

实验六 全息干涉技术

——二次曝光法测量微小形变

全息干涉术是人们在大量全息照片的拍摄实践中发现并发展起来的一门新的光学干涉技术。1962年第一张激光全息照片成功地拍摄以后不久，美国以利思（E.N.Leith）为首的全息研究小组偶然发现，当一张全息感光干板进行了二次重复曝光，而在这二次曝光之间，被摄物又稍有移动，则摄得的全息照片的再现物像上将呈现出一些独特的干涉条纹簇。对这些叠加于再现物像上的条纹进一步研究表明，它们带有被摄物体表面位移或变形的信息，根据这些条纹的疏密分布，可以定量地计算出物体表面各点位移的大小。

目前全息干涉技术已被广泛应用于无损检测、微小形变或振动的检测、弹道和流场显示、光学信息的存储和处理等领域，并有着广泛的发展前景。

【实验目的】

1. 了解二次曝光全息干涉术的原理、特点及应用；
2. 通过用二次曝光法测量悬臂梁弯曲变形。

【实验原理】

1. 二次曝光全息干涉法

二次曝光全息干涉法就是在同一片感光板上分别记录同一物体变形前后的两张全息照片（全息图）。先后二次曝光的唯一差别在于后一次曝光前该物体有了一个微小的变形或移动，而全息防振台上的整个拍摄装置、元件仍保持原状，故当在再现观察时，用再现光波照射这张经过双重曝光后，又经过化学冲洗处理（显影、定影处理）的全息照片时，在看到再现物像的同时，还会在像的表面上看到由于物体的微小形变或位移而产生的干涉条纹。出现这种形变干涉条纹的物理解释如图1所示。S为被照明物体光波的波源，G为感光版上的任意点，设物点变形前、后位于 Q_1 和 Q_2 ；形变所产生的物点实际位移是 $\overline{Q_1Q_2} = d_y$ ，所以，物光波由照明光波的波源发出后被 Q_1 及 Q_2 物点散射到G点，此二列散射光波在G点的位相差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d_y (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (1)$$

式中， θ_1 是 $\overline{Q_1Q_2}$ 与 $\overline{SQ_1}$ 间的夹角， θ_2 是 $\overline{Q_1Q_2}$ 与 $\overline{Q_1G}$ 间的夹角， λ 是拍摄时激光的波长，

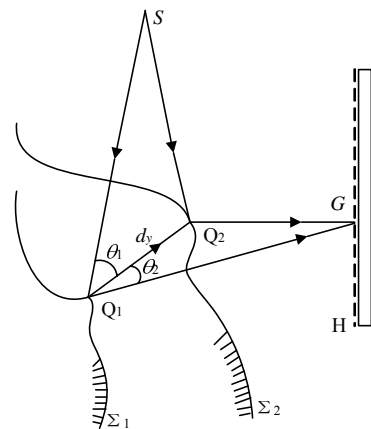


图1 二次曝光干涉的解释

此式成立的条件是 $d_y \ll \overline{SQ_1}$ 与 $\overline{Q_1G}$.

如再假设变形前后物光在感光板G上的复振幅分别是 $O_{1(x,y)}e^{-i\varphi_1(x,y)}$ 和 $O_{2(x,y)}e^{-i\varphi_2(x,y)}$ (其中 $O_{1(x,y)}$, $O_{2(x,y)}$, 是物体变形前后散射光波的振幅; $\varphi_1(x,y)$ 和 $\varphi_2(x,y)$ 是物体变形前后, 散射光波的位相, 两者之差即为前述的 $\Delta\varphi$). 二次曝光全息图经再现光波照射后, 正一级的衍射光波便再现出二次曝光前、后物表面所散射的物光波的波前 (即也可认为是再现虚像发出的波前), 它们的传播方向相同, 而且满足相干条件, 故总的衍射光强为

$$\begin{aligned} I(x,y) &= K \left[O_{1(x,y)}e^{-i\varphi_1(x,y)} + O_{2(x,y)}e^{-i\varphi_2(x,y)} \right]^2 \\ &= K \left[O_1^2 + O_2^2 + 2O_1O_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式 (3) 中, K 为与显影、曝光处理有关的比例常数. 此式说明在再现虚像上会出现干涉条纹. 位移相同的点, 其干涉条纹光强分布相同, 干涉强度极小的条纹位置 (暗条纹位置) 应满足 $\varphi = (2k+1)\pi$ 的条件, 即应有

$$d_y = \frac{(2k+1)\lambda}{2(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}, \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

其中 k 为干涉级次, 此式又说明同一位移所形成的干涉级次, 还与照明方向 θ_1 和散射方向 θ_2 有关. 通常可以在 $\theta_1 = \theta_2$ 的条件下拍摄全息照片. 由图 2 可知

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{a-x_i}{h_1}, \quad \operatorname{tg}\theta_2 = \frac{b-x_i}{h_2} \quad (4)$$

2. 二次曝光测量悬臂梁变形分布

本实验中将拍摄一端夹紧的悬臂梁, 当另一端受力发生弯曲变形的二次曝光全息干涉照片, 并测出该梁中性截面上各点的位移值. 实验光路如图 2 所示.

