

现代 几何光学

易明

CONTEMPORARY GEOMETRIC OPTICS

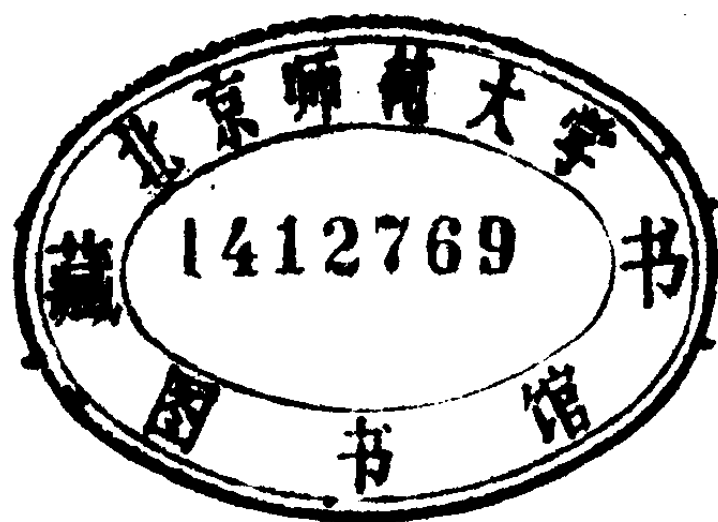


南京大学出版社

现代几何光学

易 明

J211.53/11



南京大学出版社

1986·南京

内 容 提 要

本书以革新的观点处理陈旧的几何光学理论、概念和方法,全书以矩阵光学方法贯穿始终,并详细介绍了哈密顿光学、变折射率光学(GRIN光学)、光学自动设计、光学传递函数等最新内容。其中哈密顿光学、GRIN光学、用Walsh函数计算光学传递函数等内容更是他书少见。

本书适合高等院校物理专业作教材用,起点较低,而观点较高而新。书内附有微机程序,可作一般计算及练习;也有联系实际的习题,以加深概念,增加学习兴趣及掌握设计技巧之用。

读者对象:物理系、信息物理系的师生,研究光纤、光学工程设计人员,声学、声光学、微波、红外、大气光学等科技人员。



江苏省新华书店发行 江苏宜兴印刷厂印刷
开本: 787×1092 1/32 印张: 10.5 字数: 243千字
1986年9月第1版 1986年9月第1次印刷
印数: 1—3,000

统一书号: 13336·019 定价: 2.40元

责任编辑 李曾沛

前 言

迫在眉睫 近20年来, 计算机(电脑)和激光器的发明, 激光技术、光纤通讯、集成光学、GRIN光学 (gradient index optics——变折射率光学)的发展, 各种光信息处理的广泛应用, 引起了光学、包括几何光学的巨大变革。一些传统的几何光学概念和方法已不能适应新的形势和要求。崭新的理论、概念和方法应运而生。因此, 迫切需要有一本物理概念清晰的、用新的概念和方法处理几何光学的、能为广大读者易于接受的新的教科书。作者在多年从事有关科研和教学的基础上写成本书, 是为适应这一形势而作出的初步尝试。希望能给予读者有所启发和帮助。由于作者水平有限, 难免有不当之处, 恳请读者提出批评、指正。

物理学的内在联系 在基本概念上, 几何光学与分析力学有惊人类似之处。几何光学的基本原理与分析力学的哈密顿原理形式相似, 二者皆为变分问题, 有解的条件皆为拉格朗日方程成立, 并可得出哈密顿正则方程。二者有着物理学的内在联系。几何光学与波动光学之间的过渡和经典力学与量子力学之间的过渡亦十分类似: 几何光学是波动光学的波长 λ 趋于零的极限, 经典力学是量子力学的德布罗意波长趋于零的极限; 用算符来表示力学量便于从经典力学过渡到量子力学, 同样, 用算符表示有关光学量则便于从几何光学过渡到波动光学。力学系统可以在动量空间或位置空间来描述, 相互间满足傅里叶变换关系。光学系统的性能也可以在坐标域或空间频率域来描

