

引用格式: 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):1212005

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):1212005

校谱线弯曲的共轴 PGP 成像光谱仪光学系统设计

樊星皓^{1,2,3}, 刘春雨^{1,3}, 徐明林^{1,3}, 刘帅^{1,3}, 赵英明^{1,2,3}, 崔亚珍^{1,2,3}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 长春 130033)

摘 要:针对共轴棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪的谱线弯曲难以校正的问题,提出了使用弯曲狭缝配合准直镜、聚焦镜畸变校正谱线弯曲的方法。该方法在保留棱镜-光栅-棱镜高衍射效率和光路共轴等优点的基础上,能够校正仪器的谱线弯曲和光谱弯曲。为了提高该方法的通用性,考虑狭缝、镜头畸变、光栅、棱镜等参数,建立棱镜-光栅-棱镜矢量色散模型,给出校正光谱弯曲和谱线弯曲的目标函数,并利用遗传算法对目标函数进行优化,快速计算不同狭缝长度时狭缝形状和镜头参数的最佳组合。用该方法的计算结果设计了一个狭缝长度为 22 mm,工作波段为 400~800 nm,光谱分辨率为 2 nm, F 数为 3.5 的弯曲狭缝 PGP 成像光谱仪光学系统,该系统谱线弯曲小于 $1\ \mu\text{m}$,光谱弯曲小于 $0.7\ \mu\text{m}$,且满足成像质量要求。设计结果表明,用弯曲狭缝配合准直镜、聚焦镜畸变的方法能够有效校正谱线弯曲。

关键词:光谱学;校谱线弯曲;弯曲狭缝;棱镜-光栅-棱镜;成像光谱仪;遗传算法

中图分类号:O433.1;TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1212005

0 引言

成像光谱仪是一种能同时获得目标光谱信息、辐射信息和空间信息的光学遥感仪器,具有图谱合一的优点^[1-2]。因此,在地球资源普查、地面测绘、环境监测、医疗器械、自然灾害的检测与预警等方面有着重要的应用^[3-6]。

棱镜和光栅是成像光谱仪最常用的分光元件,但是棱镜型和光栅型成像光谱仪的光路为离轴系统,存在装调困难、稳定性不足等问题^[7-8]。基于棱镜-光栅-棱镜(Prism-Grating-Prism, PGP)组合色散元件的成像光谱仪拥有衍射效率高、光路共轴等优点,其组合色散元件由左右两块棱镜和中间的体相位全息光栅组合而成。两个棱镜的作用是抵消光栅的衍射角度,使得某一波长的出射光束与入射光束处于同一轴线,从而使 PGP 成像光谱仪整体上为方便安装的共轴结构。

AIKIO M 最早将 PGP 组合色散元件应用于机载成像光谱仪(Airborne Imaging Spectrometer for different Applications, AISA),并论述了 PGP 成像光谱仪的特点^[9-10]。RASMUS N J 指出了 PGP 成像光谱仪存在较大的、会影响光谱探测准确性的谱线弯曲,并提出采用电子标定方法校正谱线弯曲^[11]。国内的李哲^[12]使用了类似的标定方法校正了光谱仪的谱线弯曲。但是电子标定方法无法解决谱线弯曲造成的探测器使用效率下降的问题,也在一定程度上加大了图像处理的复杂性。

在设计上,中国科学院西安光学精密机械研究所、苏州大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等先后对 PGP 光谱成像仪进行研究和改进^[13-20]。2014 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51827806, 41974210, 62175236)

第一作者:樊星皓(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为先进光学系统的设计。Email: xinghao.fan@foxmail.com

导师(通讯作者):刘春雨(1982—),女,研究员,博士,主要研究方向为光学系统设计、光电系统总体设计等。Email: mmliucy@163.com

收稿日期:2021-11-30;录用日期:2022-02-16

<http://www.photon.ac.cn>

的张晓龙^[15]提出了引入离轴透镜的方法补偿校正谱线弯曲,但是该方法增加了光路的复杂性;杨增鹏^[13]和陈洪福^[16]利用棱镜和光栅的谱线弯曲方向相反的特性,采用棱镜-光栅(PG)的组合方式校正了谱线弯曲,但打破了PGP光路的共轴性。2021年,该机构的李伟^[19]使用球面反射镜配合PG结构降低了谱线弯曲,但同样打破了PGP光路的共轴性,增加了装调难度。同年,中国科学院国家空间科学中心的王志昆^[20]通过降低第一个棱镜的顶角配合狭缝离轴的方式在保证光路共轴性的同时,校正了谱线弯曲,但是该光谱仪的狭缝长度仅为9 mm,视场较小。为了实现大视场共轴PGP光谱仪谱线弯曲(smile)的校正,还需探索其他方法。

2020年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张嘉伦^[21]在offer光谱仪的设计中,为了克服长狭缝的谱线弯曲问题,使用了弯曲狭缝,取得了比较好的效果,但是并没有给出弯曲狭缝形状的计算方法。基于此,本文将论证采用弯曲狭缝的方式校正共轴PGP成像光谱仪中谱线弯曲问题的可行性,并拟给出共轴PGP成像光谱仪弯曲狭缝形状的一般计算方法。

本文首先建立了PGP矢量色散模型,分析成像光谱仪各个要素对谱线弯曲大小的影响。然后,根据分析结果,确定共轴型PGP分光元件的谱线弯曲特点,指出引入弯曲狭缝的必要性,并提出狭缝弯曲形状配合镜头畸变校正谱线弯曲的一般方法。最后,利用遗传算法快速确定狭缝弯曲形状和镜头畸变的最佳参数组合,并设计了一套光学系统验证该方法的可行性。

1 工作原理

PGP成像光谱仪结构如图1所示,由狭缝、准直镜、PGP组合色散元件、聚焦镜和探测器组成。望远物镜将来自目标的光线会聚在狭缝处,狭缝作为成像光谱仪的视场光阑,只允许落在狭缝内的光线进入PGP成像光谱仪,经狭缝入射的光线经过准直镜准直为平行光后进入PGP组合色散元件。不同波长的光线被PGP色散成为不同角度的平行光,最后通过聚焦镜会聚在探测器上形成光谱。

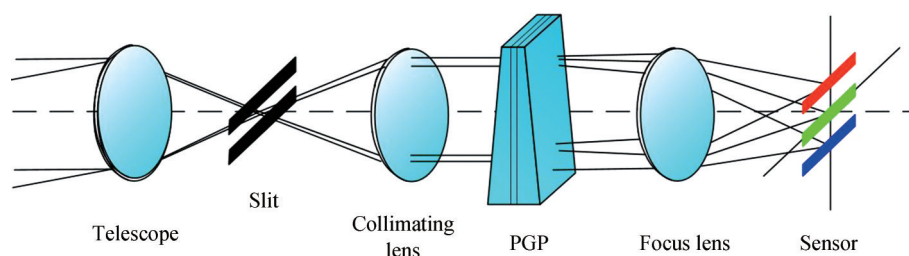


图1 PGP成像光谱仪的工作原理
Fig.1 The working principle of PGP imaging spectrometer

成像光谱仪的谱线弯曲(smile)被称为“微笑畸变”,是由主截面光束和非主截面光束之间的色散差异造成的^[20]。狭缝中心的光束在棱镜和光栅的主截面上入射,狭缝其他位置的光束则在非主截面上入射,故狭缝像会在光谱维方向产生形变,如图2所示。从图中可以看出,谱线弯曲会使探测器的同一行像素接收到多个通道的光谱能量,从而增加成像光谱仪光谱提取的难度;另外,探测器的左上角、右上角和下面中间部分

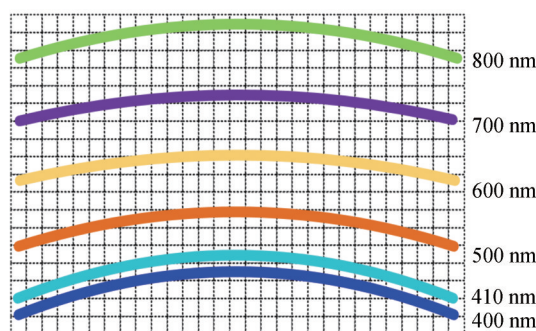


图2 弯曲的狭缝像在探测器上的成像示意图
Fig.2 Schematic image of the curved slit on the detector

像素无法被利用,会降低探测器的使用效率。

2 PGP 矢量色散模型

2.1 模型建立

光束在分光元件上的入射角度、棱镜的材料、棱镜的角度和光栅的刻线数等都对谱线弯曲有影响,为了定量分析各个因素对谱线弯曲的影响情况,探讨谱线弯曲的改善方法,需要建立基于PGP组合色散元件的矢量色散模型。

