

doi:10.3788/gzxb20154407.0712002

# 滤光片阵列型多光谱相机中阵列的设计与形变影响分析

方煜, 吕群波, 刘扬扬, 谭政, 李伟艳, 裴琳琳, 王建威

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

**摘 要:**为了限制多光谱相机中滤光片与探测器靶面之间存在的光谱混叠区域的大小,提高像元利用率,详细设计了滤光片阵列.不同于在轨运行时的状态,实际地面实验测试时滤光片阵列承受较大的内外压差,面型发生变化,可能对多光谱相机成像质量造成不良影响.根据有限元分析方法详细分析了滤光片阵列在这种情况下变形,利用 Zernike 多项式拟合形变面型附加于 Zemax 中原滤光片阵列面型上,考察多光谱相机光学系统调制传递函数的变化.结果表明:在内外压差的作用下,系统调制传递函数未出现明显变化,可以忽略滤光片阵列表面变形对多光谱相机光学系统成像质量的影响.

**关键词:**光学设计;多光谱成像;有限元分析;滤光片阵列;面型拟合;Zernike 多项式;形变分析

中图分类号:TH744

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)07-0712002-6

## Design and Deformation Analysis of the Filter-array in the Filter-array Multi-spectral Camera

FANG Yu, LÜ Qun-bo, LIU Yang-yang, TAN Zheng, LI Wei-yan, PEI Lin-lin, WANG Jian-wei  
(Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China)

**Abstract:** In order to limit the size of aliasing area caused by distance between filter-array and the detector and improve efficiency of pixel utilization, the filter-array was designed. Filter-array which is different from itself in-orbit state is withstood greater differential pressure in the ground testing experiment, the surface of filter-array changed, which may adversely affect the quality of multi-spectral imaging camera. Based on Finite element method, the deformation of the filter-array was analyzed which is attached to original surface of filter-array in Zemax by means of Zernike polynomials. The changes of the modulation transfer function of multi-spectral imaging camera was studied. The results show that under pressure difference, the modulation transfer function of system is not changed significantly and the impact of filter-array's deformation on imaging quality of optical system can be negligible.

**Key words:** Optical design; Multispectral imaging; Finite element analysis; Filter-array; Surface fitting; Zernike polynomials; Deformation analysis

**OCIS Codes:** 120.2440; 120.4820; 110.2960; 110.3000

## 0 引言

对于遥感对地观测而言,目标探测能力的提高不仅仅取决于空间分辨率的提高,还取决于遥感仪器覆盖的谱段范围以及谱段数.通过对目标多个纬度信息的同步获取,能够提高对目标特性的综合探测感知与识别,极大地扩展了遥感对地观测的目标分辨、监测能

力,尤其是对特定的近红外谱段的选择,对于揭示目标的各种物化性质、识别伪装具有重要意义.多光谱成像技术已广泛地用于资源考察、农林、水文和地质勘查、环境监测、灾害调查以及测绘制图等方面<sup>[1-4]</sup>.

近年来,随着各种轻小型搭载平台的快速发展,对于小型高稳定度多光谱相机的需求增加,它也成为多光谱遥感技术发展的重点<sup>[5]</sup>.针对这种情况,本文提出

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2014AA7012022)资助

第一作者:方煜(1987-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光谱成像技术. Email: fangyuopt@126.com

收稿日期:2015-01-23;录用日期:2015-03-23

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

了一种滤光片阵列式多光谱相机,以面阵推扫方式工作,其结构极为紧凑,稳定性高,能够很好地适应各遥感平台搭载需求。

滤光片阵列作为本文多光谱相机光学系统的核心组成部分,不仅实现光谱在视场上的分割,同时还起着保护探测器靶面、隔离外部环境影响、维持探测器靶面处于真空状态的作用。滤光片阵列本身是平行平板式的零光焦度光学元件,但是放置于系统会聚光路中仍然会引入像差,设计时需要将它视为多光谱相机的一部分来考虑。

