

星敏感器支架的指向性标定及校正

李元鹏, 郭 疆*

(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: 为保证星敏感器支架安装后具有高精度的指向性, 提出了一种星敏感器支架定量修研的技术方法, 首先通过构造虚拟水平轴建立星敏感器支架坐标系, 然后利用经纬仪交互测量和逐级求解方法获得星敏感器支架和相机任意两坐标轴的夹角关系。根据该结果进行了星敏感器支架实际坐标系与相机坐标系姿态变换矩阵的求解, 利用星敏感器支架与相机坐标系的技术指标要求, 进行了星敏感器支架理论坐标系与航天相机坐标系的姿态变换矩阵求解。然后以相机坐标系进行中间传递, 获得了星敏感器支架实际坐标系到理论坐标系的姿态变换矩阵。根据该结果精确求解了星敏感器支架的修调量。通过试验研究表明利用该方法装调完成的星敏感器支架, 经过两次修研迭代, 其指向精度由最初的 760" 提升至 10" 以内。证明了该方法的有效性, 同时星敏感器支架的指向性标定及校正也可指导其他有空间自由角度关系的两部件的精密装调。

关键词: 星敏感器支架; 指向精度; 交互测量; 姿态变换

中图分类号: TN433, V4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210875

Directivity calibration and correction of bracket for star sensor

Li Yuanpeng, Guo Jiang*

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

Abstract: In order to ensure the high-precision pointing of bracket for star sensor after installation, a technical method for quantitative grind of bracket for star sensor was proposed. Firstly, we established the star sensor bracket's coordinate system by constructing the virtual horizontal axis, then obtained the angle relationship between any two coordinate axes by the theodolite interactive measurement and sequential solving strategy. According to the results, we got the posture transformation matrix between star sensor bracket's actual coordinate system and the space camera's coordinate system. By the technical requirements of the star sensor bracket's installing, we acquired the posture transformation matrix between the ideal star sensor bracket's coordinate system and the space camera's coordinate system. Then, we obtained the posture transformation matrix from the actual coordinate system to the ideal coordinate system by bridge of the camera coordinate system. According to this result, the corrective value of bracket for star sensor was accurately solved. The experimental research shows that this method can improve the star sensor bracket's pointing accuracy from the initial 760" to less than 10" after two rounds of iteration, which proves effectiveness of the method. At the same time, directivity calibration and

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-03-25

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所大口径光学技术基金 (Y6A912U160)

作者简介: 李元鹏, 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间遥感相机结构设计及装调方面的研究。

通讯作者: 郭疆, 男, 研究员, 博士, 主要从事空间遥感成像技术方面的研究。

correction of bracket for star sensor can also guide the precise assembly and adjustment of other two components with spatial free angle relationship.

Key words: star sensor bracket; pointing accuracy; interactive measurement; posture transformation

0 引言

星敏感器是卫星姿态测量的重要部件,对于光学成像卫星,为了能控制卫星姿态,对遥感图像进行精确定位,需保证星敏感器与卫星载荷航天相机之间严格的姿态关系^[1-3]。针对星敏感器与相机的高精确配准,一些学者进行了设计及检测方法的研究,从而提高星敏感器的指向精度或保证其精度稳定性,孙刚等人建立了一种高精度的星敏感器与卫星相机的姿态关系自动化测量系统,最终可实现 5" 的系统姿态测量精度,并将其用于高分二号的相机与星敏感器的姿态关系测量^[4]。余成武等人针对高分七号卫星甚高精度星敏感器的高热稳定性任务需求,进行了星敏感器的结构和热设计,将星敏感器的光轴指向性误差保证在 0.3 (")/℃ 以内^[5]。魏新国等人通过星敏感器主光轴和遥感相机主光轴交联角的在轨检校方法,进行了星敏感器和遥感相机姿态关系的系统误差补偿,最终使得遥感图像的定位精度得到显著提高^[6]。星敏感器支架作为星敏感器和相机集成的重要载体,是实现星敏感器和相机高精度姿态关系的关键部件。目前,较多研究都是针对星敏感器支架的结构和热稳定性进行了星敏感器支架的优化设计^[7],但对于星敏感器支架与相机间固有的姿态关系精度,一般仅是通过高精度数控机床进行超精密加工来保证,田丽丽针对高精度星敏感器支架的加工,进行了机床制造误差、径向跳动误差、刀具稳定误差分析,并采用动态测量方法进行了加工误差补偿,但由于多种原因依然不能普适性地对各种材料、各种结构的星敏感器支架进行误差模型应用^[8]。星敏感器支架的姿态精度主要体现为单方向的指向精度,因此如何有效地对星敏感器支架的指向性进行标定及误差校正是提高星敏感器与相机配准精度的重要课题^[9-11]。

