

光 学 设 计

徐金镛 孙培家 编

国 防 工 业 出 版 社

光 学 设 计

徐金镛 孙培家 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是高等院校光学仪器类专业本科生的必修课教材。

本教材包括像差理论和光学设计的各项基本内容：初级像差理论、高级像差的特性、像差计算、各种典型光学系统的设计方法、成像质量评价、光学传递函数和光学系统像差的自动校正等。附有思考题、习题和设计实例。本书亦可供光学仪器专业的工程技术人员参考。

光 学 设 计

徐金禧 孙培家 编

责任编辑 沈崇刚

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张21 486千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷 印数：0,001—2,080册

ISBN 7-118-00555-X/O·44 定价：4.15元

前 言

本教材是根据原兵器工业部第一教材编审委员会工程光学编审小组审定的《光学设计》课程教学大纲编写的。是高等院校光学仪器类专业本科生的必修课教材。

全书共计十四章，包括像差理论和光学设计两大部分。前六章为像差理论部分，主要叙述了共轴球面系统中几何像差分类、初级像差理论和实际像差的计算，并介绍了高级像差的级数展开和波像差，每章后面附有少量的习题和思考题，试图使学生巩固和加强所学知识。后八章为光学设计部分，主要叙述了光学系统的解析法设计基础和各种典型光学系统的设计方法，并介绍了像质评定、光学传递函数和光学系统像差的自动校正，并附有设计实例，以便提高学生分析问题和解决问题的能力。本书内容较全面，叙述力求清楚易懂。书中的重要概念、定义和符号均符合国家标准。

本书由华东工学院徐金镛和孙培家合编。第一章至第六章由徐金镛编写，第七章至第十四章由孙培家编写。

本书蒙北京理工大学丁汉章、袁旭沧教授主审，原兵器工业部第一教材编审委员会工程光学编审小组审查，机械电子工业部兵工教材编审室宋筱平审定。作者谨向他们致以深切谢意。并向引为本书参考资料的作者和单位致谢。

由于编者水平有限、编写时间仓促、书中缺点与不足之处，敬请读者批评指正。

作 者 于南京

目 录

第一章 像差概述	1	§ 5.4 畸变的计算	113
§ 1.1 色差	1	§ 5.5 宽光束子午场曲和轴外球差的 计算	115
§ 1.2 单色像差	3	§ 5.6 色差的计算	116
第二章 球差	9	§ 5.7 子午光束的垂轴像差曲线及其综合 分析	117
§ 2.1 球差图形	9	§ 5.8 向量形式的球面光路计算公式	123
§ 2.2 轴上物点的球差分布公式	13	§ 5.9 向量形式的二次曲面光路计算公式 和 细光束像散公式	127
§ 2.3 单个折射球面球差公式的讨论	16	§ 5.10 高次非球面的光路计算公式	131
§ 2.4 初级球差公式	23	§ 5.11 向量形式光路计算的初始与终结 公式	135
§ 2.5 带球差和高级球差	27	§ 5.12 弧矢像差特性曲线	139
习题与思考题	32	§ 5.13 像差的级数展开和高级像差 计算	141
第三章 初级像差理论	33	§ 5.14 像差平衡	144
§ 3.1 轴外物点的初级像差公式	33	§ 5.15 像差的综合	154
§ 3.2 单色像差的性质	38	习题与思考题	160
§ 3.3 共轴球面系统的初级像差计算 公式	46	第六章 波像差与像差容限	161
§ 3.4 单个折射球面像差的讨论	53	§ 6.1 概述	161
§ 3.5 场曲的讨论	57	§ 6.2 波像差与几何像差的关系	162
§ 3.6 棱镜的单色像差	59	§ 6.3 参考点移动时波像差的变化及最 佳像面的选择	168
§ 3.7 反射球面的单色像差	61	§ 6.4 波像差的一般表示式	175
§ 3.8 初级像差系数和光阑位置的关系	63	§ 6.5 色差的波像差表示	177
§ 3.9 初级像差系数和物面位置的关系	66	§ 6.6 像差容限	180
§ 3.10 薄透镜系统的初级像差公式	71	习题与思考题	184
习题与思考题	76	第七章 光学系统的解析法设计 基础	185
第四章 色差	77	§ 7.1 像差特性参数的规化	185
§ 4.1 光学玻璃的色散和折射率插值 公式	77	§ 7.2 双胶合透镜结构与 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{c}$ 的 关系	190
§ 4.2 近轴色差	79	§ 7.3 单透镜结构与 $\bar{P}^\infty$ 、 $\bar{W}^\infty$ 、 $\bar{c}$ 的关系	201
§ 4.3 薄透镜系统的近轴色差	85	第八章 望远镜物镜	204
§ 4.4 光学系统的色差校正	88	§ 8.1 望远镜物镜的光学特性和类型	204
§ 4.5 二级光谱	93	§ 8.2 双胶合物镜的设计方法	206
§ 4.6 色球差	97	§ 8.3 摄远物镜设计	210
习题与思考题	99		
第五章 像差的计算和平衡	100		
§ 5.1 球差的计算	100		
§ 5.2 彗差的计算和正弦条件	100		
§ 5.3 细光束像散的计算公式	107		

