

# 分析双 Amici 棱镜角度误差对色散的影响

裴琳琳<sup>1,2</sup> 黄 旻<sup>1</sup> 吕群波<sup>1</sup> 付 强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100094; <sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 双 Amici 棱镜为复合棱镜结构, 作为成像光谱系统中的分光元件, 避免了单棱镜色散结构存在的多种问题。双 Amici 棱镜的加工生产要对其各个角度提出生产指标, 而角度误差对于光谱成像系统的色散性是有影响的。针对一种编码孔径成像光谱仪, 设计了符合性能指标要求的双 Amici 棱镜, 并从光线追迹的角度出发, 计算得到双 Amici 棱镜色散的数学模型。针对给出的一特定光学系统中的棱镜结构推导了棱镜各个角度单独对线色散的影响, 并分析给出各个角度构成的误差链对线色散的综合影响, 最终给出了棱镜的生产指标。分析结果有助于指导系统中该棱镜的加工生产。

**关键词** 光学设计; 双 Amici 棱镜; 色散; 倾角误差; 公差分配

**中图分类号** O443 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0122003

## Effect of Angle Error of the Double Amici Prism on Dispersion

Pei Linlin<sup>1,2</sup> Huang Min<sup>1</sup> Lü Qunbo<sup>1</sup> Fu Qiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China)  
(<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Double Amici prism is a kind of composite prism, as the dispersion component of the imaging spectral system, avoiding some problems of the single dispersion prism. We should give out the each angle's processing targets of the double Amici prism. Every angle error has a different effect on the dispersion. We design a coded aperture imaging spectral system. A double Amici prism is designed to meet the needs of the applications of the specific system. The mathematical model of the double Amici prism dispersion is deduced from the standpoint of ray tracing. In this particular optical system, we give out the effect of every angle of the prism on the line dispersion, then analyze of the angular error chain's effect on the line dispersion, and finally give out the production index of the prism. The results contribute to the processing and production of the prism.

**Key words** optical design; double Amici prism; dispersion; angle error; allocation of tolerances

**OCIS codes** 220.2740; 230.5480; 230.2035

## 1 引 言

成像光谱技术因其能够获得被测目标的两维空间信息和一维光谱信息, 而有着广泛的应用。得到的目标图像包含丰富的空间、辐射和光谱三重信息, 能够表现出被测目标空间分布的影像特征, 同时可以以其中某一个像元或者某像元组得到其相应的光谱信息。这种技术有多种分类方式, 如光谱分辨率、扫描方式、分光原理、重构理论和调制方式。而从分光原理看, 可以分为棱镜色散、光栅衍射、滤光片和

干涉等<sup>[1~3]</sup>。其中棱镜色散的原理简单, 性能稳定, 目前已经进入实用化阶段了。目前常见的棱镜色散采用单棱镜色散的方式, 由于材料本身的性质, 使得光谱分辨率存在非线性问题: 空间方向的不同视场角对应的空间入射角不同, 带来谱线弯曲; 不同谱段的角放大率不同, 引起色畸变。使用复合棱镜, 如双 Amici 结构, 可以减小单棱镜色散存在的问题。

光学系统是一种精密系统, 对加工精度的要求很严格。而在实际生产中, 过高的加工精度往往难

收稿日期: 2012-07-20; 收到修改稿日期: 2012-09-10

基金项目: 国家 863 计划(2011AA7012022)资助课题。

作者简介: 裴琳琳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: aoe\_plin@hotmail.com

导师简介: 黄 旻(1976—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事计算光学成像与光谱技术等方面的研究。

E-mail: huangmin@aoe.ac.cn

以实现,当误差分配不合理时,造成光学系统性能的严重下降<sup>[4~7]</sup>。因此,在生产前,对棱镜制作角度进行合理的公差分配是十分必要的。本文针对一种编码孔径成像光谱仪,设计了双 Amici 棱镜的分光元件,用光线追迹的方法给出棱镜的公差分配方案。

## 2 编码孔径成像光谱仪原理

### 2.1 成像系统

成像光谱技术兴起于 20 世纪 80 年代,目前以色散型、干涉型成像光谱技术为主。本文涉及的系统是一种色散型的成像光谱仪,该系统由六部分组成:

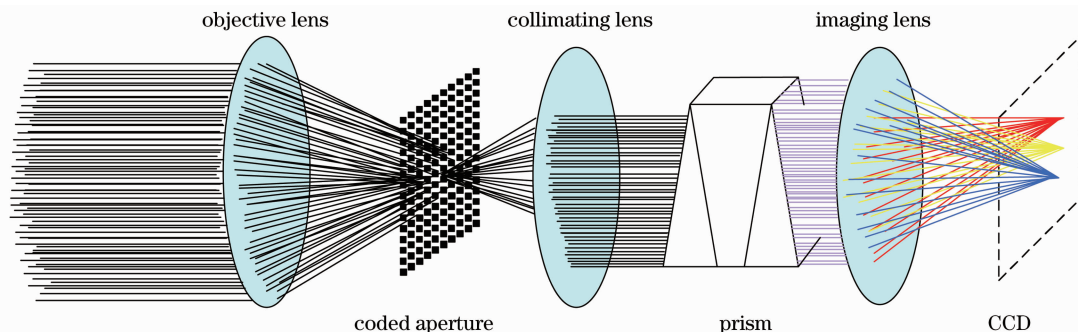


图 1 编码孔径成像光谱仪系统

Fig. 1 Coded-aperture imaging spectral system

### 2.2 色散原理

该编码孔径成像光谱仪系统用的是棱镜色散。棱镜色散原理简单,应用方便<sup>[4]</sup>。单棱镜色散存在着很多缺陷,比如:光谱分辨率存在非线性,在短波处与长波处的光谱分辨率可以相差 10 倍之多;空间方向的不同视场对应的空间入射角不同,造成谱线弯曲;不同谱段的角放大率不一样,带来的色畸变等等。为回避单棱镜的这些劣势,尝试采用双 Amici 棱镜结构。

正常色散的玻璃材料,折射率满足 Schott 公式

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_4\lambda^{-4} + A_6\lambda^{-6}, \quad (1)$$

式中  $n$  为棱镜折射率, $\lambda$  为波长, $A_0, A_1, A_2, A_4, A_6$  为系数。可知材料折射率与波长呈非线性关系<sup>[8]</sup>。如图 2 所示的三棱镜,该棱镜的偏向角公式为

$$\delta = i_1 + \arcsin \left\{ \left[ n \sin \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{\sin i_1}{n} \right) \right] \right] \right\} - \alpha, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为棱镜夹角, $i_1$  为入射到棱镜的入射角, $\delta$  为光线的偏向角,可以发现光线的偏向角与材料的折射率有关,棱镜色散就是运用了棱镜的这个性质。

双 Amici 棱镜是一种由三个棱镜构成的完全对称的结构,如图 3 所示,第一块为中等的冕牌玻璃,

前置物镜、编码板、准直镜、色散棱镜、成像镜和 CCD 探测器。光学原理为目标通过前置物镜成像在一次像面,编码板正处于一次像面处,再通过准直镜变为平行光,进入色散棱镜色散,最后通过成像镜将编码并色散开的光线成像于探测器靶面。图 1 为编码孔径成像光谱仪系统。

编码板位于系统的一次像面处,该系统的准直镜与成像镜结构完全相同,即 CCD 对编码板 1:1 成像,编码板的尺寸大小由选定的 CCD 探测器的接受面尺寸确定。探测器像面中的每一像元,为不同空间位置点不同波段信息的叠加结果。

