

消像散的自由曲面棱镜光谱仪光学系统设计

张佳伦 郑玉权 蔺超 纪振华

Design of a freeform curved prism imaging spectrometer based on an anastigmatism

ZHANG Jia-lun, ZHENG Yu-quan, LIN Chao, JI Zhen-hua

引用本文:

张佳伦, 郑玉权, 蔺超, 纪振华. 消像散的自由曲面棱镜光谱仪光学系统设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 842–851. doi: 10.37188/CO.2019–0049

ZHANG Jia-lun, ZHENG Yu-quan, LIN Chao, JI Zhen-hua. Design of a freeform curved prism imaging spectrometer based on an anastigmatism[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 842–851. doi: 10.37188/CO.2019–0049

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计

Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager

中国光学. 2018, 11(1): 92 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092>

多角度耦合分幅相机光学系统设计

Optical system design of multi-angle coupled framing camera

中国光学. 2018, 11(4): 615 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615>

光学自由曲面面形检测技术

Optical free-form surfaces testing technologies

中国光学. 2017, 10(3): 283 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0283>

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学. 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

Seya-Namioka单色仪中光栅曲率半径误差的影响及补偿

Effect and compensate of grating curvature radius error in Seya-Namioka monochromator

中国光学. 2018, 11(4): 623 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0623>

大相对孔径紫外成像仪光学系统设计

Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera

中国光学. 2018, 11(2): 212 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212>

消像散的自由曲面棱镜光谱仪光学系统设计

张佳伦^{1,2}, 郑玉权^{1*}, 蔺超¹, 纪振华¹

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

摘要: 本文根据像差理论, 开发了一种计算次镜外反射的 Offner 型自由曲面棱镜光谱仪初始结构的算法。通过光线追迹获得光线在次镜外反射 Offner 型光谱仪各光学表面传播的公式, 该公式可以确定光学元件的结构参数。应用轴外细光束像散理论分析系统产生的像散, 并设定合理阈值作为结构算法的判断依据。在 Matlab 中迭代优化出符合设计要求的初始结构, 使用 Zemax 软件对获得的初始结构进行优化。为验证算法效果, 本文设计了光谱范围为 380~780 nm, 数值孔径为 0.15, 光谱分辨率为 6 nm 的自由曲面棱镜光谱仪的初始结构。在 Zemax 中完成优化后系统可达到设计指标且谱线弯曲和色畸变均优于 0.1 pixels。设计结果表明采用本文算法可以快速计算出符合要求的初始结构, 大大简化了后续优化的复杂程度。

关键词: 自由曲面棱镜; 光线追迹; 消像散; 初始结构; 光学设计

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2019-0049

Design of a freeform curved prism imaging spectrometer based on an anastigmatism

ZHANG Jia-lun^{1,2}, ZHENG Yu-quan^{1*}, LIN Chao¹, JI Zhen-hua¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn

Abstract: In this paper, an algorithm for calculating the initial structure of the Offner freeform curved prism imaging spectrometer with secondary mirror external reflection is designed. The ray tracing method is used to obtain the formula for the propagation of light on the optical surfaces of an Offner spectrometer with secondary mirror external reflection. The formula can determine the structural parameters of the optical component. The off-axis beam astigmatism theory commonly used in the analysis of off-axis systems is used to analyze image quality, and a reasonable threshold is set to judge the structure algorithm. The initial structure that meets the design requirements is obtained through iterative optimization in Matlab and the initial structure is

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-04-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No.2016YFB0500300)

National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0500300)

optimized in Zemax. To verify the performance of the proposed algorithm, the initial structure of a free-form prism spectrometer with a spectral range of 380~780 nm, a numerical aperture of 0.15 and a spectral resolution of 6 nm is designed. After being optimized in Zemax, the system reached the design index and the spectral line bending and color distortion are both less than 0.1 pixels. The algorithm proposed in this paper can quickly calculate the initial structure such that the requirements are satisfied, and can simplify its complexity.

Key words: freeform curved prism; ray tracing; anastigmatism; initial structure; optical design

1 引言

于20世纪80年代提出的高光谱技术是一种能准确获得地物二维图像信息和一维光谱信息的遥感手段,经过30多年的发展已经成为一个光学、机械、电子学等多学科交叉的综合研究课题^[1]。自由曲面棱镜是指棱镜前后表面为曲面,两个曲面之间存在偏心或倾斜的棱镜。相比传统棱镜,自由曲面棱镜不需要准直汇聚镜组,有效减小了仪器的体积与重量。自由曲面棱镜与Offner系统结合可以实现仪器小型化、轻量化设计。在德国EnMAP^[2]及我国静止轨道全谱段高光谱探测等诸多项目均有重要应用。

