

旋转式风能摩擦纳米发电机的电势仿真及输出性能研究*

段肖力¹, 刘三伟¹, 黄福勇¹, 张道源¹, 段建家¹, 曾泽宇¹, 喻婷¹, 钟理鹏², 戴彬³

(1. 国网湖南省电力有限公司 电力科学研究院, 长沙 410036;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 3. 国网岳阳供电公司, 湖南 岳阳 414021)

摘要:提出了一种新型旋转式摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)结构。采用 COMSOL 仿真软件分析了旋转过程中的电势分布,同时研究了电极片数、薄膜宽度、独立层与电极间距对 TENG 输出性能的影响规律。随后利用 MATLAB Simulink 搭建 TENG 等效电路模型,分析连接外部电阻时,TENG 的输出性能随着负载电阻阻值的变化规律。最后,将本文设计的新式旋转式 TENG 与已有的部分风能捕获 TENG 进行输出功率方面的对比,探究它的优势及实用价值。研究发现:随着电极片数的增加,电极间电压峰值呈现下降趋势,频率随着片数的增加而增加,输出的短路电流增大;随着 PTFE 薄膜宽度的增加,电极间电压先上升后下降,当 PTFE 薄膜宽度与电极宽度一致时,电压达到峰值。当外接电阻阻值为 10 MΩ 时,TENG 的输出性能达到最大。

关键词:风能;摩擦纳米发电机;电势分布;COMSOL

中图分类号:TK89

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)06-0136-09

在经济和社会快速发展的背景下,为了配合建设资源节约型和环境友好型社会,基于化石能源的不可再生能源已难以满足社会生产的需求。因此,需要不断探索新型能源。风能作为一种新型可再生资源,具有绿色清洁、价格低廉等优势,通过充分开发风能而获得的能量将大大满足人们的生活需求。

2012年,王中林课题组首次发明了基于摩擦起电和静电感应耦合工作原理的摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)^[1],可用于收集环境中的机械能。此后许多学者将 TENG 应用到环境中的风能收集^[2-7]。目前用于收集风能的 TENG 结构主要有颤振式和旋转式两种。在颤振式结构方面,Wang 等人^[8]提出了一种以突出空气弹性颤振现象的弹性空气动力学驱动的 TENG,通过简单的人体呼吸所诱导的空气流动能量来驱动温度计,但这种 TENG 两端被固定且被限制在特定的空间中,因而无法从任何方向获取风能。Zhao 等人^[9]提出了轻质、独立的旗帜型编织 TENG,它可以收集任意方向的风能,尤其是在高空作业时它拥有比传统的风力机更多的优势。潮湿的环境和多变的风向会限制风能 TENG 的输出性能。Wang 等人^[10]提出了一种抗湿和风向适应旗帜型 TENG,它由 2 个 PET 膜和 1 条 PTFE 膜及它的边缘所连接的双胶带收集风能,在高湿度条件下表现出稳定的输出性能。总体上看,颤振式 TENG 是通过内部电负性薄膜材料在风力作用下发生振动并与内部电极发生接触分离来产生电能,因此输出信号具有较大的随机性。旋转式 TENG 则通过借助动力装置持续地推动电负性材料发生相对位移在电极之间发生电荷的迁移来产生电能,因而具有较高的稳定性和可持续性。Chen 等人^[11]设计了一种由风力驱动的旋转轮盘式 TENG,用于自驱动净化空气污染。它应用了 PCB 技术使摩擦电气化单元被小型化,输出电流明显增加;但若得到更高的输出,则需要占用较大的空间,因此应用场景有限。Ren 等人^[12]制作了一种同轴旋转式风能捕获 TENG,其中静电纺丝的 PVDF 纳米纤维膜作为摩擦电材料可以有效增大该器件的电能输出,用于自驱动的电解水系统,结果表现优异。然而,对环境的适应性和耐磨性仍然严重限制了 TENG 的使用价值。为有效避免摩擦材料的磨损,肇涛闯等人^[13]设计了一种模拟时钟指针转动的非接触式单电极 TENG,可实现无磨损运行,有效提高了 TENG 的使用寿命,具有良好的耐久性。然而,周围环境的扰动容易影响发电装置,进而降低了 TENG 输出性能。

为了提高输出信号的稳定性和可持续性以及减少周围环境的扰动对发电装置的影响,本文设计了一种新型

* 收稿日期:2022-10-12 修回日期:2023-09-15 网络出版时间:2023-10-07T16:02

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 52107147)

第一作者简介:段肖力,男,高级工程师,博士,研究方向为电力系统,E-mail: 272139237@qq.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20231006.1609.006

用于收集风能的旋转式 TENG 结构,它将发电装置封装在封闭的空间内,在同等外力条件作用下能获得更优的输出性能。本文还利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件与 MATLAB Simulink 对所设计的 TENG 结构进行了电性能输出的仿真探究,研究栅状电极分割数量、摩擦层宽度、摩擦层与电极间的垂直距离、负载电阻等参数对 TENG 输出性能的影响。通过对这些参数的比较分析,对所设计的 TENG 的机理进行了探究;并且对比了几组相同运动模式下,风能捕获 TENG 的功率密度大小,证明该结构具有更好的电学性能输出和更普遍的应用价值。

