

高分七号双线阵立体测绘相机系统集成与测试

李重阳, 张志飞, 吕 宠, 朱永红, 边志峰, 张春瑞, 王 蓉, 刘 辉, 都晓寒

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要: 2019 年 11 月 3 日发射的高分七号立体测绘卫星搭载了前、后视两台高分辨率遥感相机, 分别从前、后两个方向对地面同一景物进行不同角度的观测, 从而形成立体测绘影像。在立体测绘相机的实验室研制阶段, 需要确保双线阵相机的线阵水平、共焦一致性、内方位元素与畸变的高精度测试。为了满足高分七号双线阵相机上述技术指标的要求, 采用了计算机辅助焦平面快速装调方法以及高精度内方位元素与畸变测试方法, 所用方法提高了装调与测试效率, 保证了测试精度, 相机共焦性优于 ± 0.04 mm, 线阵水平优于 $\pm 1'$, 畸变测试精度优于 $2.3 \mu\text{m}$, 可为其他大比例尺测绘遥感相机的研制提供参考。

关键词: 双线阵; 测绘; 系统集成; 内方位元素; 畸变

中图分类号: V443.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200143

System integration and test of GF-7 bi-linear array stereo mapping sensing camera

Li Chongyang, Zhang Zhifei, Lv Chong, Zhu Yonghong, Bian Zhifeng,
Zhang Chunrui, Wang Rong, Liu Hui, Du Xiaohan

(Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of
Space Mechanics & Electricity Beijing 100094, China)

Abstract: GF-7 stereo mapping satellite launched on November 3, 2019 was equipped with two high-resolution remote sensing cameras “Front camera” and “Back camera”. By the two cameras, the same scene on the ground can be observed from different angles for forming a 3D mapping image. During the development of the stereo mapping camera in the lab, the horizontality of the linear array, field confocal, high-accuracy measurement for elements of interior orientation and distortion should be guaranteed. In order to meet the requirements of the above technical indicators of GF-7 bi-linear array cameras, computer-aided rapid fast adjustment for focal plane and high-precision test for elements of interior orientation and distortion was presented. These methods used in the GF-7 bi-linear array camera improve the efficiency of adjustment and test and guarantee the accuracy of the test results. Finally, confocal plane of each camera is better than ± 0.04 mm, horizontality of each linear array is better than $\pm 1'$, the accuracy of distortion is better than $2.3 \mu\text{m}$. It can provide reference for other large scale mapping camera.

Key words: bi-linear array; mapping; system integration; elements of interior orientation; distortion

0 引言

大比例尺航天测绘相机作为重要的天基测绘装备,可满足国家对大比例尺基础地理信息产品的需求。与一般的普查相机和详查相机相比,测绘相机对光学系统的分辨率、畸变及内、外方位元素的要求更加严格^[1-2]。不但要求成像清晰、分辨率高,相机的内方位元素、畸变等也需要在集成与测试中予以重点关注。当前,长焦距、大视场、无色差、低畸变和场曲的航天测绘相机普遍采用离轴反射式光学系统。如:美国的 Quickbird2、印度的 CARTOSAT-I 相机和日本的 ALOS.PRISM 相机均为离轴三反光学系统^[3-5],高分七号双线阵相机同样选用离轴三反光学系统。这类光学系统视场偏置,焦平面与焦面组件安装面一般成一定的夹角,这就导致在进行焦平面装调时焦平面的共焦调整和线阵水平调整会相互耦合,增加了装调测试难度。在实验室系统集成阶段,由于受时间成本和经济成本的制约,一般不会将镜头与焦面组件的集成装调放在模拟在轨运行工况下的热真空环境中进行,主、被动控温措施也不会完全开启,相机的光机组件受温度梯度及温度波动影响会非常明显,所以必须高效、高精度地完成系统集成与测试工作。

