



# 基于薄膜拍打型摩擦纳米发电机的风能收集研究

杨恩<sup>1,2</sup>, 王岩<sup>1</sup>, 王建业<sup>1</sup>, 王川<sup>1</sup>, 柳长昕<sup>1</sup>, 吴梦维<sup>3</sup>, 米建春<sup>3</sup>, 徐敏义<sup>1\*</sup>

1. 大连海事大学轮机工程学院, 大连 116026;

2. 中国船舶科学研究中心上海分部, 上海 200011;

3. 北京大学工学院, 北京 100871

\* E-mail: xuminyi@dlmu.edu.cn

收稿日期: 2020-09-19; 接受日期: 2020-12-17; 网络版发表日期: 2021-03-01

国家自然科学基金(批准号: 51879022)和中央高校基本科研业务费(编号: 3132019330)资助项目

**摘要** 大量无线传感器网络节点的能量供给是目前限制物联网技术发展的一个瓶颈。作为新型能量收集技术, 摩擦纳米发电机在环境能量收集方面有着显著优势, 为解决无线传感节点供电问题提供了技术思路。本文基于摩擦纳米发电机和风致振动原理, 提出并系统研究了一种薄膜拍打型摩擦纳米发电机(FF-TENG), 实现了风能高效收集。本文采用仿真软件分析了薄膜拍打过程中的电场分布, 利用流场显示方法展示了薄膜的运动状态。同时, 研究了薄膜材料、风速、薄膜长度、薄膜串联对FF-TENG输出性能的影响规律。研究发现: 随着风速提高, 薄膜拍打频率增加, 摩擦纳米发电机输出的短路电流增大, 而输出电压和转移电荷量在风速超过4.7 m/s之后保持稳定。随着薄膜长度的增加, 其拍打频率降低较快, 单位长度上的发电性能呈现先增后减的规律。在双薄膜FF-TENG实验中, 上游薄膜的扰动导致下游薄膜的拍打幅度更大, 这使得两个短薄膜的输出电压比单个长薄膜提升了45%。通过演示实验, 本文设计的薄膜拍打型摩擦纳米发电机成功地驱动了温度传感器, 并点亮了至少300盏LED灯, 表明其在无线传感器供电领域有着广阔的应用前景。

**关键词** 摩擦纳米发电机, 无线传感器网络, 环境能量收集

## 1 引言

随着物联网概念的迅速推广和普及, 万物互联所需构建的无线传感网络相关技术被广泛研究, 其中大量的无线传感器节点作为基本的构成单元, 构成了庞大的无线传感网络。无线传感器通常使用化学电池作为电源, 这种传统的供能方式虽然稳定可靠, 但是存在体积大、寿命短等缺点。由于电池自身体积的限制,

使得无线传感器节点的整体体积显著增大。除此之外, 化学电池属于一次性电池, 存在使用寿命短, 回收后难以处理且电解液泄露可能会污染环境等问题。无线传感器节点具有数量众多、分布广泛的特点, 频繁更换电池不仅成本高昂, 还会影响监测过程, 而常用的传感器通常寿命较长, 性能稳定, 本身无需频繁维修和更换。无线传感器节点的电源是目前限制物联网技术发展的一个瓶颈, 对于这个问题, 传统的解决方案主

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 684~698

Yang E, Wang Y, Wang J Y, et al. Research on a film-flapping triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 684~698, doi: 10.1360/SST-2020-0391

要聚焦在降低传感器功耗从而延长电池使用寿命方面,但是传感器功耗降低的同时还会带来信号传输质量变差,精度下降等致使传感网络可用性降低的问题<sup>[1~5]</sup>.

近年来,从环境中获取能量,为传感器节点/网络提供持续能源的技术被提出,为无线传感节点供电问题提供了解决方案<sup>[6,7]</sup>.环境能量收集技术可以从节点周围环境中收集能量,并为其持续提供电能<sup>[8~10]</sup>.环境能量被转化为电能,并直接接入到终端的传感器节点上,是一种理想供电方式<sup>[11]</sup>.这种方式提供了一种体积小、寿命长的电源<sup>[12]</sup>,进而可以提高整个传感器网络的稳定性和持续性.

风能作为一种可再生能源广泛存在于环境中,且基本不受昼夜变化等气象条件的影响,可利用风速范围较大,是一种理想的环境能量.采集风能的技术形式多种多样,按照其发电原理,大致可分为电磁式、压电式和摩擦电式以及复合型风能采集方式<sup>[13~17]</sup>等.每种形式还可以进一步细分,其中摩擦电式采集技术根据运动形式,主要可分为转动式和气动式.

摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)是王中林团队<sup>[18,19]</sup>于2012年提出并引起广泛关注的新型能量收集技术.其基本原理是摩擦起电和静电感应的耦合.相较于其他发电方式,TENG具有结构布置简单灵活、发电效率较高、材料选择多样等优势<sup>[20]</sup>.目前基于TENG技术,众多国内外学者在风能、振动能、波浪能、人体运动等能量采集,以及风速、振动等自驱动传感技术方面已经开展了一系列的研究与应用工作<sup>[21~30]</sup>.其中在风能采集方面,已经有大量不同结构的装置被提出,Bae等人<sup>[15]</sup>提出了一种拍打驱动的摩擦纳米发电机,与常规布置所不同的是,其做拍打运动的部件是镀金织物,另一层同样的镀金织物和PTFE薄膜粘贴在一起固定在刚性基板上,该装置最终的输出功率可达0.86 mW; Su等人<sup>[31]</sup>研究了电极分割数量对发电性能的影响,发现电极分割后的整体发电性能要明显优于电极未被分割的情况; Park等人<sup>[32]</sup>提出了一种可以收集多方向风能的摩擦纳米发电机,与Yang等人<sup>[33]</sup>采用的周向放置多个器件的方式所不同的是,其将拍打薄膜的四角固定,仅需要一个器件就可以实现多方向风能收集; Wang等人<sup>[34]</sup>则将一个复合旗帜安装于轴承上,可以自动调整方向,实现任意方向的风能收集和风速测量;为了使发电装置不受周

围环境的扰动,Zeng等人<sup>[35]</sup>将设计的信封式摩擦纳米发电机封装在一个封闭钝体中,可以不受天气影响实现稳定的输出.

本文结合风致振动现象和摩擦纳米发电机原理,提出了一种薄膜拍打型摩擦纳米发电机(film-flapping triboelectric nanogenerator, FF-TENG),用于收集低功率的环境风能.本文首先对FF-TENG的发电原理和薄膜拍打原理进行理论分析,并通过静电场仿真和薄膜拍打特性的流场显示实验进一步解释和说明.通过初步实验确定了发电装置所用薄膜材料,在风速和薄膜长度对单薄膜FF-TENG发电性能影响的实验基础上,进一步探究了影响串列式双薄膜FF-TENG发电性能的相关参数,并对其发电性能进行测试和评估.

## 2 FF-TENG结构与发电原理

TENG结构布置非常灵活,通常可根据工作模式的差异,将其分为4类: 垂直接触-分离式(vertical contact-separation mode)、水平滑动式(lateral-sliding mode)、单电极式(single-electrode mode)和独立层式(free-standing triboelectric-layer mode)<sup>[36]</sup>,可根据应用场景的不同,设计适合的能量收集装置.

### 2.1 FF-TENG器件结构

如图1所示,实验器件包括以下几个部分: 透明亚克力外壳作为器件的支撑材料,亚克力外壳截面内部尺寸为40 mm×40 mm; 电正性材料粘贴在亚克力外壳的内壁两侧,同时作为摩擦材料和电极; 电负性的电介质薄膜材料通过固定杆悬挂在通道中间.

材料是影响摩擦纳米发电机发电性能的主要因素之一,不同材料的电正/负性和得失电子能力存在差异.因此,本文首先对不同材料薄膜的发电性能做了对比实验,以确定发电装置所用材料.参考摩擦电序列<sup>[37~39]</sup>,选取了3种电负性相对较低的薄膜材料,即聚四氟乙烯(PTFE)、氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)、聚酰亚胺(Kapton).电正性摩擦材料则选择了铝箔,其电正性相对较高,具有成本低、不易生锈的优点.铝箔厚度为0.1 mm,宽度为40 mm;受限于标准规格,选取的3种电介质薄膜材料的厚度尽量接近,其中PTFE的厚度为30 μm, FEP和Kapton厚度均为25 μm;三种薄膜的宽度均设置为36 mm,两侧各留出约2 mm的空隙.这是因

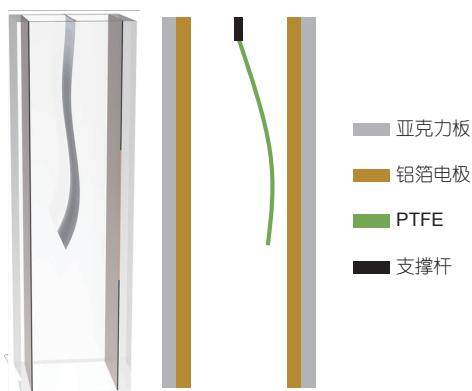


图 1 (网络版彩图) FF-TENG器件结构示意图

Figure 1 (Color online) The structure of FF-TENG.

