

文章编号 1004-924X(2017)11-2931-08

## “高分二号”上相机和星敏感器相对安装姿态的测量

孙 刚<sup>1,2</sup>, 杨再华<sup>1,2\*</sup>, 万毕乐<sup>1,2</sup>, 张成立<sup>1,2</sup>, 代卫兵<sup>1,2</sup>

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;  
2. 北京市航天产品智能装配技术与装备工程技术研究中心, 北京 100094)

**摘要:**为了精确测量“高分二号”(GF-2)卫星上相机和星敏感器的相对安装姿态,建立了一套高精度自动化测量系统。针对该系统研究了基于多传感器数据融合的高精度测量算法、基于理论安装数据驱动的自动测量模型、以及基于图像识别的立方镜法线搜索算法。该测量系统主要由二维龙门导轨、精密转台和 CCD 成像辅助准直的自准直经纬仪构成,通过融合精密转台的转动角度、自准直经纬仪的俯仰角和偏航角等数据计算被测设备安装姿态角度。测量时需先对系统进行标定,制定自动测量规划,然后通过电机驱动使设备自动到达预定位置和角度进行测量。若星上设备安装偏差较大导致被测对象超出自准直经纬仪测量范围时,可启动 CCD 相机对被测对象局部区域进行搜索识别,并引导自准直经纬仪实现精确准直测量。对测量系统进行了实验验证,结果显示:该系统姿态测量精度可以达到 5",与标准值比最大偏差为 4.1";该测量系统已用于 GF-2 卫星的相机和星敏感器相对姿态测量中,重复标准差最大为 3.5",满足 GF-2 对机上设备安装姿态测量精度的需求。

**关键词:**卫星集成;姿态矩阵;空间相机;星敏感器;角度测量;自动准直

**中图分类号:**V465 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172511.2931

## High precision automatic measurement for alignment of camera and star-sensor in GF-2

SUN Gang<sup>1,2</sup>, YANG Zai-hua<sup>1,2\*</sup>, WAN Bi-le<sup>1,2</sup>, ZHANG Cheng-li<sup>1,2</sup>, DAI Wei-bing<sup>1,2</sup>

(1. *Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;*  
2. *Beijing Engineering Research Center of the Intelligent Assembly Technology and Equipment for Aerospace Product, Beijing 100094, China*)

\* *Corresponding author, E-mail:13466501817@139.com*

**Abstract:** To alignment the posture between the camera and the star-sensor on the GF-2 satellite, a high precision automatic measurement system was established. For the measuring system, a high precision measurement algorithm based on multi-sensor fusion, an automatic measurement plane based on design data, and a cube mirror normal measurement method based on geometric figure recognition were investigated. The system was mainly constituted by a double column guideway system, a precision turntable, and an autocollimation theodolite assisted with CCD camera. The instrument posture was calculated by fusing the data of the pitch angle and the horizontal angle of the theodolite and the rotation angle of the turntable. In measurement, the system was fixed and calibrated, and an

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-05-04.

基金项目:国家高分专项天基部分资助项目(No. (2011)1199)

automatic measurement plan was generated firstly. Then the theodolite was driven to the desired location and desired angle. If there was no collimated light from the mirror to the theodolite, the CCD camera would search the cube mirror and calculate the deviation of the theodolite. Then the location and angles of the theodolite were adjusted and the posture of the cube mirror of the instrument was measured. Experimental results indicate that the precision of the system is within  $5''$  and the maximum deviation compared to the standard value is  $4.1''$ . The system has been used in the assembly of GF-2 satellite, its maximum measuring standard deviation is  $3.5''$ , and satisfies the system requirements for higher precisions and rapid speeds.

