

文章编号 1004-924X(2011)04-0775-08

## 车载平台变形对测角误差的影响分析与修正

佟 刚, 王 芳

(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:**分析了车载平台变形对经纬仪测角误差的影响,将平台变形分为平移变形和旋转变形两类。采用数值模拟实验论证了平台旋转变形是影响测角误差的主要因素,建立了车载经纬仪测角误差与旋转变形角的关系模型,并在此基础上对目标位置和平台旋转变形对测角误差的影响进行了仿真。利用基于莫尔条纹的自准直测量系统测量平台偏向角,倾角传感器测量平台倾斜角,对测量得到的结果进行了实验验证。数据分析表明:该模型能有效修正因车载平台变形而带来的测角误差,使方位测角精度提高了 103.7",高低测角精度提高了 89.4",为实现车载经纬仪高精度测量提供了理论依据和技术支持。

**关键词:**车载平台;变形;测角误差;莫尔条纹;倾角传感器

**中图分类号:**V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0775

### Analysis and correction for influence of vehicle platform deformation on measuring errors

TONG Gang, WANG Fang

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

**Abstract:** The influence of vehicle platform deformation on the measuring errors of a theodolite was analyzed, then the platform deformation was divided into two types of translation and rotation. A numerical simulation was performed to demonstrate that the platform rotation deformation was the main factors to affect the measuring error of the platform. A simulation model of vehicle theodolite between measuring error and rotation deformation was established, and the influence of the target location and rotation deformation on measuring errors was simulated based on the model. Furthermore, the platform angular deviation was measured by a self-collimation measurement system based on Moiré fringe and the platform angular rotation was measured by a inclinometer, which then was validated by experiments. Obtained data show that this method can effectively compensate static angle measuring errors come from the deformation of vehicle platform, and can improve the azimuth precision to 103.7" and elevation precision to 89.4". It provides a theoretical reference and technical support for the high-precision measurement of vehicle theodolites.

**Key words:** vehicular platform; deformation; angle measuring error; Moiré fringe; inclinometer

收稿日期:2010-08-13;修订日期:2010-08-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7034320B)

## 1 引言

现代靶场上广泛装备的光测设备主要有两种工作状态,一种是固定站形式,一种是活动站形式。活动站式是把经纬仪直接安装到车载平台上,执行任务时有下车与不下车之分,所谓下车是指经纬仪平时放在车上,当工作时设备安放到固定地基上;不下车是指设备在载车上工作,不用安装到地基上。目前国内靶场装备的活动站式都是下车形式,载车只是作为运输载体,到达测量基站后要把光测设备放置在预先设计好的地基座上,就位过程繁琐,转场和到位展开需要大量工作,而且完成任务后又要重新卸载。反复的装卸操作对于光测设备的抗震性能、轴系精度以及使用寿命都带来极大的影响<sup>[1]</sup>。

国外现代化靶场中的光电跟踪测量设备在 90 年代以后多数采用车载式结构。用先进的方法对车载平台变形进行实时测量,为整个系统提供反馈数据,实现高精度的跟踪和测量<sup>[2]</sup>。

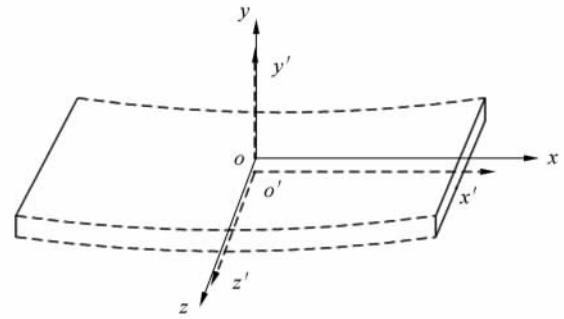
不下车式的测量能够实现真正意义的光测设备车载化,但当经纬仪在车载平台上进行测量和跟踪时,经纬仪转动速度、视轴位置、工作环境等因素会导致车载平台发生变形,降低经纬仪的测角精度。因此,对影响车载经纬仪测角误差的因素进行分析,并对车载平台的变形进行实时测量与事后修正是活动站高精度工作的关键。

