

基于单一光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪

刘佳梅 蔡长龙 樊家琦 姚昊杰 李世杰 张进 梁海锋

Optical structure symmetric imaging spectrometer based on single grating spectroscopy

LIU Jiamei, CAI Changlong, FAN Jiaqi, YAO Haojie, LI Shijie, ZHANG Jin, LIANG Haifeng

引用本文:

刘佳梅, 蔡长龙, 樊家琦, 等. 基于单一光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 71–79. DOI: 10.5768/JAO202546.0101006

LIU Jiamei, CAI Changlong, FAN Jiaqi, et al. Optical structure symmetric imaging spectrometer based on single grating spectroscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 71–79. DOI: 10.5768/JAO202546.0101006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光栅式成像光谱仪空间均匀性测试研究

Research on spatial uniformity test of grating imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(2): 354–360 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203003>

紫外-真空紫外成像光谱仪校准技术研究

Research for calibration technology of ultraviolet–vacuum ultraviolet imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(4): 778–785 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409902>

双罗兰圆结构光谱仪的光学系统设计

Optical system design of spectrometer with double Rowland circle structure

应用光学. 2022, 43(3): 415–423 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301006>

基于光-热-结构模拟的罗兰圆型光谱仪热工况优化设计

Optimization design of thermal condition of Rowland circle spectrometer based on optical, thermal and structural simulations

应用光学. 2023, 44(1): 37–45 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101006>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

高分辨率光谱仪线阵CCD采集系统设计

Design of linear CCD acquisition system based on high-resolution spectrometer

应用光学. 2022, 43(5): 864–869 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0071-09

引用格式: 刘佳梅, 蔡长龙, 樊家琦, 等. 基于单一光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 71-79.

LIU Jiamei, CAI Changlong, FAN Jiaqi, et al. Optical structure symmetric imaging spectrometer based on single grating spectroscopy[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 71-79.



在线阅读

基于单一光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪

刘佳梅¹, 蔡长龙^{1,2}, 樊家琦², 姚昊杰², 李世杰², 张进², 梁海锋²

(1. 西安工业大学 兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 针对成像光谱仪结构复杂、谱线弯曲难以校正的问题, 设计并研制了一款基于单一透射光栅分光的高分辨率成像光谱仪。建立了单一透射光栅分光模型, 计算确定了分光系统的设计参数, 其中, 分光系统中准直部分和聚焦成像部分采用完全相同的光学结构, 有利于像差校正, 也能降低系统成本。设计过程中, 以光谱分辨率为主要目标, 从聚焦系统到整体分光系统进行逐步优化, 最终设计了一套狭缝宽度为 11.42 μm , 工作波段为 450 nm~650 nm, 光谱分辨率为 2 nm, F 数为 2.5, 谱线弯曲最大值为 19 μm , 色畸变最大值为 0.35 μm 的分光系统。根据设计结果完成了该成像光谱仪的制造和装配, 并进一步对其进行推扫实验测试验证。实验结果表明: 该系统的光谱分辨率不低于 2 nm, 达到了设计要求, 证明该光谱仪成像效果良好。

关键词: 成像光谱仪; 透射光栅; 光学结构对称; 分光系统

中图分类号: O433

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0101006

Optical structure symmetric imaging spectrometer based on single grating spectroscopy

LIU Jiamei¹, CAI Changlong^{1,2}, FAN Jiaqi², YAO Haojie², LI Shijie², ZHANG Jin², LIANG Haifeng²

(1. School of Armament Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the complex structure of imaging spectrometer and the difficulty of correcting spectral line bending, a high-resolution imaging spectrometer based on a single transmission grating was designed and developed. Firstly, the optical splitting model of a single transmission grating was established, and the design parameters of the optical splitting system were calculated and determined. Among them, the collimation part and the focusing imaging part of the optical splitting system adopted the symmetry optical structure, which was conducive to the correction of aberrations and reduce the cost of the system. In the design process, the spectral resolution was taken as the main goal, and gradually optimized from the focusing system to the whole spectral splitting system. Finally, a set of optical splitting system with slit width of 11.42 μm , working band of 450 nm~650 nm, spectral resolution of 2 nm, F -number of 2.5, the maximum spectral line bending of 19 μm , and the maximum color distortion of 0.35 μm was designed. According to the design results, the fabrication and assembly of the imaging spectrometer were completed. The experimental results show that the spectral resolution of the system is not less than 2 nm, which meets the design requirements, and proves that the imaging effect of the spectrometer is good.

收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2024-03-11

基金项目: 陕西省科技厅项目 (2024GX-YBXM-085); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目 (23JY033); 西安市智能探视感知重点实验室课题 (201805061ZD12CG45); 西安市科技局项目 (23GXFW0034)

作者简介: 刘佳梅 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: 13892522445@163.com

通信作者: 蔡长龙 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事薄膜技术与光学系统研究。E-mail: changlongcai@126.com

Key words: imaging spectrometer; transmission grating; optical structure symmetry; optical splitting system

引言

随着现代光学的快速发展,成像光谱技术取得了显著的进步,各种仪器类型不断涌现,分光器件形式各异,在性能方面得到了极大的改善。其中,色散型成像光谱仪是目前所有成像光谱仪器中发展最为完善的,也因其高性能和高环境适应性,已广泛应用于卫星遥感、地质、海洋、农业、医药、生产制造、军事伪装目标侦察和智能识别等领域^[1-4]。目前,分辨率高、光机结构简单、体积小巧的光栅型成像光谱仪已成为成像光谱仪主要研究方向之一。

