

# 基于摩擦纳米发电机的耐高温井下振动传感器研制

张德龙<sup>1,3</sup>, 郭强<sup>1</sup>, 吴川<sup>\*2</sup>, 周清<sup>2</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院,湖北武汉 430074;  
3.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

**摘要:**过激的振动频率将损坏钻具、影响效率、甚至造成井下事故,因此有必要对井下钻具的振动频率进行实时测量。本文基于摩擦纳米发电机提出了一种耐高温的井下振动传感器,该传感器不仅具有振动测量功能,也具有发电功能。当该传感器测量振动频率时,试验显示其测量范围为0~8 Hz,测量误差<4%,信噪比高,抗干扰能力强,且输出信号幅值与传感器和振动源的距离成反比。当该传感器用于发电时,试验显示振动频率越高其发电量越大,其在8 Hz工况下的输出电压、输出电流和输出功率分别为70 V、 $12 \times 10^{-7}$  A和 $4.2 \times 10^{-5}$  W,展示出了其作为井下分布式发电机的潜能。此外,该传感器可在温度<180 °C以及相对湿度<90%的环境下正常使用,具有很强的适应性。

**关键词:**振动传感器;摩擦纳米发电机;高温井;振动频率;自供电

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)01-0120-08

## Development of a high temperature resistant downhole vibration sensor based on the triboelectric nanogenerator

ZHANG Delong<sup>1,3</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>, WU Chuan<sup>\*2</sup>, ZHOU Qing<sup>2</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>

(1. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;*

2. *Faculty of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;*

3. *Faculty of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)*

**Abstract:** Excessive vibration frequency will damage drilling tools, affect efficiency and even cause downhole accidents, so it is necessary to measure the vibration frequency of downhole drilling tools in real time. In this paper, a high temperature resistant downhole vibration sensor based on the triboelectric nanogenerator is proposed. The sensor has not only vibration measurement function, but also power generation function. When the sensor measured the vibration frequency, the test showed that the measurement range was 0~8Hz, the measurement error was less than 4%, the signal/noise ratio was high, the anti-interference ability was strong, and the output signal amplitude was inversely proportional to the distance between the sensor and the vibration source. When the sensor was used for power generation, the test showed that the higher the vibration frequency, the greater the power generation. Its output voltage, output current and output power at 8Hz were 70V,  $12 \times 10^{-7}$ A and  $4.2 \times 10^{-5}$ W, respectively, demonstrating its potential as a downhole distributed generator. In addition, the sensor can be used at temperature less than 180°C and relative humidity less than 90%, exhibiting strong adaptability.

**Key words:** vibration sensor; triboelectric nanogenerator; high temperature well; vibration frequency; self-powered

收稿日期:2021-10-14; 修回日期:2022-01-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.016

基金项目:国家自然科学基金项目“涡轮取心钻进钻具径向振动特征研究”(编号:41802197);自然资源部深部地质钻探技术重点实验室开放基金资助(编号:KF202103)

第一作者:张德龙,男,汉族,1984年生,高级工程师,博士研究生在读,油气井工程专业,硕士,主要从事钻探技术与钻探工程工作,北京市海淀区学院路29号探工楼406,tgszdl@126.com。

通信作者:吴川,男,汉族,1986年生,副教授,地质工程专业,博士,从事井下随钻测量及新型传感器方面的研究及教学工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,wuchuan@cug.edu.cn。

引用格式:张德龙,郭强,吴川,等.基于摩擦纳米发电机的耐高温井下振动传感器研制[J].钻探工程,2022,49(1):120-127.

ZHANG Delong, GUO Qiang, WU Chuan, et al. Development of a high temperature resistant downhole vibration sensor based on the triboelectric nanogenerator[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):120-127.

## 0 引言

钻探是固体矿产及深部能源勘探开发等的重要手段,在钻进过程中,井下钻具组合受多种激励作用而发生振动,包括轴向振动、横向振动及扭转振动。过激的振动将损坏钻具、影响效率、甚至造成井下事故,因此有必要对井下钻具的振动情况进行实时测量<sup>[1]</sup>。

