

# 不同形状的多自由度内置 PTO 式波浪能转换装置的性能分析

谢惠媚<sup>1,2</sup>, 孟凡泰<sup>1,2</sup>, 徐潜龙<sup>1,2</sup>, 王尚明<sup>1,2</sup>, 谢彬<sup>1</sup>, 李晔<sup>1,2</sup>

(1.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2.上海交通大学 海洋工程国家重点实验室多功能船模拖曳水池, 上海 200240)

**摘要:**在模态分析法的基础上,文章系统地阐释了一种多自由度内置波能转换系统(PTO)式波浪能转换装置(WEC)的运动特性和输出功率之间的关系,探究了外壳形状对 WEC 工作效率的影响。在势流理论的基础上建立多自由度频域运动模型,通过 PTO 多参数优化得到最大输出功率,采用模态分析法探究内部 PTO 在二维平面上的相对运动与输出功率之间的关系。对球形 WEC、短圆柱 WEC 和高圆柱 WEC 分析后发现,高圆柱 WEC 可有效提高低频共振的幅值,但降低了全频域上的能量捕获带宽,短圆柱 WEC 和球体 WEC 更适合实际应用。内置 PTO 式 WEC 存在低频和高频两种共振模式,其输出功率主要来源于低频时横荡方向吸收的波浪能。在设计内置 PTO 式 WEC 时,应着重优化其在横荡方向的运动响应。

**关键词:**模态分析法;波浪能转换装置;内置 PTO 式;形状优化;运动特性

**中图分类号:**TK7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5292(2022)07-0986-09

**DOI:**10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2022.07.004

## 0 引言

波浪能是一种清洁可再生、资源丰富、具有广阔应用前景的新能源。波浪能的全球总量约为 2.11 TW<sup>[1]</sup>。基于不同的工作原理,波浪能转换装置(Wave Energy Converter, WEC)大致可分为振荡水柱式、越浪式和振动浮子式。其中,代表性的原型设备包括 Carnegie 公司研制的 CETO 5, 英国 Voith Hydro Wavegen 公司研制的振荡水柱装置 Limpet 以及越浪式装置 Wave Dragon 等<sup>[2-4]</sup>。

根据波能转换系统(Power Take Off, PTO)的放置形式,振动浮子 WEC 可分为外置 PTO 式和内置 PTO 式。外置 PTO 式 WEC 的 PTO 暴露于海水当中,容易受到海水腐蚀。内置 PTO 式 WEC 将 PTO 整合到装置中,使整个系统紧凑,同时不易受到海水腐蚀,在安装和维护上具有极大的便利性。内置 PTO 式 WEC 在单一方向的工作效率较低,但可吸收多个方向的能量,如垂荡、横荡、纵荡等,从而提高整体的输出功率。郑明月探究的一种全封闭振荡浮子有两个自由度,可通过最大功率点跟踪实现功率最大化<sup>[5]</sup>。柴辉采用理论方式验证了三自由度单摆式 WEC 的可行性<sup>[6]</sup>。内置

PTO 式 WEC 可以从多个方向吸收能量,弥补了 PTO 内置造成的功率缺陷。

WEC 的形状和设计方式会影响其对波浪能的吸收效率。内置 PTO 式 WEC 主要利用内部振子与外壳间的相对运动提取能量,如广州能源所研发的“鸭式”、“鹰式”波浪能装置等<sup>[7-8]</sup>。对于外置 PTO 式 WEC,众多学者已经对其形状进行了系统分析,然而关于内置 PTO 式 WEC 的相关研究较少<sup>[9-11]</sup>。Lixian Wang 提出的圆柱状内置 PTO 式 WEC 的最大转换效率约为 50%<sup>[12]</sup>。J Cordonnier 提出了一种利用摆锤与主结构体之间的相对运动来吸收波浪能的装置 SEAREV1,为了减少抨击、增加稳定性以及降低造价,将初代的扁多面体与棱柱组合改进为凸轮型柱体和类凸轮型柱体<sup>[13]</sup>。Zhongfei Chen 对一种二维船型底和一种锥底圆柱 WEC 进行了探究<sup>[14,15]</sup>。

本文采用模态分析法研究了一种多自由度内置 PTO 式 WEC 的运动特性与功率之间的关系,并从功率、运动幅度、刚度系数、阻尼系数、共振频率和运动轨迹等方面进行了对比分析,探究了外在形状对内置 PTO 式 WEC 运动特性

收稿日期:2021-04-15。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0102500);水下测控技术重点实验室基金项目(61424070603)。

通讯作者:孟凡泰(1989-),男,博士,助理研究员,研究方向为新能源利用和自动控制技术。E-mail:fantai.meng@sjtu.edu.cn

以及功率的影响,为后续的 WEC 外形设计提供了指导思路。

## 1 内置 PTO 式 WEC 模型及数学模型

### 1.1 模型简介

图 1 为内置 PTO 式波浪能装置示意图。

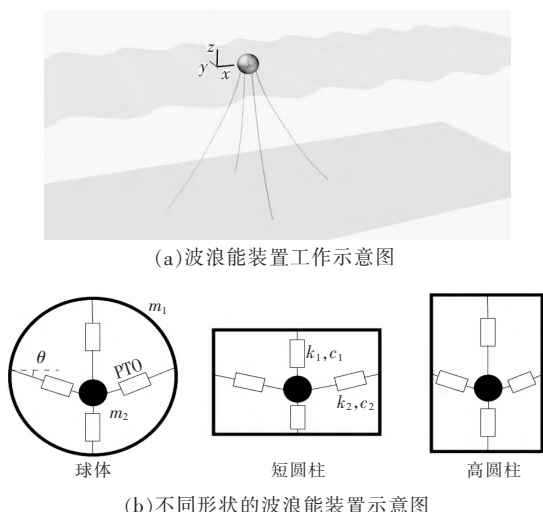


图 1 内置 PTO 式波浪能装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the wave energy converter with a built-in PTO

