

浙江大学

光学仪器工程学系成立三十周年

紀念論文集

一九八二年四月

总结经验,适应形势,为培养 优秀的工程光学科技干部继续奋斗

浙江大学光学仪器工程学系 党总支委员会
学术委员会

从一九五二年国家首先在我校设置光学仪器专业以来已经三十年了。在这期间由于党的坚强领导,同行的热情支持和同志们的努力,这个专业得到了很大发展。一九六〇年光学仪器专业扩建成全国第一个光学仪器工程学系,六五年经国家科委批准增设了光学仪器中间试验基地,七八年全国科学大会授予我系先进科研集体的光荣称号,八〇年经中国科学院批准成立了光学仪器研究分析。目前我系设有光学仪器、激光技术和仪器、技术摄影仪器和工程三个专业,五个教研室、六个研究室和一个光学仪器中间试验基地,有教职工二百五十余人、学生五百余人、研究生十四人的中等规模的系。三十年来我们为国家输送了一千七百多名大学毕业生和十四名研究生,他们的工作得到了一定的好评,其中有相当一部分已成为工程光学事业和其他事业中的骨干。

在纪念光学仪器专业成立三十周年之际,我们认为只有用二分法来总结历史经验,研究国家和科学发展的新情况、新要求,从而提出发展的方向和奋斗的目标,同心同德共同努力去实现这些目标,这才是最好的纪念!

为什么五十年代、六十年代我系培养出去的工程技术干部能较好地适用工作的需要和得到有关部门比高的评价呢?我们认为:

这是由于党有效的政治思想工作,在贯彻党的教育方针的过程中,使全系师生员工树立了为人民服务的思想、求是实干的作风和工作上的一定抱负。干字当头加上注意总结提高,人就有了希望。

这是由于我系的培养目标和教学计划注意了光学仪器领域年基础的训练,也就是在扎实的必要的基础理论学习后,在光学和机械二方面加强了专业基础、工程设计、总体分析的训练。这样的毕业生就比较容易掌握各种光学仪器的原理,从事设计工作并把握住仪器总的质量。这种把专业基础打得较宽的做法有较大的适应性。

这是由于我系注意了师资质量的提高。我们是通过钻研教材、建立实验室和从事工程设计和科学研究来实现的。一定要使读书和实际工作结合起来才能真正地提高师资质量,从而提高教学质量,同时我们还通过派出去、请进来的办法向兄弟单位学习。目前我系已可开设大学生和研究生课程三十余门,实验一百余个。七八年得全国科学大会奖三个,七九年八一年得省科技一、二等奖八个,八一年承担科研任务二十余项,其中有一些是国家的重点科研项目。参加科研的专职和兼职教师占全系教师的百分之七十以上。

这是由于注意把科研工作放在基础的光学技术方面，在较广的基础上注意有重点发展，这样比较能适应科学发展和教学工作的需要，使学生掌握较宽的专业基础知识。目前我系有一定基础的科研方向为精密光学计量、光学系统设计和测量、薄膜光学的设计和制备、照相仪器和高速摄影。正在发展形成的科研方向为光度色度仪器、激光技术和激光光谱仪器、光学工艺以及光学信息和图象处理技术。

这是由于不断掌握和学习光学领域中的新原理、新技术，能随着科学技术的发展而发展，我们教学、科研和实验工作，不因循守旧固步自封。

最近我们征求了校友们的意见，听取了国内外专家来校参观时提出的建议及有关厂、所、校的意见。我们认识到还有许多不能适应四化和工程光学发展的新形势的方面，急需我们作必要的调整、提高工作，使培养的科技干部能与国家四化建设的需要相适应。

在培养工程光学的科技干部时我们认识到必须考虑光学领域的新发展、新情况。简要地说，激光器的出现使古老的光学面貌一新，出现了蓬勃发展的局面；同时电子技术、半导体技术发展而形成的光电子学及计算机处理信息和图象的技术强烈地推动了光学仪器的不断更新。这样就迫使我们加宽专业基础来适应新形势，也就是在教学计划中要注意充实现代光学、光电技术、激光技术、微处理机和电子计算机应用技术的基础知识。与此同时有必要以提高大学生、研究生的自学能力、独立工作能力为目标逐步改革教学方法，编写相应的具有较高质量的教材、习题体、实验指导书和各种参考书。

然而我国的光学工业的水平离先进国家的差距还比较大，即使在国外大量生产的光学仪器仍以经典的光学、精密机械为基础，因此对这些基础知识的传授和工程训练还是十分重要的，不宜过分削弱。不然就不能为广大的中小型企业输送合适的技术干部。对优秀学生和研究生则应用更多的现代光学、光电技术、计算机技术、激光技术去加宽加深他们的基础，使他们能适应科学研究和研制大型精密光学仪器的需要。

为了达到上述目的就存在着提高、更新师资的任务，要让他们掌握上述新领域的知识，并用它们来解决实际问题的能力，主要的方法是讲述新课、参加科研、派遣出国留学并请学者来校讲学逐步达到。同时有必要改变师资的专业组成，充实物理、电子技术和计算机方面的研究生和大学毕业生，相应地更新教材和实验室。

为了达到培养优秀的工程光学科技干部的目的，加强我系师生员工的政治思想工作仍是至关重要的，要针对思想上存在的问题进行教育，要发动他们议论系里的大事，监督系里各级干部做好工作，各级干部有义务定期地汇报有关工作。要充分发扬民主，及时地把群众创造的经验总结出来，交流开来，从而提高各方面的工作质量和效率。可以预期，只要我们不断努力，再过十年，我们系一定会以更新的面貌出现，也能为国家挑更重一点的担子。

