

高等学校教材

红外光学系统

李正直 编著



国防工业出版社

内 容 简 介

本书分几何光学基础、象差概论, 红外光学系统的物镜及其设计基础, 红外光学系统的辅助部件, 红外光学材料和光学薄膜、红外分光系统及其数理基础, 红外光学系统的象质评定和典型红外光学系统及其设计等八章, 着重介绍红外光学系统的基础理论和设计方法。内容涉及的面较广, 并反映了国内外的新近研究成果。

本书适于作红外专业和光电子技术专业的教材, 大专院校有关专业师生(研究生)教学参考书、亦可供从事红外, 遥感和光学技术的科学工作者、工程技术人员参考。

红外光学系统

李正直 编著

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张24¹/₄ 563千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数: 0,001—1,700册

统一书号: 15034·3175 定价: 3.95元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组评选审定，并推荐出版。

该教材由杭州大学李正直编写，北京工业学院魏光辉和安连生审阅。编审者均依据激光与红外编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为72学时，其主要内容为光学系统的象差概论，红外光学系统的物镜、辅助光学部件和红外分光系统的设计基础，红外光学材料和光学薄膜的性能，红外光学系统的象质评定以及典型的红外光学系统的设计等。使用本教材时应注意到本课程的先行课程是物理光学。

本书在编写过程中，得到陆家昌同志的大力协助，作者在此表示衷心感谢。在编写本书时，曾参阅了一些单位的技术资料，由于各种原因，在参考文献中未及全部列入，为此，谨向被引用资料的作者表示谢意。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 几何光学基础

§ 1.1 光线与光的波面	1
§ 1.1.1 电磁波谱	1
§ 1.1.2 发光点、光线和光束	2
§ 1.1.3 象散光束	2
§ 1.2 光线传播的基本规律	3
§ 1.2.1 几何光学的基本定律	3
§ 1.2.2 费马原理	4
§ 1.3 光学成像的基本概念	6
§ 1.3.1 实象与虚象, 实物与虚物	6
§ 1.3.2 物空间和象空间, 物与象的共轭性	7
§ 1.3.3 物象之间的等光程性	7
§ 1.4 光线的折射方程, 符号规则	8
§ 1.4.1 几何光学的符号规则	8
§ 1.4.2 球面的折射方程	9
§ 1.5 球面系统的近轴成像	10
§ 1.5.1 单个折射球面的近轴光成像	10
§ 1.5.2 共轴球面系统	13
§ 1.5.3 球面反射镜	14
§ 1.6 理想光学系统理论	15
§ 1.6.1 理想光学系统和共线成像	15
§ 1.6.2 理想光学系统的焦点、焦平面、 主点、主平面	16
§ 1.6.3 理想光学系统的物象位置关系	17
§ 1.6.4 理想光学系统的拉亥公式及二 焦距间的关系	18
§ 1.6.5 理想光学系统的放大率	20
§ 1.6.6 光学系统的节点	22
§ 1.6.7 光学系统的光焦度	22
§ 1.7 光学系统的组合	23
§ 1.7.1 两个光组的组合	24
§ 1.7.2 共轴多光组的组合	26
§ 1.7.3 望远镜系统	31
§ 1.7.4 透镜与薄透镜	33
§ 1.7.5 近轴光学的矩阵方法	39
§ 1.8 光学系统中的光阑	48
§ 1.8.1 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	48
§ 1.8.2 视场光阑、入射窗和出射窗	49
§ 1.8.3 渐晕	50
§ 1.8.4 消杂光光阑	51

习题	52
----------	----

第二章 象差概论

§ 2.1 光线的光路计算	54
§ 2.1.1 近轴光线的光路计算	55
§ 2.1.2 非近轴子午光线的光路计算	56
§ 2.1.3 沿轴外点主光线的细光束计算	60
§ 2.2 轴上点球差	69
§ 2.2.1 球差现象	69
§ 2.2.2 初级球差	69
§ 2.2.3 单个折射球面的不晕点	71
§ 2.2.4 带球差和高级球差	72
§ 2.3 正弦差与彗差	74
§ 2.3.1 等晕条件、正弦条件	74
§ 2.3.2 正弦差	75
§ 2.3.3 彗差	76
§ 2.3.4 初级正弦差, 初级彗差	78
§ 2.4 象散与象面弯曲 (场曲)	80
§ 2.4.1 象散	80
§ 2.4.2 象面弯曲 (场曲)	81
§ 2.4.3 初级场曲与初级象散	82
§ 2.5 畸变	85
§ 2.5.1 实际畸变	85
§ 2.5.2 初级畸变	86
§ 2.6 色差	87
§ 2.6.1 光学材料的色散	87
§ 2.6.2 轴向色差 (位置色差)	88
§ 2.6.3 垂轴色差 (放大率色差)	90
§ 2.7 几何象差综述	92
§ 2.7.1 光学系统的象差要求	92
§ 2.7.2 初级象差表示式及其与视场和 孔径的关系	93
§ 2.7.3 子午象差特性曲线	95
§ 2.8 波象差	97
§ 2.8.1 轴上点的波象差, 波象差与 球差的关系	97
§ 2.8.2 参考点移动产生的波象差, 物理焦深	99
§ 2.8.3 色差的波象差表示	100
§ 2.8.4 光学系统的象差容限	101
习题	103