1 新型旋转式 TENG 的结构

本文设计的新型旋转式 TENG 结构由风杯、轴向旋转式 TENG 和圆盘旋转式 TENG 3 部分组成,如图 1 所示。轴向旋转式 TENG 和圆盘旋转式 TENG 通过一根细杆与风杯连在一起。轴向旋转式 TENG 由外壳内部贴有 PTFE 薄膜的转子和内核表面附有交叉电极的定子组成,内外壳体均选用亚克力材质构成(内半径为 3.98 cm,高度为 10 cm),将 Cu 薄膜分割成大小形状相同的条形形状等距离地贴在亚克力内壳上,利用导线交替着将 Cu 薄膜与总线相连形成交叉电极,Cu 薄膜具有摩擦材料和交叉电极的双重作用。圆盘旋转式 TENG 由半径为 5 cm 的上下两个圆盘组成,上圆盘是带有 PTFE 薄膜的转子,下圆盘是附有交叉电极的定子组成。所用材料与轴向旋转式 TENG 相同,用法也一样。该器件的工作原理是基于摩擦起电效应以及 Cu 薄膜与 PTFE 薄膜之间相对旋转运动引起周期性的电荷分离。

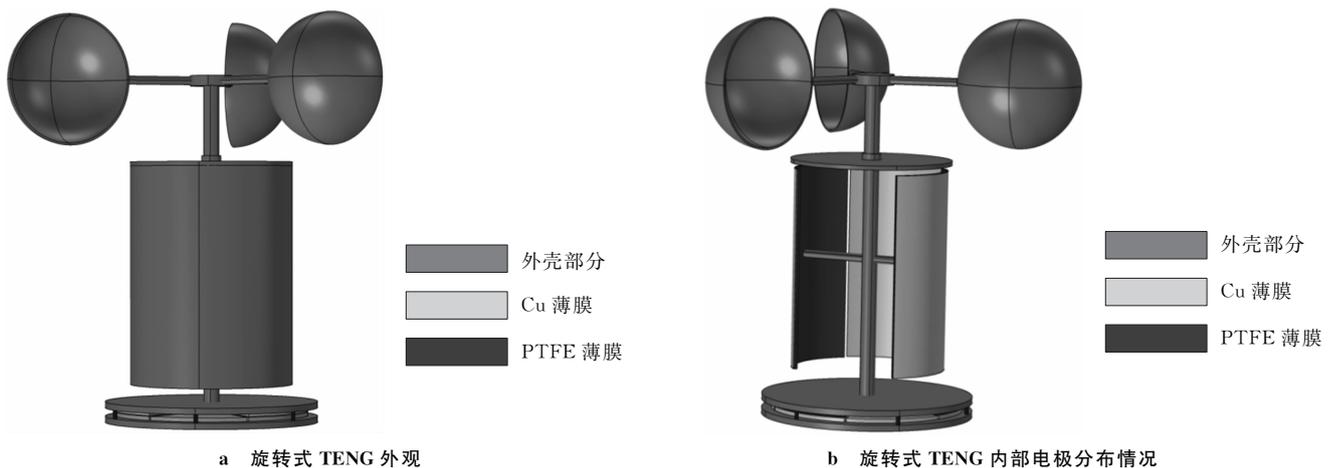


图 1 旋转式 TENG 结构

Fig. 1 Rotating TENG structure view

2 新型旋转式 TENG 的工作原理

本文所设计的 TENG 结构中的 Cu 薄膜既充当交叉电极又充当摩擦材料,且 Cu 薄膜个数是 PTFE 薄膜个数的 2 倍,符合独立层式摩擦纳米发电机结构,因此工作原理可以用传统的独立层式 TENG 的工作原理来描述,如图 2 所示。(I)为初始条件下,PTFE 薄膜与 Cu 电极 1 完全重合,PTFE 薄膜和 Cu 电极 1 的表面会产生极性相反的正负感应电荷,此时所有回路中的正电荷都被吸引到第 1 个电极的表面;在有风的情况下,风杯会带动上下 2 个部分的转子同时转动,(II)为当 PTFE 薄膜向右边电极滑动时,回路中的正电荷通过负载从 Cu 电极 1 向 Cu 电极 2 流动。(III)为当 PTFE 与 Cu 电极 2 重合时,所有的正电荷都流入 Cu 电极 2 中。(IV)为风杯继续转动时,带动下一片 PTFE 薄膜与当前交叉电极摩擦,在外电路上不断有感应电荷发生转移。PTFE 薄膜在相邻的电极间循环滑动,这样外接负载电路上就会有交流电通过。

基于旋转式 TENG 发电原理,可以根据独立层模式的 TENG 理论模型进行阐述,如图 3 所示。图中金属电极带正电,摩擦材料带负电, w 为摩擦材料和电极的宽度, g 为 2 个金属叉指电极之间的距离。假设金属电极的宽度是 l ,并与摩擦材料等宽。由于电介质底面的电势并不是一个常数,所以这个界面不能被看作 1 个节点,可根据电势叠加原理来解决问题^[14]。将 l 分为无数单元 dk ,每个单元的电荷量为:

$$dQ_1 = \frac{\sigma w dk}{1 + \frac{C_2(k)}{C_1(k)}}, dQ_2 = \frac{\sigma w dk}{1 + \frac{C_1(k)}{C_2(k)}}$$

其中: σ 为单元 dk 的电荷密度, $C_1(k)$ 和 $C_2(k)$ 分别是 2 个相邻金属电极和摩擦材料单元之间的电容。假设金属电极与摩擦材料被分割为若干个长度单元 dk , 则根据静电场叠加原理, 两金属材料之间的电荷总量可表示为:

$$Q_1 = \sigma w \int_0^l \frac{dk}{1 + \frac{C_2(k)}{C_1(k)}}, Q_2 = \sigma w \int_0^l \frac{dk}{1 + \frac{C_1(k)}{C_2(k)}}$$

