

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Modern Optoelectronic Measurement and
Testing Technology

现代光电测试技术

郝群 胡摇 王姗姗 张韶辉 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

测试是测量、试验和检验的总称，其基础是各种测量原理和测量仪器，并在此基础上形成测试方法和测试技术。测试技术建立在仪器技术的基础上，是我们进行科学探索和认识世界的重要手段。大量事实表明，谁掌握或者拥有最先进的测量仪器，谁就有可能做出最先进、最杰出的科研成果；强大的科技创新能力的基础，是科学仪器和测试方法的创新。

20世纪以来，随着激光技术、光波导技术、光电子技术、光纤技术、计算机技术的发展，以及傅里叶光学、现代光学、二元光学和微光学的出现和发展，光电测试技术无论从测量原理、方法还是准确性等方面都得到迅速发展，已成为测试技术新的发展方向，广泛应用于工业、农业、文教、卫生、国防、科研和家庭生活等各领域。

本书以光电被测对象为主线，较全面地介绍了光学量和几何量测量中所涉及的基本理论，主要测量原理、方法，主要测量仪器的组成及主要技术特点。

本书与常规以原理和技术为主线的写法不同，而是以应用对象为主线，将原理各不相同的测试方法联系起来，便于各方法之间的分析比较，突出将理论应用到实际中，注重对工程思维培养。

本书可作为光学工程、仪器科学与技术、电子科学与技术、信息科学与技术专业的研究生教材，亦可作为有关工程技术人员及高年级本科生的参考书。全书共分6章，第一章介绍精密测试技术的发展历史和发展方向；第二章介绍光电测试的基础理论和基本原理，包括干涉原理、激光多普勒原理、差分与斜率测量原理、三角测量原理、莫尔测量原理等；第三章介绍长度测量，包括柯氏干涉仪测长、双频干涉测长、激光多普勒技术、绝对距离测量和三角法测距；第四章介绍波前误差测量，包括移相干涉测量、同步干涉测量、哈特曼测量、位相反衍技术及波前误差拟合与处理方法；第五章介绍形貌测量，包括三角测量法、激光束偏转法、莫尔条纹法，以及结构光测量物体的表面轮廓；第六章介绍微观形貌测量，包括光学探针法、共焦显微镜法和白光干涉轮廓仪法等。

由于同一测量原理可能会用于测量多个对象，所以多个章节会重复出现同一测量原理，为避免重复讲解，并使全书的条理更清晰，本书将所用的光电测试基础理论和基本原理集中在第二章中统一介绍，化解了因按测

量对象编排有可能带来的使基础测量原理分散、重复混乱的问题。对于光学基础较弱的读者，有利于补充光学基础的欠缺，对于有一定光学基础的读者也起到一个回顾和强化的作用。

本书在保留经典测量方法的同时，介绍了当代国内外主流的、代表未来发展方向的光电测量原理和仪器，如同步移相干涉测试技术等。同时也将作者多年的研究成果融入其中，如数字莫尔移相干涉非球面测试技术、激光束偏转法非球面测试技术等，使读者充分了解光电测试技术领域的学术动态和最新成果。同时，介绍了自适应光学中所应用的位相反衍技术和哈特曼波前传感技术，以丰富波前检测的方法，扩展应用范围。

本书第一章由郝群和胡摇编写，第二章由胡摇、张韶辉、王姗姗编写，第三章由张韶辉、胡摇编写，第四章由王姗姗、郝群编写，第五章由胡摇、王姗姗编写，第六章由王姗姗、胡摇编写。感谢浙江大学汪凯巍副教授的有益讨论。

由于作者水平有限，本书编排是一种新的尝试，难免有不妥之处，欢迎读者提出建设性的宝贵意见。

编著者

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	001
1.1 精密测试的意义和特点	001
1.2 精密测试基础	002
1.2.1 基本概念	002
1.2.2 基本构成	002
1.3 光电测试技术的发展	004
参考文献	004
第二章 光电测试的基础理论	005
2.1 干涉原理	005
2.1.1 光波叠加	005
2.1.2 干涉条件	006
2.1.3 影响条纹对比度的因素	008
2.2 激光多普勒原理	012
2.2.1 多普勒频移原理	012
2.2.2 激光多普勒频移测量	015
2.2.3 小结	017
2.3 差分与斜率测量原理	017
2.3.1 斜率测量原理	018
2.3.2 差分测量原理	020
2.3.3 波前重构算法	022
2.4 三角测量原理	025
2.4.1 直射式激光三角法	025
2.4.2 斜射式激光三角法	028
2.4.3 直射式与斜射式特点比较	029

