

一种机载红外光谱相机的角位置误差补偿技术

董浩¹, 孙拓¹, 吴丽娜², 唐帅³, 刘晓波¹

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300308; 2. 中国空间技术研究院卫星应用总体部, 北京 100094;
3. 天津清智科技有限公司 天津 300308)

摘要: 机载红外多光谱扫描仪采用摆扫扫描成像机制, 解决了红外光谱相机的光谱分辨率、高空间分辨率和大成像幅宽之间的矛盾, 可实现下视和远距离侧视成像。为了实现采集图像无缝拼接的像元级对准, 需保证红外光谱仪的角位置信息准确。本文针对机载扫描成像光谱仪的几何定位问题进行分析, 指出角位置误差是影响相机几何定位的主要因素, 进而采用一种角位置误差的长短周期双重补偿方法, 对角位置误差进行补偿。地面测试结果表明, 补偿后相机角位置精度提高 10 倍, 且经环境试验验证, 角位置误差仍保持稳定。由机载挂飞试验结果表明, 后图像相对几何精度优于一个像元(10"), 满足图像拼接的几何定位需求。

关键词: 机载红外光谱相机; 扫描成像; 几何定位; 角位置误差补偿

中图分类号: TP731 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1013007

An angular error compensation technology for airborne infrared spectral camera

Dong Hao¹, Sun Tuo¹, Wu Li'na², Tang Shuai³, Liu Xiaobo¹

(1. Tianjin Jinhang Research Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;
2. Institute of Spacecraft Application System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
3. Tianjin TSINTEL Technology Co., Ltd, Tianjin 300308, China)

Abstract: An airborne infrared multispectral scanner can image remotely both in downward-looking and side-looking modes, by solving the contradiction among spectral resolution, high spatial resolution and large FOV imaging with whole device whiskbroom working mode. A theoretical accuracy of the object positioning error can be acquired by simulating the imaging geometry, which indicates that the angle measuring accuracy of the infrared multispectral scanner is the main error source, and should be precise enough to guarantee the linear whisk broom stripe images' pixel-level mosaic accuracy. Subsequently, a method of angular error compensation was adopted to reduce the long term and short term error. After compensation, the angle precision was ten times higher than before through labrotary test, and the accuray remained stable by environmental test. Also, the airborne flight test verifies the effectiveness of the compensation technology, the image relative geometric positioning accuracy is less than one pixel (10"), which can meet the requirements of image mosaic.

Key words: airborne infrared spectral camera; scan imaging; geo-location; angular error compensation

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-07-12

基金项目: 国家某高分重大专项民用航空项目

作者简介: 董浩(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事机载光电载荷及伺服控制方面的研究。Email: donghao-Email@163.com

0 引言

随着国内外无人机的大力发展, 航空对地观测设备取得了长足进步, 各类光学相机、光谱相机层出不穷。由于载机在飞行中存在横滚、俯仰和偏航等低频运动姿态变化和高频线/角振动等因素, 会导致相机视轴抖动, 进而影响成像质量和目标定位精度。

民用领域通常是把相机等传感器集成安装在一个稳定平台上^[1-2], 隔离载机扰动, 保证航测相机工作时成像清晰。在这种方式下, 稳定平台的运动范围通常不超过 $\pm 15^\circ$, 只具备稳像功能, 不具备调整相机光轴指向、倾斜成像功能。因此相机的视场就决定了作业任务的视场, 一般面阵相机视场不超过 $\pm 15^\circ$, 线列相机视场不超过 $\pm 35^\circ$ ^[3]。

摆扫成像是扩大成像视场的有效途径, 在军用侦查领域得到广泛应用, 如 Raytheon 公司的全球鹰光电相机、Goodrich 公司生产的 DB-110 侦查相机, 以及美国 ROI 公司生产的 CA295 侦查相机等, 其侦查视场可达 $\pm 80^\circ$ 。

1 扫描成像红外光谱相机定位

综合考虑到国产探测器阵列规模限制以及测绘的作业效率问题, 借鉴军用侦查相机设计思想, 某大型红外多光谱扫描仪采用摆扫扫描成像方式, 来实现对地光谱成像任务。为实现光谱图像几何无缝拼接, 需保证扫描图像几何定位信息足够准确。对于航空遥感测绘而言, 飞机的姿态信息及相机的角度误差是影响几何定位的主要因素, 位置误差是次要因素, 因此, 文中针对红外多光谱扫描仪的角度误差补偿技术进行深入研究, 通过补偿有效提高光电设备的定位精度^[4]。

