

光学学报

基于离轴三反光学系统的高分辨率中阶梯光栅光谱仪

杨增鹏^{1,2*}, 李政言², 浦恩昌¹, 闫力松², 汪陈跃¹, 陈吕吉¹, 李萍¹, 杨卫平³, 张洋³

¹昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;

²华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

³云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

摘要 基于离轴三反光学系统和多列线阵探测器,设计了一种具有宽波段高光谱分辨率的中阶梯光栅光谱仪。首先,以仪器性能指标为约束优化中阶梯光栅的结构参数,使光栅在保证高色散的同时将宽工作波段折叠重合在较小的光谱级次内,并采用多列线阵探测器采集信号。然后,以离轴三反光学系统作为会聚镜,以离轴抛物镜作为准直镜,实现了高色散宽自由光谱的像差校正。最终,设计的中阶梯光栅光谱仪工作波段为 400~900 nm, F 数为 4.5,光谱分辨率在 402.31,541.82,870.48 nm 时分别为 0.003,0.004,0.005 nm,系统体积为 380 mm×325 mm×230 mm。

关键词 光学设计; 中阶梯光栅光谱仪; 宽波段; 高分辨率; 离轴三反光学系统

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2212001

High-Resolution Echelle Grating Spectrometer Based on Off-Axis Three-Mirror Reflective Optical System

Yang Zengpeng^{1,2*}, Li Zhengyan², Pu Enchang¹, Yan Lisong², Wang Chenyue¹,
Chen Lüji¹, Li Ping¹, Yang Weiping³, Zhang Yang³

¹Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China;

²School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China;

³School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract A wide-band high-resolution echelle grating spectrometer is designed on the basis of an off-axis three-mirror reflective optical system and a multi-column linear array detector in this paper. First, the structural parameters of the echelle gratings are optimized with the instrument performance indicators as constraints so that the gratings can fold and overlap the wide working band within a small spectral order while ensuring high dispersion. The multi-column linear array detector is used for signal acquisition. Then, for the aberration correction of the wide free spectral region with high dispersion, the off-axis three-mirror reflective optical system is used as the focusing mirror and the off-axis parabolic mirror is used as the collimating mirror. The working band of the designed echelle grating spectrometer is 400–900 nm, and the F number is 4.5. The spectral resolution is 0.003, 0.004, and 0.005 nm at 402.31, 541.82, and 870.48 nm, respectively, and the system volume is 380 mm×325 mm×230 mm.

Key words optical design; echelle grating spectrometer; wide-band; high-resolution; off-axis three-mirror reflective optical system

OCIS codes 120.4570; 120.6200; 300.6320; 050.1950

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11875140,61805089)

通信作者: *175367864@qq.com

1 引言

相比常规光栅光谱仪,中阶梯光栅光谱仪具有高光谱分辨率、高衍射效率、全谱段瞬态直读等优点,是电感耦合等离子体、激光诱导等离子体、火花光谱、天体光谱精细分析的首选光谱仪^[1-13],被广泛应用于原子发射谱探测、天文学探测等领域。

1949年,Harrison教授研制出具有较大衍射角的中阶梯光栅^[14],并构建了相应的中阶梯光栅光谱仪。目前,国外相关机构已成功研制出了多款高性能中阶梯光栅光谱仪,国内对中阶梯光栅光谱仪的研究起步较晚。中科院长春光机所^[4-8]、天津大学^[9-11]、北京钢铁研究总院^[12-13]等研究的中阶梯光栅光谱仪均采用面阵探测器采集信号,但研究过程中发现,多数中阶梯光栅光谱仪使用不足百级的光谱级次就能实现全波段的光谱探测,这表明光谱仪二次色散方向的探测器使用率极低。此外,中阶梯光栅光谱仪的自由光谱区随波长的增加而增加,当长波段要求高光谱分辨率时,光谱仪主色散方向的探测器分辨率就成为仪器的主要设计约束。

基于上述研究,本文通过深入分析影响中阶梯光栅光谱仪性能指标的关键设计参数,针对宽工作波段和高光谱分辨率的主要性能指标,提出了一种基于离轴三反光学系统和多列线阵探测器的中阶梯光栅光谱仪设计方案。为了实现高色散宽自由光谱的像差校正,以离轴三反光学系统作为会聚镜,以离轴抛物镜作为准直镜。最终设计的中阶梯光栅光谱仪工作波段为400~900 nm, F 数为4.5,光谱分辨率在402.31,541.82,870.48 nm时分别为0.003,0.004,0.005 nm,系统体积为380 mm×325 mm×230 mm。

