

云纹干涉法瞬态应变分析¹⁾

钟国成 洪学明 郑润生

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 本文将单光束错位云纹干涉法应用于动态测量, 获得了一种可独立求解全场瞬态应变分量, 不受材料限制的动态测量新方法. 文中应用该方法对一个受冲击载荷的带孔方板的动态应变传播过程及对称面上的动应变分布进行了研究, 得到了比较理想的结果.

关键词 云纹干涉法, 错位, 动应变场

一、前 言

随着生产和科学技术的发展, 在力学研究和实际工程中提出了大量瞬态应力、应变的测量问题. 如工程结构在冲击或爆炸载荷作用下的应力分布及变化规律, 材料在高速载荷作用下的本构关系, 应力波传播及断裂力学中的裂纹扩展速率等等. 动态测量是光测力学重要的研究领域, 为国内外的学者所重视.

由于动态信息变化极快, 瞬时即逝, 其变化速度在微秒或毫微秒量级. 如何把这极快的瞬时信息采集起来进行分析, 一直是人们十分关心的问题. 光测动态分析主要采用高速摄影方法, 将快速变化的干涉条纹拍摄下来, 或缩短曝光时间, 利用单次或多次曝光记录干涉条纹, 如 Frocht 的单缝法, 沙丁照相机, 多脉冲激光法等^[1-3].

光弹性是光测力学中应力分析的古典手段之一, 也是最早应用于动态测量的实验方法. Christic, Post, Ruloy 等采用多火花高速摄影装置(沙丁照相机), 配合外光路实现了连续记录多幅(一般为 16 幅)动光弹条纹图. 该设备结构比较简单, 使用比较方便, 多年来一直是动应力分析的重要手段. 但是, 由于沙丁照相机采用电火花作光源, 光的相干性差, 只能记录等差条纹图, 因此不能直接求解全场各应力分量, 尚需其它分析方法作补充, 这对实验结果的可常性势必带来不利影响. 红宝石脉冲激光器提供了光强集中, 脉宽极窄的相干光源, 采用这种光源使很多现代光测力学新方法进入动态应用阶段, 如动全息, 动散斑干涉等. 尽管这些方法有很高的灵敏度, 但其共同的缺点是条纹对比度较差, 量程受条纹分辨率限制. 以高密度光栅作为测量元件的云纹干涉法, 几乎可以获得全息干涉法, 散斑干涉法, 错位散斑法, 散斑照相法所能获得的所有结果, 且具有干涉条纹对比度好, 量程范围大及实时观测等优点. 本文将单光束错位云纹干涉法应用于动态测量领域, 为独立求

1) 本文研究工作得到清华大学结构工程与振动开放研究实验室研究基金资助.

本文于 1992 年 5 月 27 日收到.

解全场瞬态应变解提供了一种新方法. 该法光路简单, 光学元件少, 不受材料限制, 并采用便携式红宝石脉冲光源, 为工程实际问题的动态测量提供了一种简便易行的测试手段.

二、实验原理和方法

1. 单光束错位云纹干涉法^[4]

图 1 为同时获得不同方向位移导数场的单光束错位干涉光路图. 试件 M 上复制有规整的高密度正交位相型光栅. 当准直相干光以 θ_i 入射时, 光栅衍射光的方向角 θ_m 符合下列衍射方程:

