

RZB 型钻孔应变仪原位标定技术研究*

欧阳祖熙

(中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

摘要 前两代 RZB 型钻孔应变仪基于比率臂与传感器两个差动电容构成变压器电桥进行测量,一般采用手动电气标定方法实现仪器的现场原位标定。运用数字式电容位移传感器的第三代 RZB 型钻孔应变仪由于取消了比率臂,无法进行电气标定,因而无法满足地震行业仪器入网规范的要求。对于数字式电容位移传感器,选用 REMA 稀土合金材料研制新型微位移标定器,讨论了标定器的结构与初步的实验结果,并对导致标定误差的原因进行了分析。

关键词 钻孔应变仪;数字式电容位移传感器;现场标定;地震行业规范;地震预报

中图分类号:TH762.2

文献标识码:A

RESEARCH ON IN-SITU CALIBRATION TECHNIQUE OF RZB BOREHOLE STRAINMETERS

Ouyang Zuxi

(*Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085*)

Abstract Two previous generations of RZB borehole strainmeters carry the measurement based on the transformer bridge consisting of the ratio arms and two differential capacitences of the transducer. The in-situ calibration of the strainmeter was achieved by manual electric calibration method. Because being unable to realize in-situ calibration without the ratio arms the third generation of RZB borehole strainmeters using digital capacitance displacement transducers is unqualified for the technical requirements of instruments in network for earthquake monitoring. For these digital capacitance displacement transducers the research on new micro displacement calibration technique choosing REMA Magnetostrictive Alloys is carried through recently, the configuration and primary experimental results of new regulator are introduced and causes resulting in calibration error are also discussed.

Key words: borehole strainmeter; digital capacitance displacement transducers; in-situ calibration; technical standard of earthquake instrument; earthquake prediction

1 引言

钻孔应变观测是将应变仪安装在深钻孔中进行测量的,由于传感测量单元安装在深井底部,可以显著减弱地表岩石风化与地形的影响,人类活动、降雨以及雷电等干扰因素均受到很好的屏蔽,有利于获

得高精度的测量结果。传感器输出特性标定、探头灵敏度系数标定,均可在室内完成,但经过运输、探头下井安装、水泥固结过程的挤压作用,传感器所处的环境、工作状态均发生了较大的变动,不经校核,就直接采用原先室内的测试结果来解释此后的观测数据是不科学的。所以,探头下井后的现场标定,以

* 收稿日期:2012-07-25

基金项目:科技部国家社会公益研究专项(2004DIB3J132)。

作者简介:欧阳祖熙,男,1944年生,研究员,主要从事地震成因及地壳应力应变场的观测与研究。E-mail:oyzx2855@sina.com

及运行期间的原位标定都是十分重要的。

本文主要讨论 RZB 型钻孔应变仪传感器灵敏度的井下原位标定技术及有关问题。

2 RZB 型钻孔应变仪的标定

2.1 RZB 型电容式位移传感器及测量技术

RZB-1 型电容式钻孔应变仪由井下探头与地面仪器构成,井下探头的主体是一个外径 102mm 的钢筒,在不同方向上固定了 4 个电容式位移传感器 a 、 b 、 c 与 d ,各传感器的方位从上向下顺时针依次转动 45° ,密封后的探头用膨胀水泥固结在岩石钻孔内,位移传感器的工作原理与前述伸缩仪相似,如传感器 d 可精密测量地壳岩体 d_1 、 d_2 两点间水平距离的相对变化(图 1)。

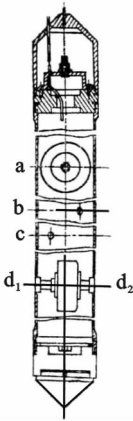


图 1 RZB-1 型电容式钻孔应变仪示意图

Fig. 1 Sketch of RZB-1 capacitance borehole strainmeter

电容式位移传感器测量基线长仅 100mm,其电极是按可变间距三极板差动式组态设计的,极板间距在 $d_1 \approx d_2 \approx 0.3\text{mm}$ 。当钻孔在构造应力作用下发生变形时,固定在钢筒上的传感器三个极板产生相对位移,使得两个差动电容的间距一个减小,另一个增大。RZB-1 型钻孔应变仪基于变压器电桥,对传感器电容的微小变化进行精密测量,其原理电路见图 2(a)。

