

改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法

刘健鹏 唐 义 黄 刚 张止戈 倪国强

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 像散是目前影响 Czerny-Turner 结构成像光谱仪空间分辨率最大的像差。首先引入柱面反射镜, 利用光焦度衡量像散大小, 推导出易于计算的像散校正公式, 有效地校正了像散。给出准直镜到光栅距离的计算方法, 有效校正了成像光谱仪边缘视场像差。给出了成像光谱仪像面倾角的计算方法, 实现了宽波段的像差校正。最终利用上述方法设计了一套用于 115~200 nm 的改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪, 焦距 $f' = 48$ mm, F 数为 5.0, 全视场、全波段调制传递函数(MTF)在 0.7 以上。全波段光谱分辨率为 0.22 nm, 像面大小为 8 mm×7 mm。设计方法适用于多种结构要求的成像光谱仪。

关键词 成像光谱仪; Czerny-Turner 结构; 柱面反射镜; 远紫外

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0322007

Design Method of Optical System of Improved Czerny-Turner Imaging Spectrometer

Liu Jianpeng Tang Yi Huang Gang Zhang Zhige Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photo-Electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Astigmatism is the main aberration that limits the spatial resolution of Czerny-Turner imaging spectrometer. Focal power is introduced to calculate astigmatism, and formulas are deduced to correct it. The method of computing the distance between grating and collimator is given, which is able to correct the aberration of the edge of field of view. The computing method of tilt angle of imaging plane, which is helpful to correct the aberration at all wavelengths. And an imaging spectrometer based on such structure working in 115~200 nm is designed, with $f' = 48$ mm, F number is 5.0 and image size is 8 mm×7 mm. The designed imaging spectrometer can get spectral resolution $\delta\lambda = 0.22$ nm and modulation transmission function (MTF) is 0.7 at all wavelengths and full field of view. The design method can be applied to other imaging spectrometers of different structures.

Key words imaging spectrometer; Czerny-Turner structure; cylindrical mirror; far ultraviolet

OCIS codes 120.4570; 300.6190; 120.6200

1 引 言

基于 Czerny-Turner 结构的光谱仪自 20 世纪提出, 经过 Murty 等^[1~3]的研究, 光谱分辨率已经发展到较高的水平, 目前的光谱仪广泛采用这种结构。由于前人主要针对光谱仪的光谱分辨率进行研究,

传统光谱仪的空间分辨率不高。

随着成像光谱技术在遥感成像技术中的发展, 由于其卓越的光信息获取能力, 如今已成为遥感领域不可或缺的重要仪器^[4,5], 因此对高空间分辨率的成像光谱仪的研制已成为热点。20 世纪初的 10

收稿日期: 2011-08-29; 收到修改稿日期: 2011-11-01

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z101)和国家 973 计划(2009CB724005)资助课题。

作者简介: 刘健鹏(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事远紫外成像光谱仪光学系统设计和辐射定标等方面的研究。

E-mail: liujp010@126.com

导师简介: 唐 义(1977—), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事紫外成像光谱技术、紫外遥感技术等方面的研究。

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn(通信联系人)

年,国内外各科研机构 and 学者对成像光谱仪像差校正方法进行了研究,2002 年 Masayuki Futamata 等^[6]提出利用超环面校正 Czerny-Turner 结构的像散,在此基础上 2009 年薛庆生等^[7,8]设计出宽波段的成像光谱仪,2010 年 Kye-Sung Lee 等^[9]利用柱面透镜设计出宽波段的成像光谱仪。

前人的研究基础上,利用光焦度衡量像散的大小,引入柱面反射镜消除 Czerny-Turner 结构的像散。并给出了准直物镜与光栅之间距离的公式,使成像光谱仪不仅可以获得宽波段的光谱信息,还可以获得大视场的空间信息。此外,给出了成像光谱仪像面倾角的计算方法,实现宽波段的光谱信息获取。

2 Czerny-Turner 结构的像差分析与校正

Kye-Sung Lee 等^[9]提出的柱面镜校正像散公式,是利用焦距衡量像散的大小,该公式设计的柱面镜置于聚焦物镜的后,因为当柱面镜置于聚焦物镜前方时,公式变得复杂,不易计算和理解。本文利用光焦度化简后的像散校正公式设计的柱面反射镜,其位置可以根据结构的使用要求任意摆放。并给出了准直物镜与光栅之间距离的公式,使成像光谱仪不仅可以获得宽波段的光谱信息,还可以获得大视场的空间信息。最后,给出成像光谱仪像面倾角的计算方法,实现宽波段的光谱信息获取。

