



# 现代光测力学 与图像处理

杨福俊 何小元 陈陆捷◎编著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

# 现代光测力学与图像处理

杨福俊 何小元 陈陆捷 编著



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

## 图书在版编目(CIP)数据

现代光测力学与图像处理/杨福俊,何小元,陈陆捷编著. —南京:东南大学出版社, 2015. 12

ISBN 978 - 7 - 5641 - 6262 - 7

I. ①现… II. ①杨…②何…③陈… III. ①光测力学②图象处理 IV. ①O348.1②TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 003307 号

## 现代光测力学与图像处理

---

出版发行 东南大学出版社

地 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

经 销 全国各地新华书店

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 700 mm×1000 mm 1/16

印 张 11.5

字 数 221 千

版 次 2015 年 12 月第 1 版

印 次 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 6262 - 7

定 价 28.00 元

---

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830。

# 前 言

计算机图像处理技术和激光干涉测量等方法的迅速发展,使得实验力学特别是光测实验力学除了应用在传统结构与材料力学性能测量外,在微纳电子机械系统、生物力学性能等领域具备了前所未有的解决问题的能力,充分体现了现代光测力学方法非接触、灵敏度高、全场测量等优点,而计算机与图像处理技术实现了光测力学数据采集的自动化以及图像数据海量处理的实时化、自动化和结果的可视化,提高了实验效率和精度。

本书主要内容分为两篇:第一篇为现代光测力学技术共9章,第一章是光测力学的预备知识,简明扼要地介绍了测量技术中使用的光学原理与现象。第二~七章结合现代光测技术发展历史,系统介绍以光波干涉为基础的,固体实验力学中广泛使用的,纳米、亚微米级的离面变形测量精度的全息干涉、牛顿条纹和散斑图干涉,以及适合于面内变形测量的云纹干涉和动态力学行为测试的激光多普勒频移技术等;第八、九章为非干涉光学测量技术,包括第八章的具有微米、亚毫米级的面内与离面变形测量精度的几何云纹技术,以及第九章介绍当前最流行的、与计算机图像处理技术密切相关的,测试精度从纳米级至毫米级甚至米级,应用领域最为广泛的测量方法——数字图像相关技术。第二篇为数字图像处理技术,包括第十章图像处理技术基础及第十一章专门针对光测力学干涉条纹计算机自动处理的条纹图相位解调技术与相位去“包裹”理论及方法等。第十二章专门介绍本书的合作者新加坡技术与设计大学机械系陈陆捷博士与课题组联合开发的光测力学图像处理软件平台的有关功能。

本书结合作者多年教学、科研经验和近年来国内外发展的最新研究成果,力求用简明扼要的语言及浅显精炼的数学公式向读者介绍现代光测力学的测量原理和实验技术,并列举相应的应用实例;不同于国内其他同类书籍之处就是本书在系统介绍光测力学图像处理技术与方法之外,为读者介绍并免费提供作者编写的图像处理及图形处理试用软件。

本书可作为高等院校工程力学、机械工程等专业的高年级本科生和研究生实验力

学课程光测部分的教材,也可供材料科学、生命科学、仪器仪表专业的研究人员和技术人员参考。

本书由杨福俊、何小元、陈陆捷主编,所附的光测力学图像处理程序由现为新加坡技术与设计大学的陈陆捷博士主体开发并通过互联网提供免费试用程序下载。参加本书编写工作的,或提供有益帮助的还有东南大学工程力学固体力学专业已毕业的孙伟、陈凡秀、朱飞鹏、史红健和戴美玲博士,戴维斯与卢位昌硕士等。

