

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

吴川, 杨朔, 樊辰星, 周清, 文国军, 刘彬

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 现有随钻测量系统的供电方式均有各自的适用条件, 因此有必要探索新型的井下供电方式作为对现有方式的补充, 或联合现有供电方式共同使用。摩擦纳米发电机源于接触起电及静电感应现象(即生活中常见的静电), 具有发电机和传感器的双重功能。基于此, 本文将摩擦纳米发电机原理引入地质勘探领域, 提出了一种可用于井下自发电(也叫自发电)及自传感的随钻测量新方法, 并以自供电式井下振动传感器的研制为例对该方法进行阐述, 同时通过大量的试验验证了传感器的高信噪比及良好的发电特性, 且进一步通过 280 °C 范围内的高温测试表明了基于该方法具有研制超高温井下传感器及超高温井下实时发电机的优势。还指出了下一步的重点研究方向及其解决途径。

关键词: 随钻测量系统; 自传感功能; 自供电; 摩擦纳米发电机; 振动传感器; 超高温井下传感器; 超高温井下发电机
中图分类号: TE92; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)04-0047-07

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

WU Chuan, YANG Shuo, FAN Chenxing, ZHOU Qing, WEN Guojun, LIU Bin

(Faculty of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The existing power supply methods of measurement while drilling systems have their own applicable conditions, so it is necessary to explore new underground power supply methods as a supplement to the existing methods or use them in conjunction with the existing power supply methods. The triboelectric nanogenerator is derived from the phenomenon of contact electrification and electrostatic induction (ie, common static electricity in life), and has the dual functions of a generator and a sensor. Based on this, this study brings the triboelectric nanogenerators into the field of geological exploration, and proposes a new measurement while drilling method that with the function of self-powered (also called self-powered) and self-sensing base on the principle of triboelectric nanogenerator, and uses a self-powered downhole vibration sensor as an example to introduce this method in detail. Subsequent tests verified the high signal-to-noise ratio and good power generation characteristics of the sensor, and further high-temperature tests in the range of 280 °C showed that this method has obvious advantages in developing ultra-high temperature downhole sensors and ultra-high temperature downhole real-time generators. In addition, since the current research of our team in this new field is still in infancy, there are still a lot of work to be carried out in detail, so this study also gives the next key research directions and solutions in order to provide some reference for interested researchers.

Key words: MWD; self-sensing; self-powered; triboelectric nanogenerator; vibration sensor; ultra-high temperature downhole sensor; ultra-high temperature underground generator

收稿日期: 2020-10-05; 修回日期: 2021-01-16 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.04.006

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金“自供电式天然气水合物两相流气泡探测传感器感应机理研究”(编号: 2019A1515110634); 湖北省智能地质装备工程技术研究中心开放基金“基于摩擦纳米理论的孔底自供电振动传感器的研制”(编号: DZZB202004)

作者简介: 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: 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.

0 引言

井下参数是获取井下工况及调整钻探工艺的重要依据,因此有必要随钻测量。对于井下随钻测量系统(MWD)而言,供电方式是其面临的“瓶颈”问题之一。现有MWD的主要供电方式有3种^[1-2],即有缆供电、电池供电及井下涡轮发电。这3种供电方式极大地促进了行业的发展,但又有各自的适应工况及工艺条件,如有缆供电方式增加了施工难度及成本,电池供电方式需频繁提钻更换电池且高温井中的电池额定容量将大幅度衰减,井下涡轮发电方式对泥浆流量和粘度有一定的要求等。因此,有必要探索新型的井下供电方式作为对现有方式的补充,或联合现有供电方式共同使用,从而扩展MWD的适用工况及工艺条件范围。

美国佐治亚理工学院Z. L. Wang院士所提出的摩擦纳米发电机理论,为解决井下发电问题带来了曙光^[3]。摩擦纳米发电机理论来源于摩擦起电和静电感应现象^[4],也就是我们常见的静电,其基本原理为:当两种不同的纳米材料相接触时(不一定摩擦,轻微接触即可),接触面将由于接触起电而产生正负电荷;当两材料由于外力作用分离时,两接触表面的正负电荷将随之发生分离,并将由于静电感应产生短路电流和感应电动势。由于两材料的“接触-分离”过程是由于测量参数的变化导致,因此摩擦纳米发电机可用于研制传感器;同时由于两材料的“接触-分离”过程本身就是发电过程,因此摩擦纳米发电机可用于研制发电机。

