

文章编号: 0253-2239(2006)05-0685-4

红外波片相位延迟的测试方法及精度分析*

孙英姿 王东光 张洪起 张志勇 邓元勇

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 通过全面分析光强随波片方位角的变化从中优化出可适用于红外波段的确定波片延迟的方法。此方法只需读取输出光强的最大值和最小值,通过简单运算得到所测波片的相位延迟。以此为理论基础,建立了一套红外波片检测系统,此系统使用元件的数量较少,操作简单,重复性好,易于得到较高的测试精度。此外,从系统光源、光学元件到接收器件等组成部分分析了整个系统中各种误差源对测试精度的影响。结果表明,该系统的检测精度与波片延迟有关,并给出其关系曲线,由该曲线可知,当所测波片的延迟大于 40° 时,该系统的仪器相对误差在 1% 之内,对于常用 $1/4$ 和 $1/2$ 波片,仪器相对误差分别为 0.2% 和 0.01%。该检测系统的测试精度在可见和近红外波段基本保持不变。

关键词: 应用光学; 红外波片; 相位延迟; 精度分析

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Method and Precision Analysis for Measuring Retardation of Infrared Waveplate

Sun Yingzi Wang Dongguang Zhang Hongqi Zhang Zhiyong Deng Yuanyong

(National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract: A new method for measuring the retardation of waveplates in the infrared spectral region is derived by analyzing the light intensity variation with the azimuth angle. The phase retardations of waveplate are determined through reading out the maximum and minimum of light intensities and simple calculation. Based on this method, an instrument is set up to measure the retardations of the waveplates in the infrared range. With less devices, easy operation and sound repetition, measurement results with high precision are obtained. The effects on the measurement precision of the different sources, such as light source, polarizer and detector, etc., have been analyzed. It is found that the instrumental accuracy is related to the waveplate retardation, and their relation is plotted. From the plot it is found that the measurement precision is within 1% when the retardations of waveplates are more than 40° . The relative errors are measured to be 0.2% and 0.01% for the conventional quarter and half waveplates, respectively. The measurement precision of the system is almost constant in the visible and near-infrared range.

Key words: applied optics; infrared waveplate; phase retardation; precision analysis

1 引 言

红外波片是现代光通讯技术和太阳磁场观测领域不可缺少的偏振元件,其延迟误差直接影响到整个系统的性能。测量波片相位延迟的方法有很多,常用的有补偿法、光谱法、光强测量法等^[1~7]。补偿法一般采用索累补偿器、 $1/4$ 波片等偏振元件作补偿得到波片相位延迟量的方法。这种方法最大的缺点是需要有高质量的补偿器件才能实现波片延迟的

高精度测量;光谱法对于测量 $1/4$ 或 $1/2$ 波片是一种简捷实用的方法,但不适合对于任意相位延迟波片的精确测量;光强法是通过测试出射光强,计算得到波片延迟的方法。这种方法光路简单且有利于计算机对数据做后期处理。本文利用光强法,通过对偏振元件各种状态的分析计算,从中优化出最佳的测试方案,并选择稳定的近红外光源系统和高灵敏度的接收系统,建立了一套红外波片测试系统。

* 国家自然科学基金(10473016)、国家重点基础研究发展规划项目(TG2000078400, TG2000078401)和国家自然科学基金重点项目(10233050)资助课题。

作者简介: 孙英姿(1979~),女,满族,辽宁抚顺市人人,中国科学院国京天文台博士研究生,主要从事光学设计。

E-mail: syzsun2005@126.com

收稿日期: 2005-06-14; 收到修改稿日期: 2005-09-24

2 测试原理

测量系统的光学原理如图 1 所示,取起偏器 P_1 的主轴方向为 x 轴,入射光的传播方向为 z 轴,检偏

器 P_2 的主轴方向与起偏器 P_1 的主轴方向成 θ_2 ,待测波片与 x 轴的夹角为 θ ,由琼斯矩阵方法求得出射光的琼斯矢量 E 为

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = M_{P_2} M_J M_{P_1} \begin{bmatrix} E_0 \\ E_0 \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_2 \cos(\delta/2) + j \left[\cos^2 \theta_2 \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \right] \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \cos \frac{\delta}{2} + j \left(\frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta + \sin^2 \theta_2 \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \right) \end{bmatrix},$$

其中 δ 为波片延迟,则出射光强 I 为

$$I = E^+ E = \frac{1}{2} I_0 \left[\cos^2 \theta_2 + \sin 2(\theta_2 - \theta) \sin 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} \right], \quad (1)$$

