

文章编号 1004-924X(2010)07-1543-05

# 光电测量设备的实时调平补偿方案

李建荣<sup>1,2</sup>,高慧斌<sup>1</sup>,王志乾<sup>1</sup>,沈铖武<sup>1</sup>,刘绍锦<sup>1</sup>

(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:**为了使光电测量设备快速进入测量状态,减小因倾斜带来的测量误差,研究了一种光电测量设备实时调平补偿方案。根据光学成像理论,推导了物高、物距、像高、像距等参数之间的换算关系。然后根据倾斜特性建立了物体或成像系统倾斜时的实时调平补偿数学模型。利用数学模型确定的补偿算法和水平倾角仪测量的角度值,可对测量设备在一定倾角范围内倾斜时进行实时调平补偿。对此补偿算法进行了实验验证。实验结果表明,测量设备在水平倾角 $\alpha$ 为 $0.26^\circ$ , $\beta$ 为 $1.197^\circ$ 的情况下,经过实时调平补偿后可将系统的测量误差由 $-0.17615\%$ 优化到 $-0.07787\%$ ,使光电测量设备可在倾斜的情况下保证测量精度。

**关键词:**光电测量;调平补偿;实时补偿;补偿算法;倾角仪

**中图分类号:**V556 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1543

## Real-time compensative leveling in photoelectric measuring equipment

LI Jian-rong<sup>1,2</sup>, GAO Hui-bin<sup>1</sup>, WANG Zhi-qian<sup>1</sup>, SHEN Cheng-wu<sup>1</sup>, LIU Shao-jin<sup>1</sup>

(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:** In order to make the measuring device quickly work and to reduce the measuring error from inclination, a scheme of real-time compensative leveling in the photoelectric measuring equipment was presented. On the basis of the optical theory, the relationships among the subject height, subject distance, image height and the image distance were deduced. Then, a mathematical model for real-time compensative leveling the object or the optics system was established using the incline characteristic. Based on the the mathematical model and the angles tested by an inclinometer, a real-time compensation scheme was carried out to level and compensate the inclining angle in a certain range. The scheme was verified by experiments, and the result shows that after real-time compensation the measurement precision is from  $-0.17615\%$  to  $-0.07787\%$  when the obliquities of measuring equipment is at  $\alpha$  in optimized  $0.26^\circ$  and  $\beta$  in  $1.197^\circ$ . It is concluded that the scheme can keep the measurement precision of the measuring equipment when it works at an incline.

**Key words:** photoelectronic measurement; compensative leveling; real-time compensation; compensation algorithms; inclinometer

收稿日期:2009-04-22;修订日期:2009-11-18.

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目

## 1 引言

光电测量设备绝大多数都是精密测量设备,广泛应用于航天、航空、航海等军事领域和建筑、工业生产等民用领域。随着科学技术的进步,各行业对测量精度的要求越来越高,这就要求光电测量设备在设计、研制、使用等过程中必须考虑各方面的误差来源,从而提高光电测量设备的测量精度。光电测量设备都有其使用基准,大多数都是以大地为水平基准。常用的建立基准的方法有两种,即使光电测量设备的基准线或基准面平行或垂直于大地<sup>[1-2]</sup>,这两种方法实质上是一致的,很容易实现相互间的转换。

光电测量设备每次使用前都需要建立测量基准,最常用的是把仪器基准面调整到与大地水平(简称调平)。调平过程一般需要较长时间,而且需要使用各种办法来保持这种水平状态。在调平过程中存在的人为因素,会使得不同人对同一事物的测量结果不完全相同。为了拓宽仪器使用条件,使测量更方便,稳定性更高,本文提出了一种利用双轴水平倾角仪测量的角度值进行系统实时调平补偿的方案,并以具体的光电测量系统为例,分析了该调平补偿方案及误差。实验证明这种补偿方法能够扩大光电设备的使用范围,补偿精度高,效果理想。

