

Guang xue
xuan jiang

光学 选讲

袁国才 编著 傅宏郎 尹道先 校订

高等教育出版社

光 学 · 选 讲

袁国才 著

傅宏郎 尹道先 校订

高等教育出版社

内 容 简 介

本书内容主要包括几何光学的矩阵方法及应用,波动光学的衍射理论及应用,和偏振光的矩阵描述及应用。

本书可供物理、光学等有关专业师生及有关科技人员参考。

本书责任编辑 曹建庭

光 学 选 讲

袁国才 著

傅宏郎 尹道先 校订

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.75 字数 260 000

1991 年 4 月第 1 版 1991 年 1 月第 1 次印刷

印数 0001—1 145

ISBN7-04-002846-8/O·905

定价 4.85 元

前 言

光学是一门相当成熟并充满活力的学科。早在 19 世纪,光线光学和波动光学就已揭示了光的若干基本规律,并将它们广泛应用到各种实际问题中;与此同时,还为物理学取得了重大的理论进展。在本世纪三十年代以来,利用矩阵和傅里叶变换这两种数学方法,逐渐开拓了光学应用的新领域。在光线光学和光的偏振问题中应用矩阵运算,方便了对繁复问题的处理,在计算机迅速发展的今天,这种方法日益受到重视。另一方面,把处理通信理论的傅里叶变换方法和观点移植到光学中,研究光的传播和成象问题,已经发展成现代光学中的一个重要分支。由于全息术、激光理论和实践所取得的成果,使这一分支的应用前景更加广阔。

由此,适当介绍矩阵光学和傅里叶光学的一些基本知识,并讨论它们关于基础光学中的一些传统内容所作的处理,对进一步了解现代光学是肯定有用的。本书第一章和第五章分别介绍应用矩阵方法解决光线光学和偏振中的某些问题。读者将会发现,用矩阵处理这些问题,条理清楚,概括性强,便于推广。第二章介绍光波的基本性质,第三、第四章则是在此基础上,通过对衍射现象的讨论,介绍傅里叶变换在光学中的应用,和由此得到一些重要结果。此外,还简单介绍了全息术和光学信息处理。傅里叶变换的基本知识和一些公式的证明则列在书后的附录里。

书中将介绍必要的数学处理方法,然而,本书的主要目的,仍然着重于分析和阐明数学处理过程中的物理思想和所得结果的物理意义,以便从物理的角度去认识所述的光学内容。

用不同的数学方法去处理同一物理现象，意味着从不同的角度、不同的深度去剖析同一观察结果。它不仅使我们更深刻地认识到物理现象的本质和内在联系，而且往往伴随着新意的发现，对开拓新的应用产生意想不到的推动作用，带来丰硕的成果。从这个意义上说，对比较为人熟知的光学内容，采用不同的处理方法，将会使我们的眼界更加开阔，思想更加活跃，更具有开创性。这是本书想达到的另一个目的。

本书内容主要取自郑州大学物理系已故袁国才教授所编光学讲义，由傅宏郎教授（云南大学）和尹道先教授（桂林电子工业学院）从中精选出来，加以增删订正，改写而成。

目 录

前言	1
第一章 傍轴矩阵光学基础	1
§ 1-1 光线传播的基本规律	2
§ 1-2 光学系统的成象问题	5
§ 1-3 光线状态的描述及其变化规律	8
(一) 光线状态的描述	9
(二) 折射过程中光线状态的变换	11
(三) 平移过程中光线状态的变换	13
§ 1-4 单球面成象的条件和规律 傍轴近似	14
§ 1-5 理想光学系统的成象规律	19
(一) 理想光学系统的系统矩阵	19
(二) 理想光学系统的物-象关系	20
(三) 理想光学系统的基点	29
(四) 反向光路问题	40
§ 1-6 几个简单应用	43
(一) 放大镜	43
(二) 望远镜和显微镜	46
(三) 摄远物镜和变焦距物镜	50
(四) 共轴折-反射球面系统(折-反系统)	54
(五) 光学谐振腔的稳定条件	58
§ 1-7 通过光学系统的光能	62
(一) 辐射能通量、辐亮度和辐照度	62
(二) 光谱光视效率和光通量	65
(三) 限制光束孔径的光阑	67
(四) 通过光学系统的光通量、象的亮度和照度	71
第二章 波动光学基础	75