1 星敏感器支架精密装调策略

星敏感器支架的指向性标定及校正即是实现星

敏感器支架在相机机身上的精密装调。常规的技术方法中,对有严格姿态要求的两个部件进行精密装调时,需先通过研磨保证两对接面的平面度,然后通过经纬仪、干涉仪等光学测量方法对其实际姿态进行检测,再根据测量结果,进行对接面的研磨修正,这样反复迭代,最终可实现角秒级的装调精度。在整个过程中,最重要的步骤是如何确定两精密部件的姿态偏差量和通过检测结果进行修研量及修研方向的计算和判断。对于两个姿态关系简单的零部件,方法比较容易,姿态偏差量可以通过经纬仪正交的高低角和方位角单独计算,修研量通过将角度误差转化为线位移量获得。

根据上述原理及星敏感器支架的单方向指向性特点^[12],决定通过交互测量、姿态变换、定量修研的技术途径,实现星敏感器支架与相机机身的高精度配准关系。星敏感器支架具有两个高精度的研磨对接面,一个是与航天相机固连的对接面,另一个是与星敏感器连接的对接面。为保证更高效地校正星敏感器的指向轴,选择星敏感器支架的星敏感器对接面作为修研校正面。具体装调策略为:首先将星敏感器支架与相机固定连接,根据星敏感器支架的星敏感器连接面建立星敏感器坐标系,然后对星敏感器坐标系与航天相机坐标系各坐标轴夹角关系进行测量,并根据测量结果计算实际星敏感器坐标系与航天相机坐标系的姿态变换矩阵 T_1 ,再根据理论的星敏感器坐标系与航天相机坐标系各坐标轴夹角关系,计算理论星敏感器坐标系与航天相机坐标系的姿态变换矩阵 T_2 ,根据姿态变换矩阵 T_1 、 T_2 计算星敏感器实际坐标系到理论坐标系的变换矩阵 T_3 。根据 T_3 确定星敏感器实际坐标到理论坐标变换的 RPY 角,根据该角度确定星敏感器支架的星敏感器对接面的测量点的修调量。根据该计算值进行定量修研,然后对星敏感器指向轴与航天相机坐标轴夹角关系进行修调后复测,若不满足指标要求,可重复上述步骤进行多次迭代,其详细的精密装调流程图如图 1 所示。

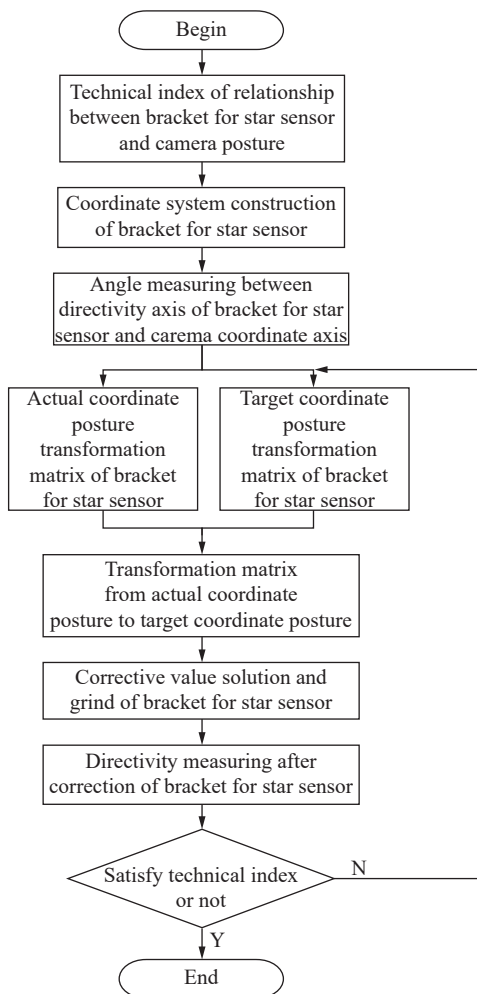


图 1 星敏感器支架精密装调流程图

Fig.1 Flow chart of precise assembly and adjustment of star sensor bracket

2 星敏感器支架指向轴与相机坐标轴的标定

星敏感器支架的指向轴与航天相机坐标轴夹角关系可以通过两台经纬仪交互测量的方式获得。首先通过虚拟坐标轴的方法进行星敏感器支架坐标系的建立。如图 2 所示,以星敏感器支架的星敏感器对接面的法向量作为星敏感器支架的 q 轴,然后构建虚拟水平轴,即以水平面内与 q 轴垂直的水平轴作为星敏感器支架的 m 轴,根据右手定则确定星敏感器支架的 n 轴,为求解星敏感器支架坐标系与相机坐标系的姿态变换关系,规定星敏感器支架的 m 、 n 、 q 分别对应航天相机的 x 、 y 、 z 轴。测量时可先将相机的 xy 轴调水平,再用平晶贴靠星敏感器支架的星敏感器对

