



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401870

引用格式:冯彦军,任建超,吴川,等.井下阵列式可变形自供电振动传感器[J].科学技术与工程,2025,25(1):186-193.

Feng Yanjun, Ren Jianchao, Wu Chuan, et al. Downhole arrayed self-powered deformable vibration sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 186-193.

井下阵列式可变形自供电振动传感器

冯彦军^{1,2,3},任建超¹,吴川^{4*},刘茂福¹,丁维波¹,白荣财¹,陈驰⁴

(1. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 神木 719100; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013;

3. 天地科技股份有限公司, 北京 100013; 4. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要 钻井过程中实时测量钻具振动对于钻井工艺及井下安全至关重要,然而传统的井下振动传感器供电方式增加了钻井成本并降低了钻井效率,而具有自发电功能的传感器无疑将更加适宜实际工况。基于摩擦纳米发电机原理,提出了一种井下阵列式可变形自供电振动传感器。试验表明该传感器可同步测量振幅和频率,其中振动频率的测量范围为0~11 Hz,测量误差小于±4%;可实现3个离散振幅值(10、25、40 mm)的测量,测量误差为±3 mm,且传感器的工作温度范围为0~85℃。此外传感器还具有发电功能,试验表明传感器的最大输出功率可达 8.3×10^{-7} W,而将多个传感器并联使用后其发电功率将大幅度提升。研究成果可为井下传感器及井下发电机的研制提供新的思路。

关键词 振动传感器;摩擦纳米发电机;自供电;钻杆振动

中图分类号 TH763; 文献标志码 A

Downhole Arrayed Self-powered Deformable Vibration Sensor

FENG Yan-jun^{1,2,3}, REN Jian-chao¹, WU Chuan^{4*}, LIU Mao-fu¹,

DING Wei-bo¹, BAI Rong-cai¹, CHEN Chi⁴

(1. Shaanxi Coal Caojiatan Mining Co., Ltd., Shenmu 719100, China;

2. Mining Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. China Coal Science and Industry Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

4. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

[Abstract] The drilling process requires real-time measurement of drill string vibration, which is crucial for drilling and downhole safety. However, the traditional power supply mode used for downhole vibration sensors has been found to increase drilling costs and reduce drilling efficiency. Therefore, sensors with self-powered capabilities are considered more suitable for practical conditions. A downhole arrayed self-powered deformable vibration sensor was proposed based on the principle of triboelectric nanogenerators. Experimental results demonstrate that the sensor synchronized measurements of amplitude and frequency. The vibration frequency is measured within a range of 0 Hz to 11 Hz, with a measurement error of less than $\pm 4\%$. Additionally, the sensor is able to measure three discrete amplitude values (10, 25, 40 mm) with a measurement error of ± 3 mm. The sensor can working normally within a temperature range of 0℃ to 85℃. Furthermore, the sensor has power generation capabilities, with experiments revealing a maximum output power of 8.3×10^{-7} W. Notably, when multiple sensors are used in parallel, the power generation capacity is significantly enhanced. These research findings provide new insights for the development of downhole sensors and downhole generators.

[Keywords] vibration sensor; triboelectric nanogenerator; self-powered; drill pipe vibration

钻探技术是指利用钻机等专用的机械设备,在地层中形成井眼以探测和开采地下资源的一种技术手段^[1-2]。在此过程中,井下振动作为影响钻探安全和效率的关键因素之一,其动态参数的准确测量对于诊断钻探过程中的复杂工况并防范潜在风

险至关重要^[3-4]。目前井下振动测量技术已经取得了显著进展,包括基于地面测量与深度学习技术结合的方法^[5-6]和利用动力学模型进行优化的策略^[7-8],取得了较好的效果。对于振动传感器而言,工业应用的振动测量场景较多,产生了除芯片式加

收稿日期:2024-03-15 修订日期:2024-10-10

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC2907502);陕西陕煤曹家滩矿业有限公司项目(KCYJY-2023-ZD-02,2023-TD-ZD003-003)

第一作者:冯彦军(1980—),男,汉族,山西吕梁人,博士,副研究员。研究方向:煤矿煤岩层水力压裂及其推广。E-mail:cristiarno@163.com。

*通信作者:吴川(1986—),男,汉族,河北邯郸人,博士,副教授。研究方向:随钻测量、钻探机具及自发电传感器。E-mail:wuchuan@cug.edu.cn。

速度计外的多种新型振动测量传感器,比如磁电式^[9]、光栅式^[10]及压电式^[11]等,极大地扩展了振动传感器的应用范围,但井下钻具振动的测量目前仍采用芯片式的加速度传感器^[12]。

然而在现场实际作业中,现有测量技术面临一定的挑战。例如,若传感器安装于地表,其记录的振动数据可能会与孔底实际情况存在较大的偏差,影响数据精度;若传感器安装于井底,无论是采用电池供电还是电缆供电的方式,都将不可避免地提高钻探成本并对钻井效率产生负面影响。因此,若井下振动传感器具有自发电功能,无疑将可有效解决传统供电方式所带来的弊端。此外,传统的振动传感器形状及规格固定,无法满足不同形状及平面的安装需求,若井下振动传感器具有变形功能,无疑将极大地提高传感器的工况适应性。