图 1 为 Czerny-Turner 型成像光谱仪光路结构图,图中 α_1 和 α_2 分别为主光线在准直反射镜和聚焦反射镜上的离轴角, i 为主光线在光栅上的入射角, θ

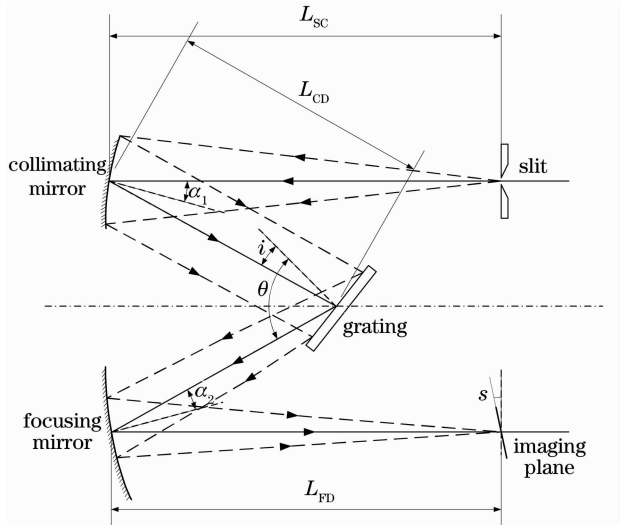


图 1 Czerny-Turner 型成像光谱仪光路结构图

Fig. 1 Schematic of Czerny-Turner imaging spectrometer

为中心波长的衍射角。 σ 为像面法线与中心波长主光线的夹角,其他物理量由图 1 中均可知。

2.1 球差

在成像光谱仪中将球差校正到允许的范围需满足公式

$$f' \leq 256\lambda F^4, \quad (1)$$

式中 f' 为凹球面反射镜的焦距, F 为成像光谱仪的 F 数。

2.2 彗差

Czerny-Turner 型成像光谱仪中的准直反射镜和聚焦反射镜都在离轴条件下使用,产生了一定的彗差。光谱仪的彗差会使得谱线产生单边扩散效应,这样既降低了光谱分辨率,也容易造成假谱线^[10],因此必须校正到合理的水平之内。Shafer^[2]提出 Czerny-Turner 结构在平行光照明光栅的情况下消彗差的方法。当图 1 中所示结构参数满足

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos \theta} \right)^3 \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \right)^3 \quad (2)$$

时就可以在特定波长处完全消除彗差。(2)式采用矢量形式求得,因此 α_1 与 α_2 同号,说明只有非交叉的 Czerny-Turner 结构才可以满足消彗差条件,而交叉 Czerny-Turner 结构不能满足。

2.3 像散

像散是目前影响 Czerny-Turner 型成像光谱仪最大的像差。像散的产生可归因于球面反射镜子午面与弧矢面的曲率半径相同,导致其在离轴成像时子午焦距与弧矢焦距不等造成,因此只需使子午焦距与弧矢焦距之差为零或比较小的值就可校正像散^[8]。利用超环面可校正像散,然而超环面镜的加工技术仍不成熟,加工费用高以及难以检测等问题导致目前难以用于低成本、民用化的成像光谱仪之中。Kye-Sung Lee 等^[9]提出加入柱面透镜的方法同样可消除像散,然而采用焦距差的形式衡量像散,使得像散校正公式非常繁琐,为简化计算只能将柱面镜加在聚焦反射镜后方,而聚焦反射镜与像面之间的距离有限,所以只能加入透射式柱面镜消除像散。此外,采用透射式柱面镜将产生两点问题:1)在紫外波段,透射式材料对宽光谱全波段的透过率通常低于反射率,导致系统能量降低,并且难以实现宽光谱成像,尤其难以用于材料吸收大的波段。2)透射材料的折射率随波长变化,产生色差,在设计结构时,需要计算像面倾斜的角度,导致计算公式复杂。

光焦度是光学系统会聚本领或发散本领的数值表示^[11],采用光焦度衡量像散,将使得像散校正公

式简单,容易计算。对于两组具有光焦度的光学元件,其总的光焦度可表示为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2, \quad (3)$$