接面,分别用经纬仪 1 和经纬仪 2 准直平晶和相机的 X 轴,测得经纬仪 1 的高低角为 V_q ,将经纬仪 1 和经纬仪 2 互瞄,测得经纬仪 1 和经纬仪 2 的方位变化角分别为 H_{qx} 和 H_{xq} ,如图 3 所示,根据三余弦定理确定星敏感器支架 q 轴与 x 轴夹角为:

$$\theta_{qx} = \arccos(\cos(90^\circ - V_q) \cos(180^\circ - H_{qx} - H_{xq})) \quad (1)$$

同理根据该方法可以获得 q 轴与 y 轴夹角为:

$$\theta_{qy} = \arccos(\cos(90^\circ - V_q) \cos(180^\circ - H_{qy} - H_{yq})) \quad (2)$$

式中: H_{qy} 与 H_{yq} 为准直平晶的经纬仪 1 和准直相机坐标系 y 轴的经纬仪 2 互瞄时的方位变化角。根据 θ_{qx} 和 θ_{qy} 可以获得星敏感器支架 q 轴与相机坐标系 z 轴的夹角为:

$$\theta_{qz} = \arccos\left(\sqrt{1 - \cos^2\theta_{qx} - \cos^2\theta_{qy}}\right) \quad (3)$$

公式中的正负取决于 V_q 的大小,若 $V_q > 90^\circ$,公式符号为正,若 $V_q < 90^\circ$,公式符号为负,因此可获得星敏感器支架指向轴与相机 xyz 轴的夹角关系。根据该实际测量值可进行任务指标的对比,判断星敏感器支架的装调精度是否合格。

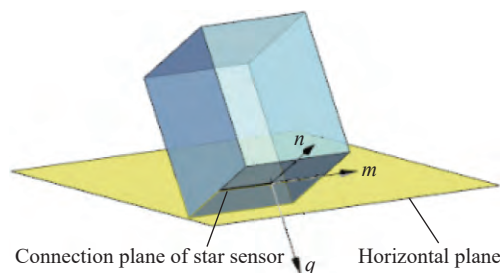


图 2 星敏感器支架坐标系建立模型

Fig.2 Modeling of star sensor support coordinate system

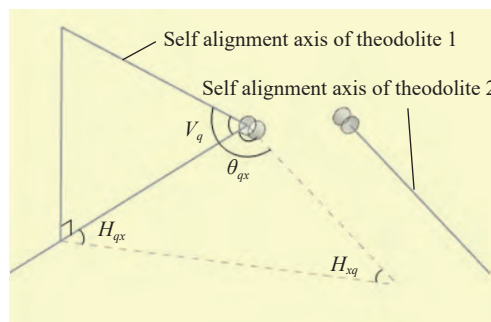


图 3 交互测量模型

Fig.3 Model of interactive measurement

3 星敏传感器支架坐标系的转化

为获得星敏传感器支架实际状态与理想状态的偏差量,需要求解星敏传感器支架实际坐标系到理论坐标系的姿态变换矩阵。由于星敏传感器支架的理论坐标系无法直接测量,但可根据星敏传感器支架指向轴与相机坐标轴的理论夹角关系进行星敏传感器支架理论坐标系与相机坐标系的姿态变换矩阵求解,然后采用相机坐标系进行中间传递的方法,获取星敏传感器支架实际坐标系到理论坐标系的变换矩阵。详细方法及步骤如下:根据上述的检测方法已获得 qx 、 qy 、 qz 的夹角具体值,由于星敏传感器支架实际坐标系的 m 轴为水平轴,同时相机检测前已将 XY 轴调为水平状态,因此可确定 mZ 轴的夹角为 90° ,此时 qz 、 mz 均为已知量,因此可根据公式 (4) 求 nz 大小:

$$\theta_{nz} = \arccos\left(\pm \sqrt{1 - \cos^2\theta_{qz} - \cos^2\theta_{mz}}\right) \quad (4)$$

