



高等学校适用教材

工程光学基础

曹俊卿 主编

GONGCHENG GUANGXUE

JICHU



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

高等学校适用教材

工程光学基础

曹俊卿 主编

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程光学基础/曹俊卿主编. —北京: 中国计量出版社, 2003. 8
高等学校适用教材
ISBN 7-5026-1790-6

I. 工… II. 曹… III. 工程光学—高等学校—教材 IV. TB133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 056079 号

内 容 提 要

本教材由几何光学、波动光学和近代光学简介三大部分组成。全书共分 8 章, 内容有: 几何光学原理、光学系统成像原理、典型成像光学系统、光波的物理基础和数学描述、光的干涉、光的衍射、光的偏振和近代光学简介。本教材可供高等院校非光学 (工程) 类测控专业使用, 书后还附有计算机辅助教学光盘。

中国计量出版社出版
北京和平里西街甲 2 号
邮政编码 100013
电话 (010) 64275360
E-mail jlfxb@ 263.net.cn
北京市媛明印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
版权所有 不得翻印

*

787 mm×960 mm 16 开本 印张 16.75 字数 292 千字
2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 100 定价 (含光盘): 30.00 元

前 言

光学教程或工程光学教程对于大学光学专业或光学工程专业的学生是必不可少的,国内外已有不少优秀的教程,它们已经起到并且还将继续起着重要的作用。21世纪被称为信息的时代,人们获取的信息90%来自于光学,然而众多的人享受着光学知识带来的快乐的同时,却对光学知识不甚了解,一本“易读”些的教程对于他们或许会有帮助。对于非光学专业或非光学工程专业的学生,一本包含必要的内容却又少些学时的教程也许更为合适。2001年5月,国家质量监督检验检疫总局政策法规宣传教育司组织召开了“测控技术与仪器”专业高校教材编写工作会议,根据会议精神,应中国计量出版社的邀请,我们编写了这本《工程光学基础》教程,供大学非光学(工程)类测控专业的课程使用。根据我们的经验,本书去掉带“*”号标记的内容可供3学分课程使用,用48学时讲完。各章的学时分配如下:

第1章 几何光学原理	1 学时
第2章 光学系统成像原理	14 学时
第3章 典型成像光学系统	6 学时
第4章 光波的物理基础和数学描述	6 学时
第5章 光的干涉	6 学时
第6章 光的衍射	4 学时
第7章 光的偏振	5 学时
第8章 近代光学简介	6 学时

带上含“*”号标记的内容,可供4学分的课程使用。有些院校甚至希望提供2学分的教材,那么去掉第8章,简讲第3章和第4章,也还有满足他们愿望的可能。编者要指出的是,凡整节含“*”号的内容,在目录中的节次前用“*”号标出;非整节含“*”号的内容,在课文的相应部分标出。由于兼顾了2学分和4学分的需要,部分内容的衔接处在语言上不免有所重复,请教师在使用时加以注意。

本教程有如下特点:

1. 几何光学部分,关于符号规则提法与国内传统教材的提法不同,在

教学实践中似更易为学生接受；在课程一开始就强调孔径和视场的概念以引起读者注意其重要性；在理想光组理论中，专辟一节实际光学系统以强调其与理想光学系统的区别与联系，接下来介绍透镜就显得从容自然；成像光学系统的分类和现代光学系统的介绍也别具匠心。

2. 波动光学部分，以波的叠加为核心，让读者明白在概念上区分了标量波和矢量波以及各自的适用范围后，他们所要做的事仅仅是“加法”而已；如果有场论数学知识的基础，典型介质中的波动方程集中在一起讲，既可减少讲授学时，又有利于学生作比较，更有利于让学生体会麦克斯韦方程的绝美统一性；利用算符求解晶体双折射方程的做法以及从杨氏干涉到夫琅和费衍射的一气呵成也是首次尝试。

3. 近代光学部分，主要是内容简介，力求概念准确到位，旨在让不设后续有关课程的院校的学生对该内容有一个大体的了解。教师可根据各自学校的具体情况加以处理。

本书由上海理工大学曹俊卿教授主编，参加编写的教师及具体分工为：合肥工业大学刘志健（第1、3章）和王永红（第8章），上海理工大学李湘宁（第2章）和曹俊卿（第4、6和7章），中国计量学院张增耀（第5章）。全书由曹俊卿定稿，郭汉明、朱靖和刘盛举等参加了本书部分绘图及校对工作，朱炜和杨晖制作了电子课件。

