

垂直应变的研究意义及模型分析

杨江, 杜为民

(中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071)

摘要:近20多年来国内垂直应变领域一直无人涉及。垂直应变量的获取可将应变固体潮从平面应变观测提升到三维空间应变观测。本文说明了垂直应变观测的必要性,建立了垂直应变观测系统的原始模型,并提出了研制的难点和理论上的解决方法。

关键词:垂直应变; 固体潮; 空间应变观测; 张量矩阵; 垂直应变系统

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)04-0355-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.04.0355

The Research Significance and Model Analysis of Vertical Strain

YANG Jiang, DU Wei-min

(Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China)

Abstract: In nearly 20 years, the vertical strain field has been neglected in China. The vertical strain can promote the strain observation caused by earth tide from plane strain to the three dimensional space. In this paper the research necessity of vertical strain observation is explained, and the initial model of vertical strain observation system is built. The research difficulties and its theoretic solution are put forward also.

Key words: Vertical strain; Earth tide; Space strain observation; Tensor matrix; Vertical strain system

0 引言

我国自20世纪80年代研究过一段时间垂直应变仪后,近20多年来垂直应变领域一直无人涉及。垂直应变仪可取得垂直向的地壳应变观测资料,将应变固体潮从平面应变观测提升到三维空间应变观测,从而将某一点的平面应变张量矩阵扩展到三维空间应变张量矩阵。垂直应变量的获取将为地震预报研究和地球动力学研究提供基础分析资料。

在上世纪80年代,比利时布鲁塞尔皇家天文台曾在卢森堡的瓦尔老当地球动力学实验室安装了一台垂直向伸缩仪。该仪器的基线长3 m,采用LVDT类型的位移传感器进行测量,电气噪声水平小于0.01 μm ,在石英基线杆中间零界约3 mm范围内线性度大于0.25%,并对观测结果进行了调和分析。日本在靠近京都逢板山台站的山洞安装了6个方向的应变仪,其中3个为水平分量,2个倾斜分

量,1个垂直分量。由于种种原因,上述两处的垂直向与倾斜向先后停测。近年来国际地球动力学研究中,对于地壳的垂直运动多采用定点的GPS与绝对重力仪定期的联合观测来进行研究,这都是大尺度的,如喜马拉雅山的隆起等。小尺度的垂直应变测量在国际上报道的不多,而国内是空白,值得进一步探索研究。

1 垂直应变研究意义

垂直向地壳应变观测资料十分重要,例如在2008年5月12日四川汶川8.0级大地震前,国土资源部地质力学所、北京地层环境检测所与清华大学在西藏拉萨附近的曲水设立了一个70 m深的深井地下水位、水温与应力监测系统,观测数据利用北斗一号卫星进行传输。作为地壳深部形变放大器的井

收稿日期:2012-03-30

作者简介:杨江(1980-),男,湖北来凤人,硕士,工程师,从事形变观测技术的研究。

水位动态数据显示,从2008年2月1日开始,汶川大震前3个月时间内井水位逐步下降了2.307 m,震后8小时上升了37 mm,然后是波动式下降。井水位观测数据表明,在汶川大震前青藏高原处于膨胀状态。震后地形观测资料亦证实了震区龙门山地块的隆起^[1]。在现有水平应变观测的基础上只有增加垂直应变观测才能监测到地块的涨缩信息,垂直向应变的研究对于取得与研究地壳三维应变状态以及用于地震监测具有科学和实践意义,同时其亦是对线应变观测手段的一种补充与完善。

汶川大地震为逆冲、右旋、挤压型断层地震。在汶川地震的观测资料中重力仪所反应的异常大于水平应变仪所反应的异常,也就是说此种类型的地震在垂直向上的反应要比水平方向上的反应强烈的多,这在以前的地震异常记录数据中是十分少见的,也正是我国前兆形变观测所欠缺的。

2 地壳应变理论分析^[2-3]

根据弹性力学理论,在均匀地壳介质中应变张量矩阵有6个分量,在地表就减少到3个分量,在地表沿3个不同方向进行应变观测就可求出该点处的2个主应变 ϵ_1 与 ϵ_2 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$)及 ϵ_1 与 x 轴向夹角 θ ,根据 ϵ_1 、 ϵ_2 与 θ 就可计算出与 x 轴夹角为 α 方向上的线应变 ϵ_α 与剪应变 γ_α :

$$\epsilon_\alpha = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)\cos 2(\alpha - \theta) \quad (1)$$

$$\gamma_\alpha = \frac{1}{2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)\sin 2(\alpha - \theta) \quad (2)$$

从而可得到在笛卡尔平面向直角坐标系中在地表应变的张量矩阵:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

利用这种思路,从上世纪90年代至本世纪初我国已经在全国多个地震台站开挖了形为直角三角形的山洞应变观测室,可分别在2个直角边和1个斜边上安装伸缩仪,进行应变固体潮观测。1994年刘序^[3]根据姑咱台这3个方向上的1991年7—8月的伸缩仪观测资料,计算得到了姑咱台应变固体潮平面应变的整点值主应变及主方向曲线图,并计算得到了整点值剪应变值,由观测值计算的剪应变值与其理论几乎完全一致。根据主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 与主方向 θ 就可按式(1)与式(2)求出 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 与 γ_{xy} ,由此就可得到该点处的平面应变张量矩阵。

该应变张量矩阵包含了该点处平面上的所有应

变信息,但不能反映该点处的空间应变信息。要想得到该点处的三维空间应变信息,除在 XY 平面上的3个不同方向进行应变观测外,还须在垂直方向和其他3个方向布设应变仪进行观测,只有在空间6个不同的方向上进行应变观测,才能确定三维应变张量矩阵:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & \epsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

设方位角为 α_i 的方向余弦分别为 l_i 、 m_i 、 n_i , $i=1, 2, \dots, 6$; α_i 方向上的应变观测值为 ϵ_i ;则有

$$\epsilon_i = l_i^2 \epsilon_{xx} + m_i^2 \epsilon_{yy} + n_i^2 \epsilon_{zz} + m_i n_i \gamma_{yz} + n_i l_i \gamma_{xz} + l_i m_i \gamma_{xy} \quad (5)$$

由6个应变观测值 ϵ_i ,就可求出式(4)中的6个应变分量,然后根据下面的三维应变张量矩阵的特征值方程就可求得3个主应变值 ϵ_p ($p=1, 2, 3$):

$$\begin{vmatrix} (\epsilon_{xx} - \epsilon_p) & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & (\epsilon_{yy} - \epsilon_p) & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & (\epsilon_{zz} - \epsilon_p) \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

并可通过下式求出特征值 ϵ_p 相应的3个特征向量 $\vec{\alpha}_p = \alpha_{p1}i + \alpha_{p2}j + \alpha_{p3}k$,即主方向值:

$$\begin{pmatrix} (\epsilon_{xx} - \epsilon_p) & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} & (\epsilon_{yy} - \epsilon_p) & \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & (\epsilon_{zz} - \epsilon_p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{p1} \\ \alpha_{p2} \\ \alpha_{p3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据弹性力学理论,一点处的体应变 Δ 为

$$\Delta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (8)$$

由于主应变与坐标的选择无关,因此体应变 Δ 为一个几何不变量。同时根据应变张量矩阵 ϵ ,我们可求出该点处任意方向上的线应变,设该方向 ξ 相对于该点处的单位活动标架的单位向量为 ϵ_ξ ,则该方向上的线应变 ϵ_ξ 可由

$$\epsilon_\xi = \epsilon_\xi \epsilon_\xi^T \quad (9)$$

求出。式中 T 表示转置。又设 η 为该点处另一方向,其相对于该点处的单位活动标架的单位向量为 ϵ_η ,那么 ϵ_ξ 与 ϵ_η 两个单位向量所构成的角度变化量(角应变)可由

$$\epsilon_{\xi\eta} = \epsilon_\xi \epsilon_\eta^T \quad (10)$$

求出。若 $\epsilon_\xi \perp \epsilon_\eta$,则 $\epsilon_{\xi\eta}$ 即为 ϵ_ξ 与 ϵ_η 所构成平面上的剪应变。

因此,得到垂直方向以及其他3个倾斜方向的线应变观测值,我们才能确定地壳中某一质点处的全部应变状态。当取得垂直向的应变变量后,其他三

个倾斜方向上的剪应变可以理论推导得到,也就是说垂直应变是获取地壳三维应变不可或缺的观测量。

3 垂直应变观测系统及分析

垂直应变观测系统及其与岩体的耦合要求相对于现有的水平应变观测更高,也更复杂。垂直应变获取的最直接方法是采用垂直应变仪进行长期、连续观测。

3.1 系统的建立

垂直应变仪应布设于山洞中浅孔中,孔底基岩作为仪器的固定端,孔顶基岩作为仪器的测量端。图1为垂直应变观测系统安装示意。在山洞内打一个浅孔,深度为2~4 m,在钻孔安装管状的基线,与基线相连的底座与钻孔底部的基岩耦合相连,传感器的活动部分与孔顶的基线相连,传感器的固定部分安装在支架上,支架与孔顶的基岩耦合连接。当孔顶与孔底之间基岩应变时,传感器的输出信号发生变化,信号通过电缆传输至仪器观测室的主机,再进入IP数据采集控制器进行数据采集和IP网络通讯传输。标定装置用于定期对仪器进行标定。

