

引用格式: 彭华, 马秀敏, 孙尧, 等, 2023. DRY-1B 型电容分量式钻孔应变仪关键技术与应用 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 313–323.

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232902

Citation: PENG H, MA X M, SUN Y, et al., 2023. Key technology and application of DRY-1B capacitive component borehole strain gauge [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 313–323. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232902

DRY-1B 型电容分量式钻孔应变仪关键技术与应用

彭 华^{1,2,3}, 马秀敏^{1,2,3,4}, 孙 尧^{1,2,3}, 姜景捷^{1,2,3}, 郝 飞^{1,5}

PENG Hua^{1,2,3}, MA Xiumin^{1,2,3,4}, SUN Yao^{1,2,3}, JIANG Jingjie^{1,2,3}, HAO Fei^{1,5}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074

1. *Institute of Geomechanics, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Crustal Stress and Strain in Beijing, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*

Key technology and application of DRY-1B capacitive component borehole strain gauge

Abstract: This paper briefly describes the theoretical basis of the DRY-1B capacitive component drilling strain gauge (drilling strain gauge). It discusses critical technologies such as micro-displacement sensing, noise reduction, temperature control, performance testing, and calibration. The strain gauge achieved high resolution ($\geq 5 \times 10^{-11} \epsilon$), wideband (10–100 Hz optional), extensive dynamic range ($\geq 1 \times 10^{-3} \epsilon$), 24-bit AD recording, low power consumption ($< 3W$), and other technical indicators. Its performance is better than the United States PBO and Japan borehole strain gauge of the same period, and it is an international leading long-term observation instrument for crustal movement, which can basically meet the observation requirements of creep movement with slow accumulation of long-term strain and seismic and volcanic activity with a rapid change of short-term strain. Since 2008, through the application of more than 20 geostress stations, the borehole strain gauge has recorded a large amount of strain information, such as crustal deformation, fault activity, co-seismic strain wave, strain step, and ore pressure activity. Based on the results of the self-consistency test of strain monitoring data of the geostress station in the Beichangshan Mountain and the analysis of seismic mapping capacity of the Turkey earthquake, it is found that the strain curves of the 1#+3# and 2#+4# capacitance sensors at the Beichangshan Mountain stress station are generally stable, and the correlation coefficient R^2 is 0.95. The annual variation rate of the differential strain of 1#–3# and 2#–4# elements is 10^{-8} magnitude, which reflects that the shear stress is dominant in the Long Island area and the stress environment of seismic activity is relatively high. The strain gauge was used to observe the apparent co-seismic strain response of Turkey's $M 7.8$ and $M 7.5$ earthquakes on February 6, 2023. In particular, it obtained the $M 7.8$ main seismic surface wave period of 50–60 s, presenting an out-facing wave anomaly. Theoretically, the strain

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20230249, DD20230014); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费 (DZLXJK202106)

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grants DD20230249 & DD20230014) and the Basic Scientific Research Fund of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (Grant DZLXJK202106).

第一作者: 彭华 (1964—), 男, 博士, 研究员, 长期从事地应力仪器研发、地应力测量及监测、地壳稳定性调查评价等研究工作。

E-mail: 13911661856@163.com

通讯作者: 孙尧 (1983—), 男, 博士, 助理研究员, 从事地震学、地应力测量和监测等方面研究。E-mail: 980483939@qq.com

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-30; 责任编辑: 范二平

wave generated by the $M 0.74$ earthquakes within 100 km can be distinguished, and the application demonstration effect has been achieved. The borehole strain gauge has good popularization value and application prospects in geodynamics research and internal dynamic geological disaster monitoring.

Keywords: capacitive component type; drilling strain gauge; differential capacitance displacement sensor; coseismic strain response; internal dynamic geological hazard monitoring

摘要: 文章简述了 DRY-1B 型电容分量式钻孔应变仪 (简称“钻孔应变仪”) 的理论基础, 攻关了微位移感知、降噪、控温、性能测试、标定等关键技术, 并通过了性能测试, 标定结果表明: 该应变仪达到了高分辨率 ($\geq 5 \times 10^{-11} \varepsilon$)、宽频带 (10~100 Hz 可选)、大动态范围 ($\geq 1 \times 10^{-3} \varepsilon$)、24 位 AD 记录、低功耗 ($< 3 \text{ W}$) 等技术指标, 其性能优于同期美国 PBO 和日本同类钻孔应变仪, 是一款国际领先的地壳运动长期观测仪器, 基本能够满足地壳长期应变缓慢积累的蠕变运动和短期应变快速变化的地震火山活动等观测需求。2008 年以来, 通过 20 余个地应力台站的应用, 该钻孔应变仪记录到大量的地壳形变、断裂活动、同震应变波、应变阶跃、矿压活动等应变信息, 并以北长山地应力台站应变监测数据自洽性检验和土耳其地震映震能力分析为例发现: 北长山地应力台站电容传感器 1#+3#和 2#+4#元件应变曲线总体平稳, 相关系数 R^2 达到 0.95; 1#-3#和 2#-4#元件的差应变年变化速率为 10^{-8} 量级, 反映出长岛地区以剪切应力为主, 且处于地震活动相对高的应力环境; 利用该应变仪观测到 2023 年 2 月 6 日土耳其 $M 7.8$ 级和 $M 7.5$ 级两次地震明显的同震应变响应, 尤其是获取了 $M 7.8$ 级主震面波周期为 50~60 s, 呈现出面波异常, 理论上可分辨出 100 km 范围 $M 0.74$ 级地震产生的应变波, 达到了应用示范效果。该钻孔应变仪在地球动力学研究、内动力地质灾害监测等领域具有较好的推广价值和应用前景。

关键词: 电容分量式; 钻孔应变仪; 差动电容位移传感器; 同震应变响应; 内动力地质灾害监测

中图分类号: P315.72+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0313-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232902

0 引言

地球表面变形、地壳内部构造运动及其引发的各种地质灾害均与地壳应力作用密切相关, 地壳应力状态的变化是导致岩体断裂、褶皱乃至地震发生的最直接动因 (国家地震局科技监测司, 1995)。高地应力是引起断裂活动、诱发重大地质安全问题的直接动力, 而断裂活动是影响深地资源安全开采、重大工程地质安全的关键因素 (陈念等, 2021; 丰成君等, 2022; 李彬等, 2022; 郑亚东, 2022; 朱思雨等, 2023)。

“十四五”期间, 中国实施深地资源勘探开发战略和一批国家重大工程, 急需加强断裂活动产生的蠕滑变形 (持续应变) 和黏滑错动 (微震) 监测, 捕捉地壳应力应变积累引起的构造蠕变和突发失稳变形特征, 以确定断层的活动方式和活动趋势, 为内动力地质灾害机理研究及其预测提供重要支撑 (范智旋和万永革, 2020)。利用钻孔应变仪开展岩体内部地应变状态随时间连续变化的长期观测, 获取地应变的时空分布特征及其发展规律, 可为内动力地质灾害治理方案、国家重大工程施工设计提供

地应力观测资料 (孙艺玫等, 2021; 樊俊屹和刘高川, 2021; 李富珍等, 2021)。因此, 钻孔应变监测是人类认识地球内部构造运动过程和研究内动力地质灾害发生机理的重要途径, 而钻孔应变仪是实现这一目标的关键利器。