美国佐治亚理工学院王中林院士所提出的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG),为研制自发电传感器带来了新的思路^[13]。目前,基于摩擦纳米发电机技术的自供电传感器已经取得了显著进展。例如,Meahud等^[14]基于结构设计和数值模拟结果成功制备了一种弹簧辅助的振动传感器,实现了对0~1 200 Hz范围内振动频率的准确监测;同时Lin等^[15]报道了一种柔性超高频摩擦电振动传感器,采用层-颗粒-层结构设计,可在平面和弯曲状态下工作,且测量范围可达3~170 kHz。基于此,现提出一种阵列式可变形自供电振动传感器,旨在解决井下供电和不规则安装空间的技术难题。传感器在安装时可以适应不同的地形条件,且其中的每个传感器单元都能独立输出信号,因此,当传感器中的某一个单元失效时,传感器仍能正常工作,且多个传感器单元组合在一起也使得传感器的输出功率大幅度提高。

1 传感器结构设计及工作原理

1.1 结构设计

如图1所示为传感器的结构示意图,传感器密封于井下的随钻测量仪器内,随仪器在井下工作。传感器由聚四氟乙烯(PTFE)管、铝(Al)电极、防水塞和水组成。PTFE管的外径为13 mm,内径为12 mm,长度为100 mm,内部装有0.6 cm³的水,之后在PTFE管的上下方安装防水塞,防止液体流出损坏传感器的输出性能。在PTFE管的下方围绕外径粘贴厚度为0.05 mm,长度为35 mm的Al电极,在PTFE管的上方每隔5 mm安装一块厚度为0.05 mm、长度为10 mm的Al电极。多个传感器阵列排布并捆扎后形成传感器组合,以增加发电量输出,同时冗余

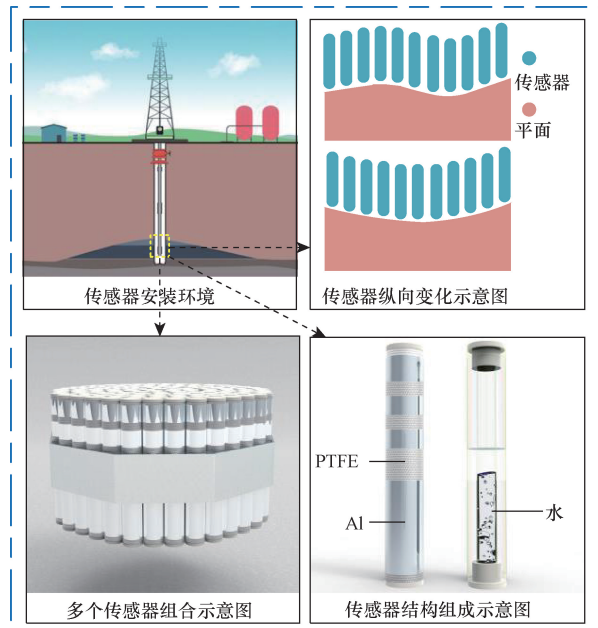


图1 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

式的布置方式可提高传感器的可靠性。此外,传感器在纵向方向可变形,因此可适用于不平整平面的安装环境。

1.2 传感器工作原理

1.2.1 振动频率监测

图2为传感器的工作原理示意图。当水在PTFE管内流动时,PTFE能够吸引水中的负电荷,使PTFE表面带有负电,水带有正电,且由于PTFE为高分子材料,其电负性不容易消失,因此电荷可保持一定时间。当钻柱处于静止状态时,由于水的重力作用,水处于PTFE管的下半部分,由于静电感应作用,水中的正电荷与PTFE管中的负电荷相互吸引且处于电势平衡状态[图2(a)];PTFE管的上半部分的负电荷同时也由于静电感应作用与Al-1~Al-3电极的正电荷相互吸引,处于电势平衡状态。当轴向振动产生时,由于惯性作用,PTFE管内的液体开始向上运动,且运动到Al-1处时,此时的PTFE管上下部分的电势平衡被打破,PTFE管下部分的Al电极中的负电荷向Al-1处移动,此时在外部电路中由于电子的移动产生电流[图2(b)]。随着振幅增加,PTFE管内的液体继续向上移动,移动到Al-2处时,PTFE管下部分的Al电极中的负电荷继续向Al-2处移动,理论上在波形图中会产生一个小峰值[图2(c)]。当振幅继续增加,液体全部移动到PTFE管的上半部分且到达Al-3处,PTFE管下部分的Al电极中的负电荷继续向Al-3处移动,理论上在波形图中会产生一个最高峰值,且暂时处于一个新的电势平衡状态[图2(d)]。当PTFE管内的液

