



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(第二版)

几何光学·像差·光学设计

GEOMETRICAL OPTICS, ABERRATIONS
AND OPTICAL DESIGN

◆ 李晓彤 岑兆丰 编著
范世福 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design

几何光学·像差·光学设计

(第二版)

李晓彤 岑兆丰 编著

范世福 主审

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

几何光学·像差·光学设计 / 李晓彤, 岑兆丰编著.
杭州: 浙江大学出版社, 2003.11 (2007 重印)
ISBN 978-7-308-03492-0

I. 几… II. ①李…②岑… III. ①几何光学②象差③光学系统—系统设计 IV. 0435

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 093134 号

几何光学·像差·光学设计

李晓彤 岑兆丰 编著

责任编辑: 杜希武

封面设计: 刘依群

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码: 310028)

(Email: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 德清第二印刷厂

印 张: 23.75

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

字 数: 534 千

版 印 次: 2007 年 12 月第 2 版 2007 年 12 月第 5 次印刷

书 号: ISBN 978-7-308-03492-0

定 价: 45.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571) 88072522

目 录

第一部分 几何光学

第 1 章 几何光学的基本概念和基本定律	3
§ 1.1 发光点、光线和光束	3
§ 1.2 光线传播的基本定律、全反射	4
§ 1.3 费马定理	7
§ 1.4 物、像的基本概念和完善成像条件	8
第 2 章 球面和球面系统	12
§ 2.1 概念与符号规则	12
§ 2.2 轴上物点经单个折射球面成像	13
§ 2.3 物平面以细光束经折射球面成像	16
§ 2.4 反射球面	17
§ 2.5 共轴球面系统	18
第 3 章 平面和平面系统	22
§ 3.1 平面镜	22
§ 3.2 双平面镜	24
§ 3.3 平行平板	25
§ 3.4 反射棱镜	26
§ 3.5 折射棱镜	32
§ 3.6 光的色散	33
§ 3.7 光学材料	35
第 4 章 理想光学系统	40
§ 4.1 理想光学系统及其原始定义	40
§ 4.2 理想光学系统的基点和基面, 焦距	41
§ 4.3 物像位置和放大率、焦距和光焦度、节点	42
§ 4.4 光学系统的图解求像	47
§ 4.5 光学系统的组合	49
§ 4.6 望远镜系统	53

§ 4.7	透镜	55
§ 4.8	实际光学系统的焦距和基点位置的计算, 焦距的测定	59
第 5 章	光学系统中光束的限制	66
§ 5.1	概述	66
§ 5.2	光学系统的孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	67
§ 5.3	光学系统的视场光阑、入射窗和出射窗, 渐晕光阑	69
§ 5.4	平面上空间像的不清晰度, 景深	71
§ 5.5	远心光学系统	73
§ 5.6	光束限制的进一步讨论与光瞳匹配	74
第 6 章	光能及其传播计算	77
§ 6.1	辐射量与光学量	77
§ 6.2	光学量基本概念	80
§ 6.3	光学量经光学系统的传输	86
§ 6.4	成像光学系统像面的照度	89

第二部分 像差理论

第 7 章	球差	95
§ 7.1	球差	95
§ 7.2	单个折射球面的球差特征	98
§ 7.3	初级球差	101
§ 7.4	薄透镜和薄透镜系统的初级球差	102
§ 7.5	平行平板的球差	104
第 8 章	轴外像差	107
§ 8.1	轴外像差概述	107
§ 8.2	正弦条件与等晕条件	109
§ 8.3	彗差	111
§ 8.4	像散和像面弯曲	113
§ 8.5	畸变	115
§ 8.6	初级轴外像差及其与孔径、视场的关系	116
§ 8.7	匹兹凡和及其校正方法	121
第 9 章	色差	124
§ 9.1	位置色差	124
§ 9.2	倍率色差	126