自 20 世纪 60 年代开始, 地震前兆观测成为焦点话题, 世界各国的科研人员们一直努力研发一种能够捕捉地震前后岩体应力状态及其相关地球物理变化的高精度 (分辨率为 $10^{-10} \sim 10^{-12} \varepsilon$) 地壳应力应变监测仪器, 以期实现地震预测预报。体应变仪是一种高精度 (分辨率为 $10^{-9} \sim 10^{-11} \varepsilon$) 应变观测仪器, 但其属于标量应变仪, 无法进行应变张量观测, 数据信息较少, 使用上具有局限性 (Benioff et al., 1961; Sacks et al., 1971; Evertson, 1977; Furuya and Fukudome, 1986; Furuya et al., 1991)。20 世纪 70—80 年代, 为了更精细捕捉地下岩体应力状态及其动态变化特征, 国内外相关科学领域科学家研制出分量式钻孔应变仪 (池顺良, 1993, 2007; Gladwin, 1984; 苏恺之, 2003; 吴立恒等, 2010, 2018, 2022), 但还不能完全满足内动力地质灾害和地震前兆监测需要。

文章针对电容分量式钻孔应变仪存在的稳定性差、精度低、频带不宽、动态范围有限、数据产出

率低等问题,拟采用电动力学、等电位环、压电陶瓷纳米微驱动、高速24位AD等方法,在微位移感知、噪声抑制、温度控制、原位自检与标定等关键技术上取得创新性进展,以期解决观测数据精度低、可靠性差等短板,提高应变仪的分辨率、灵敏度、频带和动态范围等性能,并通过现有地应力观测网络检验与应用,为该类型钻孔应变仪在地球动力学研究、内动力地质灾害监测等领域的推广应用奠定基础。

1 DRY-1B 电容分量式钻孔应变仪

1.1 基础理论与相关公式

DRY-1B 电容分量式钻孔应变仪(简称“钻孔应变仪”)主要由探头钢筒、安装梁和差动电容位移传感器构成。而差动电容位移传感器通过安装梁与外壳钢筒精密焊接在一起,钢筒用膨胀水泥与钻孔的孔壁岩石耦合在一起,孔壁岩石的变形可通过水泥和钢筒传递到电容位移传感器上(图1)。在地应力作用下,由小孔无限大平面中孔壁径向位移问题的弹性力学解算(潘立宙,1981;骆鸣津等,1989;邱泽华等,2005a,2005b;邱泽华,2010),得到钻孔孔径位移量:

$$u = \frac{a}{E} [\sigma_1 + \sigma_2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\theta - \varphi)] \quad (1)$$

式中: u —钻孔孔径位移量; a —圆孔半径; E —围岩的弹性模量; σ_1 —最大水平主应力; σ_2 —最小水平主应力; φ —最大水平主应力方向; θ — u 的方位角。

式(1)为钻孔地应力测量的理论公式,通过测量钻孔多个方向的径向位移和围岩弹性模量,可得到地应力大小和方向。

利用弹性力学的应力-应变关系,可将式(1)改写成 u 与主应变 ε_1 、 ε_2 、 φ 的关系:

$$u = a \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{1 - \nu} + \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + \nu} \cos 2(\theta - \varphi) \right] \quad (2)$$

式中: ε_1 —最大水平主应变; ε_2 —最小水平主应变; ν —泊松比;其他变量同上。

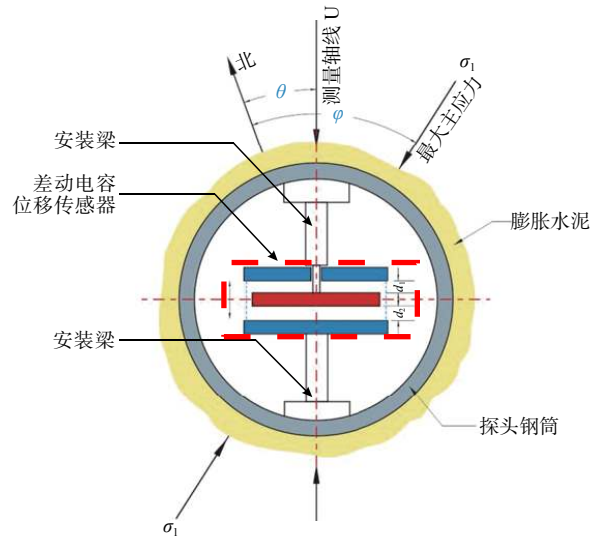
同样,式(2)作为钻孔应变测量的理论公式,通过测量钻孔多个方向的径向位移和围岩的泊松比,可得到地应变大小和方向。

由于用水泥将钢筒与钻孔的孔壁岩石耦合在一起,则电容位移传感器在钢筒中测量的不是孔壁上的孔径位移,故引入 A 、 B 和 A' 、 B' 系数,则钻孔应力观测的位移公式为:

$$u = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (3)$$

式中: A 、 B —待定系数(可利用理论应变固体潮计算得到);其他变量同上。

由式(3)可见,钻孔应力由 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 两个主要因子组成, $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 为应力张量的球量部分,引起体积应变, $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 为偏量部分,引起剪切形变。



σ_1 —最大水平主应力, MPa; θ —测量轴线与地理北的夹角, ($^\circ$); φ —最大水平主应力与地理北的夹角, ($^\circ$); d_1 、 d_2 —极板间距, μm

图1 钻孔应变仪探头结构与电容传感器原理图

Fig.1 Diagram showing the working principle of capacitance displacement sensor

σ_1 —maximum horizontal principal stress, MPa; θ —angle between measurement axis and geographic north, ($^\circ$); φ —angle between maximum horizontal principal stress and geographic north, ($^\circ$)

利用应力-应变关系,可将式(3)改写为地应变公式:

$$u = A'(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + B'(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta \quad (4)$$

式中: $A' = \frac{AE}{1 - \nu}$; $B' = \frac{BE}{1 + \nu}$; E 和 ν 分别为钻孔测点围岩的弹性模量和泊松比; A' —面应变耦合系数; B' —剪切应变耦合系数;其他变量同上。

由式(4)可见,钻孔孔径位移量(u)是体应变 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 和剪应变 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 的线性组合。 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 分别代表应变张量的球量部分与偏量部分,前一个表征地面各向同性的压缩与膨胀面应变,后一个表征地面的剪切形变,故两个因子代表着不同的物理意义(何德强等,2014)。

通过多个电容位移传感器观测到钻孔孔径位移量(u),可得到应力和应变观测结果。根据公式(3),三分量钻孔应变仪只要测量圆孔三个方向的孔径位移量,就可确定整个平面应力 σ_1 和 σ_2 。依据

公式(4),也可确定整个平面应变 ε_1 和 ε_2 ,故电容分量式钻孔应变仪实质上也是应力仪。

对于四分量钻孔应变仪,元件呈均匀分布,且各分量方向相差 45° ,其测量值为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ,则地层主应变和最大水平主应变方向计算如下:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = (U_1 + U_3)/2A' = (U_2 + U_4)/2A' \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{\sqrt{(U_1 - U_3)^2 - (U_2 - U_4)^2}}{2B'} \quad (6)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U_4 - U_2}{U_1 - U_3} \right) \quad (7)$$

$$U_1 + U_3 = U_2 + U_4 \quad (8)$$

式中: ε_1 、 ε_2 分别为地层岩体的最大、最小水平主应变; ψ —最大水平主应变的方位角; $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ —面应变和剪切应变;其他变量同上。