目 录

1. 总结经验, 适应形势, 为培养优秀的工程光学科技干部继续奋斗	
.....	浙江大学光学仪器工程学系党总支委员会, 学术委员会
2. 波面实时分析的数学模式	董大年、杨国光、曹天宁 (1)
3. 用全场法分析散斑图时滤波孔大小对条纹对比度的影响	
.....	龙槐生、倪吉生、陈 军 (9)
4. 利用X射线的干涉作用测定晶格间距以建立长度副标准的原理及装置	
.....	董太和 (14)
5. 用照射型动态莫尔轮廓法对高速旋转体变形进行测量	
.....	吴敏达、倪树槐 (20)
6. 光学仪器中的杂散光问题	王子余 (32)
7. 光学全息照相与信息处理	王润文 (38)
8. 自动记录分光光度计的基本特性	陈捷光 (50)
9. 微调机构设计	孙保定 (57)
10. 转镜式高速摄影机设计中的几个问题	许家隆 (62)
11. 全平衡园轨迹抓片机构	荣志铨 (69)
12. 光学经纬仪上两种新部件剖析	叶世鸿 (77)
13. 我国定点形变连续观测技术的现状与展望	蔡惟鑫 (84)
14. X射线望远镜	陈愈炽 (89)
15. 光源的分光测量与自动光谱辐射计的设计	包学诚 (96)
16. 自动寻找棱镜最小偏向角 (一)	叶盛祥 (101)
17. 红外测温原理与设计	梅建华 (109)
18. 相干光学信息处理系统及其在象质改善中的应用	
.....	戴晓芳、徐桂英 (113)
19. II型光电等高仪光学系统的特点	王兰娟 (126)

20. 一个消色差施密特光学系统·····	陈馨凯 (130)
21. 全息光学元件·····	徐昆贤 (135)
22. 关于光学系统扩散函数的可分性及其应用·····	朱延彬 (141)
23. 多光轴截面反射棱镜组的转象规律·····	虞启珽 (149)
24. 用于细胞显微外科手术的激光微光束·····	邱锦辉 (154)
25. 介绍一种光导纤维式的DJJD-1型激光定向经纬仪·····	骆东淼 (158)
26. 最优化方法在照相机设计中的应用·····	叶可珞 (165)
27. 荧光分析法的新进展·····	林波海 (169)
28. 规一化及组合式设计——发展光学仪器的新方法·····	王善康 (172)
29. 光学零件结构尺寸与工艺性——棱镜外形尺寸注法商讨·····	赵得宏 (178)
30. 宽银幕变形镜头“定焦设计”方法·····	包广森 (182)
31. 海水光学特性与水下摄影物镜设计·····	林金豆 (188)
32. CO ₂ 激光外科装置中的激光和光学问题(一)·····	谢树森 (193)
33. 全息光栅的槽形控制方法·····	祝绍箕 (199)
34. 瞬时温度的测量·····	陈乐璇 (206)
35. 全息波带板·····	周宇海 (211)
36. 2400条/毫米全息平面光栅的研制及其应用·····	郭厚成 (219)
37. 条形双异质结构激光器的强度模拟调制·····	杨成龙 (255)
38. 彩色电视摄象机中有关分光棱镜的问题·····	俞福民 (230)
39. 关于砷化镓红外光源主动式夜视仪的视距估算·····	张云熙 (236)
40. 光学塑料综述·····	陈丽睦 (243)
41. 光刻的衍射极限·····	陈祥桢 (250)

波面实时分析的数学模式

浙江大学 董大年 杨国光 曹天宁

利用光列阵的自扫描与微型计算机的结合,可在激光干涉场中实现波面的实时分析,这种分析对条纹场的相位测定可达到 $\frac{\lambda}{100}$ 的精度。这对传统干涉场的目视与照相数字分析方法是一个根本性的改变,使光学系统的质量达到衍射极限成为可能。

本文对这种波面实时系统的数学模式进行了探讨和分析。指出:对光列阵上每点的光强作傅里叶分析并以随机形式作多次取样平均可以把测量中的大气扰动,外界振动,热变形等多种噪声因素减到最小。利用软件系统自动消除干涉场中的各项误差。快速傅里叶变换(FFT)把波面数据变换成点扩散函数(PSF)和光学传递函数(OTF),最后用存储示波器实时地显示出波面的三维透射图或波面轮廓的等高线。

波面实时系统适合于高精度光学零件与系统的测试,是发展自适应光学的基础与手段。

(一) 波面实时傅里叶分析

光学波面的实时分析是把光程长度按时间函数作线性变化,利用干涉场的正弦讯号作强度内插,在光列阵上测量此正弦讯号的相位,就可实时显示出欲测波面的形状。

对双光束干涉场(图1),设二维参考波面是理想的,用下式表示:

$$W_R(x, y) = a \exp[2ikl] \quad (1)$$

检验波面为:

$$W_T(x, y) = b \exp[2ikw(x, y)] \quad (2)$$

式中: a, b ——是波面的振幅

k ——波数, $k = 2\pi/\lambda$

l ——参考光程长

$w(x, y)$ ——欲测定的波面形状

x, y ——被测点的坐标

参考波与检验波在干涉场中相遇而形成条纹场,条纹场的光强分布为:

$$I(x, y, l) = \langle W_R(x, y) + W_T(x, y) \rangle \langle W_R(x, y) + W_T(x, y) \rangle^* \quad (3)$$

