

文章编号 1004-924X(2013)03-0539-07

## 利用偏振光实现空间方位角的快速测量

陆卫国<sup>1,2\*</sup>, 吴易明<sup>1</sup>, 高立民<sup>1</sup>, 肖茂森<sup>1</sup>, 王海霞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了实现上下不同平面内仪器方位角的快速测量, 基于磁光调制和偏振分束构建了一种角度测量系统。根据偏振光的琼斯矢量描述方法推导出了系统的测角模型, 并采用“差除和”的办法消除光源波动以提高测角精度。分析了渥拉斯顿棱镜的两路光信号透射比与入射角、方位角的关系及其对测量结果的影响, 讨论了由双光路光电器件的光信号衰减、器件漂移和电路性能的不同带来的增益差异与测量结果的相关性。最后, 提出了采用磁光调制的方法来消除两路信号的透射比系数和增益系数的差, 从而提高仪器测量精度。实际系统测量实验表明: 系统完成测角时间为 15 s, 在  $+8^\circ \sim -8^\circ$  内测角精度优于  $5''$ 。结果显示该系统具有稳定性高、测角速度快、精度高等特点。

**关键词:** 偏振光; 磁光调制; 方位角测量; 渥拉斯顿棱镜

**中图分类号:** TH741.2; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0539

## Rapid measurement of spatial azimuth by using polarized light

LU Wei-guo<sup>1,2\*</sup>, WU Yi-ming<sup>1</sup>, GAO Li-min<sup>1</sup>, XIAO Mao-sen<sup>1</sup>, WANG Hai-xia<sup>1</sup>

(1. *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;*

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

\* *Corresponding author, E-mail: optlwg@gmail.com*

**Abstract:** To measure the spatial azimuths of different instruments in the upper and lower planes rapidly, an angle-measuring system based on magneto-optical modulation and a polarization splitter was proposed. An angle-measuring model of the system was deduced by describing the Jones vector of polarized light, and the influence of light source fluctuation on the angle-measuring precision was eliminated through signal processing method of “difference divided by addition”. Then, the relationships between the transmittance and the incidence angle, azimuth for the two pathways of optical signals from the Wollaston prism were analyzed, as well as their effects on the measurement results. Furthermore, the dependence of gain differences from optical signal attenuations, device drifts, and circuit performance of opto-electronic elements in two optical paths on the measurement precision were discussed. Finally, a magneto-optical modulation method was proposed to eliminate the difference of transmittances and gain coefficients of the two signals for the achievement of high-precision measure-

收稿日期: 2012-10-27; 修订日期: 2012-12-25.

基金项目: 国防科研基金资助项目 (No. JPPT-115-3-1360)

ment. The experimental observation demonstrates that the measurement time is 15 s and angle-measuring accuracy is better than 5" within  $+8\sim-8^\circ$ . These results show that the proposed method has some advantages on the fast angular measurement velocity, high precision, and so on.

**Key words:** polarized light; magneto-optical modulation; azimuth measurement; Wollaston prism

## 1 引言

火箭发射、航天器对接、材料内应力测量等装置需要实时测量上下不同平面内仪器的空间方位角。常用的测角方法有机械方法和光学方法<sup>[1]</sup>。机械方法需要刚性连接,且受连接件精度、稳定性等因素的影响难以实现高精度的角度测量,实际中使用较少。光学方法分为几何光学方法和物理光学方法。几何方法结构简单,容易实现,但易受空气扰动影响,不容易实现高精度的角度测量。物理光学方法利用光的偏振特性实现角度测量,比几何光学方法的测量精度要高很多。根据调制方式的不同,物理光学方法又分为电光调制法和磁光调制法。电光调制法的精度很高,但需要的调制电压较大,会对其它仪器产生电磁干扰。磁光调制方法具有调制电压低、精度高、抗干扰性强等特点,在实际中应用较多。基于偏振光的角度测量技术具有传递距离远、无需刚性连接、精度高的特点,可以方便地实现不同平面的空间角度测量,因此在火箭发射系统、航天器对接和生物医药等领域有着广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