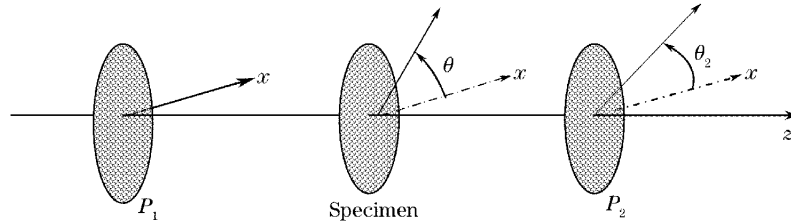


图 1 光强法测量波片相位延迟示意图

Fig. 1 Schematic for measuring waveplate retardance with intensity method

由(1)式可见,当 θ 和 θ_2 中的一个角度固定后,出射光强为随另一角度变化的正弦曲线。当 θ 为定值时,光强随 θ_2 变化的正弦曲线的周期为 180° ;当 θ_2 为定值时,光强随 θ 变化的正弦曲线的周期为 90° 。相比之下后者的测量周期较短,在某种程度上消除了光源光强随时间的长周期不稳定性;可以每间隔 45° 得到一组极值,在一个 2π 周期内可以均匀间隔取 4 组数据,取平均值,可以减小由于波片和光路不垂直带来的误差。根据以上分析采用两偏振片的夹角 θ_2 固定,被测波片以角速度 ω 在垂直于入射光线的平面内匀速转动的方法。

关于 θ_2 的取值分析如下:

由(1)式求导可知:当 $\theta = \theta_2/2$ 时,输出光强的最大值为

$$I_{\max} = \frac{1}{2} I_0 \left(\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \right), \quad (2)$$

当 $\theta = \theta_2/2 + \pi/4$ 时,输出光强的最小值为

$$I_{\min} = \frac{1}{2} I_0 \left(\cos^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \right), \quad (3)$$

由(2)式、(3)式解得

当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{2I_{\max}/I_0},$$

当 $\theta \neq 90^\circ$ 时

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} \tan^2 \theta_2}}, \quad (4)$$

(4) 式中 $I_0 = 2E_0^+ E_0$, 为系统入射光强度。由(4)式可以看出,波片延迟以 $\theta_2 = \pi/2$ 为周期变化,所以只需在一个周期内分析。当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时,需要测出入射光强度 I_0 ,但因为任何波片都存在吸收与表面反射,造成测量的入射光强永远存在误差。因此 $\theta_2 \neq 90^\circ$,取 $\theta_2 = 45^\circ$,则延迟为

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})}. \quad (5)$$

3 检测系统

根据测试原理搭建的检测系统如图 2 所示,将配有高精度稳压电源的溴钨灯作为系统入射光源,

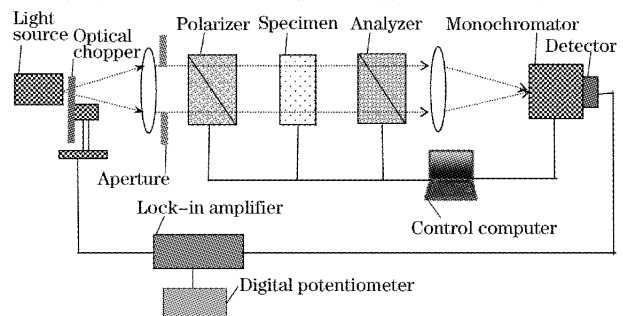


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

配以单色仪和硫化铅红外探测器,构成红外单色光源与红外接收系统。为提高接收系统灵敏度,在光路中加入斩波器,使光强成为交变信号,再利用锁相放大器、数字电压表读取光强值。格兰-汤普森棱镜作为起偏器与检偏器。

4 精度分析

本测试系统由光源系统、偏振光学元件、几何光学系统及信号接收处理系统组成,精度分析从这 4 个方面进行。

4.1 光源系统

4.1.1 光源波动带来的误差($\Delta\delta_1$)

设光源强度的相对波动值为 $\Delta I/I$,其相对误差为

$$\frac{\Delta\delta_1}{\delta} = \frac{2}{\delta} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2(\delta/2) - \Delta I/I}{1 - (\Delta I/I)\sin^2(\delta/2)}} - 1. \quad (6)$$

4.1.2 光源单色性即单色仪带宽 $\Delta\lambda$ 引起的误差($\Delta\delta_2$)

当存在一定带宽 $\Delta\lambda$ 时,波片的相位延迟相对误差为

$$\frac{\Delta\delta_2}{\delta} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \ln \frac{\lambda + \Delta\lambda/2}{\lambda - \Delta\lambda/2} - 1. \quad (7)$$

