

浮体绳轮波能采集技术的研究与试验

朱林森, 夏欣欣, 李亚军, 邬德峰, 鞠燕娜, 翟 强

(山东大学力学与机电装备联合工程技术研究中心, 威海 264209)

摘 要: 采用滚动导管机构消除前期浮体绳轮波能装置主绳缆与导绳器间的接触和磨损, 利用真空气缸收绳机构提高装置的收绳能力和可靠性。为研究改进后浮体绳轮波能装置的采集效率, 基于有限水深 Airy 波理论和莫里森方程, 利用 Aqwa 和 Orcaflex 浪流联合作用的水动力仿真技术, 以波能装置具有最大波能采集效率为优化目标, 对改进后浮体绳轮波能装置的质量、阻尼系数、收绳力等关键参数进行优化。常见海况下的优化计算结果表明: 改进后的浮体绳轮波能装置具有较高的波能采集效率, 且小浪下的装置最优采集效率高于大浪下的装置最优采集效率。

关键词: 波能装置; 实海况试验; 采集效率; 浮体绳轮; 水动力仿真

中图分类号: TM612

文献标识码: A

0 引 言

目前国内外关于提高波能装置可靠性、采集效率和性价比的主要研究内容为: 1) 波能采集原理和结构的原始创新; 2) 基于理论分析的结构优化; 3) 小尺寸物理模型的室内实验; 4) 原型机的海试验证。在结构优化阶段, 利用成熟的水动力学软件对波能装置进行仿真和优化是一种常见的理论研究手段^[1,2]。譬如, 集美大学的毛来锋^[3]利用 Aqwa 和 Matlab 软件对 8 种常见的振荡浮子的水动力特性进行了分析, 优化浮子外形参数, 寻找适合厦门海况的振荡浮子的最优结构形式; 中国海洋大学的史宏达等^[4]通过物理模型试验对振荡浮子波能发电装置的工作性能进行了研究, 发现锥形的振荡浮子捕能效率较高; 哈尔滨工程大学的郑雄波^[5]针对立柱式振荡浮子波能装置, 通过求解装置的运动方程, 分析了 PTO 系统的阻尼、弹簧、浮子和立柱尺寸等参数对最大俘获宽度比的影响, 以提高装置的能量采集效率。

浮体绳轮波能装置是一种典型的点吸收式波能装置, 该装置利用浮体绳轮机构采集波浪能。在浮体绳轮波能装置前期的研究中, 课题组分别针对浮体绳轮波能装置的浮体底面形状、系泊方案、收绳方案等进行了系统的优化研究, 并于 2015 年完

成样机的研制和海试等工作。实海况试验结果表明, 浮体绳轮波能样机具有极端气候下生存能力强、性价比高的优势, 但同时存在波能采集效率低和绳缆磨损等问题。针对此, 本文首先分析导致样机波能采集效率低的原因, 并通过二次海试进行验证, 然后对现有波能样机提出进一步的改造方案, 并选用合适的波浪理论, 利用水动力仿真软件 Aqwa 和 Orcaflex, 以波能装置具有最大波能采集效率为优化目标, 对改造后浮体绳轮波能装置的质量、阻尼系数、收绳力等关键参数进行优化, 并求取装置在常见海况下的最优波能采集效率。

1 波能装置样机的海试及改进

1.1 基于弹簧收绳的浮体绳轮波能装置及其海试

如图 1 所示, 浮体绳轮波浪能装置由重力锚、主绳缆、导绳器、卷筒、收绳弹簧、发电机组、圆柱浮体、锚链等构成。主绳缆一端系于海底的重力锚上, 另一端经导绳器缠绕在卷筒上, 当波浪推动浮体上升时, 主绳缆拖动卷筒正向旋转, 卷筒直接驱动低速同步永磁交流发电机发电; 当浮体随波浪下降时, 在收绳弹簧的作用下拉动卷筒反向旋转, 实现主绳缆的自动回收缠绕, 为下一波波能的采集做好准备。为了确保收绳及时, 在卷筒轴与电机轴之

收稿日期: 2018-10-08

基金项目: 国家海洋可再生能源专项(GHME2011BL02); 山东省重点研发计划(2018GHY115024)