**Key words:** satellite assembly; posture matrix; angle measurement; autocollimation; automatic measurement

## 1 引言

“高分二号”(GF-2)卫星是中国第一颗分辨率达到 1 m、目标定位精度达到 50 m 的民用遥感卫星,经在轨测试显示,卫星影像清晰,定位精度达到国际先进水平<sup>[1]</sup>。为了达到高分辨率和高定位的要求,GF-2 卫星平台装载了 2 台相同的高分辨率相机和 3 台高精度有源像元传感器(Active Pixel Sensor, APS)星敏感器。相机可实现幅宽为 45 km、分辨率为 1 m 的成像能力,星敏感器可满足卫星  $0.01^\circ$  的定姿精度要求。但为了实现 GF-2 卫星无控制点时 50 m 的定位精度,需要在卫星装配期间测量 2 台相机和 3 台星敏感器之间相对姿态关系<sup>[2-4]</sup>,角度测量精度应优于  $6''$ 。

相机和星敏感器的基准为光学基准立方镜,用基准立方镜的镜面法线代表设备坐标系坐标轴的指向<sup>[5]</sup>。因此对设备相对参考基准的姿态的测量,即是对基准立方镜镜面法线相对参考基准立方镜镜面法线的空间夹角矩阵的测量<sup>[6]</sup>。由于相机和星敏感器上光学立方镜的距离较远,任意两条镜面法线为远间距的异面直线,无法用小角度的准直仪和转台等经一次测量而实现,且测量精度要求达到角秒量级,难度较高。

目前国内外航天企业星上设备安装姿态的测量主要采用的是经纬仪布站测量方法。即用多台带有准直功能的高精度经纬仪,分别准直被测设备上的基准立方镜,然后再通过经纬仪之间的互瞄进行传递,从而计算出镜面法线之间的夹角矩阵。解放军信息工程大学的李广云教授、哈尔滨工业大学的唐文彦教授、长城计量研究院马骊群

研究员等分别对多台经纬仪布站测量方法开展了较为深入的研究<sup>[7-9]</sup>。但由于通过人眼观测的经纬仪测量,会受到经纬仪布站远近、光照等环境因素的影响,现场测量精度一般只能达到十几角秒,且测量效率较低。

针对远间距的异面直线夹角的测量,天津大学的裘祖荣教授、张国雄教授课题组提出了基于摄影测量的异面直线夹角测量方法<sup>[10]</sup>,即在不同被测设备或部件上固定多个靶标点,通过 CCD 成像测量靶标点拟合不同直线实现异面直线间的夹角测量。但该方法测量精度只能达到角分量级,且不适用于以光学立方镜为基准的异面直线间的夹角测量。

本文针对 GF-2 的测量需求,建立了一套高精度自动化测量系统。该系统综合利用精密导轨、自准直经纬仪、精密转台和 CCD 相机,对不同传感器的数据进行融合以实现光学立方镜之间姿态角度矩阵的高精度自动化测量。文中还对所采用的基于多传感器数据融合的高精度测量算法、基于理论安装数据驱动的自动测量模型和基于图像识别的立方镜法线搜索算法分别进行了讨论,实验证明该系统角度测量精度达到  $5''$ ,满足了 GF-2 卫星上设备安装姿态的测量要求。

## 2 测量系统构成

图 1 为高精度测量系统原理图。系统主要由精密转台、二维龙门导轨、带有 CCD 成像辅助装置的自准直经纬仪、隔振平台、全局基准镜、辅助一维导轨工装以及计算机软件系统组成。

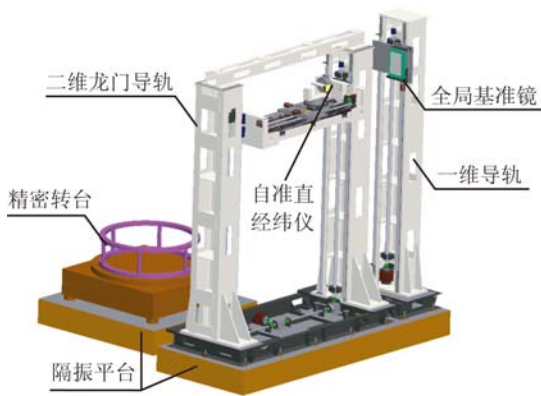


图 1 测量系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of measuring system

自准直经纬仪系统是 1 台经过了改造的 TM5100A 徕卡电子经纬仪,加装了与经纬仪相对固定的 CCD 辅助成像装置,并进行了姿态标定。CCD 成像辅助装置在小范围内搜索被测立方镜,提取立方镜的边缘,计算镜面法线,引导经纬仪实现精确自动准直。自准直经纬仪精确准直镜面后可以得到镜面法线在经纬仪坐标系下的水平角和俯仰角。

