

文章编号: 0253-2239(2010)10-3021-06

声光可调谐滤波器成像光谱仪光学系统设计

常凌颖^{1,2} 赵葆常¹ 邱跃洪¹ 汶德胜¹ 马小龙¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学技术研究室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了获得工作谱段范围在 400~900 nm 声光可调谐滤波器(AOTF)的成像光谱仪系统的二维空间信息、一维光谱及偏振信息,设计了一种应用于 AOTF 成像光谱仪的光学系统。介绍了 AOTF 的工作原理,根据 AOTF 光谱成像仪总体方案,对光学系统的物镜、准直镜及成像镜进行了合理的光学参数分配。设计中采用 CODE-V 光学设计软件模拟 AOTF 的多级衍射,在晶体中心即孔径光阑共轭的位置处设置了一块透射式光栅来模拟晶体的偏转,成像镜同时收集由 AOTF 产生的正交偏振的正、负一级衍射图像,整个系统采用了 3 种光学玻璃,最终完成了一个设计质量在 32 lp/mm 的空间频率下,调制传递函数(MTF)均值为 0.75 的光学系统。

关键词 光学设计;光谱成像仪;声光可调谐滤波器(AOTF);偏振

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.3021

Optical Design of Imaging Spectrometer Based on Acousto-Optic Tunable Filter

Chang Lingying^{1,2} Zhao Baochang¹ Qiu Yuehong¹ Wen Desheng¹ Ma Xiaolong¹

(¹ Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In order to acquire space, spectrum, and polarization information, the optical system which is applied to acousto-optic tunable filter(AOTF) imaging spectrometer is designed. The work principle of AOTF is described, then on the basis of instrument and system considerations, the optical parameters of the telescope and collimating optics are distributed reasonably. The optical design software CODE-V is used for the design, optimization and analysis of the optical system, and a refractive grating halfway along the crystal is used to simulate the effects of the AOTF. The +1 and -1 orthogonally polarized orders are produced by the AOTF at the same time. The whole system is achromatized from 400~900 nm using only three types of glass and imaging resolution excelled 32 lp/mm when the modulation transfer function (MTF) reaches 0.75.

Key words optical design; imaging spectrometer; acousto-optic tunable filter (AOTF); polarization

1 引言

声光可调谐滤波器(AOTF)偏振成像光谱仪作为一种新型的光学探测仪器,具有集成多种探测能力(偏振、光谱和成像)、光谱分辨率高、谱段可调谐、仪器结构紧凑、重量轻、体积小、探测速度快、使用方便等优点,具有极好的发展前景和广泛的应用潜力^[1]。

目前国内采用的 AOTF 成像光谱仪都不能同时探测 o 光和 e 光,这是由于 AOTF 在调谐不同谱段的衍射图像时会产生图像漂移的问题。如果只采用 o 光或 e 光某一路的偏振光,那么可以在晶体的出射面加光楔来补偿^[2],对于后端的成像光学系统来说只要收集图像就可以了。

如果两路偏振光都需要采集,就不能在晶体的

收稿日期: 2009-12-07; 收到修改稿日期: 2010-02-25

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z133)和西部之光联合学者项目(20072H02)资助课题。

作者简介: 常凌颖(1977—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事光学设计、空间光学等方面的研究。

E-mail: lychang@opt.ac.cn

导师简介: 汶德胜(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间相机方面的研究。E-mail: wen@opt.ac.cn

出射面加光楔来实现稳定图像,因为这种方法只能满足一路偏振光的情况。要同时采集两路偏振光就会增加光学设计的难度,这是由于1)要用光学设计软件模拟晶体的众多级衍射,在不同级次的情况下加入晶体的衍射后优化整个系统^[3];2)为了实现同时采集两路偏振光,后端成像光学系统还要加入补偿系统并且后端成像系统的视场除了本身视场外还要增加衍射角的部分才能收集全图像;3)为了最大利用晶体能量并满足整个系统的瞳窗匹配并使得同时采集的两路偏振光完全分离开,还要考虑留有足够的空间加入图像稳定补偿系统,所以后端的成像光学系统为光阑前置的系统,前置量约为焦距的3.5倍;4)AOTF偏振成像光谱仪光学系统谱段较宽,虽然单色光使用,但要求每个谱段的调制传递函数(MTF)和施特爾(Strehl)比都要高。