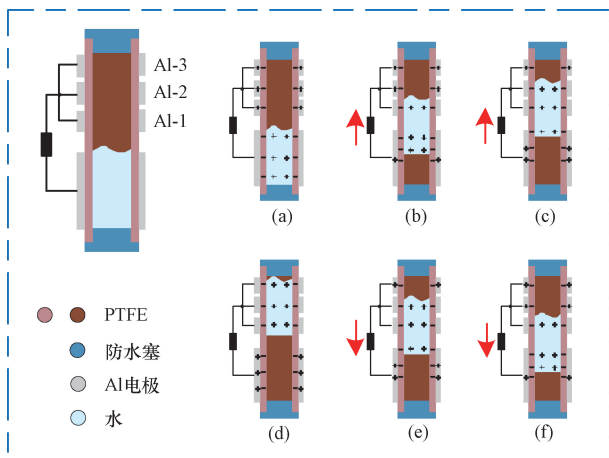


图2 传感器工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of the sensor

体开始向下运动时,电势平衡状态再次被打破,Al-3处的电子向PTFE管下方的Al电极转移,此时将会在电路中产生一个反向电流[图2(e)].最终PTFE管内的液体向下运动到[图2(f)]处.可见,在一个振动周期内,理论上会产生一个波形,因此可以通过测量输出电信号波形的频率来计算振动频率。

1.2.2 振幅检测

由上述原理可知,液体向上运动的距离与振幅成正相关,当振动幅度越大时液体向上运动与PTFE下方Al电极的距离就会越大.理论上,当管内液体运动到Al-1、Al-2、Al-3处时,会在输出信号波形图中产生相对应的3个波形峰值,因此可根据输出信号波形图中的峰值个数来判断传感器的振动幅度。

2 试验

利用室内标准的振动台及温控箱等设备对传感器的性能进行测试.如图3所示,传感器固定在振动台上方,通过控制器调整振动台的振幅和频率,随后通过传感器采集数据,采集到的数据经数据采集卡及静电计处理后接入上位机软件进行显示及存储。

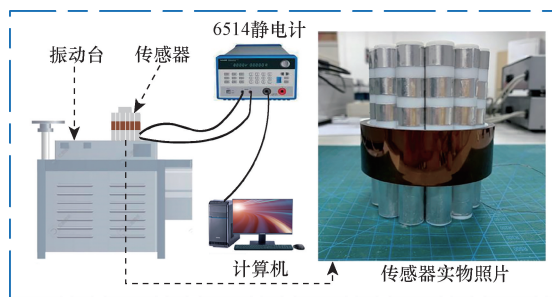


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

2.1 传感性能试验

2.1.1 振幅测量试验

图4为传感器振动测量的电流及电压输出波形图,可以看出,电流及电压的波形并不是圆滑的曲线,而是阶段性的上升及下降,即,电流及电压波形均存在阶梯状的尖峰脉冲.将其中一个波形放大研究,如图5所示,在经过Al-1电极时会产生一个峰值,之后有一段相对较为平稳的横向曲线,电压值处于稳定状态,由于此时的液体位于Al-1电极与Al-2电极的空白处,且此时Al-1电极的电子转移完毕,处于饱和状态,因此输出电压保持稳定.随后当液体经过Al-2电极时,电子将继续转移,输出电压也随之增大.最后经过Al-3电极时,输出电压达到峰值.因此,可以根据波形图中不同峰值位置来计算PTFE管内液体的上升高度,进而得到振幅值.经过计算和实验得出,当波形图中出现一个峰值时,

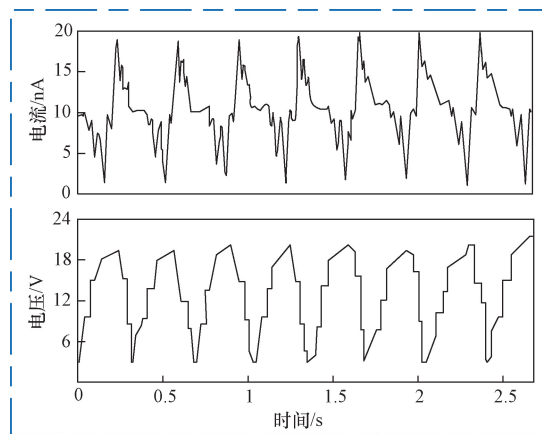


图4 传感器输出电压及电流波形图

Fig. 4 Sensor output voltage and current waveforms

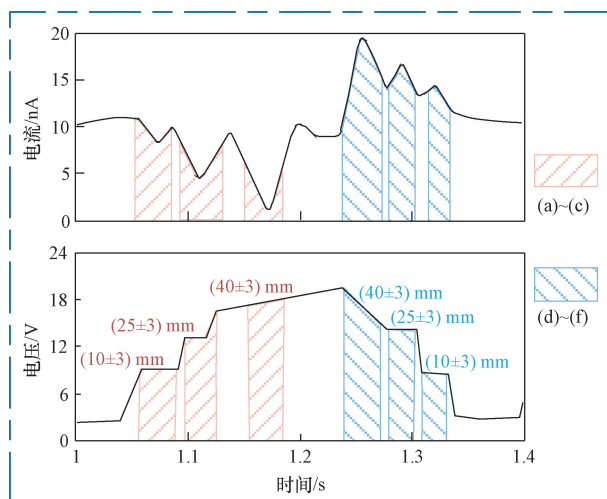


图5 传感器输出电压、电流放大波形图

Fig. 5 Sensor output voltage and current amplification waveforms

实际传感器的振动幅度为(10 ± 3) mm;当波形图中出现 2 个峰值时,振动幅度为(25 ± 3) mm;当波形图中出现 3 个峰值时,振动幅度为(40 ± 3) mm。

