

# 基于阻尼控制的不同底部形状振荡浮子俘能效果对比

支光凝<sup>1</sup>, 闫俊<sup>1</sup>, 梁海志<sup>2</sup>, 乔东生<sup>1\*</sup>, 宁德志<sup>1</sup>

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024

2. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033

**摘要** 为优化振荡浮子式波浪能装置的能量俘获效果, 针对圆柱形浮子底部的形状对装置俘能的影响展开研究, 选取主流的平底、圆锥底和半球底进行计算对比。首先, 建立浮子运动的频域模型; 然后, 通过 ANSYS-AQWA 对 3 种浮子进行水动力计算, 得到 3 种浮子的附加质量、辐射阻尼、波浪激励力、幅值响应算子等水动力参数, 对结果进行比较; 最后, 在频域运动模型中加入阻尼控制, 研究在波浪激励下不同底部形状浮子的能量俘获效果, 结果表明, 阻尼控制可以明显提高浮子的能量俘获效率, 半球底浮子在波浪谱较宽的工况下能量俘获效果更好, 而平底浮子更适合谱峰频率在其固有频率附近且波浪谱较窄的工况。

**关键词** 波浪能装置; 振荡浮子; 水动力; 频域模型; 阻尼控制

当今世界能源形式严峻, 人类对能源的需求量越来越大, 新能源的开发利用可以进一步满足能源需求的空缺。传统化石能源的有限性及其对环境带来的严重污染, 已不能再支持人类大肆开发利用, 这样更推动了新能源的开发利用进程。作为一种储量巨大的新能源, 全球年波浪能储量高达 32000 TW·h, 远高于人类全年用电量 22315 TW·h<sup>[1-2]</sup>, 可见波浪能是一种极具开发价值的新能源。

振荡浮子式波浪能发电装置是一种较为常见的波浪能发电装置, 其原理是利用一个或多个浮子在波浪的激励下产生垂荡运动, 从而实现把波浪能转换成机械能的目的<sup>[3]</sup>。浮子作为整个装置中唯一与波浪作用的俘能体, 其能量俘获效率对整个装置的能量转换起着决定性作用, 因此浮子在相同的波浪工况下如何俘获更多能量是一个重要的研究方向<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501905); 中央高校基本科研业务费专项(DUT19LAB09)

作者简介: 支光凝, 硕士研究生, 研究方向为波浪能装置, 电子信箱: zhi\_guang\_ning@163.com; 乔东生(通信作者), 副教授, 研究方向为海洋浮式结构物, 电子信箱: qiaods@dlut.edu.cn

引用格式: 支光凝, 闫俊, 梁海志, 等. 基于阻尼控制的不同底部形状振荡浮子俘能效果对比[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 53-58; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.007

由于浮子是在波浪的激励作用下吸收能量的,所以要想进行浮子俘获能量的研究首先要对其进行水动力计算。盛松伟等<sup>[5]</sup>应用分离变量法和扩展特征函数匹配法对单个圆柱形浮体进行了水动力分析,并对浮体截面半径和吃水深度进行了优化。罗清华等<sup>[6]</sup>利用 AQWA 软件对双浮体式振荡浮子波浪能装置进行了水动力研究,针对不同尺寸的垂荡板进行了对比分析。陈启东等<sup>[7]</sup>对不同角度的锥形底圆柱浮子进行了水动力计算分析,并讨论了不同角度锥形底圆柱浮子自由状态下的垂荡响应。上述学者的研究都是针对浮子外形或尺寸的变化对浮子水动力参数的影响进行研究,有些学者也进行了自由无约束浮子的时域仿真,但并未针对不同形状浮子在阻尼控制下的能量俘获效果进行对比研究。

针对平底、圆锥底、半球底 3 种类型的圆柱浮子,建立其运动方程求解的频域模型,结合水动力分析结果,得到附加质量、辐射阻尼、波浪激励力及 RAO 等水动力参数,进一步比较和分析采用阻尼控制策略下不同类型浮子的能量俘获效果。