式中 $\langle W_R(x, y) + W_T(x, y) \rangle^*$ 是 $\langle W_R(x, y) + W_T(x, y) \rangle$ 的共轭复数,将(1),

(2)代入(3)式后得到:

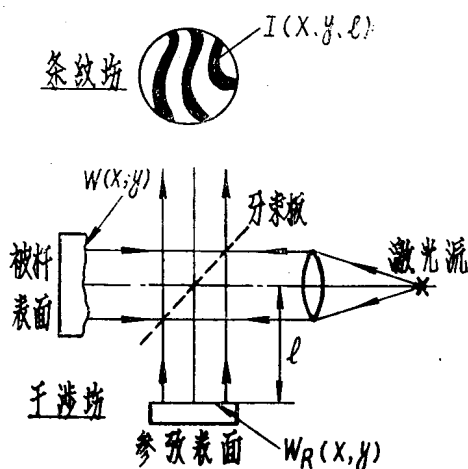


图 1

$$I(x, y, l) = 2 + 2M \cos 2k[w(x, y) - l] \quad (4)$$

式中 $M = 2ab/(a^2 + b^2)$, 是条纹的调制度。

公式(3)说明, 当参考面固定, 条纹场随被检面的形状 $W(x, y)$ 而呈正弦变化。当被检面不变时, 条纹场中的任一点, 其强度是 l 的正弦函数, 当参考面按时间函数变动, 则某一时刻的条纹场分布为:

$$I[x, y, l(t)] = 2 + 2M \cos 2k[W(x, y) - l(t)] \quad (5)$$

按傅里叶分析, 对(5)式可写成⁽¹⁾:

$$I[x, y, l(t)] = a_0 + a_1 \cos 2kl(t) + b_1 \sin 2kl(t) \quad (6)$$

对数字计算机, 应将(6)式在一个周期内取样 n 次, 共取样 p 个周期, 按傅里叶分析可求得其系数:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, l_i) \\ a_1 &= \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, l_i) \cos 2kl_i \\ b_1 &= \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} I(x, y, l_i) \sin 2kl_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

最后, 可求得被检的波面:

$$W(x, y) = \frac{1}{2k} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad (8)$$

在求傅里叶系数 a_1 , b_1 过程中, 是按时间函数线性变动 l_i , 利用光列阵的自扫描获得 $I(x, y)$, 计算机按(7), (8)式求取 $W(x, y)$, 从而实现波面的实时测定。

(二) 二维条纹场的相关

条纹场的目视或照相法测量, 除人差及底片的非线性因素严重影响测量精度外, 主要还有外界的大气扰动, 机械振动与热变形, 外界环境对干涉场的影响通常造成 $\frac{\lambda}{10} \sim \frac{\lambda}{20}$ 的误差, 最大时甚至达到 $\frac{\lambda}{5}$, 这对条纹场的高精度测量是很关键的。对波面的实时测量来说, 大气扰动, 机械振动, 热变形以及光源与检测器的噪声等可认为对条纹场 $I[x, y, l(t)]$ 带来一个噪声项 $n(t)$ 。为了检测出波面信号, 必须将信号和与此信号具有相同载波频率 $2kl(t)$ 的正弦信号的信号噪声脉冲相关, 并在一个长时间(若干个周期)内取随机平均, 光强的时间平均值为:

$$\langle I_1 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I[x, y, l(t)] + n(t) \right\} \cos 2kl(t) dt \quad (9)$$

当噪声项 $n(t)$ 为非光谱纯度时，噪声的影响将趋向于零，其相关积分项成为：

$$\langle I_1 \rangle = M \cos 2kW(x, y) \quad (10)$$

(9)式中的相关积分在正弦信号 $I[x, y, l(t)]$ 与具有相同频率和相位的信号相关时为最大值，因此，(10)式当 $W(x, y) = 0$ 时为最大。由于我们并不知道正弦光强 $I[x, y, l(t)]$ 在一个周期中的相位 $W(x, y)$ ，这样可以与 $n \sin 2kl(t)$ 相同的信号同时相关，从而得到：

$$\langle I_2 \rangle = M \sin 2kW(x, y) \quad (11)$$

最后得到欲测波面的方程式为：

$$W(x, y) = \frac{1}{2K} \tan^{-1} \frac{\langle I_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle} \quad (12)$$

在被检波面 $W(x, y)$ 为一定的情况下，干涉场是 l 的周期函数，对任意干涉场而言，仍可用傅里叶分析来获得条纹场，任一条纹场可表示为：

$$I(x, y, l) = \frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} a_r \cos 2kr, l + \sum_{r=1}^{\infty} b_r \sin 2kr, l \quad (13)$$

式中 r 是傅里叶系数的级次，利用正交系，可以求得⁽²⁾：

$$\left. \begin{aligned} a_r &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2rKl_i \\ b_r &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2rKl_i \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $I_i = I(x, y, l_i)$

$l_i = \frac{i\lambda}{2N}$, $i = 1, 2, \dots, N$, N 是条纹周期内的取样数。

对Twyman—Green干涉系统，仅存在一级条纹，是 $r = 1$ 的情况。这种系统中高阶系数仅表现为测量区以外的噪声。因此可设条纹是无噪声的。将(14)式代入(1)、(2)式来精确表徵，从而得到：

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= M \cos 2KW(x, y) \\ b_1 &= M \sin 2KW(x, y) \\ a_r &= b_r = 0, \quad r > 1, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

