



普通高等教育“十二五”规划教材

现代光学 测试技术

Contemporary Optical Measurement Technology

王文生 等 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

现代光学测试技术

Contemporary Optical Measurement Technology

王文生 苗 华 陈 宇 牟 达 著
霍富荣 张 肃 尚吉扬 郭 俊



机械工业出版社

本书基于实际教学和科研的需求,按“十二五”规划编写。本书侧重于把各种光学测试技术与 CCD 等现代探测器、EALCD 空间光调制器和计算机技术相结合,故所讨论的方法具有实时化、自动化和数字化特点。为了提高测试精度,本书中引入了数字图像处理算法,并把各种算法,包括傅里叶变换、小波变换、拉普拉斯、综合识别函数等成功地应用于相关探测、全息测试、散斑测试等中,使光学、专业数学和计算机学相结合。本书中的许多测试实例是作者科研团队和国内外许多专家的科研成果,故本书将理论与测试实践紧密结合,所讨论的方法具有实用性和先进性。全书的章、节、目、图和专业词汇均用英语标出,且每章均给出英语专业词汇列表,以利于双语教学和文献查阅。

全书共分十章,内容包括:干涉测试基础,单频干涉术,双频干涉术,莫尔干涉术,全息术,全息干涉术,全信息测量技术,散斑干涉术,光学相关测试技术,光源、记录介质和探测器。每章末均附有习题。

本书主要适用于光电信息工程、精密仪器与测试专业的本科生和研究 生,同时也可供相关科研工作者参考。

本书配有免费英文电子课件,欢迎选用本书做教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代光学测试技术/王文生等著. —北京:机械工业出版社, 2013. 4
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-41974-7

I. ①现… II. ①王… III. ①光学测量—测试技术 IV. ①TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 062456 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王小东 责任编辑:王小东 安桂芳

版式设计:潘蕊 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京富生印刷厂印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.25 印张·497 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41974-7

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010)88361066

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

(Preface)

随着计算机技术和探测器件的发展,光学测试技术向自动化、实时化、数字化和高精度发展,《现代光学测试技术》就是把光学测试技术与现代探测器、计算机技术相结合。本书是在由王文生教授编著、顾去武教授主审的《干涉测试技术》(兵器工业出版社 1989 年)的基础上,基于实际教学和科研的需求,按“十二五”规划编写的。全书共分十章:第 1 章干涉测试基础,第 2 章单频干涉术,第 3 章双频干涉术,第 4 章莫尔干涉术,第 5 章全息术,第 6 章全息干涉术,第 7 章全信息测量技术,第 8 章散斑干涉术,第 9 章光学相关测试技术,第 10 章光源、记录介质和探测器。该书的特点是:

1) 本书的测试技术是以光波的波长为单位,再对波长细分微读,故本书所讨论的方法具有高精度特点。

2) 本书侧重于把各种光学测试技术与 CCD 等现代探测器、EALCD 空间光调制器和计算机技术相结合,故所讨论的方法具有实时化、自动化和数字化特点。

3) 本书不仅讨论了数字图像处理算法,更重要的是本书作者把各种算法,包括傅里叶变换、小波变换、拉普拉斯、综合识别函数等成功地应用于相关探测、全息测试、散斑测试等中,因此本书使光学、专业数学和计算机学相结合。

4) 本书的许多测试实例是作者科研团队多年的科研成果,如在单频干涉术、全息干涉术、全信息测量技术、散斑干涉术和光学相关测试技术是团队在国内和国外的科研成果;同时也引入了国内、外许多专家的科研实验成果,故本书理论与测试实验紧密结合,所讨论的方法具有实用性和先进性。

5) 本书的章、节、目、图和专业词汇均用英语标出,每章均给出该章的英语专业词汇列表,以利于双语教学和文献查阅。

本书的第 1~4、10 章由苗华博士、王文生著,第 5~7 章由牟达博士、郭俊博士、王文生著,第 8 章由霍富荣博士、王文生著,第 9 章由陈宇博士、张肃博士、尚吉扬博士、王文生著,全书由王文生教授统一定稿。李碧莹、俞悦、徐悦、王有健、武凤栖、徐春云、董加宁、张宁、范俊叶和尹博超等也参加了本书的编写,为该书的绘图、校对做了大量工作。

在本书出版之际,作者要向为本书所引入的研究成果及做过贡献的科研团队其他人:陈方函博士、李全勇博士、姜淑华博士、王冕、王波、王宏尊、邹昕、郎琪、孙晓明、陈婷婷、董会、杨坤、郭霏、范真节、贾欢欢、杨璐、刘喆、刘文哲、张婉怡、李春杰、于国着、任延峻、李林涛、逢浩君、王洪涛、尹娜、严飞、张鹏飞、周岩、关皓文、战雪、陈驰、黄芳、张文静、孙杰、王刚等表示深深感谢,是他们不懈的共同努力和卓越的研究成果,才使本书理论与测试紧密结合,才使所讨论的方法具有实用性和先进性。感谢瑞士联邦计量院 M. kerner 教授为本书第 3 章提供了科研成果资料。

