

引用格式: 孟丽霞, 孟健, 刘士明, 等. 具有起升转速自传感的双向俘能装置研究 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 464-470.
MENG L X, MENG J, LIU S M, et al. Research on a bidirectional energy harvesting device with self-sensing rotation speed[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 464-470.

具有起升转速自传感的双向俘能装置研究



孟丽霞¹, 孟健¹, 刘士明^{1*}, 王封懿²

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168; 2. 沈阳有色冶金设计研究院有限公司, 沈阳 110003)

摘要: 起重机的起升机构需使用传感器来监测其运动参数, 目前传感器主要使用电源或电池供电, 存在布线困难、无法提供持续性电源 (电池供电) 等问题。为此研究了一种具有自驱动传感功能的双向俘能式摩擦纳米发电机, 完成自然环境风能和重物下降势能俘获的同时, 实现起升机构卷筒转速的监测。基于摩擦纳米发电的工作原理, 设计双向俘能式摩擦纳米发电机结构, 研制具有自驱动传感功能的原理样机。依据起升机构实际工作环境, 搭建实验测试系统, 进行输出性能、传感及应用演示实验。研究结果表明, 该摩擦纳米发电机可以同时收集环境中风能和起升机构重物下降势能, 双向俘能机制相对于单向俘能提高了 40% 的输出性能。同时, 通过采集分析输出的电信号监测起升机构的运动状态, 对起升机构卷筒转速的监测误差小于 1%。该工作拓展了摩擦纳米发电机在能量俘获和自驱动传感领域的研究, 为起升机构运动状态监测提供了新的解决方案。

关键词: 摩擦纳米发电机; 起升机构; 双向俘能; 自驱动传感

中图分类号: TM31; TP212.1 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2024258

Research on a bidirectional energy harvesting device with self-sensing rotation speed

MENG Lixia¹, MENG Jian¹, LIU Shiming^{1*}, and WANG Fengyi²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Shenyang Nonferrous Metallurgy Engineering and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110003, China)

Abstract: The lifting mechanism of a crane needs to use sensors to monitor its motion parameters. Currently, sensors are mainly powered by power sources or batteries, which have problems such as wiring difficulties and inability to provide continuous power supply (battery-powered). For this purpose, a bidirectional energy harvesting triboelectric nanogenerator (TENG) with self-powered sensing function is studied. The TENG can monitor the rotating speed of the drum of the lifting mechanism while capture natural wind energy and the potential energy of the descent of heavy objects. Based on the working principle of TENG, a bidirectional energy harvesting TENG structure is designed, and a prototype with self-powered sensing function is developed. According to the actual working environment of the lifting mechanism, an experimental test system is built to conduct output performance, sensing, and application demonstrations. The research results show that the TENG can simultaneously collect wind energy in the environment and the potential energy of the descent of heavy objects in the lifting mechanism. The bidirectional energy harvesting mechanism can significantly improve the output performance by 40% compared with the unidirectional energy harvesting. Meanwhile, the motion state of the lifting mechanism is monitored by collecting and analyzing the output electrical signals, and the monitoring error of the rotating speed of the drum of the lifting mechanism is less than 1%. This work expands the research of TENG in energy harvesting and self-powered sensing, providing a new solution for monitoring the motion state of lifting mechanisms.

Key words: triboelectric nanogenerator; lifting mechanism; bidirectional energy harvesting; self-powered sensing

起重机作为现代工程施工的重要设备, 广泛用于国民经济建设的各个领域, 起升机构作为起重

机的最重要工作机构, 在起重机工作时, 起升机构需要频繁升降, 重物在下降过程中势能被浪费了, 甚

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 辽宁省教育厅基本科研项目 (JYTMS20231585); 国家重点研发计划课题 (2024YFB3411101)

作者简介: 孟丽霞, 副教授, 主要从事环境微纳能源俘获与自驱动传感方面的研究。

*通信作者 E-mail: liushiming_1983@163.com

至还需额外功率对重物下降加以控制而耗费能量。其次,起升机构的运动状态监测也尤为重要,是保障起重机安全作业不可或缺的部分^[1-3]。目前,起升机构运动状态监测大多采用轮压传感器^[4]、重量传感器^[5]、位移传感器^[6]等传感装置。虽然这些传感器能完成监测任务,但存在依赖电池供电且人工布线困难等问题。摩擦纳米发电技术能够提高起升机构周边能源利用效率,减少对传统能源的依赖。因此,亟需设计一种兼具能量收集与状态监测功能的自驱动传感装置,将自然风能与起升机构重物下降时的重力势能收集利用,并实现起升机构运动状态的监测。

