



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111997823 B

(45) 授权公告日 2022.09.06

(21) 申请号 202011032149.X

(22) 申请日 2020.09.27

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111997823 A

(43) 申请公布日 2020.11.27

(73) 专利权人 香港理工大学

地址 中国香港九龙红磡香港理工大学

(72) 发明人 朱松晔 蔡亲霖

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

11227

专利代理人 郭帅

(51) Int.Cl.

F03B 13/20 (2006.01)

F03B 15/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104110347 A, 2014.10.22

CN 204186870 U, 2015.03.04

CN 212583871 U, 2021.02.23

CN 103403342 A, 2013.11.20

CN 109854434 A, 2019.06.07

CN 107917039 A, 2018.04.17

US 2007176430 A1, 2007.08.02

审查员 田子红

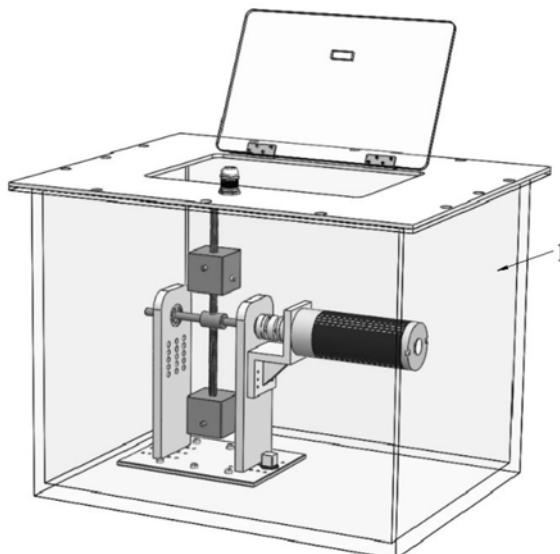
权利要求书1页 说明书8页 附图9页

(54) 发明名称

一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置

(57) 摘要

本发明涉及可再生能源发电领域，公开了一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置，包括双质量振子装置，包括第一质量体、第二质量体、连接杆、旋转轴、联轴器以及发电机，其中，所述发电机通过联轴器连接所述旋转轴，所述旋转轴上贯穿设有与之垂直的所述连接杆，所述连接杆的两端分别活动连接有所述第一质量体和第二质量体，所述第一质量体、第二质量体与所述旋转轴之间的距离均可以调节。本发明采用双质量振子形式，实现极低频自振的同时还显著缩小了所需的结构空间；并考虑了频率调谐因素，能通过实时调节两个质量体的相对位置以调频，实现共振进而提高输出功率；本装置在海事系统及新能源供电等方面具有重要的应用前景。



1. 一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:包括双质量振子装置,所述双质量振子装置包括第一质量体、第二质量体、连接杆、旋转轴、联轴器以及发电机,其中,所述发电机通过联轴器连接所述旋转轴,所述旋转轴上贯穿设有与之垂直的所述连接杆,所述连接杆的两端分别活动连接有所述第一质量体和第二质量体,所述第一质量体、第二质量体的质量相等,所述第一质量体、第二质量体与所述旋转轴之间的距离均可以调节。

2. 根据权利要求1所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:所述连接杆采用丝杆的形式,所述第一质量体、第二质量体内部均设有与所述连接杆配合的贯通轴式步进电机,所述贯通轴式步进电机能够带动所述第一质量体、第二质量体沿着所述连接杆作来回移动,用于所述双质量振子装置的振动频率调谐。

3. 根据权利要求2所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:包括加速度传感器,用于监测波浪的频率并将变化信号输出至所述贯通轴式步进电机。

4. 根据权利要求2所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:所述第一质量体、第二质量体均由一个或者多个质量块组成。

5. 根据权利要求1所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:以所述连接杆为对称线相对设置有第一支撑板和第二支撑板,所述旋转轴的两端分别通过轴承安装在所述第一支撑板和第二支撑板上。

6. 根据权利要求5所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:所述发电机的外部固定安装有发电机支撑件,所述发电机支撑件的另一端与所述第一支撑板或者第二支撑板连接。

7. 根据权利要求6所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:所述发电机为永磁发电机、异步发电机、同步发电机、开关磁阻发电机,用于将所述第一质量体、第二质量体绕所述旋转轴振动产生的机械能转化为电能。

8. 根据权利要求1-7任一所述的低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,其特征在于:包括用于承载所述双质量振子装置的壳体,所述壳体上设有漂浮装置。

9. 根据权利要求8所述的装置,其特征在于:所述壳体四周以及底部密闭,顶部设有能够开闭的盖板。

## 一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及可再生能源发电领域,更具体地说,是涉及一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置。

### 背景技术

[0002] 可再生能源包括但不局限于太阳能,风能以及波浪能。其中,波浪能由于其较高的可预测性及较大的能量密度 $2\text{-}3\text{kW/m}^3$ ,逐渐吸引研究者的目光。近年来,不同类型的波浪能收集器逐渐被提出,以浮子式类型为主。浮子式波浪收集装置的原理是通过本身浮子与海底,或者平台,或者沉浸式装置的相对运动驱动能量输出系统(通常为气动传动,机械传动,高压液压传动),进而将波浪引起的浮子运动转换为电能。

[0003] 从机械设计的角度,浮子式能量发电装置只有当浮子或其内部振子自振频率与波浪的频率一致时,其能量收集效率最高。而Munk (Munk W H.Origin and generation of waves [R]. Scripps Institution of Oceanography La Jolla Calif, 1951) 指出,海洋波浪能其实是一种低频的可再生能量来源,在大部分海况下波浪频率介于0.3至1Hz间,远小于传统的机械结构振动(<10Hz)。为了实现这种低频的共振,Shami等人(Al Shami E,Wang X,Ji X.A study of the effects of increasing the degrees of freedom of a point-absorber wave energy converter on its harvesting performance [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 133:106281) 增加额外的沉浸式装置数量以减小浮子频率;Flocard和Finnigan(Flocard F,Finnigan T D.Increasing power capture of a wave energy device by inertia adjustment [J]. Applied Ocean Research, 2012, 34:126-134) 在浮子内增加砂石混合物增加惯性以降低浮子频率。除了这些被动的方法外,主动式的方法,例如latching控制和reactive控制也被尝试应用于维持浮子的共振(Flocard F,Finnigan T D.Increasing power capture of a wave energy device by inertia adjustment [J]. Applied Ocean Research, 2012, 34:126-134; Durand M,Babarit A,Pettinotti B,et al.Experimental validation of the performances of the SEAREV wave energy converter with real time latching control [J]. EWTEC, Porto, 2007; Babarit A,Clément A H.Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves [J]. Applied Ocean Research, 2006, 28 (2) : 77-91)。需要注意的是,前述这些方法都是针对于浮子本身的频率调谐。

