

doi:10.3788/gzxb20154407.0711003

LCTF 机载高光谱相机光学系统设计

汪伟, 沈志学

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对无人机载设备结构及重量受限的特点, 基于液晶可调谐滤光器件, 设计了一种用于无人机载的高光谱成像光学系统。系统拥有 46 个通道, 工作光谱范围为可见光到近红外(0.45~0.9 μm), 光谱分辨率 10 nm, 焦距 81.25 mm, 相对孔径 1/2.5, 全视场角 12°, 最大畸变量不大于 0.12%, 在航高 5 000 m 时, 地面像元空间分辨率 0.4 m, 地面幅宽 1 km \times 0.87 km。系统采用液晶可调谐滤光器整体嵌入式设计, 在无渐晕设计条件下, 得到的光学系统成像质量优良, 均方根最大弥散斑直径不超过 5 μm , 成像器件极限分辨情况下的各视场调制传递函数值均不小于 0.54。用 Zemax 的多重结构特性定义和热分析功能, 模拟了系统成像质量, 最终确定系统整体温控 25 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、液晶可调谐滤光器件温控 35 $^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的方案。在无人机升限范围内(3~6 km), 飞行速度引起的系统像移小于像元尺寸, 无需对像移补偿。

关键词: 液晶可调谐滤光器; 高光谱; 光学设计; 成像系统; 机载

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0711003-5

Optical System Design of LCTF-Based Airborne High Spectral Resolution Camera

WANG Wei, SHEN Zhi-xue

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: Considering that the space and weight of unmanned airborne equipment is limited, an unmanned airborne high spectral imaging optical system on the basis of liquid-crystal tunable filter liquid crystal tunable filter, which has 46 channels. The working spectrum of the system covers the visible light to near-infrared light (0.45 ~ 0.9 μm), the spectrum resolution is 10 nm, the focal length is 81.25 mm, relative aperture is 1/2.5, the full viewing field angle is 12°, the maximum distortion is less than 0.12%, the ground pixel resolution is 0.4 m, the ground breadth is 1 km \times 0.87 km with 5000m of flight level. The liquid crystal tunable filter overall embedded design is adopted and the aberration produced by liquid crystal tunable filter is revised. The imaging quality of the system is excellent under the no vignetting design condition, the root-mean-square diameter of maximum dispersed spot is less than 5 μm , the modulation transfer function of every viewing field is more than 0.54 under the sCMOS Nyquist frequency situation. Zemax multi-configuration and thermal analysis were used to simulate the imaging quality of system. 25 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ of system temperature control scheme and 35 $^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ of liquid crystal tunable filter temperature control scheme was confirmed. In the range of 3 km~6 km aviation altitude, the system doesn't need image motion compensation.

Key words: Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF); High spectral resolution; Optical design; Imaging system; Airborne

OCIS Codes: 110.5200;100.2960;300.6320

基金项目: 中国工程物理研究院 909 科技专项基金(No. 009100)资助

第一作者: 汪伟(1974-), 男, 副研究员, 主要研究方向为光学高速摄影技术. Email: wwlhdd@126.com

收稿日期: 2014-12-19; 录用日期: 2015-04-03

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

高光谱成像技术在国土及海洋调查、大气研究以及环境监测等领域具有广泛的应用. 在国土资源普查领域, 只有在高光谱分辨率下才能探测到诊断性的光谱特征; 在某些领域, 高光谱成像可在复杂背景干扰下分辨伪装目标或假目标. 因此, 这种技术具有极高的应用价值, 研究者已对此开展了大量的研究, 目前已进入实用阶段^[1-3].

传统的光谱成像主要有滤光片型、色散型和干涉型等, 但它们具有光谱分辨率较低、重量较大、能量利用率低、光路结构较为复杂等缺点. 相对而言, 采用电控液晶可调谐滤光片的光谱成像技术在空间分辨率方面与传统光谱成像技术相当, 但拥有更高的光谱分辨率和能量利用率, 并且重量更轻. 液晶高光谱成像是基于电控液晶光谱分光器 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 的新型高光谱成像技术, 该技术利用液晶电控双折射效应实现光谱连续调谐, 本质上是一种带通可调双折射滤光片. 电控液晶调节是一种全固态调谐方法, 在减少调谐滤光片的结构复杂性方面发挥着重要作用, 是目前可调双折射滤光片的主要发展方向. 我国在液晶光谱成像技术方面的研究主要集中在光谱分辨率较高的 Lyot 型液晶可调滤光片^[4-5].

