

# 同时记录两族独立应力条纹的 全息光弹性法

赵 晔 英

(上海市激光技术研究所)

梅 家 福

(交通部上海船舶研究所)

## Simultaneously recording of two groups of independent stress fringes by the method of holographic photoelasticity

Zhao Yeying

(Shanghai Institute of Laser Technology)

Mei Jiafu

(Shanghai Ship Transportation Research Institute, Ministry of Communications)

### Abstract

An improved optical system is presented which can record two groups of independent fringes simultaneously. The stress patterns of the bed of Diesel engines' main bearing are shown. This system not only simplifies the measurement of static stress, but can also be used for studying dynamic stress.

### 一、前 言

在实验应力分析领域中,光弹性技术是求平面应力场的主要方法。当偏振光或圆偏振光透过受应力的模型时,产生的光程差正比于主应力差,为求得模型各点的主应力分量,尚需补充等倾线(主应力方向线),用由弹性力学平衡微分方程推导出的切力差法来计算。但是由于等倾线的散漫和切力差法计算

的累积误差,不但计算繁琐,而且影响精度。为寻求合适的补充方程,曾提出了不少试验方法,如根据平面应力中主应力和满足拉普拉斯方程的条件,即

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)(\sigma_1 + \sigma_2) = 0,$$

提出了水电比拟的方法;又有利用平面应力中  $\varepsilon_z = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$  的关系,采用横向伸长

收稿日期:1979年3月19日。

计和光学干涉仪的方法, 给出补充关系, 解平面应力场。但由于试验麻烦, 特别是逐点测量的限制, 使它不能同光弹性技术的全场测量特点相适应。Michelson 干涉法、Mach-Zehnder 干涉法等<sup>[2~4]</sup>, 都被用来获得等厚条纹, 但由于它们对模型都要求有光学平面, 试验技术的复杂, 及不易获得全场的图形等而一直未广泛推广和应用。然而激光全息光弹性较好地克服了上述困难。

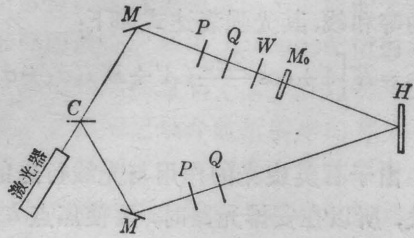


图1 全息光弹示意图

M—反射镜; C—分光镜; P—偏振片; Q—1/4波片; W—毛玻璃; H—全息底片; M<sub>0</sub>—模型(用环氧树脂做成)

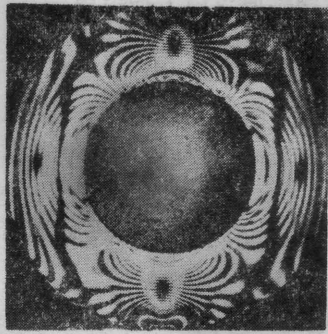


图2 组合条纹

激光全息干涉法应用于光弹性应力分析, 首先由 Fourney<sup>[5]</sup> 于 1967 年提出, 用图 1 所示的光路两次曝光获得了具有应力—光学效应的透明模型的应力图案, 如图 2 所示。它由等和线( $\sigma_1 + \sigma_2$ )及等差线( $\sigma_1 - \sigma_2$ )所组成。全息再现现象的光强分布为:

$$I = K \left[ 1 + 2 \cos \frac{\pi d}{\lambda} (A - B) (\sigma_1 - \sigma_2) \times \cos \frac{\pi d}{\lambda} (A' + B') (\sigma_1 + \sigma_2) + 2 \cos^2 \frac{\pi d}{\lambda} (A - B) (\sigma_1 - \sigma_2) \right] \quad (1)$$

$$\text{式中: } A' = A - \frac{\mu}{E} (n_0 - n);$$

$$B' = B - \frac{\mu}{E} (n_0 - n);$$

$E$ ——模型材料弹性常数;

$\mu$ ——模型材料泊桑系数;

$n_0$ ——模型无应力时的折射率;

$n$ ——模型周围介质的折射率。

显然, 这两组条纹是互相调制的, 如果它们走向相近, 不仅会使图形模糊, 不易判定和精确读数, 在某些情况下还会使等和线发生偏离甚至隐没。这给应力分析带来了很大困难。

