



北京市高等教育精品教材立项项目

MODERN FUNDAMENTALS OF OPTICS

现代光学基础

钟锡华 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

北京市高等教育精品教材立项项目

现代光学基础

钟锡华 编著

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代光学基础/钟锡华编著. —北京:北京大学出版社, 2003. 8

ISBN 7-301-06463-2

I. 现… II. 钟… III. 光学-高等学校-教材 IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067241 号

书 名: 现代光学基础

著作责任者: 钟锡华 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-06463-2/O · 0572

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村 北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021

排 版 者: 北京高新特打字服务社 51736661

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787×960 16 开本 30.75 印张 700 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000 册

定 价: 39.00 元

序

波动光学风光无限

在物理学的几门基础学科中,光学几乎与力学一样地古老,相对而言电磁学要年轻得多。然而,从20世纪40年代开始,光学在理论、方法和应用方面,均有一系列重大的突破和进展。因此,现代光学这一称谓颇为人们所共识。1948年全息术的发明,1955年作为像质评价标准的光学传递函数的确立,1960年新型光源激光器的诞生,连同1942年第一台相衬显微镜的问世,以及后来的傅里叶变换光学理论的形成和光学信息处理技术的兴起,它们正是现代光学发展中具有标志性的几项成就。尤为使人激动的是,这些振奋人心的一个个重大成就,究其基本思想、理论基础和概念要点,均与经典波动光学息息相关,均植根于波动光学这方沃土,是对波动光学传统成果的一种创造性的综合和提高。波动光学的现代发展使人们获得启迪——对已有理论和成果的综合和提高,也将导致科学技术的重大创新乃至一场科技革命。作者相信在21世纪这种重大创新或革命还将出现于波动光学这片广阔的天地中。波动光学,风光无限。

另一方面,光对于人类有着特殊的亲切感。假如不是我们的眼睛像太阳,谁还能欣赏光亮——这是前苏联科学院院长瓦维洛夫,在其名著《眼睛与太阳》的引论中,首引德国诗人歌德的一诗句。固然,光频极高,远远超过人眼的时间分辨能力,这使人们不能如观察水波那样,直观地看到光行波的运动图像。然而,又有什么波,能有光波的干涉条纹、衍射花样或显色偏振图样,那么稳定,那么一目了然,那么绚丽多彩。在揭示波的叠加和干涉效应以及波传播的行为特征方面,可以说,光波要比水波、声波或无线电波,显得更为优越。这里的部分原因就在于光频极高,光波长极短;或者说,人类对于光具有独特的视觉功能,有十分敏感的色度效应。再从理性的方面思考,有关波动的许多带有共性的概念、基本规律和处理方法,乃至波传播的行为特征,我们和我们的大学生们主要是通过波动光学的学习而获得充分认知的,这将使他们今后在工作和研究中,与其他类型的波打交道时,处于一种非常主动的地位。再者,如果联系到这样一个客观事实,即物质世界中的物理运动,其最基本的运动形式就是两种,一种是粒子运动,一种是波动,那就更能意识到学习波动光学所具有的普遍性价值。

篇章结构内容提要

基于以上感受和认识,作者对于波动光学情有独钟,决定将本书著述为一本纯粹波动光学的教科书;也是由于学时的缩减和篇幅的限制,将以往基础光学教材中通常包含的非主体内容,比如,几何光学、辐射度量学和量子光学简介,从本书中剥离出去。本书系统且深入地论述了从经典波动光学到现代变换光学的基本概念和规律、典型现象和应用,以及诸多方面

的新进展。对于本书曾先后草拟过几个书名,比如,波动光学,或现代波动光学,或波前光学——从经典波动光学到现代变换光学,犹豫再三,或因之不甚贴切,或以其字数过多,或不够特色,只好不无遗憾地放弃了。

第1章是一小章,它以费马原理作为光线光学的理论基础,去分析或追寻光线径迹。从波动光学的眼光看,光射线反映了光能流的传播路线。费马原理的限度表明了光线光学表述的正是光波长趋于零条件下的光传播行为。虽然本章的兴趣在于建立和求解在变折射率介质中的光线方程或光线径迹,仍然以相当篇幅讨论了费马原理与成像的关系,其部分原因来自教学上的考虑。教学经验表明,人们接受费马原理及其数学形式并不困难,难点在于对它的实际运用;只有在实际运用中才能领悟到变分法处理问题的微妙和窍门。

