

# 光学学报

## 狭缝离轴校正透射式光谱仪谱线弯曲

武志昆<sup>1,2,3,4</sup>, 石恩涛<sup>1,3,4\*\*</sup>, 王咏梅<sup>1,2,3,4\*</sup>, 郭宝泽<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;

<sup>4</sup>中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

**摘要** 为了有效校正透射式色散型成像光谱仪系统的谱线弯曲,提出了一种基于狭缝离轴的畸变补偿方法。该方法首先假设中心波长谱线弯曲得到校正,计算出色散元件的入射角随狭缝长度的变化关系;接着对狭缝进行离轴处理,利用准直镜的畸变得出色散元件的目标入射角,从而校正中心波长的 Smile 畸变(谱线弯曲),剩余波长的 Smile 畸变和 Keystone 畸变(色畸变)向外弯曲,整体呈枕形畸变;最后使用会聚镜的畸变校正剩余谱线弯曲。利用该方法设计了一款反射光栅型成像光谱仪,在各项参数满足设计要求的同时,利用准直镜畸变校正了系统的谱线弯曲,基于该设计研制了原理样机,系统 Smile 畸变最大为 12.9  $\mu\text{m}$ ,Keystone 畸变最大为 6.4  $\mu\text{m}$ ,测试结果满足系统的设计要求,证明了该方法的可行性。

**关键词** 光学器件; 成像光谱仪; 准直镜; 谱线弯曲; 畸变补偿

中图分类号 O433.3; TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2423001

### Correction of Spectral Line Curvature of Transmission Spectrometers By Off-Axis Slit

Wu Zhikun<sup>1,2,3,4</sup>, Shi Entao<sup>1,3,4\*\*</sup>, Wang Yongmei<sup>1,2,3,4\*</sup>, Guo Baoze<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** To effectively correct the spectral line curvature of a transmission dispersive imaging spectrometer system, this paper proposes a distortion compensation method based on the off-axis slit. Specifically, the variation in the incident angle of the dispersive element with slit length is calculated on the basis of the assumed correction of the spectral line curvature of the central wavelength. Then, the slit is moved away from the optical axis of the collimator, and the target incident angle of the dispersive element is obtained based on the distortion of the collimator. The Smile distortion (spectral line curvature) of the central wavelength is thereby corrected. The Smile distortion and Keystone distortion (color distortion) of the remaining wavelength curve outward, and overall pincushion distortion is observed. Finally, the remaining spectral line curvature is corrected with the distortion of the converging lens. A reflection grating imaging spectrometer is designed by the proposed method, and the spectral line curvature of the system is corrected with the distortion of the collimator on the premise that the various parameters meet the design requirements. A principle prototype is developed on the basis of the above design. The system achieves a maximum Smile distortion of 12.9  $\mu\text{m}$  and a maximum Keystone distortion of 6.4  $\mu\text{m}$ . The test results meet the design requirements of the system and thus prove the feasibility of the proposed method.

**Key words** optical devices; imaging spectrometer; collimator; spectral line curvature; distortion compensation

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-17; 录用日期: 2022-07-22

基金项目: 民用航天项目(D010206)、国家重大项目风云三号气象卫星

通信作者: \*wym@nssc.ac.cn; \*\*set@nssc.ac.cn

# 1 引言

成像光谱仪能同时获取观测对象的光谱信息和空间信息<sup>[1]</sup>,广泛应用于光学探测领域<sup>[2]</sup>。色散型成像光谱仪是较为常用的成像光谱仪,常用棱镜或光栅作为色散元件,但由于该元件具有非主截面色散,系统通常具有不同程度的谱线弯曲(畸变),谱线弯曲严重时会影响系统的测量精度,因此能有效校正谱线弯曲的方法在光学设计中显得尤为重要。

Offner型和PG(棱镜-光栅)型成像光谱仪是目前较为常用的光谱仪模型,因为该类型光谱仪的谱线弯曲能够得到很好的校正<sup>[3-4]</sup>。Offner型光谱仪是由Offner中继光学系统<sup>[5]</sup>改进而来,由一片凹面反射镜和一片凸面反射光栅组成<sup>[6]</sup>,或者将凹面反射镜改成两片,用于校正系统的像散<sup>[7]</sup>。该类型光谱仪具有体积小、光学效率高和谱线弯曲小等优点,常应用于空间和海洋的光学探测领域<sup>[8-10]</sup>。PG型成像光谱仪的色散元件为棱镜和光栅,棱镜型和光栅型光谱仪的谱线弯曲的方向相反,将弯曲量互补可得到消谱线弯曲的光谱仪系统<sup>[11]</sup>。色散元件可以由棱镜和光栅胶合而成,也可以是在棱镜表面刻线的浸没式光栅。虽然两种模型的谱线弯曲小,但对色散元件具有较多的要求,不能作为校正普通光谱仪谱线弯曲的方法。会聚镜倾斜具有一定的谱线弯曲校正效果,但该方法的校正效果有限,在设计、加工和装调方面具有一定的难度。

结合以上两个模型和一个方法,基于畸变补偿原理,本文提出狭缝离轴校正谱线弯曲的方法,该方法曾被用于消谱线弯曲PGP(棱镜-光栅-棱镜)型光谱仪的设计中<sup>[12]</sup>,经过完善,其具有解决透射式光谱仪谱线弯曲的普适作用。在本方法中,狭缝与准直镜不再共轴,利用准直镜的畸变对中心波长的Smile畸变进行补偿,其他波长的谱线弯曲方向关于中心波长谱线对称,整体呈“枕形”,最后利用会聚镜的负畸变对剩余谱线弯曲进行校正。设计了一款消谱线弯曲平面反射光栅型光谱仪,并研制了其原理样机,利用测试结果验证了该方法的有效性。

