

文章编号 1004-924X(2018)06-1306-08

## Wollaston 棱镜偏振非正交对空间 测角系统的影响

李春艳\*, 乔琳

(西安邮电大学 电子工程学院 光电子技术系, 陕西 西安 710121)

**摘要:**为了在一定平移范围内实现快速空间测角系统的测量功能,对一定入射及方位角的光束经过 Wollaston 棱镜后引起的两出射光束的偏振非正交及进而引起的系统测角误差进行了研究。首先,建立系统坐标系模型,采用光线追迹法,并利用坐标变化的方式,对任意入射角和方位角下 Wollaston 棱镜的偏振非正交进行了理论推导。接着,对偏振非正交与入射角的关系及它对系统测角精度的影响进行了 Matlab 仿真。仿真结果表明,随着偏振非正交及空间方位角的变大,系统测量误差变大,且 Wollaston 棱镜偏振非正交对系统测角精度的影响较大;当方位角为  $3^\circ$ ,偏振非正交为  $10'$  时,测角误差为  $30''$ 。最后,通过分析偏振非正交的产生原因,改进了原有光源扩束系统,改善了偏振非正交对系统测角精度的影响,减小了测角误差。本文的研究成果对优化系统结构并进一步提高系统性能具有一定的指导意义。

**关键词:**偏振测量;方位角测量;偏振非正交;Wollaston 棱镜

**中图分类号:**O436.3;TB96 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1306

## Influence of polarization non-orthogonality of Wollaston prism in rapid space angle measuring system

LI Chun-yan\*, QIAO Lin

(Department of Optoelectronic Technology, School of Electronics Engineering,  
Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

\* Corresponding author, E-mail: yanerlcy@163.com

**Abstract:** To realize the measurement function of a rapid space angle measuring system in a certain range of translation, the polarization non-orthogonality of the two outgoing beams and the angle-measurement error, which is caused by the beam passing through a Wollaston prism in a certain range of the azimuth and incident angle, were studied. First, the coordinate model of the system was established, a ray tracing method was used, and the polarization non-orthogonality of the Wollaston prism at any incident and azimuth angle was theoretically derived by means of coordinate variation. Next, the relationship between the polarization non-orthogonality, the incident angle, and its influence on the angle-measurement accuracy were simulated using Matlab. According to the simulation results, the system-measurement error increases with the increase of the polarization non-orthogonality and the azimuth angle, and the former has a great influence on the angle-measurement accuracy. When the az-

收稿日期:2017-11-23;修订日期:2018-01-02.

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(No. 2016JQ1026);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(No. 15JK1659);国家自然科学基金资助项目(No. 11604263)

imuth angle is  $3^\circ$ , and the non-orthogonal polarization is  $10'$ , the angle-measurement error is  $30''$ . Finally, by analyzing the causes of the polarization non-orthogonality, the original light source beam expander system was improved, the influence of polarization non-orthogonality on the system's angle-measurement accuracy was also improved, and the angle-measurement error was reduced. The results of this work have some guiding significance for optimizing the system structure, and will further improve the performance of the system.

**Key words:** polarization measurement; azimuth measurement; polarization non-orthogonality; Wollaston prism

## 1 引 言

相比机械和其他几何光学方法,基于偏振光和磁光调制的空间角度传递及精密测量技术具有不需要刚性连接、方位传递距离远、测量精度高等特点,目前已广泛应用于火箭与导弹发射、航天器对接、玻璃内应力测量等装置中<sup>[1-4]</sup>。该技术基于偏振棱镜正交消光原理来测量方位信息,需要复杂的伺服跟踪系统辅助,增加了系统的测量时间,且降低了系统的可靠性及反应灵敏性<sup>[5-11]</sup>。为提高系统的快速反应能力,学者们提出了基于渥拉斯顿棱镜(Wollaston)偏振分束的快速空间测角方法。该方法不需要伺服跟踪系统,根据两路探测光强直接解算出方位角,测量时间大大缩短,同时采用磁光调制技术来保证系统的测量精度<sup>[12-14]</sup>。快速空间测角系统要求在较长的作用距离下工作,且要求系统的接收单元在一定光束覆盖范围内的任意位置均能实现精密测量功能,受限于器件尺寸及系统体积,只能采用扩束方式使光束呈锥形发散形式入射至起偏器和检偏器,因此入射光束具有一定的入射角及方位角。Wollaston 棱镜是目前最为常用的偏光分束器件之一,它同时具有检偏和分束的作用。在实际使用过程中,常假定出射的 o 光与 e 光的偏振方向互相垂直,但在实际空间角度测量装置中,光束是以发散形式入射到棱镜,此时会造成 o 光与 e 光的偏振方向夹角偏离  $90^\circ$ ,既偏振非正交。目前,对 Wollaston 棱镜的研究主要集中在主截面内消光比、透射比及分束比等方面<sup>[15-21]</sup>,对 Wollaston 棱镜的偏振非正交特性还未有论文报道。

