

VP宽频带倾斜仪现场自动校准装置设计^①

马武刚^{1,2}, 张肖³

(1.中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),湖北 武汉 430071;

2.中国地震局地壳应力研究所武汉创新基地,湖北 武汉 430071;

3.河北省地震局易县地震台,河北 保定 074211)

摘要:为了对VP宽频带倾斜仪进行现场校准,设计了一款基于单片机AT89C51的新型现场自动校准装置。经验证该装置在+8 V激励电压情况下与高精度激光干涉仪结合使用,其校准相对误差为0.36%,满足小于1%的校准相对误差要求。

关键词:VP宽频带倾斜仪;自动校准;格值;微位移

中图分类号:TH762

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)04-0658-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.04.0658

Design of an On-site Automatic Calibration Device for the Vertical Pendulum Broadband Tiltmeter

MA Wu-gang^{1,2}, ZHANG Xiao³

(1.Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2.Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

3.Yixian Seismic Station, Earthquake Administration of Hebei Province, Baoding 074211, Hebei, China)

Abstract: The vertical pendulum (VP) broadband tiltmeter is a type of earthquake precursor observation equipment that records the inclined earth tide. The scale value represents the relationship between the measured physical quantity and the output voltage. Its accuracy plays a key role in data reliability. The calibration process provides the scale value for the instrument. Most traditional calibration methods, e.g., plat calibrations in the laboratory and manual calibrations on site, cannot satisfy the accuracy levels required in scientific applications, or might affect the continuity of observations. In this study, we investigate an on-site automatic calibration device, in which small-scale shifts are introduced by a piezoelectric ceramic under the control of a single chip microcomputer AT89C51. The device then calculates the scale values from serial corresponding values of the outputs of the VP broadband tiltmeter and a laser interferometer. This device could realize the automatic operation of calibration, and its relative calibration accuracy is 0.36% when the excitation voltage is adjusted to +8 V, and meets the requirement of a relative error of less than 1%.

Key words: VP broadband tiltmeter; automatic calibration; scale value; micro-displacement

① 收稿日期:2015-05-10

基金项目:中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH15030);中国地震局公益性行业科研专项(201208002);中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH14034);中国地震局地震研究所所长基金(201506030)

作者简介:马武刚,男,助理研究员,现主要从事宽频带地震仪器(垂直摆倾斜仪和相对重力仪)的研发工作。

E-mail:matianitian123@163.com.

0 引言

VP 宽频带倾斜仪是用来记录由于天体相互作用力引起的地倾斜固体潮变化的地震观测设备,因其自动化程度高、维护方便、观测频带宽的优势^[1]逐渐被广泛应用。随着应用的展开,如何在现场尽可能不干扰仪器正常运行的情况下对仪器进行绝对校准成为困扰使用者的一个主要问题。目前在台站工作中仅依靠观测仪器本身所设置的静电校准方式^[2]对仪器格值进行校准,这在不具备现场计量/校准技术的情况下能够部分实现检测观测仪器工作状态的目的,但由于其仍属于相对校准方式,未对仪器整体进行校准,因此其校准结果也是不可靠的。在保证仪器观测连续性的基础上,需要一种兼顾科学性、可靠性的新型现场绝对校准方式,实现对 VP 宽频带倾斜仪技术参数的现场校准,以弥补现今校准方式的不足。鉴于此,本文设计一种新型的自动现场绝对校准方式,以期能够解决目前存在的现场较准问题。

1 摆式倾斜仪校准技术发展

格值(灵敏度)是摆式倾斜仪重要的技术指标,表征了倾斜仪测量的电压量和实际地面倾斜量的转换关系(精度)。校准就是为了给仪器提供可信的格值,其原理是提供一个微小的角度变化量,监测仪器输出端数据,其中角度变化量月输出端数据的比值即为仪器的格值。仪器出厂的同时一般会通过独立的校准平台(绝对校准)获得其初始格值^[3],但对于高精度倾斜仪而言,由于在使用过程中“零漂”的存在,格值会发生变化,因此需要阶段性地对其进行校准。当前主要的现场校准方法经历了威尔班得胀盒法、手动驱动装置法^[4]、静电校准法及重块法^[5]等。

