

非成象聚光器光学

光和太阳能

〔美〕 W. T. 威尔福德 R. 维恩斯顿 著

科学出版社

79.84
410

34 226/5
非成象聚光器光学

光和太阳能

[美] W. T. 威尔福德 著
R. 维恩斯頓

王国强 译

董太和 校

科学出版社

内 容 简 介

本书在论述传统成象聚光器的基础上,讨论非成象聚光器的原理、设计和应用。全书共九章:① 聚光器的应用和一些基本概念的定义;② 几何光学的一些基本概念;③ 成象聚光器的某些设计原理;④ 非成象聚光器:复合抛物面聚光器;⑤ 基本复合抛物面聚光器的改进和发展;⑥ 非平面吸收体用复合抛物面聚光器的发展;⑦ 聚光器的形状公差;⑧ 太阳能聚光器;⑨ 非成象聚光器在其他领域中的应用。另有八篇附录,对正文中未作详细论述的有关内容作了技术上的说明。

本书可供太阳能、高能物理、红外探测等领域的科研人员、工程技术人员和大专院校师生阅读。

W. T. Welford R. Winston
**THE OPTICS OF NONIMAGING
CONCENTRATORS**

Light and Solar Energy

Academic Press, 1978

非 成 象 聚 光 器 光 学

光 和 太 阳 能

〔美〕W. T. 威尔福德 R. 维恩斯顿 著

王国强 译

董太和 校

责任编辑 陈德义

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

1987 年 10 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 10 月 第一次印刷 印张: 6 1/2

印数: 0,001—1,700 字数: 145,000

统一书号: 15031.800

本社书号: 5013·15—4

定价: 1.60 元

序 言

六十年代中期,至少在三个实验室里证实了如下事实:在许多应用场合,用非成象聚光器来收集、会聚光线(包括太阳能)要比使用传统的成象系统更为有效.设计最佳非成象光学系统的方法与传统的光学设计完全不同.新的聚光器的会聚比已非常接近于最大理论值,对于二维几何结构(这是太阳能收集中重要的结构形式),实际上已达到最大理论会聚比.

本书第一次以教科书的形式阐述了上述课题.我们的主要目的,是使本书适合于对光学几乎毫无了解而又需要设计非成象光学系统(它用于太阳能收集、高能物理、红外探测或非成象光学系统可能很有用的任一领域)的工程师和物理学家.同时,我们意识到,这一课题对于传统的光学界也不是很熟悉的,因而在本书中阐述了所有有关的基本光学理论,其做法是将叙述性和解释性的内容安排在本书正文中,而将证明性的内容安排在附录中.这样,对于想把本书用于特殊目的的人,就可以在书中找到他所需要的内容,而不必把这部分内容与纯理论区别开来.

作为聚光器的设计工具,本书基本上只涉及到几何光学.聚光器的应用,特别是太阳能利用方面的大规模应用,发展是非常迅速的.然而,其基本光学原理现在已建立起来了.

责任编辑注: 吴之林先生从国外为原书提供了勘误表, 中译本根据此勘误表做了更正. 在此谨对吴之林先生表示感谢.

致 谢

本书是根据阿根(Argonne)国家实验室负责能源和环境的副主任 E. 盖尔·匹威特(Gale Pewitt)博士 1976 年的建议写成的, 他与我们在建立非成象聚光器设计的光学原理方面进行了合作. 对于他的鼓励和支持, 我们谨表谢意. 我们还要感谢阿根国家实验室太阳能计划的负责人 R. G. 马特劳克(Matlock)博士, 感谢他对我们持续不断的关心和支持.

本书的写成要多多地感谢阿根国家实验室和芝加哥大学的太阳能小组. 我们特别感谢阿根国家实验室的阿里·勒勃尔(Ari Rabl)博士(我们与他进行了大量有益的讨论)和威廉·麦克恩泰(William McIntire)博士(第七章中非均匀照明的计算是他提供的)以及芝加哥大学的彼律兹·格林门(Peretz Greenman)先生(本书所提到的光线追迹大多是他完成的). 我们还要感谢芝加哥大学的 R. H. 希尔德伯兰(Hildebrand)教授(他对第九章给予了有价值的帮助)和雪德尼(Sydney)大学的 M. 巴塞特(Bassett)博士(我们与他进行了许多有益的讨论).

