

文章编号 1004-924X(2010)06-1347-07

高精度倾角传感器在测量车载平台变形中的应用

佟 刚^{1,2}, 王 涛¹, 吴志勇¹, 李 增^{1,2}, 陈 涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了分析车载平台变形对光电经纬仪测角误差的影响, 提出了利用倾角传感器来测量车载平台变形的办法。基于平台变形对光电经纬仪测角误差的影响的基本原理, 利用固定在垂直轴轴心的倾角传感器测量出因平台变形而导致经纬仪工作基准面中心点与水平面变化的夹角, 计算其测量坐标系的变化量, 推导出了倾角传感器输出值与测角误差的关系公式。选用双轴倾角传感器实时测量了经纬仪工作时车载平台的变形值, 结果表明, 车载平台变形量受方位方向速度影响较小, 倾角传感器输出值经过滑动加权均值滤波处理后最小相差为 0, 最大相差为 5.1"; 受经纬仪视轴位置影响较大, 高低角在 0°~90°变化时, 高低角越小, 倾角传感器输出值越大。这种测量方法为进一步提高车载经纬仪的测角精度提供了理论依据。

关键词: 车载平台; 变形; 光电经纬仪; 倾角传感器; 测角误差

中图分类号: V556; TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1347

Application of high accuracy inclinometer to deformation measurement for vehicular platform

TONG Gang^{1,2}, WANG Tao¹, WU Zhi-yong¹, LI Zeng^{1,2}, CHEN Tao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To analyze the influence of the deformation of a vehicular platform on the angle measurement precision of a theodolite, a new method was presented to measure the deformation of the vehicle platform by using an inclinometer. Based on the principle of platform deformation dependent on measuring results, the inclinometer was put on the center of the vertical axis to get deformation angles of the center of working platform, then to calculate the measuring coordinate deflection and figure out the expressions on the output data of the inclinometer and angle measurement errors. A double-axis inclinometer was chosen to measure the deformation of the vehicle platform in real time. Experimental data show that the deformation suffering from an azimuth axis velocity is small and the reading results after processing by a sliding weighted mean digital filter are 0 and 5.1" for the smallest discrepancy and the biggest one, respectively. However, the boresight location has larger influence on the deformation, and the smaller elevation angles are, the larger the reading results of inclinometer are. This test provides the

收稿日期: 2009-06-22; 修订日期: 2009-09-11.

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

theoretics for improving angle measurement precision of vehicular platforms of theodolites.

Key words: vehicular platform; deformation; photoelectric theodolite; inclinometer; angle-measurement error

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。国内靶场装备的光测设备大都采用固定站形式,把经纬仪安装到固定的地基座上,地基是根据靶场布站的要求,按照一定的地理坐标专门设置的。这种安装方式可以使仪器平稳工作,减小测量误差。但是,由于采用固定地基的方式,各观测点的位置不动,仪器设备的机动性差,而现代武器装备的特点之一就是机动性能要求越来越高,因此,车载机动式光测设备逐渐受到关注^[1]。车载经纬仪是将经纬仪安装到车载平台上,经纬仪直接在车载平台上工作,不受地理位置的限制。此项技术可以满足不同地点、不同时间进行测量和跟踪的要求,机动性强,满足了现代化装备的要求。

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。一般载车都能够满足车载平台在任意方向上的调平精度 $\leq 2'$,在转台最大的扭矩作用下,车载平台的稳定度 $\leq 50''$ 。在车载平台的刚性比较好的情况下,如果经纬仪质量比较小,则平台的变形也比较小,对测量结果影响不大;如果经纬仪质量比较大,平台就会在经纬仪的工作过程中产生弹性形变,随着经纬仪的速度、加速度等工作状态的不同而产生的变形量也不同^[2]。因此,实时测量车载平台的变形,研究车载平台变形带来的误差是活动站高精度工作的关键。