第2章波动光学引论,这是一大章,它对光波的电磁性质、数学描写、波前分析、光波的干涉、衍射、偏振的现象和原理,作了全面的论述,它是后续若干章更为专门更为深入内容的理论基础。面对波动光学这么丰富、这么综合的内容,设置这一章作为全书理论框架的第一级平台,是有着明显优点的。假如以本章内容为主体,再撷取后续几章中的感兴趣的某些段落,便可单独构成一个短课程(20~30学时)。

第3章是一小章,仿照金属光学中的术语,这一章被定名为介质界面光学,它以菲涅耳公式为基础,全面考察了光在介质界面反射折射时的传播特性,即传播方向、能流分配、相位变更和偏振态变化的主要性质。过临界角时透射场出现的隐失波,开阔了人们对光波场性质的认识;近场光学扫描显微镜的介绍,为这一章增添了现代气息。

第4章是一大章,结合几种典型的干涉装置,一方面介绍它们的实际应用,另一方面由此展开讨论光场的时空相干性。将光场的相干性分解为两个侧面,即空间相干性和时间相干性,分别给以阐述并建立相应的物理图像,这种处理方式不仅对基础光学的教学是恰当的,而且对理论光学中的互相关函数、复相干度和相干度的学习也是必要的。激光,作为一大节被安排在这一章,这是因为激光器和激光束基本性质的诸多方面,比如谐振腔的作用、高度单色性、高度相干性和高度定向性,均与本章内容息息相关;至于激活介质受激辐射光放大原理,可作为量子物理学的一般性知识予以介绍,这在本课程的教学上是可行的。新型的傅里叶变换光谱仪、强度相关实验和中子束干涉实验的介绍,为本章增添了新气象。

第5章正如其标题所表明的,关于衍射场与物结构之关系的论述在本章被显著地加强了,而并非仅限于一维光栅的衍射和光栅光谱仪。从一维、二维、三维周期结构,到自相似分形结构和无规分布的结构,它们各自的衍射场均被详细地论述;再三地运用了研究多元多维结构衍射场的数理方法,即位移-相移定理,并倡导了单元编组思想和逐维分析方法。衍射手段一直是人类认识微结构的重要途径。X射线衍射用于分析晶体结构,产生了几位诺贝尔物理学奖得主;50年前凭借X射线衍射图确认了DNA双螺旋结构,开创了分子生物学新时代;20年前凭借电子衍射图而发现准晶体,开拓了凝聚态物理学、化学和材料科学研究的新领域。这些历史背景,激励着作者决心在基础光学课程中加强多元多维结构衍射的教学,以适应当前人工微结构研究和纳米材料研究兴旺发展的需要。

第6章是一大章,系统地论述了傅里叶变换光学,这并非完全出于作者的偏爱和研究。

光学界普遍认为,现代波动光学最重要的进展是引入光学变换的概念,并由此导致空间频谱概念和空间滤波技术,即以频谱被改变的眼光去评价成像系统的像质,用改变频谱的手段对图像实施信息处理。本书以独特的概念体系和所倡导的波前相因子分析方法,阐述了傅里叶变换光学,显得物理图像清晰、数学推演简洁。另外,有了这一章所提供的有关光学变换的概念、思想基础和数理能力,学生即便今后在工作中遇到其他种类的变换,比如,普遍光学变换,分数傅里叶变换和小波变换等,也有信心能较快地掌握它们。本章专列一大节在数学上全面地介绍了傅里叶变换和 δ 函数,旨在供学生们今后学习查考,在教学上并不需要一一讲授。当然,以光学尤其以变换光学为背景,最有利于领会和掌握傅里叶变换和 δ 函数这一得力的数学工具。本章共13节,建议可重点讲授6.1—6.9节,约占全章篇幅60%。

第7章光全息术是一小章,虽然增加了各种全息图的介绍,其实,需要重点讲授的只有第一节全息术原理,从中可以看到崭新的全息术正是波的干涉术和衍射术的综合,也充分展现了波前相因子分析法,在揭示全息图衍射场特征方面的有效功能。

第8章光在晶体中的传播,系波动光学的传统内容,即使学时缩紧,也应当保证本章的讲授。

第9章光的吸收、色散和散射,增添了若干比较深入的新内容。在色散部分,不仅论及一阶色散效应下的波包群速,而且考量了二阶色散效应下的波包展宽,并由此讨论了波包中心速度和波包前沿的讯号速度,以及波包的寿命。在散射部分,不仅注意到了散射微粒自身的线度,而且还注意到微粒之间的平均距离;前者决定了单元散射因子,后者决定了大量单元散射场叠加的宏观效果;对瑞利散射的频率特性 ω^4 正比律,本章作了进一步的阐释。由脉冲星辐射的视频讯号和光频讯号到达地球的时差,去估算宇宙中自由电子的数密度,或估算光子可能有的非零质量的上限,这是一个颇有兴味的问题。

