

文章编号: 1001-3806(2005)03-0233-04

波片相位延迟测量的简捷方法研究

严 明, 高志山

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 通过引入波片通用琼斯矩阵公式, 推导出基于补偿法原理的波片相位延迟测量分析模型, 提出一种新的波片相位测量方法, 测量时无需知道波片的光轴方位, 可以测量多种波片。测量装置采用了步进电机带动被测波片转动, 使用光栅编码器测量检偏器的预置角度, 运用光功率计实现光强的采集。测量周期短, 是一种迅速方便快捷的方法。

关键词: 波片; 相位延迟; 光轴; 光栅编码器

中图分类号: O436 文献标识码: A

The simple method research for measuring the phase retardation of wave-plates

YAN Ming, GAO Zhishan

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract The measurement model of wave-plate's phase retardation based on the theory of compensate was introduced with the help of common Jones formula of wave-plate, a novel method was proposed to measure the phase retardation for many kinds of wave-plates whose axes were unknown. The stepping motor was used to drive the wave-plate and a grating encoder was used to measure rotating angle of the analyzer. A light intensity meter was used to gather the energy of laser. While the measured wave-plate was rotated around, the phase retardation was obtained from the maximum and minimum value. This method is rapid and convenient.

Key words wave-plate; phase retardation; optical axis; grating encoder

引 言

波片是基于晶体双折射性质的偏振器件, 也称相位延迟器, 它能使跟波片光轴成一定夹角线偏振光产生一个相对的相位延迟^[1], 改变光的偏振态。通常, 波片是由透明晶体制成的平行平面薄片, 其光轴与透光表面平行, 对某一特定波长的入射偏振光产生确定的相位变化, 因而被广泛应用于光纤通讯、光弹力学、光学精密测量等领域中。一般地, 波片的相位延迟和光轴精度是影响偏振光学、激光光学、光通讯等系统质量的重要因素之一。波片的相位延迟精度与波片的厚度、光学均匀性、应力双折射等诸多因素有关。

波片的相位延迟是通过波片出射光的偏振态表现出来的, 借助于起偏检偏器件, 对波片出射的偏振光偏振态进行分析, 能够准确地测定波片的相位延迟量。目前波片的测量方法有很多种, 如光学补偿法^[2~4]、分频激光探测法^[5]、电光补偿法^[6]、机械旋光调制法^[7]、

半阴法^[8]等。从测量原理看, 由简单到复杂, 由直接测量到补偿法测量, 由标准波片补偿到电光、磁光补偿。很多方法的共性, 都是要求待测波片光轴和起偏器光轴的夹角严格满足 45° 的条件, 这不适用于待测波片光轴未知的情况。作者提出一种新的波片相位延迟测量的方法, 该方法在测量波片时, 不需要知道波片的光轴方位, 即无“严格 45° ”的要求, 在预置检偏器透光轴的方位的条件下, 旋转被测波片, 通过极值法计算得到波片的相位延迟量。测量方便快捷, 周期短, 能使测量精度优于 1% 。

1 测量原理

图 1 是在待测波片光轴未知的情况下, 波片相位

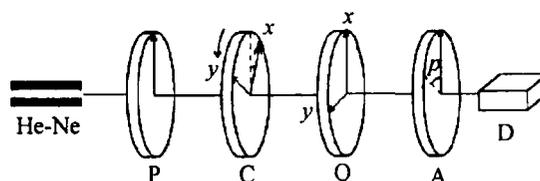


Fig 1 The diagram of measurement of wave-plate

延迟测量实验系统 PCQA 的原理图, 这里 P 为起偏器, C 为待测波片, Q 表示标准补偿 $1/4$ 波片, A 表示检偏器。规定标准波片 Q 的快慢轴为测量系统坐标系, 即

作者简介: 严 明 (1979-), 男, 硕士, 主要从事光电检测技术的研究。

E-mail: yam918@sina.com

收稿日期: 2003-12-08 收到修改稿日期: 2004-06-23

波片的快轴为 x 轴,慢轴为 y 轴。一束单色光入射(波长为 632.8nm),经起偏器 P 起偏出来的线偏振光,经待测波片 C ,标准波片 Q 后,到达检偏器 A ,检偏器 A 出来的光由光功率计 D 接收。