二维龙门导轨用于承载自准直经纬仪系统沿二维方向平行移动,以定位到可以准直到被测镜面的最优位置。二维导轨与自准直经纬仪之间有一个精密的二维调平装置,可以实现自准直经纬仪精确自动调平,调平精度优于  $1''$ 。

精密转台用于承载卫星以实现卫星绕转台轴线的精密转动,使被测项目朝向自准直经纬仪。测量时被测卫星通过定位销钉及螺钉被固定于精密转台的上端框上。测量前通过电子水平仪将精密转台精确调平,根据需要将转台转动一定角度  $\theta$ ,使星上被测项目的立方镜镜面法线朝向自准直经纬仪。精密转台的转角精度优于  $3''$ ,调平精度优于  $2''$ 。

全局基准镜的镜面法线平行于水平面且指向不变。自准直经纬仪每次准直完被测镜面会得到水平角  $\alpha_s$ ,经纬仪位置不动,自动旋转并准直全局基准镜会得到水平角  $\alpha_g$ 。从而得到被测镜面法线在全局坐标系下的方位角  $\alpha = \alpha_s - \alpha_g$ 。全局基准镜的引入可以消除自准直经纬仪沿二维导轨平行移动过程中的角度偏差。

计算机及软件系统不仅可以采集经纬仪码盘水平角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$ 、精密转台的转动角度  $\theta$  和 CCD 图像,还可以控制二维导轨、自准直经纬仪

以及精密转台的转动,并计算得到最终的测量结果。

此外,为了减少外界环境振动对测量的干扰,分别将精密转台和导轨系统固定于隔振平台上。

### 3 相机星敏夹角测量流程

#### 3.1 测量任务概述

GF-2 卫星上需要高精度测量的任务主要是 2 个光学相机和 3 个星敏感器。每个设备上有 1 块立方镜,立方镜上 3 条互相正交的镜面法线代表了设备的坐标系,如图 2 所示。测量时只需要测量每个立方镜的其中 2 条法线即可,第 3 条法线可以通过叉乘的方法计算得到。首先在全局基准镜坐标系下测量每个镜面法线矢量,最后以相机 A 的立方镜坐标系为参考坐标系计算其它矢量与相机 A 的夹角矩阵。

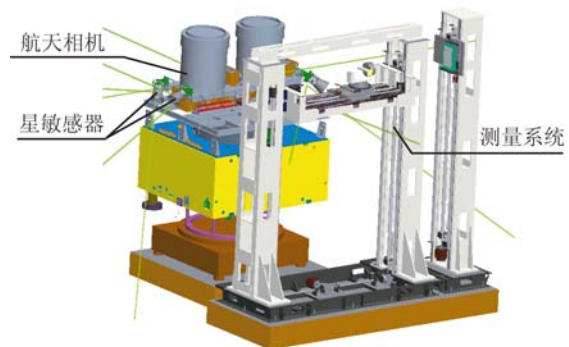


图 2 高分二号测量

Fig. 2 Measurement for GF-2 satellite

#### 3.2 系统测量流程及夹角计算

系统的测量流程如图 3 所示,首先将卫星安装到精密转台上,使卫星本体坐标系与转台坐标系重合,对测量系统进行标定,根据被测相机和星敏感器立方镜在星体坐标系下的理论安装数据,计算自准直经纬仪最优的准直位置、水平角、俯仰角和精密转台的转角,并生成优化的测量顺序。以相机 B 立方镜的 X 轴相对相机 A 立方镜的 X 轴夹角测量为例,首先根据标定得到的理论值驱动自准直经纬仪沿二维导轨准直相机 A 立方镜 X 方向,若自准直经纬仪没有示数则开启视觉引导搜索功能,搜索被测镜面法线方向。当自准直经纬仪有示数显示时,记录经纬仪的水平角  $\alpha_{1s}$  和俯