本文分析了平台在经纬仪工作时变形的类型,提出平台旋转是影响经纬仪测角误差的主要因素。建立了车载经纬仪测角误差与旋转变形角的关系模型,对目标位置、平台旋转变形对测角误差的影响进行了仿真和实验验证,得到的结果为实现经纬仪高精度测量提供了理论依据。

## 2 平台变形对测角误差的影响

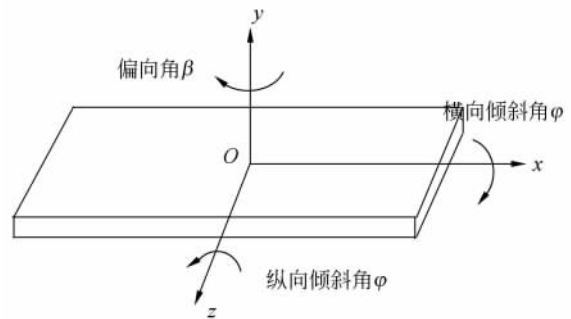
在车载经纬仪系统中,经纬仪一般都固定在车载平台的中心。由运动学理论可知,平台的变形主要有受经纬仪重力作用的平移变形和动载荷作用的旋转变形两种,如图 1 所示。如果经纬仪质量比较小,车载平台的刚性也非常好,则测角误差相对于固定站设备相差会比较小;如果经纬仪质量比较大(重达几吨),同时实际应用中车载平

台并非绝对的刚体,则必然产生较大的影响<sup>[3]</sup>。



(a) 平移变形

(a) Deformation of translation



(b) 旋转变形

(b) Deformation of rotation

图 1 车载平台变形示意图

Fig. 1 Figure of vehicular platform deformation

### 2.1 平台平移对测角误差的影响

车载平台受到经纬仪重力作用产生向下的变形时,可认为垂线(理想)测量坐标系( $O$ - $XYZ$ )沿  $Y$  轴负向平移。为了分析  $Y$  轴平移对车载经纬仪测角误差造成的影响,建立平台测量坐标系  $O'$ - $X'Y'Z'$  和垂线(理想)测量坐标系  $O$ - $XYZ$  (均为右手坐标系),如图 1(a) 所示。平台测量坐标系  $O'$ - $X'Y'Z'$  原点为经纬仪水平轴和垂直轴交点  $O'$ ,  $Y'$  轴始终与经纬仪的垂直轴重合,  $Z'$  轴和水平轴重合,  $X'$  轴指向正北。此坐标系固接在经纬仪上,随着车载平台的向下平移一起运动。垂线(理想)测量坐标系  $O$ - $XYZ$  与初始时刻的平台测量坐标系  $O'$ - $X'Y'Z'$  重合,初始时刻是指车载平台不发生变形的理想时刻,在初始时刻,经纬仪水平轴与大地水平面平行,照准轴指向大地北,垂直轴与铅垂线平行。垂线(理想)测量坐标系与极坐标

系的转换公式为:

$$\begin{cases} X=R\cos E\cos A \\ Y=R\sin E \\ Z=R\cos E\sin A \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $X, Y, Z$  为目标在坐标系内的坐标值;  $R, A, E$  为目标的距离、方位角和高低角。

由公式(1)可得:

$$\begin{cases} X=R\cos E\cos A \\ Y=R\sin E+\Delta Y \\ Z=R\cos E\sin A \end{cases}. \quad (2)$$

式中  $\Delta Y$  为  $Y$  轴向下的平移量。

当经纬仪落到车载平台上时,车载平台的向下移动必然会造成经纬仪三轴的偏离,在向下平移不是很剧烈的情况下,可以认为三轴随平台平面移动是整体偏离,即三轴间仍然保持相互垂直的关系,没有发生相对偏离。在这种情况下,当视准轴瞄准目标后,所测到的角度是平台测量坐标系下的角度,与真实的目标角度有一定的偏离。

