

Halbach 磁阵多浮体海波发电结构功率响应研究

刘祥建¹, 陈仁文², 郭 语¹

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169;

2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要:以 Halbach 磁阵多浮体海波发电结构为对象,研究了其在垂荡运动下的能量转换特性。基于线性波理论,建立了线圈浮筒的运动方程和能量转换模型,数值模拟了结构阻尼系数、弹簧刚度系数以及线圈浮筒的长度和半径,此外,数值还模拟了吃水对海波发电结构平均能量转换功率及共振频率的影响。结果表明:根据不同的海波状况,合理设计了海波发电结构的参数,将有助于其平均能量转换功率的提高。

关键词:海洋波浪能; Halbach 磁阵; 多浮体; 发电结构; 功率响应

中图分类号: P743.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2020)02-0001-04

Power Response for Halbach Permanent Magnetic Array Multiple Floating Bodies Ocean Wave Generator

LIU Xiang-jian¹, CHEN Ren-wen², GUO Yu¹

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The Halbach permanent magnetic array multiple floating bodies ocean wave generator is studied to explore the energy conversion characteristics under heave motion. The motion equation and the energy conversion model of the coil pontoon are established based on the linear wave theory. The influences of the structural damping coefficient, the spring stiffness coefficient, and the length, radius, draft of the coil pontoon on the average energy conversion power and the resonance frequency of the ocean wave generator are simulated. The results show that the rational structure parameters of the ocean wave generator will contribute to the improvement of its average energy conversion power based on different ocean wave conditions.

Key words: ocean wave energy; Halbach permanent magnetic array; multiple floating bodies; generator; power response

随着人类社会对能源需求的剧增,能源危机和环境污染已成为人们必须面对的现实问题,为此,对各类绿色环保的绿色能源的探索与利用逐渐被世界各国所关注。海洋波浪能是一种储量丰富、分布较广的可再生绿色能源^[1-2],各国的科技工作者提出和开发了各种各样的海波发电结构。Dalton 等介绍了 Pelamis 波浪能发电结构的性能和经济可行性方面的研究成果^[3]。李晖等应用 FLUENT 软件数值模拟了均匀来流和波浪来流两种情况下点头鸭式波浪能发电结构的俘能特性^[4]。Halder 等对一种用于振荡水柱

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675265); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20170119)

作者简介: 刘祥建(1980—),男,山东五莲人,副教授,博士,主要从事振动能量采集研究。

波浪能发电结构的轴流式水轮机进行了数值模拟和优化^[5]。任铭等提出一种网状波浪能发电结构,试验研究表明,发电结构可以实现 12% 的发电效率^[6]。余顺年等提出一种球形摆式波浪能发电结构,并应用 AQWA 软件数值模拟了波浪周期、波浪高度和波浪角对发电结构摆角的影响^[7]。张步恩等提出一种新型的浮筒式波浪能发电结构,并试验研究了浮筒形状、吃水深度对发电结构能量俘获效率的影响^[8]。本文研究一种新型的 Halbach 磁阵(海尔贝克磁铁阵列,是一种永磁体排列方式)多浮体海波发电结构,基于线性波理论,进行浮筒的垂荡运动分析和波能转换分析,并讨论了浮筒的结构参数对海波发电结构功率响应的影响,为海波发电结构的后续研究提供参考。

1 浮筒运动方程

Halbach 磁阵多浮体海波发电结构如图 1 所示,其由若干个封闭的圆柱形浮筒组成,浮筒之间通过弹簧连接,并在相邻的两个浮筒内部分别设置永磁体和电磁线圈,其中,为进一步提高永磁体浮筒的输出磁场强度和减少谐波,永磁体设置为 Halbach 永磁阵列形式,整个发电结构在海洋波浪推动下,依据电磁感应定律,可实现机械能到电能的转换。对于海波实际推动下的浮筒,其具有六个自由度运动,其中,海波发电结构实现能量转换主要依赖的是浮筒的垂荡运动,因此,本文重点研究垂荡运动下浮筒的运动方程和能量转换问题。

