

现代光学

XIANDAI GUANG XUE



内蒙古人民出版社

080350

现 代 光 学

A. K. 加塔克 K. 塞格雷健 著

蒙 文 林 译 徐 大 雄 校

内蒙古人民出版社

1985·呼和浩特

A · K · Ghatak and K · Thyagarajan

Contemporary Optics

Plenum Press, New York, 1978.

现代光学

A · K · 加塔克 K · 塞格雷健 著
蒙文林译 徐大雄校

内蒙古人民出版社出版

(呼和浩特市新城西街82号)

内蒙古新华书店发行 内蒙古蒙文印刷厂印刷

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 18.75 字数: 474 千

1986年6月第一版 1987年8月第1次印刷

印数: 1—2,625册

统一书号: 7089 · 440 每册: 3.95元

译者的话

本书是加塔克(A. K. Ghatak)和塞格雷健(K. Thyagarajan)教授根据印度理工学院应用光学的硕士研究生的讲义编写而成的。书中讨论了现代光学中的基本问题和某些前沿问题，并从数学的角度得出了各种光学现象的基本规律，对实际应用也给予了相当大的注意。具体有以下几个突出的特点：

1. 从经典的麦克斯韦的电磁理论出发，以严谨，简捷的数学方法，阐述现代光学中的基本现象和规律；
2. 物理图象清晰、明了，文字叙述通俗易懂；
3. 讨论了某些前沿的内容，如自焦聚，光波导等；
4. 从数学上讨论了近轴光线光学，象差，和特征函数（在一般的现代光学书中是不含这些内容的）。

基于以上特点，本书可作为理工科大学本科高年级选修课和专业课教材，也可作为硕士研究生的基础课教材，对于光学方面感兴趣的且具有一定基础知识的自学者，也是一本适用的自学教材。

为学习本书的内容不会产生数学上的困难，译者特地编写了三章数学，以作为学习本书的数学基础。其主要内容为：第一章特殊函数概述，其中包括光学上常用的一些特殊函数（阶跃函数，符号函数，矩形函数，等变率函数，三角状函数，Sinc函数， Sinc^2 函数，高斯函数，圆柱状函数）， δ 函数（包括梳状函数），

贝塞耳函数 (包括 Γ 函数, 礼帽函数); 第二章卷积 (包括一维函数和二维函数的卷积); 第三章傅里叶变换 (包括直角坐标系中的一维和二维函数的傅里叶变换及极坐标系中的汉克尔变换).

译者对书中已发现的错误均作了改正, 除特殊情况外, 一般未加说明. 由于译者水平所限, 译文与译者附录中肯定有不少不当甚至错误之处, 敬请读者给予指正.

1985年9月

序 言

随着激光的出现，它的许多的应用如光信息处理、全息和光通讯已得到发展。这些应用使科学家和工程师们必需进行光学研究。本书是为高年级大学生和一年级研究生所用，书中介绍了对许多这些应用进行了解所必需的基本概念。本书是根据新德里印度理工学院应用光学的硕士研究生的讲义编写而成。

一——三章讨论几何光学，展述光线追踪，象差计算的基本理论。由一些基本原理导出各种象差的公式。我们应用从哈密顿方程组出发的 **Luneburg** 处理法，因为我们相信这种方法容易理解。

四——八章讨论现代物理光学的最重要方面，即衍射，相干，傅里叶光学，和全息。作为讨论的基础是标量波动方程。空间频率滤波和全息的许多应用也进行了讨论。

由于大功率激光束的获得，许多非线性光学现象已被研究。在各种非线性现象中，由于介电常数对光强的非线性依赖关系而引起的光束的自聚焦（或离焦）已受到相当大的注意。在第九章中我们将详细地讨论定态光束自聚焦。

在第十章中，我们相当详细地讨论梯度折射率光波导。由于在一些光通讯系统中应用激光光束，使得这个题目深受重视。虽然着重分析折射率以抛物线型变化为特征的光波导，但是这种分析可引出光波导的许多显著性质。

