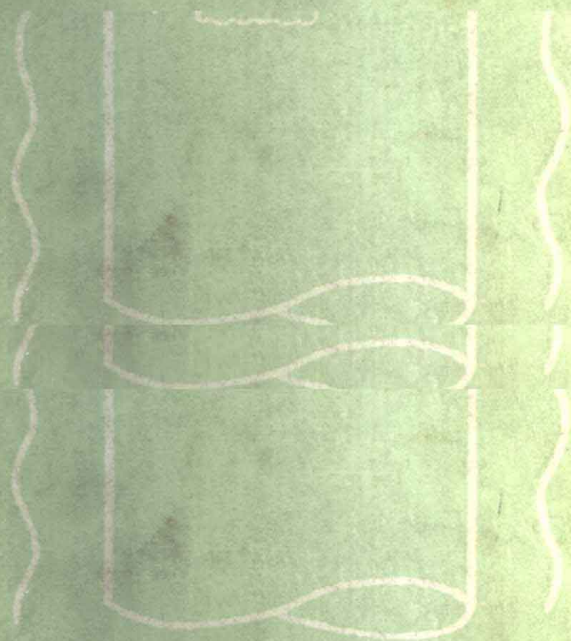


5719

710925

7233

体应变仪专题译文集



国家地震局分析预报中心

9

33

体应变仪专题译文集

刘澜波、杨 军等编译



国家地震局分析预报中心

体应变仪专题译文集

刘澜波、杨 军等编译

国家地震局分析预报中心 编译

北京丰台区靛厂印刷厂 印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.75 字数 397 千字

1983 年11月北京第 1 版 1983 年11月第 1 次印刷

印数: 1,000 册

(内部资料)

前 言

体应变仪的设想早在三十年代就有人提出过,但只是到了七十年代初期,才由美国卡奈基研究所的 Sacks 与得克萨斯大学的 Evertson 成功地研制出精度高、设计合理、适用于地球物理观测的实用仪器。该仪器被命名为 Sacks—Evertson 体应变仪,或称为钻孔应变仪。经过十余年来在美国、日本、南非、冰岛等地的观测实践证明,这种仪器具有许多优点,是其它类型的应变仪所无法比拟的。它的观测精度高(可达 10^{-11} 应变),工作频带宽(响应频率从零频到几赫兹),不易受高加速度冲击的破坏,应变测量值的失真度小。仪器安装在数百米深的钻孔内,尽可能地避免了太阳辐射热效应、气压波动,降雨等自然因素的干扰。它可用于地震前兆观测、确定震源参数与震源过程、应变固体潮观测、火山与地质构造,缓慢地震等方面的研究,利用这种体应变仪,美、日等国的学者已在以上各项研究工作中取得了重要的成果。

由于以上特点,自该仪器问世以来,它已经受到各国地球物理学界人士的广泛重视。日本科学家在 Sacks—Evertson 型仪器的基础上加以改进,已经成功地研制出了日本型的体应变仪。作为地震前兆观测的最重要手段之一,数十台这种型号的仪器所组成的观测网已经安装在日本的东海、南关东地区,以期对未来大地震的预测预报提供重要的依据。我国也已在进行这类仪器的研制工作,并已取得了重要进展。

为了配合京津地区地震试验场体应变仪的引进、安装、观测分析工作,我们编译了这个译文集,将可能收集到的有关这方面的文献尽可能地收集在一起,以便为今后从事这项工作的同志提供一个手册性的参考资料。同时,也可使对这方面工作有兴趣的同志对该仪器有一个初步的了解。

由于编译者水平所限,在论文的选择和编译工作中定有不当之处,敬希读者指正。韩燕田、田公兴、杨懋源同志参加了部分译文的翻译、审校工作;封面设计:郭铁拴。

译 者

目 录

用于地震学研究的钻孔应变仪·····	1
Sacks—Evertson 应变仪, 它在日本的安装以及与应变阶	
有关的某些初步结果·····	79
地壳变动的连续观测与钻孔应变仪 (I) ·····	89
地壳变动的连续观测与钻孔应变仪 (II) ·····	113
用 Sacks—Evertson 应变仪在南非矿井深部记录到的震时	
与短期应变变化·····	119
近震地震矩的确定·····	141
半无限介质表面的应变与倾斜·····	147
视应力: 静态应力降的计算·····	155
1980年的 Hekla 喷发——中脊火山的机制·····	159
钻孔应变仪的标定·····	164
在表面压力作用下地球模型的变形·····	167
英国海洋负荷应变潮的计算·····	175
海洋地壳的生成·····	194
慢地震与应力再分布·····	198
1978年伊豆——大岛地震后的慢地震序列·····	205
1978年1月14日伊豆——大岛近海地震的调查报告(补充)·····	221
用 Sacks—Evertson 体应变仪在南非矿井深部记录到的震	
时应变阶·····	224
慢地震的存在与地震活动区内的应力再分布·····	225
应力重新分布与缓慢地震·····	226
地震学会讲演预稿集(选译)·····	232
附录1: 专用名词索引·····	257
附录2: 《用于地震学研究的钻孔应变仪》参考文献·····	259

用于地震学研究的钻孔应变仪

摘 要

本报告所讨论的钻孔应变仪是安装在数百英尺深的地壳钻孔中的装置。作为一种新型仪器，地震学者可以用它来测量动态和准静态应变活动。与以前的应变仪相比，仪器的改进带来了信噪比的提高。