当测量元件方向相差 90° 时,由公式(4)和(5)可得公式(8),即当钻孔中两组相互垂直的测量元件径向位移之和不变(邱泽华等,2005a),故测量元件均匀分布的四分量钻孔应变仪可利用公式(8)检验测量数据是否可靠(苏恺之,2003,2018;池顺良等,2014;邱泽华,2017)。

1.2 电容位移传感器关键技术

1.2.1 微位移感知技术

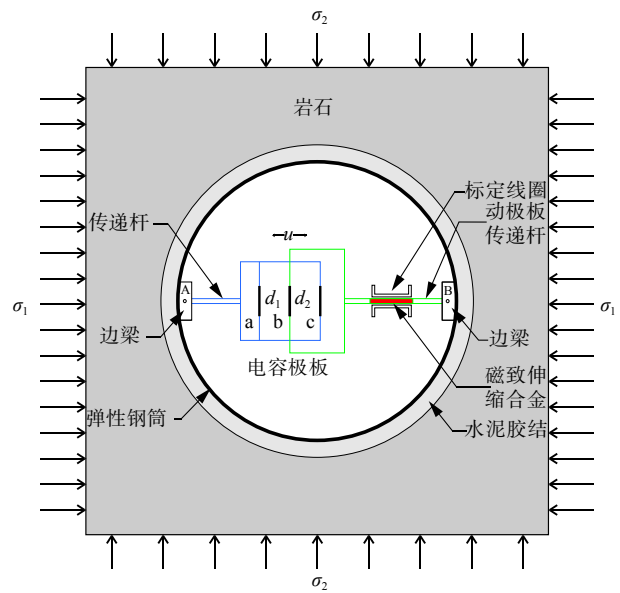
高精度电容位移传感器是钻孔应变仪的核心部件,能够将所测的钻孔孔径位移量(u)转换为电容的变化量,最终转换成电信号输出。该传感器主要由电容极板、线性标定装置和动极板传递杆组成,安装于弹性钢筒内壁呈对称布置的A和B边梁(安装梁)之间(图2)。

电容极板和线性标定装置都是电容位移传感器的重要组成部分。前者因三极板电容具有线性范围宽、线性度好、灵敏度高优点,作为钻孔应变仪的核心元器件,由两块固定极板(a和c)和一块活动极板(b)共三块极板构成,呈平行排列,并采用圆形三极板差动式变间隙结构,构成 d_1 和 d_2 两个差动变化的电容器,受力后可产生电容变化量;后者由标定线圈和磁致伸缩合金构成,能够产生纳米级位移变化,用于检查电容位移传感器的可靠性(图2)。

利用膨胀水泥将钻孔应变仪与孔壁的岩石胶结成一体,在地应力作用下电容位移传感器极板间距会发生相应的变化,致使电容随之发生改变,从而建立岩石形变与电容差动变化之间的关系。

1.2.2 降噪技术

通过屏蔽极板外电场及其边缘杂散电场的干扰,可提高电容的灵敏度。无屏蔽环将极板外环与



σ_1 —最大水平主应力,MPa; σ_2 —最小水平主应力,MPa; u —钻孔孔径位移量(即极板的位移量), μm ; a、b、c—极板编号; d_1 —极板a和极板b之间的距离, μm ; d_2 —极板b和极板c之间的距离, μm

图2 电容位移传感器结构示意图

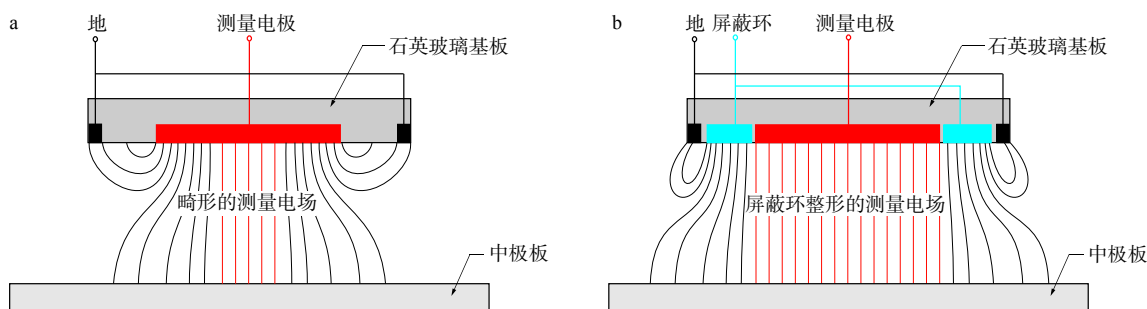
Fig. 2 Schematic showing the structure of capacitance displacement sensor

σ_1 —maximum horizontal principal stress, MPa; σ_2 —minimum horizontal principal stress, MPa; u —displacement of the pole plate, μm ; a, b and c—pole plate numbers; d_1 —distance between pole plate a and pole plate b, μm ; d_2 —distance between pole plate b and pole plate c, μm

外壳接地,可降低外界电磁干扰,但效果不佳(图3a)。另外,为了充分降低极板边缘畸变电场的影响,采用圆形极板镀金、抛光工艺,以减少毛刺与边缘效应,同时在极板周边设置一道屏蔽环,射极跟随器驱动屏蔽环与被测电极形成等电位,可对极板边缘畸变电场进行整形,能够有效压制边缘杂散电场的干扰(图3b),实践表明通过对极板周缘电场屏蔽整形,可大幅降低观测数据的噪声、提高电容位移传感器的性能。通过降噪处理,该电容位移传感器的分辨率达到 $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{m}$,具有微小位移的分辨能力。

1.2.3 控温技术

温度是影响电容极板间距(简称“极距”)的主要因素之一。为了减少温度对电容位移传感器的影响,充分利用温度特性选择材料:极板支撑杆采用与钢筒相同热胀系数的材料,以补偿温度对电容极距的影响;极板采用膨胀系数小的石英玻璃材质,以保证其稳定的尺寸;电极导电材料采用抗氧化、稳定性好的铂或金(图4)。



a—无屏蔽环-电极边缘场凌乱; b—有屏蔽环-电极边缘场稳定

图 3 双层驱动屏蔽环的电场整形作用

Fig. 3 The electric field shaping effect of the double-layer drive shielding ring

(a) Messy edge field of the no shielding ring-electrode; (b) Stable edge field of the shielded ring-electrode

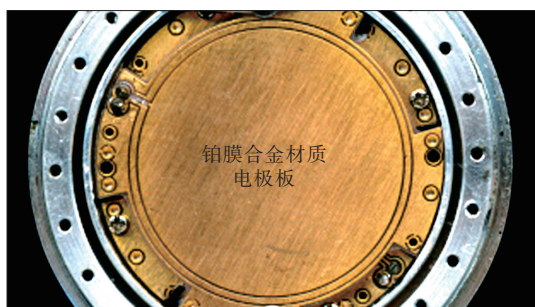


图 4 高精度电容传感器内部结构

Fig. 4 Internal structure of high precision capacitance sensor

1.3 电容传感器性能测试技术

实验室条件下,采用 1 μm 精度的微动标定平台对该传感器进行线性标定。标定平台每微动 10 μm,传感器记录一次读数,获得标定曲线,其横轴是实验时极板位移,左侧纵轴为电容中极板输出电压,右侧纵轴为极板位移时相应的应变值(图 5)。如图 5 所示,电容位移传感器的位移与电压关系为非线性曲线,但动极板处于中间位置附近时呈现出线性特征,其线性范围为±100 μm,向两端位置移动时其线性关系逐步变差,即电容传感器的有效工作

