



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405645

引用格式:王国斌,陈军,代先尧,等.适用于滑坡监测的自发电雨量传感器的研制[J].科学技术与工程,2025,25(15):6318-6323.

Wang Guobin, Chen Jun, Dai Xianyao, et al. Development of self-generated rainfall sensor suitable for landslide monitoring[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6318-6323.

适用于滑坡监测的自发电雨量传感器的研制

王国斌¹, 陈军^{1,2}, 代先尧¹, 张永权³, 王超⁴, 吴川^{4*}

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 武汉 430051; 2. 湖北交投鄂南建设管理有限公司, 武汉 430051;

3. 中国地质大学(武汉) 巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 武汉 430074;

4. 中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要 滑坡是一种非常严重的地质灾害,大多数滑坡与降雨直接相关,因此降雨量监测对于滑坡预报预测具有重要意义。基于摩擦纳米发电机技术,研制了一种用于滑坡监测的自发电雨量传感器。传感器包括传动单元和传感单元,通过降雨诱导纳米材料接触摩擦实现降雨测量和自发电的功能。实验结果表明:传感器在0~300 mL/24 h的测量范围内的测量误差为5%,线性度为3.4%,可在温度小于100℃及相对湿度小于90%的环境下正常工作,且当传感器外接负载阻值为 $7.8 \times 10^7 \Omega$ 时可输出最大功率203.5 nW。传感器能够满足野外滑坡雨量监测的实际需要,可为相关雨量监测传感器的研制提供借鉴。

关键词 雨量传感器;自供电;摩擦纳米发电机;滑坡监测

中图分类号 TH763;

文献标志码 A

Development of Self-generated Rainfall Sensor Suitable for Landslide Monitoring

WANG Guo-bin¹, CHEN Jun^{1,2}, DAI Xian-yao¹, ZHANG Yong-quan³, WANG Chao⁴, WU Chuan^{4*}

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. Hubei Jiao Tou E Nan Construction Management Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

3. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

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

[Abstract] Landslides are significant geological hazard, with most events directly related to rainfall. Consequently, rainfall monitoring is critical for landslide forecasting and prediction. A self-powered rainfall sensor based on triboelectric nanogenerator (TEENG) technology was developed for landslide monitoring. The sensor consists of a transmission unit and a sensing unit, which enable rainfall measurement and self-powering through rain-induced contact electrification of nanomaterials. Experimental results indicate that the sensor maintains a measurement error of 5% within the 0~300 mL/24 h range, with a linearity of 3.4%. It is capable of being operated in environments where the temperature is below 100℃ and the relative humidity is under 90%. Additionally, the output of the sensor can achieve a maximum power of 203.5 nW when an external load resistance of $7.8 \times 10^7 \Omega$ is applied. The performance of the sensor can meet the practical requirements for field rainfall monitoring of landslides and also show potentials for the development of related rainfall monitoring technologies.

[Keywords] self-powered; rainfall sensor; triboelectric nanogenerator; landslide monitoring

中国的滑坡地质灾害频发,给人民生命财产安全带来了巨大威胁,同时也给国家经济发展带来了严重损失^[1-2]。降雨是诱发滑坡的主要因素之一。降雨会导致土壤中的水分增加,当土壤饱和度达到一定程度时,土壤的黏聚力会减小,摩擦力也会降低,使得土层之间的结构变得不稳定^[3]。此外,降

雨还会增加土壤的重量,加大对地下水的压力,进一步削弱土壤的稳定性^[4]。因此,通过持续监测和分析降雨数据,建立降雨量和滑坡发生率之间的关联模型^[5-6],是实现滑坡预测预报的重要技术手段。

雨量传感器是实现雨量监测的重要手段。相关学者对雨量传感器进行了研究,产生了系列研究

收稿日期:2024-07-27 修订日期:2024-11-24

基金项目:汉阳区第五批“知音英才计划”(A 5-22);国家重点研发计划(2023YFC3007004)

