南海海况下振荡式波能发电装置的研究与分析

毛来锋1,张 军2,3,曲泉铀1,何宏舟2,3

(1.集美大学轮机工程学院 厦门 361000;2.集美大学机械工程学院 厦门 361000;
 3.福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心 厦门 361000)

摘 要:振荡浮子波浪能发电装置能量的转换效率较高,可以在不同水深条件(特别是 超过40m的深水区)下工作,南海海域属于深水区,振荡浮子波能发电装置更能较好地适应。文 章在已有资料的基础上,根据线性波浪理论中随机波浪力的理论,结合南海海况,计算振荡浮子 垂直方向的波浪力分布,再用 AQWA 模拟计算不同形状的浮子在随机波浪力下的运动与受力 分析。综合以上研究得出适合南海海况的浮子形状,完成装置的初步优化,为装置的海试以及推 广应用提供依据,为三沙市在海洋能(波浪能)利用方面提供参考。

关键 词:随机波浪理论;振荡式波能发电装置;浮子形状;AQWA 模拟

1 引言

开发和利用海洋再生能资源,以部分海洋能 源代替常规能源,对于解决全世界所面临的能源 短缺、温室效应和环境污染等问题具有重要的社 会经济意义。海洋再生资源主要有波浪能、潮汐 能、温差能、盐差能等,而波浪能蕴藏又很丰富, 开发利用价值大,除了可以发电以外,还可以用 于抽水、供热、海水淡化等,波浪能等海洋的应用 前景广阔。据调查统计,我国沿海和岛屿附近可 开发的波浪能理论平均功率约为1 258× 10⁴ kW,并且能源 90%以上分布在常规能源严重 缺乏的华东,沪、闽、浙沿岸^[1]。

振荡浮子式波浪能发电装置在欧洲被称为 第三代装置,由于结构与波浪直接接触获得波 浪能,因此能量的转换效率较之前的波能发电 装置的效率有所提高,例如:一般的海浪发电装 置的转换效率在10%~30%,如振荡水柱式波 能转换装置,而振荡浮子式转换装置转换效率 能达到46%以上^[2-3]。可以在不同水深条件 (特别是超过40m的深水区)下工作^[3],而南海 海域属于深海区,振荡浮子波能发电装置更能 较好地适应。

本研究在已有的资料基础上,运用线性波 浪理论中随机波浪力的理论,分析振荡浮子垂 直方向的波浪力分布,并采用 AQWA 软件对不 同形状的浮子在随机波浪力下运动学特征进行 模拟。综合以上研究得出最适合南海海况的浮 子形状,研究结果对振荡式波能发电装置浮子 形状的结构优化及设计具有一定的意义,为三 沙市海洋能(波浪能)利用和发展提供参考,进 而为三沙市的基础设施建设与发展尽一份微薄 之力。

2 随机波浪理论

2.1 随机波浪运动

海浪线性模型包括 Pierson 模型、Longuet-Higgins 模型、Fourier-StieItjes 的积分模型等,本 研究采用 Longuet-Higgins 模型。Longuet-Higgins 海浪模型,平稳海况下的海浪可视为平稳的 具有各态历经性的随机过程,波动可看做是由无 限个振幅不等、频率不等、初相位不等,并在x,y平面上与x 轴成不同角度 θ 的方向传播的简单余 弦波叠加而成的。

按线性波理论,在一固定点的波面波动 η(t) 是有无限多个随机余弦组成波叠加而成的,即

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n)$$
(1)
对于每一个分波:

2)

$$\eta_{n} = a_{n}\cos(\omega_{n}t + \varepsilon_{n})$$
 (

式中:t表示时间; $a_n, \omega_n, \epsilon_n$,分别表示组成波的振幅、圆频率和相位,相位 ϵ_n 服从(0,2 π)上均匀分布即:

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & 0 \leqslant \varepsilon \leqslant 2\pi \\ 0, & \ddagger \& \end{cases}$$
(3)

平稳海况下的坡面高度分布符合高斯正态 分布。波面垂直向上速度 μ 和波面垂直向上的 加速度 a 与薄面高度一样都遵从正态分布,它们 概率分布密度分别为:

$$P(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\eta}} \exp\left(-\frac{\eta^{2}}{2\sigma_{\eta}^{2}}\right)$$
(4)

$$P(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mu}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_{\mu}^2}\right)$$
(5)

$$P(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_a}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_a^2}\right)$$
(6)

式中: σ_{η}^{2} 表示波面高度的方差; σ_{μ}^{2} 表示波面垂直向上速度的方差; σ_{a}^{2} 表示波面垂直向上加速度的方差。

2.2 振荡浮子运动

由以上可知按线性波理论,固定点的随机波 面位移可表示为

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n)$$

上式表示不同时刻波面位移,假设浮子的运动频率、振幅和周期与波浪相同,浮子运动滞后波 面一个相位θ。此时浮子的运动可由下式表示:

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n + \theta) \qquad (7)$$

式中:H为浮子的垂直位移;A 浮子的振幅;θ为 浮子运动滞后于波面的运动的相位差。对式(7) 求一阶导数可得浮子垂直速度如下:

$$\mu_1(t) = -\sum_{n=1}^{\infty} A_n \omega_n \sin(\omega_n t + \varepsilon_n + \theta) \quad (8)$$

对式(7)求二阶导数可得浮子垂直加速度如下:

$$\mu_1(t) = -\sum_{n=1}^{\infty} A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \varepsilon_n + \theta) \quad (9)$$

上式为浮子垂荡运动分析,浮子在垂直向所 受的力有海浪波动带来的波浪力、浮力、浮子的 重力和与机械连接所带来的阻力。如果仅考虑 波浪力,根据牛顿第二定律 F=ma 得到

$$F_{ik}(t) = -m \sum_{n=1}^{\infty} A_n \omega_n^2 \cos(\omega_n t + \varepsilon_n + \theta)$$
(10)

波面垂直加速度遵从正态分布,由上面分析 得出浮子的垂直加速度也遵从正态分布,进一步 得出波浪力 F_波也遵从正态分布,从而得出浮子 是在正态分布的波浪力下做正态运动。

3 振荡浮子式波能发电装置浮子的模拟

3.1 振荡浮子波能发电装置

振荡浮子式波能发电是在波浪运动的浮子 捕获波浪能,把波浪能转化为浮子的机械能,通 过连接装置把浮子机械能传递到发电装置中进 行发电。

振荡浮子式波能发电装置的核心是依靠浮 子的运动捕获波浪能,将波浪能转化为浮子振动 的机械能,这是能量转化的第一步,直接决定装 置的能量转换效率,其中影响浮子捕获波浪能的 效率的最主要因素就是浮子的形状。



图 1 振荡浮子发电装置简图

3.2 模拟过程

南海上的风大多数为五级风以上,风速 8.0~10.7 m/s。风浪在东北季风时期以东北向 的浪为主,西南季风时期则是西南向的浪。在冬 季,全海区盛行东北浪。月平均波高,南海北部 为1.2~2.0 m,南海中部为1.0~2.5 m,南海南 部为0.5~2.0 m,月平均周期一般北部较大,整 体多为5~7 s。在夏季西南季风时期,6—8 月随 着西南季风的增强及台风活动的增加,会引起比 平常大得多的海浪,月平均波高,南海北部为 1.0 m 以上,南海中部为1.0~1.5 m,南海南部 为1.5 m 左右,月平均周期为5~7 s。^[4]

根据上述海况参数对不同形状浮子进行模拟计算,计算时所有浮子的体积和浸水体积相

同。不同浮子结构见图 2,浮子结构参数见表 1, 对 7 种浮体进行波浪力、位移、速度等分析。为 了方便,令球体为 1 号体,下梯体为 2 号体,上梯 体为 3 号体,圆柱体为 4 号体,正方体为 5 号体, 中间长两边短为 6 号体,中间短两边长为 7 号体。

南海海况参数:波高 1 m,周期 5~7 s,风速 10 m/s,观测值 γ 取 3,风区长度为 300 km,水深 为 100 m,海水密度为 ρ =1 025 kg/m³,重力加速 度为 g=9.8 N/kg。整个分析没有考虑海水的黏 滞系数(注:南海的水深平均 200 m,水深比较深, 所以在这里选择给定波普为 Jonswap 谱)。

给定海浪频谱为 Jonswap 谱即:

$$s_{\eta}(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4} (\frac{\omega_m}{\omega})^4\right] \gamma^a$$
 (11)

$$a = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_m)}{2\sigma^2 \omega_m^2}\right]$$
(12)

其中γ为谱峰升高因子,定义为

$$\gamma = \frac{s_{\eta}(\omega_m)}{s_{\eta}(\omega_m)_{P-M}}$$
(13)

 $s_{\eta}(\omega_m) = s_{\eta}(\omega_m)_{P-M}$ 分别为 Jonswap 谱的普 峰值(γ 的观测值为 1.5~6,平均值为 3.3);



$$egin{aligned} &\sigma=0.\ 07\,,&\omega\leqslant\omega_m\ &\sigma=0.\ 09\,,&\omega\geqslant\omega_m \end{aligned}$$

 α 是无因次风区 $x = gx/U^2$ (x 为风区长度, U 为海面以上 10 m 高度处的风速)的函数,即

$$\alpha = 0.076 x^{-0.22} \tag{14}$$

谱峰频率为

$$\omega_m = 22 \frac{g}{U} \tilde{x}^{-0.33} \tag{15}$$

表1 浮子结构参数

m	

浮子	半径	ĸ	宽	高	厚
1号体	1.31				
2号体		2/1		3.14	2
3号体		1/2		3.14	2
4 号体	1			3	
5 号体		2.11	2.11	2.11	
6 号体		1/2/1		4.71	1.33
7 号体		2/1/2		4.71	1.33

