



工业和信息化部“十四五”规划教材

光学设计教程

(第3版)

黄一帆 李 林◎著

OPTICAL DESIGN
(3RD EDITION)

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

和信息化部“十四五”规划教材

光学设计教程

(第3版)

黄一帆 李 林◎著

OPTICAL DESIGN
(3RD EDITION)

内 容 简 介

本书系统论述了光学系统设计的基本理论及方法。全书共分 10 章,内容包括光学系统像质评价、光学自动设计原理和程序、Zemax 光学设计软件的应用、薄透镜系统的初级像差理论以及望远物镜、显微物镜、目镜和照相物镜等典型光学系统、其他新型光学系统设计方法和光学零件加工工艺。书中各章均附有适量习题,供读者复习及上机实际操作之用。

本书可作为光学专业本科生和研究生的专业课教材,也可供从事光学系统及光电仪器设计、研制的专业技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

光学设计教程 / 黄一帆, 李林著. — 3 版. — 北京:
北京理工大学出版社, 2022.10
工业和信息化部“十四五”规划教材
ISBN 978-7-5763-1764-0

I. ①光… II. ①黄… ②李… III. ①光学设计—高
等学校—教材 IV. ①TN202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 186774 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 23.5

字 数 / 552 千字

版 次 / 2022 年 10 月第 3 版 2022 年 10 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 刘 派

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

本书是光电信息科学与工程、测控技术与仪器等专业的专业课程——“光学设计”的教学用书。“光学设计”课程旨在让学生掌握光学系统及光电仪器设计的基本理论和实际知识，学习光学设计的像差理论和像差校正方法，熟练运用光学自动设计软件对各类典型光学仪器进行设计。针对这一目标，本书从理论和实践两方面出发，系统阐述了光学设计的基本理论和典型光学系统的设计方法。书中包含大量光学系统的设计实例，希望能够帮助读者通过本书掌握光学系统设计的基本方法和步骤。

光学设计是一门理论紧密联系实际、注重操作性的科学。近 20 年来，随着新领域、新需求的不断出现，对光学设计提出了新的要求，同时也使得当代的光学设计在内容和方法上都有别于传统的光学设计。这一时期，国内外涌现出各种功能强大的自动设计软件，一方面为高质、高效的设计提供了可能；另一方面也促进了光学设计的发展。为适应新技术的发展及人才培养的要求，本书在李林等著《工程光学》的基础上，对有关光学设计的内容进行了重新编写、修订。全书共分 10 章。第 1 章光学系统像质评价，是光学设计初学者必须具备的基本知识，这一部分既介绍了传统的光学系统像质评价指标，也加入了当前国内外主流软件中普遍采用的光学传递函数、点列图、包围圆能量等概念。第 2 章光学自动设计原理和程序，介绍了像差自动校正的基本原理，重点讨论了光学自动设计的两种优化方法：最小二乘法和适应法。在这一基础上，第 3 章针对当前国内外光学设计领域普遍采用的 Zemax 软件进行了功能和使用方法介绍，对利用软件进行光学系统设计的流程及各功能模块的操作方法进行了详细说明。第 4 章薄透镜系统的初级像差理论，介绍了根据薄透镜组的像差特性要求进行结构参数求解的具体过程。第 5~第 9 章是典型光学系统的设计，第 10 章介绍了光学零件加工工艺的基本流程及相应的内容，运用前几章的基本理论分析了望远物镜、显微物镜、目镜和照相物镜的像差特性及设计特点，并对不同的结构形式进行了具体设计。书中按照实际设计过程，详细介绍了结构参数求解，采用不同优化方法和程序进行像差校正的主要步骤和实际结果。通过这些实例，能够使读者较快地掌握典型光学系统设计的具体方法。本书为工信部“十四五”规划教材，在本次修订中，增加了第 9 章其他光学系统设计，内容包含变焦距光学系统、远心光学系统、激光扫描系统和 $f\theta$ 镜头、非成像光学系统、非球面系统和自由曲面系统等光学

设计热点和前沿问题。

本书的特点如下:

(1) 基础理论采用实用化的薄透镜初级像差理论, 去掉了传统教材初级像差理论中大量烦琐的公式推导和理论分析, 便于读者理解掌握。

(2) 理论密切联系实际。全书在阐述理论、讲解软件及典型系统设计部分, 均结合了大量的实例进行说明, 给出了设计的详细步骤和具体结果。读者参照这些实例都能得出较好的设计结果。

