

文章编号: 1674 - 5566(2014)03 - 0475 - 06

双浮体波能装置的功率转换特性研究

林礼群^{1,2,3}, 吴春旭^{1,2,3}, 吴必军^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 双浮体波能装置属于漂浮振荡浮子式技术的一种形式, 研究其功率转换特性对于波能装置的发展具有重要意义。基于线性波理论和粘性阻尼理论, 建立了装置的双自由度受迫振动方程, 并以波能装置的外部阻尼作为优化变量, 推导了最佳阻尼条件下波能装置吸收的最大功率表达式; 采用 HydroStar 计算功率表达式中的附加质量、阻尼系数和波浪激励力, 进一步求解出波能装置所吸收的功率和俘获宽度比, 文中还结合实际海况分析了双浮体的主要几何参数变化对波能装置功率转换特性的影响。

波浪能是一种能流密度高、分布广泛的清洁能源, 开发和利用波浪能对能源紧缺和海岛的开发利用具有重要意义。关于波浪能发电技术的种类存在多种分类, 根据第一级吸收能量方式分类, 主要有振荡水柱式、越浪式和振荡浮子式^[1]。漂浮双浮子波浪能发电技术属于振荡浮子的一种形式, 通过水下浮子内的后续动力摄取装置(液压机构、直线电机机构等)把水面浮子吸收的波浪能转换为电能, 因其受浪向影响小、转换效率高、结构简单易于建造等优点而成为波浪能利用技术的一个研究热点^[2-3]。

漂浮式双浮子波浪能发电技术的优化研究涉及到水动力学知识、能量转换理论和动力摄取系统设计等。在水动力学研究方面: ZHENG 等^[4], 与 BERGGREN 和 JOHANSSON^[5]采用解析方法详细研究了由两个圆柱作垂荡运动的水动力学系数和波浪激励力; 在能量转换理论研究方面: CANDIDO 和 FALCAO^[6]、FALCAO 等^[7]、吴必军等^[8]对双圆柱形浮体双自由度有阻尼垂荡运动下装置的振动特性和效率转换特性问题进

研究亮点: 目前在对双浮体波能装置的最佳吸收功率研究中没求出最佳阻尼下的最大吸收功率。本文把阻尼系数作为变量对功率函数求极值, 求出最大功率表达式, 并利用 HydroStar 计算装置水动力学量。

关键词: 波浪能; 吸收功率; 最佳阻尼; 俘获宽度比

中图分类号: TK 79

文献标志码: A

行了详细研究。

在求解水动力学系数和波浪激励力方面, 目前解析方法只能求解标准圆柱体形状, 对于非标准圆柱体一般采用边界元数值计算方法, 本文采用基于边界元法的专业水动力学计算软件 HydroStar 计算装置的水动力学系数和波浪激励力; 在对波能装置的功率转换特性研究中, 吴必军推导出双自由度有阻尼垂荡运动的波能装置吸收功率表达式, 并采用数值寻优方法找出最佳阻尼^[8], 本文在此基础上以动力摄取系统提供的外部阻尼作为变量对功率函数求极值, 得出最佳阻尼条件下装置吸收的最大功率表达式, 并结合在实际波况条件下装置的主要几何参数变化对俘获宽度比的影响分析, 为波能装置的优化设计提供理论指导。

1 波能装置的数学模型

双浮体波能装置如图 1 所示, 水面浮体 1 为一圆柱锥形台状浮子, 浮子 1 通过柔性绳与直线电机的定子部分(或者液压缸, 本文考虑直线电

收稿日期: 2013-12-06 修回日期: 2014-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(51276185, 51079138)

作者简介: 林礼群(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋波浪能转换技术。E-mail: linlq@ms.giec.ac.cn

机情况)连接,水下浮体 2 由圆柱形阻尼板和装有直线电机结构的中心管浮鼓构成,直线发电机的线圈部分固定在中心管浮鼓内,定子通过弹簧与阻尼板连接。在波浪作用下,水面浮体 1 与水下浮体 2 做相对往复运动使直线发电机的线圈做切割磁感线而发电。设波能装置由电磁力提供一个粘性阻尼,阻尼系数为 C ,通过该阻尼波能装置吸收波浪能。设装置漂浮在不可压、流动无旋的波面上,在线性波作用下两浮体分别做微幅垂荡运动。

