

应用光学和光学設計

第三分冊

目 录

第六章 像点	1
光束 引	1
用光阑限制视场	3
视场的不均匀照明	4
阿贝对于光阑问题的研究	5
光阑组的孔径及瞳孔	6
定瞳孔的方法	7
光阑的其他种类	8
斜光束的初级像差	10
单折射面产生的像差	12
对整个同轴系统求和	17
斜光束像差的讨论	20
A、畸变；	
B、子午光线和弧矢光线	
C、同一带上光线的聚焦情形；	
D、光线分布的图解法；	
E、子午焦点位置的确定；	
F、慧差和像散；	
G、象场弯曲；	
H、一定孔径下所带有的总效果；	
I、全孔径的视场弯曲；	
斜光束的色差	38
讨论总结	40
Seidel 象差之计算	42
Seidel 象差 II	47

計标的例子	48
-------	----

薄透镜的 Seidel 象差	53
----------------	----

- A. 薄透镜的慧差；
- B. 薄透镜的像散；
- C. 薄透镜的 petzval 和；
- D. 薄透镜的畸变；
- E. 薄透镜的軸向色差；
- F. 薄透镜的垂軸色差；
- G. 薄透镜的球差；
- H. 薄透镜组。

Seidel 象差 II	57
--------------	----

Seidel 象差和光阑位置的关系	60
-------------------	----

Seidel 象差 IV	65
--------------	----

計标的例子	66
-------	----

光栏移动的效应讨论	67
-----------	----

光栏移动时薄透镜的作用	68
-------------	----

分离薄透镜系统	71
---------	----

Seidel 象差 V	75
-------------	----

总 结	75
-----	----

第七章 光栏的正弦定理	77
-------------	----

正弦定理的应用	38
---------	----

齐明物镜——玻功乙设计	92
-------------	----

正弦定理其他的应用	109
-----------	-----

史 料	114
-----	-----

第七章摘要	115
-------	-----

第八章 斜光束之計标	116
------------	-----

A. 子午方程；起始方程；结束方程。	116
--------------------	-----

B. 狭小的经面光束与纬面光束	120
C. 空间光线	125
D. 很接近的纬光线	133

准确方程式的应用：

A. 用三角方程式最后检验之举例	135
B. 应用准确的公式于斜光束	139
C. 象散极限与衍射	142
第八章摘要	144

第九章 理想光学系统的一般理论

C. Maxwell 理论的证明	146
------------------	-----

光学系统的特征数据	148
-----------	-----

共轭收敛角	164
-------	-----

放大倍率的测量	172
---------	-----

A. 线放大倍率；B. 角放大倍率；

C. 常用放大倍率的范围；

D. 出射光束的直径。

节点	179
----	-----

几点补充说明	180
--------	-----

小结	182
----	-----

第十章 普通目镜

惠更斯目镜	188
-------	-----

兰斯登目镜	202
-------	-----

B. 消色差兰斯登目镜	208
-------------	-----

第六章 軸外像点

[51]到现在为止，我们对象差的研究限制物点及像点都在合轴透镜组的光轴上。对于不在光轴上的物点，我们依据决定像的单向放大率的拉格朗日定理，但仅仅对于透镜组反物与像都是在近轴区域而言。我们必须预备发现这种现象，就是有限口径的斜光束，尤其是当离开光轴很远的物点所发出的斜光束，并不是非常遵守拉格朗日近轴放大率定理，而是受一些像差的影响，这些像差改变相应像点的位置及清晰度。即使用我们以前或以后所讲的方法将轴上像点改正得非常良好，斜光束的相应像点的清晰可以证明并不十分满意。因此在我们从事一个有限视场范围内成像良好的光学组设计之前，我们必须研究斜光束的性质。

因为我们仅能给予透镜组某种限度的口径（充其量口径最大不过等于最小曲率半径的二倍）又因为在许多情形中我们引进光栏，这光栏更加限制由任何一个物点所发出而实际允许达到像点的光线，所以我们开始研究斜光束时，必须首先注意有效口径的不可避免的限制如何影响各种光束。