光栅型成像光谱仪是色散型成像光谱仪最为常见的类型,比较具有代表性的有:使用平面反射式光栅的 Czerny-Turner 成像光谱仪,使用凸面和凹面光栅的同心类成像光谱仪(主要为 Offner 和 Dyson 成像光谱仪)以及光栅棱镜组合的 PGP(prism-grating-prism)型成像光谱仪^[5-9]。2017 年罗刚银等^[10]采用 Offner 结构设计了消热差中波红外成像光谱仪,工作波段在 3 000 nm~5 000 nm,视场大,但全视场范围内弥散斑半径高达 30 μm,光谱分辨率仅大于 15 nm,且采用离轴结构设计,此类光机结构加工精度要求高,在实际装配时难度很大。2021 年武志昆^[11]等设计了基于 PGP 型结构的成像光谱仪,光谱分辨率达到 2.8 nm,谱线弯曲控制到 1.5 μm,色畸变为 3.52 μm。然而,这种类型的成像光谱仪必须使用研发难度较高的体全息透射光栅,与凸面光栅面临相同的制造难题,导致整个仪器的成本非常高^[12]。2022 年谭奋利等^[13]基于 Dyson 结构设计了新型快照式分光成像系统,数值孔径达到了 0.3,光谱分辨率优于 0.54 nm,但在设计中使用的凹面光栅需要定制,价格昂贵,提高了设计成本,限制了它在民用方面的发展。

针对上述问题,本文提出一种基于单一光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪,仅采用透射光栅进行分光,同时采用光学结构对称的准直系统和聚焦成像系统,该结构不仅降低了整个系统的结构复杂性,还有利于校正像差,降低成本。本文首先介绍单一光栅衍射分光原理,建立透射光栅分光模型,并分析计算准直系统和聚焦系统的设计参数,然后给出对应的光学设计结果及其像质评价,最后利用特征谱线对其进行光谱定标,并通过实验验证其光谱分辨率达到 2 nm,表明系统推

扫成像效果良好。

1 设计原理及参数计算

1.1 光栅衍射分光原理

光栅是成像光谱仪中最常用的分光器件,光谱色散特性呈线性分布,表现出高光谱分辨率、谱线弯曲微小、易于制作、性能稳定并且衍射效率高等特点^[14-15]。透射式衍射光栅在成像光谱仪中占据主导性作用,其色散公式为

$$d(\sin\varphi + \sin\theta) = m\lambda \quad (1)$$

式中: d 为相邻两缝的中心距离,即光栅常数; φ 为入射角(入射光与光栅平面法线之间的夹角); θ 为衍射角(即第 m 级衍射光与光栅平面法线之间的角度)。透射光栅衍射原理如图 1 所示。当满足布拉格衍射条件时,即 $\varphi = \theta = \theta_B$ 时,光栅的衍射效率最大^[16-19]。其中, θ_B 为布拉格角,在布拉格衍射角度下,衍射光栅衍射效率最大理论值可达 100%。当中心波长以布拉格角入射时,光栅方程为

$$2nd\sin\theta_B = m\lambda_C \quad (2)$$

式中: n 为记录介质的平均折射率; d 为光栅常数; λ_C 为中心波长; θ_B 为布拉格衍射条件下光栅的入射角度。

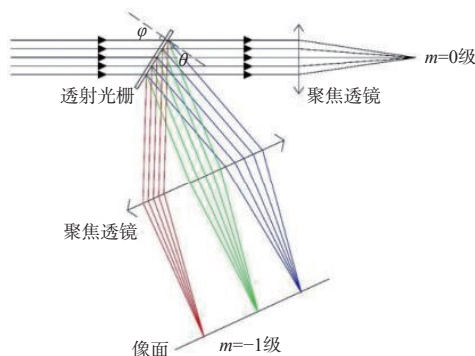


图1 透射光栅衍射原理

Fig. 1 Diffraction principle of transmission grating

1.2 单一透射光栅分光模型

单一透射光栅分光模型示意图如图 2 所示。复色光经过入射狭缝后为发散光束,使用准直系统将其变为平行光束。透射式衍射光栅是光谱仪的核心元件,根据波长改变光束的衍射方向。聚焦系统将光束聚焦成像到探测器上,不同波长的光束成像在探测器上不同的位置,将探测器上不

同位置的响应信号进行分析,可以得到不同波长的光谱信息。

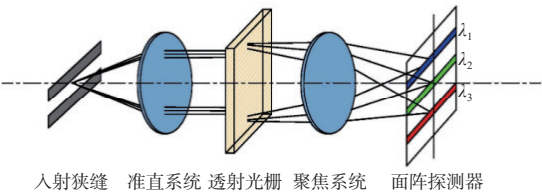


图2 单一透射光栅分光模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single transmission grating spectroscopic model