[0004] 另外一方面,浮子可被当做内部装有单自由度弹簧-阻尼-质量振子的一个装置。浮子仅为内部振子提供一个漂浮支撑的框架。在这种情况下,优化内部振子的振动状态亦为一种可提高能量采集效率的方式。针对这种内部振子的设计,在机械的能量采集领域提出了很多的结构拓扑,例如X型结构,订书夹型结构以及偏心轮结构等等(Liu C,Jing X.Vibration energy harvesting with a nonlinear structure [J]. Nonlinear dynamics, 2016, 84 (4) : 2079-2098; Wu Y,Qiu J,Zhou S,et al.A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency

vibration energy harvesting[J].Applied energy,2018,231:600-614;Halim M A,Rantz R,Zhang Q,et al.An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor,driven by pseudo-walking motion[J].Applied Energy,2018,217:66-74)。可是,目前这些设计拓扑,其自振频率鲜有低于1赫兹的。而如前所述,大部分海况下的波浪频率介于0.3至1Hz间。有些文献尝试采用频率提升技术,将低频振动转换为高频振动,再进行能量收集,这虽然也取得了一定的成果,可是这种频率提升技术会使得结构拓扑复杂化,而这种复杂化会导致能量效率在传递过程中减低(Fan K,Cai M,Wang F,et al.A string-suspended and driven rotor for efficient ultra-low frequency mechanical energy harvesting[J].Energy Conversion and Management,2019,198: 111820)。基于此目的,一个自振频率极低的可用于波浪发电装置的振子值得研究,并且为了应付不同海况波浪频率不同的情况,该装置需具备一定的频率调谐能力。

[0005] 发明专利文献CN102094746A公开了一种单摆式波浪发电系统,此发明利用漂浮体内部的重锤在随波摆动时产生的机械能发电。其所有发电装置完全密封,没有任何运动部件暴露于海水中。鹰喙式端部浮体可以更加有效地捕获波浪能。需要注意的是,该种发电装置内部为单摆式振子,是将单一质量体随波运动产生的机械能转化为电能。该发明并未涉及低频且频率调节的效果,且单一质量体(单摆式)振子若要实现低频特性,根据自振频率 $f_s = (\sqrt{g/l})/2\pi$ ,摆长l需要极长,即其所要求结构空间会极其大。

[0006] 发明专利文献CN103994017B公开了一种利用船身摆动的钟摆发电装置。根据船身在海面上不停的摆动,在船身内设计钟摆,利用钟摆和船身的相对运动进行发电。该钟摆式发电装置亦未设计频率调谐功能,且单一质量体(钟摆式)亦导致了一个极其巨大的结构空间需求。

[0007] 实用新型文献CN208396861U公开了一种波浪发电装置,其可改变内部偏心轮质量,弹簧刚度以及竖向振动幅度,进而改变内部振子的工作频带,影响波浪发电装置的能量输出。该实用新型在一定程度上满足了波浪发电装置对频率调谐的要求,然而与本发明所提出的发电装置从设计原理和结构形式上都完全迥异。

## 发明内容

[0008] 本发明针对现有技术存在的问题,提供一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,以克服现有技术中波浪发电系统占用空间大、构造复杂的问题。

[0009] 本发明上述目的通过以下技术方案实现:

[0010] 一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置,包括双质量振子装置,所述双质量振子装置包括第一质量体、第二质量体、连接杆、旋转轴、联轴器以及发电机;其中,所述发电机通过联轴器连接所述旋转轴,所述旋转轴上贯穿设有与之垂直的所述连接杆,所述连接杆的两端分别活动连接有所述第一质量体和第二质量体,所述第一质量体、第二质量体与所述旋转轴之间的距离均可以调节。

[0011] 首先,本发明区别于传统的单摆和其他摆式调频结构,采用了双质量振子形式,只需要调节两独立质量体的相对位置,即能实现实时的频率调谐,实现与波浪共振从而提高输出功率;并且双质量振子工作距离只占到传统单摆式振子的1/2甚至1/3,在实现极低频

自振的同时,显著缩小了所需的结构空间,有利于减小浮子式波浪发电装置的体积;

[0012] 其次,本发明以智能化手段进行两个质量体的位置调节,全程无需人工现场操作,省时省力,将现代科技融入至野外自运行器械,使其更好地适应波浪发电的实际工作环境。

[0013] 作为本发明的进一步优化方案,所述连接杆采用丝杆的形式,所述第一质量体、第二质量体内部均设有与所述连接杆配合的贯通轴式步进电机,所述贯通轴式步进电机能够带动所述第一质量体、第二质量体沿着所述连接杆作来回移动,用于所述双质量振子装置的振动频率调谐。

[0014] 在此,从原理上简述一下本发明中双质量振子装置(以下简称“振子”)的低频自振和频率调谐的实现过程,其结构控制方程如下:

$$[0015] m_m(L_1^2 + L_2^2)\ddot{\theta} + m_m g(L_2 - L_1) \sin \theta + c(L_1^2 + L_2^2)\dot{\theta} + K_{em}i = 0 \quad (1)$$

[0016] 其中, $L_1$ 和 $L_2$ 分别是第一质量体质心和第二质量体质心与旋转轴的距离。 $m_m$ 是单个质量体物理质量,其中包括使用的步进电机物理质量。 $c$ 为振子阻尼,包括自身机械阻尼和发电机的寄生阻尼。 $\theta$ 是该单自由度振子的振动角度。 $\theta$ 上面的点表示对时间的求导,即 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 分别为振动角速度和振动角加速度。 $K_{em}$ 是发电机的反电动势,单位为Vs/rad。 $i$ 为发电机的输出电流。该控制方程可通过拉格朗日方法获得,式中第一项为惯性力扭矩,第二项为恢复力扭矩,第三项为阻尼力扭矩,第四项为发电机提供的扭矩。

[0017] 在小振幅情况下,数学上 $\sin \theta \approx \theta$ 。根据结构动力学基本知识,该振子的自振频率可表示为其对应刚度项 $m_m g (L_2 - L_1)$ 除以质量项 $m_m (L_1^2 + L_2^2)$ ,然后开根号除以 $2\pi$ ,即,

$$[0018] f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(L_2 - L_1)}{(L_1^2 + L_2^2)}} \quad (2)$$

[0019] 其中, $g$ 是重力加速度。显然,此时该振子的频率可以通过第一质量体和第二质量体的相对位置 $L_1$ 和 $L_2$ 决定,实现频率调节的效果。安装于第一,第二质量体内部的对应步进电机可沿着连接杆调节第一质量体、第二质量体的位置。当这两个质量体关于旋转轴对称分布时,即 $L_1=L_2$ ,该双质量振子的自振频率达到零赫兹,实现极低频率的要求效果。

