

WEC—透空式防波堤集成装置能量 转换效率研究

毛艳军, 马小舟

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 166024)

摘 要:基于成本共享理念的波浪能发电装置(WEC)的开发与设计为降低建设成本提供了新的研究思路,应用计算流体力学方法对在透空箱式防波堤前附加垂荡浮子的集成装置进行数值模拟研究,主要研究了流体黏性和非线性 PTO 系统以及浮子形状对此类集成装置能量转换效率的影响。结果表明,此类集成装置可以获得较高的波能捕获宽度比(CWR),最高可达 0.7,可以较好地利用反射波波能。共振区间上受黏性影响较大,相比于线性无黏理论解,CWR 下降明显;实现了 2 种非线性 PTO 系统的模拟,有待于进一步的优化未获得更高的 CWR 值;浮子形状优化效果明显,采用圆底形浮子受黏性影响更小,可以获得更大的 CWR 值。此种集成模型的模拟和研究可以为新型防波堤设计和现有防波堤的改造提供思路和参考。

关键词:波浪能转换装置;防波堤;波能捕获宽度比(CWR);OpenFOAM;重叠网格

中图分类号:P751

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)01-0044-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.01.005

引用格式: MAO Y J, MA X Z. Study on the wave energy conversion efficiency of the device integrated by WEC and permeable breakwater[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(1): 44-52. 毛艳军, 马小舟. WEC—透空式防波堤集成装置能量转换效率研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 44-52.

在可再生能源的开发探索中,波浪能发电装置(Wave Energy Converter, WEC)得到了广泛的研究和应用,但也面临着建设成本较高的问题。针对这一问题,近些年相关学者提出了成本共享的思路,将波浪能发电装置与现有海上结构物集成,一方面可以降低建设成本,另一方面也可以增加装置的稳定性。其中将波浪能发电装置与近岸防波堤进行集成具有较高的可行性和适用性^[1-3],此类集成装置的设计方案可应用于现有防波堤的改造以及新型防波堤的结构概念设计。He 和 Huang^[4]将振荡水柱式波浪能转换(Oscillating Water Column, OWC)装置与浮式防波堤进行集成并进行了实验研究,结果显示装置在一定条件下可以获得较好的能量捕获效率和消波效果。宁德志等^[1]对一个由垂荡浮子式波浪能发电装置(Heave Oscillating Buny, HOB)与有桩柱约束的浮式防波堤组成的集成系统进行了实验研究,在合适的波频范围和 PTO (Power Take Off) 系统阻尼条件下可以获得较高的能量捕获率和较好的消波效果。针对此类形式,赵玄烈等分别针对波浪能发电装置集成于有桩柱约束的浮式防波堤^[2]和波浪能发电装置集成于固定的箱式防波堤^[3]两种不同的集成方式,进行了基于线性势流理论的频域分析。前一种集成方式采用对称结构,存在极限波能捕获宽度比 0.5。后一种集成方式是将浮子作为附属结构装配在固定的透空箱式防波堤前,有很好的适

收稿日期:2019-05-15

资助项目:国家重点研发计划项目——海洋环境安全保障—海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究(2017YFC1404200)

作者简介:毛艳军(1994-),男,硕士研究生,主要从事应用 CFD 方法进行港口海岸、海洋工程等方面波浪对结构物作用方面研究。

E-mail: myj@mail.dlut.edu.cn

* **通讯作者:**马小舟(1977-),男,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事近岸波浪非线性变形方面研究。E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

(王佳实 编辑)

用性和可扩展性。同时,理论分析显示其可以很好地利用反射波能量,波能捕获宽度比可达 0.8 甚至更高,因此后者具有更为优异的表现。然而上述理论研究是基于线性势流理论进行,波浪非线性、流体粘性和流动分离的影响均未考虑,且仅能够考虑简化为线性阻尼模型的 PTO 系统。在实际海况下,波浪的非线性、流体的黏性和流体分离对于共振浮子的运动响应往往具有很强的影响,且波浪能发电装置的 PTO 系统的阻尼模型也不仅局限于线性的形式^[5],其中液压型 PTO 也是常用形式之一,液压型 PTO 采用高压和低压蓄压器,可以光滑能量输出,其 PTO 阻尼力形式上在半周期近似滑动摩擦阻尼力^[6],因此可以用 Coulomb 阻尼模型近似液压型 PTO 阻尼模型。针对以上不足,本文应用基于黏性流的计算流体力学软件 OpenFOAM 对该模型进行模拟研究,研究线性 PTO 阻尼模型 $F_{pto} = C_{pto} \cdot V$ 约束下装置的能量转换性能和消波性能。并与理论分析结果进行对比,分析在共振区间上黏性耗散带来的影响。同时也应用 2 种二次平方型,和 Coulomb 阻尼型非线性的 PTO 阻尼模型,研究对比非线性 PTO 装置与线性 PTO 的区别和联系。同时为改进此类集成装置的能量捕获效率,针对浮子形状进行优化。从而得以获得更高的能量捕获效率。

