

用图像运算技术对光弹性条纹进行倍增

任传波 蒲 琪

云大真 于万明

(山东工程学院汽车工程系, 淄博 255012) (大连理工大学工程力学系, 大连 116023)

摘 要 在光弹应力分析中, 利用分数级条纹可以提高分析精度, 于是, 产生分数级条纹的方法研究就变得非常重要。利用图像处理技术, 首先采集一幅图像, 然后通过对这幅图像的算术运算就可以产生分数级条纹。给出了详细的理论分析, 并进行了实验。利用本文方法, 在两条整数级条纹之间, 可以相继产生 7 条分数级条纹。

关键词 光弹性应力分析, 分数级条纹, 图像运算。

1 引 言

光弹性应力分析是光测力学中较成熟的一种方法。传统的光弹性方法对条纹图拍照、冲洗后, 再对照片进行处理分析, 既费时, 精度又差。近十年来, 国内外众多学者将计算机图像处理技术应用到光弹应力分析中来^[1-3], 缩短了其处理、分析周期, 由于尽量避免人为因素的干扰, 从而提高了分析精度。

等差线是光弹性应力分析中最重要的原始数据之一。在实际工程应用中, 等差线条纹太少制约了其分析精度, 于是就有许多学者对如何增加条纹数目进行了研究。最早的条纹补偿法是柯克补偿器法, 再后来就是巴比内补偿器法以及单独旋转检偏轴逐点补偿法。文献[4, 5]把从暗场和亮场中拍摄的两张底片叠合在一起, 从而达到倍增的目的, 但这种方法要求的底片曝光量条件极其严格, 限制了它的发展。文献[6, 7]的作者 Post 提出的方法可以将等差线条纹数增加多倍, 不过, 该法需在应力模型两侧增加光束分裂器, 这使操作变得复杂, 并且会带来系统误差。利用图像处理技术对该问题进行研究, 是一条非常有意义的研究途径。本文提出的方法是先采集一幅暗场(或亮场)条纹图案, 通过对它的运算, 可以在两条整数级条纹之间产生七条分数级条纹。由于该法既不增加也不动任何元件, 因而减免了系统误差的引入。

2 系统构成

本系统由两大部分构成, 如图 1 所示, 光弹性仪由光源 1、起偏镜 2、检偏镜 6 以及两个四分之一波片 3 和 5 组成。在图 1 中, 4 为应力模型; P 和 A 分别表示起偏镜 2 和检偏镜 6 的偏振轴; F 和 S 分别表示四分之一波片的快轴和慢轴。图像采集和处理系统由 CCD 摄像机 7、

图像卡 8、监视器 9 和微机 10 组成。

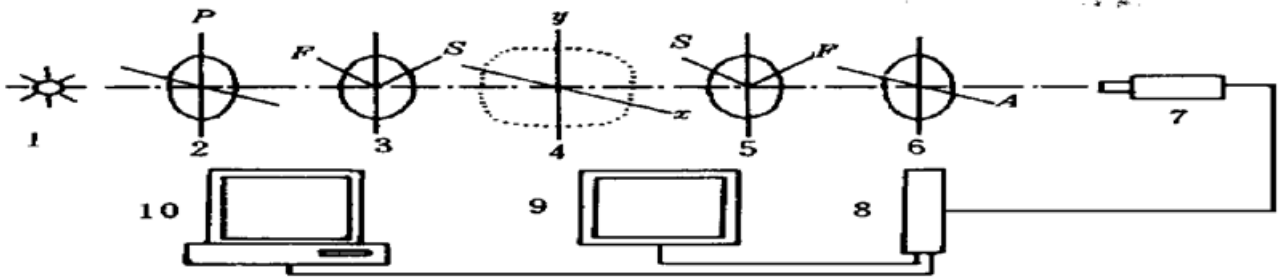


Fig. 1 The set-up of system

3 理论分析

众所周知,把应力模型放在正交圆偏振场中如图 1 所示,由于双折射现象,从检偏镜射出的光的光强为

$$I_{11} = I_0 \sin^2(\pi\delta/\lambda) \quad (1)$$

式中, δ 为光程差, λ 为光波波长。

由(1)式知,在一定的单色光照射下,当 $\delta/\lambda = m(0, 1, 2, \dots)$ 时, $I = 0$ 。这说明光程差等于整数倍波长的点,发生干涉现象,这些点的光强为 0。在 CCD 摄像机摄得的图像上,由这些点连成的一条一条的黑线就是等差线。在一般情况下,应力模型中是同时呈现 $m = 0, 1, 2, \dots$ 干涉条纹的,为了区分它们,将满足 $m = 0$ 的称为 0 级等差线条纹, $m = 1$ 的称为 1 级条纹...等等依次类推。一个应力模型上由许多不同级数的等差线组成的图案称为等差线图案。由图 1 所示的 CCD 摄像机摄得的图像就是一个等差线图案。