由公式(2)可以推出垂线(理想)测量坐标系在  $Y$  轴方向上的平移对方位角  $A$  没有影响,对高低角  $E$  有影响。假设平台沿  $Y$  轴向下平移  $\Delta Y=1\text{ cm}$ ,而目标  $M$  距离是以千米为量级的,依次取目标  $M$  的距离为 2, 5, 8, 12, 15, 18 km。统计测角误差如表 1 所示。

表 1 平台平移对测角误差的影响

Tab.1 Influence of platform translations on measuring errors

距离/km	测角误差/( $''$ )	
	$\Delta A$	$\Delta E$
2	0	1.46
5	0	0.58
8	0	0.36
12	0	0.24
15	0	0.20
18	0	0.16

图 2 为高低角误差  $\Delta E$  与目标距离  $R$  的关系图。

分析结果表明,当目标在 2 km 以外时,坐标系沿  $Y$  轴的向下平移对高低角影响为  $1.46''$ ,且

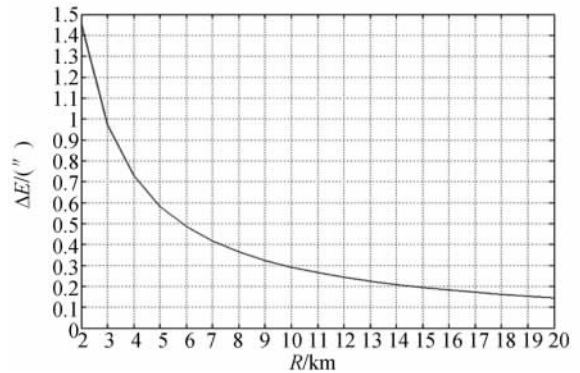


图 2 与目标距离  $R$  的关系

Fig.2 Relationship between  $\Delta E$  and  $R$

影响随着目标距离的增加而减小。在实际靶场试验中,空间目标往往在 2 km 以外,因此由平台向下平移引起的高低角测量误差可以忽略。

### 2.2 平台旋转对测角误差的影响

平台旋转如图 1(b)所示,垂线(理想)测量坐标系定义如下:

$O$  为经纬仪视轴回转中心(三轴交点);

$OX$  为过  $O$  的天文子午面与水平面的交线,指向大地北为正,经纬仪的方位  $0^\circ$  与  $OX$  轴重合;

$OY$  与大地铅垂线重合,指向地球外为正;

$OZ$  依据右手定则确定。

在垂线(理想)测量坐标系中,绕  $X$  轴的角度变化定义为横向倾斜角,面向正北顺时针方向为正;绕轴的角度变化定义为纵向倾斜角,绕  $Y$  轴的角度变化定义为偏向角。

为了对车载平台旋转变形对测角精度的影响有个定量概念,以及在事后数据处理时使用测量的变形数据,需要建立三轴旋转变形量的数学描述<sup>[4-5]</sup>。

垂线(理想)测量坐标系分别绕  $Y$  轴、 $Z$  轴、 $X$  轴旋转,可得:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由公式(1),(3)可得:

$$\begin{cases} A = \arctan \frac{(\sin \theta \cos \beta \sin \varphi - \cos \theta \sin \beta) \cos E' \cos A' + \sin \theta \cos \varphi \sin E' + (\sin \theta \sin \beta \sin \varphi + \cos \theta \cos \beta) \cos E' \sin A'}{\cos \beta \cos \varphi \cos E' \cos A' - \sin \varphi \sin E' + \sin \beta \cos \varphi \cos E' \sin A'} \\ E = \arcsin [(\cos \theta \cos \beta \sin \varphi + \sin \theta \sin \beta) \cos E' \cos A' + \cos \theta \cos \varphi \sin E' + (\cos \theta \sin \beta \sin \varphi - \sin \theta \cos \beta) \cos E' \sin A'] \end{cases} \quad (4)$$