当摩擦材料与金属电极交错接触的过程中, 电极间的电荷重复往返转移, 其中最大的转移电荷总量 $Q_{SC, final}$ 可以表示为:

$$Q_{SC, final} = \int_0^l \frac{\sigma w dk}{1 + \left(\frac{C_2(k)}{C_1(k)}\right)_{S_w=g+l}} - \int_0^l \frac{\sigma w dk}{1 + \left(\frac{C_2(k)}{C_1(k)}\right)_{S_w=0}}$$

其中: S_w 为摩擦材料的位移量。

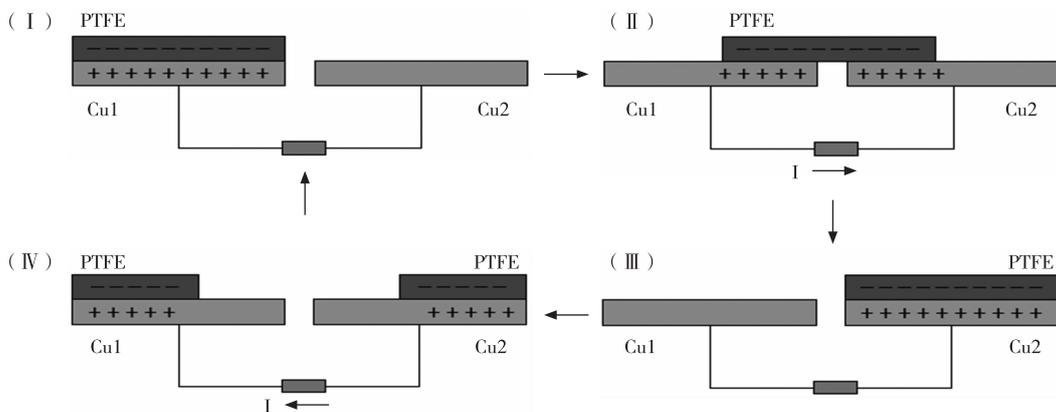


图 2 旋转式 TENG 工作原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of rotary TENG

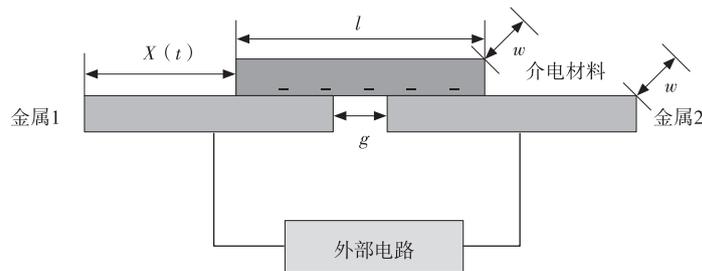


图 3 旋转式 TENG 理论模型

Fig. 3 Theoretical model of rotating TENG

3 新型旋转式 TENG 电场仿真分析

为了能直观清晰的观察到新型旋转式 TENG 的电位分布与影响因素, 采用 COMSOL 软件搭建该结构的三维静电场模型。对图 1 进行了简化, 只选取了用于发电的部分。根据转子不同的位置, 对电位分布进行仿真, 模拟转子在运动过程中的动态电位分布。由于本文中的轴向旋转式 TENG 和圆盘旋转式 TENG 的工作原理相同, 这里只选有 4 片交叉电极的轴向旋转式 TENG 的仿真过程作为演示。

图 4 所示为三维轴向旋转式 TENG 模型, 设置 PTFE 薄膜厚度为 0.2 mm, 表面电荷密度为 $-7 \mu C \cdot m^{-2}$, 铜薄膜厚度为 0.2 mm, 表面电荷密度为 $3.5 \mu C \cdot m^{-2}$ 。PTFE 薄膜与 Cu 薄膜都均匀附着在风杯的内外核壳上, 固定栅状电极间隔为 2 mm, 无限远处电势为 0。

求解需要生成网格, 即区域离散化。求解区域被划分为有限数量的正四面体单元, COMSOL 软件在网格功

能区设置了 9 个网格划分等级,划分网格的细化程度,用户可根据模拟仿真计算的需求来确定网格的细化程度。为了提高仿真精度,本文模拟仿真时使用了网格极细化,效果如图 5 所示。

仿真所用物理场为静电场,以稳态求解器进行求解,通过参数化扫描控制转子运动过程。本文中仿真实验遵循电荷守恒定律,边界条件为: $\vec{E} = -\nabla V, \nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}) = \rho_v$,其中: $\epsilon_0, \epsilon_r, \rho_v$ 分别为空气的相对介电常数、材料的相对介电常数和极化电荷密度。显式假设方程为 $n \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s$,其中: \vec{D}_1, \vec{D}_2 为电位移矢量, ρ_s 为表面电荷密度。

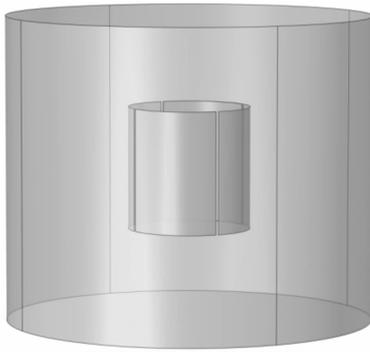


图 4 三维轴向旋转式 TENG 模型

Fig. 4 Three dimensional axial rotating TENG model



图 5 TENG 模型网格划分图

Fig. 5 Mesh division diagram of TENG model

4 COMSOL 数值结果与分析

对于所有的 TENG,影响输出性能的参数可能有很多,例如接触面积、表面电荷密度等等。每一项参数对于 TENG 的输出性能的影响大小各不相同,有的可能与 TENG 的功率输出成正相关,有的是负相关,有的则可能有 1 个最优值。本节将通过 TENG 不同参数下 COMSOL 的仿真结果为研究对象,研究栅状电极分割数量、摩擦层宽度、摩擦层与电极间的垂直距离和负载电阻等参数对 TENG 输出性能的影响。

