

消谱线弯曲棱镜-光栅型成像光谱仪设计

陈洪福^{1,2} 巩岩¹ 骆聪^{1,2} 彭建涛^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对平面光栅和棱镜成像光谱仪难以校正谱线弯曲的问题,提出了利用棱镜-光栅(P-G)组合分光元件并结合系统物镜畸变校正谱线弯曲的方法。分别计算了棱镜和光栅产生的谱线弯曲以及 P-G 组合元件产生的光谱弯曲,分析了棱镜和光栅的谱线弯曲特性,并基于此设计了 P-G 组合分光元件和消谱线弯曲成像光谱仪结构。通过优化设计得到光学系统的光谱分辨率高于 2 nm,点列图均方根(RMS)半径小于 8 μm ,系统谱线弯曲和光谱弯曲小于 2 μm 。证明了 P-G 组合元件结合系统物镜畸变可补偿校正整个工作波段的谱线弯曲和光谱弯曲。最后的设计结果表明,基于 P-G 分光元件的成像光谱仪系统在满足像质要求的前提下,谱线弯曲小于 1/4 像元尺寸,满足使用要求。

关键词 光学设计;成像光谱仪;棱镜-光栅;谱线弯曲;体全息相位光栅

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0922004

Design of Prism-Grating Imaging Spectrometer with Eliminating Spectral Line Curvature

Chen Hongfu^{1,2} Gong Yan¹ Luo Cong^{1,2} Peng Jiantao^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China

Abstract In order to eliminate spectral line curvature of plane grating and prism imaging spectrometer, a novel approach by combining prism-grating (P-G) with the compensation of lens' distortion is presented. The spectral line curvatures of prism and grating and spectral curvature of compound P-G device are calculated, respectively. The character of spectral line curvature and spectral curvature are analyzed, then the compound P-G device and imaging spectrometer with eliminating spectral line curvature are designed. The optimized optical system has a spectral resolution better than 2 nm and the root mean square (RMS) spot radius is less than 8 μm . Moreover, both the spectral line curvature and spectral curvature of system are less than 2 μm . It is proved that compound P-G device's spectral line curvature and spectral curvature of the full-wide working wavelength can be eliminated with the compensation of lens' distortion. It is concluded that the imaging spectrometer with P-G dispersing device shows a spectral line curvature less than 1/4 pixel of the detector, which meets the use request on the premise of imaging quality.

Key words optical design; imaging spectrometer; prism-grating; spectral line curvature; volume phase holographic transmission grating

OCIS codes 220.4830; 220.1000; 300.6190

1 引言

成像光谱仪将光学成像技术与光谱仪技术相结

合,能同时探测二维空间信息和一维光谱信息,在地质分析、矿产勘探、地面测绘、军事监测、医疗器械、

收稿日期: 2014-03-26; **收到修改稿日期**: 2014-05-04

基金项目: 中国与俄罗斯国家科技合作资助项目(2011DFR10010)、国家杰出青年科学基金(41104122)

作者简介: 陈洪福(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和成像光谱技术方面的研究。

E-mail: scchf2008@sina.com

导师简介: 巩岩(1968—),男,博士,研究员,主要从事短波光学、光学系统设计和成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

自然灾害预警等方面有着广泛的应用,是现代遥感技术中十分重要的探测仪器。分光元件作为成像光谱仪的核心元件,在许多文献中都有过详细的讨论^[1-2]。棱镜和平面光栅作为分光元件在成像时都会产生谱线弯曲,使得光谱标定和像元匹配变得十分复杂,加大了后期图像处理的难度。随着计算机技术的发展,人们将计算成像技术应用于成像光谱仪而诞生了计算光谱成像技术^[3-4]。然而,计算成像光谱仪对光谱成像系统的谱线弯曲要求极高,对于 10 nm 分辨率的计算成像光谱仪系统,其谱线弯曲引起的光谱偏移量应小于半个像元^[5]。校正谱线弯曲成为成像光谱仪设计的一大难题。

1991 年 Aikio 发明了直线型棱镜-光栅-棱镜 (P-G-P) 组合分光元件^[6],并于 1993 年将其应用于多用途机载成像光谱仪 (AISA)。后来, Aikio 在其博士论文^[7]中详细论述了 P-G-P 型成像光谱仪的设计及相关技术要求。Jørgensen^[8]在改进该类成像光谱仪时指出,谱线弯曲将影响图形边缘光谱探测的准确性,并提出采用电荷耦合元件 (CCD) 阵列标定校正谱线弯曲。Zhu 等^[9-10]也对该系统进行了相关设计和讨论。针对平面光栅成像光谱仪的谱线弯曲,张晓龙等^[11]提出了采用离轴透镜进行补偿校正;针对于棱镜成像光谱仪的谱线弯曲,陈杨等^[12]则采用离轴三反系统实现了谱线弯曲校正。