本文对某多光谱相机的滤光片阵列进行了详细设计,分析了镀膜面与 CCD 靶面的间距,确定了每个谱段镀膜宽度。考虑到在地面测试实验时,滤光片将承受较大的内外压差,前后表面的面型改变,可能对多光谱相机成像质量造成影响,利用 Zernike 多项式作为结构光学接口,将变形后的滤光片阵列引入系统,以调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 作为光学系统成像质量评价指标,分析了在地面状态时滤光片阵列表面变形对多光谱相机成像质量的影响。

## 1 滤光片阵列多光谱成像原理

滤光片阵列多光谱相机由成像物镜、滤光片阵列以及面阵探测器组成,三者通过相机整体结构固连。成像物镜实现对目标成像的功能(见图 1);滤光片阵列位于面阵探测器靶面前,实现对目标光谱的视场分割;面阵探测器通过光电效应获取和记录数字信息。所述滤光片阵列包括镀膜基片和玻璃基底两部分,镀膜基片上分别根据需要镀制多个不同条带滤光膜,完成后用光学粘合剂将其与玻璃基底胶合在一起,形成完整的滤光片阵列。滤光片阵列各通道排布垂直于飞行方向上,每个通道只能通过对应谱段的图像,面阵探测器上的多行像元对应一个光谱通道,则整个面阵探测器被划分为多个光谱通道,因此不同视场光线成像在面阵探测器靶面上的不同位置,经过相应通道滤光膜滤波后,获取的是相应视场的光谱信息。每次成像获得目

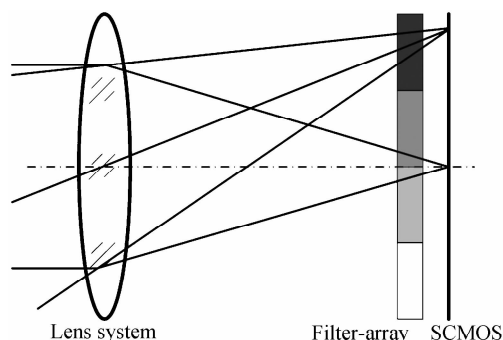


图 1 滤光片阵列多光谱成像原理

Fig. 1 Principle Schematic of filter-array multispectral camera

标的二维空间信息和不同视场对应不同的光谱信息,通过平台飞行推扫,边缘视场移动至成像系统的像面中心,再次曝光将获取该目标的另外一个谱段信息,多次曝光后将获得目标完整的数据。

由于滤光片阵列式多光谱成像技术原理简单,在谱段数不多的情况下,这种形式的多光谱成像系统与普通成像相机仅仅是一个滤光片器件的区别,因此其结构极其紧凑,工作可靠,稳定性极高。而且相对于传统线阵推扫相机而言,为了保证曝光时一行像元图像和前一时刻具有重叠部分,平台需要有足够高的姿态精度,这样经过多次曝光之后才能将每一行图像拼接出一副完整的图像,也就是说平台姿态精度是对应一个像元量级考察。而对于滤光片阵列式多光谱相机,由于每个通道都具有很多行像元,相当于一个小面阵探测器,这样平台仅需要保证在下次曝光时,该通道图像和前时刻曝光时有重叠部分就能拼接出一副完整的图像,显然平台姿态精度是对应一个通道的很多行像元这个量级,极大地降低了仪器对平台姿态精度的要求保证了光谱数据后处理的精度。

## 2 滤光片阵列设计

滤光片阵列是多光谱相机的关键技术部件,最终获取图像的光谱分辨率完全取决于各滤光片通道的镀膜要求。整个滤光片阵列分为两个部分:镀膜基片和玻璃基底。膜层镀制在薄的基片上,分别镀制 6 个不同条带,包括全色和 5 个多光谱通道。其中,全色光波段既可以实现视频成像,也可以用于实现全色数字以及全色多光谱融合超分辨率成像;为了保证相机能够获得真彩色图像,红绿蓝(RGB)三个波段是必须设置的,除此之外,为了对植被及地物特性进行研究,同时可以兼顾伪装探测应用需求,在近红外设置了一个波段外,还额外增加了一个红光波段。最终的波段范围、中心波长及带宽设置如下表 1 所示。镀膜完成后,用光学粘合剂将镀膜基片与玻璃基底胶合在一起。显然,除了全色通道,五个多光谱通道在探测器上的排列顺序可以进行调整,这就代表每个谱段其实仅需要在对应位置的视场范围内具有良好的成像效果就能满足使用要求。可以根据实际成像系统各个谱段在视场内的成像效果,选择一个优良的谱段排列情况,实际结果如图 2 所示。