我们感谢美国能源和开发管理局的支持, 它不仅在本书的写作过程中对我们之中的 W. T. 威尔福德(Welford)给予了支持, 而且对本书所报道的大多数开发工作给予了支持. 我们之中的 R. 维恩斯頓(Winston)还感谢约翰·西蒙·古根海姆(John Simon Guggenheim)纪念基金会, 它为支持本工作而提供了研究基金.

目 录

第一章	聚光器及其用途	1
1.1	聚光器	1
1.2	会聚比的定义; 理论最大值	3
1.3	聚光器的用途	6
第二章	几何光学的一些基本概念	7
2.1	几何光学概念	7
2.2	光线追迹公式	8
2.3	成象光学系统的基本特征	11
2.4	成象光学系统的象差	13
2.5	成象光学系统象差对会聚比的影响	15
2.6	光程长度和费马原理	17
2.7	广义的通过量(即拉格朗日不变量)和相位空间的概念	19
2.8	空间光线不变量	25
2.9	会聚比的各种形式	25
第三章	成象聚光器的某些设计	27
3.1	引言	27
3.2	理想成象聚光器的某些一般特性	27
3.3	能设计出理想的成象聚光器吗?	34
3.4	折射率连续变化的介质	40
3.5	另一种球对称系统	42
3.6	反射镜成象系统	43
3.7	关于成象聚光器的几个结论	46
第四章	非成象聚光器: 复合抛物面聚光器	47
4.1	光锥	47
4.2	边缘光线原理	48
4.3	复合抛物面聚光器	48

4.4	复合抛物面聚光器的性能·····	56
4.5	锥形聚光器和抛物面聚光器·····	65
第五章	基本复合抛物面聚光器的发展和改进·····	69
5.1	引言·····	69
5.2	充满介质的全内反射复合抛物面聚光器·····	69
5.3	出射角小于 $\pi/2$ 的复合抛物面聚光器 ·····	73
5.4	用于有限远光源的聚光器·····	75
5.5	两级复合抛物面聚光器·····	78
5.6	设计用于空间光线的复合抛物面聚光器·····	80
5.7	平截复合抛物面聚光器·····	84
5.8	透镜-反射镜复合抛物面聚光器 ·····	87
第六章	非平面吸收体用复合抛物面聚光器的发展·····	90
6.1	一般二维聚光器·····	90
6.2	边缘光线原理的延伸·····	90
6.3	一些实例·····	93
6.4	聚光器面形的微分方程·····	95
6.5	二维聚光器面形的机械设计法·····	96
6.6	二维聚光器最普遍的设计法·····	99
6.7	最佳聚光器推定设计法的原理 ·····	104
第七章	聚光器的形状公差 ·····	106
7.1	光学公差 ·····	106
7.2	非成象聚光器的公差 ·····	106
7.3	光线追迹的结果 ·····	108
7.4	出射光分布的峰值 ·····	110
7.5	用于均匀照明的反射器 ·····	119
第八章	太阳能聚光器的应用 ·····	122
8.1	对聚光器的要求 ·····	122
8.2	地球-太阳的几何关系·····	123
8.3	用作第二级聚光器 ·····	138
8.4	吸收体上光照的均匀性 ·····	140
8.5	充满介质的复合抛物面聚光器在光电池上的应用 ·····	140

8.6	会聚比随季节变化的聚光器	143
第九章	非成象聚光器在其他领域中的应用	146
9.1	Čerenkov 辐射和其他辐射的收集	146
9.2	在受探测器噪声限制的探测系统中辐射的会聚	147
9.3	杂散辐射的屏蔽	150
9.4	光泵送和一般聚光问题	151
9.5	生物学模拟	152
附录 A	通过量不变量的推导和解释(包括动力学模拟法), 空间光线不变量的推导	154
A.1	广义通过量	154
A.2	广义通过量理论的证明	155
A.3	力学模拟法和 Liouville 定理	158
A.4	空间光线不变量	159
A.5	传统光度学和通过量	161
附录 B	设计理想的成象系统或轴对称非成象聚光器的不可 可能性	162
附录 C	龙伯格透镜	167
附录 D	基本复合抛物面聚光器的几何结构	173
附录 E	θ_i/θ_o 聚光器	176
附录 F	空间光线下聚光器的设计	178
F.1	微分方程	178
F.2	聚光器入射与出射面积之比	179
F.3	关于最外侧光线相交于出射孔径边缘的证明	183
F.4	关于空间光线正弦关系的另一证明	184
F.5	h 的频度分布	185
附录 G	平截复合抛物面聚光器	187
附录 H	具有非平面吸收体的二维聚光器面形的微分方程	190
参考文献		193

