

## 利用新型偏振器件实现方位角测量

肖茂森<sup>1</sup>, 李春艳<sup>1,2</sup>, 吴易明<sup>1</sup>, 陆卫国<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:** 为了实现偏振光信号发生单元起偏器光轴方位角的精确测量, 介绍了一种采用磁光调制技术与利用直角棱镜和自准直仪来引出光轴方位角的装置及其工作原理, 并指出采用普通检偏棱镜时存在的问题。为解决该问题, 基于格兰-泰勒棱镜的工作原理设计了一种新型偏振器件, 该器件采用三块材料参数完全相同的方解石晶体构成, 位于两侧的晶体均可分别与中间的晶体形成一个格兰-泰勒棱镜, 使其翻转 180° 前后均能实现检偏功能; 详细介绍了该器件的工作原理及安装和工作方式, 并系统分析了新组件在工作过程中可以实现棱镜制造及安装误差的消除, 完成光轴方位角的测定。最后通过实验验证了该装置的测角精度为 0.5", 且系统具有稳定性高、精度高、可操作性强等特点。

**关键词:** 磁光调制; 方位角测量; 自准直经纬仪; 格兰-泰勒棱镜

**中图分类号:** TH741.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0611-05

## Measurement of azimuth by using new polarizer

Xiao Maosen<sup>1</sup>, Li Chunyan<sup>1,2</sup>, Wu Yiming<sup>1</sup>, Lu Weiguo<sup>1</sup>, Wang Haixia<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)

**Abstract:** In order to achieve azimuth accurate measurement of polarizer axis in the polarization signal generating unit, a device and its working principle were introduced with the use of magneto-optical modulation, right-angled prism and autocollimator to elicit the axis azimuth, and the ordinary polarization prism problems were pointed out. A new type of polarization device was designed based on Glan-Taylor prism to solve this problem, it uses three calcite crystals with identical material composition, each side can form a Glan-Taylor prism respectively with the middle, that it can be a analyzer when it is turned 180° around; the working principle of the device and installation and ways of working were described in detail, that the new component can eliminate the prism manufacture and installation errors in the work process was analyzed, it can complete polarizer axis azimuth determination. Finally, experiment results verify that the angle measurement precision of the device is 0.5", and the system has characteristics of high stability, precision and operability, and so on.

**Key words:** magneto-optical modulation; azimuth measurement; autocollimation theodolite; Glan-Taylor prism

收稿日期: 2014-06-06; 修订日期: 2014-07-08

基金项目: 国防科研基金(JPPT-115-3-1360)

作者简介: 肖茂森(1979-), 男, 副研究员, 主要从事光学定向与定位方面的研究。Email: xiaoms@opt.ac.cn

通讯作者: 李春艳(1987-), 女, 博士生, 主要从事光学系统设计及偏振光学应用方面的研究。Email: yanerly@163.com

## 0 引言

在火箭发射系统、航天器对接和材料内应力检测等装置中,需要实时测量上下不同平面内仪器的空间方位角。相比传统的测角方法(如机械方法、光学方法),采用基于偏振光的空间测角装置具有测角精度高、无需刚性连接、测角距离远等特点,所以广泛应用在火箭发射、材料内应力、直线度测量等领域。方位垂直传递系统就是一种基于偏振光的空间测角装置,其基本原理是采用处于上下不同空间平面的两偏振棱镜正交消光的方法实现空间方位角的垂直传递<sup>[1-2]</sup>。吴易明、董晓娜等人<sup>[3-5]</sup>提出了采用调制偏振光用于远距离空间方位角度精密测量的实现原理,并介绍了具体实现方案,该方案在实际应用之前,为标定偏振光信号发生单元起偏器的光轴方向与其他光学仪器(如自准直仪)光轴的夹角,需要高精度测量起偏器光轴的方位,由于系统的作用距离较远,且处于实验或工业现场等恶劣环境( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,采用附加码盘及转动多齿分度台的方法来测量出射光偏振方位角时,其精度主要依赖于多齿分度台的转动精度,目前市场上可见的最高精度多齿分度台的转动精度为  $0.2''$ ,另外,码盘及多齿分度台的使用有严格的条件,环境温度、地基震动都会对结果产生  $0.1^{\circ}$  以上的测量误差,进而影响方位测量的精度。可见该方法对环境要求较高,测量操作的难度及成本增加,同时高低温下多齿分度台的转动精度难以保证,对测量操作的影响特别明显,难以实现高精度方位角度测量。

