

在干涉计量中用矢量法判别物体 离面位移方向

陈 颢 李大刚

(应用物理系)

【摘要】详细讨论了采用波前剪切进行物体离面位移方向判别的方法。指出波前剪切可用矢量来描述。用矢量分析的方法可以对物体各种复杂形变引起的离面位移方向进行判别。并给出了有关的实验结果。

关键词：干涉计量，波前剪切

1. 引言

在工程研究和实际应用中，物体微小位移或形变的方向是一个重要的参数。在大量研究的基础上，人们已经提出各种判别物体形变方向的方法。目前广泛应用的单全息图或多全息图法^[1~3]，可以定量地测量物体在 $\frac{\pi}{2}$ 范围内形变的方向。F. Gori等人提出的在多次曝光之中改变记录光束的方向^[4]和邢美杰等人提出的在多次曝光之中移动记录干版^[5]等都是在全息干涉计量中引入附加波前剪切判别物体形变方向的方法。这种方法简易有效，受到了人们的重视。但是这种方法目前只能用于对物体在水平方向上的简单形变方向进行判别。这是由于对这种方法在理论和实验上还缺少深入充分的分析。本文详细讨论了用波前剪切进行物体离面位移方向判别的方法。指出波前剪切可用矢量来描述；用矢量分析的方法可以对物体各种复杂形变引起的离面位移方向进行判别。并给出了有关的实验结果。

2. 原理

任何一种干涉计量都可以被看作是标准波前与被检测波前相剪切，使两者之间产生一个位相差 δ 。波前剪切有5种基本类型^[6]，本文只讨论横向剪切。在全息记录中，采用双曝光法，两次曝光之间横向移动记录干版或物体和改变记录光束的角度，便可实现波前剪切。图1为横向移动记录引起波前剪切的情况。图1中， H 为记录干版； O 为物体； θ 为物光束的 λ 射角； Δy 为表示干版横移的方向和大小的矢量； P 为物体上的一点。干版移动时，相对于干版物点 P 移到 P' 点。由图1得，采用平面光波照射物体时，横向移动干版在两束物光之间所引起的有效位相差为^[5]（没波长为 λ ）

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y \sin \theta \quad (1)$$

位相差 δ 与物光的波前变化是相对应的。(1)式说明横向移动干版实际上将引起物光波前产生离面倾斜,如图2.图2中 O 为干版移动前所记录的物光波前, O' 为干版移动后所记录的物光波前, α 为物光波前的离面倾斜角.干版位移 Δy 的大小和方向与其所引起的物光波前变化的大小和方向是一一对应的.即:物光波前的倾斜角 α 与干版位移量 Δy 成正比,当 θ 角不大时

$$\alpha = \frac{\Delta Y}{Z} \quad (2)$$

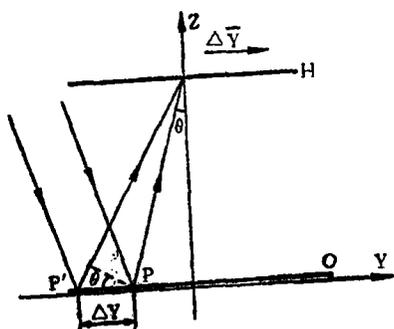


图1 横向移动记录干版引起的附加光程差

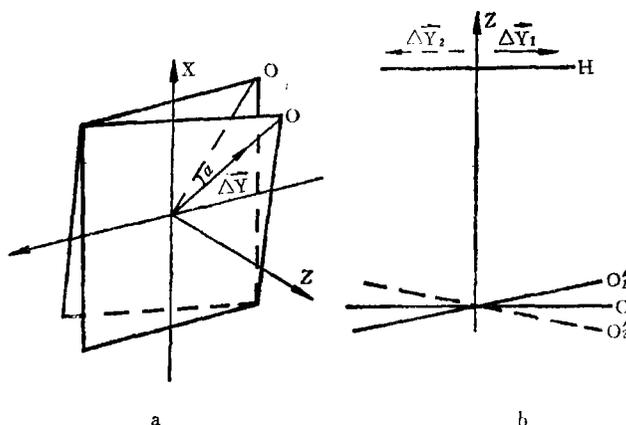


图2 横向移动记录干版引起物光波前产生离面倾斜

Z 为物平面与干版之间的距离(观察时, Z 应为物平面与观察点之间的距离);物光波前离面倾斜在物平面上所沿的方向平行于干版移动 ΔY 的方向,而倾斜角 α 的正负与矢量 ΔY 的指向有关,如图2—b.因此干版横向移动引起的物光波前变化可由一个矢量 $\vec{\alpha}$ 来表示

$$\vec{\alpha} = \frac{\Delta \vec{Y}}{Z} \quad (3)$$

波前变化与其所产生的干涉条纹分布有关.观察时,矢量 $\vec{\alpha}$ 也可由物平面内的干涉条纹分布来确定: $\vec{\alpha}$ 的方向垂直干涉条纹,指向 δ 值减小的方向; $\vec{\alpha}$ 的大小与干涉条纹的宽度 e 成反比

$$\vec{\alpha} = \frac{\lambda}{e} \vec{\alpha}_0 \quad (4)$$

$\vec{\alpha}_0$ 为 $\vec{\alpha}$ 的位单矢量.