式中  $A'$ 、 $E'$  为目标实测编码器值。从公式 (4) 可以看出, 车载经纬仪的测角精度不仅与平台各个方向的变形量有关, 还与测量时目标所在的位置有关。

### 2.3 偏向角对测角误差的影响

令目标方位角  $A' = 45^\circ$ , 高低角  $E' = 45^\circ$ 。对公式 (4) 中平台变形 3 个变量赋予特征值, 得到变形对测角误差影响的特征表, 如表 2 所示。

表 2 平台变形对方位角与高低角的影响

Tab. 2 Influence of platform deformation on  $A$  and  $E$

距离/km	测角误差/( $''$ )	
	$\Delta A$	$\Delta E$
$\theta = 1$	0.523	0.423
$\varphi = 1$	0.244 2	0.907
$\beta = 1$	1	0

根据表 2 有:

$$\begin{cases} \Delta A = 0.523\theta + 0.244 2\varphi + \beta \\ \Delta E = 0.423\theta + 0.907\varphi \end{cases} \quad (5)$$

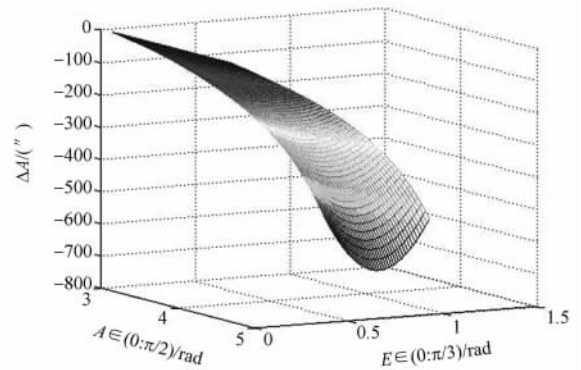
公式 (5) 即为平台变形量对经纬仪测角误差的简化影响公式, 该公式为数据统计结果, 不能作为测角误差的修正公式使用, 但从中可以看出偏向角对方位角和高低角的影响, 即对方位角的影响系数为 1, 而对高低角没有影响。

## 3 影响仿真

### 3.1 目标位置对测角误差影响的仿真

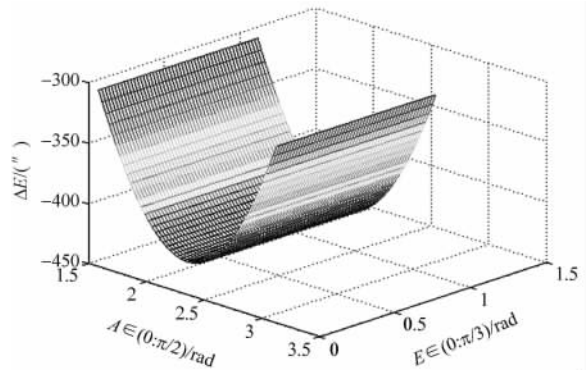
将平台变形角设为定值, 令  $\theta = \varphi = \beta = 5'$ , 方位角为  $0 \sim 90^\circ$ , 高低角为  $0 \sim 60^\circ$ , 则目标位置对测角误差的影响仿真如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 车载平台变形值为  $5'$  时, 引起的方位测角误差最大为  $-732.1''$ , 高低测角误差最大为  $-422.9''$ , 误差变化呈现正弦曲线特点,



