

## 新型高精度空间折转光管的设计方法

尹逊龙<sup>1,2</sup>, 吴易明<sup>1</sup>, 吴璀罡<sup>1</sup>, 姚震<sup>1,2</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:** 星模惯测组合装置在标调过程中, 要求测量星模拟器出射光束与惯组棱镜反射光束的方位夹角, 两光束不仅方向相反且存在空间平移, 为了实现单台经纬仪对该角度的测量, 该系统中需要加入特定的折转光管。提出了一种新型的空间折转光管的设计方法, 能够实现光路的 180°折转和垂直于星模拟器光轴的平面内的二维平移, 设计中采用了直角屋脊棱镜与斜方棱镜, 很好地消除了安装误差; 为了消除由于棱镜加工误差带来的折转光管传递偏差, 设计中加入双光楔结构。折转光管的光路通过双光楔机构可以发生一定的偏转, 该偏转可以抵消折转光管各个部分带来的传递偏差。实验结果表明, 该设计方法可以很好的实现光路折转地要求, 同时在保证折转光管的传递精度的基础上, 降低了整个光管的加工成本。

**关键词:** 空间光路折转; 直角屋脊棱镜; 双光楔; 误差分析

**中图分类号:** TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3735-05

## New design method of precise space replicated light-tube

Yin Xunlong<sup>1,2</sup>, Wu Yiming<sup>1</sup>, Wu Cuigang<sup>1</sup>, Yao Zhen<sup>1,2</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:** During the calibration and regulation of star simulator inertial measurement unit equipment, the parameter what is the azimuth angle between emergence beam from star simulator and reflected beam of inertial measurement prism is required. The directions of two beams are opposite and there are some space translation in them. The systems require a space replication light-tube for the measurement of the parameter with one theodolite. A new method was proposed for the design of replication light-tube. the light-tube can make the light pace replicate 180° in the horizontal plane and have a two dimensional translation in the plane perpendicular to the optical axis of the star simulator. Right angle roof prism and rhombic prism were used in the design of the light-tube for the purpose to eliminate the installation error of the tube. A double wedges instrument was designed to improve the accuracy of the light-tube. With the use of double wedges, the light pace could title lightly, so the transfer deviation could be eliminated. Experimental results show that the design can not only meet the requirements of the optical path and guarantee delivery accuracy, but also reduce processing costs of the precise replicated light-tube.

**Key words:** space light replication; right angle roof prism; double wedges; error analysis

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

作者简介: 尹逊龙(1990-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计及检测方面的研究。Email: yinxunlong2011@163.com

导师简介: 吴易明(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密测量方面的研究。Email: wym34@opt.ac.cn

## 0 引言

射击精度是弹道导弹的重要指标,该指标与弹道导弹的瞄准系统有着直接的联系。弹道导弹的光电瞄准系统用于在导弹发射前校正弹道导弹制导基准的初始方位(制导平台台体上的两次反射直角棱镜交棱的法平面),使其初始方位(弹道导弹的稳定基面)与射面相重合。星模惯测组合装置是目前光电瞄准系统中常用的一种装置,它主要由星光模拟器、惯组棱镜以及相关控制系统构成。它的一个重要的参数就是星光模拟器出射光束与惯组棱镜反射的光束的方位夹角。星模惯测装置在应用过程中,该夹角的测量精度很大程度上影响了整个装置的性能的优劣,进而会影响到光电瞄准系统的瞄准精度。星模拟器的出射光束与惯组棱镜的反射光束有  $180^\circ$  的夹角,应用“折转光管”来实现光束高精度的方位传递,是一种既简单、可靠,又能实现高精度方位传递的技术方案<sup>[1-4]</sup>。

