

钻孔应变观测中潮汐因子离散性 与各向异性原因探讨 ——“十五”数字地震观测网络分量钻孔应 变仪首批观测资料分析解释

池顺良¹, 武红岭², 骆鸣津³

(1. 鹤壁市地震局, 鹤壁 458000; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100085; 3. 河南省地震局, 郑州 450000)

摘 要 中国数字地震观测网络“十五”计划期间,在全国布设约 40 台我国自主研发的 YRY-4 型分量式钻孔应变仪。现已取得一批固体潮观测数据,计算 M2 波潮汐因子的结果表明,潮汐因子的相对精度最高达到了 0.001。在此基础上,发现各观测点潮汐响应(潮汐因子)与理论模型比较有很大的离散性及有规律的方位各向异性。本文提出断层隔离是造成各台站潮汐因子偏离理论值及方位各向异性的主要原因。有限元断层地块模型应变方位响应与台站实测方位响应的一致,支持了这一观点。潮汐响应各向异性现象有望在地质构造研究、城市断层探测、地块活动微动态、地震烈度区划等研究领域发挥作用。也可为 GPS 等空间大地测量观测数据改进潮汐位移修正,提供参考。

关键词 钻孔应变,应变固体潮,潮汐因子,方位各向异性

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)06-1746-08

Discussion on strain tidal factor separation and anisotropy ——Analysis of first data of borehole component strain-meter of China's digital seismological observational networks

CHI Shun-liang¹, WU Hong-ling², LUO Ming-jing³

(1. Hebi Seismological Bureau, Hebi 458030, China)

2. China Geological Academy Geological Mechanics Institute, Beijing 100085, China

3. Henan Seismological Bureau, Zhengzhou 450000, China)

Abstract The National Digital Seismological Observational Networks plans to install in China's mainland 40 YRY-4 Borehole Strain meters developed by CHI Shun-liang. First set of data has been analysed, and from the best quality data, relative accuracy of M2 wave factor can reach 0.001, which is better than the best long-base cave strain meters. We also discovered at various borehole strain-meter stations tidal response (tidal factor) are separate and have orderly anisotropy. We believe that fault isolation is the cause of separation and anisotropy. Finite element model of fault block's azimuth response has contingency with measured response, which supports this hypothesis. The anisotropy of tidal response will be helpful at geologic structure research, city fault survey, land block micro activity, earthquake intensity area delimit. And it can also improve tidal displacement revises of GPS data.

Keywords borehole strain, solid tidal strain, tidal factor, anisotropy

收稿日期 2007-07-10; 修回日期 2007-09-20.

作者简介 池顺良,男,1940年生,上海市人,1963年上海同济大学毕业。中国科学院测量与地球物理研究所客座研究员,中国地震学会地震观测技术专业委员会委员,地震学报编委。长期从事地震观测技术和大地构造成因研究,目前从事多分量钻孔应变仪的全国布网工作。(E-mail:chisl@263.net)

0 引言

1966年邢台地震后,在李四光的倡导和组织下,我国首先开展了以地震预报为目的的钻孔应力应变连续观测.李四光的地震预报科学思路中,“对地应力进行观测,找出地应力有关的性质、特点以及作用方式和变化规律……看出这种变化与地震之间的内在联系…才有可能对地震发生的地点、时间、频度和强度作出科学的判断”^[1].

为了达到地震预报科学目标,研制地应力观测仪器成为紧迫的任务.李四光与研究人员共同讨论钻孔应力测量仪器总体技术方案,采用何种传感技术,探头安装等技术细节,并在广东新丰江和邢台尧山建立了第一批地应力观测站.

1968年,萨克斯(美)研制成功体积应变仪^[2].1970~1980年代,30多套体积应变仪被布置在日本东京周围,成为日本地震科学家拱卫东京的主力前兆仪器.

1983年~1985年,我国独立研制的TJ型体积钻孔应变仪、YRY型及RZB型分量钻孔应变仪相继通过国家鉴定验收.钻孔应变观测技术迅速发展并日益完善.

2003年,美国发表规模庞大的“板块边界观测”(Plate Boundary Observatory)计划.该计划中,钻孔应变仪与GPS一起,被大量布设在圣安德烈斯断层附近和阿拉斯加南部地区.钻孔应变观测技术与测震技术、空间大地测量(GPS、INSAR)技术一起,担负起了对地壳运动全频段信息监测的重任^[3~5].