由表 1 可知,当前现场校准技术较为缺乏,常用的校准方式也是不符合规范要求的相对校准,而手动微位移驱动方法校准又会造成测试结果的不可靠性,所以当前摆式倾斜仪校准技术急需一种稳定可靠、易操作的现场校准技术。

表 1 摆式倾斜仪校准技术方式
Table 1 The calibration mode of pendulum tiltmeter

现场校准方式	位移提供方式	存在缺陷	标定精度
威尔班得胀盒法	水银胀盒	水银挥发,污染	可用
重块法	悬吊重块	稳定性差	可用
静电校准法	静电力	相对较准	可用(常用)
手动微位移驱动法	压电陶瓷	人工操作,重复性差	不可用

2 现场校准技术装置的机械结构设计

本文设计的现场自动校准系统为绝对校准系统,即把被校准仪器整体作为校准对象,对其施加外力以提供微位移变化,模拟其实际工作状态来获取仪器的校准格值。

其设计原理是将微位移装置置于待校准的 VP 宽频带倾斜仪底盘之下,通过控制校准装置上马达的转动,带动可调顶杆的上下移动。当顶杆接触倾斜仪底盘后,通过控制校准装置中的压电陶瓷使得仪器底盘产生微小的微位移变化(及倾斜仪倾斜角度变化),记录由此变化产生的仪器电压输出量的变化,把二者相比,就实现了对仪器的格值校准功能。

的影响,校准装置的机械结构设计必须要小,要能置于仪器底盘之下为仪器提供微小位移变化。此装置部分借鉴手动微位移驱动法的机械设计,但针对设计中出现的校准过程中微位移被刚性接触吸收掉的情况,新的机械结构进行了重新设计。其结构原理图及实物图如图 1。

对仪器进行现场较准时,将该机械装置置于仪器底盘之下,位于调零马达脚对向脚旁,在可调顶杆上方粘贴敷铜绝缘面板即可。

3 现场校准技术装置电路设计

电路设计核心为 AT89S51 单片机,是新型现场校准方式与手动微位移现场校准方式的主要区别之一。该电路主要优势体现在:(1)实现了现场校准过程的自动化,大大降低校准人员的工作量;(2)提高了校准时间间隔精度,将每次校准时间间隔精确到毫秒。图 2 为设计的部分控制电路。

