

成像光谱仪同心光学系统的研究

撒芃芃^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:介绍了 Offner 凸面光栅成像光谱仪和 Dyson 凹面光栅成像光谱仪两种常用的同心光学系统。Offner 凸面光栅成像光谱仪采用全反射的形式,使用光谱范围很宽,加工、装调较为简单,受外界环境影响较小;Dyson 凹面光栅成像光谱仪在体积和尺寸上的优势较为明显,易于实现整体结构的小型化。给出了这两种成像光谱仪的具体设计实例,两种光学系统的成像质量均能达到较为理想的结果,其结构畸变均 $<0.005\%$,在使用光谱范围内,光谱分辨率均能达到 3 nm ,具有高质量的光学传递函数。最后,给出了配合成像光谱仪使用的多种前置光学系统的结构形式,并讨论了消除系统杂散光的方法及消除光谱级次重叠的方法。

关键词:成像光谱仪;同心光学系统;凸面光栅;凹面光栅

中图分类号:TH744.1 **文献标识码:**A

Research of concentric optical systems of imaging spectrometers

HAN Peng-peng^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: Two types of concentric optical systems used in imaging spectrometers, Offner convex grating imaging spectrometers and Dyson concave grating imaging spectrometers, are introduced. The Offner convex grating imaging spectrometers are characterized by their broadly spectrum band, small influence from environments and easy to be fabricated and assembled, and the Dyson concave grating imaging spectrometers have advantages in their small volumes and easy to realize the compact systems. The design examples of the above types are given, and the results show that both the imaging spectrometers can offer high quality optical modulation transfer functions and can reach the perfect results in distortion less than 0.005% and spectrum resolution less than 3 nm . Moreover, several kind of fore-optics systems matched with the imaging spectrometers are given and the methods to eliminate the stray light and to restrain the spectrum overlaps in the optical systems are discussed.

Key words: imaging spectrometer; concentric optical system; convex grating; concave grating

1 引言

多光谱和超光谱成像技术是新一代光电探测技术,兴起于 20 世纪 80 年代,至今仍在迅速发展之中。由于其特有的成像和光谱探测的优点,已经广泛应用于国民经济及国防建设的各个领域。该项技术的核心部件是成像光谱仪^[1]。目前,世界各国已经研发了十几台航空用成像光谱仪,比较著名的有 AVRIS^[2]、CASI^[3]、AIS^[4]、HYDICE^[5]、OCEAN-PHILIS^[6]等。高分辨率成像光谱仪的光学系统一般由前置望远光学系统和后端光谱仪光学系统组成,在其分光光谱的成像焦平面上用面阵 CCD 采集数据,飞行器飞行沿轨迹方向推扫。

为了满足飞行载荷的要求,需要对成像光谱仪的体积和重量及具体的结构形式进行综合评估,并选择适合工作条件和要求的光谱仪系统结构形式。针对上述需求,本文介绍了成像光谱仪光学系统的主要形式,给出了 Dyson 光学系统和 Offner 光学系统的设计实例,这两种成像光谱仪满足了小型化和轻量化的要求,可用于空间、临近空间及地面的多光谱超光谱成像系统中。

2 成像光谱仪光学系统的主要形式

目前,成像光谱仪光学系统的主要结构形式是采用凸面或凹面光栅作为色散元件的同心光学系统,该种类型的结构形式能够很好地克服以棱镜为色散元件所带来的像质不好需要进行校正的缺点,已成为目前成像光谱仪设计的主流趋势,并广泛地应用在多种成像光谱仪系统中^[8]。所谓同心光学系统是由一系列折、反射球面组成的具有同一个球心的光学系统,它具有以下几个特点:(1)任一条穿过系统的光线的 nd 值为常数,其中 n 为光线经过空间的介质折射率, d 为球心到光线的距离。(2)经过公共球心的任一条直线均为系统的回转对称轴。(3)理想成像时,入射光线与出射光线平行,或者入射光线和出射光线到球心的距离之比等于像空间和物空间折射率之比,并且物点、像点和公共球心在同一条直线上。

