

# 光学系统计标方法

Г.Г.斯涅甫夫著

第二版  
补充和修改

程永铭 译  
谢德胜 校

# 第五章

## 光学系统结构的初始设计

### 1. 引言

把整个设计过程分解成尽可能彼此不相关的独立阶段是合理的。这样的分解明显地简化了设计，这主要是由于在每个阶段中需要确定的未知数数目比整个过程中的数目少，因而，每个阶段的解也可以较简单地求得。

光学系统设计也可以分成几个阶段。第一阶段是确定光学系统的整体方案，即确定完成某一任务的单个部件（组元）数目，它们的彼此位置，大约的尺寸——横向的和纵向的——和单个组元的焦距。这个初始设计阶段一般叫做外形尺寸设计。此后，设计者可以开始初始设计，因为单独部分的一切尺寸和彼此的位置，它们的大约重量和其它一些设计所必需的资料都已经足够精确地知道了。

在系统是复杂的、是由一系列彼此离得比较远的单独组元（每个组元工作的孔径值不太大而视场角可以大）组成的情况中，光学系统结构的外形尺寸设计具有特殊的意义。

望远镜系统，特别是潜望镜、测量望远镜、用于观察中间空的物体内表面的光学系统、医学仪器（胃镜、膀胱镜等）等形式的望远镜，复杂的投影系统，与照明器部分一体的显微镜形式的系统可以作为特别确切地和唯一地完成外形尺寸设计的光学系统例子。

### 2. 光学系统外形尺寸设计的原理

每个光学系统完成确定的任务和应当满足各种不同的要求，这些要求决定于光学系统在那些条件下应用。所有这些要求不能列举无遗，因为它们带

有各种各样的、有时想不到的性质。

第一类要求属于对系统的孔径或相对孔径的要求，对入瞳或出瞳大小的要求，对仪器分辨率的要求，对视场的要求。第二类要求属于系统《尺寸》，也就是它的外部尺寸和形状；近年来，随着军事技术的发展，这些要求具有越来越大的意义。

第三类要求涉及像的质量，这类要求也随着系统的用途而极为不同。例如，在观察仪器（双筒望远镜、瞄准镜、测距仪）中重要的是在视场中心有很好的像质量；在边缘上允许有颇为显著的变形，因为被观察物体总是可以调整到视场的中心。对精确摄影用的照相物镜则要求沿整个视场的像都有很好的质量；对成像于视场中不大的一定部分的记录物镜，则要求只对该部分的视场消去象差。相反，对有些光学系统要求一定的像的变形。例如变形摄影物镜应当在不同的方向中有不同的放大率；对艺术摄影用的物镜，则要求像的轮廓柔和些。最后，还有一些难以分类的要求，例如关于像的《明亮》的要求，即要求不出现使像的衬度降低的背景，这种衬度提高了某些光谱区域的透明度。

### 3. 光学系统的参数

光学系统的设计者和计算者面临着满足某些要求的任务，在材料方面，他们可以利用光学工厂制造的一切种类的玻璃以及为数很有限的几种透明矿石，象石英、萤石、岩盐等，这些矿石常由于某种原因而不适用。在光学系统的《几何学》方面，即选择限制介质的表面形状和位置方面，在理论上倒是有无限多设想得出的可能性，但实际上非常有限。首先遇到的限制就是要求应用共轴系统，虽然不能严格地证明，共轴光学系统与不共轴光学系统比较，共轴光学系统具有何种优越性（从纯理论观点出发），但是不共轴系统的理论尚未建立，且制造具有足够精确度的不共轴光学系统非常困难。第二

个非常重要的限制是优先应用球面。虽然也应用非球面，但这种情况很少。可以相信，随着生产技术的发展这个限制会逐渐消失，并在设计者面前展现新的前途远大的可能性，关于这些问题将在第九章中论述。

另外还有一个限制（对许多光学系统例如对照相物镜说来这种限制在逐渐消失），这个限制在于，光学系统被分成独立的组元，每个组元的厚度比起它们的焦距及它们中间的空气距离来都很小。这样的分解在望远系统（天文望远镜，测量望远镜，双筒望远镜，潜望镜等）及凹式照相系统中经常遇到；这是由于历史上要求简单和实用的结果。随着对光学系统要求的增长，光学系统的结构日益复杂，而组元本身也被分成独立的成分，它们的厚度变得相当大（现代的大孔径照相物镜，显微镜物镜）；这种复杂化在望远系统（特别是目镜）的结构中也开始出现。