用(15)计算的条纹轮廓是最小二乘法所获得的最好拟合,用通讯理论来说,这相当于中心通过一次谐波狭带滤波器,从而得到:

$$W(x, y) = \frac{1}{2K} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b_1}{a_1} = \frac{1}{2K} \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \frac{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2Kl_i}{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2Kl_i} \right\} \quad (16)$$

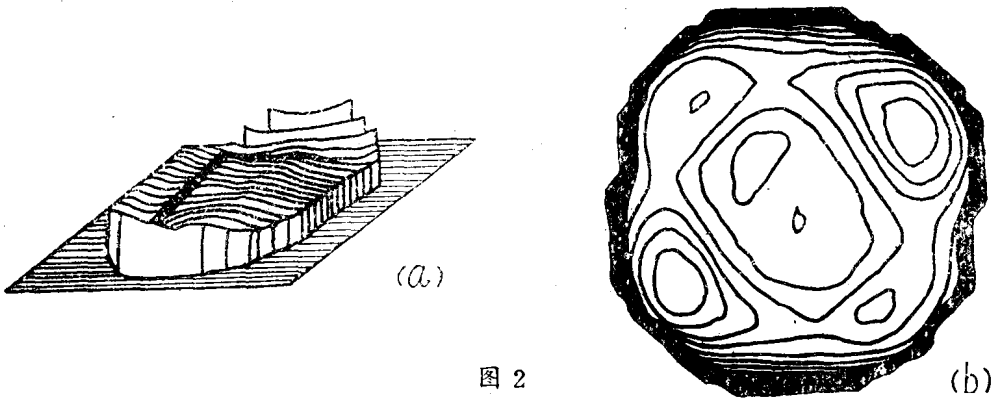


图 2

此式说明,在被验点 (x, y) 上的波面 $W(x, y)$ 的相对相位是由该点的条纹光强函数的 N 个测定值计算而得,每个 l 又有 N 个不同的相位点。这种将光列阵上光强以随机形式多次取样平均后就能使外界干扰和仪器噪声的影响降到最小。对二维被验面来说条纹场用 $N \times N$ 矩阵就可实时显示出被测表面的轮廓,如图2所示,图中(a)是波面的三维斜视图,(b)是被验面轮廓的等高线,等高线的间隔为 $\frac{\lambda}{20}$,

(三) 波面随机平均处理

公式(16)的正确性在于不存在附加的衍射效应,但由于光学系统孔径的存在,孔径边界上的Fresnel衍射是无法避免的,除非孔径在光列阵平面上。因此,在利用(16)式作波面平均处理时,首先要确定孔径,显然,孔径内的点比孔径外的点有更大的调制度,这是用计算机决定孔径的一种很好的方法。由公式(4),理论上调制度 M 应为:

$$M = \frac{2ab}{(a^2 + b^2)}$$

对双光束干涉而言,按(16)式,令

$$\frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} = \cos \varphi$$

$$\frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} = \sin \varphi$$

} (17)

则(6)式可写成:

$$\begin{aligned} I(x, y, l) &= a_0 + \sqrt{a_1^2 + b_1^2} [\cos\varphi \cos 2Kl + \sin\varphi \sin 2Kl] \\ &= a_0 + \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cos(\varphi - 2Kl) \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} M &= \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{a_0 + \sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \\ &= \frac{\left[\left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2Kl_i \right)^2 + \left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2Kl_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{1 + \left[\left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2Kl_i \right)^2 + \left(\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2Kl_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (18) \end{aligned}$$

通常 $M \leq 0.15-0.2$ 的阈值时, 则认为是孔径外的点。

随机求和的方程式(16)要达到理想的测定目的, 要求数据无限地累积, 这时波面误差大致按 $N^{-\frac{1}{2}}$ 的倍数减小, 但有一个前提, 必须 l_i 与 I_i 在验测周期内应该是相对稳定和正确的。如果有小的漂移, 那么波面在作平均处理时必须补偿或修正这个漂移, 漂移的通常表现是位移, 倾斜与离焦。

当系统中存在位移, 倾斜, 离焦等误差因素时, 在孔径内任一点 (x_i, y_i) 上的波面 $W(x_i, y_i)$ 其方程可写成:

$$W(x_i, y_i) = W_0(x_i, y_i) + A + Bx_i + cy_i + D(x_i^2 + y_i^2) \quad (19)$$

式中 $W_0(x_i, y_i)$ ——无位移, 倾斜, 离焦等因素时的理想波面。

A, B, C, D ——表微变动因素大小的系数, A, B, C 表示平面上的变动大小, D 表示离焦的大小。

对二维条纹场, 设

$$g(A, B, C, D) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[W(x_i, y_j) - (A + Bx_i + cy_j) - D(x_i^2 + y_j^2) \right]^2 \quad (20)$$

则由

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial A} &= 0 \\ \frac{\partial g}{\partial B} &= 0 \\ \frac{\partial g}{\partial C} &= 0 \\ \frac{\partial g}{\partial D} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

可以建立四个方程式, 解出A、B、C、D四个系数, $W(x_i, y_i)$ 由(16)式求得, 因而由(20), (21), (16)及(19)式就可以求出无位移, 倾斜, 离焦等因素的波面, 也就是说: 用这种波面的实时处理可以自动修正仪器的安装误差。

(四) 波面的绝对校正

任何测量都是比较, 波面实时测定仍是被检面与参考面的比较, 因此, 在导出公式时必须假定(1)式的 $W_R(x, y)$ 是理想的。也就是说用(8)式或(16)式计算出来的被验波面的绝对精度最多和参考表面一样好。从而对参考面的绝对质量必须提出极高要求, 这是制造一般干涉仪器的困难所在。