如图 1(a)所示,全局坐标系原点位于水平面,其  $z$  轴竖直向上。平面入射波沿着全局坐标系  $x$  轴正向传播。波浪能装置由 4 条锚链固定,使其保持半浸没状态,平衡位置位于水平面处。运动锚链被认为是无张紧和无弹的。

如图 1(b)所示,波浪能装置主要由外壳、内置球和 PTO 组成。本研究共分析了 3 种外壳形状的 WEC,即球体、短圆柱和高圆柱,其具体参数见表 1。为保证分析结果的准确,这 3 种形状的 WEC 具有相同的排水体积。内置球与两组在  $xz$  平面内正交的弹簧-阻尼 PTO 相连。由于整个装置沿  $xz$  平面对称,质量均匀分布,在入射波的激励下,装置仅在  $xz$  平面内运动,内置球与外壳在垂荡和横荡方向上产生振动,两者不碰撞。内置球与壳体间的相对运动驱动 PTO 将机械能转化为电能。

如图 1(b)所示:在 WEC 中, $m_1$  和  $m_2$  分别为外壳和内置球的质量,kg; $\theta$  为系统静止时横荡方向 PTO 与  $x$  轴之间的夹角,(°); $k_1$  和  $k_2$  分别为垂荡和横荡方向 PTO 中弹簧的刚度系数,N/m; $c_1$  和  $c_2$  分别为垂荡和横荡方向 PTO 阻尼器的阻尼系数,N·s/m。

表 1 内置 PTO 式波浪能装置的模型参数

Table 1 The parameters of the wave energy converter with a built-in PTO

参数	球体 WEC	短圆柱 WEC	高圆柱 WEC
总质量 $m/\text{kg}$	$2.14 \times 10^6$	$2.14 \times 10^6$	$2.14 \times 10^6$
外壳质量 $m_1/\text{kg}$	$1.43 \times 10^6$	$1.43 \times 10^6$	$1.43 \times 10^6$
小球质量 $m_2/\text{kg}$	$7.15 \times 10^5$	$7.15 \times 10^5$	$7.15 \times 10^5$
外壳半径 $R/\text{m}$	10	10	7.5
圆柱体高度 $L/\text{m}$	—	13.32	23.7
内置球半径 $r/\text{m}$	2	2	2
工作波高 $H/\text{m}$	0.02	0.02	0.02

### 1.2 运动方程的建立及优化

#### 1.2.1 运动方程的建立

在波激力和辐射力作用下,波浪能装置的运动可由牛顿第二定律描述:

$$M \ddot{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}} + \hat{\mathbf{F}}_{\text{rad}} + \hat{\mathbf{F}}_{\text{PTO}} + \hat{\mathbf{F}}_s \quad (1)$$

式中: $M = \text{diag}(m_1, m_2, m_1, m_2) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  为系统质量(下标 1 和 2 分别表示结构外壳以及内置球,下同),kg; $s$  为复数频率,rad/s, $s = j\omega$ ;  $\omega$  为波浪频率,rad/s; $j$  为单位虚数; $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{z}_1 \ \hat{z}_2 \ \hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$  为结构体响应( $\hat{z}_1$  代表外壳垂荡运动, $\hat{z}_2$  代表内置球垂荡运动, $\hat{x}_1$  代表外壳横荡运动, $\hat{x}_2$  代表内置球横荡运动), $m$ ;  $\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc}} = [\hat{f}_{\text{exc},z} \ 0 \ \hat{f}_{\text{exc},x} \ 0]^T \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$  为装置受到的波激力(下标  $z$  和  $x$  分别表示垂荡方向和横荡方向,下同),N;  $\hat{\mathbf{F}}_{\text{rad}} = [\hat{f}_{\text{rad},z} \ 0 \ \hat{f}_{\text{rad},x} \ 0]^T \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$  为辐射力,N,  $\hat{f}_{\text{rad},z} = -(s^2 A_z + s B_z) \hat{z}_1$ ,  $\hat{f}_{\text{rad},x} = -(s^2 A_x + s B_x) \hat{x}_1$ ;  $A_z$  和  $A_x$  分别为外壳垂荡方向和横荡方向的附加质量,kg; $B_z$  和  $B_x$  分别为垂荡方向和横荡方向的辐射阻尼,N·s/m;  $\hat{\mathbf{F}}_s = [\hat{f}_s \ 0 \ 0 \ 0]^T \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$  为静水恢复力,N,  $\hat{f}_s = -\rho g S \hat{z}_1$ ;  $\rho$  为海水密度,kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $S$  是结构的水线面面积,m<sup>2</sup>;  $\hat{\mathbf{F}}_{\text{PTO}} = [\hat{f}_{\text{PTO},z} \ -\hat{f}_{\text{PTO},z} \ \hat{f}_{\text{PTO},x} \ -\hat{f}_{\text{PTO},x}]^T \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$  为 PTO 提供的约束力,N。

由于本文约束了外壳与内置球的相对运动, $\theta$  变化量为小量,在计算过程中可认为  $\theta$  保持不变,由此可得:

$$\hat{f}_{\text{PTO},z} = \begin{bmatrix} -2k_1 - 2k_2 \sin^2 \theta \\ 2k_1 + 2k_2 \sin^2 \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \hat{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} -2c_1 - 2c_2 \sin^2 \theta \\ 2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T s \hat{\mathbf{x}} \quad (2)$$

$$\hat{f}_{PTO,z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2k_2 \cos^2 \theta \\ 2k_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix}^T \hat{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2c_2 \cos^2 \theta \\ 2c_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix}^T s \hat{x} \quad (3)$$