本书主要适用于光电信息工程、精密仪器与测试专业的本科生和研究生教学,但由于本





书引用了大量的科研实例并具有实用性和先进性特点，故本书同时也是相关科研工作者很好的参考书。

虽然作者力求使本书完善，但书中欠妥或错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

长春理工大学“现代光学测试技术”教研组

目 录

(Contents)

前言 (Preface)

第1章 干涉测试基础 (Chapter 1 Foundation of Interference Testing)	1
1.1 干涉与干涉术 (Interference and Interferometry)	1
1.2 基本关系式 (Basic Relations)	2
1.3 干涉条纹的特性 (Characteristics of Interference Fringes)	6
1.4 不同频率的单色平面波的干涉 (Interference of Monochromatic Plane Wave with Different Frequency)	11
1.5 球面波的干涉 (Interference of Spherical Wave)	14
1.6 光源的相干性 ^[9-11] (Coherence of Light Source)	16
1.7 对干涉仪元件的一般要求 ^[12] (General Requirements for Interferometer Elements)	21
本章习题 (Exercises)	22
本章术语 (Terminologies)	22
参考文献 (References)	24
第2章 单频干涉术 (Chapter 2 Mono-frequency Interferometry)	25
2.1 干涉仪及其分类 (Interferometer and Classification)	25
2.2 波前形状的研究 (Researching of Wavefront Shape)	27
2.3 米基准的测定 ^[2-4] (Measurement of Meter Benchmark)	32
2.4 长度测量 (Measurement of Length)	34
2.5 位移测量 (Displacement Measurement)	39
2.6 CCD-微机系统在干涉测长中的应用 ^[5,6] (Application of CCD-computer System in Interference Length Measurement)	42
2.7 波面位相自动探测技术 (Automatic Detection Technology of Wave Front Phase)	46
2.8 平行平板的楔度测量 (Wedge Angle Measurement of Plane Parallel Plate)	52
2.9 小角度测量和介质折射率测量 ^[16] (Measurement of Small Angle and Refractive Index)	55
2.10 激光波长测量 ^[17] (Measurement of Laser Wavelength)	58
本章习题 (Exercises)	60
本章术语 (Terminologies)	60
参考文献 (References)	63
第3章 双频干涉术 (Chapter 3 Double Frequency Interferometry)	64
3.1 双频干涉术 (Double Frequency Interferometry)	64
3.2 光频调制技术 (Light frequency Modulation Technology)	66
3.3 激光外差干涉仪 ^[6-9] (Laser Heterodyne Interferometer)	71
3.4 外差偏振测距干涉仪 ^[10,11] (Polarizing Heterodyne Range Finding Interferometer)	74
3.5 实时外差干涉仪 ^[12] (Real-time Heterodyne Interferometer)	79
3.6 空气折射率的测定 ^[13,14] (Refractive Index Measurement of Air)	82





3.7 微振动和角度测量 (Measurement of Micro-vibration and Angle)	85
本章习题 (Exercises)	86
本章术语 (Terminologies)	87
参考文献 (References)	88
第4章 莫尔干涉术 (Chapter 4 Moire Interferometry)	89
4.1 莫尔干涉测量原理 (Measurement Principle of Moire Interference)	89
4.2 莫尔干涉术测位移 (Displacement Measurement with Moire Interferometry)	94
4.3 莫尔干涉术测面形 (Surface Contour Measurement with Moire Interferometry)	97
4.4 莫尔干涉术测变形和振动 (Measurement of Deformation and Vibration with Moire Interferometry)	102
4.5 莫尔干涉术测流体折射率及其梯度 (Refractive Index and Gradient Measurement of Fluid with Moire Interferometry)	106
4.6 外差莫尔干涉术测平面度 ^[15] (Flatness Measurement with Heterodyne Moire Interferometry)	110
4.7 莫尔条纹的自动处理 ^[16,17] (Automatic Processing of Moire Fringes)	111
本章习题 (Exercises)	114
本章术语 (Terminologies)	114
参考文献 (References)	115
第5章 全息术 (Chapter 5 Holography)	116
5.1 全息术原理 (Holographic Principle)	116
5.2 全息图的记录、存储和重现 (Record, Storage and Reconstruction of Hologram)	117
5.3 全息图的分类 (Classification of Hologram)	122
5.4 全息图的基本性质 (Basic Characteristics of Hologram)	125
5.5 数字全息记录与重建原理 ^[5-9] (Principle of Digital Holographic Recording and Reconstruction)	130
5.6 全息术的应用 (Holographic Application)	134
5.7 实验中注意的问题 (Notice in Experiments)	144
本章习题 (Exercises)	145
本章术语 (Terminologies)	145
参考文献 (References)	147
第6章 全息干涉术 (Chapter 6 Holographic Interferometry)	148
6.1 全息干涉术原理 (Principle of Holographic Interferometry)	148
6.2 全息干涉术的特征 (Characters of Holographic Interferometry)	149
6.3 实时全息干涉术 (Real-Time Holographic Interferometry)	150
6.4 双曝光干涉术 (Double Exposure Holographic Interferometry)	151
6.5 时间平均全息干涉术 (Time-average Holographic Interferometry)	153
6.6 频闪照明全息干涉术 (Holographic Interferometry with Stroboscopic Illumination)	155
6.7 全息等高线术 (Holographic Contour Method)	155
6.8 反射照明全息图的计算 (Calculation of Reflective Illumination Hologram)	159
6.9 数字全息干涉术 (Digital Holographic Interferometry)	161
6.10 全息干涉术的应用 (Application of Holographic Interferometry)	166
6.11 计算全息图检验非球面 (Aspheric Surface Testing by Computer-generated Hologram)	170
本章习题 (Exercises)	173