目前,该项技术在工程中的应用已经相当成熟,测角精度已达角秒级。不过,以往的偏振光测角技术主要通过两偏振棱镜正交消光的方法实现方位信息的测量,需要复杂的伺服跟踪系统辅助实现高精度测量,这导致了系统的可靠性降低,测角时间较长。为了进一步提高测角精度,缩短测角时间,学者们在磁光信号调制方式和后端信号处理算法上进行了很多有意义的研究<sup>[3-7]</sup>,但以传统系统结构为基础的偏振测角技术还是难以兼顾高精度和高速度。针对此问题,本文提出了一种利用渥拉斯顿棱镜进行偏振分束的测角方法。该方法根据两路光强的大小直接计算出方位角,并采用磁光调制的办法实现角度的高精度测量。该方法可消除光源被动影响,具有测角速度快、测角精度高、稳定可靠的特点。

## 2 系统的基本构成及工作原理

快速角度测量系统装置如图 1 所示。L 为激光光源, BE 为准直扩束镜, P 为起偏器, W 为渥拉斯顿棱镜,  $D_e$  和  $D_o$  为光电二极管。

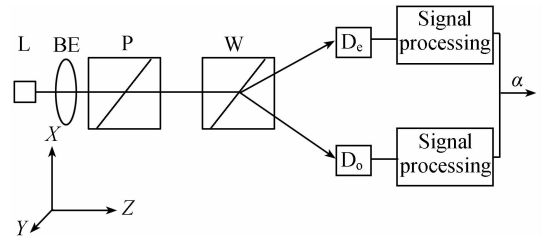


图 1 快速角度测量系统

Fig. 1 Rapid angle measurement system

起偏器的透光轴在  $X$  方向,逆时针旋转渥拉斯顿棱镜  $W$  的光轴与  $X$  轴夹角大约为  $45^\circ$ ,  $\alpha$  为渥拉斯顿棱镜光轴偏离  $45^\circ$  角的方位角。当光源  $L$  经过  $BE$  准直扩束后,经过起偏器  $P$  成为线偏振光。线偏振光经过渥拉斯顿棱镜  $W$  分成偏振方向垂直的两束线偏振光,且分别被光电二极管  $D_e, D_o$  接收。后续信号处理电路对光电二极管接收到的信号进行处理,解算出方位角  $\alpha$ 。

出射信号光  $E$  的矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

起偏器的光轴在  $X$  方向,光经过偏振棱镜  $P$  后的出射光  $E_1$  矩阵为:

$$E_1 = PE, \quad (2)$$

式中:  $P$  为起偏器的琼斯矩阵,  $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , 则:

$$E_1 = \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

渥拉斯顿棱镜  $W$  的二维旋转矩阵  $G$  为:

$$G = \begin{bmatrix} \cos(45^\circ - \alpha) & \sin(45^\circ - \alpha) \\ -\sin(45^\circ - \alpha) & \cos(45^\circ - \alpha) \end{bmatrix}.$$

$E_1$  经渥拉斯顿棱镜  $W$  后分成两束相互垂直

的线偏振光  $E_e, E_o$ , 则:

$$\begin{bmatrix} E_e \\ E_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(45^\circ - \alpha) & \sin(45^\circ - \alpha) \\ -\sin(45^\circ - \alpha) & \cos(45^\circ - \alpha) \end{bmatrix} E_1. \quad (4)$$

经计算:

$$\begin{bmatrix} E_e \\ E_o \end{bmatrix} = E_x \begin{bmatrix} \cos(45^\circ - \alpha) \\ \sin(45^\circ - \alpha) \end{bmatrix}.$$

两路光强分别为:

$$\begin{cases} I_e = E_e E_e^* = \frac{E_x^2}{2} [1 + \sin(2\alpha)] \\ I_o = E_o E_o^* = \frac{E_x^2}{2} [1 - \sin(2\alpha)] \end{cases}. \quad (5)$$

为消除光强波动影响,对式(5)中两路信号进行“差除和”运算,得:

$$S = \frac{I_e - I_o}{I_e + I_o} = \sin(2\alpha). \quad (6)$$

从式(6)可以看出,运算结果中不包含光强因素,消除了光强波动对测量结果的影响。对“差除和”运算后的结果进行反正弦运算就可以实时地解算方位角  $\alpha$ 。

### 3 器件非理想化对测量结果的影响

#### 3.1 渥拉斯顿棱镜透射比非理想化对测量结果的影响

由公式(5)可以得出线偏振光通过渥拉斯顿棱镜后,两路光信号的理想光强透射比为:

$$\begin{cases} T_e = \frac{1}{2} [1 + \sin(2\alpha)] \\ T_o = \frac{1}{2} [1 - \sin(2\alpha)] \end{cases}. \quad (7)$$

