

理综合孔径雷达信息、处理卫星照片、辨认字符和图形的特征等，光学模拟计算的优越性是明显的。但是它的精度低，通用性差，还不能够形成独立于现代电子计算机之外的计算技术体系。虽如此，我们不妨可以认为它是真正的光学计算机的先声。

光学数字计算的途径也累有尝试。有人提出仿照生物神经传输信息的特点(如:无衰减传输，无反射传输，传输过信号的神经有抑制效应和恢复效应，有触发阈值等)，用纤维激光器作为传输光信息的神经纤维，再加上具有特殊功能的各种联结，以构成二进制运算的全部功能部件，进而实现真正的全光计算机。还有人提出用激光的饱和吸收、淬灭、放大、振荡等效应，再加上光导纤维构成二进制运算的各种功能部件。又有人提出用光偏转器与全息图配合

作二进制运算或某些逻辑操作。虽然从原理上看，这些建议都说得通，但在实际上不可能对现代的电子计算机产生竞争能力，因为它们都是机械地模仿电子计算机，没有根据光运算的特点，发挥光的巨大平行性。集成光学是一代新的光学技术，它具有现代光学的共同特征，又有现代集成化的微电子学的风度，它是有希望在光学数字计算方面作出贡献的。人们都在期待着。

当前，人们把各种光学变换、光存储、光数字计算、集成光学等全都囊括在“广义的”光学计算之中。而作为新一代计算机的光计算机究竟是什么，还没有人能说得清楚。这正是摆在我们面前的一项光荣而艰巨的任务——探索具有我国特色的光计算机。

全 息 光 弹 性

秦 玉 文
(天 津 大 学)

一、引 言

一般说的光弹性，全称为光测弹性力学，是应力分析的力学方法。它的分析对象是机械零件或结构构件的强度问题。光弹性是一种模型试验法，它是用光学灵敏材料(如环氧树脂等)制成实物的模型，施加相应的载荷，在偏振光照射下就能测定模型各点的应力，从而揭示实物在强度上的薄弱环节和潜在危险，并进而改进设计，寻求合理的几何形状和尺寸，保证零件既经济又可靠。这种方法直观性强，能用来分析各种几何形状复杂的零件，具有足够的精度，尤其用它作设计方案的对比试验更有其独特的优越性。

这种方法在本世纪初首先出现于工程界，

半个多世纪以来，从事这项工作的研究者们进行了大量的工作，并取得了很大的进展。可以说，光测弹性力学自身已经发展到成熟的阶段。以二维问题寻求主应力为例，它较之其它方法能迅速、可靠地以全场应力条纹图的明确形象展现在人们的面前。

光弹性模型是用各向同性的透明材料制成的，其自然状态并不具有双折射性质，但是当外力作用时，它就如同晶体一样表现为各向异性、产生双折射现象。这种双折射现象是暂时的，当应力解除后即消失。暂时双折射是光弹性的实验基础。

当以平面偏振光垂直入射平面受力模型时，由于双折射效应偏振光在模型上任一点都将沿两个主应力方向分解成两个平面偏振光。这两个相互垂直振动的平面偏振光在模型内部

的传播速度是不同的,当它们从模型射出时就产生了一段光程差.这个光程差,我们可以在光弹仪上用光干涉的办法来测定.在光弹仪的屏幕上,可以看到干涉后光强为零的一系列点,形成性质不同的两组条纹:一组条纹表示条纹上各点的主应力方向都相同;另一组条纹表示其同一条线上各点的主应力差值都相等.前者称为等倾线,后者称为等差线.因此我们利用等倾线能够测取模型上各点的主应力方向,利用等差线能够测取模型上各点的主应力差值.但是这对于分解主应力实验数据尚不完全,还要辅以别的方法如数解法、图解法等才能近似地分解出主应力值.

而全息光弹性法可以独立地获得分解主应力所需要的全部实验数据,效率和精度方面也都有显著地提高.

激光技术的诞生,为科学技术及工业部门提供了优良的光源,它很快地得到了广泛的应用.激光光源的重要特点在于:高单色性,它比以前最好的单色光源——氪灯要纯上百万倍;高方向性,几乎是一束平行光;高强度,它能把能量在空间和时间上高度集中起来,亮度很高;同时能从激光直接获得偏振光.这些性质都是光弹性技术所需要的.1966年 Taylor 和 Swinson 等人就把激光器用作光弹仪的光源,并用于动荷及散光法光测技术的研究.