仰角  $\beta_{1s}$  及精密转台的转角  $\theta_A$ 。旋转准直经纬仪使其准直全局基准镜得到经纬仪水平角  $\alpha_{1j}$ 。则相机 A 立方镜的 X 轴在全局基准镜坐标系下的方位角为:  $\alpha_A = \alpha_{1s} - \alpha_{1j} + \theta_A$ , 俯仰角为:  $\beta_A = \beta_{1s}$ , 镜面法线的矢量  $\mathbf{X}_1 = (\cos \alpha_A \cos \beta_A, \sin \alpha_A \cos \beta_A, \sin \beta_A)^T$ 。同理可以测量得到相机 B 立方镜 X 轴的法线矢量  $\mathbf{X}_2 = (\cos \alpha_B \cos \beta_B, \sin \alpha_B \cos \beta_B, \sin \beta_B)^T$ 。相机 B 立方镜 X 轴相对相机 A 立方镜 X 轴夹角  $\varphi$  为:

$$\varphi = \arccos \left\{ \frac{\mathbf{X}_1 \cdot \mathbf{X}_2}{\|\mathbf{X}_1\| \times \|\mathbf{X}_2\|} \right\}. \quad (1)$$

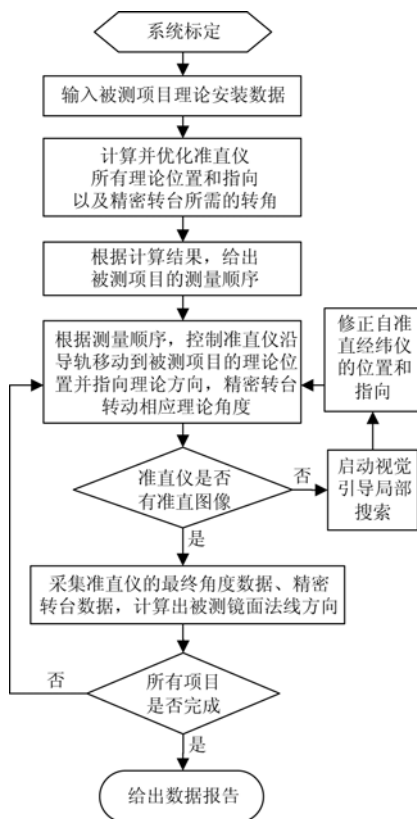


图 3 自动测量流程

Fig. 3 Flowchart of automatic measurement

## 4 自动准直原理

### 4.1 理论安装数据驱动的自动准直算法

理论安装数据驱动的自动准直算法是根据立方镜在卫星坐标系下的理论位置和矢量, 计算立方镜在二维平移导轨坐标系下的位置和镜面法线矢量, 计算矢量和二维平移导轨平面的交点, 将自准直经纬仪移动到的交点处并沿矢量方向指向立方镜镜面。

设卫星坐标系为  $O_s -xyz$ , 在卫星坐标系中, 立方镜镜面法线方向矢量定义为:

$$\mathbf{s}_s = (m_s, n_s, p_s)^T =$$

$$(\cos \alpha_s \cos \beta_s, \sin \alpha_s \cos \beta_s, \sin \beta_s)^T, \quad (2)$$

其中:  $\alpha_s, \beta_s$  为矢量  $\mathbf{s}_s$  在卫星坐标系下的方位角和俯仰角, 起点位置定义为  $\mathbf{o}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ 。

设精密转台坐标系为  $O_r -xyz$ , 在精密转台坐标系中, 立方镜镜面法线的方向矢量定义为:

$$\mathbf{s}_r = (m_r, n_r, p_r)^T =$$

$$(\cos \alpha_r \cos \beta_r, \sin \alpha_r \cos \beta_r, \sin \beta_r)^T, \quad (3)$$

其中:  $\alpha_r, \beta_r$  为矢量在精密转台坐标系下的方位角和俯仰角, 起点位置定义为  $\mathbf{o}_r = (x_r, y_r, z_r)^T$ 。

设二维平移导轨坐标系为  $O_g -xyz$ , 在二维平移导轨坐标系中, 立方镜方向矢量定义为:

$$\mathbf{s}_g = (m_g, n_g, p_g)^T =$$

$$(\cos \alpha_g \cos \beta_g, \sin \alpha_g \cos \beta_g, \sin \beta_g)^T, \quad (4)$$

其中:  $\alpha_g, \beta_g$  为矢量在二维平移导轨坐标系下的方位角和俯仰角。矢量的起点位置定义为  $\mathbf{o}_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ 。