## 2 光电测量系统的构成及其工作原理

### 2.1 光电测量系统的硬件构成

该光电测量系统是一种非接触式测量系统,结构如图1所示,它主要由激光目标点、光学镜

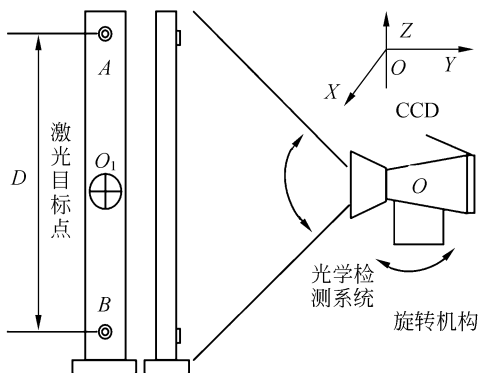


图1 光电测量系统

Fig. 1 Photoelectric measuring system

头、伺服系统、编码器系统、CCD 成像系统、数据处理系统等组成。激光目标点由激光器、激光器控制电路构成<sup>[3]</sup>。光学镜头安装在精密轴系转台上,由伺服控制系统控制转台转动。编码器系统安装在转台内部,用于测量转台转动的角度值及转台转动的速度。线阵 CCD 垂直安装在光学镜头的像面上接收图像信息。

### 2.2 光电测量系统的工作原理

该测量系统测的是两激光目标点的中心点  $O_1$  和光学镜头的主点  $O$  之间的相对位置关系。测量前先把装有激光器的目标靶调到两激光器连线与大地垂直,然后把光学镜头的光轴调到与大地水平(即转台的轴线与大地垂直,线阵 CCD 调到与大地垂直)。通电使电机带动镜头水平转动使线阵 CCD 获取激光目标点的图像信息<sup>[4]</sup>,通过图像处理得两激光目标点在 CCD 上的成像距离  $d$ <sup>[5-6]</sup>,根据光学成像理论计算出光学镜头主点到两激光器连线的中点  $O_1$  的距离  $L$ <sup>[7]</sup>:

$$L = D \times f / d \quad (1)$$

其中,  $f$  为光学镜头的焦距。由激光目标点在 CCD 上成像的位置、编码器旋转的角度值及  $L$ , 通过计算能够得出  $O_1$  相对于  $O$  在  $Z$  方向及  $X$  方向上的偏移量。坐标方向见图 1。

## 3 调平补偿方案分析

### 3.1 光电测量系统倾斜情况分析

光电测量系统的结构如图 1 所示,它的倾斜涉及两种情况:被测目标相对于大地的倾斜以及光学检测系统相对于大地的倾斜<sup>[8-9]</sup>。因为该光电测量系统测量的是光学检测系统相对于被测目标之间的位置关系,所以只要以两激光目标点连线为  $Z$  轴建立坐标系,即可以把两者倾斜量都转换到光学检测系统。

### 3.2 构建数学模型

如图 2 所示,平面  $ABCD$  平行于大地水平面,双轴倾角仪安装在光学检测系统的箱体上,其  $X$  轴和  $Y$  轴的方向为平面上直线  $FE$  和  $HG$  的方向。初始状态时,光学检测系统的底面与平面  $ABCD$  重合。当其倾斜时,相当于平面  $ABCD$  绕直线  $GH$  旋转  $\alpha$  角后为平面  $A'B'C'D'$ ,平面  $AB-CD$  绕直线  $EF$  旋转  $\beta$  角后为平面  $A''B''C''D''$ 。双

轴水平倾角仪输出的角度值为图 2 中的  $\alpha$  和  $\beta$  角。

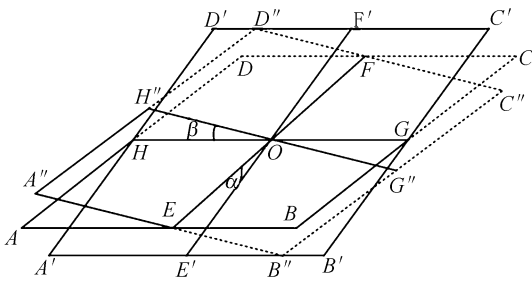


图 2 平面倾斜示意图

Fig. 2 Sketch map of plane incline

因为线阵 CCD 与水平面垂直,所以建立以线阵 CCD 第一个像元为坐标原点, X、Y 轴与图 2 相同的右手坐标系,如图 3 所示。

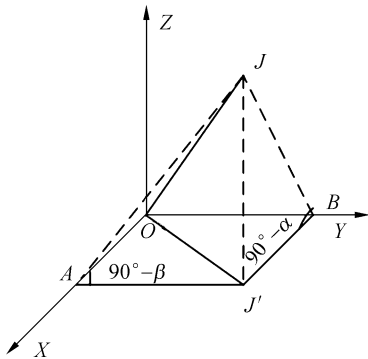


图 3 CCD 倾斜示意图

Fig. 3 Sketch map of CCD incline

图中  $JO$  为线阵 CCD 的长度,当光学测量系统如图 2 中倾斜  $\alpha$  和  $\beta$  角时,过  $J$  做  $XOY$  面的垂线,与  $XOY$  面交于  $J'$ ,过  $J'$  做  $X$  轴垂线交于  $A$ ,过  $J$  做  $Y$  轴垂线交于  $B$ ,此时线阵 CCD 的有效长度为  $JJ'$ , $JJ'$  与  $JO$  的长度关系如式(2)所示:

$$\tan \alpha = \frac{BJ'}{JJ'} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{AJ'}{JJ'} \quad (3)$$

$$JO^2 = JJ'^2 + J'O^2 \quad (4)$$

$$JJ' = \frac{JO}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \quad (5)$$