## 2 基本原理

### 2.1 谱线弯曲特性

色散型成像光谱仪一般由入射狭缝、准直镜、色散元件、会聚镜和像面系统组成,狭缝长度信息经系统被几何放大在像面上,作为系统的空间维信息,狭缝宽度信息经系统分光并被几何放大在像面上,作为光谱维信息,系统对单色光所成的像称为谱线。谱线具有一定程度的弯曲,称为Smile畸变(谱线弯曲);不同波长的谱线长度有所不同,称为Keystone畸变(色畸变)。即使准直镜和会聚镜是理想透镜,色散型成像光谱仪的谱线弯曲依然会存在,其是由色散元件的非主截面色散引起的。

以反射光栅为例,如图1所示, $XOY$ 面为光栅的

入射面,光栅刻线与 $X$ 轴平行, $YOZ$ 面为光栅的主截面。将狭缝看作由无数点光源组成的线形光源,点光源在光栅上的入射主光线为 $|SO|$ ,单位矢量为 $r$ ; $|SO|$ 与主截面的夹角为 $\beta$ ,在主截面的投影为 $|AO|$ ,衍射光线为 $|OS'|$ ,单位矢量为 $r'$ ,与主截面的夹角为 $\beta'$ ,在主截面的投影为 $|OA'|$ ;光线在主截面发生衍射,在 $X$ 轴方向只发生反射,因而 $\beta = \beta'$ 。主截面入射角为 $i$ ,衍射角为 $\theta$ ,取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ ,由光轴到光线顺时针旋转时其符号为正。该反射光栅的完整光栅方程<sup>[13]</sup>为

$$\cos\beta(\sin i + \sin\theta) = k\lambda\nu, \quad k = 0, \pm 1, \dots, \quad (1)$$

式中: $\beta \in [0, \pi/2)$ ;  $k$ 为衍射级次; $\lambda$ 为波长; $\nu$ 为光栅刻线密度。在传统型光谱仪中,狭缝和准直镜共轴,即 $i$ 不随 $\beta$ 发生变化,则 $\theta$ 随 $\beta$ 的变化可表示为

$$\frac{d\theta}{d\beta} = \frac{k\lambda\nu \tan\beta}{\cos\theta \cos\beta} = \begin{cases} \frac{\tan\beta}{\cos\theta}(\sin i + \sin\theta) > 0, & \theta > -i \\ \frac{\tan\beta}{\cos\theta}(\sin i + \sin\theta) = 0, & \theta = -i \\ \frac{\tan\beta}{\cos\theta}(\sin i + \sin\theta) < 0, & \theta < -i \end{cases} \quad (2)$$

当 $\theta = -i$ 时对应衍射0级, $\theta$ 不随 $\beta$ 发生变化;当 $\theta > -i$ 时, $\theta$ 随 $\beta$ 的增大而增大;当 $\theta < -i$ 时, $\theta$ 随 $\beta$ 的增大而减小,即谱线向远离0级的方向弯曲。因此,光栅型光谱仪的谱线向长波方向弯曲。

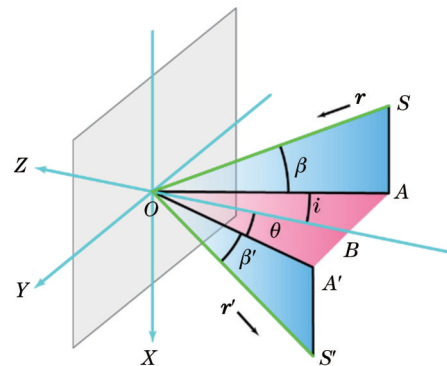


图1 光栅非主截面衍射原理

Fig. 1 Diffraction principle of non-dominant cross section of gratings

会聚镜光轴与光栅法线的夹角为 $\varphi_i$ ,建立会聚镜的局部坐标系,如图2所示,光轴为 $Z'$ 轴, $X'$ 轴与 $X$ 轴平行,衍射光与 $O'Z'$ 的夹角 $\angle Z'O'S'$ 在主截面内的投影为 $\theta - \varphi_i$ ,作为光谱维角度,在 $X'O'Z'$ 面内的投影为 $\angle Z'O'C$ ,作为空间维角度,它们之间的关系为

$$\tan \angle Z'O'C = \frac{\tan\beta}{\cos(\theta - \varphi_i)}. \quad (3)$$

将 $\tan \angle Z'O'C$ 对波长 $\lambda$ 进行求导,可得

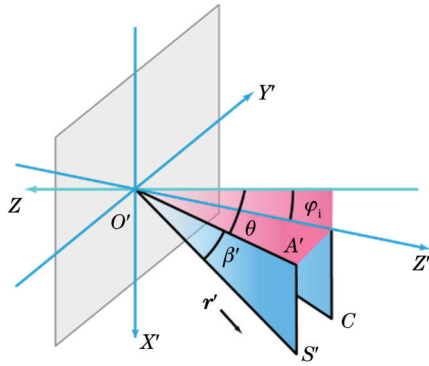


图 2 会聚镜局部坐标系

Fig. 2 Local coordinate system of convergence lens

$$\frac{d \tan \angle Z'O'C}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} \frac{d \tan \angle Z'O'C}{d\theta} = \begin{cases} \frac{k\nu}{\cos \theta \cos \beta} \frac{\tan \beta \sin |\theta - \varphi_i|}{\cos^2 |\theta - \varphi_i|} = 0, & \theta = \varphi_i \\ \frac{k\nu}{\cos \theta \cos \beta} \frac{\tan \beta \sin |\theta - \varphi_i|}{\cos^2 |\theta - \varphi_i|} > 0, & \theta \neq \varphi_i \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $\frac{d\theta}{d\lambda}$  的值随  $\theta$  的增大而增大； $\frac{d \tan \angle Z'O'C}{d\theta}$  的值关于  $\theta = \varphi_i$  呈中心对称。因此，当衍射光线的光谱维角度为 0 时，其空间维角度最小，即光谱仪 Keystone 畸变向大视场方向弯曲，且略不对称。