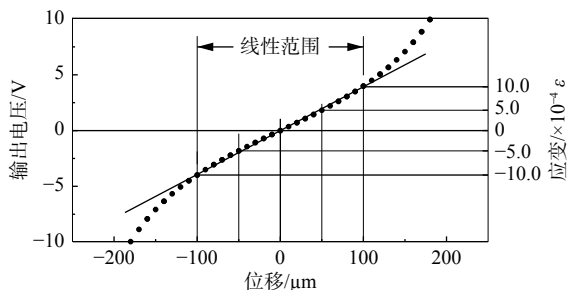


图 5 分量式钻孔应变传感器线性标定曲线

Fig. 5 Linear calibration curve of component-type borehole strain sensor

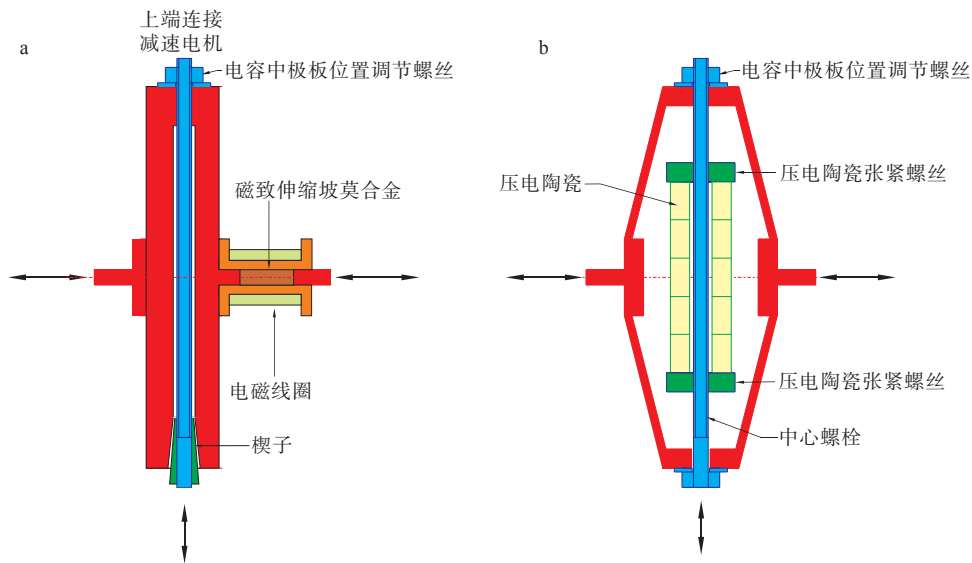
区间为±100 μm,激励电压为 AC 20 V 时,电容电压输出为-4.4~4.4 V,结合钢筒直径为 100 mm,计算出相应的最大工作应变量为(-1.0~1.0)×10⁻³ε,已超过大多数岩石的强度。

1.4 传感器标定技术

电容传感器总量程为±100 μm,测量分辨率为 10⁻¹⁰~10⁻¹¹ε,电容电桥输出信号放大倍数高,需要将量程分段,一次量程设置为±(1~10)μm,故电容传感器定位精度小于 1 μm。

早期的 DRY-1A 电容测量电桥采用直流减速电机自动平衡调节,其减速机构的减速比为 1:1000000,电机驱动楔块上下滑动,微调窄缝距离,推动电容传感器的中极板回到平衡位置(图 6a),但自动调平衡时间较长,往往需要数小时。另外,该电容传感器的标定装置为磁致伸缩标定器,可输出纳米位移进行标定(图 6a)。电容传力杆采用磁致伸缩坡莫合金(精密合金牌号 1J50)加工而成,其外裹电磁线圈,通过恒流电流驱动产生定量磁场,使传力杆坡莫合金产生磁致定量伸缩来标定。直流减速电机自动平衡优点是测量量程可调节、范围大;其缺点是整个系统过于复杂、调节时间长和可靠性低。

2008 年,笔者研发菱形螺杆定位器,通过中心螺杆调节电容中极板位置,预留间隙以适应孔隙水压力变形,并通过压电陶瓷标定器进行标定(图 6b)。安装在井下的监测探头可能会受到孔隙水压力(简称“水压力”)和膨胀水泥的复合作用,故应预先留出间隙,以适应水压力和膨胀水泥压力的变形。经计算 1000 m 深度钻孔水压力将会引起钢筒产生约 60 μm 的变形,膨胀水泥固化产生 0.1 MPa 附加应力,使钢筒产生 0.6 μm 变形,所以在安装电容传感器时,电容中极板应预先留出 60.6 μm 间隙,以便监



a—电机驱动楔缝定位器(磁致伸缩标定器); b—菱形螺杆定位器(压电陶瓷标定器)

图 6 电容传感器微调与标定装置

Fig. 6 Micro position-adjustment and calibration devices of capacitor sensor

(a) Motor driven wedge slider positioner (magnetostrictive calibrator); (b) Rhomboid screw positioner (piezoelectric ceramic calibrator)

测探头在井下安装时,电容中极板正好位于两固定极板的中间。采用电阻-电容复合电桥,控制单元通过数字电位器自动调节电桥平衡、调节量程。通过对电容传感器及标定装置改进,大大提高了DRY-1B型电容分量式钻孔应变仪的稳定性、灵敏度、带宽、数据产出率及其可靠性,可适用于地震观测、活动断裂监测、围岩稳定性监测等科学观测领域。

2 钻孔应变监测系统

2.1 钻孔应变监测系统构成

钻孔应变监测系统主要分井下与井上两部分。井下部分主要由信号线缆和DRY-1B型钻孔应变仪(图7)组成,其中钻孔应变仪由采集模块+四分量应变仪(主模块)、采集模块+四分量应变仪(备份模块)构成(图8a),负责采集井下岩体应变信号。井上部分主要由供电避雷系统、通讯系统和深井综合控制系统(井口服务器)组成。其中,供电避雷系统由AC 220 V市电经避雷器、交流参数稳压器、太阳能电源控制器,分别给蓄电池组、深井综合控制器、RS485-1TU和井下钻孔应变仪供电;通讯系统将深井综合控制器信号经过RS485-1TU、交换机、路由器、光收发器、光纤发往数据中心;深井综合控制系统由综合控制器、GPS天线和GPS避雷器组成,GPS负责定位、授时,控制器负责采集井下信号

(图8b)。

钻孔应变仪是钻孔应变监测系统的重要仪器之一,内部安装四个电容传感器和一个电子罗盘,可定位传感元件的安装角度、监测钻孔周边岩石的应变变化,采集的应变数据通过信号电缆传回地面数据中心,实现地壳应变场动态变化实时监测。



