应用光学

谭峭峰
tanqf@mail.tsinghua.edu.cn
清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

第四章
平面反射镜与棱镜

4.1 平面反射镜

§4.1.1 平面反射镜的成像

实物成虚像

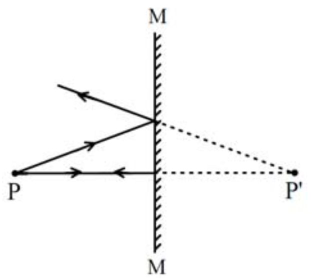


图4-1 平面反射镜成像

虚物成实像

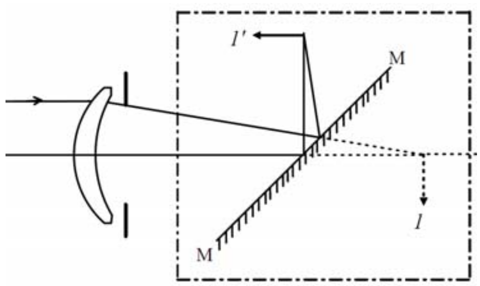


图4-2 虚物经平面反射镜成实像

§4.1.2 平面反射镜的成像方向

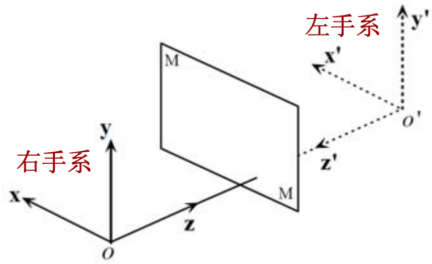


图4-3 平面反射的物像空间对应关系

右手直角坐标系经奇数次平面反射镜成像，则像一定是左手系——镜像

右手直角坐标系经偶数次平面反射镜成像，则像一定是右手系——相似像

平面反射镜是唯一能成完善像的最简单的光学元件。

§ 4.1.3 平面反射镜的旋转对光线的作用　角度放大

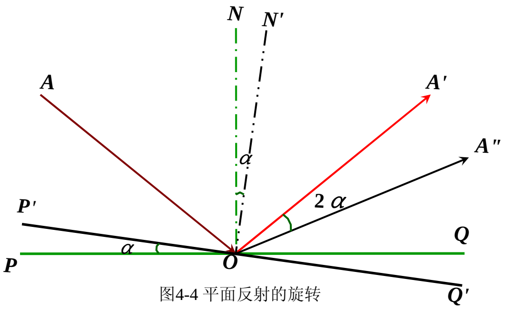
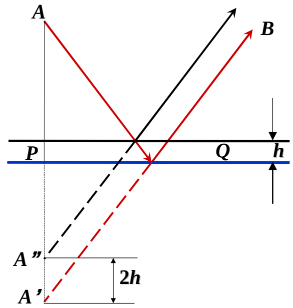
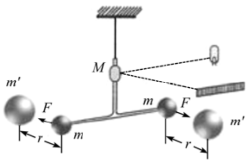
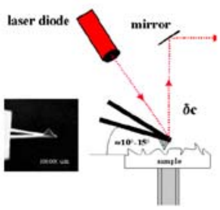


图4-4 平面反射的旋转





卡文迪许测量万有引力常数



AFM探针

§ 4.1.4 双平面反射镜系统

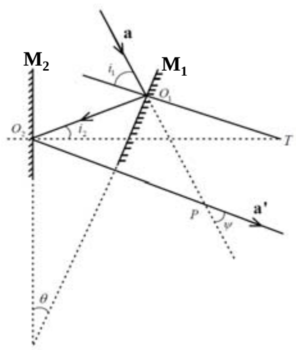


图4-5 双平面反射镜系统

$$2i_1 = 2i_2 + \psi \qquad (4\text{-}1)$$

$$\psi = 2(i_1 - i_2) \qquad (4\text{-}2)$$

由ΔO_1O_2T

$$i_1 = i_2 + \theta \qquad (4\text{-}3)$$

$$\theta = i_1 - i_2 \qquad (4\text{-}4)$$

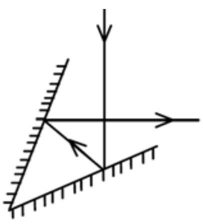
即：

$$\psi = 2\theta \qquad (4\text{-}5)$$

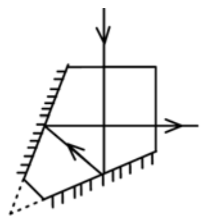
位于与两平面反射镜交棱相垂直平面内的光线，不论它的入射光线方向如何，经两个平面反射镜各反射一次后的出射光线相对于入射光线的偏转角总是等于两平面反射镜夹角的2倍；

