

# 棱镜-光栅组合分光结构参数的优化方法研究

曾朝斌<sup>1\*\*</sup>, 刘宾<sup>1,2</sup>, 夏正德<sup>1</sup>, 师钰璋<sup>1</sup>, 韩焱<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>山西省信息探测与处理重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 针对现有的棱镜-光栅的组合设计存在结构复杂、调试困难的问题,建立了三棱镜-光栅组合色散的数学模型,提出了仅需改变三棱镜、光栅的空间相对位置来提高光谱色散线性度的双目标优化方法,获得了线性度良好的棱镜-光栅组合结构参数。采用光学标准件对模型的正确性进行仿真和实验验证。仿真结果表明:在 400~1000 nm 波段,系统具有长为 15 cm、光谱线性度良好、结构简单的特点。实验结果表明,在 420~780 nm 波段,整体分辨率优于 2 nm,进一步证明了该方法的有效性。本研究为棱镜-光栅组合设计提供了一种灵活、简单的结构设计方法。

**关键词** 光栅; 棱镜-光栅组合; 线性色散; 宽光谱; 反射式光栅

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2105001

## Optimal Design of Spectroscopic Structure Based on Prism-Grating Combination

Zeng Chaobin<sup>1\*\*</sup>, Liu Bin<sup>1,2</sup>, Xia Zhengde<sup>1</sup>, Shi Yuzhang<sup>1</sup>, Han Yan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>Shanxi Key Laboratory of Information Detection and Processing, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** Aiming at the problems of complex structures and difficult debugging in the current design based on prism-grating combination, we established a mathematical model of dispersion based on prism-grating combination and proposed an optimization method of only changing the relative positions of the prism and grating to increase the spectral dispersion linearity. As a result, we obtained the parameters of the prism-grating combination structure with good linearity. Furthermore, we used optical standard elements to simulate and experimentally verify the correctness of the model, and the results showed that our system had the advantages of 15 cm length, good spectral linearity, and simple structure in the band of 400–1000 nm. Finally, the experiments demonstrated that the overall resolution was better than 2 nm in the band of 420–780 nm, which further proved the effectiveness of the proposed method. In a word, this paper provides a flexible and simple structural design method based on prism-grating combination.

**Key words** gratings; prism-grating combination; linear dispersion; wide spectra; reflective grating

**OCIS codes** 050.1950; 100.2960; 300.6190

## 1 引 言

成像光谱仪具有“图谱合一”的特性,能够同时提供图像的二维空间信息和光谱信息,实现对目标场景的探测和深度分析,在国防、航空航天、公共安全等领域均有广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在成像光谱仪设计中,不同分光系统的结构具有不同的分光效果。常用的典型的结构设计是使用棱镜作为成像系统的色散元件<sup>[6-7]</sup>,但由于线性棱镜常因光谱变化导致谱线不均

匀,故在光谱仪器中常采用曲线棱镜<sup>[8-9]</sup>。相比于棱镜分光,光栅作为核心分光器件具有更高的分辨率<sup>[10-15]</sup>,如 Pang 等<sup>[14]</sup>提出了一种由两个平面光栅构成的紧凑型高精度光谱仪,实现了 36 pm 的光谱分辨率, Jiang 等<sup>[15]</sup>设计了一种由 19 个光栅集成的光栅模块,光谱分辨率能达到 12 pm/pixel。

因棱镜、光栅单独作为分光元件时易造成谱线分布不均匀,而棱镜-光栅(Prism-Grating,简称 PG)能够结合两者各自的特性实现光谱均匀分布的

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61871351)、山西省自然科学基金(201801D221206, 201801D221207)

\* E-mail: hanyan@nuc.edu.cn; \*\* E-mail: 15750775214@163.com

特点,被广泛应用于光谱仪中<sup>[16-19]</sup>。Liu 等<sup>[18]</sup>提出了基于 PG 结构的合成孔径设计方法;Chen 等<sup>[19]</sup>设计了一种优化方法,在短红外波段得到了较好的结果。目前,作者们通过设计光栅的结构、棱镜形状、棱镜顶角、合成孔径等方法提高了光谱分辨率和光谱线性度<sup>[18,20-23]</sup>,但这些方法需要对棱镜和光栅进行专门的加工,存在结构复杂的问题。

针对上述问题,本文在分析常规三棱镜、光栅色散特性的基础上,研究并分析了影响光谱成像线性度的结构关联因素,针对单孔径成像从空间角度提出了一种基于常规三棱镜和光栅实现线性度良好、宽光谱、高分辨率的设计方法。该方法通过建立 PG 结构数学模型,对基于光谱线性度评价的 PG 结构迭代寻优,在满足色散率指标条件下求解出分光系统的最优空间结构参数。基于上述方法,在 0.4~1.0 μm 波段范围内,使用三棱镜和闪耀光栅作为分光器件,仿真设计了一款结构简单、系统长度为 15 cm、高分辨率、最大色散率和最小色散率之差为 0.604 mrad/nm 的成像系统。实验结果表明,在 0.42~0.78 μm 波段,该系统的分辨率优于 2 nm,由此进一步表明该方法的有效性。