在全息干涉计量中,物体离面位移与其所引起的物光波前的变化是相一致的.因此物体变化引起其表面上各个处的离面倾斜情况也可用矢量来表示,设该矢量为 $\vec{\theta}$.矢量 $\vec{\theta}$ 与物体离面位移所引起的干涉条纹分布之间的关系应满足公式(4).

物体离面位移和干版横向移动共同引起物光波前的总变化量是两者分别引起的物光波前变化量的叠加,因此描述物光波前总变化的矢量 \vec{r} 应是矢量 $\vec{\theta}$ 和 $\vec{\alpha}$ 的矢量和

$$\vec{r} = \vec{\theta} + \vec{\alpha} \quad (5)$$

观测时, \vec{a} 的大小和方向与 $\Delta\vec{Y}$ 一致, 是已知的. \vec{r} 、 $\vec{\theta}$ 的大小和方向可根据干版移动前和移动后所得到的两组干涉条纹的分布来确定. 只有 \vec{r} 、 $\vec{\theta}$ 的拍向是未知的, 可用矢量作图法求得. 根据零级干涉条纹与被观测点之间的相互位置 (不必知道零级干涉条纹的确切位置), 用 $\vec{\theta}$ 的方向可判知物体表面各个点处离面位移的方向. 用矢量作图确定 $\vec{\theta}$ 方向的具体方法是, 沿干版移动前和移动后所得到的两组干涉条纹的垂直方向分别作出矢量 \vec{r} , $\vec{\theta}$ 的方向线 $\overline{ArAr'}$ 和 $\overline{A\theta A\theta'}$, 以这两条直线的交点 C 为起点, 沿干版移动 $\Delta\vec{Y}$ 作矢量 \vec{a} 的矢量线, 过矢量线 \vec{a} 的矢端 a 点作一与直线 $\overline{A\theta A\theta'}$ 相平行的直线 $\overline{DD'}$, 直线 $\overline{DD'}$ 与 $\overline{ArAr'}$ 的交点为 b , 由 a 点指向 b 点的方向就是矢量 $\vec{\theta}$ 的方向, 如图 3.

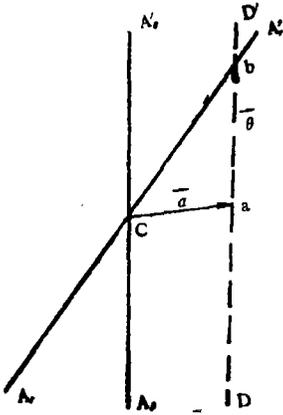


图3 用矢量作图法
确定波前剪切方向

根据式可知, 横向移动干版将使干涉条纹产生转动和疏密两种变化. 当矢量 \vec{a} 与 $\vec{\theta}$ 不相平行时, 这两种变化同时存在. 在这种情况下, 用作图法确定 $\vec{\theta}$ 的方向不必考虑干涉条纹的疏密变化. 当矢量 \vec{a} 与 $\vec{\theta}$ 相平行时, 干涉条纹只有疏密变化, 这时根据干涉条纹的疏密变化可直接确定 $\vec{\theta}$ 的方向, 而不须采用作图法, 干涉条纹变密说明 \vec{a} 与 $\vec{\theta}$ 的方向相同, 反之则说明 \vec{a} 与 $\vec{\theta}$ 的方向相反.

上述分析说明, 在全息干涉计量中, 横向移动记录干版或物体引入附加波前剪切, 可判别物体各种复杂离面位移的方向. 这种矢量分析方法对用改变参考光束的方向进行物体离面位移方向判别也同样是有用的.

