

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.022

# 经纬仪的调平对心误差补偿研究

刘春桐, 何祯鑫, 赵晓枫, 赵兵  
(第二炮兵工程学院 202 室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为进一步提高调平对心的效率和精度, 对基于调平对心误差补偿的自动调平对心的原理与系统实现进行研究。应用坐标变换方法, 分析经纬仪水平倾斜误差造成的对心偏差, 推导出补偿公式, 设计研究自动调平对心系统的补偿原理和结构, 并通过实验分析调平对心误差对测角的影响。实验结果表明, 误差补偿后的经纬仪对心精度可达 0.04 mm, 更好地提高经纬仪调平对心的精度, 减少操作人员的主观因素产生的误差, 缩短设备展开和测量时间。

**关键词:** 经纬仪; 自动调平对心; 坐标变换; 误差修正补偿

**中图分类号:** TP206+.1; O241.1 **文献标识码:** A

## Research on Leveling and Centering Error Compensation of Theodolite

Liu Chun tong, He Zhen xin, Zhao Xiao feng, Zhao Bing  
(Staff Room 202, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and precision of leveling and centering, the principle and system implementation of automatic leveling and centering based on error correction is researched. Use the method of coordinate transformation, the effects of the centering, horizontal angle and vertical angle error caused by leveling error, then the mathematical compensation formulas is derived, and the structure and operating principle of automatic leveling and centering system based on the algorithm is set forth. Through experiment, the affect of angle measurement to the corrosion of leveling and centering error is discussed. The experiments reveal that the centering precision reaches 0.04mm. The results show that the system can improve the leveling and centering precision, reduce personal error, and shorten the equipment set-up and measurement time.

**Keywords:** theodolite; automatic leveling and centering; coordinate transformation; error correction and compensation

### 0 引言

在工程测量中, 经纬仪能提供目标的方位信息, 精确测出目标的水平角。由于正确安置经纬仪的垂直轴是整个测量工作的基础, 因此, 经纬仪的调平对心特别关键。目前, 仪器的调平主要依靠参考电子气泡、调节三脚架支腿和脚螺旋来实现, 误差一般为 $10''$ ; 仪器的对心有垂球对心、光学对中、激光对中和强制对心, 误差可以控制在 $0.05\text{ mm}$ 以内<sup>[1]</sup>。但存在的主要问题包括: 自动化程度低, 操作时间长; 精度受参考基准指示器的精度和人眼判读误差的限制; 误差修正模型不够理想。故对基于调平对心误差补偿的自动调平对心原理与系统实现进行研究, 以进一步提高调平对心的效率和精度。

### 1 调平对心误差修正与补偿原理

#### 1.1 调平误差补偿公式

调平误差对测角影响推导时, 假设经纬仪视准轴、横轴和竖轴在空间上相互正交, 偏心差等其它误差均为零。调平误差是通过经纬仪竖轴倾斜误差表现出来的。利用球面三角形建立竖轴倾斜误差的修正模型, 在倾斜误差较大或经纬仪在大俯仰角状

态时, 该方法不再适用。故采用坐标变换方法<sup>[2]</sup>, 建立经纬仪调平误差对水平角测量误差影响的数学模型。

根据经纬仪目标定位测量原理, 建立测量坐标系如图 1。设地面坐标系为  $O-XYZ$ , 原点为经纬仪三轴的交点,  $Z$  轴与测站水平面垂直,  $X$  轴和  $Y$  轴在水平面内,  $Y$  轴指向大地北,  $X$  轴与  $Y$  轴和  $Z$  轴分别正交, 组成右手坐标系, 实际上该坐标系的各轴指向分别为经纬仪在理论零位时的水平轴、照准轴和垂直轴的指向; 照准坐标系为  $O-xyz$ ,  $y$  轴为经纬仪照准目标后视轴的指向,  $z$  轴与  $y$  轴正交并指向天顶,  $x$  轴与  $y$  轴和  $z$  轴分别正交, 组成右手坐标系, 并设目标脱靶量为零。