整理后得到频域运动方程为

$$[(M+A)s^2 + Cs + K] \hat{x} = \hat{F}_{exc} \quad (4)$$

其中,附加质量矩阵为

$$A = \text{diag}[A_z, 0, A_x, 0]^T$$

系统刚度矩阵为

$K =$

$$\begin{bmatrix} k_1 + 2k_2 \sin^2 \theta + \rho g S & -(2k_1 + 2k_2 \sin^2 \theta) & 0 & 0 \\ -(2k_1 + 2k_2 \sin^2 \theta) & 2k_1 + 2k_2 \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2k_2 \cos^2 \theta & -2k_2 \cos^2 \theta \\ 0 & 0 & -2k_2 \cos^2 \theta & 2k_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

系统阻尼矩阵为

$C =$

$$\begin{bmatrix} 2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta + B_z & -(2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta) & 0 & 0 \\ -(2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta) & 2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2c_2 \cos^2 \theta + B_x & -2c_2 \cos^2 \theta \\ 0 & 0 & -2c_2 \cos^2 \theta & 2c_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

一个波浪周期内,WEC在垂荡方向产生的平均功率  $P_z$  为

$$P_z = \frac{1}{2} (2c_1 + 2c_2 \sin^2 \theta) \left| \hat{z}_1 - \hat{z}_2 \right|^2 \quad (7)$$

WEC在横荡方向产生的平均功率  $P_x$  为

$$P_x = \frac{1}{2} (2c_2 \cos^2 \theta) \left| \hat{x}_1 - \hat{x}_2 \right|^2 \quad (8)$$

则一个波浪周期内,WEC的总功率  $P$  为

$$P = P_x + P_z \quad (9)$$

### 1.2.2 优化

本文在 MATLAB 优化求解器 fmincon 中对该运动模型进行优化,目标函数为总功率。为了使运动方程成立,本文设置了运动约束。假设内置球与外壳的相对运动幅度不超过半径差的 1/100,即:

$$|\hat{x}_1 - \hat{x}_2| < (R-r)/100 \quad (10)$$

$$|\hat{z}_1 - \hat{z}_2| < (R-r)/100 \quad (11)$$

在平衡状态下,弹簧在垂荡方向的形变长度为  $(R-r)\tan\theta$ ,在该方向提供的力为  $k_1(R-r) \cdot$

$\tan\theta$ 。弹簧在横荡方向的形变长度为  $\sqrt{(R-r)^2 + [\tan(R-r)]^2} - (R-r)$ ,在该方向提供的力为  $\{\sqrt{(R-r)^2 + [\tan(R-r)]^2} - (R-r)\}k_2 \sin\theta$ 。在内置球与内壁不碰撞的情况下,PTO 的刚度系数与内置球质量须满足以下条件:

$$\begin{aligned} & k_1(R-r)\tan\theta\{\sqrt{(R-r)^2 + [\tan(R-r)]^2} - (R-r)\} \\ & k_2 \sin\theta - m_2 g > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

### 1.2.3 模态分析

模态分析法是工程振动领域中的一种分析方法,用于研究结构动力特性。通过该方法可计算结构特定频率范围内在内外振源作用下产生的实际振动响应,有利于后续进行装置的结构优化。波浪能装置依靠相对运动产生输出功率,增大相对运动的幅度能有效提高装置的输出功率。固有频率会影响整个装置的动力学特性。本文通过 Matlab 在运动方程的基础上计算系统 4 个不同模态的固有频率,通过固有频率分析装置全频域范围的运动表现并研究共振频率下的运动特性。

系统特征值与特征向量满足以下关系:

$$[(M+A)^{-1}K - \lambda I]\mathbf{p} = 0 \quad (13)$$

式中: $I$  为单位矩阵; $\mathbf{p}$  为特征向量; $\lambda$  为特征值。

系统特征值  $\lambda$  与系统固有频率  $\omega_n$  之间呈平方关系,即:

$$\omega_n^2 = \lambda \quad (14)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 水动力学结果

根据势流理论,WEC在波浪中受到波浪激励力和辐射力的影响。图2,3分别描述了3种不同形状的WEC在垂荡方向和横荡方向上的附加质量、辐射阻尼和波浪激励力。由图2可知:由于球体WEC和短圆柱WEC的水线面积相等,所以两者的水动力表现更相近;短圆柱WEC的惯性效应明显,其附加质量高于球体WEC;球体WEC运动时对波面影响更明显,其辐射阻尼高于短圆柱WEC;高圆柱WEC的水线面积最小,吃水最深,其附加质量和辐射阻尼均最小;球体WEC和短圆柱WEC的波浪激励力大小相近,显著高于高圆柱WEC。由图3可知,在横荡方向上,高圆柱WEC的附加质量、辐射阻尼和波浪激励力均最高。

