

航空遥感器平面反射镜系统装调方法

张健 王健飞 方新 宋来运 刘少明 王雪

Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor

ZHANG Jian, WANG Jian-fei, FANG Xin, SONG lai-yun, LIU Shao-ming, WANG Xue

引用本文:

张健, 王健飞, 方新, 宋来运, 刘少明, 王雪. 航空遥感器平面反射镜系统装调方法[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 534–544. doi: 10.37188/CO.2021–0187

ZHANG Jian, WANG Jian-fei, FANG Xin, SONG lai-yun, LIU Shao-ming, WANG Xue. Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor[J]. Chinese Optics, 2022, 15(3): 534–544. doi: 10.37188/CO.2021–0187

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度变化对金属Ag膜反射镜偏振特性的影响研究

Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror

中国光学. 2018, 11(4): 604 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0604>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

基于无人机遥感的不同施氮水稻光谱与植被指数分析

Analysis of the spectrum and vegetation index of rice under different nitrogen levels based on unmanned aerial vehicle remote sensing

中国光学. 2018, 11(5): 832 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0832>

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

基于伪微分和加速度反馈的航空光电稳定平台控制方法

Control scheme of aerial photoelectrical stabilized platform based on pseudo-derivative and acceleration feedback

中国光学. 2017, 10(4): 491 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0491>

仿生复眼系统的子眼安装孔对准误差检测方法

Alignment error detection method of sub-eye mounting hole for bionic compound eye system

中国光学. 2019, 12(4): 880 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0880>

航空遥感器平面反射镜系统装调方法

张 健¹, 王健飞², 方 新³, 宋来运¹, 刘少明¹, 王 雪^{1*}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量中国科学院重点实验室,
吉林长春 130033;
2. 空军装备部驻长春地区军事代表室, 吉林长春 130000;
3. 空军参谋部, 北京 100843)

摘要:利用平面反射镜进行光路折转以减小航空遥感器体积及质量是一种常用设计手段,而平面反射镜的引入对航空遥感器的装调工作提出了更高的要求。为此本文提出了一种用于航空遥感器平面反射镜系统的装调方法。利用坐标变换法建立经纬仪测量数学模型,推导出单个平面反射镜组件及平面反射镜系统角度偏差(俯仰偏差及方位偏差)与经纬仪测量值之间的对应关系。提出了利用经纬仪完成平面反射镜系统角度偏差测量及装调的方法。最终使镜头光轴与焦平面安装面法线的俯仰偏差和方位偏差均满足不大于 2' 的指标要求。应用该方法已完成 10 余套航空遥感器反射镜系统的装调,方法方便高效。同时,该方法可为各种光学仪器中平面反射镜角度标定及装调提供解决思路。

关 键 词:航空遥感器;反射镜;角度偏差;装调;标定

中图分类号:V241.05;V243.5;V248.1

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2021-0187

Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor

ZHANG Jian¹, WANG Jian-fei², FANG Xin³, SONG lai-yun¹, LIU Shao-ming¹, WANG Xue^{1*}

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Military Representative Office Stationed in Changchun by the Air Force Equipment Department,
Changchun 130000, China;
3. Air Force Staff of the People's Liberation Army, Beijing 100843, China)

* Corresponding author, E-mail: snow85116@163.com

Abstract: It is a common design method to reduce the volume and mass of aerial remote sensors by using the plane mirror to replace the light path. However, the introduction of a plane mirror puts forward stricter requirements for the alignment of the aerial remote sensor. We propose an alignment method for the plane mirror system of an aerial remote sensor. The mathematical model of the theodolite measurement is established by the coordinate transformation method, and the corresponding relationship between the angular deviation (pitch deviation and azimuth deviation) of the single plane mirror assembly and plane mirror system and the

收稿日期:2021-10-30; 修订日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 52105537)

Supported by the National Natural Science Foundation of China: The Young Scientists Fund (Grant No. 52105537)

measured value of the theodolite is deduced. Then a method of measuring and adjusting the angle deviation of the plane mirror system with theodolite is proposed. Finally, the pitch angle deviation and azimuth angle deviation between the lens optical axis and the normal of the focal plane mounting surface meet the index requirements of being no more than $2'$. More than 10 sets of aerial remote sensor plane mirror systems have been aligned using this method, which is both convenient and efficient. At the same time, this method can provide a solution for the angle calibration and alignment of the plane mirror in various optical instruments.

Key words: aerial remote sensor; reflecting mirror; angle deviation; alignment; calibration

1 引言

航空遥感是获取地面信息的重要手段,因其时效性强、侦察活动区域广且机动灵活等特点,在资源普查、军事侦察和地形测绘等诸多领域得到广泛应用^[1-3]。航空遥感器即安装在飞机上用来对地面景物遥感成像的重要光电设备。航空遥感器受装机空间限制,其体积、质量等指标要求往往十分苛刻。

为了满足体积及质量等指标要求,对于采用长焦距透射式光学系统的航空遥感器(通常镜头后工作距离较长),利用平面反射镜进行光路折转是一个不错的设计思路。对于实现光路折转的平面反射镜系统,如何保证镜头光轴经各个反射镜反射后仍与焦平面组件安装面垂直,成为一个亟待解决的问题。李大伟通过自准直平行光管观察十字丝调整遥感器主光轴与像面垂直,但未给出具体装调方法^[4]。张继超等即通过加入两块平面反射镜折转光路,缩小遥感器体积及质量,文中反射光路设计与装调工作主要集中在像面标定上,未提及反射光路的具体装调方法^[5]。王旻等给出了折转光管中两块平行平面反射镜的精密装调方法,利用一对楔形垫圈根据自准直平行光管测量值反复测量、调节^[6],一方面装调效率较低,另一方面该方法不具有普适性。本文以某长焦距航空遥感器为例,对其反射镜系统(包含三块平面反射镜)的装调方法展开研究,利用坐标变换法^[7-8]建立数学模型,结合经纬仪精密角度测量原理^[9-10],给出实用快捷的装调方法。

2 某航空遥感器反射镜系统简介

某航空遥感器采用透射式光学系统,由于后工作距离较长,在系统中增加3块平面反射镜进

行光路折转。整个遥感器的结构示意图如图1所示。该航空遥感器为全景式航空遥感器,主要由扫描组件、前支撑组件、镜头组件、反射镜组件1、反射镜组件2、反射镜组件3、焦面组件和后支撑组件等部分组成。全景式航空遥感器通过转动镜筒对地面景物摆扫成像,镜筒转轴与航向平行,摆扫方向与航向垂直,扫描组件、镜头、各个反射镜组件和焦面组件等同时绕镜筒转轴旋转,从而使TDI CCD对地面景物扫描成像^[11]。