式中: $\pm$ 号根据 nz 轴夹角大小确定,若大于 90° ,符号为负;若小于 90° ,符号为正。

星敏传感器支架实际坐标轴与相机坐标轴的对应关系及当前已明确状态如图 4 所示。红色线连接的两轴夹角关系为第一级求解结果,黄色线连接的两轴夹角关系为第二级求解结果,该值可通过第一级结果进行求解,具体方法为:

$$\cos ny = \frac{-\cos qy \cos qz \cos nz \pm \cos qx \cos mz}{1 - \cos^2 qz} \quad (5)$$

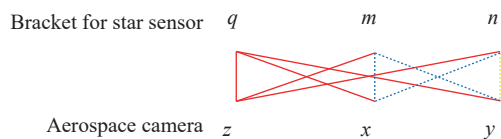


图 4 坐标轴的对应关系及求解状态

Fig.4 Corresponding relationship of coordinate axis and solution state

剩下的蓝色连线为第三级求解结果,由于同一坐标系具有任意两轴互相垂直特点,因此空间任一方向

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_x \cos\theta_y & \cos\theta_x \sin\theta_z \sin\theta_y - \cos\theta_z \sin\theta_x & \sin\theta_z \sin\theta_x + \cos\theta_z \cos\theta_x \sin\theta_y \\ \cos\theta_y \sin\theta_x & \cos\theta_z \cos\theta_x + \sin\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x & \cos\theta_z \sin\theta_y \sin\theta_x - \cos\theta_x \sin\theta_z \\ -\sin\theta_y & \cos\theta_y \sin\theta_z & \cos\theta_z \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

同时具有如下等式关系:

$$A = T_1 \cdot a \quad (12)$$

向量与坐标轴 xyz 的夹角 α 、 β 、 γ 满足公式 (6) 的等式关系。根据该等式关系及第一级和第二级求解结果,可以很容易的求解第三级坐标轴夹角具体值。

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (6)$$

根据星敏传感器支架实际坐标轴与相机坐标轴夹角关系可以进行姿态变化 RPY 角 (横滚、俯仰、偏转) 的求解,即以相机坐标系 $o-xyz$ 为固定坐标系,星敏传感器支架实际姿态的坐标系 $O'-mnq$ 相对于相机的变换角度。具体的变换顺序为:先绕 x 轴转 θ_x ,再绕 y 轴转 θ_y ,最后绕 z 轴转 θ_z ,各变换角度的具体求解方法如公式 (7)~(9) 所示:

$$\theta_x = A \tan 2(r_{32}, r_{33}) \quad (7)$$

$$\theta_y = A \tan 2\left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}\right) \quad (8)$$

$$\theta_z = A \tan 2(r_{21}, r_{11}) \quad (9)$$

式中: $r_{11} = \cos(mx)$, mx 为星敏传感器支架实际姿态的 m 轴与相机 x 轴的夹角; $r_{21} = \cos(my)$, my 为星敏传感器支架实际姿态的 m 轴与相机 y 轴的夹角; $r_{31} = \cos(mz)$, mz 为星敏传感器支架实际姿态的 m 轴与相机 z 轴的夹角; $r_{32} = \cos(nz)$, nz 为星敏传感器支架实际姿态的 n 轴与相机 z 轴的夹角; $r_{33} = \cos(qz)$, qz 为星敏传感器支架实际姿态的 q 轴与相机 z 轴的夹角; $A \tan 2(y, x)$ 为“四象限反正切函数”,具体表达式为:

$$a \tan 2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \text{undefined} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据上述 RPY 角可以获得相机坐标系到星敏传感器支架实际坐标系的变换矩阵 T_1 表示为^[13]:

式中: $A = [A_x \ A_y \ A_z]^T$; $a = [a_m \ a_n \ a_q]^T$; a 为星敏传感器支架实际坐标系内任意一点的坐标; A 为转

变到相机坐标系中的坐标。同理可知星敏感器支架理论坐标系到相机坐标系的变换矩阵为 T_2 , 并具有公

式 (13)、(14) 的等式关系:

$$B = T_2 \cdot b \quad (13)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_x' \cos \theta_y' & \cos \theta_x' \sin \theta_z' \sin \theta_y' - \cos \theta_z' \sin \theta_x' & \sin \theta_z' \sin \theta_x' + \cos \theta_z' \cos \theta_x' \sin \theta_y' \\ \cos \theta_y' \sin \theta_x' & \cos \theta_z' \cos \theta_x' + \sin \theta_z' \sin \theta_y' \sin \theta_x' & \cos \theta_z' \sin \theta_y' \sin \theta_x' - \cos \theta_x' \sin \sin \theta_z' \\ -\sin \theta_y' & \cos \theta_y' \sin \theta_z' & \cos \theta_z' \cos \theta_y' \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: b 为星敏感器支架理论坐标系中任意一点的坐标; B 为该点转换到相机坐标系中的坐标; θ_x' 、 θ_y' 、 θ_z' 为相机坐标系到星敏感器支架理论姿态坐标系变换的 RPY 角。其具体值可参照公式 (7)~(9) 进行求解。

