

文章编号: 1003-501X(2011)05-0016-05

# 星载高分辨力、大视场高光谱成像仪光学设计

薛庆生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 根据高分辨力、大视场的要求, 考虑到市售探测器的限制, 提出了视场分离分光的方法, 分析了视场分离分光的原理。利用此方法设计了一个星载高分辨力、大视场高光谱成像仪光学系统, 该系统由 11.42° 远心离轴三反消像散(TMA)望远系统和 2 个 Offner 凸面光栅光谱成像系统组成, 运用光学设计软件 CODE V 对高光谱成像仪光学系统进行了光线追迹和优化, 并对设计结果进行了分析, 分析结果表明, 光学系统在各个谱段的光学传递函数均达到 0.7 以上, 完全满足设计指标要求。

**关键词:** 光学设计; 高光谱成像仪; 离轴三反消像散; 凸面光栅; Offner 光谱成像系统

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.05.004

## Optical Design of Spaceborne High Resolution Hyperspectral Imagers with Wide Field of View

XUE Qing-sheng

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

**Abstract:** Based on the requirements of high resolution and wide field of view, considering the restrictive off-the-shelf detectors, the design method of split Field of View (FOV) is developed. The principle of split FOV is analyzed. A spaceborne high resolution hyperspectral imager with wide FOV is designed using the method. The hyperspectral imager are composed of a 11.42° telecentric off-axis Three-Mirror Anastigmatic (TMA) telescope and two Offner convex grating spectral imaging system. Ray tracing, optimization and analyzing are performed by CODE V software. The analyzed results demonstrate that the Modulation Transfer Function (MTF) for different spectral band is more than 0.7, which satisfies the pre-designed requirement.

**Key words:** optical design; hypersepectral imager; off-axis three-mirror anastigmatic; convex grating; Offner spectral imaging system

## 0 引言

高光谱成像仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术的基础上发展起来的新一代空间光学遥感仪器, 它是遥感技术的进步和发展, 能够以高光谱分辨力获取景物和目标的超多谱段图像, 在陆地、大气、和海洋观测中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。高光谱成像仪的工作波段宽、分辨力高, 一般覆盖 0.4 ~ 1.0  $\mu\text{m}$ , 地面像元分辨力从几米至几十米, 光谱分辨力从几纳米至几十纳米。目前国际上具有代表性的高光谱成像仪有美国 TRW 公司研制的 Hyperion<sup>[4]</sup>, 视场 0.624°, 刈幅宽度 7.5 km; 美国海军 NEMO 卫星的主载荷 COIS<sup>[5]</sup>, 视场 2.5°, 刈幅宽度 30 km; 英国 Sira 公司研制的 CHRIS<sup>[6]</sup>, 视场角 0.553°, 刈幅宽度 13 km。这些高光谱成像仪载荷分辨力高, 在空间遥感中发挥了重要作用, 但是缺点是视场角较小, 刈幅宽度小。随着空间遥

收稿日期: 2010-11-15; 收到修改稿日期: 2011-02-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)基金资助项目(2009AA12Z151)

作者简介: 薛庆生(1979-), 男(汉族), 山东梁山人。助理研究员, 博士, 主要研究工作是光学系统设计, 空间遥感成像光谱技术及光谱辐射定标。E-mail: qshxue2006@163.com。

感应用的不断深入,对高光谱成像仪的要求也越来越高,要求满足高分辨力的条件下,还要求具有大视场角。因为视场越大则刈幅宽度越大,仪器的回访周期就越小。因此星载高分辨力、大视场高光谱成像仪成为空间遥感的迫切需求,而现有的小视场高光谱成像仪不能满足要求。目前有几种实现大视场的技术途径,例如,采用多个镜头分割视场<sup>[7-8]</sup>、使用垂直于飞行方向的偏转反射镜<sup>[9]</sup>、采微透镜扫描器实现视场分割<sup>[10]</sup>等。采用多个镜头分割视场的方案不仅使仪器的体积和重量增大,而且对镜头的位置精度和镜头间的相对位置精度都提出了很高的要求,给机械设计和材料设计增加了困难,需要解决多个通道触发一致性、均匀性校正和通道平衡等问题。使用垂直于飞行方向的偏转反射镜的方案延伸反射型设计所需的工作量比多个镜头分割视场的方案还大<sup>[9]</sup>。采微透镜扫描器分割视场的方案中微透镜阵列的加工、制作比较困难。