2 中阶梯光栅光谱仪的参数计算

2.1 指标要求

为更精细地研究和分析目标源的光谱信息,实验研制的中阶梯光栅光谱仪主要性能指标如表1所示。

表1 光谱仪的性能指标

Table 1 Performance index of the spectrometer

Parameter	Value
Pinhole / μm	10
Spectral range /nm	400-900
F number	4.5
Spectral resolution	0.0049 nm@(510-540 nm)

2.2 中阶梯光栅光谱仪的原理

中阶梯光栅光谱仪的基本光路为 Czerny-Turner 光路,其结构如图1所示,大多数中阶梯光栅光谱仪的设计都是根据其性能指标由该光路改进演变得到。其中, θ_i 为入射光的入射角,定义为光线波矢在主截面内的投影与光栅法线的夹角,具有正负特性,光栅法线同侧为异号,光栅法线两侧为同号。 ϕ_i 为入射光的入射方位角,定义为波矢与主截面的夹角。 L 、 W 为中阶梯光栅的长和宽。复色光由针孔进入,经准直镜变为平行光束后入射到中阶梯光栅并在 x 方向进行第一次色散分光。第一次色散光束存在多个级次的光谱重叠,需由另一光栅或棱镜在 y 方向进行第二次色散分光,最终二维色散光束由会聚镜在像面上进行成像,得到针孔单色图像的二维分布。

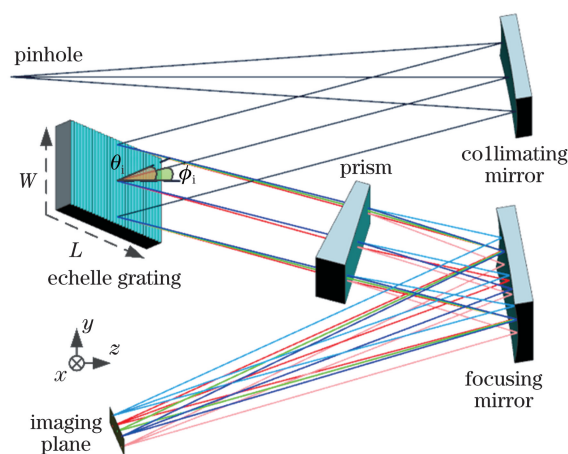


图1 中阶梯光栅光谱仪的基本光路

Fig. 1 Basic optical path of the echelle grating spectrometer

2.3 光栅色散特性的分析及参数设计

2.3.1 光栅角色散分析

空间光线以任意角度入射到平面透射光栅后的色散特性可表示为^[15]

$$\begin{cases} n_m \sin \theta_m \cos \phi_m = n_i \sin \theta_i \cos \phi_i + m\lambda/d \\ n_m \sin \phi_m = n_i \sin \phi_i \end{cases}, \quad (1)$$

式中, n_m 为 m 级衍射光所在空间的折射率, n_i 为入射光所在空间的折射率; θ_m 为 m 级衍射光的衍射角, ϕ_m 为 m 级衍射光的衍射方位角, m 为衍射级次, λ 为衍射波长, d 为光栅常数。当 $n_m = n_i = 1$ 时,(1)式为空间光线以任意角度入射平面反射光栅后的色散方程,可表示为

$$\sin \theta_m \cos \phi = \sin \theta_i \cos \phi + m\lambda/d, \quad (2)$$

式中, ϕ 为光线方位角,且 $\phi = \phi_m = \phi_i$ 。

中阶梯光栅使用时通常采用 Littrow 设置,即

光线以一定的方位角入射,且衍射光的衍射角取值区间的中位数等于入射光线的入射角。由(2)式得到光栅的角色散方程为

$$\frac{d\theta_m}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta_m \cos \phi} = \frac{m\nu}{\cos \theta_m \cos \phi}, \quad (3)$$

式中, ν 为光栅刻线密度, $\nu=1/d$ 。可以发现,影响光栅角色散率的参数共有4个,其中, m 、 ν 、 θ_m 涉及到光栅选型和使用,且这3个参数既相互作用也相互制约,需根据光谱仪的性能指标综合选取。 ϕ 为光谱仪设计时的光路参数,主要根据仪器的空间布局 and 空间许可适度选取,且仪器 y 方向的尺寸随 ϕ 的增加而增加。此外,各变量的取值受限于(2)式,随着 ϕ 的增加,同一波长固定衍射角对应的衍射级次会下降,因此, ϕ 对光栅角色散率的影响权重较低,暂时取 $\phi=10^\circ$ 。

