

扫描镜鼓和棱镜对红外成象 系统性能的影响

杨 应 槐

(天津技术物理研究所)

摘要——本文通过对扫描镜鼓和棱镜在扫描过程中运动轨迹的分析,推导出不同扫描角所引起的散焦量变化和它对红外成象系统性能影响的数学表达式。

一、引 言

光机扫描的红外成象系统,其扫描方式一般有物方和象方扫描两大类。目前,世界上先进的成象系统大多数采用象方扫描,而在这种扫描方式中,使用的扫描部件有反射式镜鼓(图1)和折射式棱镜(图2)两种。这两种扫描方式,尽管其光线行迹不同,然而它们都是对会聚光束进行扫描。本文试图通过对这两种类型扫描过程中运动轨迹的分析,导出由于不同扫描角而引起焦点变化的数学表达式,并利用这些公式来估价不同散焦量对系统热灵敏度的影响。

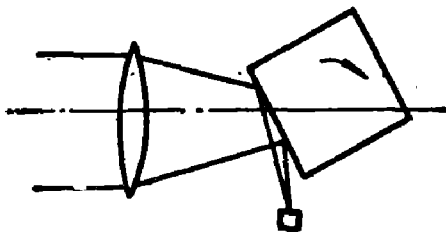


图1 反射式象方扫描
Fig. 1 Reflective image scan

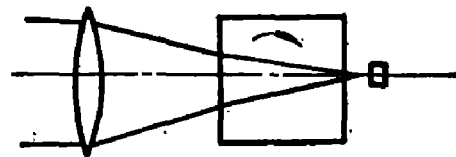


图2 折射式象方扫描
Fig. 2 Refractive image scan

二、反 射 镜 鼓

反射镜鼓在会聚光束中进行扫描时,入射辐射经镜面不同点反射后,它们到达探测器经历的光程不同,结果在光学系统的焦平面前或后形成一定的焦点位移 Δ_i ,或称作散焦量 Δ_i 。

图3为旋转的反射镜鼓。由图3可知 $\overline{OC} = R$ (正多边形外接圆半径), \overline{OB} 表示转角 β 时的等效半径 R' ,即

本文1985年5月9日收到。

$$R' = \overline{OB} = \frac{\operatorname{tg} \phi}{(\operatorname{tg} \phi + \operatorname{tg} \beta) \cos \beta} R; \quad (1)$$

式中, $\phi = \frac{N-2}{2N} \pi$, 多边形的边数 N 取值大于或等于 4。当镜鼓转动一个角度, 从与光轴平行和垂直的两个方向分别表示为 α 和 β 。在图 3 中, 根据正多边形的外接圆的圆心角和边数之间关系, 求得 α 和 β 关系为

$$\alpha + \beta = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{N} = \frac{\pi}{N}, \quad \beta = \frac{\pi}{N} - \alpha。$$

在实际应用中, 取 β 和 α 角方向一致。根据上式, 以 α 代替 β , 于是式(1)变为

$$R' = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right)}{\left[\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)} R。 \quad (2)$$

若给出镜鼓和棱镜的厚度 d , 式(2)也可写为

$$R' = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right)}{\left[\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right) \cos \frac{\pi}{N}} \cdot \frac{1}{2} d; \quad (2')$$

式中, $R = d/2 \cos \frac{\pi}{N}$ 。

从图 3 中可看出 $\overline{DB} = \overline{OB} - \overline{OD}$, \overline{DB} 是由于镜鼓旋转 α 角引起的差值, 也就相当于转动 α 角后引起光程的变化量为 \overline{DB} 。因为光程是 R 和 d 的函数, 而 R 和 d 又是随 α 角而变化的, 不考虑其它因素的影响, 光程的变化在我们讨论的情况下, 主要是

体现为有效焦长的变化, 则有, $\Delta_i = \overline{DB} = \overline{OB} - \overline{OD} = R' - \frac{1}{2} d$, 可推导出转动的反射镜鼓引起散焦量 Δ_i 变化的数学表达式为

$$\Delta_i = \left\{ \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right)}{\left[\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)} - \cos \frac{\pi}{N} \right\} R, \quad (3)$$