2.2 RZB 型电容式位移传感器标定技术

将三极板电容式位移传感器设计成可变间距差动式结构,两电容值分别为:

$$\begin{cases} C_{12} = \frac{\varepsilon A_1}{3.6\pi d_1} & (\text{pf}) \\ C'_{12} = \frac{\varepsilon A_2}{3.6\pi d_2} & (\text{pf}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $A_1 = A_2 = A$ 为极板相对有效面积, d_1 、 d_2 分别是两个电容传感器极板间距, ε 为极板间介质之介电常数。

如图 2(a)所示, N_1 、 N_2 表示感应分压器两绕组对应的匝数,且 $N_1 + N_2 = N_0$,可进一步推得联系极

板位移与仪器读数的关系式:

$$\begin{cases} d_1 = KN_1 \\ d_2 = K(N_0 - N_1) \\ \frac{d_1}{d_2} = \frac{C'_{12}}{C_{12}} = \frac{N_1}{N_0 - N_1} \end{cases} \quad (2)$$

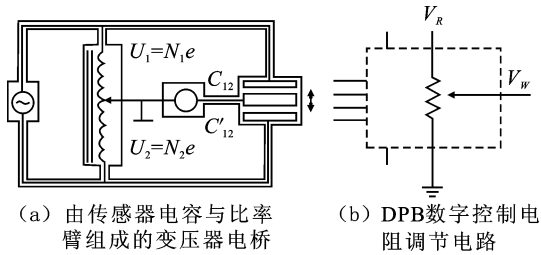


图 2 电容式位移传感器测量技术

Fig. 2 Measurement technique of capacitance displacement transducer

式中, $K = d_1 + d_2 / N_0$ 为测量系统的灵敏度系数,表示比率臂单位读数变动对应的传感器中心电极位移量^[1,2]。 N_1 由仪器面板上给出,其值从 0 至 N_0 渐进变动。RZB-1 型钻孔应变仪采用的比率臂绕组有 5 档,即有 10^5 个读数,对应着中心极板在两个外极板间从靠近一个极板,移动至相对的极板,大约 0.6mm。容易算出一个读数变化对应极板发生 6nm 位移,相应的钻孔应变为 6×10^{-8} 。当手动改变 ± 1 个仪器读数,输出记录的电信号相当于 $\pm 6 \times 10^{-8}$,这即是早期 RZB 型仪器进行等效电气标定的理论依据。由于比率变压器性能优异,长期稳定性好,为系统进行精确的标定提供了可靠的保证。

对于 RZB-1 型钻孔应变仪,以及作为技术升级的过渡产品 RZB-2 型钻孔应变仪,都是采用等效电气标定技术来实现仪器现场标定,以便对测量系统自井下前置放大器,到主放大器、相敏检波器,至最后输出级的系统增益进行标定,消除信号发生器幅度变化的误差,获得准确的钻孔应变记录格值。长期的台站观测实践表明,这种标定方法是可行的。

3 新一代钻孔应变仪标定技术

3.1 新一代数字化电容位移传感器

以三端电容与比率测量法为测量原理构成的 RZB-1 和 RZB-2 型测量系统融合了 3 项技术:

- 1) DPB 技术在电容式位移传感器中的运用;
- 2) 井下测量探头内置微处理器,以实现数字化、低功耗与高可靠性;
- 3) 井下数据总线技术。

DPB (Digitally-controlled Potentiometer Bridge) 技术的电路原理如图 2(b)所示, V_R 是可变电阻, V_w 为其中心抽头,通过数字控制改变内部集成电路开