4.1 栅状电极片数对 TENG 电位分布与电压的影响

4.1.1 轴向旋转式 TENG 的电位分布

仿真结果如图 6 所示,发现 TENG 的开路电压的大小与栅状电极分割的片数有关系,即与相邻电极间分离速率有关。随着栅状电极分割片数的增加,电极电压呈下降的趋势,原因是由于更细分割的距离缩小导致电极极化程度降低。还可以通过对比发现电极电压的频率在逐渐增加,原因是更细的分割电极导致每个单元的长度和运行时间都会变小,摩擦电荷可以传输得更快,相同时间内电荷在外部负载间的转移次数增加了。

4.1.2 圆盘旋转式 TENG 的电位分布与电压

采用 3D 建模方式,且电极材料与摩擦材料的形状大小、表面电荷密度都与轴向旋转式 TENG 的设置参数相同,固定扇形电极间隔为 1 mm,无限远处电势为 0。分别将圆盘上的电极分割成 1 对(2 片电极)、2 对(4 片电极)、3 对(6 片电极)、4 对(8 片电极)和 5 对(10 片电极)进行仿真比较,仿真结果如图 7 所示,发现随着电极片数的增加,开路电压值在逐渐下降,电压频率在逐渐增加,原因与轴向旋转式 TENG 的开路电压值下降、频率增加的原因相同。

4.2 PTFE 薄膜的大小对 TENG 电压的影响

为分析 PTFE 薄膜的大小对旋转式 TENG 电压大小的影响,控制 TENG 的转速不变,改变 PTFE 薄膜表面电荷密度,使之与 Cu 电极的表面电荷密度依然保持原对应的关系,即使得 PTFE 薄膜表面电荷密度与宽度成反比,其余的条件不变^[13]。又由于上下 2 个部分 TENG 的工作模式与工作原理相同,为了方便仿真计算,因此采用有 4 片交叉电极的轴向旋转式 TENG 为原模型即可。由于有 4 片交叉电极 TENG 的单个电极所对的圆心角度数为 90,根据弧长公式 $L = \frac{n \times \pi \times r}{180}$ 可知,单个电极的宽度约为 6.28 cm,式中: n 为圆心角度数, r 为圆半径。

因此令电极宽度 d 从 4.28 cm 开始增加到 9.28 cm,观察电压的变化情况。

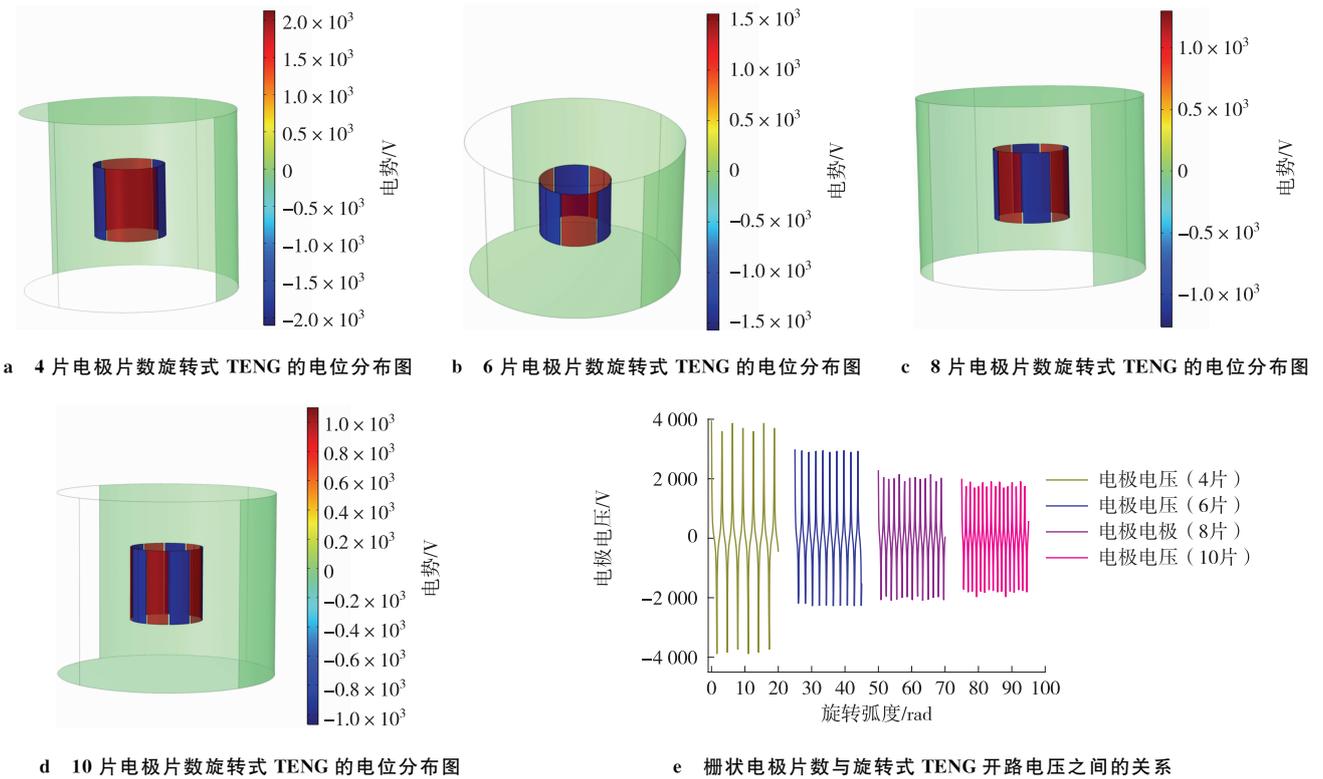


图 6 栅状电极片数对旋转式 TENG 开路电压的影响

Fig. 6 The effect of the number of grid electrodes on the open circuit voltage of rotating TENG