进一步在传感器的外电路中连接一个 700 MΩ 的电阻,由图 5 可看出,在液体上升分别经过 Al-1、Al-2 和 Al-3 电极时,会产生 3 个负向峰值,在液体下降分别经过 Al-3、Al-2 和 Al-1 电极时,会产生 3 个正向峰值,与电压波形图方向相反。但与电压输出信号相比较,电流值的输出更易受到噪声干扰,因此实际使用时应选用电压波形作为传感器的输出信号。

2.1.2 振动频率测量试验

图 6、图 7 为传感器的振动频率测量实验结果。由图 6 所示结果可知,传感器的振动频率与输出波形个数一一对应,因此可根据统计输出波形个数实现对振动频率的测量。此外,随着振动频率的增加,传感器在 0 ~ 11 Hz 测量范围内的输出电压由 20 V 增加到 38 V。作为传感器使用时,输出电压越大则信噪比越高,越有利于提高测量精度,即便是低频率时传感器的输出电压也有 20 V,该信号值远超过一般噪声信号幅值,由此证明了传感器在量程范围内的输出信号具有较高的信噪比。进一步对 0 ~ 11 Hz 量程范围内的测量误差进行了测试,部分具有代表性的测量误差散点图如图 7 所示,可见测量误差小于 ± 4%。实际钻探过程中,孔底振动频率往往与不同钻探工艺下钻柱的转速相关,

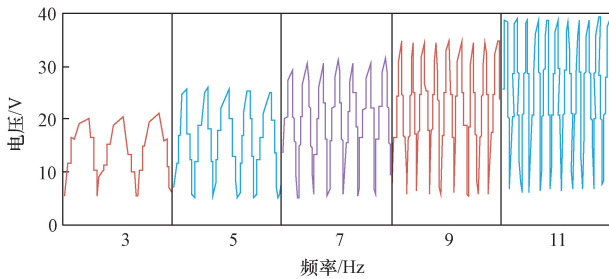


图 6 不同振动频率下的输出波形

Fig. 6 Output waveforms at different vibration frequencies

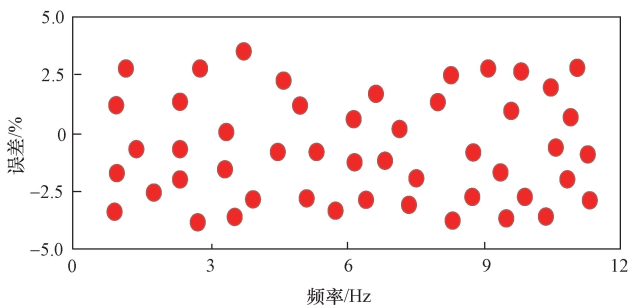


图 7 振动频率测量误差散点图

Fig. 7 Measurement errors scatter plot of vibration frequency

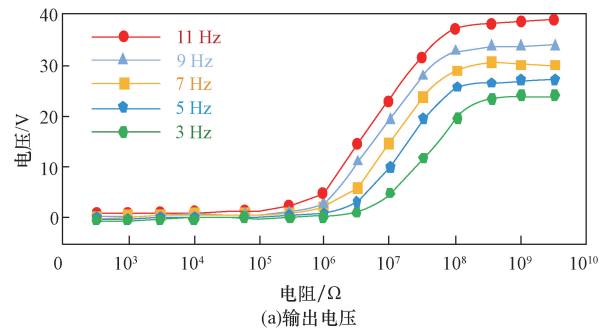
由此所产生的振动频率较低,因此传感器的量程范围满足大多数钻探工艺下振动频率的测量需求。

2.2 发电性能试验

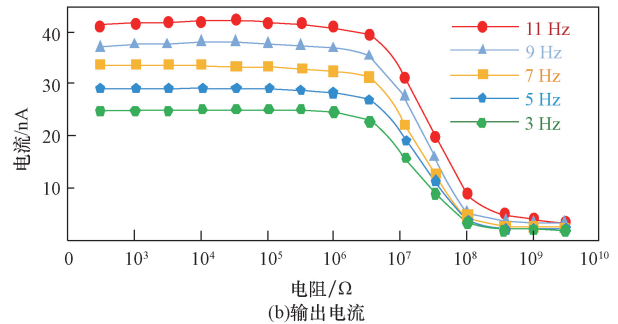
2.2.1 单个传感器发电性能测试

图 8 为单个传感器发电性能测试结果。如图 8 (a)所示,传感器的输出电压随着振动频率的增加而增加,且当振动频率为 11 Hz 时,输出电压最高可达到 40 V。根据测试曲线规律,可将传感器的输出电压分为 4 个阶段,即:低平稳阶段、增长阶段、快速增长阶段以及高平稳阶段。当外接电阻为 0 ~ 10⁵ Ω 时,传感器的输出电压属于低平稳阶段,输出电压趋近为 0 V;当外接电阻为 10⁵ ~ 10⁶ Ω 时,其输出电压开始缓慢增长;当外接电阻为 10⁶ ~ 10⁸ Ω 时,其输出电压迅速增长;直到外接电阻达到 10⁸ Ω 后,其输出电压到达高平稳阶段。