$$p(\sin\theta_i + \sin\theta_m) = m\lambda \quad (1)$$

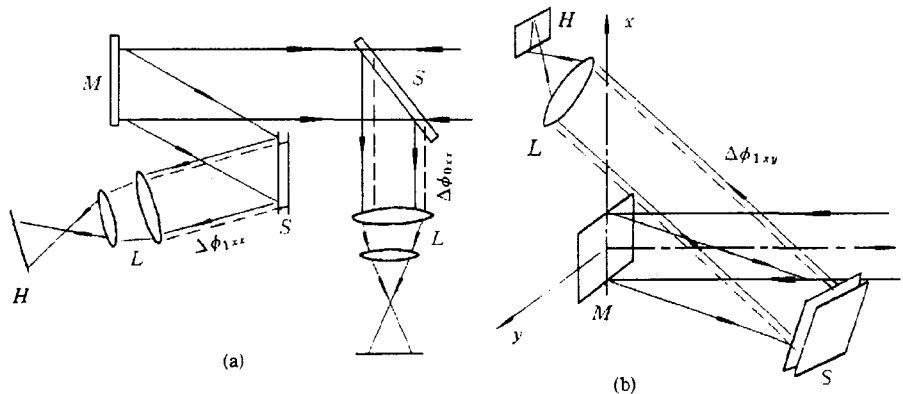


图 1 光路图

Fig. 1 Optical system

式中 p 为光栅节距, m 为衍射波级次, λ 为衍射光波长. 衍射光经过错位器 S 反射后, 成为 O 和 O' 两束光波. 当试件没有变形, 光栅很规整时, O 和 O' 皆为平面波, 记录底片 H 上将不出现干涉条纹. 试件变形后, 衍射光波发生波前的畸变, 其复振幅可表示为:

$$\left. \begin{aligned} O &= A \exp\{j[\psi + \phi(x, y)]\} \\ O' &= A \exp\{j[\psi + \Delta\psi + \phi(x, y) + \Delta\phi]\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\phi(x, y)$ 为试件表面位移产生的位相变化, ψ 为零载时衍射波的初始位相. 当试件栅比较规整时, ψ 为常数, 则上式中 $\Delta\psi = 0$. O 和 O' 相干并产生与位移导数有关的干涉条纹, 其光强分布为

$$I = K \cos^2 \frac{1}{2} \Delta\phi(x, y) \quad (3)$$

式中 K 为一常数, $\Delta\phi(x, y)$ 为 O 和 O' 的相对位相变化. 根据入射角 θ_i 和衍射角 θ_m , 可获得表面位移和位相变化的关系为:

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [w(x, y)(\cos\theta_i + \cos\theta_m) + u(x, y)(\sin\theta_i + \sin\theta_m)]$$

由错位引起的增量为:

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [(\cos\theta_i + \cos\theta_m) \frac{\partial w}{\partial x} + (\sin\theta_i + \sin\theta_m) \frac{\partial u}{\partial x}] \Delta x \quad (4)$$

当 $\Delta\phi(x, y) = 2\pi N_x$ 时, 得亮条纹. 则

$$N_x = \frac{1}{\lambda} [(\cos\theta_i + \cos\theta_m) \frac{\partial w}{\partial x} + (\sin\theta_i + \sin\theta_m) \frac{\partial u}{\partial x}] \Delta x, \quad N_x = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式中 Δx 为错位量, 可由错位器中量得. (5) 式为一耦合位移导数方程, 为了求解全场位移导数的各个分量: $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$, 必须有六个方程联立求解. 可以选择合适的光路以简化求解过程, 例如图 1 所示, 采用垂直入射光路, 在零级和 x 、 y 方向上的一级衍射波前进行不同方向的错位干涉, 记录的各方向的相对位相差为 $\Delta\phi_{0xx}, \Delta\phi_{1xx}, \Delta\phi_{0yy}, \Delta\phi_{1yy}, \Delta\phi_{1xy}$, 及 $\Delta\phi_{1yx}$. $\Delta\phi_{ijk}$ 的下标中 i 为衍射级次, j 为衍射方向, k 为错位方向. 其对应的亮条纹方程为:

$$\left. \begin{aligned} N_{0xx} &= \frac{2}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x_0 \\ N_{1xx} &= \frac{1}{\lambda} [(1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda f \frac{\partial u}{\partial x}] \Delta x_1 \\ N_{0yy} &= \frac{2}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \Delta y_0 \\ N_{1yy} &= \frac{1}{\lambda} [(1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} + \lambda f \frac{\partial v}{\partial y}] \Delta y_1 \\ N_{1yx} &= \frac{1}{\lambda} [(1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} + \lambda f \frac{\partial v}{\partial x}] \Delta x_2 \\ N_{1xy} &= \frac{1}{\lambda} [(1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} + \lambda f \frac{\partial u}{\partial y}] \Delta y_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 f 为栅频, $f = \frac{1}{p}$. (6) 式表明, 由条纹图 N_{0xx}, N_{0yy} 直接得到离面位移导数场 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial w}{\partial y}$, 再将其代入其它各式, 可容易地解得面内位移导数分量 $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial v}{\partial x}$.

