

撞击载荷下数字电子散斑离面位移的测试研究¹⁾

佟景伟 张东升 李鸿琦
(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要 采用瞬态光学图像采集技术, 实现了动态数字散斑干涉(DSPI). 以周边固支圆板受法向撞击集中载荷为例, 对其离面位移场进行了测试. 实验值与动有限元计算结果比较, 两者是比较接近的.

关键词 红宝石脉冲激光器, 瞬态光学图像采集技术, 动态数字散斑干涉, 动有限元

引言

在静态光力学研究领域, 以往都是在暗室中使用全息干板记录干涉图像^[1~3]. Cookson 等^[4]首次采用脉冲激光器, 通过磁带记录手段把摄像机靶面上的光强信息记录下来, 从而得到物体在振动时的电子散斑条纹图. Preater^[5~7]也通过这种方法测试了旋转物体的面内变形. 由于他们采用磁带记录和电子处理的手段, 其条纹质量较差. 在本文中作者引入瞬态图像采集技术. 由于要采集时间 30~50ns 的瞬态脉冲激光信号(相当于用 250 万次/s 高速照相机才能记录到的图像信息). 这就需要在加载装置、图像采集系统和脉冲激光器之间有很好的同步精度. 利用 CCD 摄像机将物体受撞击前后的散斑场直接记录和存储在图像采集卡的帧存体中, 从而实现了撞击载荷下的数字散斑干涉, 使条纹质量大大提高.

1 动态电子散斑干涉法的离面位移测试原理

在图 1 所示的光路中, 经过半反半透镜, 经红宝石脉冲激光分束后, 分别照射到物面和参考面上. 物面和参考面上的两个散斑场又通过这个半反半透镜在 CCD 摄像机的靶面上发生干涉. 当物体未受撞击载荷时, 用瞬态图像采集系统采集到摄像机靶面上散斑场的光强信息, 它可表示为

$$I_0(x, y) = A_r^2 + A_s^2 + 2A_r A_s \cos \theta \quad (1)$$

其中 A_r 和 A_s 分别为物光和参考光的振幅, θ 为它们在摄像机靶面上发生干涉的相对位相差.

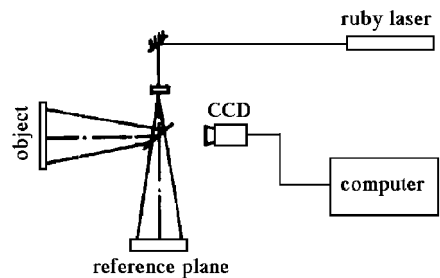


图 1 离面位移测量光路
Fig. 1 Optical arrangement for out-of-plane measurement

¹⁾ 国家教委博士点科研基金资助项目.

1994-12-14 收到第一稿, 1995-06-08 收到修改稿

当物体受撞击载荷时, 在物体受撞击后 t 时刻, 设物体产生的离面位移为 $w(t)$, 它引起两束相干光位相差的相对变化量为 (t) , 用瞬态图像采集系统采集到摄像机靶面上的散斑场的光强信息为

$$I_1(x, y, t) = A_r^2 + A_s^2 + 2A_r A_s \cos[\theta + \phi(t)] \quad (2)$$

由于采用了瞬态图像的采集技术, 物体受撞击载荷前后靶面上两幅电子散斑图像都直接记录和存储在图像采集卡的帧存体中, 因此, 可以实现数字散斑干涉. 采用相减模式得

$$I_t(x, y) = |I_0(x, y) - I_1(x, y, t)| = 4A_r A_s \left| \sin, \frac{2\theta + \phi(t)}{2} \right| \cdot \left| \sin, \frac{\phi(t)}{2} \right| \quad (3)$$

由图 1 可知, 当物光近似垂直物面照射时, $\phi(t)$ 与物体离面位移 $w(t)$ 的关系为

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} w(t) \quad (4)$$

由(3)式可以看出, 当 $\phi(t) = 2n\pi (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时, 则 $I_t = 0$, 出现暗条纹. 将其代入(4)式得

$$w(t) = \frac{n}{2\lambda} \quad (5)$$

其中 n 为条纹级次, λ 为脉冲激光的波长

2 瞬态图像采集系统

撞击载荷下光力学的瞬态图像采集系统是由 386 微机、CA-P530 图像采集卡、CCD 摄像机、图像监视器、光-电触发器、接触触发器、同步电路、精密延时器和计算机接口电路等组成. 考虑到物体受撞击前后要分别进行图像采集, 红宝石脉冲激光器的工作方式是不同的. 当物体受撞击载荷前, 设置红宝石激光器在本机触发方式, 让脉冲激光器仅发射一次脉冲光. 当脉冲激光器出光, 照射物体表面的瞬时, 它也同时照射一个光-电触发器, 其产生的电脉冲信号通过精密延时器和计算机接口电路控制图像采集卡工作, 从而采集到瞬态光学图像. 在物体受撞击载荷时, 设置红宝石激光器在外触发方式, 见图 2 所示, 用电磁脉冲加载装置的锤头遮挡氦氖激光束产生的光-电触发信号和锤头打击到物体上的接触触发信号, 分别控制红宝石脉冲激光器开始工作和物体受撞击载荷后延迟 Δt 发射出脉冲激光. 本文采用的是电磁脉冲加载装置, 它可以提供重复性极好的撞击载荷.

