

# 宽波段改进型 Wadsworth 光栅型成像光谱仪光学设计

于 磊 林冠宇 张子辉

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

**摘要** 针对传统的 Wadsworth 光学系统无法应用于宽波段高分辨率成像光谱仪的情况, 给出了一种改进的光学系统方案。通过在 Wadsworth 系统中加入柱面镜的方法, 改变了子午和弧矢方向成像聚焦距离。在对像散和光程分析的基础上, 计算获得了改进型 Wadsworth 成像光谱仪光学系统的最优成像条件, 即柱面镜的最优放置位置、最优倾斜角和最优楔角。以个工作波段为 400~800 nm 的改进型光学系统设计实例, 对设计理论进行了验证。设计结果表明系统具备良好的光学成像质量, 探测器在奈奎斯特频率 (20 lp/mm) 下全视场全波段调制传递函数值达到 0.57 以上, 光谱分辨率达到 1.6 nm, 实现了对 Wadsworth 系统的有效改进。

**关键词** 测量; 成像光谱仪; 宽波段; 光栅

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0622001

## Optical Design of Broadband Advanced Wadsworth Grating Imaging Spectrometer

Yu Lei Lin Guanyu Zhang Zihui

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** An advanced optical system has been obtained to solve the problem that the traditional Wadsworth optical system can not be applied for broadband imaging spectrometer with high resolution. The meridian and sagittal focal lengths have been changed by the method of adding a cylindrical lens into the Wadsworth optical system. The optimal imaging conditions including location, inclined angle and wedge angle of the cylindrical lens have been calculated based on the analysis of the astigmatism and optical path. An example of the advanced optical system design with the working waveband of 400~800 nm has been presented to verify the theory. The results present good optical performances of the advanced system. The modulation transfer functions in all fields of view and working waveband are over 0.57, and the spectral resolution is 1.6 nm. The Wadsworth system is improved effectively.

**Key words** measurement; imaging spectrometer; broadband; grating

**OCIS codes** 120.6200; 300.6190; 120.4570

## 1 引 言

具有高分辨率的宽波段光栅型成像光谱仪(尤其是数值孔径低于 0.05 的成像光谱仪)在许多领域都得到了广泛应用, 包括频域光学相关层析照相技术, 空域解析超短脉冲测量和特殊天文望远观测等<sup>[1-2]</sup>, 这类光谱仪可以避免过强信号造成的探测器饱和, 或者过大接收能量造成探测器不能以理想信噪比实现目标的快速成像。为了实现上述的高分辨率成像光谱分析功能, 成像光谱仪的光学系统必须具有良好的光学性能, 尤其是对系统像质产生重要影响的像差, 即狭缝带来的子午方向和弧矢方向的像散差异具有良好的修正能力。目前, 有多类成像光谱仪系统的研究均已开展, 包括单光栅罗兰圆系统、Czerny-Turner 系统、Offner 系统等<sup>[3-7]</sup>。这些系统在不断的优化和改进下都具备了良好的成像和光谱分析能力。

收稿日期: 2015-11-11; 收到修改稿日期: 2016-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(41504143)

作者简介: 于 磊(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事空间紫外遥感仪器方面的研究。

E-mail: top1gods@mail.ustc.edu.cn

0622001-1

Wadsworth 系统是较早应用于光栅光谱仪中的一种系统<sup>[8]</sup>,但是由于该系统的特殊性,仅能对单一选定波长进行像差修正,因此多用于单色仪中,很少有人对其做出在成像光谱仪方面应用上的改进。目前国内仅有于磊等<sup>[9]</sup>对串联光栅形式的改进型 Wadsworth 成像光谱仪的光学系统做出了针对性研究,并获得了较好的研究结果。本文从另一角度对 Wadsworth 系统进行了改进,在原始 Wadsworth 系统的基础上,在光路中引进一个带有楔角的倾斜放置的柱面镜,该柱面镜放置在光栅和像面之间,在满足所推导的优化条件后可以优化 Wadsworth 系统的光学质量,使得其在宽波段上具有高分辨率。这种系统的成功研究将对未来相关领域的应用产生积极影响。

