

DINDT

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

全息和散斑检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

全息和散斑检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 王任达

主 审 刘战捷

本书是激光全息散斑无损检测的培训教材,内容包括:光学基础、全息干涉检测原理、散斑干涉检测原理、检测技术、设备与器材及其使用、实际应用、相关检测标准、检测规程的编制、实验与操作、激光辐射危害及安全防护等。从基础知识到具体操作,从理论、原理到实际应用,从标准规范到设备器材,由浅入深,理论与实践相结合,全面、系统地介绍了激光全息散斑无损检测的知识。

本书可供从事激光全息散斑检测工作的无损检测人员培训使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全息和散斑检测/《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. —北京:机械工业出版社,2005.2
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-16047-9

I. 全 ... II. 国 ... III. 全息术无损检验—技术培训—教材 IV.TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005177 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吕德齐 武江 责任印制:杨曦

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1 092mm 1/16·14.75 印张·345 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

编审委员会

主 任：马恒儒

副主任：陶春虎 郑 鹏

成 员：（以姓氏笔画为序）

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付 洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主 任：吴伟仁

副主任：徐思伟 耿荣生

成 员：（以姓氏笔画为序）

于 岗 王海岭 王晓雷 王 琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘战捷 吕 杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张 鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯 松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主 任：郭广平

成 员：（以姓氏笔画为序）

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术,随着产品复杂程度的增加和对安全性保证的严格要求,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性一方面取决于所采用的技术和设备的水平,另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证;认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一级别资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准,国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712,规定了人员取得级别资格与所能从事工作的对应关系,通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来,船舶、核能、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作,对提高无损检测人员素质,确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善,国防科技工业管理体制逐步深化,技术进步日新月异,特别是高新技术武器装备科研生产对质量工作提出的新的更高要求,现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期,做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力,“国防科工委关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见”提出了要研究并建立与国际惯例接轨,适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动,各项工作稳步推进,2002 年 11 月正式颁布 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》;2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》;2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会,授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作,标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的第一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材,为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作,国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认

证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体，注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加了典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用发展十分迅速，教材编写难度较大，加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

《国防科技工业无损检测人员
资格鉴定与认证培训教材》编审委员会
2004 年 3 月

前 言

根据国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试培训教材的编写要求,我们承担了《全息和散斑检测》教材编写,并贯彻以下编制原则:一是紧密围绕考试大纲,强调解决实际问题;二是突出体现国防科技工业无损检测工作特色,适当增加典型应用及案例的介绍;三是教材内容编排应按照基础理论、相关标准、编制检测规程和实验与操作四大部分安排章节。

《全息和散斑检测》教材共设10章。第1章由徐敏编写,第2、3章由许欣华编写,第4、5、6、7、8、9、10章由王任达编写,全书由王任达主编,刘战捷主审。

本书为全息和散斑无损检测人员培训教材,培训对象是将从事全息和散斑检测的Ⅱ级和Ⅲ级人员。

全息和散斑检测作为无损检测的专业技术之一,在国内外还仍然是一门较新的领域。本教材编写的主旨在于介绍专业基础知识的内容和检测技术、技能,既要比较全面、深入浅出,又要重点突出、方便实用。第1章针对本专业涉及的光学基本原理、光学材料和激光特征给出较详细的阐述。第2、3章分别着重阐述了全息干涉和散斑干涉的原理。前3章是本专业检测技术的理论基础。第4、5章分别详细阐述了检测技术的基本方法、操作程序以及检测的设备、器材。第6章简要介绍实际应用案例,较全面了解本专业技术的应用范围和各种检测案例的特殊性。第7、8章介绍本专业的使用的国内外标准和规程,并阐明编制相关标准、规程的原则和方法。以使本专业检测技术规范化的,提高检测技术水平。第9章介绍与检测技术相关的原理实验和实际操作相关的应用实验。通过这些实验加深对检测技术本质的理解,提高实际操作能力。第10章介绍激光辐射危害及安全防护。正确认识激光辐射的危害性和安全防护的必要性。

各级检测人员培训时,教学内容可根据《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核大纲》适当增减。目录中带“*”号的章节内容对Ⅱ级人员不作要求,对Ⅲ级人员只作一般了解的要求。

