

全息法在实验力学中的应用

译文集

科学出版社

全息法在实验力学中的应用

译文集

郑州工学院激光全息技术组

天津大学力学教研室光弹组 合译

清华大学工程力学系激光组

1249/50
科学出版社

内 容 简 介

本文集收集了十四篇文章,其中有二篇(第一、二篇)是一般性介绍,有十二篇(第三篇至第十四篇)是全息光弹性方面的文章,探讨了全息光弹性的基本理论和基本方法,研究了平面问题以及两种线族(等差线及等和线)分开的方法。对全息技术应用于三维问题、动态光弹性问题的前景,也作了介绍。

全息法在实验力学中的应用译文集

郑州工学院激光全息技术组
天津大学力学教研室光弹组 合译
清华大学工程力学系激光组

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1977 年 7 月第一次印刷 印张:7 3/4

印数:0001—4,070 字数:177,000

统一书号:13031·581

本社书号:852·13—2

定 价: 0.80 元

译 者 序

伟大领袖毛主席教导我们：“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来赶上和超过世界先进水平。”自从六十年代激光器问世以来，全息干涉技术得到了迅速而广泛的发展，从而给力学实验技术开拓了新的途径。近年来我国人民在无产阶级文化大革命的推动下，狠批刘少奇、林彪的反革命修正主义路线，抓革命，促生产，鼓足干劲，力争上游，在各条战线上都取得了伟大的胜利。全息技术在力学实验上的应用也作出了显著的成绩。

我们本着：“洋为中用”“批判地吸收外国文化”的精神选择了十四篇这方面的文章，供有关研究工作者参考。

译文中有二篇（第一、二篇）是一般性的介绍。有十二篇（第三篇到第十四篇）是全息光弹性方面的文章，其中有全息光弹性的基本理论和基本方法的探讨，有平面、三向问题的研究，以及两种线族（等差线及等和线）分开的方法的研究等。

参加本文集翻译工作的有郑州工学院激光全息技术组（第三篇到第七篇以及第十三、十四篇）、天津大学力学教研室光弹组（第八篇到第十二篇）和清华大学工程力学系激光组（第一、二篇）。

全书经水电部水利科学研究院结构室有关同志审阅。

由于译者水平有限，错误是难免的，希读者予以批评指正。

目 录

译者序	ii
全息干涉法在力学试验中的应用	1
光学全息照相在应用力学中的应用	25
用于等和线应力分析的全息干涉仪	57
一个新的实验应力光学方法——应力全息干涉法	66
全息光弹性的进展	83
全息照相在光测弹性力学中的应用	98
用于全息光弹性的一种新的干涉仪	112
全息照相在光弹性模型全面应力分析中的应用	124
用于应力分析的一种新全息干涉仪	136
光弹性中确定绝对减速的技术	153
光弹性中的全息照相和光干涉法	179
全息光弹性的进展	205
全息光弹性——仅用一种程序和一个模型独立观测等差 线及等和线	227
应用全息重叠性分别记录等和线与等差线条纹图	237

32743

· i ·

全息干涉法在力学试验中的应用

Hiroyoshi Saito, Ichirou Yamaguchi

和 Toshinori Nakajima

1. 导 言

全息干涉术的优点之一是即使在粗糙表面也能出现清晰的干涉条纹^[1,2]。因此干涉术的应用不仅限于具有镜面般的反射面的物体。另一个优点是具有时间错位干涉 (time shearing interferometry) 的能力。一个物体的波前能够不与任何参考波前比较, 而与物体本身不同状态时的波前相比较。这些优点使干涉法能广泛地应用于工程问题。而且, 干涉计量术能使我们主要地测量纵向位移, 比测横向位移容易。本文主要对于弯曲试验作了一些新的尝试, 基本任务是挠度测量。我们作了下列三个试验(头两个是静态的, 第三个是动态的):

- 1) 测定板的波桑比;
- 2) 承弯板的力矩分析;
- 3) 板的弯曲振动。

进一步补充做了下面的试验;

- 4) 运动物体的分析。

2. 测定板的波桑比^[3,4]

当矩形截面的稜杆在它的一个主平面内受纯弯时, 杆的表面变成马鞍形。在三维弹性理论中这个问题的解是众所周知的^[5]。将直角坐标的原点放在截面形心处, $x-z$ 平面是受弯

