

散斑运动研究及测量应用

华建文

(华东船舶工业学院二系, 镇江 212003)

提要 进一步研究了透镜后空间散斑场与透镜前刚性漫反射体线运动或角运动的关系, 寻求出测量刚体多维运动的新方法。

关键词 散斑, 运动, 测量, 应用

以往用散斑法研究刚性物体横向位移时常使用像面散斑。测量时首先要对被测刚体调焦成像和测出放大倍率。测量刚体倾斜转动时以往使用焦面散斑。这两种方法虽有代表性, 但都不能实现使用单透镜单方位测出刚体的多维运动。1987年我们曾利用傅里叶全息法测量刚体三维线运动, 结果实现了测量过程不需对被测物体成像对焦。但全息法对在线测量条件较苛刻, 且该法不能测量转动, 也不允许有转动。本文经理论分析和实验证实, 找出刚体一般运动与透镜后空间散斑场运动的数学联系, 发现利用散斑运动所携带的信息同样做到无须对焦成像, 也无须多方位多透镜拍摄就能测定刚体的线运动与角运动。

1 透镜后空间散斑与刚体运动的联系

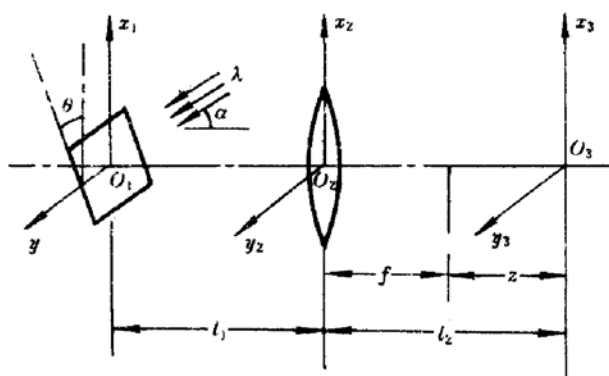


Fig. 1 The system for studying speckle motion caused by translation of a diffuse object

1.1 透镜后空间散斑运动与刚体线运动的联系

设刚体位于透镜前某一位置(图1), 由单色平行光照明, 设照明光方向矢量为 m , 透镜焦距为 f 。研究由物体散射的光波在透镜后焦面之右 z 处 O_3 平面上产生的散斑场, 可知当物体横向位移 Δx_1 , 则散斑场作整体平动, 相应的位移量^[1]

$$\Delta x_3 = - (z/f) \Delta x_1 \quad (1)$$

与照明物体的平行光照射方向及物体距透镜的距离无关。当 $z = 0$ 时, 说明透镜后焦面上的散斑场不受物体微运动的影响, 保持静止不动, 这和一般概念相符。当 z 等于物体的像距(这里从后焦面算起)时, $-z/f$ 正好是一放大因子 M (物像放大因子), 说明像面散斑法测量物体运动只是上述方法的一个特例。

1.2 透镜后空间散斑运动与刚体角运动的关系

如图 1 中的物体转动微角度 θ , 转动轴为 y , 则它在透镜后任意平面上的散斑场作整体移动, 经分析其平移量为

$$\Delta x_{3s} = l_1 \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{f} + \frac{1}{l_3} \right) l_3 \theta (1 + \cos \alpha) \quad (2)$$

