

# 棱镜-光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计

杨增鹏<sup>1,2</sup> 唐玉国<sup>1</sup> 巴音贺希格<sup>1\*</sup> 潘明忠<sup>1</sup> 崔继承<sup>1</sup> 杨 晋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 大视场、超光谱分辨率、高空间分辨是光谱成像仪的发展方向, 谱线弯曲和色畸变的抑制则是二维谱图信息准确提取的前提。提出了一种棱镜-光栅光谱成像结构形式, 并采用矢量方法构建了棱镜-光栅组合色散元件的数学模型, 优化了分光模块的结构参数, 基于此组合色散元件设计了一个具有近直视光路结构的超光谱成像仪光学系统。该系统光谱范围为400~800 nm, 入射狭缝长为14 mm,  $F$ 数为2.4, 其光谱分辨率达0.5 nm, 调制传递函数(MTF)在探测器奈奎斯特频率68 lp/mm处均大于0.7, 谱线弯曲和色畸变均小于1  $\mu\text{m}$ , 低于单个像素的13.5%。

**关键词** 成像系统; 棱镜-光栅组合; 矢量建模; 光学设计; 体相位全息透射光栅

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0911003

## Optimization Design Method for Optical System of Prism-Grating Ultraspectral Imaging Spectrometers

Yang Zengpeng<sup>1,2</sup> Tang Yuguo<sup>1</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Pan Mingzhong<sup>1</sup>  
Cui Jicheng<sup>1</sup> Yang Jin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Wide field, high spectral resolution and high spatial resolution are the development directions for the imaging spectrometer. However, in order to extract the two-dimensional spectral information accurately, spectral and spatial distortion needs to be controlled within a small fraction of a pixel. The prism-grating imaging spectrometer is proposed. The mathematical model of prism-grating component is constructed by means of the vector method, and the optimization of structural parameters is determined through analyzing quantitatively the spectrum distortion characteristics of different prism-gratings. The optical system of ultraspectral imaging spectrometers with a direct vision is devised base on the Prism-Grating component. The spectral coverage, slit length and  $F$  number of the system are visible light from 400 nm to 800 nm, 14 mm and 2.4, respectively. The results demonstrate that the spectral resolution is 0.5 nm/pixel, and the modulation transfer function (MTF) for different spectral bands are more than 0.7 at the Nyquist spatial frequency of plane array charge coupled device (CCD). Both smile and keystone are less than 1  $\mu\text{m}$ , and reduced to 13.5% of a pixel.

**Key words** imaging system; prism-grating; vector method; optical design; volume phase holographic grating

**OCIS codes** 110.4234; 120.4570; 220.2560

收稿日期: 2014-03-12; 收到修改稿日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(61108032)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)、吉林省科技发展计划项目(20126012)

作者简介: 杨增鹏(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪器和光谱成像仪器设计、装调、定标及光谱数据处理技术等方面的研究。E-mail: 175367864@qq.com

导师简介: 唐玉国(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱仪器及医用光谱技术等方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

\* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

# 1 引 言

光谱成像仪自 20 世纪 80 年代早期被提出后, 经过多年发展, 已被广泛应用于空间探测、航空航天遥感、地质分析、环境监测、医学检测诊断及军事检测等诸多领域<sup>[1-10]</sup>。光谱成像仪所采用的分光技术直接影响仪器的结构复杂度、体积、重量甚至仪器性能。根据仪器具体技术要求选择合适的分光技术<sup>[11-14]</sup>极为重要。

常用的分光元件有棱镜、光栅、滤光片等<sup>[11]</sup>。就光栅型光谱成像系统而言, 反射式光栅的应用较为普遍, 例如, Czerny-Turner 型<sup>[5]</sup>、Offner 型<sup>[3-4, 6, 10, 13]</sup>和 Dyson 型<sup>[14]</sup>光谱成像仪等, 此类仪器的光路属于离轴系统, 存在体积大、装调难、稳定性差等不足。近年来, 随着光栅制作技术的发展, 透射光栅的应用逐渐增多, 其中体相位全息透射光栅配合棱镜使用就是一个很好的例子。报道较多的是棱镜-光栅-棱镜(PGP)光谱成像仪, 具有体积小、重量轻、结构简单等优点。1991 年, Aikio<sup>[15]</sup>提出 PGP 模块, 并于 1993 年在空中光谱成像仪(AISA)中得到应用, 后来成立了 Specim 光谱成像公司, PGP 光谱成像仪实现了商业化。在国内, 苏州大学、中国科学院上海技术物理研究所和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等<sup>[16-18]</sup>先后对 PGP 光谱成像仪做过研究。但是, 此种光谱成像系统均存在较大的谱线弯曲和色畸变, 而且 PGP 模块的研制难度较大, 成本较高, 制约了仪器的推广应用。