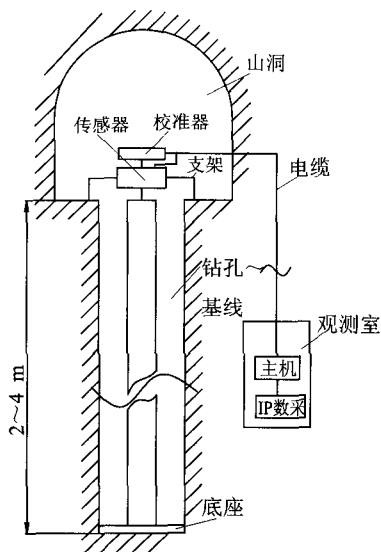


图1 垂直应变系统安装模型

Fig. 1 the install model of vertical strain system.

为了满足垂直应变的观测要求,垂直应变仪需要达到的主要技术指标有:最大允许误差(固体潮频段): $\leq 1 \times 10^{-8}$;分辨力: $\leq 2 \times 10^{-9}$;量程: $\geq 5 \times 10^{-6}$ 。

3.2 需解决的问题

垂直应变观测的要求相对于水平应变观测更为严格,需要解决下述技术问题。

(1) 洞体空腔效应对垂直应变测量的影响

垂直伸缩仪的安装场地选择在形变台站山洞中,洞体空腔效应主要表现为温度和气压对仪器的影响。从记录资料得知山洞的日温差小于 0.01°C ,年温差小于 0.5°C ,仪器基线材料选择含铌特种因瓦管,其线膨胀系数约为 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,对于记录形变资料而言其温度影响可以忽略不计。

根据水平应变长时间观测经验,气压变化是长周期地震仪器大周期波动的主要原因。罗少聪等^[4]利用弹性地球负荷理论和流体静力学平衡假设条件下的干空气及其垂直温度梯度分布,理论计算了大气压力作用下地表位移、重力和倾斜格林函数,认为大气效应弹性项影响主要来自于远离台站的区域,引力项对重力的影响主要来自于台站近区,对倾斜的影响来自于远离台站的区域。气压对地震观测资料的影响可以归结为两个原因:气压引起大气浮力的变化而改变系统平衡;气压的载荷效应引起的地壳形变。

通过对新疆库尔勒台伸缩仪2006年1月27—31日5天的伸缩和气压观测整点值数据资料分析。伸缩和气压观测整点值数据通过高通滤波分别提取高频信息,分析其相关性。该时间段气压波动幅度达到800 Pa,相应的应变量高频波动幅度也达到了 3×10^{-8} 。伸缩观测数据变化与气压变化的相关系数的均值分别达到0.95、0.89^[5]。因此气压影响并不可忽略。本方案中拟采用气压补偿的办法来修正记录数据,即设置单独的高精度气压计获取气压资料,在后期数据处理中进行气压修正。

(2) 半自由状态因瓦管的弦模振动对仪器分辨力的影响

为了减小基线的弦膜振动影响,垂直应变仪采用短基线结构,并且基线材料选用因瓦钢管,以便提高其强度。基线长度选择是最为重要的影响因素。基线长,检测信号大,信噪比增加,但机械探头系统时间常数太大,高频信号容易缺失,并且基线安装技术难度增大,成本增加;基线短,检测信号小,信噪比减小,而且受基岩局部影响大。根据多年水平应变测量的经验,选择基线长度为2~4 m比较合适。因瓦钢管外径为30 mm,壁厚5 mm,在其长度为2~4 m的情况下,弦膜振动的影响可忽略不计。

(3) 仪器底座及支架与基岩的耦合问题及导向装置

由于垂直应变仪安装于现有的形变观测山洞中,故选址条件均比较良好,底部基岩一般比较完

整。打孔 2~4 m, 如果孔直接打到基岩处, 则利用水泥浇筑将仪器底座和基岩直接固死; 如果尚未到基岩处, 则插入钢筋至基岩处, 然后在此基础上浇筑水泥墩, 保证仪器底座和基岩完全耦合。