它的偏转方向，则与反射面按反射次序由M_1偏转到M_2的方向相同；

入射光线的方向不变时，若两块平面反射镜作为一个刚体一起转动时，则出射光线的方向不会改变，但出射光线的位置可能平行位移。



(a)双平面反射镜



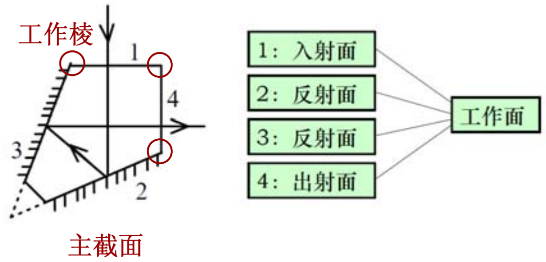
(b)反射棱镜

图4-6 能将光路转折的双平面反射镜和反射棱镜

为了使两反射面之间的夹角不变，可将两个反射面做在同一块玻璃上，以代替一般的双平面反射镜组，这就构成了另一类常用的光学元件——反射棱镜。

4.2 反射棱镜

§ **4.2.1** 反射棱镜的展开特征



棱镜展开

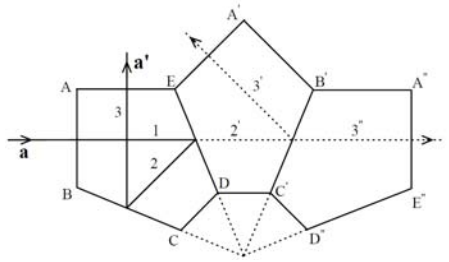
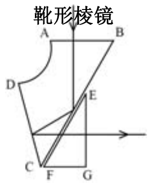


图4-7 五角棱镜及五角棱镜的展开

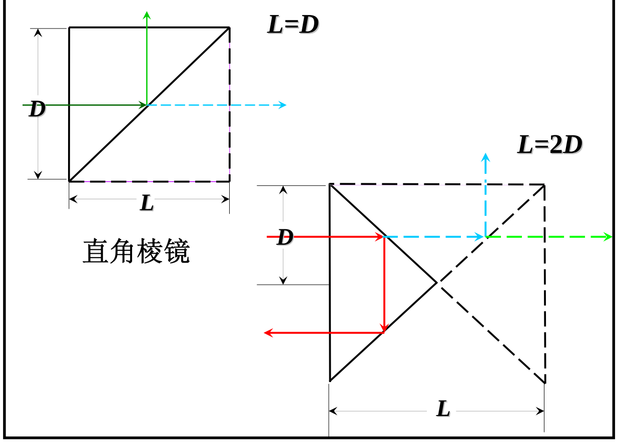


反射棱镜展开后是一块平行平板；

在共轴光路中应用反射棱镜就相当于在光路中加入了一块平行平板玻璃；

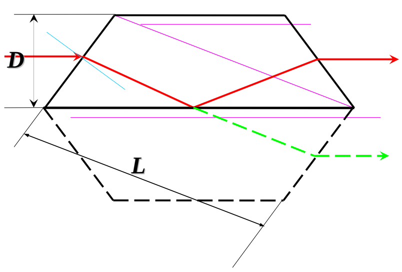
若它被用在会聚光路中，光路的光轴垂直于反射棱镜的入射面，反射棱镜的加入仍然保持了光路系统的共轴性；