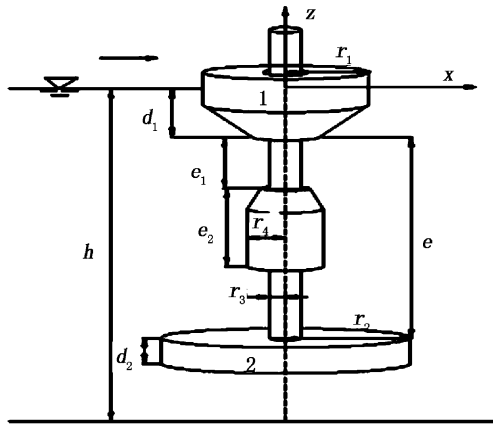


图 1 波能装置几何特征

Fig. 1 Sketch of the wave energy device

h . 水深; d_1 . 浮子 1 的吃水深度; d_2 . 阻尼板高度; r_1 . 浮子 1 半径; r_2 . 阻尼板半径; r_3 . 中心管半径; r_4 . 浮鼓半径; e . 浮子 1 与阻尼板之间距离; e_1 . 浮子 1 与浮鼓之间距离; e_2 . 浮鼓高度。

在以上假设条件下,波能装置中的浮子 1 在垂直方向上受有重力 M_1g ,浮力 F_{f1} ,静水回复力 F_{s1} ,反电磁力 F_{gen} (阻尼力),振荡浮子 1 自身运动产生的垂向波浪辐射力 F_{r11} ,浮体 2 运动作用在浮体 1 上的垂向波浪辐射力 F_{r12} ,浮体 1 所受的垂向波浪力为 F_{e21} ,波能装置中的水下浮体 2 在垂直方向上受有重力 M_2g ,浮力 F_{f2} ,静水回复力 F_{s2} ,阻尼力 $-F_{gen}$,浮体 2 自身运动产生的垂向波浪辐射力 F_{r22} ,浮体 1 运动作用在浮体 2 上的垂向波浪辐射力 F_{r21} ,浮体 2 所受的垂向波浪力为 F_{e22} ,则波能装置可简化为一个有阻尼的双自由度受迫振动系统,其数学模型简化为图 2。根据牛顿第二定律可知:

$$M_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = -M_1g + F_{f1} + F_{e21} + F_{r11} + F_{r12} + F_{s1} + F_{gen} \quad (1)$$

$$M_2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -M_2g + F_{f2} + F_{e22} + F_{r22} + F_{r21} + F_{s2}$$

$$-F_{gen} \quad (2)$$

式中:浮体 2 的静水回复力可视为零 $F_{s2} = 0$;浮体 $n(n = 1, 2)$ 在静水平衡条件下分别有:

$$M_1g = F_{f1} \quad (3)$$

$$M_2g = F_{f2} \quad (4)$$

垂荡运动的复数运动振幅为 A_n ,其位移方程表示为:

$$z_n = \text{Re}[A_n \exp(i\omega t)] \quad (n = 1, 2) \quad (5)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$, ω 为入射波频率; t 为时间, $\text{Re}[\]$ 表示取复数表达式的实部,浮体 1 的静水回复力可以表示为:

$$F_{s1} = \text{Re}[-\rho g \pi r_1^2 A_1 \exp(i\omega t)] \quad (6)$$

式中: ρ 为海水密度; g 为重力加速度; r_1 为浮体 1 的半径。电磁力可以通过以下表达式计算:

$$F_{gen} = -C \frac{\partial(z_1 - z_2)}{\partial t} = \text{Re}[-iC\omega(A_1 - A_2) \exp(i\omega t)] \quad (7)$$

在线性波理论中,对浮体的垂荡运动,浮体 $n(n = 1, 2)$ 自身运动产生的垂向波浪辐射力 F_{rnn} ,浮体 $m(m = 1, 2)$ 运动作用在浮体 n 上的垂向波浪辐射力 F_{rnm} ,均可由下式统一表示:

$$F_{rnm} = \text{Re}[(-\omega^2 \mu_{nm} - i\omega \lambda_{nm}) A_n \exp(i\omega t)] \quad (8)$$