来自狭缝任意一点的光束经过准直镜准直后入射到PGP组合色散元件上的光路情况如图3所示,光束先后经过棱镜1折射、光栅衍射和棱镜2折射后出射。

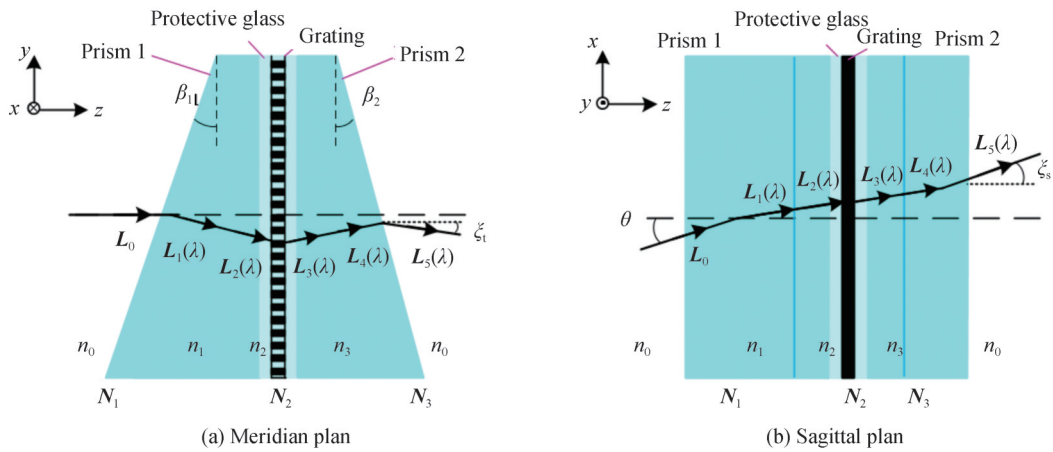


图3 PGP组合色散元件中的光路示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical path in PGP combined dispersive element

因为玻璃材料对不同波长 λ 的光的折射率有所区别,所以不同波长的光经棱镜折射后光矢量方向也会有所差别,而经光栅衍射后这种方向上的差别还会进一步增大。为了方便叙述,将经过某一界面折射或者衍射后的波长为 λ 的光矢量统一表示为 $L_i(\lambda)$ 。图3中 L_0 为来自狭缝的入射光束的光矢量,为方便研究,取 L_0 为单位向量,向量方向由光束的入射角度 θ 决定,可以表示为

$$L_0 = (0, -\sin \theta, \cos \theta) \quad (1)$$

光矢量 L_0 入射到PGP组合色散元件上,先后在各个界面发生折射,根据矢量折射定律,折射前的光矢量 $L_i(\lambda)$ 与折射后的光矢量 $L_{i+1}(\lambda)$ 的关系为^[13]

$$\begin{cases} n_{i+1}L_{i+1}(\lambda) - n_iL_i(\lambda) = TN_i \\ T = n_{i+1}\cos\alpha'_i - n_i\cos\alpha_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, n_i 和 n_{i+1} 分别为光束在第 i 个界面处的入射介质和出射介质的折射率, N_i 为第 i 个界面的法向量, α_i 和 α'_i 分别为光束在界面 i 处的入射角和折射角。其中, N_i 和棱镜的角度 β_i 有关,而 α_i 则同时受 $L_i(\lambda)$ 和 N_i 的影响,因此, N_i 和 α_i 可以表示为

$$N_i = (0, -\sin \beta_i, \cos \beta_i) \quad (3)$$

$$\alpha_i = \arccos(L_i(\lambda), N_i) \quad (4)$$

光束在经过光栅界面后的传播方向主要由光栅的衍射特性决定,任意空间角度的入射光线在平面光栅上衍射的普适光栅方程为^[13]

$$\begin{cases} \sin \mu_k \cos \phi_k = \sin \mu_j \cos \phi_j + m \frac{\lambda}{d_G} \\ \sin \phi_k = \sin \phi_j \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ_j 为光线的入射角, μ_k 为光线的衍射角,均为光矢量在子午面内的投影与光栅法线的夹角; ϕ_j 为光线的入射方位角, ϕ_k 为光线的衍射方位角,均为光矢量与主截面的夹角; λ 为入射波长, d_G 为光栅常数, m 为衍射

级次。

采用光栅的+1级衍射,光束经光栅衍射后继续向前传播,最终不同波长的光束沿光矢量 $L_5(\lambda)$ 所表示的方向出射。联立式(1)~(5),可以得到出射光矢量 $L_5(\lambda)$ 是 $(\lambda, \beta_1, \beta_2, d_G, \theta, n_1, n_2, n_3)$ 的函数。为方便描述,令 $L_5(\lambda)$ 在子午面和弧矢面的投影角度分别为 ξ_t 和 ξ_s ,如图3所示。

为满足PGP成像光谱仪的光路共轴特性,需控制参数,以保持氦氖激光器的光(632.8 nm)能直视通过光学系统,方便装调过程。即参数 $(\beta_1, \beta_2, d_G, n_1, n_2, n_3)$ 需要满足

$$\xi_t(\theta_0)_{\lambda=632.8\text{nm}} = 0 \quad (6)$$

式中, θ_0 为狭缝中心的光束在PGP上的入射角度,即 $\theta=0$ 时,波长为632.8 nm的光束经过PGP组合色散元件后传播方向不发生改变。

2.2 谱线弯曲与目标函数

谱线弯曲表现为狭缝像在探测器上的弯曲现象,其弯曲量的大小可以用狭缝端点的光束和狭缝中心的光束在探测器光谱维方向上交点的差值来表示^[16]。假设准直镜和聚焦镜的焦距均为 f' ,则在该模型中,不同波长 λ 的谱线弯曲大小可以表征为

$$\text{Smile}(\lambda) = f' \cdot (\xi_t(\theta_{\max}) - \xi_t(\theta_0))_{\lambda} \quad (7)$$

式中, θ_{\max} 为来自狭缝边缘的光束在PGP上的入射角度。

因为出射光矢量 $L_5(\lambda)$ 是 $(\lambda, \beta_1, \beta_2, d_G, \theta, n_1, n_2, n_3)$ 的函数,所以可以推得式(7)中 $\text{Smile}(\lambda)$ 是 $(f', \lambda, \beta_1, \beta_2, d_G, \theta_{\max}, n_1, n_2, n_3)$ 的函数。为了简化分析过程,忽略影响微弱的折射率 n_i ,着重研究 $\lambda, \beta_1, \beta_2, d_G$ 和 θ_{\max} 对谱线弯曲的影响,且为方便计算,棱镜和保护玻璃均取为H-K9L。

经分析可知,在满足式(6)共轴条件时, β_1, β_2, d_G 的任意组合均不能满足消除谱线弯曲的条件。图4给出了光栅刻线数在280 lp/mm、聚焦镜焦距为80 mm时的分析实例,展示了该参数下中心波长(600 nm)的光在不同棱镜角度 β_1, β_2 组合下的谱线弯曲情况。从图中可得:1)当棱镜角度和光栅常数满足一定条件时,能够消除中心波长的谱线弯曲,如图中蓝色虚线所示;2)消除中心波长谱线弯曲时 β_1, β_2 的集合和满足光路共轴条件时的 β_1, β_2 没有交集,即满足式(6)共轴条件时PGP成像光谱仪在中心波长处不可避免地具有较大的谱线弯曲,如图中红色实线所示;3)光线在PGP上的入射角度对谱线弯曲影响较大,减小光线入射角度 θ_{\max} 虽然可以在一定程度上降低谱线弯曲的大小,但同样无法消除谱线弯曲。

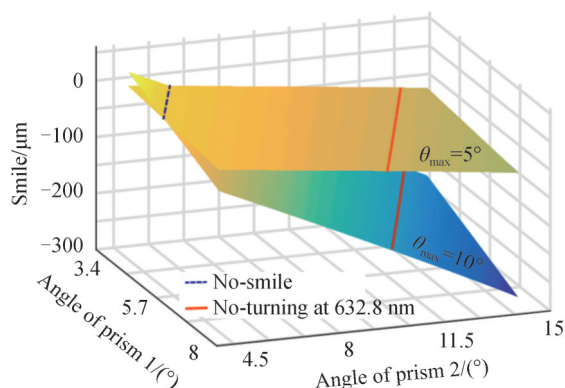


图4 光栅刻线数为280 lp/mm时的谱线弯曲
Fig.4 The smile when grating line is 280 lp/mm

因此,可以认为中心波长的谱线弯曲是共轴PGP成像光谱仪的固有问题,无法通过改变 β_1, β_2, d_G 组合的方式校正,同时,也无法通过改变入射光线的角度 θ 来校正该谱线弯曲。

