

航空工程类专业教育部质量工程教材专项立项教材

现代光测及其图像处理

王开福 著



科学出版社

航空工程类专业教育部质量工程教材专项立项教材

现代光测及其图像处理

王开福 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是南京航空航天大学航空工程类专业教育部质量工程教材专项立项教材。全书主要内容包括现代光测基础、全息照相与干涉、散斑照相与干涉、云纹与云纹干涉、图像处理基础、图像操作与分割、图像变换与滤波、变形相位检测、干涉图像处理、数字全息照相与干涉、数字图像相关与粒子图像测速和数字散斑干涉与剪切干涉等。

本书可作为高等院校航空宇航、船舶海洋、动力工程、控制科学、仪器科学、材料科学、机械工程、电气工程、土木工程、光学工程和工程力学等专业的本科生和研究生教材,使其掌握现代光测及其图像处理的基本原理、基础理论、测试方法和专业技能。本书也可供相关专业的高校教师、研究人员和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代光测及其图像处理/王开福著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-036670-2

I. ①现… II. ①王… III. ①光测法②数字图像处理 IV. ①0348.1
②TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 026789 号

责任编辑:尚 雁 罗 吉 / 责任校对:何艳萍
责任印制:赵德静 / 封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏立印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 2 月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:300 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是南京航空航天大学航空工程类专业教育部质量工程教材专项立项教材。全书由三部分内容构成:第一部分包含第1~4章,阐述了以全息底片作为记录介质的现代光测技术,主要内容包括现代光测基础、全息照相与干涉、散斑照相与干涉和云纹与云纹干涉;第二部分包含第5~9章,阐述了现代光测技术所涉及的图像处理技术,主要内容包括图像处理基础、图像操作与分割、图像变换与滤波、变形相位检测和干涉图像处理;第三部分包含第10~12章,阐述了以CCD作为记录介质的现代光测技术,主要内容包括数字全息照相与干涉、数字图像相关与粒子图像测速和数字散斑干涉与剪切干涉。

现代光测技术是在激光出现之后基于光波干涉和衍射效应而发展起来的全场非接触高精度变形测量技术,主要包括全息干涉技术、散斑干涉技术和云纹干涉技术等。现代光测技术的发展经历了两个主要阶段:第一阶段以全息底片作为记录介质;第二阶段以CCD作为记录介质。

第一阶段的现代光测技术由于采用全息底片作为记录介质,因此需要进行显影和定影等冲洗处理。另外,由于以全息底片作为记录介质时只能采用相加模式,因此第一阶段的现代光测技术只能通过条纹分析方法进行变形测量。

随着数字成像技术和图像处理技术的快速发展,现代光测技术进入了以CCD作为记录介质的第二阶段。以CCD作为记录介质,则不再需要进行显影和定影等冲洗处理。由于CCD记录的数字图像除了可以采用相加模式,还可以采用相减、相乘、相除和相关等模式,因此第二阶段的现代光测技术除了可以通过条纹分析方法进行变形测量,还可以采用相位检测方法(如相移干涉技术)和非条纹分析方法(如数字图像相关)进行变形测量。

由于作者水平有限和编写时间仓促,不当之处在所难免,敬请批评指正。

王开福

2012年11月

于南京航空航天大学

目 录

前言

第 1 章 现代光测基础	1
1.1 几何光学	1
1.2 波动光学	2
1.3 光波干涉	4
1.4 干涉系统	4
1.5 光波衍射	6
1.6 光波偏振	7
第 2 章 全息照相与干涉	8
2.1 全息照相	8
2.1.1 波前记录	8
2.1.2 波前再现	9
2.2 全息干涉	9
2.2.1 变形相位	10
2.2.2 双曝光全息干涉	10
2.2.3 实时全息干涉	12
2.2.4 时间平均全息干涉	14
2.2.5 静态时间平均全息干涉	15
2.2.6 实时时间平均全息干涉	17
2.2.7 频闪全息干涉	18
第 3 章 散斑照相与干涉	21
3.1 散斑照相.....	21
3.1.1 双曝光散斑照相	21
3.1.2 时间平均散斑照相	26
3.1.3 频闪散斑照相	28
3.1.4 多孔径散斑照相	29
3.2 散斑干涉.....	33
3.2.1 面内位移测量	33
3.2.2 离面位移测量	35
3.3 散斑剪切干涉.....	36
3.3.1 单孔径散斑剪切干涉	36
3.3.2 双孔径散斑剪切干涉	38
第 4 章 云纹与云纹干涉	41

