

应 用 光 学

(二)

目 录

第一章 象差概述 - - - - - 1

§ 1. 象差的分类 - - - - - 3

§ 2. 球差 - - - - - 4

§ 3. 慧差 - - - - - 7

§ 4. 象散差 - - - - - 17

§ 5. 象面弯曲 - - - - - 24

§ 6. 畸变 - - - - - 30

§ 7. 轴上物点的位差 - - - - - 33

§ 8. 倍率色差 - - - - - 37

§ 9. 象差大小和孔径、视场、焦距大小的关系 - - - 39

§ 10. 第一章小结 - - - - -

第二章 共轴球面的初级单色象差 - - - - - 45

§ 1. 轴上物点象差的级数展开式 - - - - - 45

§ 2. 初级象差普遍式 - - - - - 49

§ 3. 初级球差 - - - - - 56

§ 4. 初级慧差 - - - - - 58

§ 5. 初级象散和场曲 - - - - - 61

§ 6. 初级畸变 - - - - - 64

§ 7. 轴上物点的初级球差系数的计算 - - - - - 66

§ 8. 其它初级象差的计算 - - - - - 72

§ 9. 初级象差和口径、视场、焦距的关系 - - - - - 75

§ 10. 初级象差应用实例 - - - - -

单个折射面的象差分析

§ 11.	初级场曲分析	80
§ 12.	光栏位置对初级象差的影响	82
§ 13.	正弦条件	86
§ 14.	细光束象散公式	91

第三章	共轴球面光组的初级色差	95
§ 1.	折射球面的初级轴上实色差	95
§ 2.	空气中单光薄透镜的轴上实色差	99
§ 3.	空气中多光薄透镜的轴上实色差	102
§ 4.	单个折射球面的初级倍率色差	104
§ 5.	空气中单光薄透镜的初级倍率色差	106
§ 6.	空气中多光薄透镜的初级倍率色差	107
§ 7.	初级色差和口径、视场、焦距 的关系	109
§ 8.	色球差、色散差	109
§ 9.	二级光谱	112

第四章	典型光学零件和部件的象差	118
§ 1.	平面反射镜	118
§ 2.	球面反射镜的象差	120
§ 3.	棱镜或平面平行板的象差	121
§ 4.	场镜的象差	125
§ 5.	薄透镜的初级象差的普遍式	125
§ 6.	单光薄透镜、物在无穷远时的PW 与结构数(γ , N)的关系	132
§ 7.	单光薄透镜, 物在任意距时, 初级球 差最小的薄透镜形状	140

及简单的
畸变对记录

就可以掌握透镜, 物在无限远时的 $p^\infty w^\infty$	
创造出最与结构参数 (N, Y) 的关系	143
条件下的薄透镜色差	153
双胶薄透镜的 P_0 表 and 选玻璃	155

§ 11. 当规范化条件 $H < \varphi = 1$ 时, 不规则的	
P, W, ZL 与规范化的 $P,$	
$W, (ZL)$ 的关系	158
§ 12. 两组双胶物镜	162
§ 13. 小气隙双分镜	164
§ 14. 厚透镜的初级象差	166
§ 15. 全对称光组的象差	176

第五章 象差公差	182
§ 1. 瑞利判断	182
§ 2. 几何象差和波差的关系	183
§ 3. 焦斑深度	186
§ 4. 初级球差的容许限度	188
§ 5. 区域球差的容许限度	190
附录 各种光学系统的象差公差	194

第六章 光路计算公式	197
§ 1. 常用符号简介	197
§ 2. 轴上物点近轴光线计算 (简称小 l 计算)	200
§ 3. 近轴主光线计算 (简称小 l_p 计算)	203
§ 4. 初级象差计算公式	206
§ 5. 轴上点实际光线计算 (简称大 l 计算)	