可见,基于摩擦纳米发电机原理可研制自供电式传感器,如自供电转速传感器^[5]、自供电振动传感器^[6-7]、自供电气压传感器^[8]、自供电温度传感器^[9]及自供电触觉传感器^[10]等。尤其是在发电领域,摩擦纳米发电机更是具有一定的优势^[11-13],已经实现了对生物能^[14-15]、风能^[16-18]及海洋能^[19-21]等领域的实时发电。因此,若将不同种类的自供电传感器根据需要集合设计到同一个MWD中,其并联后的发电量不仅可满足传感器本身的需要,还可满足MWD的后续电路需求,从而形成完全自传感(无需安装传感器)和自供电(无需外接电源)的MWD,产生新型的井下MWD供电方式。基于此思路,本研究团队将摩擦纳米发电机原理引入地质勘探领域进行研究^[22-26],开辟了多学科交叉协同解决井下供电问题的切入点,同时在关键理论及技术问题上取得了一

些进展。本文以前期的部分研究成果为例,详细介绍可用于井下振动测量的摩擦纳米发电机的传感(即自供电式井下振动传感器)及发电机理,从而为感兴趣的科研工作者提供一些参考。

1 基本原理

传感器的结构设计比较复杂,但其核心组成部分简化后可如图1(a)所示,即,其核心部件为A摩擦板、B摩擦板及弹簧,其中A摩擦板上依次粘贴有铜箔和聚酰亚胺(Kapton),而B摩擦板上依次粘贴有铜箔和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。当振动发生时,B摩擦板受振动惯性力向下运动压缩弹簧,随后被弹簧反向弹出并与A摩擦板相接触,最终受重力和弹簧拉力作用回到初始位置。在此过程中,由于A、B两摩擦板的摩擦接触将产生相应的摩擦电信号,因此通过统计摩擦电信号次数便可得到振动频率,具体摩擦电信号的产生原因将通过图1(b)所示的工作过程详加说明。

如图1(b)所示,S1为传感器两摩擦板至少接触一次之后的初始状态,此时由于两摩擦板的接触导致摩擦电荷的产生,并且由于PMMA比Kapton材料更容易失去电子,因此此时A摩擦层带负电荷而B摩擦层带正电荷。与此同时,由于两摩擦板之间的分离导致静电感应的产生,在感应电动势(或称开路电压)的驱使下导致两电极层之间发生电荷转移,最终使得A、B两电极层分别产生相应的正负电荷,此时传感器处于电荷平衡状态。随后由于惯性力的作用导致B摩擦板向下运动到S2状态时,此时两摩擦板之间的分离距离达到最大。由于两摩擦板的分离距离与开路电压成正比^[27],因此此时开路电压达到最大值,同时由于开路电压的进一步驱使导致A、B两电极层之间的电荷进一步转移,由此在电路中产生短路电流。进一步,B摩擦板将由于弹簧反向弹力向上运动到S3状态,此时由于两摩擦板的距离逐渐减小导致开路电压逐渐降低,且开路电压的降低也将导致两电极层之间出现电荷的反向转移,由此在电路中产生反向的短路电流。当B摩擦板运动到与A摩擦板相接触时,即S4状态,此时两摩擦板之间的距离为0,因此开路电压降低为0。最终B摩擦板在重力和弹簧拉力的合力作用下回到初始状态S1,此时由于两摩擦板间距的增大导致开路电压再次增加,且由于开路电压驱动两电极层之间的电荷转移

