



高等院校电子信息科学与工程类

• 通信工程专业教材 •

光学系统设计教程

王朝晖 焦斌亮 徐朝鹏 编著

GUANGXUE XITONG SHEJI JIAOCHENG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等院校电子信息科学与工程类

• 通信工程专业教材 •

光学系统设计教程

王朝晖 焦斌亮 徐朝鹏 编著



北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是一本关于光学系统设计的入门教材,内容包括光学设计的基本概念、像差理论基础及设计方法。书中介绍了包括透镜弯曲、光阑移动、对称、元件分离、色差校正、像差平衡、平视场、非球面的使用等光学设计的基本方法,并以摄影镜头的发展历史为主线,详细介绍了渥拉斯顿摄影镜头、潜望镜、消色差物镜等系统的设计。

本书可作为光电子、仪器仪表等专业本科生及研究生相关课程的教材,书中包含大量例题和习题,均给出了详细解答,适合学生自学,本书也可作为学习 ZEMAX 软件的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

光学系统设计教程 / 王朝晖,焦斌亮,徐朝鹏编著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5635-3626-9

I. ①光… II. ①王… ②焦… ③徐… III. ①光学系统—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TH740.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 182314 号

书 名: 光学系统设计教程

著作责任者: 王朝晖 焦斌亮 徐朝鹏 编著

责任编辑: 陈岚岚

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京联兴华印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15

字 数: 373 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-3626-9

定 价: 33.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

本书是一本关于光学系统设计的入门教材。光学设计是一门实践性较强的课程,传统上应该先学习像差理论,再学习光学设计的基本方法,最后学习用软件进行光路计算和设计评价。对于初学者来说,这是一个相当艰难和痛苦的过程。本书试图把理论学习和设计实践紧密结合在一起,将软件的使用贯穿学习的全过程,对于必须涉及的像差理论,尽量摒弃繁复艰涩的公式及推导过程,使初学者在最短时间内,迈入光学设计的门槛。读者毋需先修光学设计的基础知识,也不必事先学习软件的使用,具备几何光学基础的工科学生即可阅读学习。

本书的内容涉及光学系统的设计和分析两个方面。关于设计,介绍了如何从用户的使用要求出发,用近轴分析的方法完成薄透镜形式的预先设计,得出薄透镜的光焦度、表面曲率半径和元件间隔等参数。然后把这些数据输入到软件中,用软件对预先设计方案进行优化。关于设计方案的分析,详细介绍如何根据系统的哪些指标,评价设计方案的优劣,又从哪些途径可以改进方案设计。书中的设计实例,是以摄影镜头的发展历史为主线,详细介绍了渥拉斯顿摄影镜头、潜望镜、消色差物镜等系统的设计。所采用的设计原则包括透镜弯曲、光阑移动、对称、元件分离、色差校正、像差平衡、平视场、非球面的使用等。在介绍设计实例时,特别强调使用软件进行光学设计时的核心问题——评价函数的构造和正确使用。

本书内容大体上包括以下部分:第1章和第2章是关于光学设计的基本概念、光学玻璃的相关知识和软件的使用;第3章和第4章是光学设计的基础知识,包括近轴追迹方法与理论、光阑的使用等内容;第5章介绍各种像差的基本概念、描述及评价方法;第6章至第10章是单色像差的内容;第11章和第12章讨论色差;第13章是全书的总结,同时结合前面的内容给出了一套测试题。

本书由燕山大学信息科学与工程学院王朝晖、焦斌亮、徐朝鹏编著。其中,第1、3、4、5章由焦斌亮编写,第2、6、7、8、9、10章由王朝晖编写,第11~13章由徐朝鹏编写,全书由王朝晖统稿。

