

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1003

## 推摇组合式造波的波流循环水槽设计与研究

吴思儒<sup>1</sup>, 姜楚华<sup>2\*</sup>, 陈俊华<sup>1,2</sup>, 鲍灵杰<sup>1</sup>, 李浩<sup>1,2</sup>, 王声虎<sup>1</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学科学技术学院 应用技术学院, 浙江 宁波 315300)

**摘要:** 针对海工实验波流水槽中的造流装置与造波装置间存在的干扰问题, 研发了推摇组合式造波的波流循环水槽, 并分别从造流和造波两个方面进行了设计和验证. 综合设计循环流道、造流驱动装置及稳流出水口, 保障实验区域水流稳定性及可控性; 采用倒挂式摇摆结构, 结合平行四边形结构运动特点, 实现倒挂推摇组合式造波, 在保证波形质量的同时减小对流道的影响; 建立数学模型分析推块运动与波浪要素间的关系; 基于西门子 PLC 开发实验测试平台测控系统搭建整个实验平台, 完成水槽各项性能测试. 结果表明, 实验平台能够实现最大流速  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且同时满足造波周期  $1 \sim 4 \text{ s}$ , 波高范围  $0.1 \sim 0.6 \text{ m}$  的单独造波及所需要的波流海况耦合, 能满足相关科教应用要求.

**关键词:** 海工实验装备; 波流循环水槽; 造波; 实验测试平台

**中图分类号:** TP271

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2024) 03-0020-08

随着对海洋资源的需求越来越迫切, 国内外对海洋工程的研究也越来越多, 但是由于存在波流等因素的影响, 直接在公海中进行相关实验非常具有挑战性<sup>[1]</sup>. 目前国内外多数都是通过实验水槽实现海上环境的模拟, 来进行物理模型的水动力实验研究<sup>[2-3]</sup>.

波流水槽实验平台<sup>[4]</sup>由实验水槽、造流装置、造波装置、消波装置和控制系统组成, 它可以通过控制造流装置和造波装置实现在水槽中模拟不同的海况环境. 国外实验室造波技术发展比较早, 20 世纪 30 年代就有了相关的研究和应用. 1929 年, Havelock<sup>[5]</sup>推导出实验室造波理论; 1956 年, 荷兰瓦格宁根大学开始使用摇板式蛇形造波机水池; 1957 年, 英国哈斯拉水池开始使用冲箱式造波水池, 并且具备了制造规则波和不规则波的能力. 我国在波流水槽系统的研究起步比较晚, 但是发展比较快速, 如上海交通大学<sup>[6]</sup>采用了双边多单元造波机, 可以实现不同波向角的波浪模拟, 同时能减小杂波的影响; 大连理工大学<sup>[7]</sup>设计的波流水槽实

现了主动吸收式造波, 可消除了物理模型与造波板间的波浪反射问题; 天津大学<sup>[8]</sup>改善了宽尺度水池中多板造波系统的主动吸收造波功能, 实现了吸收技术的实践创新.

目前, 有关波流实验水槽的研究在结构布局方面还存在一些问题, 本文通过分析现在典型的波流水槽布局, 讨论其存在的问题, 并针对性地提出一种新型造波造流实验平台, 同时也对该平台进行了可行性测试.

### 1 现有的波流水槽布局及流场分析

根据物理模型的移动特征<sup>[9]</sup>, 波流水槽可分为拖曳水槽和循环水槽. 在拖曳水槽中, 模型由安装在水槽上的小车拉动, 以模型不动、水动的特征来模拟水的流速; 并且受限于轨道长度, 实验时间有限, 不便观察. 相较拖曳水槽, 循环水槽中模型是静止不动的, 在启动造流装置后, 只需将模型放在工作段内便可进行长时间实验, 方便实验人员进行细致观察.

收稿日期: 2023-10-08.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 战略性国际科技创新合作重点专项(2020YFE0200100); 宁波市“科技创新 2025”专项(2020Z076); 宁波市自然科学基金(2023J172).