根据公式 (12) 可知若将相机中任意一点变换到星敏感器支架实际坐标系中, 其具体变换方法为:

$$a = T_1^{-1} \cdot A \quad (15)$$

若将星敏感器支架理论姿态坐标系中坐标为 c 的一点转换到星敏感器支架实际姿态坐标系中, 需要先将其转换到相机坐标系, 然后再转换至星敏感器支架实际姿态坐标系中, 转换公式可表示为:

$$C = T_1^{-1} \cdot T_2 \cdot c \quad (16)$$

根据公式 (16) 可以确定星敏感器支架实际姿态到理论姿态的转换矩阵 T_3 , 可表示为:

$$T_3 = T_1^{-1} \cdot T_2 \quad (17)$$

根据该转换矩阵可以求出星敏感器支架实际姿态变换到理论姿态的 RPY 角, 即以当前星敏感器支架坐标系为初始点, 按一定顺序绕 m 、 n 、 q 轴转动 θ_m 、 θ_n 、 θ_q 可获得理论的星敏感器支架姿态。

4 修调量的求解

根据星敏感器支架实际姿态到目标姿态的 RPY 角, 可进行星敏感器支架与星敏感器连接面修调量的求解, 如图 5 所示 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 是星敏感器支架安装面上 4 个修研测点, 将已建立的星敏感器支架坐标系 $O-mnq$ 坐标原点 O 移至 $B1$ 。根据星敏感器支架结构尺寸确定 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 、 $B4$ 的坐标分别是 $(0,0)$ 、 (x_{B2}, y_{B2}) 、 (x_{B3}, y_{B3}) 、 (x_{B4}, y_{B4}) 。星敏感器支架实际坐标到理论坐标的变换角度为 θ_m 、 θ_n 、 θ_q , 其中 θ_q 转角不影响星敏感器的指向性, 因此不进行该角度的变换, 最终计算各点的修调量如公式 (18)~(21) 所示:

$$\delta_{B1} = 0 \quad (18)$$

$$\delta_{B2} = y_{B2} \cdot \theta_m - x_{B2} \cdot \theta_n \quad (19)$$

$$\delta_{B3} = y_{B3} \cdot \theta_m - x_{B3} \cdot \theta_n \quad (20)$$

$$\delta_{B4} = y_{B4} \cdot \theta_m + x_{B2} \cdot \theta_n \quad (21)$$

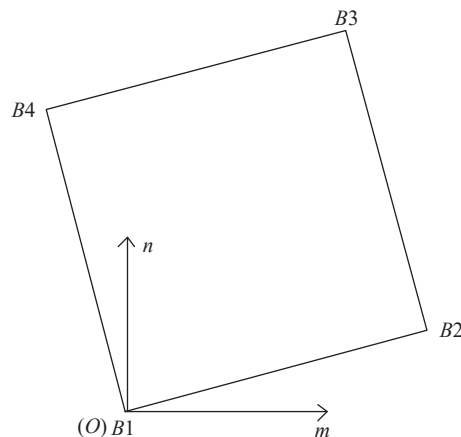


图 5 测点坐标示意图

Fig.5 Schematic diagram of measuring point coordinates

修调时只能对各测点研磨去量, 因此若求解的测点修调量为负数, 需将负值点找正。对最大负值测点进行归零, 然后将其余测点平移校正。上述求解量中若 $x_{B3} \cdot \theta_n > y_{B3} \cdot \theta_m$, 则需对 $B3$ 测点修调量归零, 最终得到的其余各测点的修调量为:

$$\delta_{B1} = x_{B3} \cdot \theta_n - y_{B3} \cdot \theta_m \quad (22)$$

$$\delta_{B2} = y_{B2} \cdot \theta_m - x_{B2} \cdot \theta_n + x_{B3} \cdot \theta_n - y_{B3} \cdot \theta_m \quad (23)$$

$$\delta_{B3} = 0 \quad (24)$$

$$\delta_{B4} = y_{B4} \cdot \theta_m + x_{B2} \cdot \theta_n + x_{B3} \cdot \theta_n - y_{B3} \cdot \theta_m \quad (25)$$