[0020] 除此之外,需要注意的是,此时该振子的实际摆长空间仅为连接杆长度,其频率的降低并非通过无限增加摆长实现,因此在实现低频效果时,该振子要求的结构空间远小于传统单摆。当该自振频率与波浪频率匹配时,本发明浮子式波浪发电装置的能量输出效率得到了有效提升。

[0021] 在此情况下,根据经典的功率计算公式,电磁电机输出电流*i*的平方乘以所连接电路的阻抗值,即为该振子的输出功率,

$$[0022] P_{out} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 Z_{load} dt \quad (3)$$

[0023] 式中, $Z_{load}$ 为电机所连电路或者外部荷载的阻抗值。 $t_1$ 与 $t_2$ 为能量收集的两个时间节点。

[0024] 应可理解的是,推导过程中,第一质量体和第二质量体的物理质量相同,在具体实施中,两个质量体质量,形状,材料等参数均可不同,公式(1)到(2)会有所变化,但原理并未改变。

[0025] 若第一,第二质量体物理质量不等,公式(1)需修正为

$$[0026] \left(m_{m1}L_1^2 + m_{m2}L_2^2\right)\ddot{\theta} + g(m_{m2}L_2 - m_{m1}L_1)\sin\theta + c(L_1^2 + L_2^2)\dot{\theta} + K_{em}i = 0 \quad (4)$$

[0027] 对应的公式(2)则变化为,

$$[0028] f_s = \sqrt{\frac{g(m_{m2}L_2 - m_{m1}L_1)}{(m_{m1}L_1^2 + m_{m2}L_2^2)}} \quad (5)$$

[0029] 式中, $m_{m1}$ 是第一质量体物理质量, $m_{m2}$ 是第二质量体物理质量。如前所述,式子(4)和(5)原理上和式子(1)和(2)是一致的,但由于两个质量体物理质量不一,其在表达式中不可约除。

[0030] 应可理解的是,各质量体内部均安装有一个或多个步进电机,取决于步进电机的推动能力,步进电机的使用数量及其带动质量体移动的方式并不能作为限定本发明的专利范围。

[0031] 总体而言,所述双质量振子装置可以通过改变两独立质量体的相对位置 $L_1$ 和 $L_2$ 以实现极低的自振频率以及频率调节,从而与波浪频率相匹配,进而提高整体发电装置的能量输出效率。基于公式(2)可知,当两质量体的质量相等时,振子装置甚至可以达到零频率。并且与传统的摆式结构相比,在实现极低频率这一点上,振子装置所要求的结构空间更小,有利于减小浮子式波浪发电装置的体积。所述旋转轴连接的发电机能够有效地将振动能转换为电能。

[0032] 应可理解的是,该振子的可调的自振频率上限与连接杆的长度有关,这里并不作具体限定。

[0033] 作为本发明的进一步优化方案,包括加速度传感器,用于监测波浪的频率并将变化信号输出至所述贯通轴式步进电机,所述加速度传感器内部安装或者连接有诸如单片机的控制器。当传感器监测到波浪频率变化较大时,单片机能够依据预先输入的算法程序输出控制信号驱动所述第一质量体和第二质量体内部的贯通轴式步进电机自身转动,进而带动对应的质量体移动位置,实现调频。

[0034] 作为本发明的进一步优化方案,所述第一质量体、第二质量体均由一个或者多个质量块组成,每个所述质量块的形状质量不作具体限定,但为了便于调节其相对位置,所述质量块上都应安装有贯通轴式步进电机之类的驱动装置。

[0035] 作为本发明的进一步优化方案,所述第一质量体、第二质量体的质量相等。当然,如上述公式(4)(5)所述,在其他一些实施方式中,两质量体的质量并不作具体限定;只是作为优选项,当第一质量体、第二质量体的质量相等时,如公式(2)所述,能够将两者质量约除,从而减少所述双质量振子装置中自振频率的因变量,有利于实现本发明的极低频调谐。

[0036] 作为本发明的进一步优化方案,以所述连接杆为对称线相对设置有第一支撑板和第二支撑板,所述旋转轴的两端分别通过轴承安装在第一支撑板和第二支撑板上。

[0037] 作为本发明的进一步优化方案,所述发电机的外部固定安装有发电机支撑件,所述发电机支撑件的另一端与所述第一支撑板或者第二支撑板连接。所述发电机支撑件为发电机卸重,避免所述发电机自身重力对所述旋转轴造成不必要的外部荷载影响。

[0038] 作为本发明的进一步优化方案,所述发电机为永磁发电机、异步发电机、同步发电机、开关磁阻发电机,用于将所述第一质量体、第二质量体绕所述旋转轴振动产生的机械能

转化为电能。

[0039] 作为本发明的进一步优化方案，包括用于承载所述双质量振子装置的壳体，所述壳体是所述双质量振子装置的支撑及密封结构，有效防止装置内部的振子构件被海水侵蚀；除此之外，所述壳体上设有漂浮装置，以确保本发明持续浮动于水体表层，有利于本发明装置正常工作以及回收处理。

[0040] 作为本发明的进一步优化方案，所述壳体四周以及底部密闭，顶部设有能够开闭的盖板。

[0041] 与现有技术相比，本发明的有益效果：

[0042] 本发明将双质量振子结构应用于波浪发电领域，相比于以单摆式为主的传统机械能量收集装置，通过在旋转轴两端设置第一质量体和第二质量体，能够以更小的摆长空间实现极低频自振；本发明采用步进电机控制质量体的位置进行频率调谐，能够根据外部海况波浪的频率改变而及时调整质量体的相对位置以实现共振，就这点而言，本发明的发电输出功率相比传统浮子发电装置更为可观；本发明结构简单、设计合理，从波浪发电的实际需求出发，实现极低频自振以及频率调谐，据此本装置在海事系统及新能源供电等方面具有重要的应用前景。

## 附图说明

[0043] 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，下面将对实施例或现有技术描述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的前提下，还可以根据提供的附图获得其他的附图。

[0044] 图1为本发明浮子式波浪发电装置的示意图(壳体透视)；

[0045] 图2为本发明所述双质量振子装置的示意图；

[0046] 图3为本发明浮子式波浪发电装置的工程正视图(透视)；

[0047] 图4为本发明浮子式波浪发电装置工程左视图(透视)；

[0048] 图5为本发明浮子式波浪发电装置工程俯视图；

[0049] 图6为本发明浮子式波浪发电装置工程右视图(透视)；

[0050] 图7为本发明图3中沿A-A线作的工程剖视图；

[0051] 图8为本发明所述双质量振子装置的关键机械组成部分的原理示意图；

[0052] 图9为本发明所述双质量振子装置的关键机械组成部分的结构示意图；

[0053] 图10展示了自由振动测试下，所述双质量振子装置的自振频率与双质量体相对位置对应结果，该相对位置在此实施例中具体表示第一质量体的位置L<sub>1</sub>，而第二质量体位置固定不变；

