

文章编号 1004-924X(2012)12-2645-09

CO₂ 探测仪光学系统设计

郑玉权*, 高志良

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:设计并架构了 CO₂ 探测仪的光学系统。通过对比国外典型大气温室气体探测仪采用的光学系统,总结了光栅与傅里叶变换两种分光方法的优缺点,确定设计的 CO₂ 探测仪采用大面积光栅色散光谱仪系统,该光学系统包括前置光学系统和三通道光栅光谱仪系统两部分。前置光学系统由无焦双离轴抛物面系统、2 个分束器和 3 个聚焦透镜组组成,采用了多种消杂光措施,有效抑制了杂散光。光栅光谱仪的 3 个通道采用相同的结构,工作在相同的偏离角下;根据光栅方程推导了固定偏离角下光栅参数的计算方程,确定了 3 个通道的光栅参数;透镜采用低膨胀熔石英材料;大面积光栅工作在大入射角、大衍射角状态,工作波段内的光栅衍射效率可达 90% 以上。对光学系统的分析测试显示:通过在光谱仪系统放置 0 级光陷阱等消杂光措施,可将杂散光控制在 10⁻⁵ 以下,空间方向的 MTF 大于 0.9,光谱分辨率达到 0.035 nm(@760 nm),实现了 20 点同步观测。由于相对孔径较大(F1.8),提高了集光能力。结果表明,设计的光学系统满足温室气体探测的技术指标要求。

关键词:温室气体探测;CO₂ 探测仪;大面积光栅;光谱仪;光学设计

中图分类号:TH703;X851 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2645

Optical system design of CO₂ sounder

ZHENG Yu-quan*, GAO Zhi-liang

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

* Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn

Abstract: An optical system for CO₂ sounder is designed and implemented. The advantages and disadvantages of two dispersive methods, grating and Fourier transfer, are summarized by the contrast of optical systems from different greenhouse gas spectrometers, and the optical system with a large area diffractive grating as a dispersive element is selected for the CO₂ sounder. The total optical system includes a fore-optics and a tri-channel grating spectrometer. The fore-optics consist of a non-focal system with double off-axial parabolic mirrors, two dichotic splitters and three focal lenses, in which several measures are taken to reduce stray light. Each channel in the tri-channel grating spectrometer has the same mechanics, and three gratings have the same deviation angle to ensure the high mechanic stability. On the basis of grating equation, a computational formula is derived to calculate the grating parameters at the fixed deviation angle and to determine the parameters of three large area gratings. The lens material is fused silica with a low coefficient of expansion. The diffractive efficiency of the large

收稿日期:2012-07-11;修订日期:2012-09-04.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A102)

area grating can be over 90% when it works at a large entrance angle and a large diffractive angle without other order diffractive lights except 0 order and +1 order diffractive lights at selected wavebands. Analysis and experiments on the system show that the system can detect 20 footprints at same time. By setting a 0 order light trap and other stray light removal methods, the stray light in the system has decreased to 10^{-5} , its spatial MTF is more than 0.9(@1.4 lp/mm), and the spectral resolution of the spectrometer exceeds 0.035 nm(@760 nm). Moreover, the large relative aperture(F1.8) increases the ability to collect light. The design results indicate that the optical system can satisfy the technical requirements of CO₂ sounders.

Key words: greenhouse gas sounding; CO₂ sounder; large area grating; spectrometer; optical design

1 引言

大气温室气体排放的不断增加使全球变暖问题受到世界各国的普遍关注。工农业生产排出的大量废气、微尘等污染物质进入大气后,最具明显温室效应的气体有二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)和氟氯烃化合物(CFCS)等,其中 CO₂ 和 CH₄ 对升温的贡献最大,占 81%^[1]。鉴于 CO₂ 气体对气候的重大影响,世界各国针对 CO₂ 气体提出了多种遥感观测方法,并发射了多颗光学遥感监测仪器。依据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》,围绕国家重大工程、重大行业应用和经济发展的迫切需求,结合《中国应对气候变化国家方案》的实施,国家 863 计划在地球观测与导航技术领域设置了“全球二氧化碳监测科学实验卫星与应用示范”重大项目,意在为开展全球气候变化研究提供依据。

该项目以 CO₂ 遥感监测为切入点,研制并发射以高光谱 CO₂ 探测仪、多通道云与气溶胶探测仪为主要载荷的高空间分辨率和高光谱分辨率全球 CO₂ 监测科学实验卫星,建立高光谱卫星地面数据处理与验证系统,完成对中国及其它重点地区 CO₂ 浓度的监测,其监测精度优于 4×10^{-6} 。本文对国内外 CO₂ 探测仪采用的光学系统进行了综合对比分析,确定了基于大面积光栅色散温室气体探测光谱仪的光学系统方案,并围绕设计结果探讨了系统的优缺点。