述，相互间也满足傅里叶变换关系。表0-1列举了上述内在联系。

表 0-1

力 学	光 学
1. 哈密顿原理	1. 费马原理
$\delta \int_{t_1 \rightarrow t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0$	$\delta \int_{A \rightarrow B} n(x, y, z) ds = 0$
2. 拉格朗日方程	2. 光学拉格朗日方程
$\frac{\partial L}{\partial q_\alpha} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} \right)$ $(\alpha = 1, 2, \dots, s)$	$\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x}$ $\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) = \frac{\partial L}{\partial y}$
3. 哈密顿正则方程	3. 光学哈密顿正则方程
$\frac{\partial H}{\partial q_\alpha} = -\dot{p}_\alpha$ $\frac{\partial H}{\partial p_\alpha} = \dot{q}_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, s)$ $\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial L}{\partial t}$	$\frac{\partial H}{\partial x} = -\dot{p}$ $\frac{\partial H}{\partial y} = -\dot{q}$ $\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{x}$ $\frac{\partial H}{\partial q} = \dot{y}$ $\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial L}{\partial z}$

4.薛定格方程

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

5.过渡关系

德布罗意波长趋于零时，量子力学过渡到经典力学。力学量用算符表示，经典力学过渡到量子力学。

6.力学量可以在动量空间及位置空间描述，相互转换关系为傅里叶变换关系。

4.波动方程

$$\frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi$$

5.过渡关系

光波长趋于零时，波动光学过渡到几何光学。

光学量用算符表示，几何光学过渡到波动光学。

6.光学系统的性能可以在坐标域或空间频率域来描述，相互转换关系为傅里叶变换关系。

费马原理、哈密顿光学、GBIN光学、光纤通讯 本书站在更高的物理观点去探索解决一般的几何光学问题。以费马原理为出发点，从传统的透镜系统到连续折射率分布的变折射率光学或哈密顿光学，呵成一气，强调物理学内在联系，自成体系。哈密顿光学或GRIN光学是现今激光光纤通讯、集成光学、纤维光学的不可缺少的基础，也是微波光学、大气光学、声光学、海洋物理学中信息传输的基础。

光学传递函数 本书结合处理光学系统的设计和评价介绍了近二十年来发展起来的光学传递函数(OTF)理论。这是把通讯理论的观点和方法引用于光学的结果。这种已被国内外广泛采用的光学系统的象质评价方法，使几何光学以崭新的面貌出现。还介绍了用沃尔什(Walsh)函数计算OTF的方法，它保证了二次傅里叶变换的优点，又降低了对计算机容量的要求。

矩阵方法 电子计算机和激光的发明,推动了光学中矩阵方法的发展。本书中近轴光线追迹与空间光线追迹都采用矩阵方法,以便于上机计算。书中还介绍了研究激光共振腔的矩阵方法。

光学自动设计 电子计算机不仅把光学设计工作者从繁重的光学计算的劳动中解放出来,而且由于用计算机可以直接追迹大量的实际光线,从而获得实际象斑分布。这样比从赛德耳(Seidel)象差理论求得的近似解析解要直观而精确。更振奋人心的是,用计算机可以进行光学自动设计,使光学设计进行到一个崭新的阶段。本书除了介绍新的象差概念外,为了照顾传统的习惯,也为了在光学自动设计中对初始结构作合理的选择,还介绍了赛德耳象差的基本概念。介绍了近二十年来发展的光学自动设计的基本概念、两种评价函数,以及光学自动设计中常用的最优化方法——阻尼最小二乘法。由浅入深地介绍这些方法和概念,便于读者入门,掌握基础。

光度学和光栏 任何光学系统都包含光源和探测系统,了解光度学和光栏的概念才能正确使用光学仪器和进行光学系统设计。这方面常被理科学生所忽视。本书强调了这个问题,并用矩阵方法处理。

