

宽波段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统设计

常凌颖¹, 张强^{1*}, 邱跃洪²¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;²中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 声光可调谐滤波器(AOTF)成像光谱仪能够同时获取图像、光谱及偏振信息,已成功应用于航天、农业、林业、医学及食品安全等领域,具有较好的发展前景。光学系统是 AOTF 成像光谱仪获取信息的关键部件之一。为此,研究国内外常见的 AOTF 成像光谱仪光学系统,介绍 AOTF 的工作原理及光谱仪的总体设计方案,计算全系统的前置、准直及成像等子系统光学设计参数,完成共口径光学系统的仿真设计。前置光学系统采用自由曲面离轴三反结构,与准直系统的光瞳匹配,准直及成像系统为光阑前置的离轴三反系统。仿真设计结果表明,在工作波段为 0.4~5.0 μm 、焦距为 125 mm、 F 数 5 和视场角为 5.3°的情况下,系统的 MTF 值分别在波段 0.4~1.0 μm 、1.0~3.0 μm 和 3.0~5.0 μm 下均接近于衍射极限且大于 0.57,畸变小于 5%,成像质量良好。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 声光可调谐滤波器; 离轴三反镜; 自由曲面

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0722002

Design of Optical System for Broadband and Integrated AOTF Imaging Spectrometer

Chang Lingying¹, Zhang Qiang^{1*}, Qiu Yuehong²¹ School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract Acousto-optic tunable filter (AOTF) imaging spectrometer can acquire image, spectrum and polarization information simultaneously. It has been successfully applied to the aerospace, agriculture, forestry, medicine, food safety, and other fields, thus having good development prospects. Optical system is one of the key parts in an AOTF imaging spectrometer to obtain information. Therefore, the optical systems of common AOTF imaging spectrometers are studied in this paper, and the working principle of AOTF and the general design scheme of the spectrometers are introduced. Furthermore, the optical design parameters of the whole system, such as the front, collimating and imaging sub-systems are calculated, and the common-aperture optical system is simulated. The front optical system has an off-axis three-mirror structure based on free-form surface, which matches with the aperture stop of the collimating system, and the collimating and imaging systems are off-axis three-mirror systems with front offset of the aperture stop. The simulation results show that the system has an MTF values close to the diffraction limit and greater than 0.57 at the bands of 0.4–1.0 μm , 1.0–3.0 μm , and 3.0–5.0 μm , a distortion less than 5%, and good imaging quality, in the case of the working band of 0.4–5.0 μm , F number 5, field of view angle of 5.3°.

Key words optical design; imaging spectrometer; acousto-optic tunable filter; off-axis three-mirror; free-form surface

OCIS codes 220.4830; 220.3620

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-05; 录用日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(61475190)

* E-mail: johnson_zhang1994@126.com

1 引言

光谱成像技术是将成像技术与光谱技术结合,用来探测目标的二维空间信息和一维光谱信息的技术^[1]。光学系统中的分光元件是光谱成像仪中的关键部分之一,其决定了系统的成像质量。声光可调谐滤波器(AOTF)作为一种新型的分光器件,与传统光谱分析系统中的棱镜或光栅相比,具有体积小、重量轻、波长任意选择、通光孔径大、扫描速度快和衍射效率高等优点^[2],为此广泛应用在各个领域。如在航天领域,AOTF用于小行星的探测等;在农业领域,AOTF用于马铃薯叶片氮气含量的估算和小麦品质的检测等;在医学领域,AOTF用于皮肤鳞状细胞癌^[3]和肺癌组织的检测^[4],也用于药物成分的检测;在食品安全领域,AOTF用于地沟油的检测、葡萄酒年份的验证和乳制品成分含量的测量等^[5]。

2005年,欧洲航天局在探测金星的卫星上搭载AOTF光谱仪,工作谱段为 $1.0\sim 1.7\ \mu\text{m}$,带宽为 $0.7\ \mu\text{m}$,光学系统主要由望远镜、FOV(Field of View)光阑、第一准直透镜、AOTF、第二准直透镜和两个带近距镜的探测器构成,光学系统为一种折射式光学系统^[6]。2010年,中国科学院西安光学精密机械研究所常凌颖等^[7]设计的AOTF成像光谱仪的工作谱段为 $0.4\sim 0.9\ \mu\text{m}$,带宽为 $0.5\ \mu\text{m}$,光学系统由物镜、准直镜、AOTF及成像镜组成,光学系统为一种折射式光学系统。2013年,中国科学院上海技术物理研究所嫦娥三号探测任务中,用于获取月球表面上信息的AOTF成像光谱仪的工作谱段为 $0.45\sim 2.40\ \mu\text{m}$,带宽为 $1.95\ \mu\text{m}$,光学系统主要由前置光学组件、分光组件、会聚镜及探测器组件组成,光学系统为一种折射式光学系统^[8]。2014年,长春理工大学赵昭等^[9]研究了用于目标跟踪的AOTF成像光谱仪,其工作谱段为 $3.2\sim 5.0\ \mu\text{m}$,带宽为 $1.8\ \mu\text{m}$,光学系统主要由放大准直系统、AOTF、成像系统及探测器组成,光学系统为一种折射式光学系统。2016年,欧洲航天局和俄罗斯国家航天集团公司合作发射的EXOMARS 2016火星探测器,用于痕量气体轨道器上的AOTF光谱仪的工作谱段为 $0.7\sim 1.6\ \mu\text{m}$,带宽为 $0.9\ \mu\text{m}$,光学系统主要由望远镜、折叠镜、偏光镜、AOTF、准直镜及衍射光栅组成,光学系统为一种折射式光学系统^[10]。2017年,天津光电信息控制和安全技术重点实验室朱海波等^[11]设计的成像光谱仪的工作谱段为