2 温室气体探测仪的典型光学系统

大气 CO₂ 的遥感探测基于大气分子吸收池原理,通过测量 CO₂ 和 O₂ 的吸收光谱来精确测定大气 CO₂ 含量。

King 和 Kaplan 分别于 1956 年和 1959 年提出卫星红外大气探测原理^[2-3],据此美国于 20 世纪 70 年代设计了高分辨率红外探测器(High-resolution Infrared Radiation Sounder, HIRS),成为卫星遥感大气探测的标志。随着传感器技术的发展,光谱分辨率越来越高,传感器的探测能力突飞猛进。大气痕量分子光谱仪(ATMOS)^[4-5]是第一个采用临边探测方式的高分辨率 FTIR 星载传感器,它使人类进入从太空观测大气的新时代。进入 21 世纪以来,随着全球变暖趋势的不断加剧,国际社会对温室气体排放的关注也越来越高,美国和欧洲等航天发达国家均开展了用于温室气体监测的星载红外高光谱技术的研究,已有多颗高光谱探测卫星进入运行轨道,并开始发挥重要作用。典型痕量气体探测光谱仪有 SCIAMACHY^[6-7]、AIRS^[8-9]、IASI^[10]、TANSO-FTS^[11-12]、OCO(Orbiting Carbon Observatory)^[13-15],这些仪器为了获得使用波段的精细光谱信息,都采用多通道光谱仪的方案。其中,SCIAMACHY、AIRS 和 OCO 采用了多通道光栅光谱仪结构,而 IASI 和 TANSO-FTS 则采用了傅里叶变换分光方法,图 1 给出了几台典型仪器的光学系统。

在这几台能够实现温室气体遥感探测的载荷中,GOSAT-FTS 和 OCO 是专用于 CO₂ 气体探测的仪器,其测量精度也比较高,表 1 给出了两台仪器的性能对比结果。对比表明,光栅光谱仪在短波长波段的综合优势更明显。

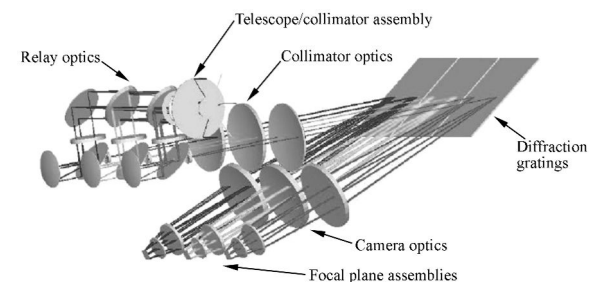
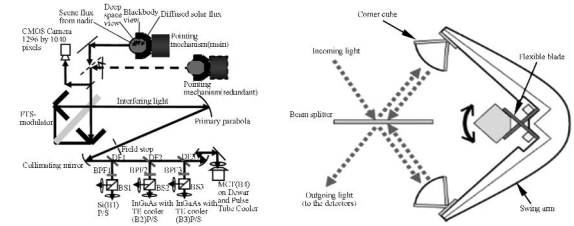
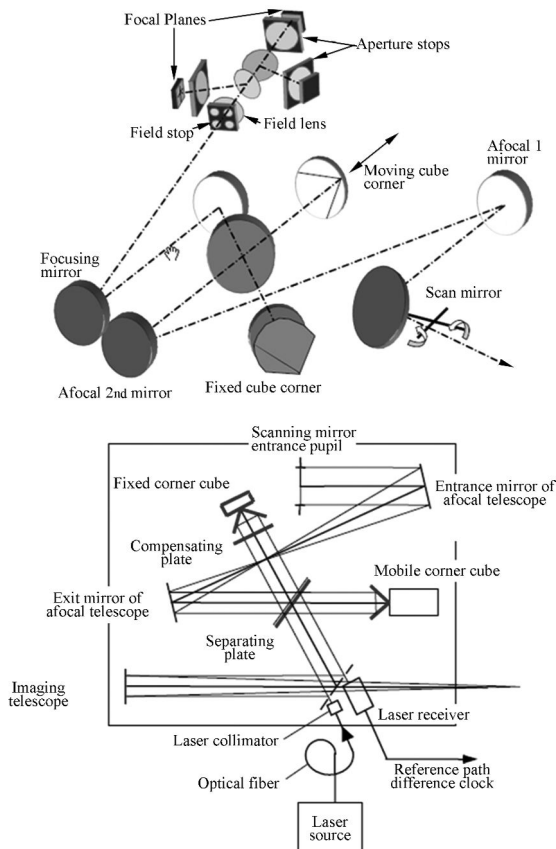
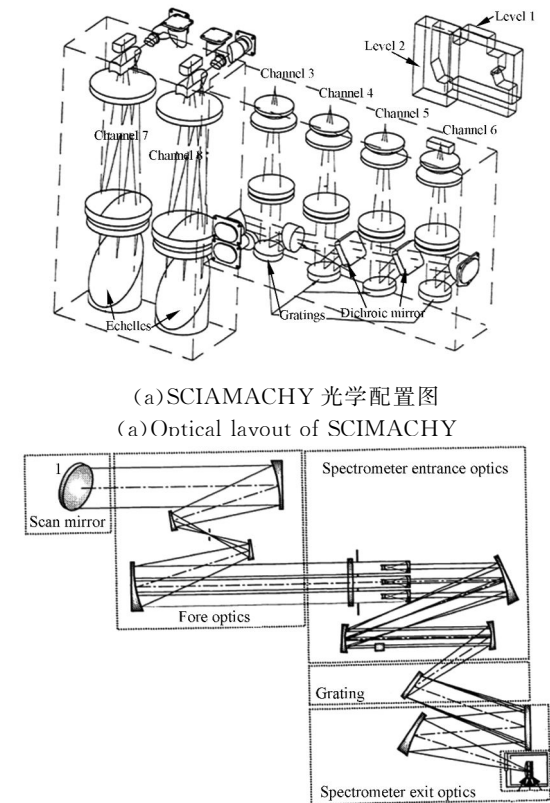