光束的限制

当我们仔细研究下面的图表，图表中大多数系指明同一透镜应用于离开该透镜固定距离之物体，我们就可以得到光栏作用的一个清楚的基本概念。

在图 46 (a) 中看出已知的通光口径之透镜并没有被任何光栏所遮蔽，因此对应于这个通光口径的光束便传达到轴上反轴外像点上。

图 46 (b) 表示透镜的口径被紧靠在透镜上的光栏所限制，事实上这效果好像该透镜的口径缩小一样，被允许进入的光束实

实际上仍然可以通过该透镜的相同的中心部分。

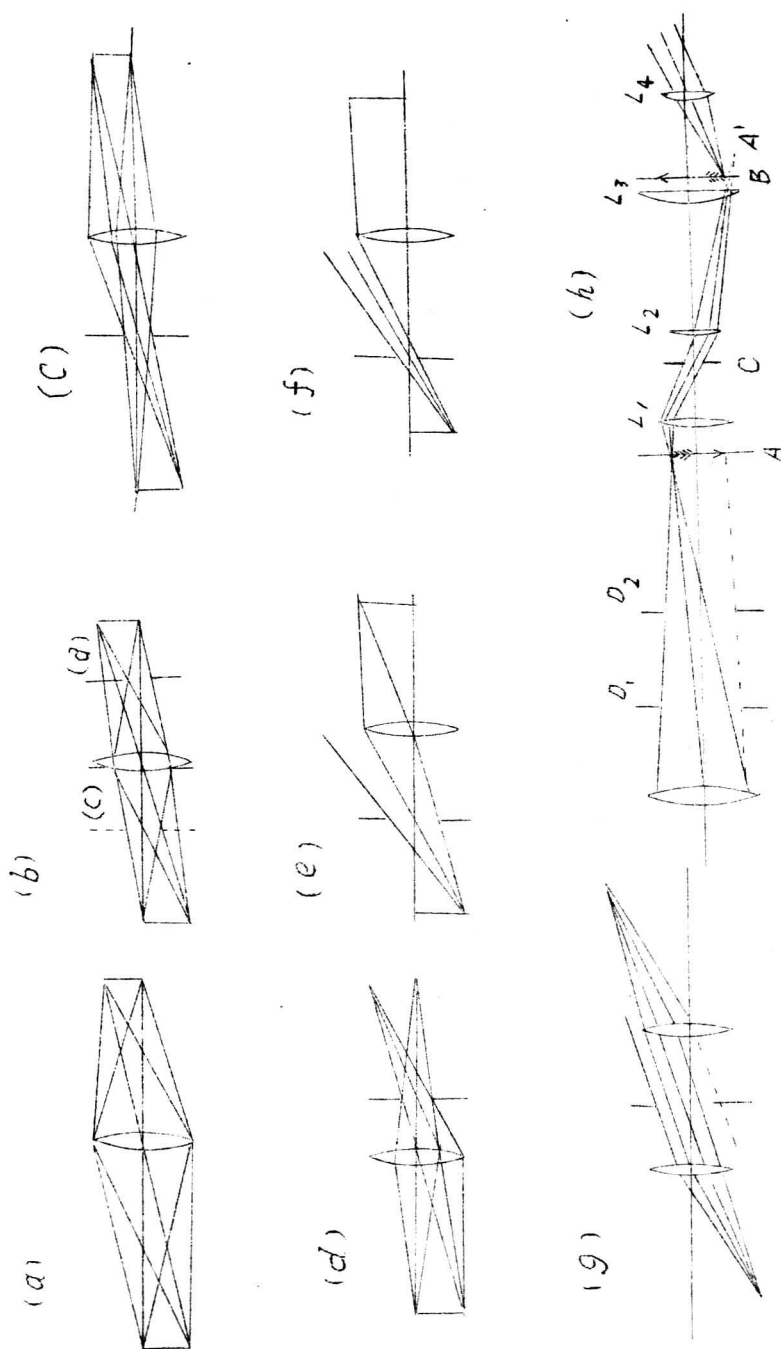


图 46

若我們進入圖 4 6 (c)，我們便看出，有效光束的口径因受光栏放在离该透镜第一面较远的距离的影响而减小。显然这是可能的來给出这样的一个光栏的孔，使轴上光束的角度范围与情形 (b) 的完全相同，为了表示清楚起见，情形 (c) 的光栏在图 4 6 (b) 中以虚线表示之。若我們現在检查一下图 4 6 (c) 我們便看出当轴上光束恰好与情形 (b) 完全一样时，有效的斜光束現在只能通过透镜的上部，这些斜光线与透镜的表面所成的入射角是完全不同於情形 (b) 的，因此我們可以可靠地預料到在轴外像点的一些像差与情形 (b) 的有很大差别，而轴上像差在这两个情形中必定完全相等。

当我们將适当的直径的光栏 [如在图 4 6 (b) 中以虚线表示之光栏 d] 放在透镜后面如图 4 6 (d) 时，在相反方向便发生相似的斜光束的改变位置，这时斜光束便偏心地通过透镜的下部，它的一些像差可以证明是与情形 (b) 式情形 (c) 的像差有所不同。

这些简单的图很清楚的指出当选择一些光线从轴外物点來追踪时，光栏的位置必須考虑，並且也指出光栏的移动可以证明是改变斜光束的改正状况的一种很有效的方法。

用光栏限制視场

