

差分 GPS 在中国地磁监测网地理方位角测量中的应用^①

李秋红¹, 辛长江¹, 许康生¹, 舒 雷², 高慧慧³

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 内蒙古地震局呼和浩特地震台, 内蒙古 呼和浩特 010010;
3. 青海省地震局都兰地震台, 青海 都兰 816100)

摘要: 中国地磁监测网由地磁台站和流动地磁测点构成, 实现对观测网内地磁场的相对记录和绝对观测。它的绝对观测采用世界上最先进的 F 、 D 、 I 测量仪器组合, 其中地磁偏角 D 是地理北和地磁北的夹角。对地磁偏角 D 的绝对测量要求在地磁台站投入正常观测前必须完成观测墩和观测标志的地理方位角测量, 流动地磁测点在每次地磁偏角 D 观测前后至少进行地理方位角测量各一次。根据地磁监测网《观测规范》要求, 地磁偏角 D 的观测精度必须 $\leq 6''$, 所以中国地磁监测网采用天文和差分 GPS 地理方位角两种测量方法, 且两种方法观测精度相当, 均 $\leq 6''$ 。与天文测量相比, 差分 GPS 观测不受天气等自然因素的限制, 操作简单, 观测快捷, 数据处理计算机程序化。随着 GPS 技术的普及, 中国地磁监测网差分 GPS 地理方位角测量方法已基本取代了天文方法。本文主要介绍差分 GPS 在中国地磁监测网地理方位角测量中的应用。

关键词: 中国地磁监测网; 地磁场; 差分 GPS; 地理方位角

中图分类号: P318.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0862-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0862

Application of Differential GPS to the Geographic Azimuth Measurement in China Geomagnetic Field Monitoring Network

LI Qiu-hong¹, XIN Chang-jiang¹, XU Kang-sheng¹, SHU Lei², GAO Hui-hui³

(1. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Hohhot Seismic Station, Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;

3. Dulan Seismic Station, Earthquake Administration of Qinghai Province, Dulan 816100, Qinghai, China)

Abstract: This study introduces the principle and method for the use of differential global positioning system (GPS) in measuring azimuth in the China Geomagnetic Field Monitoring Network (CGFMN). We also present some azimuth measurement results and accuracy levels by geomagnetic observatories and geomagnetic survey stations, and offer some suggestions on how different geomagnetic observatories can measure azimuth in the future. We adopted two sets of differential GPS (model PROMAK 2 and PROMAK 100) including auxiliary devices antennas, cables, connected bases, and used one theodolite (model Mingeo) with an accuracy higher than 1 second. We installed the two differential GPS on two tripods, locating one near a mark (called station A) and the other alongside a fixed station room (station B) to measure the angle between geographical north (N) and a line AB ($\angle NAB$). The entire measuring process ensures that the antennas and tripods remained stable and that the distance between stations A and B was more than 200 m. The GPS can receive satellite data until the transmission distance is more than 5 km, then the system turns off, and the above procedure is repeated. $\angle NAB$ is computed using the two GPS

① 收稿日期: 2014-10-04

基金项目: 地震行业科研专项(201208009); 地震行业科研专项(201308011)

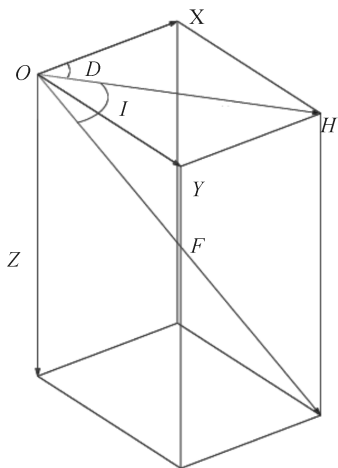
作者简介: 李秋红(1965—), 女, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: lzhimo@sina.com。

data files using a special program. The theodolite was installed on a tripod near the mark to measure the angle between lines AP and AB ($\angle PAB$, P is one of pillars), then it was moved to the pillar to measure the angle between the lines PA and PM ($\angle APM$, M is one of marks). As such, the azimuth between geographical north (N) and the line from any pillar to any mark is determined through known angles. There are several methods for measuring azimuth. The proposed CGFMN azimuth measurement has the accuracy of the astronomical and differential GPS methods, less than $6''$ of arc, which is higher than that of other equipment. Since 2001, the Lanzhou geomagnetic observatory has used differential GPS to measure the azimuth of 14 geomagnetic observatories and more than one thousand geomagnetic survey stations. Currently, the differential GPS method has replaced the CGFMN's astronomical method of azimuth measurement, using extensive GPS application. The main advantages of the differential GPS method over the astronomical method is that, in addition to having the same accuracy, it is free from the effects of weather conditions and human factors, all equipment can be operated easily by observers, and the data processing is completely computerized and has higher efficiency.