图 1 典型温室气体探测仪器采用的光学系统
Fig. 1 Several representative optical systems for greenhouse gas sounder

表 1 GOSAT-FTS 和 OCO 的性能指标对比

Tab. 1 Contrast of characteristics between GOSAT-FTS and OCO

	GOSAT-FTS	OCO
探测对象	CO ₂ , CH ₄ , O ₂ O ₃ , H ₂ O	CO ₂ , O ₂
光谱仪	4 通道傅里叶变换光谱仪	3 通道光栅光谱仪
波段/ μm	0.758~0.775 1.56~1.72 1.92~2.08 5.56~14.3	0.758~0.772 1.591~1.621 2.042~2.081
光谱分辨率	0.6 cm ⁻¹ 0.27 cm ⁻¹ 0.27 cm ⁻¹ 0.27 cm ⁻¹	0.04 nm 或 0.7 cm ⁻¹ 0.08 nm 或 0.3 cm ⁻¹ 0.1 nm 或 0.25 cm ⁻¹
信噪比(天底, 5%反照率)	~120	>300, >240
每天采样点数	18 700	500 000
空间分辨率/km	10.5	1.29×2.25
X _{CO₂} 精度	(3~4)×10 ⁻⁶	(1~2)×10 ⁻⁶

3 光学系统方案选定

借鉴国际温室气体遥感探测的成功经验,中国卫星载荷——高光谱与高空间分辨率 CO₂ 探测器采用三通道大面积光栅光谱仪方案,与傅里叶变换光谱仪系统相比具有诸多优势,表 2 给出了傅里叶变换光谱仪与光栅光谱仪在温室气体探测方面的性能对比。

表 2 两种分光方法的对比

Tab. 2 Contrast of two dispersive methods

傅里叶变换光谱仪	光栅光谱仪
均可实现高光谱分辨率	
宽光谱范围	多个光谱仪实现宽光谱范围
时间调制,周期内上千次扫描采样,信噪比低,~120	一次获得光谱,积分时间长,信噪比高,>300
低空间分辨率,10 km 级;晴空数据比例低,<10%	高空间分辨率,1 km 级;晴空数据比例高,>20%
单元探测器,单点观测,覆盖范围小	阵列探测器,多点并行观测,覆盖范围宽
振镜扫描,卫星工作环境要求高,振动灵敏度高	无精细扫描结构,工作环境要求低,振动不敏感
干涉图变化获得间接光谱,数据处理繁琐	直接获得光谱,信号保真度高
波长非等间隔采样	等波长间隔采样
定标难度大	定标容易

综合对比来看,CO₂ 探测器工作在近红外与短波红外区时能量较足,因此选择大面积光栅分光方法比较适宜。

3.1 光学系统设计参数确定

CO₂ 探测器总体技术指标要求如下:

- (1)轨道高度:700 km;
- (2)地面分辨率:1 km(穿轨)×2 km(沿轨);
- (3)光谱范围:0.758~0.778 μm,1.594~1.624 μm,2.04~2.08 μm;
- (4)光谱分辨率:≤0.044 nm,≤0.08 nm,≤0.1 nm;
- (5)信噪比:优于 300(典型工作条件下)。

根据以上总体技术参数要求,以及合并之后的探测器像元尺寸 360 μm×22.5 μm(760 nm 波

段)和 360 μm×30 μm(1 610 nm 和 2 060 nm 波段),确定前置光学系统和光谱仪光学系统的参数如下:

(1)望远成像系统为:

焦距 $f=252$ mm;

焦比 $F^{\#}\leq 2$;

瞬时视场 IFOV=0.081 8°×0.004 56°;

狭缝尺寸为 7.5 mm×(20 μm~25 μm);

视场角 FOV=1.64°;

光谱为 0.758~0.778 μm,1.594~1.624 μm,2.04~2.08 μm;MTF(@1.4lp/mm)>0.9。

(2)光谱仪系统参数为:焦距 $f=240$ mm;焦比 $F^{\#}\leq 2$;光谱为 0.758~0.778 μm,1.594~1.624 μm,2.04~2.08 μm;光谱分辨率:≤0.044 nm,≤0.08 nm,≤0.1 nm;谱面尺寸为:27 mm(760 nm 波段),15 mm(1 610 nm 和 2 060 nm 波段);采样通道数为:1 200(760 nm 波段),500(1 610 nm 和 2 060 nm 波段);光谱仪放大率为 1.0;杂光系数优于 10⁻⁵。

3.2 光栅参数确定

CO₂ 探测器采用的三通道光栅光谱仪方案,其入射光以较大的入射角入射到光栅表面,给定波段的一级衍射光处于入射光的同侧,且衍射角大于入射角(如图 2 所示),与传统正入射光栅相比,光栅大衍射角工作方式具有以下特点:

(1)在工作波段只有 0 级光和+1 级光,无其他级次的光衍射;

(2)通过光栅设计实现 0 级光到+1 级光的转移,衍射效率可达 90%以上;

(3)双交叉臂结构可有效抑制杂散光的影响;

(4)0 级光与衍射光处于两个不同的方向,可有效降低 0 级光的影响。

与正入射条件相比,大入射角条件下工作需要更大的光栅面积。CO₂ 探测器所需的平面衍射光栅的大小为 140 mm×190 mm,为了保证仪器结构的稳定性,要求各通道光谱仪入射光轴与衍射光轴的夹角完全相同;但衍射光栅的入射光夹角可以不同,要根据探测器的色散宽度,精确选定光栅入射角和衍射角的差、成像镜焦距和光栅常数。

根据光栅方程:

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta) = \lambda, \quad (1)$$

其中:θ₀,θ 分别为入射角和衍射角,λ 为衍射波

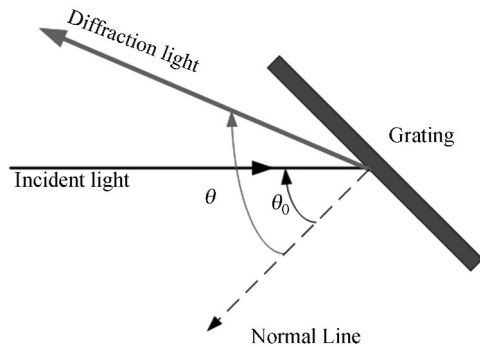


图 2 大衍射角光栅工作原理图
Fig. 2 Principle diagram of grating with large diffractive angle

长。对于一定光谱 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 可由光栅方程计算该波长范围的色散角:

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta_1) = \lambda_1, \quad (2)$$

$$d(\sin \theta_0 + \sin \theta_2) = \lambda_2. \quad (3)$$

对于 CO₂ 探测仪, 探测器的尺寸是固定的, 其色散角可以由探测器尺寸和成像系统焦距求出, 即:

$$\Delta\theta = \arctan(L/2f), \quad (4)$$

式中: L 为色散长度, 即探测器使用的色散范围; f 为成像系统焦距。 θ_1 和 θ_2 可以表示为:

$$\theta_1 = \theta - \Delta\theta, \quad (5)$$

$$\theta_2 = \theta + \Delta\theta. \quad (6)$$

将两个角度分别带入色散方程, 并相减可得:

$$2\sin \Delta\theta \cos \theta = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d}. \quad (7)$$