1.3 准直系统和聚焦系统参数计算

光栅的一个重要用途是分光,光栅的色散可以划分为角色散和线色散^[20],角色散是指两条相差单位波长的谱线从光栅中分离出来的角度。通过光栅方程即公式(1),可以确定它与光栅常数 d 和衍射级次 m 之间的关系,并对光栅方程进行微分处理(设入射角 φ 固定),得到:

$$d\theta/d\lambda = m/(d\cos\theta) \tag{3}$$

式(3)表明角色散与 d 成反比,与 m 成正比。光栅线色散是指在聚焦物镜焦面上,两条相差单位波长的谱线隔开的距离。设物镜的焦距为 f ,则线色散为

$$dl/d\lambda = f \times d\theta/d\lambda = f \times m/(d\cos\theta) \tag{4}$$

由上述公式可以推导出聚焦系统的焦距为

$$f = \Delta l \times d\cos\theta/m \times \Delta\lambda \tag{5}$$

由于本次设计的分光系统中准直系统为聚焦系统的对称结构,准直系统与聚焦系统的焦距是一致的,因此只需要计算出聚焦系统的焦距。选取波段范围为450 nm~650 nm,光谱分辨率为2 nm,中心波长 $\lambda_c=550$ nm, $\Delta\lambda=200$ nm=0.2 μm;探测器像素尺寸为5.86 μm, $\Delta l=1\,172$ μm;光栅线对数为100 lp/mm,光栅常数 $d=10$ μm,当中心波长以布拉格角入射时,取衍射级次 $m=1$,根据光栅方程即公式(2)可以得到 $\theta=2.262^\circ$,将上述参数代入公式(5)中即可计算出聚焦镜和准直镜的焦距 $f=58.588$ mm。

为使衍射效率达到最佳,需要通过光栅方程转换计算光栅最佳衍射角。根据 $\Delta s = \lambda$ 及 $\Delta s = d(\sin\varphi + \sin\theta)$ 可以推导出衍射角方程为

$$\theta = \sin^{-1}(\lambda/d - \sin\varphi) \tag{6}$$

式中: Δs 表示两条平行光线入射透射光栅后的光程差。在光栅光谱仪中使用透射式光栅时,一般使入射角等于中心波长衍射角,即 $\varphi = \theta$,使用公式(6)可得 $\theta = \sin^{-1}(\lambda/2d)$,将 $d=10$ μm和中心波长 $\lambda_c=$

550 nm 带入,即可求出最佳衍射角 $\theta=1.5758^\circ$ 。

2 成像光谱仪光学系统设计及仿真

2.1 成像光谱仪设计指标

为了验证单一光栅分光光学结构对称型成像光谱仪的可行性,本文根据某项目需求,开发了一款工作波段为450 nm~650 nm,光谱分辨率为2 nm的成像光谱仪,其主要技术指标如表1所示。

表1 成像光谱仪主要技术指标

Table 1 Main technical parameters of imaging spectrometer

参数名称	指标
工作波段/nm	450~650
光谱分辨率/nm	2
狭缝尺寸/mm	11.4×0.011 72
F 数	2.5
探测器参数/pixel	1 920×1 200
像素尺寸/μm	5.86
光栅参数(lp/mm)	100
MTF(@85 lp/mm)	>0.4
RMS半径/μm	<5.86

采用商用化平面透射光栅,材料为H-K9L,尺寸为35 mm×35 mm×6 mm,线对数为100 lp/mm,闪耀波长为500 nm,闪耀角为1.43°,在450 nm~650 nm波段衍射效率高于50%。基于该光栅参数,本文进行了LGL(透镜-光栅-透镜)型光谱仪设计。

2.2 准直系统和聚焦系统设计

在成像光谱仪分光系统中,准直系统与聚焦系统是核心部分。准直系统对狭缝的光线进行准直,将光线入射至分光元件,聚焦系统则汇聚色散光线,最终在探测器上完成成像。准直系统和聚焦系统设计成完全相同的结构,可以规模化节约成本。为使成像光谱仪分光系统与前置物镜达到光路匹配,要求聚焦系统采用像方远心光路,准直系统在此基础上翻转即为物方远心光路,这种光路结构可以保证空间维和光谱维方向的远心性,使得系统像面上的能量分布均匀,对提高成像光谱仪的能量利用率有很大帮助。

成像光谱仪的准直系统和聚焦系统均采用焦距为58.588 mm、 F 数为2.5的镜头,指标要求在450 nm~650 nm波段弥散斑均方根半径值小于5.86 μm,在探测器奈奎斯特频率85 lp/mm处调制传递函数(modulation transfer function, MTF)大于0.5。实际设计时,先设计聚焦系统,准直系统通过聚焦系统的反向翻转获得。根据设计指标要求,

寻找一种性能参数接近的像方远心镜头作为初始结构进行设计。首先进行系统缩放,使外部结构参数满足设计指标,然后进一步分析优化。聚焦系统的像差校正对像平面上成像质量有很大影响,因此通常需要校正所有像差。此外,远心镜头需要利用操作数严格控制主光线角度,为保证系统结构紧凑,还需控制系统总体长度。

优化完成后,聚焦系统 MTF 与点列图如图 3 所示。由图 3 可知,聚焦系统在 85 lp/mm 处 MTF 大于 0.7,弥散斑均方根值最大为 1.59 μm ,像质良好。

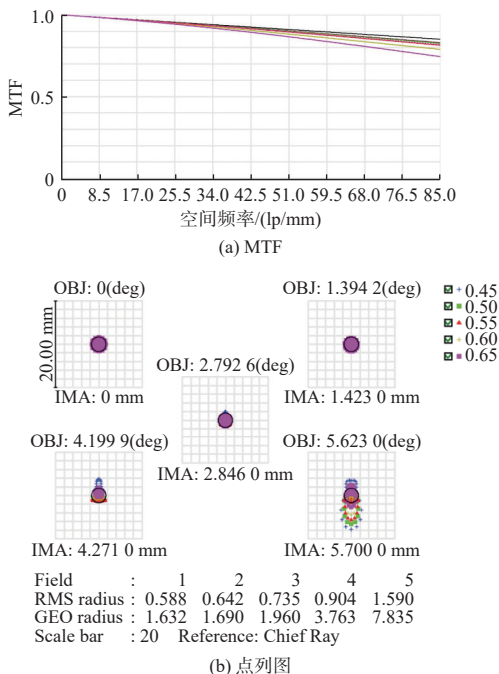


图 3 聚焦系统的 MTF 曲线图与点列图

Fig. 3 MTF curves and spot diagram of focusing system

根据设计的聚焦系统,在 Zemax 中使用翻转元件并更改相关系统参数设置,得到的光学系统即为准直系统,准直系统和聚焦系统结构图如图 4 所示。准直系统和聚焦系统采用完全对称结构,有利于整体光谱仪分光系统搭建时像差校正,减少色散影响,使得设计的光机结构简单,便于装调。