本书特色自评自勉

作者为北京大学物理系和地球物理系讲授光学课程,自1978年起算,不觉也竟有25年了。辛勤耕耘、用心积累、潜心研究、激情饱满、时有灵感,是对这一历程的自评,也是自勉。这回得到了由北京市教委推出的精品教材建设这一举措的适时促进和有力支持,使本书的撰写得以圆满完成。在立项申报表“本教材特色”一栏中,作者写了以下三点:淀积最近二十多年来申请者的教学实践和科学研究的学识和经验,吸纳波动光学学科发展的新成果,形成了一个由经典波动光学走向现代变换光学的理论结构和概念体系,将承袭传统和开拓创新两者和谐统一之;多处吸收申请者在波动光学方面的教学研究和科学研究的主要成果于本书中;继续发扬申请者撰写物理学教科书所一贯追求的风格——概念清晰流畅、物理图像丰富、数学推演简洁和语言明净生动。

二十多年的积累,十八个月的挥洒,终成此书。此时此刻,不禁想到本光学课程的改革和建设,长期以来得到了各级部门的支持和奖励,从国家教育部、北京市教委,直到北京大学教务部、物理学院和基础物理教学中心,2000年本课程被教育部确定为国家创建名牌课程;不

禁想到本课程的讲授得到了历届学生们的好评和赞赏,这使作者得以莫大的欣慰和激励,2002年作者被北京大学学生会和研究生会评选为十佳教师之一;也不禁想到与作者共事合作十几年的周岳明教授,作为助手和搭档,他为全面提高本光学课程的教学质量作出了可贵的贡献,在1992—1998年期间他主讲了物理系或地球物理系的光学课程,兹因行政事务繁重,他未能参与本书的编写,此乃实属遗憾。在此作者对他们一并表示深深的敬意和谢意。也要感谢北京大学出版社,在今年春天北京非常时期,抓紧工作,精心编辑,使本书得以高质量地适时面世。

一本70万字的书,其中不妥或错误之处在所难免,祈请读者批评和指正。

钟锡华

于北京大学物理学院

2003年5月5日

目 录

第 1 章 费马原理与变折射率光学	(1)
1.1 惠更斯原理	(1)
1.2 折射率	(3)
1.3 光程	(6)
1.4 费马原理	(8)
1.5 费马原理与成像	(10)
1.6 自然变折射率	(17)
1.7 人工变折射率 强光变折射率	(20)
1.8 光线方程	(22)
1.9 评述费马原理	(25)
习题	(29)
第 2 章 波动光学引论	(31)
2.1 光是一种电磁波	(31)
2.2 定态光波 复振幅描述	(35)
2.3 波前函数	(39)
2.4 球面波向平面波的转化	(42)
2.5 光波干涉引论	(45)
2.6 两个点源的干涉场 杨氏实验	(52)
2.7 两束平行光的干涉场	(58)
2.8 光波衍射引论	(60)
2.9 圆孔和圆屏菲涅耳衍射	(68)
2.10 波带片	(76)
2.11 单缝夫琅禾费衍射	(79)
2.12 矩孔和三角孔夫琅禾费衍射	(85)
2.13 圆孔夫琅禾费衍射 成像仪器分辨本领	(89)
2.14 偏振光引论	(98)
2.15 部分偏振光的部分相干性	(105)
习题	(112)
第 3 章 介质界面光学与近场光学显微镜	(118)
3.1 菲涅耳公式	(118)
3.2 反射率和透射率	(121)