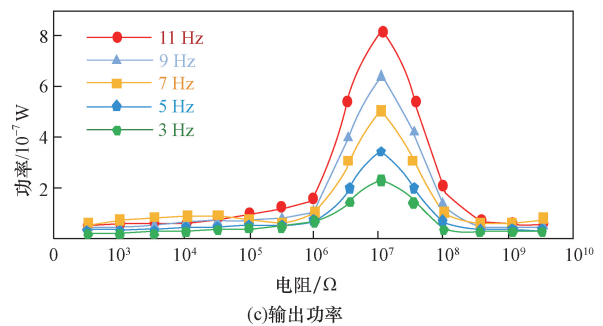
随后对传感器的输出电流进行测量,其结果如图 8 (b)所示,可见传感器的输出电流与振动频率成



(a)输出电压



(b)输出电流



(c)输出功率

图 8 单个传感器在不同负载电阻下的输出电压、输出电流和输出功率

Fig. 8 Output voltage, output current and output power of a single sensor under different load resistances

正比,与负载电阻成反比。根据图 8(b)所示曲线规律,将传感器输出电流亦可分为 4 个阶段,即当外负载电阻为 $10^3 \sim 5.5 \times 10^6 \Omega$ 时,输出电流最高,处于高平稳阶段;当外接电阻为 $5.5 \times 10^6 \sim 10^8 \Omega$ 时,传感器的输出电流迅速下降,为快速下降阶段;当负载电阻为 $10^8 \sim 5.5 \times 10^8 \Omega$ 时,传感器输出电流的下降斜率变缓,为下降阶段;当负载电阻为 $5.5 \times 10^8 \sim 10^{10} \Omega$ 时,传感器的输出电流达到低平稳阶段。进一步对其输出功率进行了测试,结果如图 8(c)所示,可见输出功率与振动频率成正比且与负载存在非线性关系,且当负载电阻为 $10^7 \Omega$ 以及振动频率为 11 Hz 时输出功率最大,且最大输出功率为 $8.3 \times 10^{-7} \text{ W}$ 。

2.2.2 多个传感器并联时发电性能测试

单个传感器的发电量较低,但多个传感器并联使用后可提高发电量,因此试验时将 4 个传感器并联使用,以测试并联后的发电效果,试验结果如图 9 所示。如图 9(a)、图 9(b)所示,4 个传感器并联后的输出电压与输出电流规律与单个相同,即电压均是逐渐增加直至稳定,而电流均是逐渐降低直至稳定。进一步对数据进行分析可知,4 个传感器并联后的输出电压与单个传感器的输出电压基本相同,而输出电流却成倍增加,这与电池的串并联特性规律相同。如图 9(c)所示,并联后的输出功率与振动频率成正比且与负载存在非线性关系,且当负载电阻为 $5.5 \times 10^6 \Omega$ 以及振动频率为 11 Hz 时输出功率最大,且最大输出功率为 $22 \times 10^{-7} \text{ W}$ 。

进一步通过大量试验测试后发现,假设单个传感器的发电功率为 p ,则 n 个传感器并联使用后的发电功率不等于 np ,而是处于 $0.65np \sim 0.8np$ 。原因有两方面,一是理论上当振动发生时,传感器内部的水应上升到 PTFE 管内的最高处,此时可输出最大功率,但由于工况环境、加工精度及安装精度等的影响,并联后并不是所有传感器内部的水均可上升到 PTFE 管的最高处,由此导致并联后的输出功率并不等于并联个数的倍数;二是振动发生时即便所有的传感器内部水都可到达最高处,但多个传感器内部的水并不是同时达到最高处,即,所有传感器并不是在同一时刻输出最大功率,由此导致某时刻测量到的功率不等于传感器并联个数的倍数。

实际应用时,传感器并联个数的选择主要取决于以下 3 个方面因素,一是若作为传感器使用,则单个传感器便可满足测量需求,若要提高传感器的可靠性,则可选择多个并联使用,并联个数越多则传感器的冗余度越高,相应的可靠性也越高;二是若作为发电机使用,并联后的总输出功率约为单个输出功率的 0.65~0.8 倍,因此可根据实际功率需求来

