

# 消像散型 Czerny-Turner 成像光谱仪图像 变形校正研究

唐 义 郑 成 南一冰 李 飞 郭 蕾

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** Czerny-Turner 结构成像光谱仪像散校正会改变系统焦距, 导致图像子午方向和弧矢方向放大率存在差异。分析了两种 Czerny-Turner 结构成像光谱仪像散校正光路(柱面镜和超环面)像散校正原理, 由此提出并推导出两类光谱图像变形校正公式和方法, 并总结二者的共同特征。通过理论计算、光线追迹仿真和实际光谱成像测量验证了图像变形校正方法的正确性。同时, 该图像校正方法对其他准直光工作条件下离轴结构色散型成像光谱仪图像变形校正研究有借鉴意义。

**关键词** 测量; 成像光谱仪; 像散; 放大率; 图像校正

**中图分类号** O433.1; TH744.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0112007

## Study of Anamorphose Correction of Astigmatism-Corrected Czerny-Turner Imaging Spectrometer

Tang Yi Zheng Cheng Nan Yibing Li Fei Guo Lei

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

**Abstract** Correcting astigmatism by using Czerny-Turner imaging spectrometer can change system focal length, which leads to the difference of magnification in tangential direction and sagittal direction of the image. The common characteristics of astigmatism correction theories of Czerny-Turner imaging spectrometers (using cylindrical mirror and toroidal mirror) are analyzed. And the correction formulas, methods of anamorphose and their common characteristics are given. The validity of correction formula of anamorphose are verified with theoretical calculation, ray tracing simulation, and actual measurement. Meanwhile, this method of image correction is useful to the anamorphose correction research of off-axis structure dispersion imaging spectrometer in other operating conditions of collimation light.

**Key words** measurements; imaging spectrometer; astigmatism; magnification; image correction

**OCIS codes** 120.4570; 300.6190; 120.6200

## 1 引 言

成像光谱技术是一种图谱合一的新型信息获取技术。在传统的光栅色散型成像光谱仪中, 多数采用 Czerny-Turner 结构<sup>[1-3]</sup>。近年来, 国内外学者对该结构成像光谱仪最主要的像差——像散提出了一系列校正方法, 2002年, Futamata 等<sup>[4]</sup>提出利用超环面校正 Czerny-Turner 结构的像散, 2010年, Lee 等<sup>[5]</sup>利用柱面透镜设计出宽波段的成像光谱仪, 2012年, 刘健鹏等<sup>[6]</sup>利用柱面反射镜设计出远紫外的成像光谱仪。这些消像散方法可以较好地校正像散, 但均会导致成像光谱仪图像子午方向和弧矢方向放大率不一致, 从而引起光谱图

收稿日期: 2014-04-15; 收到修改稿日期: 2014-09-10

基金项目: 国家 973 计划(2013CB329202)、工业技术基础项目(J312012B002)

作者简介: 唐 义(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事紫外光通信、成像光谱技术方面的研究。

E-mail: tangyi4510@bit.edu.cn

像的变形,这对摄影测量、遥感成像等后期数据应用有较大影响。本文在已有研究基础上,对基于两类 Czerny-Turner 结构成像光谱仪像散校正光路:基于柱面镜的光路结构和基于超环面的光路结构进行了分析,得出两种光路结构的共同特征,并分别给出各自图像变形校正公式和方法。通过理论计算、ZEMAX 光线追迹仿真和实际光谱成像测量验证基于柱面镜的成像光谱仪图像变形校正方法的正确性;通过 ZEMAX 光线追迹仿真验证基于超环面的成像光谱仪图像变形校正方法的正确性。同时,该图像校正方法对其他准直光工作条件下离轴结构色散型成像光谱仪图像变形校正研究有借鉴意义。