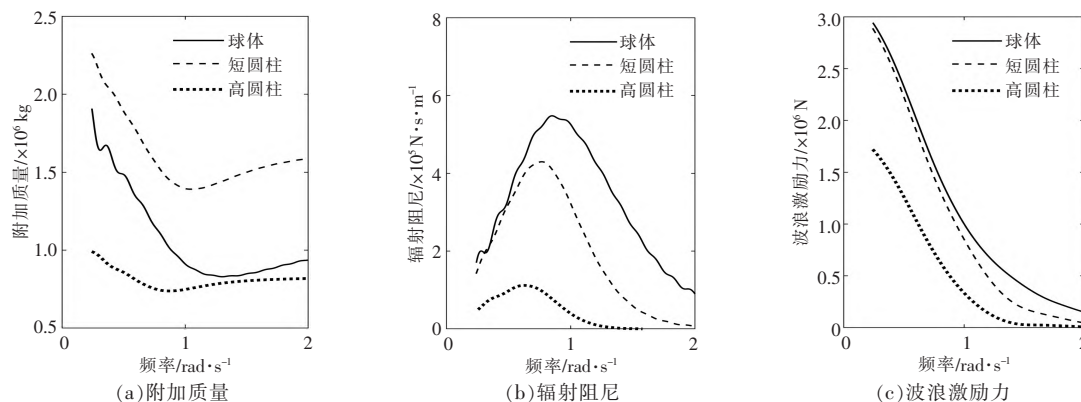


图 2 3 种不同形状的波浪能装置在垂荡方向上的水动力系数和波浪激励力

Fig.2 The hydrodynamic coefficients and wave excitation force of three investigated shapes in the heave direction

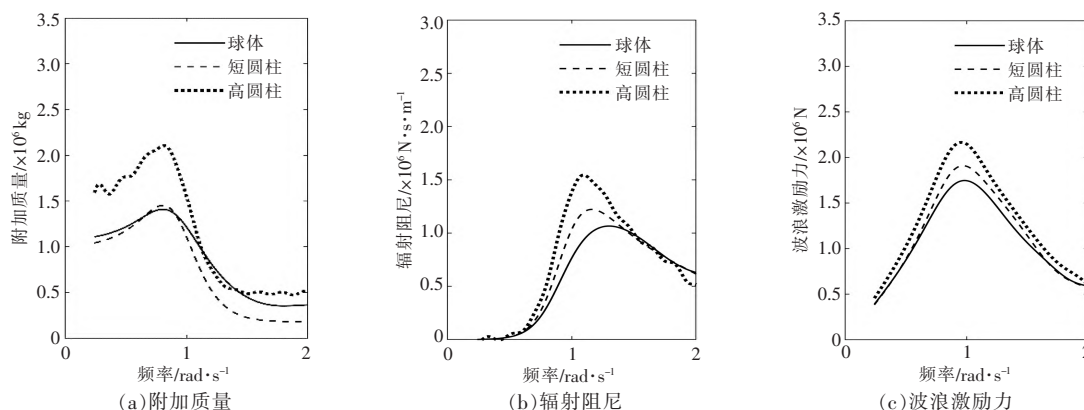


图 3 3 种不同形状的波浪能装置在横荡方向上的水动力系数和波激力

Fig.3 The hydrodynamic coefficients and wave excitation force of three investigated shapes in the surge direction

## 2.2 运动和输出功率的关系

输出功率是衡量波浪能装置工作能力的重要指标。振荡浮子依靠结构内的相对运动发电,所以 WEC 的运动幅度可以用浮体相对运动响应幅值算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 和相对

速度衡量。本文中,相对 RAO 为 WEC 外壳与内置球的振幅差与波高的比,相对速度为 WEC 外壳与内置球的速度差。

图 4,5 分别描述了 3 种形状的波浪能装置在垂荡和横荡方向上的相对 RAO 和相对速度。

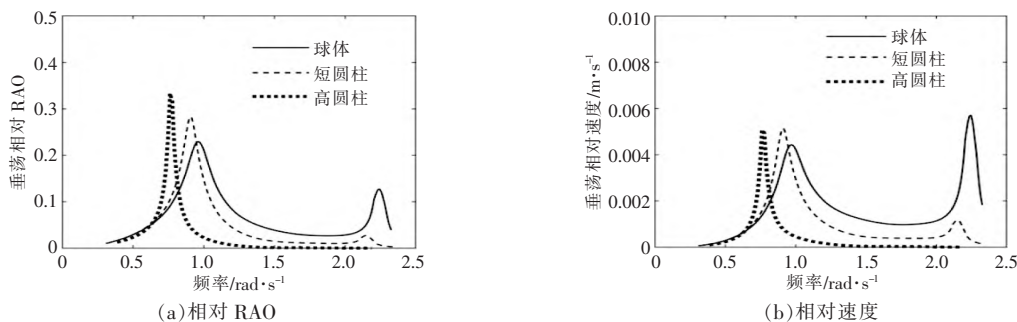


图 4 不同形状波浪能装置在垂荡方向的相对 RAO 和相对速度

Fig.4 Relative RAO and relative velocity of wave energy converters of the investigated shapes in the heave direction

从图 4 可见:在垂荡方向上,短圆柱 WEC 和球体 WEC 的相对 RAO 和相对速度均出现明显的双峰现象,且波峰频率相同,双峰现象主要是由多体多自由度耦合引起的;相对 RAO 的低频峰值

高于高频峰值。低频峰处的大幅度运动会对输出功率峰值有显著影响,而高频峰处的运动幅度虽然不小,但对输出功率贡献很小,仅在输出功率曲线的高频处造成微小波动。



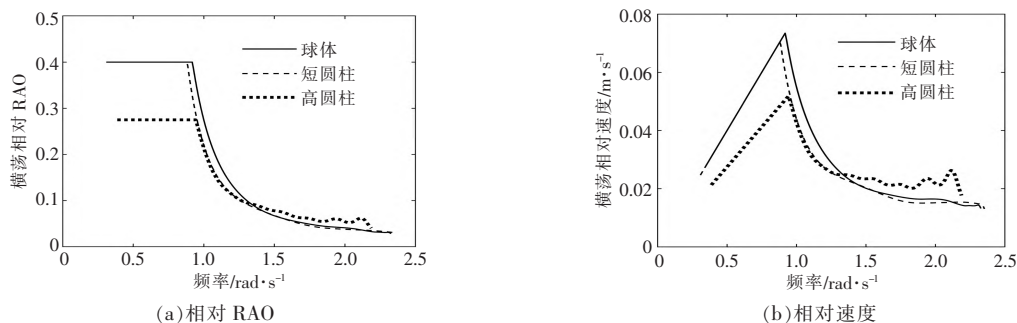


图 5 不同形状波浪能装置在横荡方向的相对 RAO 和相对速度

Fig.5 Relative RAO and relative velocity of wave energy converters of the investigated shapes in the surge direction