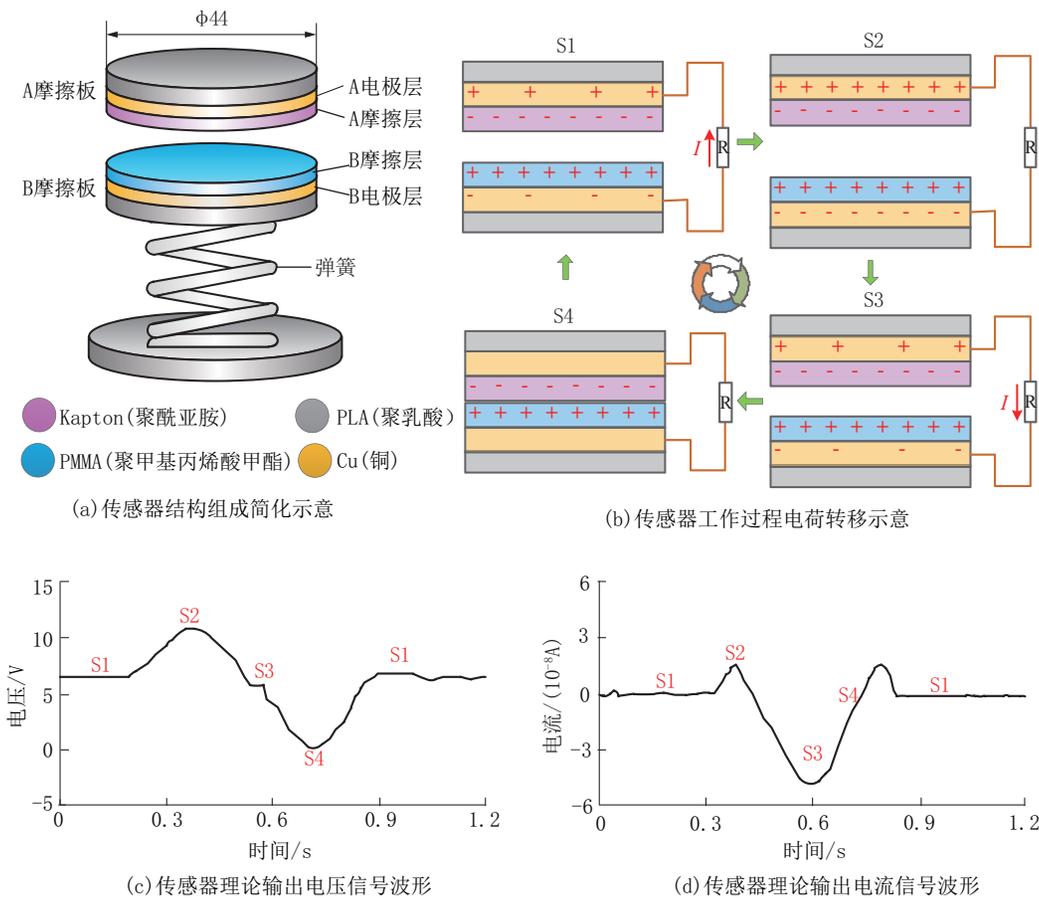


图 1 自供电振动传感器工作原理示意

Fig.1 Schematic diagram of working principle of the self-powered vibration sensor

再次形成短路电流。

综上所述,传感器的总体工作原理为:首先基于两摩擦层的接触产生摩擦电荷,随后利用两摩擦层的分离形成感应电动势,紧接着依靠感应电动势驱使电极层的电荷发生动态转移形成短路电流,如此反复循环便可实现传感和发电。在上述过程中,传感器的理论输出开路电压及短路电流信号分别如图 1(c)及(d)所示。可见,当传感器测量一次振动的过程中将输出一个含有下降沿脉冲的电压及电流信号,因此,通过后续电路统计单位时间内电压或电流信号的脉冲个数,便可计算得到振动频率,同时通过后续电路收集短路电流,便可将振动能量转换为电能而为其他电路模块供电。此外,由于采集电压信号的后续处理电路相对简单,因此本文采用电压信号作为传感器的检测信号。

2 传感器测量特性

原理样机加工完成后,利用室内模拟装置对传感器的测量特性进行了试验,结果如图 2 所示。由图 2(a)及(b)可知,由于受到传感器低频率的机械式往复运动限制,导致传感器测量振动的量程为 0~11 Hz,且其输出信号幅值与振动频率成正比。然而在较低频率时其输出信号幅值仍远大于噪声信号,因此具有较强的信噪比和抗干扰能力。进一步的,我们统计分析传感器在保持频率不变但振幅变化时的输出信号特征规律,由图 2(c)所示的试验结果可知传感器的输出峰值电压随振幅的增加而逐渐增加并最终趋于平稳,因此当振幅小于约 30 mm 时,振幅越高则传感器的输出信号信噪比越强,越有利于信号的识别及检测。此外,我们还测试了传感器在量程范围内的测量误差,结果显示测量误差 $\lt; \pm 5\%$(见图 2d)。