国内外学者在钻柱振动测量方面取得了一些成果,譬如Kim等<sup>[2]</sup>、刘伟等<sup>[3]</sup>学者使用三轴加速度计测量井下振动频率,从而给出了跳钻、粘滑、横向振动(冲击)和涡动等异常振动情况判断分析方法;Kallista等<sup>[4]</sup>、陈波<sup>[5]</sup>等学者提出通过压电加速度计来实现振动频率测量,建立了模拟钻柱振动测试的三维直角坐标系,分别模拟测试了钻柱的纵向振动、横向振动、随机振动及跳钻振动,还进一步研究分析了钻柱振动信号的时域波形以及频谱特征;Emmanuel等<sup>[6]</sup>、翟小强等<sup>[7]</sup>、吴蔚妮等<sup>[8]</sup>等学者提出了具有存储功能的振动传感器,并结合国外振动分级方法以及PDC钻头的技术发展,制定了井下钻具振动分类和风险分级标准;Lines等<sup>[9]</sup>提出利用陀螺仪测量角速度,随后通过分析输出数据进一步得到振动频率;Millan等<sup>[10]</sup>提出利用传感器结合机器学习的方法测量井下振动。

综上所述,目前现有的振动测量方法可满足多数的井下测量需求,但对于高温井或深井而言,现阶段多采取隔热装置减缓热传播速度来满足常温传感器在高温井下的使用,但当工作时间较长时,现有的隔热装置亦无法发挥作用,因此,能够耐高温的振动传感器无疑将更加适宜实际工况。与此同时,井下传感器或仪器的供电方式也是随钻测量领域的痛点之一,而摩擦纳米发电机技术为解决耐高温传感器及供电问题带来了曙光。

摩擦纳米发电机来源于纳米材料的摩擦起电和静电感应现象,在分布式发电及传感器领域得到了广泛的应用<sup>[11]</sup>。例如在传感器领域,摩擦纳米发电机被广泛应用于手势监测<sup>[12]</sup>、压力监测<sup>[13]</sup>、加速度监测<sup>[14]</sup>、旋转监测<sup>[15]</sup>、振动监测<sup>[16]</sup>、健康监测<sup>[17-18]</sup>及运动监测<sup>[19]</sup>等领域。而在发电领域,摩擦纳米发电机已可利用海洋能<sup>[20]</sup>、风能<sup>[21]</sup>、振动能<sup>[22]</sup>、雨水能<sup>[23]</sup>及生物机械能<sup>[24]</sup>等进行发电。可见,摩擦纳米发电机非常适合研制具有自发电功能的传感器,尤其是摩擦起电现象对高温不敏感,可据此研制具有耐高

温及自发电功能的传感器。基于此,笔者团队将摩擦纳米发电机技术引入钻探领域<sup>[25-26]</sup>,并据此研制了一种新型的振动传感器,以满足高温井下轴向振动频率的测量需求,同时还具有发电的功能。

## 1 结构与工作原理

### 1.1 设计指标

在工作温度方面,由于温度梯度的存在,井下温度会随着钻进深度的增加而升高,因此将工作温度设置为大于175℃以满足一般高温井的需求。对于工作湿度,由于传感器必须密封在单独设计的测量仪器中使用,而密闭的测量短节内空气湿度较低,因此传感器对空气湿度没有具体要求,但湿度适应范围越宽越好。对于输出信号幅值,根据晶体管-晶体管逻辑(TTL-transistor Logic)输入高电平的检测标准,输出电压幅值应大于2V。目前井下低功耗供电仪器的功率约mW级别,因此传感器具备为其他随钻测量低功率仪器供电的潜力,以期将来解决井下供电问题,即传感器具有发电功能,因此输出功率越多越好。此外,传感器的设计尺寸应尽可能小,以尽可能满足小尺寸钻探需求。根据以上详细介绍,设计指标如表1所示。

表1 设计指标

Table 1 Design indicators

设计要求	具体指标
温度	>175℃
相对湿度	尽可能宽范围
输出信号	>2V(DC)
输出功率	井下低功耗仪器约为mW级别,但越高越好

### 1.2 传感器结构

由于实际使用时传感器是安装于特殊设计的密封短节内,因此传感器设计时仅需进行简单密封即可。如图1(a)到图1(c)所示,传感器主要由固定球、活动球和支撑台组成。固定球固定在支撑台上,与支撑台保持静止,而活动球则嵌入在固定球内,可自由移动。将铜粘贴在固定球的上下端部,其尺寸为40mm×40mm。由于纳米材料的摩擦起电效果更好,因此将聚四氟乙烯纳米材料(PTFE)粘贴在固定球上下端的铜(Cu)上,其尺寸为45mm×45mm,以确保聚四氟乙烯能完全覆盖铜。其中聚四