式中 φ_1 和 φ_2 分别为准直反射镜和聚焦反射镜的光焦度, d 为准直反射镜到聚焦物镜的距离,等于准直反射镜到光栅的距离 L_{CG} 与光栅到聚焦反射镜距离 L_{CF} 之和。通常 d 约为两片反射镜曲率半径之和,即 $d \approx r_1 + r_2 = 2f'_1 + 2f'_2$ 。将 d 值代入(3)式得

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (4)$$

子午面和弧矢面的光焦度可表示为^[12]

$$\varphi_T = 2/(r_T \cos \alpha), \quad (5)$$

$$\varphi_S = (2/r_S) \cos \alpha. \quad (6)$$

并得到像散公式

$$\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_S, \quad (7)$$

根据光焦度的物理意义和(5),(6)式可知球面反射镜在子午面的聚光能力高于弧矢面,因而产生像散的原因可归结于球面反射镜离轴成像时光焦度在子午与弧矢面不同造成的。可以用(7)式所示的光焦度之差来反映像散的大小。而整个系统在子午面光焦度与弧矢面光焦度之差可表示为

$$\Delta\varphi = (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) = (\varphi_{T_1} - \varphi_{S_1}) + (\varphi_{T_2} - \varphi_{S_2}). \quad (8)$$

同样根据光焦度的物理意义和(8)式说明整个系统的像散是由于系统在子午面与弧矢面的聚光能力不同造成的,而整个系统在子午面与弧矢面的光焦度之差来源于每片离轴球面反射镜子午面与弧矢面的光焦度之差。若要校正像散,可以减小系统在子午面的聚光能力或增大系统在弧矢面的聚光能力。

凹柱面反射镜增加系统在弧矢面的光焦度,从而使 $\Delta\varphi=0$,达到校正像散的目的。柱面反射镜在弧矢面的光焦度和曲率半径可分别表示为

$$\varphi_C = \left(\frac{2}{r_1 \cos \alpha_1} - \frac{2}{r_1} \cos \alpha_1 \right) + \left(\frac{2}{r_2 \cos \alpha_2} - \frac{2}{r_2} \cos \alpha_2 \right), \quad (9)$$

$$r_C = \frac{2}{\varphi_C}. \quad (10)$$

上述推导与柱面反射镜的位置无关,柱面反射镜的位置可根据光谱仪结构要求合理选择。

2.4 宽波段、大视场像差校正

上述校正方法仅是对单一波长、零视场有效。图1中经光栅色散后的光线以不同的入射角射到聚焦物镜,导致聚焦物镜离轴角 α_2 随衍射角 θ 变化,被校正波长以外的像差没有得到较好的校正。若要校

正全波段的像差,需要使 α_2 不随衍射角 θ 变化或随衍射角 θ 变化缓慢,即使得球面反射镜适用于大视场成像。因此,宽波段的像差校正实质上是针对 Czerny-Turner 结构子午面内的全视场像差校正,大视场的像差校正实质上是针对 Czerny-Turner 结构弧矢面内的全视场像差校正。

图2所示为球面反射镜离轴成像时的部分光路图。平行通过孔径光阑入射到球面反射镜上,零视场主光线在反射镜上入射角为 α ,任意视场 β 的主光线在反射镜上入射角为 α' 。图中点 G 为孔径光阑中心点, C 为球面反射镜曲率中心。若 $\alpha' = \alpha$,即任意视场的主光线在反射镜上的入射角相等,则各视场的像差相等。因此只需对零视场校正像差,其余视场的像差将得到同样的校正。

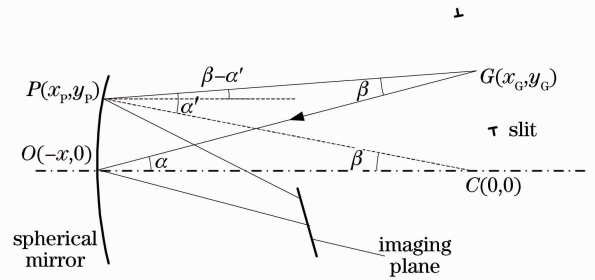


图2 球面反射镜离轴成像示意图

Fig. 2 Schematic of off-axis imaging by spherical mirror

令 $\alpha' = \alpha$,以球面反射镜曲率中心 C 为原点, OC 为 x 轴,建立平面直角坐标系, G 点为直线 OG 与 PG 的交点, OG 和 PG 的方程可分别表示为

$$y = \tan \alpha(x + r), \quad (11)$$

$$y - r \sin \beta = \tan(\alpha - \beta)(x + r \cos \beta). \quad (12)$$

则交点 G 的坐标满足上述两个方程,联立(11),(12)式,并令 $k_x = x_G/r$,可得

$$k_x = \frac{1}{2} \sin 2\alpha \frac{(1 - \cos \beta)}{\sin \beta} - \sin^2 \alpha. \quad (13)$$