设卫星坐标系到精密转台坐标系的旋转矩阵为  $\mathbf{R}_{sr}$ , 平移矩阵为  $\mathbf{T}_{sr}$ , 精密转台坐标系到二维平移导轨坐标系的旋转矩阵为  $\mathbf{R}_{rg}$ , 平移矩阵为  $\mathbf{T}_{rg}$ 。立方镜镜面法线由卫星坐标系下转换到精密转台坐标系下有:

$$\mathbf{s}_r = (m_r, n_r, p_r)^T = \mathbf{R}_{sr} \cdot \mathbf{s}_s, \quad (5)$$

$$\mathbf{o}_r = (x_r, y_r, z_r)^T = \mathbf{R}_{sr} \cdot \mathbf{o}_s + \mathbf{T}_{sr}. \quad (6)$$

根据  $\mathbf{s}_r$  计算得矢量在  $O_r -xyz$  下的方位角  $\alpha_r$ 、俯仰角  $\beta_r$ :

$$\beta_r = \arcsin p_r, \quad \alpha_r = \arcsin \left( \frac{n_g}{\cos \beta_r} \right). \quad (7)$$

将精密转台转动  $\alpha_r$  消除方位角, 此时矢量方向  $\mathbf{s}_r$  和起点位置  $\mathbf{o}_r$  在坐标系  $O_r -xyz$  下变为矢量方向  $\mathbf{s}'_r$  和起点位置  $\mathbf{o}'_r$ :

$$\mathbf{s}'_r = \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & -\sin \alpha_r & 0 \\ \sin \alpha_r & \cos \alpha_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{s}_r, \quad (8)$$

$$\mathbf{o}'_r = \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & -\sin \alpha_r & 0 \\ \sin \alpha_r & \cos \alpha_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{o}_r. \quad (9)$$

矢量方向  $\mathbf{s}'_r$  和起点位置  $\mathbf{o}'_r$  转换到坐标系  $O_g -xyz$  下有:

$$\mathbf{s}_g = (m_g, n_g, p_g)^T = \mathbf{R}_{rg} \cdot \mathbf{s}'_r, \quad (10)$$

$$\mathbf{o}_g = (x_g, y_g, z_g)^T = \mathbf{R}_{rg} \cdot \mathbf{o}'_r + \mathbf{T}_{rg}. \quad (11)$$

根据矢量方向和起始位置可得矢量  $\mathbf{s}_g$  在

$O_g$ - $xy$  $z$  下的直线方程有:

$$\frac{x-x_g}{m_g} = \frac{y-y_g}{n_g} = \frac{z-z_g}{p_g} \quad (12)$$

二维平移导轨平面方程为:

$$y=0, \quad (13)$$

联立(12)、(13)式可得:

$$x = x_g - \frac{y_g m_g}{n_g}, \quad (14)$$

$$z = z_g - \frac{y_g p_g}{n_g}, \quad (15)$$

则矢量和二维平移导轨平面的交点为:

$$(x, y, z)^T = \left[ x_g - \frac{y_g m_g}{n_g}, 0, z_g - \frac{y_g p_g}{n_g} \right]^T. \quad (16)$$

如果交点坐标在导轨移动范围内则计算旋转角度  $\alpha_r = \arctan \frac{y_g}{x_g}$ 。最后可得矢量在二维平移导轨坐标系下矢量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_g &= (m_g, n_g, p_g)^T = \\ \mathbf{R}_{rg} &\begin{bmatrix} \cos \alpha_r & -\sin \alpha_r & 0 \\ \sin \alpha_r & \cos \alpha_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{sr} \mathbf{s}_s, \quad (17) \end{aligned}$$

可得输出的经纬仪方位角  $\alpha_r$  和俯仰角  $\beta_r$  为:

$$\beta_r = \arcsin p_g; \alpha_r = \arcsin \left[ \frac{n_g}{\cos \beta_r} \right], \quad (18)$$

与二维平移导轨平面的交点为:

$$(x, y, z)^T = \left[ x_g - \frac{y_g m_g}{n_g}, 0, z_g - \frac{y_g p_g}{n_g} \right]^T. \quad (19)$$