氟乙烯作为负极摩擦层产生电荷,而铜作为电极层用于导出聚四氟乙烯产生的电荷。活动球的表面亦附着一层铜,由于铜本身具有导电性,因此可以同时用作正摩擦层和电极层。由于承载较小,考虑到传感器整体的轻便性,因此支撑台采用聚乳酸(PLA)材料3D打印而成。固定球和活动球均采用亚克力

(Acrylic)空心材料制成,外径分别为100 mm和75 mm,壁厚均为3 mm。此外,在传感器的外部使用304不锈钢进行二次封装密封,以满足传感器的基本密封性能。不锈钢外壳的外径为105 mm,厚度为2 mm。

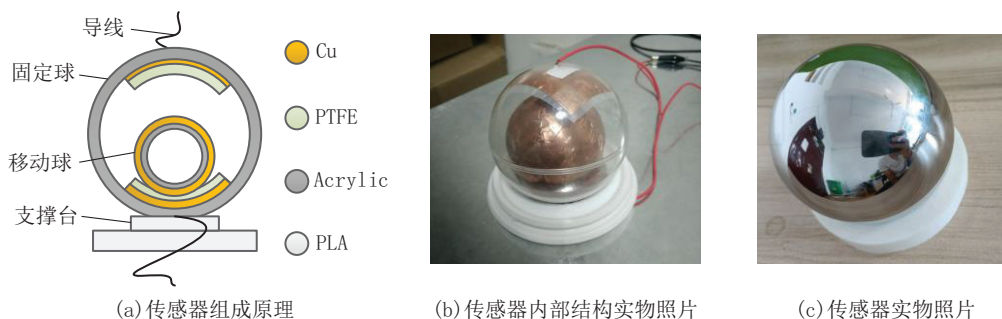


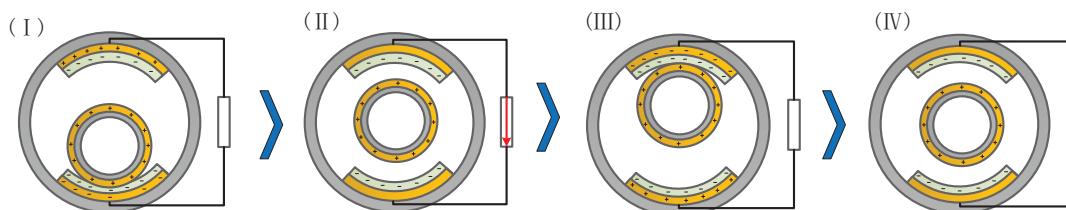
图1 传感器结构组成

Fig.1 Sensor components

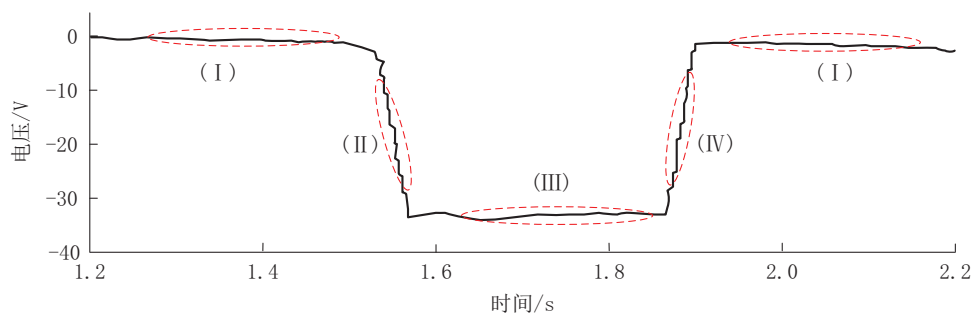
### 1.3 工作原理

传感器通过支撑台固定在测量短节内,当发生轴向振动时,活动球相对于固定球上下运动,并由于摩擦起电和静电感应产生同频率的摩擦电信号,随

后便可通过统计摩擦电信号的振动频率,实现对井底钻具振动频率的测量。图2所示为传感器的工作过程示意图,现结合图2对其工作原理进一步解释说明。



(a) 传感器工作过程中的电荷转移规律示意



(b) 传感器的理论输出电压信号

图2 传感器工作原理示意

Fig.2 Working principle of the sensor

当传感器至少工作一次时,由于摩擦起电作用,可对活动球进行预充电,图2a(I)显示了传感器的初始状态,此时在摩擦电和静电感应作用下,Cu比PTFE更容易失去电子,因此活动球的摩擦层带正电,固定球的摩擦层带负电,系统处于电荷平衡状态,因此外部电路中没有电流产生。图2a(II)为振动发生时的状态,活动球从固定球的下端往上端移动。在此阶段,系统的电荷平衡被打破,下端PTFE上的电子通过电极流向上端电极,电子流过外部负载,在固定球的上下摩擦层形成电势差,产生电流。图2a(III)为活动球接触固定球上部摩擦层时的状态,由于摩擦起电和静电感应,上部摩擦带负电荷,电荷再次处于平衡状态,此时上下端电极电势差为0,外部电路无电流。图2a(IV)为活动球从固定球的上端往下端移动,在固定球的上下电极形成与图2(II)反向的电势差,从而使得电子反向流过外负载形成反向电流。进一步回到图2a(I),此时活动球下落到初始位置状态,电荷转移到下摩擦层,下摩擦层又回到初始状态。在传感器工作过程中,理论输出的电压信号如图2(b)所示。由此可见,当钻具每振动一次,传感器在外部电路都将输出一个脉冲信号,因此通过统计脉冲信号的频率便可实现振动频率的检测。