(3) 内容丰富、全面。全书既包含了经典光学设计的主要内容, 又加入了当今热门领域的设计实例, 努力反映技术光学领域的新进展。书中介绍了当今国内外应用最为广泛的光学设计软件 Zemax, 采用这一软件设计的各种典型光学系统实例对读者具有较好的指导意义。

本书由黄一帆、李林著, 其中, 黄一帆负责第3、第6、第7、第8章的撰写; 李林负责第1、第2、第4、第5、第9、第10章的撰写, 安连生教授主审。书中采用的例子大多来自作者所在单位的实际科研成果。本书中的计算实例没有标明单位, 对于长度单位隐含为毫米 (mm), 角度单位隐含为度 ($^{\circ}$)。北京理工大学在光学设计领域具有非常优秀的历史传承, 袁旭沧教授、李士贤教授、安连生教授等前辈在这一领域的成果卓著, 作者从中受益匪浅。本书的完成直接或间接得益于这些老师的成果, 教研室其他教师、研究生也提供了大量帮助, 在此一并表示感谢!

不当之处, 恳请读者批评指正。

作者

目 录

CONTENTS

第 1 章 光学系统像质评价	001
§ 1.1 概述	001
§ 1.2 光学系统的坐标系统、结构参数和特性参数	001
§ 1.3 几何像差的定义及其计算	006
§ 1.4 垂轴像差的概念及其计算	012
§ 1.5 几何像差计算程序 ABR 的输入数据与输出结果	014
§ 1.6 几何像差及垂轴像差的图形输出	018
§ 1.7 用波像差评价光学系统的成像质量	022
§ 1.8 光学传递函数	023
§ 1.9 点列图	029
§ 1.10 包围圆能量	030
思考题	031
第 2 章 光学自动设计原理和程序	032
§ 2.1 概述	032
§ 2.2 光学自动设计中的最优化方法	034
§ 2.3 阻尼最小二乘法光学自动设计程序	038
§ 2.4 怎样使用阻尼最小二乘法程序进行光学设计	043
§ 2.5 适应法光学自动设计程序	048
§ 2.6 怎样使用适应法程序进行光学设计	051
§ 2.7 典型光学设计软件介绍	054
思考题	058
第 3 章 Zemax 光学设计软件的应用	059
§ 3.1 概述	059
§ 3.2 Zemax OpticStudio 的用户界面	060
§ 3.3 Zemax OpticStudio 基本操作	067
§ 3.4 应用实例	078
习题	083

第4章 薄透镜系统的初级像差理论	084
§ 4.1 概述	084
§ 4.2 薄透镜系统的初级像差方程组	085
§ 4.3 薄透镜组像差的普遍性质	088
§ 4.4 像差特性参数 P , W , C 的归化	090
§ 4.5 单透镜的 \overline{P}_∞ , \overline{W}_∞ , \overline{C} 和结构参数的关系	091
§ 4.6 双胶合透镜组结构参数的求解	094
§ 4.7 平行玻璃板的初级像差公式	096
§ 4.8 单透镜像差性质的讨论	097
§ 4.9 光学系统消场曲的条件——Petzval 条件	101
思考题	102
第5章 望远物镜设计	103
§ 5.1 望远物镜设计的特点	103
§ 5.2 用初级像差求解双胶合望远物镜的结构参数	104
§ 5.3 用 Zemax 软件设计双胶合望远物镜	108
§ 5.4 大相对孔径望远物镜设计	114
§ 5.5 摄远物镜设计	123
§ 5.6 反射式物镜设计	140
§ 5.7 折反射球面系统设计	150
§ 5.8 二级光谱色差	157
§ 5.9 望远物镜像差的公差	158
习题	161
第6章 显微镜设计	163
§ 6.1 显微镜设计的特点	163
§ 6.2 显微镜的类型	165
§ 6.3 低倍消色差显微镜设计	168
§ 6.4 中倍消色差显微镜设计	175
§ 6.5 显微镜镜像差的公差	184
习题	186
第7章 目镜设计	187
§ 7.1 目镜设计的特点	187
§ 7.2 常用目镜的形式和像差分析	190
§ 7.3 冉斯登、惠更斯和凯涅尔目镜设计	195
§ 7.4 对称式目镜和无畸变目镜设计	205
§ 7.5 广角目镜设计	210
§ 7.6 目视光学系统像差的公差	219