2012年,文献[7-8]提出摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)。基于摩擦起电和静电耦合原理,将机械能转换为电能输出^[9-11]。TENG具有成本低^[12-13]、易于制造^[14-15]、材料选择范围广等诸多优点。广泛用于收集各种自然能量,包括海洋能^[16-18]、风能^[19-22]、振动能^[23-26]、声波能^[27-29]和生物机械能^[30-32]。因此,TENG有望解决在起升机构结构健康监测中遇到的问题^[33-35]。

根据起升机构的工作环境与运动形式,本文提出了一种具有起升转速自传感的双向俘能装置。针对起升转速自传感的双向俘能装置工作环境的特点,建立相应实验系统,进行输出性能、传感及应用演示实验,验证了起升转速自传感的双向俘能装置在双向俘能状态下能够提高俘能效率,同时通过采集分析输出的电信号监测起升机构的运动状态,实现更稳定高效的能源利用。最后,通过一系列演示验证了起升转速自传感的双向俘能装置在推动摩擦纳米发电和自驱动传感技术的发展有重要意义。

1 起升转速自传感的双向俘能装置结构设计和工作原理

1.1 结构设计

为了高效利用自然风能和重物下降时的势能,本文设计具有双向俘能结构的自驱动传感装置,如图1所示。整体结构主要由风杯、传动单元、发电单元、监测单元以及壳体组成(图1a)。传动单元由风杯轴、齿轮、俘能轴、俘能外壳、飞轮、监测轴等部分组成,传动单元通过齿轮来改变传动的方向,并通过齿轮传动比2:1增速,提高发电效率。发电单元主要由飞轮、FEP薄膜、铜片、俘能轴和俘能壳这5部分组成,如图1b所示,风杯与传动轴通过平键连接,传动轴穿过外壳上方中心孔,避免风杯受到外界不同方向激励时发生偏心运动,飞轮通过平键固定在俘能轴上做同心旋转运

动,铜片等距均匀地粘贴在俘能壳内壁上,FEP薄膜通过胶接方式固定在飞轮外壁上均匀分布的凹槽中。监测单元由十字监测轴、单向轴承、铜片、拱形FEP薄膜和壳体组成。十字监测轴一端与壳体中间隔板通过单向轴承连接,另一端通过轴承固定在壳体侧板的中心孔中,十字监测轴的四端分别固定一个拱形FEP薄膜,与外侧壳体内侧的监测铜片相互接触。壳体则起到密封、支撑以及连接的作用,各壳体之间通过胶合黏接及螺栓紧固的方式实现相互的连接,并且对装置内部的结构组件提供有效的密封与保护。图1d为样机的整体结构实物图。该发电机内部发电单元由俘能壳内壁铜电极和飞轮结构表面的FEP组成,俘能壳内壁设置有16个铜电极,飞轮上对应设置8个FEP薄膜,如图1e所示。

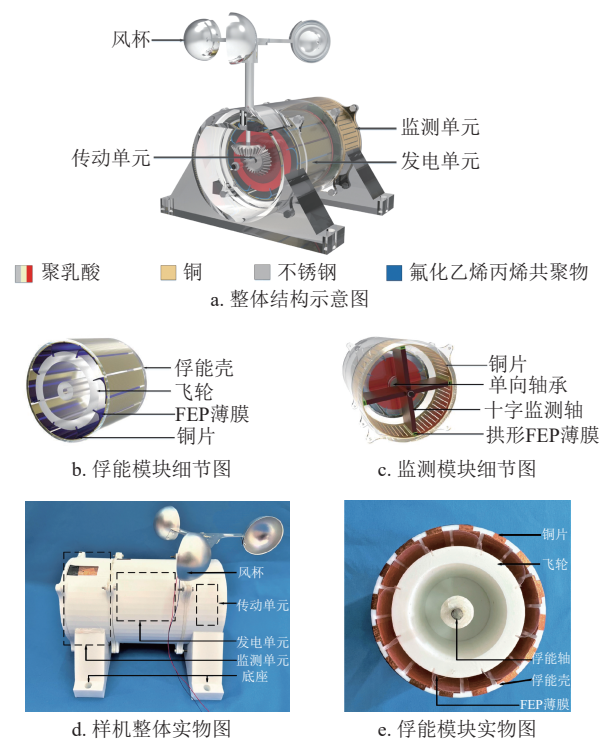


图1 起升转速自传感的双向俘能装置

1.2 工作原理

起升转速自传感的双向俘能装置样机工作原理如图2所示。为实现在环境中风能的收集,在起重机卷筒处于静止状态时,发电单元工作,监测单元处于静止状态,风吹动风杯带动齿轮和飞轮转动,从而实现发电单元对风能的单向俘获(图2a)。