#### 4.2 视觉搜索算法

相机、星敏感器等设备初装时由于安装孔位配合间隙的存在,实际安装位置和姿态与理论值相比会有一定偏差。因此通过理论计算得到的自准直经纬仪的位置也会有偏差,当偏差超出准直经纬仪视野时就无法实现自动准直。因此在系统设计时增加了视觉辅助搜索立方镜法线的方法。通过 CCD 摄像机采集立方镜局部范围的图像,根据图像分析得出待测面位置及法线方向,视觉引导工作流程如图 4 所示。

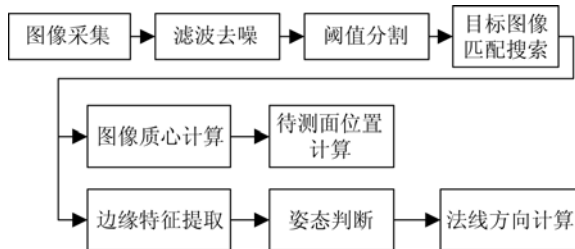


图 4 视觉引导工作流程

Fig. 4 Flowchart of vision guiding

基于图像处理的视觉伺服:首先对理论位置局部进行图像采集,根据试验选择合适的滤波算法消除噪声干扰。根据试验分析选择合适的阈值,对图像进行二值化处理<sup>[11]</sup>。由图像匹配算法判断目标图像的范围。针对目标图像计算图像质心,根据导轨位置以及系统标定的参数计算出立方镜中心位置。对图像进行边缘或特征点提取,基于立方镜的棱边正交关系及棱边的边长,建立法线的解算模型,计算出镜面法线的方向。

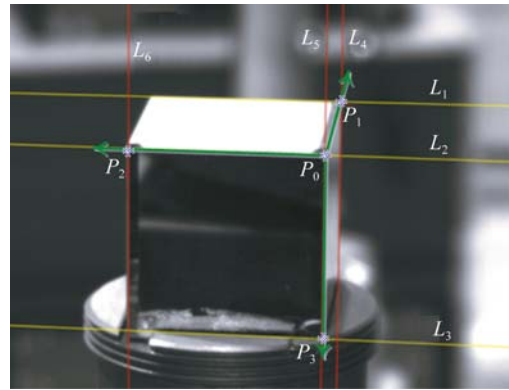


图 5 立方镜边缘提取

Fig. 5 Edge detection of cube mirror

如图 5 所示,利用图像处理算法检测到立方镜的棱边所在直线  $L_1 \sim L_6$ ,即可得到交点  $P_0 \sim P_3$ 。其中  $P_0 P_1$  即为待测镜面的法线方向。由于过  $P_0$  的 3 条立方镜棱边在空间中互为直角关系,于是有:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_2 = 0 \\ \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_3 = 0. \\ \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_2 \cdot \mathbf{P}_0 \mathbf{P}_3 = 0 \end{cases} \quad (20)$$

基于公式(20)即可解算出向量  $\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1$  在相机空间坐标系下的方向。标定出相机坐标系与准直仪坐标系的关系,即可得到向量  $\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1$  与准直仪轴线的夹角  $\Delta\alpha$ 。此外由于立方镜棱边长度已知,设为  $L$ ,则  $|\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1| = |\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_2| = |\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_3| = L$ ,由此可以计算出立方镜的位置。最后可以根据 4.1 节中的方法,反算出自准直经纬仪的位置和指向。

## 5 实验验证与 GF-2 测量的结果

### 5.1 绝对精度验证

为了验证测量系统的精度,实验中对 1 块标

准 17 面棱体上的第 1 面与第 2 面,第 1 面与第 4 面的法线夹角进行测量比对,如图 6 所示。17 面棱体第 1 面和第 2 面理论夹角为  $21.176\ 61^\circ$ ,第 1 面和第 4 面理论夹角为  $63.529\ 33^\circ$ ,实际测量数据如表 1 和表 2 所示,第 1 面和第 2 面夹角测量最大偏差为  $2.1''$ ,标准差为  $1.3''$ ,第 1 面和第 4 面夹角测量最大偏差为  $4.1''$ ,标准差为  $3.3''$ 。其中第 1 面与第 2 面夹角较小,这是因为测量路径规划时没有转台转动,因此误差较小。