鉴于此, 本文提出了用棱镜-光栅(PG)分光模块替代 PGP 分光模块设计新型 PG 光谱成像仪的思路。

# 2 PG 组合色散元件建模

在光谱成像系统的研制过程中, 理论模型的建

立具有指导性作用, 恰当的理论模型是保证设计顺利高效进行的关键所在。来自狭缝端点和狭缝中心的同一波长的光束入射于棱镜或光栅时, 入射面存在夹角致使各自光束色散角不同, 从而产生谱线弯曲。此外, 鉴于棱镜和光栅单独对平行光色散作用时, 出射光线偏向角相反, 谱线弯曲方向相反的特点, 建立 PG 组合色散元件的数学模型, 定量分析两者谱线弯曲互补特性, 从而可实现组合色散元件的结构参数优化。根据谱线弯曲产生的原因可知, 只要确定了来自狭缝端点和狭缝中心的同一波长的主光线经过色散元件后的各自色散角之差, 然后乘以成像物镜焦距, 即可得到谱线弯曲量。因此, 建立来自狭缝任意一点的某一波长的主光线经过 PG 组合色散元件后的色散模型, 才能对谱线弯曲进行分析。来自狭缝任意一点的某一波长的主光线经过透射式准直物镜后入射于 PG 组合色散元件, 主光线经过 PG 组合色散元件时的光路如图 1 所示, PG 组合色散元件由棱镜、滤光片和透射光栅组成。图 1(a)为光路在平面 YOZ 的投影示意图, 图 1(b)为光路在平面 ZOX 的投影示意图, 准直物镜的光轴与坐标系 Z 轴共线, 平面 YOZ 为 PG 组合色散元件的主截面, 因此, 入射于 PG 组合色散元件的任意主光线的初始波矢  $Q_0$  均在平面 ZOX 内, 其余波矢  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  均为空间波矢。以波矢  $Q_0$  和 PG 组合色散元件参数作为模型输入量, 求解得  $Q_4$  的传播特性时即可对模型的谱线弯曲进行分析。

图 1 中,  $n_x$  表示各介质的折射率,  $d_x$  表示光轴上各介质的厚度,  $N_x$  表示各折射界面单位法向量, 方向由入射介质指向出射介质,  $M_x$  表示主光线与各折射面的交点,  $Q_x$  表示主光线传播时在各介质中的波矢的单位向量, 点  $M_1$  在子午面(主截面)的投影点设为坐标原点, 坐标系如图 1 所示。

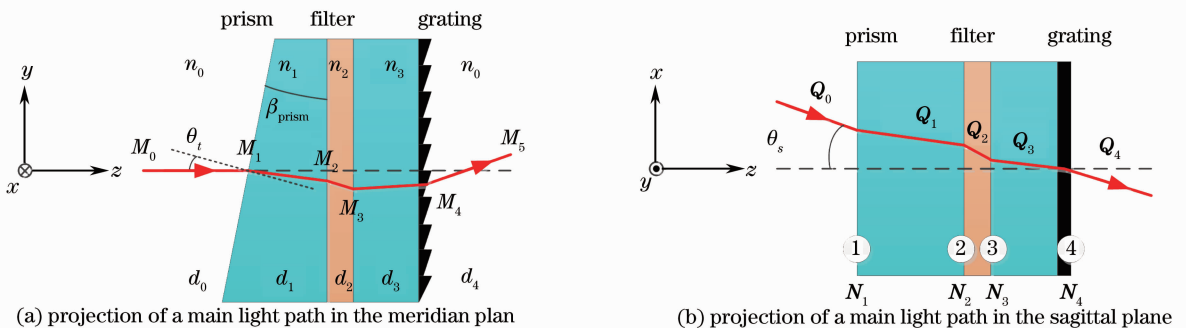


图 1 组合色散元件中光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of dispersive element

此时,入射于 PG 组合色散元件的入射光由三个参数确定,入射波矢在主截面内的投影与  $\mathbf{N}_1$  的夹角  $\theta_i$ ,入射波矢在弧矢面的投影(即入射波矢)与光轴的夹角  $\theta_s$ ,即主光线入射面与主截面之间的夹角,点  $M_1(x_1, y_1, z_1)$  的坐标值(计算验证参考)。图 1 所示情况,  $\theta_i$  和  $\theta_s$  均取正值,从图中可知,  $\theta_i = \beta_{\text{prism}}$ ,即棱镜顶角的改变将导致模型入射光参量  $\theta_i$  随之变化,  $\theta_s$  的最大值由入射狭缝的高度和准直物镜决定,当准直物镜确定后,来自入射狭缝不同高度位置的主光线,入射于 PG 组合色散元件时的  $\theta_s$  值也不同,狭缝端点主光线的  $\theta_s$  值最大,狭缝中心主光线的  $\theta_s$  值为零。根据图 1,可得  $\mathbf{Q}_0$  和  $\mathbf{N}_1$  分别为

$$\mathbf{Q}_0(\theta_s) = \mathbf{Q}_0(-\sin \theta_s, 0, \cos \theta_s), \quad (1)$$

$$\mathbf{N}_1(\theta_i) = \mathbf{N}_1(0, -\sin \theta_i, \cos \theta_i). \quad (2)$$

在界面 1 处的入射角  $\theta_1$  则为

$$\theta_1(\theta_s, \theta_i) = \arccos(\mathbf{Q}_0 \cdot \mathbf{N}_1), \quad (3)$$

在此,棱镜顶角  $\beta_{\text{prism}}$ (即  $\theta_i$ )被引入模型。根据折射定律,折射角  $\theta'_1$  为

$$\theta'_1(\theta_s, \theta_i, n_1) = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} \sin \theta_1\right), \quad (4)$$

在此,棱镜折射率  $n_1$  被引入模型。根据矢量形式的折射定律<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} n_1 \mathbf{Q}_1 - n_0 \mathbf{Q}_0 = T \mathbf{N}_1 \\ T = n_1 \cos \theta'_1 - n_0 \cos \theta_1 \end{cases}, \quad (5)$$

求得  $\mathbf{Q}_1$  为

$$\mathbf{Q}_1(\theta_s, \theta_i, n_1) = \frac{n_0 \mathbf{Q}_0 + T \mathbf{N}_1}{n_1} = \mathbf{Q}_1(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1), \quad (6)$$

式中  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  分别为矢量  $\mathbf{Q}_1$  的方向余弦,下文同理。

欲求点  $M_2$  坐标值,由直线参数方程求解:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + \alpha_1 t \\ y_2 = y_1 + \beta_1 t \\ z_2 = z_1 + \gamma_1 t \\ t = \frac{d_1}{\gamma_1} \end{cases}, \quad (7)$$