在第十一章中，我们讨论在电磁理论中占有重要地位的倏逝波；尤其着重于 Goos-Hänchen 位移。

可能还应包含许多其他有趣的课题，但限于本书的篇幅，不能一一涉及。

已解问题和未解问题是本书的重要组成部分。某些现象以问题形式提出（而不单独分节讨论）为的是使读者能够跳过它们（如果需要的话）而不致于对连续性有任何影响。

我们设法不涉及原始著作；而力求参考一些现代观点的文章，专论，学术研究论文，而这些资料在大多数图书馆内通常是备有的，并会使读者对这一学科获得更多的了解。

在此对 M. S. Sodha 教授的关心和大力支持，以及他的许多宝贵的建议表示衷心地感谢。还对 Kehar Singh 博士，I. C. Goyal 博士，Arun Kumar 博士，Anurag Sharma 先生，E. Khular 女士，Aruna Rohra 女士，Anjana Gupta 博士，和 B. D. Gupta 先生的许多鼓舞性的讨论表示感谢。还对 D. Radhika 女士，K. K. Shankari 女士，T. N. Gupta 先生和 N. S. Gupta 先生在原稿整理中给予的帮助表示感谢。

我们对 E. Wolf 教授，H. Kogelnik 博士，R. S. Sirohi 博士，K. K. Gupta 先生，和 Anurag Sharma 先生为本书提供出某些照片表示感谢，对各位编辑和出版者欣然允许我们使用他们出版的材料表示感谢。最后我们对德里印度理工学院院长，N. M. Swani 教授对本书给予的关心和支持表示衷心地谢意。

新德里

A. K. 加塔克
K. 塞格雷健

目 录

译者的话

序言

第一章 近轴光线光学

- 1.1. 引言..... (1)
- 1.2. 费马原理..... (2)
- 1.3. 拉格朗日公式..... (9)
- 1.4. 哈密顿公式..... (17)
- 1.5. 哈密顿公式对研究近轴透镜光学的应用..... (19)
 - 1.5.1. 单折射面..... (21)
 - 1.5.2. 薄透镜..... (23)
 - 1.5.3. 厚透镜..... (24)
- 1.6. 程函近似..... (26)
 - 1.6.1. 程函方程的导出..... (26)
 - 1.6.2. 程函方程和费马原理..... (29)
- 1.7. 波动光学作为量子化的几何光学..... (30)

第二章 第三级象差的几何理论

- 2.1. 引言..... (33)
- 2.2. 第三级象差的表达式..... (34)
- 2.3. 系数 A, B, C, D, 和 E 的物理意义..... (42)
 - 2.3.1. 球差..... (43)
 - 2.3.2. 彗差..... (45)

2.3.3.	象散和象场弯曲	(46)
2.3.4.	畸变	(51)
2.4.	系数 H 用折射率变量表示	(53)
2.5.	梯度折射率媒质的象差	(54)
2.6.	在具有有限不连续折射率的系统中的象差	(59)
2.6.1.	平面玻璃面	(64)
2.6.2.	薄透镜的象差	(65)
2.7.	色差	(72)

第三章 特征函数

3.1.	引言	(77)
3.2.	点特征函数	(77)
3.2.1.	定义和性质	(77)
3.2.2.	阿贝正弦条件	(82)
3.3.	混合特征函数	(85)
3.3.1.	定义和性质	(85)
3.3.2.	旋转对称系统的第三级象差	(89)
3.4.	角特征函数	(92)
3.5.	特征函数的计算	(94)
3.5.1.	对折射平面的混合特征函数	(94)
3.5.2.	折射球面的角特征函数	(95)

第四章 衍射

4.1.	引言	(98)
4.2.	球面波	(99)
4.3.	亥姆霍兹和基尔霍夫积分定理	(100)
4.4.	菲涅耳——基尔霍夫衍射公式	(103)
4.5.	夫琅和费衍射和菲涅耳衍射	(107)
4.6.	矩孔的夫琅和费衍射	(111)
4.7.	圆孔的夫琅和费衍射	(116)
4.8.	爱里图样中的强度分布	(121)
4.9.	圆孔的菲涅耳衍射	(123)