第一作者: 吴思儒, 硕士研究生, 主要研究方向: 海洋机电装备. E-mail: wusiru1031@163.com

\*通信作者: 姜楚华, 讲师, 主要研究方向: 新能源装备及海洋机电装备. E-mail: jiangchuhua@nbu.edu.cn

与循环水槽搭配的造波方式有推板造波<sup>[10-11]</sup>、摇板造波<sup>[12]</sup>、冲箱造波<sup>[13]</sup>等,受限于这些造波装置结构及造波方式,水槽入水口如果安装在造波装置后方,部分流场会被造波装置所阻挡,形成湍流,破坏流场的稳定,因此循环水槽的入水口类型为造波装置前方采用斜冲型或上冲型。如图1所示,入水口流速在  $0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  下的流场,斜冲型和上冲型入水口会在造波装置前形成低速漩涡区域,对自由液面造成干扰,同时存在一定程度的剪切层与紊流,影响水槽内的流场状态与波浪质量,无法为造波提供一个较好的环境。

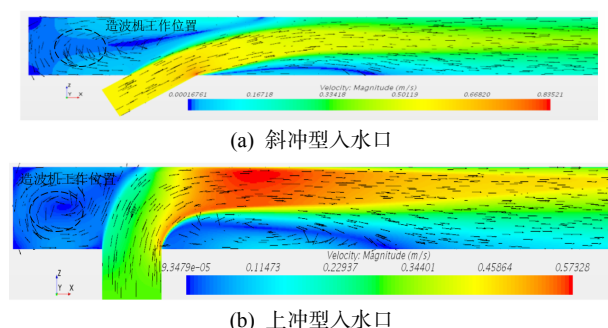


图1 入水口  $0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  下的流场

造波装置会对流场产生干扰,影响流场稳定;造流装置的安装会影响造波环境,降低造波质量。针对造流装置与造波装置间存在相互干扰等问题,本文提出一种新型造波造流实验平台,对造流、造

波及系统控制部分进行设计,并对该平台进行了可行性测试。

## 2 实验测试平台设计

综合考虑上述各方案的优缺点,实验平台总体方案如图2所示,以波流循环水槽为主体,利用水槽造流、造波功能,搭配先进测试仪器,开发波流循环水槽实验测试平台。工作原理如下:由PC端控制伺服电机,使造波机杆件做出对应动作,推波块做前后运动,制造出需要的波浪类型。同时,PC端还通过控制水槽底部的异步电机带动双向轴流式叶片工作,生成所需速度和方向的水流。此外,通过水槽中安置的传感器(包括流速仪和浪高仪)捕获波浪及水流参数,并上传到PC端,在判断模拟实验环境是否满足需求的同时,用于进行实验对象的水动力性能测试。

### 2.1 造流设计

考虑到水槽实验区域要有足够长度,并且流场状态和波浪质量必须符合要求。波流水槽主要参数如下:流道长度  $40 \text{ m}$ ,流道宽度  $1.4 \text{ m}$ ,流道高度  $0\sim 1.2 \text{ m}$ 。以钢结构为承重主体,水槽侧面镶嵌  $20 \text{ mm}$  厚钢化平板玻璃,每块玻璃长  $1.5 \text{ m}$ ,高  $1.2 \text{ m}$ 。为满足水槽防水性要求,玻璃与钢框架间采用多接触面半包围结构。如图3所示,玻璃上、下面