根据上式可知,当光学测量系统如图 2 中倾斜  $\alpha$  和  $\beta$  角时可计算出理论像高,从而可得出准确的测量值。

### 4 实验测试及数据分析

为了检验本补偿方法的校正效果,做了大量试验对本补偿方法进行检测验证。试验选用焦距为 29.76 mm 的光电测量系统对  $AB = 400$  mm 的目标进行了测量,同时用 2 台莱卡经纬仪进行交汇测量建立空间直角坐标系,坐标系的精度为 0.001 mm。测量过程如下:

(1) 把光电测量系统调平并分别用不带补偿的算法和带补偿的算法对激光目标点进行测量,测量结果分别作为本方法的基准测量值。

(2) 用两台莱卡经纬仪进行交汇测量建立的空间直角坐标系对光电测量系统的光学镜头主点(光学镜头主点和轴系的轴心重合)和激光目标点进行测量,并计算出它们之间的距离作为基准测量真值。

(3) 用专用软件读出双轴倾角仪的角度值  $\alpha$  和  $\beta$ ,作为倾斜角度基准值。

(4) 将光电测量系统调到与水平面成一个倾斜角度,分别进行 1, 2, 3 步骤,得到第一次测量值,第一次测量真值和第一次测量的  $\alpha$  和  $\beta$  角值。

按照测量步骤,对不同情况下的倾斜进行了测量,得到以下测量数据,如表 1 所示,误差分析<sup>[10]</sup>如表 2 所示。

表 1 测量数据

Tab.1 Experiment data

序号	未补偿测量值/mm	补偿测量值/mm	真值/mm	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$
基准值	1 518.19	1 518.19	1 518.22	0.035	0.054
(1)	1 519.55	1 519.881	1 520.306	0.051	0.284
(2)	1 522.25	1 522.842	1 523.04	0.051	0.562
(3)	1 524.5	1 525.335	1 525.837	0.842	0.148
(4)	1 527.25	1 528.754	1 529.945	0.295	1.251
(5)	1 528.74	1 530.309	1 532.207	0.377	1.485
(6)	1 526.51	1 527.761	1 529.224	0.274	1.191
(7)	1 523.92	1 524.782	1 525.63	0.829	0.143
(8)	1 519.28	1 519.57	1 520.366	-0.039	0.321

表 2 误差分析

Tab. 2 Error analysis

序号	$\alpha$ 差	$\beta$ 差	补偿前误差	补偿后误差
1	0.016	0.23	-0.756	-0.425 14
2	0.016	0.508	-0.79	-0.198 01
3	0.113	0.788	-1.337	-0.501 76
4	0.26	1.197	-2.695	-1.191 32
5	0.342	1.431	-3.467	-1.898 15
6	0.239	1.137	-2.714	-1.463 18
7	0.108	0.775	-1.71	-0.848 37
8	-0.074	0.267	-1.086	-0.796 4

根据相对误差计算公式(6)得相对误差如表 3 所示。

$$\text{相对误差} = \text{误差} / \text{真值} \times 100\% , \quad (6)$$

表 3 相对误差分析

Tab. 3 Analysis of relative error (%)

序号	补偿前相对误差	补偿后相对误差
1	-0.049 73	-0.027 96
2	-0.051 87	-0.013
3	-0.087 62	-0.032 88
4	-0.176 15	-0.077 87
5	-0.226 27	-0.123 88
6	-0.177 48	-0.095 68
7	-0.112 08	-0.055 61
8	-0.071 43	-0.052 38

## 参考文献:

- [1] 马登极,朱善安.线阵 CCD 在高精度测径系统中的应用[J].计算机测量与控制,2006,14(2):175-176,185.  
MA D J, ZHU S A. Application of linear CCD in high precision diameter measuring system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(2): 175-176,185. (in Chinese)
- [2] 叶东,徐巧玉,车仁生.视觉测量系统的相机校准[J].光学精密工程,2006,14(5):883-890  
YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 883-890. (in Chinese)
- [3] 凌伟,王志乾,高峰端.光电测量系统畸变的实时数字校正[J].光学精密工程,2007,15(2):277-282.