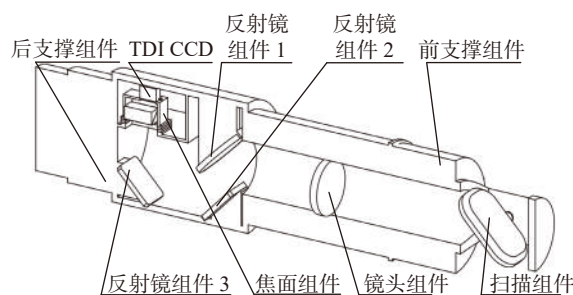


图1 某航空遥感器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of an aerial remote sensor

实际上,镜头组件、焦面组件、反射镜组件1和反射镜组件2均安装在机身上,反射镜组件3安装在后支撑组件上,后支撑组件安装在机身上,如图2所示。因此,以机身上镜头组件的安装面作为装调基准面,讨论3个平面反射镜组成的反射镜系统的装调方法,即如何保证3个平面反射镜组件装调完成后镜头光轴(机身镜头组件安装面法线)与焦面组件安装面垂直,俯仰及方位角度偏差均不大于 $2'$ (利用经纬仪测量)。

以图2中的反射镜组件2为例,建立图示坐标系 $O-xyz$ ($O-y$ 轴垂直纸面向里),显然,在入射光线方向不变的前提下,反射镜2相对于其理论位置绕 $O-x$ 轴(方位角度偏差)和 $O-y$ 轴(俯仰角度偏差)旋转均改变反射光线传播方向,而绕 $O-z$ 轴旋转则对反射光线传播方向没有影响。由于机身上各个反射镜组件安装面的加工误差,即使

单个反射镜组件处于理想角度位置,安装在机身上之后同样还会存在俯仰和方位角度偏差。同时,由于航空遥感器本身属于精密光学仪器,其各零部件的加工精度普遍较高,因加工误差引入的角度偏差属于小角度量。结合反射镜系统装调的实际情况,单个反射镜组件往往俯仰角度偏差比方位角度偏差大得多。综上,提出系统中存在调整环节的单个反射镜组件,装调时只修研俯仰角度偏差;在反射镜系统装调时,将俯仰角度偏差和方位角度偏差的修研分离。这样可以大大减小该反射镜系统的装调难度和装调时间,具体装调流程如图 3 所示。

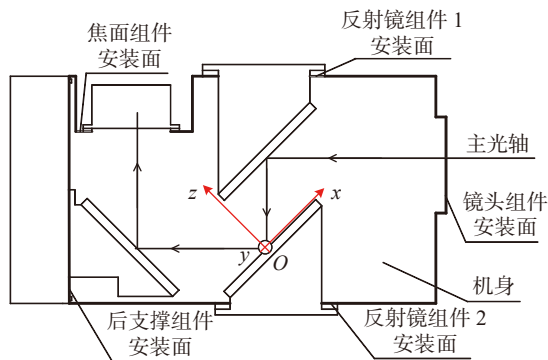


图 2 反射镜系统安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of the mirror system

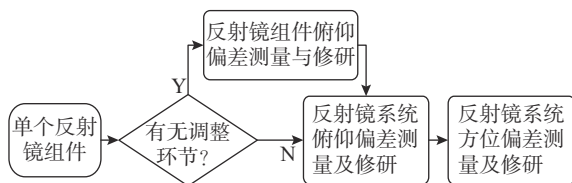


图 3 平面反射镜系统装调流程图

Fig. 3 Alignment flow chart of the plane reflecting mirror system

本文分别从单个反射镜组件和反射镜系统的装调方法出发,通过坐标变换法建立经纬仪测量数学模型,推导出经纬仪测量值与反射镜角度偏差之间的对应关系,从而给出该航空遥感器反射镜系统的装调方法。对于如何保证装调过程中反射镜的面形精度要求本文暂不讨论。

3 坐标系建立及反射镜系统角度偏差测量

通常,在进行反射镜系统装调之前,首先应开

展单个反射镜组件的装调工作,这样可以有效提高后续反射镜系统装调的效率。一般情况下,反射镜镜面与光轴夹角为 $45^\circ/135^\circ$,本文提到的 3 块反射镜亦是如此。因此,首先讨论单个反射镜组件的角度偏差测量方法。

3.1 单个反射镜组件角度偏差测量方法

以反射镜镜面与光轴夹角为 45° 为例,一般利用 45° 棱镜作为标定基准,将 45° 棱镜放置在反射镜组件安装面上,该棱镜角度公差为 $45^\circ \pm 5''$ 。将经纬仪、反射镜组件和 45° 棱镜放置在水平平台上,经纬仪调平,利用经纬仪同时观察反射镜镜面和棱镜 45° 斜面,测量反射镜的角度偏差,如图 4 所示。

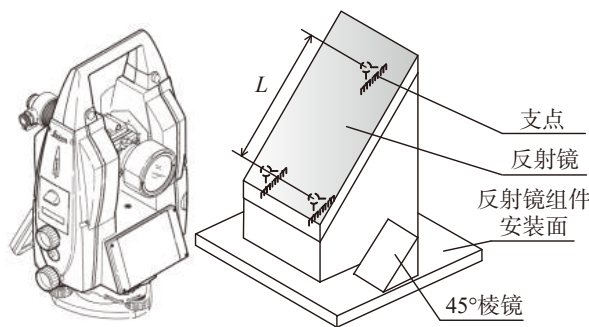


图 4 单个反射镜组件角度偏差测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the angle deviation measurement of a single reflector assembly

如图 5 所示,首先按照理论位置,建立经纬仪测量坐标系 $O_{th}-x_{th}y_{th}z_{th}$ ($O_{th}-y_{th}$ 为俯仰轴, $O_{th}-z_{th}$ 为方位轴,图中给出了两个测量轴读数变大的方向),反射镜组件坐标系 $O_a-x_a y_a z_a$, 反射镜坐标系