本文分析了车载平台变形对光电经纬仪测角误差的影响,提出了利用倾角传感器来测量车载平台变形的新技术,推导出了倾角传感器输出值与测角误差的关系公式,给出了实验数据和分析结果。

2 车载平台变形的分析

平台的变形主要有受静载荷作用的静变形和

动载荷作用的振动两种情况。一般经纬仪都固定在车载平台的中心,当经纬仪工作时,平台因为受到不均匀的作用力,就会因变形产生如图 1 所示的三轴旋转运动,从而产生平台姿态旋转角^[3]。 x, y, z 轴因受经纬仪重力作用而产生的旋转最终导致平台产生弧形的凹陷,这种凹陷变形将会随着经纬仪工作状态的变化而变化。根据文献^[4],对于长 2.54 m 的车载平台,它的最大静扰度发生在右侧横梁上,其值为 1.368 mm,当梁发生最大绕曲变形时,车载平台的最大变形为 282.2''。

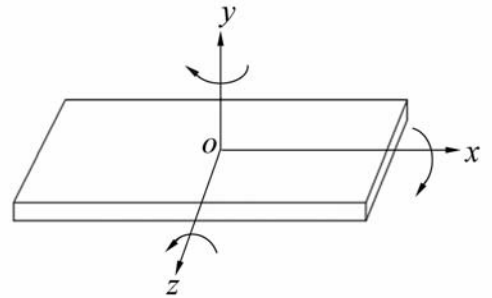


图 1 车载平台轴向变形示意图

Fig. 1 Deformation of vehicular platform in axis direction

对车载平台变形的进一步研究发现,平台在各个方向的变形都是随机且不可预测的。把车载平台 X, Y, Z 轴向的变形看作是由随机力函数激发引起的随机变量,也就是白噪声的马尔科夫过程,为了简化,考虑马尔科夫叠代过程^[5-6],模型如下:

$$\ddot{\varphi}_i + 2\beta_i \dot{\varphi}_i + \beta_i^2 \varphi_i = \eta_i, \quad i = x, y, z, \quad (1)$$

其中 $\varphi = [\varphi_x \quad \varphi_y \quad \varphi_z]^T$ 为三轴变形矢量,其标准方差为 $\sigma_\varphi = [\sigma_{\varphi_x} \quad \sigma_{\varphi_y} \quad \sigma_{\varphi_z}]^T$, $\eta = [\eta_x \quad \eta_y \quad \eta_z]^T$ 为白噪声,其谱密度为 $Q_\eta = [Q_{\eta_x} \quad Q_{\eta_y} \quad Q_{\eta_z}]^T$, 即 $\eta \propto N(0, Q_\eta)$, $\beta = [\beta_x \quad \beta_y \quad \beta_z]^T$ 为常数, Q_η, σ_φ 和 β 之间有如下对应关系: $Q_{\eta_i} = 4\beta_i^3 \sigma_{\varphi_i}^2$, 随机过程相关时间 $\tau_i = 2.146/\beta_i, i = x, y, z$ 。

文中为了计算方便,取 (x, y, z) 方向的变形角的标准误差与 y 方向的变形角相同,且取得最大值。即

$$\sigma_\varphi = [\sigma_{\varphi_x}, \sigma_{\varphi_y}, \sigma_{\varphi_z}]^T = [282.2'', 282.2'', 282.2'']^T. \quad (2)$$

假设理论平台工作坐标系为 $Oxyz$, 因变形而

产生的实际平台工作坐标系为 $Ox'y'z'$, 由于变形一般都很小, 可以把它们之间的转换矩阵近似为:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \varphi_z & -\varphi_y \\ -\varphi_z & 1 & \varphi_x \\ \varphi_y & -\varphi_x & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设在理论坐标系中, 有一个单位矢量 $r = [X \ Y \ Z]^T$, 其方位角和俯仰角为 $A_0 = \arctan(Z/X)$, $E_0 = \arcsin Y$; 实际坐标系 $Ox'y'z'$ 中的单位矢量为 $\bar{r} = [\bar{X} \ \bar{Y} \ \bar{Z}]^T$, 测得矢量的方位角和俯仰角为 \bar{A}_0, \bar{E}_0 , 则有:

$$\begin{cases} \bar{X} = \cos \bar{E}_0 \cos \bar{A}_0 \\ \bar{Y} = \sin \bar{E}_0 \\ \bar{Z} = \cos \bar{E}_0 \sin \bar{A}_0 \end{cases}, \quad (4)$$