为了进一步研究其他波长的谱线弯曲情况,令狭缝长度为22 mm,准直镜和聚焦镜的焦距均为80 mm,通过PGP矢量色散模型对400~800 nm波长的狭缝像进行分析,结果如图5、6所示。其中,图6给出了狭缝像在探测器上的成像情况,并用弯曲量 $\Delta y(\lambda, l)$ 代替了 $\text{Smile}(\lambda)$,从而更好地描述狭缝所有位置的谱线弯曲情况。在分析时,取棱镜1角度为9.27°,棱镜2角度为10.26°,此时满足光栅的布拉格衍射条件,衍射效率

最高^[12]。

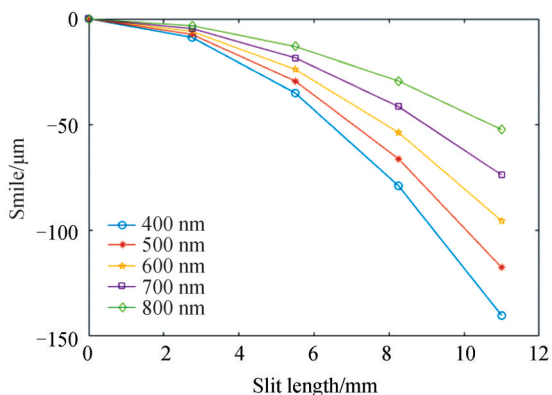


图5 400~800 nm工作波段的谱线弯曲情况
Fig.5 The smile from 400~800 nm

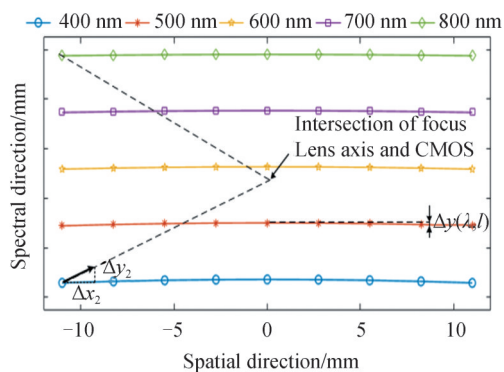


图6 探测器上的狭缝像
Fig.6 The slit image on the detector

从图5可以看出,PGP成像光谱仪的狭缝像在400~800 nm工作波段内均弯向短波方向,且波长越短,弯曲量 $\Delta y(\lambda, l)$ 越大。从图6可以看出,当狭缝像均弯向短波方向时,较难处理,例如通过聚焦镜的畸变难以校正所有波长的谱线弯曲。因此,拟用弯曲狭缝来改变不同波长狭缝像的弯曲情况,从而改善狭缝像在工作波段内均弯向短波方向的问题,为谱线弯曲的校正创造条件。弯曲狭缝的形状可由狭缝在 $0.25L$ 、 $0.5L$ 、 $0.75L$ 和 L 处的弯曲量 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 表示,如图7所示。

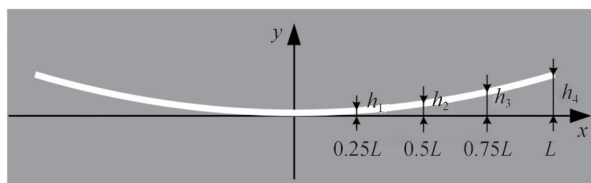


图7 弯曲狭缝示意图
Fig.7 Schematic diagram of curved slit

从图5和6可以知,为了校正谱线弯曲,狭缝应弯向长波方向,并且弯曲狭缝的形状选择也较为关键。如果只根据PGP成像光谱仪的固有谱线弯曲大小来设置狭缝形状,则谱线弯曲的校正效果并不理想。例如,图5中600 nm波长(中心波长)处的谱线弯曲可以拟合为半径为198 mm的圆弧,如果用此处的谱线弯曲来决定狭缝形状,则狭缝应当是一个半径为198 mm、与图7中x轴相切、弯向长波方向的圆弧。此时,光谱仪的谱线弯曲情况如图8所示。

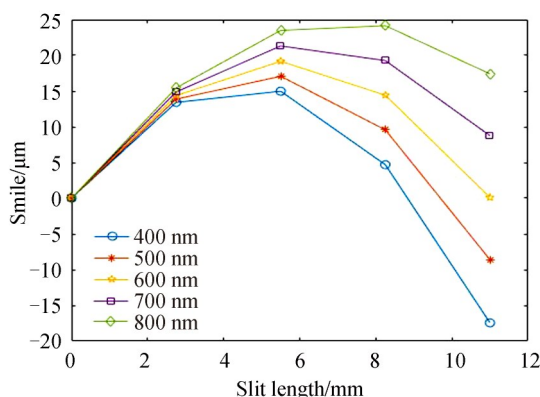


图8 圆弧形狭缝在400~800 nm工作波段的谱线弯曲情况
Fig.8 The smile of the circular slit from 400 nm to 800 nm

从图中可以看出,400~800 nm 的谱线弯曲情况有所缓解,其中 600 nm 狭缝边缘处的谱线弯曲基本得到了校正,而其他波长相对于 600 nm 波长有较大的谱线弯曲剩余。另一方面,0.25L、0.5L、0.75L 处每个波段均有较大的谱线弯曲剩余,说明该狭缝形状并非最优解。

为了进一步校正剩余的谱线弯曲,需要适当调整弯曲狭缝的形状,并改变准直镜、聚焦镜的畸变等光学参数,还要考虑镜头畸变带来的光谱弯曲(keystone)等问题。如果直接使用 Zemax 软件对系统进行校正谱线弯曲的优化,则容易陷入局部极小值,难以实现最优解。另外,Zemax 软件不容易对狭缝形状进行直接优化,需要在优化时根据经验手动调节狭缝的形状,因此成像光谱仪光学系统的优化过程可能需要较多时间,并且要求工作人员有较丰富的设计经验。

为了避免在设计时陷入局部极小值,并开发一种校正谱线弯曲的普适性方法,拟用遗传算法来快速确定狭缝弯曲形状和镜头畸变的最佳参数组合,并将该最佳参数组合作为初始结构输入到 Zemax 软件中进行设计和验证。

2.3 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物进化过程的智能算法。它适用于多维变量的优化过程,具有良好的全局搜索能力^[22]。

使用遗传算法首先要建立目标函数,将实际问题转换为可以量化表示的数学表达式。在对校正谱线弯曲的共轴 PGP 成像光谱仪的初始结构选择时,需要着重注意的是狭缝形状和镜头畸变等参数对谱线弯曲和光谱弯曲的影响。其中谱线弯曲是光谱在光谱维方向的形变,而光谱弯曲是光谱在空间维方向的形变,因此,在建立目标函数时,应尽可能使光谱在光谱维和空间维的形变均为零。

拟采用弯曲狭缝形状和镜头的畸变相互配合的方式来寻求一种谱线弯曲的校正,校正思路如图 9 所示。其中,狭缝形状、准直镜畸变、聚焦镜畸变相互影响,在目标函数建立时需要对这些参量进行耦合分析。

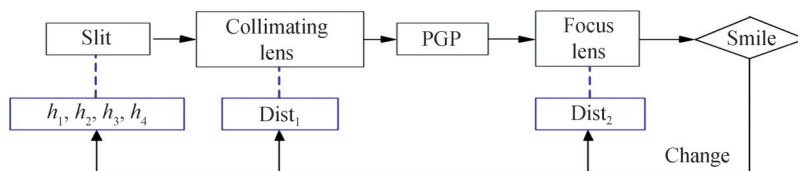


图9 校正谱线弯曲成像光谱仪的设计流程

Fig.9 Flow chart of the design of the eliminate smile imaging spectrometer

聚焦镜的畸变 $Dist_2$ 会使狭缝像在空间维产生 Δx_2 的位移,在光谱维产生 Δy_2 的位移,如图 5 所示。而准直镜的畸变 $Dist_1$ 会使狭缝像在空间维产生 Δx_1 的位移,在光谱维产生的位移趋近于零,可忽略不计。调整 $Dist_1$ 和 $Dist_2$ 的大小使 $\Delta x_1 + \Delta x_2 = 0$,则准直镜和聚焦镜的组合只影响狭缝像的弯曲量 $\Delta y(\lambda, l)$,而不影响狭缝像在空间维的长度。因此,波长为 λ 的狭缝像在狭缝长度为 l 处的弯曲量 $\Delta y(\lambda, l)$ 可以表示为

$$\Delta y(\lambda, l) = \Delta y(\lambda, h, Dist_2) \quad (8)$$

而波长为 λ 的狭缝像相比于狭缝在空间维上的偏移量 Δx 可以表示为

$$\Delta x(\lambda) = \left| \Delta x_1(\lambda, Dist_1) + \Delta x_2(\lambda, Dist_2) \right| \quad (9)$$