4.10.	单狭缝的非涅耳衍射	(125)
4.11.	沿波前具有振幅分布的波的衍射	(138)
4.12.	巴俾涅原理	(144)
4.13.	周期性孔径	(145)
4.14.	焦平面附近的强度分布	(148)
4.15.	光学谐振腔	(153)

第五章 部分相干光

5.1.	引言	(169)
5.2.	复数表示	(172)
5.3.	互相干函数和相干度	(174)
5.4.	准单色光源	(177)
5.5.	范西特——泽尼克定理	(184)
5.6.	$\Gamma_{12}(\tau)$ 满足的微分方程	(192)
5.7.	部分偏振光	(194)
5.7.1.	相干矩阵	(194)
5.7.2.	偏振度	(199)
5.7.3.	\mathbf{J} 的各元素的测量	(201)
5.7.4.	光学元件	(202)

第六章 傅里叶光学 I. 空间频率滤波

6.1.	引言	(205)
6.2.	夫琅和费衍射近似和菲涅耳衍射近似	(207)
6.3.	薄透镜对入射场分布的影响	(208)
6.4.	透镜作为傅里叶变换元件	(212)
6.5.	空间频率滤波和它的应用	(228)
6.5.1.	相衬显微术	(231)
6.5.2.	互相关	(233)
6.5.3.	特征识别	(235)
6.5.4.	多通道运算	(239)
6.5.5.	矩阵乘法	(242)

第七章 傅里叶光学 II. 光学传递函数

- 7.1. 引言..... (244)
- 7.2. 点扩展函数..... (244)
- 7.3. 薄透镜的点扩展函数..... (249)
- 7.4. 频率分析..... (252)
- 7.5. 相干和分辨..... (264)

第八章 全息学

- 8.1. 引言..... (267)
- 8.2. 基本原理..... (268)
- 8.3. 二平面光波之间的干涉..... (272)
- 8.4. 点光源全息图..... (274)
- 8.5. 物体用漫射光照明..... (280)
- 8.6. 傅里叶变换全息图..... (282)
 - 8.6.1. 菲涅耳全息图和傅里叶变换全息图的分辨本领..... (286)
 - 8.6.2. 无透镜傅里叶变换全息图..... (288)
- 8.7. 体积全息图..... (290)
- 8.8. 全息的应用..... (294)
 - 8.8.1. 三维再现..... (294)
 - 8.8.2. 干涉量度学..... (294)
 - 8.8.3. 显微术..... (301)
 - 8.8.4. 通过象差媒质成象..... (302)

第九章 自聚焦

- 9.1. 引言..... (304)
- 9.2. 自聚焦的基本理论..... (305)
- 9.3. 关于自聚焦的更严格理论..... (309)
- 9.4. 激光束的热自聚焦(离焦)..... (315)
- 9.5. 具有弱非线性的标量波动方程的解..... (319)
- 9.6. 关于非线性介电常数计算的一般问题..... (323)

第十章 梯度折射率波导

10.1.	引言	(326)
10.2.	模式分析	(329)
10.3.	通过自聚焦纤维传播	(334)
10.3.1.	关于轴对称发射的高斯光束的传播	(336)
10.3.2.	在某一轴外点平行于轴发射的高斯光束的传播	(338)
10.4.	脉冲传播	(347)
10.5.	制造	(357)

第十一章 倏逝波和 Goos-Hänchen效应

11.1.	引言	(360)
11.2.	倏逝波的存在	(363)
11.3.	有限宽度光束的全内反射	(367)
11.4.	Goos-Hänchen位移的物理理解	(374)
11.5.	平面波导中的 Goos-Hänchen效应	(377)
11.6.	棱镜——薄膜耦合器	(382)

附录

A.	狄拉克 δ 函数	(384)
B.	傅里叶变换	(386)
C.	方程 (10.2-12) 的解	(389)

译者附录

第一章 某些特殊函数概述

1.1.	光学上几个常用的函数 (阶跃函数, 符号函数, 矩形函数, 等变率函数, 三角状函数, sinc函数, sinc ² 函数, 高斯函数, 圆柱状函数)	(392)
1.2.	δ 函数	(404)
1.2.1.	δ 函数的定义	(404)
1.2.2.	δ 函数的性质	(405)