§ 6.	轴外实实际子午光线计算	80
	(简称大 $\angle p$ 、 $\angle_{上}$ 、 $\angle_{下}$ 计算)	82
§ 7.	轴外实细光束场曲、象散计算	86
§ 8.	轴外子午球差	
§ 9.	色差计算	211
§ 10.	修改象差和光路计算时常用的几个公式	218
§ 11.	有效数字取舍规则	218
§ 12.	象差曲线	220
第 七 章	典型光组设计	224
(一)	照明光路及聚光镜设计	224
(二)	双胶物镜设计	247
)	两双胶组物镜设计方法	259
>	照相物镜	275

毛主席语录

一切对立的成分都是这样，因一定的条件，一面互相对立，一面又互相联结。互相贯通、互相渗透、互相依赖，这就是这种性质，叫做同一性。一切矛盾着的方面都因一定条件具备着不同一性，所以称为矛盾。然而又具备着同一性，所以互相联结。

第一章 象差概述

“物”和“象”正是一对互相对立、互相联结、互相贯通、互相渗透、互相依赖又互相矛盾着的对立统一体。

在光学设计的初始阶段（初始阶段包括的内容例如：决定仪器的工作原理；决定光路布置；决定放大倍率、孔径、视场、焦距等。——在苏修的教科书中，把这一阶段称作“轮廓尺寸的计算”，而在于工作原理的拟定，光路的布置，各种参数如放大倍率、孔径……等的选择等。所以把这一阶段称作“光学整体设计”更好）只须把光学系统看作是“没有象差的理想状态”。或称“理想光组”。所谓“没有象差的理想光组”就是指：

从物方和光轴垂直的物平面上一点发出的所有光线都会交到和光轴垂直的象平面上的一点（仅仅只交到一点，而不交到别处）；和光轴垂直的物平面上的一个图形，成象在和光轴垂直的象平面上，物和象的图形完全相似（没有变形）。凡是满足上述条件的光学系统称为“理想光组”。

在真实的光学系统中，不可能有绝对的“理想光组”。但是在近轴区（近轴区的含义是：(1) 物方、象方孔径角 U 、 U' 都很小，即光组的孔径很小；(2) 视场很小。也就是说无论轴上物、象点或轴外物，象点的所有光线都很靠近光轴）成象状况很接近于“理想光组”。在真实的仪器中，确有孔径很小、视场很小的基本上属于近轴区的光学系统（例如要求不高的低倍显微镜等）。

当光组的孔径和视场较大时，从一物点发出的一束光线，经光组折（反）射后，不再会交于一象，也即不能会交成一个清晰的象点。这就叫“象差”。

为了形成理想象点、要求从一物点发出的光线会交成一象。而由于球面的折反射特性使光线不会交于一象，这是一对矛盾。光学设计的任务就是使矛盾转化。使从一象发出的全个出射光线尽可能交于一象（或交在一个很小的范围内，近似于一象）。

既然各光线不聚交在一起，而是有差别，那么，在无数条光线之中，究竟“象差”是指谁和谁的差？把哪一条光线作为相对的“标准”呢？通常，把轴上物点 A 的近轴光线所成的象点 A' 作为相对标准（图 1-1）。

过 A' 点且垂直于光轴的平面取作标准象面（理想象面）。

从轴外物点 B 发出的近轴光线，会交在理想象面上 B' 点处。 B' 就作为轴外物点 B 的理想象点。若

物高为 AB 则理想象高就是 $A'B'$ 。

总之，在光学计算中，在大多数情况下，所有的量（无论

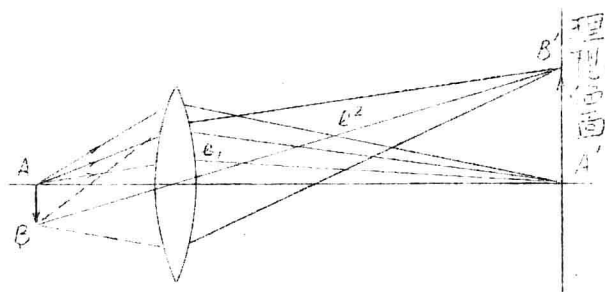


图 1-1

是象面位置、象高、轴上象点和轴外象点位置、放大率……等之)通常都是以近轴光线的数量作为相对标准(理想位置)。这不仅是由于许多小孔径、小视场的镜头的真实工作情况确实属于近轴区,而且即使在大孔径、大视场的镜头中,其孔径的中央部分和视场的中央部分(即近轴部分)也往往都是较为主要的部分。

