

# 航空光电侦察平台内藏式扫描系统像旋分析及补偿

王 平<sup>1</sup>, 田大鹏<sup>1,2</sup>, 徐 宁<sup>1</sup>, 徐迪孟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 为了解决传统光电侦察平台外露球形结构增大飞机雷达散射截面的问题, 提出一种采取双反射镜绕俯仰轴和方位轴旋转实现大角度扫描的方法, 该扫描方式的外露尺寸小, 可与载机进行共形设计以保证飞机隐身性能。基于光反射矢量理论, 对扫描系统成像特性进行了研究, 对双反射镜绕俯仰轴和方位轴旋转所产生的像旋进行了定量分析, 得出了像旋角大小和方向与双反射镜旋转角度和方向的确切关系, 并以此作为像旋补偿的理论依据, 提出一种通过控制消旋棱镜消除像旋的双向控制方法, 实现扫描镜与消旋机构的严格协同运动。通过成像实验进行了验证, 消除了所产生的像旋, 计算可得消旋精度均方根值小于  $8'$ , 实现了较高精度光学消像旋。

**关键词** 几何光学; 像旋补偿; 内藏式扫描系统; 隐身性能

**中图分类号** V241.02 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0908001

## Analysis and Compensation of Image Rotation in Internally Mounted Scanning System for Aerial Electric-Optical Reconnaissance Platform

Wang Ping<sup>1</sup>, Tian Dapeng<sup>1,2</sup>, Xu Ning<sup>1</sup>, Xu Dimeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** To solve the problem that the traditional electric-optical reconnaissance platform which is the exposed spherical structure increases the radar cross section of airplane dramatically, we propose a method using double reflectors rotating along the pitch axis and the azimuth axis to achieve wide-angle scanning. The conformal design with aircraft can be realized because of the small exposed size of this structure, and the cloaking performance of the aircraft is ensured. Based on the light reflection vector theory, we firstly study the imaging characteristics of the scanning system, and quantitatively analyze image rotation induced by the two reflectors rotating along the pitch axis and azimuth axis. The exact relationship between the degree and direction of the image rotation angle and the rotation angle and direction of the two reflectors is concluded. According to the above image rotation compensation theory, a bilateral control technique to eliminate the image rotation is put forward when the image de-rotation prism is controlled, and exactly cooperative motion of the scanning mirror and the de-rotation structure can be realized. Finally, imaging experiments are carried out to validate the proposed technique, and the results indicate that the image rotation is eliminated after de-rotation and high-precision optical image despun with root mean square less than  $8'$  is achieved.

**Key words** geometric optics; compensation of image rotation; internally mounted scanning system; cloaking performance

**OCIS codes** 080.4035; 080.2740

**收稿日期:** 2017-03-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-23

**基金项目:** 中国科学院长春光学精密机械研究所重大创新项目(Y3CX1SS14C)、中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-14-S123)

**作者简介:** 王 平(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事机载光电平台光机总体设计方面的研究。

E-mail: 13039114283@163.com

## 1 引言

现代战争中为保证战机在日益复杂的战场环境下取得作战优势,战机隐身性能至关重要。根据雷达距离公式,雷达探测距离与目标雷达散射截面(RCS)的4次方根成正比,即目标RCS下降1/10时雷达探测距离降低一半左右<sup>[1-4]</sup>,所以对于隐身飞机来说,要尽可能地消除飞机表面各种突出物、鼓包,以最大限度地减小作战飞机的RCS。由于隐身技术的运用,雷达的效能明显下降,空战中光电系统的作用显著增强。传统机载光电侦察系统多为球形结构,工作时必须将球体伸出机身外进行侦察,这种鼓包物会大大增加飞机的RCS,严重影响飞机隐身性能。为满足飞机隐身性能要求,提出一种采取两个反射镜绕俯仰轴和方位轴旋转的方法实现大角度扫描,以此实现光电侦察系统内藏式设计,从而保证飞机隐身性能。采用两个前置45°反射镜实现大角度扫描,由于外露尺寸小,因而能满足隐身要求,但该扫描方式会造成物方反射像方向的改变,使像面旋转,严重影响成像质量及跟踪精度,因此必须进行消旋控制。