图 3 给出了该项误差变化与波长的关系,可以看出,当波长大于 200 nm 时,误差值基本保持不变,波长可以任意取值。

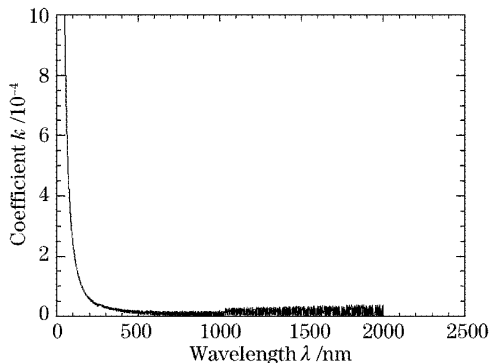


图 3 光源带宽引起的测量误差与波长的关系

Fig. 3 Relations of measurement error caused by the width of the light source and wavelength

4.2 偏振光学元件

4.2.1 偏振元件的角度误差

1) 两偏振器透光轴夹角不准确带来的误差($\Delta\delta_3$)。

在 P_1 、 P_2 夹角 45° 附近区域,其夹角误差对接收光强的最大值和最小值的影响相同,设误差角为

$\Delta\theta_2$,其相对误差为

$$\frac{\Delta\delta_3}{\delta} = \frac{2}{\delta} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2(\delta/2)}{1 - \Delta\theta_2 + \Delta\theta_2 \sin^2(\delta/2)}} - 1. \quad (8)$$

2) 待测波片旋转角度误差

因为是通过光强极值计算波片延迟,所以待测波片旋转角度误差对测量结果无影响。

4.2.2 偏振元件各自的光学缺陷

1) 起偏器 P_1 的消光比不够理想带来的误差 $\Delta\delta_4$

设起偏器 P_1 的偏振度为 a_p ,其带来的误差为

$$\frac{\Delta\delta_4}{\delta} = \frac{2}{\delta} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{\delta}{2}}{(a_p - 1)^2 - (a_p^2 - 2a_p)\sin^2 \frac{\delta}{2}}} - 1. \quad (9)$$

2) 检偏器 P_2 的消光比不够理想时

$$E = (1 + a_{p_2})E_0, \quad I = (1 + a_{p_2})^2 I_0,$$

代入(5)式中 $(1 + a_{p_2})$ 为定值被消去,因此检偏器 P_2 的消光比对测量结果无影响。

4.2.3 待测波片表面不完全垂直入射光路产生的误差($\Delta\delta_5$)

当入射角很小时,波片延迟近似可得^[8]

$$\delta_5 = \delta_0 \{1 + (\theta^2/2n_e n_o^2)[n_o - 3(n_o + n_e)\cos^2\phi]\},$$

其中 θ 为入射角, ϕ 为入射面的方位角, δ_0 为正向入射时的相位延迟。

$$\frac{\Delta\delta_5}{\delta} = \frac{\theta^2}{2n_e n_o^2} [n_o - 3(n_o + n_e)\cos^2\phi].$$

由此可见这项误差是随 ϕ 变化而变化,难以逐一计算。取其值为影响最大点,在本光路中,最大入射角为 $\theta=1^\circ$,以石英为例,其最大误差为

$$\Delta\delta_5/\delta = 0.006\%. \quad (10)$$

4.3 几何光学系统

4.3.1 准直系统造成的光束偏离带来的误差($\Delta\delta_6$)

准直系统造成的光束偏离误差类似于上面待测波片不完全垂直光路产生的误差,这里不再讨论,取相同值

$$\Delta\delta_6/\delta = 0.006\%. \quad (11)$$

4.3.2 斩波器,单色仪,滤光片,准直系统,会聚透镜的透过率带来的误差

由于相位延迟是由光强读数的比值得出,透过率在计算中被消掉,因此该项对结果无影响。

4.4 信号接收处理系统

信号接收处理系统由探测器,锁相放大器,数字电压表三部分组成。由(5)式可以看出相位延迟是由光强的比值计算得出,因此测量装置中各元件的

吸收以及探测器的接收效率对结果没有影响,只有输出漂移对结果有影响,表现在最终的光强读数波动上,这在上面已经讨论过。

5 综合误差计算

综合上述各种误差因素,若以均方差作为该方法测量精度的评价标准,则其对测量精度的影响为

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \frac{1}{\delta} \sqrt{\Delta\delta_1^2 + \Delta\delta_2^2 + \Delta\delta_3^2 + \Delta\delta_4^2 + \Delta\delta_5^2 + \Delta\delta_6^2}, \quad (12)$$