本教材在编写过程中,参考了国内外相关的专著及文献等资料,编写组对有关作者表示衷心感谢。此外,教材中内容主要为编写组成员多年从事全息和散斑检测工作积累的经验和在培训教学中的一些体会。

限于编者水平,错误和疏漏在所难免,热诚欢迎培训学员、培训教师、读者提出宝贵意见。

《全息和散斑检测》编写组

2004年10月

目 录

序言

前言

第1章 光学基础.....1

1.1 光的一般概念.....1

1.1.1 光的本性.....1

1.1.2 光源和光谱.....1

*1.1.3 光学的研究对象、分支 与应用.....2

1.2 几何光学基本原理.....3

1.2.1 点光源、光线、光束和波面.....3

1.2.2 光的传播定律.....3

*1.2.3 几何成像和典型成像器件.....5

1.3 波动光学基本原理.....17

1.3.1 光振动和光波.....17

1.3.2 光波的叠加干涉.....21

1.3.3 惠更斯-菲涅耳原理.....32

*1.3.4 光波的衍射.....35

1.4 光学材料特性.....44

1.4.1 透光带吸收系数.....44

1.4.2 光在介质及其薄膜中的传播.....45

*1.4.3 光学干涉膜.....48

*1.4.4 晶体双折射现象.....51

1.5 激光.....58

1.5.1 爱因斯坦的辐射理论.....58

1.5.2 光谱线的线宽.....60

1.5.3 激光的基本原理和特性.....62

1.6 傅里叶光学与阿贝

成像原理简述.....76

复习题.....78

第2章 全息干涉检测原理.....82

2.1 激光全息照相.....82

2.1.1 激光全息照相原理.....82

2.1.2 全息图的类型.....84

2.2 全息干涉术.....86

2.2.1 全息干涉原理.....86

2.2.2 全息干涉术方法.....86

2.2.3 全息干涉的灵敏度和其他有关 技术问题.....93

2.3 全息干涉无损检测原理.....94

2.3.1 缺陷(不连续性)判据.....94

2.3.2 应力加载与物体变形.....94

复习题.....99

第3章 散斑干涉检测原理.....100

3.1 激光散斑的物理性质.....100

3.2 散斑干涉术方法.....101

3.2.1 单光束散斑干涉术.....101

3.2.2 双光束散斑干涉术.....105

3.2.3 错位散斑干涉术.....108

3.3 散斑和错位散斑干涉无损 检测原理.....113

3.3.1 散斑干涉图及其干涉条纹特征.....113

3.3.2 错位散斑干涉图及其干涉 条纹特征.....113

3.3.3 缺陷(不连续性)判据 ——特征干涉条纹.....113

3.4 电子散斑干涉术.....114

3.4.1 简介.....114

3.4.2 电子散斑干涉术.....114

3.4.3 电子错位散斑干涉术.....116

3.4.4 可调实时时间差 DSSPI 技术 及其改进.....116

复习题.....119

第4章 检测技术	121	5.5.1 记录介质的类型.....	152
4.1 全息干涉和散斑干涉无损检测 的加载方法.....	121	5.5.2 记录介质的主要特性.....	153
4.1.1 温度差加载方法及其优点 和局限性.....	121	5.5.3 卤化银乳胶记录介质.....	155
4.1.2 压力差加载方法及其优点 和局限性.....	122	5.5.4 重铬酸盐明胶.....	157
4.1.3 振动加载方法及其优点和 局限性.....	123	5.5.5 光导热塑料.....	157
4.1.4 机械力加载方法及其优点 和局限性.....	124	5.6 光学探测器.....	158
*4.1.5 冲击力加载方法及其优点 和局限性.....	125	5.7 显影液、停影液、定影液 和漂白液.....	159
*4.1.6 微波加载方法及其优点和 局限性.....	125	5.7.1 显影液.....	159
4.2 全息干涉无损检测方法.....	125	5.7.2 停影液.....	160
4.2.1 实时法检测.....	125	5.7.3 定影液.....	160
4.2.2 二次曝光法检测.....	127	5.7.4 漂白液.....	160
4.2.3 时间平均法检测.....	128	5.8 电子错位散斑干涉仪.....	161