## 1 折转光管的组成部分和原理

图 1 给出了改进后折转光管的示意框图,已有的折转光管由直角棱镜和斜方棱镜组成,改进后的折转光管用直角屋脊棱镜替代原有的直角棱镜,在斜方棱镜与直角屋脊棱镜连接管内增加了一套双光楔结构,直角屋脊棱镜的使用可以有效避免棱镜装配时带来的误差,同时加入双光楔结构可以很好地平衡各个器件的加工误差。由星光模拟器发出平行

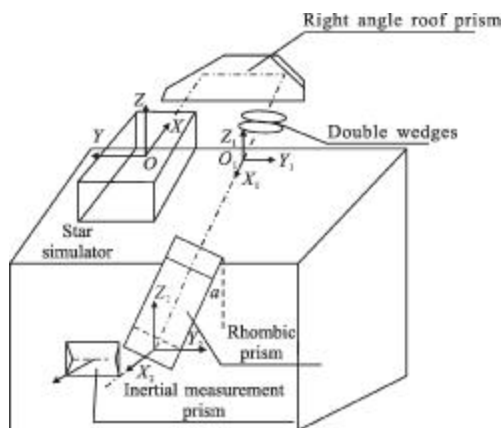


图 1 折转光管光路图

Fig.1 Light pace diagram of replication light-tube

光束,首先经过前端的直角屋脊棱镜,光路在水平面(XOY面)内折转  $180^\circ$ ,同时完成一定距离的平移,然后光束经过双光楔结构,最后入射至斜方棱镜在惯组棱镜一侧出射,为了保证斜方棱镜出射端与惯组棱镜同时处于自准直经纬仪的视场内,斜方棱镜在竖直面(YOZ面)内与竖直方向存在一定的夹角,最终星光模拟器发出的光束经由该光管实现光路空间折转以及平移。

由于棱镜存在加工误差,则在折转光管中没有加入双光楔结构时,斜方棱镜出射的光束方向与星光模拟器的光束方向有一定的夹角,该夹角即为折转光管的传递误差。为了抵消系统的传递误差,该设计在折转光管中加入一个双光楔结构。双光楔结构对光传播方向偏转的原理公式为:

$$\delta = 2\alpha(n-1)\cos\frac{\Phi}{2} \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为光束通过双光楔后,出射光束与入射光束的夹角; $\alpha$ 为光楔的楔角; $\Phi$ 为两光楔之间相对转过的角度,由上面的公式可以得出,任一光束经过过双光楔结构后,光束可以偏转到以入射方向为轴,锥角为  $\alpha$  的圆锥范围内的任意方向(此处,偏转方向主要是由角度  $\Phi$  来控制)<sup>[3]</sup>。折转光管在装调过程中,首先利用经纬仪两次自准平面镜的方法测出不加双光楔结构时折转光管的方位传递误差  $\Delta_1$  与俯仰传递误差  $\Delta_2$ ,然后,计算双光楔能产生方位偏差  $-\Delta_1$ ,俯仰偏差  $-\Delta_2$  的角度  $\phi$ ,调整两片光楔之间的相对角度  $\Phi$  到  $\phi$ ,并将两片光楔之间的相对位置固定,最后将双光楔结构装到折转光管中的连接光管中,用前面提到的经纬仪两次自准直平面镜的方法,完成折转光管传递精度的最终标定。

## 2 系统误差分析

设直角屋脊棱镜的加工误差为:第一光学平行度为  $\theta_1$ ,第二光学平行度为  $\theta_{11}$ 。则直角屋脊棱镜的作用矩阵  $H_1$  可以写为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \cos(180+\theta_1) & \cos(90+\theta_1) & \cos(90+\theta_{11}) \\ \cos(90-\theta_1) & \cos(180+\theta_1) & \cos(90+\theta_{11}) \\ \cos(90-\theta_{11}) & \cos(180-\theta_{11}) & \theta_{11} \end{bmatrix}$$

斜方棱镜在竖直平面内转过的角度为  $\alpha$ ,则坐标系的旋转矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

