

基于 AQWA 的漂浮式海洋装置载体锚泊系统耦合分析

王世明, 邹伟

(上海海洋大学工程学院 上海 201306)

摘要: 文章基于波浪力时域频域的运动理论, 采用变换锚链夹角的方法, 通过水动力软件 AQWA 进行仿真耦合分析的方式, 得出针对特定研究对象即双浮筒漂浮式浪流发电装置的最佳锚泊方案, 进而探讨类似的漂浮式海洋装置载体锚泊系统方案的设计。

关键词: 海洋能; 锚泊系统; AQWA; 系缆张力

中图分类号: TK7; P7

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2016)08-0055-05

A Coupled Analysis of the Carrier Mooring System of the Floating Marine Device Based on the AQWA

WANG Shiming, ZOU Wei

(Shanghai Ocean University, College of Engineering Science and Technology, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the kinetic theory of wave forces frequency domain, using anchor angle conversion method, the paper obtained a good anchoring program by specific study object of dual pontoon floating wave power generation device of the flow, through simulation coupling ways by hydrodynamic analysis software AQWA. A similar design of floating marine device carrier mooring system solutions were also explored.

Key words: Ocean energy, Mooring system, AQWA, Mooring tension

1 引言

随着世界能源消耗量的持续大幅上升并影响世界经济, 海洋能源利用研究的重要性日益凸显^[1]。其中, 对锚泊系统的研究极为关键。由于受到风、浪、流的联合作用, 受锚泊载体在海洋中将会产生位置偏移, 引起锚链张力的突变^[2]。

由于我国对海洋能发电装置系泊系统的研究开展较晚, 至今尚未形成专门规范, 其设计和应用主要参考类似海上建筑系泊方式^[3]。而用于搭载装置的

漂浮式载体在海上系泊时, 由于海洋环境力的作用将偏离平衡位置, 这时需要锚泊系统提供回复力, 以确保其始终处于一定范围内^[4]。由于海洋能发电装置工作环境的特殊性以及其在抵抗极端风暴荷载、使用寿命、多设备协调、经济性等方面有独特要求, 而系泊系统作为该装置的关键部分对其发电效率、装置可靠运行、年限寿命、维修成本等方面有巨大影响, 因此有必要对装置系泊方案进行设计研究。

本文重点研究载体和锚索受到的环境力以及

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-07-08

基金项目: 国家海洋局海洋可再生能源专项(SHME2013JS01); 上海市 2014 年优秀技术带头人计划项目(14XD1424300); 上海市军民结合专项(D-8005-15-0182)。

作者简介: 王世明, 教授, 博士, 研究方向为海洋能, 电子信箱: smwang@shou.edu.cn

通信作者: 邹伟, 硕士研究生, 研究方向为海洋新能源装备, 电子信箱: zouwei0302@163.com

在环境力作用下的响应,并对锚链布置方式及其可靠性能进行分析。

2 理论基础

2.1 频域和时域运动方程^[5]

通过计算频域内单位幅值波激励下的运动,得到结构的RAO值,运动方程为:

$$F(\omega)^{(2)} = [-\omega^2(M_s + M_a(\omega)) - i\omega B + K]X(\omega) \quad (1)$$

$$\text{RAO} = X(\omega)/A \quad (2)$$

式中: A 为波幅; M_s 为结构质量; M_a 为附加质量; B 为阻尼系数; K 为水静力刚度; F 为波浪力。

时域运动方程:

$$F(t)^{(2)} = M_s \ddot{x}(t) \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为浮体结构上所有受力状况,包括绕射力、辐射力、缆索张力、漂移力等; $\ddot{x}(t)$ 为加速度。用脉冲响应法,卷积积分形式为

$$[M_s + M_a] \ddot{x}(t) + Kx(t) + \int_0^t \mathbf{h}(t-\tau) \ddot{x}(\tau) d\tau = F(t) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{h}(t)$ 为加速度迭代积分矩阵。

其中阻尼系数

$$B_{jk}(\omega) = \int_0^{\infty} \mathbf{h}_{jk}(t) \cos \omega t dt$$

2.2 二阶波浪力

二阶波浪激振力近场解可写成:

$$F_{\text{strc}}^{(2)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cdot \left\{ \begin{aligned} &P_{ij}^- \cos[-(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] + \\ &P_{ij}^+ \cos[-(\omega_i + \omega_j)t + (\epsilon_i + \epsilon_j)] \end{aligned} \right\} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left\{ \begin{aligned} &Q_{ij}^- \sin[-(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] + \\ &Q_{ij}^+ \sin[-(\omega_i + \omega_j)t + (\epsilon_i + \epsilon_j)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