[0054] 图11展示了波浪水槽测试下，第一质量体位置不同时，所述浮子式波浪发电装置输出电压与波浪周期的关系，该输出电压为发电机的开路电压，参考图中的各曲线峰值位置对应的横坐标为当时第一质量体位置下，振子的自振频率倒数；

[0055] 图中，1-壳体；1a-盖板；2-第一质量体；3-第二质量体；4-连接杆；5-旋转轴；6-第一支撑板；7-第二支撑板；8-第一轴承；9-第二轴承；10-联轴器；11-发电机；12-发电机支撑件；13-振子固定底板；14-第一贯通轴式步进电机；15-第二贯通轴式步进电机。

## 具体实施方式

[0056] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步说明。在此需要说明的是，对于这些实施方式的说明用于帮助理解本发明，但并不构成对本发明的限定。此外，下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0057] 如图1-7所示，本实施例提供了一种低频且频率可调的浮子式波浪发电装置，包括壳体1和双质量振子装置。如图2所示，所述双质量振子装置包括第一质量体2、第二质量体3、用于连接第一质量体2和第二质量体3的连接杆4、旋转轴5、第一支撑板6、第二支撑板7、第一轴承8、第二轴承9、联轴器10、发电机11、发电机支撑件12以及振子固定底板13。

[0058] 其中，如图9所示，所述旋转轴5水平设置，所述连接杆4垂直于所述旋转轴5并在其中部与之刚性连接，所述连接杆4采用丝杆形式并且两端分别贯穿第一质量体2与第二质量体3，所述第一质量体2与第二质量体3形状质量相等，两者内部分别固定设有第一贯通轴式步进电机14、第二贯通轴式步进电机15，所述连接杆4同时作为所述第一贯通轴式步进电机14和第二贯通轴式步进电机15的贯穿轴，当需要频率调节时，所述贯通轴式步进电机14或者第二贯通轴式步进电机15会驱动对应的质量体沿着连接杆4旋转，利用丝杠的特性将回转运动转化为直线运动，实现所述第一质量体2或者第二质量体3的直线位移。

[0059] 补充说明的是，每个所述贯通轴式步进电机都固定设置在对应的质量体内部，并独立带动对应的质量体旋转，从而快速准确地调整质量体的位置。

[0060] 当然，在本发明的其他一些实施方式中，所述第一质量体2和第二质量体3的位移还可以通过液压推杆、电动推杆等其他形式实现，所述连接杆4也可以相应设置成光杆形式，种种形式均能有效调节质量体的相对位置，因此本发明并不对质量体的距离调节方式作具体限定。

[0061] 本实施例中，所述发电机11具体为永磁电机，所述旋转轴5在所述第一质量体2与第二质量体3的振动下会来回转动，所述旋转轴5一端通过联轴器10与所述发电机11保持同轴连接，再利用发电机11将质量体绕轴振动产生的机械能转化为电能。

[0062] 本实施例中，本装置还包括安装在所述壳体1内壁的加速度传感器(图中未示出)，所述加速度传感器内部安装有单片机，所述加速度传感器、单片机以及各个贯通轴式步进电机之间电性连接，所述加速度传感器收集的振动信息中含有振动信息。在实际发电过程中，所述加速度传感器采集到的振动信息将被输入到所述单片机中，单片机基于这些包含波浪频率信息的振动信息进行频率计算，若监测到波浪频率改变较大，则单片机会依据预先输入的程序发出控制信号，驱动第一质量体2内部的第一贯通轴式步进电机14转动从而带动第一质量体2沿着连接杆4移动，驱动第二质量体3内部的第二贯通轴式步进电机15转动从而带动第二质量体3沿着连接杆4移动，进而改变所述双质量振子装置的自振频率，使得其与外部的波浪频率匹配，提高能量收集效率。

[0063] 补充说明的是，所述加速度传感器的安装位置并不唯一，当传感器位于不同位置时，其测量到的信号幅值有所差异，但对于频率信息的收集并无太大影响，因此并不对所述加速度传感器的设置点作具体限定。

[0064] 图8展示了所述双质量振子装置的关键机械组成部分，包括所述第一质量体2、第二质量体3、连接杆4和旋转轴5。

[0065] 在此基础上，从结构原理角度解释所述双质量振子装置(以下简称“振子”)的低频

和频率调谐实现过程,其结构控制方程如下:

$$[0066] m_m (L_1^2 + L_2^2) \ddot{\theta} + m_m g (L_2 - L_1) \sin \theta + c (L_1^2 + L_2^2) \dot{\theta} + K_{em} i = 0 \quad (1)$$

[0067] 其中,L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>分别是第一质量体2质心和第二质量体3质心距离旋转轴的距离。m<sub>m</sub>是单个质量体物理质量。c为振子阻尼,包括振子自身机械阻尼和发电机的寄生阻尼。K<sub>em</sub>是发电机11的反电动势,单位为Vs/rad。i为发电机11的输出电流。在小振幅情况下,数学上sinθ≈0,该振子的自振频率可表示为,

$$[0068] f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(L_2 - L_1)}{(L_1^2 + L_2^2)}} \quad (2)$$

[0069] 其中g是重力加速度。显然,该振子的频率可以通过第一质量体2和第二质量体3的相对位置L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>决定,实现频率调节的效果。本实施例中的第一质量体2内部的第一贯通轴式步进电机14自身转动可移动第一质量体2的位置,第二质量体3内部的第二贯通轴式步进电机15自身转动可移动第二质量体3的位置。当这两个质量体关于旋转轴5对称分布时,即L<sub>1</sub>=L<sub>2</sub>,该双质量振子的自振频率达到零赫兹,实现极低频率的要求效果。当该自振频率与波浪频率匹配时,本波浪发电装置的能量输出效率得到有效提升。

[0070] 在此情况下,该振子的输出功率为

$$[0071] P_{out} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 Z_{load} dt \quad (3)$$

[0072] 式中,Z<sub>load</sub>为电机所连电路或者外部荷载的阻抗值。t<sub>1</sub>与t<sub>2</sub>为能量收集的两个时间节点。

[0073] 本实施例中,应可理解的是,所述第一质量体2和第二质量体3的物理质量等同,因此在公式(2)的推导过程中相互约除;在其他实施方式中,两个质量体的质量、形状、材料等参数均可不同,公式(1)到(2)会有所变化,但设计原理不变。

[0074] 本实施例在应用情况中,为了减少对于所述旋转轴5的负载,所述旋转轴5两端部分别安装有所述第一轴承8和第二轴承9,并通过第一轴承8贯穿通过第一支撑板6,通过第二轴承9贯穿第二支撑板7,所述第一支撑板6、第二支撑板7与第一轴承8、第二轴承9都是竖直布置并相对于所述连接杆4作镜像对称,如此设置,能够以较小摩擦力为所述旋转轴5提供有效的重力支承,并不会影响所述旋转轴5的动能输出。为了强化支撑效果,所述第一支撑板6和第二支撑板7底部还通过所述振子固定底板13连接,以形成更加稳固的框架结构。