本文叙述的波面实时测量系统应用一种绝对校正方法⁽³⁾, 这种方法已证明完全适用于实时干涉系统⁽⁴⁾。绝对校正法的数学模式是通过解算三种形式的波面方程来确定参考面及干涉系统的误差, 从而保证被测面的绝对精度。

设 $W_1(x, y)$ 是被验表面在干涉场中一个检验位置图3(a)上的波面, 用(16)式可以获得。这是第一位置的波面。 $W_2(x, y)$ 是第二位置的波面, 它代表被检表面相对光轴旋转180°后, 如图3(b)所测得的波面。第三位置是图3(c)波面 $W_3(x, y)$ 是被检表面的顶点放置在干涉场准直物镜的焦点上获得的。引入如下符号, 来代表图3的测量过程, 则

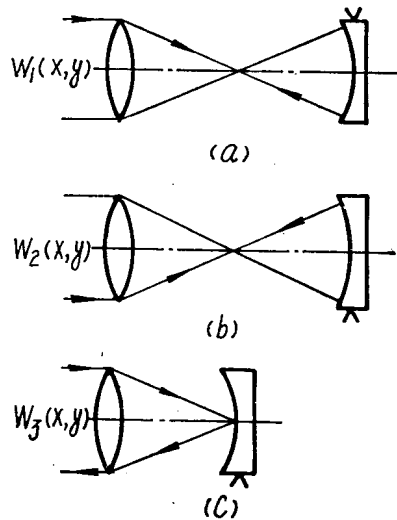


图 3

$$\left. \begin{aligned} W_1(x, y) &= W_R^0(x, y) + W_T^0(x, y) + W_S^0(x, y) \\ W_2(x, y) &= W_R^0(x, y) + W_T^0(x, y) + W_S^{\pi}(x, y) \\ W_3(x, y) &= W_R^0(x, y) + \frac{1}{2} [W_T^0(x, y) + W_T^{\pi}(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中

$W_R^0(x, y)$ ——参考光路对总波面的影响,

$W_T^0(x, y)$ ——检验光路对总波面的影响,

$W_S^0(x, y)$ ——被检表面对总波面的影响,

θ ——被检表面的位置, 即 $\theta = 0$ 或 π 。

当干涉场中完全没有误差, 即波面是理想的, 那么, $W_R^0(x, y) = 0$, $W_T^0(x, y) = 0$, 现在存在误差, 那么绝对波面 W_S^0 可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} W_4(x, y) &= \frac{1}{2}[W_1(x, y) + \overline{W}_2(x, y)] \\ &= \frac{1}{2}[W_R^0(x, y) + W_R^\pi(x, y) + W_T^0(x, y) + W_T^\pi(x, y)] + W_S^0(x, y) \\ W_5(x, y) &= \frac{1}{2}[W_3(x, y) + \overline{W}_3(x, y)] + \frac{1}{2}[W_R^0(x, y) + W_R^\pi(x, y) + \\ &\quad W_T^0(x, y) + W_T^\pi(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中 $\overline{W}(x, y)$ 表示旋转 π 弧度后等效的相位列阵变换波面。

对(23)式, 使 = 式相减就获得波面的绝对值 $W_S^0(x, y)$:

$$\begin{aligned} W_S^0(x, y) &= W_4(x, y) - W_5(x, y) \\ &= \frac{1}{2}[W_1(x, y) + \overline{W}_2(x, y) - W_3(x, y) - \overline{W}_3(x, y)] \end{aligned} \quad (24)$$

在计算机作(24)式运算时, $W_1(x, y)$ 、 $W_2(x, y)$ 、 $W_3(x, y)$ 均应是消除位移, 倾斜与离焦因素后的波面。按(24)式作三种波面的绝对校正时, 对一种数值孔径, 参考面作一次测定后数据存储在计算机内, 用软件来控制, 以后的检验就不再作上述测定处理。

(五) 从瞳函数求取OTF

将光组(镜头)置于干涉场中, 利用光组光瞳处的条纹场, 用上述实时波面分析方法, 就可以评价光组的象质。

光组光瞳处的波面是光组质量的有效指标, 点扩散函数(PSF)和光学传递函数(OTF)是应用中的质量指标。对PSF, 可用光组瞳函数 $W(x, y)$ 的傅里叶变换来求取, 在象空间域有:

$$I(x_1', y') = A(x', y') A^*(x_1', y') \quad (25)$$

式中 x', y' ——象空间的座标

$A^*(x', y')$ —— $A(x', y')$ 的共轭复数

而 $A(x', y') = F \left\{ W(x, y) \right\}$

$$= \int W(x, y) \exp[-2\pi i(xx' + yy')] dx dy \quad (26)$$

PSF的傅里叶反变换就是复数值的OTF:

$$\theta(f_x, f_y) = F^{-1} \left\{ I(x', y') \right\} \quad (27)$$

这就得到光组的调制传递函数(MTF)与相位传递函数, 如图(4)所示。图4中(a)是光组的瞳函数 $W(x, y)$, (b)是(a)的傅里叶变换, 即PSF, (c)是光学传递函数的调制MTF, (d)是OTF的相位。对(21)、(26)、(27)式的计算是在计算机上作快速傅里叶变换(FFT)得到。