本文根据AOTF成像光谱仪系统的总体技术要求设计了一种光学系统。该原理样机光学系统在工作谱段范围400~900 nm内是消色差并达到衍射极限的,并且该光学系统可以同时获得同一目标的o、e振光信息^[4]。

2 AOTF 的工作原理

2.1 结 构

AOTF由声光介质、电声换能器和吸声装置构成,其结构如图1所示。当射频信号加到换能器上时,激励出声波并射入声光介质。为了防止声波反射,透过介质的声波被吸声装置吸收。当入射光为白光时,对任一射频都将有两束衍射光同时出现,一束为正衍射光,一束为负衍射光,分别位于零级光两侧。正衍射光与负衍射光的偏振态正交。入射光是o光或e光时,只有一束衍射光输出,衍射光偏振态与入射光偏振态正交。当声波频率改变时,满足动量匹配条件的衍射光波长也将相应改变,从而构成电调谐滤波器^[5]。

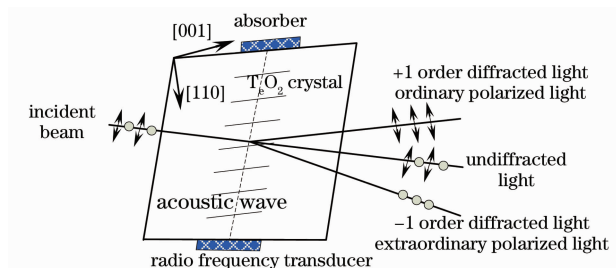


图1 AOTF原理图

Fig. 1 Schematic diagram of AOTF

2.2 基本原理

非同向声光相互作用下的波矢量和晶体光轴的基本关系,如图2所示。单轴晶体寻常光线o光与非常光线e光的波矢截面为圆和椭圆, z 轴为晶体的 $[001]$ 轴, δ 为晶体物理常数。

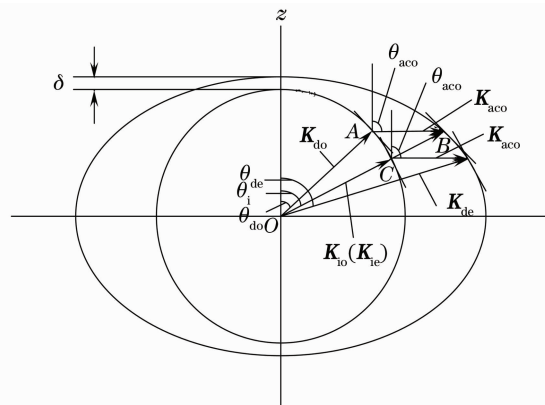


图2 光波矢和相位匹配条件

Fig. 2 Match condition of wave vectors and phase

OC 和 OB 分别表示以相同的入射角 θ_i 入射的o光和e光的光波矢量。 θ_{aco} 方向上的声矢量 K_{aco} 与入射光矢量 K_{ico} 相互作用,得到了以 θ_{dco} 方向出射的衍射光矢量 K_{dco} 。所谓的动量匹配条件为:在B点,即入射e光矢量同椭圆的交点作一切线,平行于这条切线在圆上再作一条切线,切点为A,即衍射光波矢量同o光圆的交点,偏振态为o光。对于入射o光情形是相似的,切线是互相平行的。入射光波和声波发生相互作用时,必须满足的动量匹配关系为

$$K_{aco} = K_{ico} - K_{dco},$$

$$K_{aco} \sin \theta_{aco} = K_{ico} \sin \theta_i - K_{dco} \sin \theta_{dco},$$

$$K_{aco} \cos \theta_{aco} = K_{ico} \cos \theta_i - K_{dco} \cos \theta_{dco},$$

式中 K_{aco} 表示实现e光入射o光衍射的声波矢,方向角为 θ_{aco} ; K_{ico} 为e光入射波矢; K_{dco} 为耦合得到的衍射光波矢,方向角为 θ_{dco} 。光矢量和声矢量的值分别为

$$K_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_0},$$

$$K_d = \frac{2\pi n_d}{\lambda_0},$$

$$K_a = \frac{2\pi f_a}{V_a},$$

式中 n_i 和 n_d 为折射率, f_a 为声频率, V_a 为沿 V_a 矢量方向上声速度, λ_0 为真空光波长。

当入射光波矢与入射声波矢满足动量匹配条件时,衍射光波矢量可获得最大的衍射效率。当滤光器晶体的晶轴方向选定为入射光波与声波发生正交衍射的方向时,对于给定频率的声波只有在相应的

