

试验研究

波浪能发电装置选址前期的浮子研究

冯雪娇

(沈阳建筑大学,市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为保证波浪能发电装置的采能效率在实际应用中达到最大化,在波浪能发电装置选址前期,基于弗汝德-克雷洛夫假定法分析四种基本形状浮子受力情况,并利用 matlab 进行计算得出四种浮子分别在丹东和葫芦岛海域条件下的受力曲线图。结果显示,在两个海域条件下,垂直圆柱体所受的垂直波浪力均为最大。在波浪实际周期内,丹东海域的浮子所受的垂直波浪力要普遍高于葫芦岛海域所受的波浪力。由结果可知,适用两个海域的最佳浮子形状皆为垂直圆柱体,且丹东海域波浪能条件比葫芦岛更好,该结果可成为波浪能选址时的重要依据。

关键词:波浪能发电;选址前期;弗汝德-克雷洛夫假定法;浮子

中图分类号:TM612

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)05-0009-05

THE STUDY OF BUOY PRIOR TO SITING OF WAVE ENERGY CONVERTER

FENG Xue-jiao

(Shenyang Jianzhu University, School of Municipal and Environmental Engineering Shenyang 110168, China)

Abstract: Before selection of location for wave energy converter, in order to ensure the maximum efficiency of wave energy converter's buoy in practical application, Froude-Krylov assumption method is used to analyze buoy's force of four basic shapes. And the wave force of four buoy is calculated in sea condition of Dandong and Huludao respectively by MATLAB programming. The results show that the vertical wave force of the vertical cylinder is the largest in two areas. And in the actual wave period, the vertical wave force of the buoy in Dandong is generally higher than the force in Huludao. From the results, it is known that the vertical cylinder shape is the best in the application of both sea areas, and the sea condition of Dandong is better than Huludao for buoys. This result can be important basis for the selection of the wave energy converter's location.

Key words: wave energy generation; pre-location; Froude-Krylov assumption method; buoy

波浪能作为海洋能源之一的清洁可再生能源,由于其分布广泛,能量巨大,一直是很多科学家和发明家想要征服的对象^[1]。由于我国目前对于波浪能发电装置的研究仍处于单机研发改造阶段,所以针对波浪能发电装置产业化前期的研究

十分稀少^[2]。但由于近几年波浪能发电装置的研发已逐渐走向成熟,产业化势必会成为日后中国波浪能发电装置发展趋势的一种,所以开展产业化选址前期的研究有着非常的价值。波浪能发电装置的设计可简单分为水动力系统,发电系统,机械传动系统,自动控制系统几大系统^[3-4]。在波浪能发电装置产业化的前期阶段,水动力系统在实际海域条件下的应用情况是发电装置选址的重要影响

收稿日期:2015-12-20

作者简介:冯雪娇(1990-),硕士,研究方向:波浪能发电采能装置水动力学。

因素^[5]。水动力系统的关键组成部件为浮子,因此探讨快速又有参考性的发电装置的浮子受力分析方法及流程十分必要。本文以辽宁地区具有代表性的丹东,葫芦岛海域为例,在选出最佳浮子构型的基础上,得出浮子在预选海域条件下分别所受的波浪力,为之后波浪能装置的选址提供重要分析依据。

1 原理及条件

由于实际的海水海域条件十分复杂,属于非线性波浪。现有的理论尚不能完全准确的描述。弗汝德-克雷洛夫假定法针对实际工程的应用,简化了复杂的非线性波浪计算过程,经验与理论相结合,具体应用条件如下^[6-8]:

该流体是无粘性和不可压缩的,而运动是非旋转的;

入射波是规则简谐波;

考虑微小振幅及波长远大于波高。

而弗汝德-克雷洛夫假定法(简称 F-K 假定法)的详细计算方法是假定入射波动场不因潜体的存在而发生改变,原有的波压强分布保持不变,在这一基础上,计算出该浮体在入射波压强未受扰动的作用力,并通过绕射系数 C 加以修正^[9]。

其基本思想为:波浪力分为水平力和垂直力。利用基本公式进行积分在此基础上乘以绕射系数 C 进行修正,从而获得大尺度潜体所受的水平及垂直波浪力。由于振荡浮子的应用原理是应用垂直振动带动直线发电机发电,所以我们在此只考虑浮子所受的垂直波浪力。基本公式罗列如下:

