

激光与光电子学进展

基于涡旋编码技术的波片相位测试方法

黄泽钿, 李润坤, 王乐, 李旻晖*

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 在波片相位测试中,引入 $0\sim 2\pi$ 涡旋相位板,通过构建波片相位延迟量和出射光的中空椭圆光斑方位角之间的函数关系,对相位延迟量进行仿真计算,实现对波片测试方法的论证分析。在理论上将波片相位延迟量的测量范围扩大到了 270° ,理论测量误差不超过 $\pm 0.71\%$ 。

关键词 仪器,测量与计量;波片;相位延迟量测量;涡旋相位编码;方位角

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2112001

Wave Plate Phase Measurement Method Based on Vortex Encoding Technology

Huang Zetian, Li Runkun, Wang Le, Li Yanghui*

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract The $0\sim 2\pi$ vortex phase plate is introduced to measure the phase retardance of the wave plate. By constructing a functional relationship between the phase delay of the wave plate and the azimuth angle of the hollow elliptical spot of the emitted light, the phase delay is simulated and calculated. Furthermore, the demonstration and analysis of the wave plate test method are realized. Theoretically, the measurement range of the phase retardance of the wave plate is expanded to 270° , and the theoretical measurement error does not exceed $\pm 0.71\%$.

Key words instrumentation, measurement and metrology; wave plate; phase delay measurement; vortex phase encoding; azimuth angle

1 引言

波片是偏振光学中非常重要的器件,相位延迟量作为波片的关键参数,其测量准确与否会影响到光学系统的性能^[1]。而衡量相位延迟测量的关键指标有测量精度、测量范围等,传统相位延迟量的测量是基于消光位置判断,主要有弹光调制法、旋转消光法、干涉法等^[2-7];新型测量方法有椭偏测量法、激光频率分裂法、激光回馈法、双光束偏振法等^[8-13]。其测量关键指标主要有最大测量范围、测量误差等。除了这些关键指标外,测量方法的结构简易程度对评价其方法优劣也有很大影响,新型方法中的激光频率分裂法和激光回馈法虽然测量误差小,但结构复杂难以操作;弹光调制法、旋转消光法、干涉法、双光束偏振法的结构也相对复杂;椭偏测量法则结构简单易操作。国外对旋转消

光法和弹光调制法等基于消光位置判断的方法研究起步早而且技术发展迅速^[14-15],但是国内的弹光调制法测量标准偏差不超过 1.5% ,而且在新型测量方法领域国内研究比国外更加深入。

本文提出了一种基于涡旋编码技术的波片相位测试方法,利用 $0\sim 2\pi$ 涡旋相位板形成中空的椭圆光斑,通过标定椭圆光斑的方位角 ψ ,实现相位延迟量 η 的测量^[16]。与椭偏测量法、弹光调制法和干涉法相比,该方法将测量范围扩大到了 270° ;与旋转消光法相比,测量误差小且测量范围大;与激光回馈法、激光频率分裂法和双光束偏振法相比,测量系统简单易操作。

2 基本原理

2.1 测量原理

该方法的测量原理如图 1 所示, L 为线偏振器,

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-10-11; 录用日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(62075203, 51832005, 51702339)、浙江省杰出青年基金(LR19F050001)、浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2021R409055)

通信作者: *lyh@cjl.u.edu.cn

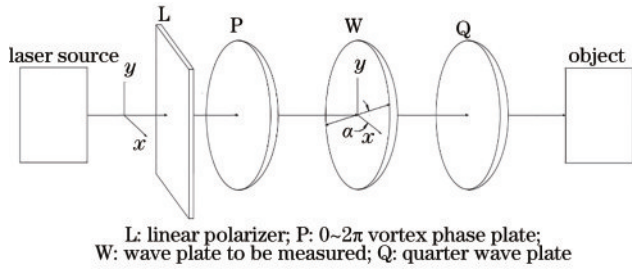


图 1 测量原理光路图

Fig. 1 Optical path diagram of measurement principle

P 为 0~2π 涡旋相位板, W 为待测波片, Q 为 1/4 波片。以待测波片 W 放置时的快轴方向为 x 轴方向、慢轴方向为 y 轴方向, 建立参考坐标系; 其中 1/4 波片 Q 的快轴与 x 轴的夹角为 $-\pi/4$ 。