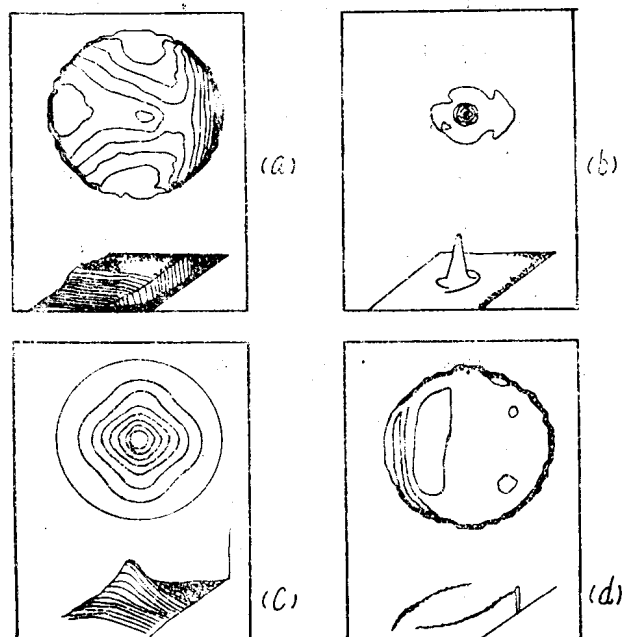


图 4

(六) 期 望

波面的实时测定已在双光路和同光路干涉场中实现^{(5)·(6)}。当采用 32×32 的光列阵和小型计算机(8K)计算时,大约一分钟内可把1024个被检波面的数据点用斜视图或等高线轮廓显示出来,精度达 $\frac{\lambda}{100}$ 。这种实时显示的形式,特别适合于工厂,研究部门的生产现

场,当增加非接触面形曲率半径测定装置时,曲率半径的测量精度可达百万分之几(ppm),这给光学设计者以更大的选择余地。

波面实时分析法的高灵敏度性,特别是测定数据与干涉场的误差无关,而且,如果进一步将被检波面的数据反馈送入光学设计的程序中去,可获得光组参数的实际最优化值。这是设计,装配与检验接近或达到衍射极限的光学系统所期望的方法。

波面实时分析系统更是开展自适应光学研究的手段。只有实时的感知发射和接收光讯号中的波面畸变,才能反馈去控制光学另件或系统的位置和形状,实时地纠正这种波面畸变。这是当前光学领域中可以预见到的新领域,本文阐叙的实时感知系统将期望在这个新领域中获得发展。

用全场法分析散斑图时滤波孔大小 对条纹对比度的影响

浙江大学 龙槐生 倪吉生 陈 军

散斑测量技术有着广泛的应用,如图1表示出测量物体面内应变的实验装置概图,其中 L_1 是扩束器,它使得整个物体表面被照明,物体0是一个具有光学粗糙表面的物体,照相物镜 L_2 对物体0调焦,全息底片处于象平面上,当激光束照明物体表面时,由于激光的高度相干性,在象平面上形成一个复杂的散斑图案,为了测量物体的应变,需要在物体的应变前后进行两次曝光,设应变前象面上散斑图案的光强分布为 $I(x,y)$,应变后,物体上各点产生了不同的位移,位移量为 $\Delta x'$ 、 $\Delta y'$,第二次曝光时,象面上光强的分布为 $I(x+\Delta x, y+\Delta y)$,

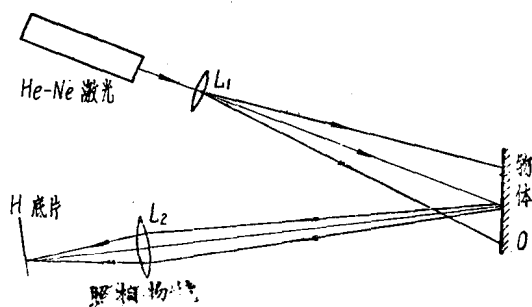


图 1 散斑照相法测物体面内位变的实验装置简图

其中 $\Delta x = M\Delta x'$ 、 $\Delta y = M\Delta y'$ (M 为成象系统的放大率),为了知道物体的应变情况,需对二次曝光的底片纪录的图案进行分析,其中空间滤波全场观察法是比较好的一种方法,它的图形是显示物面上的某方向上的等位移条纹,因而能对物体的应变情况一目了然,全场观察法分析中,要用到空间滤波器,它的结构如图2所示。本文主要是对空间滤波器中的滤波孔的大小对显示出来的条纹的对比度的影响作一分析。

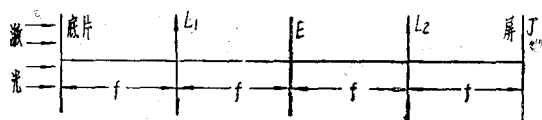


图 2 空间滤波器的结构简图, E为滤波孔

现在假设全息底片的振幅透过率与曝光量的关系处于线性段,则当平行光束照射底片H

时, 它的透过率的表达式为

$$t = A - B [I(x, y) + I(x + \Delta x, y + \Delta y)] \quad (1)$$

$$t = A - B [I(x, y) \otimes [\delta(x, y) + \delta(x + \Delta x, y + \Delta y)]]$$

这里 A, B 是二个常数, 与底片有关。

透射光通过透镜 L_1 后, 在 L_1 的焦平面上得到透过率 t 的频谱分布, 这时, 谱平面上光的振幅分布 $\tilde{t}$ 可用下式表示。

$$\tilde{t} = A\delta(u, v) - B\tilde{I}(u, v)[1 + l^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(u\Delta x + v\Delta y)}] \quad (2)$$

