

井底参数新型检测手段设计研究

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, 周欣³, 段隆臣², ЧИХОТКИН В.Ф.²

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074;
3.湖北省地震局,湖北 武汉 430064)

摘要:绝缘硅(SOI)是一种新型电子材料。俄罗斯利用SOI技术设计研究出了一种新型井底参数检测手段,包括顶角测量仪和井底钻井液压力测量仪。这种手段具有热稳定性好、抗辐射能力强、精度高、灵敏度好和可靠性高的特点。建议引起重视并对此进行讨论和研究。

关键词:绝缘硅;井底参数检测手段;热稳定性;抗辐射能力;深部钻进

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)02-0001-07

Research on design of a new measurement tool for bottom hole parameters

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, ZHOU Xin³, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V.F.²

(1.Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;

2.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3.Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: Silicon on Insulator is a new electronic material. In Russia a new measurement tool for bottom hole parameters has been developed using the SOI technology. The tool has such advantages as thermal stability, radiation resistance, high accuracy, good sensitivity and high reliability. It is suggested that we attach importance to the tool, and explore and study it.

Key words: Silicon on Insulator; measurement tool of bottom hole parameters; thermal stability; radiation resistance; deep drilling

0 引言

钻探工程是个系统工程,包括钻探设备、工具、钻进工艺、操作技术和生产管理等。在根据孔深和所钻地层选定设备、工具之后,钻进工艺和操作技术非常重要,直接影响钻探技术经济指标。目前,多数钻机机台还是依靠地面仪表显示的读数指标来指导钻进工艺和操作技术。但是,地面仪表显示的读数与孔底实际数值有一定差异,而且孔越深差异越大,俄罗斯超深井研究表明,这个差异可以高达20%~30%。而且在深井和超深井钻进时,井底条件非常恶劣:压力可能大于100 MPa,温度可能大

于200℃,各个方向的振动可达(10~100)g(g为重力加速度)。我国计划打一口13000 m的特深地质井,对使用的测量手段提出了更高的要求,需要新型检测手段^[1-3]。

俄罗斯阿斯特拉罕国立技术大学 Есауленко В.Н.教授等提出利用绝缘硅片(КНИ)技术和光纤联系通道(ВОЛС)研制井底检测仪表,并设计出了顶角检测仪和钻井液压力检测仪^[4-17]。

1 绝缘硅技术概述

КНИ(кремний на изоляторе),即SOI(Silicon

收稿日期:2022-03-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.001

基金项目:国家自然科学基金面上项目“液压冲击回转作用下热压WC-CU基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:41972327)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,周欣,等.井底参数新型检测手段设计研究[J].钻探工程,2023,50(2):1-7.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Research on design of a new measurement tool for bottom hole parameters[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):1-7.

on Insulator),称之为绝缘硅。随着芯片尺寸跨入纳米尺度后,半导体物理器件的极限问题接踵而来,如电容损耗、漏电流增大、噪声提升、门锁效应和短沟道效应等。为了克服这些问题,SOI技术应运而生。作为标准CMOS工艺的一种改进技术,SOI技术通过在两层硅基板之间封入一个绝缘的氧化层(这与大容量CMOS工艺技术恰好相反),从而将活跃的晶体管元件相互隔离。 SiO_2 埋层能有效地使电子从一个晶体管门电路流到另一个晶体管门电路,不让多余的电子渗漏到硅晶圆上。

SOI器件具有寄生电容小、短沟道效应小、速度快、集成度高、功耗低、耐高温、抗辐射等优点,越来越受有关业界的青睐。

绝缘体硅片技术是一种在硅材料与硅集成电路巨大成功的基础上出现、有其独特优势、能突破硅材料与硅集成电路限制的新技术。随着信息技术的飞速发展,SOI技术在高速微电子器件、低压/低功耗器件、抗辐照电路、高温电子器件、微机械(MEMS)以及光通信器件等主流商用信息技术领域的优势逐渐凸现,被国际上公认为是“21世纪的微电子技术”、“新一代硅”。