在单面球面镜用于离轴成像时 β 值比较小,在 5° (0.087 rad) 以内,利用泰勒展开式对 β 展开并忽略 β^2 及更高次项可得

$$\begin{cases} k_x = \frac{1}{4} \sin 2\alpha \beta - \sin^2 \alpha \\ k_y = \frac{1}{4} \tan \alpha \sin 2\alpha \beta + \sin \alpha \cos \alpha \end{cases}. \quad (14)$$

(14)式是在任意点入射角与中心点入射角相同的情况下求得,因此只需 G 点坐标满足(14)式就可以满足任意点入射角均为 α 的要求。在光学设计时,通常关心的是光学元件之间的倾角和距离,因此将图2所示的直角坐标系变换为极坐标系。在以反射镜中

心 O 为坐标原点的极坐标系中,光阑中心的坐标可表示为 $G(\alpha, \rho)$, 其中 ρ 为光阑到反射镜的距离, 同样忽略 β^2 及更高次项, ρ 可表示为

$$\rho = r \sqrt{(k_x + 1)^2 + k_y^2} = r \cos \alpha \sqrt{1 + \tan \alpha \beta}. \quad (15)$$

在实际的设计中, 通常 α 不会超过 10° , β 也在 5° 以内, (19) 式中的 $\tan \alpha \delta \theta \ll 1$, 忽略 $\tan \alpha \delta \theta$, 可得光阑到反射镜距离为

$$\rho = r \cos \alpha. \quad (16)$$

所以光阑坐标为 $G(\alpha, r \cos \alpha)$, 此时入射角随视场变化缓慢。

比较图 1 与图 2 可知, Czerny-Turner 结构为两片离轴球面反射镜组合使用, 光栅处于两镜之间的平行光束区域。对于聚焦反射镜, 光栅相当于图 2 中的入瞳。对于准直反射镜, 将图 2 所示的光路逆转, 则光栅相当于出瞳。在设计 Czerny-Turner 成像光谱仪时, 将光栅作为成像光谱仪的孔径光阑, 并保持光栅到准直反射镜的距离 L_{CG} 和光栅到聚焦反射镜的距离 L_{GF} 可表示为

$$L_{CG} = r_1 \cos \alpha_1, \quad (17)$$

$$L_{GF} = r_2 \cos \alpha_2. \quad (18)$$

这样既能校正宽波段的像差, 又能校正大视场的像差。

2.5 像面倾角

与共轴成像系统不同, 离轴球面反射镜对大视场成像时, 像面法线与主光线夹角 $\sigma \neq 0$ 。这是因为主光线在离轴球面反射上的入射角 $\alpha \neq 0$ 。将图 2 所示的成像示意图以球面镜曲率中心为原点旋转 α , 并且仍以过曲率中心 C 的水平线为光轴, 得图 3 所示的离轴成像示意图。根据高斯成像理论, 像面与物面平行并垂直于光轴, 并根据图中所示几何关系, 像面法线与主光线的夹角 $\sigma = 2\alpha$ 。

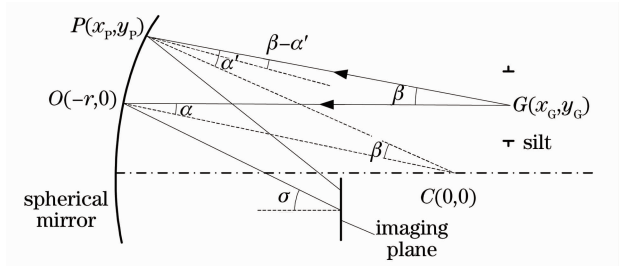


图 3 球面反射镜离轴成像示意图

Fig. 3 Schematic of off-axis imaging by spherical mirror

3 设计实例

根据上述的设计方法设计了一套用于深紫外

(115~180 nm) 的电离层探测的成像光谱仪。采用紫外 CCD 探测器接收光谱图像, 像元尺寸 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 面阵大小 $25 \text{mm} \times 8 \text{mm}$ 。取准直反射镜和聚焦反射镜的曲率半径分别为 $r_1 = 200 \text{mm}$, $r_2 = 180 \text{mm}$, 准直反射镜和光栅的入射角分别为 $\alpha_1 = 10^\circ$, $i = 5^\circ$ 。根据(2)和(14)式可确定成像光谱仪的初始结构如图 4 所示, 图中的结构参数如表 1 所示。利用光学仿真软件 Zemax 对初始设计的参数进行优化, 得到的优化后的参数如表 1 所示。图 5 为设计的最终结构图。