## 2 PG 分光系统的结构特性分析

### 2.1 棱镜和光栅色散特性的因素分析

#### 2.1.1 棱镜

三棱镜色散结构如图 1 所示,光束从左侧入射,从右侧出射。棱镜顶角为  $\alpha$ ,光线从折射率为  $n_\lambda$  的介质以入射角  $i_0$  入射到折射率为  $n'_\lambda$  的棱镜,折射角为  $i'_0$ ,由棱镜出射到折射率为  $n_\lambda$  的入射角为  $i_1$ ,折射角为  $i'_1$ ,结合图 1,由 Shell 公式可得

$$i_1 = \alpha - i'_0, \quad (1)$$

$$\delta = i_0 + i'_1 - \alpha, \quad (2)$$

式中: $\delta$  为出射偏角。对出射偏角求导,可得三棱镜角色散率为

$$\frac{\partial \delta}{\partial \lambda} = \frac{\partial i'_1}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \{n_\lambda \sin[\alpha - \arcsin(\sin i_0/n_\lambda)]\}^2} \cdot \{n'_\lambda \sin[\alpha - \arcsin(\sin i_0/n_\lambda)] + n_\lambda n'_\lambda \cdot \{\cos[\alpha - \arcsin(\sin i_0/n_\lambda)] \cdot \sin i_0 / [n_\lambda^2 \sqrt{1 - (\sin i_0/n_\lambda)^2}]\} \}}, \quad (3)$$

式中: $n_\lambda$  为环境折射率。

由(3)式可知,棱镜的色散率主要受材质、顶角、入射角三种因素的影响。当材质、顶角确定后,入射条件是影响三棱镜色散率的主要因素。由(3)式可计算出不同入射角度对三棱镜色散率的影响。本文

以介质为 F2、顶角  $\alpha$  为 60°的三角棱镜为例,图 2 给出 4 种入射角下的色散率关系曲线,可以看出,三棱镜对光线的色散率随波长的增大而非线性减小且随入射角度的增大而减小,同时入射角对色散变化率也随入射角度的增大而减小,最后趋于平稳。虽然在大角度入射情况下,能够实现相对均匀的光谱,但由于大角度的入射会导致透射能量快速衰减,不利于光电传感器的探测。而在较小入射角入射的情况下,光谱分布宽度增加,光谱密度分布减小,但环境引起的微小的入射角度变化会导致光谱色散率明显变化,以至于影响分光系统的稳定性。

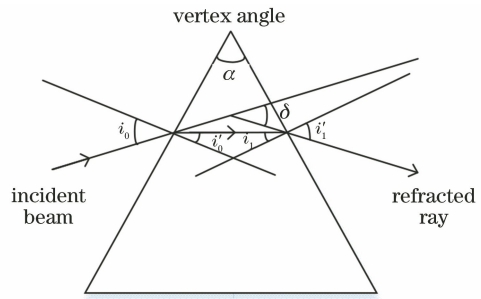


图 1 三棱镜色散图

Fig. 1 Prism dispersion diagram

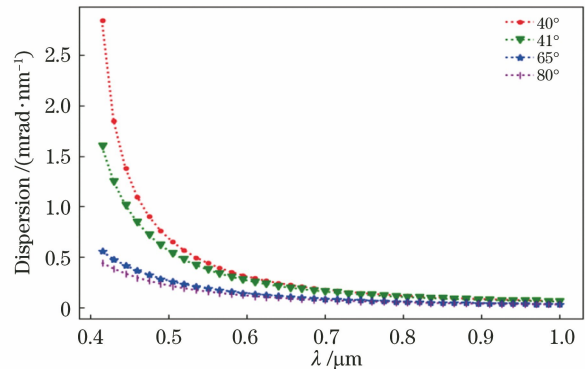


图 2 不同入射角对棱镜角色散率结果图

Fig. 2 Diagram of different incident angles versus dispersion of prism

#### 2.1.2 反射式光栅

反射式光栅是一种常见的衍射光学元件,光栅方程为

$$d(\sin \psi + \sin \gamma) = m\lambda, \quad (4)$$

式中, $d$  为刻面间距, $\gamma$  为光栅入射角, $\psi$  为衍射角, $m$  为光栅级数, $\lambda$  为波长。

由(4)式可得

$$\psi = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d} - \sin \gamma\right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{d} - \sin \gamma\right)^2}} \cdot \frac{m}{d}, \quad (6)$$

式中： $\frac{\partial \psi}{\partial \lambda}$  为色散率。

本文以 600 line/mm ( $d = 1.67 \mu\text{m}$ ) 的闪耀反射式光栅为例, 计算了 5 种不同入射角度  $\gamma$  下的闪耀光栅一级 ( $m = 1$ ) 衍射角色散率的关系曲线, 如图 3 所示。

由图 3 可见, 在小角度  $0^\circ \sim 20^\circ$  入射光线的条件

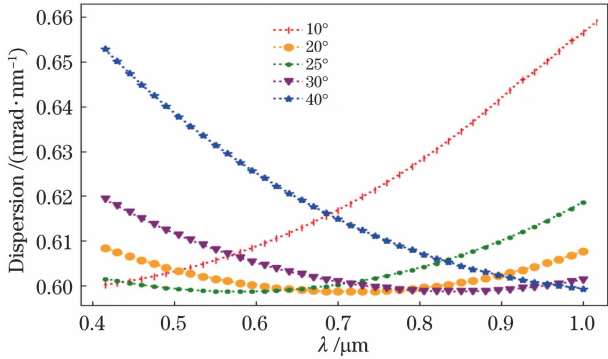


图 3 不同入射角对 600 line/mm 光栅色散率曲线  
Fig. 3 600 line/mm dispersion of prism at different incident angles