第一作者:王国斌(1974—),男,汉族,湖北公安人,博士,高级工程师。研究方向:岩土工程。E-mail:332788683@qq.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:机电一体化技术在机器人、地质勘探、灾害监测、工业生产及电力电网等方面的应用。E-mail:wuchuan@cug.edu.cn。

成果,比如黄飞龙等^[7]采用电阻应变测量技术,设计了一种称重式的降雨传感器,可在 1 mm/min 和 4 mm/min 两种雨强下实现误差小于 0.4 mm 的雨量测量。不同于接触式的测量方法,部分学者研发了光学非接触式的雨量传感器,比如王相等^[8]利用光学的全反射现象研制了新型的雨量传感器,利用光通量与降雨量之间的标定关系实现雨量的测量。姚宇等^[9]则进一步对提高光学雨量传感器灵敏度的方法进行了研究,结果表明适宜的波长及角度能够有效提高传感器的灵敏度,

然而当前的雨量传感器均采用外部供电方式,包括太阳能电池板和电池。若采用太阳能电池板供电,则遇连续阴雨天或树木遮挡时,发电效率将急剧降低甚至无法发电,导致雨量测量及数据传输中断;若采用电池供电,则定期更换或维护电池将增加监测成本和工作量。因此,若雨量传感器具备自发电功能,将有效避免传感器传统供电方式的不足,具有更高的可靠性和稳定性,更加适宜滑坡野外监测实际工况环境。

摩擦纳米发电机技术是一种新兴的能量收集技术,可以将机械运动转化为电能^[10]。目前摩擦纳米发电机技术已经在许多领域得到应用,例如自动驱动系统^[11]、智能穿戴设备^[12-13]和无线传感器网络^[14-15]等。尤其是在研发自发电传感器领域,摩擦纳米发电机已取得了广泛的应用,包括振动传感器^[16-17]、风速传感器^[18]、轨迹传感器^[19]、气湿传感器^[20]及触觉传感器^[21]等,因此基于摩擦纳米发电机原理研制一种新型的自发电雨量传感器,可同步实现降雨测量及发电的功能,从而提高滑坡监测系统的可靠性和稳定性,并降低维护成本和工作量。

1 传感器结构及工作原理

1.1 结构组成

如图 1(a)所示,传感器主要由传动单元和传感单元组成。传动单元由轴承、连杆、拨杆和转杯(容积为 10 mL)组成,转杯和轴承之间通过连杆进行连接,6 个传动单元组成了以降雨为驱动力的风车结构。工作时传动单元末端的 6 个转杯会依次收集雨水,随后在雨水重力作用下诱导风车结构旋转。图 1(b)为传感单元去掉外壳后的内部结构图,传感单元内部由翘板、摩擦圆弧和支撑块组成。翘板固定在支撑块中间,翘板受传动单元的拨杆压迫后发生转动。以转动轴为分界线,翘板可以分为主动翘板和摩擦翘板两部分,主动翘板和摩擦翘板的长度比为 1:3,因此主动翘板和摩擦翘板的角位移比也是

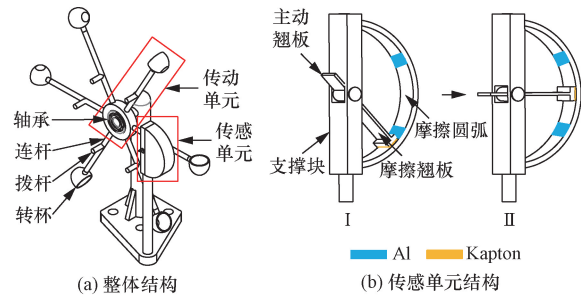


图 1 传感器结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor structure

1:3。摩擦翘板末端粘贴有聚酰亚胺(Kapton)薄膜,充当摩擦纳米发电机的负极材料。摩擦圆弧内侧贴有铝(Al)薄膜,既充当摩擦纳米发电机的正极材料,又作为电极。初始状态如图 1(b)中 I 所示,受重力作用摩擦翘板将位于摩擦圆弧下方。传动单元转动时如图 1(b)中 II 所示,拨杆压迫主动翘板向下转动,而摩擦翘板向上转动,此时 Kapton 薄膜和 Al 薄膜摩擦接触,形成单电极式摩擦纳米发电机。