1911年,CH. Fery提出的Fery棱镜,本质上就是自由曲面棱镜。其通过罗兰圆原理确定元件参数,将单自由曲面棱镜应用于摄谱仪中,获得了较好的结果^[3]。20世纪末,P. F. Morrissey基于三级像差理论得出将物点放置于自由曲面棱镜前表面的曲率中心或它的齐明共轭点时球差、彗差、像散具有最小值的结论,这一结果指导了早期自由曲面初始结构的设计^[4]。2013年,刘力采用控制像散的方法,通过光线追迹得到单自由曲面棱镜光谱仪的初始结构,结果表明,该结构能够在一定程度上减少优化复杂性^[5]。2016年,刘立银通过光线追迹得到在Offner两臂增加自由曲面棱镜形式的初始结构,大大减小了优化环节的工作量^[6]。而作为自由曲面棱镜与Offner相结合的另一形式,在次镜位置增加自由曲面棱镜,具有相同设计指标下使用棱镜数量更少、容易装调等优点。目前该结构的设计大多基于共轴系统,再用光学设计软件不断优化调整,直至获得一个较好的结构。这就要求设计者具有大量的设计经验,因此设计一种能够快速计算初始结构的算法尤为重要。

本文针对这一问题,以次镜外反射型自由曲面棱镜Offner型光谱为基础,设计一套可以快速解算出符合要求的初始结构的算法,推导了光线在各光学元件间传播的公式,获得了元件的曲率和偏心量,采用轴外细光束像散理论作为系统的像质评价手段,判断得到的结构是否符合设计要求。设计循环结构,经过多次迭代可以快速计算出一组性能较好的初始结构。

2 消像散结构设计原理

2.1 次镜外反射自由曲面棱镜光路分析

图1为次镜外反射自由曲面棱镜结构图。次镜外反射型自由曲面棱镜即将自由曲面棱镜添加在Offner结构的次镜位置。在不破坏Offner结构对称性的前提下实现分光,相比在两臂添加自由曲面棱镜的情况,由于自由曲面棱镜在系统中处于对称位置,可以明显减少自由曲面棱镜的数量。本文通过分析经过系统到达次镜的部分光路发现,在这部分计算中可以确定系统光学元件的曲率半径、偏心量等参数。次镜反射回的光线同样经过这些光学元件,故只需确定光线参数即可。

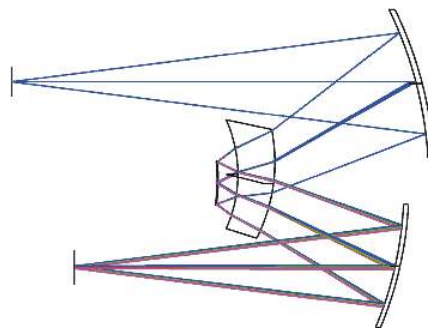


图1 次镜外反射型自由曲面棱镜光谱仪结构图

Fig. 1 Structural diagram of the freeform curved prism imaging spectrometer with secondary mirror external reflection

在分析光学系统时需要规定各参量的正负,并给出系统的符号确定规则^[7]:

(1) 光线与光轴的夹角: 规定由光轴按照锐角旋转到光线方向, 如果旋转方向沿顺时针方向, 则夹角为正, 否则为负。

(2) 光线与法线的夹角: 规定由光线按照锐角旋转到法线方向, 如果旋转方向沿顺时针方向, 则夹角为正, 否则为负。

(3) 法线与光轴的夹角: 规定由光轴按照锐角旋转到法线方向, 如果旋转方向沿顺时针方向, 则夹角为正, 否则为负。

对于 Offner 系统, 当物点与球心处于同一位置时, 光经过自由曲面棱镜后色散 S 的大小只与棱镜前后两个面的偏心量差值 Δh 和棱镜的折射率的变化值 Δn 有关^[6], 即 $S = -\Delta n \times \Delta h$ 。本文设计了光谱范围为 380~780 nm, 数值孔径为 0.15, 光谱分辨率为 6 nm 的自由曲面棱镜光谱仪的初始结构。使用成都光明光电股份有限公司的 ZF6 火石玻璃作为系统的色散元件, 该波段材料

的折射率变化值 $\Delta n = 0.071$, 选用的探测器像元尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$, 经过计算后 $\Delta h = 7 \text{ mm}$ 。整理后系统参数如表 1 所示。

表 1 设计指标

Tab. 1 Specifications designed for the system

参数	设计值
光谱范围/nm	380~780
数值孔径	0.15
光谱分辨率/nm	6
像元尺寸/ μm	13×13
色散元件材料	ZF6
色散面大小	1 mm

图 2(彩图见期刊电子版)为该结构的次镜前光路图, 通过分析光线在系统各个光学元件间的传播公式, 可以计算出系统各个元件的参数。根据大量的设计经验确定一些约束条件, 这对于存在多个变量的离轴系统是可以接受的。在各光学元件表面分别建立局部坐标系^[8], 用以计算光线的参数, 因此系统涉及大量的坐标变换。