如果忽略和频部分(TLP平台不能忽略),式(5)可化为:

$$F_{\text{strc}}^{(2)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left\{ P_{ij}^- \cos[-(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] \right\} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left\{ Q_{ij}^- \sin[-(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] \right\} \quad (6)$$

Newman近似指出:

$$P_{ij}^- = \frac{1}{2} a_i a_j \left(\frac{P_{ii}^-}{a_i^2} + \frac{P_{jj}^-}{a_j^2} \right), Q_{ij}^- = 0$$

基于上述等式,式(6)可写成:

$$F_{\text{sv}}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cdot \{ P_{ij}^- \cos[-(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] \} \quad (7)$$

式(7)近似适用于深水情况,被用来评估二阶差频波浪力,并且忽略波浪漂移阻尼。

3 系泊系统建模和环境条件

水动力系数均使用AQWA计算得出。AQWA是一个由不规则波的频域(AQWA-FER)、随机波包含慢漂移的时域(AQWA-DRIFT)、不规则波的非线性时域(AQWA-NAUT)等模块集成的完整系统^[6],是一款基于势流理论和三维二阶辐射/绕射切片理论的水动力学软件,可以求解辐射/绕射模型以及流体中多体相互作用或作用在浮体湿表面的速度势和一阶二阶力等,能够满足多种结构流体动力学特性评估相关分析需求^[7]。

3.1 浮体的基本参数

本文所研究模型为两翼双浮筒式载体,用于搭载浪流一体化发电装置,其独特的工作方式是左右对称两个浮筒挂载一个浪流直接驱动的水轮机进行直驱波能发电。所研究基本结构参数为:浮筒纵长20.4 m,浮筒直径7.08 m,两浮筒中心距20.4 m,设计吃水3.54 m,排水量795.76 m³;在AQWA中建模(图1)。

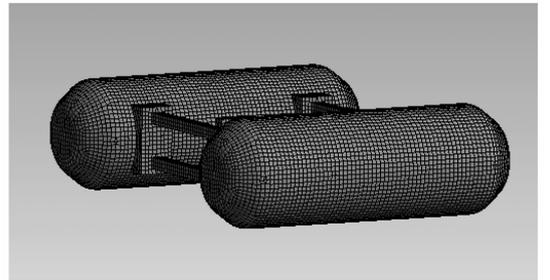


图1 浮体模型

锚泊系统参数:锚泊系统缆绳所用的材料是钢丝,刚度为 6.58×10^8 N,最小破断拉力为 7.84×10^3 kN。

针对该装置独特的双浮筒对称结构以及直驱式的波能转换方式,拟考虑以下锚链布置方案:采用4锚链布置,锚到浮体系缆点的锚链长度为

290 m,以筒纵长方向为 Y 轴、筒径长方向为 X 轴且以其正向为来流 0 角度方向。两种布链方案如图 2 所示。

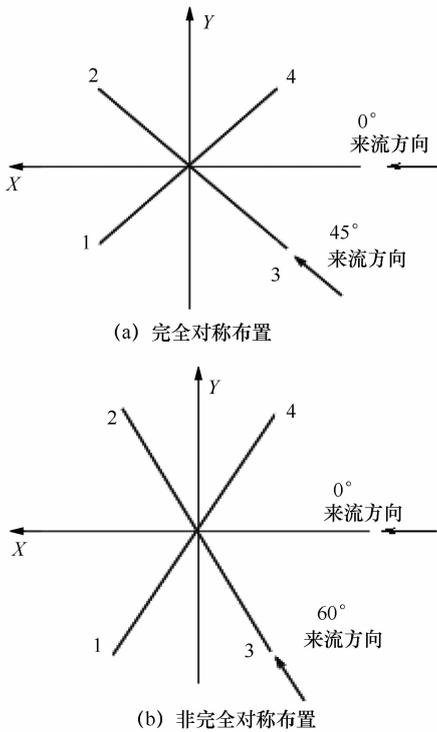


图 2 两种布链方案

3.2 环境条件

根据 API 规范,以 10 年为重现期,本文环境条件采用中国南海海域 10 年一遇海况条件作为系泊系统生存设计条件(表 1)^[8]。

表 1 环境条件

水深/m	波浪谱	有义波高/m	过零周期/s	风谱	平均风速/表面流速/ (m·s ⁻¹)	表面流速/ (m·s ⁻¹)
100	Pierson-Moskowitz	4.8	8.5	API	20	3.2