高光谱成像仪光学系统由望远系统和光谱成像系统组成。地物目标的一个条带经望远系统成像在光谱成像系统的入射狭缝上,光谱成像系统对入射狭缝进行色散,然后按波长不同成像在探测器的不同位置上,与入射狭缝长度方向平行的一维为空间维,与狭缝宽度方向平行的一维为光谱维,再经随卫星运行方向推扫得到图谱合一的图像。在成像光谱仪的研制过程中,光学系统的选择和设计直接影响着整个成像光谱仪的性能、结构的复杂程度、重量和体积等。

本文根据星载高分辨力、大视场高光谱成像仪的应用要求和技术指标,考虑到市售探测器的限制,提出了一种新的视场分离的方法,详细分析了视场分离分光的原理,运用该方法设计了星载高分辨力、大视场、高光谱成像仪光学系统,并利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对设计结果进行了分析与评价。

## 1 应用要求及主要技术指标

星载高光谱成像仪要求在 0.4 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  光谱范围内对地物特征和性质进行高光谱成像探测,试验验证目标识别,并开展在农、林、水、土、矿等资源、环境民用领域的初步应用。卫星轨道高度  $H=600\text{ km}$ , 要求刈幅宽度  $GW=120\text{ km}$ , 地面像元分辨率  $GSD=30\text{ m}$ , 光谱分辨率  $5\text{ nm}$ 。由于受市售 CCD 产品的限制,可选择的余地非常有限,在 0.4 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  波段(VNIR), 可用的 CCD 探测器像元尺寸为  $p=18\text{ }\mu\text{m}$ , 像元数为  $2\ 048$ (空间维) $\times 256$ (光谱维)。根据仪器轨道高度和刈幅宽度的要求,确定仪器的视场角为

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{GW}{2H}\right) = 11.42^\circ \quad (1)$$

高光谱成像仪全系统的焦距  $f'$  为

$$f' = \frac{H \cdot p}{GSD} = 360\text{ mm} \quad (2)$$

光谱成像系统的放大倍率取 1:1, 则望远系统的焦距  $f'$  为 360 mm。综合考虑成像质量和信噪比要求,取入瞳直径为 90 mm, 仪器的相对孔径为 1:4。高光谱成像仪光学系统的主要技术指标总结如表 1 所示。

## 2 望远系统设计

### 2.1 视场分离分光原理

从技术指标可以看出,这是一个星载高分辨力、大视场高光谱成像仪光学系统。由于市售探测器的限制,在满足地面像元分辨率的前提下,探测器在空间维上不够大。因此为同时满足高分辨力和大视场的要求,本文提出了视场分离分光方法,原理如图 1 所示,将全视场  $11.42^\circ$  分成  $0 \sim 5.71^\circ$  和  $-5.71 \sim 0^\circ$  两个视场,分别定义为视场 1(FOV 1)和视场 2(FOV 2)。视场 1 和视场 2 使用各自独立的狭缝,在望远系统的焦平面前放置一个刀口反射镜,精确控制刀口反射镜切入光束的位置,使其边缘不挡住视场 2 的入射光束,又能完

表 1 高光谱成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of hyperspectral imager optical system

Spectral range / $\mu\text{m}$	0.4 ~ 1.0
Field of view (FOV) / $(^\circ)$	11.42
Focal length of telescope /mm	360
Focal length of system/mm	360
Entrance diameter/mm	90
Detector array size/pixel	2 048 $\times$ 256
Detector pixel size/ $\mu\text{m}$	18 $\times$ 18