口径光栏另一个效应——即視场的限制，必須很谨慎的注意。只要在光栏与透镜，或透镜组的折射面之间有可感觉到的轴上间隔，光栏的存在便产生視场的限制。在图 4 6 (c) 及 (d) 中比例是这样的选择，使光栏允许通过的整个斜光束刚好通过透镜的边缘。若是我們追踪离光轴较情形 (c) 及 (d) 远些的一个物点所发出的一些光线，这很显然，光栏所允许通过的这些光线的一部或全部便与透镜不相遇了。取图 4 6 (c) 作为开始点，图 4 6 (e) 表示對於略低一些的物点，大约只有光栏所允许通过的光束的一半是落在透镜上，因而被传达到像方，而图 4 6 (f) 代表有

如的视场最后的极限。因为从较图 4 6 (e) 更低的新物点所发出的而光栏所允许通过的光束，可以看出刚好完全不与透镜相遇，因而该透镜不能作出这新物点的像。显然在图 4 6 (f) 中所表示的物点，标志着由这透镜反所透用的光栏共同描画的视场的最远极限。

视场的不均匀照明

用口径光栏限制了视场，但产生了一种不可避免的而重要的结果，这就是对于低於图 4 6 (c) 所表示的一切物点，达到像点的光便逐渐减少，这是因为被光栏所允许通过的光线只有其中一部份是被透镜所接收，因此直到图 4 6 (c) 所选择的视场的那一点为止，像的亮度差不多都是均匀的。在图 4 6 (e) 所表示的像点，其亮度大约仅有上述亮度的一半，在图 4 6 (f) 的极限情形中亮度减到为零。向着照明视场的边缘，亮度逐渐减弱，这是由於光栏及透镜的联合效应毁损了大部份的斜光束所致。当照相物镜用於大口径或接近於它的全照明视场的极限时，这种亮度的衰减在照相物镜中是困扰的最突出的来源。这种现象叫作“渐晕效应”这是由於它与人物反背景的照相的外部逐渐暗淡有显著的相似处，这种照相是用适当切成的框子放在印象架子上所晒成的，並且也得到同样的渐晕效应的名称。

在普通的望远镜裡，我们从比较宽的物镜的整个口径那裡经常得到不受阻碍的而实际用到的视场各部分的光线，这通光口径便是所有允许进入这仪器的光锥的公共底面。图 4 6 (a) 或 (b) 的简单情形，是一切有效光锥的中心通过的情形，这情形大致是实现的，並且没有感觉到有斜光束的毁损情形及渐晕效应。

大多数不贵的手照相机都装置着照相的风景透镜或月牙透镜，这些透镜通常是较宽的简单透镜或胶合消色差透镜，光栏放在与远的物体同一边的某一个位置上，这便实现了情形 (c)，有时