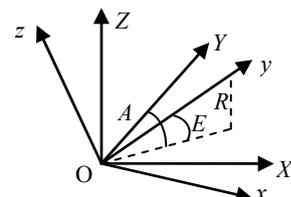


图 1 经纬仪测量坐标系示意图

先考虑理想情况, 在竖轴倾斜误差为零时, 经纬仪从零位指向目标需在水平方向上转动  $A$  角度,

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-06-11

作者简介: 刘春桐 (1972-), 男, 安徽人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事武器系统检测与故障诊断研究。

竖直方向上转动  $E$  角度, 可看成是坐标系  $O\text{-}XYZ$  先后绕  $Z$  轴 (垂直轴) 和  $X$  轴 (水平轴) 旋转  $A$  角度和  $E$  角度至坐标系  $O\text{-}xyz$ , 则式 (1) 成立:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M_x(E)M_z(A) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & \sin E \\ 0 & -\sin E & \cos E \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

可得:

$$[M_x(E)]^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \cos A & \sin A \cos E & -\sin A \sin E \\ -\sin A & \cos A \cos E & -\cos A \sin E \\ 0 & \sin E & \cos E \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

由于经纬仪跟踪目标过程中竖轴倾斜误差的影响, 空间目标在  $O\text{-}XYZ$  与  $O\text{-}xyz$  中的坐标关系可由式 (3) 表示:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:  $M$  为  $O\text{-}XYZ$  旋转至  $O\text{-}xyz$  的坐标转换矩阵, 经纬仪从零位转动到照准目标  $P$  除了发生  $A'$ 、 $E'$  角的转动外 ( $A'$  和  $E'$  分别为存在轴系误差时目标的水平方位角和竖直角), 同时也发生了  $v$  角度的转动, 每次角度转动便构成了一个转动前后坐标系间的旋转矩阵。总旋转矩阵  $M$  的生成过程为:

测量基准是建立在基座上的。竖轴发生倾斜角度  $v$ , 可看成原坐标系  $O\text{-}XYZ$  绕过原点的任一空间直线旋转了  $v$  角, 倾斜方向为  $A_v$  旋转至坐标系  $O\text{-}X_1Y_1Z_1$ 。旋转矩阵表示为:

$$M_L(v) = \begin{bmatrix} \sin^2 A_v(1-\cos v) + \cos v & \cos A_v \sin A_v(1-\cos v) & \cos A_v \sin v \\ \cos A_v \sin A_v(1-\cos v) & \cos^2 A_v(1-\cos v) + \cos v & -\sin A_v \sin v \\ -\cos A_v \sin v & \sin A_v \sin v & \cos A \end{bmatrix} \quad (4)$$

经纬仪的方位编码器装在垂直轴上, 故方位角  $A'$  为第二发生转动的角度。相应的坐标系  $O\text{-}X_1Y_1Z_1$  中的  $Z_1$  轴为第二旋转轴, 原坐标系则变换至  $O\text{-}X_2Y_2Z_2$ , 旋转矩阵表示为:

$$M_z(A') = \begin{bmatrix} \cos A' & \sin A' & 0 \\ -\sin A' & \cos A' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

然后, 坐标系  $O\text{-}X_2Y_2Z_2$  绕  $X_2$  轴旋转高角  $E'$  变换至坐标系  $O\text{-}X_3Y_3Z_3$ , 相应的变换矩阵可表示为:

$$M_x(E') = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E' & -\sin E' \\ 0 & \sin E' & \cos E' \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据旋转顺序连续右乘表示每次坐标系旋转前后的变换矩阵, 即可得到总变换矩阵  $M$  为:

$$M = M_L(v)M_z(A')M_x(E') \quad (7)$$

比较式 (2)、式 (3)、式 (4)、式 (5)、式 (6) 与式 (7), 便可得到测量误差  $\Delta A_v$  与  $A'$ 、 $E'$ 、 $v$ 、 $A_v$  之间的数学关系式如式 (8), 即竖轴倾斜误差影响经纬仪方位测角误差的数学模型:

$$\Delta A_v = A' - \arctan\{[(\cos A_v \cos v + \sin A_v \tan A_v) \sin A' + \sin A_v(1 - \cos v) \cos A' + \sin v \tan E'] / [(\sin A_v \tan A_v \cos v + \cos A_v) \cos A' - \sin A_v(1 - \cos v) \sin A' + \tan A_v \sin v \tan E']\} \quad (8)$$

