

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 2 月 3 日 (03.02.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/022243 A1

(51) 国际专利分类号:
H02N 2/18 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/104855

(22) 国际申请日: 2021 年 7 月 7 日 (07.07.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010759431.1 2020 年 7 月 31 日 (31.07.2020) CN

(71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(72) 发明人: 张云顺 (ZHANG, Yunshun); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 石小青 (SHI, Xiaoqing); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 赵香帅 (ZHAO, Xiangshuai); 中国江苏省镇江市学府路 301 号,

Jiangsu 212013 (CN)。 王勇 (WANG, Yong); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 郑仁成 (ZHENG, Rencheng); 中国江苏省镇江市学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京高沃律师事务所 (BEIJING GAOWO LAW FIRM); 中国北京市海淀区彩和坊路 11 号 6 层 602 室, Beijing 100080 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(54) Title: BISTABLE ENERGY COLLECTOR CENTRIFUGAL DISTANCE OPTIMAL MATCHING METHOD

(54) 发明名称: 一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法

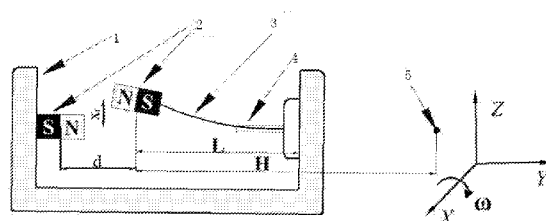


图 1

(57) Abstract: A bistable energy collector centrifugal distance optimal matching method. By considering the influence of a centrifugal effect on the collection efficiency of a bistable energy collection apparatus, the collection efficiency of the bistable energy collection apparatus under different centrifugal distances is explored, an optimal centrifugal distance is solved, and the effective collection frequency band bandwidth and the energy collection efficiency of the bistable energy collector are further optimized. The energy collection efficiency of the bistable energy collector is further improved and the effective collection frequency band is broadened by adjusting an installation centrifugal distance of a magnet at the tail end of a cantilever beam; a calculation equation of the optimal centrifugal distance is derived, so that the mounting and debugging time of the magnet under different centrifugal distances can be greatly shortened when the efficiency of the bistable energy collector is improved by using a centrifugal effect.

(57) 摘要: 一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法, 通过考虑离心效应对双稳态能量收集装置收集效率的影响, 探究不同离心距离下的双稳态能量收集装置收集效率, 求解出最优离心距离, 进一步优化双稳态能量收集器的有效收集频带带宽和能量收集效率。利用调节悬臂梁末端磁铁的安装离心距离来进一步提高双稳态能量收集器的能量收集效率和拓宽有效收集频带。推导出了最优离心距离的计算方程式, 可以大幅度缩短利用离心效应提高双稳态能量收集器效能时使磁铁处于不同离心距离下的安装和调试时间。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法

本申请要求于 2020 年 07 月 31 日提交中国专利局、申请号为 202010759431.1、发明名称为“一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

5

技术领域

本发明涉及双稳态能量收集器技术领域，特别是涉及一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法。

10 背景技术

在过去的十年中，能量收集的研究越来越丰富，特别是利用压电陶瓷来收集振动能量。能量收集器被广泛认为可以为汽车或其他风力发电装置等中小型传感器提供能量。但是，该能量收集器的问题在于，当激励频率偏离共振频率时，能量收集器无法在更宽的频率上保持这种性能。为了解决这一问题，许多研究人员正在研究如何扩展能量采集器的有效频率范围。其中，非线性能量收集器的研究非常广泛，例如共振机制对能量收集器的性能和效率的影响，此外，双稳态能量收集系统，三稳态能量收集系统和多稳态能量收集系统的研究也非常丰富。但是，离心效应对于双稳态能量收集器的性能和效率的影响的研究不够成熟，多数时候是采用估值法或经验法对离心距离进行设定，以进一步仿真研究其效能；由于双稳态能量收集器的性能和效率对于离心距离非常敏感，甚至在 0.0001m 数量级范围，当能量收集器的系统参数发生改变，研究者在进行仿真或实验时无法迅速找到最优的离心距离范围。