在快速空间测角系统中,Wollaston 棱镜作为核心功能部件,其偏振非正交的大小将会影响系统测量精度的高低。因此,本文首先采用光线

追迹的方法,并利用坐标变化的方式,理论推导了在任意入射角和方位角情况下 Wollaston 棱镜出射的 o 光与 e 光的偏振方向及对应的偏振非正交大小。然后,对偏振非正交与入射角的关系及它对系统测角精度的影响进行了 Matlab 仿真。最后,基于理论及仿真结果提出了相应的改进措施,有助于系统的结构优化和性能提升。

## 2 快速空间测角系统的工作原理

基于偏振分束原理和磁光调制技术的快速空间角度测量系统如图 1 所示。带有扩束镜 BE 的激光光源 L 发出的光束通过透振方向在  $x$  方向的起偏器 P 形成线偏振光,线偏振光经过磁光调制器成为携带调制信息的信号光,然后通过晶体光轴和  $x$  方向夹角约为  $\pm 45^\circ$  的 Wollaston 棱镜 W,分成两束偏振方向相互垂直的调制信号光,分别到达光电探测器  $D_e$  和  $D_o$ ,利用后续信号处理电路对光电探测器接收到的信号进行处理,即可解算出 Wollaston 棱镜晶体光轴偏离  $\pm 45^\circ$  的方位角  $\delta$ <sup>[12,14]</sup>。

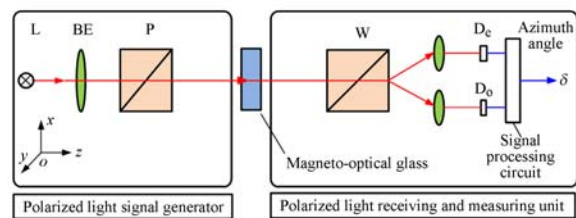


图 1 快速空间测角系统工作原理图

Fig. 1 Working principle of rapid spatial azimuth measurement system

利用获得的两路信号光强实时解算得到:

$$\delta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{I_e - I_o}{I_e + I_o}\right), \quad (1)$$

式中  $I_e, I_o$  分别为两出射光束的光强。

### 3 Wollaston 棱镜偏振非正交

快速空间测角系统需要在一定的平移范围内均能实现测量功能,因此光束在接收单元具有一定的覆盖面积,光以一定的入射角及方位角入射至接收器件。系统采用 Wollaston 棱镜来实现检偏和分束的功能,棱镜结构如图 2 所示。

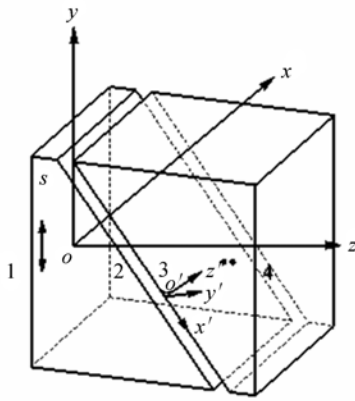


图 2 Wollaston 棱镜结构简图

Fig. 2 Structure diagram of Wollaston prism

坐标  $xyz$  的原点  $o$  位于 Wollaston 棱镜第一表面的中心,  $xy$  在第一表面内,且  $y$  轴与晶体光轴平行,  $z$  轴正方向为第一表面的法线方向。设入射光在第一表面的入射角为  $\theta$  (即与第一表面的法线方向  $z$  轴的夹角),  $\phi$  是入射光与  $y$  轴正向所夹的方位角,  $S$  为棱镜的结构角。  $i, j, k$  分别代表  $x, y, z$  方向的单位矢量。因此,入射光方向矢量可以表示为  $e_0 = i \sin \phi \sin \theta + j \cos \phi \sin \theta + k \cos \theta$ , 晶体光轴方向为  $e = j$ , 取空气的折射率  $n=1$ ,  $o$  光波的折射角为  $\theta_{o1}$ ,  $e$  光波的折射角为  $\theta_{e1}$  [22-23]。经过第一表面后,  $o$  光与  $e$  光的传播矢量可以表示为:

$$\begin{cases} e_{o1} = i \sin \phi \sin \theta_{o1} + j \cos \phi \sin \theta_{o1} + k \cos \theta_{o1} \\ e_{e1} = i \sin \phi \sin \theta_{e1} + j \cos \phi \sin \theta_{e1} + k \cos \theta_{e1} \end{cases} \quad (2)$$

