

高光谱成像仪等效焦面装调模组设计

高志良

(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:高光谱成像仪 CCD 组件在装调时,纵向需要满足 20 μm 焦深要求,横向需要实现光谱维、空间维的对准。为了避免检测时对昂贵的 CCD 频繁安装、拆除,设计了一种等效焦面装调模组。等效模组按照 CCD 组件的实测尺寸精密制造,提供了可供显微镜观察的模拟光谱像。通过测量实际光谱像和模拟光谱像的位置差别能够获取修磨垫的修整量,并实现光谱像和 CCD 像元的横向对准。试验表明,存在工具显微镜测量误差、修磨垫加工误差、互换性误差时,光谱像面各处离焦量均小于焦深。试验中仅用 3 次迭代即达到 MTF 为 0.3 的要求,提高了装调效率和操作安全性。

关键词:高光谱成像仪;等效焦面装调模组;蒙特卡罗方法;焦深;修磨垫

中图分类号:TH741 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140704.0644

Design of hyperspectral imager equivalent focal plane assembling module

GAO Zhi-liang

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

* Corresponding author, E-mail: gaozl@ciomp.ac.cn

Abstract: When assembling CCD of hyperspectral imager, 20 μm focal depth should be satisfied in longitudinal direction, and alignment in spectral and spacial direction should also be achieved. An equivalent focal plane assembling module is designed to avoid frequent installation of expensive CCD during measurements. The equivalent module is precisely manufactured according to measured dimensions of CCD module. It also provides simulated spectral image that could be observed by microscope. By measuring distance between real and simulated spectral image, spacer's reshape value is calculated, and spectral image is aligned to CCD laterally. Experiment shows that the whole spectral image's defocusing value is in focal depth in the presence of tool microscope measuring error, spacer reparation error and interchangeability error. MTF is higher than 0.3 after 3 iterations in experiment, which shows an improvement on efficiency and safety.

Key words: hyperspectral imager; equivalent focal plane assembling module; Monte Carlo method; focal depth; spacer

1 引言

目前高性能空间光学遥感器普遍采用传输型数据获取方式,制造过程中均涉及到 CCD 组件的装配调整^[1-3]。由于 CCD 器件昂贵且易损坏、定位精度要求高,故装调时的安全、工作效率问题突出。

CCD 焦面组件在高光谱成像仪主体上的安装是整个光机装调的最后一个环节。此前通过对光谱仪和望远物镜的装调,可确保成像光谱仪的光谱分辨率和空间分辨率^[4-5],此时狭缝展开的光谱面与成像光谱仪主体的相对位置已经固定。焦面装调的目标,就是将其固定于主体,保证光谱像面准确落在 CCD 感光面上:(1)纵向上须保证各视场、各波长光谱像离焦量均不超过焦深;(2)横向上须满足 CCD 空间维平行于单色像方向,特定波长在 CCD 光谱维上的像元编号符合设计值等指标。由于棱镜色散光谱仪固有的谱线弯曲、梯形畸变^[6-7]以及谱线漂移,第二个要求往往难以严格满足,但可以通过光谱定标^[8-12]缓解;第一个要求是 CCD 焦面组件装调的关键。

实际状态下,由于存在光学与机械基准不重合误差、光学元件曲率半径和离轴量加工误差、结构件加工误差,光谱面相对于主体框架的位置与设计值亦存在误差。高光谱仪光学件、机械元件众多,导致累计误差更大,相对于系统焦深这些误差是不可容忍的,需要用修磨垫进行相应的补偿,使 CCD 焦面组件安装后的感光面与光谱面准确重合。

传统的 CCD 焦面组件安装方法^[13]是在其工作状态下微量移动焦面组件的位置,以输出图像的清晰度或能量集中度最高为判据确定焦面正确的位置。此法需对焦面带电操作,且难以准确测量修磨垫的修整量,CCD 损坏风险较大、装调效率较低。本方法设计等效焦面装调模组,可准确获取垫片需要的修整量,极大减少对 CCD 组件的拆装次数,降低损坏风险、提高装调效率。