表 1 滤光片各谱段参数

Item	1	2	3	4	5	6
Central wavelength/nm		480	550	650	710	830
Wavelength range/nm	500~800	445~515	515~585	615~685	675~745	760~900



图2 滤光片阵列六通道排列

Fig.2 Schematic diagram of the arrangement of six bands

根据滤光片实际安装位置情况,滤光膜显然不可能紧贴探测器靶面,同时成像光线必然具有一定光束口径.探测器靶面上某些对应滤光片相邻通道之间的位置,整个会聚光束上下部分分别通过不同通道后成像,导致在该位置存在一个谱段混叠区域.由图3可以看出,这个混叠区域的大小与滤光片探测器靶面之间的距离以及光束口径有关.

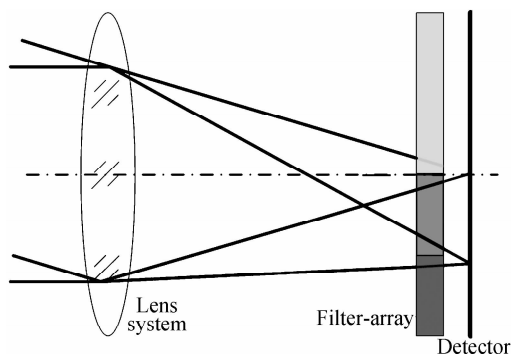


图3 相邻区域混叠示意图

Fig.3 Schematic diagram of aliasing situation at adjacent regions

根据实际滤光膜镀制工艺水平以及提高像元利用率的考虑,像面处相邻通道之间的谱段混叠区域限制在20个像元,对应每一谱段通道上下各预留10个像元.本文探测器SCMOS的像元尺寸 $6.5\mu\text{m}$ ,相应光谱混叠区域大小 $0.065\text{mm}$ .图4所示为混叠的临界情况,对应成像光束上下边缘光线通过相邻通道交界处,在这两者之间的成像光束都会发生光谱混叠.设滤光片镀膜面距探测器靶面的最大距离为 $d_{\text{max}}$ ,各参量之间的关系为

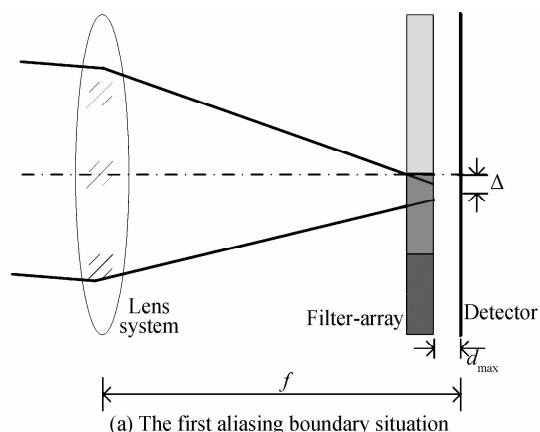
$$\frac{\Delta}{D/2} = \frac{d_{\text{max}}}{f - d_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中, $\Delta$ 为光谱混叠区域尺寸 $0.065\text{mm}$ ;  $D$ 为成像系统的入瞳直径 $328\text{mm}$ ;  $f$ 为成像系统焦距 $2528\text{mm}$ ,将数据代入式(1),求得

