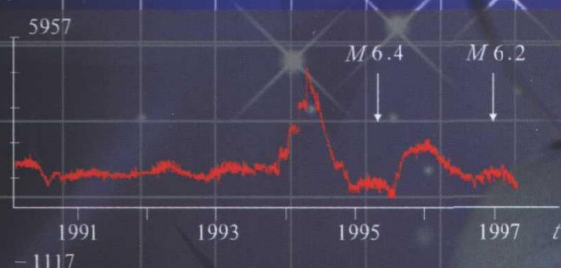


# 钻孔地应变观测新进展

苏恺之 李海亮 张钧 编著  
李秀环 马相波



地震出版社

# 钻孔地应变观测新进展

苏恺之 李海亮 张 钧  
李秀环 马相波 编著

地 震 出 版 社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

钻孔地应变观测新进展 / 苏恺之等编著. — 北京: 地震出版社, 2003.8

ISBN 7-5028-2306-9

I. 地… II. 苏… III. 地应变 — 应变观测 IV. P315.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 052968 号

## 内 容 提 要

本文集系我国近十余年来钻孔地应变连续精密观测技术新进展的总结。包括体积式钻孔应变仪的实用化进程, 及正在开发中的几种新型钻孔式地应变仪和地倾斜仪介绍; 它们的原理, 制作技术, 实地安装方法, 观测资料的分析认识与数据处理方法等, 共计 24 篇文章。这些工作方法和工作经验, 不仅应用于地震前兆的观测与相关的地学研究, 而且能应用于多种地下工程的岩体形变连续监测与研究。

本书可供岩石力学与工程人员、地震和地质专业人员, 及相关大专院校师生阅读参考。

## 钻孔地应变观测新进展

苏恺之 李海亮 张 钧 李秀环 马相波 编著

责任编辑: 吴 冰 刘 玫

责任校对: 张晓梅

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号 邮 编: 100081

发行部: 68423031 68467993 传 真: 88421706

门市部: 68467991 传 真: 68467972

总编室: 68462709 68423029 传 真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

印 刷: 北京市地大彩印厂

---

版(印)次: 2003 年 8 月第一版 2003 年 8 月第一次印刷

开 本: 787×1092 1/16

字 数: 442 千字

印 张: 17.25

印 数: 001~500

书 号: ISBN 7-5028-2306-9/P·1171 (2884)

定 价: 35.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 序

地震——地壳岩石的突然破裂，产生地震波动，以及在地表局部产生裂缝，构成一种不能回避的自然灾害。这种岩石的局部破裂及其沿破裂的快速错动，来自地壳内部机械能量的突然释放。

在地下能量释放之前，必然存在地壳能量的储存积累、运移调整及受到触发等过程。这种以机械能量为基础、为核心的力学过程，或许会伴有地下物质的运移，地下流体参数的变化，电场的、磁场的变化，等等。而能直接了解地壳机械能量的变化，最为重要也最为直接的信息，即是地壳的各种变形。

为了观测地壳的变形，人们采用了多种仪器和方法。近来，国内外正在大力发展 GPS 地壳运动网络观测，然而 GPS 观测必须辅以小尺度的精密连续的地形变观测。这是由于，前者观测的是大的空间尺度（如公里以上），及较长时间尺度（如一日或几天以上）的变化。而小尺度的地形变观测能给出尺寸较为精细的连续的（以至是动态的）地形变场时空变化图像，这对于地震预报的实践与研究是至关重要的。再有，这种观测技术完全可以适用于、也正在实用于各种大型或中型地下工程的安全监测及相关研究之中。

钻孔中的地应变（或地应力）观测，属于小尺度地形变观测中十分重要的一种。它将仪器安装于近百米以至数公里的地下，能明显降低地表的各种干扰，并有较好的动态观测性能与耐震性能，易于选点布设成网，易于维护管理。因此，它是进行重要地学研究不可或缺的观测手段，近几年来日益受到各国的重视，开始以较快的速度发展，进入了多方位的重要实用阶段。例如美国在上世纪末和本世纪初，为研究板块边界带内的地形变场分布时空图像，制定了庞大的 15 年观测计划，其中最重要的核心工作是“板块边界计划（PBO）”，用 GPS 和钻孔地应变仪联合布设 50 套密集的网阵观测；日本也在进一步推广钻孔地应变观测，如在东京湾内已安装了四套深度达 3~6 km 的海底钻孔地应变综合观测仪器。

我国在钻孔地应变观测方面起步较早，1966 年邢台大地震之后，著名地质学家李四光教授首先倡导了用地应力观测方法进行地震预报的试探，曾取得了重要的线索。但由于它是一个年青的观测技术，因而总的说来发展较慢，