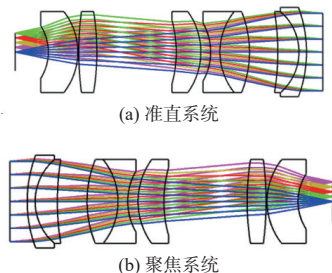


图 4 光学结构图

Fig. 4 Optical structure diagram

2.3 分光系统整体设计

各部分设计完成后,把准直系统、聚焦系统和光栅色散元件的数据输入 Zemax 中进行光路拼接,拼接时注意使光栅色散元件恰好位于准直系统和聚焦系统的光阑位置,准直系统和聚焦系统采用对称光路结构可以减小垂轴像差的影响,最终优化的基于单一透射光栅的光学结构对称型成像光谱仪分光系统如图 5 所示。其工作波段为 450 nm~650 nm,视场(即狭缝长度)为 11.4 mm,聚焦系统和准直系统均符合远心光路,采用焦距为 58.5 mm, F 数为 2.5 的光学对称结构。

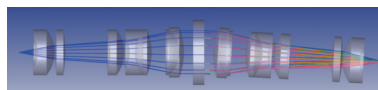
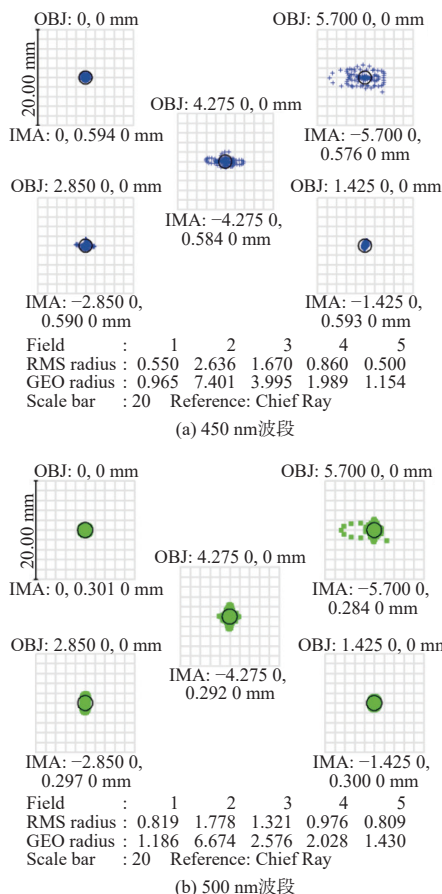


图 5 光栅型成像光谱仪分光系统

Fig. 5 Optical splitting system of grating imaging spectrometer

经过光学系统光线追迹得到该成像光谱仪不同波长的点列图和 MTF 曲线,如图 6 和图 7 所示。图 6 中给出在 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm 处对应的点列图,可以看出弥散斑均方根半径最大值为 2.095 μm ,均小于 1 个像元尺寸。从图 7 可看出,该系统在 85 lp/mm 处 MTF 优于 0.3。