常用光学仪器 常用光学仪器不作详细介绍,基本设计思想渗透于各章习题中。

程序 配有若干微机程序,可供初学者练习或供有关工程技术人员参考。

习题 每章末附有习题(问题),除巩固所学内容外,大量结合实践工作和自然现象,培养解决实际问题的能力。更注意灵活应用和思维能力的培养。

参考文献 本书引用了有关参考文献，供读者进一步深入。

本书适用范围 本书是通过三届物理系学生作为选修课，光信息处理研究生作为必修课中成长起来的。内容新，适应面广。可作为下列专业的教学参考书：物理系，光学系，光学仪器系，光学工程系，光纤通讯专业，声光学，微波光学，大气传输光学，海洋物理专业，并可供有关科技人员参考。

感谢 本书在整个写作和试用过程中，一直得到南京大学冯致光教授和魏荣爵教授的热情关怀和帮助，并承南开大学潘维济副教授和南京大学梁昆森教授审阅全稿并提出宝贵意见。书中一个FORTRAN语言程序是南京大学数学系吴新元同志完成的。图是南京大学气象系石宗祥同志绘制的。书末索引的编写是南京大学物理系李峦同学完成的。在此一并表示感谢。

目 录

前 言	I
第一章 费马原理	1
问题	4
第二章 近轴光学	7
§ 2.1 单一折射球面	9
§ 2.2 薄透镜	27
§ 2.3 厚透镜、组合透镜	34
* § 2.4 自聚焦光学纤维	43
本章小结	48
问题	50
第三章 近轴光学的矩阵方法	52
§ 3.1 矩阵基础	53
§ 3.2 光线传播的矩阵表示	56
§ 3.3 光学系统变换矩阵的具体形式	67
§ 3.4 激光谐振腔	80
§ 3.5 类透镜媒质中光线的传播矩阵	87
本章小结	88
问题	94
第四章 光度学及光栏	97
§ 4.1 光度学基础	98
§ 4.2 孔径光栏、入射光瞳、出射光瞳	117
§ 4.3 视场光栏、入射窗、出射窗	123
§ 4.4 渐晕	125
问题	127

第五章 象差和光线追迹	129
§ 5.1 赛德耳象差	129
§ 5.2 子午光传播矩阵和球差	146
§ 5.3 空间光传播矩阵	157
问题	166
第六章 光学系统自动设计的基本概念	167
§ 6.1 评价函数	167
§ 6.2 最优化方法——求评价函数极小值对应的结构参数 ...	171
第七章 哈密顿光学和GRIN光学	182
§ 7.1 哈密顿原理和费马原理	183
§ 7.2 拉格朗日方程	185
§ 7.3 光线方程	186
§ 7.4 哈密顿正则方程	201
§ 7.5 几何光学与波动光学的过渡	211
§ 7.6 GRIN成象光学	216
本章小结	225
第八章 光学传递函数	229
§ 8.1 光学传递函数的引入	229
§ 8.2 沃尔什函数	240
§ 8.3 基于二次傅里叶变换的沃尔什函数的 光学传递函数 计 算法	244
本章小结	246
附录 衍射理论 傅里叶变换 卷积理论	248
本书参考文献	256
MBBI程序使用说明 (BASIC语言)	258
ZIWU-QIUCHA程序使用说明 (BASIC语言)	272
PW程序使用说明 (FORTRAN语言)	295
索引	317

1

费马原理

人们由实践总结了几何光学的三条基本实验定律：光在均匀媒质中沿直线传播定律；光在折射率不相同的媒质分界面上的反射定律和折射定律。1650年费马把它们概括成一个原理：光从某点到另一点传播所取的实际路径所花费的时间为极值（极小值，极大值或稳定值）。叫做费马原理。^{〔1〕}