$0.45\sim 0.95\ \mu\text{m}$,带宽为 $0.5\ \mu\text{m}$,光学系统主要由前置光学系统、AOTF及成像系统组成,光学系统为一种折射式光学系统。2019年,中国科学院上海技术物理研究所He等^[12]设计了用于小行星探测的AOTF成像光谱仪,其工作谱段为 $0.4\sim 4.5\ \mu\text{m}$,带宽为 $4.1\ \mu\text{m}$,光学系统主要由放大准直镜、偏光片、AOTF、分析器及成像系统组成。同年,上海智能红外感知重点实验室周佳巧等^[13]在天空背景下探测无人机的过程中,使用的AOTF成像光谱仪的工作谱段为 $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$,带宽为 $0.6\ \mu\text{m}$,光学系统为一种折射式光学系统。美国最新发射的“毅力号”火星车搭载的AOTF光谱仪的谱段为 $1.3\sim 2.6\ \mu\text{m}$,带宽为 $1.3\ \mu\text{m}$ ^[14]。

使用宽谱段的AOTF成像光谱仪对深空小行星进行探测,分析小行星表面的物质组成。以往成像光谱仪通常采用分谱段分光成像组合系统,可以实现谱段展宽,而且不同的谱段有不同的光学系统,所以拥有多套成像系统。本文设计一种宽谱段的AOTF成像光谱仪全反射光学系统,该系统的工作谱段为 $0.4\sim 5.0\ \mu\text{m}$,带宽为 $4.6\ \mu\text{m}$,光学系统主要由前置光学系统、准直系统、AOTF及成像系统组成,采用离轴三反结构可以实现宽波段、共口径和一体化成像,而且成像质量良好。

2 AOTF 成像光谱仪

2.1 AOTF 成像光谱仪的工作原理

AOTF成像光谱仪由光机系统和电子系统构成,如图1所示。光机系统主要包括前置光学系统、AOTF、成像光学系统及探测器。电子系统主要包括可射频频信号源、控制时序模块、视频处理器和计算机等。入射光经过前置光学系统后进入AOTF中,在射频信号的控制下,入射光被衍射成对应谱段且偏振态正交的寻常光波(o光)和异常光波(e光),并分别成像在各自的CCD(Charge Coupled Device)上。电子系统中,控制时序模块为CCD和射频信号源提供电源,视频处理器将输出的电信号转化为数字信号并传送到计算机上^[7]。

2.2 AOTF 的工作原理

AOTF主要由双折射晶体、可调谐射频设备和键合在其上面的压电晶体换能器以及吸声体组成,如图2所示。AOTF是根据各项异性的双折射晶体声光衍射原理制成的。当声波在声光介质中传播时,由于声波是一种机械波,使声光介质产生弹性形变,而且介质的折射率呈现为周期性变化,从而形成