但式(7)忽略了晶体对光能的吸收、光能在晶体各个界面的反射率以及入射角的影响<sup>[8-10]</sup>。首先对 e 光的透射光强进行分析。由图 2 所示,在渥拉斯顿棱镜中 e 光分别经过 1, 2, 3, 4 界面,  $i_0, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$  分别为各个界面的入射角和折射角。s 为棱镜结构角, 双箭头和原点表示光轴方向。  $n_1, n_2$  分别为入射端面法线和斜面法线, 称  $n_1, n_2$  构成的平面为 k 面。实际使用中, 入射角一般小于半视场角, 则 e 光的折射率变化较小, 近似取其主折射率  $n_e$ , 且折射光中 e 光的反射率仍然按照菲涅尔公式进行计算。

图 3 中, X 轴为从起偏器出射的线偏振光的振动方向,  $\beta$  为入射面逆时针转到线偏振光振动

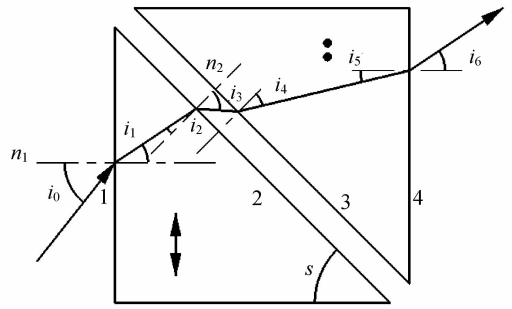


图 2 e 光在渥拉斯顿棱镜中的光路  
Fig. 2 Optical path of e light in wollaston prism

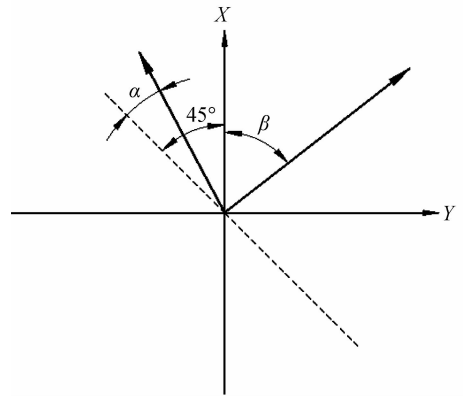


图 3 角度关系示意图  
Fig. 3 Diagram of angular relationship

方向的夹角,从起偏器出射线偏振光的振动方向逆时针转过的角为  $45^\circ$ ,  $\alpha$  为逆时针转到  $45^\circ$  角位置的方位角。这里规定逆时针转动为正。

根据文献[10],棱镜斜面上的入射角  $i_2$  应满足:

$$\begin{aligned} \cos i_2 &= \cos s \cos i_1 + \\ &\sin s \sin i_1 \cos(45^\circ - \alpha + \beta), \end{aligned} \quad (8)$$

其中:入射面绕  $n_1$  轴转到 k 面的角为  $45^\circ - \alpha + \beta$ 。当入射光以  $i_0$  入射棱镜端面时,把线偏振光分解为振动方向平行入射面 p 方向和垂直于入射面 s 方向的两束光,则 e 光在入射端面的反射率为:

$$R_1 = R_p \cos^2 \beta = \frac{\tan^2(i_0 - i_1)}{\tan^2(i_0 + i_1)} \cos^2 \beta. \quad (9)$$

由菲涅尔公式,可以得到 e 光在其余各个界面的反射率为:

$$R_n = \frac{\tan^2(A_n - B_n)}{\tan^2(A_n + B_n)}, \quad (10)$$

其中:  $n=2,3,4$ ;  $A_n=i_2, i_3, i_5$ ;  $B_n=i_3, i_4, i_6$ 。

忽略晶体对光能的吸收,且不考虑光在胶合层的干涉效应,根据各个界面的折射定律与式(8)、(9)、(10)可以得到 e 光的透射光强为:

$$I_e = \frac{E_x^2}{2} [1 + \sin(2\alpha)] \prod_{n=1}^4 (1 - R_n) = \frac{E_x^2}{2} [1 + \sin(2\alpha)] \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_0 - i_1)}{\tan^2(i_0 + i_1)} \cos^2 \beta \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_2 - i_3)}{\tan^2(i_2 + i_3)} \right] \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_3 - i_4)}{\tan^2(i_3 + i_4)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_5 - i_6)}{\tan^2(i_5 + i_6)} \right]. \quad (11)$$