却积累了不少可贵的经验和教训。近些年来, 钻孔法地应变观测已有了明显的实用化进展: 体积式应变仪已由 TJ-1 型改进为 TJ-2 型, 正在推广应用, 我国现已成为世界上三个应用体积式应变仪最多的国家之一, 第十个五年计划中还将有更大数量的使用。几种新型的地应变观测仪也正在相继问世。它们将给出更为丰富的信息, 其服务对象也将由单纯的地震预报研究和基础资料积累, 扩展到多种防灾工程的安全监测。这些将使我国的钻孔地应变观测即将进入一个新的阶段。

为了迎接这一新阶段的到来, 我们热忱期望, 无论是地震部门还是社会各有关工程部门的技术人员, 都能对这一观测技术领域给予更多的了解和关注, 让它得到更好的应用和健康的发展, 为此特编写了本文集。但限于水平, 不当与错误之处难免, 敬请读者给予指正。

本文集第一部分为我国体积式钻孔地应变仪研制在近十余年来的全面总结, 包括原理与设计, 安装技术, 对资料的分析, 资料处理方法等。为了加强钻孔仪器方面的业务交流, 共享资源, 促进我国多个部门在这一重要领域的开展, 我们将制造工艺流程、技术资料与经验等无保留地写入了文内。

第二部分为几种新型地应变仪及地倾斜仪的设计思想、工作原理和结构, 它们将在近几年内逐渐步入各观测站使用和开发新的实用领地。我们希望这些仪器和工作方法能为我国的地应变观测新时期的到来有所贡献。

第三部分是仪器研制、台站观测和资料分析三方面人员在业务交流中的部分资料, 从中可了解我们相互沟通的工作面貌和在实践中逐渐形成的业务思想, 也以此来感谢所有曾给予我们各种形式帮助的众多的人们。

在本文集的编写过程中得到了中国地震局监测预报司的关心与鼓励, 在此表以深切谢意。

作 者

2003 年 5 月 1 日

## 目 录

## 序 篇 迈入新世纪的钻孔应变观测

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| 迈入新世纪的钻孔应变观测 ..... | 苏恺之 ( 1 ) |
|--------------------|-----------|

## 第一篇 TJ-2 型体应变仪的实用化进程

|                                          |                            |
|------------------------------------------|----------------------------|
| TJ-2 型体应变仪的研制 .....                      | 苏恺之 李秀环 张 钧 马相波 李海亮 ( 8 )  |
| TJ-2 型体应变仪的力学设计 .....                    | 苏恺之 ( 16 )                 |
| TJ-2 型体应变仪的电学设计 .....                    | 李秀环 ( 29 )                 |
| TJ-2 型体应变仪的机械设计与生产工艺 .....               | 苏恺之 张 钧 李秀环 马相波 李海亮 ( 36 ) |
| TJ-2 型体应变仪的安装 .....                      | 马相波 张 钧 李秀环 苏恺之 ( 49 )     |
| 地震应力触发和观测体应变阶 .....                      | 邱泽华 石耀霖 ( 57 )             |
| 体应变资料处理与异常分析 .....                       | 易志刚 ( 63 )                 |
| 体应变观测曲线的震前异常特征与规律 .....                  | 苏恺之 ( 80 )                 |
| 地应变观测资料的物理解释 (一): 漂移、噪声和突跳 .....         | 苏恺之 ( 95 )                 |
| 地应变观测资料的物理解释 (二): 气压、水位和降雨干扰 .....       | 苏恺之 ( 111 )                |
| 地应变观测资料的物理解释 (三): 应变固体潮、地震波和地震前兆异常 ..... | 苏恺之 ( 132 )                |

## 第二篇 几种新型地应变观测仪器的研制

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| JZGS 系列井下综合观测仪器的基本考虑 .....  | 苏恺之 李海亮 马鸿钧 ( 154 )             |
| FZY-1 型多分量式钻孔应变仪的总体设计 ..... | 李海亮 马鸿钧 张 钧 李秀环 马相波 苏恺之 ( 161 ) |
| ZYG-1 型轴向应变仪的设计 .....       | 孔向阳 张志慧 王 梅 ( 176 )             |
| 组合式钻孔应变仪 .....              | 苏恺之 李海亮 马鸿钧 张 钧 李秀环 马相波 ( 182 ) |
| 土层应力-应变观测中的一些技术考虑 .....     | 苏恺之 张 钧 李秀环 马相波 李海亮 ( 194 )     |
| 应急用中等灵敏度地形变观测仪器 .....       | 苏恺之 马相波 张 钧 马鸿钧 李秀环 李海亮 ( 208 ) |
| CZB-1 型竖直摆钻孔倾斜仪的研制与应用 ..... | 马鸿钧 杨又陵 裴宏达 骆兰梅 ( 217 )         |
| 新疆竖直摆倾斜仪的观测与震兆异常 .....      | 杨又陵 马鸿钧 裴宏达 杜新民 ( 228 )         |