入射光场为 $|E|$ 且线偏振器的偏振方向与 x 轴的夹角为 α , 从线偏振器出射的光束的光场为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = |E| \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

光束经过 0~2π 涡旋相位板 P, 被其调制后, 具有涡旋相位波前。

入射线偏振光经过待测波片 W 和 1/4 波片 Q 后的琼斯矢量表示为

$$\frac{\sqrt{2}}{2} |E| \begin{bmatrix} 1 - \sin 2\alpha \sin \eta \\ \cos(\alpha + \eta/2) - i \sin(\alpha - \eta/2) \\ 1 \\ \frac{\sin 2\alpha \cos \eta}{1 - \sin 2\alpha \sin \eta} + i \frac{\cos 2\alpha}{1 - \sin 2\alpha \sin \eta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

根据式(2)计算出从 1/4 波片 Q 出射的偏振光的相位差 δ 为

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos 2\alpha}{\sin 2\alpha \cos \eta} \right). \quad (3)$$

椭圆形中空光斑的长轴与 x 轴的夹角是方位角 ψ , 可以定义为

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{ox}E_{oy}\cos\delta}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2}, \quad (4)$$

式中, E_{ox} 、 E_{oy} 分别为椭圆形中空光斑 x 轴、 y 轴方向的振幅大小。

根据式(2)~(4), 计算出待测波片 W 的相位延迟量 η 和方位角 ψ 的关系式为

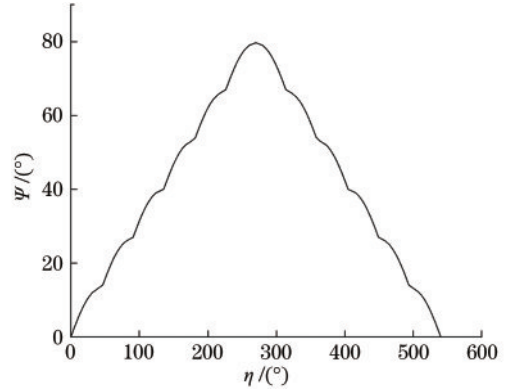
$$\tan 2\psi = -\sin 2\alpha \sin \eta \left(\sqrt{\sin^2 2\alpha \cos^2 \eta + \cos^2 2\alpha} \right) \cos \delta, \quad (5)$$

由于 ψ 和 α 变化时均会导致 η 变化。对式(3)求导, 计算得到导数处于极值时对应 α 为 0° 和 45° , 此时灵敏度最大。但是 $\alpha = 0^\circ$ 时输出光为圆偏振光, 无法通过长短轴标定方位角, 所以最佳夹角 $\alpha = 45^\circ$ 。 $\alpha = 45^\circ$ 时公式转化得到相位延迟量 η 的表达式为

$$\eta = 0.5 \sin^{-1} \left[2 \tan \left(2\psi - k \tan^{-1} \frac{1}{2} \right) \right] + 45k, \quad (6)$$

式中, k 为 $\left\lfloor 2\psi / \tan^{-1} \frac{1}{2} \right\rfloor$ 的整数部分。

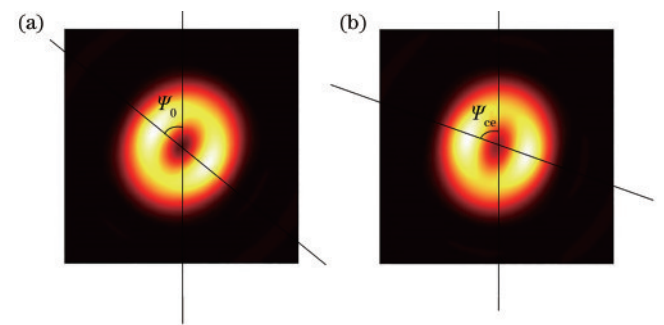
通过对式(6)的计算, 可获得方位角 ψ 随相位延迟 η 变化的关系, 如图 2 所示, 方位角 ψ 以周期 $\eta = 540^\circ$ 重复, 在 $0^\circ \sim 270^\circ$ 范围内呈单值变化趋势, 因此在 $0^\circ \sim 270^\circ$ 范围内, 可以通过 ψ 和 η 的关系, 确定相位延迟 η 的最大测量范围为 270° 。

