

文章编号 1004-924X(2009)04-0727-05

微型集成超光谱成像系统

季轶群, 官广彪, 朱善兵, 沈为民

(苏州大学 现代光学技术研究所 江苏省重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要:设计了一种便携式高集成度超光谱成像系统,其特点是将系统中的所有光学元件固化在两块胶合而成的普通玻璃表面。介绍了系统的结构原理与设计思想,给出了设计实例及像质评价。优化设计的超光谱成像光学系统由 3 个同心球面光学元件构成,曲率中心与入射狭缝、CCD 接收器位于同一平面内,系统尺寸 $< 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。光学系统在可见光波段 ($0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$) 工作,相对孔径 $> 1:2.5$,放大倍率为 $1:1$,无色畸变,谱线弯曲仅为几个纳米,满足物方和像方远心,成像质量接近衍射极限,光谱分辨率高、稳定性好,适用于航天、生物医学等领域。

关键词:超光谱成像;成像仪;凸面光栅;光学设计

中图分类号:TH744.1;TH703 **文献标识码:**A

Minimal integrated hyperspectral imaging system

JI Yi-qun, GONG Guang-Biao, ZHU Shan-bing, SHEN Wei-min

(Key Laboratory of Jiangsu Province, Modern Optical Technology
Institute of Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A compact hyper-spectral imaging system characterized by all the optical elements integrated on the glass surface combined two pieces of normal glass was reported. The working principle and configuration layout of the system were introduced and a designed example and its image quality evaluation were given. The optimized hyper-spectral imaging system consisting of three concentric spherical optical elements is less than $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ in sizes and its common center, entrance slit and the CCD detector are in the same plane. it works at the visible wavelength band ($0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$) with the optical system higher than $F/2.5$, unit magnification, negligible distortion, and both objective and imagery in telecentrics. Moreover, the imager has the advantages of high spectral resolutions, good stability, and imaging quality closed to diffraction limit, and can be widely used in the fields of aerospace, biomedical sciences, etc.

Key words: hyperspectral imaging; imager; convex grating; optical design

1 引言

20 世纪 80 年代中期, Alexander F. H.

Goetz 提出了超光谱成像的概念^[1]。基于平面或凹面光栅的光谱成像系统,受像差校正的限制,系统相对孔径一般低于 $F/4$,能量利用率偏低,光谱像存在明显的弯曲和色畸变^[2],成像放大率随波

收稿日期:2008-06-30;修订日期:2008-08-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z103);江苏省高校自然科学研究计划资助项目(No. 06KJA14003)

长变化,难以适用于超光谱成像系统。意大利 Galileo Avionica 公司首先采用 Thevenon 的建议^[3],用凸面光栅代替 Offner 中继光学系统中的凸面反射镜,1995 年研制出了世界上第一台凸面光栅超光谱成像仪系统 VIMS,已用于 Cassini 号土星探测器和多颗其他卫星,如美国 Philip 实验室研制的凸面光栅超轻小光谱成像仪 HIS(Hyper-spectral Imaging System)和“海洋成像光谱仪”COIS(VS-15),已分别装备于海洋测绘观测 NEMO 卫星;美国 TRW 公司研制的 Hyperion 凸面光栅超光谱成像仪已用于对地观察 EO-1 卫星^[4-7]。

Offner 中继光学系统由同心球面反射镜构成,具有自动消除 Seidal 像差、结构紧凑和光学加工相对简单等优点,用凸面闪耀光栅代替其中的凸面反射镜,可研制质量、体积超轻小,相对孔径大的超光谱成像光学系统,促使超光谱成像系统向小型化、轻量化、便携化的方向发展。然而,反射光学系统要求装调装配精度高、技术难度大、长期使用稳定性较差,对此本文提出一种微型、集成的超光谱成像系统,介绍了该系统的结构原理与设计思想,采用固化方法,将由两块球面反射镜和一块凸球面光栅组成的光学系统固化为一体。然后,给出设计实例及其像质评价,优化设计得到的光学系统物方和像方远心,体积 $< 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, F 数为 $F/2.5$,放大倍率为 $1:1$,成像质量接近衍射极限。

