

浮摆式波浪发电平台系泊系统设计

郑松根^{1,2}, 何宏舟^{1,2}

(1. (集美大学) 福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 厦门 361021;

2. (集美大学) 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 厦门 361021)

摘 要

针对一台自行设计的浮摆式波浪发电平台的运动特点与采能方式, 对其系泊系统进行设计。系泊型式为“平台—连接缆—浮筒—锚链—锚”的悬链线单点浮筒系泊。以试验海域海况参数为依据, 计算系统载荷, 并采用准静力分析法对系泊系统各构件进行选型设计。设计的连接缆为钢丝绳, 浮筒为圆柱型钢制浮筒, 锚链为二级有档锚链, 作业锚为 AC-14 锚。经检验, 设计的系统符合安全要求和平台稳定性需求。

关 键 词: 浮摆式; 波浪发电平台; 系泊系统

中图分类号: P743.2

文献标识码: A

0 引 言

波浪能发电是海洋可再生能源利用的一种重要方式。波浪发电装置的型式有振荡水柱式、聚波水库式、摆板式、振荡浮子式和浮摆式等。其中, 浮摆式发电装置耦合了摆板式和振荡浮子式的采能特点^[1], 具有较高的波能转换效率。在浮摆式装置中, 利用浮子和摆板作为采能设备进行能量采集^[2], 然后将获得的机械能通过发电机转换成电能。其捕获的能量主要来自两方面: 一是摆板与平台之间相对运动的动能; 二是浮子与平台之间相对运动的动能与势能。

浮摆式装置需要安装在离岸式浮体平台上。然而浮体平台对自身的运动是没有限制的, 会随波浪和海流产生六个自由度的不规则运动, 这种运动对平台上的设备和人员安全构成很大威胁。为了保障装置的正常运行和人员、设备的安全, 需要设计、安装一套适用于该发电平台的定位系统, 用来定位并维持平台的稳定性。

本文根据海况参数, 对自行设计制造的一套浮摆式发电平台的系泊系统进行载荷计算, 采用准静力分析方法对锚链、连接缆、浮筒和锚进行选型设计, 形成一套完整的系泊方案, 可为浮摆式发电平台的产业化应用提供理论指导和实践参考。

1 海况参数及定位系统选择

1.1 海况与平台参数

设计的浮摆式波浪发电装置的主要尺寸为: 总长 18m、总宽 8m、吃水深度 1.3m、满载排水量

收稿日期: 2014-07-23; 修改稿收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家海洋局海洋可再生能源专项(XMME2011BL02); 国家自然科学基金项目(51209104)

90.517 t。其运行海域位于厦门市翔安区小嶝岛附近, 该海域的海况参数如表 1 所示, 表 1 中的最大风速相当于 14 级台风。

表 1 试验海域的实海况参数

参数	数值
海域深度/m	7.9~13.9
平均高潮位/m	2.44
平均低潮位/m	-1.50
平均潮差/m	3.95
最大风速/(m/s)	45
波浪周期/s	4
波长/m	5
波高/m	1
观察期最大海流流速/(m/s)	0.96
生存海况海流流速/(m/s)	1.36

1.2 定位系统选择

波浪发电平台定位系统一般有垂直导桩、张力腿系泊和悬链线系泊这三大类。桩固定方式造价高, 施工困难, 安装时需要大型海工机械, 对本套定位系统来说不宜采用。张力腿系泊系统能给予平台更好的稳定性和采能效果^[3]。但是本装置运行海域水深有限, 在平台吃水 1.3m 而海洋日均潮差达到 3.95m 的条件下, 储备浮力不足, 张力腿亦无法发挥作用。

悬链线系泊系统具有制造成本低^[4]、适用于海域水深范围广、受潮汐影响小等优点。悬链线系泊对平台运动虽有一定的限制作用, 但不会大幅影响平台与浮摆的相对运动。因此, 本浮摆式波浪发电平台的定位系统拟采用悬链线系泊系统。