§ 9.3	初级位置色差和初级倍率色差	127
§ 9.4	平行平板的位置色差	130
§ 9.5	薄透镜系统的初级位置色差	130
§ 9.6	薄透镜系统的初级倍率色差	133
§ 9.7	二级光谱	134
§ 9.8	光学系统消像差谱线的选择	137
第 10 章	光线的光路计算	139
§ 10.1	近轴光线的计算	140
§ 10.2	子午光线的光路计算	142
§ 10.3	沿轴外点主光线的细光束像点的计算	145
§ 10.4	共轴球面系统空间光线的光路计算	149
§ 10.5	空间光线经非共轴面时的光路计算	154
§ 10.6	光程和光程差的计算	155
第 11 章	像差综述	159
§ 11.1	像差计算综述	159
§ 11.2	平行平板的初级像差系数	161
§ 11.3	对称光学系统的像差特性	162
§ 11.4	初级像差和光阑位置的关系	163
§ 11.5	光阑像差及其与物面像差的关系	164
§ 11.6	初级像差系数与物面位置的关系	166
第 12 章	波像差	168
§ 12.1	波像差概念	168
§ 12.2	波像差与几何像差的关系	171
§ 12.3	参考点移动产生的波像差、焦深	175
§ 12.4	波像差的一般表示式	175
§ 12.5	波色差及其与几何色差的关系	178
§ 12.6	光学系统的像差容限	180

第三部分 光学设计

第 13 章	典型光学系统	185
§ 13.1	眼睛	186
§ 13.2	放大镜	191
§ 13.3	显微镜及其照明系统	193



§ 13.4	望远镜系统	204
§ 13.5	摄影光学系统	216
§ 13.6	放映系统	226
第 14 章	光学系统初始结构设计	231
§ 14.1	简单物镜结构设计	231
§ 14.2	P、W形式的初级像差系数和基本像差参量	234
§ 14.3	单个薄透镜和双胶合透镜组的基本像差参量	237
§ 14.4	P、W方法计算实例	241
§ 14.5	双高斯型摄影物镜的设计	243
§ 14.6	初始结构设计的查资料法	246
§ 14.7	初始结构设计的经验法	248
§ 14.8	初始结构设计方法的比较与选择	250
第 15 章	特殊光学系统	253
§ 15.1	激光光学系统	253
§ 15.2	线性成像透镜($f \cdot \theta$ 透镜)	258
§ 15.3	傅里叶变换透镜	260
§ 15.4	光谱分析光学系统	264
§ 15.5	光电光学系统	268
§ 15.6	梯度折射率透镜	273
§ 15.7	光学纤维	278
第 16 章	特殊光学表面及其应用	285
§ 16.1	非球面的数学表示	285
§ 16.2	非球面的光路计算及其关键路径	287
§ 16.3	旋转对称非球面的初级像差及在光学系统中的应用	289
§ 16.4	特殊连续非球面在光学系统中的应用	291
§ 16.5	面形为有限间断的非球面应用简介	292
§ 16.6	衍射光学元件的一般表示	294
§ 16.7	衍射光学元件的光路计算	295
§ 16.8	衍射光学元件在光学系统中的应用	296
第 17 章	光学系统质量评价	299
§ 17.1	斯特列尔 (Strehl) 判断	299
§ 17.2	瑞利判断	301
§ 17.3	分辨率	302
§ 17.4	点列图	303

§ 17.5	光学传递函数	304
§ 17.6	非成像系统质量评价	308
第 18 章	光学系统优化设计	312
§ 18.1	概述	312
§ 18.2	评价函数及其构成	313
§ 18.3	阻尼最小二乘法	315
§ 18.4	边界条件的处理	319
§ 18.5	光学设计时对光学零件加工、装配工艺性的保证	320
§ 18.6	多组元光学系统优化设计	323
§ 18.7	光学设计过程小结	328
第 19 章	常用光学设计软件简介	329
§ 19.1	目前常用设计软件的主要功能	329
§ 19.2	几个软件各自的特点	331
§ 19.3	其他相关软件	333
§ 19.4	光学设计者和软件	334
第 20 章	光学工程制图和技术要求	336
§ 20.1	光学系统图	336
§ 20.2	光学工程图中的特殊符号标记	338
§ 20.3	胶合件图	340
§ 20.4	光学零件图	342
附 录	353
参考文献	355
索 引	357
后 记	368

第一部分 几何光学

在工农业、国防、科学技术等人类生活的各个领域内，使用着种类繁多的光学仪器。尽管其中的光学系统千差万别，但其基本功能则是共同的，即传输光能或对所研究的目标成像。因此，研究光的传播和光学成像的规律对于设计光学仪器具有本质的意义。