图 2 方位角 ψ 和相位延迟 η 的二维模型Fig. 2 Two-dimensional model of azimuth angle ψ and phase delay η

3 数值仿真及误差分析讨论

3.1 数值仿真

进一步, 利用 Richards-Wolf 矢量光衍射理论对上述理论进行了数值仿真, 计算所得的椭圆形中空聚焦光斑如图 3 所示。

图 3 椭圆形中空的聚焦光斑。(a) 相位延迟为 0° 时的光斑; (b) 相位延迟为 45° 时的光斑Fig. 3 Oval hollow focused spots. (a) Light spot when phase delay is 0° ; (b) light spot when phase delay is 45°

通过聚焦光斑两个最大光强的连线与水平方向的夹角确定方位角, 定义 $\eta = 0^\circ$ 时的方位角为起始方位角 ψ_0 , 测量方位角为 ψ_{ce} , 如图 3 所示, 则方位角为两者之差 $\psi = |\psi_{ce} - \psi_0|$ 。

$\alpha = 45^\circ$ 时且不放入待测波片的椭圆形中空光斑

如图 3(a)所示,可以通过最大光强坐标位置确定 $\psi_0 = -60.15^\circ$;当放入相位延迟 $\eta = 45^\circ$ 的待测波片时的椭圆形中空光斑如图 3(b)所示,通过最大光强坐标位置确定 $\psi_{ce} = -73.57^\circ$,所以 $\psi = |\psi_{ce} - \psi_0| = 13.42^\circ$ 。根据式(6)可以得到相位延迟 η 为 45.27° ,对于数值仿真和考虑到实际操作中产生的误差将在误差分析部分进行讨论。

3.2 误差分析

由理论分析可知,方位角的标定误差以及激光器发射的线偏振光偏振方向与 x 轴的夹角 α 的误差变化会引起椭圆偏振的输出,间接影响到波片测量的精确度。

夹角 α 的误差主要产生在实际的实验中,如待测波片快慢轴与 x 轴的方向夹角误差,1/4 波片自身的相位延迟误差,1/4 波片快慢轴与 x 轴方向的夹角误差都会引起夹角 α 的误差,若每个偏振器件的误差为 0.10° ,则 $\Delta\alpha = 0.30^\circ$ 。当 $\eta = 45^\circ$ 时,对式(3)求导,相位差在周期 $\alpha = 90^\circ$ 内重复类余弦变化,如图 4 所示。相位差的一阶导数先减小后增大,在 $\alpha = 45^\circ$ 时处于极小值,此时由 α 引起相位延迟的偏差最小。

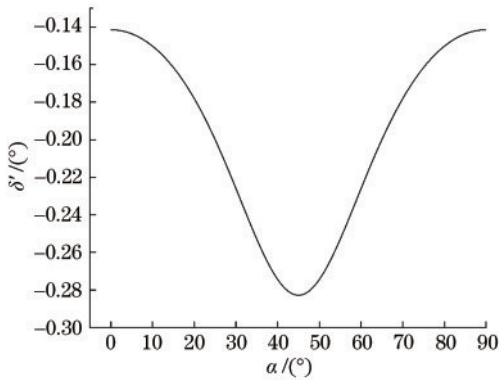


图 4 相位差一阶求导

Fig. 4 First-order derivative of phase difference

结合式(5),其引起相对误差为

$$\frac{\Delta\delta_\alpha}{\delta} = \pm \left[\frac{\eta(\alpha + \Delta\alpha) - \eta(\alpha)}{\eta(\alpha)} \right], \quad (7)$$

