

文章编号 1004-924X(2010)01-0052-08

# 双折射滤光器的误差分析与性能优化

玄伟佳<sup>1,2</sup>, 王东光<sup>1</sup>, 邓元勇<sup>1</sup>, 苏江涛<sup>1</sup>, 张志勇<sup>1</sup>, 孙英姿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台 怀柔太阳观测站, 北京 100012;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 由于双折射滤光器型太阳磁场望远镜中滤光器的研制质量直接影响透过带, 进而影响太阳磁场的测量, 本文对影响双折射滤光器透过带漂移的各种误差因素进行了分析。通过计算机编程, 完全模拟了光线轨迹, 精确分析了多种误差项对双折射滤光器透过带的影响。给出了引起透过带漂移、展宽、极大值和极小值变化的主要误差项。分析表明, 入射角、晶体光轴倾角误差、晶体厚度误差和 1/4 波片光轴方位角误差影响透过带漂移; 只有晶体光轴方位角误差影响透过带宽, 当误差为  $2^\circ$  时, 透过带展宽了 0.078%; 宽视场 1/2 波片光轴方位角误差对极大值的影响最明显, 当误差为  $2^\circ$  时, 极大值减小了 0.487%; 晶体光轴方位角误差、宽视场 1/2 波片延迟误差和 1/4 波片光轴方位角误差对极小值都有不同程度的影响。

**关键词:** 太阳观测; 双折射滤光器; 误差分析; 光线追迹方法

**中图分类号:** P111.41; TH703 **文献标识码:** A

## Error analysis and performance optimization of birefringent filter

XUAN Wei-jia<sup>1,2</sup>, WANG Dong-guang<sup>1</sup>, DENG Yuan-yong<sup>1</sup>,

SU Jiang-tao<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-yong<sup>1</sup>, SUN Ying-zi<sup>1</sup>

(1. *Huairou Solar Observing Station, National Astronomical Observatories,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** As the quality of filter in a solar magnetic field telescope with a birefringent filter directly affects the transmission band and the measurement of solar magnetic field, this paper researches the error factors that causes the shift of transmission band. By using computer program, the ray trace is simulated completely, and the variation of transmission band with different errors is obtained accurately. Analysis results provide the primary error terms that cause the band shift, band broadening, and the changes of maximum and minimum. Among these errors, the incident angle, optical axis tilt error of crystal, thickness error of crystal, and the optical axis azimuth error of quarter-wave plate affect the band shift. Moreover, the optical axis azimuth error of crystal affects the band broadening, and the transmission band will be broadened by 0.078% when the error is  $2^\circ$ . The optical axis azimuth error of a half-wave plate in a the wide field effects evidently on the maximum, and the maximum decrease

**收稿日期:** 2009-04-08; **修订日期:** 2009-05-13.

**基金项目:** 天文联合基金资助项目 (No. 10778723, No. 10878016); 国家自然科学基金 (青年基金) 资助项目 (No. 10803012)

by 0.487% when the error is  $2^\circ$ . Furthermore, the optical axis azimuth error of crystal, retardance error of half-wave plate in the wide field, and the optical axis azimuth error of quarter-wave plate have different effects on the minimum.

**Key words:** solar observation; birefringent filter; error analysis; ray tracing method

## 1 引言

近 20 年来,美国马歇尔飞行中心、夏威夷密斯太阳天文台、大熊湖天文台、日本国立天文台和中国科学院国家天文台怀柔太阳观测站等已成功观测了太阳光球局部区矢量磁场,而以美国威尔逊山天文台、基特峰国立太阳天文台为代表的地基太阳光学望远镜和空间 SOHO 卫星上的 MDI 望远镜等仪器又提供了大量的全日面纵向磁场观测资料,为发掘太阳大尺度磁场的内在规律提供了重要契机,在研究太阳磁场的形成机制方面发挥了不可估量的作用。