1.2 工作原理

现结合图 2 对自供电雨量传感器的工作原理进行详细说明。初始状态如图 2 中 I 所示,此时 Kapton 薄膜与 Al 薄膜不接触,没有摩擦电信号产生。降雨发生时的状态如图 2 中 II 所示,雨水使得传动单元的拨杆拨动翘板转动,此时 Kapton 薄膜和 Al 薄膜开始接触。由于两种纳米材料得失电子能力不同,使得 Kapton 薄膜表面带负电,而 Al 薄膜表面带正电,电路中由于电荷的移动产生电流。随着转动角度增加,到达如图 2 中 III 所示状态,此时 Kapton 薄膜和 Al 薄膜完全接触,电荷转移完毕,电路中无电流产生,所产生的开路电压达到最大值。随着转动角度进一步增加,到达如图 2 中 IV 所示状态,此时 Kapton 薄膜和 Al 薄膜开始分离。由于 Kapton 薄膜对 Al 薄膜正电荷的静电引力逐渐减弱,电荷产生反向转移,电路中产生反向电流,且开路电压逐渐降低。可见在一个摩擦周期内,电路中将产生一次交流脉冲信号和一个直流电压脉冲信号,两种信号均可以作为传感器的检测信号。

雨量测量时,通过微处理器的脉冲信号输入端口与传感器相连接,通过微处理器对脉冲信号进行识别。假设微处理器连续两次检测到脉冲信号的时间间隔为 Δt ,雨量传感器转杯的容量为 L (本传感器中 $L = 10$ mL),则降雨量 Q 的计算公式为

$$Q = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为降雨量, mL/h; L 为转杯体积, mL; Δt 为连续两次检测到脉冲信号的时间间隔, h。

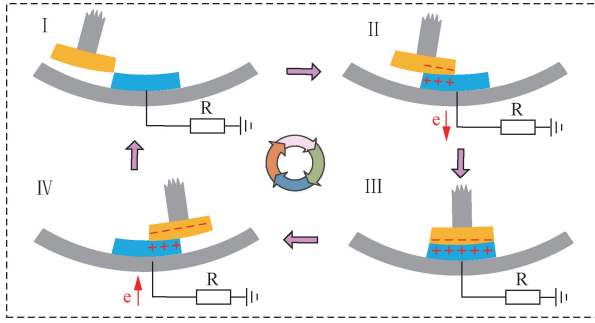


图2 传感器工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor working principle

2 试验及分析

为测试传感器工作性能,搭建了传感器测试平台,如图3所示。在滑坡土体上放置雨量传感器,传感器上方安装有降雨模拟装置,可模拟不同等级的降雨,传感器的输出数据依次经过数据采集卡和静电计处理后接入上位机软件,利用上位机软件对数据进行分析 and 存储。试验时分别对传感器的测量特性、发电特性及环境适应性进行了测试,具体如下。

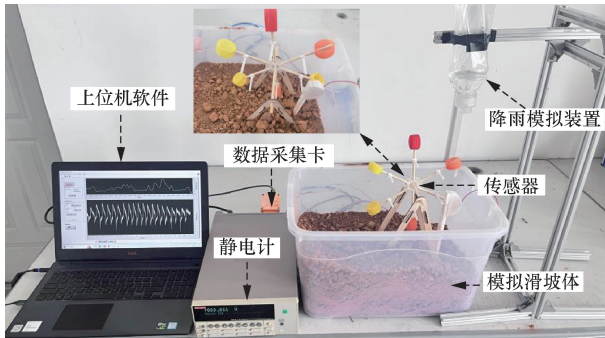


图3 传感器测试平台

Fig. 3 Sensor test platform

2.1 传感特性测试

根据国家标准,降雨可划分为6个强度等级(假设24 h内的降雨量用 Y 表示),如表1所示。

传感特性测试结果如图4所示,其中图4(a)为不同降雨等级下的输出电压波形图。由图4(a)可知,随着降雨等级的升高,传感器的输出电压幅值并未呈现出明显的变化,但输出电压波形频率却逐渐增大。原因在于随着降雨量的增大,摩擦接触面积