当 $\Delta x(\lambda) = 0$ 时,狭缝像在空间维没有形变,即没有光谱弯曲。

经过上述分析,谱线弯曲的校正过程需要综合调节弯曲狭缝的形状 h_1, h_2, h_3, h_4 和镜头的畸变 $Dist_1, Dist_2$,且谱线弯曲的大小与波长 λ 紧密相关。选取 400 nm、500 nm、600 nm、700 nm 和 800 nm 共 5 个波长进行分析,考察其狭缝像的弯曲情况。因此,目标函数可以表示为

$$\begin{aligned} F_m &= F_m(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, h_1, h_2, h_3, h_4, Dist_1, Dist_2) \\ &= \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 \omega_{ij} \Delta y(\lambda_i, h_j, Dist_2) + \sum_{k=1}^5 \omega_k \left| \Delta x_1(\lambda_k, Dist_1) + \Delta x_2(\lambda_k, Dist_2) \right| \end{aligned} \quad (10)$$

式中, F_m 为 PGP 成像光谱仪狭缝像弯曲情况的综合反映,其值越小表示系统谱线弯曲越小; ω_{ij} 与 ω_k 为相应项的权重。因此,通过建立目标函数可以将寻找狭缝形状和镜头畸变的最佳组合问题转化为寻找目标函数 F_m 的最优解问题。

用遗传算法对目标函数 F_m 进行优化,具体过程为:

1)编码和初始化种群。首先,将参数 $h_1, h_2, h_3, h_4, Dist_1, Dist_2$ 在一定范围内随机取值,并组成一个编码串,每个编码串代表一个潜在解。其中,参数被称为基因,由这6个参数组成的编码串被称为染色体。然后,随机产生多个染色体。可以认为每个个体携带一个染色体,而所有个体组成初始种群 N 。

2)计算适应度值和自然选择。首先,计算每条染色体的计算适应度值,用来评价每个个体的优劣。在本算法中,令适应度函数 fit 满足

$$fit = F_m^{-1} \quad (11)$$

目标函数值越小,个体的适应度值越大。然后,使用转盘法对所有个体进行选择。转盘法的选择是一种概率选择,评分高的个体被选中的概率更高,为了避免良好基因被排除,评分低的个体也有一定机会入选。

3)交叉与变异。被选中个体所携带的染色体按一定的概率进行交配,即染色体上的对应基因按一定的概率进行交换。然后,某些个体的基因按照设定的概率进行变异,产生子代染色体。之后携带子代染色体的个体组成新的种群,并按照相同的方式产生下一代种群。

4)终止条件和输出。终止条件通常为算法所设定的最大进化代数或者适应度函数值是否若干代没有变化。若不满足终止条件,则返回第2)步;若满足条件则输出参数。整个过程的流程如图10所示。

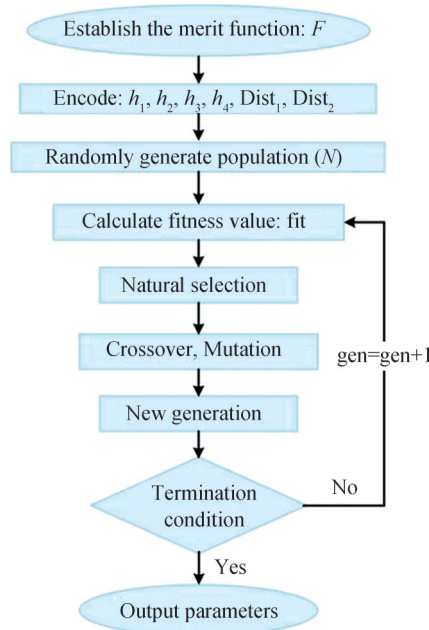


图10 遗传算法的流程

Fig.10 Flow chart of genetic algorithm

令式(10)中的 w_{ij} 与 w_k 均为5,迭代优化50代,优化后的几种参数组合以及它们的适应度值如表1所示。

表1 狭缝形状与镜组畸变的组合参数

Table 1 Combined parameters of slit shape and lens distortion

No.	Value of fit	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	$Dist_1$	$Dist_2$
1	6.13	0.005 6	0.022 1	0.049 9	0.089 1	-0.90%	-1.16%
2	4.84	0.006 2	0.022 5	0.049 2	0.089 5	-0.91%	-1.18%
3	2.95	0.005 3	0.021 2	0.049 6	0.088 7	-0.86%	-1.18%
4	2.82	0.005 5	0.021 9	0.049 4	0.089 0	-0.81%	-1.12%

注意到四种结构的适应度函数值虽有不同,但 $Dist_1$ 基本均为 $Dist_2$ 约0.75倍,这是准直镜和聚焦镜的视场大小不同所导致的。准直镜和聚焦镜的视场将在3.2节中详细分析。选取表1中的第一行作为校正谱线

弯曲 PGP 成像光谱仪狭缝形状和镜头畸变的初始结构, 计算了该初始结构的谱线弯曲情况, 如图 11 所示。

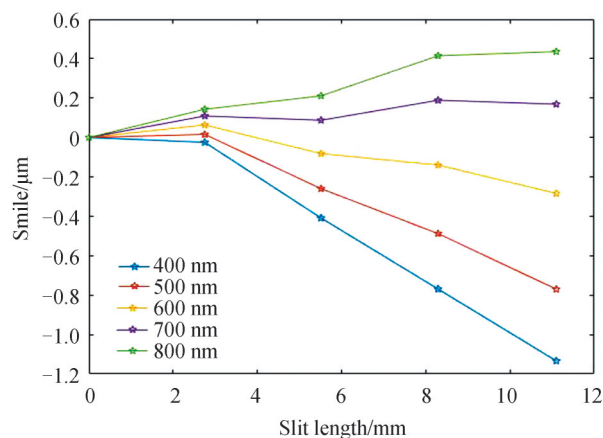


图 11 弯曲狭缝的 PGP 光谱仪的谱线弯曲

Fig.11 Smile of PGP spectrometers with the curved slit

通过比较图 5 和图 11 可知, 弯曲狭缝 PGP 成像光谱仪能大幅降低谱线弯曲, 通过弯曲狭缝和镜头畸变相互配合的方式, 能将 $-140 \mu\text{m}$ 大小的谱线弯曲量控制在 $1.2 \mu\text{m}$ 以内。

该校正共轴 PGP 成像光谱仪谱线弯曲的方法虽然引入了弯曲狭缝, 但是保证了光谱仪光路的共轴, 有利于仪器的紧凑化。并且, 该方法所使用的 PGP 矢量色散模型充分考虑了各种因素对谱线弯曲的影响, 能胜任任意光栅常数的 PGP 成像光谱仪谱线弯曲校正, 如表 2、表 3 所示。

表 2 光栅刻线数为 280 lp/mm 的组合参数

Table 2 Combined parameters when grating line is 280 lp/mm

Slit length/ mm	Smile with the straight slit / μm	Smile with the curved slit / μm	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	Dist ₁	Dist ₂
30	-260	-0.56	0.010 3	0.041 3	0.093 5	0.167 4	-1.82%	-2.02%
40	-462	-1.79	0.018 4	0.073 8	0.167 7	0.302 0	-3.32%	-3.45%
50	-721	-4.702	0.028 8	0.116 2	0.265 4	0.481 6	-5.33%	-5.30%

表 3 光栅刻线数为 250 lp/mm 的组合参数

Table 3 Combined parameters when grating line is 250 lp/mm

Slit length/ mm	Smile with the straight slit / μm	Smile with the curved slit / μm	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	Dist ₁	Dist ₂
30	-231	-0.41	0.009 2	0.036 9	0.083 5	0.149 6	-1.83%	-1.98%
40	-411	-1.63	0.016 4	0.066 0	0.150 0	0.270 2	-3.30%	-3.38%
50	-641	-4.126	0.025 7	0.103 9	0.237 3	0.430 7	-5.31%	-5.24%

保持光栅刻线数为 280 lp/mm, 准直镜、聚焦镜的焦距为 80 mm 不变, 改变狭缝长度。当狭缝长度增加到 30 mm、40 mm 时, 遗传算法也能给出合适的参数组合, 将谱线弯曲控制在 $1.79 \mu\text{m}$ 以内, 如表 2 所示。即弯曲狭缝配合镜头畸变校正 smile 的方法对不同长度的狭缝具有普适性。而表 3 则证明了该方法对于不同光栅常数的共轴 PGP 成像光谱仪具有普适性。

从表 2 和表 3 可以看出, 当狭缝长度增大到 50 mm 时, 虽然剩余 smile 变大, 但是仍能保持直狭缝大于 $600 \mu\text{m}$ 的谱线弯曲控制在 $4.7 \mu\text{m}$ 左右, 对超长狭缝共轴 PGP 光谱仪的设计具有一定的指导意义。

