

# 用于精密转像系统的别汉棱镜

丁 林 辉

随着大规模集成电路的发展，对制版设备图形发生器提出了日益增多的技术要求，其中之一是像点能以高精度快速转动。为了适应这个要求，某些图形发生器将成像的物——可变刀口狭缝装在一套旋转轴系上，由于这套机构比较大，要达到较高的速度和较高的旋转精度有不少困难。在成像光路中用一组转动的别汉棱镜代替物面旋转实现转像具有结构简单、转动惯量小、旋转精度高等优点。

别汉棱镜常用于周视观察或转动瞄准的光学仪器中，补偿由于光轴在空间或某一平面内扫瞄引起的目标像转动。目视观察时，由别汉棱镜补偿后的像转动及平移量只要不被人眼所感觉，就可以认为是比较理想的情况。在图形发生器中转像时像点的几何位置有严格的精度要求，转像以后几何中心应保持不变，此外成像质量一般也较目视观察系统要求高。别汉棱镜的形状误差、装调质量都直接影响上述两项要求，为此本文着重讨论此种应用情况下别汉棱镜各项技术参数的影响，结构设计要点和装调方法。

## 一、别汉棱镜的工作原理和结构参数

别汉棱镜由二个对分棱镜——半五角棱镜、史密特棱镜及空气隙组成，其主截面如图1所示，入射光线进入棱镜经五次反射后出射，其中在空气隙两个侧面及梯形截面下底部的三次反射，反射点 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 处满足全反射条件，而在 $O_4$ 、 $O_5$ 处光线入射角小于临界角，因此二个侧面应镀内反射膜。

由图1可见垂直入射面的光线离开棱镜时对出射面保持垂直，这个特点使别汉棱镜可用于会聚光路中。在入射面中部附近某点入射的光线若能使其出射光线在它的延长线上，则此线称为主截面的棱镜轴，对整个实体棱镜而言，棱镜轴为垂直主截面的一个平面。为使棱镜

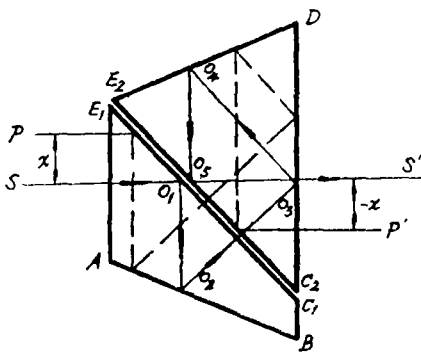


图1 别汉棱镜主截面

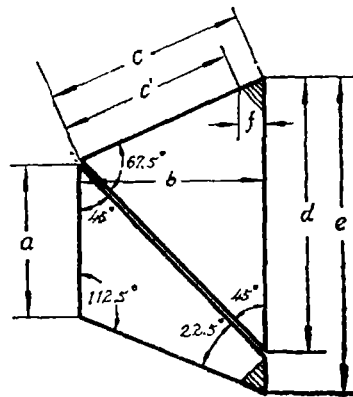


图2 别汉棱镜的结构参数

轴与棱镜梯形外廓的对称中心线重合，棱镜的边长、角度之间应保持一定的关系，其结构参数如图2所示，其中

$a$ ：通光口径，

$$b = (1 + 0.5 \tan 22.5^\circ)a = 1.207107a$$

$$c = b / \cos 22.5^\circ = 1.306563a$$

$$c' = 1.082365a$$

$$d = b / \cos 45^\circ = 1.707107a$$

$$e = (1 + 2b \cdot \tan 22.5^\circ)a = 2a$$

$$f \leq 0.5a \times \tan 22.5^\circ = 0.207107a$$

图中阴影部分光线不能进入，可选择适当尺寸倒角。

在图1所示的主截面内，距棱镜轴  $x$  处垂直入射的光线通过棱镜后平移了一段距离，在距棱镜  $-x$  轴处出射，而该光线在垂直主截面方向没有平移作用。棱镜的这个特点使通过它的光线随着它旋转，即像也随之旋转，像转动的角度是棱镜转动角度的二倍，像转动过程如图3。