则理论上 e 光的光强透射比为:

$$T_e = \frac{1}{2} [1 + \sin(2\alpha)] M_e, \quad (12)$$

式中:  $M_e$  为 e 光的透射比系数,

$$M_e = \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_0 - i_1)}{\tan^2(i_0 + i_1)} \cos^2 \beta \right] \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_2 - i_3)}{\tan^2(i_2 + i_3)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_3 - i_4)}{\tan^2(i_3 + i_4)} \right] \left[ 1 - \frac{\tan^2(i_5 - i_6)}{\tan^2(i_5 + i_6)} \right]. \quad (13)$$

同理,可以得到 o 光的理论光强透射比  $T_o$ :

$$T_o = \frac{1}{2} [1 - \sin(2\alpha)] M_o =$$

$$\frac{1}{2} [1 - \sin(2\alpha)] \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_0 - i_1)}{\sin^2(i_0 + i_1)} \sin^2 \beta \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_2 - i_3)}{\sin^2(i_2 + i_3)} \right] \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_3 - i_4)}{\sin^2(i_3 + i_4)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_5 - i_6)}{\sin^2(i_5 + i_6)} \right]. \quad (14)$$

o 光的透射比系数为:

$$M_o = \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_0 - i_1)}{\sin^2(i_0 + i_1)} \sin^2 \beta \right] \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_2 - i_3)}{\sin^2(i_2 + i_3)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_3 - i_4)}{\sin^2(i_3 + i_4)} \right] \left[ 1 - \frac{\sin^2(i_5 - i_6)}{\sin^2(i_5 + i_6)} \right]. \quad (15)$$

设入射角  $i_0 = 1^\circ$ ,可以得到方位角  $\alpha, \beta$  与 e 光光强透射比的关系,如图 4 所示。同理,可以得到  $i_0 = 1^\circ$  时方位角  $\alpha, \beta$  与 o 光光强透射比的关系,如图 5 所示。由图 4、图 5 可以看出,  $M_e, M_o$  的存在将导致理论透射比与理想透射比存在偏差,且由式(8)、(13)、(15)可以看出  $M_e, M_o$  是与入射角  $i_0$ , 方位角  $\alpha$  及  $\beta$  有关的量。