为便于进行理想仪器特性和真实仪器的近似特性的理论讨论，假设仪器位于一均匀的、弹性半空间的边界附近，这一空间的泊松比为0.25。不难看出，就仪器对压缩波、剪切波、表面波、大气噪声和应变阶的响应而言，边界是一个占主导地位的因素。

各种不同的源所产生的理想的正应变分量，如垂直应变、面应变和二者的总合应变可以作为深度的函数而导出，对压缩波和剪切波也可作为出射角的函数来导出。通常，它们由位移表达式的偏微商得到。

真实应变仪特性的近似理论，可由一个连接于孔壁的圆环模型求出。环内壁上的应变分量可以用远离钻孔处的应力来表示。应力是用虎克定律和前面得到的理想应变分量导出的。

最后，环内壁的运动由油传递给所使用的换能器，测量系统和标定系统的描述由系统的机械和液力部分的电学模拟完成。

我们正从两个测点上取得资料。样机安装在华盛顿Carnegie研究所的大地电磁部。第一台仪器，或称为体应变速率计，安装于1969年。这种仪器是垂直和面应变速率计的组合型仪器，最后才试制成用于地方震多发地区的体应变仪。与最近的Carnegie型仪器相同的三台应变仪已经安装于日本本洲中部的松代附近，构成了应变仪台网，这里是一个地震活动区。本文将报导在两个测点上得到的实验结果。

用应变表示，仪器噪声和误差范围大约从 10^{-1} 赫兹时的 10^{-12} 到 10^{-5} 赫兹时的 10^{-10} 左右。在日本，已经清晰地记到了一个大约为 3×10^{-11} 的应变阶。

对于希望使用钻孔应变仪的人来说，本报告可以作为入门读物和手册。相对较低的代价，低噪声及已经获得的经验，所有这些都充分地表明，仪器的进一步发展和使用是可能的。

目 录

第一章 绪论	3
A. 背景	3
B. 钻孔应变仪的早期研制	5
C. 本报告涉及的范围	10
第二章 平面边界附近的位移和应变	11
A. 引言	11
B. 无限固体中的传播	11
1. 膨胀波或 P 波	
2. 剪切波或 S 波	
C. 应力自由平面边界上的反射	12
1. 位移	
2. 反射系数	
a. P 波	
b. SV 波	
c. SH 波	
d. 一些定义	
3. 位移和应变	
a. P 波	
b. SV 波	
D. 与瑞雷波有关的位移和应变	26
1. 位移	
2. 应变	
E. 平面边界上正应力按余弦函数分布时的位移和应变	29
第三章 钻孔应变仪的耦合	31
A. 引言	31
B. 平面边界附近的应力	31
1. P 波	
2. SV 波	
3. 瑞雷波	
4. 平面边界上的大气噪声	
C. 垂直于平界面的圆孔壁上的应变分量	33
1. 面应变	
2. 垂直应变	

D. 与钻孔同轴的钢管内部的应变分量·····	41
1. 垂直应变	
2. 面应变	
第四章 钻孔应变仪的近似特性·····	44
A. 引言·····	44
B. 模拟分析·····	47
1. 用分块参数力学系统对应变仪的模拟	
2. 模拟电学系统	
3. 模拟电学标定系统	
C. 感兴趣的振幅和频率范围·····	56
D. 钻孔应变仪对几种源的响应·····	58
1. P 波	
2. SV 波	
3. 瑞雷波	
4. 大气噪声	
5. 应变阶	
E. 某些工艺方面的考虑·····	68
1. 材料	
2. 结构和填料	
3. 关于胶结混凝土的一些特殊问题	
4. 点位的选择	
第五章 结果和结论·····	72
A. DTM—CIW 安装结果概要·····	72
B. 在日本安装的结果·····	73
C. 理论研究结果概要·····	77
D. 结论·····	78
E. 进一步的发展·····	78

第一章 绪 论

A. 背 景

地震仪是地震学家用来研究地震及其有关现象的主要工具。现在已经处于高度发达阶段的摆式地震仪,大约是在 100 年前发明的。在地球中,由于扰动,引起了应力波的传播,地震仪的功能是真实地记录与这种传播有关的运动。地震学测量通常使用各种仪器来实现,这些仪器对位移、应变或者倾斜,以及它们对时间的微商具有不同的响应。它

们分别称为地震计、应变计和倾斜计。地震计或应变计与一个记录器的组合一般称为地震仪。

地震学者们通常存在着一种信念(或者希望):即,如果对地震和它们的成因有足够地了解,则地震预报或预测是可能的。业已证明,使用足够灵敏和稳定的应变仪,有可能发觉并判定震前应变场的改变^[1]。由于应变大致按距离的立方衰减,所以必须使用高灵敏度的仪器^[2]。特别是在数百英尺深钻孔的静态环境下,通过提高信噪比,似乎可以利用应变和应变速率记录来加强这方面的认识。

据作者所知,以前所有的应变地震仪系统,是通过测量地球内部(或地表面)两点之间的相对运动,然后,将相对运动除以两点之间的距离来求出线应变。正象现在人们所知道的,线应变地震仪是 Benioff^[3,4] 所作出的重大成果之一。Milne 在日本、Odonne 在意大利分别作了测量地表两点间相对运动的早期尝试^[3](1890—1900)。Milne 给他的仪器安装了图示记录。他利用相距 3 英尺的两个基墩及机械联动装置,在 1 赫兹时,获得了大约 30 倍的放大倍数(笔位移相对于地面位移的比率)。即使是很大很近的地震,画在熏烟玻璃上的记录曲线的振幅也只有几毫米。Milne 也被列为地震仪的发明者之一。Odonne 的装置的基准长度是 3 米,用一根杆将基墩之间的相对运动通过一个焊在活塞上的隔膜传给密封的、充满液体的罐。用小的瞄准镜观测弯液面的位置,即可得到读数。观测到了附近火车通过导致的弯液面运动,但没有观察到地震。Odonne 的系统没有任何记录能力。