## 2 改进型 Wadsworth 系统最优成像条件分析

### 2.1 柱面镜最优放置位置分析

改进后的 Wadsworth 系统形式仍然比较简单,包括一个离轴抛物面准直镜,一个凹面光栅和一块柱面透镜。传统 Wadsworth 系统和改进后的 Wadsworth 系统如图 1 所示。

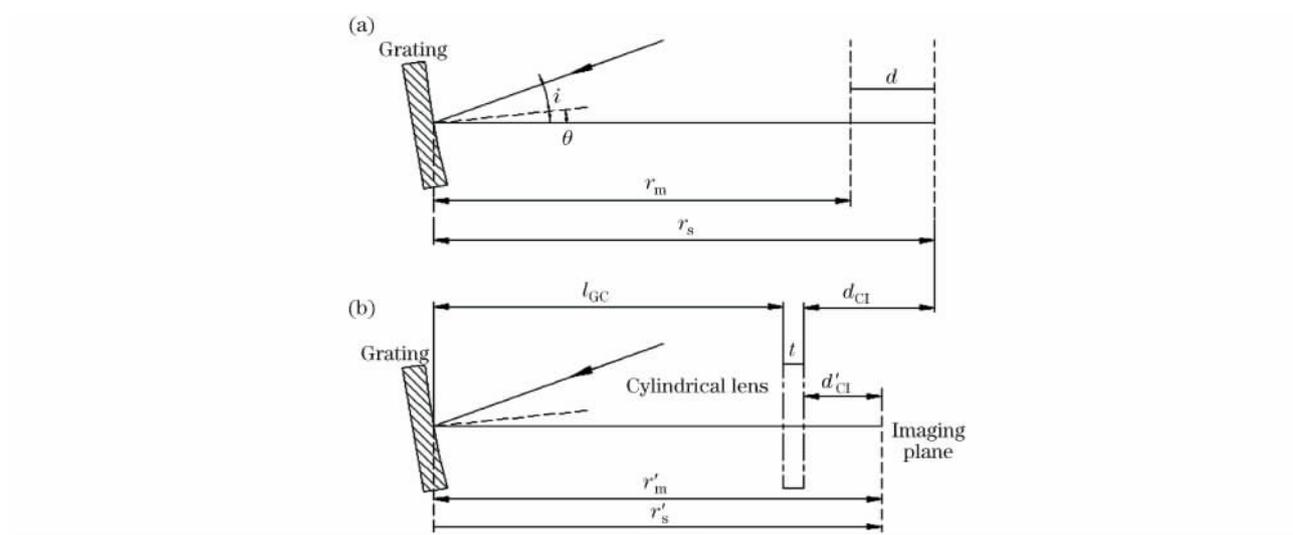


图 1 (a)传统 Wadsworth 系统形式,  $i$  和  $\theta$  是具有曲率半径  $R$  的光栅的入射角和衍射角;  
(b)改进型带有柱面镜的系统形式,下标  $m$  和  $s$  分别代表子午和弧矢

Fig. 1 (a) Traditional Wadsworth mounting,  $i$  and  $\theta$  are the incidence and diffraction angles for the grating with radius  $R$ ;  
(b) advanced mounting with a cylindrical lens, the subscript  $m$  and  $s$  stands for meridian and sagittal

首先确定柱面镜的最优放置位置。根据 Beutler 等<sup>[10]</sup>的光栅理论分析可知,图 1 中的子午像距  $r_m$  和弧矢像距  $r_s$  分别表示为

$$\begin{cases} r_m = \left( \frac{\cos i + \cos \theta}{R} - \frac{\cos^2 i}{r} \right)^{-1} \cos^2 \theta \\ r_s = \left( \frac{\cos i + \cos \theta}{R} - \frac{1}{r} \right)^{-1} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $r$  为物距,  $R$  为光栅半径。由于入射到光栅表面的光是经过准直镜准直过的平行光,因此可以认为物距为无穷大。这样,传统 Wadsworth 系统的像距就可以进一步表示为

$$\begin{cases} r_m = R \cos^2 \theta (\cos i + \cos \theta)^{-1} \\ r_s = R (\cos i + \cos \theta)^{-1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中距离  $d$  可以表示为