2 工作原理与结构设计

2.1 工作原理

如图 1 所示,等效焦面模组由分划板和支撑、结构件构成。分划板朝着光谱像的一面有针对不同谱线的多条细刻线,相互位置符合单色像的色散设计间隔。以 CCD 组件尺寸的实测数据为依据,精密制作等效模组,使模组下端面和刻线面的距离等价于 CCD 组件下端面和感光面的间距,其中考虑了 CCD 保护玻璃的厚度对光谱像距的延长,目的是当光谱像与模组的刻线重合时,若用 CCD 组件替换等效模组,光谱面能准确落在感光面上。

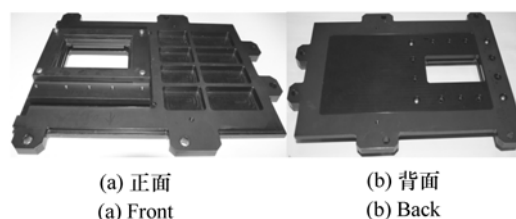


图 1 等效焦面装调模组

Fig. 1 Equivalent focal plane assembling module

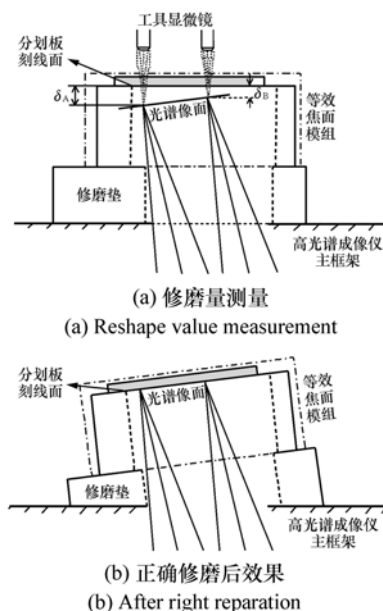


图 2 等效模组工作原理

Fig. 2 Operating principle of equivalent module

焦面装调的关键是准确确定修磨垫的修磨角度和深度并实现其高精度加工。图 2(a) 是修磨量测量示意图,用高压汞灯照射光谱仪狭缝,可在光谱像面上形成特征波长的清晰单色像。通过短焦深的工具显微镜(可见近红外波段采用目镜筒处连接红外变像管的方法)观察光谱像和刻线的横向位置,若有差别可平移、转动等效模组实现光谱像与刻画线的横向对准;读取多视场、多波长的离焦量 δ ,即可确定修磨垫理论修磨量,据此对其数控加工、手工研磨,直到满足光谱像面与刻线面准确重合的要求,如图 2(b) 所示。由于等效焦面组件与真实 CCD 组件具有高度的互换性,保证了 CCD 组件一经安装即满足焦深要求。

2.2 等效焦面装调模组结构设计

等效焦面装调模组的结构设计如图 3 所示,定位块的作用是确保模组换为 CCD 组件时的横向位置。图 4 是等效模组的分划板。

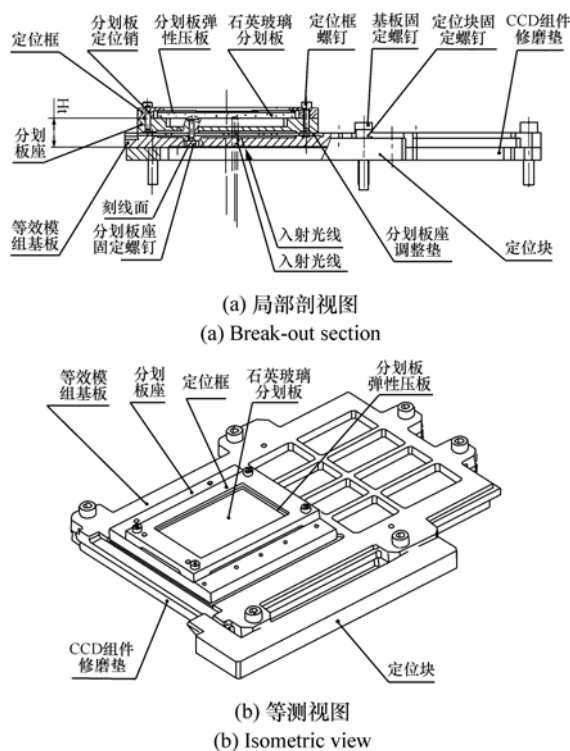


图 3 等效焦面装调模组设计

Fig. 3 Design of equivalent focal plane assembling module

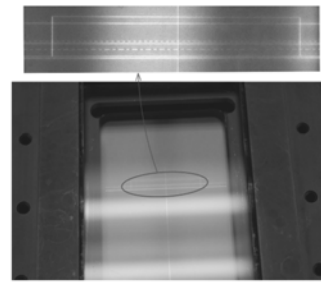


图 4 等效模组分划板

Fig. 4 Equivalent module's reticle

3 CCD 焦面定位精度分析

3.1 坐标系定义

模拟装配模组协助 CCD 焦面准确定位主要依靠其 3 个特征来实现:(1)采用工具显微镜,能够对光谱线、等效模组刻画线的纵向距离定量测量,从而计算修磨垫的理论修磨量(角度及深度);(2)采用数控加工机床实现对修磨垫的精密加工;(3)等效模组与 CCD 组件具有高的可互换性。

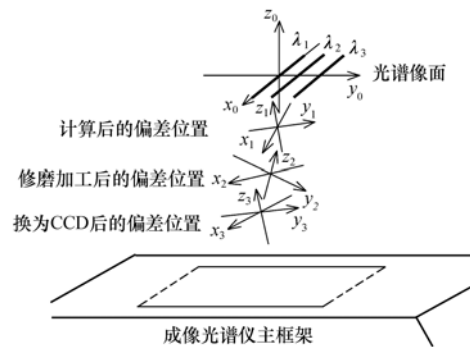


图 5 坐标系定义

Fig. 5 Coordinates definition

然而,由于工具显微镜存在物方景深、数控机床的加工精度限制、等效模组与 CCD 组件的尺寸一致性误差,将模组换为 CCD 组件后,感光面与光谱面仍不重合。CCD 焦面的最终定位精度取决于上述三环节累积误差的大小,各像元处的离焦须处于系统焦深 $\pm 20 \mu\text{m}$ 之内。精度分析涉及的坐标系定义如图 5。 x_0y_0 :光谱像面坐标系, x_0, y_0 分别沿着空间维、光谱维,光机装调完成之后,

该坐标系与光谱仪主框架相对位置不变; x_1y_1 为根据显微镜测量值计算修磨垫修磨量后等效模组的刻划线面, x_1y_1 与 x_0y_0 不重合是由测量误差引起的修磨量计算误差所致; x_2y_2 为按计算值完成修磨垫数控加工后,等效模组安装后刻划线面的位置, x_2y_2 与 x_1y_1 不重合是加工误差所致; x_3y_3 为用 CCD 组件替换等效模组后 CCD 感光面的等效位置, x_3y_3 与 x_2y_2 不重合是由等效模组和 CCD 组件尺寸不一致性所致。最终, x_0y_0 与 x_3y_3 平面的距离即是引入上述各种误差之后的离焦量。

3.2 修磨量计算误差

根据光学设计,400 ~ 1 000 nm 光谱像面尺寸为 16.0 mm(空间维) × 2.0 mm(光谱维)。如图 6 所示,利用工具显微镜观察间隔为 1.1 mm 的高压汞灯 404.7 nm、690.7 nm 谱线,边缘视场像点 A、B、C、D 离焦量的测量误差分别为 $z_A \sim z_D$ 。 x_1y_1 平面方程为:

$$a_1 \times x + b_1 \times y + \sqrt{1 - a_1^2 - b_1^2} \times (z - z_1) = 0, \quad (1)$$

式中, a_1, b_1 分别为平面法线的 x, y 方向余弦, z_1 为平面在 z_0 上的截距,在显微镜存在测量误差的情况下,通过求解如下最小二乘问题得到系数:

$$\min_{(a_1, b_1, z_1)} [f^2(a_1, b_1, z_1; A) + f^2(a_1, b_1, z_1; B) + f^2(a_1, b_1, z_1; C) + f^2(a_1, b_1, z_1; D)], \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ \sqrt{1 - a_2^2 - b_2^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin(\beta_1)\theta_1 \\ 0 & 1 & -\cos(\beta_1)\theta_1 \\ -\sin(\beta_1)\theta_1 & \cos(\beta_1)\theta_1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ \sqrt{1 - a_1^2 - b_1^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

得到系数后参照式(1)得到 x_2y_2 平面方程。

3.4 等效焦面模组与 CCD 组件尺寸一致性误差

由于检测、加工误差,等效焦面模组与 CCD 组件的厚度、倾角存在差别,将装调装置换为 CCD 组件时会引入额外的离焦量误差,其计算模型与数控加工误差的计算类似,用高度误差 Δz_2 、角度误差 θ_2 、误差角方向 β_2 描述,参照式(3)、(4)、(1),计算得到 x_3y_3 的方程:

$$a_3 \times x + b_3 \times y + \sqrt{1 - a_3^2 - b_3^2} \times (z - z_3) = 0. \quad (5)$$

式中:

$$f(a_1, b_1, z_1; P) = |a_1 \times x_p + b_1 \times y_p + \sqrt{1 - a_1^2 - b_1^2} \times (z_p - z_1)|$$

为检测点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 与 x_1y_1 平面的距离。采用 LM 方法求解式(2),解的意义为显微镜存在测量误差时的最佳拟合平面。

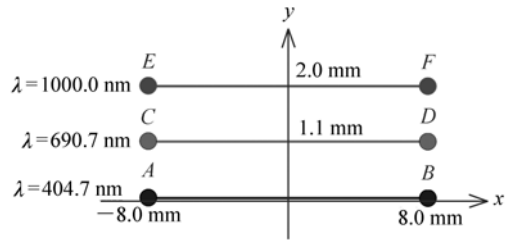


图 6 A、B、C、D 是光谱像面检测点, A、B、E、F 是边角点

Fig. 6 A, B, C, D are Spectral image plane's test points. A, B, E and F are corner points

3.3 修磨垫的数控加工误差

数控加工机床在对垫片按照修磨量计算值进行切削时存在深度、角度误差。切削深度误差为 Δz_1 , 则:

$$z_2 = z_1 + \Delta z_1. \quad (3)$$

沿着 β_1 方向的切削角度误差为 θ_1 , 则 x_2y_2 平面法向量 $[a_2, b_2, c_2]$ 可由小量转动下的矢量转轴公式计算:

x_3y_3 平面方程定量描述了 3 种误差对离焦量影响的综合效果,以光谱像面边角点 A、B、E、F 的离焦量 $\Delta Z_i (i = A, B, E, F)$ 可以综合反映整个像面的离焦情况:

$$\Delta Z_i = \frac{-a_3 x_i - b_3 y_i}{\sqrt{1 - a_3^2 - b_3^2}} + z_3, \quad i = A, B, C, D. \quad (6)$$

3.5 随机试验方法误差综合结果

根据式(2)、(3)、(4)、(6)可见,误差传递过程比较复杂,难以采用误差独立作用原理进行合成,本文采用随机试验方法,将各误差项看作相互

独立的随机变量,分布形式见表1。其中 z_A, z_B, z_C, z_D 均是工具显微镜两次读数之差,由于每次读数误差可视为误差限为 $[-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}]$ 且相互独立的均匀分布,故合成为三角分布。

表1 各误差项概率密度函数

Tab.1 Probability density function of each error

误差项	z_A, z_B, z_C, z_D	θ_1, θ_2	β_1, β_2
分布形式	三角分布	均匀分布	均匀分布
误差限	$[-4 \mu\text{m}, 4 \mu\text{m}]$	$[-3', 3']$	$[0^\circ, 360^\circ]$
误差项	Δz_1	Δz_2	
分布形式	均匀分布	均匀分布	
误差限	$[-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}]$	$[-3 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m}]$	

随机试验点数选取为 100 000,特征点 A、B、E、F 的离焦量统计见图7,误差综合后其分布接近正态分布,4个边角点离焦量误差的 3σ 在光学

系统允许焦深之内,表明此模拟装配组件的焦面定位精度是足够的。

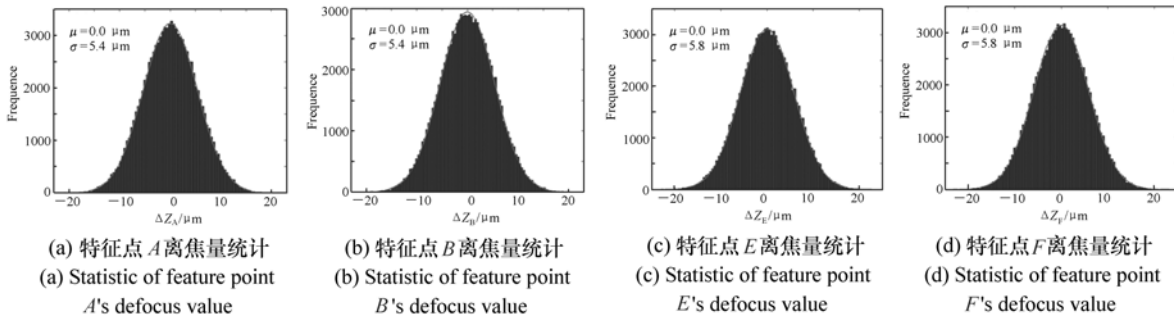


图7 光谱像面边角点离焦量统计直方图

Fig.7 Statistical histogram of spectral image plane corner points' defocus value

4 实验

用工具显微镜检测 404.7 nm、690.7 nm 谱线

上点 $P_1 \sim P_{18}$ 的离焦量和位置,结果见表2及图8。

采用式(2)的最小二乘方法对18个点做最小二乘平面拟合,得到的拟合系数为: $a = -0.004\ 646, b = 0.002\ 414, z_0 = 81.9 \mu\text{m}$,拟合残

表2 特征点坐标测量值

Tab.2 Measurements of feature points coordinates

特征点	P_1	P_2	P_3
坐标(μm)	(8 003, -12, 120)	(6 002, -6, 109)	(3 999, -4, 104)
特征点	P_4	P_5	P_6
坐标(μm)	(2 001, -1, 93)	(1, -1, 81)	(-2 001, 0, 69)
特征点	P_7	P_8	P_9
坐标(μm)	(-4 000, -5, 62)	(-6 002, -8, 51)	(-7 998, -14, 48)
特征点	P_{10}	P_{11}	P_{12}
坐标(μm)	(8 000, 1 098, 115)	(5 997, 1 102, 110)	(4 002, 1 104, 99)
特征点	P_{13}	P_{14}	P_{15}
坐标(μm)	(2 000, 1 106, 84)	(2, 1 106, 76)	(-2 005, 1 107, 72)
特征点	P_{16}	P_{17}	P_{18}
坐标(μm)	(-3 998, 1 104, 60)	(-6 001, 1 102, 53)	(-8 000, 1 095, 44)

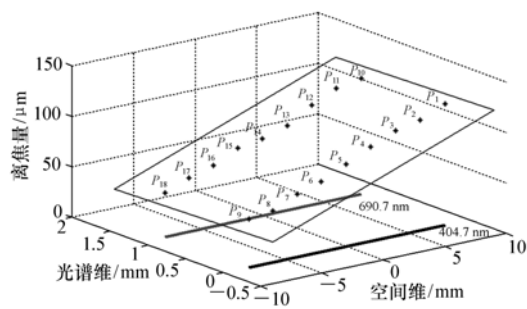


图8 用工具显微镜测量特征点坐标

Fig. 8 Measure feature points coordinates by microscope

差见图9。数控机床对修模垫加工时,角度按照最佳拟合平面的法线方向给出,修磨深度给后续

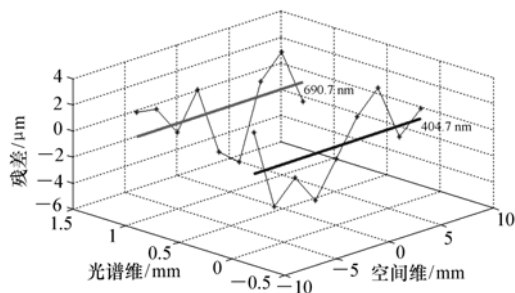


图9 最小二乘拟合残差

Fig. 9 Least square fitting residuals



图10 CCD组件装调完成

Fig. 10 CCD assembly's alignment finished

参考文献:

- [1] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)
- [2] 钟兴, 金光, 王栋, 等. CMOS 星敏传感器焦平面装配及标定[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 1-5.
ZHONG X, JIN G, WANG D, et al. Focal plane assembly and calibrating of CMOS star sensor[J]. *Opto-Electronic Engi-*