设 θ 为待测波片快轴与 x 轴的夹角, δ 为波片的相位延迟角,波片的通用琼斯矩阵^[9]如下:

$$G_C = \begin{bmatrix} \cos\frac{\delta}{2} - i\cos 2\theta\sin\frac{\delta}{2} & -i\sin 2\theta\sin\frac{\delta}{2} \\ -i\sin 2\theta\sin\frac{\delta}{2} & \cos\frac{\delta}{2} + i\cos 2\theta\sin\frac{\delta}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

可见当 $\theta = \pm 45^\circ$ 时,(1)式化简结果与文献[1]中的结果一致。图 1中,设入射光强为 I_0 ,起偏器的透光轴与 x 轴夹角为 0° ,检偏器透光轴和 x 轴的夹角为 ρ 则图 1中各光学器件的琼斯矩阵如下:

$$\begin{cases} G_P = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ G_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \\ G_A = \begin{bmatrix} \cos^2\rho & \frac{1}{2}\sin 2\rho \\ \frac{1}{2}\sin 2\rho & \sin^2\rho \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

如令(1)式中 $\cos(\delta/2) = \alpha, \cos 2\theta\sin(\delta/2) = \beta, \sin 2\theta\sin(\delta/2) = \gamma$ 则光功率计处光的琼斯矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = G_A G_Q G_C G_P = \begin{bmatrix} \cos^2\rho & \frac{1}{2}\sin 2\rho \\ \frac{1}{2}\sin 2\rho & \sin^2\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha - \beta & -i\gamma \\ -i\gamma & \alpha + i\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\rho\alpha + \frac{1}{2}\sin 2\rho\gamma - i\cos^2\rho\beta \\ \frac{1}{2}\sin 2\rho\alpha + \sin^2\rho\gamma - i\frac{1}{2}\sin 2\rho\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

则光功率计上的辐照度为:

$$I = |A + B|^2 = \begin{bmatrix} A^* & B^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = I_0 \left[\sin^2\rho\gamma^2 + \cos^2\rho(\alpha^2 + \beta^2) + \alpha\gamma\sin 2\rho \right] = I_0 \left[\sin^2\rho\sin^2 2\theta\sin^2\frac{\delta}{2} + \cos^2\rho\left(\cos^2\frac{\delta}{2} + \cos^2 2\theta\sin^2\frac{\delta}{2}\right) + \frac{1}{2}\sin 2\theta\sin 2\rho\sin\delta \right] \quad (4)$$

通过引入波片的通用琼斯矩阵公式,根据此测量原理,推导得出的(4)式是基于补偿法测量原理的波片相位通用测量模型,表示了光功率计上的光强与待测波片相位延迟量及其快轴、检偏器透光轴等之间的变化关系,以往的测量公式都是在被测波片光轴定位于 45° 时计算得到的,可以看作是(4)式的特例,因此对于

(4)式测量模型的推导,有利于分析波片在光轴未知状态下的测量原理,具有通用性。

根据(4)式,可以得到以下几种情况:

$$\rho = 0^\circ, I_1 = I_0 \left[\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) + \cos^2 2\theta\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \right] \quad (5)$$

$$\rho = 45^\circ, I_2 = \frac{I_0}{2}(1 + \sin 2\theta\sin\delta) \quad (6)$$

$$\rho = 90^\circ, I_3 = I_0\sin^2 2\theta\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (7)$$

$$\rho = 135^\circ, I_4 = \frac{I_0}{2}(1 - \sin 2\theta\sin\delta) \quad (8)$$

对(5)式~(8)式进行分析,如果检偏器的透光轴预置在不同角度时,即通过预先调整检偏器透光轴的方位,可以得到在不同方位情况下,(4)式对应的波片相位测量公式。这些公式中,被测波片快轴与 x 轴的夹角 θ 是未知量,可以看出,当 θ 在 0 到 2π 变化时,由(5)式得到:

$$I_{\max 1} = I_0, I_{\min 1} = I_0\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (9)$$

同理,对于(6)式和(8)式有:

$$\begin{cases} I_{\max 2} = I_{\min 4} = \left(\frac{I_0}{2}\right)(1 + \sin\delta) \\ I_{\min 2} = I_{\max 4} = \left(\frac{I_0}{2}\right)(1 - \sin\delta) \end{cases} \quad (10)$$

对于(7)式有:

$$\begin{cases} I_{\max 3} = I_0\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \\ I_{\min 3} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