为薄膜在安装时不可避免地会存在对中性不准的问题,为了避免薄膜在拍打时与亚克力内壁发生刮蹭,影响薄膜的正常拍打。

如图2所示,为同一风速下配置不同薄膜材料的发电装置的输出电压,实验风速为4.7 m/s。显然配置PTFE薄膜时的输出电压最高,且输出信号的波动也更小。因此,本文后续实验中将以PTFE材料为基础,进一步对其他参数进行实验研究和分析。

## 2.2 FF-TENG原理和电荷转移过程

按照具体工作模式的分类,本文的FF-TENG属于独立层式中的接触独立层式<sup>[40]</sup>(contact freestanding triboelectric-layer, CF-TENG)。PTFE薄膜在周期性拍打过程中,与铝箔电极发生周期性的接触分离,产生交流的电信号。图3(a)展示了FF-TENG的PTFE薄膜运动和电荷转移过程。

此处以PTFE薄膜与铝箔电极充分拍打之后的状态,即PTFE上的静电荷分布已经达到饱和状态为例,由于PTFE是驻极体,具有极佳的绝缘性,可认为其所带的负电荷不会丢失。在图3(a)-I状态时,薄膜处于中间位置,电场处于平衡状态,两侧电极所带正电荷数量相等且二者之和与PTFE所带负电荷相等。电极的电势差为零,但是电流达到最大值,对应图3(b)-I;当PTFE薄膜向左侧移动时,两侧电极之间产生电势差,右侧电极的正电荷向左侧电极转移,直至PTFE薄膜与左侧电极接触,此时两侧电极的电势差达到最大值,当PTFE向右侧运动时,电流方向改变,即图3(a)-II和图3(b)-II。PTFE再次回到中间位置III时与状态I类似。PTFE薄膜

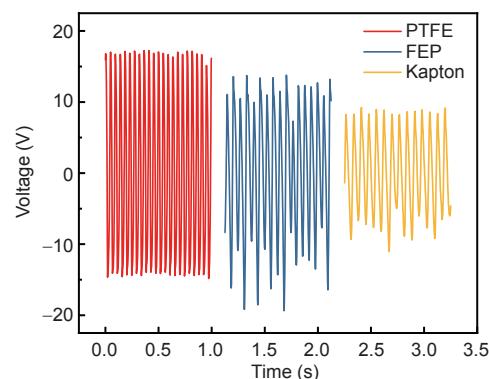


图 2 (网络版彩图)配置不同电介质薄膜材料的FF-TENG输出电压对比

Figure 2 (Color online) The comparison of output voltage of the FF-TENG with different dielectric film.

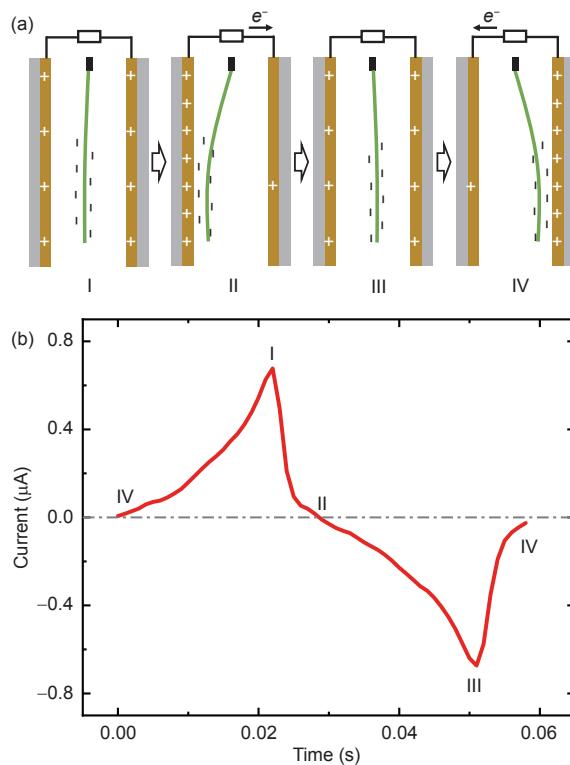


图 3 (网络版彩图) FF-TENG电荷转移过程。(a) 薄膜拍打过程;(b) 单周期电流信号

Figure 3 (Color online) The charges transition process of the FF-TENG. (a) The process of the film flapping; (b) the current signal in one period.

在电极之间往复拍打,产生交变电信号。

基于FF-TENG发电原理,可将摩擦副的每个接触面视为节点,简化为等效电容模型<sup>[41]</sup>,如图4所示。

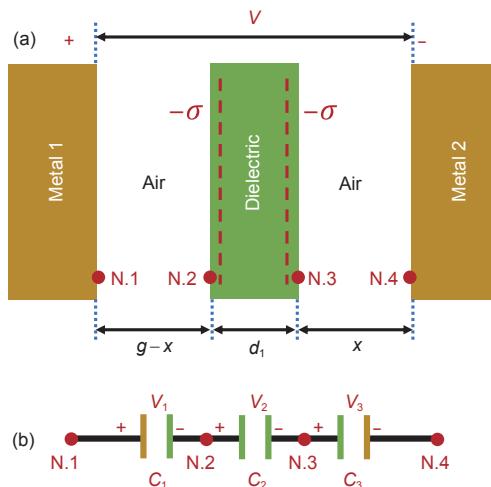


图 4 (网络版彩图) FF-TENG 模型. (a) 模型结构; (b) 等效电容模型

**Figure 4** (Color online) Model of the FF-TENG. (a) Structure of the model; (b) the equivalent capacitance model.

每两个节点之间可视作一个电容。最大短路转移电荷量可表示为

$$Q_{SC_{max}} = \frac{2\sigma Sg}{d_0 + g}. \quad (1)$$

最大开路电压表示为

$$V_{OC_{max}} = \frac{2\sigma g}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

式中,  $S$ 为摩擦副之间的有效接触面积;  $g$ 为电极间距。所以对于确定材质的模型, 其开路电压和转移电荷量与电极间距和薄膜与电极有效接触面积有关。

### 2.3 FF-TENG 电场仿真分析

本文使用多物理场仿真分析软件对FF-TENG的二维简化模型进行电场仿真。其中结构模型进行如下简化: 首先, 不考虑电介质薄膜在实际拍打时的三维性, 将其简化为二维模型; 其次, 因为电介质材料和金属电极的厚度都非常薄, 所以对材料的厚度不予考虑; 除此之外, 不考虑薄膜拍打时的弯曲状态, 即在仿真模型中将其设置为平板状; 最后, 仿真的状态为稳态仿真, 即假设薄膜已经与金属电极进行了充分接触, 薄膜所带电荷量达到饱和状态。

如图5(a)所示为二维FF-TENG模型, 此处以PTFE薄膜在左侧时为例。在该模型中, 两侧的电极材料设置为铝(alumina), 长度为80 mm, 间距为40 mm; 电介

质材料设置为PTFE, 长度为80 mm, 泊松比设置为0.4; 由于在静电场中无穷远处电势为零, 因此将外围圆周半径设置为800 mm, 即10倍于模型的长度; 面外厚度设置为40 mm。

在静电场设置中, 将电极和PTFE材料所在边界设置为终端, 其中PTFE所带静电荷设置为 $-5 \times 10^{-10}$  nC, 两侧电极各自的静电荷根据PTFE所在位置不同进行调整, 但是静电荷之和始终为 $5 \times 10^{-10}$  nC; 外围圆周所在边界设置为接地, 即电势为零。

图5(b)为仿真模型整体区域的网格划分图, 此图仅以PTFE靠近左侧电极时为例; 图5(c), (e), (f)分别为PTFE在中间和右侧位置时的网格划分局部放大图, 其中当PTFE靠近两侧电极时, 其与电极的最近距离均设置为1 mm。

仿真所用物理场为静电场, 以稳态求解器进行求解。图6(a)为模型的整体电势分布图, 此处仅以当PTFE靠近左侧电极时为例。静电场的势差主要分布在模型的中心位置, FF-TENG模型附近至外围圆周的大部分区域电势均为零, 即无穷远处电势为零。

图6(b)为FF-TENG二维模型静电场分布图。与图3所述FF-TENG电荷转移过程类似。PTFE靠近某一侧电极时, 两侧电极的电势差最大, 且在不同侧时其电势差方向相反; PTFE在两侧电极中间位置时, 两侧电极的电势差为零。PTFE材料以此在两侧电极之间往复运动, 通过外电路产生交变电流。

## 3 FF-TENG 薄膜拍打理论与特性

### 3.1 薄膜拍打理论

在Argentina和Mahadevan<sup>[42]</sup>的研究中, 当柔性体的弯曲应力 $Eh^3/\eta/L^4$ 和气动力 $\rho_f U^2(\eta/L)$ 相平衡时, 柔性体达到临界拍打风速, 即产生拍打运动, 则该临界风速可表示为

$$U_c \sim \left( \frac{Eh^3}{\rho_f L^3} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中,  $E$ 是薄膜杨氏模量,  $h$ 是薄膜厚度,  $\eta$ 是无量纲振幅,  $\rho_f$ 是流体密度,  $U$ 是流体流速,  $L$ 是膜长。显然临界风速与柔性体长度成反比。