由于悬臂梁的自由端在不大的集中外力 F_y 作用下, 梁中心截面上各点沿 x 轴向的变形很小, 常可以略去不计. 而各点沿 y 轴的变形分布, 可以用材料力学的公式确定, 即

$$d_{y\text{理论}} = \frac{F_y x^2}{6EJ} (3L-x) \quad (5)$$

式 (5) 中, L 为梁长, E 为材料的杨氏模量, J 为梁截面的惯性矩, x 为待测物点 Q_i 的位置坐标. 显然, 当 $x=L$ 时, $d_{y\text{理论}} = y_{\max} = F_y L^3 / (3EJ)$, y_{\max} 是受力点的位移值. 将 y_{\max} 代入 (5) 式得

$$d_{y\text{理论}} = \frac{y_{\max}}{2L^3} (3L-x)x^2 \quad (6)$$

从式 (6) 算出的梁上各点的变形位移与按二次曝光全息干涉照片再现虚像中测读得到的全

息干涉条纹的暗条纹次级分布求得的位移值 d_y 比较，即可评价全息干涉技术的精度。

【实验仪器】

全息防振台，拍摄全息干涉照片用的光学元件，待测悬臂梁，He-Ne 激光器（632.8 nm），台虎钳，千分表，显影液（D-19），定影液（F-5）等。

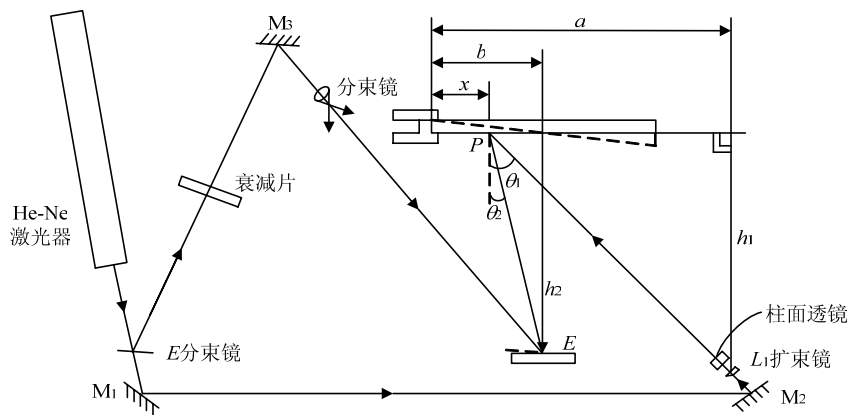


图2 用二次曝光法测量悬臂梁变形的分布的光路

【实验内容】

1. 悬臂梁变形前后的二次曝光全息干涉照片的拍摄

(1) 实验光路如图2所示，拍摄要点与注意事项与拍摄静物的全息照片相同，但在本实验中，二次全息拍摄曝光之间，当全息干板一经夹装稳妥，进行了第一次变形前的拍摄后，整个拍摄的光路系统及各元件等均应保持原状，不能触及。只能有效地使梁发生微小的弯曲变形（约 $y_{\max} = 6 \sim 10 \mu\text{m}$ ）它可由 μ 级千分表读出。而且在使梁变形的整个动态变化过程中，均应遮掩激光束，在暗绿灯下进行操作，以免发生不必要的曝光。

(2) 悬臂梁已由实验室人员稳妥可靠地夹持在台虎钳中，注意检查根部夹紧的状态，并使梁的长度轴向（ x 轴）垂直于钳口平面。

待测梁表面刻有细格线，相邻二刻线间距为10 mm，可以藉此确定任一测读点Q的 x 轴位置而决定 $\theta_1 = \theta_2$ 的值。梁自由端的挠度 y_{\max} ，由螺丝顶杆组成的加力装置控制，变形大小靠安装在另一侧的 μ 级千分表监测。

(3) 选择好悬臂梁加载点的变形量（ y_{\max} ）后，遮掩激光束，夹装感光板，分别在变形前后进行二次全息曝光。

(4) 二次曝光后，将经过显影、水洗、定影、水洗（或漂白）的二次曝光全息干涉照片烘干。

2. 悬臂梁变形时各点的挠度分布的测量

(1) 将摄制完成并经干燥的二次曝光全息照片，按正确的方法置于再现光路中（可以

是再现虚像的光路，也可以取再现实像的光路）。

用单眼观察（对再现虚像）或用屏接收实像，依次读出并记录梁上各级暗条纹及所对应的位置 x_i （由于梁的根部夹持处变形为零，是0级亮条纹，依次向自由端计数时出现的暗条纹序数，将依次为1, 2, 3, ..., k ）。

y_{\max} 之值也可从梁上在 $x=L$ 处的干涉暗条纹的级数值 k_{\max} 用全息公式计算而得。

（2）将 $d_{y,理论}$ 和 d_y 值分别算出并比较之，在毫米方格纸上作出实验曲线 d_y-x 和理论变形曲线 $d_{y,理论}-x$ 。

【思考题】

1. 在观测全息干涉条纹时，若观察点E变动，读出同一物点的干涉条纹级序数是否会变化？整个干涉条纹的分布会不会变化（干涉条纹会不会移动）？

2. 试分析本实验中产生误差的原因。如有可能试比较在计读干涉条纹级序数时，用虚像观测的办法和用实像投影至毛玻璃上的测读方法的优缺点。

3. 根据你自己的实践体会总结拍摄二次曝光全息干涉照片，及测量微小变形的经验教训。

【附表】

实验数据记录表

$L =$

$y_{\max} =$

k (暗纹序数)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x (cm)										
$\theta_1 = \text{tg}^{-1} \frac{a-x}{h_1}$										
$\theta_2 = \text{tg}^{-1} \frac{b-x}{h_2}$										
d_y (实验)										
d_y (理论)										