[0075] 同样地,本实施例在所述发电机11外部设置有发电机支撑件12,所述发电机支撑件12一端与发电机11的外壁固定连接,另一端与所述第二支撑板7连接,以此为发电机11提供重力支撑,避免发电机11的自身重力对所述旋转轴5构成外部荷载影响,保证所述旋转轴5的传动效率以及使用寿命。

[0076] 应可理解的是,上述关于旋转轴5和发电机11的支撑形式仅为一个优选例,即使是其他单边振子支撑或者将发电机定位在支撑板上等类型亦可实现类似的支撑效果,因此并不对此作具体限定。

[0077] 补充说明的是,所述壳体1外壁喷涂有防腐油漆,整体为正方体结构,其底部与四周密闭,顶部设有可开闭的盖板1a,壳体1内壁与所述振子固定底板13底壁连接,所述壳体1为双质量振子装置提供一个漂浮支撑以及密封的空间,有效防止装置内部的振子构件被海

水侵蚀；除此之外，所述壳体1外侧壁设置有一圈防水浮板，以确保本发明持续浮动于水体表层；当然，在其他一些实施方式中，本发明装置也可通过控制自身重量或者通过改良结构，而实现漂浮效果，在此不作具体限定。

[0078] 针对本发明装置的设计原理，本实施例进行了自由振动测试，以检验本发明在自由振动工况下的低频自振和调频能力；并进行了波浪水槽测试，以检验本发明在波浪工况下的低频自振和调频能力。

[0079] 这两个实验例中，第一质量体2和第二质量体3均为正方体，边长50毫米，质量各为0.947千克。连接杆4的质量为0.2千克，总长300毫米。以旋转轴5和连接杆4的交点为坐标原点，第一质量体2质心与坐标原点的距离 $L_1$ 可从-75毫米调节到125毫米，第二质量体3质心与坐标原点的距离 $L_2$ 则固定为125毫米。具体的实验结果如下：

[0080] 实验例1自由振动测试

[0081] 在该测试中，所述第二质量体3位置固定，并将所述第一质量体2从最顶部逐渐向下移动，图10展示了所述第一质量体2在不同调节位置时，所述双质量振子装置在自由振动工况下的自振频率。参见图10，所述双质量振子装置的频率在实验中可达到极低频率0.2赫兹。当第一质量体2位置继续向下移动，自振频率升高，最终约达到最大值1.4赫兹，这表明了所述双质量振子装置实现极低频自振及频率调谐的有效性。

[0082] 实验例2波浪水槽测试

[0083] 将本装置放置于波浪水槽中进行测试。图11展示了第二质量体3位置固定的情况下，当第一质量体2位置不同时，不同波浪周期下浮子发电装置的输出电压。图中符号h表示波高。参见图11，第一质量体2位置不同时，其自振频率有所区别，在波浪水槽测试中，可以观测到0.67赫兹的较低自振频率。而这种振子频率的改变使得该浮子装置适用于不同海况，有利于提高能量输出。

[0084] 综上所述，图10和图11都表明了以双质量振子为核心的浮子式波浪发电装置可以较好地实现极低自振频率(<1赫兹)，并能够有效地通过两个质量体相对位置调节实现调频功能，从而与波浪频率匹配，提高能量收集效率。

[0085] 以上结合附图对本发明的实施方式作了详细说明，但本发明不限于所描述的实施方式。对于本领域的技术人员而言，在不脱离本发明原理和精神的情况下，对这些实施方式进行多种变化、修改、替换和变型，仍落入本发明的保护范围内。