3. 实验结果

图 4 是采用在两次曝光之间横向移动干版引入附加波前剪切的方法, 对一切钢板在四周固定, 中心受压时产生形变的大小和方向进行计量和控制的实验结果. 图 4 中: a 是钢板受力变形引起的干涉条纹分布; b 是干版横向移动引起的干涉条纹分布; c 是钢板变形和干版横移共同引起的干涉条纹分布; d 是钢板变形产生的干涉条纹与干版横移产生的干涉条纹相叠加形成的莫尔条纹. 比较 a 、 c 两图, 说明在双曝光全息记录时移动干版 (或改变参考光束的方向) 引入一个附加的位相差, 所引起的干涉条纹的分布的变化与上述是一致的. 在 a 、 c 两图中, 中心水平线上各点处的干涉条纹分布只有疏密不同, 没有方向的变化. 这是因为 a 图的中心水平线上各点处的干涉条纹分布方向与 b 图相同, 即矢量 $\vec{\theta}$ 与 \vec{a} (或 $\Delta\vec{y}$) 的方向相平行, 在这些点处附加位相差的引入不会引起干涉条纹分布方向的变化. 在偏离中心水平线的各点处, a 图与 b 图的干涉条纹分布方向不同, 即矢量 $\vec{\theta}$ 与 \vec{a} (或 $\Delta\vec{Y}$) 的方向不相平行, 引入附加位相差将使这些点处的干涉条纹产生疏密和分布方向的变化. 因此在偏离中心水平线的各点处, a 图与 c 图中的干涉条纹间距和分布方向都是不同的. 在图 a 中选取 3 个不在同一条直线上的点, 沿着 a 、 c 两图中的 3 个点处与干涉条纹相垂直的方向, 分别作出各点处的矢量 $\vec{\theta}$ 与 \vec{r} 的方向线, 然后根据干版移动方向 $\Delta\vec{Y}$ 用矢量作图法确定出各点处 $\vec{\theta}$ 的方向, 根据 a 图中零级干涉条纹的位置 (钢板四边的固定处为零级干涉条纹的位置), 可判断出钢板受力时, 其中心向干版方向凸起. 这与实验中钢板的受力方向是相一致的.

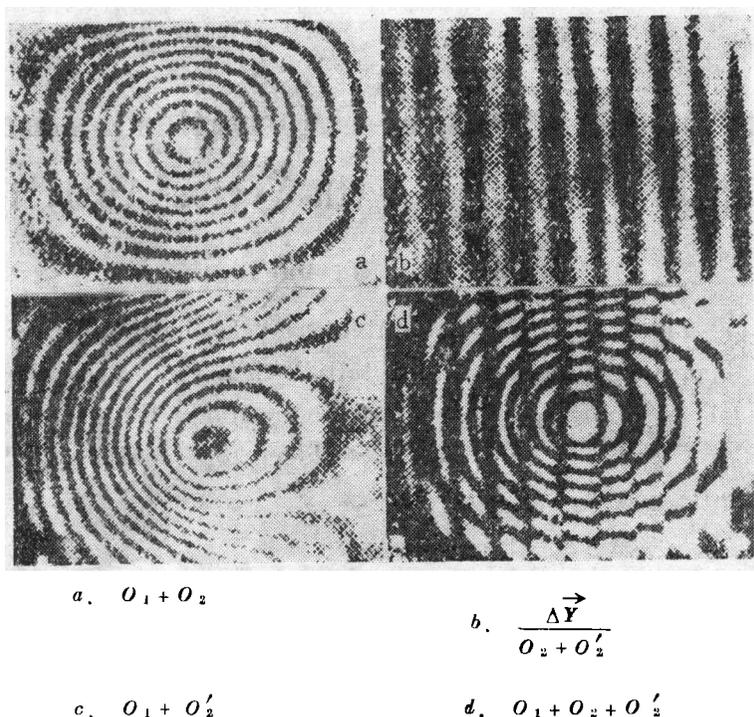


图4 实验结果 O_1 ——钢板受力前所记录的物光波； O_2 ——钢板受力后所记录的物光波； O'_2 ——钢板受力后，横向移动记录干版所记录的物光波)

4. 结论

对由物体、记录干版和记录光束的变化所引起的波前剪切进行矢量描述和矢量分析，将会给干涉计量带来许多方便之处。例如，在用引入附加波前剪切进行物体离面位移方向判别的方法中应用矢量分析，可以方便地获知物体各种复杂形变引起的离面位移方向。因此对波前剪切进行矢量分析，在干涉计量领域中的前景是可观的。

参 考 文 献

- [1] Ostrousky Yu I et al. Interferometry by Holography (Springer-Verlag, Germany, 1980), 252.
- [2] Vest C M. Holographic Interferometry. (John Wiley and Sons, Inc., U.S.A., 1979), 73.
- [3] 张如一, 陆耀楨. 实验应力分析. 北京: 机械出版社, 1981: 327~332
- [4] F. Gori et al. Optics Commu. 1972; 5(5): 359.
- [5] 邢英杰, 王文超, 范书中. 光学学报, 1986; 6(4): 355
- [6] O. Brngahl; J. Opt. Soc. Amer., 1968; 58(7): 865

Determination of Object Deformational Direction in Interferometry with Vector Analysis

Chen Yan Li Dagang

【Abstract】 The method for determining deformational direction with wave front shearing is studied in detail. With a vector the wave front shearing can be symbolized. It is easy to determine the deformational direction of any complex deformation with vector analysis. The experimental results are also given.

Key words: interferometry, wave front shearing