## 1 浮子运动响应的频域模型

在阻尼控制过程中,PTO 阻尼选取对应波浪频率下的最优阻尼,且在运行过程中固定不变。由于浮子所受波浪激励力、辐射力以及静水恢复力都与波浪频率相关,因此当 PTO 阻尼也与波浪频率相关时,可以采用频域模型对浮子的运动响应进行模拟<sup>[8-9]</sup>,假定 PTO 力与浮子的运动响应呈线性关系,则 PTO 力由阻尼系数与浮子响应计算,辐射力由附加质量、辐射阻尼及浮子运动响应计算,波浪激励力由单位波幅产生的波浪激励力和入射波波幅计算,静水恢复力由静水刚度和浮子运动响应计算,建立浮子的频域运动方程如式(1)所示。

$$\left\{-\omega^2[M + A(\omega)] + j\omega[B(\omega) + R_{\text{PTO}}] + \rho g S\right\} \times Z(j\omega) = \Gamma(j\omega)A_{\omega} \quad (1)$$

式中, $\omega$ 为波浪频率; $M$ 为浮子的质量; $A(\omega)$ 为对应波浪频率下浮子的附加质量; $B(\omega)$ 为对应波浪频

率下浮子的辐射阻尼系数; $R_{\text{PTO}}$ 为 PTO 的阻尼系数; $\rho$ 为水的密度; $g$ 为重力加速度; $S$ 为水线面面积; $Z(j\omega)$ 为浮子位移; $\Gamma(j\omega)$ 为对应波浪频率下单位波幅产生的波浪激励力; $A_{\omega}$ 为入射波波幅。

通过频域运动方程式(1),可以推导出规则工况下浮子俘能的平均功率 $\bar{P}_{\text{re}}$ 、能量俘获宽度 $W$ 、能量俘获宽度比 $\eta$ ,如式(2)~式(4)所示<sup>[10]</sup>。

$$\bar{P}_{\text{re}} = \frac{1}{2} R_{\text{PTO}} |\Gamma(j\omega)A_{\omega}|^2 / \left\{ [B(\omega) + R_{\text{PTO}}]^2 + \left[ \omega(M + A(\omega) + M_{\text{PTO}}) - \frac{\rho g S + K_{\text{PTO}}}{\omega} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

$$W = \frac{\bar{P}_{\text{re}}}{\frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{W}{B} \quad (4)$$

式中, $H$ 为规则波波高; $T$ 为规则波周期; $B$ 为浮子的迎浪宽度。

## 2 浮子模型

为了研究浮子底部形状对浮子俘能的影响,通过控制浮子底部形状为唯一变量,分别采用平底、圆锥底、半球底 3 种底部形状建立浮子模型,在进行浮子建模时保证 3 种浮子的质量和圆柱的半径相等,3 种浮子的几何参数见表 1。根据陈启东等<sup>[7]</sup>的研究结论,圆锥底浮子在锥角小于 $120^\circ$ 时其运动会很不稳定,而为了与平底浮子(相当于锥角为 $180^\circ$ )产生明显的区分,使用锥角为 $120^\circ$ 的圆锥底浮子进行计算对比。在对浮子模型网格划分时,对水线附近网格进行加密处理,3 种浮子的网格划分如图 1 所示。

表 1 3 种圆柱浮子的几何参数

浮子类型	浮子半径/m	吃水深度/m	吃水体积/m <sup>3</sup>
平底浮子	1	1	$\pi$
圆锥底浮子 ( $120^\circ$ )	1	1.3850	$\pi$
半球底浮子	1	1.3334	$\pi$

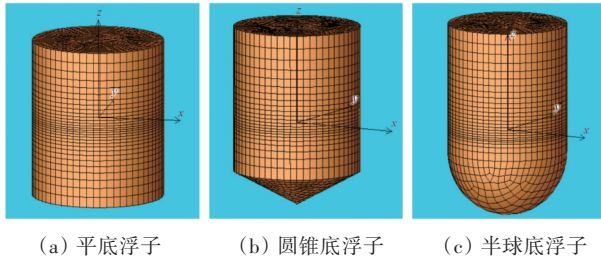


图1 3种浮子网格划分

### 3 水动力计算

利用AQWA-LINE对3个浮子模型进行频域水动力计算,由于振荡浮子式波浪能装置俘能仅考虑垂荡方向的运动,所以所有计算均只考虑垂荡方向。通过计算得到的相关水动力参数包括附加质量、辐射阻尼、波浪激励力以及幅值响应算子(RAO)。由于频域模型中所采用的浮子附加质量、辐射阻尼以及波浪激励力与PTO阻尼无关,上述水动力计算均未考虑PTO阻尼,故可用于下文的频域计算。