由于 CO₂ 探测仪包含 3 个通道的光谱仪系统, 考虑到机械结构的稳定性, 3 个通道的入射角和衍射角之差应保持固定, 即:

$$\theta = \theta_0 + \alpha, \quad (8)$$

式中: α 为中心衍射光线与入射光线之间的偏离角。则有:

$$d[\sin \theta_0 + \sin(\theta_0 + \alpha - \Delta\theta)] = \lambda_1, \quad (9)$$

$$2\sin \Delta\theta \cos(\theta_0 + \alpha) = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{d}. \quad (10)$$

二式联立可得:

$$\frac{\sin \theta_0 + \sin(\theta_0 + \alpha - \Delta\theta)}{2\sin \Delta\theta \cos(\theta_0 + \alpha)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (11)$$

在给定波长 λ_1 、 λ_2 、色散角 $\Delta\theta$ 和偏离角 α 的

条件下, 对上式进行联立求解可以得到入射角 θ_0 和光栅常数 d 。对 CO₂ 探测仪 3 个波段取 $\alpha = 23^\circ$, 成像镜焦距 $f = 240$ mm, 根据选定的探测器尺寸, 3 个波段的光栅入射角和光栅常数如表 3 所示。

表 3 3 块光栅的主要参数

Tab. 3 Main parameters of three gratings

波段/nm	入射角 /($^\circ$)	光栅常数 /($g \cdot mm^{-1}$)	色散面 /mm
758~778	46.87	2 167	27
1 594~1 624	41.7	973	15
2 041~2 081	40.51	745	15

4 光学系统设计结果

CO₂ 探测仪的光学系统比较复杂, 其关键部分是三通道光栅光谱仪, 既要具有极高的光谱分辨率, 又要实现极低的杂散光。CO₂ 探测仪光学系统由指向反射镜、双离轴抛物面无焦系统、分束器系统、聚焦系统、狭缝、光谱仪准直系统、大面积平面衍射光栅、光谱仪成像系统组成, 如图 3 所示。3 个通道共用一套前置系统, 为了避免色差和消除杂光, 前置光学系统一般采用带有中间像面的无焦全反射式系统, 在中间像面处放置一个狭缝视场光阑, 一方面用于 3 个光谱通道的配准, 另一方面可以有效抑制杂散光。光束经过无焦系统后, 光束口径降低为原来的 2/3, 有效减小了后部分光学器件的尺寸。光束经过分光器分光, 再穿过窄带滤光片获得所用波长范围的窄带平行

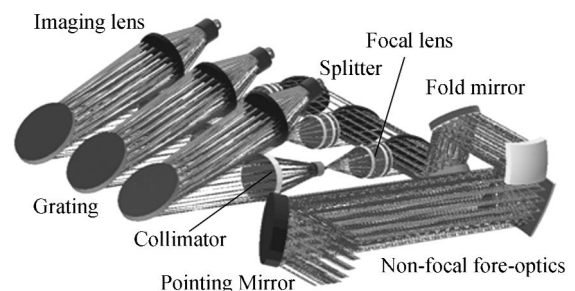


图 3 CO₂ 探测仪光学系统总体结构图

Fig. 3 Optical layout of CO₂ sounder

光,然后由两片石英玻璃成像镜聚焦在光谱仪的狭缝上。狭缝前放置偏振片,滤除沿狭缝方向振动的偏振光,降低光谱仪 0 级杂散光的影响。通过狭缝的光经过两片石英透镜准直照射在衍射光栅上,衍射光栅的一级反射衍射光再经过两片石英透镜成像在探测器上,从而获得大气的精细吸收光谱信息。图 4 为前置光学系统的结构图,3 个通道的 MTF(@1.4 lp/mm 奈奎斯特频率)设计值均达到 0.95 以上(见图 5),高于 0.5 的要求,能够充分满足 CO₂ 探测仪空间分辨率的要求。