棱镜展开成平行平板后，其平行平板的厚度***L***也称为棱镜的展开长度。展开长度不仅与棱镜的结构有关，还与棱镜入射面的口径大小***D***有关。



直角棱镜

$$L = \frac{2nD}{\sqrt{2n^2-1}-1}$$



道威棱镜

§ **4.2.2** 平行平板的成像

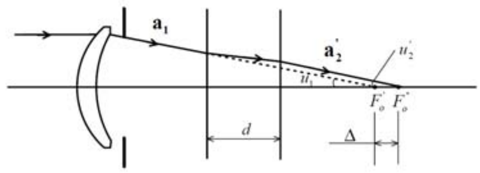


图4-8 平行平板的成像

$$\alpha = \beta = \gamma = 1 \qquad (4\text{-}6)$$

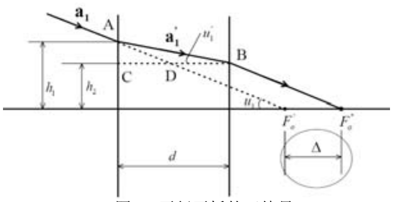


图4-9 平行平板的延伸量

$$AC = h_1 - h_2 = du_1' \tag{4-7}$$

直角ΔACD： $CD = AC/u_1 = du_1'/u_1$ (4-8)

近轴近似下，根据折射定律 $u_1 = nu_1'$

$$\Delta = F_o'F_0'' = BD = d - CD = d(1-\frac{1}{n}) \tag{4-9}$$

平行平板的成像特性

（1）光线经过平行平板折射后，出射光线的方向与入射光线平行，同时出射光线在入射光线的右侧。

（2）近轴光线经过平行平板，当平板的厚度确定后，折射光线与光轴交点的位移量为一常数，它不随入射光线的入射角而变化。

（3）对任意光线来讲，经平行平板折射后，折射光线与光轴交点的位移量随入射光线的入射角的变化而变化。

§ **4.2.3** 反射棱镜的正像作用

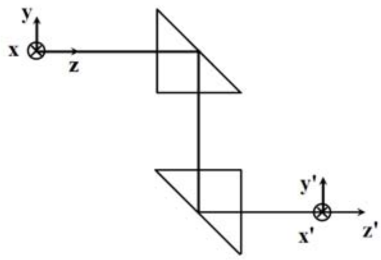


图4-10 反射棱镜的物方坐标系和像方坐标系

反射棱镜系统

1、具有单一主截面的棱镜或棱镜系统

2、屋脊棱镜

3、具有两个相互垂直的主截面的棱镜或棱镜系统

1、具有单一主截面的棱镜或棱镜系统

例**1**、一次反射直角棱镜的成像分析

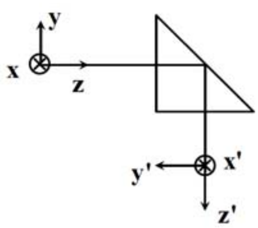


图4-11 一次反射的直角棱镜

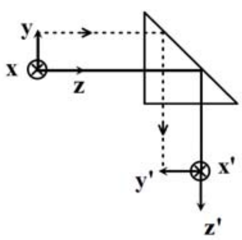


图4-12 确定*y*轴成像方向的另一种方法

例**2**、二次反射直角棱镜的成像分析

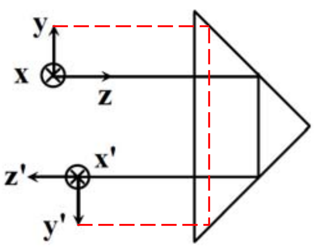


图4-13 二次反射的直角棱镜

2、屋脊棱镜

奇数次反射使得物体成镜像。如果需要得到物体的相似像，而不增加反射棱镜时，可用交线位于棱镜光轴面内的两个相互垂直的反射面取代其中一个反射面，使垂直于主截面的坐标被这两个相互垂直的反射面依次反射而改变方向，从而得到物体的相似像。