由图2可见,在不同的波浪频率下,3种浮子的附加质量变化趋势一致,平底浮子附加质量最大、锥形底浮子次之、半球底浮子最小。当频率小于1 rad/s时,浮子附加质量基本保持平稳;当频率在1~3 rad/s时,浮子附加质量明显下降;当频率大于3 rad/s,浮子附加质量随着频率的增加略有回升。

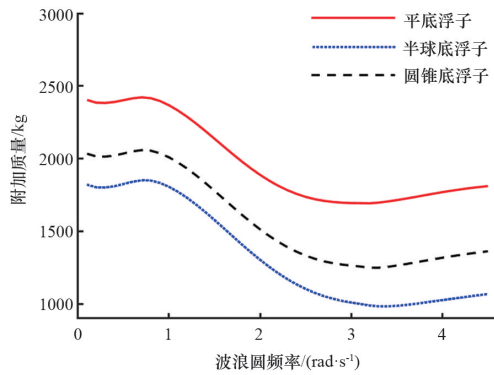


图2 3种浮子的附加质量

由图3可见,当波浪频率小于1 rad/s时3种浮子的辐射阻尼基本一致,当波浪频率超过1 rad/s,半球底浮子的辐射阻尼最大、锥形底浮子次之、平

底浮子最小。3种浮子辐射阻尼随波浪频率的变化趋势基本一致,当波浪频率小于2 rad/s时,3种浮子的辐射阻尼均随波浪频率的增加呈上升趋势;当波浪频率大于2.5 rad/s时,3种浮子的辐射阻尼均随波浪频率的增加呈下降趋势。

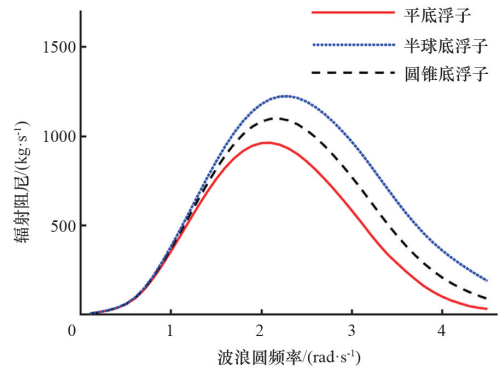
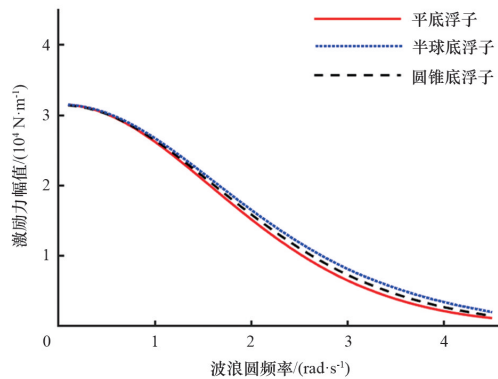
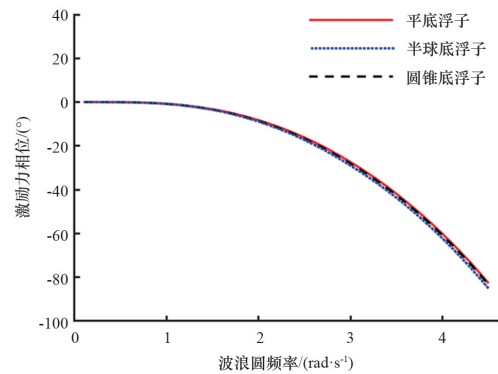