Key words: China Geomagnetic Field Monitoring Network; geomagnetic field; differential GPS; geographic azimuth

0 引言

地球磁场各成分起源不同,构成复杂,因此不同的研究领域对地磁场的分类不同。中国地磁监测网实测的地磁场根据其成分和起源分成基本磁场(主磁场)、变化磁场、磁异常场和感应磁场,它们分别来自地核、地外空间和地壳的磁性物质及地下介质的电磁感应^[1]。地磁场可用地磁七要素描述,如图 1 所示。



O:测点;F:总强度;D:磁偏角;I:磁倾角;Z:垂直分量;
H:水平分量;Y:东向分量;X:北向分量

图 1 地磁场七要素关系图

Fig.1 Seven components of geomagnetic field

中国地磁监测网共有 45 个基本地磁台站、134 个相对记录地磁台站(台阵点)、1 258 个流动地磁矢量监测点,实现对监测区内地磁场三个独立要素

时空变化的实时监测。其中,地磁偏角 D 是地磁北和地理北的夹角。地磁北的确定在很长一段时内主要通过石英悬丝悬挂磁针的地磁经纬仪测量,测量过程复杂,对观测者技术要求较高。随着科学技术的发展,从本世纪开始先进的磁通门无磁经纬仪在中国地磁监测网得到普及,这使地磁北的观测通过采用正确的观测方法很容易实现。中国地磁监测网对地理北的测量在很长时间内采用天文测量方法,此方法受各种客观条件的制约,特别是天气条件,观测效率较低。随着 GPS 应用的推广,差分 GPS 测量地理北的方法以其受客观条件约束较少的优越性得到了广泛应用,极大地提高了地磁偏角 D 绝对测量的效率。在地磁台站偏角 D 的观测中不可能每次都进行地理北的测量,所以在距离观测墩 ≥ 200 m 的地方设立永久的地磁观测标志,周期性测定观测墩与观测标志的地理方位角,每次观测地磁偏角 D 只读取观测标志就可确定地理北。流动地磁测点布设在野外环境,客观条件不允许建立明显的观测标志,必须在每次现场测定观测标石与临时观测标志的地理方位角,从而测定磁偏角 D 。

1 差分 GPS 测量标志方位角的方法

差分 GPS 的工作原理在专业书中介绍较多^[2],这里不再赘述。本文仅就差分 GPS 测量在中国地磁监测网地理方位角测量中的应用进行介绍。

观测墩(标石)的标志方位角就是观测墩(标石)的地理北到观测墩(标石)和观测标志连线之间的顺

时针旋转夹角(图2)。

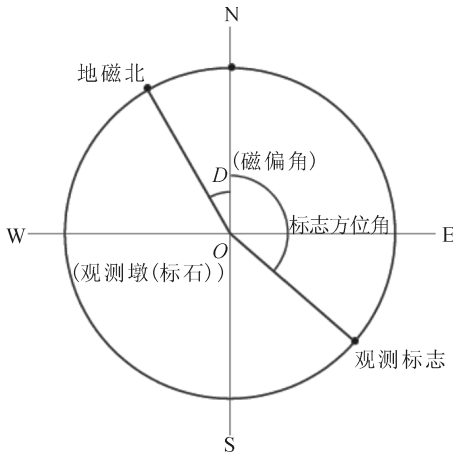


图2 磁北、地理北和标志关系图

Fig.2 Demonstration of geomagnetic north, geographical north and mark

从图2可看出,只要知道了地理北,通过高精度的经纬仪就可以精确地测定标志方位角,但地理北的精确测定必须通过科学的观测方法和观测仪器实现,不是简单的通过指北针或寻北仪得知。

图3是一个地磁台站,在台站南面设立标志 M_1 ,东北面设立标志 M_2 。台站观测室有4个观测墩,分别是 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 。在台站架设两套差分GPS,一套架设在观测室附近固定稳固的三脚架上,叫做测站A;另一套架设在观测标志附近固定稳固的三脚架上,叫做测站B。