2.2 中心波长 Smile 畸变校正

以近紫外可见成像光谱仪为例，该仪器用于痕量

气体、云和气溶胶等大气成分观测的卫星载荷，科学目标如表 1 所示，光谱范围为 300~500 nm，光栅刻线密度为 600 line/mm，准直镜和会聚镜焦距为 160 mm 和 150 mm，狭缝长度为 20 mm。

表 1 科学目标对应的光谱范围

Table 1 Spectral range corresponding to observation object

Product	Wavelength range /nm
Tropospheric ozone	305-330
Sulphur dioxide	308-325
Albedo	310-500
Total ozone	325-337
Aerosol	336-340
Formaldehyde	337-360
Rayleigh scattering	360-400
Aerosol absorption	360-400
Aerosol	400-430
Nitrogen dioxide	405-500
Glyoxal	430-460
Aerosol	440-460
Cloud	460-490

模型仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 为光谱仪原理图，准直镜 C 和会聚镜 I 使用近轴透镜代替，G 为反射光栅；图 3(b) 为像面 IMG 上的 5 条谱线，左侧为长波方向，谱线向右侧弯曲，长波谱线弯曲更为明显；图 3(c) 为系统的 Keystone 畸变，横轴为光谱范围，中心波

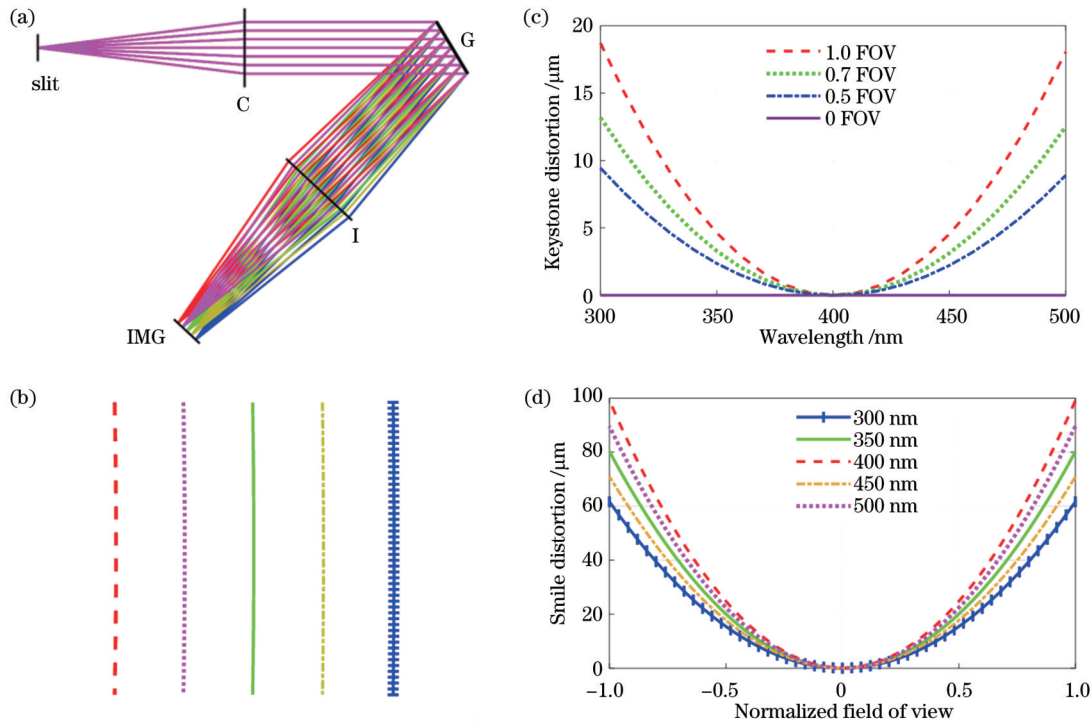


图 3 光谱仪模型的谱线弯曲情况。(a)理想光谱仪；(b)弯曲谱线；(c) Keystone 畸变；(d) Smile 畸变

Fig. 3 Spectral line curvature of spectrometer model. (a) Ideal spectrometer; (b) curved spectral line; (c) Keystone distortion; (d) Smile distortion

长 0 视场主光线与会聚镜共轴,Keystone 畸变向大视场方向弯曲,视场越大弯曲越明显;图 3(d)为系统的 Smile 畸变,横轴为归一化视场,谱线弯曲量随视场的增大而增大,波长为 500 nm 的谱线弯曲量约为 100  $\mu\text{m}$ ,波长为 300 nm 的谱线弯曲量约为 60  $\mu\text{m}$ ,弯曲方向一致(长波方向)。

若仅使用会聚镜的畸变对 Smile 畸变进行校正,需要调整会聚镜的光轴在像面的指向,使其不再指向中心波长谱线,甚至不在光谱范围之内,此时 Keystone 畸变会明显增大,二者不可兼顾,会聚镜所需孔径变大,设计和装调难度大,且不易校正系统杂散光。