第三章 红外光学系统的物镜及其设计基础

§ 3.1 红外光学系统概述	104
§ 3.1.1 红外系统的组成	104
§ 3.1.2 红外光学系统的功用	105
§ 3.1.3 望远系统	106
§ 3.1.4 红外光学系统的特点	110
§ 3.2 折射式物镜: 单折射物镜	113
§ 3.2.1 薄透镜的初级球差	114
§ 3.2.2 初级轴向色差角弥散(物在无限远)	118
§ 3.2.3 初级彗差和象散角弥散(物在无限远)	119
§ 3.2.4 物在有限远时的初级象差	119
§ 3.2.5 凸透镜、等凸透镜的初级象差	120
§ 3.3 折射式物镜: 组合透镜	122
§ 3.4 非球面子午光线追迹	126
§ 3.4.1 非球面曲面方程	126
§ 3.4.2 非球面的子午面内光线光路计算	126
§ 3.4.3 旋转二次曲面的子午光线追迹	129
§ 3.4.4 非球面的初级象差概述	133
§ 3.5 反射式物镜: 单反射镜	135
§ 3.5.1 球面反射镜	135
§ 3.5.2 抛物面反射镜	137
§ 3.5.3 双曲面反射镜	138
§ 3.5.4 椭球面反射镜和扁球面反射镜	138
§ 3.6 反射物镜: 双反射镜系统	139
§ 3.6.1 常见的双反射镜系统	139
§ 3.6.2 双反射镜系统的近轴关系	140
§ 3.6.3 双反射镜系统的初级象差	142
§ 3.6.4 几种主要的双反射镜系统	143
§ 3.7 折反射物镜	147
§ 3.7.1 施密特系统	147
§ 3.7.2 曼金(Mangin)折反射物镜	152
§ 3.7.3 包沃斯-马克苏托夫系统	153
§ 3.8 红外变焦距系统	156
§ 3.9 光学检验技术和性能量度	
方法: 光程检验法	158
§ 3.9.1 傅科刀口检验法	158
§ 3.9.2 哈特曼检验法及其它光阑检验法	159
§ 3.9.3 朗奇光栅检验法	160
§ 3.10 光学检验技术和性能量度	
方法: 干涉检验法	160
§ 3.10.1 泰曼-格林干涉仪	160
§ 3.10.2 菲索干涉仪	161
§ 3.10.3 不等光程激光干涉仪	162
§ 3.10.4 散射干涉仪	163
§ 3.10.5 剪切干涉仪	163

习题 164

第四章 辅助光学系统

§ 4.1 场镜	166
§ 4.1.1 场镜的主要作用	166
§ 4.1.2 场镜的参数计算	167
§ 4.1.3 有效焦距、有效 F 数和象差特性	169
§ 4.2 光锥	172
§ 4.2.1 光线在光锥内的传播	172
§ 4.2.2 简单光锥	173
§ 4.2.3 实心圆锥形光锥	175
§ 4.2.4 二次曲面光锥	176
§ 4.2.5 光锥与场镜的组合结构	177
§ 4.3 浸没透镜	179
§ 4.3.1 浸没透镜的物象关系和齐明条件	180
§ 4.3.2 半球浸没透镜和超半球浸没透镜	181
§ 4.3.3 浸没透镜由全反射导致的限制	183
§ 4.4 中继光学系统	187
§ 4.5 整流罩与窗	188
§ 4.5.1 整流罩	188
§ 4.5.2 窗口	190
§ 4.6 光机扫描元件: 旋转的 45° 平面反射镜	190
§ 4.6.1 光机扫描概述	190
§ 4.6.2 旋转的 45° 平面反射镜	192
§ 4.7 光机扫描元件: 摆动的平面反射镜和平面平行平板	193
§ 4.7.1 摆动的平面反射镜	193
§ 4.7.2 平面平行平板	197
§ 4.8 光机扫描元件: 旋转的多面体反射棱柱	198
§ 4.8.1 旋转的多面体反射棱柱	198
§ 4.8.2 旋转的四方反射棱柱	202
§ 4.9 光机扫描元件: 旋转的折射棱镜和折射光楔	204
§ 4.9.1 旋转折射棱镜	204
§ 4.9.2 旋转折射光楔	207
§ 4.10 其他类型的扫描元件和各种扫描图形的产生	209
§ 4.10.1 其他类型的扫描元件	209
§ 4.10.2 各种扫描图形的产生方法	211
习题	212

第五章 红外光学材料和光学薄膜

§ 5.1 红外光学材料的主要性能	213
§ 5.1.1 光谱透过率	213

第六章 红外分光系统 及其数理基础

§ 5.1.2 折射率和色散	214
§ 5.1.3 自辐射性能	214
§ 5.1.4 材料的其他物理和化学性质	214
§ 5.2 红外光学材料的种类	214
§ 5.2.1 红外光学玻璃	214
§ 5.2.2 晶体	216
§ 5.2.3 热压等法制备的 多晶红外光学材料	218
§ 5.2.4 红外透明陶瓷	220
§ 5.2.5 塑料	221
§ 5.3 常用的红外光学材料	222
§ 5.4 红外光学纤维	224
§ 5.4.1 光学纤维	224
§ 5.4.2 光学纤维的数值孔径	224
§ 5.4.3 图象的分辨率	225
§ 5.4.4 红外光学纤维的材料	225
§ 5.5 薄膜光学的理论基础	225
§ 5.5.1 麦克斯韦方程	225
§ 5.5.2 平面电磁波的波动方程	226
§ 5.5.3 E 和 H 的关系	227
§ 5.5.4 单一界面上的反射	228
§ 5.6 薄膜系统的光学特性计算	230
§ 5.6.1 单层薄膜的反射率	230
§ 5.6.2 多层介质膜的反射率	232
§ 5.6.3 薄膜组件的透过率	234
§ 5.7 周期性对称膜系的 等效光学导纳	235
§ 5.8 增透膜 (减反射膜)	237
§ 5.8.1 $\lambda_0/4$ 增透膜系的矢量分析法	237
§ 5.8.2 单层增透膜 (单层减反射膜)	238
§ 5.8.3 双层增透膜	240
§ 5.8.4 多层增透膜	242
§ 5.9 红外反射膜	243
§ 5.9.1 金属反射膜	243
§ 5.9.2 全介质反射膜	244
§ 5.10 干涉滤光片	246
§ 5.10.1 截止干涉滤光片	246
§ 5.10.2 红外带通滤光片	253
§ 5.10.3 圆形渐变 (劈式) 干涉滤光片	256
§ 5.11 吸收、反射和色散滤光片	257
§ 5.11.1 吸收滤光片	257
§ 5.11.2 反射滤光片	257
§ 5.11.3 色散滤光片	258
§ 5.12 分光片和分色片	258
§ 5.12.1 分光片	259
§ 5.12.2 介质分色片	259
习题	259