全反射视场 1 的光束，控制刀口反射镜的方向可以转动视场 1 光束的空间位置，减小仪器体积。因为高光谱成像仪的视场为线视场，在空间维上全视场为  $11.42^\circ$ ，对应入射狭缝的长度方向，在光谱维上的视场为  $0.00286^\circ$ ，对应狭缝宽度方向。因为视场 1 和视场 2 的离轴量不同，二者在焦面附近就分开了一定的距离，所以在焦面附近放置刀口反射镜，就不会有视场 1 的光进入视场 2，也不会有视场 2 的光进入视场 1。视场分离的方法，两个狭缝的位置精确匹配控制，视场 1 和视场 2 不能同时对地面同一目标成像，但通过沿卫星飞行方向推扫和数据重组，能够获得 120 km 的刈幅宽度。

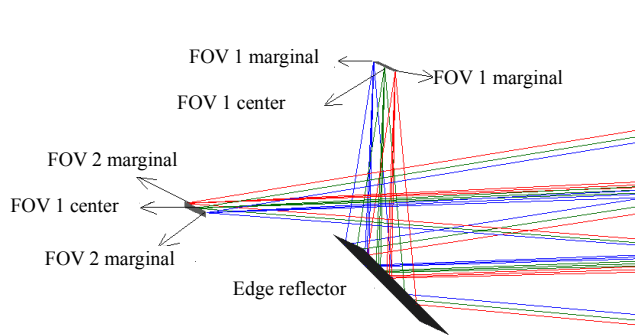


图 1 视场分离结构原理图  
Fig.1 Principle of split field of view

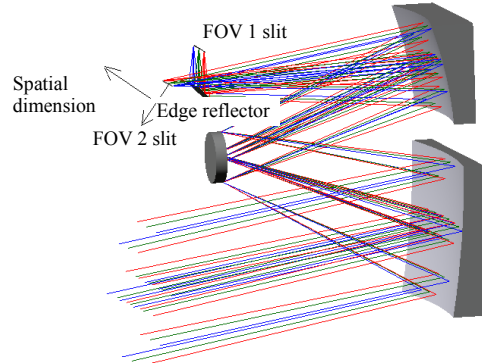


图 2 离轴三反望远系统光学结构图  
Fig.2 Optical path of TMA telescope system

### 2.2 望远系统光学设计

望远系统覆盖的波段宽，视场大，分辨力要求高，因此望远系统采用离轴三反消像散(TMA)<sup>[11-12]</sup>结构，TMA 系统是近些年发展起来的新型光学系统，由三块非球面反射镜组成，具有无中心遮拦、分辨力高、体积小、平像场等优点。为了与光谱成像系统实现光瞳匹配，要求望远系统像方远心。TMA 系统根据离轴方式不同分为光阑离轴和视场离轴两种类型。光阑离轴的 TMA 系统，孔径光阑在主镜上，一般有中间像面，光学系统很不对称，所以视场角不能做太大。视场离轴的三反系统，孔径光阑放在次镜上，使光学系统比较对称，可以设计成很大的视场角，成像质量好，并且容易实现像方远心。因此根据高光谱成像仪的望远系统的特点，选择视场离轴的 TMA 系统作为其结构型式。

首先根据高斯光学理论计算同轴三反系统的初始结构参数，然后加入适当的离轴量，避免中心遮拦，FOV 1 离轴  $8^\circ$ ，FOV 2 离轴  $10^\circ$ ，二者在像面上错开约 12 mm 的距离，在焦面附件加了一个刀口反射镜实现视场分离。利用 CODE V 软件的多重结构(zoom)优化功能，在初始结构基础上进行了优化设计，形成如图 2 所示的离轴三反望远系统，次镜为孔径光阑，无中间像，主镜为六次非球面，次镜和三镜均为二次曲面，系统总长约为系统焦距的 1/2。图 3 为望远系统的调制传递函数，各视场在特征频率 28 lp/mm 处大于 0.8，成像质量接近衍射极限。

