

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.013

# 相交圆柱摆式波能装置俘获效率数值分析

宋吉宁<sup>1,2</sup>, 邓钰瑶<sup>1</sup>, 郝一星<sup>1</sup>, 蒋学炼<sup>1,2</sup>

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384;

2. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 摆式波能装置具有结构简单和转化效率高等特点, 本文应用 AQWA 软件基于势流理论对相交圆柱摆式波能装置进行了数值模拟研究, 分析了轴间距比、结构阻尼、净浮力比、水深、波浪特性及吃水深度等主要参数对相交圆柱摆式波能装置俘获效率的影响, 并与直板摆式波能装置的俘获效率进行了对比。结果表明: 同样条件下, 相交圆柱摆式波能装置往往比直板摆式波能装置的俘获效率更高; 在研究范围内, 轴间距比越大俘获效率越高; 潮汐导致的水深变化对底铰摆式波能装置的俘获效率具有明显的影响, 在工程应用中应采取适当的措施进行处理。

**关键词:** 相交圆柱摆; 俘获效率; 波能转换; 数值模拟

**中图分类号:** TK79; TV139.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2024) 02-0115-08

波浪能是海洋中蕴含的一种可再生的绿色能源, 近年来国内外学者对波能转换装置进行了一系列深入研究, 尝试从海洋波浪中稳定地获取能量。较为常见的波能转换装置包括振荡摇摆式<sup>[1-3]</sup>、振荡水柱式<sup>[4-5]</sup>、越浪式<sup>[6-7]</sup>等。其中, 振荡摇摆式波能装置的研究主要以底铰摆式为主, 与其他波能转换装置相比, 底铰摆式波能装置结构较为简单, 具有较宽的波浪频率响应范围, 便于设置在近岸海域。在底铰摆式波能装置的构件中, 浮力摆是波能俘获的重要构件。从构造上, 浮力摆主要可分为直板摆式和圆柱摆式等形式。

目前, 对直板摆式浮力摆结构的研究已有不少成果, 如赵海涛<sup>[8]</sup>对直板摆进行数学模拟分析了不同结构参数对水动力性能的影响并进行了优化, 还通过物理模型实验显示了直板摆的实际工作状态及不同重量和重心位置对装置俘获效率的影响。RENZI E 等<sup>[9]</sup>对开阔海面下的波能装置进行参数化分析, 结果表明随着襟翼宽度的增加, 系统的水动

力特性, 即激振力矩、附加惯性力矩和辐射阻尼均有所增加。GOMES R 等<sup>[10]</sup>对直板摆式波能转换装置在规则波和不规则波中的水动力特性进行研究, 并且对直板摆板宽和板高进行了参数化分析。刘成果等<sup>[11-12]</sup>开展的物理模型实验分析了直板摆在底部透空和非透空情况下的区别。赵青<sup>[13]</sup>和徐传超<sup>[14]</sup>采用的浮力摆在结构上主体部分是直板, 而直板顶部平面改由半圆柱替代, 其物理模型实验与 AQWA 数值模拟结果表明这样的结构改变能够提高波能装置的俘获效率。

在圆柱形摆式波能装置的研究中<sup>[15-18]</sup>, 圆柱形摆可分为透空圆柱形摆和不透空圆柱形摆。透空圆柱摆通常采用多个透空水平圆柱并行布置。如王猛等<sup>[19]</sup>对 5 根外径 0.92 m 的空心钢管及筋板组成的透空圆柱摆进行物理模型实验研究。李松剑等<sup>[20]</sup>及李雪临等<sup>[21]</sup>采用 AQWA 对相似的 5 根空心钢管透空圆柱摆进行了仿真分析。李威等<sup>[22]</sup>及范梦雨等<sup>[23]</sup>分别采用 ADAMS/MATLAB 耦合仿真和 AQWA 对透空圆柱摆

收稿日期: 2023-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51509178); 天津市软土特性与工程环境重点实验室开放基金资助项目 (12030136)

作者简介: 宋吉宁 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事涡激振动与海洋能开发研究。E-mail: songcius@163.com

通讯作者: 蒋学炼 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事海岸工程及海洋能开发研究。E-mail: jiang.xuelian@tcu.edu.cn