$$d = r_s - r_m = R \sin^2 \theta (\cos i + \cos \theta)^{-1}. \quad (3)$$

这个距离表明在传统 Wadsworth 系统中存在着像散,且系统只能对某一选定的波长进行像散修正,无法在宽波段上实现良好的成像质量。图 1(b)中在光栅和像面之间加入了柱面镜用来修正子午和弧矢焦差。根据透镜的基本方程可知在弧矢方向上柱面镜具有以下关系:

$$d'_{Cl}{}^{-1} = f_{Cl}{}^{-1} + d_{Cl}{}^{-1}。 \quad (4)$$

这样,在弧矢像距上的改变量  $d_{Cl} - d'_{Cl}$  表示为

$$d_{Cl} - d'_{Cl} = d_{Cl} - [d_{Cl}f_{Cl}/(d_{Cl} + f_{Cl})], \quad (5)$$

式中  $f_{Cl}$  是柱面镜弧矢方向上的焦距。这个改变量与弧矢像距的改变量  $r'_s - r'_m$  相等。柱面镜的引入带来的子午方向上的改变量表示为

$$r'_m - r_m = \frac{n-1}{n}t, \quad (6)$$

式中  $n$  是柱面镜材料的折射率,  $t$  是柱面镜在子午方向上的中心厚度。这样改进后的 Wadsworth 系统的子午方向和弧矢方向上的像距重新表示为

$$\begin{cases} r'_m = r_m + \frac{n-1}{n}t \\ r'_s = r_s - \left( d_{Cl} - \frac{d_{Cl}f_{Cl}}{d_{Cl} + f_{Cl}} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

如图 1(b) 所示,  $r'_m$  与  $r'_s$  相等, 因此获得以下的方程:

$$d_{Cl}^2 - Vd_{Cl} - Vf_{Cl} = 0, \quad \left( V = d - \frac{n-1}{n}t \right), \quad (8)$$

该方程的解表示为

$$d_{Cl} = \frac{V + \sqrt{V^2 + 4Vf_{Cl}}}{2}, \quad (9)$$

由(5)式和(9)式可以得到  $d'_{Cl}$ 。根据图 1 中的几何关系有:

$$l_{GC} = r_s - d_{Cl} - t = r'_s - d'_{Cl} - t。 \quad (10)$$

这样就获得了柱面镜的最优放置位置, 下面进一步分析计算柱面镜的最优倾斜角和最优楔角从而实现像散在宽波段上的良好消除。

## 2.2 柱面镜最优倾角和最优楔角分析

可分为两步来计算柱面镜的最优放置倾角和最优楔角。首先来计算柱面镜的最优放置倾角。由于放置的柱面镜是子午方向无曲率半径, 弧矢方向有曲率半径, 因此在进行最优倾角的光路分析时, 采用的是子午面上的分析, 这样柱面镜可以认为是平行透射平板。为了保证可对系统的全工作波段实现像散校正, 任意选取一个一阶衍射波长作为光路分析对象。光路分析如图 2 所示。

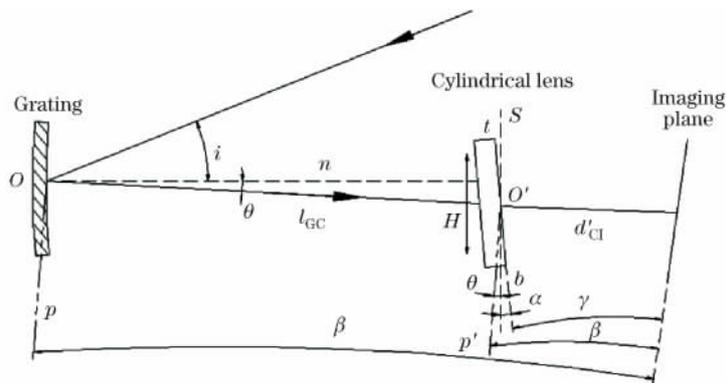


图 2 任意一个一阶波长在改进 Wadsworth 光谱仪(带有倾角的柱面镜插入)中的光线追迹(子午方向),  $i$  为光栅入射角

Fig. 2 Ray-tracing for an arbitrary 1st order diffraction wavelength in the advanced Wadsworth spectrometer by a tilted cylindrical lens in meridian view,  $i$  is the incident angle to the grating

