

光学学习指导

(修订版)

庄丕福 张恒 编著



辽宁大学出版社

PDG

前 言

由全国二十七所院校使用过的《光学学习指导》，经几届使用，现于修订后再版。修订版除保留光学教学的理论性、师范性之外增加了应用性内容，使之适应于职业大学、综合大学的要求。本书依采用中学光学教学惯用的符号法则，凡与中学教学有联系之处笔笔强调，在传授光学知识的同时，引导学生向应用型、能力型发展。使学生成为知识、能力、理论、实际、双双发展的一代新人。

为了便于成人自学，本书突出光学的物理思想，穿插物理学史内容，避开繁琐的理论推导，从感性出发总结规律，例题随机插入课文，布有大量插图、介绍世界上尖端的光学仪器等等，都是修订版理论联系实际、提倡自学的新特点。

本书第一章、第六章、第七章由庄丕福副教授修订、编著，第二章、第三章、第四章、第五章、第八章由张恒副教授修订、编著。参加本书编写工作的还有：化工部沈阳橡胶研究设计院分析检测中心王国强老师，辽宁大学化学学院郭兴家老师，沈阳大学师范学院物理系光电室主任丁毅老师。

本书修订得到了珀金-埃尔默中国公司、芜湖光学仪器有限公司、浙江光学仪器厂的大力协助；也得到了辽宁教育学院、沈阳大学师范学院物理系、牡丹江师范学院的大力支持；还得到北京大学钟锡华老师，辽宁大学黄恩令老师，东北大学张志明、马龙光老师的指导和帮助。在此表示深切的谢意。

本书虽经多次统审，但还会存在一些缺点、错误，诚望广大读者批评指正。

编 者

2000年1月

目 录

前言

绪论	(1)
----	-----

第一章 几何光学基本原理

§ 1—1 几何光学基本概念及实验定律	(5)
§ 1—2 费马原理及其应用	(8)
§ 1—3 光在平面界面上的反射和折射	(12)
§ 1—4 光在单球面上的折射和反射	(17)
§ 1—5 薄透镜	(29)
§ 1—6 理想共轴光具组的多折变单折成像	(36)
思考题 习题	(53)

第二章 光的干涉

§ 2—1 光的电磁本性	(61)
§ 2—2 光波的传播	(62)
§ 2—3 光的干涉现象 相干条件	(65)
§ 2—4 分波阵面法产生的光的干涉	(69)
§ 2—5 分振幅法产生的光的干涉	(77)
§ 2—6 迈克耳孙干涉仪及其应用	(88)
* § 2—7 多光速干涉及法布里—珀罗干涉仪	(95)
思考题 习题	(100)

第三章 光的衍射

§ 3—1 光的衍射 惠更斯——菲涅耳原理	(102)
-----------------------	-------

§ 3—2	菲涅耳圆孔(圆盘)衍射 半波带法	(106)
§ 3—3	夫琅和费单缝衍射	(117)
§ 3—4	夫琅和费圆孔衍射	(123)
§ 3—5	衍射光栅	(126)
* § 3—6	晶体对伦琴射线的衍射	(135)
思考题	习题	(138)

第四章 光的偏振

§ 4—1	光的偏振性和光的偏振态	(141)
§ 4—2	利用反射和折射获得偏振光	(147)
§ 4—3	光的双折射现象及其解释	(151)
§ 4—4	偏振仪器	(161)
§ 4—5	椭圆偏振光和圆偏振光	(165)
§ 4—6	偏振光的鉴别	(172)
§ 4—7	偏振光的干涉	(174)
* § 4—8	偏振光的应用	(180)
阅读材料 IV—I	会聚偏振光的干涉	(182)
阅读材料 IV—II	晶体的旋光性 人工双折射	(183)
思考题	习题	(188)

第五章 光速与光的吸收、散射、色散

§ 5—1	光速的测定	(193)
§ 5—2	光的吸收	(195)
§ 5—3	光的散射	(198)
§ 5—4	光的色散	(202)
§ 5—5	光的相速和群速	(204)
习 题		(209)

