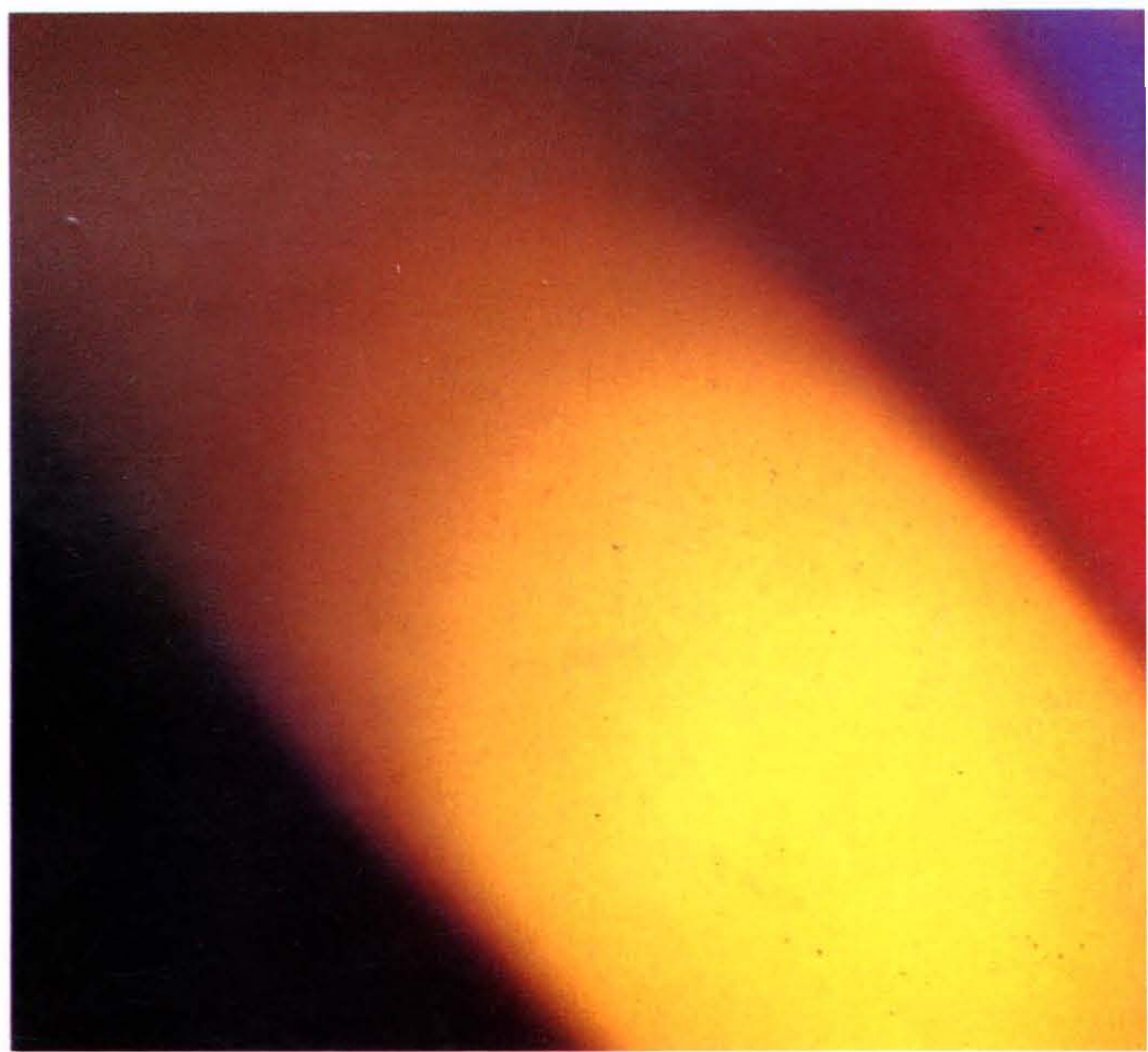


袁旭沧 编著

现代光学 设计方法



北京理工大学出版社

现代光学设计方法

袁旭沧 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是国家教委重点教材。全书把光学设计建立在使用电子计算机和光学自动设计程序的全新的技术基础上,既反映了光学设计学科的最新技术进步,又吸取了光学设计学科原有成果的精华。内容包括:光学设计中的像质评价;光学自动设计原理与程序;像差理论;典型光学系统设计。书中共有十几种典型光学系统的具体设计过程和设计数据,供读者参考;与该书配套使用的计算机软件 SOD4.0(SOD88 的更新版)将在我社同时出版,更便于教学和读者自学。本书可作为高等学校光学技术与光电仪器专业及有关其他专业的教材,亦可作为光学设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代光学设计方法/袁旭沧编著. —北京:北京理工大学出版社,1995

ISBN 7-81045-047-6

I. 现… II. 袁… III. 光学-计算机辅助设计 IV. 043-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 10496 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 9 印张 229 千字

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月第一次印刷

印数:1—1500 册 定价:13.00 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

前 言

本书取名“现代光学设计方法”，读者很可能提出这样的问题：它和现有光学设计书籍有什么区别？主要有以下两个方面的差别：

第一，光学设计在近 40 多年来，经历了一个由人工设计（人工计算像差、人工修改结构参数进行设计）到光学自动设计（使用电子计算机和光学自动设计程序进行设计）的飞跃。现有的光学设计书大多仍停留在人工设计的基础上，已不符合当前实际工作的要求。本书则是完全建立在使用计算机进行光学自动设计的新的技术基础上。对原有光学设计的内容根据自动设计的需要进行了精选，删去了那些只对人工设计有用而现在已没有实用价值的内容；对于在自动设计中仍有指导意义的内容进行了精简和提高；增加了有关光学自动设计的数学原理和程序构成方面的知识，使设计者能更好地掌握光学自动设计程序的使用。

第二，本书内容着重在讲解如何使用光学自动设计程序设计各种典型光学系统的具体方法。那些在光学自动设计工作中仍然有用的像差理论和公式，着重介绍它们在设计过程中的应用，省去不少烦琐的推导过程，大大压缩了全书的篇幅。本书的目的就是要使读者在较短时间内，依靠电子计算机和光学自动设计程序能完成大多数基本类型光学系统的设计工作。