作者

2015年3月于南京东南大学

# 目 录

## 第一篇 现代光测力学技术

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 光学基础知识 .....          | 2  |
| 1.1 光波 .....              | 2  |
| 1.2 光波的共线干涉 .....         | 3  |
| 1.3 光程差和干涉仪的基本结构 .....    | 4  |
| 1.4 干涉条纹 .....            | 6  |
| 1.5 双光束斜射干涉条纹特征 .....     | 7  |
| 1.6 光的衍射 .....            | 8  |
| 1.7 光的偏振 .....            | 9  |
| 1.8 双折射 .....             | 11 |
| 1.9 凸透镜 .....             | 12 |
| 1.10 激光 .....             | 12 |
| 1.11 激光散斑 .....           | 13 |
| 第二章 全息及数字全息干涉技术 .....     | 16 |
| 2.1 引言 .....              | 16 |
| 2.2 光学全息图记录与重现 .....      | 16 |
| 2.3 数字全息图的重现方法 .....      | 19 |
| 2.4 全息干涉与位移测量 .....       | 21 |
| 第三章 牛顿条纹与微翘曲测量 .....      | 25 |
| 3.1 牛顿条纹 .....            | 25 |
| 3.2 牛顿条纹的形成 .....         | 25 |
| 3.3 牛顿条纹法的测量装置 .....      | 26 |
| 3.4 应用测试 .....            | 27 |
| 第四章 迈克尔逊干涉仪与离面变形的测量 ..... | 29 |
| 4.1 迈克尔逊和他的实验 .....       | 29 |
| 4.2 迈克尔逊干涉仪 .....         | 29 |

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 4.3 测量离面变形的激光散斑干涉装置 .....              | 31 |
| <b>第五章 剪切散斑干涉技术</b> .....              | 35 |
| 5.1 剪切与光学剪切实现方法 .....                  | 35 |
| 5.1.1 基于迈克尔逊干涉光路的剪切散斑图干涉方法 .....       | 36 |
| 5.1.2 基于光楔剪切成像的剪切散斑图干涉方法 .....         | 37 |
| 5.1.3 基于沃拉斯顿棱镜剪切成像的剪切散斑图干涉方法 .....     | 38 |
| 5.2 剪切散斑图干涉条纹的形成原理 .....               | 39 |
| 5.3 剪切散斑图干涉技术应用简介 .....                | 41 |
| <b>第六章 云纹干涉与散斑图干涉技术——面内变形的测量</b> ..... | 44 |
| 6.1 衍射光栅 .....                         | 44 |
| 6.2 云纹干涉法测量面内位移 .....                  | 46 |
| 6.3 基于散斑图干涉方法的面内位移测量 .....             | 50 |
| <b>第七章 激光多普勒干涉技术与振动测量</b> .....        | 52 |
| 7.1 多普勒频移理论 .....                      | 52 |
| 7.2 光学多普勒频移的测量 .....                   | 54 |
| 7.3 运动方向的确定 .....                      | 56 |
| 7.4 振动模态的散斑图干涉测量技术 .....               | 60 |
| <b>第八章 光学非干涉测量(一)——几何云纹法</b> .....     | 65 |
| 8.1 几何云纹的形成 .....                      | 65 |
| 8.2 平面几何云纹条纹与面内变形的关系 .....             | 67 |
| 8.2.1 纯拉压变形 .....                      | 67 |
| 8.2.2 纯剪切变形 .....                      | 69 |
| 8.2.3 平面应变的测量与分析 .....                 | 70 |
| 8.3 影栅云纹法与离面变形及三维形貌测量 .....            | 74 |
| 8.4 栅线投影三维形貌测量方法 .....                 | 77 |
| 8.5 投影栅条纹相位的解调 .....                   | 79 |
| 8.6 栅线投影系统的标定方法 .....                  | 82 |
| 8.6.1 基于两平面的等相位坐标法 .....               | 82 |
| 8.6.2 横向标定原理 .....                     | 85 |
| <b>第九章 光学非干涉测量(二)——数字图像相关方法</b> .....  | 86 |
| 9.1 平面二维变形测量原理 .....                   | 87 |
| 9.2 相关搜索 .....                         | 88 |
| 9.2.1 粗细搜索法 .....                      | 89 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 9.2.2 十字搜索法 .....           | 89  |
| 9.2.3 牛顿-拉斐逊迭代搜索法 .....     | 89  |
| 9.3 亚像素插值 .....             | 90  |
| 9.3.1 亚像素灰度插值 .....         | 91  |
| 9.3.2 相关系数的亚像素曲面拟合、插值 ..... | 92  |
| 9.3.3 基于梯度的亚像素位移算法 .....    | 93  |
| 9.4 数字图像相关测量散斑制备要点 .....    | 94  |
| 9.5 二维图像相关测量技术的应用 .....     | 94  |
| 9.6 基于双相机的三维图像相关测量技术 .....  | 99  |
| 9.6.1 双目立体视觉原理 .....        | 99  |
| 9.6.2 双目立体视觉成像模型 .....      | 100 |
| 9.6.3 双目立体视觉成像系统标定 .....    | 101 |