2. 动态实验

实验研究在冲击载荷作用下, 应力波在带孔方板中的传播过程及孔边的瞬态应变分布. 采用北京光电技术研究所研制的 JQX-200 型红宝石脉冲激光器作为相干光源, 其波长 $\lambda = 6943\text{\AA}$. 静态调试时使用机内与脉冲激光同轴的 He-Ne 激光光源, $\lambda = 6328\text{\AA}$. JQX-200 机具有单脉冲、双脉冲和系列脉冲三种工作方式, 单脉冲输出能量约 150mJ, 双脉冲输出能量为 2×100 mJ. 脉宽约 30ns, 同步精度为 $\pm 0.5 \mu\text{s}$. 该机体积小, 移动灵活, 调试方便, 很适用于现场实测.

记录底片采用保定感光胶片厂生产的 102P 型 135 航空摄影胶片, 感光度为 ASA900°.

动态过程的记录方式为: 重复加载分时记录. 加载装置为落锤, 锤头重量 $G = 6\text{N}$, 落高 $h = 20\text{cm}$. 错位器采用两块单面带有 3° 楔角的光学玻璃楔块 (如图 2 所示). 错位量可通过两楔块之间的间距 t 而改变.

试件如图 3 所示, 材料为有机玻璃, 表面复制有 600line/mm 的正交型闪耀光栅. 记录光路如图 1 所示, 图 1(a) 记录 $\Delta\phi_{0xx}(\Delta\phi_{0yy})$ 及 $\Delta\phi_{1xx}(\Delta\phi_{1yy})$, 图 1(b) 记录 $\Delta\phi_{1xy}(\Delta\phi_{1yx})$.

对于采用重复实验的动态分析方法, 实验结果的准确性和可靠度主要取决于加载装置和同步控制系统的精度. JQX-200 型激光器机内同步控制精度可达 $0.5\mu\text{s}$, 但是如果外同步系统不匹配或设置不当, 实验的同步精度会受到很大影响. 为提高控制精度和准确抓住



图2 错位器
Fig. 2 Shearer

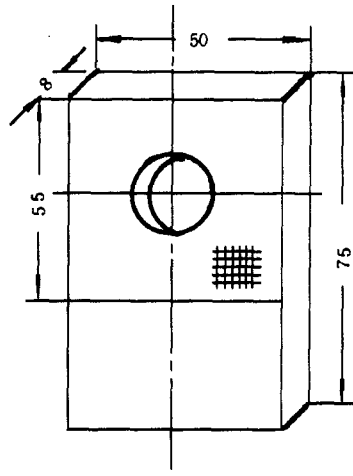


图3 试件
Fig. 3 Specimen

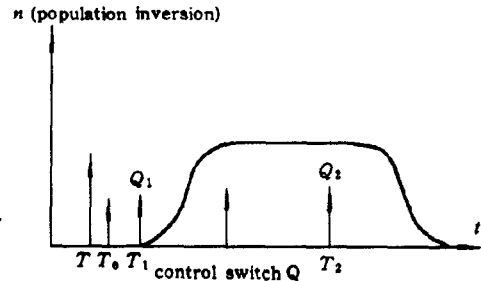


图4 特性曲线
Fig. 4 Characteristic curve

应力波产生的零时刻, 实验采用了“外同步”和“控Q”双路信号实现加载与出光的同步控制. 由于单光束错位云纹干涉法是单次曝记录, 而“控Q”信号是在双脉冲或系列脉冲工作方式下使用的, 为实现双路信号控制, 又使激光器输出单脉冲激光, 在设置延迟时序时需要依据脉冲激光器的特性曲线(图4)来确定.