4.2.4 影响全息干涉检测质量 的因素.....	128	5.8.1 设备器材.....	161
4.3 电子错位散斑干涉无损检测 方法.....	133	5.8.2 结构和原理.....	162
4.4 检测的基本操作程序.....	134	5.8.3 性能参数.....	163
复习题.....	137	5.9 干涉条纹处理装置.....	163
第5章 设备与器材及其使用	138	5.10 照相机.....	163
5.1 激光器.....	138	5.11 其他器材.....	164
5.1.1 常用的激光器.....	138	复习题.....	165
5.1.2 氦-氖(He-Ne)激光器.....	139	第6章 实际应用	166
*5.1.3 红宝石激光器.....	143	6.1 金属蜂窝胶接结构的检测.....	166
5.1.4 Nd:YAG 激光器.....	144	6.1.1 蜂窝夹层制件的结构特征.....	166
5.2 防振试验台.....	144	6.1.2 蜂窝夹层结构的缺陷类型.....	167
5.3 试件夹具和加载装置.....	147	6.1.3 检测方法(包括加载方法) 的选择.....	167
5.3.1 试件夹具的要求.....	147	6.1.4 缺陷特征条纹分析.....	171
5.3.2 加载装置.....	147	6.2 碳纤维复合材料结构的检测.....	171
5.4 光学元器件.....	149	6.3 固体火药柱包覆层粘接质量 的检测.....	173
5.5 光学记录介质.....	152	6.4 电铸高强结构(发动机燃烧室) 的检测.....	176
		6.4.1 加载的选择和理论估算.....	176
		6.4.2 参考试块的检测.....	177
		6.4.3 电铸高强结构产品检测.....	177
		*6.5 印制电路板焊点的检测.....	178
		6.6 轮胎胶接质量的检测.....	179

6.6.1 轮胎全息照相检测	179	9.1.2 光学干涉和衍射的实验	200
6.6.2 轮胎错位散斑检测	179	9.1.3 激光全息照相及全息干涉 条纹	201
6.7 压力容器焊缝的检测	180	9.1.4 激光散斑照相及散斑干涉 条纹	204
*6.8 涡轮叶片的检测	181	9.2 与实际操作相关的应用实验	205
6.8.1 叶片的内部结构完整性检测	181	9.2.1 氦氖激光器性能的简单测试 和调整	205
6.8.2 叶片振型分析	182	9.2.2 全息试验平台防振性能的 简单测试	208
6.9 热防护层/绝热层(航天飞机/ 运载火箭)的检测	183	9.2.3 全息干涉检测光路布置和 光学器件调整	208
复习题	184	9.2.4 参考试块的全息干涉检测	209
第7章 相关检测标准	185	9.2.5 全息干版使用方法的实验 操作	209
7.1 国内相关检测标准介绍	185	9.2.6 全息干涉条纹图的拍摄方法 实验	212
7.1.1 国内全息散斑检测标准	185	9.2.7 电子错位散斑干涉仪的使用方法 实验(固体药柱包覆层粘接 质量检测)	212
7.1.2 全息检测标准介绍	185	复习题	213
7.1.3 散斑检测标准介绍	187	第10章 激光辐射危害及安全防护	214
7.1.4 产品试件验收标准介绍	188	10.1 激光辐射对生物组织的影响	214
7.2 国外相关检测标准、 规程介绍	190	10.2 无防护的激光对眼睛、 皮肤可能产生的损伤和最大允许 照射量	214
7.2.1 美国国防部标准 (MIL-STD-883-1014)	190	10.2.1 激光对眼睛的危害及最大允许 照射量	214
7.2.2 美国 Pratt & Whitney 企业 检测规程 BTM-15	191	10.2.2 激光对皮肤危害及最大允许 照射量	215
7.3 各级检测标准创建和修订	192	*10.2.3 激光最大允许照射量的计算	216
复习题	192	10.3 激光辐射危害的分类	219
第8章 检测规程的编制	193	10.4 激光安全防护措施	221
8.1 编制的目的与原则	193	复习题	224
8.2 编制方法与格式	193	参考文献	225
8.2.1 检测规程的编制方法	193		
8.2.2 检测规程的格式	194		
8.2.3 检测规程的相关规程编制	195		
8.3 检测工艺卡	197		
复习题	198		
第9章 实验与操作	199		
9.1 与检测技术相关的原理实验	199		
9.1.1 激光特性的实验	199		