分离组合条纹比较方便和实用的方法是 1971 年由 O'regan<sup>[6]</sup> 提出的石英旋光器法。我们根据此原理, 研制了 JQG 100 型激光全息光弹仪如图 3 所示, 可作为应力测试的专用仪器。但此法获得两族条纹是分别先后进行的, 并且在两次曝光中, 对某些光学元件要作适当的移动, 所以不但增加了工作量, 而且还不能用于短时间间隔的动态测量。为此我们提出下述的改进光路, 克服上述的局限性。

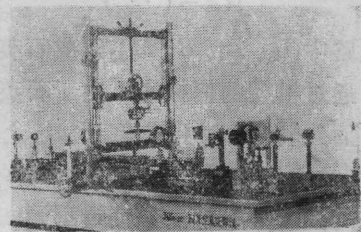


图3 JQG 100 型激光全息光弹仪

## 二、两族条纹同时记录法

同时记录等差线及等和线条纹的全息光弹光路如图 4 所示。光路中  $M_3$  为复合平面镜, 前表面镀有 50% 反射膜层, 后表面用细金钢砂磨毛, 使之既可把象返回原光路, 由全息底片  $H_1$  记录; 又能使透射光成象于毛面上, 由全息底片  $H_2$  记录。

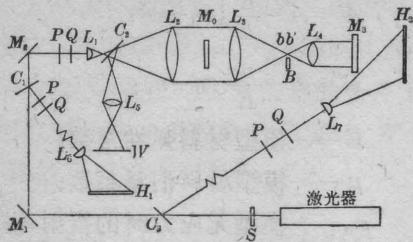


图4 同时记录法光路图

$M_1, M_2$ —全反射镜;  $M_3$ —复合平面镜;  $L_1 \sim L_6$ —透镜;  $C_1 \sim C_3$ —分光镜;  $P$ —偏振片;  $Q$ —1/4波片;  $B$ —石英旋光器;  $W$ —毛玻璃;  $S$ —快门;  $H_1, H_2$ —全息底片

### 1. 等和线条纹图的获得

从光路图图4中可知,物光束和参考光束经过偏振片和1/4波片后,形成圆偏振光,记参考光束为:

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad (2)$$

模型不受力时,透过光在  $x, y$  两个振动方向获得相同的常位相角  $\varphi$ , 于是物光束为:

$$O_1 = e^{i\varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad (3)$$

模型受力时,则透过光在  $x, y$  两个振动方向上各引进位相角  $\varphi_1, \varphi_2$ , 于是物光束为:

$$O_2 = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_1} \\ -ie^{i\varphi_2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

光路中  $L_3, L_4, B, M_3$  组成石英旋光器光路,通过模型的偏振光,由于石英晶体  $B$  的作用而旋转  $90^\circ$ , 并成象于  $M_3$  上,再由  $M_3$  折回后第二次通过模型,则本来沿快轴射出来的光将沿慢轴反方向透射回去。反之亦然。因此正交方向的光波的位相差相互抵消了,如图5所示,即消除了模型由于加载后在  $x, y$  方向所引起的相位差,而模型厚度形变引入的程差得到了倍增,这时物光束可用

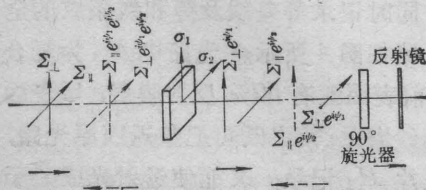


图5 旋光器消除等差线示意图

下式表示:

$$C'_2 = O_2 T O_2 \quad (5)$$

$T$  为  $90^\circ$  旋光器的转换矩阵,可表示为:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

则

$$O'_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (7)$$

这样,当模型在加载前后用两次曝光进行全息记录时,所获得的应力图案仅出现倍增的等和线,其光强表达式如下:

$$I_p = K \left[ 1 + \cos \frac{2\pi d}{\lambda} (A' + B') (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (8)$$

由于石英旋光的作用与光线行进的方向有关,所以在安排光路时,要使焦点  $b, b'$  偏离,使其中只有一个焦点通过石英晶体,由于焦点的偏离,模型和折回光线的象不会严格重合,控制小的偏离数值,可获得较好的测量精度,其偏距值可由下式给出<sup>[6]</sup>:

$$M = \frac{d}{2} \frac{\Delta B}{f} \quad (9)$$

式中:  $d$ ——模型厚度

$\Delta B$ ——二焦点间的距离

$f$ ——透镜的焦距

从焦点分离处的几何关系不难看出:

$$\Delta B = \frac{Dt}{f} \quad (10)$$

式中:  $D$ ——透镜有效孔径

$t$ ——石英晶体的厚度

将(10)式代入(9)式中可得:

$$M = \frac{td}{2} \frac{D}{f} \frac{1}{f} \quad (11)$$

从上式可知,当模型厚度给定时,为使模型和象的偏距越小,所选用的透镜要有较小的象差,其相对孔径应该较小为佳。我们选择  $L_3, L_4$  透镜的相对孔径为 1:4.8, 球差为 0.01 毫米, 已能满足实验要求。

