



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 106602684 A

(43) 申请公布日 2017.04.26

(21) 申请号 201610115163.3

(22) 申请日 2016.03.01

(71) 申请人 北京纳米能源与系统研究所

地址 100083 北京市海淀区学院路 30 号天  
工大厦 C 座

(72) 发明人 訾云龙 王杰 王思泓 王中林

(74) 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限  
公司 11283

代理人 金旭鹏 肖冰滨

(51) Int. Cl.

H02J 7/32(2006.01)

H02N 1/04(2006.01)

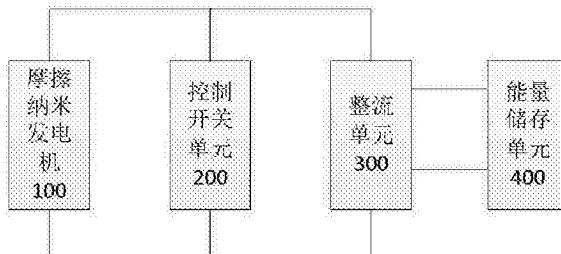
权利要求书2页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

摩擦纳米发电机的能量储存方法和能量储存  
系统

(57) 摘要

本发明提供一种摩擦纳米发电机的能量储存方法和储存系统，该储存方法中，摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中，相对位移为第一位移和第二位移时，控制开关单元将摩擦纳米发电机的输出端短路，不对能量储存单元进行充电；在其他相对位移时，摩擦纳米发电机通过整流单元为能量储存单元充电。本发明设计的能量储存方法可以提高充电速率，增大最大能量存储效率达两倍，并提升饱和电压至少两倍，可以有效的利用环境中的能量实现自驱动系统。该方法可以适用于包括各种模式/结构、使用各种材料的任何一种基本型摩擦纳米发电机，利用环境机械能实现对可携带、可穿戴、可植入式电子器件的驱动。



1. 一种摩擦纳米发电机的能量储存方法,其特征在于,摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中,相对位移为第一位移和第二位移时,控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路;在其他相对位移时,所述摩擦纳米发电机通过所述整流单元为所述能量储存单元充电。

2. 根据权利要求1所述的能量储存方法,其特征在于,所述摩擦纳米发电机的输出端并联控制开关单元,摩擦纳米发电机的输出端通过整流单元与能量储存单元连接。

3. 根据权利要求1所述的能量储存方法,其特征在于,控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路,具体为:通过电路触发、手动触发、机械触发将所述摩擦纳米发电机的输出端短路。

4. 根据权利要求1所述的能量储存方法,其特征在于,所述控制开关单元为由摩擦纳米发电机的两个相对运动部件的相对移动触发的开关。

5. 根据权利要求1所述的能量储存方法,其特征在于,所述控制开关单元为并联在摩擦纳米发电机输出端的开关元件。

6. 根据权利要求1-5任一项中所述的能量储存方法,其特征在于,摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中,所述第一位移为0;和/或,所述第二位移为最大位移。

7. 根据权利要求1-6任一项中所述的能量储存方法,其特征在于,所述第一位移和第二位移的位置是确定不变的。

8. 根据权利要求1-7任一项中所述的能量储存方法,其特征在于,所述摩擦纳米发电机的结构为垂直接触分离模式(CS)、平行滑动模式(LS)、单电极接触结构(SEC)、滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)或接触式摩擦层自由移动结构(CFT)。

9. 一种摩擦纳米发电机的能量储存系统,其特征在于,包括摩擦纳米发电机、控制开关单元、整流单元和能量储存单元,其中,所述控制开关单元和整流单元并联在所述摩擦纳米发电机的输出端,所述整流单元连接所述能量储存单元。

10. 根据权利要求9所述的能量储存系统,其特征在于,所述摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中,相对位移为第一位移和第二位移时,控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路;在其他相对位移时,所述摩擦纳米发电机通过所述整流单元为所述能量储存单元充电。

11. 根据权利要求10所述的能量储存系统,其特征在于,所述控制开关单元采用电路触发、手动触发、机械触发方式实现通断。

12. 根据权利要求10所述的能量储存系统,其特征在于,所述控制开关单元为机械开关或电子开关。

13. 根据权利要求10所述的能量储存系统,其特征在于,所述控制开关单元为设置在所述摩擦纳米发电机上的开关结构,由摩擦纳米发电机的两个相对运动部件的相对运动触发所述开关结构的通断。

14. 根据权利要求10-13任一项所述的能量储存系统,其特征在于,所述第一位移和第二位移的位置是确定不变的。

15. 根据权利要求10-14任一项所述的能量储存系统,其特征在于,所述第一位移为0,和/或,所述第二位移为最大位移。

16. 根据权利要求10-15任一项所述的能量储存系统,其特征在于,所述能量储存单元为电容或电池。

## 摩擦纳米发电机的能量储存方法和能量储存系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及能源领域,特别涉及摩擦纳米发电机的能量高效储存方法和能量储存系统。

### 背景技术

[0002] 随着移动、可携带电子器件的快速发展,寻找微瓦到毫瓦量级的可持续移动电源来给这些电子器件供电变得越来越重要。目前的主要办法是用能量存储单元如电池或者电容器来供电。但是它们的主要缺陷是有限的寿命,因此不能够可持续的供电。

[0003] 摩擦纳米发电机的研究为持续供电提供了一种可选择的方案。摩擦纳米发电机的基本工作原理是基于摩擦起电和静电感应的耦合。参见图1,首先,至少一对用不同材料做的摩擦层1和电极层2相互接触,由于不同材料吸引电子的能力不同,电子发生转移,于是摩擦电产生。然后,在外力作用下,摩擦层1的相对位移使得电极2和电极3上的平衡静电分布被打破,电势差建立并驱动电子转移来达到新的平衡,在测量单元4上可以检测到电荷流动。当摩擦层移动回来,自由电子回流回到初始静电平衡。在周期性的机械运动例如震动、行走和海浪作用下,摩擦纳米发电机给出脉冲式的交流输出。由于脉冲式交流输出的可变频率、不规则强度的特性,摩擦纳米发电机不能用来直接驱动大部分的电子器件,需要能量存储单元存储摩擦纳米发电机收集的能量并将其规整的输出。