§ 8.4 反射物镜, 折射-反射物镜	217	§ 12.3 聚光镜的设计	289
§ 8.5 斯密特校正板的设计	221	§ 12.4 螺纹透镜设计	290
第九章 目镜	224	第十三章 光学系统的自动设计	
§ 9.1 目镜的光学特性和特点	224	方法	292
§ 9.2 目镜的类型	227	§ 13.1 概述	292
§ 9.3 对称型目镜设计	230	§ 13.2 评价函数和权因子	293
§ 9.4 目镜的选型	236	§ 13.3 最小二乘法	294
§ 9.5 望远系统的像差	241	§ 13.4 阻尼最小二乘法	297
第十章 显微镜物镜	244	§ 13.5 应用光学自动设计程序设计 举例	301
§ 10.1 显微镜物镜的光学特性	244	第十四章 像质评定与光学传递	
§ 10.2 显微镜物镜的类型	245	函数	304
§ 10.3 显微镜物镜的设计方法	249	§ 14.1 像质评定的几种方法	304
第十一章 照相物镜	258	§ 14.2 光学传递函数的基本思想	307
§ 11.1 照相物镜的光学性能	258	§ 14.3 光学系统的成像	309
§ 11.2 照相物镜的分辨率	260	§ 14.4 光学传递函数	313
§ 11.3 照相物镜的像差和结构特点	261	§ 14.5 光学传递函数的计算公式	317
§ 11.4 照相物镜的类型	264	§ 14.6 理想系统的光学传递函数	322
§ 11.5 双高斯型物镜的设计方法	269	§ 14.7 几何光学传递函数的计算	323
§ 11.6 变焦距物镜	281	§ 14.8 用光学传递函数评定成像质量	326
第十二章 聚光照明系统	286	参考文献	327
§ 12.1 聚光照明系统的作用	286		
§ 12.2 聚光镜的类型	287		

第一章 像差概述

在几何光学中曾研究过物体经光学系统成像的一些基本规律，主要是研究物体经过光学系统所成像的大小、位置、倒正等问题，以及如何根据对仪器的成像要求，确定光学系统各透镜的焦距、口径，棱镜的型式、尺寸及各光学组件之间的间隔等。也就是解决光学系统的外形尺寸计算问题。

光学系统的外形尺寸计算是根据理想光学系统理论进行的。这时认为光学系统使物体成“理想像”或“完善像”。所谓“理想像”是指物方一物点发出的一束光线经过光学系统后仍交于一点（仅仅交于唯一的点），在物方位于垂直于光轴的平面上的物体，其像位在与光轴垂直的平面上，且物和像的几何形状完全相似。简单说，就是成像清晰（物点发出的光线经过光学系统不交于一点，像就会模糊。）不变形。这也是对实际光学系统成像的要求。

但对实际光学系统，只有在近轴区（即只能对近轴的小物体以很小孔径角的光束成像）才能像理想光学系统那样具有完善成像的性质。从实用的角度，任何光学系统都要根据仪器的使用要求而具有一定大小的视场和相对孔径，它远超出近轴所限定的范围，因而成像不再是理想的，即由同一物点发出的光线经过光学系统以后，出射光线并不聚交于理想像点，使得像变模糊并有变形。通常把用近轴光学公式求出的像称为实际光学系统的理想像，而把实际光线的交点和理想像点之间位置的误差称为“像差”。

实际光学系统，除了平面反射镜外，成像总是不完善而存在像差的。具有这种成像缺陷的光学系统是不能满足使用要求的，在设计光学仪器时必须适当选取光学系统的结构参数（透镜的表面曲率半径、厚度、间隔和制造透镜的玻璃）使光学系统的像差减小到可以允许的限度（人眼和所有其他光能接受器都具有一定的缺陷，只要光学系统的像差值小于一定的限度，人眼和其它光能接受器就察觉不出）以内，通常称为“消除像差”或“校正像差”。

§ 1.1 色 差

在物理光学中研究正常色散时曾指出：不同波长光的折射率不同，一切透明介质的折射率都随着光的波长增加而减小。

由近轴光学的物像位置关系式 $n'/l' - n/l = (n' - n)/r$ 和物像大小关系式 $\beta = y'/y = n'l'/n'l$ 可知，对同一物点（ l 和 y 一定）来说，介质的折射率 n 和 n' 不同，像面位置 l' 和像高 y' 都会发生改变。由同一物点发出的白光经光学系统以后，不同颜色光线不再聚交于一点，因而不能成一白色像点，而出现色彩，这样的现象称为色差。不同颜色光线像面位置之差称为轴向色差，不同颜色光线像高之差称为垂轴色差。

1.1.1 轴向色差

如果把一个简单的正透镜用来对无限远物体成像, 根据薄透镜焦距公式 $1/f' = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2)$, 不同颜色光线的焦距不同, 则所成的像面位置也不同, 如图 1-1 所示。