4.1	云纹	41
4.1.1	云纹形成	41
4.1.2	几何云纹应变测量	42
4.1.3	位移导数法应变测量	46
4.1.4	影像云纹离面位移测量	49
4.1.5	反射云纹斜率测量	52
4.2	云纹干涉	53
4.2.1	衍射光栅	53
4.2.2	云纹干涉位移测量	55
4.2.3	云纹干涉应变测量	57
第5章	图像处理基础	60
5.1	图像概念	60
5.1.1	图像及其分类	60
5.1.2	采样与量化	60
5.2	图像处理软件	60
5.3	图像表示	62
5.3.1	像素坐标	62
5.3.2	空间坐标	63
5.4	图像输入与输出	63
5.4.1	图像读出	63
5.4.2	图像写入	63
5.4.3	图像显示	64
5.5	数据类型及其转换	64
5.5.1	数据类型	64
5.5.2	数据类型转换	64
5.6	图像类型及其转换	65
5.6.1	图像类型	65
5.6.2	图像类型转换	67
5.7	颜色模型及其转换	68
5.7.1	RGB 模型	68
5.7.2	HSV 模型及其转换	69
5.7.3	YIQ/NTSC 模型及其转换	70
5.7.4	YCbCr 模型及其转换	71
第6章	图像操作与分割	72
6.1	图像操作	72
6.1.1	几何操作	72
6.1.2	算术操作	73
6.2	图像分割	78

6.2.1 阈值分割	78
6.2.2 边缘检测	78
6.2.3 边界跟踪	82
第7章 图像变换与滤波	84
7.1 图像变换	84
7.1.1 离散傅里叶变换	84
7.1.2 离散傅里叶反变换	86
7.1.3 频谱移动	87
7.1.4 离散余弦变换	88
7.1.5 离散余弦反变换	89
7.1.6 二维离散小波变换	90
7.1.7 二维离散小波反变换	92
7.2 图像滤波	94
7.2.1 空域平滑滤波	94
7.2.2 频域低通滤波	96
7.2.3 小波低通滤波	99
第8章 变形相位检测	100
8.1 相移干涉	100
8.1.1 时间相移	100
8.1.2 空间相移	106
8.2 相位展开	108
第9章 干涉图像处理	110
9.1 图像变换	110
9.1.1 离散傅里叶变换	110
9.1.2 离散余弦变换	113
9.1.3 离散小波变换	115
9.2 图像滤波	118
9.2.1 空域平滑滤波	119
9.2.2 频域低通滤波	121
9.2.3 同态低通滤波	125
9.2.4 小波低通滤波	126
第10章 数字全息照相与干涉	128
10.1 全息图分类	129
10.2 数字全息照相	131
10.2.1 数字全息记录	131
10.2.2 数字全息再现	133
10.2.3 数字全息实验	134
10.3 数字全息干涉	135

第 11 章 数字图像相关与粒子图像测速	137
11.1 数字图像相关	137
11.1.1 图像相关原理	137
11.1.2 图像相关算法	141
11.1.3 亚像素位移	143
11.1.4 图像相关应用	145
11.2 粒子图像测速	146
11.2.1 图像测速原理	147
11.2.2 图像测速系统	147
11.2.3 图像相关算法	151
第 12 章 数字散斑干涉与剪切干涉	154
12.1 数字散斑干涉	154
12.1.1 面内位移测量	154
12.1.2 离面位移测量	157
12.1.3 振动分析	160
12.2 数字散斑剪切干涉	161
12.2.1 斜率测量	161
12.2.2 无损检测	165
参考文献	167
附录 I 光弹技术与相似理论	169
I.1 光弹技术	169
I.1.1 光弹原理	169
I.1.2 等差线条纹	175
I.1.3 等倾线条纹	177
I.1.4 应力计算	178
I.2 相似理论	181
I.2.1 相似概念	181
I.2.2 相似定理	182
I.2.3 相似判据	184
附录 II 误差分析	187
II.1 基本概念	187
II.1.1 真实值	187
II.1.2 测量值	187
II.1.3 误差的来源	189
II.1.4 误差的分类	190
II.1.5 误差的表示	190
II.1.6 数据精度	192
II.2 随机误差	192