为实现在起升机构重物下降势能的收集,当起重机采用自由下降的方法下降吊钩或重物时,发电单元正常工作,监测单元监测卷筒转速。卷筒的转动动力传递到监测轴上进行旋转运动,监测轴通过单向轴承带动俘能壳发生相同方向的旋转,此时飞

轮为静止状态,发电单元开始工作,在完成重力势能单向俘获的同时实现对卷筒转速的监测。当卷筒上升吊钩或者重物时,监测单元监测卷筒转速,由于单向轴承的存在,此时发电单元不工作(图 2b)。

在双向俘能工作状态下,起重机同时利用风力和卷筒转动两种方式进行俘能。风杯转动驱使飞轮逆时针方向旋转,卷筒转动驱使监测轴带动俘能壳顺时针旋转,飞轮与俘能壳呈相反方向转动,此时装置为双向俘能工作状态,实现两种能量的同步收集。这种工作状态结合了前两种状态的特点,使起重机在多种作业环境下都能有效地进行能量收集(图 2c)。

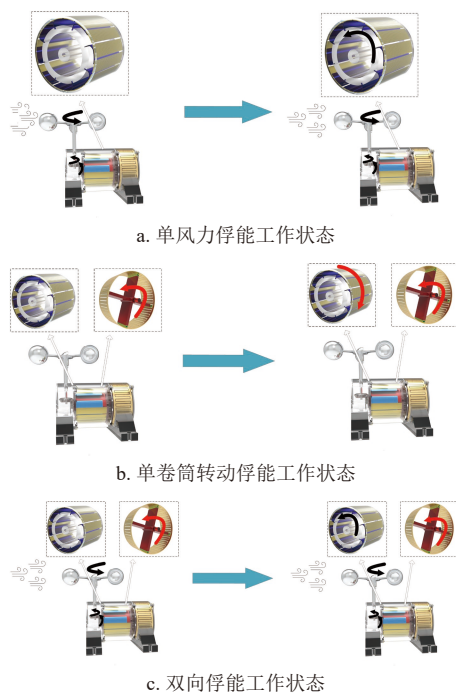


图 2 起升转速自传感的双向俘能装置工作原理示意图

具有起升转速自传感的双向俘能装置发电原理如图 3 所示。介电薄膜与铜电极相互接触,在两个接触表面形成符号相反的表面电荷。介电薄膜在两个电极之间的往复运动使两个电极之间产生电势差的变化,进而驱动电子通过外电路负载在两个电极之间来回流动。

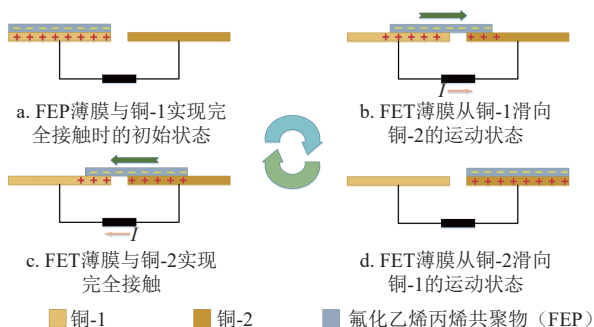


图 3 起升转速自传感的双向俘能装置发电原理示意图

2 实验对比与性能测试分析

2.1 单双向俘能对比

为了对比具有起升转速自传感的双向俘能装置单双向俘能的输出性能效果,分别从单风力俘能、单卷筒转动俘能和双向俘能 3 种运动状态进行实验,测试 3 种情况下的 TENG 开路电压、短路电流和转移电荷,如图 4a ~ 图 4c 所示。

首先,研究风速对输出性能的影响,此时起升转速自传感的双向俘能装置的发电单元正常工作,监测单元处于静止状态。在激励风速为 4、7、10 m/s 条件下分别对原型样机的输出性能进行测试,结果如图 4a 所示,在单风力俘能时,随着风速增大,开路电压和转移电荷基本保持相对稳定,短路电流随着风速的增大不断变大,在激励最大(风速 10 m/s)时短路电流最大,为 35 μA 左右。其次,研究在单卷筒转动运行状态下卷筒转速对输出性能的影响,此时起升转速自传感的双向俘能装置的发电单元正常运行,监测单元同样处于工作状态。在外界激励的转速分别为 2、6、9 rpm 条件下对原型样机的输出性能进行测试。在单卷筒俘能时,随着转速的增大,开路电压和转移电荷基本保持相对稳定,短路电流随转速增大不断变大,结果如图 4b 所示,在激励最大(转速 9 rpm)时短路电流最大,为 20 μA 左右。最后,研究了风杯和旋转电机同时工作时风速和转速对输出性能的影响,此时发电单元与监测单元均处于正常工作状态,如图 4c 所示,在外界其他激励不变的情况下,开路电压和转移电荷基本保持相对稳定,而短路电流随风速和转速的同时增大而不断变大,双向俘能时,在激励最大时短路电流最大,在 50 μA 左右。与单风力俘能相比其短路电流增加了 43%,与单卷筒俘能相比其短路电流增加了 150%。

