

## 高光谱成像仪中曲面棱镜的装调公差研究

蔡东浩<sup>1,2</sup>, 李雅灿<sup>1</sup>, 魏立冬<sup>1</sup>, 冯蕾<sup>1</sup>, 周锦松<sup>1,2</sup>, 景娟娟<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;<sup>2</sup>中国科学院大学光电学院, 北京 100049

**摘要** 基于曲面棱镜的光谱成像技术是近几年该领域研究的热点,但曲面棱镜前后球面的非共轴特性使得曲面棱镜的装调难度远大于传统共轴光学系统。装调误差是影响成像系统最终成像质量的重要因素,目前曲面棱镜高光谱成像仪的公差分配方法大多以系统调制传递函数(MTF)为评价指标,未考虑装调误差对谱线弯曲、色畸变的影响。利用几何光学方法研究了曲面棱镜谱线弯曲、色畸变的产生机理,构建了曲面棱镜光谱仪谱线弯曲、色畸变与曲面棱镜装调误差关系的数学模型,分析了曲面棱镜装调误差对高光谱成像仪光谱畸变的影响。通过几何光线追迹,对曲面棱镜装调误差的分析结果进行了验证。结果表明,谱线弯曲、色畸变和 MTF 对曲面棱镜装调误差的敏感程度存在显著差异。为了保证曲面棱镜装调误差引起的系统 MTF 下降容限在设计值的 10% 以内,进行了二次公差分配以得到最终公差分配结果,其中公差极限值最小的单项装调公差为 X 轴方向的倾斜误差,为实际系统的装调提供了参考。

**关键词** 几何光学; 成像光谱仪; 曲面棱镜; 谱线弯曲; 色畸变; 光学装调

中图分类号 O433.1; O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0608001

## Fabricating Tolerance of Curved Prisms in Hyperspectral Spectrometer

Cai Donghao<sup>1,2</sup>, Li Yacan<sup>1</sup>, Wei Lidong<sup>1</sup>, Feng Lei<sup>1</sup>, Zhou Jinsong<sup>1,2</sup>, Jing Juanjuan<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The curved-prism-based hyperspectral imaging technology has become a research hotspot in recent years. However, the non-coaxial characteristic of two spheres in a curved prism makes the fabricating procedure of a curved prism far harder than that in a traditional coaxial optical system. Fabricating error is the key factor influencing the final imaging quality of a spectrometer. At present, the modulation transfer function (MTF) is mostly regarded as an important evaluating indicator, however it does not consider the effect of fabricating error on spectral distortions including spectral smile and keystone. In this paper, the generation mechanism of spectral smile and keystone of curved prisms is investigated with the geometric-optical method. In addition, a mathematical model is proposed for deriving the relationship between fabricating errors of curved prisms and spectral distortions including spectral smile and keystone, and the effect of fabricating error on the spectral distortions of the hyperspectral imaging spectrometer is analyzed. Moreover, through geometric ray tracing, the analysis results of fabricating errors of curved prisms are verified. The results show that there exists an obvious difference in the sensitivity of spectral smile, keystone, and MTF to fabricating error. In order to ensure that the drop limit of the system MTF induced by fabricating errors of curved prisms is smaller than 10% of the design value, the tolerance for the second allocation is conducted to obtain the final tolerance allocation result, in which the fabricating tolerance with the minimum tolerance limit value is a tilt error at X-axis. The research here provides a reference for the actual

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 中国科学院战略先导课题(XDA17040203, XDA19010103)

\* E-mail: jingjj@aoe.ac.cn

fabricate procedure.

**Key words** geometric optics; imaging spectrometer; curved prism; smile; keystone; optical fabrication

**OCIS codes** 080.2208; 300.6190; 120.6200; 120.4610

## 1 引言

光谱成像仪同时记录景物空间与光谱信息,在植被研究、伪装目标辨识、地表勘测等方面有广泛的应用。传统色散光谱仪存在偏向角的问题,系统体积较大<sup>[1-5]</sup>,存在较大的谱线弯曲和色畸变,图谱质量较低。基于曲面棱镜的光谱成像技术与传统平面色散棱镜相比,可应用于非平行光路中,具有结构紧凑、色散非线性小等优点,同时具有像差校正的功能,大大提高了系统的成像质量和整体性能<sup>[6]</sup>。已研制的高分辨率曲面棱镜高光谱成像仪有 CHRIS 系统<sup>[7]</sup>、STSAT3 系统<sup>[8]</sup>、EnMAP 系统<sup>[9]</sup>和微纳光谱仪等<sup>[10]</sup>。曲面棱镜光谱仪具有低光谱畸变、高光谱分辨率等优点,但曲面棱镜的非共轴特性决定了其装调难度远大于传统平面色散棱镜。针对曲面棱镜进行合理的装调公差分配,能够保证仪器良好的光谱成像质量,提高工程效率。