候风景透镜设计时，将光栏放在透镜后面，情形(d)便实现了。在(c)及(d)两者情形中，假使将光栏开放很大的时候，在视场较边缘的部份渐晕效应变成很显著，並且很讨厌。

更野心设计的一些近代照相镜头，实际上永远由介离较大或较小的两组所构成，以前组及后组之名称来区别它们，而口径光栏是放在这两组之间。前组便属于情形(d)而后组便属于情形(c)。在照明视场外部渐晕效应变得更加复杂了，因为这两组通常从相反的两个方面毁损一些超越一定临界斜度的实际进入的光束，正如图46(f)所示。

实际的计算者应当仔细的注意到，斜光束的偏心通过所需要的透镜口径，比较对于相应的轴上光束是足够的透镜口径大得多，因此具有大视场系统的一些凸单元需要大量地增加其厚度，如同在其他一些情形一样，这厚度是很易而可靠地确定的，只要用合理而较准确的比例尺画一张这系统的投影图就成了。

阿貝對於光栏问题的研究

已经觉察在任何合轴透镜组内的光栏位置的基本重要性之后，我们下一步必须决定一种适当的追踪光线的方法，同时兼顾到光栏的位置及口径。假使我们追踪光线是由左到右的通常方向，这很容易看出，在图46的情形(b)及(c)中没有什么特殊困难，因为物点及光栏是放在相同的介质中，在决定从物点（在轴上或在轴外）到光栏口径上任何意欲点之间的光线直接路程是没有几何上的困难的，但是若我们观看一下图46(d)或(f)，我们便发现透镜组成它的一些组合之一插入在物点及光栏之间，因此每一条光线在它达到光栏之前，由於在透镜面上的折射便遭到相继的弯曲，看来彷彿无他，只是一系列厌烦的尝试，才能使我们找出那条从已知的物点发出而最后经过光栏口径上的某一特定点的光线。若适当光线的选择需要高度的三角精确度，这种精确度

是我们研究一个像点的残余像差时所追求的，那么事实上这就是上述的情况了。但是侥幸得很，这种高度的精确度是完全不需要的，因为一个能够使用的透镜组必须在它的最后的像上只有少量的残余像差，因而作成这个像的一切光线必须在这个像的理想位置的非常短的距离内通过，结果是从光栏上某一特定点而来的光线的到达点，与从该光栏合理的相邻近点而来的光线的到达点、该两到达点之间仅仅有很小的差别。为了这个道理，一个近似的方法差不多永远是允许的，并且利用一个很简单的方法来解决似乎很困难的问题。阿貝将这简单的方法作成一个方便的形式，并给予很易接受的名称。

光具组的彩帘及瞳孔

人的眼睛是一具完整的光学仪器，在性质上与照像机非常相似。位置在眼的透镜前面而构造复杂的一个圆盘中心，有一个可调节的光栏。这圆盘叫作彩帘，它以外表面主要的色辉来决定眼睛的颜色。因此阿貝对于真实的，实际的光栏引进“彩帘”这个名称，在任何透镜组内这光栏是决定着能够通过该透镜组的轴上光束的直径。当我们看一个人的眼睛时，我们不能直接看见真实的彩帘，因为角膜反充满在角膜与透镜间的空间的液体阻隔着。我们所看见的是真实的彩帘的虚像，这虚像被其中介质的透镜效应稍为放大些，而这虚像的中心孔就是我们平常称为眼的“瞳孔”。

若我们从物体这边向着图 46 (A) 及 (B) 的透镜看，或从图 46 (C) 及 (D) 的像那边看，我们必定也不能直接看到真实的光栏，但是我们只能看见介於其中的透镜所产生的光栏的像（差不多永远是正虚像）由於同眼睛的完全类似，阿貝对于真实光栏的这些像引进了“瞳孔”这个名称，从物空间看见的瞳孔叫做“入射瞳孔”，从像空间看见的叫做“出射瞳孔”各以简写符号 E_P 及 A_P 表示之，后者是由德文字母而来。我们将要稍为改变一下