当然，从本质上讲，光是电磁波，它的传播规律符合波动理论，这已为光的干涉、衍射和偏振等诸多现象所证明。按照波动理论，光的传播就是波面的传播。但用波面的观点来讨论光经透镜或光学系统时的传播规律和成像问题将会造成计算和处理上的很大困难，在解决实际的光学技术问题应用不便。

按照近代物理的观点，光具有波粒二象性。如果只考虑光的粒子性，把光源或物体看成是由许多几何点组成，并把由这种点发出的光抽象成像几何线一样的光线，那么，只要按照光线的传播来研究这种点经光学系统的成像，问题就会变得非常简便和实用。这种撇开光的波动本性，仅以光的粒子性为基础来研究光的传播和成像问题的光学学科分支称为几何光学。因此，几何光学所研究的只是一种对真实情况的近似处理方法。尽管如此，按此方法所解决的有关光学系统的成像、计算和设计等方面的光学技术问题，在大多数场合下与实际情况相符。所以，几何光学有很大的实用意义，是研究光学仪器理论必不可少的基础。

按照几何光学的观点，被成像的物体是一几何点时，如果光学系统是理想的，其像也是一个几何点。这显然与实际情况不符。由于物点发出的波面受光学系统有限孔径的限制，实际的像是一个具有一定能量分布的衍射图样，其中心亮斑已具有一定大小。这样，当两个物点靠近到一定程度时，两个像就会重叠到使人难以分辨出是两个点。这就是光学仪器的分辨率问题，它是无法由几何光学来解决的。这类问题就不能完全依靠几何光学，而必须同时应用光的波动理论才能获得完满的解决。

因此，主要依靠几何光学中建立起来的一套理论和方法，必要时辅以波动光学的理论，才能成功地解决各种光学系统的有关计算和设计问题。作为一个光学工作者，学习和掌握好几何光学将是非常重要的。

第1章 几何光学的基本概念和基本定律

本章作为全书的开始，给出了本教材的基础知识，揭示了几何光学是对光传播特性的近似描述方法的出发点。本章内容大多以简单描述的方式介绍性地给出了各项基本概念，推导和计算很少，但是这些简单概念贯穿于本教材始终，需很好掌握。

本章知识要点

1. 发光点、波面、光线、光束
2. 光的直线传播定律、光的独立传播定律、反射定律和折射定律及其矢量形式
3. 全反射及临界角
4. 光程与极端光程定律（费马原理）
5. 光轴、顶点、共轴光学系统和非共轴光学系统
6. 实物（像）点、虚物（像）点、实物（像）空间、虚物（像）空间
7. 完善成像条件

§ 1.1 发光点、光线和光束

发光点 (luminous point) 是本身发光或被其它光源 (**light source**) 照明后发光的几何点。它既无大小又无体积，但能辐射能量。它向四周发出如几何线那样的**光线 (Ray)**，携带着光能向外传播。

为什么要首先讨论发光点呢？因为物体总可看成是由点组成的，故通常讨论光学系统对物体成像时，以点作为基本成像元素。讨论物点的成像，便可全面了解物体的成像情况。然而，几何光学的这种发光点和光线的概念是简化了的抽象概念，实际上并不存在。一个实际的光源总有一定大小，才能容有能量。但从物理意义来说，一个光源只要其大小与作用距离相比可忽略不计就可认为是**点光源 (point light source)**，例如宇宙中的星体对地球上的观察者来说就是一个点光源。同样，由于光的衍射影响，要从光源发出的光能中分离出光线来也是不可能的。在此，引入这种发光点和光线的概念是为了把复杂的光学成像和光能传播问题简化，从而可利用简单的数学方法方便地描述和解决之。

按照光的波动理论，由光源上一点发出的电磁波被看做是以波面的形式向四周推进，若光所处的介质为各向同性的均匀介质，则波面向各方向的传播速度相同，不同时刻的波面为一系列以发光点为中心的**球面波 (spherical wave)**，光能就是沿着波面的法线方向传播的。这里，几何光学中的光线即波动光学中波面的法线，因此我们将波面的法线束称为**光束 (light beam)**。无限远处发光点发出的是**平面波 (plane wave)**，对应于平行光束；有限远处发光点发出的是球面波，对应于同心的发散光束和会聚光束，它们统称为同心光束。同心光束经透镜或未精心设计过的光学系统以后会失去同心性，此时所对应的波面可能是