或

$$\Delta_i = \left\{ \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right)}{\left[\operatorname{tg}\left(\frac{N-2}{2N} \pi\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{N} - \alpha\right) \cos \frac{\pi}{N}} - 1 \right\} \frac{1}{2} d。 \quad (3')$$

三、折 射 棱 镜

在会聚光束中插入一个用锗(或硅)材料制成的 $2N(N=2, 3, \dots)$ 面棱镜作为扫描部件时, 情况比上面讨论过的反射镜鼓复杂得多, 不仅扫描角变化引起很大的位移和象差, 而

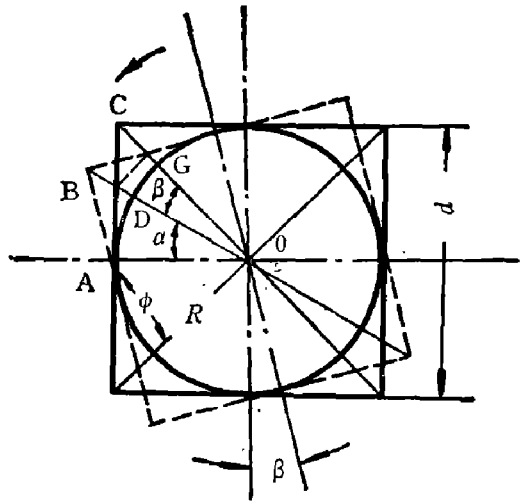


图 3 旋转的反射镜鼓

Fig. 3 Rotating mirror drum

且与制作棱镜的材料有关,因为这种扫描方式中来自景物的辐射是穿过扫描部件的。这种系统称为透射系统。参看图4,应用折射定律,入射辐射经扫描棱镜折射后引起的位移和球差是可以求出的^[1]。这里着重对已有的几个公式进行简化,以便于在工程设计中应用;并证明在这样的系统中,纵向位移(指与光线进行方向一致的位移)对系统性能的影响是主要的。

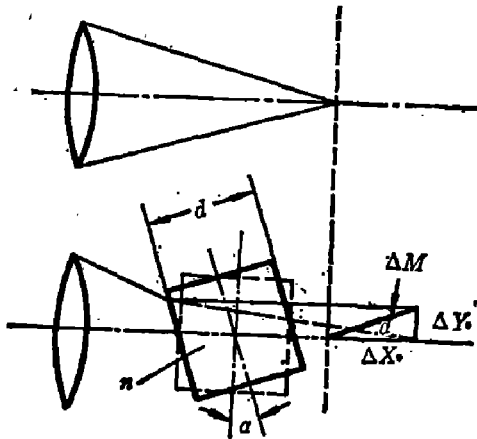


图4 折射棱镜
Fig. 4 Refractive prism

当棱镜不旋转时,对确定的系统,位移量是一个常数,设计时可设法消除它的影响。当棱镜旋转 α 角时,棱镜法线方向位移为 ΔM ,纵向位移为 Δx_0 ,横向位移(指与光线进行方向垂直的位移) Δy_0 和球差 P 分别为^[1]

$$\Delta y_0 = \left[1 - \left(\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha} \right)^{1/2} \right] d \cdot \sin \alpha; \quad (6)$$

$$P = \frac{1 - n^2}{2n^2} d \alpha^2; \quad (7)$$

考虑到 $\frac{1}{2n^2} \ll 1$,则式(7)简化为

$$P = -\frac{1}{2} d \alpha^2; \quad (7')$$

式中, d 为棱镜的厚度, n 为棱镜的折射率。

由于 $\sin^2 \alpha / 2n^2 \ll 1$,式(5)和式(6)可分别近似为

$$\Delta x_0 = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{n} \right) d \cos \alpha; \quad (8)$$

$$\Delta y_0 = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{n} \right) d \cdot \sin \alpha; \quad (9)$$

分别将 $\cos \alpha \doteq 1 - \frac{\alpha^2}{2}$ 和 $\sin \alpha \doteq \alpha$ 代入式(8)得

$$\Delta x_0 = \left(1 - \frac{\alpha^2}{2} \right) \left[d - \frac{1}{n} \left(d - \frac{1}{2} d \alpha^2 \right) \right]; \quad (10)$$

将式(7')代入式(10),则

$$\Delta x_0 = \left(1 - \frac{\alpha^2}{2} \right) \left[d - \frac{1}{n} (d + P) \right]; \quad (11)$$

