

机载光学扫描系统的设计分析

王 铁 铭

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文论述了用于机载扫描仪的几种光学扫描系统。着重讨论了它们在扫描方法、结构原理、扫描角范围、基准信号源的安置等方面的设计思想。并对它们各自的特性进行了分析。

机载扫描仪的光学系统一般包括三大部份,即光学扫描系统、主光学系统和分光系统。本文只讨论光学扫描系统。它一般分四种类型,即平面反射镜扫描系统、双 45° 度反射体扫描系统、三棱镜扫描系统和四方棱镜扫描系统。本文将逐一讨论这四种扫描系统,阐明每一种扫描方式的设计思想及设计要点。由于三棱镜扫描方式还未被人们所采用,对此将进行较为仔细的分析。

机载扫描仪的特点是:帧向扫描由飞机的飞行运动来完成,行向扫描由光学扫描系统来完成。所以在扫描方向上机载光学扫描系统只考虑行向的扫描。

任何一个光学扫描系统都有扫描角最大极限值范围。在此范围内,对地面目标进行扫描的那一部份称为扫描视场或动态视场,以 W_f 表示。在扫描过程中任一瞬间主光学系统的固有视场称为瞬时视场或静态视场,以 α 表示。扫描视场 W_f 决定了扫描仪对地面目标的行向扫描范围。瞬时视场 α 决定了扫描仪的空间分辨率。扫描视场大小受到扫描角最大极限值的限制,而此极限值和扫描方式有关。

在扫描仪的工作波长范围内,扫到的目标信号必须和它对应波长的基准信号相比较。为此在扫描角范围内必须安放这些基准信号源,如基准黑体辐射源、标准灯和天空光等。基准辐射源的类别取决于扫描仪的工作波长。在设计任何一种扫描系统时,均要考虑这些基准信号源在扫描角范围内的正确分配问题。分配方式还和扫描方式有关。

每一种机载光学扫描系统,应能把所需要的地面目标信号和各种基准信号通过扫描方式送到主光学系统,并能排斥在扫描过程中扫到的各种杂散辐射的背景干扰,以免影响有用信号。对可见光波段的杂散光可用涂黑仪器内壁的方法加以消除。而在红外波段就得采用均匀辐射板,使杂散辐射为常数。这些设计均与扫描方式、扫描系统结构尺寸和扫描视场的大小密切相关。

一、平面反射镜扫描

1. 旋转式平面反射镜扫描

这种扫描方式的光学设计较为简单。结构如图 1 所示。平面反射镜的旋转轴和主光学系统的光轴重合。平面反射镜的反射面和它的旋转轴夹角为 Y 。一般要求对地面目标作垂直扫描, Y 等于 45° 。此时平面反射镜的形状为一椭圆, 短轴是主光学系统的入瞳直径, 长轴是入瞳直径的 $\sqrt{2}$ 倍。但考虑到主光学系统的静态视场, 长轴和短轴均要相应增大。

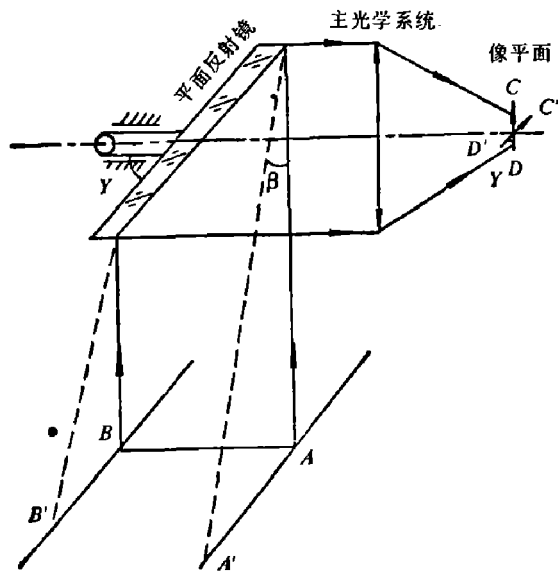


图 1 旋转扫描

在扫描过程中, 反射镜的旋转角等于扫描角, 所以它的扫描视场角的极限值可达 360° 。在 360° 扫描角范围里, 平面反射镜扫描到的任何信号均可以进入主光学系统, 并被探测器所接收。因此, 扫描视场的大小、基准信号源的安置不受它的扫描方式限制, 由扫描仪技术指标而定。

这种扫描方式的优点是: (1) 结构简单, 光学扫描部件就是一块平面反射镜; (2) 扫描系统和主光学系统彼此独立, 调试方便; (3) 扫描角范围大, 可达 360° , 扫描视场大小不受扫描方式限制, 基准信号源安置方便; (4) 系单个反射平面扫描, 仪器内部辐射不会与目标信号同时进入, 无须放置均匀辐射板。

