

内 容 简 介

本书是光学设计专业的参考书。内容包括：象差计算、象差理论、各种典型光学系统设计（包括望远物镜、目镜、显微物镜、照相镜头、聚光照明系统、折反射系统）、使用象差自动校正程序设计光学系统和光学传递函数。书中列举了二十多种典型系统的具体设计过程和方法，并附有大量数据可供设计时参考。

本书可作为从事光学设计的工程技术人员和高等院校光学专业师生的参考书。

光 学 设 计

袁旭沧 等 编著

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年2月第一版 开本：787×1092 1/32

1983年2月第一次印刷 印张：26 1/2

印数：0001—5,150 字数：610,000

统一书号：15031·464

本社书号：2920·15—4

定价：4.05 元

前 言

光学设计是二十世纪发展起来的一门学科,虽然出版的书籍已经相当多,但是对初学者来说,往往还有这样的情况:虽然读了不少有关的书籍,但是一接触具体设计任务,仍会感到不知从何入手。我们认为造成这种情况的原因:一方面是因为光学设计的理论至今还很不完善,还不能根据理论用统一的方法和步骤来解决不同类型光学系统的设计问题,象差理论还只能给出一些近似的或者定性的结果;另一方面,也因为现有的书籍,讲一般理论比较多、讲具体方法比较少,尤其是如何应用理论来解决设计中遇到的实际问题就更少了。本书力图能克服现有书籍的这一不足之处,希望既能帮助初学者很快入门,也能使已入门者得到提高。

全书以初级象差理论为基础,在初级象差分析的基础上,用实际光路计算的方法,找出系统的高级象差规律,从而得出较好的设计结果。本书全部内容共有十二章。前四章是讲实际象差的计算和象差理论。在象差理论方面除了系统地介绍初级象差理论而外,还提出了一种由实际象差计算结果来估计高级象差数量的方法。它使我们有可能对不同系统高级象差的规律进行定量研究。从第五章到第十章,分别介绍了各种不同类型光学系统的设计,包括望远镜物镜、目镜、显微镜物镜、聚光照明系统、照相物镜和折反射系统。对每一类系统首先用象差理论分析它们的特点,然后系统介绍它们的各种典型结构型式及相应的象差特性,为设计者选择结构型式时作参考。最后结合几种有代表性的典型结构实例,按

实际设计过程讲述它们的设计方法，而且尽可能对每一步修改和修改以后得出的结果用象差理论进行说明。通过这些设计实例，既可以学到具体的设计方法，也能进一步了解不同系统的具体特点，提高分析问题解决问题的能力。全书共有设计实例二十多个，它们的结构参数和象差都是实际设计结果。

由于电子计算机在光学设计中的应用，使手工计算象差发展到象差自动校正，给光学设计带来了一个跃进。为了适应使用电子计算机设计光学系统的要求，光学设计的某些内容需要加以改进和提高。这一点在本书中已有所反映，但还只是初步。

如何编制象差自动校正程序的问题，不属于本书预定的内容。但是目前光学设计已普遍使用象差自动校正程序。因此在本书第十一章（使用象差自动校正程序进行光学设计）中，从使用程序的角度出发，介绍了自动校正的原理和有关问题以及目前最常用的两种自动校正程序（阻尼最小二乘法程序和适应法程序）的特点和使用中应注意的问题。第十二章（光学传递函数在光学设计中的应用）介绍了有关光学传递函数的基本概念和它的计算方法，以及如何用它来评价光学系统的成象质量。

本书由袁旭沧主编，参加这一工作的还有李士贤，郑乐年，安连生同志。丁汉章、陈晃明两同志曾校阅了全稿。彭利铭、周文秀等同志也曾为本书做了不少工作。张以谟同志也曾给本书提出过宝贵意见，在此一并致谢。