1 理论基础

1.1 控制方程

本文模型采用 OpenFOAM 中的 overInterDyMFOam 求解器求解,流体计算采用有限体积法求解不可压缩的两相流 N-S 方程,不可压缩连续性方程及动量方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\rho (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \mathbf{u}] = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{S} + \rho \mathbf{f}_b + s \rho \mathbf{u}, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为流体的速度; $\mathbf{u}_g$ 为动网格更新时的网格修正速度; ρ 为两相流的混合密度; p 为压力; $\mathbf{S}$ 为黏性应力张量; $\mathbf{f}_b$ 为有重力作用的体积力和表面张力项; $s \rho \mathbf{u}$ 为源项,可用于阻尼区消波,其中 s 为阻尼系数。

采用 VOF 方法处理两相流界面,VOF 方法的原理是定义体积分数 $\alpha[0,1]$,其中 0 代表空气相,1 代表水相,两者之间的界面采用 0 到 1 的过渡值来表示,从而实现界面的捕捉。造波方法采用速度入口造波,通过给定速度和体积分数的入口边界条件而实现数值造波。消波方法采用阻尼区消波的方式,通过在动量方程中添加阻尼项,在消波区内设置阻尼系数大于零,从而实现数值消波。

1.2 重叠网格

重叠网格的基本原理是将不同的部件分别画在不同的网格上,然后融合到一个背景网格上,其中各部件的网格与背景之间网格有重叠区域,利用这些重叠区域网格,通过插值进行信息的双向传递,从而在重叠网格的基础上实现计算域的更新。重叠网格主要包括计算单元(calculated),插值单元(interpolated),洞单元(hole)三类网格(图 1):洞单元网格作为图上黑色网格,为结构内部网格,在计算时间步内的物理量值冻结,不随计算更新;插值单元网格作为图上中灰色网格,为信息传递的主要部分,在子部件和背景网格上分别有一圈插值单元用于双向信息的传递和插值;计算单元为正常参与流场控制方程计算部分的网格,图上灰色网格。可参考沈志荣^[7]具体网格插值方法和实现。

1.3 PTO 系统

PTO 阻尼系统采用线性阻尼模型和非线性 Coulomb 阻尼模型。线性阻尼系统可表示为

$$F_{pto} = \lambda_{pto} V_i, \quad (3)$$

式中, λ_{pto} 为线性阻尼系数,其中最优阻尼系数($\lambda_{optimal}$)可根据势流理论频域下的解析解获得。 $\lambda_{optimal}$ 的表达式为

$$\lambda_{\text{optimal}} = \sqrt{(K/\omega - \omega(M + \mu))^2 + \lambda^2}, \quad (4)$$

式中, M 为质量, μ 为附加质量力系数, λ 为辐射阻尼, K 为水静力回复刚度。

非线性 Coulomb 阻尼模型可表示为

$$F_{\text{pto}} = C_{\text{pto}} \text{sign}(\dot{X}), \quad (5)$$

式中, Coulomb 阻尼模型因为其阶跃特性容易引起数值振荡, 因此可以做近似的线性化处理如下:

$$F_{\text{pto}} = \min(G_{\text{pto}} |\dot{X}|, C_{\text{pto}}) \text{sign}(\dot{X}), \quad (6)$$