§ 6.1 红外棱镜分光系统	261
§ 6.1.1 棱镜主截面内的折射	261
§ 6.1.2 棱镜的色散	263
§ 6.1.3 棱镜的分辨率	264
§ 6.1.4 光谱线 (狭缝象) 的弯曲	265
§ 6.1.5 色散棱镜的材料	266
§ 6.1.6 红外棱镜分光光度计的工作原理	268
§ 6.2 红外光栅分光光度计	269
§ 6.2.1 衍射光栅的分光原理	269
§ 6.2.2 角色散和角放大率	270
§ 6.2.3 衍射光栅的分辨率	271
§ 6.2.4 闪耀光栅 (定向光栅)	272
§ 6.2.5 红外光栅分光光度计的工作原理	274
§ 6.3 傅里叶变换	275
§ 6.3.1 傅里叶积分变换	275
§ 6.3.2 傅里叶变换的性质	277
§ 6.3.3 一些典型函数的傅里叶变换	280
§ 6.3.4 δ 函数	283
§ 6.3.5 离散傅里叶变换	287
§ 6.3.6 快速傅里叶变换	290
§ 6.4 调制光谱仪; 傅里叶变换光谱仪	296
§ 6.4.1 傅里叶变换光谱仪的结构	296
§ 6.4.2 傅里叶变换光谱仪的基本原理	297
§ 6.4.3 分辨率和切趾	299
§ 6.4.4 傅里叶变换光谱仪的特点	303
§ 6.5 调制光谱仪; 选择调幅 干涉光谱仪	305
§ 6.5.1 选择调幅干涉光谱仪的原理和性能	305
§ 6.5.2 选择调幅干涉光谱仪的光路结构	308
习题	309

第七章 红外光学系统的象质评定

§ 7.1 光学系统的成象分析	311
§ 7.1.1 透镜的脉冲响应	311
§ 7.1.2 一般成象系统分析	314
§ 7.2 用脉冲响应讨论两点的 分辨问题	316
§ 7.2.1 狭缝和圆孔状光瞳	316
§ 7.2.2 一维情况的点象分辨判据	319
§ 7.2.3 二维情况的点象分辨判据	321
§ 7.2.4 分辨判据和光学系统象质评价	323
§ 7.3 光学系统的传递函数	323
§ 7.3.1 相干传递函数	324
§ 7.3.2 非相干传递函数	327

§ 7.3.3 光学传递函数的计算	331
§ 7.4 光学传递函数的测量	336
§ 7.4.1 数字傅里叶分析法	336
§ 7.4.2 光学傅里叶分析法	337
§ 7.4.3 光电傅里叶分析法	339
§ 7.5 传统象质评价方法	342
§ 7.5.1 斯特列尔判据	342
§ 7.5.2 瑞利 $\lambda/4$ 波象差判据	343
§ 7.5.3 点列图	344
习题	345

第八章 典型红外光学系统及其设计

§ 8.1 辐射计和扫描辐射计的光学系统	348
§ 8.1.1 透射式红外测温仪光学系统的设计	348
§ 8.1.2 反射式红外测温仪中光学系统的设计	352

§ 8.1.3 气象卫星用的扫描辐射计	355
§ 8.1.4 热图测绘辐射计	357
§ 8.2 红外跟踪系统	357
§ 8.3 热象仪系统	361
§ 8.3.1 旋转折射棱镜热象仪的光学系统	361
§ 8.3.2 多元线列并扫热象仪的光学系统	365
§ 8.3.3 医用热象仪的性能	366
§ 8.4 红外前视装置的光学系统	368
§ 8.4.1 连续变焦红外前视光学系统	368
§ 8.4.2 非球面元件的应用	370
§ 8.4.3 自反射现象	371
§ 8.4.4 渐晕现象	372
§ 8.5 多光谱扫描仪	372
§ 8.5.1 机载多光谱扫描仪设计	373
§ 8.5.2 星载多光谱扫描仪	379
习题	386

第一章 几何光学基础

§ 1.1 光线与光的波面

§ 1.1.1 电磁波谱

实验和理论都证明，光波是电磁波。电磁波谱的范围很广，从频率比 10^8Hz 更低的无线电波扩展至比 10^{24}Hz 更高的 γ 射线，它的大约分布可由图 1-1 表示。