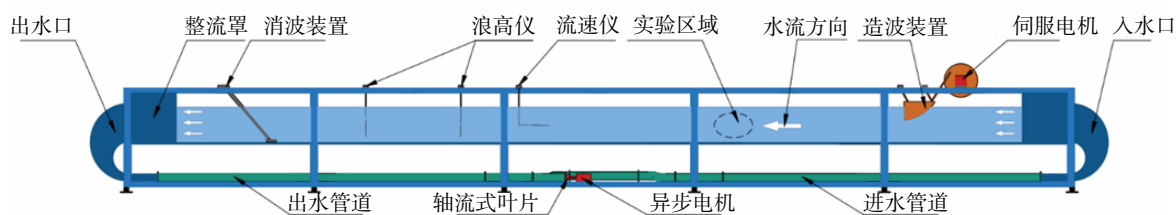


图2 实验平台总体方案

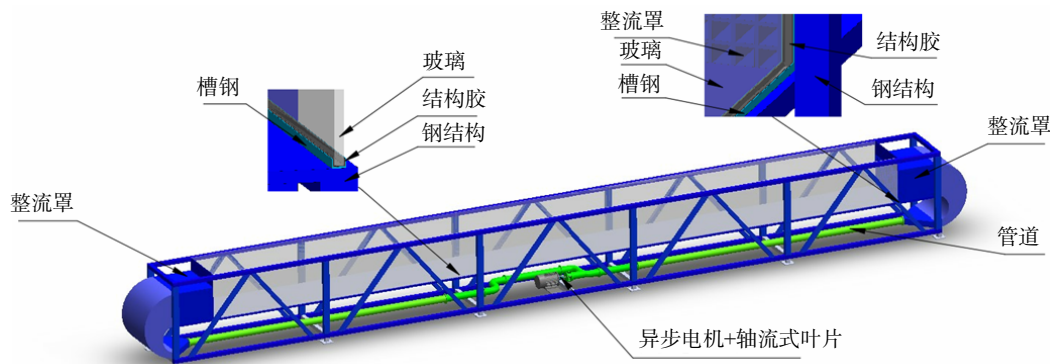


图3 水槽整体及水密性结构示意图

与槽钢连接, 缝隙处加入结构胶; 同时还考虑到热胀冷缩效应, 需在上、下两端面处仍保留一丝缝隙. 槽钢分别与顶部钢结构和底部水槽底面采用满焊固定; 在进水口和出水口处同样采用该结构. 先利用玻璃与槽钢配合, 然后槽钢通过与钢结构、整流罩以及水槽底面进行满焊, 以保证水槽密封性. 水槽顶部为敞开式结构, 在保证水槽透光性、便于从外部进行观察和测量的同时, 也同样保证了槽体的强度.

水槽造流系统由电机、轴流式叶片、导流器件、整流罩以及控制软件组成, 能够提供范围为  $0.05 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的流速. 电机选用异步电机, 确保正反双向造流, 通过确定造流扬程、进水及出水管路局部水头损失系数、管路摩擦阻力系数等参数, 得出电机的电液伺服阀增益, 再根据安装位置最后选定相应电机型号.

水槽造流系统采用直冲型入水口的全流量循环造流形式, 电机和轴流式叶片和管道安置于水槽下方. 在接收到上位机发送的工作信号后, 电机开始工作, 带动轴流式叶片旋转, 水流开始在管道流动. 当水流到达偏心渐放管处, 由于存在离心力及管道摩阻的作用, 内外两侧壁面形成流速差, 使得外侧流速快的水分子向内侧偏移, 最后形成涡流. 这时, 在入水口及出水口处的整流罩可以起到消除湍流的作用. 整流罩为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  立方体, 内部结构为长条蜂窝状, 由 25 行、21 列单位尺寸为  $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的矩形孔阵列而成, 通过切分流场中的涡流, 使流场中水分子在一定长度的矩阵管道内最终的运动速度方向平行于管壁, 使得流场在经过整流罩后会快速形成较长的稳流区域.

## 2.2 造波设计

图 4 为造波装置结构方案, 包括驱动杆、偏心轮、推波块、固定横梁、连接杆等部件组成. 偏心轮与安装在水槽上方的电机减速器配合, 在伺服电机接收到信号开始工作后旋转, 通过驱动杆将运动传递到推波块上, 带动推波块进行往复运动. 驱动杆与偏心轮间采用圆柱销固定, 与推波块间为铰链结构. 同样, 连接杆也采用铰链连接方式, 上端与固定在水槽上的横梁连接, 下端与推波块相连. 连接杆总共 2 对, 组成平行四边形结构, 能够保证推波块上表面始终保持平行状态, 即在推

波块往复运动的过程中, 推波块的前端面与水流方向呈垂直方向, 具有较高的造波效率.

