

光测力学CCD自动检测系统 及其应力分析方法*

安里千

(中国矿业大学北京研究生部, 1993年6月11日收到)

摘 要

本文提出的光测力学CCD(电荷耦合器)自动检测系统及应力分析方法能迅速、准确、实时地自动检测出等色线条纹的骨架线, 自动判别条纹级数、识别真伪信号及自动进行应力分析。其应力分析方法需要输入的数据少, 计算精度高。

关键词 光弹性 CCD 自动检测 应力分析

一、引 言

目前, 一些自动光弹仪已经研制出来, 按其工作原理, 可分为光度法、位相关系法及计算机图像处理法等。光度法是通过直接检测偏振光场中应力光图的光强, 获取光弹性实验数据。Zandman(1959)^[1], Cheng(1968), Gerlach(1968)等提出的方法皆属此类。由于光强难以准确标定, 这类方法在实际应用中受到一定限制。位相关系方法是通过检测光弹性信号之间的相位差而获取应力信息。这类方法多是用机械方法转动光路中的某些光学元件或特制的双折射补偿器件等测取光程差, 也可用电光、磁光效应获取光弹性光学参数。Redner(1974)^[2]、Robert(1976, 1981)、Allison(1974), 张合义和张远鹏(1986)等都已研制出这类自动光弹性系统。这类方法可避免光强变化对信号频率的影响, 但是, 却失去光弹性全场信息的优点。光弹性图象处理方法是利用现代电视摄像和计算机数据处理技术获得光弹性实验数据。Muller和Saackel(1979)^[3]、Burge和Voloshin(1982)、韦疑男(1984), 张帆和苏明照(1986)等研制的光弹性图像处理系统都已达到实用阶段。图象处理方法能直观、快速地显示应力光图, 但需借助其它方法判别条纹级数, 并且设备昂贵。

本文的光测力学自动检测系统是用线阵CCD转换光弹性信号, 通过数字及控制电路同微机结合, 自动采集和处理光弹性实验数据, 既保持了光弹性全场信息, 又能快速得到条纹骨架线, 而造价远低于前述各类仪器。

* 黄寿曾推荐。

本工作得到“霍英东教育基金会”资助。

二、系统总体结构及工作原理

本系统包括：光路系统、线阵CCD系统、转换和控制电路、步进电机及其控制电路系统、微机及软件系统等，总体工作原理示意如图1。

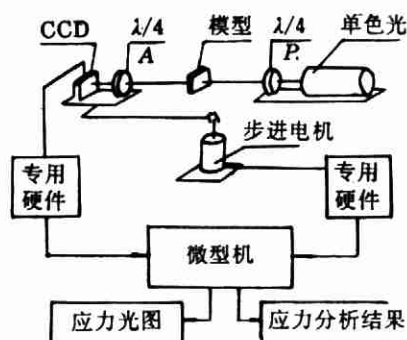


图1 总体框图

该系统是在微机控制下，由步行电机带动CCD对应力光图条纹信息进行转换，并将CCD采集的信息通过一系列转换电路送入计算机进行处理，输出全场条纹的骨架线图，然后用相关的应力分析软件，计算出应力分析结果。

2.1 线阵CCD转换系统

CCD是一种超大规模集成电路的功能器件，本系统采用的TCD102C—1电荷耦是由2048个像素单元组成的埋沟线阵CCD光传感器，光敏元之间的间隙为 $14\mu\text{m}$ ，输出频率为10MHz，为用于光弹性数据采集，研制了独特的驱动电路板，如图2。



(a) TCD102C—1



(b) 驱动电路

图 2

此驱动电路板包括TCD102C—1所需要的驱动电路，输出放大电路，时钟振荡电路，同步化电路及板上电源稳压电路。时钟振荡器输出数据时钟为1MHz，曝光时钟频率可调，调整板上RC配置可使输出频率与计算机模数转换器速度匹配。

2.2 信号自动跟踪系统

由于光弹性条纹疏密变化很大，因而得到的信号频率变化也很大，而且条纹之间灰度变化不连续。通常的峰值点转换电路无法检测这种信号。为此，研制出一种动态跟随方式的新式检测电路系统。它是由放大器、滤波器、比较器、保持器、转换及整形电路等组成。如图3。

这种新型电路系统的特点，是能迅速转换光弹性信号，能自动消除干扰信号。

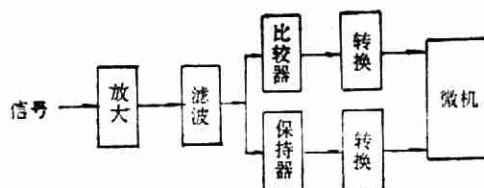


图3 信号转换电路示意图

三、等差线条纹级数检测

本系统能迅速、准确地检测出等差线的条纹中心线，确定任意小数级条纹。

3.1 整数级，半数级和1/4级条纹的测取

根据应力光学定律，在圆偏振光场中，光强

$$I_s = I_0 \sin^2(\alpha/2) \quad (\text{暗视场})$$

$$I_s = I_0 \cos^2(\alpha/2) \quad (\text{明视场})$$

式中， I_s ——圆偏振光场中的光强； I_0 ——最大光强； α ——主应力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）引起的相位差， $\alpha = 2\pi/\lambda\delta$ ； λ ——波长， $\delta = n\lambda$ 。

在明视场中， $n=0, 1, 2, \dots$ 光强 I_s 最强， n 为等差线整数级， $n=1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ， $I_s=0$ ，消光， n 为等差线半数级。暗视场则相反。 $I_s=(1/2)I_0$ 点，就是1/4级条纹点的中心线。图4为采集的等差线骨架线。

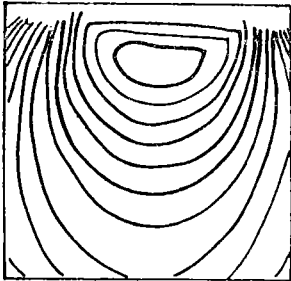


图4 等差线骨架线

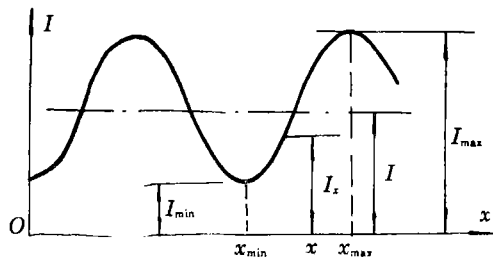


图5 光强分布图

3.2 利用应力光学定律求小数级

在一个半波内，光强 I_s 从 I_{max} 变化到 I_{min} （或者从 I_{min} 变到 I_{max} ）应遵守应力光学定律，如图5。

在任一半波内 x 点的光强 I_s 可表示为：

$$I_s = I_{min} + (I_{max} - I_{min}) \sin^2[(\pi x)/\lambda_s] \quad (3.1)$$

式中 $\lambda_s = 2(x_{max} - x_{min})$ ， $x' = x - x_{min}$

在 x 点处由受力模型双折射引起的光强变化

$$I'_s = I'_0 \sin^2[(\pi\delta)/\lambda] \quad (3.2)$$

其中 $I'_s = I_s - I_{min}$ ， $I'_0 = I_{max} - I_{min}$

由此

$$\left. \begin{aligned} (\pi x') / [2(x_{max} - x_{min})] &= (\pi\delta) / \lambda \\ \delta &= \lambda [2(x_{max} - x_{min})] (x - x_{min}) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

由此可求出左半波内任一点小数级条纹。

同理，对于右半波内诸点，则

$$\delta = \lambda / [2(x'_{min} - x_{max})] (x - x_{max}) \quad (3.4)$$

其中 x_{min} 为右半波的最小光强点的坐标。由 δ 可得截面内任意点小数级条纹。

四、等差线条纹级数自动判别

本系统提出的等差线条纹级数自动判别的新方法,不需增加任何新设备,靠两次记录和软件实现自动判别条纹级数,是简单而实用的方法。

由光弹性原理及实验表明,当增加(或减少)受力模型的载荷时,条纹总是由高(或低)级条纹处向低(或高)级条纹处移动。例如,某一截面各级条纹的坐标为 x_i (见图6),增加载荷 ΔP (ΔP 应很小,增加的条纹级数不超过半级),得 x_i 点的条纹坐标为 x'_i 。根据条纹的变化取趋势,如果 $\Delta x = x_i - x'_i$ 为正,则 $\Delta x = x_{i+2} - x'_{i+2}$ 为负。若 $x_i = x_0$,则 $N_i = N_0$ 。若 $x_{i+1} = x_0$,则 $N_{i+1} = N_0$ 。若 Δx 的正负号和 N_i 已知,则 x_i 各点的条纹级数就可求出。

五、光弹性应力分析法

本系统的光弹性应力分析方法突出的特点是,仅知3个(或5个)截面的等差线条纹级数,以及这几个截面在模型自由边界上的主应力方向角就可以进行应力分解,不仅极大地减少了输入数据量,而且也简化了计算过程,能迅速准确地分析任一截面的应力状态。

5.1 应力分析公式

在弹性平面问题中,主应力差函数 $q(x, y)$ 可由应力光图确定,自由边界上主应力和函数 $p(x, y)$ 的绝对值等于 $q(x, y)$,内部各点的主应力和及主应力角 $\theta(x, y)$ 亦可由 $q(x, y)$,

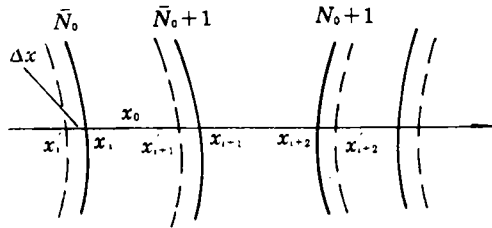


图 6

边界上的 $p(x, y)$ 及 $\theta(x, y)$ 求出。设 σ_1 和 σ_2 为主应力, $p = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$, $q = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$, 则有公式^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \frac{1}{2q} \left[\frac{\partial q}{\partial y} + \sin(2\theta) \frac{\partial p}{\partial x} - \cos(2\theta) \frac{\partial p}{\partial y} \right] \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} &= -\frac{1}{2q} \left[\frac{\partial q}{\partial x} + \sin(2\theta) \frac{\partial p}{\partial y} + \cos(2\theta) \frac{\partial p}{\partial x} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

将此二式化为差分方程,用对数逼近函数^[5]求偏导数,用改进欧拉方法^[6]求解方程(5.1),然后用下列各式计算各应力分量:

$$\sigma_x = p + q \cos(2\theta), \quad \sigma_y = p - q \cos(2\theta), \quad \tau_{xy} = q \sin(2\theta)$$

为了提高计算精度,每计算一步可用相容方程进行校核。

5.2 改进欧拉方法迭代求解微分方程

偏微分方程(5.1)虽然含有多个变量,但化为差分方程,在沿 x 方向计算时,各分点处

的偏导数都已求得，用改进欧拉方法求解 θ_i ，得如下迭代公式：

$$\theta_{i+1}^e = \theta_i^e + \frac{h}{2q_i} \left[\frac{\partial q_i}{\partial y} + \frac{\partial p_i}{\partial x} \sin(2\theta_i^e) - \frac{\partial p_i}{\partial y} \cos(2\theta_i^e) \right]$$

$$\theta_{i+1}^e = \theta_i^e + \frac{h}{2} \left\{ \frac{1}{2q_i} \left[\frac{\partial q_i}{\partial y} + \frac{\partial p_i}{\partial x} \sin(2\theta_i^e) - \frac{\partial p_i}{\partial y} \cos(2\theta_i^e) \right] + \frac{1}{2q_{i+1}} \left[\frac{\partial q_{i+1}}{\partial y} + \frac{\partial p_{i+1}}{\partial x} \sin(2\theta_{i+1}^e) - \frac{\partial p_{i+1}}{\partial y} \cos(2\theta_{i+1}^e) \right] \right\}$$

$$(\theta_{i+1}^e)_{\text{new}} = \theta_i^e + \frac{h}{2} \left\{ \frac{1}{2q_i} \left[\frac{\partial q_i}{\partial y} + \frac{\partial p_i}{\partial x} \sin(2\theta_{i+1}^e) - \frac{\partial p_i}{\partial y} \cos(2\theta_{i+1}^e) \right] + \frac{1}{2q_{i+1}} \left[\frac{\partial q_{i+1}}{\partial y} + \frac{\partial p_{i+1}}{\partial x} \sin(2\theta_{i+1}^e)_{\text{old}} - \frac{\partial p_{i+1}}{\partial y} \cos(2\theta_{i+1}^e)_{\text{old}} \right] \right\}$$

式中， θ_i^e ——第*i*点的修正值； θ_{i+1}^e ——第*i*+1点的第一次估算值； θ_{i+1}^e ——第*i*+1点的第一次修正值； $(\theta_{i+1}^e)_{\text{old}}$ ——第*i*+1点的前一次修正值； $(\theta_{i+1}^e)_{\text{new}}$ ——第*i*+1点的后一次修正值； $h=x_{i+1}-x_i$ 。

利用上式，可得到给定误差限内的 θ_i 值。本系统是将偏微分方程转换为常微分方程求解，简化了计算过程，便于程序化，迭代结果可以人为控制。

六、应用实例

对径向受压圆盘，直径 $D=40\text{mm}$ ，厚度 $d=6\text{mm}$ ，载荷 $p=882\text{N}$ 。计算结果同理论值比较最大偏差为 18.6N/cm ，相对偏差为4%，图7中实线为本系统计算值，圆点表示理论值。

七、结 论

“CCD光测力学自动检测系统”是一种新型的自动光弹性系统。能实时、准确、迅速地采集条纹密度变化很大的应力光图，直接得到全场条纹中心线和条纹级数。

本系统中的硬件和软件具有独特功能，能自动跟踪信号，自动判别真伪信号，自动判别条纹级数。本系统的光弹性应力分析新方法，只需要输入少量数据就可以自动迅速地分析出应力值，简化了应力分析程序，为光弹性自动化创造了有利条件。

该系统是廉价而实用的光测力学自动化系统，而且可以应用于其它光测方法，例如云纹法实验。

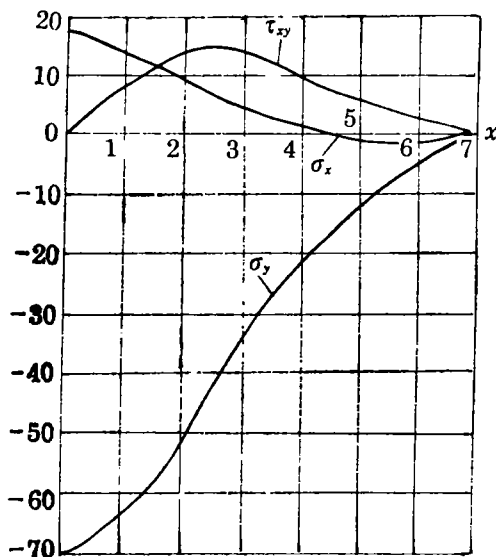


图7 径向受压圆盘应力分布曲线

参 考 文 献

- [1] Zandman, F., Photostress analysis, *Product Engineering*, (2) (1959).
- [2] Redner, S., Photoelastic measurements by means of computer-assisted spectral-contents analysis, *Exp. Mech.*, 25(6) (1985).
- [3] Muller, R. K. and L.R. Saackel, Complete automatic analysis of photoelastic fringes, *Exp. Mech.*, 19(3) (1979).
- [4] 陈至达, 根据应力光图直接求解弹性力学平面问题, *力学学报*, 5(3) (1962), 112—114.
- [5] 赵元民, 《函数逼近方法》, 黑龙江科学技术出版社 (1981).
- [6] Bajpai, A.C., I.M. Calus and J.A. Fairly, *Numerical Method of for Engineering and Scientists*, Addison-Welsley Publishing Company (1977).

CCD Automated Polariscopes System and the Stress Analysis Methods

An Li-qian

(*Beijing Graduate School, China University of Mining, Beijing*)

Abstract

A linear CCD (charge coupled device) automated measurement system and the stress analysis methods are presented in the present paper. The skeleton and the orders of photoelastic fringes can be acquired rapidly, precisely and in real time by the system. The automatic stress analysis methods in the paper only uses a small amount of known data to analyze the stress precisely.

Key words photoelastic, CCD, automated polariscopes, stress analysis