根据折射定律可得:

$$\begin{cases} \sin \theta_{o1} = \sin \theta / n_o \\ \sin \theta_{e1} = \sin \theta / n_e \end{cases} \quad (3)$$

其中  $n_{e1} = n_o n_e / \sqrt{n_o^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha}$ ,  $\alpha$  是  $e$  光波法线与晶体光轴的夹角。因此根据式(3)及式(2)可得:

$$\cos \alpha = e \cdot e_{e1} = \cos \phi \sin \theta_{e1} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$\begin{cases} \theta_{e1} = \arcsin\left(\frac{n_o \sin \theta}{\sqrt{n_o^2 n_e^2 + (n_o^2 - n_e^2) \sin^2 \theta \cos^2 \phi}}\right) \\ n_{e1} = \frac{\sqrt{n_o^2 n_e^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \phi (n_o^2 - n_e^2)}}{n_o} \end{cases} \quad (5)$$

设在第二个表面上坐标系为  $o'x'y'z'$ ,  $z'$  轴为第二个表面斜面的法线方向,  $y'$  轴与第二块棱镜的晶体光轴平行,  $x'$  轴沿斜面向下。则  $e_{o1}, e_{e1}$  在  $x'y'z'$  中可表示为:

$$\begin{bmatrix} e_{o1x'} \\ e_{o1y'} \\ e_{o1z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos S & \sin S \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin S & \cos S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{o1x} \\ e_{o1y} \\ e_{o1z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} e_{e1x'} \\ e_{e1y'} \\ e_{e1z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\cos S & \sin S \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin S & \cos S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{e1x} \\ e_{e1y} \\ e_{e1z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

设  $o$  光、 $e$  光的传播矢量在  $x'y'z'$  坐标系中为:

$$\begin{cases} e_{o2} = i' \sin \phi'_{o1} \sin \theta'_{o2} + j' \cos \phi'_{o1} \sin \theta'_{o2} + k' \cos \theta'_{o2} \\ e_{e2} = i' \sin \phi'_{e1} \sin \theta'_{e2} + j' \cos \phi'_{e1} \sin \theta'_{e2} + k' \cos \theta'_{e2} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\phi'_{o1}, \phi'_{e1}$  与  $\theta'_{o1}, \theta'_{e1}$  分别为  $o$  光和  $e$  光在新坐标系中的入射角与方位角。则根据式(6)~式(8)可以得到:

$$\begin{cases} \tan \phi'_{o1} = \frac{e_{o2x'}}{e_{o2y'}}, \tan \phi'_{e1} = \frac{e_{e2x'}}{e_{e2y'}} \\ \cos \theta'_{o2} = e_{o2z'}, \cos \theta'_{e2} = e_{e2z'} \end{cases} \quad (9)$$

第二与第三表面之间为胶合剂层,设胶合剂层的折射率为  $n_3$ ,根据折射定律可以分别得到  $o$  光波与  $e$  光波的折射角分别为  $\theta'_{o3}, \theta'_{e3}$ :

$$\begin{cases} n_o \sin \theta'_{o2} = n_3 \sin \theta'_{o3} \\ n_{e1} \sin \theta'_{e2} = n_3 \sin \theta'_{e3} \end{cases} \quad (10)$$

光经胶合剂层后,晶体的光轴发生  $90^\circ$  的偏转,在前半部分的  $o$  光波此时变为  $e$  光波,  $e$  光波变为  $o$  光波。为了便于分析,此时晶体中的  $o$  光波与  $e$  光波名称仍然与前半部分一致,但  $o$  光波与  $e$  光波的折射率发生了改变。假设第二、三表面平行,则  $o$  光与  $e$  光在第三表面的入射角分别为  $\theta'_{o3}, \theta'_{e3}$ , 折射角分别为  $\theta'_{o4}, \theta'_{e4}$ , 且  $n_3 \sin \theta'_{o3} = n_{e2} \sin \theta'_{o4}, n_3 \sin \theta'_{e3} = n_o \sin \theta'_{e4}$ , 经过第三表面后,  $o$  光与  $e$  光的传播矢量可表示为:

$$\begin{cases} e_{o4} = i' \sin \phi'_{o1} \sin \theta'_{o4} + j' \cos \phi'_{o1} \sin \theta'_{o4} + k' \cos \theta'_{o4} \\ e_{e4} = i' \sin \phi'_{e1} \sin \theta'_{e4} + j' \cos \phi'_{e1} \sin \theta'_{e4} + k' \cos \theta'_{e4} \end{cases} \quad (11)$$

