

现代光学设计方法 (第3版)

李 林 黄一帆 王涌天 著



北京理工大学出版社

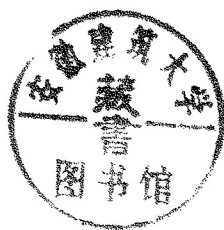


工业和信息化部“十二五”规划教材

现代光学设计方法

(第3版)

李 林 黄一帆 王涌天 著



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

内 容 简 介

本书首先介绍光学设计的基础知识和像差理论,然后以国外先进的光学设计软件 Zemax 作为基础,详细介绍采用 Zemax 设计新型光学系统的方法。本书紧密结合当前各应用领域的最新的一些光学系统,内容基本上可以分为 7 个部分。第 1 部分是光学系统的像质评价,这是设计一个光学系统所必备的基础知识。第 2 部分是光学自动设计的原理与程序,介绍了适应法和阻尼最小二乘法这两种常用的光学自动设计程序的特点和使用方法。第 3 部分是变焦距系统的原理与程序,讨论了变焦距系统的像差计算与自动设计问题。第 4 部分是光学系统的公差分析与计算,介绍了公差分析计算软件的原理与编程特点。第 5 部分是光学系统的环境温度分析与无热设计,讨论了环境温度对光学系统的影响及利用衍射光学元件进行无热设计的原理与方法。第 6 部分是典型光学系统设计,应用所介绍的光学设计程序对望远系统、显微镜物镜和照相物镜等进行了实际设计,并对所设计的例子进行了像质评价。第 7 部分对偏振像差、非球面应用、计算机辅助光学装调、衍射光学元件、非成像光学系统、空间光学系统、红外光学系统以及其他一些光电系统进行了介绍。

本书可作为从事光学设计的专业人员及高等院校光学专业教师和研究生的教学和参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代光学设计方法/李林,黄一帆,王涌天著.—3版.—北京:北京理工大学出版社,2018.9
ISBN 978-7-5682-6353-5

I. ①现… II. ①李… ②黄… ③王… 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(2018)第 214845 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)68948351(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 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 34.25

字 数 / 804 千字

版 次 / 2018 年 9 月第 3 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 79.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

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

随着科学技术的飞速发展,各种各样的新型光电仪器不断涌现,在信息、通信、工农业以及国防军事等诸多领域起着非常重要的作用。设计和研制这些新型光电仪器对于设计者来说是一种新的挑战,因为设计者需要掌握光学、机械、电子、控制以及计算机方面的多种知识,其中,光学设计是一门专业知识领域相对比较狭窄的学科。对于一个现代的光学设计工作者,一方面要求他牢固地掌握新型光学设计的像差理论知识;另一方面又要求他在设计实践中不断地积累经验,掌握各种各样新型光学系统的像差特性和设计方法,而且还需要具备熟练的计算机操作和光学设计软件使用能力。所有这些要求使得光学设计比较难以掌握,它是一门非常专业的学科。

以前的光学设计书籍介绍的内容大都只是基于像差理论而进行像差计算,设计实例较少。有的书籍虽然有一些例子,但涉及的系统较为传统,而且基本上是采用国内开发的DOS平台的光学设计软件进行设计。这些国内开发的DOS平台的光学设计软件功能较弱,使用界面不友好,操作复杂,图形功能弱,因此采用这些光学设计软件来设计高质量的新型光电仪器是一项非常费时间的工作,往往很难达到最好的成像质量。近年来,国内很多光电研制单位相继购买了国际上先进的光学设计软件,例如美国的Zemax、CODE V以及OSLO等,其中购买Zemax光学设计软件的最多,因为Zemax软件具有使用方便、功能齐全、价格低廉的特点,特别适合国内的光电仪器研制单位。但是,由于国内的光学设计工作者对这些光学设计软件不太熟悉,使用这些软件所采用的设计方法与传统的方法有较大的差异,因此往往不能很好地利用,造成了资源的浪费。相关设计人员非常希望能有一本紧密结合当前新的发展需求,既详细讲解光学设计理论知识和软件使用,又有具体光学系统设计实例的参考书籍。