限于作者水平，定会有不少缺点错误，望读者批评指正。

作者 1980年1月于北京工业学院

目 录

引言	(1)
第一章 近轴光学的基本公式	(6)
§ 1-1 几何光学的基本定律	(6)
§ 1-2 共轴球面系统中光路计算的三角公式	(7)
§ 1-3 几何光学的符号规则	(10)
§ 1-4 近轴光路计算公式	(15)
§ 1-5 近轴光学的基本公式	(17)
第二章 共轴系统的象差分类和象差计算	(22)
§ 2-1 概述	(22)
§ 2-2 介质的色散和折射率插值公式	(23)
§ 2-3 光学系统的色差——轴向色差和垂轴色差	(30)
§ 2-4 轴上点的单色象差——球差	(32)
§ 2-5 轴外点单色象差的分类	(35)
§ 2-6 轴上点象差的计算	(42)
§ 2-7 轴外点子午象差的计算	(48)
§ 2-8 轴外点细光束子午和弧矢场曲的计算	(58)
§ 2-9 近轴物点宽光束弧矢彗差——正弦差的计算	(69)
§ 2-10 球面光路计算的向量公式	(73)
§ 2-11 二次曲面光路计算的向量公式和细光束象散 公式	(81)
§ 2-12 高次非球面的光路计算公式	(87)
§ 2-13 光路向量计算的起始和终结公式	(93)
§ 2-14 编制象差计算程序中的几个光学问题	(101)
§ 2-15 象差的曲线表示	(107)
第三章 象差理论	(118)
§ 3-1 概述	(118)

§ 3-2	轴上点的初级球差公式	(121)
§ 3-3	轴外点的初级象差公式	(128)
§ 3-4	初级象差性质的讨论	(135)
§ 3-5	共轴球面系统的初级象差计算公式	(148)
§ 3-6	单个折射球面象差特性的讨论	(154)
§ 3-7	场曲和光学系统结构关系的讨论	(164)
§ 3-8	象差和光阑位置的关系	(169)
§ 3-9	初级色差公式	(172)
§ 3-10	共轴球面系统初级象差计算	(177)
§ 3-11	玻璃平板的初级象差公式	(187)
§ 3-12	波象差和几何象差的关系	(191)
§ 3-13	适用于编制程序的初级象差公式和二次曲面的 初级象差公式	(201)
§ 3-14	象差的级数表示式	(206)
§ 3-15	象差平衡	(210)
§ 3-16	高级象差的数量估计	(222)
§ 3-17	高级色差和色差的平衡	(228)
§ 3-18	高级象差数量估计的应用举例	(231)
第四章	薄透镜系统的初级象差	(236)
§ 4-1	概述	(236)
§ 4-2	薄透镜系统的初级单色象差公式	(237)
§ 4-3	象差特性参数 P 、 W 的规化	(242)
§ 4-4	薄透镜系统的初级色差公式	(251)
§ 4-5	双胶合物镜结构参数和 $\bar{P}_\infty$ 、 $\bar{W}_\infty$ 、 $\bar{C}$ 的关系 ..	(254)
§ 4-6	选玻璃程序的编制	(261)
§ 4-7	单透镜结构参数和 $\bar{P}_\infty$ 、 $\bar{W}_\infty$ 、 $\bar{C}$ 的关系	(263)
§ 4-8	单个薄透镜球差特性的讨论	(267)
§ 4-9	单个薄透镜对无限远物平面成象时的彗差和象散特性	(276)
第五章	望远镜物镜设计	(285)

§ 5-1	望远镜物镜的特点	(285)
§ 5-2	望远镜物镜的类型和设计方法	(287)
§ 5-3	双胶合望远镜物镜设计	(290)
§ 5-4	双胶合望远镜物镜的二级光谱色差	(307)
§ 5-5	消色差谱线的选择	(312)
§ 5-6	摄远物镜设计	(315)
§ 5-7	望远镜物镜象差的公差	(341)
第六章	目镜设计	(356)
§ 6-1	目镜的特点	(356)
§ 6-2	常用目镜的类型和象差分析	(360)
§ 6-3	冉斯登、惠更斯和凯涅尔目镜设计	(372)
§ 6-4	对称式目镜和无畸变目镜设计	(386)
§ 6-5	I 型广角目镜设计	(398)
§ 6-6	II 型广角目镜 (艾尔弗广角目镜) 设计	(409)
§ 6-7	望远镜系统象差的公差	(421)
第七章	显微镜物镜设计	(427)
§ 7-1	显微镜物镜的光学特性	(427)
§ 7-2	显微镜物镜的类型	(430)
§ 7-3	低倍消色差物镜设计	(436)
§ 7-4	中倍消色差物镜设计	(443)
§ 7-5	显微镜物镜象差的公差	(458)
第八章	聚光照明系统设计	(462)
§ 8-1	聚光照明系统的作用和要求	(462)
§ 8-2	照明系统的类型	(467)
§ 8-3	光线折射的作图法	(471)
§ 8-4	透镜式照明系统的设计方法	(473)
§ 8-5	非球面 (二次曲面) 照明系统设计	(478)
§ 8-6	照明螺纹透镜设计	(484)
第九章	照相物镜设计	(495)
§ 9-1	照相物镜的光学特性和设计特点	(495)

