

改进水管倾斜仪、洞体应变仪的布设结构获取大地形变真实信息

李嘉昕, 任忠, 邱雪辉, 范雷彪

包头市地震局, 内蒙古 包头

收稿日期: 2023年5月21日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

本论文分析了现行地壳形变观测方法中存在的弊端, 给出了一体化观测改进方案。具体方法是将现行的水管倾斜仪、洞体应变仪的分离式布设结构改为由两仪器组合而成的三角形结构面, 通过对两套仪器三分量的一体化观测, 可获取观测面受大地形变所产生的地倾斜和应变物理量, 有效提高地壳形变观测的预报效能。

关键词

地壳形变观测, 地震预报, 一体化观测, 压力传感器

Improving the Layout Structure of Water Pipe Tiltmeter and Tunnel Strain Gauge to Obtaining Realistic Information of Large Terrain Transformation

Jiaxin Li, Zhong Ren, Xuehui Qiu, Leibiao Fan

Baotou Seismological Bureau, Baotou Inner Mongolia

Received: May 21st, 2023; accepted: Jun. 22nd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

This paper analyzes the drawbacks of current crustal deformation observation methods and provides an integrated observation improvement plan. The specific method is to change the separated layout structure of the current water pipe tiltmeters and cave strain gauges to a triangular structural plane formed by the combination of two instruments. Through the integrated observa-

tion of the three components of the two sets of instruments, the ground tilt and strain physical quantities generated by the large terrain deformation on the observation surface can be obtained, effectively improving the prediction efficiency of crustal deformation.

Keywords

Deformation Observation, Earthquake Prediction, the Integrated Observation, Pressure Sensor

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

现行台站运行的水管、伸缩仪均采用的是两分量分离交叉式布设结构[1] [2], 在经过几十年的运行实践后, 我们逐渐发现此法的观测结果往往伴随有一些难以解释的现象存在:

1) 我国开展前兆观测 30 多年来, 积累了大量的观测数据, 也成功地预报了一些地震[3]。但也存在这种情况, 在距观测台站很近的地区发生中、强地震发生前, 台站的地壳形变数据没有明显变化特征。例如 2020 年 10 月 16 日包头 3.8 级地震、2021 年 1 月 23 日鄂尔多斯 3.8 级地震, 均发生在台站附近, 震感强烈。

2) 同一仪器的不同分量间缺失关联性。许多台站都出现过某一单分量观测数据出现了大幅度拐点变化, 而另一分量却没有任何变化。此现象无法对应大地地壳形变是一个整体性的特征。

3) 同分量上的两套仪器缺少对应性。比如伸缩仪某分量出现较大应力应变数据变化, 而与其同位置处的水管仪却没有出现明显的倾斜变化特征。用应力是产生倾斜的根源这一基本概念来解释此现象显然行不通。

面对上述三种现象, 笔者分析原因是我们在仪器布设中忽视了刚性体与柔性体间的差异性, 用刚性体的理念来衡量、判定柔性体条件下的不对称观测效果, 必然导致设想与现实不一致的局面。在刚性体条件下, 确定出两交叉线的变化就可推断出一个面的变化, 而要确定线的变化, 只要能确定其中两点的信息即可, 据此形成了我们现今的布设结构。而在柔性体条件下, 某一单个点与邻近点间它们是以独立、不确定性关系存在的, 即使我们能获取到任意两点的信息, 但不能完全认定它们间就必然存在有连接关系, 更不可能找出其中的具体关联性。在普通的低精度观测中我们可以认定大地是个刚性体, 而地震观测采用的是高精度仪器, 其获取的信息是地下微弱信号的变化量, 此时大地地壳形变特征与柔性体的变化形态相符合, 因此以柔性体状态看待大地地壳形变观测条件才贴合实际。

