

串联直驱浮子式波浪能发电装置能量捕获研究

肖晓龙¹, 肖龙飞^{1,2}, 杨立军¹

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 以振荡浮子式波浪能发电装置为研究对象, 探讨在串联不同数量直线发电机的情况下装置在规则波中的能量捕获情况。基于势流理论, 并考虑垂荡运动, 建立浮子与电机的耦合运动方程, 应用四阶龙格库塔法数值求解, 得到能量捕获宽度比, 并对能量输出系统质量比和弹簧刚度系数的影响进行研究, 对串联不同数量直线发电机情况下能量捕获的差异进行分析。结果表明: 适当选取参数, 串联装置可在波浪频率较低时比单个发电机的装置捕获更多能量, 同时能量吸收频谱带宽增加。

关键词: 波浪能发电装置; 浮子; 串联发电机; 能量捕获宽度比; 频谱带宽

中图分类号: P751

文献标识码: A

0 引 言

相比于风能, 波浪能是一种更为持久、能量密度更大的清洁能源^[1]。人类开发出了许多种不同类型的波浪能发电装置, 按照能量转换方式的不同, 可以分为振荡浮子式、振荡水柱式和收缩坡道式^[2]。振荡浮子式波浪能发电装置是目前发展较好的装置^[3], 其利用浮子的垂荡运动吸收波浪能量, 将波浪能转换为机械能或液压能再驱动发电机发电, 或者直接驱动直线发电机发电。直接驱动直线发电机的发电方式, 减少了能量转换的中间环节, 发电效率更高, 同时降低了装置的复杂性^[4]。

Eriksson 等^[5]将直线发电机等效为阻尼, 研究在频域内振荡浮子与直线发电机之间的耦合运动, 分析浮子和能量输出系统参数对能量捕获宽度因子的影响。Yeung 等^[6]通过实验确定直线发电机的参数, 并通过理论和实验对比分析直驱浮子式波浪能发电装置的发电效率。对于传统的直驱浮子式波浪能发电装置, 由于只有一个固有频率, 只有当入射波频率与装置固有频率相等而发生共振时, 捕获能量最多, 当入射波的频率偏离装置的固有频率时, 捕获的能量就大大降低。因此, 本文提出通过串联直线发电机的方式, 增加发电系统的自由度, 从而增加装置的固有频率个数, 实现发电装置在能

量吸收频谱内产生多个共振状态, 以改善能量捕获效率。

1 物理模型及运动方程

直驱浮子式波浪能发电装置(WEC)由浮子、能量输出系统、垂荡板和锚泊线组成, 能量输出系统包含直线发电机和连接弹簧, 直线发电机由定子和动子构成, 定子上有感应线圈绕组, 动子是一根裹着永磁体的轴。浮子和发电机的动子刚性连接, 发电机的定子固定在能量输出系统舱壁上, 不同直线发电机的动子之间通过弹簧相连, 图1为发电装置

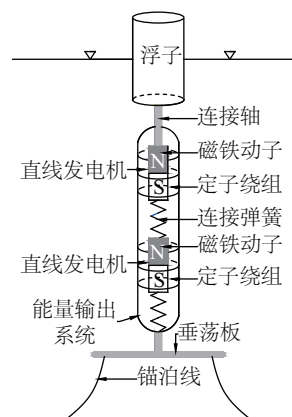


图1 串联直驱浮子式波浪能发电装置(WEC)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of WEC with serially connected generators

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239007); 海洋工程国家重点实验室自主研究课题

通信作者: 肖龙飞(1973—), 男, 博士、研究员、博士生导师, 主要从事海洋工程水动力学方面研究。xiaolf@sjtu.edu.cn

示意图。由于垂荡板运动很小,假定其静止水中^[7],因此垂荡板和锚泊线使能量输出系统稳定在水中,直线发电机完全由振荡浮子的垂荡运动驱动,浮子的上下波动带动发电机的动子上下运动,永磁动子运动时磁场将切割定子中绕组,从而在绕组中感应出电流。

1.1 直线发电机阻尼

直线发电机的动子和定子相互感应,由法拉第电磁感应定律可推导出定子线圈中的感应电流公式^[8]为:

$$L\dot{I} + RI + \gamma\dot{z} = 0 \quad (1)$$

式中, L —— 定子中线圈自感系数; R —— 定子电路中电阻, Ω , 包括线圈自身电阻和负载电阻; γ —— 定子和动子间的电感常数; I —— 产生的感应电流, A; \dot{z} —— 动子上下运动的速度, m/s。