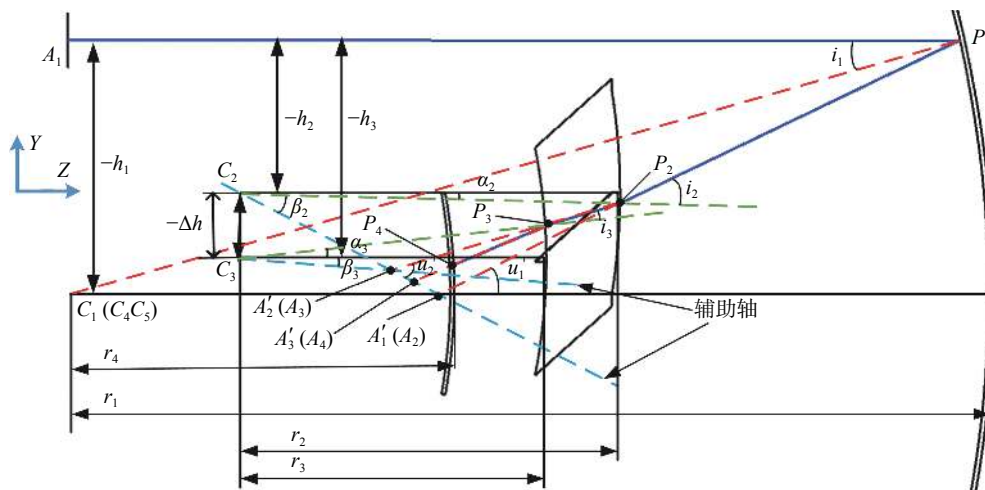


图 2 次镜前自由曲面棱镜光谱仪光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the freeform curved prism spectrometer light path before secondary mirror

根据 Offner 的结构特点^[9], 当物点与主镜在 Z 方向的位置相同时会获得较好的设计结果^[10-11]。因此, 对于初始结构, 给出如下规定: (1) 初始结构中物点与主镜的球心点位于同一水平位置; (2) 同心自由曲面棱镜存在垂直偏心量, 其球心位于同一垂直位置; (3) 为了简化初始结构的计算, Offner 结构主镜和三镜的参数相同。设定初始物距

$l_1 = 200 \text{ mm}$, $-h_0$ 为主镜初始的偏心量, $-r_1$ 为主镜的曲率半径, $-\Delta h_1$ 为偏心量的修正量, $-h_1$ 为主镜修正后的偏心量, $-\Delta r_1$ 为曲率半径的修正量。

$$-r_1 = -l_1 - \Delta r_1, \quad (1)$$

$$-h_1 = -h_0 - \Delta h_1. \quad (2)$$

选择平行光轴入射的主光线, 根据 Snell 定

律, 设 n_1, n_1' 分别为主镜物方和像方折射率, i_1, i_1' 分别为主镜入射角和出射角, 由于反射镜表面有 $n_1 = -n_1'$, 则 $i_1 = -i_1'$ 。因为系统只存在偏心量, 光学元件的光轴相互平行, 所以自由曲面棱镜第一个表面入射光线与光轴夹角 u_2 与主镜出射光线与光轴的夹角 u_1' 相等, 即 $u_2 = u_1'$ 。主镜反射光线与光轴的交点为物点经过主镜的像点, 系统具有较大偏心量不具备近轴条件, 因此像距 l_1 可以由 $l_1 = -h_1 / \sin(u_1')$ 得出。在主镜的曲率中心处建立局部直角坐标系, 求出主镜入射点 P_1 的坐标 (z_1, y_1) 。

$$z_1^2 + y_1^2 = r_1^2, \quad (3)$$

$$y_1 = h_1. \quad (4)$$

式(3)、式(4)联立, 可解出入射点 P_1 的坐标, 但此坐标是在主镜局部坐标系下求得的, 如果使用还要进行坐标变换。

光线到达自由曲面棱镜第一个曲面处有以下关系, 光线经过主镜后的像点 A_1' 即为自由曲面棱镜的物点 A_2 , 设 $-r_2$ 为自由曲面棱镜第一个曲面的曲率半径。根据设计经验, 自由曲面棱镜第一曲面的顶点与 A_2 的间距 $d_2 = 30 \text{ mm}$, 同时给出修正量 Δd_2 。第一个曲面的曲率中心相对于主镜的曲率中心在水平方向存在偏离量 pl_1 。在垂直光轴方向存在偏离量 $-h'_{12}$, 则自由曲面棱镜第一曲面的偏心量 $-h_2$ 为:

$$-r_2 = -r_1 - pl_1 - (-l_1' + d_2), \quad (5)$$

$$-h_2 = -h_1 - h'_{12}. \quad (6)$$

为了解出光线在自由曲面棱镜第一曲面的入射角、折射角, 首先需要知道入射点的位置。主镜上的入射点和第一曲面上的入射点在入射光线上, 而且光线与光轴的夹角已知。因此可以根据主镜上的入射点坐标与第一曲面方程联立求出入射点的坐标。以第一曲面的曲率中心建立局部直角坐标系, 则主镜的入射点 P_1 坐标由 (z_1, y_1) 转化为 (z_1', y_1') 。

$$z_1' = z_1 - pl_1, \quad (7)$$

$$y_1' = y_1 - (-h'_{12}), \quad (8)$$

$$z_2^2 + y_2^2 = r_2^2, \quad (9)$$

$$y_2 = \tan(u_2)(z_2 - z_1') + y_1'. \quad (10)$$

根据上述方程可以解出入射点 P_2 的坐标 (z_2, y_2) , 规定在第一曲面处光轴与法线的夹角为 α_2 , 连接物点与曲面曲率中心的连线作为辅助轴, 辅助轴与光轴的夹角为 β_2 。