限于编者水平和本版本的初次尝试，错误与不足在所难免，衷心地希望使用本教材的教师和学生给予批评指正。

编 者

2003年4月

目 录

1	几何光学原理	(1)
1.1	概述	(1)
1.2	几何光学的基本定律	(2)
1.3	物像概念和完善成像条件	(6)
	习题	(7)
2	光学系统成像原理	(9)
2.1	共轴球面光学系统	(9)
2.2	理想光学系统	(19)
2.3	平面光学系统	(38)
2.4	光学系统中的光束限制	(49)
* 2.5	像差概论	(57)
	习题	(68)
3	典型成像光学系统	(71)
3.1	眼睛	(71)
3.2	目视光学系统	(75)
3.3	摄影系统和投影系统	(90)
* 3.4	现代成像光学系统简介	(94)
3.5	光学系统的外形尺寸设计	(98)
	习题	(101)
4	光波的物理基础和数学描述	(103)
4.1	波动方程	(103)
4.2	简谐平面波的复数表示	(108)
4.3	界面光学	(123)
* 4.4	几种典型媒质中的波动方程	(131)

习题	(137)
5 光的干涉	(139)
5.1 杨氏干涉和相干性问题	(140)
5.2 平板的双光束干涉	(148)
5.3 平板干涉的应用	(155)
5.4 平行平板的多光束干涉	(160)
5.5 光学薄膜	(167)
习题	(171)
6 光的衍射	(174)
6.1 干涉和衍射	(174)
6.2 平面开孔屏的普遍衍射公式	(183)
6.3 两种典型的衍射	(184)
6.4 衍射的现代进展	(195)
习题	(197)
7 光的偏振	(200)
7.1 偏振光概述	(200)
7.2 晶体的双折射	(203)
7.3 偏振态的分析	(214)
7.4 偏振光的干涉	(218)
习题	(221)
8 近代光学简介	(223)
8.1 激光原理	(223)
8.2 傅里叶光学	(232)
* 8.3 光纤光学	(243)
* 8.4 非线性光学	(251)
思考题	(256)
参考文献	(257)
部分习题参考答案	(259)

几何光学原理

1.1 概述

光学是研究光的本性、光的传播、光与物质的相互作用以及光的实际应用的科学。光是自然现象，也是最重要的信息载体，更是十分复杂的客体。现代物理学认为，光具有波粒二象性，即光既具有波动性又具有粒子性。除了在研究光的发射和吸收等与物质相互作用的情况下须考虑粒子性之外，光从本性上讲是电磁波，它按波动理论传播，即光的传播就是光波波面的传播。

所谓几何光学，就是撇开光的波动本性，仅以光线为基础、用几何学的方法研究光在介质中的传播规律和成像规律的学科。

用波动理论来讨论某些实际光学问题如光的传播问题和成像问题将会造成分析和计算上的很大不便，而几何光学理论往往会让这些复杂的光学问题变成非常简单的几何学问题，因而几何光学理论具有很重要的实用价值，是研究和设计光学仪器的基础。

几何光学是波动光学在波长等于零时的特例，因而几何光学研究的只是一种对真实情况的近似处理方法。但这种近似处理方法在光的传播问题和成像问题中一般是适用的，只要在必要时辅以波动光学理论。

几何光学经常涉及以下几个概念：

1.1.1 发光体和发光点

能够辐射光能量的物体，称为发光体或光源。当光源的大小与其辐射能的作用距离相比可略去不计时，就称其为发光点或点光源。在几何光学中，发光点被认为是一个无体积而只有位置的发光几何点。任何被成像的物体(发光体本身或被光源照射的客体)都可以看作是由无数个发光点组成的。

1.1.2 波面

按照光的波动理论,光是电磁波(横波)。发光点向四周辐射光波,在某一时刻其振动位相相同的各点所构成的曲面称为波阵面,简称波面。有多种波面,如平面、球面和柱面等规整的简单波面,以及规整和不规整的复杂波面。