从图 1 可以看出

$$\begin{cases} \mathbf{N}_2 = \mathbf{N}_2(0, 0, 1) \\ \mathbf{N}_2 = \mathbf{N}_3 = \mathbf{N}_4 \end{cases}. \quad (8)$$

综上所述,利用(3)~(8)式循环求解可得到  $\mathbf{Q}_3$ ,记为

$$\mathbf{Q}_3(\theta_s, \theta_i, n_1, n_2, n_3) = \mathbf{Q}_3(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3). \quad (9)$$

在界面 4,任意空间光线入射平面透射光栅的普适光栅方程<sup>[20]</sup>为

$$\begin{cases} n_0 \sin \theta_m \cos \phi_m = n_3 \sin \theta_i \cos \phi_i + m \frac{\lambda}{d_G} \\ n_0 \sin \phi_m = n_3 \sin \phi_i \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $\theta_x$  为光线入射角或第  $m$  级衍射光衍射角,为波矢在主截面内的投影与光栅法线的夹角,  $\theta_i$  与  $\beta_3$  同号,  $\phi_x$  为光线入射方位角或第  $m$  级衍射光衍射方位角,为波矢与主截面的夹角,  $\phi_i$  与  $\alpha_3$  同号,  $\lambda$  为入射波长,  $d_G$  为光栅常数,  $m$  为衍射级次,本设计使用第 1 衍射级次,如图 2 所示。

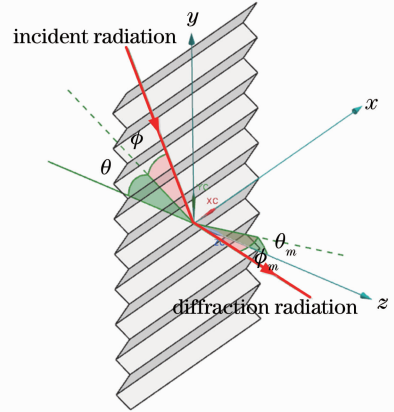


图 2 平面透射光栅表面波矢传播示意图

Fig. 2 Wave vector propagation of plane transmission grating

光栅主截面法向量  $\mathbf{N}_G$  为

$$\mathbf{N}_G = \mathbf{N}_G(1, 0, 0). \quad (11)$$

入射方位角则满足公式:

$$|\sin \phi_i| = \frac{|\mathbf{Q}_3 \cdot \mathbf{N}_G|}{|\mathbf{Q}_3| \times |\mathbf{N}_G|}. \quad (12)$$

光栅界面的入射波矢与光栅法线的夹角  $\theta_4$  满足公式:

$$\cos \theta_4 = \mathbf{Q}_3 \cdot \mathbf{N}_4. \quad (13)$$

入射角  $\theta_i$  满足公式:

$$\cos \theta_4 = \cos \phi_i \cos \theta_i, \quad (14)$$

(12)~(14)式中的  $\phi_i, \theta_4, \theta_i$  均为变量  $\theta_s, \theta_i, n_1, n_2, n_3$  的函数。

至此,联合(10)~(14)式,即可求出所使用的级次的波矢传播方向,由  $\theta_m(\theta_s, \theta_i, n_1, n_2, n_3, m, d_G, \lambda)$  和  $\phi_m(\theta_s, \theta_i, n_1, n_2, n_3)$  决定。

当光谱成像系统的狭缝长度、准直物镜结构、准直物镜与组合色散元件的距离确定时,  $\theta_s$  最大值  $\theta_{s, \text{max}}$  也随之确定,不同的  $\theta_s$  值对应狭缝不同长度的点,狭缝端点主光线的  $\theta_s$  值最大,狭缝中心主光线的  $\theta_s$  值为零。因此,谱线弯曲  $\Delta l$  可表征为

$$\Delta l = f' \cdot \Delta \theta = f' \cdot (\theta_{m, \text{max}} - \theta_{m, 0}), \quad (15)$$

式中  $f'$  为成像物镜的焦距,  $\Delta \theta(\theta_{s, \text{max}}, \theta_{s, \text{min}}, \theta_i, n_1,$

$n_2, n_3, m, d_G, \lambda$ ) 为狭缝端点主光线与狭缝中心主光线经组合色散元件色散后在色散方向的偏角差,  $\theta_{m\_max}$  为  $\theta_s = \theta_{s\_max}$  时所求得的衍射角值,  $\theta_{m\_0}$  为  $\theta_s = \theta_{s\_min} = 0$  时所求得的衍射角值。

综上所述,当棱镜、滤光片、光栅材料及光栅使用级次确定后,  $\Delta\theta$  仅为  $\theta_i, d_G, \lambda$  的函数,应用数值计算软件编程计算,即可得到不同顶角  $\beta_{prism}$  ( $|\beta_{prism}| =$

$|\theta_i|$ ) 的棱镜和不同刻线密度  $\nu$  的光栅组合使用时对不同波长所产生的主光线偏角差,进而求得谱线弯曲值;而谱线色畸变主要取决于光谱成像系统的色差。棱镜采用 K9 玻璃,滤光片暂用 K9 代替,光栅基底采用 B270,  $\theta_{s\_max} = 7^\circ, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 计算结果如图 3 所示,图中  $|\Delta\theta|$  相等的点颜色相同,三条红色等高线的值  $\Delta\theta$  分别等于  $-0.015^\circ, 0^\circ, 0.015^\circ$ 。