2 系泊系统总体型式与设计步骤

浮摆式波浪发电平台如图 1 所示。平台上有两组浮摆波能耦合装置, 它们对称布置于平台两侧。每组浮摆装置安装有 1 套摆板采能设备和 5 套浮子采能设备。根据发电平台的外形特点和浮摆的布置方位, 采用艏部单点系泊能使平台自动调整至风、浪、流合力最小的位置, 以减轻锚链受力^[5]。在风、流较小的情况下, 平台前端能自动调整至最佳迎浪方向, 有助于浮子和摆板更有效地采集能量。

据此, 拟采用的系泊型式为悬链线单点浮筒系泊: 平台—连接缆—浮筒—锚链—锚。如图 1 所示, 发电平台通过钢缆与浮筒连接, 浮筒则由三根锚链定位于试验海域。锚链采用三点对称辐射式布置, 锚链间水平夹角为 120°, 末端用锚固定于海底。

单点浮筒系泊系统的设计内容主要有浮筒设计、锚链选型、连接钢缆选型、锚固装置选型等, 其设计流程如图 2 所示, 具体设计步骤如下。

- (1) 计算平台最大的风、浪、流合成载荷。
- (2) 根据平台最大合成载荷选取连接钢缆的直径和长度, 并试选取锚链长度和直径。
- (3) 根据锚链型号和悬链线重量确定浮筒需要的排水量, 预留一定安全系数后确定浮筒尺寸。
- (4) 根据浮筒尺寸计算浮筒承受的最大风、浪、流载荷。

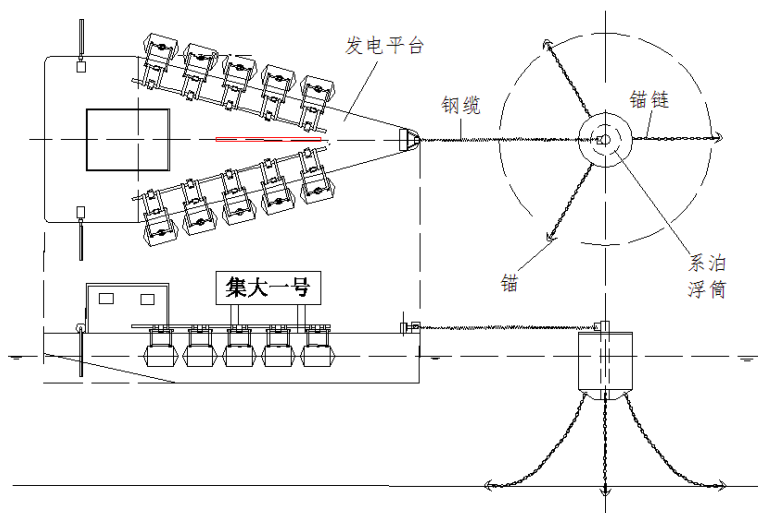


图1 浮摆式波浪发电平台及其系泊系统

(5) 将浮筒最大载荷与平台最大载荷叠加,验证所选取锚链的强度是否满足极端条件载荷。若满足,则可以进行锚的选型;若不满足,则按步骤(2)重新设计锚链直径和浮筒尺寸。

(6) 根据锚链所受的最大水平载荷选定锚的型式与规格。

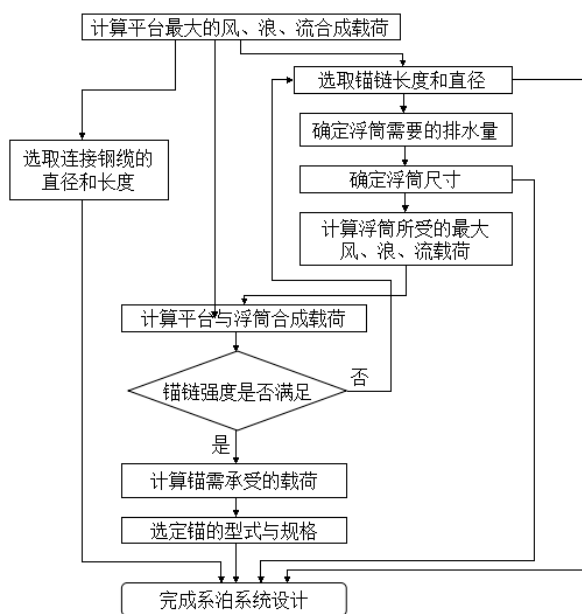


图2 系泊系统设计流程图

3 发电平台风、浪、流载荷计算^[6-7]