本书正是针对这种状况编写的。本书首先介绍光学设计的基础知识和像差理论,然后以国外先进的光学设计软件Zemax作为基础,详细介绍采用Zemax设计新型光学系统的方法。虽然主要以Zemax软件来讨论,但由于不同的光学设计软件虽有差别,却都具有其基本共同点,因此在软件使用上仍具有普遍性。本书的特点是紧密结合当前各应用领域最新的一些光学系统来进行介绍,内容基本上可以分为7个部分。第1部分是光学

系统的像质评价,这是设计一个光学系统所必备的基础知识。在这部分里,首先详细地介绍了最常用的几何像差及相应的计算程序;然后介绍了另一个重要的像质评价指标——光学传递函数,讨论了两种光学传递函数程序的特点与使用方法。第2部分是光学自动设计的原理与程序,介绍了适应法和阻尼最小二乘法这两种常用的光学自动设计程序使用方法。第3部分是变焦距系统的原理与程序,讨论了变焦距系统的像差计算与自动设计问题。第4部分是光学系统的公差分析与计算,介绍了公差分析计算软件的原理与编程特点。第5部分是光学系统的环境温度分析与杂散光分析,讨论了环境温度对光学系统的影响及分析计算的原理与方法。第6部分是典型光学系统设计,应用所介绍的光学设计程序对望远系统、显微镜物镜和照相物镜等进行了实际设计,并对所设计的例子进行了像质评价。第7部分对偏振像差、非球面应用、计算机辅助光学装调、衍射光学元件、非成像光学系统、空间光学系统、红外光学系统以及其他一些光电系统进行了介绍。对于应用光学和光学设计中的有关内容,本书直接引用,不再详细讨论,同时我们还假定读者已经基本掌握了这些有关知识,因为本书的前期必备知识就是应用光学和光学设计。本书中的计算实例结果中,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(°)。本书可作为从事光学设计的专业人员及高等院校光学专业教师和研究生的参考书。

本书第1~6,8~10,12~14章由李林负责撰写;第7,15章由黄一帆负责撰写;第11章由王涌天负责撰写。作者所在的北京理工大学光电学院应用光学和光学设计教研组长期从事应用光学和光学设计的教学工作和科研工作,在20世纪60年代就已经开设了光学设计等相关课程,前后曾经编写过近20种不同版本的应用光学和光学设计教材,这些教材先后被国内十几所高等院校采用,是国内公认的经典教材。本书的出版得到了北京理工大学2016年“双一流”研究生精品教材项目资助。教研组的袁旭沧教授、陈昆明教授、安连生教授、李士贤教授等在应用光学和光学设计研究领域成果斐然,在国内外享有盛誉,本书中很多内容都直接或间接地受益于这些前辈的研究成果。王学良、赵瑜、麦绿波、熊景杰、崔桂华、王焯、张波、王自强、曹银花、张颖、刘家国等同志在博士或硕士研究生论文中所做的工作对本书的完成起了重要作用,作者所在教研室的全体教师也给予了很大支持和帮助,李丁一对本书中的插图进行了编辑修改,在此一并表示衷心的感谢!

清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生和北京理工大学教授、中国工程院院士周立伟先生在百忙中审阅了全稿,对本书给予了高度的评价,并提出了宝贵的意见,在此也特向两位尊敬的前辈表示衷心的感谢。

现代光学设计是一门新兴的学科,它还将不断发展,本书中存在的不足之处,敬请读者不吝指正。

作者
于北京理工大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 光学系统像质评价方法	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 检测阶段的像质评价指标——星点检验	006
1.4 检测阶段的像质评价指标——分辨力测量	010
1.5 几何像差的定义及其计算	013
1.6 垂轴像差的概念及其计算	018
1.7 几何像差计算程序 ABR 的输入数据与输出结果	020
1.8 几何像差及垂轴像差的图形输出	024
1.9 用波像差评价光学系统的成像质量	028
1.10 光学传递函数	029
1.11 点列图	035
1.12 包围圆能量	036
第 2 章 光学自动设计原理和程序	037
2.1 概述	037
2.2 阻尼最小二乘法光学自动设计程序	039
2.3 光学自动设计的全局优化	045
2.4 适应法光学自动设计程序	049
2.5 典型光学设计软件介绍	054
2.5.1 国内实用软件	054
2.5.2 国外著名软件	056
本章附录	060