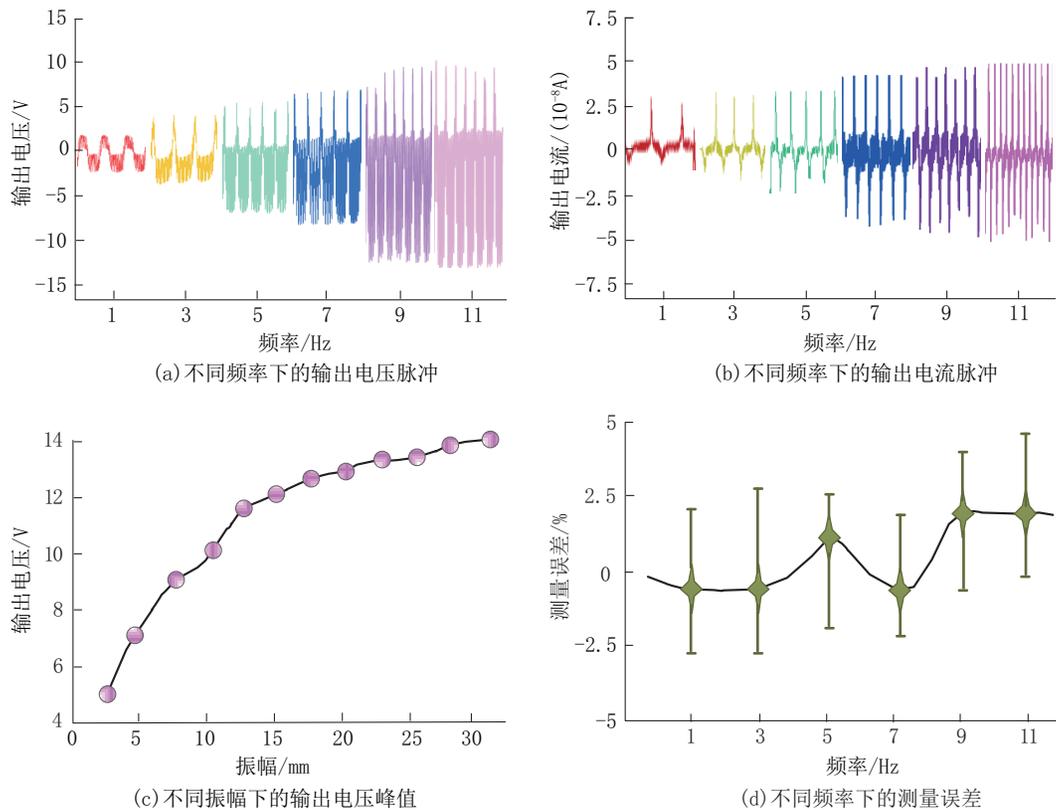


图2 自供电振动传感器测量特征

Fig.2 Measurement characteristics of the sensor

3 传感器发电特性

传感器的工作原理为接触起电及静电感应,其传感过程本身也是发电过程,因此传感器也可当做发电机使用。基于此我们对传感器的发电特性进行了测试,结果如图3所示。由图3(a)可知,随着外负载的增加,传感器的输出电流逐渐降低而负载两端的电压逐渐增大,这一现象与欧姆定律相符合,反映出传感器可视为具有较大阻抗的发电机。随后对传感器的发电功率进行了测试,结果如图3(b)和(c)所示,其中图3(b)反映出传感器的发电功率与振动频率成正比,且在负载电阻约120 kΩ时可输出最大功率,而图3(c)则反映出传感器的发电功率还与振幅成正比,但当振幅超过约25 mm之后发电功率不再增加。此外,为充分利用传感器的输出电量,可将其存储后供其他耗电设备直接使用,因此我们对传感器的充电特性进行了研究,图3(d)所示的充电曲线表明,传感器为电容充电时的充电量与充电时间成正比,显示了传感器良好的充电特性。