1 高分七号系统集成测试的特点

高分七号双线阵相机包含前、后视两台相机,均采用离轴光学系统,在利用全色 CCD 探测器进行测绘的基础上,为了提高相机的工作效率,获取更多的地物信息,增加了多光谱探测器。系统集成时需要将焦平面组件按照要求安装到理想位置,其中线阵水平和各视场、各谱段共焦一致性尤为重要。

1.1 相机的光学系统

如图 1 所示,相机采用离轴三反视轴偏置的光学系统,相机的焦距、MTF、畸变、力热稳定性等关键技术指标满足实际使用需求。

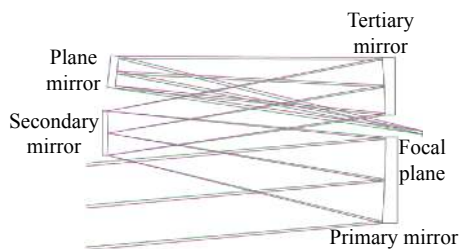


图 1 双线阵相机光学系统

Fig.1 Optical system of bi-linear array camera

1.2 光机组件系统集成的要求及难点

如图 2 所示,定义光学系统坐标系 $O-XYZ$,坐标原点 O 为光学系统的理想焦平面几何中心所在的点。定义 CCD 焦面组件坐标系为 $O'-X'Y'Z'$,坐标原点 O' 为 CCD 焦平面组件全色谱段的中心像元所在的点。CCD 焦平面组件坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 相对于光学系统坐标系 $O-XYZ$ 绕 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角度分别为 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$,相对零点 O 的位移分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 。经过分析可知,6 个参数在调整过程中相互耦合,给光机组件的系统集成带来很大的难度。

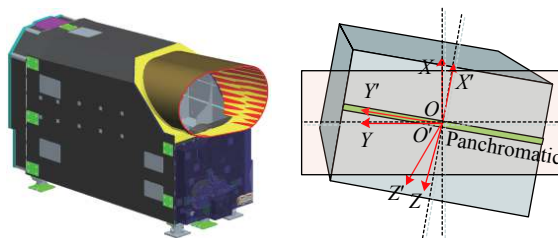


图 2 相机结构模型及坐标系定义示意图

Fig.2 Structure model and coordinate system definition diagram of camera

双线阵相机通过采用一系列高精度光机稳定性设计和热控设计,确保相机光机结构在轨的高稳定性。但在实验室研制阶段,如果相机长时间开机运行,仅靠热管对关键部组件的散热难以保证相机的光机组件的热稳定性,从而影响系统集成测试结果。

综上,为了降低温度梯度及温度波动对装调测试结果的影响,双线阵相机的系统集成与测试必须简洁、高效。

2 计算机辅助系统集成方法

利用长焦距、大口径平行光管,基于调制函数法来完成相机焦平面组件的装调。为了保证集成测试精度,需要配备制冷设备和温度传感器,确保相机在每次测试过程中焦面组件、镜头及主框架温升区间的一致性。在保证相机状态及环境条件一致的前提下快速、多轮次测试,找到焦面组件空间位置的最优解。

2.1 焦面组件装调测试方法

建立如图 3 所示的测试系统,利用测量手段将平行光管的视轴与相机的视轴调至平行状态。在进行焦面组件装调时,需建立相机安装基准与焦面组件之

间的空间位置关系。平行光管焦面处安装 MTF 测试靶标,用相机对测试靶标进行成像,计算出相机在各视场、各波段(全光谱段和多光谱谱段)的 MTF,得到 CCD 在各视场、各波段的离焦量。