用图 1 所示的记录系统, 在透镜前两倍焦距处放置一块漫反射物体, 即 $l_1 = 2f$. 在透镜后 $l_3 = 1.5f$ 处放置一块记录干板. 透镜焦距 $f = 300 \text{ mm}$. 照明光与透镜主轴的夹角为 $\alpha = 45^\circ$, 物体转动前后各曝光一次以记录物体在 O_3 平面的散斑场. 给定物体的转动量 $\theta = 0.5'$ (此角位移是用塞规提供的, 见图 2). 经适当的显定影后仍然用 $f_r = 300 \text{ mm}$ 的透镜进行傅氏变换, 得到的结果如图 3 所示. 显然它是一组水平直条纹. 说明底片记录到的确实是平移散斑场. 从图中量得 8 个条纹的宽度为 39.5 mm . 通过计算得散斑移动量为 $\Delta x_{3s} = 38.45 \text{ }\mu\text{m}$. 再把这些实验数据代入 (2) 式可算得 $\theta = 0.516'$, 与理论相符. 在透镜后方其它位置如物体像后方及后焦面前方等不同位置也得到同样的结果. 把物体前后移动后作转动实验, 也同样证明 (2) 式的成立. 但需说明的是当记录底片靠近透镜时, 误差较大. 说明这时菲涅尔近似程度较差. 由此得出结论: 当透镜前物体转动微角度 θ 时, 透镜后满足菲涅尔条件的任意平面上的散斑作整体平移运动. 其运动量由 (2) 式描述.

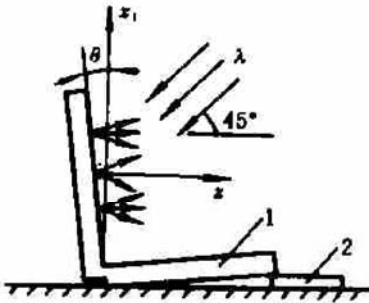


Fig. 2 Angle displacement

1—Object; 2—Feeler

当 $l_3 = f$, (2) 式给出焦面散斑的移动量 $\Delta x_{3s} = f\theta(1 + \cos \alpha)$. 当 l_3 与 l_1 为物像共距时, $\Delta x_{3s} = 0$, 即说明物体微转时, 像面散斑不运动. 这都与经验相符.

2 测量刚体多维运动

前面的分析研究旨在应用于测量刚体的线运动或角运动. 当物体具有多维运动时, 可在透镜后方不同位置放置三张感光底片进行同时记录一次或两次曝光散斑图 (图 4), 然后用细光束对各底片所记录的散斑场进行光学傅氏分析. 由于散斑结构是纵向线度远大于横向线度, 所以运动分量 V , 对透镜后的散斑在记录时间 Δt (短时间) 内没有什么影响. 而旋转分量 ω , 显然将

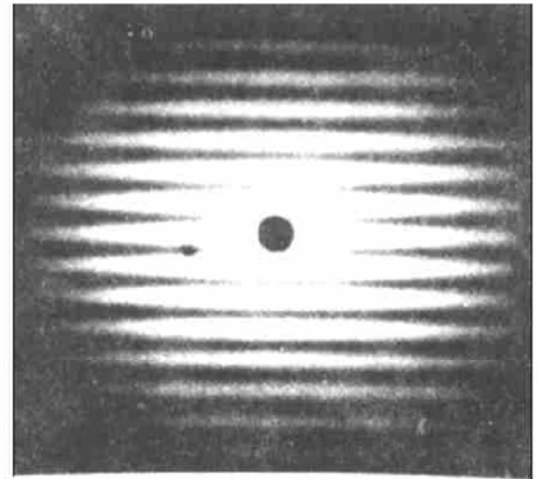


Fig. 3 Experiment result of rotation

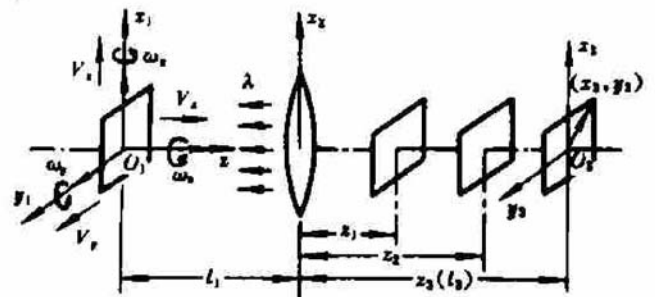


Fig. 4 The system used for measuring multi-D motion of an object

引起透镜后的散斑场线光轴作同步旋转。位置矢量 r 所指的那点的散斑速度为 $\omega_z \times r$ (这里符号“ \times ”指矢量叉积)。只要曝光时间 Δt 足够短,则此点散斑的位移量为