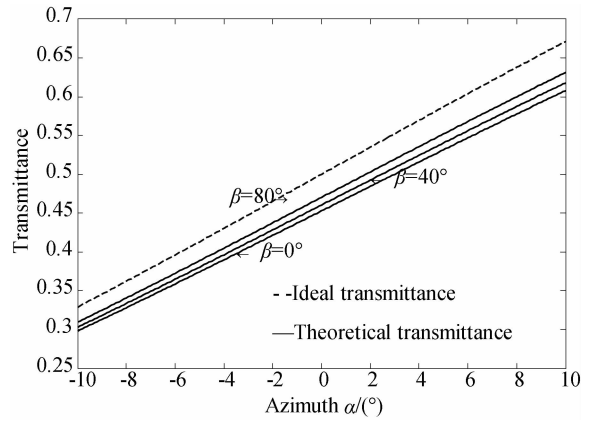


图 4 e 光透射比随  $\alpha$  与  $\beta$  变化曲线

Fig. 4 Variation of transmittance of e light with  $\alpha$  and  $\beta$

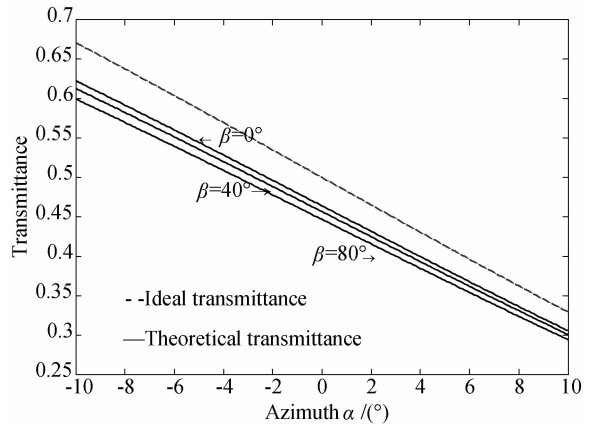


图 5 o 光透射比随  $\alpha$  与  $\beta$  变化曲线

Fig. 5 Variation of transmittance of o light with  $\alpha$  and  $\beta$

### 3.2 双光路增益差异对测量结果的影响

由于本文是根据检测两路光强的大小来解算方位角  $\alpha$  的,实际上由于渥拉斯顿棱镜对光能的吸收,以及经过光电转换后两个光电转换器件的转换效率的差异和信号处理电路的损耗等对两路信号强度产生的影响,测量精度会受到影响。

设  $C_e, C_o$  为光强衰减系数;  $\eta_e, \eta_o$  为光电转换系数;  $A_e, A_o$  为电路的损耗,结合 3.1 节的讨论结果,实际接收到的两路信号为:

$$\begin{cases} I_e = C_e \eta_e A_e \frac{E_x^2}{2} [1 + \sin(2\alpha)] M_e \\ I_o = C_o \eta_o A_o \frac{E_x^2}{2} [1 - \sin(2\alpha)] M_o \end{cases}. \quad (16)$$

设  $K_e = C_e \eta_e A_e, K_o = C_o \eta_o A_o$ 。分别为两路信号的增益系数,一般情况下  $K_e$  和  $K_o$  是不相等的,即存在增益差异。根据式(6)可得:

$$S = \frac{(K_e M_e - K_o M_o) + (K_e M_e + K_o M_o) \sin(2\alpha)}{(K_e K_e + K_o M_o) + (K_e M_e - K_o M_o) \sin(2\alpha)}, \quad (17)$$

令系数  $k = \frac{k_o M_o}{k_e M_e}$ , 由式(17)得:

$$S = \frac{(1 - k) + (1 + k) \sin(2\alpha)}{(1 + k) + (1 - k) \sin(2\alpha)}. \quad (18)$$

由式(18)可知,理想情况下  $k=1$  时,增益系数和透射比系数对检测结果没有影响。实际中  $k$  一般不为 1,系数  $k$  引起的检测误差如图 6 所示。

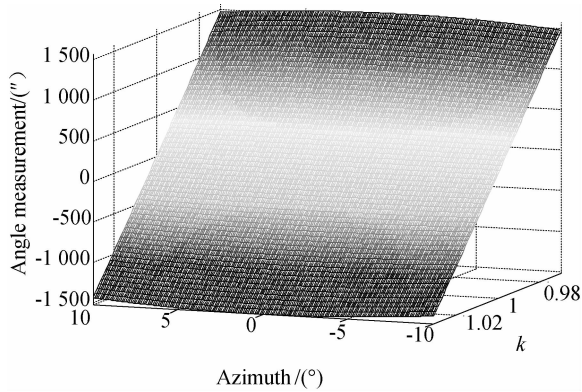


图 6 系数  $k$  引起的测角误差

Fig. 6 Angle measurement error caused by coefficient  $k$

由上图可以看出,系数  $k$  对检测精度的影响很大,如果不消除,则无法实现角度的高精度测量。由 3.1 节的分析可知,由于  $M_e, M_o$  是与  $\alpha, \beta$ ,

$i_0$  有关的量,所以采用标定的方法来标定系数  $k$  无法实时得出准确的测角结果,还会降低系统的实用性。

#### 4 利用磁光调制实现高精度测量

为了消除两路信号的增益系数  $k_e, k_o$  和透射比系数  $M_e, M_o$  对测角结果的影响,提高系统的测角精度和实用性,本文采用磁光调制的办法对偏振光进行调制,将偏振光矢量信号转换为偏振面随时间变化的信号。当从起偏器出射的线偏振光经过外加交变磁场的磁光玻璃时,由于法拉第效应,线偏振光的偏振面方向会发生偏转摆动,偏转大小为:

$$\theta = VLB_m \sin \omega t, \quad (19)$$

式中: $V$  是磁光玻璃的维尔德常数; $L$  是磁光玻璃的长度; $B_m$  是磁感强度的幅值; $\omega$  是磁光调制频率。

将式(19)带入式(5)得:

$$\begin{cases} I_e = \frac{E_x^2}{2} [1 + \sin(2\alpha + 2VLB_m \sin \omega t)] \\ I_o = \frac{E_x^2}{2} [1 - \sin(2\alpha + 2VLB_m \sin \omega t)] \end{cases}. \quad (20)$$

