

## 折转光管在光电瞄准系统中的应用

王旻\*, 余毅, 王春霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**介绍了折转光管在瞄准系统中的使用位置、结构、工作原理和装调方法,分析了折转光管安装误差和两块平面反射镜之间的装调误差对方位传递精度的影响。使用 MATLAB 软件编程、计算、绘制出方位传递误差和高低传递误差的统计直方图,其分析结果为折转光管的装调提供了指导数据。计算分析表明,影响折转光管方位传递误差的主要因素是折转光管中两平面反射镜的装调误差,只要两平面反射镜的装调满足技术要求:方位误差 $\leq 4''$ 、高低误差 $\leq 0.5'$ ,即使折转光管在3个方向的安装误差极限值达到 $15^\circ$ ,也可满足折转光管方位传递误差 $\leq 10''$ 的设计要求。

**关键词:**光电瞄准系统;折转光管;自准直经纬仪;方位传递误差

**中图分类号:**TH745.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120506.0618

## Application of reflex light-tube to photoelectric pointing system

WANG Min\*, YU Yi, WANG Chun-xia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: work6180@yahoo.com.cn

**Abstract:** The location, structure, working principle and the assembling method of a reflex light-tube in a photoelectric pointing system are introduced, meanwhile the effects of installation error and assembling error of the reflex light-tube between two plane mirrors on the accuracy of azimuth transfer are analyzed. Matlab software is used to compute and draw the statistic histograms of the azimuth transfer error and the elevation error, and the results provide a guidance for the assembling reflex light-tube. According to the results from calculation and analysis, the main factor affecting azimuth transfer error of reflex light-tube is the assembling error between the two plane mirrors in the reflex light-tube. As long as the assemble error between the two plane mirrors satisfies the technical requirements of azimuth error $\leq 4''$  and elevation error $\leq 0.5'$ , the azimuth transfer error of the reflex light-tube can be  $\leq 10''$  even the installation error extrema in three directions of the reflex light-tube reach  $15^\circ$ .

**Key words:** photoelectric pointing system; reflex light-tube; autocollimation theodolite; azimuth transfer error

收稿日期:2012-09-25;修订日期:2012-11-23

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010A0926)

## 1 引言

射程、运载能力、射击精度和生存概率是弹道导弹的4个最主要的技术指标。前两个技术指标由弹道导弹的内在因素决定,而后两个技术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。其方法是通过一套光电仪器即光电瞄准系统,将通过测地学或天文测量等技术手段得到的射面传递到弹道导弹制导基准,供弹道导弹精确制导,因而光电瞄准系统的瞄准精度是影响弹道导弹弹着点精度的重要因素之一。

为了提高弹道导弹的生存概率,一般采用机动发射技术,但陆上或海上机动发射都对弹道导弹的瞄准系统有特殊的要求。机动发射的特殊环境常常受到场地的各种制约,很多情况下不能直接采用斜瞄法,而是要求光电瞄准系统中具有能实现一定高程上的高精度方位传递环节。在高程不是太高的情况下,应用“折转光管”来实现高程上高精度的方位传递,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>。

本文在介绍折转光管的构造、工作原理和精密装调的基础上,对折转光管的安装误差、组成折转光管的两块平面反射镜之间的装调误差,以及方位传递精度进行了详细分析。

## 2 折转光管在瞄准系统中的位置

图1是最简单的应用折转光管实现高程上高精度方位传递的陆上机动发射弹道导弹的技术方案示意图。

陆上机动发射弹道导弹的光电瞄准系统主要由自准直经纬仪、折转光管、瞄准控制器组成。折转光管由两块在空间平行的平面反射镜组成,它作为方位传递器件,不仅使光路在高程上转折一定距离,并可保持其被传递的方位方向不变。如图1所示,自准直经纬仪发出的准直光通过折转

