



高职高专“十二五”规划教材

光学零件CAD

与加工工艺

丁驰竹 赵鑫 郑丹 主编



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

光学零件 CAD 与加工工艺

丁驰竹 赵鑫 郑丹 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书阐述了现代光学零件 CAD 设计和加工的基本原理与方法, 由“光学零件 CAD 设计”和“光学零件加工工艺”两部分所构成。

上篇是“光学零件 CAD 设计”, 共四章, 包括光学系统设计的具体步骤、数学原理, 光学系统像差综述和像质评价方法, 并结合通用工程光学设计软件 ZEMAX, 针对不同类型的光学系统, 讲解光学系统的优化设计过程。

下篇是“光学零件加工工艺”, 共九章, 详细讲述了光学零件加工中粗磨、精磨、抛光、定心磨边、镀膜、胶合、检验等各个流程的关键技术。

本教材可作为高职光电专业学生的教材或自学用书, 也可供有关技术人员参考。

p28322

图书在版编目 (CIP) 数据

光学零件 CAD 与加工工艺/丁驰竹, 赵鑫, 郑丹主编. —北京:
化学工业出版社, 2013. 1
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-16092-8

I. ①光… II. ①丁…②赵…③郑… III. ①光学零件-计算机
辅助设计-高等职业教育-教材②光学零件-加工-高等职业教育-教材
IV. ①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 304308 号

责任编辑: 刘 哲 洪 强 张建茹
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 289 千字 2013 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书阐述了现代光学零件 CAD 设计和加工的基本原理与方法，是作者多年来在专业学习、教学实践的基础上编写而成的。本书将理论与实践相结合，更强调其应用和工程性，既可作为光电专业高职学生、本科生的教材或自学用书，也可供有关的技术人员参考。

本书由“光学零件 CAD 设计”和“光学零件加工工艺”两个相对独立而又相互联系的部分所构成。上篇是“光学零件 CAD 设计”，共四章，包括光学系统设计的具体步骤、数学原理，光学系统像差综述和像质评价方法，并结合著名通用工程光学设计软件 ZEMAX，讲解该软件的使用方法，针对不同类型的光学系统，通过设计实例，讲解光学系统的优化设计过程，并按照由易到难的顺序进行排列，便于读者学习领悟。下篇是“光学零件加工工艺”，共九章，详细讲述了光学零件加工中粗磨、精磨、抛光、定心磨边、镀膜、胶合、检验等各个流程的关键技术，融实用性和可操作性为一体。

本书由武汉软件工程职业学院光电子与通信工程系组织编写，其中：上篇的第 1、2、3 章由丁驰竹编写，第 4 章由赵鑫编写；下篇的第 5、6、7 章由张泽奎编写，第 8、9、13 章由郑丹编写，第 10 章由孙冬丽编写，第 11 章由刘新灵编写，第 12 章由戴梦楠编写。

在本书的编写过程中，始终得到了武汉软件工程职业学院光电子与通信工程系的大力支持，李建新教授等有关教师提出了许多有益的意见和建议，在此谨表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免存在欠妥和不当之处，欢迎批评指正。

编 者

2012 年 11 月于武汉

目 录

上篇 光学零件 CAD

第 1 章 光学设计概述	2
1.1 光学系统设计的具体过程和步骤	2
1.2 光学系统优化设计的数学原理	3
第 2 章 光学系统像差综述	5
2.1 轴上点球差	5
2.2 彗差	7
2.3 像散与像面弯曲(场曲)	8
2.4 畸变	9
2.5 色差	10
2.6 波像差	11
2.7 几何像差及垂轴像差的曲线表示	11
2.8 成像质量的波像差表示与瑞利(Reyleigh)判据	15
2.9 中心点亮度	16
2.10 几何点列图的像质评价方法	17
2.11 光学传递函数	18
第 3 章 传统光学系统设计	20
3.1 ZEMAX 软件的基本界面	20
3.2 单透镜设计	25
3.3 双高斯镜头设计	32
3.4 望远镜系统设计	33
3.5 变焦镜头设计	36
3.6 离轴系统设计	39
思考题和习题	43
第 4 章 现代光学系统设计与公差分析	44
4.1 激光聚焦物镜设计	44
4.2 f-theta 镜头设计	47
4.3 手机镜头设计	51
4.4 红外物镜设计	54
4.5 公差分析	57
4.6 公差设计实例	60