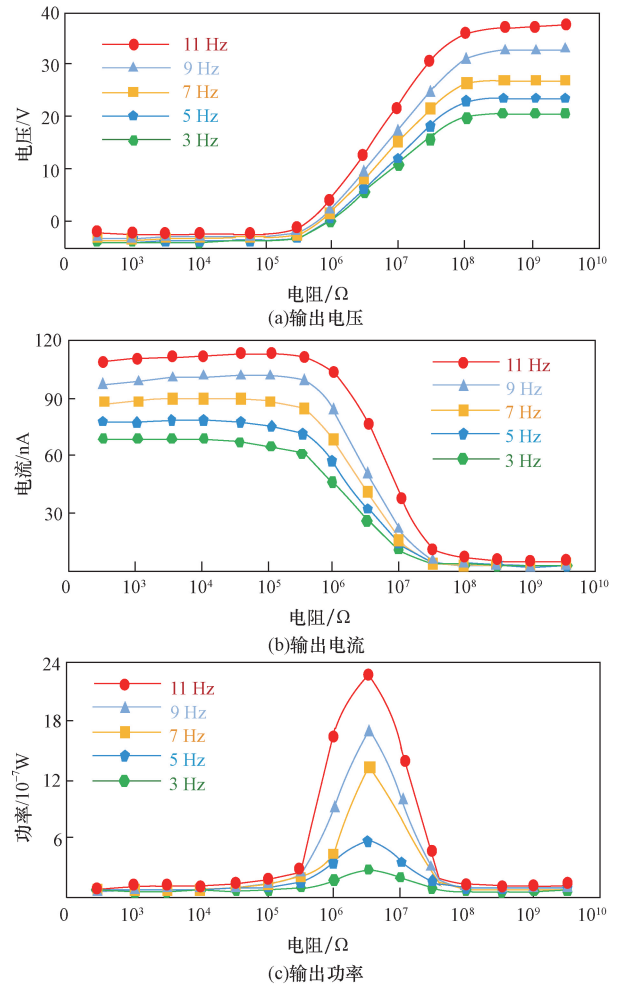


图 9 4 个传感器并联后在不同负载电阻下的输出电压、输出电流和输出功率

Fig. 9 Output voltage, output current and output power of four sensors in parallel under different load resistances

计算传感器并联个数;三是传感器安装于井下使用时,还要考虑不同钻孔直径及钻孔轨迹等井下尺寸空间的限制。

2.2.3 循环使用试验

进一步对传感器循环使用时输出信号的稳定性进行了测试,结果如图 10、图 11 所示。如图 10 所示为传感器在不同工作组数下的输出电压情况,可见在 0~4 800 组试验内,传感器的输出电压存在小幅度的波动,但由于传感器的输出为脉冲信号,只要输出电压值大于后续处理电路的高电平检测标准(一般是 2 V 左右),便对传感器的监测精度没有影响,由此证明了传感器具有较高的工作稳定性。如图 11 所示为传感器在 11 Hz 振动频率下连续工作 4 d 时的试验情况,结果显示传感器输出仍然保持稳定,其波动幅度不足以影响后续处理电路对脉冲信号电平的检测,由此进一步证实了传感器具有较高的稳定性。

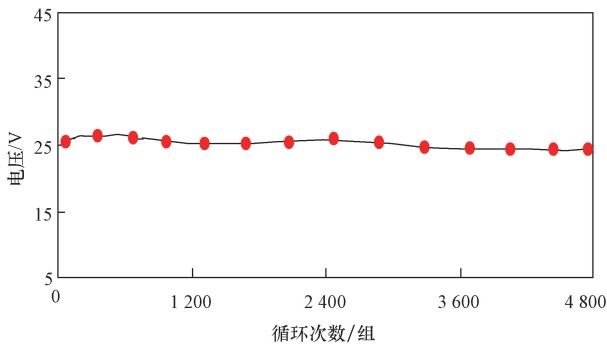


图 10 传感器在不同循环组数下的输出电压

Fig. 10 Output voltage of the sensor under different loop configurations

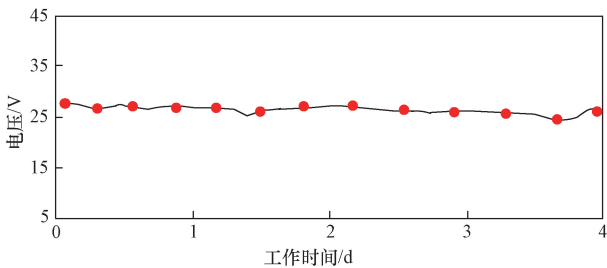


图 11 传感器在不同工作时间下的输出电压

Fig. 11 Output voltage of the sensor under different working durations

2.2.4 温度影响试验

温度会对传感器的性能产生影响,因此对不同温度下的传感器输出电压进行了测试,由如图 12 所示的实验结果可知,随着温度的增加,传感器的输出电压逐渐下降,且当温度增加到 85 ℃时,传感器输出电压由初始的 24.8 V 下降到 22.9 V,下降幅度为 7.7%。

对于振幅测量而言,由于振幅的测量依靠电压脉冲阶梯幅值,当温度增加时传感器输出电压幅值下降,但不同振幅处的电压幅值均以相同规律下降,其输出波形仍然存在电压脉冲阶梯,因此在 0 ~ 85 ℃温度范围内,振幅的测量不受影响。对于频率测量而言,频率的测量依靠电压脉冲个数。脉冲输出型传感器的后续处理电路一般与单片机的脉冲输