其中,  $\Delta A_v$  为方位测角误差,  $v$  为竖轴倾斜误差值,  $A_v$  为竖轴与当前水平轴指向之间的水平夹角,  $A'$  为未调平时水平度盘读数,  $E'$  为未调平时竖直度盘读数。

## 2 调平对心误差补偿的实现

### 2.1 调平对心误差修正与补偿原理

误差补偿方法可分为硬件补偿和软件补偿<sup>[3]</sup>。硬件补偿受误差变化规律的影响而受到限制, 当综合考虑调平与对心误差时, 硬件补偿就不能达到理想的效果。笔者采用软件补偿的方法来消除调平对心误差对角度值的影响, 在控制计算机内设有修正误差的子程序。调平对心误差修正补偿过程如图 2。

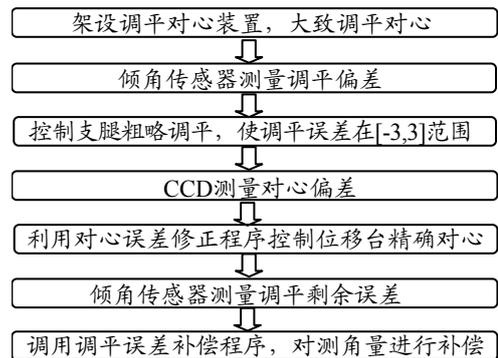


图 2 调平对心误差修正与补偿原理图

### 2.2 高精度倾角传感器对调平误差的修正

早期的光学经纬仪和电子经纬仪<sup>[4]</sup>通常使用普通的水准器和目视方法读取角度值, 其精度和灵敏性都不很高, 且不适用于自动化程度高的测量。如 DZJ5 型电子经纬仪使用的水准器的精度为: 长水

泡20"/2 mm；圆水泡8"/2 mm。从式(8)可以得出这一估计误差对于测角精度影响是比较大的。笔者采用二维数字式倾角传感器SANG1000<sup>[5]</sup>，角度稳定值最高可达1.8"；具有输出速率高、能消除双轴的双轴影响等优点。

在实际测量过程中不能直接得出 $v$ 和 $Av$ ，通过在经纬仪的底座上安置了倾角传感器，经倾角传感器测量可得到在水平面上的2个方向上的倾斜角误差 $v_1$ 、 $v_2$ ，即经纬仪在横轴方向的调平误差是为 $v_1$ ，视准轴方向上是 $v_2$ 。 $v_1$ 、 $v_2$ 的正负号代表方向，一、三象限为正，二、四象限为负。方向和大小可以通过三角运算得到，方向为 $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ ；大小为 $A_v = \arctan(v_1/v_2)$ 。得到竖轴倾斜方向和大小后，根据修正公式(8)，通过修正程序对水平测角量进行修正。

### 2.3 经纬仪对心误差的补偿

面阵CCDICX098AK<sup>[6]</sup>像敏单元尺寸为5.6 μm(H)×5.6 μm(V)，水平驱动频率为12.27 MHz，测量红色站点的精度为半个象元。为了实现精确的对心，首先要求利用CCD测出经纬仪倾斜状态过中心的重力线即位移台的竖直轴线与站点之间的相对位置关系，如图3。

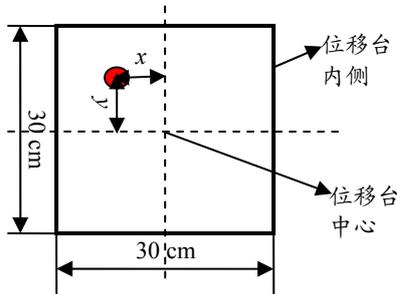


图3 对心图像判读原理

CCD敏感面与被测平面的水平度控制在3'，得到的图像变形非常小，在图像中识别电控位移台中心坐标与站点中心坐标，直接换算求出对心误差 $x$ 、 $y$ 。把 $x$ 、 $y$ 转化为控制脉冲数目，移动位移台实现经纬仪的精确对中。笔者采用精密二维电控位移为WN202WA300×300-XY<sup>[7]</sup>，行程范围为300 mm×300 mm，重复定位精度<5 μm，最大负载20 kg，可通过控制步进电机实现经纬仪沿XY两轴移动。