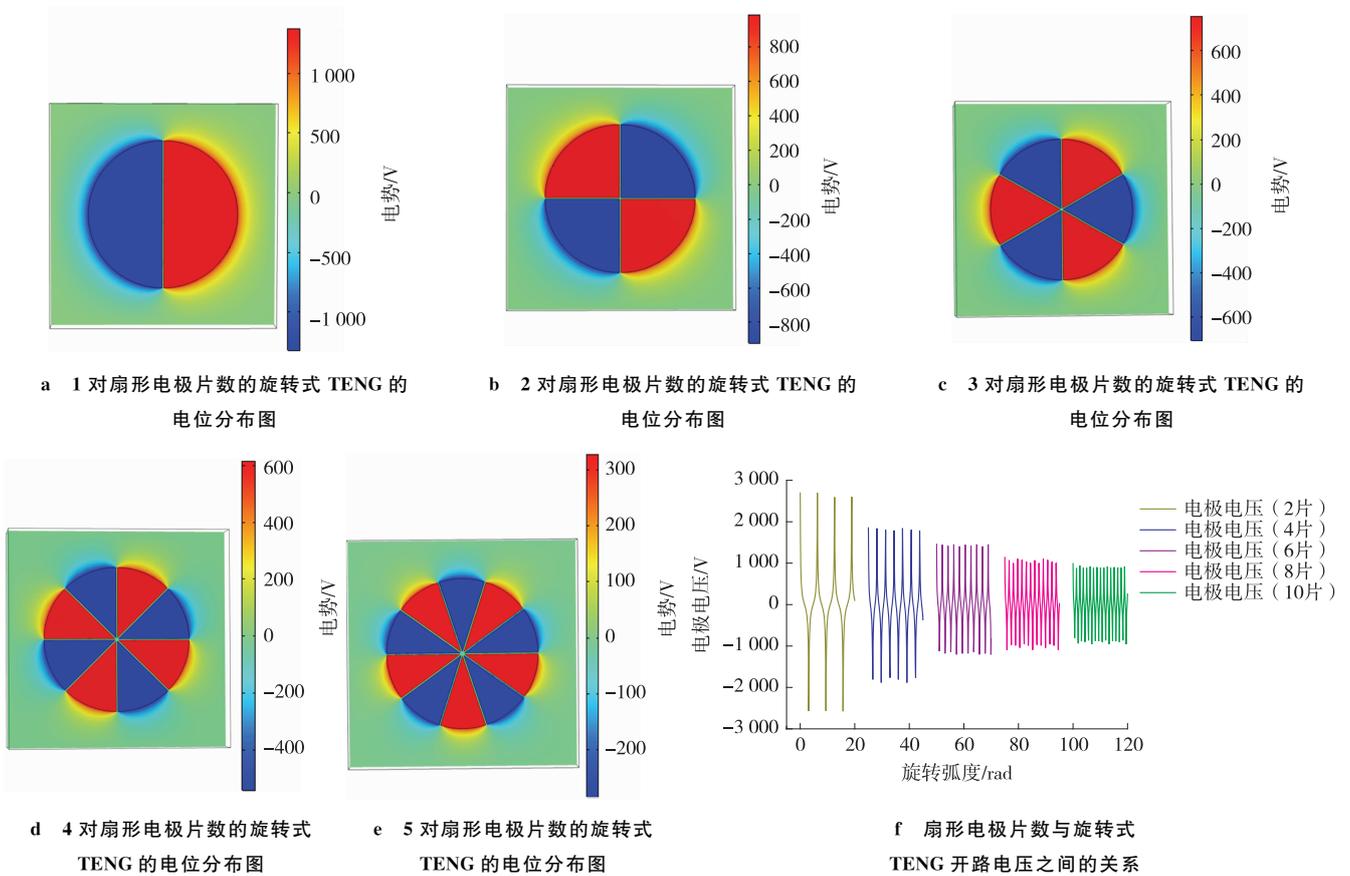


图 7 扇形电极片数对旋转式 TENG 开路电压的影响

Fig. 7 The influence of the number of sector electrodes on the open circuit voltage of rotating TENG

对比测试了不同的 PTFE 薄膜宽度下 TENG 的电压高低,仿真结果如图 8 所示,根据仿真结果可以看出随着 PTFE 薄膜宽度 d 的增加,电极电压呈先上升后下降的状态,峰值出现在 PTFE 薄膜宽度为 6.28 cm 左右。出现这种现象的原因是当 PTFE 薄膜的宽度较小时,它与电极间的接触面积减少,它对电极的影响较小,此时感应电压也较小;随着 PTFE 薄膜宽度的增加,它与电极间的接触面积增大,对电极的影响也在增加,产生的感应电压也在增加,当 PTFE 薄膜大小与电极大小相同时,2 片电极之间的电势差达到最大;当 PTFE 薄膜的宽度继续增加到能触及到 2 片电极时,2 片电极会表现出对称性,会产生极性相同的感应电荷,降低相邻的电极电压。因此可以推断出 PTFE 薄膜宽度过小或过长都会影响 TENG 的输出性能,它的最佳大小应与电极大小相同。