式中: μ_{nm} 为附加质量,满足 $\mu_{nm} = \mu_{mn}, (m \neq n)$; λ_{nm} 为阻尼系数,满足 $\lambda_{nm} = \lambda_{mn}, (m \neq n)$ 。波浪激励力 F_{ezn} 为:

$$F_{ezn} = \text{Re}[F_{fezn} \exp(i\omega t)] \quad (9)$$

式中: F_{fezn} 为空间项的激励力复数幅值。

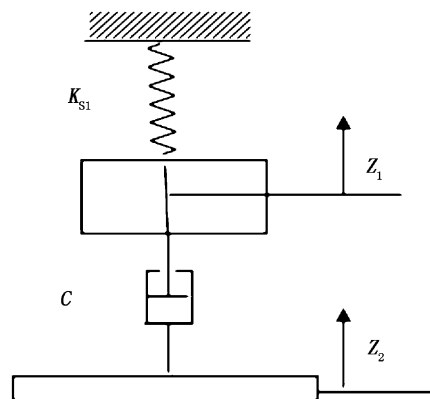


图 2 波能装置振动模型

Fig. 2 The vibration model of the wave energy device

K_{s1} . 静水回复刚度; C . 直线电机阻尼系数; Z_1 . 浮子 1 的垂荡位移; Z_2 . 浮子 2 的垂荡位移。

2 装置吸收的波浪能功率

把式(3)~(9)代入式(1)和式(2)去掉时间项最终化解为:

$$[\rho g \pi r_1^2 - \omega^2(M_1 + \mu_{11}) + i\omega(\lambda_{11} + C)]A_1 + [i\omega(\lambda_{12} - C) - \omega^2\mu_{12}]A_2 = F_{fez1} \quad (10)$$

$$[i\omega(\lambda_{12} - C) - \omega^2\mu_{12}]A_1 + [\omega^2(M_2 + \mu_{22}) + i\omega(\lambda_{22} + C)]A_2 = F_{fez2} \quad (11)$$

为方便公式的书写,令:

$$H_1 = \rho g \pi r_1^2 - \omega^2(M_1 + \mu_{11}) + i\omega(\lambda_{11} + C) \quad (12)$$

$$H_2 = -\omega^2\mu_{12} + i\omega(\lambda_{12} - C) \quad (13)$$

$$H_3 = -\omega^2(M_2 + \mu_{22}) + i\omega(\lambda_{22} + C) \quad (14)$$

方程组进一步化简为:

$$H_1A_1 + H_2A_2 = F_{fez1} \quad (15)$$

$$H_2A_1 + H_3A_2 = F_{fez2} \quad (16)$$

方程的解为:

$$A_1 = \frac{H_3F_{fez1} - H_2F_{fez2}}{H_1H_3 - H_2^2} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{H_1F_{fez2} - H_2F_{fez1}}{H_1H_3 - H_2^2} \quad (18)$$

两个浮体的相对运动位移幅值为:

$$A_r = |A_1 - A_2| = \frac{|(H_2 + H_3)F_{fez1} - (H_1 + H_2)F_{fez2}|}{|H_1H_3 - H_2^2|} \quad (19)$$

根据功的定义可知,阻尼力做的功就是波能装置吸收的能量,因此得到波能装置从波浪中吸收的功率为:

$$P = \frac{1}{2}\omega^2CA_r^2 = \frac{1}{2}\omega^2C \frac{|(H_2 + H_3)F_{fez1} - (H_1 + H_2)F_{fez2}|^2}{|H_1H_3 - H_2^2|^2} \quad (20)$$

3 最佳阻尼和最大吸收功率的推导

波能装置的吸收功率大小同海况(入射波周期、波高等)以及装置本身的结构设计(形状、尺寸、阻尼力、弹力等)有关,本文在确定海况条件下,以阻尼力作为研究变量,求解式(20)中功率 P 的最大值,即把阻尼系数作为独立变量对功率函数求极值,最后得到优化后的波能装置吸取波浪能的功率表达式。为方便求极值计算,将式(20)中的分子项、分母项整理如下:

$$H_1 + H_2 = \rho g \pi r_1^2 - \omega^2(M_1 + \mu_{11} + \mu_{12}) + i\omega$$

$$(\lambda_{11} + \lambda_{12}) \quad (21)$$

$$H_3 + H_2 = -\omega^2(M_2 + \mu_{22} + \mu_{12}) + i\omega(\lambda_{22} + \lambda_{12}) \quad (22)$$