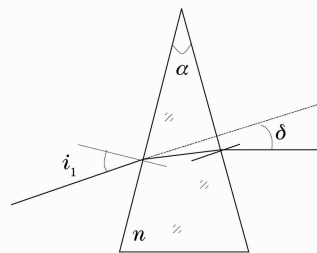


图 2 三棱镜

Fig. 2 Prism

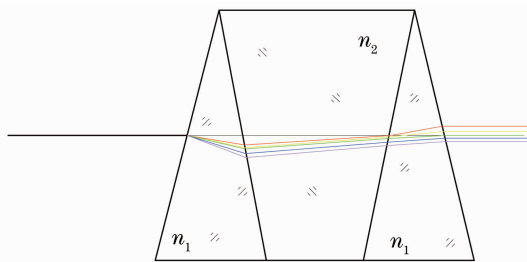


图 3 双 Amici 棱镜

Fig. 3 Double Amici prism

折射率为  $n_2$ ,第二块为高色散的火石玻璃,折射率为  $n_1$ ,第三块玻璃材料与第一块一致。光线经过该棱镜结构能增加光线的色散角度。

### 3 棱镜色散数学建模及仿真

#### 3.1 线色散的数学建模

光线经过双 Amici 棱镜结构的光程如图 4 所示。在主截面内,光线分别经过棱镜的 4 个倾斜的表面,设 4 个面与  $y$  轴的夹角分别为  $m_1, m_2, m_3, m_4$ 。双 Amici 棱镜的第一块与第三块棱镜材料相同,折射率记为  $n_1$ ,第二块棱镜折射率记为  $n_2$ 。根据折射定理,以及结构中的几何关系,可以计算得到各个参数:

$$i_1 = m_1, \quad (3)$$

由  $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_1$ , 得到

$$i_2 = \arcsin \frac{\sin i_1}{n_1}, \quad (4)$$

$$i_3 = m_1 + m_2 - i_2, \quad (5)$$

由  $\frac{\sin i_3}{\sin i_4} = \frac{n_2}{n_1}$ , 得到

$$i_4 = \arcsin \frac{n_1 \sin i_3}{n_2}, \quad (6)$$

$$i_5 = m_2 + m_3 - i_4, \quad (7)$$

由  $\frac{\sin i_5}{\sin i_6} = \frac{n_1}{n_2}$ , 得到

$$i_6 = \arcsin \frac{n_2 \sin i_5}{n_1}, \quad (8)$$

$$i_7 = m_3 + m_4 - i_6, \quad (9)$$

由  $\frac{\sin i_7}{\sin i_8} = \frac{1}{n_1}$ , 得到

$$i_8 = \arcsin(n_1 \sin i_7). \quad (10)$$

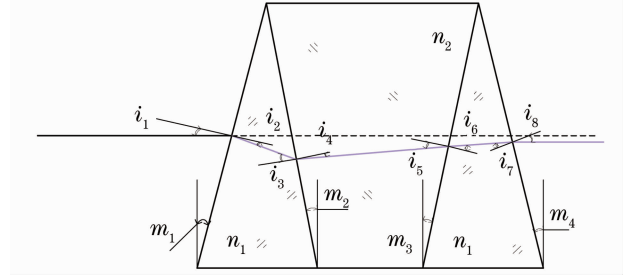


图 4 双 Amici 棱镜中的光程

Fig. 4 Light path in double Amici prism

出射角与光轴夹角大小为

$$i_{8\_equ} = m_4 - i_8 =$$

$$m_4 - \arcsin \left\{ n_1 \sin \left[ m_3 + m_4 - \arcsin \left[ \frac{n_2 \sin \left[ m_2 + m_3 - \arcsin \left[ \frac{n_1 \sin \left[ m_1 + m_2 - \arcsin \left( \frac{m_1}{n_1} \right) \right] \right] \right] \right] \right] \right] \right\}. \quad (11)$$

图 5 为双 Amici 棱镜结构的分立图,三块棱镜的中心轴向厚度均为  $d$ ,即整个双 Amici 结构,中心轴向厚度为  $3d$ 。根据三角形的几何关系,求得光线在棱镜中的光程:

$$\frac{\sin(90^\circ - i_3)}{d} = \frac{\sin(90^\circ + m_2)}{d_1}, \quad (12)$$

$$\frac{\sin(m_1 + m_2)}{d} = \frac{\sin(90^\circ - m_1)}{d'_1}, \quad (13)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - i_3)}{d} = \frac{\sin(i_1 - i_2)}{d''_1}, \quad (14)$$

$$\frac{d'_1}{d'_1 - d''_1} = \frac{d}{d'_2}, \quad (15)$$

$$\frac{\sin(90^\circ + m_3)}{d_2} = \frac{\sin(90^\circ - i_5)}{d'_2} = \frac{\sin(m_2 - i_4)}{d''_2}, \quad (16)$$