2006 年,国家天文台怀柔太阳观测站全日面磁场望远镜的投入运行,又为人们提供了研究在太阳内部形成磁场的新途径和验证发电机理论的新依据<sup>[1-2]</sup>。这台仪器的纵向磁场测量精度约为  $\pm(5 \times 10^{-4})$  T,横向磁场测量精度约为  $\pm(150 \times 10^{-4})$  T<sup>[3]</sup>。全日面磁场的观测拓展了局部区观测的视场,同时也对双折射滤光器提出了更高的要求,即保证在整个日面上(而不是局部区)都是用同一波长观测磁场。对滤光器各项技术指标的误差分析,找出影响宽视场设计的问题所在,将为太阳磁场望远镜的进一步发展奠定坚实的基础。

目前,已有一些文献研究了双折射滤光器的离轴效应和性能优化<sup>[4-6]</sup>,取得了许多有价值的科研成果,但完整的误差分析还未见报道。本文应用文[7]中方法,编写了一套偏振光学计算软件,不仅追踪光线的传播轨迹,而且考虑光束之间的干涉现象,取消了为简化运算而采用的近似假设,研究了光线在双折射晶体中的传输过程,精确分析了多种误差项对透过带漂移、展宽、极大值和极小值等主要技术指标的影响,这对滤光器的研制具有重要意义。

## 2 全日面磁场望远镜的视场效应问题

怀柔太阳观测站全日面磁场望远镜的观测资料已经向国内外的太阳物理学家开放。本项工作完成了多普勒速度对工作谱线影响的数据矫正,圆偏振对线偏振交叉串扰的数据矫正和上述数据矫正方法对偏振测量带来的误差分析,但偏振信号 Stokes V 沿全日面呈现不均匀分布始终是困扰该项研究的难题。图 1 是透过带在偏离线心  $-0.006$  nm 和  $+0.006$  nm 处观测到的全日面 Stokes V,其中左上和右下区域比较亮,而右上和左下区域比较暗。研究发现,偏振信号是由真实信号和本底信号两部分组成,而本底信号是光强信号 Stokes I 串扰到偏振信号 Stokes V 中造成的<sup>[8]</sup>。图 2 是 Stokes V 沿图 1 中白线的分布,很明显真实信号被光强信号调制过。本文对引起这种现象的原因进行了分析。

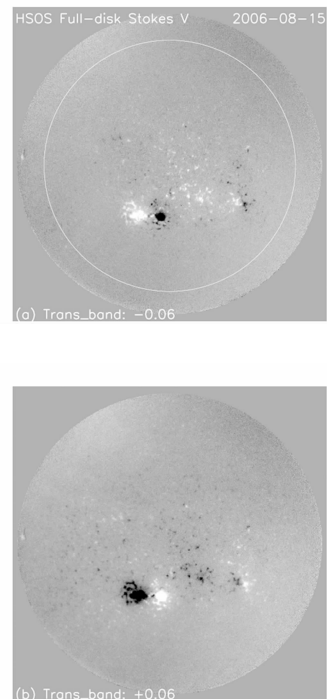


图 1 全日面 Stokes V

Fig. 1 Full-disk Stokes V map

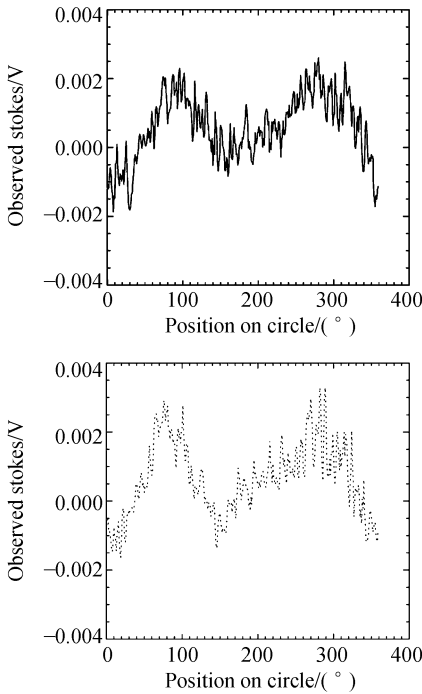


图 2 Stokes V 沿图 1 中白线的分布  
Fig. 2 Stokes V distribution along white circle on figure 1