图 7 DRY-1B 型钻孔应变仪

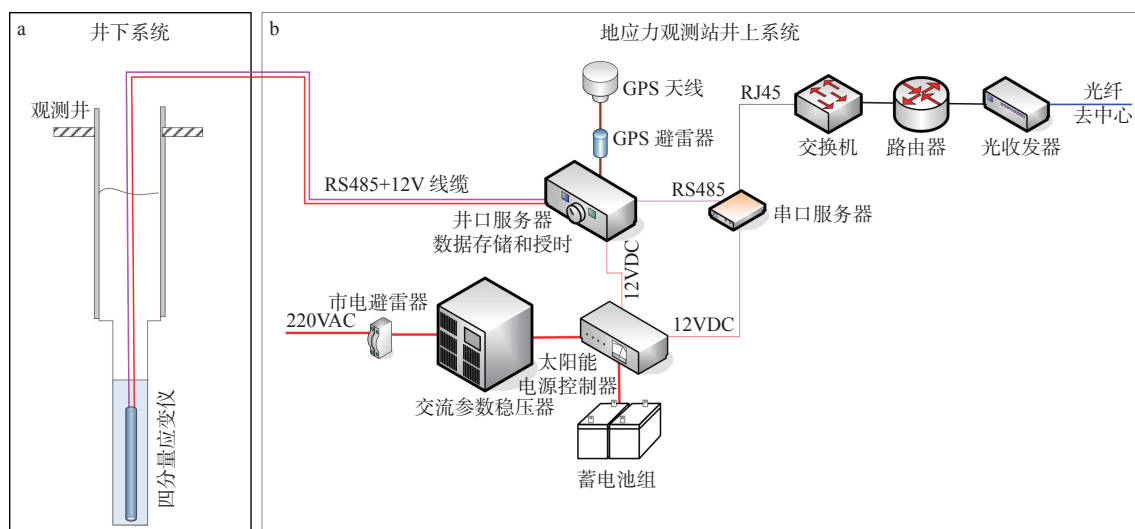
Fig. 7 DRY-1B borehole strain gauge

2.2 钻孔应变监测系统技术指标

该系统技术指标主要包括供电电压、井下功耗、AD位数、采样速率、数据传输模式/波特率、通道/角度、观测灵敏度、观测动态范围等(表1)。

3 钻孔应变仪应用

钻孔应变监测系统是一种重要的内动力地质灾害监测系统,而钻孔应变仪是该系统感知地壳应力应变的关键仪器,已广泛应用于城市活动断层调查、重大工程地壳稳定性调查评价、矿山地下巷道围岩稳定性监测、汶川科钻井长期观测等地质调查



a—井下部分; b—井上部分

图 8 钻孔应变监测系统网络拓扑图

Fig. 8 Network topology diagram of the borehole strain gauge monitoring system

(a) Under the shaft; (b) On the ground

表 1 系统技术指标

Table 1 Technical specifications of the borehole strain monitoring system

技术指标	技术参数	技术指标	技术参数
供电电压	12~48 V DC	数据传输模式/波特率	RS485/9600BPS
井下功耗	总功耗<3 W	通道/角度	4分量/45°分布
AD位数	内置数据采集, 24位	观测分辨率	$\geq 5 \times 10^{-11} \epsilon$
采样速率	所有分量10~100 Hz	观测动态范围	$\geq 1 \times 10^{-3} \epsilon$

注: 电子罗盘、温度、孔隙压问答式查询返回数据

研究领域(彭华等, 2006, 2008, 2011a, 2011b)。2008年以来, 该钻孔应变仪安装在云南普洱(安装年份为2008年, 安装深度为460 m)、四川平武(安装年份为2014年, 安装深度为1600 m)、山东长岛(安装年份为2015年, 安装深度为300 m)、深埋矿山(安装年份为2016年, 安装深度为600 m)和长白山(安装年份为2020年, 安装深度为300 m)等20余个台站, 获得丰富的应变观测资料。其中, 2015年8月, 该系统在山东长岛北长山台站投入使用, 多次记录到渤海海峡砣矶岛—大竹山岛附近小震级近震及震前、震时和震后的异常信息, 为区域地球动力学、内生地质灾害产生机理研究积累了大量的应变观测资料。尤其是2023年2月6日该台站清晰记录到土耳其两次强震在长岛地区产生的应变地震波, 反映出与传统摆式地震仪不同的深部岩石圈响应机理, 表明DRY-1B型电容分量式钻孔应变仪监测数据具有较高的可靠性。

3.1 北长山台站应用与检验

北长山台站位于郯庐断裂带东侧、张家口—渤

海断裂带长岛段附近, 区内构造复杂, 北东向和东西向次级构造发育, 中—小地震频发, 是开展地壳应力应变监测的良好场所。台站安装一套DRY-1B型电容四分量钻孔应变仪, 其1#—4#元件安装方位角分别为NE15°、NE60°、NE105°和NE150°, 其中1#、3#元件夹角是90°, 2#、4#元件夹角是90°(图9)。安装深度为292.5 m, 安装地层为元古界蓬莱群变质地层, 其岩性为石英岩夹千枚状板岩。台站辅助观测项有水位、井温、地震、气温、气压和雨量, 为钻孔应变仪的检验提供了良好的条件。

数据自治性检验是验证分量式钻孔应变仪观测数据质量的重要环节, 是观测数据应用的前提条件。钻孔应变仪从室内到野外, 从井口到井底, 受大气压、气温、井温和孔隙水压力的影响, 以及水泥固结对钻孔应变仪的扰动, 各个电容传感器可能承受不同程度的压力, 致使测值发生较大变化(陈永前等, 2021; 全建军等, 2021)。该应变仪安装成功后, 随着膨胀水泥固结, 电容传感器的压应变速率也会逐渐变缓, 通常6个月左右会趋于平稳, 并于

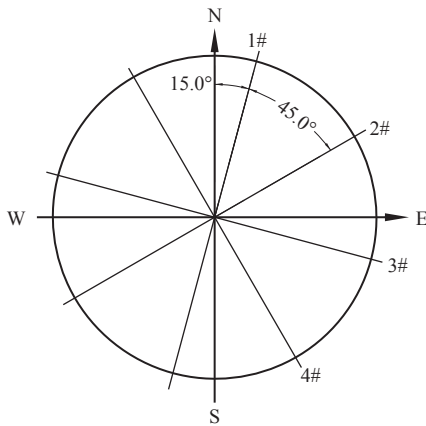


图9 长岛北长山地应力监测台站 DRY-1B 钻孔应变仪各分向元件安装方位图

Fig. 9 Element orientation diagram of DRY-1B borehole strain gauge at Beichangshan in-situ stress station, changdao, Shandong

2016年4月获得四分量钻孔应变原始观测曲线(图10)。由图10可知,2#、4#元件应变曲线处于长期稳定的小幅下降趋势,4#元件应变曲线平均日降率为 $2.2 \times 10^{-9} \epsilon/d$,2#元件应变曲线平均日降率为 $1.1 \times 10^{-9} \epsilon/d$;且1#元件应变曲线较稳定、3#元件应变曲线小幅上升,反映出长岛地区构造应力场相对稳定。同时,将1#传感器元件应变曲线单独成图(图11),发现观测曲线光滑,固体潮汐清晰,其全日波、半日波和1/3日波清晰可见,最大日变幅差为 $4.6 \times 10^{-8} \epsilon$,应变