表1 降雨强度等级划分标准

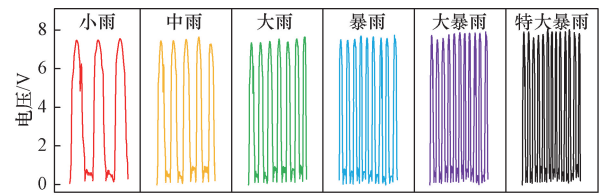
Table 1 Classification standard of rainfall intensity

降雨等级	降雨量 Y (24 h)
小雨	$Y < 10$ mm
中雨	$10 \text{ mm} \leq Y < 25$ mm
大雨	$25 \text{ mm} \leq Y < 50$ mm
暴雨	$50 \text{ mm} \leq Y < 100$ mm
大暴雨	$100 \text{ mm} \leq Y < 250$ mm
特大暴雨	$Y \geq 250$ mm

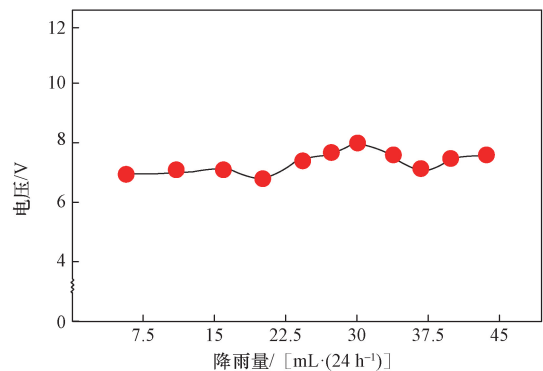
并未改变,因此电压幅值没有发生变化,然而降雨量增大时会导致传感器传动单元旋转速度加快,由此导致摩擦接触频率增加,因此呈现出电压脉冲频率加大的趋势。

进一步对传感器在不同降雨量下的输出电压及输出电流进行测试,所得测试结果拟合曲线分别如图4(b)及图4(c)所示,可见传感器的输出电压及电流幅值分别为7.5 V及125 nA左右。相较于电压值,电流幅值较小,容易受到噪声干扰而引入较大的测量误差,因此本传感器中优先选择电压输出信号作为传感器的检测信号。

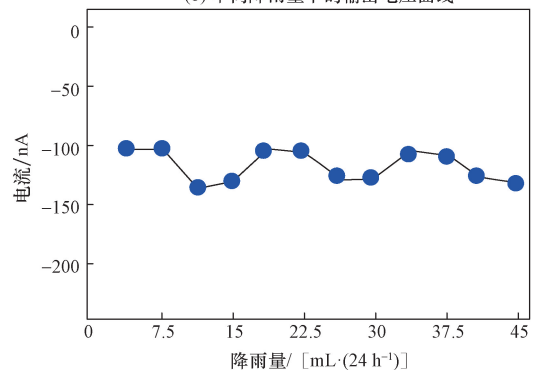
传感器的测量误差如图5所示。如图5(a)所示,随着雨量的增加,标准雨量与测定雨量之间的差值逐渐扩大,利用最小二乘法分析后得出传感器的线性度为3.4%。进一步对0~300 mL/24 h量程范围的测量误差进行了分析,部分具有代表性的测量误差散点图如图5(b)所示,可见传感器的误差控制在5%以内,能够满足野外滑坡雨量监测需求。