第3章 公差分析与计算	061
3.1 概述	061
3.2 公差设计中的评价函数	062
3.3 光学公差的概率关系	065
3.4 公差设计中的随机模拟检验	070
3.5 公差设计中的偏心光路追迹	074
第4章 目视光学系统	083
4.1 薄透镜系统的初级像差理论	083
4.2 望远镜物镜设计	091
4.3 望远镜物镜设计实例	100
4.3.1 用 Zemax 软件对双胶合望远镜物镜进行优化设计	100
4.3.2 大相对孔径望远镜物镜设计	105
4.3.3 摄远物镜设计	115
4.3.4 反射式物镜设计	130
4.3.5 折反射球面系统设计	143
4.4 显微镜物镜设计	151
4.5 显微镜物镜设计实例	157
4.5.1 低倍消色差显微镜物镜设计	157
4.5.2 中倍消色差显微镜物镜设计	161
4.6 目镜设计	169
4.7 目镜设计实例	178
4.7.1 冉斯登、惠更斯和凯涅尔目镜设计	178
4.7.2 对称式目镜和无畸变目镜设计	185
4.7.3 广角目镜设计	189
第5章 照相物镜设计	195
5.1 照相物镜的光学特性	195
5.2 照相物镜的基本类型	196
5.3 基本类型照相物镜的演变形式	201
5.4 照相物镜设计的特点	205
5.5 数码相机物镜设计特点	206
5.6 照相物镜像差的公差	210
5.7 照相物镜设计实例	212
5.7.1 用适应法自动设计程序设计反摄远物镜	212
5.7.2 用阻尼最小二乘法自动设计程序设计双高斯物镜	222

第 6 章 变焦距光学系统	230
6.1 概述	230
6.2 变焦距系统的分类及其特点	231
6.3 变焦距物镜的高斯光学	238
6.4 变焦距物镜高斯光学实例	254
6.5 体视变倍显微镜	259
6.6 变焦距物镜设计方法和设计实例	261
第 7 章 液晶投影仪和背投电视镜头设计	268
7.1 投影显示类型	268
7.2 液晶投影仪的工作原理	270
7.3 液晶投影仪照明系统的设计	272
7.4 液晶投影仪投影物镜的设计	273
7.5 背投电视镜头设计特点	275
第 8 章 其他光学系统	278
8.1 激光扫描系统和 $f\theta$ 镜头	278
8.2 光学信息处理系统和傅里叶变换镜头	280
8.3 红外光学系统	283
8.4 空间光学系统	289
8.5 空间光学系统设计方法和设计实例	292
8.5.1 同轴三反射镜系统设计	292
8.5.2 空间轻型大视场离轴 TMA 相机镜头的光学系统设计实例	293
8.6 共形光学设计	302
8.7 计算机直接制版镜头	307
8.8 投影仪扩展广角镜头	309
8.9 光刻机系统设计方法和设计实例	310
8.9.1 光刻技术发展历程	311
8.9.2 光刻物镜	312
8.9.3 全球面光刻物镜设计	315
8.9.4 偶次非球面光刻物镜光学设计	320
第 9 章 非球面和自由曲面的应用	335
9.1 非球面的表示方法	335
9.2 非球面的特性	337

9.3	反射二次非球面的应用	337
9.4	非球面设计实例	339
9.5	自由曲面	343
9.6	自由曲面设计方法和设计实例	358
9.6.1	基于自由曲面的头盔式显示系统设计	358
9.6.2	自由曲面在光刻机镜头上的应用	365
第 10 章	空间热环境及杂散光影响分析	371
10.1	热分析概述	371
10.2	光机热分析理论及有限元方法	372
10.2.1	热分析基本理论与方法	372
10.2.2	空间光机系统的热交换	374
10.2.3	有限元分析法	374
10.3	热形变的光学系统面型拟合算法	378
10.3.1	Zernike 多项式	378
10.3.2	面型拟合算法	380
10.4	不规则折射率在光机热一体化技术中的影响	384
10.4.1	梯度折射率	384
10.4.2	不规则折射率面分布拟合算法	387
10.5	杂散光分析概述	389
10.6	空间遥感器的杂光水平评价方法	391
10.6.1	杂光系数	392
10.6.2	点源透射率	392
10.6.3	杂光系数与点源透过率的关系	395
10.7	杂散辐射防护设计	396
10.7.1	关键表面和被照射表面	397
10.7.2	遮光罩和挡光环设计	398
10.7.3	光阑的设计与使用	404
第 11 章	衍射光学元件	406
11.1	概述	406
11.2	衍射光学元件的实际光线和近轴光线追迹	407
11.3	衍射光学元件在成像系统中消色差的方法	411
11.4	衍射光学元件在成像系统中对于热像差的校正	414