2.5 莫尔测量原理	029
2.5.1 莫尔测量基础	030
2.5.2 莫尔条纹测长原理	035
参考文献	039
第三章 长度测量	042
3.1 长度基准回顾	042
3.1.1 长度基准的沿革	042
3.1.2 “米”定义复现方法	044
3.2 柯氏干涉仪测长	046
3.2.1 柯氏干涉仪光路	046
3.2.2 传统柯氏干涉仪测长原理	047
3.2.3 柯氏干涉仪的改进	048
3.3 激光多普勒测量技术	049
3.4 双频激光干涉测量技术	056
3.5 绝对距离干涉测量	068
3.5.1 合成波长法	069
3.5.2 激光调频测距	073
3.5.3 波长扫描干涉测试技术	075
3.5.4 光频梳绝对距离测量	076
3.6 三角法测距	083
参考文献	088
第四章 波前误差测量	091
4.1 移相干涉测量	091
4.1.1 移相干涉技术的原理	091
4.1.2 相位解包裹	094
4.1.3 移相干涉技术的特点	094
4.1.4 常见的移相方法	095
4.1.5 移相干涉技术的应用	096
4.2 同步移相干涉测量	098
4.2.1 同步移相干涉测量的系统组成	098
4.2.2 同步移相干涉测量的抗振技术研究	098
4.2.3 典型的同步移相干涉系统	099
4.3 夏克-哈特曼自基准测量技术	101
4.3.1 夏克-哈特曼测量原理	101
4.3.2 自基准哈特曼检测	103
4.4 波前重构方法	105
4.4.1 区域法重构波前	105

4.4.2	模式法重构波前相位	109
4.5	相位恢复技术	113
4.5.1	相位恢复基本原理	113
4.5.2	相位恢复基本模型	113
4.5.3	G-S 算法	115
4.5.4	相位变更相位恢复模型	116
4.5.5	光强探测和 PDPR 模型中的离散采样	117
4.5.6	基于迭代变换的 PDPR 算法	118
4.5.7	基于参数最优化的 PDPR 算法	121
	参考文献	122
第五章	形貌测量	127
5.1	单点扫描三角测量法	127
5.2	激光束偏转法	129
5.2.1	平移法	130
5.2.2	转动法	130
5.2.3	平移转动法	131
5.3	莫尔条纹法	132
5.3.1	等高莫尔法	132
5.3.2	莫尔测偏法	136
5.3.3	微电子基板三维形貌等高莫尔法测量	137
5.4	数字莫尔法	141
5.4.1	虚光栅与数字莫尔	141
5.4.2	数字莫尔移相	143
5.4.3	相位-高度变换	145
5.4.4	应用举例	146
5.5	结构光法	148
5.5.1	结构光法概述	148
5.5.2	结构光法测量原理	150
5.5.3	应用举例	153
	参考文献	155
第六章	微观形貌测量	158
6.1	光探针法	158
6.1.1	光学探针法原理	158
6.1.2	光学探针法技术参数	159
6.1.3	光学探针法的应用	160
6.1.4	其他种类的光学探针法	160
6.2	共焦显微镜	162

6.2.1	共焦显微镜技术原理	162
6.2.2	共焦显微镜技术参数	163
6.2.3	共焦显微镜的改进	164
6.2.4	共焦显微镜的应用	166
6.3	白光干涉轮廓仪	167
6.3.1	白光干涉仪光路结构	167
6.3.2	白光干涉仪原理	168
6.3.3	白光干涉仪应用	169
	参考文献	170

第一章

绪 论

1.1 精密测试的意义和特点

精密测试技术是工业发展和科学研究的基础和先决条件之一，这已被生产发展的历史所确认。从生产发展的历史来看，工业和科学研究水平的提高总是与精密测试技术的发展水平相关的。以精密加工领域为例，由于有了千分尺类量具，使加工精度达到了 0.01 mm ；有了测微比较仪，使加工精度达到了 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右；有了电容/电感测微仪等精密测量仪器，使加工精度达到了 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ；有了激光干涉仪，使加工精度达到了 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 。目前国际上机床的加工水平已能稳定地达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的精度，正在向着稳定精度为纳米级的加工水平发展，表面粗糙度的测量则向亚纳米级的水平发展，纳米技术正在形成新的技术热点。有人认为，材料、精密加工、精密测量与控制是现代精密工程的三大支柱。同理，对于科学技术来说，测量与控制是使其发展的促进因素，测量的精度和效率在一定程度上决定着科学技术的水平。