#### 4. 光学系统外部元素和对系统光学特性提出的要求之间的关系

不能以普通的形式，用某些确定的关系式把光学系统组元的焦距、孔径、组元之间的距离和前面列举的需要光学系统满足的要求（放大率、孔径、视场、像质量）联系起来，对于大多数光学系统来说不久以前甚至未必一定要提出这个问题；所有光学系统都有原型，从这些原型，经过逐渐变化和改良而得到光学系统。这个从天文望远镜，测量望远镜和棱镜式双筒望远镜的发展史中得到证实。随着许多新光学仪器（主要是军事用途的）的出現，在研究方向中发生至大的变动；对这些仪器提出许多严格的要求，包括横向尺寸，纵向尺寸和光学系统应当满足的光学特性，在满足这些特性时，光学系统产生质量良好的像。

我们叙述一些一般推理，根据光学特性的要求确定光学系统外部元素。为了简单起见，我们假定光学系统由无限薄组元构成。这个假定不妨碍

论断的普通性，因为对于由有限厚组元构成的光学系统，所有对无限薄组元所作的计算都仍然有效，只是焦距是从相应的主平面起，这种主平面代替了无限薄组元的重合面。实际光学系统的全长和具有无限薄组元的系统长度的差等于各组元主平面之间距离的和。在下一章中我们再来讨论这个问题。

设所有组元的焦距及所有组元间的距离为已知；物平面和入瞳平面的位置已给出。同时也给出了视场的大小（例如完全照明的视场）和入瞳直径。要求确定透镜的有效直径。

设  $L_1, L_2, \dots, L_n$  (图 5.1) 是已知的透镜组；设  $BB'$  是入瞳面和物平面的交线。在这里，物平面假设在很远的地方，于是从物点发出的光线差不多是平行的

(这一情况不限制结论的普遍性)。我们首先研究从轴上物点发出的

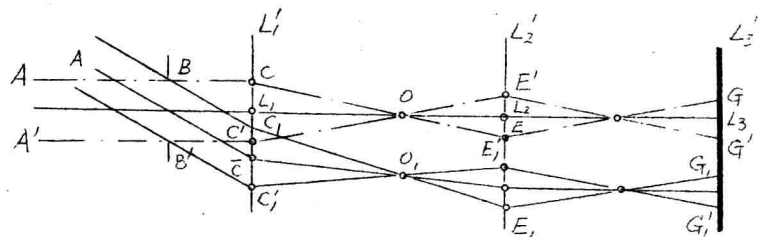


图 5.1

光束。这个光束的子午截面由通过入瞳边缘  $B, B'$  点的两条边缘光线  $ABC$  和  $A'B'C'$  限定，这两条光线叫做孔径光线。当物体是平面中的一个点时，这两条光线与各透镜表面的交点 ( $CC', EE'$  和  $GG'$ ) 用来确定透镜的有效孔径。这些孔径的直径显然分别等于系统前三个组元的相当截距  $\overline{CC'}$ ,  $\overline{EE'}$  和  $\overline{GG'}$ 。一条孔径光线与以后各表面的交点高度可以根据通过光学系统的光路计算来确定；这种计算最好按照以下公式来作

$$\alpha_{k+1} - \alpha_k = h_k \varphi_k \quad (5.1)$$

$$h_{k+1} - h_k = -d_k \alpha_{k+1} \quad (5.2)$$

此处  $\alpha_k$  是光线未经第  $k$  个组元折射前与轴的交角； $h_k$  是光线和第  $k$  个组元的交点高度； $\varphi_k$  是第  $k$  个组元的光焦度； $d_k$  是第  $k$  个组元和第  $k+1$  个组元之间的距离。

组元间的距离。公式(5.1)和(5.2)依次适用于所有的表元。

为了确定孔径光线与第一表元交点的高度  $h_1$ ，我们参看图5.2，在图上  $S$  是轴上物点； $SC$  是一条入瞳平面上高度为  $m_1$  的点的射线；入瞳平面到第一个组元  $O_1$  的距离等于  $-x_1$ ，点  $S$  到同一个组元的距离等于  $-s_1$ 。

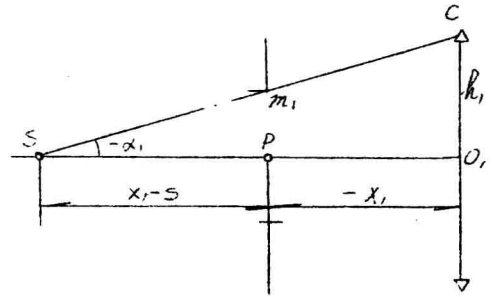


图 5.2

显然

$$h_1 = m_1 - \frac{m_1 x_1}{x_1 - s_1} = -\frac{s_1 m_1}{x_1 - s_1}$$

取角  $\alpha_1 = -\frac{m_1}{x_1 - s_1}$ 。如果物体在无限远处，则  $\alpha_1 = 0$ ，而  $h_1 = m_1$ 。