这儿, u 与 v 是谱平面上的空间坐标, 现在在谱平面上设置滤波方孔后, 孔的中心为 U_0, V_0 。为方便起见 设 $U_0 = 0$ 即方孔位于 v 轴上 矩形孔沿 v 轴长 $2b$, 沿 u 轴长 $2a$, 那末在谱平面上透过滤波矩形孔的振幅分布 u_f 由下式表示

$$\begin{aligned} u_f &= -B\tilde{I}(u, v) \left[1 + l^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(u\Delta x + v\Delta y)} \right] \text{rect}\left(\frac{u}{2a}\right) \text{rect}\left(\frac{v - v_0}{2b}\right) \\ -u_f &= +B\tilde{I}(u, v) \text{rect}\left(\frac{u}{2a}\right) \text{rect}\left(\frac{v - v_0}{2b}\right) + B\tilde{I} \text{rect}\left(\frac{u}{2a}\right) \text{rect}\left(\frac{v - v_0}{2b}\right) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(u\Delta x + v\Delta y)} \end{aligned} \quad (3)$$

这里需要注意的是滤波矩形孔的位置离坐标原点不能太远, 它应位于谱平面的衍射晕内 通过滤波孔的光通过 L_2 再进行一次付里埃变换, 最后在像平面 J 上得到振幅分布 $\tilde{u}_f$ 为

$$\begin{aligned} \text{应用常用函数记号} \quad & \left\{ \begin{array}{l} \text{sinc}(x) = \frac{\sin \pi x}{\pi x} \\ \text{rect}(x) = 1 \text{ 当 } |x| < \frac{1}{2} \end{array} \right. \quad \sim \text{表示付氏变换} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\tilde{u}_f &= +BI(x, y) 2a \text{sinc}\left(\frac{2xa}{f\lambda}\right) 2b \text{sinc}\left(\frac{2yb}{f\lambda}\right) e^{-j\frac{2\pi}{f\lambda}(u_0 y)} \\ &+ BI(x, y) 2a \text{sinc}\left[\frac{2a(x - \Delta x)}{f\lambda}\right] 2b \text{sinc}\left[\frac{2b(y - \Delta y)}{f\lambda}\right] e^{-j\frac{2\pi}{f\lambda}[u_0(y - \Delta y)]} \\ -\tilde{u}_f &= 4abBI(x, y) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(u_0 y)} \left[\text{sinc}\left(\frac{2xa}{f\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{2yb}{f\lambda}\right) \right. \\ &\left. + \text{sinc}\left(\frac{2a}{f\lambda}(x - \Delta x)\right) \text{sinc}\left(\frac{2b}{f\lambda}(y - \Delta y)\right) e^{j\frac{2\pi}{f\lambda}u_0 \Delta y} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

上式可以这样解释, 若有一照相机拍摄一粗糙物体在该物体上取一固定点, 变形前成像在底片 H 上的 A 点 (坐标为 x_0, y_0), 物体变形后, 成像于同一底片 H 上的 B 点 (坐标为 $x_0 - \Delta x, y - \Delta y$) 将这张底片放在图 2 上, 则 A, B 二点在平面 J 上各形成衍射斑, A 点在象面 J 上成衍射斑

$$\text{sinc}\left[\frac{2a}{f\lambda}(x-x_0)\right] \text{sinc}\left[\frac{2b}{f\lambda}(y-y_0)\right]$$

而B点在像面J上形成另一衍射斑

$$\text{sinc}\left[\frac{2a}{f\lambda}(x-x_0+\Delta x)\right] \text{sinc}\left[\frac{2b}{f\lambda}(y-y_0+\Delta y)\right]$$

这两个衍射斑的中心各位于A与B的几何象点上,因成倒象其坐标为 $(-x_0, -y_0)$
 $(-x_0+\Delta x, -y_0+\Delta y)$,相互分开的距离为 $\Delta s = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$ 。因为用激光照明A与B二点,所以它们生成的衍射斑是相干的,它们的位相差是

$$\left(\frac{2\pi\Delta y}{f\lambda}u_0\right), \text{当 } \frac{2\pi\Delta y}{f\lambda}u_0 = 2N\pi \text{ 时 } \exp(j\frac{2\pi}{f\lambda}u_0\Delta y) = 1 \quad N = 1, 2$$

二个衍射斑干涉的结果相互加强,所以像面J上的这些位置是亮的。公式(4)的I表示底片H的散斑场的强度分布。而卷积即表示底片H上每一点成像在J上都形成二个衍射斑;而这二个衍射斑的干涉结果,有些位置加强,有些位置减弱,加强的条件为

$$\frac{2\pi\Delta y}{f\lambda}u_0 = 2N\pi \dots (5) \quad \frac{f\lambda}{\Delta y} \text{ 表示条纹在 } u \text{ 方向的间隔所以 } N \frac{f\lambda}{\Delta y} = u_0 \text{ 表示矩形孔中心}$$

为亮条纹。而 Δy 为AB两散斑沿y方向的间距。若亮的条纹通过滤波孔E,则必须 $N \frac{f\lambda}{\Delta y} = u_0$ 。此即公式(5)的物理意义。由另一方面讲,在频谱面上,亮的干涉条纹通过滤波孔E,则在平面J上两个衍射斑相互加强,这些位置是亮的。若在频谱面上杨氏条纹的黑纹通过滤波孔E,则在平面J上的二个衍射斑位相差 180° ,相互抵销,所以这些位置是黑的。由上可看出滤波孔E位于亮纹上,则通过孔的能量较多。若滤波孔E位于暗纹上,则通过孔的能量就少,所以,我们亦可以通过滤波孔的能量多少来决定平面J上成像点的亮度。由这一点出发我们做了下面的实验,这张照片是这样得到的,被空间滤波孔分析的是一张可转动园盘的两次曝光底片,位于谱平面的空间滤波器是一径向的细长条形缝形孔缝长10m.m.宽1m.m它的中心距园盘中心14m.m而图3C这张照片是在像面J上拍摄得到的,园盘物体和滤波孔与像面上的条纹见图3。园盘上G与H二点距中心等远,园盘下底部G点虽然位移量的