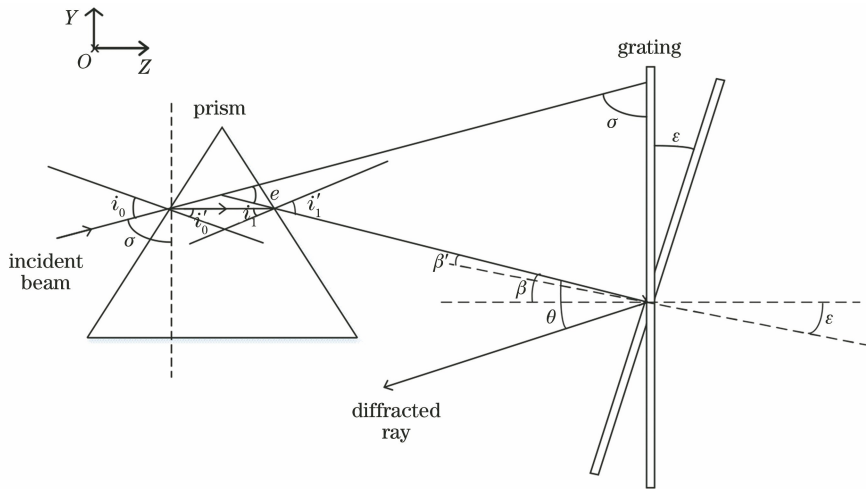


图 4 PG 组合色散原理图

Fig. 4 Schematic diagram of dispersion for combination of prism and grating

由图 4、(3)式、(6)式可得

$$\theta(\lambda) = \arcsin \left[ \frac{m\lambda}{d} - \sin \left( i_1' - \frac{1}{2}\alpha - \epsilon \right) \right], \quad (7)$$

$$\chi(\lambda) = \frac{\partial \theta}{\partial \lambda}, \quad (8)$$

式中： $\theta$  为 PG 组合的衍射角； $\chi$  为角色散率。

### 2.2.2 PG 系统优化设计方法

为实现 PG 模块的优化设计, 本文采用方差准

下, 光谱色散率随光谱波长的增加呈非线性增加, 在  $20^\circ \sim 25^\circ$  的入射条件下, 光谱分布密度的分布相对均匀, 当入射角在  $25^\circ$  以上, 光谱色散率随光谱波长的增加呈非线性降低。虽然闪耀光栅能够在特定入射角下实现相对均匀的光谱分光, 但在宽光谱中依然存在谱线两端分布稀疏、中间密集、谱线性度差的现象。

## 2.2 PG 参数的优化设计

### 2.2.1 PG 分光原理

从以上分析可知, 无论是常规的棱镜还是光栅, 都无法实现更宽光谱的均匀分布, 为了增加光学系统能量的透过率以及实现更宽光谱的均匀分布, 在许多分光系统中采用了 PG 组合模式。利用 PG 结构对谱线弯曲的互补性, 可以有效地消除谱线弯曲。

图 4 为 PG 组合结构的 YOZ 平面图, 棱镜的中位线垂直 Z 轴, 光栅相对棱镜垂直 Z 轴摆放, 光线由左往右入射。入射光栅的夹角为  $\sigma$ , 光栅相对于原位置沿 X 轴方向的偏转角为  $\epsilon$ 。

则作为光谱线性度和散布评价条件。首先, 根据分光波段, 选择棱镜材料、顶角和光栅线数, 根据棱镜全反射原理, 计算棱镜的最小入射角范围。设

$$I = I_i, i = [X_{\min}, 90], \quad (9)$$

式中,  $X_{\min}$  为棱镜最小入射角对应的数值,  $i$  为序号,  $I_i$  为  $i$  角度的入射角。计算光栅在不同入射角度下的色散角  $\theta_{i,j}(\lambda)$  和色散率  $\chi_{i,j}(\lambda_k)$ , 表达式为

$$\theta_{i,j}(\lambda) = \arcsin \left\{ \frac{m\lambda}{d} - \sin \left\{ \arcsin \{ n'_\lambda \cdot \sin [\alpha - \arcsin (\sin I / n_\lambda)] \} - \frac{1}{2}\alpha - \epsilon_j \right\} \right\}, j = [0, 90], \quad (10)$$

$$\chi_{i,j}(\lambda_k) = \frac{\partial \theta_{i,j}(\lambda_k)}{\partial \lambda}, k = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

式中,  $\epsilon_j$  为  $j$  角度下的光栅偏转角,  $\theta_{i,j}(\lambda)$  为在波长为  $\lambda$  下的 PG 系统色散偏角。再计算各角度下 PG 组合的平均角色散率  $\overline{\chi_{i,j}(\lambda)}$  和方差  $\kappa$ , 表达式为

$$\overline{\chi_{i,j}(\lambda)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \chi_{i,j}(\lambda_k), \quad (12)$$

$$\kappa_{i,j} = \sum_{k=1}^n [\chi_{i,j}(\lambda_k) - \overline{\chi_{i,j}(\lambda)}]^2, \quad (13)$$