4.3 电极与独立层之间垂直距离对电压的影响

相邻电极间电压的变化是由于独立层旋转时静电感应产生的,因此可以推断改变独立层与电极的间距 h 对电压也是有影响的。同样采用三维模型进行仿真模拟,改变独立层的半径,使之与 Cu 电极的径向间距由小到大做对比,其他参数与前面第 2 节设置相同。仿真结果如图 9 所示,图中给出了独立层与电极间距 h 和电极电压的关系,可见电极电压随间距的增大而减小,这是由于独立层远离电极,对电极的影响减弱,两个电极的电势分布趋于对称,表现为电压下降。

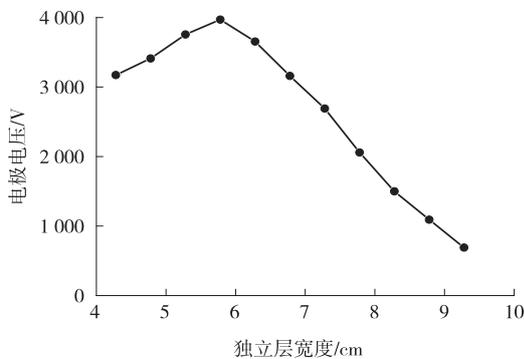


图 8 独立层宽度与电极电压的关系

Fig. 8 Relationship between the width of independent layer and electrode voltage

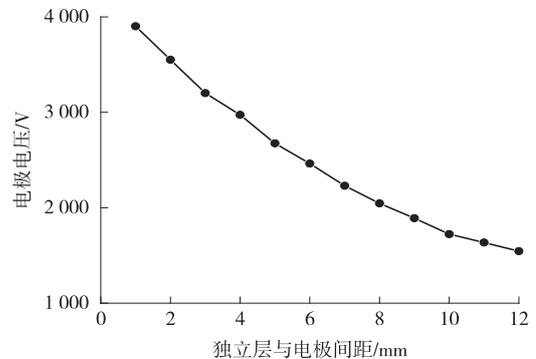


图 9 独立层与电极间距对电极电压的影响

Fig. 9 Effect of the distance between the independent layer and the electrode on the electrode voltage

根据公式可知,当 h 增加时, $(C_2(k)/C_1(k))_{x=0}$ 和 $(C_2(k)/C_1(k))_{x=g+l}$ 的区别减小。当 $h=0$ 时,在 $x=0$ 位置, $(C_2(k)/C_1(k))$ 等于 0;在在 $x=g+l$ 的位置等于无穷大时,所以 $Q_{SC,final}$ 可以达到 $\sigma\omega l$ 。当 h 足够大时,摩擦电荷表面和 2 个电极之间的平均距离将大致相同。因此 $(C_2(k)/C_1(k))_{x=0}$ 和 $(C_2(k)/C_1(k))_{x=g+l}$ 约等于 1,使 $Q_{SC,final}$ 为 0。又由于此种 TENG 的电容主要为金属 1 和金属 2 之间的电容,所以当 h 增加时电容仅有些许下降,几乎与 h 无关。因此,电压表现出的特性与 Q_{SC} 几乎相同,都呈现出下降的趋势。由此可见,TENG 对一定间距范围内有着良好的容忍度,对于能量收集应用来说,虽然相较于接触模式,非接触状态下的输出会有所下降,但在非接触模式下,最小化两表面间的摩擦阻力会使得消耗的机械能大大减小,从而很大程度上提高了能量的转化效率。

5 负载电阻对 TENG 输出性能的影响

通过第 3 节的研究,可以清楚地知道 TENG 的发电性能会受到交叉电极个数、独立层与电极宽度的相对大小以及电极与独立层垂直间距等结构因素的影响;又由于 TENG 本身是电容性的,具有非常高的内部阻抗,因此负载电阻对输出性能也有较大的影响。有必要分析外接阻性负载是如何影响 TENG 的输出性能,在本节中使用 MATLAB Simulink 搭建 TENG 外接阻性负载的等效电路模型,以便仿真探究。

TENG 可视为由电压源-电容串联的等效电路模型,2 个电极之间的固有电容可以由电容 (C) 来表示,理想电压源 (V_{oc}) 用来表征摩擦纳米发电机的开路电压。当 TENG 连接一个电阻性负载 R 时,整个系统的等效电路如图 10 所示,整个系统的控制方程为^[15]: $R \frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{C}Q + V_{oc}$ 。

由于轴向旋转式 TENG 和圆盘旋转式 TENG 的工作原理与工作模式相同,为方便计算,以有 4 片交叉电极

的轴向旋转式 TENG 为原模型,使用 MATLAB Simulink 搭建开路电压和等效电容的仿真电路图进行模拟分析,研究不同负载阻值下 TENG 的输出性能。电路中包含交流电压源(即开路电压)、恒定电容(即等效电容,用 COMSOL 仿真获得,在旋转过程中等效电容值基本稳定,可以将它看成是常数)、负载电阻 R 等。改变负载阻值,使用串联电流表和并联电压表来测量电路中电流和电压的大小,可以得到任意负载情况下的 TENG 输出功率情况。