光学系统的装调分析研究大多聚焦于基于公差的调制传递函数(MTF)分析。王志强等<sup>[11]</sup>在动态目标模拟离轴三反光学系统的公差分析流程中,以 MTF 为评价指标,未将畸变引入公差分析流程。尹超等<sup>[12]</sup>对深紫外光刻照明系统的微反射镜阵列进行了公差分析,将其光学系统的特有指标-特征尺寸误差引入公差分析流程,给出的最终公差满足实际制造需求。Moore 等<sup>[13]</sup>总结了现有的不同成像系统的公差分析流程,指出谱线弯曲、色畸变可作为光谱成像仪装调准直的有效系统指标,且利用蒙特卡罗分析方法可对系统公差进行有效评价。Ku 等<sup>[14]</sup>针对一个 Offner 同心结构光谱仪,以谱线弯曲、色畸变与 MTF 为评价指标,进行了公差分析,分析结果指出,该系统中的次镜是对公差最为敏感的元件。

本文分析了曲面棱镜谱线弯曲、色畸变的产生机理,使用矩阵光学的方法建立了曲面棱镜色畸变与装调误差关系的数学模型,并基于 ZEMAX 软件,对一款 Offner 型曲面棱镜光谱仪的数学模型分析结果进行了论证。本文对所设计的光谱成像系统进行了曲面棱镜的装调公差仿真,给出了曲面棱镜装调误差对系统谱线弯曲、色畸变与 MTF 的扰动分析并进行了总结。基于仿真分析结果,给出了曲面棱镜的装调公差方案,并进行了软件公差分析与

结果论证。

## 2 曲面棱镜光谱仪的谱线弯曲、色畸变误差模型

### 2.1 曲面棱镜光谱仪的光谱畸变产生机理分析

对于光谱成像仪,光谱畸变包括谱线弯曲和色畸变,谱线弯曲、色畸变的原理如图 1 所示。谱线弯曲(Smile)是指单波长谱线的像发生弯曲,色畸变(Keystone)是指不同波长谱线的像放大率发生变化。谱线弯曲可表达为同一波长、不同视场的谱线成像位置的光谱维差异,色畸变可表达为同一视场、不同波长的谱线成像位置的视场维坐标值之差。下面基于几何光学分析曲面棱镜光谱畸变的产生机理。

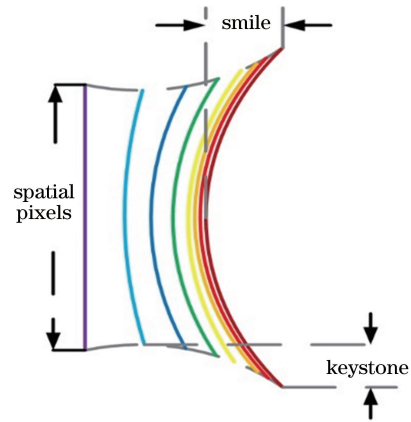


图 1 谱线弯曲与色畸变示意图

Fig. 1 Schematic of spectral smile and keystone

曲面棱镜的几何结构如图 2 所示<sup>[15]</sup>。在 Y 轴

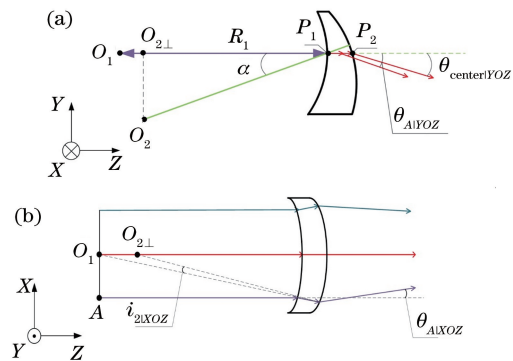


图 2 曲面棱镜的几何结构。(a) Y 轴方向的截面;(b) X 轴方向的截面

Fig. 2 Geometrical structures of curved prism. (a) Cross-section in Y direction; (b) cross-section in X direction

方向上,后球面  $S_2$  的球心  $O_2$  与前球面  $S_1$  的球心  $O_1$  同在以  $S_1$  的半径  $R_1$  为直径的圆(罗兰圆)上。 $R_1$  与  $S_2$  的球半径  $R_2$  间存在夹角  $\alpha$ ,  $\alpha$  是曲面棱镜成像特性的影响因素之一。在  $X$  轴方向上,  $O_1$  与  $O_2$  共线,  $O_{2\perp}$  为  $O_2$  在  $XOZ$  平面上的投影。曲面棱镜光谱系统多为有限共轭成像系统, 曲面棱镜应用于成像光谱仪结构中时, 常将狭缝置于  $O_1$ , 这样可减小曲面棱镜产生的球差与像散<sup>[15]</sup>。在图 2 中, 入射狭缝中点位于  $O_1$  处, 狭缝平行于  $Y$  轴并垂直于  $X$  轴与  $Z$  轴,  $P_1, P_2$  为前后球面与  $Z$  轴的交点。

狭缝中点出射的光线在曲面棱镜上发生折射的截面为主截面, 非狭缝中点出射光线在曲面棱镜上发生折射的通过截面为副截面。主截面与副截面的厚度存在差异, 导致两点经过曲面棱镜的空间色散角不同, 进而产生谱线弯曲与色畸变。光谱畸变的计算思路如下: 以狭缝中点为坐标系原点, 以  $\overline{O_1P_1}$  为  $Z$  轴建立右手坐标系, 狭缝各点出射的光线经过光谱系统后的偏转角在  $XOZ$  平面上的差异与曲面棱镜焦距的乘积即为谱线弯曲量, 在  $YOZ$  平面上的差异与曲面棱镜焦距的乘积即为色畸变量<sup>[13]</sup>。  $Y$  轴方向上的狭缝中心出射光线仅在  $S_2$  上发生一次