本装置采用单点系泊,平台能够利用横向载荷自动调整艏向至风、浪、流合力最小的方位,所以锚链设计时仅需考虑浮体纵向载荷。将风、浪、流均达到最大值且处于同一方向时的极端情况设定为锚链承受最大负载的海况,并以此计算风、浪、流各载荷。

3.1 风载荷

风载荷计算时的最大风速 $V_w=45\text{m/s}$,作用于单个构件上的风力 f 按下式计算:

$$f = C_h C_s S P \quad (1)$$

式中, P 为风压, $P = 0.613 \times V_w^2$, kPa; S 为平台在正浮或倾斜状态时, 受风构件的正投影面积, m^2 ; C_h 为受风构件的高度系数, 其值可根据构件高度按规范^[6]选取; C_s 为受风构件的形状系数, 其值可根据构件形状按规范^[6]选取, 由式 (1) 计算得到的 f , 其单位是 kN。

根据公式 (1) 计算平台各构件的纵向最大风载荷, 如表 2 所示, 作用于平台的风力之和 F_{11} 为 31.198 kN。

表 2 平台各构件纵向最大风载荷

构件	高度系数 C_h	形状系数 C_s	风力 f /kN
风力机及支柱	1.0	0.5	3.971
无线杆塔	1.0	1.0	1.154
控制室	1.0	1.0	6.826
浮子与摆板	1.0	1.0	4.914
水线上浮体	1.0	1.0	10.238
其他设备	1.0	1.1	4.095

3.2 波浪载荷

波浪作用于系泊平台上的力共有三项^[8]:

- (1) 以波频振荡为特征的一阶力, 它将引起系泊平台的一阶运动 (也可称为波频运动);
- (2) 以低于波频振荡为特征的二阶力, 它将引起系泊平台的二阶运动 (也称为低频运动);
- (3) 二阶力中的定常部分 (也称为波漂力)。

对于大尺度物体 (直径与波长之比大于 0.2, 即 $D/\lambda > 0.2$), 一般是应用绕射理论, 积分计算作用在物体湿表面上的整个水压力。在绕射理论中, 流场用速度势函数来描述, 该速度势应满足拉普拉斯方程, 并满足物体表面、自由表面、海底及无穷远处的边界条件。总速度势由入射波势、绕射波势 (假定物体固定) 和运动物体在静水中产生的辐射波势组成。

本系泊平台属于大尺度平台, 用水动力软件 AQWA 对平台的波浪载荷进行计算, 输入试验海域实海况参数, 得到如图 3 所示的波浪力随时间的变化规律。由图 3 可知, 浮体正向 (沿 x 轴反向) 最大波浪力为 $F_{12} = 122.888$ kN。

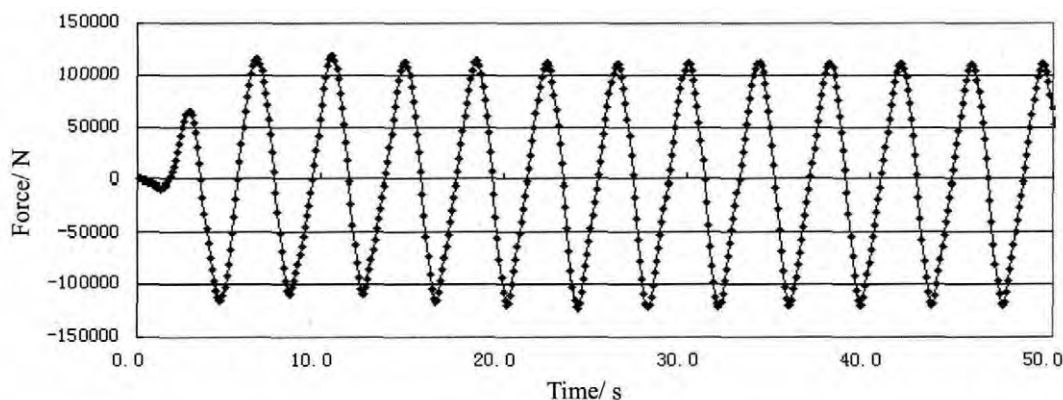


图 3 平台结构所受波浪力 (AQWA 软件计算结果)