这些符号，使与关于“一撇”用法的命名法的基本原则相一致，并且将用 E_P 作为在任何透镜组或面的左边介质的瞳孔符号及 E_P' 作为在右边介质的瞳孔符号。即使当真实的光阑或彩帘本身位置在一些介质之一内的时候，我们还是使用这些符号，因为这时彩帘的作用显然如同瞳孔一样，因此在这些情况内叫它为 E_P 或 E_P' 是没有妨害的。因为这些瞳孔是彩帘的像，它们就解决了定一条通过真实彩帘开孔上的某一定点的光线问题，这是因为按照光学像的定义，从一定物点所发出的一切光线，必定是通过其共轭像点。因此确定进入光线的方法首先是找出入射瞳孔的一点，这点是与光线经过折射后所需要通过光阑口径的一点相共轭的。其次是决定从物点发出的光线的开始数据，使这光线直接对准第一步已确定的入射瞳孔的那一点。这样决定的光线并不绝对准确地经过光阑上所需要的一点，但其误差是在垂轴像差级的一个小数里内，实际上这永远是足够近似了，其理由已在上面说过。

定瞳孔的方法

因为现在问题简化为决定已知物体，换言之就是光阑或彩帘的像的位置及放大率这两个问题，又因为仅需要不太高的精确度，我们通常可以按下面进行：

(1) 用近轴光线追踪。知道了从最近的透镜面到光阑的距离，我们以那个距离作为开始 l (或 l' 若从右到左追踪的话) 以任何开始随意的假定角作为 u (或 u') ($u' = 0.1$ 是方便的，因为我们不需要在对数表内查它的对数) 从光阑中心追踪一条近轴光线，经过所有的居间折射面到像空间或物空间。求出终了的 l'' 或 l 。它是定瞳孔离最末后折射面的距离，这时我们用拉格朗日定理计算瞳孔的放大率为 $m' = \frac{l''}{l}$ (或 $m = \frac{u'}{u}$)，离真实光阑中心距离为 Y 及在光阑平面内的任意点於是必共轭於离瞳孔中心距离为 $m' Y$ (或 $m Y$) 及在瞳孔平面内的一点。从物点发出的

光线必定与这样决定的一点连接起来。这个最普遍有用的方法的一些例子将在后面给出。

(2) 有时位置在要追踪斜光束的空间与光栏之间的透镜是法的并且具有已知的焦距，我们根据透镜公式 ($\frac{1}{x'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{x}$) 用巴旁表或用计算机得出的一些数字反又用计算机标出 $m' = \frac{x'}{x}$ 或 $m = \frac{x}{x'}$ 就能足够近似地确定瞳孔中心位置。

(3) 当主要的目的是追踪有限的倾斜角度的斜光束时，并且当已经知道（或足够近似的估计出）在什么倾斜角度下这斜光束的中心光线通过真正的光栏时，我们就能够节省时间并且得到比用(1)法较高的精确度，假使我们追踪这中心光线（在任何情况下这中心光线是必须被追踪的）是用通常的三角方法的话，这时放大率使用 $M' = N \sin U / N' \sin U'$ 得到，这是符合在下章要证明的光学正弦条件。

光栏的其他种类

对光栏这重要问题加些注意是有帮助于消除任何还存在的怀疑及困难的。首先必须要实现的是：在前几节已专题讨论的口径光栏必须放在器物平面或像平面很远的距离，学生应当自己画一些外加的图解就可以表明：这样一种光栏，假如靠近这些平面的话，必定须要非常小的口径，并且在任何实际的透镜的口径下必定严厉地限制视场，因而相应地加深了渐晕效应及亮度的不均匀性，因此眼帘或瞳孔的这样一种位置必须几乎以任何代价来避免。

在光学仪器中所遇到的各种光栏可参看地上望远镜图解，即图4-6(b)。实际上在一切望远镜里，物镜的通光口径的作用如同“眼帘”或有效的口径光栏。这仪器的其他部份必须（除去很少有的反不愿意有的情形外）如此设计：对于真正有用的视场内每一点，其共轭物点所发出而通过物镜的整个光束都被允许通过，向右方向追踪三条特性的光线经过这仪器，在所欲的视场边缘