Halbach 磁阵多浮体海波发电结构可以看成是由一个永磁体浮筒和一个线圈浮筒为基本单元进行扩展形成,在海波推动下,永磁体浮筒和线圈浮筒同时受到激励作用,假设永磁体浮筒受到幅值为 a , 频率为 ω 的正弦波浪作用,即:

$$x_p = a \sin \omega t \quad (1)$$

式中, x_p 为永磁体浮筒受到的波浪作用, t 为时间。

在垂荡运动中,当永磁体浮筒与线圈浮筒的水平距离相差为半个波长的奇数倍时,线圈浮筒偏离永磁体浮筒的垂直距离最大,线圈中磁通量变化最大,则此时线圈浮筒受到的波浪作用 x_c 可表示为:

$$x_c = -a \sin \omega t \quad (2)$$

假设线圈浮筒及其附加物(连接机构)的质量为 m , 根据牛顿第二定律,线圈浮筒的垂荡运动方程可以表示为:

$$m\ddot{z} = F_g + F_f + F_w + F_r + F_s + F_c + F_k \quad (3)$$

式中, z 为线圈浮筒的垂荡运动位移, F_g 为浮筒的重力, F_f 为浮筒的浮力, F_w 为波浪激励力, F_r 为辐射力, F_s 为静水回复力, F_c 为发电结构阻尼力, F_k 为弹簧弹性力。

其中,上述力中,浮筒的重力 F_g 与浮筒的浮力 F_f 大小相等,方向相反,构成一对平衡力。

在波浪 x_c 作用下,把线圈浮筒的垂荡运动位移 z 写成复数形式 $Z(i\omega)$, i 为虚数单位,并设单位波幅波浪激励力为 $f_w(i\omega)$, 则波浪激励力可表示为:

$$F_w(i\omega) = a \cdot f_w(i\omega) \quad (4)$$

假设波浪波数为 n , 水深为 d , 则单位波幅波浪激励力可表示如下:

$$|f_w(i\omega)| = \sqrt{\frac{2\rho g^2 U(\omega) \left[1 + \frac{2nd}{\sinh(2nd)} \right] \tanh(nd)}{\omega n}} \quad (5)$$

式中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度, $U(\omega)$ 为辐射阻尼。

辐射力可表示为:

$$F_r(i\omega) = -[U(\omega) + i\omega V(\omega)] \dot{Z}(i\omega) \quad (6)$$

式中, $V(\omega)$ 为线圈浮筒的附加质量。

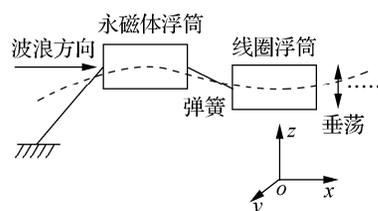


图 1 Halbach 磁阵多浮体海波发电结构示意图

设线圈浮筒的长度为 l , 半径为 r , 则线圈浮筒的附加质量可表示为^[9]:

$$V(\omega) = \frac{1}{2} \pi \rho r^2 l \quad (7)$$

静水回复力可表示为:

$$F_s(i\omega) = -\rho g A Z(i\omega) \quad (8)$$

式中, A 为线圈浮筒水线面面积。

设线圈浮筒的吃水为 h , 则:

$$A = 2l \sqrt{2rh - h^2} \quad (9)$$

设结构阻尼系数为 c , 发电结构阻尼力可表示为:

$$F_c(i\omega) = -c \dot{Z}(i\omega) \quad (10)$$

设连接弹簧的刚度系数为 k , 则其弹性力可表示为:

$$F_k(i\omega) = k Z(i\omega) \quad (11)$$

2 能量转换分析

线圈浮筒的平均能量转换功率 P 与发电结构阻尼有关, 并可利用其在 $[0, T]$ 时间内消耗的平均能量来表示, 即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (\dot{z})^2 c dt \quad (12)$$