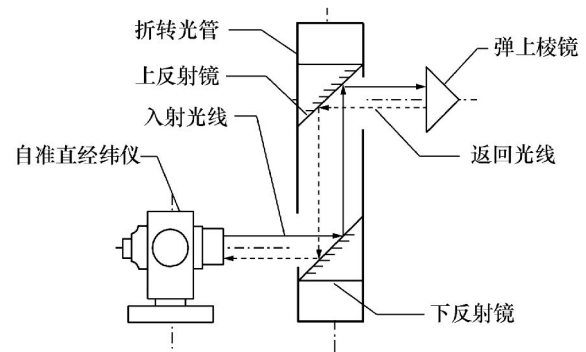


图1 光电瞄准系统工作原理示意图

Fig. 1 Principle schematic diagram of photoelectrical pointing system

光管下通气孔进入下反射镜,经过下反射镜的反射,形成平行于折转光管纵轴方向的准直光,到达上反射镜,经上反射镜的第二次反射,从折转光管上通气孔输出,投射到弹上棱镜。上述光束经弹上棱镜反射后,按原光路返回到自准直经纬仪像面上的 CCD 图像探测器上,以此读取弹道导弹制导平台初始方位的方位偏差值。

## 3 折转光管的构造和工作原理

图2为折转光管的构造简图。折转光管的光学系统由空间相互平行的两块平面反射镜组成,它们装置在同一刚体上,只要该刚体不变形,两块平面反射镜的两个反射面在空间始终保持严格平行,则无论该折转光管作为一个整体在空间的安装位置如何,出射光线和入射光线在空间将始终保持平行,这就是折转光管可以实现光线在高程上的方位高精度传递的原理<sup>[5-7]</sup>。

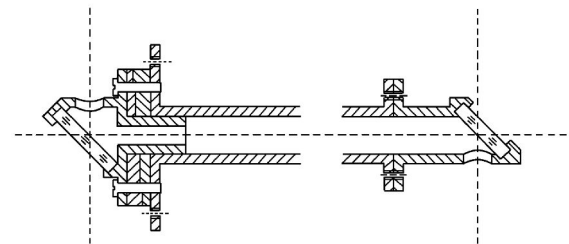


图2 折转光管的结构简图

Fig. 2 Structure diagram of reflex light-tube

为了保证折转光管在高程上的方位高传递精度,在结构设计上要尽可能地提高其热稳定性和力学稳定性。为了使其具有优良的热稳定性,采用套筒结构装配,使两块平面反射镜的内筒和外筒之间有一个合适的距离,在内筒的外壁上包裹隔热材料,尽量使外筒的温度变化不会传递到内筒,减小内筒的热变形;为了使其具有优良的力学稳定性,只依靠上端的一个法兰实现内筒与外筒之间的相互连结,处在工作位置时内筒自然下垂,外筒下端对内筒没有力的约束,也就是外筒的变形不会附带造成内筒变形。

为了实现两块平面反射镜在空间的平行性高精度装调,两个平面反射镜通过两个镜座与内筒的两端法兰相联结。下端镜座和下法兰之间设有调节垫片,通过研磨此法兰,使下端镜座和下法兰固定之后,下平面反射镜反射面的法矢量与内筒的几何轴线成 $45^\circ$ 。在上端镜座和上法兰之间设计了一对楔形垫圈,依靠反复调节两个楔形垫圈的相对位置和此对楔形垫圈在内筒上端法兰上的方位转角,以及上镜座与内筒上端法兰在方位上的转角,使得两块平面反射镜的反射面在空间处于精确的平行。其平行度指标应随光电瞄准系统的系统精度要求来分配,就一般的精度来说,以下的技术指标可以作为参考,即出射光线与入射光线在空间的不平行度的极限误差方位优于 $4''$ ;高低误差优于 $1'$ ;而折转光管方位传递的极限误差 $\leq 10''$ 。

#### 4 折转光管精密装调方法

折转光管精密装调方法如图3所示,其装调步骤如下:(1)调平平台,在平台上相距折转光管进、出光口的距离上,放置两个水银盘;(2)在右端水银盘的上方架设一个 $0.2''$ 自准平行光管,调整该自准平行光管的位置,使其与右端水银盘液面(即当地水准面)自准;(3)将待装调的折转光管放置在平台上,使出光口对准上方的自准平行光管,并使折转光管的进光口对准下方的另一个水银盘位置;(4)使该自准平行光管的自准光通过折转光管,与左端水银盘液面(即当地水准面)自准;(5)用自准平行光管测量出在方位上和俯