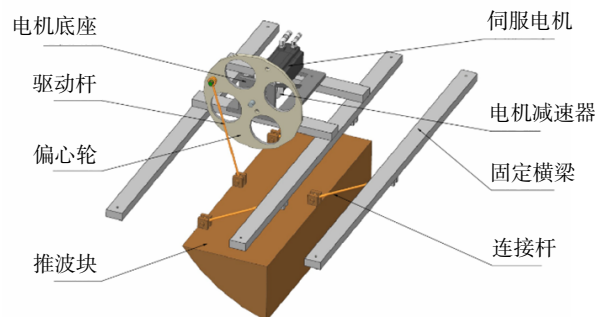


图4 造波装置结构方案

此外, 驱动杆和连接杆均采用图 5 所示的结构. 由鱼眼螺栓和空心钢管组成, 在空心钢管两端的内壁同时车一对正反螺纹, 鱼眼螺栓也选用一对正反螺纹. 当驱动杆和连接杆安装完成后, 可以根据需要来旋转钢管调节驱动杆或连接杆的杆长, 从而改变推波块的运动幅度, 并调节波高. 在空心钢管外壁中间处铣一定长度的外六角, 方便旋转钢管. 在空心钢管两端做标记, 可以方便根据旋转圈数计算杆件长度的变化.

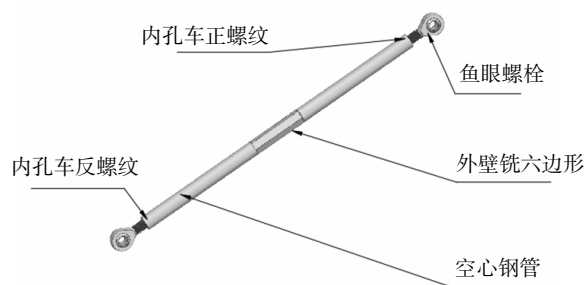


图5 杆件结构示意图

推波块在往复运动过程中, 由电机驱动偏心轮转动, 同时 3 个平行的连接杆分前后 2 组进行往复摆动, 造波装置的运动实质即为曲柄摇杆机构的运动规律. 造波机构杆件简图如图 6 所示. 图中  $A$  点为电机轴中心点, 也是坐标系原点,  $AB$  为偏心轮等价杆,  $CB$  为驱动杆,  $CD$  为连接杆,  $CC'$  为推波块上前、后铰链距离的等价杆,  $C$  点为驱动杆与后连接杆在推波块上的重合点,  $C'$  点为前连接杆在推波块的旋转点,  $D'$ 、 $D$  点分别为前后连接杆在固定横梁上的旋转点,  $\theta_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) 为杆件在图 6 中的相应夹角,  $\dot{\theta}_i$  为对应角速度,  $L_i$  表示对应杆的杆长.



波块入水后的排水体积近似相等等于推波块前的波浪体积, 即  $V_1 \approx V_2$ . 通过迭代前面公式推导出制造指定波浪要素时电机的转速及推波块在  $t$  时刻应入水的深度.

### 2.3 测控系统设计

波流循环水槽实验测控系统主要包括造流控制系统、造波控制系统及数据监视采集系统. 由上位机集成控制和数据监测功能, 通过西门子博途开发平台实现人机交互、数据记录、故障实时诊断等功能.

电气控制柜组成如图 8 所示, 主要由 HMI 触摸屏 KTP900、PLC 主机 S7-1200、PLC 模块 SB1231 和 SM1234、西门子伺服驱动器 V90、ABB 变频器 ACSS10-031A-4、各开关和继电器所组成. 测控平台的控制系统采用上、下位机控制模式, 通过工业以太网进行实时通信; 造流系统采用 ABB 变频器来控制造流泵进行造流, 变频器改变水泵电机频率实现流速调节, 造波系统采用伺服驱动器 V90 控制伺服电机的定位和速度来实现造波机构进行造波.