通信作者: 朱林森(1966—), 男, 博士、教授, 主要从事海洋波浪能利用技术与装备方面的研究。zllinsen@sdu.edu.cn

间装有单向轴承,卷筒轴反向旋转时电机转轴并不旋转,浮体在下降过程中不发电,因此浮体绳轮波能装置具有半程采集波能的特点^[6]。

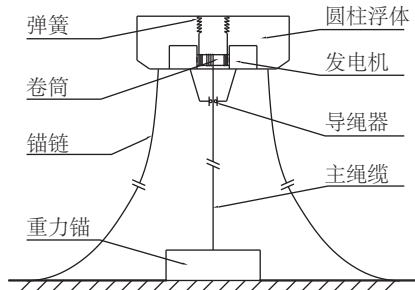


图1 基于弹簧收绳的浮体绳轮波能装置工作原理示意图

Fig. 1 Buoy-rope-drum wave power schematic diagram based on spring receiving line

浮体绳轮波能发电技术在2011年国家海洋可再生能源专项的资助下历经4a时间的理论研究、模型实验、样机研制等过程,于2015年4月8日~8月27日在山东威海小石岛海域进行了第一次实海况试验,如图2所示。样机浮体直径为4.5 m,高度2.5 m,装置质量为12.5 t,装机容量为10 kW,收绳弹簧刚度系数为700 N/m,预拉力为700 N。



图2 海试中的浮体绳轮波能装置样机

Fig. 2 Buoy-rope-drum wave power prototype in sea trial

海试期间历经台风“苏迪罗”(海风10级,浪高5 m)的考验,样机性能(系泊、密封、监控等)维持完好,但发现与导绳器接触的主绳缆(材料为UHMPV)出现磨损。此外,海试期间还发现样机在常见波况下的瞬时最大发电功率较大,但平均发电功率过低。为不失一般性,分别取小浪和中浪下的实际发电状况进行说明。

图3所示为2015年4月19日10:40:00~10:59:59样机实测发电功率图。期间波况为有效波高0.5 m,有效波周期3.5 s。从图3可知,样机最大发电功率可达712 W,但大于200 W的高功率点出现频率太低,样机平均发电功率只有46 W,平均发电效率仅

为2.3%,平均波能采集功率(波能一级转换功率)为121 W,平均波能采集效率为6.1%。

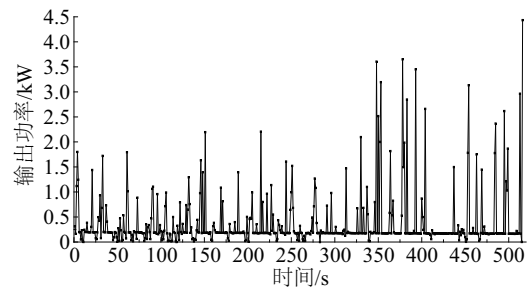


图3 小浪下样机实测发电功率图

Fig. 3 Power generation diagram of prototype under small waves

图4所示为2015年4月19日20:42:01~21:02:00样机实测发电功率图。期间波况为有效波高1.7 m,有效波周期5.7 s。从图4可知,样机最大发电功率可达16034 W,但大于2 kW的高功率点出现频率太低,样机平均发电功率只有440 W,平均发电效率仅为1.2%,平均波能采集功率只有1100 W,平均波能采集效率仅3.0%。

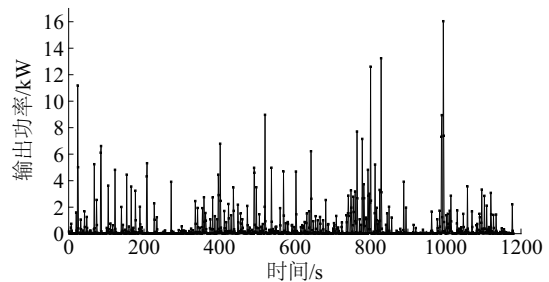


图4 中浪下样机实测发电功率图

Fig. 4 Power generation diagram of prototype under medium waves

综上所述,浮体绳轮波能装置样机第一次海试期间在小浪和中浪下的波能采集效率过低,经数据分析初步判断其原因为:弹簧回收主绳缆的能力太弱,加之海流的作用,致使浮体下落时主绳缆回收严重滞后,浮体上升阶段的有效做功行程大幅缩短,从而严重削弱了装置的波能采集效率。