对上述结构浮子运动进行模拟,得到7种浮 子的垂直波浪总力、位移曲线(图3和图4)。

通过图 3 和图 4 可分析出每个浮子受到垂直 波浪力、位移情况,根据图中波浪力、位移曲线分 布情况很相似,范围大则接收到波浪力、位移运 动就大,故7号体得到的波浪力、位移范围最大, 2 号体、6 号体、3 号体、4 号体、5 号体、1 号体依 次减少。

根据图 3 和图 4 还可以得到,开始时每个浮 子的运动都不是很稳定,随着时间的延长,运动 越来越稳定,越来越具有规律性。这样可以找出 其中规律,虽然是随机波,也没有变得无规律可 循,使研究分析计算变得不太复杂。

通过图 3 和图 4 可以得出:7 号体运动比其 他体运动更剧烈,受到的波浪力、位移运动范围 明显比其他体要大,故能捕获较多的波浪能。

根据图 3 和图 4 分析得出,浮子在 0~45 s 时得到浮子的运动情况不是很具有规律性,这段 时间我们称为浮子的适应期,当 45 s 以后很明显 发现浮子各种运动、受力状态基本趋于给定波浪 运动,此时我们称为浮子的稳定期,主要就稳定 期进行计算分析。



图 4 7 种浮子垂直位移曲线

在 50~160 s时间内,浮子运动基本比较舒缓,变化不是很大,在 160~360 s内又运动类似波 浪运动。长时间分析得出浮子是在做周期约为 350 s的运动。那就可以认为浮子虽然是在随机波 的作用下,也可以看成在比较长的时间内做着周期 性的运动,只要分析其中一个周期运动即可。 以捕获波浪能最大的7号浮子,捕获较小的2 号浮子和最小的1号浮子为例,计算捕获的波浪能 效率。

根据 AQWA 软件模拟计算可以得到浮子位 移运动曲线图,在稳定区 55~165 s内浮子运动曲 线图和在规则波下的运动图重合度比较高,可以视 为规则波进行计算。

波浪能总能量 E_波:

$$E_{ik} = \frac{1}{2}\rho g A^2 \tag{16}$$

式中: ρ 为海水密度(取 1 025 kg/m³); g 为重力加 速度(取 9.8 N/kg); A 为振幅(波高)。

同理得出浮子捕捉到的波浪能 E_浮

$$E_{\vec{P}} = \frac{1}{2} (m\omega^2 + \rho gS) A_0^2 \qquad (17)$$

式中:m为浮子的质量;S表示浮子水面的截面积; A。表示浮子的振荡运动的振幅。

装置吸收波浪能的效率

$$\eta = \frac{E_{ik}}{E_{ij}} \tag{18}$$

经计算得出浮子吸收波浪力的效率(表 2)。

表 2 浮子吸收波浪力的效率

浮子	m/kg	A_0/m	$E_{ar{arepsilon}}/\mathrm{J}$	η
7 号体	4 712.39	0.591	2 076.77	41.34%
2 号体	4 712.39	0.382	1 768.95	35.22%
1号体	4 712.39	0.215	1 165.76	23.12%

由表 2 得出 7 号浮子捕捉波浪能效率最高,2 号体次之,1 号体最小。根据上述模拟计算得出浮 子垂直波浪力、位移运动情况,给定波浪相同,振幅 范围大则捕获波浪能就多,捕获效率高,计算情况 与之相符。由于进行模拟计算时只考虑了波浪力, 没有考虑其他的力,故计算效率可能会偏高,但对 于研究不同形状浮子捕获波浪能效率之间的设计 和比较选择,仍具有一定的指导意义。

综上所述,结果是在给定南海海况下得到,故

为在南海海况下更好地利用波浪能提供一点理论 依据,为三沙市在海洋能(波浪能)利用方面的建设 与发展提供参考,为三沙市基础设施建设与发展尽 一份微薄之力。

4 结论

运用线性波浪(随机波)理论知识,考虑南海海 况具体参数,采用 AQWA 软件对 7 种不同形体浮 子进行计算模拟,理论分析和模拟计算得到以下结 论:

(1)根据模拟结果,在给定条件相同的情况下, 获得各种不同结构浮子位移及所受的载荷曲线图。 模拟结果表明中间短两边长体最大,下梯体次之, 正方体和球体最小。

(2)对各种结构浮子的波浪能效率计算,结果 表明中间短两边长体浮子捕获波浪能效率最高,下 梯体次之,球体最小。由于计算时未考虑浮子所受 阻力,故模拟计算结果可能会偏高,但对于比较各 种不同浮子的运动规律及捕获波浪能的效率比较 分析,仍具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 程思.浅谈波浪能的利用和前景[J].商情,2011 (1):164.
- [2] 李仕成.振荡浮子式波能转换装置性能的实验研究 [D].大连:大连理工大学,2006.
- [3] 平丽.振荡浮子式波能转换装置性能的研究[D].大 连:大连理工大学,2005.
- [4] 邳帅. 起重船对南海海况的适用性研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院,2011.