(a) 不同降雨等级下的输出电压波形



(b) 不同降雨量下的输出电压曲线



(c) 不同降雨量下的输出电流曲线

图4 传感特性测试结果

Fig. 4 Test results of sensing characteristics

进一步对实验结果的重复性进行了测试。采用标准差表示传感器输出数据的重复性。试验时分别统计了不同实验组数下的标准差,所得结果如表2所示,可见当选取不同的试验组数计算标准差时,所得到的重复性数值不同,但最大值均不超过2%,由此表明了传感器具有较好的重复性。

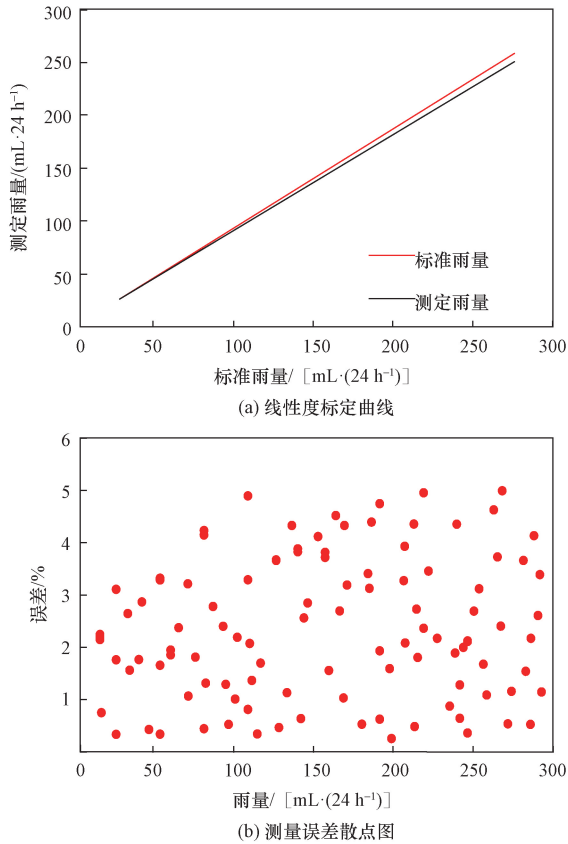


图5 传感器测量误差
Fig. 5 Sensor measurement error

表2 传感器重复性测试结果
Table 2 Sensor repeatability test results

实验组数	重复性/%
100	1.63
200	1.87
300	0.97
400	1.84
500	1.96

2.2 发电特性测试

进一步对传感器的发电特性进行了测试,结果如图6所示。如图6(a)所示为暴雨时传感器在不同负载下的输出电压及电流曲线,可见电压和电流曲线均可划分为三个阶段,即,缓慢减小/增加,急剧减小/增加以及缓慢减小/增加阶段。由于传感器基于摩擦纳米发电机原理研制,具有高电压及低电流的特点,因此输出电压与电流幅值的量级相差较大。同时随着外负载的增加,电压逐渐增加而电