本书是这方面的一个新的尝试和开端。作者希望在此基础上逐步完善和发展，使光学设计由不易掌握的“艺术”，变成较易掌握的实用化技术。不妥之处望读者提出宝贵意见。

作 者

1995.2 于北京

目 录

| | |
|---|------|
| 绪言 | (1) |
| 第一章 光学系统像质评价 | (3) |
| § 1-1 概述 | (3) |
| § 1-2 共轴光学系统的结构参数和光学特性参数 | (4) |
| § 1-3 用几何像差评价光学系统的成像质量 | (13) |
| § 1-4 几何像差的曲线表示 | (28) |
| § 1-5 用波像差评价光学系统的成像质量 | (33) |
| 第二章 光学自动设计原理和程序 | (35) |
| § 2-1 概述 | (35) |
| § 2-2 光学自动设计中的最优化方法 | (39) |
| § 2-3 阻尼最小二乘法光学自动设计程序 | (44) |
| § 2-4 怎样使用阻尼最小二乘法程序进行光学设计 | (54) |
| § 2-5 适应法光学自动设计程序 | (60) |
| § 2-6 怎样使用适应法程序进行光学设计 | (66) |
| 第三章 薄透镜系统的初级像差理论 | (70) |
| § 3-1 概述 | (70) |
| § 3-2 薄透镜系统的初级像差方程组 | (72) |
| § 3-3 薄透镜组像差的普遍性质 | (76) |
| § 3-4 像差特性参数 P, W, C 的规化 | (79) |
| § 3-5 单透镜的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty, \bar{C}$ 和结构参数的关系 | (81) |
| § 3-6 双胶合透镜组结构参数的求解 | (85) |
| § 3-7 平行玻璃板的初级像差公式 | (87) |
| § 3-8 单透镜像差性质的讨论 | (89) |
| § 3-9 光学系统消场曲的条件——petzval 条件 | (95) |
| 第四章 望远物镜设计 | (98) |
| § 4-1 望远物镜设计的特点 | (98) |

| | | |
|--------------|-----------------------------|--------------|
| § 4-2 | 用初级像差求解双胶合望远物镜的结构参数 | (100) |
| § 4-3 | 用适应法光学自动设计程序设计双胶合望远物镜 | (106) |
| § 4-4 | 高级像差 | (112) |
| § 4-5 | 二级光谱色差 | (116) |
| § 4-6 | 大相对孔径望远物镜设计 | (118) |
| § 4-7 | 摄远物镜设计 | (129) |
| § 4-8 | 望远物镜像差的公差 | (138) |
| 第五章 | 显微物镜设计 | (147) |
| § 5-1 | 显微物镜设计的特点 | (147) |
| § 5-2 | 显微物镜的类型 | (150) |
| § 5-3 | 低倍消色差显微物镜设计 | (155) |
| § 5-4 | 中倍消色差显微物镜设计 | (162) |
| § 5-5 | 显微物镜像差的公差 | (174) |
| 第六章 | 目镜设计 | (178) |
| § 6-1 | 目镜设计的特点 | (178) |
| § 6-2 | 常用目镜的型式和像差分析 | (183) |
| § 6-3 | 冉斯登、惠更斯和凯涅尔目镜设计 | (191) |
| § 6-4 | 对称式目镜和无畸变目镜设计 | (203) |
| § 6-5 | 广角目镜设计 | (209) |
| § 6-6 | 目视光学系统像差的公差 | (219) |
| 第七章 | 照相物镜设计 | (226) |
| § 7-1 | 照相物镜的光学特性和结构型式 | (226) |
| § 7-2 | 照相物镜设计的特点 | (232) |
| § 7-3 | 用适应法自动设计程序设计反摄远物镜 | (235) |
| § 7-4 | 用阻尼最小二乘法自动设计程序设计双高斯物镜 | (253) |
| § 7-5 | 照相物镜像差的公差 | (265) |
| 附录 | | (270) |
| 附表 1 | 双胶合透镜玻璃光学常数表 | (270) |
| 附表 2 | 双胶合透镜 P_0 、 Q_0 表 | (271) |
| 主要参考书 | | (281) |

绪 言

光学设计在最近 40 多年来,经历了由人工计算和人工校正像差,到计算机计算像差和像差自动校正的巨大变革。在人工计算时期,设计一个光学系统需要相当长的时间,在校正像差过程中,很大程度上要依靠设计人员的经验和像差理论知识。当时人们把光学设计看作是一个介于科学技术和艺术之间的学问,似乎设计能否获得成功,要靠设计者的艺术灵感。设计出一种新结构的光学系统就是一个发明。电子计算机出现以后,很快被用来替代人工计算像差,并进一步发展成为像差自动校正。只要原始系统选择合理,像差自动校正程序能很快得出要求的设计结果。设计人员不必了解光学设计软件的编制方法和程序自动进行像差校正的具体过程。因此借助光学自动设计程序,在计算机上设计一些一般性能的光学系统已变得相当简单。光学设计已经由少数人掌握的艺术,变成了一门较易掌握的实用技术。设计人员的经验和理论知识的作用已相对降低。因此光学设计课程和光学设计教材需要进行改造。

现有的光学设计教材,基本上还是按过去人工计算和人工校正像差的方式编写的,不仅篇幅大,而且不少内容在使用自动设计程序的情况下已失去实用价值,同时也不符合当前教学改革的要求。因为现代光电仪器是光、机、电、算的综合体,学生所要学的知识面宽,知识量大,每门课程的学时数大大减少。原有教材往往不能适应客观的需要。本教材正是为了满足上述要求而编写的。

本课程是在学生已经学了“应用光学”课程之后的一门选修课,要求学生具备几何光学的基础知识。总学时约 50 学时,课堂讲授和做设计练习各占一半。因此,如何精选教材成了十分突出的问题,我们采取了以下两个原则。

(1)本课程的目的是让学生掌握基本的光学设计方法和基本

类型系统的设计,依靠光学自动设计程序能独立完成一般光学系统的设计工作。重点是介绍具体的设计方法和设计过程。有关的光学设计理论着重在如何应用,而对它的具体推导过程则尽量简略,甚至只介绍相应的参考书,而直接引用其结果。