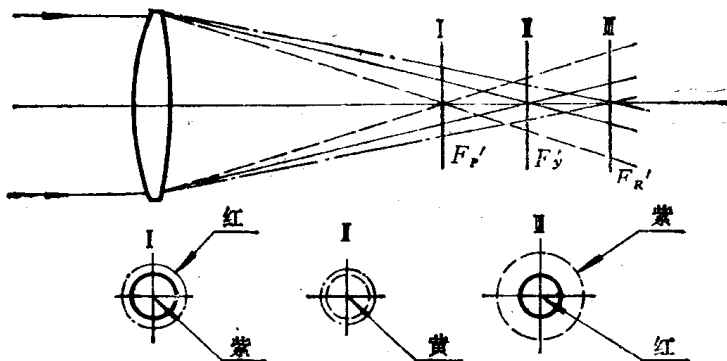


图 1-1

红光的像面最远, 紫光的像面最近。对轴上物点来说不同颜色光线的像点依次排列在光轴上。如果在紫光的像点 F'_P 处用屏幕观察, 则屏幕上呈现一个圆形的光斑, 光斑中心为一紫色亮点, 外边绕有红色边缘, 如图中位置 I 所示; 如果在黄光的像点 F'_Y 处观察, 则光斑中心为黄色亮点, 周围出现红光和紫光合成的紫红色光环, 如图中位置 II 所示; 如果在红光的像点 F'_R 处观察, 则光斑中心为红色亮点, 周围有紫色边缘, 如图中位置 III 所示。因此像平面在任何位置上都得不到一个清晰的白色像点, 而使得整个像面模糊不清。通常用两种指定波长光线的像平面位置之差表示轴向色差, 最常见的是用 C 和 F 两种波长光线的像面间距离 $\Delta l'_{FC}$ 来表示轴向色差, 如图 1-2 所示。由图可知:

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

$\Delta l'_{FC}$ 的符号规则是: 以 C 光线像面为起点计算到 F 光线的像面, 向右为正, 向左为负。轴向色差 (或称为位置色差) 对整个像面上每个像点的质量都要产生影响。

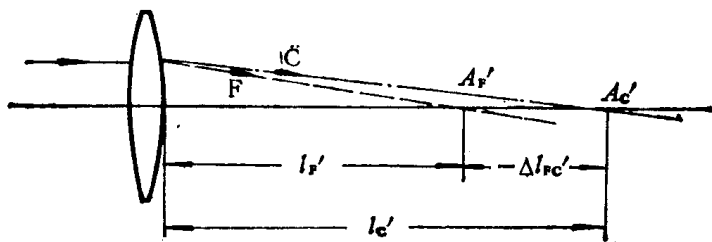


图 1-2

1.1.2 垂轴色差

由无限远轴外物点像高的计算公式 $y' = f \tan \omega$ 可知, 不同颜色光线的物方焦距 f 不同, 像高 y' 也不同。换句话说, 不同颜色光线的放大率不同。如图 1-3 所示, 红光

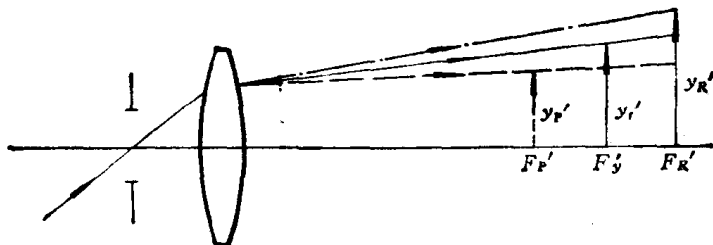


图 1-3

的像高最大，紫光的像高最小。这种不同颜色像高的差异称为垂轴色差（或称为倍率色差）。当光学系统存在垂轴色差时，轴外物体所成的像将出现由红到紫的色边，使像模糊不清。通常也是用两种指定波长光线在同一像平面上主光线的投射高（像高）之差表示垂轴色差，最常见的是用C和F两种波长的主光线在D光像平面上的投射点高度之差 $\Delta y'_{FC}$ 来表示垂轴色差，如图 1-4 所示。由图可知：

$$\Delta y'_{FC} = y'_F - y'_C \quad (1-2)$$

$\Delta y'_{FC}$ 的符号规则是：以C光线像点为起点计算到F光线的像点，向上为正，向下为负。

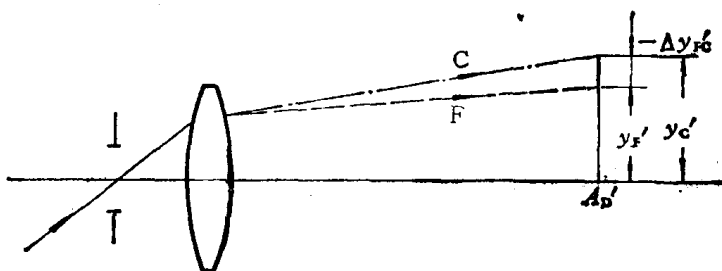


图 1-4

轴上点显然没有垂轴色差，不同像高的像点垂轴色差各不相同，一般随着像高的增加而增大。

单个透镜（正透镜或负透镜）总是存在色差（轴向色差和垂轴色差）的，但用不同色散的光学玻璃做成的正透镜和负透镜组合在一起，可以消除色差。所以实际光学系统中的透镜组大多数由正透镜和负透镜组合而成。