根据入射点可以解出:

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{y_2}{-r_2}\right), \quad (11)$$

$$\beta_2 = \frac{-h'_{12}}{-r_1 - pl_1 - l_1'}. \quad (12)$$

由几何关系可知入射角为法线、光轴、入射光线构成的三角形的外角, 存在 $|i_2| = |\alpha_2| + |u_2|$ 。 i_2 为正值。由 Snell 定律可以解出 i_2 , 出射光线与光轴夹角有以下关系: $|u_2'| = |i_2| - |\alpha_2|$ 。由几何关系可知 $\angle P_2 C_2 A_2' = \beta_2 - \alpha_2$, 在 $\Delta P_2 C_2 A_2'$ 中有: $\angle C_2 A_2' P_2 = \pi - \angle P_2 C_2 A_2' - i_2'$ 。

根据正弦定理知, 在 $\Delta P_2 C_2 A_2'$ 中有:

$$\frac{P_2 C_2}{\angle C_2 A_2' P_2} = \frac{C_2 A_2'}{\angle C_2 P_2 A_2'}, \quad (13)$$

其中: $C_2 A_2'$ 是第一曲面的曲率半径, $\angle C_2 P_2 A_2' = i_2'$ 。可以解出折射光线与辅助轴的交点, 即像点 A_2' 的像高 $-H_2' = C_2 A_2' \times \sin(\beta_2)$, 像距 $l_2' = -r_2 - H_2' \times \cot(\beta_2)$ 。

光线到达自由曲面棱镜第二个曲面处, 只需解出曲面入射点 P_3 的坐标 (z_3, y_3) 就可以采用上述方法获得折射光线的相关参数。图2中, $-r_3$ 为曲面的曲率半径, $-h_3$ 为曲面的偏心量, $-h'_{23}$ 为自由曲面棱镜第一曲面和第二曲面的偏心量差值, 这个值是 $-h'_{23} = -\Delta h$ 。自由曲面棱镜两个曲面沿光轴方向的间距为 $d_3 = 15 \text{ mm}$, 修正量为 Δd_3 。

$$-r_3 = -r_2 + d_3 + \Delta d_3, \quad (14)$$

$$-h_3 = -h_2 - h'_{23}. \quad (15)$$

入射点的坐标解算方法与第一曲面的相同,第一曲面和第二曲面的入射点都在折射光线上,折射光与光轴的夹角相等,即 $u_3 = u'_2$ 。为了简化计算,在第二曲面建立局部直角坐标系,解算入射点的坐标。

$$z'_2 = z_2, \quad (16)$$

$$y'_2 = y_2 - h'_{23}, \quad (17)$$

$$z_3^2 + y_3^2 = r_3^2, \quad (18)$$

$$y_3 = \tan(u_3)(z_3 - z'_2) + y'_2. \quad (19)$$

根据上述方程可以解出第二曲面入射点 P_3 的坐标 (z_3, y_3) ,采用与计算第一曲面相同的算法相继解出:

$$\alpha_3 = \arcsin\left(\frac{y_3}{-r_3}\right), \quad (20)$$

$$\beta_3 = \arctan\left(\frac{H'_2 - h'_{23}}{r_3 - l'_2}\right), \quad (21)$$

$$|u'_3| = |\beta_3| - |\alpha_3|, \quad (22)$$

$$-H'_3 = C_3 A'_3 \times \sin(\beta_3), \quad (23)$$

$$l'_3 = -r_3 - H'_3 \times \cot(\beta_3). \quad (24)$$

光线到达次镜位置, $-r_4$ 为次镜的曲率半径, $-h_4$ 为次镜的偏心量,规定次镜与主镜曲率中心位置相同。入射光线与光轴的夹角相等,即 $u_4 = u'_3$ 。次镜与自由曲面棱镜第二个曲面的间距 $d_4 = 10$ mm,修正量为 Δd_4 。

$$-r_4 = -r_3 + d_4 + \Delta d_4 - pl_1, \quad (25)$$

$$-h_4 = -h_1. \quad (26)$$

次镜入射点 P_4 的坐标为:

$$z'_3 = z_3 + pl_1 - d_4 - \Delta d_4, \quad (27)$$

$$y'_3 = y_3 - h_4 - (-h_3), \quad (28)$$

$$z_4^2 + y_4^2 = r_4^2, \quad (29)$$

$$y_4 = \tan(u_4)(z_4 - z'_3) + y'_3. \quad (30)$$

根据上述方程可以获得入射点 P_4 的坐标 (z_4, y_4) 。光线经过次镜完成如图3所示的光路转折,其中, α_4 为法线与光轴的夹角, α_5 为入射光线与光轴夹角。次镜的反射光线还要经过自由曲面棱镜的两个面和三镜才能汇聚于像面,光线入射角、折射角等参数的计算方法相同,这里不予赘述。