绝缘硅片技术实际上是一种微处理器技术,它能够将更多的硅和硅氧化层添加到处理器中,用于绝缘。即它是在处理器芯片内部的硅晶片上先嵌埋一层二氧化硅绝缘物,再以这一绝缘物作为基板来制造各个晶体管,通过绝缘的氧化层起到保护芯片上数百万个晶体管的作用,减小晶体管的静电电容,而使晶体管的状态切换加快,降低了误差,提高了晶体管的工作效率以及微处理器的速度。同时,减小了状态切换时的充电电流,降低了功耗,延长了设备的使用寿命。

俄罗斯新设计的仪器采用的是频率信号,工作原理是:对作为所测工艺参数变化函数的平衡机械振动系统中的一个单元施加作用时,则会导致与此单元振动频率有联系的另一单元的振动频率发生变化,其结果是导致机械振动系统的能量损失、仪器性能参数 Q 值下降。要计算和绘制失去平衡机械振动系统的频率特性,为此,在对该系统输入端施加不同频率电磁振动时,要确定这个失去平衡振动的振幅。按频率特性最大振幅值的0.7倍计算截止频率的下限和上限,利用微处理器按式(1)计算失去平衡振动系统相对所测工艺参数的仪器性能参数 Q 值:

$$Q = f_0 K / (2kf) \quad (1)$$

式中: f_0 ——仪器音叉固有频率; $2kf$ ——音叉通过频带; K ——比例系数, $K=1\sim 1.3$ 。

据此参数 Q 来确定其与所测井底工艺参数的关系,进而确定出仪器所测井底工艺参数的数值。设计出了2种仪器,即顶角测量仪和井底钻井液压力测量仪^[4-7]。

2 检测手段的工作原理^[4-7]

以顶角测量仪为例,其工作原理见图1。

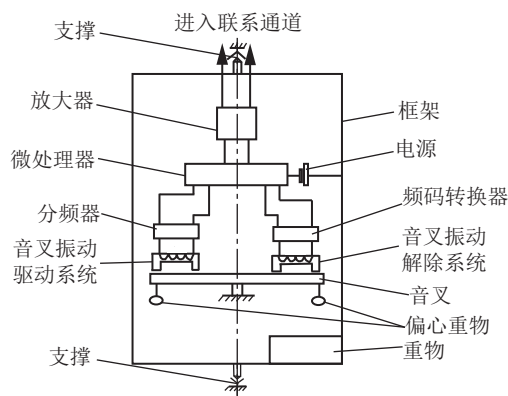


图1 顶角测量仪原理

Fig.1 Principle of the inclinometer

如图1所示,这种仪器包含有带有偏心重物的转动框架和机械电子转换装置。机械电子转换装置呈带有电子激发电路的音叉形式。音叉装有偏心重物,偏心重物装在音叉的分支上,而且带有偏心重物的分支彼此张开 180° 。仪器装有处理器、分频器、频码转换器和放大器。机械电子转换装置呈驱动振动和解除振动形式电子激发电路的输入端,通过分频器与微处理器冲程脉冲发生器的输出端连接,音叉振动解除系统与频码转换装置的输入端连接,而频码转换装置的输出端与微处理器的输入端连接。微处理器的输出端通过放大器与井底和井口的联系通道连接。

仪器由音叉、偏心重物和电子激发电路组成。电子激发电路包括有音叉振动驱动系统和音叉振动解除系统、微处理器、分频器、频码转换器、放大器和电源。

仪器置于框架内,在重力作用下,利用重物在支撑内自由转动。测量时,框架在重物作用下在支撑

内转动,固定在井筒弯曲的平面内。偏心重物在音叉的分支内移动,移动角度与井眼弯曲角度一致。而且,偏心重物中的一个重物移动到音叉的固定点,这个分支的振动频率增加。偏心重物的另一个重物移离音叉固定点同样一个角度,这个分支的振动频率下降。由于这个不匹配,音叉的仪器性能参数 Q 值下降了,其下降幅度与井眼弯曲角度成比例。启动微处理器,从微处理器的一个出口端(从冲程脉冲发生器)通过分频器供给频率等于音叉谐振频率的电流脉冲,音叉开始在解除振动系统内振动,产生电动势,其频率与井眼弯曲成比例,这个频率被送入频码转换器的输入端,而其输出端进入微处理器的输入端,在此按照设计程序计算得出音叉的频率特性,按此频率特性确定振动的固有频率和通过频带 $2kf$,并按下列公式(1)计算仪器性能参数 Q 值。