消除像旋一般有图像消像旋、光学消像旋两种方法。图像消旋是采用数字图像处理的方法对图像传感器所拍图像进行旋转,通过精确给出旋转后图像与原图像的坐标转换关系实现图像消旋<sup>[5-6]</sup>。由于图像消旋算法不可避免地会引起能量损失,一般情况下不予采用。光学消旋是利用道威棱镜或K镜保持转角为像旋角的一半,从而消除像旋<sup>[7-8]</sup>,或者不使用消旋棱镜而直接转动CCD或CMOS等探测器组件,使探测器组件的角位置、角速度与扫描镜的扫描运动同步,从而消除像旋<sup>[9]</sup>。由于光电侦察系统包含可见光、红外、1.06  $\mu\text{m}$ 多个谱段,若选择旋转探测器方案,则必须采用3个旋转组件,这会导致系统体积大、可靠性差,所以不采用。K镜消像旋是采用3个反射镜排成K形进行光路旋转,在较小视场下光学配准困难,并且体积较大,一般不用于航空领域对体积、重量要求严格的场合。经过分析,在可见光、红外、1.06  $\mu\text{m}$ 激光共光路中设置一个道威棱镜进行消旋是最优方案,一方面光束经过前置望远系统缩束后口径较小,道威棱镜尺寸小,便于加工、装调,另一方面放置一个消旋棱镜可实现可见光、红外、1.06  $\mu\text{m}$ 三个谱段同时消除像旋,有利于缩小系统体积。

## 2 扫描系统像旋特性分析

扫描结构如图1所示,反射镜1绕水平轴旋转实现俯仰大角度扫描,反射镜1和2整体绕方位轴旋转实现方位大角度扫描。这种扫描结构只需露出反射镜通光口径部分,外露尺寸很小,可大大减小飞机RCS。根据最大探测距离与目标RCS的4次方根成正比的关系,原球形光电侦察平台鼻锥方向的RCS初始值为

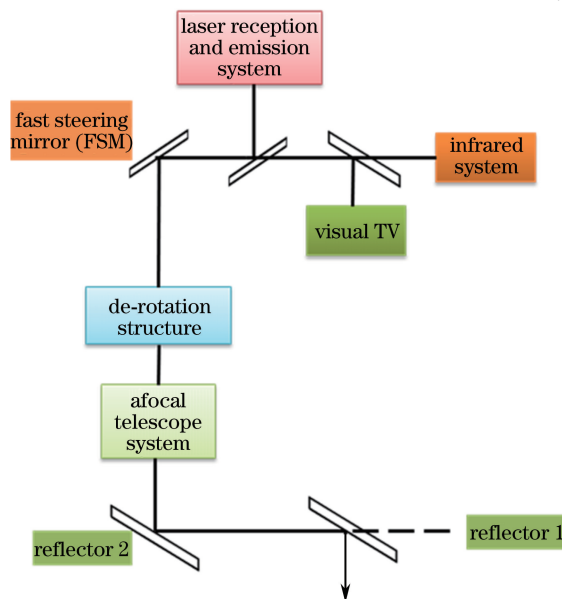


图1 光电侦察系统内藏式扫描结构

Fig. 1 Internally mounted scanning structure in electric-optical reconnaissance system

1 m<sup>2</sup>, 采用内藏式扫描结构使 RCS 降低 10 dB, 即达到 0.1 m<sup>2</sup>, 则雷达的探测距离将缩短到原来的 56%。由此可见, 与传统球形光电平台相比, 内藏式扫描结构光电侦察系统大大提高了飞机的隐身性能。

内藏式扫描系统扫描时会造成物方反射像的方向发生改变, 使像面旋转, 像旋会使成像在探测器靶面的图像发生像移, 影响成像质量和跟踪精度, 因此必须消除像旋。

为定量分析扫描系统的成像特性, 需要用到两个重要公式<sup>[10]</sup>, 即镜面反射作用表达式和矢量转动公式。镜面反射作用的解析表达式为

$$\mathbf{A}_1 = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}\mathbf{N}^T)\mathbf{A}_0 = \mathbf{R}\mathbf{A}_0, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{A}_0$  为入射光线矢量,  $\mathbf{A}_1$  为出射光线矢量,  $\mathbf{E}$  为单位矩阵矢量,  $\mathbf{N}$  为反射镜法线方向的单位矢量。