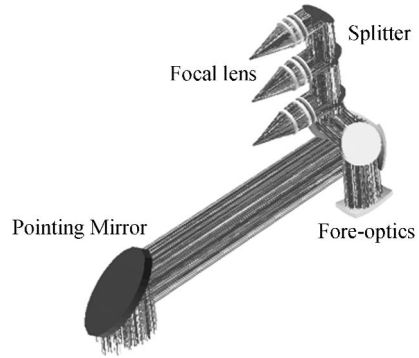


图 4 前置光学系统结构图

Fig. 4 Layout of fore-optics

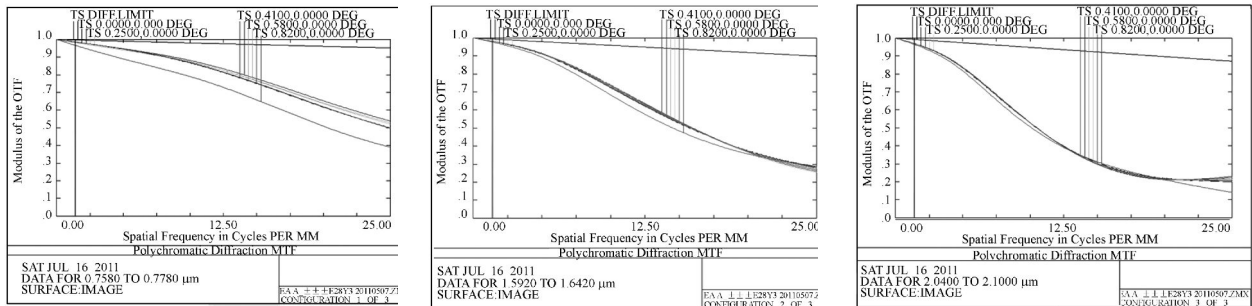


图 5 前置光学系统 MTF 设计结果

Fig. 5 MTFs of three focal lens of fore-optics

CO₂ 探测仪的光谱仪系统采用大闪耀角平面衍射光栅作为色散元件。图 6 为 0.76 μm 通道望远系统和光谱仪系统组合的结构图,一个通道中使用了 5 个非球面透镜,每个透镜的一个表面为非球面,另一个表面为球面。对于光谱仪的

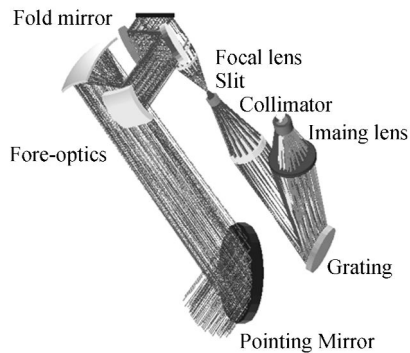


图 6 CO₂ 探测仪 760 nm 通道光学系统结构图

Fig. 6 Optical layout of 760 nm channel of CO₂ sounder

设计只给出 0.76 μm 通道的结果,其结构如图 7 所示。光谱仪结构主要包括 4 块熔石英透镜和一块平面闪耀光栅,入射光轴与出射光轴的夹角为 23°,入射光轴与平面闪耀光栅的夹角为 46.87°,光栅刻线密度为 2 167 g/mm;0.76 μm 通道光谱仪的波长为 0.758~0.778 μm;色散谱面长度为 27 mm;空间方向的光谱分辨率为 7.2 mm,优于 0.044 nm。

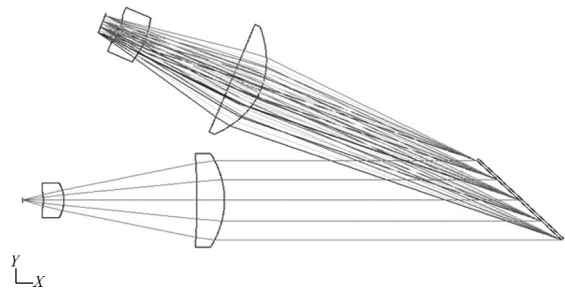


图 7 760 nm 波段光谱仪光学系统结构图

Fig. 7 Optical layout of 760 nm spectrometer

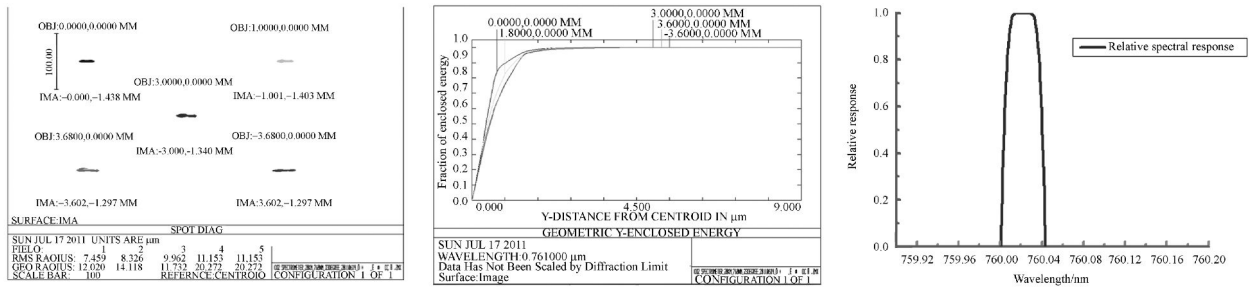


图 8 760 nm 波段光谱仪光学系统的点列图、圆内能量和光谱响应函数

Fig. 8 Spot diagram, enclosed energy and relative spectral response function of 760 nm spectrometer