第一章 聚光器及其用途

1.1 聚光器

非成象聚光器现已具有数种实际用途及某些潜在的用途, 但根据其最重要的用途(即在太阳能利用中的用途)来阐述它的一般原理则较为合适. 地球表面从太阳接收到的辐射功率密度(通常以 S 表示)与许多因素有关, 其峰值约为 1 kW m^{-2} . 如果我们用一个理想黑体来吸收该辐射功率以达到收集的目的, 则理想黑体的平衡温度 T 将由下式给出*:

$$\sigma T^4 = S \quad (1.1)$$

式中, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常数, 它等于 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

在上述例子中, 平衡温度为 364 K, 即稍低于水的沸点.

该平衡温度对于太阳能的许多实际应用是足够的. 众所周知, 按照该原理制成的家用热水器现已商品化, 并安装在民宅中使用. 然而, 对于太阳能的大规模利用或太阳能发电, 就 364 K 这样的热源而言, 其热力学效率则是很低的, 因为不管热机使用什么工作流体都无法在实用上获得很大的温差. 比如说, 如果要使温度达到 $\geq 300^\circ \text{C}$ (这是产生动力电的实用温度), 根据式 (1.1) 就需要使吸收黑体上的功率密度 S 增加到 O (约等于 6~10) 倍.

简言之, 这就是聚光器的用途——增加太阳辐射的功率

* 诸如对流损失、传导损失、低有效发射率下的再辐射等各种因素均忽略不计.

密度。像这样明白地说出,问题听起来就不复杂了。解决这一问题的原理自从阿基米德及其取火镜那个时代*以来就为人们所了解:我们只要简单地用成象系统(即透镜)使太阳成象就行了,成象的结果就是增加了功率密度。所要解决的问题虽说是属于技术和实用方面的,但也产生了一些有趣的纯几何光学方面的问题。第一个问题是最大聚光能力的问题,即 C 值在理论上能达到多大的数值。这个问题在所有重要的情况下都能获得简单的答案。第二个问题,即实际上能否使聚光能力达到理论最大值的问题,却并不那么容易回答。我们将会看到,这在材料及制造技术方面都存在限制,这是我们应该预见到的。然而,实际所能设计的光学系统的类型与理论上可以实现的类型不同,也是有限制的,这与经典镜头设计中所遇到的情况是相似的。设计者有时就发现,某种技术要求之所以不能达到,是因为需要多得无法实现的折射或反射表面。但有时设计者也并不知道在原理上能否达到某种象差校正。

从事经典光学研究的物理学家所采用的一种很自然的方法是:把上述问题看作是一个设计数值孔径很大(即孔径比或 F 数很小)的成象光学系统的问题。在这方面所产生的最有趣的结果之一是存在有一类很有效的聚光器,然而在它们用作成象系统时象差却很大。不过,作为聚光器,它们比成象系统有效得多,而且能设计得达到或接近理论极限。我们将这类光学系统称为非成象会聚集光器,简称为非成象聚光器。这类光学系统与以前使用的任何一种光学系统都很不相同。它们既具有导光管的某些特性,又具有成象光学系统的某些特性,只不过象差很大。这类聚光器设计技术的发展以及对这类聚光器特性的研究使几何光学产生了一系列新的概念和新

* 关于阿基米德故事真实性的有趣讨论,请参阅参考文献 Stavroudis (1973)。

的原理。为便于这些新概念的导出,必须先概括地叙述一下几何光学中的某些基本原理,这在第二章中进行。第三章阐述了传统的成象光学系统在作为聚光器使用时的性能,并指出它们为什么必定达不到理想性能。在第四章中,我们描述了基本的非成象聚光器,即复合抛物面聚光器,并导出了它的光学性能。第五章讨论了具有平面吸收体的基本复合抛物面聚光器的几个改进,主要目的在于减小它的总长度。第六章更为详尽地研究了具有槽形几何形状的聚光器,其表面是柱形的(但不是圆柱体)。它们在使用诸如非平面形状的管形吸收体来收集太阳能时具有特殊的用途。第七章讨论了聚光器所必须达到的形状精度。第八章专门讨论了用于收集太阳能的非成象聚光器。最后,第九章简要地讨论了非成象聚光器与太阳能无关的其他几个用途。书末还有几个附录,在附录中列出了几个较复杂公式的推导过程。