轴对称或非轴对称的非球面。

§ 1.2 光线传播的基本定律、全反射

几何光学通过上述简化,把光能的传播和光学成像问题归结为光线的传播问题,光线的传播遵循以下四个基本定律。

一、光的**直线传播定律**:在各向同性的均匀介质中,光在两点之间沿直线传播,即在这种介质中,光线都是直线。

二、光的**独立传播定律**:以不同途径传播的光同时在空间某点通过时,彼此互不影响,各路光好像其它光线不存在似的独立传播。而在各路光相遇处,其光强度是简单地相加,总是增强的。

光的直线传播定律和光的独立传播定律只在不考虑光的波动性质时才是正确的。据此可以很好地解释日食、月食等现象,很多光学仪器的应用也都以此为基础。但是,这两个定律并不是在所有场合下都是正确的。当光传经小孔时,光的**衍射 (diffraction)**现象将明显地表现出来,通过小孔的光除了按原来的直线方向继续传播外,还要向其它方向衍射光能,并有:

$$\sin \alpha = \frac{K\lambda}{D} \quad (1-1)$$

式中, λ 是波长, D 是小孔直径, K 是衍射级数。仅当波长为零时,才不存在衍射现象。即几何光学忽略了光的波动性质,是波长近似为零的一种特殊情况。波动光学还告诉我们,从光源上同一点发出的光经不同途径传播后再相遇于某点时,其合成作用应是电矢量的相加,而不是简单的光强度的相加,其光强度可能加强,也可能是减弱的。这就是光的**干涉 (interference)**现象。

以上是光在同一介质中的传播规律。当光传播到两种介质的光滑分界面时,依界面的性质不同,光线或返回原介质,或进入另一介质。前者称为光的**反射 (reflection)**,按反射定律传播,一般抛光的金属镜面为反射界面;后者称为光的**折射 (refraction)**,按折射定律传播,两种透明介质的光滑分界面为折射界面。

如图 1-1 所示,光线 AO 入射于界面 PQ 上的 O 点, NON' 为界面上入射点处的法线,一部分光能在该点反射,由 OC 方向射出, OC 为**反射光线 (reflection ray)**,另一部分光能在该点折射, OB 为**折射光线 (refraction ray)**。入射光线与法线的夹角 I 称为**入射角 (incident angle)**,反射光线与法线的夹角 I'' 称为**反射角 (reflection angle)**,折射光线与法线的夹角 I' 称为**折射角 (refraction angle)**。

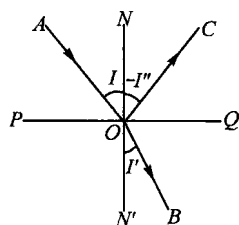


图 1-1

三、光的**反射定律 (reflection law)**:反射光线与入射光线和法线在同一平面内;入射光线和反射光线分别位于法线的两侧,与法线夹角相同,即

$$I'' = -I \quad (1-2)$$

四、光的**折射定律 (snell's refraction law)**:折射光线与入射光线和法线在同一平面内;

折射角与入射角的正弦之比与入射角的大小无关，仅由两介质的性质决定，当温度、压力和光线的波长一定时，其比值为—常数，等于前一介质与后—介质的折射率之比，即

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

或

$$n' \sin I' = n \sin I \tag{1-3}$$

式中， n 和 n' 分别是入射和折射介质的折射率 (refractive index)，是介质的绝对折射率。我们知道，光在不同介质中的传播速度各不相同，在真空中光速最快，以 c 表示。介质的折射率便是描述光在该介质中的传播速度 v 减慢程度的一个物理量，即

$$n = \frac{c}{v} \tag{1-4}$$

真空的折射率为 1。空气的折射率在标准大气压 760mmHg 和标准温度 20°C 下，对于波长为 0.5893μ 的钠光为 1.000272，与真空的折射率相差甚微。所以常以介质相对于空气的相对折射率作为该介质的折射率。

在图 1-1 中，若令 CO 和 BO 为入射光线，则根据反射定律和折射定律，光线必由 OA 方向射出，这说明光的传播是可逆的，此即光路的可逆性。

在公式 (1-3) 中，若假定 $n' = -n$ ，则可得 $I' = -I$ ，此即反射定律。所以反射定律可认为是折射定律在 $n' = -n$ 时的特殊情况，也可认为空气中的反射界面是折射率分别为 1 和 -1 的两种介质的光滑分界面。