下篇 光学零件加工工艺

第 5 章 光学零件工艺一般知识	64
------------------------	----

5.1	光学零件加工工艺的特点及一般过程	64
5.2	光学零件加工工艺的操作知识	66
5.3	光学材料及辅料	68
5.4	光学零部件图及其标注	71
5.5	光学零件的加工余量	76
	思考题	79
第 6 章	光学零件的粗磨成型工艺	80
6.1	光学零件的开料成型	80
6.2	球面零件的粗磨	83
6.3	平面零件及棱镜的粗磨	90
	思考题	93
第 7 章	光学零件的细磨(精磨)工艺	94
7.1	概述	94
7.2	上盘与下盘技术	97
7.3	透镜的细磨工艺	101
7.4	棱镜的细磨工艺	103
	思考题	106
第 8 章	光学零件的抛光工艺	107
8.1	概述	107
8.2	光圈的形成与识别	111
8.3	古典法抛光	117
8.4	高速抛光	120
	思考题	124
第 9 章	光学零件的定心磨边	125
9.1	偏心与定心方法	125
9.2	定心磨边工艺	128
	思考题	131
第 10 章	光学零件的镀膜工艺	132
10.1	光学薄膜	132
10.2	真空镀膜及其设备	135
10.3	真空镀膜工艺	142
10.4	薄膜特性检测技术	146
	思考题	148
第 11 章	光学零件的胶合工艺	149
11.1	光学零件的胶合工艺	149
11.2	胶合定中心	153
	思考题	159
第 12 章	晶体光学零件加工工艺	160

12.1	概述	160
12.2	晶体的选料与定向	161
12.3	晶体的加工工艺	165
	思考题	169
第 13 章	光学加工质量检验	170
13.1	粗糙度及表面疵病检验	170
13.2	面型误差检验	174
13.3	角度与线性尺寸检验	182
	思考题	184
	参考文献	185

上篇 光学零件CAD

第1章 光学设计概述

- 第1章 光学设计概述
- 第2章 光学系统像差综述
- 第3章 传统光学系统设计
- 第4章 现代光学系统设计与公差分析

第 1 章 光学设计概述

1.1 光学系统设计的具体过程和步骤

光学系统的种类繁多，由于其结构参数与成像质量之间的复杂关系，即使简单的镜头，也难以从像质要求直接求解得可用的结果。因此，光学系统设计是一个非常复杂的过程，通常是先根据镜头的性能参数和像差要求选择适当的结构形式，再基于初级像差理论求解或从文献中查找最佳的初始结构参数，然后对像差进行逐步平衡，直到满足像质要求。

光学系统初始结构设计方法包括算法、经验法、计算结合经验法、查资料法（即根据孔径、视场、波长、焦距，进行整体缩放）等。

光学系统设计的基本步骤如下。

第 1 步，根据仪器的总体性能设计要求，确定光学镜头的性能指标，即确定镜头的焦距、视场范围、相对孔径或数值孔径等，同时确定镜头的成像质量要求。

第 2 步，根据这些具体的指标，选择镜头的结构形式，设计光学系统的初始结构。

初始结构的选择可以有多种途径，最常用的是在已经失效公开的专利中或者学术期刊上发表的论文中找一个光学特性相似的镜头，通过整体缩放，作为设计的初始结构。对于一些常见的光学镜头，有许多现成的成像质量好的结构可供选择；而一些新型的光学镜头，则要在选型上花费一番工夫。对于所选的初始结构，要进行初步的外形尺寸计算和可行性分析，甚至返回第 1 步，对设计指标进行修正。

第 3 步，进行像差校正，即通过改变镜头的面型参数（球面透镜的曲率半径、非球面透镜的各非球面系数），改变透镜的厚度及透镜之间的间隔，更换透镜材料，改变光瞳位置和大小，来减小光学系统的像差。这一步称为光学镜头的优化设计。