从上面的分析可以看出,对波片相位测量的方法有很多,这也进一步体现了(4)式波片相位测量模型的通用分析性,然而通过分析发现,针对于每一种波片,并不是所有的测量公式都适用的,有的式子测量时误差较大,因此,有必要有针对性的对每种波片测量进行具体分析,下面将对 $1/4$ 波片和 $1/2$ 波片进行测量公式分析。

1.1 1/4波片测量方法分析

由于 $1/4$ 波片的相位延迟值为 90° ,因此, $\sin\delta = 1$ 若用(10)式计算,则 $I_{\min 2} \ll I_{\max 2}$,测量 $I_{\min 2}$ 时受暗噪声影响较大,用 $|\delta| = \sin^{-1}\left(\frac{I_{\max 2} - I_{\min 2}}{I_{\max 2} + I_{\min 2}}\right)$ 计算相对误差较大;若用(11)式计算,还需要测量出光强值 I_0 ,增加测量的复杂度。为了快速测量和保证精度,选用(9)式有:

$$\delta_{1/4} = 2\cos^{-1}\sqrt{\frac{I_{\min 1}}{I_{\max 1}}} \quad (12)$$

$$\Delta\delta_{1/4} = 90^\circ - 2\cos^{-1}\sqrt{\frac{I_{\min 1}}{I_{\max 1}}} \quad (13)$$

下标 $1/4$ 表示适用于 $1/4$ 波片。测量时,只要预置检偏器透光轴与 x 轴夹角为 0° ,无需知道待测 $1/4$ 波片的快慢轴具体方位,放入待测波片并旋转,测出光功率

计接收的极值 $I_{m \max 1}$ 和 $I_{m \min 1}$, 经 (13) 式能够精确得到 1/4 波片的相位延迟值及其误差量。并且如果 $\frac{I_{m \min 1}}{I_{m \max 1}} < \frac{1}{2}$ 时, $\delta_{1/4} > 90^\circ$, 反之, 则 $\delta_{1/4} < 90^\circ$ 。

1.2 1/2 波片测量方法分析

同理, 1/2 波片的相位延迟值是 180° , $\cos \frac{\delta}{2} = 0$ 。为了快速测量和保证精度, 选用 (10) 式有:

$$\delta_{1/2} = \sin^{-1} \left[\frac{I_{m \max 2} - I_{m \min 2}}{I_{m \max 2} + I_{m \min 2}} \right] \quad (14)$$

$$\Delta \delta_{1/2} = 180^\circ - \sin^{-1} \left[\frac{I_{m \max 2} - I_{m \min 2}}{I_{m \max 2} + I_{m \min 2}} \right] \quad (15)$$

测量时, 预置检偏器透光轴与 x 轴夹角为 45° 或 135° , 在待测 1/2 波片的快慢轴方位未知情况下, 放入待测波片并旋转, 测出光功率计接收到的极值 $I_{m \max}$ 和 $I_{m \min}$, 经 (15) 式可计算得到 1/2 波片的相位延迟值和误差量。 $\Delta \delta_{1/2}$ 的正负可以通过在非极值点的状态下, 一个方向转动检偏器, 根据光功率计值的增大和减小来判断。

2 误差分析

实验中影响测量结果的误差源有以下两个方面。

2.1 系统误差

2.1.1 起检偏器的消光精度 产生偏振光的偏振器种类很多, 有偏振分光镜、偏振棱镜、二向色性偏振器 (人造偏振片) 等。偏振器件的消光比不理想时, 在最暗点, 接受到的光强不为 0 光电探测器的直流噪声对测量影响较大。实验采用的是人造偏振片, 使用光功率计测得消光比为 10^{-3} , 在消光点时, 光功率计读数不为 0 其值为 $0.80 \mu\text{W}$, 应在测量结果中剔除。

2.1.2 标准补偿波片的相位误差 测量中, 使用了 1/4 标准补偿波片, 如该波片的相位延迟存在偏差 ξ 则 (2) 式中标准 1/4 波片的琼斯矢量将变为: $G_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(90+\xi)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & ie^\xi \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i\cos\xi \end{bmatrix}$, 经计算后,

则 (4) 式变成 $I = I_0 \{ \sin^2 \rho \sin^2 2\theta \sin^2 (\frac{\delta}{2}) \cos^2 \xi + \cos^2 \rho \times [\cos^2 (\frac{\delta}{2}) + \cos^2 2\theta \sin^2 (\frac{\delta}{2})] + \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin 2\rho \sin \delta \cos \xi \}$,