目前在基础工业的某些领域，例如研究切削速度与进刀量对加工误差的影响、摩擦磨损等，精密测试已成为不可分割的重要组成部分；在电子工业部门，精密测试技术也被提到从未有过的高度，例如制造超大规模集成电路，目前半导体工艺的典型线宽为 14 nm ，正向 7 nm 过渡，如果定位要求占线宽的 $1/3$ ，那么就要求 2 nm 量级的精度，所以要研究这种集成电路的装备，必须有高精度测量用的稳频激光系统和定位系统；又如在阿伏伽德罗基础常数的测定中，不仅要求X射线干涉仪的工作台能在 10 nm 的分辨率下连续移动，而且在 50 mm 的位移行程上的角偏量为千分之几的秒级；此外，在对半导体材料、生物细胞、空气污染微粒、石油纤维、纳米材料等基础研究中，无不需精密测试技术。

针对上述应用需求，光电测试技术由于具有高精度、非接触、多功能等特点，得到广泛的关注和应用。

利用自然界存在的光线进行计量与测试最早始于天文和地理测量中。望远镜和显微镜的出现，光学与精密机械的结合，使许多传统的光学计量与测试仪器广泛用于各级计量及工业测量部门。激光器的出现和信息光学的形成，特别是激光技术与微电子技术、计算机技术的结合，出现了光机电一体化光电测试技术。在光机电金字塔中，塔顶是光，光学是这个基本体系中的原理基础，而精密机械、电子技术与计算机技术构成塔底，是光学测量的支撑基础。相比传统的光学测量系统，现代光学测量系统具有以下主要特点：

(1) 从主观测量发展成为客观测量，即用光电探测器取代人眼这个主观探测器，提高了测量精度与效率；

- (2) 用激光光源取代常规光源, 获得方向性极好的光束用于各种光学测量上;
 (3) 从光机结合的模式向光机电一体化的模式转换, 实现测量与控制的一体化。

1.2 精密测试基础

1.2.1 基本概念

计量 (Metrology): 是指研究测量、保证测量统一和准确的所有工作; 计量泛指对物理量的标定、传递与控制。计量研究的主要内容包括: 计量单位及其基准, 标准的建立、保存与使用, 测量方法和计量器具, 测量不确定度, 观察者进行测量的能力以及计量法制与管理等。计量也包括研究物理常数和物质标准以及材料特性的准确测定。

测量 (Measurement): 是指将被测值和一个作为测量单位的标准量进行比较, 求其比值的过程。测量过程可以用一个基本公式表示为

$$L = Ku \quad (1.1)$$

式中, L 为被测长度; u 为长度单位; K 为比值。

从计量的定义和内容可以看出, 计量的主要表现方式是测量。测量的目的是得到具体的测量数值, 这个测量数值还应包含测量的不确定度。一个完整的测量过程包括 4 个测量要素: 测量对象和被测量, 测量单位和标准量, 测量方法, 测量的不确定度。

检验 (Inspection): 是指判断测量是否合格的过程, 通常不一定要要求具体数值。

测试 (Measuring and Testing): 是指具有试验研究性质的测量, 一般是测量、试验与检验的总称。测试是人们认识客观事物的方法。测试过程是从客观事物中摄取有关信息的认识过程。在测试过程中, 需要借助专门的设备, 通过合适的试验和必要的数据处理, 求得所研究对象的有关信息量值。

灵敏度 (Sensitivity): 是指测量系统输出变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比, 其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.2)$$

测量系统输出曲线的斜率就是其灵敏度。对于线性系统, 其灵敏度是一个常数。

分辨率 (Resolution): 是指测量系统能检测到的最小输入增量。

误差 (Error): 是指测得值与被测量的真值之间的差。误差可以分为系统误差、随机误差与粗大误差。

精度 (Accuracy): 是指反映测量结果与真值接近程度的量。在现代计量测试中, 精度的概念逐步被测量的不确定度代替。

测量不确定度 (Uncertainty of Measurement): 是指表征合理地赋予被测量的量值的分散性。主要包括: ①不确定度的 A 类评定, 即用对重复观察值的统计分析进行不确定度评定的方法; ②不确定度的 B 类评定, 即用不同于统计分析的其他方法进行不确定度评定的方法。

1.2.2 基本构成

任何一个测量系统, 其基本组成部分可用图 1.1 所示的原理方框图来表示。



图 1.1 测量系统原理框图

传感器用于从被测对象获取有用的信息，并将其转换为适合于测量的信号。不同的被测物理量要采用不同的传感器，这些传感器的作用原理所依据的物理效应或其他效应是千差万别的。对于一个测量任务来说，第一步是能够有效地从被测对象取得能用于测量的信息，因此传感器在整个测量系统中的作用十分重要。

信号处理是对从传感器所输出的信号作进一步的加工和处理，包括对信号的转换放大、滤波、存储和一些专门的信号处理。这是因为从传感器输出的信号往往除有用信号外还夹杂有各种干扰和噪声，因此在作进一步处理之前必须尽可能将干扰和噪声滤除掉。此外，传感器的输出信号往往具有光、机、电等多种形式，而对信号的后续处理通常采取电的方式和手段，因此必须把传感器的输出信号转换为适宜于电路处理的电信号。通过信号的处理，最终获得便于传输、显示、记录及可进一步后续处理的信号。

