

# 水平基准装置图像测量系统的不确定度分析<sup>\* 1</sup>

史雨辉 路杰 郑勇 张亿 赵义飞  
(中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),武汉 430071)

**摘要** 针对高精度水平基准装置人工调试时人为误差大,费时费力等情况,对水平基准装置进行了自动化升级改造,并采用A类与B类标准不确定度的组合评分方式对升级改造后的图像测量系统进行不确定度分析,经检验其能满足计量检定的精度要求。

**关键词** 水平基准装置;自动化升级;图像测量系统;不确定度;计量检定  
**中图分类号**:TH741 **文献标识码**:A

## UNCERTAINTY ANALYSIS OF IMAGE MEASUREMENT SYSTEM IN HORIZONTAL REFERENCE DEVICE UPGRADING

Shi Yuhui, Lu Jie, Zheng Yong, Zhang Yi and Zhao Yifei

(Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071)

**Abstract** A high-accuracy horizontal reference device is very important for verification of instrument of surveying and metering. At present the debugging of high-accuracy horizontal reference device is men-made, which wastes much time and with large error, therefore, it is necessary to make this equipment automation retrofits. The uncertainty analysis image measurement system after upgrading was studied by the combination of evaluation methods using standard of class A and class B, the results show that the transformation accuracy can meet the requirements of metrological verification.

**Key words**: horizontal reference device; automation upgrade; image measurement system; uncertainty; metrological verification

## 1 引言

水平基准是大地观测技术中一项十分重要的计量标准,它在计量、测绘、国防军事、水利、电力等国计民生建设中起着十分重要的作用。中国地震局地震研究所现有的水平基准装置能提供0.3"水平瞬时基准,但调校工作还是人工操作,这种方法虽然比较成熟,但在调试过程中易出现人为误差,对检定结果造成一定影响<sup>[1,2]</sup>。为减少人为因素对水平基准

调平的影响及提高调试效率,我们对调平装置进行了自动化升级改造。本文主要对改造后的图像测量系统的标定和不确定度进行分析,以检核其精度是否满足计量检定的要求。

## 2 图像测量系统的原理

水平基准装置图像测量系统如图1所示,系统采用自准直原理,分划板3位于准直物镜的焦平面上,基于重力基准的反光镜5的法线方向始终位于

\* 收稿日期:2012-09-30

基金项目:中国地震局地震科技星火计划(XH12033Y)

作者简介:史雨辉,男,主要研究方向为光电测试计量技术。E-mail: shiyuhui1986@126.com

水平面上。当光源照明分划板后,在 CCD7 的位置存在两个分划板像  $Y_1$  和  $Y_2$ 。 $Y_1$  是分划板本身经 CCD 物镜 6 后的成像; $Y_2$  是分划板经准直物镜成像于无穷远处,再由反光镜反射回来的成像。分划板十字刻划中心与准直物镜光心的连线称为光轴。如果光轴不位于水平面而存在偏差  $\alpha$  角时,CCD 处的分划板像  $Y_1$  和  $Y_2$  将分开一段距离  $\Delta Y$ 。由几何光学可知, $\Delta Y$  的大小为:

$$\Delta Y = 2f\beta \tan \alpha$$

(1)

偏差角为:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \Delta Y / (2f\beta)$$

(2)

式中, $\beta$  为 CCD 物镜的放大倍数, $f$  是准直物镜焦距。

通过测量  $\Delta Y$ ,不仅可以通过公式(1)测量出水平偏差  $\alpha$  角,而且可以通过高精度的微位移装置带动分划板移动,实现刻线的自动对准。

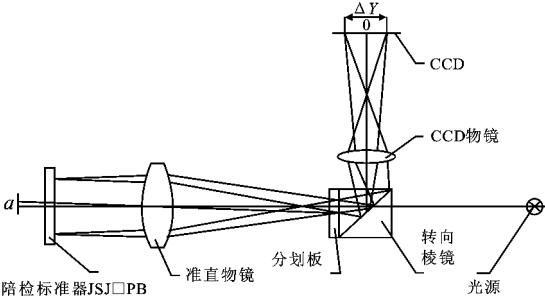


图1 图像测量系统原理

Fig. 1 Sketch of image measurement system

3 测量系统的不确定度分析

如果仅仅利用 CCD 的分辨率和亚像素定位精度,换算出图像测量系统精度是不充分的<sup>[3]</sup>,需要对图像测量系统进行实际的检测。

图像测量系统的测量精度决定了整个水平基准装置的精度。因此,作为整个水平基准装置的重要组成部分,必须对图像测量系统的测量质量给出定量的说明。而测量不确定度就是对测量结果质量的定量表征,是测量中的一种通用规则,适用于各种准确度等级的测量<sup>[4]</sup>。