1.2 会聚比的定义;理论最大值

从1.1节的简单讨论可知,聚光器的最重要性能就是入射光束面积与出射光束面积的比值,这是因为吸收体的平衡温度与该比值的四次方根成正比。我们用字母 O 表示该比值,并称它为会聚比。首先,我们将聚光器的模型设计成一个具有平面入射孔(面积为 A)和平面出射孔(面积为 A')的箱子,出射孔的面积 A' 大到刚好可使所有透过光线出射(图1.1),此时的会聚比为

$$O = A/A' \quad (1.2)$$

在上述定义中,我们显然作了如下假设:对入射光束相对于光束方向的两个横向尺寸进行了压缩,这与普通的透镜系统一样。在太阳能技术中,还有一大类使光束只在一个尺寸

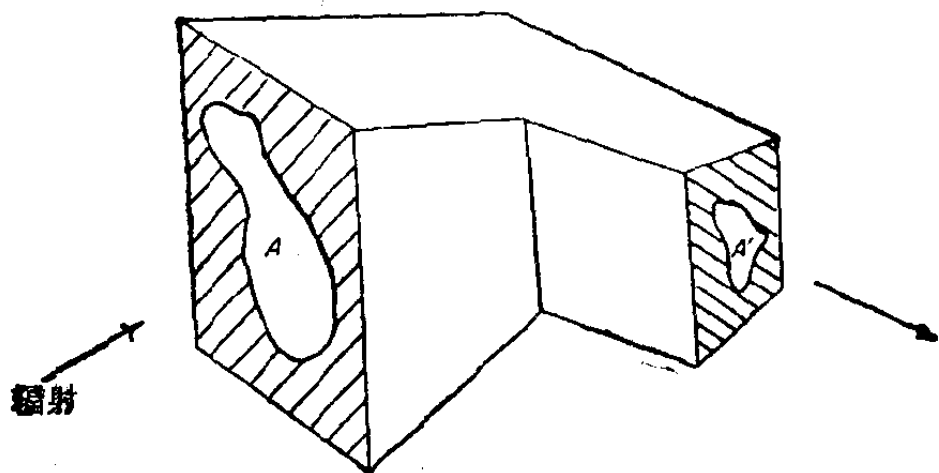


图 1.1 聚光器示意图。入射与出射表面的取向可以是任意的，图中所画的取向使我们能同时看见这两个表面。假设光孔 A' 刚好大到可使所有以小于规定集光角的入射角入射并透过内部光学系统的光线从出射光孔射出

上进行压缩的系统，图 1.2 示出了聚光器的一种典型形状，吸收体(图上没有示出)沿着槽面配置。这种长槽形聚光器的明显优点是不需要对它们进行控制，以跟踪太阳每天在天空的移动。这两种聚光器有时就分别称为三维 (3-D) 和二维 (2-D) 聚光器。二维聚光器的会聚比有时就定义为横向输入尺寸与横向输出尺寸之比 (这两个尺寸均垂直于槽体的直线形母线来度量)。

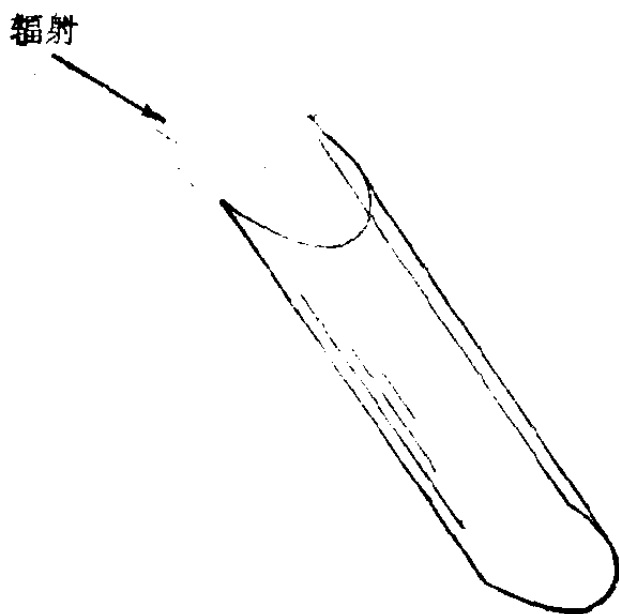


图 1.2 槽形聚光器，图中没有示出吸收体

这时立即就会产生的问题是： C 值有没有上限。我们将会看到， C 值是有上限的。以后还会证明，其结果对于二维聚光器和具有旋转对称轴的三维聚光器都是很简单的。假设入射和出射介质的折射率都等于 1，并设入射辐射由半角为 θ_i 的无限远圆形光源发出的，