根据线圈浮筒运动方程, 可解得线圈浮筒垂荡运动的位移为:

$$z = \frac{a |f_w(i\omega)| \sin(\omega t + \pi)}{\sqrt{Q^2 + S + \omega^2 c^2}} \quad (13)$$

式中,

$$Q = \rho g A - k - \omega^2 [m + V(\omega)]$$

$$S = \omega^2 U(\omega)^2 + 2\omega^2 U(\omega) c$$

将线圈浮筒垂荡运动位移代入式(12), 得到线圈浮筒的平均能量转换功率为:

$$P = \frac{\omega^2 a^2 c [2\omega T + \sin(2\omega T)] |f_w(i\omega)|^2}{4\omega T (Q^2 + S + \omega^2 c^2)} \quad (14)$$

3 数值模拟及分析

为数值研究海波发电结构的能量转换情况, 根据式(14), 利用 Matlab 软件编制数值模拟程序, 选取线圈浮筒的长度为 1 m, 半径为 0.3 m, 吃水为 0.3 m, 质量为 20 kg, 连接弹簧的刚度系数为 5 000 N·m⁻¹, 结构阻尼系数为 500 kg·s⁻¹, 波浪周期取为 5 s, 波高为 1 m, 水深为 25 m。运行数值模拟程序, 即可得到数值模拟结果。

图 2 给出了在不同的结构阻尼系数下, 海波发电结构的平均能量转换功率变化曲线。可以看出, 随着结构阻尼系数的增加, 海波发电结构的最高平均能量转换功率逐渐降低, 但是在共振区域的频带宽度有所增加, 因此, 为了在共振区域附近实现更多的波浪能量转换, 将结构阻尼系数确定为 500 kg·s⁻¹ 左右较为合理。图 3—图 6 分别给出了线圈浮筒的长度、半径、吃水以及弹簧刚度系数对海波发电结构平均能量转换功率的影响曲线。不难看出, 线圈浮筒长度增加时, 海波发电结构的共振频率由 2 rad·s⁻¹ 逐渐增大到 6 rad·s⁻¹, 平均能量转换功率呈先增加后降低的趋势, 在线圈浮筒长度为 1 m 时, 最高功率达到约 458 W, 海波发电结构的共振频率为 2 rad·s⁻¹ (图 3)。线圈浮筒半径变化时, 海波发电结构的共振频率变化不大, 由 2 rad·s⁻¹ 增大到 3 rad·s⁻¹, 平均能量转换功率在线圈浮筒半径为 0.3 m 时最高 (图 4)。从图 5 看出, 吃水对共振频率的影响并不明显, 从海波发电结构的平均能量转换功率来看, 其呈现先升高后降低的趋势, 在吃水为 0.3 m 时, 最高功率达到约 458 W。从图 6 看出, 随着弹簧刚度系数的增大, 海波发电结构的共振频率呈现不断减小的趋势, 而平均能量转换功率出现一个最高值, 其中, 在弹簧刚度系数为 5 000 N·m⁻¹, 频率为 2 rad·s⁻¹ 时, 平均能量转换功率最高。