折射, 在  $X$  轴方向上不发生偏转。非狭缝中点  $O_1$  出射的光线通过曲面棱镜时分别在  $S_1$  与  $S_2$  上发生两次折射, 由于出射光线的点位置不同, 因此经曲面棱镜折射发生偏转的光线偏转角不同。

根据折射定律, 狭缝出射光线在球面上的出射角度为

$$n_{j+1} \cdot \sin i_{j+1} = n_j \cdot \sin i_j, \quad (1)$$

式中:  $n_j$  为第  $j$  个折射介质的折射率;  $i_j$  为光线与第  $j$  个表面法线的夹角;  $j$  为折射界面序号。

设  $Y$  轴方向上狭缝中心出射光线经过曲面棱镜的偏转角为  $\theta_{\text{center}|YOZ}$ , 可得

$$\theta_{\text{center}|YOZ} = \arcsin\left(\frac{n' \cdot R_1}{2 \cdot n_{\text{air}} \cdot R_2} \cdot \sin 2\alpha\right) - \arcsin\left(\frac{R_1}{2R_2} \cdot \sin 2\alpha\right), \quad (2)$$

式中:  $n'$  为曲面棱镜折射率;  $n_{\text{air}}$  为外部介质折射率。如图 2(b) 所示, 设某非狭缝中点  $A$  的  $X$  坐标为  $-d$ , 其折射光线所在的副截面的厚度大于主截面厚度。结合球面光线折射公式与正余弦定理, 计算  $X$  轴方向狭缝上  $A$  点的出射光线经  $S_1$  折射后入射到  $S_2$  的入射角  $i_{2|XOZ}$ , 可得

$$i_{2|XOZ} = \frac{\frac{n' \cdot R_1}{n' - n_{\text{air}}} - |P_1P_2| - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{1}{2}R_1 \sin 2\alpha\right)^2}}{\sqrt{R_2^2 - \left(\frac{1}{2}R_1 \sin 2\alpha\right)^2}} \cdot \sin \left[ \arctan \left( \frac{d}{R_1 - \sqrt{R_1^2 - d^2} + \frac{n' \cdot R_1}{n' - n_{\text{air}}}} \right) \right], \quad (3)$$

其中

$$|P_1P_2| = \sqrt{R_2^2 - R_1^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} - R_1 \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

式中:  $|P_1P_2|$  为曲面棱镜的主截面厚度。主副截面厚度的差异导致点  $A$  出射的单波长光线在  $Y$  轴

方向上的色散角小于狭缝中点的光线色散角。  $Y$  轴方向狭缝上  $A$  点的出射光线经  $S_1$  折射后入射到  $S_2$  的入射角  $i_{2|A}$  为

$$i_{2|A} = \arctan \left\{ \frac{R_1 \cdot \sin 2\alpha}{2 \cdot \sqrt{R_2^2 - \left(\frac{1}{2}R_1 \sin 2\alpha\right)^2} \cdot \cos \left[ i_{2|XOZ} - \arctan \left( \frac{d}{R_1 - \sqrt{R_1^2 - d^2} + \frac{n' \cdot R_1}{n' - n_{\text{air}}}} \right) \right]} \right\}. \quad (5)$$

根据折射定律可知, 当波长为  $\lambda_k$  ( $k$  为采样波长序号) 时,  $A$  的像点  $A'$  处的谱线弯曲  $\Delta y_{A'}$  为

$$\Delta y_{A'} = (i'_{2|A} - i_{2|A} - \theta_{\text{center}|YOZ}) \cdot f, \quad (6)$$

式中:  $i'_{2|A}$  为  $Y$  轴方向狭缝上  $A$  点的出射光线经曲面棱镜折射后的出射角;  $f$  为曲面棱镜的焦距。通过分析可知, 狭缝中点出射光线的偏转角大于非狭缝中心各点出射光线的偏转角, 谱线向短波方向弯曲。

色畸变是不同波长下狭缝像放大率不一致所导致的。点  $A$  出射单波长光线在  $X$  轴方向上的偏转角为

$$\theta_{A|XOZ} = \arcsin(n'/n_{\text{air}} \cdot \sin i_{2|XOZ}) - i_{2|XOZ} + \arctan \left( \frac{-d}{R_1 - \sqrt{R_1^2 - d^2} + \frac{R_1 \cdot n'}{n' - n_{\text{air}}}} \right). \quad (7)$$

点 A 处色畸变的表达式<sup>[8]</sup>为

$$\Delta x_{A'} = \left[ (\theta_{A|XOZ})_{\lambda_k} - \frac{\sum (\theta_{A|XOZ})_{\lambda_k}}{m} \right] \cdot f, \quad (8)$$

