

# GNSS 连续站锚标观测墩稳定性测试研究<sup>\*</sup>

王 岩, 张 勇<sup>\*</sup>, 洪 敏, 邵德盛, 黎 炜, 黎志军

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 基于中国大陆构造环境监测网络弥勒站点的钢筋混凝土观测墩与弥勒锚标观测墩所采集的数据, 采用 Gamit/Globk 软件对其进行处理。通过建设初期的基线变化、日周期变化等分析锚标观测墩自身的稳定性, 结果表明锚标观测墩在建设初期自身稳定性良好; 通过一年的点位移时间序列对比锚标与钢筋混凝土观测墩之间的差异变化, 发现两者具有高度的一致性; 利用高精度全站仪与多路温度计测试锚标观测墩, 发现其在温度极端变化时稳定性较高; 因此锚标观测墩可以作为监测地壳运动的基准站点。

**关键词:** GNSS; 观测墩; 锚标; 稳定性

**中图分类号:** P315.78

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0686-06

## 0 引言

中国大陆构造环境监测网络(以下简称陆态网络)主要用于获取中国大陆地壳运动细部特征, 服务于地震预测和科学研究, 同时兼顾军事测绘、大地测量等综合应用。站点主要分布于中国大陆及周边, 并且在一系列主要活动构造区、活动断裂带、地震重点危险区等进行了针对性的加密布设, 这些站点的观测墩均采用钢筋混凝土浇灌, 并建设了观测室以确保观测墩不受外界环境变化的干扰(地壳运动监测工程研究中心, 2014)。为应对一些施工困难或要求快速建站的特殊地区的需要, 中国地震局地壳运动监测工程研究中心(以下简称工程中心)引入了已在国外广泛应用的锚标站作为站点观测标墩建设的补充。2015年1月, 在云南弥勒站增设了一座锚标基岩标墩, 并进行高精度的长期对比观测实验。本文基于弥勒锚标站与弥勒基准站的基线变化, 通过点位移时间序列对钢筋混凝土观测墩与锚标观测墩进行对比分析研究, 并通过人工加温的方法对锚标观测墩的稳定性进行分析测试, 研究锚标观测墩是否能应用于地壳形变观测(张锐等, 2014)。

## 1 数据解算方法

云南弥勒 GNSS (YNML) 连续观测始于 2009

年 12 月, 使用 TrimbleNet R8 接收机和 TRM59800.00 扼流圈天线, 数据采样间隔为 1 s 和 30 s。弥勒锚标 GNSS (YNZB) 的观测始于 2015 年 1 月, 使用 TrimbleNet R8 接收机和 TRM59800.00 扼流圈天线, 采样间隔为 1 s 和 30 s。笔者选取 2015 年 1~12 月的观测数据进行研究分析, 并采用 GAMIT/GLOBK 软件进行基线处理。为了获得单日解与参考框架的联系, 利用 GLOBK 将 GAMIT 处理得到的单日松弛解和 SOPAC 给出的全球 IGS 站的单日松弛解合并, 通过 7 个参数的相似变换可得到 ITRF2008 参考框架下的单日解(许才军, 张朝玉, 2009; 王伶俐等, 2015)。本文在研究站点间基线长度和方向的变化情况时, 采用赤道投影的计算方法来计算基线长度(施发奇等, 2012):

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (1)$$

式中,  $L$  代表基线长度;  $(x_1, y_1)$  ( $x_2, y_2$ ) 分别代表两点的地心坐标。

## 2 锚标站点的介绍

应工程中心的要求, 云南省地震局形变测量中心配合工程中心相关专家, 在云南弥勒 GNSS 基准站西南面约 18 m 建设了一个锚标 GNSS 观测墩。锚

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-01-13.

基金项目: 地震行业科研专项(201508003)和李建成院士工作站联系资助.

✉ 通讯作者: 张勇(1977-), 硕士研究生, 主要研究方向为形变数据处理与分析. E-mail: 22803128@qq.com.