(2)目前光学设计已离不开计算机和光学设计软件。因此把讲授光学设计和介绍所用的软件结合起来进行,往往能收到事半功倍的效果。本教材主要是结合北京理工大学技术光学教研室研制的微机用光学设计软件包 SOD88(见参考书〔1〕)来编写的。不同的光学设计软件虽有差别,但也有其基本共同点,因此本教材仍有其普遍性。

本书内容可分为四个部分:第一部分是光学系统像质评价,这是光学设计的基础知识。第二部分是光学自动设计原理和程序(即像差自动校正),这部分内容的目的是使设计者更快、更好的掌握光学自动设计程序的使用方法和处理设计过程中出现的问题,并不是为研制光学自动设计程序。第三部分是薄透镜系统的初级像差理论,它是像差理论研究中最有实用价值的成果,在使用光学自动设计程序设计光学系统的过程中,对求解原始系统结构参数,选择原始系统的结构型式,以及确定加入校正的像差参数等一系列问题,像差理论都能发挥重要的作用。在像差理论指导下使用光学自动设计程序,可以使光学自动设计更充分发挥出它的威力。第四部分是基本类型系统的设计。这里介绍的设计方法,完全是结合光学自动设计程序的运用进行的。共有十多个典型光学系统的设计例子,都是按照实际设计的过程来叙述的,可以作为设计工作的参考,或者用作自动设计的原始系统,它们的设计结果也都达到了较好的水平。

本书对从事光学设计软件的研制和光学设计理论研究,或者专门从事特殊类型复杂光学系统设计工作的人来说,显然是不够的。他们还必须学习更多的有关光学设计理论和光学自动设计的专著。但本书可作为他们的入门教材。

第一章 光学系统像质评价

§ 1-1 概述

凡是使用光进行工作的仪器,无论是可见光、红外光,还是紫外光,都有一个光学系统。光学系统的作用是把目标发出的光,按仪器工作原理的要求,改变它们的传播方向和位置,送入仪器的接收器,从而获得目标的各种信息,包括目标的几何形状,能量强弱等等。不同仪器光学系统的工作原理和构成方式各不相同,有关这方面的问题在应用光学课程中已经介绍。在应用光学中,每个透镜组都用它的主面和焦距(即主面和焦点位置)来代表,并假定每个透镜组都是一个理想光学系统。利用理想光学系统的公式,就可以计算出系统中各个透镜组要求的焦距、通光孔径、成像的位置和大小等一系列参数。至于透镜组的具体结构参数,例如透镜表面的曲率半径、厚度、各透镜之间的间隔和所用的玻璃材料等都没有考虑。因此既不能进行透镜组的加工制造,也不能设计仪器的机械结构。因为不同结构的透镜组尽管它们的焦距和通光孔径相同,但是主面之间的间隔和透镜组中每个透镜的实际尺寸,可能有很大差别。因此我们必须确定透镜组的具体结构参数,这就是“光学设计”课程所要解决的问题。

为了设计出透镜组的具体结构参数,首先必须明确对透镜组的技术要求。对透镜组的要求主要有两个方面。

(1)光学特性:包括该透镜组的焦距、物平面位置、光束孔径、成像范围(物高或像高)。这些要求在理想光学系统计算过程中就已经确定。

(2)成像质量的要求:光学系统除了满足光学特性的要求而外,一般还要满足成像质量的要求,即要求成像清晰和物像相似。

一个透镜组如果仅仅满足光学特性的要求是很容易的事,简单的一个薄透镜就可以达到。但是要保证成像质量优良就不那么简单了。单个透镜往往不能满足要求,必须采用两个或多个透镜组合起来,才能达到要求的成像质量。光学设计的任务就是根据对透镜组的两个方面的要求确定透镜组的结构参数。其中最困难的是如何保证它的成像质量。

为了保证光学系统的成像质量,首先要找出在设计过程中用来评价系统成像质量的方法和指标,使设计人员在制造出实际的系统以前就能预先确定其成像质量的优劣。因此如何在设计过程中评价光学系统的质量是光学设计首先要解决的问题,这就是本章的内容。

现有光学自动设计程序中,主要使用几何像差和波像差这两种像质评价方法,本章将介绍这两种方法。为了评价一个已知光学系统的质量,必须首先解决根据系统结构参数和光学特性的要求,计算出它的像质指标——几何像差、波像差。这些计算目前都有成熟的计算机程序可供使用。一般的光学设计人员不必具体了解它们的计算方法和计算过程,只需要知道这些程序所要输入的参数,按规定要求,输入这些参数后,启动程序即可获得所要求的计算结果。本章的重点是介绍程序要求的输入参数和它的输出结果,而不介绍它们的具体计算公式。这方面的内容读者可看参考文献[2]。

§ 1-2 共轴光学系统的结构参数 和光学特性参数

为了评价一个已知光学系统的质量,必须确定用哪些参数来描述系统的结构和要求的光学特性。本节介绍共轴光学系统的结构参数和光学特性参数。

一、共轴光学系统的结构参数

共轴光学系统的最大特点是系统具有一条对称轴——光轴。系统中每个曲面都是轴对称曲面，它们的对称轴均与光轴重合，如图 1-1 所示。系统中每个曲面的形状用方程式(1-1)表示，所用坐标系如图 1-2。

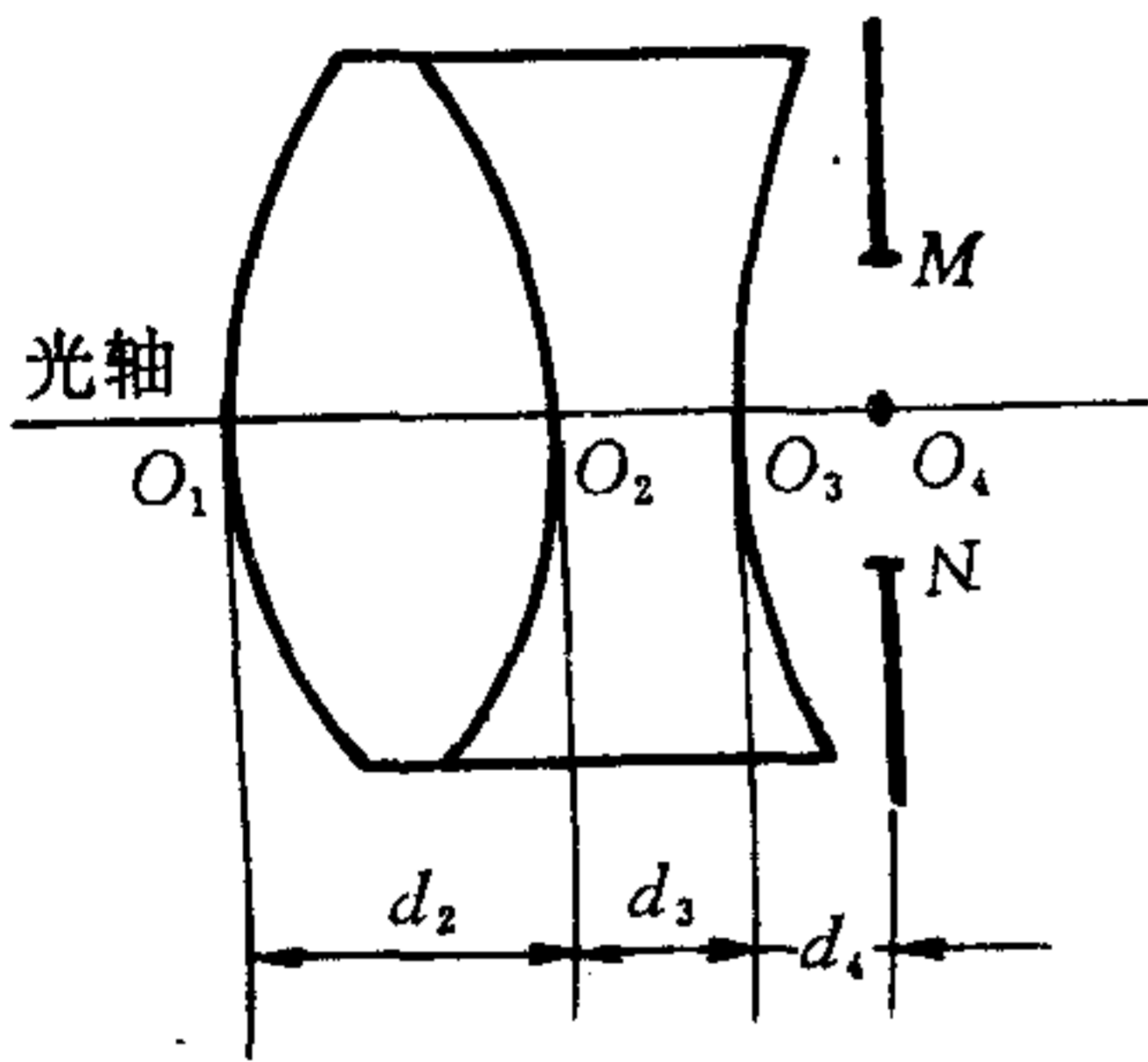


图 1-1

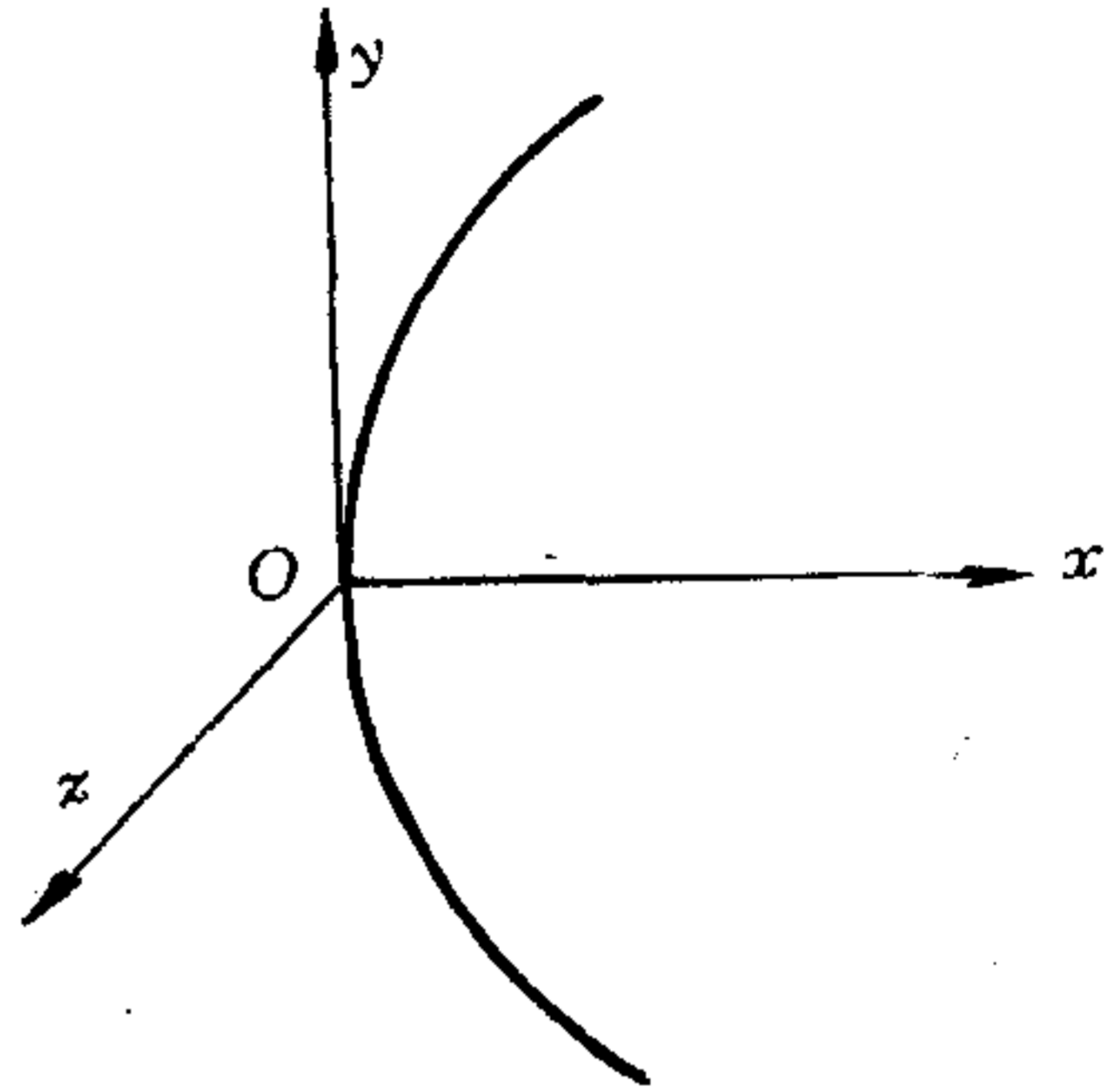


图 1-2

$$X = \frac{cH^2}{1 + \sqrt{1 - Kc^2H^2}} + a_4H^4 + a_6H^6 + a_8H^8 + a_{10}H^{10} + a_{12}H^{12} \quad (1-1)$$

$$H^2 = Y^2 + Z^2$$

式中 c 为曲面顶点的曲率； K 为二次曲面系数； $a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ 为高次曲面系数。

以上方程可以普遍的表示球面、二次曲面和高次曲面。公式右边第一项代表基准二次曲面，后面各项代表曲面的高次项。基准二次曲面系数 K 值不同，代表不同的二次曲面如表 1-1 所示。

表 1-1

| K 值 | $K < 0$ | $K = 0$ | $0 < K < 1$ | $K = 1$ | $K > 1$ |
|-----|---------|---------|-------------|---------|---------|
| 面形 | 双曲面 | 抛物面 | 椭球面 | 球面 | 扁球面 |

顶点曲率 c 相同, 但 K 值不同的各种曲面在 xy 坐标面内的形状如图 1-3 所示。

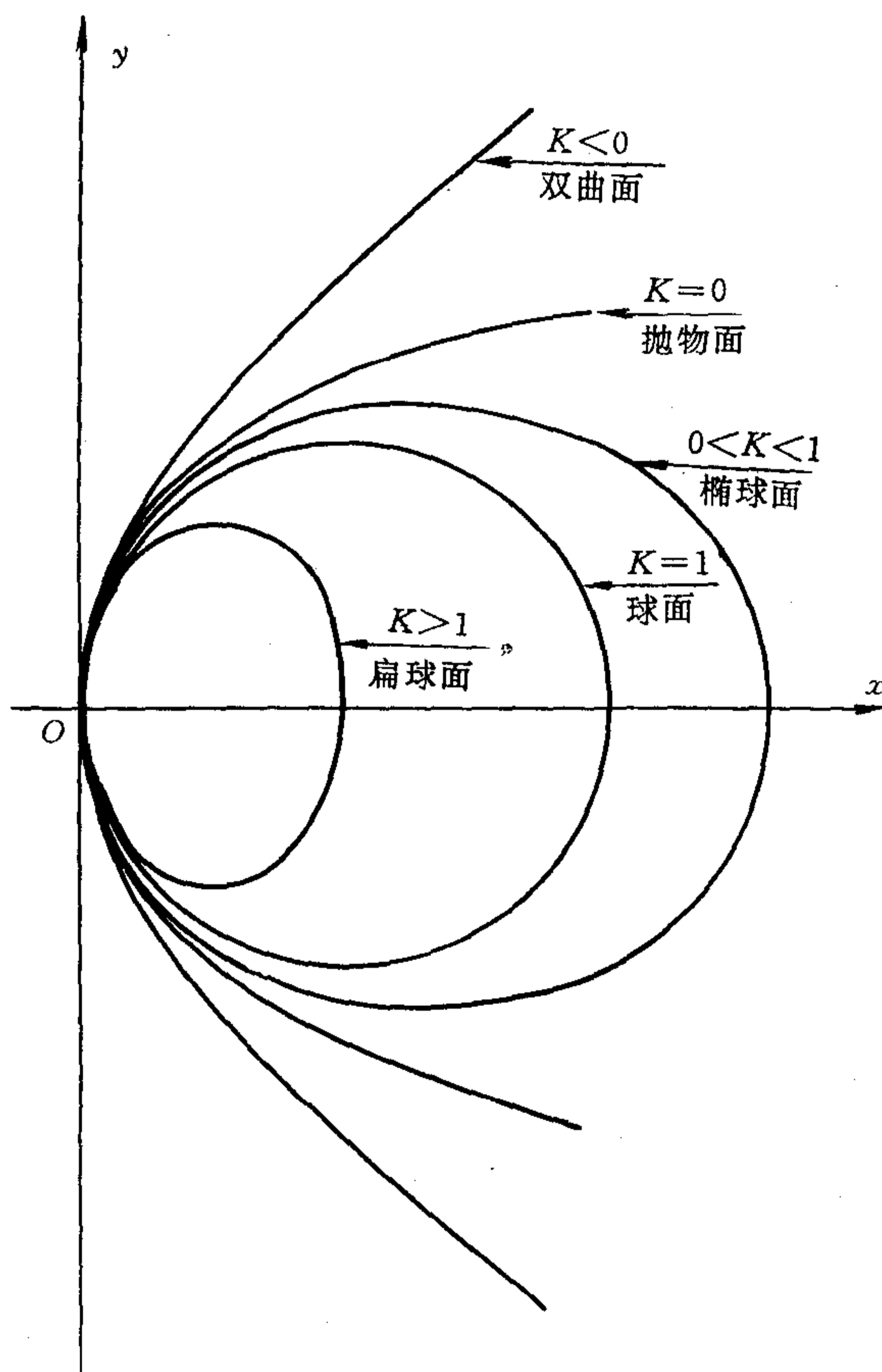


图 1-3

不同的面形, 对应不同的面形系数, 例如:

球面: $K = 1, a_4 = a_6 = a_8 = a_{10} = a_{12} = 0$

二次曲面: $K \neq 1, a_4 = a_6 = a_8 = a_{10} = a_{12} = 0$

实际光学系统中绝大多数为球面, 在计算机程序中为了简便

直观,对球面只给出曲率半径 r ($r=1/c$) 一个参数。平面相当于半径等于无限大的球面,在程序中以 $r=0$ 代表,因为实际半径不可能等于零。对非球面除给出顶点曲率半径 r 外,再给出面形系数 $K, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ 的值。

如果系统中有光阑,如图 1-1 中 MN 所示,则把光阑作为系统中的一个平面来处理。

各曲面之间的相对位置,依次采用它们顶点之间的距离 d 表示,如图 1-1。

系统中各曲面之间介质的光学性质,用它们对指定波长光线的折射率 n 表示。大多数情况,进入系统成像的光束,包含一定的波长范围。为了全面评价该系统的成像质量,必须从整个波长范围内选出若干个波长,分别给出系统中各介质对这些波长光线的折射率,然后计算每个波长的像质指标,综合评定系统的成像质量。一般选出 3~5 个波长。当然对单色光成像的光学系统只须计算一个波长就可以了。波长的选取随仪器所用的光能接收器不同而改变,例如用人眼观察的目视光学仪器采用 C (656.28nm)、 D (589.30nm)、 F (486.13nm) 三种波长;用感光底片接收的照相机镜头,则采用 C 、 D 、 g (435.83nm) 这三种波长。

有了每个曲面的面形参数 ($r, K, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$) 和各面顶点间距 (d) 以及每种介质对指定波长的折射率 (n),给出入射光线的位置和方向,就可以应用几何光学的基本定律计算出该光线通过系统以后的出射光线的位置和方向。确定了系统的结构参数,系统的焦距和主面位置也就确定了。

二、光学特性参数

仅仅有了系统的结构参数,还不能对系统进行确切的像质评价,因为成像质量评价必须在给定的光学特性下进行。如果不符合要求的光学特性,则成像质量的评价便失去意义。这些光学特性包括如下内容:

1. 物距 L

同一个透镜组用来对不同位置的物平面成像时,它的成像质量是不一样的。从理论上说我们不可能使同一个光学系统对两个不同位置的物平面同时校正像差。一个光学系统只能用于对指定的物平面成像。例如望远镜只能对远距离物平面成像;显微物镜只能用于指定倍率的共轭面(即指定的物平面)成像。离开这个位置的物平面,成像质量就要下降。因此在设计光学系统时,必须首先明确该系统是用来对哪个位置的物平面成像的。

表示物平面位置的参数是物距 L ,它代表从系统第一面顶点 O_1 到物平面 A 的距离,符号是向左为负,向右为正,如图 1-4 所示。

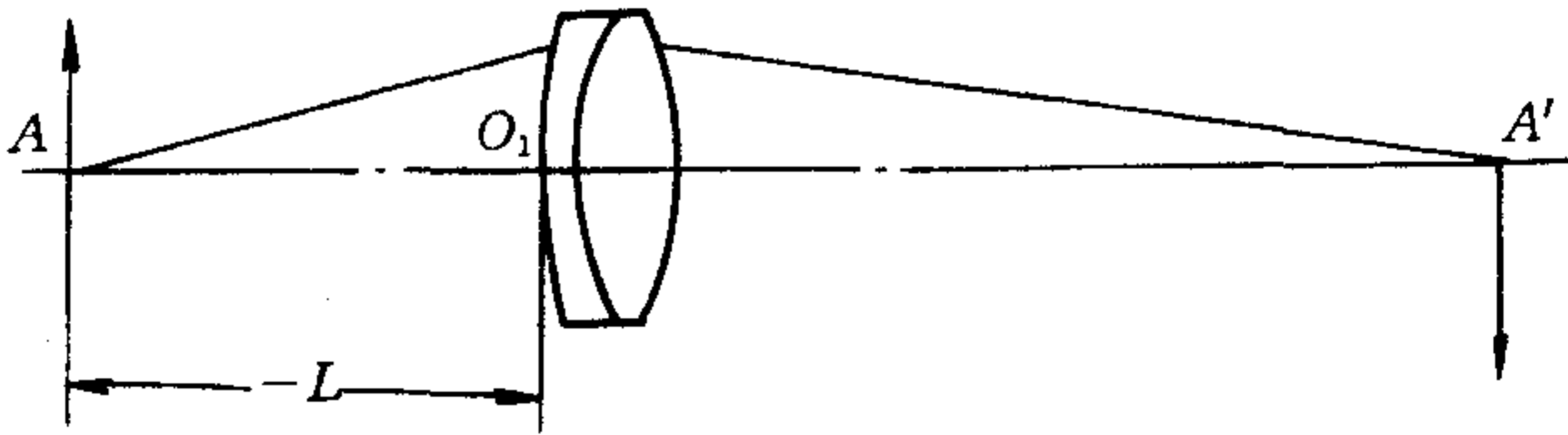


图 1-4

当物平面位在无限远时,在计算机程序中一般用 $L=0$ 代表。如果物平面与第一面顶点重合,则 L 用一个很小的数值代替,例如 10^{-5}mm ,或更小。

2. 物高 y 或视场角 ω

实际光学系统不可能使整个物平面成像清晰,只能使光轴周围的一定范围成像清晰。因此在评价系统的成像质量时,只能在要求的成像范围内进行。所以在设计光学系统时,也必须指出它的成像范围。表示成像范围的方式有两种。当物平面位在有限距离时成像范围用物高 y 表示;物平面位在无限远时成像范围用视场角 ω 表示,如图 1-5(a)(b)所示。

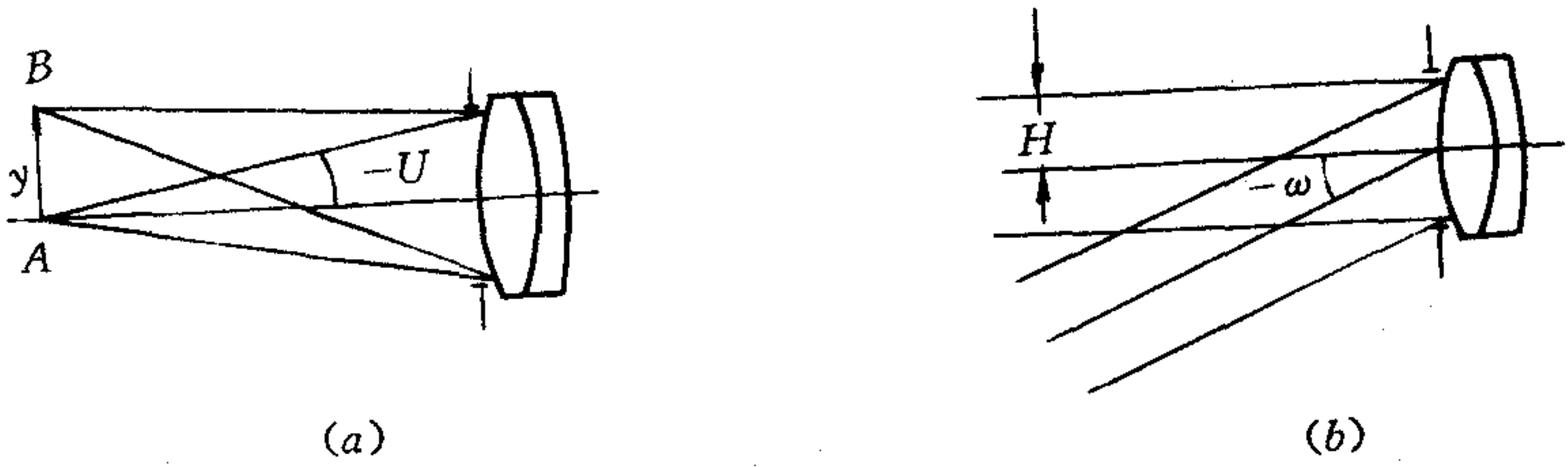


图 1-5

3. 物方孔径角正弦($\sin U$)或光束孔径高(H)

实际光学系统只能对指定的物平面上光轴周围一定范围内的物点成像清晰,而且每个物点进入系统成像的光束孔径大小也有限制。只能保证在一定孔径内的光线成像清晰,孔径外的光线成像就不清晰了。因此必须在指定的孔径内评价系统的像质。所以在设计光学系统时,必须给出要求的光束孔径。

当物平面位在有限距离时,光束孔径用轴上点边缘光线和光轴夹角的正弦($\sin U$)表示;物平面位在无限远则用轴向平行光束的边缘光线孔径高(H)表示,如图 1-5(a)(b)所示。

4. 孔径光阑或入瞳位置

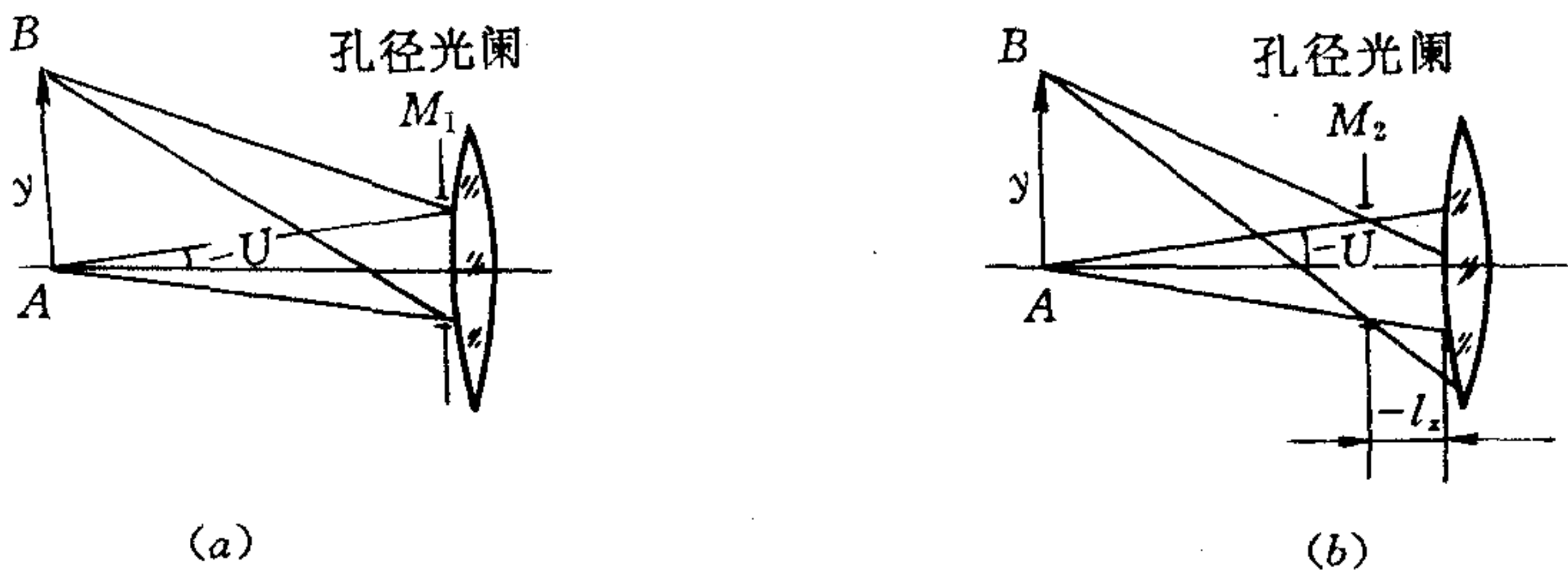


图 1-6

对轴上点来说,给定了物平面位置和光束孔径 $\sin U$ 或 H ,则进入系统的光束便完全确定,就可以确切地评价轴上点的成像质量。但对轴外物点来说,还有一个光束位置的问题。如图 1-6(a)和