的一点是被这三条光线所绘画，经过这物镜后成一个初级倒像在 A 点，这像对于这两个透镜 L_1 及 L_2 的作用如同物体， L_1 及 L_2 共同组成“正像组”其作用正如同显微物镜，经过正像组后产生外面物体的二级正像于 A' 点，可是这像被惠更斯目镜 L_3 L_4 的场镜 L_3 拦截，而缩小的真实的二级像便作成在 B 点，并且经过接目镜 L_4 可以看到，

假使在这种望远镜内没有额外的一些光栏，那么根据渐晕原理，视场就被由 L_1 到 L_4 的透镜中之一二个或几个的边缘所限制，当我们用这望远镜观看时，我们便看见对着视场的边缘方向渐次的暗淡下去，有时靠近视场边缘成像模糊反带有讨厌的颜色效应，要除去这些缺陷在透镜 L_3 与 L_4 之间永远放进一个光栏，使光栏的边缘经过接目镜 L_4 很清楚地看见，於是限制视场于所要的一定的范围，这样的一种光栏可以恰当地叫做“场光栏”，它的通光口径必须调节得这样，使没有光栏的目镜所产生的整个视场的渐晕的反可能不清晰的边缘拦截掉，场光栏可以放在外面物体的任何合理清晰的像平面上，并且每个像平面放一个光栏时常是适当的，尤其在长而狭的仪器内如同潜水艇的潜望镜，但是任何副场光栏必须要有比主场光栏稍为大一些的直径，主场光栏通常是指最靠近仪器的眼端的那个光栏，因为若是这些场光栏计算得刚好包含同样的视场范围，那么任何一点与偏心或仪器的一点弯曲都可以产生互相干涉很丑的非圆形的最后视场，在地上望远镜裡有一个机会来放第二个场光栏于 A 点，但是这机会是很少用的，

当真正的有效光栏在仪器内成一个实像时，口径光栏的数目加多会产生有益的结果的，地上望远镜就贡献了这种性质的机会，这机会是永远被利用着，物镜的通光口径被正像组的第一个透镜 L_1 成实像于一切的斜光束与光轴所相交的 C 点上，一个光栏便被放在这个位置上，它的口径比物镜的像的口径略大，这样

它便不能阻礙真正有用的光线，可是它能阻礙在鏡筒內部反射的无用的光线，不让这些无用光线通过，因此这种“正像组光栏”能够大大地增加像的高度。不幸这种光栏时常被一些卑劣的光学仪器商人所誤用，他们为了暗地裡减小劣等物鏡的有效口径这样一个目的，便简单地使这光栏的口径比物鏡的像的口径来得小，这样便减弱亮度而得到较清晰的最后成像。

第三种光栏主要用在天文望远镜及很长的地上望远镜内，在图 4.6 (h) 内 D_1 及 D_2 便代表这种光栏（虽然在这种望远镜内不常用）这种光栏的目的是不让从天空中来的並经过鏡筒内或至少有些光亮的内壁的反射的光线到达观测者的眼睛，这种“内耀光栏”的放置及大小必須要它不能拦截任何有用的光线。若是它刚好接触以物鏡的通光口径为底面及以物鏡的初级像的通光口径为頂面的截圓錐体时，它便满足了上述的这个重要条件。

斜光束的初级像差

[52] 在第二章中我们看到当光束限于所謂广义近轴区域时初级球差的表示式是很简单的；斜光束若也限于初级像差时，可以从前几章的知识获得正确而简洁的结果，对应的五种初级像差一般称为 *Seidel* 像差。