作者对书中使用的软件经过了慎重的考虑,选用的ZEMAX软件在光学业内广泛采用,具有简单易学、通用性强等特点,可以很好地与实际光学设计工作相衔接。

本书可作为光电子、仪器仪表等专业本科生及研究生相关课程的教材,整

个课程大约需要 40 个学时。书中全部 16 道习题,18 道例题,均给出了详细解答,适合学生自学。作为一本入门教材,作者不建议具有丰富设计经验的中、高级光学设计人员阅读。

限于作者水平,书中定会有不少缺点和错误,望读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 预备知识	1
1.1 名词与概念	1
1.2 镜头的设计步骤	1
1.2.1 初始系统的来源	2
1.2.2 光路计算	2
1.2.3 设计评价	2
1.2.4 系统的修改	3
1.3 高斯光学和理想成像	3
1.4 初级像差及其独立性原理	5
1.5 轴向球差与横向球差	6
1.6 透镜的近似表示	7
1.6.1 薄透镜与薄透镜系统	7
1.6.2 真实透镜的近轴形式	7
1.7 玻璃的特性	8
1.7.1 折射率	8
1.7.2 色散	8
1.7.3 玻璃色散特性的量化	8
1.7.4 玻璃图	10
1.7.5 熔炼数据	13
1.7.6 部分色散	14
1.7.7 实际考虑	14
1.8 习题	15
第 2 章 ZEMAX 软件的使用	16
2.1 ZEMAX 中数据的输入	16
2.1.1 将初始数据输入到透镜数据编辑器中	16
2.1.2 通过对话框完成的操作	18
2.2 外形图及一级特性的调用	20
2.3 ZEMAX 的分析功能	21
2.4 ZEMAX 玻璃库的调用	24
2.4.1 ZEMAX 玻璃库的调用	24
2.4.2 玻璃库中的特殊文件夹	24

2.4.3 描述玻璃的多项式	25
2.5 其他	25
2.5.1 ZEMAX 中的 3 个 F 数	25
2.5.2 光线的选择	26
2.5.3 设计方案的跟踪	27
第 3 章 近轴光路与非球面公式	28
3.1 符号规则	28
3.2 透镜及表面形状的描述	30
3.2.1 面形因子	30
3.2.2 表面挠度	30
3.3 近轴光线追迹公式	31
3.3.1 基本公式	31
3.3.2 用 PRTE 描述的透镜外观	32
3.3.3 光学表面的光焦度	32
3.3.4 M 方案和 F 方案	34
3.4 二合系统的光焦度及主面位置	35
3.5 单反射面和薄透镜的光焦度公式	38
3.6 高斯透镜公式	38
3.7 非球面	39
3.7.1 为什么要采用非球面	39
3.7.2 二次曲面表达式的推导	39
3.7.3 相对于球面的偏离	42
3.8 练习题	43
3.9 习题	49
第 4 章 光阑与摄影镜头	50
4.1 光阑与光瞳	50
4.2 边缘光线和主光线	52
4.3 光阑位于透镜内部时用 PRTE 确定入瞳和出瞳的位置	52
4.4 光瞳的大小与 F 数的关系	53
4.5 拉格朗日不变量	54
4.6 光阑移动与像差控制	55
4.7 涅拉斯顿后摄影透镜	58
4.8 习题	59
第 5 章 像差概述及设计评价	62
5.1 分析工具	62
5.1.1 光线扇曲线	62