进行了模拟仿真分析,其浮力摆模型主体为5根直径0.92 m的圆柱形浮筒组成,浮筒轴间距是其直径的1.11倍。史宏达等<sup>[24]</sup>对直板摆和椭圆柱形摆进行了物理模型实验对比分析,其椭圆柱形摆的轴间距是其短轴长度的1.5倍,指出在相同波况下,透空椭圆柱形摆在单向阻尼作用下的最大功率比直板摆低。在不透空圆柱摆的研究中,以Oyster装置及类似的结构居多。Oyster装置在欧洲开展了一系列的动力系统测试<sup>[25-26]</sup>。滕斌等<sup>[27]</sup>建立了频域和时域两种分析模型,对摆板的转动、板面的水压力、活塞的作用力和俘获的波浪能量做了分析研究。BABARIT A等<sup>[28]</sup>对Oyster装置进行水动力分析和能量计算,预计近海浅水区可以获得约440 kW的平均功率。然而,关于不透空圆柱摆式波能装置的研究仍然不够充分,例如对于不透空圆柱中的相交圆柱摆式波能装置,特别是其圆柱轴间距比及潮汐导致的水深变化对波能俘获效率有何影响等方面的认识都尚有不足。

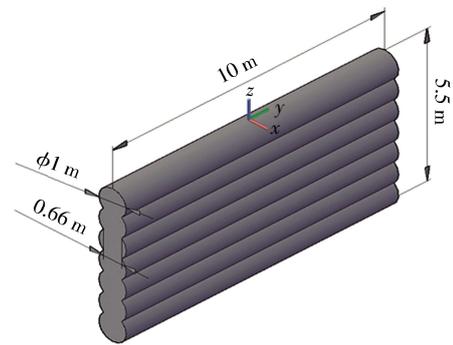
综上所述,目前对直板摆式和透空圆柱摆式波能装置的研究较多,但对不透空圆柱摆式波能装置的研究较少,因此,本文针对不透空圆柱中的相交圆柱摆式波能装置进行数值研究,采用AQWA计算波能装置在不同轴间距比、阻尼、水深、波高、波周期、吃水等条件下的动力响应,分析相交圆柱摆式波能装置在各类不同工况条件下的俘获效率,并与直板摆式波能装置做了相应的对比。

## 1 数值模型与计算方法

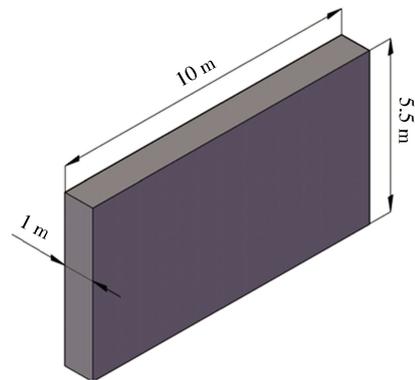
### 1.1 数值模型

本文采用的相交圆柱摆式波能装置模型为多根直径 $D$ 为1 m的圆柱组合而成,如图1(a)所示,各圆柱长10 m,摆高5.5 m,圆柱轴间距 $I_c$ 为圆柱直径的0.75倍,即 $I_c = 0.75D$ 。为了对比,也建立了直板摆结构模型,如图1(b)所示,展向长度10 m、厚1 m、高5.5 m。材料均匀分布,质心与形心位置重合。利用ANSYS DesignModeler模块建立浮力摆的三维模型,相交圆柱摆模型网格如图2所示。通过Workbench工作平台将浮力摆模型导入AQWA进行水动力分析计算。浮力摆底部通过铰与海底连

接。计算中采用线性阻尼 $C_{PTO}$ 模拟液压装置产生的阻尼效应。



(a) 相交圆柱摆



(b) 直板摆

图1 浮力摆模型示意图



图2 相交圆柱摆模型网格

采用ANSYS AQWA基于势流理论和边界元法进行水动力求解,并将频域计算结果传递至时域计算模块进行时域分析,得出浮力摆所受波浪力及其摆动角度、角速度等数值结果。基于Cummins方程<sup>[27]</sup>,在波浪作用下浮力摆的运动方程如下。

$$(I + a_{55}(\infty))\ddot{\theta}(t) + \int_0^t K(t-\tau)\dot{\theta}(\tau)d\tau + C_{55}\theta(t) = M_{PTO}(t) + F_{wave}(t) \quad (1)$$

$$K(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} B(\omega)\cos(\omega t)d\omega \quad (2)$$

式中, $I$ 是摆板的转动惯量; $a_{55}(\infty)$ 是摆板在无

穷大频率时摆板的附加转动惯量;  $\ddot{\theta}(t)$  是摆板转动的角加速度;  $\dot{\theta}(\tau)$  是角速度;  $\theta(t)$  是转角;  $K$  是脉冲响应函数;  $t$  是时刻;  $\tau$  是时域积分变量;  $C_{55}$  是静水恢复力系数;  $M_{PTO}(t)$  是能量转换装置对摆板的力矩;  $F_{wave}(t)$  是作用在摆板上的波浪激励力。