第六章 光学仪器及光度学基础

§ 6—1	简化眼简介	(211)
§ 6—2	助视仪器的放大本领	(215)
§ 6—3	光学仪器的分辨本领	(226)
§ 6—4	辐射度学和光度学基本概念	(231)
§ 6—5	光学仪器的集光本领	(239)
§ 6—6	像差概述	(242)
§ 6—7	色度学简介	(247)
	阅读材料:供读者了解的一些国产光学仪器	(250)
	思考题 习题	(251)

第七章 光的量子性

§ 7—1	热辐射 基尔霍夫定律	(253)
§ 7—2	黑体辐射及其实验定律	(257)
§ 7—3	普朗克辐射公式 能量子	(260)
§ 7—4	光电效应	(264)
§ 7—5	康普顿效应	(273)
§ 7—6	波粒二象性	(280)
	习 题	(286)

第八章 现代光学简介

§ 8—1	激光的基本原理	(289)
§ 8—2	光学谐振腔	(295)
§ 8—3	激光器简介	(297)
* § 8—4	非线性光学效应	(302)

§ 8—5 全息照相.....	(303)
思考题.....	(306)

红外光谱仪的发展与现状..... (307)

1. 引言.....	1
2. 红外光谱仪的发展.....	2
3. 红外光谱仪的现状.....	3
4. 结论.....	4

红外光谱仪的发展与现状..... (307)

1. 引言.....	1
2. 红外光谱仪的发展.....	2
3. 红外光谱仪的现状.....	3
4. 结论.....	4

红外光谱仪的发展与现状..... (307)

1. 引言.....	1
2. 红外光谱仪的发展.....	2
3. 红外光谱仪的现状.....	3
4. 结论.....	4

绪 论

一、光学的研究内容和特点

光学从广义上讲，是研究光的行为、光的本性、光的一切的学科。作为基础光学则主要研究光的直进性（几何光学）、光的波动性（波动光学）、光的量子性及光与物质的相互作用（量子光学）及光学理论的应用，阐述它们的基本概念、基本原理、基本规律及有关问题。

光学既是最古老，又是当今最活跃的科学阵地之一；既是理论体系十分严密的理论科学，又是应用十分广泛的科学。从历史来看，光学革命曾导致整个物理学的革命，它是近代物理学的生长点。

二、光学发展概要

人类对光的认识，经历了二千多年的漫长岁月，按照历史的发展和研究的内容可分为：几何光学时期（17世纪之前），波动光学时期（18、19世纪），量子光学时期（20世纪初）及现代光学时期（本世纪60年代后）。下面从光的本性和光学仪器两方面对上述几个时期的要点作一简要介绍。

1. 光的本性

关于光的本性的说法，历史上主要表现为粒子性和波动性观点之争。这可分为：经典粒子，弹性波阶段，电磁波阶段；光子、几率波阶段。

在17世纪，以杰出的科学家牛顿为代表的一些人认为：光是服从牛顿力学规律的。光是从光源飞出并在均匀介质中沿直线传播的微粒流。这一“微粒说”成功地解释了光的直进。反射及折射等规律，并在解释折射定律时得出光在水中的速度比在空气中

大的论断。由于牛顿在当时科学界的权威性及实验条件的限制，微粒说不但很快被确立，而且差不多统治了17、18两个世纪。尽管如此，和牛顿同时代的惠更斯等人则认为：光同声一样是一种波动，是以球形波面传播的波，这种波同把石子投在平静的水面上时所看到的情形相似。他认为，能振动的以太就是光本身。由于“波动说”自身的不完善性（如认为光是纵波等），使得该理论虽然也能解释诸如光的反射，折射等现象，却没有占居应有的地位。到了19世纪，在托马斯·杨和菲涅耳等人从实验和理论上进一步辛勤工作后，成功地解释了牛顿微粒说所不能解释的问题，同时博生用实验测得了光在水中的速度是小于而不是大于空气中的速度（此结果与波动说理论推断一致），这就给牛顿的微粒说以致命的打击，使光的波动说才以强有力的说服力战胜了微粒说，确立了自己的历史地位，但是由于惠更斯——菲涅耳波动理论同牛顿微粒说一样具有浓厚的机械论色彩，因而不得不臆造一种特殊性质的传播介质“以太”，致使其理论难于发展下去。