同时, 柔性体的惯性力 $\rho_s h \omega^2 \eta$ 和气动力 $\rho_f U^2(\eta/L)$

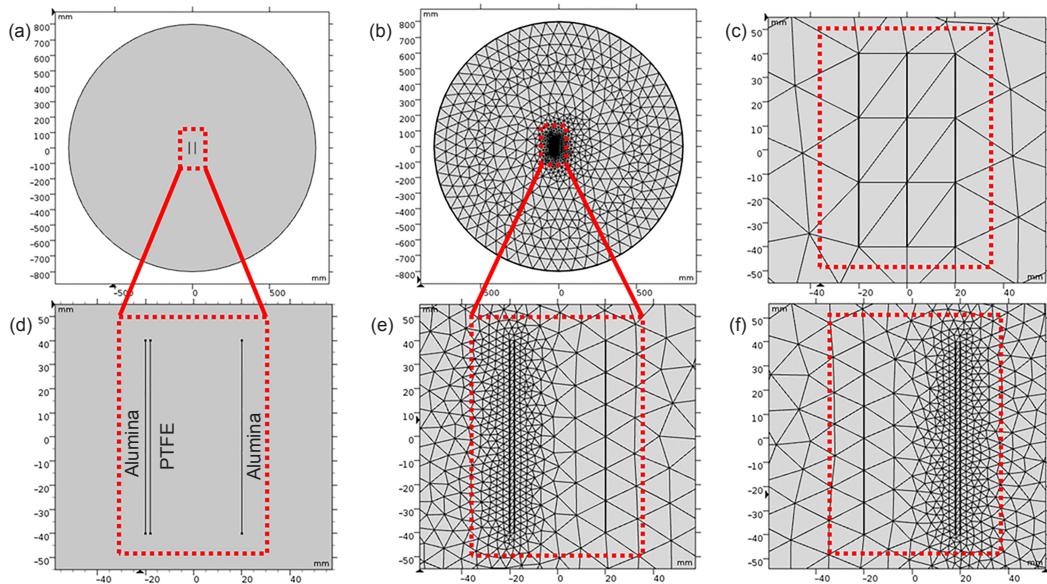


图 5 (网络版彩图) FF-TENG 仿真模型网格划分图. (a) 二维FF-TENG模型; (b) 仿真模型整体区域的网格划分图; (c) PTFE在中间位置时的网格划分局部放大图; (d) 二维FF-TENG模型放大图; (e) PTFE在左侧位置时的网格划分局部放大图; (f) PTFE在右侧位置时的网格划分局部放大图

**Figure 5** (Color online) The diagram of FF-TENG simulation model. (a) Two dimensional FF-TENG model; (b) the whole area simulation model; (c) partial enlarged of PTFE in the middle position; (d) enlarged mesh two dimensional FF-TENG model; (e) partial enlarged of PTFE in the left position; (f) partial enlarged of PTFE in the right position.

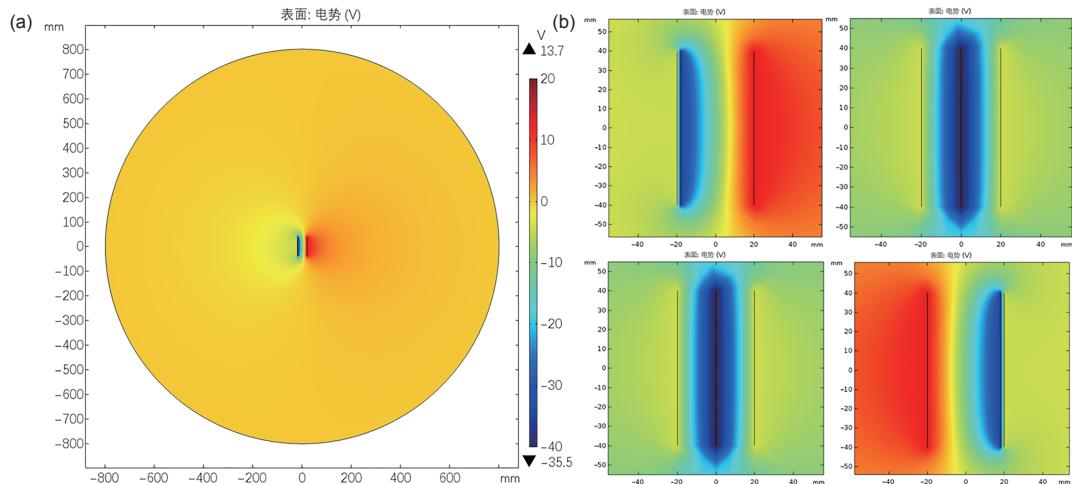


图 6 (网络版彩图) FF-TENG 静电场仿真图. (a) 模型的整体电势分布图; (b) FF-TENG二维模型静电场分布图

**Figure 6** (Color online) The FF-TENG electrostatic field simulation. (a) Overall potential distribution of the model; (b) electrostatic field distribution of two-dimensional FF-TENG model.

达到平衡状态，则可以得出柔性体的拍打频率 $\omega$ :

$$\omega \sim \left( \frac{\rho_f U^2}{\rho_s h L} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中， $\rho_s$ 为薄膜密度。所以薄膜拍打频率与风速成正比，

与薄膜长度成反比。

柔性体所受张力 $T$ 可表示为

$$T \sim U^{3/2} \sqrt{\rho_f \mu L} \left( 1 - \sqrt{\frac{x}{L}} \right) = \frac{L \rho_f U^2}{\sqrt{Re}} \left( 1 - \sqrt{\frac{x}{L}} \right), \quad (5)$$

式中,  $\mu$ 为空气动力黏度。显然, 张力  $T$  与  $U^{3/2}$  成正比。而柔性体在弯曲时, 张力的存在倾向于使柔性体变平, 最终在风速达到一定程度时, 增大的张力会限制柔性体摆动的振幅<sup>[43]</sup>。

### 3.2 薄膜拍打特性

本文实验主要在竖直风洞实验台内进行。首先对竖直风洞实验台进行了风速测量和标定, 以确定变频器频率和风速的对应关系, 方便后续通过调节变频器频率进行风速调节。图7为变频器频率-风速标定图, 图中标示了特定频率对应的风速值, 后续实验将在这些风速下进行。

为了探究薄膜拍打运动的模式, 利用图8所示的FF-TENG薄膜拍打特性测试系统对薄膜拍打运动进

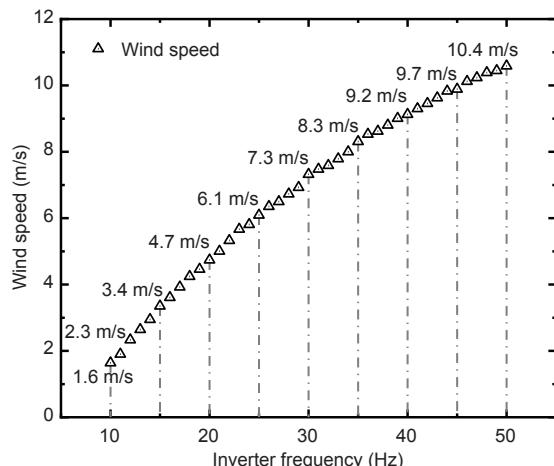


图 7 变频器频率与竖直风洞工作段风速值标定  
Figure 7 The calibration of inverter frequency and wind speed value in working section of vertical wind tunnel.

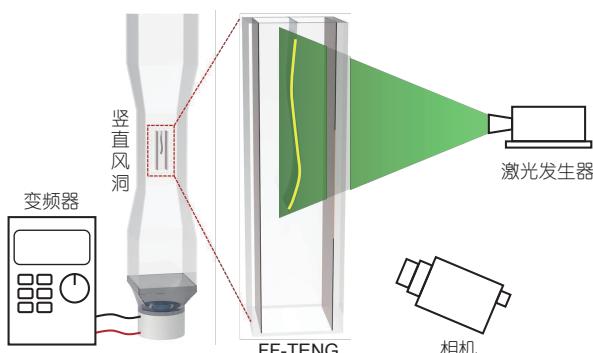


图 8 (网络版彩图)薄膜拍打特性测试设备及其系统图  
Figure 8 (Color online) The lay-out of test equipment for film flapping characteristics experiment.