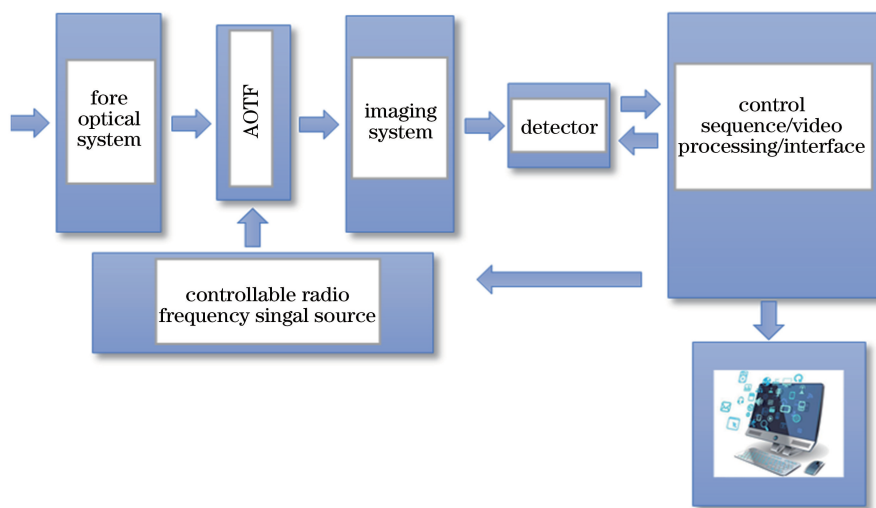


图 1 AOTF 成像光谱仪的原理图

Fig. 1 Framework of AOTF imaging spectrometer

光学相位光栅。当光波通过声光介质时,可以产生布拉格衍射。当改变声波频率时,满足动量匹配条件的衍射光波长也将相应改变,从而起到分光的作用。

当入射光为自然光时,在任一频率下,都被衍射成两束光,一束为+1级o光,一束为-1级e光,两束光分别位于零级光的两侧^[15]。

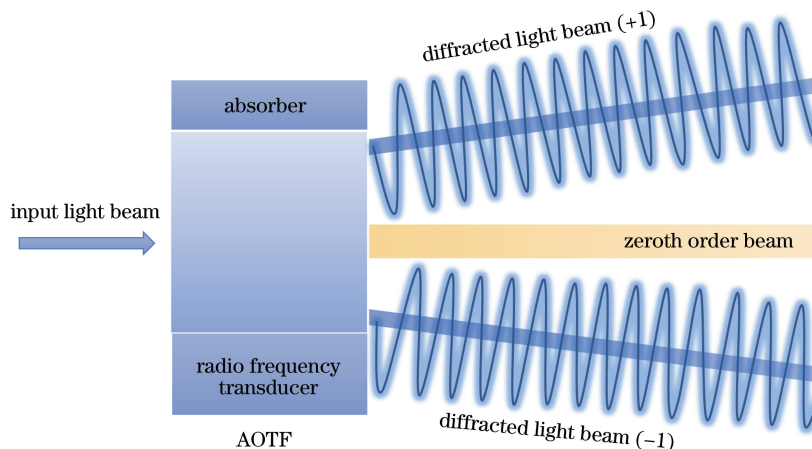


图 2 AOTF 的工作原理图

Fig. 2 Schematic AOTF

3 AOTF 成像光谱仪光学系统的设计

3.1 参数的确定与计算

3.1.1 CCD 器件

AOTF 成像光谱仪的工作谱段为 0.4 ~

5.0 μm , 光学系统的工作谱段为 0.4 ~ 5.0 μm , CCD 接收器的工作谱段分为 0.4 ~ 1.0 μm 、1.0 ~ 3.0 μm 和 3.0 ~ 5.0 μm 三个,用来接收目标的光谱图像,CCD 的具体参数如表 1 所示。

表 1 CCD 的参数

Table 1 Parameters of CCD

Type of CCD	Wavelength / μm	Resolution ratio / (pixel \times pixel)	Pixel size / μm	Manufacturer
C9100-23B	0.4-1.0	512 \times 512	16	Hamamatsu
C10633-34	1.0-3.0	640 \times 512	20	Hamamatsu
LCT650	3.0-5.0	640 \times 480	28	LMT

3.1.2 相对孔径

相对孔径的大小决定了光学系统的光通量,

这会影晌光学系统的设计。在 0.4 ~ 1.0 μm 谱段,刘晓梅^[16]研究的反射式宽视场高分辨率成像

光谱仪的相对孔径为 1/4,其望远系统和成像系统均采用离轴三反结构。在 0.4~2.5 μm 谱段,陈杨等^[17]研究的光谱仪的相对孔径为 1/5,望远镜选择二次成像的同轴三反系统,光谱仪部分使用离轴三反系统。薛庆生等^[18]研制的大视场高分辨率星载成像光谱仪的相对孔径为 1/4,光学系统为反射式光学结构。在中红外谱段,计云兵^[19]研究的光谱仪的相对孔径为 1/4,前置望远系统采用离轴三反结构,成像系统采用硅锗组合的七片式结构。

综上所述,在可见光到中红外谱段,反射式光学系统中成像光谱仪的相对孔径一般在 1/4~1/5 之间。根据 CCD 的相关参数及光学系统的结构,实验选取的相对孔径 D/f' 为 1/5,其中 D 为入射光瞳直径, f' 为光学系统的总焦距。

3.1.3 焦距

TeO_2 晶体选取中国电子科技集团重庆声光有限公司生产的产品,通光口径的尺寸为 25 mm \times 25 mm,其限制了系统孔径光阑的尺寸^[20],因此光学系统的总焦距为

$$f' = FD = 5 \times 25 = 125, \quad (1)$$

式中: F 为相对孔径的倒数。

3.1.4 视场

对于 CCD 靶面尺寸,在 0.4~1.0 μm 谱段为 8.19 mm \times 8.19 mm,在 1.0~3.0 μm 谱段为 12.80 mm \times 10.24 mm,在 3.0~5.0 μm 谱段为 17.92 mm \times 13.44 mm,取最小的靶面尺寸来确定光学系统的视场角,表达式为

$$2\omega = \arctan(y/f') = \arctan\left(\frac{8.19 \times \sqrt{2}}{125}\right) = 5.3^\circ, \quad (2)$$

式中: y 为像高。声光晶体可接收的光束角通常不能大于 6° ^[21],因此系统的视场角 2ω 选取 5.3° 。

综上所述,AOTF 成像光谱仪中光学系统的光学设计参数:工作谱段为 0.4~5.0 μm ,焦距 $f' = 125$ mm,相对孔径 $D/f' = 1/5$,视场角 $2\omega = 5.3^\circ$ 。