3.3 流载荷

作用在平台水下部分单个构件的海流载荷按莫里森公式(2)计算:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho V_C^2 A \quad (2)$$

式中, C_D 为曳力系数, 一般为0.6~1.2, 本文取1.0; ρ 为海水密度, $1.025 \text{ kNs}^2/\text{m}^4$; V_C 为设计海流流速; A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积, m^2 。

若取设计海流流速 V_C 为当地生存海况中的最大海流速度, 即 $V_C=1.36\text{m/s}$; 则可根据公式(2), 算平台水下构件的纵向最大流载荷, 如表3所示。

表3 平台水下各构件及平台总体纵向最大流载荷			单位: kN
平台主体	浮子及摆板	平台总体 F_{13}	
9.858	3.413	13.271	

3.4 平台水平总载荷

作用于发电平台的风、浪、流总载荷为: $F_1 = F_{11} + F_{12} + F_{13} = 167.357\text{kN}$ 。

锚链水平受力分析如图4所示。在锚链未发生偏移的情况下, 平台总载荷为 F_1 , 锚链1水平受力为 T_1 , 锚链2水平受力为 T_2 , 虚线圆是以 F_1 为半径的作用圆(当 F_1 与锚链3辐射方向一致时, 可以忽略 T_3)。由力的合成法则, T_1 与 T_2 的合力 F' 与 F_1 大小相等、方向相反。当 T_2 的方向与合力 F' 的方向垂直, 即合力四边形 BC 边与力作用圆相切时, T_1 达到最大值: $T_1 = F_1 / \cos 30^\circ = 193.247\text{kN}$ 。

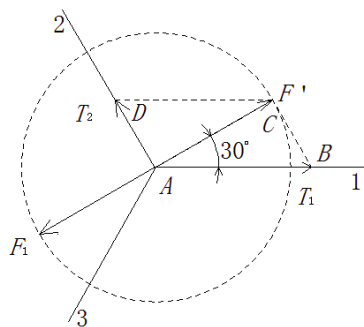


图4 锚链水平受力分析

4 锚链、浮筒与连接钢缆设计

4.1 连接钢缆选择

钢缆为连接发电平台与浮筒的结构。在其限制下, 发电平台能够在一定范围的海域内围绕浮筒运动。根据实海域情况和试验需要, 拟采用20m长的钢缆作为柔性连接件, 则平台的漂泊半径为20m左右。

根据3.4节计算的合成载荷 F_1 , 查询钢丝绳规格表^[9], 选取直径26mm和抗拉强度1570MPa的6*19S+FC钢芯钢丝绳作为连接钢缆。其破断强度为378kN, 安全系数 $K=2.25$, 可满足设计要求。

此外, 本系统的连接钢缆为可拆卸式, 可以在极端恶劣的气象或水文状况发生前解开钢缆, 将发电平台拖入港口避开危险工况。这将进一步提高系泊设备的安全系数。

4.2 锚链初步设计

4.2.1 锚链长度设计

根据国外学者的研究^[10], 船舶锚泊时, 锚链长度 L 与锚地水深 h 之间具有如表 4 所示的关系。

表 4 锚链长度与水深关系

H/m	0~25	25~50	50~150	≥ 150
L/h	≥ 4	≥ 3	≥ 2.5	≥ 1.5

若取抛锚海域水深为 13m, 则锚链长度 L 应至少为 52m。

锚链长度的设计计算原理如图 5 所示。在图 5 中, l 为锚链水平投影长度, l_1 为悬垂段投影长度, l_2 为水平拖地段长度, h 为水深, s 为悬垂段长度, L 为锚链总长度。以 3.4 节中所述的锚链 1 为对象, 根据有关锚链推导公式^[11], l_1 与 s 之间存在如下一些关系式:

$$l_1 = \sqrt{\frac{2T_1 h}{\rho g}} \quad (3)$$

$$s = l_1 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{h^2}{l_1^2}\right) \quad (4)$$