第1章 光学基础

1.1 光的一般概念

1.1.1 光的本性

光是一种重要的自然现象。我们所以能够看到客观世界中瞬息万变的景象，是因为眼睛接收到物体发射、反射或者散射的光。在很长一个历史时期里，人类对光学知识仅限于对一些现象和简单规律的描述。光的本性是什么？历史上有两种学说并立，以牛顿为代表提出了微粒理论和以惠更斯为代表的波动理论，特别是19世纪60年代，麦克斯韦提出光的电磁理论，指出光是一种波长较短的电磁波。其实“粒子”和“波动”都是经典物理的概念。近代科学实践证明，光是个十分复杂的客体。光的某些方面的行为像“经典”的波动，另一些方面的行为却像经典的“粒子”，这就是光的波粒二象性。任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

1.1.2 光源和光谱

任何发光的物体，都可以称之为光源。太阳、烛光、钨丝白炽灯、日光灯、水银灯是我们熟悉的光源。光源不仅用来照明，在科技工作中常使用形式多样的特殊光源，如钠光灯、气体辉光放电管等。激光器是一种与过去的光源性质不同的崭新光源。

光是一种电磁辐射，就要有能量补给来维持其发射。按能量补给方式不同，光发射可以分为两大类

1. 热辐射

不断给物体加热来维持一定的温度，物体就会持续的发射光，包括红外线、紫外线等不可见的光。在一定温度下处于热平衡状态下物体的辐射，叫热辐射。太阳、白炽灯中光的发射属于此类。

2. 非热辐射

各种气体放电管内的发光过程是靠电场来补充能量的，这种过程叫电致发光。某些物质在放射线、X射线、紫外线、可见光或电子束的照射或轰击下，可发出可见光束，这种过程叫做荧光，如示波管或电视显像管中的荧光屏的发光属于此类，还有磷光，化学发光，生物发光等。

在各种波长 λ 的电磁波中，能为人类的眼睛所感受的，只是 $\lambda=400\sim 760\text{nm}$ ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)的狭小范围。该波段的电磁波叫可见光。在可见光范围内不同波长的光引起不同的颜色感觉。一般说来，波长与颜色的对应关系见表1-1。

由于颜色是随波长连续变化的，上述各种颜色的分界线带有人为约定的性质。

在电磁波谱中与可见光波段衔接的短波一侧是紫外线 ($400\sim 5\text{nm}$ 左右)，长波一侧

是红外线(760nm~零点几 mm)。习惯上红外线波长用 μm (微米)作单位, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$, 波长小于 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的叫近红外线, 大于 $10\mu\text{m}$ 的叫远红外线, 二者之间便是中红外线。

表 1-1

波长 λ /nm	760~630	630~600	600~570	570~500	500~450	450~430	430~400
颜色	红	橙	黄	绿	青	蓝	紫

单一波长的光叫单色光, 否则是非单色光。

不同的光源有不同的光谱, 如热辐射光源光谱的特点是连续分布, 这种光谱叫连续光谱。如图 1-1 所示($dI/d\lambda$ 为光谱密度)。气体放电发射光谱的特点如图 1-2 所示, 光强集中在一些分立的波长值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \cdots$ 附近形成一条条谱线, 这种光谱叫做线光谱。不同的化学成分各有自己的特征谱线。每条谱线只是近似的单色光。它们的光强分布有一定的波长范围 $\Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 称谱线宽度。 $\Delta\lambda$ 越小, 表示光的单色性越好。激光器的 $\Delta\lambda$ 可做得比普通光源小很多。某些元素的普通光源和激光器的典型谱线列于表 1-2。