这两个相互垂直的反射面称为屋脊面，带有屋脊面得棱镜为屋脊棱镜。

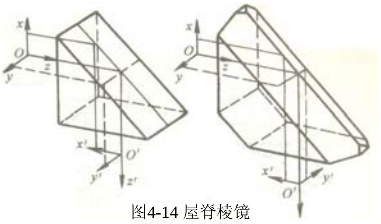


图4-14 屋脊棱镜

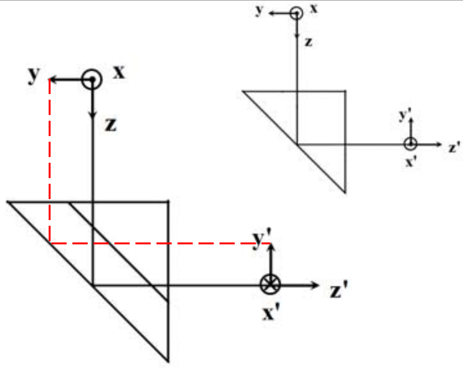


图4-15 直角屋脊棱镜的成像方向确定

确定屋脊棱镜成像方向的一般方法和步骤：

(1)、按光轴是在屋脊棱上被反射的情况确定出射光轴*z'*的方向；

(2)、根据一对屋脊面颠倒了垂直于主截面的物像方向的结论确定*x'*轴的方向；

(3)、按棱镜的总反射次数的奇偶性（一对屋脊面算两个反射面）确定像方坐标系是左手系还是右手系，从而定出位于主截面内*y'*轴的方向。

例3、列曼屋脊棱镜的成像方向分析，并与列曼棱镜的成像方向作比较

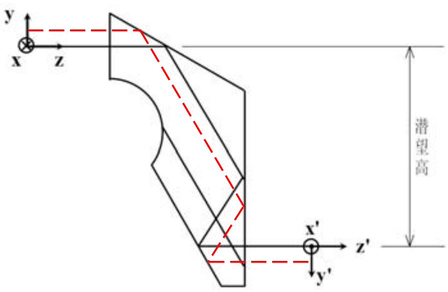


图4-16 列曼屋脊棱镜的成像(a)

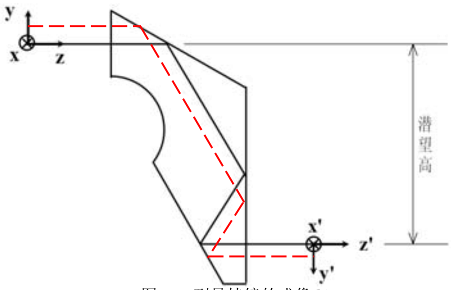


图4-16 列曼棱镜的成像(b)

3、具有两个相互垂直的主截面的棱镜或棱镜系统

例4、普罗棱镜

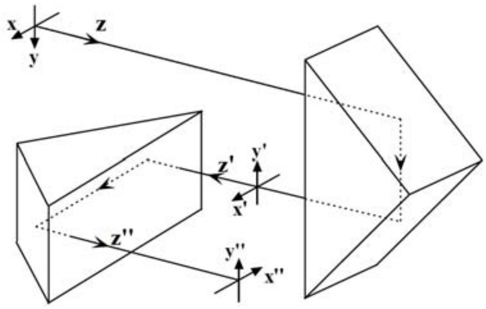
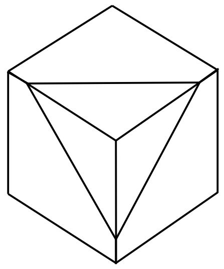
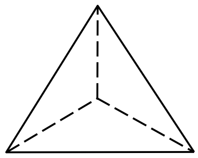