则会聚比的理论最大值为

$$C_{\max} = 1/\sin^2 \theta_i \quad (1.3)$$

在上述条件下，出射光线与出射面法线的夹角均不大于 $\pi/2$ ，如图 1.3 所示。对于二维聚光器，相应的值可认为是 $1/\sin \theta_i$ 。

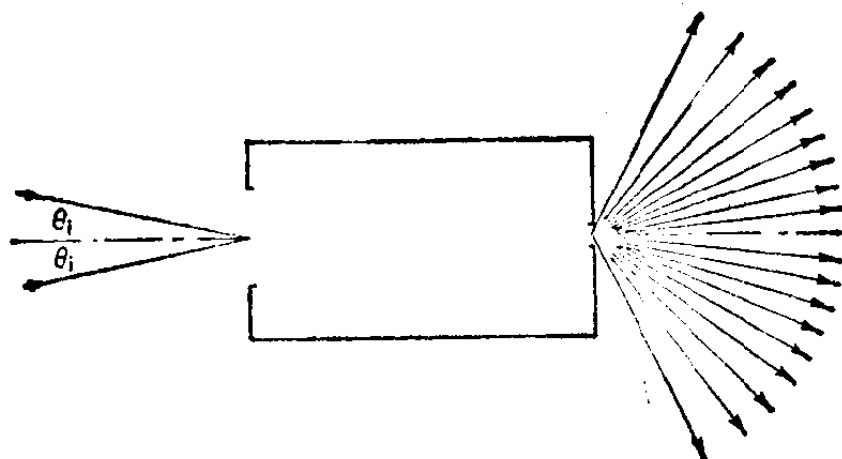


图 1.3 对称于旋转轴的三维聚光器的入射和出射光线的光路。出射光孔的直径为入射光孔直径的 $\sin \theta_i$ 倍，从出射光孔各点出射的光线位于 2π 立体角内

下一个出现的问题是能否设计出具有理论最佳性能的实用聚光器。在回答这个问题时，我们要作一些理想化的假设，例如，所有反射表面的反射率均为 100%，所有折射表面都镀上理想的减反射膜，所有形状都能加工精确，等等。这样，我们就能获得下列结论：(a) 可设计出会聚比为理论最大值的二维聚光器；(b) 三维聚光器也能设计成具有理论最大值的会聚比，只要其结构是球形对称的；(c) 具有柱面对称（即旋转轴）的三维聚光器的会聚比不可能达到理论最大值。在(c)的情况下，似乎充分增加设计的复杂性或采用折射率在理论上可能的但实际上是达不到的材料就可无限接近理论上最大的会聚比。例如，我们虽然可把材料的折射率定得很大（如等于 5），但实际上却不可能获得这种折射率如此之大而在可见光波段又没有很大吸收的材料。

1.3 聚光器的用途

当然,上述聚光器用于太阳能利用的过程使聚光器的设计和制造技术取得了最大的发展,但这决不是聚光器唯一的用途.已获得最大发展的一种特殊非成象聚光器最初被认为是一种在某个立体角范围内从发光体积(Čerenkov 计数器中的气体或液体)收集尽可能多的光,并将它们传送到光电倍增管阴极上的器件.既然光电倍增管的大小是有限的,而所研究的发光体积又约达 1 m^3 ,这就显然是一个聚光器问题(Hinterberger and Winston, 1966 a, b).

后来,这个概念被用于红外探测问题(Harpor *et al.*, 1976).在这种情况下,大家知道,对于给定的探测器,系统噪声随探测器表面面积的增加而增加(其他条件相同).

聚光器另一个不同类型的用途是用于研究人眼视网膜感光细胞的光学问题.有人(Winston and Enoch, 1971)已注意到,人眼视网膜锥状细胞的形状近似于集光角约等于暗适应条件下人眼瞳孔在视网膜上所张角度的非成象聚光器的形状.