本文论述了光栅和棱镜产生谱线弯曲 (smile)

的机理,并推导了光谱弯曲 (keystone) 的计算公式。提出利用棱镜和光栅组合补偿校正中心波长的谱线弯曲,使棱镜-光栅 (P-G) 组合分光元件全工作波段的谱线弯曲和光谱弯曲近似对称分布;再利用准直物镜和成像物镜的畸变补偿校正其剩余的谱线弯曲和光谱弯曲。最后,设计了一个消光谱弯曲 P-G 型成像光谱仪系统,优化设计后系统的谱线弯曲和光谱弯曲均小于 2 μm,满足使用要求。

2 谱线弯曲

为了校正 P-G 组合分光元件中心波长的谱线弯曲,引入棱镜和光栅谱线弯曲公式,分析了棱镜和光栅谱线弯曲的相关性质,并推导了 P-G 组合分光元件校正谱线弯曲的公式,由此建立校正谱线弯曲的方案。

2.1 棱镜谱线弯曲

图 1 为棱镜折射产生谱线弯曲的示意图。MQ 为狭缝半高, Q 为狭缝中心, QO 为系统光轴。狭缝中心 Q 点发出的光线经过棱镜的主截面 ABC; 狭缝的上端点 M 发出的光线 MO 通过棱镜的截面 ABD, i_1 为光线入射角, β_1 为 MO 与光轴的夹角, $i_{1\beta}$ 为棱镜法线 HO 与光轴的夹角。由于两个截面的色散顶角不相等 ($\alpha < \alpha'$), 使得两点经过棱镜的色散角不同, 成像后谱线发生弯曲。

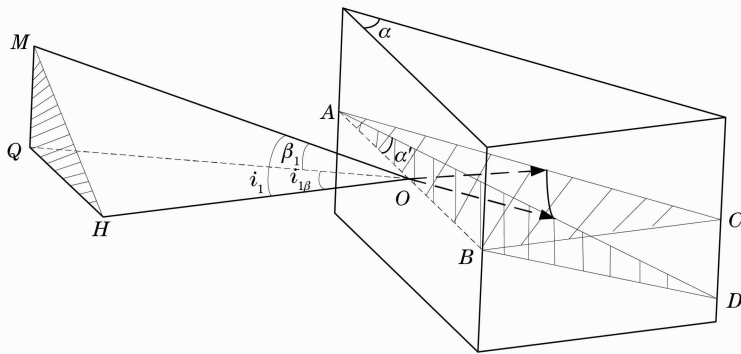


图 1 棱镜折射光路示意图

Fig. 1 Sketch map of prism refractive path

设 $\beta'_1, i'_{1\beta}, i'_1$ 为 $\beta_1, i_{1\beta}, i_1$ 所对应的折射角。由文献^[1]可知,狭缝上任意点发的光线经棱镜第一个面发生折射,其在主截面内的折射定律公式表示为

$$\sin i_{1\beta} = N \sin i'_{1\beta}, \quad (1)$$

$$N = n \frac{\cos \beta'_1}{\cos \beta_1} = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \tan^2 \beta_1}. \quad (2)$$

假设系统中准直物镜和成像物镜焦距相同,则

经棱镜色散后的谱线弯曲公式可表示为^[1]

$$\Delta y'_p = - \frac{(n^2 - 1) \sin \alpha}{2n \cdot f'_1 \cos i'_{1\beta} \cos i'_{2\beta}} x^2, \quad (3)$$

其中 α 为棱镜主截面的顶角, $i'_{2\beta}$ 为经第二面后在主截面内的折射角, x 为狭缝宽度。由于棱镜主截面内折射的角色散率公式为 $\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{\sin \alpha}{\cos i'_{1\beta} \cos i'_{2\beta}} \frac{dn}{d\lambda}$, 从