它的缺点是: (1) 平面反射镜在高速旋转时, 反射面的变形会影响光学系统成像质量; (2) 平面反射镜外形结构的机械设计必须考虑动平衡问题, 给加工造成困难; (3) 在平面反射镜相对地面目标作旋转扫描时, 主光学系统的像平面旋转。因此本扫描方式不能采用多元列阵探测器。像平面旋转的原因如下: 假设主光学系统和扫描平面反射镜成为一体, 作同步旋转, 如图 1 所示。平面反射镜从 AB 扫到 $A'B'$, 旋转了 β 角。与此同时, 主光学系统和它的像平面从 DC 位置转到 $D'C'$, 也同步旋转 β 角。因为任何同轴光学系统绕其光轴旋转时和静止时, 它的像平面均是静止的(如美国响尾蛇导弹中马克苏托夫式光学系统)。所以在主光学系统固定、平面反射镜单独旋转时, 其像平面也是旋转的。又因扫描旋转速度相对光速可忽略, 所以主光学系统的像平面和平面反射镜同步旋转。

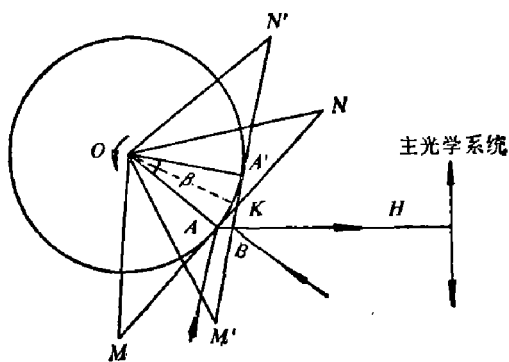


图 2 摆动扫描

根据反射定律, 扫描角 $W = 2\beta$, 即扫描角为摆角的二倍。在设计时根据扫描仪总体指标要求的扫描视场角 W 和各基准源所占扫描角的范围来确定总扫描角, 从而决定摆角 β 。

2. 平面反射镜摆动扫描

如图 2 所示, 扫描平面反射镜绕 O 点作摆动, 从 MN 位置摆到 $M'N'$ 位置时摆角为 β 。根据反射定律, 扫描角 $W = 2\beta$, 即扫描角为摆角的二倍。在设计时根据扫描仪总体指标要求的扫描视场角 W 和各基准源所占扫描角的范围来确定总扫描角, 从而决定摆角 β 。

这种扫描方式的特点是:

(1) 主光线在物空间除扫描外还有平移运动。如图 2, 平移量 $x=AB$ 。

$$x = D \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \gamma)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}$$

式中 D 是扫描平面镜 MN 距摆动中心 O 的距离; β 是摆角; γ 是摆动起始位置时主光线和反射面 MN 的夹角。如 $D=0$, 摆动中心位于反射面 MN 上, 此时 $x=0$ 。位移量 x 的存在会带来空间扫描的非线性, 并影响空间分辨率。

(2) 像平面不会旋转, 可放置列阵探测器。

(3) 摆角二端有非线性区, 扫描角 $W < 2\beta$ 。

(4) β 的数值受反射镜的摆动速度、结构尺寸、面形变形的限制, 不适合大视场扫描使用。

(5) 单个反射面工作, 无须安置均匀辐射板。

二、双 45° 反射体扫描

如图 3 所示, 其扫描角等于双 45° 反射体的旋转角。主光学系统的作用位置随扫描角而变。理论上扫描角最大极限为 180°, 但实际上无法做到, 因为一个反射面对着目标时另一个反射面却对着仪器内壁, 探测器同时收到目标信号和仪器内壁的杂散辐射。为了避免这种情况发生, 本系统必须加置均匀辐射板。而均匀辐射板的安置限制了扫描角的大小。

1. 均匀辐射板的作用和对扫描角的限制

双 45° 反射体的一个反射面接收到目标的扫描信号时, 另一个反射面接收的却是仪器内壁变化的杂散信号, 此信号相对于目标信号来说是噪声。用均匀辐射板代替内壁, 给出的杂散信号是常数, 相当于直流信号, 避免了对目标信号的干扰。