在图 2 中, 从准直镜发出的光线入射在光栅上, 光栅的局部法线表示为  $n$ 。选取的任意波长通过的光程路径为  $l_{GC}$  和  $d'_{Cl}$ 。虚线  $p$  和  $p'$  均垂直于  $l_{GC}$ 。点  $O'$  是任意波长在柱面镜背部出射点, 穿过点  $O'$  的虚线  $s$  垂直于法线  $n$ 。像面和  $p'$  的夹角为  $\beta$ , 该角度会随着波长的变化而变化。柱面镜的倾角  $\alpha$  表示为虚线  $S$  和柱面镜后表面  $b$  的夹角。柱面镜后表面  $b$  与像面的夹角为  $\gamma$ 。  $H$  是光线在柱面镜上的入射高度。

在 Wadsworth 系统中,一般令中心波长的衍射角  $\theta$  的值为 0,这是由于在传统 Wadsworth 系统的使用中,一般会确保中心波长沿法线出射,以消除该波长的像散,这样在整个工作波段内,系统的短波的衍射角定义为负值,长波的衍射角定义为正值。衍射角的变化同时也会带来像散的变化,此时如果将柱面镜进行合理倾斜,就可以有效地控制像散。根据图 2 中的几何关系,可以获得以下关系:

$$\alpha = \gamma - \beta - \theta, \quad (11)$$

对于角  $\gamma$ ,有以下关系:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{dd'_{Cl}}{dH}\right) = \arctan\left(\frac{dd'_{Cl}}{dd} \frac{dd}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dH}\right) = \arctan\left(\frac{f_{Cl}^2}{(d_{Cl} + f_{Cl})^2} \frac{dd_{Cl}}{dd} \frac{dd}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dH}\right). \quad (12)$$

通过对之前推导的公式进行微分,可以获得式中各项表示如下:

$$\begin{cases} \frac{dd_{Cl}}{dd} = \frac{1}{2} + \frac{V + 2f_{Cl}}{2\sqrt{V^2 + 4Vf_{Cl}}} \\ \frac{dd}{d\lambda} = \frac{dd}{d\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} = R \frac{\sin\theta}{\cos i + \cos\theta} \left(2\cos\theta + \frac{\sin^2\theta}{\cos i + \cos\theta}\right) \frac{g}{\cos\theta}, \\ dH = d\theta \cdot l_{GC} \\ \frac{d\lambda}{dH} = \frac{d\lambda}{d\theta \cdot l_{GC}} = \frac{\cos\theta}{g(r_s - d_{Cl} - t)} \end{cases} \quad (13)$$

式中  $g$  为光栅刻线密度,  $d\theta/d\lambda$  是光栅的角色散,将各值代入即可计算得到柱面镜的最优倾角。需要注意的是,在光栅近似线性的色散能力下,这个倾斜角实际上是随着波长的线性变化而变化的,因此在不同的波长值下,获得的最优倾角是不同的,但是无论这个倾角怎样变化,始终不会影响 Wadsworth 系统的最基本条件,即对中心波长的完善聚焦。这样,这个倾角就会在中心波长时为 0,而在工作波段的最长波和最短波处绝对值最大。为了简化优化过程,可以直接选择边缘波长来对最优倾角进行计算,这种简便的处理方法在后面的设计实例验证中被证明是正确的。