第 12 章 偏振像差的理论	419
12.1 光的偏振	419
12.2 偏振像差的定义	420
12.3 偏振光线追迹的方法	422
12.4 旋转对称光学面形中的偏振像差函数	423
12.5 旋转对称光学系统中的偏振像差函数	427
12.6 薄膜设计与光学设计	428
第 13 章 计算机辅助装调	430
13.1 概述	430
13.2 计算机辅助装调数学模型的建立	430
13.3 计算机辅助装调的像差数据处理	433
13.4 基于 Moore-Penrose 广义逆的失调量求解方法	438
13.5 光学系统计算机辅助装调的数值模拟	440
第 14 章 非成像光学	454
14.1 辐射度学和光度学基本概念	454
14.2 照明光学系统基本组成	461
14.3 照明光学系统的设计	463
14.4 均匀照明的实现	466
14.5 太阳光能量获取系统	469
第 15 章 Zemax 光学设计软件应用	476
15.1 概述	476
15.2 Zemax 的用户界面	477
15.3 Zemax 基本操作	483
15.4 应用实例	492
附录 1 双胶合薄透镜参数表 (冕玻璃在前)	498
附录 2 双胶合薄透镜参数表 (火石玻璃在前)	514
参考文献	529

第 1 章

光学系统像质评价方法

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,改变它们的传播方向和位置,送达仪器的接收器,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:第一方面是光学特性,包括焦距、物距、像距、放大率、入瞳位置、入瞳距离等;第二方面是成像质量,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,则在光学设计部分做了详细介绍。

从物理光学或波动光学的角度出发,可见光是波长在 $400\sim 760\text{ nm}$ 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点物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点物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,因此就存在一个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,人们定义了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,人们定义了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。本章将首先介绍用于检测阶段的像质评价指标——星点检验和分辨率检测,然后介绍用于设计阶段的像质评价指标——几何像差、垂轴像差、波像差、光学传递函数、点列图、点扩散函数、包围圆能量等。

1.2 光学系统的坐标系统、结构参数和特性参数

为了对光学系统进行像质评价,必须首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,在阅读比较时需特别加以注意。在本书中,如不特别加以说明,所讨论的光学系统均为共轴光学系统。

1. 坐标系统、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,在下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	由光线起转到法线
折射角	I'	由光线起转到法线
物方孔径角	U	由光轴起转到光线
像方孔径角	U'	由光轴起转到光线
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'_t	由系统最后一面顶点到像方焦点
物方焦截距	l_t	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。

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式(1-1)表示,所用坐标系如图 1-2 所示。

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

式中, $h^2 = y^2 + z^2$; c 为曲面顶点的曲率; K 为二次曲面系数; $a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ 为高次非曲面系数。

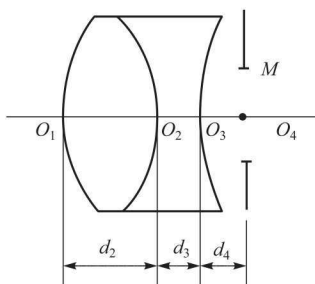


图 1-1 光学系统图

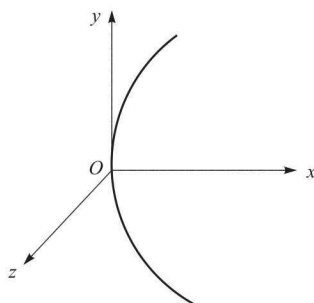


图 1-2 光学系统坐标系

式(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。不同的基准二次曲面系数 K 值所代表的二次曲面如表 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,对应不同的面形参数,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,还要给出面形参数 $K, a_4, a_6, a_8, a_{10}, a_{12}$ 的值。

如果系统中有光阑(如图 1-1 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 $C(656.28 \text{ nm}), D(589.30 \text{ nm}), F(486.13 \text{ nm})$ 3 种波长;用感光底片接收的照相机镜头,则采用 $C, D, g(435.83 \text{ nm})$ 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。