3.2 分系统的设计参数分配

宽谱段一体化 AOTF 成像光谱仪的光学系统由前置光学系统、准直系统、AOTF 以及成像系统组成,其中由前置光学系统和准直系统构成倍率为 1 的望远系统,进入 AOTF 的光束为平行光,经过 AOTF 衍射后的光束又经过成像系统后会聚于 CCD 上,所有波段可共口径同时使用。各子系统的设计参数如表 2 所示。从表 2 可知,系统的 F 数为 5。

表 2 各子系统光学参数

Table 2 Optical parameters of each optical system

Optical system	f' / mm	F	2ω / ($^\circ$)	Special requirement
Front optical system	125	5	5.3	/
Collimating system	125	5	5.3	The aperture stop is in front
AOTF	/	/	/	The whole system aperture stop is located on it
Imaging system	125	5	5.3	The aperture stop is in front

3.3 光学系统的设计

3.3.1 初始结构的确定

AOTF 成像光谱仪的工作谱段为 0.4~5.0 μm ,需采用全反射式光学系统来避免宽谱段所产生的色差,同轴全反射光学系统由于存在中心遮拦而影响信噪比,因此设计采用离轴三反光学系统作为初始结构^[22]。

1) 光学系统的整体布局

光学系统布局的选择会影响整个光谱仪的性能、结构的复杂性、质量及体积,光学系统中的各子系统均采用离轴三反光学系统,采取的布局形式如图 3 所示,其中 I 为前置光学系统,II 为准直系统,III 为成像系统。前置光学系统位于 AOTF 的右下侧,准直系统位于 AOTF 的左侧,成像光学系统位于 AOTF 的右上侧。入射光进入光学系统中多次

反射后从 AOTF 的上方出射,并成像在 CCD 上。目前,实验室样机采用已有的 CCD,通过像面的三切换模式在各个波段成像,从而获取全波段图像信息。

2) 子光学系统初始结构的确定

子光学系统初始结构的确定是以同轴三反光学系统为基础,对其进行光阑、视场离轴或镜面倾斜的处理,达到避开镜面相互之间遮拦的目的,从而得到离轴三反光学系统的初始结构。因此,在设计离轴三反光学系统之前,根据各子系统的光学设计参数及各子系统结构的遮拦比 $\alpha_1 = 0.4$ 和 $\alpha_2 = 1.5$,以及放大率 $\beta_1 = 2.5$ 和 $\beta_2 = 0.4$ ^[23],计算出三反光学系统在同轴情况下的主反射镜、次反射镜和第三反射镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 和 R_3 等初始结构参数,其中 α_1 和 α_2 分别为次镜对主镜与三镜对次镜

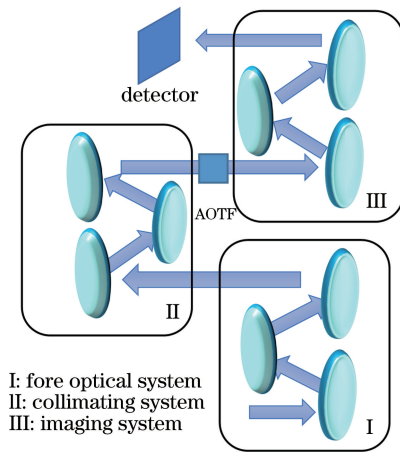


图 3 整体光学系统的布局图

Fig. 3 Layout diagram of whole optical system

的遮拦比, β_1 和 β_2 分别为次镜对主镜与三镜对次镜的放大率。由于三个子系统的的光学设计参数分配一致, 因此选取同一同轴初始结构作为三个子系统的初始结构并对其进行设计。

根据三级像差及高斯光学的理论, 计算 R_1 、 R_2 和 R_3 等初始结构参数, 表达式为

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1+\beta_1)} f', \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f', \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} f', \quad (7)$$

式中: d_1 为主镜与次镜之间的距离; d_2 为次镜与三镜之间的距离。

由(3)~(7)式计算出各子系统的曲率半径 $R_1 = -250$ mm、 $R_2 = -71.43$ mm 和 $R_3 = -107.14$ mm; 镜间距 $d_1 = 75$ mm 和 $d_2 =$

62.5 mm; 二次非球面系数 $-e_1^2 = -1.68$ 、 $-e_2^2 = -0.22$ 和 $-e_3^2 = 0.17$ 。

三个反射镜的光焦度若都为正或都为负, 则不能满足厄兹万的条件; 若主镜及次镜的光焦度同时为正, 这会导致各镜的口径过大; 若次镜及三镜的光焦度同时为正, 这会对光学仪器的制造带来不便^[24], 因此本次设计中子系统的初始结构采用正-负-正的模式。