1.1.3 光线和光束

几何光学把光看成能够传输能量但没有截面积的几何线,这样的几何线称为光线。光线的方向代表光的传播方向。

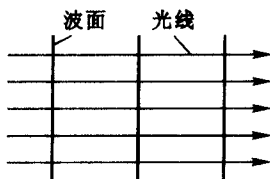


图 1-1 平面波和平行光束

从能量的观点来看,几何光学所论述的发光点和光线的概念是一个简化了的抽象概念,实际上是不存在的,因为它们的能量密度为无限大。

无限多条光线的集合称为光线束(简称光束)。显然,波面的法线束就是几何光学中的光束。与平面波和球面波对应的光束分别为平行光束和同心光束(见图 1-1 和图 1-2)。平行光束中的光线相互平行永不相交;同心光束(包括会聚和发散光束)中的光线由一点发出或相交于一点;与不规整的复杂面波相对应的光束不相交于一点且不平行(见图 1-3)。

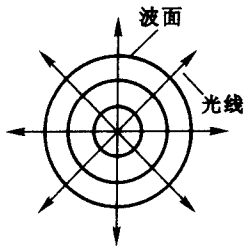


图 1-2 球面波和同心光束

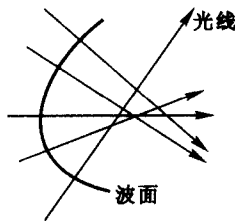


图 1-3 复杂波面及其对应的光束

1.2 几何光学的基本定律

1.2.1 直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光沿着直线传播。这就是光的直线传播定律。这一定律可以解释很多宏观的光学现象(如日蚀、月蚀、小孔成像等)。不遵守直线传播定律的例子如下:光在传播途中如遇到很小的孔或不透明

屏, 将发生衍射, 不再沿直线传播; 若介质不均匀, 光的传播轨迹将是任意曲线。

1.2.2 独立传播定律

不同的光线在空间相交, 彼此互不影响, 仍保持各自的规律继续传播; 光线在相交处满足叠加原理, 即非相干光满足强度叠加, 相干光满足复振幅叠加。这就是光的独立传播定律。

此定律的意义在于, 人们对光线传播情况的考虑大为简化。因为在考虑某一光线传播时, 可以不必考虑其他光线对它的影响。

1.2.3 折射定律和反射定律

若一束光入射到两种介质的光滑分界面时, 光就分成两部分, 如图 1-4 所示。一部分光线经分界面反射到原来的介质中, 称为反射光线; 另一部分光线透过分界面进入第二种介质中, 称为折射光线。反射光线和折射光线的传播规律遵循反射定律和折射定律。

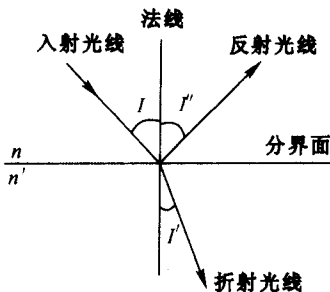


图 1-4 折射和反射

入射光线和分界面法线间的夹角 I 称为入射角; 折射光线和分界面法线间夹角 I' 称为折射角; 反射光线和分界面法线间的夹角 I'' 称为反射角。

1.2.3.1 折射定律

(1) 入射光线、折射光线和法线共一平面(即入射面)且分居于法线两侧。

(2) 入射角的正弦和折射角的正弦之比只与两种介质的绝对折射率有关。设 n 为入射光所在介质的绝对折射率, n' 为折射光所在介质的绝对折射率, 折射定律可表示为:

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

或
$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-2)$$

绝对折射率简称折射率。若光在某介质中的传播速度为 v , 光在真空中的速度为 c , 则介质的折射率

$$n = c/v \quad (1-3)$$

真空的折射率为 1。空气的折射率与真空的折射率相差甚微, 常被认为是 1。

1.2.3.2 反射定律

(1) 反射光线位于入射面内。

(2) 反射角 I' 和入射角 I 的绝对值相等, 符号相反, 可表示为 $I = -I'$ 。式中的负号是根据符号规则而确定的, 说明反射光线和入射光线分居法线两侧。