式中:  $(\theta_{A|XOZ})_{\lambda_k}$  为采样波长  $\lambda_k$  对应的偏转角;  $\lambda_k$  为某采样波长;  $m$  为采样波长个数。

### 2.2 曲面棱镜装调误差对光谱仪光谱畸变的影响

曲面棱镜在实际装配过程中的空间位置误差主要有装调位移和装调倾斜, 这些误差导致狭缝各点出射光线在曲面棱镜表面上的入射角与入射高度出现差异。图 3 为曲面棱镜的典型装调误差示意图, 其中  $D_X$  表示曲面棱镜在 X 轴正方向上发生的整体平移量(装调位移误差),  $T_Y$  表示曲面棱镜绕 Y 轴的旋转角度(装调倾斜误差)。

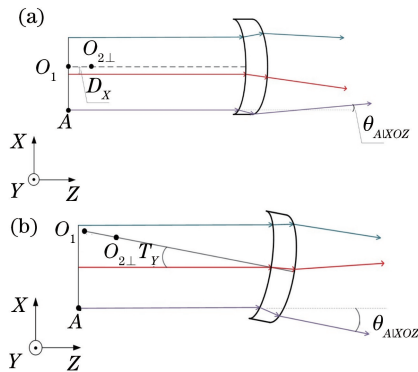


图 3 典型的曲面棱镜装调误差项示意图。

(a) 装调位移误差; (b) 装调倾斜误差

Fig. 3 Schematic of fabricating error terms of typical curved prism. (a) Fabricating distance error; (b) fabricating tilt error

谱线弯曲可通过实验室定标进行校正, 而色畸变的校正难度较高<sup>[16]</sup>, 因此下面针对装调误差引起

的光谱色畸变进行分析。基于矩阵光学与近轴光学, 理想装调情况下在 X 轴方向上, 曲面棱镜的折射传递矩阵<sup>[17]</sup>可表示为

$$N_2 = M_{S_2} M_t M_{S_1} N_1, \quad (9)$$

$$M_{S_q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n'' - n}{r_q} & 1 \end{bmatrix}, \quad q = 1, 2, \quad (10)$$

$$N_q = \begin{bmatrix} h_q \\ n_q \sin u_q \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M_{S_2|XOZ} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{|P_1 P_2|}{n_{\text{prism}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M_{S_1|XOZ}, \quad (12)$$

式中:  $N_2$  为 X 轴方向上曲面棱镜的光线折射矩阵;  $M_{S_q}$  为单一球面的折射矩阵;  $M_t$  为  $S_1$  到  $S_2$  的转面矩阵;  $n''$  为折射一侧介质的折射率;  $n$  为入射一侧介质的折射率;  $r_q$  为第  $q$  个折射球面的半径;  $n_q$  为第  $q$  个折射球面的材料折射率;  $N_q$  为光线矩阵;  $M_{S_2|XOZ}$  为 X 轴方向上球面间的转面矩阵;  $M_{S_1|XOZ}$  为前球面在 Y 轴方向上的折射矩阵;  $n_{\text{prism}}$  为曲面棱镜材料的折射率;  $h_q$  为入射到球面的光线交点到球面主轴的距离;  $u_q$  为入射到折射面的光线与球面主轴的夹角。

曲面出现装调误差时, 狭缝上点 A 光线在 XOZ 方向上的偏转角计算过程如下: 联立光线所在的 XOZ 平面方程与引入装调误差的  $S_1, S_2$  空间方程, 求得  $S_1, S_2$  与 XOZ 平面的交线半径  $R_{1|XOZ}, R_{2|XOZ}$ 。使用(9)~(12)式求得点 A 光线在 X 轴方向上的色散角。X 轴方向上点 A 光线的偏转角  $\theta_{A|XOZ}$  为

$$\begin{bmatrix} h'_{\text{Final}} \\ n_{\text{air}} \sin(\theta_{A|XOZ} + T_X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_{\text{air}} - n'}{R_{2|XOZ}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{(|P_1 P_2| - \frac{D_Y}{\tan \alpha}) \cos T_Y}{n_{\text{prism}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h'_1 \\ n_{\text{prism}} \sin U'_{1|XOZ} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中

$$\begin{bmatrix} h'_1 \\ n_{\text{prism}} \sin U'_{1|XOZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n' - n_{\text{air}}}{R_{1|XOZ}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (-d + D_X) \cos T_X \\ n_{\text{air}} \sin T_X \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中:  $h'_{\text{Final}}$  为曲面棱镜出射光线与后表面的交点到曲面棱镜后表面主轴的距离;  $T_X$  为曲面棱镜绕 X 轴的倾斜误差;  $D_Y$  为曲面棱镜沿 Y 轴方向的离轴误差;  $U'_{1|XOZ}$  为 XOZ 平面上经  $S_1$  折射后的光线与  $S_1$  主轴的夹角;  $h'_1$  为  $S_1$  折射点到  $S_1$  主轴的距离;