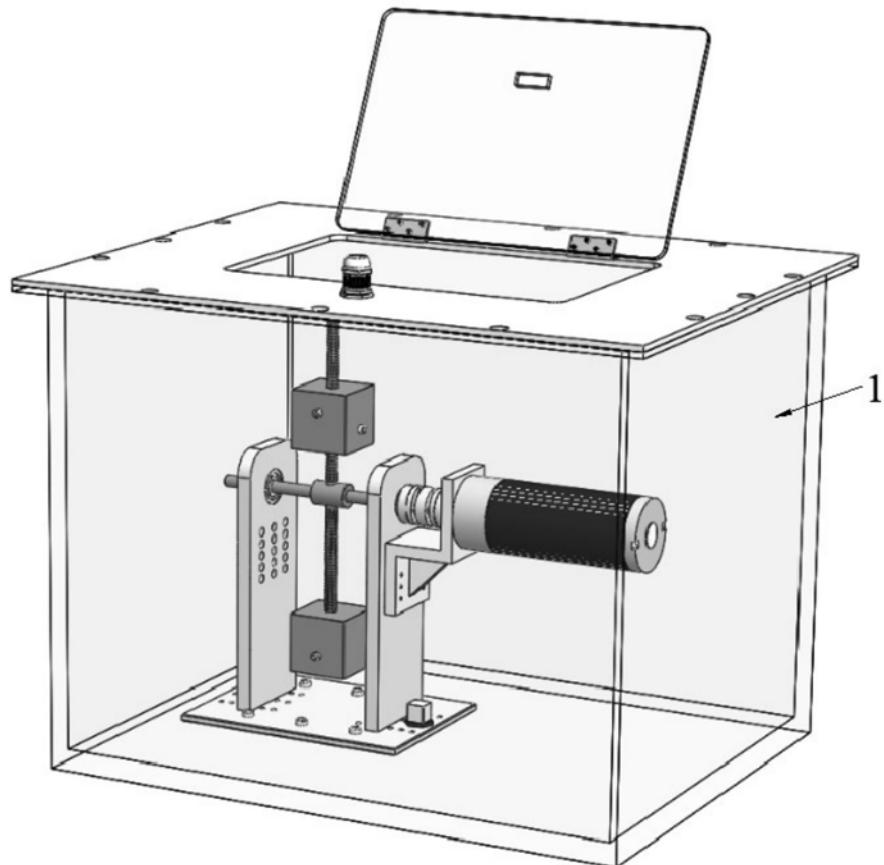


图1

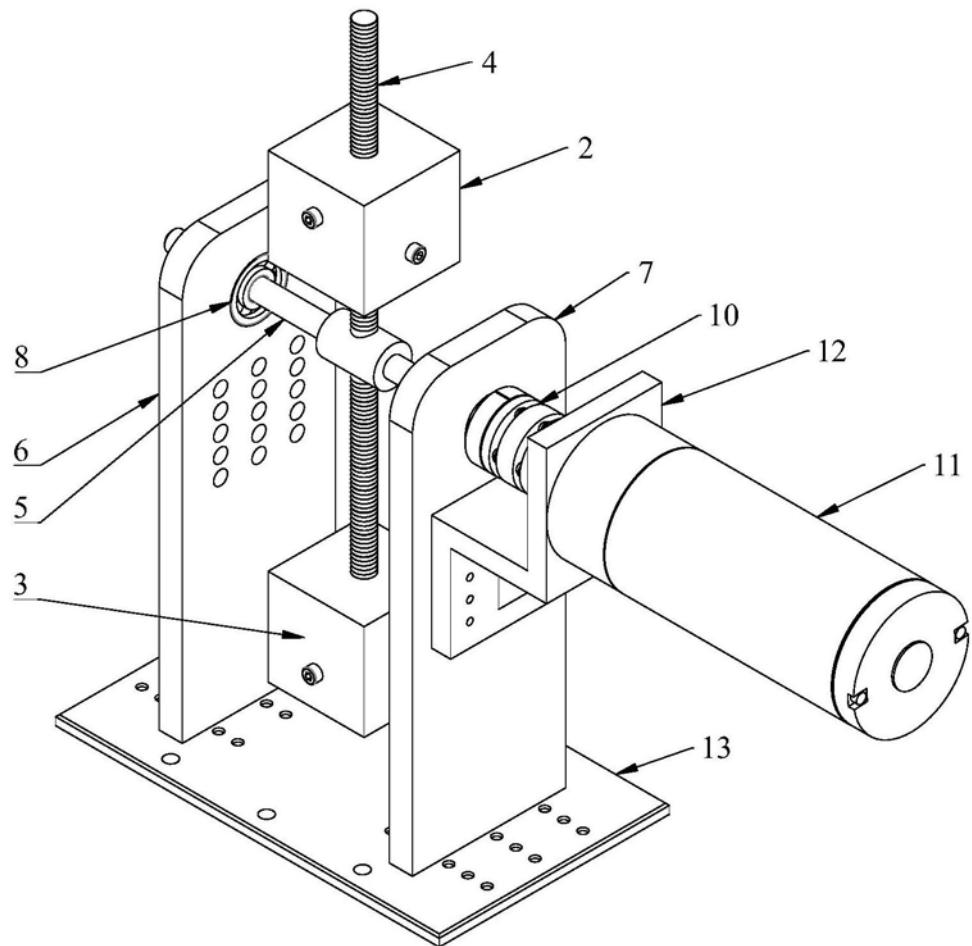


图2

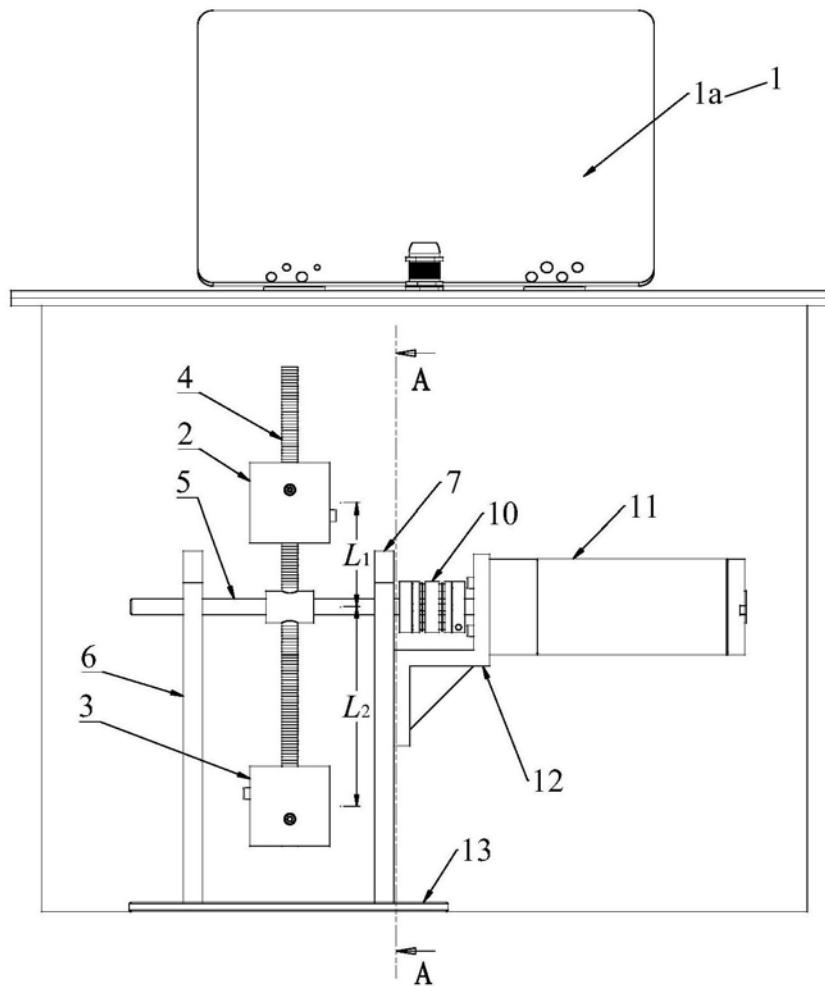


图3

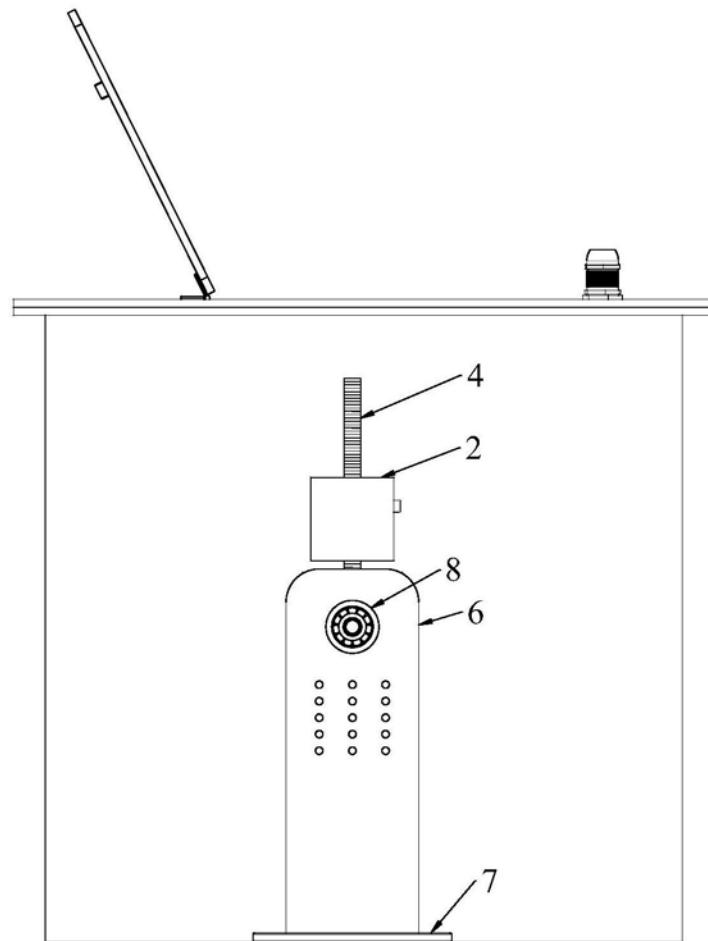