4 漂浮式海洋装置载体锚泊系泊分析计算

4.1 水动力计算

首先在 0°~180°的单位波高的规则波作用下进行频域分析,得出系泊载体的 RAO,由于结构的对称性,给出 0°、30°、45°、60°和 90°的 RAO(图 3~图 8)。

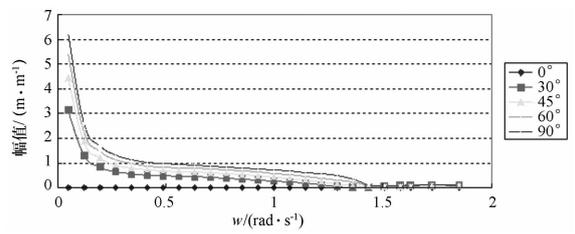


图 3 纵荡 RAO

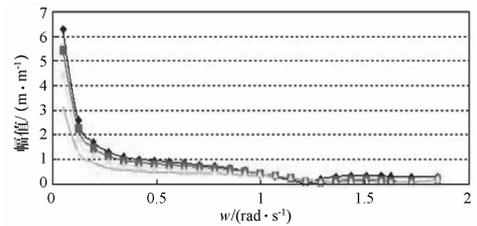


图 4 横荡 RAO

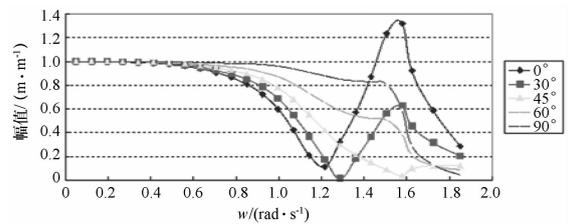


图 5 垂荡 RAO

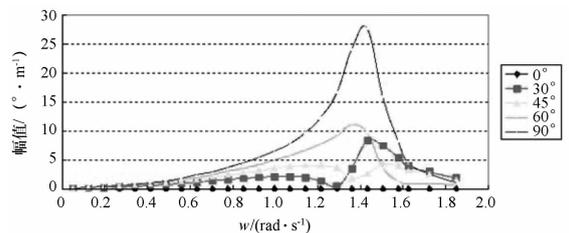


图 6 横摇 RAO

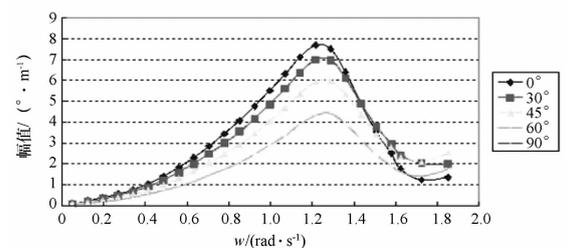


图 7 纵摇 RAO

综合以上各图结果可以看出,由于浮体结构对称

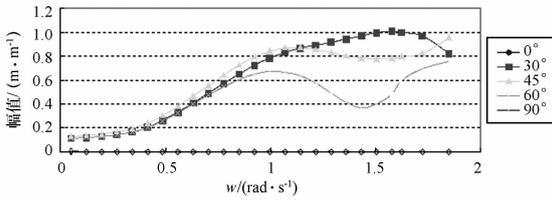


图 8 船摇 RAO

性,纵荡和横荡的运动响应在低频时,RAO 值由于波浪角度的不同有所区别,但随着角频率增大不同来流角度导致的 RAO 值会逐渐趋近。垂荡运动响应则在 0.8~1.6 rad/s 频率区间内,RAO 值则会由于波浪方向的不同有很大差别。横摇、纵摇和船摇分别在波浪

频率为 1.4 rad/s、1.2 rad/s 和 1.5 rad/s 时 RAO 值在各个方向上表现出很大区别。

4.2 时域耦合分析

根据 API 规范,以 10 年为重现期,计算出在来流方向为 0°、30°、45°、60°、90°、120°、135°、150°、180° 情况下,4 根锚索的最大张力如表 2、表 3 所示。

锚链布置角度不同将对整个锚泊系统的可靠性产生影响。由表 2 与表 3 可知,在浪流方向为 60°~120°时,非完全对称布置方式的安全系数较完全对称布置更加可靠。由于发电装置的发电效率受到浪流方向的影响,在确定浮体投放方向时,优先选择非完全对称布链方式。