行流场显示。

首先对单薄膜FF-TENG的拍打过程进行流场显示实验。实验所用PTFE薄膜长度为80 mm。图9(a)和(b)为单个薄膜拍打过程的包络图和一个拍打周期内不同位置的瞬时图, 直观地反映了薄膜的拍打状态。

在串列双薄膜的情况下, 上下游薄膜的运动状态会相互影响, 图9(c)和(d)为串列式双薄膜的流场显示图像。随着风速增加, 上下游薄膜的拍打幅度均在增大, 其中上游薄膜的拍打幅度在各个风速下一直小于下游薄膜, 因为下游薄膜被固定的前端会抑制上游薄膜尾部流场横向上的流动<sup>[44]</sup>, 但是上游薄膜的振荡尾迹会增强下游薄膜的运动<sup>[45]</sup>。此外, 观察瞬时图可以发现上下游薄膜拍打相位相反, 下游薄膜是受到了上游薄膜尾部左右移动的尾涡的影响, 导致下游薄膜被迫会向另一侧运动。

## 4 FF-TENG发电特性实验与分析

如图10所示, 为实验的发电性能测试系统图。FF-TENG置于竖直风洞中, 两侧电极通过导线与静电计输入端相连, 静电高阻计经过NI DAQ采集卡将数据传入计算机。计算机对数据进行采集和存储, 以便后续的处理分析。

### 4.1 单薄膜FF-TENG发电性能

单薄膜FF-TENG器件结构如图11所示。风速和PTFE薄膜的长度是影响单薄膜FF-TENG发电性能的重要因素。

#### (1) 风速的影响

在实际收集环境风能时, 环境风速并不是恒定的, 所以需要评估风速对器件的发电特性的影响。实验使用长度为80 mm, 厚度为0.03 mm的PTFE薄膜, 风速大小在1.6~10.6 m/s之间。

由图12(a)和(c)可以看出, 风速低于4.7 m/s时, FF-TENG开路电压  $V_{OC}$  和转移电荷量  $Q$  都是随着风速的增加而明显增大, 但是在风速达到4.7 m/s之后二者的大小随风速不再有明显变化, 其中开路电压  $V_{OC}$  逐渐稳定在35 V左右, 转移电荷量  $Q$  稳定在11 nC左右。因为开路电压和转移电荷量的最大值取决于薄膜和电极的有效接触面积和电极间距, 当风速低于4.7 m/s时, 随着风速增加, 薄膜受到气动力的作用与铝箔电极的有效

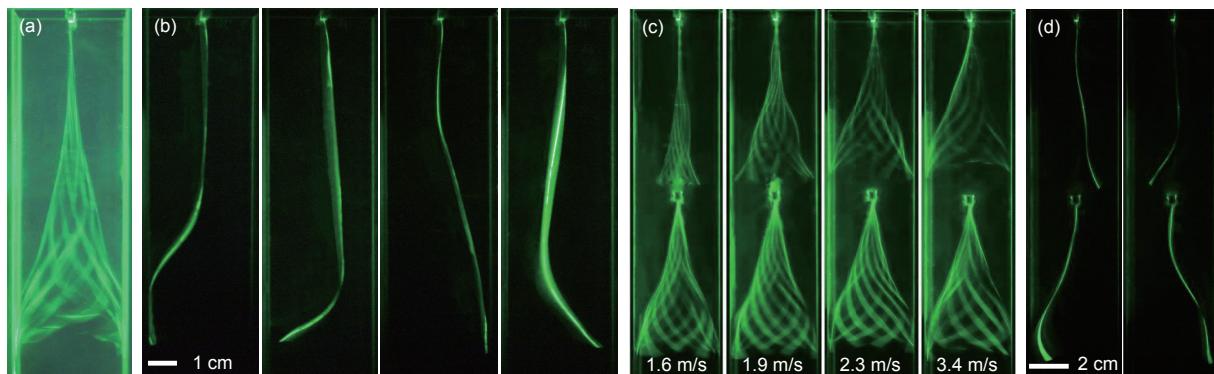


图 9 (网络版彩图)薄膜拍打包络图和瞬时图. (a), (b) 单薄膜; (c), (d) 串列双薄膜

Figure 9 (Color online) The envelope and instantaneous image of flapping film(s). (a), (b) Single film; (c), (d) double tandem films.

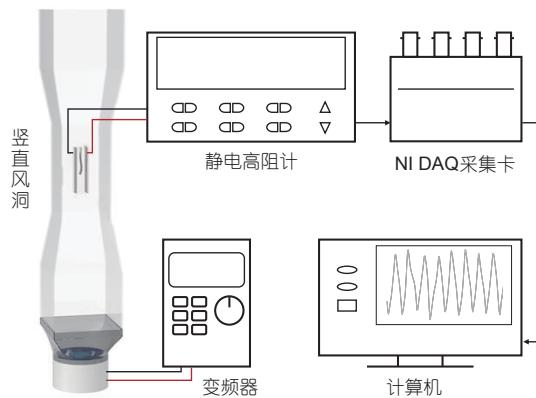


图 10 (网络版彩图)发电性能测试系统图

Figure 10 (Color online) The lay-out of electricity performance experiment system.

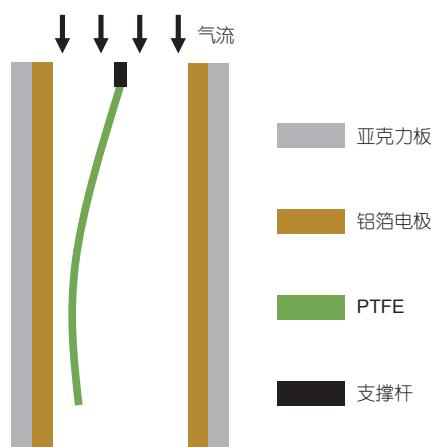


图 11 (网络版彩图)单薄膜FF-TENG结构布置图

Figure 11 (Color online) The structure of the FF-TENG with single film.

接触面积一直在增加,但风速再提高时,薄膜拍打幅度和薄膜与电极的接触面积不再显著增加,开路电压 $V_{OC}$ 和转移电荷量 $Q$ 会趋于稳定。

图12(b)显示了FF-TENG的短路电流 $I_{ST}$ 随风速变化的关系。当风速低于4.7 m/s时,短路电流 $I_{ST}$ 随风速增加较快,在最大风速(10.6 m/s)时,可达到2.0  $\mu$ A。这主要是因为随着风速增大,薄膜拍打频率显著增加进而引起短路电流增大。

## (2) 薄膜长度的影响

除了风速之外,薄膜长度也是影响器件发电性能的一个重要参数。在本小节实验中,选用长度为1~5倍器件内部尺寸的PTFE薄膜,即40, 80, 120, 160和200 mm,实验在4.7 m/s的风速下进行。

从图13(a)和(c)可以看出,FF-TENG开路电压 $V_{OC}$ 和转移电荷量 $Q$ 都随薄膜长度的增加而增大。因为随着薄膜长度增加,PTFE薄膜的拍打幅度也逐渐增加,进而薄膜与电极的接触面积逐渐增大。但开路电压 $V_{OC}$ 和转移电荷量 $Q$ 的增加并不与薄膜长度的增加成比例。例如,当薄膜长度增加至160 mm时,虽然薄膜长度增加了1倍,但其开路电压 $V_{OC}$ 和转移电荷量 $Q$ 仅是薄膜长度为80 mm时的1.1和1.5倍。

图13(b)是FF-TENG的短路电流 $I_{ST}$ 随薄膜长度的变化情况,可以看出,在薄膜长度为40 mm时,FF-TENG的短路电流 $I_{ST}$ 约为0.2  $\mu$ A;在另外4种薄膜长度下,FF-TENG的短路电流趋于稳定且明显大于40 mm的情况,约为1.5  $\mu$ A。薄膜长度为40 mm时 $I_{ST}$ 较小,主要是因为薄膜过短,拍打时与电极的接触面积非常小,所以导致FF-TENG的开路电压和转移电荷