3.3	反射光的相位变化	(128)
3.4	反射光的偏振态	(134)
3.5	全反射时的透射场——隐失波	(135)
3.6	近场扫描光学显微镜	(139)
	习题	(143)
第4章	干涉装置与光场时空相干性 激光	(146)
4.1	分波前干涉装置	(146)
4.2	光源宽度对干涉场衬比度的影响	(152)
4.3	光场的空间相干性	(160)
4.4	薄膜干涉	(164)
4.5	迈克耳孙干涉仪	(177)
4.6	非单色性对干涉场衬比度的影响	(184)
4.7	傅里叶变换光谱仪	(189)
4.8	光场的时间相干性	(193)
4.9	多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	(198)
4.10	激光	(206)
4.11	强度相关实验 中子束干涉实验	(216)
	习题	(220)
第5章	多元多维结构衍射与分形光学	(225)
5.1	位移-相移定理	(225)
5.2	有序结构 一维光栅的衍射	(229)
5.3	光栅光谱仪 闪耀光栅	(235)
5.4	二维周期结构的衍射	(241)
5.5	三维周期结构 X射线晶体衍射	(244)
5.6	无规分布的衍射	(254)
5.7	分形光学——自相似结构的衍射	(257)
5.8	光栅自成像	(264)
5.9	超短光脉冲和锁模	(267)
	习题	(271)
第6章	傅里叶变换光学与相因子分析方法	(275)
6.1	衍射系统 波前变换	(275)
6.2	相位衍射元件——透镜和棱镜	(278)
6.3	波前相因子分析法	(283)
6.4	余弦光栅的衍射场	(287)
6.5	夫琅禾费衍射实现屏函数的傅里叶变换	(292)
6.6	超精细结构的衍射——隐失波	(297)

6.7	阿贝成像原理与空间滤波实验	(299)
6.8	光学信息处理列举	(306)
6.9	泽尼克的相衬法	(314)
6.10	相位物可视化的其他光学方法	(323)
6.11	夫琅禾费衍射的普遍定义与多种装置	(326)
6.12	傅里叶变换和 δ 函数	(330)
6.13	准确获得物频谱的三种系统	(343)
	习题	(349)
第7章	光全息术	(355)
7.1	全息学原理	(355)
7.2	各种全息图	(364)
7.3	全息应用简介	(371)
	习题	(375)
第8章	光在晶体中的传播	(377)
8.1	晶体双折射	(377)
8.2	单轴晶体光学公式 双轴晶体	(383)
8.3	晶体光学器件	(393)
8.4	圆偏振光、椭圆偏振光的产生和检验	(399)
8.5	偏振光干涉	(403)
8.6	旋光性	(413)
8.7	电光效应	(424)
8.8	偏振的矩阵表示	(427)
	习题	(431)
第9章	吸收·色散·散射	(436)
9.1	吸收	(436)
9.2	色散	(440)
9.3	经典色散理论	(445)
9.4	波包的群速	(451)
9.5	波包的展宽	(459)
9.6	脉冲星辐射的色散·光孤子	(464)
9.7	散射	(468)
	习题	(477)

1

费马原理与变折射率光学

- 1.1 惠更斯原理 1.2 折射率 1.3 光程 1.4 费马原理
- 1.5 费马原理与成像 1.6 自然变折射率
- 1.7 人工变折射率 强光变折射率 1.8 光线方程
- 1.9 评述费马原理 习题 8 道

1.1 惠更斯原理

- 原理内容 • 评价 • 导出折射定理 • 折射定律与光速比

• 原理内容

距今三百多年前,惠更斯提出了一个关于光波传播的理念,如图 1.1 所示,其大意如下:光扰动同时到达的空间曲面被称为波面或波前,波前上的每一点可以被看作一个新的扰动中心,称其为子波源或次波源,次波源向四周激发次波;下一时刻的波前应当是这些大量次波面的公共切面,也称其为包络面;次波中心与其次波面上的那个切点的连线方向,给出了该处光传播方向,亦即光射线方向.根据惠更斯原理,人们可以由某一时刻(t)的波前,用作图法导出下一时刻($t+\Delta t$)的波前,并确定波前上各点的光射线.这就是说,该原理解决了波前随时间在空间的传播问题.图 1.2 显示了光在非均匀介质中波前的推移,以及相应的光线弯曲,在这里上方介质中的波速大,下方介质中的波速小.

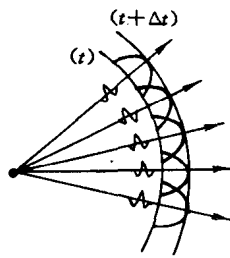


图 1.1 说明惠更斯原理

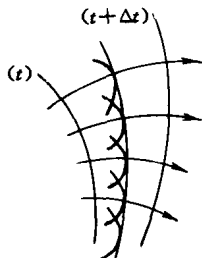


图 1.2 非均匀介质中光线弯曲

• 评价

惠更斯(Christian Huygens, 1629—1695),荷兰物理学家、天文学家和数学家.青年时期与 R. 笛卡尔(1596—1650)等学界名流交往甚密.他在 1679 年向法国科学院的报告,和

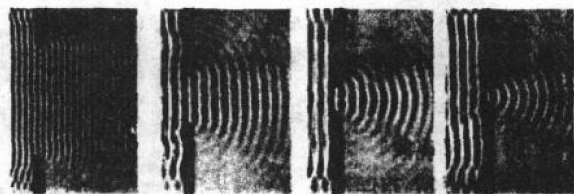


图 1.3 惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)

1690年出版的《论光》中,提出了光的波动理论,从几何学上给出了寻求光传播方向的普遍方法——被后人演绎并命名为惠更斯原理,如前面所述.惠更斯原理毕竟是历史上第一个关于波传播的原理,自然地有着许多重大的不足.比如,它不能回答光振幅或光强度的传播问题,它也不能回答光相位的传播问题,这是因为当时在惠更斯关于光波动的论述中,尚无空间周期性概念,即尚无光波长概念.对这些问题的进一步研究最终导致了光波衍射理论的形成.然而,惠更斯原理的精华是其次波概念——波场中的任意一点均可以被看作一个点源,它具有永恒的科学价值,至今

依然被不时

地引用,且适用于一切波场,包括光波、声波、水波,等等.图 1.4 是一张水波盘实验照片,在浅水表面波传播的前方,设置一个狭缝;当狭缝足够窄时,凸显出狭缝小孔处成为一个次波源,以此为中心向前激发一个发散型波前.



水波盘实验

图 1.4 显示次波源的存在

• 导出折射定律

我们知道,作为几何光学基础的是三个实验定律,即,光在均匀介质中的直线传播定律,光在介质界面的反射定律和折射定律.而应用惠更斯原理,可以粗略地说明直线传播定律,可以成功地解释反射定律和折射定律.这里,我们仅给出惠更斯原理对折射定律的解释.

如图 1.5 所示,设两种介质的界面为平面,在上方介质中光速为 v_1 ,在下方介质中光速为 v_2 ;一束平行光射向界面,入射角为 i_1 ,图中显示的这一组光线,其入射面是重合的,均为纸面.惠更斯原理是怎样分析光束的折射过程呢? 首先,任选一个与入射光束正交的平面(ABC)作为波前.该波前上经 C 点的光线到达入射点 C' 所需的时间为 $\Delta t = \overline{CC'}/v_1$;同时,波前上的 A 点作为次波源,已经产生次波以 v_2 速度进入介质 2,故该次波面的半径为 $\rho_A = v_2 \Delta t$;当然,在这段 Δt 时间中,波前上经 B 点的光线,先以 v_1 速度传播到入射点 B_0 ,再以 B_0 点为源产生次波,以 v_2 速度进入介质 2,并有相应地按比例缩小了的次波球面半径 ρ_B .接着,对这一系列同时出现的次波面作一个公切面(A'B'C'),它便是存在于介质 2 中的一个宏观波前.几何上不难证明,由 C' 点向半径为 ρ_A 的半圆周所作的切线 C'A',必定也相切于那些按比例缩小了的一系列半圆周.回归到三维空间中,图中的那些半圆周实际上代表的是一个半圆柱面,公切线(A'B'C')实际上代表的是垂直纸

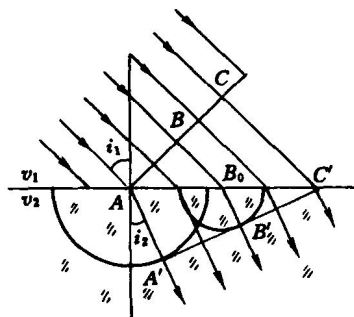


图 1.5 导出折射定律

面的一个平面波前。最后,连接次波中心与相应的切点,分别得到折射光线 AA', BB', \dots 形成了一束平行折射光束,相应的折射角为 i_2 。现在,让我们定量考察折射角 i_2 与入射角 i_1 的关系: $\sin i_1 = \frac{\overline{CC'}}{AC'}$, $\sin i_2 = \frac{\rho_A}{AC'}$, 注意到 $\overline{CC'} = v_1 \Delta t$, $\rho_A = v_2 \Delta t$, 于是

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.} \quad (1.1)$$

这表明,入射角正弦与折射角正弦之比值等于波速之比值,与入射角的大小无关,这也正是实验上确立的折射定律的结果。

• 折射定律与光速比

基于波动理念的惠更斯原理对光的折射理论的新贡献是,将光线方向的偏折与光速的变化联系起来。当光束从空气射向水面或玻璃表面时,折射角变小,即折射光束更靠近法线,按(1.1)式,这表明光在这类介质中的波速小于在空气中的传播速度,即 $v_1 > v_2$ 。这时通常称介质 2 为光密介质(相对于介质 1),介质 1 为光疏介质(相对于介质 2)。历史上,当时盛行的光的微粒说也解释了折射定律,且与速度比联系起来。按微粒说,当光粒子流射向光密介质时,受到一个与界面正交的法向力且指向光密介质。于是,光粒子的水平速度分量不变, $v_{2x} = v_{1x}$, 而垂直速度分量增加了, $v_{2y} > v_{1y}$, 致使折射方向更靠近法线,即折射角 i_2 小于入射角 i_1 , 进而利用矢量图可容易地导出

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1} = \text{const.}$$

可见,在折射定律与速度比的关系上,波动说与微粒说的结论正巧相背。波动说是 v_1/v_2 , 微粒说是 v_2/v_1 。那么,在折射角变小的光密介质中,光速究竟是变大了还是变小了? 这只能由光速测量的实验加以判决。两位法国实验物理学家,傅科和斐索于 1850 年前后采用旋转镜法,比较了光在空气和在水中的速度,两人几乎同时宣布:空气中的光速大于水中的光速。无疑,光的波动理论的正确性又一次得到实验的证认。

1.2 折 射 率

- 定义
- 夫琅禾费谱线
- 色散
- 正常色散
- 折射率与光速比
- 折射率与波长比
- 讨论——关于色视觉

• 定义

折射率是一个关于介质材料光学性能的重要参数,它源于折射定律,参见图 1.6,

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.2)$$

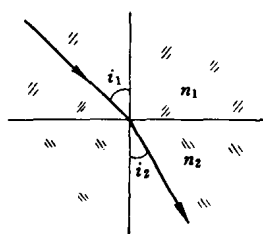


图 1.6 折射定律

人们更喜欢写成不变量形式如下，

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (1.3)$$

这里， n_{12} 称作介质 2 对于介质 1 的相对折射率， n_1 是介质 1 对真空的相对折射率， n_2 是介质 2 对真空的相对折射率。通常省略“相对”一词，直呼折射率。当然，真空折射率为 1。比如，

冕牌玻璃 $n = 1.520$ ，水 $n = 1.333$ ，空气 $n = 1.000$ ，对空气折射率的精确测量结果是，在标准状态下空气折射率为 1.000 292。

● 夫琅禾费谱线

表 1.1 列出被广泛引用的几条夫琅禾费特征谱线——包括其标识符号、发光元素、波长、色视觉以及其相对于四种光学玻璃的折射率。

表 1.1

标识符号	化学元素	波长/nm	色视觉	冕牌玻璃	轻火石	重火石	特重火石
C	H	656.3	红	1.520 42	1.572 08	1.666 50	1.713 03
D	Na	589.2	黄	1.523 00	1.576 00	1.670 50	1.720 00
F	H	486.1	蓝	1.529 33	1.586 06	1.680 59	1.737 80
G	H	434.0	紫	1.534 35	1.594 41	1.688 82	1.753 24

● 色散

从表 1.1 中，我们注意到，一种介质对不同波长的光具有不同的折射率，这被称作色散 (color dispersion)。因此，一束白光经界面折射，就被分散为不同颜色的光束，如图 1.7 所示。棱镜分光是先后两次折射的色散效应。大气中出现的虹霓是阳光经大量水滴的折射而产生的色散现象。在家庭居室中也有可能出现色散现象。比如，当晨光照射居室，你可能发觉墙壁上某处呈现一彩色光带，那可能是哪块磨边镜面引起的色散，因为镜面的棱形边缘就是一块背面为反射面的棱镜，阳光经折射、反射再折射而返回，二次折射产生更为明显的色散效应。又比如，装饰灯具上悬挂着的一组多面水晶球，在灯光的映照下，呈现五光十色，斑斓闪烁，十分美观。水晶的色散明显地强于玻璃或有机玻璃。是否有耀眼的彩色光斑，可以作为辨认真假水晶体的一种方法。

● 正常色散

在表 1.1 中我们也注意到，介质折射率随波长的变

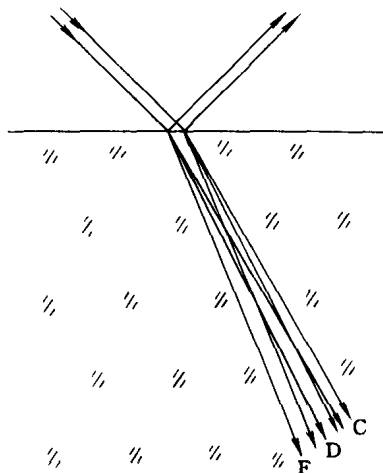


图 1.7 折射导致色散，反射无色散，图中 F、D、C 表示不同的光波长，见表 1.1

化是：随波长增加而折射率减少，如图 1.8 所示。一般透明介质在可见光波段均是如此，这被称作正常色散(normal dispersion)。图 1.9 显示石英的正常色散曲线。