一般情况下，光线射至透明介质的分界面时将同时发生反射和折射现象。但在特定条件下，该界面可将入射光能全部反射回去而无折射发生，这就是光的全反射 (total reflection)。

习惯上，我们把界面两边折射率相对较大的介质称为光密介质 (optically denser medium)，折射率较小的称为光疏介质 (optically thinner medium)。那么，全反射这种特殊情况会在何时发生呢？当光线由光密介质向光疏介质传播时，因 $n' < n$ ，则 $I' > I$ ，当 I 增大时，折射光线远离法线，如图 1-2 所示。此时逐渐增大入射角 I 到某一值时，折射角 I' 达 90° ，使折射光线沿界面掠射而出。若入射角继续增大，则有 $\sin I' > 1$ ，显然这是不可能的。实验表明，这些光线不能折射入另一介质，而将按反射定律在界面上被全部反射回原介质。对应于 $\sin I' = 1$ 的入射角 I_m 称为临界角 (critical angle)，由式 (1-3) 可知：

$$\sin I_m = \frac{n'}{n} \tag{1-5}$$

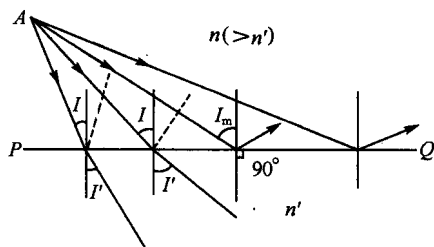


图 1-2

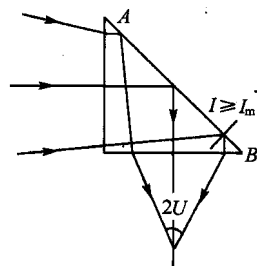


图 1-3

当光线由光疏介质向光密介质传播时，由公式(1-3)可知，不会发生全反射。

全反射现象在光学仪器中有着重要的应用，例如，为了转折光路可以使用全反射棱镜，图1-3所示等腰直角棱镜就是最常用的一种，只要光束孔径角 $2U$ 在一定范围内，所有光线在斜面 AB 上的入射角都大于临界角，因而可以在该面上发生全反射。

有一种光学纤维是利用全反射原理来传输光的。单根光纤由内外两层透明介质，即高折射率玻璃的芯子和低折射率玻璃的包皮所构成，进入光纤的光束在芯子材料和包皮材料的分界面上入射角大于临界角的光线连续全反射，直至传到光纤的另一端，如图1-4所示。



图 1-4

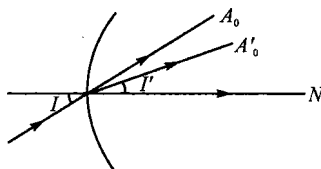


图 1-5

以上形式的折(反)射定律在计算平面光路时是可行的，但要求知任何一条光线经界面折(反)射以后的方向，特别是当界面在空间分布复杂，或光线是三维空间的空间光线时，应用矢量形式的折射定律和反射定律来计算更为方便。

如图1-5所示， A_0 和 A'_0 分别是沿入射光线和折射光线的单位矢量， N 是沿法线的单位矢量。法线矢量的方向是从入射介质到折射介质。按此，式(1-3)可写为：

$$n'(A'_0 \times N) = n(A_0 \times N)$$

展开，并将长度为 n' 的折射光线矢量和长度为 n 的入射光线矢量分别记为 A' 和 A ，得

$$A' \times N = A \times N$$

或

$$(A' - A) \times N = 0$$

$(A' - A)$ 与 N 都不可能为零，因此，此两矢量必定是互相平行的，故上式可表示为

$$A' - A = PN \quad (P \text{ 为待定常数})$$

上式两边同与 N 作标积，得

$$P = N \cdot A' - N \cdot A = n' \cos I' - n \cos I$$

当 $n' > n$ 时， $P > 0$ ，矢量 $A' - A$ 与 N 正向平行，反之，当 $n' < n$ 时， $P < 0$ ，两矢量为反向平行。请读者自行画出这两种情况下的矢量关系图。