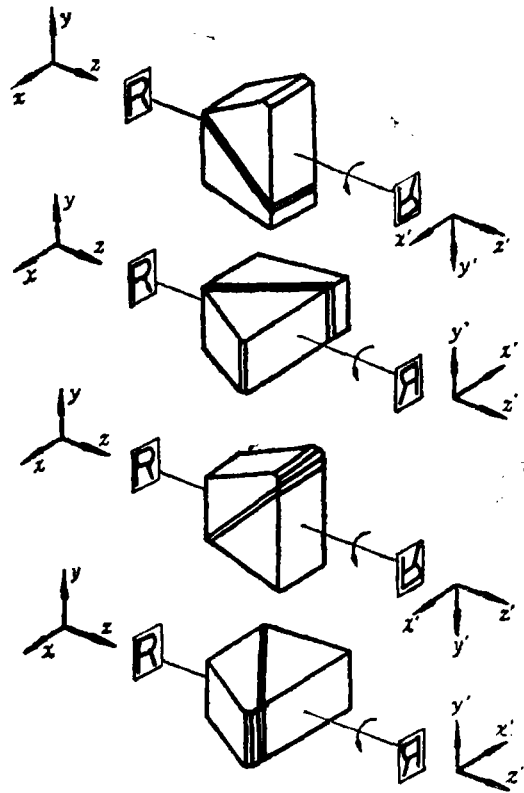


图3 别汉棱镜转象过程

## 二、别汉棱镜展开图

别汉棱镜由于内部多次反射，光路比较复杂，为进一步分析它的特性，使用展开图比较简便。

反射棱镜展开图是按光线在棱镜内进行的方向依次以各个反射面为对称面作出的主截面图形，因为入射角等于反射角，经反射面反射的光线在展开图上用透过反射面的直线表示。棱镜的各个角度符合理论值时展开后出射面平行于入射面。棱镜对透射光线的作用等效于厚度为  $L$  的平行玻璃板。

图4是别汉棱镜的展开图，为便于识别每个反射面，同一个面在展开图上使用与图1主截面相同的字母标出，按先后次序加“1”、“2”、“3”号。

在展开图上棱镜轴的位置可根据棱镜轴的定义确定，由图1可知沿棱镜轴入射的光线垂直于入射面，它在棱镜内的第一个反射点  $o_1$  与最后一个反射点  $o_5$  应重合（设气隙厚度忽略）

$$\text{即 } E_1o_1 = E'_2o_5$$

在展开图上作一组垂直入射面的光线，其中使  $E_1o_1 = E'_2o_5$  的线  $S_1S_2$  即棱镜轴位置，不难看出若改变二个对分棱镜主截面的相互位置或相互尺寸比例会使  $E_1o_1 \neq E'_2o_5$ ，这时必须将  $S_1S_2$  移至一个新位置才能使上述条件重新得到满足，这种移动在主截面上意味着棱镜轴偏离了入射口径的几何中心，结果会使通光口径减小。

在展开图上  $P_1P_2$  是平行于棱镜轴的光线，若  $P_1S_1 = x_1$ ，则  $P_2S_2 = -x_1$ ，符号的变化是

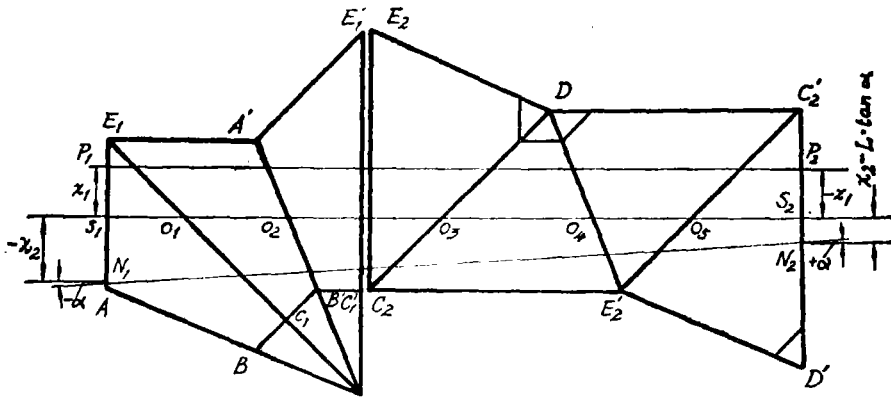


图1 别汉棱镜展开图

因为有奇数个反射面的棱镜对入射坐标系有反转作用，入射的右手坐标系出射时要变为左手坐标系，沿光线方向的Z轴及垂直主截面方向的坐标y轴（或x轴）都不改变方向，坐标系的反转体现在x轴（或y轴）上。将展开图上的各点还原到主截面图上，由于C'D'与主截面上的CD颠倒，也可明显看出x符号的改变。

