



基于 Savonius 桨叶的浮式防波堤 捕能消波性研究

刘嘉虎, 刘祚时, 龚 凯

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对海浪运动产生的巨大波浪能, 设计一种 Savonius 桨叶与双浮筒式防波堤组合的波浪能转换模型。为了研究该新型防波堤的捕能性能和消波性能, 对模型结构参数优化设计, 基于试验数据进行插值拟合获得模型的最佳入水深度, 再对模型在不同入射波波高和不同波浪周期条件下进行组合测试, 对测得的捕获功率、透射系数等数据进行分析。基于黏性流体理论, 利用 STAR-CCM+ 软件进行数值模拟, 并与物理试验结果进行对比验证。结果表明, 该模型的捕能性能处于最佳区间时, 消波性能最佳, 说明该模型成功地进行了波浪能的捕获和转化, 模拟值与试验值的差异较小, 变化趋势基本一致。

关键词: 浮式防波堤; Savonius 桨叶; 捕能; 消波性能

中图分类号: U 656.3; TK 730.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0014-07

Study on energy capturing and wave elimination performance of floating breakwater based on Savonius rotor

LIU Jia-hu, LIU Zuo-shi, GONG Kai

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Aiming at the huge wave energy generated by wave motion, we design a wave energy conversion model composed of Savonius rotor and a double-buoy floating breakwater. In order to study the energy capturing and wave elimination performance of the new type of breakwater, we optimize the parameters of the model structure, obtain the optimal water penetration depth of the model by data interpolation on the basis of the experimental data, then test the model under different incident wave heights and different wave periods, analyze the measured capture power coefficient, transmission coefficient and other data, apply the STAR-CCM+ software for numerical simulation on the basis of the theory of viscous fluids, and compare with the physical experiment results for verification. The results show that the model has the best wave elimination performance when the energy capture performance of the model is in the best range, which means that the model successfully captures and transforms wave energy. The variation trend of the simulated data is basically consistent with the experimental data, and the differences of data are within the error allowable range.

Keywords: floating breakwater; Savonius rotor; energy capturing; wave elimination performance

浮式防波堤具有抵御破坏力大的深远海波浪、海洋建筑和港口停靠的船只等特点。因其建设成本低、建造周期短, 可以针对不同海域进行组合

收稿日期: 2021-07-21

作者简介: 刘嘉虎(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋机电装备。

通讯作者: 刘祚时(1963—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为机电设备自动化、智能机器人技术等。E-mail: liuzuoshi@163.com

设计等优点使其受到广泛的关注^[1]。

Khan 等^[2]首次将 Savonius 桨叶(简称“S 形桨叶”)用于水轮机水槽试验, 结果表明双级转子 S 形水轮机具有更好的捕能性; Talukdar 等^[3]通过试验得出 S 形桨叶水轮机的最优捕能结构参数(双叶片, 重叠率 0.15, 曲率 1, 叶尖速比 0.9); Huang 等^[4]设计 3 个模型, 分别对其消波捕能性和系泊力进行对比分析, 结果表明 S 形桨叶与双浮筒浮式防波堤的组合, 显著提升了消波性能; 邹志利等^[5]对作用于浮式防波堤的非线性力进行试验研究, 在不同波浪周期、波高、波型和防波堤吃水等参数下进行对比分析; 刘崇期等^[6]针对具有波浪能转换功能的浮式防波堤性能进行评估, 试验表明浮子之间的相互作用是正面的且有助于能量提取; 侯勇等^[7]改变相对波高、相对堤宽和相对水深等参数对浮式防波堤进行物理模型试验, 并将试验数据进行拟合得出计算公式; 谢敏捷^[8]进行波流耦合状态下 S 形桨叶性能研究, 结果表明波浪的周期与桨叶转动周期满足一定的倍数关系时, 桨叶与波浪间存在耦合作用, 使桨叶的动转矩系数和功率系数数值大幅提升; 鲍灵杰等^[9]针对并列与垂直布置的 S 形桨叶浮式防波堤进行研究, 试验表明桨叶并列布置的消波性能比垂直布置更为优越; 吴映江等^[10]利用数值仿真和试验相结合的方法研究二阶 S 形桨叶水动力特性, 提出一种设置可调开口弹片阀的桨叶, 研究重叠率、相对入水深度对桨叶捕能效率的影响。