一般的，在已知两介质折射率和光线的入射角求折射角时， P 可化为

$$P = \sqrt{n'^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I} - n \cos I \quad (1-6)$$

$$A' = A + PN \quad (1-7)$$

这就是矢量形式的折射定律，应用它就可由已知的入射光线矢量 A 和法线矢量 N 求得折射光线矢量 A' 。

矢量形式的反射定律，可以在 $n' = -n$ 的情况下直接由式(1-7)得到，只是其中的 P 可以更为简化。可得

$$P = n' \cos I' - n \cos I = -2n \cos I = -2(N \cdot A)$$

将其代入式(1-7)可得矢量形式的反射定律

$$A'' = A - 2N(N \cdot A) \quad (1-8)$$

§ 1.3 费马原理

费马原理从光程的观点来描述光传播的规律，它具有更普遍的意义。

所谓光程 (optical path) s ，是光在介质中所经过的几何路程 l 与该介质折射率 n 的乘积，即

$$s = nl \quad (1-9)$$

由于 $n = c/v$ ， $l = vt$

$$s = ct \quad (1-10)$$

故光程相当于光在介质中走过 l 这段路程的时间 t 内，在真空中所走过的几何路程。光程的概念在以后将有重要的应用。

费马原理 (Fermat's principle): 光从一点到另一点是沿光为极值的路径传播的。即，光沿光程为极小、极大或常量的路径传播。该原理又称**极端光程定律**。

不失一般性，设光在非均匀介质中传播，则所走的路径不是直线，如图 1-6 所示。此时从 A 点到 B 点的总光程为

$$s = \int_A^B ds = \int_A^B n \cdot dl$$

根据费马原理， s 应为极值，即

$$\delta s = \delta \int_A^B n \cdot dl = 0 \quad (1-11)$$

这就是费马原理的数学表达式。它的证明读者可参阅参考文献[1]。

费马原理是描述光线传播规律的最基本的定律。前述光的直线传播、反射和折射定律均可由费马原理导出。对于均匀介质，根据两点间直线为最短的几何公理，应用费马原理可直接解释光沿直线传播的必然性。同样根据该几何公理，由图 1-7 也可得到反射定律。

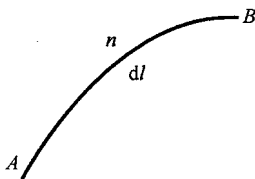


图 1-6

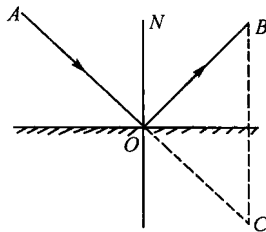


图 1-7

折射的情况如图 1-8，分别从 A ， B 点作界面的垂线 AP ， BQ ，并令其长度分别为 y_1 和 y_2 ，则 A 点到 B 点的光程为

$$(AOB) = n \cdot AO + n' \cdot OB = n\sqrt{x^2 + y_1^2} + n'\sqrt{(L-x)^2 + y_2^2}$$

光程为极值的条件为

$$\frac{d(AOB)}{dx} = 0$$

对上面的光程公式求导并化简即可得折射定律：

$$n \sin I - n' \sin I' = 0$$

可见，在以平面为界面的情况下，光线是按光程为极小值的路径传播的。但按费马原理，光也可能按光程为极大值或常量的路径传播。当以曲面为界面时，随曲面的性质和曲率的不同，实际光程可能是极小、极大或常量。例如图 1-9 所示的以 F 和 F' 为焦点的椭球反射面，根据椭球面的性质可知，由 F 点发出的所有光线经该面反射后必聚焦于 F' 点，且光程为常量，即

$$FF' = FM + MF' = \text{const}$$

这样的面，对 F 和 F' 点来说，谓之等光程面。

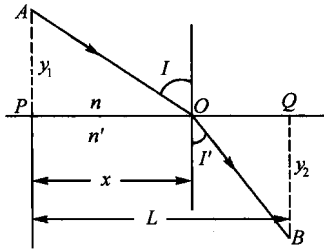


图 1-8

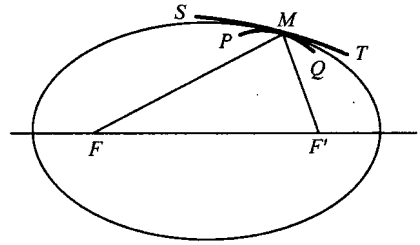


图 1-9

图中还给出了两个均与椭球面相切于 M 点而曲率不等的反射面 PQ 和 ST ，前者曲率大于椭球面，后者曲率小于椭球面。 FM 和 MF' 也是这两个面的入射光线和反射光线。显然，光程 (FMF') 对 PQ 面为极大值，而对 ST 面为极小值。