将计算的仪器性能参数 Q 值,以码带形式从微处理器输出端送入放大器的输入端,从放大器的输出端送入井底与井口的联系通道。

根据确定的 Q 值与所测工艺参数的关系曲线,确定所测参数的数值。

顶角测量仪试验台如图 2 所示。从图 2 可见,试验台是由带有偏心重物的音叉(其分支彼此张开 180°)、振动驱动系统和振动解除系统 4 的电子电路组成的。驱动系统的输入端与冲程脉冲发生器连接,振动解除系统的输出端与示波器连接。模板固定在一个可以转动设计角度的度盘上。

试验结果见表 1^[4-7]。机械振动系统(音叉)性能参数 Q 与顶角值 α 的关系,见表 2^[4-7]。

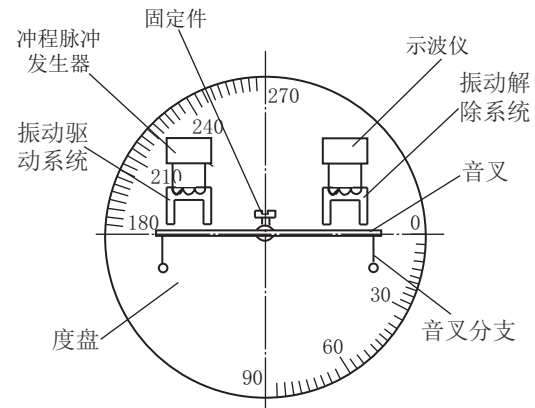


图 2 顶角测量仪试验台示意

Fig.2 Test table for the inclinometer

机械振动系统(音叉)频率特性与性能参数 Q 、顶角 α 值的关系见图 3^[4-7]。

技术特性为:

音叉:45号钢,长度 100 mm,宽度 4 mm,厚度 0.5 mm。

重物:长度 10 mm,质量 5 g。

冲程脉冲发生器:Г3102,№18544。

示波器:С1-76,№0645582。

振动驱动和解除系统为导磁体,线圈为 $\Pi\Theta B$ 0.08,2000 匝。

机械振动系统(音叉)性能参数 Q 与顶角 α 值的关系见图 4。

3 检测手段的设计计算^[4-7]

以钻井液压力井底测量仪为例,检测手段的设

表 1 不同顶角时频率 f 与音叉解除振动系统输出端电压 U 的关系数据

Table 1 Frequency " f " vs tuning fork output voltage " U " at different inclinations

$\alpha=0^\circ$		$\alpha=2^\circ$		$\alpha=4^\circ$		$\alpha=6^\circ$		$\alpha=8^\circ$	
f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV
52	12	52	11	52.3	15	52.7	13	52.8	11
53	18	53	14	53.2	18	53.7	15	53.5	14
53.8	20	54	18	54.8	28	54.88	22	54.4	17
54.6	24	55.2	26	55.8	38	55.77	28	55.6	18
55.8	41	56.4	3	56.5	43	56.5	32	56.7	19
56.4	138	57.1	24	57.3	34	57.2	28	58	16
56.7	86	58.1	19	57.9	23	57.8	20	58.9	11
57.1	45	58.6	13	58.8	14	58.7	12		
57.7	26								
58.2	19								

表2 机械振动系统(音叉)性能参数 Q 与顶角 α 值的关系
Table 2 Characteristic parameter " Q " of the mechanical vibration system (tuning fork) vs inclination " α "