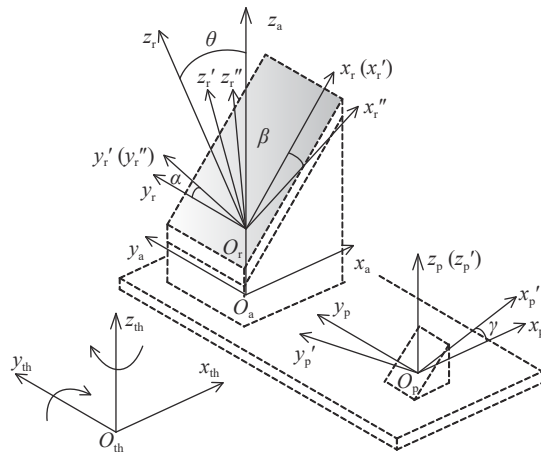


图 5 单个反射镜组件测量坐标系建立

Fig. 5 Establishment of measurement coordinate systems for the single reflector assembly

$O_r-x_r y_r z_r$, 45° 棱镜坐标系 $O_p-x_p y_p z_p$ 。其中, $O_{th}-x_{th} y_{th} z_{th}$ 、 $O_a-x_a y_a z_a$ 和 $O_p-x_p y_p z_p$ 各坐标轴互相平行, $O_r-x_r y_r z_r$ 为 $O_a-x_a y_a z_a$ 绕 O_a-y_a 轴转过角度 $-\theta$ (右手定则) 得到, 此处 $\theta=45^\circ$ 。则反射镜法向量在坐标系 $O_r-x_r y_r z_r$ 中的坐标为 $[0 \ 0 \ 1]^T$, 但由于加工及装

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于 45° 棱镜, 由于测量时其放置的位置可能绕 O_p-z_p 轴转过角度 γ (坐标系 $O_p-x'_p y'_p z'_p$), 则其法向量在棱镜坐标系 $O_p-x_p y_p z_p$ 中的坐标为

$$\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} n_{px} \\ n_{py} \\ n_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ 0 \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\theta=45^\circ$ 。实际测量过程中, 角度 γ 是无法测量的。若在测量过程中转动 45° 棱镜, 即改变角度 γ , 是否存在某一角度 γ , 使经纬仪观察到的被测镜面及 45° 棱镜反射面的自准直十字丝只存在俯仰方向的偏差, 方位方向重合? 此时, 在经纬仪测量坐标系 $O_{th}-x_{th} y_{th} z_{th}$ 中, 被测反射镜法向量 $\mathbf{n}$ 与 45° 棱镜法向量 $\mathbf{n}_p$ 的矢量积应平行于 $O_{th}-x_{th} y_{th}$ 平面, 即向量 $\mathbf{n} \times \mathbf{n}_p$ 的 z 坐标为 0:

$$\sin^2 \varphi = \frac{(1 + \cos^2 \alpha - 3 \cos^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \beta) \cos \alpha \cos \beta - (1 + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta) \sin \beta}{2 \sqrt{\sin^2 \alpha \cos^2 \beta - 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \beta + 1}} + 0.5 \quad (7)$$

由于 α, β 均为小角度, 故式(7)可化简为

$$\sin^2 \varphi \approx 1 - \frac{2 \cos^3 \beta \cos \alpha - 2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin \beta}{2(\cos \beta - \sin \beta)} \approx \sin^2 \beta, \quad (8)$$

即经纬仪测得的俯仰方向角度偏差 φ 近似为被测平面反射镜俯仰方向的角度偏差 β 。考虑到机械及光学零件的加工精度, 被测反射镜两个方向的角度偏差一般不超过 $20'$, 因此, 通过将 α 和 β 在区间 $[-20', 20']$ 范围内取随机数, 仿真计算角度 β 的经纬仪测量误差 (即 $\varphi - \beta$), 图 6 为 α 和 β 均取 100 万次随机数的计算结果, 可见 β 的经纬仪测量误差均落在 $(-4'', 4'')$ 区间内, 完全可以将俯仰方向经纬仪的测量偏差 φ 作为反射镜俯仰方向角度偏差 β 的测量值。

按照上述推导, 在实际测量过程中, 利用经纬仪同时观察反射镜镜面和棱镜 45° 斜面, 在经纬仪视场内应能同时看到两个平面反射回来的十字

配误差, 导致反射镜的法向量偏离理论位置, 假设反射镜法向量的实际位置为分别绕 O_r-x_r 轴转过角度 α (右手定则)、绕旋转后的 O_r-y_r 轴转过角度 β (右手定则), 则反射镜法向量在坐标系 $O_a-x_a y_a z_a$ 中的坐标为

$$\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma \sin^2 \theta - \sin \beta \sin \gamma \sin \theta \cos \theta - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \sin \theta = 0 \quad (3)$$

化简得

$$\tan \gamma = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\cos \alpha \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta} \quad (4)$$

由于 α, β 均为小角度, 故

$$\tan \gamma \approx \frac{\tan \alpha}{\sin \theta} = \sqrt{2} \tan \alpha \quad (5)$$

此时, 经纬仪测得的俯仰方向的角度偏差 φ 即向量 $\mathbf{n}$ 与 $\mathbf{n}_p$ 的夹角

$$\sin \varphi = \frac{|\mathbf{n} \times \mathbf{n}_p|}{|\mathbf{n}| \cdot |\mathbf{n}_p|} \quad (6)$$

等式两边平方, 代入 $\theta=45^\circ$, 并利用式(4)消去 γ 得

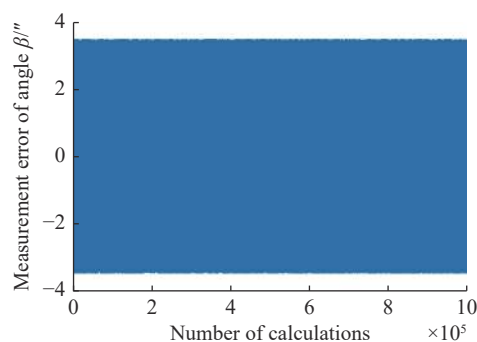


图6 角度 β 经纬仪测量误差的计算结果 (计算次数为 100 万次)

Fig. 6 Calculation results of the theodolite measurement error for angle β (1 million calculation times)

丝像; 转动 45° 棱镜, 使两个十字丝像在经纬仪方位方向重合。微调经纬仪俯仰方向, 设平面反射镜自准直时 (十字丝像在经纬仪视场中心) 经纬仪俯仰角读数为 θ_{m1} , 45° 棱镜自准直时经纬仪俯仰