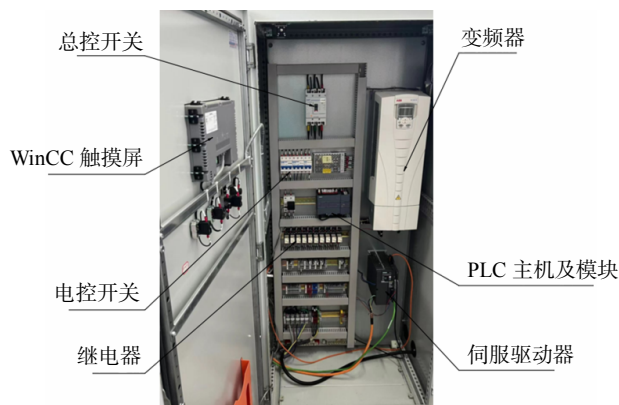


图 8 电气控制柜实物图

此外, 实验水槽中还布置了多普勒流速仪和 YWH200-D 型数字波高仪. 图 9 为监测系统电气柜, 流速仪和波高仪通过西门子 PLC 进行快速数据采集, 传给上位机, 上位机电脑运用 MATLAB 软件编写算法, 以造波的波形数据为目标函数, 耦合采集流速、浪高、造波连杆机构等数据计算推导伺服电机运动的位置以及速度, 并且通过 PROFINET 传送到下位机, 下位机 PLC 通过 PROFINET 总线实时控制伺服电机造波机构以实现造波, 形成闭环的控制调节系统.

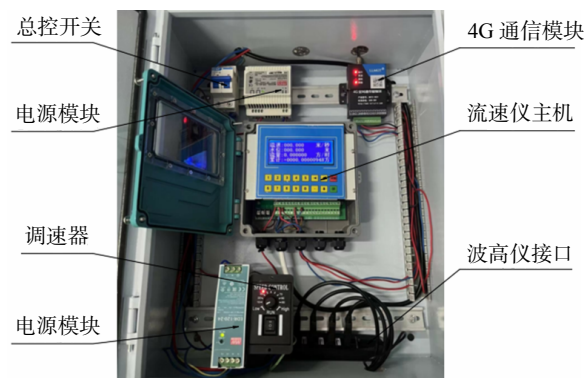


图 9 数据采集系统电气柜实物图

## 3 实验装置测试

基于上述研究内容, 搭建如图 10 所示的波流水槽实验平台, 并分别对单独造流、造波及波流耦合环境进行验证.



图 10 波流耦合实验平台

### 3.1 纯流功能测试

在控制页面中设置双向轴流式叶片的转速为  $700 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$ , 当流场稳定运行一段时间后, 以水流方向为正向, 分别在距离入水口和出水口  $1.5 \text{ m}$  处的流场截面上测量采集点的平均速度(图 11).