1.2.3.	三维的 δ 函数	(415)
1.2.4.	偶与奇 δ 函数对	(416)
1.2.5.	梳状函数	(419)
1.3.	贝塞耳函数	(422)
1.3.1.	Γ 函数	(422)
1.3.2.	贝塞耳函数	(425)
1.3.3.	阔檐帽函数	(441)

第二章 卷积

2.1.	卷积概念	(443)
2.1.1.	$f(-x)$, $-f(x)$, $f(x+a)$ 的意义	(444)
2.1.2.	卷积的物理解释	(444)
2.1.3.	卷积存在条件	(448)
2.2.	卷积的性质	(449)
2.3.	相关	(458)
2.3.1.	互相关的定义及其物理图象	(459)
2.3.2.	互相关的性质	(459)
2.3.3.	自相关	(462)
2.4.	二维函数的卷积	(465)
2.4.1.	二维函数的卷积定义	(465)
2.4.2.	二维函数的卷积的性质	(466)
2.5.	二维函数的相关	(472)

第三章 傅里叶变换

3.1.	傅里叶级数	(475)
3.1.1.	周期函数的傅里叶级数	(475)
3.1.2.	奇函数, 偶函数及其对称积分	(478)
3.1.3.	奇、偶周期函数	(481)
3.1.4.	复指数形式的傅里叶级数	(483)
3.2.	傅里叶积分	(485)
3.3.	傅里叶变换的性质	(492)
3.4.	举例	(502)

3.5.	二维傅里叶变换	(52)
3.5.	二维傅里叶变换	(522)
3.6.	汉克尔变换	(537)
3.6.1.	汉克尔变换	(538)
3.6.2.	零阶汉克尔变换的性质	(540)
3.6.3.	举例	(547)
索引		(563)
参考文献		(573)

第一章 近轴光线光学[⊖]

1.1. 引言

光是一种电磁波，由于应用麦克斯韦方程组可完全地描写电磁波，从原则上讲，要得到作为麦克斯韦方程组的解的光的全部传播定律似乎是可能的。问题是，一般说来，求解麦克斯韦方程组是困难的，只是对某些简单系统可以得到严格解。^①因此我们来考虑某些近似，这些近似可以给出某些容易理解的解，同时还能很好地描述现象。其中一个近似是应用这样的事实，即当光的波长远小于与它相互作用的系统的线度时，在相当好的近似程度上，我们可以略去波长的有限长度。的确，波动光学的零波长近似称为几何光学。

几何光学应用光线的概念，它定义为在 $\lambda \rightarrow 0$ 的极限情况下能量的传播方向。正如在第四章中要证明的，由于衍射而引起的光束的扩展完全是由于波长的有限长造成的。但是，当假定波长趋于零时这些衍射效应也趋于零，所以我们能够构成无限细的光束，这种无限细的光束被定义为光线。

在1.2节中我们将引入作为极值原理的费马原理，从费马原理出发我们可在一般媒质中追踪光线(即所谓的光线追迹——译者)。

①举例来说，为了求解平面电磁波经平面电介质表面的反射和折射是不困难的；另一方面，求解某些平面光波经曲面的反射是相当困难的。(经圆柱面反射的一般规律，Snyder 和 Mitchell, 1974, 已进行了讨论。)

⊖也称为傍轴光线光学。——译者

这个原理是与经典力学中的哈密顿变分原理相似的光学中的变分原理。我们将举几个例子，在这些例子中光线在两点间的光程是极大值，极小值，或稳定值。

从费马原理出发，我们可提出两种并行的近似方法：拉格朗日近似法（1.3节）和哈密顿近似法（1.4节）。后者将在第二章中用来讨论各种象差。拉格朗日近似将给出光线方程。为了得到非均匀媒质（即媒质的性质在空间上依赖于折射率的变化）中的各光路，需要解光线方程。