设  $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^T$ , 代入(1)式, 则有

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{R}$  为光矢量的反射矩阵。

矢量  $\mathbf{B}$  绕转轴单位矢量  $\mathbf{P}$  转动角度  $\xi$  成为矢量  $\mathbf{B}'$ , 即

$$\mathbf{B}' = \mathbf{S}_{P\xi}\mathbf{B}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{S}_{P\xi}$  为矢量  $\mathbf{B}'$  绕  $\mathbf{P}$  转动角度  $\xi$  的转动矩阵。设  $\mathbf{P} = [P_x, P_y, P_z]^T$ , 则

$$\mathbf{S}_{P\xi} = \begin{pmatrix} \cos \xi + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} & -P_z \sin \xi + 2P_xP_y \sin^2 \frac{\xi}{2} & P_y \sin \xi + 2P_xP_z \sin^2 \frac{\xi}{2} \\ P_z \sin \xi + 2P_xP_y \sin^2 \frac{\xi}{2} & \cos \xi + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} & -P_x \sin \xi + 2P_yP_z \sin^2 \frac{\xi}{2} \\ -P_y \sin \xi + 2P_xP_z \sin^2 \frac{\xi}{2} & P_x \sin \xi + 2P_yP_z \sin^2 \frac{\xi}{2} & \cos \xi + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\xi$  为角度, 其正负号由右手法则确定。

下面分析地面物体在焦平面上所成的像在两个反射镜同时对地扫描时的运动规律。如图 2 所示, 在扫描反射镜覆盖范围内的任一物体  $OA$  经过反射镜 1 和反射镜 2 在焦面上所成的像为  $O'A'$ , 物、像空间坐标系  $xyz, x'y'z'$  一致。反射镜 1 的单位法线矢量为

$$\mathbf{N}_0 = [\sin 45^\circ, 0, \cos 45^\circ]^T = \left[ \frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} \right]^T. \quad (5)$$

反射镜 2 的单位法线矢量为

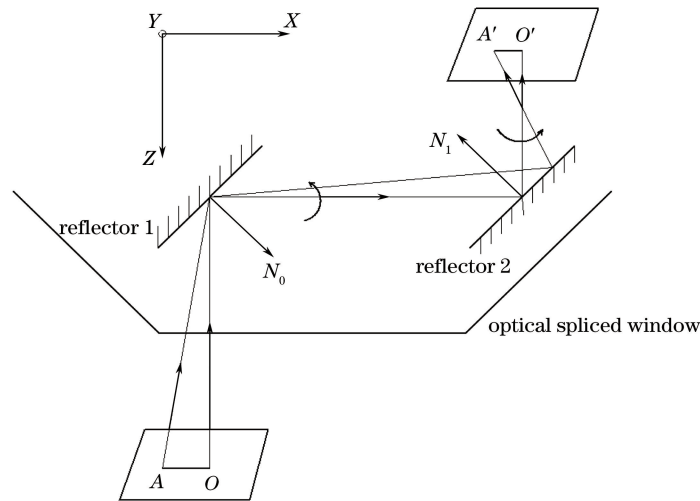


图 2 扫描反射镜成像示意图

Fig. 2 Imaging schematic of the scanning reflectors

$$\mathbf{N}_1 = [-\sin 45^\circ, 0, -\cos 45^\circ]^T = \left[ -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right]^T. \quad (6)$$

当反射镜 1 和反射镜 2 没有发生转动时,

$$\mathbf{A} = [x_0, y_0, 0]^T. \quad (7)$$

经过反射镜 1 后,

$$\mathbf{A}' = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_0\mathbf{N}_0^T) [x_0, y_0, 0]^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_0 \\ -x_0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

经过反射镜 2 后,

$$\mathbf{A}'' = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_1\mathbf{N}_1^T) [0, y_0, -x_0]^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y_0 \\ -x_0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

当反射镜 1 绕  $x$  轴转过角度  $\theta$  时,

$$\mathbf{S}_{x,\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (10)$$

则

$$\mathbf{A}_\theta = \mathbf{S}_{x,\theta}\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \cos \theta \\ y_0 \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{N}'_0 = \mathbf{S}_{x,\theta}\mathbf{N}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{A}'_\theta = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_1\mathbf{N}_1^T)(\mathbf{E} - 2\mathbf{N}'_0\mathbf{N}'_0{}^T)\mathbf{A}_\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \cos \theta \\ y_0 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (13)$$