§1 象差的分类:

在实际的镜头中,不存在绝对的理想光组,即使暂时不考虑加工、装调等之工艺方面的误差,就从球面折(反)射本身所具有的特性来说,也会使光线不聚交到理想象点处而有象差。“象差”是指矛盾的总体。一个镜头,在其工作时(成像时),所有象差都同时出现。也就是说,由于球面折(反)射的本身规律性使按照理想光组应该聚交到一点的至了成像光线有的折(反)射到这儿,有的到那儿。不是成一个点而造成一团(注意,不一定是个团团,也可以是其它形状)。“象差”就是这一团的总称。那么,为什么要人为地把象差再分类(分成这种象差或那种象差)呢?

毛主席教导我们:“为要暴露事物发展过程中的矛盾在其总体上、在其相互联结上的特殊性,就是说暴露事物发展过程的本质,就必须暴露过程中矛盾各方面的特殊性,否则暴露过程的本质成为不可能。这也是我们作研究工作时必须十分注意的。”

毛主席又教导我们:“集中优势兵力,各个歼灭敌人。”

把这些象差加以分类,好比把敌人一个个孤立起来,有利于突出矛盾,分析矛盾和解决矛盾。

一般可以粗略地把常见的象差分解成七类。

以下,我们结合前述的5^x读数物镜头进行分析。

在本章内先讨论各种象差的现象和形成原因(结合实验演示)。

§2 球差

§2-1 球差的现象：已知5×显微镜物镜；玻璃为K9；

$\gamma_1 = 25.815 \text{ mm}$ ； $\gamma_2 = -25.815 \text{ mm}$ ；离第一面的物距
 $l_1 = -150 \text{ mm}$ (图1-2)

又设光栏在第一面前15 mm处 (也可设在别处，此处只是一例)。

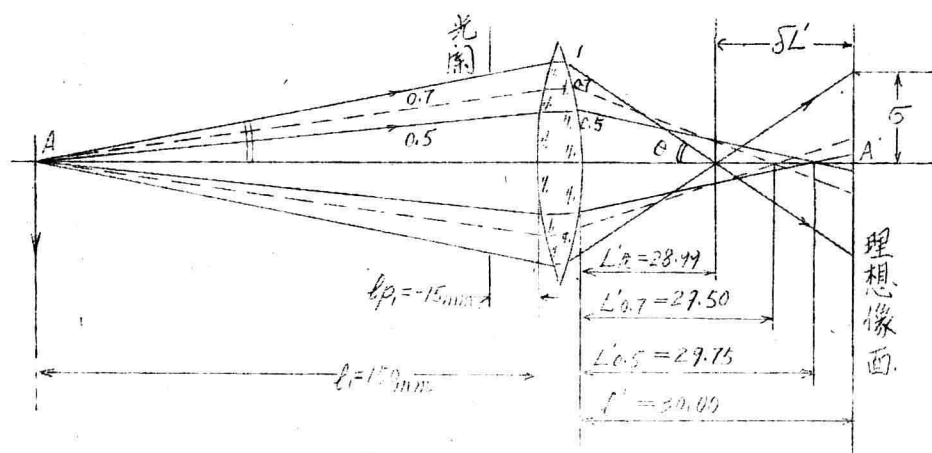


图 1-2

轴上物点A所具有的一种象差称为球差，其现象如下：

轴上物点A发出的近轴光线，会聚在A'点。A'点就是理想象点。用实验或近轴公式可以求出理想交点 $L' = 28.00 \text{ mm}$ 。

若光栏大小为：最大孔径角 $\sin u_1 = 0.024$ 。

用实验或实际光线追迹公式可求得，实际光线 (例如全口径，0.7口径，0.5口径等) 的交点不在理想象点A'处。在本例中是交在A'之前 (在其他镜头中也可能交在A'点之后)。对于本例，实验或计算的结果如下表：(见下页)