在上述科学背景下,“十五”计划期间,中国地震局“数字地震观测网络”计划在全国布设一批YRY-4型分量式钻孔应变仪.经过项目实施单位和有关地区地震局共同努力,YRY-4分量式钻孔应变仪已在全国布设了32套,取得了一批钻孔应变观测数据.对这批台站的记录数据计算M2波潮汐因子的结果表明,应变分量的相对精度最高达到了0.001,比最好的长基线洞室应变仪精度还高.在此基础上,发现了各观测点潮汐响应(潮汐因子)的离散性及有规律各向异性现象.本文提出:地块间的断层隔离是造成各台站潮汐因子偏离理论值及方位各向异性的原因.有限元断层地块模型应变方位响应与台站实测方位响应的一致,支持了这一观点.分量钻孔应变观测获取的应变固体潮信息,有望用于地层构造及力学特性研究,监测“活动地块”间的相互作用与地震活动间的联系等领域.潮汐响应各向异性现象

还有望在地质构造研究、城市断层探测、地震烈度区划等研究领域发挥作用.也可改进GPS等空间大地测量观测数据进行潮汐位移修正,提供参考依据.

1 YRY-4型分量式钻孔应变仪的性能与指标

YRY-4型分量式钻孔应变仪是我国自主研发的仪器,是国家地震局在1980年代组织攻关研制的四种高灵敏度、高稳定性钻孔应变仪器中的一种,可同时测量体积应变和形状应变.属长圆筒径向位移式仪器.4个电容式径向位移传感器互成45°夹角,与“张衡地动仪”的八方分布相仿,呈米字形布置,安装在长圆筒的中平面上.米字形4分量布置方式可以方便地分离体积应变和形状应变.探头与地层的耦合采用水泥固结方式.

径向电容测微传感器中,由长度基准杆支撑的电容极片分为动片与定片组,分别固定在直径相对方向的筒壁上,钻孔孔径的变化使极片间隙变化,引起电容量改变.测量电路将电容量的变化转换成电压值并通过信号电缆送上地面.

传感器的通频带为0~20Hz,应变仪的记录频带包括潮汐频段,也包括了地震频段.由于数据采集与传输设备的限制,应变探头的通频带尚未充分利用.目前的记录信息主要在每分钟一个点的低频段,反映潮汐信息已经足够.

YRY-4型分量式钻孔应变仪的主要技术指标:

(1) 分辨力: 优于 5×10^{-11} .

(2) 漂移: 小于 $10^{-8}/d$.

(3) 通频带 0~20 Hz.

(4) 一次量程: 大于 5×10^{-6} 应变; 接续量程: 大于 5×10^{-5} 应变.

(5) 非线性度: $\leq 1\%$.

(6) 标定方法: 电压标定(自动), 标定重复性误差: $\leq 1\%$.

(7) 输出: 数字输出(五位半).

(8) 供电: 交流 $220 \text{ V} \pm 20\%$ 或直流12 V, 探头功耗 $< 1 \text{ W}$.

(9) 探头安装深度: 40~60 m.

2 台站情况

已安装的三十多套仪器,有的布设在地震活动较频繁的地区.如青海的格尔木台、门源台、德令哈台、湟源台、乐都台,四川的姑咱台、攀枝花台、金河台、小庙台.有的台位于地震活动相对平静地区,如江苏的江宁台、徐州台,湖北的麻城台、襄樊台,上海

的余山台,吉林的双阳台,浙江的安吉台、常山台.有的是近刚刚发生过强烈地震的地区,如辽宁的营口台.

这些台站的基岩条件,有的是坚硬完整的安山岩、花岗岩基岩,有的是较完整的花岗岩基岩,但有裂隙,有的台站是石灰岩,有的台是硬度小的泥砂岩、凝灰质砾砂岩、紫红色砂岩,还有个别台是完整性差的泥质胶结砾岩.

大部分位于西部地震活动区的台站,由于周围人烟稀少,机井抽水之类人为干扰相对较少,记录数据受到的干扰小.但一些台站吃水用机井对仪器仍有干扰.位于东部人烟稠密地区的台站,由于考虑供电、管理方便等因素,点位大都选在居民点附近,四周往往有居民户抽水机井干扰.记录数据受到机井干扰的情况较多,有的台周围机井抽水频繁,以致潮汐曲线完全无法辨认.避开居民区建无人观测站,用太阳能供电,无线网络通讯方式可能是东部地区建高精度钻孔应变观测站的一种选择.

3 记录数据与潮汐分析

应变仪安装后,很快就能记录地震传来的应变地震波.在经过安装初期头几天的稳定后,应变固体潮开始显现.图 1. 是麻城台仪器安装 20 天后,记录到的印尼 7 级地震.其上的固体潮背景已十分清晰.