标 GNSS 观测墩的应用常见于美国及一些欧洲国家，在国内弥勒锚标站是首先应用锚标观测墩的站点之一，目前处于实验测试阶段。锚标站的优点首先是建设时间短，正常情况下一天可建好一个站点。其次是耗材少、重量轻，故搬运和建设的成本都较低，只需要四根合金钢与一个托盘及 8 管植筋胶即可在较短的时间内完成，并且无需建设观测房，使成本大幅降低（地壳运动监测工程研究中心，2014）。

锚标观测墩建设的具体步骤为：（1）首先勘选一块露出地表面积约 2.5 m<sup>2</sup> 的基岩（基岩需完整，且有很好的稳定性）、在出露的基岩上初步设计出一个正三角形，每个角之间距离约 1.5 m，或者以一块基岩为中心点，另外三爪距中心点约 0.9 m，且三爪互相以 120° 均匀分布，其任何一爪的着地处均为基岩；（2）在每个角的位置用冲击钻打一个直径为 4 cm、长约 80 cm 的钻孔，在外围 3 个角钻孔时，需倾斜一定的角度，约 55°（实际操作根据拟建观测墩的高度调节），中心孔垂直钻深 80 cm；（3）中心杆确定后，根据实际需要，裁截其他 3 个锚标钢筋的长度；（4）清理钻孔内粉尘后注入植筋胶，注满后将钢筋插入孔中，并分别与中心杆焊接在一起；（5）中心杆焊接好后，根据实际需要，裁截中心杆高度，并在中心杆上焊接连接盘，以便安装天线。锚标站的具体布设形式如图 1 所示。



图 1 锚标站布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the layout of claw mark station

3 锚标站稳定性测试

3.1 数据质量评价

用 TEQC 软件对 2015 年 1 月~12 月 YNML 钢筋混凝土观测墩与 YNZB 锚标观测墩记录的观测数据进行评估，分别统计 2 个观测墩所得观测数据的 MP1、MP2 值、正态化均方根残差与数据有效率值（吴培稚等，2012），如表 1 所示。从统计结果看，两站各项指标均比较接近，均在误差范围内，表明两个观测墩所处的观测环境和观测设备的综合影响基本一致。

表 1 数据质量评价结果

Tab. 1 Evaluation results of data quality

测站	MP1	中误差	MP2	中误差	数据有效率	Nrms
YNML	0.284	0.007	0.303	0.010	97%	0.171 21
YNZB	0.323	0.012	0.355	0.011	98%	0.169 98

3.2 稳定性分析

通过 GAMIT 软件解算测站单日解，然后直接从基线结果 O 文件中提取 YNZB 相对于 YNML 的 N、E、U 基线分量，得到 YNZB 相对 YNML 在 N、E、U 三个方向的运动量。为了分析锚标观测墩建

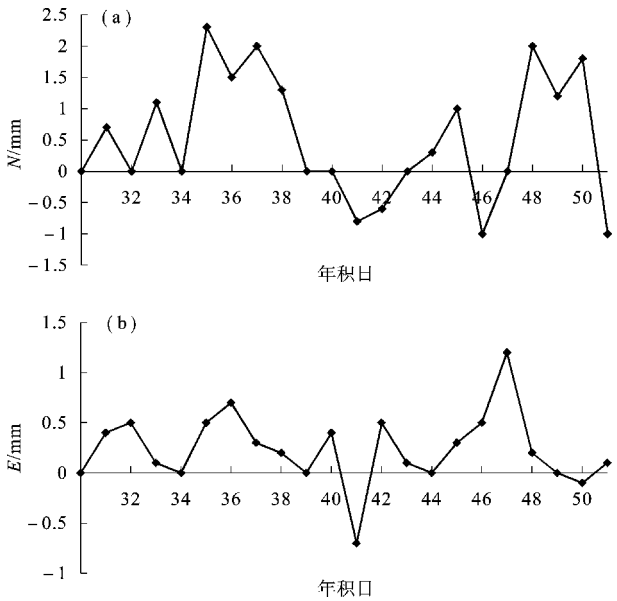


图 2 YNZB - YNML 基线 N (a)、E (b) 方向的时序变化图

Fig. 2 Time sequence variation diagram of YNZB - YNML baseline in N (a) and E (b) directions