由于 $r = C\bar{r}$, 即:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varphi_z & -\varphi_y \\ -\varphi_z & 1 & \varphi_x \\ \varphi_y & -\varphi_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X} + \varphi_z \cdot \bar{Y} - \varphi_y \cdot \bar{Z} \\ \bar{Y} + \varphi_x \cdot \bar{Z} - \varphi_z \cdot \bar{X} \\ \bar{Z} + \varphi_y \cdot \bar{X} - \varphi_x \cdot \bar{Y} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

从而:

$$\begin{cases} \Delta X = \bar{X} - X = \varphi_y \cdot \bar{Z} - \varphi_z \cdot \bar{Y} \\ \Delta Y = \bar{Y} - Y = \varphi_z \cdot \bar{X} - \varphi_x \cdot \bar{Z} \\ \Delta Z = \bar{Z} - Z = \varphi_x \cdot \bar{Y} - \varphi_y \cdot \bar{X} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\Delta E = \bar{E}_0 - E_0 = \arcsin \bar{Y} - \arcsin Y = \arcsin \bar{Y} - (\arcsin \bar{Y} - \frac{\Delta Y}{\sqrt{1-Y^2}}) = \frac{\Delta Y}{\sqrt{1-Y^2}} = \frac{\varphi_z \cdot \bar{X} - \varphi_x \cdot \bar{Z}}{\sqrt{1-Y^2}}, \quad (7)$$

$$\Delta A_0 = \bar{A}_0 - A_0 = \arctan \frac{\bar{Z}}{\bar{X}} - \arctan \frac{Z}{X}, \quad (8)$$

令

$$\Delta = \bar{Z}/\bar{X} - Z/X = \frac{\frac{\Delta X}{\bar{X}} - \frac{\Delta X \cdot \bar{Z}}{(\bar{X})^2}}{1 - \frac{\Delta X}{\bar{X}}}, \quad (9)$$

根据泰勒级数:

$$\frac{1}{1 - \frac{\Delta X}{\bar{X}}} = 1 + \frac{\Delta X}{\bar{X}} + (\frac{\Delta X}{\bar{X}})^2 + \dots; \frac{\Delta X}{\bar{X}} < 1$$

可得:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{\frac{\Delta Z}{\bar{X}} - \frac{\Delta X \cdot \bar{Z}}{(\bar{X})^2}}{1 - \frac{\Delta X}{\bar{X}}} \approx (\frac{\Delta Z}{\bar{X}} - \frac{\Delta X \cdot \bar{Z}}{(\bar{X})^2}) + \\ &\frac{\Delta Z \cdot \Delta X}{(\bar{X})^2} = \sec \bar{A}_0 \cdot \tan \bar{E}_0 \cdot \varphi_x - \\ &(1 + \tan^2 \bar{A}_0) \varphi_y + \tan \bar{E}_0 \cdot \tan \bar{A}_0 \cdot \varphi_z, \quad (10) \end{aligned}$$

则方位角和俯仰角变化值为:

$$\Delta A = \bar{A}_0 - A_0 = (\varphi_x + \sin \bar{A}_0 \cdot \varphi_z) \cdot \cos \bar{A}_0 \tan \bar{E}_0 - \varphi_y, \quad (11)$$

$$\Delta E = \bar{E}_0 - E_0 = \varphi_z \cdot \cos \bar{A}_0 - \varphi_x \cdot \sin \bar{A}_0, \quad (12)$$