$$H_1H_3 - H_2^2 = iC\omega(\rho g \pi r_1^2 + i\lambda_{11}\omega + 2i\lambda_{12}\omega + i\lambda_{22}\omega - \mu_{11}\omega^2 - 2\mu_{12}\omega^2 - \mu_{22}\omega^2 - M_2\omega^2 - M_1\omega^2) + (\lambda_{12}^2\omega^2 - \lambda_{11}\lambda_{22}\omega^2 - \rho\mu_{22}g\pi r_1^2\omega^2 - \rho g M_2\pi r_1^2\omega^2 - \mu_{12}^2\omega^4 + \mu_{11}\mu_{22}\omega^4 + \mu_{22}M_1\omega^4 + \mu_{11}M_2\omega^4 + M_1M_2\omega^4) - i\mu_{22}\lambda_{11}\omega^3 + i\lambda_{22}g\pi r_1^2\rho\omega + 2i\lambda_{12}\mu_{12}\omega^3 - i\mu_{11}\lambda_{22}\omega^3 - i\lambda_{22}M_1\omega^3 - i\lambda_{11}M_2\omega^3 \quad (23)$$

由式(21)、(22)知式(20)中分子项中不含变量 C , 可视为一常量, 令:

$$S_0 = |(H_3 + H_2)F_{fez1} - (H_1 + H_2)F_{fez2}|^2 \quad (24)$$

式(21)中的分母项可根据式(24)作变换如下:

$$S_1 = \rho g \pi r_1^2 - \omega^2(\mu_{11} + 2\mu_{12} + \mu_{22} + M_1 + M_2) \quad (25)$$

$$S_2 = \omega(\lambda_{11} + 2\lambda_{12} + \lambda_{22}) \quad (26)$$

$$S_3 = \omega^2(\lambda_{12}^2 - \lambda_{11}\lambda_{22} - \rho\mu_{22}g\pi r_1^2 - \rho g M_2\pi r_1^2 - \mu_{12}^2\omega^2 + \mu_{11}\mu_{22}\omega^2 + \mu_{22}M_1\omega^2 + \mu_{11}M_2\omega^2 + M_1M_2\omega^2) \quad (27)$$

$$S_4 = \lambda_{22}g\pi r_1^2\rho\omega - \mu_{22}\lambda_{11}\omega^3 + 2\lambda_{12}\mu_{12}\omega^3 - \mu_{11}\lambda_{22}\omega^3 - \lambda_{22}M_1\omega^3 - \lambda_{11}M_2\omega^3 \quad (28)$$

将式(25)~(28)代入式(23), 式(20)中分母项可化简为:

$$H_1H_3 - H_2^2 = iC\omega(S_1 + iS_2) + S_3 + iS_4 \quad (29)$$

将式(25)、(30)代入式(21)得到波能装置吸收的功率为:

$$P = \frac{\omega^2CS_0}{2[(S_4 + CS_1\omega)^2 + (S_3 - CS_2\omega)^2]} \quad (30)$$

因此,要使波能装置从波浪能吸收的功率 P 达到最大, 必须满足:

$$\frac{\partial P}{\partial C} = 0 \quad (31)$$

由此得出最佳阻尼为:

$$C_0 = \frac{1}{\omega\sqrt{S_3^2 + S_4^2}} \quad (32)$$

将 C_0 代入式(30)即可求得最佳功率函数表达式为:

$$P_0 = \frac{\omega^2C_0S_0}{2[(S_4 + C_0S_1\omega)^2 + (S_3 - C_0S_2\omega)^2]} \quad (33)$$