式中, C_{pto} 为预设 Coulomb 阻尼型 PTO 阻尼力, G_{pto} 为线性化位置 PTO 阻尼系数。

PTO 阻尼系统采用线性阻尼模型, 非线性 Coulomb 阻尼模型和线性化处理的 Coulomb 阻尼模型三种阻尼模型如图 2 所示。

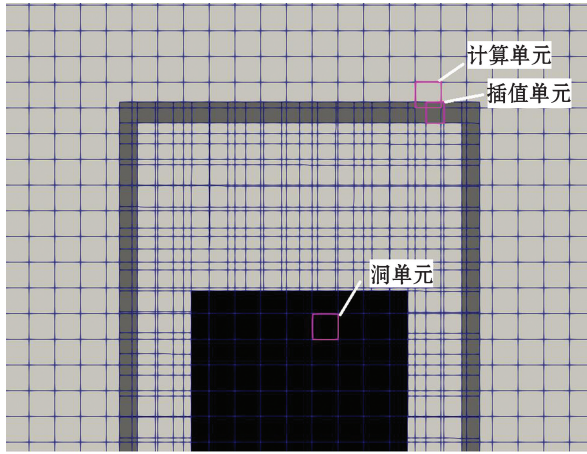


图 1 重叠网格

Fig.1 A diagram of the overlapping grid

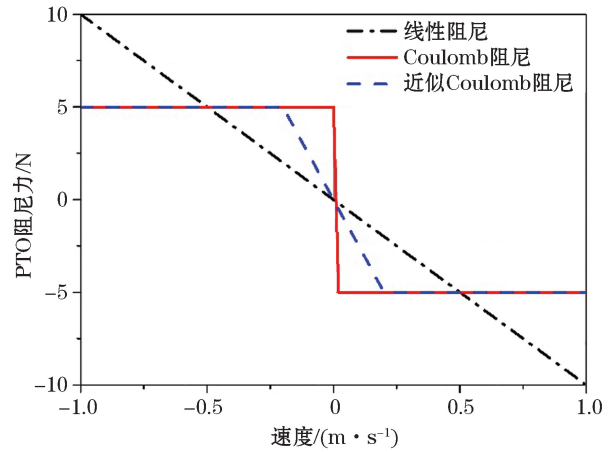


图 2 线性 PTO 阻尼模型, Coulomb 阻尼模型和线性化的 Coulomb 阻尼模型

Fig.2 Damping models of linear PTO, Coulomb and linearized Coulomb

2 数值水槽构建和模型验证

2.1 模型构建

参考赵玄烈等^[3]给出的结构参数构建模型, 模型基本布置如图 3, 水深 $h = 10$ m, 浮子宽度 $a_1 = 2$ m, 后方固定式防波堤宽度 $a_2 = 6$ m, 浮子与防波堤间距离 $D = 1$ m, 浮子吃水深度 $d_1 = 1$ m, 防波堤吃水深度 $d_2 = 2.5$ m。此模型的模拟工作难点在于动网格的处理方法, 因附属浮子与固定箱式防波堤的距离较近, 且共振时浮子运动响应较大。OpenFOAM 中传统的随体网格变形不适用于此类在靠近固定边界处的局部网格变形过大的模拟工作。OpenFOAM-v1906 版本中的重叠网格的功能, 可适用于海洋工程浮式结构物的模拟工作, 因此本文应用此种网格更新方式。同时可以利用 OpenFOAM-v1906 中的速度入口造波边界进行数值波浪水槽的构建。入口 U 边界条件为 waveVelocity, 相体积分数边界条件为 waveAlpha, 压力边界条件为 fixedFluxPressure。重叠网格区域边界类型为 overset。浮子边界为固壁边界条件。自由液面和重叠网格区域进行如图 4 的加密处理以满足计算精度要求, 网格总数为 136 050, 近壁面网格大小为 0.1 m。时间步长控制采用自动调整时间步长, 最大库朗数为 0.5。

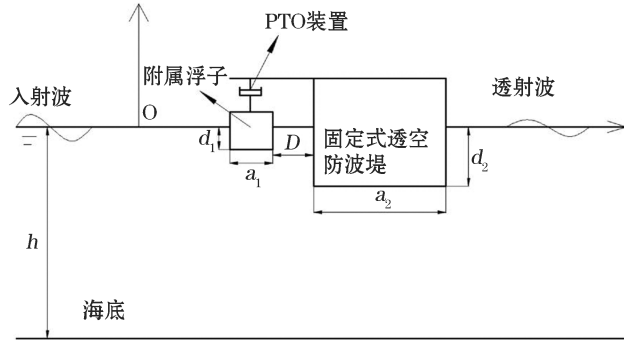


图3 附属结构式集成装置
Fig.3 Layout of the integrated device
with a subordinate structure

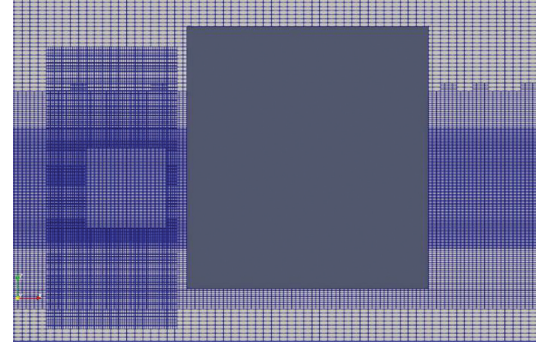


图4 附属结构形式装置附近重叠网格划分情况
Fig.4 Division of the overlapping grid around the
integrated device with a subordinate structure