### 2. 零级条纹的确定

要判断应力图案的干涉条纹序数及其正、负号,必须先确定该应力图案的无应力处

即零级条纹。所以记录零级条纹是应力定量分析所不可少的。

在获得等和线应力图案的光路中, 当对模型不断连续加载时进行一次全息照相。全息图在曝光过程中由于载荷不断的变化, 物光的位相也随之而不断改变, 这样由位相所决定的干涉条纹在再现现象中就会模糊而形成黑区, 只有零级条纹以最大亮度出现在再现现象中, 如图 6 所示(用变载荷全息法记录零级条纹, 也适用于表面形变及位移测量)。

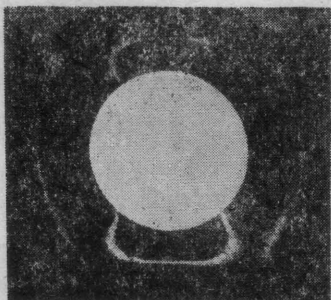


图 6 零级条纹图

### 3. 等差线条纹图的获得

第一次透过模型的物光成象于复合镜  $M_3$  后表面的毛面上。为在  $M_3$  前、后表面上均能获得清晰的象, 镜  $M_3$  的厚度必须小于光学系统的焦深, 如象平面上弥散圆直径为  $d$ , 有效孔径为  $D$ , 透镜组物距为  $u$ , 则焦深可以证明用下式来计算:

$$S = \frac{2d}{D} \left[ f_2 + \frac{f_2^2}{f_1} - \frac{f_2^2}{f_1} u \right] \quad (12)$$

在我们使用的系统中  $f_1 = f_2 = 480$  毫米, 当  $u = 200$  毫米时, 可获得 20 毫米以上的焦深, 这对于平面镜  $M_3$  来说是足够的。这时如果在  $M_3$  后面安置  $1/4$  波片和偏振片就可以在拍摄等和线的同时用照相机拍摄等差线。

此外, 除上述方法进行记录外, 还可用全息干涉法来记录。如图 4 所示, 在  $M_3$  后面安置全息底片  $H_2$ , 投射到  $H_2$  上的参考光束是同物光反旋向的圆偏振光, 可记为:

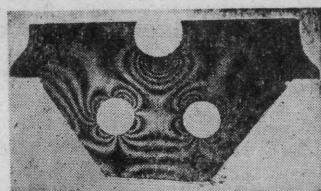
$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (13)$$

光路中, 若对无载荷的模型进行一次曝光, 则再现光强为零。这时, 若对无应力模型和有应力模型进行两次曝光, 则再现光强可计算得:

$$I_c = 1 - \cos^2 \left[ \frac{\pi d}{\lambda} (A - B) (\sigma_1 - \sigma_2) \right] \quad (14)$$

(14) 式表示, 所得应力条纹图不是组合条纹, 而是暗场的等差线条纹图。

图 7(a)、(b) 为改进光路对一个柴油机主轴轴承座进行应力分析时所拍摄的等差线条纹图案及等和线图。



(a) 等和线图



(b) 等差线图

图 7

将激光全息原理用于光弹性应力测量, 不但能得到传统光弹性法所能获得的等差线图, 而且还能获得等和线图, 使之能方便、精确地获得各应力分量。本文提出的改进光路, 为动态全息光弹摄影提供了可能。

### 参 考 文 献

- [1] Kjell Gasvik; *Exp. Mech.*, 1976, **16**, No. 4, 146.
- [2] M. Nisida, H. Satio; *Exp. Mech.*, 1964, **4**, No. 12, 366.
- [3] Albrecht Kuske Photoelastic Stress Analysis, New York 1974.
- [4] M. M. 弗罗赫特; 《光测弹性力学 (II)》, 科学出版社.
- [5] M. E. Fourney; *Exp. Mech.*, 1968, **8**, No. 1, 33.
- [6] R. O'regan; *Exp. Mech.*, 1971, **11**, No. 6, 241.