根据(3)式进行数值分析,得到相同角色散率时参数 m 、 ν 、 θ_m 之间的关系如图2所示。其中,横坐标为衍射级次 m ,纵坐标为光栅刻线密度 ν ,曲线标值为角色散率,单位为 $(^\circ)/\text{nm}$ 。

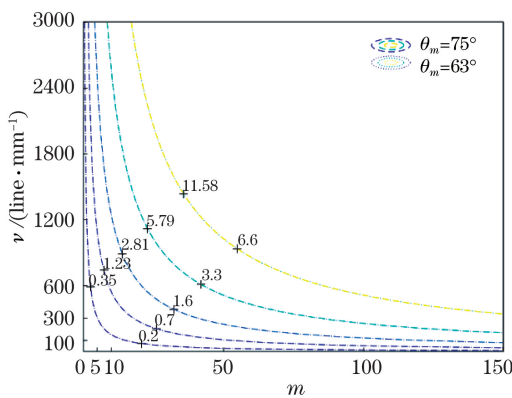


图2 光栅角色散率与 m 、 ν 、 θ_m 的关系

Fig. 2 Relationship between grating angular dispersion rate and m , ν and θ_m

由(3)式可以发现,增大 θ_m 可在一定程度上增加光栅角色散率,如 $\theta_m=75^\circ$ 时的角色散率为 $\theta_m=63^\circ$ 时的1.7倍。但对于横纵比相等的通光路径,大角度 θ_m 也相应增加了光栅的长宽比。设长宽比 $L/W=1$ 的光栅为标准光栅,则 $\theta_m=63^\circ$ 时,使用的光栅长宽比 $L_{63^\circ}/W=2.2$; $\theta_m=75^\circ$ 时,使用的光栅长宽比 $L_{75^\circ}/W=3.8$,相当于3.8块标准光栅,1.7块 63° 光栅,这无疑增加了光栅的制造难度和成本。因此,选取合适的衍射角在大型高分辨率中阶梯光栅光谱仪的研制中尤为重要。

为便于分析和讨论,图3仅绘制了 $\lambda=400, 540, 900 \text{ nm}$, $\theta_m=63^\circ$ 时, m 和 ν 对角色散率的影响,

并采用对数坐标系显示。可以发现,增加光栅刻线密度或使用高衍射级次均能提高光栅的角色散能力,如1930 line/mm光栅的1级色散能力与31.6 line/mm光栅的62级色散能力相当,约为 $0.249 (^\circ)/\text{nm}$ 。但光栅刻线密度与其能提供的衍射级次受限于(2)式。 $\theta_m=63^\circ$ 时, m 与 ν 的有效取值区域为空心圆虚线和实心圆虚线之间,不论何选取光栅,角色散率均随波长的增加而减小。在短波400 nm时,最大角色散率为 $0.563 (^\circ)/\text{nm}$;在长波900 nm时,最大角色散率为 $0.249 (^\circ)/\text{nm}$ 。

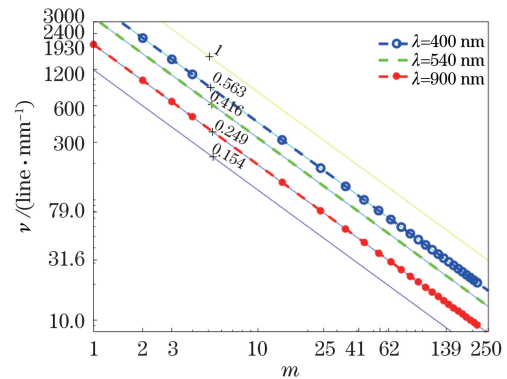


图3 $\theta_m=63^\circ$ 时光栅的角色散率

Fig. 3 Angular dispersion rate of the grating when $\theta_m=63^\circ$

从图3可以发现,采用高刻线密度光栅(1930 line/mm)的低级次也能获取较大的角色散率,且使用较少的级次($m=1, 2, 3$)就能覆盖全波段。但对于宽波段光谱仪,随着波长的增加,同一级次长波的衍射角也逐渐偏离计算时预设的 θ_m ,其角色散能力也随之发生变化。此外,同一低级次宽波段的高色散会导致短波与长波存在较大夹角,即光谱仪的会聚镜需要较大的视场角,增加了像差校正的难度,且很难找到适配的探测器。采用低刻线密度光栅的高级次获得较大角色散率时会产生光谱重叠现象,相当于将宽工作波段光谱在一定级次范围内折叠重合在小色散角区域,然后通过二次色散将重叠光谱在垂直于第一次色散方向的维度进行区分,最终实现宽波段光谱在二维面阵上的有序排布,从而构建出中阶梯光栅光谱仪。