2.2 模型验证

本节验证模型选取一在波浪作用下垂荡方向无约束运动的浮式方箱进行模拟,背景网格和重叠网格如图5所示,近壁面网格大小0.02 m,模型几何参数详以及数值造波的精度验证详见已发表工作^[8]。本节应用重叠网格方法进行了浮子在周期 $T=1.79$ s,入射波高 $H=0.2$ m下的运动响应模拟,并与Isaacson的实验的RAO值^[9]和应用随体变形网格方法模拟的结果^[8]进行对比。垂荡方向运动响应历时线如图6,表明应用重叠网格方法进行浮式结构物计算可以获得稳定且可靠的计算结果,进而验证重叠网格方法的有效性。

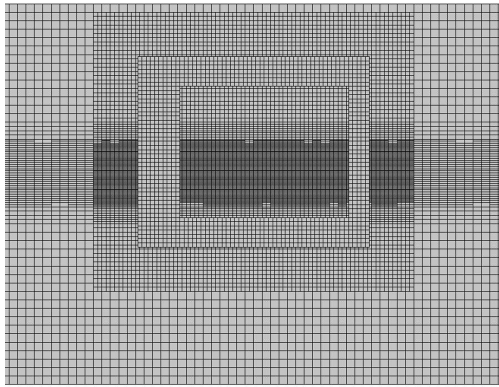


图5 方箱周围重叠网格网格划分
Fig.5 Division of the overlapping grid
around the permeable box

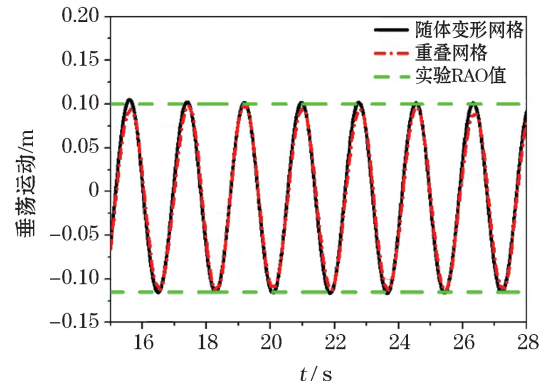


图6 重叠网格法模拟的桩式约束方箱垂荡方向运动
响应时程与随体变形网格以及实验值的对比

Fig.6 The response time history of heave motion of the floating pile-restraint box simulated by overlapping grid method comparing with those obtained by body deformation grid method and by experiments

3 PTO 阻尼模型与浮子形状优化

3.1 线性 PTO 阻尼模型

赵玄烈等^[3]文中线性 PTO 阻尼力选取为单个浮子在线性频域解下的理论最优 PTO 阻尼系数,而在考虑黏性的 CFD 模拟中,该最优阻尼系数可能不为最优值,且集成系统结构的非对称性也使得附加质量和辐射阻尼发生变化,也导致了集成系统的最优阻尼系数不再与单一浮子相同。因此本节采用线性 PTO 模型,从频域下的理论最优阻尼系数出发,研究黏性流下此结构的最优 PTO 阻尼的特性。结合理论分析结果,选取模拟工况: $T=4.74, 4.45, 3.88, 3.66, 3.45, 3.30, 3.18, 3.04, 2.84, 2.57, 2.49$ 和 2.39 s,对应的无量纲

波数(kh)的范围为 $7.073 \sim 1.882$, 水深和波高设为恒定值($h=10$ m, $H_i=0.5$ m)进行模拟研究。

图 7 为各波况下附加浮子在理论最优 PTO 阻尼 λ_{optimal} 作用下的能量捕获宽度比(Capture Width Ratio, CWR)与理论分析结果的对比。研究发现相对比于单浮子结构形式^[8]约 0.30 的最大 CWR 值, 能量捕获宽度比明显提升, 其最大 CWR 值可达 0.7。但是相比于理论分析结果, 在共振区间 $kh=2.0 \sim 5.0$ 上, CWR 值明显下降, 理论最大值接近 1.0, 模拟值相较于理论值下降约 30%, 可以明显看到黏性效应对于此类装置能量捕获效率的影响。对于 $kh=6.089$ 97 和 $kh=7.07$ 两个短波波况, CWR 的极小值和第 2 个峰值也能够被有效地模拟获得。选取 $kh=3.72$ 波况, 对 PTO 阻尼系数进行了放缩, 选取放缩系数 0.75, 1.25, 1.5。模拟发现, $1.25\lambda_{\text{optimal}}$ 和 $1.5\lambda_{\text{optimal}}$ 的 CWR 值都比 $1.0\lambda_{\text{optimal}}$ 要略大, 关于在考虑黏性影响下理论最有阻尼值的讨论详见文献[8]。图 8, 图 9 是反射系数(K_r)和透射系数(K_t)与解析结果的对比。反射系数在共振位置附近出现了下降, 在共振位置 $kh=3.72$ 反射系数达到极小值, 意味着反射波能被吸收。 $kh=6.09$ 波况反射系数偏小, 因为在模拟中此波况下波浪仍然可以引起浮子的振荡。由图 7 可见, $kh=6$ 时 CWR 不完全是 0, 可能是由于非线性原因, 导致波浪并不是完全的满足了此处的 kh 值, 从而能量也没有被完全反射。