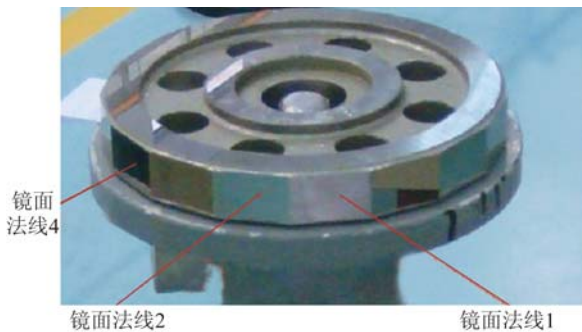


图 6 17 面棱体测试

Fig. 6 Normal angle measurement of 17-face prism

表 1 第 1 面与第 2 面夹角测量结果

Tab. 1 Measuring results of angle between the first and second sides

测量顺序	实测夹角/ $(^\circ)$	与理论值偏差/ $('' )$
1	21.176 42	-0.7
2	21.176 85	0.9
3	21.176 11	-1.8
4	21.176 34	-1.0
5	21.177 20	2.1
6	21.176 69	0.3
7	21.176 97	1.3
8	21.176 67	0.2
9	21.176 34	-1.0
10	21.176 18	-1.6
标准差	—	1.3

表 2 第 1 面与第 4 面夹角测量结果

Tab. 2 Measuring results of angle between the first and fourth sides

测量顺序	实测夹角/ $(^\circ)$	与理论值偏差/ $('' )$
1	63.528 19	-4.1
2	63.530 06	2.6
3	63.528 24	-3.9
4	63.530 07	2.7
5	63.530 10	2.8
6	63.528 28	-3.8
7	63.528 41	-3.3
8	63.528 53	-2.9
9	63.528 41	-3.3
10	63.530 21	3.2
标准差	—	3.3

用两台 TM5100A 经纬仪建站对 17 面棱体的第 1 面和第 4 面进行了测量,测量结果见表 3。最大偏差达到  $10.1''$ ,标准差为  $7.4''$ 。当需要传递测量时根据经验每次传递误差会扩大约 1.4 倍。

表 3 第 1 面与第 4 面夹角经纬仪测量结果

Tab. 3 Measuring results of angle between the first and fourth sides with theodolite

测量顺序	实测夹角/ $(^\circ)$	与理论值偏差/ $('' )$
1	63.531 93	9.4
2	63.531 63	8.3
3	63.528 68	-2.3
4	63.530 56	4.4
5	63.527 19	-7.7
6	63.526 52	-10.1
7	63.527 76	-5.7
8	63.530 98	5.9
9	63.531 63	8.3
10	63.531 29	7.1
标准差	—	7.4

## 5.2 相机星敏夹角矩阵测量

以相机 A 为基准测量相机 B、星敏感器 A、B、C,重复测量 6 次,得到每个夹角的测量数据的标准差如表 4 所示,其中最大标准差为  $3.5''$ 。与传统的经纬仪测量相比测量精度和效率都提高了约 1 倍左右。

表 4 GF-2 相机星敏夹角矩阵测量结果

Tab. 4 Measuring results of angle matrix for GF-2 camera and star-sensor (")

		与相机 A 的 X 轴夹角 重复误差	与相机 A 的 Y 轴夹角 重复误差	与相机 A 的 Z 轴夹角 重复误差
相机 B	X 轴	1.8	1.8	2.3
	Y 轴	2.0	2.6	2.6
	Z 轴	2.6	2.7	2.7
星敏 A	X 轴	0.8	0.8	2.8
	Y 轴	1.6	3.3	3.2
	Z 轴	0.9	3.3	3.1
星敏 B	X 轴	1.6	1.5	1.5
	Y 轴	1.5	3.5	2.5
	Z 轴	2.3	1.4	2.5
星敏 C	X 轴	2.7	2.7	1.3
	Y 轴	1.5	2.1	2.2
	Z 轴	2.7	1.6	2.5