将  $\sin(2\alpha + 2VLB_m \sin \omega t)$  按三角公式展开,再由贝塞尔函数的母函数级数展开,并忽略二阶以上的高频信号,则实际检测的  $I_e, I_o$  为:

$$\begin{cases} I_e = K_e M_e \frac{E_x^2}{2} \{ [1 + J_0(VLB_m) \sin 2\alpha] + 2J_2(VLB_m) \sin 2\alpha \cos 2\omega t + 2J_1(VLB_m) \cos 2\alpha \sin \omega t \} \\ I_o = K_o M_o \frac{E_x^2}{2} \{ [1 - J_0(VLB_m) \sin 2\alpha] - 2J_2(VLB_m) \sin 2\alpha \cos 2\omega t - 2J_1(VLB_m) \cos 2\alpha \sin \omega t \} \end{cases}. \quad (21)$$

令:

$$A = K_e M_e \frac{E_x^2}{2} [1 + J_0(VLB_m) \sin 2\alpha];$$

$$B = K_e M_e \frac{E_x^2}{2} [2J_1(VLB_m) \cos 2\alpha];$$

$$C = K_o M_o \frac{E_x^2}{2} [1 - J_0(VLB_m) \sin 2\alpha];$$

$$D = K_o M_o \frac{E_x^2}{2} [2J_1(VLB_m) \cos 2\alpha].$$

其中: $A, C$  分别为两路信号的直流量; $B, D$  分别为两路信号的基频信号幅值。通过对采集到的信号做快速傅里叶运算,分别检测基频和直流量幅值,

并做以下运算:

$$S = \left( \frac{B}{A} - \frac{D}{C} \right) / \left( \frac{B}{A} + \frac{D}{C} \right) = J_0(VLB_m) \sin 2\alpha \approx \sin 2\alpha. \quad (22)$$

由式(22)可以看出,通过反正弦运算可以实时地解算方位角  $\alpha$ ,并且可以有效消除两路信号的增益差异和透射比系数的影响,且测量结果对光强波动不敏感,提高了测角精度,进而提高了系统的实用性。为了比较式(6)和式(22)的实际测角精度,分别对这两种测角方式做了实验,测角时间为 15 s,测角数据如表 1 所示。

$\alpha$  为根据式(6)得出的方位角平均值,  $\alpha'$  为根据式(22)得出的方位角平均值;  $\alpha_0 = 8'15''$  为式(6)的初始角度,  $\alpha'_0 = 35''$  为式(22)的初始角度;  $\Delta$  为  $\alpha$  的角度误差,  $\Delta'$  为  $\alpha'$  的角度误差。

表 1 实验数据表  
Tab. 1 Experiment data

转角/(°)	$\alpha$	$\alpha'$	$\Delta$	$\Delta'$
11	2°6'42"	2°0'36"	-93"	+54"
10	3°48'0"	4°0'38"	-1 215"	+28"
9	5°41'41"	6°0'32"	-1 594"	+7"
8	8°3'59"	8°0'39"	-256"	+4"
6	8°59'43"	9°0'42"	-512"	-3"
4	9°57'22"	10°1'3"	-653"	+3"
2	10°55'8"	11°1'29"	-787"	+1"
-2	-1°50'49"	-1°59'26"	56"	-1"
-4	-3°49'51"	-3°59'24"	114"	+1"
-6	-5°48'55"	-5°59'30"	170"	-5"
-8	-7°51'45"	-7°59'29"	208"	-4"
-9	-8°46'29"	-8°59'40"	316"	-15"
-10	-9°43'46"	-9°59'53"	519"	-28"
-11	-10°39'12"	-11°0'12"	753"	-47"

由表 1 可知,采用式(6)得出的方位角误差很大,实际中几乎无法使用。当采用磁光调制后,根据式(22)得出的方位角在  $-8 \sim +8^\circ$  可以达到  $5''$  的测量精度;超过  $8^\circ$  以后,随着角度的增大误差也变大。由式(5)可知,当转角变大时其中一路信号变得微弱,此时难以抑制系统信号噪声,从而造成测角精度变低。实验表明:采用磁光调制可以有效地消除透射比系数和增益系数对测量结果的影响,系统的测量精度得到了显著提升。