## 3 经纬仪调平对心系统误差分析

### 3.1 补偿后对心误差分析

对心系统的误差主要由图像处理、判读方式、平台倾斜造成的像变等环节引入。取1个像素元对于物体宽度为5 μm，即物元分辨率。物元分辨率带

来的误差服从均匀分布，因此其误差按均方值计算，即 $\sigma_0 = 5 \mu\text{m} / \sqrt{3} \approx 2.89 \mu\text{m}$ 。

在图像处理方面，判读算法包括图像分割等处理。采用亚像元像移测量方法<sup>[8]</sup>，测量的均方差达到0.4个像元误差，即 $\sigma_{c2} = 0.4 \times 2.89 \approx 1.16 \mu\text{m}$ 。

质心判读方式为连续操作，误差约为1~2个像元误差，即 $\sigma_{c3} = 1.5 \times 2.89 \approx 4.34 \mu\text{m}$ 。

假设调平误差为3'，CCD靶面中心到地面垂直距离为1.5 m，经纬仪倾斜误差对位移台中心与被测站点中心的距离测量的影响的， $\sigma_{c4} = 2.28 \mu\text{m}$ 。由误差分析理论<sup>[9]</sup>，经误差补偿后经纬仪对心综合误差为 $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{c1}^2 + \sigma_{c2}^2 + \sigma_{c3}^2 + \sigma_{c4}^2} = 26 \mu\text{m}$ 。

通过搭建实验平台，得经纬仪对心在补偿前后 $x$ 轴、 $y$ 轴定位误差的数据，误差曲线如图4、图5。

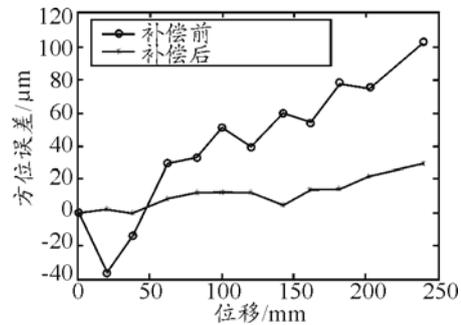


图4 经纬仪x轴对心定位误差曲线

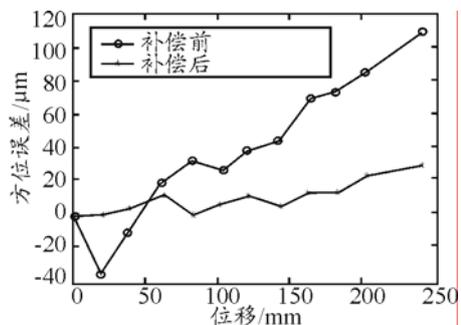


图5 经纬仪y轴对心定位误差曲线

由图4和图5可见，通过对对心误差进行一次补偿，系统的定位精度有了较大程度的提高，经纬仪沿 $x$ 轴方向的定位精度由补偿前的114 μm提高到补偿后的27 μm，沿 $y$ 轴方向的定位精度由补偿前的120 μm提高到补偿后的29 μm，总对心误差达到40 μm，比理论分析值大，可能是实验环境以及电路等原因造成的，证明了所采用的误差补偿策略能有效地提高对心精度。随着位移的增加，经纬仪定位精度有所下降，但由于系统是闭环的，可通过二次误差补偿来进一步减小对心误差。

(下转第88页)

### 6 结论

实验结果证明，该控制器的设计是正确的和可行的。下一步，必须在保证减振器性能稳定性和可靠性达到要求的基础上，对减振器的控制性能及规律进行详细、细致的仿真和实验分析，总结其控制规律，并针对不同的路谱分析减振器的控制性能，使之更加接近于实际的路况控制。

### 参考文献：

[1] Kamath G M, Wereley N M, Jolly, MR. Characterization of Semi-Active Magnetorheological Lag Mode Dampers[C]. SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, San Diego CA, March 1998: 3329-3337.  
 [2] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model for Magnetorheological Dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123 (3): 230-238.