4 应用试验

为进一步展示传感器的传感及发电特性,我们进行了传感器的应用试验,试验结果如图4所示。试验前首先对传感器的可靠性进行了测试(如图4a所示),结果显示当传感器重复使用35000次后,其输出信号电压并无衰减,这表明了传感器具有较高的可靠性。与此同时,考虑到深部钻探井下的高温情况,我们对高温下的传感器输出信号进行了测试(如图4b所示),结果显示其输出电压随温度的升高而缓慢增加。由于所设计的传感器是以脉冲信号频率反映振动频率,而输出电压幅值越高则越有利于频率信号的检测,因此这意味着传感器在高温下的输出特性反而优于常温,这种特性也为研制超高温井下传感器指明了思路,同时也是我们团队目前正在积极开展的重要研究方向之一。

为了更直观地展示传感器的发电及传感特性,我们进行了如图4(c)及(d)所示的室内演示试验。由图4(c)可见,传感器的实时发电量经整流桥电路处理后便可直接进行存储,图中多个电源指示灯被

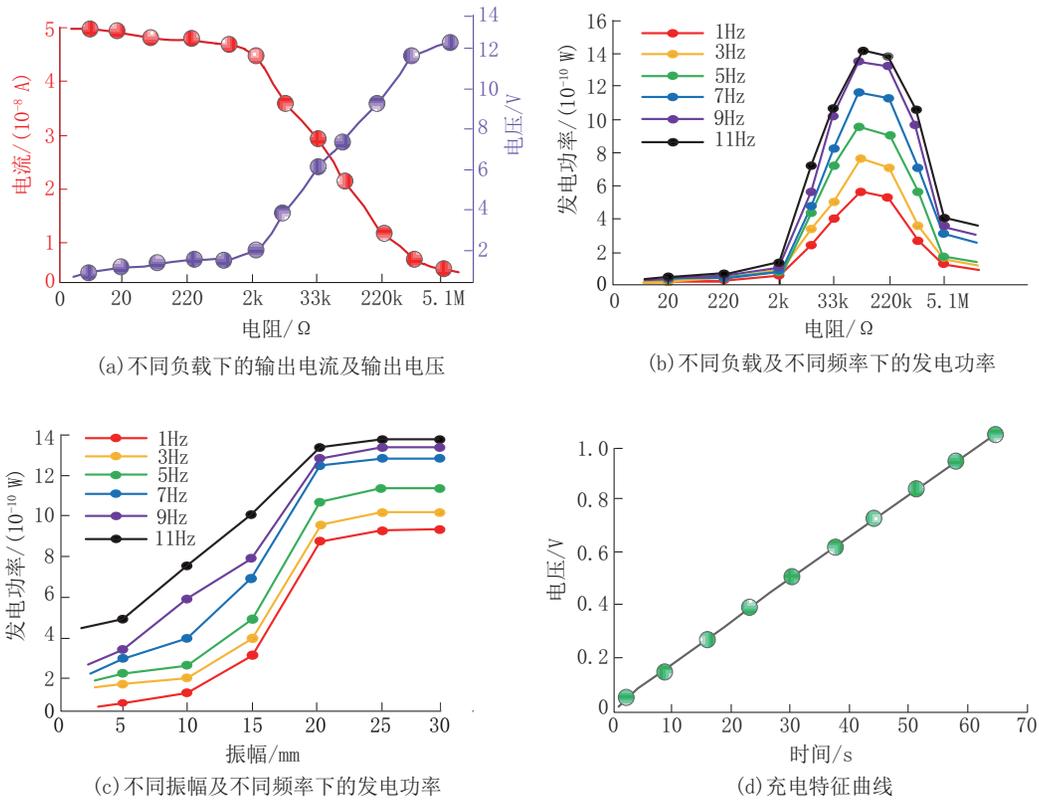


图 3 自供电振动传感器发电特征
 Fig.3 Power generation characteristics of the sensor

实时点亮,表明了传感器在井下发电上的巨大潜能。同时,我们将自供电振动传感器直接与无线发射模块相连(如图 4d 所示),则传感器的测量数据便可经无线网络实时传输到远程无线终端,并进一步通过上位机软件成功地读取到了传感器远程发送的数据波形,展示了传感器良好的自供电及自传感器性能。