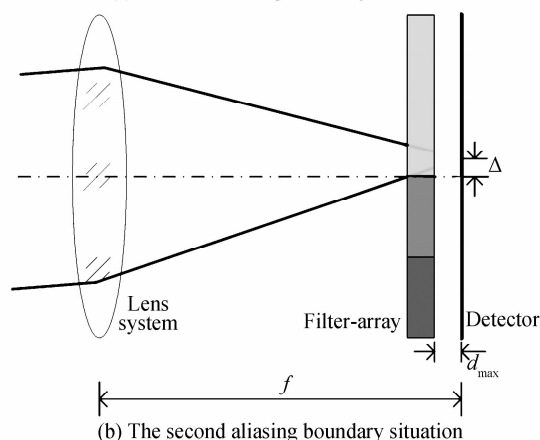
$$d_{\text{max}} \approx 1\text{mm}$$

即滤光片镀膜面与探测器靶面间距离应满足条件

$$d \leq 1\text{mm}$$



(a) The first aliasing boundary situation



(b) The second aliasing boundary situation

图4 滤光片阵列混叠临界情况

Fig.4 Schematic diagram of aliasing boundary situation

整个探测器有效像元数为 $2560 \times 2160$ ,考虑到实际全色区域需要制作60s高清视频,其在探测器靶面要求至少覆盖 $1920 \times 1080$ 大小成像区域,亦即在垂直于平台飞行方向要求探测器像元数量达到1080个.考虑到平台姿态稳定精度,初步选定这一方向像元数为1160.则剩余区域需要等间隔分布5个多光谱通道,各通道覆盖像元数为

$$N = 1000/5 = 200$$

根据实际探测器封装的结构形式,滤光片与探测器间距若要满足小于 $1\text{mm}$ 的条件,必须去除探测器本身的保护玻璃,以滤光片代替它.在实现滤光的同时,隔离外部环境影响,保护探测器靶面.替代保护玻璃后,滤光片镀膜面与探测器靶面间隔可以达到 $d = 0.7\text{mm}$ ,显然实际光谱混叠区域小于预先设置的20个像元.

在确定了探测器各通道对应像元数量后,还需要分析各个通道镀膜区域的宽度.由图5可知,镀膜宽度的大小与两者之间的距离、各通道对应像面范围、系统焦距有关,即

$$\frac{B}{H} = \frac{f - d}{f} \quad (2)$$

式中,  $B$  为通道镀膜区域的宽度;  $H$  为各通道对应像面大小;  $f$  为光学系统焦距. 将各参数值代入式(2), 则 5 个多光谱通道滤光膜的宽度为

$$B_1 = \frac{f-d}{f} \cdot H = \frac{2528-0.7}{2528} \times 200 \times 0.0065 \text{ mm} \approx 1.3 \text{ mm}$$

同理, 对于全色通道为

$$B_2 = \frac{f-d}{f} \cdot H = \frac{2528-0.7}{2528} \times 1160 \times 0.0065 \text{ mm} \approx 7.54 \text{ mm}$$

显然, 实际在镀膜基片上各通道镀膜宽度与对应在探测器上像元覆盖宽度保持一致.

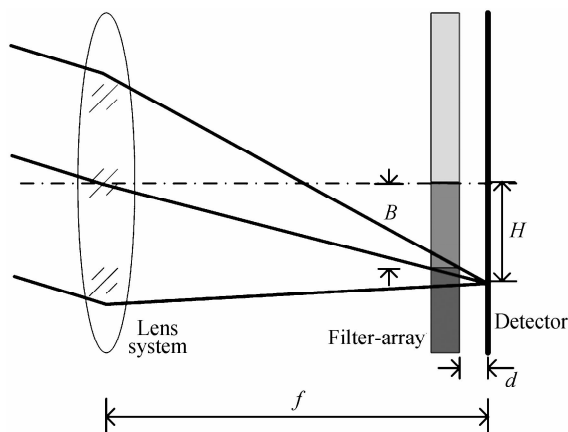


图5 滤光膜宽度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the width of the coating region

### 3 滤光片阵列形变分析

为了满足滤光片与探测器间距小于 1 mm 的约束, 去除了探测器本身存在的保护玻璃, 以滤光片替代来保护探测器. 考虑到在轨工作时多光谱相机处于真空状态, 为了保证滤光片良好的工作性能, 将探测器靶面与滤光片间存在的空气间隙做真空处理. 但是在地面测试实验时, 整个多光谱相机实际都处于一个大气压的环境中, 滤光片阵列前、后侧存在一个大气压的压差, 滤光片面型发生变化, 整体倾向于凸向探测器靶面方向. 显然, 滤光片阵列作为光学系统的一部分, 其面型变化必然导致成像光束的光程发生改变<sup>[6-7]</sup>, 影响多光谱相机性能测试的准确性. 为了了解面型变化对成像质量造成的影响, 需要对滤光片阵列形变情况进行详细分析, 以决定是否采取必要的补偿措施.