4 求解波浪激励力和水动力学系数

求解装置的最佳阻尼和最大吸收功率等未知量,均需完成水动力学系数和波浪激励力计算。本文利用基于边界元方法的 HydroStar 软件对如图 1 中具有复杂形状波漂浮双浮子波能装置建模并计算水动力学系数和波浪激励力。在一定水深情况下,求解装置在垂荡辐射速度势计算出的附加质量 μ_{11} 、 μ_{12} 、 μ_{21} 、 μ_{22} 和阻尼系数 λ_{11} 、 λ_{12} 、 λ_{21} 、 λ_{22} (其中 $\mu_{12} = \mu_{21}$ 、 $\lambda_{12} = \lambda_{21}$, 只需求 μ_{12} 、 λ_{12} 即可), 由绕射速度势和入射波速度势计算出的波浪激励力 F_{e21} 、 F_{e22} , 然后使用 Mathematica 编程求解上述方程组。原装置参数尺寸见表 1 中 case3 算例给出。因计算时不涉及到装置的水线面以上部分,只需要在装置湿表面划分网格,原模型 case3 的网格示意图如图 3 所示。计算不同几何参数装置的波况均为:入射波波幅 1 m,周期 1-10 s,步长 0.2 s。由于该波能装置的轴对称性,计算时选择浪向角 θ 。因装置受约束只作垂荡运动,航速选为 0 m/s。据此可计算出波能装置所受波浪激励力和水动力学系数。

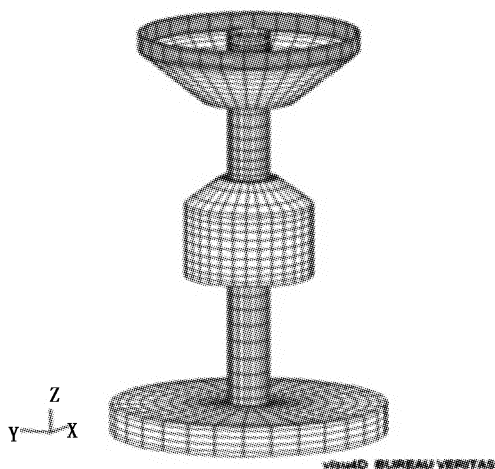


图 3 波能装置网格示意图

Fig. 3 Mesh sketch of the wave energy device

5 计算结果分析

波能装置的俘获宽度比(波能装置的一级转换效率)为:

$$\eta = P/P_i \quad (34)$$

式中: P_i 为射波功率,其计算公式为:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho g A c d + \frac{2\pi \rho g A h r_1}{T \cosh(4\pi h/\lambda)} \quad (35)$$

式中: λ 为波长, $\lambda = 2\pi/k$, 其中 k 为波数; c 为波速, $c = \lambda/T$; d 为浮子 1 的直径; h 为水深; T 为入射波周期; A 为入射波波幅。

为进一步提高装置在实际海况周期 2~7 s 内的俘获宽度比,文中还考虑了装置的重要几何参数变化对俘获宽度比的影响,对于水面浮子 1 的几何形状优化,文献[9]做过了详细研究,所以本文选择的浮子 1 形状按照文献[9]选择,对于水下浮子 2 参数变化,表 1~3 分别给出了中心管参数变化、两浮子半径比变化和两浮子间距离 e 变化作为计算条件(为简化建模计算,表 2~3 中的装置简化为无中心管双浮子模型),分析在最佳阻尼条件下哪种几何参数的装置具有更大的俘获宽度比。

表 1 计算条件:中心管参数变化

Tab. 1 Calculation condition: the changes of center pipe parameters m

计算条件	变化参数	公共条件
Case1 $r_3 = 0$	$r_4 = 0$	$d_1 = 1.5$ $d_2 = 1.0$
Case2 $r_3 = 0.45$	$r_4 = 0.45$	$r_1 = 2.0$ $r_2 = 2.5$
Case3 $r_3 = 0.45$	$r_4 = 0.75$ $e_1 = 3$ $e_2 = 2$	$e = 7.5$ $h = 30$

表 2 计算条件:两浮子半径比 r_2/r_1 变化

Tab. 2 Calculation condition: the changes of relative radius ratio parameters of two buoys m

计算条件	变化参数	公共条件
$r_2/r_1 = 0.5$	$r_2 = 1$	$h = 30$
$r_2/r_1 = 1.0$	$r_2 = 2$	$e = 7.5$
$r_2/r_1 = 1.25$	$r_2 = 2.5$	$d_1 = 1.5$
$r_2/r_1 = 1.5$	$r_2 = 3$	$d_2 = 1.0$
$r_2/r_1 = 2.0$	$r_2 = 4$	$r_1 = 2.0$
$r_2/r_1 = 4.0$	$r_2 = 8$	

表 3 计算条件:两浮子间距离 e 变化

Tab. 3 Calculation condition: the changes of distance parameters between two buoys m