非成象聚光器还有几种其他可能的用途,这些用途将在第九章中讨论.

第二章 几何光学的一些基本概念

2.1 几何光学概念

几何光学几乎是设计任何光学系统(成象光学系统或非成象光学系统)的基本学识。我们使用的是光线(它大致定义为光能量通过的路径)和使光发生反射和透射的表面这样一些直观的概念。当光从光滑表面反射时,它遵循大家熟知的反射定律,即入射光线和反射光线与反射表面法线的夹角相等,而且入射光线、反射光线和法线位于一个平面内。当光透射时,光线方向的变化遵循折射定律,即斯涅尔定律(Snell's law)。该定律的内容如下:法线和入射光线之间夹角的正弦与法线和折射光线之间夹角的正弦之比为一常数,而且入射光线、折射光线和法线的方向是共面的。

设计和分析聚光器时所要做的一项主要工作是光线追迹,即跟踪光线通过一个由反射、折射表面所组成的系统时的路径。这是传统镜头设计中大家熟知的一种方法。但在聚光器的情况下要求就稍有不同,因此从头来阐述、推导光线追迹的方法是合适的。这是因为在传统的镜头设计中所涉及的反射或折射表面几乎总是球面的一部分,而且球面的球心位于一条直线上(即对称光学系统),从而可利用表面形状的简单性及对称性而使用一些特殊的方法。一般说来,非成象聚光器不使用球面。事实上,这些表面虽然通常都具有对称轴或对称平面,但有时连表面形状的明显解析式都没有。我们将会发现,发展以矢量公式为基础的光线追迹方法是非常合适

的，但在以每一不同形状为特定基础的计算机程序中却要涉及到一些具体细节。

在几何光学中，我们用光线与某一表面交点的密度来表示通过该表面的能量密度，并用光线数表示总能量。应用这一概念（它使我们想起静电学中那个有用但已过时的“力线”概念）的方法如下。如图 2.1 所示，取 N 条以入射角 θ 入射到聚光器入射孔径上的光线，而且光线间的间隔相等。假设在对这些光线通过系统进行追迹后只有 N' 条光线从出射孔径（出射孔径的大小由所希望的会聚比确定）出射，其余的 $N - N'$ 条光线会因某些过程（这些过程在我们分析了一些实例之后就会明白）而损失掉了。因此，入射角为 θ 时的能量透过率为 N'/N 。这可按需要扩展到一系列的 θ 角。显然 N 必须取得足够大，以保证对聚光器中可能的光线路径进行透彻的研究。

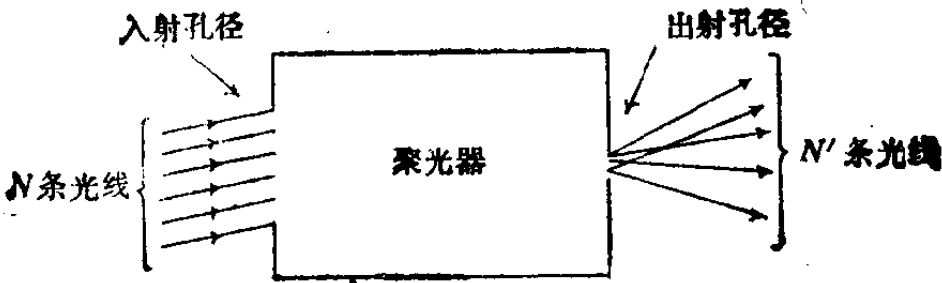


图 2.1 用光线追迹来确定聚光器的能量透过率

2.2 光线追迹公式

为导出各种情况下都适用的光线追迹公式，用矢量形式来表示反射定律和折射定律是方便的。图 2.2 示出了沿入射光线的单位矢量 $\mathbf{r}$ 、沿反射光线的单位矢量 $\mathbf{r}'$ 和沿指向反射表面的法线的单位矢量 $\mathbf{n}$ 之间的几何关系。如图所示，容易证明反射定律可由如下矢量方程表示：

$$\mathbf{r}'' = \mathbf{r} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r})\mathbf{n} \quad (2.1)$$

因而,要“通过”反射表面进行光线追迹,首先必须找到入射点,这是一个与入射光线的方向和表面的已知形状有关的几何问题;其次,必须找到入射点处的法线,这又是一个几何问题;最后,必须用式