[0004] 目前常采用的方法是一个摩擦纳米发电机和一个能量储存单元通过一个全波段整流桥复合为一个自充电能量系统。但是,对自充电能量系统的充电性能的研究中可以看到,充电速率在数个周期后会快速下降;并且作为最高充电可达电压的饱和电压,也远小于自充电能量系统的开路电压;其能量存储效率也较低。因此,进一步研究关于自充电能量系统充电过程是必需的。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种通过控制电荷传输来进行摩擦纳米发电机能量储存的方法,提高摩擦纳米发电机的能量的采集和储存效率,有效的利用环境中的能量实现自驱动系统。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供一种摩擦纳米发电机的能量储存方法,摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中,相对位移为第一位移和第二位移时,控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路;在其他相对位移时,所述摩擦纳米发电机通过所述整流单元为所述能量储存单元充电。

[0007] 优选的,所述摩擦纳米发电机的输出端并联控制开关单元,摩擦纳米发电机的输出端通过整流单元与能量储存单元连接。

[0008] 优选的,控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路,具体为:通过电路触发、手动触发、机械触发将所述摩擦纳米发电机的输出端短路。

[0009] 优选的,所述控制开关单元为由摩擦纳米发电机的两个相对运动部件的相对移动

触发的开关。

- [0010] 优选的，所述控制开关单元为并联在摩擦纳米发电机输出端的开关元件。
- [0011] 优选的，摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中，所述第一位移为0；和/或，所述第二位移为最大位移。
- [0012] 优选的，所述第一位移和第二位移的位置是确定不变的。
- [0013] 优选的，所述摩擦纳米发电机的结构为垂直接触分离模式(CS)、平行滑动模式(LS)、单电极接触结构(SEC)、滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)或接触式摩擦层自由移动结构(CFT)。
- [0014] 相应的，本发明还提供一种摩擦纳米发电机的能量储存系统，包括摩擦纳米发电机、控制开关单元、整流单元和能量储存单元，其中，所述控制开关单元和整流单元并联在所述摩擦纳米发电机的输出端，所述整流单元连接所述能量储存单元。
- [0015] 优选的，所述摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中，相对位移为第一位移和第二位移时，控制开关单元将所述摩擦纳米发电机的输出端短路；在其他相对位移时，所述摩擦纳米发电机通过所述整流单元为所述能量储存单元充电。
- [0016] 优选的，所述控制开关单元采用电路触发、手动触发、机械触发方式实现通断。
- [0017] 优选的，所述控制开关单元为机械开关或电子开关。
- [0018] 优选的，所述控制开关单元为设置在所述摩擦纳米发电机上的开关结构，由摩擦纳米发电机的两个相对运动部件的相对运动触发所述开关结构的通断。
- [0019] 优选的，所述第一位移和第二位移的位置是确定不变的。
- [0020] 优选的，所述第一位移为0，和/或，所述第二位移为最大位移。
- [0021] 优选的，所述能量储存单元为电容或电池。
- [0022] 本发明提供的能量储存方法中，摩擦纳米发电机的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中，相对位移为第一位移和第二位移时，控制开关单元将摩擦纳米发电机的输出端短路，不对能量储存单元进行充电；在其他相对位移时，摩擦纳米发电机通过整流单元为能量储存单元充电。通过理论和实验的比较证实了本发明设计的能量储存方法可以提高充电速率，增大最大能量存储效率达两倍(高达50%)，并提升饱和电压至少两倍。本发明提供的方法，可以适用于包括各种模式/结构、使用各种材料的任何一种基本型摩擦纳米发电机。
- [0023] 这是一个对于纳米发电机收集能量有效存储的里程碑式的进步，对于利用环境机械能实现对可携带、可穿戴、可植入式电子器件的驱动有重大意义。

## 附图说明

- [0024] 通过附图所示，本发明的上述及其它目的、特征和优势将更加清晰。在全部附图中相同的附图标记指示相同的部分。并未刻意按实际尺寸等比例缩放绘制附图，重点在于示出本发明的主旨。
- [0025] 图1为摩擦纳米发电机的工作原理示意图；
- [0026] 图2a至图2e为5种结构摩擦纳米发电机的结构示意图；
- [0027] 图3至图5为摩擦纳米发电机直接进行充电的V-Q曲线示意图、充电过程示意图和不同充电电压的充电循环示意图；

- [0028] 图6为本发明的摩擦纳米发电机能量储存方法和系统的示意图；  
[0029] 图7至图9为采用本发明的方法摩擦纳米发电机进行充电的V-Q曲线示意图、充电过程示意图和不同充电电压的充电循环示意图；  
[0030] 图10中a-c图为本发明提供的充电循环方法和直接充电的测量结果曲线；d图为本发明提供的充电循环方法和直接充电的实验结果与理论计算结果曲线；  
[0031] 图11为采用本发明提供的能量储存系统为一个商用计算器提供电源的电路示意图，以及采用直接充电和本发明设计的方法进行充电的V-Q曲线。

## 具体实施方式

[0032] 摩擦纳米发电机的基本原理是摩擦发电和静电感应的耦合。一个基本的发电机具有至少一对相应的摩擦层来通过物理接触产生相反的摩擦电荷。发电机内一般还有两个相互绝缘的电极使得自由电子只能从外电路流过。在外部机械作用力的驱动下，摩擦层之间周期性的相对运动使得静电荷的原有平衡被打破，自由电子会通过外电路来建立新的平衡，形成对外输出。

[0033] 本发明提供的方法适用于所有摩擦纳米发电机，这里仅列出5种结构的摩擦纳米发电机，

[0034] 五种基本的结构为垂直接触分离模式(CS)、平行滑动模式(LS)、单电极接触结构(SEC)、滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)和接触式摩擦层自由移动结构(CFT)。下面参照附图具体介绍每种模式发电机的典型结构：