(a) 方位角与测角误差的关系

(a) Relationship between  $A$  and measuring error



(b) 高低角与测角误差的关系

(a) Relationship between  $E$  and measuring error

图 3 目标位置与测角误差的关系

Fig. 3 Relationship between target locations and measuring errors

同时误差大小随方位角、高低角不同而不同。

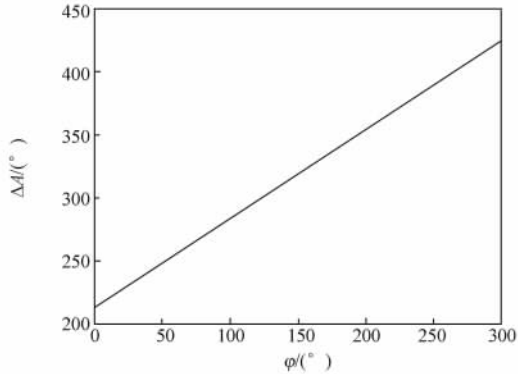
### 3.2 平台变形对测角误差影响的仿真

将目标位置设为定值, 令  $A' = E' = 45^\circ$ , 横向倾斜角  $\theta = 5'$ , 由于偏向角只对方位产生影响, 且影响系数为 1, 故令其为 0, 则纵向倾斜角  $\varphi$  对测角误差影响的仿真如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 方位角和高低角测角误差随着纵向倾斜角  $\varphi$  的增大而增大。可知平台变形角越大, 对测角误差的影响越大。

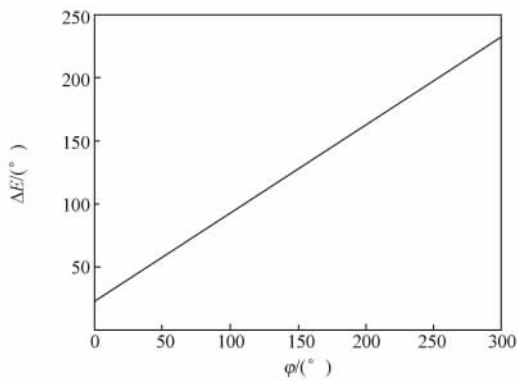
上述两种情况都是假定某些值是固定值, 而

在实际工作过程中,目标位置和平台变形值都是时时在变的,而由于目标比较远,车载经纬仪在工作时基本是匀速运动,且速度较慢,因此测角误差值远小于上面仿真的最大值。



(a)  $\varphi$  与方位角误差的关系

(a) Relationship between  $\varphi$  and  $\Delta E$



(b)  $\varphi$  与高低角误差的关系

(b) Relationship between  $\varphi$  and  $\Delta A$

图 4  $\varphi$  与测角误差关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $\varphi$  and measuring errors

## 4 平台变形的测量

### 4.1 倾斜角的测量

倾角传感器用于测量载体倾斜状态,即用于测量待测物体(或平台)相对于标准水平面的倾斜角度,已广泛应用于仪表测量、工业自动化、航空航海等领域。其工作原理与“摆”相同,即利用地球重力加速度工作,根据“摆”在重力场范围内保持其垂直向下的方向特性来设计的<sup>[6]</sup>。

由于车载经纬仪正常工作时平台变形在  $\pm 5'$  之内,为了保证车载平台变形值测量的精度与实时性,这里选用了美国 HL PLANAR 公司的 NS-

5/P2 双轴倾角传感器,其主要优点是:精度高、稳定性好、输出数率高,技术参数如表 3 所示。

表 3 倾角传感器技术参数

Tab. 3 Parameters list of inclinometer

测量范围/(°)	测量精度/(°)	分辨率/(°)	通讯频率/Hz
$\pm 5$	0.01	0.000 5	1

倾角传感器在车载经纬仪上安放位置的选择对测量车载平台倾斜角的准确性至关重要。平台倾斜角的测量可以看成是平台绕固定点转动角的测量,固定点应该在经纬仪垂直轴上,因此将倾角传感器安装在经纬仪垂直轴轴心位置,倾角传感器的输出值才是工作基准面和绝对水平面的夹角。