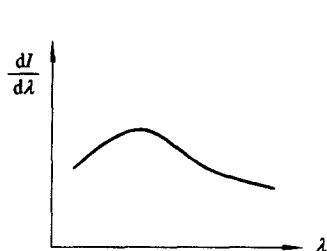


图1-1 连续光谱

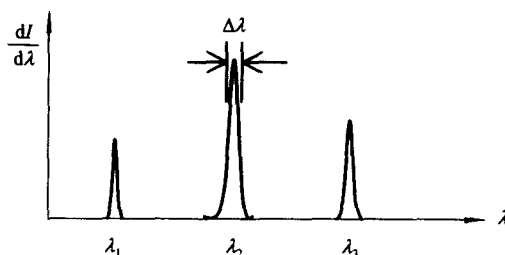


图1-2 线光谱

表 1-2 典型谱线

元素	谱线波长/nm	颜色	元素	谱线波长/nm	颜色
钠 (Na)	589.0, 589.6	黄 (D 双线)	氢 (H)	410.2	紫
汞 (Hg)	404.7, 407.8	紫		434.0	蓝
	435.8	蓝		486.1	青绿 (F 线)
	546.1 (最强)	绿		656.3	橙红 (C 线)
	577.0, 579.1	黄	氦氖激光器	632.8	红
镉 (Cd)	643.8	红	氩离子激光器	488.0	青
氪 (Kr)	605.7	橙		514.5	绿

*1.1.3 光学的研究对象、分支与应用

光学是研究光的传播及它和物质相互作用的学科。若不涉及光的发射和吸收等相互作用过程的微观机制, 光学可以分为两大部分: 当光的波长可视为极短, 从而其波动效应不明显时, 人们把光的能量看成是沿一根根光线传播的, 它们遵循直进、反射、折射等定律, 这就是几何光学。研究光的波动性(干涉、衍射、偏振)的学科, 称波动光学(或物理光学)。

光学应用十分广泛。几何光学就是为设计各种光学仪器而发展起来的学科。光的干

涉目前是精密测量中不可替代的手段。衍射光栅是重要的分光仪器。光谱在研究物质的微观结构、天体物理研究等方面起着关键性作用。将数学中的傅里叶变换和通信中的线性系统理论引入光学,形成了傅里叶光学,由此引入的空间滤波和频谱的概念已成为光学信息处理、像质评价、成像理论及相干光学计算机的基础。激光的发明是光学发展史上的一个重要里程碑。由于激光具有高强度、高单色性、方向性强等独特性能,很快被用于材料加工、精密测量、通信、全息(散斑)检测与显示,医疗及信息处理等领域。

1.2 几何光学基本原理

1.2.1 点光源、光线、光束和波面

我们知道,波动是扰动在空间里的传播。这里所说的扰动,一般指周期性的振动。

在同一振源的波场中,扰动同时到达的各点具有相同的相位,这些点的轨迹是一曲面,称为波面(或波阵面)。例如由一个点振源发出的波,在各向同性的均匀介质中的波面是以振源为中心的球面,这种波称为球面波(见图 1-3a)。在离振源很远处,波面趋于平面,称平面波(见图 1-3b)。

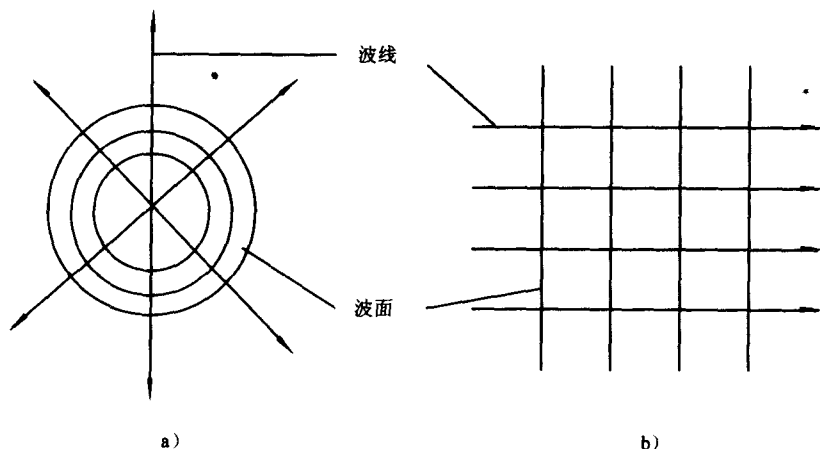


图1-3 波面与波线

a) 球面波 b) 平面波

我们设想在波场中绘出一线族,它们每点的切线方向代表波扰动的传播方向。这样的线族,称为波线。在各向同性介质中,波线总是与波面正交的(见图 1-3)。所以球面波的波线通过共同中心点,构成同心光束。平面波的波线构成平行光束。所谓“光线”,就是光波的波线。一个点光源发出的光束便是同心光束,我们说“光束由无数光线构成”不过是说光沿无数不同的方向传播罢了。