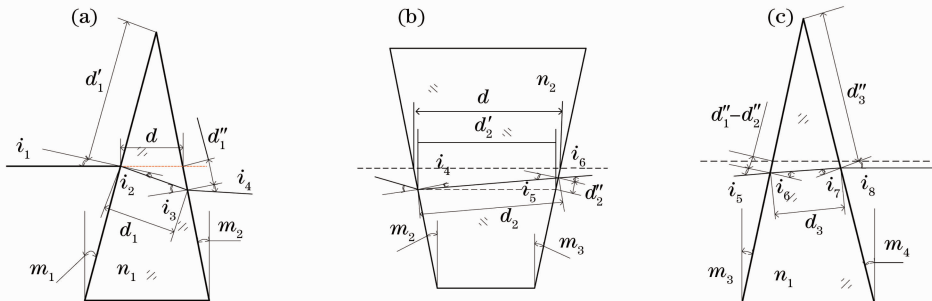


图 5 双 Amici 棱镜结构。(a) 第一块棱镜; (b) 第二块棱镜; (c) 第三块棱镜

Fig. 5 Structure of double Amici prism. (a) The first prism; (b) the second prism; (c) the third prism

$$\frac{\sin(m_3 + m_4)}{d_3} = \frac{\sin(90^\circ - i_7)}{d_1'' - d_2'' + d_1'} = \frac{\sin(90^\circ - i_6)}{d_3''}, \quad (17)$$

$$d_3'' = \frac{d_3 \sin(90^\circ - i_6)}{\sin(m_3 + m_4)}. \quad (18)$$

从光轴与棱镜出射面的交点到接收的距离为  $D$ , 可以得到光线从棱镜出射后在接受面的投射高度  $y$  (正值表示投射点位于中心位置上方, 负值表示投射点位于中心位置下方):

$$y = i_{8\_equ} D + \left[ \frac{\sin(90^\circ - m_3) d}{\sin(m_3 + m_4)} - d_3'' \right] \cos m_4. \quad (19)$$

### 3.2 系统仿真

针对编码孔径成像光谱仪系统, 该系统采用双 Amici 棱镜为色散元件的光学。选用的探测器为  $1384 \text{ pixel} \times 1036 \text{ pixel}$ , 像素大小为  $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ , 根据 2 节中阐述探测器与编码板互为物像关系, 确定编码板的参数为:  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  ( $12.9 \mu\text{m} \times 12.9 \mu\text{m}$ ), 即编码板每一个孔径对应探测器上  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 。选取的工作谱段范围:  $450 \sim 700 \text{ nm}$ , 光谱分辨率为  $5 \text{ nm}$ , 即 50 个谱段, 瞬时视场为  $0.095 \text{ mrad}$ 。

根据已知参数, 可以计算出

$$f_0 = \frac{V_e}{V_v} = \frac{12.9}{0.095} = 135 \text{ (mm)}, \quad (20)$$

$$2\omega = \frac{0.095 \times 512}{1000} \times \frac{180}{\pi} = 2.803^\circ, \quad (21)$$

式中  $f_0$  为物镜焦距,  $V_e$  为像素大小,  $V_v$  为瞬间视场,  $2\omega$  为视场角。确定物镜、准直镜和成像镜的设计, 设计指标为: 物镜焦距为  $135 \text{ mm}$ , 系统视场角大小为  $2.803^\circ$ 。

该光学系统中, 目标经过物镜之后, 在焦面处成一次实像, 此处放有编码板, 光线经过编码板编码, 从编码板到 CCD 探测器之间, 是一个 4F 系统。棱镜在整个系统中, 起着至关重要的作用, 本文主要针对对棱镜的制作倾角误差对于系统成像的影响给出量化的分析。在 Zemax 软件中, 搭建该 4F 系统结构模型, 视场角  $2\omega = 2.803^\circ$ , 前后的镜组采用近轴镜片模式, 焦距为  $135 \text{ mm}$ , 优化后得到最终结构参数。

优化之后的玻璃结构为图 6 所示, 序号 1 的玻璃材料为: H-Fk61 ( $n_d = 1.49700, v_d = 81.61$ ), 序号 2 的玻璃材料为: H-F4 ( $n_d = 1.62005, v_d = 36.35$ )。图 6 中从左到右, 棱镜面倾斜角度相对于图中  $y$  轴依次为:  $m_1 = 1.108355^\circ$ 、 $m_2 = -4.357006^\circ$ 、 $m_3 = 4.357006^\circ$ 、 $m_4 = -1.108355$ 。这个棱镜结构是关于