本文采用双浮筒与二级 S 形桨叶的组合作为捕能消波一体化装置, 在分析其最佳入水深度情况下, 通过物理试验与 STAR-CCM+ 软件数值模拟相结合的方法, 在不同入射波波高及不同周期的波况下, 对该防波堤的捕能性能和消波性能进行分析和对比, 其数值模拟结果与物理试验结果得到相互验证。

1 物理试验

1.1 试验模型设置

S 形桨叶见图 1, 模型的主要参数为: 叶轮端盘直径 $D_d=0.40\text{ m}$, 叶轮直径 $D=0.35\text{ m}$, 叶片直径 $d=0.20\text{ m}$, 叶片间隙 $e=0.05\text{ m}$, 高度 $H=0.60\text{ m}$ 。为充分发挥桨叶性能, 本文根据测得的理想波况选取大小适中的桨叶, 并参考文献[2]和[3]的试验结论, 选取重叠率为 0.15、曲率为 1 的双叶片二级 S 形桨叶进行设计。模型的桨叶采用水平放置, 受试验场地限制, 桨叶为单排 3 个, 模型整体高度均为 1.8 m。

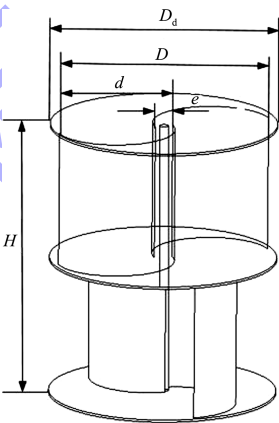


图 1 S 形桨叶

选择 S 形桨叶与高密度聚乙烯双浮筒浮式防波堤的组合, 在海洋工况下能够耐受各类腐蚀及波浪冲击, 实现较长时间的使用寿命。单根浮筒直径 0.33 m、长度 3 m、质量为 40 kg。两根浮筒中心距 0.8 m。将 S 形桨叶悬挂于双浮筒之间, 通过调节扁铁可以快速改变入水深度。在桨叶组右侧安装同步轮, 通过同步带传送至安装于浮筒右侧的动态扭矩传感器, 从而测得实时扭矩以及转速。防波堤三维图见图 2。

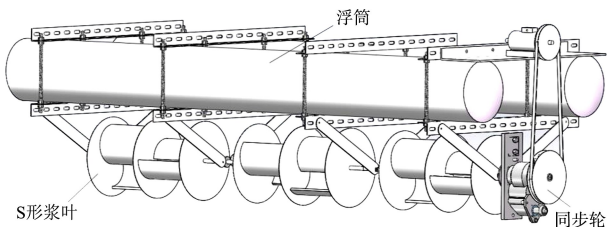


图 2 防波堤三维图

1.2 试验环境设置

试验布置见图 3。试验水槽长 70 m、宽 3.75 m、水深 1.8 m。水槽前端配备了摇板式造波机，可产生重复稳定的波形，水槽后端设置方形消波池以

减小反射波。防波堤前后各布置 2 个波高仪用于监测入射波以及透射波波高。锚链系泊采用非交叉系泊式，整体处于平衡位置。

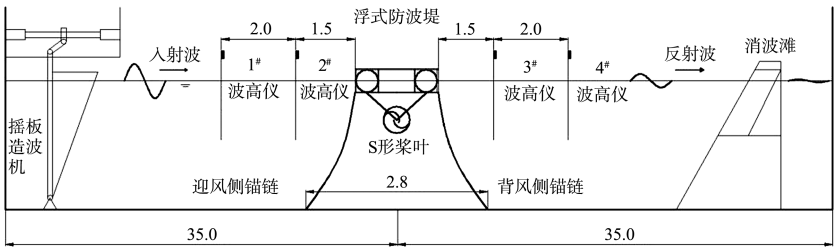


图 3 试验布置 (单位: m)