25 发明内容

基于此，有必要提供一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法，以通过考虑离心效应对于双稳态能量收集装置收集效率的影响，探究不同离心距离下的双稳态能量收集装置收集效率，求解出最优离心距离，进一步优化双稳态能量收集器的有效收集频带带宽和能量收集效率。

为实现上述目的，本发明提供了如下方案：

一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法，所述匹配方法包括以下步骤：

步骤一：建立离心效应的双稳态能量采集器的动力学模型；

5 步骤二：对双稳态能量采集器进行工作模拟；

步骤三：悬臂梁在振动过程中，磁铁受到的磁力为 F_M ，切向分力为 F_H ；

F_N 为悬臂梁末端磁铁受到的压力， F_C 为悬臂梁末端磁铁受到的离心力，则

$$F_H = F_M \sin \theta \sin \theta \approx \frac{x_r}{d}$$

$$F_H = \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{3 \left[M_{cy} (dM_{fx} + x_r M_{fy}) + M_{cx} (dM_{fy} + 3x_r M_{fx}) \right]}{(d^2 + x_r^2)^{5/2}} \right\} - \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{15x_r (dM_{fy} + x_r M_{fx})(dM_{cy} + x_r M_{cx})}{(d^2 + x_r^2)^{7/2}} \right\}$$

$$10 \quad F_H \approx (\mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5})x_r - (\mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fy} - 90M_{cy}M_{fx}}{8\pi d^7})x_r^3, \text{ 其中: } v \text{ 是磁铁}$$

的体积； μ 是真空中磁导率； $Mf = (M_{fx}, M_{fy})$, $Mc = (M_{cx}, M_{cy})$ 是安装在机架上的永磁体的磁化强度振幅和磁端质量；

步骤四：基于磁体在高能势能阱中振荡的双稳态能量采集系统的动力学方程表示为

$$15 \quad m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + kx_r + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L}x_r - \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}x_r + \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7}x_r^3 = G \sin(\omega t + \mu)$$

$$, \quad a = \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}, \quad b = \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7},$$

$$m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + (k + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L} - a)x_r + bx_r^3 = G \sin(\alpha + \mu), \text{ 其中 } m \text{ 为悬臂梁末端磁铁质量；}$$

c 为阻尼； k 为初始时悬臂梁刚度； L 为悬臂梁长度； r 为旋转中心距离悬臂梁根部的距离； $H \approx L+r$ 为悬臂梁末端磁铁质心与旋转中心间的距离； a

20 为磁铁力的线性系数； b 为磁铁力的非线性系数；

步骤五：运用谐波振动法求解动力学方程，设 $x = B + X \cos \omega t$ ，则

$$\frac{9}{16}b^2X^6 - \frac{3}{2}b(m\omega^2 + a - k)X^4 + [(m\omega^2 + a - k - \frac{3m\omega^2H}{2L})^2 + c^2\omega^2]X^2 - m^2g^2 = 0 ;$$

步骤六：下跳点频率方程为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sqrt{\left(\frac{2(a-k)L - 3m\omega^2H}{2L} \right)^2 + \frac{3mbG^2}{c^2}} + \frac{3m\omega^2H - 2(a-k)L}{4mL} \right)}, \gamma \text{ 曲线与频率曲}$$

线 ω 的拟合效果越好，则对应漂移后的单稳态高能轨道能量越高，频带越宽。

进一步改进在于：当 γ 曲线与频率曲线 ω 相切时的离心距离 H 的求

解：令 $\gamma = \omega$ ，化简有： $(4m^2 - \frac{6m^2H}{L})\omega^4 + 4m(a-k)\omega^2 - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0$ ，方程为复数域方程， ω 为下跳点轨迹与频率曲线相交处位置对应的频率值，且 ω 只取正实根。

进一步改进在于：所述离心距离 H 的求解方程中令 $W = \omega^2$ ，且 W 仅取正值，方程化简为 $(4m^2 - \frac{6m^2H}{L})W^2 + 4m(a-k)W - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0$ ，上述方程看作关于 W 的一元二次方程，由一元二次方程求根公式：

$$W_{1,2} = \frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L},$$

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L}}, \gamma \text{ 曲线与频率}$$

曲线 ω 相切，即对应方程仅有一个实根，

$$\Delta = 16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - 24m^2H/L) \cdot 3mbG^2/c^2 = 0, \text{ 即: } H = (2/3 + 2(a-k)^2c^2/9mbG^2)L,$$