显示与记录是将处理过的信号用便于人们观察和分析的介质与手段进行显示或记录。

图 1.1 所示的三个方框构成了测量系统的核心部分。但被测对象和观察者也是测量系统的组成部分，它（他）们同传感器、信号处理部分以及数据显示与记录部分一起构成了一个完整的测量系统。这是因为在用传感器从被测对象获取信号时，被测对象通过不同的连接方式对传感器产生了影响和作用；同样，观察者通过自身的行为和方式直接或间接地影响着系统的特性。

一个光电测量系统的基本组成部分主要包括光源、被测对象与被测量光信号的形成与获得、光信号的转换、信号或信息处理等部分。按照不同的需要，实际的光学测量系统可能简单些，也可能还要增加某些环节，或者由若干个不同的光学测量系统集成。下面对每一部分分别加以说明。

(1) 光源。光源是光学测量系统中必不可少的一部分。在许多光学测量系统中需要选择一定辐射功率、一定光谱范围和一定空间分布的光源，以此发出的光束作为携带被测信息的载体。

(2) 被测对象与被测量。被测对象主要是指具体要测量的物体或物质，被测量就是具体要测量的参数，被测量可以分为几何量、力学量、光学量、时间频率、电磁量、电学量等。

(3) 光信号的形成与获得。实际上就是光学传感部分，主要是利用各种光学效应，如干涉、衍射、偏振、反射、吸收、折射等，使光束携带上被测对象的特征信息，形成可以测量的光信号。能否使光束准确地携带上所要测量的信息，是决定光学测量系统成败的关键。

(4) 光信号的转换。就是通过一定的途径获得原始的光信号。目前主要通过各种光电接收器件将光信号转换为电信号，以利于采用目前最为成熟的电子技术进行信号的放大、处理和控制等。也可采用信息光学或其他手段来获得光信号，并用光学或光子学方法对其进行直接处理。最终观察者得到的是电信号、图像信息或数字信息。

(5) 信号与信息处理。根据获得的信号的类型不同，信号或信息处理主要包括模拟信号处理、数字信号处理、图像处理以及光信息处理。在当代光电测量系统中，大部分系统采

用计算机来处理、分析和显示各种信息，也可以通过计算机形成闭环测量系统，对某些影响测量结果的参数进行控制。

在光电测量系统中，特别需要注意的是光信号的匹配处理。通常表征被测量的光信号可以是光强的变化、光谱的变化、偏振性的变化、各种干涉和衍射条纹的变化等。要使光源发出的光或产生携带各种待测信号的光与光电探测器等环节间实现合理的，甚至是最良好的匹配，经常需要对光信号进行必要的处理。例如，利用光电探测器进行光强信号测量时，当光信号过强时，需要进行衰减处理；当入射信号光束不均匀时，则需要进行均匀化处理等。

1.3 光电测试技术的发展

随着光电子产业的迅速发展，对光电测试技术提出了新的要求，促使光电测试技术向以下几个方向发展：

(1) 亚微米级、纳米级的高精密光电测试技术首先得到发展，利用新的物理学原理和光电子学原理产生的光电测试技术将不断出现；

(2) 以微细加工技术为基础的高精度、小尺寸、低成本的集成光学和其他微传感器将成为技术的主流方向，小型、微型非接触式光学传感器以及微光学这类微结构光电测量系统将得到广泛应用；

(3) 快速、高效的3D测试技术将取得突破，发展具有存储功能的全场动态测量仪器；

(4) 发展闭环式光电测试技术，实现光电测量与控制的一体化；

(5) 发展光学诊断和光学无损检测技术，以替代常规的无损检测方法手段。

参考文献

- [1] 冯其波. 光学测量技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [2] 李岩. 精密测量技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.
- [3] Gao W, Kim S, Bosse H, et al. Measurement technologies for precision positioning [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64, 773 - 796.
- [4] Dorey A P, Bradley D A. Measurement Science and Technology-Essential Fundamentals of Mechatronics [J]. Measurement Science and Technology, 1994, 5 (12): 1415 - 1428.