§ 1.2 单色像差

即使是同一波长的光线通过透镜成像时，出射光线一般也并不聚交于理想像点，这样的像差称为单色像差。下面分别介绍轴上点的单色像差和轴外点的单色像差。

1.2.1 轴上点的单色像差——球差

如果把一个简单的平凸透镜用来对轴上无限远的物点成像，由于成像光束的对称轴与系统的光轴重合，具有对称性， h 相同的光线（这些光线位于一个以光轴为中心轴的圆柱面上）经过透镜折射以后，出射光线和光轴的交点显然相同。同时位于通过光轴的任意一个截面内的光束结构都是相同的。因此可以从整个光束中取出一个过光轴的平面光束，用来代表整个光束的结构，如图 1-5 所示。

由轴上无限远的物点发出的一束与光轴平行的光线，与第一个平面垂直不发生折射，进入透镜内部仍为一平行光束。当遇到第二个球面时要产生折射。对不同入射高度 (h) 的光线经光路计算公式计算后可知，它们的折射光线和光轴的交点到球面顶点的距离 $L'_1 \dots L'_4$ ，随入射高度 h 的增加而减小。而且 h 越大， L' 减小得越迅速。如图 1-5 中的曲线所示。

通常用不同入射高的光线和光轴的交点到理想像点的距离 $\delta L'$ 来表示轴上点球差的大小， $\delta L'$ 称为轴向球差或简称为球差。其表示式为：

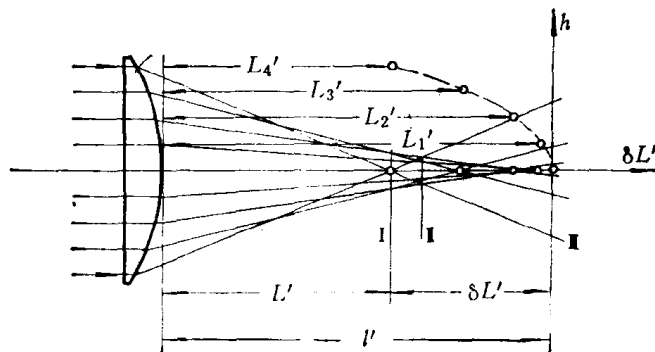


图 1-5

$$\delta L' = L' - l' \quad (1-3)$$

$\delta L'$ 的符号规则是：以理想像点为起点，计算到实际光线和光轴的交点，向右为正，向左为负。

图 1-5 中标注了最大入射高的光线的球差。为了说明整个光束的球差情况，可以用球差与入射高 h 之间的关系曲线 ($\delta L' - h$) 来表示，该曲线称为球差曲线。

当存在球差时，不同像平面位置得到的像点图形如下。当像平面在图 1-5 中位置 I 时，光线的弥散图形为一个周围带有亮圈的圆斑；当像平面逐渐往右移时，弥散图形的面积逐渐缩小，亮度增大，并且除了四周的亮圈而外，中心开始出现亮斑；当像平面到达位置 II 时，弥散图形的面积最小，亮度最大，称为“最小弥散圆”；当像平面继续往右移动，弥散图形周围的亮圈逐渐消失，到达位置 III 后，如果像平面再往右移，则弥散图形的面积很快扩大，亮度迅速减小，最后中央亮斑消失。

轴上点的单色像差只有球差。对包含各色光线的白光来说，轴上点除球差而外，还有轴向色差。

1.2.2 轴外点单色像差的分类

讨论轴上点单色像差时，由于共轴系统对称于光轴，当物点位在光轴上时，光轴就是整个光束的对称轴线，通过光轴的任意截面内的光束结构都是相同的，故可用过光轴的某一截面的平面光束结构代表整个光束结构。因而球差曲线能够表示轴上点的光束结构，它就代表了系统轴上物点的成像质量。轴外物点的光束结构就要复杂得多。

如图 1-6 所示，由无限远轴外点发出的一束平行光线，投射在透镜 O 上，经透镜折射以后出现像差。此时出射光束不再存在对称轴线，而只存在一个对称面，它就是通过

光轴和入射光束平行的截面（当物点位于有限距离时，就是通过光轴和物点的截面）。显然，无论是折射前还是折射后，整个光束对该截面对称的。通常把主光线 BP 当作入射光束的中心光线。为了了解轴外斜光束的结构，一般在入射光束中取出两个通过主光线而互相垂直的截面，其中一个是由主光线和光轴决定的平面，也就是光束的对称面，称为子午面，另一个为通过主光线和子午面垂直的截面，称为弧矢面。用这两个截面内

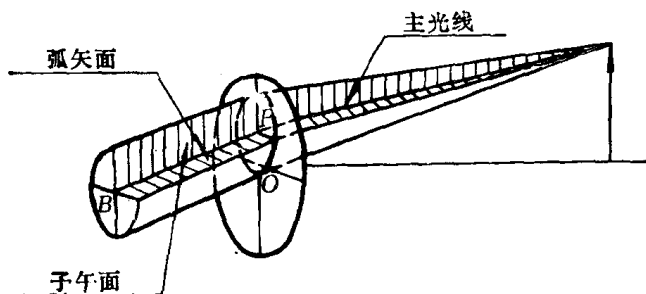


图 1-6

的光线，经过系统以后，出射光线的聚焦情况近似地代表整个光束的结构和成像质量。当然要更全面地了解光束结构，仅仅了解这两个截面内光线的情况是不够的，还须研究截面以外的其他光线。