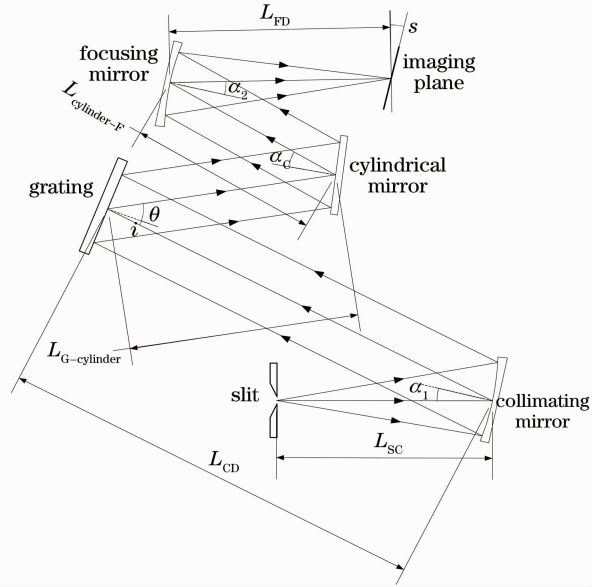


图 4 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪结构示意图

Fig. 4 Schematic of the improved Czerny-Turner imaging spectrometer

表 1 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪参数

Table 1 Parameters of the improved Czerny-Turner imaging spectrometer

	Initial structure parameters	Optimized structural parameters
$\alpha_1 / (^\circ)$	10	10
$\alpha_2 / (^\circ)$	8.72	8.38
$\alpha_c / (^\circ)$	13.3	13.3
$i / (^\circ)$	5	5
$\theta_{147.5 \text{ nm}} / (^\circ)$	15.48	15.48
$\sigma / (^\circ)$	17.42	18.42
r_1 / mm	200	202.56
r_2 / mm	180	178.82
r_c / mm	3541.23	3743.11
L_{SC} / mm	100	100
L_{CG} / mm	196.96	195.48
$L_{G-cylinder} / \text{mm}$	100	100
$L_{cylinder-F} / \text{mm}$	77.91	83.70
L_{FD} / mm	90	88.19

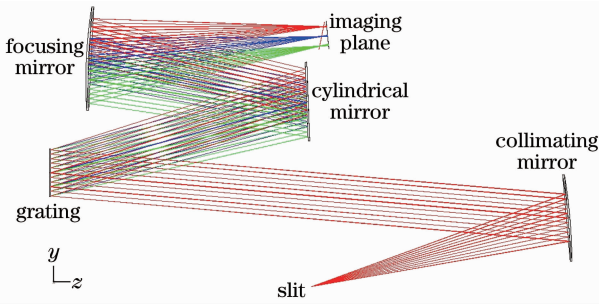


图 5 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪结构图
Fig. 5 Structure of the improved Czerny-Turner imaging spectrometer

4 设计结果比较与分析

4.1 像散校正前后比较

图 6 分别给出了引入柱面反射镜前成像光谱仪在 x 方向(空间维)和 y 方向(光谱维)点列均方根半径随波长变化的曲线图。由图中数据可以看出未引入柱面反射镜时,成像光谱仪在光谱维的像差已经得到较好的校正,而在空间维仍然存在非常大的像差。图 7 为引入柱面反射镜后成像光谱仪在 115~180 nm 的 x 方向(空间维)和 y 方向点列均方根半径随波长变化的曲线图。比较图 6 与图 7 可知,引入柱面反射镜后空间维的像差得到极大校正,而光谱维保持不变。