### 1.2 俘获效率

浮力摆的水动力性能通常以俘获效率  $c_f$  作为评价指标。俘获效率是波能装置俘获的波浪能与装置宽度范围内输入波浪能的比值, 通常表达<sup>[23]</sup>如下。

$$c_f = \frac{P_{PTO}}{P_W \times w} \quad (3)$$

式中,  $w$  为摆板宽度;  $P_{PTO}$  为转换功率, 即装置吸收能量之后克服阻力做功进行一级能量转换的平均功率;  $P_W$  为波浪的波能功率。

$$P_W = Ecn = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh) \quad (4)$$

式中,  $E$  为波能;  $c$  为波速;  $n$  为波能传递率;  $T$  为波周期;  $H$  为波高;  $k$  为波数;  $h$  为水深。考虑实际工程的海洋环境, 选用 Stokes 波理论进行波浪计算。为简化计算采用线性阻尼  $C_{PTO}$ , 动力输出装置 (Power Take-Off, PTO) 阻力矩  $T_{PTO}$  正比于浮力摆角速度 $\dot{\varphi}$ <sup>[27]</sup>, 即

$$T_{PTO} = C_{PTO} \dot{\varphi} \quad (5)$$

于是, 可以得到转换功率  $P_{PTO}$ 。

$$P_{PTO} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} C_{PTO} \dot{\varphi}^2 dt \quad (6)$$

式中,  $\Delta T = T_2 - T_1$ ,  $T_1$  和  $T_2$  分别为计算分析时段的起止时刻。

## 2 模型验证

### 2.1 网格独立性验证

采用下列算例进行对比分析: 相交圆柱摆圆柱轴间距为  $0.75D$ , 波周期  $T = 6$  s, 波高  $H = 1$  m, 水深  $h = 6$  m。表 1 给出了 4 种不同疏密网格的计算结果, 数据表明, 当网格从 Mesh 2 加密至 Mesh 3 时, 浮力摆正向摆角幅值、负向摆角幅值与俘获效率的变化幅度分别为 0.011 2%、0.167 1%和 0.111 5%; 当网格从 Mesh 3 加密至 Mesh 4 时, 浮力摆正向摆角幅值、负向摆角幅值与俘获效率的变化幅度分别为 0.081 2%、-0.056%和 0.084 2%。基于精度和计

表 1 网格独立性验证

网格	单元数/个	正向摆角幅值/(°)	负向摆角幅值/(°)	俘获效率
Mesh 1	9 980	8.903	-5.625 5	69.87%
Mesh 2	14 536	8.907 1 (0.045 6%)	-5.632 0 (0.115 7%)	69.96% (0.132 3%)
Mesh 3	20 240	8.908 1 (0.011 2%)	-5.641 4 (0.167 1%)	70.04% (0.111 5%)
Mesh 4	25 101	8.915 3 (0.081 2%)	-5.638 3 (-0.056%)	70.10% (0.084 2%)

算效率的考虑, 本文选择 Mesh 2 作为计算网格。

### 2.2 数值模型验证

采用了赵海涛<sup>[8]</sup>物理模型实验的直板摆数据进行了模拟计算和对比验证, 实验模型为未充水状态直板摆, 结构宽 0.8 m, 高 1.05 m, 厚 0.16 m, 质量为 36 kg, PTO 阻力矩是在物理实验中设置 7 个不同激磁电流 (0.0 A, 0.1 A, 0.2 A, 0.3 A, 0.4 A, 0.5 A, 0.6 A) 来实现的<sup>[8]</sup>, 实验水深  $h_1 = 0.9$  m, 具体波浪参数工况见表 2。根据此实验参数, 本文使用 ANSYS AQWA 软件, 应用二阶斯托克斯波理论进行模拟计算。

表 2 模型验证各工况的波浪参数

工况	波周期 $T/s$	波高 $H/m$	波长 $L/m$	相对水深 $h_1/L$
1	0.94	0.027	1.378 8	0.653
2	1.16	0.040	2.082 6	0.432
3	1.30	0.050	2.574 2	0.350

图 3 给出了在不同激磁电流即不同 PTO 阻力矩下浮力摆摆动幅度的对比结果, 图 4 给出了波能转换功率的对比结果。通过图 3 和图 4 的对比可以看出, 本文数值模拟结果与文献物理模型实验的结果吻合较好, 这验证了本文所建立的数值模型具有较好的准确性。