基于 LCTF 的光谱相机, 一般直接将 LCTF 器件置于相机镜头之前, 或者在标准镜头和相机之间放置 LCTF 器件, 这些简便的方法严重影响了成像质量和对光能量的利用^[6-7]. 本文设计的高光谱相机, 将 LCTF 嵌入光学系统内部, 并进行像差平衡校正, 最大限度减少了其对像质的影响, 并且将进入 LCTF 的光学入射角控制在 $\pm 5^\circ$ 以内, 在获取高光谱分辨率图像的同时, 可以达到较高的空间分辨率.

1 系统参量及结构

基于 LCTF 的机载高光谱相机光学系统要求在 450~900 nm 光谱范围内对地物特征进行高光谱成像探测, 光谱分辨率可达 10 nm. 为实现光谱成像, 选用 sCMOS 数字成像器件, 其量子效率曲线见图 1. 该数字成像器件具有较大幅面、大线性动态范围 (84 dB)、高灵敏度、低暗电流等优点, 在全画幅成像条件下最高帧频可达 100 fps, 可与 LCTF 电控调谐频率匹配; 有效像素为 $2\,560 \times 2\,160$, 总像素为 550 万, 像元大小 p 为 $6.5\ \mu\text{m} \times 6.5\ \mu\text{m}$, 其有效面积为 $16.6\ \text{mm} \times 14.0\ \text{mm}$, 对角线 d' 为 21.7 mm; 动态范围达 84 dB.

无人机飞行高度 $H=5\,000\ \text{m}$, 要求系统像元分辨率 $\delta=0.4\ \text{m}$, 由此计算出光学系统的焦距 f' 为

$$f' = H \cdot p / \delta = 81.25\ \text{mm} \quad (1)$$

光学系统的视场角 2ω 为

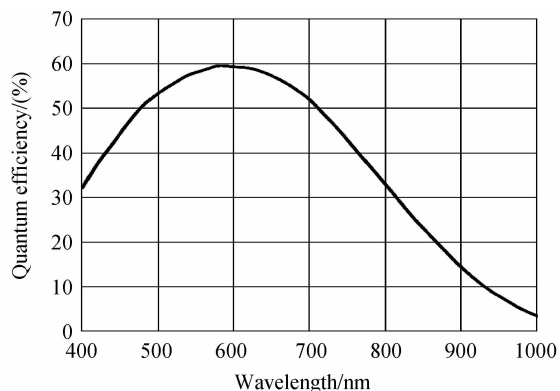


图 1 sCMOS 量子效率曲线

Fig. 1 sCMOS quantum efficiency

$$2\omega = 2\arctan(d'/2f') = 15.4^\circ \quad (2)$$

对应地面成像范围为 $1037.5\ \text{m} \times 875\ \text{m}$.

在确定光学系统相对孔径时, 要求衍射斑的直径要小于一个像元尺寸, 由

$$D/f' = 2.44 \cdot \lambda / p \quad (3)$$

计算出系统相对孔径 $D/f' = 1:3$. 在高光谱相机工作时, 对光利用率较小, 因此要求光学系统具有大的相对孔径, 综合考虑系统的成像质量、LCTF 的通光口径和数字成像器件信噪比, 设计系统的相对孔径为 $1:2.5$. 光学系统的 Nyquist 频率为 77 lp/mm.

由所确定的光学系统参量可知, 本系统属于中等视场、大孔径的摄影物镜. 考虑到机载空间的限制, 需将 LCTF 嵌入光学系统内部, 以使系统结构更为紧凑. 但是, LCTF 的嵌入将会严重打破初始系统的像差平衡, 带来更大的球差、色差、像散等. 因此, 需要将基本结构中的某些透镜分裂成几个, 以减小每个透镜的光焦度, 增大它们的曲率半径, 减小光线的入射角, 从而减少系统的剩余像差. 对于二级光谱, 由于本系统焦距较短, 结果并不严重, 在设计中不需考虑^[8-9].