习题	224
第 8 章 照相物镜设计	225
§ 8.1 照相物镜的光学特性和结构形式	225
§ 8.2 照相物镜设计的特点	229
§ 8.3 用 Zemax 软件设计双高斯物镜	230
§ 8.4 照相物镜像差的公差	238
习题	240
第 9 章 其他光学系统设计	242
§ 9.1 变焦距光学系统	242
§ 9.2 远心光学系统	258
§ 9.3 激光扫描系统和 $f\theta$ 镜头	263
§ 9.4 非成像光学系统	266
§ 9.5 非球面系统	275
§ 9.6 自由曲面系统	284
习题	293
第 10 章 光学零件加工工艺	295
§ 10.1 光学材料的特性	295
§ 10.2 光学零件的技术要求	296
§ 10.3 光学零件的粗磨与精磨加工	299
§ 10.4 抛光工艺与技术	306
§ 10.5 光学零件的胶合、镀膜和刻划	317
§ 10.6 光学零件工艺规程的编制	321
§ 10.7 非球面光学零件的加工	326
习题	335
附录 1 符号表	336
附录 2 双胶合薄透镜参数表	340
参考文献	365

第 1 章

光学系统像质评价

§ 1.1 概 述

任何一个光学系统不管用于何处，其作用都是把目标发出的光按仪器工作原理的要求改变其传播方向和位置，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。因此，对光学系统成像性能的要求主要有两个方面：一是光学特性，包括焦距、物距、像距、放大率、入瞳位置、入瞳距离等；二是成像质量，光学系统所成的像应该足够清晰，并且物像相似，变形要小。有关第一方面的内容即满足光学特性方面的要求属于应用光学的讨论范畴，第二方面的内容即满足成像质量方面的要求则属于光学设计的研究内容。

从物理光学或波动光学的角度出发，光是波长在 400~760 nm 的电磁波，光的传播是一个波动问题。一个理想的光学系统应能使一个物点发出的球面波通过光学系统后仍然是一个球面波，从而理想地聚交于一点。从几何光学的观点出发，人们把光看作是“能够传输能量的几何线——光线”，光线是“具有方向的几何线”，一个理想光学系统应能使一个物点发出的所有光线通过光学系统后仍然聚交于一点，理想光学系统同时满足直线成像直线、平面成像平面。但是实际上任何一个实际的光学系统都不可能理想成像。所谓像差就是光学系统所成的实际像与理想像之间的差异。由于一个光学系统不可能理想成像，因此就存在光学系统成像质量优劣的评价问题，从不同的角度出发会得出不同的像质评价指标。从物理光学或波动光学的角度出发，人们推导出波像差和传递函数等像质评价指标；从几何光学的观点出发，人们推导出几何像差等像质评价指标。有了像质评价的方法和指标，设计人员在设计阶段，即在制造出实际的光学系统之前就能预先确定其成像质量的优劣，光学设计的任务就是根据对光学系统的光学特性和成像质量两方面的要求来确定系统的结构参数。本章着重讨论的像质评价指标是几何像差和光学传递函数等。

本书讨论的大部分内容都采用国际上最为流行的 Zemax 软件进行分析、设计和讨论，其中的部分内容采用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，部分实例也采用 SOD88 的输出结果。若想深入了解该软件包，可进一步参阅 SOD88 的使用说明书。

§ 1.2 光学系统的坐标系统、结构参数和特性参数

为了计算光学系统的像质评价指标，必须先明确光学系统的坐标系统、结构参数和特性参数的表示方法。不同的光学书籍及光学自动设计软件中的坐标系统、结构参数和特性参数

的表示方法可能是不一样的,在使用时需特别加以注意。本书中,如不特别加以说明,所讨论的光学系统均为共轴光学系统,即系统有一条对称的旋转轴。系统中的面形可以是球面、二次曲面或高次非球面,系统可以是折射系统、反射系统或折反射系统,读者也需加以注意。

1.2.1 坐标系统及常用量的符号及符号规则

本书中所采用的坐标系与应用光学中所采用的坐标系完全一样,线段从左向右为正,由下向上为正,反之为负;角度一律以锐角度量,顺时针为正,逆时针为负。表 1-1 给出了光学系统中常用量的符号及符号规则,后面将对一些量做必要的解释。

表 1-1 光学系统中常用量的符号及符号规则

名称	符号	符号规则
物距	L	由球面顶点算起到光线与光轴的交点
像距	L'	由球面顶点算起到光线与光轴的交点
曲率半径	r	由球面顶点算起到球心
间隔或厚度	d	由前一面顶点算起到下一面顶点
入射角	I	由入射光线起转到法线
出射角	I'	由出射光线起转到法线
物方孔径角	U	由光轴起转到入射光线
像方孔径角	U'	由光轴起转到出射光线
物高	y	由光轴起到轴外物点
像高	y'	由光轴起到轴外像点
光线投射高	h	由光轴起到光线在球面的投射点
像方焦距	f'	由像方主点到像方焦点
物方焦距	f	由物方主点到物方焦点
像方焦截距	l'_f	由系统最后一面顶点到像方焦点
物方焦截距	l_f	由系统第一面顶点到物方焦点