可见，每一口径的实际光线都有自己的交点 (象点)。从轴上物点A发出的所有光线不再聚交到一点。因此，得不到清晰的象点A'。在理想象平面处，全口径的实际光线将造成一个半径为

口 径	物方孔径 角 $\sin U_1$	计算所得 的象距 L' (mm)	轴向球差 $\Delta L' = l' - L'$ (mm)	横向球 差 σ' (mm)
全 口 径	$\sin U_1 = -0.024$	$L'_{全} = 28.99$	$\Delta L'_{全} = 1.01$	0.12
0.7 口 径	$\sin U_1 = 0.707(-0.024)$	$L'_{0.7} = 29.50$	$\Delta L'_{0.7} = 0.50$	0.04
0.5 口 径	$0.5(-0.024)$	$L'_{0.5} = 29.75$	$\Delta L'_{0.5} = 0.25$	0.015
近轴(零口径)	近轴光 u_1	$l' = 30.00$	0	0

〔注〕由于光轴上下是对称的，计算时，只需计算上半下的光线

σ' 的图。(在光学设计中，称为“弥散圆”——即光线散开成一个圆)同样，0.7口径，0.5口径，以及任一口径的实际光线，都将汇理想象面上造成不同半径的弥散圆。这就是球差的现象。实际上，被成象的物体不会仅仅只有一个尖A，而是由许多个尖组成，此时球差的作用就等于在象面上有无数个弥散圆叠加在一起，使象模糊。

光轴上的物尖，就有球差。所以，球差是危害较大的一种象差。

§2-2 球差的数量表示

球差的现象如上述。毛主席教导我们：胸中有“数”，这是说：对情况和问题一定要注意到它们的数量方面；要有基本的数量分析。任何质量都表现为一定的数量，没有数量也就没有质量。

我们有许多同志至今不懂得注意事物的数量方面，不懂得注意基本的统计，主要的百分比，不懂得注意决定事物质量的数量界限，一切都是胸中无“数”。结果就不能不犯错误。

用什么来表示球差“数量方面”，即球差的大小呢？这里先介绍实践中常用的两种。

(一) 轴向球差：

把近轴象点 A' 取作相对标尺。其它口径的光线的交点离近轴象点的轴向距离称为该口径的轴向球差。

即：轴向球差 $= l' - l'$ 某口径 $\dots\dots\dots (1-1)$

本例的计算结果见表(1)的第四竖栏可以看出，口径愈大，轴向球差愈大；且口径增大时轴向球差增大得更快。例如，从0.5口径增大到全口径（即口径变为原来的两倍）时，轴向球差由0.25mm迅速增加到1.01mm（即轴向球差变为原来的四倍）。

关于球差随口径变化的规律将在以后详细分析。

(二) 横向球差（或称垂轴球差）：

仍见图(1-2)。在许多情况下，用来判断成像质量的是象平面上弥散圆的大小。弥散圆半径 σ' 愈大，象点的质量愈差。从图可见：轴向球差和垂轴球差所说明的实质是同一回事。不过是用不同的方式来表示球差的数量而已。两者的相互换算关系是：

$$\text{横向球差： } \sigma' = -tg U' (l' - l') \quad (1-2)$$

式中正负号用来区别这条光线造成的 σ' 是在光轴之上或下。实际中，用它的绝对值就能表示弥散圆半径的大小了。

由(2)式算出的弥散圆半径 σ' 列于表(1)的最右边竖栏内。

除这种表示方式以外，还可以有其它的方式（例如，以出射光线的角度差来表示，称为角球差；从光波的波动性质出发，以波面的光程差来表示球差，称为波球差等）。

§2-3 球差的形成原因。

对于一个镜头来说，造成球差的内因是玻璃材料的折射特性和球面半径。在夸大的图1-3中可以明显地看到，边缘光线1在球面处的折射状况和近轴光线2显然不同。尽管边光和近轴光都遵循折射定律（ $N \sin I = N' \sin I'$ ——这是玻璃本身折射特性所决定的），但边光偏折得比近轴光更厉害，于是就造成球差。