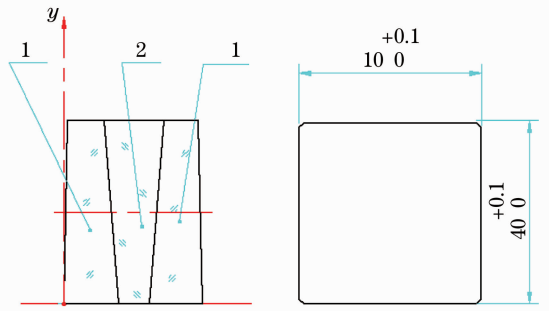


图 6 编码孔径成像光谱系统中的色散棱镜结构  
Fig. 6 Layout of the dispersion prism in the coded aperture imaging spectral system

$y$  轴对称的结构, 即  $m_4 = -m_1, m_3 = -m_2$ 。

在 Zemax 中, 光线追迹并查看光线色散范围, 如表 1 所示, 该结构棱镜符合设计目标。

表 1 Zemax 模拟值

Table 1 Simulated data by Zemax

Item	Simulated data by Zemax
$i_8(450)$	1.042287
$i_8(700)$	1.169942
$y(450)$	0.166868
$y(750)$	-0.155632
Size of the line dispersion	0.322500

## 4 误差分析

### 4.1 倾角误差分析

2 节中提到的系统参数为例子, 分析四个面倾角  $m_1, m_2, m_3$  和  $m_4$  对于棱镜色散的影响。该光学系统允许的线色散偏差为  $+5 \text{ pixel}$  大小, 所以色散范围最大比原来数值大  $0.03225 \text{ mm}$ 。在 Matlab 软件中写函数计算, 将 4 个角度分别设为变量, 得到色散范围  $d$  与角度偏差  $\theta$  的关系图, 如图 7 所示。

判断线色散可接受的误差范围内, 得到 4 个倾角的公差范围如表 2 所示。

双 Amici 棱镜的 4 个角度是生产上可以控制的, 是直接测量量, 而光线经过棱镜之后的线色散, 是直接测量量所得到的各个测量值的函数, 是间接测量量。间接测量误差的计算是误差的传递问题, 间接测量量与直接测量量构成一个误差链, 误差传递系数就可以通过对该误差链求偏导数获得<sup>[9]</sup>。故光线经过棱镜之后的线色散范围  $Y_y$  的合成标准差为

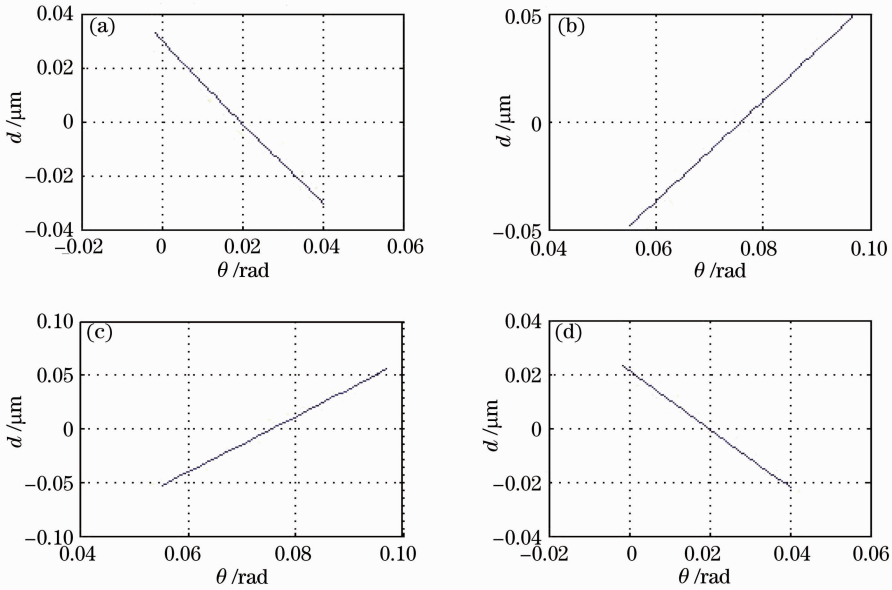

 图 7 各个倾角对色散偏差的影响。(a)  $m_1$ ; (b)  $m_2$ ; (c)  $m_3$ ; (d)  $m_4$ 

 Fig. 7 Effect of every angle of the prism on deviation of the line dispersion. (a)  $m_1$ ; (b)  $m_2$ ; (c)  $m_3$ ; (d)  $m_4$ 