在光学设计中，像差校正是最重要的一步。工作量较大，对设计人员的要求很高，需要像差理论的指导和设计经验的积累。有经验的设计者可以根据对像差情况的计算与分析，有针对性地改变各镜片的形状和位置，对镜头进行优化。

第 4 步，进行像质评价，即按照要求的成像质量对镜头的像差值进行评价。如果没有达到设计要求，则回到第 3 步，分析原因，采取适当的步骤和措施，继续进行像差校正，直至镜头的成像质量符合要求。在实际的设计过程中，像差校正是一个循序渐进的过程，往往需要在第 3 步和第 4 步之间反复校正。如果经多次校正，像差仍达不到要求，此时要回到第 2 步，重新寻找合适的结构形式。

第 5 步，计算分析各镜头元件的加工公差和装配公差。

第 6 步，绘制光学系统图、光学组件和零件图，并作规范的各项标注。

光学设计软件的应用并没有改变这一过程，只是使这一过程的进程大为加快，使设计质量和效率大为提高。

1.2 光学系统优化设计的数学原理

光学系统的结构由所有透镜的曲率半径或非球面系数、透镜的厚度和间隔、各透镜的折射率和色散系数所确定, 这些参数统称为系统的结构参数, 可以用 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示。一组 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 就代表了光学系统的一个设计方案。而多种像质评价方法对应的判据和指标、系统的焦距、后工作距和各类几何像差、波像差, 都是光学系统优化设计的目标, 统称为像差, 即广义像差, 可以用 $f_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示。显然, 对于给定结构参数的光学系统, 在一定的孔径和视场下, 其像差也就完全确定, 因此像差是结构参数的函数, 即

$$f_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad j=1, 2, \dots, m$$

光学系统优化设计, 就是要修改结构参数 x , 使 m 种像差逐渐达到各自的目标值。

但结构参数有一定的限制, 如透镜的边缘和中心厚度不能小于一定的数值, 透镜之间的间隔不能为负值, 折射率和色散系数受限于材料而不能任意改变, 系统的总长度受实际使用情况的限制等。因此修改结构参数时, 需要一些边界条件的约束。

光学系统设计有阻尼最小二乘法、适应法、正交法等多种优化方法, 其中阻尼最小二乘法是目前优化设计程序中较为普遍采用的一种方法。

首先构造一个评价函数 $\varphi(x)$, 来综合反映成像质量的好坏, 并引导结构参数的修改。设各种像差的目标值为 f_j^* , 而当前值为 f_j , 使 $f_j - f_j^*$ 参与评价, 即

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^m (f_j - f_j^*)^2$$

考虑到对不同的像差应区别对待, 对于严重影响像质的像差应严格控制, 而另一些影响不大的像差可以适度放宽要求, 在各种像差前乘上一个表示其相对重要性的非负数 W , 称为权因子。要严格控制的像差, 权因子较大; 要求不高的像差, 权因子较小; 不需考虑的像差, 权因子为零。对光学系统进行设计时, 可根据具体的像质要求, 选用若干种像差作为受控像差。修改过的评价函数为

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^m W_j (f_j - f_j^*)^2$$

光学系统优化设计的任务, 就是在边界条件的限制下, 寻求一组结构参数 x , 使评价函数 $\varphi(x)$ 具有尽可能小的值。

根据多元函数的极值理论, 使 $\varphi(x)$ 为极值的条件是 $\varphi(x)$ 关于各自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的一阶偏导数为零, 即

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^m 2W_j (f_j - f_j^*) \frac{\partial f_j}{\partial x_i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, n$$

上式是一组非常复杂的非线性函数关系式, 为便于计算, 将像差 $f_j(x)$ 在初始点 x_0 作泰勒级数展开, 并只取其线性项, 有

$$f_j = f_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n \quad j=1, 2, \dots, m$$

式中, f_{0j} 是初始结构参数为 x_0 时的广义像差, 原则上可以由光路计算得出; $\partial f_j / \partial x_i$

是第 j 种像差关于第 i 个结构参数的偏导数,原则上可由基于光路计算的差商求得。这样得到一个 n 元线性方程组,当 $m > n$ 时有唯一解。这种方法称为最小二乘法。但实际上,在远离极小点时,像差函数的非线性程度非常严重,由该线性方程组求得的 Δx_i 往往太大,远远超出了实际允许的线性区。因此,最小二乘法在光学系统优化中没有实用意义。