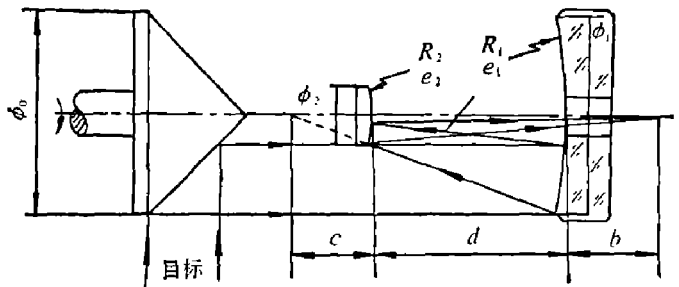


图 3 双 45° 反射镜扫描系统

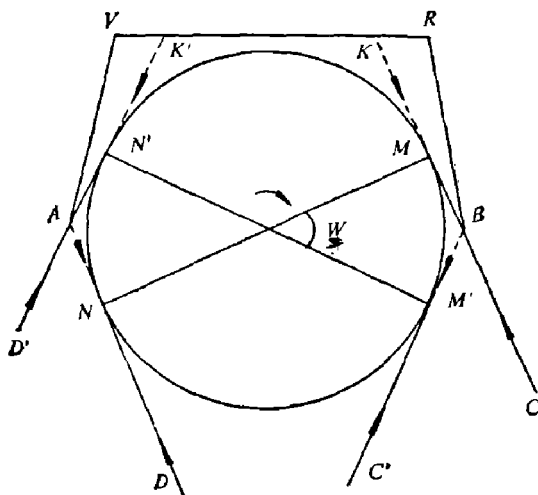


图 4 均匀辐射板对双 45° 扫描系统的扫描角限制

图 4 表示了均匀辐射板对扫描角的限制情况。它实际上就是图 3 的光轴方向投影图。当扫描角为 W 时, 双 45° 反射体从 MN 转到 $M'N'$ 位置。一个反射面接收来自目标的 CD 和 $C'D'$ 光线, 另一反射面接收来自均匀辐射板 $A'V'RB'$ 的恒定信号。其 AB 的结构尺寸和扫描角 W 的关系为

$$D = 2R / \cos \frac{W}{2} \quad (1)$$

D 是 AB 间距离; R 是双 45° 反射体的半径; $R = \frac{1}{2} MN$; W 是总的扫描角。 W 越大, D 也

越大。如 $W=160^\circ$ ，则 $D=806\text{mm}$ ，这么大的结构尺寸对航空仪器是不能允许的。可见扫描角的大小受到结构尺寸的限制。

2. 基准源的安置和扫描角的关系

基准源的安置会引起扫描角与扫描结构尺寸之间的矛盾。现以图 5 的黑体辐射板为例，它的关系式为

$$X = R / \operatorname{tg} \frac{W_\alpha}{2}, \quad (2)$$

式中 X 是黑体板到双 45° 反射体旋转中心的距离； R 是反射体半径， $R=OD$ ； W_α 表示无法被利用的扫描角范围。当扫描体从 A 位置扫到 D 位置过程中（见图 5），目标和黑体信号同时进入主光学系统，探测器在此 W_α 扫描角里收到的是毫无用处的目标和黑体的混合信号，

必须用码盘通过门电路把这类混合信号去掉。可见，安置了黑体板，使得在 W_α 角内的扫描范围无法使用。

设计时 R 由入瞳面积确定。根据公式 (2) 来权衡结构尺寸 X 和扫描角损失 W_α ，从而确定 X 和 W_α 。

安置黑体板实际占去的扫描角 W_b 为

$$W_b = W_\alpha + W'_b,$$

式中 W'_b 是黑体板充满瞬时视场时的扫描角，一般取 W'_b 为 $1^\circ \sim 3^\circ$ 。

对于其它基准源，如标准灯、天空光等的安置和黑体板完全一样。

3. 讨论

双 45° 反射体扫描时两个反射平面和它的旋转轴所夹的 45° 角必须有一定精度要求，否则会引起两个反射面成像点不重合和航空图片帧向扫描线位错。而两个反射面在旋转方向的加工误差会引起图片行向扫描线位错。为了保证图像清晰，一般位错量不得大于空间分辨率的五分之一。

为了避免上述矛盾，把双 45° 反射体一面涂黑不用，仅用另一面进行扫描。这样虽降低了扫描效率，但不需用均匀辐射板来排除仪器内壁干扰信号。在 360° 范围内可自由选取扫描视场的大小，基准源的安置也较方便。美国 DAEDALUS 公司的 DS-1240 和 DS-1260 航空扫描仪均采用这种一面涂黑的双 45° 反射体。实际上一面涂黑的双 45° 反射体和旋转式平面反射镜扫描完全一样，但它不必解决旋转时的动平衡及面形变形问题。

它的缺点是像平面旋转，所以该系统不能够使用多元列阵探测器。

三、三棱镜扫描

在图 6 中， A 与 A' 、 B 与 B' 是平面反射镜， A 与 B 、 A' 与 B' 的夹角必是 60° ，到达 A 与 A' 反射镜的光线，它的水平夹角必然是 30° ，扫描角 W 等于二倍的三棱镜旋转角 ω ； O 是主镜； $2l$ 是入射光束横截线； $2T$ 是不透光区，它并不表示光线透过与否，只表示在三棱镜

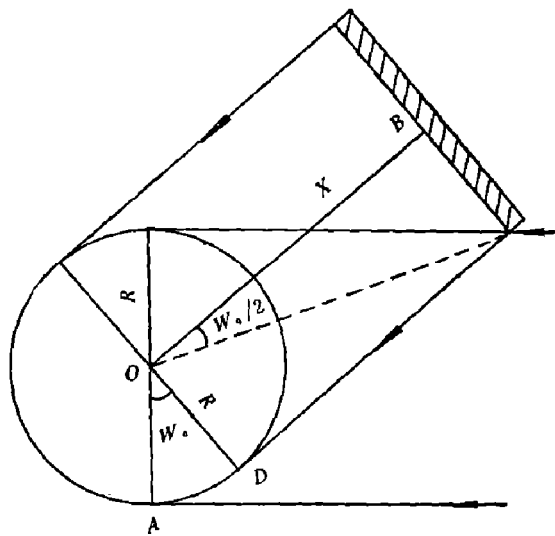


图 5 基准黑体板对扫描角的影响

扫描时有一部份反射面，它反射的目标光线随扫描角大小而变。其目的在于保持入瞳面积为常数。

1. 不透光区的选取

(1) 不设不透光区时入瞳变化关系

见图7,当三棱镜在 ABC 位置时,来自目标的光线 $I_1I_2I_3$ 通过 AC 和 BC 反射到 m 和 n 反射镜上。 m 与 n 平面反射镜相当于图6中的 A 与 A' 反射镜。