计算可得

$$\mathbf{A}'_\theta = \begin{pmatrix} x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta \\ x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

对比  $\mathbf{A}'_\theta$  及  $\mathbf{A}''$ , 设  $\mathbf{M}\mathbf{A}'' = \mathbf{A}'_\theta$ ,  $\mathbf{M}$  为  $\mathbf{A}''$  与  $\mathbf{A}'_\theta$  的转换矩阵,

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

由此可见反射镜 1 绕  $x$  轴转过角度  $\theta$  时造成像绕焦面坐标系  $x'y'z'$  的  $z'$  轴相应旋转角度  $\theta$ 。

当反射镜 2 绕  $z'$  轴旋转  $\alpha$  角时,

$$\mathbf{S}_{z',\alpha} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{N}'_1 = \mathbf{S}_{z',\alpha} \mathbf{N}_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \alpha \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

反射镜 1 旋转角度  $\theta$  后的入射光矢量为

$$\mathbf{A}_\theta = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}'_1 \mathbf{N}'_1{}^T) \mathbf{A}_\theta = \begin{pmatrix} 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \cos \theta \\ y_0 \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta \\ -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (18)$$

反射镜 2 绕  $z'$  轴旋转角度  $\alpha$  后,

$$\mathbf{A}'_\alpha = \mathbf{S}_{z',\alpha} \mathbf{A}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ x_0 \sin \theta + y_0 \cos \theta \\ -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_0 \sin \alpha \sin \theta - y_0 \sin \alpha \cos \theta \\ x_0 \cos \alpha \sin \theta + y_0 \cos \alpha \cos \theta \\ -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (19)$$

则

$$\mathbf{A}''_\alpha = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}'_1 \mathbf{N}'_1{}^T) \mathbf{A}'_\alpha = \begin{pmatrix} \sin^2 \alpha & -\sin \alpha \cos \alpha & -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha & -\sin \alpha \\ -\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -x_0 \sin \alpha \sin \theta - y_0 \sin \alpha \cos \theta \\ x_0 \cos \alpha \sin \theta + y_0 \cos \alpha \cos \theta \\ -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (20)$$

计算可得

$$\mathbf{A}''_\alpha = \begin{pmatrix} x_0 \cos(\alpha + \theta) - y_0 \sin(\alpha + \theta) \\ x_0 \sin(\alpha + \theta) + y_0 \cos(\alpha + \theta) \\ -x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (21)$$

设  $\mathbf{M} \mathbf{A}'' = \mathbf{A}''$ ,  $\mathbf{A}'' = (x_0, y_0, 0)$ , 则

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \theta) & -\sin(\alpha + \theta) & 0 \\ \sin(\alpha + \theta) & \cos(\alpha + \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

可见, 反射镜绕  $x$  轴转过角度  $\theta$ 、反射镜 2 绕  $z'$  轴旋转角度  $\alpha$  时, 像在焦面坐标系绕  $z'$  轴相应旋转  $\alpha + \theta$ , 其中  $\alpha, \theta$  的正负与反射镜 1、2 的旋转方向有关。  $\mathbf{A}''_\alpha$  的矢量方向如图 3 所示。

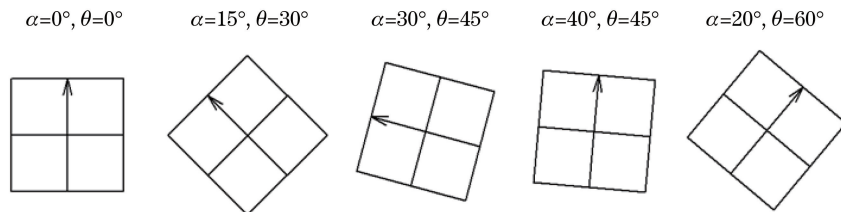


图 3 像矢量旋转示意图

Fig. 3 Diagram of image vector rotation

由上述分析可得, 扫描系统对地扫描会造成反射像旋转, 这种旋转相对于扫描反射镜旋转同时、同步旋转。确定像方旋转方向为: 沿光轴方向看, 如果反射镜 1 顺时针旋转角度  $\theta$ , 则像会逆时针旋转  $\theta$ , 如果反射镜 2 顺时针旋转  $\alpha$ , 则像会顺时针旋转  $\alpha$ 。像旋角的大小为两个  $45^\circ$  发射镜旋转角的矢量和。