(4)在全部由折射面组成的系统和由偶次反射面组成的系统里,实物成虚像,物和像在球心同侧;由奇次反射面组成的系统里,实物成实像,物和像在球心两侧^[9]。

在成像光谱仪中,色散光学系统大多数是由以下两种典型同心光学系统或者它们的改进形式组成的。一个是 Dyson 光学系统,如图 1(a)所示。Dyson 系统由一个大凹面反射镜和一个平凸透镜组成,凹面反射镜和透镜凸面的曲率中心相同,且在透镜的平面上。透镜的焦面在反射球面上,是系统孔径光阑的位置。另一个是 Offner 三反射镜光学系统,如图 1(b)所示。Offner 系统是由两个同心球面反射镜组成的三反射镜系统,一个为凸面镜,一个为凹面镜,凸面反射镜为系统孔径光阑的位置。将 Dyson 结构中的凹面反射镜和 Offner 结构中的凸面反射镜改为凹面光栅和凸面光栅,它们就成为同心光学系统的光栅式光谱仪。

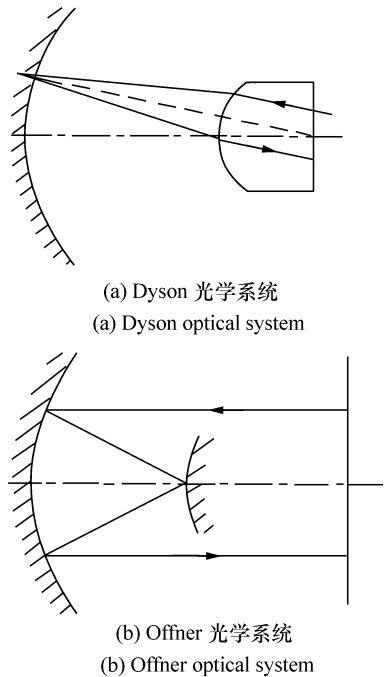


图 1 两种同心光学系统

Fig. 1 Two types of concentric optical systems

3 Dyson 凹面光栅成像光谱系统

Dyson 凹面光栅成像光谱系统是从同心 Dyson 光学系统演变而来的,即将其中的凹面反射镜

换成凹面光栅,其结构如图2所示。由于光栅的引入破坏了原有的同心系统的结构,因此需通过控制平凸透镜的曲率半径来实现成像优化。

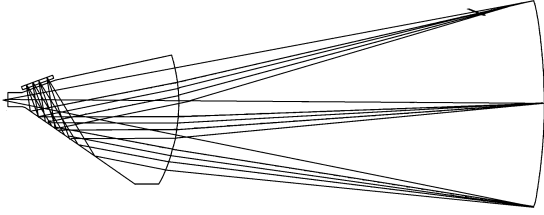


图2 Dyson 凹面光栅光谱成像系统

Fig. 2 Dyson spectrum imaging system with concave grating

本文以图2所示的结构形式设计了一款Dyson凹面光栅成像光谱仪,表1为系统的结构参数,其系统的设计指标如下:

- 光谱范围:350 ~ 1 100 nm;
- 物方数值孔径:0.3;
- 光谱分辨率:3 nm;
- 光谱弯曲: < 0.2% (像元大小为 25 μm);
- 系统畸变: < 0.005%;
- 光学系统体积:165 mm × 80 mm × 80 mm。

表1 Dyson 凹面光栅光谱成像系统结构参数

Tab. 1 Construct parameters of Dyson spectral imaging system with concave grating

序号	半径/mm	材料	口径/mm	偏心量 Y/mm
1	-	K9	25 × 25	0
2	-53.693			
3	-165	凹面光栅	40 × 40	0
4	-	平面反射镜	44 × 44	0
像面			22 × 5	0