19世纪末，麦克斯韦等人建立了光的电磁理论，认为光是时空连续的电磁波。由于他们的波动概念仍带有一定的机械性，故还需要“电磁以太”作为介质。

20世纪初，是物理学革命的时代。1900年普朗克首先将“能量子”的概念引入物理学。受他的启发，1905年杰出的科学巨匠爱因斯坦又提出了光量子的思想。而他所说的光量子是粒子性和波动性的统一体，是经典粒子的“原子性”和经典波的“叠加性”的统一体。光量子的波是几率波，就是所谓“光的波粒二象性”。目前，对于光的本性的认识，只能用它所表现的性质和规律来回答，光的某些行为象“波”，另一些行为象“粒子”，这如同太阳形状象“球”，热度象“火”一样。

2. 光学仪器

光学作为科学从它诞生之日起，就是一门“仪器化”的科学。光学在它漫长的发展史中，形成了一系列很有特色的实验和

测试设备——三代光学仪器。

从牛顿、伽利略时代到本世纪50年代的几百年内，光学仪器的生产和工艺达到了前所未有的高水平，各种光学零件表面加工达到0.1微米的精度。各种显微镜、照相机、望远镜、大地测量仪器、实验室仪器、计量仪器、物理光学仪器在经济建设各部门发挥着越来越重要的作用。这些仪器的特点，可概括为“光学加精密机械”，我们称为第一代光学仪器。

60年代以后，半导体物理和电子工业的蓬勃发展，大大刺激了光学工业，一批新型的光学仪器（如数字式工具显微镜，光电显微镜等）出现了，用电子技术实现自动化，用光电管代替眼睛，用数码代替仪表指针……它们是所谓“光—机—电”三结合的仪器（参看彩图及其说明，亦即“光学加精密机械加电子技术”，我们称之为第二代光学仪器。

随着物理学中的许多其它分支学科——原子物理学、量子电子学、凝聚态物理学等的巨大进展，在光学领域中发生了三件大事：1948年全息术诞生了，物理学家第一次纪录了光波所携带的全部信息；1955年第一次提出用光学传递函数来评价光学系统成像质量的概念；特别是1960年，一种全新光源——激光器的诞生，震动了整个科技界。70年代末期，由于近代光学和微处理机的结合，又导致了光学仪器的一次新的、意义更深刻的更新换代。新一代的光学仪器可称为信息光学仪器或智能光学仪器，亦即第三代光学仪器。其功能的完善程度和应用的广泛程度，以及仪器本身的标准化、系列化和通用化程度，都发展到了空前的高水平，光以它高速、高效率的工作性能，飞快地进入军事工业及经济建设的各个领域。

三、研究和学习光学的方法

光学同其它物理学分支一样，是在观察和实验的基础上，对物理现象进行分析，经过抽象，提出假说，经过实验考验的假

说，形成理论，再不断反复经受实践的检验，遵循实验——假说——理论——实验的认识规律。

由于光的性质、特点及各种光学书的思想体系各有侧重，往往使得初学者既感到光学生动有趣，又感到繁琐难学，其实，光学自从它成为独立的一门基础科学后，就具有很明晰的思想理论体系，以及作为直接证明的实验系列。因此读者学习中应抓住全书和各章的知识结构，弄清各部分的地位、特点及其联系。熟练掌握基本概念、原理和规律，以理论分析实验，以实验帮助理解理论。只有学好基本理论，走向生产及教学实际才是学好光学的必由之路。

第一章 几何光学基本原理

本章以光学的几个基本实验定律为基础，研究光在透明介质中的传播问题。这是与中学教学密切相关的一部分内容。读者应熟练掌握光在平面界面上、单球面上的反射和折射规律，光经薄透镜折射的成象特性、物象公式及应用。并能正确运用符号法解决逐个球面成象的问题。

§1-1 几何光学基本概念及实验定律

一、几何光学基本概念

光线：设想一个封闭房间的天棚上有一个小孔，阳光经过小孔射入室内。人们往往认为这就是光线。其实，几何光学中的光线是人们为研究光的传播而引入的几何线，用它来表示光的传播方向。因此，光线不是经小孔射入室内的极限光束，更不是光中存在什么“线”。