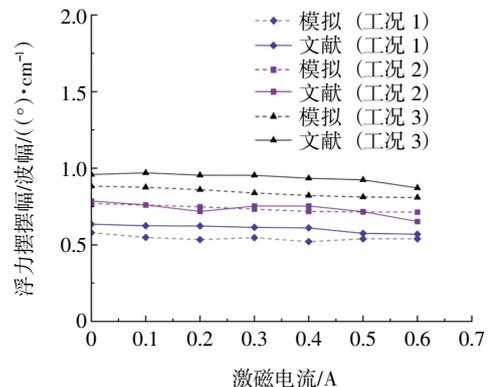


图 3 浮力摆摆幅对比

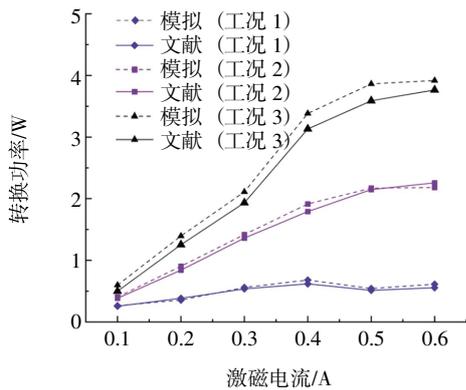


图4 波能转换功率的对比

### 3 结果与分析

本文研究的相交圆柱摆式波能装置，预计安装在我国沿海水域，水深范围为5~20 m，波周期为5~15 s，后文的模拟计算环境条件都选择在这个范围内。时域计算中，相交圆柱摆在波浪作用下从静止开始摆动，前期摆动尚不稳定，这些数据在分析中需要舍弃，只采用摆动角度变化比较稳定时的数据进行统计分析。

#### 3.1 净浮力比和线性阻尼对俘获效率的影响

净浮力比  $b$  为浮力摆净浮力  $F_{net}$  与浮力  $F_{float}$  的比值，净浮力  $F_{net}$  是浮力  $F_{float}$  与其重量  $G$  的差值。本文选取了3个不同的净浮力比 (0.5, 0.7, 0.9)，计算了在不同净浮力比和线性阻尼条件下的俘获效率。

图5给出了相交圆柱摆在不同阻尼下的俘获效率的变化。从图5可以看到，在同一净浮力比条件下，俘能装置存在最佳阻尼值，当阻尼高于这个值之后，俘获效率随着阻尼增大出现较为缓慢的下降，并且，该最佳阻尼值随着净浮力比增大而减小。当阻尼值较低时 ( $C_{PTO} < 5 \times 10^6$  Nms/rad)，相交圆柱摆模型的俘获效率均随阻尼增大而快速增大，净浮力比较大时的俘获效率更高。当阻尼值较高时 ( $C_{PTO} \geq 8.021 \times 10^6$  Nms/rad)，小净浮力比的俘获效率更高。例如，当阻尼值  $C_{PTO} = 10.31 \times 10^6$  Nms/rad 时，净浮力比  $b = 0.5$ 、 $b = 0.7$  和  $b = 0.9$  的俘获效率分别为 61.58%、59.31% 和 59.08%，俘获效率差异较小。图6给出了净浮力比  $b = 0.7$  的条件下相交圆柱摆与直板摆俘获效率随阻尼变化的对比。结果表明，在同样的阻尼条件下相交圆柱摆的俘获效率比

直板摆的更高，差异最大时高约7%。

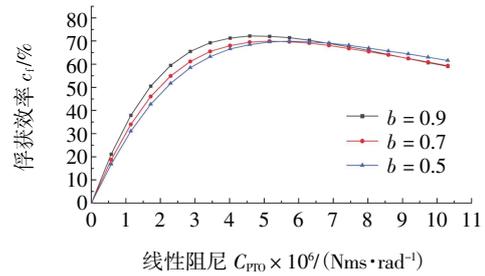


图5 相交圆柱摆不同阻尼下的俘获效率

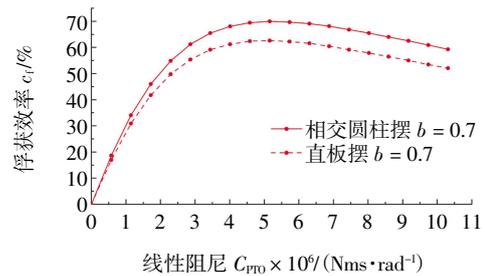


图6 相同净浮力比条件下相交圆柱摆与直板摆的对比

从图5和图6可见，在本节的计算条件下相交圆柱摆的最佳阻尼值  $C_{PTO}$  为  $5.157 \times 10^6$  Nms/rad，为保持一致性和简明起见，在后续计算中都默认采用这一阻尼值，净浮力比默认取  $b = 0.7$ 。

#### 3.2 波浪周期的影响

本文选取了5个不同的波浪周期进行对比，水深6 m、波高1 m等参数保持相同，并求得了其波长  $L$  及相对水深  $h/L$ ，见表3。相交圆柱摆如图1(a)，静水状态下完全淹没，顶部与静水面距离0.5 m。

表3 不同波周期下的波长与相对水深等参数

波周期 $T/s$	波长 $L/m$	相对水深 $h/L$	波数 $k$	波数×水深 $kh$
5.0	32.188	0.186	0.195	1.170
5.5	36.569	0.164	0.172	1.030
6.0	40.867	0.147	0.154	0.924
6.5	45.097	0.133	0.139	0.836
7.0	49.274	0.122	0.127	0.766