§ 2-1 简谐波	75
(一) 一维简谐波	76
(二) 简谐波的复数表示	78
(三) 三维空间内的简谐波	79
§ 2-2 非简谐波	84
(一) 一维非简谐波	85
(二) 波动方程式	89
(三) 三维非简谐波	90
§ 2-3 光波的基本性质	93
(一) 光波的电磁性质和横波性	93
(二) 平面波的反射和折射	96
(三) 光波的能量密度和辐照度	99
§ 2-4 光波的叠加和相干性	101
(一) 叠加原理	102
(二) 光波的相干性	102
(三) 干涉条纹的可见度	110
(四) 相干光的获得	112
第三章 光波衍射——光场分布的傅里叶变换	115
§ 3-1 光的衍射现象	115
§ 3-2 惠更斯-菲涅耳原理	116
(一) 惠更斯-菲涅耳原理	117
(二) 衍射屏和屏函数	121
(三) 互补屏和巴俾涅原理	122
§ 3-3 菲涅耳衍射与夫琅和费衍射	123
(一) 菲涅耳衍射	125
(二) 夫琅和费衍射	127
§ 3-4 透镜的相位变换作用和傅里叶变换作用	130
§ 3-5 夫琅和费衍射和空间频谱	134
§ 3-6 夫琅和费衍射的基本性质	141
§ 3-7 几种简单衍射屏的夫琅和费衍射	143
(一) 正弦振幅光栅	144

(二) 单狭缝·····	148
(三) 圆孔·····	153
(四) 光学仪器的分辨本领·····	156
§ 3-8 多缝的夫琅和费衍射 光栅·····	160
(一) 光栅的衍射图象·····	160
(二) 光栅的性能参数和光栅光谱·····	167
(三) 闪耀光栅·····	171
§ 3-9 菲涅耳衍射·····	177
(一) 菲涅耳圆孔衍射·····	177
(二) 菲涅耳圆屏衍射·····	179
(三) 菲涅耳余弦型环带光栅(波带片)·····	180
第四章 象的形成和处理 ·····	185
§ 4-1 物在相干光照明下的成象·····	185
(一) 二次衍射成象理论·····	185
(二) 阿贝-波特实验·····	190
(三) 透镜有限孔径的影响和振幅脉冲响应·····	194
§ 4-2 物在非相干光照明下的成象·····	199
(一) 点扩展函数(PSF)·····	199
(二) 光学传递函数(OTF)·····	200
§ 4-3 波前重现成象(全息术)·····	206
(一) 波前的概念·····	206
(二) 波前的记录·····	207
(三) 波前重现成象·····	210
§ 4-4 空间滤波和光学信息处理·····	216
(一) 简单的空间滤波·····	218
(二) 相-幅滤波器、相衬法·····	218
(三) 匹配滤波器和特征识别·····	221
第五章 光的偏振 ·····	226
§ 5-1 光波的偏振状态及其琼斯矩阵表示法·····	226
(一) 偏振光·····	226
(二) 非偏振光(自然光)·····	236