图 8 为 0.76 μm 通道的点列图、圆内能量和相对光谱响应函数。从图中可以看到,系统的点列图为长条形,强调了光谱仪的光谱分辨率高,空间分辨率低的特点;系统的弥散斑在光谱维很小,50%能量弥散圆半径为 0.43 μm ,99%能量弥散圆半径为 4.6 μm ,该系统的优点是各光谱通道光谱纯净度高,谱段间串扰小。若采用 20 μm 宽的狭缝,45 μm 光谱像元采样,各通道的光谱响应函数不再是高斯函数线形,接近矩形函数,谱段间的串扰极低。

5 防杂光设计

由于 CO₂ 探测仪的光谱带宽非常窄,只有 0.044 nm,探测器曝光时间长,微弱的杂散光就可能导致有效光谱信号被淹没,因此仪器的防杂光设计至关重要。

5.1 遮光罩与遮光筒防一次杂光

双抛物面无焦系统前的遮光筒长度在 1 000 mm 左右,遮光筒前端安装指向镜,指向镜前安装遮光罩,二者可有效降低入射到系统内的一次杂光。

5.2 挡光环降低杂散光

在遮光罩内壁、遮光筒内壁、分束器内壁安装挡光环来抑制杂散光,从而提供正常路径的精细光谱信息。

5.3 双狭缝设计有效降低视场外光线的入射

视场光阑是降低系统杂光的有效手段,在双离轴抛物面系统的中间像面位置放置狭缝光阑,以减少进入后光学系统无用视场的光谱辐射。

5.4 光栅零级光陷阱降低杂散光

光栅的 0 级光遵从反射镜的镜反射规则,采

用大入射角衍射光栅,0 级光反射方向放置 0 级光陷阱,0 级反射光不能进入光谱仪的成像系统。

5.5 交叉筒式大衍射角光栅光谱仪

衍射光路与入射光路独立、无直接散射光进入成像系统光路。

通过以上设计,系统的杂散光控制在 1×10^{-5} 以内。

6 公差分析

CO₂ 探测仪对空间分辨能力要求较低,但对光谱分辨能力要求极高,因此前置系统可以看作能量收集系统。另外,探测仪对无焦系统、分束器系统和二次成像系统公差要求较低,放松的曲率半径与光学元件间距公差需通过后工作距补偿。

光谱仪是获得精细光谱信息的关键部件,它由 4 片非球面石英透镜和 1 片大面积光栅组成,透射式元件的面型精度要求不高,但反射式光栅的波前精度要求较高。采用光谱仪系统 Y 方向(光谱维方向)的点列图尺寸为基准,限制尺寸为 10 μm (RMS),以狭缝到准直镜 1 和像面至成像镜 2 的直接距离作为补偿环节,从而确定光学元件的公差要求如下:

6.1 透镜的公差要求

半径公差为 0.1%;非球面系数公差为 0.1%;厚度公差为 0.01 mm;面型精度为 $\lambda/2$ (PV, $\lambda=632.8$ nm,轮廓仪检测给出曲率半径和非球面系数)。

准直镜组间和成像镜组间的距离公差均为 0.01 mm;准直镜组和成像镜组的偏心公差均为 10''。

计算出狭缝至准直镜 1 和像面至成像镜 2 的

距离,误差控制在 0.005 mm 以内。

6.2 光栅的公差要求

面型精度为 $\lambda/50$ (RMS, $\lambda=632.8$ nm, 干涉仪检测); 倾斜和旋转均为 $10''$; 偏心为 0.5 mm。

CO₂ 探测仪机械结构受温度的影响,会产生变形从而导致光谱的精细程度变差。计算分析表明,准直镜组之间和成像镜组之间的间隔变化对系统的光谱性能影响较大,其变化应控制在 0.003 mm 以内,以保证光谱维方向的点列图光谱尺寸小于 10 μ m,因此在结构设计上需要考虑低膨胀系数材料,如钢、碳纤维等,并尽量使仪器的温度保持稳定。

7 结 论

与采用傅里叶变换光谱仪相比,CO₂ 探测仪采用三通道光栅光谱仪光学系统,具有集光能力

强,能够多点同时观测,无运动部件,空间应用可靠性高等优势。

CO₂ 探测仪的前置光学系统采用双离轴抛物面无焦系统,配合中间像面狭缝视场光阑、隔离折转反射镜、分束器、窄带滤光片和偏振片,有效降低了进入光谱仪系统的杂散光。

光谱仪光学系统采用三通道大面积光栅色散光谱仪,光栅工作在大入射角、大衍射角状态,在工作谱段只有 0 级光和 +1 级光,无其他级次光,能使光栅效率提高至 90% 以上,杂散光可控制在 10^{-5} 以下。