的主平面,如图1所示,则反翘曲面的等高线是双曲线,可用下面的方程表示:

$$x^2 - \nu y^2 = \text{常数} \quad (1)$$

令式(1)中常数等于零,即可表达此双曲线的渐近线,其较小的夹角 2α 与波桑比有如下关系:

$$\nu = \tan^2 \alpha \quad (2)$$

因此,由干涉法得到的等高线,即可容易地测定板材的波桑比。

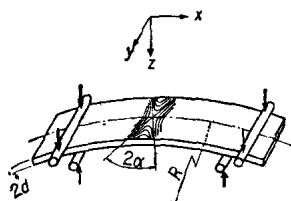


图1 纯弯板的变形

所用的实验装置表示在图2。用一对钢棒支承试验板,并通过在它背面的另一对钢棒加载。氦氖激光器的平行光束被分束器分成两束光。反射光垂直地照明试验表面,从试验表面散射的光落到置于场透镜的后焦平面处的全息图底板上,向场透镜位于试验板的法线方向。透过分束器的光,经过镜子反射到全息图底板上作为参考光。参考光对全息图底板的人射角约 15° 。

这个实验的最初阶段曾尝试用双曝光法,但后来选择了实时法,这是因为弯曲装置的微小歪斜,用前一方法难以实现对称的条纹图样,而且渐近线并不总能出现在干涉图上。而在实时法中,因为已知预期的条纹图样,恢复和调整全息图的位置是容易的。条纹图样的非对称性大大地降低角度测量的精确度。

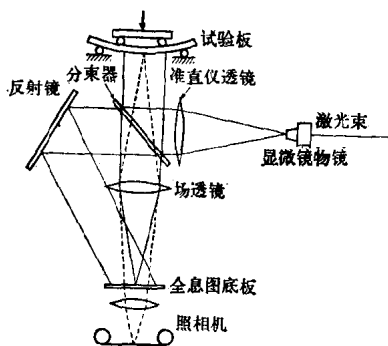


图2 全息干涉术实验装置略图

在再现的时候，一个大小合适的光栏，放在全息图附近。观察的方向和得到光的张角各自唯一地决定于光栏的位置和孔径。

图 3 表示一个干涉图的例子。在靠下的图中，沿 x 轴的条纹级数用对数刻度表示，两条线的斜率正好等于 2，正如从

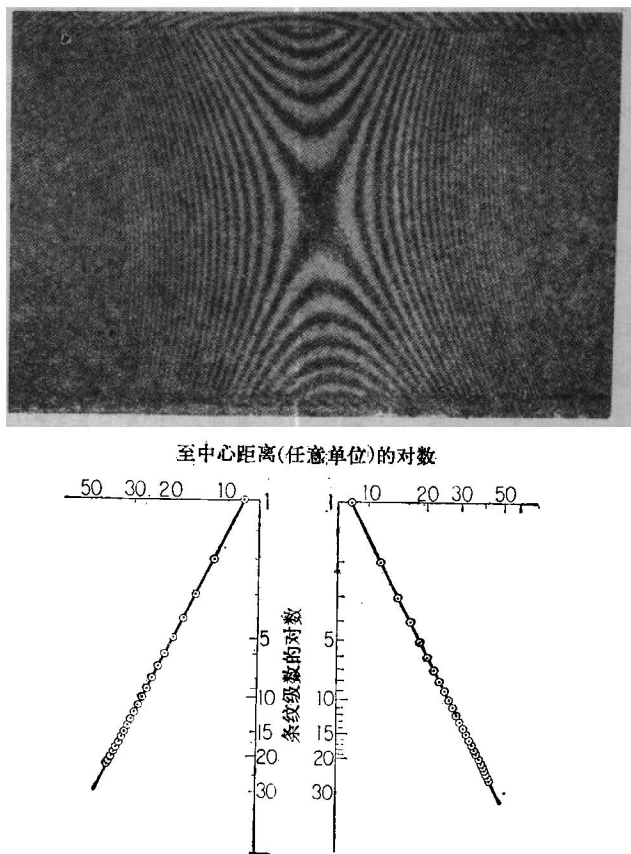


图 3 钢板受纯弯时的干涉图例
下图表示沿 x 轴的条纹级数

方程(1)所予计的那样。从同样的钢板准备了四个试件,它们的尺寸是长 125 毫米,厚 3 毫米,宽为 30, 20, 15 和 10 毫米。板的内支承间距和外支承间距分别为 80 毫米和 110 毫米。