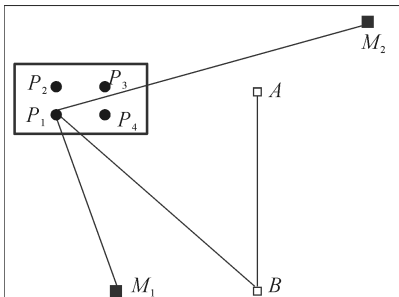


图3 差分GPS测量地磁台站标志方位角的原理示意图

Fig.3 Principle diagram of measuring mark azimuth in magnetic observatory using differential GPS

通过接受卫星数据,对数据采用专用软件进行计算,得到从A站到B站连线的地理方位角 $\angle NAB$ 。同样的测量进行两次,两次观测方位角差值要求 $\leq 6''$,在地磁台站的测量中此差值通常 $\leq 2''$ 。在实际测量中,若两次方位角测量的差值 $\geq 6''$,同样的测量必须进行三次甚至更多,直到多组方位角实

测值均方差 $\leq 6''$ 。取多组差分GPS测量方位角均值作为从A站到B站连线的地理方位角 $\angle NAB$,然后将高精度的经纬仪架设在观测墩 P_1 的中心点(也就是地磁台站在日常观测中架设绝对观测仪的点),测定夹角 $\angle M_1P_1B$ 、 $\angle M_2P_1B$,再将经纬仪架设在B站三脚架上测定 $\angle ABP_1$ 。通过角度传递关系式计算观测墩的标志地理方位角:

$$\angle NBA = \angle NAB \pm 180^\circ \quad (1)$$

$$\angle NBP_1 = \angle NBA - \angle ABP_1 \quad (2)$$

$$\angle NP_1B = \angle NBP_1 \pm 180^\circ \quad (3)$$

$$\angle NP_1M_1 = \angle NP_1B + \angle BP_1M_1 \quad (4)$$

$$\angle NP_1M_2 = \angle NP_1B - \angle BP_1M_2 \quad (5)$$

式中字母N代表地理北极点, $\angle NAB$ 、 $\angle NBA$ 、 $\angle NBP_1$ 、 $\angle NP_1B$ 、 $\angle NP_1M_1$ 、 $\angle NP_1M_2$ 分别为直线AB、BA、 BP_1 、 P_1B 、 P_1M_1 、 P_1M_2 的地理方位角; $\angle NP_1M_1$ 和 $\angle NP_1M_2$ 就是观测墩 P_1 对观测标志 M_1 、 M_2 的地理方位角。

同样的方法可得观测墩 P_2 、 P_3 和 P_4 对观测标志 M_1 和 M_2 的地理方位角。

流动地磁测点观测标志的设立由观测环境决定,因天文测量方法不可能在现场天文观测标石与观测标志的地理方位角,只能应用差分GPS测量。测量时将测量标石上测点(通常是“十”字交点)作为GPS测站A,将临时观测标志作为测站B,直接测量AB连线地理方位角。

中国地磁监测网有45个地磁基本台站,各台站的观测室、观测墩、观测标志布局各不相同,观测者应视台站的具体情况设计最高效的测量方法及流程。

标志方位角测量完成后,需按照观测规范用近零法或指零法观测两组完整的地磁偏角D、倾角I,计算观测点的地磁偏角D、倾角I的绝对值^[3,5],再同最新版的地磁图数据进行比较分析,对测得的地理方位角进行验证。

2 测量实例

2008年10月底内蒙古自治区地震局满洲里地磁台用差分GPS测量完成了各观测墩对不同观测标志的地理方位角。台站观测墩和观测标志布局如图4。

观测室建有6个绝对观测墩 P_5 、 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 、 P_{10} ,在观测室北、南分别建立观测标志 M_1 、 M_2 。除 P_9 因窗框遮挡不能和观测标志通视,对其他5个观测墩进行了观测墩与观测标志地理方位角

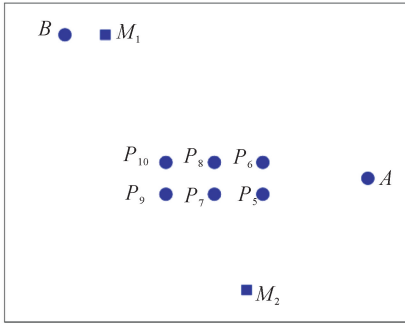


图 4 满洲里地磁台观测墩与观测标志布局图

Fig.4 Distribution of observation piers and marks in Manchuria magnetic observatory