在圆偏振亮场中,由 CCD 摄像机摄得的等差线图案可用下列数学式表示:

$$I_{12} = I_0 \cos^2(\pi\delta/\lambda) \quad (2)$$

在亮场中,可得到 0.5 级、1.5 级、2.5 级, ... 等差线条纹。

由(1)式、(2)式可以看出

$$I_{12} = I_0 - I_{11} \quad (3)$$

也就是说,(2)式表达的图案 I_{12} 可以由(1)式表达的图案 I_{11} 通过灰度反转得到。这样,在实际操作时可以先在暗场中,用 CCD 摄像机摄取一幅等差线图案把它固化下来,并存入计算机,然后对图案 I_{11} 像素进行统计分析确定出 I_0 ,于是由(3)式就可确定出亮场中(2)式表达的图案 I_{12} 。

下面,分析由等差线图案 I_{11} 和 I_{12} 产生分数级条纹的原理。将(1)式减去(2)式并取绝对值,有

$$I_{21} = |I_{11} - I_{12}| = |I_0 \sin^2(\pi\delta/\lambda) - I_0 \cos^2(\pi\delta/\lambda)| = I_0 |\cos(2\pi\delta/\lambda)| \quad (4)$$

令 $I_{21} = 0$, 即有

$$\cos(2\pi\delta/\lambda) = 0 \quad (5)$$

满足(5)式的条件是

$$2\pi\delta/\lambda = (2m + 1)\pi/2,$$

$$\text{即} \quad \delta/\lambda = (2m + 1)/4, \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

也就是说,应力模型上满足(5)式条件的位置处产生干涉现象,即在那些位置处会产生等差线条纹。当 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时, $(\delta/\lambda) = 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, \dots$ 。这样,由(4)式表

达的图像 I_{21} 是一幅条纹级数为 0.25、0.75、1.25、1.75、… 的等差线图案。

通过对图像 I_{21} 的运算, 可得到它的倒置图像 I_{22} , 其数学表达式为

$$I_{22} = I_0 - I_{21} = I_0 - I_0 |\cos(2\pi\delta/\lambda)| \quad (6)$$

将(4)式减去(6)式并取绝对值, 得

$$I_3 = |I_{21} - I_{22}| = I_0 |1 - 2|\cos(2\pi\delta/\lambda)|| \quad (7)$$

从(7)式可以看出 $I_3 = 0$ 的条件是

$$\cos(2\pi\delta/\lambda) = \pm 1/2 \quad (8)$$

由(8)式, 得

$$\frac{\delta}{\lambda} = m + \frac{1}{6}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9a)$$

或
$$\frac{\delta}{\lambda} = m - \frac{1}{6}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (9b)$$

或
$$\frac{\delta}{\lambda} = m + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{6}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (9c)$$

由(9)式可知, 当 $m = 0$ 时, $\delta/\lambda = 0.167, 0.333, 0.667$; 当 $m = 1$ 时, $\delta/\lambda = 0.833, 1.167, 1.333, 1.667$; 当 $m = 2$ 时, $\delta/\lambda = 1.833, 2.167, 2.333, 2.667$ 。这样, 由(7)式表达的图像 I_3 是一幅条纹级数为 0.167、0.333、0.667、0.883、1.167、1.333、1.667、1.833、… 的等差线图案。至此, 本文已将条纹数目增加了 4 倍, 在 0 级与 1 级之间有级数 0.167、0.25、0.333、0.5、0.667、0.75、0.883 等 7 条分数级条纹。

上述过程中, 用到了五幅图案, 从(1)、(2)、(7)式可以看出图案 I_{11} 和 I_{12} 的条纹信息完全包含在图案 I_{22} 中, 进一步分析时, 只要对图案 I_{21} 、 I_{22} 、 I_3 进行分析即可, 这是以后的工作, 在此不再赘述。