为保证基线只在垂直方向上受力和运动, 需要利用支架为其设计导向机构, 保证基线单自由度运动方向并尽可能降低导向机构与基线之间摩擦力的影响。

(4) 新型传感器的研制

除了在仪器结构和环境因素上的考虑外, 测量端的位移传感器需要保证更高的测量精度。为了保证仪器在 2~4 m 基线情况下能清晰记录到垂直向固体潮汐, 传感器分辨力应小于 $0.001 \mu\text{m}$, 量程 $\geq 40 \mu\text{m}$ ^[6]。目前台站水平应变测量正在使用的差动变压器的精度约为 $0.01 \mu\text{m}$, 不能满足测量要求。

为了获得更高的测量精度, 传感器拟采用差动式电容传感器, 需要解决的问题主要包括: ①电容极板的工艺处理: 由于测量精度要求很高, 对电容极板的表面处理要求就十分严格, 拟采用传统研磨方式加工基面, 超声波加工工作面, 最后激光刻线的方法来实现。②电容传感器的密封要好。山洞的潮湿环境是影响其测量精度最为主要的一个原因。

除此以外, 观测系统还需要考虑标定装置、数据采集传输、防雷、后期数据处理等一系列问题。一套完整的垂直应变观测系统应该是一个不断创新、完

(上接 341 页)

也听取了很多建议; 审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见; 台站的加速度记录数据由四川省地震局台站管理中心的赖敏老师提供。在此一并向他们表示衷心的感谢!

[参考文献]

- [1] 卢大伟, 姚凯, 闵祥仪, 等. 兰州观象台存放台阵汶川 $M_s 8.0$ 强震动记录与分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 171-176.
- [2] 姚家骏, 杨立明, 冯建刚. 常用时频分析方法在数字地震波特征量分析中的应用[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 105-110.
- [3] 李大虎, 何强, 李才明, 等. MATLAB 与 C++ 混合编程实现航磁异常提取的小波分析方法研究[J]. 地震研究, 2011, 25(2): 98-105.
- [4] 武安绪, 吴培稚, 兰从欣, 等. Hilbert-Huang 变换与地震信号的时频分析[J]. 中国地震, 2005, 21(2): 207-215.
- [5] 公茂盛, 谢礼立, 连海宁, 等. 基于 HHT 的结构强震记录分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 24-29.
- [6] Z Wu, N E Huang. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J].

善、实验的过程。

4 小结

垂直应变的研究需求是迫切的, 其理论研究已经很成熟, 但在国际上和国内却很少有相关的观测系统。本文主要从理论上给出了三维地壳应变观测的需求, 建立了垂直应变观测系统的初始模型, 讨论了观测系统研制过程中需要注意的问题和理论上的解决方案, 有待后续工作进一步完善和验证。当然一套完整的观测系统的研制面临的问题依然很多, 希望以此文为契机, 逐步深入垂直应变系统的研究填补国内在此观测领域内的空白。

[参考文献]

- [1] 罗腾, 白征东, 过静珊, 等. 基于北斗卫星系统的地质灾害监测系统在西藏地下水位和地应力监测中的应用[J]. 工程勘察, 2011, 39(2): 78-80.
- [2] 刘序俨, 李平, 张雁滨. 垂直应变固体潮理论值计算及其调和和分析[J]. 地壳形变与地震, 1989, 9(4): 46-50.
- [3] 刘序俨, 黄声明, 梁全强. 正交曲线坐标系的应变张量转换[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(2): 71-76.
- [4] 罗少聪, 孙和平, 徐建桥. 大气变化对位移、重力和倾斜观测影响的理论计算[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1288-1294.
- [5] 张文来, 罗宏江, 苏萍. 气压变化对 SS-Y 伸缩仪观测日变曲线的干扰分析[J]. 内陆地震, 2006, 20(3): 266-270.
- [6] 吕宠吾, 孙亚强. SS-Y 型短基线伸缩仪及其标定装置[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(3): 82-88.
- [7] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1: 1-41.
- [8] 李大虎, 赖敏, 何强, 等. 基于聚类经验模态分解 (EEMD) 的汶川 $M_s 8.0$ 强震动记录时频特性分析[J]. 地震学报, 2012, 34(3): 350-362.
- [9] Rilling G, Flandrin P, Gonc P, et al. On empirical mode decomposition and its algorithms[A]// IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, NSIP-03 [C]. Grado, Italy; IEEE, 2003: 1-5.
- [10] Flandrin P, Rilling G, et al. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Process, 2004, 11: 112-114.
- [11] Akiyama H. Earthquake-resistant design for building[M]. Tokyo, Japan; University of Tokyo Press, 1985.
- [12] Kamamra H, Galambos, Theodore V. Earthquake loads structural for reliability[J]. J. STRUCT. ENG-ASCE, 1989, 115(6): 1446-1462.
- [13] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(10): 1186-1194.