光波能满足 K_a 矢量要求, 才发生声波与光波的正交衍射。如果声波频率改变, 能出射的光波频带范围也会随之改变。当光线入射角有一个小的改变 $\delta\theta_i$ 时, 由于双折射量随角度的变化恰好补偿了因角度变化而引起的动量失配, 所以仍能够保持动量匹配条件近似成立^[6]。

3 AOTF 偏振成像光谱仪总体方案

系统的工作波段为 400~900 nm, 128 个波段

(波数等间隔), 光谱分辨率 1.75 nm(400 nm)。所获得的图像要大于 128 pixel×128 pixel 的要求。CCD 采用 E2V 公司的背照 EMCCD, 像元大小 16 μm ×16 μm , 像元数为 512 pixel×512 pixel, 满阱电子数 $130\times 10^3 e^-$ 。

仪器主要由前置光学系统、AOTF、成像光学系统、探测器、控制时序、视频处理、接口和可控射频信号源组成^[7], 其原理图如图 3 所示。

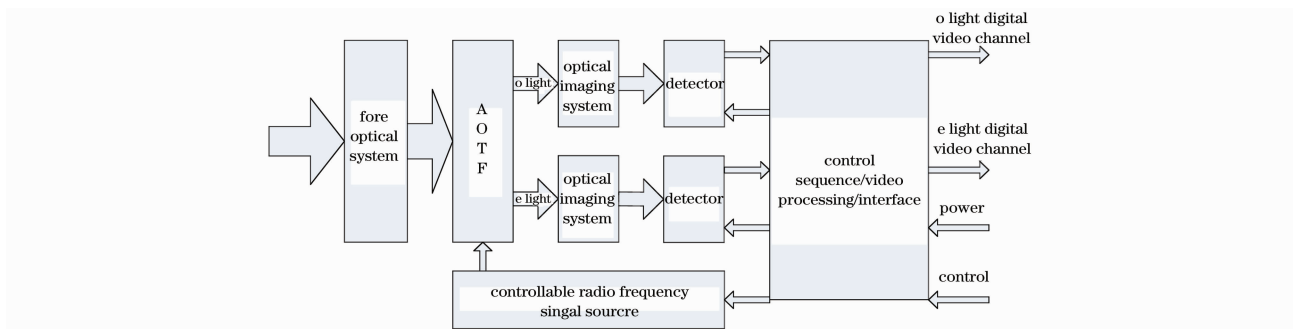


图 3 AOTF 成像光谱仪原理样机原理框图

Fig. 3 Framework of AOTF imaging spectrometer

AOTF 偏振成像光谱仪由物镜、准直镜、 T_eO_2 晶体、收集镜及 CCD 组成, 其结构如图 4 所示。

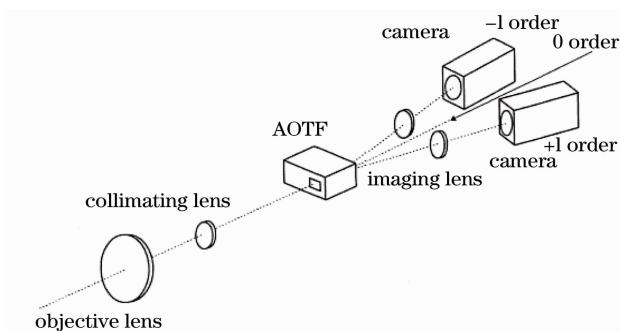


图 4 AOTF 偏振成像光谱仪结构示意图

Fig. 4 Structure of AOTF imaging spectrometer

光学系统包括由物镜和准直镜组成的前置望远光学系统、AOTF 和成像光学系统。来自目标的发射、反射或透射光经前置光学系统会聚、准直后传送到 AOTF, 经 AOTF 衍射后产生零级衍射光和正负一级衍射光, 正负一级衍射光即为偏振态正交的 o 光和 e 光, 成像光学系统将 AOTF 出射的 o 光和 e 光分别会聚到各自的图像传感器感光面上。

4 AOTF 偏振成像光谱仪光学系统设计

4.1 各分系统的参数分配

光学系统由物镜、准直镜及成像镜组成。晶体

选用美国 Brimrose 公司研制的非共线 T_eO_2 晶体, 晶体尺寸为 10 mm×10 mm, 角孔径为 6° , 为保证入射到晶体上的光束满足角孔径的要求, 同时要保证衍射光束和入射光束的空间分离, 设计要求准直系统的光束发散角要小于 3° , 综合考虑后, 选择视场角为 2.2° 。 T_eO_2 晶体尺寸限制了孔径光阑的尺寸, 晶体可接收的角度决定了系统的视场角。根据光学系统的空间不变性, 这两个指标决定了光学系统的孔径与视场^[8]。