## 第二篇 光测力学中的图像处理技术

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第十章 图像处理技术基础 .....               | 106 |
| 10.1 图像处理概述 .....                | 107 |
| 10.2 数字图像的获取 .....               | 107 |
| 10.3 数字图像处理方法 .....              | 107 |
| 10.4 图像处理中的正交变换——离散傅里叶变换 .....   | 109 |
| 10.5 图像增强 .....                  | 111 |
| 10.5.1 基于空间域的图像增强方法 .....        | 111 |
| 10.5.2 基于频域的图像增强 .....           | 114 |
| 第十一章 条纹图条纹相位的解调技术 .....          | 115 |
| 11.1 相移技术 .....                  | 115 |
| 11.2 相移技术实现方法 .....              | 117 |
| 11.2.1 时间相移技术 .....              | 117 |
| 11.2.2 空间相移技术 .....              | 121 |
| 11.2.3 载波调制条纹的相位解调 .....         | 122 |
| 11.3 单幅载波调制条纹的傅里叶变换解调相位 .....    | 123 |
| 11.4 不连续体表面形貌测量问题中的相位解调 .....    | 125 |
| 11.5 条纹正则化处理技术 .....             | 127 |
| 11.5.1 统计滤波 .....                | 127 |
| 11.5.2 条纹图的条纹方位场和方向场的估计与调整 ..... | 129 |
| 11.5.3 条纹空间频率场的估计与调整 .....       | 130 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 11.5.4 应用实例 .....              | 130 |
| 11.6 相位“去包裹”技术 .....           | 133 |
| 11.6.1 空域相位解包裹算法 .....         | 133 |
| 11.6.2 时域相位解包裹算法 .....         | 134 |
| 11.7 数字采样云纹法 .....             | 136 |
| 11.7.1 基本原理 .....              | 136 |
| 11.7.2 误差分析 .....              | 138 |
| 11.7.3 误差补偿 .....              | 139 |
| 11.7.4 补偿方法 .....              | 142 |
| <b>第十二章 光测力学图像处理软件平台</b> ..... | 144 |
| 12.1 跨平台图像处理程序——UU .....       | 144 |
| 12.1.1 图像采集模块的功能与使用方法 .....    | 145 |
| 12.1.2 图像导入与批处理操作功能 .....      | 148 |
| 12.1.3 图像处理模块 .....            | 151 |
| 12.1.4 光测控制与图像处理模块 .....       | 154 |
| 12.1.5 图形与文本工具 .....           | 157 |
| 12.1.6 多字节图像的导入 .....          | 158 |
| 12.2 跨平台数值数据渲染程序——Fig .....    | 159 |
| 12.2.1 图形的融合 .....             | 159 |
| 12.2.2 直方图图形显示 .....           | 160 |
| 12.2.3 平面曲线图形显示 .....          | 162 |
| 12.2.4 三维基本图形元素图的绘制 .....      | 163 |
| 12.2.5 二维、三维图形的渲染 .....        | 164 |
| 12.2.6 立体图形的渲染 .....           | 166 |
| 12.2.7 程序 Fig 自定义文件格式 .....    | 167 |
| <b>参考文献</b> .....              | 171 |
| <b>致谢</b> .....                | 173 |

# 第一篇

---

## 现代光测力学技术

# 第一章 光学基础知识<sup>①</sup>

## (Chapter 1 Basic of Optics)

### 1.1 光波

光是一种物质形态,是可见的能量辐射。解释光的本质有两种理论:波动理论和微粒理论(量子力学)。光的波动理论是菲涅耳(Fresnel A J)首先建立的,而麦克斯韦(Maxwell J C)的电磁理论进一步证明了光波是电磁波的一种,它可用两个相互垂直并且都垂直于波的传播轴的矢量来描述。这两个波矢量分别是电矢量  $E$  和磁矢量  $H$ 。波的振动方向与传播方向相互垂直,所以光波是横波(如示意图 1-1)。光测实验力学所利用的大多数现象,包括反射、折射、干涉和偏振等光学现象都可以通过波动理论来预测和解释。而量子模型认为:光是由名叫光子的能量束组成的,光子的产生和表现可以由统计力学来预测;光子具有波和粒子特性。利用光的粒子理论可以解释如光电效应、激光和摄影等现象,基于这一点来检测和产生光,这对光学测量方法同等重要。当然我们并不需要成为量子力学的专家就能使用水银灯、激光器或者 CCD 相机。