为了同时校正系统的 Smile 和 Keystone 畸变,需要先校正中心波长的 Smile 畸变,即假设中心波长  $\lambda_i$  的衍射角  $\theta_p$  为常量,由式(1)可知,入射角  $i$  需随  $\beta$  发生变化,其变化关系由式(2)改写为

$$\frac{di}{d\beta} = \frac{k\lambda_p \nu \tan\beta}{\cos i \cos\beta} = \begin{cases} \frac{(\sin i + \sin \theta_p)}{\cos i} \tan\beta > 0, & i > -\theta_p \\ \frac{(\sin i + \sin \theta_p)}{\cos i} \tan\beta = 0, & i = -\theta_p \\ \frac{(\sin i + \sin \theta_p)}{\cos i} \tan\beta < 0, & i < -\theta_p \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\theta_p$  为中心波长在  $\beta=0$  时的衍射角,将中心波长无弯曲的谱线视作光源,对其进行逆向光线追迹,

$i = -\theta_p$  为其 0 级衍射,  $i$  不随  $\beta$  发生变化,否则,  $i$  随  $\beta$  向高衍射级次方向弯曲。

假设使用弯曲的入射狭缝提供可変入射角,结果如图 4 所示,中心波长谱线的 Smile 畸变得得到校正。图 4(a)为入射狭缝的弯曲情况,狭缝长度为 10 mm 处的弯曲量约为 90  $\mu\text{m}$ ;图 4(b)中 5 条参考谱线没有明显弯曲的情况;因为会聚镜光轴方向不变,图 4(c)中 Keystone 畸变曲线与图 3(c)中几乎一致;图 4(d)中 Smile 畸变曲线的中心波长谱线近似为直线,其他波长的谱线向两侧弯曲,且弯曲量小于 20  $\mu\text{m}$ ,说明在中心波长谱线得到校正的同时,其他波长的谱线也得到了校正,且弯曲量与图 4(c)中 Keystone 畸变的弯曲量接近,可以使用会聚镜畸变实现剩余弯曲情况的校正。

实际情况中不使用弯曲的狭缝也能实现入射角  $i$  随  $\beta$  的变化,图 4(a)中狭缝所需弯曲量小于最大物高的 1%,处在畸变的量级范围内,因此可以利用准直镜的畸变提供入射角的改变量,此时需要狭缝离轴。

### 2.3 狭缝离轴

畸变主要使像发生形变,因此狭缝离轴距离对光谱仪的像点质量影响不大,非常适用于谱线弯曲的校正。畸变可分为径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变<sup>[14]</sup>,径向畸变即常见的正畸变和负畸变,偏心畸变是透镜相对于像面发生倾斜时的畸变,而薄棱镜畸变是由系统加工和装调所产生的误差引起。可以利用这三种畸变建立准直镜的畸变模型,从而计算狭缝的离轴距离。

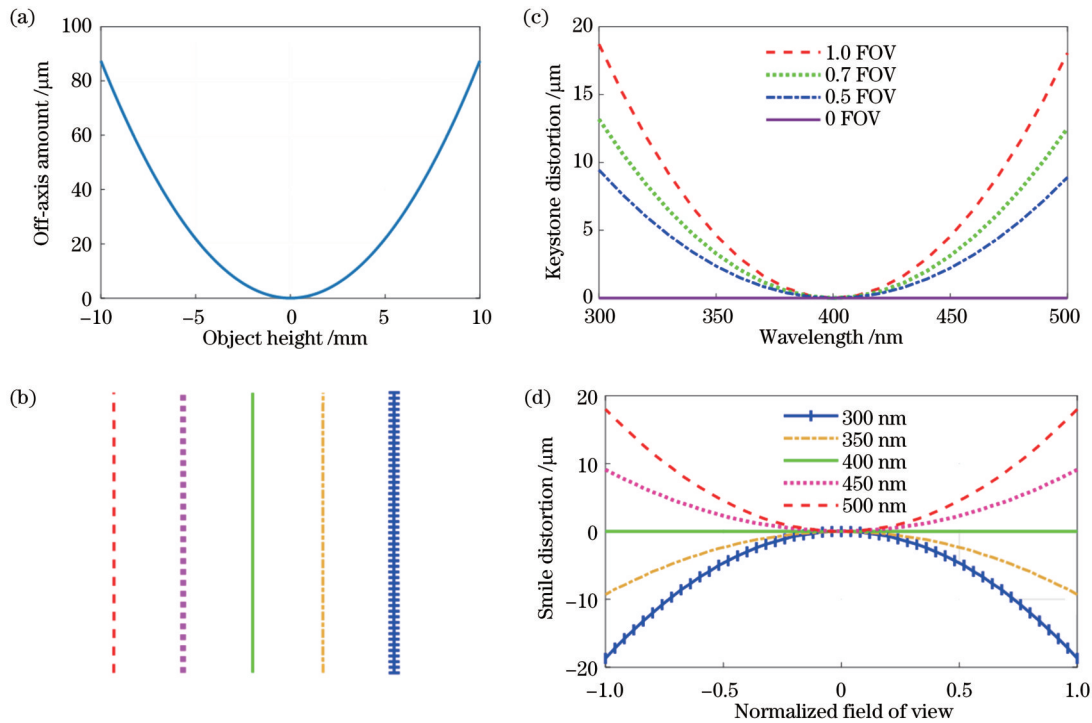


图 4 中心波长谱线弯曲被校正。(a)弯曲狭缝;(b)弯曲谱线;(c) Keystone 畸变;(d) Smile 畸变  
Fig. 4 Spectral line curvature of central wavelength is corrected. (a) Curved slit; (b) curved spectral line; (c) Keystone distortion; (d) Smile distortion