由于与检流计联结使用的高灵敏度电磁换能器的发展^[3],使 Benioff 有可能造出线应变地震仪。这种早期的换能系统首先运用在垂直地震计上,随后即装在应变测量系统中。这种仪器的基准长度是 20 米,由内径为两英寸的铁管组或,沿管的长度方向上有 12 个支撑点,每个点用三根自行车辐条作支撑。这就是第一个周期大于 100 秒的、记录长周期地震现象的装置。

现代的线应变地震仪通常设置在隧道或矿井中;它们的长度可达 100 米,用熔融石英管传递墩子的运动。这些装置称为伸缩仪。熔融石英的热膨胀系数是 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,这种高度的热稳定性正是所需要的。既使是用一级温度补偿,隧道中 0.01°C 的温度变化就能产生相当于 0.5×10^{-9} 应变的噪声。通常,水平伸缩仪安置在小山边坡的隧道内,而这样的安装方式总要感受到由于太阳日辐射使山体不均匀受热所产生的应变噪声。

将许多石英管组装在一起时需特别小心,要保证这些管子之间的位置不会改变。石英管组件的固有频率必须要高于所要观测的频率范围。对于靠近震中区的装置,由于需经受较高频率和较大的加速度振幅,这就需要更加严格地保证以上要求。虽然伸缩仪悬挂系统传感器可能发生变化,但通常使用的电容位移^[4]型换能器都具有零频响应。就最大分辨率而言,电磁换能器可以用来作应变速率传感器。位移换能器的标定方法很多,从联动分划千分尺的运动,直到光学干涉仪,都可以应用。

最近,激光伸缩仪得到了发展,它是用干涉技术来测量相对运动的。与石英管伸缩仪相比,它还相当昂贵,复杂,且难于维护。虽然激光型仪器不用进行多重联接而带来

[1] 上标的数字指文献目录中的参考资料。

减小噪声的优点，但是，业已证明，在光通道上所需要的光学性质的不变性却是难于维持的。现今，石英管伸缩仪是可用的所有仪器中最接近标准应变仪的一种仪器。

Benioff^[3](1935)提出了膨胀仪或体积应变仪的概念，它是一个非常接近地表的，充满液体的球形容器。图1表示他所设想的体积应变仪的示意图；安装在连通颈或管上的小波纹管的运动通过电磁换能器监测，但是，还不知道这种装置是否曾经制造出来过。

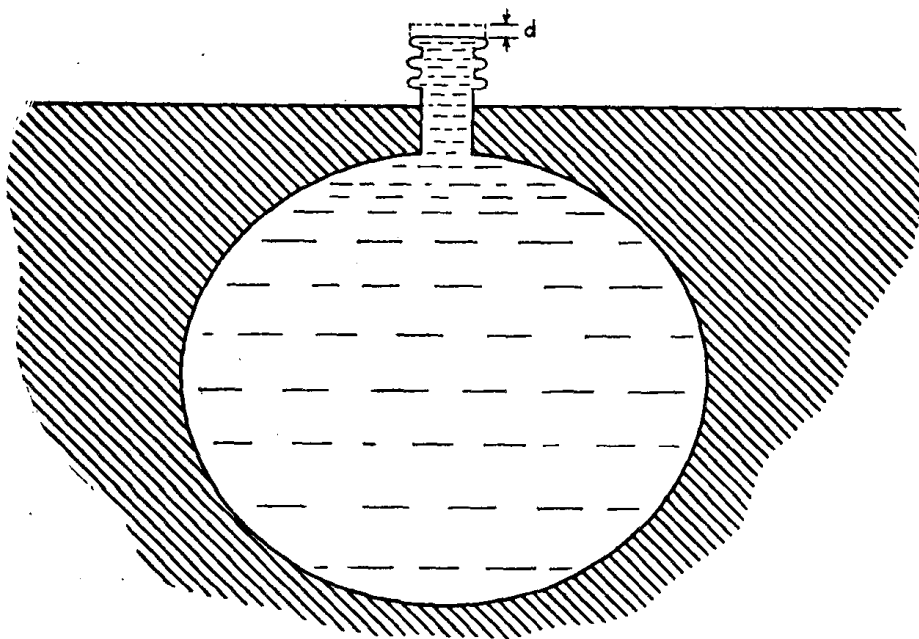


图1 Benioff膨胀应变仪示意图

Pekeris^[5](1940)建议使用膨胀计来研究固体潮。在这本述评性的出版物中，讨论了几个作者的发现，这几个人报道了井水水位的变化，可能与固体潮有关。推测是，井打在岩石里，水受岩石挤压而扩散，因而造成了水位的变化。但是，Pekeris的建议似乎没有引起人们的重视。