此时的离心距离 H 的离心效应最优，有效收集频带最宽。

进一步改进在于：所述离心距离 H 效应最优时下跳点轨迹与 ω 相交处位置对应的频率值为

$$\omega = \sqrt{\frac{(a-k)}{3mH/L-2m}} = \sqrt{\frac{\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}}{4\pi d^6(3mH/L-2m)}}, \quad k = \frac{3EI}{L^3} \text{ 为悬臂梁的}$$

抗弯刚度, E 为悬臂梁材料的弹性模量, I 为悬臂梁截面惯性矩, 此时

$$H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2[\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}]}{9g^2m^3 \cdot 4\pi d^3(75M_{cx}M_{fx}-90M_{cy}M_{fy})} \right\} L,$$

$$\text{即: } H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2[\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}]}{9g^2m^3 \cdot 4\pi d^3(75M_{cx}M_{fx}-90M_{cy}M_{fy})} \right\} L \text{ 时系统的能量收集效率最}$$

5 优, 有效收集频带最宽。

与现有技术相比, 本发明的有益效果是:

本发明利用调节悬臂梁末端磁铁的安装离心距离来进一步提高双稳态能量收集器的能量收集效率和拓宽有效收集频带。推导出了最优离心距离的计算方程式, 可以大幅度缩短利用离心效应提高双稳态能量收集器时使磁铁处于不同离心距离下的安装和调试时间。推导出了最优离心距离 H 下, 最高效能量收集效率对应的旋转频率。以此可以设计出不同参数的双稳态能量收集器, 以适应经常工作于某一固定旋转频率(车速)下的旋转机械(车辆), 进一步提高双稳态能量收集器的性能和效率。

15 说明书附图

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动性的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

20 图 1 是本发明的离心效应的双稳态能量采集器的动力学模型图;

图 2 是本发明的悬臂梁末端磁铁受力分析图;

图 3 是本发明的不同离心距离下的 γ 曲线与频率曲线匹配图。

符号说明

1-框架、2-磁铁、3-悬臂梁、4-压电片、5-旋转中心。

25 具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图, 对本发明实施例中的技术方案进

行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

5 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

如图1所示,离心效应的双稳态能量采集器的动力学模型包括框架1、磁铁2、悬臂梁3、压电片4和旋转中心5,框架1安装于旋转环境(圆盘)上,磁铁2包括固定磁铁和尖端磁铁;固定磁铁通过吊耳或是使用强力胶水固定在框架1上,尖端磁铁使用强力胶水固定在悬臂梁3末端,压电片4粘贴在悬臂梁3两侧,悬臂梁3通过吊耳固定在旋转圆盘上且保证悬臂梁3所在直线过旋转中心5,旋转中心5是圆盘的旋转中心5也是旋转轴的旋转中心5。

本实施例提供了一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法,所述匹配方法包括以下步骤:

步骤一:建立离心效应的双稳态能量采集器的动力学模型。

步骤二:对双稳态能量采集器进行工作模拟。

步骤三:悬臂梁在振动过程中,如图2所示,磁铁受到的磁力为 F_M ,切向分力为 F_H ; F_N 为悬臂梁末端磁铁受到的压力, F_C 为悬臂梁末端磁铁受到的离心力, 则 $F_H = F_M \sin \theta$, $\sin \theta \approx \frac{x_r}{d}$

$$F_H = \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{3 \left[M_{cy} (dM_{fx} + x_r M_{fy}) + M_{cx} (dM_{fy} + 3x_r M_{fx}) \right]}{(d^2 + x_r^2)^{5/2}} \right\} - \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{15x_r (dM_{fy} + x_r M_{fx}) (dM_{cy} + x_r M_{cx})}{(d^2 + x_r^2)^{7/2}} \right\}$$

$$, F_H \approx (\mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5})x_r - (\mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fy} - 90M_{cy}M_{fx}}{8\pi d^7})x_r^3, \text{ 其中: } v \text{ 是磁}$$