根据实验中的开路电压、短路电流和转移电荷的测试结果显示,在设定外界激励最大(风速为 10 m/s,转速为 9 rpm)时,图 4a 开路电压、短路电流和转移电荷分别为 208.23 V、34.62 μA 和 188.14 nC,图 4b 中的开路电压、短路电流和转移电荷分别为 180.10 V、15.42 μA 和 160.65 nC,图 4c 中的开路电压、短路电流和转移电荷分别为 160.77 V、48.08 μA 和 156.34 nC。实验表明,相比于前两种的单向俘能情况,双向俘能的俘能效率提升明显,发电效果更好。当处于双向俘能时,开路电压

和转移电荷相较于单向俘能稍有减小。由于摩擦层之间的接触时间减少, 没有足够的时间在摩擦层之

间充分分离, 导致摩擦起电产生的电压和电荷量减少, 因此开路电压和转移电荷会稍有降低。

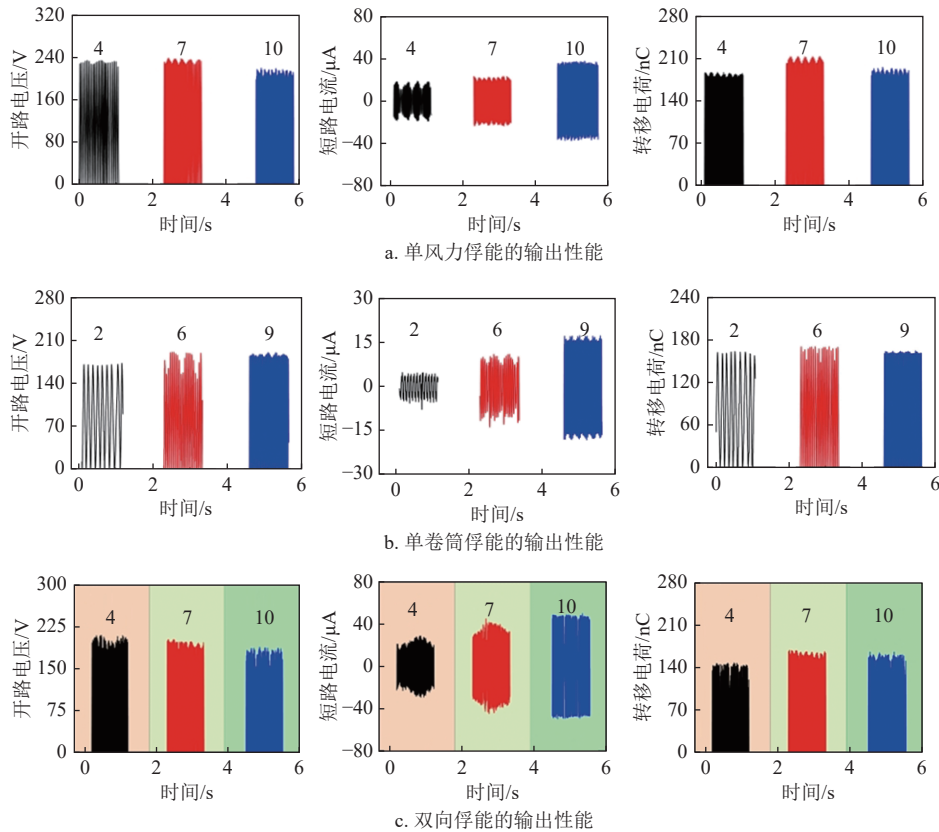
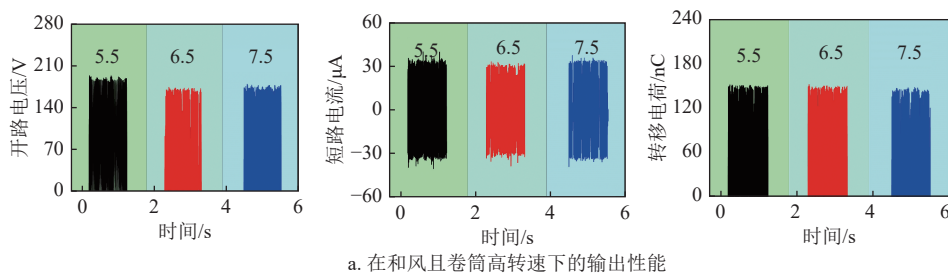