2 光学系统设计

LCTF 器件的基本结构见图 2, 其中 $VR_1 \sim VR_{11}$ 为可调液晶波片, $P_1 \sim P_7$ 为偏振片, 为了提高透过率, 需要在相邻的偏振片与液晶波片之间, 以及相邻的两个液晶波片之间填充折射率匹配材料, 这种填充材料的

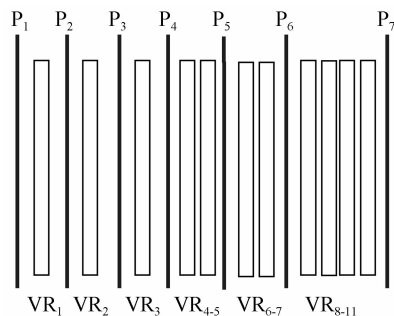


图 2 LCTF 基本结构示意图

Fig. 2 LCTF schematic diagram

厚度小于 $10\ \mu\text{m}$. 因此整个结构可看作是胶合的平板玻璃,其总厚度为数十毫米. 如果将 LCTF 置于光学系统孔径光阑附近,不但可减小有效口径,还可利用其产生的光阑球差校正系统的轴外球差和像散,同时使色差得到更好的校正. 但是, LCTF 器件随着光线入射角的增大,光谱分辨率增大、光线透过率降低. 文献[10]表明将光线入射角控制在 $\pm 5^\circ$ 以内可满足系统光谱分辨率和透过率. 显然,将 LCTF 置于孔径光阑附近,多数光线入射角将大于 $\pm 5^\circ$,这将大大限制相机的使用范围. 因此,最终考虑将 LCTF 器件嵌入系统后组内部,参与光学成像和像差校正.

所设计的光学系统结构如图3,系统总长174.3 mm. LCTF 器件置于光学系统后组内部,位于会聚光路中. 为平衡像差并确保入射 LCTF 的光线入射角在 $\pm 5^\circ$ 范围内,在其前后增加了较多的单透镜^[11]. 为了保证在有效视场内的成像质量,设定光学系统的视场角为 $\pm 6^\circ$,选用 $0.45\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.7\ \mu\text{m}$ 、 $0.8\ \mu\text{m}$ 和 $0.9\ \mu\text{m}$ 作为像差校正波长.

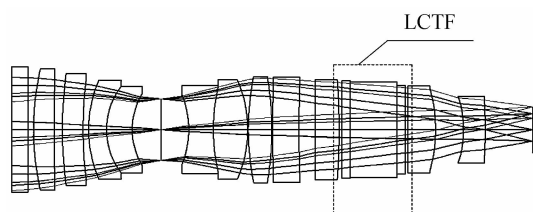


图3 光学系统结构

Fig. 3 Optical system layout

为验证系统成像质量,分别用系统点列图、能量分布曲线图、调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线、场曲和畸变来评价各视场的成像情况,如图4~8. 图4显示各视场光线所成像点的均方根直径最大为 $4.9\ \mu\text{m}$,小于数字成像器件的像元尺寸 $6.5\ \mu\text{m}$,能量几乎全部落在探测器有效像元上. 图5表示系统满足85%的光能量会聚在一个像元内的要求^[12]. 图6表明各视场的 MTF 值均不小于0.54. 由图7可知,像散和畸变得到很好的控制,各个视场的像散