图 5 中相对 RAO 曲线的前端横线和相对速度曲线的前端斜线主要是由于外壳和球体横荡方向相对运动幅度差不超过半径的 1/100 的运动约束造成的,同时,这一约束也限制了 WEC 的输出功率。在短圆柱 WEC 和球体 WEC 的输出功率到达峰值前,其主要受到横荡方向运动约束的影响。在低频处,由于高圆柱 WEC 在横荡方向相对运动的空间更小,所以受到的约束更明显,在横荡方向上吸收的能量较少,影响了输出功率峰值和能量捕获宽度。在高频处,3 种形状 WEC 的相对 RAO 曲线和相对速度曲线均有一个微小的波动,但对输出功率的影响很小。结合图 4,5 可以明显看出,WEC 在横荡方向的运动幅值高于垂荡方向,在横荡方向吸收的能量比垂荡方向高,横荡方向的波浪能是能量的主要来源,输出功率曲线的各种特征也主要受横荡方向相对运动的影响。

图 6 描述了不同形状波浪能装置的输出功率。

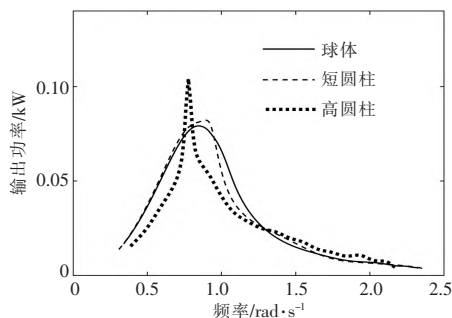


图 6 不同形状波浪能装置的输出功率对比

Fig.6 Power comparison of wave energy converters of different shapes

从图 6 可以看出:高圆柱 WEC 具有最高的输出功率峰值,然后依次是短圆柱 WEC 和球体 WEC;输出功率峰值对应的频率由低到高依次为高圆柱、短圆柱和球体,差距不明显。

除了输出功率峰值外,能量捕获带宽是衡量 WEC 工作性能的另一重要指标。能量捕获带宽是指浮子吸收功率超过其最大功率的一半时的频率宽度。从图 6 还可以看出,球体 WEC 和短圆柱 WEC 的能量捕获带宽相似,球体 WEC 的能量捕获带宽稍微比短圆柱 WEC 宽,这两种 WEC 的能量捕获带宽约为高圆柱 WEC 的两倍。结合功率峰值以及能量捕获带宽可知,短圆柱 WEC 和球体 WEC 比高圆柱 WEC 更适合在实际环境中工作。本文设置的 WEC 更适合在波浪周期为 6~11 s 的海域中工作。高圆柱 WEC 和短圆柱 WEC 的外壳都是圆柱形,外壳的几何类型相同,但宽高比不同。由高圆柱 WEC 和短圆柱 WEC 的输出功率表现可以看出,在排水量等同的情况下,增加 WEC 的宽高比虽然会降低输出功率峰值,提高峰值频率,但能使能量捕获宽度变宽,更符合实际工作需求。

### 2.3 分析及原理

图 7 描述了 3 种形状 WEC 由式 (10)~(12)优化后得到的刚度系数。从图 7 可以看出:在垂荡方向上,高圆柱 WEC 的刚度系数显著高于另外两种 WEC,主要原因是,在特征频率相似的情况下,高圆柱 WEC 在垂荡方向上的附加质量最小;在横荡方向上,3 种形状 WEC 的刚度系数基本一致。3 种形状外壳在横荡方向上的固有频率接近 0,内置球质量相等,为了使内置球在横荡方向上达到共振,优化结果为 PTO 系统在横荡方向上的刚度系数几乎相等。同时,由 PTO 系统在横荡和垂荡方向上的刚度系数与质量之间的关系可知,横荡方向刚度系数与垂荡方向刚度系数呈负相关关系。

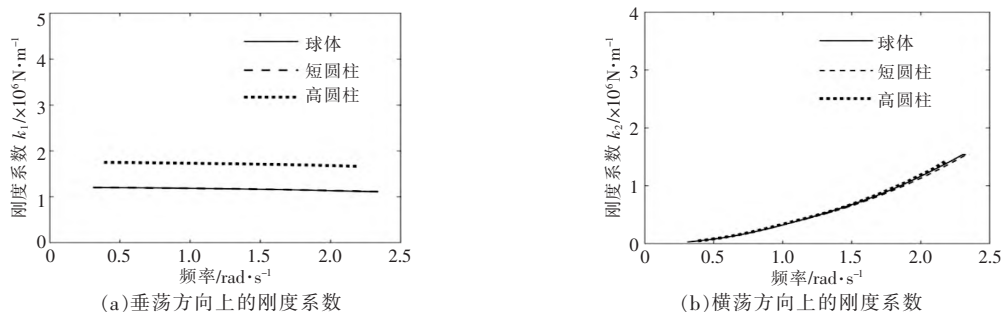


图 7 不同形状波浪能装置的刚度系数

Fig.7 The stiffness coefficients of wave energy converters of the investigated shapes