II.2.1 统计特性	192
II.2.2 正态分布	193
II.2.3 标准误差	193
II.2.4 极限误差	194
II.3 系统误差	194
II.3.1 系统误差分类	195
II.3.2 系统误差消除	195
II.4 误差合成	196
II.4.1 系统误差合成	196
II.4.2 随机误差合成	197
II.4.3 系统误差和随机误差合成	197
II.5 误差传递	197
II.6 测量结果的表示	198
II.6.1 单次测量结果的表示	198
II.6.2 多次测量结果的表示	198
II.6.3 间接测量结果的表示	199

第 1 章 现代光测基础

1.1 几何光学

1. 光源

本身发光或被其他光源照亮后发光的物体称为光源。当光源的尺寸与其辐射距离相比可以忽略不计时,则该光源可以看成点光源。在几何光学中,点光源可以抽象成几何点,任何被成像的物体都可看成由无数几何发光点组成。

2. 光线

在几何光学中,光线可以抽象为几何线,其方向表示光波的传播方向。几何光学研究光的传播,实际上就是研究光线的传播。利用光线的概念,可以把复杂的光学成像归结为几何运算问题。目前使用的光学成像系统绝大多数都是根据几何光学原理,利用几何光线概念设计而成。

3. 直线传播定律

在各向同性介质中,光线沿着直线传播,这就是光的直线传播定律。该定律可以很好地解释影子、日食和月食等现象。但是,当光在传播过程中遇到很小的不透明屏或通过小孔时,光的传播将偏离直线方向,这就是光的衍射现象。显然,光的直线传播定律只有当光在均匀介质中无阻拦地传播时才成立。

4. 独立传播定律

当多束光通过空间某一点时,各光线的传播不受其他光线的影响,称为光的独立传播定律。当两束光汇聚在空间某点时,其作用为简单相加。利用这条定律,在研究某一束光的传播时,可以不考虑其他光束的存在。光的独立传播定律只对非相干光束成立。对于相干光束,光的干涉效应将使光的独立传播定律不再成立。

5. 反射和折射定律

当一束光投射到两种透明介质的光滑分界面时,将有一部分光反射回原介质,这部分光称为反射光;另一部分光则通过介质分界面进入第二种介质,这部分光称为折射光,如图 1.1 所示。光线的反射和折射分别满足反射和折射定律。

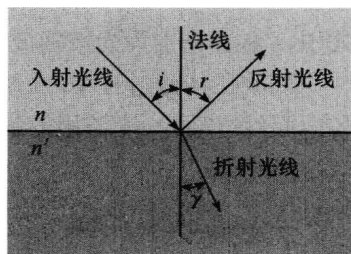


图 1.1 反射和折射

反射定律可表述为入射角(incidence angle) i 和反射角(reflection angle) r 相等,即

$$i = r \quad (1.1)$$

式中, i 和 r 分别为入射光线和反射光线与法线之间所形成的锐角。

折射定律可表述为入射角 i 与折射角(refraction angle) γ 的正弦之比等于折射光线所在介质与入射光线所在介质的折射率(refractive index)之比,即

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{n'}{n} \quad (1.2)$$

式中, i 和 γ 分别为入射光线和折射光线与法线之间所形成的锐角。如果光线由光疏介质(optically thinner medium)进入光密介质(optically denser medium),即 $n' > n$,则 $\gamma < i$;如果光线由光密介质进入光疏介质,则 $\gamma > i$ 。