不考虑玻璃折射率对入射光线、出射光线及气隙附近光线进行方向的影响，在主截面内倾斜入射光线N<sub>1</sub>N<sub>2</sub>同样由于C'D'的颠倒作用，在实际空间出射角的符号与入射角的符号也相反，出射点对棱镜轴的偏移量  $u = -(x - L \cdot \tan \alpha)$  其中

$\alpha$ ：光线入射角，以棱镜轴为基准，顺时针转向光线为正。

$L$ ：别汉棱镜等效玻璃长， $L = 4.6a$

$x$ ：入射光线对棱镜轴的偏移量，上方为正。

在垂直主截面方向以倾角 $\alpha$ 入射的光线出射时方向不变，如图5所示，出射点的移动量  $v = L \cdot \tan \alpha$ 。

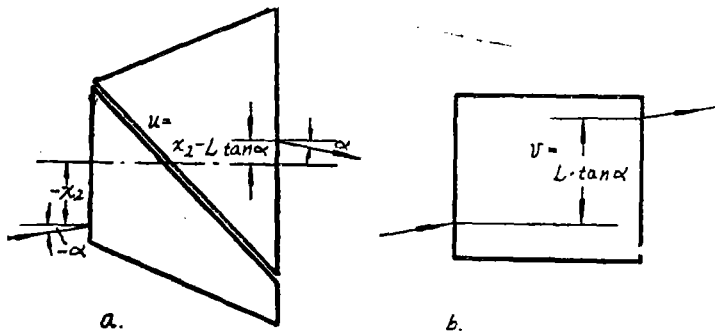


图5 倾斜入射光线通过别汉棱镜的情形  
a. 在主截面内      b. 在垂直主截面方向

考虑玻璃折射率  $n$  的影响时， $u$ 、 $v$  式中之  $\alpha$  应该用  $\frac{\alpha}{n}$  代替

### 三、别汉棱镜的角度差及塔差

棱镜加工不可避免存在误差，边长误差造成棱镜轴的平移，使通光口径减小，适当加大

通光口径可弥补该项误差。角度误差使棱镜主截面展开后不等效于二个平行玻璃板，而等效于二个尖劈，即图 4 中的出射面  $C_1'E_1'$ 、 $C_2'D'$  不平行于入射面  $AE_1$ 、 $C_2E_2$  此项平行度误差称为第一光学平行差。

半五角棱镜的第一光学平行差用  $\theta_{11}$  表示，由图 4 可见它决定于  $112.5^\circ$  角及  $22.5^\circ$  角的误差。

$$\theta_{11} = 112.5^\circ + 3 \cdot 22.5^\circ$$

史密特棱镜是一等腰棱镜，它的第一光学平行差  $\theta_{12}$  由它的二个底角的差值决定，

$$\theta_{12} = \delta 67.5^\circ$$

第一光学平行差使入射光线经棱镜出射后产生了附加的偏向角  $\eta$ ， $\eta = (n-1)\theta_1$ 。

对别汉棱镜而言，除了第一光学平行差的要求外，两个对分棱镜组合后在空间入射面与出射面也应平行，但是二者的  $45^\circ$  角偏差  $\delta_{45^\circ}$  破坏了这个平行度。垂直入射面的光线通过没有第一光学平行差的别汉棱镜后，垂直于出射面射出，在主截面上  $\delta_{45^\circ}$  的存在使出射光线与入射光线不平行，棱镜旋转，出射光线将随之绕动。

图 6 是有角度差的别汉棱镜主截面及其展开图，楔形角  $\theta_1$  使出射光线与出射面形成角  $r$ ，由于在主截面上出射光线的方向角与展开图上相反，因此有可能用改变入射角大小的办法在主截面上得到与入射光线方向一致的出射光线。为此可假设存在着一个棱镜轴  $S_1S_2$ （它只表示出射光线与入射光线共线，不考虑棱镜内部光线的方向关系），它与入射面交角  $\alpha$ ，与主截面出射面交角  $\beta$ 。此外，还设  $\delta_{45^\circ}$ ， $\theta_1$  造成的楔形角使入射面和出射面交会在上方为正。按图 6 三角形的相互关系可写出下列关系式。