斜方棱镜的第一光学平行度为  $\theta_1'$ , 第二光学平行度为  $\theta_{11}'$ 。

则此时斜方棱镜的作用矩阵  $H_2$  可以写为:

$$Y = M^{-1} \cdot H_2 \cdot M \cdot H_1 \cdot X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos\theta_1' & -\sin\theta_1' & -\sin\theta_{11}' \\ \sin\theta_1' & \cos\theta_1' & -\sin\theta_{11}' \\ \sin\theta_{11}' & \sin\theta_{11}' & \cos\theta_{11}' \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & -\sin\theta_{11} \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & -\sin\theta_{11} \\ \sin\theta_{11} & \sin\theta_{11} & \cos\theta_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\cos\theta_1' \cos\theta_1 - \sin\theta_1' (\sin\theta_1 \cos\alpha - \sin\theta_{11} \sin\alpha) \\ -\sin\theta_1' (\sin\theta_1 \sin\alpha - \sin\theta_{11} \cos\alpha) \\ -\cos\theta_1 (\sin\theta_1' \cos\alpha + \sin\theta_{11}' \sin\alpha) + (\sin\theta_1 \cos\alpha - \sin\theta_{11} \sin\alpha) (\cos\theta_1' \cos\alpha + \sin\theta_{11}' \sin\alpha) + (\sin\theta_1 \sin\alpha + \sin\theta_{11} \cos\alpha) \cdot (-\sin\theta_{11}' \cos\alpha + \cos\theta_{11}' \sin\alpha) \\ -\cos\theta_1 (-\sin\theta_1' \sin\alpha + \sin\theta_{11}' \sin\alpha) + (\sin\theta_1 \cos\alpha - \sin\theta_{11} \sin\alpha) (-\cos\theta_1' \sin\alpha + \sin\theta_{11}' \cos\alpha) + (\sin\theta_1 \sin\alpha + \sin\theta_{11} \cos\alpha) \cdot (\sin\theta_{11}' \sin\alpha + \cos\theta_{11}' \cos\alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

由公式(2)可以得出斜方棱镜出射光束的方向向量, 通过该向量可以求出由斜方棱镜出射光束与入射到折转光管光束之间的方位偏差  $\Delta_1$  与及俯仰偏差  $\Delta_2$ 。

$$\tan\Delta_1 = \frac{Y(2)}{Y(1)} \quad (3)$$

$$\tan\Delta_2 = \frac{Y(3)}{Y(1)} \quad (4)$$

由于  $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_{11}$ 、 $\theta_1'$ 、 $\theta_{11}'$  都为小角度, 故  $\theta_1$ 、 $\theta_{11}$ 、 $\theta_1'$ 、 $\theta_{11}'$  的正弦乘积项可以省略, 由公式(2)-(4)可得:

$$\Delta_1 = -\theta_1' \cos\alpha + \theta_{11}' \sin\alpha + (\theta_1 \cos\alpha - \theta_{11} \sin\alpha) \cos\alpha - \frac{(\theta_1 \sin\alpha + \theta_{11} \cos\alpha) \cos\alpha}{\cos\theta_1' \cos\theta_1} \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \theta_1' \sin\alpha - \theta_{11}' \cos\alpha - (\theta_1 \cos\alpha - \theta_{11} \sin\alpha) \sin\alpha - \frac{(\theta_1 \sin\alpha + \theta_{11} \cos\alpha) \cos\alpha}{\cos\theta_1' \cos\theta_1} \quad (6)$$

光楔 1 的楔角为  $\beta + \beta_1$ , 光楔 2 的楔角为  $\beta + \beta_2$ , 由公式(1)可知, 此时双光楔产生的偏转角在  $(\beta_1 - \beta_2) \sim (2\beta + \beta_1 + \beta_2)$  范围内。通过控制两光楔之间的相对角度  $\varphi$  以及两光楔之间的楔角偏差  $\beta_1 - \beta_2$ , 可以将双光楔产生的偏差调为: 方位偏差为  $-\Delta_1$ , 俯仰偏差为  $-\Delta_2$ 。故整个折转光管由于各个零件加工误差引起的光管