若对 1/4 波片进行测量时, $\rho = 0^\circ$, 仍然得到 (5) 式, 由此可知偏差 ξ 对 1/4 波片测量无影响; 若对 1/2 波片测量时, $\rho = 45^\circ$, 则 (6) 式为: $I_2 = \frac{I_0}{2} [1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2 (\frac{\delta}{2}) \sin^2 \xi + \sin 2\theta \sin \delta \cos \xi]$ 。实验中使用的是国产石英零级波片, 零级波片对波长、温度和入射角不太敏

感, 光程差小于 $\lambda/300$ 相位延迟精度 $\xi < 1.2^\circ$, 则对 1/2 波片产生的测量误差经计算很小, 为 10^{-4} , 可以忽略不计。

2.2 测量误差分析

对于 1/4 波片测量, 若对 (12) 式取微分, $\sin \frac{\delta}{2} \times$

$$|\Delta \delta| = 2 \left[\left| \frac{I_{m \min 1}}{I_{m \max 1}^2} \right| \Delta I_{m \max 1} + \frac{1}{I_{m \max 1}} \Delta I_{m \min 1} \right], \text{ 也可以写成}$$

$$\delta \sin \frac{\delta}{2} \frac{|\Delta \delta|}{\delta} = 2 \frac{I_{m \min 1}}{I_{m \max 1}} \left[\frac{\Delta I_{m \max 1}}{I_{m \max 1}} + \frac{\Delta I_{m \min 1}}{I_{m \min 1}} \right], \text{ 因为 } \sin \frac{\delta}{2} \approx$$

0.707, 那么当 $\frac{I_{m \min 1}}{I_{m \max 1}} \approx \frac{1}{2}$, $\frac{\Delta I_{m \max 1}}{I_{m \max 1}} = \frac{\Delta I_{m \min 1}}{I_{m \min 1}} = \frac{\Delta I}{I} \ll 1\%$ 时, 有 $\frac{\Delta \delta}{\delta} = \frac{2}{90 \times 0.707} \frac{\Delta I}{I} \ll 1\%$ 。

对于 1/2 波片测量, 若对 (14) 式微分, 有 $\delta \cos \delta \frac{\Delta \delta}{\delta} =$

$$\frac{2I_{m \max 2} I_{m \min 2}}{(I_{m \max 2} + I_{m \min 2})^2} \left[\frac{\Delta I_{m \max 2}}{I_{m \max 2}} - \frac{\Delta I_{m \min 2}}{I_{m \min 2}} \right], \text{ 因为 } \cos \delta \approx -1,$$

$$\frac{2I_{m \max 2} I_{m \min 2}}{(I_{m \max 2} + I_{m \min 2})^2} < \frac{1}{2}, \text{ 同样当 } \frac{\Delta I_{m \max 2}}{I_{m \max 2}} = \frac{\Delta I_{m \min 2}}{I_{m \min 2}} = \frac{\Delta I}{I} \ll 1\%,$$

有 $\frac{\Delta \delta}{\delta} \ll 1\%$ 。

因此, 综合系统误差和测量误差, 可知波片相位延迟的测量相对误差一定远低于 1%。

3 实验结果与分析

实验装置原理如图 1 所示, 实验中分别测量了 1/4 波片、1/2 波片的相位延迟误差量。测量时, 采用步进电机带动被测波片旋转。角度值的定位测量采用了圆光栅编码器, 并根据编码器输出信号的特点, 通过倍频细分处理, 设计可逆计数电路, 能够精确的测量出检偏器的转角, 测角分辨精度可达 $1.5'$, 角度数值还可通过单片机数显电路显示, 也可通过串口输入计算机供程序显示与计算。

Table 1 The measured results for a quarter wave-plate

measure number	$I_{m \max} / \mu\text{W}$	$I_{m \min} / \mu\text{W}$	$\delta_{1/4} / (^\circ)$	$\Delta \delta_{1/4} / (^\circ)$
1	350	182	87.71	2.29
2	350	181	88.04	1.96
3	351	183	87.55	2.45
4	350	182	87.71	2.29
5	349	181	87.87	2.13
6	351	182	87.88	2.12
7	350	182	87.71	2.29
8	350	182	87.71	2.29
average	350.13	181.88	87.78	2.23