改进的办法是采用阻尼最小二乘法,即在评价函数中加入一个对 Δx 给予阻尼的项,将评价函数改为

$$\phi(x) = \varphi(x) + p \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2$$

式中, p 是一个适当的正数,称为阻尼因子。此时,就不只是对 $\varphi(x)$,而是对包含带阻尼因子的参数修改量 Δx 在内的新评价函数 $\phi(x)$ 使用最小二乘法。在对新评价函数作最优化处理时,被减小的不仅是像差,同时还有修改步长 Δx 本身。 Δx 被减小的程度由阻尼因子 p 的大小决定。适当地选择阻尼因子 p ,就能有效控制 Δx ,使之在像差的线性范围内,从而很好地防止评价函数的早期发散。此外,由于在新评价函数中加入了 $p \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2$ 项,实际上又加入了 n 项要求,使总要求数变为 $m+n$,使阻尼最小二乘法也适用于 $m < n$ 的情况。

目前许多光学镜头优化设计程序采用的就是阻尼最小二乘法。

第2章 光学系统像差综述

实际光学系统与理想光学系统有很大差异，即物空间的一个物点发出的光线经实际光学系统后，不再会聚于像空间的一点，而是形成一个弥散斑，产生各种成像缺陷。这些成像缺陷可以用各种像差来描述。

光学系统对单色光成像时，可能产生五种性质不同的像差：球差、彗差、像散、像面弯曲和畸变，统称为单色像差。对白光或复色光成像时，由于色散的存在，还会产生两种色差，即轴向色差和垂轴色差。

光学系统设计的目的就是为了校正像差，使光学系统能够在一定的相对孔径下对给定大小的视场成清晰的像。事实上，不可能获得将各种像差完全校正和消除的实际光学系统。但是考虑到人眼和其他光能接收器都具有一定的缺陷，只要将像差校正到某一限度以内，使人眼和其他光能接收器觉察不出其成像的缺陷，这样的光学系统从实用意义上说就可以认为是完善的。

2.1 轴上点球差

2.1.1 球差的定义和表示方法

由几何光学的知识可知，光轴上一点发出的光线经球面折射后在光轴上的截距 L' ，是入射光线与光轴夹角 U （孔径角）或入射光线在球面上的入射点高度 h 的函数，即 L' 随 U 或 h 不同而不同。因此，轴上点发出的同心光束经光学系统各个球面折射后，将不再是同心光束。不同倾角的光线交光轴于不同位置，相对于理想像点的位置有不同偏离。这种偏离称为轴向球差，简称为球差。

球差可以表示为

$$\delta L' = L' - l'$$

式中， $\delta L'$ 为球差大小，可正可负； L' 为与某一入射孔径角相对应的实际的像方截距； l' 为理想像点对应的像方截距。显然，与光轴成不同角度的各条光线都有各自的球差。

如图 2-1 所示，由于球差的存在，在理想像面上的像点已不再是一个点，而是一个圆形的弥散斑。弥散斑的半径用 $\delta T'$ 表示，称作垂轴球差。它与轴向球差 $\delta L'$ 之间有如下关系

$$\delta T' = \delta L' \tan U'$$

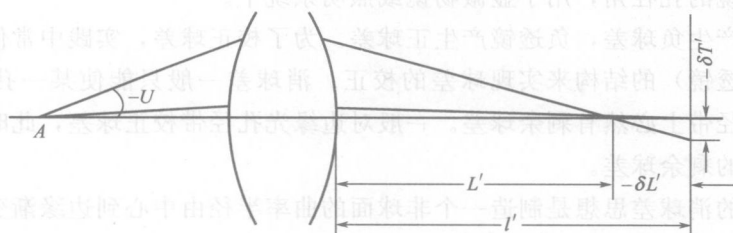


图 2-1 球差

球差是孔径角 U 或入射高度 h 的函数。根据光束的轴对称性质, 可以把球差表示成 U 或 h 的幂级数。显然, 球差是关于 U 或 h 的偶函数, 且当 U 或 h 为零时球差也为零, 因此可以写出以下两个表达式:

$$\delta L' = a_1 U^2 + a_2 U^4 + a_3 U^6 + \dots$$

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + A_3 h^6 + \dots$$

垂轴球差是关于 U 或 h 的奇函数, 也可以用幂级数的方式表示:

$$\delta T' = b_1 U^3 + b_2 U^5 + b_3 U^7 + \dots$$

$$\delta T' = B_1 h^3 + B_2 h^5 + B_3 h^7 + \dots$$

展开式中的第一项称为初级球差, 此后各项分别称为二级球差、三级球差等, A_1 、 A_2 、 A_3 分别称为初级球差系数、二级球差系数、三级球差系数。二级以上的球差统称为高级球差。初级球差与孔径的平方成正比, 二级球差与孔径的 4 次方成正比, 三级球差与孔径的 6 次方成正比。当孔径较小时, 主要存在初级球差; 孔径较大时, 高级球差增大。大部分光学系统二级以上的球差很小, 可以忽略。

对光学系统而言, 球差是由系统各个折射面产生的球差作用之和, 可以用球差分布式表示。对于由 k 个面组成的光学系统, 球差分布式为

$$\delta L' = - \frac{1}{2n'_k u'_k \sin U'_k} \sum_1^k S_-$$

$\sum S_-$ 称为光学系统球差系数, S_- 为每个面上的球差分布系数, 表征该光学面对最终球差的贡献量

$$S_- = \frac{niL \sin U (\sin I - \sin I') (\sin I' - \sin U)}{\cos \frac{1}{2}(I-U) \cos \frac{1}{2}(I'+U) \cos \frac{1}{2}(I+I')}$$

2.1.2 球差的校正

可以计算得出, 对于单个折射球面, 有三个特殊的物点位置不产生球差。

- (1) $L=0$, 此时 $L'=0$, 即物像点均位于球面顶点时, 不产生球差。
- (2) $L=L'=r$, 即物像点均位于球面的曲率中心时, 不产生球差。
- (3) $\sin I' - \sin U = 0$, 即 $I'=U$, 此时

$$L = (n+n')r/n$$

$$L' = (n+n')r/n'$$

不管孔径角 U 多大, 均不产生球差。

上述三对不产生球差的共轭点称为不晕点或齐明点。可以利用齐明点的特性来制作齐明透镜, 以增大物镜的孔径角, 用于显微物镜或照明系统中。

一般正透镜产生负球差, 负透镜产生正球差。为了校正球差, 实践中常使用正负透镜组合 (例如双胶合透镜) 的结构来实现球差的校正。消球差一般只能使某一孔径带的球差为零, 而在其他孔径带上必然有剩余球差。一般对边缘光孔径带校正球差, 此时在 0.707 高度的光线具有最大的剩余球差。

一种理想化的消球差思想是制造一个非球面的曲率半径由中心到边缘渐变的透镜, 类似于眼睛中的水晶体的结构, 从而达到消球差的目的。

2.2 彗差

小彗差是一种描述轴外点光束经系统成像后失去相对于主光线的对称性的像差。

如图 2-2 所示,轴外物点 B 发出的子午光束中, B_a 、 B_p 、 B_b 分别为上光线、主光线、下光线。由于它们在球面上的入射点相对于辅轴 BC 有不同的高度,即有不同的球差,因此原本对称于主光线的上、下光线经球面折射后,失去了对称性,其交点 B'_i 相对于主光线有偏离,偏离量 K'_i 的大小反映了子午光束失对称的程度,称为子午彗差。