CO₂ 探测仪光学系统的设计结果表明,利用大面积光栅色散技术实现了大相对孔径 ($F=1.8$),光学系统的集光能力增强,光谱分辨率分别达到了 0.035 nm (@760 nm)、0.065 nm (@1 610 nm) 和 0.08 nm (@2 060 nm),可以 20 点并行同步观测,各项技术指标均满足要求。

参考文献:

- [1] 刘毅,吕达仁,陈洪斌,等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2):247-254.
- LIU Y, LÜ D R, CHEN H B, *et al.*. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2):247-254. (in Chinese)
- [2] KING J IF. *Scientific Use of Earth Satellites* [M]. Michigan: Ann Arbor Univ. of Michigan Press, 1956:133-136.
- [3] GKAPLAN L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurement [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49(10):1004-1007.
- [4] SMITH W L, WOOLF H M, HAYDEN C M, *et al.*. The TIROS-N operational vertical sounder [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1979, 60: 1177-1187.
- [5] HIROKAZU K, AKIRO S, CHISATO Y, *et al.*. Satellite-borne high-resolution FTIR for lower atmosphere sounding and its evaluation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3):1496-1507.
- [6] BOVENSMANN H. SCIAMACHY-Mission objectives and measurement modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, 56:127-150.
- [7] MAGER R, FRICKE W, BURROWS J P. SCIAMACHY, a new-generation of hyperspectral remote sensing instrument [J]. *SPIE*, 1997, 3106:84-94.
- [8] AUMANN H H, PAANO T S. The atmospheric infrared sounder (AIRS) on the earth observing system [J]. *SPIE*, 2001, 4151:115-125.
- [9] MORSE P, BATES J, MILLER C. Development and test of the atmospheric infrared sounder (AIRS) [J]. *SPIE*, 1999, 3759:236-253.
- [10] BLUMSTEIN D, CHALON G, CARLIER T, *et al.*. IASI instrument: technical overview and measured performances [J]. *SPIE*, 2004, 5543: 196-207.
- [11] AKIHIKO K, TOMOYUKI U, HIROSHI S, *et al.*. The instrument and the BBM test results of thermal and near infrared sensor for carbon observation (TANSO) on GOSAT [J]. *SPIE*, 2006, 6297: 6297K-1-6297K-8.
- [12] KUZE A, SUTO H, NAKAJIMA M, *et al.*. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35):6716-6733.
- [13] CRISP D. The orbiting carbon observatory: NASA's first dedicated carbon dioxide mission [J]. *SPIE*,

- 2008, 7106: 4-11.
- [14] HARING R, POLLOCK R, SUTIN B. Current development status of the orbiting carbon observatory instrument optical design[J]. SPIE, 2005, 5883:58830C-1-58830C-10.
- [15] POLLOCK R, HARING R E, HOLDEN J R. The orbiting carbon observatory instrument: performance of the OCO instrument and plans for the OCO-2 instrument [J]. SPIE, 2010, 7826: 78260W-1-78260W-13.

作者简介:



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射测量与定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao. ac. cn.



高志良(1962—),男,山东高密人,工学硕士,高级工程师,硕士研究生导师,主要从事星载相机、星载高光谱仪器及相关机械结构设计等研究工作。E-mail: gaozl@ciomp. ac. cn

●下期预告

级联紫外电光开关准分子激光 ASE 控制

胡云,赵学庆,薛全喜,王大辉,郑国鑫

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

高功率准分子激光系统中的自发辐射放大(ASE)会导致主脉冲信号对比度下降,引起波形展宽和畸变,影响精确物理实验的进行。为抑制 ASE,提高激光脉冲信号的信号对比度,开展了级联双电光开关的研究。在原来电光开关的研究基础上,分析了影响电光开关削波对比度的因素,进而提出采用级联工作的方式来大幅度地提高削波对比度。在单电光开关的基础上,设计了级联电光削波的光路布局。其中前一级电光开关的检偏器作为后一级的起偏器,而电路则采用分立式以避免相互之间的串扰。采用级联双电光开关对低占空比预放大器进行了 ASE 控制实验。实验中级联双电光开关的削波对比度达到了 10^4 量级,而预放大器的放大输出信号对比度提高到 10^6 量级,有利于激光脉冲信号在系统中后续放大级的进一步放大。