图4-17 普罗棱镜

§**4.2.4** 角锥棱镜（角隅棱镜）

由立方体切下一个角而形成的。



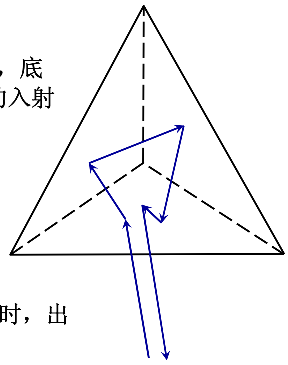


角锥棱镜特点

1、三个反射工作面相互垂直，底面是一等边三角形，为棱镜的入射面和出射面。

2、当光线以任意方向从底面入射，经过三个直角面依次反射后，出射光线始终平行于入射光线。

3、当角锥棱镜绕其顶点旋转时，出射方向不变仅产生一个平移。



4.3 反射棱镜转动引起的光轴方向和成像方向变化的分析和计算

在光学仪器的装校过程中，往往利用反射棱镜的微量转动调整光学系统的光轴方向和成像方向的倾斜。

§**4.3.1** 棱镜转动定理

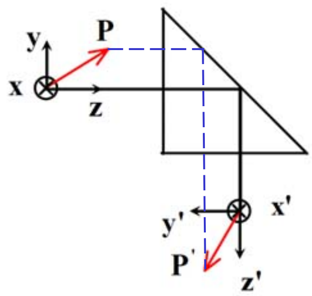


图4-18 转轴P与它经棱镜所成的像**P'**

棱镜绕转轴**P**转动θ角（正负按右旋法则确定）后，像空间坐标系$x'y'z'$的转动情况可以表述如下：

$x'y'z'$首先绕 $\mathbf{P}'$转 $(-1)^{N-1}\theta$，然后绕 $\mathbf{P}$转θ。

其中N为棱镜的反射次数。

棱镜转动定理

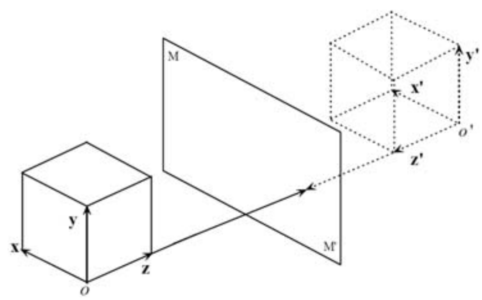


图4-19 立方体xyz与立方体经平面反射镜所成的像$x'y'z'$

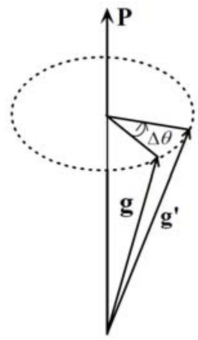
棱镜转动定理

第一步：物绕P轴转$-\theta$角　棱镜不动　像绕P'轴转$(-1)^{N-1}\theta$角

第二步：物绕P轴转θ角　棱镜绕P轴转θ角　像绕P轴转θ角

总结果：　物不动　棱镜绕P轴转θ角　像绕P'轴转$(-1)^{N-1}\theta$角，再绕P轴转θ角

§ 4.3.2 转动矩阵



$$\mathbf{g}' = \mathbf{g} + \Delta\theta \mathbf{P} \times \mathbf{g} \qquad (4\text{-}10)$$

图4-20 向量**g**绕轴**P**旋转角$\Delta\theta$后成向量**g'**

$$\mathbf{g}' = \mathbf{g} + \Delta\theta \mathbf{P} \times \mathbf{g}$$

设转轴 $\mathbf{P} = \cos\alpha' \mathbf{i}' + \cos\beta' \mathbf{j}' + \cos\gamma' \mathbf{k}'$

令g分别为i'、j'、k'，求出g'

$$\mathbf{i}'' = \mathbf{i}' + \Delta\theta\cos\gamma' \mathbf{j}' - \Delta\theta\cos\beta' \mathbf{k}'$$

$$(\mathbf{i}' \times \mathbf{j}' = \mathbf{k}' \quad \mathbf{j}' \times \mathbf{k}' = \mathbf{i}' \quad \mathbf{k}' \times \mathbf{i}' = \mathbf{j}')$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}'' \\ \mathbf{j}'' \\ \mathbf{k}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta\cos\gamma' & -\Delta\theta\cos\beta' \\ -\Delta\theta\cos\gamma' & 1 & \Delta\theta\cos\alpha' \\ \Delta\theta\cos\beta' & -\Delta\theta\cos\alpha' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}11)$$

转动矩阵

$$\mathbf{R}_{\Delta\theta} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta\cos\gamma' & -\Delta\theta\cos\beta' \\ -\Delta\theta\cos\gamma' & 1 & \Delta\theta\cos\alpha' \\ \Delta\theta\cos\beta' & -\Delta\theta\cos\alpha' & 1 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}12)$$

§ 4.3.3 反射棱镜的作用矩阵

物空间坐标系 xyz $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ $\xleftrightarrow{\mathbf{P}}$ 物空间坐标系 $x'y'z'$ $(\cos\alpha', \cos\beta', \cos\gamma')$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}' \\ \mathbf{j}' \\ \mathbf{k}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i} \\ \mathbf{j} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}13)$$

反射棱镜作用矩阵

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad \text{正交} \qquad (4\text{-}14)$$