铁的体积; μ 是真空中磁导率; $M_f = (M_{fx}, M_{fy})$, $M_c = (M_{cx}, M_{cy})$ 分别是安装在

机架上的永磁体和尖端磁铁的磁化强度幅值, M_{fx} 为水平方向安装在机架上磁铁的磁化强度幅值, M_{fy} 为竖直方向安装在机架上磁铁的磁化强度幅值, M_{cx} 为水平方向尖端磁铁的磁化强度幅值, M_{cy} 为竖直方向尖端磁铁的磁化强度幅值, x_r 为尖端磁铁的实时位移, d 为安装在机架上的磁铁与尖端磁铁间的距离。

步骤四: 基于磁体在势能阱中振荡的双稳态能量采集系统的动力学方程表示为

$$m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + kx_r + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L}x_r - \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}x_r + \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7}x_r^3 = G \sin(\omega t + \mu_0)$$

$$, \quad a = \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}, \quad b = \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7},$$

10 $m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + (k + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L} - a)x_r + bx_r^3 = G \sin(\omega t + \mu_0)$, 其中 m 为悬臂梁末端磁铁质量; c 为阻尼; k 为初始时悬臂梁刚度; L 为悬臂梁长度; r 为旋转中心距离悬臂梁根部的距离; $H \approx L+r$ 为悬臂梁末端磁铁质心与旋转中心间的距离; a 为磁铁力的线性系数; b 为磁铁力的非线性系数, $\ddot{x}_r$ 为尖端磁铁垂直方向振动的加速度, $\dot{x}_r$ 为尖端磁铁垂直方向振动的速度, x_r 为尖端磁铁垂直方向振动的位移, ω 为旋转角速度, G 为尖端磁铁等效重力, $\omega t + \mu_0$ 为尖端磁铁旋转过程中的实时相位角。

步骤五: 运用谐波振动法求解动力学方程, 设 $x = B + X \cos \omega t$, 则

$$\frac{9}{16}b^2X^6 - \frac{3}{2}b(m\omega^2 + a - k)X^4 + [(m\omega^2 + a - k - \frac{3m\omega^2H}{2L})^2 + c^2\omega^2]X^2 - m^2g^2 = 0, \quad x \text{ 为尖端磁铁实时位移, } B \text{ 为尖端磁铁的平衡位移, } X \text{ 为尖端磁铁振动的位移幅值, } \omega t \text{ 为}$$

20 尖端磁铁振动的相位角, H 为安装离心距离, g 为重力加速度。

步骤六: 下跳点频率方程为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sqrt{\left(\frac{2(a-k)L - 3m\omega^2H}{2L} \right)^2 + \frac{3mbG^2}{c^2}} + \frac{3m\omega^2H - 2(a-k)L}{4mL} \right)}, \quad \gamma \text{ 曲线与频率曲线 } \omega$$

的拟合效果越好，则对应漂移后的单稳态高能轨道能量越高，频带越宽，图 3 为不同离心距离下的 γ 曲线与频率曲线匹配图。

当 γ 曲线与频率曲线 ω 相切时的离心距离 H 的求解: 令 $\gamma = \omega$, 化简有:

$$(4m^2 - \frac{6m^2H}{L}) \omega^4 + 4m(a-k) \omega^2 - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0, \text{ 方程为复数域方程, } \omega \text{ 为下跳点轨迹}$$

5 与频率曲线相交处位置对应的频率值, 且 ω 只取正实根。

所述离心距离 H 的求解方程中令 $W = \omega^2$, 且 W 仅取正值, 方程化简为

$$(4m^2 - \frac{6m^2H}{L}) W^2 + 4m(a-k) W - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0, \text{ 上述方程看作关于 } W \text{ 的一元二次方}$$

程, 由一元二次方程求根公式:

$$W_{1,2} = \frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L},$$

$$10 \quad \omega_{1,2} = \sqrt{\frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L}}, W_{1,2} \text{ 为 } W \text{ 的第一个根和 } W$$

的第二个根, $\omega_{1,2}$ 表示 ω 的第一个根 ω_1 和 ω 的第二个根 ω_2 , ω_1 表示下跳点的频率数值, ω_2 表示下跳后的峰值频率的数值, γ 曲线与频率曲线 ω 相切, 即对应方程仅有一个实根, $\Delta = 16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - 24m^2H/L) \cdot 3mbG^2/c^2 = 0$, 即:

$$H = (2/3 + 2(a-k)^2 c^2 / 9mbG^2) L, \text{ 此时的离心距离 } H \text{ 的离心效应最优, 有效收集}$$