第二章

光电测试的基础理论

本章将介绍光电测试方法中常用的基础物理理论，包括干涉原理、激光多普勒原理、差分与斜率测量原理、三角测量原理和莫尔测量原理等，作为全书测试技术的基础。

2.1 干涉原理

19 世纪 60 年代，麦克斯韦的电磁理论证实了光是一种电磁波。电磁波谱中能够引起人眼视觉感受的部分称为“可见光”，波长在 400 ~ 760 nm，超出这个范围人眼就感觉不到。不同波长的可见光对人眼引起的色觉不同，大致对应关系如表 2.1 所示。

表 2.1 波长与颜色的关系

单位：nm

760	620	590	570	500	475	450	400
红	橙	黄	绿	青	蓝	紫	

同一波长的光，具有相同的颜色，称为“单色光”。由不同波长的光波混合而成的光称为“复色光”。白光是由各种波长光混合而成的一种复色光。

光是电磁波，具有波动性，当两束（或多束）光波在空间某一区域相遇时，会发生叠加现象。有些情况下，两束（或多束）光波在同一空间域叠加时，该空间域的光能量密度分布不同于各个分量波单独存在时的光能量密度之和，则称光波在该空间域发生了干涉，该空间域称为干涉场。

光波的叠加服从叠加原理：两束（或多束）波在相遇点产生的合振动是各个波单独产生的振动的矢量和。叠加原理表明了光波的传播具有独立性。

2.1.1 光波叠加

本节以两束频率相同、振动方向相同的单色光波相遇为例，研究光波叠加后的复振幅分布。如图 2.1 所示，设光波分别发自光源 S_1 和 S_2 ， P 点是两光波相遇区域内的任意一点， P 到 S_1 和 S_2 的距离分别为 r_1 和 r_2 ，则两光波在 P 点产生的光振动可以写为

$$\begin{cases} E_1 = a_1 \cos(kr_1 - \omega t + \varphi_1) \\ E_2 = a_2 \cos(kr_2 - \omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (2.1)$$

式中， a_1 和 a_2 分别为两光波在 P 点的振幅； φ_1 和 φ_2

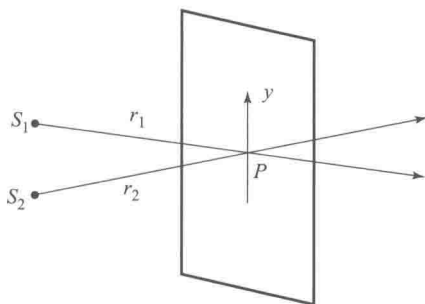


图 2.1 光波叠加示意图

分别为两束光波在光源处的初相位。则 $\alpha_1 = kr_1 + \varphi_1$, $\alpha_2 = kr_2 + \varphi_2$ 分别为两束光波在 P 点的初相位, 根据叠加原理, 合振动为

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 = a_1 \cos(\alpha_1 - \omega t) + a_2 \cos(\alpha_2 - \omega t) \\ &= (a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2) \cdot \cos \omega t + (a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2) \cdot \sin \omega t \end{aligned} \quad (2.2)$$

因为 a_1 、 a_2 和 α_1 、 α_2 均为常数, 所以可令

$$\begin{cases} a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2 = A \cos \alpha \\ a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2 = A \sin \alpha \end{cases} \quad (2.3)$$

将式 (2.3) 等号两侧分别平方相加, 并化简可得

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2.4)$$

将式 (2.3) 等号两侧对应相除可得

$$\tan \alpha = \frac{a_1 \sin \alpha_1 + a_2 \sin \alpha_2}{a_1 \cos \alpha_1 + a_2 \cos \alpha_2} \quad (2.5)$$

因此, 由式 (2.2)、式 (2.3) 可得, P 点的合振动仍可写为简谐振动的形式, 即

$$E = A \cos(\alpha - \omega t) \quad (2.6)$$

若两束单色光的振幅相等, 即 $a_1 = a_2 = a$ 时, P 点的光强可以写为

$$I = A^2 = 2a^2 [1 + \cos(\alpha_1 - \alpha_2)] \quad (2.7)$$

当两束光波在 P 点的初相位差 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 为 2π 的整数倍, 即 $\alpha_1 - \alpha_2 = \pm 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), 则 P 点的光强具有最大值。

当两束光波在 P 点的初相位差 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 为 2π 的半整数倍, 即 $\alpha_1 - \alpha_2 = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot 2\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), 则 P 点的光强具有最小值。

若光源 S_1 和 S_2 的初相位 φ_1 和 φ_2 相同, 则两束光波在 P 点的初相位差 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 与传播距离差 $(r_1 - r_2)$ 之间满足关系

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n(r_2 - r_1) \quad (2.8)$$

式中, λ 为真空中的波长; n 为介质折射率; $n(r_2 - r_1)$ 为光程差。

显而易见, 在两光波叠加区域内, 不同点的光程差可能不同, 所以光强也不同。但对于理想的单色光波, 即使光程差不同, 只要两束光波的位相差保持不变, 叠加区域内各点的强度分布也不变。把叠加区域内出现的光强稳定的强弱分布现象称为光的干涉, 产生光干涉的光波称为相干光波, 光源称为相干光源。

