

# 一种浅孔安装的 YRY-2型钻孔 应变仪在中国华北地区8个 台站试验观测的结果<sup>\*</sup>

池顺良

(中国河南鹤壁456650鹤壁市地震办公室)

## 摘 要

对在华北地区的8个YRY-2型钻孔应变仪试验点观测结果的分析指出:浅孔(21—25m)安装的钻孔应变仪能真实反映地壳应变活动.在地震和潮汐频段,仪器提供的记录可供定量分析提取有关信息.对日波以上长周期频段信息的使用,要考虑仪器零漂的影响.仪器要在更大范围推广使用,须提高安装成功率并加强雷击防范措施.

**关键词** 钻孔应变仪;应变地震波;应变固体潮;潮汐振幅因子

## 1. 前 言

钻孔应变仪作为一种连续观测地壳运动的仪器,由于具有无需硐室、造价低、干扰小等优点,可以预料在未来的地震预报观测研究中会更广泛地得到应用(力武常次,1978).

近年来,我国已经安装了5种不同型号的50套钻孔应变仪.但是,在更广泛地使用钻孔应变仪以前,尚有不少问题需要澄清.这些问题有:钻孔应变仪探头适宜的安装深度及允许最浅安装深度的确定;钻孔应变仪接受地壳应变本底的能力;仪器在不同频段的噪声特性及精度;仪器在不同岩性地区的适用性;仪器格值的长期稳定性;仪器的工作寿命及可靠性和可维修性;探头的耦合方式等.有些问题还互相关联,例如,探头的可维修性就和采用永久性耦合方式(膨胀水泥连接)或可卸式耦合(石英砂耦合)方式有关系.这些问题都需通过试验解答.

尤其在仪器的安装深度及耦合方式上,面临不同的抉择.比如,探头深孔安装可以降低地面干扰,但深钻孔耗费巨大,究竟多少深度安装既能获得地壳的主要应变信息,又不致耗资太大;又如,用膨胀水泥固定探头,力学特性看来比较简单,但是探头一旦出现故障

\* 此项试验由国家地震局科技监测司专项经费资助.  
1991年7月15日收到本文初稿,1992年8月31日决定采用.

就难以处理.对需要常年工作的地震监测仪器,不考虑仪器故障及损坏的可能,在我们目前的工艺水平下还不行.但用可卸式的安装,如石英砂耦合,耦合模型比较复杂.这种耦合方式能否反映地壳的主要应变信息,也存有疑问.

YRY-2型钻孔应变仪是一种高灵敏度、宽频带的钻孔应变仪,适于在浅孔中(20—40m)安装.采用石英砂耦合、浅孔安装的仪器能否记录到真实的地壳应变活动,只有一定数量的现场试验才能回答.这就是在国家地震局和有关部门支持下开展这项试验工作的目的.

## 2. 仪器结构简介

为了观测到地壳应变本底:应变固体潮、地震波、地脉动,应变仪的灵敏度必须达到 $10^{-11}$ 量级.对于0.1m 直径的钻孔应变仪,传感器必须能分辨百分之几埃的位移.电容传感器能满足此要求,且具有稳定、无自热效应、测量力小等优点.因此,选用电容传感器作位移传感器,传感电容极片由长度稳定性好的材料制作的基准杆支撑在探头筒壁上.基准杆中段夹有压电晶片,可在外加电压下产生已知长度的伸缩.施加不同频率的标定电压,可对传感器进行频率特性的标定(池顺良,1982).使用这种传感器可以组装成平面三分量探头、剪切应变二分量探头等多种探头.这项试验主要使用剪应变二分量探头.

## 3. 钻孔应变仪探头与地层的耦合

应变仪探头与地层的耦合是钻孔应变仪正常工作的关键.

探头放进钻孔,若地层是松弛时间短的岩层(粘土、粉砂等),经过数天或更长时间,由于钻孔孔缩,探头与地层就可紧密连接.对于岩石钻孔,只能用粘合剂或填充料将探头与岩孔孔壁连接.

用膨胀水泥将探头与围岩固结的方法,力学模型比较清楚,问题是探头无法取出维修.这种方法国外用得比较普遍.