### 3 消像旋方法

确定像旋角大小和方向后, 拟采取反向旋转消旋棱镜一半像旋角来实现光学实时消像旋。目前, 多采用机械联动或电机伺服结合机械联动的方法实现消旋棱镜协同运动<sup>[11-15]</sup>。机械联动方法是利用齿轮、摩擦轮、

槽轮加钢索传动的形式,使消旋棱镜随两个  $45^\circ$  扫描镜协同转动。这种方法会导致系统的轴系尺寸较大,在实际应用中有很大的局限性;并且联动机构存在空回、打滑、钢索松弛等问题,传动精度难以保障。电机伺服方法是将  $45^\circ$  扫描镜、消旋棱镜分别用电机伺服系统驱动,在扫描镜旋转时,根据计算得到的像旋角将相应转动指令发送至消旋棱镜伺服系统。这种方法的突出优点是机械设计简单,不需要增加机械轴系,但由于不同伺服系统的转动惯量、承受的摩擦力矩和外界扰动差异很大,很难实现扫描镜与消旋机构的严格协同运动。

为解决现有采用机械联动传动精度低、电机伺服驱动难以实现扫描镜与消旋机构严格协同运动的问题,设计一种用于扫描成像系统消除像旋的双向控制方法<sup>[16]</sup>。其中包括两个单电机指令跟踪控制器、两个等效力矩估计器和四通道双向控制器。两个单电机指令跟踪控制器分别用于扫描镜伺服电机和消旋机构伺服电机对指令的跟踪;等效力矩估计器为四通道双向控制器的计算提供力矩信息;四通道双向控制器用于协调扫描镜伺服电机和消旋机构伺服电机的转动。双向控制方法原理如图 4 所示。

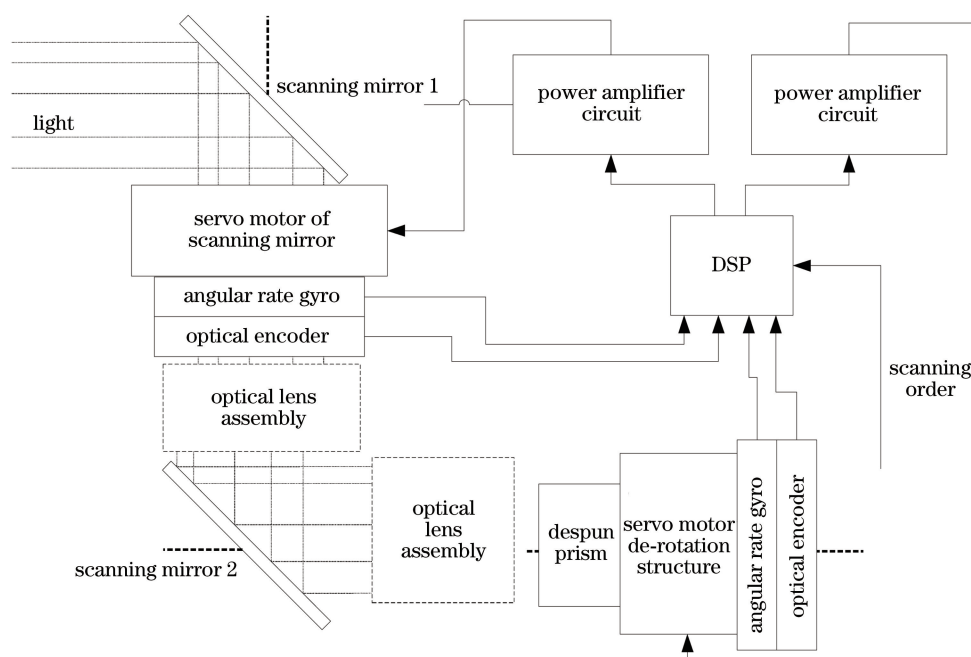


图 4 消除像旋的双向控制方法原理图

Fig. 4 Principle diagram of bilateral control to eliminate image rotation

具体方法如下:

1) 根据扫描镜转动指令,分别获得扫描镜 1 和扫描镜 2 伺服电机的角位置信息  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、角速度信息  $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$  以及消旋机构伺服电机的角位置信息  $\theta_3$ 、角速度信息  $\dot{\theta}_3$ ;