(三) 部分偏振光和相干矩阵	238
§ 5-2 光在晶体中的双折射	242
(一) 双折射现象	247
(二) 单轴晶体中的单色平面波	254
§ 5-3 晶体中光的振动方向和传播方向的几何图示	254
(一) 波法线椭球和折射率椭球	254
(二) 对偶规则、波法线方程和光线方程	258
(三) 单轴晶体的光线面和法线面	260
(四) 双轴晶体的光线面和法线面	265
§ 5-4 变换偏振状态的光学元件	266
(一) 改变光波偏振状态的光学晶体元件	266
(二) 偏振光学元件的矩阵表示——琼斯矩阵	270
(三) 光波偏振态的变换	275
§ 5-5 光波偏振态的定性分析和定量测量	278
(一) 光波偏振态的定性分析	278
(二) 光波偏振态的定量测量	279
§ 5-6 偏振光的干涉	281
(一) 实验装置 干涉光的辐照度	281
(二) 显色偏振	283
(三) 出现干涉条纹的偏振光干涉	284
(四) 光测弹性	285
§ 5-7 旋光性、电光效应和磁致旋光	289
(一) 非线性极化	289
(二) 旋光效应	290
(三) 线性电光效应	296
(四) 磁致旋光性(法拉第效应)	303
§ 5-8 二次谐波的产生(倍频效应)	306
附录 I 傅里叶变换的基本概念和公式	311
附录 II 透镜的傅里叶变换性质的证明	323
附录 III 阿贝正弦条件	327
索引	328

第一章 傍轴矩阵光学基础

光是波长相当短的电磁波, 波长为 10^{-5}cm 的数量级. 从原则上讲, 求解麦克斯韦方程组, 应可得到关于光传播的全部规律. 但实际上, 只有在某些简单的情形里, 才能求得麦克斯韦方程组的严格解. 因此, 我们常要采用一些近似的考虑, 以便比较容易地求得方程组的解, 从而在忽略细节的情况下描述现象. 我们把凡能改变光传播方向或光能量及其分布的无器件(以及它们的组合), 统称为光学系统. 如果光所通过的系统的线度比光的波长 λ 大得多, 则可近似地认为 $\lambda \approx 0$, 这是零波长近似条件. 取一个线度小到可以忽略的光点, 让它发出的光通过一个小孔, 从而形成一个光锥. 如果光的波长可以视为零, 就可以认为, 随着小孔线度的减小, 通过小孔的光锥截面也将无限变细. 无限细的光锥定义为光线. 光锥的中心线代表了光线的方向, 也代表了光能量的传输方向, 从这个意义上说, 光线是携带光能量的射线, 或者, 简单地说成: 光沿着光线传播.

光的电磁理论已经证明, 表示平均能流密度传播的平均坡印廷矢量垂直于几何波阵面(空间内振动相位相同的点所组成的面); 也垂直于光波的电矢量 E 和磁矢量 H . 所以, 光线上每一点的方向(切线方向)和平均坡印廷矢量重合, 并和电矢量 E 及磁矢量 H 垂直. 因而光线也可定义为和波阵面正交的几何轨迹线. 这个定义实际只适用于各向同性媒质. 我们以后将会看到, 在各向异性媒质中, 坡印廷矢量的方向通常都不和波阵面法线的方向重合.

从实验事实建立起来的某些基本定律出发,应用光线概念,以研究光的传播及成象规律,是光学中的一个重要分支,称为光线光学或几何光学。

由于实际上不可能有无限细的光锥,因而光线只是在 $\lambda \rightarrow 0$ 时的一种抽象的几何概念,是在一定条件下对实际情形所取的近似。至于以波动概念为基础的波动光学,则是肯定波动的基本参量——波长为有限值。因此,光线光学可看成是波动光学在零波长(即忽略波动性)时的极限情形。它的结论只是一定程度的近似结果。但光线光学的处理方法简单明了,所以,在研究光学仪器的原理和设计中,它还是十分有用的。

用矩阵方法研究光线光学,称为矩阵光学。最初是由托马斯·史密斯(Thomas Smith)于1928年提出的,但直到六十年代,由于电子计算机的发展和广泛应用,这种方法才得到重视和发展。我们将只对近轴矩阵光学作一初步介绍。

§ 1-1 光线传播的基本规律

实验观察表明,描述光传播的光线遵从如下一些基本规律:

(一) 光的直线传播定律。光在均匀透明媒质中沿直线传播,因而均匀媒质中的光线是直线。

(二) 光的反射定律。光在两种透明均匀媒质的分界面上发生反射和折射现象:一部分光被反射回原媒质,另一部分光则透过分界面进入另一种媒质内,并且改变传播方向。如图 1-1 所示。