15 频带最宽。

所述离心距离 H 效应最优时下跳点轨迹与 ω 相交处位置对应的频率

$$\text{值为 } \omega = \sqrt{\frac{(a-k)}{3mH/L - 2m}} = \sqrt{\frac{\mu v^2 (9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}) - 4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}}{4\pi d^5 (3mH/L - 2m)}}, \quad k = \frac{3EI}{L^3} \text{ 为悬臂梁的抗}$$

弯刚度, E 为悬臂梁材料的弹性模量, I 为悬臂梁截面惯性矩, 此时

$$H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2 [\mu v^2 (9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}) - 4\pi d^5 k]^2}{9g^2 m^3 \cdot 4\pi d^3 (75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy})} \right\} L,$$

$$\text{即: } H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2 [\mu v^2 (9M_{\alpha}M_{f_x} - 12M_{\alpha}M_{f_y}) - 4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}]^2}{9g^2 m^3 \cdot 4\pi d^3 (75M_{\alpha}M_{f_x} - 90M_{\alpha}M_{f_y})} \right\} L \text{ 时系统的能量收集效率最}$$

优, 有效收集频带最宽。

本说明书中各个实施例采用递进的方式描述, 每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处, 各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。

本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述, 以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想; 同时, 对于本领域的一般技术人员, 依据本发明的思想, 在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述, 本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

1、一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法，其特征在于：所述匹配方法包括以下步骤：

步骤一：建立离心效应的双稳态能量采集器的动力学模型；

步骤二：对双稳态能量采集器进行工作模拟；

步骤三：悬臂梁在振动过程中，磁铁受到的磁力为 F_M ，切向分力为 F_H ； F_N 为悬臂梁末端磁铁受到的压力， F_C 为悬臂梁末端磁铁受到的离心力，则 $F_H = F_M \sin \theta$ ， $\sin \theta \approx \frac{x_r}{d}$

$$F_H = \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{3 \left[M_{cy} (dM_{fx} + x_r M_{fy}) + M_{cx} (dM_{fy} + 3x_r M_{fx}) \right]}{(d^2 + x_r^2)^{5/2}} \right\} - \frac{\mu v^2}{4\pi} \left\{ \frac{15x_r (dM_{fy} + x_r M_{fx})(dM_{cy} + x_r M_{cx})}{(d^2 + x_r^2)^{7/2}} \right\},$$

$F_H \approx (\mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5})x_r - (\mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fy} - 90M_{cy}M_{fx}}{8\pi d^7})x_r^3$ ，其中： v 是磁铁的体积； μ 是真空中磁导率； $M_f = (M_{fx}, M_{fy})$ ， $M_c = (M_{cx}, M_{cy})$ 是安装在机架上的永磁体的磁化强度振幅和磁端质量；

步骤四：基于磁体在势能阱中振荡的双稳态能量采集系统的动力学方程表示为

$$m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + kx_r + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L}x_r - \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}x_r + \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7}x_r^3 = G \sin(\omega t + \mu_0)$$

$$a = \mu v^2 \frac{9M_{cx}M_{fx} - 12M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^5}, \quad b = \mu v^2 \frac{75M_{cx}M_{fx} - 90M_{cy}M_{fy}}{4\pi d^7},$$

$$m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + (k + \frac{3m\omega^2(L+r)}{2L} - a)x_r + bx_r^3 = G \sin(\omega t + \mu_0),$$

其中 m 为悬臂梁末端磁铁质量； c 为阻尼； k 为初始时悬臂梁刚度； L 为悬臂梁长度； r 为旋转中心距离悬臂梁根部的距离； $H \approx L+r$ 为悬臂梁末端磁铁质心与旋转中心间的距离； a 为磁铁力的线性系数； b 为磁铁力的非线性系数；

步骤五：运用谐波振动法求解动力学方程，设 $x = B + X \cos \omega t$ ，则

$$\frac{9}{16}b^2X^6 - \frac{3}{2}b(m\omega^2 + a - k)X^4 + [(m\omega^2 + a - k - \frac{3m\omega^2H}{2L})^2 + c^2\omega^2]X^2 - m^2g^2 = 0 ;$$