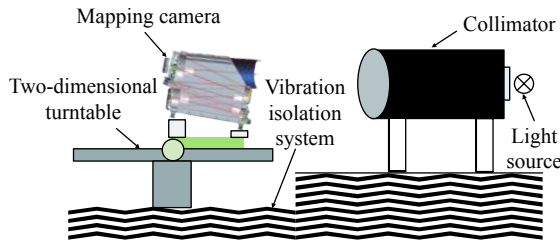


图 3 系统集成测试示意图

Fig.3 System integration test diagram

2.2 建立计算机辅助装调模型

获取初步的光学测试数据后,建立焦面组件与相机镜头之间的三维模型,进一步将光学测试数据转换为机械加工数据,从而获得满足技术要求的垫片厚度的解。

利用三维设计软件建立焦面组件与焦面组件安装面的模型,如图 4 所示。以焦面组件中全光谱段的中心像元为基准点,以探测器的线阵水平度不变为约束条件,将上述 MTF 测试获得的各视场、各波段的离焦量通过焦面组件在 $O'-X'Y'Z'$ 坐标系中分别或同时绕 X' 轴和 Y' 轴旋转以及沿 Z' 轴平移来补偿,从而快速获取焦面组件调整后理想的空间位置。然后,在三维模型中计算调整前后两个状态下调整垫片在各安装孔位处的厚度差,最终确定焦面组件安装垫片的修配量。

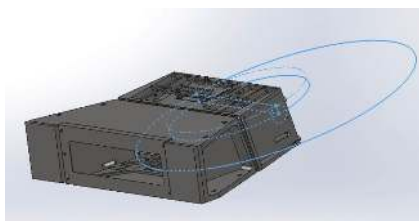


图 4 焦面组件装调模型

Fig.4 Assembly model of focal plane subassembly

2.3 实验验证

经过多轮测试后,在三维模型的指导下确定了焦面组件的最佳空间位置,仅经过一轮垫片修配就完成了焦面组件的集成工作。测试结果表明,相机整机各

视场及各波段的 MTF (详见表 1) 均可满足技术要求,各片 CCD 间的共焦性优于 ± 0.04 mm,线阵水平优于 $\pm 1'$ 。

表 1 后视镜 MTF

Tab.1 MTF of the back camera

Test project	P	$B1$	$B2$	$B3$	$B4$
Average MTF	0.2	0.36	0.36	0.37	0.36

3 高精度内方位元素与畸变测试技术

内方位元素与畸变的测试精度是影响测绘相机成图精度的重要因素,各级摄影测量数字化测图规范对测绘相机的内、外方位元素的测试误差均有明确的规定,测绘相机实验室测试结果作为摄影测量处理的初始值使用,其测试精度会影响初期的解算效率和精度。

3.1 测试原理及测试难点

国内外通常采用光电精密测角法对长焦距航天测绘遥感相机的内方位元素与畸变进行测试,测试原理如图 5 所示。图中: N' 为被测相机镜头的后节点, O 为像面中心, P 为像面测量主点位置,角度 ΔW 为测量主点和像面中心偏差所成的角度, f 为被测相机主距, H_i 为测量点, H'_i 为被测点的理想位置, L_i 为 H_i 距像面中心 O 点的距离, W_i 为对应 H_i 点的偏差。

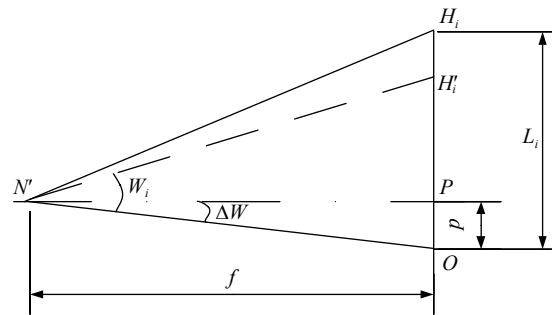


图 5 一维内方位元素与畸变测试原理

Fig.5 Measuring principle of elements of interior orientation and distortion for one dimension

根据图中的几何关系, H_i 点的畸变计算公式为:

$$D_i = L_i - f \tan W_i + p \tan^2 W_i \quad (1)$$

为了求解该方程,一般令畸变的平方和最小,从而得到该超定方程的解^[6-7],求出主点和主距:

$$\left\{ \begin{aligned} f &= \frac{\left(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i \right)} \\ p &= \frac{\left(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i \right)} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

相机的主点与相面中心位置的差别一般在像元级,可以忽略不计,即 $p=0$,可以得到:

$$f = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan W_i / \sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \quad (3)$$