下面分别讨论这三个实验定律是怎样概括为费马原理的。

一、直线传播定律

光在均匀媒质中沿直线传播。显然，实际光路——直线是花时最短的路径。时间取极小值。

二、反射定律

1. 平面镜

如图1-1, MN 为平面反射镜。从点 A 发出的光线经镜面反射到 B 点，满足反射定律： $\angle APS = \angle SPS$ 。实际光路 APB 所花费的时间是否为极值呢？

A' 为 A 点对于平面 MN 的对称点。光路 APB 的路程长等于 $A'PB$ 的路程长。附近光路 AQB 的路程长等于 $A'QB$ 的路程长。于是比较光路 APB 与光路 AQB 的路程长短就是比较 $A'PB$

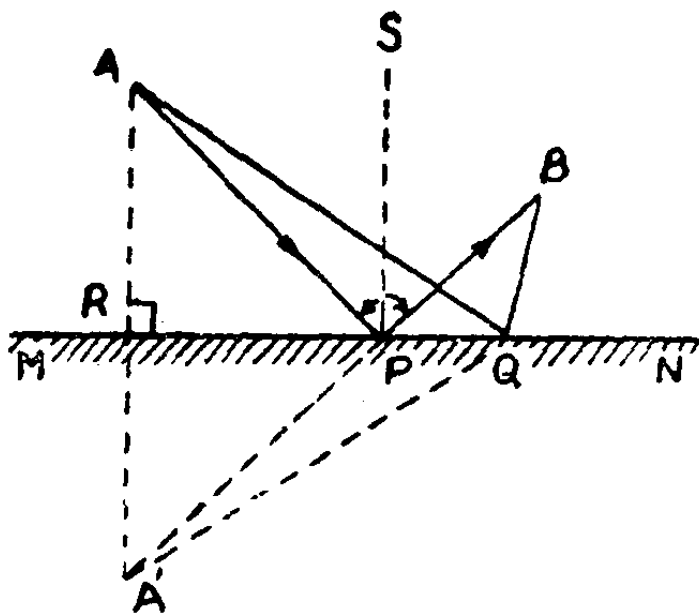


图 1-1

与 $A'QB$ 的路程长短。因为 $\angle APS = \angle SPB$ ，所以 $A'PB$ 为直线。光路 APB 对应的光程最短，为极值。均匀媒质中传播速度相同，所以满足反射定律的光路 APB 费时最短，时间取极小值。

2. 椭圆面反射镜

图1-2为椭圆面反射镜的剖面。 S_1 与 S_2 为椭圆的两个焦点。从任一焦点发出的所有的光线经椭圆面反射后都会聚到另一个焦点。由椭圆的几何性质可知：每条光线 S_1PS_2 都满足反射定律，而且光线的光程 $SP_1 + PS_2$ 为常数，也就是说随 P 点的位置而变。可见，这时实际光路的光程取稳定值。或者说实际光路所费时间取稳定值。

红宝石激光器的腔体的截面就是椭圆反射镜。闪光灯置于一个焦点，红宝石棒置于另一焦点。

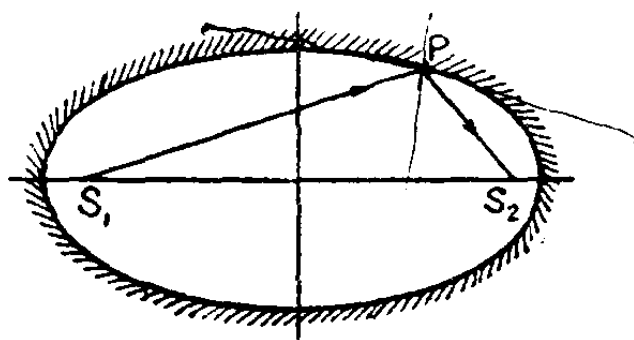


图 1-2

3. 球面反射镜

图1-3为凹球面反射镜。点 A 与点 B 与光轴等距，连线 AB 过凹球面的曲率中心 C ，实际光路 APB 满足反射定律。这条实际光路所费时间

是否极值？为比较光路 APB 与邻近任意一条光路 AQB ，以 AB 为两个焦点，过 P 作一椭圆，如图1-3中 EPR 所示。因为过 P 点的椭圆的曲率半径大于 PC ，所以椭圆必在圆面之外。延长 AQ 交椭