光反射时遵从的规律称为反射定律,可表述如下:

1. 入射光线 SO_1 、反射光线 OS_1' 和法线 N_1N_2 同在一个平面内,包含此三者的平面称为入射面;

2. 入射角 i_1 和反射角 i_1' 分别是入射光线、反射光线和法线所成的夹角,其值相等,即

• 2 •

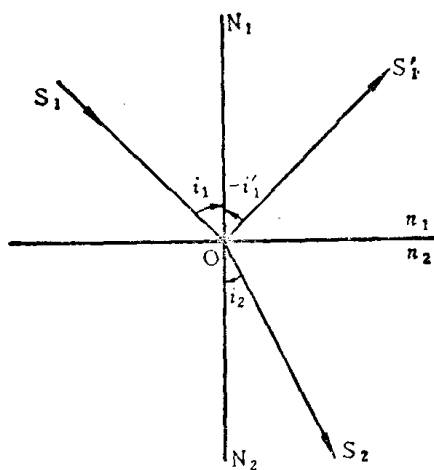


图 1-1

$$i_1 = -i_1'. \quad (1.1)$$

这里,角度的正负号规定如下:取由光线位置转移到法线位置的锐角;沿顺时针方向转过的锐角定为正值,沿逆时针方向转过的锐角定为负值.另外并规定,图上的字母一律只表示绝对值.所以,图 1-1 中的 i_1' 前需冠以负号.

(三) 光的折射定律. 光透过分界面发生折射时遵从的规律称为折射定律,可表述如下:

1. 入射光线 S_1O 、折射光线 OS_2 和分界面的法线 N_1N_2 三者也同在入射面内;

2. 分界面两侧媒质不同时,入射角 i_1 和折射角 i_2 的正弦之比为—不随入射角而变的常数. 这个关系可表为

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (1.2)$$

式中 n_1 及 n_2 分别是媒质 1 和媒质 2 的折射率, i_1 和 i_2 的正负号也按上述符号规则确定. 比值 $n_{21} = n_2/n_1$ 称为媒质 2 对于媒质 1 的相对折射率,这样, (1.2) 式也可表为

$$\sin i_1 / \sin i_2 = n_2 / n_1 = n_{21}. \quad (1.2a)$$

(1.2)式或(1.2a)式通常称为斯涅耳定律。

折射率与波长有关,即 $n=n(\lambda)$ 是波长的函数,称为媒质的色散。折射率是媒质关于光波的特征值。如果媒质内折射率处处相同,这媒质是光学均匀的;如果对于任何光线方向,媒质的折射率都相同,则称为各向同性媒质;否则称为各向异性媒质。真空的折射率 $n=1$,与光波的波长无关。媒质的折射率一般都大于1。在发生折射的分界面两侧,折射率大的媒质称为光密媒质,折射率小的媒质称为光疏媒质。当光线从光疏媒质进入光密媒质时,有 $n_2>n_1$,或 $n_{21}>1$,这时 $\sin i_1>\sin i_2$,即折射角小于入射角,这称为外反射;反之,若 $n_2<n_1$,则折射角大于入射角,这称为内反射。

在内反射情形下, $n_{21}<1$,当 $\sin i_1=n_{21}$ 时,由(1.2a)式可知, $\sin i_2=1$,有 $i_2=90^\circ$,这时光将沿着界面折射,而不是在媒质2中传播,这称为全反射。