光束：具有一定关系的光线的集合形成光束。

例如：只有一个公共顶点 E 的光线集合形成**单心光束**；从无穷远处射来的平行光线形成**平行光束**。单心光束与球面波相对应，平行光束与平面波相对应。

还有一种现象如图1-1-1所示，光波波面 $CDEF$ 射出的一条条垂直于此面的光线相交于 BB' 、 AA' 两条线段。它们分别称为**弧矢象线**、**子午象线**。这样的光束称为**象散光束**。

光束是从光源发出的。从形状上把光源分成点光源、线光

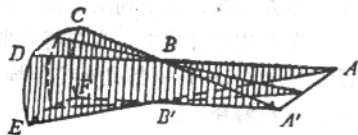


图 1-1-1

源、面光源等。不难理解，点光源发出的是单心光束。

实物：发散光束的顶点称为实物点。一群实物点形成实物。

虚物：会聚光束延长线的顶点称为虚物点。一群虚物点形成虚物。

虚象：光束经过光学系统后，光线反向延长线的交点称为虚象。如图1—1—2 (a) 平面反射成象中， S 是实物， S' 是虚象。

实象：光束经过光学系统后，光线实际会聚点称为实象。如图1—1—2 (b) 平面反射成象中 S 是虚物， S' 是实象。

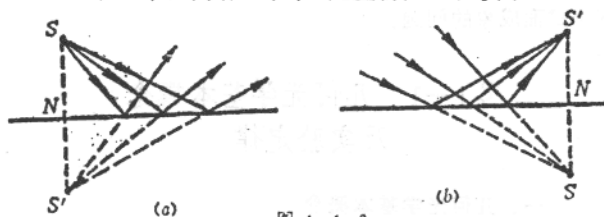


图 1—1—2

二、几何光学基本定律

1. 光的直线传播定律：光在均匀透明介质（下文使用介质一词，不特殊指明均指透明介质）中是沿直线传播的。物体的影子、木匠吊线、战士列队等都是此定律的体现和应用。

在非均匀介质中，光线将弯曲。海市蜃楼见图1—1—3与沙漠蜃景见图1—1—4都是光在非均匀大气层中传播而形成的（请读者自行解释）。

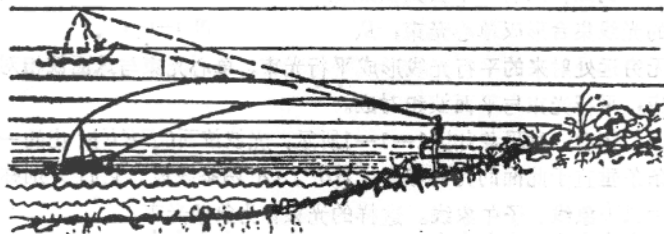


图 1—1—3

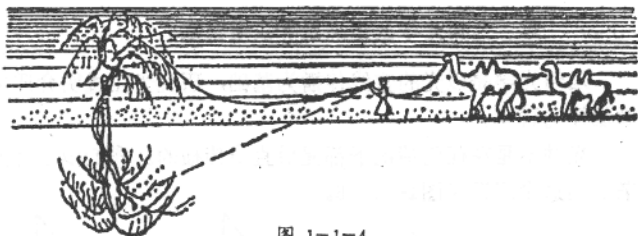


图 1-1-4

2. 光的独立传播定律：光在传播过程中互不干扰、各自独立地传播着，不同方向射来的光经过人眼的瞳孔各自成象在视网膜上，我们能看清眼前万物就是此定律的体现。

近年来人们发现，当光的强度相当大，如几束强激光束同时射入非线性介质时，会发生光学的倍频、混频等强光效应。此时，光的独立传播定律不再成立。所以光的独立传播定律只是通常光强下在介质中传播的实验定律。