计算条件	变化参数	公共条件
Case4	$e = 5$	$h = 30$
Case5	$e = 7.5$	$d_1 = 1.5$
Case6	$e = 10$	$d_2 = 1.0$
Case7	$e = 12$	$r_2 = 2.5$
Case8	$e = 16$	$r_1 = 2.0$

按照表 1~3 中所给的装置几何参数,利用 HydroStar 软件求得水动力学系数和波浪激励力

代入式(24) - (28)、式(33) - (34)可求得各波能装置理论上的最佳阻尼下的俘获宽度比。

图4描述了最佳阻尼条件下,不同中心管参数装置的俘获宽度比随入射波周期变化曲线,从图4中可看出,一定尺寸的中心管对装置整体俘获宽度比影响较小,其曲线变化趋势基本不变,最大峰值出现在周期5.6 s左右。在2~7 s周期内,case1——无中心管装置(简化为两浮子的装置)的俘获宽度比平均值为48.6%,略大于case3——原模型波能装置的俘获宽度比46.0%,这主要原因是加入中心管浮鼓部分计算的浮子2,其几何重心和浮心均提高,使浮子2受波浪激励力、水动力学系数和运动幅值响应发生变化,进而影响到功率转换特性,中心管相对阻尼板尺寸越小,则忽略中心管部分的计算结果也越接近按照实际装置模型的计算结果,本文的表2~3中的计算模型是将浮子2简化为半径为 r_2 的阻尼板模型尺寸。

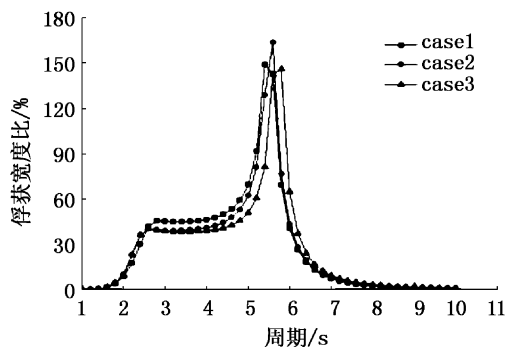


图4 不同中心管参数装置的俘获宽度比
Fig.4 Capture width ratio of the wave energy device with different size of the center tube

图5为最佳阻尼条件下,不同种 r_2/r_1 装置的俘获宽度比在计算周期内的变化曲线,结果表明两浮子相对半径比值 r_2/r_1 对俘获宽度比影响很大:在所选计算范围内,无论比值 r_2/r_1 怎样变化,第一个峰值均出现在周期3 s左右,其值基本无变化,而第二个峰值随着比值 r_2/r_1 的增大向更大周期移动,峰值大小变化受 r_2/r_1 影响大;相对半径比 $r_2/r_1 = 1.5$ 曲线在2~7 s周期内的平均值为50.5%,最大峰值出现在周期6.6 s,其值为246%,相对半径比 $r_2/r_1 = 1.25$ 的最大峰值出现在周期5.4 s(比较靠近实际海域普峰周期4.5 s),其值为149%,在2~7 s周期内的平均值为48.6%,根据中国实际海域波浪周期出现3~6 s

概率大,相对半径比 $r_2/r_1 = 1.25$ 的装置在周期3~6 s的俘获宽度比较大,因此在设计中选择 r_2/r_1 为1.25左右较好。

图6中,选择计算的装置中两浮子相对半径比均为1.25,从图中可以看出:两浮子间距离变化对俘获宽度比的影响类似于图4中心管浮鼓的影响;曲线变化趋势不受 e 变化,随着距离 e 的增大,俘获宽度比也缓慢增大,且随着 e 的增大增速先快后慢;在周期2~7 s内, $e = 16$ 对应的平均俘获宽度比最大,其值为59.2%,比 $e = 5$ 对应的平均俘获宽度比(值为43.2%)高出16个百分点,因此适当增大两浮子间距离对提高波能装置的转换效率有一定作用。

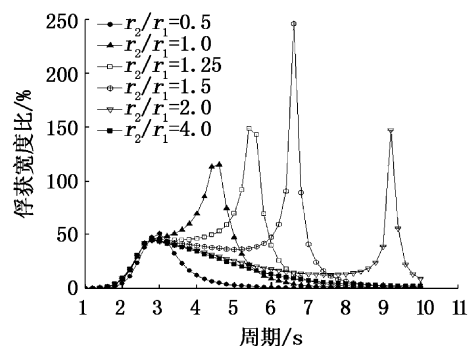


图5 不同相对半径比的双浮体的俘获宽度比
Fig.5 Capture width ratio of different relative radius of ratios two buoys