上述三个实验的基本定律,可以用费马原理高度概括成一个统一的原理。费马原理是说:如果将折射率与光线通过的路径的乘积称为光程 L ,

$$L=n_1S_1O+n_2OS_2,$$

则光线总是以

$$\delta L=0 \quad (1.3)$$

的方式进行。若在 S_1S_2 (或 $S_1S'_1$)路径上折射率发生连续变化,则费马原理可表为

$$\delta(S_1S_2)=\delta\int_{(L)}^{s_2} n dl=0. \quad (1.3a)$$

光程的变分为零说明光程应取极值,即它的二阶微分可能大于零(光程取极小值)、小于零(光程取极大值)或等于零(光程为恒定值,即等光程.)。

可以证明,符合费马原理的光线路径是遵从三个基本定律的。

按照费马原理,光线也可以定义为线积分 $\int n dS$ 具有稳定值的曲线.因此,在折射率作连续变化的不均匀媒质中,光线将是弯曲的,弯向折射率高的一方以使光程最小.星光的闪烁、处于地平线上的太阳呈扁圆形、沙漠和海面上出现的海市蜃楼,都是大气的光学非均匀性引起光线弯曲而出现的现象.根据光线弯曲的程度,可以观测折射率分布的梯度,用于检查光学玻璃的质量、各种原因引起的气体或液体的密度变化.

由于费马原理只涉及路径的光程长度而没有考虑沿路径传播的方向,因此,如果能证明光线从 S_1 经 O 到 S_2 的光程是极值,则从 S_2 经 O 到 S_1 的光程自然仍是极值,即光将沿同一路径反向传播.这称为光传播的可逆性,这个结论也可以直接由反射定律和折射定律推出.

另外,如果形式地假设 $n_2 = -n_1$ 以表示在同一媒质中的反向传播,即可由(1.2)式导得 $i_2 = -i_1$ 的反射公式(1.1).这就是说,反射问题可以形式地看作在负折射率媒质中的折射问题.实际不存在负折射率的媒质,因此,纯粹是形式上的统一,只为便于讨论问题,并无实际的物理意义.

§ 1-2 光学系统的成像问题

光线光学中的主要研究题目之一是,物体发出的光线通过光学系统后的成像问题.

发光的物体称为光源.发光物体的线度比它和观察位置间的距离小得很多,以致可以忽略不计时,该发光物体就可以近似地看作点光源.当发光物体的线度不可忽略时,它的有限大小的发光表面就称为扩展光源,扩展光源仍可以看作是许多各不相关的连续分布的点光源的集合.

点光源向各方发出光线，通过一个有限大的小孔后的光线形成一个光锥，也称作同心光束。点光源位于同心光束的顶点，它是同心光束内所有光线集合在一起的共同点，在成象问题中即称为物点。同心光束边缘的光线描述出光束的立体角，这个立体角所包含的空间就是光能量传播的空间。沿同心光束中心轴方向的光线称为主光线，它表示该同心光束的方向。倘若同心光束底面积沿着主光线传播方向不断增加，则为发散同心光束。反之，则为会聚同心光束。

面光源上各点发出的同心光束的集合，构成一般的光束。按照光束边缘光线的描述，一般光束也可分为发散的或会聚的，它和构成这个光束的光锥(同心光束)是发散还是会聚无关。如图 1-2 所示，图(a)中 SO 是发散光锥构成会聚光束， OS' 是发散光锥构成发散光束；图(b)中的 PQ 是会聚光锥构成会聚光束， QP' 是会聚光锥构成发散光束。图 1-2 还表明，一般的光束所占空间中的每一点，可以有許多条光线通过。

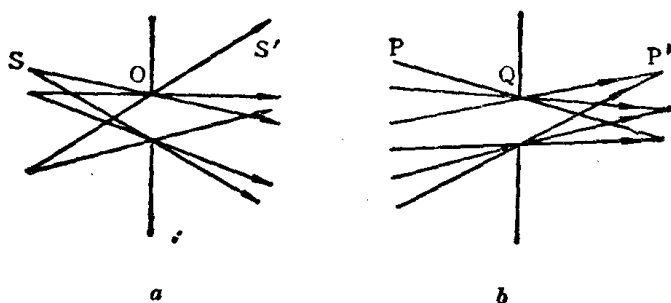


图 1-2

同心光束所占空间中的每一点，只有一条光线通过，这样的一簇光线称为线汇。如果存在一组曲面，它的每一个曲面都和线汇中的每一条光线正交，这样的线汇称为法线汇，它的正交曲面又称正交轨面。如果法线汇的每条光线都是直线，则称为法直线汇。均