### 3 误差影响

本文选用的样本为全日面磁场滤光器中的第三级,结构如图 3 所示。 $p_1$ 、 $p_2$  是平行偏振片,  $b_1$ 、 $b_2$  是厚度为 8.803 mm 的冰洲石 ( $n_o = 1.66282$ ,  $n_e = 1.48864$ ), 中间插入与晶体光轴成  $45^\circ$  的  $1/2$  波片组成了宽视场部分,  $b_2$  后面是一个光轴与偏振轴平行的  $1/4$  波片和一个可以  $360^\circ$  旋转的  $1/2$  波片, 调整  $1/2$  波片的旋转角度, 能够补偿因温度变化和误差项带来的透过带漂移<sup>[9]</sup>。图 4 是光线垂直入射、偏振元件没有误差

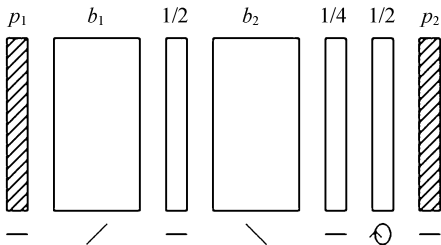


图 3 宽视场可调谐型滤光器

Fig. 3 Schematic of filter with wide field and compensator

时的透过带,这时中心波长位于 532.419 nm, 对应的极大值  $I_{\max,0} = 1$ , 带宽为 0.0924 nm, 极小值  $I_{\min,0} = 0$ 。

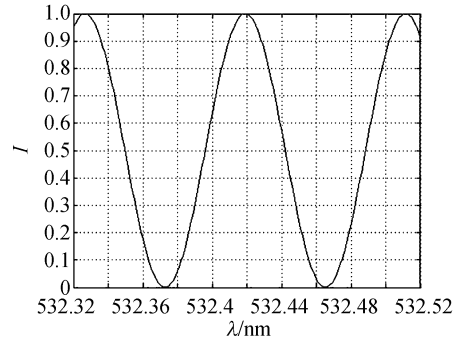


图 4 宽视场可调谐型滤光器的透过带

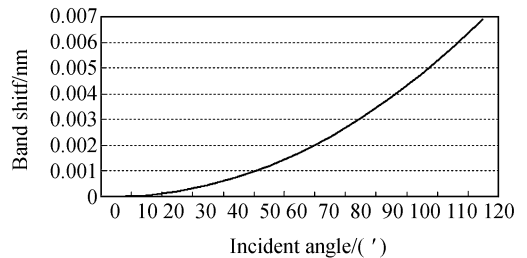
Fig. 4 Transmission band of filter with wide field and compensator without errors