针对以上所述缺点,文中基于格兰-泰勒棱镜原理<sup>[6-10]</sup>,设计了一种新型偏振器件并结合磁光调制技术,提出了一种测量起偏器光轴方位角的新方法,该测量方法简单,容易实现,且装置具有精度高、稳定可靠的特点,通过实验测定,该系统测量精度能达到  $0.5''$  以内。

## 1 系统测量原理

方位垂直传递系统中光电自准直仪所测方位失准角在不同空间平面的传递靠偏振光方位传递的方法来实现,为使方位垂直传递系统实现空间方位角的高精度测量,传递之前须精确标定光电自准直仪

光轴与起偏器光轴的夹角,因此起偏器光轴方位角的测量精度将直接影响其与自准直仪光轴之间角度的标定精度。实际应用中,在标定光电自准直仪的光轴与起偏器光轴方位的夹角时,由于光轴方位角是一个虚拟的方位信息,必须将其转移到直观、可靠的实物(如平面镜或直角棱镜)上,通过建立起偏器光轴方位与反射镜反射面法线之间的关系,最终间接获得光轴的方位角。一般选用直角棱镜作为基准信息输入和输出装置,实现方位信息的引入和引出。

测量系统的结构图如图 1 所示, $P_1$ 、 $P_2$  分别为起偏器和检偏器,设起偏器  $P_1$  的起偏方向为  $x$  轴,晶体光轴如图 1 中双箭头所示,与纸面平行。

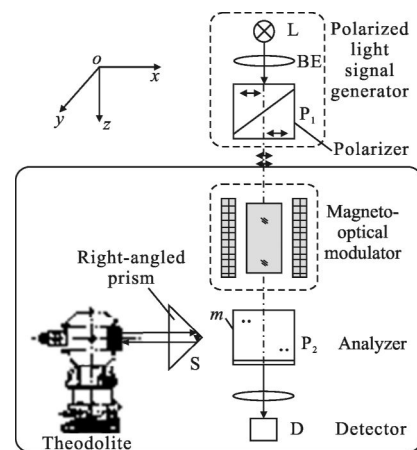


图 1 测量原理结构图

Fig.1 Measurement principle of the system

如图 1 所示,光源  $L$ 、准直镜  $BE$ 、起偏器  $P_1$  共同组成偏振光信号发生单元;磁光调制器由磁光玻璃及螺线管组成,对偏振光信号进行调制;检偏器组件由偏振棱镜  $P_2$  和探测器  $D$  组成,直角棱镜  $S$  与检偏器通过结构件固定,且共同置于精密转台上,直角棱镜  $S$  作为方位引出器件,将检偏器  $P_2$  的侧面(图中  $m$  面)的方位引出,假设理想情况下  $S$  棱脊垂直于光束传播方向且平行于  $m$  面, $m$  面平行于  $P_2$  光轴,因此通过间接测量得出的  $m$  面方位角即可作为与  $P_2$  光轴垂直的方位,实现起偏器光轴方位角的测量。

根据马吕斯定律,当  $P_1$ 、 $P_2$  光轴相互垂直时(即两者处于消光态),从  $P_2$  出射的光强值为零,因此可以通过检测光强的方式确定  $P_1$ 、 $P_2$  的消光位置,但该方法精度低,目前对光轴夹角的判定仅能够达到角分级。如果要达到更高的角度定位精度必须采取磁