步骤六：下跳点频率方程为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2m} \left(\sqrt{\left(\frac{2(a-k)L - 3m\omega^2H}{2L} \right)^2 + \frac{3mbG^2}{c^2}} + \frac{3m\omega^2H - 2(a-k)L}{4mL} \right)}, \quad \gamma \text{ 曲线与频}$$

率曲线 ω 的拟合效果越好，则对应漂移后的单稳态高能轨道能量越高，频带越宽。

2、如权利要求 1 所述的一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法，其特征在于：当 γ 曲线与频率曲线 ω 相切时的离心距离 H 的求解：令 $\gamma = \omega$ ，化简有： $(4m^2 - \frac{6m^2H}{L})\omega^4 + 4m(a-k)\omega^2 - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0$ ，方程为复数域方程， ω 为下跳点轨迹与频率曲线相交处位置对应的频率值，且 ω 只取正实根。

3、如权利要求 2 所述的一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方法，其特征在于：所述离心距离 H 的求解方程中令 $W = \omega^2$ ，且 W 仅取正值，方程化简为 $(4m^2 - \frac{6m^2H}{L})W^2 + 4m(a-k)W - \frac{3mbG^2}{c^2} = 0$ ，上述方程看作关于 W 的一元二次方程，由一元二次方程求根公式：

$$W_{1,2} = \frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L},$$

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{-4m(a-k) \pm \sqrt{16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - \frac{24m^2H}{L}) \cdot \frac{3mbG^2}{c^2}}}{8m^2 - 12m^2H/L}}, \quad \gamma \text{ 曲线与频率曲线 } \omega \text{ 相}$$

切，即对应方程仅有一个实根， $\Delta = 16m^2(a-k)^2 + (16m^2 - 24m^2H/L) \cdot 3mbG^2/c^2 = 0$ ，即：

$H = (2/3 + 2(a-k)^2c^2/9mbG^2)L$ ，此时的离心距离 H 的离心效应最优，有效收集频带最宽。

4、如权利要求 3 所述的一种双稳态能量收集器离心距离优化匹配方

法，其特征在于：所述离心距离 H 效应最优时下跳点轨迹与 ω 相交处位

置对应的频率值为 $\omega = \sqrt{\frac{(a-k)}{3mH/L-2m}} = \sqrt{\frac{\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}}{4\pi d^5(3mH/L-2m)}}$,

$k = \frac{3EI}{L^3}$ 为悬臂梁的抗弯刚度， E 为悬臂梁材料的弹性模量， I 为悬臂梁截

面惯性矩，此时 $H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2[\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}]}{9g^2m^3 \cdot 4\pi d^3(75M_{cx}M_{fx}-90M_{cy}M_{fy})} \right\} L$ ，即：

$H = \left\{ \frac{2}{3} + \frac{2c^2[\mu v^2(9M_{cx}M_{fx}-12M_{cy}M_{fy})-4\pi d^5 \frac{3EI}{L^3}]}{9g^2m^3 \cdot 4\pi d^3(75M_{cx}M_{fx}-90M_{cy}M_{fy})} \right\} L$ 时系统的能量收集效率最优，有效