1.2 基于配重收绳的浮体绳轮波能装置及其海试

为了进一步验证弹簧收绳能力弱是导致浮体绳轮波能样机采集效率过低的主要原因,课题组在海试样机基础上,将弹簧收绳改为配重收绳,如图5所示。导杆下端与锚石铰链,上端与主绳缆相连,收绳配重可沿直立导杆上下移动,浮体下落时配重

通过收绳绳缆,拖动卷筒反转实现对主绳缆的回收,因此收绳能力的大小与收绳配重的质量成正比,为了大幅提高样机的收绳能力,收绳配重设计质量为 240 kg,相对于前期弹簧收绳方案,采用配重收绳方案样机收绳能力提高 3 倍。经配重收绳改造后的浮体绳轮波能装置样机如图 6 所示。

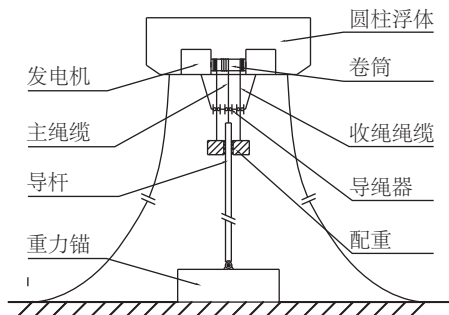


图 5 基于配重收绳的浮体绳轮波能装置工作原理示意图

Fig. 5 Buoy-rope-drum wave power schematic diagram based on weight receiving line

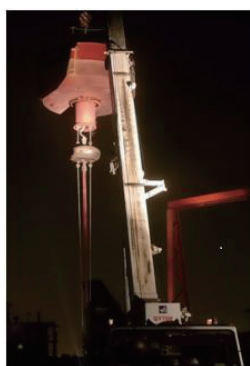


图 6 基于配重收绳的浮体绳轮波能装置样机

Fig. 6 Buoy-rope-drum wave power prototype based on weight receiving line

改造后的样机于 2015 年 12 月 10 日进行第二次海试。图 7 所示为 2015 年 12 月 10 日 20:42:01~21:02:00 样机的实测发电功率图。期间波况为有效

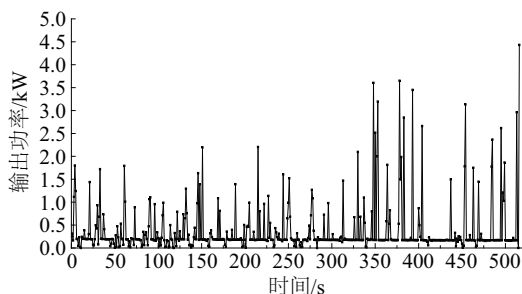


图 7 小浪下改造后样机实测发电功率图

Fig. 7 Actual power generation diagram of prototype after modification under small waves

波高 0.4 m,有效波周期 3.4 s。从图 7 可知,样机最大发电功率可达 4432 W,大于 200 W 的高功率点出现频率很高,样机平均发电功率为 377 W,样机平均发电效率为 30.8%,样机平均波能采集功率为 817 W,样机平均波能采集效率为 66.7%。

表 1 所示为样机两次实海况试验部分数据。通过比较小浪下的两组数据可知,改造后的配重收绳样机的平均波能采集效率,远高于弹簧收绳样机的平均波能采集效率,该结果验证了弹簧收绳能力弱是导致前期海试中浮体绳轮波能采集效率过低的主要原因。由于受样机安装空间和项目进度所限,前期样机的改造采取简单易行的配重收绳方案,该方案虽然便于提高样机收绳能力,但由于收绳配重外置,可靠性较差,在海试期间配重多次被海水中的破碎渔网和绳缆缠绕,导致栓系配重的收绳绳缆多次拉脱,从而未能及时测到样机在中到大浪下的发电数据。