### 第三篇 业务交流与回顾

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| 地应变观测中一些问题的解答 .....  | 苏恺之 (236) |
| 共同做好台站应变观测工作 .....   | 苏恺之 (245) |
| 地应力相对测量方法 .....      | 苏恺之 (252) |
| 钻孔法地应力测量中的弹性响应 ..... | 苏恺之 (261) |
| 编后语 .....            | 苏恺之 (268) |

· 序 篇 迈入新世纪的钻孔应变观测 ·

## 迈入新世纪的钻孔应变观测<sup>①</sup>

苏 恺 之

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

在 1977 年召开的第一届“全国地应力观测工作会议（芜湖）”上，许多代表就地应力（应变）观测的理论、新测量仪器的设计方案等，提交了很好的报告，还进行了十分有意义的讨论，思想活跃，从而使这一会议就地应力观测的发展方向问题取得了较一致的认识：钻孔应变与钻孔应力观测间关系紧密；研制出几种新型高应变仪的必要与可行；应变观测将由实孔法取代空孔法；对井下仪器的力学原理进一步开展调查等。这些共识，为其后正确的工作方向与取得的重要成果奠定了思想基础，这些成果证明了“芜湖会议”是我国钻孔应力—应变观测工作发展的一个里程碑。

在我们步入新世纪的今天，在这一次“全国地应力—应变观测工作研讨会（深圳）”上，有必要再对今后发展的基本问题作出思考，以制订出新的科学的战略决策。

### 一、钻孔应变前兆观测的任务

通过对地层内部应变状态依时间连续变化的精细观测，掌握地震应变前兆的（长）中期—短期—临震以及震后调整的时空分布与发展变化的规律，构成重要的地震前兆观测手段，为地震学研究、防震减灾工程提供基础性背景资料。

### 二、钻孔应变观测的优点（不可替代性）

钻孔应变观测具有其他观测手段不可替代的优点，归纳如下：

- (1) 能给出小区域内地壳应变场时空分布细微变化的图像。
- (2) 观测具有良好的高频特性与高灵敏度的兼顾性。
- (3) 能有效地降低气象的和人为的地面干扰，较深钻孔能削弱地表大量裂隙带来的干扰与不稳定性。
- (4) 容易选点，占地面积小，有助于布设合理的台网。
- (5) 观测仪器易于日常维护。
- (6) 能开展多种物理量的综合观测（如对地倾斜、地温、微震，地磁等进行同时同地

---

<sup>①</sup> 本文系作者 2002 年 9 月 23 日在深圳的“全国地应力—应变观测工作研讨会”上的发言稿。



点观测)。

正是由于上述的优点, 钻孔应变观测正在成为仅次于 GPS 观测的前兆手段, 两者在测量的空间尺度与时间尺度上相互补充。而在短临前兆观测中尤其要以使用应变仪器为主。日本的前兆仪器数量的布局即是如此。又例如, 日本气象厅召集“地震预知判定会”所用的标准, 在 1998 年又作了修改(表 1), 新标准更加突出了(体积式)钻孔应变观测资料的地位。

表 1 日本气象厅召集“地震预知判定会”的新旧标准对比

| 新 标 准                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 旧 标 准                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>· 体应变观测网中, 有三个点出现可识别异常(若为火山喷发不受此限)</li> <li>· 可识别异常: 噪声水平的两倍<br/>               东海地区: <math>0.4 \times 10^{-7}/3 \text{ h}</math>, <math>0.6 \times 10^{-7}/\text{d}</math><br/>               大雨时: <math>1.5 \times 10^{-7}/3 \text{ h}</math>, <math>2.6 \times 10^{-7}/\text{d}</math></li> <li>· 在地震防灾强化区内, 观测数据有值得讨论情况时, 可随即召开会议</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 应变观测网中, 有一个点达 <math>0.5 \times 10^{-6}</math> 变化, 另有三个点也有明显变化时</li> <li>· 一小时内, 4 级以上地震出现三次以上, 地震群 10 个, 且持续两小时以上, 且该时间内有其他异常现象时</li> <li>· 除上两个标准外, 判定会会长认为有必要时, 可召开会议</li> </ul> |

我们还可以只从观测频段的角度, 来审视钻孔应变仪观测所处的地位。在地应变的变化周期大于 10 d 以上时, 好的 GPS 网阵的观测灵敏度优于应变仪, 在地应变的变化周期介于 10~0.1 s 时, 宽频带地震仪的灵敏度略优于地应变仪, 于是, 地应变仪器观测的最大优势频段在 10 d 至 10 s。在周期小于 0.1 s 的更高频率范围内, 地声仪器优于宽频带地震仪; 不过, 也可以制作高灵敏度的动态应变仪, 它的灵敏度可与地声仪器相当且接受地下声音更为直接可靠。再次说明, 这里只是从灵敏度来讨论, GPS 只能是在大区域范围内给出好的灵敏度; 目前的地声仪器和测震仪器可以感受应变场的快速变化信息却不能给出平面场的三个未知数。