图7给出了俘获效率随相对水深（波浪周期）的变化。从图7可见，随着相对水深的增大（波周期减小），浮力摆的俘获效率随之增大。当波浪周期  $T = 7$  s ( $h/L = 0.122$ ) 时，相交圆柱摆与直板摆的俘获效率相差较小，仅约4%；当波浪周期为  $T = 5$  s ( $h/L = 0.186$ )，相交圆柱摆与直板摆的俘获效率相差较大，约14%。从整体上看，在有限水深条件下，相交圆柱摆的俘获效率要高于直板摆，且波浪周期

越小即相对水深越大时, 两者俘获效率相差越多。

### 3.3 波高大小的影响

本文选取 4 个波高值, 分别是 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m, 对波高大小的影响进行对比分析, 水深 6 m, 相对波高 ( $H/h$ ) 在 0.083~0.333 范围内。相交圆柱摆如图 1(a), 静水状态下完全淹没, 顶部与静水面距离 0.5 m。

图 8 给出了相交圆柱摆和直板摆式波能装置在不同波高下的俘获效率变化。从图 8 可以发现, 浮力摆的俘获效率随相对波高增加而增加, 相交圆柱摆随波高增加的程度比直板摆更显著一些。这表明在计算条件范围内, 波能越大, 浮力摆的俘获效率也越高, 且相交圆柱摆的俘获效率要高于直板摆, 而且相对波高越大时, 两者俘获效率相差的越多, 约在 5%~12%。

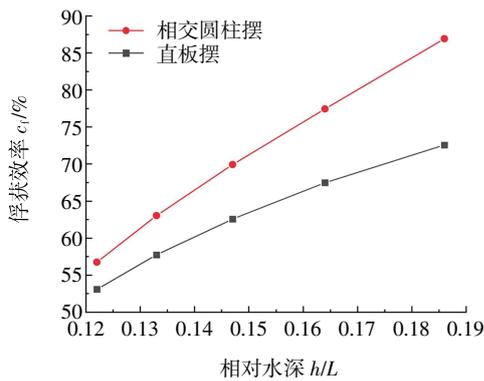


图 7 不同相对水深下两种波能装置的俘获效率

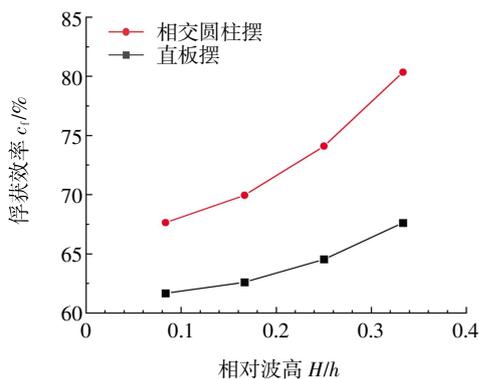


图 8 不同波高下的俘获效率

### 3.4 吃水深度的影响

设置静水状态下模型吃水深度  $d'$  分别为 4.5 m、4.75 m、5.0 m、5.25 m、5.5 m, 水深 6 m, 据此得到不同  $d'$  下相交圆柱摆和直板摆的净浮力比  $b$ , 见表 4。图 9 给出了俘获效率随波能装置吃水的变化, 从中可以看到与直板摆相比, 相交圆柱摆对吃水变

化更为敏感。以波能装置吃水 5.25 m 与完全淹没状态对比来看, 相交圆柱摆俘获效率降低 12.7%, 而直板摆俘获效率只降低 5.4%。这是由于相交圆柱摆吃水增大时, 相交圆柱摆与波浪接触面积也增大了, 吸收波浪能增多, 因而俘获效率增大。

表 4 浮力摆的吃水深度与净浮力比

$d'/m$	相交圆柱摆	直板摆
	$b$	$b$
4.50	0.638	0.633
4.75	0.655	0.653
5.00	0.673	0.670
5.25	0.690	0.686
5.50	0.700	0.700

另外, 从图 9 可以看到, 不论是直板摆或是相交圆柱摆, 当模型吃水深度增大时, 净浮力比和俘获效率都有相应的变化, 而从变化幅度来看, 净浮力相差最大不到 7%, 而俘获效率相差最大可达 30%左右, 可见俘获效率的改变比净浮力比要快得多, 同时结合 3.1 节的分析可知, 吃水深度改变时, 净浮力比间接变化对俘获效率的影响较小, 俘获效率的变化主要是吃水深度的影响。因此, 在工程应用中, 为达到更高的俘获效率, 应尽量减小露出静水面部分的比例。