实验在双脉冲工作方式下进行.“外同步”信号启动延迟时序, 经时间 T_0 后点燃氙灯, 再经时间 T_1 触发第一脉冲激光 Q_1 (见图4); 此时由于 Q_1 处于特性曲线的平台区以外, 粒子反转数尚未达到饱和, 虽触发 Q_1 , 但不会出光. 此后, 激光器等待“控Q”信号输入. 当“控Q”信号到来之后, 在经时间 T_2 触发第二脉冲激光 Q_2 . 因 Q_2 在特性曲线的平台区内, 因而可正常出光. 至此完成了双路信号的同步控制.

“外同步”信号的产生是由一束He-Ne激光通过试件顶端约2mm处照射在一个光电接收器上, 通过一个反向电路, 在He-Ne激光常照情况下, 输入机内一个+5伏的高电平, 当落锤下落遮挡He-Ne激光束时, 外同步系统输入机内+0.5伏低电平, 启动脉冲激光器的延时时序.

在试件顶端用环氧树脂胶粘一短路铜片, 当落锤撞击试件, 与短路片形成短接时, 通过一个匹配电路, 同步控制系统产生“控Q”信号(高电平)输入机内, 从而完成同步控制. 同步控制系统如图5所示.

三、实验结果

实验对冲击加载后20—250 μ s内的一系列时刻的各级衍射像进行了错位记录. 图版I照片1(a)—(d)给出了四个时刻(10 μ s, 25 μ s, 50 μ s, 100 μ s)的各级错位条纹图. 计算对称截面A-B上的应变分布. 由于对称面上不存在剪应变, 因此只需 N_{0xx} , N_{1xx} , N_{0yy} 和 N_{1yy} , 四个干涉条纹图即可求解. 图6为50 μ s时A、B截面上的各项条纹级次分布. 将A-B截面上各点的条纹级数分别代入方程(6)可解得该截面上应变 ϵ_x , ϵ_y 的分布, 如图7所示. 图8为孔边最大应变点(A)的 ϵ_x 随时间变化曲线.