3.3.2 光学系统的设计

在同轴三反光学系统的基础上进行光阑离轴, 光阑位于主镜上, 光阑的离轴量设为 -50 mm, 此时系统可实现无遮拦。之后将各镜的曲率半径及镜间距作为优化变量, 且采用 CODEV 中的 JMRCC 宏模块来避免遮拦光, 优化后的光学系统在工作谱段 $0.4 \sim 5.0$ μm 、焦距 $f' = 125$ mm、相对孔径 $D/f' = 1/5$ 和视场角 $2\omega = 5.3^\circ$ 的情况下, 在空间频率为 50 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.76 , 接近于衍射极限, 所以将该结构作为三个子光学系统的初始结构并进行下一步设计。

AOTF 在全系统中相当于孔径光阑^[25], 起到了限制光束的作用, 根据光学系统的整体布局及初始结构的镜间距, 准直系统及成像系统的光阑前置量为 75 mm ($0.6f'$)。为了降低光学系统的复杂程度, 可将两个子系统使用同一光学系统来实现。以各镜的曲率半径、偏心量及倾斜角度为变量进行仿真优化, 光阑前置会使光学系统失对称, 导致光学系统的垂轴像差较大, 则系统存在较大的像散及畸变残余量, 于是逐步提高各镜的非球面系数, 对光阑前置产生的各种像差进行校正。最终光学系统优化后, 在空间频率为 50 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.71 , 畸变小于 2.9% , 成像质量较好, 各镜的偏心量、倾斜角度及非球面系数如表 3 所示, 其中 M_1 、 M_2 和 M_3 分别代表准直系统及成像系统的主镜、次镜和三镜。

表 3 准直系统及成像系统各镜的偏心及倾斜

Table 3 Decentration and tilt of each mirror in collimation system and imaging system

Parameter	M_1	M_2	M_3
Decentration /mm	-2.25	9.71	-42.62
Tilt /($^\circ$)	-8.85	14.94	-9.46
Conic constant	-0.0057	-0.5971	0.2905
4 th order coefficient	3.2099×10^{-8}	1.1255×10^{-7}	4.5249×10^{-9}
6 th order coefficient	6.8373×10^{-13}	-7.0802×10^{-12}	-1.3881×10^{-12}

在前置光学系统的设计过程中, 需满足与准直系统的瞳窗匹配原则, 两个子系统需要共像面, 共瞳

位置。在初始结构的基础上, 调整出瞳位置与准直系统相匹配, 优化过程中逐步加入曲率半径、镜间

距、偏心量及倾斜角等优化变量,但优化后系统的像质和畸变不能同时达到良好状态,且此时提高非球面系数对像差校正的影响已经很微弱,则需要引入新的优化变量。近几年,中国科学院西安光学精密机械研究所利用基于自由曲面的离轴三反光学系统设计了大视场空间相机^[26],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[27]和中国科学院光电技术研究所也都基于自由曲面设计了离轴三反光学系统^[28-29]。自由曲面具有较多的自由度,在光学设计中能够有效地校正像差,提高光学系统的成像质量。自由曲面的多项式描述一般有两种:泽尼克多项式^[30]和 XY 多项式。其中 XY 多项式描述的曲面具有能够校正非对称像差、精度高以及易于加工等特点,广泛应用于成像光学系统中。XY 多项式的表达式为

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=2}^J a_j x^m y^n, \quad (8)$$

表 4 前置光学系统的次镜及三镜自由曲面参数

Table 4 Free-form surface parameters of 2th and 3th mirrors of front optical system

Parameter	M ₅	M ₆
x^2	-0.000210697216032047	0.000255701901033404
y^2	-0.00171804160559217	-0.000236872764458664
x^2y	$9.04570554409036 \times 10^{-5}$	$6.20840490996327 \times 10^{-5}$
y^3	$2.00886732732122 \times 10^{-5}$	$2.4067793728652 \times 10^{-5}$
x^4	$8.14765363997121 \times 10^{-7}$	$1.11814320160958 \times 10^{-6}$
x^2y^2	$1.07561516752013 \times 10^{-6}$	$1.93207601895823 \times 10^{-6}$
y^4	$-5.15133651906762 \times 10^{-7}$	$6.9508661703245 \times 10^{-8}$
x^2y^3	$1.63554420207729 \times 10^{-7}$	$7.35226113716151 \times 10^{-8}$
x^4y	$1.06110204783277 \times 10^{-7}$	$6.55137454872012 \times 10^{-8}$
y^5	$4.59026670330349 \times 10^{-8}$	$4.82190236092222 \times 10^{-9}$
x^6	$2.94401246962391 \times 10^{-9}$	$-1.98161446537076 \times 10^{-10}$
x^4y^2	$6.81970754121763 \times 10^{-9}$	$1.71051475340913 \times 10^{-9}$
x^2y^4	$3.89696710828571 \times 10^{-9}$	$1.0572403532361 \times 10^{-9}$
y^6	$6.27978015435262 \times 10^{-10}$	$3.26946542626363 \times 10^{-12}$

表 5 前置光学系统的各镜偏心及倾斜

Table 5 Decentration and tilt of each mirror of front optical system

Parameter	M ₄	M ₅	M ₆
Decentration /mm	-50.00	13.51	31.97
Tilt / (°)	-10.98	9.76	15.39