本章术语 (Terminologies)	173
参考文献 (References)	174
第 7 章 全信息测量技术 (Chapter 7 All Information Measurement Technology)	176
7.1 自动处理全息图 (Automatic Processing Hologram)	176
7.2 实时全息干涉术的全信息测量 (All information Measurement of Real-time Holographic Interferometry)	178
7.3 双曝光全息干涉术的全信息测量 (All Information Measurement of Double-exposure Holographic Interferometry)	182
7.4 全信息测量的光学系统 (Optical System of All Information Measurement)	185
7.5 电学系统与自控技术 (Electrical System and Auto-control Technology)	188
7.6 表面变形的全信息测量 (All Information Measurement of Deformed Surface)	190
7.7 胶体硬化时厚度变化的全信息测量 ^[12] (All Information Measurement of Thickness Changing under Adhesive Shrinking)	193
7.8 基于 EALCD 的数字全息干涉术 ^[14] (Digital Holographic Interferometry Based on EALCD)	198
7.9 四步数字相移全息干涉术三维变形测量 ^[17,18] (3D Deformation Measurement Based on Four-step Digital Phase Shifting)	202
本章习题 (Exercises)	205
本章术语 (Terminologies)	205
参考文献 (References)	206
第 8 章 散斑干涉术 (Chapter 8 Speckle Interferometry)	208
8.1 散斑计量学的发展历程 (Development Course of Speckle Metrology)	208
8.2 散斑及其特性 (Speckle and Its Characteristics)	210
8.3 数字散斑照相术 (Digital Speckle Photography)	215
8.4 数字散斑干涉术测物面形变 (Digital Speckle Interferometry for Deformation Measurement)	224
8.5 数字散斑相关技术 (Digital Speckle Correlation Technique)	234
8.6 剪切散斑干涉术 (Shearing Speckle Interferometry)	238
本章习题 (Exercises)	242
本章术语 (Terminologies)	242
参考文献 (References)	244
第 9 章 光学相关测试技术 (Chapter 9 Optical Correlation Test Technology)	245
9.1 光学信息处理技术 (Technology of Optical Information Processing)	245
9.2 傅里叶变换原理 (Principle of Fourier Transform)	247
9.3 范德尔-卢格特 (Vander-lugt) 相关器 (Vander-lugt Correlator)	248
9.4 实时联合变换相关器 (Real-time Joint Transform Correlator)	250
9.5 基于实时联合变换相关器的滤波技术 (Filtering Technique Based on Real-time Joint Transform Correlator)	255
9.6 畸变不变目标识别技术 (Distortion Invariant Target Recognition Technology)	267
本章习题 (Exercises)	279
本章术语 (Terminologies)	280
参考文献 (References)	282
第 10 章 光源、记录介质和探测器 (Chapter 10 Light Source, Recording Material and Detector)	285
10.1 全息干涉对光源的要求 (The Requirements for Light Source of Holographic Interference)	285



10.2	激光光源 (Laser Light Source)	287
10.3	对全息记录材料的要求 (The Requirements for Recording Materials in Holography)	292
10.4	卤化银照相乳胶 (Halogenating Silver Photographic Emulsion)	294
10.5	光导热塑料 ^[8] (Photoconductor Thermoplastic Film)	297
10.6	硅酸铋晶体 ^[9,10] (BSO Crystal)	299
10.7	电视摄像机 (Television Camera)	300
10.8	固体图像传感器 ^[13,14] (Solid Image Sensor)	301
10.9	空间光调制器 (Spatial Light Modulator)	306
	本章习题 (Exercises)	310
	本章术语 (Terminologies)	310
	参考文献 (References)	312