$$\Delta x_{\omega_z} = \omega_z \times r \cdot \Delta t \quad (3)$$

如果进行傅氏分析时点取在底片的 x, y 的不同方向上,则根据读出信息利用(1),(2),(3)可联立解出 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 和 $\Delta\omega_z$ 以及 $\Delta x_1, \Delta y_1$ 或 l_1 。即利用单透镜一次拍摄(这时傅氏变换后为 sinc 函数)多自由度连续运动物体的散斑场即可知道该物体的五个运动分量或该物体后透镜的距离。这是较有实用意义的。例如可用它来测量发动机运动活塞的摆动,连杆振动或飞行弹头等出筒旋转速度和线速度等;也可应用于拍摄静止物体时根据拍摄好的照片(即散斑像)来判断相机的抖动量。

2.1 多维运动测量关系式推导

参照图 4 的系统,设物体在 Δt 时刻内其线位移用矢量 $(\Delta x_1 i, \Delta y_1 j, \Delta z_1 k) = (V_x i, V_y j, V_z k) \Delta t$ 表示,它在透镜后 O_3 平面上产生的散斑位移矢量记为 ΔS_T ,运用式(1)有

$$\Delta S_T = -\frac{l_3 - f}{f} (\Delta x_1 i + \Delta y_1 j) \quad (4)$$

设物体的转动角位移为 $(\Delta\theta_x i, \Delta\theta_y j, \Delta\theta_z k) = (\omega_x i, \omega_y j, \omega_z k) \Delta t$,及它在 O_3 平面上任意一点 (x_3, y_3) 处产生的散斑位移矢量为 ΔS_R 。参照式(2)及(3)并记

$$l_1 \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{f} + \frac{1}{l_3} \right) l_3 (1 + \cos 0^\circ) = \beta \quad (5)$$

则有
$$\Delta S_R = \beta (\Delta\theta_y i - \Delta\theta_x j) + \Delta\theta_z (-y_3 i, x_3 j) \quad (6)$$

当物体线位移和角位移同时存在时,它在 O_3 平面上的散斑位移 ΔS 为式(4)和(6)的叠加

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_R = \left(\frac{f - l_3}{f} \Delta x_1 + \beta \Delta\theta_y - \Delta\theta_z y_3 \right) i + \left(\frac{f - l_3}{f} \Delta y_1 - \beta \Delta\theta_x + \Delta\theta_z x_3 \right) j \quad (7)$$

若 $\Delta\theta_z$ 不为零,则底片记录到的散斑位移处处不等,因而要用细光束对底片上点 (x_3, y_3) 的散斑场进行光学傅氏变换,读出其散斑位移矢量。用 $\Delta S_x, \Delta S_y$ 表示散斑移动量在 x_3 轴和 y_3 轴上的投影,即有

$$\Delta S_x = \frac{f - l_3}{f} \Delta x_1 + \beta \Delta\theta_y - \Delta\theta_z y_3 \quad (8)$$

$$\Delta S_y = \frac{f - l_3}{f} \Delta y_1 - \beta \Delta\theta_x + \Delta\theta_z x_3 \quad (9)$$

把(5)式代入(8)及(9)式,有

$$\begin{cases} \Delta S_x = \frac{f - l_3}{f} \Delta x_1 + 2l_1 \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{f} + \frac{1}{l_3} \right) l_3 \Delta\theta_y - \Delta\theta_z y_3 \\ \Delta S_y = \frac{f - l_3}{f} \Delta y_1 + 2l_1 \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{f} + \frac{1}{l_3} \right) l_3 \Delta\theta_x - \Delta\theta_z x_3 \end{cases} \quad (10)$$

上式就是平面 O_3 上的散斑与刚体六维运动的关系。

从(10)式可知,其第一项是散斑携带的物体横向运动的信息,其第二项、第三项是散斑携带的物体转动信息。并同时注意到第二项还携带物体距透镜多远的信息 l_1 。如果预先知道 l_1 ,则方程组(10)中含有未知数 $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 及 $\Delta\theta_z$ 共 5 个。只要在透镜后方三个不同平面上各放置一张透明感光底片,同时记录三个不同平面的散斑场。然后在三张底片上各找一点,用光学傅氏变换测出此三点的散斑位移矢量,分别代入(10)式得到六个方程式构成的一个方程组,从中可解出未知量,但必须注意取傅氏分析点时至少有一点不取在座标原点。否则(10)式中