3 成像光谱仪的设计

3.1 设计指标

结合应用需求, 设计了一台工作波段为 400~800 nm 的共轴 PGP 成像光谱仪, 光栅基底材料和棱镜材

料均选用 H-K9L,狭缝长度定为 22 mm,棱镜 1 角度为 9.27°,棱镜 2 角度为 10.26°。该共轴 PGP 成像光谱仪的主要设计指标如表 4 所示。

表 4 成像光谱仪的主要设计指标

Table 4 The main indexes of imaging spectrometer

Parameter	Value
Wavelength/nm	400~800
F number	3.5
Slit length/mm	22
Slit width/ μm	11
Spectral resolution/nm	2
Channels	200
Pixel size/ μm	11

3.2 准直镜与聚焦镜

成像光谱仪的准直镜和聚焦镜均采用焦距为 80 mm、 F 数为 3.5 的镜头。准直镜和聚焦镜的视场分别受狭缝长度 l 和像面大小(空间维长度 $H \times$ 光谱维长度 V)的影响,即

$$\begin{cases} \omega_1 = \arctan\left(\frac{b/2}{f_z}\right) \\ \omega_2 = \arctan\left(\frac{\sqrt{H^2 + V^2}/2}{f_j}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中, ω_1 与 ω_2 分别为准直镜和聚焦镜的视场角, f_z 为准直镜的焦距, f_j 为聚焦镜的焦距, b 为狭缝长度; H 为像面空间维的长度,由于准直镜和聚焦镜的焦距相等,故数值上 $H = b = 22$ mm; V 为像面光谱维的长度,其数值大小由光线在光谱维的色散角度和聚焦镜的焦距共同决定。由 PGP 的矢量色散模型可知,400 nm 光束的光谱色散角度约为 -3.77° ,800 nm 光束的光谱色散角度约为 2.72° ,可以计算得到像面光谱维的长度 $V = 9.07$ mm。故由式(12)可知准直镜和聚焦镜的视场角分别为 $2\omega_1 = 15.7^\circ$ 和 $2\omega_2 = 20.2^\circ$ 。

在设计准直镜和聚焦镜时,应该使准直镜的最大畸变接近 -0.9% ,聚焦镜的最大畸变接近 -1.16% 。为确保 PGP 成像光谱仪与前端望远物镜达到光路匹配,要求成像光谱仪准直镜的光路为物方远心光路。在实际设计中,准直镜采用反向设计,即设计为像方远心光路,如图 12 所示。而聚焦镜无需使用像方远心结构,从而减小限制条件以方便系统像差的校正,其初步优化结果如图 13 所示。

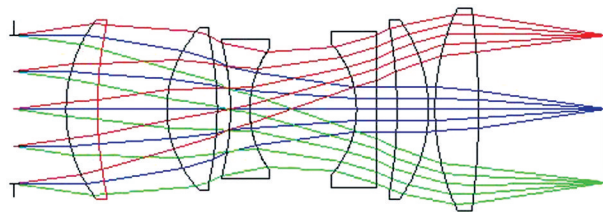


图 12 准直镜的光路结构

Fig.12 Optical path diagram of collimator lens

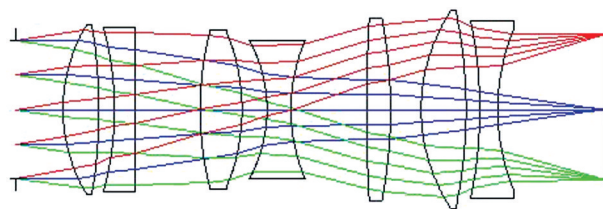


图 13 聚焦镜的光路结构

Fig.13 Optical structure diagram of the focusing lens

3.3 整体优化

各部分设计完成后,将准直镜、聚焦镜和 PGP 组合色散元件的结构参数输入 ZEMAX 中,在软件中进行光路拼接。拼接时注意使 PGP 元件恰好位于准直镜和聚焦镜的光阑位置,这样被 PGP 色散的不同波长的光束都恰好能充满聚焦镜的光瞳。

拼接完成后,在 ZEMAX 软件中根据 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 这 4 个弯曲狭缝的形状参数设置系统的视场。本系统所用的狭缝参数如表 1 中序号 1 所示,根据狭缝参数,该弯曲狭缝的形状可以拟合为式(13)所示的多项式。目前的加工工艺可以对这种 4 次项多项式表示的狭缝进行高精度加工,其实际加工效果如图 14 所示。

$$y = (-1.73 \times 10^{-7})x^4 + (7.49 \times 10^{-4})x^2 \quad (13)$$

在软件中完成系统的视场设置后,用 RAGX、RAGY 等操作数将 $\Delta x(\lambda)$ 和 $\Delta y(\lambda, l)$ 的优化目标设置为 0,从而限制光学系统谱线弯曲和光谱弯曲的大小。把点列图和调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的大小作为镜头成像质量的评价指标,对光学系统进行优化以提高其成像质量。PGP 成像光谱仪光学系统的最终优化结果如图 15 所示。该 PGP 成像光谱仪光栅刻线数为 280 lp/mm、棱镜 1 角度为 9.27°,棱镜 2 角度为 10.26°,系统共使用 13 片玻璃,包络尺寸为 180 mm × 28 mm × 28 mm。

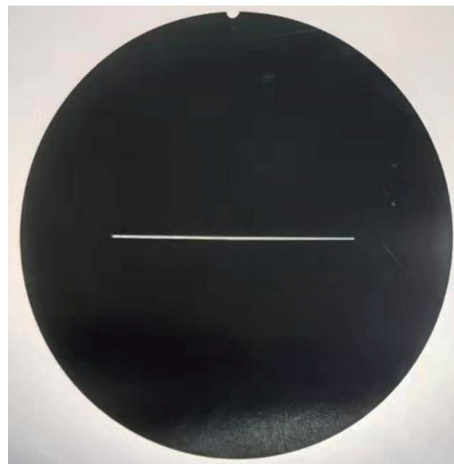


图 14 弯曲狭缝加工示意图

Fig.14 Schematic diagram of processed curved slits

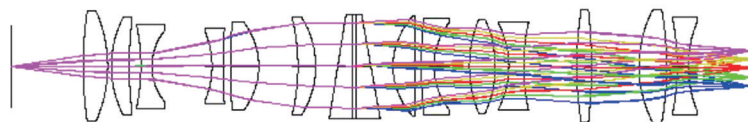


图 15 PGP 光谱仪的光学结构

Fig.15 Optical structure diagram of the PGP spectrometer

3.4 像质评价

在 ZEMAX 中对 3.3 节中的 PGP 成像光谱仪进行了谱线弯曲分析,该光谱仪使用的狭缝形状如式(13)所示。分析结果表明,设计的弯曲狭缝 PGP 成像光谱仪具有较强的校正谱线弯曲的能力,其在 400~800 nm 的谱线弯曲均小于 1 μm,且在 0.091 个像元以内。该成像光谱仪各视场的光谱弯曲均小于 0.7 μm,且小于 0.7 个像元,如图 16 和 17 所示。

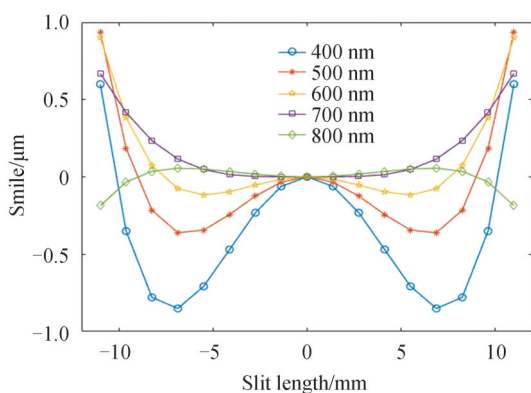


图 16 PGP 光谱仪的谱线弯曲
Fig.16 Smile of PGP spectrometer

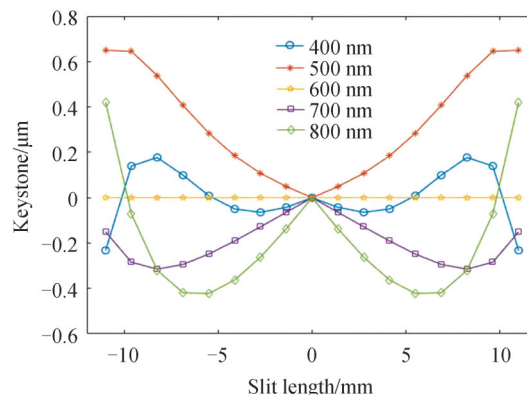


图 17 PGP 光谱仪的光谱弯曲
Fig.17 Keystone of PGP spectrometer

图 18 给出了该光学系统狭缝像的点列图情况,图中每个方格代表一个探测器的像元大小,结果显示,系统对间隔为 2 nm 的狭缝像具有良好的区分能力,故能满足 2 nm 光谱分辨率的设计要求。图 19 则给出了该光学系统在不同波长下弥散斑的均方根半径情况。结果显示,在 400~800 nm 波长范围内,经过狭缝不同位置的光线在像面上的弥散斑半径均不大于 5.4 μm ,能满足成像要求。