假设被测相机的主距值 f 已知,可以得到:

$$p = \left(\sum_{i=1}^N f \cdot \tan^3 W_i - \sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan^2 W_i \right) / \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i \quad (4)$$

将采集到的每个采样点的质心位移 L_i 以及对应的角量 W_i 代入公式 (2) 中得到主点 p 和主距 f , 再将主点 p 和主距 f 代入公式 (1) 中求解每个采样点的畸变 D_i 。

畸变测量误差随着被测相机视场角的增大而变大,其中测角误差是畸变误差的主要来源,因而提高测角精度是关键。主距测试误差与被测相机设计的视场角有关,被测相机设计的视场角越小,主距的测试误差越大。在视场角一定的情况下,提高测试设备的测角精度也是提高主距测试精度的关键。在确保测角精度的前提下,适当增加采用点数量可以提高主距和畸变的测量精度^[8]。但随着采样点数量的提高,相机开机测试的时间也会相应的延长,被测相机和测试系统的不稳定性会制约测试精度的提高。所以,测试系统测角精度的提高、采样点数量与测试时间的冲突是该相机内方位元素与畸变测试的难点。

3.2 区域比较法预标定转台示值误差

根据上节分析可知,在较短的测试时间内如何能确保测试系统具备较高的测角精度是高效、高精度完成内方位元素与畸变测试的关键。高精度转台分度误差的来源是多方面的,包括轴系误差、偏心误差、光栅分度误差、细分误差等,所有误差综合起来构成转台的分度示值误差。对于转台的综合误差,一般采用精度更高的仪器设备对其误差进行检定,然后采用

插值的方式对其分段补偿,补偿后的分度视值误差可优于 2" 甚至更高,比较常见的检定方法是直接比较法和排列互比法^[9-12]。对于大型高精度转台,由于其体积巨大,运行缓慢,一般采用直接比较法。考虑到高分七号双线阵相机进行内方位元素与畸变测试时,仅仅使用水平旋转 5° 以内的小区间,比较理想的检定方法是采用区域比较法测量出测试点的分度视值误差,然后利用非线性拟合方法对检定区域内的分度视值误差进行拟合与预测,从而可获得检定区域内较高精度的转台分度视值误差,为实现被测相机内方位元素与畸变的高精度测量提供了有力保障。

3.3 实验验证

(1) 检定数据采集

建立如图 6 所示的测试系统,在温度 (20±0.5) °C、湿度 50%±5% 的条件下对高精度转台水平方向 92°~112° 之间的区域进行分度视值误差检定。在 92°~112° 范围内,每隔 0.5° 选取一个测量点,在该区域共采集 41 个点,重复采集 10 组有效数据,将分度视值误差绘制成图,如图 7 所示。

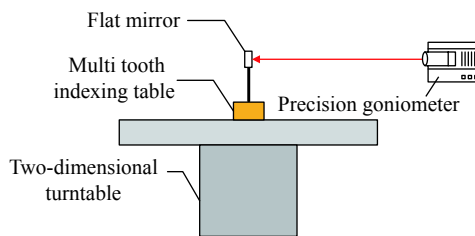


图 6 分度误差检定示意图

Fig.6 Verification diagram of the dividing error

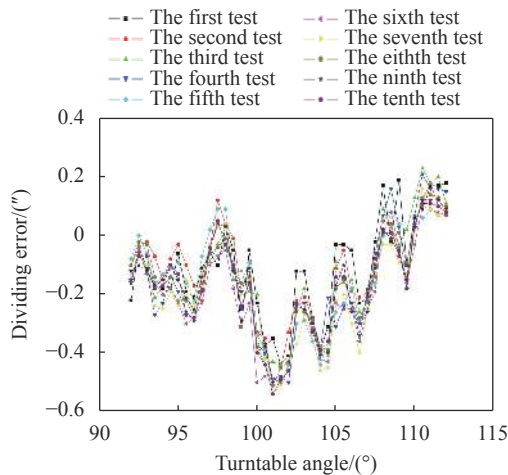


图 7 分度误差测量值

Fig.7 Measured value of dividing error

对测试数据进行统计分析,计算得到每个采样点视值误差 10 次测试数据的均方根最大值为 0.081"。从图 7 中可以看出,转台视值误差具有一定的重复性,可作为系统误差叠加到测试结果中。采用肖维纳准则剔除较不可信的粗大误差后,视值误差平均值如图 8 所示,每个采样点视值误差 RMS 最大值为 0.037"。