带有最优楔角的柱面镜可以进一步消除残余像散,以及像面弯曲带来的影响,如图 3 所示。

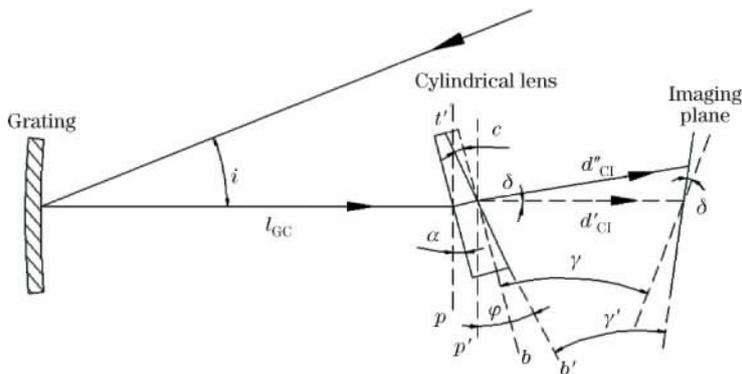


图 3 最优楔角的一阶中心衍射波长光线追迹

Fig. 3 1st order center diffraction wavelength tracing for the optimal wedge angle

在计算柱面镜的最优楔角时,选用了中心衍射波长。在图 3 中,两条虚线  $p$  和  $p'$  彼此平行并垂直于中心波长通过的光程,即  $l_{GC}$ ,该光程方向同时也是光栅的局部法线方向。 $t'$  是柱面镜在子午面上厚度。角  $\alpha$  是柱面镜前表面和虚线  $p$  之间的夹角,同时也代表了之前计算的柱面镜的最优倾角。角  $\varphi$  是柱面镜的后表面  $b'$  和虚线  $p'$  之间的夹角。虚线  $b$  代表了没有最优楔角前柱面镜的后表面(平行于前表面)。虚线表示的成像焦点是柱面镜未被赋予最优楔角时的焦点位置,此时焦点和光程  $l_{GC} - d'_{Cl}$  表征的光程与图 2 中一致;实线表示的成像焦点是柱面镜被赋予最优楔角时的焦点位置,此时光程  $l_{GC} - d''_{Cl}$  为需要利用来计算最优楔角的光程。 $\gamma$  为图 2 中对应的未加最优楔角的柱面镜后表面  $b$  与像面的夹角;为赋予最优楔角的柱面镜后表面  $b'$  与最终像面的夹角。根据几何关系,柱面镜楔角可以表示为  $c = \varphi - \alpha$ 。通过这个楔角,出射波长将旋转一个角度  $\delta$ ,这个角度就是  $d'_{Cl}$  和  $d''_{Cl}$  的夹角,它也被认为是柱面镜带有楔角后,初始像面和最终像面的夹角。如图 3 中的设置,柱面镜的中心厚度与未加楔角时一致,即  $t' = t$ 。因此对于中心波长而言,楔角并不会影响最

优的成像聚焦距离  $r'_s$ , 这样  $r'_s$  就可以表示为

$$r'_s = l_{GC} + d'_{Cl} + t = l_{GC} + d''_{Cl} + t', \quad (14)$$

对上面的公式进行求导有:

$$\frac{dr'_s}{dH} = \frac{dl_{GC}}{dH} + \frac{dd'_{Cl}}{dH} + \frac{dt}{dH} = \frac{dl_{GC}}{dH} + \frac{dd''_{Cl}}{dH} + \frac{dt'}{dH}, \quad (15)$$

方程推演得到

$$\frac{dd''_{Cl}}{dH} - \frac{dd'_{Cl}}{dH} + \frac{dt'}{dH} - \frac{dt}{dH} = \tan \gamma' - \tan \gamma - \tan c = 0, \quad (16)$$

通过光线折射分析有:

$$\delta = \alpha + c - \sin^{-1} \left\{ n \cdot \sin \left[ \sin^{-1} \left( \frac{\sin \alpha}{n} \right) + c \right] \right\}, \quad (17)$$

因此可得到最终的柱面镜最优楔角表达式:

$$\tan \gamma' = \tan \gamma + \tan c = \tan(\gamma + c - \delta), \quad (18)$$

代入各值, 并使用 Matlab 软件编程就可以很容易地实现上述的迭代计算过程, 获得相应的初始优化结果。

### 3 改进型 Wadsworth 成像光谱仪光学系统模拟及结果分析

根据前面介绍的方法, 使用 Zemax 软件模拟了一个改进型的 Wadsworth 成像光谱仪光学系统, 该系统作为前置系统应用于实验室的相关测量中。要求体积不超过  $150 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 工作波段范围  $400 \sim 800 \text{ nm}$ , 为保证前端接收能量不超过探测器饱和值, 并配合前端系统, 设计系统数值孔径为 0.05。探测器选用  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的 CCD, 像元大小为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。光栅刻线密度选用  $300 \text{ l/mm}$ , 为保证对前端光路的视场完全接收, 设定狭缝大小为  $6 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ , 其中狭缝可变, 以满足系统不同情况下的光谱分辨率测量, 最小光谱分辨率要求为  $1.8 \text{ nm}$ , 最大光谱分辨率要求为  $3 \text{ nm}$ 。柱面镜材料折射率约 1.62。其他各项固定的参数如表 1 所示。