基(i, j, k)到基(i', j', k')的过渡矩阵

例、DI-90°直角棱镜

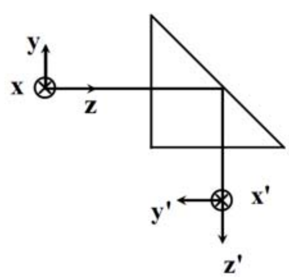


图4-21 一次反射直角棱镜的成像

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}$$
$$\mathbf{j}' = -\mathbf{k}$$
$$\mathbf{k}' = -\mathbf{j}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

设转轴 $\mathbf{P}=\cos\alpha\mathbf{i}+\cos\beta\mathbf{j}+\cos\gamma\mathbf{k}$

$$=\cos\alpha'\mathbf{i}'+\cos\beta'\mathbf{j}'+\cos\gamma'\mathbf{k}'$$

$$(\cos\alpha,\cos\beta,\cos\gamma)\begin{pmatrix}\mathbf{i}\\ \mathbf{j}\\ \mathbf{k}\end{pmatrix}=(\cos\alpha',\cos\beta',\cos\gamma')\begin{pmatrix}\mathbf{i}'\\ \mathbf{j}'\\ \mathbf{k}'\end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{i}'\\ \mathbf{j}'\\ \mathbf{k}'\end{bmatrix}=\mathbf{B}\begin{bmatrix}\mathbf{i}\\ \mathbf{j}\\ \mathbf{k}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\cos\alpha'\\ \cos\beta'\\ \cos\gamma'\end{bmatrix}=\mathbf{B}\begin{bmatrix}\cos\alpha\\ \cos\beta\\ \cos\gamma\end{bmatrix}\qquad(4\text{-}15)$$

§ 4.3.4 光轴偏与像倾斜的计算公式

棱镜转动定理

物不动　　棱镜绕P轴转θ角　　像绕P'轴转$(-1)^{N-1}\ \theta$角，再绕P轴转θ角

$$\mathbf{P}=\cos\alpha\mathbf{i}+\cos\beta\mathbf{j}+\cos\gamma\mathbf{k}=\cos\alpha'\mathbf{i}'+\cos\beta'\mathbf{j}'+\cos\gamma'\mathbf{k}'$$

$$\mathbf{P}'=\cos\alpha\mathbf{i}'+\cos\beta\mathbf{j}'+\cos\gamma\mathbf{k}'$$

像绕P'轴转$(-1)^{N-1}\ \theta$角

$$\begin{bmatrix}\mathbf{i}''\\ \mathbf{j}''\\ \mathbf{k}''\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}1 & (-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma & -(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\beta\\ -(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma & 1 & (-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\alpha\\ (-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\beta & -(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\alpha & 1\end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_{\mathrm{P}'}}\begin{bmatrix}\mathbf{i}'\\ \mathbf{j}'\\ \mathbf{k}'\end{bmatrix}$$

再绕P轴转θ角

$$\begin{bmatrix}\mathbf{i}'''\\ \mathbf{j}'''\\ \mathbf{k}'''\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}1 & \Delta\theta\cos\gamma' & -\Delta\theta\cos\beta'\\ -\Delta\theta\cos\gamma' & 1 & \Delta\theta\cos\alpha'\\ \Delta\theta\cos\beta' & -\Delta\theta\cos\alpha' & 1\end{bmatrix}}_{\mathbf{R}_{\mathrm{P}}}\begin{bmatrix}\mathbf{i}''\\ \mathbf{j}''\\ \mathbf{k}''\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{i}'''\\ \mathbf{j}'''\\ \mathbf{k}'''\end{bmatrix}=\mathbf{R}_{\mathrm{P}}\mathbf{R}_{\mathrm{P}'}\begin{bmatrix}\mathbf{i}'\\ \mathbf{j}'\\ \mathbf{k}'\end{bmatrix}\qquad(4\text{-}16)$$

$$\begin{bmatrix}\mathbf{i}'''\\ \mathbf{j}'''\\ \mathbf{k}'''\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \Delta\theta\left[(-1)^{N-1}\cos\gamma+\cos\gamma'\right] & \Delta\theta\left[(-1)^{N}\cos\beta-\cos\beta'\right]\\ \Delta\theta\left[(-1)^{N}\cos\gamma-\cos\gamma'\right] & 1 & \Delta\theta\left[(-1)^{N-1}\cos\alpha+\cos\alpha'\right]\\ \Delta\theta\left[(-1)^{N-1}\cos\beta+\cos\beta'\right] & \Delta\theta\left[(-1)^{N}\cos\alpha-\cos\alpha'\right] & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{i}'\\ \mathbf{j}'\\ \mathbf{k}'\end{bmatrix}$$