最后,将设计好的三个子系统进行组合拼接,组合后各视场在弧矢方向上的 MTF 接近于衍射极限,但子午方向的 MTF 小于弧矢方向,组合后的光学系统存在子午彗差及像散,通过调整系统的像距

$$j = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1, \quad (9)$$

式中: c 为顶点的曲率半径; k 为圆锥常数; m 和 n 均为非负整数且之和大于 1; a 为 $x^m y^n$ 项的系数; J 为 $x^m y^n$ 的总项数。通常自由曲面 XY 多项式的阶数最多为 8 次,高阶数会使优化效率降低,根据光学系统的像差情况,选取表达式中合适的系数进行优化。在离轴三反光学系统中,由于各镜的偏心及倾斜情况均在 YOZ 平面, X 项一般选取偶次项进行优化^[31]。

基于自由曲面的光学系统设计可以增加系统的自由度,XY 多项式在校正离轴三反光学系统的非对称像差具有优势^[32],因主镜不产生畸变,将次镜及三镜的面型均设为 XY 多项式表达的自由曲面,优化后的光学系统在空间频率为 50 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.65,畸变为 2.5%,其自由曲面参数如表 4 所示,优化后系统中各镜的偏心量及倾斜角度如表 5 所示,其中 M₄、M₅ 和 M₆ 分别代表前置光学系统的主镜、次镜和三镜。

和成像系统次镜在 y 向上的偏心量来获得性能较好的光学系统,从而完成全系统的设计。

3.3.3 设计结果

设计的 AOTF 成像光谱仪光学系统的结构如图 4 所示,利用 MTF、畸变曲线和像差曲线对系统的设计结果进行分析评价,结果如图 5~7 所示。整体光学系统的 MTF 值如表 6 所示。

从表 6 可以看到,在 0.4~1.0 μm 谱段,在空间频率为 50 lp/mm 处,MTF 的最小值为 0.621;在 1.0~3.0 μm 谱段,在空间频率为 20 lp/mm 处,

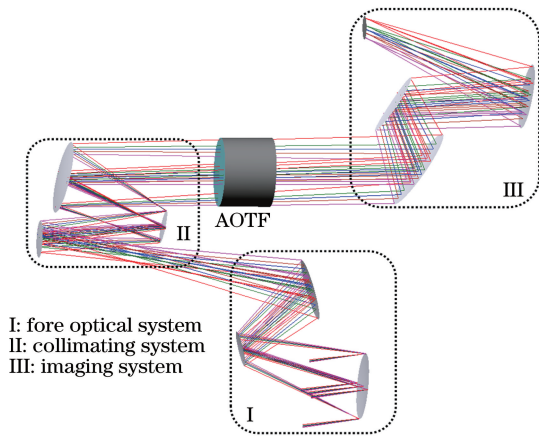


图 4 光学系统的结构

Fig. 4 Structure of optical system

MTF 的最小值为 0.577; 在 3.0~5.0 μm 谱段, 在空间频率为 12 lp/mm 处, MTF 的最小值为 0.579, 各谱段的 MTF 值均大于 0.57。从图 5 和图 7 可以看到, 各视场在各谱段的 MTF 均接近于衍射极限, 各像差均得到较好校正。从图 6 可以看到, 最大畸变值小于 5%, 说明所设计的 AOTF 成像光谱仪光学系统获得了较好的成像质量。

表 6 整体光学系统的 MTF 值

Table 6 MTF values of whole optical system

Spatial frequency / (lp·mm ⁻¹)	Spectral band / μm	Wavelength / μm	MTF
50	0.4-1.0	0.4	0.787
		0.5	0.771
		0.7	0.707
		0.9	0.651
		1.0	0.621
20	1.0-3.0	1.0	0.845
		1.5	0.778
		2.0	0.711
		2.5	0.643
		3.0	0.577
12	3.0-5.0	3.0	0.742
		3.5	0.701
		4.0	0.659
		4.5	0.619
		5.0	0.579

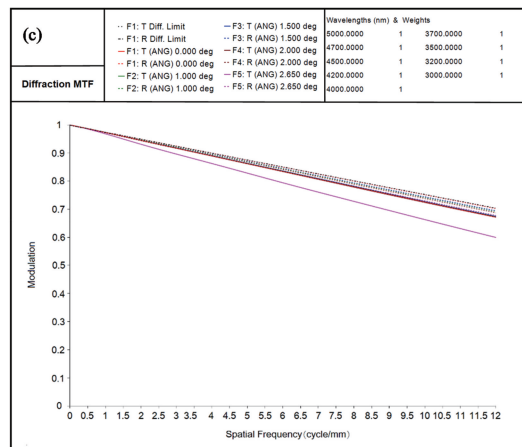
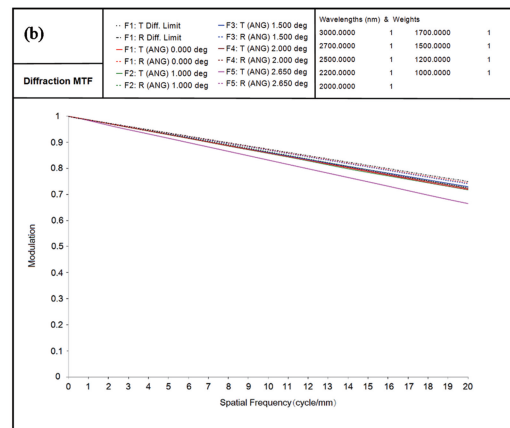
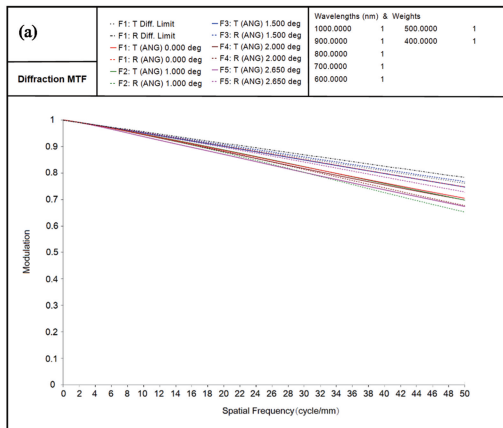