安装时,使倾角传感器底面与经纬仪垂直轴轴心延长线垂直,与大地水平面平行。倾角传感器的 X 轴正向与主镜正镜水平时在同一垂直面内并平行,Y 轴正向与水平轴在同一垂直面内并平行,并且倾角传感器的 X 轴正向始终与经纬仪的正北方向重合<sup>[7-8]</sup>。

安装完毕后,要对倾角传感器做初始化调试和输出值测试,使倾角传感器 X 轴、Y 轴的输出值在经纬仪方位角  $0 \sim 360^\circ$  内任一位置为 0 或接近于 0。如图 5 所示。

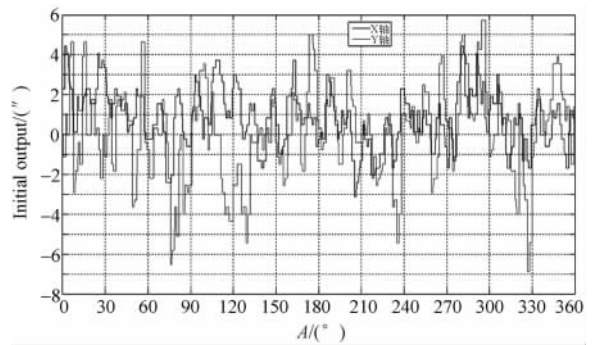


图 5 倾角传感器初始输出值

Fig. 5 Initial output values of inclinometers

倾角传感器 X 轴输出值即为横向倾斜角  $\theta$ , Y 轴输出值为纵向倾斜角  $\varphi$ ,和编码器值、时间信息一起送到通讯系统,由数据通讯系统打包将这些信息送到控制计算机并存储,从而可详细记录

下每一位置下倾斜角的测量值,以进行事后修正。

### 4.2 偏向角的测量

偏向角的测量利用基于莫尔条纹的自准直测角方法实现,其原理如图 6 所示。从光源发出的光照亮位于物镜前焦平面上的发射光栅,再经物镜准直后成为平行光束,该平行光束经直角棱镜反射,再经物镜及分光棱镜后会聚于位于物镜后焦面的接收光栅处,即将发射光栅成像于接收光栅上。发射光栅的像与接收光栅干涉形成莫尔条纹,该莫尔条纹由面阵 CCD 接收进行后续图像处理。当目标棱镜绕光轴 Z 轴发生旋转时,引起反射光线旋转,导致发射光栅的像发生绕 X 轴的旋转,从而发射光栅的像与接收光栅的栅线夹角发生改变,表现为莫尔条纹宽度的变化<sup>[9-10]</sup>。