2) 单电机指令跟踪控制器 A 根据扫描镜转动指令与扫描镜伺服电机角位置信息的差,获得扫描镜伺服电机的指令跟踪控制量  $uc_1$ ,单电机指令跟踪控制器 B 根据所述扫描镜转动指令与消旋机构伺服电机角位置信息的差,获得消旋机构伺服电机的指令跟踪控制量  $uc_2$ ;

3) 计算扫描镜伺服电机和消旋机构伺服电机的等效力矩估计值;

4) 根据步骤 1) 获得的位置差值与步骤 3) 获得的扫描镜伺服电机和消旋机构伺服电机等效力矩估计值重新计算扫描镜伺服电机的双向控制量  $ub_1$  和消旋机构伺服电机的双向控制量  $ub_2$ ;

5) 将步骤 2) 获得的扫描镜伺服电机的指令跟踪控制量  $uc_1$  和消旋机构伺服电机的指令跟踪控制量  $uc_2$  分别与步骤 4) 获得的扫描镜伺服电机的双向控制量  $ub_1$  和消旋机构伺服电机的双向控制量  $ub_2$  叠加,叠加后的输出值作用在相应的电机上。

工作流程如图 5 所示。

双向控制方法的最大优点是控制精度与扫描速度无关,能够实现扫描镜与消旋机构的严格协同运动,适用于对扫描速度要求高的侦察飞机上。



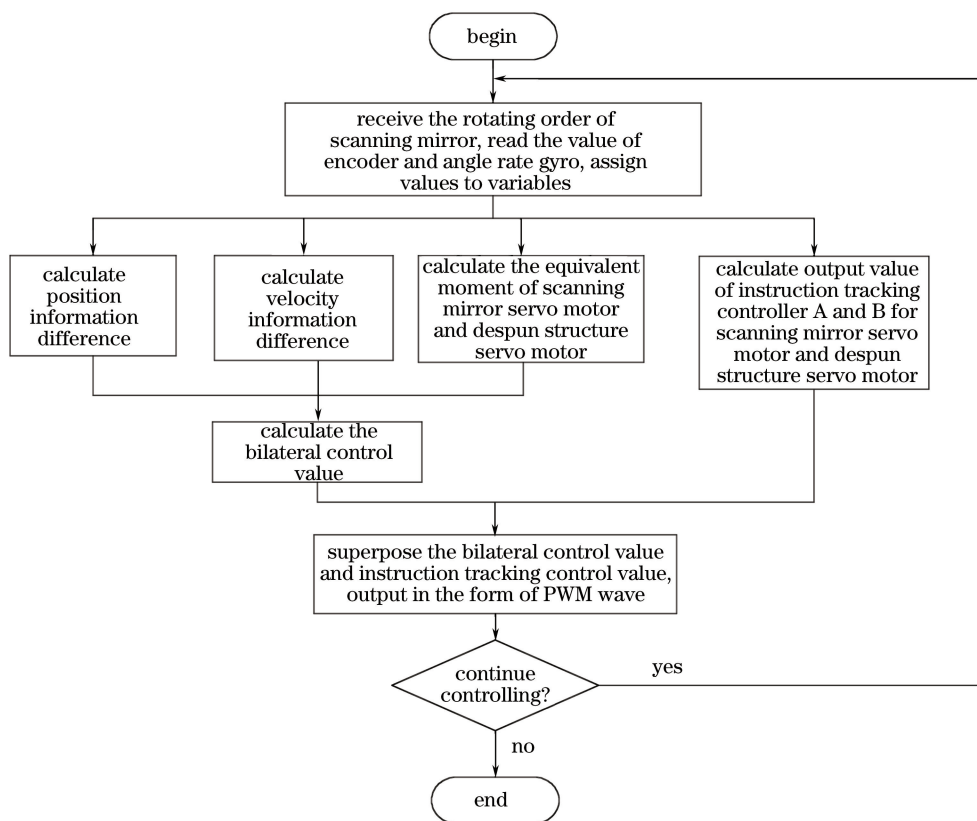


图 5 双向控制工作流程框图

Fig. 5 Work flow diagram of bilateral control

#### 4 实验结果及测试

根据扫描系统结构及消像旋控制原理搭建相关实验装置,如图 6 所示。首先进行成像实验,将两个扫描镜旋转到任意位置,先后让消旋棱镜不参与消旋和参与消旋,所成图像如图 7 (a)、(b)所示。由图 7 可见,消旋棱镜不参与消旋时图像存在很大像旋角,按照像旋计算结果进行消旋后图像没有像旋,由此验证了像旋计算的正确性。