笔者提出这样的分析意见是依据两个简易实验现象而来, 实验 1, 在一滩黏度较强的泥浆上, 分别插入四根火柴棍, 两火柴棍间搭接一条软线并让两条软线呈相互交叉状态。当泥浆缓慢蠕动时我们会发现: 四根火柴棍的初始位置会发生变化, 两软线间的松紧度也有变化, 与此同时其相互间的夹角也再发生变化。此时即使我们能获取到各点的信息状况, 却给不出任何结论, 因为它们间没有任何内在关联性, 无法建立起一个数学计算模型, 更不能用这些信息概括出泥浆真实的移动轨迹和形态。实验 2, 同样备一份泥浆, 让泥浆沿代有转弯的缓坡缓慢的滑动, 用三根木条做成一个三角框架, 框架的三个点都呈绞接状态可转动, 在三个绞点下置三根刚钉将三角形框架插入泥浆中, 同时在框架上置一纸片, 纸片中央位立一根火柴棍(位于三角形的中心位)。在泥浆缓慢蠕动时我们会发现火柴棍的倾斜角度发生了变化; 框

架的三个夹角也发生了变化。由于框架是个设定体其具有内在的关联性，在知道三个角度和火柴棍的初始及变化情况后，就可以为其建立起相应的数学模型，从而大体地推断出泥浆的变动状况和趋势走向。通过实验 1，说明用柔性体理念看待现行观测中所存在的现象，能够合乎逻辑解释通其产生的原因。因为各观察点所反应出的信息都属独立存在的其并不直接反应地下信息，依赖这些信息极易被表象所困扰从而丢失捕捉地下真实信息的目的。通过实验 2 证明在柔性体条件下，只有采用框定办法获取到的信息才能勾勒出大地地壳形变的体貌特征。

2. 面观测方式的布设结构

先设立一个中心观测点位 O，在中心点位插入地下一根直径 5 cm 的钢棒。让伸缩仪呈三基线状，对 O 点实施布设，伸缩仪的三个固定端须与钢棒相接，活动端均设在外延处(参见图 1)。

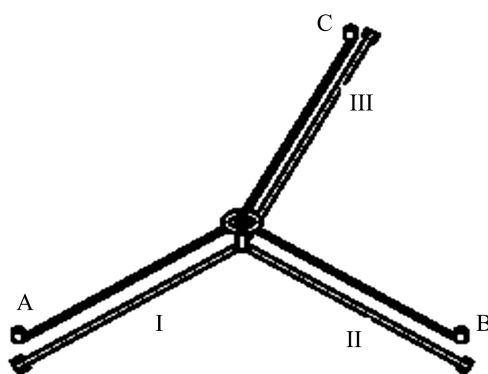


Figure 1. Layout structure of surface observation method
图 1. 面观测方式的布设结构

水管仪以一个圆环接三根水管形成三联通状，在三台水管仪的钵体底部开孔并置压力传感器。为钵体底部安装压力传感器是因为在组合体中三钵体中的任一浮子所记录到的电压值，是其余两钵体液面对其形成的变化值，而非它自身变化情况的真实体现。为了记录三点的各自的倾斜变化，特需配置压力传感器，通过压力值就能知道每个钵体水位的累积过程，由该值就可推算出该点是处在抬升或下降状态，进而可确定出观测面所呈现出的倾斜变化状态。

3. 框定面观测可获取的信息

在框定面观测中，水管仪的三个压力传感器实质上就相当于在三角形平面内安放的三个水平仪，了解到三个水平仪的不同变化就知道了这个平面三点的倾斜状态。再通过三伸缩仪的伸缩变化就能知道三角形中三条对角线的伸、缩变化，由此可知道三角形的结构变化形态。因此新观测方式可获得的信息量有：观测面的倾斜特征；地应力的指向和地面移动趋势方向，将这两方面的信息综合比较，在应用计算机三维技术就可准确描述出观测区域的一个整体变化全貌。

3.1. 观测面的倾斜情况

对于三水管仪而言，当地面出现倾斜后，其三端钵体的水量必然有所变化，在底部的压力传感器就有了不同的记录值，经过长时间的积累，三钵体的压力值就会出现明显差别。根据压力值的变化量反推纵向水位的增减量，就可知道三钵体位所形成的相对抬升或降低量。根据观测面内三点的变化量，通过掌握观测面的法线在空间位置的角度变化情况(参见图 2)，就能计算出观测面的一个整体变化情况。