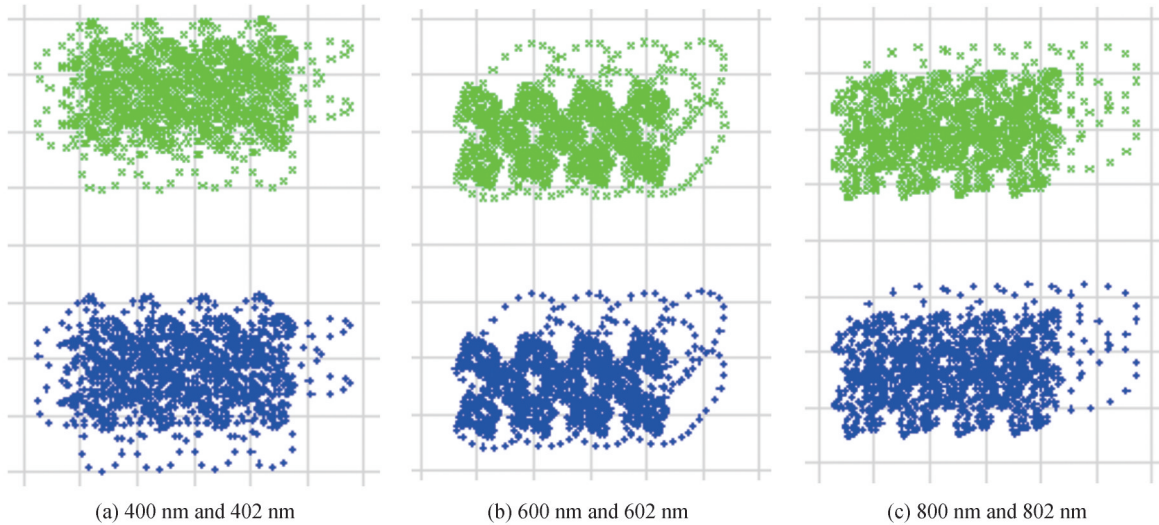


图 18 系统的点列图
Fig.18 Spot diagrams

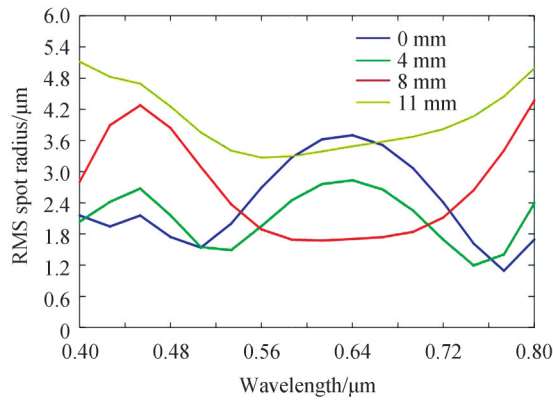


图 19 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线
Fig.19 RMS spot radius versus wavelength

图 20 为该光学系统的衍射能量集中度曲线,其中横坐标为距离像点质心距离,纵坐标表示一定范围内能量所占总能量的比例,不同颜色曲线则表示不同狭缝位置的情况。可见,所有视场的能量集中度在 2×2 像元包围框内均达到 90%,符合设计要求。

MTF 能够全面反映光学系统的成像质量,图 21 给出了 400 nm、600 nm 和 800 nm 波长在 Nyquist 频率 45.5 lp/mm 处的调制传递函数情况。从结果可见,800 nm 波段在 Nyquist 频率处的 MTF 值均优于 0.6;400 nm 和 600 nm 波长在 Nyquist 频率处的 MTF 值优于 0.4,像质良好,满足成像质量要求。

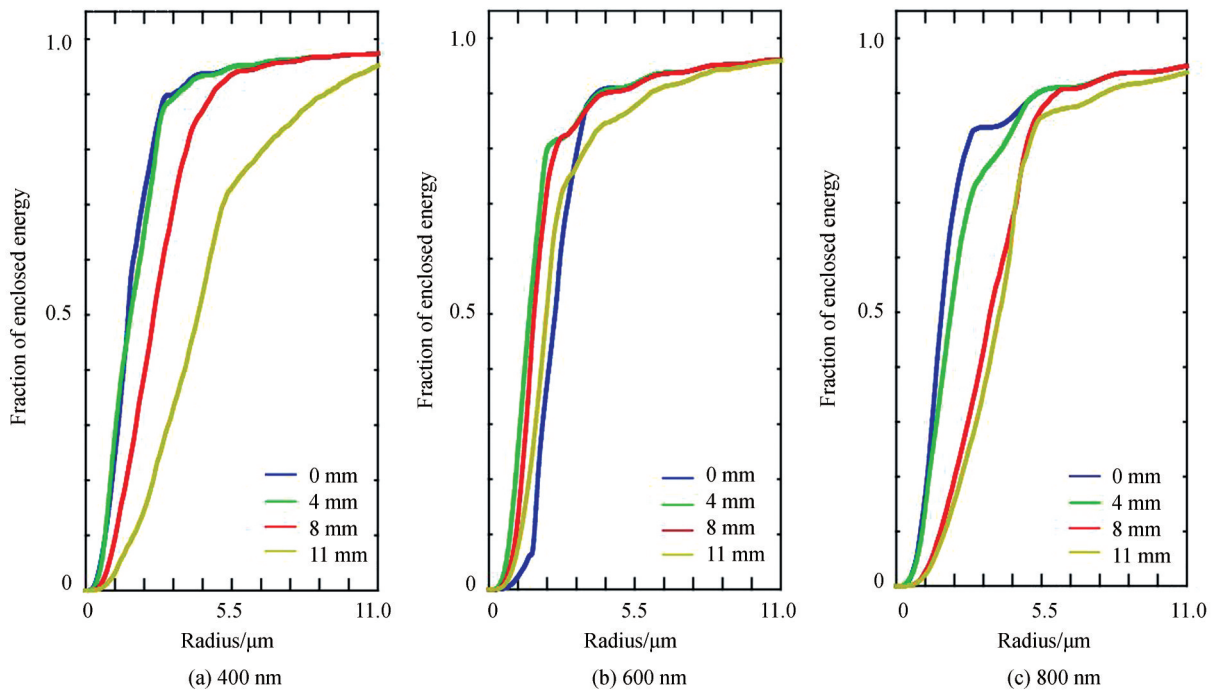


图20 能量集中度曲线
Fig.20 Energy concentration diagram

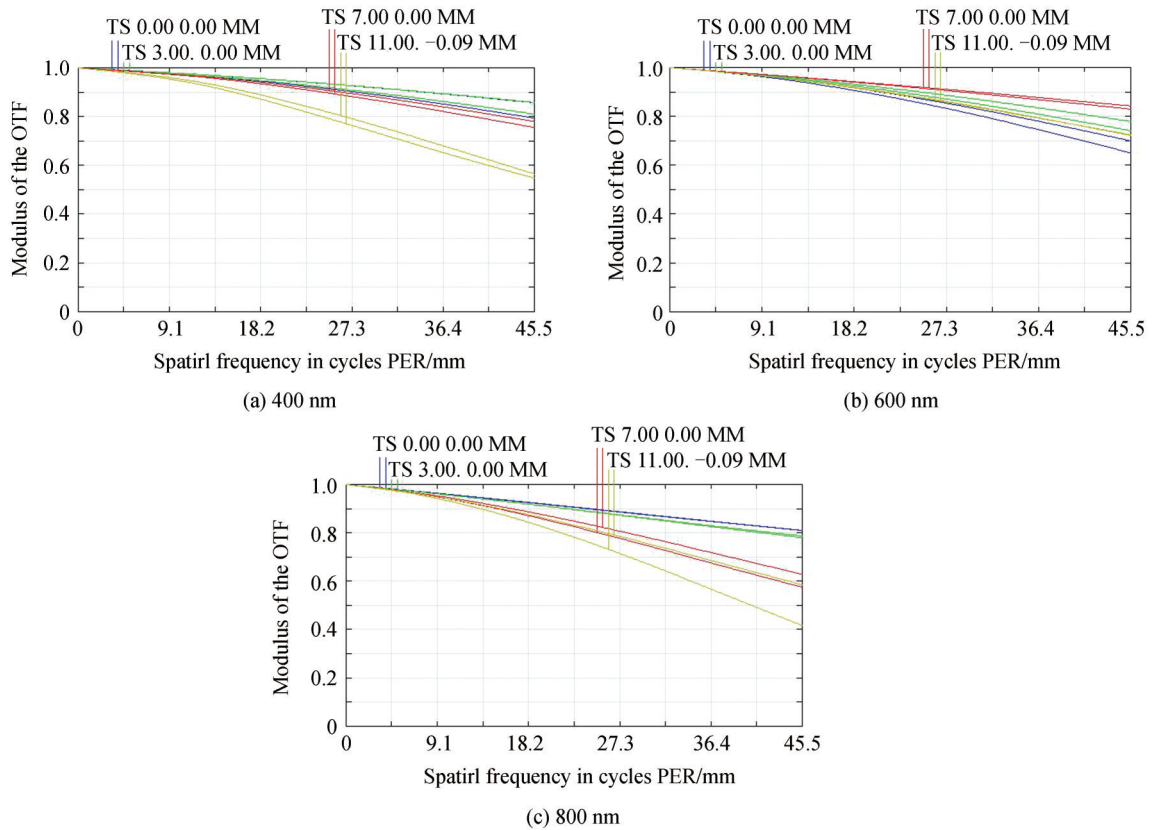


图21 多个波段的调制传递函数曲线
Fig.21 The modulation transfer function of multiple wavelengths