## 2 Czerny-Turner 结构的图像变形分析与校正

Czerny-Turner 型成像光谱仪利用两片同样曲率的球面镜,分别作为准直镜和聚焦镜,如图 1 所示。

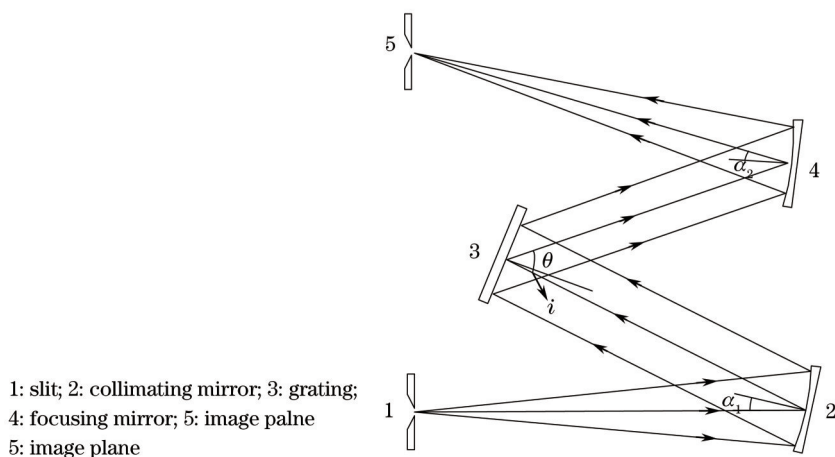


图 1 Czerny-Turner 结构光学系统原理图

Fig.1 Schematic of Czerny-Turner spectral imaging system

像散是目前影响 Czerny-Turner 型成像光谱仪最大的像差。像散的产生主要是由于光线的离轴入射导致球面反射镜在子午方向与弧矢方向的焦距不同<sup>[7-8]</sup>,如图 2 所示。球面反射镜离轴入射光束产生的子午方向和弧矢方向焦距可分别表示为<sup>[9]</sup>

$$f_T = \frac{r_T \cos a}{2}, \quad (1)$$

$$f_s = \frac{r_s}{2 \cos a}. \quad (2)$$

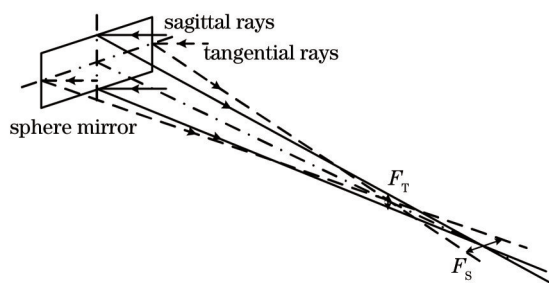


图 2 球面反射镜离轴入射光束的像散

Fig.2 Off-axis spherical mirror astigmatism of incident beam

由(1)式和(2)式可以看出,各个球面镜弧矢方向焦距比子午方向焦距长。为了校正像散,可令系统弧矢方向和子午方向焦距差  $\Delta f$  为 0 或尽可能小。 $\Delta f$  可以表示为

$$\Delta f = (f_{1s} - f_{1T}) + (f_{2s} - f_{2T}), \quad (3)$$

式中 1, 2 分别表示准直镜和聚焦镜。由(3)式可知,通过减小系统在子午方向的聚光能力或增大系统在弧矢方向的聚光能力可以达到校正光谱仪系统像散的目的。

对于在准直光工作条件下的 Czerny-Turner 成像光谱仪,其光束通过光栅后,子午方向光束口径减小,弧矢方向光束口径不变。因此,该结构成像光谱仪的子午方向放大率  $\beta_T$  和弧矢方向放大率  $\beta_s$  可分别表示为

$$\beta_T = \frac{f'_{2T}}{f'_{1T}} \times \frac{\cos i}{\cos \theta} = \frac{r_{2T} \cos a_2 \cos i}{r_{1T} \cos a_1 \cos \theta}, \quad (4)$$

$$\beta_s = \frac{f'_{2s}}{f'_{1s}} = \frac{r_{2s} \cos a_1}{r_{1s} \cos a_2}, \quad (5)$$