机械振动系统(音叉)性能参数 Q	顶角 $\alpha/(^{\circ})$
139	0
81	2
32	4
10	6

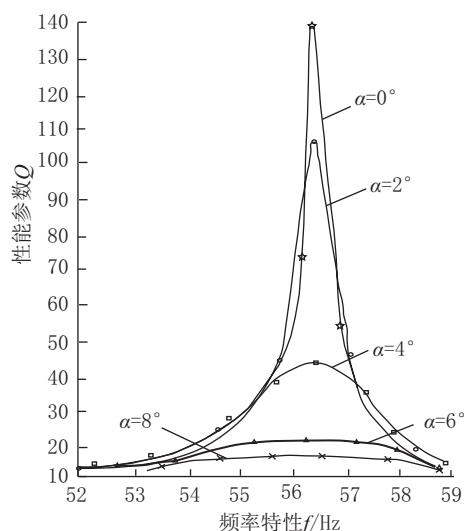


图3 机械振动系统(音叉)频率特性与性能参数 Q 、顶角 α 值的关系

Fig.3 Frequency of the mechanical vibration system (tuning fork) vs characteristic parameter " Q " and inclination " α "

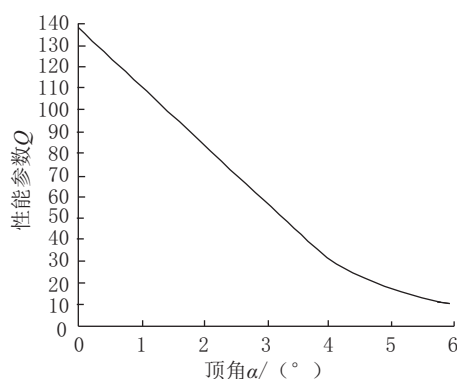


图4 机械振动系统(音叉)性能参数 Q 与顶角 α 值的关系曲线

Fig.4 Curve of characteristic parameter " Q " of the mechanical vibration system (tuning fork) vs inclination " α "

计计算如下。

目前,钻井液井底压力是根据地面仪表读数确

定的。所用方法有很大误差,对钻井过程中井底钻井液压力变化不能迅速做出反映。同时,大家都知道,在不同地质剖面情况下,在钻井过程中会出现各种复杂情况,如漏失、油气显示、地层压力异常等。在这种情况下,最重要的是在钻井过程中直接有效控制钻井液的压力。由于井底测量仪器使用的条件恶劣,温度可达 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$,所以,需要使用可靠性高的机械振动系统,见图5^[4-7]。

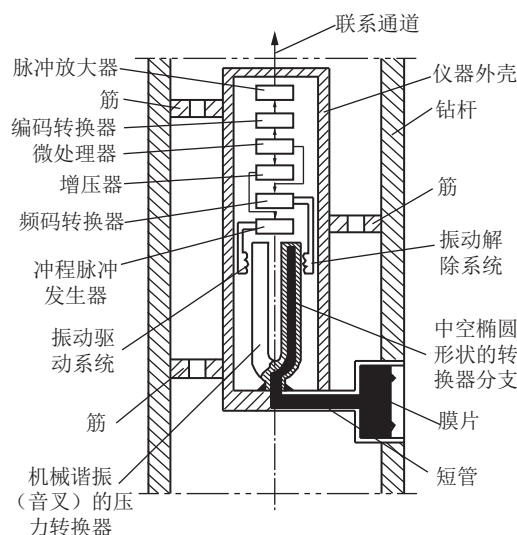


图5 测量井底钻井液压力用的仪器

Fig.5 Instrument for measurement of bottom hole drilling fluid pressure

这种仪器置于钻头上方的容器内。该仪器包括有:用3根筋固定在钻杆内的外壳、振动驱动系统、解除振动系统、联系通道、机械谐振(音叉)的压力转换器(其一个分支呈中空椭圆形形状,充满液体)、固定在外壳中的微处理器、冲程脉冲发生器、频码转换器、增压器、编码转换器、脉冲放大器、在钻杆中接受钻井液压力的膜片和把膜片腔体、分支腔联系起来的短管。

仪器工作过程:当管外空间钻头上方的钻井液压力变化时,膜片弯曲,钻井液通过短管在压力转换器的分支内移动。此时,分支的腔体力图成圆形形状(分支的厚度与钻井液压力成比例)变化,导致其频率相对第二个分支的振动频率发生变化,因此,导致音叉的性能参数 Q 值发生变化。