(3) 式可知谱线的弯曲量由狭缝长度、棱镜的角色散

率及物镜的焦距共同确定。由于 $\Delta y'_p \leq 0$ ，可知棱镜谱线向短波方向弯曲；狭缝越长，谱线弯曲越大；角色散率越大，谱线弯曲量越大。

2.2 光栅谱线弯曲

光栅谱线弯曲的原理与棱镜相似，狭缝上不同点发出的光线入射在光栅时相对于主截面是倾斜的，其衍射光线在主平面的投影也将不同，造成衍射光成像时谱线弯曲。如图 2 所示，直角坐标系原点为 O ，透射式光栅平面与 XOY 重合，光栅刻痕平行于 X 轴。 Z 轴为通过光栅中心的法线， YOZ 为光栅的主截面。狭缝上某点发出的光线经准直后，入射到光栅上 (Ψ 为入射角)，入射光线 OI 通过坐标原点， OI' 是入射光线在主截面上的投影； OD 是经过光栅中心的衍射光线， OD' 为其在主截面的投影。由文献 [2] 和 [13] 可知，完整的光栅方程表示为

$$d \cos \varepsilon (\sin \Phi' - \sin \Phi) = k\lambda, \quad (4)$$

式中 d 为光栅常数， ε 为入射光线与主截面的夹角， Φ 、 Φ' 分别为入射光线和衍射光线在主截面内与光轴的夹角， k 为衍射级次。

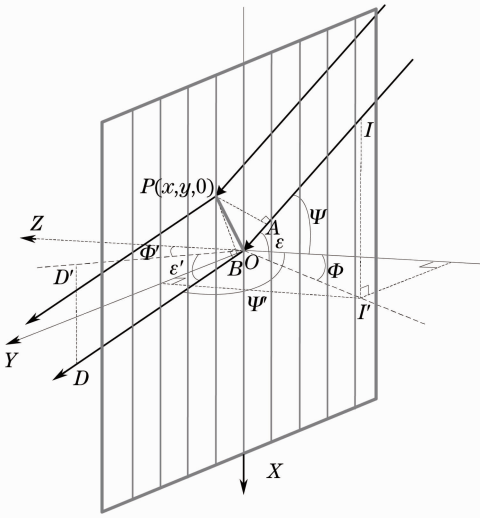


图 2 透射式光栅衍射光路示意图

Fig. 2 Sketch map for transmission grating diffractive path

假设系统中准直物镜和成像物镜焦距相同，透射平面光栅的谱线弯曲公式可表示为 [2]

$$\Delta y'_g = \frac{k\lambda x^2}{2df'_1 \cos \Phi_0}, \quad (5)$$

式中 Φ_0 为狭缝中心光线经光栅的衍射角， x 为狭缝宽度， $\frac{d\Phi_0}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \Phi_0}$ 为光栅主截面内的角色散率公式。本次设计采用光栅的一级衍射，即 $k = 1$ ，从 (5) 式可以看出 $\Delta y'_g \geq 0$ 时，光栅谱线向长波方向弯曲，谱线弯曲量与狭缝长度的平方、波长以及角色散率成正比，与物镜焦距成反比。比较 (3) 式和 (5) 式可知，棱镜和光栅的谱线弯曲方向相反，在设计过程中可利用棱镜和光栅补偿校正谱线弯曲。

2.3 校正中心波长谱线弯曲计算

图 3 为中心波长光通过分光元件的光路示意图，狭缝中心发出的光入射到棱镜的表面，经棱镜折射后进入体全息相位光栅，光栅的入射角为 Φ ，衍射角为 Φ' 。棱镜顶角为 α ，第一面倾角为 β (图中取负)，第二面倾角为 γ (图中取正)；光栅与棱镜第二面平行，即 $\Phi = i'_2$ 。为了使体全息相位光栅的衍射效率达到最大，应满足布拉格条件 [14]，即 $\Phi = -\Phi'$ 。由 (4) 式可得

$$\sin \Phi = \sin i'_2 = -\frac{k\lambda_0}{2d}. \quad (6)$$

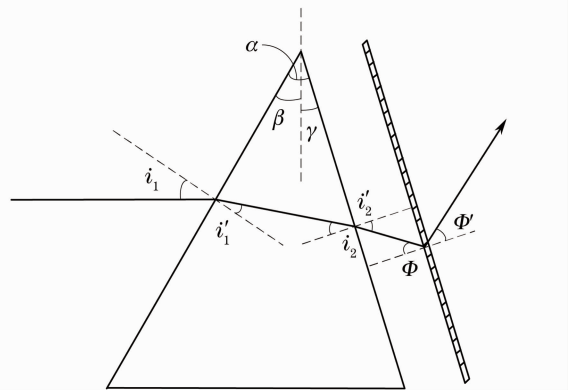


图 3 P-G 组合元件光路示意图

Fig. 3 Sketch map of compound P-G light path

由折射定律可得

$$i'_1 = \arcsin \left[\frac{\sin(-\beta)}{n_{\lambda_0}} \right], \quad (7)$$

$$i'_2 = \arcsin \{ n_{\lambda_0} \sin [i'_1 - (\gamma - \beta)] \} = \arcsin \left(-\frac{k\lambda_0}{2d} \right), \quad (8)$$