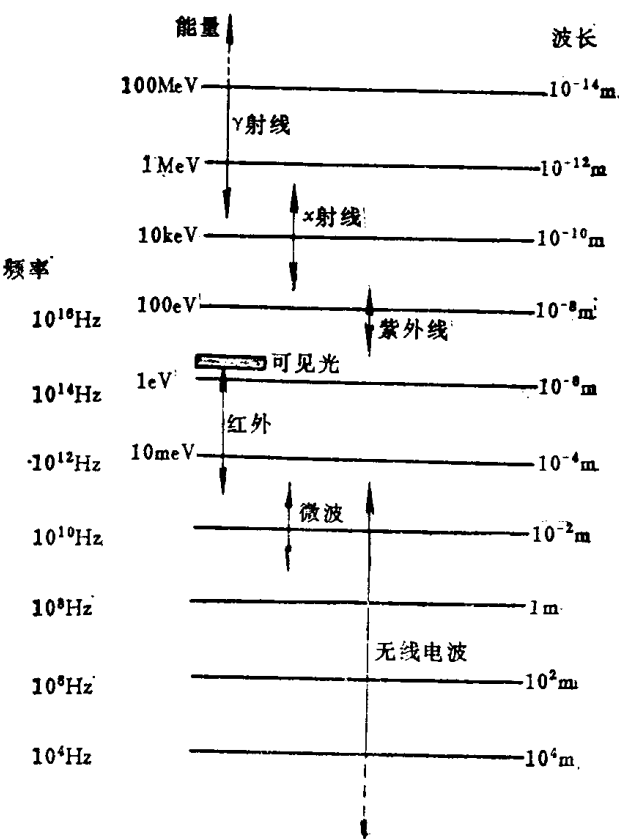


图1-1 电磁波谱

在真空中任何波长的简谐电磁平面波都具有相同的速度，其值 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。真空中电磁波的波长 λ_0 和频率 ν 之间的关系为

$$\lambda_0 \nu = c \tag{1-1}$$

在光学中常用的波长单位是 $\text{\AA}$ 、 nm 及 μm ，它们之间的关系为

$$1 \text{\AA} = 0.1 \text{nm} = 10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-10} \text{m}$$

在图 1-1 中，对宽广的电磁波谱同时采用频率、波长和能量标度。它们的转换因子如下：

频率	能量	波 长
1Hz	$4.1366 \times 10^{-15} \text{eV}$	$2.9979 \times 10^8 \text{m}$
$2.4180 \times 10^{14} \text{Hz}$	1eV	$1.2398 \times 10^6 \text{m}$
$2.9979 \times 10^3 \text{Hz}$	$1.2398 \times 10^{-6} \text{eV}$	1 m

在介质中平面电磁波的传播速度随介质而异，而频率与介质无关，因此在不同介质中，波长有不同的数值。

一般所讨论的光波包括真空紫外至远红外波段。为了便于研究各种不同波长的红外光性质，可将红外光谱分成四个区域：近红外（ $0.76 \sim 3 \mu\text{m}$ ）、中红外（ $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ）、中远红外（ $6 \sim 20 \mu\text{m}$ ）和远红外（ $20 \sim 1000 \mu\text{m}$ ）。

§ 1.1.2 发光点、光线和光束

任何发光体都是有一定大小的。但从物理的观点来看，当它的大小与它到观察点的距离相比可以忽略不计时，就可看作是一个发光点。在几何光学中，把发光点抽象为一个几何点。如果光能从由两个光孔限制的细长的空间（光管）中通过，若此光管横截面的线度与其长度相比可以忽略时，就可以看成是光线。在几何光学中，把光线抽象为具有方向的几何线。根据光的波动理论，任何一个发光点都是一个波源。在光波传播过程中任一瞬时，光扰动位相相同的各点所构成的曲面称为波面。在各向同性的介质中，光沿着波面法线方向传播，所以可以认为光波波面的法线就是几何光学中的光线。与波面对应的法线束通常称为光束。球面波对应于发散或会聚同心光束，平面波对应于平行光束，如图 1-2 所示。

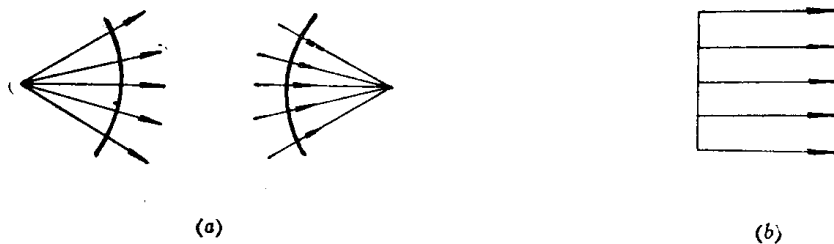


图1-2 波面与光线
(a)同心光束；(b)平行光束。

§ 1.1.3 象散光束

一般说来，球面波通过实际光学系统后总要发生变形，不再是球面波，相应的光束不再是同心光束。下面从实际的波面上取出一个波面元，或者说从宽光束中取出一束无限细光束来讨论它们的情况（图1-3）。图中 $a_1 a_3 c_1$ 是一波面元。 $b_2 F_2 F_1$ 是波面元中心点 b_2 的法线。根据微分几何对曲面的讨论可知，在波面元上通过某点必定有两条法截线（通过曲面上某点法线的平面与曲面的截线），其中一条曲率半径最大，另一条最小，并且这两条截线互相垂直，称之为主截线。

如图 1-3 所示，曲率半径最大的波面主截线 $b_1 b_2 b_3$ 的曲率中心为 F_1 点。曲率半径最小的波面主截线 $a_2 b_2 c_2$ 的曲率中心在 F_2 点。靠近主截线 $b_1 b_2 b_3$ ，并处于截线 $a_1 a_2 a_3$ 和 $c_1 c_2 c_3$ 之间的其它截线，其曲率中心均处于直线元 $F'_1 F_1 F''_1$ 上。靠近主截线 $a_2 b_2 c_2$ ，并处