$T_Z$  为曲面棱镜绕 Z 轴的倾斜误差。

狭缝中点出射的光线在 XOZ 方向上的偏转角的计算过程与点 A 出射光线的偏转角计算过程相同。将两点的偏转角值代入(8)式, 求得曲面棱镜装调误差影响下点 A 的像点 A' 处的色畸变函数为



$$\Delta x_{A'} = \left[ (\theta_{A'|XOZ})_{\lambda_k} - \frac{\sum (\theta_{A'|XOZ})_{\lambda_k}}{m} \right] \cdot f = G(T_x, T_y, T_z, D_x, D_y), \quad (15)$$

式中:  $(\theta_{A'|XOZ})_{\lambda_k}$  为 XOZ 方向上采样序号为  $k$  的单色波在像点  $A'$  处的光线偏转角;  $G(\cdot)$  为色畸变函数。

曲面棱镜在 Z 轴方向上的离轴误差仅改变狭缝与曲面棱镜间的距离, 该项误差不影响狭缝各点出射光线与曲面棱镜前表面的夹角, 故色畸变的装调误差函数共包含 5 个装调误差变量。针对装调误差, 分析色畸变对各误差项的灵敏度。离轴误差为 1 mm, 倾斜误差为  $1^\circ$  时, A 点像处的色畸变曲线如图 4 所示。

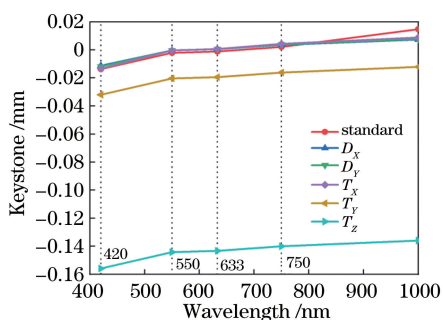


图 4 不同误差下的色畸变曲线

Fig. 4 Keystone curves for different fabricating errors

可以看出, 光谱系统的色畸变对  $T_z$  (曲面棱镜绕 Z 轴的倾斜误差) 与  $T_y$  (曲面棱镜绕 Y 轴的倾斜误差) 较为敏感。为了进一步验证这个结论, 接下来利用几何光线追迹法对一个双曲面棱镜光谱仪系统进行装调误差分析。

### 3 曲面棱镜光谱仪的几何光线追迹公差分析

前文已对曲面棱镜的装调误差进行讨论, 曲面棱镜的装调误差项对光谱仪的谱线弯曲、色畸变的影响程度不同。使用 ZEMAX 软件对一个双曲面棱镜光谱仪系统进行装调误差分析。双曲面棱镜光谱系统基于 Offner 同心结构, 像元 (Pixel) 尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ , 工作波段为  $0.42 \sim 1.00 \mu\text{m}$ , 狭缝长度为 32 mm, 物方数值孔径为 0.111, 具备大视场、高光谱分辨率和低畸变等特点。光学结构如图 5 所示, 两只曲面棱镜分别位于主镜与三镜的前方, 孔径光阑位于次镜处。图 6 为中心波长与边缘波长处的 MTF 曲线, 当光栅刻线密度为 32 lp/mm 时各视场的 MTF 均大于 0.7<sup>[18]</sup>。图 7 为理想装调 (无装调误差) 下的系统谱线弯曲与色畸变曲线, 该系统使用长度为 32 mm 的狭缝。如前文所述, 狭缝中点位于系统主轴, 与 X 轴平行; 图 7(b) 中的物体高度