2.1.2 干涉条件

干涉基于光波叠加原理, 光的干涉现象是指两束或多束光波在某区域内叠加时, 叠加区域内出现的各点强度稳定的强弱分布现象。通过分析处理干涉条纹, 可以获取被测量的有关信息。下面来探讨下发生稳态干涉的条件。

平面波用数学表达式可表示为

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi)] \quad (2.9)$$

式中, \mathbf{A} 为光波振幅矢量; \mathbf{k} 为波矢; \mathbf{r} 为方向矢量; ω 为光波的角频率; φ 为平面波的初始相位。根据光矢量波的叠加原理及 $\mathbf{I} = \langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \rangle$, 设在空间点 P 处同时存在两个平面光

波 $E_1 = A_1 \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t + \varphi_1)]$, $E_2 = A_2 \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_2 t + \varphi_2)]$, 该点的光强应为两光波叠加后的光强

$$\begin{aligned} I &= \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^* \rangle \\ &= \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_1^* \rangle + \langle \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_2^* \rangle + \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* \rangle + \langle \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_1^* \rangle \\ &= I_1 + I_2 + I_{12} \end{aligned} \quad (2.10)$$

从式 (2.10) 可以看出, 该点的光强除两束光波单独在该点产生的强度和之外, 还增加了 I_{12} , 称为干涉项, 并可以得到

$$\begin{cases} I_{12} = \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* \rangle + \langle \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 \rangle = 2A_1 \cdot A_2 \cos \Delta\varphi \\ \Delta\varphi = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r} - (\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases} \quad (2.11)$$

由式 (2.10)、式 (2.11) 可以看出, $I_{12} \neq 0$ 是干涉现象产生的条件。 I_{12} 与方向夹角和初始相位差有关, 从这两项得到了产生干涉现象的条件:

(1) 频率相同或非常接近。由于相位的表达式中含有 $(\omega_1 - \omega_2)$ 项, 说明两光波的频率差造成相位差随时间变化。如果两光波频率差远大于探测器的响应频率, 探测器探测到的为瞬时光强 I_{12} 的平均值, 这个平均值等于 0, 看不到干涉现象。如果两光波的频率相差不大, 通过探测器可以看到两光波产生周期性变化的拍频现象。

(2) 振动方向不垂直。干涉项 I_{12} 与两光波的振动方向夹角 $\langle \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 \rangle$ 以及在 P 点的相位差 $\Delta\varphi$ 相关。当两光波振动矢量相互平行, 及 $\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 = |\mathbf{A}_1| |\mathbf{A}_2|$ 时, 此时合强度 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ 为干涉光强的最大值; 当两光波振动方向相互垂直时, $\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 = 0$, $I_{12} = 0$, 此时不产生干涉现象, 其合强度为 $I = I_1 + I_2$; 当两光波振动方向存在一定的夹角 α 时, $I_{12} = 2A_1 A_2 \cos \alpha \langle \cos \Delta\varphi \rangle$, 只有振动的两个平行分量可以发生干涉, 垂直分量则形成背景光, 影响干涉条纹的对比度。

(3) 初始相位差恒定。干涉场 I_{12} 与相位差的余弦函数相关。如果相位差不恒定, 而是在 $0 \sim 2\pi$ 中随机变化, 其变化频率大于探测器的响应频率, 探测器探测到的光强将是瞬时光强随时间的积分值, 接近于 0。

由此可以得到两束光波发生干涉必须满足 3 个基本条件: 频率相同或相近, 振动方向不垂直, 具有恒定的相位差。

从干涉条件中可以知道, 两个独立的光源 (即便是两个独立的原子) 发出的光波不能产生干涉, 因此为了获得两个相干光波, 只能利用同一个光源, 通过具体的干涉装置使之分成两束光波。

由于参与干涉的两束光波是从一个光源得到的, 这两束光波天生具有相同的频率和振动方向。但应该指出的是, 对于一束光波分离出来的两束光波, 只有当它们通过的光程差不是太大时, 才可能满足相位差恒定的条件, 从而发生干涉。光源辐射的光波可看作一段段有限长的波列, 进入干涉装置的每个波列也都分成同样长的两个波列, 当它们到达相遇点的光程差大于波列长度时, 这两个波列就不会相遇。这时相遇的是对应于光源前一时刻和后一时刻发出的两个不同波列, 它们之间已无固定的位相关系, 也就不能发生干涉。要得到相干光源, 必须利用同一光源同一发光时刻发出的波列。而要保证这一条件, 必须使光程差小于光波的波列长度。