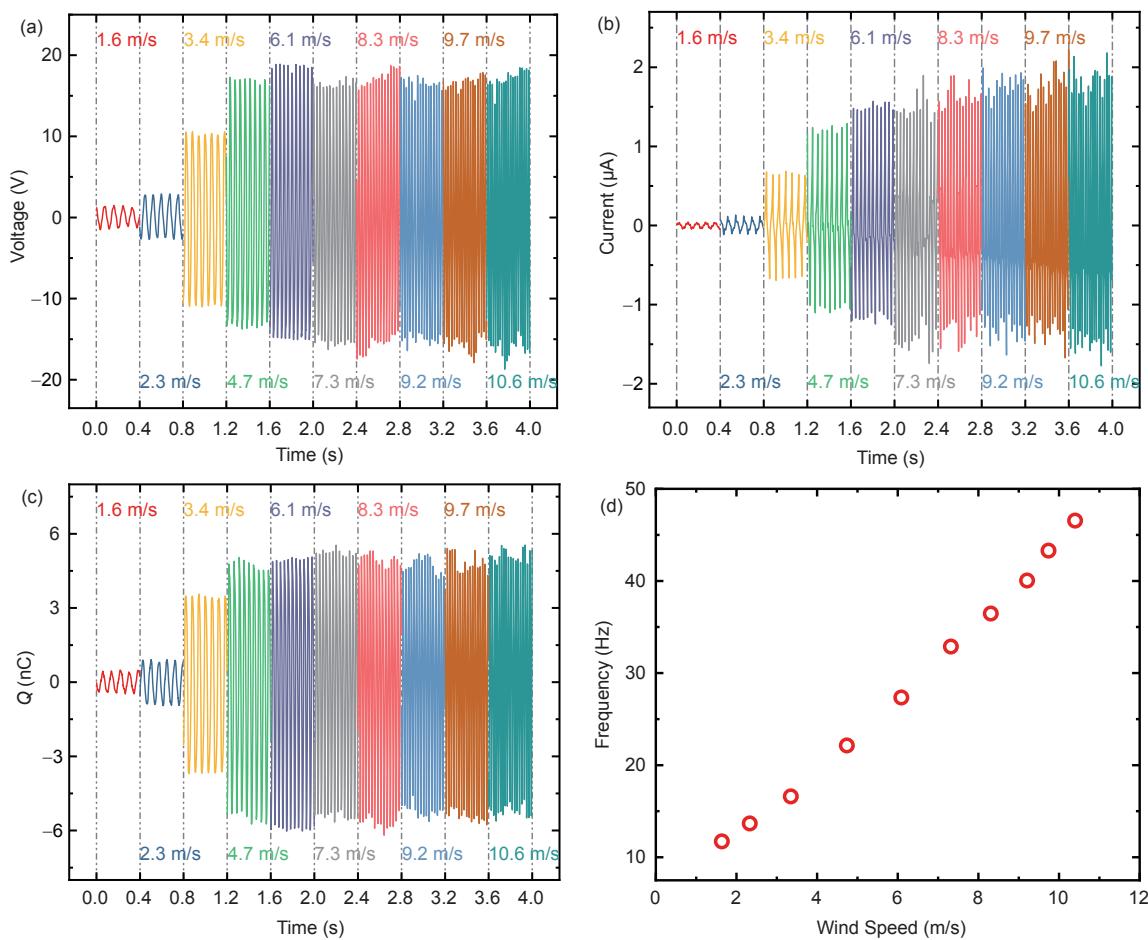


图 12 (网络版彩图)单薄膜FF-TENG输出电信号和薄膜拍打频率随风速的变化. (a) 开路电压  $V_{OC}$ ; (b) 短路电流  $I_{ST}$ ; (c) 转移电荷量  $Q$ ; (d) 薄膜拍打频率

**Figure 12** (Color online) The output signal and flapping frequency of the single film FF-TENG under varying wind speed. (a) Open circuit voltage  $V_{OC}$ ; (b) short circuit current  $I_{ST}$ ; (c) transferred charge quantity  $Q$ ; (d) film flapping frequency.

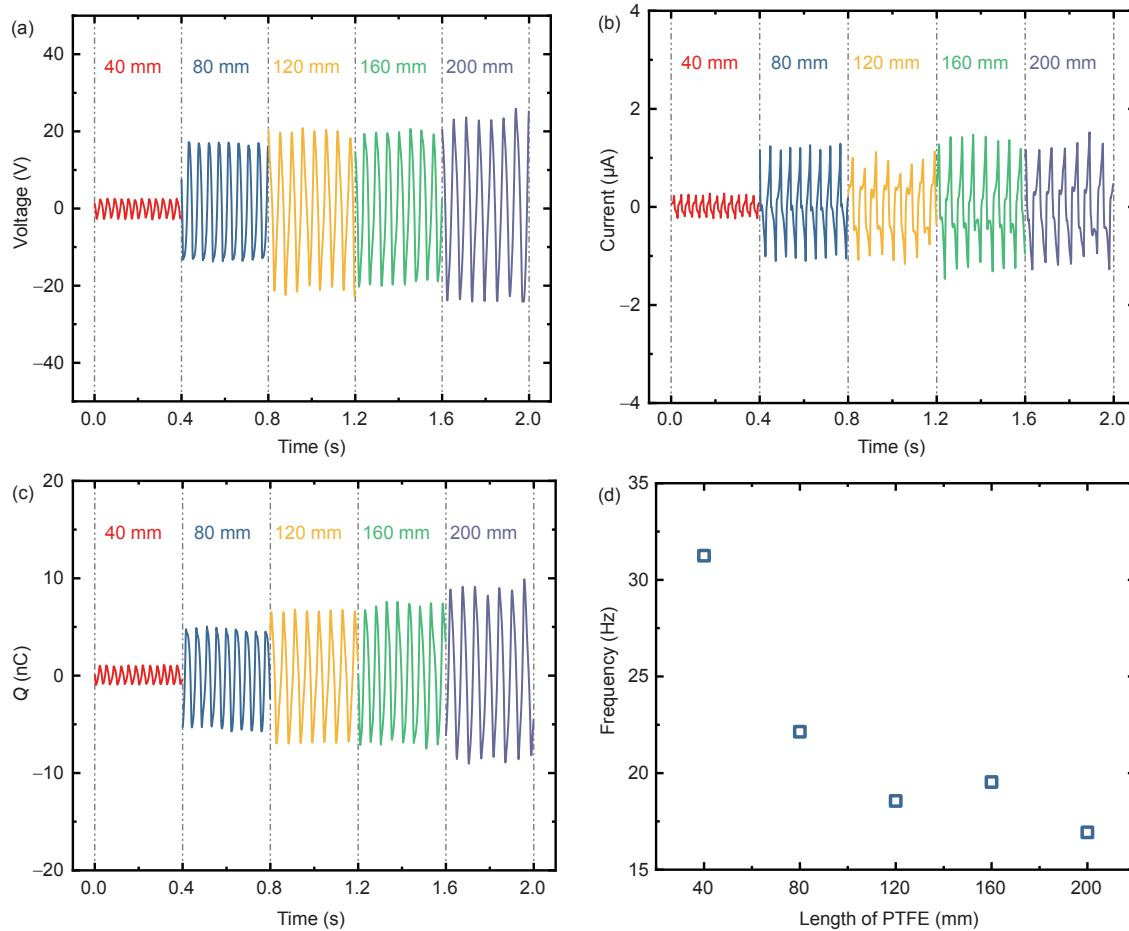
量也非常小, 如图13(b)和(d)所示, 尽管此时拍打频率较高, 但是短路电流依然较小; 另外4种薄膜长度下FF-TENG的短路电流较大且基本不随薄膜长度变化, 因为虽然薄膜长度增加会使接触面积增大, 但是薄膜的拍打频率却随薄膜长度增加而减小, 如图13(d)所示, 频率的减小会抵消由于薄膜长度增加对短路电流的增强效果.

为了更直观地反映在不同薄膜长度时, 发电器件的发电效率, 在开路电压、短路电流和转移电荷量的基础上提出电压密度  $\rho_V$ 、电流密度  $\rho_I$  和转移电荷量密度  $\rho_Q$ , 分别表示在单位薄膜长度下对应的输出电信号密度, 则有

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_V = \frac{V_{OC}}{L_{PTFE}}, \\ \rho_I = \frac{I_{ST}}{L_{PTFE}}, \\ \rho_Q = \frac{Q}{L_{PTFE}}, \end{array} \right. \quad (6)$$

式中,  $L_{PTFE}$  表示PTFE薄膜长度. 在式(6)的基础上对数据进一步处理得到图14.

对比图13(a)~(c)可以看出, 尽管PTFE薄膜长度在80 mm时, 输出电信号总量不是最大, 但是单位长度下的电压密度  $\rho_V$ 、电流密度  $\rho_I$  和转移电荷量密度  $\rho_Q$  都明显大于其他几种情况, 可以得出单薄膜长度在80 mm时发电效率最大的结论.



**图 13** (网络版彩图)单薄膜FF-TENG输出电信号和薄膜拍打频率随膜长的变化. (a) 开路电压  $V_{oc}$ ; (b) 短路电流  $I_{st}$ ; (c) 转移电荷量  $Q$ ; (d) 薄膜拍打频率

**Figure 13** (Color online) Output signal and flapping frequency of the single film FF-TENG under varying films length. (a) Open circuit voltage  $V_{oc}$ ; (b) short circuit current  $I_{st}$ ; (c) transferred charge quantity  $Q$ ; (d) film flapping frequency.

## 4.2 双薄膜FF-TENG发电性能

在目前利用柔性薄膜或旗子收集环境风能的研究成果中, 多采用单薄膜设计, 这极大地限制了装置收集风能的功率上限, 并且会降低功率密度. 因此, 基于上一节实验的结果, 对双薄膜的FF-TENG的发电性能做进一步的实验研究. 双薄膜FF-TENG的结构布局如图15所示, 上下游两个发电单元的铝箔电极从中间断开. 本节实验所用薄膜长度为80 mm.

图16(a)~(c)对上下游薄膜发电单元的输出电信号进行对比. 在风速较低(1.6 m/s)时, 下游薄膜能够与两侧的电极接触摩擦产生电信号. 但是在串列式布置下, 上游薄膜拍打受到下游薄膜拍打的抑制, 所以此时上

游薄膜并未产生有效的拍打, 在实验时可观察到小幅晃动, 这在薄膜摆动特性的分析中已经提到, 所以此时薄膜未能与两侧金属电极产生有效接触, 未能输出有效的电信号.

