

陈贵美, 谭争光, 刘锦, 等. 广东形变数字化观测资料质量评价[J]. 华南地震, 2022, 42(1): 7-14. [CHEN Guimei, TAN Zhengguang, LIU Jin, et al. Quality Evaluation of Digital Deformation Observation Data in Guangdong [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(1): 7-14]

广东数字化形变观测资料质量评价

陈贵美, 谭争光, 刘 锦, 王小娜, 邵 叶, 李晓慧

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 通过对广东各数字化形变观测仪器潮汐因子中误差、相位滞后及仪器零漂等参量的计算, 对仪器观测资料的连续性、稳定性及观测质量进行了分析和评价。分析结果认为: 各台仪器的观测精度基本达到了中国地震局形变 I 类台的标准; 地倾斜类观测仪器精度高, 稳定性好, 尤其是水管倾斜仪的稳定性及精度较高; 垂直摆倾斜仪的漂移较大且资料精度较低。伸缩仪和钻孔应变仪资料精度较高; 但钻孔应变仪汕头台漂移较大, 仪器稳定性不及信宜台; 信宜、汕头各形变台观测资料总体质量较好, 韶关台次之, 潮州台较其它台受干扰大、相对噪声大, 资料的稳定性及精度较低, 说明台址条件是决定观测质量的重要因素之一。

关键词: 形变观测; 固体潮; 内在精度; 观测质量

中图法分类号: P315.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)01-0007-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.01.02

Quality Evaluation of Digital Deformation Observation Data in Guangdong

CHEN Guimei, TAN Zhengguang, LIU Jin, WANG Xiaona,
SHAO Ye, LI Xiaohui

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Based on the calculation of the MSE of tidal factors, phase lag and zero drift of the digital deformation observation instruments in Guangdong, the continuity, stability and observation quality of the instrument observation data are analyzed and evaluated. The analysis results show that: the observation accuracy of each instrument basically meets the standards of Class I deformation stations of China Earthquake Administration; the ground tilt observation instruments have high accuracy and good stability, especially water pipe inclinometer; the vertical pendulum inclinometer has larger drift and lower data accuracy. The data accuracy of the extensometer and the borehole strain gauge is high; but the drift of borehole strainmeter at Shantou station is large, and the stability of instrument is not as good as that of Xinyi station; the overall quality of observation data from Xinyi and Shantou deformation stations is better than that from Shaoguan station. The deformation observation data of Chaozhou station

收稿日期: 2021-08-10

基金项目: 中国地震局地震预测开放基金项目和国家自然科学基金项目(41604055)资助

作者简介: 陈贵美(1969-), 女, 高级工程师。主要从事地震监测、数据处理及分析工作。

E-mail: 417540683@qq.com

is disturbed with highly noisy. The stability and accuracy of the data are lower than that from other stations, which indicates that the site condition is one of the important factors to determine the observation quality.

Keywords: Deformation observation; Solid tide; Intel precision; Observation quality

0 引言

中国地震局为推进地球物理台网从观测向观测、应用并重转变,强化观测数据的质量控制,规范数据处理分析工作,发挥前兆观测数据在震情监视、会商中的基础性作用,推进监测预报结合,更好地服务于地震预测和科学研究。广东区域地球物理台网从2014年6月份开始,按中国地震台网中心制定的相关要求开展了数据跟踪分析工作^[1]。随着多年的跟踪分析工作的积累及研究,台站产生大量的数据。而这些工作对台站产出数据是否真实可靠,观测人员能正确认识观测资料质量和变化特征,确定观测值的正常动态变化范围,正确识别异常等等,却未做过论证和评价。本文针对广东省形变台站观测数据资料进行探讨分析。认为资料的稳定性和可靠性等方面均达到预报指标要求,可以应用到日常的地震预报工作中。

1 观测资料质量分析

1.1 观测数据分析

广东形变观测历经了模拟和数字长时间的数据观测:期间模拟观测经过近30年的运行,在地球动力学及地震预报研究中均显示出不可替代的作用。N3水准仪、007水准仪、摆式倾斜仪、电子倾斜仪、水管倾斜仪、金属摆倾斜仪、整体倾斜仪等,水准仪的数据所显示的各测区的总体形变过程及局部形变变化特征,为全省地震趋势会商会提供了背景资料。倾斜仪能观测到固体潮,这些仪器可以观测到目前唯一能从理论上精确计算的形变(倾斜、重力、应变)固体潮,还有可能捕捉到不同形式的地震前兆信息。