表 1 样机海试数据

Table 1 Prototype trial data in sea

收绳方式	弹簧收绳	配重收绳	弹簧收绳
有效波高/m	0.5	0.4	1.7
有效波周期/s	3.5	3.4	5.7
潮流流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5	1.5	1.2
水深/m	20	20	20
理论占有波能功率/W	1969	1224	37064
实测平均发电功率/W	46	377	440
实测平均发电效率/%	2.3	30.8	1.2
实测平均波能采集功率/W	121	817	1100
实测平均波能采集效率/W	6.1	66.7	3.0

1.3 基于真空气缸收绳的浮体绳轮波能装置

针对浮体绳轮波能装置样机海试结果,本文提出如下改进措施。如图 8 所示,首先采用滚动导管理机构代替导绳器机构,消除主绳缆与导绳器间的接触和磨损;其次利用真空气缸代替拉簧,承担主绳缆的回收功能。由于真空气缸内置于浮体内部,不受海水中漂浮物的干扰,可大幅提高收绳的可靠性,同时由于真空气缸收绳能力大且活塞惯性小,有助于大幅提高波能装置的采集效率。

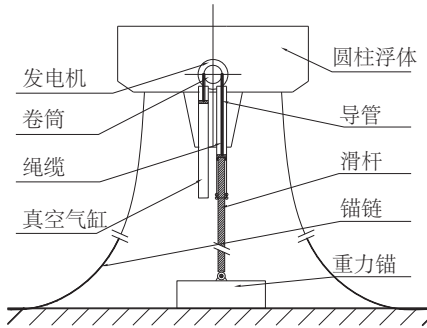


图8 改进后的浮体绳轮波能装置工作原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of working principle of improved buoy-rope-drum wave energy device

2 波能装置水动力学基础

2.1 波浪理论的选择

浮体绳轮波能装置试验海域的波况数据为:水深 $d=20$ m, 规则波, 波周期 $T=6.3$ s, 波高 $H=2$ m, 海流流速 $v=1.2$ m/s。由于 $T\sqrt{\frac{g}{d}}=4.41<6$, 且 $\frac{H}{d}=0.1<0.2$, 根据文献[7]关于波浪理论的适用范围, 本文可采用线性波浪理论。

由于线性波的弥散关系为:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (1)$$

波浪角频率:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

根据试验海况参数, 利用式(1)和式(2)可求得波数 $k=0.105$, 波长 L 由式(6)计算为 60 m。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (3)$$

由于 $0.05 < \frac{d}{L} = 0.33 < 0.5$, 根据文献[7]关于波浪水深的判断依据, 试验海域波浪属于有限水深波浪。

综上所述, 本文采用有限水深线性波理论。

2.2 有限水深线性波波浪理论

微幅线性波如图9所示^[7]。

线性波的波面方程为:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

式中, a ——波幅, m, $a = H/2$ 。

线性波浪的速度势函数为:

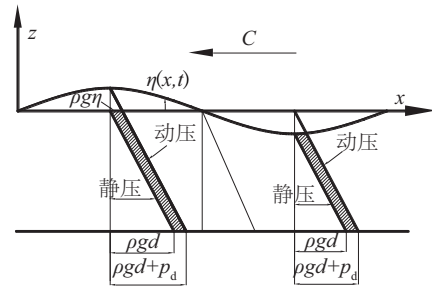


图9 微幅线性波

Fig. 9 Microamplitude linear wave

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (5)$$

流体水质点水平速度分量为:

$$u_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

流体水质点垂直速度分量为:

$$u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

流体水质点的动水压强为:

$$p_d = \rho g \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \eta \quad (8)$$

单位时间沿波浪传播方向跨过与波浪传播方向垂直的单位宽度铅直断面的能量称为波能流, 单位 W/m, 它等于该断面上动水压力对流体流量所做的功在一个波浪周期内的平均值, 其公式为:

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-d}^y p_d u_x dz dt \\ &= \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \tanh kd \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

波能装置在一个波浪周期内所占有的平均波功率(单位为 W)为:

$$E_w = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T D \tanh kd \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \quad (10)$$

式中, ρ ——海水密度, kg/m³; D ——浮体直径, m。

2.3 莫里森方程^[7]