2.3.2 自由光谱区的计算

光栅的自由光谱区 $\delta\lambda$,即相邻级次光谱的不重叠区域,可表示为

$$\delta\lambda_m = \lambda_m^{\max} - \lambda_m^{\min} = \frac{\lambda_m^{\min}}{|m_{\delta\lambda_m}|} = \frac{\lambda_m^{\max}}{|m_{\delta\lambda_m}| + 1}, \quad (4)$$

式中, λ_m^{\max} 为自由光谱区的最大波长, λ_m^{\min} 为自由光谱区的最小波长, $m_{\delta\lambda_m}$ 为对应的光谱级次。

当光栅使用状态确定时,波长与光谱级次为反比关系,即短波对应高级次。结合(4)式可知,在设定的工作波段范围内,自由光谱区由短波到长波逐渐增加。当光栅刻线密度为 79 line/mm、入射角为 63° 时,特定衍射角度范围内波长与级次的关系如图 4 所示。其中,图 4(a)为短波波段,图 4(b)为长波波段,曲线上的数值为相应波长和衍射角度对应的衍射级次。为实现 400~900 nm 全波段光谱探测,需将光谱在 55~25 级次内进行折叠,共计 31 个级次。对于固定衍射角度,可视为级次逐渐降低但波长逐渐增加的离散波谱重叠,且离散度随波长的增加而增加,如 58.4° 、402.31 nm 的级次波长间距(离散距离)约为 7.7 nm,约等于相应级次的自由光谱区; 58.4° 、835.57 nm 的离散距离约为 33.4 nm。为实现全波段连续光谱探测,相邻光谱级次间需存在一定的重叠探测波段,且长波自由光谱区大于短波自由光谱区。因此,长波自由光谱区也限制了衍射角度范围的最小取值区间,约为 $58.4^\circ \sim 67.6^\circ$,光谱仪会聚镜 x 方向的视场角 $\Delta\theta_m^{\min} = 9.2^\circ$ 。

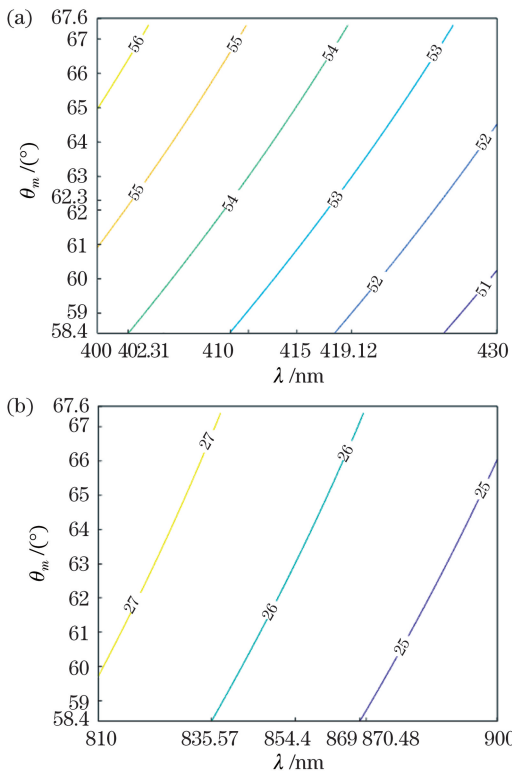


图 4 特定衍射角度范围内波长与级次的关系。

(a)短波波段;(b)长波波段

Fig. 4 Relationship between wavelength and order within a specific diffraction angle range. (a) Short wave band; (b) long wave band

2.3.3 中阶梯光栅的参数选择

在满足光谱仪主要性能指标的前提下,以高分辨率为设计目标,综合考虑中阶梯光栅的研制难度及制造成本,最终选择长宽比适中的中等刻线密度中阶梯光栅。其中,光栅的刻线密度为 79 line/mm,衍射角 $\theta_m = 63^\circ$,即中阶梯光栅闪耀角。

2.4 色散棱镜的设计

采用中阶梯光栅对宽波段进行高色散分光时,对于某一固定衍射角,重复叠加了多个离散波长,因此,还需使用光栅或棱镜将叠加的离散波长在垂直于主色散方向进行二次色散分光,以实现全波段在二维平面的色散展开。光栅作为二次色散元件,使用时存在一定限制,即叠加的离散波长跨度不宜超过光栅能提供的最大自由光谱区,否则光学系统需进行滤波处理或分波段设计。棱镜色散具有全谱段范围内无光谱重叠现象的优点,但缺点是色散能力远低于光栅且角色散率随波长的变化而变化。