校准格值=

倾斜角度变化量

输出电压变化量

为了尽可能降低安放校准装置对仪器观测产生

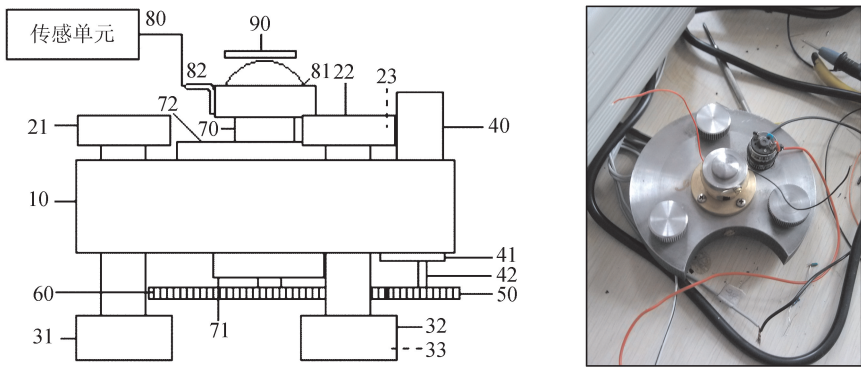


图 1 校准装置结构

Fig.1 The structure of calibration device

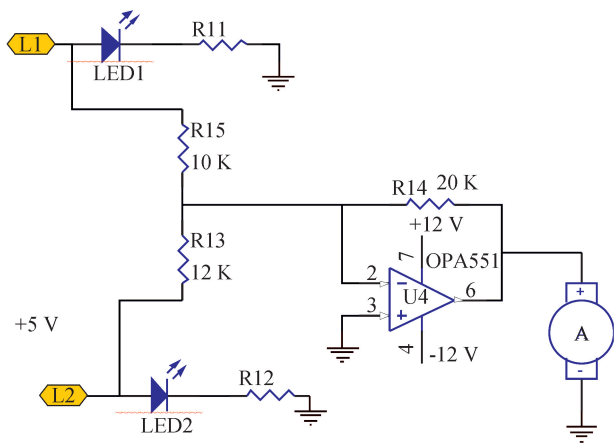


图 2 马达控制电路

Fig.2 Motor control circuit

在单片机发出校准指令后,先由 L1 路通过运算放大器 U4 控制马达正向转动,使压电陶瓷接触到仪器底盘,以方便后续校准工作。校准完成后,再由 L2 路通过运算放大器 U4 控制马达反相转动,使压电陶瓷接触不到仪器底盘。

单片机发出校准指令后,先由马达控制电路使压电陶瓷接触到仪器底盘,然后再由 P1.4 口输出高电平,通过运算放大器 U5 控制继电器的吸合,接通压电陶瓷控制电源,使压电陶瓷伸长,顶起底盘开始校准。当校准完成后,同样由 P1.4 口输出低电平,断开继电器,压电陶瓷恢复原来长度,再由马达控制电路使压电陶瓷接触不到仪器底盘,校准结束(图 3)。

控制程序如下:

```
ORG 0000
ST:MOV P1, #00
MOV P2, #00
SETB P2.1
B1:JNB P1.0 B1
CLR P2.1
SETB P2.4
```

```
SETB P1.4
MOV R1, #0FFH
MOV R2, #0FFH
MOV R3, #80
B21:MOV R0, #10
B2:DJNZ R0, B2
DJNZ R1, B21
DJNZ R2, B21
DJNZ R3, B21
CLR P1.4
CLR P2.4
SETB P2.0
MOV R0, #0FFH
MOV R1, #0FFH
MOV R2, #10
MOV R3, #01
B3:DJNZ R0, B3
DJNZ R1, B3
DJNZ R2, B3
DJNZ R3, B3
CLR P2.0
SETB P2.5
MOV R5, #0FFH
MOV R6, #0FFH
MOV R7, #80
B41:MOV R4, B4
B4:DJNZ R4, B4
DJNZ R5, B41
DJNZ R6, B41
DJNZ R7, B41
CLR P2.5
AJMP ST
END
```

4 现场较准装置的应用及结果分析

现场校准装置系统由洞外控制单元、现场校准装置和激光干涉仪三部分组成。洞外控制单元包括

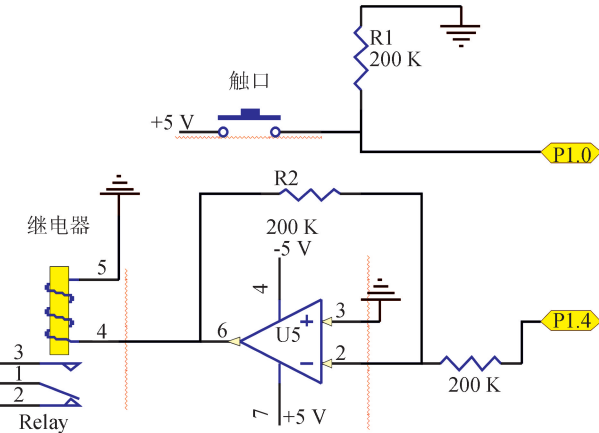


图 3 继电器电路
Fig.3 Relay circuit

压电陶瓷控制电源和校准控制电路两部分。其应用过程包括垂直向位移(倾斜角度)的产生和测量两部分。

(1) 垂直向位移的产生

压电陶瓷控制电源用来控制校准装置中压电陶瓷所施加电压的大小。由压电陶瓷特性可知,电压的变化将会导致压电陶瓷长度变化,而校准装置中压电陶瓷紧密安装在倾斜仪底盘与地面之间,所以压电陶瓷长度的变化必定引起倾斜仪底盘垂直向位移变化。这种位移变化依据所加驱动电压的不同,在纳米和微米量级之间。校准装置通过程序控制可以每隔五分钟对压电陶瓷施加一次电压并持续五分钟,即使仪器产生一次垂直向位移变化。