从表达式(11)、(12)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。由于本文是对平台变形进行研究, 故设 $\bar{A}_0 = 45^\circ, \bar{E}_0 = 45^\circ$ 。平台变形在各个方向的分量为随机的、且幅值最大为 $282.2''$ 的白噪声, 在 $0 \sim 282.2''$ 中随机抽取 100 个值, 通过仿真得到测角偏差角与平台变形值的关系, 如图 2 所示:

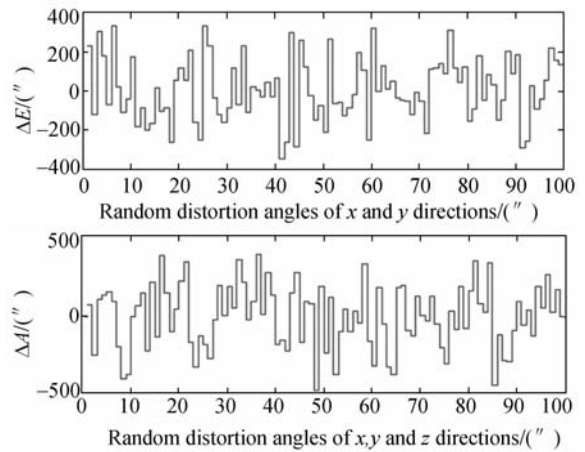


图 2 测角偏差角与平台变形示意图

Fig. 2 Deformations of vehicular platform and wraps of angles

3 车载平台变形的测量

3.1 倾角仪选择及安放

为了保证测量的精度与实时性, 本文选用了美国 HL PLANAR 公司的 NS-5/P2 双轴倾角传感器, 其主要优点是精度高、启动快、稳定性好、分辨率高, 其技术参数如表 1 所示。

表 1 倾角传感器技术参数

Tab. 1 Parameter list of inclinometer

技术参数	
测量范围	$\pm 5^\circ$
测量精度	0.01°
分辨率	0.0005°
通讯频率	1 Hz

倾角仪内部密封了电解溶液和电极,根据重力作用而导致内部液体分布的不均匀性来测量平面的不水平度。据此看出它的动态精度没有静态精度高,因此把它固定在垂直轴轴心^[7],尽量减小转动离心力对传感器产生的影响,位置如图 3 所示。

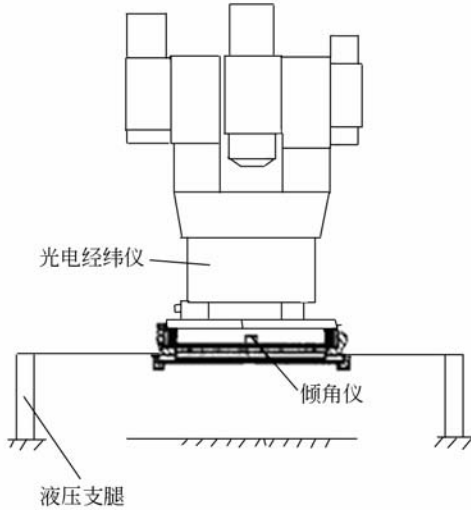


图 3 倾角传感器固定位置

Fig. 3 Location of inclinometer

倾角仪输出其固定平面与水平面夹角在两个正交方向上的分量。将倾角仪固定在垂直轴轴心,倾角仪的输出值就为方位轴垂直平面与水平面的夹角,方位轴垂直面与工作基准面平行,从而得到了经纬仪工作基面与水平面的夹角^[8]。由于自身的测量特性,其输出值具有一定的滞后性。