光调制的方法,对磁光玻璃进行正弦调制,令:

$$\delta = VLB \sin \omega t \tag{1}$$

式中:  $\delta$  为线偏振光经过磁光调制器后振动方向的偏转角;  $\omega$  为调制频率;  $V$  为维尔德常数, 是表征磁光玻璃特性的常数;  $L$  为磁光玻璃的长度;  $B$  为磁感应强度。

定义  $m_j = 2VLB$  为调制度, 则通过调制后最终探测器接收到的光强为:

$$I = I_0 \cos^2(\gamma - \delta) = I_0 [1 + \cos 2\gamma \cdot \cos(m_j \sin \omega t) + \sin 2\gamma \cdot \sin(m_j \sin \omega t)] \tag{2}$$

式中:  $\gamma$  为  $P_2$  光轴与  $P_1$  光轴的夹角。对上式运用第一类贝塞尔函数进行展开, 并忽略二阶以上的贝塞尔函数, 则探测信号的基频分量为:

$$V_{1f} = kI_0 J_1(m_j) \sin 2\gamma \tag{3}$$

式中:  $k$  为光电转换系数。由上式可知, 当基频信号  $V_{1f} = 0$ 、探测光强最小时, 可判断检偏器相对起偏器处于消光位置, 此时二者晶体光轴垂直,  $\gamma = 90^\circ$ 。目前, 采用磁光调制的方法改测量光强信号为测量频率信号, 可以大大的提高光轴角度定位精度, 达  $0.3''$ 。

当  $P_1$  光轴与  $P_2$  光轴垂直时,  $P_2$  光轴与纸面垂直, 如图 1 中圆点所示, 此时  $P_1$  光轴平行于  $m$  面, 即可将  $m$  面所在方位认为  $P_1$  光轴的方位, 这样自准经纬仪通过瞄准直角棱镜  $S$  获得  $S$  所处方位角, 就可间接得到检偏器  $m$  面的方位, 进而完成偏振光信号发生单元起偏器光轴方位角的测量。

由以上分析可知, 探测器处于消光状态时, 检偏器光轴垂直于起偏器光轴, 处于  $y$  轴, 由于偏振镜加工时无法保证侧面  $m$  绝对平行于晶体光轴, 且直角棱镜  $S$  的棱脊由于装配误差难以和  $m$  面绝对平行, 设侧面  $m$  偏离检偏器光轴的方位角为  $\alpha$ , 直角棱镜  $S$  的棱脊与  $y$  轴的夹角为  $\beta$ , 如图 2 所示。

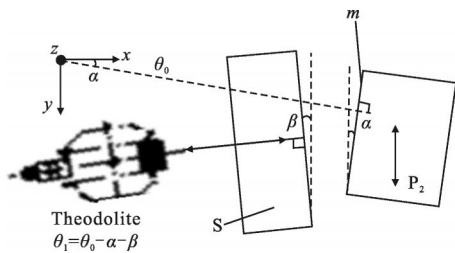


图 2 直角棱镜及检偏器光轴偏离角

Fig.2 Deviation angles of right-angled prism and analyzer axis

由图 2 可知, 经纬仪对直角棱镜  $S$  自准测量时,

得出  $S$  所在方位  $\theta_0 - \beta - \alpha$  ( $\theta_0$  为经纬仪瞄准  $m$  面时的示值, 经纬仪顺时针旋转方位角示值变大, 逆时针旋转方位角示值变小), 系统采用直角棱镜的目的是为间接引出  $m$  面的方位, 便于后续的测量工作。

因此探测器处于消光状态时, 利用直角棱镜  $S$  与  $m$  面之间的关系, 将起偏器光轴所在的方位角间接从  $m$  面引出时, 只能测出  $S$  所在方位  $\theta_0 - \beta - \alpha$ , 而得不出起偏器光轴  $x$  轴的真实方位  $\theta_0 - \alpha$ 。