(2) 垂直向位移的测量

为了测得这种微小位移变化,校准系统使用激光干涉仪进行测量。激光干涉仪作为精密位移测量仪器,其测量端设定在倾斜仪的底盘之上,通过记录垂直向位移变化,再结合底盘基线长度就可以计算出倾斜仪由于压电陶瓷长度变化所引起的角度变化。

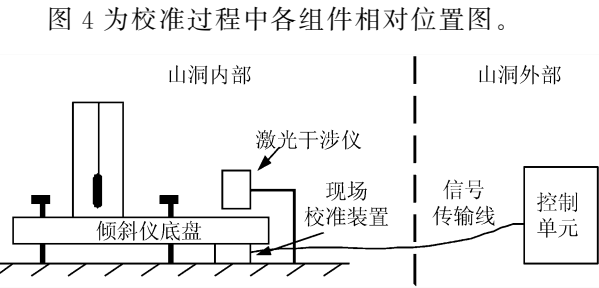


图 4 现场校准示意图

Fig.4 Schematic diagram of on-site calibration

笔者于 2015 年 3 月 11 日在河北省怀来地震台用该现场校准技术装置对正在运行的 VP 宽频带倾

斜仪进行了校准(图 5)。校准过程如下:

(1) 打开压电陶瓷驱动电源,调节驱动电压到 +8 V 档位;

(2) 打开激光干涉仪电源,把激光干涉仪测量



图 5 测试现场
Fig.5 Test site

端设定在 VP 宽频带倾斜仪底盘之上;

(3) 启动自动校准装置,进行自动校准操作。

其中干涉仪初始位移是未对压电陶瓷施加驱动电压时所测得的 VP 宽频带倾斜仪底脚垂直位移变化量。压电陶瓷施加驱动电压后,测得的 VP 宽频带倾斜仪底盘垂直向的位移变化量即为干涉仪测得位移变化量,而 VP 宽频带倾斜仪读数变化量是指压电陶瓷施加电压后其所产生的电压变化量。

VP 宽频带倾斜仪校准测试结果见表 2。

结果表明倾斜仪格值(灵敏度^[6])为 $0.053\ 3 \times 10^{-3}''/\text{mV}$,与其出厂平台测试格值 $0.053 \times 10^{-3}''/\text{mV}$ 基本一致,并且:

格值校准相对误差 = $\frac{\text{格值校准标准差}}{\text{格值校准均值}} = \frac{0.000\ 193}{0.053\ 3} = 0.36\%$,满足其校准相对误差小于 1% 的校准要求。

随后,对仪器分别用 +6 V、+10 V、+12 V、+14 V、+16 V 和 +20 V 压电陶瓷激励电压进行了校准测试,所得格值均值及标准差如表 3 所列。

由表 3 可知,激励电压大于 12 V 以后,其校准格值标准差成倍加大,虽然其格值校准相对误差仍在允许的范围内,但不建议采用高电压对倾斜仪进行校准。

5 讨论

由以上应用过程及结果可以看出,与传统的现场校准方式相比,基于单片机的新型现场校准方式

表 2 校准测试结果

Table 2 Test results

干涉仪 初始位移	施加校准电压后 干涉仪位移	VP 宽频带倾斜仪 初始读数	施加校准电压后 VP 宽频带倾斜仪 读数/mV	校准倾斜仪 格值	干涉仪测得 位移变化量	VP 宽频带倾斜仪 读数变化量
/nm	/nm	/mV		/ $^{\circ}\cdot\text{mV}^{-1}$	/nm	/mV
0	-95	1 449.28	795.343	5.297 1E-05	95	653.937
0	95.4	795.343	1 452.25	5.295 35E-05	95.4	656.907
0	-94.7	1 452.25	803.661	5.323 91E-05	94.7	648.589
0	95.3	803.661	1 459.99	5.294 46E-05	95.3	656.329
0	-94.9	1 459.99	809.947	5.323 22E-05	94.9	650.043
0	95.2	809.947	1 463.07	5.314 87E-05	95.2	653.123
0	-95	1 463.07	8 12.673	5.325 93E-05	95	650.397
0	95.3	812.673	1 467.1	5.309 85E-05	95.3	654.427
0	-95.5	1 716.42	1 065.41	5.348 92E-05	95.5	651.01
0	95.7	1 065.41	1 716.81	5.356 91E-05	95.7	651.4
0	-95.4	1 716.81	1 068.07	5.362 02E-05	95.4	648.74
0	95.3	1 068.07	1 722.54	5.309 5E-05	95.3	654.47
0	-95.3	1 722.54	1 072.28	5.343 88E-05	95.3	650.26
0	95.3	1 072.28	1 723.25	5.338 05E-05	95.3	650.97
均值				5.333 32E-05	95.29	651.484
标准差				1.935 82E-07	0.228 278	1.916 1