滤光片受压变形是一个静力学结构分析的问题, 可以利用有限元的方法获得相关变形数据. 基于 ANSYS 软件, 对滤光片建立单元模型, 定义包括弹性模量在内的结构材料属性. 滤光片材料为成都光明的 H-K9L 玻璃, 其相关属性列入表 2 中.

表 2 H-K9L 玻璃材料参数

Material properties	Elastic modulus/Pa	Poisson's ratio	Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Values	$7.92 \times 10^{11}$	0.211	2520

在建立滤光片的有限元模型时, 需要考虑后期便于各种约束、载荷的施加, 然后再对三维实体进行网格划分, 划分结果如图 6 所示. 根据实际滤光片的安装情况施加自由度约束与受压载荷, 最后对有限元模型进行求解, 得到前后表面的变形数据. 图 7 为受压变形分析后的滤光片形变等值线图, 在滤光片中心区域的形变最为严重, 符合实际平面受压变形的情况, 其最大形变为  $2.66 \times 10^{-4} \text{ mm}$ , 略小于半个波长(中心波长  $0.57 \mu\text{m}$ ).

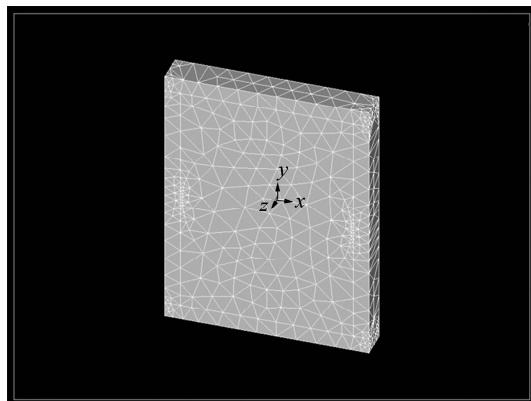


图6 网格划分示意图

Fig. 6 Meshing of the filter-array

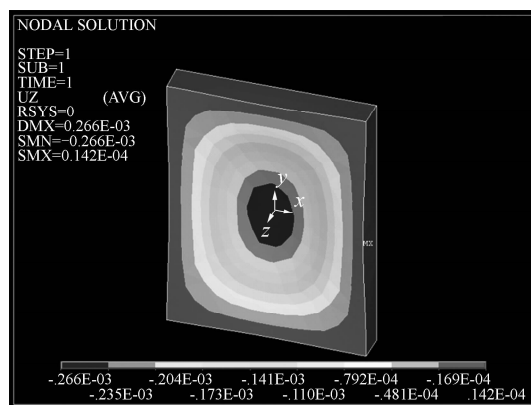


图7 滤光片阵列形变等值线图

Fig. 7 Meshing of the filter-array

### 3 滤光片形变对成像质量的影响分析

在获得滤光片的变形数据后, 为了实现其对多光谱相机系统的影响分析, 需要将附加变形后的滤光片作为光学系统的一部分来考察. 而在常用的光学设计软件 Zemax 中光学元件面型包含有 Zernike 多项式面型, 因此它可以直接作为结构分析与光学分析之间的接口工具<sup>[8-13]</sup>, 将形变后的滤光片阵列前后表面进行对应的拟合, 拟合后的各项系数输入 Zemax 中, 附加于原本滤光片的标准表面上, 这样就能将整个系统作为一个整体, 直观地考察滤光片附加变形后系统的像质变化.

Zernike 多项式在单位圆上正交, 对消除偶然因素

的干扰很有利<sup>[14-15]</sup>. 为此,在滤光片上根据实际成像光束通光口径选择一个合适的圆形区域,仅对这个区域的变形进行拟合,就能实现对整体相机光学系统影响的分析. 同时,要注意在 Zemax 中设置最大的径向尺

寸, Zernike 多项式在超出此半径时,会很快地发散,虽然 Zemax 光线追迹算法仍然可以进行,但是结果很容易出错. 根据获取的形变数值分析结果,将拟合后滤光片的两表面前 7 项 Zernike 系数列于表 3 中.