3. 光的反射定律、折射定律（斯涅尔定律）。

反射定律：反射线、法线、入射线在同一平面（即入射面）内；反射线、入射线分居于法线的两侧；反射角 i_1 等于入射角 i 。它的数学表示：

$$i = i_1 \quad (1-1-1)$$

折射定律：折射线、法线、入射线在同一平面（入射面）内；折射线，入射线分居于法线的两侧； n 为入射前折射率， n' 为折射物质的折射率，则有见图1-1-5。

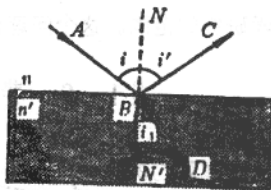


图 1-1-5

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin i}{\sin i'}$$

或写成

$$n' \sin i' = n \sin i \quad (1-1-2)$$

4. 光路可逆原理

当光线的方向反转时，光的传播路径不变。

三、几何光学的定义及其应用范围

几何光学是以光的直线传播为基础，研究光在透明介质中传播规律的科学。

光并不是在任何情况下都是沿直线传播的。我们以小孔成像来说明这个问题见图1-1-6。

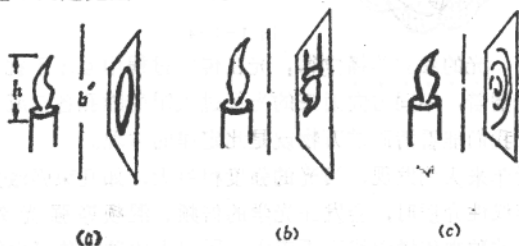


图 1-1-6

图1-1-6 (a) 是当孔径线度 b' 与物高 h 可以相比拟时，屏上有不显象的亮斑。图1-1-6 (b) 是当孔径线度 b' 变小到针孔大小时，屏上呈现一个倒立的象。即中学讲过的针孔成像。这两种情况都说明光是沿直线传播的。如果用单色光照明，当孔径继续缩小到 b 可与光波波长相比拟时，屏上将出现明暗相间的条纹见图1-1-6 (c)，可见此时光不再沿直线传播了，也不再是几何光学研究的范围。这个问题留在后面的衍射一章里详细讨论。

§ 1-2 费马原理及其应用

光在均匀的透明介质中沿直线传播。光在一般的透明介质（包括非均匀介质）中沿着—

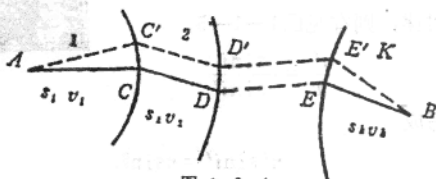


图 1-2-1

一条什么样路径从A点传播到B点呢 见图1-2-1? 费马原理： AB

两点间光线的实际路径是光程 l_{AB} （或传播所需要的时间 t_{AB} ）为极值的路径。

一、光程及其物理意义

图1—2—1中，光从A点至B点经历1、2、…k层均匀介质。在其中传播的速度分别为 $v_1, v_2 \dots v_k$ 。各层介质中光经过的路程的几何长度分别为 $s_1, s_2 \dots s_k$ 。光从A点到B点所经历的时间为

$$\begin{aligned} t_{AB} &= t_1 + t_2 + \dots + t_k \\ &= \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \dots + \frac{s_k}{v_k} \\ &= \frac{s_1}{\frac{c}{n_1}} + \frac{s_2}{\frac{c}{n_2}} + \dots + \frac{s_k}{\frac{c}{n_k}} \\ &= \frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i s_i \quad (1-2-1) \end{aligned}$$

其中 n_i 是第*i*层介质的折射率。光程在数值上等于光在介质中的路程（ s_i ）乘以该介质的折射率（ n_i ）。即令 $l_i = n_i s_i$ 称为光在第*i*层介质中的光程。光从A到B经历了K层均匀介质，总光程为：

$$l_{AB} = \sum_{i=1}^k n_i s_i \quad (1-2-2)$$

或

$$l_{AB} = c t_{AB} \quad (1-2-3)$$

即光程亦等于传播所用时间 t_{AB} 与光速 c 的乘积。光程的物理意义是把光在介质中传播的路程折算为光在真空中的路程。引入光程的概念在于比较光在不同介质中传播的光程差。光程是光学中极重要的概念。