4 实验结果

4.1 计算机模拟实验及结果

为了说明上述理论分析, 本文进行了模拟实验, 给出了模拟结果图案, 验证了理论分析所得出的结论。图 2 中的数字是指黑色条纹的级数。

$$I = I_0 \sin^2(\pi x/c) \quad (10)$$

首先, 用计算机产生了一幅用(10)式表达的具有级数为 0~3 四条整数级条纹的图案, 如图 2(a) 所示。

第二步, 对图 2(a) 所示的图案进行运算, 得到其灰度反转图案, 如图 2(b) 所示。该图案具有级数为 0.5、1.5、2.5 三条半整数级条纹。

第三步, 用图 2(a) 所示的图像减去图 2(b) 所示的图像并取绝对值, 可得到图 2(c) 所示条纹图, 该图案具有级数为 0.25、0.75、1.25、1.75、2.25、2.75 的分数级条纹。

第四步, 对图 2(c) 所示的图案进行运算, 得到其倒置图像, 如图 2(d) 所示。该图具有级数为 0、0.5、1、1.5、…3 的级数条纹, 从图中可以看出, 它包含了图 2(a)、图 2(b) 的所有条纹, 与理论分析相吻合。

第五步, 用图 2(c) 所示的图像减去图 2(d) 所示的图像并取绝对值, 可得到图 2(e) 所示的条纹图, 该图案具有级数为 0.167、0.333、0.667、0.883、1.167、…、2.833 的分数级条纹。

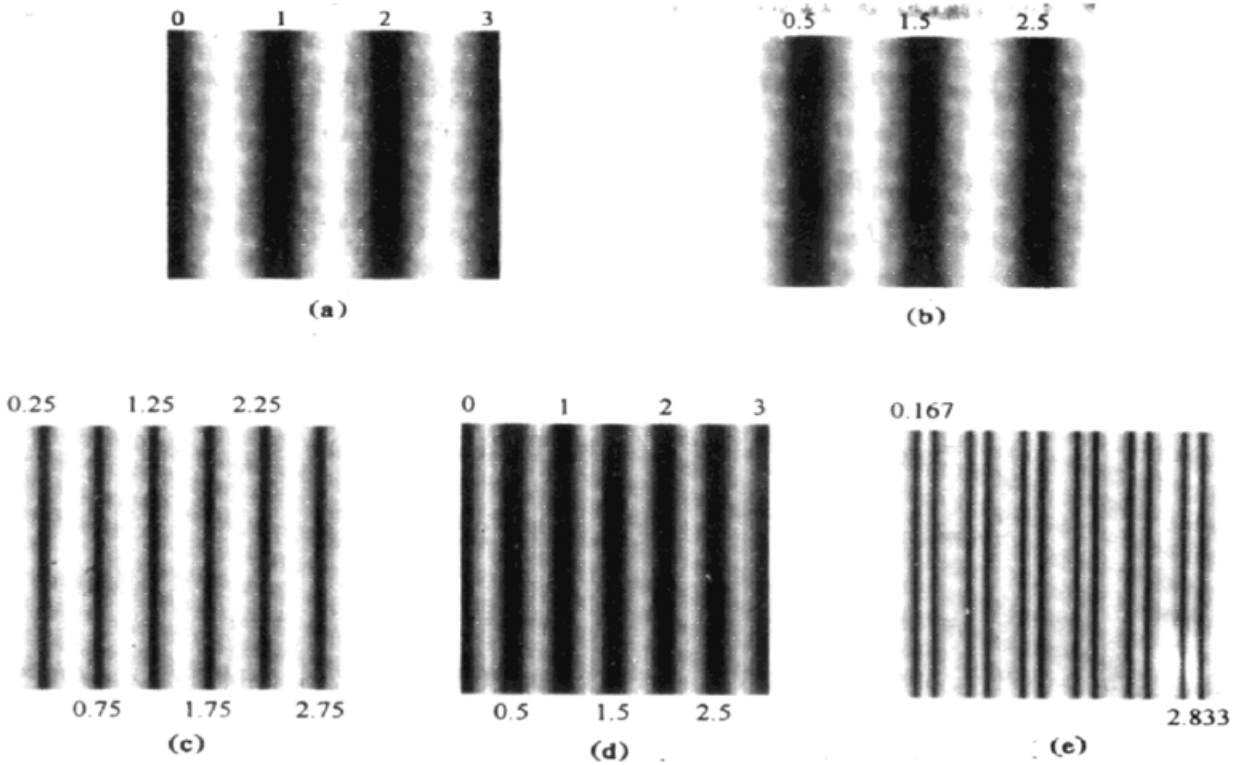


Fig. 2 Simulated fringe patterns

图 2(e) 中的数字是指最左边和最右边黑色条纹的级数。

4.2 工程问题的实验结果——榫槽与榫头的啮合问题

用图 1 所示装置可得到图 3(a) 所示榫槽与榫头啮合的光弹实验的暗场等差线条纹图案; 用上节的理论所介绍的图像运算技术可获得加密倍增的等差线条纹图案[图 3(b)]。此方法已用到榫槽与榫头啮合的平面接触应力分析中去。