式中光栅入射角  $i$  为定值,衍射角  $\theta$  随波长改变,但在一定光谱范围内,其值变化不大,计算时可根据实际情况选取中心波长对应的  $\theta$  值。

由(4)式和(5)式可知,准直镜和聚焦镜两个方向的曲率半径和离轴角,以及光栅的入射角和衍射角均会导致 Czerny-Turner 成像光谱仪子午和弧矢方向放大率存在差异。然而准直镜和聚焦镜的离轴角  $a_1$  和  $a_2$ ,光栅入射角  $i$  和衍射角  $\theta$  相对较小,在未校正像散情况下,离轴结构和通过光栅光束口径改变导致的子午方向和弧矢方向放大率差异不显著。校正像散后,即增大子午方向焦距或减小弧矢方向焦距,子午方向和弧矢方向放大率会产生较大差异,导致图像明显变形。

基于 Czerny-Turner 成像光谱仪的两种校正像散结构——柱面镜<sup>[6]</sup>和超环面<sup>[10-12]</sup>,其光路均是在准直光条件下工作的,且都是通过减小系统弧矢方向焦距达到消像散目的。因此,这两种结构都会减小图像弧矢方向放大率,导致图像变形,需要对图像子午方向或弧矢方向进行缩放才能获得与狭缝像等比缩放的图像(由于前置放大系统得到的狭缝像与实物在子午方向和弧矢方向是等比放缩的,本文只考虑成像光谱仪得到图像相对狭缝像变形的校正)。

首先,定义图像变形校正系数  $K$  为子午方向放大率  $\beta_T$  和弧矢方向放大率  $\beta_s$  之比:

$$K = \frac{\beta_T}{\beta_s} = \frac{f'_{1s} f'_{2T} \cos i}{f'_{1T} f'_{2s} \cos \theta} = \frac{r_{1s} r_{1T} \cos^2 a_2 \cos i}{r_{1T} r_{2s} \cos^2 a_1 \cos \theta}. \quad (6)$$