反射定律可以看成是折射定律在 $n = -n'$ 时的一种特殊情况。

1.2.3.3 全反射现象

在一定条件下, 介质的分界面可将入射光能全部反射回去而无折射现象发生, 这就是光的全反射现象。

通常, 我们把分界面两边折射率较大的介质称为光密介质, 而把折射率较小的介质称为光疏介质。当光从光密介质向光疏介质传播时, 因 $n' < n$, 由式(1-1)可知, $I' > I$ 。当入射角 I 增大到某一数值 I_m 时, 折射角 I' 为 90° , 折射光线沿分界面掠射, 如图 1-5 所示。这种情况下的入射角 I_m 称为临界角, 由式(1-1)可知

$$\sin I_m = n' / n \quad (1-4)$$

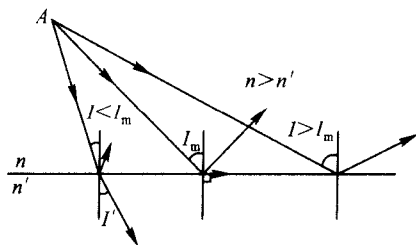


图 1-5 全反射现象

发生全反射的条件可归结为:

- (1) 光线从光密介质射向光疏介质;
- (2) 入射角大于或等于临界角。

全反射现象有着重要的应用, 例如全反射棱镜和光学纤维。

1.2.4 光路的可逆性

当光线的方向反转时, 它将逆着同一路径传播。这就是光路的可逆性。

光路的可逆性普遍存在, 不论通过何种介质, 经过多少次反射和折射。在研究光线传播规律和进行光学设计时, 可以按实际光线进行的方向(即“正向光路”)进行研究和计算, 也可按与实际光线相反的方向(即“反向光路”)进行研究和计算, 其结果完全相同。究竟采用哪种方法取决于使用的方便性。

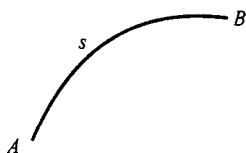
1.2.5 费马原理

费马原理从光程的角度来描述光的传播规律。

光程是指光在均匀介质中经过的几何路程 l 与该介质的折射率 n 的乘积, 即

$$s = nl \quad (1-5)$$

如光在非均匀介质中传播, 此时 n 是位置的函数, 即 $n=n(x, y, z)$ 如图 1-6 所示, 则从 A 点到 B 点的光程为



$$s = \int ds = \int n(x, y, z) dl \quad (1-6)$$

图 1-6 非均匀介质中的光程

与式(1-5)相比, 式(1-6)更具一般性。由 $l = \int v dt$ 、 $n=c/v$ 和式(1-6)可得

$$s = ct \quad (1-7)$$

从式(1-7)可以看出, 光程可理解为在相同时间内光线在真空中传播的距离。光程的概念在波动光学中有更重要的应用。

费马原理表述如下: 光从一点到另一点是沿光程(或者说所需的时间)为极值的路径传播的, 即光沿光程(所需时间)为极小、极大或恒定的路径传播。该原理也称为极值光程原理。其数学表达式如下

$$s = \text{极值(极小值、极大值或恒定值)}$$

费马原理是几何光学中的一个最普遍的基本原理。几何光学中直线传播定律、反射定律和折射定律均可以由费马原理导出。在均匀介质中光的直线传播定律是费马原理的显然推论。结合图 1-7, 可由费马原理推导出反射定律。请读者自己完成折射定律的推导。

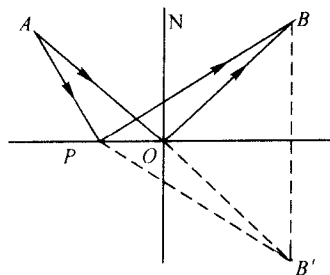


图 1-7 费马原理和反射定律

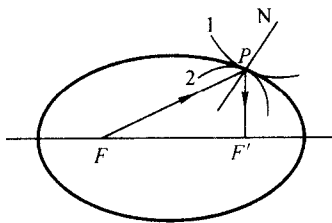


图 1-8 费马原理

以上的分析表明, 当界面为平面时, 光线是按光程为极小值的路径传播的。而当界面为曲面时, 光线传播路径的光程可能是极小值、极大值或

恒定值。图 1-8 中, 曲面 1 和曲面 2 均与椭球反射面相切于 P 点。由椭球面的性质可知, 无论反射点位于椭球面的何处, 对于椭球焦点 F 和 F' 其光程总是相等, 所以光线是按光程为恒定值(FPF')的路径传播的; 而对于曲面 1 和曲面 2, 光线则分别是按光程为极小值的路径(FPF')和极大值的路径(FPF')传播的。

1.3 物像概念和完善成像条件

1.3.1 物像概念

光学系统由一系列折射和反射表面组成。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, 这条直线称为光轴。光轴与各表面的交点称为顶点。实际光学系统大部分为共轴光学系统, 非共轴系统较少使用。由于非球面的加工和检验较困难, 实际的折射和反射表面绝大多数为平面或球面。