定子对动子作用的阻尼力为^[8]:

$$F_{ce} = \gamma I \quad (2)$$

解式(1),并由初始条件 $\dot{z}=0$, $I=0$, 得:

$$I = \frac{-\gamma}{R} \dot{z} \quad (3)$$

取发电机阻尼 $C = \frac{\gamma^2}{R}$, 则阻尼力 F_c 和发电功率 P 分别如式(4)和式(5)所示:

$$F_c = \gamma I = -C\dot{z} \quad (4)$$

$$P = I^2 R = C\dot{z}^2 \quad (5)$$

1.2 单机直驱装置

依据式(4)和式(5)将直线发电机用阻尼替代,画出单机直驱装置简化物理模型,如图 2a 所示。根据牛顿第二定律,振荡浮子的垂荡运动方程表示如式(6)所示:

$$m\ddot{z} = F_e + F_r + F_h + F_c + F_k \quad (6)$$

式中, m —— 浮子和动子质量之和,其值等于浮子排水量, kg; \ddot{z} —— 浮子的加速度, m/s²; F_e —— 波浪激励力, N; F_r —— 辐射力, N; F_h —— 静水恢复力, N; F_c —— 发电机阻尼力, N; F_k —— 弹性力, N。

在规则波作用下把垂荡运动 z 写成简谐形式 $Z(i\omega)$, 则:

$$\begin{aligned} F_e(i\omega) &= f_{RAO}(i\omega)a, \quad F_r(i\omega) = -[B_z(\omega) + i\omega A(\omega)]\dot{Z}(i\omega), \\ F_h &= -\rho g S Z(i\omega), F_k = -K Z(i\omega), \text{变换式(6)得:} \\ (-\omega^2(m + A(\omega)) + i\omega(C + B_z(\omega)) + \rho g S + K)Z(i\omega) &= f_{RAO}(i\omega)a \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ρ —— 水的密度; g —— 重力加速度, m/s²; ω —— 波浪频率, rad/s; i —— 虚数单位; S —— 浮子水线面面积, m²; $A(\omega)$ —— 浮子附加质量; $B_z(\omega)$ —— 辐射阻尼, (N·m)/s; K —— 弹簧刚度系数, N/m; $f_{RAO}(i\omega)$ —— 单位波幅的波浪激励力, N; a —— 入射波波幅, m。

则浮子垂荡运动的频率响应函数为^[9]:

$$H(i\omega) = \frac{f_{RAO}(i\omega)}{(-\omega^2(m + A(\omega)) + i\omega(C + B_z(\omega)) + \rho g S + K)} \quad (8)$$

浮子在频率为 ω 、波幅为 a 的规则波中运动时,其垂荡位移为:

$$z(t) = |H(i\omega)|a \cos(\omega t + \sigma) \quad (9)$$

式中, σ —— 相位差。

当入射波频率与装置固有频率相同时,浮子运动发生共振,垂荡位移 $z(t)$ 达到最大。装置固有频率为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S + K}{m + A(\omega)}} \quad (10)$$

1.3 串联直驱装置

在单机直驱装置基础上,为改善共振响应特性,在浮子下部串联 2 个直线发电机,其物理简化模型如图 2b,运动方程如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_1 + A(\omega) & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + B(\omega) & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_1 + \rho g S & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, z_1 、 z_2 —— m_1 、 m_2 对应垂荡位移; m_1 —— 浮子与 1 号发电机动子质量之和,其值等于浮子排水量; m_2 —— 2 号发电机动子质量; C_1 、 C_2 —— 1 号和 2 号发电机阻尼; K_1 、 K_2 —— 对应的弹簧刚度系数。式(11)为二阶微分方程,可转为一阶微分方程组求解,令 $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T = [z_1 \ z_2 \ \dot{z}_1 \ \dot{z}_2]^T$, 则:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_3 \\ \dot{X}_2 = X_4 \\ \dot{X}_3 = -\frac{C_1 + B_z(\omega)}{m_1 + A(\omega)}X_3 - \frac{K_1 + \rho g S}{m_1 + A(\omega)}X_1 + \\ \quad \frac{K_1}{m_1 + A(\omega)}X_2 + \frac{F_e}{m_1 + A(\omega)} \\ \dot{X}_4 = -\frac{C_2}{m_2}X_4 + \frac{K_1}{m_2}X_1 - \frac{K_1 + K_2}{m_2}X_2 \end{cases} \quad (12)$$