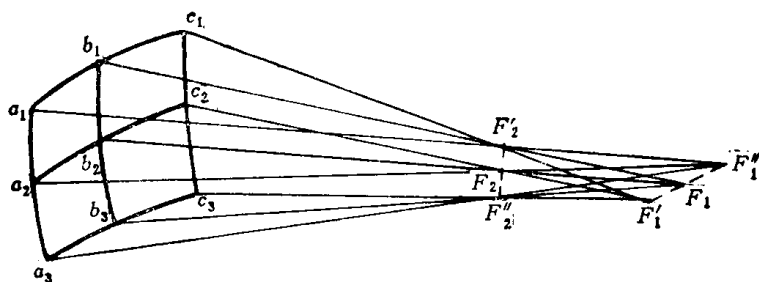


图1-3 象散光束

于截线 $a_1b_1c_1$ 和 $a_3b_3c_3$ 之间的其它截线，其曲率中心形成另一条直线 $F'_2F_2F''_2$ 。所以该波面元上诸点的法线首先会聚于短直线 $F'_2F_2F''_2$ ，然后发散，再会聚于第二条短直线 $F'_1F_1F''_1$ 。这两条短线相互垂直，并且都垂直于波面中心点的法线或光束轴 $b_2F_2F_1$ 。

具有上述结构的非对称性细光束称为象散光束。波面二主截面的曲率中心 F_2 和 F_1 称为象散光束的焦点。象散光束所会聚的两条短线称为焦线。二焦线之间的距离 F_1F_2 称为象散差或象散，它是光学系统成像缺陷的一种。显然，象散差越小，则光束越接近于同心光束，波面越接近于球面波。如果变形的波面具有一定的大小，则情况要较上述波面元复杂得多，此处不予讨论。

§ 1.2 光线传播的基本规律

光线的传播基于几个几何光学基本定律。费马原理则从光程的观点来描述光的传播规律。

§ 1.2.1 几何光学的基本定律

一、光线直线传播定律

光线在各向同性的均匀介质中是按直线传播的。

二、光线独立传播定律

在几何光学中，不同的光线以不同的方向通过空间某一点时，各光线的传播不受其它光线的影响，称为光的独立传播定律。因此，当两束光线会聚于空间某点时，其作用是简单地相加。

三、折射定律与反射定律

光线射到不同介质的光滑分界面上，将发生折射与反射（图1-4）。折射定律是：折射光线位于由入射光线与法线所构成的入射面内。入射角 I 的正弦与折射角 I' 的正弦之比，与入射角的大小无关，仅决定于两种介质的性质。对于一定波长的光线，其比值为常数，且为

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} \quad (1-2)$$

式中 n ， n' 分别为这两种介质的绝对折射率。绝对折射率在数值上等于光在真空中的传播速度与光在介质中的速度之比。对于红外光学材料，其折射率大约介

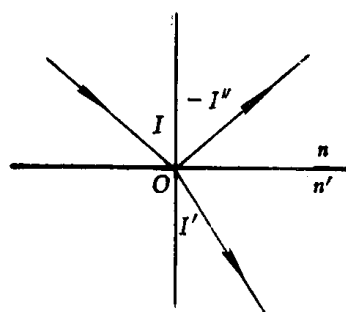


图1-4 折射定律

于1.3~5, 而常用于可见光的光学材料, 介于1.4~1.8。空气的折射率约为1.0003, 近似取作1。

反射定律是: 反射光线位于入射面内, 反射角与入射角大小相等。根据§1.4几何光学的符号规定, 即

$$I'' = -I \quad (1-3)$$

如果令 $n' = -n$, 代入式(1-2), 即可得式(1-3)。因此, 可以把反射定律看成是折射定律在 $n' = -n$ 时的特殊情况。折射定律是几何光学中最重要的定律。

§1.2.2 费马原理

费马原理是从光程概念出发来描述光的传播规律, 可方便地处理光在非均匀介质中的传播。由它可推出折射定律, 两者是等价的, 可以灵活运用。亦可以说, 费马用光程的概念把几何光学的基本实验定律概括成一个统一的原理。

一、光程

“光程”是指光在介质中经过的几何路程 l 和该介质折射率 n 的乘积, 如光程用 s 表示, 则

$$s = n \cdot l \quad (1-4)$$

设光在介质中的速度为 v , 由于 $n = \frac{c}{v}$, $l = vt$, 代入式(1-4), 可得

$$s = \frac{c}{v} \cdot vt = c \cdot t$$

由此可知, 光在介质中的光程, 即相当于光在该时间 t 内在真空中所走过的几何路程。

对于非均匀介质, 若介质的折射率连续变化, 必须把光线的几何路程分成这样的一些小线段 dl , 在每一小段内 n 可以看作常数。从 A 点到 B 点的光程为

$$S = \int_A^B n dl \quad (1-5)$$

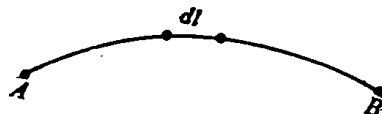


图1-5 光程

其中积分沿光线的路径 l , 即光线从 A 点传播到 B 点时所沿的曲线 AB (图1-5)。

光程的概念在几何光学和物理光学中都是经常要用到的。

二、费马原理的表述

费马原理指出: 光线在两点间传播的实际路径, 是光程为平稳的路径。

对以上表述, 特别是其中“平稳”一词, 作点解释。在微分学中, 一个函数 $y = f(x)$ 的增量 Δy 可写成

$$\Delta y = f'(x) \Delta x + O(\Delta x^2)$$

其中 $f'(x) = \frac{dy}{dx}$ 是 $f(x)$ 的微分, $O(\Delta x^2)$ 代表数量级为 Δx^2 以及更高级无穷小的项。微分 dy 的定义是

$$dy = f'(x) \Delta x$$

它是 Δy 中正比于 Δx 的线性主部。若在某处 $dy = 0$, 我们就说函数在该处是平稳的。函数在某处平稳, 包含下列各种可能: 若在该处进一步有 $d^2y > 0$, 则函数在该处具有极