(b)中,两个光学系统的结构、物平面位置和轴上点光束的孔径 U 都是相同的,但是限制光束的孔径光阑 M_1 和 M_2 的位置不同,轴外点 B 进入系统成像的光束改变。当光阑由 M_1 移动到 M_2 时,一部分原来不能进入系统成像的光线能进入系统了;反之,一部原来能进入系统成像的光线,不能进入系统了。因此对应的成像光束不同了,成像质量当然不同了。所以在评价轴外物点的成像质量时,必须给定入瞳或孔径光阑的位置。入瞳的位置用从第一面顶点到入瞳面的距离 l_z 表示,符号规则同样是向左为负向右为正,如图1-6(b)所示。如果给出孔径光阑,则把光阑作为系统中的一个面处理,并指出哪一面是系统的孔径光阑。在系统结构确定的条件下给出孔径光阑就可以计算入瞳位置。在我们的程序中把入瞳到系统第一面顶点的距离作为系统的第一个厚度 d_1 ,它应等于 $-l_z$ 。实际透镜的第一个厚度为 d_2 如图1-1所示。

5. 渐晕系数或系统中每个面的通光半径

实际光学系统视场边缘的像面照度一般允许比轴上点适当降低。这一方面是因为要把轴外光束的像差校正得和轴上点一样好,往往是不可能的。为了保证轴外点的成像质量,把轴外子午光束的宽度适当减小。另一方面,为了减小某些光学零件的直径,也把轴外子午光束的宽度减小。这种现象称为“渐晕”。为了使光学系统的像质评价更符合系统的实际使用情况,必须考虑轴外像点的渐晕。表示系统渐晕状况有两种方式,一种是渐晕系数法,另一种是给出系统中每个通光面的实际通光半径,下面分别介绍。

渐晕系数法是给出指定视场轴外点成像光束的上、下光的渐晕系数。如图1-7所示,孔径光阑在物空间的共轭像为 $M'N'$,轴上点 A 的光束充满了入瞳 $M'N'$,轴外点 B 的成像光束由于孔径光阑前后两个透镜通光直径的限制,使子午面内的上光和下光不能充满入瞳,因而存在渐晕。

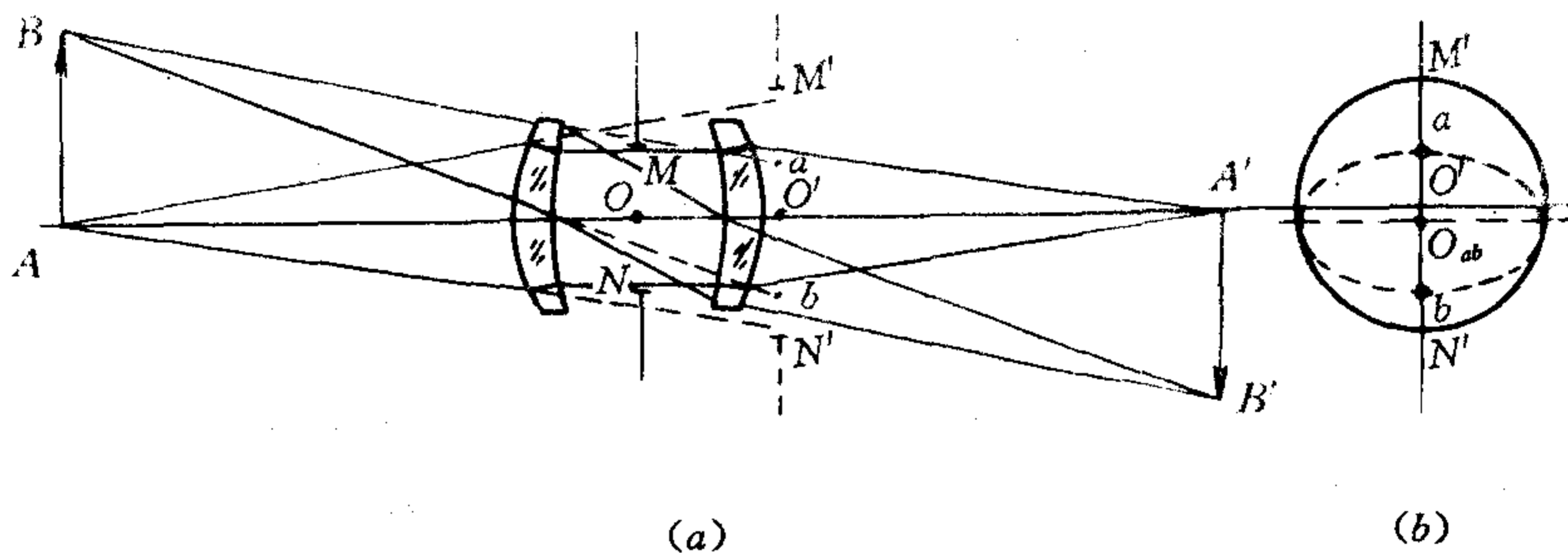


图 1-7

我们从侧视图中可以看到实际通光情况,图中直径为 $M'N'$ 的圆为轴上点的光束截面,子午面内上光的宽度为 $\overline{O'a}$,下光的宽度为 $\overline{O'b}$,对应上下光的渐晕系数为

$$K^+ = \frac{\overline{O'a}}{\overline{O'M'}} \quad K^- = \frac{-\overline{O'b}}{\overline{O'M'}}$$

这时实际子午光束的中心为 O_{ab} ,一般我们把有渐晕的成像光束截面近似用一个椭圆代表,如图 1-7(b)中虚线所示。椭圆的中心为 a, b 的中点 O_{ab} ,它的短轴为

$$\overline{O_{ab}a} = \overline{O_{ab}b} = \frac{K^+ - K^-}{2} \overline{O'M'}$$

椭圆的长轴为弧矢光束的宽度,一般近似等于 $\overline{O'M'}$ 。用这样的椭圆近似代表轴外点的实际通光面积进行系统的像质评价。

用渐晕系数来描述轴外像点的实际通光状况,显然有一定误差。如果需要对系统进行更精确的评价,则用另一种方式确定轴外点的实际通光面积。这就是给出系统中每个曲面的通光半径 H ,计算机通过大量计算光线确定出能通过系统成像的实际光束截面,例如图 1-7(a)的系统,直接给出第一面至第五面(包括光阑面)的通光半径 $H_1 \cdots H_5$ 。程序能自动把轴外点对应的实际光束截面计算出来。这种方式主要是用于最终设计结果的精确评价。而