对于每一个试件取了大约十张相应于不同挠度值的干涉图。每个试件所测角度的离差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,最后得到的 ν 值对应板宽与加载线间距之比的关系画在图 4。可以指出在

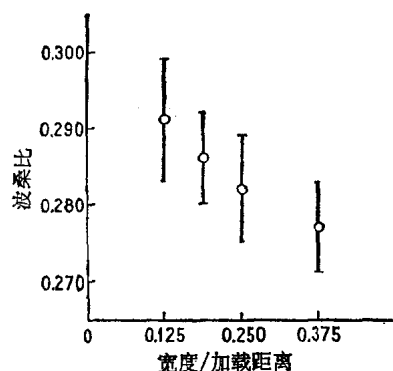


图 4 不同宽度钢板波桑比的实验结果

实验中未能充分满足板的纯弯假定,即加载线离板的中间足够远。从宽板得到的 ν 值较小,它的加载和支承位置比较接近中间。但是,每个试件测量值的重复性是十分好的。测量精度主要取决于角度测量,它被条纹的宽度所限制,在这个实验中达到的精度约为 3%。

对于那些表面不能被抛光成光学表面的材料应用这个方法是最有效的。对于水泥板和木板做了类似的实验。图 5 表示了水泥板情况的干涉条纹,并从这个干涉图样测出波桑比为 0.18。图 6 是顺着木纹和横切木纹的木板干涉图样的例子,可观察到由于木纹影响使条纹有细微的不规则性。这对于研究类似于纤维增强塑料的正交异性板弯曲问题是有意义的。

3. 板块模型中力矩分析

任意形状的板受弯曲时应力分布的计算总是一个困难的问题。已经设计了一些实验方法,例如波纹法 (moiré method) 和 Salet-Ikeda's 法^[6]。此处是用全息干涉法来求力矩分布。

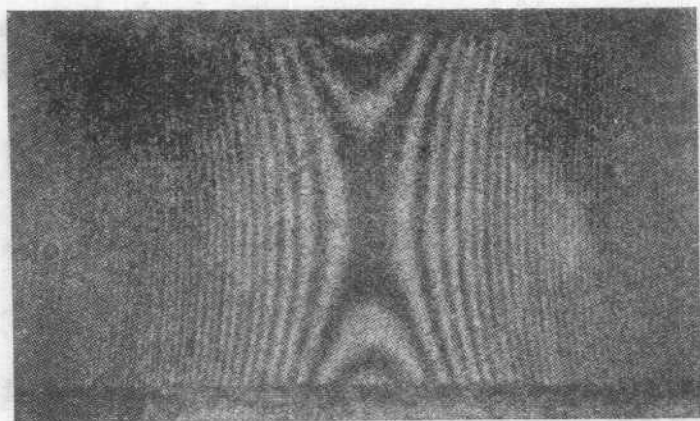


图5 水泥板在纯弯状态下的干涉图

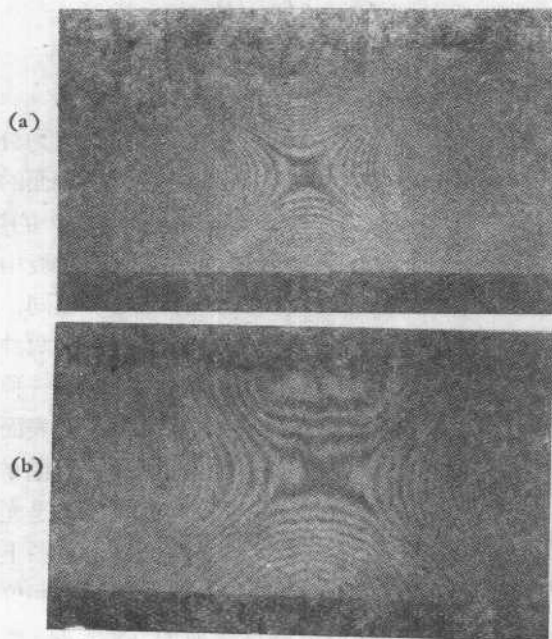


图6 受弯木板的干涉图。(a)与(b)分别对应于板顺木纹和横切木纹

现在考虑板受横向载荷而弯曲的情况(图7)。根据弹性理论,众所周知^[7],单位长度力矩 m_x , m_y 和 m_{xy} 以及挠度 w 之间存在下列关系:

$$\begin{aligned} m_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ m_y &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ m_{xy} &= -m_{yx} = D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