在 m 平面反射镜处的截线为 AD ,在 n 平面反射镜处的截线为 BE ,

$$BE = AD = L \sin 30^\circ,$$

其中 L 是三棱镜边长,为图7中 AC 或 BC 。

$$AD + EB = L.$$

当三棱镜旋转 ω° 到 $A'B'C'$ 时,在 m 上光束为 $A'D'$,

$$A'D' = L \cdot \sin(30^\circ - \omega).$$

在 n 反射镜处光束截线为 $B'E'$ 。

$$B'E' = L \cdot \sin(30^\circ + \omega),$$

$$A'D' + B'E' = L \cdot [\sin(30^\circ - \omega) + \sin(30^\circ + \omega)] = L \cdot \cos \omega.$$

由此可见,

$$A'D' + B'E' \neq AD + EB.$$

从以上关系式可知,不考虑不透光区的三棱镜扫描系统,其入射光瞳面积随扫描角而变。

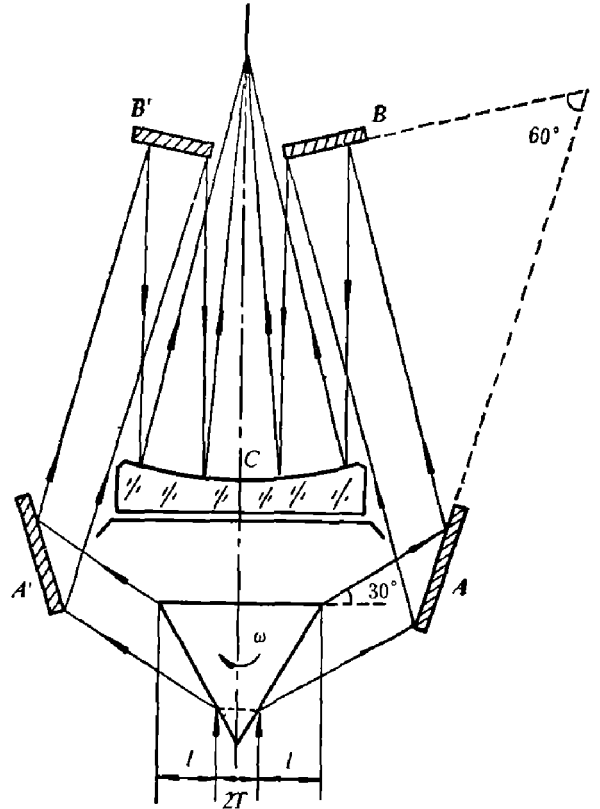


图6 三面体扫描系统

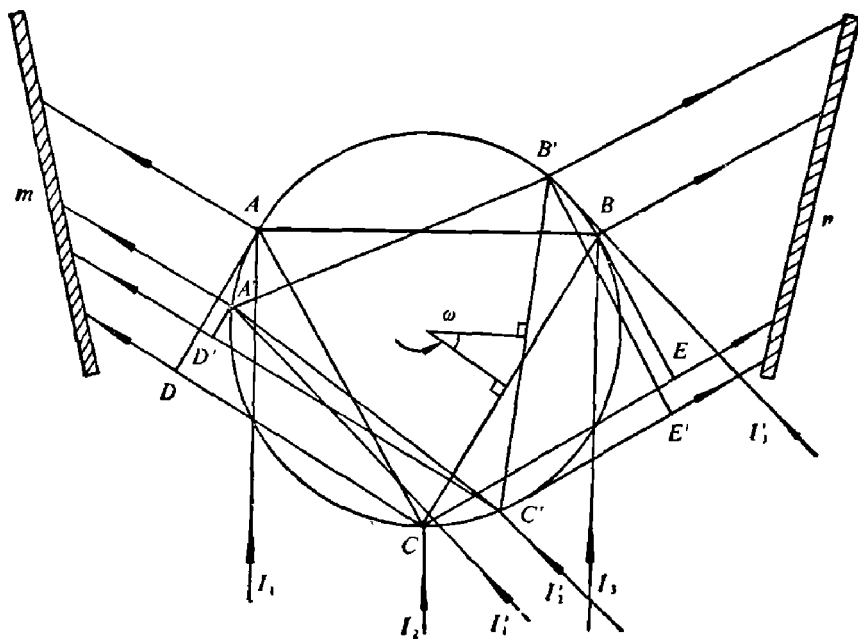


图7 三面体扫描时入瞳面积的变化

(2) 加设不透光区 $2T$

如图 8 所示, 在扫描位置 ABO 时, 入瞳面积 S 为

$$S = 2AD \times P,$$

其中 P 是三棱镜棱长, 在反射面 GO 和 HO 范围内的入射光线反射不到 MM' 和 NN' 上。实际上 M', N' 起了有效光阑的作用, 所以也形成了不透光区 $2T$ 。当三棱镜旋转到 $A'B'O'$ 时, 进入系统的入射光线截线为 XD 和 YE 。