图 5 各谱段的 MTF 曲线。(a) 0.4~1.0 μm; (b) 1.0~3.0 μm; (c) 3.0~5.0 μm

Fig. 5 MTF curves of each wave band. (a) 0.4-1.0 μm; (b) 1.0-3.0 μm; (c) 3.0-5.0 μm

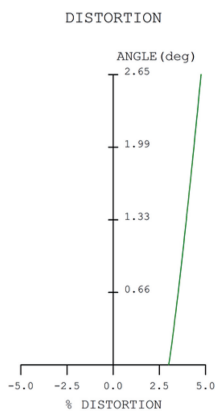


图 6 光学系统畸变的曲线

Fig. 6 Distortion curve of optical system

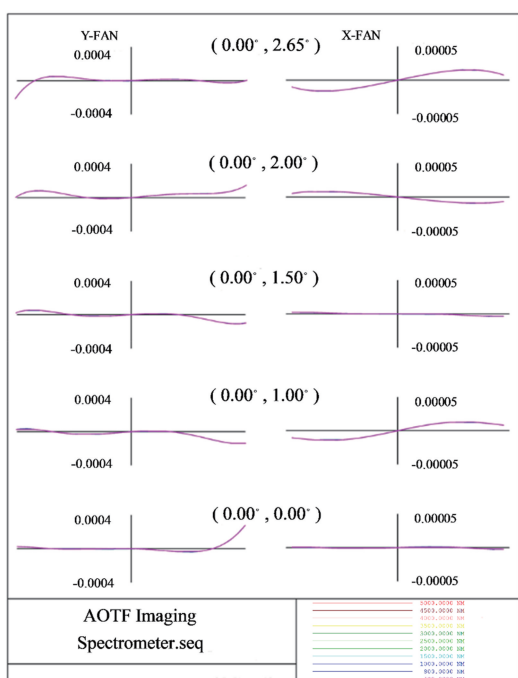


图 7 光学系统像差的曲线

Fig. 7 Ray aberration curves of optical system

4 结 论

设计用于深空小行星探测的宽谱段一体化 AOTF 成像光谱仪光学系统,其工作谱段为 $0.4 \sim 5.0 \mu\text{m}$,带宽为 $4.6 \mu\text{m}$,由离轴三反结构的前置光学系统、准直系统及成像系统组成的多次离轴反射光学系统,各子系统的离轴情况受限于整体光学系统的布局,离轴量及离轴方向均取决于各镜组的位置。其中前置光学系统为基于自由曲面的离轴三反结构,满足与准直系统共像面,共瞳位置。仿真结果表明,该光学系统在谱段分别为 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 及 $3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 可共口径同时使用,成像质量满足高像质低畸变的要求。

参 考 文 献

[1] Wang J Y, Shu R, Liu Y N, et al. Introduction to imaging spectroscopy technology [M]. Beijing: Science Press, 2011.
王建宇, 舒嵘, 刘银年, 等. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[2] Liu S S. Acousto-optic tunable filter and the application of imaging spectrometer [J]. Infrared, 2004, 25(7): 12-17.
刘石神. 声光可调谐滤波器及其在成像光谱仪上的应用[J]. 红外, 2004, 25(7): 12-17.

[3] Sheng Z F, Zhang C G, Qiu Z L, et al. Spectroscopic imaging of cutaneous squamous cell carcinoma based on acousto-optic filtering [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 34-40.
盛振扉, 张春光, 邱泽龙, 等. 皮肤鳞状细胞癌声光滤波显微光谱成像研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 34-40.

[4] Yuan J W, Zhang C G, Wang H, et al. Rapid microscopic spectral imaging of lung cancer tissue based on acousto-optic tunable filter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0407003.
原江伟, 张春光, 王号, 等. 基于声光可调滤波器的肺癌组织快速显微光谱成像[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0407003.

[5] Yang Y Y. Measure and analysis of algorithm optimization for near infrared spectrum of dairy product composition content [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018: 1-3.
杨羽翼. 乳制品成分含量近红外光谱测量及分析算法优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018: 1-3.