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1' & \cos(90 + \theta_1') & \cos(90 + \theta_{11}') \\ \cos(90 - \theta_1') & \cos\theta_1' & \cos(90 + \theta_{11}') \\ \cos(90 - \theta_{11}') & \cos(90 - \theta_{11}') & \cos\theta_{11}' \end{bmatrix}$$

设入射光束方向向量  $X$  为:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

则由斜方棱镜出射光束方向向量  $Y$  可以表示为:

传递精度的偏差可以降低到要求范围之内。

例如, 直角屋脊棱镜的加工误差为:  $\theta_1=6''$ ,  $\theta_{11}=11''$ 。斜方棱镜的加工误差为  $\theta_1'=9''$ ,  $\theta_{11}'=12''$ 。两块光楔楔角分别为  $44.6''$ ,  $45.4''$ 。将各个数据带入公式(5)和(6)可得出  $\Delta_1=-15.75''$ ,  $\Delta_2=12.86''$ 。由双光楔对光路的偏转原理可以得出, 光束经过双光楔后, 光束可以偏向两个圆锥构成的圆锥环带范围内任一方向, 其投影范围如图 2 所示。由上面的计算得出,  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  所代表的偏转方向在双光楔结构的光线偏转范围之内, 即可以通过调节两片光楔之间的相对角度  $\varphi$  使得光束经过双光楔结构后偏向  $-\Delta_1$  和  $-\Delta_2$  方向, 进而消除棱镜加工误差带来的光路传递偏差。

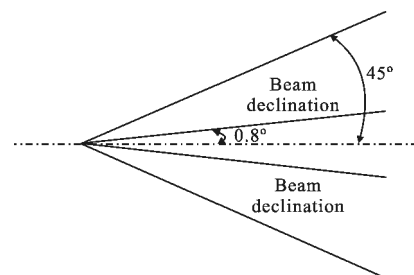


图 2 双光楔光路偏转范围投影图  
Fig.2 Chart of light deflection via double wedges

通过上面的分析可以得出采用该种折转光管的设计方法,可以很好地消除棱镜加工误差所带来的光路传递的偏差。

### 3 折转光管传递精度的标定方法

折转光管加工完成后,需要对折转光管的光路传递精度进行标定,该光管采用经纬仪两次自准直平面镜的方法来完成光管传递精度的标定。首先将折转光管、自准直经纬仪以及平面镜如图 3 所示架

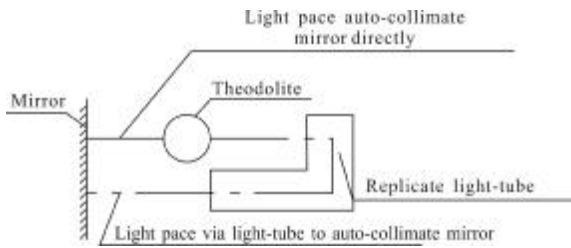


图 3 光管精度标定原理图

Fig.3 Schematic diagram to calibrate the accuracy of light-tube

设到位,然后用经纬仪自准平面镜可以得出平面镜的方位和俯仰值分别为  $\alpha_1$  和  $\beta_1$ ,再将经纬仪转过  $180^\circ$  经过折转光管后完成对平面镜的自准直,同样得出一组平面镜的方位和俯仰值,其值分别为  $\alpha_2$  和  $\beta_2$ ,则折转光管的方位和俯仰传递精度分别为:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 - 180^\circ \quad \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$$

该检测系统的误差主要来源于经纬仪自身的误差,在测量过程中可以利用正倒镜分别测量以及多次测量求平均值的方法很好地降低经纬仪带来的误差。

### 4 实验数据

首先,利用上文提到的两次自准直平面镜的方法测出不装光楔时,折转光管的方位俯仰传递精度,然后推算出光楔相对转动的角度  $\varphi$  并将光楔装入光管,最后,利用两次自准直平面镜的方法完成折转光管最终传递精度的测量。