现在我们研究图(5.1)从离轴有限远的物点发出的光束(如果物体在无限远，则我们研究以有限角距离离开光轴的点)。这个光束在子午面内和上述光束一样也由入瞳边缘的点  $B$  和  $B'$  限定；它有和上述光束相同的孔径，也就是从物平面任何点来看对光瞳张的角度都相同；在这种情况下，如在傍轴区域计算中通常作的那样，我们把光束倾斜的影响略去。这样，所有光束为各组元的所截的截面都有相同尺寸而和发光点在物平面中的位置无关。例如，含有中心光线(主光线)  $\overline{ABC}$  的光束有与截面直径  $CC'$  相等的截面直径  $GG'$ ；同样  $E, E' = EE'$  并依次类推。同时第二个光束对第一个光束有位移。这个位移量的大小是一个变量；不难看出，对每一个透镜，这个位移都等于从轴到斜光束主光线和组元表面交点的距离。点在物平面中离轴愈远，相当光束的主光线与各组元表面的交点  $\bar{C}, \bar{E}, \dots$  也愈远。因为边缘光束的主光线确定系统的视场，也就是确定空间或像域的界限，故这些光线可以叫做视场光线。

用字母  $y_k$  表示视场光线与组元表面交点到轴的距离。如果从完全照明视场的大小出发，则可以将视场边缘上光束的主光线（就是视场光线）和从轴上物点发出的孔径光线这两条光线与各组元的交点高度  $h$  和  $y$  的绝对值之和的一倍，作为每个透镜的有效孔径（ $2\overline{L_1C'_1}$ ， $2\overline{L_2E'_1}$ ， $2\overline{L_3G'_1}$  等）。例如，第一个透镜的孔径直径  $2\overline{L_1C'_1} = D$  决定于方程：

$$\overline{L_1C'_1} = \frac{D}{2} = \overline{L_1C} + \overline{CC'_1} = |y_1| + |h_1| \quad (5.3)$$

这个公式对其它组元也都成立。量  $y_k$  可用类似于求量  $h_k$  的方法根据视场光线的光路计算求得，这种计算最好按照类似于公式 (5.1) 和 (5.2) 进行。

这样，如果已知两条通过系统的主光线光路，即孔径光线和视场光线的光路后，则很容易计算系统透镜的尺寸，反之，如果透镜尺寸为已知，则可以知道，视场的那一部分是完全照明地看到。关于完全照明两说的一切都可以推广到不完全照明视场的情形。为此只需作出类似于图 5.1 的图，但是，此时不是研究通过入瞳边缘的光线  $BC_1$ ， $B'C'_1$ ，而是研究具有一倾度但是通过入瞳另外的点的光线，并且探究它们通过整个光学系统的光路。

用这样的方法得出了透镜孔径和其它高斯元素（焦距，透镜间的距离，入瞳和入窗的位置）间的关系的解析表示式。

用这种方法得到的关系只是近似的，因为关于组元无限薄的假设不符合实际情况。然而在大多数情形中，从实用角度来说它们是足够精确的，因为透镜有效孔径的确定不要求高的精确度。关于存在于光学系统中的《尺寸》性关系，只有当系统分成一个一个组时才能进行更具体的讨论，而这每一个组的组元数目和相互之间的位置是各不相同的。

## 5. 由薄组元和转像棱镜构成的光学系统的 不同结构

按照由十个薄的单个组元构成的光学系统之结构，光学系统可以分成三

种类型。

1、由两个部分——物镜和目镜构成的光学系统（虽然目镜一般由两个组元构成，但还是把目镜视为一个部分）。属于这种类型的可以有天文望远镜，测量望远镜，伽利略双筒望远镜，低倍显微镜，一切类型的瞄准具。

2、由带附加棱镜转像系统的两个部分（物镜和目镜）构成的光学系统。属于这种类型的有棱镜双筒望远镜，炮队镜，测距仪，一系列瞄准望远镜等等。几种带摆动或转动棱镜的系统（罗盘，巴特马镜）也可以属于这种类型。

3、带转像透镜的光学系统。属于这种类型的有望远镜、潜望镜、瞄准望远镜。

### 由两个组元构成的光学系统

对每一种类型的系统来说，透镜的结构和尺寸的初始计算非常简单。

对它们的基本要求是保证确定的最低鉴别率，也就是给观察者有可能区别互相离开某个直线距离或角距离的两个点或两个物体，这两个点或两个物体有确定的形状。这个要求已经确定了一切。从像衍射理论知道，鉴别率与物镜的孔径有关并和它的直径成正比；故直径是已知的。筒长是物镜孔径的函数并和物镜结构的复杂性有关。在这个简单的例子上说明了，为了确定长度需要知道和第一部分计算有关的量，第二部分计算的目的在于消除系统象差。一般的说，物镜结构越复杂，则它可能有的相对孔径也越大，而光学系统的长度也可能越短。