图4 起升转速自传感的双向俘能装置单双向俘能对比

2.2 模拟实际工作条件的基本性能测试

为了更好地测试起升转速自传感的双向俘能装置的性能条件, 模拟起重机工作状态的3种激励范围, 这3种激励条件要求俘能单元与监测单元均保持正常工作状态, 便于研究起升转速自传感的双向俘能装置在集成状态下的输出性能。3种激励范围分别为在和风条件下卷筒呈高速转动工作状态、在劲风条件下卷筒呈低速转动工作状态以及在强风条件下卷筒呈慢速转动工作状态。首先, 在和风条件下卷筒呈高速转动工作状态时, 最接近起重机正常工作条件, 将激励风速依次设定为5.5、6.5、7.5 m/s, 卷筒转速依次对应为9、8、7 rpm的激励

条件, 如图5a所示, 其输出性能基本保持稳定。其次, 在劲风条件下卷筒呈低速转动工作状态时, 接近稍恶劣工作条件, 将激励风速依次设定为8、9、10 m/s, 卷筒转速依次对应为6、5、4 rpm的激励条件, 如图5b所示, 其开路电压、转移电荷相对稳定, 而短路电流随风速的增加而逐渐变大。最后, 在强风条件下卷筒呈慢速转动工作状态时, 此时风速超出正常工况条件, 将风速依次设定为11、12、13 m/s, 卷筒转速依次对应为3、2、1 rpm的激励条件, 如图5c所示, 在此范围内的开路电压、短路电流、转移电荷随着风速的增加而不断变小。



a. 在和风且卷筒高速下的输出性能

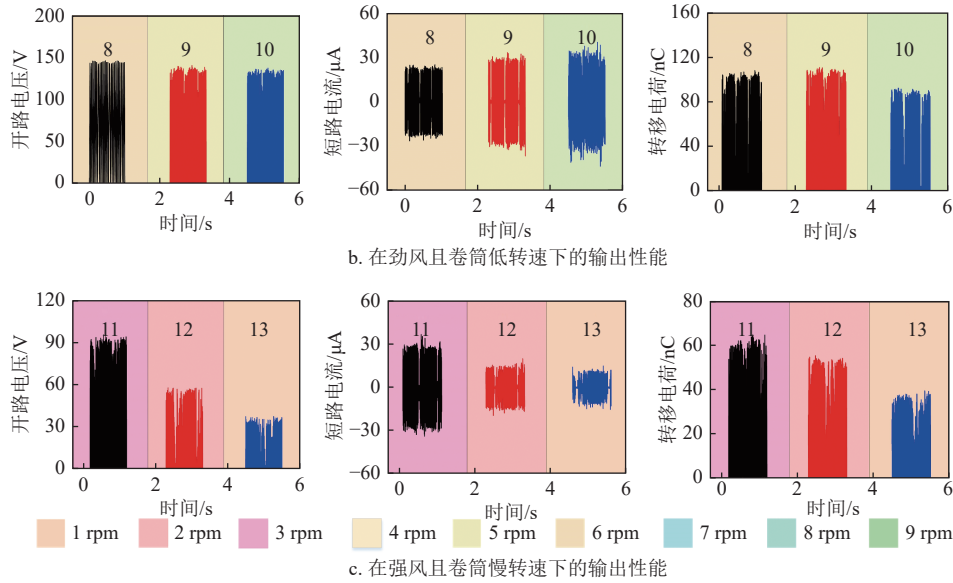


图 5 起升转速自传感的双向俘能装置在不同工作条件下的输出对比

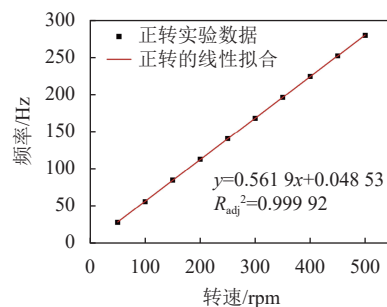
实验表明,起升转速自传感的双向俘能装置可以在正常的工况条件下保持相对稳定的输出性能,一旦超出正常的工况条件,该发电机的输出性能会随激励条件的增加而不断变小。