1.3 试验参数设置

实际情况中，波浪的状态为瞬时变化，总体呈正态分布，考虑到防波堤难以根据波浪的瞬时变化来不断调节自身最佳入水深度，而试验最终目的是确定该防波堤在特定海域波浪能转化的可行性，因此取理想环境中波浪正态分布的中间区域进行试验，找到最佳波浪状态，设计合适的桨叶尺寸并确定在该波浪状态下的最佳入水深度。1#、2#波高仪分别在造波机不同推板周期和不同推板位移时测得的数据对比见图 4(图例中的 10、15、20、25 cm 指推板位移)。当波浪在波高 0.17 m、周期 1.6 s 时，波形完整、波浪无破碎且波陡合适。分别将桨叶放在该波况的不同入水深度进行测试，对测得的数据进行插值拟合，桨叶入水深度 D_a 与平均转速 N 的拟合曲线见图 5。当 D_a 在 0.2~0.3 m 时，桨叶单个叶片完全浸入水中，桨叶在整个周期内都能够充分转动，此时模型位于最佳捕能效率区间，得到理想波况下的最佳入水深度为 0.26 m。试验共有两组变量，分别为入射波波高 H_i 分别为 0.11、0.14、0.17、0.20 m；周期 T 分别为 1.4、1.6、1.8、2.0 s，将试验模型放置于最佳入水深度，分别在不同波高与不同周期下进行组合测试。

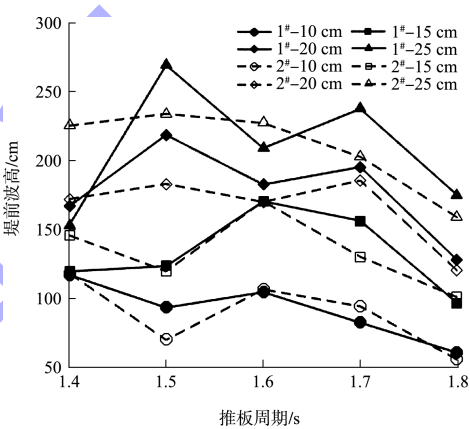


图 4 堤前波浪变化对比

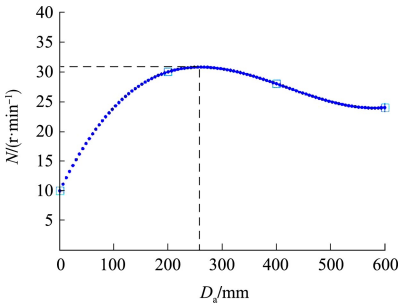


图 5 模型在不同入水深度的转速

1.4 试验结果分析

模型在不同入射波波高与不同波浪周期条件下的物理试验数据见表 1。模型的捕获功率为扭矩与转速的乘积，捕能效率则为捕获功率与波浪功率的比值，捕能效率越高捕能性越好。波浪透射系数是消波性能的重要评价指标，消波波高与入射波波高的比值即为透射系数，透射系数越小，消波性能越好。