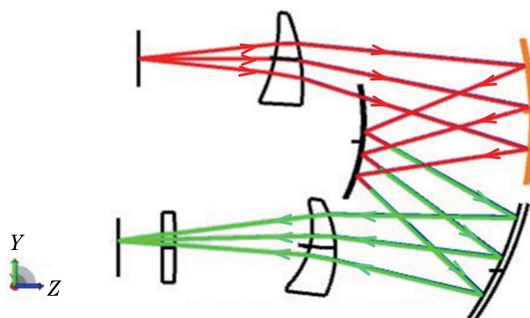


图 5 双曲面棱镜光谱成像仪的光学结构图

Fig. 5 Optical structure of two-curved-prism-based imaging spectrometer

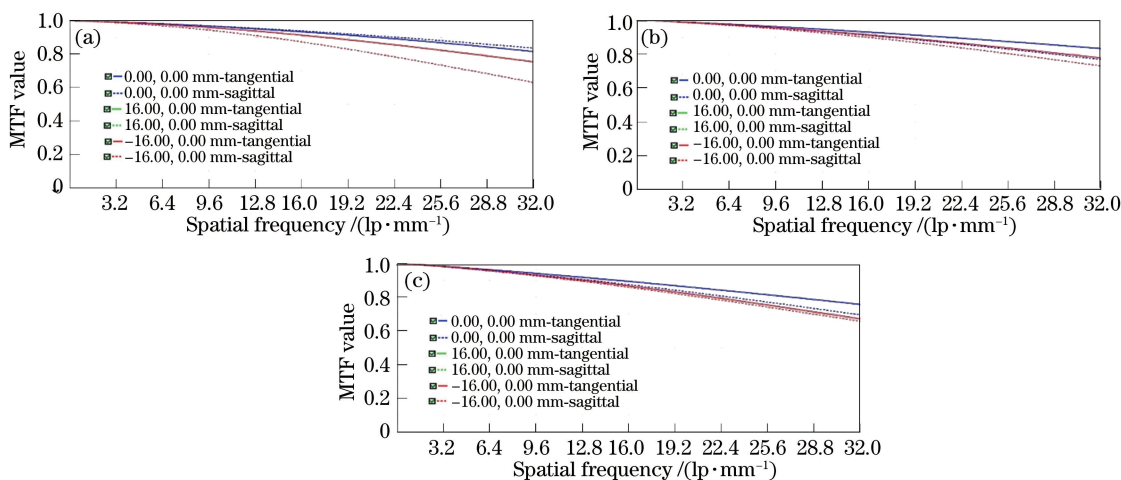


图 6 不同波长处的 MTF 曲线。(a) 420 nm; (b) 633 nm; (c) 1000 nm

Fig. 6 MTF curves for different wavelengths. (a) 420 nm; (b) 633 nm; (c) 1000 nm

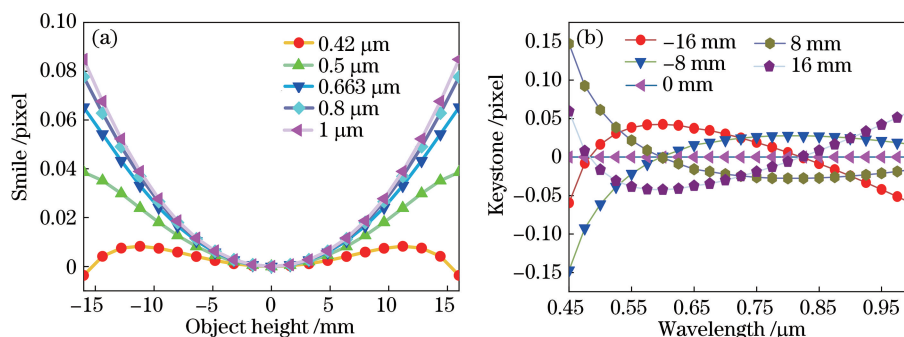


图 7 理想装调下系统的光谱畸变。(a)不同波长下的谱线弯曲曲线;(b)不同物高下的色畸变曲线

Fig. 7 Spectral distortions of system under ideal fabricating conditions. (a) Spectral smile curves for different wavelengths; (b) keystone curves for different object heights

表示采样点到狭缝中点的距离,正负号表示狭缝上采样点的位置。可以看出,理想装调时谱线弯曲小于 0.09 pixel,色畸变小于 0.15 pixel。

光谱仪的传统公差分析方法主要是基于光学元件的灵敏度分析与蒙特卡罗法。本文将谱线弯曲、色畸变与系统 MTF 作为系统装调过程的评价指标。首先针对三个评价指标分别进行装调误差项的灵敏度分析,灵敏度分析的波长设置为 632.8 nm,分析物高为 16 mm。此处灵敏度分析的离轴误差

项( $D_x, D_y$ )的误差范围设置为  $-1 \sim 1$  mm,倾斜误差项( $T_x, T_y, T_z$ )的误差范围设置为  $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ 。在给定误差范围内,分析了三个评价指标对误差项的灵敏度,结果如图 8 所示。

由图 8(a)、(b)、(d)、(e)可以看出,谱线弯曲、色畸变随误差的变化呈线性。由图 8(c)、(f)可以看出,MTF 随误差的变化曲线为二次曲线; $D_y$ (曲面棱镜在 Y 方向上的离轴误差)与  $T_x$ (曲面棱镜绕 X 轴的倾斜误差)对光谱成像仪像质的影响很大,