Table 2 The measured results for a half wave plate

measure number	$I_{max}/\mu W$	$I_{min}/\mu W$	$\delta_{1/2}/(^{\circ})$	$\Delta\delta_{1/2}/(^{\circ})$
1	198	171	175.80	4.20
2	197	170	175.78	4.22
3	198	170	175.64	4.36
4	198	171	175.80	4.20
5	198	171	175.80	4.20
6	199	172	175.83	4.17
7	198	171	175.80	4.20
8	198	172	175.97	4.03
average	198	171	175.80	4.20

表 1 和表 2 中分别给出了 1/4 波片和 1/2 波片连续 8 次的测量结果。表 1、表 2 中第 2 列第 3 列实验数据已经扣除了直流噪声的影响, 第 4 列是待测波片的相位延迟的测量结果, 第 5 列是相位延迟测量值与标称值之间的误差量。实验中, 选择功率误差很小的稳频激光管, 将激光管预热 30min 让激光器输出光强趋于稳定。图 2 和图 3 分别是表 1 和 2 中相位延迟误差量在其平均值附近的散布, 其纵轴表示相位延迟测量值, 单位为角度, 横轴表示测量次数。

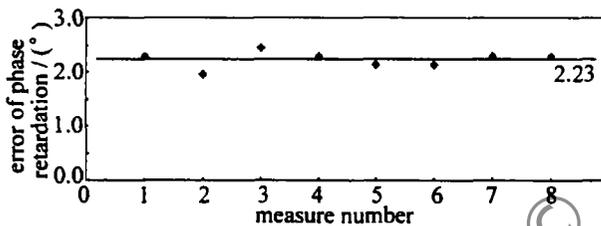


Fig. 2 The distribution of the tested phase retardation for a quarter wave plate

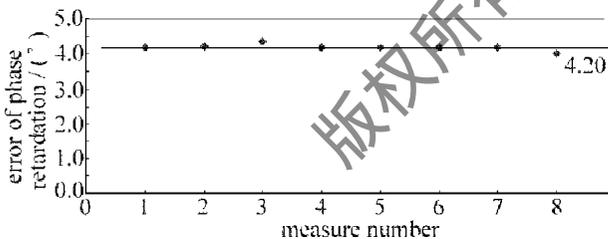


Fig. 3 The distribution of the tested phase retardation for a half wave plate

由表 1、表 2 及图 2、图 3 可以看出, 1/4 波片和 1/2 波片被测件的相位延迟误差测量均值分别为 2.23° 和 4.20°。经计算, 测量值的均方根偏差分别为 0.12 和 0.05, 最大相对误差分别为 0.31% 和 0.10%。测量时, 操作方便, 对待测波片的光轴方位无精确要求, 放上被测波片即可进行。

4 结 论

所介绍的波片相位测量方法不同于过去的测量方法, 测量中无需精确调整待测波片光轴方位, 根据具体的被测波片来预置检偏器透光轴的位置, 测量时, 只需放入被测波片, 通过步进电机带动其旋转, 得出光强的极值就可以计算出相位延迟量。测量简单方便、结果准确可靠, 精度可达到 1% 以下, 是一种有效的波片相位延迟测量方法。如需测量不同波长的波片, 可采用白光光源和分光计得到所需要的波长进行测量, 并可以通过光电接收处理电路和计算机测量程序的结合来加快测量速度。

参 考 文 献

- [1] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 322~370.
- [2] SHYU L, CHEN C, SU D. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. Appl Opt 1993, 32(22): 4228~4230.
- [3] OAKBERG T C. Measurement of wave plate retardation using a photoelastic modulator [J]. Proc SPIE, 1997, 3121: 19~22.
- [4] SANKARASUBRAMANIAN K, VENKATAKRISHNAN P. A CCD-based polarization interferometric technique for testing wave plates [J]. Opt & Laser Technol 1998, 30: 15~21.
- [5] ZHANG Y, ZHANG Sh L. Method for the measurement of retardation of wave plates based on laser frequency splitting technology [J]. Opt Engng 2001, 40(6): 1071~1075.
- [6] 戴高良, 殷存永. 高复现性波片测量方法和实验 [J]. 计量学报, 1998, 19(2): 136~141.
- [7] 徐文东, 李锡善. 波片相位延迟量精密测量新方法 [J]. 光学学报, 1994, 14(10): 1096~1101.
- [8] 薛庆文, 李国华. 半阴法测量 $\lambda/4$ 波片的相位延迟 [J]. 光电子·激光, 1998, 9(2): 150~151.
- [9] 新谷隆一. 偏振光 [M]. 上海: 原子能出版社, 1994. 10~60.