利用棱镜与光栅光谱弯曲的特性对中心波长谱线弯曲进行校正，即将 (3) 式和 (5) 式相加得

$$\Delta y' = \Delta y'_p + \Delta y'_g = \frac{k\lambda_0 x^2}{2df'_2 \cos \Phi} - \frac{(n_{\lambda_0}^2 - 1) \sin(\gamma - \beta)}{2n_{\lambda_0} f'_2 \cos i'_1 \cos i'_2} x^2 = 0 \Rightarrow \frac{\lambda_0}{d \cos \Phi} = \frac{(n_{\lambda_0}^2 - 1) \sin(\gamma - \beta)}{n_{\lambda_0} \cos i'_1 \cos i'_2}. \quad (9)$$

求解(7)~(9)式组成的方程组可求得棱镜两面的倾斜角 β 和 γ , 从而确定 P-G 组合分光元件的结构。

3 光谱弯曲

P-G 型成像光谱仪系统除了会产生谱线弯曲之外, 还会引起光谱弯曲, 即同视场下光谱发生弯曲。系统出射光路坐标关系如图 4 所示, OQ_0 是出射光路光轴, 垂直于光轴的虚线框为像面, $M_\lambda Q_\lambda$ 是波长为 λ 的谱线半高, Φ'_λ 为其出射角。系统在成像过程中, 狭缝方向的角分量保持不变, 即 $\beta_1 = \beta'_2 = \epsilon = \epsilon' = x/f'_1$, 由几何关系可得

$$M_\lambda Q_\lambda = \frac{f'}{\cos(\Phi'_\lambda - \Phi'_0)} \tan \epsilon'. \quad (10)$$

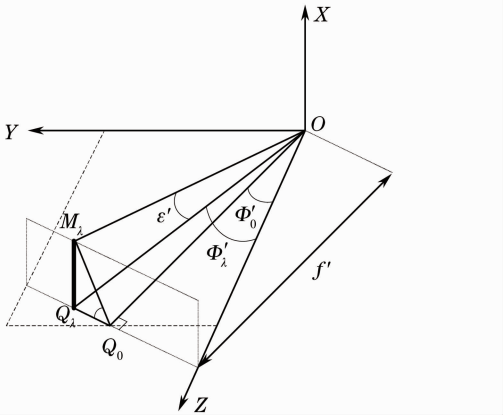


图 4 系统出射光示意图

Fig. 4 Sketch map of ray out from the system

像面上同一视场 x 、不同波长的谱线成像位置(空间维)坐标表示为

$$x'_\lambda = \frac{f'_2}{\cos(\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0)} \tan \epsilon'. \quad (11)$$

则同视场光谱弯曲量可表示为非中心波长与中心波长空间维坐标之差

$$\Delta x' = x'_\lambda - x'_{\lambda_0} = f'_2 \tan \epsilon' [\sec(\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0) - 1]. \quad (12)$$

当 $\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0$ 较小时, $\sec(\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0)$ 可近似为 $1 + (\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0)^2/2$ (以弧度表示), 将 $\tan \epsilon' = x/f'_1$ 代入(12)式, 可得光谱弯曲公式

$$\Delta x' = \frac{mx(\Phi'_{\lambda \rightarrow x} - \Phi'_0)^2}{2}, \quad (13)$$

式中 m 为光谱成像系统放大率。当 m 取 1:1 时, 光谱弯曲量与物镜焦距无关, 正比于非中心波长出射角与中心波长出射角之差的平方。由于光谱弯曲量与狭缝长度成正比, 则光谱向大视场方向弯曲。

4 P-G 型成像光谱仪光学设计

4.1 主要的技术指标

P-G 型成像光谱仪系统包括前置望远系统和光谱成像系统。光谱成像系统由准直物镜、P-G 组合色散元件、成像物镜及探测器组成。本次设计的成像光谱仪前置物镜选用成品工业镜头, 光谱成像系统放大率取 1:1。光栅采用 Wasatch Photonics 公司生产的体全息相位光栅, 线对数为 350 lp/mm。CCD 像元大小为 $8.9 \mu\text{m}$, 可用面积为 $14.24 \text{ mm} \times 6.14 \text{ mm}$, 在实际应用过程中采用 2 pixel \times 2 pixel 像元合并模式。光谱成像系统主要的参数指标如表 1 所示。