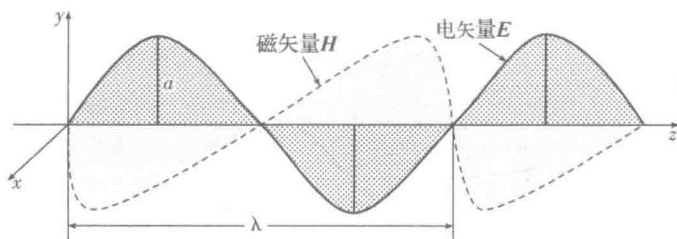


图 1-1 光波

① 数学物理理论角度理解本章有关光学现象,可参阅诺贝尔物理学奖获得者 Born Max 著作: Principles of Optics — Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light(7Ed). London: Cambridge University Press, 2005.

## 1.2 光波的共线干涉

干涉与衍射是光学测量方法的两大基石,光测力学方法中的光弹性、散斑干涉和云纹干涉等都可以应用干涉思想来理解。而云纹干涉的条纹与激光散斑的形成则需要通过衍射理论来解释。

人的眼睛和所有其他的感光元件都不足以感受以可见光的频率( $\sim 10^{14}$  Hz)所做的振动,只能探测到相对较长时间内的平均光强,而对光波的相位敏感性就更不必提了。然而通过干涉的方式就可将不能直接感受到的相位差转化为人们可见的光的强度变化。尽管本书的大部分读者学习过波的干涉理论,但为了进一步理解光波干涉的概念,这里还是有必要共同来了解一下当两列能量相同的光波沿相同的轴线传播叠加到一起时所观察到的现象。

如图 1-2,对于沿  $z$  轴传播的两列平面光波的电矢量(电矢量反映了光波的主要特性),假设它们有相同的振幅和偏振方向:

$$E_1 = A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - vt) \right] \quad (1-1)$$

$$E_2 = A \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (z - vt - r) \right] \quad (1-2)$$

式中,  $A$ ——振幅;

$\lambda$ ——波长;

$v$ ——波速。

光波  $E_2$  在空间上滞后于第一列波  $E_1$  的距离为“ $r$ ”,其余与第一列波相同。这个“滞后距离”就是两列波之间的相位延迟,即通常所说的光程差或者相位差;而它就是人们选择测量的量。

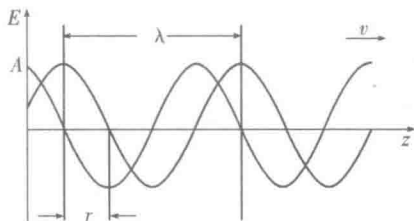


图 1-2 两列平面光波的电矢量

将这两列波的波动方程简单叠加,很容易得到合成波的电矢量:

$$E_s = 2A \cos \left( \frac{\pi r}{\lambda} \right) \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( z - vt - \frac{r}{2} \right) \right] \quad (1-3)$$

这是干涉测量中常见的形式,这一类等式通常看做具有如下的形式:

电磁矢量=振幅×波动方程

除了延迟项,式(1-3)的第二个余弦表达式可视为与式(1-1)表示的第一列波的波动方程具有相同的形式;它正好是另一列光波,如图 1-3 所示。如果这种推论成立,那么整个第一部分就一定是波的振幅,它既包含了原来光波的振幅,也包含了取决于延迟项  $r$  和波长  $\lambda$  的余弦项。

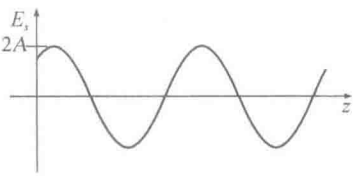


图 1-3 两列光波合成后的电矢量

这一结果很重要,它表明可以通过检测两列波叠加产生的振幅来测量延迟项  $r$ ,但还不能直接测量一列光波的振幅。然而,人们可以利用眼睛、照相胶卷、光电池或者 CCD 相机来观察辐照或者光强。对简单的情形可由下列关系求出辐照:

辐照=振幅<sup>2</sup>

如果用数学公式来表示,即

$$I_t=4A^2\cos^2\left(\frac{\pi r}{\lambda}\right) \tag{1-4}$$

辐照从 0 变化到  $I_{\max}=4A^2$ ,这取决于原来波的强度。图 1-4 为光强随滞后(或称为延迟) $r$ 的变化函数。

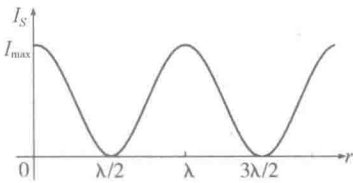


图 1-4  $I-r$  曲线

由图可以看出,如果两列初始光波以  $r=0,\lambda,2\lambda,\cdots$  相叠加,那么辐照将达到最大值;如果  $r=\lambda/2,3\lambda/2,5\lambda/2,\cdots$ ,那么辐照将为 0。更重要的是,通过测量合成波的强度可以获得两列初始波的相位

延迟,即通过光波的干涉可以将相位差的变化转化成光的强度变化,将不可见的转化成了可见的,这个过程使得干涉成为一种用于测量的手段。

当然真正测量时还有一个很有意义的问题,即对于测量到的每一个强度值,相位滞后  $r$  并不是单值的,它的可能值是波长的整数倍。因此需要用更多的步骤,比如数条纹级次或相移技术来确定正确的相位值。

当光强和相位差的基本关系建立起来后,下一步的工作就是如何将这一想法应用于测量力学量,也就是如何将变形或材料的折射率变化转化成光程差,本书的后续章节将针对不同的变形测量方法做详细的介绍。

1.3 光程差和干涉仪的基本结构

为了得到相位差,需要知道怎样描述光波传播路径的长度。首先要了解一下折射率,因为可以通过绝对折射率来理解光传播的路径长度与光程差之间的关系。绝对折射率定义如下:

$$\text{绝对折射率 } n_1 = \frac{\text{真空中的光速}}{\text{材料 1 中的光速}}$$

有时,定义两种材料的相对折射率更为方便:

$$\text{相对折射率 } n_{12} = \frac{\text{材料 2 中的光速}}{\text{材料 1 中的光速}}$$

相对折射率可以用来描述光从介质 1 进入介质 2 时的光速。注意此时使用了两个下标,第一个下标表示前一种介质,第二个下标表示进入的介质。注意将这些关系理顺,因为很容易将它们颠倒。许多读者不注意区分相对折射率和绝对折射率,尤其是进入的介质是空气的时候。为了减少这种混淆,这里仅使用绝对折射率。正如大家所知道的,真空中的光速最大(约等于  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),所以材料的折射率总是比 1 大。

出于测量的目的,常常用到光程(Optical Path Length)和光程差(Path Length Difference, PLD)的概念。所谓光程,即是指光在介质中经过的路程,数值上等于光以在真空中的速度在时间  $T$ (光穿过介质所用的时间)内所能走的路程的长度。根据上述概念显然有

$$\text{光程} = \text{光传播的物理长度} \times \text{折射率}$$

在实验力学测量中,我们感兴趣的是一个路程长度的变化或者两个路程长度的差别,这叫做光程差。光程差是引起相位滞后的原因。

如图 1-5 描绘的那样,两列光波都在折射率为  $n_0$  的介质中传播且同时离开起点线。但第二列波中途穿过一块材料折射率为  $n_1$ 、厚度为  $d$  的平板。第一列波从起点线出发后,在时刻  $t_1$  到达 A 点。而此刻,第二列波仅仅到达 B 点,因为它在经过平板时耽误了一段时间。第二列波滞后于第一列波的距离是这个问题的光程差,也叫做“绝对延迟” $R$ 。因为只需要考虑速度、时间和位移,光程差的计算变得简单。光程差是  $d$  和第一列波在第二列波穿过介质板所需的时间里传播的距离之差。结果是:

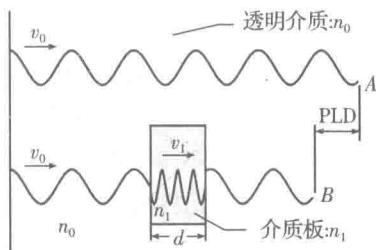


图 1-5 光程差的确定

$$\text{PLD} = \left[ \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right] d \quad (1-5)$$

这一方法的好处是它自动纠正了传播介质的影响,这一因素可能不能通过直接计算来直观地观察到。显然,无论是折射率的变化还是距离  $d$  的变化,都将产生光程差。

需要说明的是,经常用来成像的凸透镜具有等光程性。即从垂直于入射光束的任一平面算起直到(副)焦点,各条光线都具有相等的光程,如图 1-6 所示。

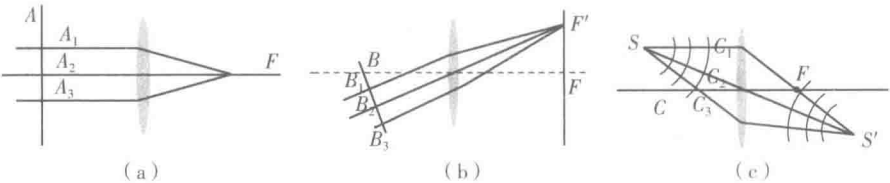


图 1-6 凸透镜的等光程原理

(图(c)中点光源  $S$  与其像点  $S'$  之间的光线都是等光程的)

实验力学中的光学测量方法中大多是基于干涉来测量光程差的过程,例外的是“几何云纹法”和“数字图像相关法”等。

测量光程差的干涉仪工作流程如图 1-7 所示。

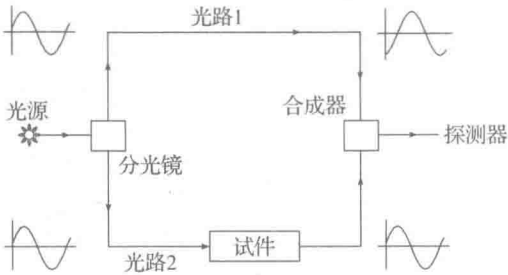


图 1-7 干涉仪的基本组成示意图

这一模型展示了干涉测量方法中常见的必要元件,即干涉仪装置中以某种形式出现的设备。因为两条路径中的光波必须能够干涉,所以它们必须来自同一个光源。分光镜将两列波分开,两列波就沿着不同的路径传播,其中一条路径或者两条路径上可能会有各种光学元件或者物体,也就是需要测量的试件。在光路的末端,两列波就有了不同的相位,因为产生了光程差,需要某种合成器将两列波合到一起,使它们发生干涉。如前所述,干涉产生了光强的变化,所以光强是光程差的函数。因此,加上能够探测光强的设备就构成了完整的干涉仪装置。

需要再次强调的是光测力学中干涉测量的思想就是测量两条光路长度之差。实验时,我们可使得其中一条光路恒定不变(如第二章的全息干涉测量光路),并把它叫做参考光路。然后把待测变量引入到第二条光路,在变化前和变化后测量光强。将变化前的光强减去变化后的光强,这样得到第二条光路光程的变化。在某些时候,也可以让两条光路都变化来进行测量(如第六章介绍的云纹干涉与散斑干涉法测量面内变形的光路)。

1.4 干涉条纹

前面只考虑了两列波相干涉的情形,意味着只能获得试件上一小区域的光程差,

也就是说测量是逐点的。怎样将这种思想推广到全场呢？如果在普通干涉仪的“点”光源附近添加一个扩束器，来产生一束平行光；或者在分光镜后使用两个光束扩展器。合成器将宽光束合成产生一幅光场强度图，这幅图显示了由局部光程差产生的局部光强。使用的探测器为照相机之类的设备，记录并显示光强度图像，这也就是说光学测量技术可以产生一个全场位移图或应变图。

一般情况下，全场干涉图案是由亮点、灰点和暗点组成的随机图案，和激光散斑图案一样。光程差是随机分布的，所以条纹也是随机的。但如果光程差是由类似于固体变形的空间连续过程产生的，那么所有具有相同光程差的点连接起来将产生相同光强的光斑图案。这样一系列的明(暗)光斑带叫做干涉条纹(Fringe)。干涉条纹是具有等光程差的点集，但如果被测物面的反射率相同，也可以把它们视为有相同光强的点集。一个典型的干涉条纹图，包含数个这样的点集，叫做条纹图案(Fringe Pattern)。在一幅图上确定相近条纹的级次常常是复杂的，比如一个3级条纹看上去和5级条纹很接近，有时候所得的条纹图案甚至可能没有0级条纹。

## 1.5 双光束斜射干涉条纹特征

许多形式的干涉，包括云纹干涉(见第六章)都是基于两列光波成一个小角度的干涉，云纹干涉实验通过这种方式产生所需的精细光栅。另外，全息图记录其实是双光束干涉产生的高密度光栅。实际上，下面描述的过程其实就是产生一个简单的全息图(即平面的全息图)，而对于干涉条纹的分析，也几乎与几何云纹条纹公式(第八章)的推导相同。