由于 $\triangle AA'X = \triangle BB'Y$, 有 $AX = YB$, $XD + YE = AD + BE$ 。

在三棱镜旋转 ω_0 以后, 入瞳面积 S 仍等于 $2AD \times P$ 。可见, 不透光区 $2T$ 的存在保证了入瞳面积在扫描时为常数。 $2T$ 表示为

$$2T = \frac{4L}{\sqrt{3}} \sin \frac{W}{8} \sin \left(30^\circ + \frac{W}{8} \right), \quad (3)$$

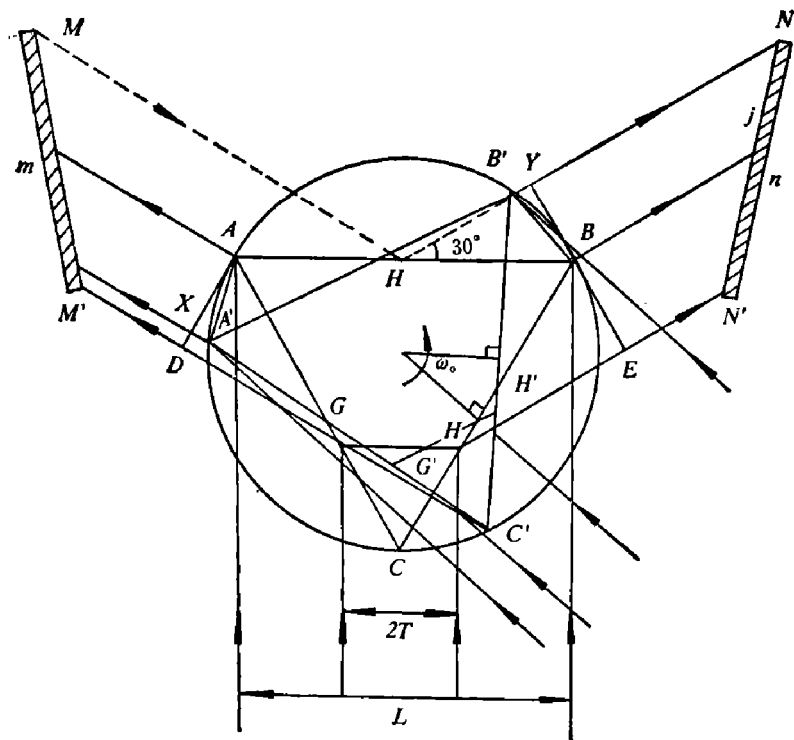


图 8 三面体扫描的不透光区选取

式中 L 是三棱镜边长, 相当于图 8 中 AB ; W 是三棱镜总的扫描角, $W = 4\omega_0$ 。 ω 是三棱镜的旋转角。 ω_0 是旋转半角。

2. 三棱镜扫描极限角

在图 8 中, M, N 点是反射镜上极限点, 若反射镜位置低于此点 (如把 N 点移到 j 点), 入瞳面积就不是常数。所以反射镜 m 和 n 的上极限点不能低于 M 和 N 点。

反之, m 和 n 反射镜的尺寸也不能高于 M 和 N 点。否则探测器本身的辐射可经 MH 以及 HN 反射到探测器上, 也就是探测器收到了自身的辐射信号, 出现类似光学上的自准直现象。

如果是致冷红外探测器, 就会出现低温背景的脉冲信号, 这是不允许的。为此扫描角不能大于 $4\omega_0$ 。

从图 8,

$$YB = B'B \cdot \cos \frac{\omega_0}{2},$$

$$B'B = \sin \frac{\omega_0}{2} \cdot L / \cos \frac{\omega_0}{2}.$$

所以

$$YB = \frac{\sin \frac{\omega_0}{2}}{\cos 30^\circ} L \cos \frac{\omega_0}{2} = \frac{1}{4} L,$$

$$\sin \omega_0 = \frac{1}{2} \cos 30^\circ,$$

$$\omega_0 = 25.6589^\circ.$$

此处 ω_0 是三棱镜单边旋转角, 即旋转半角。所以总的扫描角

$$W \leq 4\omega_0 = 102.6356^\circ。$$

可见三棱镜的扫描极限角应是 102.6356° , 而不是 120° 。

3. 不透光区 $2T$ 与扫描极限角的关系

(1) 对公式(3)的讨论

如根据总体指标, 扫描角大于扫描极限角时, 三棱镜之一面必须涂黑使用。当扫描角小于 120° 时, 不透光区按公式(3)计算。但扫描角大于 120° 时, 情况有所变化。