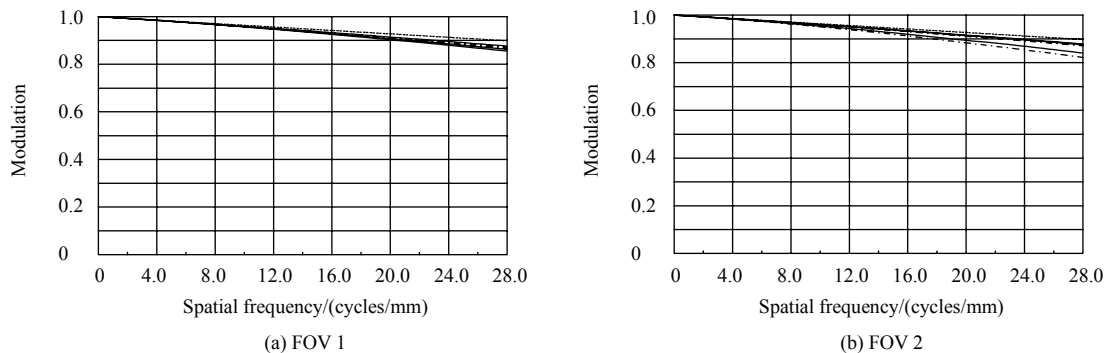


图 3 离轴三反望远系统调制传递函数曲线  
Fig.3 MTF curve of TMA telescope system

### 3 光谱成像系统设计

Offner 光谱成像系统(如图 4 所示)是在反射式 Offner 中继光学系统<sup>[13-14]</sup>的基础上发展起来的新型光谱成像系统, 2 块球面反射镜分别作为主镜和三镜, 凸面光栅作为第二个面。在 Offner 中继光学系统的初始结构中, 主镜和三镜具有相同的曲率半径和曲率中心, 孔径光阑在次镜上, 因此系统的入瞳和出瞳均位于无限远, 系统可以看作关于光阑对称的系统, 彗差和畸变因对称性消除。当把第二个面换成光栅后, 尽管在一定程度上破坏了系统的对称性, 但可以适当调整主镜和三镜的旋转角度来获得良好的成像质量。与传统准直光束中使用光栅或棱镜的方法相比, Offner 光谱成像系统具有体积小、质量轻、谱线弯曲和色畸变小等优点。如图 4 所示, 纸面内为光谱维, 垂直纸面方向为空间维, 图 4 给出了中心波长和两个边缘波长的位置。

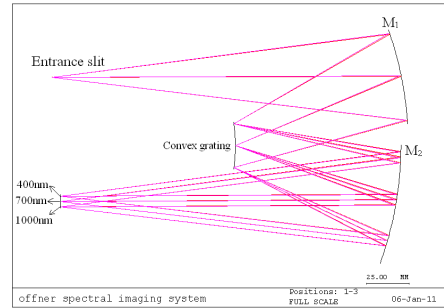


图 4 Offner 光谱成像系统光学结构

Fig.4 Optical path of Offner spectral imaging system

因此, 光谱成像系统采用 Offner 凸面光栅结构, 入射狭缝尺寸为 36 mm×18 μm, 物方数值孔径为 0.124。为了使狭缝像与探测器匹配, 光谱成像系统的放大率取为 1:1, 利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 进行了优化设计, 图 5 给出了 Offner 光谱成像系统的设计结果。从图 5 可以看出, 不同波长的调制传递函数(MTF)在奈奎斯特空间频率 28 lp/mm(对应 18 μm 探测器像元)处均大于 0.75, 成像质量优良。畸变小于 0.02%, 可以忽略。

