

高等学校“十三五”规划教材

光学设计及 Zemax 应用

Optical Design and Zemax Application



主编 张欣婷 向阳 牟达

高等学校“十三五”规划教材

光学设计及 Zemax 应用

Optical Design and Zemax Application

主 编 张欣婷 向 阳 牟 达
副主编 夏日辉
主 审 安志勇

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据相关专业应用型人才培养方案和“光学设计”教学大纲组织编写。全书系统地论述了光学设计的基本理论及设计方法,并引入具体软件仿真实例,将理论与实践相结合,让大学生学以致用。

本书分为像差理论、典型光学系统和 Zemax 光学设计实例三大部分。像差理论(第 1~3 章)主要介绍光学设计的基础;典型光学系统(第 4~13 章)主要介绍如何将像差理论运用到具体设计中;Zemax 光学设计实例(第 14 章,包括 15 个设计实例)则是利用软件仿真出理论设计的结果并进行优化。

本书可作为高等学校光电信息工程专业、测控技术与仪器专业以及其他相关专业的教材,也可作为从事光学系统及光电仪器的研究、设计、制造和系统开发的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学设计及 Zemax 应用 / 张欣婷, 向阳, 牟达主编. — 西安: 西安电子科技大学出版社, 2019. 8

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5361 - 7

I. ① 光… II. ① 张… ② 向… ③ 牟… III. ① 光学设计—高等学校—教材 IV. ① TN202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 122750 号

策划编辑 井文峰

责任编辑 杨薇

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 8 月第 1 版 2019 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5

字 数 365 千字

印 数 1~3000 册

定 价 39.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 5361 - 7/TN

XDUP 5663001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前言

Preface

本书主要针对理工类院校光电信息科学与工程专业的高年级本科生和研究生而编写,也可服务于从事光学设计工作的工程技术人员。书中总结了前人的设计经验,对传统的设计理论进行完善,引入了近些年前沿的研究成果。

本书的特色如下:

(1) 将理论与实践相结合,符合教育部提出的培养应用型人才的宗旨。书中列举了大量的 Zemax 实例,这些实例均具有典型性。

(2) 理论部分内容丰富、涵盖面广,每一个章节都能自成体系,形成一套完整且系统的知识链。

(3) 实践部分由浅及深,即使是软件初学者也完全能够理解。在传统的光学系统设计基础上,本书还补充了一部分现代光学系统设计的内容,以适应科技的发展。

(4) 各部分内容相对独立又相互关联,融会贯通。

本书由“像差理论”、“典型光学系统”和“Zemax 光学设计实例”三部分构成。第一部分“像差理论”共三章,分别是绪论、像差综述、光学系统的像质评价和像差容限;第二部分“典型光学系统”共十章,分别是望远物镜设计、显微物镜设计、照相物镜设计、目镜设计、非球面及其在现代光学系统中的应用、衍射光学元件及其在现代光学系统中的应用、梯度折射率透镜及其在现代光学系统中的应用、红外光学系统设计、激光扫描光学系统设计、变焦光学系统设计;第三部分“Zemax 光学设计实例”共一章,包括 15 个设计实例,分别是单透镜的设计、双胶合望远镜物镜设计、40 倍生物显微物镜设计、双高斯照相物镜设计、显微-望远光学系统设计、折反射式望远物镜设计、照明系统设计、变焦物镜设计、非球面系统设计(带施密特校正板的卡塞格林系统)、傅里叶变换透镜设计、F-theta 透镜设计、梯度折射率透镜设计、偏心与倾斜、激光扩束准直系统设计、带有衍射光学元件的平行光管物镜设计。

本书第 1~3 章由向阳教授执笔,第 4~7 章由牟达副教授执笔,第 8~14 章及 15 个设计实例由张欣婷副教授执笔;全书插图由高级工程师亢磊、研发总监夏日辉和张

欣婷副教授绘制；全书由张欣婷副教授统稿，安志勇教授主审。

本书作者长期从事光学设计的教学及科研工作，书中也有一部分内容为自身的体会与总结，但难免存在考虑不周全或欠妥之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2018年12月