相比满洲里地磁台,陕西省地震局乾陵地磁台的方位角测量就简单多了(图 5)。

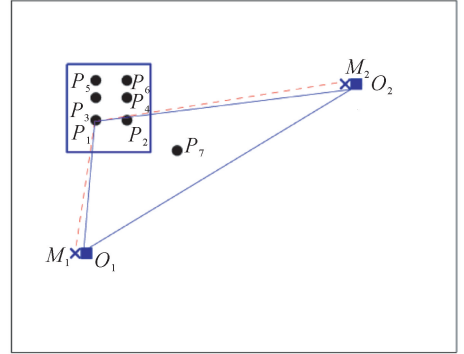


图 5 乾陵地磁台观测墩与观测标志布局图

Fig.5 Distribution of observation piers and marks in Qianling magnetic observatory

的测量(表 1)。

表 1 满洲里地磁台的方位角观测结果

Table 1 Azimuth of Manzhouli geomagnetic observatory

方位	方位角	方位	方位角
P_5M_1	$349^{\circ}54'48.31''$	P_5M_2	$172^{\circ}03'50.03''$
P_6M_1	$349^{\circ}53'58.28''$	P_6M_2	$172^{\circ}03'25.88''$
P_7M_1	$350^{\circ}44'41.79''$	P_7M_2	$171^{\circ}18'14.38''$
P_8M_1	$350^{\circ}45'55.03''$	P_8M_2	$171^{\circ}16'59.08''$
P_9M_1	因窗框遮挡不能观测	P_9M_2	因窗框遮挡不能观测
$P_{10}M_1$	$351^{\circ}29'24.71''$	$P_{10}M_2$	$170^{\circ}38'03.22''$

在观测过程中使用了两套差分 GPS 和三脚架、一套秒级测量经纬仪和计算机。

踏勘台站布局和观测条件,不能将两套 GPS 架设在观测墩中心和观测标志顶面中心,不能直接通过一次性差分 GPS 测量完成观测墩与观测标志的地理方位角。为简化观测程序,GPS 测站 A 架设在观测室附近,测站 B 架设在能同时看到所有绝对观测墩的观测标志附近。使两个测站 GPS 严格调平、居中、稳定后,采集满足计算程序要求的卫星数据两次,现场计算 AB 方位角测量结果,使其满足两次测量方差 $\leq 6''$ 。居中架设观测精度 $\leq 1''$ 的经纬仪在 GPS 测站 B 的三脚架上,检查仪器水平。用正镜和倒镜分别观测各观测墩和 GPS 测站 A 的夹角 6 组以上,现场计算夹角和方差,并消除超差读数,计算出 $\angle P_nBA$ 的平均值。人为改变经纬仪水平度盘,重复观测 $\angle P_nBA$ 的平均值,计算不同度盘测得 $\angle P_nBA$ 的均值差,若差值 $> 6''$ 则增加观测次数,直到差值 $\leq 6''$ 。将经纬仪分别架设在观测墩 P_n 的中心位置,按相同的方法测量 $\angle M_1P_nB$ 和 $\angle M_2P_nB$,并满足 $\leq 6''$ 。最后按照本文描述的角度传递关系式计算各观测墩与各观测标志的地理方位角。

乾陵地磁台观测标志墩 M_1 、 M_2 采用优质的汉白玉石材,埋设稳固,标志墩高度、墩面光滑度及周围环境适合进行经纬仪角度测量操作,且直接将 GPS 架设在两个标志墩顶面几何中心,进行从 O_1 到 O_2 地理方位角和经纬仪角度测量。首先用差分 GPS 测量 O_1O_2 连线地理方位角,再将经纬仪分别架设在 M_2 和 P_1 的墩面几何中心,测得 $\angle P_1O_2O_1$ 、 $\angle M_1P_1O_1$ 、 $\angle M_2P_1O_2$ 和 $\angle O_1P_1O_2$,经过角度间的传递计算得到观测墩 P_1 对观测标志 M_1 、 M_2 的标志方位角。同理得 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_7 对 M_1 、 M_2 的标志方位角。