仰方向上的不自准值;(6)根据这个不自准值,调节一对楔形垫圈的相对位置和此对楔形垫圈在内筒上端法兰上的方位转角;(7)反复测量、调节,直到满足指标要求,使方位上的不自准偏差的极限值 $\leq 4''$ ,而高低上的不自准偏差 $\leq 1'$ ;(8)翻转折转光管 $180^\circ$ ,使出光口与进光口交换位置,使进光口对准平行光管,再次使自准平行光管的自准光通过折转光管,与左端水银盘液面(即当地水准面)自准,并用自准平行光管测量出在方位上和俯仰方向上的不自准值,两次测量偏差值的一致性可证明被检折转光管的力学稳定性<sup>[8-11]</sup>。

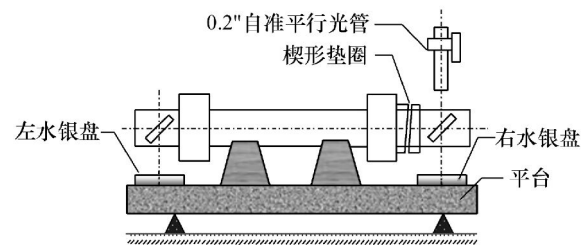


图3 折转光管装调示意图

Fig. 3 Assembling schematic diagram of reflex light-tube

#### 5 折转光管安装误差和平面反射镜之间的装调误差对方位传递精度影响的分析

如图4(a)所示,设大地坐标系为 $X(x_1, x_2, x_3)$ , $x_1, x_2$ 组成地平面, $x_3$ 垂直地平面;设入射光线的单位矢量 $A_1$ 与 $x_1$ 轴重合且方向相反,两平行平面反射镜法线的单位矢量分别为 $N_1$ 和 $N_2$ ,并且在 $x_1, x_3$ 平面内与 $x_1$ 轴成 $45^\circ$ 角, $A_2$ 为入射光线 $A_1$ 经过第一块反射镜反射后的出射光线, $A_3$ 为出射光线 $A_2$ 经过第二块反射镜反射后的出射光线。

$A_1, N_1$ 和 $N_2$ 的单位矢量分别为:

$$A_1 = [-1 \ 0 \ 0]^T, \quad (1)$$

$$N_1 = [\cos(\pi/4) \ 0 \ \sin(\pi/4)]^T, \quad (2)$$

$$N_2 = [-\cos(\pi/4) \ 0 \ -\sin(\pi/4)]^T. \quad (3)$$

第一平面反射镜的反射作用矩阵为:

$$H_1 = 1 - 2N_1N_1^T. \quad (4)$$

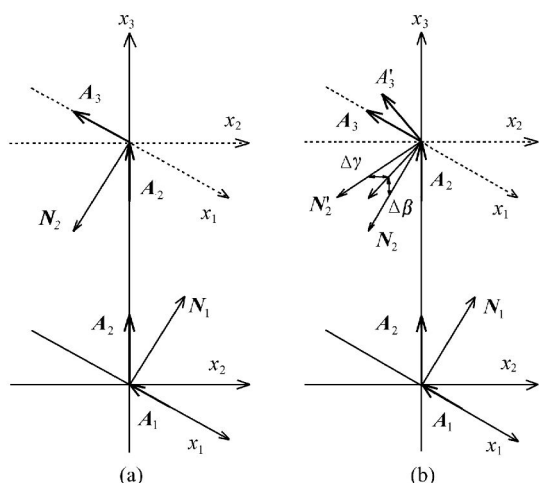


图4 折转光管方位传递误差分析原理图

Fig.4 Schematic diagram of azimuth transfer error analysis of reflex light-tube

第二平面反射镜的反射作用矩阵为:

$$H_2 = 1 - 2N_2N_2^T \quad (5)$$

入射光线  $A_1$  经第一平面反射镜反射后得到出射光线  $A_2$ :

$$A_2 = H_1A_1 \quad (6)$$

光线  $A_2$  经第二平面反射镜反射后得到出射光线  $A_3$ :

$$A_3 = H_2A_2 \quad (7)$$

折转光管的方位传递误差为:

$$\Delta A_2 = \arctan(A_{32}/A_{31}) \quad (8)$$

折转光管的高低传递误差为:

$$\Delta E = \arctan(A_{33}/A_{31}) \quad (9)$$

### 5.1 折转光管方位传递误差分析概述

如图4(a)所示,当两平面反射镜严格平行时,即两个平面反射镜的法线  $N_1$  和  $N_2$  在空间严格平行时,将式(1)、(2)、(3)带入式(4)~(9)中,计算结果  $\Delta A = 0, \Delta E = 0$ ,即出射光线  $A_3$  与入射光线  $A_1$  在空间上始终保持平行,没有方位和高低传递误差。但当  $N_1$  和  $N_2$  之间由于安装或结构上的变形形成误差(即两块平面反射镜在空间上不是严格平行),如图4(b)所示,而且还有折转光管的安装误差时,将会造成方位上的传递误差。本文将从误差的来源进行分析,使用 MATLAB 编程,用蒙特-卡洛方法进行计算并绘出误差统计直方图,根据误差分析结果来指导折转光管的设计:(1)根据光电瞄准系统的系统精度要求来分配折

转光管的精度指标要求;(2)提出热稳定性要求,做热设计;(3)提出力学稳定性要求,做刚度设计;(4)提出在外场应用中,折转光管的安装要求。

### 5.2 折转光管无安装误差,仅有两平面反射镜的装调误差时,折转光管传递误差分析

当两块平面反射镜的两个反射面在装调后是严格平行的,则入射光线  $A_1$  与出射光线  $A_3$  在空间上也严格平行,则不存在方位和高低传递误差,即  $\Delta A = 0, \Delta E = 0$ 。

从折转光管的结构上可以看出,两平面反射镜存在装调误差  $\Delta\beta, \Delta\gamma$  时,可以认为是上反射镜相对下反射镜存在如下两个方向的旋转变换,一是绕  $x_2$  轴旋转  $\Delta\beta$  误差角,二是绕  $x_3$  轴旋转  $\Delta\gamma$  误差角,如图4(b)所示。

绕  $x_2$  轴旋转  $\Delta\beta$  误差角的坐标变换矩阵  $M_{\Delta\beta}$  为:

$$M_{\Delta\beta} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\beta & 0 & -\sin\Delta\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\beta & 0 & \cos\Delta\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

绕  $x_3$  轴旋转  $\Delta\gamma$  误差角的坐标变换矩阵  $M_{\Delta\gamma}$  为:

$$M_{\Delta\gamma} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\gamma & \sin\Delta\gamma & 0 \\ -\sin\Delta\gamma & \cos\Delta\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将  $N_2$  经折转光管装调误差的二次坐标变换转换到大地坐标系  $X(x_1, x_2, x_3)$  中,得到上反射镜的新单位法矢量  $N_2' = M_{\Delta\beta}^T M_{\Delta\gamma}^T N_2$ ,依据式(4)~(7),得出入射光线  $A_1$  依次序经两块平面反射镜反射后的出射光线  $A_3$  的表达式:

$$A_3' = [A_{31}' A_{32}' A_{33}']^T = (1 - 2N_2'N_2'^T)(1 - 2N_2N_2^T)A_1 \quad (12)$$

折转光管的方位传递误差表达式为:

$$\Delta A' = \arctan(A_{32}'/A_{31}') \quad (13)$$

折转光管的高低传递误差表达式为:

$$\Delta E' = \arctan(A_{33}'/A_{31}') \quad (14)$$

分别将  $\Delta\beta = 0.5'$  和  $\Delta\gamma = 4''$  带入计算,结果为  $\Delta A = 4'', \Delta E' = 1'$ ,即当上反射镜围绕  $x_3$  轴旋转  $4''$ ,并围绕  $x_2$  轴旋转  $0.5'$  时,折转光管的方位传递误差为  $4''$ 、高低传递误差为  $1'$ 。如果不考虑折转光管的装调误差,两平面反射镜如果要达到折

转光管传递误差设计要求时,必须把折转光管的上反射镜的反射面相对下反射镜的反射面在绕  $x_3$  轴方向上的装调误差控制在  $4''$  以内,而绕  $x_2$  轴方向上的装调误差控制在  $0.5''$  以内。