\*\*\*\*\*

(上接第 78 页)

### 3.2 调平误差补偿分析

为了分析调平误差对测角的影响，假设  $\nu=30''$ ， $A\nu=\pi/4$ ， $A$  的范围为  $(0,2\pi)$ ， $E$  的范围为  $(-\pi/6,\pi/6)$ ，根据式 (8) 的修正公式，影响曲线如图 6。

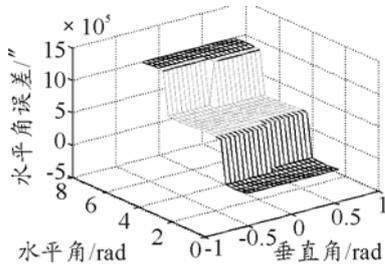


图 6 调平误差对水平角的影响

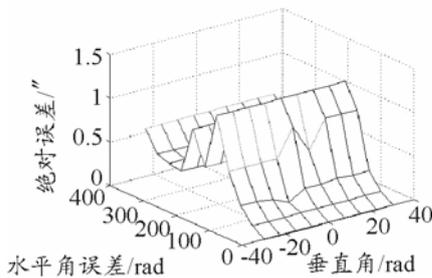


图 7 修正后水平角误差绝对值

由图 6 知，竖直角在  $\pm 30''$  的影响相对较小的，但随着角度增加影响也会急剧变大，水平角的影响是明显的，必须对测角的结果进行修正。利用 J2 经纬仪进行实验过程，经纬仪的度盘误差、横轴误差等可以通过对径符合读数等方法进行消除，但调平误差却不能消除，水平角经修正后的误差如图 7，

[3] Pang L, Kamoth G M, Wereley N M. Dynamic characterization and analysis of magnetorheological damper behavior[C]. In: Davis L P, Proc. Of SPIE. Int. Soc. Opt Eng. Washington: SPIE, 1998, 3327: 284-302.  
 [4] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器及其性能[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 74-81.  
 [5] 翁建生, 胡海岩, 张庙康. 磁流变阻尼器的实验建模[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 616-620.  
 [6] 廖昌荣, 余淼, 陈伟氏, 等. 汽车磁流变减振器设计原理及实验研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(16): 1391-1394.  
 [7] Li Hua-lin, Chen Yong, Huang Qi, Li Jian. FUZZY PID CONTROL FOR LANDING GEAR BASED ON MAGNETO-RHEOLOGICAL (MR) DAMPER[C]. The 2009 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis International Proceeding. 2009, 10(23): 22-25.  
 [8] 苏楚奇, 窦传威, 邓亚东, 等. 汽车 42V 电源及其驱动系统的应用分析[J]. 武汉大学学报, 2006, 39(4): 91-94.

从结果可知：由经纬仪调平误差引起的水平角误差最大值  $1.172 0''$ ，最小值为  $3.505 4e-006''$ ，说明推导的数学模型是可靠的，仍然存在的误差由实验过程中引入的随机误差，表明此种补偿方法测量水平角已经达到经纬仪对高精度的要求。

### 4 结论

结果表明，误差补偿可以更好地提高经纬仪调平对心的精度，修正后对心误差  $\leq 0.04 \text{ mm}$ ，调平误差对水平测角影响  $\leq 0.5''$ ，并减小了操作人员的主观因素产生的误差，缩短了设备展开和测量时间，很好地满足了机动作战对方位角快速测量的要求。

### 参考文献：

[1] 于成浩, 柯明, 赵振唐. 论测量仪器的精密整平及对中技术[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 87-88.  
 [2] 柯金朴. 空间三维坐标转换原理及实现[J]. 江西测绘, 2008, 12(5): 71-74.  
 [3] 周俊. 电子经纬仪的误差修正和模型仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.  
 [4] 须鼎头. 电子测量仪器原理及应用技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.  
 [5] Motion Control Sensor Corporation, SANG1000 Dual Axis Tilt-sensor Datasheet. <http://www.xrsensor.com>  
 [6] Sony Corporation, ICX098AK Progressive Scan CCD Image Sensor Datasheet. <http://www.sony.co.jp>.  
 [7] Beijing Weinaguangke Instrument Co. Ltd. WN202WA 300×300 Motorized Positioning Systems Datasheet. <http://www.bjwn.cn>.  
 [8] 樊超, 易红伟, 陈浩锋, 等. 基于光学相关的亚像原像移测量方法研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 181-184.  
 [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.