角读数为 θ_{pm} , 则该反射镜组件的俯仰偏差为

$$\varphi = \theta_{tm} - \theta_{pm} \quad (9)$$

若 $\varphi > 0$, 说明反射镜镜面与组件安装基准面夹角小于 45° ; $\varphi < 0$, 则说明反射镜镜面与组件安装基准面夹角大于 45° 。此时, 如果反射镜与安装支座之间有调整环节, 需要修调反射镜支撑点之间的调整垫, 修研量为

$$\Delta_1 = L \tan \varphi \quad (10)$$

式中, L 为反射镜支点之间的跨距, 如图 4 所示。该航空遥感器反射镜系统中的反射镜组件 2 和反射镜组件 3 都属于这种情况。经过修研调整垫, 使经纬仪观测到的反射镜镜面和棱镜 45° 斜面反射回来的十字丝像在俯仰方向重合, 可使反射镜镜面与组件安装基准面夹角满足 $45^\circ \pm 10''$ 的精度要求。

如果反射镜安装在支撑结构中无调整环节, 则只需反射镜面形精度满足要求即可, 其角度标定及调整在系统联调时通过修研该反射镜组件与机身之间的调整垫完成。本系统中的反射镜组件 1 即属于该情况。

3.2 反射镜系统角度偏差测量方法

依据各个反射镜组件的相对位置关系, 如图 7 所示, 建立经纬仪测量坐标系 $O_{th}-x_{th}y_{th}z_{th}$, 镜头组件安装基准坐标系 $O_{lens}-x_{lens}y_{lens}z_{lens}$, 反射镜组件坐标系 $O_{ai}-x_{ai}y_{ai}z_{ai}$, 反射镜坐标系 $O_{ri}-x_{ri}y_{ri}z_{ri}$ ($i=1, 2, 3$), 焦面组件安装基准坐标系 $O_f-x_fy_fz_f$ 。其中, $O_{th}-x_{th}y_{th}z_{th}$ 、 $O_{ai}-x_{ai}y_{ai}z_{ai}$ 和 $O_f-x_fy_fz_f$ 各坐标轴互相平行; $O_{r1}-x_{r1}y_{r1}z_{r1}$ 为 $O_{a1}-x_{a1}y_{a1}z_{a1}$ 绕 $O_{a1}-y_{a1}$ 轴转过角度 $-\theta_1$ (右手定则) 得到, $O_{r2}-x_{r2}y_{r2}z_{r2}$ 为 $O_{a2}-x_{a2}y_{a2}z_{a2}$ 绕 $O_{a2}-y_{a2}$ 轴转过角度 $-\theta_2$ (右手定则) 得到, $O_{r3}-x_{r3}y_{r3}z_{r3}$ 为 $O_{a3}-x_{a3}y_{a3}z_{a3}$ 绕 $O_{a3}-y_{a3}$ 轴转过角度 $180^\circ-\theta_3$ (右手定则) 得到, 使 $O_{ri}-z_{ri}$ 轴均与反射镜法向量平行, $\theta_1=\theta_2=45^\circ$, $\theta_3=135^\circ$ 。为了计算方便, 使坐标系 $O_{lens}-x_{lens}y_{lens}z_{lens}$ 与 $O_{th}-x_{th}y_{th}z_{th}$ 重合。

首先在镜头组件安装面放置一块玻璃平板, 利用经纬仪自准直, 此时经纬仪出射光线与镜头组件安装面垂直, 然后取下镜头组件安装面平板玻璃, 在焦面组件安装面放置一块玻璃平板, 经纬

仪出射光线经过反射镜系统及焦面组件平板玻璃的反射再次回到经纬仪视场内, 得到的十字丝像将偏离视场中心, 需要建立经纬仪测得的方位、俯仰角度偏差与各反射镜组件角度偏差之间的对应关系。镜头组件安装面和焦面组件安装面由于机械加工误差, 肯定与理想位置存在偏差, 但该偏差在实际测量时与 3 个反射镜组件的角度偏差混合在一起, 因此, 可以认为镜头组件安装面及焦面组件安装面均位于图 7 所示位置, 最终还是体现在反射镜组件的调整量中。则经纬仪对镜头组件安装面平板玻璃自准直后出射光线在坐标系 $O_{th}-x_{th}y_{th}z_{th}$ 中的向量表示为 $A_{in}=[-1 \ 0 \ 0]^T$, 焦面组件安装面平板玻璃的法向量为 $n_f=[0 \ 0 \ -1]^T$ 。

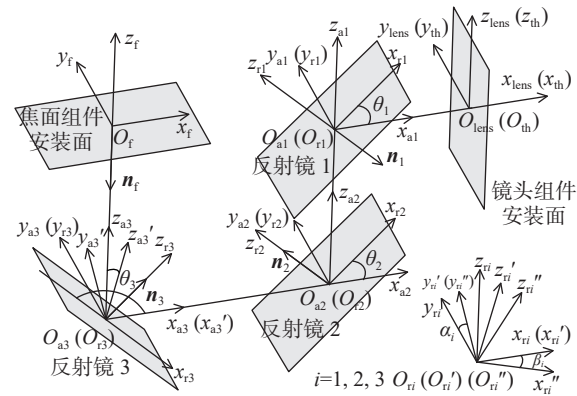


图 7 反射镜系统测量坐标系建立

Fig. 7 Establishment of the measurement coordinate systems for the plane reflecting mirror system

理想情况下, 反射镜 1 法向量在坐标系 $O_{r1}-x_{r1}y_{r1}z_{r1}$ 中的坐标为 $[0 \ 0 \ -1]^T$, 反射镜 2 和反射镜 3 的法向量在坐标系 $O_{r2}-x_{r2}y_{r2}z_{r2}$ 及 $O_{r3}-x_{r3}y_{r3}z_{r3}$ 中的坐标均为 $[0 \ 0 \ 1]^T$, 但由于反射镜组件自身的装调残差或偏差、机身安装面及组件调整垫的加工误差等原因, 导致反射镜的法向量偏离理想位置, 由于引起的偏差均为角度量, 与位置无关, 如图 7 右下角所示, 假设各个反射镜法向量的实际位置为分别绕 $O_{ri}-x_{ri}$ 轴转过角度 α_i (右手定则, 定义为方位偏差)、绕旋转后的 $O_{ri}-y_{ri}$ 轴转过角度 β_i (右手定则, 定义为俯仰偏差), $i=1, 2, 3$, 则各个反射镜法向量在各反射镜组件坐标系 $O_{ai}-x_{ai}y_{ai}z_{ai}$ 中的坐标为

$$n_i = \begin{bmatrix} n_{x1} \\ n_{y1} \\ n_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & 0 & \sin \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_1 & 0 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_2 = \begin{bmatrix} n_{x2} \\ n_{y2} \\ n_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & -\sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_2 & -\sin\alpha_2 \\ 0 & \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_2 & 0 & \sin\beta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_2 & 0 & \cos\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{n}_3 = \begin{bmatrix} n_{x3} \\ n_{y3} \\ n_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_3 & -\sin\alpha_3 \\ 0 & \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_3 & 0 & \sin\beta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta_3 & 0 & \cos\beta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