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_y = y(450) - y(700) \\ \frac{\partial Y_y}{\partial m_1} = -2.5665, \quad \frac{\partial Y_y}{\partial m_2} = 4.8931, \quad \frac{\partial Y_y}{\partial m_3} = 4.8931, \quad \frac{\partial Y_y}{\partial m_4} = -2.5665 \\ s_{Y_y} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_1}\right)^2 s_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_2}\right)^2 s_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_3}\right)^2 s_{m_3}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_4}\right)^2 s_{m_4}^2} \end{array} \right. \quad (22)$$

误差分配是误差合成的逆过程,即给定测量结果的总误差允差,合理进行误差分配,确定各个单项的误差<sup>[10~12]</sup>。具体到双 Amici 棱镜,是针对给定的棱镜线色散允差  $s_{Y_y}$ ,确定棱镜 4 个角度的制造误差,即

$$\sqrt{\left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_1}\right)^2 s_{m_1}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_2}\right)^2 s_{m_2}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_3}\right)^2 s_{m_3}^2 + \left(\frac{\partial Y_y}{\partial m_4}\right)^2 s_{m_4}^2} \leq 0.03225. \quad (23)$$

按等作用原则分配误差,找出合理的公差分配方案,即

$$\frac{\partial Y_y}{\partial m_1} s_{m_1} = \frac{\partial Y_y}{\partial m_2} s_{m_2} = \frac{\partial Y_y}{\partial m_3} s_{m_3} = \frac{\partial Y_y}{\partial m_4} s_{m_4} < \frac{s_{Y_y}}{\sqrt{4}} = \frac{s_{Y_y}}{2}. \quad (24)$$

表 2 单个倾角的公差范围

Table 2 Tolerance of every angle

Item	Tolerance /rad
$m_1$	-0.021~0
$m_2$	0~0.014
$m_3$	0~0.012
$m_4$	-0.03~0

根据计算得到 4 个角度对棱镜线色散的影响,系统允许弥散斑有 +5 pixel 的偏差,否则会降低光谱分辨率,经过计算得到 4 个角度的允差如表 3

所示。

表 3 误差链中各个倾角公差

Table 3 Tolerance of every angle in error chain

Item	Tolerance /rad
$m_1$	-0.0062~0
$m_2$	0~0.0032
$m_3$	0~0.0032
$m_4$	-0.0062~0

由表 3 可知,  $m_2$  和  $m_3$  的公差范围相比之下要偏紧,对光线重新追迹,查看线色散偏差大小是否在允差范围内,如图 8 所示,线色散偏差在工程应用的允差范围内。

通过追迹光线给出了双 Amici 棱镜的数学模型,将工程应用中的设计标准输入该模型中,便可以得到各个倾角的制造公差。为更明确的验证此种算法得到的公差分配方案的合理性,采用蒙特卡罗模拟法<sup>[9]</sup>。此种验证方法不仅可以在满足设计要求的前

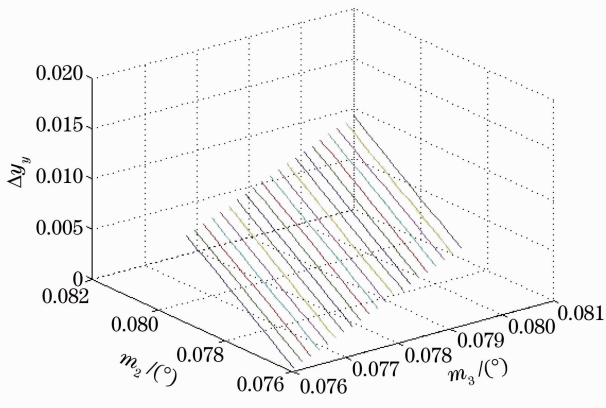


图 8 线色散偏差值

Fig. 8 Deviation value of the line dispersion

前提下使系统的加工和装调公差得到合理分配,还可以正确地预测生产结果,判断设计的合理性<sup>[13]</sup>。以本节给出的应用指标为例,将计算得到的公差输入到 Zemax 软件中,用蒙特卡罗模拟法分析,结果表明在此种公差分配方案下,以高于 90% 的概率,使经过棱镜线色散开的范围偏差在 +0.01923146 mm 内,符合此棱镜的设计标准。