不确定度依据其评定方法分为“ A ”,“ B ”两类, A 类标准不确定度由以观测列频率分布导出的概率密度函数得到; B 类标准不确定度由一个认定的或假定的概率密度函数得到,此函数基于事件发生的信任度(常称为主观概率或先验概率)<sup>[5]</sup>。

两类不确定度在评定中可以同时采用,也可以独立采用,只要做到评定过程不遗漏和不重复就可以<sup>[6]</sup>。因此,在一个不确定度评定实例中可以采用单一的 B 类方式评定,也可以采用 A 类和 B 类组合

的方式进行评定,本文采用组合评定方式,对形成不确定度的分量进行分析。即同向移动一段距离消除回程误差后,对微位移平台 4μm 的位移进行测量,测量数据如表 1 所示。

表 1 测量数据

Tab. 1 Measurement data

序号	测量值 $e_i$ (μm)	残差 $v_i$ (μm)	$v_i^2$ (μm <sup>2</sup> )
1	3.9	-0.1	0.01
2	4.1	0.1	0.01
3	3.8	-0.2	0.04
4	3.9	-0.1	0.01
5	4.2	0.2	0.04
6	3.9	-0.1	0.01
7	4.3	0.3	0.09
8	3.9	-0.1	0.01
9	3.9	-0.1	0.01
10	4.1	0.1	0.01
平均 $\bar{e}$	4.0	$\sum v_i^2 = 0.24$	

3.1 标准不确定度的 A 类评定

首先计算出  $\Delta Y$  的平均值为  $\Delta Y/\beta = 4.0\mu\text{m}$ ,则偏差角  $\alpha$  的测量结果的估计值为:

$$\alpha = \Delta Y / (2f\beta) = 0.2''$$

下面计算各测量分量引起的不确定度分量。

1) 准直物镜焦距的不确定度对  $\alpha$  不确定度的贡献( $f$ )

查阅物镜的出厂资料,物镜焦距  $f = 2000\text{mm}$ ,物镜的焦距标准不确定度为 20mm,包含因子为 2(服从正态分布)。由此可得到物镜焦距相对标准不确定度为:

$$u(f)_r = \frac{20}{2 \times 2000} \times 100\% = 0.5\%$$

(3)

对  $\alpha$  不确定度的贡献为:

$$\begin{cases} u(f)_r = 1 \times 0.5\% = 0.5\% \\ u(f) = 4 \times 0.5\% = 0.02\mu\text{m} \end{cases}$$

(4)

换算成角度为 0.001''。

估计相对不确定度为 25%,则

$$v(f) = \left(\frac{1}{2}\right) / \left(\frac{25}{100}\right)^2 = 8$$

(5)

2) CCD 图像测量值  $\Delta Y/\beta$  引入的不确定度 ( $\Delta Y/\beta$ )

由  $\Delta Y/\beta$  的 10 次测量得到平均值的标准差为  $\delta_{\Delta Y/\beta} = 0.052\mu\text{m}$ ,则  $\Delta Y/\beta$  的测量标准不确定度为  $u_{\Delta Y/\beta} = \delta_{\Delta Y/\beta} = 0.052\mu\text{m}$ ,故由 CCD 图像测量值  $\Delta Y/\beta$  测量的重复性引起的不确定度分量为

$$u(\Delta f/\beta) = \left| \frac{\partial \alpha}{\partial (\Delta f/\beta)} \right| u_{\Delta f/\beta} = 0.0026''$$

(6)

其自由度为  $v(f) = 10 - 1 = 9$ 。

3.2 标准不确定度的 B 类评定

图像测量系统的测角公式为

$$\alpha \approx \tan \alpha = \Delta Y / (2 \beta)$$
 (7)

除了随机影响到测量结果的不确定度外,  $f$  和 CCD 相元尺寸的不均匀等对图像测量系统的不确定度同样有贡献。CCD 物镜的放大倍数  $\beta$  虽然不容易精确测量但是固定, 而且通过标定得到了数字图像像素值与实际尺寸的对应关系,  $\beta$  已经被约掉, 因此  $\beta$  不引入不确定度分量。

1) 取近似值(方法误差)引入不确定度

通常当  $\alpha < 5^\circ$ ,  $\tan \alpha \approx \alpha$  (用弧度制表示), 这样取近似值, 引入了方法误差。当  $\alpha = 1''$  时, 用弧度制表示,  $\alpha = 4.848\ 136\ 811\ 095\ 1 \times 10^{-6}$ ,  $\tan \alpha = 4.848\ 100\ 000\ 038 \times 10^{-6}$ ; 当  $\alpha = 1'$  时,  $\alpha = 2.90\ 888\ 209 \times 10^{-4}$ ,  $\tan \alpha = 2.90\ 888\ 216 \times 10^{-4}$ , 可忽略不计<sup>[7]</sup>。