1.2.2 光的传播定律

1. 几何光学的三定律

几何光学是以下面三个实验定律为基础建立起来的,它是各种光学仪器设计的理论

基础。

(1) 光的直线传播定律 光在均匀介质中沿直线传播。在非均匀介质中, 光线会因折射发生弯曲, 这种现象在大气中经常发生。如在海边或沙漠地区有时出现的海市蜃楼幻景, 就是因为光线通过当地密度不均匀的大气产生折射而形成的。

(2) 光的独立传播定律和光的可逆性原理

1) 光的独立传播定律: 光在传播过程中与其他光束相遇时, 各光束都各自独立传播而不改变其原来的传播方向。

2) 光的可逆性原理: 当光线的方向反转时, 它将逆着同一路径传播。

(3) 光的反射定律和折射定律 光入射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种介质分界面上时, 在一般的情况下, 入射光线 I_1 将分解为反射光线 I_1' 和折射光线 I_2 , 如图 1-4 所示。

实验表明:

1) I_1' 和 I_2 都位于 I_1 和对应法线所组成的入射面内。

2) 反射角 i_1' 等于入射角 i_1 。

3) 折射角 i_2 的正弦与入射角 i_1 的正弦之比与入射角 i_1 无关, 它是一个与介质和光的波长有关的常数。

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1-1)$$

式中, n_1 、 n_2 分别是入射光线、折射光线所在介质的折射率。

折射率较大的介质称为光密介质, 折射率较小的介质称为光疏介质。

2. 费马原理

(1) 光程 如图 1-5 所示, 真空中 a 、 b 两点相距 s , 光线从 a 传播到 b 所需时间 t 为

$$t = s/c \quad (1-2)$$

式中 c —— 光在真空中的传播速度。

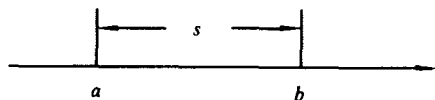


图 1-5

当 a 、 b 间充满折射率为 n 的透明介质时, 光线由 a 到 b 所需时间 t' 为

$$t' = s/v = ns/c \quad (1-3)$$

式中, v 是光在介质中的传播速度, 已知 $n = c/v$ 。

对比式 (1-2) 和式 (1-3) 可知, 若求光线通过介质中两点 a 、 b 所用的时间, 只需将 a 、 b 之间的距离 s 乘以介质的折射率 n 代替式 (1-2) 中的 s 即可。

为了方便, 将 ns 称为光线在 a 、 b 之间的光程, 记作

$$(ab) = ns \quad (1-4)$$

若 a 、 b 之间的折射率 n 是连续变化的, 则其光程为

$$(ab) = \int_a^b n ds \quad (1-5)$$

采用光程概念相当于把光在介质中所走的路程折算为光在真空中的路程。换句话说, 介质中某一几何路程的“光程”可理解为在相同时间内光线在真空中传播的距离。

在后面会看到, 相位差在波动中是很重要的, 而相位差又依赖于光程差, 故“光程”成为波动光学中一个很重要的概念。

(2) 费马原理的表述 光从空间一点 A 到另一点 B 总是沿着光程为极值的路程传播的。其数学表达式为

$$\int_A^B n ds = \text{极值}$$

根据两点之间直线最短这一几何公理, 从费马原理可直接推出光在均匀介质或真空中是沿直线传播的。同样可用费马原理证明: 光通过两种不同介质分界面时所遵从的反射定律和折射定律也是费马原理的必然结论。

*1.2.3 几何成像和典型成像器件

1. 实像与虚像 实物与虚物

我们将若干反射面或折射面组成的光学系统, 叫做光具组, 例如平面镜 (一个反射平面)、透镜 (两个折射球面) 及更复杂的光学仪器, 均可称之为光具组。如果一个以 Q 点为中心的同心光束经光具组的反射或折射后转化为另一以 Q' 点为中心的同心光束, 我们说光具组使 Q 成像于 Q' 。 Q 称为物点, Q' 称为像点。若出射的同心光束是会聚的 (图 1-6a 与 c), 称像点 Q' 为实像; 若出射的同心光束是发散的 (图 1-6b 与 d), 我们称像点 Q' 为虚像。