对成像镜系统而言, 要使得同时采集的两路偏振光完全分离开, 并留有足够的空间加入图像稳定补偿系统^[4], 所以后端的成像镜光学系统的光阑需要有一定的前置量, 这时光阑的前置量为焦距的 3.5 倍, 并且 T_eO_2 晶体本身固有的色散性质, o 光与 e 光的折射率 n_o, n_e 均为波长的函数, 从晶体出射的衍射角实际上是波长的函数, 随着波长的变化产生变化。在成像的过程中就会出现改变驱动频率, 引起衍射波长变化和衍射角变化, 造成整个视场图像漂移^[9]。所以要求成像镜的视场角不但要满足视场的要求还要求能够接收到各个谱段的光束, 经计算成像镜的设计视场角为 5° 。成像系统焦距为

$$f' = \frac{h \cdot dx}{\tan \omega} = \frac{(128^2 + 128^2)^{1/2} \times 1.6 \times 10^{-2}}{2 \times \tan 1.1^\circ} = 75.12 \text{ mm},$$

式中 h 为对角线像元数, dx 为 CCD 像元尺寸, f' 成像镜焦距, ω 为系统视场角。当满足图像大于 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的要求时, 成像系统的焦距要大于 75.12 mm , 本文取 80 mm 。为了最大利用能量, 晶体的尺寸即为系统入瞳的大小, 这样成像镜的相对孔径 (F 数) 为 8。

由物镜和准直镜组成的前置望远系统的目的是产生射入晶体的平行光束。综合考虑了物镜、准直

镜及成像镜的像差匹配关系后, 选择前置望远镜的倍率为 1 倍, 物镜和准直镜的焦距取 50 mm , 对角线视场角选择为 2.2° 。由于准直镜的后方要放置 TeO_2 晶体, 准直镜的出瞳又应位于晶体中心, 因此物镜入瞳直径选择为 $\phi 10 \text{ mm}$, 则相对孔径 (F 数) 为 5。根据上述分析, 各分系统的光学设计参数, 如表 1 所示。

表 1 各分系统光学参数

Table 1 Optical parameters of each optical system

Optical parameters	Focal length /mm	F number	Field angle /($^\circ$)	Special requirements	
Name of subsystem	Objective lens	50	5	2.2	Aperture stop conjugate to the center of TeO_2 crystal
	Collimating lens	50	5	2.2	Exit pupil of collimating lens located in the center of TeO_2 crystal
	Imaging lens	80	8	5	Entrance pupil of imaging lens located in the center of TeO_2 crystal
	Whole system	80	8	2.2	Meet the image more than $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ (pixel size $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$)

4.2 设计分析

物镜和准直镜的目的是产生射入晶体的平行光束。因此, 凡是能对光束的性能产生影响的像差必须加以校正。球差会严重影响平行光束的会聚或发散, 轴向色差和色球差使不同波长的光束产生不同程度的收缩或发散。所以, 对于物镜必须在整个光谱范围内校正球差、轴向色差和色球差, 其他彗差和像散、场曲等与视场有关的像差可与准直镜一起校正。

物镜的初始结构可选择三片式, 对第 1 个镜片分离光焦度, 多加 1 片镜片进行结构复杂化以增加优化变量来得到好的成像质量, 在靠近一次像面的地方增加场镜来调整与准直镜的光瞳匹配。

在前置望远镜物镜的焦平面上放置一个视场光阑, 有利于杂光的防治, 孔径光阑设置在望远镜物镜上, 它与晶体中心位置共轭。为了最有效的利用 TeO_2 晶体的口径, 把系统的有效孔径光阑放置在晶体中心, 从而使准直镜成为一个后置孔径光阑系统,

使成像镜成为一个前置孔径光阑光学系统。

在设计准直镜时, 按反向光路计算像差, 即假定物平面位于无限远, 准直镜对于无穷远目标成像, 在准直镜的焦面上衡量系统的像差。这样准直镜和成像镜都成为光阑前置的系统, 初始结构形式可选择目镜的形式进行复杂化。成像物镜是把通过晶体衍射的光线会聚到像平面上, 它的像差校正直接影响平面上的成像质量, 因此要校正所有像差^[10]。