图 8 描述了 3 种形状 WEC 由式 (10)~(12) 优化后得到的阻尼系数。从图 8(a)可见:阻尼对运动的影响非常明显,阻尼系数的波谷对应 WEC 运动幅值的波峰;在垂荡方向上,高圆柱 WEC 的阻尼系数高于另外两种形状的 WEC,这限制了高圆柱 WEC 除峰值外的运动,导致了能量带宽变窄。从图 8(b)可见:在横荡方向上,3 种形状 WEC 的阻尼系数差距不明显;随着频率的逐渐增大,阻

尼曲线呈先降再升最后再降的变化趋势,第一个波谷对应的是横荡运动的折点;波谷前较高的阻尼值主要是由横荡方向的运动约束引起的。由图 8 可知,垂荡方向的阻尼系数比水平方向要高 1~2 个数量级,这造成了 WEC 在垂荡方向的运动幅值小于横荡方向的运动幅值。WEC 的功率与阻尼呈一次方关系,与运动幅值呈二次方关系,横荡运动吸收的能量对功率的贡献更为显著。

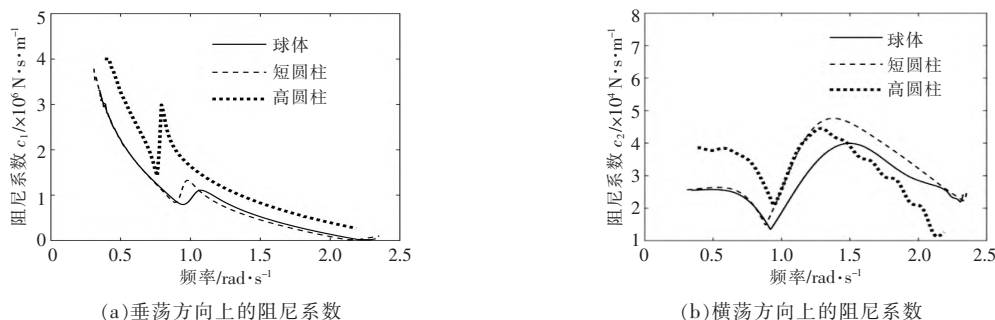


图 8 不同形状波浪能装置的阻尼系数

Fig.8 The damping coefficients of wave energy converters of the investigated shapes

固有频率是结构体的重要特性,对物体的运动有着至关重要的意义。图 9 描述了 3 种形状 WEC 在不同来波频率下的固有频率(图中: $\omega_{s1}$  为

外壳在横荡方向的固有频率; $\omega_{s2}$  为内置球在横荡方向的固有频率; $\omega_{h1}$  为外壳在垂荡方向的固有频率; $\omega_{h2}$  为内置球在垂荡方向的固有频率)。

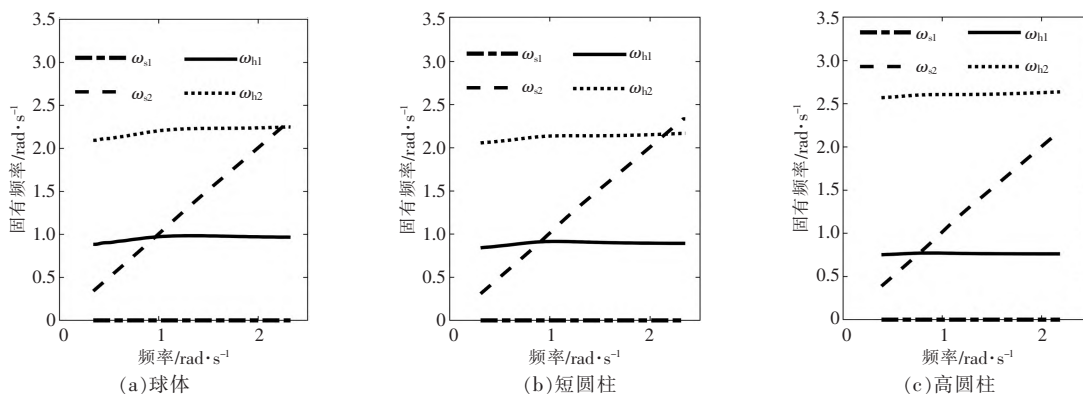


图 9 不同形状波浪能装置的固有频率

Fig.9 Natural frequencies of wave energy converters of the investigated shapes

从图 9 可以看出,3 种形状 WEC 的  $\omega_{\omega}$  曲线在低频处均与  $\omega_{h1}$  曲线相交,在高频处与  $\omega_{h2}$  曲线相交;外壳形状对固有频率的整体变化趋势影响不大,但对具体的频率值有细微影响。结合图 4~6 和图 9 可以看出,3 种形状 WEC 在低频交点处的运动幅值和功率明显增大并出现峰值,在高频交点处有微小波峰。这两个峰的共振模式并不相同,低频峰是在入射波作用下由内置球横荡方向运动与外壳垂荡方向运动发生共振引起的;高频峰是在入射波作用下由内置球在横荡方向和垂荡方向发生共振引起的。3 种形状 WEC 的最终优化结果:让内置球横荡方向的固有频率与波浪输入频

率始终保持一致,整个系统以内置球横荡方向运动与其他运动的耦合共振为优化方向。这一结论可以为后续内置 PTO 式 WEC 的设计提供参考,在进行设计时需着重考虑内部振子以及装置在横荡方向上的运动性能。

为了深入了解 WEC 在发生共振时的运动状况,本文选取了共振频率下的 3 种形状 WEC 作为研究对象,通过分析其运动轨迹来探究规律。在入射波的激励下,外壳垂荡运动和内置球横荡运动会在 WEC 的共振频率下发生共振。图 10~12 分别描述了短圆柱 WEC、球体 WEC 和高圆柱 WEC 在其共振频率下的运动轨迹和模态。