6. 全反射

如果光线由光密介质进入光疏介质,且当 $i = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right)$ 时,则 $\gamma = 90^\circ$,此时光线将发生全反射(total reflection)。因此,当光线由光密介质进入光疏介质时,发生全反射的条件是

$$i \geq i_{\text{cr}} = \arcsin\left(\frac{n'}{n}\right) \quad (1.3)$$

式中, i_{cr} 称为临界角。

1.2 波动光学

1. 光波概念

光是电磁波,其振动方向和光的传播方向垂直,即光波是横波。通常所说的光是指可见光,即人眼所能感知的电磁波,其波长范围为400~760 nm。

光在真空中的传播速度 $c = 3 \times 10^8$ m/s,在空气中的传播速度近似等于真空中的传播速度,而在水和玻璃等透明介质中的传播速度要比真空中慢,其速度与波长和频率的关系可表示为

$$v = \lambda \nu \quad (1.4)$$

式中, λ 和 ν 分别为光波的波长和频率。

光波在传播过程中,在某一时刻其振动相位相同的各点所构成的曲面称为波面。在各向同性介质中,光波沿着波面法线方向传播,因此可以认为光波波面的法线就是几何光学中的光线。

2. 波动方程

光波是电磁波,因此满足波动方程

$$\nabla^2 E(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.5)$$

式中, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子(Laplacian); $E(r, t)$ 为瞬时光场; c 为光速。
式(1.5)的单色(monochromatic)解为

$$E(r, t) = A(r) \exp\{-i\omega t\} \quad (1.6)$$

式中, $A(r)$ 为光波复振幅; $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位; ω 为光波圆频率。把式(1.6)代入式(1.5), 得

$$(\nabla^2 + k^2)A(r) = 0 \quad (1.7)$$

式中, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数(wave number)。式(1.7)即为亥姆霍兹(Helmholtz)方程。

3. 平面波

如果波动方程的解为

$$A(x, y, z) = a \exp\{ikz\} \quad (1.8)$$

式中, a 为光波振幅。式(1.8)表示沿 z 方向传播的平面波(plane wave), 其强度分布可表示为

$$I(x, y, z) = |A(x, y, z)|^2 = a^2 \quad (1.9)$$

显然, 平面波光场中各点的强度相同。

4. 球面波

如果波动方程的解为

$$A(r) = \frac{a}{r} \exp\{ikr\} \quad (1.10)$$

式中, a 为单位距离处点的光波振幅。式(1.10)表示沿半径向外传播的球面波(spherical wave), 其强度分布可表示为

$$I(r) = |A(r)|^2 = \frac{a^2}{r^2} \quad (1.11)$$

即球面波光场中各点的强度分布与 r^2 成反比。

式(1.10)的二阶近似可表示为

$$A(x, y, z) = \frac{a}{z} \exp\{ikz\} \exp\left\{\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right\} \quad (1.12)$$

式(1.12)表示距离点光源为 z 的平面上点 (x, y, z) 处的复振幅。

5. 柱面波

如果波动方程的解为

$$A(r) = \frac{a}{\sqrt{r}} \exp\{ikr\} \quad (1.13)$$

式中, a 为单位距离处的光波振幅。式(1.13)表示沿半径向外传播的柱面波(cylindrical wave), 其强度分布为

$$I(r) = |A(r)|^2 = \frac{a^2}{r} \quad (1.14)$$

即柱面波光场中各点的强度分布与 r 成反比。

1.3 光波干涉

频率相同、振动方向相同和相位差保持恒定的两列光波相互叠加后将会出现干涉(interference)效应。设两列光波复振幅分别表示为

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 \exp\{i\varphi_1\} \\ A_2 &= a_2 \exp\{i\varphi_2\} \end{aligned} \quad (1.15)$$

式中, a_1 和 a_2 分别为两列光波的振幅; φ_1 和 φ_2 分别为两列光波的相位。两列光波相互干涉后的强度分布为

$$I = |A_1 + A_2|^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos\Delta\varphi \quad (1.16)$$

式中, $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 为相位差。式(1.16)也可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\varphi \quad (1.17)$$