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。从光学设计的角度出发,应包括如下光学特性参数。

(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,望远镜只能对无限远或远距离物平面成像;显微镜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,符号是从左向右为正,反之为负,如图 1-3 所示。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,则用一个很小的数值代替,如 10^{-5} mm,或更小。

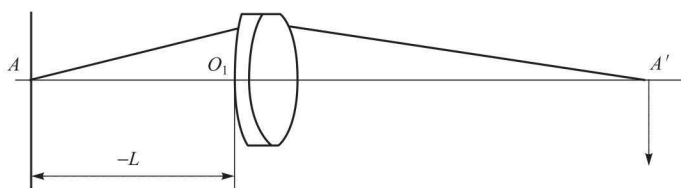


图 1-3 物平面表示方法

(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 1-4(a)和图 1-4(b)所示。

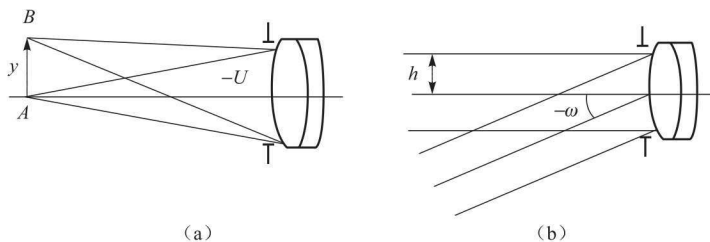


图 1-4 成像范围表示方法

(a) 物平面位在有限远;(b) 物平面位在无限远

(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。

当物平面位在有限距离时,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;当物平面位在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。

(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,则进入系统的光束便完全确定,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角 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就改变了。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

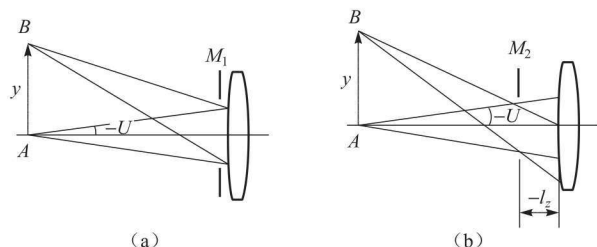


图1-5 孔径光阑位置

(a) 给定孔径光阑;(b) 给定入瞳距离

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。

(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,从系统外形尺寸上考虑,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。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1-6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

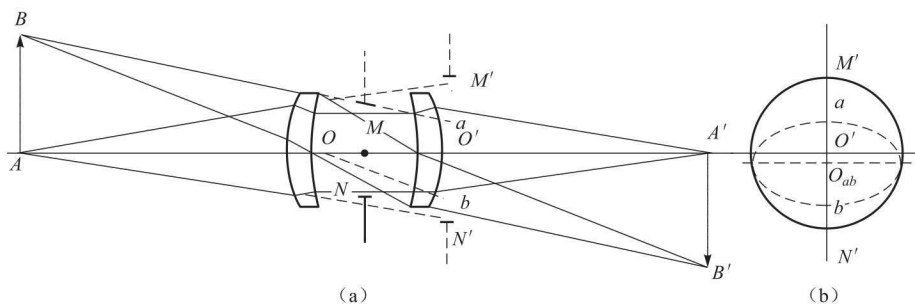


图1-6 光学系统的渐晕

(a) 成像光束限制情况;(b) 成像光束截面

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。

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

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

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。这就是给出系统中每个曲面的通光半径 h ,计算机通过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。这种方式主要是用于最终设计结果的精确评价。例如,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需输入的参数。

1.3 检测阶段的像质评价指标——星点检验

任何一个实际的光学系统都不可能理想成像,即成像不可能绝对地清晰和没有变形,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,因此就存在一个光学系统成像质量优劣的评价问题。成像质量评价的方法分为两大类,第一类用于在光学系统实际制造完成以后对其进行实际测量;第二类用于在光学系统还没有制造出来,即在设计阶段通过计算就能评定系统的质量。对于第一类像质评价方法,主要有“分辨率检验”和“星点检验”。由近代物理光学知道,利用满足线性与空间不变性条件的系统的线性叠加特性,可以将任何物方图样分解为许多基元图样,这些基元对应的像方图样是容易知道的,然后由这些基元的像方图样线性叠加得出总的像方图样。从这一理论出发,当光学系统对非相干照明物体或自发光物体成像时,可以把任意的物分布看成是无数个具有不同强度的、独立的发光点的集合,我们称点状物为物方图样的基元即点基元。这里,也可以理解为一个无限小的点光源物,如小星点,故可采用单位脉冲 δ 函数作为点基元,有如下数学关系

$$O(u, v) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(u_1, v_1) \delta(u - u_1, v - v_1) du_1 dv_1 \quad (1-2)$$