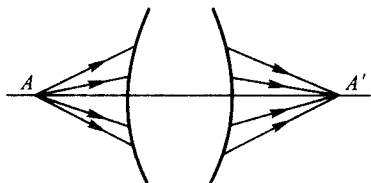


图 1-9 物像概念

如图 1-9 所示, 发光点 A 发出的人射光束经过光学系统后, 变成以 A' 为会聚点的出射光束, 我们就称 A 点为物点, A' 点为像点。根据光束的会聚和发散, 物、像均有实有虚。由实际光线相交所形成的点称为实物点或实像点; 而由实际光线的延长线相交

所形成的点称为虚物点或虚像点。需注意的是, 当前系统的虚物只能由前一系统所成的实像给出。如图 1-10 所示, A' 是实物点 A 经系统 I 所成的实像点, 同时它又是系统 II 的虚物点; A'' 是整个系统的虚像点, 同时可以作为后继系统的实物点。实像能用屏幕或胶片直接接收, 也能为眼睛所感受; 虚像能为眼睛所感受, 或者再经过后继系统的变换, 成实像于屏幕或胶片上。

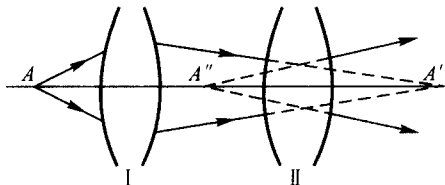


图 1-10 物、像的虚实

通常, 对某一光学系统而言, 当物体的位置固定后, 就可以在一个相应的位置上成清晰像, 例如放电影时胶片(即物)和银幕上的像相对于镜头的

位置就有这样的对应关系。这种物像之间的对应关系在光学上称之为共轭。

现引入物空间和像空间的概念,即物所在的空间为物空间,像所在的空间为像空间。物、像空间的范围均为 $(-\infty, +\infty)$ 。由于物、像有虚实之分,物空间和像空间同样也有虚实之分。关于物像空间的概念在第二章中将作进一步讨论。

1.3.2 完善成像条件

一个物点发出的同心光束与球面波相对应。如果该球面波经光学系统后仍为一球面波,对应的光束仍为同心光束,则称该同心光束的中心 A' 为物点 A 经光学系统所成的完善像点,如图1-11所示。由费马原理可推导出一个重要结论:物点和相应的像点之间各光线的光程相等。因而,等光程是完善成像的物理条件。

要实现对某一物点的等光程成像,只须用单个合适的反射或折射界面就能满足,这种单个界面称为等光程面,例如图1-8所示的椭球反射面(物点 A 和像点 A' 分别位于椭球面的两个焦点上)和图1-12所示的抛物反射面(物点 A 位于无限远,像点 A' 位于抛物面的焦点)以及习题1.10。

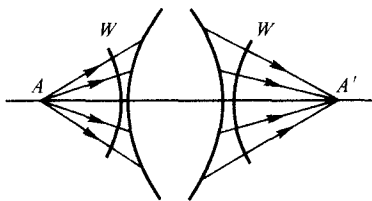


图 1-11 完善成像条件

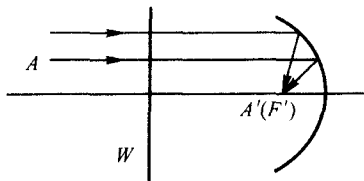


图 1-12 等光程面

习 题

- 1.1 举例说明光线传播基本定律,并用实验方法证明它们。
- 1.2 试由折射定律证明光路的可逆性。
- 1.3 弯曲的光学纤维可以将光线由一端传至另一端,这是否违背光的直线传播定律?
- 1.4 清晨和黄昏时的太阳略显扁平,为什么?
- 1.5 由费马原理推导出光的折射定律。
- 1.6 已知光在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,求光在水($n=1.33$)和金刚石($n=2.417$)中的传播速度。

1.7 有一玻璃球, $n=1.5$, 有一光线射到球的前表面上一点, 若入射角为 60° , 求在此点上反射光线和折射光线的夹角。

1.8 一物体经针孔相机在屏上成 30mm 高的像。若将屏拉远 25mm , 则像的高度为 35mm 。试求针孔到屏和物体的初始距离。

1.9 当我们向 1m 深的水看去时, 感觉水的深度为多少?