或:

$$\dot{X} = \tilde{f}(t, X) \quad (13)$$

式(4)和式(5)作为一阶微分方程组,可用四阶龙格库塔法数值求解。

将方程(11)中载荷和阻尼取为 0,可得系统固有自振频率,如式(14)所示:

$$\omega_n^2 = \frac{(m_1 + A(\omega))(K_1 + K_2) + m_2(K_1 + \rho g S)}{2m_2(m_1 + A(\omega))} \pm \frac{\sqrt{[(m_1 + A(\omega))(K_1 + K_2) + m_2(K_1 + \rho g S)]^2 - 4m_2(m_1 + A(\omega))[K_1 K_2 + (K_1 + K_2)\rho g S]}}{2m_2(m_1 + A(\omega))} \quad (14)$$

式中, ω_n^2 有 2 个正值, $\omega_{n1}^2 \leq \omega_{n2}^2$, 其中 ω_{n1} 为第一自振频率, ω_{n2} 为第二自振频率。

将串联发电机的数量增加到 4 个,其物理简化模型如图 2c,运动方程如式(15)所示:

$$\begin{bmatrix} m_1 + A(\omega) & & & \\ & m_2 & & \\ & & m_3 & \\ & & & m_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_3 \\ \ddot{z}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + B_z(\omega) & & & \\ & C_2 & & \\ & & C_3 & \\ & & & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + \rho g S & -K_1 & & \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 & \\ & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 \\ & & -K_3 & K_3 + K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_e \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,各参数意义与串联 2 个的装置一致,下标 1、2、3、4 分别代表自上而下的 1、2、3、4 号发电机。

令 $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8]^T = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ \dot{z}_1 \ \dot{z}_2 \ \dot{z}_3 \ \dot{z}_4]^T$, 式(15)可转化为式(16):

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_5 & \dot{X}_2 = X_6 & \dot{X}_3 = X_7 & \dot{X}_4 = X_8 \\ \dot{X}_5 = -\frac{C_1 + B_z(\omega)}{m_1 + A(\omega)} X_5 - \frac{K_1 + \rho g S}{m_1 + A(\omega)} X_1 + \frac{K_1}{m_1 + A(\omega)} X_2 + \frac{F_e}{m_1 + A(\omega)} \\ \dot{X}_6 = -\frac{C_2}{m_2} X_6 + \frac{K_1}{m_2} X_1 - \frac{K_1 + K_2}{m_2} X_2 + \frac{K_2}{m_2} X_3 \\ \dot{X}_7 = -\frac{C_3}{m_3} X_7 + \frac{K_2}{m_3} X_2 - \frac{K_2 + K_3}{m_3} X_3 + \frac{K_3}{m_3} X_4 \\ \dot{X}_8 = -\frac{C_4}{m_4} X_8 + \frac{K_3}{m_4} X_3 - \frac{K_3 + K_4}{m_4} X_4 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)为一阶微分方程组,可用四阶龙格库塔法求解。

2 能量捕获宽度比

在 $[0, t]$ 时间内波浪能发电装置产生电能的平均功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{t} \int_0^t C \dot{z}(t)^2 dt \quad (17)$$

依据式(9)可得到单机直驱装置的 $z(t)$, 数值求解式(11)可得到串联 2 个发电机装置的 $z_1, z_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2$, 数值求解式(15)可得到串联 4 个发电机装置的 $z_1, z_2, z_3, z_4, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_4$, 分别代入式(17), 可得单机直驱装置和串联直驱装置的平均发电功率。

波浪能量输运定义为单位时间内穿过垂直于波浪传播方向的单位宽度截面的能量。根据线性波理论,波浪运输能量为^[10]:

$$Q_{\text{wave}}(\omega) = \frac{\rho g}{2} v_g(\omega, h) a^2 \quad (18)$$

式中, $v_g(\omega, h)$ ——波群速度。

$$\text{定义为: } v_g(\omega, h) = \frac{g}{2\omega} \tanh(kh) \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (19)$$

式中, h ——水深, 频率 ω 和波数 k 满足色散关系:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (20)$$