表 3 不同电压条件的格值

Talbe 3 Scale values under different voltage conditions

激励电压	格值	格值标准差	格值相对
/V	/ $(\times 10^{-5}^{\circ}\cdot\text{mV}^{-1})$	/ $(\times 10^{-6}^{\circ}\cdot\text{mV}^{-1})$	误差/%
6	5.46	0.318	0.58
8	5.33	0.193	0.36
10	5.70	0.563	0.98
12	5.51	0.09	0.15
14	5.66	1.63	0.28
16	5.21	4.69	0.90
20	4.71	2.49	0.52

有以下优势：

(1) 实现了现场绝对校准，避免了传统人工现场校准方式对仪器工作连续性及精度的影响。

(2) 校准装置与高精度激光干涉仪的结合能够提供稳定可靠的校准结果，在+6~+12 V 压电陶瓷激励电压的条件下，校准相对误差在 1% 以内，且重复性(格值校准差)良好。

(3) 校准装置良好的通用性使得仪器也可对石英水平摆等倾斜仪进行校准。

鉴于装置仍处于试验阶段，存在校准电压范围较窄、可提供微位移范围有限等问题，这为下一步的研究提供了方向。

参考文献(References)

[1] 方燕勋,卞根发,惠若愚.湖州台高采样率倾斜仪同震响应初析[J].地震工程学报,2014,36(3):628-633.
FANG Yan-xun, BIAN Gen-fa, HUI Ruo-yu. Preliminary Analysis of Coseismic Response of Tiltmeters with High Sampling

Rate Used at Huzhou Seismostation[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(3):628-633.(in Chinese)
[2] 肖峻,吴艳霞,胡国庆,等.高精度垂直摆倾斜仪静电标定方法的研究[J].测控技术,2005,24(8):10-15.
XIAO Jun, WU Yan-xia, HU Huo-qing, et al. Research on Electrostatic Calibration of High Precision Vertical Pendulum Inclinator[J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(8):10-15.(in Chinese)
[3] 马武刚,卢海燕,胡国庆,等.VP 型垂直摆倾斜仪校准装置的设计[J].大地测量与地球动力学,2012,32(4):152-155.
MA Wu-gang, LU Hai-yan, HU Guo-qing, et al. Design of Calibration Device for VP Vertical Pendulum Tiltmeter[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(4):152-155.(in Chinese)
[4] 邹舟,杜瑞林,卢海燕,等.高精度倾斜仪现场校准微倾斜发生装置的设计[J].大地测量与地球动力学,2014,34(4):172-174.
ZOU Zhou, DU Rui-lin, LU Hai-yan, et al. Design of Slight Tilt Generate Using in High Precision Tiltmeters' Calibration[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4):172-174.(in Chinese)
[5] 肖峻,吴艳霞,莫易敏.高精度垂直摆倾斜仪重块标定方法的研究[J].测控技术,2004,23(7):11-14.
XIAO Jun, WU Yan-xia, MO Yi-min. Research on Heavy Block Calibration of High Precision Vertical Pendulum Inclinator[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(7):11-14.(in Chinese)
[6] 施志龙,吴书朝.垂直摆倾斜仪灵敏度标定方法研究[J].测绘科学,2007,32(4):63-64.
SHI Zhi-long, WU Shu-chao. Research of Calibration Method in Vertical Pendulum Tiltmeter [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(4):63-64.(in Chinese)