5.1.2 点列图	63
5.2 像差的光线描述	64
5.2.1 离焦	64
5.2.2 球差	66
5.2.3 彗差	68
5.2.4 像散	70
5.2.5 场曲和畸变	72
5.2.6 阿贝正弦条件	73
5.3 波像差	73
5.3.1 点光源的波前(或参考波前)	74
5.3.2 波前与光学系统间的相互作用	74
5.3.3 波前的描述	75
5.3.4 波前与衍射	76
5.3.5 像面像差与出瞳像差间的关系	78
5.4 设计方案评价	79
5.4.1 环与臂	79
5.4.2 评价函数	80
5.4.3 RMS 点半径	81
5.4.4 RMS 点曲线	84
第 6 章 透镜的分离与对称结构	86
6.1 透镜分离	86
6.1.1 单元组	86
6.1.2 二元组	87
6.1.3 三元组	88
6.2 透镜分离的应用	90
6.3 对称结构——潜望镜设计	92
6.3.1 确定初始半径	92
6.3.2 在 ZEMAX 中设置初始数据	93
6.3.3 物位于无穷远	95
6.3.4 平视场	97
6.4 潜望镜与后摄影透镜的比较	97
6.5 打破对称性	99
6.6 习题	101
第 7 章 球差	103
7.1 有关 W_{ijk} 的讨论	104
7.2 通过近轴追迹求得 W_{040} 的实例	106
7.3 W_{040} 的薄透镜形式	108

7.4	W_{040} 计算实例	109
7.5	轴外像差系数	110
7.6	波像差球差系数 W_{040} 的推导	112
7.7	习题	115
第 8 章	透镜弯曲与像差平衡	116
8.1	薄透镜结构的表达式	116
8.2	薄透镜的弯曲	117
8.3	焦点的移动	118
8.4	W_{020} 与 W_d 间的差异	120
8.5	像差平衡:球差与离焦	121
8.6	最小模糊斑处散焦的轴向位置和半径大小	122
8.7	W_{040} 与 SA3 间的联系	123
8.8	薄透镜公式的推导	125
8.9	习题	129
第 9 章	彗差和像散	130
9.1	横向球差:SA3	130
9.2	ZEMAX 中轴外像差的计算	133
9.2.1	用赛得系数表示彗差(W_{131})	134
9.2.2	用薄透镜公式表示彗差(W_{131})	135
9.2.3	用赛得系数表示像散(W_{222})	135
9.2.4	用薄透镜公式表示像散(W_{222})	136
9.3	彗差与透镜弯曲	136
9.4	彗差和像散随 $f/\#$ 及视场角的变化关系	137
9.5	习题	139
第 10 章	场曲与畸变	140
10.1	匹兹瓦尔弯曲	140
10.1.1	匹兹瓦尔弯曲的概念	140
10.1.2	匹兹瓦尔波像差	141
10.1.3	匹兹瓦尔像差系数与匹兹瓦尔和	141
10.1.4	计算实例	142
10.1.5	匹兹瓦尔半径	143
10.2	平场器的基本理论	145
10.3	波前倾斜与畸变	148
10.3.1	波前倾斜	148
10.3.2	畸变	150
10.4	畸变计算实例	151

10.5 讨论	153
10.6 习题	153
第 11 章 色差与消色差物镜	155
11.1 公式推导	155
11.1.1 初级轴向色差公式的推导	155
11.1.2 赛得像差系数 C_L 的推导	157
11.1.3 波色差系数 W_{ax} 的推导	157
11.2 消色差物镜的预先设计	159
11.2.1 约束条件	160
11.2.2 消色差物镜的光焦度	160
11.2.3 消色差物镜的设计实例	160
11.3 实际消色差物镜的设计	164
11.4 消色差物镜的弯曲	167
11.4.1 赛得球差	167
11.4.2 高级球差	167
11.4.3 色球差	169
11.4.4 彗差及像散	170
11.4.5 消球差透镜	171
11.5 二级光谱	172
11.5.1 部分色散	173
11.5.2 消色差物镜的二级光谱	175
11.5.3 用 ZEMAX 校正过的消色差物镜	177
11.5.4 什么时候需考虑二级光谱	179
11.6 横向色差	180
11.7 习题	181
第 12 章 分离式消色差物镜、法国摄影物镜和复消色差物镜	182
12.1 用分离的薄透镜构造的消色差物镜	182
12.1.1 色散约束条件的修改	182
12.1.2 确定各个镜片的光焦度	183
12.1.3 用同一种玻璃构造的消色差物镜	184
12.2 消色差物镜的场曲问题	185
12.2.1 平视场的消色差物镜	185
12.2.2 契伐利埃(Chevalier)物镜	186
12.3 复消色差的条件	187
12.3.1 部分初级轴向色差	187
12.3.2 双透镜组和三透镜组的初级部分色差	189
12.4 复消色差物镜	189