用石英砂填充夯实并镇压重锤产生预应力的方法亦可使探头与孔壁连接.这种安装方法我们称为“沉砂法”,用这种方法安装钻孔应变仪,探头可取出修理、更换(池顺良,1982;唐定仑,1991).此项试验,全部采用“沉砂法”固定探头.

## 4. 仪器标定

在 YRY-2型钻孔应变仪中,标定系统由插入长度基准杆中的一组石英晶片或铌酸锂压电晶片为主体构成.在这组晶片上施加电压,利用逆压电效应引起晶片伸缩,改变传感电容片的间隙,这相当于对传感器施加了可控应变.

采用压电晶体的逆压电效应来标定应变仪,标定的精度主要取决于压电晶体逆压电常数的稳定性和测定常数的精度.石英晶体的压电常数稳定性很好,但逆压电系数很小. $\alpha$

$\approx 2.2 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ , 精确测定很困难. 铌酸锂单晶的逆压电常数  $\alpha \approx 29.5 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ , 比石英高13倍. 因此, 试验探头采用铌酸锂晶体标定. 对一组铌酸锂单晶片的逆压电常数的测定结果如表1所示.

表1 一组铌酸锂单晶片的逆压电常数测定结果

晶 片 编 号	1	2	3	4	5
测值( $10^{-12} \text{ m/V}$ )	$30.8 \pm 0.8$	$29.0 \pm 0.7$	$29.1 \pm 0.6$	$28.9 \pm 0.6$	$29.5 \pm 0.6$

平均值为  $\alpha = 29.5 \pm 0.7 \times 10^{-12} \text{ m/V}$

由于 YRY-2型仪器可以对幅频特性进行标定, 记录的地震图可以换算为地动位移与地震频段摆式地震仪的资料比对.

## 5. 试验观测概况

为了试验浅孔、沉砂法安装的钻孔应变仪的性能, 在华北地区的泰安、长治、鹤壁、浚县、辉县、香山、昌平及滦县8个试验点, 安装了10套 YRY-2型钻孔应变仪. 这8个试验点都是岩石钻孔, 探头安装段钻孔孔径为130mm. 各个试验点探头安装深度及地层岩性见表2所示.

表2 各试验点探头安装深度及岩性

台 站 名 称	泰 安	长 治	鹤 壁	浚 县	辉 县	香 山	昌 平	滦 县
安 装 深 度	32m 39m	40m	24m	22m	25m	38m	52m	25m 21m
岩 性	花 岗 岩	灰 岩	石 灰 岩	石 灰 岩	石 灰 岩	凝 灰 岩	白 云 岩	砂 岩

试验点起初配置的记录设备采用长图模拟记录器. 由于台站经常停电, 这种记录仪的功耗大, 停电时不能直流供电工作, 因而难以保证资料的连续性. 为此, 又研制了低功耗的4位半(十进制)数据采集器及以PC-1500袖珍机为主机的低功耗微机控制系统, 在交流停电时可用12V电瓶供电工作. 之后, 试验点的观测数据的连续性得到了保证. 1991年, 泰安台的仪器因观测资料数据连续, 在全国评比中获第二名.

但是, 目前这套数据采集系统的采样间隔为2min, 这样的记录能反映潮汐频段的信号. 然而, 由于采样密度不够, 地震频段信号不能反映. 但是香山、长治和辉县台曾用笔绘记录仪记到若干地震图.

## 6. 台站仪器工作情况及记录资料分析

这10套仪器是从1985年6月开始陆续安装的. 除了香山、鹤壁、滦县及泰安的1套共5套仪器从安装后一直工作没有损坏, 辉县、长治、昌平、浚县、泰安的另5套仪器因雷击损坏或安装失败更换过探头. 其中昌平台因安装失败又重安装, 长治、泰安、浚县3套仪器因雷击

损坏需要更换。辉县台的仪器因井下元件失效需更换。由此估计,按目前的工艺水平,探头的安装成功率为80%,6年中雷击损坏的机率为25%。由此看来,井下探头损坏的可能性必须认真考虑,并采取相应的防雷击措施,否则会严重影响台站正常工作。