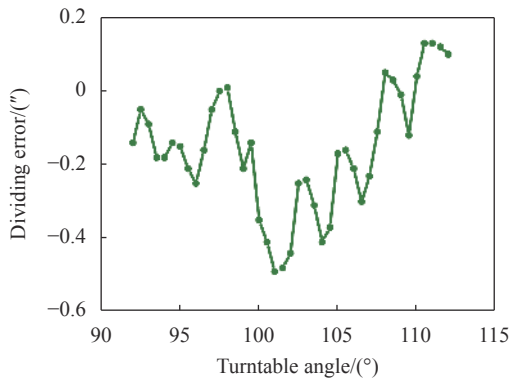


图 8 分度误差平均值

Fig.8 Average value of dividing error

(2) 分度误差拟合

常用的曲线拟合方法有分段线性拟合法、最小二乘拟合法、样条函数差值法以及神经网络算法等^[13-15]。各种拟合方法各有优缺点,其中神经网络算法非常适合此类非线性拟合,它结构简单易于实现,最重要的是其拟合精度高。采用 BP 神经网络模型对高精度转台示值误差数据进行拟合,拟合值与实测值如图 9 所示。通过对拟合结果的分析可知,采用 BP 神经网络模型可以达到很高的非线性拟合精度,小区域内转台分度误差的 RMS 优于 0.2",可以满足遥感相机高精度畸变测量对转台分度精度的要求,同时可以降低测试时间 50% 以上。

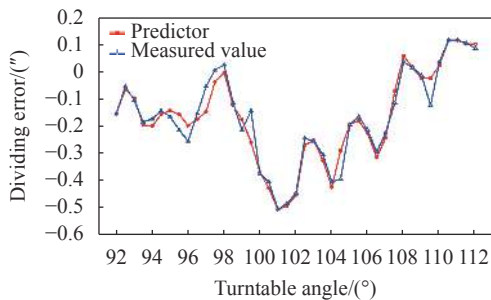


图 9 拟合值与实测值对比

Fig.9 Comparison graph of fitted value and measured value

(3) 内方位元素与畸变测试

将获取的转台分度误差应用到高分七号某台相机的畸变测试中,被测相机全视场共选取 55 个采样点,进行了 10 次有效测试。分别使用转台的原始视值和补偿后的视值对被测相机的各个测试点的畸变进行了计算和统计。表 3 给出了两种数据处理结果对应的 55 个点的畸变测量值的均方根。

表 2 采样点畸变测量值的均方根

Tab.2 RMS of measurement of distortion of sampling points

Test point	RMS of distortion	RMS of distortion after compensation	Test point	RMS of distortion	RMS of distortion after compensation
1	0.2	0.2	29	0.4	0.0
2	1.8	1.8	30	0.0	0.1
3	0.3	0.3	31	0.5	0.5
4	1.7	1.7	32	1.8	1.8
5	1.1	1.1	33	1.1	1.1
6	0.5	0.5	34	1.5	1.5
7	0.4	0.0	35	0.3	0.0
8	0.0	0.0	36	0.3	0.0
9	0.0	0.0	37	1.1	1.1
10	1.2	0.1	38	0.0	0.0
11	3.0	1.8	39	0.0	0.0
12	2.7	1.4	40	0.6	0.0
13	1.6	1.1	41	0.1	0.0
14	3.5	1.9	42	1.0	0.0
15	3.3	2.1	43	1.6	1.6
16	2.9	2.2	44	0.0	0.0
17	2.1	2.1	45	0.1	0.1
18	1.2	1.2	46	0.5	0.5
19	0.0	0.0	47	0.5	0.5
20	0.8	0.8	48	0.4	0.4
21	0.9	0.9	49	0.0	0.0
22	0.2	0.0	50	0.2	0.2
23	1.7	1.2	51	0.0	0.0
24	0.0	0.0	52	0.3	0.3
25	1.6	0.0	53	0.2	0.2
26	1.2	1.2	54	0.5	0.5
27	2.1	2.0	55	0.4	0.4
28	0.0	0.0			