的第三项就不出现,也就得不到 $\Delta\theta_1$ 。另外傅氏分析时采用的细光束截面积必须保证在此范围内的所有散斑点位移矢量近似相等,否则影响傅氏分析效果。

2.3 测量实例

用上述提供的方法,测量发动机气阀模拟机构的运动。在气阀下方粘上一个反光圆柱体,气阀的运动也就是被测圆柱体的线性运动和旋转运动的复合。测量简化系统如图 5 所示。被测圆柱体半径 $R = 20 \text{ mm}$,用双向光电计时装置测得某一时段内,它以 $n = 10 \text{ rpm}$ 旋转,气阀同时以 $V_x = -280 \text{ mm/s}$ 向 x 轴负向运动。以平行相干激光照明圆柱体表面,形成一个光斑。其照明表面的运动可分解成绕其照明区域中心母线的旋转运动 ω_1 和向 y 轴负向线运动 V_1 (其值为 $-R\omega_1 = -20.9 \text{ mm/s}$) 同时又向 x 轴负向的线运动。被测参数有 3 个。采用两张底片记录已足够。一张置于透镜后焦面上记录旋转信息。另一张置于透镜后 $3/2f$ 处。记录表面移动信息。在光电装置进行测量的同时,对物体曝光 1 ms ,记录连续运动信息。记录透镜焦距 $f = 100 \text{ mm}$ 。经适当的显影定影之后放在焦距 $f_T = 300 \text{ mm}$ 的光学系统中进行傅氏变换。傅氏变换采用的激光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。光学傅氏变换的结果如图 6 所示。由于记录的是连续运动散斑,变换结果为 $|\text{sinc}(\pi\zeta\Delta S/\lambda f_T)|^2$ 所描述的条纹。其中 ζ 为垂直于条纹方向的座标。 ΔS 为散斑运动踪迹的长度。量出 sinc 函数的正负一级之间的宽度 $\Delta\zeta \pm 1$ 便可从下式计算出散斑踪迹长度