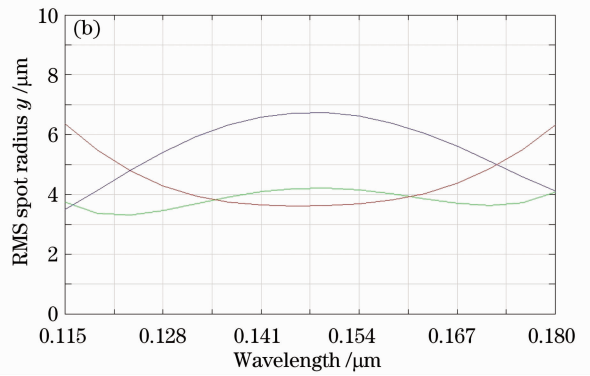
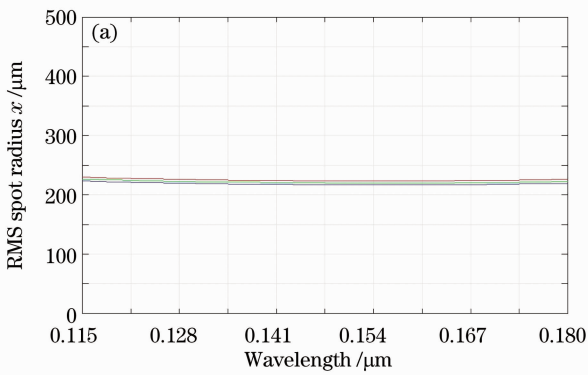


图 6 不加柱面反射镜时点列均方根半径与波长关系。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 6 RMS of spot radius versus wavelength without cylindrical mirror. (a) x dimension; (b) y dimension

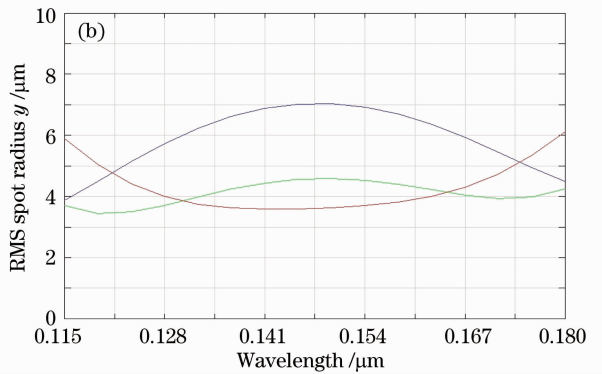
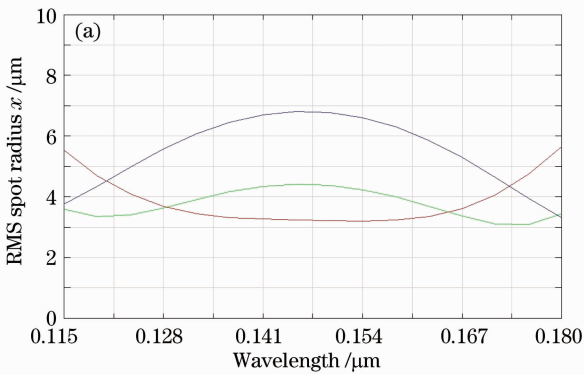


图 7 加柱面反射镜后点列均方根半径与波长关系。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 7 Root mean square (RMS) of spot radius versus wavelength with cylindrical mirror. (a) x dimension; (b) y dimension

4.2 宽波段、大视场校正前后比较

图 8(a)为传统型结构光栅到聚焦反射镜距离 $L_{GF} = f'_F$ 时的点列均方根半径随波长的变化曲线,可以看这种结构只能校正中心波长像差,而随着波长偏离中心波长,像差急剧增大。图 8(b)为传统型结构光栅到聚焦反射镜距离满足(22)式时点列均方根半径随波长的变化曲线,可以看出全波段的像差得

到有效校正。

图 9 分别给出大视场校正前后点列均方根半径随视场的变化曲线,可以看出本文提出的大视场校正方法对成像光谱仪的全视场像差校正有效。这表明准直反射镜与光栅之间的距离并非为无关的量^[13]。