§ 9-2	照相物镜的基本类型	(499)
§ 9-3	基本类型照相物镜的演变型式	(508)
§ 9-4	变焦距照相物镜	(525)
§ 9-5	象差变化量表的计算	(535)
§ 9-6	照相物镜设计例一——根据象差变化量表用逐步 修改的方法设计反摄远物镜	(537)
§ 9-7	照相物镜设计例二——从设计半部系统出发设计 双高斯物镜	(558)
§ 9-8	照相物镜设计例三——从初级象差求解入手设计 三片型照相物镜	(591)
§ 9-9	照相物镜象差的公差	(609)
第十章	折反射系统设计	(613)
§ 10-1	概述	(613)
§ 10-2	光程和等光程条件	(614)
§ 10-3	反射和折反射的望远镜物镜和照相物镜	(620)
§ 10-4	折反射显微镜物镜	(628)
§ 10-5	施密特校正板的设计	(630)
§ 10-6	折反射球面系统设计 举例	(635)
第十一章	使用象差自动校正程序进行光学设计	(645)
§ 11-1	概述	(645)
§ 11-2	象差自动校正的基本原理及其和人工校正过程 的关系	(646)
§ 11-3	象差自动校正程序中的几个问题	(652)
§ 11-4	怎样使用阻尼最小二乘法程序	(658)
§ 11-5	怎样使用适应法程序	(665)
§ 11-6	使用阻尼最小二乘法程序的一个例子	(670)
§ 11-7	使用适应法程序的例子	(683)
第十二章	光学传递函数在光学设计中的应用	(697)
§ 12-1	概述	(697)
§ 12-2	图象的分解和合成——傅里叶级数和傅里叶	

变换	(698)
§ 12-3 什么是光学传递函数	(704)
§ 12-4 怎样计算光学传递函数	(709)
§ 12-5 几何传递函数的计算	(711)
§ 12-6 波象差和瞳函数的计算	(714)
§ 12-7 用两次傅里叶变换法计算光学传递函数	(718)
§ 12-8 用自相关法计算光学传递函数	(720)
§ 12-9 光学传递函数的应用	(721)
附录	(725)
双胶合薄透镜参数表 (王冕玻璃在前)	(725)
双胶合薄透镜参数表 (火石玻璃在前)	(781)

引 言

设计一个光学仪器的光学系统，大体上可以分成两个阶段，第一阶段是根据仪器总的技术要求（性能指标，外形体积、重量，以及有关技术条件），从仪器各部分（光学、机械、电路）出发，拟定光学系统的原理图，并初步计算系统的外形尺寸，以及系统中各个部分要求的光学特性等等。一般称为“初步设计”或者“外形尺寸计算”；第二阶段是根据初步设计的结果，确定每个透镜组的具体结构参数（半径、厚度、间隔、玻璃材料），保证满足系统光学特性和成象质量的要求，称为“象差设计”，一般简称“光学设计”。这两个阶段既有区别又有联系，在初步设计时，就要预计到象差设计是否有可能实现，以及系统大致的结构型式，反之当象差设计无法实现，或者结构过于复杂时，不得不回过来修改初步设计。一个光学仪器工作性能的好坏，初步设计是关键，如果初步设计不合理，严重的可能使仪器根本无法完成工作，其次给第二阶段象差设计工作带来困难，导致系统结构过分复杂，或者成象质量不佳；当然在初步设计合理的条件下，如果象差设计不当，同样也可能造成上述不良后果。评价一个光学系统设计的好坏，一方面要看它的性能和成象质量，另一方面还要看系统的复杂程度，一个好的设计应该是在满足使用要求（光学性能、成象质量）的情况下，结构最简单。

初步设计和象差设计这两个阶段的工作，在不同类型的仪器中所占的地位和工作量也不尽相同。在某些仪器，例如大部分军用光学仪器中，初步设计比较繁重，而象差设计相

对来说比较容易；在另一些光学仪器，例如一般显微镜和照相机中，则初步设计比较简单，而象差设计却较为复杂。本书主要解决象差设计问题，而不讨论初步设计，并且认为读者已经具备了应用光学的一般基础知识。