3 误差控制

所有的测量都是针对一定的测量目的进行的,都有特定的精度要求及误差控制。地磁台站的标志方位角测量是地磁台站地磁偏角 D 观测的基础,需满足地磁台站偏角 D 观测精度 $\leq 6''$ 的要求。所以在差分 GPS 的测量中要求 GPS 测站 A、B 间距 ≥ 200 m,测量至少进行两次,AB 方位角的观测值均方差 $\leq 6''$ (在实际观测中通常测量结果 $\leq 2''$);要求经纬仪的观测分辨率优于 $1''$,经纬仪对角度的测量要求同一角度的正镜和倒镜读数分别 ≥ 6 组。在数据计算中 6 组数据舍去差值大于均方差的数据。所有观测完成后对经纬仪进行人为变盘,按照同样的观测方法和步骤再进行一次方位角测量,要求变盘前后测得的两次方位角差值 $\leq 6''$ [4]。最终方位角为变盘前后两次方位角测量值的均值。表 2 给出了甘肃省地震局兰州观象台用差分 GPS 对部分地磁台

站和野外流动地磁测点方位角测量的误差。

表 2 差分 GPS 对部分地磁台站和野外流动地磁测点方位角测量误差

Table 2 Measurement error of azimuth of some magnetic observatories and mobile field monitoring points by sing differential GPS

满洲里		乌加河		野外测点	
墩号	观测精度	墩号	观测精度	测点代码	观测精度
P_5	3"	P_1	2"	BGSG005	1.6775"
P_6	2"	P_2	2"	BNXN001	2.2900"
P_7	3"	P_3	2"	BSCC001	1.9948"
P_8	2"	P_4	3"	CGSG003	0.3085"
P_9	?	-	-	CGSG014	3.1179"
P_{10}	2"	-	-	CNXN004	0.9791
-	-	-	-	CSCC003	2.0906
-	-	-	-	CSCC083	1.0665
-	-	-	-	CNMG097	1.6155
-	-	-	-	CSXS011	0.1526

4 结论

随着我国地磁台站观测环境日益恶化,新的地磁台站建成和原有地磁台站改造,地磁台站观测墩与观测标志地理方位角测量的需求将会越来越普遍。地磁台站大多有观测分辨率优于 1" 的经纬仪,不存在对角度的观测,但由于大多对天文观测的方法不太熟悉,不能测定地理北,从而造成方位角的测量困难。

观测墩和观测标志的地理方位角是观测墩的地理北与观测墩和观测标志连线之间的顺时针旋转夹角,测定方位角就是测定地理北,然后测量观测墩和观测标志连线同地理北的夹角。差分 GPS 方位角测量不受客观条件制约,操作简单方便,观测精度 $\leq 6''$, 完全满足地磁台站观测规范要求。

5 意见建议

多年来兰州观象台已经用差分 GPS 对甘肃省地震局兰州地磁台、嘉峪关地磁台、天水地磁台、湖北省恩施地磁台、河南省洛阳地磁台、山东省马陵山地磁台、泰安地磁台、济南地磁台、内蒙古自治区满洲里地磁台、呼和浩特地磁台、乌加河地磁台、锡林浩特地磁台、陕西省乾陵地磁台及重庆地磁台进行标志方位角测量。为了使差分 GPS 地磁台站标志方位角观测更加方便高效,观测精度得到提高,提出如下建议:

(1) 新建地磁台站

新建台站一般没有测量过任何观测墩对任何观测标志的地理方位角,要求熟悉天文测量或差分

GPS 测量的专业人员按照本文所述的观测原理和观测方法进行地理方位角的测量。

(2) 改造地磁台站

由于地磁台站观测环境遭到局部破坏或观测室、观测墩、观测标志的局部维修,可能造成其中一个观测墩或观测标志发生移位,或增加观测墩或观测标志。但在这种情况下,台站仍保留了已测量过的某个标志方位角不变,也就是说知道地理北的位置,仅用高精度的经纬仪进行角度传递,最后测定要测量的标志方位角。

(3) 标志方位角测量的时间节点

尽管差分 GPS 测量标志方位角比天文测量高效,受自然条件等多种因素的制约较少,但必须满足良好的卫星接收条件。从已完成的地磁台站来看,方位角的测量都被安排到了地磁台站新建或改造工程竣工后。由于观测室墙体和屋顶遮挡,GPS 不能直接架设在观测墩和观测标志顶面,只能架设在观测室户外,导致标志方位角不能直接由 GPS 测量一次完成,必须通过分辨率优于 1" 的经纬仪进行角度传递,使测量程序复杂化,这严重影响了差分 GPS 测量的效率和精度。所以不管采用何种测量方法,建议地磁台站标志方位角的测量最好安排在观测墩和观测标志落成,而观测室还未砌墙封顶之前。