但是,这先后安装的13个探头,都有固体潮显示,并能记录地震波。图1是这8个台记录的应变固体潮和理论值的比较。

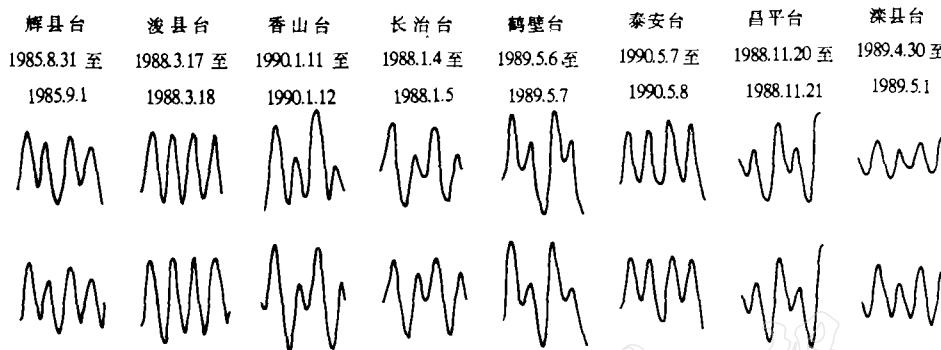


图1 华北8个台站记录的应变固体潮(上)与应变固体潮理论值(下)的比较

表3是根据潮汐导纳计算的这8个台的潮汐振幅因子和相位滞后。

表3 8个台的潮汐振幅因子和相位滞后

台站名称	泰安	长治	鹤壁	浚县	香山	辉县	昌平	滦县
振幅因子	0.94	1.02	0.96	1.04	1.06	1.13	0.90	0.52
相位滞后(h)	0.21	0.12	0.99	0.11	0.30	0.36	0.21	0.17

可见,除了滦县台,潮汐振幅因子明显偏小,其余各台站潮汐观测值与理论值都比较接近。

考虑到钻孔应变仪安装中的地形、耦合条件等因素均会影响潮汐振幅因子的大小,这8个不同地形、地质条件下安装的应变仪,大体均记录到接近理论值的数据,使我们得出如下看法:

浅孔、沉砂法安装的钻孔应变仪,甚至安装深度只有21m的仪器,也能真实反映地壳的潮汐应变。对于周期约12h的半日波的单位权中误差达到 $2-6 \times 10^{-9}$ 的精度(见表5,6)。

香山台的钻孔应变仪曾记录过微震频段的信号,将应变地震波换算为地动位移,再计算震级、距离等参数与摆式地震仪的结果进行比较(表4)。这说明,仪器在地震频段的应变检测能力可高达 $10^{-11}$ 。

表4 应变地震记录与摆式地震记录的比较

记 录 仪 器	P 波到时	S 波到时	地动位移( $\mu\text{m}$ )	震中距(km)	震级( $M_L$ )
摆式地震仪	57' 52. 4"	58' 11. 0"	0. 028	157. 2	2. 1
钻孔应变仪	57' 52. 4"	58' 11. 0"	0. 042	157. 2	2. 3
摆式地震仪	27' 24. 6"	27' 27. 5"	0. 12	24. 8	1. 4
钻孔应变仪	27' 24. 6"	27' 27. 5"	0. 24	24. 8	1. 7
摆式地震仪	55' 12. 6"	55' 13. 9"	0. 056	11. 1	0. 6
钻孔应变仪	55' 12. 6"	55' 13. 9"	0. 039	11. 1	0. 5
摆式地震仪	26' 15. 1"	26' 41. 1"	0. 16	220. 4	3. 2
钻孔应变仪	26' 15. 1"	26' 41. 1"	0. 16	220. 4	3. 2

但是,对于周期长于1d的信号,缺少可利用的地壳本底信号供检验仪器信号的可靠性. 对此,唯一可行的方法是采用比对试验.