则体现能量捕获效率的能量捕获宽度比 (ξ) 可定义为^[3]:

$$\xi = \frac{\bar{P}}{b Q_{\text{wave}}} \quad (21)$$

式中, b ——波浪宽度。

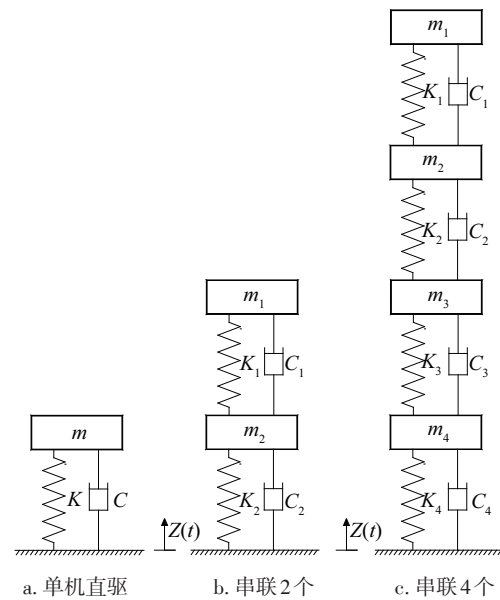


图2 直驱浮子式波浪能发电装置简化物理模型

Fig. 2 Physical model of WEC

3 数值结果分析

3.1 参数选取及无量纲化

在 40~100 m 水深范围内,波浪的幅值较大,是布置波浪能发电装置的理想水深范围,水深太浅波浪衰减过快,水深太深不利于装置的安装^[11]。本文取水深为 $h=50$ m。圆柱形振荡浮子直径 $D=1$ m,吃水 $d=5$ m,规则波浪幅值取 $a=1$ m。

Falnes^[10]提出轴对称物体垂荡运动受到的单位波幅波浪激励力解析表达式为:

$$|f_{\text{RAO}}(i\omega)| = \left[\frac{2\rho g^2 D(kh) B_z(\omega)}{\omega k} \right]^{1/2} \quad (22)$$

式中,

$$D(kh) = \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh) \quad (23)$$

用三维势流软件 SESAM 计算浮子的水动力参数和波浪激励力^[12],为验证该软件计算结果的准确性,应用式(22)计算出单位波幅波浪激励力的解析解,并和 SESAM 计算结果进行对比,如图 3 所示。

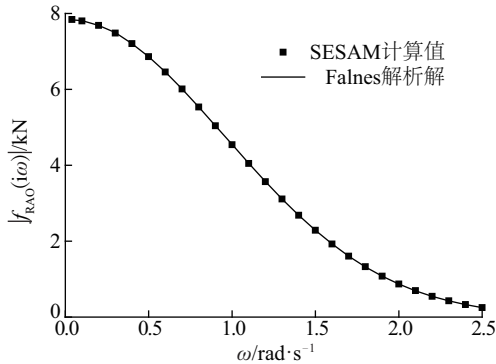


图3 SESAM软件计算结果与Falnes^[10]解析解对比

Fig. 3 Comparison of wave excitation force by SESAM and Falnes^[10]

可见,SESAM 计算结果与文献 Falnes^[10]提出的解析解吻合很好,验证了 SESAM 计算的可靠性。

为对比分析串联直驱装置的效果,最佳刚度系数和发电机阻尼参数的选取依据让单机直驱装置获得最大捕获能量来确定,并在之后计算中单机直驱和串联直驱装置都选取此时的阻尼和刚度系数。要使发电装置从波浪能中吸收的功率 P 达到最大,最佳阻尼和弹簧刚度系数必须满足^[13]:

$$\frac{\partial P}{\partial C} = \frac{\partial P}{\partial K} = 0 \quad (24)$$

由式(24)得出最佳刚度为负数,与实际不符合。弹簧刚度系数的选取与能量捕获效率及浮子的稳定性有关,Vicente 等^[14]将弹簧刚度系数取为浮体静水恢复力系数的 10%,即 $K=0.1\rho gS$,但其浮子模型为半球,横截面较大,本文浮子为细长圆柱,截面较小,因此将刚度系数的选取在 $K=0.1\rho gS$ 基础上增大,取 $K=(0.1\sim 0.5)\rho gS$ 。由式(24)可得最佳阻尼为:

$$C_{\text{opt}} = \frac{|K + \rho gS - (m + A(\omega))\omega^2|}{\omega} \quad (25)$$

根据式(25)计算的最佳阻尼如图 4 所示,图中曲线最低点对应发电装置的固有频率。不同刚度系数、不同波浪频率下最佳阻尼不同,而一般波浪频率低于发电装置的固有频率,为了考虑在共振区域附近尽可能多的吸收低频的波浪能量,取 $C=1000$ kg/s。