[0035] 垂直接触分离模式(CS)摩擦纳米发电机的结构参见图2a，两个相对运动部件中，第一部件包括摩擦层a2和设置在摩擦层a2上的第一电极层a1，第二部件包括第二电极层a3，在第一部件与第二部件互相垂直接触分离相对运动时，第二电极层a3同时充当另一个摩擦层，与摩擦层a2互相接触和分离，摩擦层a2的材料与第二电极层a3的材料不同，第一电极层a1和第二电极层a3为摩擦纳米发电机的输出端，连接外电路可以形成电信号输出。

[0036] 平行滑动模式(LS)摩擦纳米发电机的结构参见图2b，两个相对运动部件中，第一部件包括摩擦层b2和设置在摩擦层b2上的第一电极层b1，第二部件包括第二电极层b3，在第一部件与第二部件互相平行滑动时，第二电极层b3同时充当另一个摩擦层，与摩擦层b2互相滑动摩擦，摩擦层b2的材料与第二电极层b3的材料不同，第一电极层b1和第二电极层b2为摩擦纳米发电机的输出端，连接外电路可以形成电信号输出。

[0037] 单电极接触结构(SEC)摩擦纳米发电机的结构参见图2c，两个相对运动部件中，第一部件包括摩擦层c2，第二部件包括第一电极层c1和第二电极层或等电位c3，在摩擦层c2与第二部件的第一电极层c1互相垂直接触分离或者相对滑动运动时，摩擦层c2的材料与第一电极层c1的材料不同，第一电极层c1和第二电极层c3为摩擦纳米发电机的输出端，连接外电路可以形成电信号输出。

[0038] 滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)摩擦纳米发电机的结构参见图2d，两个相对运动部件中，第一部件包括摩擦层d2，第二部件包括互相分隔的第一电极层d1和第二电极层d3，在第一部件与第二部件互相滑动时，摩擦层d2从第一电极层d1滑动到第二电极层d3，第一电极层d1和第二电极层d3充当另一个摩擦层，摩擦层d2的材料与第一电极层d1和第二电极层d3的材料不同，第一电极层d1和第二电极层d2为摩擦纳米发电机的输出端，连接外电

路可以形成电信号输出。

[0039] 接触式摩擦层自由移动结构(CFT)摩擦纳米发电机的结构参见图2e,两个相对运动部件中,第一部件包括摩擦层e2,第二部件包括互相分隔的第一电极层e1和第二电极层e3,摩擦层e2设置在第一电极层e1和第二电极层e3之间,摩擦层e2在两个电极层之间运动分别与两个电极层互相接触分离,第一电极层d1或第二电极层d3充当另一个摩擦层,摩擦层e2的材料与第一电极层e1和第二电极层e3的材料不同,第一电极层e1和第二电极层e3为摩擦纳米发电机的输出端,连接外电路可以形成电信号输出。

[0040] 滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)和接触式摩擦层自由移动结构(CFT)均为摩擦层自由移动模式的摩擦纳米发电机。

[0041] 摩擦纳米发电机的四种工作模式已经被证实,每种模式有不同的结构设计和材料选择,以适应相应的机械触发条件。

[0042] 无论哪种工作模式的摩擦纳米发电机,其输出的电信号均为交流脉冲信号,形成的自充电能量系统由摩擦纳米发电机和能量存储单元通过一个整流器直接连接而成。然而,这样会导致较低的充电速率、较小的饱和电压和较低的能量存储效率。

[0043] 下面发明人从理论上分析了摩擦纳米发电机直接充电的充电效率,传统上,摩擦纳米发电机(以下简称TENG)和能量存储单元的连接是通过一个全波整流桥,利用V-Q曲线作为一个TENG能量存储的分析工具,如图3所示。其中V是两电极之间电压,而Q是电极之间的电荷转移量。TENG的一些重要参数定义于表1。这里使用最为常用的最小可达电荷参考状态(MACRS),因此在摩擦层相对位移x为0的时候,V和Q都取0作为初始状态。x代表TENG操作的具体状态。无限外电阻下的最大能量输出循环有最大可能的每周期输出能量 $E_m$ ,被用虚线画于图3和图5中。这里默认充电电压 $V_c$ ,作为能量存储单元的电压,在每周期的充电过程中并不会变化太大。

[0044] 表1 TENG重要参数的定义

[0045]

参数	定义
$Q_{SC,max}$	最大短路转移电荷
$V_{OC,max}$	$Q=0$ 时最大开路电压
$V'_max$	$Q=Q_{SC,max}$ 时最大开路电压(绝对值)
$E_m$	最大可能每周期输出循环

[0046] 因此,从 $(Q,V)=(0,0)$ 开始,TENG的直接充电循环可以被以下过程描述(图3和图4):

[0047] 对于第一个循环:

[0048] 步骤一(状态I到状态II):系统的初始状态I是从 $(Q,V)=(0,0)$ 和 $x=0$ 开始。因为TENG的初始电压比充电电压 $V_c$ 要小,所有整流器中的二极管都处于关的状态,使得外电路近似于开路状态。当TENG开始工作时,电压开始随着位移增大而增大。在这一步中没有电荷转移,直到 $V=V_c$ (状态II)。

[0049] 步骤二(状态II到状态III):四个二极管中的两个被打开,从而开始了充电过程。位移持续增加一直到 $x_{max}$ ,在这个过程中TENG在 $V_c$ 电压下给电池/电容器充电,直到达到状态III。请注意状态III的时候所有电荷并不能完全转移到另一个电极( $Q < Q_{SC,max}$ ),因为在这

一步中电压需要被保持在 $V_C$ 。

[0050] 步骤三(状态III到状态IV): $x$ 开始降低。由于反向电流被截止, $V$ 在无电荷转移的情况下降低,直到 $V=-V_C$ (状态IV所示)。在该阶段,由于 $V$ 的绝对值小于阈值电压,整流器中的二极管均处于关闭状态。

[0051] 步骤四(状态IV到状态V):整流器中的余下两个二极管开启并重新开始充电过程。 $x$ 继续减少直到0,如状态V所示。在该过程中,TENG以 $V=-V_C$ 的电压给电池或电容器充电。与状态III类似,由于在该阶段将保持 $V=-V_C$ ,所以在到达状态V时电荷并不能完全转移回初始状态。至此,第一个充电循环完成。