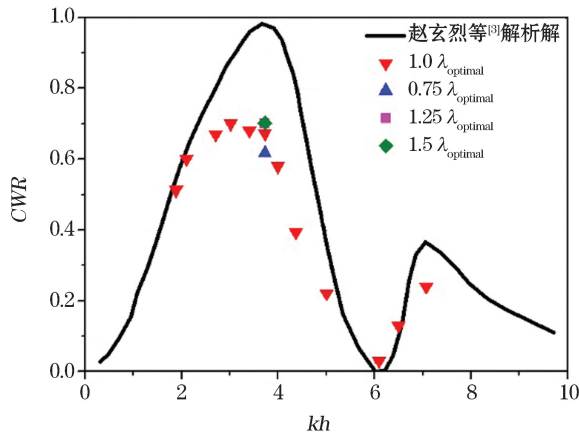


图 7 1.0 倍最优 PTO 阻尼约束下 CWR 值与解析解的对比值的对比

Fig.7 Comparison between the CWR values and the analytical solutions under the constraint of 1.0 times optimal PTO damping

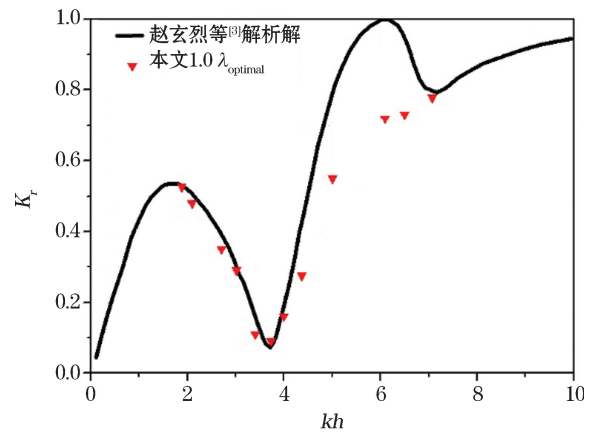


图 8 1.0 倍最优 PTO 阻尼约束下反射系数与解析解的对比

Fig.8 Comparison between the reflection coefficient (K_r), and the analytical solution under the constraint of 1.0 times optimal PTO damping

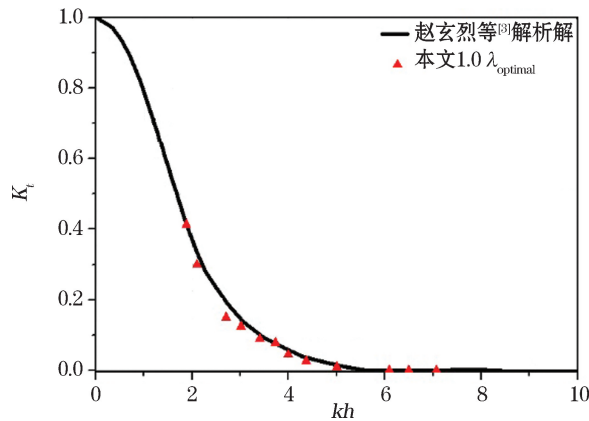


图 9 1.0 倍最优 PTO 阻尼约束下透射系数与解析解的对比

Fig.9 The comparison between the transmission coefficient K_t and the analytical solution under the constraint of 1.0 times optimal PTO damping