表 2 完全对称布置锚索最大张力

角度/(°)	Line1/kN	Line2/kN	Line3/kN	Line4/kN	MAX/kN	安全系数
0	1 055 413.8	1 055 437.1	2 219 893.5	2 219 874.0	2 219 893.5	3.53
30	1 389 432.8	1 075 776.3	2 726 725.8	1 636 809.3	2 726 725.8	2.87
45	1 441 488.3	1 088 268.3	2 807 231.5	1 577 096.1	2 807 231.5	2.79
60°	1 498 146.5	1 102 417.6	2 834 316.3	1 511 907.8	2 834 316.3	2.76
90	2 268 781.3	1 308 182.1	2 269 129.3	1 307 974.1	2 269 129.5	3.45
120	2 834 047.0	1 512 010.3	1 497 855.3	1 102 463.5	2 834 047.0	2.76
135	2 807 100.8	1 577 306.1	1 441 320.0	1 088 056.9	2 807 100.8	2.79
150	2 726 723.0	1 636 731.9	1 389 406.6	1 075 788.5	2 726 723.0	2.87
180	2 219 715.3	2 219 808.3	1 055 417.3	1 055 410.6	2 219 808.3	3.53

表 3 非完全对称布置锚索最大张力

角度/(°)	Line1/kN	Line2/kN	Line3/kN	Line4/kN	MAX/kN	安全系数
0	1 050 522.8	1 050 572.0	2 566 318.8	2 566 208.8	2 566 318.8	3.05
30	1 370 884.6	1 002 981.4	2 836 829.5	1 901 621.9	2 836 829.5	2.76
45	1 322 361.8	1 032 665.6	2 811 431.5	1 776 695.8	2 811 431.5	2.78
60	1 365 014.9	1 099 018.4	2 776 837.8	1 640 660.5	2 776 837.8	2.82
90	2 214 958.5	1 284 312.6	2 215 500.8	1 284 151.6	2 215 500.8	3.53
120	2 776 495.8	1 640 766.6	1 365 372.1	1 099 015.5	2 776 495.8	2.82
135	2 811 139.0	1 776 927.8	1 322 217.3	1 032 556.9	2 811 139.0	2.78
150°	2 836 533.8	1 901 987.9	1 370 819.1	1 002 915.4	2 836 533.8	2.76
180°	2 566 002.0	2 566 147.0	1 050 481.0	1 050 435.3	2 566 147.0	3.06

由表 3 可知,其最大值出现在方向为 30°时的第三条锚链上,其值为 2 836 829.5 kN;安全系数 $K = 2.76$,符合规范要求的 1.67。第三条锚链 X 方向上的位移主要在 2.5~4.5 区间内变化,Y 方向上的位移主要在 -0.5~0.5 区间内变化,Z 方向上的位移

主要在 -2~1 区间内变化。以上各方向的位移变化皆在装置的可承受范围之内。

5 结论

(1)本文基于 AQWA 得到合理的水动力响应结果,可用于锚泊系统的适应性与可靠性计算。

(2)当环境力方向在 30° 附近时,由于受力面积等因素的影响,系泊缆张力较大。

(3)针对上文模型结构且相同条件下,四锚链非完全对称布置较于完全对称布置更加可靠。

(4)进一步研究探讨四锚链对称布置方式对于类似的海洋对称漂浮装置是否同样适用。

参考文献

- [1] 赵阳,范菊,袁梦,等.多刚体动力学在缆索动力分析中的应用[J].船海工程,2011,40(1):152-155.
- [2] 祁祺,张涛,文攀,等.基于 AQWA 的 FPSO 系泊系统响应数值模拟[J].舰船科学技术,2011,33(12):5-10.
- [3] 鄢华林,姜飞龙,周超,等.半潜式海洋平台定位系统的控制系统研究[J].海洋工程,2012,30(3):145-149.
- [4] 刘晓丰.影响锚泊安全的因素分析[D].大连:大连海事大学,2011.
- [5] CLEMENT A, MCCULLEN P, FALCAO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2002(6):405-431.
- [6] HENDERSON R. Design simulation and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energyconverter[J]. Renewable Energy, 2006(31):271-283.
- [7] ALEXANDER M M. Optimal switching control of an absorber ocean wave energy device[C]//16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre, Ajaccio, France, Conference on Control & Automation, 2008:25-27.
- [8] MARGHERITONIL V D. Sea wave slot-cone generator: An innovative caisson break waters for energy production[C]//Coastal Engineer 2008-Proceedings of the 31st International Conference, Hamburg, Germany, Coastal Engineering-international Conference, 2008:3694-3705.