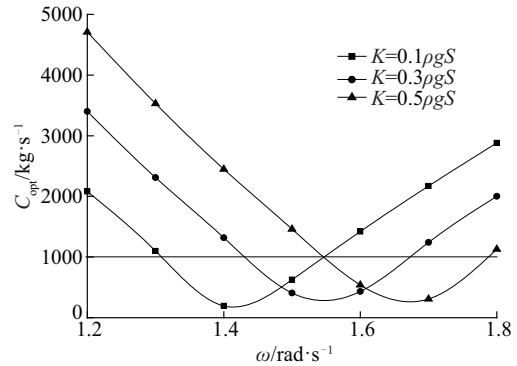


图4 单机直驱装置最佳阻尼

Fig. 4 Best damping constant of WEC with one generator

将参数无量纲化,无量纲阻尼系数 $C^* = Cp^{-1}D^{-3/2}d^{-1}g^{-1/2}$,无量纲刚度系数 $K^* = K/(\rho gS)$,无量纲波浪频率 $\omega^* = \omega(d/g)^{1/2}$ 。

3.2 刚度系数和质量比影响分析

无量纲最佳阻尼 $C^*=0.0623$,质量比 $\lambda = m_2/m_1$, $K=K_1=K_2$, $C=C_1=C_2$,考虑 K^* 和 λ 的变化,分别计算单机直驱装置和串联两个发电装置的能量捕获宽度比 ξ ,结果如图 5 所示。

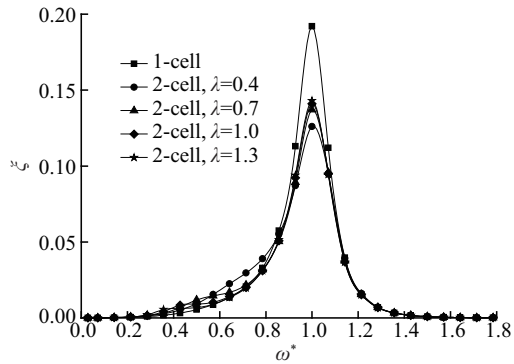
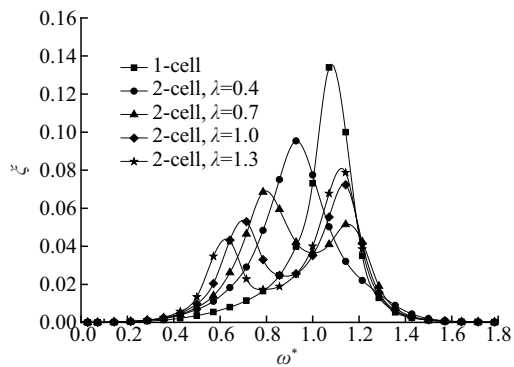
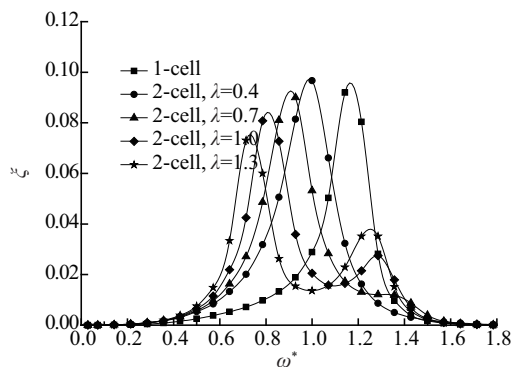
可见,串联 2 个发电机的装置在刚度系数和质量较小时,能量吸收频谱呈现单峰值,而刚度系数和质量比较大时呈现双峰值。这是由于刚度系数和质量比较大时,弹性力和惯性力较大,足以与波浪激励力耦合,装置的 2 个固有自振频率得以展现

出来,而较小时,弹性力和惯性力的合力与波浪激励力相比太小,能量吸收频谱与单机直驱装置相似。在同一刚度系数下,随着质量比的增大,串联直驱装置在第一自振频率附近捕获能量峰值相对减小,第二自振频率附近捕获能量峰值相对增大。串联 2 个发电机的装置由于具有 2 个固有自振频率,在波浪中存在 2 个共振峰值,因此能量捕获频