#### 4.2 第二维倾斜

3.1 节分析了 4 个倾角误差对线色散的影响,而棱镜的制作,还包括倾角所在平面的翻转<sup>[14,15]</sup>,如图 9 所示,实线为理想结构,虚线为有偏差的实际加工件。

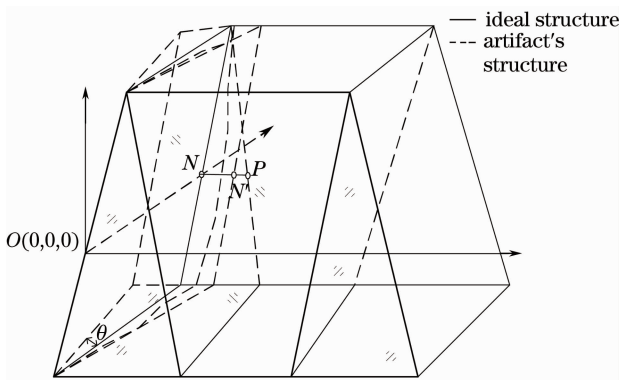


图 9 第一个制造面的摆动

Fig. 9 Swing of the first manufacture surface

第一个平面不同位置有不同角度的翻转,以距离  $O(0,0,0)$  位置最远的平行位置  $N$  为例,这样,实际第三节中的  $d$  值即为(25)式的值,同理,当存在第二、三、四个平面的翻转时,光学结构中的每个  $d$  值也会有改变。转换到光线追迹的概念上,即对应光程的改变。在 Matlab 软件中,查看每个平面翻转角度对色散开的范围的影响,如图 10 所示,图中横坐标表示在  $\pm 1^\circ$  范围内变化,纵坐标表示线色散偏

差。从图 10 中数据可以看出,  $1^\circ$  的倾斜对色散的影响还不足一个像元大小,故对该棱镜的制造生产中,这个维度的制造公差可以放开,即

$$d = l_{NP} - l_{NN'} = l_{NP} - l_{ON} \times \tan \theta, \quad (25)$$

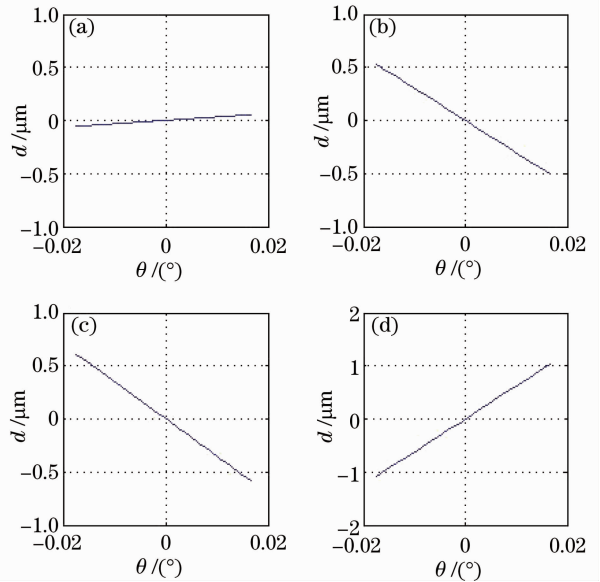


图 10 4 个倾角表面摆动对色散的影响。(a) 第一个平面; (b) 第二个平面; (c) 第三个平面; (d) 第四个平面  
Fig. 10 Effect of the four-angle surface's swinging on the line dispersion. (a) The first plane; (b) the second plane; (c) the third plane; (d) the fourth plane