对于角度和物、像距,用大写字母代表实际量,用小写字母代表近轴量。

1.2.2 共轴光学系统的结构参数

为了设计出系统的具体结构参数,必须明确系统结构参数的表示方法。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旋转曲面,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 (1-1) 表示,所用坐标

系如图 1-2 所示。

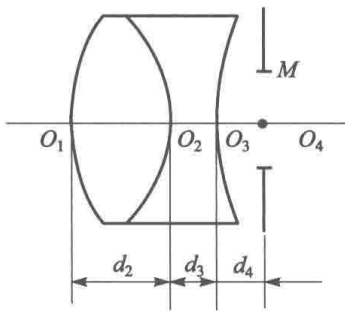


图 1-1 光学系统图

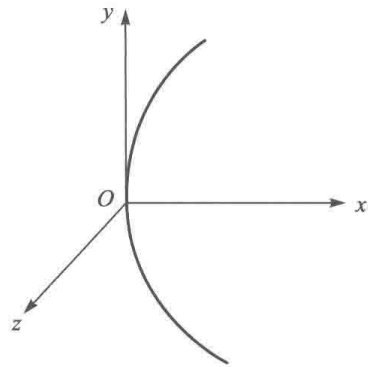


图 1-2 光学系统坐标系

$$x = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - Kc^2h^2}} + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + a_{10}h^{10} + a_{12}h^{12} \quad (1-1)$$

式中, $h^2 = y^2 + z^2$;

c ——曲面顶点的曲率;

K ——基准二次曲面系数;

$a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ ——高次非曲面系数。

方程 (1-1) 可以普遍地表示球面、二次曲面和高次非曲面。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。不同基准二次曲面系数 K 值所对应的二次曲面面形如表 1-2 所示。

表 1-2 二次曲面面形

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

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表面面形均为球面, 在计算机程序中为了简便直观, 对球面只给出曲面半径 r ($r = 1/c$) 一个参数。平面相当于半径等于无限大的球面, 在计算机程序中以 $r = 0$ 代表, 因为实际半径不可能等于零。对于非球面除给出曲面半径 r 外, 还要给出面形系数 K 及 $a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ 的值。

如果系统中有光阑 (图 1-1), 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, 依次用它们顶点之间的距离 d 表示, 如图 1-1 所示。

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。大多数情况下, 进入系统成像的光束包含一定的波长范围。由于波长范围通常是连续的, 无法逐一计算每个波长的像质指标, 为了全面评价系统的成像质量, 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, 综合判定系统的成像质量。一般应选出 3~5 个波长。当然对单色光成像的光学系统, 只需计

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的不同而改变。例如，用人眼观察的目视光学仪器采用 C (656.28 nm)，D (589.30 nm)，F (486.13 nm) 3 种波长；用感光底片接收的照相机镜头，则采用 C，D，g (435.83 nm) 这 3 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) 及每种介质对指定波长的折射率 (n)，再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相应确定了。

1.2.3 光学特性参数

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。从光学设计 CAD 的角度出发，应包括以下光学特性参数。

1. 物距 L

同一个系统对不同位置的物平面成像时，它的成像质量是不一样的。从像差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某一指定的物平面成像。例如，望远镜只能对远距离物平面成像；显微物镜只能用于对指定倍率的共轭面（即指定的物平面）成像。离开这个位置的物平面，成像质量将会下降。因此在设计光学系统时，必须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，符号是从左向右为正，反之为负，如图 1-3 所示。当物平面位于无限远时，在计算机程序中一般用 $L=0$ 表示。如果物平面与第一面顶点重合，则用一个很小的数值代替，例如 10^{-5} ，或更小。

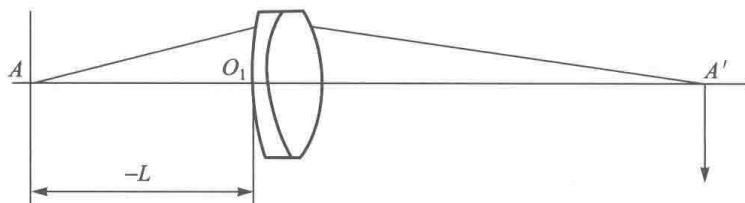


图 1-3 物平面表示方法

2. 物高 y 或视场角 ω

实际光学系统不可能使整个物平面都清晰成像，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。在设计光学系统时，必须指出它的成像范围。表示成像范围的方式有两种：当物平面位于有限距离时，成像范围用物高 y 表示；当物平面位于无限远时，成像范围用视场角 ω 表示，如图 1-4 所示。

3. 物方孔径角正弦 ($\sin U$) 或光束孔径高 (h)

实际光学系统口径是一定的，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，而且对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。在设计光学系统时，必须给出符合要求的光束孔径。

当物平面位于有限距离时，光束孔径用轴上点边缘光线和光轴夹角 U 的正弦 ($\sin U$) 表示；当物平面位于无限远时，则用轴向平行光束的边缘光线孔径高 (h) 表示，如图 1-4 所示。

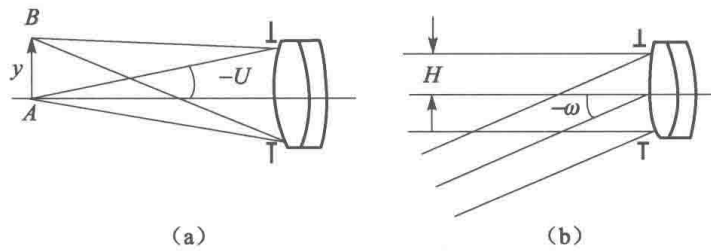


图 1-4 成像范围表示方法

(a) 物平面位于有限远; (b) 物平面位于无限远

4. 孔径光阑或入瞳位置

对轴上点来说, 给定了物平面位置和光束孔径或光束孔径高, 则进入系统的光束已经完全确定, 就可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 1-5 所示, 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, 故轴外点 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, 一部分原来能进入系统成像的光线则不能进入系统了。因此对应的成像光束不同了, 成像质量当然也就不同。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, 符号规则同样是向右为正、向左为负, 如图 1-5 (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, 并指出哪个面是系统的孔径光阑。在系统结构参数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 , 它等于 $-l_z$ 。实际透镜的第一个厚度为 d_2 , 如图 1-1 所示。

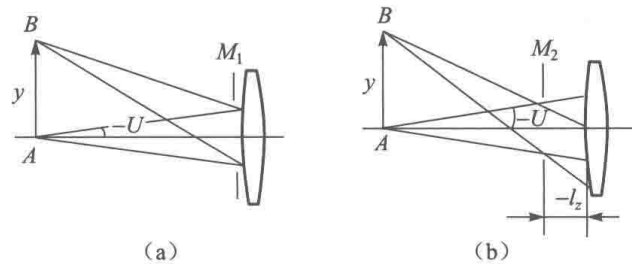


图 1-5 孔径光阑位置

(a) 给定孔径光阑; (b) 给定入瞳距离

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, 也就是轴外子午光束的宽度比轴上点光束的宽度小, 这种现象叫作“渐晕”。允许系统存在渐晕有两个方面的原因: 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, 从系统外形尺寸考虑, 为了减小某些光学零件的直径, 也需要把轴外子午光束的宽度减小。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孔的实际通光半径。

渐晕系数法是给出指定视场轴外点成像光束上下光的渐晕系数。如图 1-6 所示, 孔径光

阑在物空间的共轭像为入瞳，轴上点 A 的光束充满了入瞳，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，因此存在渐晕。

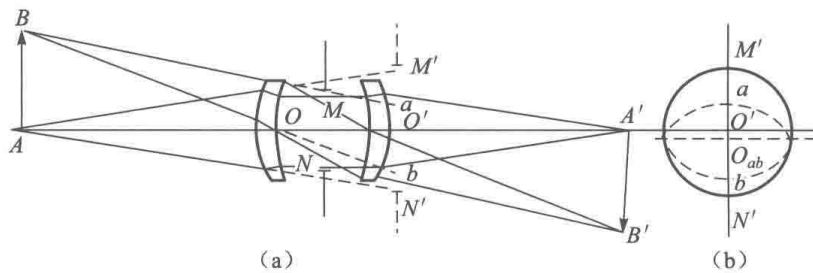


图 1-6 光学系统的渐晕

(a) 成像光束限制情况; (b) 成像光束截面

从侧视图中可以看到实际通光情况，图 1-6 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 $O'a$ ，下光的宽度为 $O'b$ ，对应上、下光的渐晕系数为

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

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 1-6 (b) 中虚线所示。椭圆的中心为 a, b 的中点 O_{ab} ，它的短轴为

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

椭圆的长轴为弧矢光束的宽度，一般近似等于 $O'M'$ 。用这样的椭圆近似代表轴外点的实际通光面积来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，即给出系统中每个曲面的通光半径 h ，通过计算机计算大量光线，确定出能够通过系统成像的实际光束截面。例如图 1-6 (a) 所示的系统，直接给出第 1~第 5 面（包括光阑面）的通光半径 $h_1 \sim h_5$ ，程序能自动把轴外点对应的实际光阑截面计算出来。这种方式主要用于最终设计结果的精确评价，在光学传递函数计算中经常使用。而在设计过程中，如在几何像差计算和光学自动设计程序中则多用渐晕系数法。

有了上面所说的系统结构参数和光学特性参数，利用近轴光线和实际光线的公式，用光路计算的方法即可计算出系统的焦距、主面、像面和像高等近轴参数，也能对系统在指定的工作条件下进行成像质量评价。这些参数就是我们在设计光学系统过程中进行像质评价所必须输入的参数。

§ 1.3 几何像差的定义及其计算

目前国内外常用的光学设计 CAD 软件中，主要使用几何像差、波像差和光学传递函数这几种像质评价方法。为了评价一个已知光学系统的成像质量，首先需要根据系统结构参数和光学特性的要求计算出它的成像指标，本节介绍几何像差的概念和计算方法。

1.3.1 光学系统的色差

前面曾经指出,光实际上是波长为 400~760 nm 的电磁波。不同波长的光具有不同的颜色,不同波长的光线在真空中传播的速度 c 都是一样的,但在透明介质(例如水、玻璃等)中传播的速度 v 随波长而改变,波长长的光线,其传播速度 v 大;波长短的光线,其传播速度 v 小。因为折射率 $n=c/v$,所以光学系统中介质对不同波长光线的折射率是不同的。如图 1-7 所示,薄透镜的焦距公式为

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1-2)$$

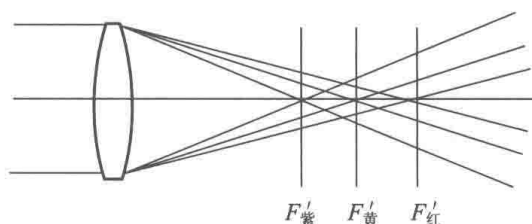


图 1-7 单透镜对无限远轴上物点白光成像

因为折射率 n 随波长的不同而改变,因此焦距 f' 也要随着波长的不同而改变,这样,对无限远的物体成像时,不同颜色光线所成像的位置也就不同,我们把不同颜色光线理想像点位置之差称为近轴位置色差。通常用 C 和 F 两种波长光线的理想像平面间的距离来表示近轴位置色差,也称为近轴轴向色差。若 l'_F 和 l'_C 分别表示 F 与 C 两种波长光线的近轴像距,则近轴轴向色差 $\Delta l'_{FC}$ 为

$$\Delta l'_{FC} = l'_F - l'_C \quad (1-3)$$

同样,如图 1-8 所示,根据无限远物体像高 y' 的计算公式,当 $n'=n=1$ 时,有

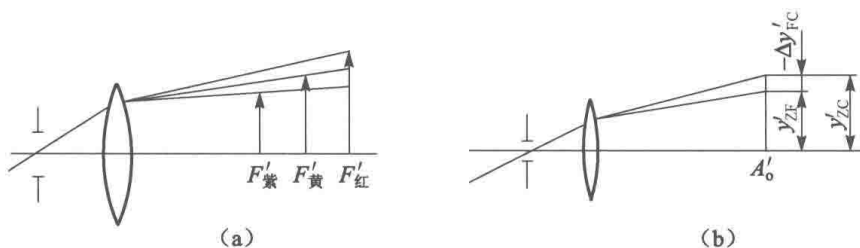


图 1-8 单透镜对无限远轴外物点白光成像
(a) 不同颜色光线像高差异; (b) 垂轴色差表示方法

$$y' = -f' \tan \omega \quad (1-4)$$

式中, ω ——物方视场角。

当焦距 f' 随波长改变时,像高 y' 也随之改变,不同颜色光线所成的像高也不一样。这种像的大小的差异称为垂轴色差,它代表不同颜色光线的主光线和同一基准像面交点高度(即实际像高)之差。通常这个基准像面选定为中心波长的理想像平面,例如 D 光的理想像平面。若 y'_{ZF} 和 y'_{ZC} 分别表示 F 和 C 两种波长光线的主光线在 D 光理想像平面上的交点高度,