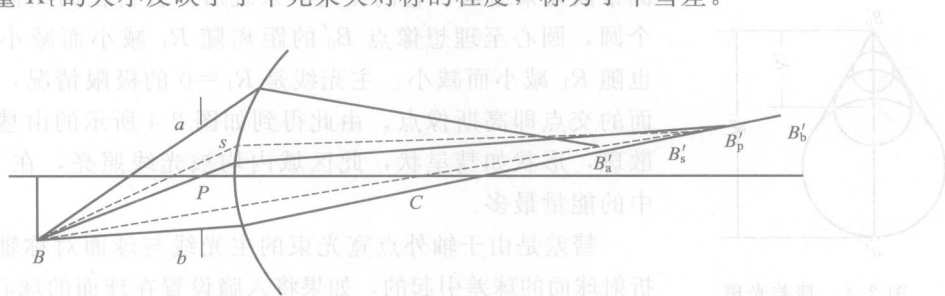


图 2-2 彗差

子午彗差(图 2-3)以上、下光线与高斯像面交点高度的平均值和主光线与高斯像面交点高度之差来表征,即

$$K'_i = \frac{1}{2}(y'_a + y'_b) - y'_p$$

式中, y'_a 、 y'_b 、 y'_p 分别是上、下、主光线与高斯像面交点的高度。

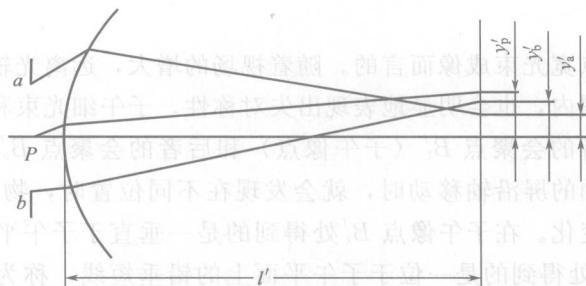


图 2-3 子午彗差

类似的,对于弧矢平面(包含主光线并与子午平面垂直的平面)上具有相同孔径的一对前后光线,由于对称于辅轴,其折射光线必相交于辅轴上。这对光线在球面上的入射高度略高于主光线,等效于子午平面上比主光线略高的一条光线 B_s ,因此,其与辅轴的交点,即前后光线的交点 B'_s ,也将偏离主光线,其偏离量用 K'_s 表示,称为弧矢彗差。

前、后光线与高斯像面的交点高度必相等,故有

$$K'_s = y'_s - y'_p$$

式中, y'_s 是前、后光线与高斯像面交点的高度, y'_p 是主光线与高斯像面交点的高度。

彗差是轴外点成像时产生的一种宽光束像差,与视场 y 和孔径角 U 或入射高度 h 有关。当孔径角 U 改变符号时,彗差的符号不变,故彗差的级数展开式中只有 $U(h)$ 的偶次项;

当视场 y 改变符号时, 彗差反号, 故彗差的级数展开式中只有 y 的奇次项; 当视场和孔径均为零时, 没有彗差, 故展开式中没有常数项。彗差的级数展开式可写为

$$K'_s = A_1 y h^2 + A_2 y h^4 + A_3 y^3 h^2 + \dots$$

式中, 第一项为初级彗差, 第二项为孔径二级彗差, 第三项为视场二级彗差。大孔径小视场的光学系统, 彗差主要由一、二项决定; 大视场、孔径较小的光学系统, 彗差主要由一、三项决定。

轴外点发出的充满整个入瞳的光束可以看作是由一系列与入瞳面相截成不同半径 R_1 的圆锥面光束组成。它们经光学系统后, 各自在高斯像面上形成一个圆, 圆心至理想像点 B'_0 的距离随 R_1 减小而减小, 圆的半径也随 R_1 减小而减小。主光线是 $R_1=0$ 的极限情况, 它与高斯像面的交点即高斯像点。由此得到如图 2-4 所示的由彗差形成的弥散斑, 形状如彗星状, 此区域内均被光线照亮, 在 B'_0 点附近集中的能量最多。

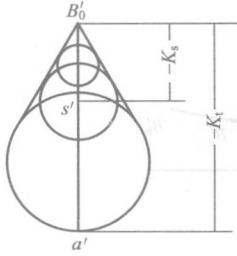


图 2-4 彗差光斑

彗差是由于轴外点宽光束的主光线与球面对称轴不重合而由折射球面的球差引起的, 如果将入瞳设置在球面的球心处, 则通过入瞳中心的主光线与辅助光轴重合, 此时, 轴外点同轴上点一样, 入射的上下光线必将对称于该辅助光轴, 出射光线也一定对称于辅轴, 此时不再产生彗差。