$$\Delta S = \frac{4\lambda f_T}{\Delta\zeta_{\pm}}$$

同时量出底片上条纹的法向与 y 轴的夹角即为散斑运动方向。表 1 是实测数据和由此计算的结果。

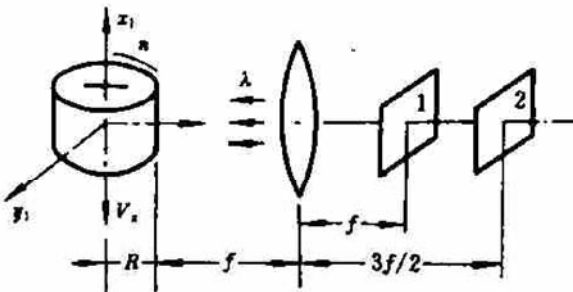


Fig. 5 The simplified measuring system of engine valve imitated motion

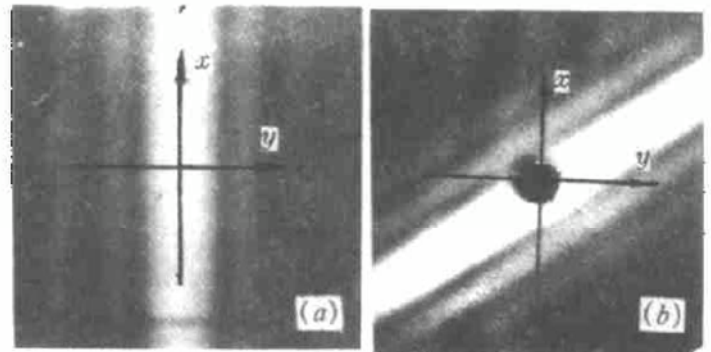


Fig. 6 The result of the valve motion measuring

(a) $l_1 = f$ (b) $l_2 = 3/2 f$

scale 5 : 1

Table 1 Measurement results of the motion track length of the speckles

Record negative number	$5\Delta\zeta_{\pm} \text{ (mm)}$	Angle between the fringes and x -axis	Speckle motion track vector		Projection of the vector on the x, y axes	
			Length	Direction	x	y
1	18	180°	0.211	180°	$\Delta S_{x_1} = 0$	$\Delta S_{y_1} = -0.211$
2	15.5	145.3°	0.245	145.3°	$\Delta S_{x_2} = 0.139$	$\Delta S_{y_2} = -0.201$

将表 1 实验结果分别代入式(10),并注意到 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$ 都为零,从而可计算出

$$\begin{cases} \Delta\theta_x = 1.05 \times 10^{-3} \text{ rad} \\ \Delta x_1 = -0.278 \text{ mm} \\ \Delta y_1 = -0.02 \text{ mm} \end{cases}$$

在曝光时间 1 ms 内物体转过角度 1.05×10^{-3} rad, 相当于转速为 10.1 rpm; 向 x 轴向运动 -0.278 mm, 相当于 x 轴向线速度为 -278 mm/s; 向 y 轴向运动 -0.02 mm, 相当于照亮表面 y 轴向的线速度为 -20 mm/s, 这与实际吻合较好。说明本文提供的方法能用来测量刚体的平转复合运动。

3 测量灵敏度

这种测量法对于各个方向上的灵敏度是各不相同的。对于垂直于记录透镜主光轴的横向运动的灵敏度可用记录底片上由这种横向运动引起的散斑运动与这种横向运动比值 $|\Delta S_T| / \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 来表示。对于物体绕 x 轴及 y 轴的旋转运动灵敏度可用记录底片上由这种角运动引起的散斑运动量 $|\Delta S_R(\theta_x, \theta_y)|$ 与这种角运动的比值 $|\Delta S_R(\theta_x, \theta_y)| / \sqrt{\Delta \theta_x^2 + \Delta \theta_y^2}$ 来表示。对于物体绕 z 轴的旋转运动灵敏度可用记录底面上由这种 z 向转动引起的散斑运动量 $|\Delta S_R(\theta_z)|$ 与这一角位移的比值 $|\Delta S_R(\theta_z)| / |\Delta \theta_z|$ 来表示。从(4)及(6)式分析, 上述第一个灵敏度为

$$|\Delta S_T| / \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = |(l_3 - f) / f|$$

与记录底片距透镜的距离有关。同理, 上述第二个灵敏度为

$$\frac{|\Delta S_R(\theta_x, \theta_y)|}{\sqrt{\Delta \theta_x^2 + \Delta \theta_y^2}} = \left| \frac{1}{l_1} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{f} + \frac{1}{l_3} \right) l_3 \right| \quad (\text{mm/rad})$$

除了上述两个因素外还与物体 l_1 有关。同理, 上述第三个灵敏度为

$$\frac{|\Delta S_R(\theta_z)|}{|\Delta \theta_z|} = \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \quad (\text{mm/rad})$$

仅与底片上信息读出点的位置有关。在上述实测的例子中, 不涉及第三灵敏度。后焦面上记录底片处的上述第一、第二个灵敏度分别为 0 和 100 mm/rad。另一记录底片处的第一、第二个灵敏度分别为 0.5 和 100 mm/rad。适当选取 l_3 就可以调整灵敏度。

参 考 文 献

- 1 华建文. 应用激光, 1993, 13: 164

Speckle Motion Study and Its Measurement Application

Hua Jianwen

(East China Ship Building Institute, Zhenjiang, Jiangsu 212003)

Abstract A relationship between the spatial speckles after a lens and the translational or rotational motion of a diffuse object before the lens was found. The novel method to measure multi-dimensional motion of body was presented.

Key words speckle, motion, measurement, application