## 参考文献:

- [1] 潘腾, 关晖, 贺玮. “高分二号”卫星遥感技术[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4):16-24.  
PAN T, GUAN H, HE W. GF-2 satellite remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4):16-24. (in Chinese)
- [2] 姜海滨, 罗世魁, 曹东晶, 等. “高分二号”卫星轻小型高分辨率相机技术[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4):25-33.  
JIANG H B, LUO SH K, CAO D J, *et al.*. Technology of high-density and high-resolution camera of GF-2 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4):25-33. (in Chinese)
- [3] 魏新国, 王清龙, 李健, 等. 星敏感器和遥感相机主光轴交联角的在轨检校[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):274-280.  
WEI X G, WANG Q L, LI J, *et al.*. On-orbit calibration for cross-angle between optical axes of star sensor and remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):274-280. (in Chinese)
- [4] 宋俊儒, 邢辉, 穆生博, 等. 航空红外相机的装调[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2125-2133.  
SONG J R, XING H, MU SH B, *et al.*. Alignment of aerial multi-angle infrared camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2125-2133. (in Chinese)
- [5] YANG Z H, YANG S, WAN B L, *et al.*. Posture

## 6 结 论

本文根据 GF-2 卫星相机、星敏感器相对安装姿态测量的需求,设计了一种高精度自动化姿态测量系统。首先介绍了系统组成、测量流程及基于多传感器融合的角度测量算法,然后研究了基于理论数据驱动的自动测量流程和基于图像识别的立方镜法线测量方法。最后给出了测量系统的实验比对精度以及在 GF-2 号相机和星敏相对姿态测量中的应用及重复精度。实验结果证明:该系统姿态测量精度在角秒级;与标准值比对最大偏差为  $4.1''$ ;在 GF-2 相机星敏相对测量中,重复标准差最大为  $3.5''$ ,满足了 GF-2 相机星敏相对姿态测量的要求。

metrology for aerospace camera in the assembly of spacecraft [J]. *SPIE*, 2015, 9903:990331.

- [6] ZHANG R, CHEN H H, LI G Y, *et al.*. Preliminary research on data abnormality diagnosis methods of spacecraft precision measurement [J]. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2015, 5(2):9-15.
- [7] ZHANG R, CHEN H H, YANG Z H, *et al.*. Design of a data processing system for automatic measurement of spacecraft [J]. *Journal of Convergence Information Technology (JCIT)*, 2015, 10(2):57-61.
- [8] 潘廷耀, 范百兴, 西勤, 等. 经纬仪多基准尺联合标定技术研究[J]. 测绘工程, 2016, 25(5):56-58.  
PAN T Y, FAN B X, XI Q, *et al.*. Research of theodolite scale joint calibration technology[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016, 25(5):56-58. (in Chinese)
- [9] 高廷, 孙安斌, 马骊群, 等. 一种新型带有自标定的数字准直瞄准测量系统[J]. 计测技术, 2016, 36(3):18-21.  
GAO T, SUN A B, MA L Q, *et al.*. A novel digital collimation telescope with self-calibration [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36(3):18-21. (in Chinese)
- [10] 胡文川, 袁祖荣, 张国雄, 等. 大尺寸空间异面直线夹角的检测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):

1427-1433.

HU W CH, QIU Z R, ZHANG G X, *et al.*.  
Measurement of large-scale space angle formed by  
non-uniplanar lines [J]. *Opt. Precision Eng.*,  
2012, 20(7):1427-1433. (in Chinese)

[11] LI Y H, QIU Y R, CHEN Y X, *et al.*. A novel  
orientation and position measuring system for large  
& medium scale precision assembly [J]. *Optics  
and Lasers in Engineering*, 2014, 62:31-37.

作者简介:



孙 刚(1972—),男,黑龙江哈尔滨人,  
博士,研究员,1996 年于哈尔滨工业大  
学获得学士学位,1999 年于中国空间  
技术研究院获得硕士学位,2014 年于  
西北工业大学获得博士学位,主要从事  
航天器数字化总装与测试技术研究。  
E-mail:sungang\_2017@163.com



杨再华(1980—),男,河北涿水人,硕  
士,高级工程师,2002 年于长春理工大  
学获得学士学位,2005 年于清华大学  
获得硕士学位,主要从事航天器总装相  
关的大尺寸几何量精度测量研究。  
E-mail:13466501817@139.com

(本栏目编辑:秦 思)