在坐标系  $xyz$  中,  $e_{o4}, e_{e4}$  可表示为:

$$\begin{bmatrix} e_{o4x} \\ e_{o4y} \\ e_{o4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\cos S & 0 & \sin S \\ \sin S & 0 & \cos S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{o4x'} \\ e_{o4y'} \\ e_{o4z'} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} e_{e4x} \\ e_{e4y} \\ e_{e4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\cos S & 0 & \sin S \\ \sin S & 0 & \cos S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{e4x'} \\ e_{e4y'} \\ e_{e4z'} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

设  $\phi_{o2}, \phi_{e2}$  分别为 o 光、e 光在坐标系  $xyz$  中的方位角,  $\theta_{o5}, \theta_{e5}$  分别为折射角, 则有:

$$\begin{cases} e_{o5} = i \sin \phi_{o2} \sin \theta_{o5} + j \cos \phi_{o2} \sin \theta_{o5} + k \cos \theta_{o5} \\ e_{e5} = i \sin \phi_{e2} \sin \theta_{e5} + j \cos \phi_{e2} \sin \theta_{e5} + k \cos \theta_{e5} \end{cases} \quad (14)$$

且:

$$\begin{cases} \tan \phi_{o2} = \frac{e_{o4x}}{e_{o4y}}, \tan \phi_{e2} = \frac{e_{e4x}}{e_{e4y}} \\ \cos \theta_{o5} = e_{o4z}, \cos \theta_{e5} = e_{e4z} \end{cases} \quad (15)$$

光通过第四表面的折射角为  $\theta_{o6}, \theta_{e6}$ , 则可以表示为:

$$\begin{cases} e_{o6} = i \sin \phi_{o2} \sin \theta_{o6} + j \cos \phi_{o2} \sin \theta_{o6} + k \cos \theta_{o6} \\ e_{e6} = i \sin \phi_{e2} \sin \theta_{e6} + j \cos \phi_{e2} \sin \theta_{e6} + k \cos \theta_{e6} \end{cases} \quad (16)$$

根据折射定律得  $n_{e2} \sin \theta_{o5} = \sin \theta_{o6}$ ,  $n_o \sin \theta_{e5} = \sin \theta_{e6}$ , 其中  $n_{e2} = n_o n_e / (n_o^2 \sin^2 \gamma + n_e^2 \cos^2 \gamma)^{1/2}$ ,  $\gamma$  是 o 光波法线与晶体光轴的夹角, 此时晶体光轴方向为  $e=i$ , 可得:

$$\cos \gamma = e_{o5} \cdot e = \sin \phi_{o2} \sin \theta_{o5}. \quad (17)$$

经过第四表面后, o 光波与 e 光波主平面的法线方向可以表示为:

$$\begin{cases} n_1 = e_{o6} \times e = \frac{j \cos \theta_{o6} - k \cos \phi_{o2} \sin \theta_{o6}}{\sqrt{1 - (\sin \phi_{o2} \sin \theta_{o6})^2}} \\ n_2 = e_{e6} \times e = \frac{j \cos \theta_{e6} - k \cos \phi_{e2} \sin \theta_{e6}}{\sqrt{1 - (\sin \phi_{e2} \sin \theta_{e6})^2}} \end{cases} \quad (18)$$

由于出射光在空气中, 可以认为 o 光波的偏振方向与 o 光波主平面的法线方向相同, 即  $E_o = n_1$ , e 光波的偏振方向在 e 光主平面内并垂直于 e 光波的法线方向(此时 e 光光线方向与 e 光波法线方向相同), 则:

$$\begin{aligned} E_e = n_2 \times e_{e6} = & \left( \frac{\cos^2 \theta_{e6} + \cos^2 \phi_{e2} \sin^2 \theta_{e6}}{\sqrt{1 - (\sin \phi_{e2} \sin \theta_{e6})^2}} i - \right. \\ & \left( \frac{\cos \phi_{e2} \sin \phi_{e2} \sin^2 \theta_{e6}}{\sqrt{1 - (\sin \phi_{e2} \sin \theta_{e6})^2}} j + \right. \\ & \left. \left. \left( \frac{\cos \theta_{e6} \sin \theta_{e6} \sin \phi_{e2}}{\sqrt{1 - (\sin \phi_{e2} \sin \theta_{e6})^2}} k \right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