系统像差曲线如图3所示。

从图3可以看出,系统的主要像差的像散校正得比较理想,系统的球差及畸变控制得都很好,达到了较为理想的结果。

系统光学传递函数曲线如图4所示。这里选用 CCD 像元的大小为 25 μm,根据公式(1)得到光学系统的特征频率为 20 lp/mm。

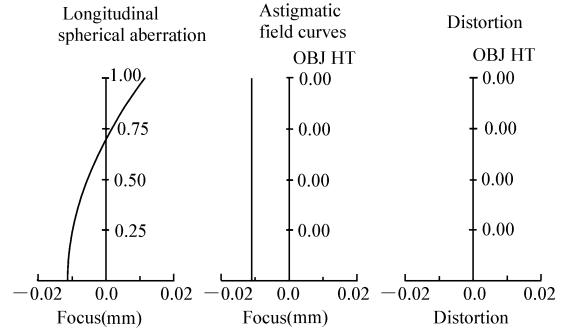


图3 系统像差曲线

Fig. 3 Aberration curves of Dyson system

$$A = \frac{1}{2a}, \quad (1)$$

式中, A 为光学系统特征频率; a 为探测器像元大小。

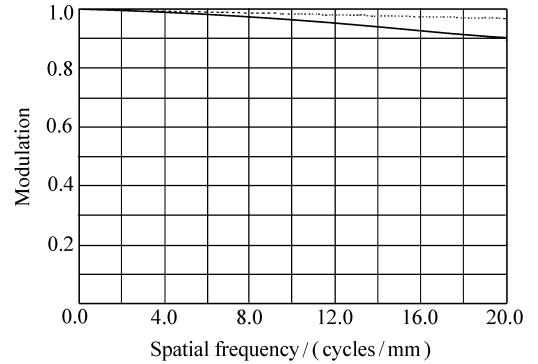


图4 系统传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of Dyson system

上述结果表明,Dyson凹面光栅成像光谱系统具有体积小、重量轻、成像质量好的优点。由于色散元件选用的是光栅,因此会引入光谱级次重叠的影响,为了克服该种影响,在像面接收处增加了带通滤光片,以消除谱次重叠的影响。

4 Offner 凸面光栅成像光谱系统

Offner凸面光栅成像光谱系统是从同心Offner三反射镜光学系统演变而来的。将第二反射镜换成凸面光栅,系统仅由3块反射镜组成,结构简单、体积小,且其谱线弯曲和色畸变可以忽略。

Offner 凸面光栅成像光谱系统的结构如图 5 所示。两块球面反射镜分别为主镜和三镜,凸面光栅作为第二反射镜。当把第二反射面换为光栅后,破坏了原有系统的对称性,必须分离主镜和三镜,使它们不再具有同心性,同时通过旋转调整主镜和三镜,使它们具有一定的倾角,从而仍能获得较为理想的成像质量。

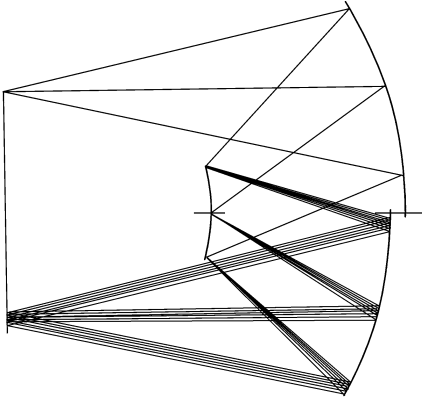


图 5 Offner 凸面光栅光谱成像系统

Fig. 5 Offner spectrum imaging system with convex grating

本文以 Offner 系统为设计基础,设计了一款轻小型成像光谱仪,该光谱仪中的色散元件为凸面光栅。表 2 为成像光谱系统的结构参数,其设计指标如下:

- 光谱范围:350 ~ 1 100 nm;
- 物方数值孔径:0.22;
- 光谱分辨率:3 nm;
- 光谱弯曲: < 0.2% (像元大小为 25 μm);
- 系统畸变: < 0.005%;
- 光学系统体积:219 mm \times 223 mm \times 110 mm。

表 2 Offner 凸面光栅光谱成像系统结构参数

Tab. 2 Construct parameters of Offner spectral imaging system with convex grating