根据空间布局 and 空间许可,拟采用反射棱镜作为二次色散元件,反射棱镜及其光路如图 5 所示。其中, n 为棱镜的折射率, α 为棱镜顶角, θ_{in} 为光线入射角(状态①中入射角为正值,状态②中入射角为负值), θ_{out} 为光线出射角。

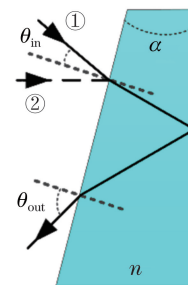


图 5 反射棱镜的光路

Fig. 5 Optical path of the reflecting prism

反射棱镜的色散特性可表示为

$$\theta_{out} = \arcsin \left\{ n \sin \left[2\alpha + \arcsin \left(\frac{\sin \theta_{in}}{n} \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

玻璃材料的折射率与波长的经验关系通常由 Sellmeier 等式描述,可表示为

$$n_\lambda^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3}, \quad (6)$$

式中, n_λ 为波长 λ 对应的折射率, K_1 、 K_2 、 K_3 、 L_1 、 L_2 和 L_3 为 Sellmeier 系数。

表 2 为 K9 玻璃的 Sellmeier 系数,根据(5)式、(6)式和表 2 计算分析 400 nm 和 900 nm 波长经过反射棱镜色散分光后的偏角差 $\Delta\theta_{out}$,结果如图 6

所示。可以发现,在400~900 nm波长范围内,当棱镜顶角较小时,不论光线以哪种状态入射,入射角对棱镜的色散影响权重均较小,顶角边界值约为6°。当棱镜顶角较大时,入射角对棱镜的色散影响权重较大。当棱镜顶角固定并以状态①入射时,棱镜的色散能力随入射角的增大而增大;以状态②入射时,棱镜的色散能力随入射角的增大而减小。 $\Delta\theta_{\text{out}}$ 为光谱仪会聚镜y方向的视场角,其值受限于会聚镜焦距 f 和探测器y方向的像面尺寸,也能决定棱镜的选型和使用状态,可表示为

$$\Delta\theta_{\text{out}} = 2\arctan\left(\frac{p \times N_{\text{CCD},y}}{2f}\right), \quad (7)$$

式中, p 为探测器像元尺寸, $N_{\text{CCD},y}$ 为探测器y方向的像元数量。

表2 K9玻璃的 Sellmeier 系数

Table 2 Calculation constants of K9 glass

Parameter	Value	Parameter	Value
K_1	$5.67853792 \times 10^{-1}$	L_1	$2.38581579 \times 10^{-3}$
K_2	$7.02269689 \times 10^{-1}$	L_2	$1.35348332 \times 10^{-2}$
K_3	1.08102455	L_3	1.07748228×10^2

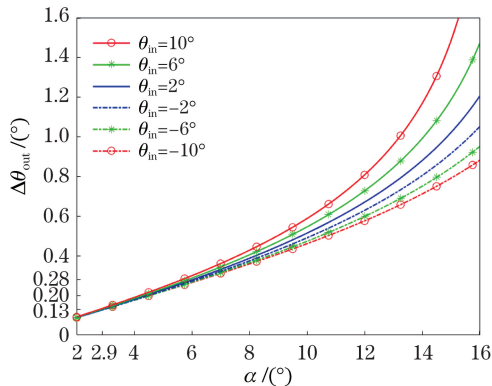


图6 偏角差与棱镜顶角和光线入射角的关系

Fig. 6 Relationship between deflection angle and prism vertex angle and light incident angle

2.5 针孔和探测器

针孔为宽波段单模光纤出射端,其芯径为10 μm。对于光栅光谱仪,准直镜和会聚镜的焦距通常相等,系统放大率为1:1,探测器的像元尺寸需与针孔尺寸匹配。当中阶梯光栅及其使用状态确定后,其所提供的角色散率 $d\theta_m/d\lambda$ 、重叠光谱区总数量 M_m 、自由光谱区 $\delta\lambda_m$ 和全波段衍射角最小角度范围 $\Delta\theta_m^{\text{min}}$ 也随之确定,则主色散方向和二次色散方向探测器的最少像元数 $N_{\text{CCD},x}$ 和 $N_{\text{CCD},y}$ 可表示为