2.1.3 影响条纹对比度的因素

为进行高精度观测,要求得到的干涉条纹不仅明亮、清晰、稳定,而且亮暗分明,即具有良好的对比度。干涉条纹的对比度定义为

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.12)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为静态干涉场中光强的最大值和最小值,也可以理解为动态干涉场中某点的光强最大值和最小值。

对于式 (2.12), 当 $I_{\min} = 0$ 时 $K = 1$, 对比度有最大值; 而当 $I_{\max} = I_{\min}$ 时 $K = 0$, 干涉条纹完全消失。对于目视干涉仪而言, 当 $K > 0.75$, 可以看到对比度较好的条纹。在实际应用的干涉仪中, 由于种种原因, 所观察到的干涉图样对比度都是小于 1 的。

常见影响条纹对比度的因素主要有以下几个方面:

- (1) 光源的时间相干性和空间相干性;
- (2) 相干光束的光强不相等;
- (3) 杂散光的存在;
- (4) 各光束的偏振状态有差异。

另外还有一些因素, 如振动、空气扰动及干涉仪结构的刚性不足, 都有可能影响干涉图样的对比度下降, 甚至条纹消失。下面分析影响条纹对比度的各项因素。

1. 光源单色性与时间相干性

干涉测量中实际使用的光源都有一定的谱线宽度, 记为 $\Delta\lambda$ 。如图 2.2 所示, 实线 1 和虚线 2 分别对应 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 两组条纹的强度分布曲线, 其他波长对应的条纹强度分布曲线居于上述两曲线之间。干涉场中实际见到的条纹是这些干涉条纹叠加的结果。

如图 2.2 中实线 3 所示, 在零级位置处, 各波长的极大值重合, 之后慢慢错开。干涉级次越高, 各波长极大值错开的距离越大, 合强度峰值逐渐变小, 对比度逐渐降低。当 $\lambda +$

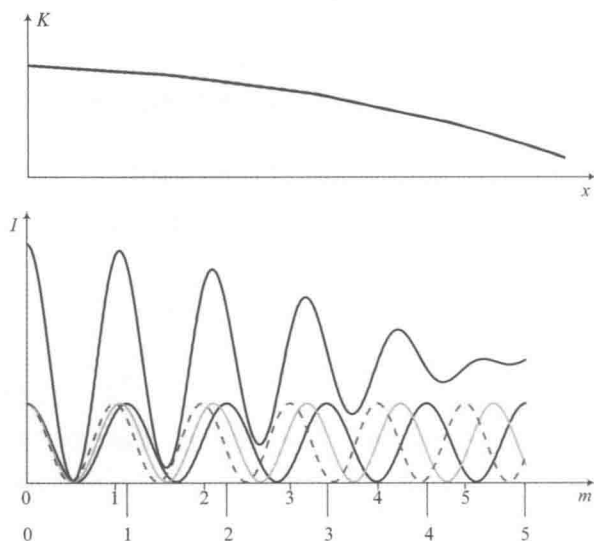


图 2.2 各种波长干涉条纹的叠加

$\Delta\lambda$ 的第 m 级亮纹与 λ 的第 $m+1$ 级亮纹重合后, 所有亮纹开始重合, 而在此之前是彼此分开的。以上条件可作为尚能分辨干涉条纹的限度, 即

$$(m+1)\lambda = m(\lambda + \Delta\lambda) \quad (2.13)$$

由此得最大干涉级 $m = \lambda/\Delta\lambda$, 因此相应的尚能产生干涉条纹的两束相干光的最大光程差(即光源的相干长度)为

$$L_M = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2.14)$$

式(2.14)表明, 光源的相干长度与其谱线宽度成反比。表 2.2 列出了一些干涉仪光源的相干长度与辐射亮度的参考数值。表中所列的氦氖(He-Ne)激光器, 其相干长度最长, 辐射亮度也比同位素灯大 10 个量级。

表 2.2 几种光源的相干长度和辐射亮度

光源		波长/nm	相干长度/mm	辐射亮度 /(W · Sr ⁻¹ · mm ⁻²)
白炽灯加干涉滤光片		550	0.06	1×10^{-5}
汞灯	超高压汞灯	546.1	1	2.5×10^{-4}
	低压汞灯	546.1	50	5×10^{-6}
氙灯	d 谱线	578.56	—	—
钠灯	D 谱线	589.3	< 10	—
单色 同位素灯	Hg ¹⁹⁸	546.1	500	1.5×10^{-6}
	Cd ¹¹⁴	644.0	330	2.9×10^{-6}
	Kr ⁸⁶	605.7	710	3×10^{-7}
激光器	He-Ne	632.8	$> 1 \times 10^5$	1×10^4
	半导体	633, 670, 1530 等	10 (典型值)	$> 5 \text{ mW}$ (功率)