上式中, T_1 为锚链 1 承受的水平力, g 为重力加速度, ρ 为海水密度。

此外, 从图 5 可得如下关系式:

$$l = l_1 + l_2 \quad (5)$$

$$L = s + l_2 \quad (6)$$

在实践中一般取 $l = 4h$ ^[11], 由式 (3) ~ 式 (6) 求得, $L = 57\text{m} > 4h = 52\text{m}$, 满足锚链的设计理论要求, 可以作为本系泊系统的锚链长度。

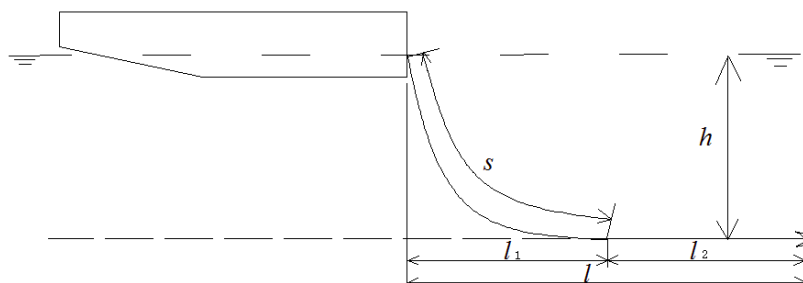


图 5 锚链长度计算简图

4.2.2 链径选取

根据 3.4 节计算, 锚链 1 所受的最大水平力为 $T_1 = 193.247\text{kN}$, 查询有档锚链规格表^[12], 预选直径 40mm 的二级有档锚链为设计锚链, 该锚链的拉力负荷为 640kN, 破断负荷为 895kN, 锚链质量 35.04kg/m、空气中重量为 0.343kN/m。

单位长度锚链在水中的重量 W 可按式计算^[13]:

$$W = \beta W_a \quad (7)$$

式中, W_a 为锚链在空气中每米重量, kN/m; β 为锚链在水中重量系数^[13], 取 0.87。

根据悬链线方程^[14-15], 如图 6 所示, 在未安装浮筒的情况下, 锚链 1 在导链孔处受到最大张力为

$$F_{1\max} = T_1 / \cos \theta = T_1 + Wh = 197.130\text{kN} \quad (8)$$

式中, T_1 为最大水平拉力, θ 为锚链与平台夹角。

$F_{1\max}$ 小于破断负荷, 安全系数 $K = 895/197.130 = 4.54$, 则初步选择的锚链满足强度要求。

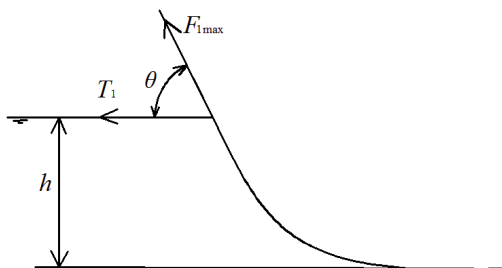


图 6 锚链处于最大张力时的受力分析

4.3 浮筒设计

根据节 4.2 锚链初选结果, 直径 40mm 的二级有档锚链在水中重量为 0.298kN/m。假设浮筒与锚链处于极端情况, 即有一根锚链 (锚链 1) 呈完全悬链状态。如图 7 所示, 锚链 1 全部脱离海底, 靠浮筒维持悬浮, 锚链 2、3 处于竖直悬垂状态。假定锚设备不承受竖向拉力, 此时浮筒承受的竖直向下静态作用力 G 包括锚链 1 悬垂段的重力 G_1 、锚链 2 悬垂段的重力 G_2 、锚链 3 悬垂段的重力 G_3 和浮筒自重 G_b 。此时竖直向下的静态作用力理论上达最大值 G_{\max} 。

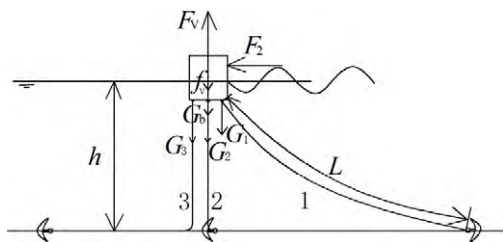


图 7 浮筒处于极端情况时简图

$$G_{\max} = G_1 + G_2 + G_b \quad (9)$$

$$G_1 = WL \quad (10)$$

$$G_2 = G_3 = Wh \quad (11)$$

式中, W 为单位长度锚链在水中的重量, kN/m; L 为锚链 1 的总长, m; h 为海域水深, m。

维持锚链悬浮所需的基本浮力 $F_{v1} = G_1 + G_2 + G_3 = 24.734\text{kN}$, 等效成基本排水量为 $M_1 = 2524\text{kg}$ 。