共轴系统存在径向畸变,像面同一圆环的畸变相等,其可以用级数展开进行表示:

$$r_u = r_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots), \quad (6)$$

式中: $r_u$ 为无畸变的圆环半径; $r_d$ 为有畸变的圆环半径; $k_i$ 为多项式系数。像面坐标可以表示为

$$\begin{cases} x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) \\ y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $(x_d, y_d)$ 为狭缝畸变对应的点坐标。考虑到系统的偏心畸变和薄棱镜畸变<sup>[14]</sup>,式(7)可以表示为

$$\begin{cases} x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) + \\ \quad p_1(3x_d^2 + y_d^2) + 2p_2 x_d y_d + s_1 r_d^2 \\ y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) + \\ \quad p_2(3y_d^2 + x_d^2) + 2p_1 x_d y_d + s_2 r_d^2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $p_1$ 和 $p_2$ 为偏心畸变的系数; $s_1$ 和 $s_2$ 为薄棱镜畸变的系数。当该模型用于相机定标时,常保留径向畸变的3个系数。在利用会聚镜畸变校正剩余波长谱线弯曲时,经常对会聚镜做倾斜处理,甚至改变其同轴性,这样做是为了利用这三种畸变最大限度地校正剩余谱线弯曲。

狭缝的实际离轴距离要以最终设计为主,这里对畸变模型进行简化,仅使用径向畸变评估狭缝的离轴距离,式(6)还有另一种表示形式<sup>[15]</sup>:

$$r_u = \frac{r_d}{1 + \eta_1 r_d^2 + \eta_2 r_d^4 + \dots}, \quad (9)$$

式中: $\eta_i$ 为多项式系数,实际使用过程中系数的个数是有限的,式(9)可以用更少系数表示与式(6)相同的结果。为了方便计算,这里只保留1个系数<sup>[16]</sup>,其坐标形

式可以表示为

$$\begin{cases} x_u = \frac{x_d}{1 + \eta r_d^2} \\ y_u = \frac{y_d}{1 + \eta r_d^2} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $\eta > 0$ 时,准直镜为正畸变,否则为负畸变。这里以准直镜的正畸变为例,离轴狭缝对应无畸变情况,而弯曲狭缝作为离轴狭缝的畸变,向远离光轴方向弯曲,狭缝实际的离轴距离为 $h_u$ ,对应的畸变为 $h_d$ ,准直镜的焦距为 $f_c$ ,其光轴与 $Z$ 轴的夹角为 $\varphi_c$ ,色散元件的入射主光线与准直镜光轴的夹角在主截面的投影为 $i - \varphi_c$ ,狭缝畸变对应的点坐标为

$$\begin{cases} x_d = f_c \frac{\tan \beta}{\cos(i - \varphi_c)} \\ y_d = f_c \tan(i - \varphi_c) \end{cases} \quad (11)$$

通过多项式拟合,得到弯曲狭缝坐标间的关系为 $y_d = 0.0008743x_d^2 + h_d$ ,决定系数为1。假设已知准直镜的畸变系数 $\eta = 0.0002$ ,基于式(10)可以求得离轴狭缝,利用 $y_u$ 的标准差作为评估参数,标准差小说明离轴狭缝计算值越接近直线,如图5所示。图5(a)为 $y_u$ 的标准差随 $h_d$ 的变化关系,图5(b)为离轴狭缝及其畸变的对比结果。计算得到的离轴狭缝的弯曲量约为 $0.02 \mu\text{m}$ ,可以用来代表离轴狭缝;离轴量约为 $4.338 \text{ mm}$ ,不及狭缝长度的 $1/4$ ,不会对准直镜增加太多的设计难度。另外,计算狭缝弯曲量在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 范围内时,对应的离轴量约为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ,说明该方法对离轴距离不敏感,容易实现系统的加工和装调。

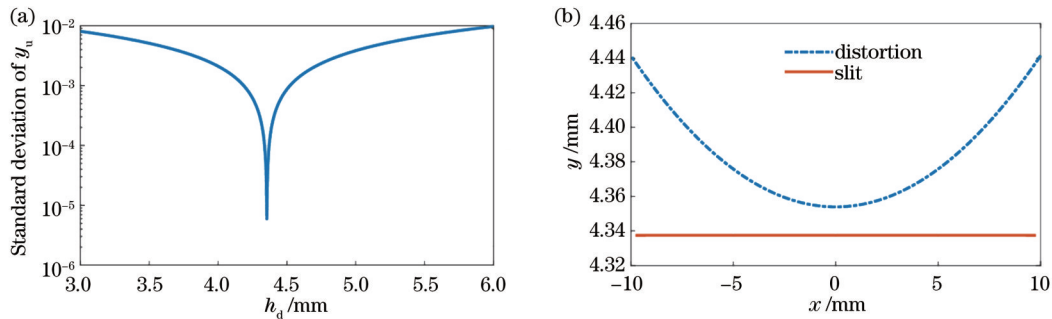


图5 狭缝离轴量计算。(a)标准差随离轴量的变化关系;(b)狭缝离轴量及其畸变

Fig. 5 Slit off-axis distance calculation. (a) Variation of standard deviation with off-axis distance; (b) off-axis amount of slit and its distortion

该方法完整的校正流程图如图6所示,首先确定系统的设计参数,接着分析中心波长谱线不弯曲时入射角的变化情况,然后对准直镜进行初步设计并建立其畸变模型,通过该模型计算狭缝的离轴距离,最后通过光学系统设计得到最优的结果。