第1章 干涉测试基础

(Chapter 1 Foundation of Interference Testing)

1.1 干涉与干涉术 (Interference and Interferometry)

1.1.1 干涉发展简史 (Brief History of Interference Development)

干涉是光具有波动性的最严格的证明。这个现象是由于两束或多束光重叠，使能量体密度在空间上再分布的结果。

在17世纪，包伊尔 (Boyle)、格莱马尔蒂 (Grimaldi) 和胡克 (Hooke) 首先描述了干涉现象。当光从薄板或薄膜反射时，可以观测到彩色条纹。胡克试图从波的观点解释这一现象，但是他没有足够清楚地提出光的波动性。第一个最详细地研究这个现象的人是牛顿。他把凸透镜放在平板玻璃上，研究了在空气楔中形成的条纹图样 (即牛顿环, Newton ring)。虽然牛顿坚持把粒子概念加在光的属性上，但是当他解释这个现象时，不得不假定光粒子同透明物体相互作用时产生光振动。

杨氏首先根据光振动叠加现象提出光干涉的基本原理，而后菲涅耳又进一步发展了这一原理。这两个人被认为是波动光学 (wave optics) 的奠基人^[1]。

在1802年，杨氏做了双孔干涉实验，如图1-1所示。从扩展光源发出的光照在不透明屏A的针孔 S_0 上，具有两个针孔 S_1 和 S_2 的屏B放在针孔 S_0 的圆锥形衍射光束 (diffraction light beam) 中。如果把观察屏G放在针孔 S_1 和 S_2 的衍射波重叠的位置，那么能在屏G上看到干涉条纹。如果其中一针孔被挡住，干涉条纹将消逝，观察屏G被均匀地照亮。条纹的出现不能由针孔在观察屏上产生的照度和来解释，它是具有一定位相的光波的总和，位相由针孔 S_1 和 S_2 到观察屏G上相关点的距离决定。条纹的空间频率 (spatial frequency) (单位长度内的条纹数) 随线段 S_1S_2 相对观察屏G上的点的张角 α 增大而增加，同时也与波长有关。因此，当应用具有连续光谱的光源 (如白炽灯、太阳) 时，所观察到的条纹，除了中心条纹外，都是彩色的，而且可见条纹的数目相当少 (大约8~10个)。随着光源的谱线变窄，有足够对比度的可观察的条纹数增加。条纹的对比度取决于针孔 S_0 的大小，当针孔 S_0 的尺寸增大时，条纹将逐渐消逝^[2,3]。

杨氏和菲涅耳提出了干涉的必要条件：只有当两波是从针孔 S_0 发出的同一原始波时才能产生干涉。杨氏和菲涅耳的波动理论解释了所有观察到的各种干涉现象，但是在麦克斯威

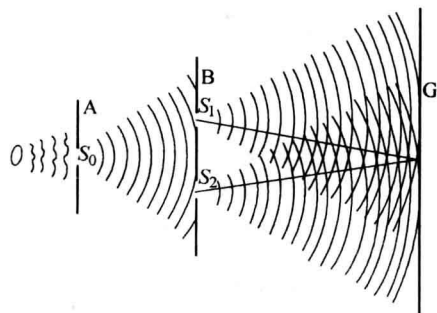


图1-1 杨氏双孔干涉实验
(Fig. 1-1 Young's Interference
Experiment with Double Pinholes)



(Maxwell) 发展了光的电磁理论之前, 光波的属性仍然是不清楚的。

1.1.2 干涉测试技术的应用 (Application of Interference Testing Technology)

干涉测试技术是以光波干涉原理为基础进行测试的一门技术, 现在已是实验物理学的重要方法之一。随着干涉测试技术的应用, 其正扩展到其他科学分支。在 20 世纪初, 迈克尔逊首先将可见光干涉术应用到计量学和光谱学中; 1947 年, 人们又把干涉术应用到射电天文学; 后来又出现了红外干涉光谱仪。

与一般光学成像测试技术相比, 干涉测试技术具有更高的测试灵敏度 (measure sensitivity) 和测试精度 (measure precision)。尤其激光的出现及其在干涉测试技术中的应用, 以及干涉仪 (interferometer) 与计算机的结合, 不但进一步提高了测试精度, 而且扩大了测试范围, 提高了测试速度, 实现了干涉条纹的实时自动分析。因为在干涉测试中, 干涉仪是以干涉条纹来反映被测件信息的, 所以干涉条纹的自动扫描和处理是近代干涉测试技术的发展方向。干涉术的应用见表 1-1。这些应用范围是从 X 射线到无线电波, 包含整个电磁频谱, 也适用于声波、电子和中子。

表 1-1 干涉术的应用
(Table 1-1 Application of Interferometry)