表 1 防波堤物理试验数据

入水深度/m	波浪周期/s	入射波波高/m	消波波高/mm	平均扭矩/(N·m)	平均转速/(r·min ⁻¹)	捕获功率/W	波浪功率/W
0.26	1.4	0.11	46.32	1.60	25.4	4.26	29.83
		0.14	58.41	2.53	28.7	7.60	48.32
		0.17	68.82	3.58	31.1	11.66	71.25
		0.20	77.51	4.76	32.7	16.30	98.61
	1.6	0.11	50.52	1.60	23.4	3.92	34.68
		0.14	62.27	2.53	27.3	7.23	56.17
		0.17	74.44	3.58	29.4	11.02	82.83
		0.20	82.89	4.76	31.5	15.70	114.64
	1.8	0.11	53.94	1.60	25.2	4.22	40.37
		0.14	69.01	2.53	27.4	7.26	65.39
		0.17	81.85	3.58	30.6	11.47	96.42
		0.20	89.95	4.76	32.6	16.25	133.45
	2.0	0.11	57.85	1.60	17.9	3.00	46.67
		0.14	75.73	2.53	21.4	5.67	75.60
		0.17	85.39	3.58	24.2	9.07	111.47
		0.20	93.39	4.76	26.0	12.96	154.28

1.4.1 捕能性能分析

试验模型的捕能效率随不同入射波波高和不同波浪周期的变化见图 6。在试验参数范围内，当入射波波高相同时，模型的捕能效率随波浪周期的增大而减小；当波浪周期相同时，模型的捕能效率均随入射波波高的增大而增大。模型在入射波波高 0.2 m、波浪周期 1.4 s 时达到了最大捕能效率 16.5%。入射波波高的增加，对捕能效率的提升具有积极作用，但随着波幅不断增大，波浪出现破碎，影响捕能效率。结合表 1 可知，桨叶在周期为 1.4 s 时达到了最大平均转速 32.7 r/min，尽管桨叶在 1.8 s 时也达到了理想转速，但此时捕能效率远不及 1.4 s 周期，而周期为 2.0 s 时，桨叶平均转速大幅下降，捕能效率也明显下降。

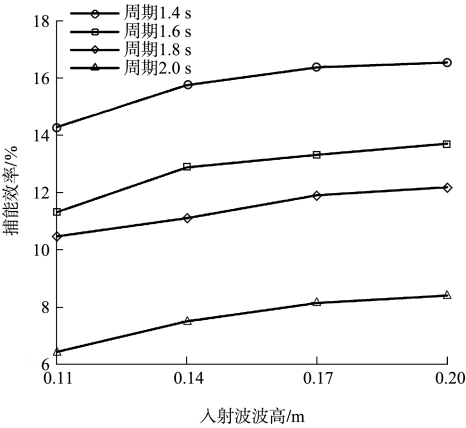


图 6 模型捕能效率变化

1.4.2 消波性能分析

试验模型的透射系数随不同入射波波高和不同波浪周期的变化见图 7。在试验参数范围内，当入射波波高相同时，模型的透射系数随波浪周期的增大而增大，消波性能降低；当波浪周期相同时，模型透射系数的整体趋势随着波高的增加均随波高的增加而下降，消波性能增强，其中在长周期波浪中模型消波性能增强得更加明显。模型的透射系数介于 0.39~0.54，模型在入射波波高为 0.2 m 时，波浪在各个周期内的透射系数均为最低，其中在波浪周期 1.4 s 时达到了最佳消波效果。

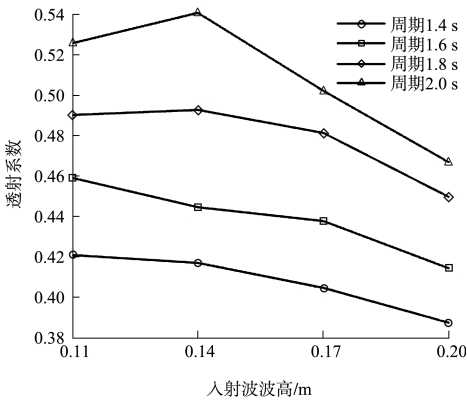


图 7 模型透射系数变化

2 数值模拟试验验证

2.1 数值模型及参数

对试验模型重复部分进行简化，在宽度上按

照 1:3 进行缩小,数值模拟水槽设置为长 40 m、宽 1.25 m、高 3 m、水深 1.8 m,双浮筒直径为 0.33 m、长 1 m、浮筒中心距为 0.8 m、质量为 13.33 kg,浮式防波堤下仅悬挂 1 个 S 形桨叶。通过上述比例缩放,在不影响计算精度的前提下,大幅减小计算域,将计算性能合理分配用以后续优化网格以及细化时间步,提升计算精度。