参看图 9, 当扫描角为 120° 时, $\omega_0 = 30^\circ$ 。图 9 中三棱镜一边 ZP 与反射光线方向相重合, A' 反射镜上已无光线到达。而 A 反射镜的光束截线 QN 由上限点 M 与下限点 N 控制。如 M 点不限制其光束进入, 那么入瞳面积是固定常数。此时, 即使扫描角大于 120° , 不透光区 $2T$ 仍按扫描角 120° 计算。

$$2YB = 2 \frac{\sin \frac{\omega_0}{2}}{\cos 30^\circ} L \cos \frac{\omega_0}{2} = 0.57735 L。$$

又,

$$YB = XD,$$

所以,

$$QN = YB + XD = 2YB = 0.57735 L。$$

$$2T = FC = 0.42265 L。$$

所以不管扫描角如何增大, 不透光区有上限,

$$2T \leq 0.42265 L。 \quad (4)$$

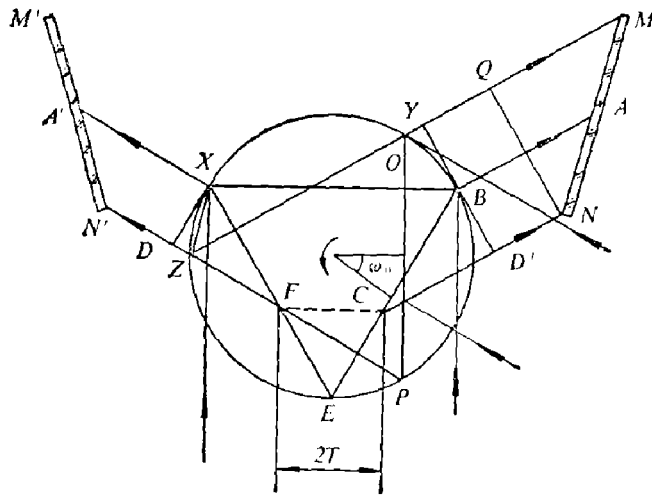


图 9 旋转半角为 30° 时的不透光区

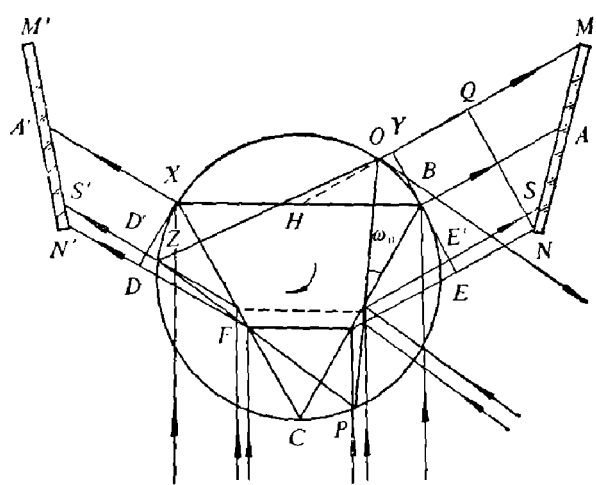


图 10 三面体扫描的极限扫描角

(2) 极限扫描角的讨论

如根据总体指标, 扫描角大于扫描极限角, 三棱镜一面又不想涂黑使用, 那么还可以通过扩大不透光区的方法来解决。结构原理见图 10。反射镜 A 与 A' 的上限点没有超过 M 与 M' 点, 探测器不会收到自身辐射信号。把 A 与 A' 反射镜的下限点 N 与 N' 移到 S 与 S' 处, 使得扫描角大于极限扫描角 102.6356° 时, 入瞳面积仍为常数。如图 10 中 $W \geq 102.6356^\circ$, 即 $W \geq 4\omega_0$, 则不透光区使得目标光线不能到达 A' 反射镜, 而全部到达 B' 反射镜上。进入系统的光束截线 SQ 和 $\omega=0$ 时一样, 这是因为

$$BE' = XD'; \quad YB = XD'。$$

所以

$$SQ = BE' + XD' = YB + BE' = 2YB。$$

$$YB = \frac{\sin \frac{\omega_0}{2}}{\cos 30^\circ} L \cos \frac{\omega_0}{2} \quad \left(\omega_0 = \frac{1}{4} \times 102.6356^\circ \right) = 0.25L,$$

$$SQ = 0.5L,$$

那么

$$2T = 0.5L。$$

4. 结论

- (1) 扫描角小于极限扫描角, 不透光区按公式(3)计算。
- (2) 扫描角大于极限扫描角, 并且三棱镜一边涂黑使用时, 它的不透光区计算有以下两种情况: 在扫描角小于 120° 时按式(3)计算; 在扫描角大于 120° 时按 120° 计算。
- (3) 扫描角大于极限扫描角, 三棱镜不涂黑, 此时 $2T = 0.5L$ 。
- (4) 从上述分析可知, 三棱镜扫描系统一般适合于在扫描角小于 102.6356° 情况下工作。
- (5) 基准辐射源和均匀辐射板的安置同图 4、图 5。
- (6) 像平面不旋转, 可使用多元列阵探测器。