式中,  $\lambda_1$  和  $\lambda_n$  分别为系统的最小输入波长和最大输入波长。为保证光谱线性度良好且光谱宽度足够宽, 定义光谱色散宽度  $\Delta\theta_{i,j}$  与光谱方差  $\kappa_{i,j}$  的比值为光谱色散力, 即

$$R_{i,j} = \frac{\theta_{i,j}(\lambda_n) - \theta_{i,j}(\lambda_1)}{\kappa_{i,j}} = \frac{\Delta\theta_{i,j}}{\kappa_{i,j}}, \quad (14)$$

$$R = \max R_{i,j}, \quad (15)$$

式中,  $\theta_{i,j}(\lambda_1)$ 、 $\theta_{i,j}(\lambda_n)$  分别为经过棱镜入射角  $I_i$  和光栅偏转角  $\epsilon_j$  且相对于光栅入射角的最小波长和最大波长的偏转角,  $\Delta\theta_{i,j}$  为光谱的色散宽度, 由  $\theta_{i,j}(\lambda_n)$  和  $\theta_{i,j}(\lambda_1)$  相减得到。在每个棱镜入射角下, 通过算法寻优得到(15)式的最大光谱色散力, 最大光谱色散力所对应的光栅入射角即为在该棱镜入射角下的光栅结构解, 最后通过系统最大与最小色散率之差的指标选取棱镜的最优空间结构解。

图 5 给出整个系统的设计流程, 根据系统波段, 选择棱镜材料和棱镜顶角参数, 计算棱镜的最小输入角来确定该波段最小入射角的人射范围, 接着通过本文算法进行迭代, 根据最大色散率减去最小色散率的差值小于 0.6 mrad/nm 的条件, 从结构参数解中选取入射角最小的那一组参数即可确定系统的整体结构参数, 得到满足指标的结果。

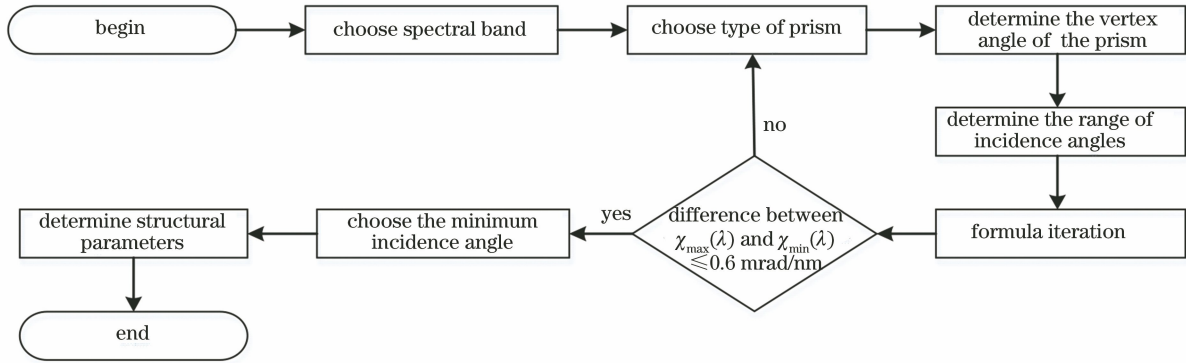


图 5 PG 分光系统设计流程图

Fig. 5 PG spectroscopic system design flow chart

闪耀光栅是一种特殊形式的反射式光栅, 闪耀光栅能够在特定衍射级次上产生最大的衍射效率, 因此在单色仪和光谱仪中有着重要的作用<sup>[24-25]</sup>。本研究根据图 5 的设计流程, 在 2.1.1 与 2.1.2 节中选定的三角棱镜和闪耀光栅参数条件下, 根据棱镜的全反射特性计算出 PG 组合结构波长范围内最小入射角为 39.71°, 经过优化迭代, 从满足条件的解中选取最小入射角 48° 作为分光系统的入射角。根据(14)式, 对光栅在不同偏转角  $\epsilon$  下的色散力进行分析, 结果如图 6 所示, 光谱色散力  $R$  随着偏转角的增加而上升, 达到一个极值后迅速下降。可见, 在确定分光系统的入射角的条件下, 这种 PG 组合系统会有一个最佳的光栅入射角, 在此入射角下光谱谱宽足够宽, 光谱线性分布良好。随着光栅线度的增加, 最佳入射角往左移。

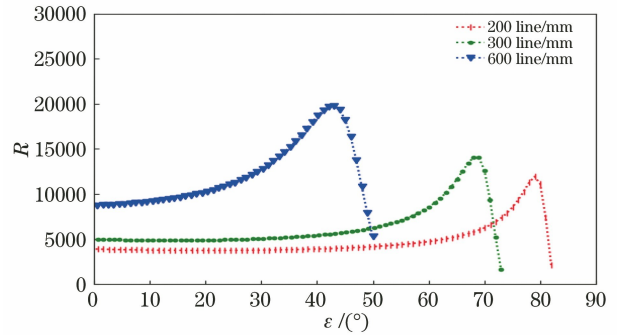


图 6 不同线性光栅对应不同光栅入射角的光谱色散力

Fig. 6 Spectral dispersion ability of different linear gratings corresponding to different grating incident angles

### 3 系统参数的仿真分析

#### 3.1 系统结构参数的确定

典型的成像光谱仪由望远物镜、准直物镜、分光

系统以及成像系统构成<sup>[26-27]</sup>。本研究在工作波段为 0.4~1 μm,光谱仪系统数值孔径为 0.18,有效孔径为 25 mm,光谱分辨率优于 2 nm,光谱最大与最小色散率差值小于 0.6 mrad/nm,系统长度小于 15 cm 的指标下进行设计。采用常规双胶合消色差