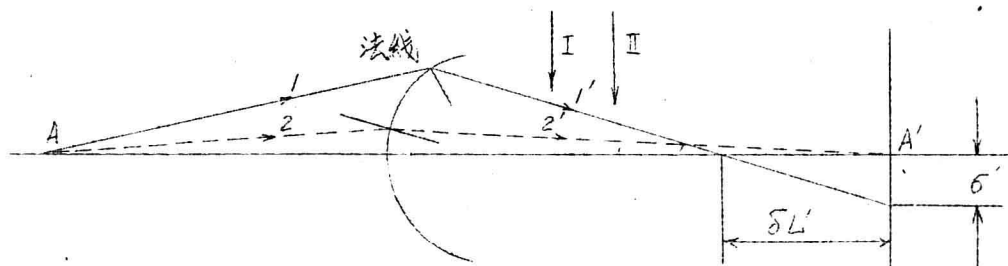


图 1-3

实际上，在折射表面处，由于折射规律和球面半径等的作用，已经决定了出射光线1'、2'等不可能聚交到一点。如果把聚交到一点的光束称为“同心光束”那么，同心性的被破坏，在折射表面处就已产生。所以无论在折射表面处，或是在垂直于光轴的平面I、II等处，光线1'、2'的截面内，都已包含了“光束同心性被破坏”的特性（也即在这些截面内都已包含着象差）。但是，这些象差集中地、突出地表现在象平面A'附近，这也就是我们通常所说的“矛盾的焦点”（或矛盾的交点）所在。

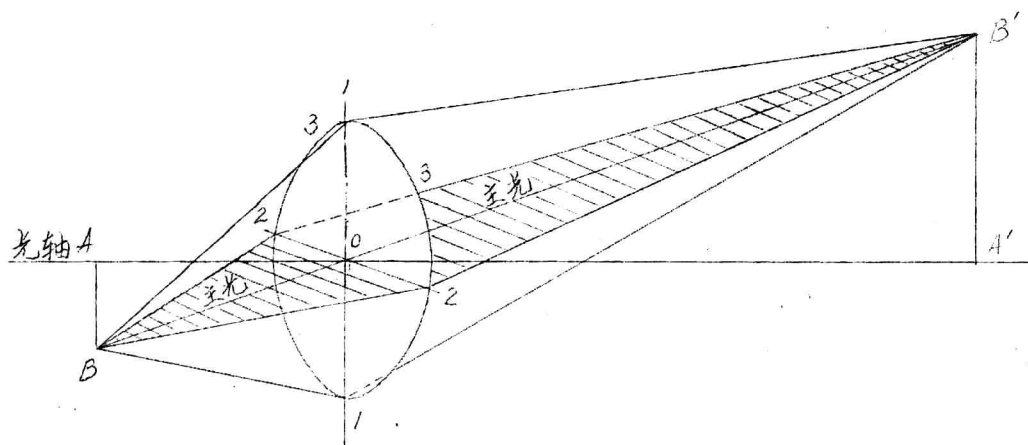
以上我们讨论了球差的现象、数量表示和形成原因。对于球差的规律性的进一步分析和消除方法将在以后讨论。

§3 慧差

§3-1 慧差的现象(配合实验演示)

假如，一个镜头已经消除了球差，亦即从一轴上物点发出的各个口径的出射光线都聚交到一点。(这样假设的目的是先把球差排除在外，以集中揭露慧差的矛盾。)

