

航空遥感器扫描反射镜与窗口尺寸的计算与分析

聂品 田海英 张景国 董斌 张健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:航空遥感器扫描反射镜按照给定的速度旋转, 补偿飞行器运动以及姿态变化引起的像移, 为此需要确定补偿后反射镜的大小、航空遥感器窗口的位置与大小。运用光学反射矢量的基本理论, 给出扫描反射镜的反作用矩阵, 补偿后光线矢量间的关系; 通过推导建立扫描反射镜转轴位置与反射镜大小、窗口位置及大小的理论计算公式; 以实际遥感器的工作参数为条件对结果进行计算和分析。实例计算表明理论公式计算简便, 不仅在遥感器设计时用于计算反射镜与窗口的尺寸及位置, 还可作为具有相似反射镜结构的其他系统的计算依据与基础。

关键词:航空遥感器; 扫描反射镜; 旋转轴

中图分类号: TH761 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.016

Calculation and analysis of the dimensions of aerial sensor's scanning mirror and window

NIE Pin, TIAN Hai-ying, ZHANG Jing-guo, DONG Bin, ZHANG Jian

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to compensate the image motion created by the movement and gesture of aircraft, scanning mirror of aerial sensors is designed to rotate at a given velocity. A practical design about the position and dimensions of the scanning mirror and the window is given in this paper. Based on the vector theory of optical reflection, the scanning mirror's reflection matrix and the relation between the ray vectors are given. The relation between window's characters and the position of scanning mirror's rotation center is also given. The results are analyzed and studied. It shows that the derived formulations can be used to the developed aerial sensor and other similar systems.

Key words: aerial sensor; scanning mirror; rotating center

1 引言

航空遥感器扫描反射镜主要有两个作用^[1], 一是将光路折转 90°, 满足安装空间要求; 二是控制反射镜按照给定的速度转动, 补偿飞行器的前向运动、俯仰及偏航所引起的像移, 保证成像质量。

反射镜转轴位置的基本要求是通过反射镜组件的质心, 保证反射镜的静态与动态平衡。对于光学反射镜而言, 常采用背部三点支撑、中心支撑、侧面支撑等^[2-3], 由于结构和安装空间的约束, 无论哪种固定方式, 在满足基本要求的前提下, 反射镜转轴位置一般难以通过系统光轴与反射镜面的交点。为此推导转轴位置与遥感器窗口和反射镜尺寸的理论计算结果, 通过实例分析转轴位置对遥感器窗口的影响。

2 工作原理

摆扫型航空遥感器的工作原理如图 1 所示。

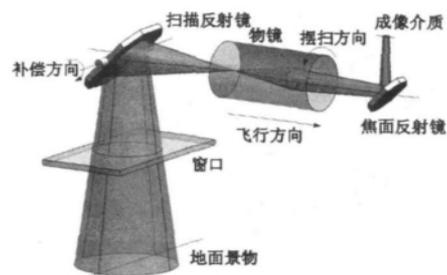


图1 航空遥感器工作原理

Fig. 1 principle of aerial sensor

作者简介: 聂品(1981-), 男, 主要从事航空相机结构设计方面的研究。E-mail: np0618@126.com

收稿日期: 2011-05-20; 修订日期: 2011-06-16

地面景物通过传感器窗口、扫描反射镜、照相物镜、焦面反射镜成像在感光介质上。照相物镜与飞行方向平行 摆扫方向与飞行方向垂直 整个光学系统都绕传感器的转轴旋转 实现对地面景物的摆扫成像。

为了补偿飞行器姿态变化产生的各种像移 扫描反射镜的旋转速度为:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{H} \sin \theta_s - \omega_p \sin \theta_s - \omega_y \cos \theta_s \right) \quad (1)$$

式中 V/H 为速高比; ω 为镜头扫描角速度; ω_p 为俯仰角速度; ω_y 为偏航角速度; θ_s 为扫描角。

扫描反射镜的旋转角度:

$$\theta = \int_0^t \omega dt = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{V}{H} \sin \theta_s dt \quad (2)$$

3 光学反射矢量理论

由光学反射矢量基本理论,如图2所示平面镜的法线方向为 $N = (N_x, N_y, N_z)$, 入射光线矢量 $A = (A_x, A_y, A_z)$, 经平面镜反射后的矢量公式^[4-5]可以表达为:

$$S_{P\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_z \sin \theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_y \sin \theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ P_z \sin \theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos \theta + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_x \sin \theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ -P_y \sin \theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_x \sin \theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos \theta + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