系统指标要求光学系统的工作波长范围是 $\lambda = 400 \sim 900 \text{ nm}$, 波段跨度达到了 500 nm 。由于是光谱仪器, 在各个波长上都要求有很好的像质。因此在整个波段范围内复消色差是设计的重点。考虑到系统在校正色差和二级光谱方面及各种像差的要求, 并且玻璃的折射率在短波范围内变化较快, 而在长波范围内变化较慢, 因此在确定消色差谱线时稍接近短波端^[9,11]。现将系统设计采用的玻璃的折射率及 P, V 值如表 2 所示。

表 2 三种玻璃材料的折射率及 P, V 值Table 2 Index of refraction and P, V of three glasses

Wavelength		900 nm	600 nm	400 nm	P	V
Glass	KF2	1.506439	1.514623	1.532145	0.681631	20.02
	NFK51A	1.481153	1.486237	1.496629	0.671491	31.42
	ZK3	1.579757	1.588329	1.605846	0.671432	22.55

从上表可以看出采用 ZK3 配对 NFK51A, 部分色散系数非常接近, 所以在 $400 \sim 900 \text{ nm}$ 两条谱线

校正色差后, 二级光谱一定非常小。

由以上分析, 把物镜、准直镜和成像物镜的初始

结构输入到光学设计软件 CODE-V 中,进行人机交互式优化,运用逐步逼近的方法校正像差。通过建立合适的优化评价函数、约束关系及设置恰当的优化变量作像差平衡,优化光学元件的结构参数,适当复杂化,反复分析与优化,直到获得满足设计指标和性能要求的光谱成像系统^[12,13]。

4.3 设计结果

设计采用 CODE-V 光学设计软件模拟 TeO_2 晶

体的多级衍射,在晶体中心即孔径光阑共轭的位置处设置了一块透射式光栅来模拟晶体的偏转^[14],前置望远物镜由复杂化的三片式实现,设计结果为 3 组 5 片,收集镜由复杂化的目镜结构实现,设计结果为 4 组 6 片,结构图如图 5 所示。