从式(11)可看出,对折射系统来说,在 Δx_0 中也包含了扫描角变化引起的球差,影响系统性能的主要是不同扫描角引起的纵向位移。

从式(4)可知, ΔM 为 α 角时, Δx_0 可认为是角度为零时的棱镜法线方向位移。从图4可知,当棱镜旋转时,任一角度法线方向上的位移量为

$$\Delta y_0 = \left(1 - \frac{1}{n} \right) d \alpha = A \alpha; \quad (12)$$

上式是从式(9)变化过来的。其中, $A = \left(1 - \frac{1}{n} \right) d = \text{常数}$ 。很显然, Δy_0 与 α 之间是线性关系(见图5)。

任一角度法线方向上位移量相对 Δx_0 之差为

$$\Delta_i = \Delta M - \Delta x_0 = \left(1 - \frac{\cos \alpha}{n}\right) (1 - \cos \alpha) d_0 \quad (13)$$

从式(13)可知:当 $\alpha=0$, $\Delta_i=0$;而由式(8)得到 $\alpha=0$, $\Delta i'_0 = \Delta x_{00} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) d \neq 0$;表示在 $\alpha=0$ 时,焦点的位移值为恒定的值;实质上式(8)是说明棱镜引起的焦点位移量;式(13)说明棱镜在扫描过程中引起焦点位移的变化量。

不同扫描角引起散焦量变化的曲线,如图6所示。由图6中的曲线簇清楚地看出,散焦量的变化程度与扫描类型、扫描部件的厚度和边数有关。相同的扫描部件,折射式引起的散焦量大于反射式;同一类型的扫描方式,边数多,厚度薄,由扫描角变化引起的散焦量就小。实际上,边数的确定除了考虑上面已提到的情况外,还考虑最大转角在象面引起的复盖范围和转速等其它因素,这里就不一一讨论了。