12.4.1 复消色差物镜的约束条件	190
12.4.2 复消色差物镜光焦度的求解	190
12.4.3 计算实例	192
12.4.4 ZEMAX 中的优化	193
12.5 色差校正与像点大小的关系	196
12.6 习题	198
第 13 章 测试与总结	200
13.1 显微镜	200
13.2 设计综述与提示	201
13.2.1 第 1 部分:预先的薄透镜设计	201
13.2.2 第 2 部分:利用 ZEMAX 对设计进行优化	203
13.3 测试题	203
13.4 总结与展望	204
习题答案	206
第 1 章(1.8 习题)	206
第 3 章(3.9 习题)	207
第 4 章(4.8 习题)	208
第 6 章(6.6 习题)	212
第 7 章(7.7 习题)	217
第 8 章(8.9 习题)	218
第 9 章(9.5 习题)	219
第 10 章(10.6 习题)	221
第 11 章(11.7 习题)	223
第 12 章(12.6 习题)	227
第 13 章(测试题)	228
参考文献	229

1.1 名词与概念

透镜:如图 1.1 所示,所谓透镜,是指由两个折射曲面围限的透明体。曲面通常是球面,平面可以看成曲率半径无限大的球面。非球面由于加工困难,实际应用较少。

透镜组:有时把一组胶合的或有空气间隙的密接透镜称为一个透镜组,或组元。

镜头:镜头是具有一定功能的透镜组,也可以是几个透镜组的组合。

光学系统:光学系统经常用来表示由镜头、反射镜、棱镜、起偏器和检偏器等诸如此类的元件构成的组合体,读者可以参阅图 4.11 给出的系统示意图。单个镜头也可以看成一个光学系统。

共轴光学系统:如果系统中各元件表面(通常为球面或平面)曲率中心都在同一直线上,则称该光学系统为共轴光学系统,将曲率中心所在的直线称为光轴。大部分光学系统都是共轴光学系统,非共轴系统较少使用。

在英语中,透镜、透镜组、镜头等用同一个词(lens)表示,它可以指单个镜片,也可以指像装在照相机中那样的整个物镜,有时还泛指包括折射、反射和折反射系统在内的各种光学构件。

本书所说的光学设计大体上是指镜头设计,但有时也说成“透镜组”或“光学系统”。总之,以上术语的定义并不严格,读者在阅读中遇到时,要注意判断它们的含义。

光线追迹:又称光线的“光路计算”,就是在已知系统参数和入射光线坐标的前提下,逐面计算出射光线坐标。光线追迹的目的是为了计算光学系统的像差值,它是逐面按计算公式精确计算的,这样求得的像差值称为实际像差值(或像差的精确值)。

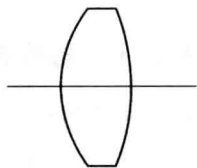


图 1.1 透镜

1.2 镜头的设计步骤

镜头要预先设计好才能加工,也就是说,要预先计算或规定好各组元的表面曲率半径、厚度、空气间隔和口径,以及所采用的玻璃牌号。这些正是光学设计师的主要工作。

经过长期的努力,人们已经逐步认识到了影响镜头成像质量的各种像差,它们可以通过改变镜头结构来消除或校正。可供设计师改动的镜头参数称为“自由度”,包括各面的曲率半径、厚度与空气间隔、各镜片所用玻璃的折射率和色散率,以及孔径光阑(或镜框)的位置