此处 $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$ 是板的抗弯刚度, E 是杨氏模量, h 是板厚。板的纤维应力由下列方程给出:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 6m_x/h^2 \\ \sigma_y &= 6m_y/h^2 \\ \tau_{xy} &= 6m_{xy}/h^2 \end{aligned} \quad (4)$$

所以,如果得到了在每一点 w 的二阶导数,板的应力分布也就能从方程(3)和(4)得知。显然,板在弯曲前后表面的干涉图

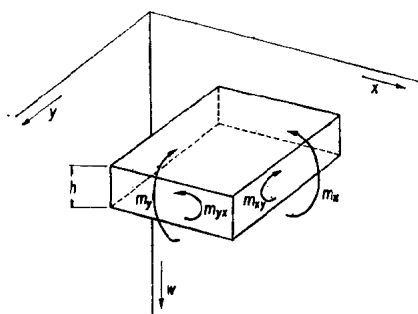


图7 板受弯曲时用的符号

样表示了 w 的拓扑图,因为它与薄板中面的拓扑图几乎相同。

采用了两种实验方法(图8),一种是对于光学的光滑表面,另一种是对于粗糙的表面。当弯曲表面是光滑的时候,在全息图上相继记

录了与没有横向位置移动的挠度 $w(x, y)$ 和有横向位置移动的挠度 $w(x - \Delta x, y)$ 相对应的反射波前。因此从这张全息图再现出的两个波前引起了错位干涉 (Shearing interference)^[8],

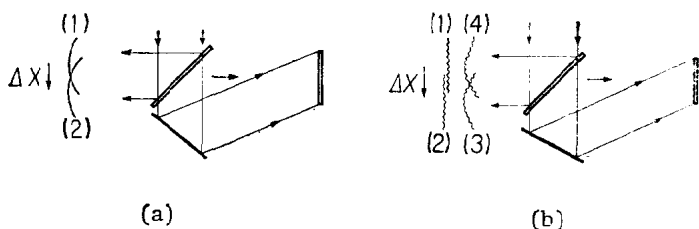


图8 得到挠度一阶导数条纹的两个方法的示意图
(a) 对于平滑表面 (b) 对于粗糙表面

干涉的强度正比于 $1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x$ ，于是，条纹就表示了 w 的第一阶导数。

第二个方法是对于粗糙表面。在记录这一步骤中，全息图底片被曝光四次，即：

- 1) 处于表面受弯前的状态，
- 2) 处于和 1) 同样的状态，但有微小的横向位移，
- 3) 处于和 2) 同样的位置，但板受弯曲。
- 4) 处于与 3) 同样的状态，但回到初始的位置。

因此，这张全息图再现时，四个波前互相干涉。干涉图的强度由 $1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \Delta x \cos \frac{4\pi}{\lambda} w$ 给出（未包括比例因素）。在这里，表示挠度等值线的干涉图被板挠度的一阶导数所调制。实验装置如前所述，只是弯曲装置固定在一个可以稍作横向移动的托架上。

处理了两个弯曲问题，一个是在方板上具有四个集中载荷的反翘曲弯曲，另一个是在圆周支承，在中心加载的圆盘弯曲。图9是从第一个方法得到的方板错位干涉图的例子。仅仅第一阶导数条纹表现为等间距平行的直条纹。从弹性理论知道， $\frac{\partial w}{\partial x}$ 的等值线沿 y 方向是等间距的直线。这个结果与理