度量色散效应大小的物理量是色散本领(dispersive power)，它被定义为

$$\Delta = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}, \quad (1.4)$$

其中下标 F、D、C 表示夫琅禾费特征谱线。比如，对于冕牌玻璃，其色散本领为

$$\Delta = \frac{1.52933 - 1.52040}{1.52300 - 1} = \frac{0.00893}{0.523} \approx \frac{1}{59},$$

对于轻火石、重火石和特重火石，其色散本领分别为 $\Delta_1 \approx \frac{1}{42}$ ， $\Delta_2 \approx \frac{1}{48}$ ， $\Delta_3 \approx \frac{1}{29}$ 。看来，选取高折射率、高色散本领的特重火石玻璃制作棱镜，应用于棱镜光谱仪是有利的。有些文献上，取色散本领的倒数值来度量色散，它被称作色散率(dispersive index)。

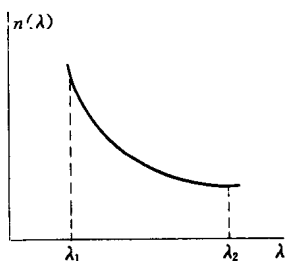


图 1.8 正常色散

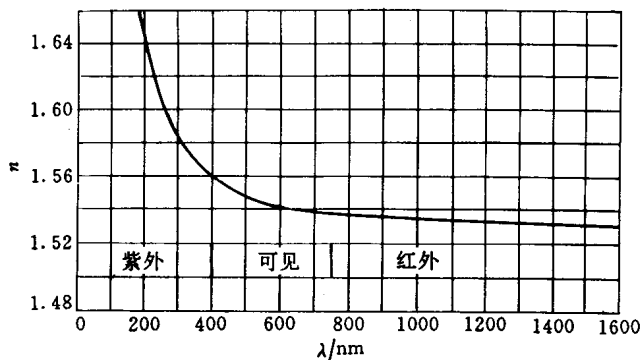


图 1.9 石英的色散曲线

• 折射率与光速比

基于波动理念而形成的惠更斯原理，将赋予折射率以更为丰富的物理意义。让我们联系由惠更斯原理导出的折射定律(1.1)式与折射定律的原始形式(1.2)，

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

得到 $n_2/n_1 = v_1/v_2$ 。设入射方为真空，则 $n_1 = 1, v_1 = c$ (真空中的光速)。于是，有

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{或} \quad v = \frac{c}{n}. \quad (1.5)$$

这表明，介质折射率等于真空中光速与该介质中光速之比值，或者说，介质中光速值等于真空中光速值除以折射率。比如，光在水中的传播速度 $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 3/4 \approx 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。因此，前面论及的色散关系 $n(\lambda)$ 也可以表达为 $v(\lambda)$ ，即不同波长的光在同一介质中的传播速度是不同的。红光速度大于蓝光速度，这是正常色散。

• 折射率与波长比

我们知道，扰动在空间传播而形成波动。波速 v 值等于扰动的频率 f 与波动的空间

周期即波长 λ 的乘积, $v = f\lambda$. 关于波速的这个关系式是一个运动学意义上的公式, 与波形成和传播的动力学机制无关, 它适用于一切波动. 对于光波, 真空中的光速被表示为 $c = f_0\lambda_0$, 介质中的光速被表示为 $v = f\lambda$. 这里, λ_0, λ 分别是光源发射的某一特征谱线在真空中或介质中的波长. 据此, 关系式(1.5)被进一步表示为

$$n = \frac{f_0\lambda_0}{f\lambda},$$

问题是, 介质中的光频 f 是否等于真空中的光频 f_0 ? 在线性介质的光场中, 光扰动的时间频率仅由光源决定, 它与波赖以传播的介质无关. 这就是说, 同一谱线的光波在不同介质中虽然有不同的速度, 但其频率是不会改变的, 均同于真空中的光频, 即 $f = f_0$. 因此, 人们也称扰动频率为光源的本征频率. 于是, 在上式中消去光频, 我们得到

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \text{或} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (1.6)$$

这表明, 介质折射率等于同一谱线在真空中波长与在该介质中波长之比值. 折射率值大于 1, 表明在介质中光波长变短了.