随着电阻阻值的增加,电压、电流及功率输出的变化情况如图 11、图 12 所示,当电阻阻值小的时候,电压接近 0,峰值电流接近短路电流,这是因为 TENG 的高内阻属性,外接电阻的分压小(TENG 的第 1 个工作区域);随着阻值的增加,电阻限制两个电极间的电荷转移速率的效果越来越明显,电流值开始减小,而电压开始增大(TENG 的第 2 个工作区域);当负载电阻足够大时,电荷转移的速率会相当慢,电流变得接近 0,此时电阻的阻抗远比 TENG 的固有电容阻抗大,几乎所有的电压都分布在负载电阻上(TENG 的第 3 个工作区间)^[16]。由此可以得出当外界电阻的阻值为 $10^7 \Omega$ 左右时,TENG 的输出功率达到最大。因此,在实际应用中,可以通过外接与 TENG 匹配的最佳负载电阻,使得负载上输出功率最大。

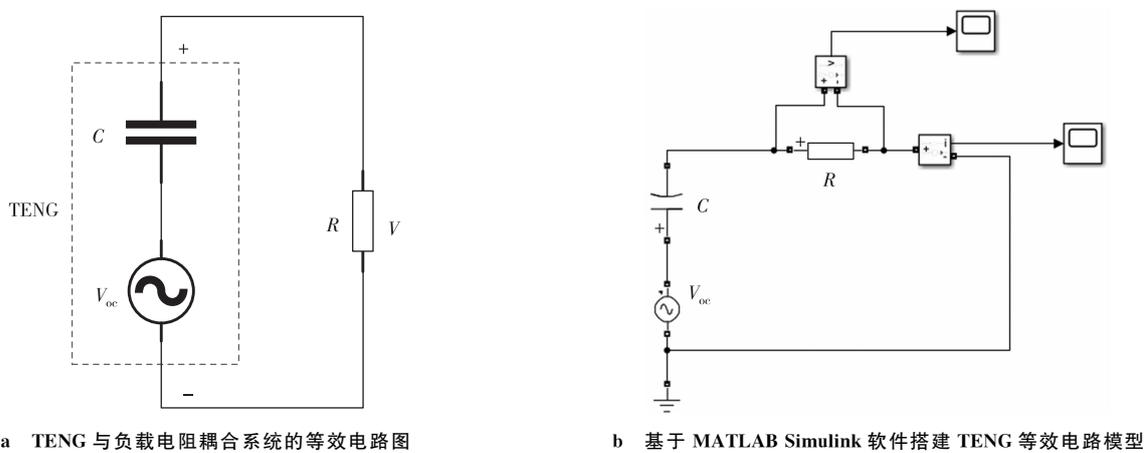


图 10 TENG 等效电路图

Fig. 10 TENG equivalent circuit diagram

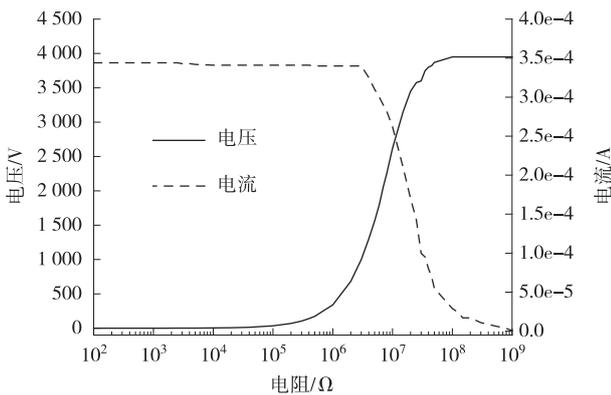


图 11 阻性负载对瞬时最大输出电压、电流的影响 (以 4 片电极旋转式 TENG 为例)

Fig. 11 Influence of resistive load on instantaneous maximum output voltage and current

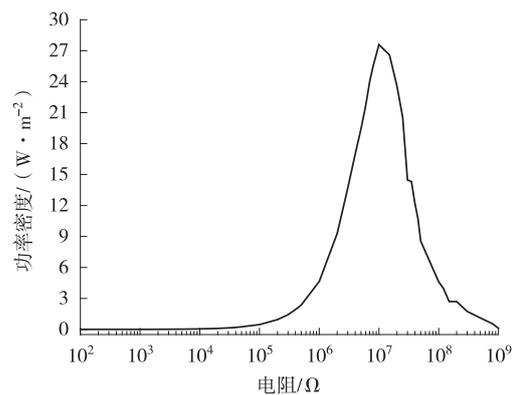


图 12 发电机的功率输出随外接电阻的变化 (以 4 片电极旋转式 TENG 为例)

Fig. 12 Variation of generator power output with external resistance

6 风能收集 TENG 研究成果对比

表 1 总结了常见 TENG 装置在俘获风能中的研究成果。相同运动模式下,在 40%~48% 的环境湿度、20~30 °C 的环境温度、标准大气压强和约为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速条件下,将本文所设计的新型 TENG 与其他几种旋转

式 TENG 进行对比,可以发现若在有效发电面积相同的情况下,本文的新型 TENG 会有较高的功率输出和实际使用价值。

表 1 风能捕获 TENG 研究对比

Tab. 1 Comparison of wind energy capture TENG studies

文献来源	材料	功率密度	文献来源	材料	功率密度
参考文献[1]	PTFE+AL	$39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	参考文献[4]	FEP+Cu Magnet+coil	$1.8 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$
参考文献[2]	FEP+AL	$0.82 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$	本文	PTFE+Cu	$0.13 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$
参考文献[3]	PTFE+Cu Magnet+coil	$2.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$			