### 5.3 折转光管存在安装误差时,折转光管传递误差的分析

这里分析折转光管整体存在安装误差时,即  $|\Delta\varphi| = 0, |\Delta\theta| = 0, |\Delta\psi| = 0$  时折转光管的传递误差。可分为两种情况来分析,一是两平面反射镜没有装调误差  $\Delta\beta = 0, \Delta\gamma = 0$ ;二是两平面反射镜装调有误差  $\Delta\beta \neq 0, \Delta\gamma \neq 0$ 。

#### 5.3.1 当 $\Delta\beta = 0, \Delta\gamma = 0$ 时

折转光管的安装误差由 3 个旋转自由度分量: $\Delta\varphi$ (绕  $x_1$  轴)、 $\Delta\theta$ (绕  $x_2$  轴)和  $\Delta\psi$ (绕  $x_3$  轴)组成。由于组成折转光管的上反射镜和下反射镜在同一刚体上,这 3 个旋转自由度的装调误差将同时作用在两个单位法矢量  $N_1$  和  $N_2$  上。在这 3 个旋转自由度的装调误差的作用下,使  $N_1$  和  $N_2$  在大地坐标系  $X(x_1, x_2, x_3)$  中,分别依次作如下的坐标变换  $M_{x_1}, M_{x_2}, M_{x_3}$ 。

$$M_{x_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\varphi & \sin\Delta\varphi \\ 0 & -\sin\Delta\varphi & \cos\Delta\varphi \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$M_{x_2} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & 0 & -\sin\Delta\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\theta & 0 & \cos\Delta\theta \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$M_{x_3} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\psi & \sin\Delta\psi & 0 \\ -\sin\Delta\psi & \cos\Delta\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

从大地坐标系中观察(按相反的次序作负角变换) $N_1$ 和  $N_2$ ,得到新的单位法矢量:

$$N''_1 = M_{x_1}^T M_{x_2}^T M_{x_3}^T N_1, \quad (18)$$

$$N''_2 = M_{x_1}^T M_{x_2}^T M_{x_3}^T N_2. \quad (19)$$

依据式(4)~(7),得出入射光线  $A_1$  依次序经两块平面反射镜反射后的出射光线  $A_3$  的表达式:

$$A''_3 = [A''_{31} \ A''_{32} \ A''_{33}] = (1 - 2N''_2 N''_2{}^T)(1 - 2N''_1 N''_1{}^T)A_1. \quad (20)$$

折转光管的方位传递误差表达式为:

$$\Delta A'' = \arctan(A''_{32}/A''_{31}). \quad (21)$$

折转光管的高低传递误差表达式为:

$$\Delta E'' = \arctan(A''_{33}/A''_{31}). \quad (22)$$

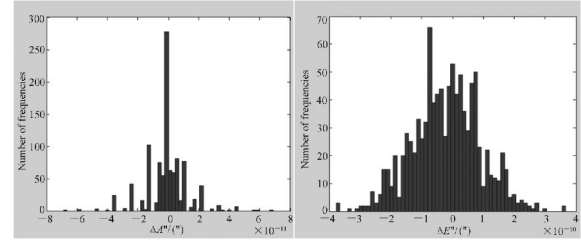


图 5  $\Delta\beta = \Delta\gamma = 0, \Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 15^\circ$  条件下  $\Delta A''$  和  $\Delta E''$  统计直方图

图 5  $\Delta\beta = \Delta\gamma = 0, \Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 15^\circ$  条件下  $\Delta A''$  和  $\Delta E''$  统计直方图

Fig. 5 Statistic histograms of  $\Delta A''$  and  $\Delta E''$  when  $\Delta\beta = \Delta\gamma = 0, \Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 15^\circ$

折转光管的两个平面反射镜在空间上平行,但折转光管在 3 个方向的安装误差达到  $15^\circ$ ,即假设:  $|\Delta\varphi| = |\Delta\theta| = |\Delta\psi| = 15^\circ$  时,用统计试验法,经 1 000 次采样计算,可获得如图 5(a), (b) 所示的方位传递误差  $\Delta A''$  和 高低传递误差  $\Delta E''$  的统计直方图。该统计直方图说明,只要折转光管的两个平面反射镜在空间上严格平行,就不会引入  $\Delta A''$  和  $\Delta E''$ 。