1.1 传统航空测绘相机的定位原理

传统航空测绘相机的相机本体安装在航空通用稳定平台上, 以推扫方式进行线列扫描成像或者面阵凝视成像, 随载机完成一个条带的拍摄^[5], 如图 1 所示。位置姿态测量系统 (Position and Orientation System, POS) 同样安装在稳定平台上, 其安装位置与相机固连, 测量值直接反应了拍摄相片的外方位元素, 通过标定或检校消除安装误差的影响, 可获得相片的外方位元素。因此, 在忽略内方位元素误差以及安装误差的前提下, 航测相机的定位精度仅与 POS 精度有关, 与稳定平台本身的精度无关^[6]。

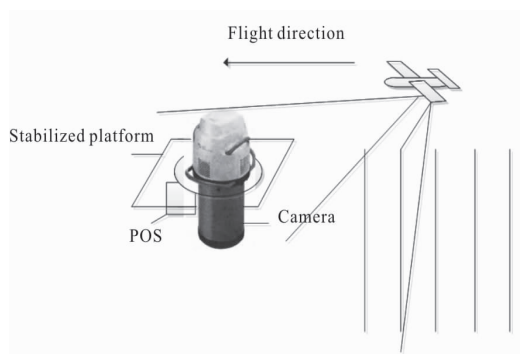
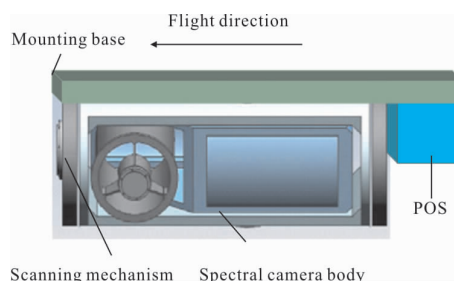


图 1 传统航测相机工作原理

Fig.1 Operating principle of traditional aerial survey camera

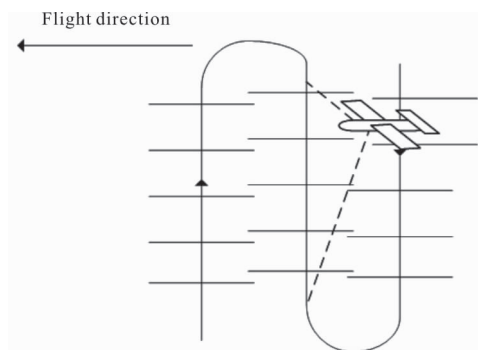
1.2 扫描成像红外光谱相机的定位问题分析

扫描成像光谱相机工作原理如图 2 所示, 光谱相机安装在滚动运动机构上, 随滚动机构大角度姿态调整, 可实现倾斜成像, 倾斜角度可达 $60^\circ \sim 70^\circ$, 有利于对远距离地物、航线受限条件下的地物进行测量。在低速高比飞行全视场扫描条件下, 无论内部器件采用面阵相机还是采用线阵相机, 有效扫描成像视场可达 $\pm 80^\circ$ ^[7-9]。



(a) 设备组成示意图

(a) Schematic diagram of equipment composition



(b) 地面成像轨迹

(b) Imaging trajectory on ground

图 2 扫描成像光谱相机工作原理

Fig.2 Operation principle of scan imaging spectral camera

受动杆臂因素和高精度 POS 体积质量范围的影响, POS 需固连在安装基座上, 其测量值为安装基座的运动状态, 不直接反映光谱相机的姿态信息, 因此光谱相机的定位需通过 POS 信息与扫描机构测角信息合成获得^[10]。

1.3 两种工作方式的图像定位方式比较

传统航测相机工作方式下相机的姿态精度取决于 POS 姿态精度和 POS 安装误差两个因素, 其中安装误差为系统误差, 但不影响扫描条带间的图像拼接。图像的相对几何精度仅取决于 POS 本身的精度, 现阶段高精度 POS 姿态精度已优于 10", 可满足空间角分辨力不高于 100 μrad 的相机实现像元级对准。

与传统航测相机不同, 多光谱扫描仪的姿态精度不仅取决于 POS 姿态精度、POS 安装误差, 还取决于扫描机构测角误差等三个因素, 受航空设备体积重量的限制, 运动机构刚度受限, 相机的测角精度一般在角分级, 难以满足光谱相机高精度几何定位和图像拼接的需求, 因此需要对相机的测角精度进行补偿。