利用平面反射镜的成像矩阵^[12]

$$\mathbf{R} = \mathbf{E} - 2\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}^T. \quad (14)$$

由此可计算出3个平面反射镜的成像矩阵 $\mathbf{R}_i(i=1, 2, 3)$ 、焦平面安装面平板玻璃的成像矩阵 $\mathbf{R}_f$,那么,对于入射向量 $\mathbf{A}_{in}=[-1 \ 0 \ 0]^T$,其经过反射镜系统和焦平面安装面平板玻璃反射后的出射向量 $\mathbf{A}_{em}$ 可表示为

$$\mathbf{A}_{em} = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_f \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 \mathbf{A}_{in} = \mathbf{R}_s \mathbf{A}_{in}. \quad (15)$$

而代表镜头光轴的入射向量 $\mathbf{A}_{in}$ 通过反射镜系统后,在焦平面安装面处的出射向量 $\mathbf{A}_{er}$ 可表示为

$$\mathbf{A}_{er} = \mathbf{R}_3 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 \mathbf{A}_{in}. \quad (16)$$

如果按照上述公式计算 $\mathbf{A}_{em}$ 、 $\mathbf{A}_{er}$,将十分繁琐且无法直观反映经纬仪测量值与各反射镜组件角

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} -1 & 2\sqrt{2}(\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_3) & 4(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3) \\ 2\sqrt{2}(\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_3) & 1 & 0 \\ 4(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3) & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 2\sqrt{2}\alpha_s & 4\beta_s \\ 2\sqrt{2}\alpha_s & 1 & 0 \\ 4\beta_s & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

此时,由于各个反射镜组件存在角度偏差 α_i 和 β_i ,经纬仪观察到的出射向量 $\mathbf{A}_{em}$ 的十字丝像会偏离经纬仪视场中心,即 $\mathbf{A}_{in}$ 与 $\mathbf{A}_{em}$ 不平行,此时需要利用经纬仪测量该角度偏差。设经纬仪

$$\mathbf{A}_{in} = \begin{bmatrix} \cos p & -\sin p & 0 \\ \sin p & \cos p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q & 0 & \sin q \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin q & 0 & \cos q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos p \cos q \\ -\sin p \cos q \\ \sin q \end{bmatrix}, \quad (21)$$

出射向量 $\mathbf{A}_{em}$ 变为:

$$\mathbf{A}_{em} = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{A}_{in} = \begin{bmatrix} \cos p \cos q - 2\sqrt{2}\alpha_s \sin p \cos q + 4\beta_s \sin q \\ -2\sqrt{2}\alpha_s \cos p \cos q - \sin p \cos q \\ -4\beta_s \cos p \cos q + \sin q \end{bmatrix}, \quad (22)$$

又 $\mathbf{A}_{in}$ 与 $\mathbf{A}_{em}$ 平行,得到方程组

$$\begin{cases} 2\sqrt{2}\alpha_s(\cos^2 p - \sin^2 p) + 2\sin p \cos p + 4\beta_s \sin p \tan q = 0 \\ 2\sqrt{2}\alpha_s \tan q + 4\beta_s \sin p = 0 \end{cases}. \quad (23)$$

考虑到角度 p 和 q 也是小角度,同样作如下近似:
 $\cos p \approx 1$ 、 $\sin p \approx p$ 、 $\cos q \approx 1$ 、 $\sin q \approx q$,且略去高次项得

度偏差之间的关系。由于 α_i 、 β_i ($i=1, 2, 3$)均为小角度,因此,在接下来的计算中作如下近似:
 $\cos \alpha_i \approx 1$ 、 $\sin \alpha_i \approx \alpha_i$ 、 $\cos \beta_i \approx 1$ 、 $\sin \beta_i \approx \beta_i$ (α_i 、 β_i 单位为弧度),且只保留一次项,则3个平面反射镜的成像矩阵可化简为:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 2\beta_1 & -\sqrt{2}\alpha_1 & 1 \\ -\sqrt{2}\alpha_1 & 1 & \sqrt{2}\alpha_1 \\ 1 & \sqrt{2}\alpha_1 & -2\beta_1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 2\beta_2 & -\sqrt{2}\alpha_2 & 1 \\ -\sqrt{2}\alpha_2 & 1 & \sqrt{2}\alpha_2 \\ 1 & \sqrt{2}\alpha_2 & -2\beta_2 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} -2\beta_3 & \sqrt{2}\alpha_3 & -1 \\ \sqrt{2}\alpha_3 & 1 & \sqrt{2}\alpha_3 \\ -1 & \sqrt{2}\alpha_3 & 2\beta_3 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

将其代入式(15)且只取一次项,计算 $\mathbf{R}_s$ 得

绕 $O_{th}-z_{th}$ 轴转过角度 p (右手定则,方位偏差),再绕旋转后的 $O_{th}-y_{th}'$ 轴转过角度 q (右手定则,俯仰偏差),此时经纬仪观测到出射光线十字丝像位于视场中心。注意,此时入射向量 $\mathbf{A}_{in}$ 变为

$$\begin{cases} p \approx -\sqrt{2}\alpha_s = -\sqrt{2}(\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_3) \\ q \approx 2\beta_s = 2(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3) \end{cases}, \quad (24)$$

即经纬仪测得的方位偏差 p 近似为 3 个反射镜组件方位偏差代数之和的 $-\sqrt{2}$ 倍, 经纬仪测得的俯仰偏差 q 近似为 3 个反射镜组件俯仰偏差代数之和的 2 倍。

将式(17)、式(18)和式(19)代入式(16), 得到镜头光轴与焦平面组件安装面法线的俯仰偏差和方位偏差, 即式(24)的计算结果, 也就是说, 利用经纬仪测得的反射镜系统的俯仰偏差和方位偏差就是此时镜头光轴与焦平面组件安装面法线的俯仰偏差和方位偏差。

如前所述, 各个反射镜组件单独装调时未消除方位偏差, 调整环节的反射镜组件俯仰偏差可调整至 $\pm 10''$ 以内; 当各个反射镜组件安装在机身上组成反射镜系统时, 由于机身、调整垫的加工误差仍然会对各个反射镜组件的方位偏差和俯仰偏差产生影响, 各个反射镜组件的方位偏差 α_i 和俯仰偏差 β_i 一般也不超过 $20'$, 因此, 将 α_i 和 β_i 在 $[-20', 20']$ 内取随机数, 仿真计算经纬仪方位和俯仰偏差的近似值与测量真值之间的误差, 图 8 为 α_i 和 β_i 均取 100 万次随机数的计算结果,