由于以上特点,激光具有较好的相干性,使全息照相技术得到了迅速的发展.光弹性也很快引用了全息干涉法.它的目的显然是针对一般光弹法缺点的,即为了提高速度,补充数据,减少误差.它的发展十分迅速,目前平面问题研究基本成熟,三维问题已经着手.有了前一段的工作,动应力,热应力全息光弹性的研究会变得更加有利.

二、全息光弹基本方程

全息光弹法首先由 Fourny 在 1967 年提出.利用全息干涉法不仅可以获得一般光弹性所获得的两组条纹——等倾线及等差线,而且

还可以获得一组等和线条纹.但最初的试验等差线和等和线是同时获得的,它们是相互依赖的两族条纹.下面让我们看看这两族条纹是如何获得的.

全息照相的原理已为人们所熟悉,它利用两束相干光(物光和参考光)产生干涉.在照相底片上形成光栅,这光栅记录了光波的全部信息——振幅和相位.当再用参考光照射处理后的底片时,便产生光衍射现象,其中的一列衍射光即为物光波再现.全息光弹就是利用了全息照相这种特点,采用两次曝光记录模型受力前后两种状态的光波信息.在物光再现时,两种状态的光波衍射后发生干涉,形成干涉条纹.这种干涉条纹与模型受力前后主方向折射率的改变,模型厚度的改变而引起光程的变化有直接关系.

当采用同旋圆偏振光光路、两次曝光时间相等时,干涉条纹的光强表达式可表示为:

$$I = \frac{3}{2} + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\delta_2}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_3, \quad (1)$$

λ 为光波波长, δ_1 、 δ_2 称为绝对减速, δ_3 称为相对减速.它们与主应力之间有如下的关系:

$$\delta_1 = (A'\sigma_1 + B'\sigma_2)h, \quad (2)$$

$$\delta_2 = (A'\sigma_2 + B'\sigma_1)h,$$

h 为模型厚度, A' 、 B' 为与应力光学常数 A 、 B 有关的常数.将(1)式代入(2)式,化简后得到:

$$I = 1 + 2 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} (A' + B')(\sigma_1 + \sigma_2)h \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} C(\sigma_1 - \sigma_2)h \right] + \cos^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} C(\sigma_1 - \sigma_2)h \right]. \quad (3)$$

此式即为全息光弹性的基本方程式(其中 $C = A - B$).由式可知在干涉图上可见到两组条纹,一组为等和线,一组为等差线.设等和条纹级数为 n_p , 等差条纹级数为 n_c , 并按下列定义:

$$(\sigma_1 + \sigma_2)(A' + B')h \cdot \frac{1}{2\lambda} = n_p,$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)Ch \cdot \frac{1}{\lambda} = n_c, \quad (4)$$

或者

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{2\lambda}{(A' + B')h} \cdot n_p, \quad (5)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{Ch} \cdot n_c.$$

原则上讲,有了这两组条纹数据主应力 σ_1, σ_2 可以很容易地分解出来。但是实际上这两族条纹并不完全独立,在某些区域它们互相调制,尤其在两族条纹平行时,区分等和线和等差线比较困难,甚至会造成比较严重的误差。图1所示为径向受压圆环等差线及等和线组和条纹图的照片。