2 扫描成像测角机理分析

扫描成像红外光谱相机采用圆感应同步器进行测角, 感应同步器具有寿命长、可靠性高、成本低以及环境适应性强等优点, 广泛应用在航空、航天等军事领域, 精度可达 1"量级。

圆感应同步器是依据电磁感应效应将角位移量转换为电信号的一种传感器, 由定子和转子组成, 如图 3 所示。圆感应同步器定子为分段绕组, 分段绕组由空间相位相差 90°电角度的两相正交绕组构成, 转子为连续绕组。通过两组线圈互感变化来检测其相互位置, 因此, 需要有激磁信号来产生关系磁场。激磁信号一般为正弦信号, 频率 10 kHz 左右。

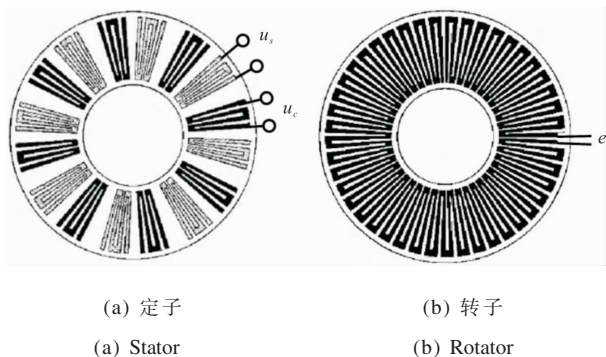


图 3 圆感应同步器示意图

Fig.3 Schematic diagram of round inductosyn

圆感应同步器的激磁方式有两种: 分段绕组激磁连续绕组输出和连续绕组激磁分段绕组输出, 信号处理方式同样有鉴相方式和鉴幅方式两种^[11-12], 因此, 得到 4 种对应的测角方案。由于圆感应同步器是感应元件, 它的磁路和电路都不会饱和, 因此, 两种激磁方式是由圆感应同步器电气误差造成的原理上相同, 通过函数变压器可获得精确的两相正交电压, 有利于输出信号解算, 因此, 选用分段绕组激磁连续绕组输出方式。考虑到幅值检测方法难度低于相位检测方法, 因此, 利用鉴幅方式, 加到转子两项绕组激磁电压为:

$$u_s = U_m \cos \theta_d \sin \omega t \quad (1)$$

$$u_c = -U_m \sin \theta_d \sin \omega t \quad (2)$$

它们分别在定子感应出的电动势为:

$$e_s = k_v U_m \cos \theta_d \cos \omega t \sin(\varphi_e) \quad (3)$$

$$e_c = -k_v U_m \sin \theta_d \cos \omega t \cos(\varphi_e) \quad (4)$$

则定子总感应电势为:

$$\begin{aligned} e &= e_s + e_c = k_v U_m \cos \theta_d \cos \omega t \sin \theta_e - k_v U_m \sin \theta_d \cos \omega t \cos \theta_e = \\ &= k_v U_m \cos \omega t (\cos \theta_d \sin \theta_e - \sin \theta_d \cos \theta_e) = \\ &= k_v U_m \cos \omega t \sin(\theta_e - \theta_d) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: k_v 为传感耦合系数; U_m 为激磁电压幅值; ω 为激磁电压角频率; θ_e 为感应电动势的相位角, 在一个节距内与定子和转子的相对角位移有一一对应的关系, 每经过一个节距, 变化一个周期 360°。

设在原始状态时 $\theta_e = \theta_d$ 时, $e = 0$ 。然后转子相对定子有一角位移, 则小角度情况下感应电动势增量为:

$$\Delta e = k_v U_m \cos \omega t \sin \Delta \theta_e \approx k_v U_m \cos \omega t \Delta \theta_e = k_v U_m \cos \omega t \Delta \theta_e \quad (6)$$

可见在角位移增量 $\Delta \theta_e$ 较小的情况下, 感应电动势增量的幅值 Δe 与 $\Delta \theta_e$ 成正比, 通过鉴别电压 Δe , 就可以测出一个节距内的 $\Delta \theta_e$ 大小。