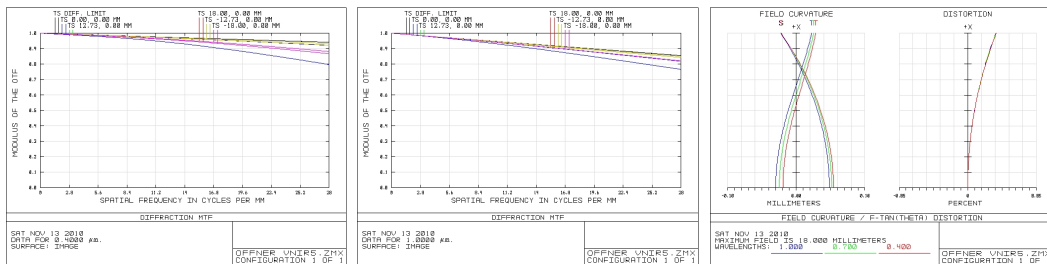


图 5 Offner 光谱成像系统设计结果

Fig.5 Design results of Offner spectral imaging system

### 4 高光谱成像仪全系统设计

将离轴三反消像散(TMA)望远系统与 Offner 光谱成像系统组合, 并适当调整, 得到高分辨力、大视场高光谱成像仪全系统的光学结构如图 6 所示, 光谱维在纸面内, 空间维在垂直纸面方向。图 6 给出了视场 1 和视场 2 的中心波长和边缘波长在焦平面上的位置。高光谱成像仪全系统视场 1 不同波长的调制传递函数(MTF)如图 7 所示。高光谱成像仪全系统视场 2 不同波长的调制传递函数(MTF)如图 8 所示。可以看出, 各视场不同波长的调制传递函数(MTF)在奈奎斯特空间频率 28 lp/mm 处(对应 18 μm 探测器像元)均大于 0.7, 远高于 MTF ≥ 0.5 的设计指标要求。