5 总结及讨论

本文将摩擦纳米发电机引入地质勘探领域,提出了一种可用于井下自供电及自传感的随钻测量新方法。后续的试验结果显示,利用该方法所研制的振动传感器同时具有传感器和发电机的双重功能。当作为传感器使用时,可实现自供电式的振动频率测量,且输出信号具有良好的信噪比;当作为发电机使用时,其发电量与振动的频率及振幅均相关。同时进一步的试验结果显示高温反而有利于传感器的信号检测及发电,因此有望据此研制耐超高温的井下传感器及井下电源。此外,室内自传感及自供电的演示试验也表明传感器可在自供电模式下工作,非常适合用于研制井下自供电及自传感

器的随钻测量系统。

然而,团队针对这一全新交叉学科领域的研究目前仍处于起步阶段,虽然前期已通过一些实践研究证实了基于摩擦纳米发电机研制自供电及自传感的井下随钻测量系统的可行性及优势,但并未进行相关的理论研究,系统性的理论及技术体系仍未建立,仍有大量的理论及实践工作需要详细展开,这也是我们下一步的重点研究方向,具体如下:

(1)测量参数种类较少。目前团队仅基于摩擦纳米发电机研制了几种自供电传感器,且测量参数的种类太少,无法满足多样化的井下随钻测量系统需求。根据目前所查阅到的最新文献资料显示,基于摩擦纳米发电机所研制的传感器还可实现角度、压力、流量、温度、压差、方向、加速度、角加速度等多种参数的测量,因此下一步将通过合理的设计及纳米材料的选择来研制满足不同种类测量参数需求的自供电传感器,从而拓展井下随钻测量系统的测量参数种类。