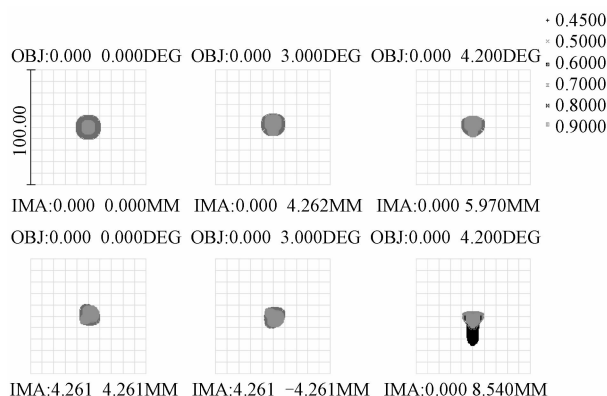


图4 各视场点列

Fig. 4 Spot diagram

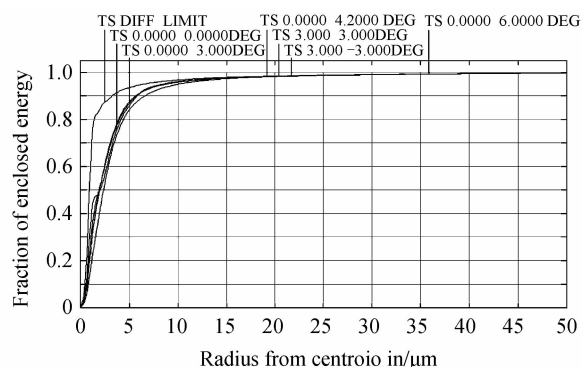


图5 能量分布曲线

Fig. 5 Encircled energy curves

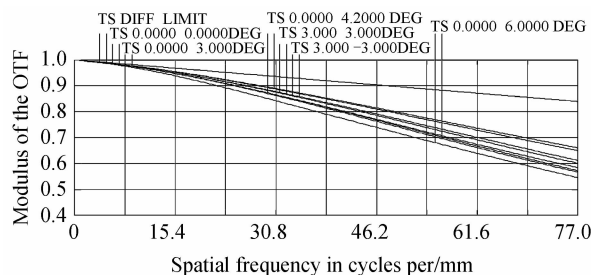


图6 各视场 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves

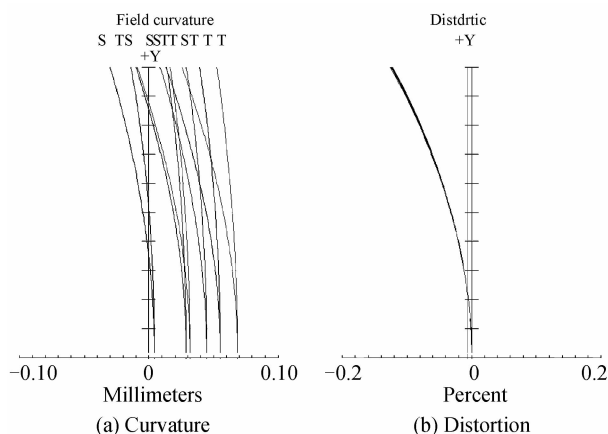


图7 场曲和畸变

Fig. 7 Field curvature and distortion

很小,系统畸变不大于 -0.12% ,满足专项中畸变技术指标不大于 0.2% 的要求.

飞行器的通常飞行高度在 $3\ 000\sim 6\ 000\ \text{m}$,通过模拟可知,系统在该区间的成像质量只有细微变化,完全可以满足使用要求.

3 LCTF 温控对系统及机载条件对像质的影响评估

3.1 LCTF 温控对系统像质的影响

光学玻璃材料折射率对温度的变化量表示为

$$\Delta n_{\text{abs}} = \frac{n^2 - 1}{2n} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_2 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_g^2} \right] \quad (4)$$

式中 n 是光学玻璃标准温度和压力条件下的相对折射率, ΔT 是相对 20℃ 的变化值, 其余常量描述玻璃的热性能, 由玻璃厂商提供.

液晶材料(折射率匹配材料)折射率对温度变化更为敏感, 如图 8, 在温控 34℃ ± 2℃ 条件下, 长波方向最大中心波长漂移从 +5 nm ~ -9 nm; 而在温控 35℃ ± 1℃ 条件下, 长波方向最大中心波长漂移从 +3 nm ~ -5 nm.