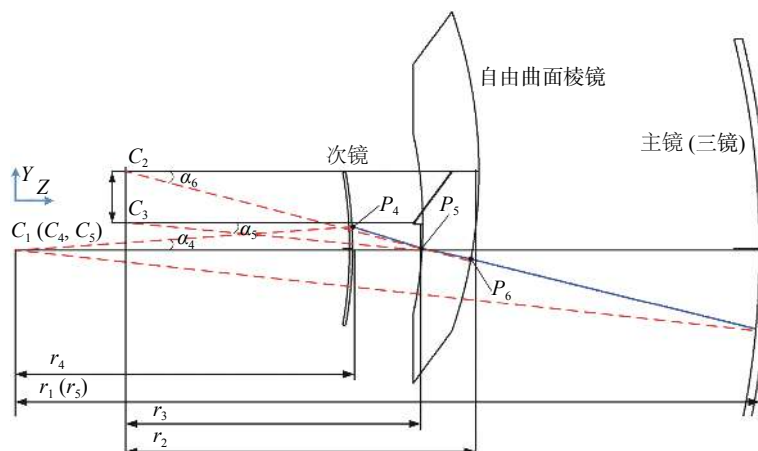


图3 次镜后自由曲面棱镜光谱仪光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light path of the freeform curved prism spectrometer after secondary mirror

2.2 轴外细光束像散理论

无限细像散光束的两个主截面方向的光束都

有各自的焦点,整个细光束形成两条相互垂直的短线,称为焦线。子午光束形成的子午焦线垂直

于子午平面, 弧矢光束形成的弧矢焦线在子午面内。像散产生的根本原因是, 轴外视场光学系统在子午方向和弧矢方向的聚焦能力不同, 从而导致弧矢焦面和子午焦面不重合^[12-13]。实际上, 光学系统轴上点发出的细光束与光学系统的光轴重合, 所以折射后仍保持同心。但是当细光束的光束轴与投射点法线不重合时, 折射后的光束就不再是同心光束, 如图4所示。

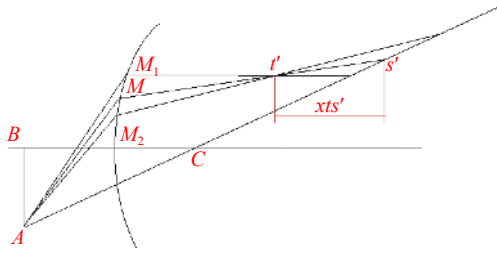


图4 轴外细光束像散示意图

Fig. 4 Schematic diagram of off-axis rays astigmatism

图4中, A 为轴外物点, C 为折射面的曲率中心, AC 为系统的辅轴, 系统初始子午物距与弧矢物距分别为 t 和 s , 系统子午像距与弧矢像距分别

为 t' 和 s' 。 A 发出的轴外细光束经过折射后首先汇聚到点 t' 处, 然后发散, 最后汇聚在辅助轴上, 两个像点分别对应轴外细光束的子午像点与弧矢像点。子午像点与弧矢像点之间的差值可以作为轴外细光束像散大小的评价标准。设 n 为物方折射率, n' 为像方折射率, 根据 Snell 定律和几何关系, 分别得到子午方向和弧矢方向的物像关系^[14]:

$$\frac{n' \cos^2 i'}{t'} - \frac{n \cos^2 i}{t} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}, \quad (31)$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}. \quad (32)$$

整理可以分别得到子午像距与弧矢像距。

$$t' = \frac{n' \cos^2 i'}{\frac{n \cos^2 i}{t} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}}, \quad (33)$$

$$s' = \frac{n'}{\frac{n}{s} - \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r}}. \quad (34)$$

子午像距与弧矢像距之间的距离为:

$$x_{ts'} = t' - s' = \frac{n' \cos^2 i' \left(\frac{n}{s} - \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right) - n' \left(\frac{n \cos^2 i}{t} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right)}{\left(\frac{n \cos^2 i}{t} + \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right) \times \left(\frac{n}{s} - \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right)}. \quad (35)$$

如果系统初始子午物距与弧矢物距相同, 即 $t = s$ 。根据 Snell 定律可知, 折射角与入射角相关, 那么影响像散大小的参数变为入射角、物方折射率、像方折射率、曲率半径。折射率可以由选择的材料确定, 因此影响像散变化的因素只有入射角和曲率半径。