实验和理论指出，在多朗德发明消色差方法（1753年）以前应用的单透镜只在相对孔径不超过  $1:50 \sim 1:70$ （和透镜的直径有关）时产生足够好的像；由普通冕牌玻璃和火石玻璃制造的两个透镜构成的物镜在相对孔径  $1:10 \sim 1:12$  时效果良好；近年来出现的应用于天文照相中的更复杂的三透镜或四透镜物镜在同样的直径（ $20 \sim 40 \text{ cm}$  级的）时能使相对孔径扩大到  $1:9$  和

1:6. 测量望远镜的发展史和以上的情形相似, 由于应用了优良型式的物镜和目镜, 它们的纵向尺寸缩小了。

这样, 物镜型式的选择已经确定了筒长和系统的所有尺寸。目镜在长度方向通常是量很小的量, 这个量可以忽略。

### 转像棱镜

在设计带反射棱镜的第二种光学系统时产生了和棱镜型式的选择、可做的棱镜最小尺寸、它在系统中最适当的位置有关的一系列问题, 当棱镜摆动时, 解决这些问题更要复杂些。当反射棱镜为在折射效果上和它等效的平行平板(这个平行平板有和反射棱镜相同的光路)代替时, 所有与确定棱镜尺寸有关的问题都很简单地解决了; 在这种情况下, 反射现象全然不用考虑。这一情况简化了所有的计算, 因为光线通过平板时沿直线进行, 没有那些在反射面上的曲折。这种把通过反射棱镜的光线光路的变直有时叫做棱镜的展开。在图5.3上<sup>1</sup>指出几个展开的例子; 在上图画出了反射棱镜的截面, 反射面标有斜线; 在下图是展开棱镜的截面。在上图中的光线的曲折光路为下

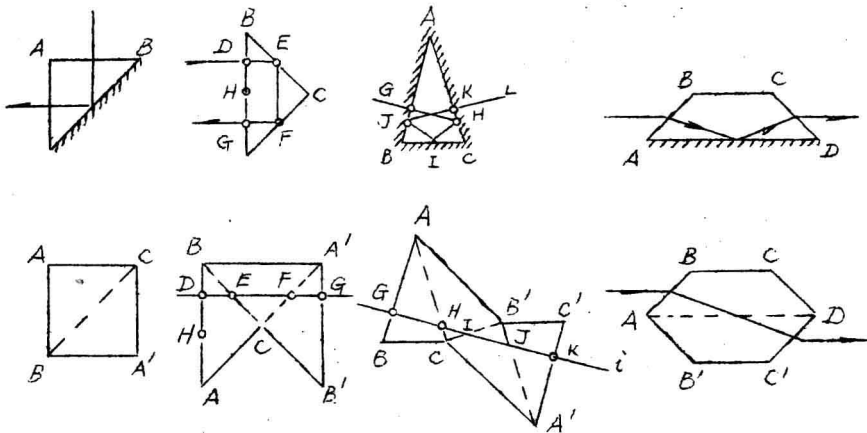


图 5.3

<sup>1</sup> 在这里表示的是棱镜的基本型式。在本书第二部分将更详细地讨论反射棱镜。

图中的直线光路所代替，也就是反射棱镜为平行平板代替，其折射光线的作用完全和棱镜一样，但是没有反射作用。这种等效平板有时叫做棱镜的展开图，在等效平板中反射消失。等效平板用下列方法作出：在每个反射面附近作由该反射面附近的棱镜的棱和反射光线的像，作完之后可以在图上擦去反射面，因为它们不影响垂直光线的光路。显然，借下图的帮助不难画出光线和棱镜任意面交点的位置。这种计算很有价值，因为在棱镜双筒望远镜中棱镜的框能够斩断光束，甚至到达限制视场的程度。

在实际中最常遇到的一种特殊情况，就是当棱镜的折射面垂直于系统的光轴时，计算可能更加简单些。在这种情况下，如果把已经展开的棱镜用等效的《空气》平行平板，也就是以厚度  $d_1 = \frac{d}{n}$ （等于在棱镜中光线几何路程的长度  $d$  除以棱镜的折射率）的空气层来代替，就可以不改虑在棱镜面上的折射。

必须指出，在第一种展开方法和用空气玻璃的第二种方法之间有一种原则上的区别。第一种方法对所观察的任意光线都是合理的，而第二种方法只在傍轴区域内适用；一般的说，放置在会聚或发散光束中的反射棱镜都产生象差，这种象差当用空气代替玻璃时未被改虑到。故第二种方法只在有确定棱镜的结构元素、棱镜产生的光束斩断程度等时起作用。