2 原理与结构

Offner 于 1971 年提出的中继光学系统如图 1 所示^[4],由两块球面反射镜 M_1 和 M_3 构成,它

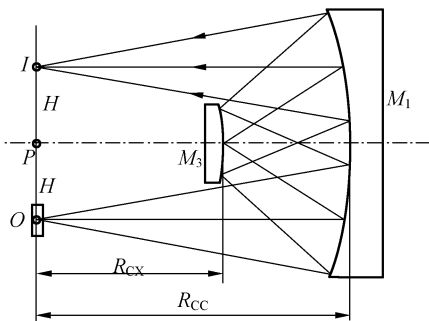


图 1 Offner 结构示意图

Fig. 1 Sketch map of Offner configuration

们的曲率中心重合于轴上点 P 点。Offner 中继系统起转像作用,从物面上 O 点发出的光首先经过凹面反射镜 M_1 下部的第一次反射到达凸面反射镜 M_3 ,由 M_3 反射至 M_1 上半部分,再经 M_1 上部的第二次反射,在 I 处形成放大倍率为 $1:1$ 的像,像点 I 和物点 O 关于 P 点对称,且 P 、 I 和 O 在同一平面内。这种系统固有像差小^[7-9],无球差、彗差和畸变,当反射镜 M_1 的曲率半径等于反射镜 M_3 的两倍时,场曲和三级像散自动消除,可以实现大相对孔径。

Thevenon 基于 Offner 中继系统建议的凸面光栅光谱成像系统^[2]如图 2 所示,用凸面衍射光栅 G 代替 Offner 中继系统的凸面反射镜 M_3 ,用共球面的两块分离反射镜 M_1 和 M_1' 代替图 1 所示 Offner 系统中的反射镜 M_1 。前置光学系统(图中未画出)形成的被测目标的像位于光谱仪的入射狭缝 S 处,通过此狭缝进入 Offner 成像光谱仪系统后,首先到达 M_1 ,由 M_1 会聚至凸面光栅 G ,再由凸面反射光栅衍射至 M_1' ,最后经 M_1' 反射,在焦平面 CCD 处形成不同波长的光谱像 $O_{\lambda 1}, \dots, O_{\lambda n}$ 。用凸面光栅代替 Offner 中继系统的凸面反射镜,保持了同心结构及其小像差特性。

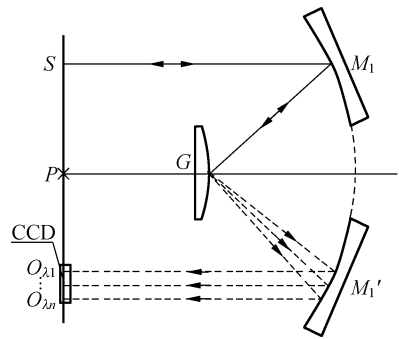


图 2 超光谱成像仪初始结构

Fig. 2 Primary configuration of hyper-spectrograph

这种采用纯反射式的球面光学系统易加工,在适用工作波段和环境温度变化方面具有明显的优点。不足的是系统中的反射元件属于离轴使用,装调难度大,精度要求高;特别是各光学元件是分离的,需要单独支撑固定,导致长期使用稳定性差,易受振动、冲击、气压等外界因素变化的影响。一个解决办法是采用模块化设计思想,提高系统的稳定性。

本文提出的系统如图 3 所示,它由两块同种

光学玻璃元件 G_1 和 G_2 胶合而成, S_{12} 为胶合球面, G_2 的后表面也是球面, 镀有反射膜 M_1 和 M_2 , G_1 的前表面是平面, 用于固定入射狭缝 S 和 CCD 接收器。 P 是 M_1 、 M_1' 和衍射光栅 G 的曲率中心, S 、 C 和 P 共面。光栅槽可刻划在元件 G_1 的凸面上, 也可刻划在 G_2 的凹面上。来自待测目标的光通过入射狭缝 S 后在玻璃介质内传播, 经 M_1 反射、光栅 G 衍射色散和 M_1' 的反射后, 在焦平面所在位置 C 处形成入射狭缝 S 的光谱像。这种系统将成像光谱仪内的所有元件固化为一个实体, 具有优越的稳定性。