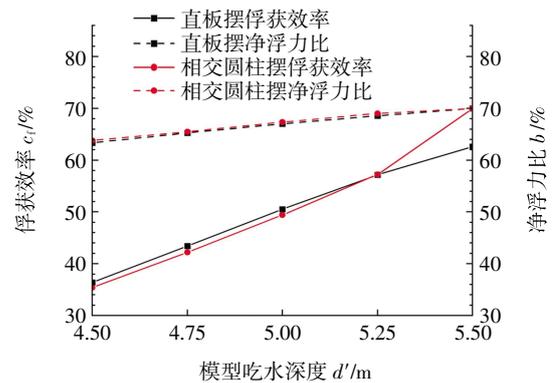


图 9 不同吃水深度下的俘获效率和净浮力比的对比

### 3.5 水深变化 (潮汐) 的影响

实际海况潮位通常是变化的, 波能装置所处的水深也就随之变化。在此对比了 5 个水深  $h'$ , 分别是 5.0 m、5.5 m、6.0 m、6.5 m、7.0 m, 摆底部距离海底 0.5 m 保持不变, 分析水深变化对装置获能效率的影响。

图 10 给出了水深变化对波能功率和俘获效率

的影响。从图 10 中可见, 当潮位水深为 6.0 m 时, 俘获效率最高, 而在潮位增大或降低时, 俘获效率都降低了, 表明潮位变化对俘获效率有明显的影 响。当水深发生变化时, 波能流的变化幅度小于 5%, 而浮力摆的俘获效率变化较大, 这表明, 这几组水深变化引起的波能流改变对俘获效率的影响是有限的, 更主要的是水深变化引起的吃水的改变导致的。当浮力摆因潮位下降而露出水面时, 吃水深度减小, 因此俘获效率减小, 这与 3.4 节的结果一致。当浮力摆因潮位上升而沉入静水面以下时, 波浪的一部分能量从浮力摆顶部透过, 且由于波浪水质点运动幅度随水深向下衰减, 因此, 导致浮力摆的俘获效率随潮位升高而降低。

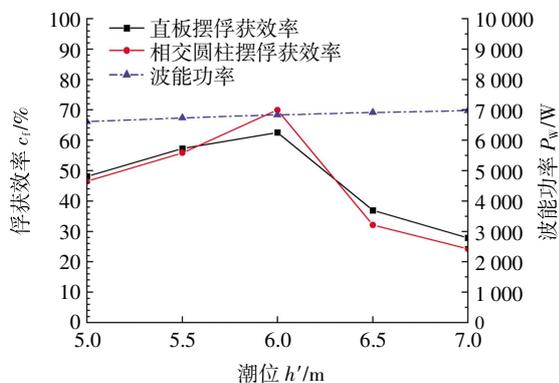


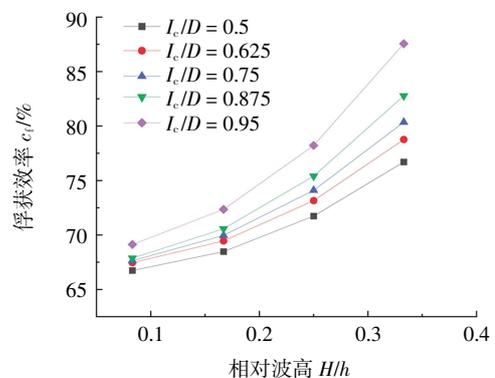
图 10 不同潮位下的俘获效率和波能功率对比

与直板摆相比, 相交圆柱摆对水深变化更为敏感。以潮位 6 m 时作为参考, 当潮位下降 8.3% 时, 相交圆柱摆俘获效率降低 14%, 直板摆降低 5.3%; 当潮位上升 8.3% 时, 相交圆柱摆俘获效率降低 37%, 直板摆降低 25%。当相交圆柱摆是固定于海底时, 潮位改变也可能引起结构吃水深度随之变化。在实际工程应用中, 需要注意潮位变化可能带来的俘获效率改变, 建议底铰摆式波能装置尽量放置在潮位变化较小的海域, 或者采取措施使波能装置能够随着潮位变化而相应调整位置。

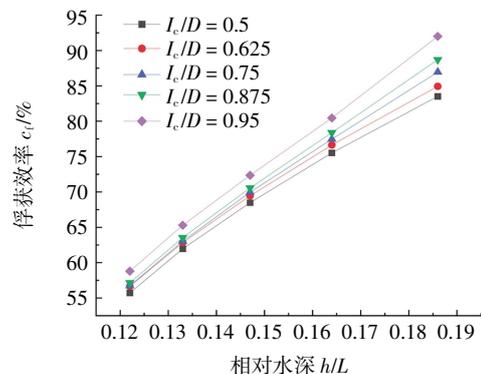
### 3.6 轴间距大小的影响

相交圆柱摆是由多个圆柱相交构成的, 为了研究圆柱轴间距的影响, 本文对比了 4 个轴间距  $I_c$ , 分别是  $0.5D$ 、 $0.625D$ 、 $0.75D$ 、 $0.875D$ 、 $0.95D$ , 以轴间距  $I_c = 0.75D$  时作为参考值。模型长、高及圆柱直径  $D$  均与图 1(a) 相同, 而圆柱相交位置处的厚度随轴间距变化而有所不同。