(4) 观测墩和标志的建设

地磁台站建设都是按照《行业标准》要求施工完成的,对观测墩和标志的建设材料、稳定性有非常严格的要求。但考虑到地磁台站未来的日常工作,建议最好做到观测标志和观测墩采用相同的材料、规格,按相同的施工工艺完成,以便在观测标志顶面架设各种地磁观测仪器进行相应的观测。

致谢:本文在此特别感谢中国地震局地球物理研究所五室给予的观测设备和技术支持。

参考文献(References)

- [1] 徐文耀.地球电磁现象物理学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009:20.
XU Wen-yao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 20. (in Chinese)
- [2] 尹文天.方位角的 GPS 测量方法[J].测绘与空间地理信息, 2008, 31(1): 120-126.
YIN Wen-tian. Obtaining the Azimuth with GPS[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2008, 31(1): 120-126. (in Chinese)

- 2007,90:031913.
- [26] Liu M, Lou J, Li S, et al. E-Field Control of Exchange Bias and Deterministic Magnetization Switching in AFM/FM/FE Multiferroic Heterostructures [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21: 2593-2598.
- [27] Das J, Song Y Y, Mo N, et al. Electric-field-tunable Low Loss Multiferroic Ferrimagnetic-ferroelectric Heterostructures [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21: 2045-2049.
- [28] Nan T, Hui Y, Rinaldi M, et al. Self-Biased 215 MHz Magnetolectric Nems Resonator for Ultra-Sensitive DC Magnetic Field Detection [J]. *Sci Rep*, 1985, 3: 1-6.
- [29] Dong S, Zhai J, Li J, et al. Small dc Magnetic Field Response of Magnetolectric Laminate Composites [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 082907.
- [30] Nian X Sun, Gopalan Srinivasan. Voltage Control of Magnetism in Multiferroic Heterostructures and Devices [J]. *World Scientific*, 2012, 2(3): 1240004.
- [31] 魏光辉, 孙永卫, 田明宏. 雷电电磁场理论计算与模拟技术研究 [J]. *安全与电磁兼容*, 2003, 3: 36-38, 56.
WEI Guang-hui, SUN Yong-wei, TIAN Ming-hong. Theoretical Calculation and Experimental Simulation for Lightning Electromagnetic Field [J]. *Safety & EMC*, 2003, 3: 36-38, 56. (in Chinese)
- [32] 邹相国, 杨新华. 雷电电磁场空间分布的计算与仿真 [J]. *微计算机信息*, 2006, 12: 217-218, 177.
ZOU Xiang-guo, YANG Xin-Hua. Computation and Simulation of the Lightning Electromagnetic Fields Spatial Distribution [J]. *Control & Measurement*, 2006, 12: 217-218, 177. (in Chinese)
- *****
- (上接 866 页)
- [3] Jerzy J, Christian S. Guide for Magnetic Measurement and Observatory Practice [M]. Boulder: International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996: 86-98.
- [4] 徐学恭, 尚先旗, 周锦屏. 静海地磁台天文方位角测量及其质量评估 [J]. *西北地震学报*, 2003, 25(3): 281-285.
XU Xue-gong, SHANG Xian-qi, ZHOU Jin-ping. Measurement of Astronomic Azimuth Angle in Jinghai Station and its Quality Evaluation [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2003, 25(3): 281-285. (in Chinese)
- [5] 辛长江, 沈文荣, 李秋红, 等. 指零法和近零法观测基线值对比分析 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2003(1): 78-81.
XIN Chang-jiang, SHEN Wen-rong, LI Qiu-hong, et al. Analysis Of Baseline Values of Null and Offset Method [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2003(1): 78-81. (in Chinese)
- [6] 许康生, 李英, 李秋红. 近地震波的小波相对能量分布特征分析 [J]. *地震工程学报*, 2013, 35(1): 166-170.
XU Kang-Sheng, LI Ying, LI Qiu-Hong. Distribution Characteristics of Wavelet Relative Energy on Near-earthquake Wave [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(1): 166-170. (in Chinese)
- [7] 许康生, 辛长江, 李英. 汶川地震前后地磁 Z 分量的谱质心变化 [J]. *地震工程学报*, 2014, 36(2): 393-397.
XU Kang-sheng, XIN Chang-jiang, LI Ying. The Spectrum Centroid Variation in Geomagnetic Z Component Data before and after the Wenchuan Earthquake [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(2): 393-397. (in Chinese)