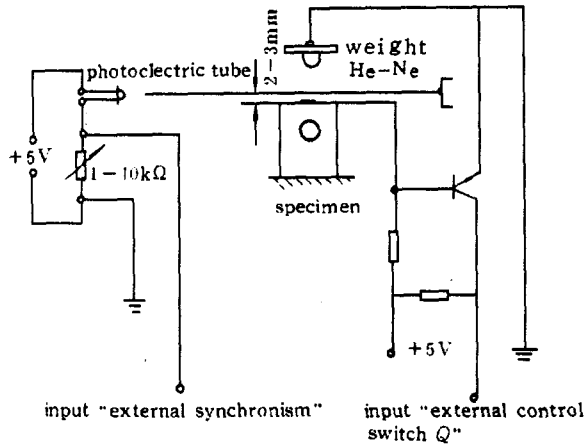


图 5 同步控制系统图

Fig. 5 Synchronous control system

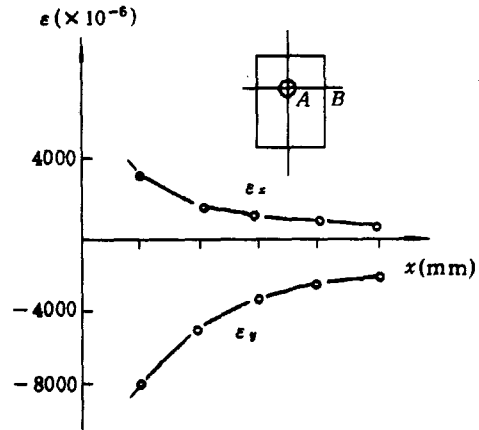


图 7 A - B 截面应变分布图

Fig. 7 Strain distribution on A - B Section

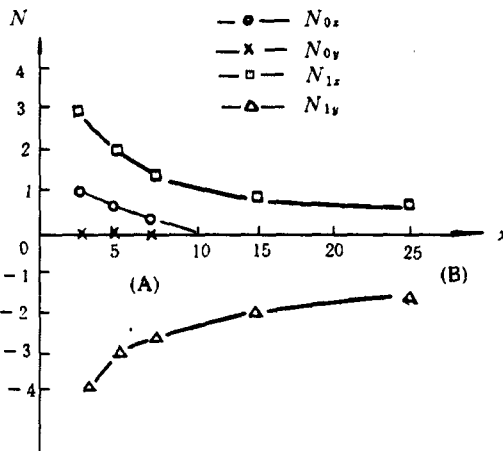


图 6 A-B 截面条纹分布图

Fig. 6 Fringe distribution on A - B section

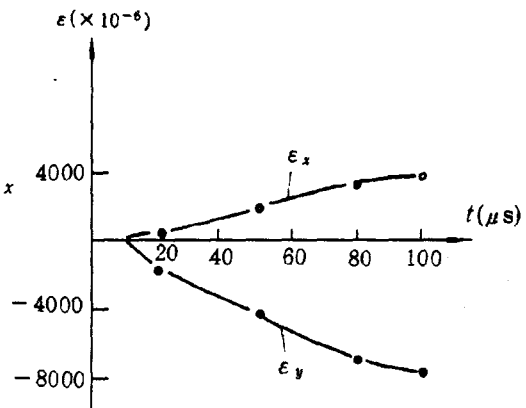


图 8 $\epsilon-t$ 曲线

Fig. 8 $\epsilon-t$ curve

四、实验中的几个技术问题

1. 实验时，一般先进行静态光路调整，这可使用机内与脉冲激光同轴的 He-Ne 激光光源。由衍射方程 $p(\sin\theta_i + \sin\theta_m) = m\lambda$ ，可知，当 θ_i 一定时，不同衍射级次的衍射角 θ_m 与相干光源波长 λ 有关。由于脉冲激光波长为 6943\AA ，而静态调试用的 He-Ne 激光其波长为 6328\AA ，因此动、静态同级衍射像的衍射角不同。在垂直入射情况下，一级衍射角 θ_1 的动、静态值分别为 24.61° 和 22.31° 。所以在动态记录前应首先判定脉冲激光衍射像的位置。为避免动、静态衍射像偏离过大，应尽量缩短衍射波的光程，这对提高成像质量也是有益的。

2. 错位器的质量直接影响零场的调节，所以最好用平面度较高的光学玻璃做错位器。本文所述的错位器其错位量连续可调，错位量增大可提高灵敏度，但过大的错位量会影响

测量精度,也会使图像产生无干涉条纹的重边.而且由于灵敏度过高,使零场的调节十分困难.然而过小的错位量要求较大的载荷,这在某些情况下也是不当的.建议在零场不易调出时,采用加载波的双曝光法,以获得无噪声的应变场条纹.

五、结 语

单光束错位云纹干涉法测量瞬态应变具有以下显著特点:

1. 使用高密度闪耀光栅,有较高的灵敏度.衍射光强集中,保证动态记录时具有足够的光强.
2. 用两块玻璃楔块的间隙进行错位,错位量可以根据灵敏度需要连续可调,并可简便地实现载波叠加,以消除零场条纹干扰或初应变影响.
3. 该方法可独立求解动应变分量.且不受模型材料的限制,可以对实际构件进行现场测量.
4. 采用“外同步”、“控 Q ”双路信号同步控制,可以准确抓住应力波产生的零时刻,提高实验的可靠度.