如果A、B两点间介质折射率连续变化，则光程为：

$$l_{AB} = \int_A^B n ds$$

二、费马原理及其数学表示

为了说明费马原理，请见图1—2—1，光是沿着 $ACDE \cdots B$ 的路径从 A 点传到 B 点，我们设想与上述路径稍有不同的一些邻近的路径，如 $AC'D'E' \cdots B$ 。它们都从 A 到 B 。若问：为什么光实际上沿 $ACDE \cdots B$ 这条路径从 A 点传到 B 点呢？回答是：光沿 $ACDE \cdots B$ 这条路径的光程 l_{ACB} 与光沿其它邻近的路径如 $AC'D'E' \cdots B$ 的光程 $l_{AC'B}$ 相比是一个极值（极值的含意是：极小值、或极大值或稳定值）。也就是说，如果 $l_{ACB} > l_{AC'B}$ 或 $l_{ACB} < l_{AC'B}$ 时，光实际是沿 $ACDE \cdots B$ 路径传播，而不走 $AC'D'E' \cdots B$ 这条路径；如果 $l_{ACB} = l_{AC'B}$ ，则路径 $ACDE \cdots B$ 和 $AC'D'E' \cdots B$ 都是光实际可以传播的路径。这就是费马原理的极大值或极小值或稳定值的含意。

光程取稳定值、极大值和极小值的三种情况，前两者可用图1—2—2来说明。图1—2—2(a)中的凹面镜是旋转椭球面的一部分。

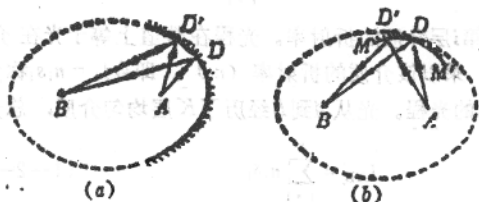


图 1-2-2

A 和 B 是两个焦点，从 A 点发出的光经凹面镜上任何点的反射都将过 B 点，且所有路径光程都相等。即光程取稳定值的情形，图1—2—2 (b) 中， MM' 为凹面镜内切于椭球面，切点为 D 。从 A 点发出的光经 D 点反射到 B 是实际的路径。 D' 是凹面镜上任一点。这时光程 $l_{ADB} > l_{AD'B}$ ，即光程取极大值情况。

费马原理的数学表达式为

$$\int_A^B n ds = \text{极值 (极大值或极小值或稳定值)}。$$

三、费马原理的应用

费马原理是几何光学的基本原理。由它可推导出反射定律，折射定律。

下面从费马原理导出折射定律。

在图1-2-3中，折射率分别为 n ， n' 的两种介质的分界面为 xoy 面。 A 、 B 是任取的两点。由 A 点发出的光，经 D 点折射后，通过 B ，可用费马原理来找出符合费马原理的 D 点在什么位置。

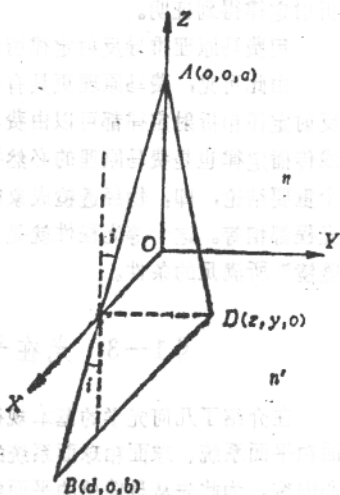


图 1-2-3

首先写出 ADB 的光程表达式

$$l_{AB} = n \overline{AD} + n' \overline{DB}$$

$$= n \sqrt{x^2 + y^2 + a^2} + n' \sqrt{(d-x)^2 + y^2 + b^2}$$

l_{AB} 取极值的条件是 $\frac{\partial l_{AB}}{\partial y} = 0$ ， $\frac{\partial l_{AB}}{\partial x} = 0$

$\frac{\partial l_{AB}}{\partial y} = ny / \sqrt{x^2 + y^2 + a^2} + n'y / \sqrt{(d-x)^2 + y^2 + b^2} = 0$ 必有 $y = 0$ ，即 D 点必在 x 轴上。得出折射线、法线、入射线在同一平面内的结论。在 $y = 0$ 的条件下：

$$\text{由 } \frac{dl_{AB}}{dx} = \frac{nx}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{n'(d-x)}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}} = 0$$

得到：

$$n \sin i = n' \sin i'$$

的结论。又由 $\frac{d^2 l_{AB}}{dx^2} > 0$ 。知光程 l_{AB} 为取极小值的路径。于是