(2)发电量较低。目前所研制的自供电传感器的发电量较低,单个传感器的发电量无法满足井下

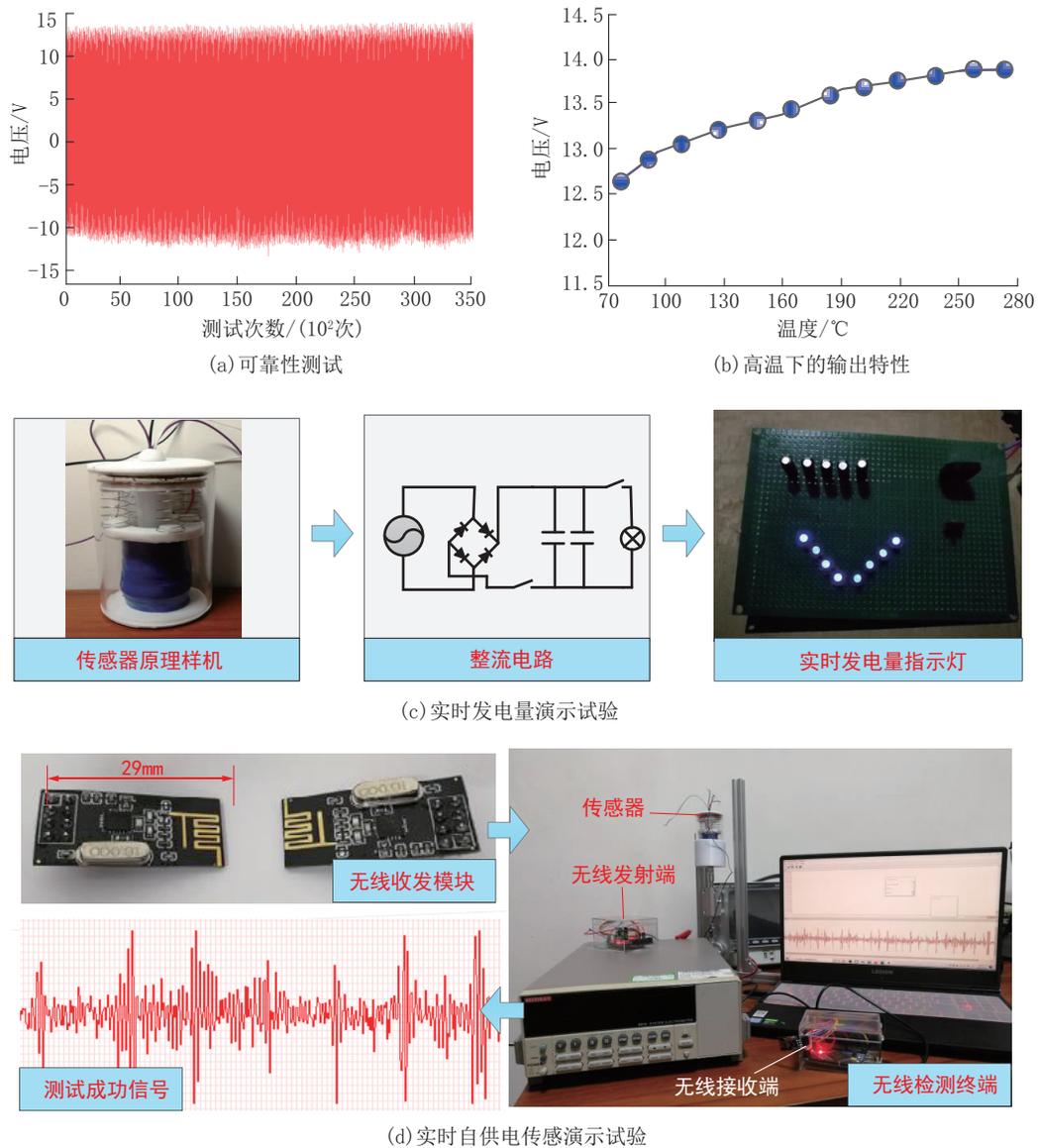


图4 自供电振动传感器应用试验
 Fig.4 Application tests of the sensor

随钻测量系统的实时用电需求。解决方法有3个：一是增加传感器个数，比如将本文所研制的振动传感器多个并联使用，当数目增加到一定程度时便可满足井下随钻测量用电需求，但这会增加仪器体积；二是增加能源转换种类，比如设计一种高效的井下摩擦纳米发电机可同时将孔底振动、转动、流体流动及温度等多种能量进行吸收及电能转换，从而增加发电量；三是改变纳米材料表面形貌，使得具有相同尺寸的两摩擦层的有效接触面积增加，从而增加发电量。

(3)可靠性有待进一步提高。摩擦纳米发电机

涉及摩擦起电现象，但此处摩擦起电并非真正的硬摩擦，而是一种轻微接触或碰触，因此可极大地降低材料的磨损。虽然团队前期已经对可靠性进行了一定的研究及试验，但考虑到钻探对井下仪器设备的高可靠性要求，因此有必要研究进一步提高可靠性的方法。目前为提高输出特性，传感器部分采用了非金属纳米材料制作，而实际上金属材料的可靠性及耐磨特性更优，因此下一步将尝试采用纯金属的材料制作摩擦层，进而在保证传感器输出特性的同时还大幅度地提高其可靠性，以满足钻探对高可靠性的需求。

参考文献(References):