### 三、钻孔应变观测的观测量

钻孔应变观测, 目前以水平面应变状态的观测为主体, 水平应变状态可以用  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  和  $\theta$  三者(最大、最小主应变和其方位角)来表示, 也可以用下列三个参量来表示:

( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ )——面应变, 即面积大小的变化<sup>①</sup>;

( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ )——剪切应变, 即形状的畸变;

$\theta$ ——最大主应变的方位角(它与最大剪应变的方向差  $45^\circ$ )。

上三者的物理概念是十分清晰的。从观测仪器工作原理的角度来看, 尤其建议在资料分析中, 使用( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ )、( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ )、 $\theta$ 三者。这是由于( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ )与( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ )两者的计算表达式不同, 涉及的应变灵敏系数不同(数值和系统误差都不同)。

① 体应变仪也能感受铅直向的应变  $\epsilon_3$ , 如气压、水位带来的对  $\epsilon_3$  的干扰能明显感受到, 但对应变场而言, 通常认为地壳表面铅直向没有来自地下的应力, 因而  $\epsilon_3 = -\mu(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ ,  $\mu$  为泊松比。体应变仪相当于面应变仪。

此外,并不排斥铅直向应变  $\epsilon_2(\epsilon_3)$  的观测,或是在硐室中进行多方位钻孔内的各种观测,以至在地面钻孔中进行三维的观测。

再者,现已有人将地倾斜纳入地应变的范畴,地倾斜来自地应变场的不均匀性,或是解释为地倾斜来自铅直面上的剪切应变。

## 四、钻孔应变观测的仪器分类

迄今,尚无“直接”测量  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  和  $\theta$  (水平面地应变的三个参量)的仪器。现实的仪器只能是多类型与系列化。

仪器的分类(及其命名)应首先着眼于力学原理与测量物理量的分类。

(1) 体积式钻孔应变仪(简称体应变仪),测量 ( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ ),只使用一个参数  $A$  (体应变灵敏系数)。

(2) 剪应变仪,测量 ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ),目前是用两组元件进行观测,只使用两个参数  $B_1$ 、 $B_2$  (剪应变灵敏系数)。

(3) 多分量式应变仪,测量 ( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ )、( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ )、 $\theta$ ,当前都是用三个(或四个)元件测量弹性圆筒内壁的径向位移,通过六个参数( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ ),或是在简化条件下用  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  及  $B/A$  值四个参数计算出( $\epsilon_1 + \epsilon_2$ )、( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ )、 $\theta$  三者,又称径向位移式多分量应变仪。

以上的分类是为了讨论的方便,或许将来有更恰当的分类方法。例如,上述的第(2)类(剪应变仪)也可归属于第(3)类。又如日、美的三分量体应变仪,它介于第(1)类与第(3)类之间,这种仪器的发展前景尚未明了,虽然造价较高却有一些特有的优点(从弹性理论上两个灵敏系数  $A$  值与  $B$  值相近,大的工作面积使得资料连续性与可靠性较好),美国的 PBO 计划里仍要使用它作观测。

而系列化,多指测量条件或服务对象的不同所要求的多品种:

(1) 孔深:浅孔(1~30 m);普通孔(30~100 m);中深孔(100~300 m);深孔(>300 m)。

(2) 岩层状况:致密岩体、松散岩体、土层。

(3) 孔径:小孔径(岩孔孔径小于 80 mm);中孔径(80~130 mm);大孔径( $\geq 150$  mm)。

(4) 测量系统的分辨率:中等灵敏度( $10^{-7} \sim 10^{-8}$ );高灵敏度( $> 1 \times 10^{-9}$ )。

(5) 测项:单测项(应变仪)与多测项(井下综合观测仪器)。

## 五、钻孔应变观测的现状

### 1. 体应变仪

目前的钻孔应变前兆观测仪器以体应变仪为主体,据不完全统计,国内外的 237 台钻孔应变仪中,体积式占了 162 台。体应变仪的应用正处于昌盛时期。

体应变仪在日、美、中三个国家得以发展,不约而同地成为应变观测的主体,绝非偶

然,而是由于它的力学原理与力学结构相对比较简单,对钻孔及安装条件的要求相对较低,易于取得较为长期可靠的资料。日本的30余套仪器已有20余年观测资料,中国的峰峰、徐州地震台体应变仪器已有20年的观测史。在我国的“九五”计划期间,体应变仪的结构已有重要突破,其长度由5 m以上降为1.8 m、1.3 m,由TJ-1型改为TJ-2型,仪器性能也有明显提高。