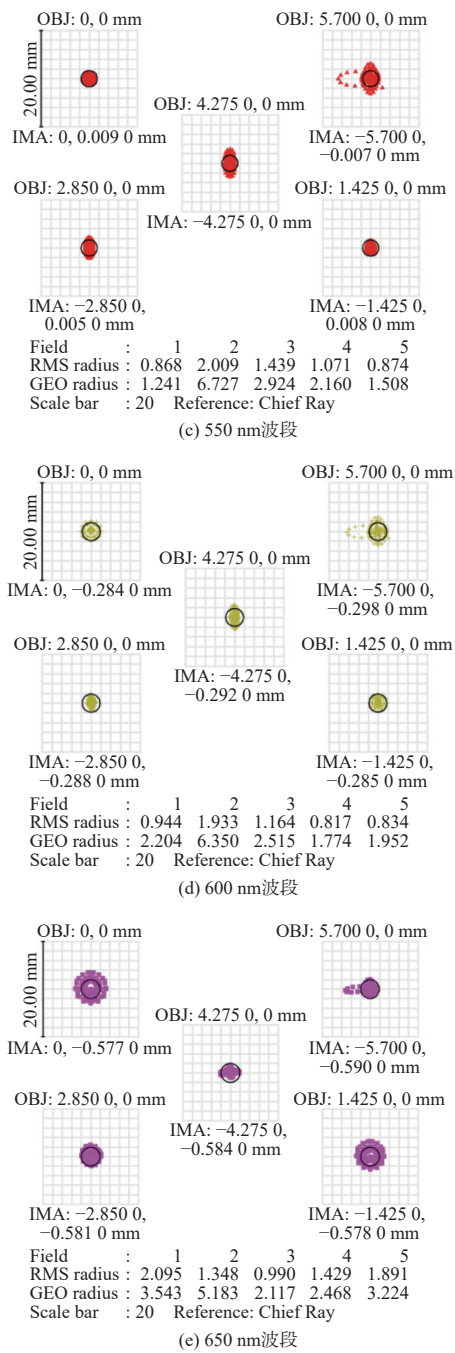


图 6 光栅型成像光谱仪不同波段处点列图

Fig. 6 Spot diagram at different bands of grating imaging spectrometer

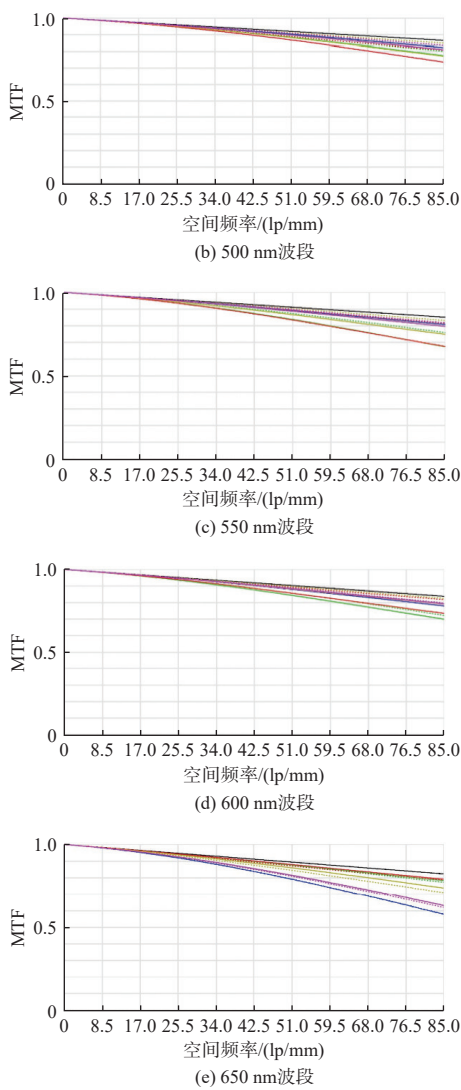
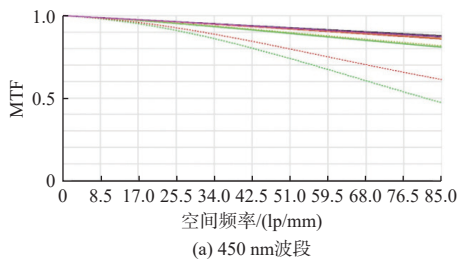
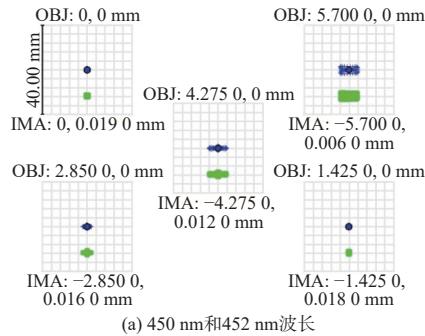


图 7 光栅型成像光谱仪不同波段处 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF curves at different bands of grating imaging spectrometer

分光系统在 450 nm 和 452 nm、500 nm 和 502 nm、550 nm 和 552 nm、600 nm 和 602 nm、650 nm 和 652 nm 处的分光情况如图 8 所示。从图 8 可以看出,在不同工作波段处光谱分辨率小于 2 nm,表明该光栅型成像光谱仪具有良好的光谱分光性。



(a) 450 nm和452 nm波长

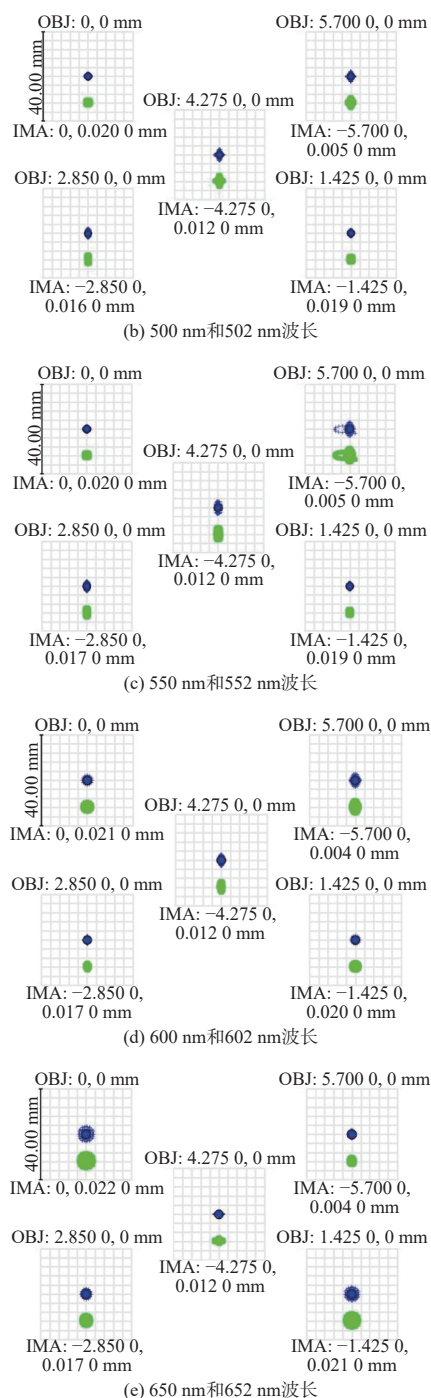


图8 光谱仪在2 nm 波长间隔的分光情况

Fig. 8 Spectroscopic results of imaging spectrometer at wavelength interval of 2 nm