- [1] 陈冬冬. 井下涡轮发电技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
CHEN Dongdong. Research on underground turbine power generation technology[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [2] 胡永建, 李显义, 黄衍福, 等. 基于TPS2121的井下自动供电装置设计[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 76-81.
HU Yongjian, LI Xianyi, HUANG Yanfu, et al. Design of downhole automatic power supply device based on TPS2121[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 76-81.
- [3] LIU Wenlin, WANG Zhao, WANG Gao, et al. Integrated charge excitation triboelectric nanogenerator[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-9.
- [4] LIU Di, YIN Xing, GUO Hengyu, et al. A constant current triboelectric nanogenerator arising from electrostatic breakdown[J]. Science Advances, 2019, 5(4): eaav6437.
- [5] HU Jie, PU Xianjie, YANG Hongmei, et al. A flutter-effect-based triboelectric nanogenerator for breeze energy collection from arbitrary directions and self-powered wind speed sensor[J]. Nano Research, 2019, 12(12): 3018-3023.
- [6] LI Shaoxin, LIU Di, ZHAO Zhihao, et al. A fully self-powered vibration monitoring system driven by dual-mode triboelectric nanogenerators[J]. ACS Nano, 2020, 14(2): 2475-2482.
- [7] GARCIA Cristobal, TREDAFILOVA Irina. Real-time diagnosis of small energy impacts using a triboelectric nanosensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 291: 196-203.
- [8] CUI Xiaojing, ZHANG Hulin, CAO Shengli, et al. Tube-based triboelectric nanogenerator for self-powered detecting blockage and monitoring air pressure[J]. Nano Energy, 2018, 52: 71-77.
- [9] XIA Kequan, ZHU Zhiyuan, ZHANG Hongze, et al. A triboelectric nanogenerator as self-powered temperature sensor based on PVDF and PTFE[J]. Applied Physics A, 2018, 124(8): 520.
- [10] PU Xiong, LIU Mengmeng, CHEN Xiangyu, et al. Ultra-stretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and tactile sensing[J]. Science Advances, 2017, 3(5): e1700015.
- [11] LIU Wenlin, WANG Zhao, WANG Gao, et al. Switched-capacitor-convertors based on fractal design for output power management of triboelectric nanogenerator[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-10.
- [12] LAI Yingchih, HSIAO Yungchi, WU Hsingmei, et al. Waterproof fabric-based multifunctional triboelectric nanogenerator for universally harvesting energy from raindrops, wind, and human motions and as self-powered sensors[J]. Advanced Science, 2019, 6(5): 1801883.
- [13] DONG Kai, PENG Xiao, An Jie, et al. Shape adaptable and highly resilient 3D braided triboelectric nanogenerators as e-textiles for power and sensing[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-11.
- [14] RAHMAN Mtoyabur, RANA Smsohelrana, SALAUDDIN Md, 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.
- [15] XIONG Jiaqing, CUI Peng, CHEN Xiaoliang, 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.
- [16] KIM Daewon, TCHO Ilwoong, CHOI Yangkyu. Triboelectric nanogenerator based on rolling motion of beads for harvesting wind energy as active wind speed sensor[J]. Nano Energy, 2018, 52: 256-263.
- [17] WANG Yuqi, YU Xin, YIN Mengfei, et al. Gravity triboelectric nanogenerator for the steady harvesting of natural wind energy[J]. Nano Energy, 2020: 105740.
- [18] RAVICHANDRAN Aravindnarain, CALMES Cyril, SERRES Julien, et al. Compact and high performance wind actuated venturi triboelectric energy harvester[J]. Nano Energy, 2019, 62: 449-457.
- [19] XU Minyi, ZHAO Tiancong, WANG Chuan, et al. High power density tower-like triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional water wave energy[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 1932-1939.
- [20] LIU Guanlin, GUO Hengyu, XU Sixing, et al. Oblate spheroidal triboelectric nanogenerator for all-weather blue energy harvesting[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(26): 1900801.
- [21] RODRIGUES C, NUNES D, CLEMENTE D, et al. Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: state of the art and future perspectives[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(9): 2657-2683.
- [22] WU Chuan, FAN Chenxing, WEN Guojun. Self-Powered speed sensor for turbodrills based on triboelectric nanogenerator[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4889.
- [23] WU Chuan, HUANG He, YANG Shuo, et al. Pagoda-shaped triboelectric nanogenerator with high reliability for harvesting vibration energy and measuring vibration frequency in downhole[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(23): 13999-14006.
- [24] FAN Chenxing, WU Chuan, WEN Guojun, et al. Development of self-powered bubble velocity sensor for gas-liquid two-phase flow based on triboelectric nanogenerator[J]. Nanotechnology, 2020, 32(8): 085503.
- [25] FAN Chenxing, WU Chuan, WEN Guojun. Development of gas-liquid two-phase flow pattern sensor of coalbed methane based on the principle of triboelectric nanogenerator[J]. Nanotechnology, 2020, 31(19): 195501.
- [26] WANG Yu, WU Chuan, YANG Shuo. A self-powered rotating speed sensor for downhole motor based on triboelectric nanogenerator[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3030823.
- [27] WU Changsheng, WANG Aureliac, DING Wenbo, et al. Triboelectric nanogenerator: A foundation of the energy for the new era[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(1): 1802906.