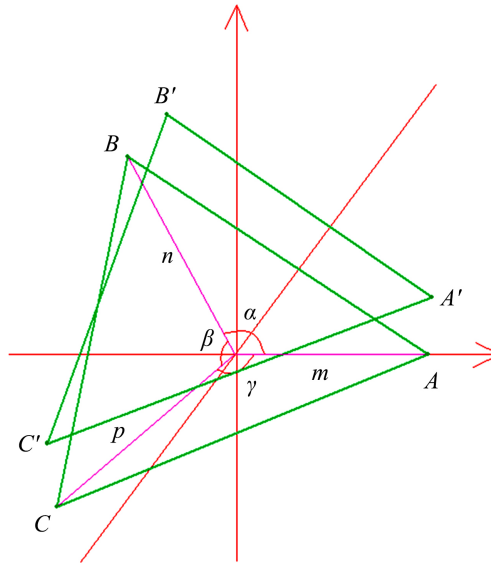


Figure 2. Angular variation of the normal spatial position of the observation surface
图 2. 观测面的法线空间位置的角度变化

简要的计算可以证明此法可行，根据水管仪的位移传感器的运行灵敏度是每 1 微米变化对应 20 毫伏 (20 mv/mu) 在日常观测中，电压的变化经常可达到几百毫伏的变化量(一季度或半年的累计变化量)，假设电压值达 500 毫伏，说明水面有 25 微米的积蓄量即 0.025 mm，钵体的内径约为 18 cm，这样整个钵体的水增加量： $9\text{ cm} \times 9\text{ cm} \times 3.14 \times 0.025 \approx 0.64$ (克)，此水量的增减足以在普通压力传感器上的到反应。

具体公式如下：

设 $\alpha + \beta + \gamma = 360^\circ$ ，且 $\alpha, \beta, \gamma \in (0^\circ, 180^\circ)$

则由图知 $A(0, m, 0)$

$$B(-n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ), -n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ), 0)$$

$$C(-p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ), -p \cdot \sin(\gamma - 90^\circ), 0)$$

设 A, B, C 地地壳形变产生的竖直方向位移量分别为 X, Y, Z ，此时 A, B, C 坐标变为 $A'(0, m, X)$

$$B'(-n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ), -n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ), Y)$$

$$C'(-p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ), -p \cdot \sin(\gamma - 90^\circ), Z)$$

设平面 $A'B'C'$ 的法向量为 $m(X_1, Y_1, Z_1)$ ，则

$$A'B' = (-n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ), -n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) - m, Y - X)$$

$$A'C' = (-p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ), -p \cdot \sin(\gamma - 90^\circ) - m, Z - X)$$

由 $A'B' \cdot m = 0$ ， $A'C' \cdot m = 0$ 得：

$$-n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ) \cdot X_1 + [-n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) - m] \cdot Y_1 + (Y - X) \cdot Z_1 = 0 \tag{1}$$

$$-p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ) \cdot X_1 + [-p \cdot \sin(\gamma - 90^\circ) - m] \cdot Y_1 + (Z - X) \cdot Z_1 = 0 \tag{2}$$

令 $Y_1 = 1$ 则(1) (2)联立方程组解得:

$$X_1 = -\frac{[p \cdot \sin(\gamma - 90^\circ) - m] \cdot (Y - X) - [n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) + m] \cdot (Z - X)}{p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ) \cdot (Y - X) + n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ) \cdot (Z - X)}$$

$$Z_1 = \frac{[p \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) + m] \cdot p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ) - [p \cdot \sin(\alpha - 90^\circ) + m] \cdot n \cdot \sin(\alpha - 90^\circ)}{p \cdot \cos(\gamma - 90^\circ) \cdot (Y - X) + n \cdot \cos(\alpha - 90^\circ) \cdot (Z - X)}$$

所以 $m(X_1, 1, Z_1)$, 而平面 ABC 的法向量为 $n' = (0, 0, 1)$

所以平面 $A'B'C'$ 与平面 ABC 夹角 θ 满足

$$\cos \theta = (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{m}) / (|\mathbf{n}'| |\mathbf{m}|) = \sqrt{Z_1 / X_1^2 + 1 + Z_1^2}$$

$$\theta = \arccos \left[(\mathbf{n}' \cdot \mathbf{m}) / (|\mathbf{n}'| |\mathbf{m}|) = \sqrt{Z_1 / X_1^2 + 1 + Z_1^2} \right]$$