四、四方棱镜扫描

1. 典型式

扫描结构如图 11 所示: A 与 A' 、 B 与 B' 都是平面反射镜, 它们的作用是改变光线方向, 使其垂直入射到主镜上; N 与 N' 点位置决定了不透光区 $2T$, 起了有效光阑的作用; M 是均匀辐射板; ω_0 是棱镜转角的二分之一, 所以总扫描角 $W = 4\omega_0$

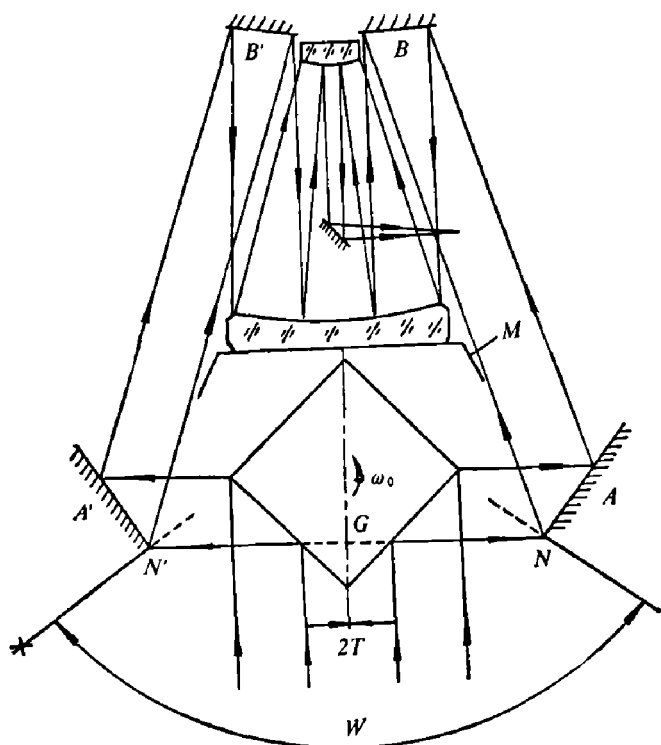


图 11 四方棱镜扫描系统

使其垂直入射到主镜上; N 与 N' 点位置决定了不透光区 $2T$, 起了有效光阑的作用; M 是均匀辐射板; ω_0 是棱镜转角的二分之一, 所以总扫描角 $W = 4\omega_0$

(1) 不透光区 $2T$

$$2T = \sqrt{2} L (1 - \cos \omega_0),$$

其中 L 是棱镜边长; ω_0 是旋转半角。

(2) 反射镜下限点 $N'N$ 间距

$$\begin{aligned} N'N = & \sqrt{2} L \cos \omega_0 \\ & + 2 \operatorname{tg} 2\omega_0 \left[\left(\frac{L}{\sqrt{2}} - T \right) \right. \\ & \left. + \frac{L}{\sqrt{2}} \sin \omega_0 \right], \end{aligned} \quad (5)$$

上式表示在扫描角 $W = 4\omega_0$ 时, 本扫描系统的横向尺寸。 $N'N$ 的间距直接影响扫描仪的体积大小。

- (3) 基准源和均匀辐射板的安置同图 4 和图 5 所述。
- (4) 像平面不旋转, 适合使用多元列阵探测器。

2. 前置式

图 12 是一个前置式四方棱镜扫描系统。扫描带和四方棱镜对地面的垂线夹角为 α 。其扫描角可达极限值 180° ，不受图 11 中反射镜 A' 与 A 限制。它的 A 与 A' 反射镜、 B 与 B' 反射镜均和图 11 等同。

它的优点是：

(1) 扫描角大，可达 180° ，并且不受公式 (5) 的限制。一般在大扫描角情况下，结构尺寸可做得较小。

(2) 基准源的安置不受 A 、 A' 反射镜的影响，较自由。

(3) 像平面不旋转，可使用多元列阵探测器。

存在的问题是：

(1) 扫描像元变形。在主光学系统的视场光阑为方形时，它所对应的扫描带目标像元呈长方形。如图 12 中的 a 和 b ：

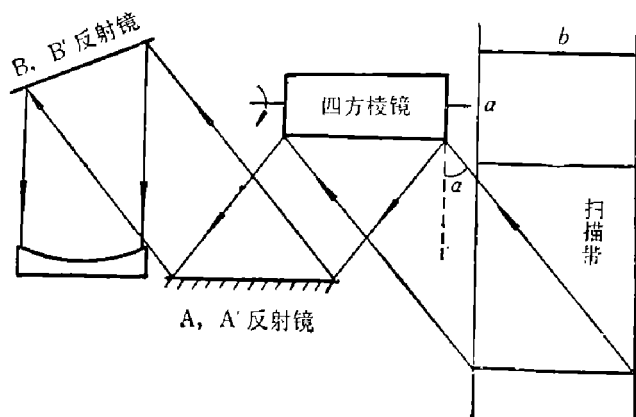


图 12 前置式

$$b = a \cos \alpha。$$

当然，这一问题也可通过校正视场光阑来解决。

(2) 扫描带是曲线。

参看图 13。虚线曲线 CD 是扫描带， QO 是四方棱镜转轴， G_x 是地面， AB 是飞行高度。当扫描仪从 E 点扫到 M 点，旋转角为 ω_x 。此时平面 $OBNH$ 和平面 $OB AO'$ 间的夹角就是 ω_x 。