[0052] 对于第二个充电循环和之后的情况(开始于状态V):

[0053]  $x$ 开始增加,由于 $|V| < V_C$ ,整流器中所有的二极管均关闭, $V$ 在开路状态增加,直到状态IV中所示的 $V=V_C$ 的状态。 $x$ 继续提高,相应的两个二极管开启并开始充电过程,直到 $x=x_{max}$ ,与状态III相同。完成一个完整循环的过程和第一次循环时第三和第四阶段相同,最终回到状态V。因此,第二次循环和后续过程遵循V→IV→III→IV→V的顺序,是一个稳态充电过程。相应的V-Q循环如图3所示。每个循环存储的能量为 $E_{C,direct}$ ,该能量与平均能量输出成正比,可以由每个循环中回路的面积计算得出:

$$[0054] E_{C,direct} = \begin{cases} V_C Q_{SC,max} \left( 2 - 2V_C / V_{OC,max} - V_C / V'_{max} \right), & \text{第一周期} \\ 2V_C Q_{SC,max} \left( 1 - V_C / V_{OC,max} - V_C / V'_{max} \right), & \text{第二周期及以后} \end{cases} \quad (1)$$

[0055] 由于充电过程中需要操作TENG完成多个循环,在此我们将只关注稳态循环中涉及的公式。在每个充电循环中存储的电荷量 $Q_{C,direct}$ 可以通过 $E_{C,direct}/V_C$ 计算得到,该值即为V-Q回路中与Q轴平行的边长。针对不同 $V_C$ 的充电循环如图5所示,电压强度顺序为iv>iii>ii>i,表明 $Q_{C,direct}$ 随 $V_C$ 的增加而降低

[0056] 通过公式1,通过不同的 $V_C$ ,可以根据 $V'_C = \frac{1}{2} \frac{V_{OC,max} V'_{max}}{V_{OC,max} + V'_{max}}$ 获得 $E_{C,direct}$ 的最大值,即:

$$[0057] E_{C,direct,max} = \frac{Q_{SC,max}}{2} \frac{V_{OC,max} V'_{max}}{V_{OC,max} + V'_{max}} \quad (2)$$

[0058] 通过每个循环可能获得的最大能量 $E_m$ ,可以定义出单位循环的能量存储效率 $\eta$ 。据此,每个循环的最大充电效率为:

$$[0059] \eta_{direct} = \frac{E_{C,direct,max}}{E_m} = \frac{V_{OC,max} V'_{max}}{(V_{OC,max} + V'_{max})^2} \leq 25\% \quad (3)$$

[0060] 相应地,可能的最大 $V_C$ 为:

$$[0061] V_{Sat,direct} = \frac{V_{OC,max} V'_{max}}{V_{OC,max} + V'_{max}} \quad (4)$$

[0062] 通过上述公式可以从直接充电循环过程获得三点结论:1. 单位循环进入存储单元的电荷量( $Q_{C,direct}$ ,与充电速率成正比)随 $V_C$ 的增加而迅速减少;2. 最大能量存储效率为25%;3. 饱和充电电压 $V_{Sat,direct}$ 远小于 $V_{OC,max}$ 和 $V'_{max}$ 。

[0063] 本发明中,发明人设计了一种充电循环,通过控制开关元件控制摩擦纳米发电机

的电荷转移的方法来最大化能量储存效率，并用一个带有运动驱动开关的摩擦纳米发电机来实现了这个循环。下面结合附图具体介绍该能量储存方法。

[0064] 参见图6，所述摩擦纳米发电机100的输出端并联控制开关单元200，摩擦纳米发电机100的输出端通过整流单元300与能量储存单元400连接。工作过程为，摩擦纳米发电机100的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中，相对位移为第一位移和第二位移时，控制开关单元200将摩擦纳米发电机100的输出端短路；在其他相对位移时，摩擦纳米发电机100通过整流单元300为能量储存单元400充电。

[0065] 其中，第一位移和第二位移可以为摩擦纳米发电机100的两个相对运动部件摩擦层的相对运动过程中的相对位移从0至最大位移之间的任意位移位置。优选的，第一位移为0，第二位移为最大位移。在每个工作循环过程中，第一位移和第二位移的位置是确定不变的。

[0066] 下面以滑动式摩擦层自由移动结构(SFT)摩擦纳米发电机为例，参照附图7和图8，详细介绍本发明的摩擦纳米发电机的能量储存方法。

[0067] 首先对于该能量储存方法的过程进行理论分析：设计了如下充电循环：通过一个平行于TENG的开关在 $x=0$ 和 $x=x_{\max}$ 时瞬时开启，其他情况则关闭。由此，充电过程转变为（参见图7和8）：

[0068] 第一和第二步(状态I到状态III)与直接充电循环相同。类似地，在状态III电荷并不能充分转移到另一个电极( $Q < Q_{SC,\max}$ )。

[0069] 第三步(状态III到状态IV)： $x$ 在状态III时达到 $x_{\max}$ ，然后开关开启。在短路条件下，电荷转移达到( $Q, V = (Q_{SC,\max}, 0)$ ，即状态IV。

[0070] 第四步(状态IV到状态V)：随着 $x$ 的降低，开关关闭。同时，由于 $|V| < V_c$ ，整流器中的所有二极管均处于关闭状态。因此， $V$ 开始在无电荷转移的前提下降低，是为状态V。

[0071] 第五步(状态V到状态VI)：随 $x$ 进一步降低，充电循环进入另一半，直到 $x=0$ (如状态VI所示)。同时，在状态VI，电荷并不能完全回到原来的电极( $Q > 0$ )。

[0072] 第六步(状态VI到状态I)：开关重新开启，直到( $Q, V = (0, 0)$ ，是为状态I。

[0073] 因此，重新设计后的充电循环变为I→II→III→IV→V→VI→I。如上述第三到第六步，开关在该过程中创造瞬时的短路状态。随之，在之后的半循环里将有更多的电荷用于给存储单元充电，这也是该改进设计得以提高充电效果的关键。