图 6 像旋验证实验装置

Fig. 6 Verification test device of image rotation

在正确消旋后通过像倾斜仪测试光电扫描系统的像倾斜指标,像倾斜是消像旋的关键指标,由于方位是  $360^\circ$  旋转,俯仰是  $-90^\circ \sim 90^\circ$  旋转,以方位  $0^\circ$ 、俯仰  $-90^\circ$  为基准,方位每旋转  $10^\circ$ 、俯仰每旋转  $5^\circ$  进行一组测试,共选取 36 组数据进行测试,测试结果如图 8 所示。

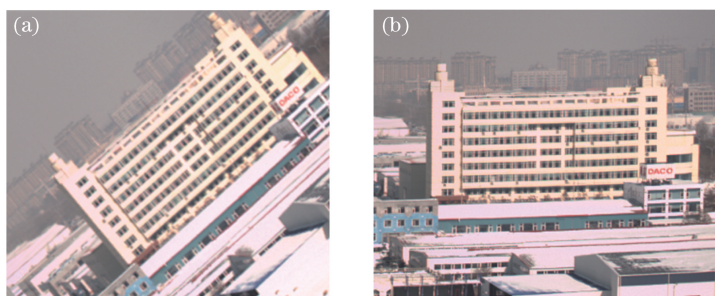


图 7 像旋实验图像。(a)未消旋图像;(b)消旋后图像

Fig. 7 Images of image rotation test. (a) Rotation image; (b) de-rotation image

表 1 像倾斜测试结果

Table 1 Image tilt test results

Serial No.	Azimuth angle / (°)	Pitch angle / (°)	Image tilt / (')	Serial No.	Azimuth angle / (°)	Pitch angle / (°)	Image tilt / (')	Serial No.	Azimuth angle / (°)	Pitch angle / (°)	Image tilt / (')
1	0	-90	6.6	13	120	-30	7.7	25	240	30	9.3
2	10	-85	4.4	14	130	-25	6.8	26	250	35	11.4
3	20	-80	5.2	15	140	-20	9.2	27	260	40	10.4
4	30	-75	4.8	16	150	-15	5.0	28	270	45	8.9
5	40	-70	4.0	17	160	-10	6.3	29	280	50	11.4
6	50	-65	4.9	18	170	-5	8.1	30	290	55	12.1
7	60	-60	10.8	19	180	0	6.4	31	300	60	16.7
8	70	-55	9.2	20	190	5	5.1	32	310	65	12.2
9	80	-50	10.1	21	200	10	5.9	33	320	70	10.3
10	90	-45	9.3	22	210	15	8.2	34	330	75	10.1
11	100	-40	5.1	23	220	20	9.2	35	340	80	10.8
12	110	-35	5.7	24	230	25	14.8	36	350	85	15.2

通过计算得到像旋指标均方根误差为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 7.2, \quad (23)$$

式中  $X_i$  为第  $i$  组数据测试的像旋转,  $\bar{X}$  为 36 组测试数据的平均值。均方根误差为  $7.2'$ , 小于系统像旋指标要求的  $10'$ , 实现了光学消像旋较高精度的位置控制。从表 1 可以看出, 在消旋角较大的后半部分像倾斜值大于像旋角较小时的像倾斜值, 原因是当旋转装置旋转角超过  $180^\circ$  后会带来一定的线绕力矩, 增大了旋转装置的干扰力矩, 如果对正式样机中棱镜旋转装置施加导电环, 可保证各个角度位置的干扰力矩平稳, 能进一步提升像倾斜指标。