圆于 R ，连接 RB 。由椭圆性质 $AP + PB = AR + RB$ 。在三角形 RQB 中， $RQ + RB > QB$ ，所以光程 APB 比邻近任意一条光路的光程长。这里的实际光路的光程取极大值。或者说，实际光路所费时间取极大值。

三、折射定律

图1-4中， MN 为两种媒质的分界面。光线从 A 点到 B 点的实际光程 ABP 满足折射定律：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

这条实际光路所花的时间是否取极值呢？

在前面，我们问实际光路所费时间 t 是否取极值，只要看实际光路的路程 l 是否取极值。因为 $t = l/v$ ，而在同一媒质里速度 v 相同。现在有两种不同的媒

质，对应的光速不同，比较不同媒质的路程长短不能反应所经历的时间长短。但是，如果把光速为 v 的媒质里光传播路程 l 折算为在相同时间里光在真空中传播的路程 lc/v ，那就好比较了。因为 $c/v = n$ ，所以 $lc/v = nl$ 叫做光程。就是说，光在折

射率为 n 的媒质里传播长度 l ，则在相同的时间间隔里，在真空中传播长度 nl 。于是，问时间是否取极值，就只要问对应的光程是否取极值。

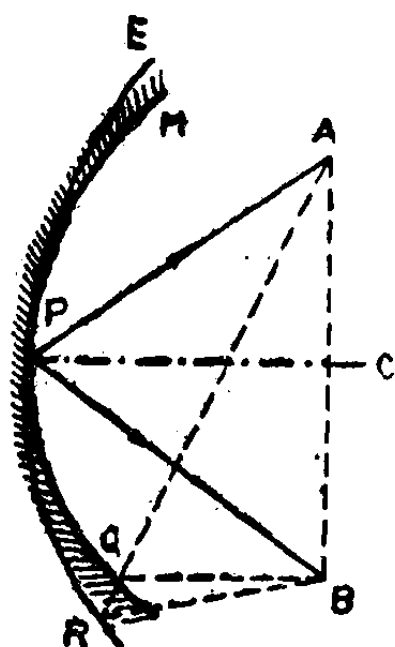


图 1-3

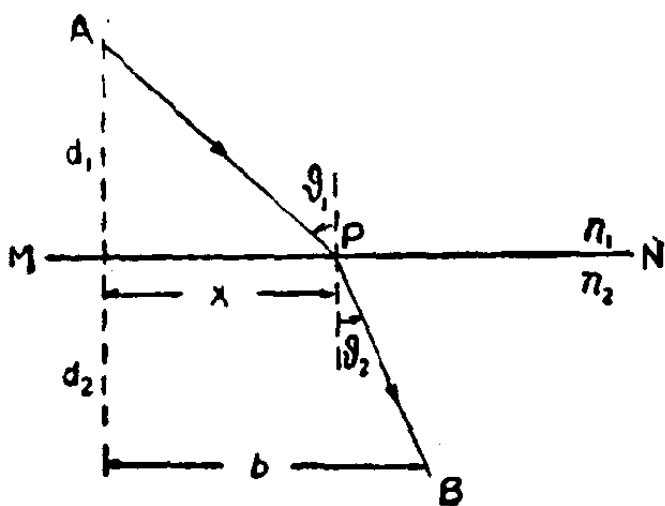


图 1-4

回到折射问题。光路 APB 的光程 L 为

$$L = n_1 \left(d_1^2 + x^2 \right)^{\frac{1}{2}} + n_2 \left[d_2^2 + (b - x)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

光程取极值的条件为 $\frac{dL}{dx} = 0$

$$\frac{dL}{dx} = n_1 \frac{x}{\left(d_1^2 + x^2 \right)^{\frac{1}{2}}} - n_2 \frac{b - x}{\left[d_2^2 + (b - x)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = 0$$