小值；若 $d^2y < 0$ ，则函数具有极大值；若 $d^2y = 0$ ，而 $d^3y \neq 0$ ，则该处是函数的拐点；若 $d^2y = 0$ ， $d^3y = 0$ ，则函数在该点有更高阶的平稳值。费马原理中“平稳”一词的含义也是如此。

以上概念推广到多元函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，增量和微分分别为

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n f_i \Delta x_i + O(\Delta x_i^2)$$

$$dy = \sum_{i=1}^n f_i \Delta x_i$$

其中 $f_i = \partial y / \partial x_i$ 是 f 对 x_i 的偏微商， dy 亦为 Δy 中的线性主部。若在某处 $dy = 0$ ，则多元函数在该处平稳，其中亦包括极小、极大、马鞍点，以及具有更高阶平稳值等各种可能性。

光程 $S = \int_A^B n dl$ 是路径 l 的函数，而路径 l 本身又可用空间坐标的函数表示出来。

故光程是函数的函数，在数学上叫泛函，下面记作 $J[l]$ 。泛函 $J[l]$ 这个概念是多元函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 概念的推广。因为积分路径 l 上的每一点可看作是一个自变量，整个积分路径的改变，是由其上每一点的移动构成的，但是积分路径上的点有无穷多个，即积分路径是无穷多个自变量的集合，从而泛函 $J[l]$ 可以看作是无穷多个自变量的多元函数。这样广义多元函数的微分称作“变分”，代表微分的符号 d 也改作 δ 。若对于某条给定的路径 l_0 ，变分 $\delta J[l_0] = 0$ ，则我们说，泛函 $J[l]$ 在 l_0 上是平稳的。因此利用变分的概念，费马原理可表述为：在光线的实际路径上，光程的变分等于0，即

$$\delta J[l] = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-6)$$

现在来看，如果有两条或多条光线从 C 点发出，并相交于另一点 C' （图1-6）。依费马原理，这些光线经历的光程应该相等，即

$$\int_{(1)} n dl = \int_{(2)} n dl$$

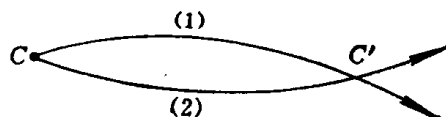


图1-6 恒定光程

由此可得出两个重要推论：一是按光线（1）和光线

（2）传播的时间相等；二是从 C 点发出时，如两光线是同位相的，到达 C' 点时亦应是同位相的。现对第二点推论略加说明。路径 dl 改变位相 $d\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} dl$ ，这里 λ 是相应于光线在该介质中的波长。因为 $\lambda = \lambda_0 / n$ ， λ_0 为真空中的

的波长，则 $d\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n dl$ ，经路径 CC' 后，改变位相 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \int_C^{C'} \frac{2\pi}{\lambda_0} n dl = \frac{2\pi}{\lambda_0} \int_C^{C'} n dl$$

由费马原理可知，上面等式右边的积分 $\int_C^{C'} n dl$ 对两条可能的路径都相等。

§ 1.3 光学成象的基本概念

光学仪器中的光学系统由一系列光学零件组成。我们可以把它看成是由一系列折射和反射面所组成。这些表面中，主要是球面，也可以有平面和非球面。各表面的曲率中心均在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统。这一公共直线称为光轴。共轴系统中有平面和轴对称非球面时，平面应垂直于光轴，非球面应使其对称轴与光轴重合。实际光学系统大部分属共轴系统，非共轴光学系统只是少数。

§ 1.3.1 实象与虚象，实物与虚物

各光线本身或其延长线交于同一点的光束，叫同心光束。在各向同性介质中它对应于球面波。如图 1-7 所示，若以 A 为顶点的同心光束，经光学系统后相交于 A' 点，即得到另一以 A' 为顶点的同心光束，则称点 A 为物点，点 A' 为象点。

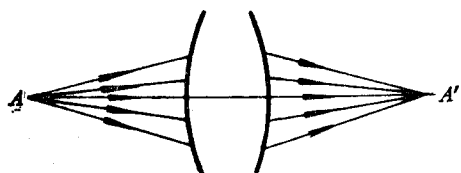


图1-7 实物点与实象点

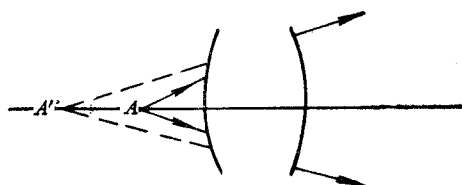


图1-8 虚象点

凡是入射到光学系统的发散同心光束的发散中心称为实物点，而由光学系统出射的会聚同心光束的交点称为实象点(图1-7)。由光学系统出射的发散同心光束的发散中心，则称为虚象点，如图 1-8 中的 A' 点。如果入射到光学系统的是个会聚的同心光束，则相应的会聚中心称为虚物点。在图 1-9 中， A_2 点是反射镜 M 的虚物点。虚物出现在几个光学系统联合成象的情况下。以图 1-9 所示的光路为例，真实发光点 A_1 (实物) 经第一个光学系统成象于 A'_1 ，这是个实象。当反射镜 M 插在 A'_1 之前时，它接收到的便是一个会聚光束， A'_1 (即 A_2) 可看作是 M 的虚物， M 把虚物 A_2 成实象于 A'_2 。