3.2 非线性 PTO 阻尼模型

上节所述线性 PTO 模型在微幅低速运动中可以获得较好的近似效果,但当非线性较强,运动响应较大时更适合采用非线性 PTO 模型,可选用二次非线性阻尼模型。液压型 PTO 装置因为有光滑能量输出的效果,常用于 WEC 装置的 PTO 系统中,其中 Coulomb 阻尼模型可作为液压型 PTO 的有效近似模型。因此本节选用二次非线性阻尼模型和 Coulomb 阻尼模型作为集成系统的 PTO 装置进行模拟,其中在原型比尺的计算中采用理想的 Coulomb 阻尼模型未发现明显的数值振荡,可以获得稳定的计算结果,原因可能为原型比尺中模型的流体阻尼和静水回复力可以抵消数值振荡。阻尼系数取 $\lambda_{quadratic}=\lambda_{linear},\lambda_{coulomb}=\lambda_{linear}V_{max}$,其中 λ_{linear} 对应线性 PTO 系统在 $kh=3.01$ 时的理论最优阻尼 $\lambda_{linear}=5\,720.91\text{ kg/s}$ 。 $V_{max}=0.48\text{ m/s}$ 为线性 PTO 作用下浮子的最大运动速度。如图 10 为附加浮子在 3 种 PTO 模型作用下,在共振波况 $T=3.663\text{ s}$, $H=0.5\text{ m}$ 下的运动响应的对比。图 11 为 3 种不同 PTO 模型的 PTO 阻尼力的对比,可以发现,因阻尼系数选取相同,模拟速度低于 1.0 m/s ,所以二次非线性阻尼型 PTO 系统的运动响应比线性 PTO 装置运动响应偏大。PTO 阻尼力偏小,并且在 PTO 力为 0 kg/s 的附近表现出二次抛物线形的 PTO 力的时程,证明二次非线性阻尼模型可以很好地应用于 PTO 系统的模拟。Coulomb 阻尼模型因其在半周期上保持恒定最大 PTO 力,因此其约束的浮子运动响应最小。线性阻尼模型,Coulomb 阻尼模型以及二次非线性 PTO 阻尼模型下集成装置的能量捕获宽度比 CWR 结果如表 1 所示。可以看到在此种条件下,线性 PTO 阻尼模型获得了最大的 CWR 值。这里其他两种非线性 PTO 阻尼模型表现较差。但是也有待于进一步的优化 PTO 阻尼系数的选取,以获得更大的 CWR 值。

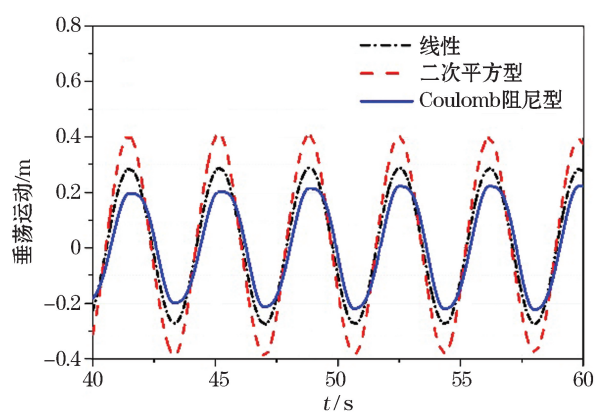


图 10 3 种不同形式 PTO 阻尼约束下的浮子垂荡运动响应

Fig.10 The heave motion response of the floater under the restraints of three kinds of PTO damping