假定法波浪力一般表达式为:

$$F = CF_K \quad (1)$$

其中可以用 $F_k = \rho V_0 (dv/dt)_\alpha$ 表示, $(dv/dt)_\alpha$ 表示当浮体不存在时,在排水体积 V_0 中水体的平均全加速度。由于作用在水体的每一质点加速度不可能完全相同,所以在此利用质点积分的形式求解作用于浮体上的水平力和垂直力,具体公式如下:

$$F_H = C_H \int_S P_x dS \quad (2)$$

$$F_v = C_v \int_S P_z dS \quad (3)$$

式中

P_x --入射波在潜体表面任意一点处的波压强的水平分量

P_z --入射波在潜体表面任意一点处的波压强的垂直分量

S --潜体浸没在海水中的总表面

C_H --水平绕射系数

C_v --垂直绕射系数

2 基本形状浮体波浪力分析

2.1 长方体浮体的垂直波浪力

设有一长方浮体,尺寸为长 L_1 (浮体沿传播方向的长度),宽 L_3 ,高 L_2 。假设浮体漂浮在海面上,水深为 h 。其形态如下图:

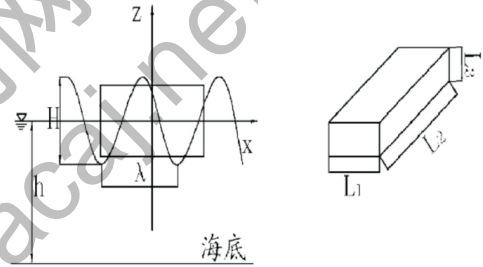


图1 长方形浮体示意

该长方形浮体在 t 时刻的吃水深度为 $d(t)$,入射波向 X 轴方向传播,入射波特征参数为波长 λ ,波高 H 。原点为该浮体的中心点与海面的交点,设 X 轴沿波浪传播方向为该坐标系正方向, Z 轴以向上为正, k 为波数。

长方体浮体在垂直方向所受波浪力计算如下:

$$\begin{aligned} F_v &= C_v \int_S P_z dS = C_v L_3 \left[\int_{-L_1/2}^{L_1/2} P_z dx - \int_{-L_1/2}^{L_1/2} P_1 dx \right] \\ &= C_v L_3 \int_{-L_1/2}^{L_1/2} \frac{\rho h H}{2} \frac{\cos(h-d(t))}{\cosh hk} \cos(kx - \omega t) dx \quad (4) \\ &= C_v \frac{\rho g H L_3}{k} \frac{\cos(h-d(t))}{\cosh hk} \sin \frac{1}{2} k L_1 \cos \omega t \end{aligned}$$

通过模型试验来确定长方体的垂直绕射系数 C_v 是十分必要的,其中浮体自身的相对大小对于 C_v 值有决定性影响。由于试验条件不完全,国内外通过模型试验得出的 C_v 值大小差别较大。HerbiCh, J.B.(1974)^[10]通过试验得出,建议长方体垂直绕射系数 C_v 的取值为 $C_v=2.7$ 。

2.2 水平圆柱体的垂直波浪力

设水平放置圆柱体有一端面半径为 R ，柱体长为 L ，漂浮在海面上，海深为 h ，浮体在 t 时刻吃水深度为 $d(t)$ ， k 为波数， c 为波浪的传播速度，其形态如图 2：

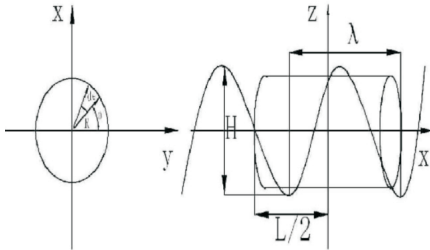


图 2 水平圆柱浮体示意

设 (x, R, θ) 为圆柱坐标系，则圆柱面上任一点坐标为：

$$\begin{cases} x=x \\ y=R\cos\theta \\ z=R\sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