对于海洋工程结构, 水面以下的结构构件, 均会受到波浪载荷的作用。由于 $\frac{D}{L} = \frac{4.5}{60} = 0.075 < 0.2$, 波能装置浮体尺度远小于入射波波长, 即浮体本身对波浪运动影响很小, 波浪对浮体的作用主要表现为附加质量效应和粘滞效应。根据文献[7]选用 Morison 方程计算装置所受到的波浪力。波能装置的附加质量系数可利用 Aqwa 的频域分析得到, 拖曳力系数可参照国家规范数据。

3 波能装置水动力仿真技术

3.1 波能装置水动力仿真技术

本文首先利用 Aqwa 强大的水动力参数计算功能,通过频域分析求解波能装置浮体的附加质量系数,然后导入 Orcaflex,利用 Orcaflex 强大的流固耦合能力实现对浮体绳轮波能装置的水动力仿真^[8]。为此,需将绳轮机构等效为弹簧阻尼模块,如图 10 所示。

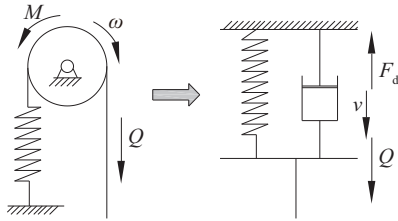


图 10 绳轮采集机构的等效转换

Fig. 10 Equivalent conversion of rope wheel acquisition mechanism

模块阻尼与模块下端线速度之积等效于绳轮阻力矩与绳轮角速度之积,该乘积就是波能装置的波能采集功率(一级波能转换功率);另外,还需将弹簧收绳力按图 11a 所示设置,则弹簧近似为恒力弹簧,以模拟真空气缸;其次将阻尼系数按图 11b 所示设计,则阻尼变为单向阻尼,满足浮体绳轮波能装置半程采集波浪能的特点。

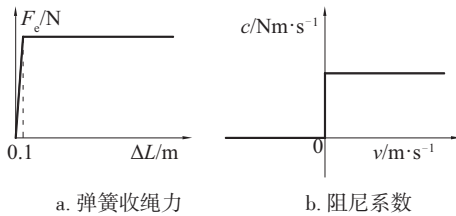


图 11 弹簧刚度系数与阻尼系数的设置

Fig. 11 Setting of spring stiffness coefficient and damping coefficient

本文仿真海况设置为:海底为刚性海底,海水密度 $\rho = 025 \text{ kg/m}^3$,海水深度 $d=20 \text{ m}$,波浪理论为有限水深线性规则波,波高 $H=2 \text{ m}$,波周期 $T=6.3 \text{ s}$,海流 $v=1.2 \text{ m/s}$ 。浮体绳轮波能装置主要参数:浮体直径 $D=4.5 \text{ m}$,高度为 $h=2.5 \text{ m}$,外导管与浮体固联,其长度为 $l_1=8 \text{ m}$ 、内径 $d_1=0.30 \text{ m}$,内导管与海底重力锚球铰联接,其长度

$l_2=10 \text{ m}$ 、外径 $d_2=0.20 \text{ m}$;主绳缆线密度为 1.6 kg/m ,主绳缆横截面直径 $d_3=0.042 \text{ m}$,主绳缆一端与内导管上端铰链,另一端与弹簧阻尼模块下端铰链。采用三锚链系泊,锚链长度 50 m ,锚链线密度为 28 kg/m ,三锚链沿中心重力锚石均布,其中一根锚链布放方向与来波方向一致,改进后的浮体绳轮波能装置仿真模型如图 12 所示。

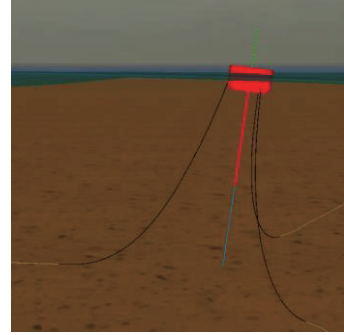


图 12 改进后的波能装置仿真模型

Fig. 12 Simulation of improved wave energy device

3.2 波能装置采集功率的计算

基于 Orcaflex 完成仿真计算后,在后处理模块中提取主绳缆的瞬时拉力 Q (单位为 N),则瞬时阻尼力 F_d (单位 N)为:

$$F_d = Q - P_0 \quad (11)$$

$$F_d = cv \quad (12)$$

式中, P_0 ——真空气缸收绳力, N ; c ——阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s/m}$; v ——弹簧阻尼模块下端的移动速度,大小等于浮体的垂荡速度, m/s 。