若 P 与 Z 轴重合 转动矩阵可写成:

$$S_{P\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(4)与式(6)可得法线矢量 $N' = [\sin(\theta + \pi/4), \sin(\theta - \pi/4), \rho]^T$, 代入式(3), 可得扫描反射镜的反射作用矩阵:

$$R_\theta = \begin{bmatrix} -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)与式(3)即可确定任意入射光线矢量经扫描反射镜后的出射光线矢量。

4 扫描反射镜光线分析

扫描反射镜简化模型如图3所示, X 轴为光轴, 并与传感器的转轴重合, 原点 O 为光轴与镜面的交点 $R(x_0, y_0)$ 为反射镜的转轴中心, θ^I, θ^{II} 为补偿角度 H 为窗口距光轴的距离, I, I^I, I^{II} 分别为反射镜初始及补偿后的位置。

$$A' = R \cdot A$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_x N_y & -2N_x N_z \\ -2N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_y N_z \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

R 代表反射作用矩阵^[6]。

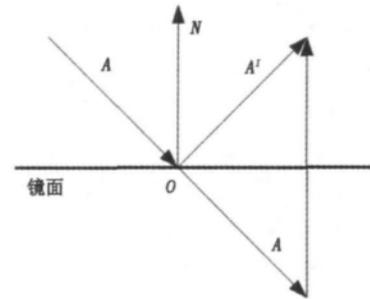


图2 镜面反射矢量图

Fig.2 mirror reflection vector

矢量 $N = [\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, \rho]^T$ 绕转轴单位矢量 P 转动一角度 θ 成为矢量 N' 写成矩阵形式:

$$N' = S_{P\theta} \cdot N \quad (4)$$

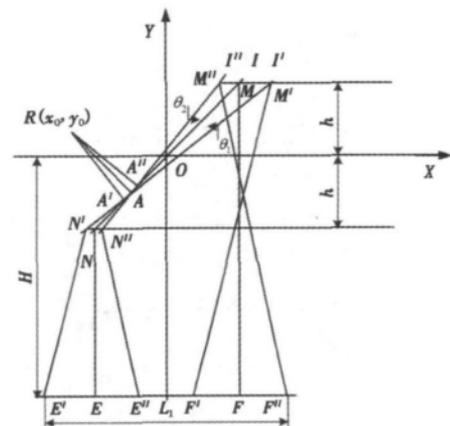


图3 扫描反射镜模型

Fig.3 model of scanning mirror

反射光线矢量分别为 $N^I, N^{II} = M^{II} M^I = [1, \rho, 0]^T$, 当扫描反射镜补偿像移而转过角度 θ^I 到达 I^I 位置时, 由式(4)与式(7)可以确定矢量 E^I, N^I, F^I, M^I :

$$E^I, N^I = F^I, M^I = [\sin 2\theta^I, \cos 2\theta^I, \rho]^T \quad (8)$$

由点 $A^I(x_A^I, y_A^I)$ 求出点 $M^I(x_M^I, y_M^I), N^I(x_N^I, y_N^I)$ 。

其中:

$$x'_A = x_0 + \frac{1}{2}(\cos\theta' - \sin\theta')|y_0 - x_0|$$

$$y'_A = y_0 - \frac{1}{2}(\cos\theta' + \sin\theta')|y_0 - x_0|$$

$$x'_M = \cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta'\right)(h - y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta'\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

$$y'_M = h$$

$$x'_N = -\cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta'\right)(h + y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta'\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

$$y'_N = -h$$

所以,反射镜尺寸 L 为:

$$L = |M'N'| = 2h\sqrt{1 + \cot^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta'\right)} \quad (9)$$

可见扫描反射镜尺寸与转轴位置无关,只与补偿角度 θ' 通光孔径 h 有关。

由式(8)及 N' 求出 $E'(x'_E, H)$ 其中 $x'_E = \tan 2\theta' \cdot$

$$L_1 = |E'F''| = \left| \frac{\sin 2\theta' \cdot H - h - (1 + \sin 2\theta')y_0 + (\cos\theta' + \sin\theta')|y_0 - x_0| + x_0 \cos 2\theta'}{\cos 2\theta'} \right| + \left| \frac{\sin 2\theta'' \cdot H + h - (1 + \sin 2\theta'')y_0 + (\cos\theta'' + \sin\theta'')|y_0 - x_0| + x_0 \cos 2\theta''}{\cos 2\theta''} \right| \quad (11)$$