则垂轴色差 $\Delta y'_{FC}$ 为

$$\Delta y'_{FC} = y'_{ZF} - y'_{ZC} \quad (1-5)$$

1.3.2 轴上像点的单色像差

下面讨论单色像差, 即单一波长的像差。首先讨论轴上点的单色像差。在 § 1.2 节中指出, 本书所讨论的是共轴光学系统, 面形是旋转曲面。对于共轴系统的轴上点来说, 由于系统相对于光轴对称, 故进入系统成像的入射光束和出射光束均对称于光轴, 如图 1-9 所示。轴上有限远物点发出的以光轴为中心的、与光轴夹角相等的同一锥面上的光线 (对轴上无限远物点来说, 对应以光轴为中心的同一直面上的光线) 经过系统以后, 其出射光线位于一个锥面上, 锥面顶点就是这些光线的聚交点, 而且必然位于光轴上, 因此这些光线成像为一点。但是, 由于球面系统成像不理想, 不同高度的锥面 (柱面) 光线 (它们与透镜的交点高度不同, 即孔径不同) 的出射光线与光轴夹角是不同的, 其聚交点的位置也就不同。虽然同一高度锥面 (柱面) 的光线成像聚交为一点, 但不同高度锥面 (柱面) 的光线却不聚交于一点, 这样成像就不理想。最大孔径的光束聚交于 $A'_{1.0}$; 0.85 孔径的光线聚交于 $A'_{0.85}$, 依此类推。

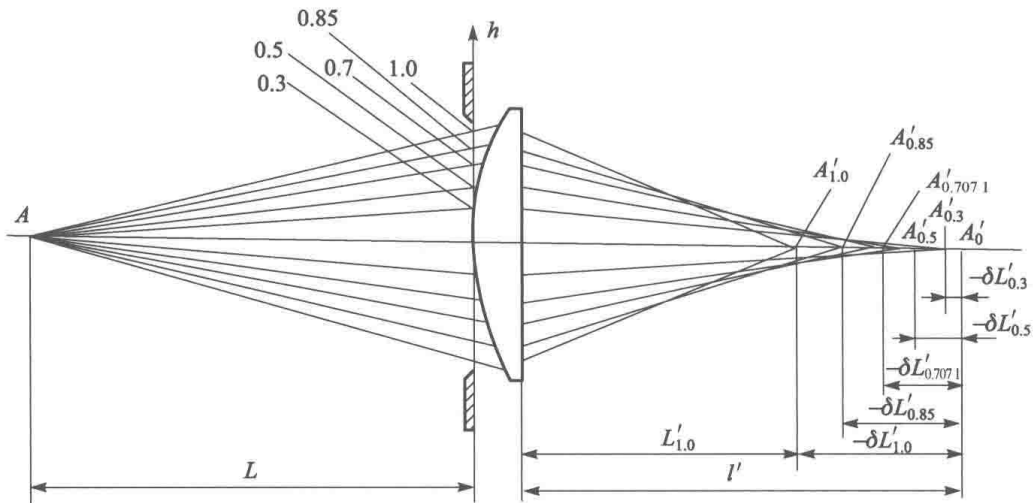


图 1-9 球差示意图

由图 1-9 可见, 轴上有限远同一物点发出的不同孔径的光线通过系统以后不再交于一点, 成像不理想。这些对称光线在光轴方向的离散程度, 我们用不同孔径光线对理想像点 A'_0 的距离 $A'_0 A'_{1.0}$, $A'_0 A'_{0.85}$, ... 表示, 称为球差, 用符号 $\delta L'$ 表示, $\delta L'$ 的计算公式是

$$\delta L' = L' - l' \quad (1-6)$$

式中, L' ——宽孔径高度光线的聚交点的像距;

l' ——近轴像点的像距, 如图 1-9 所示。

$\delta L'$ 的符号规则是: 光线聚交点位于 A'_0 的右方为正、左方为负。为了全面而又概括地表示出不同孔径的球差, 我们一般从整个公式中取出 1.0, 0.85, 0.7071, 0.5, 0.3 这 5 个孔径光束的球差值 $\delta L'_{1.0}$, $\delta L'_{0.85}$, $\delta L'_{0.7071}$, $\delta L'_{0.5}$, $\delta L'_{0.3}$ 来描述整个光束的结构。如果系统理想成像, 则所有出射光线均交于理想像点 A'_0 , 球差 $\delta L'_{1.0} = \delta L'_{0.85} = \delta L'_{0.7071} = \delta L'_{0.5} = \delta L'_{0.3} = 0$; 反之, 球差值越大, 成像质量越差。