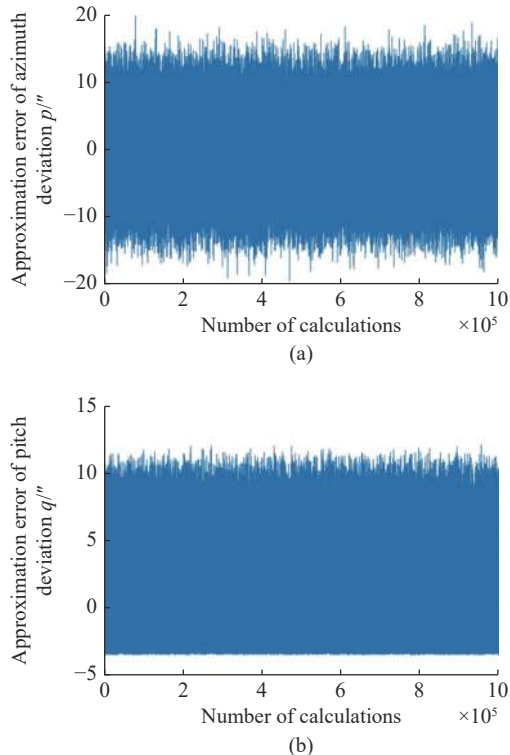


图 8 (a)方位偏差 p 和(b)俯仰偏差 q 近似值误差的计算结果(计算次数为 100 万次)

Fig. 8 Calculation results of the approximate error of (a) the azimuth angle deviation p and (b) the pitching angle deviation q (1 million calculation times)

可见方位偏差 p 的近似值误差均落在 $(-20'', 20'')$ 区间内, 俯仰偏差 q 的近似值误差均落在 $(-4'', 14'')$ 区间内。因此, 可以认为经纬仪测得的方位偏差 p 为 3 个反射镜组件方位偏差代数之和的 $-\sqrt{2}$ 倍, 经纬仪测得的俯仰偏差 q 为 3 个反射镜组件俯仰偏差代数之和的 2 倍。

在实际装调过程中, 利用经纬仪可以直接测得方位偏差 p 和俯仰偏差 q , 故根据式(24)就可以得到 3 个反射镜组件方位偏差和俯仰偏差的代数和。根据图 7 中各反射镜组件方位偏差和俯仰偏差的定义可知, 通过改变一个反射镜组件(比如反射镜组件 2)的方位偏差和俯仰偏差可以消除整个反射镜系统的方位偏差 p 和俯仰偏差 q , 但这需要将反射镜组件 2 与机身之间的调整垫修研成空间角(二面角), 实现难度大。因此, 考虑将调整垫只修研平面角(一面角), 再结合其它操作实现反射镜系统装调。

如图 2 和图 7 所示, 反射镜组件 3 安装在航空遥感器后支撑组件上, 假设后支撑组件和反射镜组件 3 同时绕主光轴 ($O_{\text{lens}}-x_{\text{lens}}$ 轴) 旋转角度 γ (右手定则), 实际计算时, 由于只考虑向量, 可认为反射镜组件 3 坐标系 $O_{a3}-x_{a3}y_{a3}z_{a3}$ 绕 $O_{a3}-x_{a3}$ 轴转过角度 γ 得到 $O_{a3}'-x_{a3}'y_{a3}'z_{a3}'$ 。此时, 反射镜 3 的法向量在坐标系 $O_{a3}-x_{a3}y_{a3}z_{a3}$ 中的坐标由式(13)变为

$$\mathbf{n}'_3 = \begin{bmatrix} n'_{x3} \\ n'_{y3} \\ n'_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{x3} \\ n_{y3} \\ n_{z3} \end{bmatrix} \quad (25)$$

利用式(25)代替式(13), 按照上述方法再次计算经纬仪测得的方位偏差 p' 和俯仰偏差 q' 得

$$\begin{cases} p' \approx -\sqrt{2}(\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_3) - \gamma = p - \gamma \\ q' \approx 2(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3) = q \end{cases} \quad (26)$$

因此, 当将反射镜组件 3 和后支撑组件一起绕主光轴转过角度 γ 后, 只改变了经纬仪测得的方位偏差, 对俯仰偏差基本无影响。于是, 可以对该反射镜系统采用以下装调方法: 通过旋转反射镜组件 3 消除反射镜系统的方位偏差, 旋转角度 γ 等于经纬仪测得的方位偏差 p ; 通过修研反射镜组件 1 或反射镜组件 2 的调整垫平面角, 消除反射镜系统的俯仰偏差, 该平面角为经纬仪测得的俯仰偏差 q 的一半。

需要注意的是,在实际测量过程中,如果不考虑人眼对准误差、经纬仪的测角误差及其它粗大误差,经纬仪测得的就是反射镜系统的俯仰偏差和方位偏差。上述俯仰偏差和方位偏差的近似值是为了将经纬仪测量值与具体的修研环节联系起来,给出具体的装调方法,而并非测量值是近似值。

4 反射镜系统装调实现

在进行反射镜系统装调前,应根据前面提到的方法完成单个反射镜组件的装调。在反射镜系统装调过程中,需要用到玻璃平板,一方面应将玻璃平板及各个安装面擦拭干净,另一方面测量时应多次贴靠平板玻璃,消除可能引入的粗大误差。首先消除反射镜系统的俯仰偏差。

4.1 反射镜系统俯仰偏差装调

将反射镜组件1安装在机身上,利用两块平板玻璃测量反射镜1与镜头光轴之间的夹角,如图9(彩图见期刊电子版)所示。玻璃平板1贴靠在机身镜头组件安装面上,玻璃平板2贴靠在机身反射镜组件2的安装面上。首先利用经纬仪对玻璃平板1进行自准直,记此时经纬仪俯仰轴读数为 θ_{p1} 。撤去平板玻璃1,贴靠平板玻璃2,如果反射镜组件1处于理想位置(图9红色虚线所示),则经纬仪中观察到的十字丝仍与中心重合;若此时反射镜组件1相对于理想位置存在俯仰偏差 β_1 ,则需要调整经纬仪的两个测量轴使光线再次自准直,光线如图9中绿色粗实线所示,记此时经纬仪俯仰轴读数为 θ_{p2} 。则俯仰偏差 $q_1 = \theta_{p2} - \theta_{p1}$,若 $q_1 > 0$,则 $\beta_1 < 0$;若 $q_1 < 0$,则 $\beta_1 > 0$ (如图9所