透镜作为望远物镜和准直物镜,在望远物镜和准直物镜中间放置孔径为 50 μm 的孔径光阑,结合三棱镜和闪耀光栅参数作为分光系统,最后使用凹面反射镜作为成像系统。系统结构如图 7 所示,光谱仪系统的设计参数见表 1。

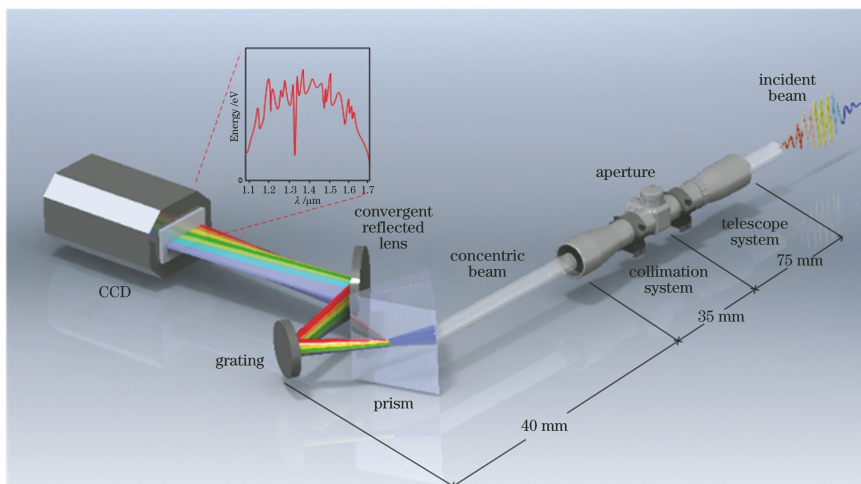


图 7 成像系统

Fig. 7 Imaging system

表 1 成像光谱仪设计指标参数

Table 1 Design index parameters of imaging spectrometer

Parameter	Value
Spectral band /μm	0.4-1.0
Numerical aperture	0.18
Resolution /nm	≤2
$\chi_{\max}(\lambda) - \chi_{\min}(\lambda) / (\text{mrad} \cdot \text{nm}^{-1})$	≤0.6
System length /cm	≤15

### 3.2 仿真分析

利用 ZEMAX 对理论模型进行仿真模拟以证明模型的可靠性。仿真结果如图 8 所示。

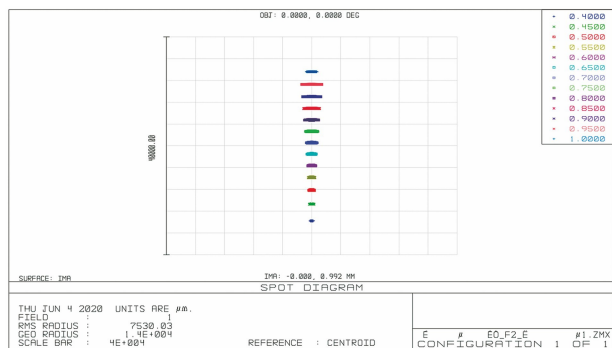


图 8 点阵列图

Fig. 8 Spot diagram

由图 8 可以看出波长两端相对疏松,中间光线分布相对密集,但光谱整体分布相对均匀。图 9 为中心

视场的点阵列图,图 9 中(a)、(b)、(c)分别给出了 400,700,1000 nm 波长附近的成像情况。根据瑞利准则,能分辨开的两点间的最小间隔等于艾里斑的半径<sup>[28]</sup>。由图 9 中可以看出系统分辨率优于 2.5 nm。

图 10(a)~(c)分别为文献[9]、文献[29]、本文的系统光谱色散分布点阵列图,光谱总长 600 nm,图上每点代表的光谱间距为 50 nm。从图 10 可知,本系统光谱线性度良好,光谱分布更均匀。

### 4 实验分析

实验按照理论计算得到的最优结果进行结构搭建,系统采用武汉安扬公司生产的连续谱激光器(型号为 SC-PRO)作为光源,然后将光源出射的光线输入至单色仪(型号为 AOTF-PRO),经过单色仪出射的光变成单色光入射到成像系统上,将连接光谱分析仪(型号为 QE-PRO)的光纤探头放置在微动移动平台上,调节微动移动平台,使得光谱分析仪能够对在系统像元面上的光线进行接收,实验测试如图 11 所示。其中:激光器波长范围为 400~2400 nm;单色仪波长覆盖范围为 420~1430 nm,出射光线的线宽优于 1.2 nm;光谱分析仪的探测波段为 400~780 nm;微动移动平台的精度为 10 μm。由于受单色仪和光谱分析仪的工作波段范围的限制,本次实验选择 420~780 nm 的波段对光谱分辨率和光谱分布进行测量。