在夹角 $\alpha = 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 45^\circ$ 时,对 $\eta = 45^\circ$ 的待测波片进行数值仿真,其绝对误差和相对误差见表 1。相位延迟的绝对误差以及相对误差随夹角 α 的增大而减小,且在 $\alpha = 45^\circ$ 时对相位延迟测量的影响最小。

由于激光光斑强度分布变化会引起方位角的标定误差,而影响激光光斑强度分布变化的主要原因是夹角 α 的变化,在相位延迟不变的情况下,随着 α 增加损耗光的中心点光强呈周期为 90° 的正弦变化。因为 $\Delta\alpha = 0.30^\circ$,所以中心光强会产生 0.01 的误差,从而对光斑图像处理时产生相应的误差 $\Delta\psi = 0.01^\circ$ 。对式(6)求导,相位延迟的导数在周期 $\psi = 13.28^\circ$ 内重复

表 1 不同夹角 α 下的绝对误差和相对误差

Table 1 Absolute errors and relative errors under different angles α

| Included angle $\alpha / (^\circ)$ | Absolute error $/ (^\circ)$ | Relative error $/ \%$ |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 9 | 7.61 | 16.91 |
| 18 | 6.43 | 14.29 |
| 27 | 4.67 | 10.38 |
| 36 | 2.41 | 5.36 |
| 45 | 0.17 | 0.38 |

类指数型变化,如图 5 所示。以第一个周期为例,在 $\psi = 0^\circ$ 时相位延迟对方位角求导最小,此时方位角标定误差对测量影响最小;在 $\psi = 13.28^\circ$ 时相位延迟对方位角求导最大,此时方位角标定误差对测量影响最大。

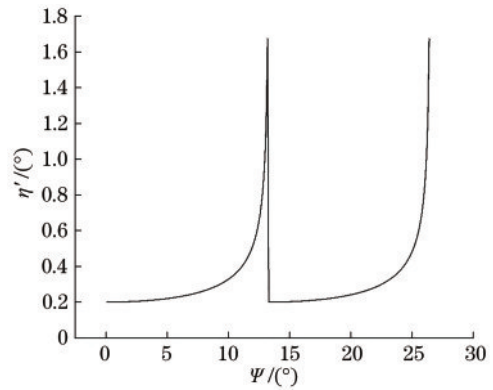


图 5 相位延迟一阶求导

Fig. 5 First-order derivative of phase delay

结合式(6)标定中产生的相对误差为

$$\frac{\Delta\delta_\psi}{\delta} = \pm \left[\frac{\eta(\psi + \Delta\psi) - \eta(\psi)}{\eta(\psi)} \right], \quad (8)$$

对 $\eta = 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 45^\circ$ 的波片进行数值仿真,其绝对误差和相对误差见表 2。第一个周期内,相位延迟的绝对误差随方位角的增大而增大,当测量相位延迟为 45° 时,方位角标定误差对测量影响达到最大。

表 2 不同相位延迟下的绝对误差和相对误差

Table 2 Absolute errors and relative errors under different phase delays

| Wave plate phase retardation $\eta / (^\circ)$ | Absolute error $/ (^\circ)$ | Relative error $/ \%$ |
|--|-----------------------------|-----------------------|
| 9 | 0.02 | 0.22 |
| 18 | 0.03 | 0.16 |
| 27 | 0.04 | 0.11 |
| 36 | 0.11 | 0.31 |
| 45 | 0.27 | 0.60 |

综合上述各个因素,得到波片相位延迟总相对误差为

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta\delta_\psi}{\delta} \right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_\alpha}{\delta} \right)^2}, \quad (9)$$

则夹角 $\alpha = 45^\circ$ 时系统的测量相对误差不超过 $\pm 0.71\%$ 。

4 结 论

提出一种基于涡旋编码技术的波片相位测试方法,利用涡旋相位编码理论和矢量光衍射理论进行公式计算。对相位延迟量为 45° 的波片进行了仿真测试和误差分析,结果表明该系统相对误差不超过 $\pm 0.71\%$,并且对测量范围进行了讨论验证,表明该系统最大波片相位延迟测量范围为 270° 。这说明该方法测量误差小且测量范围较广。