3.2 倾角仪数据采集

倾角仪串口输出数据中包含 X,Y 方向不平行值、编码器值和时间信息,这些信息被送到数据通讯系统,由数据通讯系统打包送到控制计算机

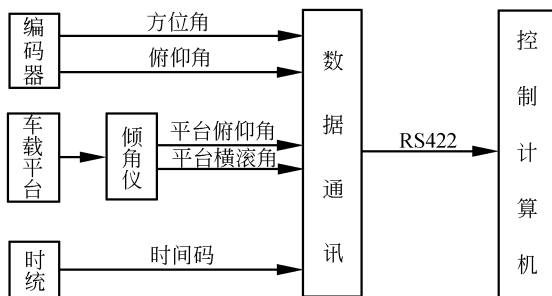


图 4 平台变形量数据采集系统

Fig. 4 Data sampling system for platform deformation

并存储,由此可详细记录光电经纬仪工作速度加速度对平台变形的影响。工作框图如图 4 所示。

4 车载平台变形的数据处理

将倾角仪放在图 3 所示位置,经纬仪高低角为 55.623° ,方位分别以 $5^\circ/s, 10^\circ/s, 20^\circ/s$ 速度匀速运动,分别用图中 3 种颜色曲线表示经纬仪以不同速度运动时倾角仪的输出值,如图 5 所示。

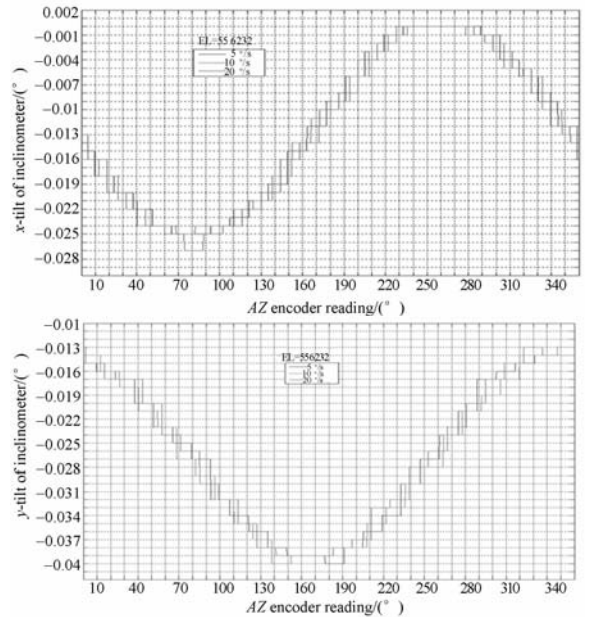


图 5 方位以 $10^\circ/s$ 转动时倾角仪输出值

Fig. 5 Results of inclinometer with azimuth axis of $10^\circ/s$

从图 5 中可以看出经纬仪以不同速度工作时,在同一方位值上倾角仪输出值是基本一致的,而且 X,Y 方向变形量具有一定的正弦特性,相位差为 90° ,其原因在于双轴倾角仪输出的是正交方向上与水平面的倾斜偏差量,而且随着方位轴旋转,每个轴都将测量其固定平面在各个方位上与水平面的夹角,因此值的大小相同^[9]。X,Y 输出最大值为 0,最小值为 $-144''$,峰峰值为 $144''$,可以通过一个正弦函数予以表示。实验结果表明,经纬仪方位方向的工作速度对平台变形的影响比较小。

经纬仪高低方向值分别为 $30^\circ, 55^\circ, 80^\circ$ 时,方位以 $10^\circ/s$ 匀速运动,本文研究了高低角的变化对平台变形的影响。图 6 分别用 3 种不同的曲线表示经纬仪以不同高低角运动时倾角仪的输出值。