#### 5.3.2 当 $\Delta\beta \neq 0, \Delta\gamma \neq 0$ 时

从大地坐标系中来观察  $N_1$  和  $N_2$ ,使用公式(10)、(11)变换矩阵得到新的单位法矢量:

$$N'''_1 = M_{x_1}^T M_{x_2}^T M_{x_3}^T N_1, \quad (23)$$

$$N'''_2 = M_{x_1}^T M_{x_2}^T M_{x_3}^T M_{\Delta\beta}^T M_{\Delta\gamma}^T N_2. \quad (24)$$

依据式(4)~(7),得出入射光线  $A_1$  依次序经两块平面反射镜反射后的出射光线  $A_3$  的表达式

$$A'''_3 = [A'''_{31} \ A'''_{32} \ A'''_{33}] = (1 - 2N'''_2 N'''_2{}^T)(1 - 2N'''_1 N'''_1{}^T)A_1. \quad (25)$$

根据设计要求,将上反射镜相对下反射镜旋转误差角  $|\Delta\beta| = 0.5''$ ,  $|\Delta\gamma| = 4''$ ,而折转光管装调时在 3 个方向上都存在误差。同样用统计试验法,经 1 000 次采样计算,可获得如图 6(a)、(b) 和图 7(a)、(b) 所示的方位传递误差  $\Delta A'''$  和 高低传递误差  $\Delta E'''$  的统计直方图。图 6 是  $|\Delta\varphi| =$

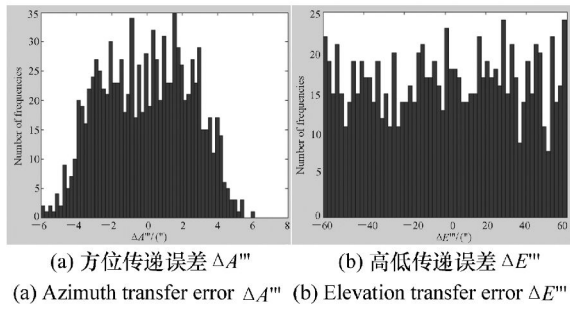


图 6  $\Delta\beta = 0.5'$ ,  $\Delta\gamma = 4''$ ,  $\Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 5^\circ$  条件下  $\Delta A''$  和  $\Delta E''$  统计直方图

Fig. 6 Statistic histograms of  $\Delta A''$  and  $\Delta E''$  when  $\Delta\beta = 0.5'$ ,  $\Delta\gamma = 4''$ ,  $\Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 5^\circ$

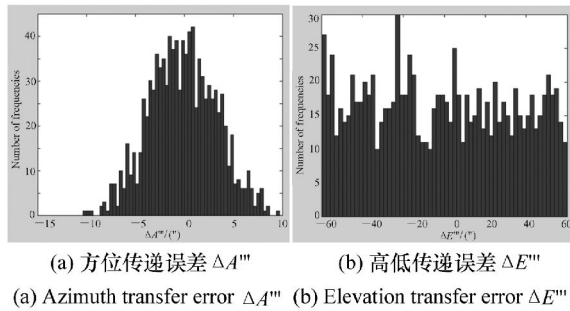


图 7  $\Delta\beta = 0.5'$ ,  $\Delta\gamma = 4''$ ,  $\Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 15^\circ$  条件下  $\Delta A''$  和  $\Delta E''$  统计直方图

Fig. 7 Statistic histograms of  $\Delta A''$  and  $\Delta E''$  when  $\Delta\beta = 0.5'$ ,  $\Delta\gamma = 4''$ ,  $\Delta\varphi = \Delta\theta = \Delta\psi = 15^\circ$

$|\Delta\theta| = |\Delta\psi| = 5^\circ$  的计算结果;而图 7 是  $|\Delta\varphi| = |\Delta\theta| = |\Delta\psi| = 15^\circ$  的计算结果。

当  $|\Delta\varphi| = |\Delta\theta| = |\Delta\psi| = 5^\circ$  时,方位传递误差  $\Delta A''$  的极限值为  $\pm 6''$ 、高低传递误差  $\Delta E''$  的极限值为  $\pm 60''$ ;而当  $|\Delta\varphi| = |\Delta\theta| = |\Delta\psi| = 15^\circ$  时,方位传递误差  $\Delta A''$  的极限值为  $\pm 10''$ ,而高低传递误差  $\Delta E''$  的极限值没有增大,仍为  $\pm 60''$ 。