为了表示这两个截面内的光束结构，需要规定若干描述光束结构的几何量，用以度量光束的成像质量，这就是像差分类。下面分别按子午面和弧矢面进行说明。

一、子午光束

由于系统对子午面对称，位于子午面内的光线通过系统后永远位于此同一平面内。为了描述子午光束的结构，通常取对称于主光线 BP 的成对光线 BM^+ 和 BM^- ，称为子午光线对，如图 1-7 所示。如果光学系统没有像差，则所有光线对都应交在理想像点上。

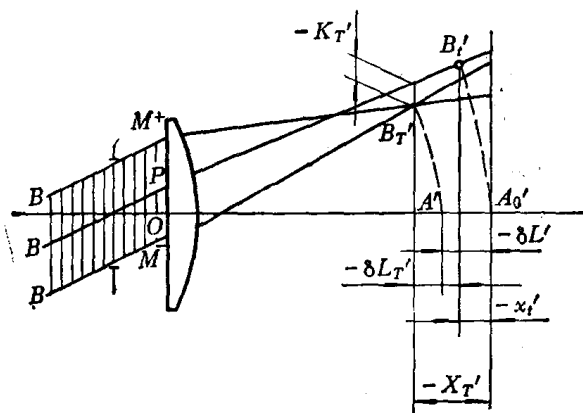


图 1-7

由于存在像差， BM^+ 和 BM^- 光线对的交点 B_T' ，可能既不在主光线上，也不在理想像平面上。通常把 B_T' 离开理想像平面的距离 X_T' 称为子午场曲，而把 B_T' 离开主光线的垂轴距离称为子午彗差，用 K_T' 表示。 X_T' 、 K_T' 这两个量就表示了 BM^+ 和 BM^- 这一对子午光线的交点相对于理想像面和主光线的位置。为了了解整个子午光束的结构，可以在光束中取不同宽度的若干子午光线对，求出它们各自对应的 X_T' 和 K_T' 值。

X_T' 的符号规则是：以理想像面为计算起点，到子午光线对的交点，向右为正，向左为负。

K_T' 的符号规则是：以主光线为计算起点，到子午光线对交点的垂轴距离，向上为正，向下为负。

如果知道了一定数量的子午光线对的 X_T' 和 K_T' 值，也就可以近似地说明子午光束的结构和成像质量。如果全部子午光束都聚交于理想像面上同一点，则所有子午光线对的 X_T' 和 K_T' 都等于零。

靠近主光线的细光束，和轴向光束的近轴光线相当，是整个光束的核心部分，它的聚焦情况对整个光束的成像质量有重要作用。当子午光束的宽度趋于零时， B_T' 的极限位置显然应该位于主光线上，用 B_s' 表示，相应的 X_T' 的极限值用 x_s' 表示， x_s' 称为细光束子午场曲。

子午光束的成像质量，通常用下列三个几何量表示。

1. x_s' ——细光束子午场曲

它代表理想像面到子午细光束焦点的距离，表示子午细光束在理想像面上的成像质量。

2. $\delta L_T' = X_T' - x_s'$ ——子午球差（轴外子午球差）

它代表子午细光束焦点到宽光束子午光线对交点的轴向距离，同轴上点的近轴像点和实际宽光束与光轴交点的距离相当，所以称为子午球差。

3. K_T' ——子午彗差

它代表由主光线到子午光线对交点的垂轴距离，可表示原来对称于主光线的子午光线对经过系统以后，其出射光线对主光线不对称的程度。

根据 x_s' 和若干子午光线对的 $\delta L_T'$ 和 K_T' ，就可以确定子午光束的成像质量，它们统称为子午像差。

二、弧矢光束

为了描述弧矢光束的结构，通常在弧矢面内取对称于主光线 BP 的成对光线 BD^+ 和 BD^- ，称为弧矢光线对，如图 1-8 所示。由于弧矢光线对对称于子午面，而系统对于子午面也是对称的，它们的出射光线也应该和子午面对称，所以出射弧矢光线对必相交于子

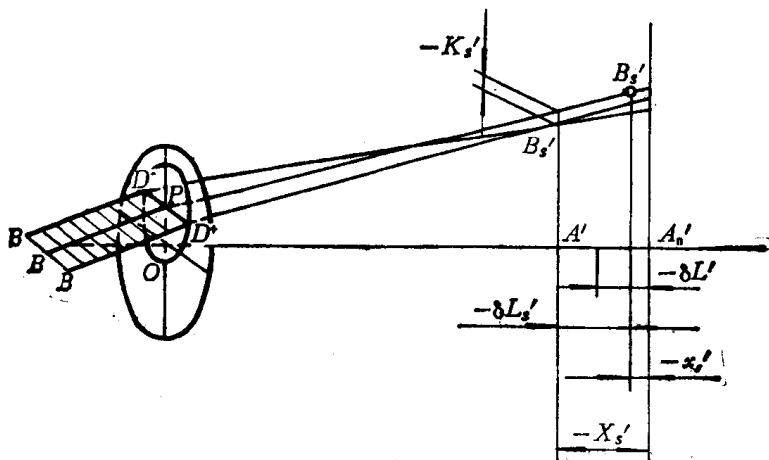


图 1-8

午面上的同一点 B'_s 。和子午光线对相似，把理想像面到 B'_s 的距离称为弧矢场曲，用 X'_s 表示。主光线到 B'_s 点的垂轴距离称为弧矢彗差，用 K'_s 表示。

