

⑦ 269-275

# 三轴稳定静止气象卫星成像仪二维 光机扫描成像特性分析

孙胜利 陈桂林 史美耀

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

V44  
V474.24

**摘要** 对三轴稳定静止气象卫星成像仪二维驱动下的摆动平面镜、摆动 45°镜两种扫描形式的成像特点进行比较分析, 给出了不同扫描模式下的光轴扫描轨迹和像旋转计算公式, 以及机械扫描与光学扫描角度关系。

**关键词** 三轴稳定静止气象卫星, 二维扫描, 成像仪。

成像特性

## 引言

静止气象卫星一般采取自旋稳定或三轴稳定, 卫星采取不同的稳定形式, 扫描仪的结构也不同. 美国的 GOES1-M 采取三轴稳定, 成像仪采用二维摆镜扫描方式; 印度的三轴稳定卫星 INSAT 和 NASATS-6 卫星上也采取二维扫描镜方案. 考虑到三轴稳定的难度, 欧洲的 MSG(第二代静止气象卫星)采取自旋稳定方案. 三轴稳定有其诸多优点, 发达国家竞相研制, 然而因其难度大不易成功<sup>[1]</sup>. 从各国气象卫星成像仪的发展状况可以看出, 新一代气象卫星必然采取三轴稳定的形式.

## 1 成像数学模型

无论是 GOES1-M 的二维扫描方案还是光机并扫方案, 要考虑把面阵 CCD 加二维光学机械扫描作为一个方案, 首先要考虑各种扫描方式的成像模型及成像特性. 建立正确的成像模型是选择扫描方式和进行数据校正的基础.

整个系统的光学结构原理如图 1 所示. 由面阵 CCD 完成凝视成像, 由步进电机驱动的二维扫描镜完成全视场覆盖.

### 1.1 坐标系

首先建立基准坐标系, 对基准坐标系作如下规定:  $x$  轴指向光线入射方向,  $x$  轴从纸面向外,  $y$  轴使整个坐标系属于右手坐标系. 扫描系统简化如图 2 所示, 摆动平面镜与  $x$  轴的 45°放置, 为研究方便, 定义后光学系统方向为物方, 地面为像方, 同时定义单位矢量为  $\bar{Q} = P_x \bar{i} + P_y \bar{j} + P_z \bar{k}$ , 平面反射摆镜先绕固定的  $\bar{Q}$  轴转动  $\beta$ , 实现南北步进, 再绕与反射镜固定在一起的动坐标系  $z$  轴转动  $\alpha$ , 实现东西扫描. 在成像仪中, 整个光学视场角为  $21^\circ(\text{N/S}) \times 23^\circ(\text{E/W})$ , 有效的成像范围是  $19^\circ(\text{N/S}) \times 20.8^\circ(\text{E/W})$ .

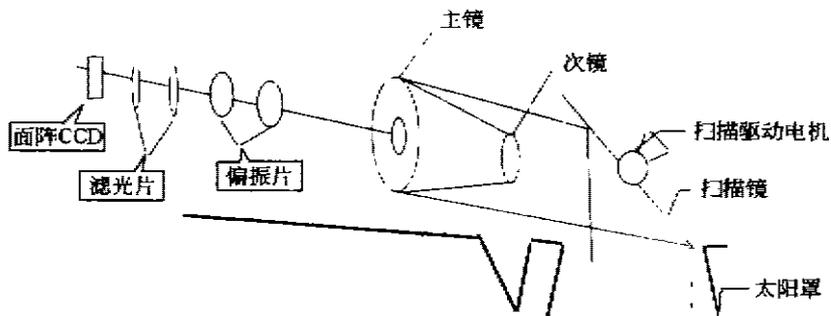


图 1 CCD 成像仪光学系统原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of optical system for CCD imager

1.2 成像公式

定义物矢量为:  $\vec{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}, A_i (i = x, y, z)$

为物矢量在基准坐标系中的坐标.

根据反射棱镜转动定理, 像矢量  $\vec{A}'$  在基准坐标系中的坐标可以按照下面的式子计算<sup>[1]</sup>:

$$\vec{A}' = C \cdot M \cdot C^{-1} \cdot \vec{A}, \quad (1)$$

$$P = CMC^{-1}, \quad (2)$$

式中  $C$  为从动坐标系到定坐标系之间的坐标变换矩阵,  $M$  为基准坐标系下在初始位置反射棱镜的作用矩阵,  $M = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $C^{-1}$  为  $C$  的逆矩阵,

$$C = C_{\vec{Q}} \cdot C_z, \quad (3)$$

式(3)中,  $C_{\vec{Q}}$  为绕  $\vec{Q}$  轴转动后从动坐标系到定坐标系之间的坐标变换矩阵,  $C_z$  为绕  $Z$  轴转动后动坐标系到定坐标系之间的坐标变换矩阵.