为了说明问题，我们来研究具有下列特性的棱镜双筒望远镜的外部尺寸计算例子：放大率  $8\times$ ；视场  $6^\circ$ ；出瞳直径  $4\text{ mm}$ 。已知物镜作为双筒望远镜的入瞳，望远系统的入瞳和出瞳的直径之比值等于系统的放大率，故得物镜孔径的直径为  $4 \times 8 = 32\text{ mm}$ 。

目镜型式根据要求的视场和镜目距（出瞳至目镜最后一面的距离）来选取。当物镜视场为  $6^\circ$  时，目镜的视场  $2W'$  由下列条件求得：

$$tg W' = 8 tg \frac{6^\circ}{2} = 8 \times tg 3^\circ = 8 \times 0.0524 = 0.419;$$

$$2W' = 22^\circ 45'; \quad 2W' = 45^\circ 30'.$$

当采用凯涅尔目镜时能够得到这种视场（见本章最后）。

当确定物镜和目镜的焦距时，产生了不定价，因为出现与物镜型式选择有关的几个价。一般都采用双胶合物镜。当孔径为  $32\text{ mm}$  级时，保证像的良好质量的最小可能的焦距等于  $32 \times 4 = 128\text{ mm}$ 。在这种情况下，目镜的焦距应为  $\frac{128}{8} = 16\text{ mm}$ 。对凯涅尔目镜，从玉瞳到最后一片的距离  $\alpha'$  一般约为目镜焦距的  $0.5 \sim 0.6$ 。在这种情况下  $\alpha' = (8 \sim 10)\text{ mm}$ ，然而，一般都要求不小于  $10\text{ mm}$ ，故在计算这种情况下的目镜时，稍增大  $\alpha'$  值是必要的。

现在我们求出当采用最常用的普罗棱镜系统的情况下反射棱镜的尺寸。

为了确定尺寸，必须先求出通过系统的一切光束的象限。问题在二次近似中解决。在第一次近似中，根据本节开头所述方法画出二条光线（孔径光线和视场光线）与物镜和目镜的场镜的交点高度。为了确实，设场镜到物镜的焦面的距离为目镜焦距的  $\frac{1}{3}$ ，这对于凯涅尔型目镜是普通的值。

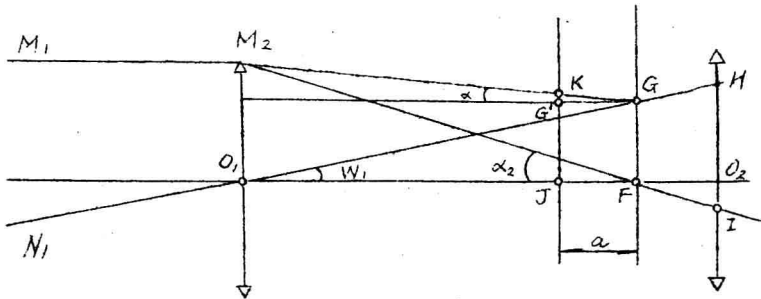


图 5.4

在高度  $O_1M_2 = h = 16\text{ mm}$  处与物镜相交的孔径光线  $M_1M_2$ （图 5.4）经物镜折射后交轴于焦点  $F$ ，焦点  $F$  到物镜中心  $O_1$  的距离  $f = 128\text{ mm}$ 。

角  $\alpha_2 = \angle M_2FO_1 = \frac{16}{128} = \frac{1}{8}$ 。该光线与目镜的场镜的交点高度

$h_2 = \overline{O_2I}$  等于

$$h_2 = \overline{FO_2} \alpha_2 = 5.3 \times \frac{1}{8} = 0.7\text{ mm}. \quad (5.4)$$

与系统轴成  $\omega, -3^\circ$  角的视场光线  $N, O_1$  通过入瞳中心, 在这种情况下, 入瞳中心与物镜中心  $O_1$  重合。该光线与场镜的交点高度  $\overline{O_2 H}$  等于  $\overline{O_1 O_2} \operatorname{tg} 3^\circ = (128 + 5.3) 0.0524 = 7.0 \text{ mm}$ 。在加入稜镜系统后两个交点的高度  $\overline{O_2 H}$  和  $\overline{O_2 I}$  不发生变化。设所采用的一些稜镜在系统中用若干空气层来代替, 每个空气层的高度和宽度需要确定。先设在  $6^\circ$  范围内的视场应当均匀照明, 也就是在系统中不应有遮光。于是, 场镜的有效孔径等于高度和  $\overline{O_2 H} + \overline{O_2 I}$  的两倍, 即  $2(7 + 0.7) = 15.4 \text{ mm}$ 。为了确定稜镜的有效孔径我们研究一种普罗稜镜的展开图 (图 5.3 上的第二个图)。稜镜中的光路  $DEFG$  至少应当等于通过系统的光束的宽度  $HB$  的两倍, 因为展开图是正方形的一部分, 该正方形的边等于入射光束宽度  $HB$  的两倍。这样, 稜镜应当放在光束的最窄部分中, 这样的结构多少可以紧凑些。在这种情况下光束的最窄部分处在物镜的焦点上, 在那里, 光束截面直径等于

$$2 \times FG = 2 \times 128 \times \operatorname{tg} 3^\circ = 13.4 \text{ mm}.$$