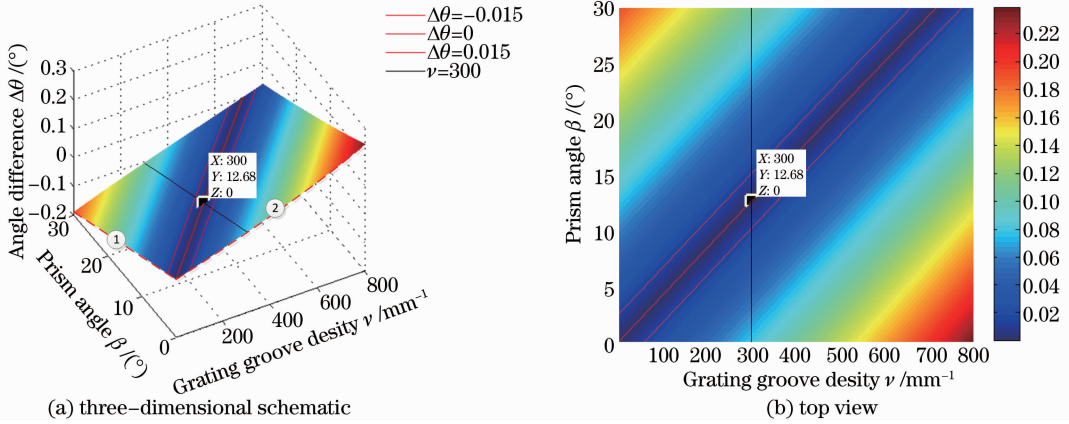


图 3 组合色散元件 632.8 nm 狭缝边缘与狭缝中心主光线偏角差计算结果

Fig. 3 Angle deviation results of the chief ray from slit center and slit edge for 632.8 nm

从图 3 可以看出,只有特定的组合参数才能保证 PG 组合色散元件实现单一波长的谱线弯曲校正,即偏角差等于零。将单一波长的谱线弯曲完全校正时,光栅刻线密度与棱镜顶角近似线性关系。根据 PG 组合色散元件的结构特点,图 1(a)所示,当光栅刻线密度为定值并且趋于 0 时,光栅色散特性减弱,逐渐演变为平行平板,则 PG 组合色散元件变为组合透射棱镜,其谱线弯曲特性如图 3(a)中的虚线 1 所示,随着棱镜顶角的增大,主光线偏角差由零开始逐渐递减;当棱镜顶角逐渐减小至零时,棱镜逐渐演变为平行平板,则 PG 组合色散元件变为组合

光栅,其谱线弯曲特性如图 3(a)中的虚线 2 所示,随着光栅刻线密度增加,主光线偏角差由零开始逐渐递增,由此也说明棱镜和光栅的谱线弯曲特性相反。如图 3(b)所示,光栅刻线密度固定,棱镜角度较小时,谱线弯曲互补不足,反之亦然。

然而,光谱成像系统的工作波段一般较宽,仅对单一波长进行谱线弯曲校正是不合理的,至少应同时考虑三个波长:边缘短波、中心波长、边缘长波。将三个波长的偏角差计算结果绘制于同一坐标系中,如图 4 所示,选择适合的棱镜顶角  $\beta_{prism}$  和光栅刻线密度  $\nu$  使得长波  $\Delta\theta_{lw}$  与短波  $\Delta\theta_{sw}$  之差  $\Delta\theta_{sw}$  尽可

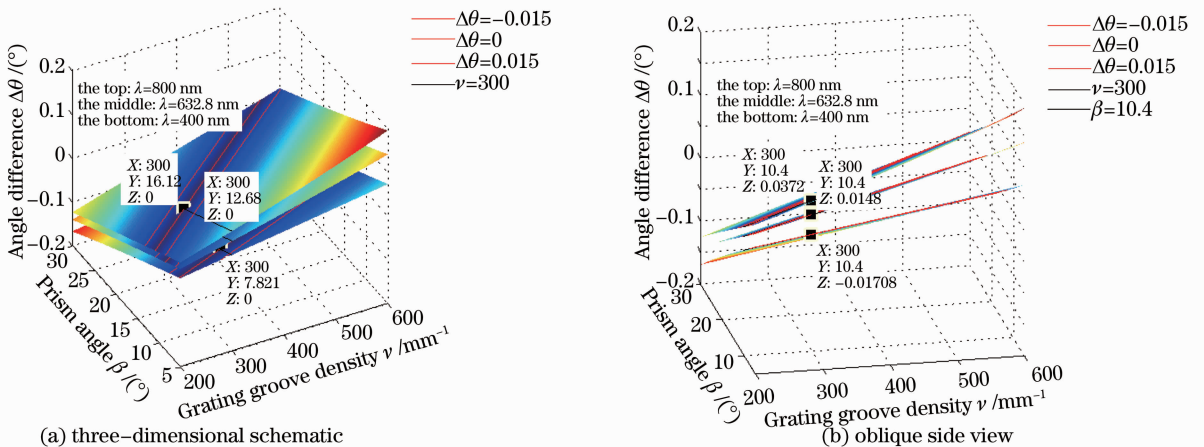


图 4 组合色散元件三个波长狭缝边缘与狭缝中心主光线偏角差计算结果

Fig. 4 Angle deviation results of the chief ray from slit center and slit edge for three wavelengths



能小,则有利于光谱成像系统整体谱线弯曲校正。

从图 4(a)可以看出,当光栅刻线密度确定时,欲使不同波长的谱线弯曲完全校正所要求的棱镜顶角不同;从图 4(b)可以看出,对于结构已定的 PG 组合色散元件,随着波长的变化,偏角差随之变化;三个偏角面存在明显夹角,表明在一定波段范围内,合理选择棱镜和光栅的参数可有效减小全波段的  $\Delta\theta_{aw}$ ;三个偏角面无交线,至少说明这三个波长仅有一个波长可实现偏角差的完全校正,即除某一波长外,其余波长均存在偏角差,在此称其为 PG 组合色散元件的固有谱线弯曲偏角差。