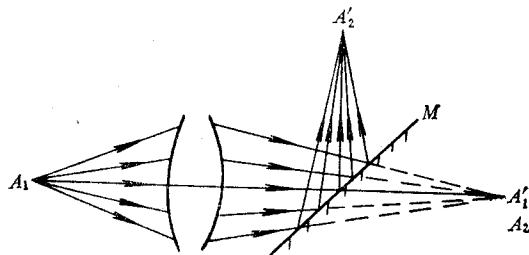


图1-9 虚物点

此外有一种说法，认为象的虚实要看它是光线本身还是延长线的交点。然而对于几个光学系统联合成象时，用这种方法来规定中间象的虚实就容易发生混淆(参见图1-9)。

若一个实物点发出的同心光束，经光学系统后所成的象点也是由同心光束汇交而成，则称这个象点为完善象点。同心光束对应的波面为球面波，因此，光学系统若能对某一物点完善成象，由该物点发出的球面波经光学系统后，出射的也应是球面波。以后我们将看到，球面透镜并不能严格地保持光束的同心性，即它们不能成完善象点。然而，单

个反射平面却是为数不多的几个能成完善象点的例子之一。

§ 1.3.2 物空间和象空间，物与象的共轭性

一个能使任何同心光束保持同心性的光学系统，称为理想的光学系统，以后对它还将详述。理想光学系统将空间每个物点（包括实物点和虚物点）和相应的象点（亦包括实、虚象）组成一一对应关系。为了讨论问题的方便，我们把分别由这两类点组成的空间区别开来，前者称为物空间（物方），后者称为象空间（象方）。但这里要注意的是，对一确定的光学系统的成像过程，起决定作用的是入射光束。因而在一个问题中为了区分空间某个点属于物方还是象方，不是看它在光学系统之前还是之后，而要看它是与入射光束相联系还是与出射光束相联系。例如图1-10为一单平面折射成像系统（不是理想成像系统）。 M 是介质分界面， n 、 n' 分别为介质分界面两边的折射率，且 $n > n'$ 。 A 为实物点， A' 为对应的虚象点。从光学介质空间来说， A 与处于 n 介质空间的入射光束相联系，故属于 n 介质空间； A' 与处于 n' 介质空间的出射光束相联系，故属于 n' 介质空间。光学介质空间是用来描述物、象间的光学变换规律的光学概念。我们通常把物所在的光学（介质）空间称为物空间（或物方），象所在的光学（介质）空间称为象空间（或象方），就是指的上述光学概念。

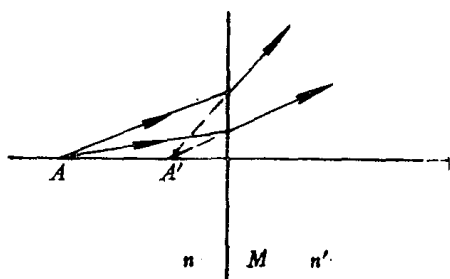


图1-10 物空间与象空间

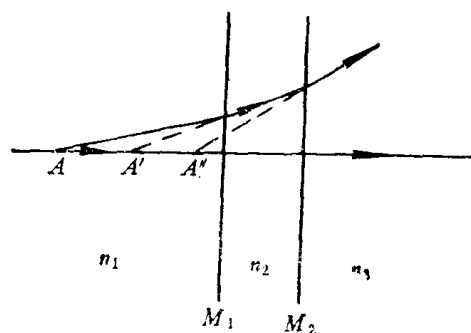


图1-11 物、象的相对性

现再以图1-11所示的两个平面折射系统成像为例加以说明。相对于折射面 M_1 来说，物点 A 所在的物空间就是 n_1 光学空间，象点 A' 所在的象空间就是 n_2 光学空间；相对于折射面 M_2 来说，物点 A' 所在的物空间就是 n_2 光学空间，象点 A'' 所在的象空间就是 n_3 光学空间。这是由物、象空间的定义和物、象概念的相对性所导致的必然结果。

根据光路可逆原理，显然，在理想光学成像过程中，入射同心光束与出射同心光束是可逆的，物点与象点是可以互换的。我们可以把这种彼此一一对应而又可以互换的关系称为共轭关系。物空间和象空间中这样一一对应的点就称为共轭点。

§ 1.3.3 物象之间的等光程性

由费马原理可导出一个重要结论：物点和象点之间各光线的光程都相等。这便是物象之间的等光程性。

实物与实象之间的等光程性很容易阐明。如图1-12所示，在物点 A 到象点 A' 的同心光束内连续分布着无穷多条实际的光线路径。根据费马原理，它们的光程都应取极值。

或恒定值。这些连续分布的实际光线，其光程都取极大值或极小值是不可能的，唯一的可能性是取恒定值，即它们的光程都相等。物象之间的等光程性当然也适用于虚物或虚象的情况。