在1.6节中我们通过用小波长近似解标量波动方程得到程函方程；这种近似，称为程函近似，它与量子力学中的WKB近似相似。然后我们把程函方程变为光线方程。还将给出从程函方程导出费马原理。在1.7节中，我们将用从经典力学过渡到量子力学相似的方法讨论从几何光学过渡到波动光学。

1.2. 费马原理

与经典力学中的哈密顿最小作用原理〔例如，参看Goldstein (1950)，第2章〕相类似，在光学中，我们有费马原理，从费马原理出发，几何光学的全部定律都可导出，与在经典力学中一样，我们能够从变分原理导出两个相关的近似法，一个包含着拉格朗日近似，另一个为哈密顿近似。

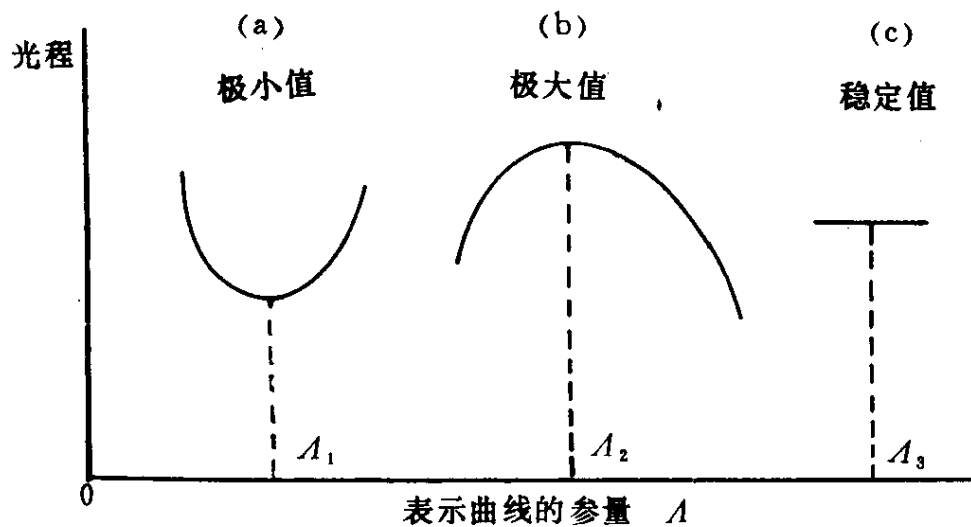
在介绍费马原理之前，必须引入光程的概念。给定任意两点 P 和 Q 及连接它们的曲线 C ，我们可把两点之间的几何路程定义为位于在两点之间的曲线的长度 $\int_P^Q ds$ ，式中积分是沿曲线 C 从 P 到 Q 进行，而 ds 表示无限小弧长。光程被定义为

$$\text{光程} = \int_P^Q n(x, y, z) ds \quad (1.2-1)$$

式中的 $n(x, y, z)$ 是折射率函数而积分仍然沿曲线 C 实行。在均匀媒质这种简单的情况中，光程恰好等于几何路程乘以媒质的折射率。在一般情况下，光程除以 C （自由空间中的光速）表示沿给定曲线光从 P 传播到 Q 所需要的时间。

现在我们可以叙述费马原理了，按照费马原理，连接两给定点 P 和 Q 可能有很多不同的路线，光线将沿着两点之间的光程为极值的路线传播，即

$$\delta \int_P^Q n(x, y, z) ds = 0 \quad (1.2-2)$$



两点间的光程随 A 变化曲线， A 表示确定光路的参量。三条曲线表示当两点间的光程为极小值，极大值，稳定值时确定的实际光线的三种情况。
 (a) 中实际光路对应于 $A = A_1$ ；(b) 中实际光路对应于 $A = A_2$ ；而在 (c) 中在靠近 $A = A_3$ 值处的所有光路都是可能的。

图1.1.

式中积分的变分 (δ) 意味着为使两端点 P 和 Q 固定时积分光路的变分。应当指出费马原理要求光程是极值，它可以是极小值（最经常遇到的就是这种情况），极大值，或稳定值。马上就清楚，在均匀媒质中，这些光线是一些直线，因为两点间最短的光程是沿