设 o 光波与 e 光波振动方向的夹角为  $\epsilon$ , 则:

$$\cos \epsilon = \frac{E_o \cdot E_e}{|E_o| |E_e|}. \quad (20)$$

o 光波与 e 光波偏振方向相对  $90^\circ$  的偏离角度为  $\eta$ , 则:

$$\eta = \epsilon - \frac{\pi}{2}. \quad (21)$$

根据式(20)和式(21), 在入射光与  $y$  轴正向

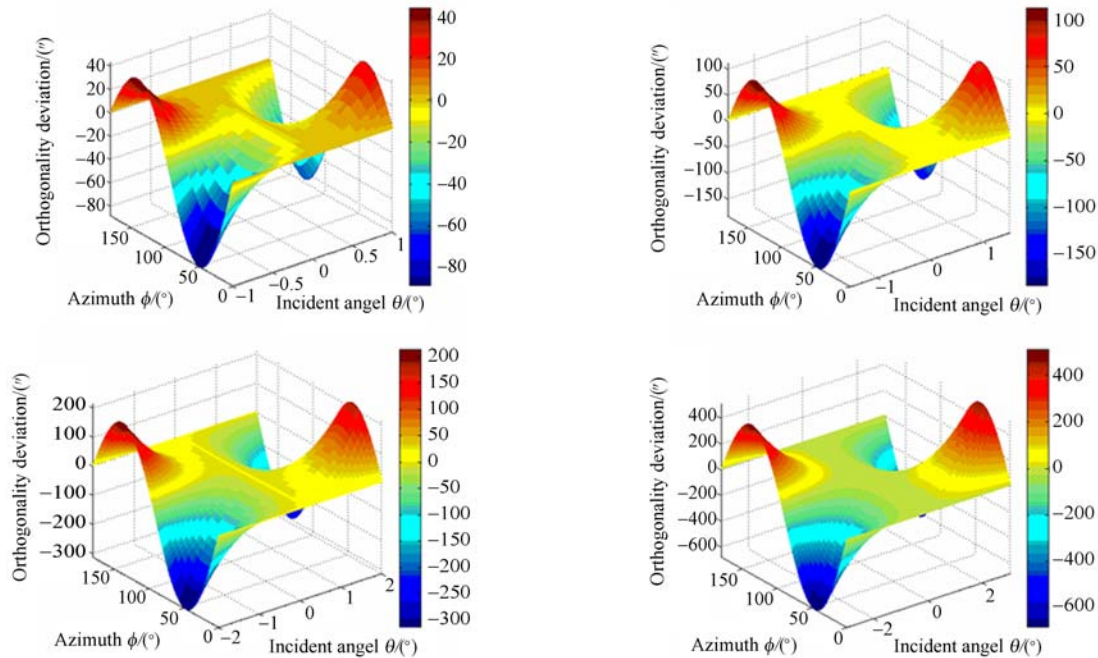


图 3 Wollaston 棱镜偏振非正交与入射角的关系

Fig. 3 Relationship between polarization non-orthogonality of Wollaston prism and incident angle

所夹  $0\sim 180^\circ$  方位角的范围内,对 Wollaston 棱镜偏振非正交与入射光在第一表面的入射角的关系进行 Matlab 仿真,其中波长  $\lambda$  为 650 nm,初始入射时  $n_o=1.655\ 67$ ,  $n_e=1.485\ 15$ ,胶合剂层的折射率  $n_3$  为 1.54,另外,棱镜的结构角  $S$  为  $45^\circ$ ,仿真结果如图 3 所示。

由图 3 的仿真结果可知,Wollaston 棱镜偏振非正交随入射角的增大而增大,在入射角为  $\pm 3^\circ$  时,偏振非正交约为  $10'$ 。

#### 4 Wollaston 棱镜偏振非正交对测角精度的影响

在采用 Wollaston 棱镜时,通常假定出射的 o 光波与 e 光波偏振方向互相垂直。由以上理论及仿真结果可知,当光束以发散形式入射至快速空间测角系统的接收单元时,光束的非垂直入射会导致 Wollaston 棱镜出射的两束光偏振方向的夹角偏离  $90^\circ$ ,即偏振非正交,入射角为  $\pm 3^\circ$  时,偏振非正交约为  $10'$ ,Wollaston 棱镜偏振非正交的存在势必会影响快速空间测角系统的测量精度。