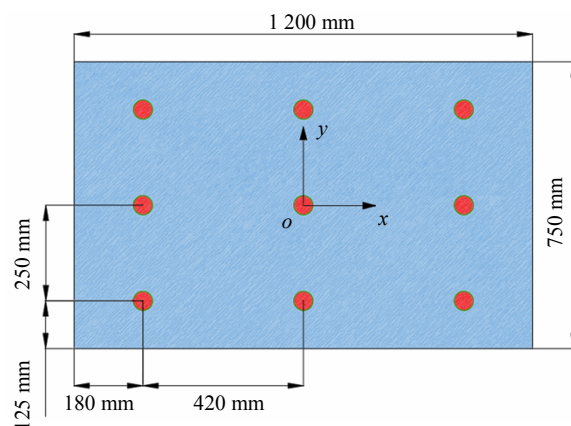
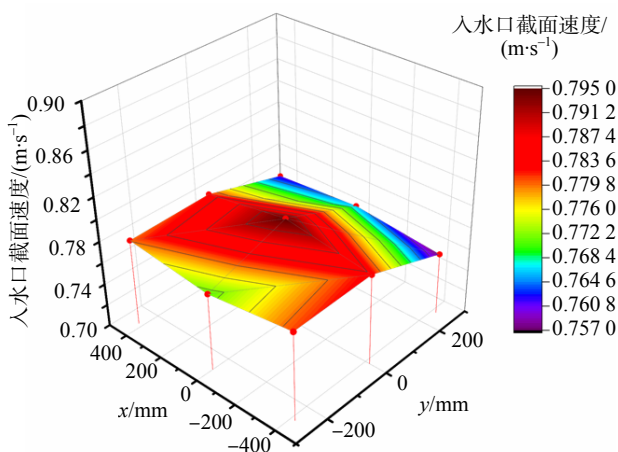
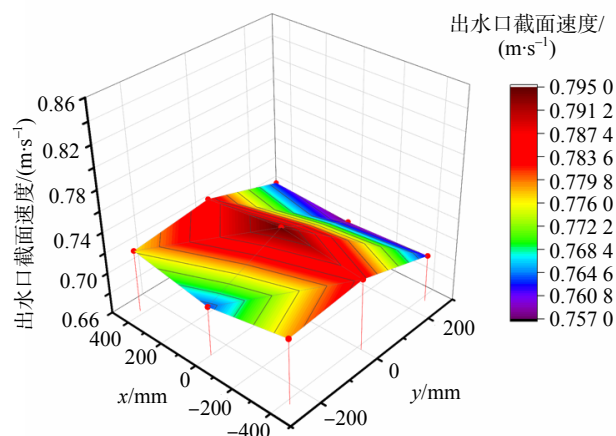


图 11 速度采集点示意图

如图12所示, 入水口1.5 m处的流场截面流速偏差为4.7%, 出水口1.5 m处的流场截面流速偏差为5.0%, 均优于JTJ/T 234—2001《波浪模型试验规程》中的要求。



(a) 入水口截面流速



(b) 出水口截面流速

图12 流场截面各点平均速度

### 3.2 纯波功能测试

对水深0.75 m、波高0.2 m、周期2 s的规则波浪进行模拟。在距离造波装置的2 m处, 向后等距4 m安置3组波高仪, 再分析波浪衰减规律。图13为启动后12 s内的不同位置波高, 图14为节选造波捕捉画面。由图13可知, 在距离造波装置6 m内, 波场仍具有较高稳定性及传递性能<sup>[16]</sup>, 可在该范围内能够进行相关的模型物理实验。

### 3.3 波流耦合环境验证

鉴于波流耦合环境的质量检验较难描述, 本文利用Savonius型桨叶分别在纯流以及波流耦合下进行性能研究, 通过分析在两种环境下桨叶功

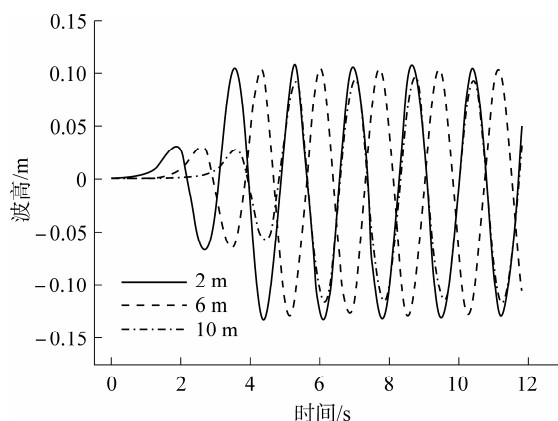


图13 不同位置的波高



图14 波浪画面(节选)