B. 钻孔应变仪的早期研制

1965年，华盛顿Carnegie研究所的I. S. Sacks博士开始与搞电化控制元件换能器（在发表的文献^[6]中已予以描述）的本文作者进行合作。在此后的访问中，Sacks建议在膨胀仪或体应变仪中，可用电化控制元件作为一种换能器。那时，能被广泛承认的地球噪声的估算是Brune和Oliver^[7]作出的。作为频率的函数，噪声估算值表示在图2中。他们最初将数据显示为周期的函数。脉动接近于1赫兹，大约相当于 10^{-10} 应变；固体潮近乎于 10^{-5} 赫兹，相当于 10^{-8} 应变。电化控制元件的电流灵敏度为40安培/厘米³/秒，在 10^{-1} 赫兹到 10^{-2} 赫兹频段内，已知电流噪声小于 10^{-8} 安培。若使用传感体积为30升的水，并假设全部膨胀都通过电化控制元件，则噪声在1赫兹时小于 10^{-12} 应变，在

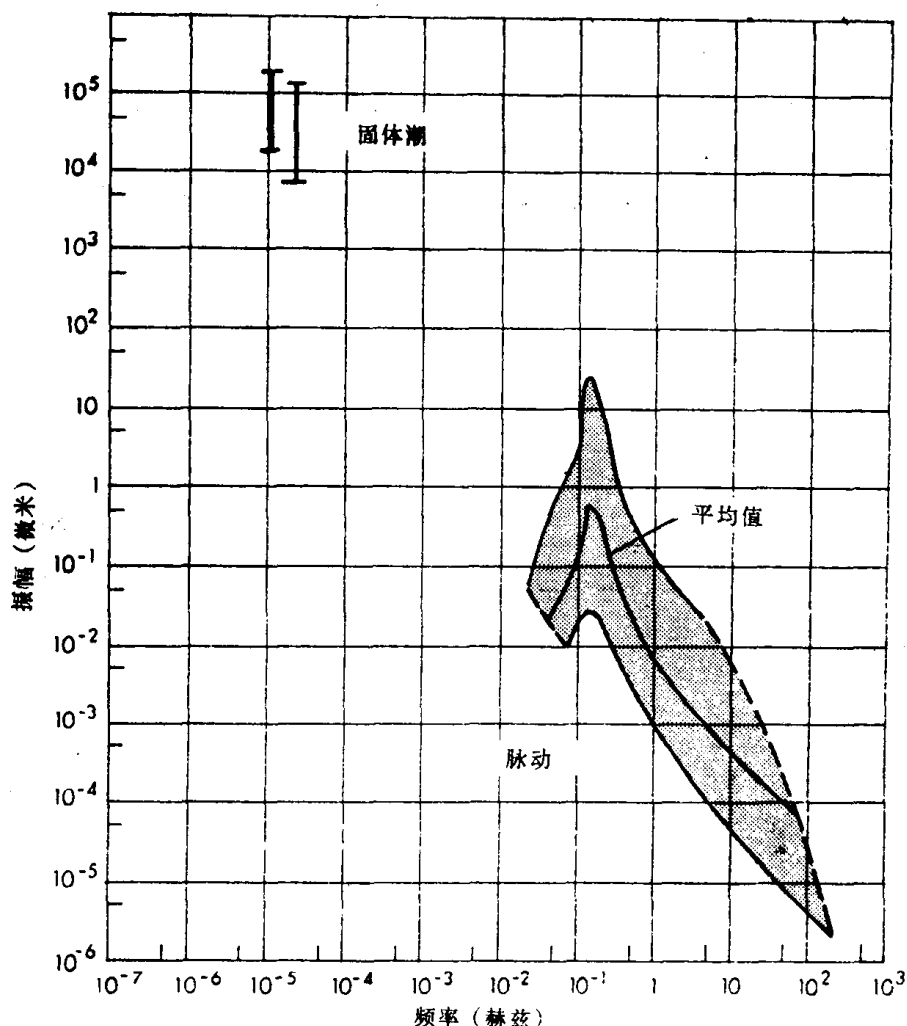


图2 Brune和Oliver给出的地震噪声

固体潮频段内小于 10^{-8} 。

在Sacks的鼓励下，作者设计并制造了第一台安装于钻孔中的体应变仪，作为进一步研制的样机。这个应变仪的草图如图3所示。1968年8月，这一应变仪安装于华盛顿Carnegie研究所大地电磁部（DTM—CIW），深度大约是150英尺。没过几天，甚至当混凝土仍处于固化过程中，在电化控制元件系统的输出端，用一个Simpson型电压表就可以观测到微震。1968年9月，即固化一个月之后，Sacks^[8]就记录到了图4中的地震。在以后的一个月中，为了记录和研究固体潮，Sacks使用了严格的低通电子滤波。典型的记录^[9]如图5，在预期的水平上明显地表现出半日潮，但迭加了原因不明的噪声。这种噪声以前并未记到过，它显现出与天气条件有关。随后，作者给Sacks提供了一个电化控制元件的微气压计用以进行比较。从图6的图示关系中，似乎可以看出结论性的证据：大气压的局部波动确实是噪声源。用相同的仪器进行相关试验，Dorman^[9]报道，从 10^{-8} 赫兹到 10^{-2} 赫兹间的相关系数为0.8到0.95，大约在 2×10^{-2} 赫兹时，相关性急剧下降。

由于 Carnegie 研究所 Harry Wood 基金的资助，作者设计并帮助在大地电磁部安装了一台带有两个电化控制元件换能器的、定向钻孔应变仪，如图 7 所示。在这个系统中，体应变被分成垂直应变分量和面应变分量。在换能器之前，加置了液力和声学的滤波器来作为两个低通滤波组件，以防止特大地震产生的应变波动使电化控制元件过载。在一个远距离地震波通过期间，第一台电化控制元件应变仪的电饱和大约为 30 分钟。