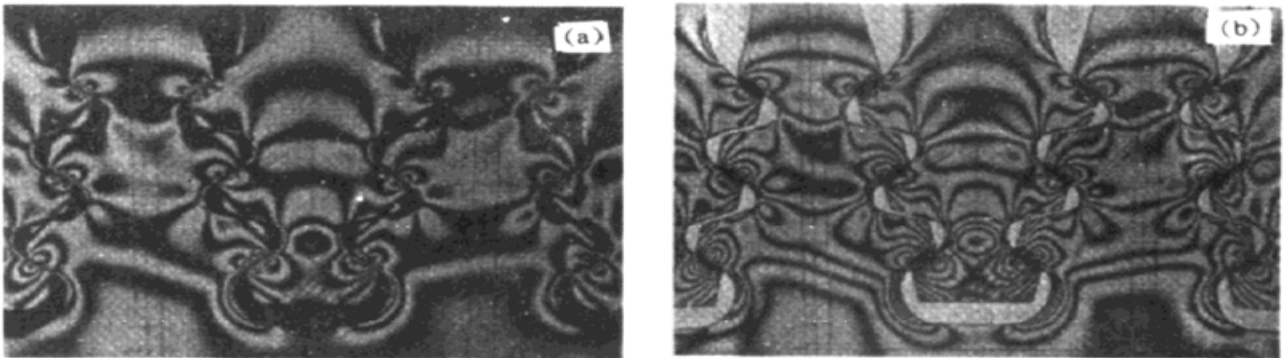


Fig. 3 Isochromatic fringe multiplication patterns of engagement of tenon with mortise. (a) Original fringes in a dark field, (b) Multiplication fringes by image operation

结束语 1) 本方法可用一幅暗场(或亮场)的条纹图在两条整数级条纹之间相继产生七条分数级条纹, 为以后的进一步分析提供了方便。

2) 用一个比较复杂的实际工程问题——榫槽榫头啮合问题进行了实验, 得到了较为清晰的倍增条纹图案, 说明本方法可应用于实际工程问题中去, 具有较大的实用价值。

3) 在光测力学中, 由于大部分图案都可以用类似于(1)式或(2)式的形式来表达, 因此本文方法也可以适应于其它光学干涉图案条纹的倍增。

参 考 文 献

- [1] Muller R K, Sacckel L R. Complete automatic analysis of photoelastic fringes. *Exp. Mech.*, 1979, **19**(7) : 245~251
- [2] Seguchi Y, Tomita Y, Watanable M. Computer-aided fringe pattern analyzer: a case of photoelastic fringe. *Exp. Mech.*, 1979, **19**(10) : 362~ 370
- [3] Bryanston-Cross P J, Quan C, Judge T R. Application of the FFT method for the quantitative extraction of information from high-resolution interferometric and photoelastic data. *Opt. & Laser in Engng.*, 1994, **26**(3) : 147~155
- [4] Dally J W, Ahimaz F J. Photographic method to sharpen and double isochromatic fringes. *Exp. Mech.*, 1962, **2**(6) : 170~ 175
- [5] Das Talukder N K, Ghosh P. On fringe multiplication by superimposition of negatives. *Exp. Mech.*, 1975, **15**(6) : 237~ 239
- [6] Post D. Isochromatic fringe sharpening and fringe multiplication in photoelasticity. *Proc. SESA*, 1995, **7**(2) : 143~ 156
- [7] Post D. Photoelastic fringe multiplication: for tenfold in sensitivity. *Exp. Mech.*, 1970, **10**(8) : 305~ 312

Photoelastic Fringe Multiplication by Using Image Operation Technique

Ren Chuanbo Pu Qi

(Department of Automobile Engineering, Shandong Institute of Technology, Zibo 255012)

Yun Dazhen Yu Wanming

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

(Received 8 January 1998; revised 17 March 1998)

Abstract In photoelastic stress analysis, the accuracy of analysis can be improved by using fractional isochromatic fringes, so it is very important to study the approach for producing fractional fringes. By using image processing technology, a fringe pattern is captured firstly, then fractional fringes can be produced by arithmetic operation to the fringe pattern. Theoretical analysis is given in detail, and experiments are carried out. Seven fractional fringes are produced between two integer fringes by using the technique.

Key words photoelastic stress analysis, fractional isochromatic fringes, image operation.