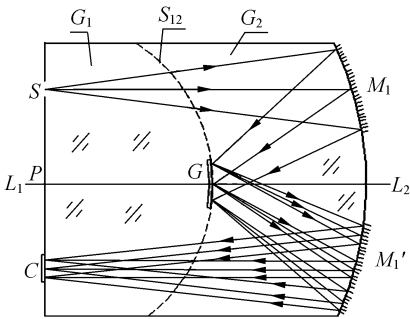


图 3 系统结构图

Fig. 3 Configuration layout of system

3 设计结果

图 4 是经过优化设计得到的一个超光谱成像光学系统实例, 其工作波段为 $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$, 视场(狭缝尺寸)为 $2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$, 物方数值孔径为 0.2 , 系统放大倍率 $1:1$, 物、像方均满足远心光路, 狭缝 S 和 CCD 探测器的放置分别与物方和像方的主光线垂直, 且 S 、 C 和 P 共面。前置系统在狭缝处形成待测目标的像, 经 M_1 反射至光栅 G 表面, 光栅是直线形的, 槽密度约 400 lp/mm , 光栅槽的取向与狭缝方向一致, 光栅将来自 M_1 的光沿垂直于光栅槽取向方向分光, 再经 M_1' 反射后在 CCD 探测器光敏面上形成不同波长的光谱像, 它们沿色散方向均匀排列, 得到的谱面宽度为 1.5 mm , 线色散率达 $3.75 \times 10^{-3} \text{ mm/nm}$ 。选用像元大小为 $7.5 \mu\text{m}$ 的 CCD 探测器接收, 获得的光谱分辨率为 2 nm/pixel 。凹面反射镜 M_1 和 M_1' 曲率半径相等, 约等于凸面衍射光栅 G 的 2

倍, M_1 、 M_1' 、 G 的光学有效口径分别约为 $\phi 6.5 \text{ mm}$ 、 $\phi 8.5 \text{ mm}$ 、 $\phi 3.8 \text{ mm}$, 光学系统的尺寸沿光轴方向为 27 mm , 沿色散方向为 23 mm 。

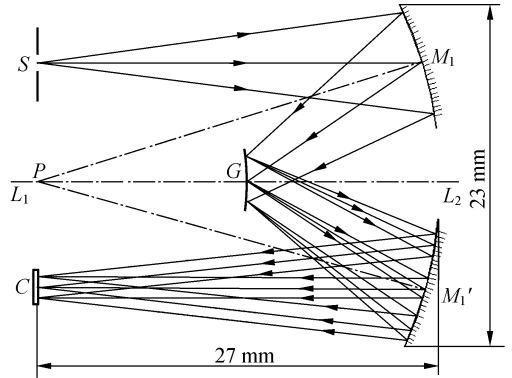


图 4 系统光路图

Fig. 4 Optical path layout of optimized example

光学系统畸变如图 5 所示, 图中网格结点为理想像点所在位置, 十字叉“ \times ”表示实际成像点位置, 光学系统的相对畸变最大值是 0.1078% , 由于设计时放大倍率严格按照 $1:1$, 无色畸变^[8], 谱线弯曲量的数量级在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, 这样的畸变值远小于所选用的探测器的像元大小, 不会明显影响光谱分辨率。

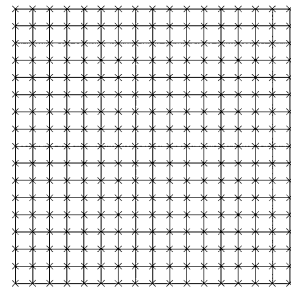


图 5 网格畸变 (%)

Fig. 5 Grid distortion (%)