3 周边固支圆薄板受撞击力时的离面位移测量

试件是钢质圆薄板, 直径为 50mm, 厚度为 4.5mm, 其圆心处受法向的撞击载荷.

在试件受撞击载荷前, 用瞬态图像采集系统采集到圆板变形前的电子散斑图, 并记录和储存在图像采集卡中. 试件受撞击载荷后, 将红宝石激光器设置在不同的延迟时间 $3\mu s$, $4\mu s$, $5\mu s$, 和 $6\mu s$, 分别采集到对应的电子散斑图像, 并记录和储存在图像采集卡中. 将圆板变形前和受撞击载荷后时间延迟为 Δt 的两幅电子散斑图像进行数字相减运算, 可得到电子散斑条纹图像, 见图 3 所示.

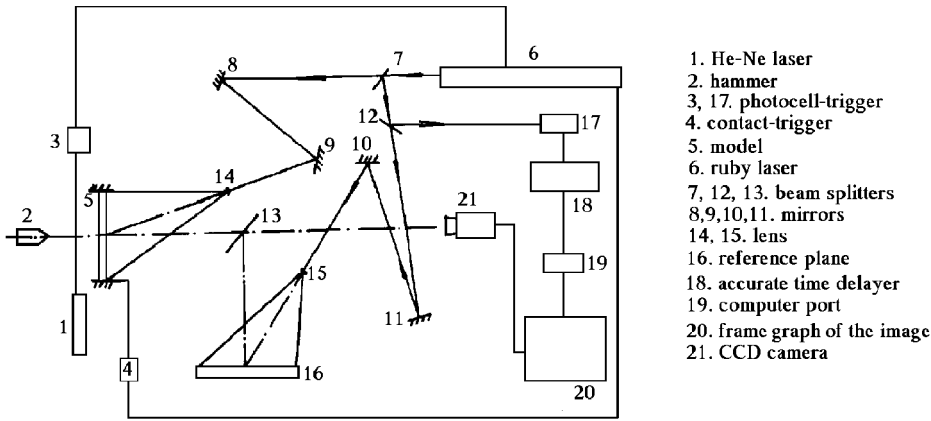


图 2 触发和同步系统
Fig. 2 Triggering and synchronizing system

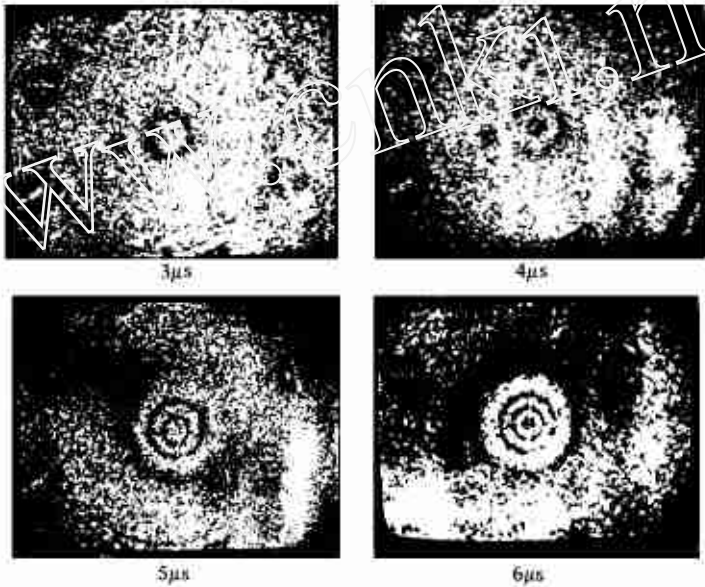


图 3 撞击后的电子散斑条纹图
Fig. 3 Fringe patterns for DSPI after impact

经过同态滤波处理, 可以得到质量较好的电子散斑条纹图像, 然后, 提取其条纹的灰度中心线, 由(5)式可得到圆板表面在不同时间延迟下的离面位移。由于圆板的变形对圆心是对称的, 取与图像监视器呈 45° 方向上径向截面为研究对象, 其离面位移的分布见图 4 所示