## 6 结 论

本文介绍了用于瞄准系统中的折转光管的结构、工作原理和装调方法,分析了折转光管的安装误差,讨论了应用折转光管来实现高程上高精度方位传递的技术方案。经过严格的误差分析后指出,要想控制折转光管的方位传递误差,首先要使两块平面反射镜镜面在空间上严格平行,而“折转光管”作为整体,其安装误差可以不考虑,只要将折转光管安装到从自准直经纬仪到弹上棱镜的瞄准光路畅通即可。另外,影响折转光管的方位传递误差的主要因素是两平面反射镜的装调误差。根据计算分析,只要两平面反射镜的装调误差满足技术要求,即  $|\Delta\gamma| \leq 4''$ ,  $|\Delta\beta| \leq 0.5'$ ,即使折转光管在 3 个方向的安装误差  $|\Delta\varphi_{\max}|$ ,  $|\Delta\theta_{\max}|$ ,  $|\Delta\psi_{\max}|$  的极限值达到  $15^\circ$ ,也可以满足折转光管方位传递误差  $\leq 10''$  的设计要求。

## 参考文献:

[1] 金光,王家骥. 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.  
JIN G, WANG J Q. 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)

[2] 王家骥,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.  
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):105-116. (in Chinese)

[3] 张明慧,张尧禹,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.  
ZHANG M H, ZHANG Y Y, QIAO Y F. Study on vehicle twin-photoelectrical pointing system[J]. *Opto-electronic Eng.*, 2004,31(7):18-23. (in Chinese)

[4] 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,2007,6:98-100.  
OU T G, CHEN ZH G, YANG B X, et al. Operating principle and error source of a new type of ccd photoelectric autocollimator[J]. *J. Geodesy and Geodynamics*, 2007,6:98-100. (in Chinese)

[5] 张强. 方位瞄准系统中折转光管的应用研究[J]. 应用光学,2008,29(4):512-517.

- ZHANG Q. Reflex light-tube in azimuth pointing system of missile[J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, 29(4): 512-517. (in Chinese)
- [6] 王家骥. 光学仪器总体设计[R]. 长春: 中科院长春光学精密机械研究所, 1998.  
WANG J Q. Design of optical instrument[R]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998. (in Chinese)
- [7] 张俊杰, 李政阳. 直角棱镜用作自准直反光镜的光学特性[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(4): 1-4.  
ZHANG J J, LI ZH Y. The optical characteristics of right angle prisms as auto-collimating mirror[J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 2009, 29(4): 1-4. (in Chinese)
- [8] 张磊, 郭劲. 分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 789-795.  
ZHANG L, GUO J. Design of parallelism measuring equipment for laser beams from independent laser expanding beam system e[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 789-795. (in Chinese)
- [9] 刘磊. 轻型高稳定性离轴非球面平行光管设计[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 588-593.  
LIU L. Design of off-axis aspherical collimator with lightweight and high stability[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 588-593. (in Chinese)
- [10] 辛雪军, 陈长征, 张星祥, 等. 平行光管主反射镜组件的非线性有限元分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 170-176.  
XIN X J, CHEN CH ZH, ZHANG X X, *et al.*. Nonlinear analysis of primary mirror subassembly for collimator base on finite element method[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(2): 170-176. (in Chinese)
- [11] 任淑艳, 张琢, 刘国栋, 等. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 331-336.  
REN SH Y, ZHANG ZH, LIU G D, *et al.*. Restraining speckle of laser imaging system in accurate measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 331-336. (in Chinese)
- [12] 王旻, 宋立维, 乔彦峰, 等. 外视场拼接测量系统的视场拼接和交汇测量算法及其实现[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(3): 229-238.  
WANG M, SONG L W, QIAO Y F, *et al.*. Convergence algorithm of field stitching and intersection measurement for external field stitching measuring system and its implementation[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(3): 229-238. (in Chinese)

作者简介: 王旻(1977—), 女, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 主要从事光电瞄准等方面的研究。

E-mail: work6180@yahoo.com.cn