式(11)确定了传感器窗口大小与扫描反射镜转轴位置之间的计算公式,窗口另外一个方向尺寸由相机光轴允许倾角 β 决定:

$$L_2 = 2 \times (H \cdot \tan\beta + h) \quad (12)$$

5 扫描反射镜转轴位置对窗口的影响分析

以某航空传感器为例,参数选取如下 $\theta' = 5^\circ$, $\theta'' = -4^\circ$, $H = -260$ mm, $h = 51.3$ mm。取反射镜转轴位置为变量,取值范围为 $-10 < x_0 < 10$, $-10 < y_0 < 10$,代入式(11)可得窗口尺寸随转轴位置变化关系如图4所示。

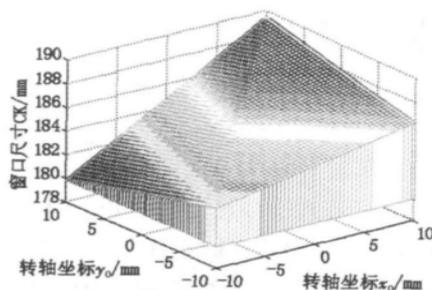


图4 窗口尺寸与转轴位置关系

Fig.4 relation between window's dimension and scanning mirror's rotation center

$(H + h) + x'_N$ 。

同理,当扫描反射镜补偿飞机俯仰等姿态变化而转过角度 θ'' 到达 I'' 位置时,由式(7)可以确定矢量 $E''N''$, $F''M''$:

$$E''N'' = F''M'' = [\sin 2\theta'', \cos 2\theta'', \rho]^T \quad (10)$$

由点 $A''(x''_A, y''_A)$ 可以求出点 $M''(x''_M, y''_M)$, $N''(x''_N, y''_N)$ 。

其中:

$$x''_M = \cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)(h - y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

$$y''_M = h$$

$$x''_N = -\cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)(h + y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

$$y''_N = -h$$

$$x''_M = \cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)(h - y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

$$y''_M = h$$

$$x''_N = -\cot\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)(h + y_0) + \frac{\sqrt{2}}{2}\sec\left(\frac{\pi}{4} - \theta''\right)|y_0 - x_0| + x_0$$

由式(10)及 M'' 可以得到 $F''(x''_F, H)$ 其中 $x''_F = \tan 2\theta''(H - h) + x''_M$,故窗口大小为:

由图4可知,① $10 > y_0 > x_0 > -10$,窗口尺寸随 x_0 的增大而增大,随 y_0 的增大而减小;② $-10 < y_0 \leq x_0 < 10$,窗口尺寸随 x_0 的增大而增大,随 y_0 的增大而增大。

6 结论

考虑扫描反射镜质量要求,安装方式,空间约束以及配重形式,取反射镜转轴位置 $x_0 = -10$, $y_0 = 7$,倾角 $\beta = 30^\circ$,代入式(11)与式(12)中求得窗口尺寸为 215 mm \times 402.8 mm,将参数代入式(9)求得反射镜尺寸为 159.2 mm。利用理论公式快速计算反射镜与窗口的尺寸,分析结果可以作为选择反射镜转轴的参考。

参考文献:

[1] 耿立中,安文化,朱涛,等. KA-112A 全景式航空相机[M]. 空军司令部情报司,1988.
 [2] Fu Yun, Xu Changji, Ding Yalin. Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(6): 550-554. (in Chinese)
 付芸,徐长吉,丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑

- 技术[J]. 光学 精密工程 2003 ,11(6) : 550 - 554.
- [3] Shao Jun. Investigation on supporting structure of spacial reflector[J]. Infrared ,2006 ,27(4) : 36 - 41. (in Chinese)
邵君. 空间反射镜支撑结构要就概述 [J]. 红外 , 2006 , 27(4) : 36 - 41.
- [4] Lian Tongshu. Conjugate theory of reflective prism [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press ,1988. (in Chinese)
连铜淑. 反射镜共轭理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社 ,1988.
- [5] Huang Yinguo ,Lin Yuchi ,Wang Wei ,et al. Research on the model of photoelectric auto-collimating system based on vector operation [J]. Laser & Infrared 2009 ,39(10) : 1086 - 1090. (in Chinese)
黄银国 林玉池 王为 等. 基于矢量运算的光电自准直系统建模研究[J]. 激光与红外 2009 ,39(10) : 1086 - 1090.
- [6] Xu Yongsen ,Ding Yalin ,Tian Haiying. Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17(2) : 453 - 459. (in Chinese)
徐永森 ,丁亚林 ,田海英 ,等. 推扫式航空传感器像移补偿精度分析 [J]. 光学 精密工程 2009 ,17(2) : 453 - 459.