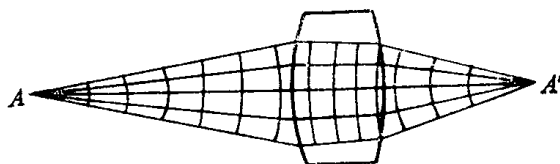


图1-12 物象的等光程性

如图1-12所示，由一实物点 A 发出一个球面波，即以 A 为中心的同心光束，经光学系统后，设仍为一球面波，即以点 A' 为中心的同心光束。点 A' 是一个几何点，这样的象称为完善象。因此光学系统成完善象的条件是入射为球面波时，出射也是球面波；或者根据费马原理可得，实现物、象点之间的等光程是光学系统完善成像的物理条件。

§ 1.4 光线的折射方程，符号规则

光线经过光学系统时是逐面进行折射的，光线光路计算也应是逐面进行。因此，首先讨论单个折射球面。在图 1-13 中，折射球面 OE 是折射率为 n 和 n' 两个介质的光滑分界面， C 为球面的曲率中心， OC 为球面曲率半径，以 r 表示。对于单个球面来说，通过球心的直线称为光轴，它与球面的交点称为顶点，以字母 O 表示。由于球面的轴对称性，只要计算包括物点和光轴的截面内少数几条光线的光路，整个光束的传播情况就知道了。这种包含物点和光轴的光路截面称为子午面，也称为含轴面。入射光线 AE 的位置可由两个参量来决定，一个是顶点 O 到光线与光轴的交点 A 的距离，以 L 表示之，称为物方截距；另一个是入射光线与光轴的交角 $\angle EAO$ ，以 U 表示之，称为物方倾斜角。而出射光线的位置参量分别称为象方截距 L' 和象方倾斜角 U' 。为了正确地进行光路计算，必须对光路图中各个有关量的符号加以规定。

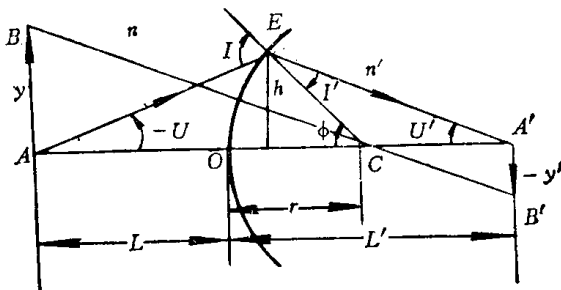


图1-13 线段和角度的符号规则

§ 1.4.1 几何光学的符号规则

符号规则影响几何光学公式的形式，现将各参量的符号规则规定如下：

一、光路方向

规定光线传播方向从左到右为正向光路，反之为逆向光路（图 1-13 为正向光路）。

二、线段

1. 沿轴线段 凡由规定的原点（计算起点）到终点的方向与光线的传播方向相同者，取为正，反之为负。因此，沿轴线段以原点为起始点，向右为正，向左为负。

曲率半径 r ，物方和象方的截距 L 、 L' 均以折射面（或反射面）顶点 O 为原点。球面之间的间隔以前一球面顶点为原点。

2. 垂轴线段 以光轴为准，在光轴之上者为正，光轴之下者为负。

三、角度

一律以锐角来衡量。由规定的起始边，顺时针转成者为正，逆时针转成者为负。

1. 对光线与光轴的倾斜角 U 、 U' ，规定光轴为起始边，由光轴转向光线，顺时针为正，逆时针为负。

2. 对入射角 I 和折射角 I' ，规定光线为起始边，由光线顺时针转到法线为正，反之为负。

3. 对球心角 ϕ ，规定光轴为起始边，由光轴顺时针转到法线为正，反之为负。

由上述符号规定，可以看出，图1-13中， r 、 L' 、 y 、 U' 、 ϕ 、 I 及 I' 是正的，而 L 、 y' 和 U 是负的。在光路图上通常只列出线段和角度的绝对值，因此对于负的量，必须在表示该量的字母前加一负号。

§ 1.4.2 球面的折射方程

下面讨论在已知折射球面的结构参数时，即在给定折射球面半径 r 和两边的介质折射率 n 、 n' 时，如何由已知入射光线位置参量 L 、 U 求得出射光线的位置参量 L' 、 U' 。

按照上述的符号规定，在图1-13中，应用三角正弦定律于三角形 AEC 可得

$$\frac{r}{\sin(-U)} = \frac{r-L}{\sin(180^\circ - I)} = \frac{r-L}{\sin I}$$

$$\text{或} \quad \sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \quad (1-7)$$

由折射定律可得

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-8)$$

由上图可知

$$I = \phi - U \quad \text{或} \quad \phi = I + U = I' + U'$$

$$\text{所以} \quad U' = I + U - I' \quad (1-9)$$

同样在三角形 $A'EC$ 中应用正弦定律，得

$$\frac{r}{\sin U'} = \frac{L'-r}{\sin I'}$$

$$\text{或} \quad L' = r + \frac{r \sin I'}{\sin U'} \quad (1-10)$$

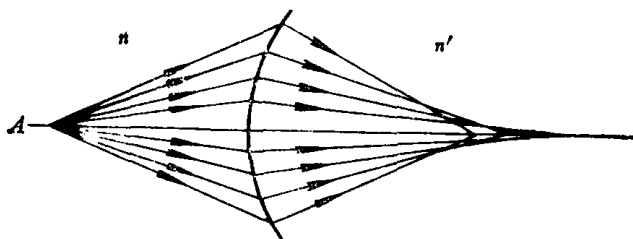


图1-14 折射球面的球差

式(1-7)~(1-10)就是计算含轴面内光线光路的基本公式，亦称为球面折射方程。

由以上公式可知，在轴上一物点发出与光轴成不同角度的光线，经球面折射后，并不相交于一点(图1-14)。这就是说，同心光束经球面折射后不再是同心光束了。所以，