得到成像光谱仪图像后,对其弧矢方向放大  $K$  倍就能得到相对狭缝像等比缩放的图像。

### 2.1 基于柱面镜的成像光谱仪图像变形校正系数

基于柱面镜的成像光谱仪结构是在光栅与聚焦镜之间加入凹柱面反射镜减小系统在弧矢方向的焦距,达到校正像散的目的,如图3所示。

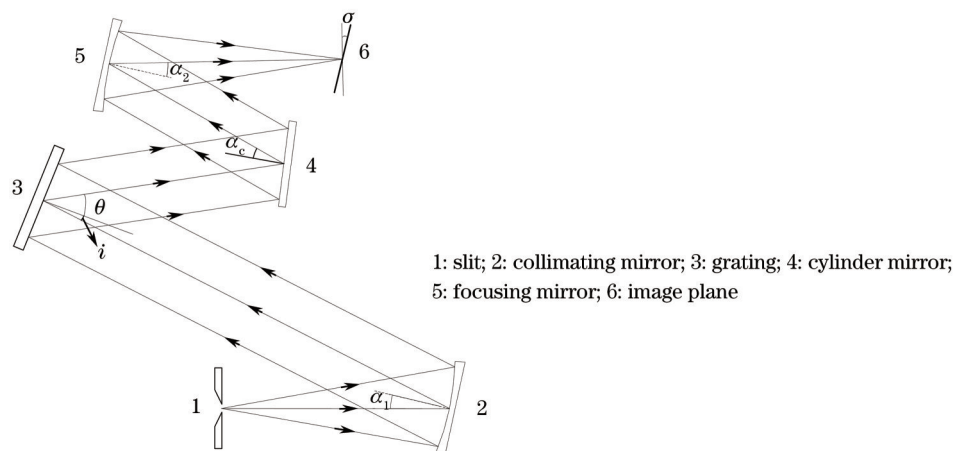


图3 基于柱面镜的成像光谱仪光学系统结构图

Fig.3 Structure of cylinder mirror imaging spectrometer system

为了得到图像变形校正系数  $K$ ,可以利用组合焦距公式先对柱面镜和聚焦镜进行组合,分别计算组合子午焦距  $f'_{2T}$  和组合弧矢焦距  $f'_{2s}$  [柱面镜子午方向和弧矢方向焦距可由(1)式和(2)式分别得到,其子午方向焦距为  $\infty$ ,  $r_{cs}$  为其弧矢方向曲率半径,  $a_c$  为其离轴角],表示为

$$f'_{2T} = \left( \frac{1}{f'_{2T}} \right)^{-1} = \left( \frac{2}{r_{2T} \cos a_2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$$f'_{2S} = \left( \frac{1}{f'_{CS}} + \frac{1}{f'_{2S}} - \frac{d}{f'_{CS} f'_{2S}} \right)^{-1} = \left( \frac{2 \cos a_C}{r_{CS}} + \frac{2 \cos a_2}{r_{2S}} - \frac{4d \cos a_C \cos a_2}{r_{CS} r_{2S}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

从而可以得到基于柱面镜的成像光谱仪图像变形校正系数  $K$  为

$$K \frac{\beta_T}{\beta_S} = \frac{f'_{1S} f'_{2T} \cos i}{f'_{1T} f'_{2S} \cos \theta}. \quad (9)$$

### 2.2 基于超环面的成像光谱仪图像变形校正系数

基于超环面的成像光谱仪结构一般采用减小聚焦镜弧矢方向的曲率半径,即减小系统在弧矢方向的焦距,达到校正像散的目的,如图4所示。

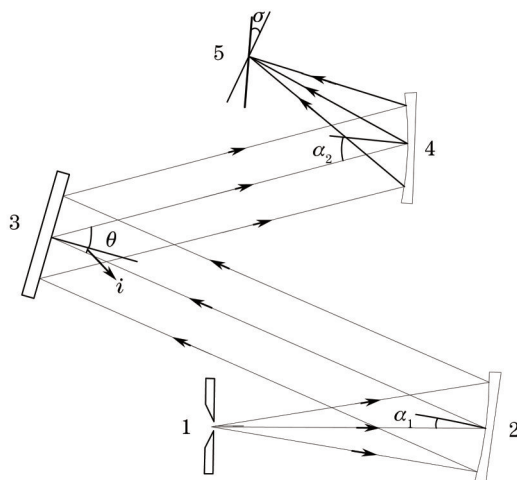


图4 基于超环面聚焦物镜的成像光谱仪光学系统结构图

Fig.4 Structure of toroidal mirror imaging spectrometer system

基于超环面的成像光谱仪图像变形校正系数  $K$  可直接由(6)式得到。

## 3 图像变形校正结果分析

### 3.1 基于柱面镜的成像光谱仪图像变形校正系数结果分析

基于柱面镜的成像光谱仪设计实例采用图3结构,结构参数如表1所示。

表1 光谱仪光路结构参数表

Table 1 Parameters of optical path structure

Structure parameters	
$\alpha_1 / (^\circ)$	13
$\alpha_2 / (^\circ)$	8.9
$\alpha_C / (^\circ)$	38.33
$i / (^\circ)$	2.48
$\theta / (^\circ)$	13.12
$r_1 / \text{mm}$	228.6
$r_2 / \text{mm}$	210.73
$r_C / \text{mm}$	2587

由上文公式和表1数据可以得到图像变形校正的各项参数,如表2所示。

表2 图像变形校正参数表

Table 2 Parameters of anamorphose correction

$f'_{1T}$	$f'_{1S}$	$f'_{2T}$	$f'_{2S}$	$\beta_T$	$\beta_S$	$K$
111.370	117.307	104.096	97.074	0.935	0.828	1.130