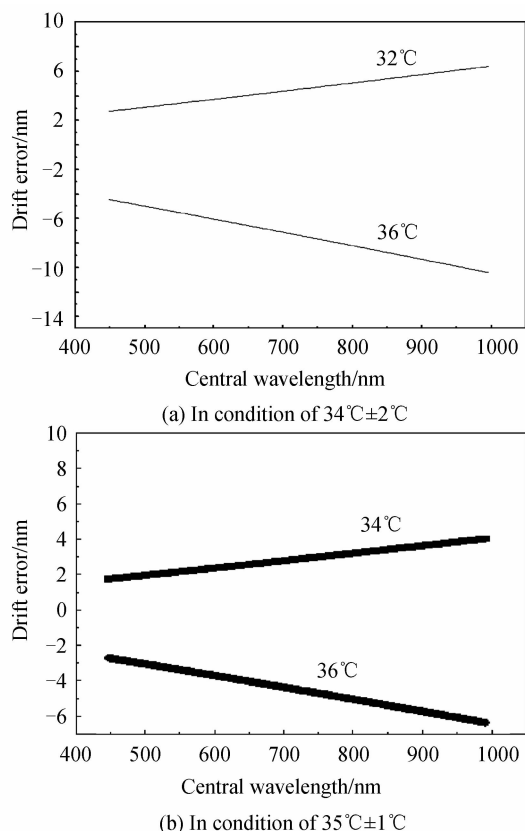


图 8 温度对 LCTF 中心波长的影响
Fig. 8 Effect of temperature for LCTF central wave

在进行工程设计时, 确定 LCTF 器件的温控温度为 35℃ ± 1℃. 在高空机载环境中, 除 LCTF 器件外, 如果其余光学元件裸露在约 -10℃ 的舱内, 系统不同部份的温度差异会引起光学元件的半径、厚度以及元件之间的间隔的变化, 从而影响光学系统的性能. 将 LCTF 器件设置为 35℃, 其余光学元件设置为 -10℃, 用 Zemax 的多重结构特性定义和热分析功能, 模拟了成像质量, 如图 9, 系统的 MTF 曲线有较大幅度下降. 因此, 最终确定采用系统整体温控 25℃ ± 5℃、LCTF 温控 35℃ ± 1℃ 的方案, 可确保光学系统成像质量, 模拟的成像质量如图 10, 与图 6 相比, 视场边缘稍有下降, 在 Nyquist 频率时 MTF 值从 0.54 下降到 0.52. 温控试验表明, 系统整体温控需功耗 50 W、LCTF 温控需功耗 30 W, 机载条件完全能够满足供电要求.

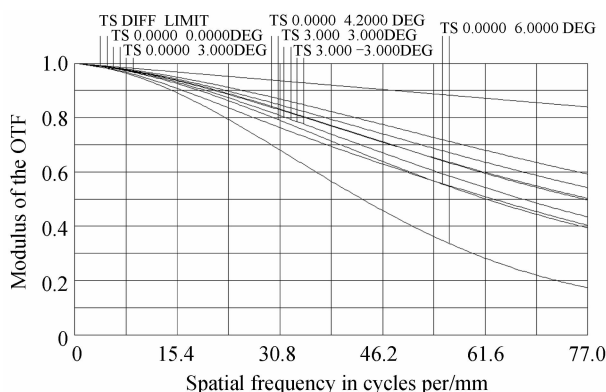


图 9 不同温度条件下(LCTF35℃, 其余元件 -10℃) 的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves in different temperature condition (LCTF 35℃, others -10℃)

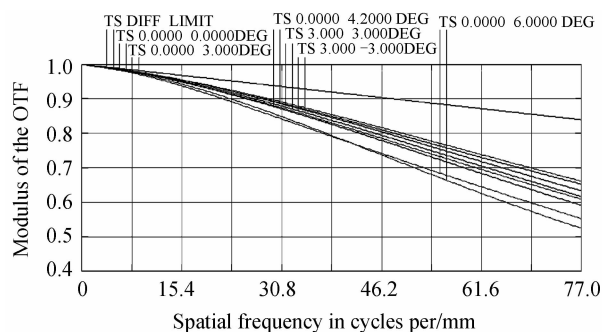


图 10 不同温度条件下(LCTF35℃, 其余元件 25℃) 的 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves in different temperature condition (LCTF 35℃, others 25℃)

3.2 飞行速度对像移的影响^[13]

假设飞行器的航速为 v , 飞行高度为 H , 光学系统焦距为 f' , 数字成像器件的曝光时间为 t , 则像面上的像移 Δs 表示为

$$\Delta s = v \cdot t \cdot f' / H \quad (5)$$

数字成像器件的曝光时间最短 2 ms, 按照 4 ms 计算, 航速 50 m/s, 载机的飞行高度为 3 000 ~ 6 000 m, 得到不同飞行高度的像移量如表 1.

表 1 不同飞行高度的像移量

Table 1 Image motion in different aviation altitude				
Aviation altitude/km	3	4	5	6
Image motion/ μm	5.3	4	3.2	2.67

从表 1 可以看出, 在飞行高度 3 000 m ~ 6 000 m 时, 像面上的像移量均小于像元尺寸, 不需要对像移进行补偿. 当像移量大于像元尺寸时, 需要用惯性传感器自动控制摆镜进行像移补偿.