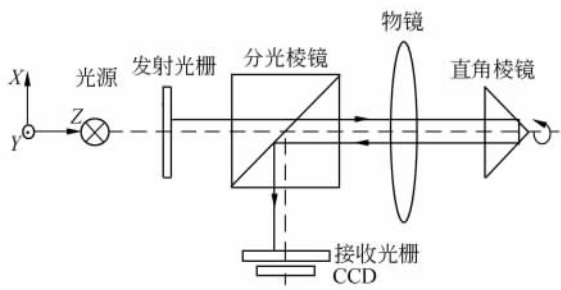


图 6 基于莫尔条纹的自准直测角原理

Fig. 6 Illustration of auto-collimation system based on Moiré fringe

基于莫尔条纹自准直测角方法的基本原理就是通过莫尔条纹宽度变化来测量角度。其测角流程图如图 7 所示。

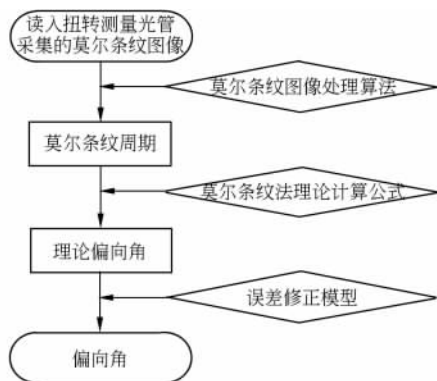


图 7 偏向角数据处理流程图

Fig. 7 Flow chart of data processing for deflected angle

## 5 测角误差的修正

将经纬仪放置在载车上,载车由液压支腿支撑,四轮离地,进行车载经纬仪整车调平。以 T 型检测架 45°高角光管为中心做保精度正弦绕动。

车载经纬仪部分测量数据如表 4 所示。

表 4 车载经纬仪部分测量值

Tab. 4 Part of vehicle theodolite measuring values

编码器方位值/(°)	高角合成方位值/(°)	方位测角误差/(″)	编码器高低值/(°)	高角合成高低值/(°)	高低测角误差/(″)
10.498	10.376	-125.435	65.137	65.014	116.812
10.509	10.377	-126.449	65.147	65.015	116.928
10.518	10.379	-133.944	65.156	65.016	121.964
10.526	10.379	-134.056	65.164	65.016	120.445
10.533	10.379	-133.214	65.171	65.016	123.535

车载经纬仪室内检测测角误差公式为:

$$\begin{cases} \Delta A = (A_s - A_{gh} - J) \cdot 3600 - C \cdot (\sec E_{gz} - 1) - b \cdot \tan E_{gz} \\ \Delta E = (E_{gh} - E_{gz}) \cdot 3600 - L \end{cases} \quad (6)$$

式中  $A_s$  为独立检测架方位角(经纬仪测量值);  $A_{gh}$  为 T 型检测架高角方位合成值;  $J$  为独立检测架和 T 型检测架方位夹角(莱卡标定);  $C$  为照准差;  $b$  为水平轴倾斜误差;  $L$  为零位差;  $E_{gh}$  为 T 型检测架高角高低合成值;  $E_{gz}$  为 T 型检测架高角高低真值(莱卡标定);

将测量数据带入公式(6)可得车载经纬仪测角精度:方位为 129.691″,高低为 117.263″,远大于指标规定的方位 30″、高低 30″的测角误差值。

将平台倾斜角和偏向角测量值代入公式(4),求得修正后的测角值,部分数据如表 5 所示。

表 5 车载经纬仪修正后的部分测量值

Tab. 5 Part of vehicle theodolite measuring values after correction

编码器方位值/(°)	高角合成方位值/(°)	方位测角误差/(″)	编码器高低值/(°)	高角合成高低值/(°)	高低测角误差/(″)
10.469	10.348	-20.545	65.111	64.989	26.812
10.479	10.347	-21.517	65.121	64.989	26.928
10.489	10.350	-28.981	65.130	64.990	31.964
10.497	10.351	-29.062	65.138	64.990	30.445
10.504	10.350	-28.188	65.146	64.991	33.535

将表5数据代入公式(6)可得修正后的测角精度:方位为 $25.99''$ ,高低为 $27.82''$ ,符合指标要求。

## 6 结 论

制约车载经纬仪在靶场中使用的主要原因是车载平台变形对经纬仪测角误差的影响,为了对其进行修正,本文分析了平台在经纬仪工作时的变形类型,得出了平台旋转是影响经纬仪测角误

差的主要因素。建立了车载经纬仪测角误差与平台变形角的关系模型,基于该模型对经纬仪测角误差进行修正。与修正前测角误差比较,方位角已从原来的 $129.691''$ 提高到 $25.99''$ ,高低角则从原来的 $117.263''$ 提高到 $27.82''$ 。另外还在其他车载经纬仪上做了相同的实验,得到了同样的结果,验证了车载经纬仪测角误差修正公式和平台变形测量方法的正确性,为车载经纬仪在工程中的应用提供了理论支撑和技术参考。