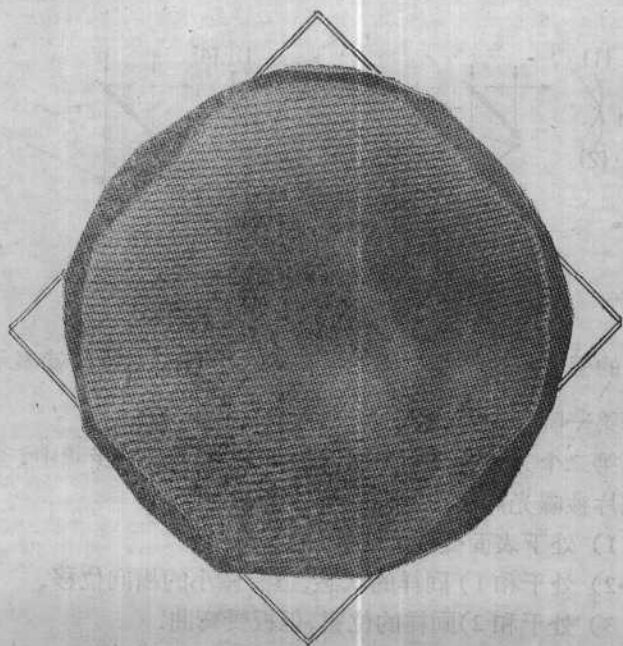


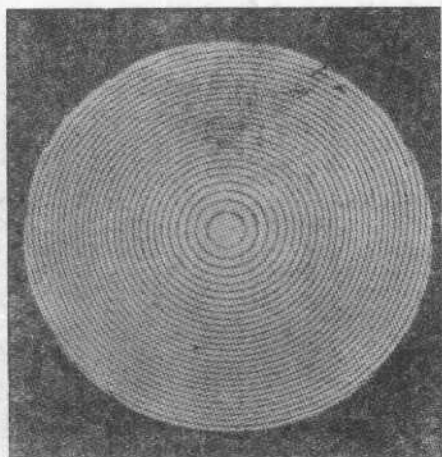
图9 指示 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 等值线的错位干涉图

试件为在反翘曲弯曲下的方板

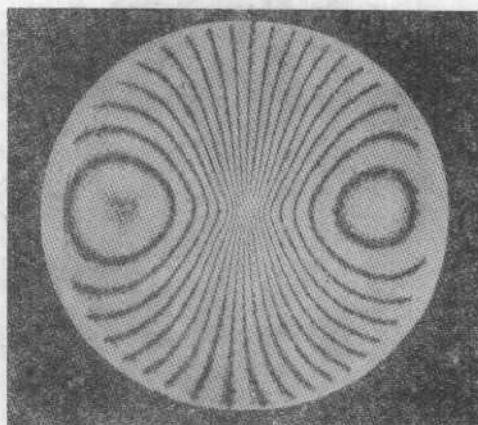
论符合得很好。

图10表示了中心加载圆盘的干涉图的例子。左图表示挠度 w 的等值线，右图表示了从错位干涉得到的第一阶导数 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 的等值线。两组条纹都具有如弹性理论所预期的形状。

由第二个方法(或四次曝光法)对于粗糙表面得到的干涉图样表示在图11。试件表面用 MgO 的白灰所复盖，以便扩散反射光。图11(a)表示挠度 w 的等值线即对称的双曲线。图11(b)表示 w 对 x 的一阶导数的等值线。这个干涉图表示了有趣的调制特点；描述 w 的一阶导数的平行的半暗半明



(a)



(b)

图 10 中心加载受弯圆板的干涉图

(a) 表示挠度 w 的等值线, (b) 表示 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 的等值线