[0074] 通过图7中V-Q曲线对应的状态，可知在设计的充电循环中有三个环形能量区。区域1表示可以存储在直接和所设计的充电循环的能量；区域3表示通过开关释放的能量；区域2的能量只能存储在设计的充电循环中。因此，在设计的充电循环中的每循环所存储的能量仅应包括在区域1和2的能量。步骤1-3和步骤4-6所存储的能量推导出分别为 $V_c Q_{SC,\max} (1 - V_c / V_{OC,\max})$ 和 $V_c Q_{SC,\max} (1 - V_c / V'_{\max})$ 。因此，每个循环所储存的能量为：

$$[0075] E_{c,designed} = V_c Q_{SC,\max} (2 - V_c / V_{OC,\max} - V_c / V'_{\max})$$

[0076] 请注意，这个公式是仅适用于 $V_c \leq \min\{V_{oc,\max}, V'_{\max}\}$ 。考虑到 $V_{oc,\max}$ 和 $V'_{\max}$ 的对称角色，这里可以简单地认为 $V_{oc,\max} \geq V'_{\max}$ 。如果 $V'_{\max} < V_c \leq V_{oc,\max}$ ，因为在步骤四时的电压不能达到 $-V_c$ ，在步骤四至六之间能量不能储存。此时该方程变为：

$$[0077] E_{c,designed} = V_c Q_{SC,\max} (1 - V_c / V_{OC,\max})$$

[0078] 因此，

$$[0079] E_{C,\text{designed}} = \begin{cases} V_C Q_{SC,\max} \left( 2 - V_C / V_{OC,\max} - V_C / V'_{\max} \right), & V_C \leq V'_{\max} \leq V_{OC,\max} \\ V_C Q_{SC,\max} \left( 1 - V_C / V_{OC,\max} \right), & V'_{\max} < V_C \leq V_{OC,\max} \end{cases} \quad (5)$$

[0080] 同样地,所述设计的充电循环的其他特征参数可以计算出来,具体如下:

[0081] 每个周期的最大储存能量(在 $V_C = \frac{V_{OC,\max} V'_{\max}}{V_{OC,\max} + V'_{\max}}$ 或 $V_C = \frac{V_{OC,\max}}{2}$ 处获得):

$$[0082] E_{C,\text{designed,max}} = \max \left\{ Q_{SC,\max} \frac{V_{OC,\max} V'_{\max}}{V_{OC,\max} + V'_{\max}}, \frac{Q_{SC,\max} V_{OC,\max}}{4} \right\} \quad (6)$$

[0083] 最大能量存储效率则为:

$$[0084] \eta_{\text{designed}} = \frac{E_{C,\text{designed,max}}}{E_m} = \max \left\{ \frac{2V_{OC,\max} V'_{\max}}{(V_{OC,\max} + V'_{\max})^2}, \frac{V_{OC,\max}}{2(V_{OC,\max} + V'_{\max})} \right\} \leq 50\% \quad (7)$$

[0085] 饱和电压为:

$$[0086] V_{Sat,\text{designed}} = \max \{ V_{OC,\max}, V'_{\max} \} \quad (8)$$

[0087] 从推导的这些设计充电循环的方程式可知:设计充电循环中每个循环充到电池/电容器中的电荷量( $Q_{C,\text{designed}}$ )比直接充电循环的大( $Q_{C,\text{direct}}$ ),对 $V_C$ 同理;最大能量存储效率已提高到50%;饱和电压 $V_{Sat,\text{designed}}$ 与 $V_{OC,\max}$ 和 $V'_{\max}$ 较大的值相等,至少是 $V_{Sat,\text{direct}}$ 两倍大小。因此,这种设计充电循环是一个可以提升TENG给一个能量存储单元充电效率的有效路径。

[0088] 在原有的自充电能量系统中,TENG被加上了一个并联的开关。本发明的优选方案为,当TENG的移动部分(摩擦层)移动到 $x=0$ 和 $x=x_{\max}$ 的时候,该开关自动闭合以实现两个电极的瞬间短路;当 $x$ 处于0和 $x_{\max}$ 之间的的时候,该开关断开来充电。实验上,可以用一个TENG自带的、用TENG本身的运动驱动的开关来实现这个设计充电循环。两种循环在实验上进行了表征和比较,符合原有的理论预期。该实验证实了设计充电循环对原有能量存储的性能的提升。

[0089] 发明人通过一个实验比较了TENG直接充电和通过本发明的方法进行循环充电的结果,充电循环之间的定量比较。能量储存单元采用电容,利用电容器利于在充电过程中实现不同的电压。图10为本发明设计的充电循环方法和直接充电循环的实验结果,图10中a-c图分别显示每个周期充电电压,电荷充进电容,以及单位周期存储能量随充电循环数的变化关系。对于两种循环,都存在随着充电次数增多,越来越多电荷流入电容,充电电压增大;而电压增大,电荷随之降低。但是,与直接充电比较,前者充电电压提升更快,电荷降低缓慢,因此,单位能量得到显著提高。电荷缓慢衰减的原因是:在电路的开关操作间(状态III到IV和VI到I),电荷完全转移,因此在接下来的半循环中,会有更多的电荷充入电容中。同样值得注意的是:在该循环充电设计中,可得到更大的饱和电压。这是由于直接充电中,一旦充电电压接近饱和电压,就不存在能量储存。储存能量随充电电压变化的实验和计算结果见图10中d图,从曲线变化可以看出:在同样的充电电压下,该充电循环设计可提供更大的能量和更高的饱和电压。

[0090] 发明人通过V-Q曲线的方法研究了直接充电过程和本发明设计的充电过程,本发

明的充电方法有效的提高了充电速率,增加了能量储存效率(提高了50%),提升了饱和电压值(2倍)。

[0091] 相应的,本发明还提供一种能量储存系统,包括摩擦纳米发电机100、控制开关单元200、整流单元300和能量储存单元400,其中,控制开关单元200和整流单元300并联在摩擦纳米发电机100的输出端,整流单元300连接能量储存单元400。