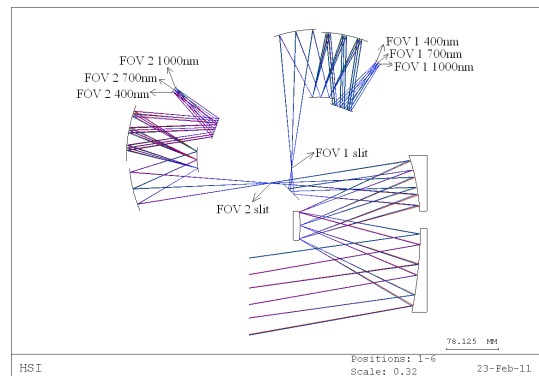


图 6 高光谱成像仪全系统光学结构图

Fig.6 Optical path of hyperspectral imager system

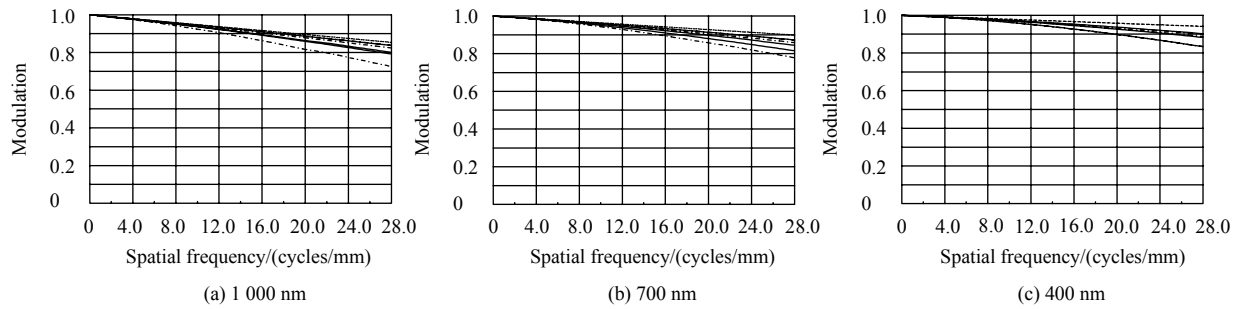


图7 视场1不同波长的MTF

Fig.7 MTF of different wavelengths for FOV 1

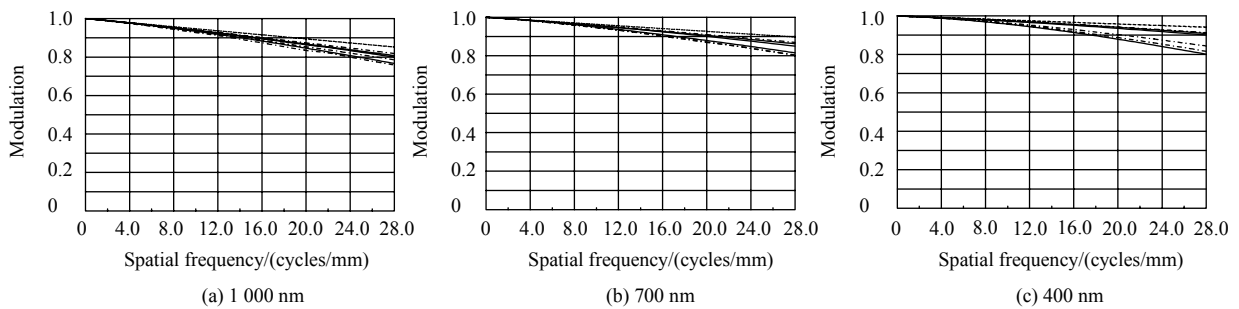


图8 视场2不同波长的MTF

Fig.8 MTF of different wavelengths for FOV 2

## 5 结论

星载高分辨力、大视场高光谱成像仪已成为空间遥感的迫切需求,本文根据高分辨力、大视场高光谱成像仪的要求,考虑到市售探测器的限制,提出了一种新的视场分离分光方法,这种视场分离方法具有结构简单紧凑、易于实现的特点。详细分析了视场分离分光的原理,并利用这种设计方法设计了全视场 $11.42^\circ$ 、地面像元分辨率30 m,光谱分辨率5 nm,工作波段为 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ,光谱通道为120的星载高光谱成像仪光学系统,用光学设计软件CODE V和ZEMAX进行了优化设计,并对设计结果进行了分析。分析结果表明,不同波长的调制传递函数(MTF)均达到0.7以上,完全满足成像质量要求,并且结构紧凑,适合空间遥感应用。

### 参考文献:

- [1] 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 Qing-sheng, WANG Shu-rong, LI Fu-tian, *et al.* Limb imaging spectrometer for remote sensing of atmosphere [J]. **Opt. Precision Eng.**, 2010, 18(4): 823-830.
- [2] 王爱春,闵祥军,李杏朝,等.“环境-1号”A星高光谱成像仪飞行定标[J].航天返回与遥感,2009,30(3):34-41.  
WANG Ai-chun, MIN Xing-jun, LI Xing-chao, *et al.* In-flight absolute calibration of HJ-1A HSI [J]. **SPACECRAFT RECOVERY & REMOTE SENSING**, 2009, 30(3): 34-41.
- [3] 贾辉,李福田.阿达玛变换成像光谱仪编码模板的设计与制作[J].光电工程,2003,30(4):53-58.  
JIA Hui, LI Fu-tian. Design and fabrication of encoding template for Hadamard transform imaging spectrometer [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2003, 30(4): 53-58.
- [4] Pearlman Jay, Segal Carol, Lushalan Liao, *et al.* Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [J]. **Pro. of SPIE(S0277-786X)**, 2004, 4135: 243-253.
- [5] Wilson Thomas, Curtiss Davis. Naval EarthMap Observer (NEMO) Satellite [J]. **Pro. of SPIE(S0277-786X)**, 1999, 3753: 1-11.