式中, I_1 和 I_2 分别为两列光波的强度分布。由此可见, 两列光波相互干涉后的强度分布含有余弦干涉条纹。条纹对比度为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \quad (1.18)$$

式中, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为最大强度和最小强度。利用式(1.18), 式(1.17)还可表示为

$$I = I_B + I_M \cos\varphi = I_B(1 + V \cos\Delta\varphi) \quad (1.19)$$

式中, $I_B = I_1 + I_2$ 和 $I_M = 2\sqrt{I_1 I_2}$ 分别为背景强度和调制强度; V 为条纹对比度。当 $I_1 = I_2$, 即 $a_1 = a_2$ 时, 则条纹具有最大对比度, 最大值为

$$V_{\max} = 1 \quad (1.20)$$

1.4 干涉系统

1. 迈克耳孙干涉仪

图 1.2 所示为迈克耳孙(Michelson)干涉仪。激光器输出的单色光由分光镜分成两束光, 其中一束射向固定反射镜, 然后反射回分光镜, 被分光镜透射的部分光由观察

面接收,被分光镜反射的部分光返回激光器;激光器输出的经分光镜透射的另一束光入射到可动反射镜,经反射后回到分光镜,经分光镜反射的部分光传至观察面,而其余部分光经分光镜透射后返回到激光器。

当两个反射镜到分光镜间的光程差小于激光相干长度时,射到观察面上的两光束便产生了干涉,两相干光的相位差为

$$\Delta\varphi = k\Delta l \quad (1.21)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 为光在空气中的传播常数; Δl 为两相干光的光程差。

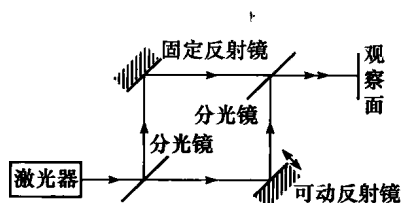


图 1.3 马赫-曾德尔干涉仪

分;另一束是右边垂直光束的透射部分。

3. 萨奈克干涉仪

图 1.4 所示为萨奈克(Sagnac)干涉仪,它是利用萨奈克效应构成的一种干涉仪。激光器输出的光由分光镜分为反射和透射两部分,这两束光由反射镜的反射形成传播方向相反的闭合光路,然后在分光镜上汇合,被送入观察面中,同时也有一部分光返回激光器。在这种干涉仪中,任何一块反射镜在垂直于反射表面的方向移动,两光束的光程变化都相同,因此根据双光束干涉原理,在观察面上观察不到干涉强度的变化。但是当把这种干涉仪装在一个可绕垂直于光束平面旋转的平台上,且平台以角速度 ω 转动时,根据萨奈克效应,两束传播方向相反的光束到达观察面的相位不同。

若平台顺时针旋转,则顺时针方向传播的光到达观察面要比逆时针方向传播的光滞后,两路光的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A}{\lambda c} \omega \quad (1.22)$$

式中, A 为光路围成的面积; c 为真空中的光速; λ 为真空中的光波长。这样,通过观察面

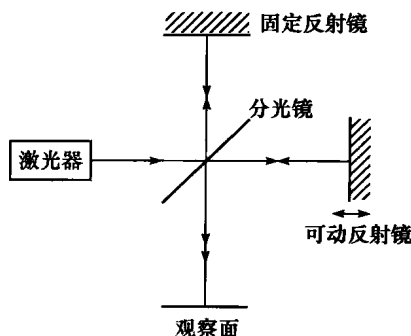


图 1.2 迈克耳孙干涉仪

2. 马赫-曾德尔干涉仪

图 1.3 所示为马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪。从激光器输出的光束先分后合,两束光由可动反射镜的位移引起相位差,并在观察面上产生干涉。这种干涉仪没有光返回激光器。此外,从右上方分光镜向上还有另外两束光:一束是上面水平光束的反射部分;另一束是右边垂直光束的透射部分。