对光学系统的设计结果进行了分析评价,光学系统的点列图(从左到右依次为 400,500,600,700,800 和 900 nm)和 MTF 如图 6,7 所示。

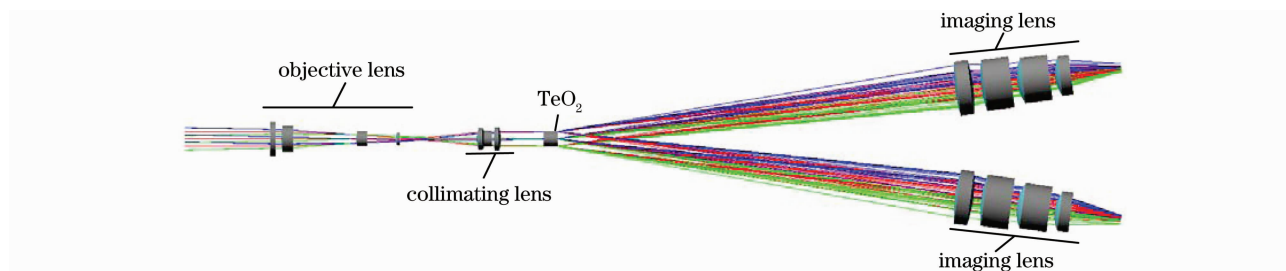


图 5 光学系统结构图

Fig. 5 Structure of the optical system

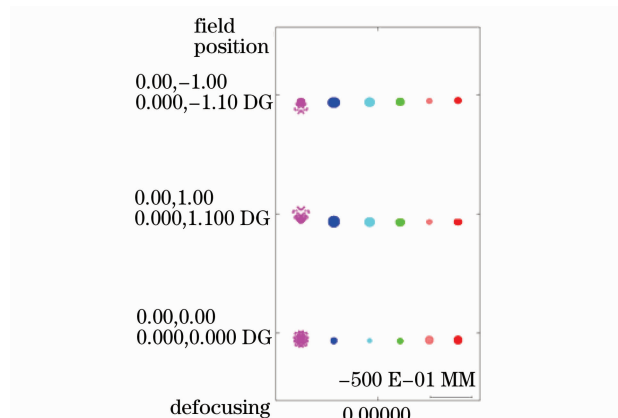


图 6 各波段点列图

Fig. 6 Spots of each wave band

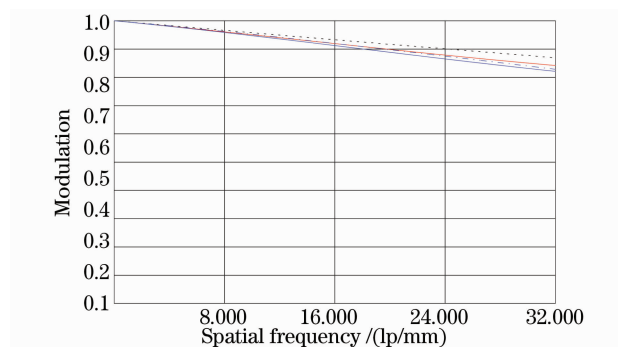


图 7 系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF of the system

32 lp/mm 时的设计 MTF 值及 Strehl 比如表 3 所示。从各波段系统的点列图和 MTF 数据可以看出,各视场各波段的像斑的弥散斑直径,基本上都在像元尺寸之内,控制得非常好,系统的设计 MTF 在

32 lp/mm 的空间频率下单个系统的 MTF 都在 0.7 以上,均值 0.75。

表 3 32 lp/mm 时的设计 MTF 值及 Strehl 比

Table 3 Value of 32 lp/mm design MTF and Strehl ratio

Waveband /nm	Average MTF	Strehl ratio
400	0.833	0.895
500	0.76	0.989
600	0.77	0.992
700	0.75	0.988
800	0.7	0.987
900	0.67	0.986

5 结 论

本文设计了一种应用于 AOTF 成像光谱仪原理样机的光学系统,该光学系统在工作谱段 400~900 nm 内是消色差并达到衍射极限的。通过优化设计得到的应用于 AOTF 成像光谱仪的光学系统,采用 3 组镜头组合而成,前置望远镜系统采用 1 倍的物镜与准直镜光学系统,成像镜采用光阑前置系统收集由 AOTF 产生的正交偏振的正、负一级衍射图像,全系统在 32 lp/mm 的空间频率下,MTF 大于 0.65,满足成像要求,像质良好。

参 考 文 献

- Liu Shishen. Acousto-optic tunable filter and the application of imaging spectrometer[J]. *Infrared*, 2004, (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, 7: 12~17
- D. R. Suhre. White-light imaging by use of a multiple pass band acousto-optic tunable filter[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(22): 4494~4501

- 3 Apostolos Deslis, Charlie G. Kurzweil, Clayton C. LaBaw. Optical design of an imaging spectrometer utilizing an acousto-optic tunable filter as a disperser [C]. *SPIE*, 1998, **3482**: 170~178
- 4 Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong. Eliminate chromatic aberrations for acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2895~2899
常凌颖,赵葆常,邱跃洪. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色散设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2895~2899
- 5 Georgi Georgiev. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(1): 209~217
- 6 Xu Jieping. Acousto-optic Device; Principle, Design and Application[M]. Beijing: Science Press, 1982
徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京:科学出版社, 1982
- 7 David A. Glenar. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(31): 7412~7424
- 8 X. C. Yuan. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983
袁旭沧. 光学设计. 科学出版社[M]. 北京:1983
- 9 Li Yuyao, Tang Yong, Lin Zhaoheng *et al.*. Design of apochromatism objective lens of aerial camera based on large frame array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3183~3185
李玉瑶,唐 勇,林昭珩 等. 基于大面阵 CCD 的复消色差航空相机物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3183~3185
- 10 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian. Design of hybrid refractive diffractive ultra wide angle eyepieces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 85~87
张慧娟,王肇圻,傅汝廉. 折衍混合超广角视场目镜系统的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 85~87
- 11 Leng Jiakai, Cui Qingfeng, Pei Xuedan *et al.*. Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 981~987
冷家开,崔庆丰,裴雪丹 等. 折衍射混合复消色差望远镜中的色球差[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 981~987
- 12 Ma Hongtao, Han Bing, Zhang Xiaohui *et al.*. Design of hyper long focal length in the short structure optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3503~3505
马洪涛,韩 冰,张晓辉 等. 超长焦距短结构光学系统设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3503~3505
- 13 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
- 14 Zhang Chunguang, Zhang Zhonghua, Wang Hao. Improvement of the spectral resolution of acousto-optic tunable filter by double filtering method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 348~353
张春光,张中华,王 号. 二次滤波提高声光可调谐滤波器光谱分辨率研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 348~353