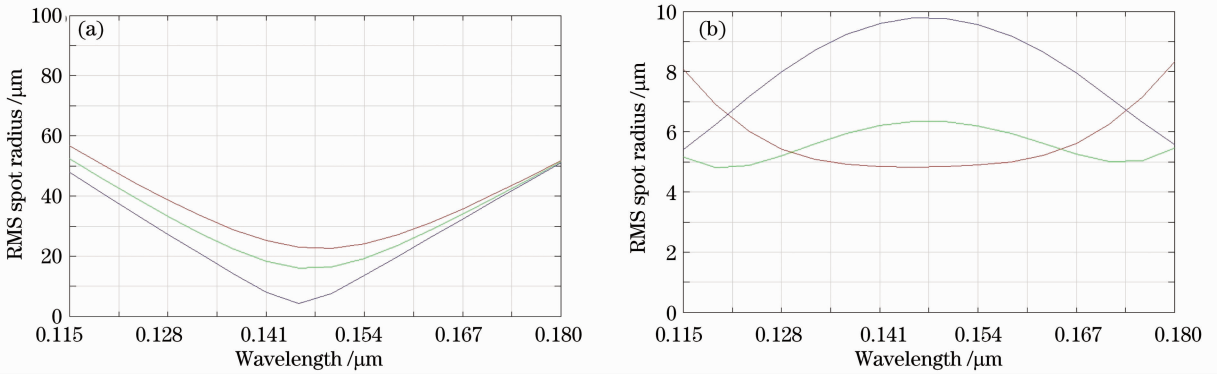


图 8 列点均方根半径与波长关系。(a)仅对中心波长校正时的关系曲线;(b)改进型结构对全波段校正的关系曲线
Fig. 8 RMS of spot radius versus wavelength. (a) Only the central wavelength corrected; (b) all wavelength corrected with the improved structure

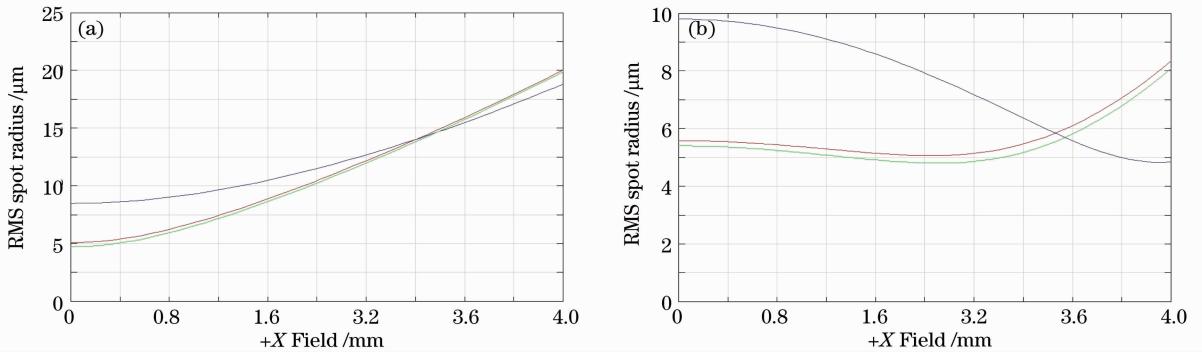


图 9 列点均方根半径与波长关系。(a)传统结构;(b)改进型结构

Fig. 9 RMS of spot radius versus wavelength. (a) Traditional structure; (b) improved structure