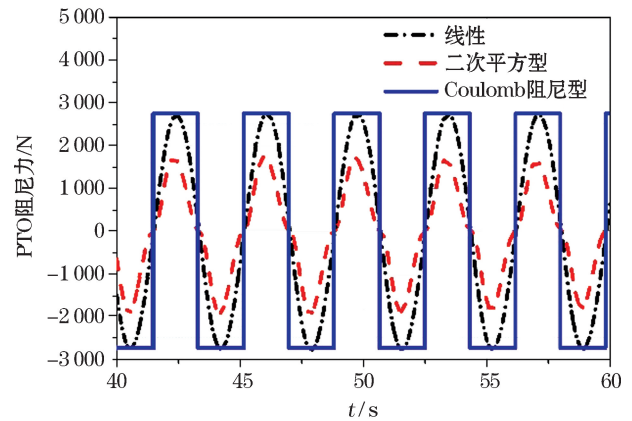


图 11 3 种不同形式 PTO 阻尼力的时程

Fig.11 Time history of the three kinds of PTO damping forces

表 1 3 种阻尼模型下装置的 CWR 值

Table 1 The CWR values of the device under three kinds of PTO pumping model

周期/s	PTO 阻尼模型	CWR
3.663	线性阻尼模型	0.710
	Coulomb 阻尼模型	0.663
	二次非线性平方阻尼模型	0.616

3.3 浮子形状优化

为进一步优化装置的能量捕获效率和消波性能,浮子形状是影响装置能量捕获宽度比的重要参数之一^[10],因此本节主要就附属结构中,前方浮子的形状进行优化。由毛艳军等^[8]研究可知,方箱型浮子在底部迎浪测和背浪测两个直角处产生了明显的漩涡,从而导致流场粘性效应的增加,因此本节选用 2 种避免这种结构形式突变的浮子形状,修圆角形式和圆底形式。模拟后,由图 12 可以看到三者的速度矢量图,方箱形浮子在底部两个拐角处产生了明显的漩涡,漩涡从边壁上分离向外发展并逐渐耗散。修圆角形浮子底部也有漩涡产生,但是可以看到漩涡的尺度较小,且并未脱离浮子的壁面。圆底形浮子底部流场则光滑很多,流体沿着底部壁面发展,对整个流场的扰动较小,从而也对应流体粘性和湍流耗散影响较小。

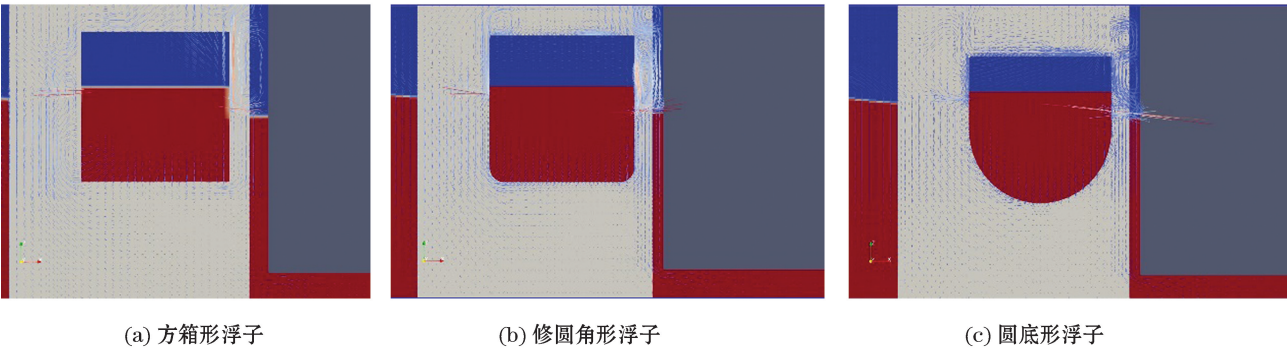


图 12 3 种形状浮子周围的流场变化情况

Fig.12 The flow field variations around the floaters with three kinds of shapes

3 种形状浮子的运动时程如图 13 所示,可以看到由于结构水线面宽度相同,排水体积较为接近。从运动响应可以看出,修圆角的浮子和方箱形浮子的运动相位基本上一致,运动响应幅值算子(Response Amplitude Operator, RAO)略微增大。圆底形的浮子在运动相位上与方箱形浮子产生了一定的相位偏移,同时 RAO 也有所增加。如表 2 所示,为 3 种浮子形状算例的透射系数(K_t),反射系数(K_r),运动响应幅值算子(RAO),捕获宽度比(CWR)模拟性结果对比与方箱形浮子对比,修圆角形浮子和圆底形浮子可以保持透射系数基本上不变,反射系数下降,圆底形浮子的反射系数最小,对应的运动响应和能量捕获宽度比都是最大的,其中圆底形浮子的 CWR 达到 0.808,相比方箱形浮子,提升了近 0.1,效率提升明显。

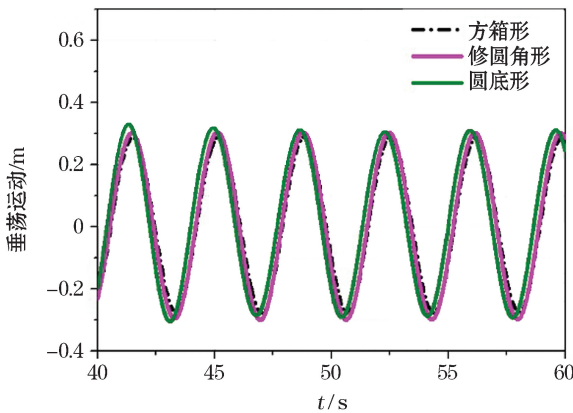


图 13 3 种形状浮子的垂荡运动响应时程

Fig.13 The time history of the heave motion response of the floaters with three kinds of shapes

表 2 3 种形状浮子的模拟结果对比

Table 2 Comparison of the results (K_t , K_r , RAO and CWR) simulated for the floaters with three kinds of shapes

算 例	参 数			
	K_t	K_r	RAO	CWR
方箱形	0.124 330	0.320	1.126	0.710
修圆角形	0.124 330	0.305	1.202	0.798
圆底形	0.124 335	0.298	1.205	0.808