理想情况下, 当检偏器不存在加工误差时  $\alpha = 0^\circ$ , 直角棱镜没有装配误差时, 其棱脊与  $P_2$  光轴、 $m$  面的夹角  $\beta = 0^\circ$ , 则  $S$  所在方位即可代表起偏器光轴的方位角。由于偏振晶体加工时, 采用 X 射线衍射图案观测法对其晶轴定向, 定向精度一般可达  $5'$ , 这样从晶体侧面  $m$  面引出的方位信息也是同等精度量级, 显然不能满足测量精度要求; 且装配过程中无法保证直角棱镜棱脊与检偏器  $P_2$  光轴绝对平行。由分析结果还可以看出, 测量误差随直角棱镜安装误差线性增大, 可见选用普通的检偏棱镜难以实现偏振光信号发生单元起偏器光轴方位角的精确测量。

## 2 新型偏振器件的设计

### 2.1 新型偏振器件的结构及安装方式

为解决以上问题, 文中设计了新型偏振器件, 如图 3 所示。

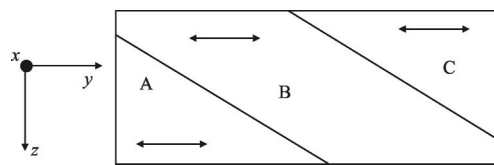


图 3 新型偏振器件

Fig.3 New polarizer

新型偏振器件是基于格兰-泰勒偏振棱镜的工作原理, 由三块材料、参数完全相同的方解石晶体制成, 其中位于中间的方解石晶体记为  $B$ , 位于两侧的方解石晶体分别记为  $A$ 、 $C$ ; 则  $B$  具有上下通光面,  $A$ 、 $C$  均为楔形, 且  $A$  具有下通光面、 $C$  具有上通光面;  $A$ 、 $C$  分别与  $B$  形成的斜向胶合面相互平行; 各晶体的光轴均如图 3 中双箭头所示。

使用过程中, 为了引出检偏器  $m$  面所在方位, 以比较方便地对起偏器光轴的方位进行测量, 设置

直角棱镜与该偏振器件固连(为说明问题,该节先假设直角棱镜弦面的法线方向与 B 部分  $m$  侧面垂直),其连结方式简图参考图 1、图 3,如图 4 所示。

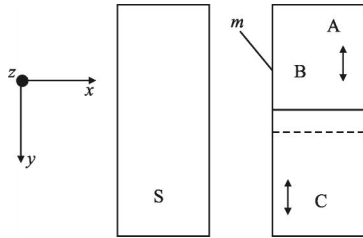


图 4 直角棱镜与新型偏振器件连结方式(俯视图)

Fig.4 Connection of right-angled prism with new polarizer (the top view)

图 4 中,直角棱镜 S 固连于偏振器件的侧面,并使其棱脊垂直于光束传播方向,与新型偏振器件光轴方向平行(图 4 中,A 部分处于 B 的下方、C 部分处于 B 上方)。

### 2.2 新型偏振器件的工作原理

新型偏振器件是基于格兰-泰勒棱镜的原理进行设计的,在系统中当做检偏器使用,其工作原理如图 5 所示。

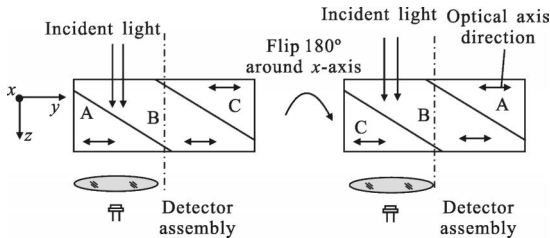


图 5 新型偏振器件的工作原理

Fig.5 Working principle of new polarizer

图 5 中,线偏振光束沿  $z$  轴入射至新型偏振器件的 B 部分,A、B 两部分构成一个格兰-泰勒棱镜,旋转偏振器件,当线偏振光的偏振方向与 A、B 的光轴方向垂直时,探测器探测到的光强为零,此时处于消光状态,将新型偏振器件绕  $x$  轴与固连的直角棱镜同时翻转  $180^\circ$ ,线偏振光束沿  $z$  轴依然入射至偏振器件的 B 部分,此时 B、C 两部分构成一个格兰-泰勒棱镜,探测器位置不变,然后精确旋至  $P_1$  光轴与 B、C 光轴相互垂直时,探测器再次处于消光状态。可见新型偏振器件的作用就是在翻转前后均可实现格兰-泰勒棱镜的功能。