在风速到达3.4 m/s后, 上游薄膜可以与两侧的金属电极产生有效接触分离, 并且拍打幅度也会增加, 其输出电信号大于下游发电单元, 这种现象一直持续到风速为9.2 m/s时. 在风速为9.2和9.7 m/s的情况下, 上游发电单元的输出电信号大于下游发电单元, 而在最高风速10.6 m/s的情况下, 下游发电单元的输出电信号却大于上游发电单元, 此时考虑在高风速下薄膜拍打会出现扭曲、旋转等三维性运动进而影响薄膜与电极的接触面积, 所以输出电信号不稳定. 此外, 图16(d)

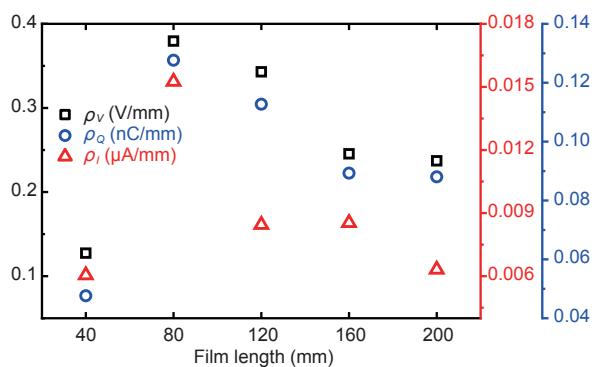


图 14 (网络版彩图) 4.7 m/s 风速下, 不同长度 PTFE 薄膜的  $\rho_v$ ,  $\rho_i$  和  $\rho_Q$  对比

Figure 14 (Color online) The comparison of  $\rho_v$ ,  $\rho_i$ , and  $\rho_Q$  on different lengths PTFE films at 4.7 m/s of wind speed.

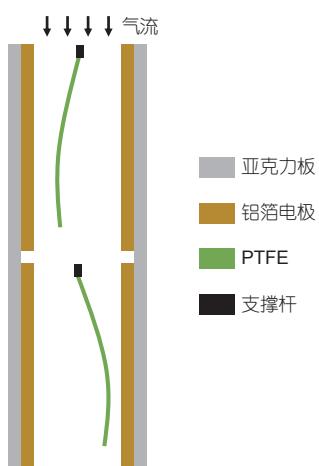


图 15 (网络版彩图) 双薄膜FF-TENG结构布置图

Figure 15 (Color online) Structure of the FF-TENG with double tandem films.

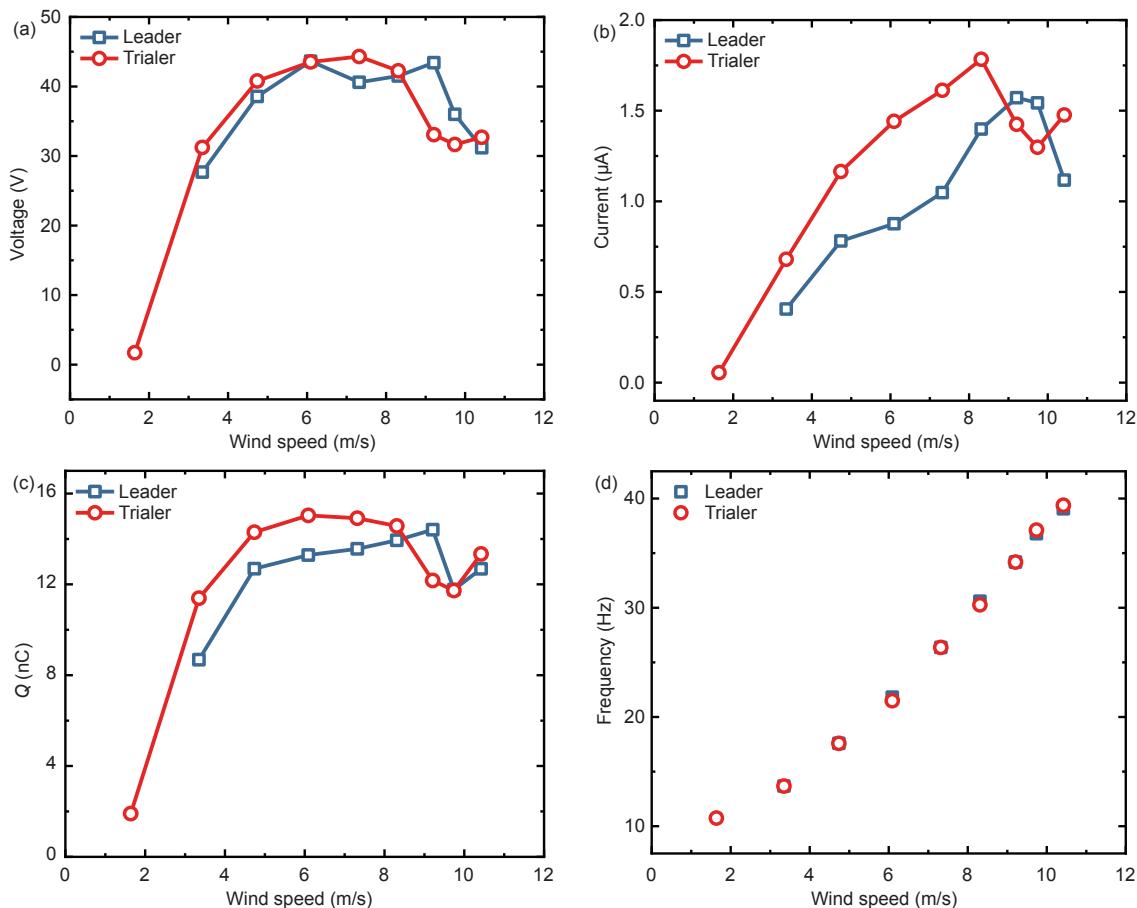


图 16 (网络版彩图) 不同风速下, 双薄膜FF-TENG上下游发电单元输出电信号及薄膜拍打频率. (a) 开路电压  $V_{oc}$ ; (b) 短路电流  $I_{st}$ ; (c) 转移电荷量  $Q$ ; (d) 上下游薄膜拍打频率

Figure 16 (Color online) The output signal and flapping frequency of the double tandem films FF-TENG under varying wind speed. (a) Open circuit voltage  $V_{oc}$ ; (b) short circuit current  $I_{st}$ ; (c) transferred charge quantity  $Q$ ; (d) films flapping frequency.

显示上下游薄膜的拍打频率十分接近。与上游薄膜前端相对稳定的流场所不同, 下游薄膜前端受到了上游薄膜尾部振荡尾迹的影响, 会在上游薄膜的尾涡中产生受迫运动, 因此上下游薄膜的频率是十分接近的<sup>[45]</sup>。

进一步地, 本文将上下游发电单元的电极进行串联, 与其他薄膜配置的输出电压进行对比。串列式双薄膜FF-TENG上/下游薄膜对应的发电单元(DL80, DT80), 单个80 mm(S80), 单个160 mm(S160)和串列式双80 mm(D80)薄膜发电单元的输出电压对比如图17所示, 实验风速为4.7 m/s。

可以看出串列式双薄膜FF-TENG发电性能最佳, 其开路电压可达73 V, 单个80 mm薄膜发电单元的开路电压仅为39 V, 二者相差近1.9倍。单个长度为160 mm的薄膜发电单元的输出电压仅为51 V, 是单个80 mm薄膜发电单元的1.3倍。但是串列式双薄膜FF-TENG的开路电压可达单个160 mm薄膜发电单元的近1.5倍。实验结果证实了串列式双薄膜FF-TENG优异的发电性能, 这样的结构布局不仅避免了通过增加薄膜长度来提高发电性能的低效率, 也大大提升了空间利

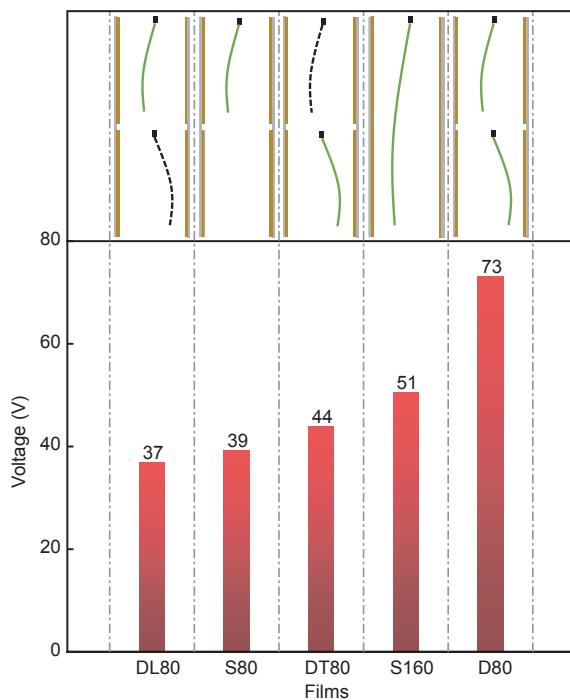


图 17 (网络版彩图)不同薄膜配置的FF-TENG发电单元开路电压

**Figure 17** (Color online) The open circuit voltage comparison of FF-TENG units with different film configurations.

用率, 使发电量得到大幅提高。

### 4.3 功率测定与发电性能演示实验

本小节实验中, 将双薄膜FF-TENG的上下游发电单元进行串联, 并对串联后的功率特性和发电性能进行测定。

实验在最大风速值10.6 m/s的条件下进行, 将不同阻值( $1\text{ M}\Omega$ ,  $5\text{ M}\Omega$ ,  $10\text{ M}\Omega$ ,  $50\text{ M}\Omega$ ,  $100\text{ M}\Omega$ ,  $500\text{ M}\Omega$ ,  $1\text{ G}\Omega$ ,  $5\text{ G}\Omega$ 和 $10\text{ G}\Omega$ )的电阻串联在外电路中, 分别测量电阻两端的电压和经过电阻的电流。图18(a)展示了电阻两端电压和流经电流在不同负载下的变化情况, 并根据测得的数值计算电阻的功率, 得出负载电阻的功率变化曲线。