根据表 1,表 2 和表 3 可知,补偿后的相对误差要明显小于补偿前的相对误差,且随着  $\alpha$  和  $\beta$  的增大,补偿效果明显。由于光电测量系统自身有随机误差存在,所以测量结果误差可能不是严格随角度线性变化。但总的可以看出角度越大,未补偿时的测量误差越大,补偿效果越明显。

## 4 结 论

针对光电测量系统的调平补偿问题,根据工程实际情况,建立了调平补偿相关的数学模型,通过实验对该调平补偿方案进行了验证评价。实验测量结果表明,该调平补偿方案结构简单可行,补偿精度高,经过实时调平补偿后可将系统的测量误差由-0.17615%优化到-0.07787%,有效地拓展了光电测量系统的使用条件。在系统测量过程中把双轴倾角仪读数子程序嵌入到主程序中,对测量结果进行实时补偿,调平实时补偿后的测量结果精度显著提高。

- LING W, WANG ZH Q, GAO F D. Real time digital correction for distortion in photoelectricity measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):277-282. (in Chinese)
- [4] 杨风暴,阳方林,韦全芳,等.基于图像迹的快速配准算法研究[J].测试技术学报,2006,20(1):71-74.  
YANG F B, YANG F L, WEI Q F, et al.. Study on image registration algorithm based on image trace [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2006, 20(1):71-74. (in Chinese)
- [5] 陈华,叶东,车仁生,陈刚.基于精确控制点的立体像机校准技术[J].光学精密工程,2006,14(5):903-909.  
CHEN H, YE D, CHE R SH, et al.. Stereo camera calibration based on accurate control points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 903-909. (in Chinese)

- [6] 王莲莲,王健. 高精度测量光学成像系统畸变的一种新方法—数字相关法[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2001,17(1):69-73.  
WANG L L, WANG J. A new method of measuring distortion in optical image system accuracy—digital image interrelated method[J]. *Journal of Suzhou University(Natural Science)*, 2001,17(1):69-73. (in Chinese)
- [7] 胡家升. 光学工程导论[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2006:19-70.  
HU J S. *Introduction to Optical Engineering*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2006:19-70. (in Chinese)
- [8] 李建荣,王志乾. 光电测量系统中的实时调平补偿方法[J]. 测试技术学报, 2008,22(1):80-83.  
LI J R, WANG Z Q. Real-time compensative level in photoelectric measuring systems[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2008, 22(1):80-83. (in Chinese)
- [9] 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, 2008,35(11):8-12.  
NING D Y, GAO Y G. Method of high accuracy control for motor-based optoelectronic tracking equipment and simulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,35(11):8-12. (in Chinese)
- [10] 梁志国,张大治,孙璟宇,等. 四参数正弦波曲线拟合的快速算法[J]. 计测技术, 2006,26(1):4-7.  
LIANG Z G, ZHANG D Z, SUN J Y, et al.. A fast arithmetic method of four-parameter sine wave curve-fit[J]. *Journal of Calculate and Measure Technology*, 2006,26(1):19-23. (in Chinese).

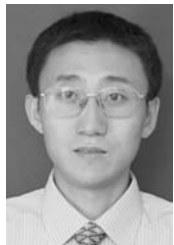
#### 作者简介:



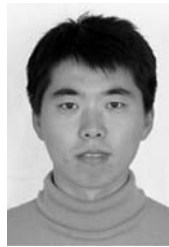
**李建荣**(1980—),男,陕西榆林人,博士研究生,研究实习员,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电测量与瞄准等方面的研究。E-mail: lijianrong\_1997@sohu.com



**高慧斌**(1963—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1990年于吉林工业大学获得硕士学位,主要从事自动控制等方面的研究。E-mail: yuanxinxin\_y@163.com



**王志乾**(1969—),男,吉林市人,博士,副研究员,1991年于长春工业大学获得学士学位,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事自动控制、数据处理等方面的研究。E-mail: zhiqian\_wang@sina.com



**沈铖武**(1978—),男,吉林松原人,硕士,助理研究员,2002年于吉林大学获得学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事惯性测量、数据处理等方面的研究。E-mail: chengwushen@163.com



**刘绍锦**(1979—),男,山西大同人,博士,助理研究员,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电测量等方面的研究。E-mail: evsv@sohu.com