图3 3种浮子的辐射阻尼

如图4可见,在单位波幅下的波浪激励力对比中,3种模型相差不大,半球底浮子略高、锥形底浮



(a) 激励力幅值



(b) 激励力相位

图4 3种浮子的波浪激励力

子次之、平底浮子略低,变化趋势基本一致,3种浮子的波浪激励力相位基本相同。

如图5可见,平底浮子的峰值RAO最大、圆锥底浮子次之、半球底浮子最小。当波浪频率小于2.6 rad/s时,平底浮子RAO最高;当波浪频率大于2.7 rad/s时,半球底浮子RAO最高。由于3种浮子的外形略有差别,故共振频率不完全相同,3种浮子的RAO峰值也略有不同。

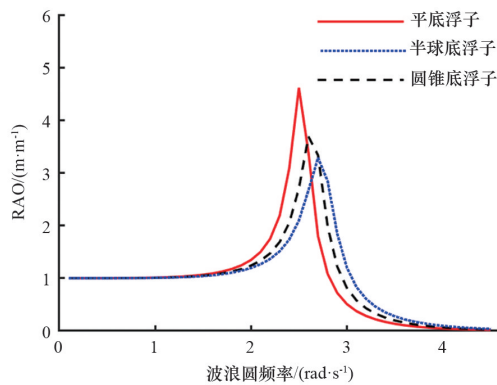


图5 3种浮子的幅值响应算子

#### 4 阻尼控制下俘能对比

当不对振荡浮子式波浪能装置进行控制时,PTO阻尼恒定,不随波浪频率的变化而变化,而由式(2)可知,在不同的波浪频率下,都存在一个最优的PTO阻尼系数,使浮子俘能的平均功率最大,因此可以通过控制调节PTO阻尼提升浮子俘能效果。阻尼控制是通过改变PTO阻尼,对浮子运动响应幅值进行控制的方法<sup>[11]</sup>。在不同的波浪频率下,可以通过选取最优的PTO阻尼,在不进行相位控制的情况下,实现更好的能量俘获效果。本节采用第1节建立的频域计算模型,研究3种浮子模型在阻尼控制下的能量俘获效果,采用能量俘获宽度进行结果对比,均采用单位波高。

PTO最优阻尼的计算如式(5)所示,3种浮子在不同波浪频率下的最优阻尼如图6所示。

$$R_{PTO,opt} = \sqrt{B^2(\omega) + \left\{ \omega [M + A(\omega)] - \frac{\rho g S}{\omega} \right\}^2} \quad (5)$$

式中, $R_{PTO,opt}$ 为对应波浪频率下的PTO最优阻尼。

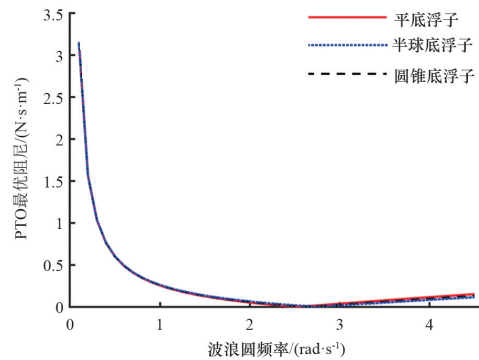


图6 3种浮子的PTO最优阻尼

为探究阻尼控制对不同浮子俘能效率的影响,采用横向对比与纵向对比的方式,对比不同浮子的俘能优劣。横向对比是比较均采用阻尼控制时不同浮子类型的俘能效果;纵向对比是比较3种类型浮子在有/无采用阻尼控制时的俘能效果。

##### 4.1 3种浮子俘能效果横向对比

利用建立的浮子频域运动模型,可以计算浮子在不同频率下的能量俘获宽度,然后通过对比相同频率下不同浮子的能量俘获宽度,判断不同浮子的俘能优劣<sup>[12]</sup>。

计算结果如图7所示,3种模型在共振频率处,俘获能量最优的是平底浮子,其能量俘获宽度可到达1.52 m左右,圆锥底浮子约为1.34 m,半球底浮子约为1.26 m。当波浪频率小于2 rad/s时,3种浮子的能量俘获效果基本相同;当波浪频率在2~2.5 rad/s时,平底浮子的能量俘获效果最好,且在2.5 rad/s处达到峰值,之后圆锥底浮子和半球底浮子相继达到峰值;当大于半球底浮子共振频率的范围