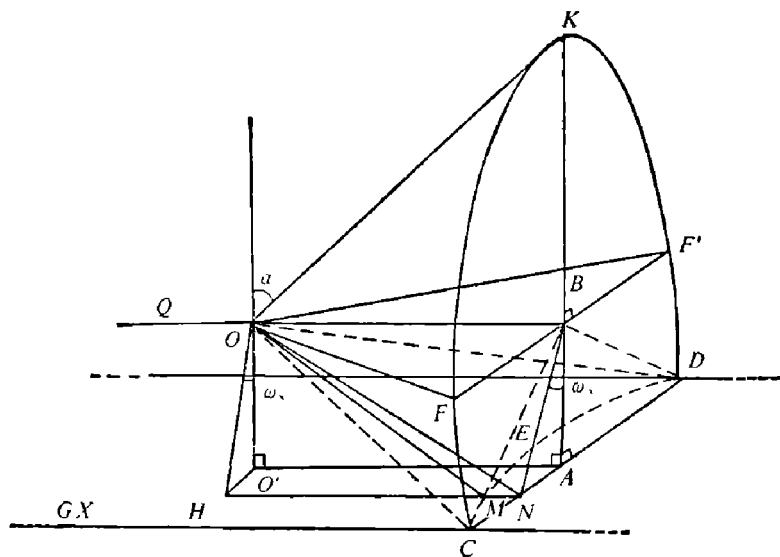


图 13 前置式四方棱镜扫描系统的扫描线

$$BN = AB / \cos \omega_x = h / \cos \omega_x,$$

$$OB = BF \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \alpha / \cos \frac{W}{2}。$$

$$\therefore BF = BD = h / \cos \frac{W}{2},$$

$$OH = BN = h / \cos \omega_x,$$

$$\therefore HM = OH \cdot \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \alpha / \cos \omega_x。$$

由此可推出：

$$NM = HN - HM = OB - HM。$$

$$\therefore NM = h \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1}{\cos \frac{W}{2}} - \frac{1}{\cos \omega_x} \right) \quad (6)$$

由图 13，

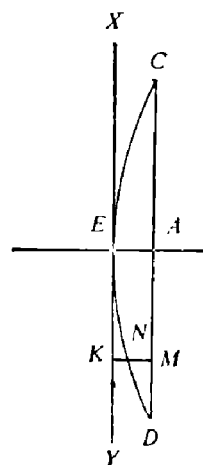


图 14 扫描轨迹

式中 h 是飞行高度； ω_x 是某一瞬间的扫描角； W 是总的扫描角； α 是四方棱镜垂线和扫描

带的夹角, 见图 12。

把图 13 的 DC 扫描线画在图 14 中, 并过 E 点作切线 XY 。求出扫描线上任何一点到该切线距离 KN 的方程:

$$AE = h \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{1}{\cos \frac{W}{2}} - 1 \right)$$

$$\therefore KN = AE - NM,$$

$$KN = h \cdot \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1}{\cos \omega_x} - 1 \right) \quad (7)$$

此式就是前置四方棱镜扫描的扫描轨迹方程。

3. 垂直式

把图 12 结构纵向转 α 角就形成图 14 的垂直式。它的设计和前置式完全一样, 但扫描性能上有些不同。它排除了扫描带像元的变形问题, 而且扫描线是直线。最大缺点是像平面旋转, 无法用多元列阵探测器。

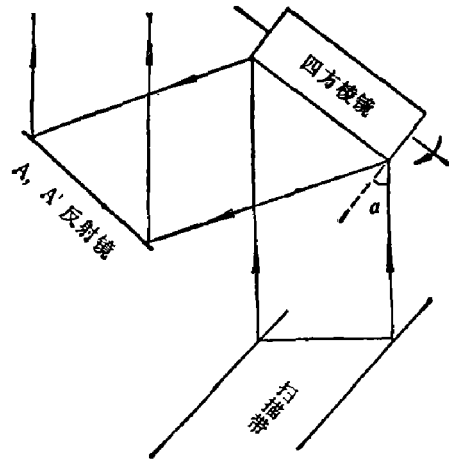


图 15 垂直式

致谢——作者在设计航空多光谱扫描仪光学系统时, 曾对一些扫描方式进行了分析据此写成本文。在整个扫描仪的光学设计过程中, 曾得到薛永祺同志的协助, 并进行了多次有益的讨论, 在此表示感谢。

DESIGN AND ANALYSIS OF AIRBORNE SCANNING OPTICAL SYSTEMS

WANG TIEMING

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Some scanning optical systems used in airborne scanners are described in this paper. The scanning method, the scanning principles, the ranges of scanning angles and the positions of standard radiation sources are discussed. An analysis of characteristics of these scanners is given.