### 2.3 新型偏振器件的应用

由于检偏器组件中直角棱镜与新型偏振器件是固连在一起的,因此同时分析直角棱镜棱脊及新型偏振器件  $m$  面与晶体光轴夹角对测量结果的影响,如图 6 所示,新型偏振器件  $m$  面偏离晶体光轴的夹角为  $\alpha$ ,直角棱镜棱脊与  $y$  轴的夹角为  $\beta$ 。

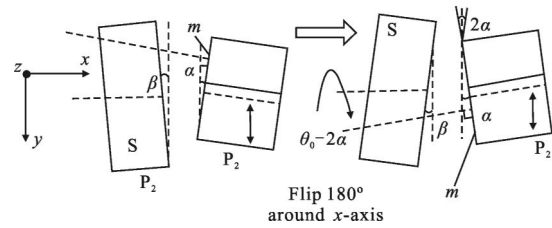


图 6 各误差角度关系

Fig.6 Relation of error angles

新型偏振器件和直角棱镜存在加工和装配误差  $\alpha$ 、 $\beta$  时,根据第一节分析,得第一次测量的直角棱镜的方位角:

$$\theta_1 = \theta_0 - \alpha - \beta \quad (4)$$

绕  $x$  轴翻转  $180^\circ$  之后,继续旋转检偏器组件,当线偏振光的偏振方向与 B、C(B、C 二者组成一个格兰-泰勒棱镜)的光轴方向垂直时,探测器探测到的光强为零,处于消光状态,自准直经纬仪瞄准直角棱镜,测得方位角:

$$\theta_2 = \theta_0 - 2\alpha + \alpha + \beta \quad (5)$$

两次测量求和平均,即可得出  $x$  轴方位值(即起偏器光轴的方位角):

$$\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2 = \theta_0 - \alpha \quad (6)$$

由公式(6)可知,通过测量翻转前后直角棱镜的方位值,并对测量结果求取平均值的方法可以得出  $x$  轴的真实方位,完成了偏振光信号发生单元起偏器光轴真实方位角的测量。采用这种方法进行测量时,虽然标准偏振棱镜 B 部分是决定检测精度的关键,需要仔细设计和加工,但是该方法通过两次检测平均消除了用于方位信息输出的直角棱镜棱脊与偏振镜侧面之间的方位差,光轴定位精度对测量结果的影响也得到消除,并且偏振方位角的测量精度不受器件加工差异性(光轴定位差异性)的影响,即消除了偏振器组件加工和装配时的误差,系统使用高精度自准直经纬仪自准测量检偏器侧面的直角棱镜,避免了使用转动多齿分度台自身并读数引起的

误差,提高了测量精度,可以完成偏振光信号发生单元起偏器光轴方位角的高精度测量,且该方法具有很强的可操作性。

### 3 实验

为了验证系统使用新型偏振器件的实际方位角测量精度,对这种测角方法做了实验并获得了实验数据,将偏振光信号发生单元架设于检偏器组件测量装置之上并调平,两次旋转检偏器至消光状态,并分别采用自准直经纬仪瞄准测量与新型偏振器件一起翻转 $180^\circ$ 前后的直角棱镜,将两次测量的结果求取平均值。为验证系统的测角精度,采用将偏振光信号发生单元旋转一定角度并依次测量,其中将偏振光信号发生单元未旋转时( $\varepsilon=0^\circ$ )的位置经过反复多次测量并求取平均值,得出 $\theta=215^\circ 6' 4.5''$ ,以此值作为参考真值,测角数据如表1所示。