体应变仪只对 $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 敏感( $A \neq 0$ ),而对 $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 不敏感( $B = 0$ ),既是它的缺点,又是它的优点:由所得的资料只需用一个参数 $A$ 直接求得 $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 。

日本正在发展400 m、2.5 km的深孔综合观测及海底观测(深度达3~6 km),负责此项任务的东京大学并没有使用本单位石井紘博士的径向位移式三分量应变仪,而是使用了Sacks-Evertson式体应变仪,或坂田-萨克斯(Sakada-Sacks)式的三分量体应变仪,也是由于,认为体应变仪在技术上更成熟一些。更确切地说,也可归结为它的工作面积大,对于岩石的不均匀、钻孔形状的不规则,对水泥层的不均匀度等外界条件宽容度大一些,所用的参数 $A$ 值本身所受的影响也比 $B$ 值少一些。

## 2. 剪应变仪

这是我国于20世纪80年代中期诞生的一种应变仪器品种,它的内部有四个元件经组合后构成两套元件,给出两个测值,通过两个参数 $B_1$ 、 $B_2$ 计算出 $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 和 $\theta$ 两个未知量,算式简捷。虽然这种仪器没有普遍推广,但它的工作方法对现今组合式仪器的研制有启发作用。

单从测量技术来看,由于对 $B$ 值的影响因素较对 $A$ 值为多,因而剪应变仪所得的长期观测资料可能不抵体应变仪的资料;但在气压、水位的干扰情况方面,对剪应变资料几乎没有影响,而体应变资料中所受的这种干扰明显。常见有人据前者或据后者来评价仪器的优劣及取舍其一。对此需说明的是:①上述所谓的优缺点,完全是由所测的对象不同所限定的,而不是仪器设计上的或制作工艺技术上的水平问题;② $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 与 $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 两者,对于地震前兆监测来说都是需要的,且无轻重之分。

## 3. 多分量应变仪

这几乎是除上两者而外的“惟一”选择,它的优点十分明显:其内只需装入三个元件,就可以代替上两种仪器给出三个未知量: $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ 、 $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 和 $\theta$ 。从力学原理上看,它还容许使用多种微位移传感器,如电容式、半导体片式、振弦式、磁场式等,形式多样。于是,中国用压磁式、振弦式、电容式、半导体应变片式传感器构成元件,制出了四种多分量应变仪,达到较高的水平;美国于20世纪80年代初有了振弦式,90年代又使用了Glagwin型的电容式三分量应变仪(并已称之为“张量应变仪”,的确,这一称呼或许更为贴切一些,不容易被误以为它是能够直接测量到了该方向的岩石应变),在西部地区与体应变仪器一道安装了16台。日本的石井紘于90年代中期也制成了小巧的三分量应变仪,外径9 cm,长45 cm,其内部结构的独特之处是加有三级机械位移放大,总倍数达45倍,该杠杆放大系统内没有机械接触面,由一块金属板激光切割,其图形是用电脑经动态模拟绘出。这种仪器最初用双电极电容传感器,现又改用更为方便的磁式位移传感器,先在硐室、隧道内的1~2 m浅孔中使用,取得经验,现已能在数百米钻孔中安装。

他在前年退休后进入一个民间研究所继续工作,使其仪器在一些大学及研究所中推广;并已开发出综合观测仪,它可以将几种类型井下仪器作多种积木式搭配。

日本的坂田正治博士,继三分量体应变仪获得成功之后,曾于1992年前后研制成功了井下综合观测仪(IBOS),后于1996年与俄国的激光研究所合作开发了三分量激光式应变仪,其优点是,长寿命,耐雷击,适于深钻孔,室内样机问世后由于非技术性的原因而搁浅。该激光式应变仪稍作改动和简化,现已做成了海啸计(“津波计”),置于海底能感测海啸的发生,以实现提前预警。

上述的优点及形式多样化,已为人所共知,并寄予了较高的期望,甚而以为各个元件直接反映了岩石中各方向的线应变,并称之为“线应变仪”;以为由测值能直接算出 $\epsilon_1$ 及 $\epsilon_2$ ,而不是先算出 $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ ,  $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ ,但对于径向位移式多分量应变仪的弱点,较少讨论和思索。如果对此不作一中肯分析,那么我们正在着手研制的新仪器难使我国的应变观测进入新的水平。

## 六、钻孔应变观测迈入新世纪

中国大陆的地震活动规律,地震前兆的规律特征,地应变前兆的规律特征,或许与有深大走滑断层的美国西部,与深源地震为多却观测空间较小的岛国日本,有些不同。以至有国外学者说:具有广阔观测空间的中国大陆,或许地应变观测最有希望取得突破。

钻孔应变观测是一个新兴的技术,自20世纪末的20年中才起步发展,开始认识它的不可替代性,在本世纪的开始,又有大步前进之势。但在理论体系及技术体系上还不完善,有待充实,还有许多空白点,个性化设计的空间也十分明显。在中国,摆脱了1991~1995年前后的低潮和谷底之后,通过艰难的努力,近五年来已有了生机。与此同时,日、美、中三个国家中开创上述仪器的多数专家已开始陆续退役,一个全新的充满希望与活力的时代开始了。

此时,我们又该做些什么,尤其是该想些什么?