2.3 传感监测能力的可行性验证

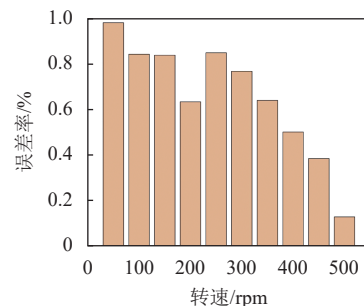
结合起重机卷筒日常工作情况的需求,针对其转速监测进行相应研究和分析,对正转及反转的两种旋转分析结果如图 6a 和图 6c 所示。为了增大转速分析的范围,选择通过对监测轴的转速进行验证。经计算,监测轴与卷筒的传动比约为 50:1,在 0~500 rpm 范围内,在监测正转与反转时,转速与频率呈良好的线性关系,调节后的方差分别约为 0.999 92、0.999 91。良好的线性度证明了起升转速自传感的双向俘能装置作为监测传感器的优良性能。另外,将根据起升转速自传感的双向俘能装置的频率计算出的转速与编码器测量的值进行了比较,误差率可控制在 1% 以下。在高转速下,起升转速自传感的双向俘能装置具有更好的精度,误差率低于 0.2%。产生这种实验现象的原因是:转速越高,电信号的负载电压越大,信号质量越好。在此基础上进行了耐久性试验,如图 6e 所示,连续测试约 5.5 h 后,输出的电信号依然保持稳定。实验过程相当于连续旋转约 140 000 个周期,证明起升转速自传感的双向俘能装置在长时间运行条件下能够保持稳定,为该发电机在实际应用过程中的可靠性提供了有力的支持。

2.4 应用演示研究

为验证具有起升转速自传感的双向俘能装置原型样机实际应用能力,利用原型样机对常见的电容器进行充电实验,在最佳激励条件下,选取 4.7、10、22、47、100 μF 这 5 种电容器作为实验变量。随着电容量的增加,原型样机为电容器充电的时间不断增加,如图 7a 所示。为 4.7 μF 电容器充电至 5 V 所需的时间为 3.0 s,为 100 μF 电容器充电至 5 V 所需的时间为 32 s。



a. 卷筒正转时的线性度



b. 卷筒正转时的误差率

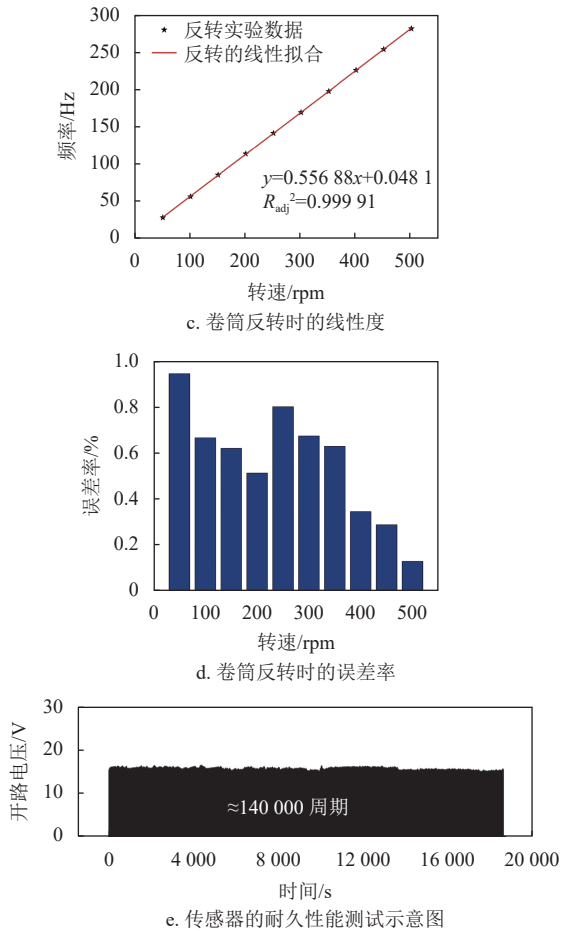


图6 起升转速自传感的双向俘能装置转速分析及耐久性实验

为了进一步地测试的负载特性,在最佳激励条件时,对发电单元的负载电压、负载电流和负载功率进行了测试。该发电机的峰值功率最高可达到0.82 mW,如图7b所示,随着发电单元外接负载电阻值的逐渐增大,发电单元所输出的负载电压呈现持续上升的趋势,而输出短路电流则呈现不断降低的趋势。图7c为原型样机进行实际应用能力演示实验。通过旋转电机和小型鼓风机对原型样机施加外部激励,原型样机产生的交流电信号被整流器转换为直流电信号,然后为220 μF的商用电容器充电,大约需要76 s的时间,当电容电压达到5.0 V左右,然后启动温湿度传感器,在温湿度传感器正常开启之后,电容器电压下降后维持在相对稳定的起伏状态,该温湿度传感器在原型样机的供能下可以正常地连续运行,并且该原型样机可以为220个发光二极管(LED)供电,如图7d所示。图7e为该发电机安装在起重机起升机构的卷筒处。通过上述实验,该发电机有效俘获起升机构周