在次镜外反射自由曲面棱镜光谱仪光学系统中, 初始的子午物距及弧矢物距相同, 故可以通过追迹光线确定经过每一个光学元件表面后像散值的变化, 这样既可以将最后输出的像散值作为评价系统性能的依据, 也可以掌握每一个光学元件表面的像散变化情况。经过主镜得到子午像距 t_1 , 弧矢像距 s_1 , ts 为主镜入射点和自由曲面棱镜第一曲面入射点的间距, 得到自由曲面棱镜第一曲面的子午物距 t_2 与弧矢物距 s_2 。

$$-ts = -\sqrt{(z_1' - z_1)^2 + (y_1' - y_1)^2}, \quad (36)$$

$$t_2 = t_1' - (-ts), \quad (37)$$

$$s_2 = s_1' - (-ts). \quad (38)$$

将参数带入上述方程就可以解出经过第一曲面后的子午像距及弧矢像距, 进而得到具体像散值。对于每个光学元件表面, 采用相同的方法, 通过多次求解可以得到系统的像散值。

2.3 初始结构解算流程

根据上述分析, 以光线追迹公式为基础, 对次镜外反射结构进行消像散分析。在 Matlab 中实现程序设计, 合理设置修正量, 若满足设计要求则可以跳出循环, 获得初始结构, 如果不符合要求则调整参数继续循环。程序中存在大量的判断结构用于确定光线与光学元件的交点坐标。综合考虑, 设计算法流程如图5所示。

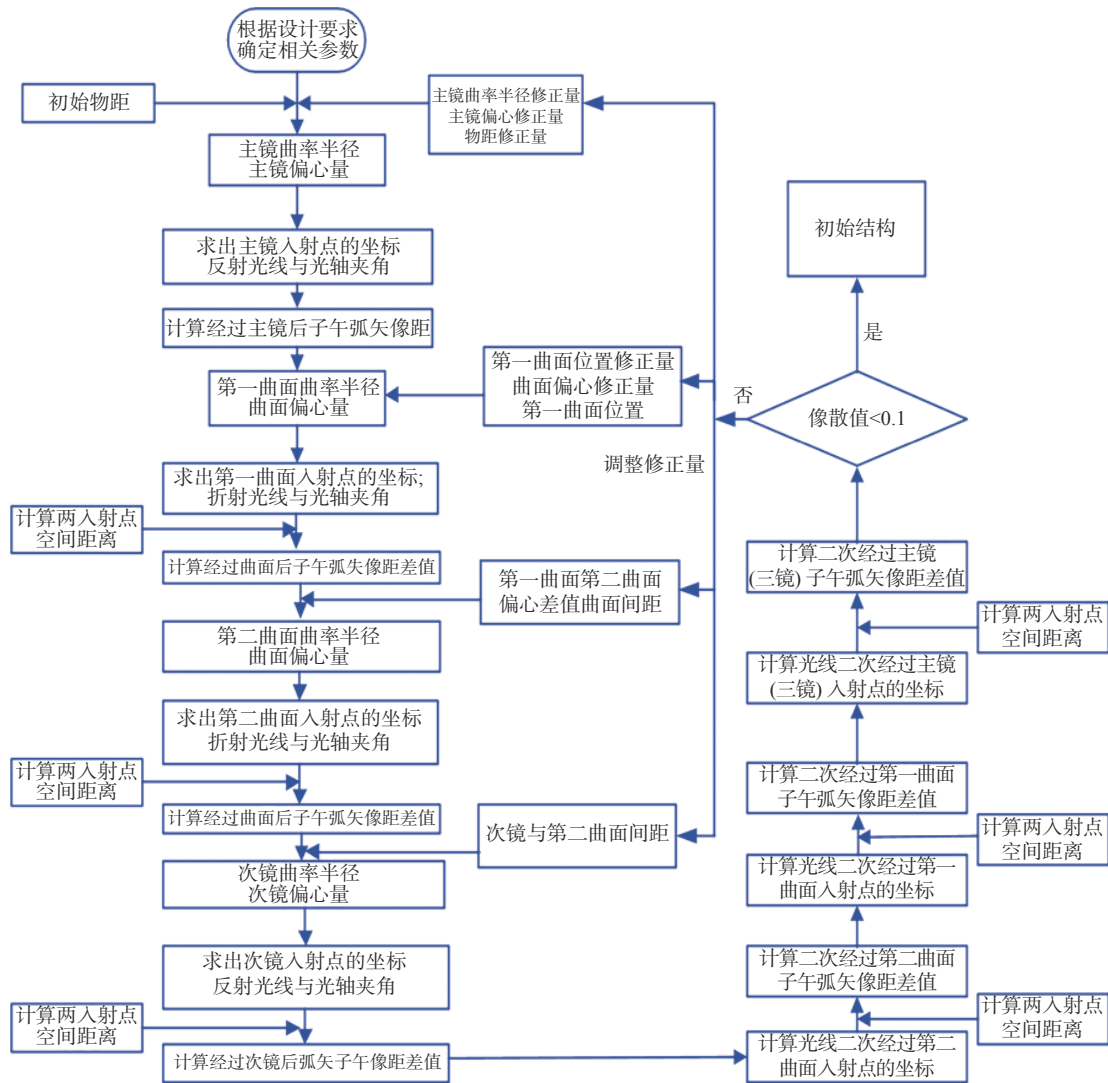


图 5 本文算法流程图

Fig. 5 Flow chart of proposed algorithm

3 初始结构优化

根据具体的循环迭代情况,不断调整修正量的值,使像散值在循环过程中趋于收敛。经过多次循环,系统找到一组符合条件的结构参数,如表 2 所示。

将初始结构输入到 Zemax 中可以得到光学结构,如图 6 所示。

对初始结构进行优化,在结构解算中,为了简化系统的复杂程度,设定主镜和三镜参数相同,在具体优化中可以对它们分别进行优化。这样经过几次优化,即可得到符合设计要求的光学系统。优化后的参数,如表 3 所示。