在图(1-4)中，在没有任何象差的理想成象的情况下，轴上



图(1-4)

物点A发出的全部光线都聚交到理想象点A'点(成象于A'点)；轴外物点B发出的全部光线都聚交到理想象点B'点(成象于B'点)。

如果没有球差，那么，A'点将是一个清晰的点而不是一个弥散圈。

但是，即使没有球差，轴外物点B发出的全部光线，也不可能完全聚交到B'点处，而是聚成一个慧星(又称扫帚星)形状的图样。在慧星尖端处最亮，向拖着尾巴的方向逐渐暗淡下去。这种象差称为慧差。

§3-2 慧差的形成原因

也象轴上物点的球差一样，轴外物点的慧差是由玻璃的折(

反)射特性和球面半径等内因所决定的。在分析慧差成因(以及轴外物点的其他象差的成因)之前,先要了解“子午光线”和“弧矢光线”的概念:

图(1-4)是立体图。 AOA' 是光轴。

轴上物点 A 成象于 A' 处(A 的成象光线未画出);

轴外物点 B 成象于 B' ; BO , OB' 是主光线;

如果镜头没有象差,则从 B 点发出的全部光线都聚交到 B' 点。

从图可见:从轴外物点 B 发出的全部成象光线都包含在一个以 B 为顶点,以圆 132123 为底的圆锥内。我们分析象差也就是分析这一光线锥内的全部光线是否都聚交到理想象点 B' 。实际上,当然无需分析全部光线,只需找出几根具有典型特性的光线,一般都取两个截面内的光线:

① 过轴外物(象)点 $B(B')$,且包含光轴在内的平面称为“子午平面”(如图1-4中的 BAO 及 $B'A'O$ 平面);

在子午平面内光线称为“子午光线”(图中,光线 $B1$ 、 $1B'$ 等是子午光线);

② 过轴外物(象)点 $B(B')$,且和子午平面垂直的平面称为“弧矢平面”。

过 $B(B')$ 点且和子午面垂直的平面可以有无数个。一般,当然选取对分析象差具有典型意义的几个。例如,常用的弧矢面是过轴外物(象)点 $B(B')$,包含光轴中心 O 在内,且和子午面垂直的那个弧矢面(图1-4剖面线的 $B22$ 及 $B'22$ 平面)。

在弧矢面内的光线称为“弧矢光线”(图中光线 $B2$, $2B'$ 等是弧矢光线)。

注意:图中的 $B33$ 平面等也是弧矢面,只是在分析象差中较少用到;

子午、弧矢等名称比较别扭,但它们不过是一种称号,实际上,从图1-4的空间立体关系来了解这两个平面是不难的。

只是轴外物(象)点 $B(B')$ 才有子午面和弧矢面的区分;对于轴上物(象)点 $A(A')$,没有子午弧矢之分。对轴上物象点(AA')