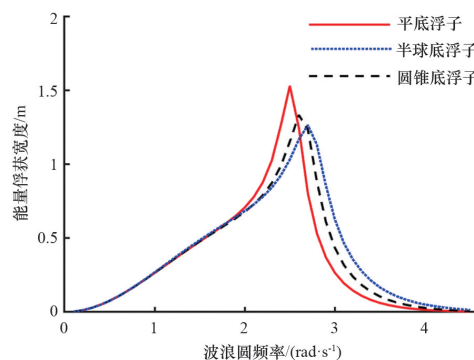


图7 阻尼控制下3种浮子的能量俘获宽度

时,半球底浮子的能量俘获效果最好、圆锥底浮子次之、平底浮子最低。3种浮子能量俘获宽度和波浪频率的关系趋势与RAO的结果一致。

#### 4.2 3种浮子俘能效果纵向对比

利用第2节建立的浮子频域运动模型,比较同一种类型浮子在采用阻尼控制和定阻尼时的俘能效果差异,定阻尼选用不同浮子各自共振频率下的最优阻尼,各浮子在阻尼控制和定阻尼情况下的能量俘获宽度对比如图8所示。

由图8可见,在阻尼控制下各浮子的能量俘获宽度在远离共振频率明显高于定阻尼的情况,在接近共振频率处两种情况相差甚小,但阻尼控制下的浮子能量俘获宽度不会低于定阻尼情况。

通过积分计算,求出能量俘获宽度曲线下的面积 $\lambda$ ,作为全频率(0.1~4.5 rad/s)段内浮子能量俘获宽度的计量标准,进而得到阻尼控制对定阻尼状态浮子俘能的提升效果,计算结果如表2所示。

由表2可知,在考虑全频段内能量俘获宽度的情况下,采用阻尼控制对平底浮子的能量俘获宽度提升程度高达92.47%,对圆锥底浮子的提升效果为79.09%,对半球底浮子的提升为76.30%。在全频段内考虑能量俘获宽度大小,无论是在定阻尼的情况下还是在阻尼控制的情况下,半球底浮子的能量俘获宽度都为最大、圆锥底浮子次之、平底浮子最小。

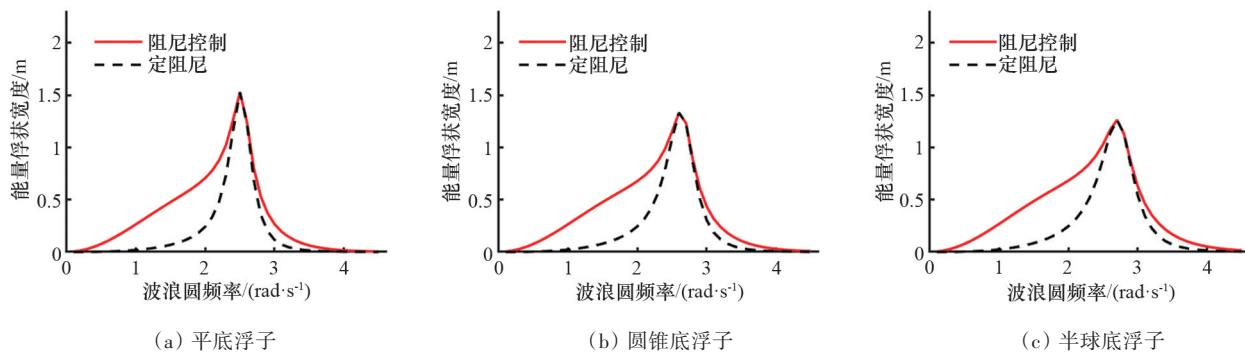


图8 不同PTO阻尼控制策略下浮子能量俘获宽度

表2 全频段内阻尼控制和定阻尼能量俘获宽度对比

条件	$\lambda/(\text{m}\cdot\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$		
	平底浮子	圆锥底浮子	半球底浮子
定阻尼	0.81	0.91	0.99
阻尼控制	1.56	1.64	1.75
提升程度/%	+92.47	+79.09	+76.30

## 5 结论

基于频域运动模型,比较了采用阻尼控制策略下不同底部形状振荡浮子的俘能效果,控制浮子底部形状为唯一变量,保证平底、圆锥底、半球底3种底部形状浮子的质量和圆柱的半径相等,可得到以下结论。