图 4 为快速空间测角装置的各角度矢量关系。 $P$  为起偏器透阵方向, $E_o, E_e$  分别为 Wollas-

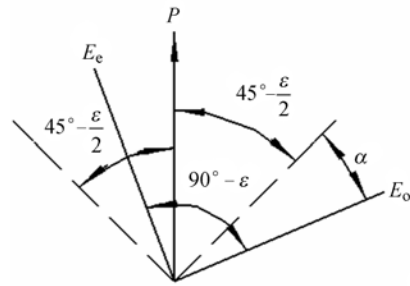


图 4 测角系统中各角度模型的矢量关系

Fig. 4 Vector relations of angle models in measuring system

ton 棱镜的两个晶体光轴方向,  $\alpha$  为 Wollaston 棱镜晶体光轴偏离  $\pm 45^\circ$  的方位角。设 Wollaston 棱镜出射两束光的偏振方向夹角为  $90^\circ - \epsilon$ ,且与起偏器晶体光轴的初始方位夹角为  $45^\circ - \epsilon/2$ ,则根据文献[12,14]可以得到:

$$K = \frac{I_e - I_o}{I_e + I_o} = \frac{\sin(2\alpha + \epsilon) + \sin(2\alpha - \epsilon)}{2 + \sin(2\alpha + \epsilon) - \sin(2\alpha - \epsilon)} \quad (22)$$

由于棱镜偏振非正交引起的测角误差为:

$$\Delta = \frac{1}{2} \arcsin(K) - \alpha \quad (23)$$

假设  $-10' \leq \epsilon \leq 10'$ ,则偏振非正交引起的装置空间测角误差如图 5 所示。

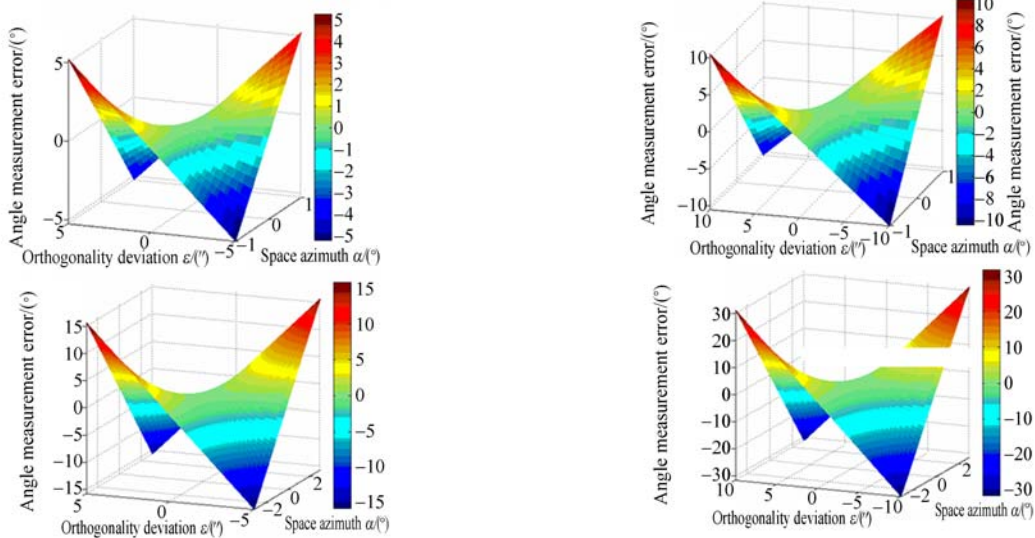


图 5 偏振非正交引起的测角误差

Fig. 5 Angle error caused by non-orthogonal polarization

根据图 5 的仿真结果,分析可知随着偏振非正交  $\epsilon$  及空间方位角  $\alpha$  的变大,空间测角装置的

测量误差  $\Delta$  也在变大。当  $\alpha$  为  $3^\circ$ ,偏振非正交  $\epsilon$  为  $10'$  时,理论上会引起  $30''$  的测角误差。因此,

Wollaston 棱镜的偏振非正交对系统测角精度的影响很大。然而,由于 Wollaston 棱镜的偏振非正交大小是随入射光的入射角和方位角发生变化的,所以标定显然是不现实的。入射角和方位角的敏感性也限定着系统的使用范围,为此必须消除或改善 Wollaston 棱镜偏振非正交对系统测角精度的影响,以提高系统的实用价值。