所以得 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

满足折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 的实际光路 APB 的光程取极值。又因为 $d^2 L / dx^2 > 0$ ，所以是极小值。

由上述讨论可知，费马原理还可以说成：光的实际路径的光程为极值。数学表达式是

$$\delta \int_{A \rightarrow B} n(x, y, z) ds = 0$$

这种形式使我们想起了分析力学里的哈密顿原理：质点的真实运动轨迹取作用量极小值：〔2〕

$$\delta \int_{t_1 \rightarrow t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0$$

它们是何等相似！

费马原理的意义在于它概括了光传播的规律，是几何光学的理论基础。在第2章里，我们用费马原理讨论近轴光学系统的成象规律。

问 题

用费马原理说明下列问题中的光程取稳定值、极小值还是极大值。

1. 光线斜入射于一块平行平面玻璃板的光路(图1-5)
2. 太阳落山(图1-6)
- 3* 沙漠幻景(图1-7)
4. 平行光被抛物面反射镜会聚于一点(图1-8)
5. 透镜系统的近轴光成像(图1-9)

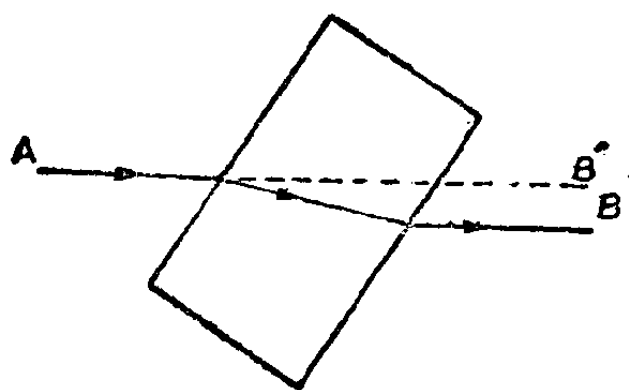


图 1-5

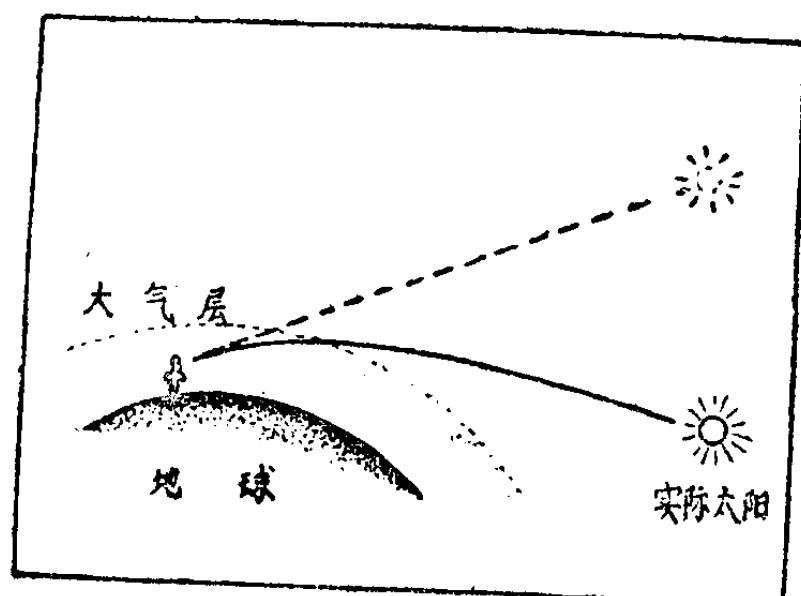


图 1-6

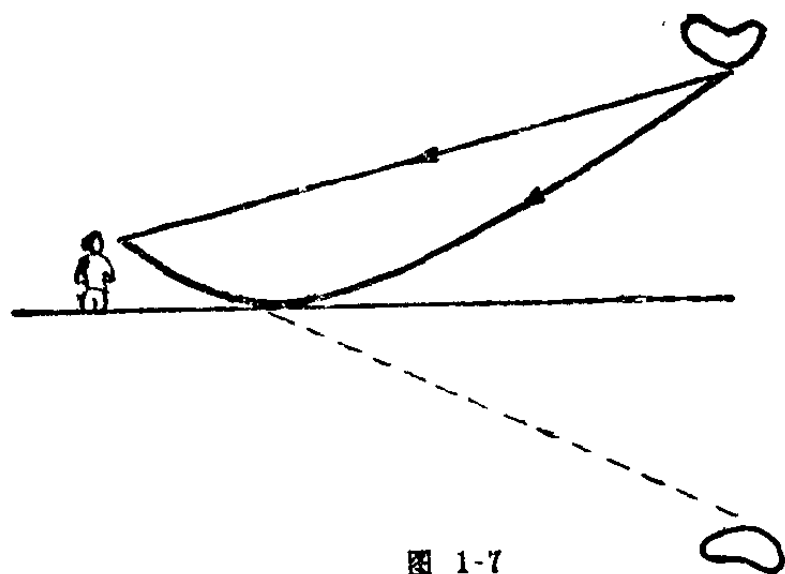


图 1-7

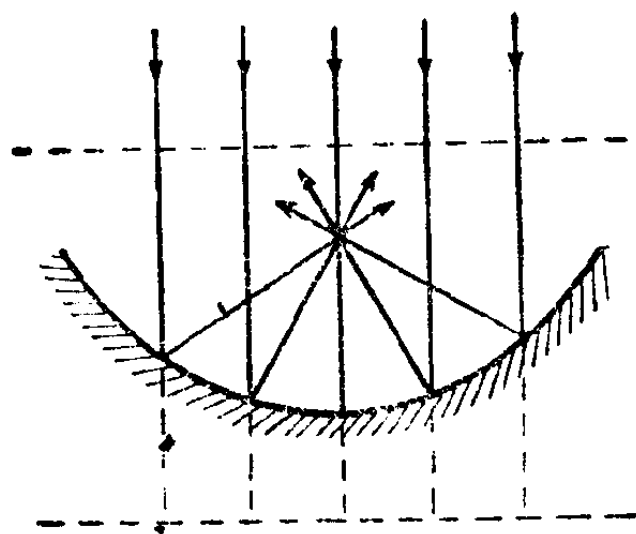


图 1-8

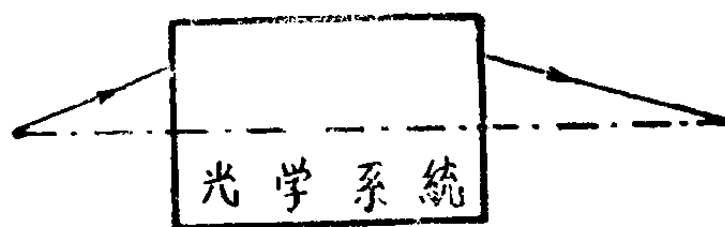


图 1-9

2

近 轴 光 学

费马原理是几何光学的基本原理，本章用费马原理讨论近轴光学的成象规律。近轴光学又称高斯光学。

先交代两个基本概念——光轴和近轴光线，以及有关符号规定。

光轴：由许多球面(当球面曲率 $\rho = 0$ 时，就是平面，所以也包括平面在内。)组成的光学系统，当它们的球心位于同一条直线上时，这条直线就是光学系统的光轴。光纤的光轴则是折射率分布的对称轴。本章限于讨论这种共轴的球面系统。

近轴光线：光线与光轴的夹角、光线在折射面上的入射角、折射角等都很小，使所有角的正弦、正切都可用角的弧度值代替。一般这些角小于 5° 。

符号规定：

一、折射系统

(1) 光线从左向右入射，为 $+z$ 方向。

(2) 球面的曲率半径：球心在球面顶点的右方为正，反之为负。

(3) 物高和象高：物高、象高垂直于光轴，向上为正，向下为负。