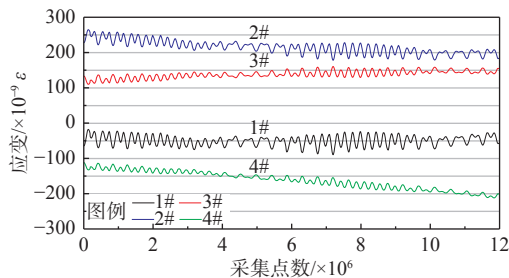


图10 北长山台站四个分量应变趋势图(向上为压)

Fig. 10 Curves of 4-component strain observed at the Beichangshan station (upward pressure)

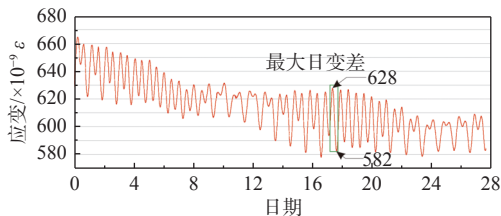


图11 2016年4月北长山台站1#元件(N15°)月应变曲线

Fig. 11 Monthly strain curve of element 1#(N15°) at the Beichangshan station in April 2016

幅值总体稳定。

文章中公式(8)是监测数据自洽性的方程,可作为测量数据可靠性检验的依据。通过元件1#+3#和2#+4#获得面应变曲线,1#-3#和2#-4#形成剪切应变曲线(图12)。通过1#+3#与2#+4#数据的相关分析,其相关系数 R^2 为0.95,由式(8)可判定该应变仪监测数据可靠,四个分量的应变数据能够真实反映地壳应变变化。其中,面应变幅值约 $25 \times 10^{-9} \epsilon$,差应变幅值约 $80 \times 10^{-9} \epsilon$,差应变幅值明显大于面应变,差应变年变化速率为 10^{-8} 量级应变,与GPS同量级相当,反映出长岛地区的构造应力以剪切应力为主,且处于地震活动相对高的应力环境。

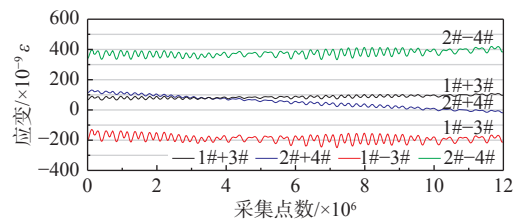


图12 北长山台站应变趋势图(向上为压)

Fig. 12 Strain observed curves of the Changdao station (upward pressure)

此外,钻孔应变仪的1#与2#元件S波明显存在半个周期的相位差,原因是1#元件与2#元件夹角 90° ,在钻孔中一个方向处于压缩状态时,水平正交方向则为拉张,可利用多个台站正交感应元件的观测数据,获得双力偶地震波应变张量,以求取地震震源机制解(邱泽华等,2020)。

3.2 土耳其地震响应与示范

3.2.1 地震应变波到时分析

2023年2月6日,土耳其中南部卡赫拉曼马拉什省一天之内发生两次大规模地震。第一次 $M 7.8$ 级(矩震级)地震(N37.17°; E37.03°)发生在当地时间凌晨4时17分(北京时间9时17分),第二次 $M 7.5$ 级地震(N38.02°; E37.20°)发生在13时24分(北京时间18时24分),距 $M 7.8$ 级地震震中约100 km,两次地震均发生在安纳托利亚高原和伊朗高原过渡地带,即东安纳托利亚左旋走滑断裂带上。

北长山台站捕捉到上述两次地震的完整地震应变波形。因DRY-1B型电容分量式钻孔应变仪的感应元件均为水平方向,故对剪切型的横波响应效果好,而近垂直入射的远震纵波响应不明显(图13)。台站记录到两次地震Sn波到时分别为北京时间2023年2月6日9时45分42秒和18时52分30秒,

与横波从震源经过莫霍面到达台站的估算到时基本一致(图 14, 图 15)。

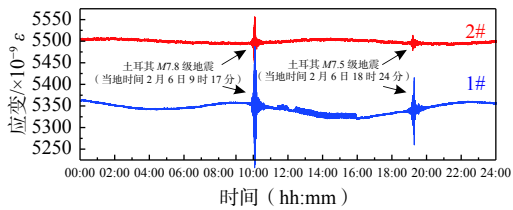


图 13 2023.2.6 土耳其两次地震同震应变曲线
Fig. 13 Coseismic strain curves of the two earthquakes occurred in Turkey on February 6, 2023

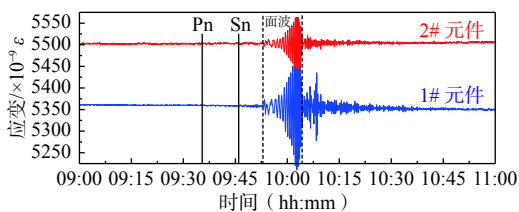


图 14 北长山台站记录的土耳其 $M7.8$ 级地震应变波 Sn 波到时 (2月6日9时45分42秒)
Fig. 14 Seismic strain Sn wave of the Turkey $M7.8$ earthquake recorded by the Beichangshan station (9:45:42 on February 6)

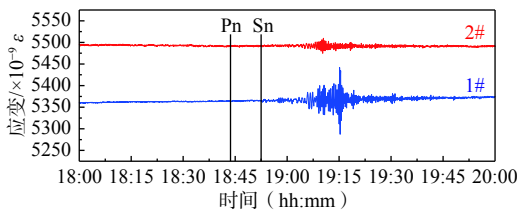


图 15 北长山台站记录的土耳其 $M7.5$ 级地震应变波 Sn 波到时 (2月6日18时52分30秒)
Fig. 15 Seismic strain Sn wave of the Turkey $M7.5$ earthquake recorded by the Beichangshan station (18:52:30 on February 6)

3.2.2 地震应变波差异性分析

土耳其的两次地震震级分别为 $M7.8$ 级和 $M7.5$ 级, 且震中相距较近, 但长岛台站获得的地震应变波却差别较大, 主要表现在幅度、波形等方面。

(1) 幅度差异大, 但地震能量基本一致。第一次 $M7.8$ 级地震应变波在 1# 元件上产生最大振幅为 $275 \times 10^{-9} \epsilon$, 第二次 $M7.5$ 级地震应变波在 1# 元件上产生最大振幅为 $165 \times 10^{-9} \epsilon$, 相差 1.67 倍, 换算成能量相差 2.79 倍。依据地震能量计算经验公式 $E = 10^{4.8} \times 10^{1.5M} \text{J}$ (E 为地震能量, M 为地震震级), 基本等同于 $M7.8$ 级地震和 $M7.5$ 级地震 2.81 倍的能量释放比。从能量释放角度来看, 同震应变振幅换成能量与能量经验公式相比, 两次地震能量释放比基本一致。

(2) 应变波形持续时间不同。第一次地震应变

波面波明显, 主要是周期 50~60 s 面波, 持续约 11 min; 第二次地震面波要小得多。

(3) 应变波形形态差异性大。一般天然地震波有明显的高峰, 且高峰前后都有连续波动。但第一次地震应变波形异常, 地震应变波是突然达到高峰, 前导波不明显, 波形有点“不太自然”, 疑似人造地震波形, 尾波正常, 震后与天然地震相似; 而第二次地震应变波形正常。