表 1 P-G 型成像光谱仪系统参数

Table 1 Parameters of P-G imaging spectrometer

Performance parameters	Value
Spectral range	400~800 nm
F number	F/2.4
Spectral resolution	2 nm (with 30 μm slit)
Image size	6.14(spectral) \times 14.3(spatial) mm
Spatial resolution	RMS spot radius [<8.9 μm (1 pixel)]
Bending of spectral line and spectral	Smile (<2 μm) Keystone (<2 μm)
Slit width multiply length	30/20 $\mu\text{m} \times 14.3 \text{ mm}$
MTF (full field of view)	≥ 0.6 (with 2 pixel \times 2 pixel)

4.2 P-G 分光元件结构设计

本次设计棱镜材料选用成都光明公司的 H-K9L, 中心波长 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ 。用数值求解的方法解出(7)~(9)式组成的方程组的近似解为: $\beta = -15.2624^\circ$; $\gamma = -1.4010^\circ$ 。将 H-K9L 的折射率参数 $n(\lambda)$ 代入(7)、(8)、(4)式可求出狭缝中心处波长范围在 400~800 nm 的色散角度为 $1.8013^\circ \sim 10.1573^\circ$, 中心波长的色散角为 $\Phi'_0 = 6.0272^\circ$ 。以中心波长主光线作为成像物镜光轴, 即成像光谱仪的准直系统和成像系统光轴夹角为 6.0272° 。由此可以得出两物镜的焦距

$$f' = \frac{6.14}{\tan(10.1573^\circ - 6.0272^\circ) + \tan(6.0272^\circ - 1.8013^\circ)} \approx 42.027 \text{ mm}.$$

设计过程中考虑像面倾斜和装调余量等因素, 取焦距为 41.5 mm。

利用(3)式和(5)式求得波长在 400、500、600、700、800 nm 时棱镜谱线弯曲、光栅谱线弯曲以及组合元件的谱线弯曲,如图 5 所示。图 5(a)为不同波长下棱镜的谱线弯曲图,谱线向短波方向弯曲。由于棱镜角色散率小,不同波长通过棱镜后的偏转角几乎相同,各谱线弯曲差异较小。图 5(b)为不同波长下光栅的谱线弯曲图。从图 5(b)可看出,光栅谱线向长波方向弯曲,不同波长谱线弯曲差异较大,波

长越长,弯曲越大。比较图 5(a)和图 5(b)可看出,不同波长棱镜和光栅谱线弯曲变化不一致,所以仅利用光栅和棱镜组合很难实现全工作波的谱线弯曲校正。图 5(c)为不同波长下 P-G 组合元件的谱线弯曲图,由图可知中心波长处的谱线弯曲得以校正,而其他波长的谱线弯曲近似关于中心波长谱线对称分布。

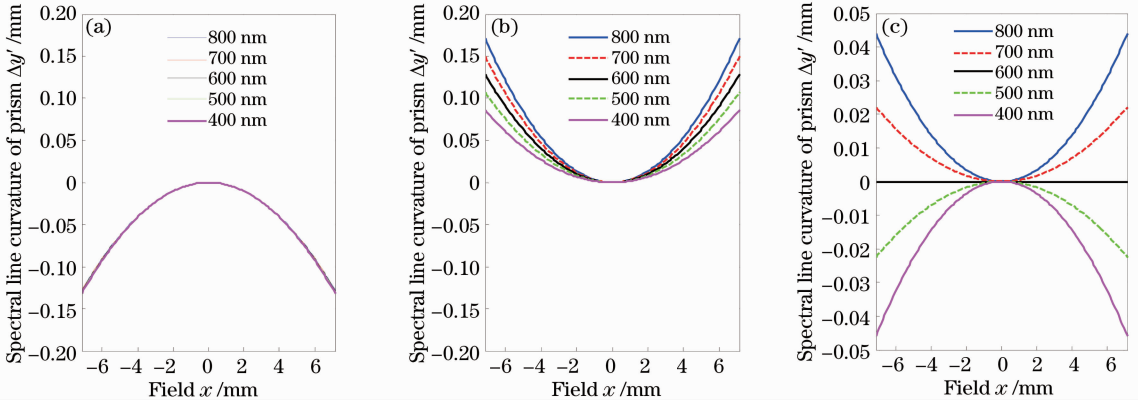


图 5 谱线弯曲。(a)棱镜；(b)光栅；(c) P-G 组合元件

Fig. 5 Spectral line curvature. (a) Prism; (b) grating; (c) compound P-G

图 6 为利用(1)式、(4)式以及(13)式计算出视场在 $x=0, 2.4, 4.8, 7.15$ mm 时的光谱弯曲。由图可知光谱向大视场弯曲,视场越大,光谱弯曲量越大;不同视场光谱的弯曲近似关于中心波长对称分布。结合图 5(c)和图 6 可发现,P-G 组合元件的谱线弯曲和光谱弯曲与光学系统畸变形式相似,且属于正畸变。在设计时,可以利用准直物镜和成像物镜产生相应的负畸变对剩余的光谱弯曲与谱线弯曲进行补偿校正。