按照微处理器的程序,向增压器发送与接于发生器的电容器电容相应号码的编码组合。电磁振动从发生器进入音叉驱动系统的输入端,音叉开始振

动。振动解除系统把音叉分支的机械振动转换成电磁振动,电磁振动进入频码转换装置的输入端,与钻井液压力相应的频码组合进入微处理器的输入端。微处理器计算音叉的性能参数 Q ,生成一系列与所测钻井液压力成比例的脉冲。这一系列二进脉冲从微处理器的输出端进入频码转换装置的输入端,通过脉冲放大器进入联系通道线路,并沿这个通道线路进入安装在井口的接收装置。

图 6 为钻井液压力测量仪设计计算框图。输出电压 U 与频率 f 的关系数据见表 3。不同压力时输出电压与频率的关系见图 7。程序处理结果窗口显示见图 8。最终根据性能参数 Q 的数值来确定出井底钻井液的压力数值。

钻井液压力测量仪设计计算步骤如下。

(1) 输入信息:音叉固有频率 f_0 ;音叉材料弹性模量 γ ;音叉长度 L ;音叉分支厚度 e ;常数 0.1615;确定音叉频率特征用的频率数值个数 N ;脉冲发生器频率实时数值 f_1 ;压力测量时间(转换、计算、送到联系通道) T ; $\alpha=1\sim 1.3$ 。

(2) 计算音叉固有频率 f_0 。

(3) 计算频率发生器初始频率的数值 $f_{\text{初始}}=f_0-3\text{ Hz}$ 。

(4) 通过向频率发生器电路添加与此频率相应电容器的办法,用 N 次以步长 $\Delta f=0.1\text{ Hz}$ 的步骤,向初始频率 $f_{\text{初始}}$ 增加频率数值。同时测量解除振动系统输出端上的电压 U 。此过程一直继续到解除振动系统输出端电压达到最大值 U_{max} 为止。

(5) 确定最大值 U_{max} 。

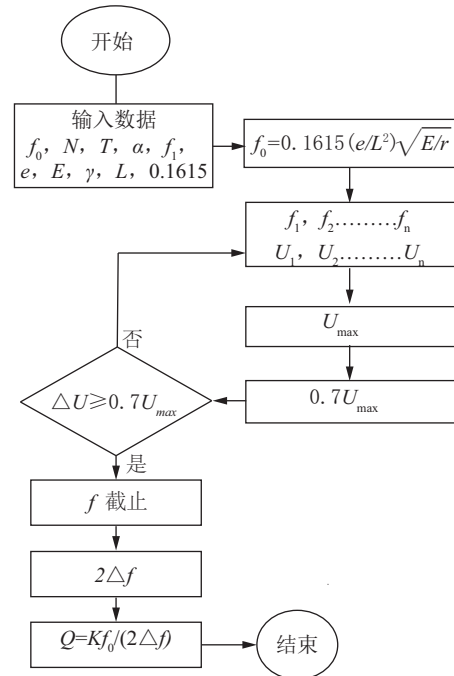


图 6 钻井液压力测量仪设计计算框图^[4-7]

Fig.6 Framework of design and calculation for the drilling fluid pressure measurement instrument

(6) 计算 0.7 倍的最大值 U_{max} ,并根据此值计算截止频率的数值。

(7) 运用公式 $2\Delta f=(f_0-f_{\text{截止}})$ 计算 $2\Delta f$ 。

(8) 按公式(1)计算振动系统(音叉)性能参数 Q 。 Q 值与此时的井底钻井液压力相应。

(9) 将与(井底钻井液压力值) Q 值相应的编码组合,转换为抗干扰编码(赫民格 ХЕМИНГ 码),发给联系通道,重复 3 到 5 次。

所用程序是用 C# 语言,在 Visual Studio 2019

表 3 不同压力时频率 f 与输出电压 U 的关系数据^[4-7]