本文将用三种方法:理论计算、Zemax光线追迹仿真和实际光谱成像测量验证图像变形校正系数公式的

正确性。

首先,用理想组合系统光路计算公式验证。由于该设计实例的离轴像差得到较好的校正,可用该公式进行计算。组合系统光路计算公式可以表示为

$$u_{i+1} = \frac{h_i}{f'} - u_i, \quad (10)$$

$$h_{i+1} = h_i - d \times u_{i+1}. \quad (11)$$

式中  $u_i$  和  $u_{i+1}$  分别表示同一面镜子的入射角和反射角,  $h_i$  和  $h_{i+1}$  分别表示光线入射到该面镜子和下一面镜子的位置相对镜面中心的距离,  $d$  表示两面镜子的间距。

以狭缝中心为原点,子午方向和弧矢方向分别为  $X$  轴和  $Y$  轴建立坐标系,则原点坐标可记为  $(0,0)$ 。同理,以像面中心为原点建立类似坐标系,易知狭缝坐标  $(0,0)$  点对应的像面坐标也为  $(0,0)$ 。那么在狭缝  $X$  轴上任取一点计算其在像面上的坐标就可以得到子午方向放大率,同理可得弧矢方向放大率。

选取狭缝上坐标为  $(0.2,0)$  和  $(0,3)$  两点,其入射到准直镜上的坐标分别为  $(0.326,0)$  和  $(0,4.945)$ 。由(10)式和(11)式通过计算可以得到狭缝上两点在像面上对应的坐标分别为  $(-0.188,0)$  和  $(0,-2.511)$ ,此处的负值表示系统成倒像,对计算放大率没有影响。从而可以得到理论计算后的图像变形校正系数  $K$ ,如表3所示,表中数据均取正值。

表3 理论计算图像变形校正参数表

Table 3 Parameters of theoretical calculation of anamorphose correction

$\beta_r$	$\beta_s$	$K$
0.942	0.837	1.125

其次,用 Zemax 对光路进行追迹仿真验证。在狭缝中心设置一长方形物体,子午方向长 0.4 mm,弧矢方向长 6 mm。利用 Zemax 的光线追迹工具 Ray Trace 可以得到其在像面上的尺寸,子午方向长 0.377 mm,弧矢方向长 4.993 mm。通过光路仿真测得图像的变形校正系数  $K$ ,如表4所示。

表4 仿真图像变形校正参数表

Table 4 Parameters of simulation image distortion correction

$\beta_r$	$\beta_s$	$K$
0.943	0.832	1.133

最后,用成像光谱仪实际光谱成像测量验证。使用该设计实例研制的成像光谱仪样机(如图5所示)扫描重建5角硬币图像和部分标准色卡图像。电荷耦合器件(CCD)相机的像素尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ ,通过像面上硬币和色卡像素尺寸可以分别得到其重建图像尺寸,再根据其实际尺寸可计算得到图像变形校正系数  $K$ ,如表5所示(色卡像素尺寸为单色小方块均值)。表中放大率受到前置放大系统影响,其值与上述放大率不一致,但不影响  $K$  值。

表5 5毛硬币和标准色卡图像变形校正参数表

Table 5 Parameters of image distortion correction of the coin and standard color card

		Pixel	Image /mm	Object /mm	Magnification	$K$
5 Mao coin	Tangential direction	189	3.024	20.5	0.1475	1.125
	Sagittal direction	168	2.688	20.5	0.1311	
Standard color card	Tangential direction	113	1.808	9.5	0.1903	1.130
	Sagittal direction	100	1.600	9.5	0.1684	