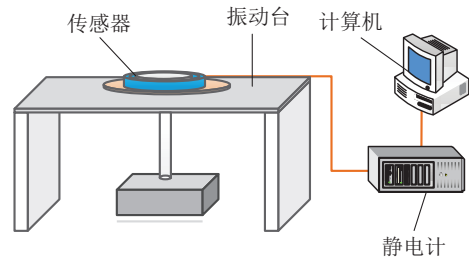
## 2 试验测试

试验测试分为3部分,一是测量振动频率的传感测试,二是测量振动发电性能,三是测量对环境的适应性。测试平台的搭建如图3所示,其中图3(a)为测试装置的原理图,图3(b)是根据图3(a)原理图搭建的实际测试平台照片。测试时利用搭建的振动平台进行测试,通过调节控制器,可在同一幅值下获得不同的振动频率。传感器固定在振动平台上,输出信号由静电计测量,然后通过数据采集卡收集测量数据,最终数据被传输到电脑软件进行显示,具体测试结果如下。

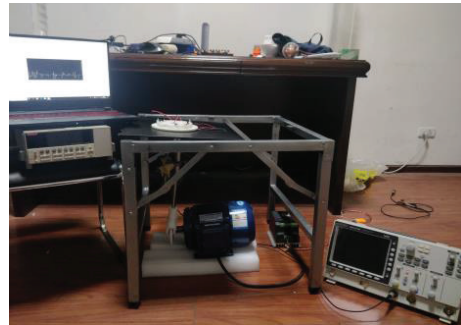
### 2.1 传感性能测试

通过对传感器的传感特性进行测试,得到以下结论。

(1)如图4(a)所示,井下钻具的振动频率与电压脉冲的个数相对应,因此通过电路统计电压脉冲信号可以测量振动频率。进一步将低通滤波器对测试波形进行滤波处理,可得如图4(b)所示结果。由



(a) 试验装置原理



(b) 试验设备

图3 测试设备

Fig.3 Test devices

于普通单片机(微程序控制单元)均具有脉冲测量功能,且触发方式具有负脉冲触发模式,因此可以将单片机相应的引脚直接连接到传感器进行振动频率的统计。

(2)如图4(c)所示,为了研究传感器与振动源的安装距离对输出信号的影响规律,测试了不同振动距离下的传感器输出信号,结果表明:传感器输出信号幅值与安装距离成反比,但相关性近似,且当距离 $>150\text{ cm}$ 时,输出电压将降至约 $5\text{ V}$ ,此时信噪比不明显。因此,传感器与振源的安装距离应小于 $150\text{ cm}$ ,并且距离越近其信噪比越好。

(3)图4(d)为对测量数据进行统计分析后所得的相对误差散点图,其中每个频率下测量10次。可见,当振动频率 $\leq 8\text{ Hz}$ 时,相对误差 $\leq 4\%$ ;当振动频率 $>8\text{ Hz}$ 时,相对误差明显增大,因此该传感器的测量范围为 $0\sim 8\text{ Hz}$ 。

### 2.2 发电性能测试

该传感器利用摩擦起电原理研发,其测量过程也是发电过程,因此可将井下钻具振动能量转化为电能,为此,我们对传感器的发电性能进行了测试。如图5(a)至图5(d)所示,其中传感器的电荷转移、开路电压、短路电流、输出功率均为100次测量值的