$$C_{\vec{Q}} = \begin{bmatrix} \cos\beta + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} & -P_x \sin\beta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\beta}{2} & P_y \sin\beta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\beta}{2} \\ P_x \sin\beta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\beta}{2} & \cos\beta + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} & -P_x \sin\beta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\beta}{2} \\ -P_y \sin\beta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\beta}{2} & P_x \sin\beta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\beta}{2} & \cos\beta + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

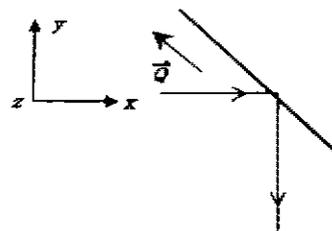


图 2 二维扫描原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of two-dimensional scanning mirror

$$C_x = \begin{vmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

由式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)得到研究二维成像特性及进行几何校正的数学模型. 采用二维扫描, 当转动轴  $\bar{Q}$  不同时, 其光轴的扫描轨迹、像面的旋转特性也是不相同的. 为研究两种

形式下光轴的扫描轨迹、像面的旋转特性, 定义光轴矢量  $\bar{A}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ , 定义物面矢量  $\bar{A}_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ .

与光轴像矢量平行且经过坐标原点的直线在大地平面的交点的轨迹即为光轴的扫描轨迹. 不失一般性, 在  $Y=0$  平面上研究光轴扫描轨迹, 在  $XOZ$  平面内研究像的旋转. 像的旋转角为物面像矢量  $\bar{A}'_y = (A'_{yx}, A'_{yy}, A'_{yz})$  与矢量  $A'_{y0} = (-1, 0, 0)$  的交角. 即  $\tan \delta = A'_{yx} / A'_{yz}$ ,  $\delta$  为旋转角.

## 2 两种扫描形式的成像特性

我们称南北方向绕与光轴成  $45^\circ$  的轴进行的二维扫描为摆动平面镜扫描, 南北方向绕系统光轴进行的二维扫描为摆动  $45^\circ$  镜扫描.

### 2.1 摆动平面镜扫描

对于摆动平面镜,  $\bar{Q} = -\frac{\sqrt{2}}{2}\bar{i} + \frac{\sqrt{2}}{2}\bar{j}$ ,

$$C_{\bar{Q}} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) + \sin\left(\frac{1}{2}\right)^2 & -\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \beta\right)^2 & \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\beta) \\ -\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \beta\right)^2 & \cos(\beta) + \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \beta\right)^2 & \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\beta) \\ \frac{-1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\beta) & \frac{-1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}.$$

由式(1), 得到轴像方矢量的坐标为:

$$x' = \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha)^2 \cdot \sin(\beta)^2,$$

$$y' = \sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 - \cos(2 \cdot \alpha),$$

$$z' = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \cos(\alpha)^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \sin(\beta),$$

光轴的扫描轨迹参数方程为:

$$x = \frac{\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha)^2 \cdot \sin(\beta)^2}{-\sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 + \cos(2 \cdot \alpha)},$$

$$z = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \cos(\alpha)^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \sin(\beta)}{-\sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 + \cos(2 \cdot \alpha)}.$$

A<sub>1</sub>处光轴的扫描轨迹为二次曲线,曲率半径很大,近似直线,在 $\beta=0$ 处,轨迹为直线(见图3).图中 $x, z$ 坐标代表了光轴在 $Y=-1$ 平面上的位置,下面图(4)、图(5)中坐标含义与此相同.

保持入射光线不变,当扫描镜转过 $(\beta, \alpha)$ 角,出射光线南北方向转过的角度为 $\beta'$ :

$$\tan(\beta') = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \cos(\alpha)^2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \cdot \sin(\beta)}{\sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha)};$$

出射光线东西方向转过的角度为 $\alpha'$ :

$$\tan(\alpha') = \frac{\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\beta)^2 + \cos(\alpha)^2 \cdot \sin(\beta)^2}{\sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 - \cos(2 \cdot \alpha)};$$

像的旋转为:

$$\tan(\delta) = \frac{A'_{yz}}{A'_{xz}} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \sin(\beta)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot \cos(\alpha)^2}{\sin(\beta)^2 \cdot \cos(\alpha)^2 - \cos(2 \cdot \alpha)}.$$

$\delta$ 为像的旋转角.  $A'_{yz}, A'_{xz}$ 分别为对应物面矢量的像矢量 $x, z$ 坐标像旋转(倾斜)是扫描角度的函数. 在 $\alpha=0, \beta=0$ 处像无旋转,在 $\alpha=0, \beta \neq 0$ 处像旋转为:

$$\tan(\delta) = -\sqrt{2} \cdot \tan(\beta).$$

在有效的成像范围内,当 $\alpha$ 在正的最大值、 $\beta$ 在正反摆动边缘时,像旋转角最大.