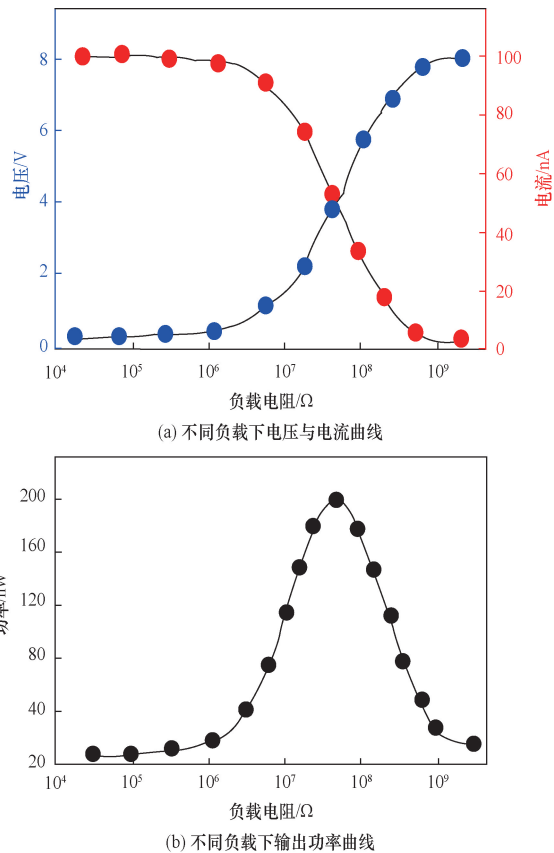


图6 传感器发电特性测试结果
Fig. 6 Test results of power generation characteristics of the sensor

流逐渐降低,这与欧姆定律相一致。图6(b)所示为传感器在不同负载阻值下的输出功率,可见传感器的输出功率随外部负载电阻的增大呈现先变大后变小的趋势,且在外接负载阻值约为 $7.8 \times 10^7 \Omega$ 时输出最大功率可达 203.5 nW。

2.3 环境适应性测试

与室内环境不同,真实的滑坡中存在影响传感器性能的因素,包括温度及相对湿度的变化,因此需要对传感器在温度及相对湿度下的输出特性进行测试,结果如图7所示。由图7(a)及图7(b)可知,在温度范围为 $5 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 且降雨等级为暴雨的环境条件下,随着温度的升高,传感器的输出峰值电压由 7.98 V 降至 6.69 V,降幅约为 16.2%。同样,如图7(c)及图7(d)所示,在相对湿度范围为 $0\% \sim 90\%$ 且降雨等级为暴雨的环境条件下,随着相对湿度的增加,传感器的输出电压峰值由 7.98 V 下降到 6.9 V,降幅约为 13.2%。在温度及湿度升高的工况下,传感器的输出电压虽然有所下降,但下降后的电压幅值仍远大于噪声信号幅值,因此不影响传感器的检测精度,由此证明传感器具备较高的环境适应性。

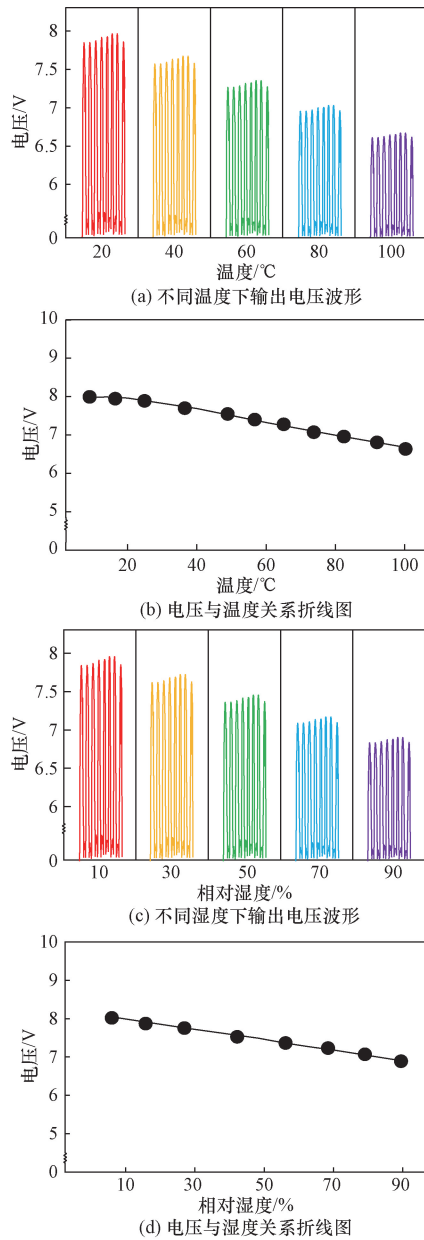


图7 传感器环境适应性测试结果

Fig. 7 Test results of environmental adaptability of sensors

3 结论

基于摩擦纳米发电机研制了一种用于滑坡监测的自发电雨量传感器,可同步实现雨量测量及发电的功能。实验结果表明,传感器在0~300 mL/24 h 的量程范围内的测量误差为5%,线性度为3.4%,可在温度小于100 °C及相对湿度小于90%的环境下正常工作,且当传感器外接负载阻值为 $7.8 \times 10^7 \Omega$ 时可输出最大功率203.5 nW。由此证明传感器具备较高的可靠性和环境适应性,能够满足滑坡监测系统的需求。