序号	半径/mm	材料	口径/mm	偏心率 Y/mm
1	-142.66	反射镜	50 \times 50	43.2
2	-73.33	凸面光栅	30 \times 30	0
3	-137.26	反射镜	48 \times 48	-40.7
像面			21 \times 5	-41.2

系统的像差曲线如图 6 所示。

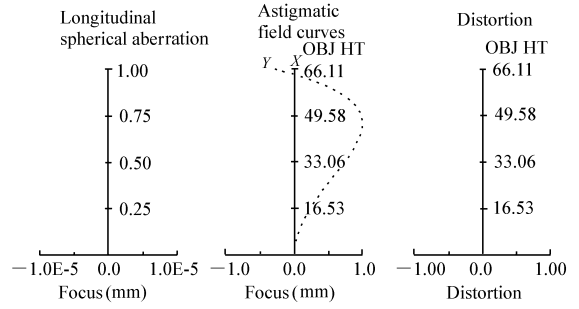


图 6 系统像差曲线

Fig. 6 Aberration curves of Offner system

从图中可以看出系统的主要像差象散校正的比较理想,系统的球差及畸变控制得都很好,达到较为理想的结果。

系统光学传递函数曲线如图 7 所示。这里同样选用 CCD 像元大小为 25 μm 的接收器,根据公式(1)得到光学系统的特征频率为 20 lp/mm。

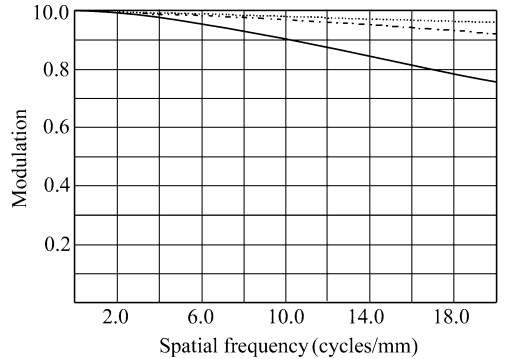


图 7 系统传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves of Offner system

上述结果可以看出,Offner 凸面光栅成像光谱系统具有体积小、成像质量好的优点。同样由于选用了光栅作色散元件,而会引入光谱级次重叠,为了克服该种影响,在像面接收处也增加了带通滤光片来消除谱次重叠的影响。

5 前置光学系统

成像光谱仪的前置光学系统具有多种结构形式,但为了能与后端成像光谱仪的光瞳相匹配,前置光学系统应为像方远心型结构形式。根据使用

要求不同选择相应的结构形式。空间或临近空间应用最好选用全反射式(TMA系统)或折反射式(卡式系统)的光学系统,以便应用于空间超光谱成像相机或航空推扫超光谱相机;地面应用则可