我们在滦县、泰安各安装了两套YRY-2型仪器. 图2是滦县台两套仪器的重复分量记录的固体潮及5个月的日均值记录的比较. 显见,在潮汐频段,两个相同分量的主要成分相当一致,两者间的偏差不会超出 $1 \times 10^{-8}$ ,但5个月的长期变化却不同步,1个月的最大累计偏差可达到 $2 \times 10^{-7}$ .

以上结果证实了苏恺之的论点(苏恺之,1991)对具有自校分量的四分量压磁应力仪的长期资料的分析,也可看出长周期成份有 $10^{-6}/\text{a}$ 的不确定性(康仲远等,1989).

因此,从这种小尺度应变仪中获取可靠的、 $<10^{-8}$ 应变的高分辨率的地层应变信息,目前只能局限于短于数日周期的成分. 期望从数月或数年的长周期应变信号中获取地壳应变缓慢积累变化的真实信息,必须考虑仪器的长周期噪声特性.

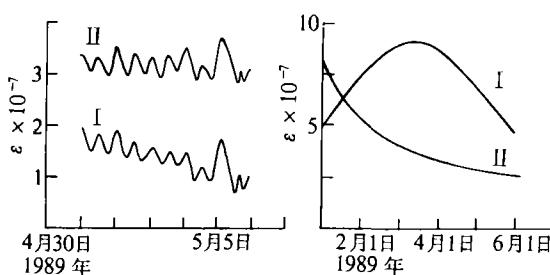


图2 重复的两个分量在潮汐频段及长周期频段(日均值)的比对记录

在短于数日的地壳应变本底中,固体潮应变是最强的成份. 一些作者提出,孕震过程中,地壳介质弹性参数的变化会引起应变潮汐响应幅度及滞后的变化(毛伟健等,1984).

这是目前钻孔应变观测技术可能检测出的效应. 这样,仪器的标定、格值精度和记录到的潮汐的调和分析精度就成为观测技术中的关键问题. 表5和表6是泰安台52天和鹤壁台152天资料的调和分析结果(计算程序由骆鸣津提供).

由表5,6可见,这两个台的 $M_2$ 波的潮汐因子的相对精度已分别达到0.4%和0.8%.

这种小尺度的应变仪记录应变潮汐能达到这样高的精度,是有些出乎意料的,这可能与我们观测的是剪切应变有关. 观测剪切应变,仪器能自动将气压、水位、井温等外界干扰作为一种共模干扰而排除. 记录中的干扰成份较少,因而调和分析的精度就高.

表5 泰安台52天资料的调和分析结果

波群	振幅因子	单位权中误差	相位滞后	单位权中误差
日波	Q <sub>1</sub>	0.6033	0.1251	-0.12
	O <sub>1</sub>	0.5023	0.0272	-8.28
	M <sub>1</sub>	0.1433	0.4486	-16.44
	P <sub>1</sub> S <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	0.2277	0.0180	38.63
	J <sub>1</sub>	0.4276	0.3203	-19.08
	OO <sub>1</sub>	0.7146	0.5435	-70.98
M. S. E. = 5.1472				
半日波	2N <sub>2</sub>	1.0078	0.0813	7.14
	N <sub>2</sub>	1.1375	0.0173	1.96
	M <sub>2</sub>	1.1305	0.0044	1.27
	L <sub>2</sub>	1.1474	0.0850	-1.17
	S <sub>2</sub>	1.1562	0.0084	1.48
M. S. E. = 2.0056				

表6 鹤壁台152天资料的调和分析结果

波群	振幅因子	单位权中误差	相位滞后	单位权中误差
日波	Q <sub>1</sub>	1.1839	0.1222	-26.73
	O <sub>1</sub>	0.8683	0.0261	-30.08
	M <sub>1</sub>	0.9378	0.3361	-22.46
	P <sub>1</sub> S <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	0.8583	0.0183	-22.54
	J <sub>1</sub>	1.5502	0.3137	-26.36
	OO <sub>1</sub>	1.6924	0.3977	-18.61
M. S. E. = 14.1437				
半日波	2N <sub>2</sub>	1.0319	0.2026	-4.61
	N <sub>2</sub>	1.0304	0.0410	12.63
	M <sub>2</sub>	1.0558	0.0086	10.33
	L <sub>2</sub>	1.1645	0.2202	-6.35
	S <sub>2</sub>	0.9653	0.0148	7.04
M. S. E. = 6.1495				

由调和分析结果看,这两个台的半日波的观测值与理论值较接近,而日波的观测值则明显小于理论值,尤其是泰安台.这同这两个台的探头采用沉砂法安装时,石英砂的粒径、镇压重锤的质量不同有关.