因系统具有线性和空间不变性,有如下物像关系式

$$i(u', v') = \iint_{-\infty}^{\infty} O(u, v) h(u' - M_u u, v' - M_v v) du dv \quad (1-3)$$

式中, $O(u, v)$, $i(u', v')$ 为像方图样; u, v 和 u', v' 分别对应物面和像面的笛卡尔坐标; M_u, M_v 为物像的横向放大率; $h(u' - M_u u, v' - M_v v)$ 为系统的点基元像分布, 即 (u, v) 处的一个点基元物 $\delta(u, v)$ 的像。式(1-3)表示了线性空间不变系统的一个成像过程, 即将任意物强度分布与该系统的点像分布卷积就得到像强度分布, 点物基元像分布完全决定了系统的成像特性。只有当点物基元像分布仍为 δ 函数时, 物像之间才严格保证点对应点的关系。

实际上每一个发光点物基元通过光学系统后, 由于衍射和像差以及其他工艺疵病的影响, 绝对的点对应点的成像关系是不存在的, 因此卷积的结果, 是对原物强度分布起了平滑作用, 从而造成点物基元经系统成像后的失真, 因此采用点物基元描述成像的过程, 其实质是一个卷积成像过程, 通过考察光学系统对一个点物基元的成像质量就可以了解和评定光学系统对任意物分布的成像质量, 这就是星点检验的基本思想。

对一个无像差衍射受限系统来说, 其光瞳函数是一个实函数, 而且在光瞳范围内是一个常数。因此衍射像的光强分布仅仅取决于光瞳的形状。在一般圆形光瞳的情况下, 衍射受限系统的星点像的光强分布函数就是圆孔函数的傅里叶变换的模的平方, 即艾里斑光强分布为

$$\frac{I}{I_0} = \left[\frac{2J_1(\varphi)}{\varphi} \right]^2 \quad (1-4)$$

式中, $\varphi = (2\pi/\lambda)h\theta = (\pi D/\lambda f')r$ 。

上式所代表的几何图形及各个量的物理意义如图 1-7 所示。图 1-8 是艾里斑的三维光强分布图及其局部放大图。表 1-3 给出了艾里斑各极值点的数据。至于焦面附近前后不同截面上的光强分布, 也可通过类似的计算求出。

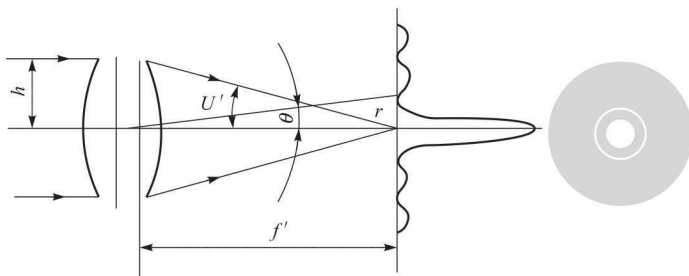


图 1-7 夫朗和斐圆孔衍射图

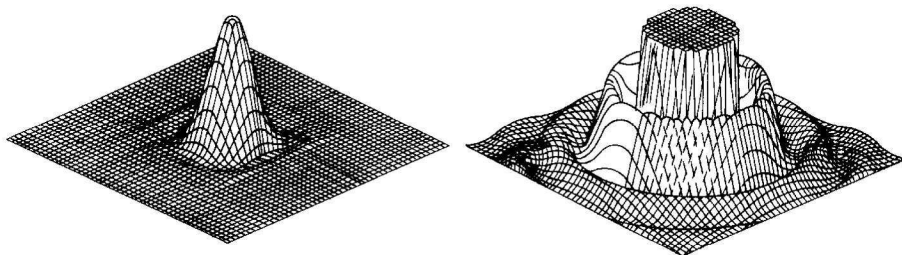


图 1-8 艾里斑的三维光强分布图及其局部放大图(在相对强度 0.03 处截断)