3.3 振动的抑制

振动对像质有较大的影响. 在低频时, 载机振动可能会带来图像模糊; 在高频时, 载机振动造成的图像像

质影响较小.可采取被动减振和主动抑振两种控制方式:在中高频,通过安装减振器抑制高频振动,在进行系统被动减振隔离设计时要尽可能控制载体传来的角位移,并抑制平台座架线振动转化为角振动;低频振动很难通过安装减振器的方式来抑制,因此应采用主动抑振的方式,通过陀螺等稳定方式可有效地抑制低频振动.

4 结论

本文设计了一种基于 LCTF、采用 LCTF 嵌入式光学系统内部的方法,设计了焦距为 81.25 mm、相对孔径为 1/2.5、全视场 12°、地面像元分辨率为 0.4 m、工作波段为 0.45~0.9 μm 、光谱分辨率为 10 nm,光谱通道为 46 个的高光谱相机光学系统.应用 ZEMAX 软件对系统进行了优化设计,并对设计结果进行了分析,结果表明,不同波长的调制传递函数均达到 0.5 以上,成像质量优良.光学系统总长仅为 174.3 mm,全系统结构总长不超过 200 mm.设计中充分考虑各种因素的影响,重点分析了机载环境温度和 LCTF 温控对光学系统成像的影响以及载机飞行速度和振动对系统成像的影响,提出了温控最佳方案和减振方法,为机载高光谱相机获取高质量航空影像提供了重要参考.

参考文献

- [1] PETER J MILLER, CLIFFORD C HYOT. Multispectral imaging with a liquid crystal tunable filter[C]. International Society for Optical Engineering(SPIE), 1995, **2345**: 354-365.
- [2] KOHZO HOMMA, HIROKIMI SHINGN, HIROHISA KUROSAKI, *et al.* Experimental checking of the spectro-polarimeter airborne remote sensing [C]. Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE), 2003, **4881**: 575-583.
- [3] KUROSAKI H, KOSHIISHI H, SUZUKI T, *et al.* Development of tunable imaging spectro-polarimeter for remote sensing[J]. *Advanced Space Reviews*, 2003, **32**(11): 2141-2146.
- [4] SHEN Zhi-xue, LI Jian-feng, ZHANG Da-yong, *et al.* Research on LC-based spectral imaging system for visible band [J]. *Spectroscopy and Spectral Analys*, 2011, **31**(10): 2672-2675.
- 沈志学, 李剑峰, 张大勇, 等. 可见光液晶光谱成像系统研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(10): 2672-2675.
- [5] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, HONG Jin, *et al.* Optical and mechanical design of SWIN hyperspectral field spectroradiometer [J]. *Optics and Precision Engineerin*, 2007, **31**(10): 1657.
- 李新, 郑小兵, 洪津, 等. 高光谱短波红外地物光谱仪的光机设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **31**(10): 1657.
- [6] FANG Wei, ZHANG Dong-ying, QIAN Wei, *et al.* Radiometric calibration method of LCTF hyperspectral image [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 360.
- 方薇, 张冬英, 钱玮, 等. LCTF 调谐的高光谱成像系统辐射定标方法研究[J]. *光学技术*, 2009, **35**(3): 360.
- [7] FU Qiang, HUANG Min, JING Juan-juan, *et al.* Relay lens design for an LCTF multi-spectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022002-2.
- 付强, 黄旻, 景娟娟, 等. 用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的中继成像系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1022002-2.
- [8] 胡家升. 光学工程导论(第二版)[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005: 673-681.
- [9] 林大键. 工程光学系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1987: 139-179.
- [10] SHEN Zhi-xue. Research on LC-based spectral imaging technology and its applications [D]. China Academy of Engineering Physics, 2012: 61-62.
- 沈志学. 基于液晶的光谱成像技术及其应用研究[D]. 中国工程物理研究院, 2012: 61-62.
- [11] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2003: 91.
- [12] SUN Xin, BAI Jia-guang, WANG Zhong-hou, *et al.* Optical system design of an airborne multispectral camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3161-3162.
- 孙鑫, 白加光, 王忠厚, 等. 一种机载多光谱相机的光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3161-3162.
- [13] SHI Guang-hui. The effect of image motion on the quality of the images formed for the satellite photography [J]. *Optics and Precision Engineerin*, 1997, **5**(4): 31.
- 史光辉. 像移对卫星摄影成像质量的影响 [J]. *光学精密工程*, 1997, **5**(4): 31.