根据该修调量可通过直接修研连接面或增加修研垫的方法对星敏感器支架的实际指向误差进行修正。

5 试验研究

根据上述星敏感器支架的指向性标定及校正理论, 对某相机的星敏感器支架装调进行了试验研究。根据卫星总体技术要求, 星敏感器支架的指向轴 q 要求与相机的坐标轴 xyz 的夹角分别为 37.2491° 、 76.8521° 、 55.8810° , 指向精度要求优于 $30''$ 。星敏感器支架与相机坐标的位姿关系如图 6 所示。对相机和星敏感器支架对接面的平面度进行修研保证平面度优于 0.005 mm 后, 将星敏感器支架安装在相机本

体上,将相机 x 、 z 轴通过经纬仪监测调至与大地水平面平行,用平晶贴靠星敏传感器支架与星敏感器的连接面,通过两台经纬仪交互测量获得星敏传感器支架实际坐标与相机坐标关系,为保证测量数据的精确,对 qx 和 qz 重复测量三次取平均值,然后利用该结果进行其余坐标轴夹角关系求解, qx 和 qz 的三次测量结果如表 1 所示。再根据总体对星敏传感器支架的指向性技术要求,求解星敏传感器支架理论坐标与相机坐标的关系,理论和实际数据对比如表 2 所示。

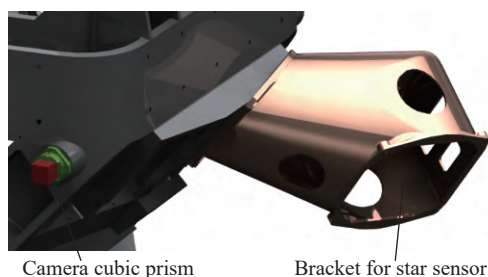


图 6 星敏传感器支架与相机立方棱镜位置关系

Fig.6 Position relationship between star sensor bracket and camera's cube prism

表 1 qx 、 qz 的测量结果

Tab.1 Measurement results of qx and qz

	First	Second/(°)	Third/(°)	Average/(°)
qx	37.4154	37.4162	37.4161	37.4159
qz	55.665	55.6650	55.6646	55.6649

根据星敏传感器支架坐标与相机坐标实际和理论关系的对比可知:星敏传感器支架安装后其指向轴的指向误差分别为: $\Delta qx=0.1668^\circ$, $\Delta qy=0.0909^\circ$, $\Delta qz=-0.2126^\circ$ 。根据星敏传感器支架实际姿态坐标系与相机坐标系的坐标轴夹角关系求解实际姿态的 RPY 角,得 $\theta_x=-13.0570^\circ$, $\theta_y=54.6196^\circ$, $\theta_z=0$ 。再根据星敏传感器支架理论姿态坐标系与相机坐标系的坐标轴夹角关系求解理论姿态的 RPY 角,得 $\theta'_x=-13.1479^\circ$, $\theta'_y=54.8294^\circ$, $\theta'_z=0$ 。根据上述角度可求星敏传感器支架实际坐标系到理论坐标系的姿态变换矩阵为:

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -0.0008 & 0.0036 \\ 0.0008 & 1 & 0.0016 \\ -0.0036 & -0.0016 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

根据该矩阵可求星敏传感器支架实际坐标系到理论坐标系的 RPY 角。得 $Rx=-0.0917^\circ$, $Ry=0.2063^\circ$, $Rz=$

表 2 星敏传感器支架实际坐标系、理论坐标系与相机坐标系关系对比

Tab.2 Relationship comparison between actual coordinate, theoretical coordinate of bracket for star sensor and camera coordinate

		Camera coordinate system		
		$x/(^\circ)$	$z/(^\circ)$	$y/(^\circ)$
Coordinate system of bracket for star sensor	Theory	q	37.2491	55.8810
		m	54.8294	144.8294
		n	100.7159	97.5287
		q	37.4159	55.6649
	Reality	m	54.6196	144.6169
		n	100.6145	97.5163

0.0458° 。由于 Rz 不影响星敏传感器支架指向轴与相机坐标系的姿态关系,因此不对该偏差量进行修调。对星敏传感器支架与星敏传感器对接面修研前,需先确定 4 个检测位置点,然后计算 4 个检测点的修研量。为了方便计算,测点按坐标方向取规则矩形的 4 个角点,同时将星敏传感器支架实际坐标系的原点设置在其中一个测点上。对接面的结构尺寸如图 7 所示,其中 $l_{A0A1}=173$ mm, $l_{A0A3}=188$ mm。实际测点位置如图 8 所示,4 个测点全部设置在星敏感器的连接螺纹孔附近。