目 录

Contents

第 1 部分 像差理论

第 1 章 绪论	2	2.4.1 畸变的定义	22
1.1 光学设计的概念及发展概况	2	2.4.2 畸变的分类	22
1.1.1 光学设计的概念	2	2.4.3 畸变的校正	22
1.1.2 光学设计的发展概况	3	2.4.4 畸变的级数展开式	23
1.2 光学系统设计的具体过程和步骤	4	2.4.5 畸变的分布式	24
1.2.1 光学系统设计的具体过程	4	2.5 正弦差	24
1.2.2 光学设计的具体步骤	5	2.5.1 余弦定律	24
1.3 仪器对光学系统性能与质量的要求	5	2.5.2 正弦条件	25
第 2 章 像差综述	7	2.5.3 赫歇尔条件	26
2.1 球差	7	2.5.4 弧矢不变量与正弦条件的关系	26
2.1.1 球差的定义及表示方法	7	2.5.5 正弦条件的其他表示形式	28
2.1.2 球差的校正	8	2.5.6 在不晕点处的正弦条件	29
2.1.3 球差的分布式	9	2.5.7 等晕条件	29
2.1.4 齐明点	10	2.5.8 正弦差	32
2.1.5 球差的级数展开式	12	2.6 位置色差	32
2.2 彗差	14	2.6.1 位置色差的产生原因及定义	32
2.2.1 彗差的定义	14	2.6.2 消色差谱线的选择	32
2.2.2 彗差的级数展开式	15	2.6.3 二级光谱	34
2.2.3 彗差的校正	16	2.6.4 色球差	34
2.2.4 彗差的分布式	18	2.6.5 位置色差的级数展开式	34
2.3 像散及场曲	18	2.6.6 位置色差的分布式	36
2.3.1 像散	18	2.6.7 消色差系统光焦度分配	36
2.3.2 场曲	20	2.7 倍率色差	40
2.4 畸变	22	2.7.1 倍率色差的定义	40

2.7.2 倍率色差的校正	41	3.2 中心点亮度	48
2.7.3 倍率色差的级数展开式	41	3.3 分辨率	49
2.7.4 倍率色差的分布式	42	3.4 点列图	50
2.8 波像差	42	3.5 光学传递函数	51
2.8.1 波像差的定义	42	3.5.1 利用 MTF 曲线来评价成像质量	52
2.8.2 参考点移动对波像差的影响	43	3.5.2 利用 MTF 曲线的积分值来评价 成像质量	53
2.8.3 参考点移动与焦深	45	3.6 像差容限	54
2.8.4 波色差	46	3.6.1 望远物镜和显微物镜的像差公差	54
第 3 章 光学系统的像质评价和像差		3.6.2 望远目镜和显微目镜的像差公差	55
容限	47	3.6.3 照相物镜的像差公差	56
3.1 瑞利判断	47		

第 2 部分 典型光学系统

第 4 章 望远镜物镜设计	58	第 6 章 照相物镜设计	82
4.1 望远镜及其光学特性	58	6.1 照相物镜及其光学特性	82
4.1.1 普通望远镜特性	58	6.1.1 照相物镜的光学特性	82
4.1.2 伽利略望远镜和开普勒望远镜	60	6.1.2 照相物镜的像差要求	85
4.2 望远物镜的设计	62	6.2 照相物镜的类型	85
4.2.1 望远物镜的特点	62	6.2.1 大孔径物镜	86
4.2.2 望远物镜的类型和设计方法	63	6.2.2 广角物镜	89
第 5 章 显微镜物镜设计	70	6.2.3 长焦物镜	93
5.1 显微镜及其光学特性	70	6.2.4 变焦距物镜	94
5.1.1 显微镜成像原理	70	6.2.5 折反射照相物镜	95
5.1.2 显微镜中的光束限制	71	第 7 章 目镜设计	97
5.1.3 显微镜的景深	74	7.1 目镜及其光学特性	97
5.1.4 显微镜的分辨率和有效放大率	76	7.1.1 目镜的光学特性	97
5.2 显微镜物镜的类型	77	7.1.2 目镜的像差特点	98
5.2.1 消色差物镜	77	7.1.3 目镜的视度调节	98
5.2.2 复消色差物镜	78	7.2 目镜的类型	99
5.2.3 平像场物镜	79	第 8 章 非球面及其在现代光学系统中的	
5.2.4 反射和折反射显微镜物镜	79	应用	103