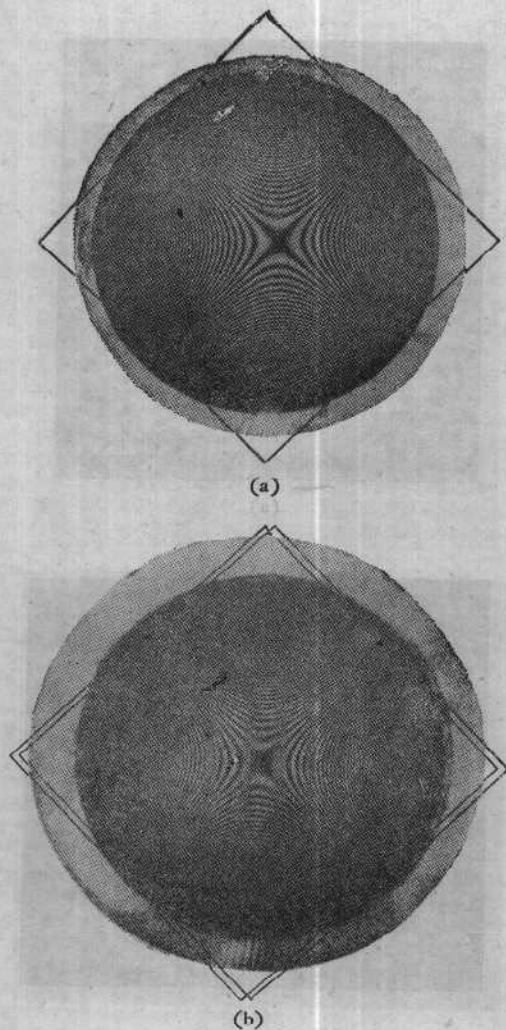
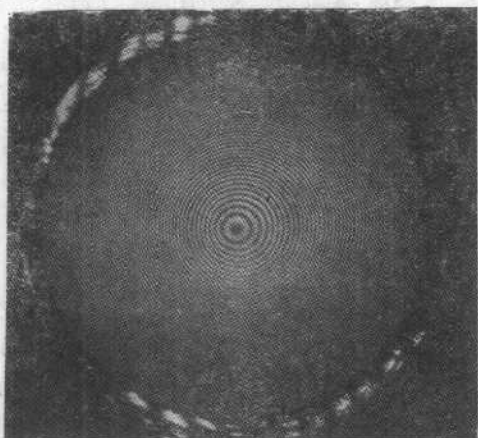


图 11 四个集中载荷反翘曲弯曲方板的干涉图

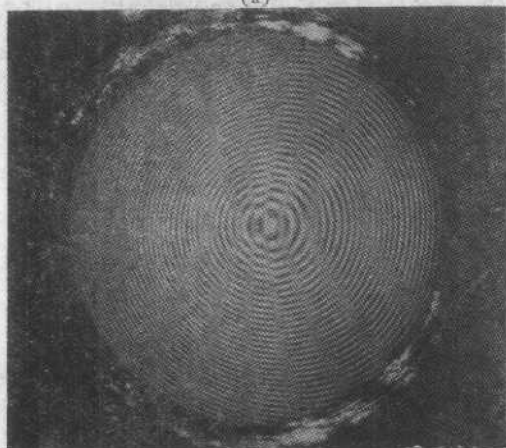
(a) 表示挠度 w 的等值线, (b) 表示 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 的等值线

(half-tone) 的直条纹是等间距的。

另一个圆盘弯曲的例子表示在图 12. 图(a)对应于挠度, 图(b)对应于挠度的一阶导数, 在这些条纹中可以看到类似的



(a)



(b)

图 12 中心加载受弯圆板的干涉图

(a) 表示挠度 w 的等值线和 (b) 表示 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 的等值线

特点。从上面实验中得到的干涉图也很好的与弹性理论所预期的图样一致。

但是,第一阶导数的条纹基本上没有足够的可见度;因此依靠任何光学技术进一步获得二阶导数是困难的。而在第一个方法中给出了相应于一阶导数的清晰条纹,而且可能用光学方法继续微分。由于不能补偿初始的轻微变形及差的表面光洁度,因此第一种方法只是对于光学平面是合适的,因而限于少量应用。

4. 板的弯曲振动实验

用全息照相来分析表面振动,已经发展了两种技术,即时间平均术^[9]和频闪观测术。在时间平均术中,全息照片底板在比振动周期长的时间内充分曝光。这样,条纹图样的强度正比于第一类零阶贝塞尔函数的平方。因此能得到相同振动幅度的等值线,暗条纹对应于贝塞尔函数的根。对于振动幅度,条纹不是等间距的,并且它的强度很快衰减到零。

另一方面,在频闪观测术中,照明光的断续与板的运动是同步的,在一张全息图上记录振动板的两个状态。这是双光束干涉术的通常方案。条纹的级数正比于振动幅度,在较高级数处的条纹强度并不减低。

金属板的振动是用后一个技术来验证的。实验装置表示在图 13。除了紧接在激光器输出后的遮光装置外,其他均与普通的全息干涉仪是一样的。图中的插画表示了遮光器圆盘的细节。一个沿着圆周有许多等间隔孔的金属盘用作遮光器,由同步马达使之以 3000 转/分的转速转动。它还起着激振板的讯号的传感器作用。通过与照明孔平行的另一列孔的光讯号,具有近似脉冲方波的波形,经电子学的方法转换成正弦讯号。用这个与照明光同步的讯号来激振板。还可移动讯号接