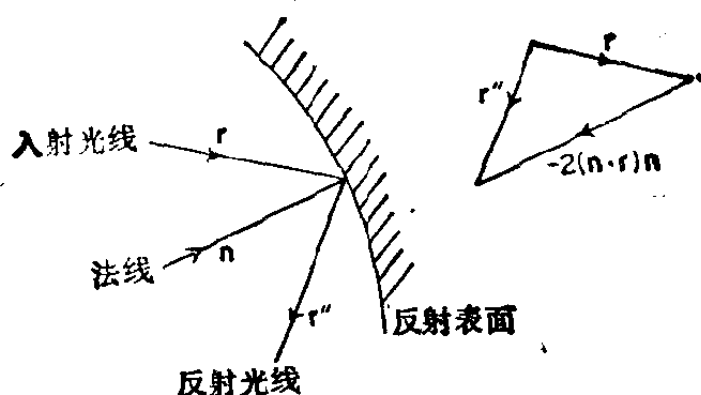


图 2.2 反射定律的矢量公式, $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}''$ 和 $\mathbf{n}$ 都是单位矢量

(2.1)来找出反射光线的方向. 如果要考虑另一条入射光线的反射问题,就重复上述过程即可. 图 2.3 示出了上述过程的各个步骤. 在进行数值计算时,单位矢量自然要用其分量来表示,也就是使用光线或法线在某一确定反射表面形状的直角坐标系中的方向余弦来表示.

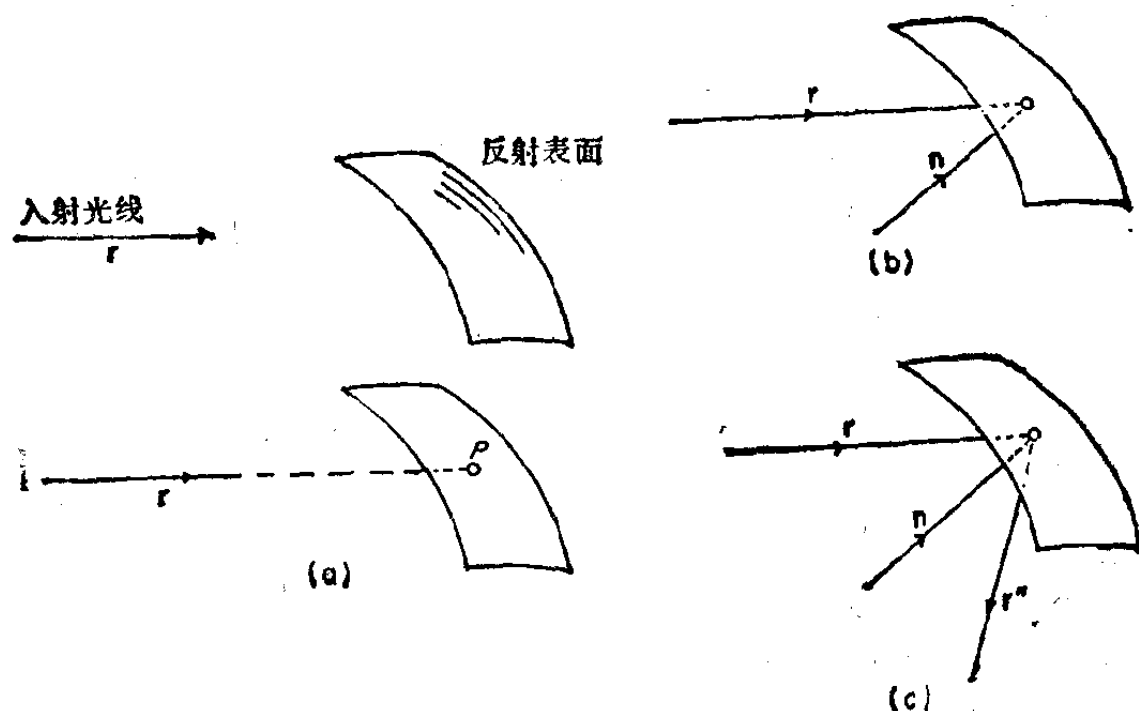


图 2.3 反射时光线追迹的步骤: (a) 找出入射点 P ; (b) 找出 P 点处的法线; (c) 使用式(2.1)找出反射光线 $\mathbf{r}''$

• 9 •