好初期的稳定性,所选取的解算数据为从锚标观测墩建设完成后的第二天开始,连续 22 天的完整观测数据(薄万举等,2009)。从图 2 可以看出,两站在 N 方向最大互差约为 2.5 mm,在 E 方向最大互差约为 1.3 mm,各单日解间互差呈现随机性,无明显偏离趋势。由此可见,锚标观测墩在建设初期稳定性基本能达到地壳观测运动的要求,能反映出基岩的运动趋势,建好后即可投入观测应用。

### 3.3 YNZB 相对 YNML 日周期运动的相对变化分析

由于弥勒 GNSS 基准站与锚标站相距较近,坐落于同一地质单元,理论上 2 个站的地壳运动方式

应比较一致(江在森等,2003)。为了分析观测墩在一天内的短时间变化,利用 GAMIT 软件进行数据解算,每隔 60 min 得到一个观测墩坐标变化值,为了防止观测数据过少影响精度,采用 3 h 为一个解算时段,每 60 min 滑动一次,每天得到 24 个解,用 YNZB 相对于 YNML 的 N、E 两个分量变化来显示 YNZB 相对于 YNML 的日周期运动,共计算了两天的观测数据,分别为年积日 030 与年积日 031。由图 3 可以看出,YNZB 相对 YNML 东西和南北方向运动分量没有明显的周期性,坐标变化量较小,变化量均在 2 mm 以内,因此日周期变化锚标站能够满足地壳运动监测的要求。

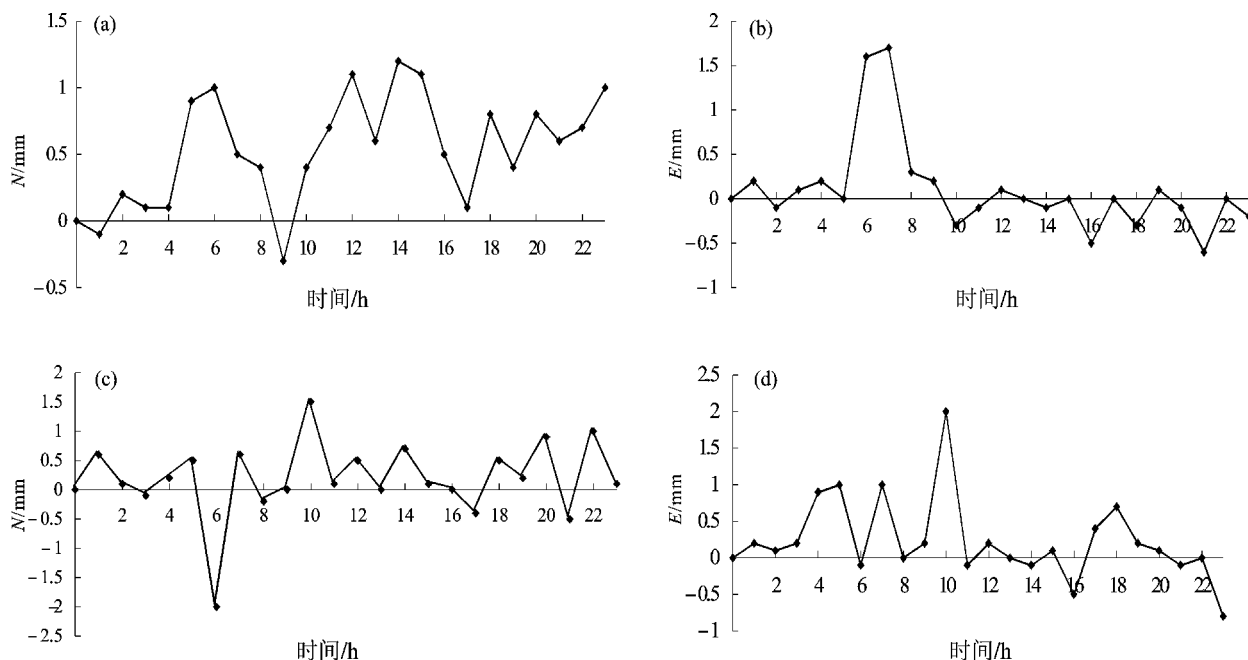


图 3 年积日 030 N (a)、031 N (b)、030 E (c)、031 E (d) 方向时序对比结果

Fig. 3 Time sequence comparison in day of year of 030N (a), 031 N (b), 030E (c) and 031 E (d) directions