测 量		应 用
直 接	间 接	
条纹位置	平均位相差	1) 长度标准和波长 2) 长度比较和机床控制 3) 折射术 4) 光速
	位相变化	1) 干涉显微术 2) 显微拓扑术 3) 光学检验 4) 全息干涉术
条纹可见度	光源频谱 光源空间分布	对称谱线的形状 天体直径
强度分布 (位置和可见度)	光源频谱	1) 干涉光谱学 2) 傅里叶光谱学
	光源空间分布	1) 光学传递函数 2) 射电天文学

1.2 基本关系式 (Basic Relations)

1.2.1 光波的一般表达式 (General Expression of Light Wave)

尽管已知的许多光的干涉现象可以用量子光学 (quantum optics) 的术语来解释, 但在干涉全息 (holography) 和全息干涉术中, 光的量子属性的证明却是微乎其微的。因此, 本书中将应用古典的光电磁理论概念来讲述。单色光波 (monochromatic light wave) 可以表示为



$$\vec{E} = (x, y, z, t) = \vec{a}(x, y, z) \cos[\omega t + \phi(x, y, z)] \quad (1-1)$$

式中 $\vec{E}$ ——在给定的空间点的电场强度矢量；
 $\vec{a}$ ——在给定的空间点的振幅矢量 (amplitude vector)；
 ϕ ——在给定的空间点的振动初位相 (initial phase)；
 ω ——振动角频率。

振动角频率 ω 与频率 ν 、振动周期 T 和波长 λ 有如下关系：

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi v}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中 v ——给定介质中光的速度。

光波也可以用波矢量 (wave vector) $\vec{k}$ 表示，其方向与波传播方向一致，在各向同性介质 (isotropic medium) 中，传播方向垂直于波前 (wave front) 表面。波矢量 $\vec{k}$ 的大小为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{n\omega}{c} = \frac{\omega}{v} \quad (1-3)$$

式中 n ——介质的折射率 (refractive index)，它等于光波 λ 在真空中的相速 (phase speed) c 与在介质中的相速 v 的比值 $\left(\frac{c}{v}\right)$ 。

1.2.2 光波的位相 (Phase of Light Wave)

本书仅研究均匀波的情况，即恒定位相的波面与恒定振幅的波面重合。位相是干涉的重要参数，因此必须确定平面波 (plane wave) 和球面波 (spherical wave) 两种重要情况的位相 $\phi(x, y, z)$ 的表达式。

如果在任意瞬时，等位相面是平面，那么将这种波称为平面波。假设研究图 1-2 中平面波前 S 。如果在初始时刻 $t = 0$ ，点 $O(x = 0, y = 0, z = 0)$ 振动的位相是 δ ，那么从点 O 向平面 S 引垂线，其交点 P 的振动位相为

$$\phi(P) = \delta - \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (1-4)$$

式中 l ——线段 $\overline{OP}$ 的长度。

如果研究平面 S 上任意点 Q ，那么长度 l 是点 Q 的位置矢量 $\vec{r}$ 向平面 S 的法向方向的投影，即

$$l = \vec{r} \cdot \vec{n} \quad (1-5)$$

其中， $\vec{n}$ 为波前法线的单位矢量，它等于

$$\vec{n} = \frac{\vec{k}}{k} \quad (1-6)$$

$\vec{r} \cdot \vec{n} = l$ 的条件适合于平面 S 上所有观察点。因此，这些点的波位相是常量并等于

$$\phi(\vec{r}) = \delta - \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{r} \cdot \vec{n}) = \delta - \vec{r} \cdot \vec{k} \quad (1-7)$$

这样，对于平面波，式(1-1)可以写成

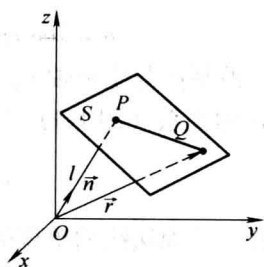


图 1-2 平面波的传播
(Fig. 1-2 Propagation of Plane Wave)



$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{a}(\vec{r} \cdot \vec{k}) \cos(\omega t + \delta - \vec{r} \cdot \vec{k}) \quad (1-8)$$

如果平面波沿一个坐标轴方向传播, 如沿 z 轴方向, 那么 $\vec{r} \cdot \vec{k} = zk$, 则

$$\vec{E}(z, t) = \vec{a}(z) \cos(\omega t + \delta - zk) \quad (1-9)$$

对于从坐标原点发出的球面波, 对距中心点 O 的距离为 r 的所有点, 波的位相是常量。如果在初始时刻, 点 O 的位相是 δ , 振幅是 a_0 , 那么在半径为 r 的球面上所有点的位相为

$$\phi(r) = \delta - \frac{2\pi}{\lambda}r = \delta - kr \quad (1-10)$$

振幅为

$$\vec{a}(r) = \frac{\vec{a}_0}{r} \quad (1-11)$$

这样, 对于球面波, 式(1-1)有下列形式:

$$\vec{E}(r, t) = \frac{\vec{a}_0}{r} \cos(\omega t + \delta - kr) \quad (1-12)$$