3.2.3 台站的映震能力分析

此钻孔应变监测系统的观测灵敏度 $\geq 5 \times 10^{-11} \epsilon$ (表 1), 即可清晰分辨 $10^{-10} \epsilon$ 量级地震应变波。利用土耳其 $M7.8$ 级地震产生的地震应变波对北长山台站钻孔应变仪进行检测, $M7.8$ 级地震应变波在仪器元件上产生最大振幅为 $275 \times 10^{-9} \epsilon$, 则产生 $10^{-10} \epsilon$ 量级振幅的地震应变波需要能量约为 $M7.8$ 级地震的 $(1/2750)^2$ 。由地震能量计算经验公式推算, 该钻孔应变仪可分辨出同样震中距下的 $M3.2$ 级地震产生的地震应变波。然而, 土耳其地震震中距北长山台站约 7200 km, 由于地震能量随距离呈平方衰减, 理论上钻孔应变仪可分辨出 100 km 范围 $M0.74$ 级地震产生的应变波。

4 结论

(1) 文章基于小孔无限大平面中孔壁径向位移的弹性力学理论基础和可变间隙的差动电容位移传感原理, 在微位移感知、降噪、控温等关键技术方面取得进展, 成功研制出 DRY-1B 型电容分量式钻孔应变仪。

(2) 采用性能测试与标定技术, 验证了钻孔应变仪具有高分辨率 ($\geq 5 \times 10^{-11} \epsilon$)、宽频带 (10~100 Hz 可选)、大动态范围 ($\geq 1 \times 10^{-3} \epsilon$)、24 位 AD 记录、低功耗 ($< 3 \text{ W}$) 等性能指标, 其性能优于同期美国和日本同类钻孔应变仪, 具备了地壳长期应变缓慢积累的蠕变运动和短期应变快速变化的地震火山活动观测能力, 是一款高精度地壳运动长期观测仪器。

(3) 通过北长山地应力台站应变监测数据自洽性检验和土耳其地震映震能力分析结果显示: 该应变仪电容传感器元件 1#+3# 和 2#+4# 应变曲线总体平稳, 相关系数 R^2 为 0.95; 元件 1#-3# 和 2#-4# 差应变年变化速率为 10^{-8} 量级, 显示出监测区以剪切应力为主, 且处于地震活动相对高的应力环境; 捕捉到 2023 年 2 月 6 日土耳其地震明显的同震应变响应和主震面波异常信息; 理论上具备 100 km 范围内

M0.74级地震应变波的监测能力;该应变仪达到了应用与示范的效果,可在地球动力学研究、内动力地质灾害监测等领域推广应用。

References

- BENIOFF H, PRESS F, SMITH S, 1961. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 66(2): 605-619.
- CHEN N, WANG C H, CHEN P Z, et al., 2021. Reunderstanding of ground stress field characteristics of right bank of Baihetan using borehole caving data[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 430-440. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y Q, ZHANG S L, LI H W, 2021. Analysis on characteristics of regional strain field based on four-component borehole strain[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 41(10): 1095-1100. (in Chinese with English abstract)
- CHI S L, 1977. Electric capacity stress meter of automatic continuous recording[M]//Selected papers of the national conference on stress measurement (part 2). 369-373. (in Chinese)
- CHI S L, 1993. The results of experimental observations of a shallow-hole-installed YRY-2 borehole strainmeter at 8 stations in North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 15(2): 224-231. (in Chinese with English abstract)
- CHI S L, 2007. Deep-hole broad-band strain-seismograph and high-frequency seimology: the hope to successful earthquake prediction[J]. *Progress in Geophysics*, 22(4): 1164-1170. (in Chinese with English abstract)
- CHI S L, ZHAGN J, CHI Y, 2014. Failure of self-consistent strain data before Wenchuan, Ludian and Kangding earthquakes and its relation with earthquake nucleation[J]. *Recent Developments in World Seismology*(12): 3-13, 47. (in Chinese with English abstract)
- EVERTSON D W, 1977. Borehole strainmeters for seismology[R]. Austin: Applied Research Lab, University of Texas.
- FAN J Y, LIU G C, 2021. Comparative analysis of coseismic response characteristics from three borehole strain gauges recorded for the Maduo $M_s7.4$ earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 37(3): 564-573. (in Chinese with English abstract)
- FAN Z N, WAN Y G, 2020. Study on co-seismic signal of the M7.8 earthquake in Sumatra, Indonesia, recorded by strainmeter[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 40(8): 849-853, 876. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, Li B, Li H, et al. 2022. Estimation of geostress field and discussion on structural stability in Nangabawa area [J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)
- FURUYA I, FUKUDOME A, 1986. Characteristics of borehole volume strainmeter and its application to seismology[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 34(3): 257-296.
- FURUYA I, YAMASATO H, SEINO M, 1991. Rayleigh waves recorded by the volumetric strainmeters at the time of a rather small volcanic eruption[J]. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 42(3): 93-103.
- GLADWIN M T, 1984. High-precision multicomponent borehole deformation monitoring[J]. *Review of Scientific Instruments*, 55(12): 2011-2016.
- HE D Q, LI Y F, SHE R C, et al., 2014. Near field anomalies of Yiliang $M_s7.5$ earthquakes on Sep. 7, 2102[J]. *Journal of Seismological Research*, 37(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- Li B, ZHANG W, WEN R, 2022. Geostress measurement results and engineering geological significance analysis of hydraulic fracturing method for extra-long highway tunnel in southern Shaanxi Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI F Z, REN T X, CHI S L, et al., 2021. The dynamic Coulomb stress changes caused by remote earthquakes based on the borehole strainmeter data[J]. *Chinese Journal of Geophysics Chinese Journal of Geophysics*, 64(6): 1949-1974. (in Chinese with English abstract)
- LUO M J, GU M L, LI A Y, et al., 1989. Borehole strain-stress calibration in the same place by use of tidal generation force[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 9(4): 51-62. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, WU Z H, MA X M, 2006. Unmanned in-situ stress monitoring stations along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2008. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress monitoring station[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 97-108. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011a. Strain characteristics of WFSD stress stations and its co-seismic effects analysis: a case study upon $M_w9.0$ earthquake in Japan[J]. *Journal of Geomechanics*, 17(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2011b. In-situ stress measurement by differential strain analysis method in WFSD-1[J]. *Journal of Geomechanics*, 17(3): 249-261. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, SHI Y L, OUYANG Z X, 2005a. Absolute calibration of 4-component borehole strainmeters[J]. *Earthquake*, 25(3): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, SHI Y L, OUYANG Z X, 2005b. Relative in-situ calibration of 4-component borehole strain observation[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(1): 118-122. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2010. A review of component borehole observation of stress-strain in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(5): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2017. Theory and application of borehole strain observation[M]. Beijing: Earthquake Publishing House. (in Chinese)
- QIU Z H, TANG L, ZHAO S X, et al., 2020. Fundamental principle to determine seismic source moment tensor using strain seismographs[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(2): 551-561. (in Chinese with English abstract)
- QUAN J J, LAI J S, CHEN S H, et al., 2021. Analysis of observation quality and earthquake reflecting ability of borehole body strain meter at Xiaotao seismic station[J]. *South China Journal of Seismology*, 41(1): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- SACKS I S, SUYEHIRO S, EVERTSON D W, 1971. Sacks-evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Proceedings of the Japan Academy*, 47(9): 707-712.
- Science and Technology Monitoring Department of the National Seismological Bureau, 1995. Seismic deformation observation technology[M]. Beijing: Earthquake Press: 229-250. (in Chinese)
- SU K Z, 2003. Relative measurement method of crustal stress[M]//SU K Z, LI H L, ZHANG J, et al. New progress in borehole strain observation.