关连接状态,使得该比率元件输出信号可精确调节,实现了电容传感电路的数字式调节、测量。由于DPB 测量电路可以实现高度集成化,置入传感器内部,由内置微处理器通过数据总线连接,进行程序控制,输出数字测量结果^[3,4]。

3.2 数字化电容位移传感器标定技术研究

根据行业规范要求,传感器内置标定装置应产生不小于数纳米的已知位移,来对测量系统的输出特性进行定期标定。

我们设计了电致伸缩位移器和磁致伸缩位移器两种方案,这两种方案使用的材料及标定装置结构不同,但实验结果表明,两种方案基本上都能实现将电信号转换为位移标定信号,在钻孔径向产生纳米级的已知位移。实际运用中,考虑到:四个电容位移传感器在钻孔应变仪钢筒内组装时,以及下井后水泥固结过程中,会受到较大的挤压作用;多个传感器的安装存在变形调节互相影响;作用在传感器端面的压力不平衡等因素,加之试验操作中发现压电元件一般由晶体薄片堆叠而成,边沿易产生微小碎裂,而且激励电压偏高,故我们的试验工作主要是基于磁致伸缩位移器完成的。

3.2.1 新型磁致伸缩稀土功能材料

在所研制的磁致伸缩位移器中选用了新型 RE-MA 钕镧铁合金材料,这是一类能显示巨大磁致伸缩性能的稀土功能材料,其室温下磁致伸缩系数 λ 可达 $1\,500 \sim 2\,000\text{ppm}$, 其弹性模量为 $2.5 \sim 3.5 \times 10^4\text{Mpa}$,抗压强度近 700MPa ,能量密度在 $14\,000 \sim 25\,000\text{J/m}^3$,于 $10^{-5} \sim 10^{-6}\text{s}$ 的极短时间内,可精密、稳定地形成与磁场静、动态特性相匹配的无滞后型响应,高效地实现电能转换成机械能,传输出巨大的能量。其响应稳定,速度敏捷,使 REMA 作为驱动元件的机械系统滞后时间显著降低。将 REMA 功能材料用于微位移标定器,可以快速、精确、稳定地控制微小的位移,具有重复位移精度高、无间隙、刚性好、结构简单紧凑等优点。

3.2.2 标定器的结构

采用的技术方案是在电容式位移传感器的两组位移传递杆中,将其中一组位移传递杆分作两段,包括第一传递杆和第二传递杆,第一传递杆与密封钢筒内壁连接,第二传递杆与传感器底座连接,在两个传递杆之间连接有标定器(图 3(a))。

标定器的结构示如图 3(b)。该壳体为一个圆筒状结构,壳体底部与第二传递杆连接,磁致伸缩微位移器和整体导轨安装在壳体内,整体导轨与第一传递杆连接。上述磁致伸缩微位移器包括稀土超磁致伸缩棒、散热铜架、激励线圈和磁轭等部件。散热铜架

为两端翻边的圆管结构,该稀土超磁致伸缩棒安装在散热铜架的中心圆孔处,激励线圈缠绕在该散热铜架外围,该磁轭包括上磁轭和下磁轭,均为铁镍合金的圆盘状结构,它与磁致伸缩材料一起构成封闭磁路,防止漏磁。整体导轨包括一个圆柱状导块,其下表面与上磁轭的导杆连接,上表面与第一传递杆连接,在该导块外缘设有一个环状的弹片,该弹片外缘设有与之垂直的圆筒,该圆筒配合连接在壳体内表面。伸缩传递轴等其他零件均由非磁性不锈钢制成。

超磁致伸缩材料内部应变与激励磁场强度、材料特性常数、应力状态等直接相关。所以,适当配置机械和电气的结构参数(主要是预压应力和偏置磁场)可使超磁致伸缩材料处于最优的机电耦合状态,提高能量转换效率。根据铁磁学理论,这是由于外加应力提高了材料的饱和磁化强度,使其饱和磁致伸缩系数提高的缘故。