由图像变形校正系数公式得到的  $K$  值与使用三种验证方法得到的  $K$  值比较结果如表6所示(实际测量法中  $K$  取均值)。

表6 图像校正系数比较表

Table 6 Comparison of image correction coefficient

	Formula method	Simulation method	Theoretical calculation method	Actual measurement method
$K$	1.130	1.133	1.125	1.128

由表6数据可知,三种验证方法得到的图像变形校正系数数值非常接近,可以认为这三种方法是合理可靠的。图像变形校正系数公式法得到的  $K$  值与三种验证方法得到的  $K$  的均值相对误差仅为 0.12%,可以认为



图 5 成像光谱仪样机

Fig. 5 Prototype of imaging spectrometer

基于柱面镜的成像光谱仪图像变形校正系数公式是正确的。

根据公式法得到的图像变形校正系数就可对图像进行变形校正,即直接对图像的弧矢方向放大 1.130 倍,图像校正前后与实物的对比图分别如图 6 和图 7 所示。

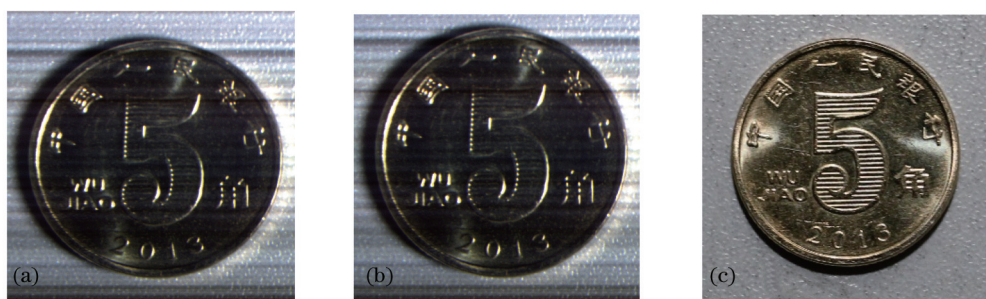


图 6 5 毛硬币图像变形校正前后与实物对比图。(a)重建图;(b)校正图;(c)实物图

Fig.6 Comparison images of coin. (a) Reconstructed image; (b) corrected image; (c) real object image

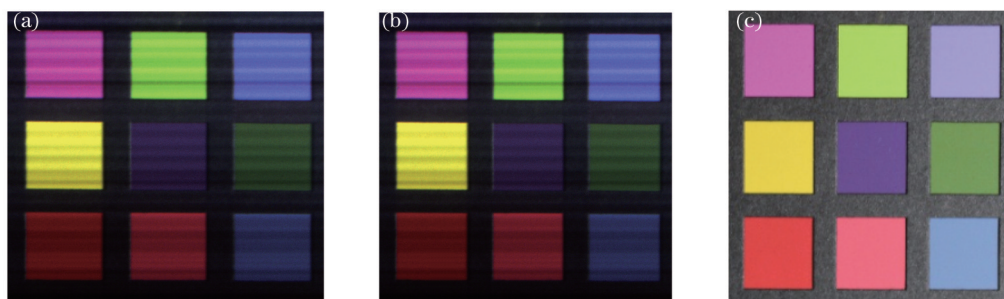


图 7 标准色卡图像变形校正前后与实物对比图。(a)重建图;(b)校正图;(c)实物图

Fig.7 Comparison images of standard color card. (a) Reconstructed image; (b) corrected image; (c) real object image

由图 6 和图 7 可知,重建图弧矢方向相对子午方向的压缩通过图像变形校正得到了恢复,校正后图像与实物在弧矢方向和子午方向是等比缩放的。

### 3.2 基于超环面的成像光谱仪图像变形校正系数结果分析

基于超环面的成像光谱仪设计实例采用图 4 结构,结构参数如表 7 所示。

表 7 光谱仪光路结构参数表

Table 7 Parameters of optical path structure

	Structure parameters
$\alpha_1 / (^\circ)$	10.36
$\alpha_2 / (^\circ)$	8.13
$i / (^\circ)$	5
$\theta / (^\circ)$	15.32
$r_1 / \text{mm}$	221.04
$r_{2T} / \text{mm}$	180.51
$r_{2S} / \text{mm}$	172.3