综上所述,利用狭缝离轴的方法校正谱线弯曲具有如下优点:离轴量小,不会对系统增加设计难度;狭缝位置可调范围大,提升了其公差容限;没有增加额外

的元件,控制了系统的设计成本;系统的Smile和Keystone畸变能同时得到校正;系统的畸变具有多样化,校正效果会随加工工艺不断提升。

### 3 方法验证与分析

#### 3.1 光学设计

基于该方法对上文模型的仿真结果进行光学设计,光谱采样数为4,探测器为CMOS,像素尺寸为

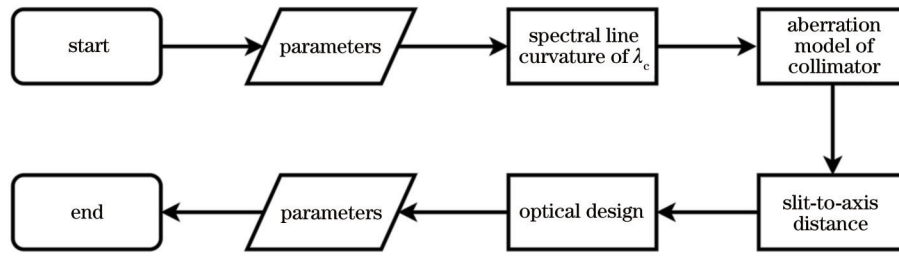


图 6 狭缝离轴设计流程图

Fig. 6 Flow chart of slit off-axis design

11 μm × 11 μm, 像素数为 2048 × 2048, 空间维每 3 个像素合并为一个, 光栅的入射角为 32°, 正透镜材料为

氟化钙, 负透镜材料为熔融石英, 系统详细参数汇总如表 2 所示。

表 2 光谱仪系统参数

Table 2 Parameters of spectrometer system

Parameter	Spectral range /nm	Spectral resolution / nm	Spectral oversampling number	Pixel size / (μm × μm)	Focal length of collimating lens	Focal length of converging lens	Spatial sampling distance / μm	Groove density / (line · mm <sup>-1</sup> )
Value	300-500	0.5	4	11 × 11	160	150	33	600

图 7 为系统的设计结果, 准直镜和会聚镜均由 6 片透镜组成, 各有一片弯月透镜校正系统的场曲, 其余 5 片透镜共轴。狭缝相对于弯月透镜离轴, 使其 0 视场主光线倾斜于准直镜光轴, 同时利用 3 种畸变校正中心波长的谱线弯曲, 会聚镜与准直镜类似, 弯月透镜与另外 5 片透镜不共轴, 利用畸变校正了剩余波长的 Smile 和 Keystone 畸变。

通过像素合并得到空间维像元为 33 μm, 光谱维像元为 44 μm。考虑到公差影响, 这里要求弥散斑半径小于像元宽度的 1/3。图 8 为系统在空间维 (X) 和光谱维 (Y) 的均方根 (RMS) 弥散斑半径, 空间维弥散斑半径小于 10 μm, 光谱维弥散斑半径小于 12 μm, 均满足设计要求。

图 9 为设计结果的谱线弯曲。图 9(a) 为波长为 300 nm、350 nm、400 nm、450 nm 和 500 nm 的 Smile 畸变, 最大弯曲量小于 6 μm。图 9(b) 为视场为 0、0.5、0.7 和 1.0 时的 Keystone 畸变, 最大弯曲量小于

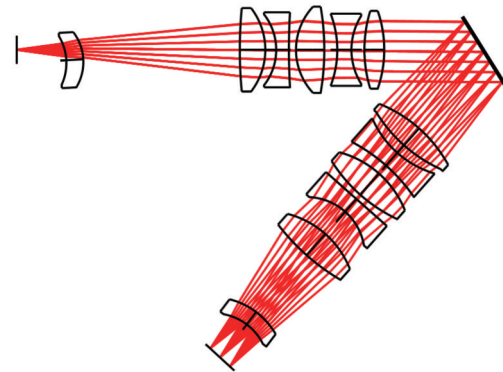


图 7 光谱仪系统光路图

Fig. 7 Optical path diagram of spectrometer system

3.5 μm, Smile 和 Keystone 畸变均远小于光谱维和空间维的像元宽度, 证明了利用狭缝离轴的方式校正光谱仪谱线弯曲的可行性。

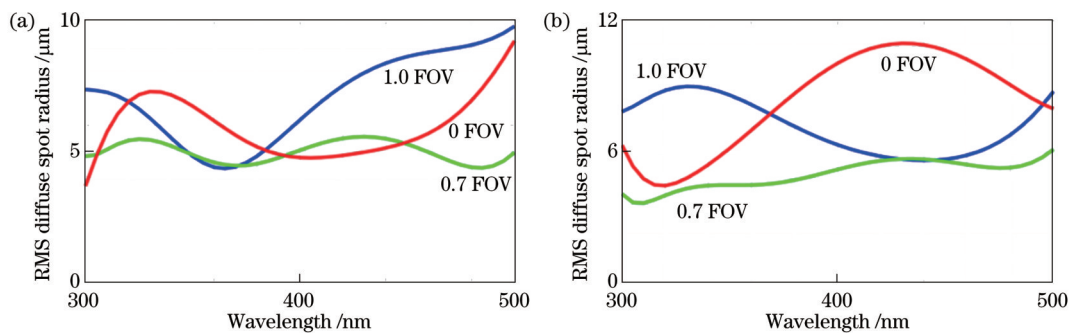


图 8 RMS 弥散斑半径。(a) 空间维 (X); (b) 光谱维 (Y)

Fig. 8 RMS diffuse spot radius. (a) Spatial dimension (X); (b) spectral dimension (Y)