经过对比,使用补偿后的转台分度误差得到的畸变测量值的 RMS 降低 35%。

4 结 论

利用计算机辅助装调方法快速完成了高分七号双线阵相机的系统集成与测试,既保证了各视场、各谱段的 MTF 及共焦精度,又保证了相机的几何装调精度。区域比较法预标定转台示值误差与 BP 神经网络非线性拟合的应用,可以有效提高大型高精度转台在小范围内的分度精度,从而实现相机内方位元素与畸变的高效、高精度测量,满足大比例尺航天测绘相机的实验室测试需求。目前,高分七号双线阵相机已成功发射,下传图像显示成像效果良好,验证了实验室研制阶段系统集成与测试方法合理、可行。

参考文献:

- [1] Yao Yuan, Xu Yongshen, Ding Yalin, et al. Optical-system design for large field-of-view three-line array airborne mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2334-2343. (in Chinese)
- [2] Yue Liqing, Zhang Jiyou, Fu Ruimin, et al. Alignment method of axis angle and linear array parallelism for three-line array mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, 33(3): 35-40. (in Chinese)
- [3] Lv Yong, Feng Qibo, Sun Shijun, et al. Feasibility analysis of on-orbit intersection angle monitoring for tree-line-array mapping camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3390-3395. (in Chinese)
- [4] Zhao Yuchen, He Xin, Zhang Kai, et al. Optical design of miniaturized and large field of view off-axis optical system based on freeform surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1218001. (in Chinese)
- [5] Tian Tiejun. The optical design of multispectral camera [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2013, 6(11): 78-81. (in Chinese)
- [6] Fu Ruimin, Zhang Yuanming, Zhang Jiyou. Study on geometric measurement methods for line-array stereo mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, 32(6): 62-67. (in Chinese)
- [7] Li Chongyang, Dong Xin, Yue Liqing, et al. Testing method of distortion for space remote sensing camera with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117003. (in Chinese)
- [8] Zhang Jiyou. Simulation of geometric measurement method for stereo mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, 3(3): 48-54. (in Chinese)
- [9] Guo Jingbin, Cao Hongyan, Wang Kexin, et al. Check of indexing error for turntable and establishment of its compensation model [J]. *Journal of Tianjin University*, 2014, 47(6): 524-529. (in Chinese)
- [10] Gao Guanbin, Wang Wen, Lin Kengyuan, et al. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1766-1772. (in Chinese)
- [11] Wang Lei, Zhang Zhongwu, Wang Zhen, et al. Piecewise interpolation measurement in circular indexing angle measurement verification [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(1): 6-10. (in Chinese)
- [12] Cao Xuedong, Fan Tianquan, Wu Shibin, et al. Current developments of measurement techniques for geometry parameters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 884-889. (in Chinese)
- [13] Fan Tiansuo, Rui Bing. The realization of spline interpolation based on MATLAB [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2011, 29(2): 238-240. (in Chinese)
- [14] Tang Zongyao. A pedagogical exploration into the cubic spline interpolation in the course of numerical analysis [J]. *Journal of Kashgar Teachers College*, 2015, 36(3): 10-12. (in Chinese)
- [15] Ye Bing. An arbitrary angle measurement system based on genetic and neural network real-time error correction [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004. (in Chinese)

第一作者简介: 李重阳(1987-),男,高级工程师,硕士,主要从事空间光学遥感相机的装调与检测方面的研究。Email: jlulcy508@sina.com