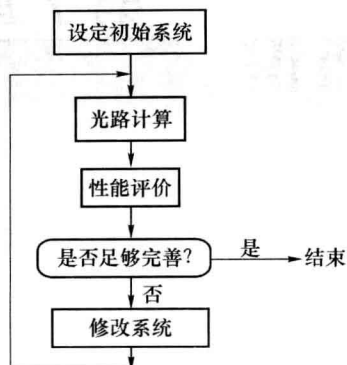


图 1.2 镜头的设计流程

等。不过在改动这些参数时,镜头焦距要保持一个恒定值,否则相对孔径和像高会改变,以至于设计师最后得到的镜头虽然像质良好,但却已经不是原设计所要求的了。此外,如果镜头要在固定倍率下工作,在设计过程中还要保持倍率恒定。

求取镜头结构参数的严密数学解(即将结构参数用期待的性能指标表示)非常复杂,几乎不可能完成。设计师所能采取的最好办法,是利用已有的光学知识,先设定一个初始近似方案,评价其性能,然后做适当的修改,再评价性能,等等。这个过程可以用一个简单的流程图(图 1.2)表示。下面按顺序介绍图中的 4 个步骤。

1.2.1 初始系统的来源

在绝大多数情况下,初始系统是通过以下几种途径中的一种取得的:

- ① 凭个人的学识和经验估计设定,这要求设计师具有丰富的设计经验;
- ② 通过查阅已经设计过的镜头的技术档案,这是最常用的办法;
- ③ 购进各种镜头,分析其结构,这种方法费时费力,适于技术储备有限的设计者采用;
- ④ 查阅专利档案,镜头专利非常丰富,但是专利文献上给出的例子往往是不完整的或未校正好的,还有大量工作要做,当然还要避免侵犯专利权的问题。

1.2.2 光路计算

在不同视场、不同孔径、不同色光等条件下,对大量光线,用准确的三角方法,通过光线追迹计算出射光线。通过近轴“光路计算”可求得理想像点的位置;通过实际光线的追迹并与理想像比较得到各像差值。可以做出各种表示像差的曲线,有经验的设计师往往一看这些曲线就能知道系统的缺陷所在。

光线的“光路计算”又称“光线追迹”或“描光路”。早期的光路计算都借助于对数表,后来采用台式计算机和三角函数表进行。现在电子计算机已广泛用于光学系统像差的自动平衡工作。按设计要求,在设计师对计算过程的干预和控制下,将光学系统的像差校正到最佳状态。在整个计算过程中,计算机要做大量的光线追迹工作。所以,光线追迹的重要意义由于有了电子计算机,显得更为突出了。

1.2.3 设计评价

判断一个镜头对于特定的用途是否已经校正到足够好,往往是十分困难的。有效的办法是由点光源开始,追迹大量光线。要保证这些光线均匀地分布在镜头入瞳上,然后作这些光线和像面交点的“点列图”。为了真实地反映点像的分布特点,需要追迹几个不同波长的

光束,每个波长要追迹几百条光线。不同波长的光束进入镜头的疏密程度按该波长的光在最后的像中被设定的权数加以调整。这样,点列图就同时可以反映出色差情况。

为分析点列图的特点,还需对点列图做后续处理。一种处理方法是计算容纳 10%, 20%, 30%, ..., 100% 光线的圆的直径,并画出倾斜度不同的各光束的“区域能量”曲线。另一种方法是把点列图看成是点扩散函数,通过傅里叶变换使它变成 MTF(调制传递函数)对空间频率的分布曲线。这样的曲线包含许多信息,例如镜头的分辨率、粗糙物体的像的反差等。计算 MTF 时还可以考虑衍射效应,因而 MTF 是可望得到的有关镜头性能最全面的表达。如果镜头的加工尺寸与设计数据准确相符,就可以通过实验测定 MTF,检查镜头性能是否已经达到预定的理论目标。