4.3 成像光谱仪系统设计

通过校正中心波长谱线弯曲,实现剩余谱线弯曲和光谱弯曲对称分布,完成棱镜和光栅组合结构的设计,同时确定准直物镜和成像物镜的光轴夹角。分析成像光谱仪系统 F 数及像方视场角,选择三片式物镜作为准直物镜和成像物镜的初始结构,并将其复杂化以校正几何像差。利用像面倾斜的方式校

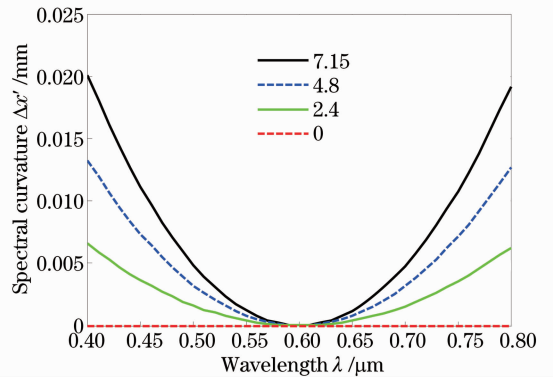


图 6 P-G 组合元件的光谱弯曲

Fig. 6 Spectral curvature of compound P-G

正轴向色差并达到平谱面的目的。在优化的过程中使用校正谱线弯曲和光谱弯曲的相关操作数进行优化,进一步校正其他波长的谱线弯曲。优化后系统的光路如图 7 所示。

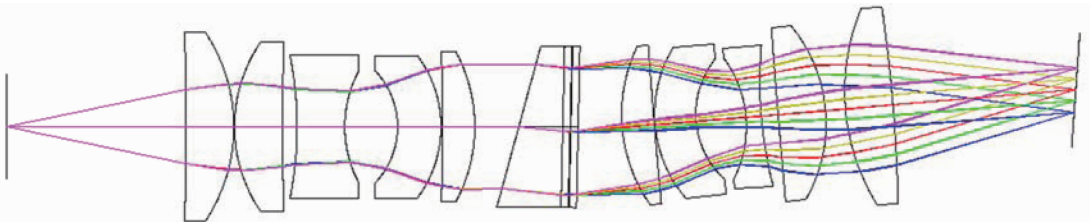


图 7 P-G 型成像光谱仪系统光路图

Fig. 7 Optical layout of P-G imaging spectrometer system

图 8 给出了不同波长的系统点列图和调制传递函数(MTF)图。2 pixel×2 pixel 像元模式下,系统的截止频率为 28.1 lp/mm。从图中可以看出所有视场点列图的均方根(RMS)半径均小于一个像元,