$\varepsilon$ 为偏振光信号发生单元旋转角度; $\theta_1$ 为经纬仪第一次测量所得的方位值; $\theta_2$ 为将偏振器组件翻转 $180^\circ$ 后测得的方位值; $\theta$ 为计算得出的平均值。

表1 实验数据表

Tab.1 Experiment data

$\varepsilon/(\circ)$	$\theta_1/(\prime)$	$\theta_2/(\prime)$	$\theta/(\prime)$
$2^\circ$	$217^\circ 5' 21''$	$217^\circ 6' 47''$	$217^\circ 6' 4''$
$4^\circ$	$219^\circ 5' 22''$	$219^\circ 6' 47''$	$219^\circ 6' 4.5''$
$6^\circ$	$221^\circ 5' 21''$	$221^\circ 6' 47''$	$221^\circ 6' 4''$
$8^\circ$	$223^\circ 5' 23''$	$223^\circ 6' 45''$	$223^\circ 6' 4''$
$9^\circ$	$224^\circ 5' 21''$	$224^\circ 6' 49''$	$224^\circ 6' 5''$
$-2^\circ$	$213^\circ 5' 20''$	$213^\circ 6' 49''$	$213^\circ 6' 4.5''$
$-4^\circ$	$211^\circ 5' 22''$	$211^\circ 6' 46''$	$211^\circ 6' 4''$
$-6^\circ$	$209^\circ 5' 22''$	$209^\circ 6' 47''$	$209^\circ 6' 4.5''$
$-8^\circ$	$207^\circ 5' 24''$	$207^\circ 6' 46''$	$207^\circ 6' 5''$

由表1可知采用该方法得出的起偏器光轴方位角测量精度达 $0.5''$ 。实验表明:采用所设计的新型偏振器件可以有效消除器件加工及装配等误差对测量结果的影响,达到高精度起偏器光轴方位角的测量。

### 4 结论

文中基于格兰-泰勒棱镜原理设计了一种新型

偏振器件,并采用新型偏振器组件实现了偏振光信号发生单元起偏器光轴方位角的测量,与传统的检偏棱镜相比,消除了复杂的读数转动机构及器件加工误差对测量精度的影响。系统具有可靠性高、精度高、操作方便等特点。在实际系统实验中达到了 $0.5''$ 的测量精度。随着偏振光技术的发展越来越成熟,文中的工作对偏振器件在工业和民用测量领域的应用具有很大的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Wang Yueyong, Guo Xiqing, Wu Keyong. Development trend of azimuth aiming system of ballistic missiles abroad[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 31-35. (in Chinese)
- [2] Lu Weiguo, Wu Yiming, Gao Limin, et al. The use of polarized light to realize the rapid measurement of the spatial azimuth [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 539-545. (in Chinese)
- [3] Wu Yiming, Gao Limin, Chen Liangyi. Precision measurement and transmission of azimuthal information based on polarization modulated light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 525-529. (in Chinese)
- [4] Dong Xiaona, Gao Limin, Shen Xiaojun, et al. Passing azimuth vertically with the technique of magneto optic modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1389-1391. (in Chinese)
- [5] Yang Zhiyong, Zhou Zhaofa, Zhang Zhili. Improvement of transmitting spatial azimuth based on sine wave magneto-optic modulation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 692-698. (in Chinese)
- [6] Zhu Huafeng, Song Lianke, Peng Handong, et al. Distribution of transmitted light of a Glan-Taylor prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1881-1884. (in Chinese)
- [7] Zhao Tingsheng, Li Guohua, Peng Handong, et al. A novel design for Glan-Taylor prism without interference effect[J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(5): 0372-0375.
- [8] Tang Hengjing, Wu Fuquan, Deng Hongyan. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 215-217. (in Chinese)
- [9] Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 184-211. (in Chinese)
- [10] Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical Optics and Application Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 26-40, 216-251. (in Chinese)