参 考 文 献

- [1] Riley W F and Dully J W. Recording dynamic fringe patterns with a crang-schardin camera, *Experiment Mechanics*, 1969,9(8)
- [2] Clark J A and Durell A J. An introduction to dynamic photoelasticity. *Experiment Mechanics*, March,1983
- [3] Rowlands R E. A multiple-pulse ruby-laser system for dynamic photomechanics: applications to transmitted and scattered-light photoelasticity. *Experiment Mechanics*, 1969 9(9):385-393
- [4] 戴福隆. 单光束错位云纹干涉法测板的斜率和曲率. *力学学报*, 1987,19 (6)

DYNAMIC STRAIN ANALYSIS METHOD USING ONE-BEAM SHEARING MOIRE INTERFEROMETRY

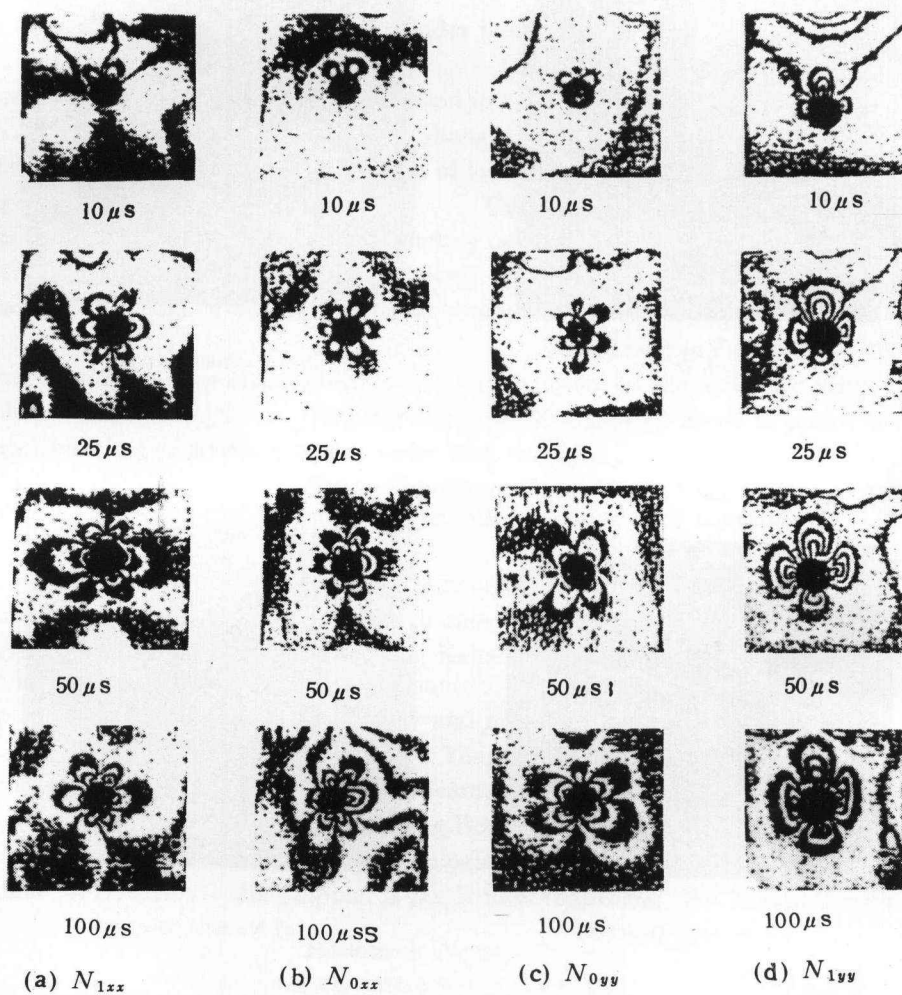
Zhong Guocheng Hong Xueming and Zheng Runsheng

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract This paper developed a new dynamic analysis method based on the principle of one beam shearing Moire interferometry. The method can be used to measure the full strain field of dynamic problems. It is characterised by simple optical arrangement, excellent fringe contrast and high sensitivity, etc. Besides, as it uses a portable multiple pulsed - ruby - laser as light source, the method is particularly suitable for field measurement.

In the paper, a problem of stress propagating in a rectangle is studied with the above method.

Key words Moire interferometry, shearing, dynamic strain field.



图版 I 照片 1 四个时刻的各级衍射错位条纹图
Photo 1 Diffraction shearing fringe Patterns in a specimen at four instants