选用 360 极对感应同步器, 感应电动势的相位角 $\theta_e = 360\theta$, 因此, 每转过 1°机械角度, 电角度走过一个周期, 测角系统分辨力 0.000 1°, 因此, 感应同步器测角范围为 0.000 0°~0.999 9°, 通过设置计数器进位, 对整数位进行累加, 可实现 0.000 0°~359.999 9°的高分辨力、宽范围的角位置读数。

如此节分析, 采用的感应同步器为 360 极对, 每 1°机械角度, 电信号变化一个周期(360°)。因此, 测角误差呈现长、短周期特点。以 360°为一个长周期, 整数度误差随着机械角度变化而变化, 以 1°为一个短周期, 小数误差随着电角度变化而变化。由于平均效应的存在, 理论上长周期误差仅与器件误差和安装

误差有关。由于小角度范围内安装误差和轴系回转变化较小,理论上短周期误差仅与测角电路电气误差有关。由于长、短周期误差相互独立,因此,需进行长、短周期误差的双重补偿。

3 角位置误差分析及补偿原理

感应同步器测角元件的测角误差来源主要包含四方面因素:机械轴系的回转运动误差、感应同步器的安装误差、感应同步器的制造误差以及测角电路电气误差。所选用的感应同步器精度优于 1",感应同步器制造误差可以忽略,因此,机载光谱相机角位置误差主要影响因素为轴系回转误差、感应同步器的安装误差以及测角电路电气误差。

根据测角误差呈现周期性特点,可利用谐波分析法对测角误差进行分析,由参考文献[13]分析可知,一次谐波与二次谐波是测角误差的主要误差源,因此,文中采用非线性谐波分析及曲线拟合的方法,根据采样数据来辨识一次谐波与二次谐波系数。

3.1 长周期误差拟合

机械轴系回转误差、感应同步器安装误差影响测角误差的长周期分量,通常以机械角度 360°为一个周期。轴系回转误差和感应同步器安装误差越大,则测角误差的长周期分量值越大。

采用自准直仪和 24 面体棱镜进行测角误差标定和补偿,通过 360°内 24 点的标定数据,采用最小二乘拟合的方法对测角误差曲线进行拟合。长周期误差表达式如公式(7)所示:

$$e_L(\theta)=e_0+A_{L1c}\cos\theta+A_{L1s}\sin\theta+A_{L2c}\cos2\theta+A_{L2s}\sin2\theta \quad (7)$$

式中: θ 为角位置; A_{L1c} 、 A_{L1s} 、 A_{L2c} 、 A_{L2s} 为拟合系数,采用拟合出的模型进行补偿并复测,若补偿后测角精度满足定位精度指标的 1/3,则可进行后续步骤,若不满足,则需重新拟合长周期误差模型。

3.2 短周期误差拟合

测角电路电气误差体现为测角误差的短周期分量,随着感应同步器电势相位角的变化而变化,选用感应同步器为 360 极对,以机械角度 1°为一个周期。在 1°范围内轴系回转误差以及安装误差的变化量很小,因此,1°范围的测角误差主要由测角电路电气误差引起。

采用 23 面体棱镜的数据标定,将标定数据根据小数部分进行排序,将排序后的数据采用最小二乘拟合的方法对测角误差曲线进行拟合。短周期误差

表达式如公式(8)所示:

$$e_S(\theta)=A_{S1c}\cos\theta+A_{S1s}\sin\theta+A_{S2c}\cos2\theta+A_{S2s}\sin2\theta \quad (8)$$

式中: A_{S1c} 、 A_{S1s} 、 A_{S2c} 、 A_{S2s} 为拟合系数,采用拟合出的短周期模型进行补偿并在补偿的基础上重新进行 23 点标定,若补偿后测角精度满足定位精度指标,则补偿结果有效,若不满足,则需重新拟合长周期误差模型。