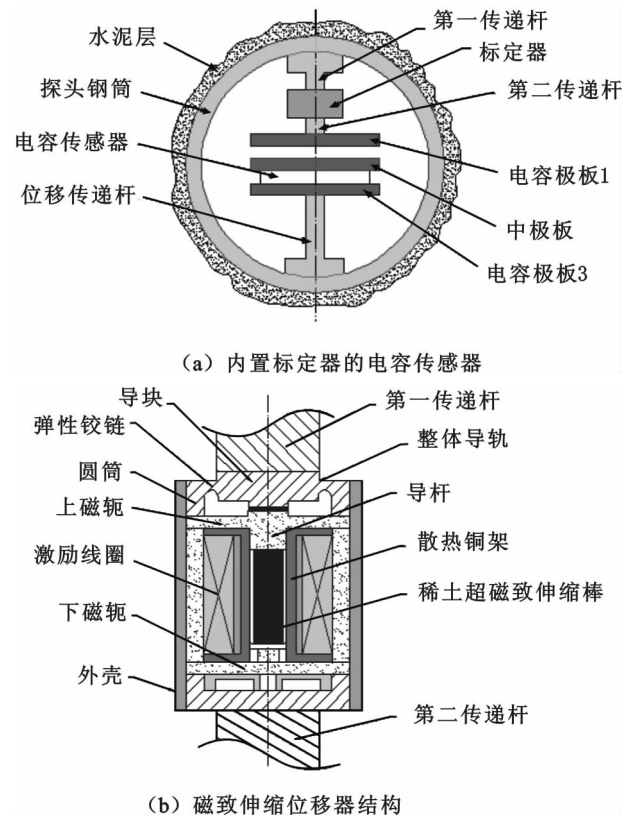


图 3 内置标定器的数字式电容位移传感器示意图
Fig. 3 Digital capacitance displacement transducer with calibrator inside

3.2.3 初步实验结果

本阶段研究是在实验室内进行的。首先将带有标定装置的传感器固定在一模拟探头钢筒的刚性卡具上,对传感器供电,并用数据采集器连续记录。标定控制信号用信号发生器接入作为替代,标定时即打开信号发生器电源开关,标定结束就关闭,信号发生器选择为方波脉冲输出,周期为 20 s 。磁致伸缩

微位移器的激励电流可通过选择电阻来调节,其大小控制在(1~10) mA 之间。

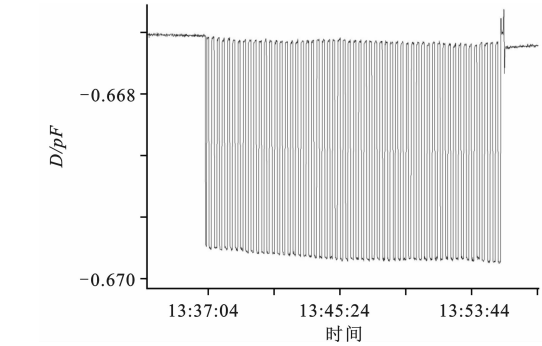


图4 电容位移传感器(9#,10 mA)标定实验记录
Fig. 4 Calibration experiment records of capacitance displacement transducer (No. 9, 10 mA)

图4给出了9号传感器的一段试验记录,标定器激励电流为10 mA,曲线向下变化对应传感器受压。根据电容位移传感器的灵敏度特性可计算出,此时标定器产生的位移约为7 nm。本次实验持续近20分钟,对磁致伸缩微位移器共进行了60多次激励,可发现该位移器响应快速、重复精度高,标定结束后,传感器测值基本上回复原先漂移的趋势,其状态未受到明显扰动。