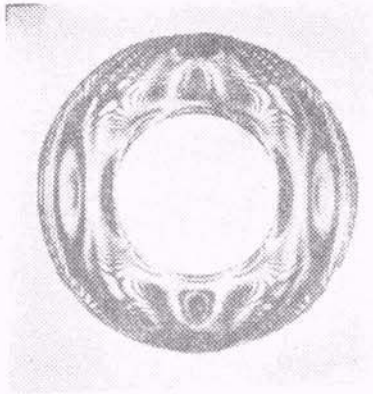


图1 组合条纹图

三、条纹分离

由于组合条纹图中,等差线和等和线的区分困难,在实际应用中受到很大限制。因此分离两族条纹便是全息光弹性必须解决的一个问题。

一些研究者提出了几种分离条纹的方法,如不同曝光时间法,涂布半反射层法,石英旋光法等等。目前国内外采用较多的是两个模型法,但比较好的是法拉弟-铈玻璃旋光法。

1. 两个模型法

两个模型法是用光学灵敏材料(如环氧树脂)制成一个模型,加载曝光一次获得等差线;再用光学不灵敏材料(如有机玻璃)制成另一个

同样的模型,加载前后两次曝光便可单独获得等和条纹。光学不灵敏材料的光学常数 A 和 B 近似相等,则有

$$C = A' - B' = A - B = 0.$$

所以方程(3)变为:

$$I = 2 + 2 \cos \frac{\pi h}{\lambda} (A' + B') (\sigma_1 + \sigma_2). \quad (6)$$

则等差线不复存在,光强仅由 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 决定。由此可以独立获得等和线。将(4)式代入(6)式,有

$$I = 2 + 2 \cos 2\pi n_p. \quad (7)$$

当等和线条纹级数 $n_p = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 时,

$$I = 4, \text{ 为全亮条纹;}$$

当 $n_p = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}, \dots$ 时,

$$I = 0, \text{ 出现全黑条纹.}$$

即等和条纹图上的黑色条纹为半级次。令(5)式中,

$$\frac{2\lambda}{(A' + B')h} = f_p; \quad \frac{\lambda}{C} = f_c.$$

f_p, f_c 分别称为等和材料条纹值和等差材料条纹值,它只与所使用的光源光波波长和材料的光学性质有关。则(5)式可写为:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{f_p}{h} n_p,$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_c}{h} n_c. \quad (8)$$

材料条纹值 f_p 和 f_c 可从有已知解的受力模型全息干涉条纹图中测得,从而由(8)式可很容易地确定所测模型各点主应力的大小。

虽然这种方法较过去分解主应力简单、迅速得多,但是两个模型法也有它的缺点。由于要制作两个模型,在模型制作、加载、测试过程中均要增加工作量和产生误差。石英旋光法是利用一个模型通过旋光分离两族条纹,但它的往返光路要求有一个偏离,方法本身固有的弱点决定了试验中必然产生误差。优点是较之两个模型法工作量可以大为减少。为了克服石英旋光法的缺点,法拉弟-铈玻璃旋光法的效果较好。

2. 法拉第-铈玻璃旋光法

比较好的条纹分离方法是应用法拉第-铈玻璃旋光法,这是目前平面全息光弹性试验中的先进技术。法拉第-铈玻璃旋光器的研制成功,对于三维全息光弹性、动应力以及热应力全息光弹性的研究也将有所促进。

铈玻璃是一种非旋光物质,在强磁场作用下,通过铈玻璃的偏振光振动平面将发生转动,其转动的角度 θ 与铈玻璃的维尔德常数 V 和光束经过玻璃的路程 L 以及所加磁场强度在光束传播方向上的分量 H 成正比,即

$$\theta = VHL. \quad (9)$$

在用于条纹分离时,要求光束单次通过时能够旋光 45° ,因此研制铈玻璃并提高其维尔德常数 V 乃是关键问题,困难也较多。我们与天津市硅酸盐研究所合作,已完成了法拉第-铈玻璃条纹分离的研制,在波长为 6328 \AA 时,铈玻璃的维尔德常数可达到 $0.120 \text{ min/cm} \cdot \text{Oe}$ 。制成的法拉第旋光器满足了实用要求,可以很容易地使旋转角度达到 45° 。

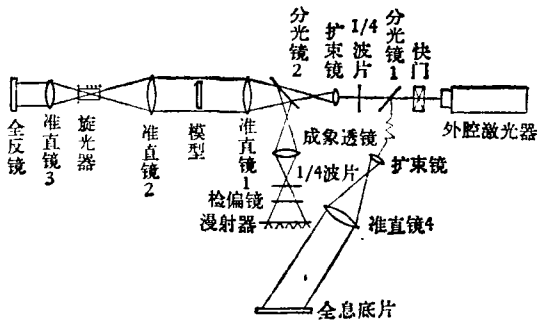


图2 法拉第-铈玻璃旋光光路图

使用的法拉第-铈玻璃旋光分离条纹的光路如图2所示。激光束经分光镜1分为两束,反射的部分做为参考光,透射的部分做为物光束。物光经过受力模型后经准直镜2聚焦,在此焦点处放置旋光器,铈玻璃棒的中断面恰好与透镜焦点重合。偏振光穿过旋光器后其振动平面旋转 45° ;光束过焦点后又扩散,经准直镜3又变为平行光。当光从前表面全反镜反射回来时,使准直镜3的焦点与准直镜2的焦点重合,光束按原来光路返回,再通过法拉第旋光