2. 光源大小与空间相干性

干涉图样的照度, 在很大程度上取决于光源的尺寸, 而光源的大小又会对各类干涉仪的干涉图样的对比度产生不同的影响。

由平行平板产生的等倾干涉, 无论多么宽的光源尺寸, 其干涉图都有很好的对比度。而杨氏干涉实验只在限制狭缝宽度的情况下才能看清干涉图样。由楔形板产生的等厚干涉图样, 则是介于以上两种情况之间。如图 2.3 所示, 光源是被均匀照明的直径为 $2r$ 的光阑孔, 光阑孔上不同点 S 经过准直物镜后形成与光轴不同夹角 θ 的平行光束。不同 θ 角的平行光束经干涉仪形成彼此错位的等厚干涉条纹, 经叠加后形成的干涉条纹如图 2.4 所示。当光阑孔较小时, 干涉条纹的对比度较好; 随着光阑孔增大, 干涉条纹的对比度下降, 直至趋于零。如取对比度降至 0.9 为限, 可得光源的最大许可半径为

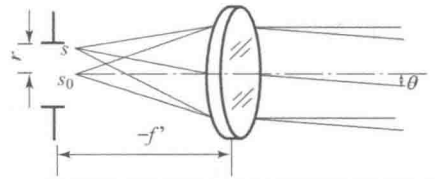


图 2.3 等厚干涉仪中的扩展光源

$$r_m \leq \frac{f'}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{h}} \quad (2.15)$$

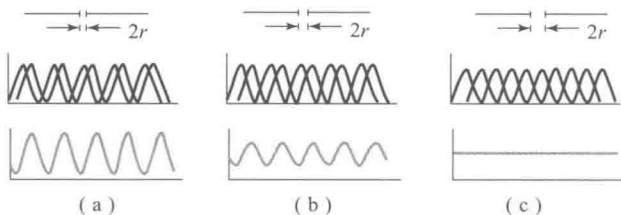


图 2.4 光阑孔大小对干涉条纹对比度影响

(a) 光源半径很小时, 干涉条纹对比度高; (b) 光源半径变大时, 干涉条纹对比度下降;
(c) 继续增大光源半径, 干涉条纹对比度降为 0

可见, 光源的最大许可半径正比于准直物镜的焦距 f' , 反比于等效空气层厚度 h 的平方根。空气层厚度越小, 光源开孔越可调大, 干涉条纹则具有较高的亮度。

在干涉测量中, 采取尽量减少光源尺寸的措施, 虽然可以提高条纹对比度, 但干涉场的亮度也随之减弱, 从而不利于观测。如能设法改变参考光路或测量光路的光程, 使两束光的等效空气层厚度减薄, 可以达到适当增大光源的目的。

3. 相干光束光强不等和杂散光的影响

干涉实验中, 设两束相干光的光强的关系为 $I_2 = nI_1$, 则有

$$K = \frac{2\sqrt{n}}{n+1} \tag{2.16}$$

图 2.5 所示实线表示了干涉条纹对比度 K 随两束光束强度比 n 的变化。当 $n=6$ 时, $K=0.7$ 。

此外, 在干涉测试中, 还常常伴有非期望的杂散光进入干涉场。例如, 光束在干涉仪光学零件表面上的反射、散射等。

设混束两束干涉光路中杂散光的强度均为 $I' = mI_1$, 这种情况下,

$$I_{\min} = (1 + n + m - 2\sqrt{n})I_1 \tag{2.17}$$

$$I_{\max} = (1 + n + m + 2\sqrt{n})I_1 \tag{2.18}$$

由此得到

$$K = \frac{2\sqrt{n}}{1 + n + m} \tag{2.19}$$

当 $n=1$ 时, 有

$$K = \frac{2}{2 + m} \tag{2.20}$$

可见, 在两束光强接近, 即光强比 n 较小时, 杂散光对条纹对比度的影响更为明显。所以, 必须重视干涉仪中采取抵制和消除非期望的杂散光的技术措施, 主要包括在光学零件表面镀增透膜、设置消杂光光阑、选用带楔角的分光板等。

4. 干涉光束偏振状态的不同影响

在使用激光光源的干涉仪中, 大都是部分偏振光干涉的情况。如果两束干涉光的偏振态

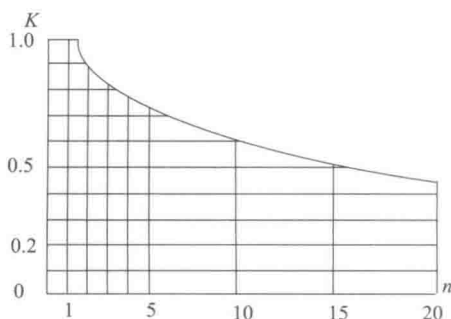


图 2.5 对比度 K 与两束干涉光强比 n 的关系