最初生产的光学仪器是人们直接磨制了各种不同形状的透镜，把这些透镜按不同情况进行组合，找出成象质量比较好的结构。由于实际透镜的制作比较困难，要找出一个质量比较好的结构，势必花费很长的时间和很多的人力、物力，而且也很难找到各方面都较为满意的结果。

为了节省人力、物力，后来逐渐把这一过程用计算来代替。对不同结构参数的光学系统，由同一物点出发，按光线的折射、反射定律，用数学方法计算若干条光线。根据这些光线通过系统以后的聚焦情况，也就是根据这些光线象差的大小，就可以知道该物点的成象质量，在整个成象物平面上计算若干个点，就可以大体知道整个物平面的成象质量。然后修改光学系统的结构参数，重复上述计算，直到成象质量满意为止。这样的方法叫做“光路计算”，或者叫做“象差计算”，光学设计正是从光路计算开始发展的。用象差计算来代替实际制作透镜这当然是一个很大的进步，但是这样的方法仍然不能满足光学仪器生产发展的需要，因为光学系统结构参数和象差之间的关系十分复杂，要找到一个比较理想的结果，仍然需要经过长期的繁重计算过程，特别是对于一些光学特性要求比较高、结构比较复杂的系统，这个矛盾就更加突出。

为了加快设计进程，促使人们对光学系统象差的性质及象差和结构参数之间的关系进行研究，希望能够根据象差要求，用解析的方法直接求出结构参数，这就是所谓“象差理论”的研究。但是这方面的进展是不能令人满意的，直到目

前为止象差理论只能给出一些近似的结果，或者指出如何修改结构参数的方向，加速设计的进程，但仍然没有使光学设计从根本上摆脱繁重的象差计算过程。

正由于光学设计的理论还不能使我们采用一个普遍的方法，根据使用要求直接求出系统的结构参数，而只能通过计算象差，逐步修改结构参数，最后得到一个较为满意的结果。因此设计人员的经验对设计的进程有着十分重要的意义，同时不同的人对不同的系统所采用的设计方法和步骤差别很大。因此学习光学设计，除了要掌握象差的计算方法和熟悉象差的基本理论之外，还必须学习不同类型系统的具体设计方法，并且不断地从实践中去积累经验。

由于电子计算机的出现，才使光学设计人员从繁重的手工计算中解放出来，过去一个人需用几个月的时间进行计算，现在用电子计算机只要几十分钟甚至几分钟就能完成了。设计人员的主要精力已经由象差计算转到整理计算资料和分析象差结果这方面来。光学设计最近的发展是除了应用电子计算机来进行象差计算而外，让机器进一步代替人做分析象差和自动修改结构参数的工作，这就是所谓“自动设计”，或者“象差自动校正”。

光学设计领域中应用了电子计算机以后，使光学设计产生了一个跃进，不少过去需要长时间才能完成的工作，今天在较短时间内就可能完成；有些过去由于受到计算量的限制而无法进行的工作，今天有可能进行了。电子计算机的采用，不仅节省了大批劳动力，缩短了设计周期，同时也使我们有可能设计出质量更高、结构更简单的光学系统。

由于电子计算机的应用，使光学设计面临着一个改进和提高的任务，某些内容则已经不很适用了，大部分内容今天仍然可以应用，但须要加以发展和改进，本书在这方面已有

所反映。本书原是北京工业学院光学专业的讲义，大部分材料是1974年前后写成的，鉴于当时的情况，我们基本上是按照使用电子计算机计算象差，但用人工修正结构参数这样一种设计方式来写的。由于近年来光学自动设计在我国发展十分迅速，今天大部分光学设计都在不同程度上借助于这样或那样的自动设计程序来完成。某些人认为在有了自动设计程序以后，似乎过去有关光学设计的一些理论和方法已经没有什么用处了，只要能上机计算就可以做光学设计了。其实不然，要设计一个光学特性和象质都能满足特定的使用要求而结构又最简单的光学系统，只靠自动设计程序是难以完成的。在使用自动设计程序的条件下，人的主观能动性仍然起主导作用，特别是那些为了满足某些特殊需要而设计的新结构型式，主要是依靠设计人员的理论分析和实际经验来完成的。因此我们认为，即使使用了自动设计程序，也必须学习光学设计的基本理论，以及不同类型系统具体的分析和设计方法，才能真正掌握光学设计。