[0092] 控制开关单元200可以采用电路触发、手动触发、机械触发等方式实现开关的通断。也可以采用具体的开关来实现该功能,常见的机械开关、电子开关等开关元件均可以,也可以为由摩擦纳米发电机触动的自动开关,如在TENG两个相对运动的部件互相运动过程中,直接触发开关的开与关。

[0093] 本发明中,可以采用一种运动触发的TENG来实现这样的充电循环。即在TENG上直接设计开关结构作为控制开关单元,在TENG两个相对运动的部件互相运动过程中,直接触发开关的开与关。TENG的移动部分接两个金属片,和固定在固定部分的 $x=0$ 和 $x=x_{max}$ 位置处的两个金属棒构成自动开关,该开关可以由TENG的移动来驱动TENG两个电极(或者输出端)的短路。当然也可以通过独立的开关来实现TENG输出端的短路。具体开关结构的选择不作为对本发明中能量储存方法和储存系统的限制。

[0094] 整流单元300可以为整流桥、二极管等整流元件。

[0095] 能量储存单元400可以为电容或者电池,例如可以为超级电池。

[0096] 为了进一步证明本发明的能量储存方法存在优于普通充电的能量储存,将摩擦纳米发电应用于图11中a图的电路来驱动商用计算器(工作电压1.5V)。为了确保向计算器提供稳定的电压,摩擦纳米发电机TENG的平均输入功率需要与输出电路的功率相匹配。起初,将电容器充电到电压为19.2V,根据图11中a图中虚线框所示的电容器并联输出电路,其中包括将电压整流为3.45V的能量转换器,计算器和能给计算器供1.5V电压的500k $\Omega$ 的分压电阻R。测量1.5 $\mu$ A的电流用于驱动输出电路,最终计算出摩擦纳米发电机可提供28.8 $\mu$ W的平均输出功率。若设摩擦纳米发电机TENG的工作周期为3s,那么需要单个循环的存储能量为8.65 $\mu$ J。为了实现以上设想,发明人设计了新式的单个循环最多可积累780nC的摩擦纳米发电机。图11中b和c图分别是两种充电循环在充电电压为19.2V状态下的电压一电荷曲线。测得直接充电的存储能量为2.73 $\mu$ J,明显比预设的存储能量8.65 $\mu$ J小。而且,在该充电方式下的电容能量消耗很快,计算器较快断电,如b图内插图所示。但是,采用本发明的设计充电循环方式的能量存储为8.75 $\mu$ J,恰好比预设的单循环消耗能量8.65 $\mu$ J大。因此,在同样的充电电压19.2V时,利用摩擦纳米发电机TENG操控的设计充电循环可以持续的驱动计算器。展示了一个自充电的能源系统来可持续的为一个商业的计算器供电。

[0097] 本发明的所有测量过程为,V-Q曲线测量:一个与TENG并联的电压表和一个与TENG串联的电荷表同时测量V和Q并相互作图。从V-Q曲线中可以获得能量储存单元的电压、每周期充入电荷量,计算每周期充入能量。

[0098] 本发明提供的能量储存方式,提供了一种新颖的方法来提高TENG乃至其他的发电机的能量的采集和储存效率,是有效的利用环境中的能量来实现自驱动系统的重要一步。

[0099] 通过理论和实验的比较证实了本发明设计的能量储存方法可以提高充电速率,增大最大能量存储效率达两倍(高达50%),并提升饱和电压至少两倍。这是一个对于纳米发

电机收集能量有效存储的里程碑式进步,对于利用环境机械能实现对可携带、可穿戴、可植入式电子器件的驱动有重大意义。

[0100] 本发明提供的方法,适用于包括各种模式/结构、使用各种材料的任何一种基本型摩擦纳米发电机。

[0101] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制。任何熟悉本领域的技术人员,在不脱离本发明技术方案范围情况下,都可利用上述揭示的方法和技术内容对本发明技术方案做出许多可能的变动和修饰,或修改为等同变化的等效实施例。因此,凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所做的任何简单修改、等同变化及修饰,均仍属于本发明技术方案保护的范围内。