Table 3 Data of frequency "f" vs output voltage "U" at different pressure

$P=0.10\text{ MPa}$		$P=0.15\text{ MPa}$		$P=0.20\text{ MPa}$		$P=0.25\text{ MPa}$		$P=0.30\text{ MPa}$	
f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV	f/Hz	U/mV
26.5	10	26.6	10	26.8	10	26.1	7	26.3	6
26.9	15	27.1	15	27.3	18	26.5	8	26.9	7
27.2	20	27.4	30	27.4	28	26.9	10	27.1	8
27.4	35	27.6	65	27.6	41	27.2	15	27.4	11
27.6	78	28.1	30	28.0	31	27.4	20	27.7	13
28.0	36	28.4	20	28.4	16	27.7	28	28.0	14
28.3	20	28.6	15	28.8	9	27.9	20	28.4	13
28.5	15	28.9	12			28.2	16	28.9	13
						28.9	6	29.4	8

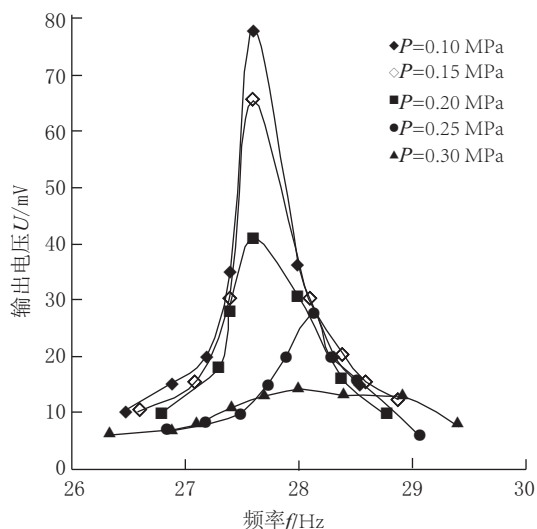


图7 不同压力时音叉系统输出端电压 U 与频率 f 的关系^[4-7]

Fig.7 Curve of output voltage " U " of the tuning fork system vs frequency " f " at different pressure

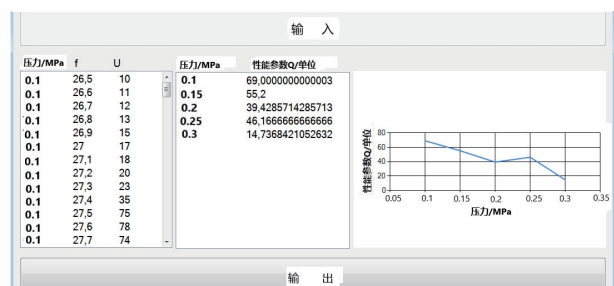


图8 程序处理的输出窗口显示^[4-7]

Fig.8 Program processing output display

Community Edition 环境下实现的。

研究各种不同用途转换器,用于评价中空音叉芯子的电路性能参数 Q 时,可以用此程序绘出 $Q(U)$ 与 U 关系的图件。使用这个程序时,需要准备好包括有程序所用初始数据的CSV文件。初始数据应该包括仪器指标压力 P 值、频率 f 值和电压 U 值,其中 P 是给出频率点组 $U(f)$ 的仪器指标数值。

把每个仪器指标压力的点,都记入置有所用程序模板目录的CSV文件中。

为了保证程序运用的质量,对于每个仪器指标来说,建议使用 $U(f)$ 的点数 >30 。

程序的限制:本程序处理的仪器指标组数为20个。

4 讨论、分析与建议

根据上述材料,可作如下讨论、分析和建议。

(1)SOI元件具有寄生电容小、短沟道效应小、速度快、集成度高、功耗低、耐高温、抗辐射等优点。SOI技术在高速微电子器件、低压/低功耗器件、抗辐照电路、高温电子器件、微机械(MEMS)以及光通信器件等方面具有明显优势,被国际上公认为是“21世纪的微电子技术”、“新一代硅”,将其用于深部钻探检测技术手段设计中具有重要实际意义。