未来可从如下两方面对传感器进一步的改进与拓展。一是进一步优化摩擦材料和结构设计,提

升摩擦纳米发电机的能量转化效率,进一步提高传感器的发电能力和测量精度,以适应更加精细的降雨监测需求;二是将自发电雨量传感器与其他环境传感器(如位移、风速、倾角等)集成,开发综合性的自发电环境监测系统,提供多维度的数据支持,实现更全面的滑坡灾害预警。

参考文献

- [1] 郭飞, 赖鹏, 黄发明, 等. 基于知识图谱的滑坡易发性评价文献综述及研究进展 [J]. 地球科学, 2024, 49(5): 1584-1606.
Guo Fei, Lai Peng, Huang Faming, et al. Literature review and research progress of landslide susceptibility assessment based on knowledge map [J]. Earth Science, 2024, 49(5): 1584-1606.
- [2] 朱涛, 翟亚锋, 翟会君. 浅层顺层滑坡成灾机制分析及其稳定性评价 [J]. 中国地质调查, 2023, 10(6): 88-94.
Zhu Tao, Zhai Yafeng, Zhai Huijun. Disaster mechanism analysis and stability evaluation of shallow bedding landslide [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(6): 88-94.
- [3] 余国安. 两类泥石流形成机制的再讨论 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 238-250.
Yu Guoan. Re-discussion on the formation mechanism of two types of debris flows [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 238-250.
- [4] 刘晶, 左双英. 水位升降和降雨联合作用的岸坡流固耦合及失稳机理分析: 以贵州平塘六洞南岸滑坡为例 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(12): 4876-4886.
Liu Jing, Zuo Shuangying. Fluid-solid coupling and instability mechanism analysis of bank slope under the combined action of water level fluctuation and rainfall: a case study of Liudong south bank landslide in Pingtang, Guizhou [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 4876-4886.
- [5] 陈朗, 陈娱, 何俊霖, 等. 基于前期累积降雨和高斯过程回归模型的滑坡位移预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3491-3497.
Chen Lang, Chen Yu, He Junlin, et al. Prediction of landslide displacement based on previous cumulative rainfall and Gaussian process regression model [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3491-3497.
- [6] 黄智杰, 沈佳, 简文彬, 等. 基于XGBoost模型的降雨诱发阶跃型滑坡位移预测 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(2): 217-226.
Huang Zhijie, Shen Jia, Jian Wenbin, et al. Prediction of rainfall-induced step landslide displacement based on XGBoost model [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(2): 217-226.
- [7] 黄飞龙, 邹庆彪, 曾慧明. 高精度电阻应变称重降雨传感器设计 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(6): 39-43.
Huang Feilong, Zou Qingbiao, Zeng Huiming. Design of high-precision resistance strain weighing rain sensor [J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(6): 39-43.
- [8] 王相, 庞喜龙, 林虹宇, 等. 光学雨量传感器设计研究 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36(4): 95-98.
Wang Xiang, Pang Xilong, Lin Hongyu, et al. Design of optical rainfall sensor [J]. Automation and Instrument, 2021, 36(4): 95-98.