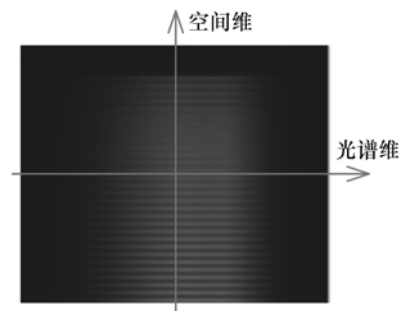


图11 鉴别率成像实验

Fig. 11 Resolution test

手工精研留有 $10\ \mu\text{m}$ 的余量。经 1 次机床加工、3 次后续手工研磨及检测, 完成了焦面的装调, 见图 10。以卤钨灯为光源, 对鉴别率板的成像实验见图 11, MTF 优于 0.3, 满足指标。本方法减少了在装调过程中对 CCD 焦面组件的频繁操作, 提高了装调可靠性和效率。虽然实验中对修磨量数据的测量并未针对 $400\sim 1\ 000\ \text{nm}$ 谱段内所有谱线进行, 但从实际效果来看, 由于光谱像面近似为平面, 仅用 $404.7\ \text{nm}$ 和 $690.7\ \text{nm}$ 谱线的检测结果描述整个像面的离焦状态具有足够高的精度。

5 结 论

本文设计的等效焦面装调模组能够准确测量光谱像面相对于刻划平面和 CCD 感光面的位置, 从而给出 CCD 组件修磨垫的修磨量; 能够协助实现光谱维和空间维的对准。精度分析表明显微镜测量误差、数控机床加工误差、等效模组与 CCD 组件尺寸一致性误差同时存在时, 仍能够满足各视场、各波长 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 的系统焦深要求。在实验中较快地完成了焦面装调, 提高装调效率并降低损坏 CCD 的风险。本方法适用于多种焦面组件的装调。

- neering, 2011, 38(9):1-5. (in Chinese)
- [3] 赵梅. 航空相机焦面位置定位量测[J]. 电光与控制, 2010, 17(4):66-68.
ZHAO M. Locating of focal plane position for aerial cameras[J]. *Electronics Optics Control*, 2010, 17(4):66-68. (in Chinese)
- [4] 薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4):823-830.
XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):823-830. (in Chinese)
- [5] 张晶, 王淑荣, 黄煜, 等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展[J]. 中国光学, 2013, 6(5):692-700.
ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):692-700. (in Chinese)
- [6] 程欣, 洪永丰, 张葆, 等. 插入 Fery 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8):1773-1780.
CHENG X, HONG Y F, ZHANG B, *et al.*. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Fery prism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1773-1780. (in Chinese)
- [7] NEVILLE R A, SUN L X, STAENZ K. Detection of spectral line curvature in imaging spectrometer data[J]. *SPIE*, 2003, 5093:144-154.
- [8] YOKOYA N, MIYAMURAB N, IWASAKIB A. Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and key-stone properties[J]. *SPIE*, 2010, 7857:78570B1-78570B9.
- [9] 张军强, 颜昌翔, 郑玉权, 等. 棱镜色散成像光谱仪的谱线漂移特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(12):3429-3433.
ZHANG J Q, YAN CH X, ZHENG Y Q, *et al.*. Spectral line shift property of prism dispersive imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(12):3429-3433. (in Chinese)
- [10] 刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. 中国光学, 2012, 5(6):566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):566-577. (in Chinese)
- [11] 金辉, 姜会林, 郑玉权, 等. 高光谱遥感器的光谱定标[J]. 发光学报, 2013, 34(2):235-239.
JIN H, JIANG H L, ZHENG Y Q, *et al.*. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(2):235-239. (in Chinese)
- [12] 张春雷, 向阳. 超光谱成像仪图像均匀性校正[J]. 中国光学, 2013, 6(4):584-590.
ZHANG CH L, XIANG Y. Correction of image uniformity for imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):584-590. (in Chinese)
- [13] 夏元杰, 段红建, 石欣, 等. 多视场定焦距 CCD 摄像系统结构设计及调校[J]. 应用光学, 2012, 33(2):240-244.
XIA Y J, DUAN H J, SHI X, *et al.*. Structure design and adjustment of multiple-field-of-view fixed-focal-length CCD camera system[J]. *J. Appl. Optics*, 2012, 33(2):240-244. (in Chinese)

作者简介:



高志良(1962—),男,山东高密人,硕士,高级工程师,硕士研究生导师,主要从事星载相机、星载高光谱仪器及相关机械结构设计方面的研究。E-mail:gaozl@ciomp.ac.cn