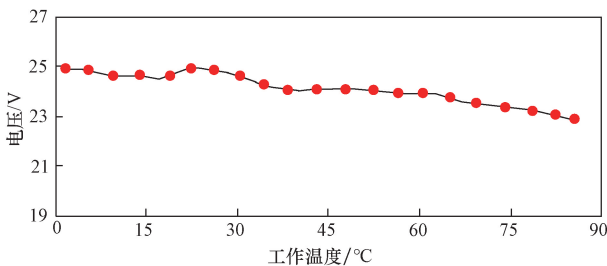


图 12 温度影响试验结果

Fig. 12 Temperature influence test results

入端口相连接,端口依据 TTL (transistor-transistor logic) 逻辑电平实现脉冲信号的识别及计数。由于 TTL 电平将电压幅值大于约 2 V 识别为高电平,传感器在高温下的输出电压幅值仍远大于 TTL 电平的识别标准,因此在 0 ~ 85 ℃温度范围内,频率的测量不受影响。

进一步通过大量试验发现,当温度超过 85 ℃后,传感器的输出电压幅值波动较大且无规律,原因在于高温下传感器中的水溶液存在少量的挥发,挥发的水蒸气在传感器顶部重新凝结为小水滴后,沿 PTFE 管内部滑落,由此给电荷转移造成了影响。因此将传感器的工作温度范围定义为 0 ~ 85 ℃,该温度范围满足一般的矿山地质钻探工况环境需求。

2.3 液体性质对传感器输出影响试验

进一步研究内部液体对传感器输出性能的影响。首先研究内部液体体积对传感器输出电压的影响,由图 13 所示结果可知,当液体高度在 20 mm 时,其输出电压为 10 V;当液体高度在 50 mm 时,即位于 PTFE 管的中间部分,其输出电压最大且最大值为 30 V;随着液体高度继续增加,其输出电压下降,原因在于当液体高度位于 PTFE 管的中间部分时,液体与上下两个电极之间摩擦时的面积能够达到最大,因此其转移的摩擦电荷数量也会达到最大值。因此在传感器设计时,为保证输出电压最大,液体的高度应位于 PTFE 管的中间部分。

随后研究液体 pH 对传感器输出性能的影响,由图 14 所示试验结果可知,当液体呈酸性时,输出电压最低为 60 V;当液体呈中性时,输出电压为 30 V;当液体呈碱性时,输出电压最高为 15 V。出现此现象的原因在于随着液体的 pH 增加,其氢离子的浓度会减少,导致液体内正电荷的密度减少,继而降低了 PTFE 表面的负电荷密度,最终输出电压也随之减少。因此在传感器设计时,可根据实际工况

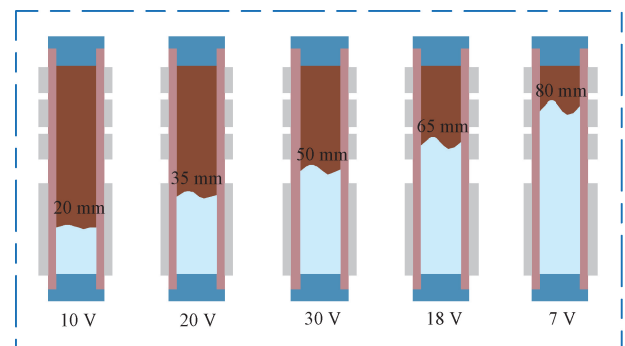


图 13 液体高度对传感器输出性能的影响

Fig. 13 Influence of liquid height on sensor output performance

及工作条件为传感器选择合适的液体 pH。

最后对液体的性质进行研究,由图 15 所示试验结果可知,当使用去离子水时,其输出电压最高且最大值为 41 V;当使用自来水时,输出电压可达 38 V;当使用含有杂质的水时,其输出电压为 32 V;当使用 NaCl 溶液时,其输出电压最低且最小值为 25 V。因此不同液体的性质会对传感器的电压输出造成影响,在进行传感器设计时应根据实际情况进行选择。

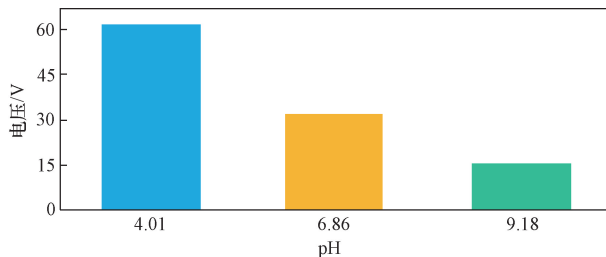


图 14 液体酸碱度对传感器输出性能的影响

Fig. 14 Influence of liquid acidity and alkalinity on sensor output performance

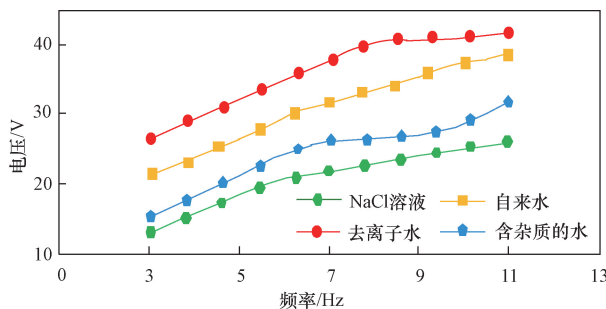


图 15 液体性质对传感器输出性能的影响

Fig. 15 Influence of liquid properties on sensor output performance

3 结论

提出了一种井下阵列式可变形自供电振动传感器,并通过一系列实验验证了其性能。以下是实验结果的结论。

(1)传感器可同步测量振幅和频率,其中振动频率的测量范围为 0~11 Hz,测量误差小于 $\pm 4\%$;可实现 3 个离散振幅值(10、25 及 40 mm)的测量,测量误差为 ± 3 mm。传感器的工作温度范围为 0~85 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2)传感器具有发电功能,试验表明传感器的最大输出功率可达 8.3×10^{-7} W,且多个传感器并联使用后可提高发电量。