1.2.3 光波的空间频率 (Spatial Frequency of Light Wave)

光波可以用波的空间频率表示, 这个概念及其表示方法可以用于干涉条纹。在图 1-2 中, 设平面波的波面上任一点 $Q(x, y, z)$ 的位置矢量为 $\vec{r}$, 则

$$\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z \quad (1-13)$$

波面法线的单位矢量 $\vec{n}$ 与坐标轴 x 、 y 、 z 的夹角分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 , 即

$$\vec{n} = \vec{i} \cos \alpha_1 + \vec{j} \cos \alpha_2 + \vec{k} \cos \alpha_3 \quad (1-14)$$

波平面与坐标轴 x 、 y 、 z 的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , θ 与 α 的关系 (图 1-3) 为

$$\alpha_i = \frac{\pi}{2} - \theta_i \quad (1-15)$$

这样, 波面法线的单位矢量 $\vec{n}$ 可表示为

$$\vec{n} = \vec{i} \sin \theta_1 + \vec{j} \sin \theta_2 + \vec{k} \sin \theta_3 \quad (1-16)$$

设初位相 δ 为零, 那么点 Q 的位相可表示为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{r} \cdot \vec{n}) = 2\pi \left(\frac{\sin \theta_1}{\lambda}x + \frac{\sin \theta_2}{\lambda}y + \frac{\sin \theta_3}{\lambda}z \right) = 2\pi(f_x x + f_y y + f_z z) \quad (1-17)$$

式中 f_x —— x 轴方向的空间频率, $f_x = \frac{\sin \theta_1}{\lambda}$;

f_y —— y 轴方向的空间频率, $f_y = \frac{\sin \theta_2}{\lambda}$;

f_z —— z 轴方向的空间频率, $f_z = \frac{\sin \theta_3}{\lambda}$ 。

空间频率的单位为 cy/mm (cycle/millimeter)。平面波传播方向 $\vec{n}$ 与坐标轴的正向夹角 θ

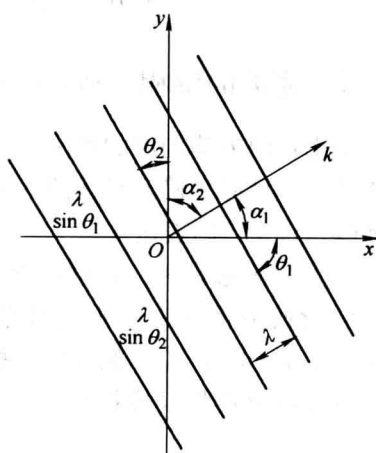


图 1-3 光波的空间频率
(Fig. 1-3 Spatial Frequency of Light Wave)



小于 90° 时, 空间频率分量为正; 大于 90° 时, 空间频率分量为负。负空间频率只是表示传播方向不同, 无其他物理含义。

1.2.4 光波对辐射探测器的作用^[4] (Effect of Light wave on Radiation Detector)

光波对辐射探测器的作用由其强度决定, 即由平均时间内的能流密度 U 决定, U 可表示为

$$U = \langle v\omega \rangle \quad (1-18)$$

式中 $\langle \rangle$ ——表示在平均时间内;

v ——光波在介质中的传播速度;

ω ——光场能量密度。

在 cgs 系统中, 能量密度 ω 可表示为

$$\omega = \frac{\epsilon}{4\pi} \vec{E} \cdot \vec{E} \quad (1-19)$$

式中 ϵ ——介质的介电常数。

因此

$$U = \frac{\epsilon v}{4\pi} \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle \quad (1-20)$$

在时间 τ 内, $\vec{E} \cdot \vec{E}$ 的平均值为

$$\langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle = \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} E^2(x, y, z) dt \quad (1-21)$$

把式(1-1)代入式(1-21), 电场强度和振幅矢量只取其大小, 得

$$\begin{aligned} \langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle &= \frac{a^2(x, y, z)}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \cos^2[\omega t + \phi(x, y, z)] dt = \\ &= \frac{a^2(x, y, z)}{2\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \{1 + \cos 2[\omega t + \phi(x, y, z)]\} dt \end{aligned} \quad (1-22)$$

因为积分时间 τ 远大于振动周期 T , 那么

$$\int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \cos 2[\omega t + \phi(x, y, z)] dt \approx 0$$