X'_s 的符号规则是：以理想像面为计算起点，到弧矢光线对的交点，向右为正，向左为负。

K'_s 的符号规则是：以主光线为计算起点，到弧矢光线对交点的垂轴距离，向上为正，向下为负。

主光线周围的弧矢细光束的焦点与理想像面之间的轴向距离用 x'_s 表示，称为细光束弧矢场曲。用来表示弧矢光束成像质量的三个几何量是：

1. x'_s ——细光束弧矢场曲
2. $\delta L'_s = X'_s - x'_s$ ——弧矢球差
3. K'_s ——弧矢彗差

它们的意义和相应的子午像差相似。根据 x'_s 和若干弧矢光线对的 $\delta L'_s$ 和 K'_s 就可以表示弧矢光束的成像质量，它们统称为弧矢像差。

三、畸变

上面的六种子午和弧矢像差，可以用来表示轴外光束的结构和轴外像点的清晰度。对整个像面来说，除每个像点应该清晰而外，还要求物像相似。而上面这六种像差并不能说明物像之间的形状对应关系。如果六种像差都等于零，表示整个光束都聚交在理想像面上的同一点，但是这一点并不一定和由近轴光学公式计算出来的理想像点重合，也就是说物像不一定相似，因此还必须另外规定一个量来说明物像之间的形状对应关系。通常把主光线和理想像面的交点 B'_z 作为实际像点，用它到理想像点 B'_0 的距离来表示像点变形程度，称为畸变，用 $\delta y'_z$ 表示，如图 1-9 所示。

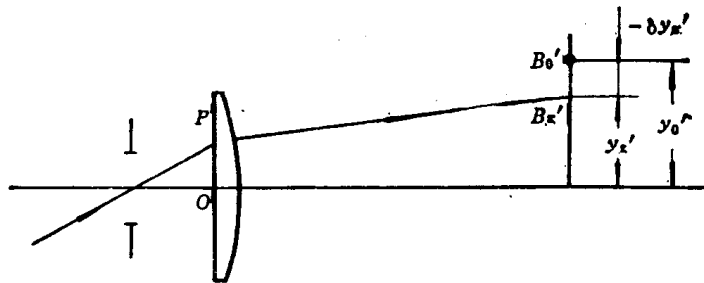


图 1-9

$\delta y'_z$ 的符号规则是：以理想像点为计算起点到实际像点，向上为正，向下为负。

$\delta y'_z$ 的计算公式为：

$$\delta y'_z = y'_z - y'_0 \quad (1-4)$$

公式中 y'_0 为理想像高， y'_z 为主光线和理想像面交点的高度，称为主光线的实际像高。

细光束子午和弧矢焦点的位置，有时也用如下的量来表示：

$x'_{fs} = x'_s - x'_t$ ——称为细光束像散，它表示子午和弧矢细光束焦点之间的距离。

$x' = (x'_t + x'_s)/2$ ——称为平均场曲，它表示细光束子午和弧矢焦点的中点到理想像面的距离。

通常把轴外物点的单色像差按性质不同分成五类，再加上两种色差共七类像差。

1. 细光束像散： $x'_{fs} = x'_s - x'_t$

2. 场曲: 子午场曲 x'_t ; 弧矢场曲 x'_s ; 平均场曲 $x' = (x'_t + x'_s)/2$
3. 球差: 子午球差 $\delta L'_t$; 弧矢球差 $\delta L'_s$
4. 彗差: 子午彗差 K'_t ; 弧矢彗差 K'_s
5. 畸变: $\delta y'_t$
6. 轴向色差: $\Delta l'_{FC}$
7. 垂轴色差: $\Delta y'_{FC}$

当系统既有单色像差又有色差时, 则通常把中间波长光线的理想像面 (在目视光学仪器中采用D光) 作为系统的理想像面, 并用中间波长光线的像差代表系统的单色像差, 而把C、F光线的主光线和理想像面的交点之间的距离代表垂轴色差, 如图 1-10 所示。