这台定向的电化控制元件应变仪所记到的地震图，如图 8 所示，面应变的信噪比大约是垂直应变的两倍。这个特征将在大气噪声这一节中作更充分的讨论。定向系统所遇到的困难是总要经受一种奇特的噪声，甚至过了 6 年以后仍然如此。偶尔，噪声脉冲也在两个信号上同时显现。随着时间的推延，两者产生了分离，但仍然出现。我们认为，这些噪声脉冲是由截留在液体中的空气所产生，截留空气可能存在于滤波系统中的波纹管管和毛细管的某些部位。当仪器安装时，有两种因素使这一系统不能够成为真空。首先，填充的溶液是三氯甲烷和水，在真空条件下，它们会继续沸腾，所以不可能被脱气。其

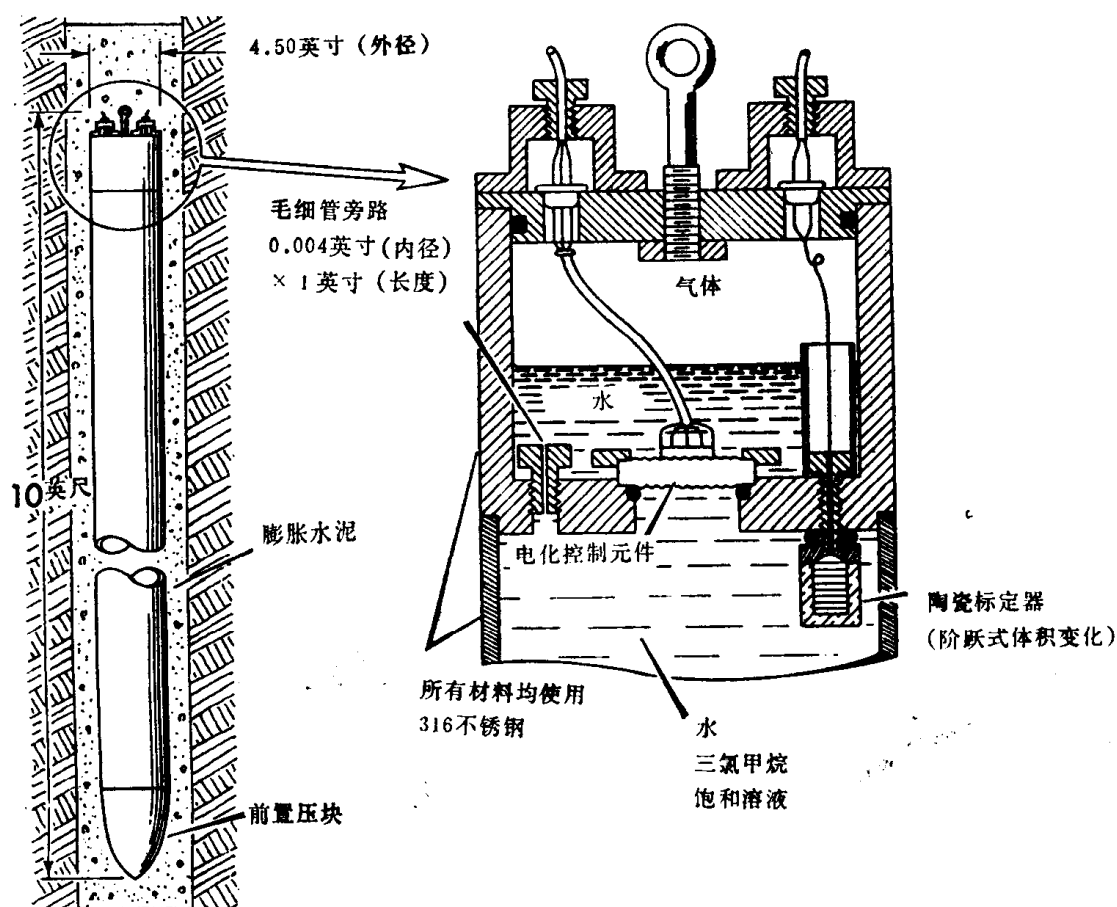


图 3 第一台膨胀钻孔应变仪的频率响应与应变速率成正比

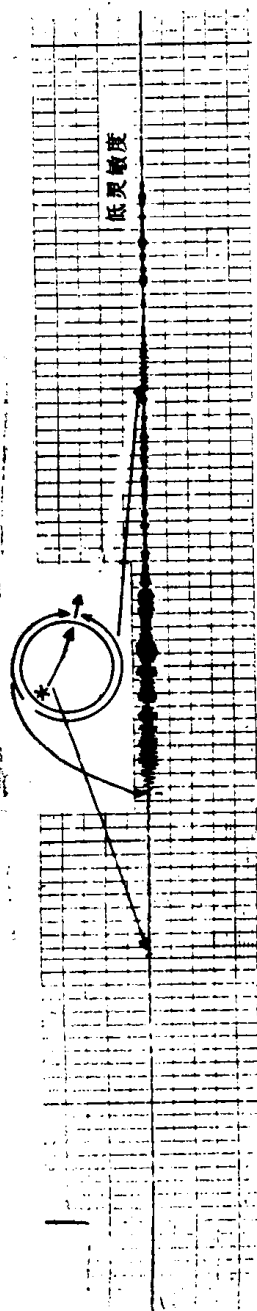


图 4 新几内亚地震的应变速率记录

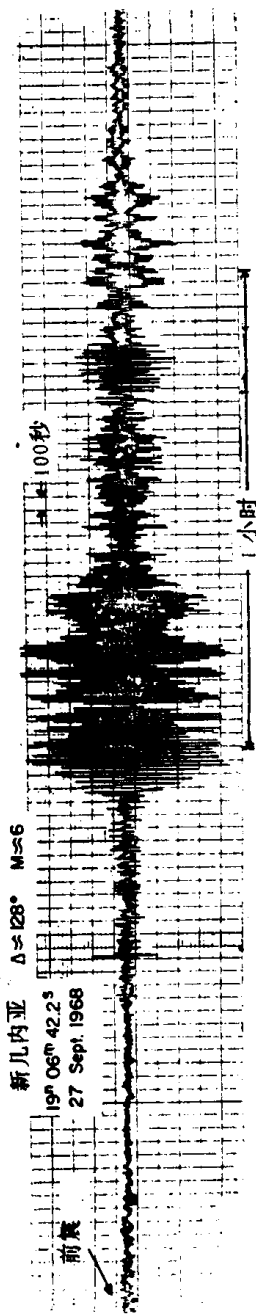
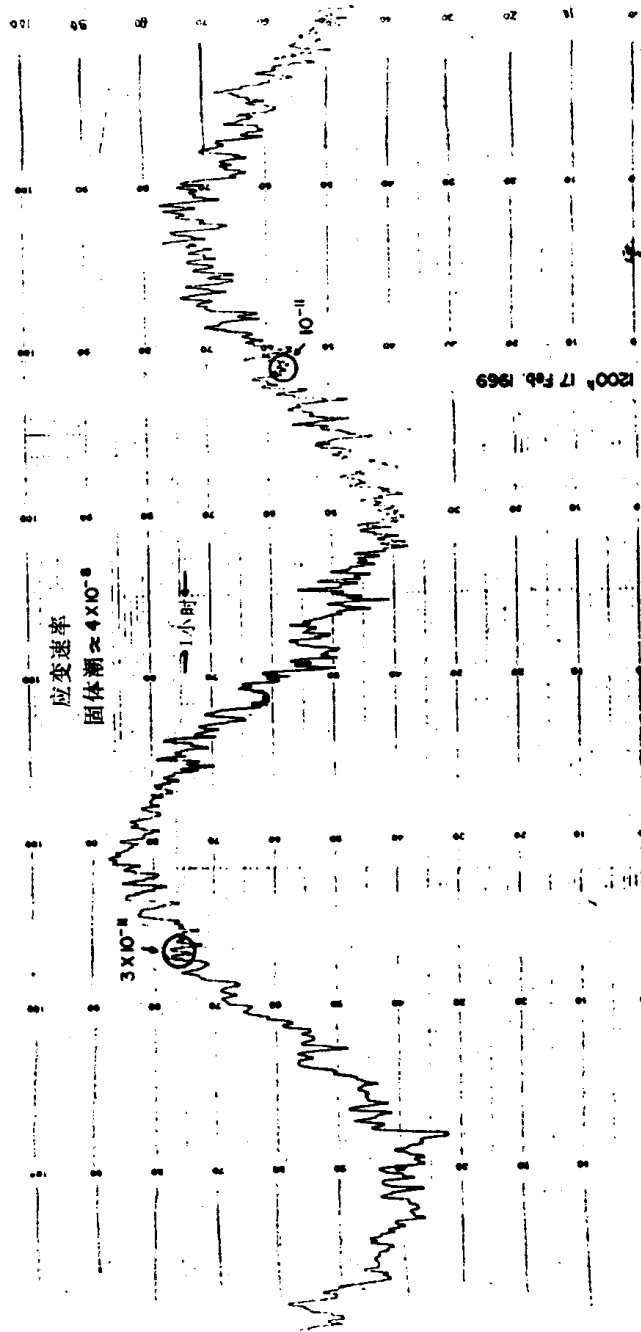