成像光谱仪的光学系统畸变可分为谱线弯曲和色畸变,如图9所示,图9中横坐标 $\lambda_1 \sim \lambda_n$ 方向代表色散方向,纵坐标代表归一化狭缝视场。图9(a)为没有谱线弯曲时理想成像情况;图9(b)为谱线弯曲发生时成像状况,可看出谱线弯曲是在光谱维方向上,狭缝像边缘视场和中心视场像点存在差异,谱线弯曲易造成光谱混叠,尤其是在边缘视

场;图9(c)为色畸变导致梯形失真的情况,色畸变是指不同波长狭缝像放大率之间的差异^[21]。图10为设计系统的谱线弯曲和色畸变曲线,其中横坐标表示光学系统的归一化视场,纵坐标表示相应的谱线弯曲和色畸变值。从图10可以看出,系统的谱线弯曲最大值为19 μm ,色畸变最大值为0.35 μm 。

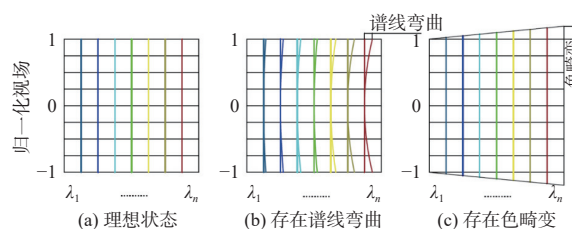


图9 谱线弯曲和色畸变示意图

Fig. 9 Diagram of line bending and color distortion

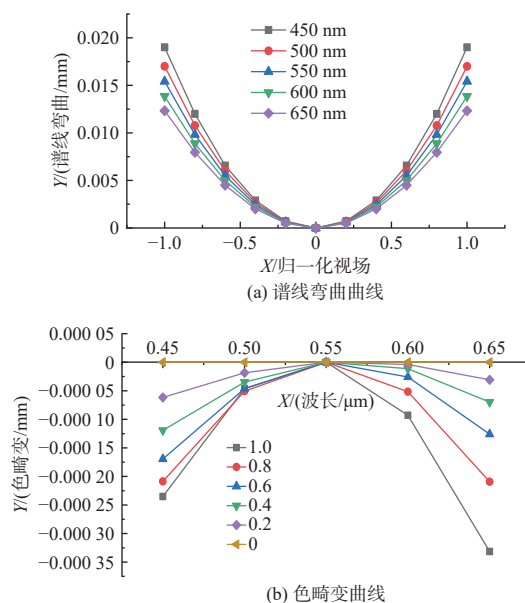


图10 光谱仪的谱线弯曲与色畸变

Fig. 10 Spectral line bending and color distortion of spectrometer

3 系统性能测试与评估

3.1 光谱分辨率测试

成像光谱仪系统利用谱线灯(汞灯、钠灯、铯灯等)或单色仪进行定标^[22-24]。本文选用汞灯、平行光管、光谱仪搭建光谱定标平台,如图11(a)所示。使用低压汞灯作为光源,光线通过平行光管后出射平行光,记录低压汞灯发出的特征光谱波峰在探测器上对应的像素位置。特征光谱和像素位置之间存在线性关系,将记录的数据与已知的汞灯特征光谱进行比例换算,最终得出定标结果,如图11(b)所示。根据汞灯已知的特征谱线宽度

分析可知,该光谱仪可以把 577 nm 和 579 nm 光谱分开,验证了该系统的光谱分辨率可达到 2 nm。

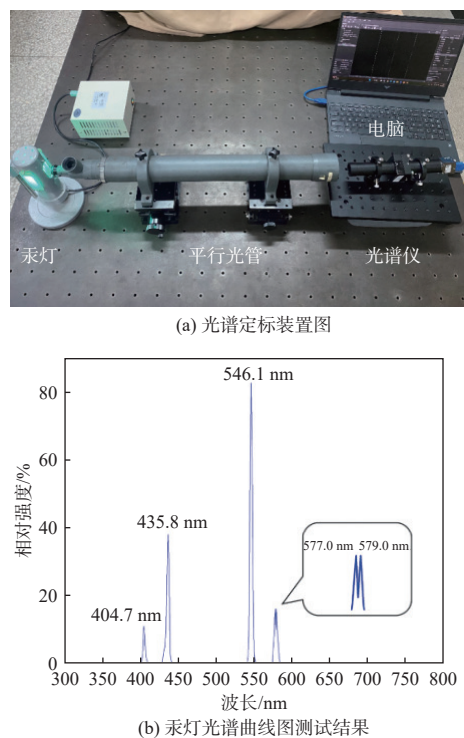


图 11 光谱定标装置与标定结果

Fig. 11 Spectral calibration device and its calibration results

3.2 推扫成像测试

利用电动位移平台对搭建的光谱仪进行推扫成像实验,如图 12 所示。将光谱仪置于电动位移平台上,小麦种子放在工作距离处并用光源照亮,通过控制光谱仪有序连续的运动,进行推扫即可获得小麦种子的整个光谱图像。推扫采集过程如图 13 所示。每次扫描对小麦种子一个狭缝宽度的区域(图 13(a)中用黄色框标示)进行光谱成像,一次扫描就可获得小麦种子此区域的光谱图像,经过连续推扫可以获得整个小麦种子的一组光谱图像信息,如图 13(b)所示。如果想要获得某个波段