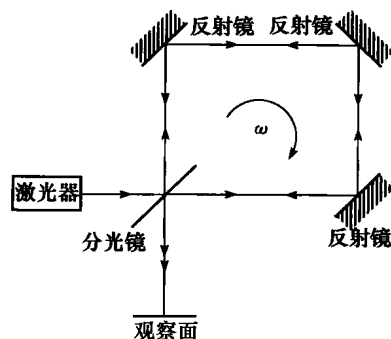


图 1.4 萨奈克干涉仪

检测干涉强度的变化,便可确定旋转角速度 ω 。

4. 法布里-珀罗干涉仪

图 1.5 所示是法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪,它由两块平行放置的半透半反镜组成,在两个相对的反射表面镀有反射膜。由激光器输出的光束入射到干涉仪,在两个相对的反射表面作多次往返,透射出去的平行光束由观察面接收。这种干涉仪与前几种干涉仪的根本区别是,前几种干涉仪都是双光束干涉,而法布里-珀罗干涉仪是多光束干涉。

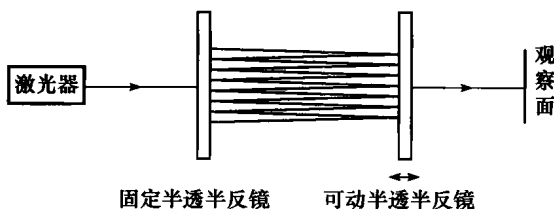


图 1.5 法布里-珀罗干涉仪

根据多光束干涉的原理,观察面上探测到的干涉强度为

$$I = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (1.23)$$

式中, I_0 为入射强度; R 为半透半反镜的反射率; $\Delta\varphi$ 为相邻光束间的相位差。

由式(1.23)可知,当反射率 R 一定时,透射光束的干涉强度仅随 $\Delta\varphi$ 变化。因此,通过检测干涉强度的变化,即可解调出导致光相位变化的外界被测量。当 $\Delta\varphi = 2n\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,干涉强度有最大值 I_0 ; 当 $\Delta\varphi = (2n+1)\pi$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,干涉强度有最小值 $I = [(1-R)/(1+R)]^2 I_0$ 。显然,反射率 R 越大,干涉强度变化越显著,即有高的分辨率,这是法布里-珀罗干涉仪最突出的特点。通常,可以通过提高半透半反镜的反射率来提高干涉仪的分辨率,从而使干涉测量有极高的灵敏度。

1.5 光波衍射

光波在传播过程中,当遇到障碍物时,将产生偏离直线传播路径的衍射(diffraction)效应。平面单色光波通过孔径后将发生衍射效应,如图 1.6 所示。考虑到傍轴近似,则观察面上光波复振幅可表示为

$$A(x, y) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \frac{\exp\{ikr\}}{r} d\xi d\eta \quad (1.24)$$

式中, λ 为光波波长; r 为衍射孔径面上次光源点和观察面上观察点之间的距离; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $A(\xi, \eta)$ 是衍射孔径面上光波复振幅。

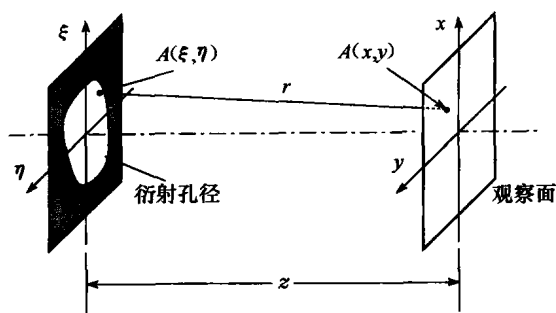


图 1.6 孔径衍射

1. 菲涅耳衍射

在非涅耳(Fresnel)衍射区,有 $\frac{2\pi}{\lambda} \frac{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]_{\max}^2}{8z^3} \ll 1$, 则观察面上光波复振幅可表示为

$$A(x, y) = \frac{\exp\{ikz\}}{i\lambda z} \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \times \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z} (\xi^2 + \eta^2)\right\} \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta \quad (1.25)$$