图 5 固体潮的应变速率记录和大压力波动引起的噪声



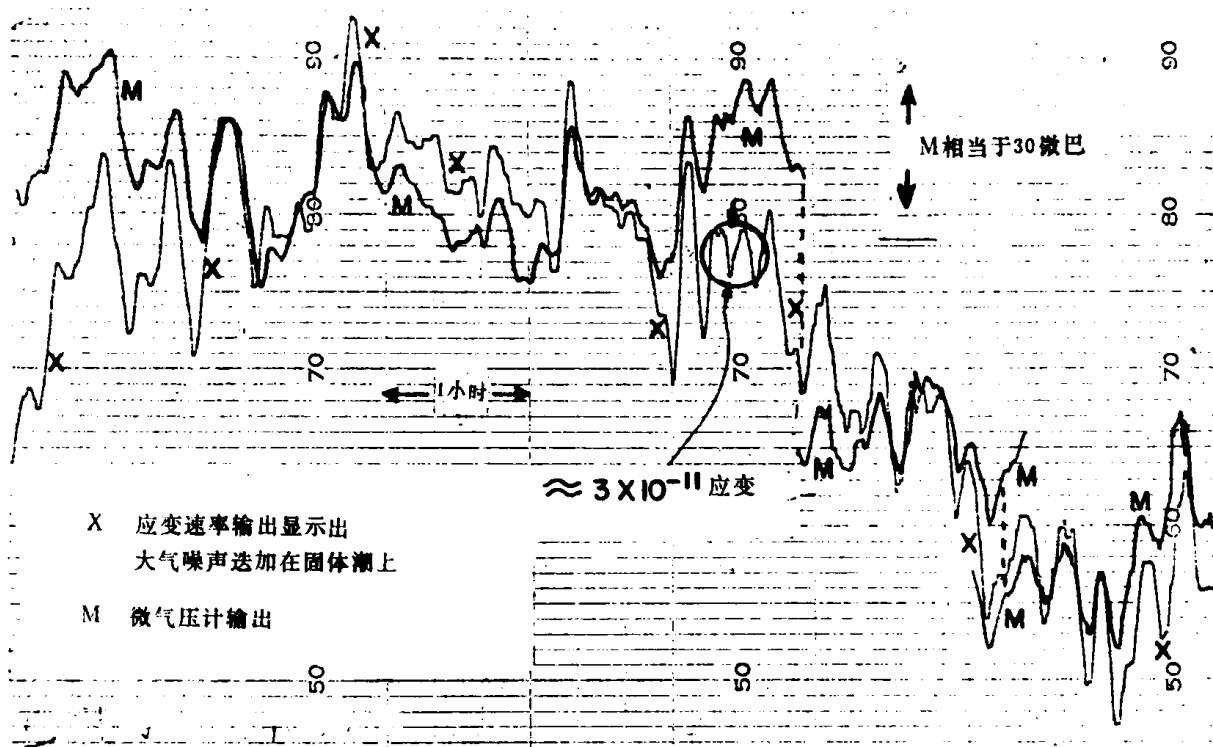


图6 应变速率和微气压计记录的比较

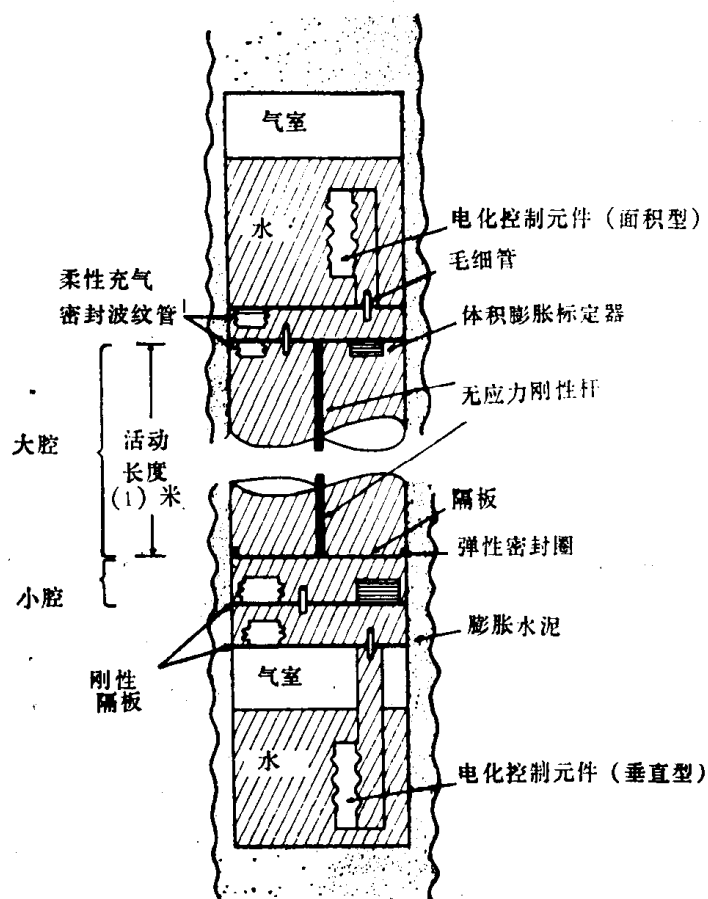


图7 具有应变速率响应的垂直和面应变组合型仪应变示意图

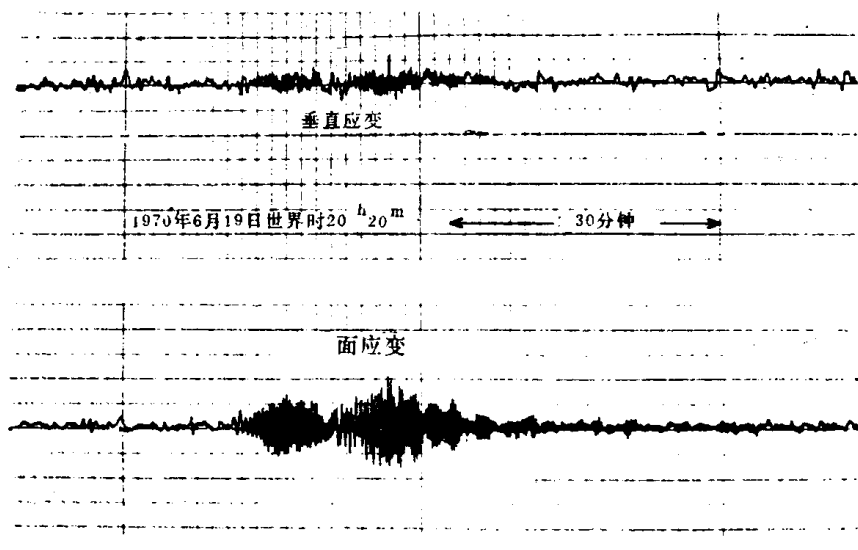


图8 两个斐济地区地震的瑞雷波

次，已经发现，电化控制元件换能器在真空中可能损坏，而且这种元件是缺乏补给的。该元件由奥斯汀的德克萨斯州立大学应用研究实验室（ARL）制造，于1965年停产。另外，电化控制元件应变仪也不能令人满意地测出应变阶。看来，如果要继续进行研制，就必须进行新的换能器系统的研究。