将以上各误差公式(6)~(11)式及其取值代入(12)式,就可以计算出系统测量精度。

从(12)式中可以看出,测量误差不仅与系统中各单项误差有关,而且与波片自身的延迟大小有关。我们首先取定系统中的各单项误差,通过图4给出测量误差与波片延迟的关系。在本实验中,格兰棱镜的消光比为 $a_p = 10^{-5}$,单色仪的最大带宽 $\Delta\lambda = 5.4 \text{ nm}$,光强波动相对值 $\Delta I/I = 0.2\%$,两偏振器夹角误差 $\Delta\theta_2 = 2.9 \times 10^{-4} \text{ rad}$,测试波长取为 1083 nm 。

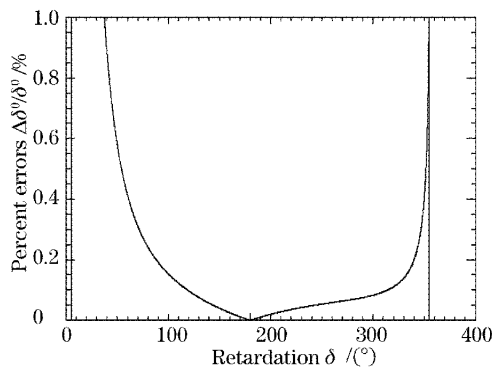


图4 测量误差与波片延迟的关系

Fig. 4 Relations of measurement error and waveplate retardations

从图4中可见,系统测量误差对不同延迟的波片不同,下面给出对于常用的1/4波片和1/2波片的测量精度:

当 $\delta = 90^\circ$ 时,检测精度为: $\Delta\delta/\delta = 0.2\%$ 。

当 $\delta = 180^\circ$ 时,检测精度为: $\Delta\delta/\delta = 0.01\%$ 。

表1 测量结果

Table 1 Measurement results

	I_{\max}/V	I_{\min}/V	$\delta/(^\circ)$
1	0.8982	0.3398	84.382
2	0.8977	0.3379	84.613
3	0.8968	0.3387	84.459
4	0.8952	0.3376	84.526
5	0.8901	0.3371	84.332
6	0.8895	0.3354	84.533
Average	0.8963	0.3378	84.474

下面是任取一片近红外波片,通过本套系统,在波长为 1083 nm 处,得到的延迟测量结果如表1所示。可见仪器的重复性很好。

6 结 论

本套波片延迟测试系统选择了最佳测试方案,优点在于:1)光路简单,不需要额外的补偿器件,减少了误差源;2)对被测波片的转角精度没有要求;3)测量系统中各个光学元件的吸收以及探测器的接收效率对测量精度的计算没有影响。实验结果表明:对1/4波片的相对测量误差为 0.2% ,对1/2波片的相对测量误差为 0.01% 。

参 考 文 献

- 1 Su Meikai, Song Lianke, Li Yi *et al.*. Compensation method for measuring wave plates[J]. *Applied Lasers*, 1990, **10**(5): 220~222 (in Chinese)
苏美开,宋连科,李 艺等. 波片测量中的补偿法[J]. *应用激光*, 1990, **10**(5): 220~222
- 2 Zhu Li, Li Xishan, Xu Wendong. Precision analysis of phase-modulation method for measuring stress birefringence of optical-disk substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9): 1258~1265 (in Chinese)
朱 莉,李锡善,徐文东. 用相位调制方法测量光盘盘基应力双折射的精度分析[J]. *光学学报*, 1995, **15**(9): 1258~1265
- 3 Yun Maojin, Li Guohua. Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave-plate[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(5): 328~330 (in Chinese)
云茂金,李国华. 晶体相位延迟测量的 $\lambda/4$ 波片法及理论研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(5): 328~330
- 4 Yu Chunri. Determination of the phase delay angle of a wave-plate with a quarter wave-plate[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 383~384 (in Chinese)
余春日. 利用 $\lambda/4$ 波片测定任意波片的相位延迟角[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 383~384
- 5 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1121~1123 (in Chinese)
王 伟,李国华,吴福全等. 测量波片延迟量和快慢方位的新方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1121~1123
- 6 Fan Shuhai, Song Lianke, Peng Handong *et al.*. Two-dimensional measurement for optical phase retardation[J]. *Laser J.*, 2003, **24**(1): 12~14 (in Chinese)
范树海,宋连科,彭捍东等. 光相位延迟的二维测量及系统设计[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(1): 12~14
- 7 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 247 (in Chinese)
金国藩,李景镇. *激光测量学*[M]. 北京: 科学出版社,1998. 247
- 8 Zhang Weiquang. Accurate formulas of phase retardation and polarization aberration for waveplates in oblique incident beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1121~1123 (in Chinese)
张为权. 斜入射时波片相位延迟和偏振像差的精确公式[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 1121~1123