$$\begin{cases} N_{\text{CCD},x} \geq \frac{\delta\lambda_m^{\text{max}}}{\Delta\lambda}, \\ N_{\text{CCD},y} > M_m \end{cases}, \quad (8)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为对应波长的光谱分辨率。综上所述,采用79 line/mm, $\theta_m = 63^\circ$ 的中阶梯光栅实现400~900 nm全波段光谱探测时,仅需将光谱在55~25级次内进行谱段折叠,共计31个级次,所需的衍射级次总数较少。因此,选择多列线阵探测器进行信号采集。该光谱仪的中间波段需具有较高光谱分辨率且兼顾宽工作波段的特点。因此,探测器的选型需综合考虑多个因素,对应参数可表示为

$$f = \frac{p \times 10^{-3}}{2 \tan\left(\frac{\Delta\lambda}{2} \times \frac{d\theta_m}{d\lambda}\right)}, \quad (9)$$

$$L_{\text{CCD},x} = 2f \tan\left(\frac{\Delta\theta_m^{\text{min}}}{2}\right), \quad (10)$$

式中, $L_{\text{CCD},x}$ 为探测器x方向的像面尺寸。当540 nm波长处的光谱分辨率为0.0049 nm、 $p = 10 \mu\text{m}$ 时,相应光谱级次($m = 41$)所需的像元数 $N_{\text{CCD},x} = 2688$,最小焦距 $f_{\text{min}} = 281 \text{ mm}$, $L_{\text{CCD},x} = 45.3 \text{ mm}$ 。最终选定的多列线阵探测器参数:尺寸为12000 pixel×256 pixel,像素尺寸为5.2 μm,每4个像素作为一个成像单元,像面尺寸为62.4 mm×1.33 mm。

2.6 准直镜和会聚镜

准直镜采用离轴抛物镜,以减少像差。由中阶梯光栅光谱仪的原理可知,探测器像面尺寸即会聚镜的线视场,会聚镜x方向的线视场远大于y方向的线视场,且y方向的线视场极小。为了获得较小的F数,采用离轴三反光学系统作为会聚镜。综上所述,为充分使用探测器并预留适当的装调边距,根据(7)式、(10)式和图6确定的会聚镜焦距和反射棱镜的最终参数: $f = 370 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 2.9^\circ$ 。

3 光学设计

根据上文分析确定的参数,将针孔、准直镜、中阶梯光栅、反射棱镜和离轴三反光学系统集成成为中阶梯光栅光谱仪。以成像质量为优化目标,并设定光路中关键参数的约束边界,通过人机交互逐步逼近方法完成优化。设计得到的光谱仪光路结构如图7所示,光学尺寸约为380 mm×325 mm×230 mm。

光谱仪的点列图如图8所示,其中,方框尺寸(1个像元)为10.4 μm×10.4 μm,两个光斑的中心间距约为10 μm。可以发现,该光谱仪的光谱分辨

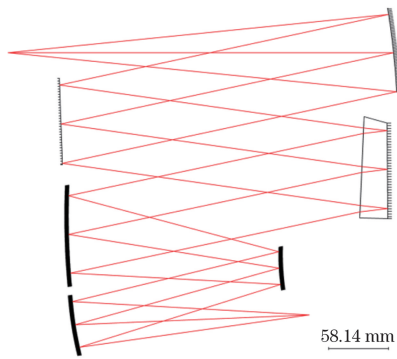


图7 光谱仪的光路结构

Fig. 7 Optical path structure of the spectrometer

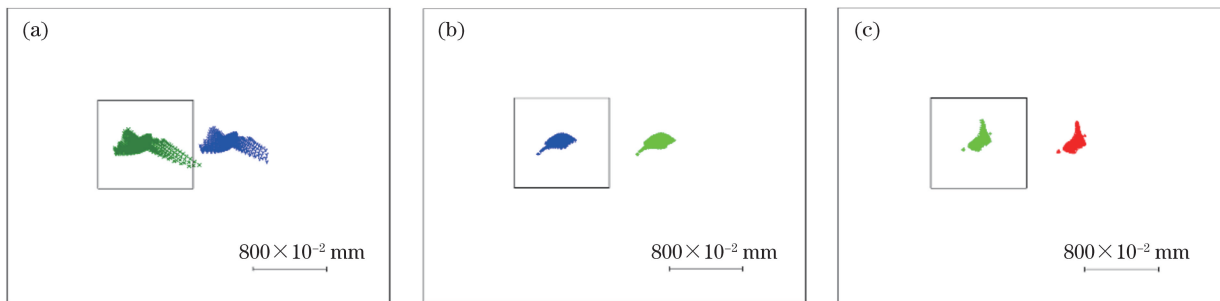


图8 系统点列图。(a) 402.31 nm 和 402.313 nm; (b) 541.82 nm 和 541.824 nm; (c) 870.475 nm 和 870.48 nm