根据图 3 及式(21)的理论和仿真分析,得知在一定的出射光范围内,入射角是影响偏振态变化的主要因素。为改善 Wollaston 棱镜偏振非正交对系统测角精度的影响,本文针对光源扩束镜进行了改进设计,设计原则包括:(1)光源经扩束镜扩束后,应保证光束在起偏器、磁光玻璃通光口径范围内,以避免杂光的形成;(2)在满足接收单元平移范围的情况下,光束尽量以一定的小角度入射至起偏器;(3)各个视场的光束尽量以“均匀”的入射角度入射至起偏器。

后续实验发现,系统采用改进后的光源扩束镜,在工作距离为 380 mm,平移 20 mm 时,对应的光束入射角为  $3^\circ$ ,此种状态下系统的测角精度由  $30''$  提高至  $11''$ ,效果显著。改进光源扩束镜的方法虽不能消除 Wollaston 的棱镜偏振非正交,但在一定程度上通过减小光束入射角进而减小了偏振非正交的大小,因此同等平移范围条件下,在

一定程度上提高了系统的测量精度。

## 5 结 论

本文根据快速空间测角系统在一定的工作距离下,信号接收单元需要在特定接收范围内的任一位置均能实现测角功能,即发射单元发出的信号光要有一定的覆盖范围,因此接收单元接收的扩束后的光束具有一定的入射角及方位角,系统的核心功能部件 Wollaston 棱镜会引入偏振非正交,偏振非正交的存在会引起系统测角精度误差。本文通过理论推导研究了在任意入射角和方位角情况下 Wollaston 棱镜出射的 o 光波与 e 光波的偏振方向及对应的偏振非正交的大小,并对偏振非正交与入射角的关系及它对系统测角精度的影响进行了 Matlab 仿真。由理论及仿真结果可知,随着偏振非正交及空间方位角的变大,空间测角装置的测量误差也在变大,Wollaston 棱镜的偏振非正交对系统测角精度的影响较大。通过分析偏振非正交的产生原因,可知无法通过标定偏振非正交来修正系统,本文通过改进原有光源扩束系统改善了偏振非正交对系统测角精度的影响,对优化系统结构并进一步提高系统性能具有一定的指导意义。

## 参考文献:

- [1] 董晓娜,高立民,申小军,等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. 光子学报,2001,30(11): 1389-1391.  
DONG X N, GAO L M, SHEN X J, *et al.*. Passing azimuth vertically with the technic of magneto-optic modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1389-1391. (in Chinese)
- [2] 申小军,马彩文,董晓娜. 一种无机械连接的方位测量同步系统[J]. 光子学报,2001,30(7): 892-896.  
SHEN X J, MA C W, DONG X N. A kind of disconnected mechanically azimuth measuring and synchronizing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(7): 892-896. (in Chinese)
- [3] 吴易明. 高精度方位垂直传递技术研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所,2009.
- [4] 吴易明,高立民,陈良益. 基于偏振光的精密角度测量及传递技术[J]. 红外与激光工程,2008,37(3): 525-529.  
WU Y M, GAO L M, CHEN L Y. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [5] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 方波磁光调制测量在无机械连接的设备间方位传递中的应用[J]. 光学学报,2012,32(12): 184-190.  
YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. Application of square wave magneto-optic mod-

WU Y M. *Research on High-precision Vertical Transmission Technology*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2009. (in Chinese)