表 3 前后表面前 7 项 Zernike 多项式系数

Table 3 The first seven Zernike polynomial coefficients of front and rear surfaces

Item	1	2	3	4	5	6	7
Coefficients of front surface	$1.66 \times 10^{-4}$	$3.26 \times 10^{-9}$	$-2.2 \times 10^{-7}$	$-9.1 \times 10^{-5}$	$-5.6 \times 10^{-5}$	$-1.6 \times 10^{-8}$	$-1 \times 10^{-7}$
Coefficients of rear surface	$1.67 \times 10^{-4}$	$1.88 \times 10^{-8}$	$-7.6 \times 10^{-8}$	$-9.2 \times 10^{-5}$	$-5.8 \times 10^{-5}$	$-1.7 \times 10^{-8}$	$-1 \times 10^{-7}$

将数据拟合分析后的结果导入并附加于原滤光片前后表面,考察整个成像系统 MTF 的变化. 在图 8 中, (a)为原系统 MTF 曲线, (b)为滤光片附加表面变形后系统的 MTF 曲线. 为了更清楚地了解 MTF 的变化,在表 4 中列出了三个视场在 Nyquist 频率 77lp/mm 处,子午和弧矢两个方向的原系统 MTF 以及引入表面变形后的系统 MTF. 通过对数值的比较可以看出:滤

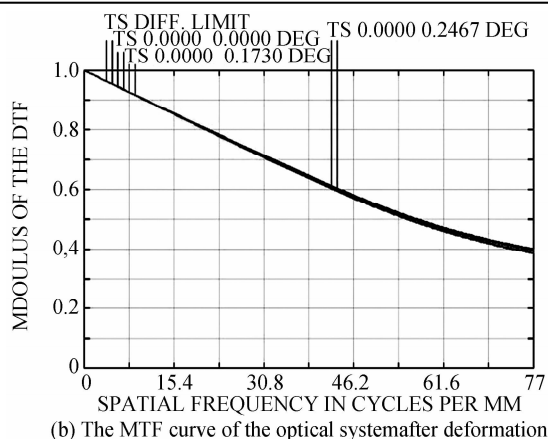
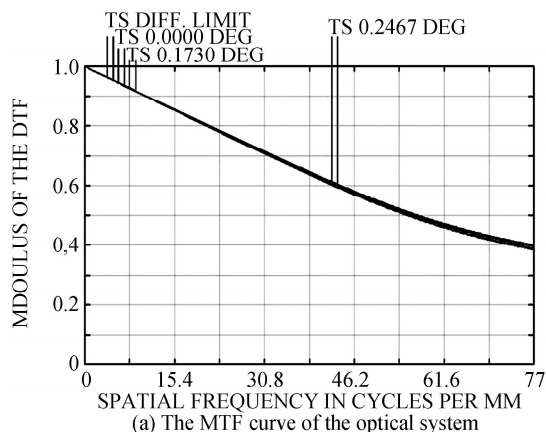


图 8 变形前后系统的 MTF 曲线

Fig. 8 The MTF curve of the optical system before and after deformation

光片附加变形后,系统三个视场的 MTF 变化非常小. 因此在一个大气压的内外压差下,滤光片阵列面型变化对多光谱相机的成像质量的影响可以忽略.

表 4 三个视场 Nyquist 频率处系统 MTF 的变化

Table 4 The change of the system MTF of three fields at Nyquist frequency

	Axial field of view		0.7 field of view		Full field of view	
	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal
MTF	0.398 246	0.398 243	0.390 477	0.396 581	0.385 605	0.396 262
MTF after deformation	0.398 250	0.398 250	0.390 484	0.396 585	0.385 614	0.396 263