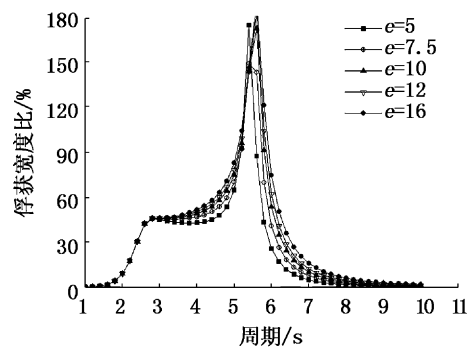


图6 两浮子间距离变化条件下的俘获宽度比
Fig.6 Capture width ratio of different distance parameters between two buoys

6 结论

本文基于线性规则波理论针对一种漂浮式双浮子波能发电装置的功率转换特性进行研究。建立了装置双自由度受迫运动方程,据此推导出最佳阻尼下波能装置的最大吸收功率函数表达

式,进一步求解出俘获宽度比。文中还结合实际海况分析了双浮体的主要几何参数变化对波能装置功率吸收特性的影响,数值计算表明:将水下浮子的中心管浮鼓和阻尼板简化为一个标准圆柱体对俘获宽度比的影响不大;两浮子的相对半径大小对整个装置的俘获宽度比影响很大,选择适当的半径比和增加浮子间距离能大大提高装置转换效率,根据文中的计算结果,在周期 2 ~ 7 s 内, $r_2/r_1 = 1.25$ 和 $e = 16$ 时的平均俘获宽度比最大,其值为 59.2%。文中所求解的最大俘获宽度比对波能装置设计和优化提供了理论依据和参考价值。

参考文献:

- [1] FALCAO A F D O. Wave energy utilization: A review of the technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899 - 918.
- [2] CLEMENT A, MCCULLEN P, FALCAO A F D O, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(5): 405 - 431.
- [3] FALNES J. A review of wave-energy extraction[J]. *Marine Structures*. 2007, 20(4): 185 - 201.
- [4] ZHENG Y H, SHEN Y M, YOU Y G, et al. Hydrodynamic properties of two vertical truncated cylinders in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(3): 241 - 271.
- [5] BERGGREN L, JOHANSSON M. Hydrodynamic coefficients of a wave energy device consisting of a buoy and a submerged plate[J]. *Applied Ocean Research*, 1992, 14(1): 51 - 58.
- [6] CANDIDO J J, JUSTINO P A P. Modeling, control and Pontryagin Maximum Principle for a two-body wave energy device[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1545 - 1557.
- [7] FALCAO A F D O, CANDIDO J J, JUSTINO P A P, et al. Hydrodynamics of the IPS buoy wave energy converter including the effect of nonuniform acceleration tube cross section[J]. *Renewable Energy*, 2012, 41: 105 - 114.
- [8] 吴必军, 王幸, 刁向红, 等. 双圆柱形浮体波能装置双自由度响应及转换效率分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(8): 978 - 986.
- [9] VANTONE M, BANASIAK R, VERHOEVEN R. Modeling of hydraulic performance and wave energy extraction by a point absorber in heave[J]. *Applied Ocean Research*, 2004, 26(1/2): 61 - 72.

Study on power conversion features of the two-buoy wave energy device

LIN Li-qun^{1,2,3}, WU Chun-xu^{1,2,3}, WU Bi-jun^{1,2}

(1. *Guangzhou Institute of Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*; 2. *Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Two-buoy wave energy device is a form of oscillating float technology, and it is of great significance to study the power conversion characteristics for development of wave energy devices. This paper established the device's dual-degree of freedom forced vibration equations based on linear wave theory and viscous damping theory, and expression of optimal absorbed power of the device was deduced under condition of the optimum damping. Added masses coefficients, damping coefficients and wave excitation force were calculated by using HydroStar software, then, absorbed power and capture width ratio were obtained. The paper also analyzed effects on power absorption characteristics with the change of geometry parameters of two-buoy wave energy device in actual sea conditions.

Key words: wave energy; absorbed power; optimal damping; capture width ratio