图 4.7 (a) 表示斜光束象差的情况， B 、 B' 是轴上物点和像点， B_0 、 B'_0 是相应的轴外物点和像点， C 是折射面的球心， BC 是辅助轴，通过光栏的斜光束边缘光线 a 和 b 交折射面于 P_a 和 P_b 点，从第二章我们知道球差一般可表示为二项式：

$$LA' = a_2 Y^2 + a_4 Y^4$$

在这裡我们假定 B 点和 B_0 点的球差表示式中系数相同，一般來說这个假定所引起的誤差是不大的，誤差的来源有二，首先是由於物距 BA 与 B_0A_0 不相等，其次則由於 B 点发出的光束原有像差和 B_0 点发出的光束原有的像差不相同。当限于讨论初级像差

时（孔径很小，像场很小）上述影响就可完全忽视。从图 4-7（a）（这个图并不是那种很少遇到情形）折射点高度 A_0P_0 是 PA 的三倍， A_0P_a 是 PA 的五倍，由上面的公式， b 光线的初级球差是轴上光束的 9 倍，二级球差为 81 倍，而 a 光线则各为 25 倍和 625 倍，由此可知斜光束的像差要比轴上光束的像差大得多。

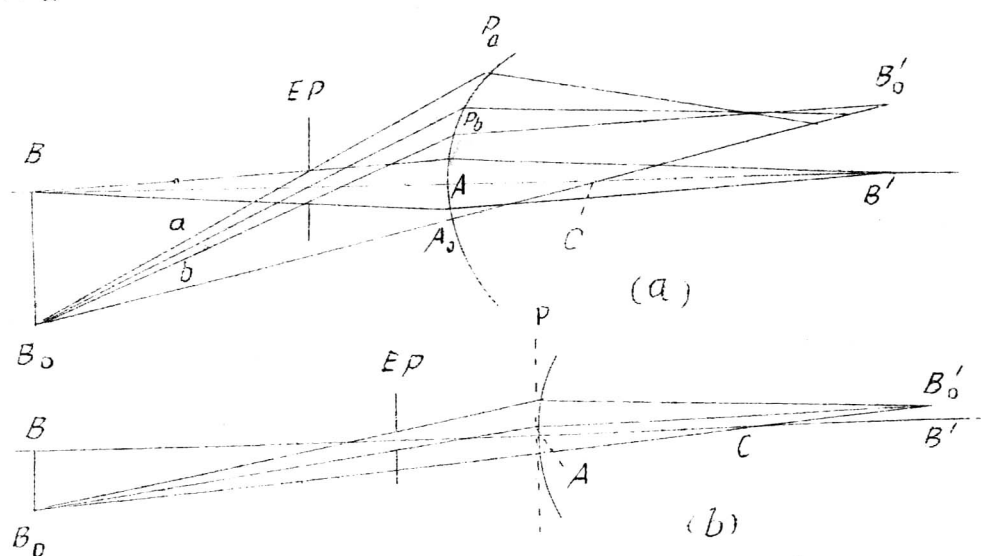


图 4-7

要是把光栏放在折射面的球心，那么折射面就并不对斜光束产生更多的像差，光栏愈近球心则轴外像差就愈小，用这一点可以解释照相物镜特别是广角照相物镜的透镜常为弯月形并且弯向光栏，可以注意到：轴外光束的高级像差特别大，而轴上光束的二级球差愈小则轴外光束的二级像差也随之愈小。

下面就只对孔径很小视场很小的情况下讨论，以求出初级像差；图 4-7（b）更近于这种情况。此时 BA 和 B_0A_0 之差很小而可将轴向球差系数代替轴外球差系数，图 4-7（a）中的入射点高度 P_aA_0 等在此时沿平面 PA 量度也不会引起误差，而角的正弦和正切也都可用其弧度数替代。

虽然导出的公式只能表示孔径和视场都很小时的准确知识，

但它也表示了视场和口径都很大的时候斜光未像差的极好的第一次近似值。用它来很快地求出近似的解这就可以使三角计算求解的过程缩短。这是 Seidel 像差的重大实际意义之一。另一方面，既然 Seidel 像差是初级像差，我们就可以用它来决定高级像差之大小，三角计算结果之像差值与初级的差异就是 2 级和更高级像差的和。因此在所有光学仪器的设计中 Seidel 像差理论是原则上的重要性。