经试算, 拟采用直径为 2.6m, 高度为 2.8m, 厚度为 10mm 的圆柱型钢制浮筒。则浮筒质量为 $M_b = 2628\text{kg}$, 总排水量为 $M = 15230\text{kg}$, 总浮力为 149.254kN。这样, 则浮筒剩余的有效排水量 $M_E = 11602\text{kg} > M_1 = 2524\text{kg}$, 储备排水量 $M_c = 9078\text{kg}$ 。

按照第 3 节介绍的载荷计算方法, 计算浮筒承受的风、浪、流载荷, 如表 5 和图 8 所示。

表 5 浮筒风、浪、流载荷				单位: kN
水平风载荷 F_{21}	水平波浪载荷 F_{22}	水平流载荷 F_{23}	水平总载荷 F_2	最大向下波浪载荷 f_v
2.286	19.807	3.359	25.452	43.865

浮筒所受的最大竖直向下载荷为最大波浪向下载荷 f_v 与最大向下静态作用力 G_{\max} 之和。如图 7 所

示, 该载荷由浮力 F_V 平衡, 即:

$$F_V = f_V + G_{\max} = 94.353 \text{ kN} < 149.254 \text{ kN} \quad (12)$$

浮筒安全系数为 $K = 148.187/94.353 = 1.58$ 。若采用直径 2.6m、高度 2.8m、厚度 10mm 的圆柱形钢制浮筒, 那么在极端海况下不会沉没, 可满足安全要求。

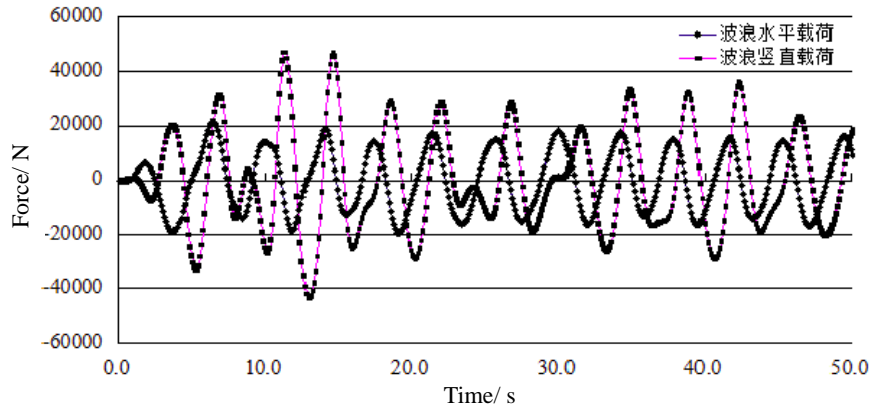


图 8 浮筒所受波浪力 (AQWA 软件计算结果)

4.4 锚链强度验证

当发电平台和浮筒所受的水平载荷共同作用于锚链时, 水平总载荷为 $F = F_1 + F_2 = 192.809 \text{ kN}$ 。

按照 3.4 节锚链受力分析方法, 锚链 1 所受的最大总水平力为: $T = F / \cos 30^\circ = 222.636 \text{ kN}$ 。

按 4.2 节分析, 锚链在导链孔处受到最大总张力为

$$F_M = T / \cos \theta = T + Wh = 226.515 \text{ kN} < 895 \text{ kN} \quad (13)$$

安全系数 $K = 895/226.515 = 3.95 > 2$ 。由此可见, 4.1.2 所选择的锚链直径符合强度要求, 可以作为本系泊系统的锚链。

5 锚的选型

5.1 锚载荷计算

锚承受的最大水平载荷 P 如下^[13]:

$$P = T + R - f' \quad (14)$$

式中, T 为锚链水平最大张力; R 为潮流对锚链的水动力; f' 为锚链与海底的摩擦力。

R 可用莫里森公式计算:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho V_C^2 A \quad (15)$$