根据测量点的位置关系及姿态变换角度,求得各测量点修调量,然后将修调量最大负值点归零。可得各点的修调量可表示为:

$$\delta_{A0} = 0 \quad (27)$$

$$\delta_{A1} = l_{A0A1} \cdot \tan(Ry) = 0.623 \text{ mm} \quad (28)$$

$$\delta_{A3} = l_{A0A3} \cdot \tan(Rx) = 0.301 \text{ mm} \quad (29)$$

$$\delta_{A2} = l_{A0A1} \cdot \tan(Ry) + l_{A0A3} \cdot \tan(Rx) = 0.924 \text{ mm} \quad (30)$$

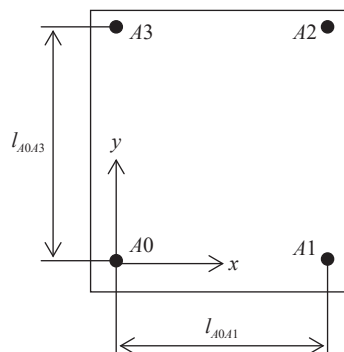


图 7 对接面示意图

Fig.7 Schematic diagram of docking surface

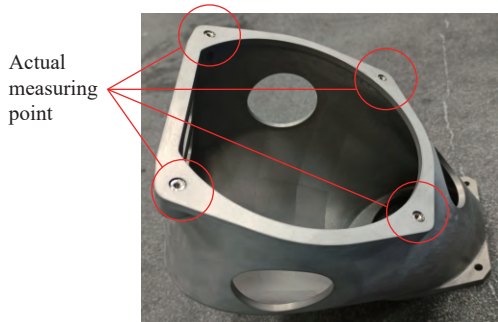


图 8 星敏传感器支架的实际测点

Fig.8 Actual measuring points of star sensor bracket

按上述求解量进行去量修研,同时需保证修调后平面度优于 0.005 mm。修调完对星敏传感器支架重新安装后进行姿态复测,测量步骤同第一次测量,对 qx 、 qz 测量三次取平均值求解,测量结果如表 3 所示,最终坐标关系计算结果如表 4 所示。

表 3 第一次修调后 qx 、 qz 测量结果

Tab.3 Measurement results of qx and qz after the first grinding and calibration

	First/(°)	Second/(°)	Third/(°)	Average/(°)
qx	37.2403	37.2405	37.2416	37.2408
qz	55.8860	55.8850	55.8855	55.8855

表 4 第一次修调后复测结果

Tab.4 Retest result after the first grinding and calibration

		Camera coordinate system		
		$x/(^{\circ})$	$z/(^{\circ})$	$y/(^{\circ})$
Coordinate system of bracket for star sensor	q	37.2408	55.8855	76.8606
	m	54.8355	144.8355	90
	n	100.7098	97.5228	13.1394

根据测量结果,可求星敏传感器支架在第一次修研后指向轴的指向误差分别为: $\Delta qx = -0.0082^{\circ}$, $\Delta qy = 0.0085^{\circ}$, $\Delta qz = 0.0045^{\circ}$ 。相比于修调前其指向精度明显提高。然后按照第一次计算步骤进行第二次修调量的计算,并进行第二次修研。第二次修调去量的结果为: $\delta_{A0} = 0.019$ mm, $\delta_{A1} = 0$, $\delta_{A2} = 0.019$ mm, $\delta_{A3} = 0.038$ mm。修研结束后,进行星敏传感器支架指向轴精度复测,结果如表 5 所示。

从结果可计算,第二次修调后星敏传感器支架指向轴精度 $\Delta qx = -2.52''$, $\Delta qy = 8.64''$, $\Delta qz = -1.8''$ 。该精度满

表 5 第二次修调后复测结果

Tab.5 Retest result after the second grinding and calibration

		Camera coordinate system			
		$x/^{\circ}$	$z/^{\circ}$	$y/^{\circ}$	
Coordinate system of bracket for star sensor	q	First	37.248 9	55.880 6	-
		Second	37.248 2	55.880 4	-
		Third	37.248 1	55.880 4	-
		Average	37.248 4	55.880 5	76.854 5

足指标要求,因此完成对星敏传感器支架的精密装调。在星敏传感器支架的指向性标定及校正过程中,经纬仪的测试误差为 $2''$,平晶的平行度误差约为 $2''$,研磨修正的误差可控制在 $1''$ 以内,因此受上述因素限制最终星敏传感器支架的指向性精度最高可达到 $5''$ 量级。对于上述修正结果,基本已接近极限精度。将修正前和两次修正后的星敏传感器支架指向精度列于表 6 中,将偏差量取绝对值后用柱形图表示,如图 9 所示。