图4

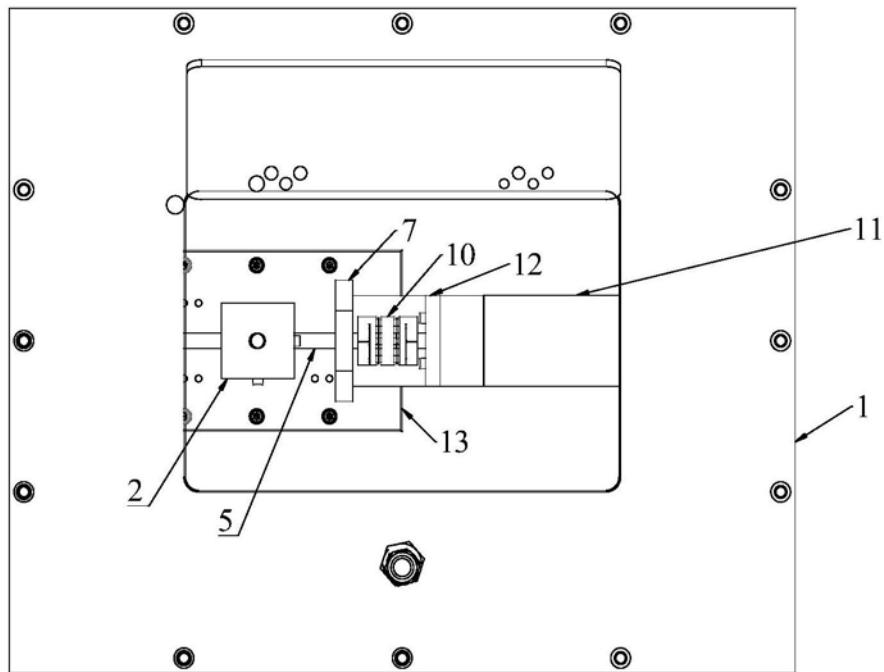


图5

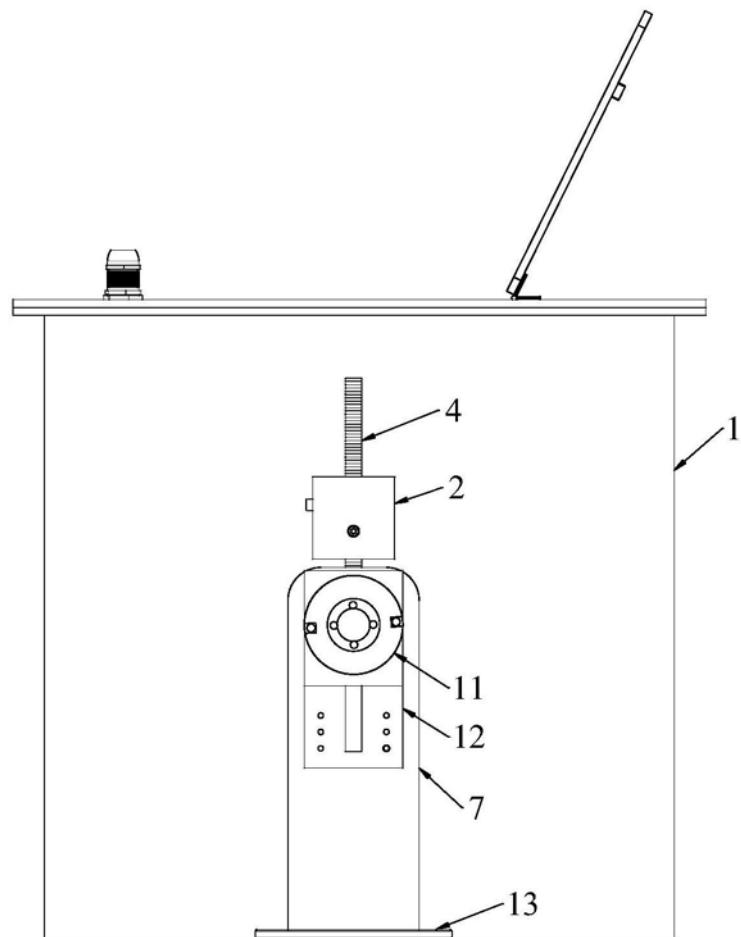


图6

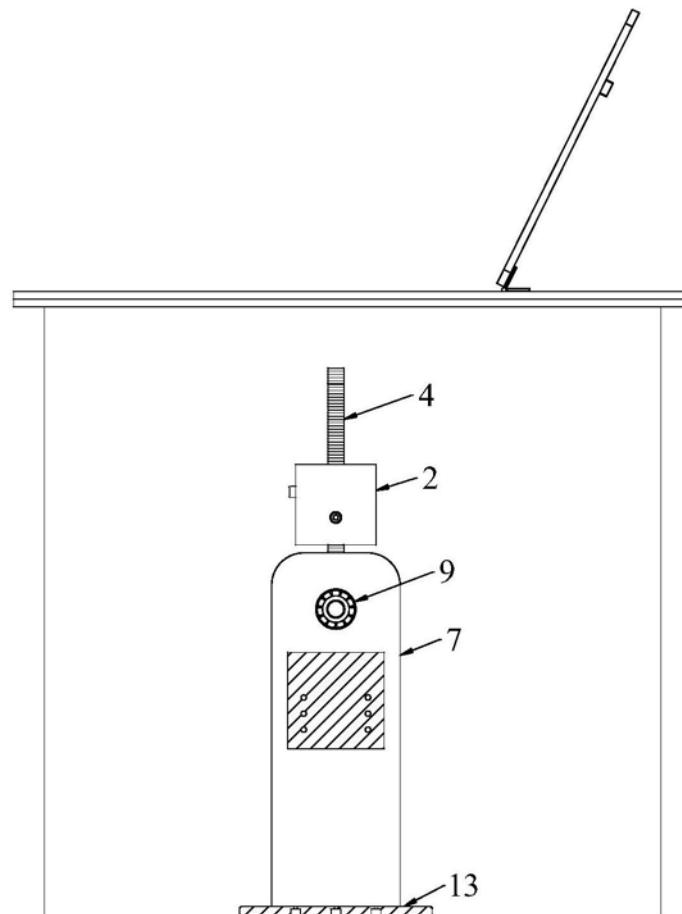


图7