折转光管传递精度测量数据如表 1 所示。

表 1 实验数据统计表

Tab.1 Testing data statistics chart

No.		1	2	3	4	5	
Direct auto-collimation	Front	H	0°0'0.4"	0°0'2.5"	359°59'57.4"	0°0'0.3"	359°59'58.7"
		V	89°34'34.9"	89°34'10.9"	89°15'33.4"	89°15'31.6"	89°15'32.6"
	Contrary	H	179°59'58.4"	180°0'0.7"	180°0'3"	180°0'0.5"	179°59'59.6"
		V	270°24'28.7"	270°24'59"	270°43'33.3"	270°43'32.2"	270°43'31.1"
Auto-collimation by light-tube	Front	H	359°59'56.3"	0°0'0"	0°0'0.4"	359°59'58.3"	359°59'59"
		V	90°24'13.9"	90°24'57.2"	89°15'35.3"	89°15'34"	89°15'34.1"
	Contrary	H	180°0'2"	180°0'3.9"	179°59'55.8"	179°59'54.9"	179°59'55.2"
		V	269°34'47.3"	269°34'12.8"	270°43'32.6"	270°43'30.6"	270°43'31"
Transmitting accuracy	H	1.7"	0.4"	2.2"	1.3"	1.5"	
	V	4.4"	2.9"	3.7"	2"	3.3"	

对上面五次测量结果求平均,得出该折转光管的方位传递精度为 1.5",俯仰传递精度为 3.3"。

由上文误差分析可以得出,在理想情况下,光楔可以将光管中其他部分引入的误差消除,即最终光管的方位和俯仰传递精度都达到 0"。通过对系统的分析,可以得出这里传递精度未达到理想要求,主要是由光楔之间相对角度  $\varphi$  的控制未达到理想值导致的。

### 5 结论

通过实验可以得出,文中提出的折转光管的设计方法可以利用两块加工误差分别为 15"的棱镜以及两块楔角为 45"的光楔制作出光路传递精度在 4"以内的折转光管。该方法可以很好地保证光管的传递精度,同时可以大幅度降低高精度折转光管的加工成本,因此此种方法可以很好地替代原有的高

精度折转光管的设计方法。

#### 参考文献:

- [1] Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. Opt Precision Eng, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)  
王家琪, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
- [2] Jin Guang, Wang Jiaqi. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation[J]. Opt Precision Eng, 1999, 7(5): 89-94. (in Chinese)  
金光, 王家琪. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.
- [3] Zhang Minghui, Zhang Xiaoyu, Qiao Yanfeng. Study on vehicle twin-photoelectrical pointing system [J]. Opto-electronic Eng, 2004, 31(7): 18-23. (in Chinese)  
张明慧, 张骁禹, 乔彦峰. 车载双联光电瞄准系统的研究 [J]. 光电工程, 2004, 31(7): 18-23.
- [4] Ou Tonggeng, Chen Zhigao, Yang Boxiong, et al. Operating principle and error source of a new type of ccd photoelectric autocollimator [J]. J Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(6): 98-100. (in Chinese)  
欧同庚, 陈志高, 杨博雄, 等. CCD 光电自准直仪工作原理及误差源分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 98-100.
- [5] Li Yonggang, Shang Qiufang, Zhao Weigong, et al. Research on error measurement method of the replicate light-tube [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(4): 23-29.  
李永刚, 商秋芳, 赵伟功, 等. 折转光管误差检测方法的研究 [J]. 宇航计测技术, 2012, 32(4): 23-29.
- [6] Cheng Yunpeng, Zhang Kaiyuan, Xu Zhong. Matrix Theory [M]. Xi'an: North Western Polytechnical University Press, 2006: 11-16. (in Chinese)  
程云鹏, 张凯院, 徐仲. 矩阵论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 11-16.