来说，主光线就是光轴。由于从A点发出的成象光锥是完全绕光轴对称的，所以，包含光轴在内的任何一个平面都是子午面。

图1-4是轴外物点B理想成象的情况。实际上，无论从实践

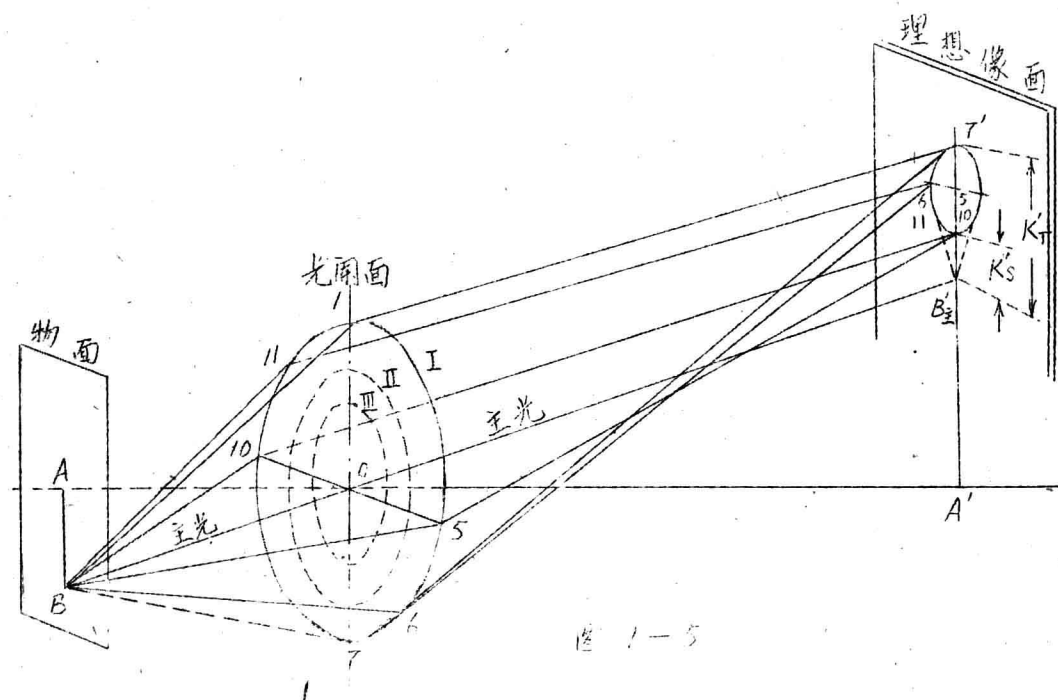


图 1-5

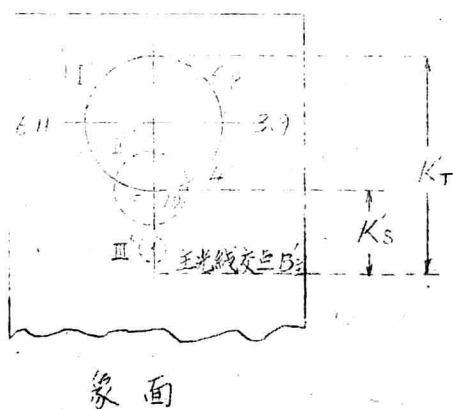
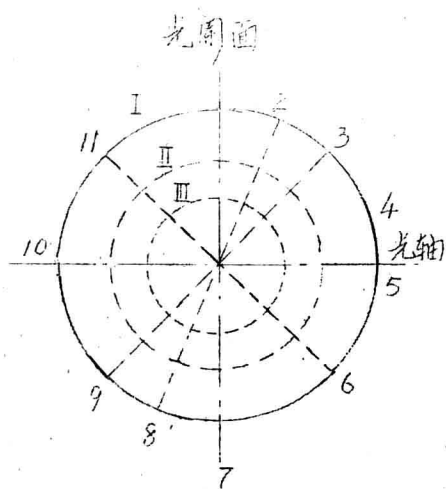


图 1-6

或是理论分析、计算所得到的都不会是一个象点 B' ，而是各条光线有自己的交点。

当镜头没有球差时（即纯慧差的情况）从 B 点发出的各条光线大致（近似地）有如下的规律：（图1-5）

从轴外物点 B 发出的子午光线对 $B1, B7$ ，出射后聚交到理想象面上 $1, 7$ 点；

从轴外物点 B 发出的弧矢光线对 $B5, B10$ ，出射后聚交到理想象面上 $5, 10$ 点；

从轴外物点 B 发出的任意空间光线对 $B6, B11$ ，出射后聚交到理想象面上 $6, 11$ 点。

其余光线的交点，在图（1-5）上因光线太多，难以表示清楚，我们把它重新画在图（1-6）中。

图1-6中，大圆代表光栏面（或入射光瞳面），小圆代表轴外物点 B 发出的各条光线在理想象面上的交点图形。

从轴外物点 B 发出光栏面上某一圆周上的各条光线 $B1, B2, \dots, B11$ 。（同时参看图1-5及图1-6），从物镜出射后聚交到理想象面上相应的 $1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$ 各点。其规律是：