由于浮体绳轮波能装置具有半程采集特点,波能装置瞬时采集功率 P (单位为 W)计算公式应为:

$$P = F_d v = F_d^2 / c \quad (13)$$

波能装置在一个周期内的平均采集功率为:

$$\bar{P} = \frac{\int_0^T P dt}{T} \quad (14)$$

由于 Orcaflex 中数据输出频率为 100 Hz ,而波浪周期为 $3 \sim 15 \text{ s}$,因此波能装置的平均采集功率 \bar{P} (单位为 W)可近似看成是 N 个完整周期内装置瞬时功率点 P_i 的平均值,由式(11)~式(14)得:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^n [Q_i - P_0]^2 \quad (15)$$

式中, n —— N 个完整周期内装置瞬时功率点的数量; Q_i 、 l_i 、 P_i ——第 i 个点的瞬时主绳缆拉力、弹

簧长度、波能采集功率。

波能装置的平均采集效率 ε 为:

$$\varepsilon = \frac{\bar{P}}{E_w} \quad (16)$$

4 波能装置参数优化

波能装置平均采集效率是反映波能装置先进性的重要指标之一。本文针对规则波(波高 $H=2\text{ m}$, 波周期 $T=6.3\text{ s}$), 海流 $v=1.2\text{ m/s}$ 的海况, 基于上述仿真技术, 以波能采集效率为优化目标, 现分别对改进后的浮体绳轮波能装置的质量、阻尼系数和收绳力进行优化, 并求取最优波能采集效率。优化前的浮体绳轮波能装置关键参数取值: 质量为 12.5 t , 样机阻尼系数为 $250\text{ kN}\cdot\text{s/m}$, 收绳力为 1 kN 。

4.1 波能装置质量优化

现将浮体质量的优化范围设定为 $6\sim 16\text{ t}$, 步长为 1 t , 基于 Aqwa 频域分析求得不同质量波能装置在规则波(波高 $H=2\text{ m}$, 波周期 $T=6.3\text{ s}$)下的附加质量系数, 如表 2 所示。

表 2 波能装置各质量下的附加质量系数

Table 2 Additional mass coefficient of wave energy device under each mass

浮体的质量/t	附加质量系数	
	水平方向	垂荡方向
6	0.232	4.519
7	0.242	3.800
8	0.267	3.277
9	0.288	2.890
10	0.309	2.577
11	0.334	2.313
12	0.358	2.012
13	0.372	1.925
14	0.390	1.774
15	0.407	1.644
16	0.422	1.528

将表 2 中的附加质量系数导入 Orcaflex 中, 样机等效阻尼系数暂取 $250\text{ kN}\cdot\text{s/m}$, 收绳力暂取 1 kN , 完成相应质量的波能装置的水动力仿真, 然后提取相关仿真数据, 利用式(15)求取各质量下浮体绳轮波

能装置的平均采集功率, 如图 13 所示。

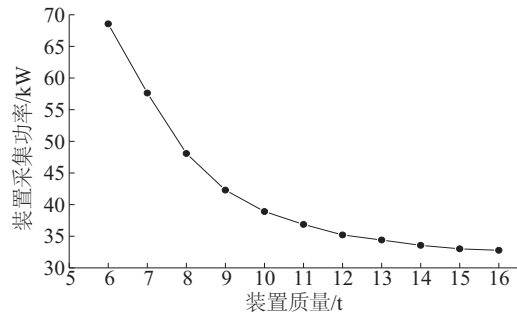


图 13 波能装置在各质量下的平均采集功率

Fig. 13 Second generation floating body pulley wave energy device simulation model

由图 13 可看出: 在其他参数不变的情况下, 浮体质量对装置采集功率的影响显著。为了提高装置的采集功率装置应采用较小的质量, 但在实际生产过程中, 受材料和制造条件的限制, 装置质量不能太小, 综合考虑制造的经济性、可行性以及发电装置的高效性, 改进后的浮体绳轮波能装置的最优质量选取 8 t 。