4 结 论

应用 OpenFOAM 进行了附属结构形式的波浪能与防波堤的集成系统的数值模拟工作,分析了考虑黏性和流动分离影响下集成装置的运动响应,能量捕获宽度比和消波性能。通过 3 种不同形式 PTO 系统的对比,研究了 PTO 阻尼系统对集成装置的影响。进一步优化浮子形状,研究了浮子形状对装置能量捕获效率的影响。研究发现:

1) 此类结构在考虑黏性影响的模拟中仍可以获得较高的能量捕获宽度比, CWR 值可达 0.7。反射波能量得到很好地利用,反射系数(K_r)在共振区间上降低,同时透射系数(K_t)在 $kh > 1.8$ 的较宽波频范围内都可以维持在 0.5 以下,保证良好的消波效果。

2) 非线性 PTO 的开发和应用,进一步扩展了波浪能发电装置的 PTO 模拟工作。2 种 PTO 阻尼模型可以维持较好的数值稳定性,在本文选取的阻尼系数条件下,非线性 PTO 阻尼模型作用的浮子能量捕获宽度比小于线性 PTO 阻尼模型。

3) 形状参数的优化显示圆底形浮子可以减小流体黏性和流动分离的影响,从而可以进一步提高装置的能量捕获效率。

参考文献 (References):

- [1] NING D Z, ZHAO X L, GÖTEMAN M L, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: an experimental study[J]. *Renewable Energy*, 2016, 95: 531-541.
- [2] ZHAO X L, NING D Z, ZHANG C W, et al. Hydrodynamic investigation of an oscillating buoy wave energy converter integrated into a pile-restrained floating breakwater[J]. *Energies*, 2017, 10(5): 712.
- [3] ZHAO X L, NING D Z, ZHANG C W, et al. Analytical study on an oscillating buoy wave energy converter integrated into a fixed box-type breakwater[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017: 1-9.
- [4] HE F, HUANG Z H. Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters: an experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 618-626.
- [5] SJÖKVIST L. Wave loads and peak forces on moored wave energy devices in tsunamis and extreme waves[D]. Uppsala, Sweden: Acta Universitatis Upsaliensis, 2017.
- [6] SO R, CASEY S, KANNER S, et al. PTO-Sim: development of a power take off modeling tool for ocean wave energy conversion[C]// 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver: IEEE, 2015: 1-5.
- [7] SHEN Z R. Development of overset grid technique for hull-propeller-rudder interactions[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [8] MAO Y J, MA Z, CHENG Y, et al. Effect of the PTO damping force on the wave damping performance and wave capture efficiency of a WEC-type breakwater[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(4): 45-53. 毛艳军, 马哲, 程勇, 等. 动力输出系统(PTO)对集成波能转换装置式防波堤消波性能及波能捕获率影响研究[J]. *海洋工程*, 2019, 37(4): 45-53.
- [9] ISAACSON M, BALDWIN J, BHAT S, et al. Wave propagation past a pile-restrained floating breakwater[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1998, 8(4): 265-269.
- [10] CHEN Z F, ZHOU B Z, ZHANG L, et al. Geometrical evaluation on the viscous effect of point-absorber wave-energy converters[J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(4): 443-452.

Study on Wave Energy Conversion Efficiency of the Device Integrated by WEC and Permeable Breakwater

MAO Yan-jun, MA Xiao-zhou

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The design and development of wave energy converter devices (WEC) based on the concept of cost-share have provided a new research idea for reducing the construction cost. In this paper, an integrated device constructed by adding floating floaters in front of a permeable box breakwater is numerically simulated by means of computational fluid dynamic method (CFD), and the fluid viscosity, the nonlinear PTO system and the influence of the floater shape on the wave energy conversion efficiency of this device are studied. The results show that this kind of integrated device can obtain higher wave energy capture width ratio (CWR), with the highest one being 0.7, indicating that the energy of the reflective waves can be utilized better. At the resonance interval, the affection of the fluid viscosity is great so that the *CWR* goes down significantly, compared with the linear inviscid theoretical solution. Two types of nonlinear PTO systems are simulated in the study, but further optimal work is needed in order to obtain higher *CWR* values. The effect of the floater shape optimization is obvious. Higher *CWR* values can be obtained when floaters with a round bottom are adopted, because of small affection of fluid viscosity. This study can provide a reference for designing new breakwaters and/or reforming the existing breakwaters.

Key words: wave energy converter device; breakwater; wave energy capture width ratio (CWR); Open-FOAM; overlapping grid

Received: September 25, 2019