表 1 改进结构的固定参数

Table 1 Fixed parameters of the advanced mounting

Fixed parameters	$R_1$	$R_2$	$f_{Cl}$	$t$	$\lambda_{\text{central}}$
Value/mm	200	250	100	4	600

计算了改进优化 Wadsworth 系统的初始结构并用 Zemax 软件进行了最终的二次优化获得参数如表 2 所示。

表 2 改进系统的初始参数和优化参数

Table 2 Initial and optimized parameters of the advanced mounting

Parameters	$\omega$ (off-axis angle) / ( $^\circ$ )	$i$ / ( $^\circ$ )	$\alpha$ / ( $^\circ$ )	$L_{GC}$ /mm	$x$ / ( $^\circ$ )
Initial value	5.9	10.9	31.44	115.01	4.3
Optimized value	5.73	10.85	30.974	113.07	3.62

优化结构与结果如图 4 所示。可以看到点列图均方根(RMS)半径值随波长变化的曲线均小于  $10 \mu\text{m}$ , 这表明最终成像时全波段各个弥散斑均可包含在  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  的像元内, 边缘波长和中心波长全视场的调制传递函数(MTF)值均高于 0.57, 这表明改进的 Wadsworth 成像光谱仪系统在全波段全视场内都具备良好的成像质量。

对设计系统的光谱分辨率进行分析<sup>[11]</sup>, 系统的光谱分辨率可以表示为

$$d\lambda = \frac{\cos i}{mg f_1} \cdot b \cos \zeta, \quad (19)$$

式中  $i$  为光栅入射角,  $f_1$  为准直镜焦距,  $m$  为衍射级数, 取为 1,  $g$  为光栅刻线密度,  $b$  为狭缝宽度,  $\zeta$  为像面倾角, 将各值代入可计算得到设计系统的光谱分辨率为  $1.6 \text{ nm}$ , 满足了系统的光谱分辨率设计需求。