彗差的大小、正负还与透镜的形状、系统的结构形式有关, 采用对称式结构形式可消除彗差。

2.3 像散与像面弯曲 (场曲)

2.3.1 像散

彗差是针对轴外点宽光束成像而言的。随着视场的增大, 远离光轴的物点, 即使在沿主光线周围的细光束范围内, 也会明显地表现出失对称性。子午细光束和弧矢细光束能各自会聚于主光线上, 但前者的会聚点 B'_t (子午像点) 和后者的会聚点 B'_s (弧矢像点) 并不重合。当用一垂直于光轴的屏沿轴移动时, 就会发现在不同位置时, 物点 B 发出的成像细光束的截面形状有很大变化。在子午像点 B'_t 处得到的是一垂直于子午平面的短线, 称为子午焦线; 在弧矢像点 B'_s 处得到的是一位于子午平面上的铅垂短线, 称为弧矢焦线, 且两焦线互相垂直。在两条短线之间, 光束的截面形状由子午焦线变到长轴与子午面垂直的椭圆, 变到圆, 变到长轴在子午面的椭圆, 再变到弧矢焦线。子午光线交点 B'_t 和弧矢光线交点 B'_s 间的沿轴偏离, 称为像散。

像散的存在是因为轴外物点发出的细光束在光学球面上所截得的曲面是非对称的, 在子午和弧矢面上表现最大的曲率差, 从而会聚点不同, 产生像散。若入瞳处于球心处, 则不存在像散。

2.3.2 场曲

子午像点 B'_t 和弧矢像点 B'_s 相对于高斯像面有偏离, 偏离量的大小与视场有关。子午像点构成的像面称为子午像面, 弧矢像点构成的像面称为弧矢像面, 两者均为以光轴为旋转轴的旋转曲面, 并与高斯像面相切。

子午像点 B'_t 和弧矢像点 B'_s 相对于高斯像面的沿轴偏离 x'_t 和 x'_s ，表征了子午像面和弧矢像面的弯曲程度，分别称为子午像面弯曲和弧矢像面弯曲，也叫场曲。两者之差，即 $\Delta x' = x'_t - x'_s$ ，就是同一视场的像散，见图 2-5。

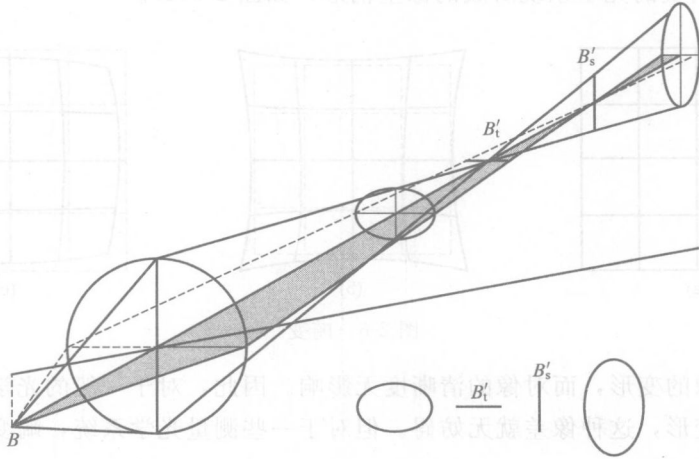


图 2-5 像散

细光束的场曲与孔径无关，只是视场的函数。场曲的级数展开式为

$$x'_{i(s)} = A_1 y^2 + A_2 y^4 + A_3 y^6 + \dots$$

式中，第一项为初级场曲，第二项为二级场曲，第三项为三级场曲。

存在场曲的光学系统成像时，一平面物体将变成一回转曲面，在任何像平面处都不会得到一个完善的平面像。

像散和场曲是两种密切联系的像差。但是需要说明的是，场曲是由球面特性所决定的，即使无像散，即子午像面与弧矢像面重合在一起，仍存在场曲，此时的像面弯曲称为匹兹伐尔场曲，此时的像面为匹兹伐尔像面。

2.4 畸变

在讨论理想光线的成像时，认为在一对共轭的物像平面上，其放大率是常数。但对于实际光学系统，只有视场较小时才具有这一性质。而视场较大时，像的放大率就要随视场而异，不再是常数，这样会使像相对于物失去相对性。这种使像变形的缺陷称为畸变。