由图 (a)  $\alpha = r + \delta_{45^\circ}$

$$\beta = 180^\circ - r$$

由图 (b)  $\alpha = [\beta + (n-1)\theta_1] + \theta_1 = \beta + n\theta_1$

解得

$$\alpha = 90^\circ + \frac{\delta_{45^\circ}}{2} + \frac{n\theta_1}{2}$$

$$\beta = 90^\circ + \frac{\delta_{45^\circ}}{2} - \frac{n\theta_1}{2}$$

$$r = 90^\circ - \frac{\delta_{45^\circ}}{2} + \frac{n\theta_1}{2}$$

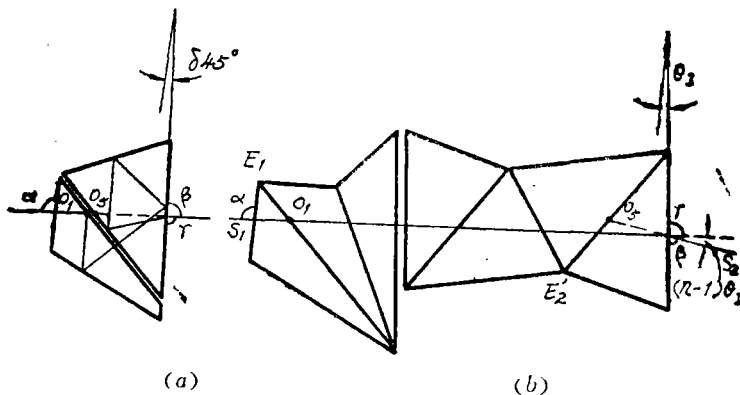


图 6 有角度误差的别汉棱镜

由此得出结论，有角度差的别汉棱镜存在一棱镜轴，只要入射角  $\alpha$  满足上式，其出射光线在空间即与之平行，若此光线还能满足  $E_1 O_1 = E_2 O_2$  条件，此线即为该主截面之棱镜轴。由于角度差不可避免，通常棱镜轴都不垂直于入射面，除非满足  $\delta_{45} = 0$ ， $\theta_1 = \theta_{11} + \theta_{12} = 0$  及气隙侧面保持平行等三个条件。

塔差的存在使通过棱镜的光线在垂直主截面方向产生偏折。塔差通常指棱镜的各个工作面对某一公共假想面垂直度的偏差，由于这个公共假想面难于选择确切的位置，因此塔差对不同棱镜又有一些不同的描述方法。在三棱镜中塔差常被理解成某一个棱与所对平面的平行度偏差，考察不同的棱一面，塔差有不同的数值。在光路中起作用的并不是塔差本身，而是由塔差引起第二光学平行差  $\theta_{II}$ ，它使棱镜在垂直主截面方向不等效于平行玻璃板，精密转象系统中第二光学平行差也必须限制在较小的数值。

半五角棱镜的第二光学平行差

$$\theta_{II1} = 2.4 r_E \quad r_E: E \text{ 棱对 } AB \text{ 面之倾角。}$$

史密特棱镜的第二光学平行差

$$\theta_{II2} = 1.85 r_C, \quad r_C: C_2 \text{ 棱对 } E_2 D \text{ 之倾角。}$$

若二个没有塔差的对分棱镜组合在一起，气隙的二个侧面保持平行，但如果二者主截面不平行，则虽然入射光线仍可在二个棱镜各自的主截面内进行，但最后出射光线确不与入射光线平行，产生偏折。利用二个对分棱镜主截面相对位置的变化能改变出射光线方向这一特性。可对塔差进行补偿，图7表示了这种补偿作用，图中  $oo$  为理想棱镜轴上的一根光线，塔差使出射光线沿  $o'M$  方向出射，它与  $oo$  轴夹角  $\varphi$ 。过出射点  $o'$  作垂直于  $EC$  面的轴  $x'$ ，它与  $oo$  轴夹角为  $45^\circ$ ，令史密特棱镜绕  $x'$  轴转动  $\alpha$  角， $o'M$  随之转到  $o'N$  位置， $o'N$  位于半五角棱镜的主截面内。为进一步分析空间角度关系，将图7出射光线、调整后光线、调整轴等单独列出作图8，补偿塔差应使光线  $o'M$  在垂直主截面方向转动  $\varphi$  角移至  $o'o$ ，但史密特棱镜绕  $x'$  轴转动  $\alpha$  角只能使  $o'M$  转至  $o'N$ 。后者与  $oo'$  轴交角  $\beta$ 。