清理、更新和充实我们的理念,或许最为紧迫、最为有益。一代新人必将伴随下述工作的开展而显现。

(1) 深思考、深加工、细分析(软件建设与基础建设):

- ① 应变仪力学原理的分析与科学设计,观测方法基础理论的研究。
- ② 应变仪灵敏系数等参量的室内定量测试与实地检测方法。
- ③ 台站观测环境条件的调查研究,它对观测质量影响的研究。
- ④ 应变固体潮观测资料的深化分析,质量评定方法的改进。
- ⑤ 干扰因素、干扰过程、交叉干扰的细化分析、动态图像。
- ⑥ 应变观测资料数据处理中心的建设。

(2) 广储备,多品种(硬件建设),加大技术储备,丰富观测方法:

- ① 组合式多分量应变仪(测量 $\epsilon_1 + \epsilon_2$ 的元件,测量 $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 及 $\theta$ 的元件)。
- ② 井下综合观测仪(应变、倾斜、井温三部分或更多内容)。
- ③ 土层剪应力仪。
- ④ 深井体应变仪(口径60 mm,井深200~400 m)。

⑤ 浅孔应变仪（用于硐室或隧道 2 m 左右浅孔，大震应急及短临监测用）。

⑥ 动态应变仪（0.01~100 Hz）。

⑦ 轴向应变计（用于硐室、隧道钻孔中及三维应变观测）。

⑧ 新工艺、新元件、新材料的引入，它们的引入会不同程度地提高仪器性能，甚而带来新突破。

上述仪器应辅以：智能化快速数据采集器（含事件记录仪）；长寿命与防雷技术；质量更好的气压、水位辅助监测；安装方法与安装材料的再改进；性能检测实验室的建设。

（3）大形变学科下的大时空观念（队伍建设与环境建设）：

① 在地震前兆全部观测中，地形变观测占有最突出的地位。

② 在地形变观测中，小尺度应变观测（含倾斜量）为仅次于 GPS 观测的相互补充的不可或缺的重要手段；在小尺度应变观测中，含有多种测项，所用仪器必定是系列化与多品种。

③ 小尺度应变观测点要布设成网，以观测形变波的传播，同震应变阶的分布，大震引起的震前异常与震后应变调整的时空分布图像。

④ 小尺度资料与中尺度、大尺度资料的对比分析。从台网角度对多台同类仪器的资料作对比分析；从台站角度对多套非同类仪器的资料作对照分析。

⑤ 既重视长期连续资料的积累，又须开拓动态资料的捕捉与分析，大幅度扩展每台仪器的信息量。

## 七、建立我国的钻孔应变前兆观测技术体系

经历了多年风雨的我国地应变前兆手段，现在已经可以并且应当看清近 5~10 年中该走的路径与方向，这是历史的使命。

这个技术体系是一个有机整体，含及下列扎实而具体的工作，而决不能是形式口号。

（1）应变前兆手段物理基础的建立。

深入研究与实际运用一两个地震应变前兆的物理模式，它们能半定量地给出不同岩石或构造条件下地应变场（含倾斜场，以下同）在震前—震时—震后的时空分布规律。

（2）可靠连续的观测系统的建立：

① 以力学设计及电学设计为理论指导的硬件研制与生产。

② 仪器指标性能的严格检测方法与装备。

③ 有 2~3 个应变观测量所相应的几种观测系统，其工作效果必须是连续（长寿命）、准确与可靠。

④ 它们又可综合为井下综合观测系统，并逐步向较深钻孔发展。

⑤ 探头高频特性的开发，及地面快速智能采集与事件记录装备的运用。

（3）有一套科学的台网建设原则与台址选定标准。

① 重点地区与一般地区的台距，监控能力的大体估算。

② 小环境条件对观测的影响预计方法，台址选定标准的认定。

③ 钻孔施工要求的细化设计，钻孔质量的检定标准与方法。

（4）更为系统、科学和丰富的数据处理方法与软件开发。

- ① 信息提取与处理方法的多样化、半自动化。
- ② 台网管理中心、数据管理中心的建立与纽带作用的发挥。
- (5) 与其他相邻手段的对话、联系与综合分析更为紧密。