式中, C_D 为曳力系数, 取 1.0; A 为构件投影面积, 若链径为 d 、水深为 h 、折合面积 $A = 1.5dh$; ρ 为海水密度, $1.025 \text{ kNs}^2/\text{m}^4$; V_C 为设计海流流速。

锚链与海底的摩擦力 f' 按下式确定:

$$f' = \mu l_2 W \quad (16)$$

式中, μ 为静摩擦系数, 取 1.0; l_2 为锚链躺底段长度; W 为锚链水中每米重量。

计算得 $R = 739 \text{ N}$, $f' = 8.842 \text{ kN}$, $P = 214.533 \text{ kN}$ 。

5.2 锚选型

锚的种类较多,按其结构和用途不同,可分为有杆锚、无杆锚、大抓力锚和特种锚等。

有杆锚结构简单,爪力大(抓重比4~8),抓底稳定性较好;但其抛锚和收藏不便,容易缠住锚链,在浅水锚地易刮坏船底。无杆锚抓土时两爪同时入土,结构简单、抛起锚作业和收藏方便;但其抓力小(抓重比2.5~4),流转时容易耙松泥土而引起走锚。大抓力锚分有杆大抓力锚和无杆大抓力锚,其特点是锚爪宽且长、啮土深、稳定性好和抓重比大。特种锚的结构特点与普通锚不同,一般用于浮标、灯船、浮船坞及浮码头等永久性系泊。

本套浮摆式波浪发电平台所需系泊时间较长,需要有较好的定位稳定性,系泊系统所需锚抓力需达21.89 t。抛锚地的海底条件为砂质粘土和礁石,平均有0.4~3.8m的淤泥层。结合锚的种类与用途分析,大抓力锚中的AC-14型锚,具有稳定鳍厚实且宽大、对各种底质的适应性强、啮土迅速、抓底稳定性好、抓重比高(取值12~14)以及常用于首锚等特点,适用于本系泊系统。

因此,本文拟选择抓重比14的AC-14锚作为本系统的作业锚。根据AC-14锚的规格表^[16],选取自重2.655t、锚高2 210mm、锚宽2 013mm、锚厚614mm的AC-14锚为作业锚,其抓力为364.266kN,安全系数达到1.70,可满足系泊要求。

6 结 语

设计了浮摆式波浪发电平台“集大一号”的系泊系统,系泊型式为悬链线单点浮筒系泊:平台—连接缆—浮筒—锚链—锚。在该系泊系统中,选取直径 $\phi 26\text{mm}$ 和抗拉强度1 570MPa的钢芯钢缆作为连接钢缆,设计了直径2.6m、高度2.8m、厚度为10mm的圆柱型钢制系泊浮筒,选取直径40mm、长度57m的二级有档锚链作为锚固链;选取自重2.655 t、锚高2 210mm、锚宽2 013mm、锚厚614mm的AC-14锚作为作业锚。该系统满足浮摆式波浪发电平台“集大一号”的安全要求和稳定性需求。

设计的系泊系统对浮摆式发电平台的产业化应用具有理论指导和实践参考作用,对于其它类型浅海平台的开发应用也具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 曲泉铀. 一种浮摆式波能发电装置的设计开发[D]. 厦门: 集美大学, 2013: 7-9.
- [2] 曲泉铀, 何宏舟, 李晖. 一种浮摆式波能发电装置摆板运动响应的数值模拟[J]. 海洋工程, 2013(5): 82-88.
- [3] HARRIS R E, JOHANNING L, WOFLRAM J. Mooring systems for wave energy converter: a review of design issues and choices: UK, [R/OL]. [2013-10-17]. http://abs-5.me.washington.edu/pub/tidal_wave/mooringsystems.pdf.
- [4] The Carbon Trust. Future marine energy results of the marine energy challenge: cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy: UK, [R/OL]. 2007-03[2013-10-17]. <http://www.oceanrenewable.com/wp-content/uploads/2007/03/futuremarineenergy.pdf>.
- [5] 余建星, 王永功, 王宏伟. 风浪流联合作用下单点系泊船的受力分析[J]. 海洋技术, 2005(3): 96-100.
- [6] 中国船级社. 海上移动平台入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005(2): 21-29.
- [7] Det Norske Veritas. Environmental conditions and environmental loads[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2007: 47-61.
- [8] BERNARD M. Hydrodynamique des structures offshore[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 147-246.
- [9] GB/8918-2006 重要用途钢丝绳[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2006: 12-13.
- [10] 李凤来, 贾攀攀, 马良, 马勇. 潮流能电站四点式锚泊定位系统设计研究[J]. 工程与试验, 2012(2): 60-64.
- [11] 张怀慧. 趸船锚链长度的计算[J]. 港口工程, 1996(3): 27-30.