1.2.4 系统的修改

如果是手动计算或用小型计算机计算,设计师必须判断需作哪些修改来消除镜头的剩余像差,这往往是十分困难的。设计师常常将某些镜头参数作微小的试探性改动,算出每种像差相对于各参数变动的变化率(或者叫做“变化系数”)。这样可以通过解一个联立方程组求出可试用的某些改变量。但是,由于光学系统的非线性程度很高,这种方法实际上并不是那么简单。现在,随着计算机性能的不断提提高,许多高速计算机程序能用最小二乘法同时修改几个参数以改变多种像差,为系统设计带来了很大的便利。

光学设计师在做镜头系统的设计时,其中一部分既占据时间又消耗精力的工作是系统一级以及三级特性的手动计算。

所谓的系统一级特性是指能用近轴公式描述的系统性质,包括等效焦距和后焦距; F 数;像的位置;像的大小;主面位置;顶点与主面间的间隔;入瞳的大小和位置;出瞳的大小和位置;拉格朗日不变量;轴向和横向色差等。

而系统的三级特性是指能用初级像差公式描述的系统性质,包括球差、最小模糊斑的位置和大小、彗差、像散、中间焦点的位置和大小、匹兹瓦尔弯曲、畸变、波前方差、斯特列尔比、二次曲面系数等。

1.3 高斯光学和理想成像

如果点光源位于对称光学系统的光轴上,由对称性可知,在像空间,光束的波前必然是以光轴为对称轴的回转曲面。取如图 1.3 所示的坐标系统,其中的 z 轴是其对称轴,可以写出像空间的波前方程:

$$z = \frac{1}{2}c(x^2 + y^2) + O[(x^2 + y^2)^2] \quad (1.1)$$

其中坐标原点选在折射面上。

同理,任何折射面都可以用相似的方程表示,例如,曲率为 c 的球面可以表示为

$$z = \frac{1}{2}c(x^2 + y^2) + \frac{1}{8}c^3(x^2 + y^2)^2 + O[(x^2 + y^2)^3] \quad (1.2)$$

式(1.1)、式(1.2)这样的幂级数展开式有助于我们考察由于仅保留式中的第一项,即二次项,忽略其他项而导致的近似性。德国的数学家、物理学家高斯于 1841 年对此做出了完整的概括。有鉴于此,傍轴光学也称为高斯光学,其范围规定为足够接近光轴的区域,以保

证式(1.1)或式(1.2)中高于 x 和 y 的二次方项的所有高次项都可被忽略。这个“近轴区域”也称高斯区域。在下面的讨论中将说明,在高斯区域内是理想成像的。

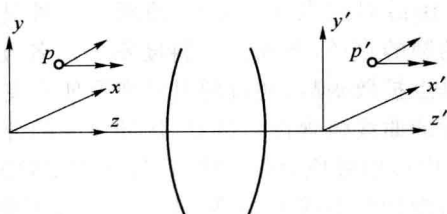


图 1.3 对称光学系统的坐标系

图 1.4 是由 A 点发出的一条光线经过一个折射球面的情形,利用折射定律和三角公式可以得到式(1.3)(推导过程请参阅几何光学教材)。利用该式就可以精确地计算出射光线的位置。

$$\begin{cases} \sin I = \frac{L-r}{r} \sin U \\ \sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \\ U' = U + I - I' \\ L' = r + \frac{r \sin I'}{\sin U'} \end{cases} \quad (1.3)$$

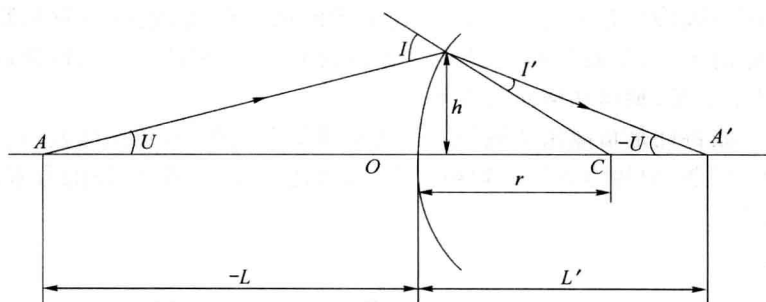


图 1.4 光线通过单个折射面的光路

若入射光线与光轴的夹角 U 很小,并且与其相应的 I, I', U' 等也很小,则这些角度的正弦值可以用弧度来代替。上述光线必然很靠近光轴,故称它们为“近轴光线”。光轴附近的这个区域称为“近轴区”。