以上五项，大都不可能全盘仿照国外，都将以自己的创造为主体。若此，我们一定能建成具有我国特色的钻孔应变观测技术体系，使我国的钻孔应变观测成为名符其实的三强之一。

让我们齐心协力迎接它的到来。那时，人们将认为，这一次“全国地应力—应变观测工作研讨会（深圳）”也是一个重要的里程碑。

## · 第一篇 TJ-2 型体应变仪的实用化进程 ·

# TJ-2 型体应变仪的研制

苏恺之 李秀环 张 钧 马相波 李海亮<sup>①</sup>

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

TJ-2 型(液压型)体积式钻孔应变仪<sup>[1]</sup>, 和传统的液位型体积式钻孔应变仪相比<sup>[2]</sup>在结构上有所不同, 体积更小, 且保持或提高了液位型体积应变仪的技术指标。TJ-2 型仪器的研制成功, 为推动我国钻孔应变前兆观测手段在“十五”期间的新发展, 为近几年开展深孔应变观测及井下综合观测准备了一定的技术条件。

## 一、任务来源与工作目标

本课题系中国地震局“九五”科技攻关项目“中短期前兆观测仪器的研制”课题的子专题, 编号 95-04-02-0103, 经投标, 于 1996 年 9 月 24 日论证通过, 中标。实际工作系 1995 年 5 月启动, 1998 年 12 月通过了中国地震局组织的项目验收。至今, 已在国内东部地区安装 22 套, 全部安装成功, 并投入连续观测。连同原有的 11 套 TJ-1 型仪器, 我国已有 33 套体应变仪, 成为世界上应用体应变仪最多的三个国家之一, 见表 1。

表 1 全球钻孔应变仪布点统计表

| 仪器名称    | 中国大陆          | 中国台湾  | 日 本                     | 美 国 | 其他地区        | 总计/台 |
|---------|---------------|-------|-------------------------|-----|-------------|------|
| 体应变仪    | 6(美产), 33(国产) | 2(美产) | 33                      | 25  | 40(美产)      | 139  |
| 三分量体应变  | —             | —     | 8                       | 4   | —           | 12   |
| 深井体应变仪  | —             | —     | 4(3~6 km),<br>4(2.5 km) | —   | 4(美产)(2 km) | 12   |
| 径向位移应变仪 | 20            | —     | 约 45                    | 16  | (不详)        | 81   |
| 差应变仪    | 4             | —     | —                       | —   | —           | 4    |

注: 据称, 日本县一级的地方台站也有体应变仪, 未计入内。

体应变仪在全球的应变仪数量中占有最大的比例, 在中、日、美三个国家中也不约而同地成为主导型仪器, 有其内在的技术原因, 即体应变仪的力学原理相对较为简捷, 对岩石及水泥状态的依赖性相对较低, 易于取得较为可靠的观测资料。因此, 日本在发展陆地及海下深钻井观测工作中仍以体应变仪为主要设备。

<sup>①</sup> 参加前期工作的人员还有刘瑞民、裴玉珍、张涛、李桂荣、李群芳。

我们在 TJ-2 型仪器研制中将工作目标锁定为如下三点：

(1) 新原理、新结构、新尺寸。采用液压原理和液压传感器，缩小井下仪器的外径，以降低对岩孔孔径的要求，降低钻孔成本，也为今后的小口径深井体应变仪的研制积累经验。

(2) 新功能。紧密结合台站的实际需要，使体应变仪更加实用有效，着重解决便于运送，不依靠钻机安装，长寿命、防雷击、操作简便、资料连续及有备用传感器等系列问题。

(3) 新指标。结合数字化改造，将观测系统的动态范围（不作机械调零与电调零时）达  $\pm 2 \times 10^4$  以上，即超过  $\pm 86$  dB。其他指标亦应作相应的提高。

## 二、解决的问题与达到的技术指标

在 TJ-1 型体应变仪研制与小批量生产的技术基础上<sup>[3~6]</sup>，本项目先后开发了 TJ-2 (A)、TJ-2 (B)、TJ-2 (C)、TJ-2 (D) 型系列设备（基本参数见本书 p.20 表 1）。它们的外形尺寸不同，而技术指标近于一致或有所提高。研制中主要解决了如下问题：

### 1. 液压型体应变仪设计中最佳体积值的优化理论与实践

液位型体应变仪的灵敏系数  $A$  值，与应变仪的体积大小成正比；而液压型仪器是，当探头体积较小时为正比关系，在体积较大时，灵敏系数则渐趋饱和。于是应当选择一个较为经济适用的体积范围，称之为设计中的优化理论<sup>[1]</sup>。

本项目中对这一体积范围作了计算，给出了体应变仪灵敏系数  $A$  的理论解。通过 22 套体应变仪的测试数据表明，实际的  $A$  值与理论值十分相近。这一结果一方面证明了探头生产质量的可靠（探头内一旦含有微量气泡， $A$  值即会有明显下降）；另一方面表明体应变仪最佳体积的优化理论符合实际情况。