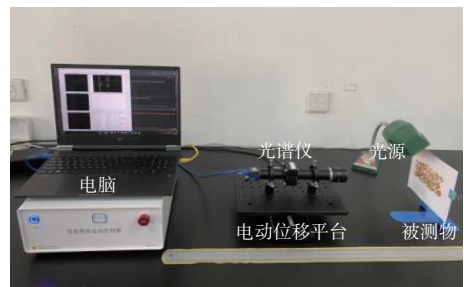


图 12 推扫成像测试示意图

Fig. 12 Push-scan imaging test diagram

的光谱图像,就需要在获得的这组光谱图像数据中,在该波段分别选取一定宽度的窄条纹(图 13(b)中用不同颜色框表示不同波长处)依次进行拼接,即可获得该波段处的光谱图像,同时也可以获得其他波段的光谱图像(图 13(c)从上到下依次为不同单波段)。

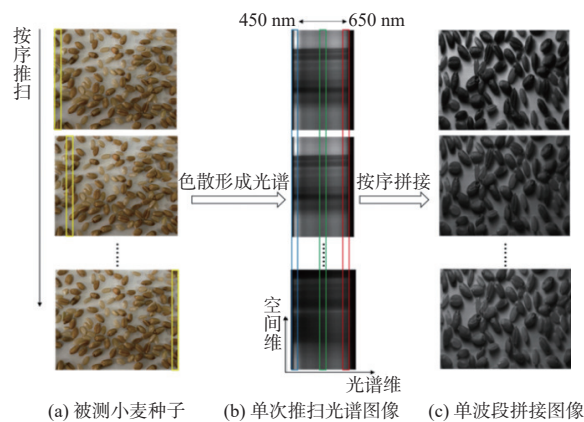


图 13 小麦种子光谱图像拼接示意图

Fig. 13 Mosaic diagram of wheat seed spectral image

在光谱波段 450 nm~650 nm 范围内,通过数据处理得到不同波段的光谱图像,组合排列起来即可得到如图 14(a)所示光谱数据立方体。图 14(a)中 X 、 Y 表示空间维, Z 表示光谱维,空间维的各个单元对应于不同像素点,光谱维的各个单元对应于波段范围。从光谱数据立方体中可以获得被测物在不同波段的光谱图像,也可以获得被测物某个像元的光谱曲线,从而识别被测物的结构及组成成份等信息。如图 14(b)所示,通过对比 2 个不同像素位置处的光谱曲线可以判断出小麦种子中混杂着其他类型的种子,即推扫成像光谱仪不仅可以从空间维进行辨别,对难以区分的目标也可以从光谱维进行分辨。根据光谱图像数据立方体,也可以查看 R、G、B 不同通道下的图像及其假色彩合成图像,如图 14(c)所示。假色彩合成图像能够在一定程度上提高光谱图像中目标的识别精度,更好地将光谱数据可视化,最大化提高光谱数据的优势。

4 结论

针对成像光谱仪简单化的需求,本文提出了一种基于单一透射光栅分光的光学结构对称型成像光谱仪,详细介绍了光谱仪的分光原理和系统设计方法。设计了一款工作波段在 450 nm~650 nm,

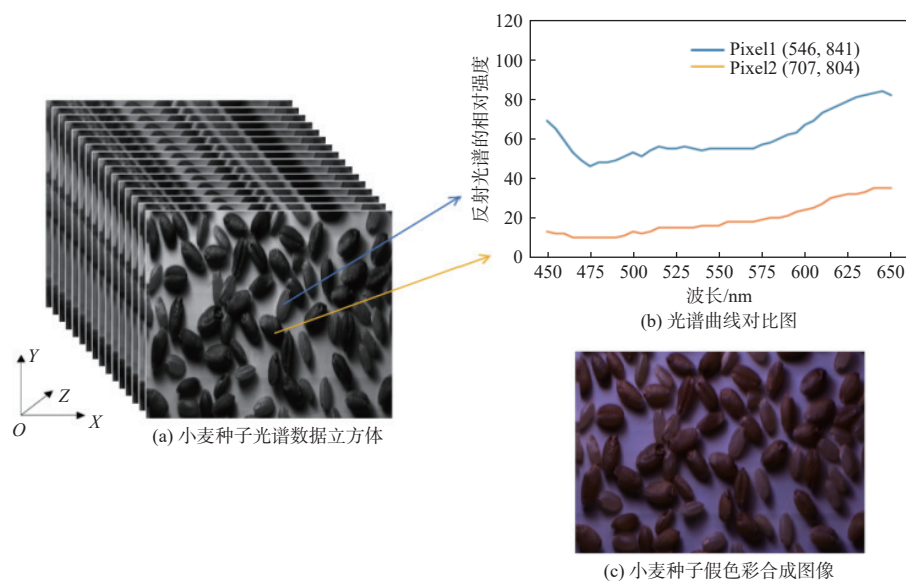


图 14 小麦种子光谱图像立方体、光谱曲线对比图和假色彩合成图像

Fig. 14 Wheat seed spectral image cube, spectral curve contrast and false color synthesis image

光谱分辨率可达 2 nm 的成像光谱仪, 并研制出实验样机, 通过光谱标定实验和推扫成像实验验证了该光谱仪的性能指标达到设计要求。该成像光谱仪相较于其他分光方式的光谱仪具有直视性、结构紧凑、加工装调简单、成像质量好、光谱分辨率高、制造费用低且易于携带等特性, 可用于农业、地质勘探、水质监测等各个领域。

参考文献:

- [1] 刘光宏, 吴刚, 凌青, 等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 229-236.
LIU Guanghong, WU Gang, LING Qing, et al. Modeling and aberration analysis of Offner imaging spectrometer[J]. Acta Optica, 2011, 31(3): 229-236.
- [2] 王建宇, 李春来. 高光谱遥感成像技术的发展与展望[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 22-33.
WANG Jianyu, LI Chunlai. Development and prospect of hyperspectral imager and its application[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 22-33.
- [3] 薛庆生, 李畅, 李婷婷, 等. 基于 LVF 的高光谱成像仪研制及应用[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 203-214.
XUE Qingsheng, LI Chang, LI Tingting, et al. Development and application of hyperspectral imager based on LVF[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 203-214.
- [4] 梅风华, 李超, 张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 708-718.
MEI Fenghua, LI Chao, ZHANG Yuxin, et al. Application of spectral imaging technology in maritime target de-

tection[J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 708-718.