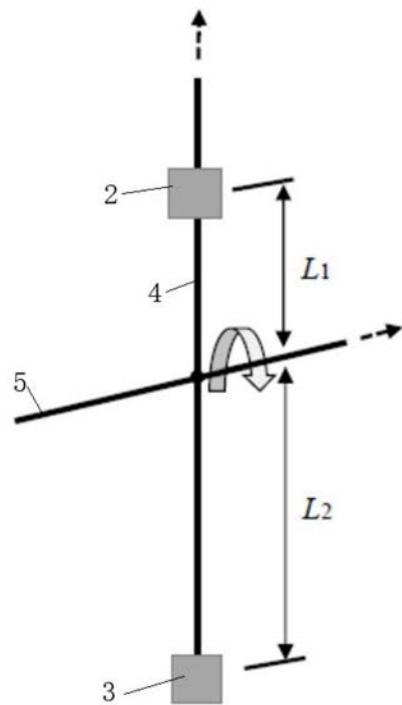


图8

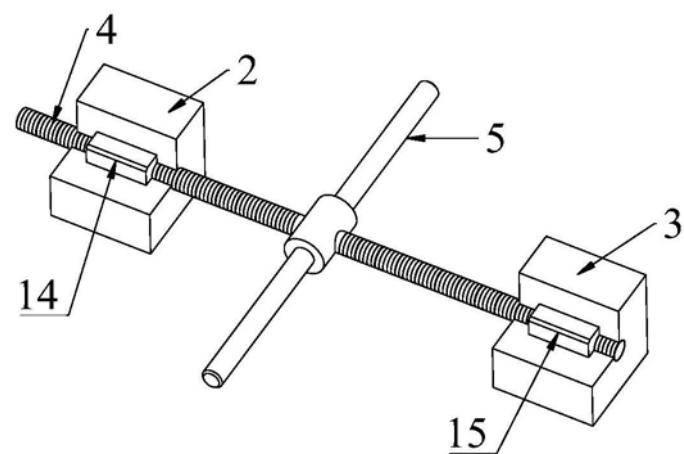


图9

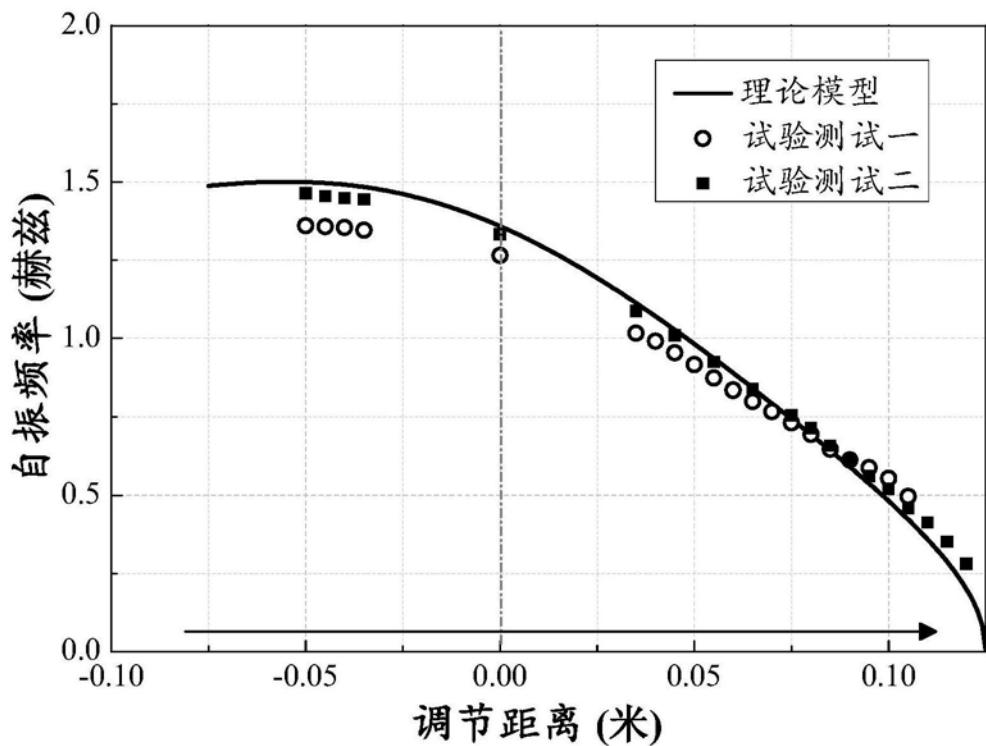


图10

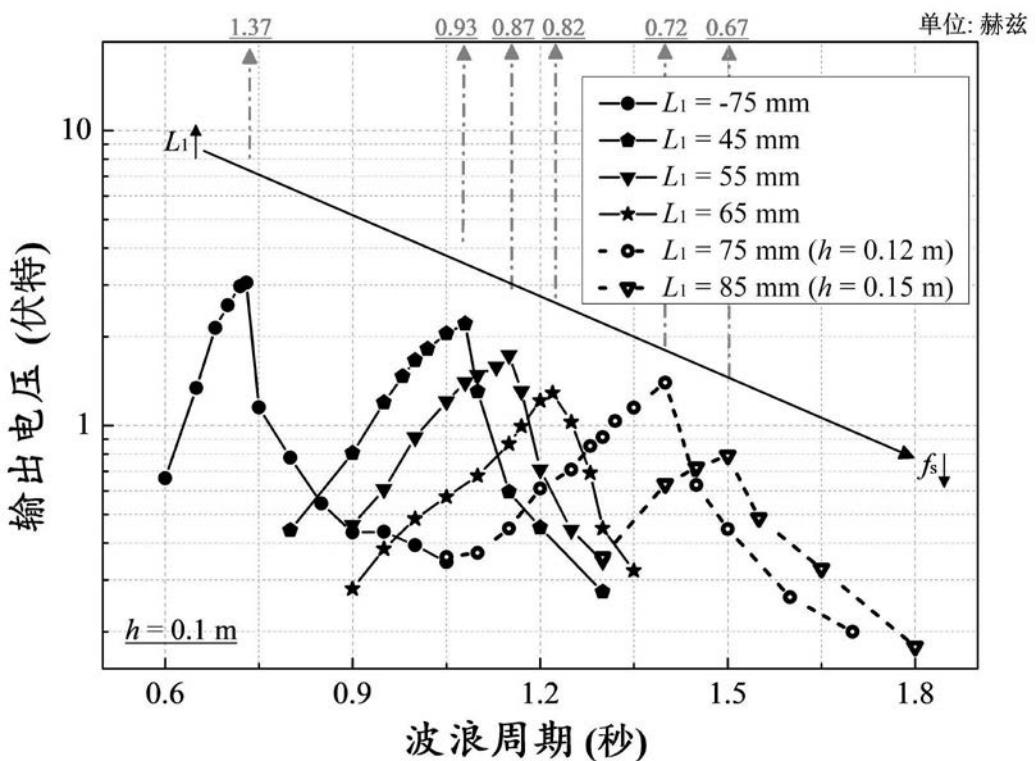


图11