广东省形变数字化观测自2007年陆续开始至今,也经历了10多年的时间。形变仪目前主要为地倾斜和地应变仪,包括“九五”、“十五”地倾斜5套(垂直摆倾斜仪和水管倾斜仪)和地应变仪3套(伸缩仪和分量式钻孔应变仪)。其中汕头4套,

分别为DSQ水管倾斜仪、VP宽频带倾斜仪、SS-Y钢瓦棒伸缩仪和RZB-2分量式钻孔应变仪;信宜2套为VS垂直摆倾斜仪和RZB-2分量式钻孔应变仪;潮州1套VP宽频带倾斜仪;韶关1套VS垂直摆倾斜仪。形变数字化前兆仪器的使用,避免了观测人员到观测室换纸等干扰因素,减少了对观测环境的影响,同时也避免了人工读数造成的误差。因此观测资料总体质量应更有保证。

广东地区虽然是少震区,但在过去模拟时期的30多年的地震预报探索过程中。也观测到一些震前形变异常,如1986年的阳江5.0级地震和自1970年以来新丰江水库区4级以上地震。信宜台整体摆倾斜仪观测结果显示出倾斜量有异常变化;新丰江台的形变仪在新丰江水库区4级以上地震前后,有异常变化显示。通过岩石力学实验和理论研究以及大量的观测和震例总结,以往地形变模拟观测在地震预报中的作用已为地震学者所公认。2007年以后投入的数字化观测,资料已应用到地震监测中。在积累了多年的资料后,在做跟踪分析之余,有必要根据形变观测规范的标准,对观测数据进行全面的认识和评价,以便能更有效的在强地震的监测中发挥作用^[2]。

1.2 资料选取

在整理多年的资料时发现,部分台站的可用资料长度仅3~4个月,计算 m_{γ} 、 σ_{α} 的误差太大,因此用月序列主波潮汐参数的稳定性研究资料的稳定性。另外在观测精度分析前增加了Nakai检验,对资料进行预处理,并以残差值的分布评判资料稳定性。

观测数据内精度分析对数据的基本要求是,①进行Nakai检验的资料连续率在48h以上,并剔除不连续的数据段;②为保证潮汐参数的准确性,必须排除Nakai检验中拟合残差太大的数据段。原计划统一使用2017年1月到2017年12月的资料进行分析,但在整理数据后发现,部分台站不连续的数据段较多,如韶关台的垂直摆倾斜仪、潮州台的宽频带倾斜仪等,为保证计算精度和准确性,选择至少连续稳定观测3个月以上的资料参加分析。各套仪器所选取的时间见表1、表2。

1.3 观测数据内精度分析

连续形变主要观测倾斜与应变。本文根据中国地震局制定的《地震及前兆数字观测技术规范—地壳形变观测(试行)》^[3]及中国地震局监测预报司编制的《地形变测量》为标准,以2017年观测数据为例,对广东省现行在观测的各形变仪进行分析。

《地形变测量》中提出,现有的倾斜和应变观测资料内精度指标共有两项内容:观测资料调和分析,观测相对噪声水平计算。而优秀台站即 I 类台的标准是,地倾斜 M2 波中误差 $m_\gamma \leq 0.02$ 、日均值相对噪声水平 $M_1 \leq 0.02$ ”;地应变 M2 波相对中误差 $\sigma_\alpha/\alpha \leq 0.05$ 、日均值相对噪声水平 $M_1 \leq 0.05 \times 10^{-6}$ ^[4]。

1.3.1 固体潮观测精度

(1)利用相对 M2 波潮汐因子的中误差和相对误差。检验观测资料的精度。优秀台站(I 类台)的标准是,地倾斜潮汐因子的中误差 $m_\gamma \leq 0.02$ 。应变相对中误差 $\sigma_\alpha/\alpha \leq 0.05$ 。

(2)内在精度计算结果分析。使用中国地震前兆台网数据处理系统软件对各台站数字化形变观测资料进行了数据检验和评价分析。采用以倾斜潮汐因子 γ 值、线应变因子 α 等为代表的、既具有明确物理意义,又有较高的有效率的误差分析方法进行计算^[5]。地倾斜仪的倾斜潮汐 M2 波 γ 值中误差以及应变仪潮汐 M2 波 σ 值相对中误差计算精度结果见表 1、表 2,由表可见各台形变仪精度大多数达到优秀标准。

表 1 地倾斜观测数据精度结果表
Table 1 Precision results of clinometer observation data

台站	仪器名称	时间/年-月	NS 向		EW 向	
			潮汐因子	中误差	潮汐因子	中误差
汕头台	DSQ 水管倾斜仪	2017-01	0.9559	0.0196	1.9466	0.0162
		2017-02	0.9354	0.0173	1.9067	0.0248
		2017-03	0.9241	0.0148	1.8509	0.0178
	VP 宽频带倾斜仪	2017-01	1.1858	0.0177	3.2355	0.0631
		2017-02	1.1232	0.0194	3.1403	0.0361
		2017-03	1.1010	0.0217	3.0598	0.0462
潮州台	VP 宽频带倾斜仪	2017-03	1.0594	0.1492	1.8960	0.1363
		2017-04	1.1260	0.0148	2.0583	0.0486
		2017-05	1.3554	0.0880	1.9598	0.0270
信宜台	VS 垂直摆倾斜仪	2017-05	1.2646	0.0176	2.0280	0.0233
		2017-06	1.2759	0.0116	1.9200	0.0478
		2017-07	1.2366	0.0138	0.5219	0.0678
韶关台	VS 垂直摆倾斜仪	2017-02	0.6453	0.0212	2.3769	0.0090
		2017-03	0.6833	0.0143	2.3678	0.0144
		2017-04	0.6640	0.0278	2.4055	0.0106

表 2 地应变观测数据精度结果表
Table 2 Precision results of strainmeter observation data

台站	仪器名称	时间/年-月	测向分量 NS		测向分量 EW	
			潮汐因子	相对误差	潮汐因子	相对误差
汕头台	SS-Y 钢瓦棒伸缩仪	2017-03	0.2619	0.0425	1.1903	0.0101
		2017-04	0.2620	0.0431	1.1843	0.0399
		2017-05	0.2438	0.0401	1.1903	0.0070
	RZB-2 分量式钻孔应变仪	2017-02	3.0741	0.0073	1.0367	0.0115
		2017-03	3.0315	0.0082	1.0523	0.0080
		2017-04	3.0978	0.0087	1.0384	0.0154

(转下表)

(接表2)

台站	仪器名称	时间/年-月	测向分量NS		测向分量EW	
			潮汐因子	相对误差	潮汐因子	相对误差
信宜台	RZB-2分量式钻孔应变仪	2017-02	0.0133	0.0092	0.0291	0.0032
		2017-03	0.0135	0.0108	0.0288	0.0034
		2017-04	0.0138	0.0053	0.0289	0.0029

各台形变仪误差结果见图1、图2。对地倾斜仪资料的分析表明，①水管倾斜仪的误差最小， $m_{\gamma} \leq 0.02$ 的月份有9个，整年误差均值是0.0214，最小误差值为0.0077；②同为VP宽频带倾斜仪，汕头台的误差相对较小，NS向较EW向好， $m_{\gamma} \leq 0.02$ 的月份NS向有8个，EW向无，整年误差均值是0.0323，最小误差值为0.0128。潮州台为市县台，从安装开始就不稳定，其误差较大，尤其EW向更甚， $m_{\gamma} \leq 0.02$ 的月份NS向有6个，EW向无，整年误差均值是0.0573，最小误差值为0.0148；VS垂直摆倾斜仪，韶关台的误差较信宜台大，可能是因为仪器老化，故障较多，导致2台的误差均较大。韶关台NS向较EW向差， $m_{\gamma} \leq 0.02$ 的月份NS

向有5个，EW向11个，整年误差均值是0.0276，最小误差值为0.0081。信宜台主要是NS向较差，EW向很好， $m_{\gamma} \leq 0.02$ 的月份NS向有6个，EW向12个，整年误差均值是0.0167，最小误差值为EW向的0.00。

对洞体应变仪资料的分析来看，相对误差较小， $\sigma_{\alpha}/\alpha \leq 0.05$ 的月份12个，整年误差均值是0.0268，最小误差值为0.007。说明潮汐观测的日变形态正常，稳定性好。

钻孔体应变资料的分析表明，汕头和信宜2个台站的相对误差均很小。 $\sigma_{\alpha}/\alpha \leq 0.05$ 的月份分别为11和12个，整年误差均值是0.0183和0.0131，最小误差值为0.0054、0.0024。

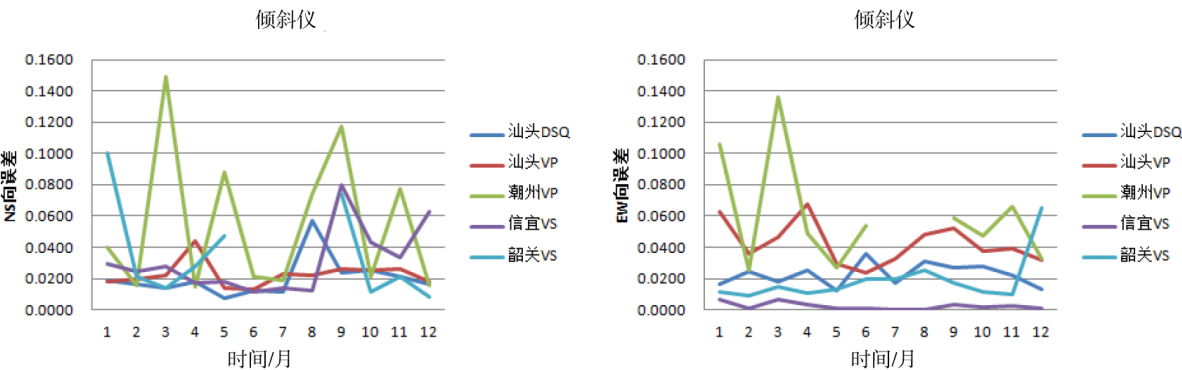


图1 各台倾斜仪M2波 γ 值中误差

Fig.1 The RMS of γ value of M2 wave of each inclinometer

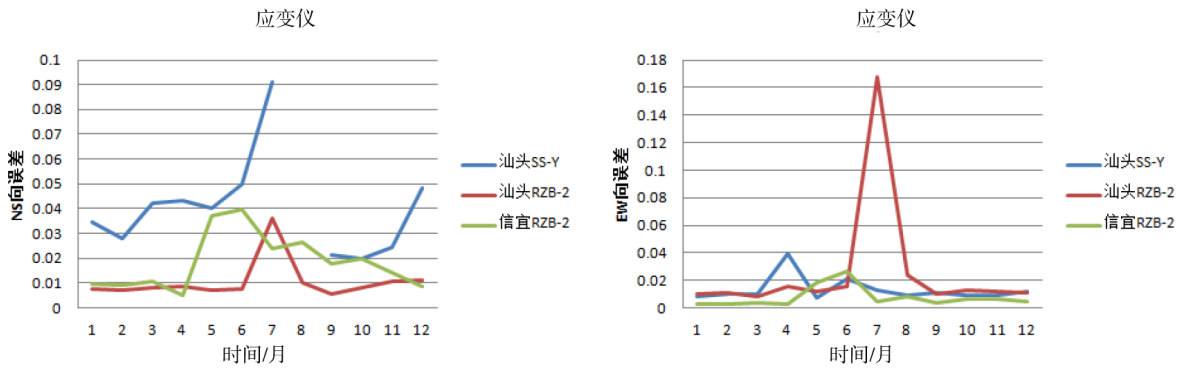


图2 各台应变仪M2波 σ 值相对中误差

Fig.2 The relative RMS of σ value of M2 wave of each strain gauge

1.3.2 相对噪声水平

相对噪声水平 M_1 是用来判断观测资料长期稳定性的一项定量指标。优秀台站即 I 类台此项标准是,地倾斜日均值相对噪声水平 $M_1 \leq 0.02''$;地应变日均值相对噪声水平 $M_1 \leq 0.05 \times 10^{-6}$ 。采用中国地震前兆台网数据处理系统集成版软件提供的相对噪声水平计算方法,计算了广东省4个台站8套形变仪器连续3年的数据均值。计算结果见表3。结果表明,除市县管理的潮州台VP宽频带倾斜仪相对噪声水平较高,为0.0308"和0.0568"未达到优秀外,其余均为优秀以上,其中伸缩仪的最低,其次是2套钻孔应变仪。

表3 形变仪相对噪声水平表			
Table 3 Relative noise level of deformation instruments			
仪器	台站	日均值相对噪声水平	
		NS向	EW向
DSQ水管倾斜仪	汕头	0.0032	0.0009
VP宽频带倾斜仪	潮州	0.0308	0.0568
	汕头	0.0040	0.0014
VS垂直摆倾斜仪	信宜	0.0034	0.0052
	韶关	0.0010	0.0025
SS-Y钢瓦棒伸缩仪	汕头	0.0002	0.0000
RZB-2分量式钻孔应变仪	信宜	0.0003	0.0002
	汕头	0.0010	0.0005

2 形变观测资料评价

对广东省观测资料的连续性、动态稳定与噪声水平、观测精度等方面进行数据质量评价。

2.1 资料连续性

数据连续是地震预报对观测数据的基本要求之一。对2017年度各台仪器的连续率进行统计,结果见表4可以看出,各仪器的连续率均达到99%以上,观测仪器的运行状态良好。

2.2 资料年零漂、年变幅及噪声水平统计

由漂移量可以看出仪器的稳定性和年变形态,漂移量是检验仪器是否正常工作的重要指标。由表5和图3可以看出:对于地倾斜仪,汕头台的1套水管倾斜仪的月漂移量在0.001~0.08之间;汕头台、潮州台、信宜台和韶关台的垂直摆倾斜仪,其NS向月漂移量在0.0002~0.61之间,EW向在

0.0015~0.52之间。总体来说,垂直摆倾斜仪的月漂移量都不大,多数在0.2内。信宜和韶关台的月漂移量较大,信宜台NS向超出0.2范围内有3个,韶关1个,EW向超出0.2信宜、韶关台各1个,说明这2台仪器的稳定性较其他台略差。

对于地应变仪,汕头台的洞体应变仪的稳定良好,月漂移量在0.0003~0.03之间;信宜台、汕头台的钻孔应变仪NS向和EW向月漂移量,除了汕头台各有1个较大值外,分别为2.8和0.6,其余均在0.1范围内。

表4 2017年度各台形变仪连续率		
Table 4 The continuity rate of each deformation instrument in 2017		
仪器	台站	连续率
DSQ水管倾斜仪	汕头	99.52
VP宽频带倾斜仪	潮州	99.52
	汕头	99.82
VS垂直摆倾斜仪	信宜	99.97
	韶关	99.89
SS-Y钢瓦棒伸缩仪	汕头	99.83
RZB-2分量式钻孔应变仪	信宜	99.94
	汕头	99.83

表5 2017年各台形变仪年零漂均值			
Table 5 Mean value of annual zero drift of deformation instruments in 2017			
仪器	台站	零漂均值/ms	
		NS向	EW向
DSQ水管倾斜仪	汕头	-0.0101	-0.0088
VP宽频带倾斜仪	潮州	0.0054	-0.0080
	汕头	-0.0025	-0.0029
VS垂直摆倾斜仪	信宜	-0.0167	-0.0496
	韶关	-0.0792	-0.0418
SS-Y钢瓦棒伸缩仪	汕头	-0.0007	-0.0023
RZB-2分量式钻孔应变仪	信宜	0.0000	0.0000
	汕头	-0.2525	0.0569

噪声水平指标与观测环境、观测系统噪声水平等直接关联,主要反映数据动态变化的稳定性水平^[6-7]。从表3结果来看,汕头台形变观测仪器安装在168 m的坑道内,干扰少,观测条件较好,各仪的相对噪声水平均较低。信宜台洞壁为花岗片麻岩,岩性完好。2套形变仪的相对噪声水平应变仪较小,垂直摆稍大。韶关台基条件稳定,观

测条件较理想,形变仪噪声水平较低。潮州台噪声水平较高,该台是隶属潮州市地震局的地方台站。形变观测的山洞洞壁和洞顶为石砌结构,底

部为水泥埕面,洞体长年潮湿,加上南方雷雨天气频繁,因而一定程度影响了记录的连续性、完整性、稳定性和观测质量^[8-9]。

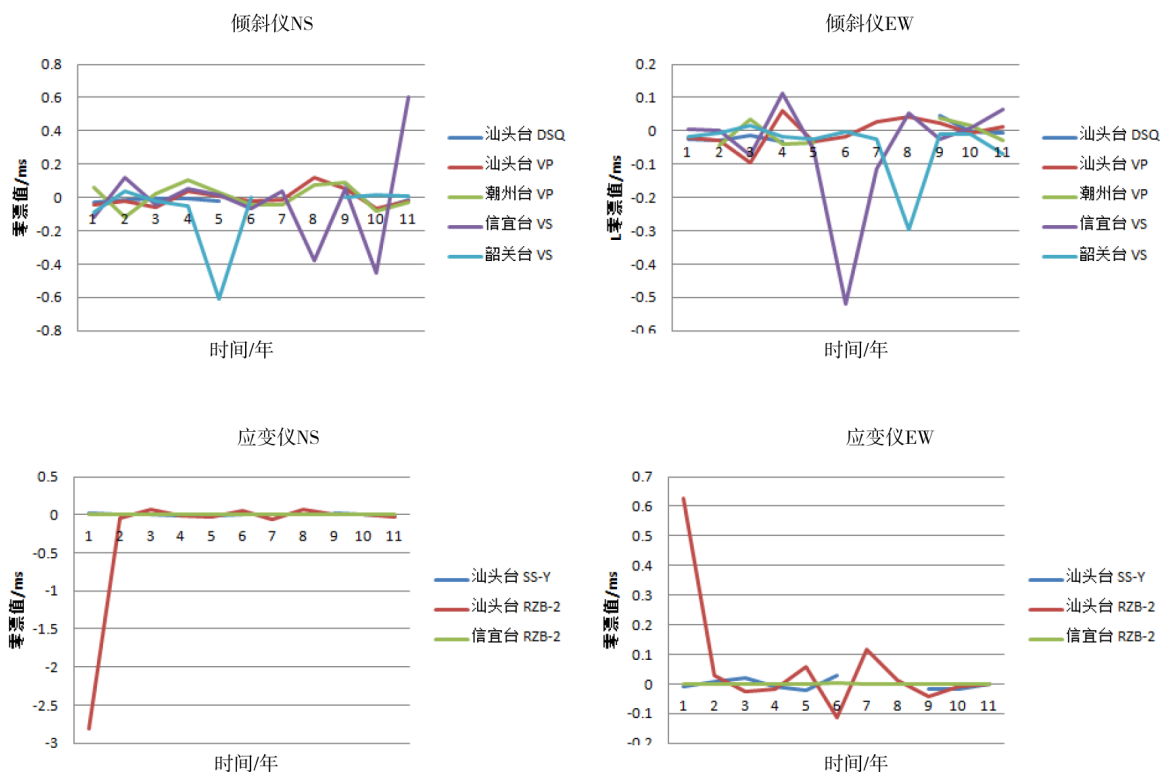


图3 2017年倾斜、应变仪各月零漂值

Fig.3 Monthly zero drift value of inclinometer and strainmeter in 2017

2.3 资料稳定性及可靠性评价

潮汐变化是外部天体对于地面观测站相对位置变化造成的附加引力而引起的,而地震研究关注的是从实际观测资料中分离出与地震孕育有关的非潮汐因素所引起的倾斜、应变及重力变化^[10]。用 Venedikov 法可将潮汐波背景值剔除,较完整地保留细微的形变信息。M2 波潮汐因子中误差是评定观测资料精度的主要标准,用相位滞后可以比较不同台站资料的稳定程度^[11-12]。在地震平静期,用上述方法也可反映出观测系统受干扰情况、自身运行情况及台址条件,从而对各台资料稳定性和可靠性进行评价

2.3.1 地倾斜仪

洞体地倾斜测量是在山洞或地下室内应用倾斜仪测定地面的倾斜变化。广东此类形变观测仪有水管倾斜仪和垂直摆倾斜仪。

倾斜仪 γ 因子中误差和 M2 波相位滞后误差见图 1 和图 4。对 DSQ 水管倾斜仪潮汐因子中误差及相位滞后误差计算情况来看: γ 因子中误差达到优

秀标准的月份 NS 向 10 个较 EW 向 7 个多,说明观测精度 NS 向较 EW 向高。汕头、信宜 VP 宽频带倾斜仪 NS 向 γ 因子中误差达到优秀标准的月份较 EW 向多。信宜、韶关垂直摆倾斜仪则 EW 向 γ 因子中误差达到优秀标准的月份较 NS 向多,误差小的分量说明观测精度较高。

从 M2 波相位滞后的误差可以得出: DSQ 水管倾斜仪、汕头 VP 宽频带倾斜仪和韶关 VS 垂直摆倾斜仪的 EW 向误差较小,表明固体潮波动小,数据记录稳定。而潮州 VP 宽频带倾斜仪和韶关 VS 垂直摆倾斜仪的 NS 向误差相对较大,表明固体潮波动大,数据不够稳定。

垂直摆倾斜仪 m_γ 年误差均值和 M2 波相位滞后的误差由小到大的排序为信宜、韶关、汕头、潮州和汕头、信宜、韶关、潮州。信宜台的 m_γ 误差最小,相位误差也较小,说明观测精度高,资料较为稳定。汕头台相位误差最小, m_γ 误差略大,潮州台各项指标均较差,观测精度及稳定性均不理想。

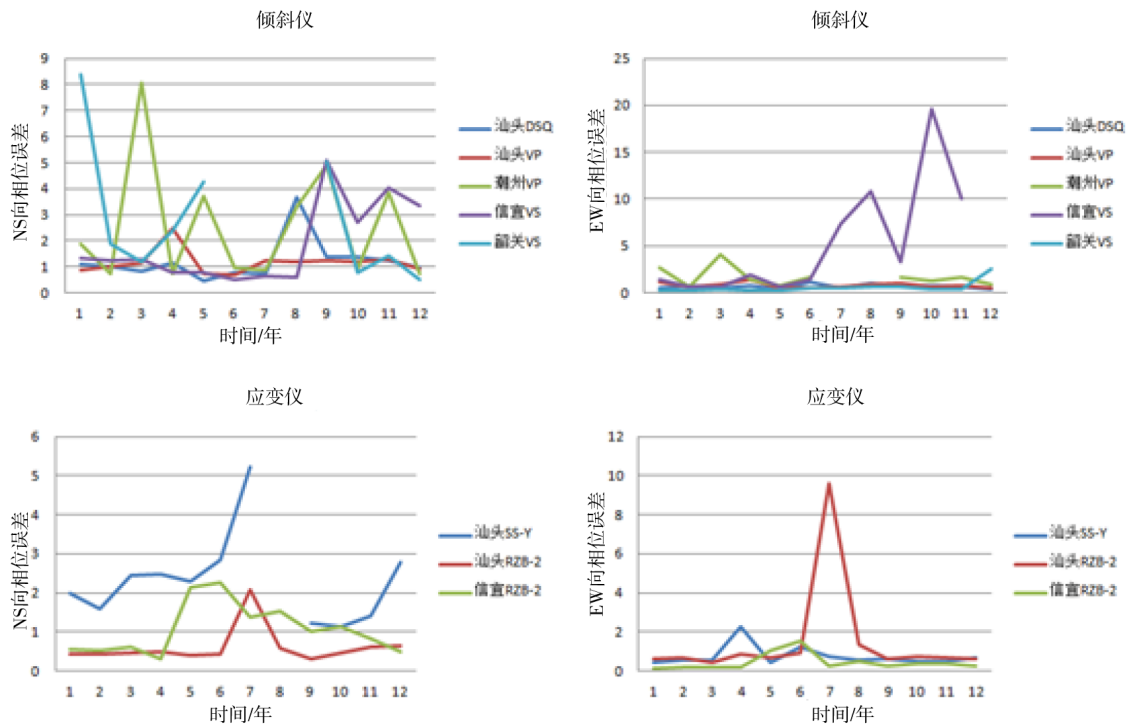


图4 形变仪相位滞后误差

Fig.4 Phase lag error of deformation instrument

2.3.2 地应变仪

由图2和图4可以得出:汕头SS-Y伸缩仪潮汐M2波 σ 值相对中误差较小。相位滞后误差NS向较大,EW向较小。RZB-2分量式钻孔应变仪,汕头和信宜2个台站潮汐M2波 σ 值相对中误差均很小,信宜台略小。相位滞后误差以上2台总的基本相当,而汕头台NS向较EW向小,为0.6121和1.4880;信宜台NS向较EW向大,为1.0667和0.4394。说明应变仪的以上指标达到或超过了中国局形变I类台标准。