边能量为低功耗设备供电的能力得到了充分验证,在自驱动传感领域具有良好的工业应用前景。

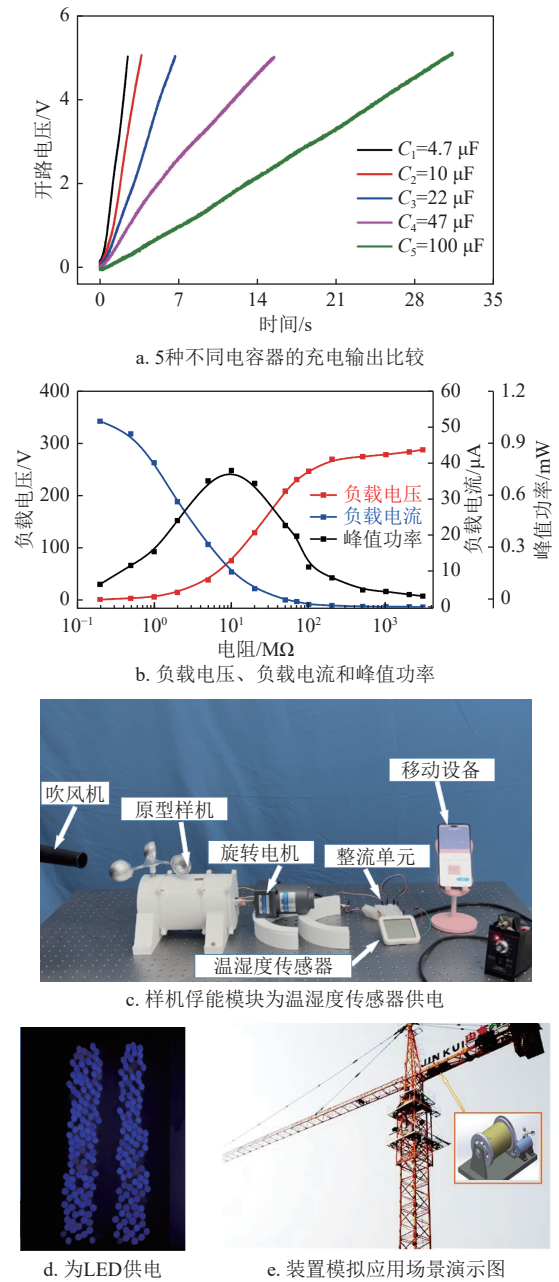


图7 起升转速自传感的双向俘能装置的应用实验

3 结束语

本文提出了一种具有起升转速自传感的双向俘能装置,该发电机可有效收集自然风能和重物下降时的势能,并对起升机构进行运动状态监测。其双向俘能机制具有更高的能量俘获效率。研究成果拓宽了摩擦纳米发电机在能量俘获和自驱动传感领域的应用,为起升机构运动状态监测提供了新的解决方案并为其自供电无线转速监测提供了可能。