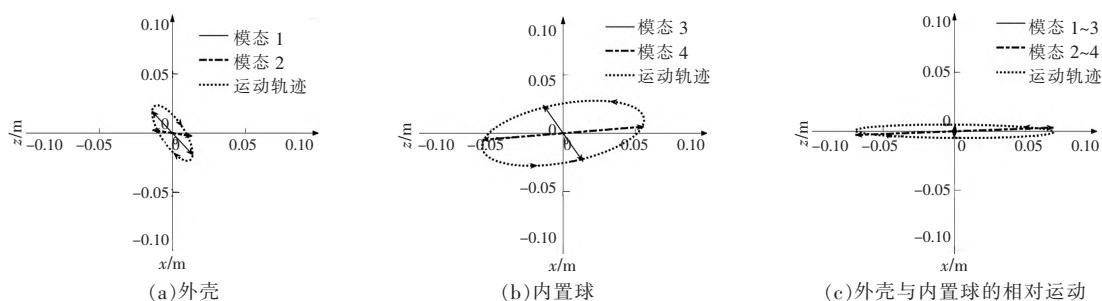


图 10 短圆柱 WEC 的运动轨迹和模态

Fig.10 Trajectory and mode shape of short cylinder WEC

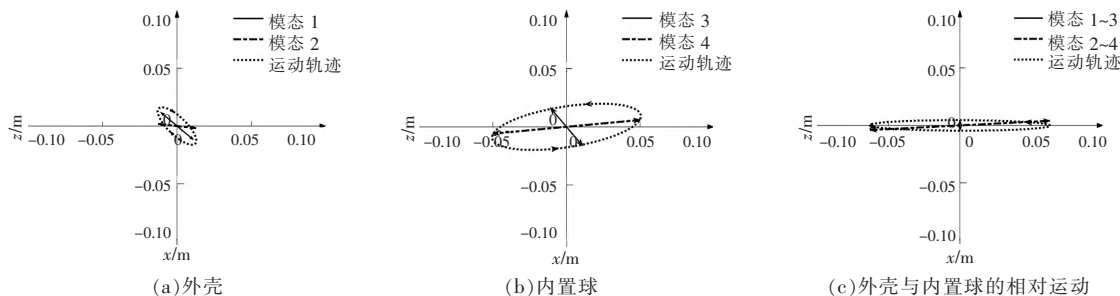


图 11 球体 WEC 的运动轨迹和模态

Fig.11 Trajectory and mode shape of sphere WEC

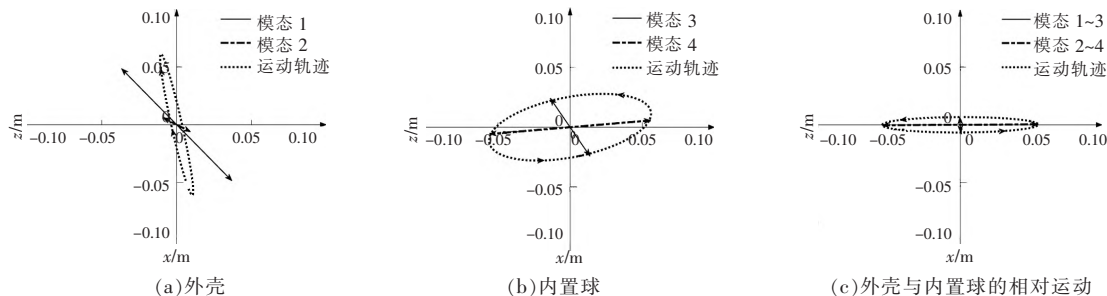


图 12 高圆柱 WEC 的运动轨迹和模态

Fig.12 Trajectory and mode shape of tall cylinder WEC

在图 10(a)中:模态 1 是外壳垂荡运动主导的,模态 2 是外壳横荡运动主导的;外壳的横荡运动和垂荡运动的振幅较小,总体的吸能效果有

限;模态 1 和模态 2 之间的相位差为  $222^\circ$ ,模态 1 在入射波影响下发生共振,振幅比模态 2 大;对于共振频率下的外壳,垂荡方向的运动对其影响

更大。在图 10(b)中:模态 3 是内置球垂荡运动主导的,模态 4 是内置球横荡运动主导的;模态 3 和模态 4 之间的相位差约为  $66.2^\circ$ ,模态 4 在入射波影响下发生共振,幅值约为模态 3 的 2 倍;在共振频率下,内置球受横荡方向运动的影响更大。在图 10(c)中:模态 1~3 代表外壳和内置球在垂荡方向上的相对运动,而模态 2~4 代表外壳和内置球在横荡方向上的相对运动;模式 1~3 和模态 2~4 的相位差接近零,意味着振幅几乎沿  $x$  和  $z$  轴振荡;垂荡和横荡方向的运动几乎同时达到峰值和谷值,由于横荡方向的运动幅值远大于垂荡方向,相对运动的椭圆形轨迹的纵横比相当高,吸收能量的效果有限。由于 WEC 依靠外壳和内置球之间的相对运动发电,所以相对运动的轨迹决定着 WEC 的效率。

结合图 10,11 可以看出,球体 WEC 和短圆柱 WEC 的运动轨迹基本一致。结合图 10~12 可以看出:高圆柱 WEC 的外壳和内置球在垂荡方向的运动幅度大于球体 WEC 和短圆柱 WEC;高圆柱 WEC 的内置球的运动轨迹接近圆形,这表明内置球在共振频率下有较好的运动表现;高圆柱 WEC 的外壳和内置球的相对运动轨迹整体呈现扁椭圆形,轨迹形状略优于球体 WEC 和短圆柱 WEC,但幅值比前两者小,运动表现没有明显优势。从 3 种形状 WEC 的运动表现可总结出,内置 PTO 式 WEC 整体的吸收效果有待提高。短圆柱 WEC 在横荡方向上的运动振幅远高于垂荡方向,可以将该类装置应用于横荡方向能吸收更多波能的场景。在设计短圆柱 WEC 时,考虑到其他频率的运动表现,应该在横荡方向上设置更小的运动约束以达到更好的功率输出效果。