2.2 数值波浪水槽基础设置

基于黏性流体理论,采用 STAR-CCM+ 软件,对规则波进行数值模拟。根据边界造波法原理及阻尼消波原理,建立 S 形桨叶浮式防波堤的三维数值模型,采用湍流模型、重叠网格技术、六自由度运动模型、VOF (volume of fluid, 流体体积) 自由液面捕捉技术在计算域内进行气液两相流计算透射系数等参数,并监测桨叶捕能性能。

沿坐标系 3 个方向的动量守恒定理为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (3)$$

式中: ρ 为流体的密度; t 为时间; p 为流体压强; μ 为黏度; u 、 v 、 w 为沿 x 、 y 、 z 方向的速度分量; S_u 、 S_v 、 S_w 为边界条件。

RNG (renormalization group, 重整化群) 湍流模型,通过添加 ε 方程考虑涡流对湍流的影响,提升了高速流动的计算准确性^[11],方程如下:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中: ρ 为流体的密度; u_i 为湍流黏度, $u_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$,

其中 C_μ 为经验系数, k 、 ε 为输运方程的基本参数; x_k 为沿 x 方向的湍动能。

在进行 CFD (computational fluid dynamics, 计算流体动力学) 仿真时,运动学的边界条件一般为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \nabla \eta = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5)$$

$$Z = \eta(x, y, t) \quad (6)$$

式中: ∇ 为水平梯度 $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; Z 、 η 为自由液面方程、函数; t 为时间; ϕ 为速度势函数。

流体体积 (volume of fluid, VOF) 法通过在整个计算流体域中引入了一个函数 ψ , 表示为水相或气相的体积占计算域网格单元体积的比值,可以实现聚类变化下的波面捕捉,大幅提高数值模拟的计算精度^[12]。这种方式用公式表示为:

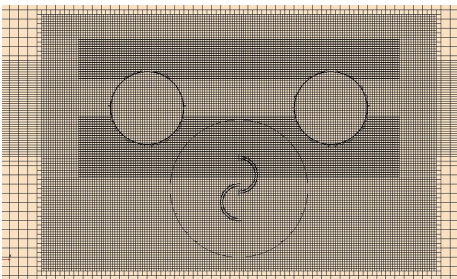
$$\frac{1}{\rho_p} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\psi_p \rho_p) + \nabla (\psi_p \rho_p \mathbf{v}_p) \right] = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^n \psi_p = 1 \quad (8)$$

式中: ψ_p 为计算域单元网格中 p 相流体的体积分数; ρ_p 为计算域中 p 相流体的密度; \mathbf{v}_p 为计算域中 p 相流体的速度矢量。

2.3 有限元模型

在流域相对不重要区域适当增大网格,在与模型接触的交界面上细化网格,用于捕捉交界面上流体的剧烈变化。同样需要在波面附近进行网格细化,用以捕捉波面的变化,观察防波堤模型的消波效果。防波堤加密网格及桨叶边界过渡层加密网格见图 8。



a) 防波堤

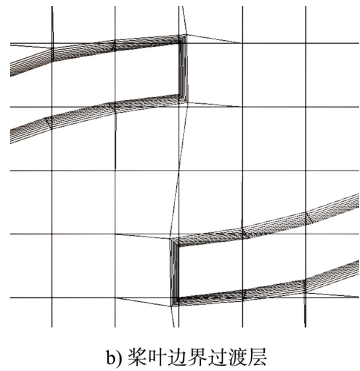


图 8 加密网格

在 STAR-CCM+软件中利用 DFBI(dynamic fluid body interaction,流体与刚体相互作用)功能,防波堤开放 3 个自由度:沿 x 、 z 轴的移动和绕 y 轴的转动。将 S 形桨叶和防波堤做耦合,实现与防波堤同步运动,并为 S 形桨叶开放一个绕 y 轴旋转的自由度,即桨叶能在波浪的作用下旋转。多项流分离见图 9,防波堤渲染图见图 10。