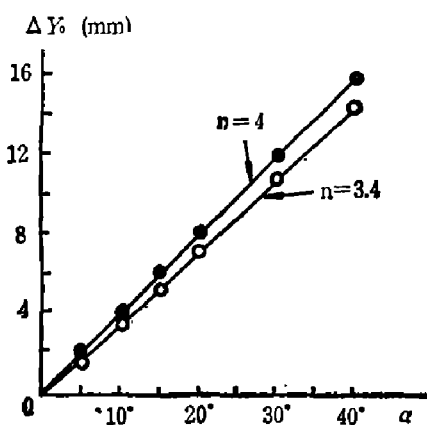


图5 纵向位移与扫描角的关系
Fig. 5 Vertical displacement vs scanning angles

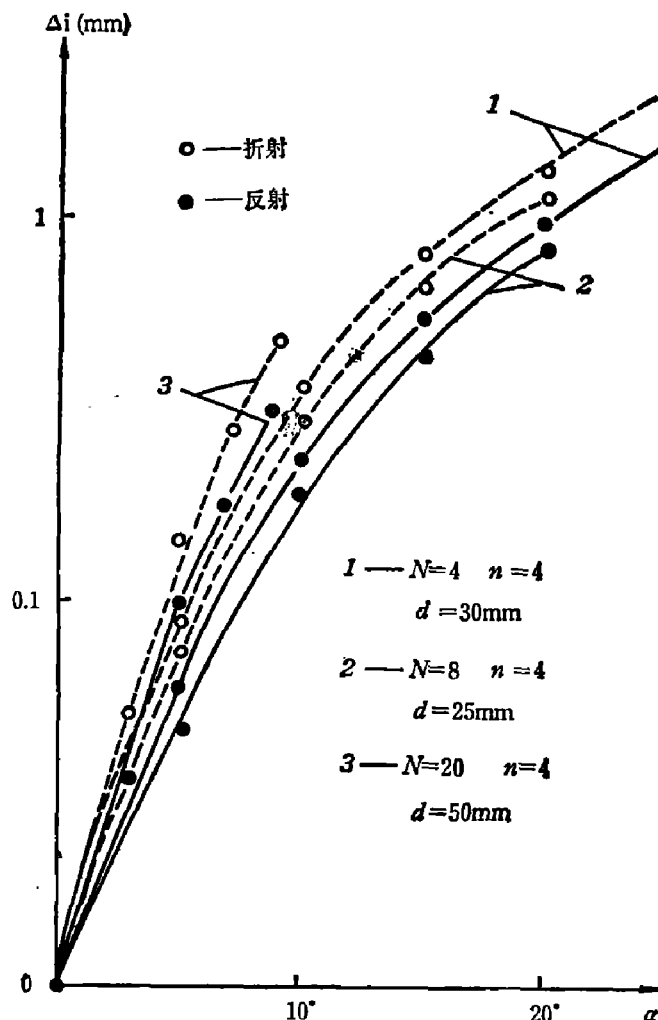


图6 散焦量与扫描角关系曲线
Fig. 6 Focus-out vs scanning angles

四、对系统性能的影响

最小可分辨温差(MRTD)是红外成象系统设计和性能分析的一种有效手段。为了便于讨论,我们将文献[2]中MRTD的表达式简写为

$$MRTD = K_1 (NETD) \cdot \omega; \quad (14)$$

式中, K_1 为原式中与本文讨论内容无关的各参数乘积的统称; $\Delta\omega$ 为系统的空间分辨率。

$$\omega = l_d / F; \quad (15)$$

式中, l_d 为探测器的线度尺寸, F 为光学系统有效焦距。

NETD为系统噪声等效温差,它表示红外成象系统的热灵敏度,类似式(14)的表示方

法, $NETD$ 简写为

$$NETD = K_2 F. \quad (16)$$

当系统有效焦距变化为 ΔF , 且令 $\Delta F = \Delta l$, 系统的热灵敏度变化为

$$(NETD)' = K_2(F + \Delta F) = K_2 F \left(1 + \frac{\Delta F}{F}\right) = NETD \left(1 + \frac{\Delta l}{F}\right). \quad (17)$$

上式还可写为

$$(NETD)' = NETD \left(1 + \frac{l_d}{F} \cdot \frac{\Delta l}{l_d}\right) = NETD(1 + \Delta\omega); \quad (18)$$

式中, $\Delta\omega = \omega \frac{\Delta l}{l_d}$ 。

类似上述方法, 系统空间分辨率变化可写为

$$\omega' = \omega + \Delta\omega = \omega \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega}\right) = \omega \left(1 + \frac{\Delta l}{l_d}\right). \quad (19)$$

将式(18)和式(19)代入式(14), 经变换和整理便得到由于散焦而引起系统 $MRTD$ 变化的表达式为

$$(MRTD)' = (MRTD) \left(1 + \omega \frac{\Delta l}{l_d}\right) \left(1 + \frac{\Delta l}{l_d}\right). \quad (20)$$

式(20)就是我们通过分析推导出的, 能够说明在会聚光束中进行扫描的反射镜鼓或棱镜, 不同扫描角引起散焦量变化对系统性能影响的表达式。

五、结 论

综上所述, 不论是反射镜鼓, 还是用棱镜作扫描部件, 都存在散焦对系统性能的影响。为寻求减小这种影响的方法, 本文导出了计算公式, 经过讨论得出以下结论:

1. 在会聚光束中进行扫描的镜鼓和棱镜, 扫描角 α 的变化会对红外成象系统性能产生不利的影响。其一, 散焦使光学系统象质变坏, 系统接收的辐射能量损失增大, 从而引起系统热灵敏度下降; 其二, 散焦使系统空间分辨率降低, 它表现为 $MRTD$ 值的增加, 这就意味着系统图象象质变坏, 因而使系统对目标的分辨性能变差。

2. 相同尺寸的扫描部件, 折射式的影响大于反射式的影响。

参 考 文 献

- [1] 张君福, 激光与红外, (1980), 2: 44~48.
- [2] Lloyd, J. M., *Thermal imaging Systems*, (1975), 105.

THE EFFECT OF SCANNING DRUM AND PRISM ON PERFORMANCES OF INFRARED IMAGING SYSTEMS

YANG YINGHUI

(Tianjin Institute of Technical Physics)

ABSTRACT

By analysis of the moving trace during scanning for scanning mirror drum and prism, the mathematical expressions are derived of the focus-out for different scanning angles and the effects of change of focus-out on performances of infrared imaging system.