### 3.2 原理样机

通过公差分析, 发现该设计结果符合加工要求, 对

该设计进行了光机加工和系统装调, 样机的成像质量和光谱分辨率均满足要求。样机如图 10 所示, 入射光

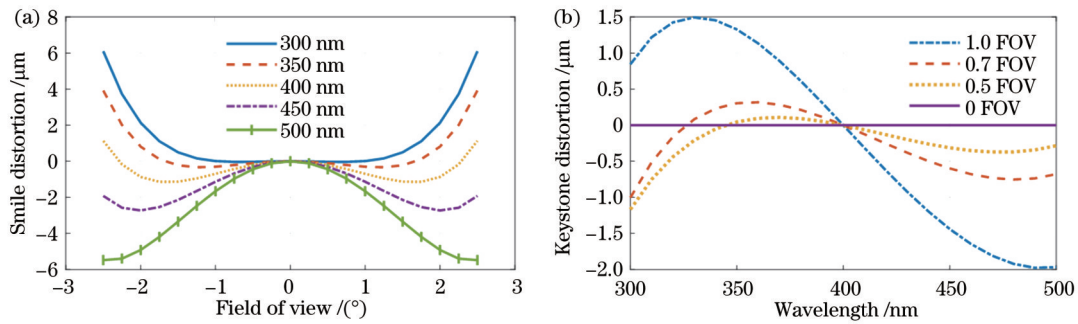


图 9 设计结果的谱线弯曲。(a) Smile 畸变; (b) Keystone 畸变

Fig. 9 Spectral line curvature of design results. (a) Smile distortion; (b) Keystone distortion

束经望远镜系统被会聚进光谱仪的入射狭缝,再经光谱仪成像到探测器上。望远镜的入瞳直径为 65 mm, 焦距为 240 mm。



图 10 原理样机

Fig. 10 Principle prototype

由于光谱仪系统的 Smile 和 Keystone 畸变的参照对象不同,需要对二者分别进行测试。测量 Smile 畸变需要分析单条谱线的弯曲情况,这里使用狭缝函数测量仪能同时获得多条谱线,提升测试精度与效率;狭缝函数测量仪<sup>[17]</sup>类似光栅单色仪,由入射狭缝、反

射镜、反射光栅和出射狭缝组成,其使用中阶梯光栅分光,同一个位置存在多级衍射,因此其出射波长为离散的,波长和衍射级次成反比,波长越短则衍射级次越高,样本越密。Keystone 畸变测试使用平行光管,光源为能产生连续光谱的氙灯,平行光束经望远镜成像到光谱仪的入射狭缝处,经系统分光到像面上,通过改变系统的入射角,得到全视场的 Keystone 畸变测试结果。

Smile 畸变和 Keystone 畸变的测试均得到线状的像,线宽度方向分别对应光谱分辨率和空间分辨率,其强度符合高斯分布,通过拟合可以得到其峰值对应的像素位置,从而可以分析其谱线弯曲情况<sup>[18]</sup>。

Smile 畸变的测量结果如图 11 所示。图 11(a)为狭缝函数测试结果,垂直方向为空间维,水平方向为光谱维,像面左侧谱线较为密集,为短波方向;图 11(b)为抽样谱线的弯曲情况,对谱线宽度进行高斯拟合寻峰,进而得到系统的 Smile 畸变曲线,图中扰动<sup>[19]</sup>由拟合精度不足引起,光谱范围内系统的 Smile 畸变最大为 12.9  $\mu\text{m}$ ,小于系统谱带宽度(44  $\mu\text{m}$ )的 1/3,表明系统 Smile 畸变得到了很好的校正。

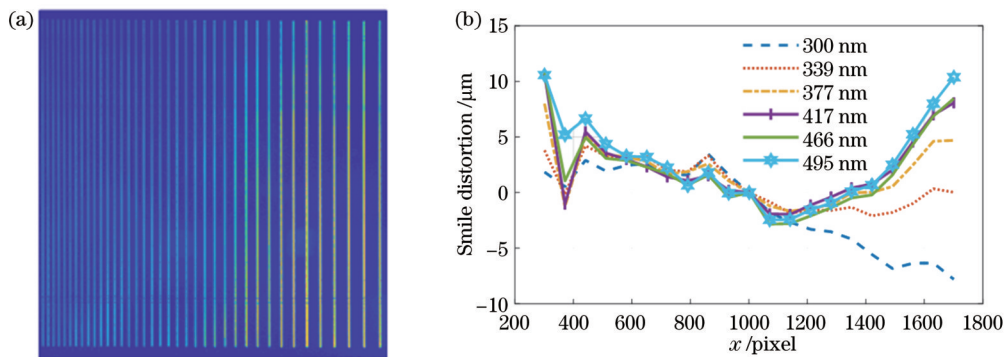


图 11 Smile 畸变的测量结果。(a)狭缝函数测量结果; (b) Smile 畸变

Fig. 11 Measurement results of Smile distortion. (a) Slit function measurement result; (b) Smile distortion

图 12 为系统 Keystone 畸变测试结果,对半视场中的样本分别进行采样,对其空间维进行高斯拟合寻峰,寻峰结果如图 12(a)所示,图中曲线为峰值对应的像素位置,每一条曲线对应一个视场;Keystone 畸变如图 12(b)所示,与图 12(a)中曲线一一对应。测试结果表

明:全视场的 Keystone 畸变最大,最大值小于 6.4  $\mu\text{m}$ ,不足空间像元宽度(33  $\mu\text{m}$ )的 1/5,说明系统的 Keystone 畸变得到了很好的校正。

相比仿真模型,实验系统的 Smile 畸变从 100  $\mu\text{m}$  下降到 13  $\mu\text{m}$ ,Keystone 畸变从 20  $\mu\text{m}$  降到 6.4  $\mu\text{m}$ ,二