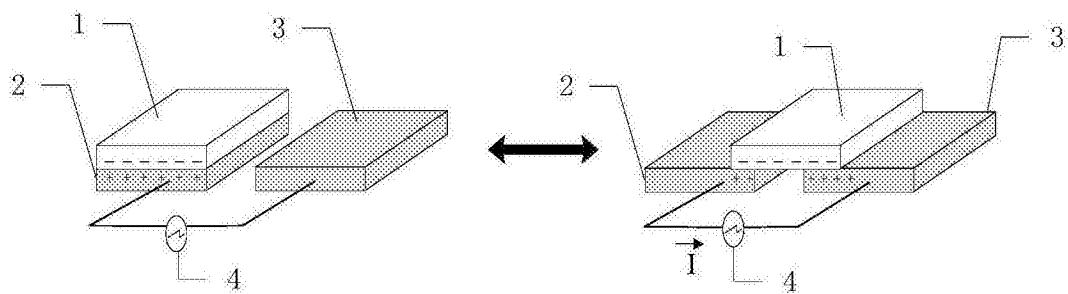


图1

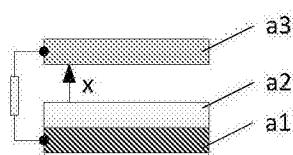


图2a

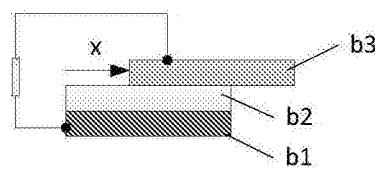


图2b

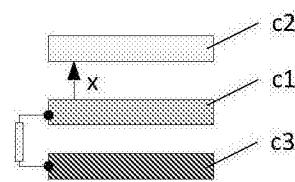


图2c

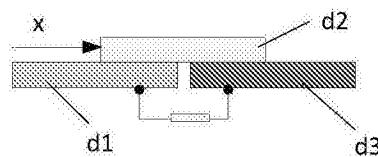


图2d

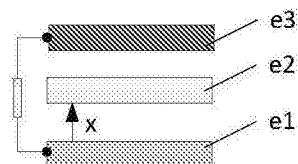


图2e

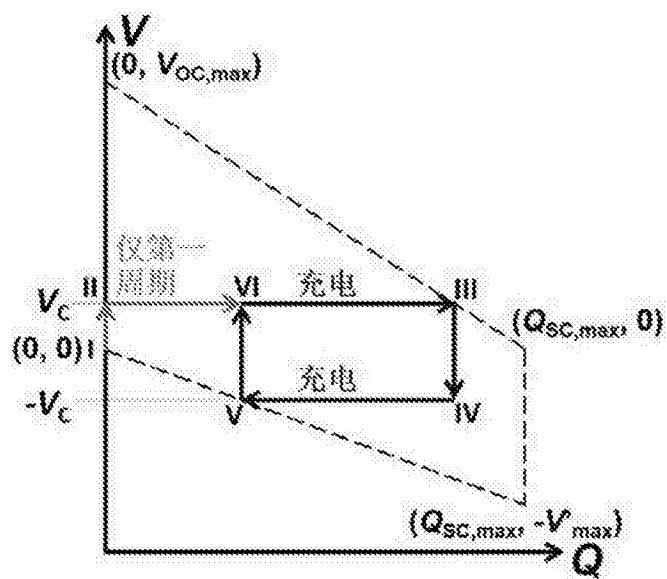


图3