### 3 结论

本文基于模态分析法探究了一种多自由度内置 PTO 式波浪能装置的运动特性和输出功率之间的关系,为后续形状优化提供指导思想。本文选取了球体、短圆柱和高圆柱 3 种形状的外壳,在势流理论的基础上建立 WEC 的四自由度频域模型并进行优化,求解 WEC 在不同频率范围内的输出功率、相对 RAO、相对速度、刚度系数、阻尼系数、固有频率以及运动轨迹。通过分析可以得出以下结论。

①短圆柱 WEC 和球体 WEC 的输出功率峰

值比高圆柱 WEC 低,但是能量捕获带宽比高圆柱 WEC 宽约一倍,更适合在真实海况中工作;适当加大 WEC 外壳的宽高比有利于增大能量捕获带宽,吸收更多能量。

②对于短圆柱 WEC,其横荡方向运动对输出功率的影响比垂荡方向运动更显著。在设计短圆柱 WEC 时,可着重考虑其在横荡方向的运动性能。

③内置 PTO 式 WEC 的优化结果:内置球横荡运动的固有频率与入射波频率始终一致,以内置球横荡运动与其他运动的共振为优化方向。内置 PTO 式 WEC 有两种不同的共振模式,低频时内置球横荡方向运动与外壳垂荡方向运动的共振是造成运动幅值和输出功率峰值的主要原因。3 种外壳形状对系统的共振模式影响不大,但对具体的频率值有细微影响。

### 参考文献:

- [1] Kester Gunn, Clym Stock-Williams. Quantifying the global wave power resource [J]. Renewable Energy, 2012, 44: 296-304.
- [2] N Y Sergiienko, A Rafiee, B S Cazzolato, et al. Feasibility study of the three-tether axisymmetric wave energy converter [J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 221-233.
- [3] M Folley, R Curran, T Whittaker. Comparison of LIMPET contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions [J]. Ocean Engineering, 2005, 33(8): 1056-1069.
- [4] 陈兵, 杨宗宇, Tom Bruce. 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.
- [5] 郑明月, 杨金明, 林凯东, 等. 双自由度波浪发电系统的最大功率跟踪控制 [J]. 可再生能源, 2017, 35(5): 778-783.
- [6] 柴辉, 刘野, 张继明, 等. 基于海洋资料浮标的单摆式波浪能发电装置仿真模型研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(9): 1398-1403.
- [7] 叶寅, 游亚戈, 王文胜, 等. 鸭式波浪能装置能量转换系统力学模型优化 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 15-19.
- [8] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式波浪能发电装置发电系统研究 [J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1422-1426.
- [9] 张亮, 国威, 王树齐. 一种点吸式波浪能装置水动力性能优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 117-121.
- [10] 孙科, 解光慈, 周斌珍. 波能装置浮子选型及水动力性



- 能分析[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(1):8-14.
- [11] 刘延俊,王伟,陈志,等.波浪能发电装置浮体形状参数对俘能性能影响[J].山东大学学报(工学版),2021:1-9.
- [12] Lixian Wang,Hui Tang,Yanhua Wu. On a submerged wave energy converter with snap-through power take-off[J].Applied Ocean Research,2018,80:24-36.
- [13] J Cordonnier,F Gorintin,A De Cagny,et al. SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter[J].Renewable Energy,2015,80:40-52.
- [14] Zhongfei Chen, Binzhen Zhou, Liang Zhang,et al. Experimental and numerical study on a novel dual-resonance wave energy converter with a built-in power take-off system[J].Energy,2018,165:1008-1020.
- [15] Zhongfei Chen, Binzhen Zhou, Liang Zhang, et al. Performance evaluation of a dual resonance wave-energy converter in irregular waves [J].Applied Ocean Research,2018,77:78-88.

## Performance analysis of multi-degree-of-freedom built-in PTO wave energy converter with different shapes

Xie Huimei<sup>1,2</sup>, Meng Fantai<sup>1,2</sup>, Xu Qianlong<sup>1,2</sup>, Wang Shangming<sup>1,2</sup>, Xie Bin<sup>1</sup>, Li Ye<sup>1,2</sup>

(1.School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.State Key Laboratory of Ocean Engineering, Deepwater Towing Tank, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper investigated the relationship between the shape-dependent motion characteristics and power capability of three built-in PTO wave energy converters (WEC) with multi degrees of freedom. Based on the potential theory, a multi-degree-of-freedom frequency domain motion of equation was established with optimum PTO configuration, and the relationship between motion characteristic and the shapes of the WECs was studied by using modal analysis. The sensitivity analysis on the three shapes, including sphere, short cylinder and tall cylinder, shows that the tall cylindrical WEC can effectively increase the amplitude of low-frequency resonance but the energy capture bandwidth was reduced over the frequency domain of interest, while the short cylindrical WEC and spherical WEC have higher working efficiency in practical use. Furthermore, the built-in PTO converter has two resonance modes at low frequency and high frequency respectively, but the dominant contribution comes from the sway motion at low frequency. Therefore, it is recommended to optimize the sway response of the wave energy converter when the prototypes are designed.

**Key words:** modal analysis; multi degrees of freedom; wave energy converter; built-in PTO; shape optimization; motion characteristic