3.5 小结

分析可知,弯曲狭缝对于矫正光谱仪的谱线弯曲和光谱弯曲有较好的效果,但有利也有弊,弊端是此弯

曲狭缝光谱仪与望远物镜联合使用时,可能会导致观测的瞬时视场与探测器像元存在几何配准问题。如果狭缝与谱线(狭缝像)都是平直的,则探测器获得的数据可以直接使用;如果狭缝平直而谱线弯曲,则需要进行光谱定标,对谱线进行校正;如果狭缝弯曲而谱线平直,则需要将探测器的谱线与狭缝进行几何配准,图22和23给出了狭缝平直谱线弯曲和狭缝弯曲谱线平直的两种情况。

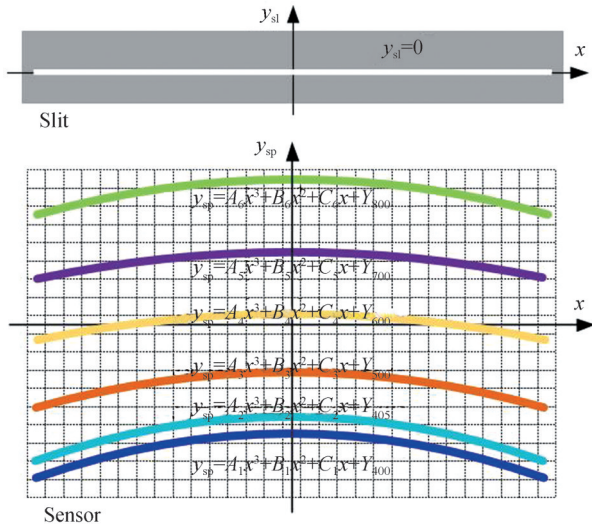


图22 平直狭缝与弯曲谱线的对应关系

Fig.22 The correspondence between straight slit and curved spectral lines

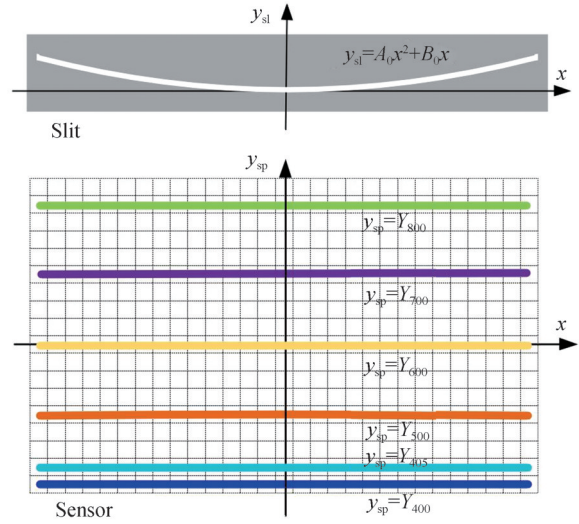


图23 弯曲狭缝与平直谱线的对应关系

Fig.23 The correspondence between curved slit and straight spectral lines

图23中, Y_{400} 、 Y_{405} 分别为狭缝中心点在400 nm、405 nm所对应像点在探测器上的 y_{sp} 坐标大小; $y_{sp} = A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + Y_{400}$ 和 $y_{sp} = A_2 x^3 + B_2 x^2 + C_2 x + Y_{405}$ 分别表示400 nm狭缝像和405 nm狭缝像的弯曲程度,因为不同波长的谱线弯曲大小不同,因此 A_1 与 A_2 、 B_1 与 B_2 、 C_1 与 C_2 的值并不相同,在光谱定标时,每个通道的谱线弯曲情况要进行分别标定和校正,光谱仪的通道数一般在100个以上,工作量很大。另外,从400 nm和405 nm的狭缝像可以看到,存在同一个像元承接相邻两个波段狭缝像的情况,会影响数据准确性。

弯曲狭缝对应的狭缝像是平直的,如果将探测器获得的数据不加校正直接使用,那狭缝边缘的目标会被认为与中心目标在同一直线上,即图像数据与目标实际空间位置并不相同,类似于畸变。能够注意到任意光谱通道与弯曲狭缝的对应关系都是相同的,因此可以通过弯曲狭缝的表达式 $y_{sl} = A_0 x^3 + B_0 x^2 + C_0 x$ 进行数据修正(几何配准),使探测器上的数据点回归正确的空间位置,即对空间维进行校正。通过两种方法的比较可得,弯曲狭缝的几何配准更简单一些,且光谱的准确性更高。

另一方面,弯曲狭缝在制作时,采用飞秒激光设备对薄金属材料进行微米级加工。首先根据表达式在电脑中画出弯曲狭缝的图形,然后激光设备在加工时对电脑设计好的图形进行走位,以达到弯曲狭缝的效果。在设计时狭缝各处 y_{sl} 方向的宽度相同,即在推扫方向上边缘区域和中心区域对应的地面分辨率相同,因此在推扫时能实现条带区域的全覆盖,如图24所示。在狭缝加工完成后使用二次元测量仪对狭缝的轮廓进行检测,以保证狭缝的加工精度,二次元测量仪和狭缝在仪器下的检测实拍图分别如图25和26

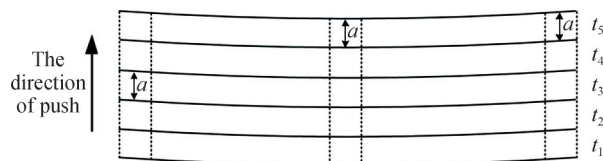


图24 弯曲狭缝的推扫示意图
Fig.24 The push process of curved slit

所示。



图25 二次元测量仪

Fig.25 Quadratic element measuring instrument

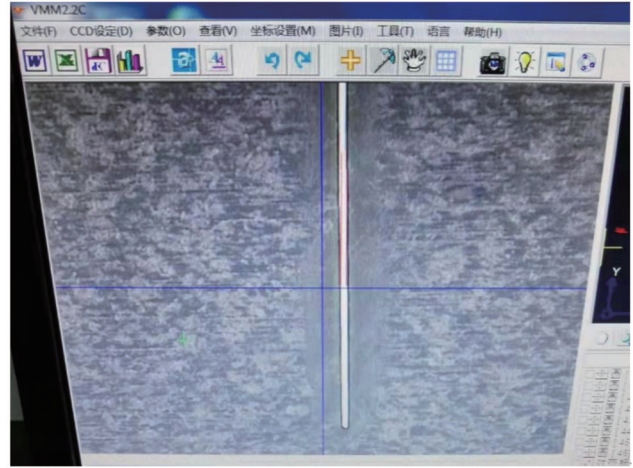


图26 狭缝测量结果

Fig.26 Slit measurement results

为了将本文使用了弯曲狭缝的PGP成像光谱仪与其他类型的成像光谱仪相比较,引入了筒长狭缝比和体积狭缝比的概念。文献[13]中的系统与本文设计的成像光谱仪相似,不过该文献中的利用的是棱镜和光栅的谱线弯曲相反的特点校正了谱线弯曲,该仪器的尺寸大小约为 $175\text{ mm}\times 33\text{ mm}\times 33\text{ mm}$,狭缝长度为 14 mm ,筒长与狭缝长度的比值为 12.5 ,而本文中仪器筒长与狭缝长度的比值为 8.2 ,因此,在相同的筒长下,采用本文设计的光谱仪的狭缝更长,采用相同望远物镜时能实现更大的视场。

文献[23]中的系统为 offer 系统,能够实现 40 mm 的长狭缝设计,系统的尺寸为 $310\text{ mm}\times 220\text{ mm}\times 125\text{ mm}$,筒长与狭缝长度的比值更小,为 7.75 。但是 offer 系统是一种离轴反射结构,体积较大,如果评价成像光谱仪体积与狭缝长度的比值的话,文献[23]中系统数值比值为 $213\ 125$,而本文中的系统该数值比值为 $6\ 414$ 。综合来看,采用了弯曲狭缝的PGP成像光谱仪更加紧凑,更容易实现小型化。