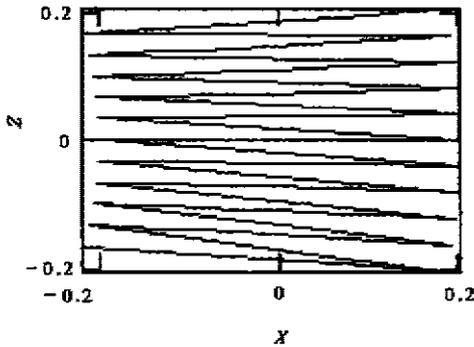


图3 摆动平面镜光轴扫描轨迹  
Fig. 3 The scanning trace of planar oscillating mirror's optical axis

## 2.2 摆动45°镜

所谓摆动45°镜是由旋转45°反射镜而来,即与光轴成45°的平面反射镜绕 $\bar{A}'$ 轴( $\bar{Q}=\bar{j}$ )或 $x$ 轴( $A'_{yz}, A'_{xz}$ )进行有限角度(并非360°)摆动,从而进行南北扫描.例如GOES-8即采用了这种方式.下面分别讨论其成像特性.

### 2.2.1 绕 $y$ 轴进行南北扫描

$$\text{这时 } \bar{Q}=\bar{j}, C_{\bar{Q}} = \begin{vmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{vmatrix}$$

由式(1),得东西方向(固定某 $\beta$ ,连续东西步进 $\alpha$ 角)光轴轨迹的参数方程为:

$$x(\alpha) = \frac{\cos(\beta)^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) + \sin(\beta)^2}{\cos(\beta) \cdot \cos(2 \cdot \alpha)},$$

$$z(\alpha) = \frac{-\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \sin(\beta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\beta)}{\cos(\beta) \cdot \cos(2 \cdot \alpha)};$$

东西方向光轴轨迹如图4.由图4可见, $\beta \neq 0$ 处光轴的扫描轨迹为二次曲线,在 $\beta=0$

处,轨迹为直线.

保持入射光线不变,当扫描镜转过 $(\beta, \alpha)$ 角,出射光线南北方向转过的角度为 $\beta'$ :

$$\tan(\beta') = \frac{-\sin(2 \cdot \alpha) \cdot \sin(\beta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\beta)}{-\cos(\beta) \cdot \cos(2 \cdot \alpha)};$$

出射光线东西方向转过的角度为 $\alpha'$ :

$$\tan(\alpha') = \frac{\cos(\beta)^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) + \sin(\beta)^2}{-\cos(\beta) \cdot \cos(2 \cdot \alpha)};$$

像的旋转为

$$\tan(\delta) = \frac{A'_{yz}}{A'_{yx}} = -\tan(\beta).$$

像的旋转与东西扫描位置无关,像元的旋转角等于南北摆动角 $\beta$ ,与摆动角方向相同.当 $\beta$ 在正反摆动边缘时,像的旋转角最大.

### 2.2.2 绕 $x$ 轴进行南北扫描

$$\text{这时 } \vec{Q} = \vec{i}, C_{\vec{Q}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{vmatrix}$$

光轴东西方向扫描轨迹的参数方程为:

$$x(\alpha) = \frac{\tan(2\alpha)}{\cos(\beta)},$$

$$z(\alpha) = -\tan(\beta).$$

光轴东西方向扫描轨迹如图5所示.光轴的东西扫描轨迹为直线.这是对系统进行几何校正很有利的特性.

保持入射光线不变,当扫描镜转过 $(\beta, \alpha)$ 角,出射光线南北方向转过的角度为 $\beta'$ :

$$\tan(\beta') = \tan(\beta),$$

出射光线东西方向转过的角度为 $\alpha'$ :

$$\tan(\alpha') = \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{-\cos(2 \cdot \alpha) \cdot \cos(\beta)},$$

像的旋转为:

$$\tan(\delta) = -\frac{\sin(\beta) \cdot \sin(2 \cdot \alpha) + \sin(\beta)}{\cos(2 \cdot \alpha)}.$$

在 $\alpha=0, \beta=0$ 处无旋转,在 $\alpha=0, \beta \neq 0$ 处像旋转为:

$$\tan \delta = -\sin(\beta),$$

当 $\alpha$ 在正的最大值、 $\beta$ 在正反摆动边缘时,像旋转角最大.