## 5 结 论

本文提出了一种基于偏振光的快速角度测量系统,与传统的空间偏振测角技术相比,省去了复杂的伺服跟踪系统。该系统具有可靠性高,精度高,测角速度快等特点。在实际测角实验中,测量时间为 15 s,在  $-8 \sim +8^\circ$  其角度测量精度可达  $5''$ ;虽然目前正交消光方法也可以达到角秒级的测量精度,但测量时间较长,一般约为 2 min,因此,本文方法在测角时间上具有很大优势。随着该技术的继续深入与发展,测角的速度和精度将会进一步提升,它在国防和民用测量领域的应用前景也会更大。

## 参考文献:

- [1] 董晓娜. 方位垂直传递技术的研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2001.  
DONG X N. *The Research on Technique of Passing Azimuth Angle Vertically* [D]. Xi'an:Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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 azimuth measurement error [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 461-465. (in Chinese)
- [4] 杨志勇,黄先祥,周召发,等. 基于磁光调制偏振光的空间方位失调角高精度测量新方法[J]. 光学学报,2011,31(11):166-170.  
YANG ZH Y, HUANG X X, ZHOU ZH F, et al.. New high-precision method of measuring spatial azimuth based on magneto-optic modulation polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 166-170. (in Chinese)
- [5] 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)

- [6] 孟甜甜,符照森,刘辉,等. 基于磁光调制原理的高精度偏振角测量方法模拟与实验研究[J]. 西北大学学报:自然科学版,2011,41(6):964-968.  
MENG T T, FU ZH S, LIU H, *et al.*. Modeling and experimental study on a high precision polarization measurement based on magneto-optical modulation [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(6): 964-968. (in Chinese)
- [7] 李小俊,李永安,汪源源,等. 基于矩形波信号的磁光调制偏振测量方法[J]. 光学学报,2008,28(8):1533-1537.  
LI X J, LI Y A, WANG Y Y, *et al.*. Magneto-optical modulation method for polarization measurement based on rectangular wave signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1533-1537. (in Chinese)
- [8] 李红霞,吴福全. 偏光棱镜调制器调制光强扰动的理论分析[J]. 光学学报,2003,23(12):1456-1459.  
LI H X, WU F Q. An analytical study on modulated intensity's perturbation for the polarizing prisms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1456-1459. (in Chinese)
- [9] 姚海涛,李国华,彭捍东,等. Wollaston 棱镜分束角和光强分束比的研究[J]. 曲阜师范大学学报,2008,34(2):51-54.  
YAO H T, LI G H, PENG H D, *et al.*. The splitting angle and light intensity splitting ratio of wollaston prism within its viewing field angle [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2008, 34(2):51-54 (in Chinese)
- [10] 朱化凤. 激光偏光棱镜对输出光强的影响[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2003.  
ZHU H F. *The Effect of Laser-Polarizing Prism of the Output Light Intensity* [D]. Qufu: Qufu Normal University,2003. (in Chinese)

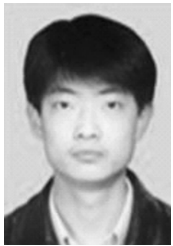
#### 作者简介:



**陆卫国**(1984—),男,广西来宾人,博士研究生,2008年于西安邮电大学获得学士学位,主要从事偏振光学应用方面的研究。E-mail: optlwg@gmail.com



**肖茂森**(1979—),男,新疆乌苏人,硕士,副研究员,2000年、2005年于西安建筑科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学定向与定位方面的研究。E-mail: xiaoms@opt.ac.cn



**王海霞**(1977—),男,山西大同人,硕士,工程师,2005年、2009年于西安建筑科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事信号处理方面的研究。E-mail: wang9317@126.com



**吴易明**(1975—),男,陕西乾县人,博士,研究员,博士生导师,1998年于西安交通大学获得学士学位,2009年于中科院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事偏振光信息处理方面的研究。E-mail: wym34@opt.ac.cn



**高立民**(1965—),男,陕西韩城人,博士,研究员,博士生导师,1988年于浙江大学获得学士学位,1991年、2004年于中科院西安光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光电测量技术与仪器方面的研究。E-mail: glm@opt.ac.cn