- [9] 姚宇, 禹胜林. 基于光散射原理的雨量传感器灵敏度的研究 [J]. 电子器件, 2022, 45(2): 450-454.
Yaoyu, Yu Shenglin. Study on the sensitivity of rainfall sensor based on light scattering principle [J]. Electronic Devices, 2022, 45(2): 450-454.
- [10] 冯彦军, 吴川, 杨朔. 用于井下振动测量的自发电振动传感器的研制 [J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(4): 63-67.
Feng Yanjun, Wu Chuan, Yang Shuo. Development of self-generated vibration sensor for underground vibration measurement [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(4): 63-67.
- [11] 蒲雄, 刘佳鑫, 李绍欣, 等. 纳米发电机应用: 自驱动系统 [J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(6): 967-988.
Pu Xiong, Liu Jiaxin, Li Shaixin, et al. Nano-generator application: self-driven system [J]. China Science: Technology Science, 2023, 53(6): 967-988.
- [12] 许子傲, 吴雅梦, 郭浩, 等. 纤维基摩擦纳米发电机的构建及其在可穿戴技术领域的研究进展 [J]. 纺织工程学报, 2023, 1(6): 71-85.
Xu Ziao, Wu Yameng, Guo Hao, et al. Construction of fiber-based friction nano-generator and its research progress in wearable technology [J]. Journal of Textile Engineering, 2023, 1(6): 71-85.
- [13] 张欣颜, 许旭兵. 摩擦纳米发电机在现代智能可穿戴服饰中的应用及发展趋势 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(12): 108-110.
Zhang Xinyan, Xu Xubing. Application and development trend of friction nano-generator in modern intelligent wearable clothing [J]. Chemical Fiber and Textile Technology, 2023, 52(12): 108-110.
- [14] 何汇成, 冯程鹏, 穆继亮. 荒漠化防治的自供电风速监测系统的设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(11): 84-87.
He Huicheng, Feng Chengpeng, Mu Jiliang. Design of self-powered wind speed monitoring system for desertification control [J]. Application of Single Chip Microcomputer and Embedded System, 2022, 22(11): 84-87.
- [15] 杨恩, 王岩, 王建业, 等. 基于薄膜拍打型摩擦纳米发电机的风能收集研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(6): 684-698.
Yang En, Wang Yan, Wang Jianye, et al. Study on wind energy collection based on membrane flapping friction nano-generator [J]. China Science: Technology Science, 2021, 51(6): 684-698.
- [16] 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 high temperature resistant downhole vibration sensor based on friction nano-generator [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 120-127.
- [17] 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 method of measurement while drilling with downhole self-generating and self-sensing functions-taking downhole friction nano-generator for vibration measurement as an example [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 47-53.
- [18] 路永玲, 王真, 刘征宇, 等. 用于输电线路微风振动监测的自供电风速传感装置 [J]. 微纳电子技术, 2024, 61(5): 118-126.
Lu Yongling, Wang Zhen, Liu Zhengyu, et al. Self-powered wind speed sensing device for breeze vibration monitoring of transmission lines [J]. Micro-nano Electronic Technology, 2024, 61(5): 118-126.
- [19] 步晓飞, 张鹏, 黄梁松, 等. 基于摩擦纳米发电机的乒乓球落点轨迹与速度识别的研究 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(5): 916-922.
Bu Xiaofei, Zhang Peng, Huang Liangsong, et al. Research on the impact trajectory and speed identification of table tennis based on friction nano-generator [J]. Journal of Sensing Technology, 2024, 37(5): 916-922.
- [20] 刘勃豪, 谢光忠, 段再华, 等. 一体化摩擦电自供能气湿传感器研究进展 [J]. 电子学报, 2024, 52(2): 660-677.
Liu Bohao, Xie Guangzhong, Duan Zaihua, et al. Research progress of integrated triboelectric self-powered gas-moisture sensor [J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(2): 660-677.
- [21] 顾文俊, 王国鹏, 胡慧娟, 等. 基于摩擦纳米发电机的多模式触觉传感器研究 [J]. 计量与测试技术, 2024, 51(1): 83-85.
Gu Wenjun, Wang Guopeng, Hu Huijuan, et al. Research on multi-mode tactile sensor based on friction nano-generator [J]. Metrology and Testing Technology, 2024, 51(1): 83-85.