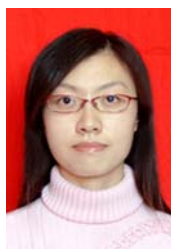
- ulation to transmitting the azimuth between equipments without mechanical connection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 184-190. (in Chinese)
- [6] 杨志勇,蔡伟,伍樊成. 基于三角波磁光调制的空间方位信息测量系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(a01): 178-183.
- YANG ZH Y, CAI W, WU F CH. Azimuth measurement system based on triangle wave magneto-optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(a01): 178-183. (in Chinese)
- [7] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 利用原始光强信号实现空间方位失调角高精度传递新方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 132-138.
- YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. New high-precision transmission method of spatial azimuth with original light intensity signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 132-138. (in Chinese)
- [8] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 基于正弦波磁光调制的方位失调角精确测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 111-115.
- YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, *et al.*. An accurate method of measuring azimuth based on sine wave magneto-optic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 111-115. (in Chinese)
- [9] 杨志勇,周召发,张志利. 基于正弦波磁光调制的空间方位失调角传递技术的改进[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 692-698.
- YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 692-698. (in Chinese)
- [10] 杨志勇,蔡伟,周召发,等. 一种基于正交线偏振光的高精度方位测量方法[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(1): 65-72.
- YANG ZH Y, CAI W, ZHOU ZH F, *et al.*. An accurate azimuth measurement method based on orthogonal linearly polarized light[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2017, 28(1): 65-72. (in Chinese)
- [11] 杨志勇,周召发,张志利. 贝塞尔函数展开对空间方位失调角测量误差的影响[J]. *应用光学*, 2012, 33(3): 461-465.
- YANG ZH Y, ZHOU ZH F, ZHANG ZH L. Influence of Bessel functions expansions on spatial azimuth measurement error[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 461-465. (in Chinese)
- [12] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 利用偏振光实现空间方位角的快速测量[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 539-545.
- LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 539-545. (in Chinese)
- [13] 陆卫国,吴易明,高立民,等. 方波调制消除 Wollaston 棱镜非线性系数对空间测角的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2198-2203.
- LU W G, WU Y M, GAO L M, *et al.*. Square wave modulation to eliminate the influence of Wollaston prism nonlinear coefficients on spatial angle measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2198-2203. (in Chinese)
- [14] 陆卫国. 快速方位垂直传递技术研究[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2013.
- LU W G. *Research on Fast Orientation Vertical Transmission Technology*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2013. (in Chinese)
- [15] 郝北荣,吴福全,元欣. Wollaston 棱镜晶体光轴的垂直偏差对分束特性影响分析[J]. *激光杂志*, 2011, 32(5): 8-9.
- HAO ZH R, WU F Q, QI X. Influence of optical axis vertical divergence on beam splitting property in Wollaston prism[J]. *Laser Journal*, 2011, 32(5): 8-9. (in Chinese)
- [16] 薛林,吴福全,蒋琳琳. Wollaston 棱镜对发散光束的分束特性分析[J]. *激光技术*, 2011, 35(6): 833-836.
- XUE L, WU F Q, JIANG L L. Effect of Wollaston prism on splitting properties of divergent beam [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 833-836. (in Chinese)
- [17] 徐毓娴,蔡昕,张志利. 改进型 Wollaston 棱镜设计

- [J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 131-134.  
XU Y X, CAI X, ZHANG ZH L. Design of modified Wollaston prisms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 131-134. (in Chinese)
- [18] 吴海英, 张淳民, 赵葆常, 等. 改型 Wollaston 棱镜的光程差及其特性分析[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1642-1647.  
WU H Y, ZHANG CH M, ZHAO B CH, *et al.*. Calculation and analysis of the optical path difference of modified Wollaston prism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1642-1647. (in Chinese)
- [19] 钱彬杰. 利用 Wollaston 棱镜产生全矢量光束的研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.  
QIAN B J. *Generation of Full-vector Beams with a Wollaston Prism*[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. (in Chinese)
- [20] 朱化凤, 宋连科, 吴福全, 等. 利用坐标变换求 Wollaston 棱镜的分束角[J]. 激光技术, 2003, 27(4): 362-364.  
ZHU H F, SONG L K, WU F Q, *et al.*. Calculation of the splitting angle of Wollaston prism by means of coordinate conversion [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 362-364. (in Chinese)
- [21] 朱久凯, 吴福全, 任树锋. Wollaston 棱镜正反向的分束角及分束角的对称性[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 636-638.  
ZHU J K, WU F Q, REN SH F. Forward and backward splitting angles of Wollaston prisms and their symmetry [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 636-638. (in Chinese)
- [22] 朱化凤, 韩瑞芳, 郭文婷, 等. Wollaston 式平行分束偏光棱镜的光学特性分析[J]. 光子学报, 2013, 42(9): 1118-1122.  
ZHU H F, HAN R F, GUO W T, *et al.*. Analysis of optical properties of Wollaston-type parallel-splitting prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(9): 1118-1122. (in Chinese)
- [23] 万玲玉, 谷巍, 班卫华, 等. 光波 p 分量在单轴晶体表面反射和折射的相位特性[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1481-1486.  
WAN L Y, GU W, BAN W H, *et al.*. Phase characteristics of p-polarized light reflecting and refracting at the uniaxial crystal surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1481-1486. (in Chinese)

#### 作者简介:



李春艳(1987—),女,河南商丘人,博士,讲师,2009年于西北工业大学获得学士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事偏振光信息处理及应用方面的研究。E-mail: yanerlcy@163.com



乔琳(1983—),女,北京人,硕士,讲师,2007年于长春理工大学获得学士学位,2014年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事光学设计、光学精密测量等领域的研究。E-mail: qiaolin@xupt.edu.cn