在讨论晶体和波片的光轴误差时,定义光轴与晶面的夹角为倾角误差,光轴在晶面内的偏差为方位角误差。文中没有给出结果的说明该误差项的影响极小,可忽略不计。

#### 3.1 光线倾斜入射对透过带的影响

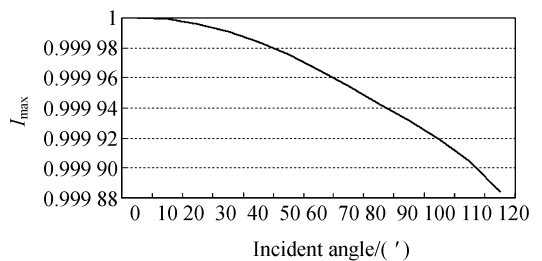
##### 3.1.1 入射角对透过带的影响

入射角对透过带的影响如图 5 所示,它引起



(a) 入射角与透过带漂移的关系曲线

(a) Relation between incident angle and band shift



(b) 入射角与极大值的关系曲线

(b) Relation between incident angle and maximum

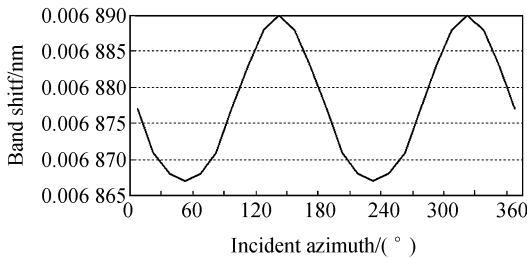
图 5 入射角对透过带的影响

Fig. 5 Effect of incident angle on transmission band

了透过带向红端的漂移和极大值减小。当入射角为  $2^\circ$  时,透过带相对于带宽漂移了  $7.454\%$ ;极大值相对于  $I_{\max,0}$  减小了  $0.012\%$ 。

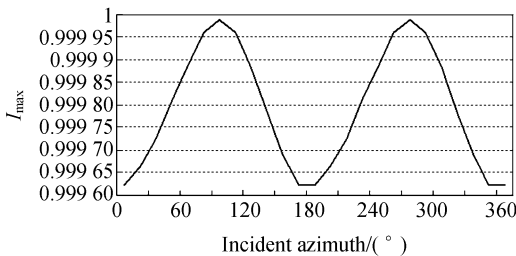
### 3.1.2 入射光方位角对透过带的影响

光线倾斜入射对透过带的影响不仅和入射角有关,还和入射光在晶面坐标系中的方位有关。图 6(a)是入射角为  $2^\circ$  时,入射光方位角与透过带漂移的关系曲线。当方位角为  $135^\circ$  时,透过带相对于中心位置漂移了  $0.014\%$ 。如果取消宽视场结构,当入射角为  $2^\circ$ ,方位角为  $135^\circ$  时,透过带相对于中心位置的漂移量为  $134.321\%$ 。由此可见,宽视场型滤光器可以有效减小但无法完全消除方位角对透过带漂移的影响,这是 Evans 离轴效应公式在做了近似后无法得到的。图 6(b)是入射光方位角与极大值的关系曲线,其分布形态明显与图 2 相似,这说明入射光方位角是造成全日面纵场分布不均匀的主要原因。



(a) 入射光方位角与透过带漂移的关系曲线

(a) Relation between incident azimuth and band shift



(b) 入射光方位角与极大值的关系曲线

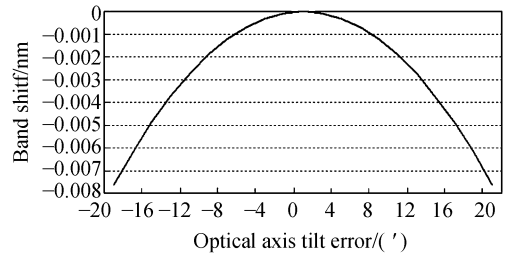
(b) Relation between incident azimuth and maximum

图 6 入射光方位角对透过带的影响  
Fig. 6 Effect of incident azimuth on transmission band

## 3.2 双折射晶体制造误差对透过带的影响

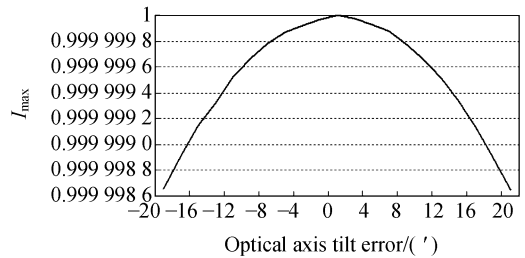
### 3.2.1 $b_1$ 光轴倾角误差对透过带的影响

$b_1$  光轴倾角误差对透过带的影响如图 7 所示,它引起了透过带向蓝端的漂移和极大值减小。当倾角误差为  $20'$  时,透过带漂移了  $-8.277\%$ ;极大值减小了  $1.349 \times 10^{-4}\%$ 。