### 3.4 锚标墩在极端温度影响下的实验情况

分析锚标观测墩在极端温度变化影响下的稳定性,主要是要检测钢筋热膨胀及冷收缩时对观测墩位移的影响。对锚标观测墩的几个支脚分别进行大幅度的升温 and 降温 ( $20^{\circ} \sim 95^{\circ}$ ),并利用两台 Leica TCA 2003 高精度(标称精度测角  $0.5''$ ,测距  $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ )全站仪对锚标观测墩进行基线测量,在测量过程中,首先进行背景值测量,待观测数值稳定后开始升温。升温所采用的方法是,首先将锚标的 4 个支脚用塑胶管包好,然后用速干水泥将底部密封,待底部凝固后注满水,升温时

用电热管按需要对 3 个支脚分别加热。基线测量时,我们将反射镜固定到天线下面的托盘上。两台全站仪成  $90^{\circ}$  直角,距离观测墩约 4 m,温度每升高或降低  $5^{\circ}\text{C}$ ,分别在测站 1 与测站 2 用全站仪进行基线测量。为保证基线测量数据能够达到精度要求的分辨率,进行了精度评定。利用白塞尔公式  $\pm \sqrt{\frac{VV}{n-1}}$  计算观测精度,其中,  $V$  为观测值与真值的差,  $n$  为观测次数,真值是观测值加权后求平均值,通过计算可知本次观测的精度为  $0.2 \text{ mm}$ 。温度测量采用多路温度计,其分辨率为  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

从图4可以看出,测站1、测站2的基线变化量分别约为0.6 mm、1 mm。由两站的基线变化可以看出,随着温度的上升,基线均有伸长的变化趋势,说明当温度升高时,锚标的支脚会产生一定的膨胀。

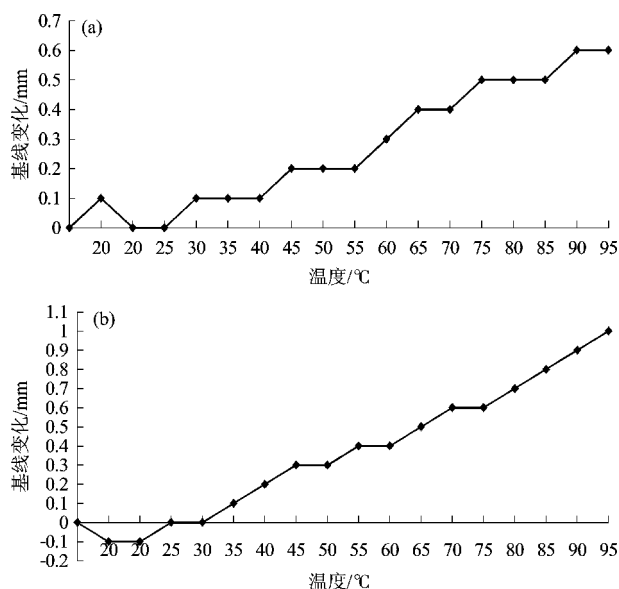


图4 1号支脚升温时测站1(a)和测站2(b)基线随温度的变化图

Fig. 4 Baselines recorded by No. 1 (a) and No. 2 (b) measuring stations varied with the temperature rising of No. 1 feet