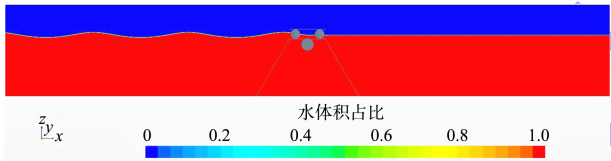


图 9 多项流分离

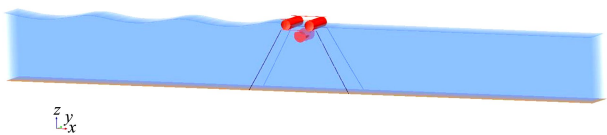


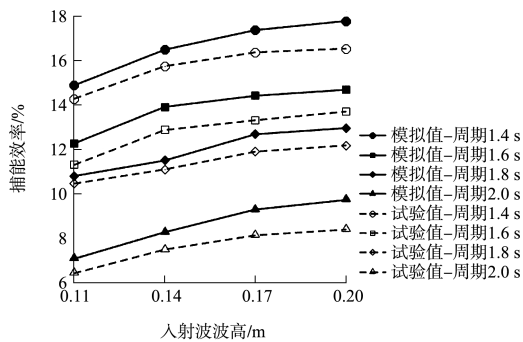
图 10 防波堤渲染图

2.4 数值模拟结果及对比

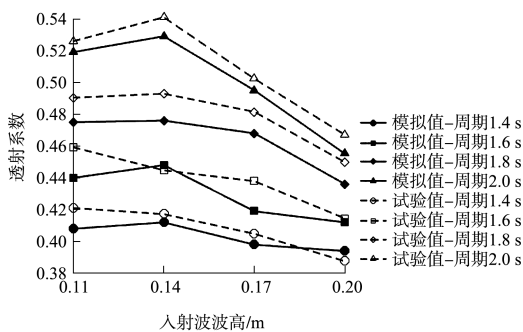
模型在不同入射波波高与不同波浪周期条件下的数值模拟数据及对比见表 2,数值模拟与物理试验的捕能效率、透射系数对比见图 11。可以看出,平均转速的模拟值和捕获功率的模拟值略大于试验值,原因在于试验的装配误差,3 个二级桨叶在装配中不能保持很高的同轴度,在旋转过程中增加了阻力,使得在波浪的冲击下物理试验的平均转速不及模拟值,在转速得到提升的同时,捕能效率的模拟值也略微大于试验值。消波波高的模拟值略小于试验值,原因在于数值波浪水槽在正常传播的过程中存在波浪衰减,堤后测量位置相较于产生波浪的速度入口距离较远,波浪衰减也更加明显,使模型数值模拟的消波性能略优于物理试验的消波性能。模拟值与试验值的变化趋势基本一致,且对比差异均在误差允许的范围内。