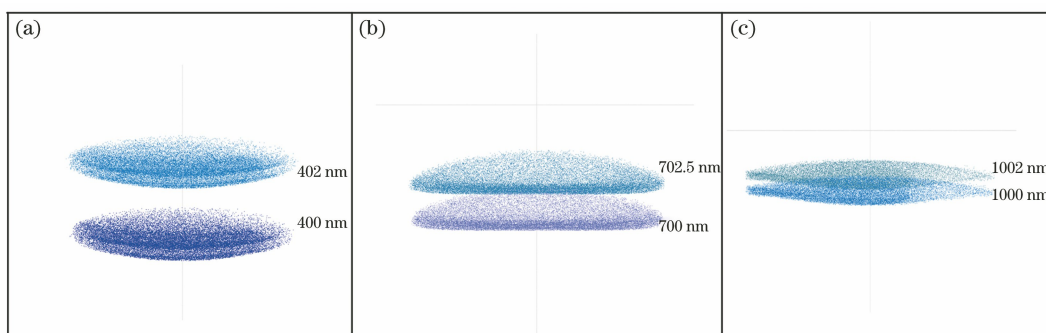


图 9 分辨率仿真验证结果。(a) 400 nm 与 402 nm 的光谱分布;(b) 700 nm 与 702.5 nm 的光谱分布;  
(c) 1000 nm 与 1002 nm 的光谱分布

Fig. 9 Resolution simulation verification results. (a) Spectral distribution of 400 nm and 402 nm; (b) spectral distribution of 700 nm and 702.5 nm; (c) spectral distribution of 1000 nm and 1002 nm

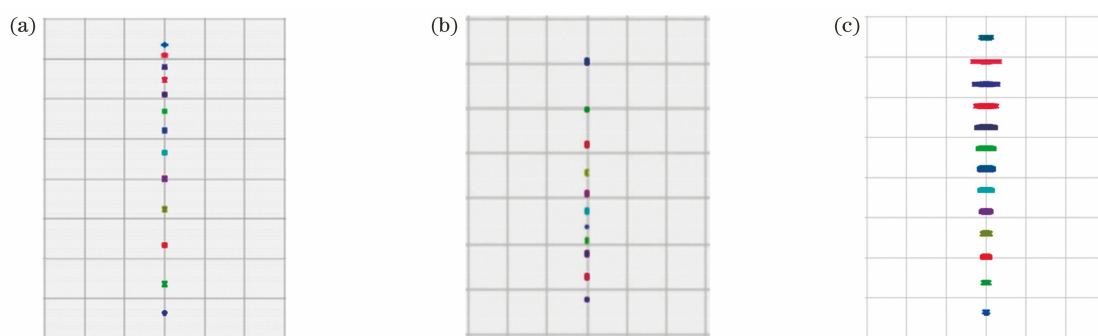


图 10 光谱色散分布对比图。(a)文献[9]的仿真结果图;(b)文献[29]的仿真结果图;(c)本文的仿真结果图

Fig. 10 Comparison of spectral dispersion distribution. (a) In Ref. [9]; (b) in Ref. [29]; (c) ours

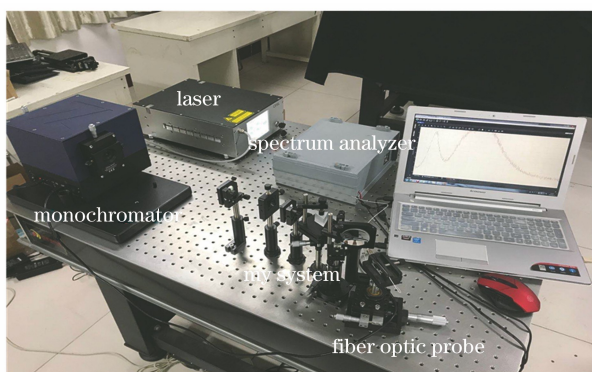


图 11 实验测试环境

Fig. 11 Experimental test environment

实验分别对 420, 600, 780 nm 三个波长进行分辨率测试。实验结果如图 12 所示。本实验通过控制单色仪, 输出指定单色光, 最大波峰对应的波长代表单色光的中心波长, 图中用虚竖线标出, 每个图的右上角标注了对应的中心波长值。造成图 12(a) 中能量较低的原因是激光器在 400~420 nm 波段内具有较小的输出功率, 而图 12(c) 中能量较低是因为光谱分析仪在 780 nm 处具有较小的光谱吸收率。根据瑞利准则<sup>[26]</sup>, 从图 12 可知光谱分辨率均优于 2 nm。

表 2 列举了近五年来一些作者所设计的成像光谱仪分辨率的结果, Feng 等<sup>[9]</sup>设计了一款曲面棱镜来改进光谱色散的线性度, 在 400~1000 nm 的光谱范围内仿真结果实现了 4.9~7.1 nm 分辨率; 刘兵等<sup>[29]</sup>采用三棱镜作为分光系统, 在 400~1000 nm 的光谱范围内仿真实现了 5 nm 的分辨率; Pei 等<sup>[8]</sup>设计了一款曲面棱镜结构, 实现了在 400~1000 nm 波段 4.3 nm 的分辨率; Liu 等<sup>[18]</sup>基于棱镜-光栅组合的微透镜阵列设计了一款集成视野的光谱仪, 在 400~800 nm 的光谱范围内仿真实现了优于 1 nm 的分辨率。相较于以上作者的工作, 依据本文方法对分光系统结构参数进行优化设

表 2 分辨率对比结果

Table 2 Resolution comparison results

Method	Spectral resolution /nm
In Ref. [9]	4.9-7.1
In Ref. [29]	5
In Ref. [8]	4.3
In Ref. [18]	<1
Ours	<2