3.3 误差补偿

由于任意位置角度值既包含误差长周期分量又包含误差短周期分量,因此,首先进行误差长周期分量的检测和补偿,再进行短周期误差分量的测试和补偿,最终感应同步器测角误差模型为:

$$e(\theta)=e_L(\theta)+e_S(\theta) \quad (9)$$

取 $\hat{\theta}=\theta-e(\theta)$ 作为补偿后测角值。

4 试验结果

4.1 长周期误差补偿

对相机的角位置长周期误差进行测试,测试位置为 0°~345°,每隔 15°进行一个数据采样,共 24 个测试点。补偿前后角位置误差如表 1 所示,可见补偿前

表 1 长周期误差补偿结果

Tab.1 Compensation results of long-period error

$\theta/(^\circ)$	Error before compensation/(")	Error after compensation/(")
0	0	0
15	0.2	0
30	0.6	0.3
45	0.5	0.1
60	0.5	0
75	0.8	0.5
90	1.3	0.7
105	1.9	1.1
120	2.4	1.8
135	2.8	2
150	2.8	1
165	2.9	2.2
180	2.6	1.6
195	2	0.9
210	1.7	0.9
225	1.1	0.2
240	0.9	-0.3
255	0.9	-0.1
270	1	-0.4
285	0.8	-0.6
300	0.9	-0.3
315	0.6	-0.3
330	0.5	-0.4
345	0.8	0.1

误差不大于 $2.7''(3\sigma)$, 补偿后误差不大于 $2.4''(3\sigma)$ 。长周期误差在 $3''$ 量级, 表明感应同步器安装误差以及轴系回转误差影响较小, 因此, 补偿效果不明显。

4.2 短周期误差补偿

对相机的角位置短周期误差进行测试, 测试位置为 $0^\circ \sim 345.3478^\circ$, 每隔 15.6522° 进行一个数据采样, 共 23 个测试点。补偿前后角位置误差如表 2 所示, 可见补偿前误差不大于 $145.6''(3\sigma)$, 补偿后误差不大于 $2.7''(3\sigma)$ 。与长周期误差相比, 补偿前短周期误差要提高一个量级, 表明感应同步器测角电路电气误差较大。补偿后精度提高 54 倍, 有效减小了测角误差。

表 2 短周期误差补偿结果

Tab.2 Compensation results of short-period error

$\theta/(\circ)$	Error before compensation/ $('')$	Error after compensation/ $('')$
0	0	0
15.652 2	18	0.2
31.304 4	-82.1	0.6
46.956 5	22.2	0.5
62.608 7	0.2	0.5
78.260 9	-84.8	0.8
93.913 0	37.7	1.3
109.565 2	-14.9	1.9
125.217 4	-79.8	2.4
140.869 6	45.2	2.8
156.521 7	-28	2.8
172.173 9	-73.8	2.9
187.826 1	50.8	2.6
203.478 3	-41.8	2
219.130 4	-61.7	1.7
234.782 6	50.2	1.1
250.434 8	-52	0.9
266.087 0	-47	0.9
281.739 1	44.4	1
297.391 3	-63.6	0.8
313.043 5	-24.5	0.9
328.695 7	31.2	0.6
344.347 8	-74.9	0.5

4.3 环境试验验证

进行温度循环、振动试验前后光谱相机的测角误差稳定性验证结果如表 3 所示, 试验前测角误差为 $2.7''(3\sigma)$, 经过温度、振动试验后, 测角误差增大至 $5.4''(3\sigma)$, 表明补偿结果有效, 测角精度保持稳定。

表 3 角位置稳定性测试

Tab.3 Angular stability test

$\theta/(\circ)$	Before testing/ $('')$	After testing/ $('')$
0	0	0
15.652 2	0.2	2.3
31.304 4	0.6	4.3
46.956 5	0.5	-0.6
62.608 7	0.5	2.8
78.260 9	0.8	5
93.913 0	1.3	-0.2
109.565 2	1.9	3.4
125.217 4	2.4	3.2
140.869 6	2.8	0.4
156.521 7	2.8	2.7
172.173 9	2.9	3.6
187.826 1	2.6	-0.4
203.478 3	2	2.3
219.130 4	1.7	3.3
234.782 6	1.1	0.5
250.434 8	0.9	2.2
266.087	0.9	3.2
281.739 1	1	0.6
297.391 3	0.8	2.6
313.043 5	0.9	3.2
328.695 7	0.6	-1.3
344.347 8	0.5	4.2

4.4 飞行试验验证

利用飞行试验的红外谱段拼接影像对扫描仪测角误差进行验证, 取某一谱段拼接图像如图 4 所示, 可见图像拼接部位平齐, 无明显拼接缝隙现象, 相邻条带影像相对定位精度优于 1 个像元 ($10''$), 有效验证了机载光谱相机角位置误差补偿的有效性。