图 11(a) 给出了波浪周期相同情况下, 波高的变化对不同轴间距相交圆柱摆俘获效率的影响曲线, 波浪周期  $T = 6$  s, 取 4 个波高值 (0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m), 相对波高 ( $H/h$ ) 在 0.083~0.333 范围内。当相对波高  $H/h = 0.333$  时,  $I_c = 0.95D$  俘获效率为 87%,  $I_c = 0.5D$  俘获效率为 76%, 其余两种轴间距情况可近似在  $I_c = 0.95D$  与  $I_c = 0.5D$  之间线性插值, 例如  $I_c = 0.75D$  情况下, 插值可得俘获效率为 82%, 与模拟计算得到的俘获效率相差约为 2%。将图 11(a) 与图 8 对比来看, 轴间距变化并不改变俘获效率与波高的变化趋势, 不同轴间距情况下, 相交圆柱摆的俘获效率都随波高增大而增大, 且轴间距越大俘获效率越高。图 11(b) 给出了波高相同情况下, 相对水深变化  $h/L$  时, 不同轴间距的相交圆柱摆的俘获效率曲线, 波高  $H = 1$  m, 取 5 个波周期值 (5 s、5.5 s、6 s、6.5 s、7 s), 相对水深 ( $h/L$ ) 在 0.122~0.186 范围内。当相对水深增大时, 不同轴间距相交圆柱摆的俘获效率都随之增大。当  $h/L = 0.122$  时, 俘获效率集中在 55%~59%,  $h/L = 0.186$  时, 俘获效率在 83%~92%。并且在同



(a) 不同波高下的俘获效率



(b) 不同相对水深下的俘获效率

图 11 不同轴间距下的俘获效率变化

一相对水深条件下, 轴间距越大俘获效率越高。

另外, 从趋势上看, 当轴间距增大到接近相切时, 相交圆柱摆的俘获效率会更高。但要注意, 若是正好相切, 此时轴间距等于1倍直径, 结构在相切处可能出现局部强度不足的问题。当轴间距比大于1, 则为透空圆柱形摆式波能装置, 不属于本文关注的类型, 在此不做进一步的探讨。

## 4 结 论

本文应用 AQWA 软件基于势流理论对相交圆柱摆式波能装置进行了数值模拟研究, 分析了轴间距比、结构阻尼、净浮力比、水深、波浪特性、吃水深度和水深变化等主要参数对相交圆柱摆式波能装置俘获效率的影响, 并与直板摆式波能装置做了对比分析。在本文研究的条件范围下得到以下结论。

(1) 在相同水深、波浪、线性阻尼和净浮力比等条件下, 相交圆柱摆式波能装置的俘获效率通常比同尺寸直板摆式波能装置的俘获效率更高。

(2) 相交圆柱摆式波能装置俘获效率随轴间距增加而增大, 建议工程应用中选择较大的轴间距值。

(3) 相交圆柱摆式波能装置有最佳线性阻尼值, 该值随着净浮力比增大而减小。如在本文计算条件下净浮力比 0.7 时, 最佳线性阻尼值为  $5.157 \times 10^6 \text{ Nms/rad}$ 。

(4) 有限水深条件下, 相交圆柱摆式波能装置俘获效率随波浪周期增大而减小, 随波高增大而增大。

(5) 俘获效率随吃水深度增加而增加, 如本文计算中当吃水深度从 4.5 m 增大到 5.5 m 时, 俘获效率增加了 34%。工程应用中, 相交圆柱摆式波能装置应尽量减小露出静水面部分的比例。

(6) 潮汐导致的水深变化对波能装置的俘获效率具有明显的影响, 在应用中应采取措施进行处理。

本文因采用势流理论在规则波条件下模拟计算相交圆柱摆式波能装置的俘获效率, 忽略了水体黏性, 所以俘获效率计算结果可能偏大, 后续研究可采用黏性流理论做进一步模拟分析和对比。