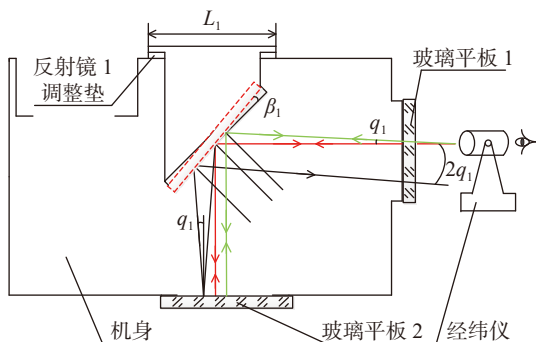


图9 反射镜组件1装调示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the alignment of the first reflector assembly

示)。根据上一节推导结果,调整垫的修研角度即为 q_1 的一半,若 $q_1 > 0$,则左高右低;若 $q_1 < 0$,则左低右高。由式(10)计算调整垫修研量。

反射镜组件1装调完成后,再进行反射镜组件3的装调工作。首先将反射镜组件3安装在后支撑组件上,将后支撑组件安装在机身上。利用玻璃平板1和玻璃平板3进行反射镜组件3角度偏差的测量,如图10(彩图见期刊电子版)所示。平板玻璃1仍贴靠镜头组件安装面,平板玻璃3贴靠机身焦面组件安装面,从原理上,反射镜组件3的俯仰偏差测量和反射镜组件1的俯仰偏差测量是完全相同的:俯仰偏差 $q_3 = \theta_{p2} - \theta_{p1}$,若 $q_3 > 0$,则 $\beta_3 < 0$;若 $q_3 < 0$,则 $\beta_3 > 0$ (如图10所示);反射镜3的修研角度为 q_3 的一半,若 $q_3 > 0$,则反射镜3顺时针旋转;若 $q_3 < 0$,反射镜3逆时针旋转。如果要去除反射镜组件3的俯仰偏差,需要将反射镜组件3拆下,利用其自身调整环节修研反射镜3的角度。此时暂不进行修研工作,继续进行反射镜组件2的装调。

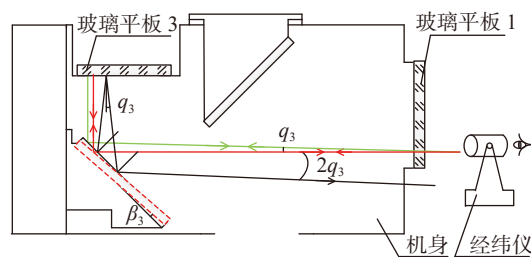


图10 反射镜组件3装调示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the alignment of the third reflector assembly

安装反射镜组件2后,即可测量整个反射镜系统的俯仰偏差,同样需要玻璃平板1和玻璃平板3配合完成,测量原理图如图11(彩图见期刊

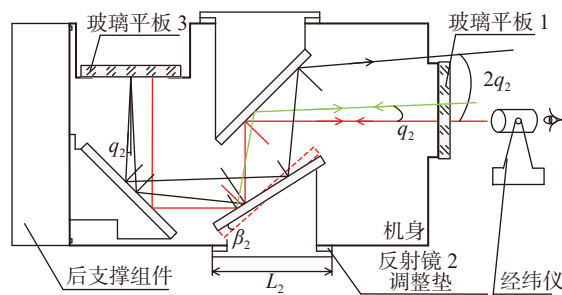


图11 反射镜组件2装调示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the alignment of the second reflector assembly

电子版)所示。此时实际测得的是 3 个反射镜组件俯仰偏差的代数和,可以认为是反射镜组件 2 的俯仰偏差,通过修研其调整垫可消除整个反射镜系统的俯仰偏差。此时,俯仰偏差 $q_2 = \theta_{p2} - \theta_{p1}$,若 $q_2 > 0$,则 $\beta_2 > 0$ (如图 11 所示);若 $q_2 < 0$,则 $\beta_2 < 0$;调整垫的修研角度即为 q_2 的一半,若 $q_2 > 0$,则左高右低;若 $q_2 < 0$,则左低右高。

前面提到,安装反射镜组件 3 后只进行了俯仰偏差测量,未修研消除该角度偏差,而安装反射镜组件 2 后测得的俯仰偏差实际是 3 个反射镜组件俯仰偏差的代数和,若消除反射镜系统的俯仰偏差,需修研反射镜组件 2 调整垫的平面角,角度为 $q_2/2$ 。如果各机械组件安装面的形位公差控制得较好,则角度 $q_2/2$ 应该比较小,此时直接修研反射镜组件 2 的调整垫即可消除反射镜系统的俯仰偏差。但受机械加工精度的影响,有可能角度 $q_2/2$ 较大(大于 $10'$),若仍修研反射镜组件 2 调整垫,会影响反射镜 2 组件紧固螺钉接触面积,引入附加装配应力,并存在安全隐患。此时需要根据反射镜系统的俯仰偏差测量结果 q_2 ,拆下反射镜组件 3,通过修研反射镜 3 角度,使 q_2 减小一半或更多,最终再利用上述方法,通过经纬仪测量及修研反射镜组件 2 调整垫,从而消除整个反射镜系统的俯仰偏差。

4.2 反射镜系统方位偏差装调

通过上一节计算可知,反射镜组件方位偏差可通过旋转后支撑组件(其上安装反射镜组件 3)消除。后支撑组件与后机身为止口配合,联接螺钉与光孔之间有一定的调整量。如图 11 所示,经纬仪对玻璃平板 1 自准直时其方位角读数记为 ψ_1 ,去除玻璃平板 1 后,经纬仪通过反射镜系统对玻璃平板 3 自准直时的方位角读数记为 ψ_2 ,则反射镜系统方位偏差 $p = \psi_2 - \psi_1$ 。根据前面的计算结果,若 $p > 0$,则后支撑组件顺时针旋转角度 p (观察方向为图 11 由经纬仪往后支撑方向看);若 $p < 0$,则后支撑组件逆时针旋转角度 p (p 代表角度值,观察方向同前)。由于后支撑组件重量较大,利用微调机构使其旋转较难实现,具体实现方法为:在后支撑组件及机身贴靠的圆柱面上画一条细线,松开联接螺钉,利用外力使后支撑组件旋转,通过控制两条细线拉开的距离控制后支撑组件的旋转角度,拧紧联接螺钉,待稳定后