图 4 拼接图像

Fig.4 Stitching image

5 结 论

文章对机载光谱相机的定位原理进行了分析,指出角位置误差是影响相机定位误差的主要因素。给出了相机的测角原理和解角算法,依据测角原理对测角误差进行了分析,并根据装配过程中的实测结果对光谱相机角位置长、短周期误差进行了非线性双重补偿,经过环境试验验证、补偿结果稳定有效。机载挂飞试验表明:光谱相机定位精度优于 10",满足当前图像拼接的需求,相关算法可移植到侦查转塔、侦打型目指吊舱中。

装配过程中状态与实际带载状态存在一定差异,制约了相机定位精度的进一步提高,采用飞行试验对补偿算法进行验证,时间、经费代价较高,出现问题难于反复验证,因此,需进一步研究实际带载状态、运动范围受限条件下的定位精度测试补偿方法和外场工况条件下的角位置误差的高精度检测方法。

参考文献:

- [1] Fang Jiancheng, Qi Zihui, Zhong Maiying. Feedforward compensation method for three axes inertially stabilized platform imbalance torque [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(1): 38-43. (in Chinese)
房建成, 戚自辉, 钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(1): 38-43.
- [2] Jiang Hongxiang, Ding Zhushun, Wang Yuanyuan, et al. Inertial stabilization and attitude tracking in the geographic coordinate system of the large platform [J]. *Navigation and Control*, 2017, 16(3): 12-17. (in Chinese)
蒋鸿翔, 丁祝顺, 王媛媛, 等. 大型平台的惯性稳定与地理坐标系姿态跟踪 [J]. 导航与控制, 2017, 16(3): 12-17.
- [3] Li Haixing, Hui Shouwen, Ding Yalin. Development and key techniques of optical mapping equipment in foreign airborne [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 16(3): 12-17. (in Chinese)
李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 16(3): 12-17.
- [4] Liu Yanjun, Yan Haixia, Wang Donghe. Calibration for wide field of view infrared theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 832-836. (in Chinese)
刘岩俊, 闫海霞, 王东鹤. 大视场红外光电经纬仪精度标定 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 832-836.
- [5] Li Junjie, Guan Yanling, Yang Mengmeng. Development of digital airborne camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(1): 54-56. (in Chinese)
李军杰, 关艳玲, 杨蒙蒙. 数字航测相机的研究进展 [J]. 测绘科学, 2013, 38(1): 54-56.
- [6] Yang Hongtao, Zhang Guangdong, Shi Kui, et al. Aerial camera geo-location method based on POS system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 1-8. (in Chinese)
杨洪涛, 张广栋, 史魁, 等. 一种基于 POS 系统的航空相机目标定位方法 [J]. 光子学报, 2018, 47(4): 1-8.
- [7] Li Yongkun, Lin Zhaorong. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2017, 8(6): 11-18. (in Chinese)
李永昆, 林招荣. 国外远距斜视航空相机发展概况 [J]. 航天返回与遥感, 2017, 8(6): 11-18.
- [8] Lareau A G, Partynski A J. Dual-band framing Cameras: technology and status [C]//International Symposium on Optical Science & Technology, 2000, 4127: 148-156.
- [9] Sementelli R G. EO/IR Dual-band Reconnaissance System DB-110 [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering Airborne Reconnaissance, 1995, 2555: 222-231.
- [10] Du Yanlu, Ding Yalin, Xu Yongsen, et al. Geo-Location algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 37(3): 0328003. (in Chinese)
杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0328003.
- [11] Li Haixia, Zhang Rong, Han Fengtian. Error testing and compensation of an inductosyn-based angular measurement system [J]. *J Tsinghua Univ(Sci & Technol)*, 2016, 56(6): 611-616. (in Chinese)
李海霞, 张嵘, 韩丰田. 感应同步器测角系统误差测试及补偿 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(6): 611-616.
- [12] Lu Zhongda. Research on dynamic angle-measuring project by amplitude discrimination mode of inductosyn [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*. 2003, 43: 48-51. (in Chinese)
陆仲达. 鉴幅型感应同步器动态测角方案研究 [J]. 测试技术学报, 2003, 43: 48-51.
- [13] Zhang Gong, Zhang Xiaofei, Wang Yufeng, et al. Study on error compensation of angular position measurement [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2016, 30(4): 353-357. (in Chinese)
张功, 张晓飞, 王昱峰, 等. 角位置测量误差补偿方法研究 [J]. 测试技术学报, 2016, 30(4): 353-357.