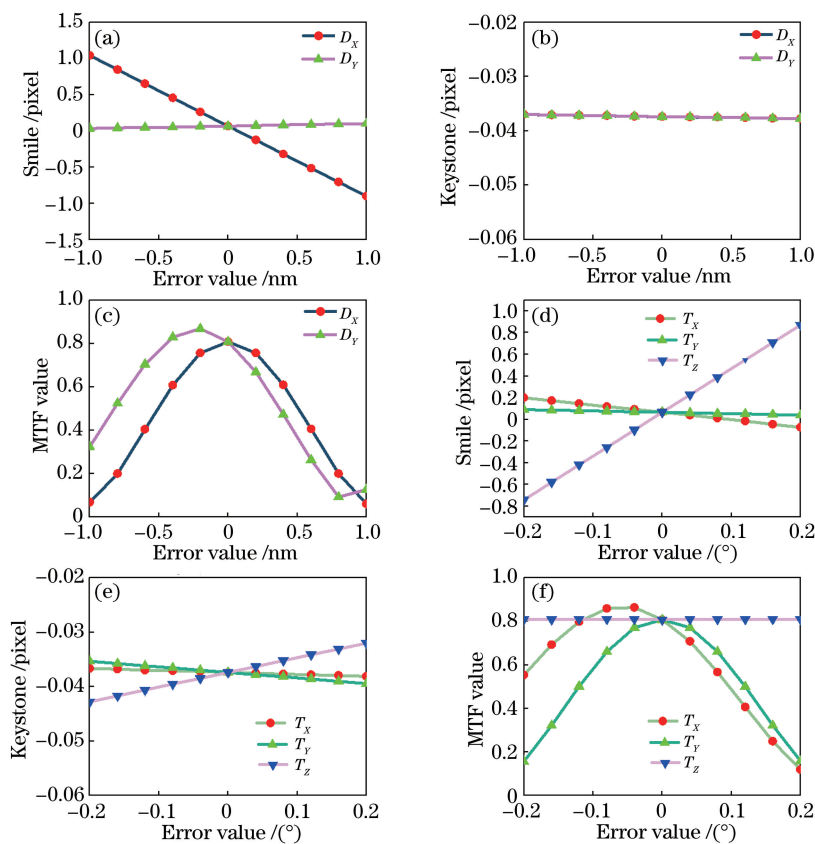


图 8 单个装调误差项下的谱线弯曲、色畸变与 MTF 曲线

Fig. 8 Curves of spectral smile, keystone and MTF under single fabricating term

在装调过程中应严格控制以保证成像光谱仪的成像质量。由图 8(a)、(c)可以看出,系统的谱线弯曲对  $T_z$  (曲面棱镜绕  $Z$  轴的倾斜误差) 和  $D_x$  (曲面棱镜在  $X$  方向上的离轴误差) 较为敏感。由图 8(b)、(d)可以看出,对于系统的色畸变,离轴装调误差的影响小于倾斜装调误差的影响,色畸变对  $T_z$  (曲面棱镜绕  $Z$  轴的倾斜误差) 较为敏感,与数学模型的计算结果吻合。由图 7(b)可知,物高在  $\pm 8$  mm 处

的色畸变最大,结合图 8(b)、(d)可知,将光谱成像系统的全视场色畸变控制在一定范围内,将有利于装调误差项的公差容限控制。

为了保证光谱数据的一致性并避免相邻两个像元间出现光谱混叠,一般将全视场色畸变控制在 0.2 pixel 以内。当测试波长为 632.8 nm,全视场的色畸变近似为 0.2 pixel 时,单一误差项的公差极限值与其对应的系统谱线弯曲和系统 MTF 值如表 1 所示。

表 1 系统色畸变为 0.2 pixel 时单个误差项的公差极限值及对应的谱线弯曲和 MTF

Table 1 Tolerance limit as well as spectral smile and MTF of single fabricating error term at system keystone of 0.2 pixel

Fabricating error term	Tolerance value	Smile@	Smile@	Smile@	MTF
		400 nm / pixel	632.8 nm / pixel	1000 nm / pixel	@632.8 nm and 32 lp·mm <sup>-1</sup>
Design value		0.004	0.065	0.084	0.807
$D_x$	0.19 mm	0.119	0.200	0.944	0.762
	-0.25 mm	0.255	0.309	0.321	0.726
$D_y$	0.50 mm	0.02	0.08	0.100	0.36
	-0.10 mm	0.04	0.327	0.055	0.325
$T_x$	1.08°	0.893	0.734	0.676	0.0374
	-0.32°	0.231	0.277	0.287	0.124
$T_y$	0.07°	0.299	0.348	0.358	0.693
	-0.07°	0.306	0.217	0.188	0.694
$T_z$	0.05°	0.851	0.917	0.936	0.810
	-0.05°	0.858	0.786	0.765	0.810

由表 1 可知,不同评价指标对误差项的敏感程度不同。光谱色畸变对  $T_y$  与  $T_z$  的敏感程度大于其对其他三项误差项的敏感程度;谱线弯曲仅对  $D_y$  不敏感。结果表明,在三个评价指标中,谱线弯曲对装调误差更为敏感,但是可通过后期实验室定标对谱线弯曲进行校正。另外,MTF 对装调误差的敏感程度小于色畸变与谱线弯曲,所以后续公差分

配中对谱线弯曲不作重点考虑。MTF 对  $T_x$  与  $D_y$  敏感,对其他三个误差项不敏感。为了保证曲面棱镜装调公差引起的系统 MTF 下降容限在设计值的 10% 以内,对曲面棱镜的  $D_y$ ,  $T_x$  进行进一步的公差分配。单一误差项最终的公差极限值及其对应的系统 MTF 如表 2 所示,其中 FOV 为视场。

表 2 单一误差项最终的公差极限值及其对应的系统 MTF

Table 2 Final tolerance limit as well as system MTF of single fabricating error term

Fabricating error term	Tolerance limit value	MTF value at	MTF value at	MTF value at edge
		central FOV	edge of positive FOV	of negative FOV
Standard	0	0.807	0.780	0.780
$D_x$	0.19 mm	0.762	0.720	0.750
	-0.20 mm	0.726	0.721	0.684
$D_y$	0.10 mm	0.749	0.75	0.765
	-0.09 mm	0.848	0.780	0.780
$T_x$	0.03°	0.737	0.761	0.761
	-0.03°	0.855	0.775	0.775
$T_y$	0.06°	0.723	0.725	0.685
	-0.06°	0.724	0.685	0.725
$T_z$	0.05°	0.811	0.783	0.780
	-0.05°	0.810	0.780	0.783