(a)  $b_1$  光轴倾角误差与透过带漂移曲线的关系曲线

(a) Relation between optical axis tilt error of  $b_1$  and band shift



(b)  $b_1$  光轴倾角误差与极大值的关系曲线

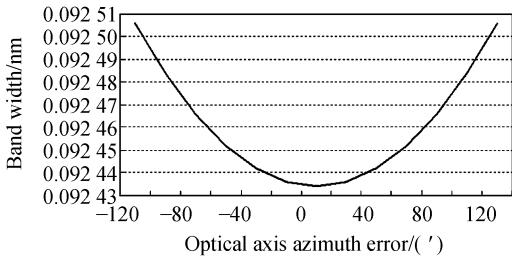
(b) Relation between optical axis tilt error  $b_1$  and maximum

图 7  $b_1$  光轴倾角误差对透过带的影响

Fig. 7 Effect of optical axis tilt error of  $b_1$  on transmission band

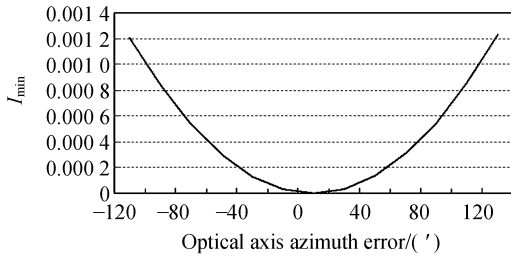
### 3.2.2 $b_1$ 光轴方位角误差对透过带的影响

$b_1$  光轴方位角误差对透过带的影响如图 8 所示,表现为透过带的展宽和极小值增大。当方位角误差为  $2^\circ$  时,带宽增大了  $0.078\%$ ;极小值为  $0.001\ 23$ 。



(a)  $b_1$  光轴方位角误差与透过带漂移的关系曲线

(a) Relation between optical axis azimuth error of  $b_1$  and band shift



(b)  $b_1$  光轴方位角误差与极大值的关系曲线

(b) Relation between optical axis azimuth error of  $b_1$  and maximum

图 8  $b_1$  光轴方位角误差对透过带的影响

Fig. 8 Effect of optical axis azimuth error of  $b_1$  on transmission band

### 3.2.3 $b_2$ 厚度误差对透过带的影响

图 9 是  $b_2$  厚度误差与透过带漂移的关系曲线,当厚度误差为  $1 \mu\text{m}$  时,透过带漂移了 32.717%。

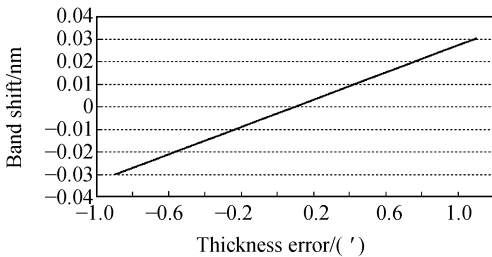


图 9  $b_2$  厚度误差与透过带漂移的关系曲线

Fig. 9 Relation between thickness error of  $b_2$  and band shift

## 3.3 宽视场 1/2 波片制造误差对透过带的影响

### 3.3.1 宽视场 1/2 波片光轴方位角误差对透过带的影响

图 10 是宽视场 1/2 波片光轴方位角误差与

极大值的关系曲线,它引起了极大值减小。当方位角误差为  $2^\circ$  时,极大值减小了 0.487%。

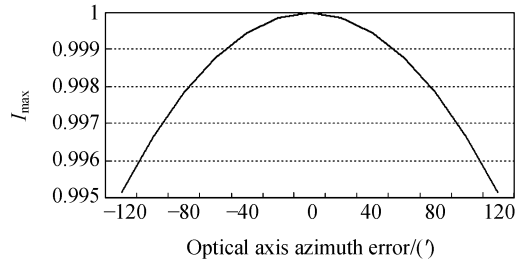


图 10 宽视场 1/2 波片光轴方位角误差与极大值的关系曲线

Fig. 10 Relation between optical axis azimuth error of half-wave plate in wide field and maximum