但是在这里碰到的是非平行光束, 故必须注意光束的发散角, 这可以用下列方法来计算。

设  $A'B'$ ,  $A''B''$  (图 5.5) 是为等效于一种普罗稜镜的空气平板所截的光束截面的边缘界限。设在稜镜中的光路长度等于  $d$ , 于是  $AB = DE$  是空气平板中的路程长度等于  $\frac{d}{n}$ 。

通过稜镜展开图下点的  $C$  点的光线属于稜镜的下半部。必须指出, 如果顶角  $C$  不精确地等于  $90^\circ$ , 则对于先从稜  $HC$  上反射, 然后从稜  $CA'$  上反射的光线有另一种展开图。在这种情况下, 如果  $C$  角对直角的偏差等于  $\alpha$ , 则对于在《玻璃》中展开图即没有化为空气层的展开图, 在边缘稜之间的夹角对于一

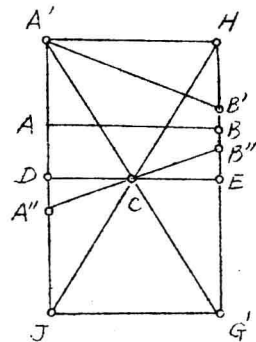


图 5.5

种展开图为  $+2\alpha$ ，而另一种展开图为  $-2\alpha$ 。

当入射在透镜上的光束中存在着沿一边从 C 点通过的光线时，这就产生了像的分裂。属于空气空间的这个分裂用角量表示时等于  $4\alpha n$ ，因为在从玻璃化为空气时，等效平板缩小到  $n$  倍。

用  $D_1$  表示截凸的最大尺寸 A'A"，用  $D_2$  表示截凸的最小尺寸 B'B"。设  $\alpha = \angle HA'B'$  —— 边缘光线 A'B、A"B" 和中间光线 AB 所成的角。在 AB、 $D_1$  和  $D_2$  之间存在着明显的关系式：

$$D_1 = \overline{A'D} + \overline{DA''} = \frac{d}{2} + \frac{\overline{AB}}{2} \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2} + \frac{d}{2n} \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{n} \right), \quad (5.5)$$

$$D_2 = D_1 - 2\overline{AB} \operatorname{tg} \alpha = D_1 - \frac{2d}{n} \operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{3\operatorname{tg} \alpha}{n} \right). \quad (5.6)$$

最好用已知的  $D_1$  或者  $D_2$  表示未知的  $d$  值，即

$$d = \frac{2D_1}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{n}}; \quad (5.7)$$

$$d = \frac{2D_2}{1 - \frac{3\operatorname{tg} \alpha}{n}}. \quad (5.8)$$

发散角  $\alpha$  的正切，或者精确地说光束的发散角  $\alpha$  的正切等于孔径角  $\alpha_2$  和视场角  $W_1$  的正切的绝对值之差，这种情况由图 5.4 可以看出。由于角  $\alpha$  不大，在我们的情况中可以取：

$$\alpha = \frac{1}{8} - \operatorname{tg} 30^\circ = 0.125 - 0.052 = 0.073.$$

于是，公式 (5.8) 给出

$$d = \frac{2D_2}{1 - \frac{3\operatorname{tg} \alpha}{n}} = 2.34 D_2.$$

借助这个公式很容易算出透镜的尺寸。设  $a$  是从焦凸到透镜的后表凸的距离 (图 5.4)。从结构考虑出发  $a$  值不能小于确定的最小值  $a_m$  (10 mm 级)。在我们的例子中取  $a = 13 \text{ mm}$ ；在平凸 B'B' 中的光束宽度  $D_2$  (图 5.4) 将等于：

$$L_2 = \overline{JK} = 2(\overline{FG} + \overline{G'K}) = 2(f \operatorname{tg} \omega + a \operatorname{tg} \alpha) = 2(6.7 + 0.95) = 15.3$$

这样，在靠近目镜的普罗稜镜中的光路等于

$$15.3 \times 2.34 = 36.0 \text{ mm}.$$

采用第二种普罗稜镜以使稜镜之间的间隔不小于  $5 \text{ mm}$ 。这样，对于第二个稜镜  $a_2$  有：

$$13 + \frac{36}{1.5} + 5 = 42 \text{ mm}.$$

在这个位置上的光束宽度  $D_2$  由下式的计算确定：

$$D_2 = 13.4 + 42 \times 2 \operatorname{tg} \alpha = 13.4 + 84 \times 0.073 = 13.4 + 6.1 = 19.5 \text{ mm}.$$