2) CCD 像元尺寸不均匀性引入的不确定度

由于系统的像素当量固定, CCD 相元尺寸的不均匀会引入不确定度分量, 根据 ICX413AQ 数据手册, CCD 像元尺寸扩展不确定度为 1%, 包含因子为 2.45 (服从三角分布)。由此可得 CCD 像元尺寸不均匀性的相对标准不确定度为:

$$u(\text{CCD})_r = \frac{1}{2.45} \% = 0.41 \%$$
 (8)

对  $\alpha$  不确定度的贡献为:

$$u(\Delta \text{CCD})_r = 1 \times 0.41 \% = 0.41 \%$$
  
$$u(\Delta \text{CCD}) = 4 \times 0.41 \% = 0.016 \mu\text{m}$$
 (9)

换算成角度为  $0.000\ 8''$ , CCD 生产时测量次数非常大, 取

$$v(\Delta \text{CCD}) = \infty$$
 (10)

3) 平面反光镜的垂直不确定度

根据研究, 平面反光镜测量不确定度为  $u(\alpha')$   $= 0.2''$ , 包含因子为  $k = 2$ , 由此可得平面镜标准不确定度为:

$$u(\alpha') = \frac{0.2''}{2} = 0.1''$$
 (11)

估计相对不确定度为 10%, 则

$$v(\alpha') = \left(\frac{1}{2}\right) / \left[\left(\frac{10}{100}\right)^2\right] = 50$$
 (12)

3.3 合成标准不确定度

将各不确定度分量和相关信息列于表 2。

各不确定度分量彼此无关, 故合成标准不确定度  $u_c$  为:

$$u_c(\alpha) = \sqrt{u(f)^2 + u(\Delta Y / \beta)^2 + u(\text{CCD})^2 + u(\alpha')^2}$$
  
$$= \sqrt{0.001^2 + 0.002\ 6^2 + 0.000\ 8^2 + 0.1^2}$$
  
$$= 0.1''$$
 (13)

有效自由度为:

表 2 标准不确定度分量

Tab.2 Components of standard uncertainty

不确定度来源	标准不确定度	自由度	类别
准直物镜焦距的不确定度	$u(f):0.001''$	8	A
CCD 图像测量重复性引起的不确定度	$u(\Delta Y/\beta):0.002\ 6''$	9	A
CCD 像元尺寸不均匀性引入的不确定度	$u(\text{CCD}):0.00''$	$\infty$	B
平面反光镜的垂直不确定度	$u(\alpha'):0.1''$	50	B

$$v_{\text{eff}} = \frac{uc(\alpha)^4}{\sum \frac{u_i}{v_i}} = \frac{0.1^4}{\frac{0.001^4}{8^4} + \frac{0.002\ 6^4}{9^4} + \frac{0.000\ 8^4}{\infty^4} + \frac{0.1^4}{50^4}}$$
  
$$= 50$$
 (14)

取置信水准为 0.95, 由  $t$  分布表查得对应自由度为 50 的包含因子为 2.01, 故扩展不确定度为

$$U(\alpha)_{95} = 2.01 \times 0.1'' = 0.201''$$
 (15)

4 结束语

分析了水平基准装置升级改造中图像测量系统各不确定度的来源, 得到整个图像测量系统的标准不确定度和扩展不确定度, 在原有传统设备精度 ( $0.3''$ ) 的基础上有了明显的提高, 而且得出该系统不确定度的主要影响因素为陪检标准器, 为后续的改进指明了方向。证明改造后的精度能满足计量检定的精度要求, 说明文献[1, 2]的自动化改造方法是成功的。

参 考 文 献

1 史雨辉, 路杰. 高精度水平基准装置自动化图像处理研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, (增刊 II): 129 - 131, 135. (Shi Yuhui and Lu Jie. Study on image auto-processing of high-precision horizontal benchmark standard installment[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, (Supp. II): 129 - 131, 135.)

2 路杰, 史雨辉. 高精度自动化水平基准装置中微米级微位移平台的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, (2): 145 - 148. (Lu Jie and Shi Yuhui. Application of micro-sized micro translation platform of high-accuracy automatic horizontal benchmark installment[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, (2): 145 - 148)

3 胡云, 周铭. 基于微位移技术的图像测量系统自动校准[J]. 工业控制计算机, 2009, 22(10): 30 - 31. (Hu Yun and Zhou Ming. Image measurement system's automatic calibration based on micro-displacement technology[J]. Industrial Control Computer, 2009, 22(10): 30 - 31)