### 3.3.2 宽视场 1/2 波片延迟误差对透过带的影响

图 11 是宽视场 1/2 波片延迟误差与极小值的关系曲线,当延迟误差为  $5^\circ$  时,极小值为 0.001 89。

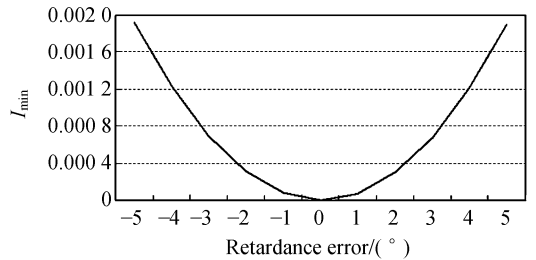
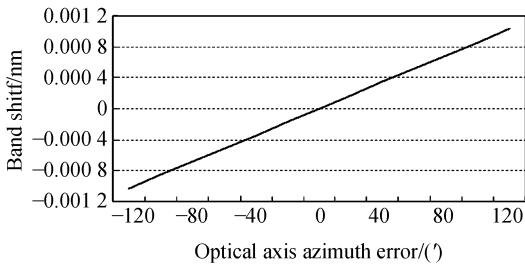


图 11 宽视场 1/2 波片延迟误差与极小值的关系曲线

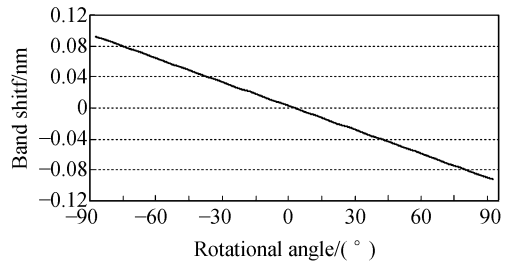
Fig. 11 Relation between retardance error of half-wave plate in wide field and minimum

## 3.4 1/4 波片制造误差对透过带的影响

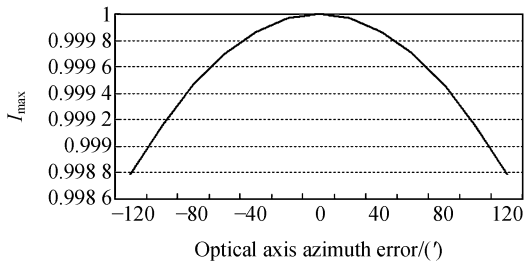
1/4 波片光轴方位角误差对透过带的影响如图 12 所示,它引起了透过带的线性漂移,但不管漂移方向如何,极大值都减小,而极小值都增大。当方位角误差为  $2^\circ$  时,透过带漂移了 1.114%;极大值减小了 0.121%;极小值为 0.001 22。



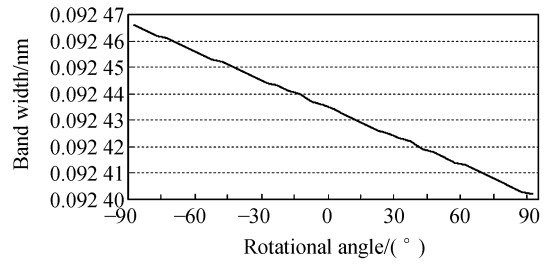
(a)1/4 波片光轴方位角误差与透过带漂移的关系曲线  
(a) Relation between optical axis azimuth error of quarter-wave plate and band shift



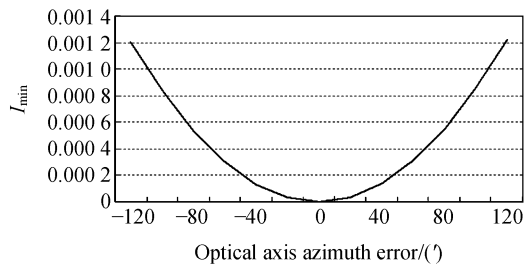
(a)旋转 1/2 波片转动角与透过带漂移的关系曲线  
(a) Relation between rotational angle of half-wave plate and band shift