截止频率处的 MTF 大于 0.7。全视场中 85%的能量集中在直径为 17.8 μm 的范围内。系统像散较小,从而保证了各视场强度分布的均匀性。

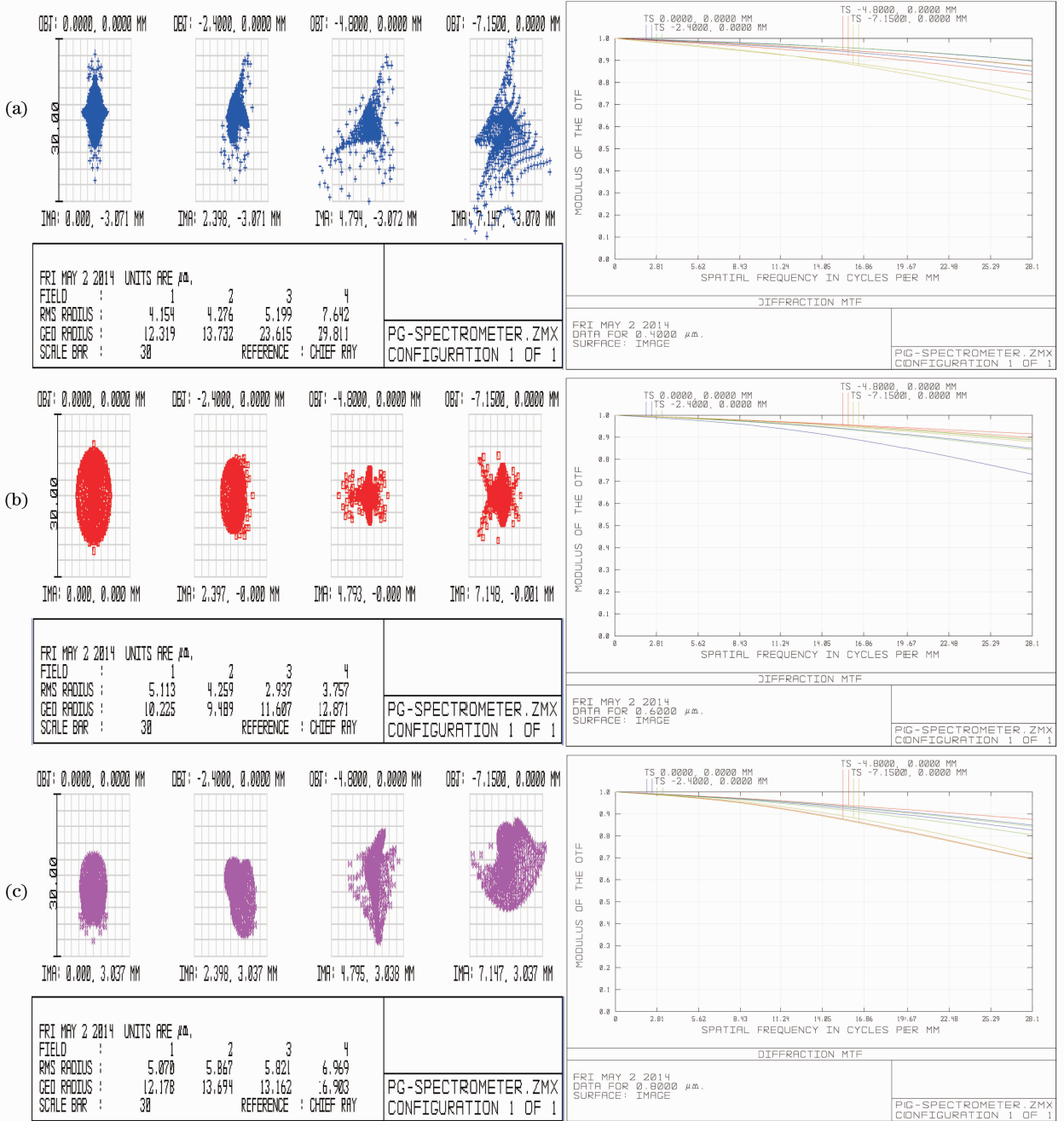


图 8 成像光谱仪系统在波长(a) 400 nm、(b) 600 nm、(c) 800 nm 点列图及 MTF 图

Fig. 8 Spot diagrams and MTF of imaging spectrometer system at wavelength of (a) 400 nm, (b) 600 nm, (c) 800 nm

图 9 为通过 Zemax 软件模拟的畸变校正前后系统谱线弯曲和光谱弯曲的对比图。从图 9(a)和 (c)可以看出理论计算结果与 Zemax 软件的模拟结果非常吻合,验证了理论模型的准确性。对比图 9 可以看出,通过物镜畸变补偿校正,系统的谱线弯曲

由原来的 47 μm 降为 1.9 μm,系统的光谱弯曲由 20 μm 降为 1.7 μm。整个工作波段的谱线弯曲量和全视场的光谱弯曲量均在 1/4 像元大小以下。在实际应用中,从光学设计根源上校正谱线弯曲和光谱弯曲,提高了 CCD 数据采集的准确性,更利于成