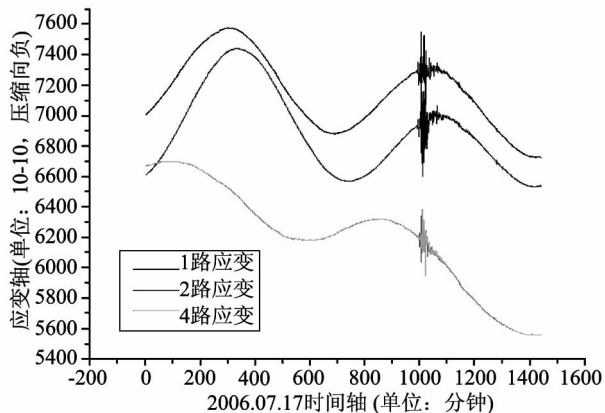


图 1 麻城台仪器安装 20 天后, 固体潮记录上的印尼 7 级地震

Fig. 1 Macheng station 20 days after installation with Indonesia M7 quake

由于仪器配置的数据采集器采样率仅每分钟一次,记录的地震波严重失真,无法作地震分析、地球自由振荡(可同时记录球型分量和环型分量!)等需要更高采样率的数据研究,目前的数据只能作固体潮波分析.

对麻城台第 2 路应变数据的调和,分析, M2 波的相对精度达到了 0.001,超过最好的山洞长基线伸缩仪的观测精度.表 1. 是调和结果.

表 1 麻城台钻孔应变第 2 分量调和结果

Table 1 Macheng station component No. 2 harmonic analysis

(经度 115.15; 纬度 31.13; 高程 95.00 M) 2006.9.1.0~2006.9.30.23 (Probe Azimuth: 42.0°)

波群名称	Q1	O1	M1	P1S1K1	J1	OO1	2N2	N2	M2	L2	S2
振幅因子	1.4584	1.4469	1.5323	0.9664	1.5038	1.3507	1.1601	1.2114	1.2133	1.1229	1.2050
M. S. E	0.0351	0.0080	0.0608	0.0080	0.0864	0.0931	0.0248	0.0060	0.0013	0.0549	0.0020
相位滞后°	-11.35	-11.79	-23.75	-8.55	-18.50	-2.45	8.26	3.00	1.37	-4.28	-2.92
M. S. E	1.38	0.32	2.27	0.46	3.30	3.94	1.22	0.28	0.06	2.81	0.09

表 2 8 个台站体应变 M2 波潮汐因子计算结果

Table 2 Tidal factor M2 wave from 8 station

台站	分量	M2 潮汐因子	M. S. E	相位滞后	M. S. E	O1/k1	O1/M2
攀枝花	体应变	0.7438	0.0060	-2.83°	0.46°	1.1694	1.0263
余山	体应变	0.7372	0.0047	33.81°	0.36°	1.1959	0.7660
门源	体应变	0.8479	0.0113	-6.08°	0.76°	1.0152	0.9893
格尔木	体应变	0.4036	0.0162	3.23°	2.28°	0.8669	2.1336
姑咱	体应变	0.1956	0.0025	8.29°	0.73°	0.9021	0.7046
江宁	体应变	0.6011	0.0153	7.60°	1.46°	0.7241	1.1085
德令哈	体应变	0.1307	0.0106	7.33°	4.66°	1.1592	0.9029
敦化	体应变	0.1691	0.0166	7.22°	5.22°	0.2940	0.7678

表 3 由实测数据算得的应变格值修正系数

Table 3 Strain sensitivity correction coefficient by measured data

	姑咱台	门源台	攀枝花台	余山台	江宁台	丰满台
1 路修正系数	1.0321	0.9740	0.9269	1.1390	1.0312	0.9758
2 路修正系数	1.0271	0.9928	1.0978	0.8663	0.9685	0.9779
3 路修正系数	0.9936	1.0416	1.0985	0.9423	1.0498	0.8998
4 路修正系数	0.9492	0.9916	0.8847	1.0675	0.9065	1.0923

表 4 攀枝花台 4 路线应变分量 M2 波潮汐因子

Table 4 Panzihua station 4 components M2 wave tidal factor

台站	分量方位	M2 潮汐因子	M. S. E	相位滞后	M. S. E	O1/k1	O1/M2
攀枝花	A -44°	0.2786	0.0047	22.64°	0.96°	0.6728	1.3041
	B 1°	0.5844	0.0026	-3.20°	0.25°	1.3613	1.0135
	C 46°	0.8228	0.0035	-1.46°	0.24°	1.4454	0.8854
	D 91°	0.2653	0.0077	0.25°	1.66°	1.0726	1.6426

其它台站 M2 波的相对精度大致在 0.005~0.08 之间. 较高的 M2 潮波精度为各台站观测数据分析对比, 提供了基础条件.

分量应变仪中两路互相垂直分量测量值之和为体积应变. 在对各台站记录的体应变固体潮数据计算 M2 波潮汐因子时, 发现各台站 M2 波潮汐因子离散性很大. 表 2. 是攀枝花、余山、门源、格尔木、姑咱、江宁、德令哈、敦化 8 个台的体应变 M2 波潮汐因子.

其中, 门源台的体应变潮汐因子最大, 达到 0.8479, 但仍小于理论值 1.0. 德令哈台的体应变潮汐因子值仅 0.1307, 只有理论值的 13%. 潮汐因子最大与最小值之比达到 600%.

对于测量基线仅 0.1 m 长, 应变灵敏度高达 10^{-11} 的分量钻孔应变仪, 要保证各路应变分量的格值准确, 技术上确有一定难度. 而且, 仪器一旦安装到井下, 就难以再复测仪器的格值. 怀疑仪器格值的准确性是必然的. 但已安装的 32 套仪器都是作者亲自在地下实验室中进行测试的, 作者以为这一批仪器格值一致性在 10% 的误差限上是有保证的, 测量结果相差达到 6 倍的差异, 需要寻找格值因素之外的原因.

4 分量仪器具有自检功能, 仪器各分量格值还可通过观测数据进行相对标定和修正^[6]. 通过对实地观测数据作格值相对标定, 除了可对仪器格值作修正外, 修正幅度的大小也在一定程度上反映了这批仪器格值数据的一致性及其可靠性.

表 3. 是按照邱泽华文中的方法, 由各台实测数

据算得的应变格值修正系数.

由表 2 可见, 各台仪器的格值, 相对误差大致不超过 10%. 但在表 1. 中, 8 个台的体应变潮汐因子的离散性达到 600% 以上. 把观测到的很大的离散性完全归结为仪器格值误差是有待进一步研究的.

进一步分析实测数据还发现, 同一台站不同分量的潮汐因子也相差很大. 说明不仅存在各台站间潮汐因子数值的离散性, 同一台站不同方向的潮汐因子还存在强烈的方位各向异性. 表 4. 是攀枝花台 4 路线应变分量 M2 波潮汐因子计算结果, 第 3 路分量比第 4 路分量的潮汐因子要大 3 倍.

钻孔中 4 路分量潮汐因子不同, 说明在仪器安装点位, 潮汐响应具有强烈的各向异性, 与均匀地球模型中各向同性响应情况相去甚远.

潮汐响应方位上的各向异性具有何种规律性呢?

为了得到仪器安装点位, 地层对潮汐响应各向异性的方位分布, 需要通过钻孔应变 4 分量计算任意方向地面应变, 再通过潮汐分析求得该方向 M2 波潮汐因子值(响应系数), 即可绘出仪器安装点位潮汐响应的方向玫瑰图.

YRY-4 型分量式钻孔应变仪探头壁厚相对较薄, 弹性筒外径、内径比仅 1.039. 弹性钢筒对应变测值的影响较小, 为简化计, 我们近似采用空孔公式处理测量数据^[7], 计算中取地层泊松比 $\nu=0.25$.

根据弹性力学分析, 在垂直方向的钻孔中, 在平面应力状态下, 地层水平平面上 A 方向的钻孔孔壁径向位移 u_A 与水平面上的地层主应力 σ_1 、 σ_2 间有

表 5 不同方向潮汐因子值 (数据因具有对称性,表中只列出了 0°~180°数据)

Table 5 Tidal factor of different directions(0°~180°)

台站方位	格尔木台	麻城台	门源台	湟源台	攀枝花台	金河台	江宁台	德令哈台
0°	0.0893	0.7883	0.2412	1.2629	0.5462	0.0223	0.4030	0.1628
20°	0.0297	0.9888	0.0829	1.0030	0.6449	0.0832	0.4947	0.1326
40°	0.0724	1.1421	0.1425	0.6075	0.6939	0.1748	0.5561	0.2081
60°	0.1458	1.1840	0.4782	0.1046	0.6502	0.3666	0.5642	0.2803
80°	0.2551	1.0037	1.1913	0.4089	0.4622	0.6377	0.6306	0.2444
100°	0.3391	0.6737	1.5645	0.7273	0.2540	0.7070	0.7603	0.2942
120°	0.2987	0.5532	1.1211	1.0704	0.2570	0.4935	0.6372	0.3888
140°	0.2329	0.5161	0.7331	1.3089	0.3221	0.2612	0.4486	0.3522
160°	0.1625	0.6032	0.4515	1.3701	0.4279	0.0943	0.3573	0.2619
180°	0.0893	0.7883	0.2412	1.2629	0.5462	0.0223	0.4030	0.1628

关系式:^[8]

$$u_A = (a/E)((\sigma_1 + \sigma_2) + 2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(A - \psi)), \quad (1)$$

E为地层杨氏模量; ψ 为主应力 σ_1 的方位.

在 $\sigma_{zz} = 0$ 情况下,平面主应力和主应变间有关系:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E(e_1 + \nu e_2)/(1 - \nu^2), \\ \sigma_2 &= E(e_2 + \nu e_1)/(1 - \nu^2), \end{aligned} \quad (2)$$

e_1, e_2 为地层水平主应变.

以(2)代入(1)式,得:

$$\epsilon_A = u_A/a = (e_1 + e_2)/(1 - \nu) + 2(e_1 - e_2)\cos 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (3)$$

若 ϵ_A 为1路应变分量测值 ϵ_1 ,则YRY-4型分量式钻孔应变仪第1、2、3、4路分量应变测值与地层水平主应变 e_1, e_2 间有关系:

$$\epsilon_1 = (e_1 + e_2)/(1 - \nu) + 2(e_1 - e_2)\cos 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (4)$$

$$\epsilon_2 = (e_1 + e_2)/(1 - \nu) - 2(e_1 - e_2)\sin 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (5)$$

$$\epsilon_3 = (e_1 + e_2)/(1 - \nu) - 2(e_1 - e_2)\cos 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (6)$$

$$\epsilon_4 = (e_1 + e_2)/(1 - \nu) + 2(e_1 - e_2)\sin 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (7)$$

由(4~7)式,可得关系并解得地面主应变 e_1, e_2 及主方向 ψ :

$$\epsilon_1 + \epsilon_3 = \epsilon_2 + \epsilon_4 = 2(e_1 + e_2)/(1 - \nu), \quad (8)$$

$$\epsilon_1 - \epsilon_3 = 4(e_1 - e_2)\cos 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (9)$$

$$\epsilon_2 - \epsilon_4 = -4(e_1 - e_2)\sin 2(A - \psi)/(1 + \nu), \quad (10)$$

$$\psi = A - [\text{tg}^{-1}(\epsilon_4 - \epsilon_2)/(\epsilon_1 - \epsilon_3)]/2, \quad (11)$$

地面某方向 Φ 应变 e_Φ 可由地面主应变 e_1, e_2 及主方向 ψ 确定:

$$e_\Phi = (1/2)(e_1 + e_2) + (1/2)(e_1 - e_2)\cos 2(\Phi - \psi), \quad (12)$$

由(12)式,我们计算了格尔木台、麻城台、门源台、湟源台、攀枝花台、盐源金河台、江宁台、德令哈台8个台不同方向潮汐响应系数(表.5)

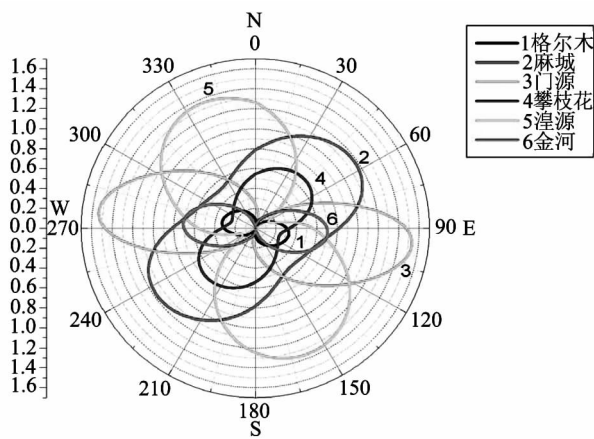


图 2 格尔木、麻城、门源、攀枝花、湟源、金河 6 个台潮汐应变方位响应图

Fig. 2 Tidal strain directional responses of Geermu, Macheng, Mengyuan, Panzhihua, Huangyuan, Jinhe station

图 2 是格尔木、麻城、门源、攀枝花、湟源、金河等 6 个台应变响应的方位分布,具有明显的各向异性.按照均匀弹性地球理论模型,应变响应应该是各向同性的,为何实际的应变响应却具有明显的各向

异性?

格尔木台位于柴达木盆地边缘,盆地与昆仑山交界断层为北西西—南东东走向,正与该台应变响应的长轴方向平行.攀枝花台西北方向,距台站 15 公里处有一条北偏东 30°的断层,断层的走向和方位响应的长轴方向一致.门源台地处大坂山断裂北 15 公里,祁连山断裂南缘,该台应变响应的长轴方向与断裂也大致平行.麻城台地处秦岭—大别造山褶皱带东段,西侧的麻城—团风地震构造断裂带距离台站约 5 公里远,该断裂带走向北北东向,该台应变响应的长轴方向与断裂走向平行.在马杏垣主编的“中国及邻近海域岩石圈动力学图”上,湟源台附近有一条北西—南东向的走滑逆断层,与湟源台应变方位响应图的长轴方向大致平行^[9].

由此看来,正是断层阻断了潮汐应变的传递路径,与断层平行方向的潮汐应变却基本不受影响,这就造成了潮汐响应的各向异性.

认为各个台站的仪器应该记录到与理论值一致的、各向同性的潮汐因子是基于均匀弹性地球假定.其实,地球表面到处是深度达到数公里到数十公里的断裂.按照地质学家的说法,中国大陆是由若干“活动地块”拼接成的.除了数十公里深处的上地幔和下地壳在巨大地层压力作用下可大致看作连续介质,上层地壳更接近于若干不连续块体的拼合体.安装在各个“活动地块”上的钻孔应变仪,接收到的潮汐应变来自地块底部传上来的部分和相邻地块通过断层接触,衰减后传来的潮汐应变两部分之和.若安装仪器靠近的断层刚有过活动,断层还没有被充填和“焊接”,与断层走向垂直方向的分量就可能完全不能接收到潮汐应变,M2 波的潮汐因子就会特别小.2001 年的昆仑山 8 级地震,使地块已完全“松动”,断层之间还未能充填与粘结,断层的隔离作用十分彻底,因而格尔木台与断层垂直方向应变分量的潮汐因子特别小,仅 0.03,而且长轴方向的潮汐因子值也只有 0.34.处于地震活动相对平静的麻城台,潮汐因子最小值仍有 0.51,长轴方向的潮汐因子值则达到了 1.20.

4 断层阻挡效应的有限元模型

由于断层的解耦作用,来自与断层垂直方向的潮汐应变将被断层阻挡.因此,安装在断层附近的钻孔应变仪对不同方向的潮汐响应必然不同.为验证断层对应变的阻隔作用,我们对一有垂直断层的有限元地层模型,计算了断层旁侧点位对不同方向应

变传递的响应.并通过模型与实测结果比较,来确定上述潮汐因子各向异性系断层对潮汐作用阻挡的假设是否成立.

图 3 是断层旁距断层 L/5 距离点位处,计算应变传递影响的有限元模型.此模型中,外加应变沿 X 轴方向,与断层交角为 45°.分别计算不同交角的传递系数,得到断层旁 L/5 距离点位处应变传递系数随加载方位随断层交角的变化曲线.(图 4)用极坐标表示,就得到应变传递系数随断层交角变化的方向玫瑰图.(图 5)

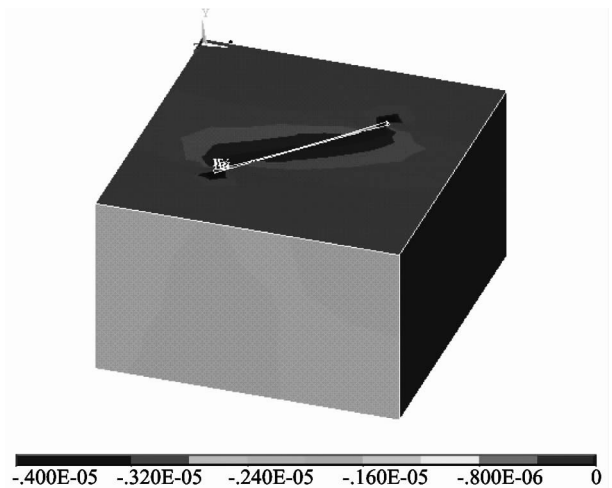


图 3 计算应变传递系数随断层交角变化的有限元计算模型

Fig. 3 Finite element computation model of strain transmittance along with changing fault cross-angle

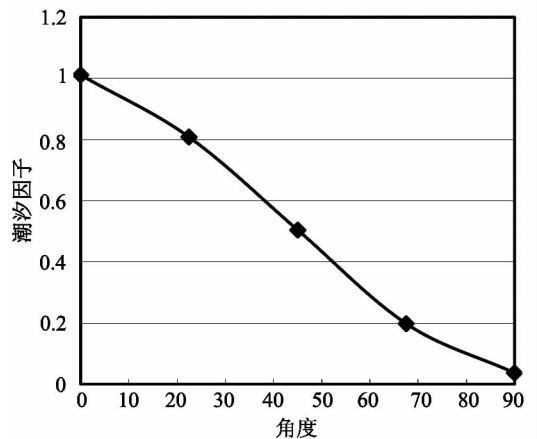


图 4 断层旁 L/5 处某点应变传递系数随加载方位的变化曲线

Fig. 4 L/5 of fault strain transmittance with changing loading direction

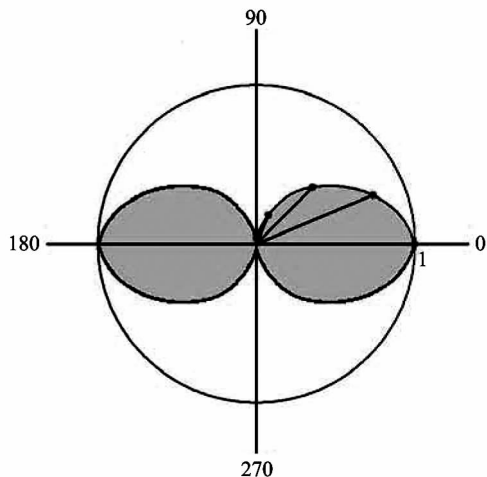


图 5 应变传递系数的方位玫瑰图，最大响应方位与断层方位平行

Fig. 5 Strain transmittance rose diagram, the biggest response position and the fault position are parallel

从有限元模型计算结果看，断层旁侧点位对潮汐响应的各向异性方向玫瑰图与格尔木、门源、湟源、金河等台实测的潮汐响应方向玫瑰图形状一致，说明台站附近断层的阻挡是各台站潮汐因子偏离理论值及方位各向异性的主要原因。

地球表面到处都是断裂，有的台站附近有多条交叉的断层，有的断层已有物质填充，粘结程度各不相同，应变传递受到阻挡的情况更复杂。图 6、图 7 是江宁台和德令哈台的方位响应图，显示了不同方向多条断层的影响。

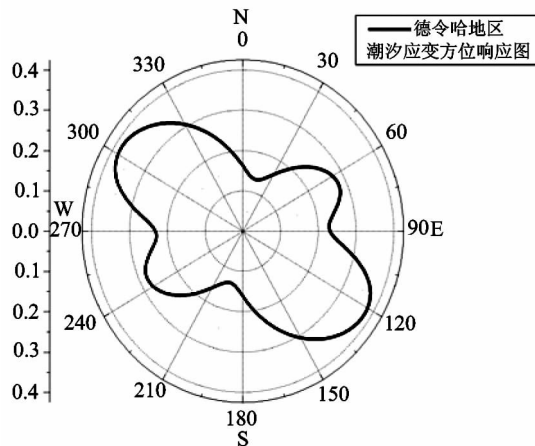


图 7 德令哈台应变方位响应图

Fig. 7 Delingha station directional response

对形变类仪器潮汐因子的计算与分析已进行多年，很早就发现各个台站，仪器实测的 M2 波潮汐因子的离散性很大，与理论值相差很远。而且，同一测点不同测向的潮汐因子也各不相同。

唐九安编的“中国大陆固体潮数据中心”材料中，对 126 台套应变类仪器（体应变、洞室应变、分量应变）记录数据计算 M2 波从大到小的排序，M2 波潮汐因子最大达到 7.77，最小为 0.07（有的甚至为 0），大与小的比达到 100。^①

由于大部分洞室应变仪只有东—西，南—北向两个分量，无法计算地面任意方位的应变，也由于分析研究人员与仪器制造人员间缺乏交流与沟通，潮汐因子为何有如此大的分散性，很多情况下被分析研究人员归于“仪器格值不准”，研究人员错失了寻找实测数据与理论间巨大偏差背后物理机制的机会。这次“十五”中国数字地震观测网络一次布设了数十台同型号的多分量钻孔应变仪，终于解开了“潮汐因子离散性及方位各向异性”之谜。

5 结 语

固体潮是目前地球科学中唯一能被精确计算的作用于地球的外加作用。利用这种天然的外加作用可以帮助我们探测地层介质的构造与特性。潮汐应变观测有望在地质构造研究、城市断层探测、地块活动微动态、地震烈度区划等研究领域发挥作用^[10]。在空间大地测量(GPS, VLBI, SLR)的数据处理中，固体潮

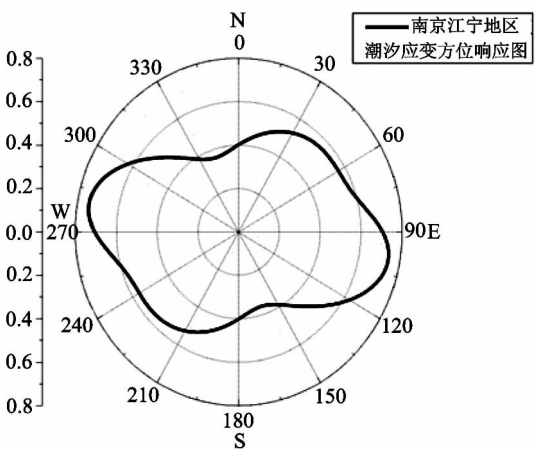


图 6 江宁台应变方位响应图

Fig. 6 Jiangning station directional response

①内部报告：唐九安，中国固体潮观测数据库建设及共享服务（科技报告），中国地震局兰州地震研究所，2006 年 2 月

位移是最重要的摄动因素^[11].但以往的固体潮位移校正均是对无断层均匀地球模型进行的,应变是位移对方向的导数,既然断层的存在会对地层应变产生如此大的影响,高精度空间大地测量数据仅按均匀地球模型不考虑测点处断层影响所作的位移校正必然严重失真.本文揭示的事实对空间大地测量观测数据作潮汐位移修正的现有方法,提出了异议和改进的方向.