如图1-8是两束平行平面相干光源(即振动频率、偏振状态、初相位相同)，以水平面为对称面汇聚到一起。为讨论简便起见，这里仅考虑二维的问题，即看到的只是纸平面内的横截面图。由图1-8不难看出，当两列光束的波阵面峰值(正弦波的最大值)相交时，将产生一个亮点，两个波阵面最小值相交时也会出现同样的情形。

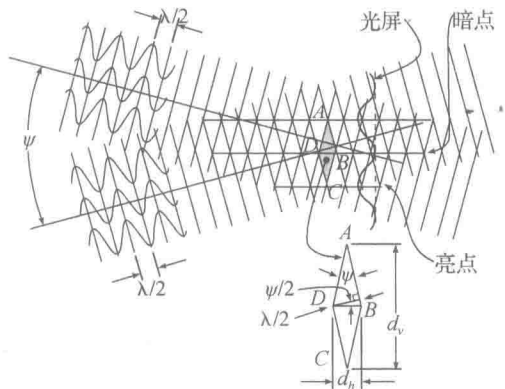


图 1-8 斜射干涉条纹的形成

取两亮点的水平距离为  $d_h$ , 竖直距离为  $d_v$  如图 1-8 中右下方放大的菱形  $ABCD$  的简图。利用简单的三角函数可知:

$$d_h = \frac{\lambda}{2 \cos \frac{\psi}{2}} \quad (1-6)$$

$$d_v = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\psi}{2}} \quad (1-7)$$

为了进一步理解这个结果的物理意义, 考虑交角  $\psi$  很小的情形, 差不多  $2^\circ$  的级别。亮斑的水平距离大约为半个波长, 意味着它太小而难于分辨。另一方面, 竖直距离接近波长的 30 倍 (大约 0.018 mm, 以 He-Ne 激光的 633 nm 波长为参考), 这个距离可以被照相胶卷和高分辨率的设备分辨。在更小的角度下, 竖直距离可以直接用眼睛观察。正如图 1-8 所示, 若放一个光屏或者照相胶卷于两光波交集重叠区, 屏上将会产生交替的亮暗线图案 (干涉条纹), 干涉条纹是光程差的等值线 (点集)。更精确的分析表明, 任何横截面上的振幅都是按正弦规律变化的。如果两列光束间的光程差 (PLD) 发生变化, 那么条纹在空间的位置将发生变化; 当光束之间的夹角发生变化时, 条纹的距离将变化。如果一束光的相位关系变化 (比如弯曲波阵面), 那么条纹将发生弯曲。这些干涉特性在定量干涉计量中是很重要的。

## 1.6 光的衍射

本书在正式对光测力学技术介绍前尽量避开复杂的数学推导以便让读者初步认识和了解测量方法中所需要的基本光学理论或采用的有关光学现象, 因此这里介绍一系列简单易行的实验来阐述小孔和单缝衍射的有关特性。

当把带有一个尖锐边缘小孔 (接近针孔的大小) 的不透明板放在太阳光下面, 并在物体的下方放置一张白纸时, 按照光的直线传播理论你应该看到带小孔板的阴影; 也就是, 除了那些被透过小孔的光照亮的地方, 白纸其他区域是物体的阴影。但如果仔细观察你会发现阴影的边缘是模糊的, 而且孔径越小, 模糊发亮的区域就越大, 且能在模糊区域中观察到同心圆条纹。如果使用相干性好的激光作光源照射带小孔的不透明板, 保持光源与观察屏距离不变, 在两者之间移动小孔, 你会发现屏上正对小孔的位置不是一直是亮点, 可能是暗点! 如果是用连续规则排列的狭缝 (狭缝宽度接近针孔宽度为宜) 继续做实验来进一步探索, 会发现阴影附近出现条纹, 且狭缝越多条纹的对比度就变得越好。在日常的生活中当出现轻微的雾霾时, 可以观察到太阳光和月光经大气层中雾滴的衍射, 其边缘将呈现彩色光圈, 即所谓的日晕或月晕。这些现象都与光的波动性有关, 当光通过小孔、细线、针、毛发时, 光波会显著地发生偏离直线传播的衍射现象。