图 5 为不同  $\theta_s$  情况下的偏角差计算结果,从图中可以看出, $\theta_s$  越小,偏角差也就越小。

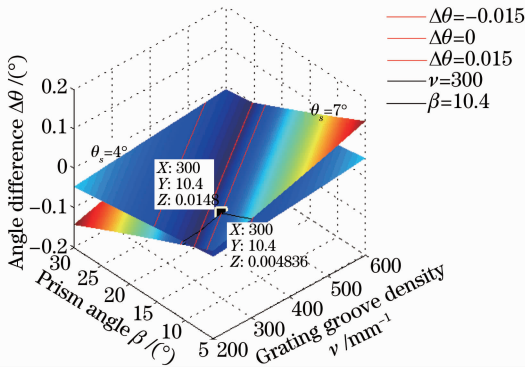


图 5 632.8 nm 不同  $\theta_s$  的主光线偏角差计算结果  
Fig. 5 Angle deviation results of the chief ray in different  $\theta_s$  for 632.8 nm

## 3 超光谱成像系统光学设计

### 3.1 设计指标

PG 超光谱成像系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 超光谱成像仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of imaging spectrometer optical system

Parameter	Value
Spectral range / nm	400~800
Slit length / mm	14
F number	2.4
Spectral sampling / nm	$\leq 1$
Smile / pixel	$\leq 20\%$
Detector pixel size / $\mu\text{m}$	$7.4 \times 7.4$
Detector array size / mm	$14 \times 7$

### 3.2 组合色散元件设计

传统表面刻划透射光栅,需要相对低的刻线密度来维持高的衍射效率,且衍射效率对入射角的敏

感度较低。在此,PG 组合色散元件所采用的光栅的刻线密度选择为 300 line/mm。为确保光栅的可替换性,使得光线按布拉格角入射于 300 line/mm 的体相位全息透射光栅,前端棱镜顶角应为  $10.4^\circ$  (介于  $7.82^\circ \sim 16.12^\circ$ )。如图 4(b)所示,组合色散元件在 800、632.8、400 nm 处的固有偏角差分别为:  $0.0372^\circ$ 、 $0.0148^\circ$ 、 $-0.01708^\circ$ 。

### 3.3 准直物镜和成像物镜设计

准直物镜和成像物镜是 PG 超光谱成像系统的重要组成部分。准直物镜起准直作用,来自入射狭缝的光辐射经准直物镜变为平行光束后,入射于组合色散元件进行分光,因此,影响准直特性的像差都要求校正,主要是球差。成像物镜将色散后的光束会聚成像于像面,因此,对影响成像质量的所有像差都必须加予校正,即所有像差都应控制校正。综上,成像物镜的设计要求高于准直物镜,同时,为了减少设计和加工成本,可将成像物镜和准直物镜设计为相同的结构,而准直物镜采用成像物镜的倒置结构。

为确保 PG 超光谱成像仪与前端成像镜头达到视场和光瞳(位置和大小)匹配,同时使得仪器像面相对照度均匀,则要求 PG 超光谱成像仪设计为物方、像方远心光路。因此,仪器的成像物镜应设计为像方远心光路,孔径光阑置于物方焦面位置,且前焦距等于系统集成时光栅到成像物镜第一面折射面的预设距离。

采用 PG 组合色散元件的建模程序,亦可计算出来自狭缝中心的任意波长的光束经过组合色散元件后的偏向角,解得:800 nm 的光波经色散后,主光线偏向角为  $8.4^\circ$ ,400 nm 的光波偏向角为  $1.3^\circ$ ,则总偏向角之差  $2\omega_1$  等于  $7.1^\circ$ 。像面大小为  $H$  pixel  $\times V$  pixel (空间维  $\times$  光谱维),因此,成像物镜的焦距  $f'$  由(16)式决定:

$$f' = \frac{V/2}{\tan \omega_1}. \quad (16)$$

为保证此光谱成像系统在整个像面大小范围内均能获得良好的成像质量,其成像物镜总视场  $2\omega$  由(17)式决定:

$$\tan \omega = \frac{\sqrt{H^2 + V^2}/2}{f'}. \quad (17)$$

探测器的像素大小为  $7.4 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,像面大小为  $14.208 \text{ mm} \times 7.992 \text{ mm}$ ,系统光谱宽度为 7 mm,解得成像物镜焦距  $f' = 56.4 \text{ mm}$ ,视场  $2\omega = 7.9^\circ$ 。根据固有偏角差即

可得到 800、632.8、400 nm 处的固有谱线弯曲分别为:36.6、14.6、-16.8  $\mu\text{m}$ 。欲进一步减小固有谱线弯曲,可选择减小  $\theta_{s\_max}$  值,如图 5 所示,在准直物镜设计过程中,如若保持焦距、视场等技术参数不变情况下,增加准直物镜最后出射面到光阑的距离,可有效减小  $\theta_{s\_max}$ ,但会致使光学系统变长。

选择双高斯物镜作为成像物镜的初始结构,为

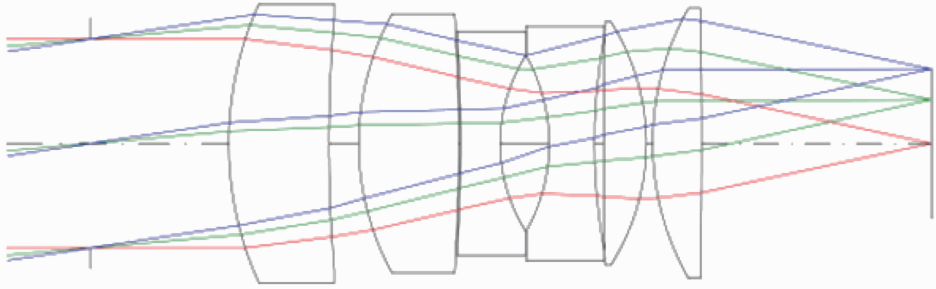


图 6 成像物镜光学结构图

Fig. 6 Optical structure of the imaging lens

### 3.4 超光谱成像系统整体设计

PG 超光谱成像系统中的准直物镜为成像物镜的倒置结构,所构建的系统放大倍率为 1:1,入射狭缝长度  $b=14\text{ mm}$ ,等于像面空间维长度。

将准直物镜、棱镜-光栅组合色散元件、成像物镜集成为 PG 超光谱成像系统,光阑置于光栅面,设置成像物镜和准直物镜之间的等量约束及系统质优约束,进行人机交互初始优化,初始优化主要以成像