光轴偏与像倾斜的计算公式：

光轴偏： k'''与k'的差

$$\Delta\mathbf{k}'=\mathbf{k}'''-\mathbf{k}'=\left[(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\beta+\Delta\theta\cos\beta'\right]\mathbf{i}'+\left[(-1)^{N}\Delta\theta\cos\alpha-\Delta\theta\cos\alpha'\right]\mathbf{j}'\qquad(4\text{-}17)$$

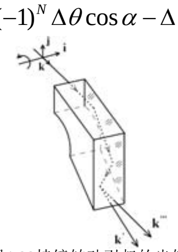


图4-22棱镜转动引起的光轴偏

像倾斜： j'''与j'的差在i'上的分量

$$\Delta\mathbf{j}'=\left[(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma-\Delta\theta\cos\gamma'\right]\mathbf{i}'\qquad(4\text{-}18)$$

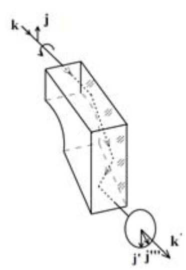


图4-23棱镜转动引起的像倾斜

例、L III$_J$-0°列曼屋脊棱镜

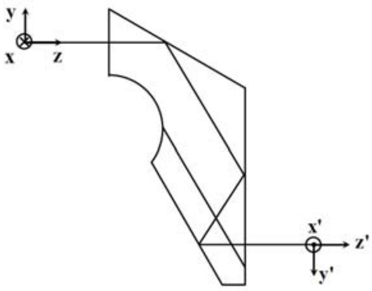


图4-24 列曼屋脊棱镜成像

$$\mathbf{i}' = -\mathbf{i}$$
$$\mathbf{j}' = -\mathbf{j}$$
$$\mathbf{k}' = \mathbf{k}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设转轴 $\mathbf{P} = \cos\alpha\,\mathbf{i} + \cos\beta\,\mathbf{j} + \cos\gamma\,\mathbf{k}$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha' \\ \cos\beta' \\ \cos\gamma' \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha \\ -\cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix}$$

光轴偏：$\Delta\mathbf{k}' = -2\Delta\theta\cos\beta\,\mathbf{i}' + 2\Delta\theta\cos\alpha\,\mathbf{j}'$

像倾斜：$\Delta\mathbf{j}' = 0$

§ 4.3.5 特征方向、特征平面和最大像倾斜方向

(1) 特征方向

若有一根轴或几根轴，棱镜绕其微量转动既不产生光轴偏也不产生像倾斜，这根轴**P***所表示的方向定义为棱镜的特征方向。

$$\Delta\mathbf{k}' = \left[(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\beta + \Delta\theta\cos\beta'\right]\mathbf{i}' + \left[(-1)^{N}\Delta\theta\cos\alpha - \Delta\theta\cos\alpha'\right]\mathbf{j}' = 0$$

$$\Delta\mathbf{j}' = \left[(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma - \Delta\theta\cos\gamma'\right]\mathbf{i}' = 0$$

$$(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\beta + \Delta\theta\cos\beta' = 0$$
$$(-1)^{N}\Delta\theta\cos\alpha - \Delta\theta\cos\alpha' = 0$$
$$(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma - \Delta\theta\cos\gamma' = 0$$

B是否有特征值(–1)^N?

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha' \\ \cos\beta' \\ \cos\gamma' \end{bmatrix} = (-1)^N \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}19)$$

$$\mathbf{B}\begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} = (-1)^N \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}20)$$

求特征方向$\mathbf{P}^*$就是求特征值为$(-1)^N$的矩阵B的特征向量！

(2) 特征平面

棱镜绕轴微量转动不产生像倾斜，这些转轴均在同一个平面内。定义这个平面为棱镜的特征平面。

$$\Delta\mathbf{j}' = \left[(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma - \Delta\theta\cos\gamma'\right]\mathbf{i}'$$

$$(-1)^{N-1}\Delta\theta\cos\gamma - \Delta\theta\cos\gamma' = 0 \qquad (4\text{-}22)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha' \\ \cos\beta' \\ \cos\gamma' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix}$$

特征平面方程

$$b_{31}\cos\alpha + b_{32}\cos\beta + (b_{33} + (-1)^{N-1})\cos\gamma = 0 \qquad (4\text{-}23)$$

例、K II-80°-90°空间棱镜

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos100^\circ & -\cos10^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\cos10^\circ & \cos80^\circ & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1736 & -0.9848 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -0.9848 & 0.1736 & 0 \end{bmatrix}$$

***N*=2** $\quad -0.9848\cos\alpha + 0.1736\cos\beta - \cos\gamma = 0$

平面法矢量： $\mathbf{n} = -0.9848\mathbf{i} + 0.1736\mathbf{j} - \mathbf{k}$

(3) 最大倾斜方向

棱镜绕轴P_M微转一角度而产生的像倾斜最大。定义P_M轴所表示的方向为最大像倾斜方向。

$$\Delta \mathbf{j}' = \left[(-1)^{N-1} \Delta\theta \cos\gamma - \Delta\theta \cos\gamma' \right] \mathbf{i}'$$

$$\max \quad \Delta\theta (b_{31}\cos\alpha + b_{32}\cos\beta + (b_{33} + (-1)^{N-1})\cos\gamma)$$

限制条件： $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$

例、K II-80°-90°空间棱镜

$$b_{31} = -0.9848, b_{32} = 0.1736, b_{33} = 0, N = 2$$

$$\cos\alpha = \frac{-0.9848}{\sqrt{0.1736^2 + 0.9848^2 + 1}} = \cos 134.14^o$$

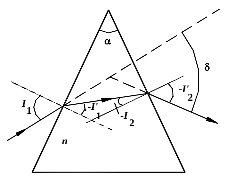
$$\cos\beta = \frac{0.1736}{\sqrt{0.1736^2 + 0.9848^2 + 1}} = \cos 82.95^o$$

$$\cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{0.1736^2 + 0.9848^2 + 1}} = \cos 45^o$$

$$\Delta \mathbf{j}' = \sqrt{2}\Delta\theta \mathbf{i}'$$

4.4 折射棱镜与光楔

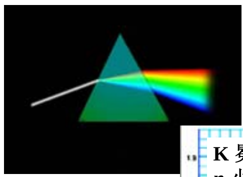
如果棱镜工作面对光线的主要作用为折射，则此类棱镜称作折射棱镜。折射棱镜是将两个成一定夹角的平面折射面做在同一块玻璃上的器件，它们之间的夹角α称作棱镜顶角。出射光线相对于原入射光线的方向将发生改变，它们之间的夹角称作棱镜的偏向角，用δ表示。



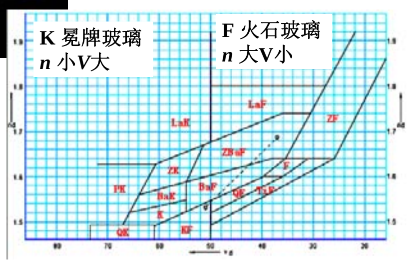
最小偏向角

$$\sin\frac{1}{2}(\alpha + \delta_{\min}) = n\sin\frac{\alpha}{2}$$

折射棱镜的色散



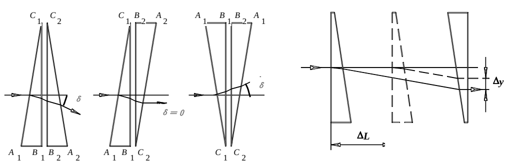
1672年，牛顿利用三棱镜将太阳光分解成彩色光带，这是首次色散实验。



α很小时，折射棱镜→光楔

光线可以在两个折射面上近乎垂直地入射和出射，

$$\delta = (n-1)\alpha$$



角度测微　　移动测微

小结：

平面反射镜、反射棱镜（屋脊棱镜）、像方向的判断、平行平板成像特性、角锥棱镜

棱镜转动定理及其应用

折射棱镜与光楔