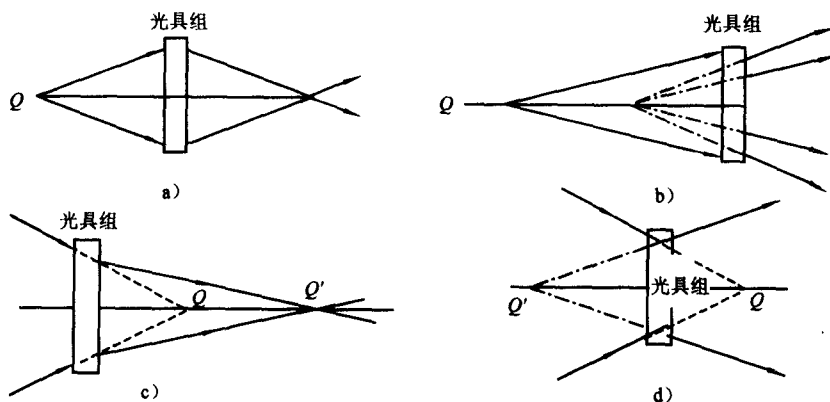


图1-6 物与像

a) 实物成实像 b) 实物成虚像 c) 虚物成实像 d) 虚物成虚像

作为成实像或成虚像的例子,有人会想到凸透镜或凹透镜来。以后会看到,透镜不能严格保持光束的同心性,即它们只能近似成像。单个反射平面是严格成像的例子。

图 1-7 所示为平面镜成像原理。 MM' 为镜面。由镜前一发光点 Q 射出的同心光束经镜面反射后称为发散光束。根据反射定律不难证明,反射线的延长线严格地交于镜面后同一点 Q' ,像点 Q' 与物点 Q 对镜面对称。它是实物严格成虚像的例子。

像点有虚实之分,物点也有虚实之别。对某一光具组而言,如入射的是个发散的同心光束,则相应的发散中心 Q 称为实物(图 1-6a 与 b);如入射的是个会聚的同心光束,则相应的会聚中心 Q 称为虚物(图 1-6c 与 d)。来自真实发光点的光束当然不会是会聚的,虚物出现在几个光具组联合成像的问题中。

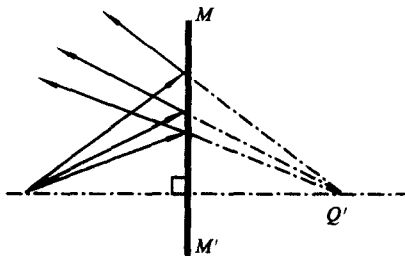


图 1-7 平面镜成像

2. 光在平面界面上的反射和折射

如果由于反射或折射的结果,光束已不再保持同心,那么一个发光点就不能成像于一点。几何光学所研究的问题主要是怎样能准确地反映发光体形状,也即怎样保持光束同心性的问题。

(1) 光在平面上的反射 从任一发光点 P 发出的光束(图 1-8)经平面镜反射后,根据反射定律,其反射光线的延长线相交于 P' 点, P' 点就是 P 点的虚像,它位于镜后,在通过 P 点向平面所作的法线上,有 $PN=P'N$,即 P' 点与 P 点相对镜面而言是对称的。因此,平面镜是一个简单的不改变同心性的、能成完善像的光学系统。

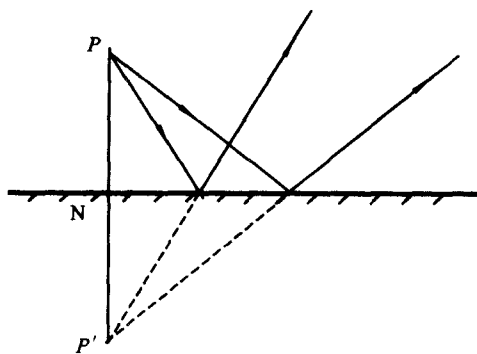


图 1-8

(2) 光在平面上折射、同心光束的破坏 光线在折射率不同的两透明物质的分界面上折射时,除平行光束折射时仍为平行光束外,同心光束将被破坏。

3. 全反射光学纤维

由折射定律可知,若 $n_2 > n_1$, 则 $i_2 < i_1$, 即折射光线向法线方向偏折;若 $n_2 < n_1$, 则 $i_2 > i_1$, 折射光线将偏离法线(图 1-9)。在后一种情况下,随入射角 i_1 增大,折射角 i_2 增加很快,当 $i_1 = i_c$ 时, $i_2 = 90^\circ$; 当 $i_1 \geq i_c$ 时,就不再有折射光线而光全部被反射,这种现象叫全反射。入射角 i_c 称临界角,其值为