Fig. 8 Spot diagrams of system. (a) 402.31 nm and 402.313 nm; (b) 541.82 nm and 541.824 nm; (c) 870.475 nm and 870.48 nm

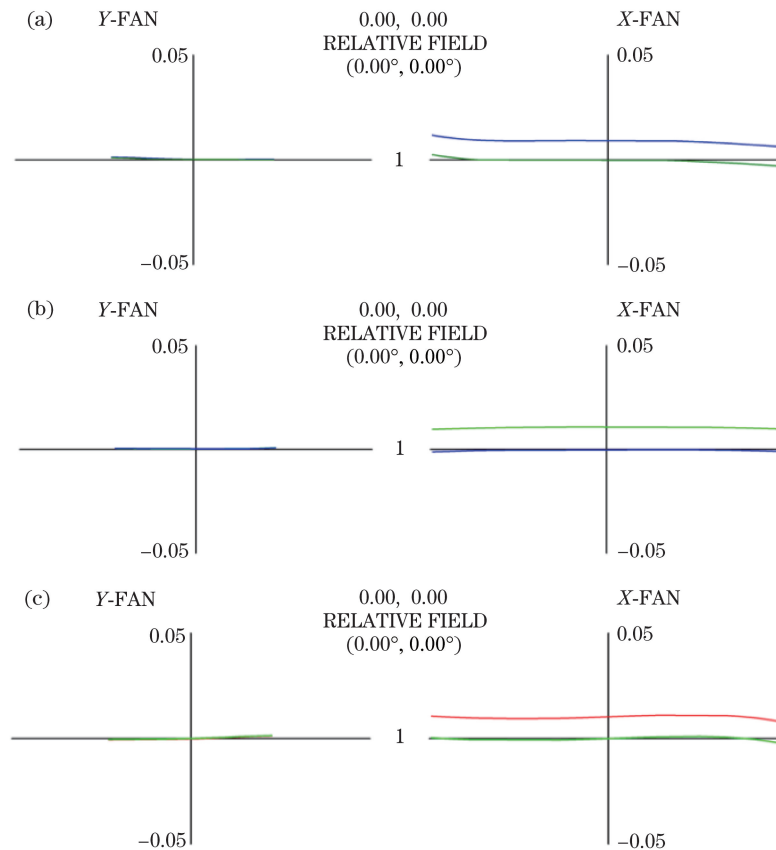


图9 系统的像差。(a) 402.31 nm 和 402.313 nm; (b) 541.82 nm 和 541.824 nm; (c) 870.475 nm 和 870.48 nm

Fig. 9 Aberration of system. (a) 402.31 nm and 402.313 nm; (b) 541.82 nm and 541.824 nm; (c) 870.475 nm and 870.48 nm

率为 $0.003 \text{ nm}@402.31 \text{ nm}$ 、 $0.004 \text{ nm}@541.82 \text{ nm}$ 、 $0.005 \text{ nm}@870.475 \text{ nm}$ 。图 9 为系统的像差曲线, 可以发现, 该光谱仪在全波段范围内的像差均得到了良好地校正。

通过真实光线追迹确定不同波长在像面的空间位置, 以分析全波段范围占用的空间尺寸和各级次的谱线特点, 具体情况如图 10 所示。其中, X_{image} 为像面宽度, Y_{image} 为像面高度。可以发现, $400 \sim 900 \text{ nm}$ 范围内的二维色散图谱占用的成像空间尺寸约为 $60.01 \text{ mm} \times 1.17 \text{ mm}$, 小于探测器的像面尺寸; 同一级次的谱线在微观尺寸为弯曲形状, 主