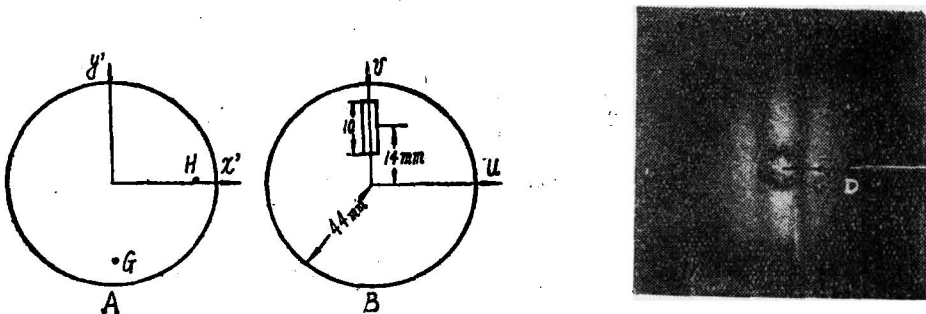


图3: A)可转动的园盘,作为物体。

B)位于谱平面上的长条形径向滤波孔,该园表示谱平面上的衍射率。

C)用图(B)的空间滤波孔在像面J上得到的照片。

大小与园周上H点的相同，但方向不同。由于滤波孔的衍射斑在水平方向（x方向）上较大，虽然二衍射斑有些义开，但两衍射斑的重合部分的条纹仍然清晰。在H点的位移是垂直方向（y方向）的，由于滤波孔的衍射斑在垂直方向很小，所以即使滤波孔的二衍射斑在垂直方向上叉开的距离与G点在水平方向叉开的距离相同，但两衍射斑重合部分小条纹的对比已降到看不清条纹的地步。

下面从另外一个角度来分析一下图3C中光强沿X轴的分布情况。由于二次曝光的被分析的底片上X轴上各点的散斑的位移方向与 v_0 方向一致，故 $\cos(\frac{2\pi}{f\lambda}v_0\Delta y) = 1$ 且位移的大小与x成正比，图象中心为零，现在设底片X轴上某处一个散斑的位移量为 Δy ，则在不考虑谱平面上衍射晕内光强分布的不均匀性的近似条件下，底片上二个散斑在谱平面上形成的杨氏条纹的强度分布为 $\cos^2(Kv)$ ，其中 $K = \frac{\pi\Delta y}{\lambda f}$ ，（这里 $\Delta X = 0$ ），这时，通过长条形滤波孔的能量为 $W = \int_0^{10} \cos^2(Kv)dv$ ，这些能量由空间滤波孔的第二个透镜会聚到象平面上一个很小的范围内，这个范围就是滤波孔在像平面的二个衍射斑。这样，像平面上光强沿X轴的分布为 $I = \int_0^{10} \cos^2(Kv)dv$ ，这里K也是 $K = \frac{\pi\Delta y}{\lambda f}$ ， $\Delta y = \theta x$ ， θ 为园盘的转角。

若谱平面上杨氏条纹亮纹在长条状滤波孔的中心时，积分可得

$$I = \frac{2}{K} \left[\frac{1}{2}(kv) + \frac{1}{4} \sin(2kv) \right] \Big|_0^5 = 5 + \frac{1}{2k} \sin(10k) \quad (6)$$

若谱平面上杨氏条纹的暗纹在长条状滤波孔的中心时，则 $I = \frac{2}{K} \int_0^5 \sin^2(kv) d(kv)$

$$= \frac{2}{K} \left[\frac{1}{2}(kv) - \frac{1}{4} \sin(2kv) \right] \Big|_0^5 = 5 - \frac{1}{2k} \sin(10k) \quad (7)$$

下面计算几个不同的K值。

$K = 0$ ，谱平面上分布 $\cos^2(kv) = 1$ ，即均匀分布 $I = 10$ ， $\Delta y = 0$ 。

$K = \frac{\pi}{28}$ ，谱平面上分布 $\cos^2(\frac{\pi}{28}v)$ 这时暗纹在中心 $I = 1$ $\Delta y = 7.5\mu$

$K = \frac{\pi}{14}$ ，谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{\pi}{14}v)$ 这时亮纹在中心 $I = 7.12$ $\Delta y = 15\mu$

$K = \frac{3\pi}{28}$ ，谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{3\pi}{28}v)$ 这时暗纹在中心， $I = 5.34$ $\Delta y = 22.5\mu$

$K = \frac{\pi}{7}$ 谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{\pi}{7}v)$ 这时亮纹在中心 $I = 3.92$ $\Delta y = 30\mu$

$K = \frac{5\pi}{28}$ 谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{5\pi}{28}v)$ 这时暗纹在中心 $I = 5.44$ $\Delta y = 37.5\mu$

$K = \frac{3\pi}{14}$ ，谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{3\pi}{14}v)$ 这时亮纹在中心 $I = 5.32$ $\Delta y = 45\mu$

$K = \frac{7\pi}{28}$ 谱平面上分布为 $\cos^2(\frac{\pi}{4}v)$ 这时暗纹在中心 $I = 4.36$ $\Delta y = 52.5\mu$