收集频带最宽。

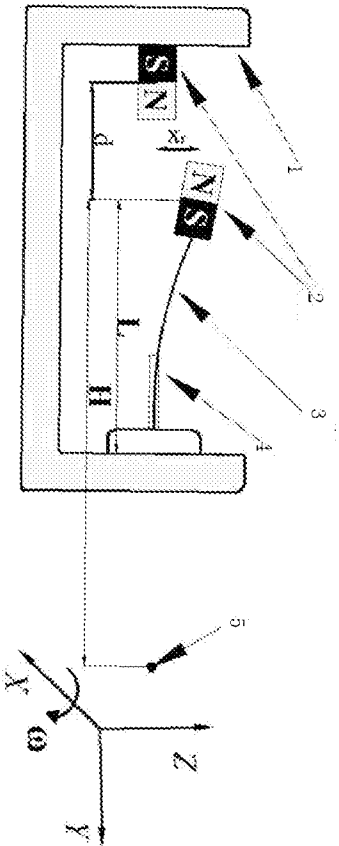


图 1

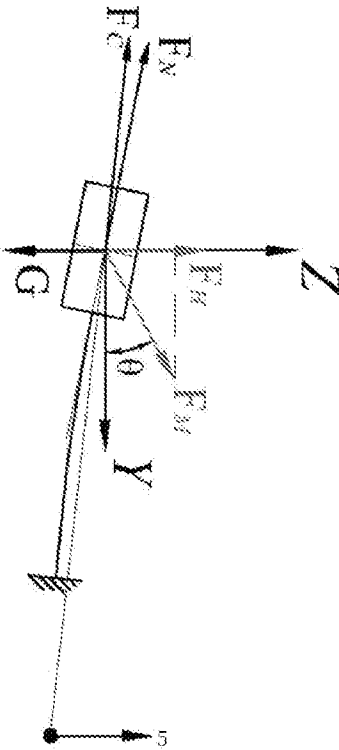


图 2

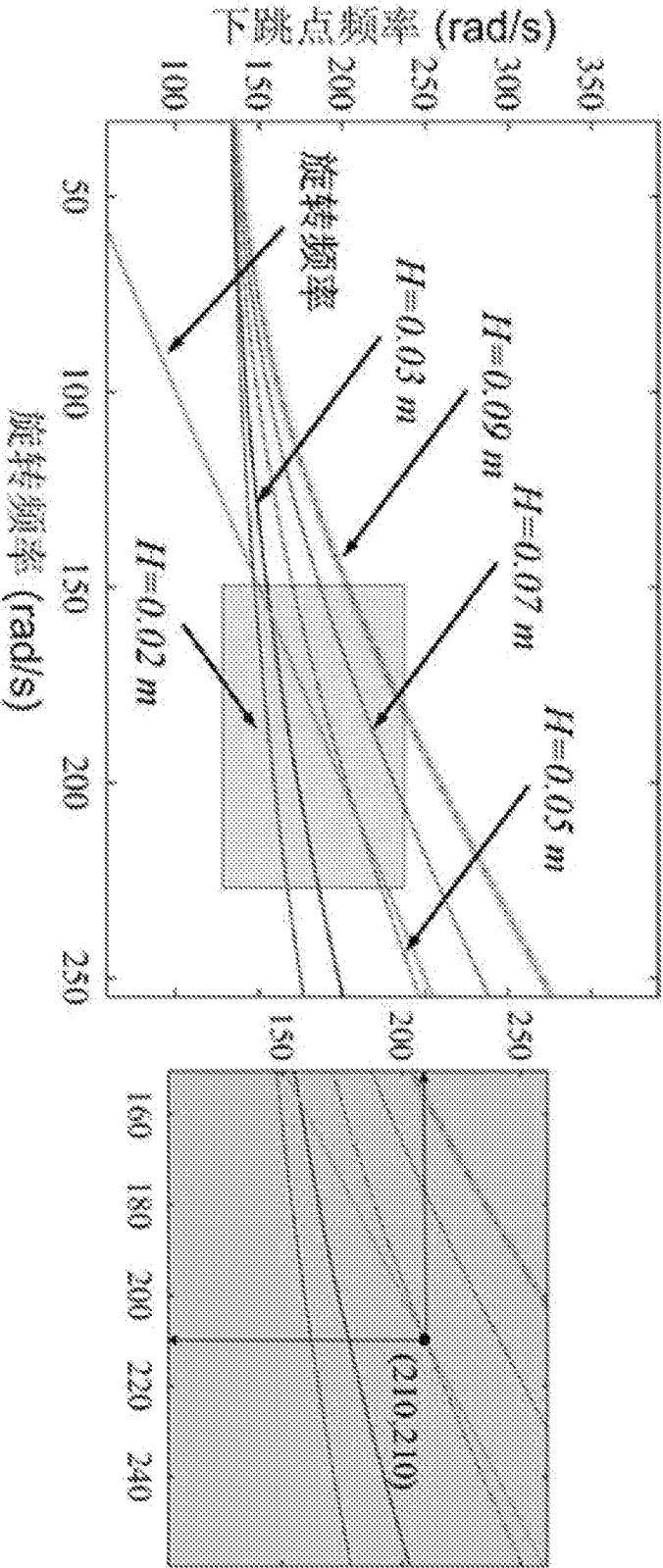


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/104855

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02N 2/18(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 双稳态, 收集器, 距离, 长度, 磁铁, 悬臂梁, 离心, 优化, 向心力, 切向力, bistable, energy, harvester, centrifugal, distance, optimization, length, magnet, tangential, component, force