图 6 是在工作波长为 $0.6 \mu\text{m}$ 时系统的场曲、像散曲线, 横坐标表示场曲像散值, 纵坐标是归一化视场, 图中的两条曲线 S 和 T 分别表示弧矢和子午两个面内的场曲, 两曲线之间的差值即像散值。利用焦深计算公式 $2\lambda(f/\#)^2$, 得到系统焦深约 $10 \mu\text{m}$, 因此, 图中所示的像散值在像差容限范围内。

光线经过光学系统的光线追迹点列图如图 7

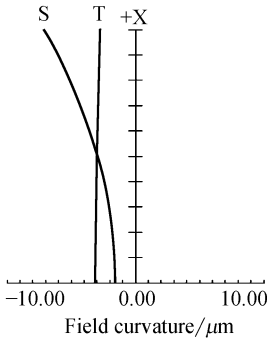


图 6 光学系统的场曲/像散曲线图

Fig. 6 Field curvature/astigmatism of optical system

所示,由此可考察入射狭缝经过光谱仪分光成像后在 CCD 接收器光敏面上的聚焦情况,图中的黑色圆圈表示艾利斑,艾利斑的大小除了与光学系统的数值孔径有关外,还与波长成正比;图中给出了矩形狭缝中心和 4 个顶点视场处,3 个不同工作波长 0.4 μm 、0.6 μm 和 0.8 μm 对应的艾利斑及其点列图分布情况。可见,像面上不同波长的各视场处的点列图都落在艾利斑以内,成像质量接近衍射极限。从图 8 所示调制传递函数曲线也可看出,该光学系统成像性能达到了衍射极限,所选探测器在奈奎斯特空间频率 66.7 lp/mm 处的 $\text{MTF} > 0.9$ 。

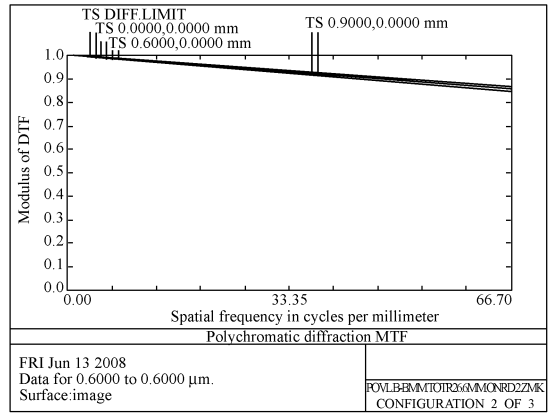


图 8 光学系统传递函数曲线

Fig. 8 Modulation transfer function curve

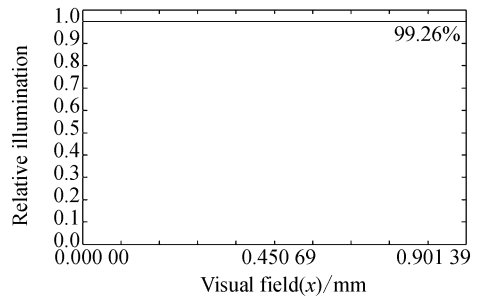


图 9 像面相对照度曲线图

Fig. 9 Relative illumination on image surface

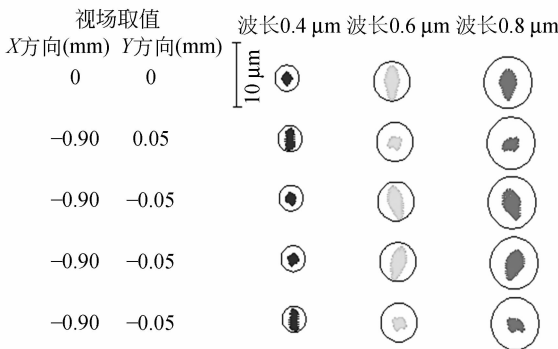


图 7 光线追迹点列图

Fig. 7 Spot diagram of system

光学系统所成光谱像在接收器件表面上的相对辐照度分布曲线如图 9 所示,边缘照度为中心的 99.26%,没有明显下降,像面照度分布十分均匀,这是由于系统满足像方远心。图 10 是能量集中度曲线可见,80%以上的能量集中在 CCD 探测器的一个像元范围内。