这样, 式(1-22)可转化为

$$\langle \vec{E} \cdot \vec{E} \rangle = \frac{a^2(x, y, z)}{2} \quad (1-23)$$

把式(1-23)代入式(1-20), 得

$$U = \frac{\epsilon v}{8\pi} a^2(x, y, z) \quad (1-24)$$

由式(1-24)可知, 光波对探测器的作用由其振幅的平方决定, 与波的位相无关。从这点来说, 所有光辐射探测器都是二次性的, 故可称为平方律探测器。一般来说, 去掉常数因子 $\frac{\epsilon v}{8\pi}$, 并定义强度 I 为

$$I = a^2(x, y, z) \quad (1-25)$$

1.2.5 光波的复数表示 (Complex Expression of Light Wave)

在计算时, 以复数形式来表示光波很方便, 即



$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{a}(x, y, z) e^{-i[\omega t + \phi(x, y, z)]} \quad (1-26)$$

由式(1-26)所决定的电场强度矢量大小为

$$E(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z, t)] \quad (1-27)$$

当用复数形式表示光波时,三角函数运算被简单的指数函数运算代替。然而,必须注意,在完成具有复数量的数学运算后,应该取所得结果的实数部分。

复数 $\vec{E}(x, y, z, t)$ 可以用两个因子表示,即

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{a}(x, y, z) e^{-i\phi(x, y, z)} e^{-i\omega t} = \vec{A}(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (1-28)$$

$$\vec{A}(x, y, z) = \vec{a}(x, y, z) e^{-i\phi(x, y, z)} \quad (1-29)$$

其中,因子 $e^{-i\omega t}$ 取决于时间,而因子 $\vec{A}(x, y, z)$ 取决于给定点的坐标。将 $\vec{A}(x, y, z)$ 称为波振幅复矢量 (complex vector of wave amplitude), 而将 $\vec{a}(x, y, z)$ 称为波振幅矢量 (vector of wave amplitude), 矢量 $\vec{A}$ 和 $\vec{a}$ 的大小分别称为波的复振幅 (complex amplitude) A 和波振幅 a 。当波以复数形式写出时,其强度为

$$I = \vec{E} \cdot \vec{E}^* = \vec{A} \cdot \vec{A}^* = A \cdot A^* \quad (1-30)$$

其中,星号 (*) 表示共轭复数值。

1.2.6 波场的叠加 (Superposition of Wave Field)

如果几个光波同时在空间传播而又相遇时,那么根据叠加原理,相遇后的电场强度可以表示为

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(x, y, z, t) \quad (1-31)$$

如果各叠加的波有相同的频率,那么按式(1-28)可以将式(1-31)写成

$$\vec{E}(x, y, z, t) = e^{-i\omega t} \sum_{i=1}^n \vec{A}_i = \vec{A} e^{-i\omega t} \quad (1-32)$$

$$\vec{A} = \sum_{i=1}^n \vec{A}_i \quad (1-33)$$

这样,可以忽略掉时间因子,用累加复振幅矢量代替电场强度矢量。很明显,当不同频率的波叠加时,上述简化是不可能的。如果电场强度的方向是平行的,那么可以从复振幅矢量的和过渡到复振幅的和,即

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-34)$$

1.3 干涉条纹的特性 (Characteristics of Interference Fringes)

1.3.1 干涉条纹的强度分布 (Intensity Distribution of Interference Fringes)

具有相同频率的两平面单色波,可以忽略掉时间因子,用复振幅矢量来表示。设两波的



波矢量为 $\vec{k}_1$ 和 $\vec{k}_2$ ，那么两波的复振幅矢量为

$$\left. \begin{aligned} \vec{A}_1 &= \vec{a}_1(\vec{r}) e^{-i(\delta_1 - \vec{r} \cdot \vec{k}_1)} \\ \vec{A}_2 &= \vec{a}_2(\vec{r}) e^{-i(\delta_2 - \vec{r} \cdot \vec{k}_2)} \end{aligned} \right\} \quad (1-35)$$

图 1-4 所示为同频率两平面波的干涉。如果两波的电场强度矢量垂直于图示平面，那么可按标量研究两波的复振幅。按式(1-34)复合波的振幅为

$$A(\vec{r}) = A_1(\vec{r}) + A_2(\vec{r}) = a_1(\vec{r}) e^{-i(\delta_1 - \vec{r} \cdot \vec{k}_1)} + a_2(\vec{r}) e^{-i(\delta_2 - \vec{r} \cdot \vec{k}_2)} \quad (1-36)$$

对于在非吸收介质中传播的均匀平面波，其振幅与坐标无关，因此式(1-36)中的 a_1 和 a_2 与坐标 r 无关。这样，按式(1-30)复合波的强度为

$$\begin{aligned} I(\vec{r}) &= A(\vec{r}) A^*(\vec{r}) = a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2 e^{-i[(\delta_1 - \delta_2) - \vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)]} + a_1 a_2 e^{i[(\delta_1 - \delta_2) - \vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)]} \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos[\vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) - (\delta_1 - \delta_2)] \end{aligned} \quad (1-37)$$