- [5] 于磊. 成像光谱仪的发展与应用 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 298-308.
YU Lei. Development and application of imaging spectrometer (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 298-308.
- [6] 赵意意, 杨建峰, 薛彬, 等. 宽谱段消像散 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1182-1187.
ZHAO Yiyi, YANG Jianfeng, XUE Bin, et al. Optical system design of broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1182-1187.
- [7] 赵美红, 李文昊, 巴音贺希格, 等. Offner 成像光谱仪的消像差技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3001-3011.
ZHAO Meihong, LI Wenhao, BAYIN hexige, et al. Aberration correction technique of Offner imaging spectrometer[J]. Optical Precision Engineering, 2017, 25(12): 3001-3011.
- [8] 刘玉娟, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 红外成像光谱测量中 Dyson 光学系统的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 548-552.
LIU Yujuan, TANG Yuguang, BAYIN hexige, et al. Research progress of Dyson optical system in infrared imaging spectrum measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 548-552.
- [9] 何天博, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 棱镜-光栅-棱镜分光模块整体化设计及衍射特性分析[J]. 光谱学与光谱分

- 析, 2014, 34(1): 279-284.
- HE Tianbo, BAYIN hexige, LI Wenhao, et al. Integrated design and diffraction characteristic analysis of prism-raster-prism splitting module[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 279-284.
- [10] 罗刚银, 王弼陡, 陈玉琦, 等. Offner 型消热差中波红外成像光谱仪设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 95-101.
- LUO Gangyin, WANG Bidou, CHEN Yuqi, et al. Design of athermal mid-infrared imaging spectrometer based on Offner scheme[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 95-101.
- [11] 武志昆, 石恩涛, 王咏梅. 消谱线弯曲 PGP 型成像光谱仪系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(6): 181-186.
- WU Zhikun, SHI Entao, WANG Yongmei, et al. Design of PGP imaging spectrometer with eliminating spectral line bending[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 181-186.
- [12] 杨晋, 张锐, 潘明忠, 等. 大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 335-342.
- YANG Jin, ZHANG Yue, PAN Mingzhong, et al. Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field[J]. *Optical Precision Engineering*, 2017, 25(4): 335-342.
- [13] 谭奋利, 曾晨欣, 冯安伟, 等. 基于 Dyson 结构的新型快照式分光成像系统光学设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 157-164.
- TAN Fenli, ZENG Chenxin, FENG Anwei, et al. Optical design of novel snapshot spectral imaging system based on Dyson structure[J]. *Acta Optica*, 2022, 42(4): 157-164.
- [14] 孙宝朋, 张毅, 岳江, 等. 一种组件透射式成像光谱仪设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(5): 1414-1418.
- SUN Baopeng, ZHANG Yi, YUE Jiang, et al. Design of a modular transmission imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1414-1418.
- [15] 朱善兵, 季轶群, 宫广彪, 等. 棱镜-光栅-棱镜光谱成像系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2270-2273.
- ZHU Shanbing, JI Tiequn, GONG Guangbiao, et al. Optical design of prism-raster-prism spectral imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2270-2273.
- [16] 吴从均, 颜昌翔. 棱镜-光栅-棱镜型光谱成像系统光学设计[J]. *应用光学*, 2012, 33(1): 37-43.
- WU Congjun, YAN Changxiang. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 37-43.
- [17] 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 162-167.
- YU Meiwen. Optical holography and its applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 162-167.
- [18] BARDEN S C, ARNS J A, COLBURN W S. Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications[J]. *SPIE*, 1998, 3355: 866-876.
- [19] BARDEN S C, ARNS J A, COLBURN W S et al. Volume-phase holographic gratings and the efficiency of three simple VPH grating[J]. *The Publications of Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 11(2): 809-820.
- [20] 韩军, 刘钧. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2016: 346.
- HAN Jun, LIU Jun. Engineering optics [M]. 2th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2016: 346.
- [21] 樊星皓, 刘春雨, 徐明林, 等. 校谱线弯曲的共轴 PGP 成像光谱仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2022, 51(12): 187-202.
- FAN Xinghao, LIU Chunyu, XU Minglin, et al. Design of the optical system of coaxial PGP imaging spectrometer with eliminating spectral smile[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(12): 187-202.
- [22] 王建宇, 舒嵘, 刘银年. 成像光谱技术导论[M]. 1 版. 北京: 科学出版社, 2011: 145.
- WANG Jianyu, SHU Rong, LIU Yinnian. Introduction to imaging spectroscopy[M]. First ed. Beijing: Science Press, 2011: 145.
- [23] YANG Y. Spectral calibration of hyperspectral imager[J]. *Infrared*, 2006, 27(8): 24-26.
- [24] 刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 52-57.
- LI Yujuan, CUI Jicheng, BAYIN hexige, et al. Development and application of convex grating imaging spectrometer[J]. *Optical Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57.