(下转第29页)

## 参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.  
YIN Xing-liang. **Principle of Aero-Optics** [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003.
- [2] Christopher Wyckham, Zaidi S H, Miles R, *et al.* Measurement of Aero-Optic Distortion in Transonic and Hypersonic, Turbulent Boundary Layers with Gas Injection [C]// **36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference**, Toronto, Ontario Canada, June 6-9, 2005: AIAA-2005-4755 .
- [3] William J Yanta, W Charles Spring III. Near-and far-field measurements of aero-optical effects due to propagation through hypersonic flows [R]. AIAA-2000-2357.
- [4] Eric Tromeur, Eric Garnier, Pierre Sagaut. Large-eddy simulation of aero-optical effects in a spatially developing turbulent boundary layer [J]. **Journal of Turbulence**(S1468-5248), 2006, 7(1): 1-28.
- [5] Stanislav Gordeyev, Eric J Jumper, Ng Terry T, *et al.* Aero-optical characteristics of compressible, subsonic turbulent boundary layers [C]//**34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference**, Orlando, Florida, June 23-26, 2003: AIAA-2003-3606.
- [6] 李桂春. 气动光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
LI Gui-chun. **Aero-Optics** [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [7] Augirre R C, Catrakis H J. Aero-optical wavefronts and scale-local characterization in large-Reynolds-number compressible turbulence [J]. **AIAA Journal**(S0001-1452), 2004, 42(10): 1982-1990.
- [8] 盛骤, 谢世千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. **Probability and Statistics** [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [9] Balakumar P. Stability of Supersonic Boundary Layers over Blunt Wedges [C]// **36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit San Francisco**, California, June 5-8, 2006.
- [10] 杨文霞, 蔡超, 丁明跃, 等. 超音速/高超音速飞行器湍流场气动光学效应分析 [J]. 光电工程, 2009, 36(1): 88-92.  
YANG Wen-xia, CAI Chao, DING Ming-yue, *et al.* Numerical Analysis of Aero-optic Effects Induced by the Turbulence Flow Field Surrounding Super/Hypersonic [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, 36(1): 88-92.

~~~~~  
(上接第 20 页)

- [6] Cutter Mike A, Hill South. Compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance [J]. **Pro. of SPIE**(S0277-786X), 2004, 5546: 126-131.
- [7] 马艳华, 敬忠良, 王建宇, 等. 基于视场分割方式的宽视场高光谱成像系统的辐射匹配技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 457-460.  
MA Yan-hua, JING Zhong-ling, WANG Jian-yu, *et al.* Radiation matching technology for wide-view hyperspectral imager based on field-dividing [J]. **J. Infrared Millim. Waves**, 2008, 27(6): 475-460.
- [8] 危峻, 蔡海蛟, 翁东山. 视场合成技术在推扫式成像光谱仪中的应用研究 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(15): 4531-4533.  
WEI Jun, CAI Hai-jiao, WENG Dong-shan. Application research of FOV composition in Imaging spectrometer [J]. **Science Technology and Engineering**, 2009, 9(15): 4531-4533.
- [9] 张立. 机载推帚式高光谱成像仪实现宽视场的技术途径 [J]. 红外, 2002(9): 20-25.  
ZHANG Li. Technology approaches of wide field of view air borne hyperspectral imager [J]. **INFRARED**, 2002(9): 20-25.
- [10] 董珊, 陈四海, 向思桦, 等. 分视场成像光谱仪 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(10): 221-225.  
DONG Shan, CHEN Si-hai, XIANG Si-hua, *et al.* Field of-view-multiplexing imaging spectrometer [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2006, 35(10): 221-225.
- [11] 伍和云, 王培纲. 离轴反射式光学系统设计 [J]. 光电工程, 2006, 33(1): 34-37.  
WU He-yun, WANG Pei-gang. Design of reflective off-axis system [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, 33(1): 34-37.
- [12] Offner A. Unit Power imaging catoptric anastigmat: US, 3748015[P]. 1973.