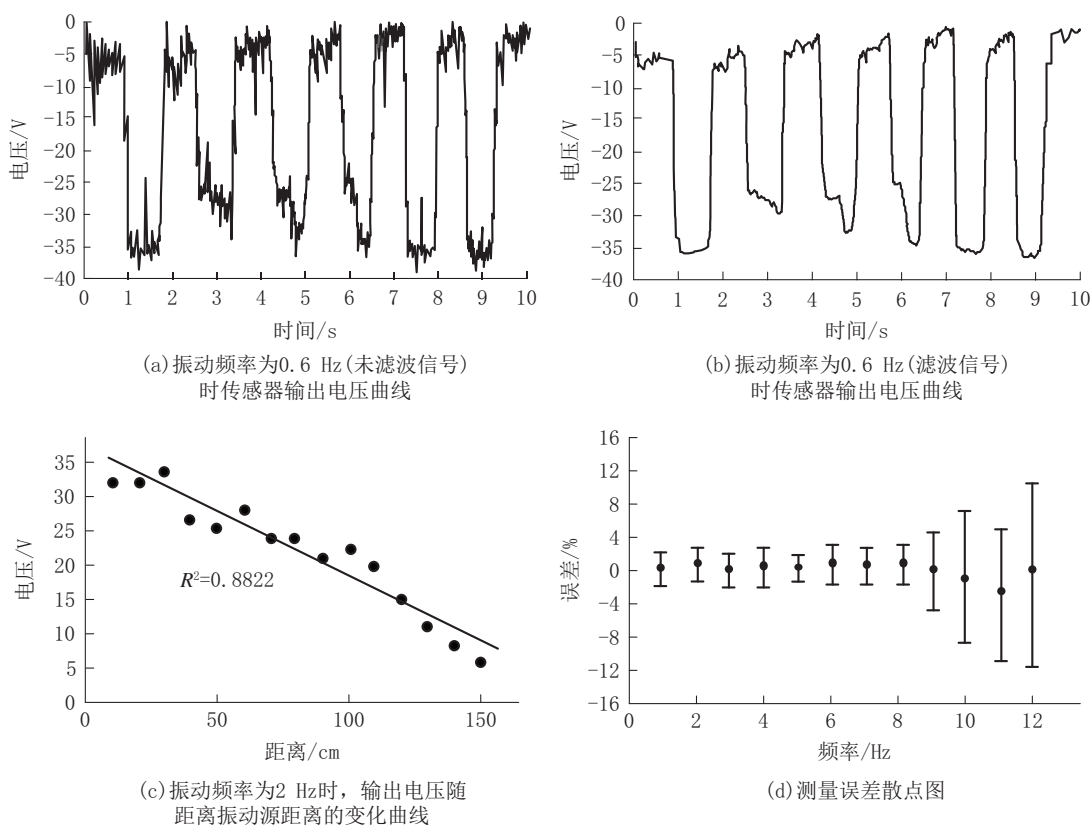


图4 传感性能测试结果

Fig.4 Performance test results of the sensor

平均值,其中传感器的电荷转移,开路电压和短路电流都随振动频率的增加而增大。当振动频率为8 Hz时,传感器的电荷转移、开路电压、短路电流均达到最大值,最大电荷转移 $27 \times 10^{-9}$  C,最大电压为70 V,最大电流为 $12 \times 10^{-7}$  A。此外,当外接电阻时,输出功率随外接电阻的增大先增大后减少,且当外接 $5 \times 10^7 \Omega$ 的电阻时,得到最大功率为 $4.2 \times 10^{-5}$  W。如图5(e)所示,为了直观显示该自供电传感器的发电性能,将传感器的输出功率经电路处理后存储到电容中,闭合开关K1,打开开关K2。大约3 min后,当开关K2开启时,点亮一个0.25 W的LED(发光二极管)。此外,将该传感器的输出经整流桥直接给电容(50 V、20  $\mu$ F)时,可以在500 s的时间将电容充电到最大电压,其充电曲线如图5(f)所示。因此,当多个这样的自供电传感器并联时,如果将发电量存储一段时间,就有可能为低功率井下测量仪器提供间歇性电源。