谱带宽更宽。串联装置的第一自振频率低于单机直驱装置的固有频率,借助于第一自振频率附近的共振,在低频时较单机发电装置可捕获更多的波浪能量,且随着刚度系数的增加这种优势更加明显,但在单机装置的共振频率附近捕获的能量相对较低,在高频区域能量捕获差异不大。

为分析串联直驱装置内部各直线发电机能量捕获宽度比 ξ 随无量纲刚度系数 K^* 和质量比 λ 的变化情况,进一步对串联 4 个电机发电装置进行计算,得到各发电机能量捕获宽度比,如图 6 所示。其中, $\lambda = m_4/m_1 = m_3/m_1 = m_2/m_1$, $C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4$, $K = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$ 。

可见,当无量纲刚度系数 K^* 较小时,能量吸收主要集中在与浮子相连的 1 号发电机上(见图 6a 和图 6b),随着刚度系数的增大,2、3、4 号发电机吸收能量相对增大,1 号发电机吸收能量相对减小(见图 6c 和图 6d)。这是由于刚度系数较小时,弹性力太小,不足以对波浪激励力产生影响,随着刚度系数的增大,弹性力增大,更硬的弹簧将更多的波浪能从浮子传递给下面的 2、3、4 号发电机。当刚度系数较小时,质量比对各发电机能量吸收影响不大,而刚度系数较大时,质量比较大,各个发电机的能量吸收图谱会出现多个峰值。

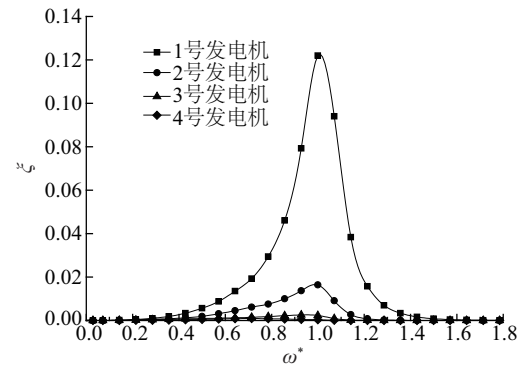
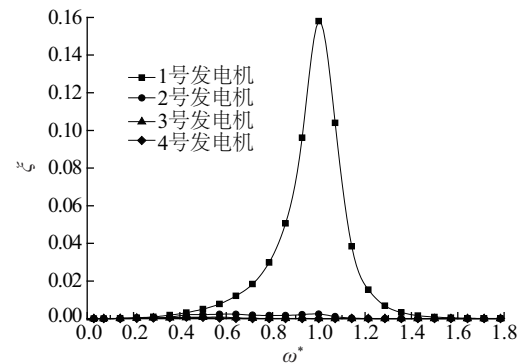
a. $K^*=0.1$ b. $K^*=0.3$ c. $K^*=0.5$

(1-cell, 2-cell 分别代表单机直驱和串联 2 个发电机的 WEC)