4.3 像质分析

图 10 为设计的改进型 Czerny-Turner 成像光

谱仪的 3 个波长(115, 147.5, 180 nm)的调制传递函数(MTF)曲线。全视场、全波段 MTF 均在 0.7 以

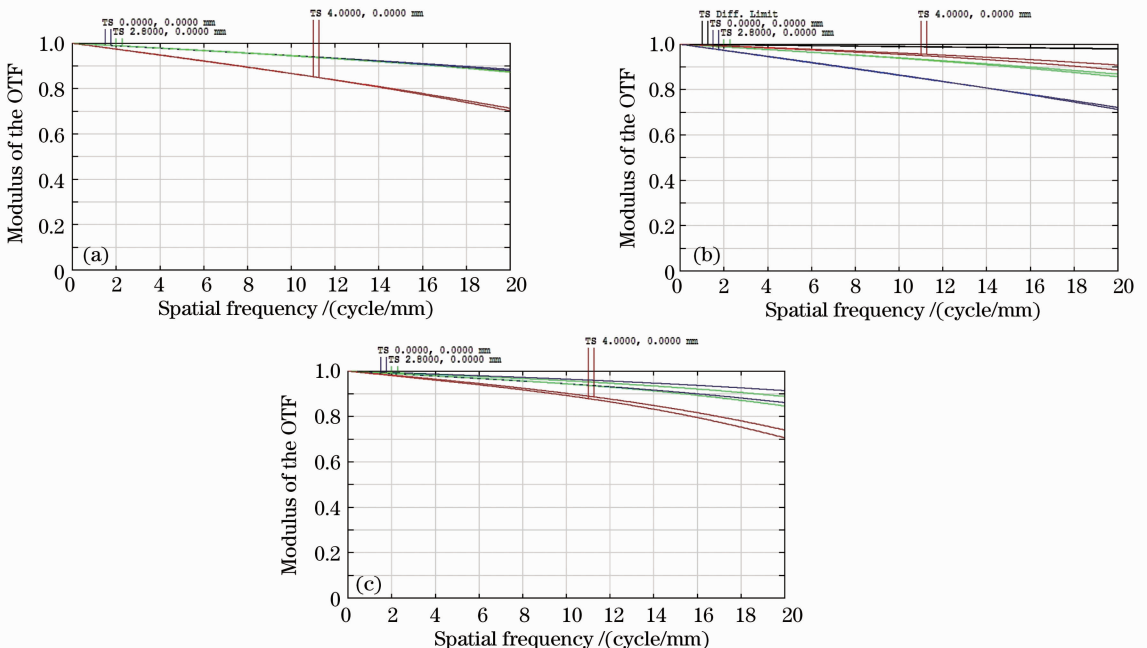


图 10 光学系统的 MTF 曲线。(a) 115 nm; (b) 147.5 nm; (c) 180 nm

Fig. 10 MTF of the optical system. (a) 120 nm; (b) 150 nm; (c) 180 nm

上。

由上述的像质分析可知全视场、全波段点列均方根半径均小于 $10\ \mu\text{m}$, 小于一个像元, 这表明此时像差已不是限制成像光谱仪光谱分辨率的主要因素, 而狭缝宽度和像元尺寸已成为影响光谱分辨率的主要因素。通过光栅线色散光程可以计算出以 $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ 为一个像元时, 对应的光谱分辨率为 $0.22\ \text{nm}$ 。

5 结 论

本文提出了利用光焦度衡量像散大小, 使得利用柱面镜校正像散时, 其位置不受公式限制, 可根据结构的需求任意摆放。证明了准直镜到光栅距离对成像光谱仪全视场像差校正具有显著影响。又给出了成像光谱仪像面倾角的确定方法, 实现了宽波段的像差校正。并利用上述方法设计了一套用于远紫外 ($115\sim 180\ \text{nm}$) 的改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪, 焦距 $f' = 48\ \text{mm}$, F 数为 5.0 , 全视场、全波段 MTF 在 0.7 以上, 全视场、全波段点列均方根半径均小于 $10\ \mu\text{m}$ 。狭缝长度为 $8\ \text{mm}$, 像元光谱分辨率为 $0.22\ \text{nm}$, 像面大小为 $8\ \text{mm} \times 7\ \text{mm}$, 该设计方法同样适用于多种结构要求的成像光谱仪光学系统设计。

参 考 文 献

- 1 M. V. R. K. Murty. Use of convergent and divergent illumination with plane gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(7): 768~773
- 2 Aathur B. Shafer. Optimization of the Czerny-Turner Spectrometer [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **54**(7): 879~887
- 3 Murphy L. Dalton, Jr. Astigmatism compensation in the Czerny-Turner spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1121~1123
- 4 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guangyu. Optical system design

of wide-angle and high-resolution space borne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001

- 薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822001
- 5 Yu Lei, Wang Shurong, Qu Yi *et al.*. Single-grating optical system of imaging spectrometer with high resolution for ionosphere detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712005
- 于磊, 王淑荣, 曲艺等. 用于电离层探测的单光栅高分辨率成像光谱仪光学系统研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712005
- 6 Masayuki Futamata, Takehiko Takenouchi, Kei-ichi Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 24~31
- 7 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 35~40
- 薛庆生, 王淑荣, 鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 35~40
- 8 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- 薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1516~1521
- 9 Kye-Sung Lee, Kevin P. Thompson, Jannick P. Rolland. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(22): 23378~23384
- 10 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in $120\sim 180\ \text{nm}$ carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
- 于磊, 曲艺, 林冠宇等. $120\sim 180\ \text{nm}$ 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 11 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 55~56
- 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007. 55~56
- 12 F. A. Jenkins, H. E. White. Fundamentals of Optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1950. 92~93
- 13 Dane R. Austin, Tobias Witting, Ian A. Walmsley. Broadband astigmatism free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3846~3853

栏目编辑: 谢婧