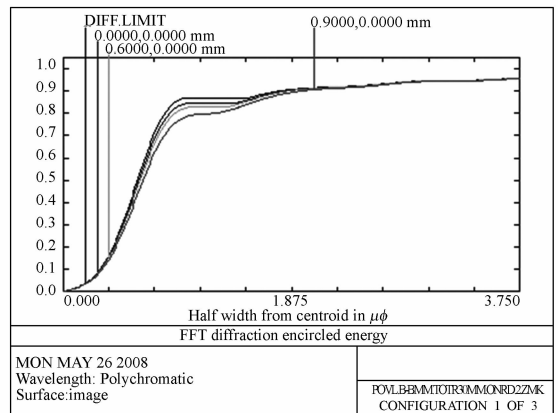


图 10 光学系统能量集中度曲线图

Fig. 10 Encircled energy

4 结论

报导了一种 Offner 型微型集成凸面光栅超光谱成像系统,给出了工作原理和设计实例,并对

其作了详细的像质评价。通过优化设计得到的超光谱成像系统,采用 Offner 全反射对称结构,由两块球面反射镜和一块凸球面光栅组成,3个光学元件共轴同心,系统几何像差小,且物、像方均满足远心光路,接收器件表面照度均匀。

参考文献:

- [1] GOETZ A F H, VANE G, SOLOMON J E, *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, 228(4704):1147-1153.
- [2] OFFNER. Unit Power Imaging; Catoptric Anastigmat[P]. *United States*: No. 3748015, 1973.
- [3] MERTZ L. Concentric spectrographs [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(12):3122-3124.
- [4] 刘虎,沈为民. 扫描平场凹面光栅[J]. *光学学报*, 1991, 11(6):545-552.
LIU H, SHEN W M. The scanning flat holographic concave gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(6):545-552. (in Chinese)
- [5] 王丽霞,王慧,高军. 星载超光谱成像技术应用及现状分析[J]. *航天返回与遥感*, 2000, 21(1):40-47.
WANG L X, WANG H, GAO J. Analysis and application of space-borne hyper-spectral imaging technology[J]. *Spacecraft recovery & remote sensing*,

所提出光谱成像系统的显著特点是光学系统集成成为一个整体,具有加工装调简单、体积小、稳定性好、像质好、光谱分辨率高、成本低且便于携带等优点,可望用于航空航天光谱成像遥感器和显微光谱成像仪。

- 2000, 21(1):40-47. (in Chinese)
- [6] 沈中,葛之江,张连台. 航天超光谱成像技术原理及其发展现状[J]. *航天器工程*, 2001, 10(4):45-52.
SHEN ZH, GE ZH J, ZHANG L T. Theory and development of space-borne hyper-spectral imaging technology[J]. *Spacecraft Engineering*, 2001, 10(4):45-52. (in Chinese)
- [7] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):650-656.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):650-656. (in Chinese)
- [8] DYSON J. Unit magnification optical system without Seidel aberrations [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49(7):713-716.
- [9] MOUROULIS P, WILSON D W, MAKER P D, *et al.*. Convex grating types for concentric imaging spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31):7200-7208.

作者简介:



季轶群(1980—),女,江苏宜兴人,2003年于徐州师范大学获学士学位,2006年于苏州大学获硕士学位,现为苏州大学博士研究生,主要从事光学设计与仪器光学等方面的研究工作。E-mail: jiyiqun@163.com

宫广彪(1981—),男,安徽人,2006年毕业于长春理工大学获得学士学位,现为苏州大学现代光学技术研究所硕士研究生,主要研究方向为光学仪器和光学设计。E-mail: ggb2116@163.com

朱善兵(1983—),男,江苏南通人,2006年毕业于苏州大学获得学士学位,现为苏州大学现代光学技术研究所硕士研究生,主要研究方向为光学仪器与光学设计。E-mail: 064239056005@suda.edu.cn

导师简介:

沈为民(1963—),男,江苏吴江人,教授,博士生导师,1984年、2004年于苏州大学分别获学士、博士学位,主要从事光学设计与仪器光学等方面的研究。E-mail: swm@suda.edu.cn