图 5 单机直驱和串联 2 个发电机的装置在不同刚度系数 (K^*)、质量比 (λ) 时能量捕获宽度比

Fig. 5 Power capture ratio of 1-cell and 2-cell WEC

versus K^* and λ

a. $K^*=0.1, \lambda=0.4$ b. $K^*=0.1, \lambda=1$

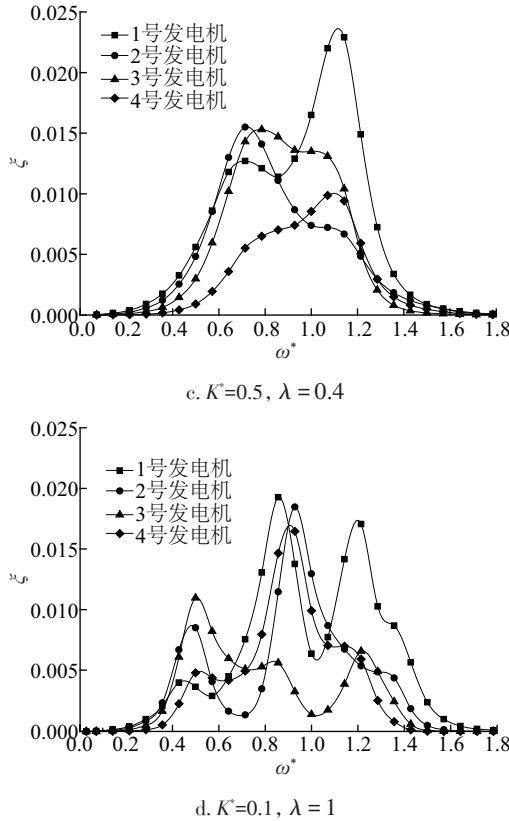


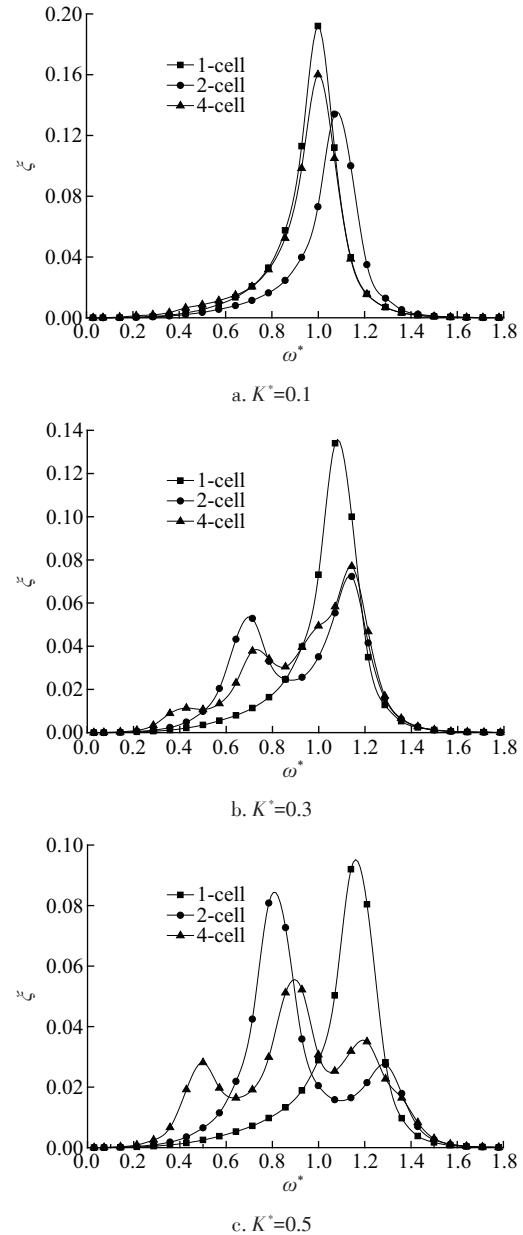
图6 串联4个发电机的装置各发电机能量捕获宽度比

Fig. 6 Power capture ratio by each generator of 4-cell WEC

3.3 单机直驱与串联直驱装置对比分析

由3.2节结果可知,只有质量比较大时,串联直驱装置能量吸收频谱才会出现多个共振幅值,能量捕获性能较优,对串联2个和4个电机的直驱装置,将质量比取为1,而刚度系数和电机阻尼取值与单机直驱装置一致,对串联2个装置: $C=C_1=C_2$, $K=K_1=K_2$, $\lambda=m_2/m_1=1$, 串联4个装置: $C=C_1=C_2=C_3=C_4$, $K=K_1=K_2=K_3=K_4$, $\lambda=m_2/m_1=m_3/m_1=m_4/m_1=1$ 对比分析这种性能较优的串联直驱装置与单机直驱装置在不同刚度系数时的能量捕获宽度比,如图7所示。可见,刚度系数较小时(见图7a),单机直驱装置在共振区域捕获的能量大于串联直驱装置,在高频和低频时捕获能量差异不大。然而随着刚度系数增大(见图7b和图7c),串联直驱装置的多个共振峰值开始呈现,在低频时捕获的能量显著大于单机直驱装置,并且随着刚度系数的增加这种优势更加明显,能量吸收频谱更宽,但在单机直驱装置的共振频率附近捕获的能量较低,在高频

区域能量捕获差异不大。考虑到波浪谱峰频率较低,通常远低于波浪能发电装置的固有频率,如中国渤海1年一遇的海浪谱峰频率为0.79 rad/s^[15],因此在实际海况中,串联装置可捕获更多的波浪能量。串联2个发电机和串联4个发电机的直驱装置在不同波浪频率下捕获能量存在差异,二者都有各自不同的最优捕获波浪频率,需具体根据实际不规则波浪谱选取相应装置。



(1-cell, 2-cell 和 4-cell 分别代表单机直驱、串联2个发电机和串联4个发电机的WEC)