1.10 一等光程折射面能够将有限远物点完善成像于无限远处。求此曲面的方程。

光学系统成像原理

光学系统的作用之一是对物体成像。光学系统由一系列光学零件组成。常用的光学零件有透镜、反射镜、棱镜及平行平板等，它们按一定的方式组合成光学系统，从而满足特定的使用要求，例如显微镜、望远镜、照像镜头和投影镜头等。本章讨论光学系统的成像规律，将主要分球面系统和平面系统来讨论。在球面系统中还将引入理想光学系统的概念。

2.1 共轴球面光学系统

透镜是构成光学系统的最基本的成像元件，绝大多数透镜都由球面构成(平面可看作半径为无限大的球面)，如果光学系统中的所有界面均由球面构成，则该光学系统称为球面系统。在球面光学系统中，如果所有的球心都位于同一条直线上，这类光学系统称为共轴球面系统，连接各球面球心的直线称为系统的光轴，共轴球面系统对称于光轴。光学系统对物体的成像过程是透镜的各个折(反)射面对光线的作用过程，因此，我们讨论共轴球面系统的成像首先从单个折射球面开始，逐步过渡到整个系统。

2.1.1 符号规则

为了对物、像的位置和正倒、光线的方向、以及球面的方位有一个方便统一的描述，光路中的线量、角量都使用了代数量，并在光路计算中建立如下符号规则(参照图 2-1)。

2.1.1.1 光路方向

光路方向即光线行走的方向，规定为从左到右为正向，反之取负。

2.1.1.2 线段的正负号

在图 2-1 中，物体 Y 经单个球面成像为 Y' ，涉及到的线段有：物距 L 、

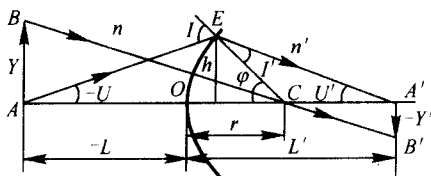


图 2-1 单个球面的成像光路及符号规则

像距 L' 、物高 Y 、像高 Y' 、光线入射高度 h 及球面半径 r ，所有的沿轴线段以光轴与球面的交点(称顶点)为原点，向右取正，向左取负；所有的垂轴量以光轴为基准轴，向上取正，向下取负，例如物距 AO 为负，像高 $A'B'$ 为负，像距 OA' 为正，物高 AB 为正以及投射点高度 h 为正等。

2.1.1.3 角度的正负号

图 2-1 中所涉及到的角度有：物方孔径角 U 、像方孔径角 U' 、球心角 φ 、入射角 I 及折射角 I' 。其中对于 U 、 U' 和 φ 等一类轴上角度，规定角度的正负用该角度的正切值的正负来表示，即正切值为正时角度为正，反之为负。在定义了线段的正负之后，正切值的正负从而角度的正负随之而定。

例如，在图中 $\tan U = \frac{h}{AO}$ 之值因 h 为正 AO 为负而结果为负值，所以 U 也为负值。对于角度 I 、 I' 一类非轴上角度，则以光线在球面投射点的法线为基准轴代替光轴，投射点为该轴的原点，符号规则与前一致。例如，同样规定角度的正切值为正时角度为正，反之为负。

如图 2-1 所示的物方孔径角 U 如上述为负值外，读者不难分析像方孔径角 U' 、球心角 φ 、入射角 I 及折射角 I' 均为正值。

几何光学中的许多计算公式都是建立在光路图的几何关系的基础上，由于几何量均以绝对值度量，为了使几何方法导出的成像公式也能正确描述物像的相对位置及正倒关系，规定所有代数量取负值的参数标注在光路图中时，均须在参数前再标注一个负号，使得负负为正，即规定光路图中的几何量一律标注其绝对值。例如在图上用 L 表示的物距 AO 为负值，必须在图上标为 $-L$ ，等等。

2.1.2 单个球面成像的光路计算

所谓光路计算，就是在已知光学系统的情况下，对给定的物点求其像点。现已知单个球面的曲率半径 r 以及物方和像方的折射率 n 和 n' ，当轴上物点的物距为 L ，发出入射光线的孔径角为 U 时，求其像方出射光线的孔径角 U' 及像方截距 L' 。

如图 2-1，在 $\triangle AEC$ 中，应用正弦定律，有