[6] Korablev O, Fedorova A, Bertaux J L, et al. SPICAV IR acousto-optic spectrometer experiment on Venus Express [J]. Planetary and Space Science, 2012, 65(1): 38-57.

[7] Chang L Y, Zhao B C, Qiu Y H, et al. Optical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3021-3026.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3021-3026.

[8] Dai S W, Wu J, Sun H X, et al. Chang'E-3 lunar rover's scientific payloads [J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(3): 332-340.
代树武, 吴季, 孙辉先, 等. 嫦娥三号巡视器有效载荷[J]. 空间科学学报, 2014, 34(3): 332-340.

[9] Zhao Z, An Z Y, Wang J S, et al. Medium infrared optical system optimized design of AOTF spectrum camera for target tracking and identifying [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0722003.

- 赵昭, 安志勇, 王劲松, 等. 用于目标跟踪/识别中红外 AOTF 光谱相机光学系统的设计与优化[J]. 光子学报, 2014, 43(7): 0722003.
- [10] Korablev O, Montmessin F, Trokhimovskiy A, et al. The atmospheric chemistry suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 trace gas orbiter[J]. Space Science Reviews, 2018, 214(1): 62.
- [11] Zhu H B, Guan S. Design of imaging spectrometer based on AOTF [J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(6): 20-23, 70.
朱海波, 关松. 基于声光可调谐滤光器的成像光谱仪系统设计[J]. 光电技术应用, 2017, 32(6): 20-23, 70.
- [12] He Z P, Zhao H T, Li J N. Characteristics of staring imaging spectrometer and its application prospect in asteroid exploration[J]. Aerospace China, 2019, 20(3): 14-21.
- [13] Zhou J Q, Cui W N, Zhang T, et al. Adaptive band selection technique based on spectral measurement data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 232501.
周佳巧, 崔文楠, 张涛, 等. 基于光谱测量数据的自适应波段选择技术[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 232501.
- [14] Roger C W, Sylvestre M, Fernando R P. The SuperCam remote sensing instrument suite for the Mars 2020 rover: a preview[J]. Spectroscopy, 2017, 32(5): 50-55.
- [15] Georgiev G, Glenar D A, Hillman J J. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy[J]. Applied Optics, 2002, 41(1): 209-217.
- [16] Liu X M. Research on the reflective optical system of imaging spectrometer with wide-field and high-resolution [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 49-73.
刘晓梅. 反射式宽视场高分辨率成像光谱仪光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院大学, 2013: 49-73.
- [17] Chen Y, Wang Y M. Optical design of prism spectrometer system with a small incident angle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922002.
陈杨, 王跃明. 小入射角棱镜成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922002.
- [18] Xue Q S, Huang Y, Lin G Y. 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.
- [19] Ji Y B. Research on optical system analysis and design of infrared bispectrum Fourier transform imaging spectrometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 33-48.
计云兵. 红外双谱段傅里叶变换成像光谱仪光学系统分析与设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 33-48.
- [20] Yuan X C. Optical design [M]. Beijing: Science Press, 1983.
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [21] Sivanayagam A, Findlay D. High resolution noncollinear acoustooptic filters with variable passband characteristics: design[J]. Applied Optics, 1984, 23(24): 4601.
- [22] Cao C, Liao Z Y, Bai Y, et al. Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13): 134201.
操超, 廖志远, 白瑜, 等. 基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计[J]. 物理学报, 2019, 68(13): 134201.
- [23] Chen Y, Wang Y M. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222003.
陈杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222003.
- [24] Wang Z J. Theoretical basis of optical design [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1985: 158-200.
王之江. 光学设计理论基础[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1985: 158-200.
- [25] Chang L Y, Zhao B C, Qiu Y H, et al. Optimal scheme of AOTF imaging spectrometer optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 5-8.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. AOTF 成像光谱仪光学系统的最优方案选择 [J]. 应用光学, 2012, 33(1): 5-8.
- [26] Li X Y, Ni D W, Yang M Y, et al. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 0922003.
李旭阳, 倪栋伟, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计 [J]. 光子学报, 2018, 47(9): 0922003.
- [27] Zhao Y C, He X, Zhang K, et al. Optical design of miniaturized and large field of view off-axis optical system based on freeform surface [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1218001.
赵宇宸, 何欣, 张凯, 等. 轻小型大视场自由曲面离轴光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47

- (12): 1218001.
- [28] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0808001.
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0808001.
- [29] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of cooled freeform-surface off-axis reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1122001.
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 制冷型自由曲面离轴反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1122001.
- [30] Fuerschbach K, Davis G E, Thompson K P, et al. Assembly of a freeform off-axis optical system employing three φ -polynomial Zernike mirrors[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2896-2899.
- [31] Ye J F, Chen L, Li X H, et al. Review of optical freeform surface representation technique and its application[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 110901.
- [32] Shen Z X, Yu J, Song Z Z, et al. Customized design and efficient fabrication of two freeform aluminum mirrors by single point diamond turning technique[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(9): 2269-2276.