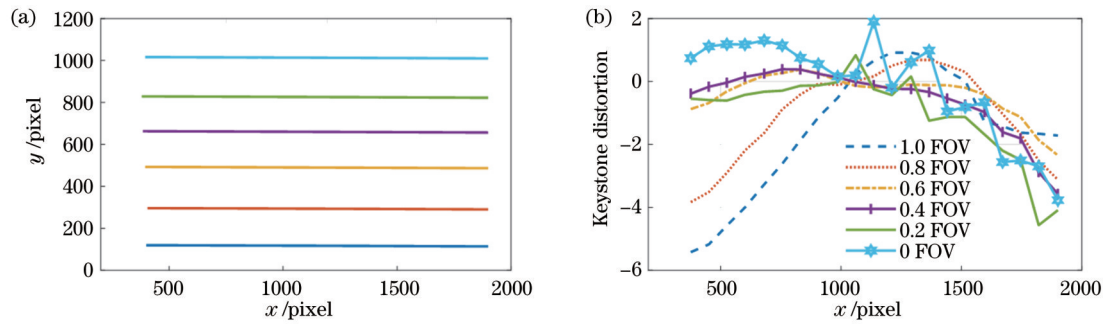


图 12 Keystone 畸变测试结果。(a) 不同视场寻峰结果; (b) Keystone 畸变

Fig. 12 Keystone distortion test results. (a) Peak finding results in different fields of view; (b) Keystone distortion

者都得到了很好的校正。由于存在加工公差和装调误差等因素,样机测试结果与设计结果存在一定的差异,但样机的 Smile 和 Keystone 畸变均满足系统的设计要求。

该结果表明,通过狭缝离轴的方法可以同时校正系统 Smile 和 Keystone 畸变,利用畸变补偿的方式可实现谱线弯曲校正,系统的设计难度小,在谱线弯曲校正中的应用潜力大。且本设计没有往高精尖的设计和工艺的方向寻找谱线弯曲的解决办法,而是在现有成熟技术中发掘,能有效控制消谱线弯曲光谱仪的成本和设计难度。

## 4 结 论

基于光栅型光谱仪谱线弯曲的产生原理,提出了利用准直镜和会聚镜畸变补偿光谱仪谱线弯曲的方法;该方法先对狭缝做离轴处理,利用准直镜畸变校正中心波长的 Smile 畸变,再利用会聚镜畸变校正剩余波长的 Smile 畸变和 Keystone 畸变;该方法具有改动小、效果好、易加工、易装调等优点。基于该方法设计了消谱线弯曲的反射光栅型光谱仪,并研制了原理样机,系统的 Smile 和 Keystone 畸变均得到很好的校正,证明了该方法的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 蔡东浩, 李雅灿, 魏立冬, 等. 高光谱成像仪中曲面棱镜的装调公差研究[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0608001. Cai D H, Li Y C, Wei L D, et al. Fabricating tolerance of curved prisms in hyperspectral spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0608001.
- [2] 杨剑宇, 杨萱, 郑建华. 近紫外天底成像光谱仪结构设计[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2123002. Yang J Y, Yang X, Zheng J H. Structural design of near ultraviolet nadir imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2123002.
- [3] Riedl S, Harlander M, Schlosser C, et al. Sentinel 4 UVN: a geostationary imaging UVN spectrometer for air quality monitoring: performance, measurement modes and model philosophy[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 1118005.
- [4] Zoogman P, Liu X, Suleiman R M, et al. Tropospheric emissions: monitoring of pollution (TEMPO)[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 186: 17-39.
- [5] Offner A. Unit power imaging catoptric anastigmat: US3748015[P/OL]. 1973-07-24[2022-05-12]. <https://www.freepatentsonline.com/3748015.html>.
- [6] Mertz L. Concentric spectrographs[J]. Applied Optics, 1977, 16(12): 3122-3124.
- [7] Chrisp M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer: US5880834[P/OL]. 1999-03-09[2022-05-12]. <https://www.freepatentsonline.com/5880834.html>.
- [8] Zhao M J, Si F Q, Zhou H J, et al. Preflight calibration of the Chinese Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI) [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(9): 5403-5419.
- [9] Choi W J, Moon K J, Yoon J, et al. Introducing the geostationary environment monitoring spectrometer[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(4): 044005.
- [10] 朱嘉诚, 陆伟奇, 赵知诚, 等. 静止轨道中波红外成像光谱仪分光成像系统[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1122001. Zhu J C, Lu W Q, Zhao Z C, et al. Spectroscopic imaging system in mid-wave infrared imaging spectrometer on geostationary orbit[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1122001.
- [11] 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. 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.
- [12] 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. Wu Z K, Shi E T, Wang Y M. Design of PGP imaging spectrometer with eliminating spectral line bending[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(6): 20200433.
- [13] James J F. Spectrograph design fundamentals[M]. Leiden: Cambridge University Press, 2007.
- [14] Wang J H, Shi F H, Zhang J, et al. A new calibration model of camera lens distortion[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 607-615.
- [15] Bukhari F, Dailey M N. Automatic radial distortion



- estimation from a single image[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2013, 45(1): 31-45.
- [16] Rong J P, Huang S Y, Shang Z Y, et al. Radial lens distortion correction using convolutional neural networks trained with synthesized images[M]//Lai S H, Lepetit V, Nishino K, et al. *Computer vision-ACCV 2016. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2017, 10113: 35-49.
- [17] 毛靖华, 王咏梅, 石恩涛, 等. 星载高光谱成像光谱仪狭缝函数测试方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1286-1290.
- Mao J H, Wang Y M, Shi E T, et al. Study on the slitfunction test method based on hyperspectral imaging instrument[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1286-1290.
- [18] Høye G, Løke T, Fridman A. Method for quantifying image quality in push-broom hyperspectral cameras[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 053102.
- [19] Bakker W, Werff H V D, Meer F V D. Determining smile and keystone of lab hyperspectral line cameras[C]//2019 10th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), September 24-26, 2019, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2019.