前言中曾提到李四光“地应力观测”地震预报科学思路.李四光过世后,“地应力观测”地震预报科学思路发展迟缓.直到2003年美国提出“板块边界观测”计划,钻孔应力、应变观测才重新引起关注.但钻孔应力、应变观测真正的潜力并未被充分认识.我国地球科学家提出了“大陆动力学”、“活动地块”等深入探索我国大陆地震成因的研究设想,主要依靠的是GPS空间大地测量手段.从李四光的开拓性工作至今,钻孔应力、应变观测的分辨力已达到 10^{-11} (应变标度),而GPS观测手段测量点上应变的分辨力仅 $10^{-6} \sim 10^{-7}$.加上在观测频带宽度上的优势,钻孔应力、应变测量可以观测到的固体潮、“活动地块”活动的微动态等现象,GPS手段是绝难观测到的.

通过在“活动地块”上及周边布设钻孔应力、应变观测网络,我们将能找到作用在地块上“地应力有关的性质、特点以及作用方式和变化规律……看出这种变化与地震之间的内在联系”.结合测震、空间大地测量等新观测技术,最终“对地震发生的地点、时间、频度和强度作出科学的判断”^[1,12].李四光的“地应力观测”地震预报科学思路将在新的观测技术基础上得到新的发展.

[作者注] 潮汐调和与分析采用骆鸣津、顾梦林、李安印的HAETR.EXE程序计算.为检验计算公式及程序的正确性,先用固体潮理论值计算程序TVPN.EXE,计算出某一经、纬度,钻孔中互成 45° 角,米字型布置的4个钻孔应变理论值数据(数据长度一个月)后,代入根据钻孔应变4分量计算地面任意方向 Φ 的线应变 e_Φ 的(12)式计算程序,算出地面某方向的线应变固体潮理论值 e_Φ .再用HAETR.EXE调和与分析程序,计算数据长度一个月的 e_Φ 的

M2波的潮汐因子.计算结果是,由此导得的地面任意方向线应变M2波的潮汐因子都为1.000,说明理论上,潮汐响应是各向同性的.计算公式和程序也得到了检验.

致 谢 压容式钻孔应变仪(应力—应变地震仪)从1978年国家科委立项,研制、试验、鉴定到扩大试验与不断改进的30年中,得到傅承义、顾功叙、秦馨菱、王仁、曾融生、陈鑫连、许厚泽、陈运泰、张奕麟、高龙生、骆鸣津、郝钦文、苏恺之、蔡惟鑫等专家学者的帮助和支持.在实地试验研究中,又得到地震系统包括台站许多同志的热情帮助,他们是:柴保平、徐树心、王炜、徐平、唐九安、高法成、高荣胜、朱国成、薄万举、刘厚明、王勇、张海春、荣英华、寿海涛、林锦南等同志,作者在此对他们表示衷心的感谢.

参 考 文 献 (References):

- [1] 李四光.论地震[M].北京:地质出版社,1977.
- [2] Sacks I S, Evertson D W. Sensitive borehole strain-rate meter [J]. Carnegie Inst, Washington Yearb, 1971 (68): 448~453.
- [3] <http://www.unavco.ucar.edu/community/publications/proposals/PBOwhitepaper.pdf>.
- [4] 张宝红.美国的板块边界观测(PBO)计划[J].大地测量与地球动力学,2004(3):105~108.
- [5] 周硕愚,吴云,李正媛,杜瑞林.形变大地测量学的进展、问题与地震预报[J].大地测量与地球动力学,2004(4):95~101.
- [6] 邱泽华,等.四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J].大地测量与地球动力学,2005,1:118~122.
- [7] 苏恺之.地应力测量方法[M].北京:地震出版社,1985:59~65.
- [8] 潘立宙,测量地应力的钻孔变形法[A].见:中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队编,地应力测量的原理和应用[C].北京:地质出版社,1981:1~47.
- [9] 马杏垣,中国及邻近海域岩石圈动力学图[M].北京:地质出版社,1986.
- [10] 吴子泉,刘元生,刘保金,等.地球物理方法在城市地震活动断层精确定位中的应用[J].地球物理学进展,2005,20(2):528~533.
- [11] 张捍卫,郑勇,赵方权.固体潮对测站位移影响的理论研究[J].大地测量与地球动力学,2003,3:98~103.
- [12] 赵文津.中国大陆动力学研究进展——纪念中国地球物理学会成立60周年[J].地球物理学进展,2007,22(4):1113~1121.