表7是鹤壁台从1989年9月3日至1990年12月28日期间,分成4个时间段,分别进行调和分析得出M<sub>2</sub>波的振幅因子及相位滞后的相对变化情况.

在此期间,鹤壁台周围100km 范围内地震活动相对平静,潮汐振幅因子变化也未超出仪器的分辨精度,表现为相对稳定。

表7 鹤壁台潮汐因子的相对变化

日期	1989.9.3—12.10	1989.12.12—1990.2.12	1990.2.23—4.26	1990.4.27—10.2
有效天数	30天	32天	32天	28天
振幅因子	1.0525	1.0464	1.0426	1.0603
中误差	0.0240	0.0097	0.0145	0.0151
相位滞后	11.00	9.10	8.73	10.08
中误差	1.35	0.53	0.81	0.84

关于这种浅孔安装的钻孔应变仪对地震前兆的反映,《钻孔应变仪的潮汐和非潮汐变化机理及其在地震预报中的运用》一文对此作了探讨,此处摘录一段结论:

“从应变固体潮观测中提取前兆信息,用日波、半日波的振幅残差或相位残差来判别前兆能获得震前几天至2.6个月的信息,属于短临前兆,但主要是短期前兆。这一方法对于近场应变(100km 以内)4.0 级以上的地震前兆识别是有效的,而且效果较好。因此,作为短期预报,今后在实用中是大有希望的”(徐树心,1991)。

## 7. 结 论

华北地区8个沉砂法浅孔(21—52m)安装的YRY-2型钻孔应变仪均记录到与理论值接近的应变固体潮,  $M_2$  波的潮汐振幅因子的相对误差达到0.4%—0.8%, 半日波的单位权中误差达到 $2-6 \times 10^{-9}$ , 说明浅孔安装的钻孔应变仪能真实反映地壳应变活动。但数月以上的长周期信号的噪声(零漂)可达到 $10^{-7}-10^{-6}$ , 大于一般情况下的地壳应变积累速率, 对这部分资料的使用要十分慎重。

我们认为,监测孕震过程中,地壳介质弹性参数的变化及介质失稳破裂前加载、卸载特性的差别引起的应变潮汐响应的改变是目前的钻孔应变技术可能检测出的效应,应在理论和观测中给以重视。

艾学民、池亮、葛海军、张肖霞、赵润波、马伯坚等参加了本项试验工作。试验工作得到河南省地震局骆鸣津研究员、天津测量大队徐树心高级工程师的大力支持。香山台、泰安台、昌平台、长治台、浚县台、辉县台、浚县台等许多台站工作同志在繁重的试验工作中给予了支持和帮助。笔者对他们表示感谢。

## 参 考 文 献

- 池顺良, 1982. 压容式钻孔应变仪的初步试验结果. 地震学报, 4, 98—103.  
 康仲远、杨修信、王廷辐、任庆维、曾祥桐、蒋荣发, 1989. 地应力测量结果的校验和震前观测事实. 地震学报, 11, 106—111.

- 力武常次,1978. 地震预报,83—98. 地震出版社,北京.
- 毛伟健、许厚泽,1984. 地球表面质量负荷的静态响应. 地球物理学报,27,74—82.
- 苏恺之,1991. 钻孔应变仪的地震监测能力. 地震,5:38—45.
- 唐定仑,1991. 一种高灵敏度的压阻式钻孔应变仪. 地震,6:61—67.
- 徐树心,1991. 钻孔应变仪的潮汐和非潮汐变化机理及其在地震预报中的应用. 大地形变测量,2,63—73.
- 尹祥瑞、尹灿,1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预报. 中国科学, B辑,5:512—518.

地 球 物 球  
震 学 期 刊  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA