

光弹性力学的普遍数字图象 处理与纹理分析*

欧阳颀 叶宁

(复旦大学应用力学系, 1985年4月30日收到)

摘 要

本文对光弹性力学的数字图象处理与纹理分析进行了研究探讨。克服了前人工作[2]、[3]的若干局限。首先阐述了分析光弹性力学图象条纹的普遍有效方法, 并利用光强 I 与图象条纹级数 N 之间的三角函数关系, 推导出象素点灰度 Z 与条纹级数 N 的对应关系式, 从而得到力学参数。相应地还建立了光弹性力学的普遍数字图象处理与纹理分析系统。简称为OYC—1系统。最后, 用实例检验此系统, 其结果与理论值的最大误差仅为2.3%。

一、引 言

对于复杂的应力分析问题(如文献[1]的裂纹群问题), 需要高精度的力学实验加以检验。但目前国内外的全自动光弹性力学实验分析, 还不能达到足够的精度。R. K. Muller 和 L. R. Saackel^[2]对光弹性力学作数字图象处理时取骨架细画, 这就抛弃了光弹性力学图象的许多特征, 从而被迫地使用插值法, 使得误差增大。A. S. Voloshin 和 C. P. Burger 认识到这个问题, 在[3]中提出半级条纹光弹性力学。这要求光弹性力学的条纹只能有半级, 太苛刻了, 这对低条纹值光弹材料和大量的应力集中问题难以满足。本文中, 我们首先推导出普通光弹性力学图象的灰度与图象条纹级数的关系式, 以及与主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 的关系式。然后, 以此为基础, 建立了OYC—1光弹性力学的普遍数字图象处理与纹理分析系统。用对径受压圆盘实例对此系统加以检验后, 发现结果令人满意, 实验值与理论解间的最大误差仅为2.3%。

二、光弹分析的基本公式

本文只对光弹性力学实验中的圆偏振——暗场装置进行分析, 明场装置亦可同样分析, 此处从略。这时, 在检偏镜中的透射光强

$$I = I_0 \sin^2 N\pi \quad (2.1)$$

其中, I 为光强, I_0 为参考光强, $I_0 \neq 0$; N 为等差线条纹级数。

* 中国科学院科学基金资助的课题。

当 $N=0, 1, 2, \dots, I=0$, 产生消光干涉, 形成等差线。

从线弹性平面光弹性的应力-光学定律, 可得

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_0}{h} \quad (2.2)$$

这里, σ_1, σ_2 为主应力; f_0 为材料条纹值; h 为模型厚度。

由于图象的失真, 灰度 Z 值与光强 I 值有关系式

$$Z = \psi I^\gamma \quad (2.3)$$

其中, Z 为灰度或亮度; ψ, γ 为常数。

将(2.1)式代入(2.3)式, 得

$$Z = \psi [I_0 \sin^2 N\pi]^\gamma$$

$$\text{或者} \quad N = \frac{1}{\pi} \text{Arc sin} \left[AZ^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

$$\text{或者} \quad \sin^2 N\pi = AZ^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.5)$$

$$\text{且} \quad A = [\psi^{\frac{1}{\gamma}} I_0]^{-1}$$

由(2.5)式可知, 只要知道任意两点的条纹级数 N 和灰度 Z 值, 便可确定 A 和 γ , 即对 $(N_1, Z_1), (N_2, Z_2)$, 有

$$\gamma = \frac{\ln Z_1 - \ln Z_2}{\ln \sin^2 N_1 \pi - \ln \sin^2 N_2 \pi} \quad (2.6)$$

$$A = Z_1^{-\frac{1}{\gamma}} \sin^2 N_1 \pi = Z_2^{-\frac{1}{\gamma}} \sin^2 N_2 \pi \quad (2.7)$$

这里, 我们遇到了反三角函数的多值性。但一幅光弹性力学图象的条纹整数级是可确定的, 因此, 当 $N - [N] \leq 1/2$ 时 (其中 $[N]$ 是 N 的整数部份),

$$N = [N] + \frac{1}{\pi} \text{arc sin} [AZ^{\frac{1}{\gamma}}]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

当 $N - [N] > 1/2$ 时,

$$N = [N+1] - \frac{1}{\pi} \text{arc sin} [AZ^{\frac{1}{\gamma}}]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

从而, 当 $N - [N] \leq 1/2$ 时,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_0}{h} \left\{ [N] + \frac{1}{\pi} \text{arc sin} [AZ^{\frac{1}{\gamma}}]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.10)$$

当 $N - [N] > 1/2$ 时,

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_0}{h} \left\{ [N+1] - \frac{1}{\pi} \text{arc sin} [AZ^{\frac{1}{\gamma}}]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.11)$$

这些就是所要的基本公式。

三、系 统 描 述

光弹性力学的数字图象处理与纹理分析系统 (即 OYC—1 系统) 的流程框图, 如图 1 所示。此系统分两大部份: 第一部份是光弹性力学系统, 由光源、起偏镜、模型、 $2 \times 1/4$ 波

片、检偏镜及 Tardy 补偿器组成；第二部份是数字图象处理与纹理分析系统，它包括电子扫描器、显示器、量化器、CBX—1631 图象处理机、人机对话控制器、PDP—11/23 计算机及其外部设备。

OYC—1 系统能扫描图象的任意区域，并平滑放大。它能处理具有 8 位分辨率 ($2^8=256$ 个灰度级) 的 512×512 个象素的图象。借助于机内的实时量化器，系统也可以实时处理。

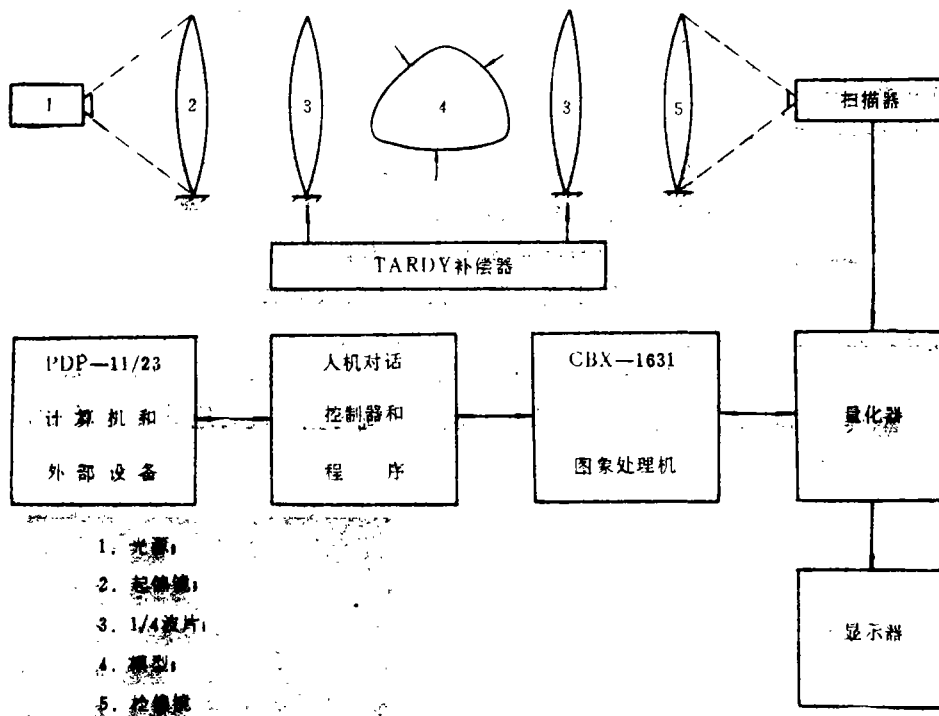


图1 OYC—1 系统

OYC—1 系统的软件是将光强场转换为条纹场，再由条纹场求得应力场。其中通过安排一些人机对话，可确定任意区域的应力场。

a. 图象预处理

OYC—1 系统的图象预处理，主要是消除噪声的影响^{[4]、[5]}。污染图象的噪声有两种，一是电噪声，它是由于电源的不稳定及传输失真引起的随机噪声；另一是由于光源、镜片以及模型的不完善而引起的光噪声，这里含有大量的系统噪声。

对于电噪声，我们采用多图象平均法消除，以达到平滑化。这里我们用扫描相同区域的二十帧图象迭加平均。这一处理方法的平均结果，使得噪声显著减少。但光噪声仍未能很好消除（特别是对三维光弹性力学切片模型上的切痕及光弹仪本身的偏差），我们再采用邻域平均法来进行改善。考虑到平滑化是以模糊图象为代价的，且易改变灰度与条纹级数间的三角函数关系，故此选择邻域尺寸为 3×3 象素。

这样，我们能由公式(2.6)、(2.7)及 Tardy 补偿器求出参数 A , γ 。实际上，用公式(2.5)求得最小二乘方值 A , γ 以提高精度是必要的。从而得到条纹级数 N 和主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$)，但这样做非常麻烦且精度低，我们还需要条纹的纹理分析以简化运算。

b. 条纹分析

通过人机对话,用区域处理方法对条纹灰度进行修正,抽取条纹峰值,以使每整数级间或半数级间条纹的灰度一致,就是图2灰度曲线的诸波峰间和诸波谷间灰度值各相一致,即那些灰度函数的一阶导数为零,二阶导数为正或者负值的点所在条纹级数各相一致。

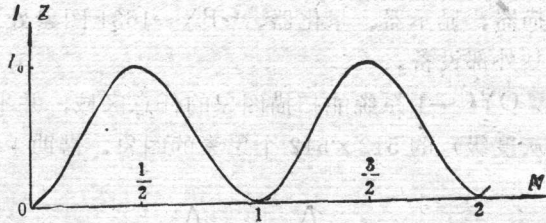


图2 灰度曲线

因为应力场是单值的,条纹级数场也是单值的,所以能确定每一级条纹级数。这里,为确定式(2.8)、(2.9)、(2.10)、(2.11)中的 $[N]$ 值,我们先只考虑整数级和半数级条纹。

再次通过人机对话,用光笔点出较高条纹级数点 A_i ,和较低条纹级数点 B_i ,并画线 $A_i B_i$,从低到高地确定出与 $A_i B_i$ 线相交的整数级和半数级条纹级数。进一步,我们选取适当的标准点,将由上面所确定的相对条纹级数,重编为绝对条纹级数^[6]。最后,扫描每一象素,并将灰度值代入(2.10)和(2.11)式,求出此象素的主应力差。事实上,只要对光弹性力学图象中所感兴趣的截面(如图3中的 $A_1 B_1$)画线,就可直接确定绝对条纹级数,从而得到有关的应力解答。

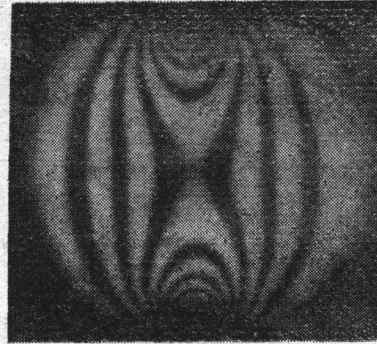
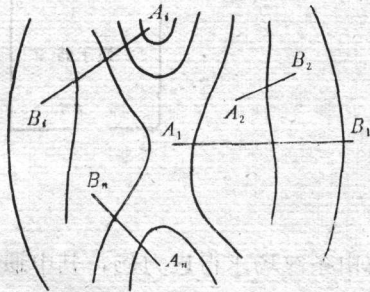


图3 条纹分析

四、实例分析

这里,我们以标准试件——对径受压圆盘作为模型,应用OYC-1系统对它的光弹图作数字图象处理与纹理分析及应力计算,以标定本系统的有效性及其精确度。选用的模型材料是一般的光弹性力学实验材料——环氧树脂。圆盘的直径是49.52毫米,厚度是5.20毫米,载荷为100公斤。图4所示为人机对话台,即终端和电视屏幕。由于噪声影响严重(如图5),必须对其图象进行平滑化处理。处理后情况有明显改善(见图6),但可以看到光噪声的系统误差还十分严重。再通过调谐区域灰度值,抽取峰值,可得图7。经Tardy补偿器确定 A, ν 及条纹分析后,可从每个象素的灰度值得应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 。以圆盘中截面为对象,考虑到对称性,只须取一半结构。图8示出了实验结果与理论结果的两条曲线,为比较,再列于表1,可见误差在2.3%内。



图 4 人机对话台

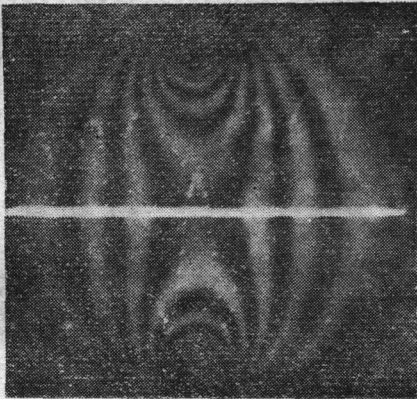


图 5

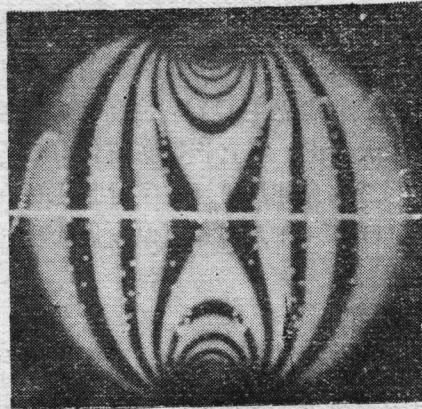


图 6

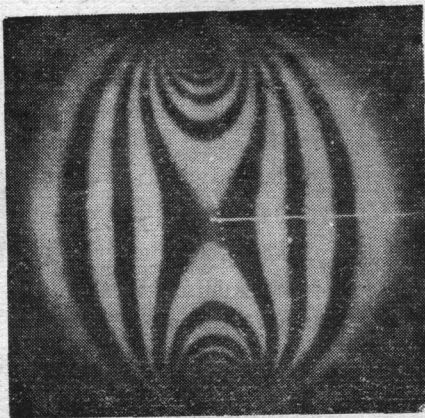


图 7

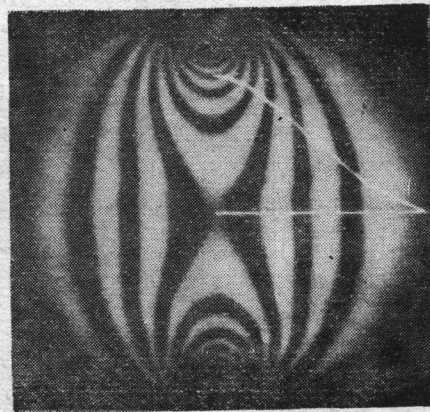


图 8

表 1 结 果 比 较*

x 坐标值	0.000	6.190	12.380	18.570	24.760	误 差	
OY-02	理论值	0.98891	0.82124	0.47468	0.17721		0.00000
	实验值 I	0.98890	0.81741	0.47395	0.17964	0.00000	2.3%
	实验值 II	0.98890	0.80438	0.47338	0.18313	0.00000	3.8%

* 坐标系以圆盘圆心为原点, 中截面为 x 轴。单位为 kg/mm^2 。实验值 I 为应用本系统得到的结果, 实验值 II 为只经平滑化处理的结果。

五、结 论

1. 本文推导出的普通光弹性力学图象的条纹级数与灰度级的三角函数关系式, 真实地反映了它们间的本质联系, 使得精度大大提高, 即使只经平滑化处理后的实验结果亦令人满意, 误差在 3.8%, 如图 9 示。

2. 本文成功地运用了数字图象处理与纹理分析技术, 建立了 OYC-1 系统, 使得运算操作大大简化, 可直接供实验使用。

3. 考虑到计算机具有实时量化和高速扫描功能, OYC-1 系统还可以发展和扩充到动态实验。

本文进行中, 曾得到复旦大学应用力学系固体力学实验室张福保同志的有益讨论, 及光弹组金孝维和杨菊华同志的协助, 谨此致谢。

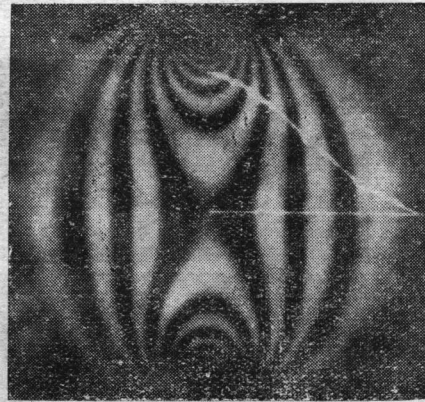


图 9

参 考 文 献

- [1] 欧阳睿、朱涵, 关于任意边界缺口或裂纹群问题的一类解法(I)——缺口群的计算, 应用数学和力学, 5, 2 (1984), 153—158.
- [2] Müller, R. K. and L. R. Saackel, Complete automatic analysis of photoelastic fringes, *Exp. Mech.*, 19, 7 (1979), 245—251.
- [3] Voloshin, A. S. and C. P. Burger, Half-fringe photoelasticity: A new approach to whole-field stress analysis, *Exp. Mech.*, 23, 3 (1983), 304—313.
- [4] Rosenfeld, A. and A. C. Kak, *Digital Picture Processing*, Academic Press (1976).
- [5] Gonzalez, R. C. and P. Wintz, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company (1977).
- [6] Yatagal, T., et al., Automatic fringe analysis using digital image processing techniques, *Opt. Eng.*, 21, 3 (1982), 432—435.
- [7] 欧阳睿、叶宁, 光弹性力学图象的条纹分析, 《全国高教系统第六次人工智能学术讨论会文集》, 成都, 2, 6 (1985).

General Digital Picture Processing and Texture Analysis for Photoelasticity

Ouyang Chang Ye Ning

(Department of Applied Mechanics, Fudan University, Shanghai)

Abstract

In this paper, a general digital picture processing and texture analysis for photoelasticity is developed. Overcoming some defects of references [2] and [3], it presents an effective method to analyse the fringe patterns of photoelasticity. Using the trigonometric function relationship between the light intensity I and the image fringe order N , the equations of the fringe order N on brightness Z are deduced, and the mechanical parameters are thus obtained. We established a system of digital picture processing and texture analysis for photoelasticity, which is called OYC-1 system. Finally, this system is checked with an example. It is found that the differences between measured results and the theoretical values are within 2.3 percent.