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111953230 A (JIANGSU UNIVERSITY) 17 November 2020 (2020-11-17) claims 1-4	1-4
A	付美真 等 (FU, Meizhen et al.). "双稳态磁致伸缩能量采集器的动态特性 (Dynamic Characteristics of Bistable Magnetostrictive Energy Harvester)" 电工电气 (Electrotechnics Electric), No. 2, 28 February 2017 (2017-02-28), pp. 13-17	1-4
A	CN 109940613 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 28 June 2019 (2019-06-28) entire document	1-4
A	CN 102064745 A (NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY, PLA.) 18 May 2011 (2011-05-18) entire document	1-4
A	CN 109104123 A (JILIN UNIVERSITY) 28 December 2018 (2018-12-28) entire document	1-4
A	CN 106124036 A (SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY) 16 November 2016 (2016-11-16) entire document	1-4



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 September 2021

Date of mailing of the international search report

11 October 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/104855

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2014035438 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 06 February 2014 (2014-02-06) entire document	1-4
A	孙舒 等 (SUN, Shu et al.). "双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析 (Dynamic Modeling and Analysis of a Bistable Piezoelectric Cantilever Power Generation System)" <i>物理学报 (Acta Physica Sinica)</i> , Vol. 61, No. 21, 30 November 2012 (2012-11-30), pp. 210505-1 to 210505-11	1-4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/104855

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111953230	A	17 November 2020	None			
CN	109940613	A	28 June 2019	None			
CN	102064745	A	18 May 2011	None			
CN	109104123	A	28 December 2018	None			
CN	106124036	A	16 November 2016	None			
US	2014035438	A1	06 February 2014	WO	2012142292	A2	18 October 2012

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/104855

A. 主题的分类 H02N 2/18(2006.01) i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) H02N 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT, CNKI, WPI, EP0D0C: 双稳态, 收集器, 距离, 长度, 磁铁, 悬臂梁, 离心, 优化, 向心力, 切向力, bistable, energy, harvester, centrifugal, distance, optimization, length, magnet, tangential, component, force		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 111953230 A (江苏大学) 2020年 11月 17日 (2020 - 11 - 17) 权利要求1-4	1-4
A	付美真 等. “双稳态磁致伸缩能量采集器的动态特性” 电工电气, 第2期, 2017年 2月 28日 (2017 - 02 - 28), 第13-17页	1-4
A	CN 109940613 A (南京理工大学) 2019年 6月 28日 (2019 - 06 - 28) 全文	1-4
A	CN 102064745 A (中国人民解放军国防科学技术大学) 2011年 5月 18日 (2011 - 05 - 18) 全文	1-4
A	CN 109104123 A (吉林大学) 2018年 12月 28日 (2018 - 12 - 28) 全文	1-4
A	CN 106124036 A (西南交通大学) 2016年 11月 16日 (2016 - 11 - 16) 全文	1-4
A	US 2014035438 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 2014年 2月 6日 (2014 - 02 - 06) 全文	1-4
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2021年 9月 16日		国际检索报告邮寄日期 2021年 10月 11日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 王芳 电话号码 86-(10)-53961369

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	孙舒 等. “双稳态压电悬臂梁发电系统的动力学建模及分析” 物理学报, 第61卷, 第21期, 2012年 11月 30日 (2012 - 11 - 30), 第210505-1至210505-11页	1-4

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/104855

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111953230	A	2020年 11月 17日	无	
CN	109940613	A	2019年 6月 28日	无	
CN	102064745	A	2011年 5月 18日	无	
CN	109104123	A	2018年 12月 28日	无	
CN	106124036	A	2016年 11月 16日	无	
US	2014035438	A1	2014年 2月 6日	W0 2012142292	A2 2012年 10月 18日