于是，TJ-2 (A)、TJ-2 (B) 型体应变仪的探头已在直径 130 mm 的钻孔中成功安装，今后还可将外径为 88 mm 的 TJ-2 (C) 型仪器在直径 110 mm 的岩孔中安装。探头的长度也有了明显缩短，可在火车或小汽车上随安装人员同行运输。

### 2. 双传感器的安装技术

不仅探头的直径缩小，而且在其内又增加了一支备用传感器（图 1）。工艺上的困难已经解决。备用传感器是为了延长探头的使用寿命，一旦主体传感器损坏（例如遭雷击），可将备用传感器接替运行。

### 3. 信号处理流程的改进

结合整机动态范围指标的大幅度提高，在应变信号数据链之三个环节（传感器、前级电路、主机）的方案选定、性能调试中，都注意并已作到了：

(1) 频带宽度为 0~10 Hz。钻孔应变仪的优点之一为其优良的高频特性，液压型体应变仪比液位型体应变仪具有更好的频率响应。因此，全部电子线路应将高频率截止端设于 10 Hz 以上。



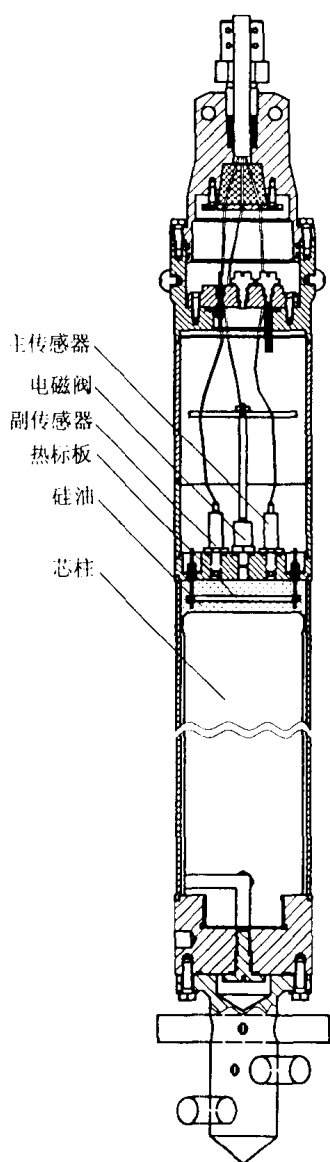


图1 TJ-2型体应变仪的内部结构

表明, 只要不更换或维修仪器, 该电学零点的年变化量明显小于  $1 \times 10^{-7}$ , 尚未出现需要作此校准的情况, 但有此检测装置毕竟有助于可靠性的充分保证。

### 5. 标定重复性的提高

为检测体应变灵敏系数  $A$  值是否依时间有明显变化, 所设置的热电阻标定方法, 是一种相对较为“直接”的力学量输入标定方法, 即相当于直接向探头加力。国外传统的作法是恒电压通电 5 s, 标定的重复误差为 5% 或再高些。

经分析, 重复误差较大的原因, 在于硅油受热后在腔体内产生的热运动, 并有少量热量传递 (损失) 于金属器件上。硅油受热后运动状态的不确定性致使标定的重复性受到了影响。

(2) 综合观测误差小于 1%。三个主要环节 (传感器、井下机械装置及前级电路) 的线性误差、重复性误差及迟滞误差三者构成的综合误差应明显小于 1%, 实测值在 0.5% 以下。

(3) 总输出的噪声水平小于 0.1 mV。为了与公用数据采集器相匹配, 仪器电输出的噪声水平应明显小于 0.1 mV, 以确保数字化输出曲线的平稳。一些台站的测试结果为 0.04 ~ 0.06 mV, 它相应的体应变值为  $2 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-10}$  或再小些。

(4) 每个环节的动态范围必须大于 86 dB。只有当每个环节的动态范围大于 86 dB, 且相互间的电平有恰当匹配时, 才能保障观测系统总的动态范围达 86 dB 以上, 实际值可达 96 dB 以上。

### 4. 电学零点控制在 0 mV 附近

体应变仪的优点之一, 是存在一个绝对的机械零点, 即电磁阀开启时探头的上腔与下腔之间的压力差为零, 此时构成了绝对的机械零点。为了充分体现这一优点, 应当在绝对机械零点条件下令电学量的输出值也为 0 mV, 即电学零点与机械零点完全同步, 同时为零。

在 TJ-2 型体应变仪调试中, 注意了三个环节间的连接及电调零装置的前后协调。于是, 在日常观测中, 通过每次电磁阀开启时刻的电测值, 可直接了解电学系统有无异常, 观测系统自身有无零点漂移或直接了解漂移数值, 以进行数据分析中的零位校准。尽管台站的实际观测效果