8.1 非球面概述	103	11.3 红外光学系统的温度特性	132
8.2 非球面的数学表述	104	11.4 红外光学系统的设计原则	133
8.2.1 二次非球面	104	11.5 红外光学系统的主要参数	133
8.2.2 高次非球面	104	11.5.1 F 数	133
8.2.3 Forbes 非球面	105	11.5.2 视场	133
8.2.4 自由曲面	108	11.5.3 焦深和景深	134
8.3 非球面的初级像差	110	11.5.4 最小弥散斑及其角直径	134
8.4 非球面的确定	111	11.6 红外光学系统的材料选择	135
第 9 章 衍射光学元件及其在现代光学		11.6.1 红外光学材料的主要性能	135
系统中的应用	112	11.6.2 红外光学材料的特点	136
9.1 普通衍射光学元件及其特性	112	11.6.3 红外光学材料的种类	136
9.1.1 衍射光学元件的发展历程	112	11.7 红外探测器	139
9.1.2 衍射光学元件的制作方法	113	11.7.1 热探测器	139
9.1.3 衍射光学元件的特性	114	11.7.2 光子探测器	140
9.2 谐衍射光学元件及其特性	116	11.7.3 红外焦平面器件	140
9.2.1 谐衍射的概念	116	第 12 章 激光扫描光学系统设计	142
9.2.2 谐衍射光学元件的色散	118	12.1 光束扫描器	142
第 10 章 梯度折射率透镜及其在现代		12.2 扫描方式	144
光学系统中的应用	120	12.3 $f\theta$ 透镜的特性	144
10.1 梯度折射率光学概述	120	12.4 $f\theta$ 透镜参数确定	145
10.2 梯度折射率介质中的光线追迹	121	第 13 章 变焦光学系统设计	147
10.3 梯度折射率光学系统像差	128	13.1 变焦系统的原理	147
第 11 章 红外光学系统设计	131	13.2 变焦系统的分类	147
11.1 红外波段的分类	131	13.3 变焦系统的特点	150
11.2 红外光学系统的特点	131	13.4 变焦系统的几个重要规律	150

第 3 部分 Zemax 光学设计实例

第 14 章 Zemax 软件及光学设计实例 ...	156	设计实例四 双高斯照相物镜设计	172
设计实例一 单透镜的设计	160	设计实例五 显微-望远光学系统设计	175
设计实例二 双胶合望远镜物镜设计	162	设计实例六 折反射式望远物镜设计	189
设计实例三 40 倍生物显微物镜设计	169	设计实例七 照明系统设计	196

设计实例八 变焦物镜设计	199	设计实例十三 偏心、倾斜	225
设计实例九 非球面系统设计(带施密特 校正板的卡塞格林系统)	208	设计实例十四 激光扩束准直系统设计	228
设计实例十 傅里叶变换透镜设计	212	设计实例十五 带有衍射光学元件的平行 光管物镜设计	232
设计实例十一 F-theta 透镜设计	216	参考文献	239
设计实例十二 梯度折射率透镜设计	222		

第 1 部分 像差理论

第1章 绪 论

1.1 光学设计的概念及发展概况

1.1.1 光学设计的概念

随着科学技术的发展,光学仪器已普遍应用于社会的各个领域。我们知道,光学仪器的核心部分是光学系统。光学系统成像质量的好坏,决定着光学仪器整体质量的好坏。然而,一个高质量的成像光学系统是要靠好的光学设计去完成的。因此说,光学设计是实现各种光学仪器的基础。随着光学仪器的发展,光学设计的理论和方法也在日益发展和完善。