作者用压电陶瓷换能器作水下声学试验的经验使作者相信，陶瓷双压电晶片型换能系统可以接近电化控制元件系统所达到的噪声水平。另一优点是，双压电晶片造价低廉，易于使用。因为Sacks用过具有零频响应的空气芯差动变压换能器，所以，决定制造以硅油填充真空的新型膨胀应变仪。两种换能器都被采用，对较高灵敏度用双压电晶片，对零频响应用差动变压器，现已生产了五套这类仪器，第一套安装在大地球磁部进行试验，其他安装在日本松代附近的地震活动区。

C. 本报告涉及的范围

本报告的主要论题是描述最新型或称为日本型应变仪的设计及特性；不过，在这一研制过程中所使用的理论，可以很容易地运用到其他钻孔型应变测量系统中去。

下面将系统地研究对钻孔应变仪的四种基本影响。它们是：（1）膨胀波或P波，（2）剪切波或S波，（3）瑞雷波，以及（4）大气噪声。对它们的研究分两方面，首先是研究在理想弹性半空间的边界附近理想应变分量受到的影响。其次是用导出的以上四种影响所造成的自由应力场来论述钻孔和空孔的影响。对这种应力的认识将导致应变仪与应力耦合近似理论的发展。这种近似理论也可用来检验半空间表面附近的耦合应变阶。报告还将给出更为重要的应变仪的工艺细节，以及一些日本型应变仪的结果。

第二章 平面边界附近的位移和应变

A. 引言

Love对弹性波传播的研究作了历史性的描述^[10]。Poisson发现,固体中可以存在两类以不同的速度传播的波。Stokes指出,这是“无旋膨胀波”和“等体积畸变波”。它们分别是熟知的压缩波或叫P波、及剪切波或叫S波。

为了本文的研究目的,仅论述平面波,因为震源—接收器的范围是从数十英里到数千英里,所以,这是一个合理的限制;波长是在十英里量级或更大些。进一步的限制是将介质考虑为均匀的、各向同性的,这样,波动产生的任何变形都是弹性的。这些限制的目地是为了使研究不至于过分复杂,这样位移和应变就都是入射波所造成的。

在此所作的论述完全遵从Ewing^[11]、White^[12]、和Gupta^[13]等人的结果。在应力自由表面附近,将纵波和垂直偏振剪切波的单位位移振幅作为出射角和深度的函数,求出了位移和应变分量的稳态值。

正如以前所讨论的,气压扰动也是应变仪讯号的一个噪声源。边界上的噪声模型可用静态正弦形的应力分布表示。Fung^[4]给出了这种边值问题的位移解。对位移求导数即可得到所期望的应变分量。

B. 在无限固体中的传播

Ewing^[11]对均匀、无限固体介质中应力波传播理论的经典研究作了相当完整的总结。不失一般性,在xyz直角坐标系中,可设平面波的运动仅限于xz坐标面,且沿x轴方向传播。可用两种情况来说明运动。

1. 膨胀波或P波

假设质点位移 u 平行于 x 轴,且仅与 x 和 t 有关。这种类型的波除了可称为膨胀波或P波之外,还可称为压缩波、纵波、或其他名称。为避免语义混乱,本文只用膨胀波或P波来代表这一类型的运动。膨胀意味着每个单位体积的体积变化,或称为体应变。

Ewing给出如下的运动方程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

这里, λ 和 μ 是表述介质特性的Lamé常数, ρ 是物质密度。

方程 (1) 是一个一维波动方程, 它有如下形式的解:

$$u = F\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) + G\left(t + \frac{x}{\alpha}\right) \quad (2)$$

式中, F 和 G 是一任意函数, 它们的一、二阶导数存在, α 是传播速度。函数 F 表示沿 x 正方向传播的扰动, G 代表 x 负方向的扰动。

如果 P 波速度取为

$$\alpha = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

即可满足运动方程。按运动的定义, 只有一个应变分量存在, 这就是正应变分量 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 。

2. 剪切波或 S 波

我们对无限固体介质关心的另一种运动是平行于 z 轴的质点运动 w , 它仅依赖 x 和 t , 这是一种纯粹的畸变运动, 其运动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4)$$

另外, 该方程是一维波动方程, 如果剪切波速度 β 取为如下形式,

$$\beta = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

即可满足方程。在这种情况下, 仅有的应变分量为剪应变 $\frac{\partial w}{\partial x}$ 。

C. 在应力自由平界面上的反射

通常, 波的传播受到介质中间断面上反射和折射的支配。在应力自由平界面上只有反射。因为所有的地震测量均在地表及其附近进行, 且反射是位移和应变的主要影响因素, 因此, 必须对反射效应加以讨论。

1. 位移位

Morse⁽¹⁵⁾ 阐述和证明了“赫姆霍兹” (Helmholtz) 定理, 该定理将任意有限大小、均匀、连续、并在无穷远处为零的矢量场描述为:

$$\vec{S}(u, v, w,) = \text{grad } \phi + \text{curl } \vec{\psi}(\psi_x, \psi_y, \psi_z^*) \quad (6)$$

• 原文为 ψ_x , 有误——译注。