再次用经纬仪观察测量,直至反射镜系统的方位偏差满足要求。

4.3 误差分析

在实际装调过程中,通过认真擦拭清洗各安装面,消除了粗大误差。前面提到,机身上镜头组件安装面和焦面组件安装面由于存在加工误差,两个安装面之间的角度偏差就成了一个系统误差,这个偏差可以在反射镜系统装调时被修正,因此可以不考虑。利用经纬仪自准直测量两次,并将两次观测结果作差,这样,经纬仪调平误差作为一个已定系统误差就被消除了,因此,利用经纬仪观测的误差源有两项:人眼对准误差和经纬仪测角误差。

人眼对准误差 σ_{eye} :按照压线对准极限误差 $\delta_1 = 2'$,经纬仪采用 TM5100 型徕卡经纬仪,角放大率为 $\Gamma = 30$,由于该项误差为随机误差,服从均匀分布,故单次测量标准差为^[1]:

$$\sigma_{eye} = \frac{\delta_1}{\sqrt{3}\Gamma} = 2.3'' \quad (27)$$

TM5100 型徕卡经纬仪单次测量的测角误差 $\sigma_1 = 0.5''$ ^[1]。因此,利用经纬仪单次测量的标准差为

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{eye}^2 + \sigma_1^2} = 2.35'' \quad (28)$$

无论是俯仰偏差还是方位偏差,均是经纬仪两次自准直测量值作差,因此,利用经纬仪测得的俯仰偏差和方位偏差的标准差为^[13]:

$$\sigma_{pitch} = \sigma_{azimuth} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_s^2} = 3.3'' \quad (29)$$

取置信系数 $K=3$,此时置信概率为 99%^[13],则经纬仪测得的俯仰偏差和方位偏差的误差为: $\pm 3\sigma_{pitch} = \pm 3\sigma_{azimuth} = \pm 9.9''$ 。

4.4 反射镜系统装调结果

通过上述方法,完成航空遥感器反射镜系统的光机装调工作,保证镜头光轴与机身焦面组件安装面法线在俯仰和方位两个方向上的角度偏差要求。应用本方法,利用型号为 TM5100 的徕卡经纬仪测量,已完成 10 余套该航空遥感器反射镜系统的装调工作,俯仰及方位角度偏差均不大于 $2'$,实际装调完成后镜头光轴与焦平面组件安装面法线的俯仰偏差及方位偏差如表 1 所示,俯仰

偏差均控制在 70"以内,方位偏差均控制在 20"以内,该方法方便快捷,大大提高了装调效率。

5 结 论

本文结合航空遥感器反射镜系统的实际装调作业需求,通过坐标变换法建立了经纬仪测量数学模型,推导了经纬仪测量值与反射镜组件、反射镜系统俯仰偏差及方位偏差之间的对应关系,从而给出该航空遥感器反射镜系统的装调方法。特别需要注意的是,利用经纬仪测量平面反射镜俯仰偏差时,如果有参照物(如 45°棱镜),则经纬仪测得的角度偏差就是其与参照物之间的角度偏差;而利用经纬仪和平板玻璃自准直测量反射镜俯仰角度偏差时,反射镜的俯仰角度偏差(修研量)为经纬仪测量值的一半。这个在实际经纬仪测量作业时是很容易混淆的。本文提出的反射镜系统装调方法,为各种光学仪器中平面反射镜角度标定及装调提供理论指导和解决思路。

表 1 10 套航空遥感器反射镜系统装调结果

Tab. 1 Alignment results of the angle deviation of the reflector system of 10 aerial remote sensors

序号	俯仰偏差	方位偏差
1	50"	10"
2	63"	1"
3	43"	1"
4	63"	10"
5	55"	1"
6	17"	4"
7	56"	2.3"
8	10"	11"
9	49"	15"
10	59"	11"

参考文献:

- [1] 张健. 全景式航空遥感器焦平面组件 TDI 方向标定方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
ZHANG J. Research on calibration method of TDI direction for focal plane assembly in aerial panoramic camera[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- [2] MILLER J L, WAY S P, ELLISON B, *et al.*. Design challenges regarding high-definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 061310.
- [3] 李军, 黄厚田, 修吉宏, 等. 载机飞行参数对倾斜成像重叠率影响及补偿[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1254-1264.
LI J, HUANG H T, XIU J H, *et al.*. Effect and compensation of overlap influenced by flight parameter of oblique aerial camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1254-1264. (in Chinese)
- [4] 李大伟. 长焦距航空遥感器的光学装调[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 29-32.
LI D W. Optical alignment of long focus aerial camera[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(2): 29-32. (in Chinese)
- [5] 张继超, 李大伟. 长焦距光学系统中反射光路的设计与装调[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1496-1499.
ZHANG J CH, LI D W. Design and adjustment of the reflection optical path in a long optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1496-1499. (in Chinese)
- [6] 王旻, 余毅, 王春霞. 折转光管在光电瞄准系统中的应用[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 618-624.
WANG M, YU Y, WANG CH X. Application of reflex light-tube to photoelectric pointing system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 618-624. (in Chinese)
- [7] 王家骥, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)
- [8] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)

- [9] 李斌, 陈佳夷, 王海超, 等. 卡塞格林系统装调过程中高精度测角方法[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 958-962.
LI B, CHEN J Y, WANG H CH, *et al.*. Accuracy angular measurement method in alignment process for Cassegrain telescope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(6): 958-962. (in Chinese)
- [10] 张赢, 丁红昌, 赵长福, 等. 基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 344-352.
ZHANG Y, DING H CH, ZHAO CH F, *et al.*. The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 344-352. (in Chinese)
- [11] 田海英, 惠守文, 李友一, 等. 用作图法判定航空相机TDI CCD积分方向[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(11): 1784-1788.
TIAN H Y, HUI SH W, LI Y Y, *et al.*. Estimation of TDI direction of CCD sensor in aerial camera by graphing method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1784-1788. (in Chinese)
- [12] SCHWERTZ K, BURGE J H. *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis*[M]. Washington: SPIE, 2012: 10-11.
- [13] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



张 健(1986—), 男, 山东济南人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2018 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事航空遥感器光机结构设计及标定技术的研究。E-mail: zjian000@163.com



王 雪(1985—), 女, 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 2012 年于吉林大学获得硕士学位, 主要从事航空遥感器电子学系统及航空产品质量体系管理方面的研究。E-mail: snow85116@163.com