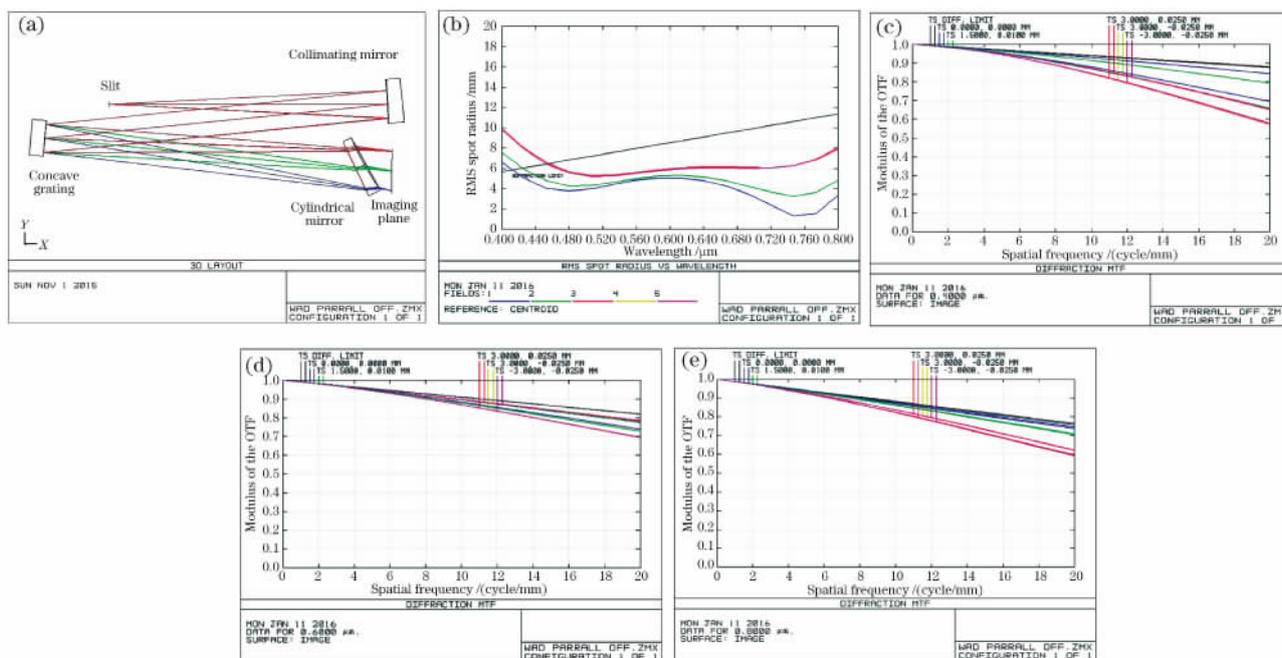


图 4 (a)改进 Wadsworth 光谱仪设计结构图;(b)RMS 点列图半径随波长变化曲线;(c)400 nm 全视场 MTF 曲线;  
 (d)600 nm 全视场 MTF 曲线;(e)800 nm 全视场 MTF 曲线  
 Fig. 4 (a) Layout of the advanced Wadsworth spectrometer; (b) RMS spots radii versus wavelengths;  
 (c) MTF curves in all fields of view under 400 nm; (d) MTF curves in all fields of view under 600 nm;  
 (e) MTF curves in all fields of view under 800 nm

## 4 结 论

给出了一个合理和详细的改进型 Wadsworth 成像光谱仪的光学系统优化设计。相比于以往传统的 Wadsworth 系统,该设计使用了一个带有楔角的倾斜放置的柱面镜实现了改进系统在宽波段上的良好成像质量。通过几何光程分析计算,可以获得改进系统的最优条件,即柱面镜的最优摆放位置,最优倾斜角度和最优楔角。用一个实例证明了这一分析得到的优化结论是行之有效的,并且几乎不受其他任何条件的约束,就可以在 400~800 nm 的宽波段上获得良好的成像质量,实现了像差的良好消除,大大提高了改进系统的分辨率。该设计优化理论可使改进型 Wadsworth 系统在成像光谱仪领域上得到应用,并可在不同波段上实现良好的成像能力和光谱分析能力,其紧凑的体积和小型化的优点也使其将来可在多个相关科研领域得到应用。

## 参 考 文 献

- Zheng Yuquan, Wang Hui, Wang Yifan. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.
- 郑玉权, 王 慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
- MZürch, C Kern, C Spielmann. XUV coherent diffraction imaging in reflection geometry with low numerical aperture[J]. Opt Express, 2013, 21(18): 21131-21147.
- K S Lee, K P Thompson, J P Rolland. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. Opt Express, 2010, 18(22): 23378-23384.
- X Prieto-Blanco, C Montero-Orille, B Couce, et al.. Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. Opt Express, 2006, 14(20): 9156-9168.
- C Montero-Orille, X Prieto-Blanco, H Gonzalez-Nunez, et al.. Two-wavelength anastigmatic Dyson imaging spectrometers [J]. Opt Lett, 2010, 35(14): 2379-2381.
- Qingsheng Xue, Shurong Wang, Fengqin Lu. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. Appl Opt, 2009, 48(1): 11-16.
- Qingsheng Xue. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity[J]. Appl

- Opt, 2011, 50(10): 1338-1344.
- 8 J D F Bartoe, G E Brueckner. New stigmatic, coma-free, concave-grating spectrograph[J]. J Opt Soc Am, 1975, 65(1): 13-21.
- 9 Yu Lei, Lin Guanyu, Yu Xiangyang. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122001.  
于 磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122001.
- 10 H G Beutler. The theory of the concave grating[J]. J Opt Soc Am, 1945, 35(5): 311-350.
- 11 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.