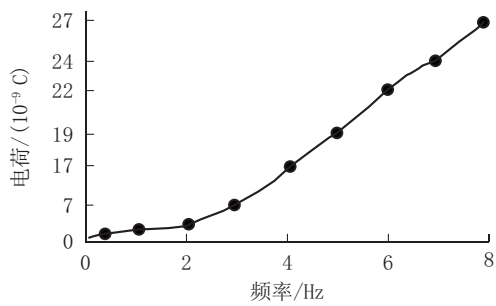
### 2.3 外部环境测试

当用于高温井或深井时,由于地温梯度的存在,

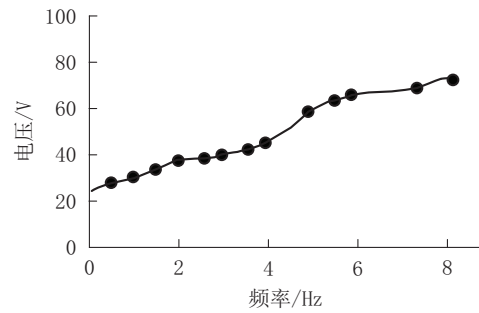
井下温度随钻深逐渐增加,为此测试了传感器在高温下的输出性能,结果如图6(a)所示。可见,当温度 $<100^\circ\text{C}$ 时,输出电压受温度影响不大,当温度 $>100^\circ\text{C}$ ,输出电压迅速减少,当处于 $180^\circ\text{C}$ 时,传感器输出电压下降为38 V,但38 V的电压幅值仍然具有较强的信噪比,因此传感器可满足 $180^\circ\text{C}$ 工况环境下的使用需求。此外,井下泥浆的存在以及井下地质环境中的地下水可能会导致传感器的使用环境存在一定范围的相对湿度,为此进一步进行了测试,结果如图6(b)所示。可见当相对湿度逐渐增加时,传感器输出电压逐渐降低,当相对湿度为90%时,传感器输出电压下降为25 V,该幅值仍然具有较高信噪比,因此传感器可在高湿度环境下正常使用。由此可见,该传感器具有较强的外部环境适应性。

### 3 分析与讨论

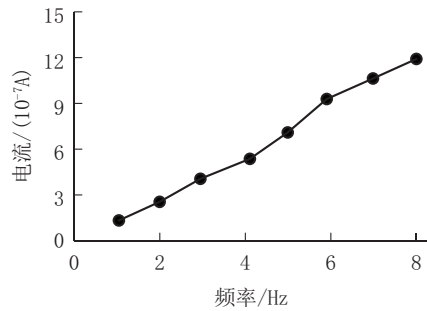
所研制的振动传感器具有振动测量和发电的双重功能,预期将在钻探领域取得以下几方面的应用。一是所研制的传感器具有发电功能,未来可考