参考文献

- [1] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 106-126.
- [2] GEORGE B, TAN Z C, NIHTIANOV S. Advances in capacitive, eddy current, and magnetic displacement sensors and corresponding interfaces[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12): 9595-9607.
- [3] MUDULI L, MISHRA D P, JANA P K. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 106: 48-67.
- [4] 薛志钢, 苏文胜, 巫波, 等. 基于轮辐式传感器的起重机轮胎测试方法研究[J]. *测试技术学报*, 2019, 33(6): 465-469.
- XUE Z G, SU W S, WU B, et al. Research on crane wheel pressure test method based on spoke sensor[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2019, 33(6): 465-469.
- [5] 阎旭文. 一种岸边集装箱起重机拉板式重量传感器研发[J]. *港口装卸*, 2021(5): 50-52.
- YAN X W. Development of pull plate weight sensor for quayside container crane[J]. *Port Operation*, 2021(5): 50-52.
- [6] 肖成林, 周化龙, 崔相东. 用于起重机吊臂的电阻式位移传感器设计[J]. *建设机械技术与管理*, 2023, 36(4): 41-44.
- XIAO C L, ZHOU H L, CUI X D. Design of resistance displacement sensor for crane jib[J]. *Construction Machinery Technology & Management*, 2023, 36(4): 41-44.
- [7] LIANG X, JIANG T, FENG Y W, et al. Triboelectric nanogenerator network integrated with charge excitation circuit for effective water wave energy harvesting[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(40): 2002123.
- [8] FAN F R, TIAN Z Q, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328-334.
- [9] WANG Z L. Triboelectric nanogenerator (TENG): Sparking an energy and sensor revolution[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 2000137.
- [10] ZOU H Y, ZHANG Y, GUO L T, et al. Quantifying the triboelectric series[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1427.
- [11] WANG Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9533-9557.
- [12] REN Z W, WU L T, PANG Y K, et al. Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators[J]. *Nano Energy*, 2022, 100: 107522.
- [13] WANG X, WEN Z, GUO H, et al. Fully packaged blue energy harvester by hybridizing a rolling triboelectric nanogenerator and an electromagnetic generator[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11369-11376.
- [14] WANG Z, MUN T J, MACHADO F M, et al. More powerful twistrion carbon nanotube yarn mechanical energy harvesters[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(27): e2201826.
- [15] GAO Q, XU Y, YU X, et al. Gyroscope-structured triboelectric nanogenerator for harvesting multidirectional ocean wave energy[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4): 6781-6788.
- [16] YANG Y F, YU X, MENG L X, et al. Triboelectric nanogenerator with double rocker structure design for ultra-low-frequency wave full-stroke energy harvesting[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 46: 101338.
- [17] YUAN W, ZHANG B F, ZHANG C G, et al. Anaconda-shaped spiral multi-layered triboelectric nanogenerators with ultra-high space efficiency for wave energy harvesting[J]. *One Earth*, 2022, 5(9): 1055-1063.
- [18] LIU S M, LI X, WANG Y Q, et al. Magnetic switch structured triboelectric nanogenerator for continuous and regular harvesting of wind energy[J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105851.
- [19] ZHANG C G, LIU Y B, ZHANG B F, et al. Harvesting wind energy by a triboelectric nanogenerator for an intelligent high-speed train system[J]. *ACS Energy Letters*, 2021: 1490-1499.
- [20] WANG Y Q, YU X, YIN M F, et al. Gravity triboelectric nanogenerator for the steady harvesting of natural wind energy[J]. *Nano Energy*, 2021, 82: 105740.
- [21] REN Z W, WANG Z M, WANG F, et al. Vibration behavior and excitation mechanism of ultra-stretchable triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 45: 101285.
- [22] WANG J, LIU P, MENG C, et al. Tribo-induced smart reflector for ultrasensitive self-powered wireless sensing of air flow[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(18): 21450-21458.
- [23] WANG X H, YIN G F, SUN T, et al. Mechanical vibration energy harvesting and vibration monitoring based on triboelectric nanogenerators[J]. *Energy Technology*, 2024, 12(4): 2300931.
- [24] YANG X R, ZHENG H, REN H B, et al. A tuned triboelectric nanogenerator using a magnetic liquid for low-frequency vibration energy harvesting[J]. *Nanoscale*, 2024, 16(4): 1915-1923.
- [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): E1063.
- [26] CHA S N, SEO J S, KIM S M, et al. Sound-driven piezoelectric nanowire-based nanogenerators[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(42): 4726-4730.
- [27] YU Z, CHEN M, WANG Y, et al. Nanoporous PVDF hollow fiber employed piezo-tribo nanogenerator for effective acoustic harvesting[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(23): 26981-26988.
- [28] ZHANG Q Q, XI Z Y, WANG Y W, et al. Multi-tube Helmholtz resonator based triboelectric nanogenerator for broadband acoustic energy harvesting[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 896953.
- [29] ZHOU Y K, SHEN M L, CUI X, et al. Triboelectric nanogenerator based self-powered sensor for artificial intelligence[J]. *Nano Energy*, 2021, 84: 105887.
- [30] RAHMAN M T, SOHEL RANA S M, MAHARJAN P, et al. Ultra-robust and broadband rotary hybridized nanogenerator for self-sustained smart-farming applications[J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 105974.
- [31] SHI Q, SUN Z, ZHANG Z, et al. Triboelectric nanogenerators and hybridized systems for enabling next-generation IoT applications[J]. *Research*, 2021, DOI: 10.3413312021/6849171.
- [32] CAO Y Y, SHAO H, WANG H X, et al. High-linearity, response-range adjustable force sensors based on a yarn/film/spacer triboelectric device design[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(6): 2100203.
- [33] KUANG S, SUO X, SONG P, et al. Instantaneous self-powered sensing system based on planar-structured rotary triboelectric nanogenerator[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3741.
- [34] HE H C, MU J L, MU J B, et al. Breeze-activated wind speed sensor with ultra-low friction resistance for self-powered gale disaster warning[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(1): 57-70.
- [35] YONG S, WANG J Y, YANG L J, et al. Auto-switching self-powered system for efficient broad-band wind energy harvesting based on dual-rotation shaft triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(26): 2101194.