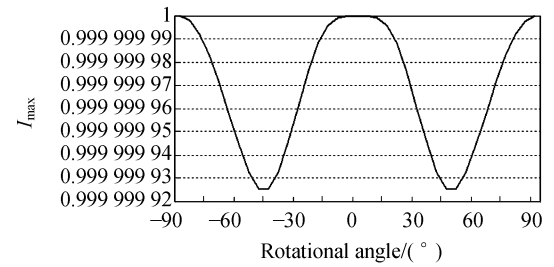
(b)1/4 波片光轴方位角误差与极大值的关系曲线  
(b) Relation between optical axis azimuth error of quarter-wave plate and maximum



(b) 旋转 1/2 波片转动角与透过带展宽的关系曲线  
(b) Relation between rotational angle of half-wave plate and band broadening



(c)1/4 波片光轴方位角误差与极小值的关系曲线  
(c) Relation between optical axis azimuth error of quarter-wave plate and minimum



(c)旋转 1/2 波片转动角与极大值的关系曲线  
(c) Relation between rotational angle of half-wave plate and maximum

图 12 1/4 波片光轴方位角误差对透过带的影响  
Fig. 12 Effect of optical axis azimuth error of quarter-wave plate on transmission band

图 13 旋转 1/2 波片转动角对透过带的影响  
Fig. 13 Effect of rotational angle of rotation half-wave plate on transmission band

### 3.5 旋转 1/2 波片转动角对透过带的影响

旋转 1/2 波片转动角对透过带的影响如图 13 所示,在转动过程中,透过带漂移的同时,带宽和极大值有微小变化。当 1/2 波片转过  $-90^\circ$  时,中心波长位于  $532.5115\text{ nm}$ ,带宽增大了  $0.035\%$ ;当 1/2 波片转过  $90^\circ$  时,中心波长位于  $532.3266\text{ nm}$ ,带宽减小了  $0.035\%$ 。

## 4 结 论

本文通过计算机编程,得到了误差项与透过带漂移、展宽、极大值和极小值等主要技术指标的关系曲线。在所有误差项中,入射角、晶体光轴倾角误差、晶体厚度误差和 1/4 波片光轴方位角误差影响透过带漂移,上述误差项是造成双折射滤光器多级串联后各晶体级不匹配的主要原因;只

有晶体光轴方位角误差影响透过带宽,当误差为 $2^\circ$ 时,透过带展宽了 $0.078\%$ ;宽视场 $1/2$ 波片光轴方位角误差对极大值的影响最明显,当误差为 $2^\circ$ 时,极大值减小了 $0.487\%$ ;晶体光轴方位角误差、宽视场 $1/2$ 波片延迟误差和 $1/4$ 波片光轴方位角误差对极小值都有不同程度的影响。透过带

的漂移可以通过旋转 $1/2$ 波片调节,但展宽和极值的变化将直接影响透过带的形状和增加杂散光,应该重点控制这方面的误差项,以提高滤光片研制质量。本项工作下一步将研究误差项之间的相互作用,为研制高性能滤光器以及制备工艺容差提供可靠的理论依据。

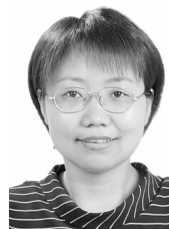
## 参考文献:

- [1] KLEERIN N, KUZANYAN K, MOSS D, *et al.*. Magnetic helicity evolution during the solar activity cycle: observations and dynamo theory[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003,409:1097-1105.
- [2] ZHANG H Q, SOKOLOFF D, ROGACHEVSKII I, *et al.*. The radial distribution of magnetic helicity in the solar convective zone: observations and dynamo theory[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006,365:276-286.
- [3] ZHANG H Q, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Solar magnetism and the activity telescope at HSOS [J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2007(7):281-288.
- [4] EVANS J W. The birefringent filter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949,39(3):229-242.
- [5] 汤学胜,毛伟军. 晶体定轴误差对宽视场双折射滤光器视场影响的分析[J]. *天文研究与技术*, 2008,5(2):206-212.  
TANG X SH, MAO W J. The analysis of effects of optical axis errors on the field of view in the wide-field birefringent filter[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008,5(2):206-212. (in Chinese)
- [6] 王锋,胡晓阳,叶一东. 单轴晶体的光程差和 Lyot 型滤光器的视场[J]. *强激光与粒子束*, 2007,19(12):2001-2006.  
WANG F, HU X Y, YE Y D. Optical path difference of uniaxial crystal and field of view of Lyot filter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007,19(12):2001-2006. (in Chinese)
- [7] 玄伟佳,王东光,邓元勇,等. 光线追迹法在双折射滤光器误差分析中的应用[J]. *光学精密工程*, 2008,16(5):771-777.  
XUAN W J, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Application of ray tracing method to birefringent filter error analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):771-777. (in Chinese)
- [8] SU J T, ZHANG H Q. The effects of polarization crosstalk and solar rotation on measuring full-disk solar photospheric vector magnetic fields[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007,666:559-575.
- [9] 宋国峰. 红外双折射滤光器和波分器的设计研究[D]. 北京:中国科学院,2002.  
SONG G F. *Research on near-infrared birefringent filter and wavelength division multiplexing* [D]. Beijing:Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

## 作者简介:



玄伟佳(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,2004年于长春理工大学获得学士学位,主要从事偏振光学的研究。  
E-mail: xuanwj@bao. ac. cn



王东光(1966—),女,北京人,博士,高级工程师,于北京理工大学获得学士学位,国家天文台获得博士学位,主要从事太阳磁场测量仪器与偏振元件的研究。  
E-mail: wdg@bao. ac. cn



邓元勇(1965—),男,四川资阳人,博士,总工程师,于北京大学获得学士学位,国家天文台获得硕士、博士学位,主要从事太阳物理和天文仪器的研究。E-mail: dyy@bao. ac. cn



张志勇(1972—),男,辽宁锦州人,博士,工程师,于国家天文台获得博士学位,主要从事天文光学仪器的研究。E-mail: polarimetry@163. com



苏江涛(1973—),男,吉林大安人,博士,副研究员,于吉林师范大学获得学士学位,北京师范大学获得硕士学位,国家天文台获得博士学位,主要从事太阳矢量磁场测量的研究。E-mail: sjt@bao. ac. cn



孙英姿(1979—),女,辽宁人,博士,工程师,于长春理工大学获得学士学位,国家天文台获得博士学位,主要从事天文光学仪器的研究。E-mail: syz@bao. ac. cn

## ● 下期预告

# 超磁致伸缩致动器的广义预测-多模 PID 控制

李欣欣<sup>1</sup>,王 文<sup>2</sup>,陈子辰<sup>2</sup>

(1. 广西民族大学 物理与电子工程学院,广西 南宁 530006;

2. 浙江大学 现代制造工程研究所,浙江 杭州 310027)

为了克服超磁致伸缩致动器的磁滞现象对精密驱动定位精度的影响,在进行磁滞补偿的前提下,研究自校正 PID 控制思想,建立了基于广义预测控制的广义预测-多模 PID 控制方法。介绍了广义预测控制的主要思想,并由此导出 PID 参数与被控对象待估参数的关系,实现了广义预测 PID 控制。针对起动阶段控制效果不平稳的问题,提出了多模 PID 控制模式转换条件;最后,根据 PID 参数变化情况,建立致动器的多模 PID 控制方法,实现了广义预测 PID 与常规 PID 的在线控制模式转换与控制。实验结果表明:采用广义预测-多模 PID 控制器,虽然单次平均运算时间比广义最小方差-模糊 PID 控制器长 7 ms,但跟踪误差均方差减少 0.066  $\mu\text{m}$ ;同时改善了起动平稳性。广义预测-多模 PID 控制能有效消除由于扰动带来的影响,提高跟踪精度,并改善起动平稳性,在对实时性、控制精度要求较高的精密定位领域,有良好的应用价值。