4 结论

本文提出了利用弯曲狭缝配合准直镜和聚焦镜畸变的方法校正共轴PGP成像光谱仪谱线弯曲的设计思路,给出了普适性的设计方法,并证明了该方法的可行性。通过建立的PGP矢量色散模型分析得到PGP在满足光路共轴条件下一定会产生较大的谱线弯曲,阐明了使用弯曲狭缝校正共轴PGP成像光谱仪的必要性。利用遗传算法确定了狭缝弯曲形状的数学表达式和准直镜、聚焦镜畸变的大小,并设计了一个狭缝长度为 22 mm ,工作波段为 $400\sim 800\text{ nm}$,光谱分辨率为 2 nm , F 数为 3.5 的弯曲狭缝PGP成像光谱仪光学系统,该系统谱线弯曲小于 $1\ \mu\text{m}$,光谱弯曲小于 $0.7\ \mu\text{m}$ 。

该方法在校正谱线弯曲的基础上保留了PGP成像光谱仪的光路共轴性,有利于光谱仪的紧凑化和批量化生产、装调。该方法具有普适性,对不同狭缝长度、不同光栅常数的共轴PGP成像光谱仪均能快速给出合适的组合参数。但是本文未能进行弯曲狭缝成像光谱仪的实际成像实验,在之后的研究中若能进行相关的成像和光谱反演实验,则能够对弯曲狭缝PGP成像光谱仪的性能有更清晰的认识。

参考文献

- [1] ZHU J C, SHEN W M. Design and manufacture of compact long-slit spectrometer for hyperspectral remote sensing[J]. *Optik*, 2021, 247(1): 167896.
- [2] XUE Qingsheng, LI Chang, LI Tingting, et al. Development and application of hyperspectral imager based on LVF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911001.
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): 0911001.
- [3] FAN X, LIU C, LIU S, et al. The instrument design of lightweight and large field of view high-resolution hyperspectral camera[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2276.
- [4] TRANSON J, DANDRIMONT R, MAUGNARD A, et al. Survey of current hyperspectral earth observation applications

- from space and synergies with Sentinel-2[C]. IEEE Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images, 2017.
- [5] MEI Fenghua, LI Chao, ZHANG Yuxin. Application of spectral imaging technology in maritime target detection [J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 708-718.
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.
- [6] CHEN Wei, ZHENG Yuquan, XUE Qingsheng. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 15-21.
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15-21.
- [7] FENG Lei, WEI Lidong, YANG Lei, et al. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 511002.
冯蕾, 魏立冬, 杨雷, 等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 511002.
- [8] WANG Baohua, RUAN Ningjuan, GUO Chongling, et al. Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022001.
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022001.
- [9] 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)[C]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 1993.
- [10] AIKIO M. Hyperspectral prism grating prism imaging spectrograph[D]. Finland: VTT Electronics, 2001.
- [11] RASMUS N J. The VTTVIS line imaging spectrometer-principles, error sources and calibration[D]. Roskilde: Risw National Laboratory, 2002.
- [12] LI Zhe, YU Anlan, ZUO Duluo, et al. Analysis and correction of slit curvature in spectrograph with high NA [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630004.
李哲, 余安澜, 左都罗, 等. 大口径光谱系统狭缝弯曲的分析与矫正[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630004.
- [13] YANG Zengpeng, TANG Yuguo, Bayanheshig, et al. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 132-140.
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): 132-140.
- [14] WU Congjun, YAN Changxiang. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device[J]. Chinese Optics, 2012, 33(1): 37-43.
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.
- [15] ZHU Shanbing, JI Zhiqun, GONG Guangbiao, 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.
- [16] ZHANG Xiaolong, LIU Ying, SUN Qiang, et al. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 266-273.
张晓龙, 刘英, 孙强, 等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 266-273.
- [17] CHEN Hongfu, GONG Yan, LUO Cong, 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.
- [18] QI Yonghong. Design of an imaging spectrometer based on prism-grating-prism dispersive element [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
齐永红. 基于棱镜-光栅-棱镜的成像光谱系统设计[D]. 北京: 中国科学院大学.
- [19] WEI L, ZHOU J, LI Y, et al. Wide-field grating-prism imaging spectrometer: optical design and implementation [J]. Applied Optics, 2021, 60(24): 7136-7144.
- [20] WU Zhikun, SHI Entao, WANG Yongmei. Design of PGP imaging spectrometer with eliminating spectral line bending [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 20200433.
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): 20200433.
- [21] ZHANG J L, LIN C, JI Z, et al. Design of a compact hyperspectral imagingspectrometer with freeform surface based onanastigmatism[J]. Applied Optics, 2020, 59(6): 1715-1725.
- [22] XU Fenggang, HUANG Wei. Application of genetic algorithm in the design of off-axis four-mirror optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2076-2082.
徐奉刚, 黄玮. 遗传算法在离轴四反光学系统设计中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2076-2082.
- [23] ZHU Yuji, YIN Dayi, CHEN Yonghe, et al. Design of hyperspectral resolution ultraviolet offner imaging spectrometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 222001.
朱雨霁, 尹达一, 陈永和, 等. 高光谱分辨率紫外 Offner 成像光谱仪系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 222001.

Design of the Optical System of Coaxial PGP Imaging Spectrometer with Eliminating Spectral Smile

FAN Xinghao^{1,2,3}, LIU Chunyu^{1,3}, XU Minglin^{1,3}, LIU Shuai^{1,3}, ZHAO Yingming^{1,2,3},
CUI Yazhen^{1,2,3}

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Hyperspectral remote sensing technology is an optical remote sensing technology developed on the basis of imaging spectroscopy, which can realize comprehensive observation of spatial information, spectral information and radiation information. The imaging spectrometer adopting the Prism-Grating-Prism (PGP) spectroscopic element avoids the off-axis problem of traditional prism-type and grating-type imaging spectrometers, and is conducive to the miniaturization and compactness of imaging spectrometers. Aiming at the problem that the spectral smile of coaxial PGP imaging spectrometer is difficult to correct, this paper proposes a method to rectify the curvature of spectral line by using curved slit and distortion of the collimator lens and focusing lens. On the basis of retaining the advantages of PGP such as high diffraction efficiency and coaxial optical path, this method can correct spectral smile and keystone of the instrument. In this paper, the prism-grating-prism vector dispersion model is established by focusing on the influence of lens distortion, the number of grating lines and prism angle on spectral smile and keystone. By tracing the light vector and analyzing the intersection between the light vector and the image plane after the light vector passes through the PGP element with different parameters, the influence of different parameters on the smile was analyzed. It is worth noting that when the shape of the slit changes, the direction of the initial light vector also changes. Therefore, this model can also analyze the effect of the slit shape on the spectral smile and keystone. Further, the prism-grating-prism vector dispersion model is used to analyze the spectral line bending characteristics of coaxial PGP spectroscopic elements: when the coaxial condition is met, the PGP imaging spectrometer will inevitably have a large smile, and the spectrum is bent in the short-wave direction. After adjusting the prism Angle, the number of grating lines and the lens distortion, we analyzed the smile size of the combination of the above parameters, and came to an optimistic conclusion: the smile problem of the imaging spectrometer could not be eliminated only by changing the prism, grating and lens. However, the smile can be corrected well by the method of bending the slit and matching the appropriate lens distortion. In order to improve the versatility of this method, this paper gives an objective function for correcting spectral curvature and spectral line curvature by using the PGP vector dispersion model, and uses genetic algorithm to optimize the objective function and calculate the best combination of slit shape and lens parameters quickly. In order to verify the feasibility of this method, this paper uses the calculation results of this method to design a curved slit PGP imaging spectrometer with a slit length of 22 mm, an operating wavelength of 400~800 nm, a spectral resolution of 3 nm, and an F number of 3.5 which has a spectral curvature of less than 2 μm and a spectral line curvature of less than 2 μm . The optical system has a diffuse spot radius of less than 5.4 μm in the wavelength range of 400~800 nm, and can distinguish slit images with a spectral interval of 2 nm. The energy concentration of all fields of view can reach 90% in the 2×2 pixel scale. The design results show that the use of curved slit and distortion of the collimator lens and focusing lens can effectively correct the curve of the spectral line, which has important guiding significance for the design of the coaxial PGP imaging spectrometers. In this article, we calculated the optimal slit shape and lens parameters for different slit lengths and different grating parameters, which proved that the method had universal applicability.

Key words: Spectrometer; Correcting spectral curvature; Curved slit; Prism-grating-prism; Imaging spectrometer; Genetic algorithm

OCIS Codes: 120.6200; 330.6180; 220.3620; 110.4234