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

而轴外点的轴向色差 $\Delta l'_{FC}$ 仍用C、F两种光线的理想像面之间的距离来表示。也就是说认为整个像平面上所有像点的轴向色差都是相等的。

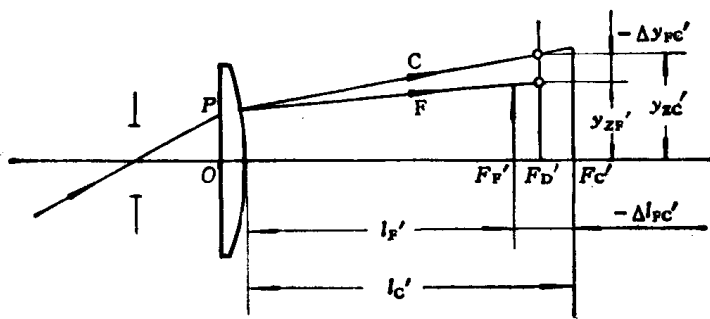


图 1-10

第二章 球 差

第一章概略地介绍了各种像差现象，本章开始将较深入地分析各种像差。

从第一章叙述可知，一个轴外物点会产生各种像差，而轴上物点，就单色光而言只产生球差，因此比较简单，所以首先研究球差。

§ 2.1 球 差 图 形

如前所述，一个轴上物点发出的光束经光学系统成像不再相交于一点就是球差。图 2-1 表示一个光学系统的球差，考虑到一般情况，仅画出其第一和最后两个折射面。一个轴上物点 A 经光学系统成像，近轴像点为 A'_0 ，一条孔径角为 U 的光线，经光学系统后交光轴于 A' 点，近轴像点的像距为 l' ， A' 到最后折射面的距离为 L' ，则二者之差可以表示球差的大小，以 $\delta L'$ 表示

$$\delta L' = L' - l' \quad (2-1)$$

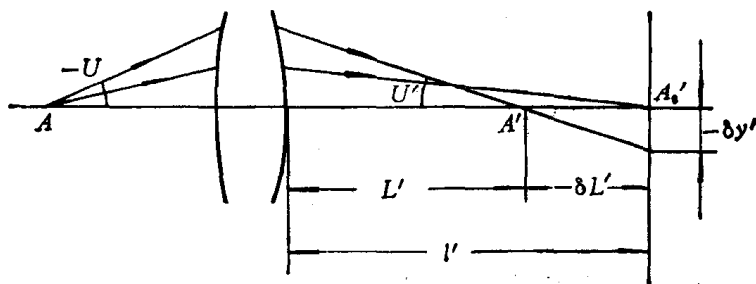


图 2-1

显然，各个孔径（带区）的光线有各自的球差值。 $\delta L'$ 愈大，表示光学系统的球差愈严重，成像质量愈差。由于 $\delta L'$ 是一个沿光轴方向度量的量，是一种轴向像差，故称为轴向球差。通常的光学系统只能使一个孔径（边缘孔径）的球差为零。称为消球差或校正球差。有些光学系统可以对两个孔径校正球差，但不可能使所有孔径的球差同时为零。若边缘孔径的球差不为零，有负球差（ $\delta L' < 0$ ）时称为球差“校正不足”或“欠校正”，有正球差（ $\delta L' > 0$ ）时称为球差“校正过度”或“过校正”。

此外，球差还可在垂轴方向度量，称为垂轴球差。通常是在理想像平面上来度量的。如图 2-1 所示，通过 A'_0 点垂直于光轴的平面即为理想像平面，孔径角为 U 的光线经光学系统后与理想像面的交点到光轴的距离即为垂轴球差（或称为横向球差），用 $\delta y'$ 表示。

$\delta y'$ 的符号规则是：以理想像点 A'_0 为计算起点，到实际光线与理想像面的交点，向上为正，向下为负。

由图 2-1 可知，同一孔径的光线，其轴向球差和垂轴球差之间有一简单的关系。

$$\delta y' = \delta L' \operatorname{tg} U' \quad (2-2)$$

下面讨论成像光束仅有球差时, 其与理想像平面所截的弥散斑图形 (简称球差图形)。为了分析有球差时, 出射光束的结构图形, 需要知道当光束入射高度变化时球差值的变化规律。由同一点发出与光轴成有限角度 U 的光线或距光轴有限高度 h 的光线, 其像方截距 L' 是 h 或 U 的函数, 故球差也必然是 h 或 U 的函数, 但由于球差 $\delta L'$ 与 h 或 U 之间的关系不是用简单函数所能描述的, 因而将球差展开成 h 或 U 的幂级数。

2.1.1 球差的级数表示式

球差的级数展开式可写成:

$$\delta L' = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + \dots$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 $\dots$ 等系数是光学系统结构和物点位置的函数。

由于共轴球面系统是轴对称系统, 故轴上点发出的光束折射后仍然对称于光轴。因而当入射高改变符号时, 轴向球差值不变, 即入射高为 h 和 $(-h)$ 的两条光线折射后是相交于光轴上一点的。从这个性质可得出结论: 球差的级数展开式中不应包含 h 的奇次方项。而且当 $h = 0$ 时, 球差必为零, 故球差展开式中没有常数项 a_0 。所以球差展开式应该是如下形式:

$$\delta L' = a_2 h^2 + a_4 h^4 + a_6 h^6 + \dots \quad (2-3 a)$$

对于垂轴球差, 当 h 改变符号时, 垂轴球差数值大小不变, 但改变符号, 即入射高为 h 和 $(-h)$ 的两条光线其垂轴球差大小相等符号相反, 故垂轴球差展开式中只包含 h 的奇次方项, 而由 (2-2) 式