光学设计所要完成的工作应该包括光学系统设计和光学结构设计。本书主要讨论的是光学系统设计。

所谓光学系统设计,就是根据仪器所提出的使用要求,来决定满足各种使用要求的数据,即设计出光学系统的性能参数、外形尺寸和各光组的结构等。如今,我们要为一个光学仪器设计一个光学系统,大体上可以分成两个阶段。第一阶段是根据仪器总体的技术要求(性能指标、外形体积、重量以及有关技术条件),从仪器的总体(光学、机械、电路及计算技术)出发,拟定出光学系统的原理图,并初步计算系统的外形尺寸,以及系统中各部分要求的特性等。一般称这一阶段的设计为“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),以保证满足系统光学特性和成像质量的要求。这一阶段的设计称为“像差设计”,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,就要预计到像差设计是否有可能实现,以及系统大致的结构形式,反之,当像差设计无法实现,或者结构过于复杂时,则必须回过头来修改初步设计。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,严重的可致使仪器根本无法完成工作,其次会给第二阶段的像差设计工作带来困难,导致系统结构过分复杂,或者成像质量不佳。当然在初步设计合理的条件下,如果像差设计不当,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像质量,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、成像质量)的情况下,结构设计最简单的系统。

初步设计和像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,初步设计比较繁杂,而像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,初步设计则比较简单,而像差设计却较为复杂。



1.1.2 光学设计的发展概况

最初生产的光学仪器是利用人们直接磨制的各种不同材料、不同形状的透镜，并把这些透镜按不同情况进行组合，找出成像质量比较好的结构。由于实际制作比较困难，要找出一个质量好的结构，势必要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，后来人们逐渐把这一过程用计算的方法来代替。对于不同结构参数的光学系统，由同一物点发出，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像差的大小，就可以大体知道整个物平面的成像质量；然后修改光学系统的结构参数，重复上述计算，直到成像质量满意为止。这样的方法叫做“光路计算”，或者叫做“像差计算”，光学设计正是从光路计算开始发展的。用像差计算来代替实际制作透镜这当然是一个很大的进步，但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与像差之间的关系十分复杂，要找到一个理想的结果，仍然需要经过长期繁杂的计算过程，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，促进人们对光学系统像差的性质及像差和结构参数之间的关系的研究，希望能够根据像差要求，用解析的方法直接求出结构参数，这就是所谓“像差理论”的研究。但这方面的进展不尽如人意，直到目前为止像差理论只能给出一些近似的结果，或者给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像差计算过程。

电子计算机的出现，使光学设计人员从繁重的手工计算中解放出来，过去一个人花几个月时间进行的计算，现在用计算机只要几分钟或几秒钟就能完成了。设计人员的主要精力已经由像差计算转移到整理计算资料和分析像差结果这方面来。光学设计的发展除了应用计算机进行像差计算外，还进一步让计算机代替人来完成分析像差和自动修正结构参数的工作，这就是所谓的“自动设计”，或者称“像差自动校正”。

现在大部分光学设计都不同程度地借助于这样或那样的自动设计程序来完成。有些人认为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用了，只要能上机计算就可以做光学系统设计了。其实不然，要设计一个光学特性和像质都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。在广泛使用自动设计程序的条件下，那些为了满足某些特殊要求而设计的新结构形式，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，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，并且不断地从实践中积累经验，才能真正掌握光学设计。

光学设计是 20 世纪发展起来的一门学科，在大半个世纪发展的进程中，光学设计的发展经历了人工设计和光学自动设计两个阶段，实现了由手工计算像差、人工修改结构参数进行设计，到使用电子计算机和光学自动设计程序进行设计的巨大飞跃。国内外已出现了不少功能相当强大的光学设计 CAD。如今，CAD 已在工程光学领域中普遍使用，从而使设计者能快速、高效地设计出优质、经济的光学系统。然而，不管设计手段如何变革，光学设计过程的一般规律仍然是必须遵循的。

1.2 光学系统设计的具体过程和步骤

1.2.1 光学系统设计的具体过程

1. 制定合理的技术参数

从光学系统对使用要求的满足程度出发,制定光学系统合理的技术参数,这是设计成功的前提条件。

2. 光学系统的总体设计和布局

光学系统总体设计的重点是确定光学原理方案和外形尺寸计算。为了设计出光学系统的原理图,确定基本光学特性,使其满足给定的技术要求,首先要确定放大率(或焦距)、线视场(或角视场)、数值孔径(或相对孔径)、共轭距、后工作距、光阑位置和外形尺寸等。因此,常把这个阶段称为外形尺寸计算阶段。在这个阶段,一般都按理想光学系统的理论和计算公式进行外形尺寸计算。

在进行上述计算时还要结合机械结构和电气系统,以防止这些理论计算在机械结构上无法实现。每项性能的确定一定要合理,过高的要求会使设计结果复杂,造成浪费;过低的要求会使设计不符合要求。因此,这一步必须慎重。

3. 光组的设计

光组的设计一般分为选型、确定初始结构参数、像差校正三个阶段。

1) 选型

光组的划分,一般以一对物像共轭面之间的所有光学零件为一个光组,也可将其进一步划小。现有的常用镜头可分为物镜和目镜两大类。目镜主要用于望远和显微系统,物镜可分为望远、显微和照相摄影物镜三大类。镜头在选型时首先应依据孔径、视场及焦距来选择镜头的类型,特别要注意各类镜头各自能承担的最大相对孔径、视场角。在大类型的选型上,应选择既能达到预定要求而又结构简单的一种。选型是光学系统设计的出发点,选型是否合理、适宜是系统设计成败的关键。

2) 确定初始结构参数

初始结构的确定常用以下两种方法。

(1) 解析法(代数法):即根据初级像差理论求解初始结构。这种方法是根据外形尺寸计算得到的基本特性,利用初级像差理论来求解满足成像质量要求的初始结构,即确定系统各光学零件的曲率半径、透镜的厚度和间隔、玻璃的折射率和色散等。

(2) 缩放法:即根据对光组的要求,找出性能参数比较接近的已有结构,将其各尺寸乘以缩放比 K ,得到所要求的结构,并估计其像差的大小或变化趋势。

3) 像差校正

初始结构选好后,要在计算机上进行光路计算,或用像差自动校正程序进行自动校正,然后根据计算结果画出像差曲线,分析像差,找出原因,再反复进行像差计算和平衡,直到满足成像质量要求为止。



4. 长光路的拼接与统算

以总体设计为依据,以像差评价为准绳,来进行长光路的拼接与统算。若结果不合理,则应反复统算并调整各光组的位置与结构,直到达到预期的目的为止。

5. 绘制光学系统图、部件图和零件图

绘制各类图纸,包括确定各光学零件之间的相对位置,光学零件的实际大小和技术条件。这些图纸为光学零件加工、检验,部件的胶合、装配、校正,乃至整机的装调、测试提供依据。

6. 编写设计说明书

设计说明书是光学设计整个过程的技术总结,是进行技术方案评审的主要依据。

7. 进行技术答辩

必要时可以进行技术答辩以便明确相关问题。

1.2.2 光学设计的具体步骤

光学设计就是选择和安排光学系统中各光学零件的材料、曲率和间隔,使得系统的成像性能符合应用要求。一般设计过程基本是减小像差到可以忽略不计的程度。光学设计可以概括为以下几个步骤:

- (1) 选择系统的类型;
- (2) 分配元件的光焦度和间隔;
- (3) 校正初级像差;
- (4) 减小残余像差(高级像差)。

以上每个步骤可以包括几个环节,重复地循环这几个步骤,最终会找到一个满意的结果。

1.3 仪器对光学系统性能与质量的要求

任何一种光学仪器的用途和使用条件必然会对它的光学系统提出一定的要求。因此,在进行光学设计之前一定要了解对光学系统的要求。这些要求概括起来有以下几个方面。

1. 光学系统的基本特性

光学系统的基本特性有:数值孔径或相对孔径,线视场或视场角,系统的放大率或焦距。此外还有与这些基本特性有关的一些特性参数,如光瞳的大小和位置、后工作距、共轭距等。

2. 系统的外形尺寸

系统的外形尺寸,即系统的轴向尺寸和径向尺寸。在设计多光组的复杂光学系统时,如一些军用光学系统,外形尺寸的计算以及各光组之间光瞳的衔接都是很重要的。

3. 成像质量

成像质量的要求和光学系统的用途有关。不同的光学系统按其用途有不同的成像质量要求。对于望远系统和一般的显微镜,只要求中心视场有较好的成像质量;对于照相物镜,

则要求整个视场都要有较好的成像质量。

4. 仪器的使用条件

根据仪器的使用条件,要求光学系统具有一定的稳定性、抗振性、耐热性和耐寒性等,以保证仪器在特定的环境下能正常工作。

在对光学系统提出使用要求时,一定要考虑在技术上和物理上实现的可能性。例如生物显微镜的视觉放大率 Γ ,一定要按有效放大率的条件来选取,即满足 $500 \text{ NA} < \Gamma < 1000 \text{ NA}$ 的条件。过大的放大率是没有意义的,只有提高数值孔径(NA)才能提高有效放大率。

对于望远镜的视觉放大率 Γ ,一定要把望远系统的极限分辨率和眼睛的极限分辨率放在一起考虑。在眼睛的极限分辨率为 $1'$ 时,望远镜的正常放大率应该是 $\Gamma = D/2.3$,式中, D 是人瞳直径。实际上,在多数情况下,按仪器用途所确定的放大率常大于正常放大率,这样可以减轻观察者眼睛的疲劳度。对于一些手持的观察望远镜,它的实际放大率比正常放大率低,以便具备较大的出瞳直径,从而增加观察时的光强度。因此望远镜的工作放大率应按下式选取:

$$0.2D \leq \Gamma \leq 0.75D$$

有时对光学系统提出的要求是互相矛盾的。这时,应进行深入分析,全面考虑,抓住主要矛盾,切忌提出不合理的要求。例如在设计照相物镜时,为了使相对孔径、视场角和焦距三者之间的选择更加合理,应该参照下列关系式来选择这三个参数:

$$\frac{D}{f} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} = C_m$$

式中, $C_m = 0.22 \sim 0.26$,称为物镜的质量因数。实际计算时,取 $C_m = 0.24$ 。当 $C_m < 0.24$ 时,光学系统的像差校正就不会发生困难;当 $C_m > 0.24$ 时,系统的像差很难校正,成像质量很差。但是,随着高折射率玻璃的出现、光学设计方法的完善、光学零件制造水平的提高以及装调工艺的完善, C_m 值也在逐渐提高。

总之,对光学系统提出的要求要合理,保证在技术上和物理上均能够实现,并且要具有良好的工艺性和经济性。

第2章 像差综述

2.1 球 差

2.1.1 球差的定义及表示方法

由实际光线的光路计算公式知,当物距 L 为定值时,像距 L' 与入射高度 h 及孔径角 U 有关,随着孔径角的不同,像距 L' 是变化的,即如图 2.1 所示:轴上点 A 发出的光束,对于光轴附近的光用近轴光路计算公式,像点为 A' (看作高斯像点),对于实际光线采用实际光计算公式,成像于 A'' (实际像点)。

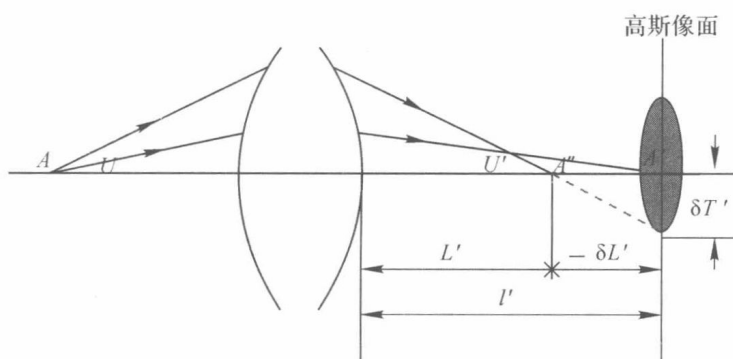


图 2.1 轴上点球差

显然实际像与理想像之间存在着沿轴的差异,把实际像点与理想像点的偏移称为球差,用 $\delta L'$ 表示,即

$$\delta L' = L' - l' \quad (2.1)$$

由于球差的存在,导致点物经系统之后所成的不再是点像,而是一个弥散斑。当用接收屏沿轴移动时,光斑的大小不同,其光斑大小也充分体现了球差的另一种表示方法,即垂轴球差。垂轴球差的表示形式为

$$\delta T' = \delta L' \tan U' = (L' - l') \tan U' \quad (2.2)$$

其中, $\delta T'$ 表示弥散斑半径。

可见对于球差可用两种方式加以表示:一为沿轴度量;二为垂轴度量。由于轴上点发出的光束是轴对称的,所以子午面内的球差只计算上半部分即可。

每一条光线对应一个球差值,如果把不同孔径所对应的球差值全部计算出来,并且将它们绘制成图,就称此图为球差曲线,球差曲线非常直观地表达了系统球差的大小,通过

球差曲线可以非常形象地对球差进行表征,如图 2.2 所示。

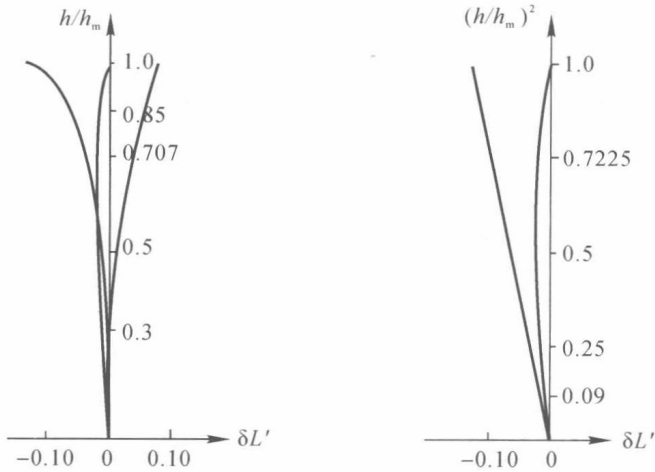


图 2.2 球差曲线

2.1.2 球差的校正

从上述分析知,球差与孔径密切相关,对于单透镜来说, $\sin U$ 越大则球差值越大,也就是说单透镜自身不能校正球差。单正透镜产生负球差,单负透镜则产生正球差,分别见图 2.3 和图 2.4。

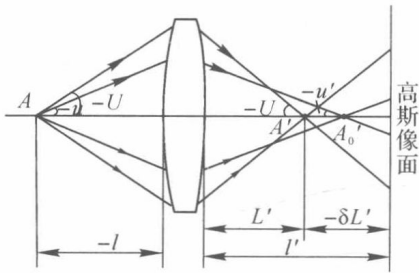


图 2.3 单正透镜产生负球差

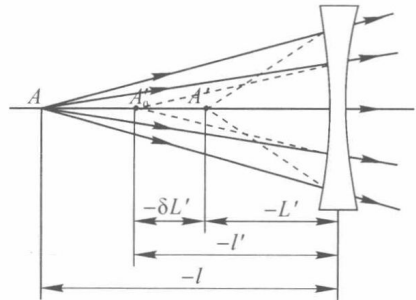


图 2.4 单负透镜产生正球差

因此,将正负透镜组合起来就能使球差得到校正,组合光组称为消球差光组。最简单的消球差光组是图 2.5(a)中的双分离透镜组或 2.5(b)中的双胶合透镜组。

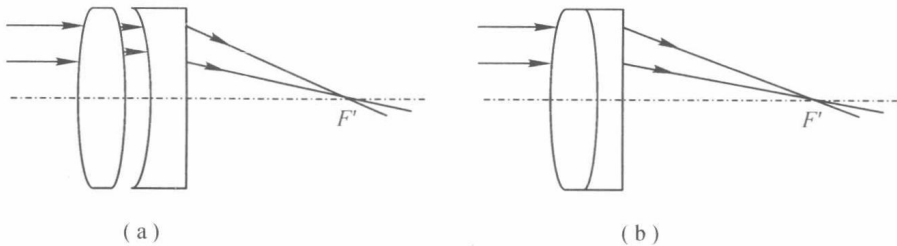


图 2.5 消球差光组

光学系统中,对某一给定孔径的光路达到 $\delta L' = 0$ 的系统称为消球差系统。所谓的消球