当 U, I, I' 和 U' 同时趋于零时,把代表这些角度的无限小量用相应的小写字母 u, i, i' 和 u' 表示,对应的 L 和 L' 用 l 和 l' 表示。相应的关于 i, i', u' 和 l' 的光路计算公式如下:

$$\begin{cases} i = \frac{l-r}{r} u \\ i' = \frac{n}{n'} i \\ u' = u + i - i' \\ l' = r + \frac{r i'}{u} \end{cases} \quad (1.4)$$

式(1.4)称为近轴公式。近轴公式的实质就是用三角函数 $\sin \theta$ 的幂级数展开式($\sin \theta = \theta - \theta^3/3! + \theta^5/5! + \dots$)中的第一项 θ 来代替 $\sin \theta$, 即取 $\sin \theta = \theta$ 。

对于同由 A 点发出的 U 角不同的光线, 由近轴公式(1.4)可得, 出射光线都交于同一点 A' (即 U 角不同的光线对应的 l' 都相同)。可见近轴公式计算出来的像就是理想像, 这个像通常称为高斯像, 或者说在近轴区域是理想成像的。

1.4 初级像差及其独立性原理

所谓像差, 简单地说就是实际光线位置和理想像点位置之差。既然理想像是用近轴公式计算出来的, 而近轴公式又是取 $\sin \theta = \theta$ 得到的, 因此像差的存在可以看成是由级数(三角函数的展开式)中其余各项引起的。

在像差理论研究的发展过程中, 为了由易到难, 由浅入深, 一般把像差分为初级像差和高级像差两大类。由级数中第二项引起的像差叫做初级像差, 其他各式引起的像差称为高级像差。

德国数学家赛得于 1856 年第一个系统地提出初级像差计算公式, 因此初级像差有时也叫赛得像差。

初级像差是用三角函数 $\sin \theta$ 幂级数展开式的前两项代替函数本身(即取 $\sin \theta = \theta - \theta^3/3!$)而得到的, 同样是一种近似公式。因为只有当 θ 比较小时, 才能忽略 $\theta^5/5!$ 及以后的各高次项。也就是只有当孔径角和物高都不大时, 初级像差才能够近似地表示光学系统的像差性质。

初级像差公式所适用的范围没有明确的边界, 由光学系统所允许的误差决定。例如, 如果以 θ 代替 $\sin \theta$, 同时要求误差小于 $1/1000$, 则 θ 的最大值为 5° , 此时的近轴区大约和角度小于 5° 的范围相当。而如果用 $\theta - \theta^3/3!$ 代替 $\sin \theta$, 要求误差小于 $1/1000$, 则 θ 的最大值为 32° , 对应初级像差公式适用的范围就和角度小于 32° 的范围相当。

实际使用的光学系统, 其光束的孔径角和成像物高往往都比较大, 由级数中 $\theta^5/5!$ 及以上各高次项引起的像差, 即所谓高级像差就相当大。因此初级像差尚不能充分地代表光学系统的成像性质。