(i) 射向光栏圆周上同一直径两端的光线（如子午光线对 $B1, B7$ ）。出射后聚交于理想象面上同一点（ $1, 7$ 点），又如光线 $B3, B9$ 聚交于（ $3, 9$ ）点——；弧矢光线对 $B5, B10$ 聚交于（ $5, 10$ ）点等等。

(ii) 射向光栏圆周I上的所有光线，在理想象面上聚交在一小圆周I'上；

射向光栏圆周II上的所有光线，在理想象面上聚交在一较小的圆周II'上；

射向光栏圆周III上的所有光线，在理想象面上聚交在更小的圆周III'上；

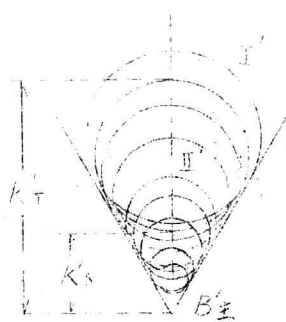
依此类推……；

射向光栏中心的光线（即主光线 $B0$ ），在理想象面上交在 B' 主点（也可理解成：交在一个半径为零的无限小圆周）上。

(iii) 从轴外物点 B 发出的全部成像光线(即射向光阑上圆周 I 、 II 、 III ……, 充满全 π 光锥的光线), 在理想象面上形成一组由大到小的连续圆

周(见图1—7a)。射向

光阑圆周 I 的所有光线, 在象面上分布在较大的圆周 I' 上, 故光线较暗(较分散); 射向光阑圆周 II 上的所有光线, 在象面上分布在较小的圆周 II' 上, 光线较集中(较亮)。主光线与象面的交点 B' 主附近最亮, 结果看来尤似一个



(a)

图 1—7



(b)

彗星形状。如图(1—7b), 这就是轴外物点 B 不成实象而成彗星形状的原因。

至于为什么各对光线聚交成这种图形, 可由图(1—8)定性地说

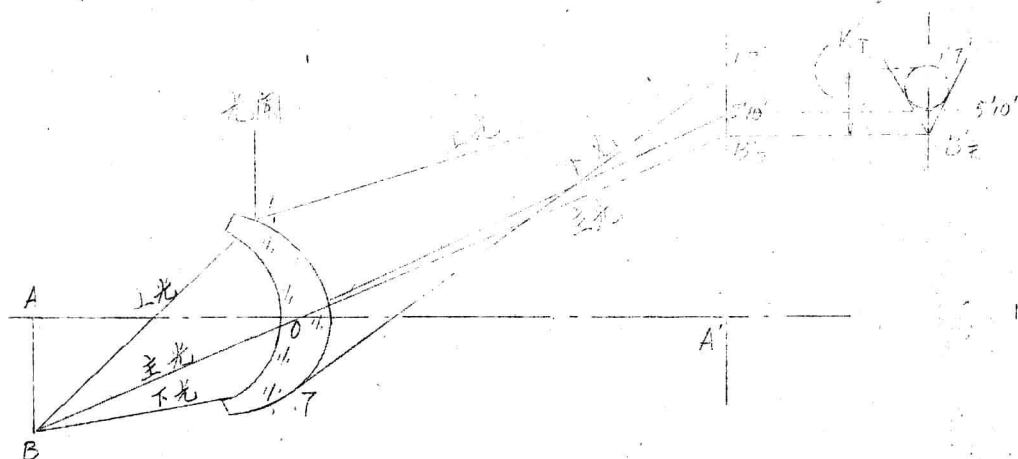


图 1—8

图(1—8)是平面图, 光轴 AA' 和轴外物点 B 都位于纸面内, 故纸面就是子午面。光线 $B1$, $B7$ 就是图(1—5)和(1—6)