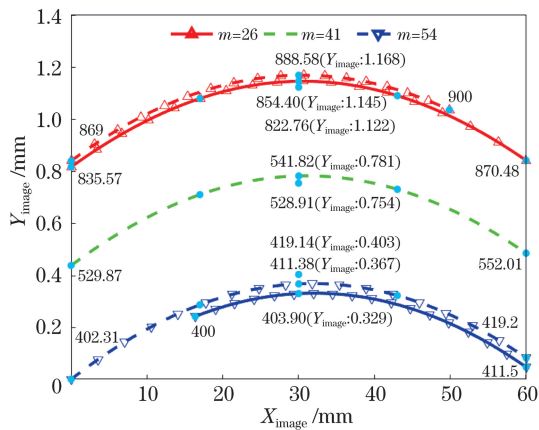


图10 二维色散图谱

Fig. 10 Two-dimensional dispersion spectrum

要由棱镜的非线性色散和光栅的锥面衍射引起;短波范围内相邻级次(55级次的403.90 nm波长与54级次的411.38 nm波长)的光斑中心间距为0.038 mm,约为7.3 pixel;长波范围内相邻级次(26级次的854.40 nm波长与25级次的888.58 nm波长)的光斑中心间距为0.023 mm,约为4.4 pixel,这表明全波段范围内棱镜已将各相邻级次的重叠光谱色散分开。此外,棱镜在长波波段的色散能力减弱,即采用棱镜作为二次色散元件时,需以长波段相邻级次的二次色散数据校验棱镜设计的合理性。对比55级次与54级次、26级次与25级次的谱线可知,在确定的成像空间尺寸范围内,短波方向相邻级次的光谱存在较长波段范围内同一波长信号重复探测,反之亦然;此外,26级次与25级次的谱线重复探测波段范围为1.48 nm,这表明该系统能够实现400~900 nm的连续光谱探测。

4 结 论

通过深入分析影响中阶梯光栅光谱仪性能指标的关键设计参数,针对宽工作波段和高光谱分辨率的主要性能指标,提出了一种基于离轴三反光学系统和多列线阵探测器的中阶梯光栅光谱仪设计方案。首先,探讨和分析了获取高光谱分辨的技术途径,通过综合对比和权衡设计,确定了中阶梯光栅的选型及使用状态;然后,定量分析了反射棱镜色散特性与其结构参数的关系;最后,综合主色散和二次色散的特点,提出了以离轴三反光学系统作为会聚镜同时采用多列线阵探测器进行信号采集的中阶梯光栅光谱仪架构,并经过光学仿真分析验证了该方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] Porter M J. Spectroscopy on small telescopes: the echelle spectrograph [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2000, 273(1/2/3/4): 217-224.
- [2] Ma C, Li J L, Chen X, et al. High-resolution tunable fiber laser based on echelle grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1014001.
马成, 李金亮, 陈笑, 等. 基于中阶梯光栅的高分辨率可调谐光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1014001.
- [3] Tanaka H, Fujii K, Shikama T, et al. Plasma spectroscopy on an aluminum-pellet ablation cloud in an LHD plasma with an echelle spectrometer [J]. *Atoms*, 2020, 8(4): 81.
- [4] Tang Y G, Song N, Bayanheshig, et al. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1989-1995.
唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.
- [5] Ning C L, Qi X D, Chen S J, et al. Optical design and performance analysis of light and small echelle spectrograph [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3406-3410.
宁春丽, 齐向东, 陈少杰, 等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3406-3410.
- [6] Yang J, Yin L, Yao X F, et al. Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812001.
杨晋, 尹禄, 姚雪峰, 等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812001.
- [7] Zhang R, Pan M Z, Yang J, et al. Optical system of echelle spectrometer based on DMD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 2994-3000.
张锐, 潘明忠, 杨晋, 等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12): 2994-3000.
- [8] Sun C, Yang J, Zhu J W, et al. Optical design of echelle spectrometer with ultra-wide wavelength range and high resolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 45-53.
孙慈, 杨晋, 朱继伟, 等. 超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪的光学设计 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 45-53.
- [9] Zhang Y X, Yang H D, Deng C, et al. Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,

- 2013, 33(6): 1706-1710.
- 张尹馨, 杨怀栋, 邓超, 等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1706-1710.
- [10] Feng F, Duan F J, Bo E, et al. An optical design of small-size echelle spectrograph [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(7): 20-25.
- 冯帆, 段发阶, 伯恩, 等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014, 41(7): 20-25.
- [11] Li Y, Duan F J, Fu X, et al. Optical design of small high resolution echelle spectrograph [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(8): 1139-1144.
- 李洋, 段发阶, 傅骁, 等. 小型高分辨率中阶梯光栅光谱仪光学设计[J]. 传感技术学报, 2017, 30(8): 1139-1144.
- [12] Cao H X, Zhao Y F, He M, et al. Design of small-size high resolution echelle grating spectrometer with divided spectral coverage [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1105002.
- 曹海霞, 赵英飞, 何森, 等. 小型分段式高分辨率中阶梯光栅光谱仪的设计[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1105002.
- [13] Cao H X. Development status of dispersion systems for echelle spectrometer used in ICP spectrometer [J]. Analytical Instrumentation, 2019(2): 86-88.
- 曹海霞. 应用于 ICP 光谱仪的中阶梯光栅光谱仪色散系统分析[J]. 分析仪器, 2019(2): 86-88.
- [14] Harrison G R. The production of diffraction gratings: II. the design of echelle gratings and spectrographs [J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(7): 522-528.
- [15] Yang Z P, Tang Y G, Bayanheshig, et al. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.
- 杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911003.