为扰动入射波在圆柱面上任意点的压强为：

$$p = \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

则水平圆柱浮体的垂直波浪力模型如下（忽略粘滞效应）：

$$\begin{aligned} F_v &= C_v \int_s P_z dS = 2C_v \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-\pi/2}^{\arcsin \frac{d(t)-R}{R}} p \sin\theta \cdot R d\theta dx \\ &= 2C_v \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-\pi/2}^{\arcsin \frac{d(t)-R}{R}} \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh} \cos(kx - \omega t) \sin\theta \cdot R d\theta dx \\ &= C_v \frac{\rho g H A}{chkh} \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx - \omega t) dx \\ &= C_v \frac{\rho g H A}{chkh} \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$A = \int_{-\pi/2}^{\arcsin \frac{d(t)-R}{R}} chk(h+R\sin\theta) \sin\theta d\theta \quad (8)$$

水平圆柱体的绕射系数分析可参考垂直圆柱体。

2.3 垂直圆柱体的垂直波浪力

设半径为 R 的垂直圆柱体，其柱体长为 L ，浮在海中，水深为 h ，在 t 时刻浮体的吃水深度为 $d(t)$ ，其形态如图 3：

设圆柱坐标系为 (r, θ, z) ，则圆柱底面上任一点的柱坐标为

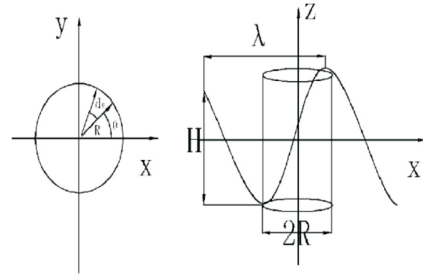


图 3 垂直圆柱浮体示意

$$\begin{cases} x=r\sin\theta \\ y=r\cos\theta \\ z=z \end{cases} \quad (9)$$

令 $\theta = \frac{\pi}{2} + \varphi$ ，则未扰动入射波在圆柱面任意点的

压强为：

$$p = \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh} \cos(kr\cos\theta - \omega t)$$

$$p = \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh}$$

$$\{ [J_0(kr) + 2J_2(kr)\cos 2\varphi] \cos \omega t - 2[J_1(kr)\sin\varphi] \sin \omega t \} \quad (10)$$

$$= \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh} [\cos(kr\sin\varphi)\cos\omega t - \sin(kr\sin\varphi)\sin\omega t]$$

经计算可得，

$$p = \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h+z)}{chkh}$$

$$\{ [J_0(kr) + 2J_2(kr)\cos 2\varphi] \cos \omega t - 2[J_1(kr)\sin\varphi] \sin \omega t \} \quad (11)$$

公式中， $J_0(kr)$ 、 $J_1(kr)$ 、 $J_2(kr)$ 分别为零阶、一阶、二阶第一类贝塞尔函数。

当 $H/2R$ 值很小的时候，粘滞效应可忽略不计，将上式的 p 和 $ds = r d\theta dr$ 代入式 (3)，可得垂直圆柱体所受的垂直波浪力为：

$$F_v = C_v \int_s p_z dS = 2C_v \int_0^{R\pi} p r d\theta dr$$

$$= 2C_v \int_0^R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\rho g H}{2} \frac{chk(h-d(t))}{chkh}$$

$$\{ [J_0(kr) + 2J_2(kr)\cos 2\varphi] \cos \omega t - 2J_1(kr)\sin\varphi \} r d\theta dr$$

$$= C_v \frac{\rho g \pi H J_1(kr)}{k} \frac{chk(h-d(t))}{chkh} \cos \omega t \quad (12)$$

当海浪波高一定时，垂直圆柱体的垂直波浪力的大小影响因素包括： C_v ，相对浸没高度 $\frac{d}{R}$ ，圆

柱体相对浸没半径 $\frac{2\pi R}{\lambda}$ 以及相对水深 $\frac{h}{R}$ 。本文采用的修正系数 C_v 来自于 Hogben.N 和 Standing R.G.^[11](1974)的模型试验。

2.4 正梯体的垂直波浪力

设浮子沿波方向长度为 l_1, l_2 作为浮子的高度,垂直波浪方向的浮子宽度为 l_3 。海水深度为 h 时,吃水深度在 t 时刻时设置成 $d(t)$,波的长度为 λ ,波高 H , x 轴正方向作为传播方向。如图 4:

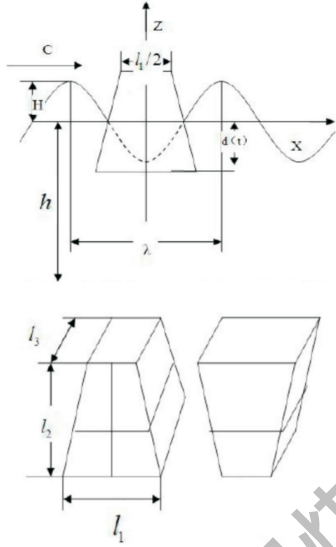


图 4 正梯体示意

则正梯体所受垂直波浪力的计算式为

$$F_{v3} = C_v \iint_S p_z dS = C_v (4 - \sqrt{10}) l_2 \int_{\frac{-l_1}{2}}^{\frac{l_1 \sqrt{10}}{8}} \frac{\rho g H}{2} \cdot \frac{\cosh k[h-d(t)]}{2} \cos(kx - \omega t) dx + \frac{13 - 4\sqrt{10}}{16} l_2 \left\{ \int_{\frac{-l_1}{2}}^{\frac{l_1 \sqrt{10}}{8}} \frac{\rho g H}{2} \cdot \frac{\cosh k[h-d(t)]}{2} \cos(kx - \omega t) dx \right\}$$

$$= C_v \frac{\rho g H l_2}{k} \frac{\cosh k[h-d(t)]}{\cosh kh} \cdot \left[(4 - \sqrt{10}) \sin \frac{k l_1 \sqrt{10}}{8} \cos \omega t + \frac{13 - 4\sqrt{10}}{8} \sin \frac{4 - \sqrt{10}}{8} l_1 k \cos \left(\frac{+\sqrt{10}}{8} + \omega t \right) \right] \quad (13)$$

3 实际海况波浪参数

实际海况参考位置选于葫芦岛市,葫芦岛港柳条沟港区地处渤海辽东湾西岸北侧,紧邻辽东湾海岸。该区四季海浪平均有效波高为 0.90 m,平

均有效周期为 3.50~4.00 s^[14-16]。

表 1 实际海况参数表^[12-13]

海域	春季		夏季		秋季		冬季	
	高度	周期	高度	周期	高度	周期	高度	周期
丹东	<1	3~4.5	<1.2	4~5.5	1~1.2	5~5.5	1.2~1.6	5~6
葫芦岛	<1	3	<0.6	3~4	<0.8	3~4	1~1.2	4.5~4.8



图 5 葫芦岛区域位置

实际海况参考位置 2 选于丹东市,位于辽东半岛,鸭绿江入海口,东邻朝鲜半岛,所在海域为黄海北端。该区四季海浪平均有效波高为 1.25 m,平均有效周期为 4.25~5.38 s^[14-16]。



图 6 丹东区域位置

4 尺寸设定及计算

在保证某一时刻各浮子形状排水体积相同的情况下,将各浮子结构尺寸设定如下:

表 2 各形状浮子结构尺寸

参数结构	结构 1 长方体	结构 2 水平圆柱体	结构 3 垂直圆柱	结构 4 正梯形体
d		3.00	0.800	
L ₁	2.039			1.000
L ₂	2.039			2.000
L ₃	2.039	1.200	4.218	2.958

将表 1,表 2 中的数据分别代入不同形状垂直波浪力的计算公式,式(4),(7),(12),(13)。将有效周期进行分段计算,保证在相同排水体积的情况下,利用 Matlab 进行编程计算,得出 4 种不同形状浮子在两种海况下的垂直波浪力。振荡浮子最适宜安装水深范围为 18~35 m,本次比较计