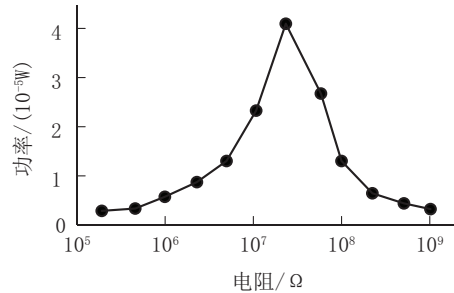
(a)摩擦纳米发电机的转移电荷随振动频率的变化曲线



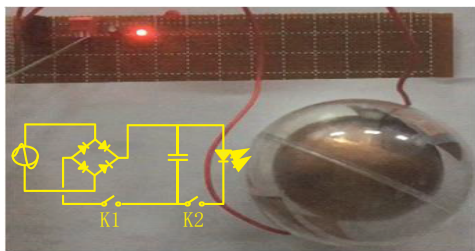
(b)摩擦纳米发电机的开路电压随振动频率变化曲线



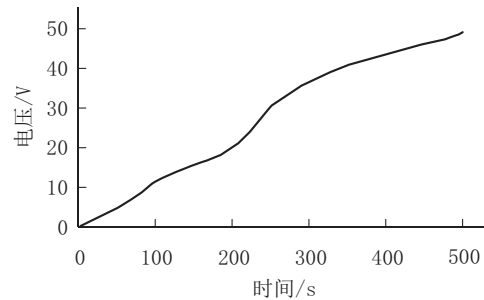
(c)摩擦纳米发电机的短路电流随振动频率的变化曲线



(d)8 Hz振动频率下,摩擦纳米发电机输出功率随电阻的变化曲线



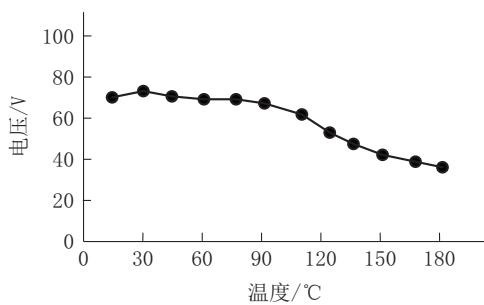
(e)传感器点亮LED二极管的照片



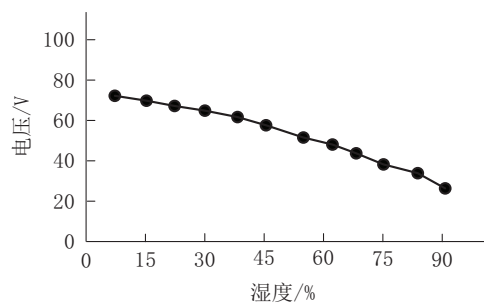
(f)当电容为2 uF时,传感器为电容的充电曲线

图5 传感器发电性能测试结果

Fig.5 Power generation performance test results of the sensor



(a)当振动频率为8 Hz时,不同温度下的摩擦纳米发电机的电压幅值



(b)当振动频率为8 Hz时,不同湿度下的摩擦纳米发电机电压幅值

图6 外部环境测试

Fig.6 External environment test

虑在井下钻具组合不同位置处安装该传感器,从而形成井下分布式的储能,为井下低功耗随钻测量仪器提供间歇式或实时供电;二是所研制的传感器为自供电式的振动传感器,当环境温度达到180℃时仍可正常工作,且工作温度范围还具有进一步提升的空间,因此未来可用于高温或超深井下的振动测量;三是基于此原理所研制的传感器除可测量振动外,理论上还可测量转速、压力及流量等参数的测量,因此未来可考虑基于此原理设计完全密封的随钻测量仪器,无需安装任何传感器和电源便可实现随钻测量功能,形成具有自供电及自传感功能的新型随钻测量仪器;四是基于此原理可设计具有自发电功能的智能钻杆,并在智能钻杆上增加信号中继站,利用智能钻杆的自发电为信号中继站供电,从而形成高速的井下信号传输网络。

#### 4 结论及展望

本研究基于摩擦纳米发电机设计了一种井下耐高温的振动频率传感器,该传感器同时具有振动测量与发电的功能,可在温度 $<180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及湿度 $<90\%$ 的环境下正常使用,具有较强的环境适应性。当该传感器用于测量振动时,其测量范围为 $0\sim 8\text{ Hz}$ ,测量误差 $<4\%$ ,信噪比高,抗干扰能力强,且输出信号幅值与传感器和振动源的距离成反比。当该传感器用于发电时,其在 $8\text{ Hz}$ 工况下的输出电压、输出电流和输出功率均达到最大值,分别为 $70\text{ V}$ 、 $12\times 10^{-7}\text{ A}$ 和 $4.2\times 10^{-5}\text{ W}$ 。该传感器可以点亮一个 $0.25\text{ W}$ 的LED二极管,以及在 $500\text{ s}$ 的时间内把电容( $50\text{ V}$ 、 $2\text{ }\mu\text{F}$ )充电到最大电压,展示出了其作为井下分布式发电机的潜能。

但该传感器仍然存在两点需进一步改进,一是振动频率测量范围较小,无法满足高频振动测量需求。解决该问题的关键是从传感器结构及回复力方式入手,比如可采用磁悬浮方式对活动球进行悬浮以增加回复速度,从而提高频率测量范围。二是若作为发电机使用时电量较小,其发电量无法带动井下使随钻测量仪器工作,因此可从提升摩擦材料发电性能或联合多种井下发电方式,从而提高发电量。

#### 参考文献(References):

[1] Kapitaniak M, Hamaneh V V, Chávez J P, et al. Unveiling complexity of drill-string vibrations: Experiments and modelling