在仅考虑曲面棱镜装调公差条件下,使用蒙

特卡罗分析法,依照正态分布随机生成 1000 个误差

分布样本以进行 MTF 分析,在制定的公差范围内随机产生多个光谱系统,以 MTF 为评价指标分析这些存在公差的系统的工作质量。根据表 2 的单项公差极限值,进行蒙特卡罗分析,结果表明,多于 98% 的误差随机分布样本对应的 MTF 数值大于 0.678,多于 90% 的误差随机分布样本对应的 MTF 数值大于 0.711,多于 80% 的误差随机分布样本对应的 MTF 结果大于 0.733。

给出的公差保证了良好的成像质量,控制了光谱系统的色畸变,该公差分配方案可用于指导曲面棱镜的装调,并缩短装调周期。

## 4 结 论

使用几何光学方法构建了曲面棱镜光谱仪谱线弯曲、色畸变与曲面棱镜装调误差的数学模型,分析了曲面棱镜装调误差对高光谱成像仪光谱畸变的影响。通过几何光线追迹法对曲面棱镜的装调误差进行了分析与验证。结果表明:谱线弯曲、色畸变与 MTF 对曲面棱镜装调误差的敏感程度存在显著差异。光谱色畸变对  $T_Y$  与  $T_Z$  敏感;谱线弯曲仅对  $D_Y$  不敏感,对其他误差均敏感;MTF 对  $T_X$  与  $D_Y$  敏感。为了保证曲面棱镜装调误差引起的系统 MTF 下降容限在设计值的 10% 以内,进行了公差分配并得到了最终的公差分配方案,其中公差极限值最小的单项装调公差为 X 轴方向的倾斜误差,结论为实际系统的装调提供了参考。后续将对曲面棱镜的制造误差与反射镜的制造误差、装调误差进行研究,以期进一步降低加工与装调难度。

## 参 考 文 献

- [1] Pearlman J S, Barry P S, Segal C C, et al. Hyperion, a space-based imaging spectrometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1160-1173.
- [2] Mouroulis P, Van Gorp B, Green R O, et al. Portable Remote Imaging Spectrometer coastal ocean sensor: design, characteristics, and first flight results [J]. Applied Optics, 2014, 53(7): 1363-1380.
- [3] Holly A. Bender, Mouroulis P, Ronald J, et al. Wide-field imaging spectrometer for the Hyperspectral Infrared Imager (HypIRI) mission [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9222: 92220E.
- [4] Boni A, Taiti A, Bini C. Sentinel-5 short-wave infrared spectrometer optical design [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10690: 106901J.
- [5] Ohgi N, Iwasaki A, Kawashima T, et al. Japanese hyper-multi spectral mission [C]//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 25-30, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2010: 3756-3759.
- [6] Ch F. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1911, 34: 79.
- [7] Cutter M A, Lobb D R, Williams T L, et al. Integration & testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3753: 180-191.
- [8] Kim D H, Yang S, Cheon D I, et al. Combined estimation method for inertia properties of STSAT-3 [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(8): 1737-1741.
- [9] Kaiser S, Sang B, Schubert J, et al. Compact prism spectrometer of pushbroom type for hyperspectral imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7100: 710014.
- [10] Nie Y F, Xiangli B, Zhou J S, et al. A wide-field push-broom hyperspectral imager based on curved prism [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1708-1711.  
聂云峰, 相里斌, 周锦松, 等. 基于曲面棱镜的宽视场推帚式高光谱成像仪设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1708-1711.
- [11] Wang Z Q, Wang C Y, Sun H, et al. Design of off-axis three-mirror optical system for dynamic target simulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012203.  
王志强, 王春艳, 孙昊, 等. 动态目标模拟离轴三反光学系统的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012203.
- [12] Yin C, Li Y Q, Yan X, et al. Tolerance analysis of micromirror array in deep ultraviolet lithography illumination system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0722001.  
尹超, 李艳秋, 闫旭, 等. 深紫外光刻照明系统的微反射镜阵列公差分析 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0722001.
- [13] Moore L B, Mouroulis P. Tolerancing methods and metrics for imaging spectrometers [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10590: 105900Q.
- [14] Ku H, Kim S H, Kong H J, et al. Optical design, performance, and tolerancing of an Offner imaging spectrograph [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8491: 84910K.
- [15] Chen H F, Gong Y, Luo C, et al. Design of prism-grating imaging spectrometer with eliminating spectral line curvature [J]. Acta Optica Sinica, 2014,



34(9): 0922004.

陈洪福, 巩岩, 骆聪, 等. 消谱线弯曲棱镜-光栅型成像光谱仪设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922004.

- [16] Jing J, Zhou J, Li Y, et al. Spectral curvature correction method based on inverse distance weighted interpolation[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10004: 100041W.
- [17] Ji G M, Hu C, Li X Q. Deduction of transfer matrices in matrix optics [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology

Edition), 2003, 30(1): 107-110.

季光明, 胡灿, 李雪琴. 矩阵光学中变换矩阵的推导 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 107-110.

- [18] Cheng Y, Yi H W, Liu X L. Improved method for on-orbit modulation transfer function detection of space cameras[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704010.
- 程莹, 易红伟, 刘鑫龙. 一种改进的空间相机在轨调制传递函数检测方法 [J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704010.