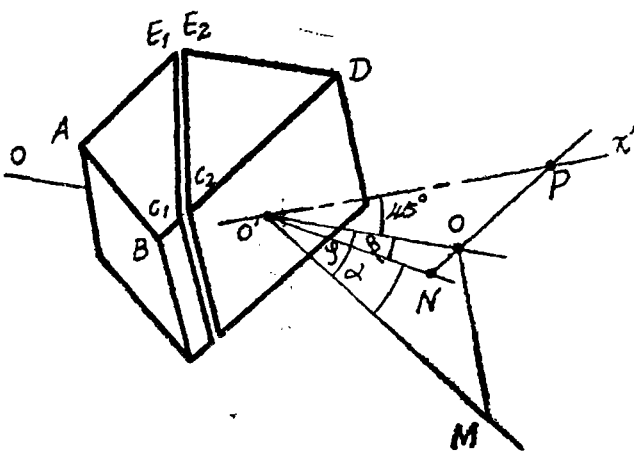


图7 别汉棱镜塔差调整

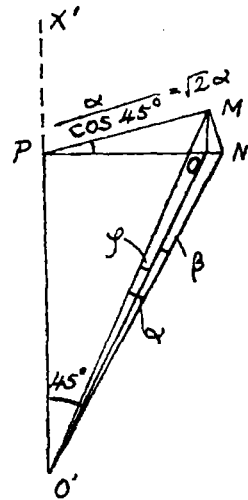


图8 塔差调整的角度关系

通常  $\varphi$  角不大，可近似地认为  $o'N$ 、 $o'M$  与  $o'x'$  轴夹角为  $45^\circ$ ，由图中可见

$$\beta = \frac{ON \cdot \cos 45^\circ}{O'O} = \frac{MN \cdot \sin \sqrt{2} \alpha \cdot \cos 45^\circ}{O'O}$$

$$= \frac{O'O \cdot \alpha \cdot \sin \sqrt{2} \alpha \cdot \cos 45^\circ}{O'O} = \alpha \cdot \sqrt{2} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \alpha^2 = \alpha^2$$

式中  $\beta$ 、 $\alpha$  角均以弧度值表示， $\alpha$  为  $10'$  时  $\beta$  只是  $1.7''$ ，即在  $\alpha$  角不大时，旋转史密特棱镜的主截面补偿塔差引起的角度误差  $\beta$  可以略去不计。 $\alpha^2$  关系说明随着旋转角度增加  $\beta$  角增加的速度更快，若  $\alpha = 1^\circ$  则  $\beta = 62''$ ，这个差值是不可忽视的，必须对角度误差另行调整。

塔差和角度差可以通过调整得到补偿，并不是说两者的误差可以放宽到很大。图形发生器光路是一种高分辨力成像系统，光路中的尖劈会使共轭点间各光线光程不等，并引起色散，结果会使像边缘“锐度”下降，分辨力降低。为保证良好的成像质量要求别汉棱镜在光路中具有等光程。通常可以采用组合配对，统一修改的办法改正一个棱镜的角度差及塔差，使二个对分棱镜的第一光学平行差、第二光学平行差互相补偿，即改正时有意使  $\theta_{11}$  与  $\theta_{12}$ ， $\theta_{21}$  与  $\theta_{22}$  符号相反，以达到既纠正光轴偏折，又减少像差的作用。究竟改正那个棱镜的那个面需要根据实际检测情况仔细分析后确定。

#### 四、别汉棱镜装调

装调的目的是使别汉棱镜轴、机械轴旋转轴及系统光轴三者准确地重合在一起，三者不重合造成的光轴挠动可用下列二式描绘。

##### 1. 三轴平行但不重合时有：

$$P = 2(D_{MP} \cos \theta - D_{VP}) \quad (1)$$

$P$ ：出射光轴对入射光轴的平移量

$D_{MP}$ ：机械轴和入射光轴的横向不重合量。

$D_{VP}$ ：机械轴和棱镜轴横向不重合量

##### 2. 三轴不平行时有：

$$\psi = 2(\zeta_{MP} \cos \theta - \zeta_{MP}) \quad (2)$$

$\psi$ ：出射光线对入射光线的交角，

$\zeta_{MP}$ ：机械轴和入射光线的交角，

$\zeta_{MP}$ ：机械轴和棱镜轴交角。

上列二式中  $\theta$  是棱镜转角，即以  $D_{V1}$  为基准，转向  $D_{V2}$  的夹角，顺时针转向为正，二式具有同样形式，第一式为长度量纲，第二式为角度量纲。有角度差的别汉棱镜，棱镜轴的位置如第三节所述方法确定。

别汉棱镜的装调过程大致如下：

塔差调整——棱镜轴对旋转轴交角调整——棱镜轴对旋转轴平移调整——旋转轴对系统光轴的交角及平移调整。上述调整可分为粗调及精调二步，粗调限于部件调整，可在专用工具上进行，内容只涉及前三项。精调需在系统总调时进行，上述几项，精调时要逐一检测、调整才能达到理想的要求。机械结构方面为适应调整要求首先必须使旋转轴具有极高的旋转精度，否则由于旋转轴的晃动会使整个调整过程无法进行，此外每个调整项目必须设有独立的调整环节以免互相干扰。

实际调整过程特别是精调过程由于调整参数很多，按照数学分析结果判别调整那一个参

数是极其复杂的，为使精调过程更直观，可在系统的像面（或物面）处放一“T”形或“+”分划板，它的中心与镜头光轴近似重合，然后在物面（或像面）用装有测微目镜的显微镜观察，由于角度差、塔差及三轴不重合，别汉棱镜旋转时像有挠动，大的挠动主要来自旋转轴与光轴不重合。根据光线在别汉棱镜主截面内相对棱镜轴对称平移，在垂直主截面方向不平移，棱镜转一周像转两周这二个基本特点，选定四个特征位置即别汉棱镜转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $360^\circ$  作为分析、调整的位置。

图9左侧为棱镜的四个特征位置，其中  $o_1$  为入射光轴， $o_2$  为旋转中心，虚线为棱镜轴。图右侧中心线代表理想的像中心位置， $\neq$  为通过棱镜后的分划版像，由于各种误差存在，它与理想像中心线不重合，偏离值的大小如下列各式所示

$$\rho_1 = 2(D_{MP} - D_{MI} \cos \theta_0), \quad \rho'_1 = 0$$

$$\rho_2 = 0, \quad \rho'_2 = 2(D_{MP} + D_{MI} \sin \theta_0)$$

$$\rho_3 = 2(D_{MP} + D_{MI} \cos \theta_0), \quad \rho'_3 = C$$

$$\rho_4 = C, \quad \rho'_4 = 2(D_{MP} - D_{MI} \sin \theta_0)$$

式中  $\rho_1$ ：分划版像的竖线位置与理想像竖线之中心距，

$\rho'_1$ ：分划版像的横线位置与理想像横线之中心距，

$\theta_0$ ：初始位置旋转轴——入射光轴距离与旋转轴——棱镜轴距离间的夹角。

$C$ ：塔差造成的像移动。

$D_{MI}$ 、 $D_{MP}$  的含义如(1)式所示，

若  $D_{MP} = 0$  即别汉棱镜轴与旋转轴重合，则  $\rho_1 + \rho_3 = 0$ ， $\rho'_2 + \rho'_4 = 0$ ，这时比较位置 I 与 III，可发现  $\neq$  像的竖线位置重合，但与理想像中心位置有偏差  $\rho_1$ ，若比较位置 II 与 IV，可发现两个位置的横线象重合，但与理想像中心位置的横线有偏差。若  $D_{MI} = 0$ ，则  $\rho_1 = \rho_3 = 2D_{MP}$ ， $\rho'_2 = \rho'_4 = 2D_{MP}$ ，即位置 I 与 III 分划版像的竖线间距为  $4D_{MP}$ 。实际调整时  $D_{MI}$ 、 $D_{MP}$  开始均不为零，调整的第一步先找到理想中心线位置，并用显微镜目镜之叉丝代替。在位置 I 或 III 处，象的横线一般偏离理想中心线横线不太大（粗调中塔差已基本调好），可取两个位置的平均值处将显微镜目镜分划版横叉丝调到与之重合，然后再在位置 II、IV 处将显微镜座平移使目镜分划版之竖叉丝与二位置竖线像之平均位置重合，反复检查四个位置直至确认显微镜之分划版叉丝已能较准确代替入射分划版之理想中心线，接着比较位置 I 与 III 竖线位置之偏差，平移棱镜座，改变棱镜轴相对旋转轴的位置，直至这两种状态下竖线在显微

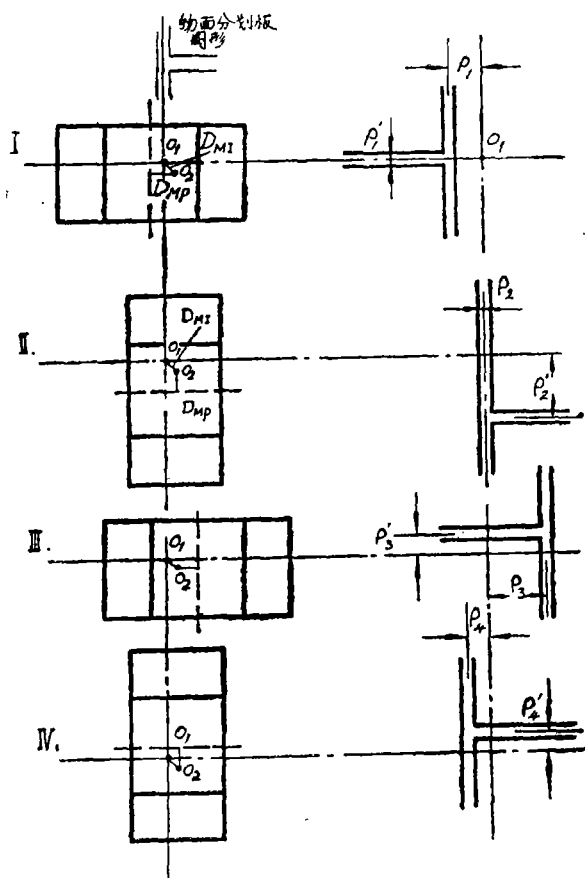


图9 别汉棱镜的四个特征位置

镜视场内的位置不变,此时可认为  $D_{MF} = 0$ , 然后在位置 I 水平移动旋转轴系位置使  $\rho_1$  减至最小, 在位置 II 垂直移动旋转轴系位置使  $\rho_2$  减至最小。由于塔差的存在  $\rho_1$  及  $\rho_2$  不可能都为零, 所以精调的第一步要使塔差调至最小, 然后使  $D_{MF}$  调至最小, 最后再调整  $D_{MI}$ 。应该指出角度差的存在或三轴不平行也会使  $\rho_1$  不为零, 其表现形式与  $D_{MI}$ ,  $D_{MF}$  不为零造成的结果相似, 为区别这个因素, 可将别汉棱镜座沿光轴方向前后移动, 观察  $\rho_1$  值是否变化, 有变化则说明角度差及三轴不平行的影响大, 应进行相应的调整。这种移动必须保证较高的精度, 不致引入新的误差。在设计上采取一些措施如使棱镜尽量接近像面, 或将棱镜放在物方尽量接近物面等均可减少角度差等因素对光轴挠动造成的影响。

## 五、结 论

1. 高分辨力精密转像系统中别汉棱镜的光学平行差  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  以保证成像质量为主,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  对光轴偏折的影响可通过合理装调消除。
2. 半五角棱镜, 史密特棱镜的各角度误差、塔差对光学平行差的贡献不同, 应分别给定不同的误差值, 以利组合修改。
3. 棱镜口径大于通光口径的数值应包括安装及边长误差引起棱镜轴偏移量。
4. 棱镜的夹持及其旋转部件应考虑设有塔差调整、主截面倾角调整, 棱镜轴平移调整结构。
5. 轴系旋转精度应比像的旋转精度高若干倍至一个量级。

## 参 考 文 献

- [1] 德林, 佩英摘译, 光学工程, 1975, No.4
- [2] 连铜淑, 《棱镜调整》, 国防工业出版社, 1978.