3 结语

广东省数字化形变观测台网经过10多年的运行,各手段数据在观测质量、灵敏度及精度上尚可,资料的稳定性和可靠性等方面均达到预报指标要求。观测台点以及部分台站的观测数据,为地震预报提供了丰富的资料。经数据处理分析认为:观测资料能够提供较明显的短临及临震信息,在地震预报工作中将会成为有利的判据,发挥重要作用。

(1)对广东数字化形变观测资料的分析表明,仪器的观测精度多数台达到中国地震局形变I类台标准,部分台的精度远远超过了现有的指标,可以用于前兆异常的分析研究。形变仪器最多的汕头台和仪器次多的信宜台观测资料总体质量较好。韶关

台次之,潮州台较其它台受雷电、降雨干扰大、相对噪声大,资料的稳定性及精度较低,可能与台基条件有关,值得进一步研究。

(2)汕头DSQ水管倾斜仪的观测精度和稳定性较好。中误差 m_y 为0.021,相对噪声水平0.002,月漂移量在0.001~0.08之间,相位滞后误差0.96。各项指标均达到优秀。

(3)VP宽频带倾斜仪,潮州台因为市县台站,从安装开始就不稳定。其各项指标均不理想;汕头台的形变观测仪器安装在100多米长的坑到内,干扰少,观测条件较好,观测精度较高,各项观测指标较潮州台好。对于VS垂直摆倾斜仪,可能是因为仪器老化,韶关、信宜2台运行均超出10年,故障较多,导致2台的误差均较大。 m_y 中误差普遍NS向较EW向差。

(4)分析认为,用于洞体地应变观测与研究的SS-Y型伸缩仪,其EW分量的观测结果优于NS分量, σ_a/α 相对中误差EW向0.0132、NS向为0.0403。

(5)为观测地壳应变状态随时间的微小变化的钻孔应变仪不同于其他洞室固体潮仪器,受人为及环境变化影响小^[13-14]。对其资料的分析表明,汕头和信宜2个台站的相对误差均很小。 $\sigma_a/\alpha \leq 0.05$ 整年误差均值分别为0.0183和0.0131。其余各项指标均为优秀以上。

参考文献

- [1] 严兴. 广东省前兆台网数据跟踪分析情况概述[J]. 华南地震, 2015, 35 (1): 43-50.
- [2] 广东省地方史志编纂委员会. 广东省志: 地震志[M]. 广州: 广东人民出版社, 2003.
- [3] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范—地壳形变观测[M]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [4] 中国地震局监测预报司. 地形变测量 [M]. 北京: 地震出版社, 2008.
- [5] 杨又陵. 新疆数字化形变观测的潮汐参数及稳定性分析[J]. 内陆地震, 2009, 23 (2): 107-115.
- [6] 刘春国. 数字化地震前兆台网观测数据质量评价方法[J]. 中国地震, 2017, 33(1): 112-121.
- [7] 禹小军, 李翀, 郜怀龙, 等. 韶关地震台数字化地震前兆观测典型非正常事件分析[J]. 华南地震, 2019, 39(S1): 66-70.
- [8] 广东省地震局. 广东省地震监测志—中国地震监测志系列[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [9] 全建军, 陈美梅, 陈珊桦, 等. 前兆台站综合防雷系统的升级改造[J]. 华南地震, 2019, 39(S1): 17-21.
- [10] 陈棋福, 李 乐, 姜金钟. 中国大陆强震孕育深处的变形模式构建[J]. 地震研究, 2020, 43 (2): 232-240.
- [11] 姜丛, 蒋长胜, 张琰, 等. 近十年地震预测的国际研究进展[J]. 地震研究, 2020, 43 (2): 208-215.
- [12] 张国民. 地震预测科学研究论文选[M]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [13] 唐九安. 泰安台 YRY-2 钻孔应变仪线差应变潮汐参数及其稳定性研究[J]. 西北地震学报, 2001, 23 (2): 112-116.
- [14] 张嘉敏, 杨绍富. 天山中段分量式钻孔应变仪观测资料可靠性论证 [J]. 华南地震, 2020, 40(3): 108-115.