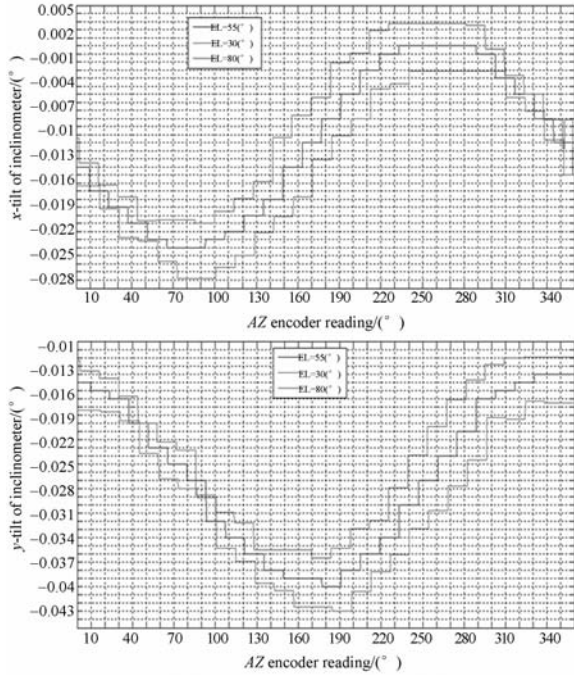


图 6 俯仰角变化后倾角传感器的输出

Fig. 6 Results of inclinometer after elevation angle changed

从图 6 记录的结果可以看出, 视轴的位置对平台变形影响较大, 主要原因是视轴的位置不同导致经纬仪重心发生变化, 从而影响车载平台的变形。

5 测角误差与倾角仪输出值的关系

车载平台与经纬仪紧密相连的中心位置的变形对经纬仪影响最直接, 可以认为经纬仪与平台固定处的局部是严格刚性的, 因此不管哪种变形, 最终影响的是垂直轴与铅垂线之间的夹角, 即垂直轴倾斜角度^[10]。根据垂直轴倾斜误差对经纬仪测角精度的影响公式^[11-12]:

$$\begin{cases} \Delta A = I \cdot \sin(A_H - A_M) \cdot \tan E_M \\ \Delta E = I \cdot \cos(A_H - A_M) \end{cases}, \quad (13)$$

式中 A_M, E_M 为目标实测编码器值, I 为垂直轴倾斜误差, A_H 为实际垂直轴线在水平面上的投影线与方位角(即定向线)之间的夹角, 称为垂直轴倾斜方向。如图 7 所示。

$OXYZ$ 为 $OX'Y'Z'$ 平移所得, 设在新坐标系 $OXYZ$ 中有一点 $D(0, 0, 1)$, D' 为平移前的位置, M 为 D 在 OXY 平面上的投影, M' 为 D' 在 $OX'Y'$ 平面上的投影。

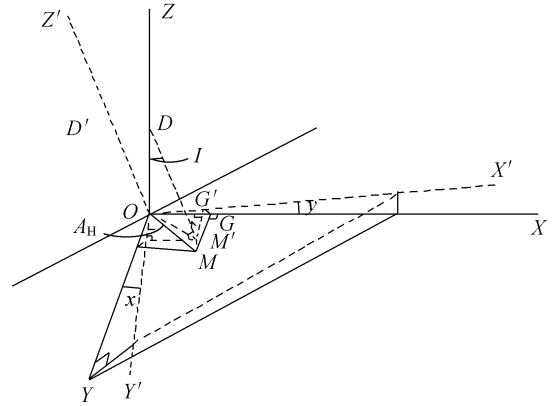


图 7 垂直轴倾斜误差及倾斜方向

Fig. 7 Vertical axis inclination error and its azimuth

则

$$A_H = \arctan \frac{y}{x} = \arctan \frac{-\sin Y \cdot \cos X}{-\sin X} = \arctan(\sin Y \cdot \cotan X), \quad (14)$$

$$I = 90 - \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 X + \sin^2 Y \cos^2 X}}{\cos Y \cos X}, \quad (15)$$

X, Y 为倾角仪输出值, A_H, I 值可通过上述公式求得, 这样因平台变形带来的测角误差 $\Delta A, \Delta E$ 也可以求得, 因此, 只要确定每个时刻的和就能够计算出该时刻相对应的测角真值^[13]。