由式(1-37)可知，干涉条纹的强度分布在空间上按周期性余弦变化，干涉条纹的变化与时间无关，如图 1-5 所示，图中 d 是干涉条纹的周期。

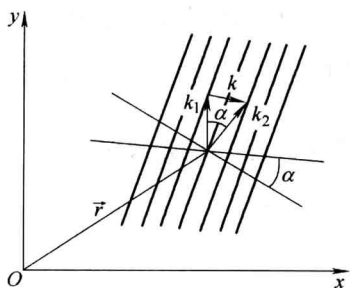


图 1-4 同频率两平面波的干涉

(Fig. 1-4 Interference of Two Plane Waves with the Same Frequency)

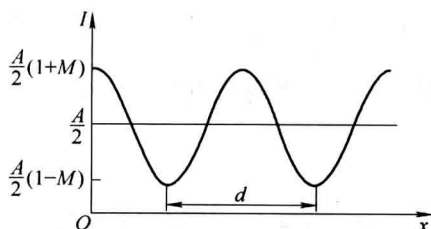


图 1-5 干涉条纹强度分布

(Fig. 1-5 Intensity Distribution of Interference Fringes)

在下列点获得相长干涉 (constructive interference)，即获得强度极大值 (也就是波峰, wave crest)

$$\vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) - (\delta_1 - \delta_2) = 2m\pi \quad (1-38)$$

其中, $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

在下列点获得相消干涉 (destructive interference)，即获得强度极小值 (也就是波谷, wave valley)

$$\vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) - (\delta_1 - \delta_2) = (2m+1)\pi \quad (1-39)$$

如果初位相 $(\delta_1 - \delta_2)$ 是常数，那么由式(1-38)和式(1-39)决定的波峰线和波谷线的空间位置保持不变，即能观察到稳定的干涉条纹。

任一实光源发出的光振动位相都是随时间随机变化的。如果两平面波的光源是独立的，那么 $(\delta_1 - \delta_2)$ 的值随机地变化，这样导致在测量时间 t 内 ($t \gg T$)，式(1-37)中第三项



的平均值为零。因此,式(1-37)给出的两波强度相加,观察不到稳定的干涉条纹。其复合波的强度为

$$I(r) = a_1^2 + a_2^2 \quad (1-40)$$

很明显,如果从独立光源辐射的光波位相缓慢地变化,例如,高稳态的激光,那么也可以从两个独立的光源观察到干涉条纹,尤其当迅速提取强度信号时,便能观察到干涉条纹。

当用普通光源(非激光)作为干涉仪的光源时,为了看到干涉条纹,必须保证两波是同一原始波分出的波,正如在杨氏实验中所用的光学装置,针孔 S_1 和 S_2 把从针孔 S_0 发出的光波分成两部分一样的波。在许多其他干涉装置中,原始波也要类似的分开,或者按波前分割法,如菲涅耳双棱镜、菲涅耳反射镜、劳埃德(Lloyd)反射镜;或者按振幅分割法,如迈克尔逊干涉仪、马赫-曾德尔干涉仪等。在这些干涉仪中,尽管位相 δ_1 和 δ_2 随时间随机地变化着,但它们的差 $(\delta_1 - \delta_2)$ 保持不变,所以,能产生稳定的干涉条纹。

1.3.2 干涉条纹的方向和频率 (Direction and Frequency of Interference Fringes)

假定 $\delta_1 - \delta_2 = 0$, 波峰形成的条件变为

$$\vec{r} \cdot (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) = 2m\pi \quad (1-41)$$

式(1-41)是垂直于矢量 $\vec{k} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$ 的平面族方程式,图 1-4 给出干涉条纹的方向。

因为 $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = \frac{2\pi}{\lambda}$, 矢量 $\vec{k}$ 是两边为 $\vec{k}_1$ 和 $\vec{k}_2$ 的等腰三角形的底边,这样波峰平面平行于矢量 $\vec{k}_1$ 和 $\vec{k}_2$ 之间的内角平分线。从这些平面族到坐标原点 O 的距离为

$$a_m = \frac{2m\pi}{|\vec{k}|} \quad (1-42)$$

序号为 m 和 $(m+1)$ 的相邻平面间的距离为

$$d = a_{m+1} - a_m = \frac{2\pi}{|\vec{k}|} \quad (1-43)$$

由图 1-4 可得

$$|\vec{k}| = 2|\vec{k}_1| \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1-44)$$

因此,干涉条纹的间隔为

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1-45)$$

干涉条纹的空间频率为

$$\nu = \frac{1}{d} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \quad (1-46)$$

由式(1-46)可知,两波叠加形成平行等间隔的直条纹,如图 1-6 所示。

这样,在选择记录介质后,必须正确安排两束光的夹角,以满足探测器的频率要求。