7 结论

本文利用 COMSOL 软件对旋转式 TENG 进行仿真分析,研究发现:旋转式 TENG 可以应用于收集环境中的风能,它的输出性能会受到电极片数、PTFE 薄膜与电极的相对宽度、径向间距和外接电阻阻值的影响。结果表明:1) 电极片数的增加,会使电极间电压下降,输出电流增大;2) PTFE 薄膜宽度的增加,会使电极间电压呈现先上升后下降的趋势,当 PTFE 薄膜宽度与电极宽度一致时,电压达到峰值;3) 电极与独立层之间垂直距离逐渐增加时,电极电压逐渐下降;4) 当外接负载阻值逐渐增加会使 TENG 的输出性能先增加后下降,在制备 TENG 时,可以通过改变负载阻值的大小,获得最佳的输出性能。

参考文献:

- [1] WANG Z L, WANG S H, PAN C F, et al. Progress in nanogenerators for portable electronics[J]. *Materials Today*, 2012, 15(12):532-543.
- [2] XIE Y N, WANG S H, LIN L, et al. Rotary triboelectric nanogenerator based on a hybridized mechanism for harvesting wind energy[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(8):7119-7125.
- [3] LIN H B, HE M H, JING Q S, et al. Angle-shaped triboelectric nanogenerator for harvesting environmental wind energy[J]. *Nano Energy*, 2019, 56:269-276.
- [4] 卢品静. 摆动型摩擦-电磁复合纳米发电机的风能收集研究[D]. 南宁:广西大学, 2021.
LU P J. Swing-structured triboelectric-electromagnetic hybridized nanogenerator for breeze wind energy harvesting [D]. Nanning:Guangxi University, 2021.
- [5] FANG Y, TANG T Y, LI Y F, et al. A high-performance triboelectric-electromagnetic hybrid wind energy harvester based on rotational tapered rollers aiming at outdoor IoT applications[J]. *iScience*, 2021, 24(4):102300.
- [6] WANG Q, ZOU H X, ZHAO L C, et al. A synergetic hybrid mechanism of piezoelectric and triboelectric for galloping wind energy harvesting[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(4):043902.
- [7] HE L X, ZHANG C G, ZHANG B F, et al. A Dual-Mode triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and Self-Powered wind speed monitoring[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(4):6244-6254.
- [8] WANG S H, MU X J, WANG X, et al. Elasto-Aerodynamics-Driven triboelectric nanogenerator for scavenging Air-Flow energy [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(10):9554-9563.
- [9] ZHAO Z F, PU X, DU C H, et al. Freestanding flag-type triboelectric nanogenerator for harvesting high-altitude wind energy from arbitrary directions[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(2):1780-1787.
- [10] WANG Y, YANG E, CHEN T Y, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing[J]. *Nano Energy*, 2020, 78:105279.
- [11] CHEN S W, GAO C Z, TANG W, et al. Self-powered cleaning of air pollution by wind driven triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2015, 14:217-225.
- [12] REN X, FAN H, WANG C, et al. Wind energy harvester based on coaxial rotatory freestanding triboelectric nanogenerators for self-powered water splitting[J]. *Nano Energy*, 2018, 50:562-570.
- [13] 肇涛闯. 单电极摩擦纳米发电机用于自驱动风速及磁场监测[D]. 太原:太原理工大学, 2021.

- ZHAO T C. Single electrode triboelectric nanogenerator for self-powered wind speed and magnetic field monitoring [J]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [14] 周晖, 王优强, 王秀通, 等. 基于 COMSOL 环形独立层式摩擦发电机的仿真探究 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(26): 31-33.
ZHOU H, WANG Y Q, WANG X T, et al. Simulation exploration of a COMSOL ring independent layer friction generator [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(26): 31-33.
- [15] NIU S M, ZHOU Y S, WANG S H, et al. Simulation method for optimizing the performance of an integrated triboelectric nanogenerator energy harvesting system [J]. Nano Energy, 2014, 8: 150-156.
- [16] NIU S M, WANG S H, LIN L, et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source [J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(12): 3576-3583.

Research on Potential Simulation and Output Performance of Rotating Wind Energy TENG

DUAN Xiaoli¹, LIU Sanwei¹, HUANG Fuyong¹, ZHANG Daoyuan¹, DUAN Jianjia¹,
ZENG Zeyu¹, YU Ting¹, ZHONG Lipeng², DAI Bin³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd, Changsha 410036;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

3. State Grid Yueyang Power Supply Company, Yueyang Hunan 414021, China)

Abstract: With the increasing shortage of traditional fossil energy and the continuous deterioration of the global ecological environment, it is urgent to develop new green renewable energy and new energy collection technologies. A novel rotary triboelectric nanogenerator structure is proposed, and the potential distribution during the rotation process is analyzed by using COMSOL simulation software. Then the MATLAB Simulink is applied to build the equivalent circuit model of the TENG, and analyze the variation law of the output performance of the TENG with the resistance value of the load resistor when the external resistor is connected. Finally, the output power of the new rotary TENG is compared with the existing partial wind energy capture TENG to explore its advantages and practical value. The study found that: with the increase of the number of electrode sheets, the peak value of the voltage between the electrodes showed a downward trend, the frequency increased with the increase of the number of sheets, and the output short-circuit current increased; with the increase of the width of the PTFE film, the voltage between the electrodes increased first and then decreases, and the voltage peaks when the width of the PTFE film coincides with the width of the electrode. When the external resistance value is 10 M Ω , the output performance of TENG reaches the maximum.

Keywords: wind energy; triboelectric nanogenerators; potential distribution; COMSOL

(责任编辑 黄 颖)