选择透射式光学系统,便于应用在农作物的植被分布详查相机或军事防伪装光谱成像相机等。图8列出了几种不同的前置光学系统,均可以应用在成像光谱仪中。

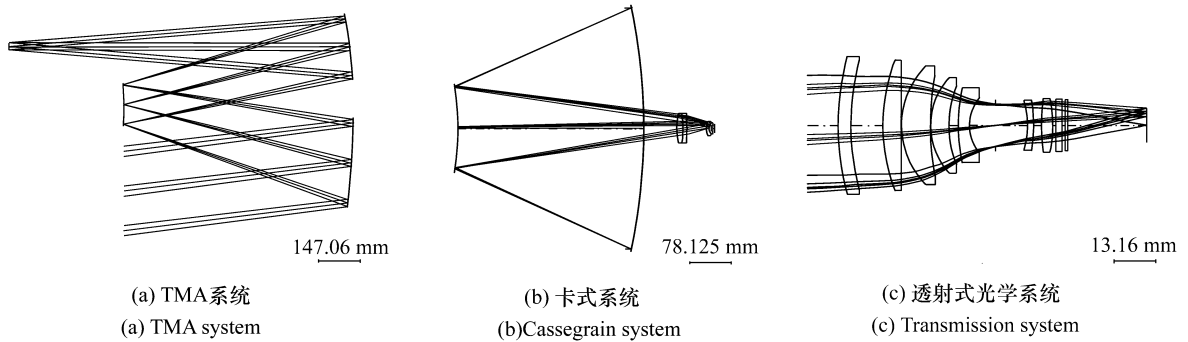


图8 几种不同的前置光学系统

Fig. 8 Optical systems

6 杂散光控制

在成像光谱仪中杂散光的控制是必须要考虑的,尤其是在短波段,因为在这个波段有效信号自身就比较弱。杂散光可以通过增加遮光罩或者在镜片镀膜时加以控制,但由于采用光栅作为分光元件,不可避免地会带来二级光谱对成像质量的影响。而且,由于设计的成像光谱仪的使用波段为350~1100 nm,二级光谱甚至三级光谱都会带来影响。目前较为理想的方法是在接收器的接收窗口处增加渐变滤光片。由于镀膜工艺的限制,制作渐变滤光片较为困难,因此常采用多种滤光片重叠使用来消除短波高级次光谱的影响。本文中所设计的成像光谱仪,在接收器窗口前使用了3种滤光片重叠的形式,这3种滤光片分别是350 nm前截止、650 nm前截止和850 nm前截止,这样的设置可消除短波段高级次光谱对成像质量

的影响。

7 结论

目前,成像光谱仪中大多选用光栅作为色散元件,为了保证系统的成像质量通常采用凸面光栅或凹面光栅的同心光学系统结构。同心光学系统的成像光谱系统主要有两种,一种是Offner凸面光栅成像光谱系统,另一种是Dyson凹面光栅成像光谱系统,两种系统形式在光谱像质方面所能达到的效果比较接近,但各有其应用的优势。通过实际设计可以看出,Offner凸面光栅成像光谱仪由于采用了全反射的形式,其使用光谱范围可以很宽,加工、装调较为简单,受外界环境影响较小;Dyson凹面光栅成像光谱仪则在体积和尺寸上的优势较为明显,可以实现结构的轻小型化。这两种形式的成像光谱仪可广泛地应用在空间、临近空间及地面的多光谱、超光谱成像中。

参考文献:

- [1] GOETZ A F H, VANG G, SOLOMON J E, *et al.*. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. *Science*, 1985, 228: 1147-1153.
- [2] BABEY S K, ANGER C D. Compact airborne spectrographic imager(CASI): a progress review[J]. *SPIE*, 1993, 1937: 152-163.
- [3] BRAAM B M, OKKONEN J T, AIKIO M, *et al.*. Design and first test results of the Finnish airborne imaging spectrometer

for different applications(AISA)[J]. *SPIE*,1993,1937:142-151.

- [4] RICKARD L J,BASEDOW R W,ZAI EWSKI E F,*et al.*. HYDICE:an airborne system for hyperspectral imaging[J]. *SPIE*,1993,1937:173-179.
- [5] DAVIS C O,BOW I ES J,IEATHERS R A,*et al.*. Ocean PHILIS hyperspectral imager:design,characterization,and calibration[J]. *Opt. Express*,2002,10(4):210-221.
- [6] CHARLS G W. Monocentric telescopes for microlithography[J]. *Opt. Eng.*,1987,26(4):300-303.
- [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):650-657.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(6):650-657. (in Chinese)
- [8] 黄元申,倪争技,庄松林. 光栅成像光谱仪同心光学系统研究[J]. *光学仪器*,2005,27(6):38-42.
HUANG Y SH,NI ZH J,ZHUANG S L. Research of the concentric optical system of grating spectrometers[J]. *Opt. Instrum.*,2005,27(6):38-42. (in Chinese)
- [9] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. *光学精密工程*,2006,14(6):974-979.
LI Y P,YU B X,HAN CH Y,*et al.*. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(6):974-979. (in Chinese)

作者简介:撇芃芃(1977 -),女,山西永济人,助理研究员,主要从事光电仪器总体设计和精密仪器设计等方面的研究。

E-mail:cuihanpengpeng@sina.com.cn