## 参考文献:

- [1] 石世宁, 阎耀保. 摆式海洋波浪能量转换原理与应用[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(1): 1-5.
- [2] 顾明浩, 谭祺, 石世宁, 等. 摆式海洋波浪发电原理与事例[J]. 流体传动与控制, 2012, 5: 5-9.
- [3] 张丽珍, 羊晓晨, 王世明, 等. 海洋波浪能发电装置的研究现状与发展前景[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(1): 161-164.
- [4] 刘德兴, 郑艳娜, 张佳星. 振荡水柱波能发电装置的研究应用进展[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(2): 231-236.
- [5] 刘臻. 岸式振荡水柱波能发电装置的试验及数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [6] 陈兵, 杨宗宇, BRUCE T. 越浪式波能发电装置的水力性能研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(1): 81-86.
- [7] 韩光华. 越浪式波能发电装置的能量转换系统设计研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [8] 赵海涛. 浮力摆式波浪能装置的水动力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [9] RENZI E, DIAS F. Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean[J]. European Journal of Mechanics, 2013, 41(9-10): 1-10.
- [10] GOMES R, LOPES M, HENRIQUES J, et al. The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves[J]. Ocean Engineering, 2015, 96(Mar.1): 86-99.
- [11] 刘成果, 宁德志. 底部铰接浮力摆波能转换装置模型实验[J]. 水力发电学报, 2017, 36(6): 114-120.
- [12] 刘成果. 浮力摆式波能转换装置水动力性能的实验和数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [13] 赵青. 摆式波浪能发电装置浮式基础试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [14] 徐传超. 摆式波浪能俘获装置水动力性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [15] SARKAR D, DOHERTY K, DIAS F. The modular concept of the oscillating wave surge converter[J]. Renewable Energy, 2016, 85(1): 484-497.
- [16] 邱守强, 王冬姣, 叶家玮, 等. 底铰摆式波浪能转换装置实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(5): 121-127.

- [17] 李蒙, 李雪临, 王兵振, 等. 浮力摆式波浪能发电装置结构与强度优化[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 85–89.
- [18] YUAN Z, ZHANG L, ZHOU B, et al. Analysis of the hydrodynamic performance of an oyster wave energy converter using Star-CCM+[J]. Journal of Marine Science and Application, 2019, 18(2): 153–159.
- [19] 王猛, 李蒙, 夏增艳, 等. 浮力摆式波浪能发电装置模型试验[J]. 海洋技术学报, 2013, 32(1): 79–82.
- [20] 李松剑, 潘卫明, 刘靖飙, 等. 摆式波浪能发电装置水动力学研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(4): 46–51.
- [21] 李雪临, 王项南, 王兵振, 等. 浮力摆式波浪能发电装置水动力性能优化研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1340–1345.
- [22] 李威, 潘卫明, 杨戈尔, 等. 浮力摆式波浪能发电装置运动学仿真分析[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(2): 52–60.
- [23] 范梦雨, 赵江滨, 贾玉山, 等. 浮力摆波能发电装置的俘能特性分析[J]. 中国修船, 2020, 33(5): 51–55.
- [24] 史宏达, 张雨晴, 赵晨羽, 等. 底铰摆式波浪能转换装置实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 150–155.
- [25] WHITTAKER T, COLLIER D, FOLLEY M, et al. The development of Oyster: A shallow water surging wave energy converter[C]// Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference. Porto: Portugal, 2007: 11–14.
- [26] CAMERON L, DOHERTY R, HENRY A, et al. Design of the next generation of the Oyster wave energy converter[C]//3rd international conference on ocean energy. ICOE Bilbao: Spain, 2010: 1–12.
- [27] 滕斌, 陈文. 摆式波能转换装置的水动力分析模型[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 653–658.
- [28] BABARIT A, HALS J, MULIAWAN M J, et al. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters[J]. Renewable Energy, 2012, 41: 44–63.

## Numerical Analysis on Efficiency of a Parallel-Intersecting-Cylinder Flap Wave Energy Converter

SONG Jining<sup>1,2</sup>, DENG Yuyao<sup>1</sup>, HAO Yixing<sup>1</sup>, JIANG Xuelian<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** The flap-type wave energy converters have attracted more attentions for its structural simplicity and high capture efficiency. In this paper, a kind of parallel-intersecting-cylinder flap wave energy converters was studied using AQWA based on the potential flow theory. The capture efficiency of the parallel-intersecting-cylinder flap converters was investigated by changing space ratio of the cylinders, structural damping, net buoyancy ratio, water depth, wave height, draft depth and tidal level, which was compared with plate flap converters as well. The results show that the performance of the parallel-intersecting-cylinder flap converters is generally better than that of the plate flap one. Capture efficiency of the converter increase as the space ratio of the cylinders within the scope of this paper. The change of water depth caused by the tide has a significant impact on the capture efficiency, which should be considered carefully in practical application.

**Key words:** parallel-intersecting-cylinder flap; capture efficiency; wave energy conversion; numerical simulation