可以看出, 电阻两端电压随阻值的增加显著增大,

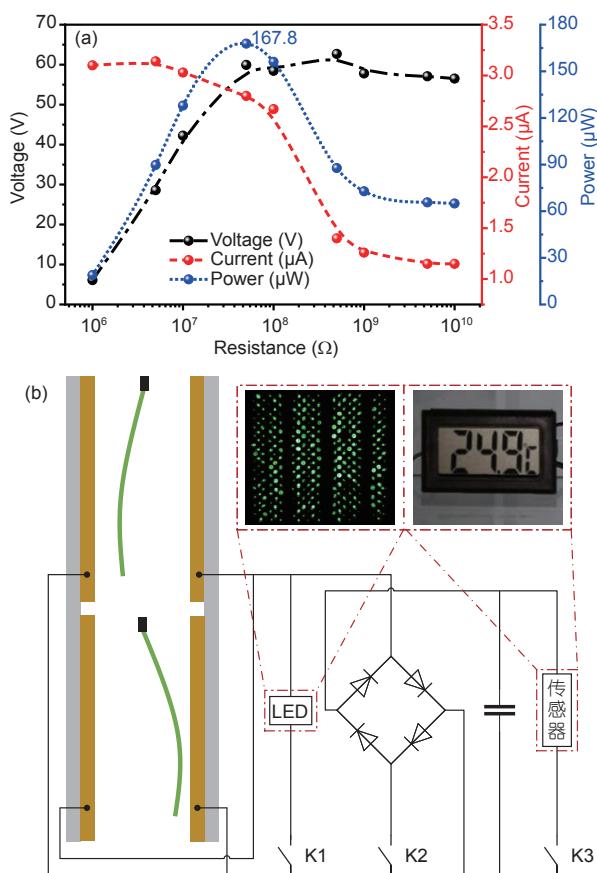


图 18 (网络版彩图) (a) 双薄膜FF-TENG功率曲线; (b) 温度传感器供电实验和点灯实验

**Figure 18** (Color online) (a) Power measurement of the FF-TENG with double tandem films; (b) the experiment of temperature sensor power-supply and LEDs lighting.

在阻值大于 $50\text{ M}\Omega$ 后, 电压稳定在 $58\text{ V}$ 左右; 电流则随着阻值的增加而减小, 最终稳定在 $1.3\text{ }\mu\text{A}$ 左右; 负载电阻的功率呈现出先增大后减小的趋势, 当负载电阻的阻值为 $50\text{ M}\Omega$ 时功率最大约为 $168\text{ }\mu\text{W}$ . 目前常用的无线传感器, 功率在微瓦至毫瓦量级, 因此该器件的输出功率足以供其正常工作.

为了验证该器件的实际供电能力, 本文在风速 $10.6\text{ m/s}$ 下进行验证实验. 如图18(b)所示, 首先是温度传感器进行供电实验, 该传感器的型号为NTC(10K/3453), 工作电压 $1.5\text{ V}$ , 最大工作电流 $4\text{ }\mu\text{A}$ . 闭合开关K2, 器件的输出电流被整流后为电容充电,  $30\text{ s}$ 后闭合开关K3, 利用电容中储存的电能为温度传感器供电, 可以使该传感器正常工作.

在点灯实验中, 断开开关K2, K3, 闭合开关K1, 实验器件可以同时点亮至少300颗LED灯, 该LED灯的标准工作电压为 $3.0\sim 3.4\text{ V}$ , 标准工作电流为 $20\text{ mA}$ . 虽然电压达到了LED灯的单向导通电压, 可视度已经相当良好, 但是其电流过小, 不足以支撑其达到最大亮度. 可见该串列式双薄膜FF-TENG的发电量已经比较可观. 但该发电装置还可以进一步优化, 提高其发电量, 因此在实际应用中可将其用于低功耗的路标, 指示灯和逃生通道指示牌等需要灯光指示和显示的场合. 因此, 该器件具备应用于实际场景的可行性.

## 5 讨论与结论

为了收集环境风能为低功耗自供能传感器等设备供电, 本文提出了一种薄膜拍打型摩擦纳米发电机(FF-TENG), 并以此为基础进一步改进, 提出了串列式双薄膜的FF-TENG, 实验结果表明可以实现良好的发电性能. 得到如下主要结论.

(1) 首先是总结分析了FF-TENG的发电原理, 并对3种不同材料薄膜的发电性能进行了初步的对比实验. 对于一定材质的发电模型, 其开路电压和转移电荷量与电极间距和电介质材料与电极的有效接触面积成正比; 对电荷转移过程进行了分析, 验证了其与薄膜拍打

过程的一致性; 通过静电场仿真模拟了FF-TENG静电场在电荷转移过程中的变化.

(2) 结合已有的薄膜拍打理论, 探讨了影响薄膜拍打特性的参数. 薄膜起拍的临界风速和拍打频率与薄膜长度呈负相关, 拍打频率与风速成正比; 在高风速下薄膜所受张力会抑制薄膜摆动的幅度. 这些都为后续实验现象的解释提供了理论依据.

(3) 在发电特性实验中, 首先是研究了单薄膜FF-TENG的发电性能. 发现其开路电压和转移电荷量随风速增加而增加, 且在风速达到 $4.7\text{ m/s}$ 之后, 二者不再有明显的变化; 短路电流则一直增加, 最终在风速 $10.6\text{ m/s}$ 时, 短路电流可达 $2\text{ }\mu\text{A}$ . 开路电压和转移电荷量与PTFE长度成正比, 短路电流则在PTFE薄膜长度达到 $80\text{ mm}$ 之后, 不再有明显变化, 这是因为薄膜的拍打频率在降低. 在PTFE薄膜长度为 $80\text{ mm}$ 时, 输出电信号密度达到最大值.

(4) 以单薄膜FF-TENG为基础, 研究了串列式双薄膜FF-TENG的发电性能. 实验发现下游薄膜的临界风速明显小于上游薄膜, 但是上下游薄膜的拍打频率是基本重合, 这与之前的理论分析是相一致的. 下游发电单元的输出电信号基本上始终大于上游发电单元, 但是在较高风速下, 由于薄膜拍打的不稳定, 导致输出电信号出现了不规则和降低. 此外, 与 $160\text{ mm}$ 长单薄膜FF-TENG相比, 串列式双薄膜FF-TENG发电性能更加优异, 其开路电压是前者的1.5倍左右, 是 $80\text{ mm}$ 长单薄膜FF-TENG的1.9倍.

(5) 对串列式 $80\text{ mm}$ 长双薄膜FF-TENG发电单元功率特性进行了实验分析, 其开路电压随外电路负载阻值的增加而增加, 短路电流则随外电路负载阻值的增加而减小, 输出功率在外电路负载阻值为 $50\text{ M}\Omega$ 时输出功率达到最大值为 $168\text{ }\mu\text{W}$ ; 此外该器件可以为商业温度传感器供电, 使其正常工作; 在点灯实验中, 可以同时点亮至少300颗LED灯. 因此在将来的实际应用中, 该模型既可以单独使用, 直接收集环境风能为低功耗传感器供电, 实现自供能传感; 也可以组成大规模的微电网网络, 获得更高的输出功率, 为用电单元供电.