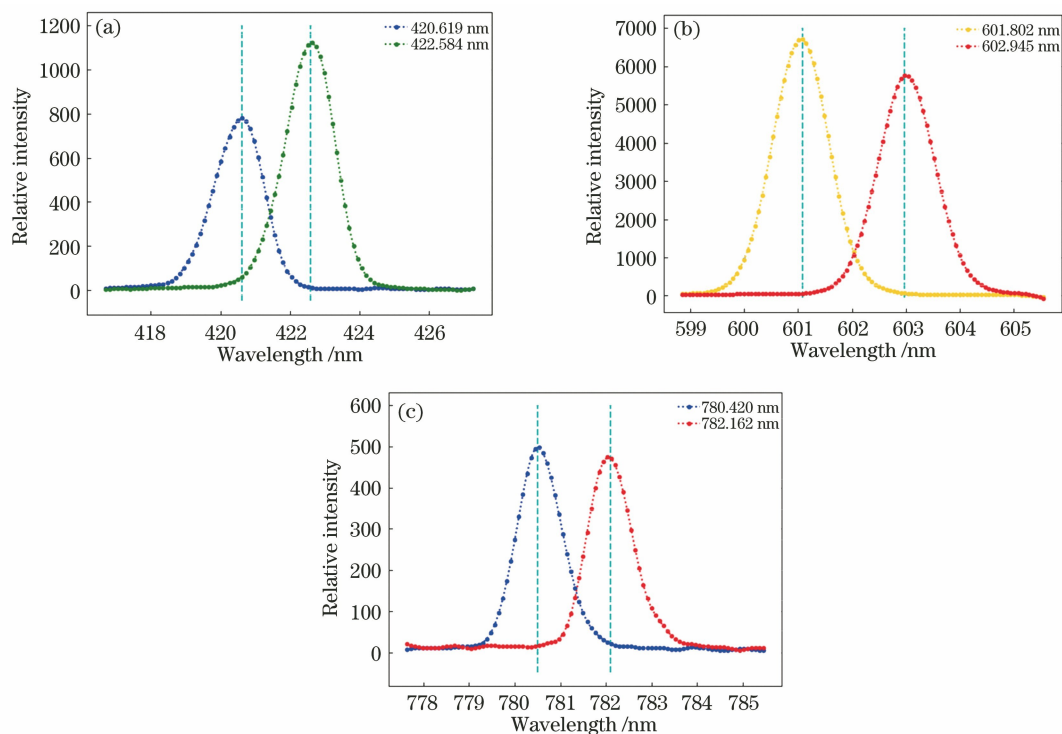


图 12 光谱分辨率实验结果图。(a) 420 nm 附近;(b) 600 nm 附近;(c) 780 nm 附近

Fig. 12 Experiment results of sresolution. (a) Near 420 nm; (b) near 600 nm; (c) near 780 nm

计,在 400~1000 nm 波段仿真实现了光谱分辨率优于 2.5 nm 的系统,最后通过实验表明,系统在 420~700 nm 波段光谱分辨率整体优于 2 nm。

Liu 等<sup>[18]</sup>采用 PG 组合和透镜阵列的混合模式进行多孔径合成,这种设计能够提高光谱分辨率的精度,可在更高分辨率要求的背景下应用,但也存在着结构复杂的问题。相较于 Liu 等<sup>[18]</sup>设计的系统,本系统的光谱分辨率略差,这是因为本文仅仅采用了市面上常规的双胶合消色差透镜作为望远物镜和准直物镜。该方法旨在提高光谱线性度,尽管采用了常规的标准件进行设计,但实际得出的结果仍可验证该方法的有效性。本系统在满足一定核心指标的条件下,具有结构简单、调试便捷的特点。

在 420~780 nm 波段,实验过程中通过控制单色仪以每 20 nm 的步长输出单色波长,在像面上通过调节微动移动平台来记录波长峰值的位置,每记录一次数据,都将螺旋测微仪归零,重复测量 3 组,然后对 3 组数据取平均值,结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,在 420~460 nm 波段,光谱分布相对稀疏,在 460~780 nm 波段,光谱分布线性度良好,实验结果中的最大与最小的光谱色散率的差为 0.604 mrad/nm。

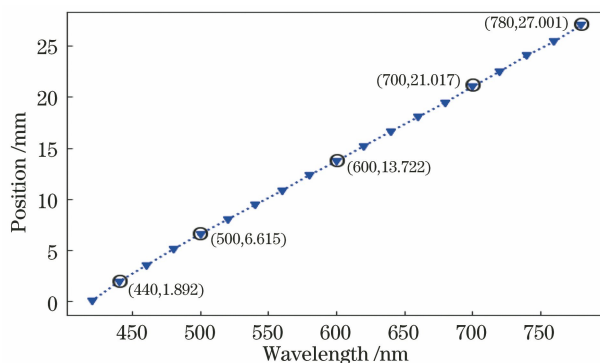


图 13 光谱分布实验结果图

Fig. 13 Experiment results of spectral distribution

## 5 结 论

棱镜或者光栅作为分光元件可以实现成像光谱仪结构紧凑、装调快捷等要求,但是这样的结构具有色散不均匀、谱线易重叠等问题,现有的 PG 组合结构的设计侧重于光栅结构、棱镜顶角、棱镜形状等来提高光谱分辨率和光谱线性度,而这样的设计存在结构复杂、调试困难的缺点。针对上述问题,本文提出了 PG 组合最优结构参数的设计方法,旨在提高光谱线性度,进而提高光谱分辨率。最后,经过实验证明,本文提出的 PG 组合分光结构参数的双目标优化方法能够提高光谱线性度,实验论证了该方法的可行性,这为 PG 组合从空间角度提供了一种灵