(3)传感器的溶液体积、pH 和溶液性质会对输出信号产生影响,且在长时间循环使用后仍然具有较高的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 李根生,穆总结,田守增,等. 冲击破岩钻井提速技术研究现状与发展建议[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(1): 1-12.
Li Gensheng, Mu Zongjie, Tian Shouceng, et al. Research status and development proposal of ROP improvement technology with percussion rock-breaking method[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(1): 1-12.
- [2] 吴文兵,刘涛,谢伦,等. 大位移井岩屑床厚度预测模型与现场应用:以 CH1-1-XX 井钻井为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(9): 3654-3662.
Wu Wenbing, Liu Tao, Xie Lun, et al. Prediction model and field application of cuttings bed thickness in extended reach well: taking CH1-1-XX well drilling as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(9): 3654-3662.
- [3] 祝效华,李柯,李文哲,等. 万米深井上部大尺寸井眼钻柱动力学特性研究[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 49-57.
Zhu Xiaohua, Li Ke, Li Wenzhe, et al. Drill string mechanical behaviors of large-size borehole in the upper section of a 10 000 m deep well[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 49-57.
- [4] 高成,梅熠轩,刘旭辉,等. 考虑连续特性的水平井钻柱轴向振动分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1007-1013.
Gao Cheng, Mei Yixuan, Liu Xuhui, et al. Axial vibration analysis of horizontal well drill string considering continuous characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1007-1013.
- [5] 汪海阁,高博,郑有成,等. 机器学习在钻柱振动识别与预测中的研究进展[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 149-158.
Wang Haige, Gao Bo, Zheng Youcheng, et al. Research progress of machine learning in drill string vibration recognition and prediction[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 149-158.
- [6] 龙远. BHA 振动模式及驱动机制的智能诊断方法研究[D]. 荆州:长江大学, 2024.
Long Yuan. Research on intelligent diagnosis method of BHA vibration mode and driving mechanism [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2024.
- [7] 柳军,梁爽,蔡萌琦,等. 深水无隔水管钻井全井钻柱纵-横-扭耦合非线性振动模型研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 269-277.
Liu Jun, Liang Shuang, Cai Mengqi, et al. Longitudinal-transverse-torsional coupled nonlinear vibration model of drill string in deepwater riser-free drilling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 269-277.
- [8] 刘伟吉,冯嘉豪,汪洋,等. 深层页岩气水平井钻柱动态摩擦扭矩分析[J]. 石油机械, 2023, 51(8): 18-25.
Liu Weiji, Feng Jiahao, Wang Yang, et al. Analysis on dynamic friction torque of drill string in deep shale gas horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(8): 18-25.
- [9] 尚帅锟,高峰,杨学山,等. 磁电式低频振动传感器原位校准改进型系统的设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(3): 96-98.
Shang Shuaikun, Gao Feng, Yang Xueshan, et al. Design and implementation of in-situ improved calibration system of low-frequency magneto-electric vibration transducers [J]. Transducer and

- Microsystem Technologies, 2024, 43(3): 96-98.
- [10] 唐翔, 吴俊, 黎琪慧, 等. 基于 FBG 的微小型三轴振动传感器研究[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 205-213.
Tang Xiang, Wu Jun, Li Qihui, et al. Research on miniature three-axis vibration sensor based on FBG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(2): 205-213.
- [11] 汪思奇, 汪忠睿, 吴志坚, 等. 压电薄膜振动传感器灵敏度与频响标定研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(6): 925-928.
Wang Siqi, Wang Zhongrui, Wu Zhijian, et al. Study on calibration of sensitivity and frequency response characteristics of piezoelectric thin film vibration sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(6): 925-928.
- [12] 吕俊, 张嘉伟, 程晶晶. 一种用于随钻核磁共振测井的钻柱运动监测电路[J]. 测控技术, 2022, 41(8): 78-84.
Lü Jun, Zhang Jiawei, Cheng Jingjing. A drill string motion monitoring circuit for nuclear magnetic resonance logging while drilling[J]. Measurement & Control Technology, 2022, 41(8): 78-84.
- [13] Zhao Z H, Zhou L L, Li S X, et al. Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4686.
- [14] Mehamud I, Marklund P, Björling M, et al. Machine condition monitoring enabled by broad range vibration frequency detecting triboelectric nano-generator (TENG)-based vibration sensors[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107292.
- [15] Lin Z W, Sun C C, Zhang G Q, et al. Flexible triboelectric nano-generator toward ultrahigh-frequency vibration sensing[J]. Nano Research, 2022, 15(8): 7484-7491.