### 参考文献:

- [1] 张政. 车载光电经纬仪在准动基座下的测量误差修正研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.  
ZHANG ZH. *Researchs on Measurement Error Corrcion of Vehicle Photoelectric Theodolite Working on the Quasi-Moving Base* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [2] MANERI E, GAWRONSKL W. A method and a GUI for the creation of azimuth-track level-pointing-error corrections[J]. *Antenna and Propagation Magazine, IEEE*, 2002, 44(4): 23-29.
- [3] 李增, 吴志勇, 佟刚, 等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2010, 16(4): 921-927.  
LI Z, WU ZH Y, TONG G, *et al.*. Pointing error correction technology for vehicular platform theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 16(4): 921-927. (in Chinese)
- [4] 李晓勇, 张忠华, 何晶. 船体变形对航天测量船外弹道测量的影响[J]. *飞行器测控学报*, 2006, 6(3): 7-12.  
LI X Y, ZHANG ZH H, HE J. The effect of instrumentation ship hull deformation on its tracking data [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2006, 6(3): 7-12. (in Chinese)
- [5] GREVE A, BREMER M, PENALVER J, *et al.*. Improvement of the IRAM 30 m telescope from temperature measurements and finite element calculations[J]. *IEEE Trans Antennas and Propagation*, 2005, 53(2): 851-860.
- [6] PARKER D, SCHWAD F R, SHELTON J W, *et al.*. Calibration and modeling of a dual-axis inclinometer[J]. *Precision Engineering*, 2005, 29(3): 381-385.
- [7] 佟刚, 王涛, 吴志勇, 等. 高精度倾角传感器在测量车载平台变形中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1347-1353.  
TONG G, WANG T, WU ZH Y, *et al.*. Application of deformation measurement for vehicle platform with high accuracy inclinometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1347-1353. (in Chinese)
- [8] GAWRONSKI W, BAHER F, QUINTERO O. Azimuth track level compensation to reduce blind pointing errors of the deep space network antennas[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2000, 42(2): 28-38.
- [9] 蔡盛, 梁爽, 丁振勇, 等. 基于莫尔条纹的自准直测角方法研究[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(10): 1375-1377.  
CAI SH, LIANG SH, DING ZH Y, *et al.*. Auto-collimation angular measurement method based on Moiré fringe [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(10): 1375-1377. (in Chinese)
- [10] 乔彦峰, 王成龙, 李向荣, 等. 莫尔条纹测量扭转变形角的方案研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2132-2139.  
QIAO Y F, WANG CH L, LI X R, *et al.*. Measurement of torsion angular distortion based on Moiré fringe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2132-2139. (in Chinese)

## 作者简介:



佟刚(1978—),男,辽宁兴城人,博士研究生,助理研究员,2001年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为光电精密跟踪测量技术。E-mail: thongang@yahoo.com.cn



王芳(1966—),内蒙通辽人,研究员,1988年于长春邮电学院获学士学位,主要从事光电跟踪测量方面的研究。E-mail: flybir125@yahoo.com

## ●下期预告

## 利用晶体多重衍射进行同步辐射光子能量标定

陶世兴<sup>1,2</sup>, 牛晶<sup>1</sup>, 陈鸣之<sup>1</sup>, 刘科<sup>1</sup>,

王玉<sup>1</sup>, 汪启胜<sup>1</sup>, 孙波<sup>1</sup>, 黄胜<sup>1</sup>, 唐琳<sup>1</sup>, 何建华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院研究生院, 北京 10049)

介绍了多重衍射的基本原理,包括多重衍射的指标化、衍射光强度的计算和入射光方向的确定,并根据晶体多重衍射现象提出入射 X 光能量标定的方法。理论上,使用该标定方法当角度扫描精度为 1" 时,光子能量标定精度可达到 1 eV。在 10 keV 处用 Si(111)为主衍射收集了 180°  $\Phi$  扫描衍射谱,对其中的衍射谷进行指标化,并根据指标化的结果计算得到标定能量 10.06 keV。该实验结果与理论结果相符,从而验证了在角度扫描精度满足实验要求时,通过该标定方法可进行高精度的光子能量标定。