式中, z 为衍射孔径面和观察面之间的距离。

2. 夫琅禾费衍射

在夫琅禾费(Fraunhofer)衍射区,有 $\frac{\pi}{\lambda z} (\xi^2 + \eta^2)_{\max} \ll 1$, 则观察面上光波复振幅可表示为

$$A(x, y) = \frac{\exp\{ikz\}}{i\lambda z} \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta \quad (1.26)$$

1.6 光波偏振

普通光源(如太阳和灯泡等)发出的光波在传播过程中,电场矢量在垂直于传播方向的平面内振动时并不表现出特定的方向性和旋转性,则该光源发出的光波称为非偏振光(unpolarized light)。如果电场矢量仅在一个特定方向振动,并在传播过程中振动方向始终保持不变,则该光波称为平面偏振光(planarly polarized light)或线偏振光(linearly polarized light)。如果在光波传播过程中电场矢量振动方向不断围绕传播方向旋转,当电场矢量在垂直于传播方向的平面内绘制出圆形轨迹时称为圆偏振光(circularly polarized light),当绘制出椭圆轨迹时称为椭圆偏振光(elliptically polarized light)。

第2章 全息照相与干涉

全息技术首先由 Gabor 提出,但由于当时没有高度相干光源,且无法分离同轴全息所产生的孪生像,所以 Gabor 提出的同轴全息技术在之后的 10 多年间并未得到广泛关注。直到激光问世以及 Leith 等提出离轴全息后,全息技术才得到了迅速发展,各种不同的全息方法相继提出,开辟了全息应用的新领域。

2.1 全息照相

全息照相(holography)利用物体光波和参考光波之间的干涉效应将物体光波的振幅和相位信息以干涉条纹的形式同时记录在全息底片上,全息底片经过显影和定影后变成全息图,然后用再现光波(通常采用记录全息图时的参考光波)照射全息图,通过全息图的衍射效应使物体光波得到再现,进而得到包含物体振幅和相位信息的立体像。因此,全息照相不但能记录物体光波的振幅信息,而且能同时记录物体光波的相位信息。

2.1.1 波前记录

全息记录系统如图 2.1 所示。来自激光器的光波经分光镜分光后变成两束光波,其中一束光波经反射镜反射并经扩束镜扩束后照明物体,然后经物体漫反射后照射全息底片,这束来自物体的漫反射光波称为物体光波;另一束光波经反射镜反射并经扩束镜扩束后直接照射全息底片,这束光波称为参考光波。

设全息底片处物体光波和参考光波的复振幅分别为 $O=a_o \exp\{i\varphi_o\}$ 和 $R=a_r \exp\{i\varphi_r\}$, 其中, a_o 和 φ_o 分别为物体光波的振幅和相位; a_r 和 φ_r 分别为参考光波的振幅和相位; $i=\sqrt{-1}$ 是虚数单位。则全息底片所记录的强度分布可表示为

$$I = (O+R)(O+R)^* = (a_o^2 + a_r^2) + a_o a_r \exp\{i(\varphi_o - \varphi_r)\} + a_o a_r \exp\{-i(\varphi_o - \varphi_r)\} \quad (2.1)$$

式中, $*$ 表示复共轭。利用 $\cos\theta = \frac{1}{2}(\exp\{i\theta\} + \exp\{-i\theta\})$, 式(2.1)还可表示为

$$I = (a_o^2 + a_r^2) + 2a_o a_r \cos(\varphi_o - \varphi_r) \quad (2.2)$$

由此可见,全息底片所记录的强度分布是余弦干涉条纹(不过这些干涉条纹通常很细很

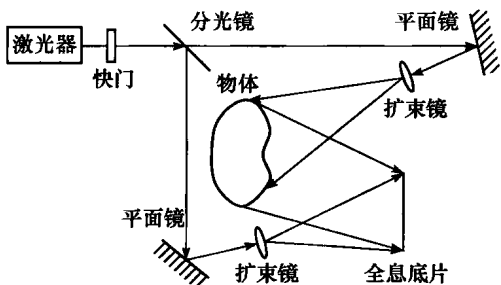


图 2.1 全息记录系统