§ 1.4 物、像的基本概念和完善成像条件

光学仪器中的光学系统由一系列折射和反射表面组成，这些表面中，主要是折射球面，也可以有平面和非球面。各表面曲率中心均在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统 (symmetrical optical system)，这条直线就叫光轴 (optical axis)。实际光学系统绝大部分属共轴光学系统，为满足一些特殊需要如航天相机中也常用到非共轴光学系统。

如图 1-10 所示，若以 A 为顶点的入射光束经光学系统的一系列表面折射或反射后，变为以 A' 为顶点的出射光束，我们就称 A 为物点 (object point)， A' 为物点 A 经该系统所成的像点 (image point)。图中的物、像点由实际光线相交而成，是实物 (real object) 成实像 (real image) 的情况。若物像点由光线的延长线相交而成，则称为虚的。图 1-11 中， A 是虚物点， A' 是虚像点，是虚物 (virtual object) 成虚像 (virtual image) 的情况。需指出，虚物不能人为设置，也不能独立存在，它只能被前面另一系统给出。实像能用屏幕或感光器件来接收和记录，虚像则不能，但可为眼睛所感受。

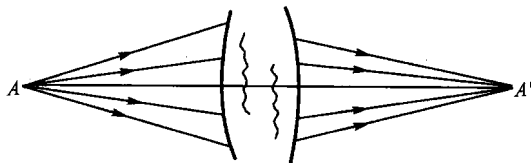


图 1-10

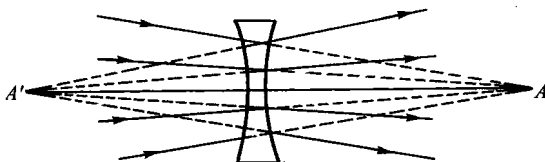


图 1-11

物所在的空间称为**物空间 (object space)**；像所在的空间称为**像空间 (image space)**。它们都可以在从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整个空间内。

一个发光点或实物点，总是发出同心光束，与球面波相对应。一个像点，情况应该也是由与球面波对应的同心光束汇交而成，这种像点称**完善像点 (perfect image)**。因为光学系统入射波面与出射波面之间的光程是相等的，故要能够将物点 A 完善成像于 A' ，必须实现 A 与 A' 之间的等光程。所以，等光程是完善成像的物理条件。

图 1-12 所示为一由 k 个表面组成的光学系统，它将物点 A 成像于 A' 。如果 A' 是完善像点，则由 A 到 A' 之间任何光路的光程必须相等，即

$$\begin{aligned} (AA') &= n_1 \cdot AO_1 + n_2 \cdot O_1O_2 + \cdots + n_k \cdot O_{k-1}O_k + n_{k+1} \cdot O_kA_k' \\ &= n_1 \cdot AE_1 + n_2 \cdot E_1E_2 + \cdots + n_k \cdot E_{k-1}E_k + n_{k+1} \cdot E_kA_k' \\ &= \text{const} \end{aligned}$$

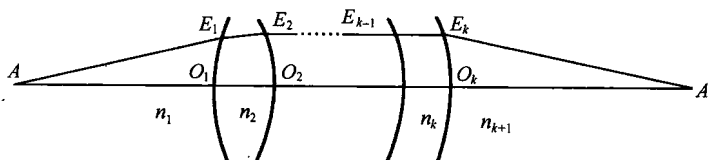


图 1-12

实际上，要实现对某一给定点的等光程成像，只需用单个反射或折射界面就能满足，这种单个界面称为**等光程面**，举数例如下：

1) 有限距离物点 A 反射成像于有限距离的 A' 点，只需分别以 A 和 A' 为其焦点的椭球面就能达到要求，如图 1-9 所示。

2) 无限远物点 A 反射成像于有限距离的 A' 点，只需以 A' 为焦点的抛物面就能达到要求，如图 1-13 所示。反之，根据光路的可逆性，抛物面镜也可将有限距离物点成像于无穷远处。