表 2 模拟值与试验值对比

入水深度/ m	波浪周期/ s	入射波波高/ m	平均转速/($r \cdot \min^{-1}$)		消波波高/mm		捕获功率/W	
			模拟值	试验值	模拟值	试验值	模拟值	试验值
0.26	1.4	0.11	26.5	25.4	44.88	46.32	4.44	4.26
		0.14	30.1	28.7	57.68	58.41	7.96	7.60
		0.17	33.0	31.1	67.66	68.82	12.37	11.66
		0.20	35.2	32.7	78.80	77.51	17.52	16.30
	1.6	0.11	25.4	23.4	46.75	50.52	4.25	3.92
		0.14	29.5	27.3	62.72	62.27	7.82	7.23
		0.17	31.9	29.4	71.23	74.44	11.94	11.02
		0.20	33.8	31.5	82.40	82.89	16.83	15.70
	1.8	0.11	26.0	25.2	52.25	53.94	4.36	4.22
		0.14	28.4	27.4	66.64	69.01	7.52	7.26
		0.17	32.6	30.6	79.56	81.85	12.23	11.47
		0.20	34.7	32.6	87.20	89.95	17.30	16.25
	2.0	0.11	19.7	17.9	57.09	57.85	3.30	3.00
		0.14	23.6	21.4	74.06	75.73	6.26	5.67
		0.17	27.7	24.2	84.15	85.39	10.37	9.07
		0.20	30.1	26.0	91.02	93.39	15.02	12.96



a) 捕能效率对比



b) 透射系数对比

图 11 模型捕能效率和透射系数对比

3 结论

1) 在试验研究范围内, 防波堤的捕能性能和消波性能均随入射波波高的增大而增大, 随波浪周期增大而减小。当桨叶捕能性能处于最佳区间时, 透射系数最小, 消波性能最佳, 说明该模型成功进行了波浪能的捕获和转化。

2) 通过模拟值与试验值的对比可知, 两者捕能性和消波性的变化趋势基本一致。通过捕能性能的对比, 数值模拟结果略大于试验结果, 需要充分考虑数值模型过于理想化而导致的摩擦力等阻力系数较小等问题。通过消波性能的对比, 数值模拟结果略小于物理试验结果, 需要充分考虑波浪自身衰减而引起的测量误差等问题。

3) 本文是先在理想波况下测得模型的最佳入水深度, 在此基础上再对该模型进行性能测试,

但在实际情况中, 不同波高与周期的组合有不同的最佳入水深度。在后续研究中, 可以分别在不规则波浪、海流等情况下测得防波堤最佳性能, 分析对比防波堤性能与各类波况间的关系。

参考文献:

[1] 栾英妮, 陈汉宝. 浮式防波堤研究进展[J]. 水运工程, 2021(3): 64-69.

[2] KHAN N, IQBAL T, HINCHEY M, et al. Performance of Savonius rotor as a water current turbine[J]. Journal of ocean technology, 2009, 4(2): 71-83.

[3] TALUKDAR P K, SARDAR A, KULKARNI V, et al. Parametric analysis of model Savonius hydrokinetic turbines through experimental and computational investigations[J]. Energy conversion and management, 2018, 158: 36-49.

[4] HUANG F P, GONG K, LIU Z S, et al. Experimental research on a new type of floating breakwater for wave-absorbing and energy-capturing[J]. China ocean engineering, 2020, 34(6): 817-827.

[5] 邹志利, 王大国, 李广伟, 等. 浮式防波堤非线性波浪力试验研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 61-69.

[6] 刘崇期, 陈兵, 胡涛. 兼具波浪能转换功能的双浮式防波堤性能研究[J]. 水运工程, 2019(7): 44-48.

[7] 侯勇, 孙大洋. 规则波作用下矩形浮式防波堤的消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 2013(5): 41-44.

[8] 谢敏捷. 波流耦合作用下 Savonius 型桨叶性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

[9] 鲍灵杰, 彭天好, 黄方平, 等. 新型捕能消波浮式防波堤数值模拟与试验研究[J]. 水运工程, 2020(4): 9-14.

[10] 吴映江, 宋瑞银, 郑堤, 等. Savonius 型桨叶水动力特性研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(2): 143-150.

[11] 邓小康. 经济高效型浮式防波堤设计及性能分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.

[12] 王志东, 汪德耀. VOF 方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2003(1): 52-56.