• 讨论——关于色视觉

一光源发射一光束, 在空气中的波长为 600 nm, 看起来它呈橙色. 当这个光源置于水中时这束光的波长为多少? 潜水员观察到的这束光呈何种颜色?

考量到水的折射率为 $4/3$, 故此束光在水中的波长为

$$\lambda = 600 \text{ nm} \times 3/4 = 450 \text{ nm}.$$

不过, 水下观察者对这束光的色视觉依然为橙色, 而不是蓝色. 须知, 对视网膜上的视觉细胞直接地起作用的是光扰动, 因此, 决定色视觉的是扰动频率, 而不是波长. 根据光源扰动频率的本征性, 水下这束光作用于视网膜上的频率与空气中的情形是相同的, 故色视觉不会被改变. 如果一定要以波长语言间接地理解这一点, 那也应该是眼球腔中的光波长, 而不是水中的光波长. 显然, 眼球腔中的介质没有变化, 故球腔中的光波长不变、色视觉不变. 总之, 光与物质的相互作用、光与一切接收器的相互作用, 归根结底, 是光扰动与物质的相互作用. 这一概念具有普遍意义.

1.3 光 程

• 定义 • 光程与相位差 • 光程与时差 • 反射光束、折射光束的等光程性

• 定义

普遍地说, 光线路径的几何长度与所经过的介质折射率的乘积, 被定义为光程(optical path). 视不同场合, 给出光程的定量表达式如下. 参见图 1.10 所示, 在均匀介质中, 光线经 Q 点到达 P 点的光程为

$$L(QP) = nl. \quad (1.7)$$

在介质分区均匀的场合,比如透镜或透镜组,光程为

$$L(QP) = n_1 l_1 + n_2 l_2 + \cdots = \sum n_i l_i. \quad (1.8)$$

在变折射率介质中,光线弯曲,其光程计算从上式求和表示过渡到积分表达式,

$$L(QP) = \int_Q^P n(\mathbf{r}) ds, \quad (1.9)$$

这是一个路径积分,其中 \mathbf{r} 是空间点的位置矢量, $n(\mathbf{r})$ 是随位置而变化的介质折射率.

光程的物理意义,可以从光程与相位差、光程与时差的关系中获得初步认识.

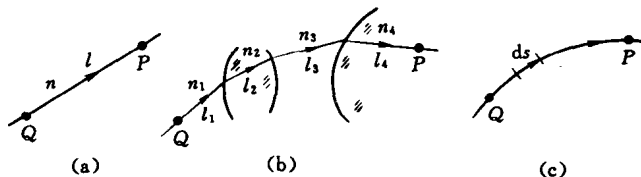


图 1.10 各种场合下的光程计算. (a) 均匀介质, (b) 介质分区均匀, (c) 变折射率场合

• 光程与相位差

如图 1.11 所示,考察一列光波,其经 Q 点的光线先后通过 M, N, \cdots 而到达 P 点. 我们知道,沿波传播方向,各点扰动的相位是逐点落后的,其倍率为 $2\pi/\lambda$. 于是, P, Q 两点扰动的相位差为

$$\varphi(P) - \varphi(Q) = - \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} l_1 + \frac{2\pi}{\lambda_2} l_2 + \cdots \right) = - 2\pi \sum \frac{l_i}{\lambda_i},$$

借用(1.6)式,将不同介质中的波长 λ_i 统统换算为真空中的光波长 λ_0 ,于是上式简缩为

$$\varphi(P) - \varphi(Q) = - \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum n_i l_i,$$

这里求和项正是光程 $L(QP)$,最后写成

$$\varphi(P) - \varphi(Q) = - \frac{2\pi}{\lambda_0} L(QP). \quad (1.10)$$

这是一个由光程表达相位差的最简洁且普遍适用的公式.

• 光程与时差

光速有限,光传播需要时间. 光扰动经 Q 到达 P 点的时间为

$$t_P - t_Q = \sum \Delta t_i = \sum \frac{l_i}{v_i},$$

借用(1.5)式,将介质中的光速 v_i 统统换算为真空中的光速 c ,于是上式简缩为

$$t_P - t_Q = \frac{1}{c} \sum n_i l_i,$$

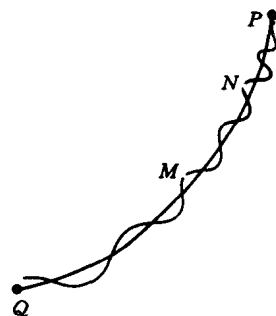


图 1.11 由光程导出相位差