保证超光谱成像系统的集成,将光阑置于物镜第一镜面前端 15 mm 处(至少大于组合色散元件厚度);焦距、后焦距、光阑位置、像方远心等参数作为主要约束条件,采用人机交互逐步逼近的方法对成像物镜进行优化,优化过程中通过镜片分离来增加优化变量从而提高成像质量,优化后的结构形式如图 6 所示。

质量为主,减小误差函数,提高成像质量。

当系统成像质量达到要求时,可适当设置特殊约束进一步校正谱线弯曲;最后进行系统微调优化,主要包括透镜中心厚度和边缘厚度、空气间隔和后焦距的调整。微调过程中,特殊约束微变逐步逼近期望值,反复优化得到符合要求的系统结构,如图 7 所示。

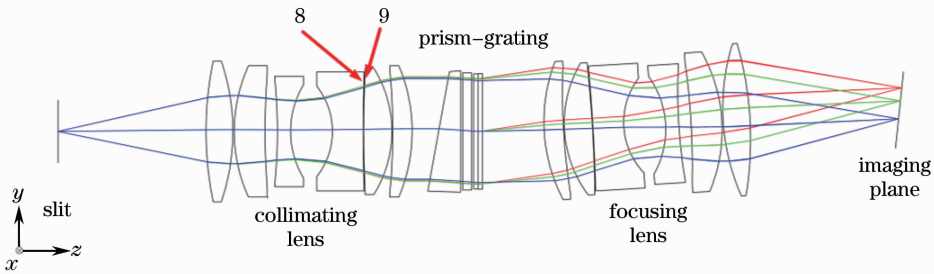


图 7 符合指标的系统初始结构

Fig. 7 Initial structure meeting the requirement

图 7 所示结构,镜面 8 与镜面 9 曲率半径相近且间隙较小,此位置则易产生较高的公差灵敏度,因此需优化改进,胶合镜是较好的选择。先进行参数耦合,再采用逐步逼近方法反复优化,使两镜面曲率半径逐渐相等;然后逐步减小空气间隔直至变为胶合镜,最终系统结构如图 8 所示。成像物镜光轴沿色散方向倾斜  $3.58^\circ$ ,但对系统机械结构影响不大,系统的直视性的不足并不影响其光谱分辨率、空间分辨率等各项指标,系统依然具有体积小、重量轻、

结构简单等优点。像面沿色散方向倾斜  $-9.33^\circ$ 。

### 3.5 成像质量分析

#### 3.5.1 系统调制传递函数(MTF)

系统的 MTF 曲线如图 9 所示,由电荷耦合器件 (CCD) 像素大小求得其奈奎斯特频率为 68 lp/mm。从图中可以看出,PG 超光谱成像系统在整个波段,整个视场范围内,MTF 在探测器奈奎斯特频率处均大于 0.7。

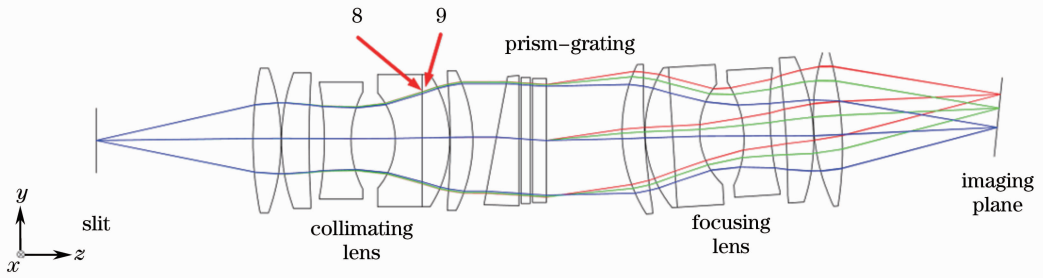


图 8 系统最终结构图

Fig. 8 Final structure of the system

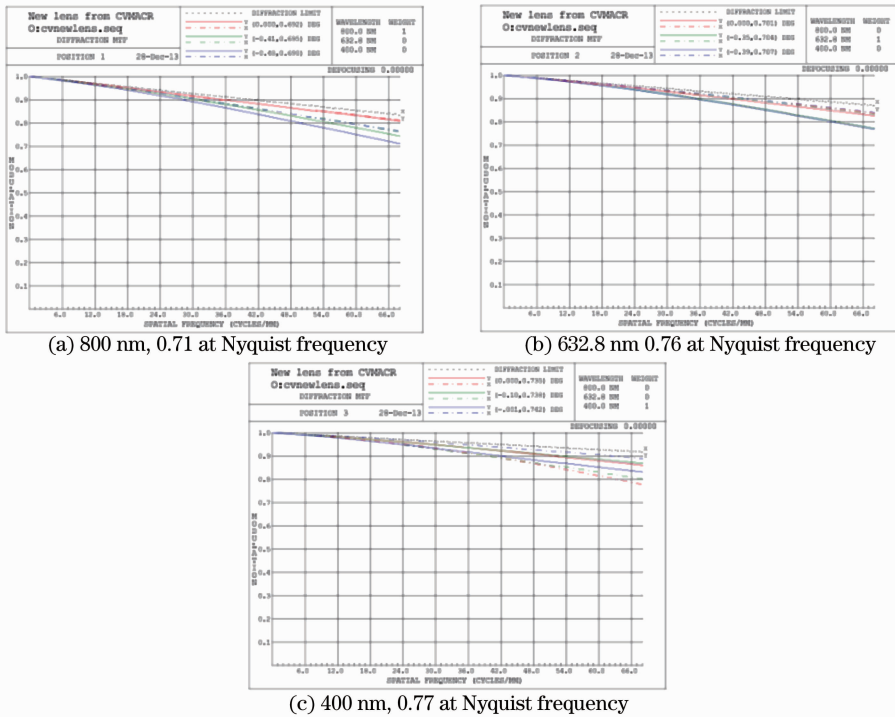


图 9 不同波长处的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF of the system at different wavelengths