本书的内容大体分成三部分，第一部分是象差计算，这是光学设计的基础和基本的手段。考虑到目前国内已普遍使用电子计算机计算象差，我们压缩了过去采用的手工计算的内容，而以适用于电子计算机编制程序的球面和非球面的向量公式和有关数据处理，以及象差表示方法为重点。第二部分是象差理论，它讨论象差的基本性质和象差与光学系统结构参数的关系，它是光学设计的理论基础。本书着重系统地介绍初级象差理论，特别是薄透镜的初级象差理论。定性地讨论了某些高级象差的性质。第三部分是不同类型光学系统的设计。除了介绍不同类型系统的共同特点，基本结构型式和象差的特点而外，结合例子按照实际的设计步骤详细介绍它们的设计方法。着重说明如何应用基本的象差理论来分析

和解决设计中遇到的具体问题。通过实际应用进一步加深对理论的理解。

本书第十一章是“使用象差自动校正程序进行光学设计”。介绍了目前用得最广泛的两种自动设计方法——阻尼最小二乘法 and 适应法的基本原理以及有关问题。主要是为了使用程序设计光学系统，而不是为了编程序。第十二章介绍了光学传递函数和它的计算方法以及如何用来评价光学系统的质量。

光学设计是一门实践性很强的学科，它并没有很多高深的理论，但要真正掌握它必须在实际设计过程中，通过理论和实践的反复结合，才能达到应用自如。本书编写过程中，我们在这方面作了不少的努力，读者在学习过程中，也应对此狠下功夫。

第一章 近轴光学的基本公式

§ 1-1 几何光学的基本定律

几何光学是建立在把光看作“光线”（能够传输能量的几何线）这个物理假设基础上的，另外加上三条描述光线在不同情况下传播规律的物理定律，即直线传播定律、折射定律和反射定律，就构成了它的全部基础。几何光学就是根据这三条基本定律用数学方法来研究各种光的传播现象。

一、直线传播定律：光线在均匀透明介质中按直线传播。

二、折射定律：光线在两介质分界面上的折射遵守以下的规律，如图1-1所示。

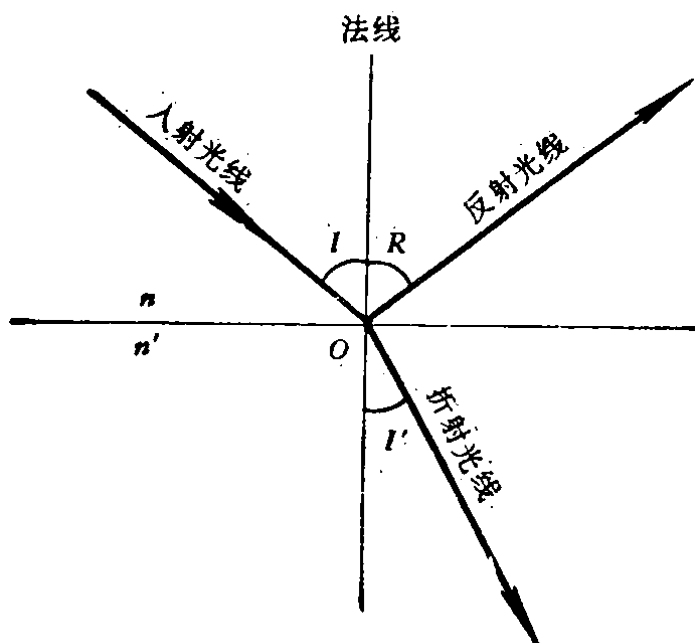


图 1-1

1. 入射光线，折射光线和投射点的法线三者在同一平面内。

2. 入射角 I 和折射角 I' 正弦之比为一个与入射角大小无关的常数

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

公式中 n ， n' 为介质的折射率。

三、反射定律：光线在两介质分界面上的反射，如图1-1所示：

1. 入射光线，反射光线和投射点的法线三者在同一平面内，

2. 入射角等于反射角

$$I = R$$

以上就是几何光学仅有的三条物理定律。

光学设计长期以来基本上建立在几何光学的基础上，实践证明这是可行的，只是对某些特殊问题才需要使用物理光学的概念。因此以上三条定律实际上也是光学设计的基础。

§ 1-2 共轴球面系统中光路计算的三角公式

为了知道某一个物点通过已知光学系统成象的质量，只要利用基本定律找出由该物点发出的一系列光线通过光学系统后的出射位置，根据它们的聚交情况就可以判断系统对该物点成象的质量。由入射光线位置计算出射光线位置的公式称为光路计算公式。在使用电子计算机以前，光路计算大多是依靠三角函数表或者三角函数对数表进行的，它们所用的公式称为光路计算的三角公式，以便和今后要介绍的适用于电子计算机使用的向量代数公式相区别。这一节就介绍这种