物理

器。此时偏振光振动平面又旋转 45° ,较之光束第一次进入旋光器前共旋转了 90° 。光束继续前进第二次通过模型后由分光镜2将两次通过模型的物光反射经过成像透镜到漫射器上成象。下面我们分析一下光束单次旋光 45° 、往返旋光 90° 时等差线消除而单独获得等和线的情形。

当光束第一次通过未受力模型时,物光的位相 ψ 变化为:

$$\psi = k(n_0 h - h) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_0 - 1)h, \quad (10)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波数, n_0 是模型未受力时的折射率,当光束返回第二次通过未受力模型时,物光的位相变化又增大一倍,即

$$\psi' = 2\psi,$$

或

$$\psi' = \frac{4\pi}{\lambda} (n_0 - 1)h. \quad (11)$$

当物光第一次穿过受力模型时,物光沿两个主方向引起的位相改变为:

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - 1)h', \quad (12)$$

$$\psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 - 1)h'.$$

n_1 和 n_2 为沿两个主方向的主折射率, h' 为受力模型的厚度。当物光返回第二次穿过受力模型后,其快轴方向和慢轴方向的偏振光正好互换位置,振动平面都旋转了 90° ,因而两个偏振光的位相变化相等。即:

$$\psi'_1 = \psi'_2 = \psi_1 + \psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 + n_2 - 2)h'. \quad (13)$$

全息光弹性实验法中,一般同旋圆偏振光光路求取等和条纹的两次曝光光强基本方程式除表达为(1)式的形式外,还可表达为:

$$I = \frac{1}{2} k^2 + k \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_1 + k \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_2 + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_3. \quad (14)$$

其中 $k = t_1/t_2$,为两次曝光时间的比值,而

$$\begin{aligned}\delta_1 &= (\phi_1 - \phi) \frac{\lambda}{2\pi}, \\ \delta_2 &= (\phi_2 - \phi) \frac{\lambda}{2\pi}, \\ \delta_3 &= \delta_1 - \delta_2 = (\phi_1 - \phi_2) \frac{\lambda}{2\pi}.\end{aligned}\quad (15)$$

将(11)、(13)式代入(15)得到

$$\delta_1 = \delta_2 = (n_1 + n_2)h' - 2n_0h - 2(h' - h). \quad (16)$$

将应力-光学定律

$$A\sigma_1 + B\sigma_2 = n_1 - n_0,$$

$$A\sigma_2 + B\sigma_1 = n_2 - n_0,$$

代入上式,最后可得

$$\begin{aligned}\delta_1 = \delta_2 &= (A + B)(\sigma_1 + \sigma_2)h' \\ &+ 2(n_0 - 1)(h' - h),\end{aligned}\quad (17)$$

以 h' 除该式两边,变为

$$\begin{aligned}\frac{\delta_1}{h'} = \frac{\delta_2}{h'} &= (A + B)(\sigma_1 + \sigma_2) \\ &+ 2(n_0 - 1) \frac{h' - h}{h'},\end{aligned}$$

将 $\frac{\delta_1}{h'} = \frac{\delta_2}{h'}$ 及 $\frac{h' - h}{h'}$ 的分母改为 h , 带来的误差极小,可以忽略,所以

$$\begin{aligned}\frac{\delta_1}{h} = \frac{\delta_2}{h} &= (A + B)(\sigma_1 + \sigma_2) \\ &+ 2(n_0 - 1) \frac{h' - h}{h}.\end{aligned}$$