## 5 结 论

针对双 Amici 棱镜给出了详细的光线追迹推导,在玻璃材料、厚度固定的情况下,针对棱镜面各倾角的误差,建立数学模型,后运用 Matlab 软件进行出射角、投射高度的理论值得计算,再通过与 Zemax 模拟该棱镜色散效果的对比,证明了该数学理论模型的正确性。Zemax 辅助分析四个倾角误差对于双 Amici 棱镜的色散的影响,并通过蒙特卡罗模拟分析法,给出了计算出的公差范围内,产品的合理性。对于光学元件的加工生产,过高的生产精度要求,会大幅度的提高生产成本,而通过本文建立的数学模型可以得到双 Amici 棱镜的各种线色散标准下的四个倾角合理的制造允差,为项目应用中此棱镜的生产提供了理论指导。

## 参 考 文 献

1 Yuan Yan. Theoretical and Technical Study of the Imaging Spectrometry[D]. Xi'an; Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, 2005. 1~22

- 袁 艳. 成像光谱理论与技术研究 [D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005. 1~22
- 2 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
- 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术 [J]. 光学学报, 1998, **18**(1): 18~22
- 3 R. G. Sellar, G. D. Boreman. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications[J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(1): 013602
- 4 Fu Qiang, Huang Min, Jing Juanjuan *et al.*. Relay lens design for an LCTF multi-spectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022002
- 付 强, 黄 旻, 景娟娟 等. 用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的中继成像系统设计 [J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1022002
- 5 Chang Shan, Cao Yiping, Chen Yongquan. Effect of processed angle error of pentagonal prism on wave front measurement [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(5): 24~28
- 常 山, 曹益平, 陈永权. 五角棱镜的角度制造误差对波前测量的影响 [J]. 光学仪器, 2005, **27**(5): 24~28
- 6 Yan Yadong, He Junhua, Cang Yuping *et al.*. Effect of penta prism error on parallelism detection[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 649~653
- 闫亚东, 何俊华, 仓玉萍 等. 用 Zemax 模拟五棱镜误差对平行度检测的影响 [J]. 应用光学, 2007, **28**(5): 649~653
- 7 Zhang Yueguo, Zhang Jilong, Wang Zhibin *et al.*. Tolerance analysis of wedge angle in Wollaston prism array[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(1): 80~84
- 张跃国, 张记龙, 王志斌 等. Wollaston 棱镜阵列中子棱镜结构角误差分析[J]. 应用光学, 2011, **32**(1): 80~84
- 8 俞胜清, 黄晓俊. 冕牌玻璃 K9 棱镜色散关系的测定 [J]. 科技创新导报, 2011, **24**: 216~218
- 9 吴石林, 张 玘. 误差分析与数据处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2010
- 10 Yu Minglang, Shi Yanfeng. The influence of angle error in plane dimension chain[J]. *J. Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2008, **27**(2): 146~147
- 余明浪, 史延枫. 角度误差在平面尺寸链中的作用 [J]. 成都大学学报(自然科学版), 2008, **27**(2): 146~147
- 11 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322003
- 曲贺盟, 张 新, 王灵杰 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0322003
- 12 Lian Tongshu. Analysis and calculation of manufacturing errors for reflecting prisms[J]. *Review of Science and Technology*, 2010, **28**(9): 68~72
- 连铜淑. 反射棱镜制造误差的分析与计算 [J]. 科技导报, 2010, **28**(9): 68~72
- 13 Liu Lin, Zhang Dexing, He Yiliang. Monte Carlo simulation and its application in the IR optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(5): 496~499
- 刘 琳, 张兴德, 贺谊亮. 基于蒙特卡洛模拟法的红外光学系统公差[J]. 激光与红外, 2010, **40**(5): 496~499
- 14 He Yingwei, Li Ping, Feng Guojin *et al.*. Analysis of a sub-aperture scanning machine with double-rotating arms for large-aperture optical system transmittance measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112004
- 赫英威, 李 平, 冯国进 等. 大口径光学系统测试用双回转子孔径扫描装置设计与误差分析 [J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112004
- 15 Zhao Jiali, Liang Jiaohu, Xue Pan. Analysis and modeling of variation transmission in multi-stage manufacturing process [J]. *J. Lanzhou University of Technology*, 2011, **37**(3):
- 赵家黎, 梁角虎, 薛 盼. 多工序制造过程误差传递分析与建模 [J]. 兰州理工大学学报, 2011, **37**(3):

栏目编辑: 韩 峰