活、简单的结构设计方法。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Z M, Gao M G, Liu W Q, et al. Passive remote measurement of flame infrared image by a FTIR scanning imaging system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(11): 2520-2522.  
刘志明, 高闽光, 刘文清, 等. 傅里叶变换红外光谱仪扫描成像系统被动遥测火焰红外图像[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(11): 2520-2522.
- [2] He C, Liu K Z, Shu L F, et al. The diagnostic methods for resurgences of smoldering fire in the forests by infrared thermal imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 326-332.  
何诚, 刘柯珍, 舒立福, 等. 基于红外热成像的林地余火死灰复燃点诊断方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 326-332.
- [3] Yang T P, Si F Q, Ping W, et al. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0901001.  
杨太平, 司福祺, Ping Wang, 等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0901001.
- [4] Feng X, Han C P, Zou Y P, et al. On-orbit spectral calibration algorithm of infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0630002.  
冯绚, 韩昌佩, 邹曜璞, 等. 红外傅里叶光谱仪在轨光谱定标算法研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0630002.
- [5] Bhatt M, Mall U, Wöhler C, et al. A comparative study of iron abundance estimation methods: application to the western nearside of the Moon[J]. *Icarus*, 2015, 248: 72-88.
- [6] Kampe T U. The compact hyperspectral prism spectrometer: advanced imaging spectrometer for sustainable land imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10767: 7076708.
- [7] Chen Y, Wang Y M. Optical design of prism spectrometer system with a small incident angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0922002.  
陈杨, 王跃明. 小入射角棱镜成像光谱仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0922002.
- [8] Pei L L, Xiangli B, Lv Q, et al. Optical system design of the Dyson imaging spectrometer based on the Fery prism [J]. *Optical Review*, 2016, 23(4): 695-702.
- [9] Feng L, Zhou J S, Xiangli B, et al. Design of a nonlinearity-corrected spectrometer based on curved prism[J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 239-245.
- [10] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Design of a SWIR offner imaging spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7): 2267-2272.  
郑志忠, 杨忠, 修连存, 等. 一种 Offner 型小型短波红外成像光谱仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(7): 2267-2272.
- [11] Hsu H Y, Lan Y H, Huang C S. A gradient grating period guided-mode resonance spectrometer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-9.
- [12] Meng X, Yang Z M, Du J Y, et al. Double-pass grating imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011202.
- [13] Pang Y J, Yao M L, Liu S. Grating multiplexing structure based high-resolution infrared spectrometer [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103148.
- [14] Pang Y J, Zhang Y X, Yang H D, et al. Compact high-resolution spectrometer using two plane gratings with triple dispersion [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6382-6391.
- [15] Jiang A Q, Zang K Y, Tu H T, et al. Ultrahigh-resolution spectrometer based on 19 integrated gratings [J]. *Scientific Reports*, 9(1): 10211.
- [16] McCubbin T K, Grosso R P, Mangus J D. A high-resolution grating-prism spectrometer for the infrared [J]. *Applied Optics*, 1962, 1(4): 431-436.
- [17] Nagayama T, Kurita M, Kino M, et al. Design and status of an optical and near-infrared spectrometer for the IRSF 1.4 m Telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8446: 844671.
- [18] Liu J N, Chen J J, Liu J L, et al. Optical design of a prism-grating-based lenslet array integral field spectrometer [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19456-19469.
- [19] Chen J J, Yang J, Liu J N, et al. Optical design of a short-wave infrared prism-grating imaging spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): F8-F14.
- [20] Chen H F, Gong Y, Luo C, et al. Design of prism-grating imaging spectrometer with eliminating spectral line curvature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922004.  
陈洪福, 巩岩, 骆聪, 等. 消谱线弯曲棱镜-光栅型成像光谱仪设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0922004.
- [21] 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.
- [22] Yang Q H, Wang W Q. Compact orthogonal-dispersion device using a prism and a transmission grating[J]. Journal of the European Optical Society, 2018, 14(1): 1-7.
- [23] Yuan L Y, Xie J N, He Z P, et al. Optical design and evaluation of airborne prism-grating imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17686-17700.
- [24] Zhou Y, Wen Z Y, Yang T Y, et al. Modeling and simulation of blazed grating based on MEMS scanning micro-mirror for NIR micro-spectrometer [J]. Proceedings of SPIE, 9795: 97952P.
- [25] Fernández R, Gallego S, Márquez A, et al. Blazed gratings recorded in absorbent photopolymers [J]. Materials, 2016, 9(3): 195.
- [26] Cao D S, Shi Z H, Lin G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1403-1409.
- 曹佃生, 石振华, 林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1403-1409.
- [27] Zhu S B, Ji Y Q, Gong G B, et al. Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2270-2273.
- 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.
- [28] Takahashi N, Kikuchi H. Rayleigh criterion [J]. Annals of Business Administrative Science, 2017, 16(5): 203-213.
- [29] Liu B, Liu Y, Zhang X L, et al. Study on coaxial linear dispersion triplet prisms of wide spectral imaging spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1543-1548.
- 刘兵, 刘英, 张晓龙, 等. 宽谱段共光轴线色散成像光谱仪三棱镜分光系统设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1543-1548.