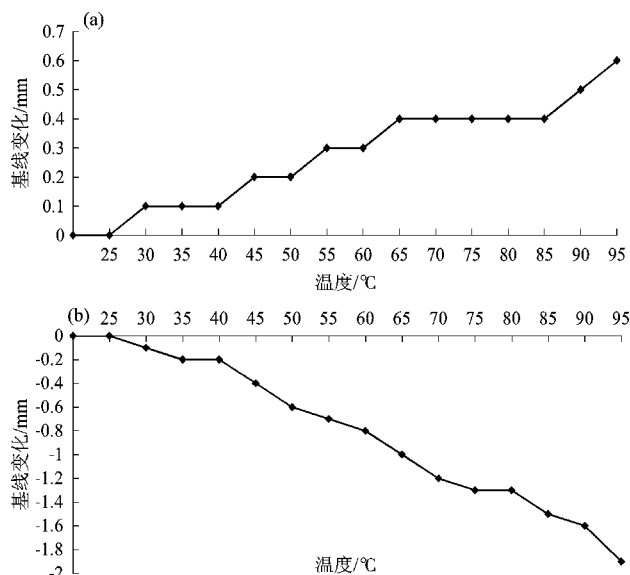


图5 2号支脚升温1号支脚温度回落时测站1(a)和测站2(b)基线随温度的变化图

Fig. 5 Baselines recorded by No. 1 (a) and No. 2 (b) measuring stations varied with the temperature rising of No. 2 feet and temperature drop of No. 1 feet

从图5可以看出,1号支脚温度缓慢回落2号支脚升温过程中,测站1基线变化量约为0.6 mm,测站2变化量约为1.9 mm,变化量不同的原因是测站2基本是正对1号支脚,测站1与1号支脚有一定角度。两测站均能反映出支脚随温度的增加会产生一定膨胀。

从图6可以看出,所有支脚同时进行加温与降温时,基线变化均不大,测站1最大互差仅为0.3 mm,测站2最大变化互差为0.4 mm,且观测数值与背景场值基本相符。因为观测墩所有支脚均处在同一环境下,故相互间温差基本可以忽略,由此可以得出自然条件下的温度变化不会对锚标站点的水平方向造成显著影响。

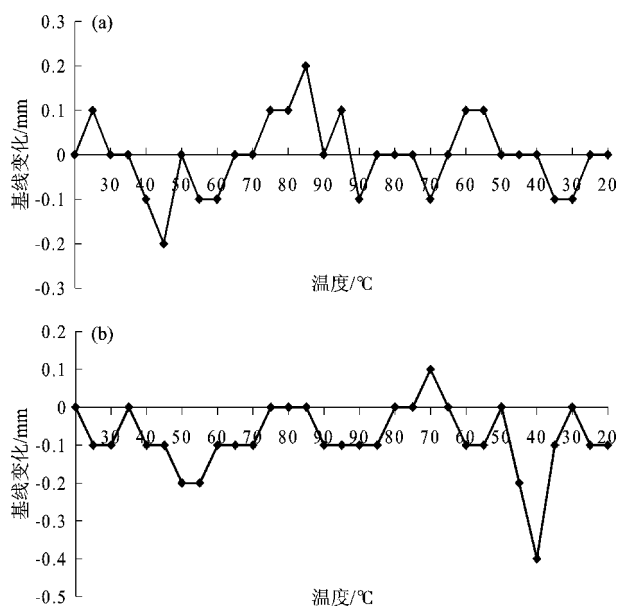


图6 3个支脚同时升温与温度缓慢回落时测站1(a)和测站2(b)基线随温度的变化图

Fig. 6 Baselines recorded by No. 1 (a) and No. 2 (b) measuring stations varied with the temperature rising and temperature drop of the three feet at the same time

### 3.5 锚墩标与混凝土观测墩用于地壳运动的分析

为了分析锚标观测墩在地壳变形研究中的变化情况,计算了YNML、YNZB在ITRF2004框架下的点位移时间序列图(洪敏等,2012),然后利用GAMIT软件进行数据解算,得到2个观测墩对应文山站点变化值的时间序列曲线(牛之俊等,2005)。

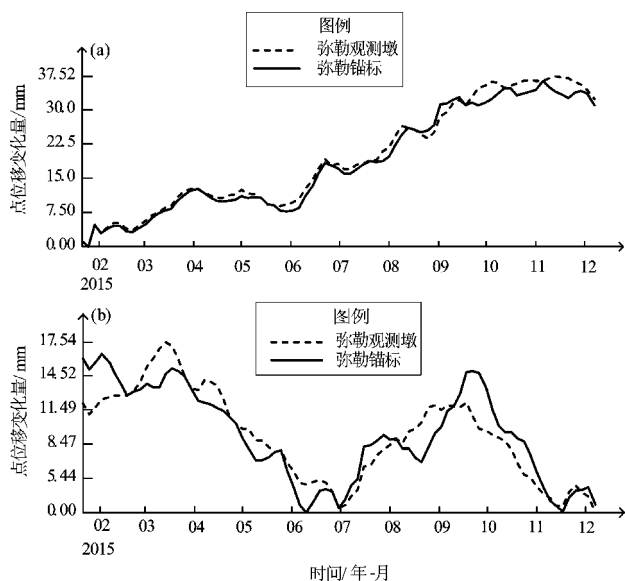


图7 弥勒基准站与锚标站相对于文山站点东西 (a) 和南北 (b) 向的变化时序图

Fig. 7 Time sequence diagram of Mile Reference Station and law mark station relative to the Wenshan Station in EW (a) and NS (b)