单折射面产生的像差

[53] 下面只对同轴球面组成的光学系统并对某一定波长来讨论。设物平面是垂直于系统光轴的平面，所以理想的像应是垂直于光轴且与物体相似的平面。和上述要求的差异即认作像差。理想像面的位置是可以从第一章中近轴光线计算而给出的。在下面设此光线已求出，而 l, l', u, u' 都是已知的。若再决定理想倍率，那么理想像就完全确定了。由 [18] 节，近轴部分的倍率由 Lagrange 定理决定，由于它是近轴部分的唯一可能倍率，因此它也就是整个像面的理想倍率，这个理想倍率 m 所决定的像高与像平面和辅轴交点的高度相同，如图 4.8 所示 C 是折射面的球心， B' 是 B 点的近轴像点，由高 H 的轴外物点 B_0 作辅轴 B_0C 与近轴象面相交于 B'_0 点， B'_0 的高度 H' 由相似三角形得出为：

$$\frac{H'}{H} = \frac{CB'}{CB} = \frac{l' - r}{l - r}$$

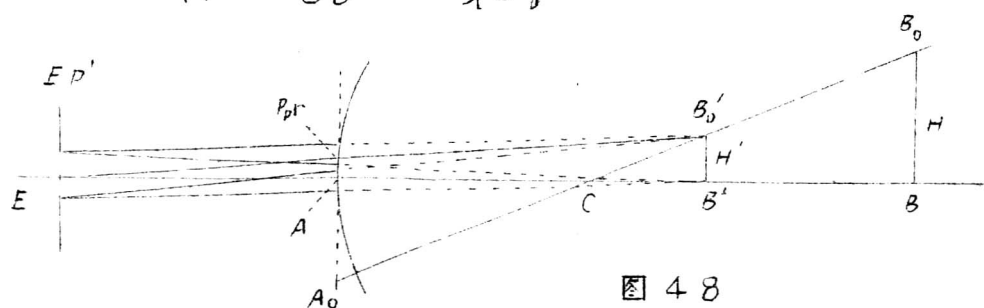


图 4.8

这个倍率和[18]节中公式(10P)*是一样的。

由[52]中的一般考虑，我们现在要决定每个折射面上的轴向初级球差之值。现在以 a 代替前面的 a_2 ，以 SA （口径之半）代替 y 或 Y ，则有：

$$LA_p' = a \cdot SA^2.$$

由[28]节，标出近轴光线后每个折射面产生的初级球差即可标出为：

$$Sph_j' = \frac{1}{2} l_j' \frac{l_j' - r_j}{r_j} (i_j' - u_j) (i_j - i_j'),$$

由 $SA_j = l_j' \cdot u_j'$ ，此式即表示 $LA_{pj}' = a_j SA_j^2$ ，而得

$$a_j \cdot l_j'^2 u_j'^2 = \frac{1}{2} l_j' \frac{l_j' - r_j}{r_j} (i_j' - u_j) (i_j - i_j'),$$

故

$$(a) \quad a_j = \frac{1}{2} \frac{l_j' - r_j}{r_j \cdot l_j' \cdot u_j'^2} (i_j' - u_j) (i_j - i_j'),$$

从此式即可标出每一折射面上的初级球差系数，

下面再决定出轴外光束的折射点位置（决定各光线的 SA ）。显然此位置随光栏的位置而异，因此再标出各媒质中的光栏位置。通过光栏中心的光线称为主光线，以足号 pr (Principal) 标记，如 i_{pr} 为主光线入射角 l_{pr} 为主光线在某一面之左的媒质中截距等。下面设主光线也已标出了。

由图48，光栏对像面上 B' 点和 B_0' 点各张成一锥体，当 H' 很小时二锥体相似，二锥体为球面切面所截出的边界线形也全同，而且当实际光栏大小变动时各边界线也按同样的比例变化。因为这些原因，在广义近轴区的像差特别简单。实际的光瞳大小随像面上各点位置而变（光栏位置的像差）以及通过光瞳的光束与折射面相交而形成的周界形状随像点高度而变等也都是高级像差产生的原因。