$$\delta y' = \delta L' \operatorname{tg} U = \delta L' \frac{h}{L'}$$

可见 $\delta y'$ 的幂级数展开式应比 $\delta L'$ 的幂级数展开式 (以 h 为自变量) 高一次方, 即

$$\delta y' = A_3 h^3 + A_5 h^5 + A_7 h^7 + \dots \quad (2-3 b)$$

以上各展开式中第一项称为初级球差 (因 $A_3 h^3$ 为 h 的三次方项, 有的作者称为三级球差)。

第二项称为二级球差 (有的作者称为五级球差)。

第三项称为三级球差 (有的作者称为七级球差)。

其余各项依次类推。二级以上的球差统称为高级球差。

在几何光学中, 曾讲过当实际光路计算公式的角度趋近于零时, 即用三角函数级数展开式 ($\sin \theta = \theta - \theta^3/3! + \theta^5/5! - \dots$) 的第一项来代替三角函数 ($\sin \theta = \theta$) 时, 得到的公式就是近轴公式。利用近轴公式计算出来的像就是理想像, 而实际光线位置和理想像点位置的差就是像差。因此像差的存在可以看作是由级数中其余各项所引起的。在像差理论研究的发展过程中, 为了由易到难, 由浅入深, 一般把像差分成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, 其它各项引起的像差称为高级像差。初级像差公式乃是用三角函数级数展开式的前两项代替函数本身 ($\sin \theta = \theta - \theta^3/3!$) 所获得的结果, 它同样是一种近似公式, 因为只有当 θ 比较小时, 才能忽略 $\theta^5/5!$ 以上各项, 也就是只有孔径角和物高不大的情形, 初级像差才能足够近似地表示出光学系统的像差性质。初级像差公式所适用的范围称为赛得 (L. Seidel) 区, 这个光

轴附近的小区域和近轴区一样, 没有确定的边界, 由允许的误差决定。例如用级数第一项代替三角函数 (以 θ 代替 $\sin \theta$) 误差小于千分之一的最大角度为 5° , 所以这时近轴区大约和角度小于 5° 的范围相当, 用级数前两项代替三角函数 ($\theta - \theta^3/3!$ 代替 $\sin \theta$) 误差小于千分之一的最大角度为 32° , 对应初级像差公式所适用的范围就和角度小于 32° 的范围相当。

对于一般实际使用的光学系统, 光束的孔径角和成像物高往往都比较大, 由级数中 $\theta^3/5!$ 以上各项引起的像差, 即所谓高级像差相当大, 因此初级像差尚不能充分地代表光学系统的成像质量。

尽管初级像差不足以充分代表光学系统的成像质量, 但是它正确地反应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, 如果成像清晰, 则在小孔径和小视场范围内成像必然是清晰的。因此对于一个成像质量优良的光学系统, 使初级像差校正到一定限度以内, 虽说不是一个充分条件, 但却是一个必要条件。因此研究初级像差对设计光学系统仍具有重要的实际意义。

下面根据初级球差来讨论光束结构问题。由 (2-3b) 式可知, 初级球差表示式为,

$$\delta y' = A_s h^3 = Ah^3 \quad (2-3)$$

公式 (2-3) 只适用于光线位于 XOY 坐标面内的情形, 对于不位在 XOY 坐标面内的光线, 如图 2-2 所示的 PA' 光线不能应用。为了表示这种光线的像差, 我们选取最简单的单个折射球面来研究。在折射球面顶点和理想像平面上作两个直角坐标系 (X, Y, Z) 和 (x', y', z') , $X(x')$ 轴和光轴重合, 如图 2-2 所示。由于共轴系统的对称性, 通过光轴的任意一个截面内光线成像情况都相同, 因此 PA' 光线所在平面可以看作是 XOY 平面绕光轴旋转 φ 角度后形成的。研究当光线在 YOZ 平面 (在初级像差区域内, 可用通过折射面顶点 O 的切平面来代替该折射球面) 上的投射点的坐标 h 、 φ 或 Y 、 Z 变化时 (它们是确定光线位置的坐标), 其在 $y'o'z'$ 像面上的交点是如何分布的, 就可以确定出射光束的结构。

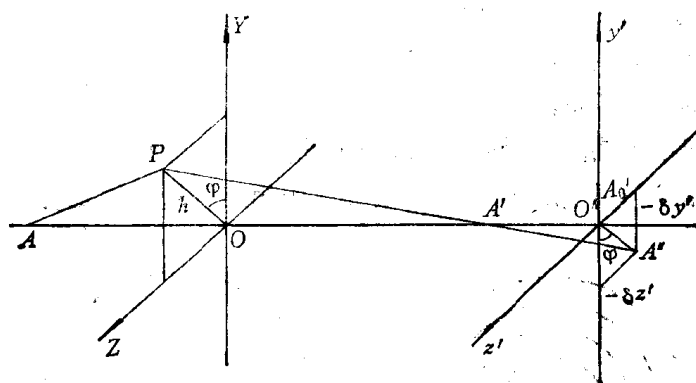


图 2-2

由图 2-2 可知, OP 即是入射高, 由 (2-3) 式可知, 对应的垂轴球差为 $A'_s A'' = Ah^3$, 此量在 $y'o'z'$ 坐标系中的两个分量为:

$$\left. \begin{aligned} \delta z' &= (Ah^3) \sin \varphi \\ \delta y' &= (Ah^3) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$