 + \cos \frac{8\pi A}{\lambda f} \left(x_{20} \frac{\partial W}{\partial x} + y_{20} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + S_1 + S_2 \right\}, \quad (5)$$

式中 A 为散焦距。当滤波孔取在 x_2 (或 y_2) 轴上, 可获得给定相位下的位移方向导数 $\partial W/\partial x$ (或 $\partial W/\partial y$) 在 x (或 y) 方向分量的等值线。此时亮条纹对应的分量有

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \theta_x = \frac{N\lambda f}{2Ax_{20}}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \theta_y = \frac{N\lambda f}{2Ay_{20}}, \quad (7)$$

式中 N 为条纹的序数。两条相邻亮条纹 $\partial W/\partial x$ 相差 $\lambda f/2Ax_{20}$, 即为灵敏度。由此可见, 物体作离面振动时, 其测量灵敏度不仅与滤波孔的位置 (x_{20}, y_{20}) 有关, 而且还与散焦距 A 有关。当散焦距增大时, 测量灵敏度相应提高。

对大振幅振动物体进行测量时, 只要改变图 2 中脉冲激光照明振动信号的相位, 使其向平衡位置移动, 就能得到较满意的结果。

3 实验结果

实验中的记录光路如图 1 所示。以 He-Ne 激光照明试件, 功率为 40 mW, 同步频闪激光的占空比为 1/20, 照相机的焦距 f 为 360 mm。

3.1 圆盘作面内振动

试件为半径 $R = 15$ mm 的铝圆盘, 圆盘沿中心轴作面内振动。实验中激振频率为 100 Hz, 并用千分表实测振幅, 频闪激光对准振动物体振幅位置进行照射。图 3 为其散斑照片, 照片上可观察到以圆盘中心为起点 8 条亮条纹。全场滤波分析时取 $x_{20} = 30$ mm, 实验中测得圆盘边缘处的振幅(峰峰值)为 $30 \mu\text{m}$, 则测量灵敏度等于 $30 \mu\text{m}/8 = 3.75 \mu\text{m}$, 理论值为: 灵敏度等于 $\lambda f/2x_{20} = 3.79 \mu\text{m}$ 。

对振动物体作离面振动记录散斑图时, 照相机聚焦在物体前方一定距离的平面上, 该平面称为散焦面。这样, 物体作离面振动问题就化为散焦面内散斑振动的问题。

如物体作简谐振动, 且按图 2 方式曝光, 将记录的散斑图置于 $4f$ 系统进行全场滤波分析, 则像平面上的平均光强分布为



Fig.3 Plane vibration of aluminium disc

3.2 圆盘作离面振动测固有频率

试件为半径 $R = 150$ mm, 厚度 $t = 0.45$ mm 的铝圆盘。圆盘的周界固支, 用扬声器置于圆盘的背面进行非接触式激振。

在测量铝圆盘的固有频率时, 首先选取适当的激振力, 在较大的频率范围内, 由低到高进行扫描, 初步找出圆盘振动的固有频率。然后在初测的基础上, 缩小频率的扫描范围, 进行精确的测量, 这样测量的精确度可提高。图 4 是上述铝圆盘的实测结果。频率的变化范围为: 50.1 Hz ~ 52.5 Hz。在全场滤波分析时, 选择了 7 个不同位置得到的全场条纹图, 从图中根据条纹的数量可以得到铝圆盘的固有频率: $f = 51.3$ Hz; 由理论计算^[5]:

$$f_0 = \frac{0.47t}{R^2} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\mu^2)}},$$

式中:

$$t = 0.45 \text{ mm},$$

$$R = 150 \text{ mm},$$

$$Y = 7.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2,$$

$$\rho = 2680 \text{ kg/m}^3,$$

$$\mu = 0.34,$$

所以 $f_0 = 51.1$ Hz。实测的结果与理论值吻合较好, 相对误差小于 0.5%。

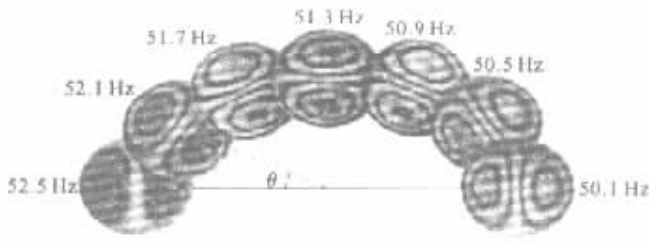


Fig.4 The experimental results for testing resonant frequencies of aluminium disc by use of rotating aperture-stroboscopic speckle photographic method

图 5 是用时间平均散斑照相法所得到的全场条纹图,条纹的可见度较差。



Fig.5 The experimental result by use of time average speckle photographic method

图 6 是上述周界固支铝圆盘作离面振动的全场条纹图,该圆盘沿 x 轴 $\partial W/\partial x$ 的测量灵敏度等于 $\lambda f/2Ax_{20} = 0.00038$ 。式中: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $f = 360 \text{ mm}$, $A = 10 \text{ mm}$, $x_{20} = 30 \text{ mm}$ 。



Fig.6 Leave plane vibration of aluminium disc

结论 由以上的理论分析和实验结果说明,用孔径旋转频闪散斑照相法测量物体的固有频率,能得到全场的条纹图,且图像的质量较高,测量误差小,是一种实用可行的方法。

参 考 文 献

- [1] Gu Jie, Shen Yongzhao. Rotating aperture time-averaged speckle photography. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1989, 16(4): 238 ~ 240 (in Chinese)
- [2] Chen Bingquan, Cheng Chuafu. Investigation on the rotating a perture methods of white-light speckle photography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, 8(3): 281 ~ 283 (in Chinese)
- [3] Chen Bingquan, Jiang Jinhu. The application of model LSV-1 laser-stroboscopic vibration controlling and measuring instrument. *Applied Laser* (应用激光), 1989, 9(1): 21 ~ 24 (in Chinese)
- [4] Jiang Jinhu, Chen Bingquan. Stroboscopic speckle photographic method. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, 8(7): 612 ~ 617 (in Chinese)
- [5] Seto W. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Acoustics* (声学原理概要和习题), Hangzhou: Zhejiang Scientific and Technical Publishers, 1985. 57 ~ 59 (in Chinese)

Measurement of Resonant Frequencies of Objects by Rotating Aperture-Stroboscopic Speckle Photographic Method

Chen Bingquan

(Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006)

(Received 10 August 2001; revised 17 December 2001)

Abstract: A new experimental method for measuring resonant frequencies of objects is proposed by use of rotating aperture-stroboscopic speckle photographic method. It can easily measure the resonant frequencies of objects with this method. In addition to the advantages of high precision, a better visibility of lines is provided. The theoretical analysis and experimental result are given.

Key words: rotating aperture; stroboscopic speckle photographic method; resonant frequencies