### 3.5.2 系统点列图

点列图用于查看点物的成像质量。系统的点列图及相应的均方根(RMS)值如图 10 所示,其中的方框代表一个 CCD 像素,从图中可以看出,点物的像较好地落于一个像素内,且光谱分辨率均达到 0.5 nm。

### 3.5.3 系统能量集中度曲线

光学系统的能量集中度曲线如图 11 所示,可以看出 90% 的能量都集中于 CCD 的一个像素范围内。

### 3.5.4 系统 Keystone 和 Smile

通过真实光线追迹,可获得光学系统的谱线畸变信息,具体情况如图 12 所示。

经计算,系统色畸变和谱线弯曲均小于一个像素的 13.5%,像面大小为 14 mm×7.2 mm。

## 4 结 论

提出了一种新型的棱镜-光栅超光谱成像系统,并对核心分光模块棱镜-光栅进行数学建模,采用矢量方法定量分析出组合色散元件的谱线弯曲特性,分析表明:1)棱镜和光栅组合使用可实现谱线弯曲互补;2)对于单一波长,组合色散元件可实现谱线弯曲的完全校正,且棱镜顶角与光栅刻线密度近似线性关系;3)组合色散元件不能实现多波段的谱线弯曲完全校正,但合理的组合参数可有效减小全波段

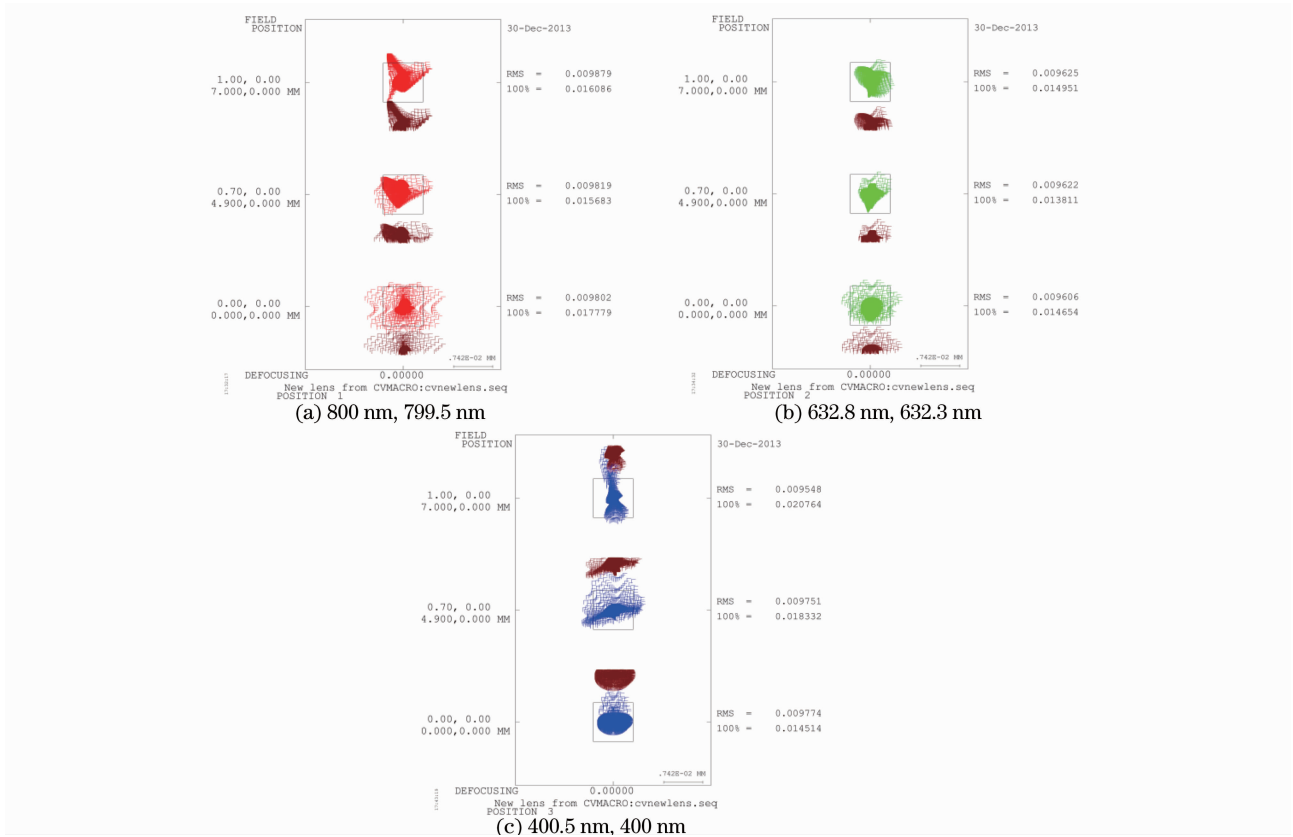


图 10 系统点列图和 RMS 值

Fig. 10 Spot diagrams and RMS spot diameter

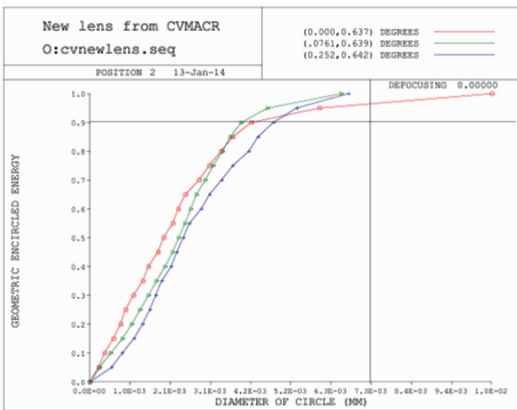


图 11 径向能量分析(632.8 nm)