通过对2个站点东西、南北方向的变化量求差,获取了其地壳形变活动速率差异的时间序列,进一步求取速率差异的均方根值。结果显示,2个站点1年内的地壳活动速率差异较小,均方根值均为2.2 mm。

由观测一年的点位移时间序列变化曲线可以看出,弥勒锚标站与GNSS连续基准站具有相同的变化趋势,且变化量级也基本一致,因此锚标站点可以应用到地壳形变监测中。

## 4 结论

通过锚标站稳定性试验与在极端温度下的基

线形变试验可以得出以下结论;

(1) 锚标GNSS观测墩的遴选至关重要,地质条件为稳定基岩的情况下基本能代替钢筋混凝土观测墩,能更快更直观地反映地壳运动。

(2) 锚标站点的建设相比于钢筋混凝土观测墩的建设更简便,省时、省力、成本低、材料消耗少。从目前计算结果看,其稳定性与钢筋混凝土观测墩相差不大,均能满足GNSS连续基准站的要求。

(3) 锚标站点对于温度变化大的地点也可以达到钢筋混凝土观测墩的稳定性。

(4) 由于锚标站点高度有限制,因此更适用于建设临时GNSS基准站点。

## 参考文献:

- 薄万举,黄立人,李军. 2009. GNSS野外检场[J]. 测绘科学,34(增刊1):48-50.
- 地壳运动监测工程研究中心. 2014. 地壳运动监测技术规程[M]. 北京:中国环境出版社.
- 洪敏,邵德盛,李春光等. 2012. 云南省GNSS连续观测资料应用研究[J]. 地震研究,35(4):535-539.
- 江在森,马宗晋,张希等. 2003. GPS初步结果揭示的中国大陆应变场与构造变形[J]. 地球物理学报,46(3):352-358.
- 牛之俊,王敏,孙汉荣等. 2005. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报,50(8):839-840.
- 施发奇,付云文,汪志民. 2012. GNSS基准站基线时间序列反映红河断裂带运动特征研究[J]. 地震研究,35(4):529-533.
- 王伶俐,邵德盛,洪敏. 2015. 云南境内陆态网络GNSS观测资料数据处理与初步结果[J]. 震害防御技术,10(1):141-149.
- 吴培稚,徐平,赵桂儒等. 2012. GNSS柔性观测墩的试验研究[J]. 大地测量与地球动力学,32(5):143-147.
- 许才军,张朝玉. 2009. 地壳形变测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社.
- 张锐,刘志广,占伟等. 2014. GNSS连续站不同类型观测墩稳定性研究[J]. 大地测量与地球动力学,34(2):31-35.

## Research on Stability of Clark Mark Observation Pier of GNSS Continue Station

WANG Yan,ZHANG Yong,HONG Min,SHAO Desheng,LI Wei,LI Zhijun  
(*Earthquake Administration of Yunnan Province,Kunming 650224,Yunnan,China*)

### Abstract

Firstly,based on the data recorded by reinforced concrete observation pier and clark mark observation pier at Mile Station in Tectonic Environmental Monitoring Network of China,we process the data by using Gamit/Globk software. Secondly,through analyzing the baseline variation,daily periodic variation etc. ,we found that the stability of clark mark observation pier is good at the early stage of construction,and the time series of point displacement in a year recorded by reinforced concrete observation pier and clark mark observation pier have highly consistence. Finally,when the clark mark observation pier was tested by using high-precision total station and multi-channel thermometer in the condition of extreme temperature,the stability of it is higher. So the clark mark observation pie could be used as the reference site for monitoring crustal movement.

**Key words:**GNSS;observation pier;clark mark;stability