在第二个普罗稜镜中的光路

$$19.5 \times 2.34 = 45.6 \text{ mm}.$$

这样，求得下列通过二个普罗稜镜的光路长度：第一个是  $36 \text{ mm}$ ，第二个是  $45.6 \text{ mm}$ 。

在图 5.6 上画出了代替两个稜镜的空气平板  $P_1, P_1'$  和  $P_2, P_2'$ 。

现在我们研究当允许斜光束渐晕的其它情况。不久前还认为在视场边缘上出瞳有效部分不应少于  $50\%$ 。近年来，为了缩小仪器的尺寸和重量，可容许的渐晕要大得多，例如由一个优秀公司生产的双筒望远镜，从视场边缘点发出的光束截面面积不超过中心光束截面面积的  $15 \sim 10\%$ ；实践表明，这样的渐晕并没有产生有害的结果。

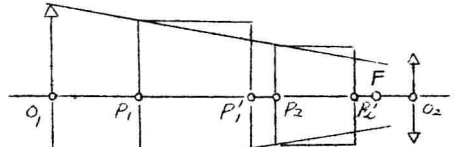


图 5.6

很有趣的是：在稜镜双筒望远镜和一切稜镜系统中，用恰当地选择稜镜和场镜的孔径值的方法不仅能够任意地改变渐晕的大小，而且还可以改变边缘光束的中心光线的位置。

让我们来观察图 5.7，在图上  $O_1$  是物镜的中心； $O_2$  和  $O_3$  是有效孔径的边缘； $F$  是物镜的焦距； $C_1$  是场镜的中心。设  $L$  是在视场边缘上的点

—— 13 ——

的像；角 $\angle O_1F$ 是系统的视场角（在这种情况下等于 $3^\circ$ ）。设 $D_1$ 和 $D_2$ 是两个光栏，一个放在物镜和场镜之间的平凸中，另一个放在场镜的平凸中。其实是用稜镜框或者场镜框作为这种光栏。由图可见，可以用这样的方法选取光栏有效部分的尺寸，使得

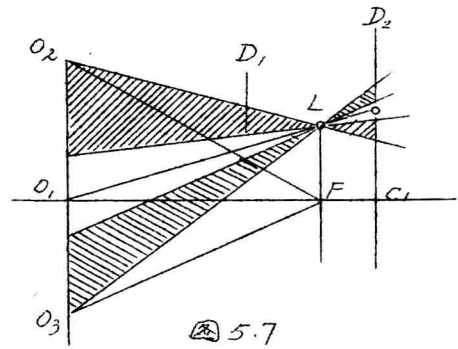


图 5.7

能够任意栏去主光线上任何部分的光束。这样做有两个优点：一方面可以缩小稜镜尺寸，并能够把整个双筒望远镜做得更紧凑和轻巧，而另一方面像质得到改善，因为光束相对于主光线是对称配置的，但在这种情况下照度降低。

### 摆动稜镜

这种稜镜总是放在物镜的前凸，它们的框的轴垂直于物镜光轴。稜镜框的轴旋转某一角度后能够把与物镜轴成某个角度的光束引向物镜。和固定稜镜的情况一样，可以不再考虑反射而只考虑通过玻璃平板（展开稜镜求得的）时的折射，在这种情况下，物空间旋转了两倍的稜镜反射面的法线的倾角。用空气平板来代替玻璃平板在这里不可能，因为高斯光学不适用于大的稜镜倾角的情况中，故必须精确地计算折射光路。旋转中心在O点的玻璃平行六面体（用来代替稜镜）（图5.8）在旋转时作用有些像镜筒。如果稜镜尺寸不用

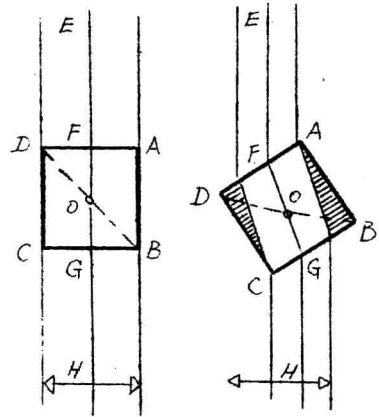


图 5.8

专门方法选取使光束无限制地通过的话，则通过稜镜的光束，甚至通过视场中心的光束发生了畸变。

为了精确计算不同的棱镜倾角和不同的视场角时的畸变，必须对每个棱镜倾角画出它的展开图位置并计算光束的界限。这些界限为展开的棱镜的位置所确定（在图 5.8 上棱 A 和 C 限制了中心光束）。另外产生了光束的中心光线的位移（在图 5.8 上的 EFGH）。