表 2 初始结构数据

Tab. 2 Initial structural data (mm)

表面	半径	厚度	材料	偏心量
1	-	249.500 000		
2	-248.510 000	-104.255 000	MIRROR	-45.990 000
3	-138.305 000	-15.990 000	ZF6	-36.980 000
4	-122.315 000	-5.990 000		-43.980 000
5	-122.275 000	5.990 000	MIRROR	-45.990 000
6	-122.315 000	15.990 000	ZF6	-43.980 000
7	-138.305 000	104.255 000		-36.980 000
8	-248.510 000	-	MIRROR	-45.990 000
9	-	-		

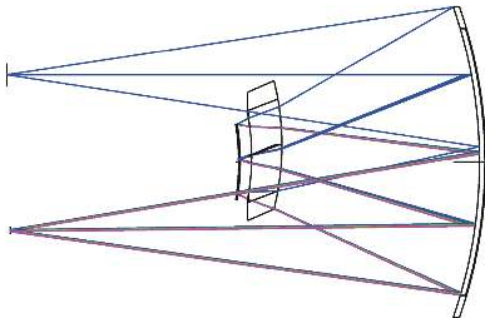


图 6 初始自由曲面棱镜光谱仪结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of initial freeform curved prism spectrometer

表 3 优化后结构数据

Tab. 3 Optimized structural data (mm)

表面	半径	厚度	材料	偏心量
1	—	240.045 897		
2	-234.113 632	-99.964 613	MIRROR	-58.302 387
3	-138.439 720	-18.303 653	ZF6	-42.950 734
4	-120.219 597	-7.986 594		-49.982 314
5	-105.485 631	7.986 594	MIRROR	-60.171 600
6	-120.219 597	18.303 653	ZF6	-49.982 314
7	-138.439 720	89.943 651		-42.950 734
8	-223.969 005	—	MIRROR	-61.713 353
9	—	—		

一个好的光学设计很大程度上取决于初始结构的合理性, 使用本文算法解算出的初始结构可以快速优化出符合设计要求的光学结构。同时在追迹光线的过程中, 由于计算了光线在每一个表面的像散值, 因此可以更容易选择合适的优化路线^[15-16]。优化后的光学结构如图 7 所示。图 8(彩图见期刊电子版)为光学系统调制传递函数。

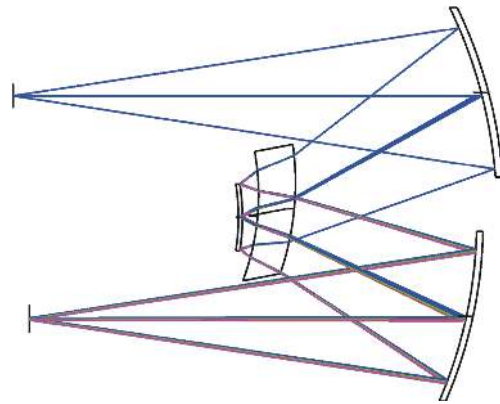


图 7 优化后的自由曲面棱镜光谱仪结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the optimized freeform curved prism spectrometer