由上文公式和表 7 数据可以得到图像变形校正的各项参数,如表 8 所示。

表 8 图像变形校正参数表

Table 8 Parameters of anamorphose correction

$f'_{1r}$	$f'_{1s}$	$f'_{2r}$	$f'_{2s}$	$\beta_r$	$\beta_s$	$K$
108.718	112.352	89.348	87.025	0.849	0.775	1.061

用 Zemax 对光路进行仿真验证。在狭缝中心设置一长方形物体,子午方向长 0.2 mm,弧矢方向长 4 mm。利用 Zemax 的光线追迹工具 Ray Trace 可以得到其在像面上的尺寸,子午方向长 0.166 mm,弧矢方向长 3.018 mm。从而可以得到光路仿真测得的图像变形校正系数  $K$ ,如表 9 所示。

表 9 仿真图像变形校正参数表

Table 9 Parameters of simulation image distortion correction

$\beta_r$	$\beta_s$	$K$
0.830	0.755	1.100

图像变形校正系数公式法得到的  $K$  值与仿真验证方法得到的  $K$  值较为接近,可以认为基于超环面的成像光谱仪图像变形校正系数公式是正确的。

通过对基于柱面镜和超环面的成像光谱仪图像变形校正公式的验证可以得出,该公式不但准确可靠,而且仅需要几个简单的系统参数就能校正变形图像,操作简单。

对于准直光工作条件下离轴结构色散型成像光谱仪,其离轴结构引起的子午方向和弧矢方向焦距不同及像差校正结构引起的焦距不同均会对系统成像造成影响(主要导致图像变形)。本文提出的图像变形校正方法对单镜和系统分别进行详细分析,对于该类结构成像光谱仪的图像变形问题可以按照上述步骤逐一分析各镜情况并结合具体系统进行图像变形校正。

## 4 结 论

提出了 Czerny-Turner 结构成像光谱仪消像散后一种图像变形校正方法。分别给出了基于柱面镜和基于超环面的成像光谱仪图像变形校正系数公式。通过理论计算、Zemax 光线追迹仿真和实际光谱成像测量验证了图像变形校正系数公式的正确性以及图像变形校正方法的易于操作性。提出的图像变形校正公式和方法能为其他准直光工作条件下离轴结构色散型成像光谱仪的图像变形校正研究提供参考。

## 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 A B shafer, L R Megill, L Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer [J]. J Opt Soc Am A, 1963, 54(7): 879-887.
- 3 J D L Murphy. Astigmatism compensation in the Czerny-Turner spectrometer [J]. J Appl Opt, 1966, 5(7): 1121-1123.
- 4 M Futamata, T Takenouchi, K Katakura. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy [J]. Appl Opt, 2002, 41(22): 24-31.
- 5 K S Lee, K P Thompson, J P Rolland. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. Opt Express, 2010, 18(22): 23378-23384.
- 6 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.  
刘建鹏,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.
- 7 Tang Yi, Zhang Zhige, Cheng Ting'ai, *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.
- 8 T A Chen, Y Tang, L J Zhang, *et al.*. Correction of astigmatism and coma using analytic theory of aberrations in imaging spectrometer based on concentric off-axis dual reflector system [J]. Appl Opt, 2014, 53(4): 565-576.
- 9 F A Jenkins, H E White. Fundamentals of Optics [M]. New York: Mcgraw-Hill Press, 1950. 92-93.
- 10 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu, *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm

- carried by satellite [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112011.
- 于 磊, 曲 艺, 林冠宇, 等. 120~180 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 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.
- 12 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.

栏目编辑: 张浩佳