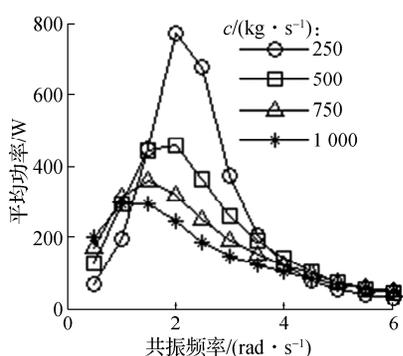


图2 平均功率与结构阻尼系数关系

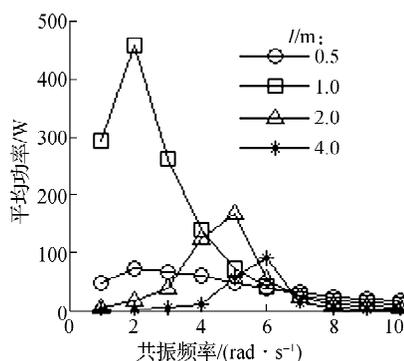


图3 平均功率与线圈浮筒长度关系

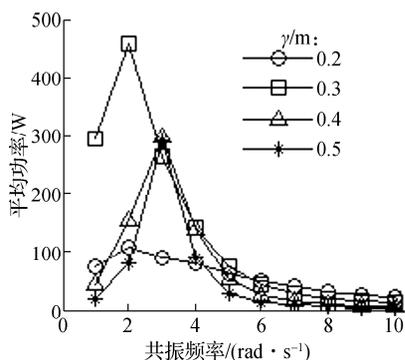


图4 平均功率与线圈浮筒半径关系

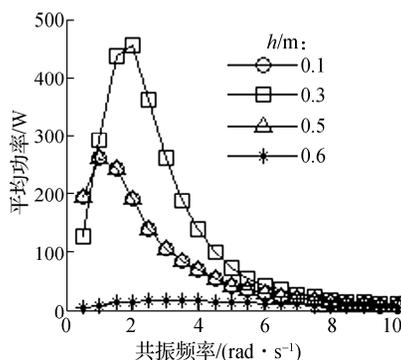


图5 平均功率与线圈浮筒吃水关系

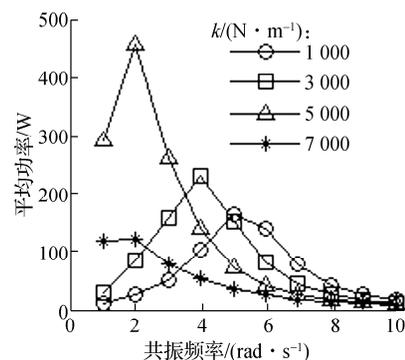


图6 平均功率与弹簧刚度系数关系

4 结 语

以 Halbach 磁阵多浮体海波发电结构为对象,采用线性波理论,推导了垂荡运动下线圈浮筒的运动方程和能量转换模型。通过数值模拟发现,海波发电结构的平均能量转换功率和共振频率受到结构阻尼系数、弹簧刚度系数以及线圈浮筒的长度、半径、吃水的影响,其中,随着结构阻尼系数的增大,海波发电结构的最高平均能量转换功率逐渐降低,但是共振区域的频带宽度有所增加,随着弹簧刚度系数和线圈浮筒的长度、半径、吃水的增大,平均能量转换功率均呈现先升高后降低的现象,最高功率约达到 458 W。研究结果表明,针对不同的波浪状况,合理设计浮筒的长度、半径和吃水等参数可以改善海波发电结构的能量转换功率。

参考文献:

- [1] 陈仁文,刘川,张宇翔.直接式波浪能采集的研究现状与展望[J].数据采集与处理,2019,34(2):195-204
- [2] 张亚群,盛松伟,游亚戈,等.波浪能发电技术应用发展现状及方向[J].新能源进展,2019(4):374-378
- [3] Dalton G J,Alcorn R,Lewis T. Case study feasibility analysis of the pelamis wave energy convertor in Ireland,Portugal and North America[J]. Renewable Energy,2010,35(2):443-455
- [4] 李晖,何宏舟,杨绍辉,等.点头鸭式波浪能采集装置的数值模拟[J].集美大学学报(自然科学版),2016,21(5):363-369
- [5] Halder P,Mohamed M H,Samad A. Wave energy conversion:design and shape optimization[J]. Ocean Engineering,2018,150:337-351
- [6] 任铭,张超,刘畅.新型网状波浪能发电装置的设计及初步试验结果[J].可再生能源,2018,36(9):1409-1414
- [7] 余顺年,詹立垒,陈韦,等.球形摆式波能发电装置研究[J].机械设计与制造,2018(4):200-202
- [8] 张步恩,郑源,付士凤,等.一种新型波浪能发电转换装置试验研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7263-7271
- [9] 王晓卿.20 kW 海洋三浮筒波浪能发电装置结构设计及性能优化[D].镇江:江苏科技大学,2013

(责任编辑:谭彩霞)