将广义虎克定律

$$\frac{h' - h}{h} = \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

代入上式,经化简后便可得到

$$\delta_1 = \delta_2 = h(A' + B')(\sigma_1 + \sigma_2),$$

$$\delta_3 = \delta_1 - \delta_2 = 0,$$

其中

$$A' = A - \frac{\nu}{E} (n_0 - 1),$$

$$B' = B - \frac{\nu}{E} (n_0 - 1),$$

ν 是模型材料的横向变形系数, E 是弹性模量. 将 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 代入(1)式,便得到经过旋光后两次曝光干涉条纹的光强表达式:

$$I = 2 + 2 \cos \frac{2\pi h}{\lambda} (A' + B')(\sigma_1 + \sigma_2). \quad (18)$$

可见(18)式在运用法拉第-铈玻璃旋光以后,两次曝光获得的条纹图不含有等差线的成分,只表达了等和条纹的分布.

设等和条纹级数为 n_p , 并把 n_p 定义为:

$$n_p = (\sigma_1 + \sigma_2)(A' + B')h \cdot \frac{1}{2\lambda}, \quad (19)$$

并代入(18)式,可变为

$$I = 2 + 2 \cos 4\pi n_p, \quad (20)$$

根据(20)式可以对等和条纹进行解释:

(A) 当 $I = 0$ 时, $\cos 4\pi n_p = -1$, 即

$$n_p = \pm \frac{1}{4}, \pm \frac{3}{4}, \pm \frac{5}{4}, \pm \frac{7}{4}, \dots \quad (21)$$

为全暗条纹;

(B) 当 $I = 4$ 时, $\cos 4\pi n_p = +1$, 即

$$n_p = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm 2, \pm \frac{5}{2}, \pm 3, \dots \quad (22)$$

为全亮条纹.

可见通过旋光两次曝光获得的等和线较一般光路两次曝光等和线条纹数是倍增的,即亮条纹出现在半级次和整级次,暗条纹则出现在四分之一级的奇数倍上. 当不让旋光器工作,加载时一次曝光或直接在漫射器上可获得等差线的倍增条纹图.

四、法拉第旋光法应用

全息光弹性应用法拉第-铈玻璃旋光器分离条纹. 关键是旋光器的旋光性能. 而旋光性能的检验主要是看等差线消除及等和线拍摄的质量. 由下面几张照片可以看出旋光器性能是好的. 图 3 是加载后所获得等差线条纹图的照片. 图 4 为单次旋光 45° 等差线消除的情况. 图 5 则为旋光时加载前后两次曝光拍摄的独立、清楚的等和条纹图. 这三张照片是一台 350 吨快锻水压机架模型上弯部的条纹图.

下面我们看一下用法拉第旋光分离条纹法对该机架最大应力截面 $A-F$ (见图 6) 进行应力分析的实例. 实物最大载荷

$$P_{\max} = 350 \times 10^3 \text{kg},$$

厚度 23.4cm, 平面尺寸缩小 50 倍制作模型, 模

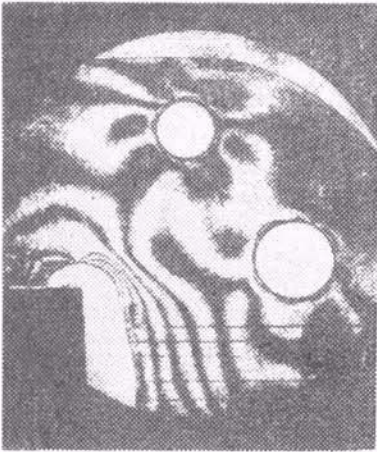


图3 等差线

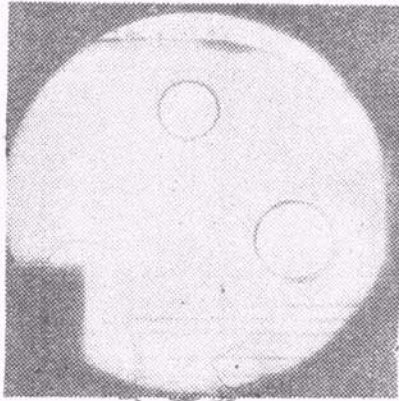


图4 等差线消除



图5 等和线

型材料使用 CR-39。模型厚度 $h = 0.481\text{cm}$ 。用同一块 CR-39 材料同时制作求材料常数的圆盘。

第一步,用圆盘求取材料条纹常数 f_c 和 f_p 。由弹性理论知道对经受压圆盘中心的主应力值为:

$$\sigma_1 = \frac{2p}{\pi h d},$$

$$\sigma_2 = \frac{-6p}{\pi h d},$$

其中 p 为荷载, h 为圆盘厚度, d 为直径。将该式代入(8)式,即得

$$f_c = \frac{8p}{\pi d} \cdot \frac{1}{n_c^0},$$

$$f_p = \frac{4p}{\pi d} \cdot \frac{1}{n_p^0}. \quad (23)$$

使圆盘在与模型试验相同的条件下对经受压,测出圆盘中心条纹数 n_c^0 和 n_p^0 ,代入(23)式即可求得材料常数为

$$f_c = 20.8\text{kg/cm} \cdot \text{级},$$

$$f_p = 4.5\text{kg/cm} \cdot \text{级}.$$

第二步,给模型分别加载 $p_c = 15\text{kg}$ 和 $p_p = 5\text{kg}$,拍摄的等差线和旋光后拍摄的等和线分别示于图3和图5;根据(21),(22)式分别测取 A-F 截

面上各测点的倍增条纹数,之后换算出条纹级数;将结果代入(8)式即可分解出模型主应力 σ_1 和 σ_2 。再根据模型理论即可换算出实物应力 σ_1 和 σ_2 的数值。以上结果均列于表1中。

为比较,用两个模型分离条纹法对该例同一截面进行了分析,所获结果也列于表1中。模型分别由有机玻璃和环氧树脂制作,材料常数分别为 $f_c = 14.5\text{kg/cm} \cdot \text{级}$ 和 $f_p = 5.15\text{kg/cm} \cdot \text{级}$;模型厚度分别为

$$h_c = 0.525\text{cm}, h_p = 0.70\text{cm};$$

所加载荷分别为

$$p_c = 13.6\text{kg}, p_p = 10.2\text{kg}.$$

显然 A、D、E、F 四个测点均为单向应力状态,两个主应力之一为零。由表1可见所获结果基本符合实际情况,误差不大。两种方法所得到的结果也基本相符。

当然,有些问题只求得各点的主应力值还不算完全,还要求知道各点的主应力方向,即要求测取等倾线。不论是通常的光弹仪还是一般方法的全息光弹仪,等倾线的测取是相当麻烦的,而且准确性较差。现在可以采用法拉弟-铈玻璃旋光器,只要在光路中加上两个参数相同、旋向相反的旋光器,等倾线的测取就变得容易、准确。这种方法为今后光弹仪的自动化提供了一个基础。图7表示使用这种装置测得的四组等倾线。

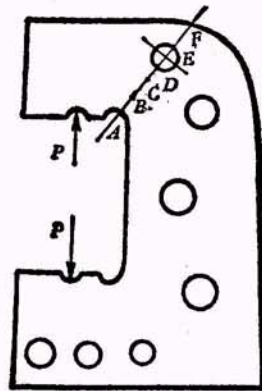


图6 350吨快锻水压机架示意图

表1 350吨快锻机架A—F截面主应力值(模型应力按单位厚度单位载荷计算)

方法	测点	条纹条数		条纹级数		$\sigma_1 - \sigma_2$ (kg/cm ²)	$\sigma_1 + \sigma_2$ (kg/cm ²)	模型应力		实物应力	
		等差线 (条)	等和线 (条)	n_c (级)	n_p (级)			σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)
法拉弟旋光法	A	6.6	10.2	3.30	5.10	4.60	4.60	+4.60	0	+1380.0	0
	B	1.4	3.4	0.70	1.70	0.97	1.53	+1.25	+0.28	+373.0	+83.6
	C	1.4	0.9	0.70	0.45	0.97	0.41	+0.68	-0.28	+204.00	-83.6
	D	2.5	-4.0	1.25	-2.00	1.74	-1.80	-0.03	-1.77	-8.95	-529.0
	E	3.9	-6.0	1.95	-3.00	2.71	-2.70	+0.01	-2.71	+2.99	-809.0
	F	2.3	-3.4	1.15	-1.70	1.54	-1.53	+0.01	-1.54	+2.99	-459.0
两个模型法	A	4.5	8.5	4.5	8.5	4.80	4.80	+4.80	0	+1440	0
	B	1.0	2.6	1.0	2.6	1.07	1.47	+1.27	+0.203	+380.0	+60.6
	C	1.0	0.1	1.0	0.1	1.07	0.06	+0.56	-0.504	+168.0	-151.0
	D	1.5	-3.0	1.5	-3.0	1.60	-1.69	-0.05	-1.65	-15.0	-484.0
	E	2.5	-5.0	2.5	-5.0	2.66	-2.82	-0.11	-2.74	-33.0	-820.0
	F	1.6	-3.0	1.6	-3.0	1.71	-1.69	+0.01	-1.70	+2.99	-508.0