公式。

为了能够由入射光线计算折射光线，首先要选择表示光线位置的坐标。采用的坐标不同，公式的形式亦随之改变。我们这里选取光线和光轴的交点到球面顶点的距离 L ，以及光线和光轴的夹角 U 表示入射光线 PA 的位置，如图1-2所示。至于球面的半径 r ，以及球面两边介质的折射率 n 、 n' 当然都是已知。球面折射的光路计算公式就是根据已知的球面半径 r 和介质的折射率 n 、 n' 以及入射光线的坐标 L 、 U ，计算折射光线的位置 L' 、 U' 。但是我们不能直接把 L' 、 U' 表示为已知数 r 、 n 、 n' 、 L 、 U 的函数，而是采用光线在球面上的入射角 I 和折射角 I' 作为中间参数，用一个公式组逐步由已知数求出 L' 和 U' 。下面我们就推导这样的公式组。

由图1-2，对 $\triangle APC$ 应用正弦定理得：

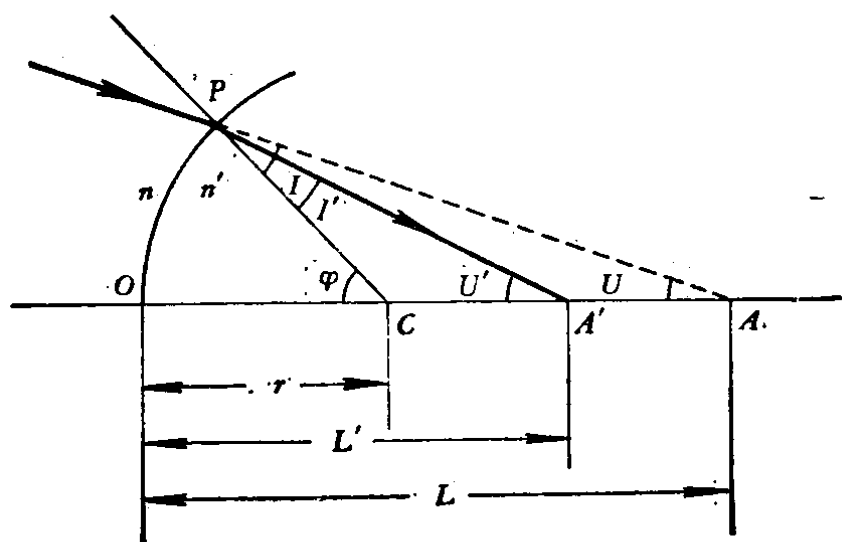


图 1-2

$$\frac{AC}{\sin I} = \frac{PC}{\sin U}$$

由图可以看到：

$$AC = L - r; \quad PC = r$$

把以上关系代入上式得：

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

由上式求解 $\sin I$ 得：

$$\sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \quad (1-2)$$

公式右边的所有参数都是已知的，因此由上式就可以求出光线的入射角 I 。有了入射角 I ，即可根据折射定律求出折射角 I' 。

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-3)$$

由图根据 $\triangle APC$ 和 $\triangle A'PC$ 得：

$$\varphi = U + I = U' + I'$$

由上式求解 U' 得：

$$U' = U + I - I' \quad (1-4)$$

式中 U 为已知， I 和 I' 前面已经求得，因此利用上式即可得出要求的 U' 。

再由 $\triangle A'PC$ ，同样应用正弦定理可以得到：

$$\frac{A'C}{\sin I'} = \frac{PC}{\sin U'}$$

和上面相似，以 $A'C = L' - r$ ， $PC = r$ 代入上式求解 L' 得：

$$L' = r + \frac{r \sin I'}{\sin U'} \quad (1-5)$$

上式右边 r 为已知， I' 、 U' 已经求出，所以能够算出要求的 L' 。这样依次应用上面四个公式(1-2)~(1-5)，就可以根据已知条件求出表示折射光线位置的坐标 L' 和 U' 。

当计算完第一个球面以后，其出射光线就是第二个球面的入射光线，如图1-3所示。由图很容易见到，以下关系成