均匀各向同性媒质中的同心光束是一个法直线汇，它的正交轨面就是以顶点为球心的球面。正交轨面是平面的法直线汇就是平行光束，平行光束和顶点在无限远的同心光束相对应。

在光线光学中，只有法线汇才是重要的。可以证明，在法线汇光线的任何两个正交轨面之间，所有光线的光程长度都相等。这一结果在多次折射或反射后仍然成立；在折射率连续变化的媒质中也成立，它称为等光程原理。

按前述光学系统的定义，任何两个或多个不同折射率的媒质的分界面都是光学系统，因为它起着变换光线方向或所带能量的作用。一个同心光束通过光学系统后，如果仍然保持为同心光束，这样的光学系统称为理想光学系统，入射同心光束的顶点是物点，出射同心光束的顶点是光学系统对物点所成的理想象点。理想光学系统对同心光束的变换作用就称为理想成象，如果不致于引起混淆时，就简称为成象而略去理想二字。

物和象是相对于一个指定的光学系统而言的。入射的发散同心光束的顶点称为实物；入射的会聚同心光束的顶点则称为虚物。从该光学系统出射的会聚同心光束的顶点称为实象；出射的发散同心光束的顶点则称为虚象。我们定义光学系统外面含有入射光束的一侧为物空间或物方；光学系统外面含有出射光束的一侧为象空间或象方。如图 1-3 所示。图中 S 是实物，一定位于物空间； P 是实象，一定位于象空间。 S' 是入射的会聚同心光束沿光线方向延长后的交点，它一定位于光学系统内部或象空间，这是虚物；与此相似，位于光学系统内部或物空间的象必是虚象，它是出射的发散光束沿光线反向延长后的交点。

实际的光学系统都只能在一定条件下近似地理想成象，也就是说，它对入射同心光束起变换作用后，将在一定程度上破坏光束的同心性。这时，观察到的不是一个象点，而是一个边缘模糊的亮

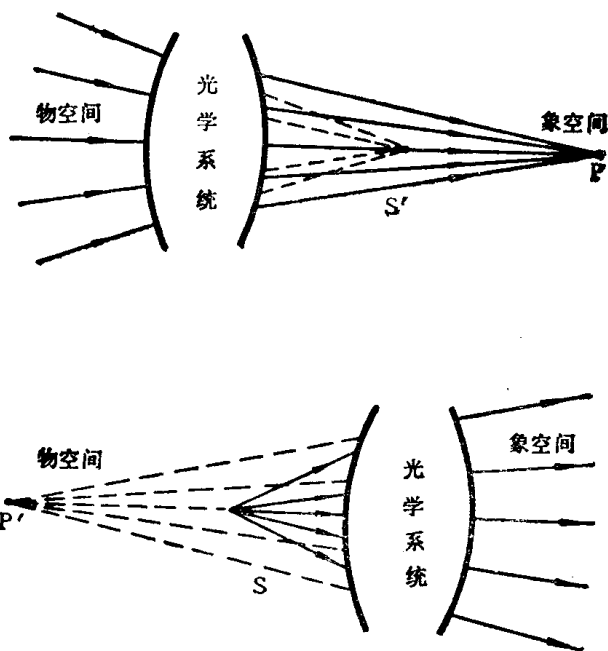


图 1-3

斑,称为象散象.

对于一个有限大小的平面物体,理想成象的条件更为苛刻.因为平面物体的理想象必须满足更多的要求:

(一) 所用的光学系统对每个点物都应能理想成象,而得到相应的点象.

(二) 光学系统形成的全部点象应都在一个平面上.

(三) 象上各点间的距离,应与物上各相应点间的距离成正比.这样,象和物才能有完全相似的几何形状.

(四) 象上各点的亮度比应与物上各相应点的亮度比相同.这样,象和物才能有完全相似的黑白层次.

§ 1-3 光线状态的描述及其变化规律

绝大多数的实际光学系统,都可以看作是由一系列共轴球形