算选择 20 m 水深。此处计算海水密度取值为 1025 kg/m^3 。

在葫芦岛水域条件下的四种结构所受垂直波浪力(图7)。

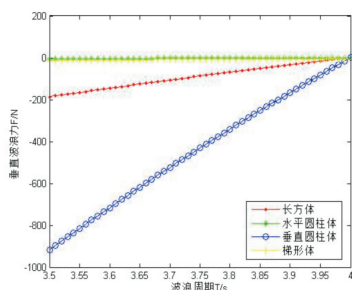


图7 四种结构在葫芦岛海域受垂直波浪力曲线

在丹东水域条件下的四种结构所受垂直波浪力(图8)。

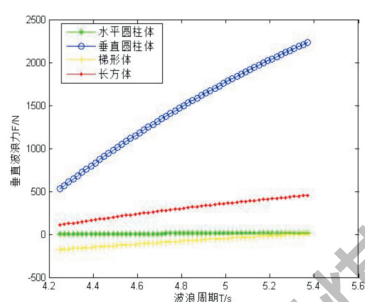


图8 四种结构在丹东海域受垂直波浪力曲线

从图中对比可得,无论是在葫芦岛海域还是在丹东海域,垂直圆柱体所受的垂直波浪力皆为最大值,因此在针对海域初选浮子形状,我们直接排除了因海域波浪条件略有不同而带来的对于浮子形状甄选的影响。经弗汝德假定法结合葫芦岛、丹东实际波浪条件计算得出垂直圆柱体为本次研究的最佳浮子形状。

同时,从图中可看出,在相同排水体积的情况下,垂直圆柱体浮子在丹东所能产生的最大垂直波浪力约为浮子在葫芦岛海域的两倍,且在各自实际周期区段内丹东海域所受垂直波浪力比葫芦岛海域整体偏高。在考虑产业化前期选址过程中,此计算结果将作为重要考虑因素。

5 结论

本文基于波浪能发电装置前期实际选址过程,利用弗汝德-克雷洛夫假定法结合丹东、葫芦岛实际海域条件对四种基本形状浮子的受力进行

了分析,并利用 matlab 进行了编程计算。生成四种结构分别在丹东,葫芦岛海域条件下的垂直波浪力曲线图。由该曲线图得出具体结论如下:

无论是在丹东海域,还是葫芦岛海域,垂直圆柱体所受的垂直波浪力为最大。即在未确定最终海域的情况下,可确定垂直圆柱体为本次波浪能发电装置的最佳浮子基本形状。

在两个海域的波浪实际周期区段内,丹东海域的浮子所受的垂直波浪力要普遍高于葫芦岛海域所受的波浪力。

以上结论可用于辽宁地区波浪能发电装置前期选址的分析。

参考文献

- [1]林佳. 海洋—巨大的能源宝库[J]. 可再生能源,2003,03:53.
- [2]游亚戈,盛松伟,吴必军. 海洋波浪能发电技术现状与前景[A]. 中国海洋工程学会.第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上)[C].中国海洋工程学会,2011:8.
- [3]FALCAO A F O. Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 899–918.
- [4]高大晓,王方杰,史宏达,常宗瑜,赵林. 国外波浪能发电装置的研究进展[J]. 海洋开发与管理,2012,11:21–26.
- [5]史宏达,王鸿旭. 波浪能发电装置海上选址的分析研究[J]. 海岸工程,2011,03:1–10.
- [6]马哲. 振荡浮子式波浪发电装置的水动力学特性研究[D]. 中国海洋大学,2013.
- [7]邹志利. 海岸动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [8]任福安. 海洋动力学[M]. 大连:大连海事大学出版社,2001.
- [9]毛来锋. 波浪能发电系统的振荡浮子结构优化[D]. 集美大学,2013.
- [10]Herbich J.B.ed:Handbook of Coastal and Ocean Engineering[M]. Gulf Publishing Co,1990.
- [11]Standing R.G.Use of potential flow theory in evaluating wave forces on offshore structures [M] Feltham, Middlesex:National Maritime Institute, 1979.
- [12]王绿卿,冯卫兵,唐筱宁. 我国沿海省份的波能特征[J]. 可再生能源,2013,11:126–131.
- [13]李燕,薄兆海. SWAN 模式对黄渤海海域浪高的模拟能力试验[J]. 海洋预报,2005,03:75–82.
- [14]王冠,郑崇伟,李思祥,仇晓庆. 渤海-黄海北部海浪特征分析[J]. 中国科技信息,2011,22:36.
- [15]程宜杰. 渤海及黄海北部海域水文要素的基本特征[J]. 中国科技信息,2006,17:40–41.
- [16]张晓霞. 辽宁海洋灾害风险分级及评价方法研究[D]. 大连海事大学,2013.