设一视场的主光线与高斯像面交点的高度为 y'_p ，而理想像高为 y'_0 ，两者之差称为线畸变（绝对畸变），即

$$\delta y' = y'_p - y'_0$$

实际上常用 $\delta y'$ 相对于理想像高的百分比来表示畸变，称为相对畸变，即

$$\frac{\delta y'}{y'_0} = \frac{y'_p - y'_0}{y'_0} \times 100\%$$

畸变仅与视场 y 相关，随 y 符号改变而反号，故畸变的级数展开式中仅有 y 的奇次项

$$\delta y' = A_1 y^3 + A_2 y^5 + \dots$$

式中，第一项为初级畸变，第二项为二级畸变。展开式中没有 y 的一次项，因为 y 的

一次项代表理想像高。

有畸变的光学系统,若对等间距的与光轴同心的圆物面成像,将得到非等间距的同心圆。若物面为图 2-6(a)所示的正方形网格,则由正畸变的光学系统所成的像呈枕形,如图 2-6(b),由负畸变的光学系统所成的像呈桶形,如图 2-6(c)。

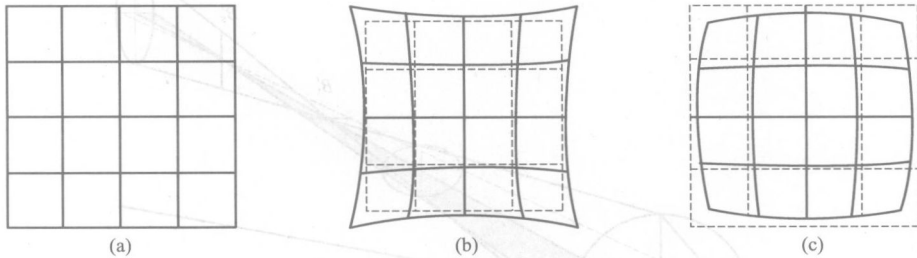


图 2-6 畸变

畸变只引起像的变形,而对像的清晰度无影响。因此,对于一般的光学系统,只要感觉不出它所成像的变形,这种像差就无妨碍。但对于一些测量光学系统,畸变将直接影响测量精度,必须严格校正。

采用对称式结构可自动消除畸变,孔径光阑处于透镜之前得到负畸变,处于透镜之后得到正畸变,所以,如果将光阑设置在两透镜之间,可能消除畸变。将光阑设置在球心或与透镜重合,也可不产生畸变。

2.5 色差

绝大多数光学仪器用白光成像。白光是由各种不同波长的单色光组成的,所以白光经光学系统成像可看成是同时对各种单色光的成像。各种单色光各具有前面所述的各种单色像差,而且其数值也是各不相同的,这是因为任何透明介质对不同波长的单色光具有不同的折射率。白光经光学系统第一个表面折射后,各种色光就被分开了,随后就在光学系统内以各自的光路传播,造成了各种色光之间成像位置和大小差异,称之为色差。色差分为两种,描述不同色光对轴上物点成像位置差异的色差称为位置色差或轴向色差,描述不同色光成像倍率差异的色差称为倍率色差或垂轴色差。

对于目视光学系统,通常用蓝色的 F 光和红色的 C 光来描述色差。

2.5.1 位置色差

如图 2-7,轴上物点 A 发出一束近轴的白光,经光学系统后,其中 F 光交光轴于 A'_F , C 光交光轴于 A'_C ,它们分别是 A 点发出的 F 光和 C 光的高斯像点,它们的轴向偏离就是近轴光的位置色差,用 $\delta l'_{ch}$ 表示,即

$$\delta l'_{ch} = l'_F - l'_C$$

由于位置色差的存在,光轴上一点即使以近轴光成像也不能得到清晰像,而是在像平面上产生彩色光圈状的弥散斑。可见,色差严重影响光学系统的像质,成像用的光学系统都必须校正位置色差。

单透镜不能校正色差。单正透镜产生负色差,单负透镜产生正色差。色差的大小与光焦