我们用不同大小的激励电流做过比较(图5)。对10号传感器,激励电流在第1、2、3时间段分别为3、6、10 mA,标定器产生的位移分别达到1.8、3.5、5.7 nm,每一段标定持续时间都在20分钟左右。分析所获得的记录,同样可看到该位移器响应快速、重复精度高,标定对传感器状态扰动较小。

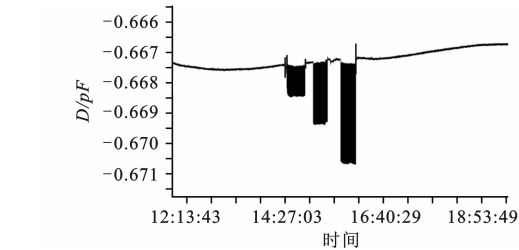


图5 电容位移传感器(10#)标定实验记录
Fig. 5 Calibration experiment records of capacitance displacement transducer (No. 10)

根据规范要求,标定器用于台站观测时,每次标定可进行10次激励,取全部传感器测值的平均值作为该次标定值存档。本阶段研究持续了十多天,我们对获得的大量标定试验数据做了统计分析,按10次激励为一组,计算出平均值,并对标定重复率进行统计。计算结果表明,在每一次连续记录时间段内,标定相对不确定度优于0.7%;对全部实验记录统计,相对不确定度优于1.5%。

分析还揭示了产生标定误差的几个原因:

- 1)受实验室环境因素变动的影响,传感器测值存在漂移与跳变,对标定结果有一定影响,这类干扰在传感器置于井下后将会大大降低;
- 2)用信号发生器电源开、关来控制标定信号输入,信号发生器输出信号的暂态建立过程会造成激励电流不够稳定,带来误差;
- 3)因为REMA元件均是处于压应力状态下工作,故标定器的安装应预加适当载荷。所以,下一阶段对此问题还需深入开展研究。

4 结论

- 1)RZB-1与RZB-2型电容式钻孔应变仪基于比率臂进行的等效电气标定,具有精度高、长期稳定性好的特点,可以对从前置放大器直到输出级的增益进行校准,实际使用效果良好。
- 2)采用数字式传感器的RZB-3型电容式钻孔应变仪目前不具备现场标定功能,尚未达到地震行业规范要求。作者选用REMA稀土合金材料研制出新型微位移标定器,快速、精确地实现了数纳米的位移,可对RZB型数字式位移传感器进行原位标定,已接近地震行业规范的要求。下一阶段,我们拟用带有标定功能的传感器开展下井试验,系统标定精度预计会有大幅度提高。

致谢 感谢师洁珊和张宗润二位同志协助完成实验测试与分析处理等工作!

参 考 文 献

- 1 欧阳祖熙. RDB-1型电容器式地应变计[A]. 第一届全国地应力会议论文选编[C]. 北京:地震出版社,1977:337-348. (Ouyang Zuxi. RDB-1 borehole capacitance strainmeter[A], The Proceeding of 1st National Assembly on Crustal Stress[C], Beijing: Seismological Press, 1977: 337-348)
- 2 欧阳祖熙,张宗润. 钻孔应变仪与钻孔井壁耦合方法的研究[A]. 地壳构造与地壳应力文集(2)[C]. 北京:地震出版社. (Ouyang, Zuxi and Zhang Zongrun. A coupling method of borehole strainmeters with the rock well[A]. Crustal structure and crustal stress (2) [C]. Beijing: Seismic Press, 1988)
- 3 欧阳祖熙,等. 地壳形变深井综合观测技术的新进展[J]. 国际地震动态,2009,(11):1-13. (Ouyang Zuxi, et al. New progress in multi component observation of crustal deformation in deep boreholes [J]. Recent Developments in World Seismology, 2009,(11):1-13)
- 4 Ouyang, Zuxi. A new type of multi-component borehole instrument for continuous monitoring of crustal deformation [A]. Rock stress and earthquakes[C]. Taylor & Francis Group, London, 2010, 809-814.