## 参考文献

- 1 Akbari S. Energy harvesting for wireless sensor networks review. In: 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. Warsaw, 2014. 987–992

- 2 Langendoen K, Reijers N. Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison. *Comput Networks*, 2003, 43: 499–518
- 3 Stojcev M K, Kosanovic M R, Golubovic L R. Power management and energy harvesting techniques for wireless sensor nodes. In: 2009 9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services. Nis, 2009
- 4 Tiliute D E. Battery management in wireless sensor networks. *Elektronika Elektrotehnika*, 2007, 76: 9–12
- 5 Liu B Y, Chen W, Li B, et al. Micro-power energy harvester based on electromagnetic induction (in Chinese). *Proc CSEE*, 2020, 40: 1474–1485 [柳百毅, 陈为, 李榜, 等. 基于感应取能的微功率能量收集器. 中国电机工程学报, 2020, 40: 1474–1485]
- 6 Wang Z L. Toward self-powered sensor networks. *Nano Today*, 2010, 5: 512–514
- 7 Du X Z, Zhang L B, Yu H, et al. Research status of the self-powered sensor energy harvesting technology (in Chinese). *Micronanoelec Tech*, 2018, 55: 265–275, 83 [杜小振, 张龙波, 于红, 等. 自供能传感器能量采集技术的研究现状. 微纳电子技术, 2018, 55: 265–275, 83]
- 8 Shaikh F K, Zeadally S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 55: 1041–1054
- 9 Yan Z, He Q. Performance analysis on incentive environment of micro cantilever piezoelectric vibration generator (in Chinese). *Proc CSEE*, 2011, 31: 140–145 [闫震, 何青. 激励环境下悬臂梁式压电振动发电机性能分析. 中国电机工程学报, 2011, 31: 140–145]
- 10 Dai X Z, Zhang Z. Study on ambient energy sources for self-powering sensors (in Chinese). *Chin J Power Sources*, 2012, 36: 440–443 [代显智, 张章. 用于自供能传感器的环境能量源研究. 电源技术, 2012, 36: 440–443]
- 11 Akorede M F, Hizam H, Pouresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, 14: 724–734
- 12 Leland E S, Lai E M, Wright P K. A self-powered wireless sensor for indoor environmental monitoring. In: Proceedings of the Wireless Networking Symposium, University of Texas at Austin Department of Electrical & Computer Engineering, 2004
- 13 Sardini E, Serpelloni M. Self-powered wireless sensor for air temperature and velocity measurements with energy harvesting capability. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 1838–1844
- 14 Karami M A, Farmer J R, Inman D J. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine. *Renew Energy*, 2013, 50: 977–987
- 15 Bae J, Lee J, Kim S M, et al. Flutter-driven triboelectrification for harvesting wind energy. *Nat Commun*, 2014, 5: 4929
- 16 Wang P, Pan L, Wang J, et al. An ultra-low-friction triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for rotation energy harvesting and self-powered wind speed sensor. *ACS Nano*, 2018, 12: 9433–9440
- 17 Yang Y, Yang W L. Hybridized electromagnetic-trioboelectric nanogenerator (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1268–1275 [杨亚, 杨婉璐. 复合型电磁-摩擦纳米发电机. 科学通报, 2016, 61: 1268–1275]
- 18 Fan F R, Tian Z Q, Lin Wang Z. Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012, 1: 328–334
- 19 Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 2013, 7: 9533–9557
- 20 Zhao J, Zhen G, Liu G, et al. Remarkable merits of triboelectric nanogenerator than electromagnetic generator for harvesting small-amplitude mechanical energy. *Nano Energy*, 2019, 61: 111–118
- 21 Xu M, Wang P, Wang Y C, et al. A soft and robust spring based triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional vibration energy and self-powered vibration sensing. *Adv Energy Mater*, 2018, 8: 1702432
- 22 Xiao X, Zhang X, Wang S, et al. Honeycomb structure inspired triboelectric nanogenerator for highly effective vibration energy harvesting and self-powered engine condition monitoring. *Adv Energy Mater*, 2019, 9: 1902460
- 23 Xu M, Wang S, Zhang S L, et al. A highly-sensitive wave sensor based on liquid-solid interfacing triboelectric nanogenerator for smart marine equipment. *Nano Energy*, 2019, 57: 574–580
- 24 Xu M, Zhao T, Wang C, et al. High power density tower-like triboelectric nanogenerator for harvesting arbitrary directional water wave energy. *ACS Nano*, 2019, 13: 1932–1939
- 25 Zhang X, Yu M, Ma Z, et al. Self-powered distributed water level sensors based on liquid-solid triboelectric nanogenerators for ship draft detecting. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1900327
- 26 Zhao H, Xiao X, Xu P, et al. Dual-tube helmholtz resonator-based triboelectric nanogenerator for highly efficient harvesting of acoustic energy. *Adv Energy Mater*, 2019, 9: 1902824
- 27 Phan T K, Wang S, Wang Y, et al. A self-powered and low pressure loss gas flowmeter based on fluid-elastic flutter driven triboelectric nanogenerator. *Sensors*, 2020, 20: 729

- 28 Wang Y, Wang J, Xiao X, et al. Multi-functional wind barrier based on triboelectric nanogenerator for power generation, self-powered wind speed sensing and highly efficient windshield. *Nano Energy*, 2020, 73: 104736
- 29 Yu J B, Hou X J, Cui M, et al. Flexible PDMS-based triboelectric nanogenerator for instantaneous force sensing and human joint movement monitoring. *Sci China Mater*, 2019, 62: 1423–1432
- 30 Xu W, Zhou X, Hao C, et al. SLIPS-TENG: Robust triboelectric nanogenerator with optical and charge transparency using a slippery interface. *Natl Sci Rev*, 2019, 6: 540–550
- 31 Su Y, Xie G, Xie T, et al. Wind energy harvesting and self-powered flow rate sensor enabled by contact electrification. *J Phys D-Appl Phys*, 2016, 49: 215601
- 32 Park S J, Kim S, Seol M L, et al. A multi-directional wind based triboelectric generator with investigation of frequency effects. *Extreme Mech Lett*, 2018, 19: 46–53
- 33 Yang Y, Zhu G, Zhang H, et al. Triboelectric nanogenerator for harvesting wind energy and as self-powered wind vector sensor system. *ACS Nano*, 2013, 7: 9461–9468
- 34 Wang Y, Yang E, Chen T, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing. *Nano Energy*, 2020, 78: 105279
- 35 Zeng Q, Wu Y, Tang Q, et al. A high-efficient breeze energy harvester utilizing a full-packaged triboelectric nanogenerator based on flow-induced vibration. *Nano Energy*, 2020, 70: 104524
- 36 Wang Z L, Chen J, Lin L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy Environ Sci*, 2015, 8: 2250–2282
- 37 Davies D K. Charge generation on dielectric surfaces. *J Phys D-Appl Phys*, 1969, 2: 1533–1537
- 38 Wang Z L, Lin L, Chen J, et al. *Triboelectric Nanogenerators*. Cham: Springer, 2016
- 39 Zou H, Zhang Y, Guo L, et al. Quantifying the triboelectric series. *Nat Commun*, 2019, 10: 1427
- 40 Wang S, Niu S, Yang J, et al. Quantitative measurements of vibration amplitude using a contact-mode freestanding triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 2014, 8: 12004–12013
- 41 Niu S, Liu Y, Chen X, et al. Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators. *Nano Energy*, 2015, 12: 760–774
- 42 Argentina M, Mahadevan L. Fluid-flow-induced flutter of a flag. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 1829–1834
- 43 Moretti P. Tension in fluttering flags. In: *Tenth International Congress on Sound and Vibration*. Stockholm, 2003
- 44 Ristroph L, Zhang J. Anomalous hydrodynamic drafting of interacting flapping flags. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 194502
- 45 Zhu L. Interaction of two tandem deformable bodies in a viscous incompressible flow. *J Fluid Mech*, 2009, 635: 455–475

## Research on a film-flapping triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting

YANG En<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WANG JianYe<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>1</sup>, LIU ChangXin<sup>1</sup>, WU MengWei<sup>3</sup>, MI JianChun<sup>3</sup> & XU MinYi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

<sup>2</sup> Shanghai Branch, China Ship Scientific Research Center, Shanghai 200011, China;

<sup>3</sup> College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

The power supply for numerous wireless sensor network nodes is a bottleneck that restricts the development of Internet of Things. As a new energy harvesting method, Triboelectric Nanogenerator (TENG) has significant advantages in environmental energy harvesting, which provides technical ideas for addressing the power supply problem of wireless sensor nodes. Based on the principle of Triboelectric Nanogenerator and wind-induced flutter, this study proposes and systematically investigates a film-flapping Triboelectric Nanogenerator (FF-TENG) to realize wind energy harvesting with high efficiency. Herein, the electric field distribution in the film-flapping process is analyzed through simulation software, and the flapping state of the film is displayed using flow visualization. Furthermore, the influence of film materials, wind speed, film length, and film series connection on the output of the FF-TENG is studied. Increase in wind speed increased the film-flapping frequency and the FF-TENG's short-circuit current, whereas the open circuit voltage and transferred charges remained stable when the wind speed was higher than 4.7 m/s. Increase in the film length decreased the flapping frequency sharply, and the output performance per unit length first increased and then decreased. For the FF-TENG with double tandem films, under the excitation of the leader film, the trailer one obtained wider flapping amplitude, which increased the output voltage of the FF-TENG with two tandem short films by 45% comparing with the one with single long film. Experimentally, the FF-TENG with double tandem films powered a temperature sensor successfully, and at least 300 LED lights were lighted simultaneously, which showed that it is promising for application in the field of wireless sensor power supplements.

**triboelectric nanogenerator, wireless sensor network, environmental energy harvesting**

doi: 10.1360/SST-2020-0391