- [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 101: 324-337.
- [2] Kim Y Y, Simons L H. Drilling vibration measurements on a BOP stack [C]//Offshore Technology Conference, 1976. doi: 10.4043/2620-MS.
- [3] 刘伟,周英操,王瑛,等.井下振动测量、分析原理研究[J].石油钻采工艺,2012,34(1):14-18.  
LIU Wei, ZHOU Yingcao, WANG Ying, et al. Study on downhole vibration measurement and analysis theory [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(1): 14-18.
- [4] Kalista Karel, Liska Jindrich, Jakl Jan. A vibration sensor-based method for generating the precise rotor orbit shape with general notch filter method for new rotor seal design testing and diagnostics[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 5249.
- [5] 陈波.井下钻柱振动测试方法研究[D].成都:西南石油大学, 2015.  
CHEN Bo. Research on downhole drilling string vibration testing method [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [6] Emmanuel Schen, A.D.Snell, B.H.Stanes. Optimization of bit drilling performance using a new small vibration logging tool [C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: 2005.
- [7] 翟小强,王瑛,刘伟.存储式井下振动测量工具的设计与室内试验[J].石油钻探技术,2011,39(4):111-114.  
ZHAI Xiaoqiang, WANG Ying, LIU Wei. Design and laboratory test of memory downhole vibration measurement tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(4): 111-114.
- [8] 吴蔚妮,沈雪峰.存储式井下振动测量仪的应用研究[J].石化技术,2019,26(2):79-80.  
WU Weiwei, SHEN Xuefeng. Research on the application of stored underground vibration survey[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2019, 26(2): 79-80.
- [9] Lines L A, Mauldin C L, Hill J W, et al. Advanced drilling dynamics sensor allows real-time drilling optimization, damage prevention and condition monitoring of RSS and LWD BHAs[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2014. doi:10.2118/170586-MS.
- [10] Millan E, Ringer M, Boualleg R, et al. Real-time drillstring vibration characterization using machine learning [C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2019. doi:10.2118/194061-MS.
- [11] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [12] Qin K, Chen C, Pu X, et al. Magnetic array assisted triboelectric nanogenerator sensor for real-time gesture interaction [J]. *Nano-micro Letters*, 2021, 13(1): 1-9.
- [13] Vivekananthan V, Chandrasekhar A, Alluri N R, et al. A highly reliable, impervious and sustainable triboelectric nanogenerator as a zero-power consuming active pressure sensor [J]. *Na-*

- noscale Advances, 2020,2(2):746-754.
- [14] Liu C, Wang Y, Zhang N, et al. A self-powered and high sensitivity acceleration sensor with VQa model based on triboelectric nanogenerators (TENGs) [J]. Nano Energy, 2020, 67: 104228.
- [15] Zhou Q, Huang H, Wu C, et al. A self-powered sensor for drill pipe capable of monitoring rotation speed and direction based on triboelectric nanogenerator[J]. Review of Scientific Instruments, 2021,92(5):055006.
- [16] 吴川,杨朔,樊辰星,等.具有井下自发电及自传感功能的随钻测量新方法研究——以用于振动测量的井下摩擦纳米发电机为例[J]. 钻探工程,2021,48(4):47-53.  
WU Chuan, YANG Shuo, FAN Chenxing, et al. Research on a new measurement while drilling method with downhole self-powered and self-sensing function—An example of triboelectric nanogenerator used in downhole vibration measurement [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):47-53.
- [17] Yi F, Zhang Z, Kang Z, et al. Recent advances in triboelectric nanogenerator-based health monitoring [J]. Advanced Functional Materials, 2019,29(41):1808849.
- [18] Wang S, Tai H, Liu B, et al. A facile respiration-driven triboelectric nanogenerator for multifunctional respiratory monitoring [J]. Nano Energy, 2019,58:312-321.
- [19] Luo J, Gao W, Wang Z L. The triboelectric nanogenerator as an innovative technology toward intelligent sports [J]. Advanced Materials, 2021,33(17):2004178.
- [20] Zhang D, Shi J, Si Y, et al. Multi-grating triboelectric nanogenerator for harvesting low-frequency ocean wave energy[J]. Nano Energy, 2019,61:132-140.
- [21] Lin Z, Zhang B, Guo H, et al. Super-robust and frequency-multiplied triboelectric nanogenerator for efficient harvesting water and wind energy [J]. Nano Energy, 2019, 64: 103908.
- [22] Rahman M T, Rana S M S, Salauddin M, et al. A highly miniaturized freestanding kinetic-impact-based non-resonant hybridized electromagnetic-triboelectric nanogenerator for human induced vibrations harvesting [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115799.
- [23] Zhang Q, Jiang C, Li X, et al. Highly efficient raindrop energy-based triboelectric nanogenerator for self-powered intelligent greenhouse[J]. ACS Nano, 2021.
- [24] Xiong J, Cui P, Chen X, et al. Skin-touch-actuated textile-based triboelectric nanogenerator with black phosphorus for durable biomechanical energy harvesting [J]. Nature Communications, 2018,9(1):1-9.
- [25] Wu C, Huang H, Li R, et al. Research on the potential of spherical triboelectric nanogenerator for collecting vibration energy and measuring vibration[J]. Sensors, 2020,20(4):1063.
- [26] Wu Chuan, Zhou Qing, Wen Guojun. Research on self-powered rotation speed sensor for drill pipe based on triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021,326: 112723.

(编辑 荐华)