4.2 波能装置等效阻尼系数优化

在波能装置最优质量 8 t 的基础上, 对装置的等效阻尼系数进行优化。选取阻尼系数的优化范围为 $200\sim 400\text{ kN}\cdot\text{s/m}$, 步长为 $10\text{ kN}\cdot\text{s/m}$, 计算各负载阻尼系数下装置的平均波能采集功率, 如图 14 所示。

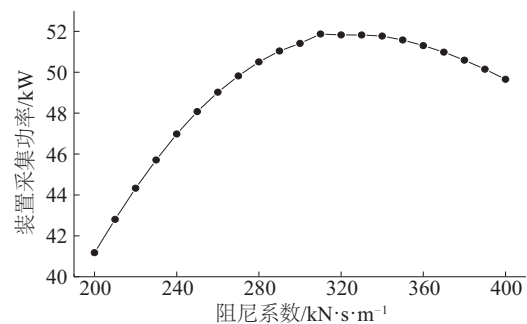


图 14 波能装置在各阻尼系数下的平均采集功率

Fig. 14 Acquisition power under load damping of wave energy device

由图 14 可知: 随着阻尼系数的增大, 装置的采集功率呈先增大后减少的趋势。负载阻尼系数在 $310\text{ kN}\cdot\text{s/m}$ 附近, 装置的采集功率取得最大值。因此波能装置质量为 8 t , 在波高 2 m , 波周期 6.3 s 的规则波下, 当阻尼系数为 $310\text{ kN}\cdot\text{s/m}$ 时, 装置的波

能平均采集功率达到最大值 51.869 kW。

4.3 收绳力的优化

浮体绳轮波能装置收绳力的大小直接影响装置收绳的及时性,进而对波能装置采集效率产生显著影响。基于上述仿真模型,保持质量和负载阻尼系数为上述最优值,对装置的收绳力进行优化,选取收绳力的优化范围为 1~40 kN,步长 1 kN,求得不同收绳力下的波能装置采集功率,如图 15 所示。

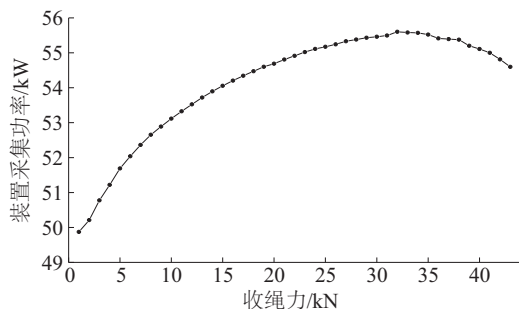


图 15 波能装置在各收绳力下的平均采集功率

Fig. 15 Acquisition power curve of each cable receiving force of wave energy device

由图 15 可知:当收绳力在 1~10 kN 时,波能装置的采集效率快速增加;当收绳力达到 10 kN 之后,随着收绳力的增加,装置波能平均采集功率的增长速度明显变缓;当收绳力为 32 kN 时,装置平均波能采集功率达到最大值 55.6 kW,对应平均波能采集效率为 45.6%,之后随着收绳力的增大,装置平均波能采集功率逐渐减小。

4.4 优化结果

综上所述,利用水动力仿真软件 Aqwa 和 Orcaflex,得到规则波(波高 $H=2$ m,波周期 $T=6.3$ s)在海流 $v=1.2$ m/s 海况下的装置最优参数及其采集效率。为了全面了解改进后浮体绳轮波能装置在常见海况下的发电效果,且不失一般性,再求取 2 种常见海况下的装置优化结果,如表 3 所示。

由表 3 可知,改进后的浮体绳轮波能装置具有如下特点:

- 1)装置的最优阻尼系数和最优收绳力大小与波高和波周期正相关;
- 2)装置在常见波况下的平均波能采集效率较高,且小浪下的波能采集效率高于大浪下的采集效率。

表 3 不同海况下的装置优化结果

Table 3 Optimization results for different sea conditions

参数	海况 1	海况 2	海况 3
波高/m	0.5	1	2
波周期/s	3.4	5.2	6.3
潮流流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.2	1.2	1.2
水深/m	20	20	20
理论占有波能功率/W	3764	23611	121220
最优质量/t	8	8	8
最优阻尼系数/ $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	60	190	310
最优收绳力/kN	5	8	32
最优平均波能采集功率/W	2482	11469	55600
最优平均波能采集效率/%	66	48.6	46

5 结 论

本文针对浮体绳轮波能装置样机实海况试验中发现的问题,利用导管机构代替导绳器机构,消除主绳缆的磨损问题,同时采用真空气缸代替拉和配重,可大幅提高样机收绳能力。

为了验证改进后的浮体绳轮波能装置的波能采集效果,本文基于有限水深 Airy 波理论和莫里森方程,利用 Aqwa 和 Orcaflex 浪流联合水动力仿真技术,以波能装置具有最大采集效率为优化目标,针对常见规则波波况,对改进后的浮体绳轮波能装置的质量、阻尼系数、收绳力等关键参数进行优化并求取最优波能采集功率和采集效率。

3 种常见海况的优化结果表明:改进后的浮体绳轮波能发电装置的最优阻尼系数和最优收绳力的大小与波浪参数密切相关,装置在常见浪况的平均采集效率较高,且小浪下的最优采集效率高于大浪下的采集效率。

[参考文献]

- [1] Gomes R P F, Henriques J C C, Gato L M C, et al. Hydrodynamic optimization of an axisymmetric floating oscillating water column for wave energy conversion[J]. Renewable Energy, 2012, 44(2): 328—339.
- [2] Budal K, Falnes J. The Norwegian wave-power buoy project[R]. NTNU, 1982.
- [3] 毛来锋. 波浪能发电系统的振荡浮子结构优化[D]. 厦门: 集美大学, 2013.

- [3] Mao Laifeng. Structural optimization on the oscillating buoy of the wave power generation system[D]. Xiamen: Jimei University, 2013.
- [4] 史宏达, 曹飞飞, 马哲, 等. 振荡浮子式波浪发电装置物理模型试验研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 98—104.
- [4] Shi Hongda, Cao Feifei, Ma Zhe, et al. Physical model experimental study on the floating buoy wave power generator[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(4): 98—104.
- [5] 郑雄波. 两类点吸收式波能装置水动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [5] Zheng Xiongbo. Study on the hydrodynamic performance for two kinds of point absorbing wave energy device[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [6] 朱林森, 曲严明, 王延刚, 等. 浮体绳轮波浪发电效率的研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1381—1386.
- [6] Zhu Linsen, Qu Yanming, Wang Yangang, et al. Wave power efficiency of buoy-rope-drum[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1381—1386.
- [7] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
- [7] Wang Shuqing, Liang Bingchen. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013.
- [8] Hill J, Laycock S, Chai S, et al. Hydrodynamic loads and response of a Mid Water Arch structure[J]. Ocean Engineering, 2014, 83(2): 76—86.

RESEARCH AND TEST ON BUOY-ROPE-DRUM WAVE ENERGY GATHERING TECHNOLOGY

Zhu Linsen, Xia Xinxin, Li Yajun, Wu Defeng, Ju Yanna, Zhai Qiang

(Research Center of Mechanics and Mechatronic Equipment, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: The vacuum cylinder technology is used to improve the ability and reliability to retrieve the rope in the pre-floating rope pulley wave energy device, and the guide rod technology is used to eliminate contact and wear between the main cable and rope guide. In order to study the gathering efficiency of the reconstructive wave energy device, based on the finite water depth Airy wave theory and Morrison equations, and the maximum wave energy gathering efficiency taken as the optimization target, the key parameters of the reconstructive buoy-rope-drum wave energy device, such as the quality, damping coefficient and rope pulling force, are optimized by using the Aqwa and Orcaflex. The optimization results in the three common sea conditions show that the reconstructive buoy-rope-drum wave energy device has higher wave energy gathering efficiency, and the wave energy gathering efficiency in small waves is higher than that in big waves.

Keywords: wave energy devices; sea tests; sampling efficiency; buoy-rope-drum; hydrodynamic simulation