### 具有转像透镜系统的光学系统

#### 具有一个转像系统的陆地望远镜。

望远镜的光学系统由四部分组成：物镜  $O_1$ ，场镜  $O_2$ ，转像透镜  $O_3$  和目镜  $O_4$   $O_5$ （图 5.9）。

#### 场镜 $O_2$ 的用途

在于把斜光束的主光线导向转像透镜的中心，从而可以把透镜的孔径缩至最小；这

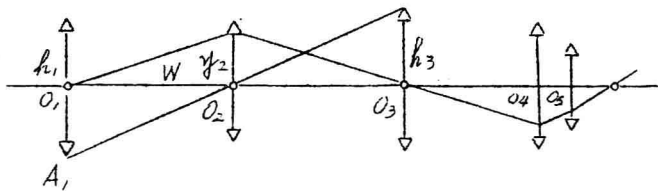


图 5.9

就使透镜在某几种象差（畸变、放大率色差和高级象差）处于最佳的工作条件。场镜  $O_2$  通常放置在物镜  $O_1$  的焦面上，于是，除了增加一些场曲和畸变外，它对系统的象差不发生任何影响。（参看上册 II 章 122-124 页）

转像透镜  $O_3$  一般给出放大率  $-1$ ，但也有从  $-\frac{1}{2}$  到  $-2$ ， $-3$  的其它的放大率。目镜和通常应用于望远镜系统中的没有区别。有时称转像透镜一目镜系统为陆地目镜。设  $\gamma$  是假定系统为望远镜时的放大率； $2m'$  是出瞳直径； $2W_1$  是物镜的视场； $f_1, f_2, f_3, f_4$  是物镜、场镜、转像透镜和目镜的焦距。我们来确定系统的尺寸。

把物镜当作系统的入瞳，我们求它的孔径的直径；孔径的直径应当等于  $2m_1 = 2\gamma m'$ 。物镜的焦距取决于所选择的型式和要求的像的质量。在双胶合物镜的情况下，如果要得到清晰的像则必须取至少有比它的孔径大到

五倍的焦距（在棱镜双筒望远镜中是4倍）；这是必要的，因为和棱镜双筒望远镜比起来陆地望远镜是更复杂的系统，因而产生了更大的象差。这样我们有  $f_1 = 10 \gamma m'$ 。物镜的外部元素就完全确定了。

场镜的尺寸由物镜视场的大小来确定；从图上很明显地看出  $\gamma_2$  等于  $f_1 \tan W_1$ 。这个透镜的焦距根据下述条件来确定，就是物镜应当被场镜成像在转像透镜上。设转像透镜的放大率等于  $-1$ 。在这种情况下，如果  $f_3$  是转像透镜的焦距，则场镜应当在距转像透镜为  $2f_3$  的地方，焦距  $f_2$  满足方程：

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{2f_3} \quad (5.9)$$

转像透镜应当具有由相似三角形  $O_1 O_2 A_1$ 、 $O_2 O_3 A_3$  来确定的孔径，即  $h_3 = \frac{2f_3}{f_1} h_1$ 。焦距  $f_3$  由下述条件来确定，就是转像透镜的视场不应当比物镜的大： $2f_3 \geq f_1$ 。

由这个方程： $h_1 = m' \gamma$ ； $f_1 \geq 10 h_1$ （从简单的物镜结构的情况下有良好的校正条件得出）； $2f_3 \geq f_1$ ； $\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{2f_3}$ ； $h_3 = h_1 \frac{2f_3}{f_1}$  求出系统前一部分的一切外形尺寸的元素。

目镜的结构元素仍然需要确定；结构元素取决于目镜的型式，而视场和出瞳到目镜最后一块透镜的距离的大小影响到目镜型式的选择。

例子。设  $\gamma = +12$ ； $2m' = 2mm$ ；视场  $3^\circ 30'$ 。如果出瞳到目镜的距离不少于  $10mm$ ，则眼睛的标准工作条件得到了保证。物镜的直径  $2 \times 12 = 24mm$ ；它的焦距  $24 \times 5 = 120mm$ 。于是

$$f_2 = \frac{3}{4} f_1 = 90mm, \quad f_3 = 1.5 f_1 = 180mm,$$

$$h_2 = f_1 \tan 1^\circ 45' = 120 \times 0.0306 = 3.7mm; \quad h_3 = 0.15 f_1 = 18mm.$$

目镜的焦距  $\frac{f_1}{\gamma} = \frac{120}{12} = 10mm$ ；从目镜到光瞳的距离  $x'$  对目镜焦距