- Beijing: Earthquake Publishing House: 252-260. (in Chinese)
- SU K Z, 2018. The four-component borehole strainmeter calculation formula and strain anomalies of two earthquakes[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 39(5): 101-111. (in Chinese with English abstract)
- SUN Y M, ZHA N, REN X, et al., 2021. A review of application research on the borehole body strain gauge in earthquake precursory observation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 37(4): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- WU L H, CHEN Z, LI T, et al., 2010. Application of capacitive tilt sensor in crustal deformation measurement[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 29(10): 129-131. (in Chinese with English abstract)
- WU L H, XIONG Y Z, LI T, et al., 2018. In-situ linear calibration technique of the RZB-type borehole strain meter: including a laboratory experiment[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(4): 437-440. (in Chinese with English abstract)
- WU L H, LI H, CHEN Z, et al., 2022. Research on the stability of the RZB-type borehole strain sensor with function of the range expansion and in-situ calibration[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 42(3): 318-320. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG Y D, ZHANG J J, ZHANG B, 2022. Two pillars theory of structural geology in the new century: Maximum effective moment criterion and deformation configuration decomposition[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(3): 319-337. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S Y, CAO J W, FENG C J, et al. 2023. Study on fault instability risk induced by recharge water in Gaoyang low uplift deep hot reservoir, Hebei Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 29(2): 220-235. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈念, 王成虎, 陈平志, 等, 2021. 利用钻孔崩落数据再认识白鹤滩右岸地应力场特征[J]. *地质力学学报*, 27(3): 430-440.
- 陈永前, 张淑亮, 李宏伟, 2021. 基于四分量钻孔应变资料的区域应变场特征分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 41(10): 1095-1100.
- 池顺良, 1993. 一种浅孔安装的 YRY-2 型钻孔应变仪在中国华北地区 8 个台站试验观测的结果[J]. *地震学报*, 15(2): 224-231.
- 池顺良, 2007. 深井宽频钻孔应变地震仪与高频地震学: 地震预测观测技术的发展方向, 实现地震预报的希望[J]. *地球物理学进展*, 22(4): 1164-1170.
- 池顺良, 张晶, 池毅, 2014. 汶川、鲁甸、康定地震前应变数据由自洽到失洽的转变与地震成核[J]. *国际地震动态* (12): 3-13, 47.
- 樊俊屹, 刘高川, 2021. 3 种钻孔应变仪记录的玛多 $M_w 7.4$ 地震同震响应特征对比分析[J]. *中国地震*, 37(3): 564-573.
- 范智旒, 万永革, 2020. 应变仪记录的印尼苏门答腊海域 7.8 级地震的同震信号研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 40(8): 849-853, 876.
- 丰成君, 李滨, 李惠, 等, 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. *地质力学学报*, 28(6): 919-937.
- 国家地震局科技监测司, 1995. 地震地形变观测技术[M]. 北京: 地震出版社: 229-250.
- 何德强, 李亚芳, 余如昌, 等, 2014. 2012 年 9 月 7 日彝良 5.7、5.6 级地震的近场异常[J]. *地震研究*, 37(1): 1-8.
- 李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 28(2): 191-202.
- 李富珍, 任天翔, 池顺良, 等, 2021. 基于钻孔应变观测资料分析远震造成的动态库仑应力变化[J]. *地球物理学报*, 64(6): 1949-1974.
- 骆鸣津, 顾梦林, 李安印, 等, 1989. 用引潮力进行钻孔的应变-应力的原地标定[J]. *地壳形变与地震*, 9(4): 51-62.
- 潘立宙, 1981. 测量地应力的钻孔变形法[M]//中国地质科学院地质力学研究所, 国家地震局地震地质大队. 地应力测量的原理和应用. 北京: 地质出版社: 1-47.
- 彭华, 吴珍玟, 马秀敏, 2006. 青藏铁路无人值守地应力综合监测站[J]. *地质力学学报*, 12(1): 96-104.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2008. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J]. *地质力学学报*, 14(2): 97-108.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011a. WFSD 地应力台应变特征及其同震效应分析: 以日本 $M_w 9.0$ 级特大地震为例[J]. *地质力学学报*, 17(1): 1-14.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2011b. 差应变法地应力测量: 以汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 钻孔为例[J]. *地质力学学报*, 17(3): 249-261.
- 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙, 2005a. 四分量钻孔应变观测的实地绝对标定[J]. *地震*, 25(3): 27-34.
- 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙, 2005b. 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*, 25(1): 118-122.
- 邱泽华, 2010. 中国分量钻孔地应力-应变观测发展重要事件回顾[J]. *大地测量与地球动力学*, 30(5): 42-47.
- 邱泽华, 2017. 钻孔应变观测理论和应用[M]. 北京: 地震出版社.
- 邱泽华, 唐磊, 赵树贤, 等, 2020. 用应变地震观测求解震源矩张量的基本原理[J]. *地球物理学报*, 63(2): 551-561.
- 全建军, 赖见深, 陈珊珊, 等, 2021. 小陶地震台钻孔体应变仪观测质量与映震能力分析[J]. *华南地震*, 41(1): 26-33.
- 苏恺之, 2003. 地应力相对测量方法[M]//苏恺之, 李海亮, 张钧, 等. 钻孔地应力应变观测新进展. 北京: 地震出版社: 252-260.
- 苏恺之, 2018. 四分量钻孔应变仪计算式梳理及震例应用[J]. *地震地磁观测与研究*, 39(5): 101-111.
- 孙艺玫, 查楠, 任雪, 等, 2021. 钻孔体应变仪在地震前兆观测中的理论和应用研究综述[J]. *防灾减灾学报*, 37(4): 69-74.
- 吴立恒, 陈征, 李涛, 等, 2010. 电容式倾斜传感器在地壳形变测量中的应用[J]. *传感器与微系统*, 29(10): 129-131.
- 吴立恒, 熊玉珍, 李涛, 等, 2018. 一种 RZB 分量式钻孔应变仪原地线性标定技术及试验[J]. *大地测量与地球动力学*, 38(4): 437-440.
- 吴立恒, 李宏, 陈征, 等, 2022. 具有量程扩展和原位标定功能的 RZB 钻孔应变仪传感器稳定性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 42(3): 318-320.
- 郑亚东, 张进江, 张波, 2022. 新世纪构造地质学两大支柱理论: 最大有效力矩准则与变位形分解[J]. *地质力学学报*, 28(3): 319-337.
- 朱思雨, 曹佳文, 丰成君, 等, 2023. 河北高阳低凸起深部热储层回灌注水诱发断层失稳危险性探讨[J]. *地质力学学报*, 29(2): 220-235.