### 2.3 比较分析

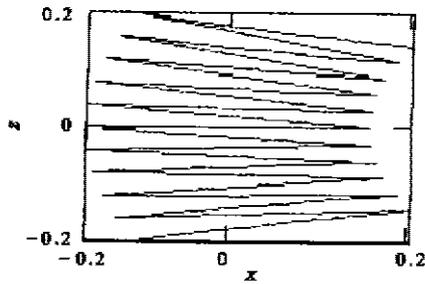


图4 摆动45°镜(绕y轴)光轴东西轨迹  
Fig. 4 The scanning trace of 45° mirror's optical axis (enclosing y axis)

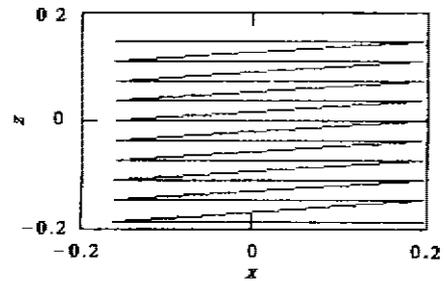


图5 摆动45°镜(绕x轴)光轴东西扫描轨迹  
Fig. 5 The scanning trace of 45° mirror's optical axis(enclosing x axis)

为了便于比较分析,利用上面的计算公式,对平面摆镜和摆动45°镜的有关成像特性参数进行计算,得到如表1所示的数据.由表1中的数据可见,摆动平面镜东西摆动5.67°,南北摆动7.376°,即可以完成整个光学视场角为21°(N/S)×23°(E/W)的全视场覆盖,并有最小的像旋转.

表1 平面摆镜和摆动45°镜的成像特性参数  
Table 1 The imaging characteristics of planar oscillating mirror and the 45° mirror

| 摆动形式       |           | 最大摆动角度           |                   | 最大旋转角        |
|------------|-----------|------------------|-------------------|--------------|
|            |           | $\beta$ (南北)/(°) | $\alpha$ (东西)/(°) | $\delta$ (°) |
| 平面摆镜       |           | 7.376            | 5.67              | 11.499       |
| 摆动<br>45°镜 | 绕y轴进行南北扫描 | 12.586           | 4.489             | 12.586       |
|            | 绕x轴进行南北扫描 | 10.5             | 5.565             | 12.49        |

在一维扫描情况下,摆动平面镜不会造成像的旋转,45°镜则会带来像的旋转.而在二维扫描方式下,平面摆动扫描和45°扫描都会带来像面的旋转,但像面的旋转情况并不相同,可以通过选择合适的步进角度来达到图像最佳匹配.无论采用哪一种扫描方式,都需要加以校正.例如在GOES-8上面,由于采用的是多元探测器,因此在地面处理系统中加以校正<sup>[2]</sup>.采用摆动扫描可以提高扫描效率,但造成扫描镜尺寸加大,用冷空间作辐射基准困难大,45°镜相对摆镜尺寸小,尽管由于45°安装,存在较大的静平衡和动平衡问题,但实践证明此问题能解决得很好.像面的旋转带来很大的校正工作量,可以加像消旋器以降低校正工作量,但如此必会造成系统庞大,降低可靠性.在小的旋转角下,可以通过过采样的办法来实现旋转图像的数值校正.

另外,由表1中的数据也可以看出,不同的扫描模式下,机械扫描角度与光学扫描角度也并非简单的二倍角关系,机械扫描角度与光学扫描角度之间简单的二倍角关系只是一种近似结论,这是在设计扫描镜结构时应该注意的.

### 3 结语

本文以矩阵为工具,对三轴稳定静止气象卫星成像仪二维驱动下的摆动平面镜、摆动

45°镜两种扫描形式的成像特点进行比较分析,给出了不同扫描模式下的光轴扫描轨迹和像旋转计算公式,得出了摆动平面镜具有最小的摆动角和最小的像旋转的结论.文中的有关结果已经应用到静止气象卫星 CCD 成像仪中,确定了二维扫描驱动方案,获得了较好的效果.

#### REFERENCES

- 1 *GOES I-M Data Books*, National Aeronautics and Space Administration, 1996, 3~12, 20~36
- 2 CHI Ze-Ying, *Applied Optics*, Nanjing: East China Industry Institute Press (迟泽英, 应用光学, 南京:华东工业学院出版社), 1994, 80~120

### ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL GIMBALED MIRROR IMAGING CHARACTERISTICS FOR IMAGING SYSTEM ON THE THREE-AXIS STABILIZED OPERATIONAL METEOROLOGICAL SATELLITE

SUN Sheng-Li CHEN Gui-Lin SHI Mei-Yao

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of  
Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The imaging characteristics of the planar oscillating mirror and the 45° mirror under two-axis gimbaled driving system were analyzed and compared. The scanning traces of optical axis and the equations of image rotation were given for different scan mode. The relationship between optical scan and mechanical scan was presented meanwhile.

**Key words** geostationary three-axis stabilized-body operational meteorological satellite, two-dimensional gimbaled scan, imager.