参 考 文 献

- [1] 黄书强, 江秀美, 冯元华. 光谱编码型穆勒矩阵测量中的相位延迟量误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1926001.
Huang S Q, Jiang X M, Feng Y H. Analysis of phase error of retarders in spectrally encoded Mueller matrix measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1926001.
- [2] 王金伟, 李克武, 景宁, 等. 波片相位延迟量测量和快轴标定系统[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 0217002.
Wang J W, Li K W, Jing N, et al. Phase retardation measurement and fast axis calibration system for wave plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 0217002.
- [3] 王兰, 宋连科, 王葱敏. 旋光法测量波片位相延迟量[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2007, 33(4): 65-67.
Wang L, Song L K, Wang C M. Phase retardation measurement with polarimetry[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2007, 33(4): 65-67.
- [4] 张伟, 杨林, 刘灿. 一种基于光弹调制器的应力双折射测量方法[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(2): 64-69.
Zhang W, Yang L, Liu C. A stress birefringence measurement method based on photoelastic modulator[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(2): 64-69.
- [5] 王军, 陈磊, 刘兆栋, 等. 采用白光干涉色色调信息测量零级波片延迟量的方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1784-1788.
Wang J, Chen L, Liu Z D, et al. Method of measuring retardation of zero-order wave plate based on hue value of white-light interference color[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1784-1788.
- [6] 胡建明, 曾爱军, 王向朝. 基于光弹调制技术的波片相位延迟量测量方法[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1681-1686.
Hu J M, Zeng A J, Wang X Z. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1681-1686.
- [7] 王喜宝, 宋连科, 朱化凤, 等. 连续偏光干涉法测量波片宽波段延迟量变化[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 258-261.
Wang X B, Song L K, Zhu H F, et al. Measurement of wide-band phase retardation variation of wave-plates by means of continuous polarization interference method[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 258-261.
- [8] 谭巧, 徐启峰, 谢楠. 一种测量 $1/4$ 波片相位延迟量的新方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0717002.
Tan Q, Xu Q F, Xie N. New method for retardance measurement of a quarter-wave plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 0717002.
- [9] 宗晓斌, 朱钧, 李岩, 等. 基于激光频率分裂的波片位相差测量方法[J]. 激光技术, 2003, 27(4): 293-295, 306.
Zong X B, Zhu J, Li Y, et al. Phase retardation measurement of wave-plate based on laser frequency splitting technology[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 293-295, 306.
- [10] 刘维新, 魏志伟, 赵文谦, 等. 光学波片相位延迟测量仪设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0718001.
Liu W X, Wei Z W, Zhao W Q, et al. Design of phase retardation measuring instrument for optical wave plate [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0718001.
- [11] Li J Y, Niu Y X, Niu H S. Measurement of phase retardation of optical multilayer films based on laser feedback system[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 409-416.
- [12] 赵培, 吴福全, 郝殿中, 等. $1/4$ 波片延迟量的相位调制椭圆测量法[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 379-382.
Zhao P, Wu F Q, Hao D Z, et al. Measurement of the delay of the quarter-wave plate by phase-modulated ellipsometry[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 379-382.
- [13] 彭建国, 袁沐, 金振宇, 等. 基于双光束检偏的波片测量系统[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0912002.
Peng J G, Yuan S, Jin Z Y, et al. Accurate parameter measurement of wave plate based on the dual-beam polarization analyzer configuration[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0912002.
- [14] Oakberg T C. Measurement of waveplate retardation using a photoelastic modulator[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3121: 19-22.
- [15] Randall D D. A new photoelectric method for the calibration of retardation plates[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(8): 600-602.
- [16] 郭苗军, 曾军, 李晋红. 基于螺旋相位板的涡旋光束的产生与干涉[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 092602.
Guo M J, Zeng J, Li J H. Generation and interference of vortex beam based on spiral phase plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 092602.