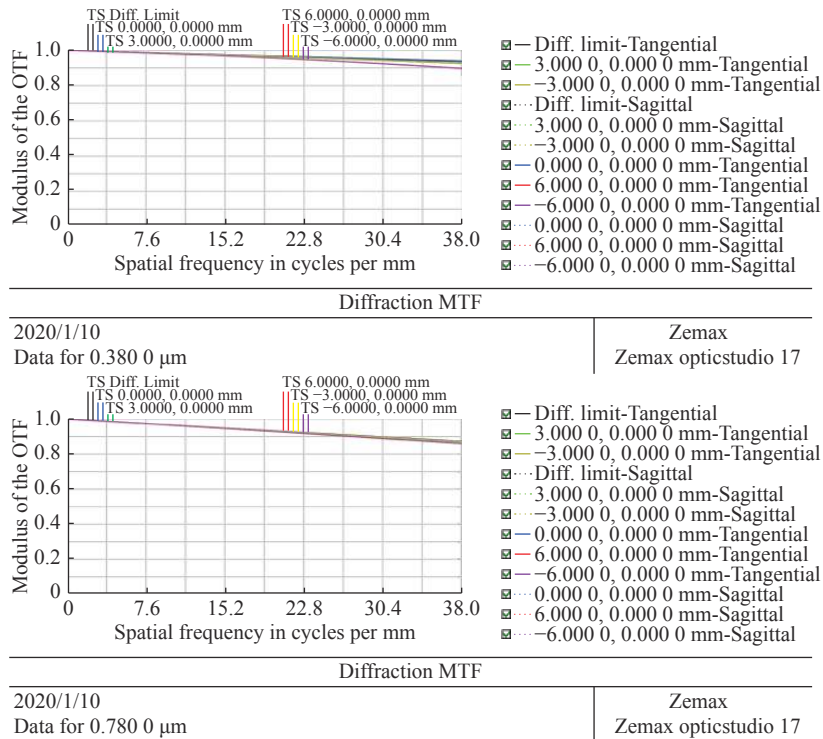


图 8 优化后光学系统调制传递函数

Fig. 8 MTF of optimized optical system

由图8可见,优化后系统各波段的调制传递函数均接近衍射极限。平均光谱分辨率优于6 nm,谱线弯曲和色畸变均小于0.1 pixel,符合设计要求。

4 结 论

本文根据消像散方法,以轴外细光束像散理论作为判断依据,计算了光线经过每个面后的像散值。通过光线追迹确定光学元件参数,在结构参数解算中,设定一系列修正量,通过循环迭代优

化,找到合理的初始结构,将初始结构放到Zemax中进行优化,从而获得符合设计要求的光学结构。为了验证算法的正确性,用其设计光谱范围为380~780 nm,光谱分辨率为6 nm,数值孔径为0.15的光谱仪。根据上述方法写出Matlab程序,迭代出一个初始结构,在Zemax中快速优化出的光学结构较好。结果证明,采用该算法可以根据设计指标快速计算出合理的初始结构,能够大大减化优化过程。

参考文献:

- [1] 郑玉权. 小型Offner光谱成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 650-657.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [2] SANG B, SCHUBERT J, KAISER S, *et al.*. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration, and technologies[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7086: 708605.
- [3] FÉRY C. A prism with curved faces, for spectrograph or spectroscope[J]. *The Astrophysical Journal*, 1911, 34(1): 79.
- [4] MORRISSEY P F. Third-order aberrations of a prism with spherically curved surfaces[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(13): 2539-2543.
- [5] 刘力. Fery棱镜特性及应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
LIU L. Research of the properties and application of Fery prism[D]. *Suzhou: Soochow University*, 2013. (in Chinese)
- [6] 刘立银. 曲面棱镜Offner高光谱成像系统的设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
LIU L Y. Design and research of curved prism Offner hyperspectral imaging system[D]. *Nanjing: Nanjing University of Science and Technology*, 2016. (in Chinese)
- [7] 张营. 长波红外高光谱成像仪光学技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016
ZHANG Y. Optical technology of long-wave infrared hyperspectral imaging[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [8] 胡海翔. 空间光学自由曲面应用的关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017
HU H X. Research on the key technologies in the application of space optical freeform surfaces[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [9] LOBB D R. Imaging spectrometers using concentric optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3118: 339-347.
- [10] 张云翠, 刘龙, 曹冠英, 等. Fery棱镜光谱仪设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 287-289.
ZHANG Y C, LIU L, CAO G Y, *et al.*. Design of spectrograph with novel Fery prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 287-289. (in Chinese)
- [11] 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.
NIE Y F, XIANG L 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. (in Chinese)
- [12] 刘光宏, 吴刚, 凌青, 等. Offner成像光谱仪建模及像差分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0322001.
LIU G H, WU G, LING Q, *et al.*. Modelling of Offner imaging spectrometers and aberrations analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0322001. (in Chinese)
- [13] FENG L, ZHOU J S, WANG D. A miniature design of near infrared spectrometer with wide field of view[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9298: 92980M.
- [14] 赵渊明. 消像散自由曲面离轴显示系统设计方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
ZHAO Y M. Studies on the design of off-axis display systems with an astigmatic free-form surface[D]. *Changchun:*

Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

- [15] FENG L, ZHOU J S, JING J J, *et al.*. A design of miniature imaging spectrometer with Fery prism[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10000: 100001P.
- [16] DONG W, NIE Y F, ZHOU J S, *et al.*. Design of a concise Féry-prism hyperspectral imaging system based on multi-configuration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8910: 89100B.

作者简介:



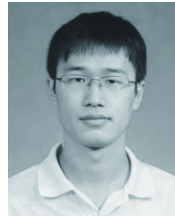
张佳伦(1994—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 2016年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事高光谱成像技术、光学系统设计方面的研究。E-mail: jlzhang0807@163.com



郑玉权(1972—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射测量与定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn



蔺超(1984—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士, 副研究员, 主要从事光谱仪器结构设计及光谱定标方面的研究。E-mail: linchao@ciomp.ac.cn



纪振华(1986—), 男, 黑龙江双鸭山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事空间遥感器设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: jizhenhua001@126.com