图7 单机直驱与串联直驱装置能量捕获宽度比

Fig. 7 Power capture ratio of WECs with serial generators

4 结 论

1) 串联直驱装置具有多个固有自振频率,但需在刚度系数和质量比较大时,能量吸收频谱的多个共振峰值才会展现出来,否则与单机直驱装置差异不大,而且峰值较低。

2) 刚度系数和质量比较大时,串联直驱装置比单机直驱装置在低频时捕获更多的能量,且具有更宽的能量捕获带宽;在共振时,串联直驱装置峰值低于单机直驱装置,说明此时振动平缓,振幅较小,有利于发电装置在波浪中生存和延长使用寿命。

3) 不同刚度系数和质量比时,串联 2 个和 4 个发电机的发电装置,具有各自不同的最优捕获波浪频率,但综合考虑装置复杂性,双机串联发电装置更经济实用。

[参考文献]

- [1] Falnes J. A review of wave-energy extraction[J]. *Marine Structures*, 2007, 20(4): 185—201.
- [2] de O Falcão A F. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, 14(3): 899—918.
- [3] 阎耀保. 海洋波浪能综合利用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013, 227—228, 231—232.
- [3] Yin Yaobao. Principle and device of the ocean wave energy conversion generation[M]. Shanghai: Shanghai scientific & technical publishers, 2013, 227—228, 231—232.
- [4] Mueller M A. Electrical generators for direct drive wave energy converters[J]. *IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, 2002, 149(4): 446—456.
- [5] Eriksson M, Isberg J, Leijon M. Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2005, 43(17-18): 1377—1387.
- [6] Yeung R W, Peiffer A, Tom N, et al. Design, analysis, and evaluation of the UC-Berkeley wave-energy extractor[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2012, 134(2): 021902.
- [7] Harne R L, Schoemaker M E, Dussault B E, et al. Wave heave energy conversion using modular multistability[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 148—156.
- [8] Mann B P, Owens B A. Investigations of a nonlinear energy harvester with a bistable potential well[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(9): 1215—1226.
- [9] 程正顺, 杨建民, 胡志强, 等. 直接驱动浮子式波浪能转换装置频域模拟研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 37(7): 1304—1310.
- [9] Cheng Zhengshun, Yang Jianmin, Hu Zhiqiang, et al. Frequency domain modeling and analysis of a direct drive point absorber wave energy converter[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 37(7): 1304—1310.
- [10] Falnes J. Ocean waves and oscillating systems: Linear interactions including wave-energy extraction[M]. London: Cambridge University Press, 2002, 45—46, 173.
- [11] Scruggs J, Jacob P. Harvesting ocean wave energy[J]. *Science*, 2009, 323(5918): 1176—1178.
- [12] Veritas D N. SESAM user's manual[J]. *PROBAN Distributions*, 1996, 1: 4.2—01.
- [13] 覃 岭, 吴必军. 复杂圆柱型波能装置振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 188—192.
- [13] Qin Ling, Wu Bijun. Oscillating property of a complex cylinder as a wave energy conversion device[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 188—192.
- [14] Vicente P C, Falcão A F O, Justino P A P. Nonlinear dynamics of a tightly moored point-absorber wave energy converter[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 59: 20—36.
- [15] 肖龙飞, 杨建民, 范 模, 等. 160 kW DWT FPSO 在极浅水中运动安全性研究[J]. *船舶力学*, 2006, 10(1): 7—14.
- [15] Xiao Longfei, Yang Jianmin, Fan Mo, et al. Research on motions and safety performance of a 160 kW DWT FPSO in ultra-shallow water[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2006, 10(1): 7—14.

ENERGY HARVESTING STUDY OF SERIES DIRECT DRIVEN FLOAT WAVE ENERGY CONVERTER

Xiao Xiaolong¹, Xiao Longfei^{1,2}, Yang Lijun¹

(1. State Key Lab of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: The oscillating float wave energy converter was studied to explore energy harvesting status of linear generators with different series number in regular waves. Floater and motor coupling motion equation was set up based on potential flow theory and considering heaving motion, the fourth-order Runge-Kutta method was used to solve the equation numerically to get energy harvesting width ratio, and study the influence of energy output system mass ratio and spring stiffness coefficient, also analyze the differences of energy harvesting in the case of series linear generators with different numbers. The results showed that with proper parameter selection, tandem devices can capture more energy at lower wave frequencies than single-generator devices, meanwhile increasing the energy-absorbing spectrum bandwidth.

Keywords: wave energy converter; floater; serially connected generators; power capture width ratio; spectrum bandwidth