$$i_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1-6)$$

如 $n_2 = 1$ 的空气对 $n_1 = 1.5$ 的玻璃而言, $i_c = 42^\circ$ 。

(1) 全反射棱镜 借助光在棱镜中的全反射来改变光的传播方向,与平面反射镜相比,它有很多优点。首先,全反射时光能量完全被反射回到原介质,而镀有介质膜的平面镜反射时在反射表面上总会有一定的光能量被吸收。第二,在研磨工艺和装校技术上,

棱镜又容易制成多组合的反射面和满足高精度的要求。

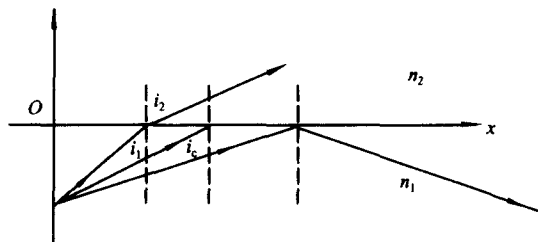


图 1-9

图 1-10 是一组棱镜，在光学仪器中常用它们来改变光束方向。

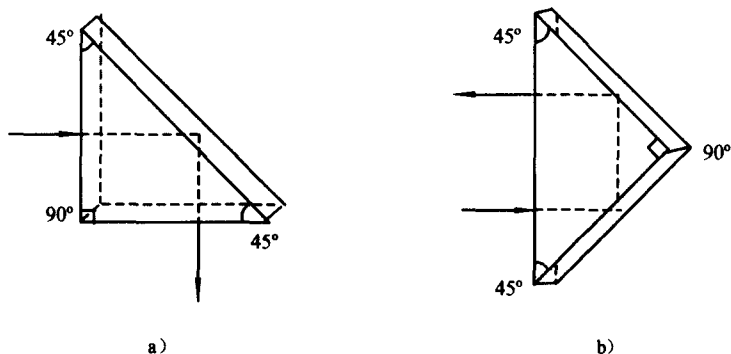


图 1-10

图 1-10a 是用作全反射的等腰直角棱镜，可使光束偏转 90° ；图 1-10b 是光线垂直于斜面射入和射出，在棱镜的两个直角面内进行两次全反射，射出的光线偏转 180° 。

(2) 光学纤维 光学纤维是由直径几微米的多根或单根玻璃纤维（或透镜塑料）组成，每根纤维分内外两层，内层材料的折射率为 1.8 左右，外层材料的折射率为 1.4 左右。当光由内层射到两层纤维的界面时，入射角小于临界角的那些光线，根据折射定律逸出纤维，而入射角大于临界角的光线由于全反射，在两层界面上经多次反射后而传到另一端，如图 1-11a 所示。

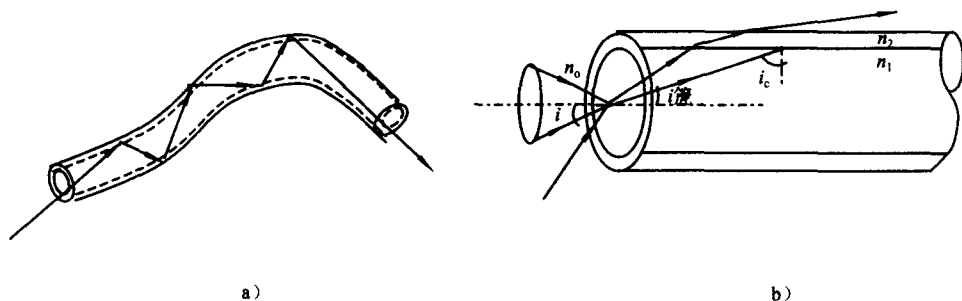


图 1-11

图 1-11b 中单箭头光线是一条临界光线，其在两层界面上的入射角为 i_c ，显然，由