## 4 结论

滤光片阵列作为本文多光谱相机的关键组成部分,主要实现光谱在视场上的分割. 根据滤光片阵列设计结果,为了实现较小的混叠区域,提高像元利用率,其与探测器靶面需要保持较近的距离. 因此实际需要去除探测器本身存在的保护玻璃,换成滤光片阵列来保护探测器,隔离外部环境保持靶面处于真空状态. 考虑到多光谱相机在地面测试实验时,处于一个大气压的环境中,而探测器与滤光片之间处于真空状态,导致滤光片承受较大的内外压差,表面面型发生改变. 为了了解这种变化对多光谱相机成像质量造成的影响,本

文利用有限元方法详细分析了滤光片在受压情况下的形变,将分析结果引入 Zemax 中,以 MTF 作为指标,分析了滤光片阵列变形对成像系统的影响. 结果表明,一个大气压的内外压差下,滤光片阵列面型变化对多光谱相机的成像质量的影响可以忽略. 相关分析过程对于类似滤光片阵列型多光谱相机的设计工作有着很重要的指导作用,使得这类工程设计问题更加合理可靠.

### 参考文献

[1] QIAN Yi-xian, GAO Xiao-dong, LIANG Wei, et al. Design of multi-spectral large format chromatic CCD digital aerial photogrammetric camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2473-2477.  
钱义先,高晓东,梁伟,等. 多光谱大面阵彩色 CCD 数字航测相机设计[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2473-2477.

- [2] XU Hong, WANG Xiang-jun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2007, **33**(1):13-17.  
许宏,王向军.多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. *红外与激光工程*. 2007, **33**(1):13-17.
- [3] SELLAR R G, BOREMAN G D. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications [J]. *Optical Engineering*. 2005, **44**(1):0136021-0136023.
- [4] 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):3160-3164.  
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):3160-3164.
- [5] FAN Cheng-xiao, HAN Jun, XIONG Zhi-jun, et al. Application and status of unmanned aerial vehicle remote sensing technology [J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2009, **34**(5):214-215.  
范承啸,韩俊,熊志军,等.无人机遥感技术现状与应用[J]. *测绘科学*. 2009, **34**(5):214-215.
- [6] LI Ming, WU Qing-wen, YU Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*. 2010, **30**(1):210-213  
黎明,吴清文,余飞.基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):210-213.
- [7] JOHN W P. Fail-safe design of an all BK-7 glass aircraft window [C]. SPIE, 2003, **2286**: 431-443.
- [8] YANG Jia-wen, HUANG Qiao-lin, HAN You-ming. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery&Remote Sensing*, 2010, **31**(5):49-55.  
杨佳文,黄巧林,韩友明. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. *航天返回与遥感*, 2010, **31**(5):49-55.
- [9] FANG Yu, XIANG-LI Bin, LÜ Qun-bo, et al. Design of the optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(4): 0422007.  
方煜,相里斌,吕群波,等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响分析. *光学学报*[J]. 2013, **33**(4): 0422007.
- [10] SHAN Bao-zhong, WANG Shu-yan, NIU Han-ben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3):318-323.  
单宝忠,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*. 2002, **10**(3):318-323.
- [11] LI Fu, RUAN Ping, MA Xiao-long, et al. Methods of optomechanical analysis with Zernike polynomials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(1):38-42.  
李福,阮萍,马小龙. 用 Zernike 多项式实现光机分析的技术方法[J]. *应用光学*. 2007, **28**(1):38-42.
- [12] ZHANG De-jiang, LIU Li-ren, SUN Jian-feng, et al. The research on wavefront error induced by the deformation of prisms under gravity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4):618-621.  
张德江,刘立人,孙建锋,等. 棱镜自重变形对波面影响的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4):618-621.
- [13] XIE Bin, XIAO Zhi-hong, YU Jing-chi. Analyzing thermal deformation of ultra-thin mirror using Zernike polynomials [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2):173-179.  
解滨,肖志宏,余景池. 利用 Zernike 多项式分析超薄镜热变形[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2):173-179.
- [14] JUERGENS R C, CORONATO P A. Improved method for transfer of FEA results to optical codes[C]. SPIE, 2003, **5174**:105-115.
- [15] PATRICK A, CORONATO R, JUERGENS C. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[C]. SPIE, 2003, **5176**:1-8.