(2)俄罗斯设计的检测手段中采用的微处理器、压力转换器、冲程脉冲发生器、频码转换器、编码转换器脉冲放大器中的电子元件,均是用SOI技术完成的,而且使用了具有独热线性膨胀系数材料制成的音叉作为机械振动系统元件,故其热稳定性 $>300^{\circ}\text{C}$ 和很高的抗辐射能力,具有很高的灵敏度和可靠性。仪器性能呈线性,因此精度也较高。

(3)俄罗斯新设计的仪器的工作原理是:对作为所测工艺参数变化函数的平衡机械振动系统中的一个单元施加作用时,则会导致与此单元振动频率有联系的另一个单元的振动频率发生变化,导致机械振动系统的能量损失、仪器性能参数 Q 值下降。可以利用计算机程序计算这个失去平衡振动系统相对所测工艺参数的仪器性能参数 Q 的数值。据此参数 Q 来确定其与所测井底工艺参数的关系,进而确定仪器所测井底工艺参数的数值。这是一种创新。

(4)这种仪器的热稳定性好、抗辐射能力强、精度高、灵敏度好和可靠性高,是一种深井钻进用的很有前景的井底参数测试手段,但是,尚未看到有其使用效果的报道。建议跟踪其使用效果及存在问题,重视研究这种类型的检测手段,以便讨论其在我国深部钻探中的适用性和可靠程度。

参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
ZHU Hengying, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research

- and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] Мордкович В.Н. Структуры Кремний на изоляторе—Новый материал микроэлектроники [J]. Материалы электронной техники, 1998(2).
- [5] В.Н. Есауленко, Н.В. Есауленко, Г.Е. Судакова. Способ измерения давления бурового раствора в скважине. № 2737901 [P]. Российская Федерация, СПКЕ21В 47/06. / №2020103505; заявл. 27.01.2020; опубл. 04.12.2020, Бюл. №34.
- [6] В.Н. Есауленко, Н.В. Есауленко, И.В. Павлова. Устройство для измерения давления бурового раствора в скважине. № 2726723 [P]. Российская Федерация, СПКЕ21В 47/06. / №2019144394; заявл. 24.12.2019, опубл. 15.07.2020, Бюл. №20.
- [7] В.Н.Есауленко. Телерегулирование забойных параметров при бурении глубоких скважин [М]. Россия, г. Астрахань: Издательство, Астрахинский государственный технический университет, 2015.
- [8] В.Н.Есауленко, Н.В.Есауленко. Частные датчики в бурении [М]. Россия, г. Астрахань: Издательство, Астрахинский государственный технический университет, 2012.
- [9] В. Н. Есауленко, Н. В. Есауленко. Аэродинамические измерительные преобразователи для телеметрии забойных параметров при бурении скважины [М]. Россия, г. Астрахань: Издательство, Астрахинский государственный технический университет, 2010.
- [10] В.Н.Есауленко, Н.В.Есауленко. Механические измерительные преобразователи для систем телеметрии забойных параметров [J]. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2009(7):4-7.
- [11] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины. № 2285797 [P]. Российская Федерация. МПК E21B47/022. опубл.20.10.2006.Бюл.№29.
- [12] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины. № 2349750 [P]. Российская Федерация. МПК E21B47/022. опубл.20.03.2009.Бюл.№8.
- [13] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения температуры в скважине. № 2381361 [P]. Российская Федерация. МПК E21B47/06. опубл.10.02.2010. Бюл.№4.
- [14] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для определения параметров искривления в скважине. № 2468201 [P]. Российская Федерация. МПК E21B47/06. опубл.27.11.2012.Бюл.№33.
- [15] Шевченко М.А. Датчик азимута искривления скважины [J]. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2011(7):2-3.
- [16] Шевченко М.А. Имитационная модель комбинированного канала связи для телеметрии забойных параметров в процессе бурения скважины [J]. 4-ая всеросс.науч.-практ.конф., 2013 (11):136-138.
- [17] Шевченко М.А. Применение струйных элементов для коммутации датчиков скважинной телеметрической системы [J]. Нефтяное хозяйство, 2013(11):124-126.

(编辑 李艺)