1) 在相同波浪激励下,平底浮子附加质量最大、锥形底浮子次之、半球形底浮子最小;在波浪频

率小于1 rad/s时3种浮子的辐射阻尼基本一致,当大于1 rad/s时,半球形底浮子的辐射阻尼最大、锥形底浮子次之、平底浮子最小,表明半球形底浮子在水中晃动时耗能最大;3种浮子对应的波浪激励力基本一致,表明浮子底部形状对波浪激励力的大小和相位影响很小。

2) 在采用阻尼控制时,平底浮子能够达到的峰值俘能效率最高、圆锥底浮子次之、半球底浮子最小,与RAO结果基本吻合,在分布上仍然符合共振频率越接近波浪频率时浮子能量俘获效果越优的规律;在0.1~4.5 rad/s的波浪频率段内,半球底的俘获能量效果最优,表明半球底浮子更适用于波浪谱较宽的波浪工况,而平底浮子在共振频率处的俘获能量效果最优,说明平底浮子更适用于波浪谱较窄且共振频率和波浪频率接近的海况;采用阻尼

控制对平底浮子的能量俘获效果提升最为显著,但是在 0.1~4.5 rad/s 的频率段内,其能量俘获宽度仍然低于半球底浮子和圆锥底浮子。

### 参考文献(References)

- [1] Mork G, Barstow S, Kabuth A, et al. Assessing the global wave energy potential[C]//Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: OMAE, 2010: 447-454.
- [2] IEA. Data and statistics: Electricity[DB/OL]. [2020-10-01]. <https://www.iea.org>.
- [3] 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, 35(7): 1304-1310.
- [4] 肖曦, 摆念宗, 康庆. 直驱式波浪发电系统浮子形状与排布优化研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(9): 7-13.
- [5] 盛松伟, 叶寅. 圆柱形波浪能吸收体水动力学分析与优化设计[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 542-546.
- [6] 罗华清, 刘延俊, 张募群, 等. 基于 AQWA 的波浪能发电装置主浮体水动力特性研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(4): 39-42.
- [7] 陈启东, 曹灿, 顾泽堃, 等. 基于 AQWA 的锥底振荡浮子水动力特性研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(4): 3-6.
- [8] Zhang X, Tian X, Xiao L, et al. Application of an adaptive bistable power capture mechanism to a point absorber wave energy converter[J]. Applied Energy, 2018, 228: 450-467.
- [9] Sheng W. Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 109: 482-498.
- [10] Sheng W, Lewis A. Assessment of wave energy extraction from seas: Numerical validation[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2012, 134(4): 041701.1-041701.8.
- [11] 肖曦, 摆念宗, 康庆, 等. 波浪发电系统发展及直驱式波浪发电系统研究综述[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 1-11.
- [12] Sheng W, Alcorn R, Lewis T. Physical modelling of wave energy converters[J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 29-36.

## Comparison of energy capture efficiency of oscillating buoys of different bottom shapes based on resistive control

ZHI Guangning<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, LIANG Haizhi<sup>2</sup>, QIAO Dongsheng<sup>1\*</sup>, NING Dezhi<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

**Abstract** To optimize the energy capture efficiency of the oscillating buoy wave energy converter, the effect of the bottom shape of the cylindrical buoy on the energy capture is studied. The commonly used oscillating buoys with the flat bottom, the cone bottom, and the hemispherical bottom are selected for comparison. Firstly, the frequency-domain model of the buoy motion is established. Then, the hydrodynamic parameters of these three buoy types, such as the added mass, the radiation damping, the wave excitation force, and the response amplitude operator, are calculated by ANSYS-AQWA software and compared. Finally, the resistive control is put into the frequency-domain motion model to investigate the energy capture efficiency of the buoys of different bottom shapes under the wave excitation. The results show that the resistive control could significantly improve the energy capture efficiency of the buoys. The hemispherical bottom buoy has a higher energy capture efficiency under wider wave spectrum conditions, while the flat bottom buoy is more suitable when the wave spectrum peak frequency is close to its natural frequency and the wave spectrum is narrow.

**Keywords** wave energy converter; oscillating buoy; hydrodynamic; frequency-domain model; resistive control ●



(责任编辑 刘志远)