5 结 论

本文分析了车载平台的变形, 并采用倾角传感器测量了车载平台的变形, 其原理简单、使用方便, 数据采集系统工作稳定。对经纬仪工作时车载平台变形值的实时测量表明: 经纬仪方位速度对平台变形影响较小, 倾角传感器数据经滑动加权均值滤波处理后最小相差为 0, 最大相差为 5.1"; 视轴位置对平台变形影响较大, 原因在于视轴的位置不同导致经纬仪重心发生变化, 进而影响车载平台的变形。分析了车载平台变形对测角误差的影响, 推导出了测角误差与倾角仪输出值关系的数学模型, 为下一步研究如何进行修正和补偿, 提高车载经纬仪的测角精度具有重要的理论意义和实际价值。

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 correction of vehicle photoelectric theodolite working on the quasi-moving base*[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2007. (in Chinese)
- [2] 高云国. 车载经纬仪技术简介 [R]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2007.
GAO Y G. *Synopsis of vehicular platform theodolite technology*[R]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,2007. (in Chinese)
- [3] 史亚莉,高云国,张磊,等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程,2008,16(4):726-732.
SHI Y L,GAO Y G,ZHANG L, et al.. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)
- [4] 张东梅. 车载平台变形测量技术研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
ZHANG D M. *The research on measurement technology of vehicle plane distortion* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences,2006. (in Chinese)
- [5] 李岩,张尧禹,岳俊华. 船体变形测量的新技术[J]. 光学精密工程,2008,11(11):2235-2238.
LI Y, ZHANG Y Y, YUE J H. New technology of ship distortion measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 11(11): 2235-2238. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 宁大勇,高云国. 车载光电跟踪设备高精度控制方法及仿真[J]. 光电工程,2008,11(7):8-12.
NING D Y,GAO Y G. Method of high accuracy control for moto-based optoelectronic tracking equipment and simulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,11(7):8-12. (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] 肖影,金龙旭. 方位角测量跟踪系统设计及实验[J]. 光学精密工程,2007,15(5):741-745.
XIAO Y,JIN L X. Design and experiment of tracking and detecting system for azimuth[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):741-745. (in Chinese)
- [10] GREVE A,PANIS J F, THUM C. The pointing of the IRAM 30-rn telescope[J]. *Astron. Astrophys,Ser. 115*,379-385,1996.
- [11] 刘利生. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
LIU L SH. *Measuring Data Process of Ballistic Trajectory*[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2002(in Chinese)
- [12] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程,2007,16(4):846-851.
GAO C, QIAO Y. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 16(4): 846-851. (in Chinese)
- [13] 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.

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



王涛(1981-),男,黑龙江虎林人,硕士研究生,研究实习员,2004年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要研究方向为光电精密转台、光学精密镜头等。E-mail :toniear@163.com



李增(1982—),男,河南邓州人,博士研究生,2005年于郑州大学获得学士学位,主要研究方向为车载高精度光电精密跟踪测量技术。E-mail:lizengluck@sohu.com

通讯作者:



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,研究员,博士生导师,主要从事光电测控设备总体技术和光纤通讯技术方面的研究。E-mail:wzy0607@yahoo.com.cn

导师简介:



陈涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,研究员、博士生导师,主要研究方向为光电精密跟踪测量技术。E-mail:chent@ciomp.ac.cn

● 下期预告

标准漫反射板绝对反射比因子测量装置

盛建军¹,张黎明²

(1.合肥学院 数学与物理系,安徽 合肥 230022;2 中国科学院 安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

为了设计、制作、建立一整套既可以测量入射照度和反射辐亮度的比辐射计和一套漫反射板绝对反射比因子测量装置,对绝对反射比因子的测量原理进行了分析和研究。首先,通过比辐射计对光源照度、反射辐亮度测量计算,给出漫射板绝对反射比因子测量公式;然后,根据推导公式中的辐射亮度由测量比辐射计的光阑面积决定,采用一种新的光学方法精确测量光阑面积从而提高测量精度,并介绍了装置其它部件的设计制作过程。最后,采用该装置实验测量了安徽光学精密机械研究所研制的标准漫反射板在633~960 nm波段内的绝对反射比因子,实验表明该装置的测量不确定度为0.19%。该测量装置测量方法简单、精度高,可以满足反射比因子的测量要求。