## 5 结 论

为满足飞机隐身性能要求, 提出一种采取双反射镜绕俯仰轴和方位轴旋转实现大角度扫描的方法, 采取此扫描方式的光电侦察系统可与载机进行共形设计, 满足飞机隐身性能要求。扫描系统对地扫描会造成反射像旋转, 这种旋转是相对于扫描反射镜旋转的同时、同步旋转, 像旋角的大小为两个  $45^\circ$  扫描镜旋转角的矢量和。像方旋转方向为: 沿光轴方向看, 如果反射镜 1 顺时针旋转  $\theta$ , 则像会逆时针旋转  $\theta$ , 如果反射镜 2 顺时针旋转  $\alpha$ , 则像会顺时针旋转  $\alpha$ 。为消除所产生像旋, 采用消旋棱镜实施光学消像旋, 通过双向控制方法可实现扫描镜与消旋机构的严格协同运动, 经过实验验证消旋精度可达  $7.2'$ , 实现了较高精度的光学消像旋。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang Yuesong, Zhang Zhiguo, Hua Houqiang. RCS simulation of targets in THz band based on fast physical optics algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211001.



- 江月松, 张志国, 华厚强. 基于快速物理光学法的太赫兹目标 RCS 计算[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211001.
- [2] Thompson K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: The comatic aberrations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(6): 1490-1504.
- [3] Thompson K P. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(5): 821-836.
- [4] Zhao Yali, Li Kexun, Li Xunfeng, *et al.* Transparent shielding film based on the metallic photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0831001.  
赵亚丽, 李克训, 李旭峰, 等. 基于金属光子晶体的透明屏蔽膜[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0831001.
- [5] Chen Qiang. Analysis and correction of the image aberration of 45° directional mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 301-305.  
陈 强. 45°指向镜成像畸变特性分析和校正[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 301-305.
- [6] Hu Jianing, Dong Jihong, Zhou Pingwei. Parametric design of flexure supporting for optical space remote sensor primary mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1128001.  
胡佳宁, 董吉洪, 周平伟. 空间光学遥感器主镜柔性支撑的参数化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128001.
- [7] Kihm H, Moon I K, Yang H S, *et al.* 1-m lightweight mirror design using genetic algorithm[C]. SPIE, 2012, 8415: 841514.
- [8] Zhang Shuqing, Zhang Yuan, Zhou Chenghao, *et al.* Image motion model of azimuthally photography for satellite borne TDICCD camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1823-1829.  
张树青, 张 媛, 周程灏, 等. 星载 TDICCD 相机方位扫描像移模型研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1823-1829.
- [9] Zhang Jichao, Zhou Jiufei, Zhang Lei. Image spin compensation on scanning frame remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2396-2400.  
张继超, 周九飞, 张 雷. 摆扫式航空遥感器像旋补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2396-2400.
- [10] Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin, *et al.* Characteristic analysis for image rotation of aerial camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 1053-1057.  
耿文豹, 翟林培, 丁亚林, 等. 航空相机的像面旋转特性分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1053-1057.
- [11] Wang Junshan, Zhai Linpei, Ding Yalin, *et al.* Characteristic analysis and correction technique about the image rotation of aerial camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 493-496.  
王俊善, 翟林培, 丁亚林, 等. 航空相机的像旋转特性分析及其补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 493-496.
- [12] Guo Xinsheng, Zhou Renkui, Tan Mingdong, *et al.* Algorithm and realization for optical de-rotation high-precision position control system[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12): 1776-1779,  
郭新胜, 周仁魁, 谭名栋, 等. 光学消像旋高精度位置控制系统的算法与实现[J]. 光子学报, 2011, 40(12): 1776-1779.
- [13] Michels G J, Genberg V L, Doyle K B, *et al.* Design optimization of actuator layouts of adaptive optics using a genetic algorithm[C]. SPIE, 2005, 5877: 58770L.
- [14] Zhuang Qiuhui, Liu Guojun, Fu Xiuhua, *et al.* Design and fabrication of a depolarizing dichroic beam splitter working in band from near-UV to near-infrared[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1131001.  
庄秋慧, 刘国军, 付秀华, 等. 工作波段覆盖近紫外到近红外波的消偏振分色片的设计与研制[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1131001.
- [15] Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.* Analysis of image rotation for aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0823002.  
于春风, 丁亚林, 惠守文, 等. 三反射系统航空遥感器像旋转分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0823002.
- [16] Tian Dapeng, Wang Dejiang. Two-way control method for eliminating imaging rotation of scanning imaging system: CN103309363[P]. 2013-09-18.  
田大鹏, 王德江. 一种用于扫描成像系统消除像旋的双向控制方法: CN103309363[P]. 2013-09-18.