Fig. 11 Radial energy analysis (632.8 nm)

的谱线弯曲,有助于光谱成像系统的设计和优化。最终,基于理论计算和工程考虑,确定了组合色散元件的组合参数,应用光学设计软件设计优化出一台光谱覆盖 400~800 nm,  $F$  数达 2.4,狭缝长 14 mm,像面大小 14 mm×7.2 mm,全视场、全波段点列均方根均小于  $10 \mu\text{m}$ ,光谱分辨率为 0.5 nm,色畸变和谱线弯曲均小于  $1 \mu\text{m}$ ,各谱段的调制传递函数均大于 0.7 的超光谱成像仪。设计过程中也体现出,以透射式物镜作为准直物镜和成像物镜的光谱成像

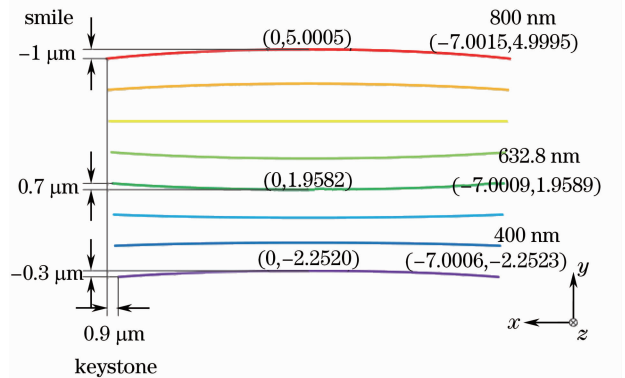


图 12 谱线畸变示意图

Fig. 12 Smile and keystone of the spectra

系统,准直物镜和成像物镜在一定程度上可校正谱线弯曲。

### 参 考 文 献

- 1 R O Green, M L Eastwood, C M Sarture, *et al.*. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. Remote Sens E, 1998, 65(3): 227-248.
- 2 Cui Jicheng, Tang Yuguo, Han Pengpeng, *et al.*. Development of diagnostic imaging spectrometer for tumor on-line operation [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3043-3049.

崔继承,唐玉国,撒芃芃,等.用于肿瘤手术在线诊断的成像光



- 谱仪的研制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3043-3049.
- 3 Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig, *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 52-57.  
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 52-57.
  - 4 Liu Yujuan, Bayanheshig, Cui Jicheng, *et al.*. Interferometric alignment of imaging spectrometers with convex grating [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1736-1742.  
刘玉娟, 巴音贺希格, 崔继承, 等. 凸面光栅成像光谱仪的干涉法装调[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1736-1742.
  - 5 Tang Yi, Zhang Zhige, Chen Tingai, *et al.*. Design of visible-ultraviolet cylinder mirror imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330004.  
唐义, 张止戈, 陈廷爱, 等. 一种基于柱面反射镜的紫外/可见光成像光谱仪[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330004.
  - 6 Xue Qingshen, Huang Yu, Lin Guangyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne 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.
  - 7 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.
  - 8 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.*. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322007.  
刘健鹏, 唐义, 黄刚, 等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322007.
  - 9 Y h Qi, B Xue, Y Y Zhao, *et al.*. Design of camera and spectrometer dual-use system [C]. SPIE, 2013, 8910: 891014.
  - 10 H Ku, S H Kim, H J Kong, *et al.*. Optical design, performance, and tolerancing of an Offner imaging spectrograph [C]. SPIE, 2012, 8491: 84910K.
  - 11 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.
  - 12 Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 75-80.  
郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
  - 13 Cheng Xin, Hong Yongfeng, Zhang Bao, *et al.*. Design of compact Offner hyperspectral imaging system with Féry prism [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1773-1780.  
程欣, 洪永丰, 张葆, 等. 插入 Féry 棱镜的小型 Offner 超光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1773-1780.
  - 14 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Yu Xiangyang. Dyson spectral imaging system with Large relative aperture and wide spectral region [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2535-2542.  
薛庆生, 王淑荣, 于向阳. 大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2535-2542.
  - 15 M Aikio. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [J]. VTT Publications, 2001, 435: 16-17.
  - 16 Zhu Shanbing, Ji Yiqun, 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.
  - 17 Yuan Liyin, He Zhiping, Shu Rong, *et al.*. Optical design of a SWIR PGP imaging spectrometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 831-834.  
袁立银, 何志平, 舒嵘, 等. 短波红外棱镜-光栅-棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 831-834.
  - 18 Wu Congjun, Yan Changxiang. Imaging spectrometer optical design based on prism-grating-prism dispersing device [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 37-42.  
吴丛均, 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): 37-42.
  - 19 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 198.  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 198.
  - 20 Bayanheshig. Exact expressions for bend phenomena of spectral line and spectral band of spectrometer [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(9): 1524-1529.  
巴音贺希格. 光谱仪谱线和谱带弯曲现象的精确表达方式[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(9): 1524-1529.
  - 20 Zhang Shanwen. The Research on Integral Theory of Diffraction Gratings and Design Methods of Broadband Metallic Gratings and Laser Resonator Gratings [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009. 26-27.  
张善文. 衍射光栅积分理论与宽波段金属光栅、激光器调谐光栅设计方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2009. 26-27.

栏目编辑: 张浩佳