- [12] GB/T 549-2008 电焊锚链[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008: 21-22.
- [13] 中国船级社. 海上单点系泊装置入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996: 25-30.
- [14] 何静. FPSO 悬式锚腿系泊系统的锚系设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 15-18.
- [15] 张洋. 漂浮式潮流电站锚泊系统的设计和计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004: 25-29.
- [16] CB/T 397-2005 AC-14 high holding power anchor[S]. BeiJing: COSTIND, 2005: 2-5.

Design of the Mooring System on the Wave Power Platform with Floating and Pendular Type

ZHENG Songgen^{1,2}, HE hongzhou^{1,2}

(1. Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian Province, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Province Key Laboratory for Energy Clean Utilization and Development, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract

In consideration of motion features and energy extraction manner of a self-designed floating and pendular wave power platform, a mooring system is designed in this paper. It is a type of single-point buoy mooring: platform - connection cable - buoy - anchor chain - anchor catenary. The load acting on the platform is calculated based on wave parameters in the sea area where trial were carried out. The quasi-static method is used to design the connecting cable, buoy, anchor chain, anchor, etc. Steel wire rope is selected as the connection cable; the buoy is cylindrical and made from steel; secondary stud chain is selected as the anchor chain, and AC-14 anchor is selected as the operation anchor. This design meets the requirements of safety and stability for the platform.

Key words: floating and pendular pattern; wave power platform; mooring system

作者简介

郑松根 男, 1985 年生, 硕士。主要从事船舶与海上装置能源工程方面的研究。

何宏舟 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师。主要从事海洋节能环保与可再生能源开发与管理工作。

附表 1 本文物理量符号汇总

符号	名称	符号	名称
F_{11}	平台所受水平总风力	F_{12}	平台所受水平波浪载荷
F_{13}	平台所受水平总流载荷	F_1	平台所受水平风、浪、流总载荷
F_{21}	浮筒所受水平风载荷	F_{22}	浮筒所受水平波浪载荷
F_{23}	浮筒所受水平流载荷	F_2	浮筒所受水平风、浪、流总载荷
$F_{1\max}$	仅考虑平台作用力时, 锚链 1 在导链孔处受到的最大张力	F_M	平台与浮筒共同作用时, 锚链 1 在导链孔处受到的最大总张力
F_{v1}	浮筒维持锚链悬浮所需的浮力	F_V	浮筒所受的浮力
T_1	仅考虑平台作用时, 锚链 1 所受的水平拉力	T_2	仅考虑平台作用时, 锚链 2 所受水平拉力
T_3	仅考虑平台作用时, 锚链 3 所受水平拉力	T	平台与浮筒共同作用时, 锚链 1 所受的最大总水平力
F'	T_1 和 T_2 的合力	G_1	锚链 1 悬垂段的重力
G_2	锚链 2 悬垂段的重力	G_3	锚链 3 悬垂段的重力
G_b	浮筒重力	G_{\max}	浮筒所受最大向下静态作用力
f_v	浮筒所受最大向下波浪载荷	M_1	F_{v1} 等效成的基本排水量
M	浮筒总排水量	M_b	浮筒质量
M_E	M 扣除 M_b 后剩余的有效排水量	M_c	浮筒储备的排水量
W	单位长度锚链在水中的重量	W_a	单位长度锚链在空气中的重量
P	锚承受的最大水平载荷	R	潮流对锚链的水动力
f'	锚链与海底的摩擦力		