表 6 星敏传感器支架修调前后偏差对比

Tab.6 Comparison of deviation before and after calibration of star sensor support

Situation	Included angle relationship		
	$\Delta qx/(^{\circ})$	$\Delta qy/(^{\circ})$	$\Delta qz/(^{\circ})$
Before correction	600.48	327.24	-765.36
After first correction	-29.52	30.6	16.2
After second correction	-2.52	8.64	-1.8

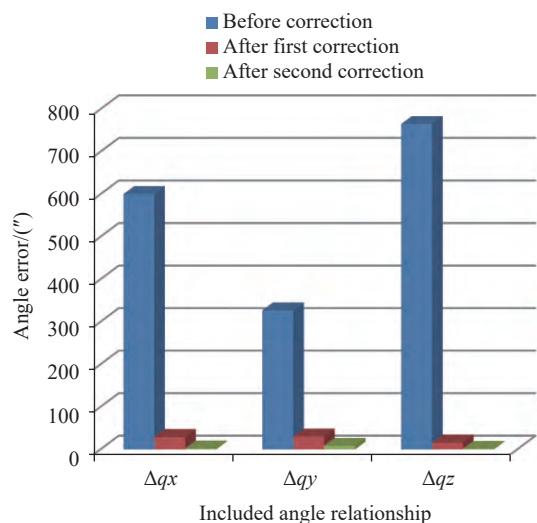


图 9 星敏传感器支架修研前后指向精度柱状图

Fig.9 Pointing accuracy histogram of star sensor bracket before and after correction

6 结 论

由于星敏传感器支架指向轴与相机坐标系具有极其自由的空间夹角关系,同时星敏传感器又具有严格的指向性要求,因此实现星敏传感器支架的超精密装调是提高卫星对图像定位精度的重要解决方案。文中通过交互测量、姿态变换、定量求解及修研的策略提供了一种高效、高精度的星敏传感器支架标定及校正方法。并对某相机进行了星敏传感器支架装调试验研究,通过两轮的迭代修研,使最初的 760" 的装调精度修正到 10" 以内,表明该方法的有效性及其实用性。该方法同样可指导其它有空间姿态关系的精密零部件的装调。

参考文献:

- [1] Jin H, Mao X N, Li X P, et al. Research on star tracker on-orbit low spatial frequency error compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0112005. (in Chinese)
- [2] Mona Zahednamazi, Alireza Toloei, Reza Ghasemi. Different types of star identification algorithms for satellite attitude determination using star sensor [J]. *Aerospace Systems*, 2021, 4: 315-321.
- [3] Yuan L, Wang M M, Wu Y P, et al. Development of space starlight measurement technology: Review [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2020, 41(8): 623724. (in Chinese)
- [4] Sun G, Yang Z H, Wang B L, et al. High precision automatic measurement for alignment of camera and star-sensor in GF-2 [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(11): 2931-2938. (in Chinese)
- [5] Yu C W, Sui J, Chen C, et al. Thermal design and verification of multi-head very high accuracy star sensor onboard GF-7 satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(3): 144-150. (in Chinese)
- [6] Wei N 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 274-280. (in Chinese)
- [7] Jiang F, Wu Q W, Wang Z S, et al. Analysis and verification of structure stability and thermal stability of a bracket of star sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3463-3468. (in Chinese)
- [8] Tian L L. Machining error analysis and experimental study of high-precision star sensor bracket[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering, 2021. (in Chinese)
- [9] Yang Zhongguang, Zhu Xiaocheng, Cai Zhiming, et al. A real-time calibration method for the systematic errors of a star sensor and gyroscope units based on the payload multiplexed [J]. *Optik*, 2021, 225(1): 165731.
- [10] Cao J S, Yuan X X, Gong J Y, et al. The look-angle calibration method for orbit geometric calibration of ZY-3 satellite imaging sensors [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(10): 1039-1045. (in Chinese)
- [11] Zhang Ying, Ding Hongchang, Zhao Changfu, et al. Detecting the normal-direction in automated aircraft manufacturing based on adaptive alignment [J]. *Science Progress*, 2020, 103(4): 1-19.
- [12] Ma L, Zhang Z A. BRDF measuring device design and pointing accuracy analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0517003. (in Chinese)
- [13] An Y Z, An Y C. A new compensation method for the pose error of robot manipulator [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 25(11): 2931-2938. (in Chinese)