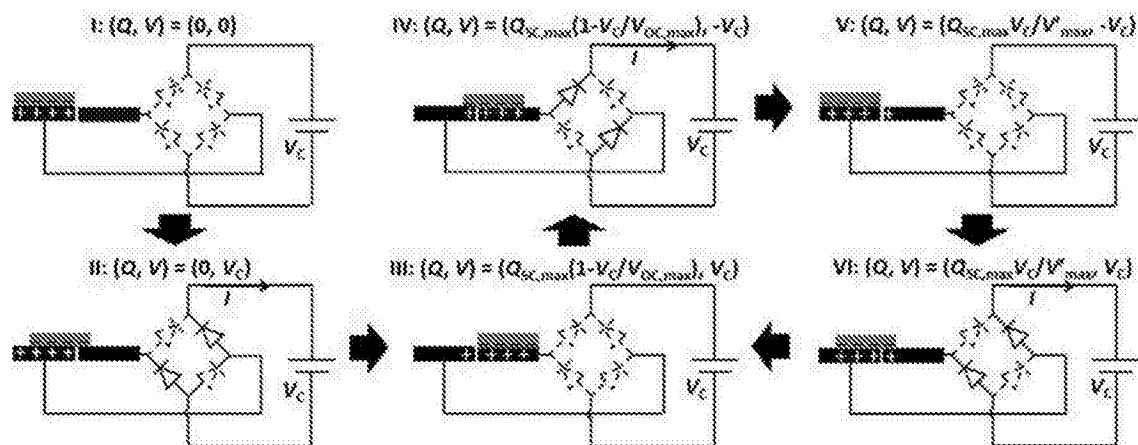


图4

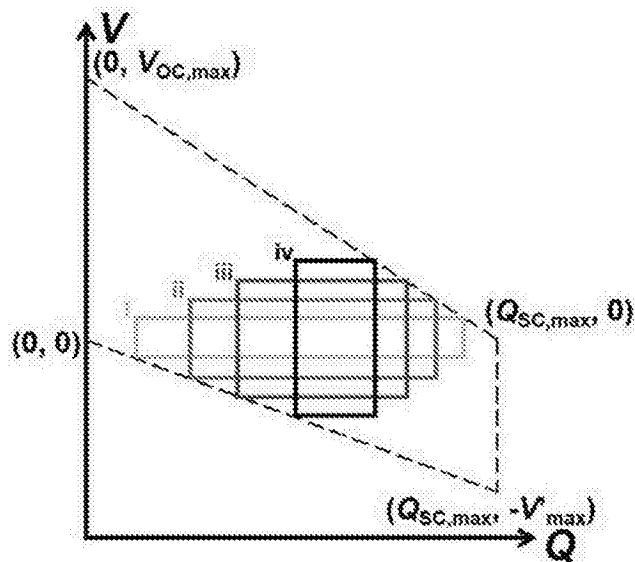


图5

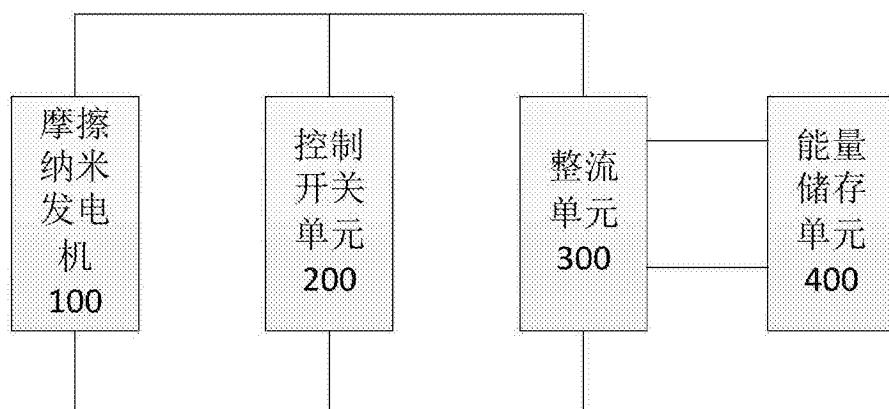


图6

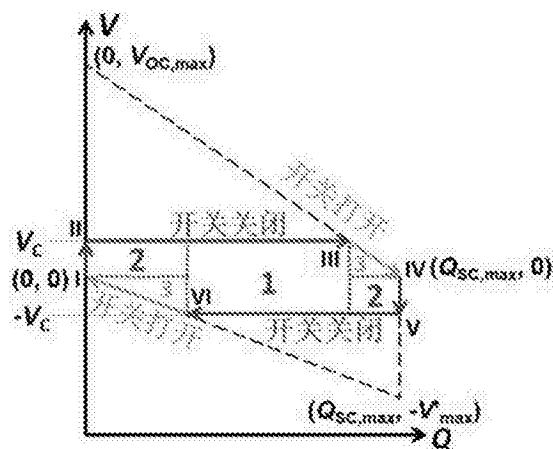


图7

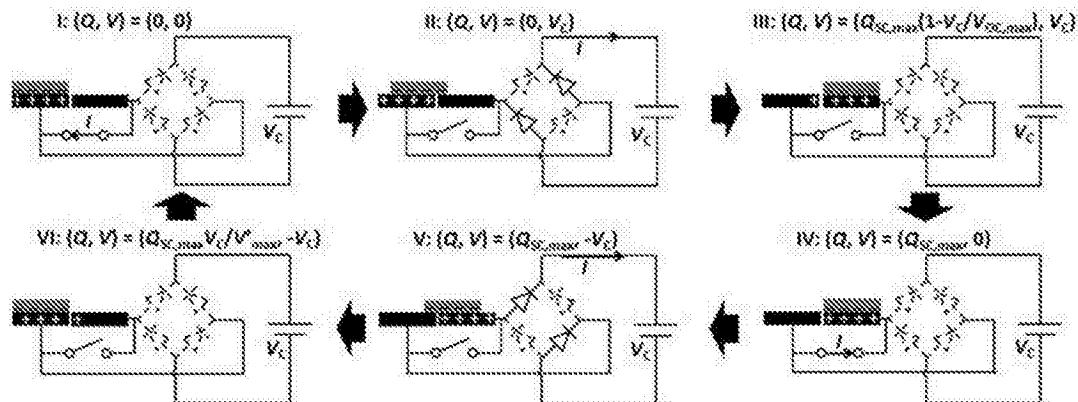


图8

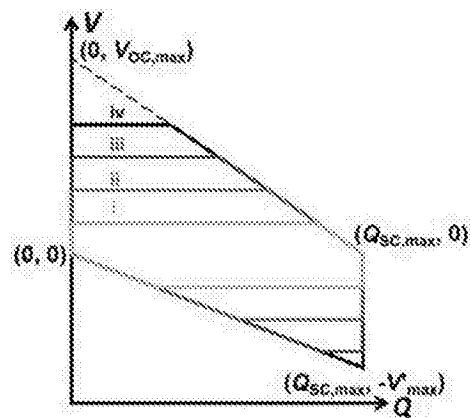


图9

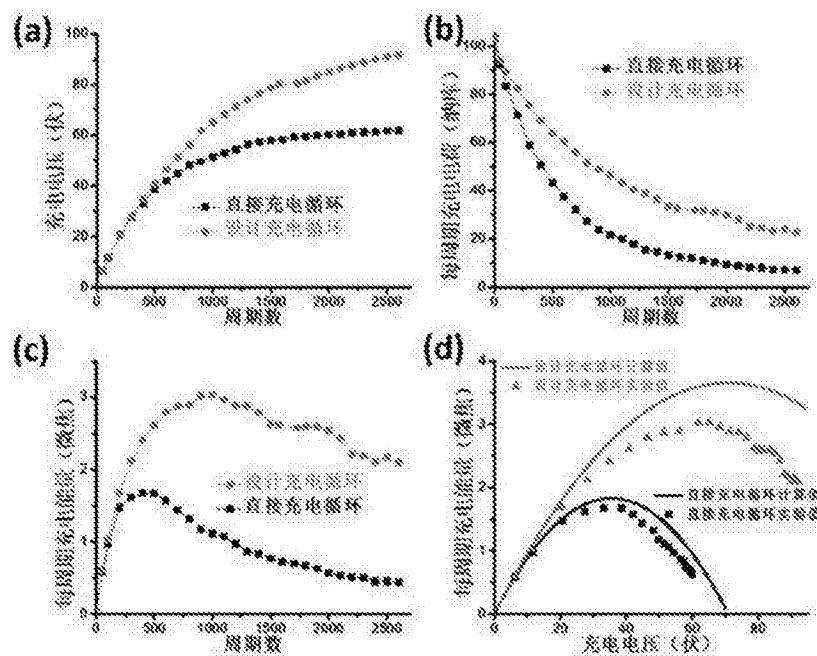


图10

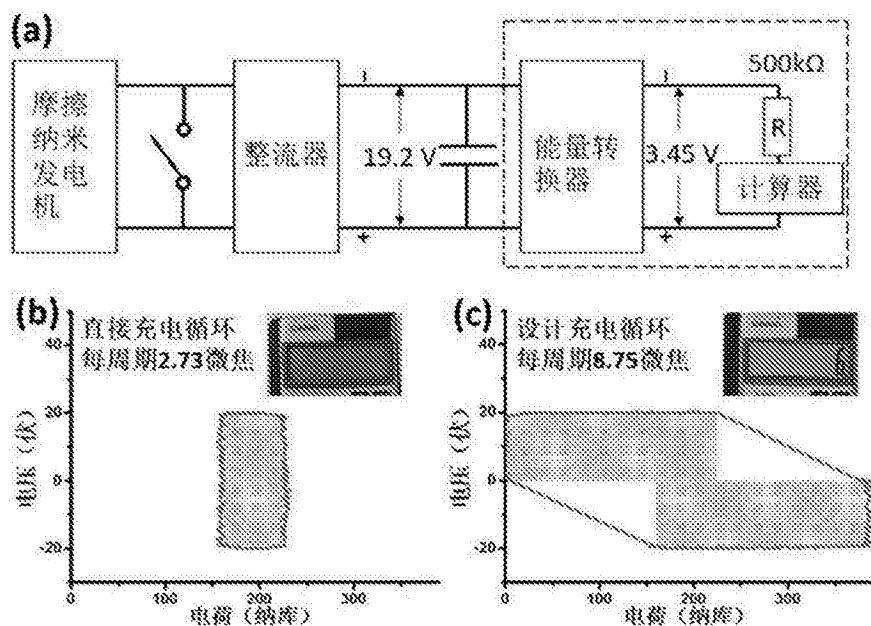


图11