4 动有限元数值解

作者采用了线性静动力结构分析程序

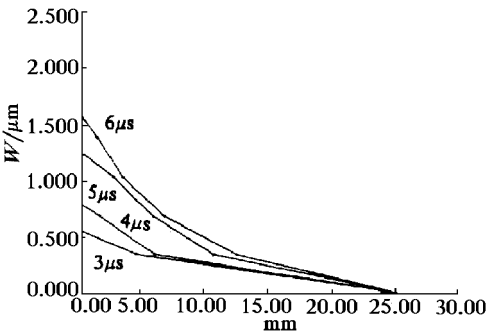


图 4 沿径向截面离面位移曲线
Fig. 4 Displacement curves along diametral section

M S A P 对圆板在撞击载荷下的离面位移进行了数值计算. 采用柱坐标的三维板单元, 单元划分见图 5 所示, 共 193 个节点, 192 个单元, 撞击载荷作用在第 193 个节点上. 用逐步积分法求瞬态响应, 时间步长为 $0.1\mu\text{s}$, 共 100 步.

钢质材料的动态常数为: 动态弹性模量为 $E_d = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 动态泊松比为 $\mu_d = 0.26$, 材料密度为 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

沿圆板半径截面上离面位移的数值解见图 6 所示.

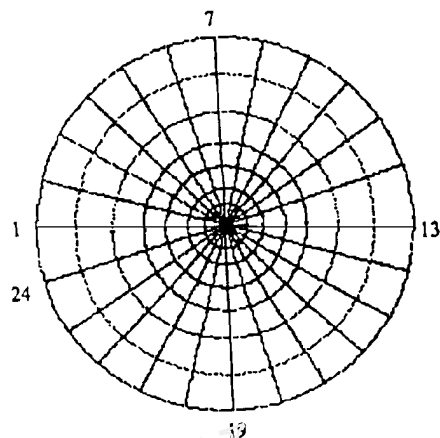


图 5 模型的单元划分

Fig. 5 Element division for model

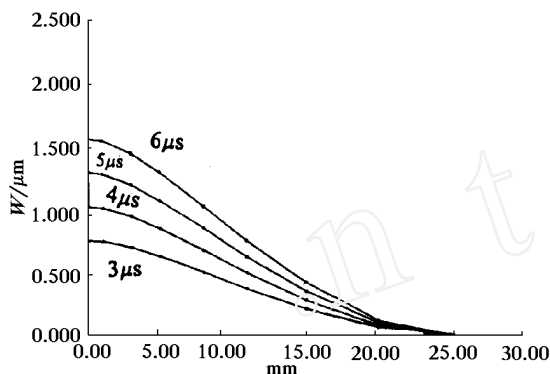


图 6 沿径向截面离面位移的有限元数值解

Fig. 6 Displacement curves along diametral section

5 结 论

本文利用瞬态图像采集技术, 实现了撞击载荷下的数字散斑干涉. 对圆薄板受撞击载荷的离面位移场进行了定量分析. 这种技术是有重要应用前景的. 实验结果与动有限元数值解是比较接近的.

参 考 文 献

- 1 Tong JW, Li HQ. Reflective photoelasticity and holo-interferometry applied to stress wave propagation. *Acta Mechanica Sinica*, 1987, 19(6): 529~ 535
- 2 Tong JW, Li HQ, Jia YQ. Frozen strain moir'e used in the analysis of impact loading. *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, 9: 47~ 55
- 3 Tong JW, An Y. A study of stress propagation under impact loading using double exposure speckle photography and finite analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 1990, 12: 35~ 42
- 4 Cookson TJ. Pulsed lasers in electronic speckle pattern interferometry. *Optic and Laser Tech*, 1978, 10(3): 119~ 124
- 5 Preater RW T. Electronic speckle pattern interferometry for rotating structures using a pulsed laser. *SP IE* 398, 1983: 225~ 228
- 6 Preater RW T. A nalysis of rotaing component strains using electronic speckle pattern interferometry. *SP IE* 473, 1984: 40~ 43
- 7 Preater RW T. Mesuring rotating component strain using ESPI. *SP IE* 673, 1986: 373~ 376

A STUDY OF MEASURING OUT-OF-PLANE DISPLACEMENT USING DSP I UNDER IMPACT LOADING

Tong Jingwei Zhang Dongsheng Li Hongqi

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The dynamic digital speckle pattern interferometry (DSP I) has been achieved by using the instantaneous image capturing technique. The measurement of out-of-plane displacement field of circular restrained plate with a cross point impact loading is completed. The results of dynamic finite element method show good agreement with those of experiments.

Key words ruby laser, instantaneous image capturing technique, dynamic DSP I, dynamic finite element analysis