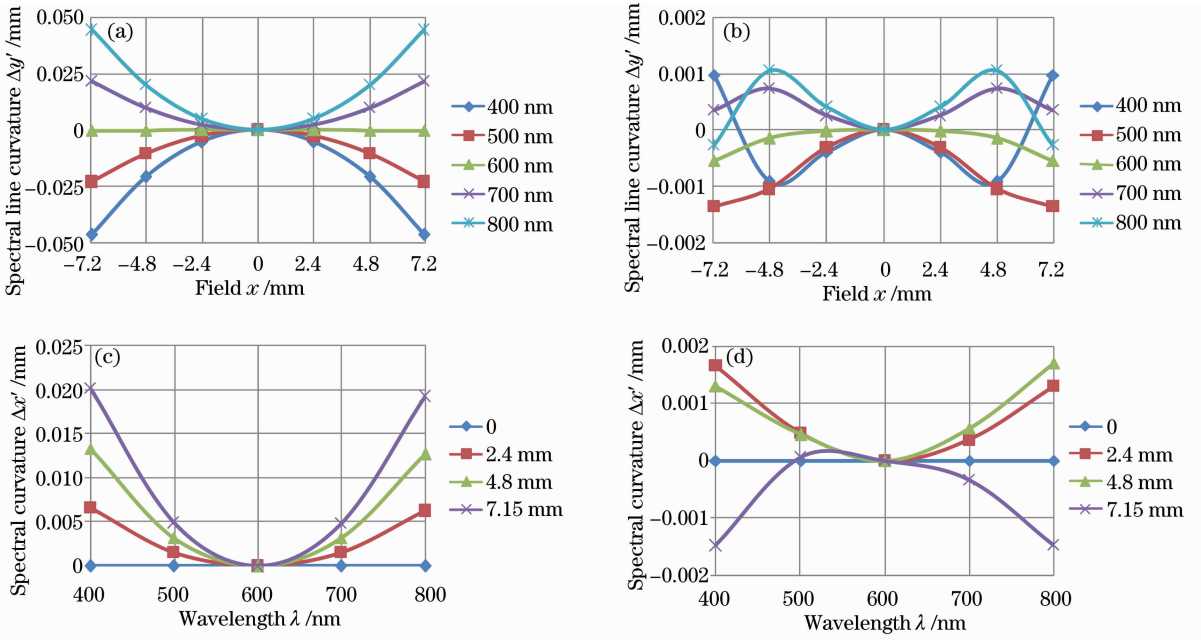


图9 畸变补偿校正前后系统谱线弯曲和光谱弯曲对比图。(a)校正前谱线弯曲;(b)校正后谱线弯曲;
(c)校正前光谱弯曲;(d)校正后光谱弯曲

Fig.9 Curvature with and without compensation correction by lens distortion. (a) Spectral line curvature without correction; (b) spectral line curvature with correction; (c) spectral curvature without correction; (d) spectral curvature with correction

像光谱仪分辨率的提高。

通过优化,光谱成像系统的像质、分辨率以及谱线弯曲和光谱弯曲的校正均达到设计要求。另外,本设计物镜采用折射式结构,减小了加工和装调的难度,更符合实际应用。

5 结 论

提出了一种校正成像光谱仪谱线弯曲的方法,并设计了一个基于 P-G 分光元件的成像光谱仪。分别计算了棱镜和光栅产生的谱线弯曲以及 P-G 组合器产生的光谱弯曲,从而确立 P-G 分光元件的结构并指导设计。所设计的成像光谱仪谱线弯曲和光谱弯曲均小于 $2 \mu\text{m}$ 。光谱分辨率在 2 nm 以上,系统像散较小,成像质量满足空间分辨率要求。设计结果表明,采用 P-G 组合分光元件校正中心波长谱线弯曲,使剩余谱线弯曲和光谱弯曲对称分布,然后结合准直物镜和成像物镜的畸变补偿校正剩余的谱线弯曲和光谱弯曲,可实现全工作谱段的谱线弯曲校正。提供了消谱线弯曲 P-G 型分光元件的设计方法,为成像光谱仪的设计提供了新思路,具有指导作用。

参 考 文 献

- 1 Wu Guoan. Design of Spectrograph [M]. Beijing: Science Press, 1987. 84-87.
- 2 Lin Zhong, Fan Gufu. Spectral Instruments [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 66-68.
- 3 M Gehm, R John, D J Brady, et al.. Single-shot compressive spectral imaging with a dual-disperser architecture [J]. Opt Express, 2007, 15(21): 14013-14027.
- 4 Chen Yuheng, Chen Xinhua, Zhou Jiankang, et al.. Spatial coding modulation effect of compressive spectral imaging [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1015001.
- 5 Qian Lulu, Xiangli Bin, Lü Qunbo, et al.. Analysis and simulation of effect of spectral line bending on computational imaging spectrometry [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(8): 897-901.
- 6 B Braam, J T Okkonen, M Aikio, et al.. Design and first test results of the Finnish airborne imaging spectrometer for different applications [C]. SPIE, 1993, 1937: 142-151.
- 7 M Aikio. Hyperspectral Prism Grating Prism Imaging Spectrograph [D]. Finland: VTT Electronics, 2001.
- 8 Rasmus Nyholm Jørgensen. The VTTVIS Line Imaging Spectrometer-Principles, Error Sources and Calibration [D]. Roskilde: Risø National Laboratory, 2002.
- 9 Zhu Shanbing, Tang Minxue, Ji Yiqun, et al.. Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers [C]. SPIE, 2008, 7156: 71560L.

- 10 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.
吴从钧, 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.
- 11 Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature [J]. Opt Precision Eng, 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.
- 12 Chen Yang, Wang Yueming. 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.
- 13 J F James. Spectrograph Design Fundamentals [M]. New York: Cambridge University Press, 2007. 72–75.
- 14 B C Samuel, A A James, S C Willis. Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications [C]. SPIE, 1998, 3355: 866–876.

栏目编辑: 韩峰