3.2. 地应力的指向

由于三分向伸缩仪是同时对一点观测, 其应力应变变量在没受到外力作用时观察结果应该是一致的, 即固体潮的峰值、相位应该一致。从理论上分析伸缩共有 6 种情况变化, 即 A 点的伸、缩; B 点和 C 点的拉伸与压缩。但实际情形有两种情况是不存在的, 即三点同时向 O 点压缩或同时对 O 点伸张, 这样就有 4 种变化情况, 每种变化均显示出一种应力的指向。

当有地应力作用时, 虽然其应力值不会被直接记录到, 但在某些特定区域会出现应力集中现象, 此处的弹性模量会有所改变, 反应到伸缩仪固体潮曲线上其形态会发生变化。如果一个地区持续出现一种变化, 那么证实该地区的应力作用存在, 依据三分向伸缩的应力应变的变化方向及量值大小做矢量图就可推断出 O 点所受的应力指向。具体做法, 假设观测面的三分向伸缩仪的应力应变指向如图 3 所示, 则 $OB + OA + OC$ 三线的矢量之合即为 O 点的应力指向。

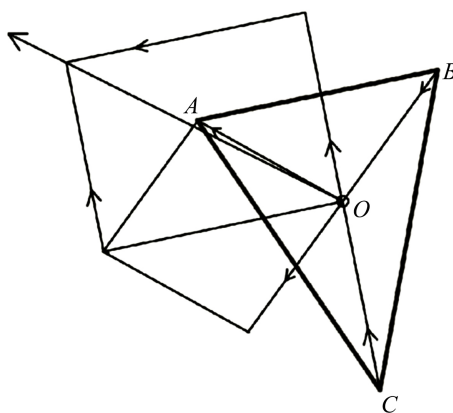


Figure 3. The stress-strain direction of the tri-axial extensometer

图 3. 三分向伸缩仪的应力应变指向

3.3. 地面移动的趋势方向

知道三角形对角线的伸缩变化情况, 一方面可确定地应力的指向; 另一方面还可知道三角形结构形态的变化情况, 因为三对角线的伸缩变化, 必然要影响到三个夹角的变化(虽然无法做到定量测定, 但定

性判断是可能的)。依据伸缩的量值变化,推断出三个夹角度的相应的增、减变化,从而确定出三角形结构形态的一个变化形态,依据此变化形态再结合地应力指向,就可大体地判断出大地地壳形变的移动趋势方向。这样判定出的大地地壳形变移动趋向要比现行方法得出的结论可靠的多,因为现行方法认为地倾斜方向就是大地移动方向(受刚性体理论影响),其实不然,在柔性体条件下,大地的倾斜变化与走势变化并非完全一致。

有了地倾斜方向、移动趋向、地应力指向三方面的信息,在结合其它观测手段综合分析判断,我们就可以对观测区域是否存在有孕震的可能性有个基本的判断。

4. 讨论与结论

地壳形变观测在地震预报中有着举足轻重的作用,地壳形变在地震预报中的作用和价值不容置疑。中国大陆发生过许多显著地震事件,特别是2008年汶川8.0级大地震,震前震中附近的地壳形变观测手段没有捕捉到地震前兆异常,未发挥出应有预报作用,笔者认为形变观测仪器布局不合理所致。为此笔者提出了这种以面观测方式替代两分量观测的新思路,该方案可行与否尚待于震例实践检验,望得到广大同仁的评判指正。

资助项目

内蒙古自治区地震局局长基金课题资助(课题编号2023QN15)。

参考文献

- [1] 国家地震局科技监测司. 地震形变观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [2] 中国地震局. DB/T 8.1-2003. 地震台站建设规范地形变台站·第1部分: 地室地倾斜和地应变台站[S]. 北京: 地震出版社, 2004.
- [3] 王长江, 康有明, 宋晓玉, 任佳, 阎熠. 困惑地震预报的一个问题——对于同物理量观测不一致问题的讨论[J]. 地震地磁观测与研究, 2005, 26(B10): 62-67.