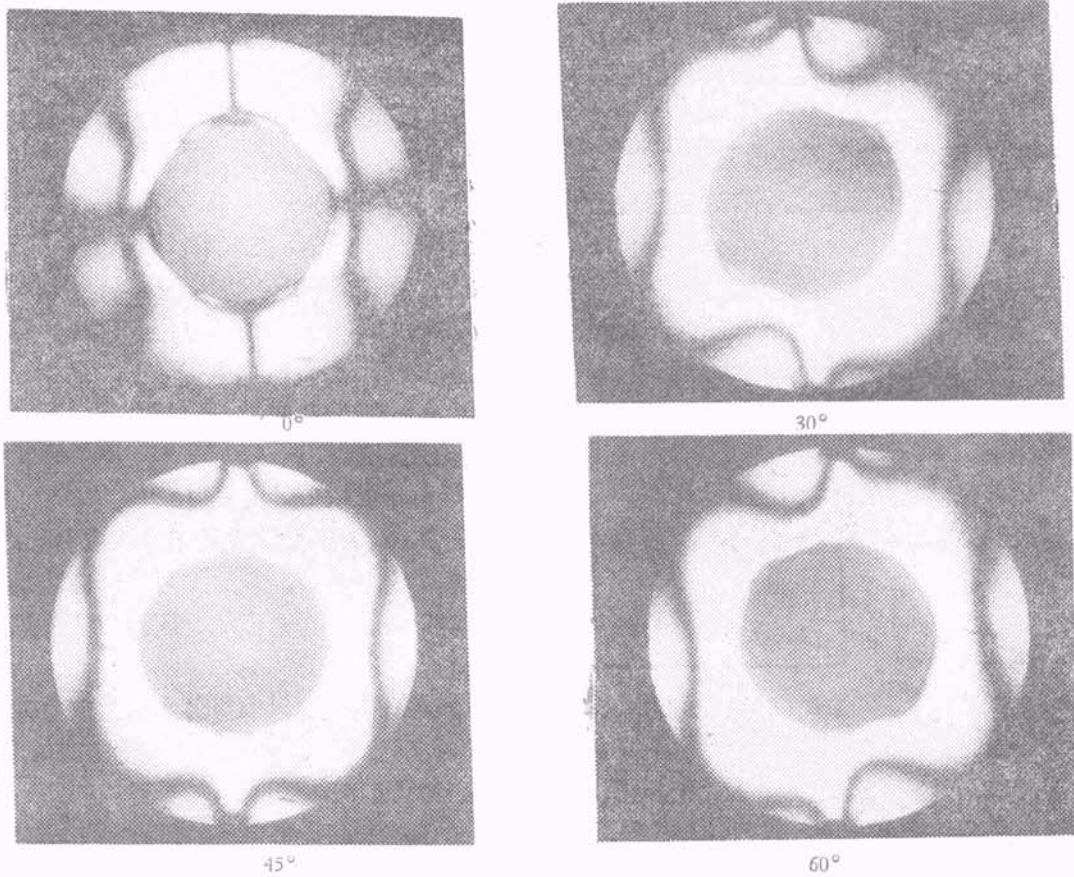


图7 等倾线

五、结束语

激光全息光弹性这门新的实验技术，产生

不过十年，但是不论在国际上还是在国内，发展是很迅速的。就平面全息光弹性来说，我国从研究到应用所用的时间是相当短的，目前我国

(下转第170页)