尽管初级像差不足以充分代表光学系统的成像质量, 但是它正确地反映了光学系统在小孔径和小视场情形下的成像性质。对于一个具有较大孔径和较大视场的实际光学系统来说, 如果要清晰成像, 则在小孔径和小视场范围内所成的像必须是清晰的。因此对于一个成像质量优良的光学系统, 将初级像差校正到一定限度以内, 就是一个虽不充分但却必要的条件。由此可见, 研究初级像差对光学系统设计具有重要的实际意义。目前初级像差理论已经比较完整, 已广泛应用于实际的设计工作中; 高级像差虽也作过不少研究, 但是由于问题本身的复杂性和计算量过大, 几乎和实际像差计算的工作量相当, 因此在实际设计中应用比较少。本书主要讨论共轴球面系统的初级像差, 对高级像差只作简单介绍。

对于一个共轴球面系统, 物体被各个球面依次成像, 最后像空间的像差是各个球面综合作用的结果。如图 1.5 所示, 光线通过共 j 个面后总的像差可分为两部分, 一部分是第一面

到第 $j-1$ 产生的,另一部分是第 j 面产生的。由于第一面到第 $j-1$ 面存在像差,因此第 j 面的入射光束中已经有像差存在。第 j 面产生的像差不仅和它本身的结构参数以及物体位置有关,而且还和入射光束的像差有关。当入射光束中的像差变化时,光线在第 j 面上的入射位置也将发生变化,第 j 面对它成像后所产生的像差也将因此发生变化。所以实际上系统中各个球面对于像差的影响并不是彼此独立的。

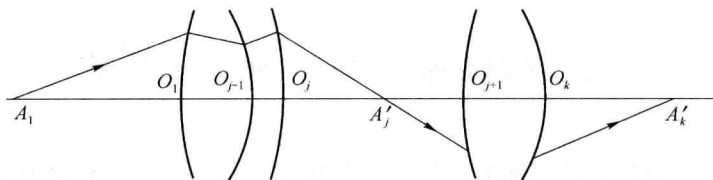


图 1.5 物体通过各个球面依次成像

但是在初级像差范围内,可以认为每一面产生的像差和入射光束的像差无关。在初级像差范围内,已忽略了高级像差。在某一面上,由入射光束像差引起的该面所产生的像差的变化量,同入射光束没有像差时该面所产生的像差相比,显然是更高阶的小量,因此可以忽略。由此得出结论:在初级像差范围内,系统中每个球面所产生的像差可以认为是彼此独立的。以上即所谓初级像差的独立性原理。

1.5 轴向球差与横向球差

参照图 1.4,考虑由轴上同一点发出的孔径角 U 不同(对应的 h 也不同)的多条光线,它们虽满足 L 相同,但通过光学系统后将有不同的 L' 值(下面将给出解释),这就是球差现象。

球差是轴上点唯一的单色像差。如图 1.6 所示,球差 $\delta L'$ 在数值上是轴上点发出的不同孔径光线的像方截距 L' 与近轴截距 l' 间的差值,即

$$\delta L' = L' - l' \quad (1.5)$$

球差是沿光轴方向度量的,是一种轴向像差,故亦称轴向球差。

如图 1.6 所示,物点 A 发出 5 条不同孔径的远轴光线和一条近轴光线。这些光线的孔径角 U 不同,通过光学系统后,并不会聚于理想像点 A'_0 处。用一个屏在透镜右侧接收物点的像。当屏沿光轴移动时,屏上所得的像为一弥散斑。但无论屏与透镜间的距离怎样变化,屏上的像都不能成为一个几何点。这种现象是由球差引起的,近轴像面上弥散斑的半径称为横向球差,以 $\delta T'$ 表示:

$$\delta T' = \delta L' \tan U' \quad (1.6)$$

由于像面上的像由弥散斑组成,所以不能反映物的细节。当球差严重时,像会变得模糊不清,所以任何光学系统都必须校正好球差。

现在给出关于 L' 值不同的解释。在图 1.4 中,由式(1.3)可知,对不同的光线,因 U 不同,从折射面出射后,将有不同的 I' 和 U' 值,从而 $\sin I' / \sin U'$ 也将是不同的值,对应的 L' 也就一定不同了。