对于轴上点来说, 仅有轴向色差 $\Delta l'_{FC}$ 和球差 $\delta L'$ 这两种像差, 就可以表示一个光学系统轴上点成像质量的优劣。

1.3.3 轴外像点的单色像差

对于轴外点来说, 情况就比轴上点要复杂得多。对于轴上点, 光轴就是整个光束的对称轴线, 通过光轴任意截面内的光束的结构都是相同的, 因此只需考察一个截面即可。而由轴外物点进入共轴系统成像的光束, 经过系统以后不再像轴上点的光束那样具有一条对称轴线, 只存在一个对称平面, 这个对称平面就是由物点和光轴构成的平面, 如图 1-10 中的 ABO 平面。轴外物点发出的通过系统的所有光线在像空间的聚交情况就要比轴上点复杂得多。为了能够简化问题, 同时又能够定量地描述这些光线的弥散程度, 我们从整个入射光束中取两个互相垂直的平面光束, 用这两个平面光束的结构来近似地代表整个光束的结构。这两个平面, 一个是光束的对称面 BM^+M^- , 称为子午面; 另一个是过主光线 BP 与 BM^+M^- 垂直的 BD^+D^- 平面, 称为弧矢面, 用来描述这两个平面光束结构的几何参数分别称为子午像差和弧矢像差。

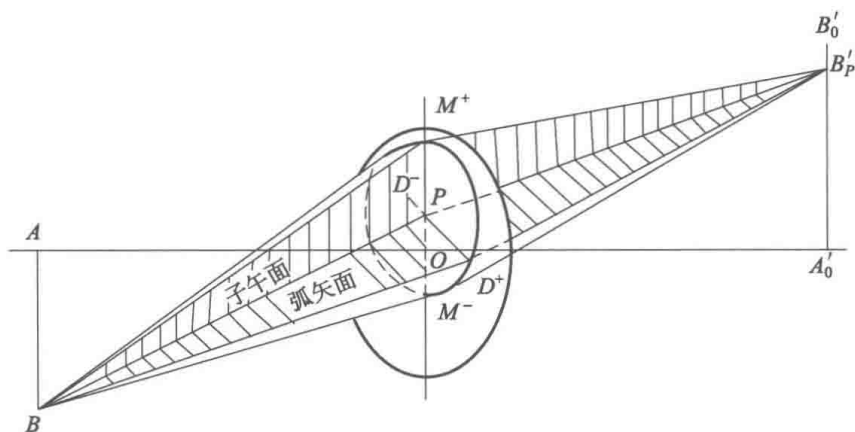


图 1-10 子午面与弧矢面示意图

1. 子午像差

由于子午面既是光束的对称面, 又是系统的对称面, 位于该平面内的子午光束通过系统后永远位于同一平面内, 因此计算子午面内光线的光路是一个平面的三角几何问题。可以在一个平面图形内表示出光束的结构, 如图 1-11 所示。

图 1-11 所示为轴外无限远物点发来的斜光束的光路图。与轴上点的情形一样, 为了表示子午光束的结构, 我们取出主光线两侧具有相同孔径高的两条成对的光线 BM^+ 和 BM^- , 称为子午光线对。该子午光线对通过系统以后当然也位于子午面内, 如果光学系统没有像差, 则所有光线对都应交于理想像平面上的同一点。由于有像差存在, BM^+ 和 BM^- 光线对的交点 B'_r 既不在主光线上, 也不在理想像平面上。为了表示这种差异, 我们用子午光线对的交点 B'_r 离理想像平面的轴向距离 x'_r 表示此光线对交点与理想像平面的偏离程度, 称为“子午场曲”。用光线对交点 B'_r 离开主光线的垂直距离 K'_r 表示此光线对交点偏离主光线的程度, 称为“子午彗差”。当光线对对称地逐渐向主光线靠近, 宽度趋于零时, 它们的交点 B'_r 趋近于一点 B'_i , B'_i 点显然应该位于主光线上, 它离开理想像平面的距离称为“细光束子午场曲”, 用 x'_i 表示。不同宽度子午光线对的子午场曲 x'_r 和细光束子午场曲 x'_i 之差 ($x'_r - x'_i$) 代表了细光束和宽光束交点前后位置的差。此差值和轴上点的球差具有类似的意义, 因此也称为“轴外子午球