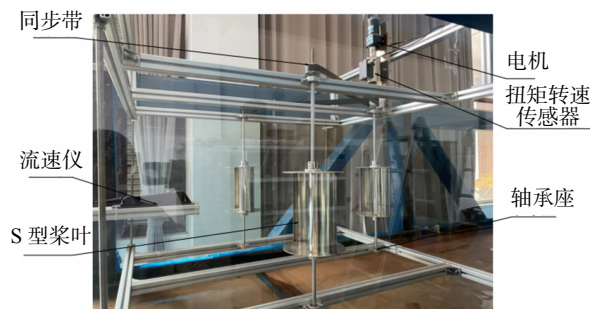


图15 Savonius型桨叶实验装置

率系数 $C_p$ 变化规律, 来评判其波流耦合场的质量。搭建如图15所示Savonius型桨叶实验装置, 实验测试的Savonius型桨叶相关参数见表1。模拟环境流速 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的纯流及流速 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、波高0.4 m、波浪周期2.5 s的波流耦合, 通过控制数据采集系统电气柜中的调速器, 设定8组不同转速的工况环境, 分析上述参数的Savonius型桨叶在8组不同叶尖速比TSR下功率特性的变化。

图16为纯流以及波流场中桨叶不同叶尖速比下功率系数的数据对比图, 依据相关的Savonius型桨叶性能研究<sup>[17-18]</sup>, 波流作用下桨叶的功率系数

表1 Savonius 型桨叶相关参数表

| 参数                    | 数值或计算式                   |
|-----------------------|--------------------------|
| 转子高度( $H$ )/m         | 0.24                     |
| 转子直径( $D$ )/m         | 0.182                    |
| 叶片直径( $d$ )/m         | 0.1                      |
| 端面直径( $D_0$ )/m       | 0.2                      |
| 功率系数 $C_p$            | $M\omega/(0.5\rho Sv^3)$ |
| 高径比( $R_{HD}$ )       | 1.32                     |
| 重叠率( $e$ )            | 0.15                     |
| 叶片曲率( $\varepsilon$ ) | 1                        |
| 叶尖速比(TSR)             | $\omega D/(2v)$          |

注:  $\omega$  为桨叶旋转角速度;  $v$  为来流流速;  $M$  为桨叶的动转矩;  
 $\rho$  为流体密度;  $S$  表示桨叶相对于来流的投影面积。

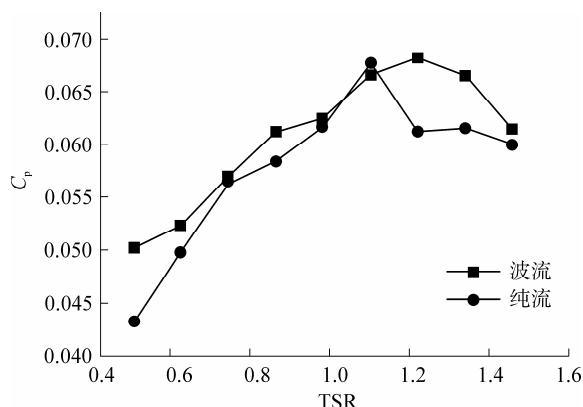


图16 波流场中 Savonius 型桨叶功率系数—叶尖速比曲线  
 往往会优于纯流场环境,考虑到流过桨叶截面的功率总量不同可能会导致交错现象,因此可以认为波流水槽能实现需要的波流场环境模拟。

#### 4 总结

针对目前波流水槽存在问题,分别对造流系统和造波系统进行设计和创新,结合循环水槽特点,通过布局整流罩来快速稳定流场,创新性提出摇摆式造波装置完成波流水槽的设计。最后通过完善测控系统,搭建出整个实验测试平台,研究波流水槽性能实验,得到如下结论:

(1)搭建的实验平台系统运行稳定、控制方便,能够模拟  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下的水流流速,同时能够满足造波周期  $1\sim 4 \text{ s}$ ,波高范围  $0.1\sim 0.6 \text{ m}$  的波浪环境。通过研究波流水槽造流、造波性能可以发现,在造波装置前  $2\sim 6 \text{ m}$  范围内,波场和流场具有更稳定的性能,能在该区段内进行相关的海工实验。

(2)造流部分采用直冲型入水口,既延长了稳流区域,又避免了对造波环境造成影响。同时为避免流场经过弯管及渐放管等后方出现的涡流现象对实验区域流场造成较大的影响,在渐放管出口处布有蜂网孔状整流罩,能有效地减少湍流,提高流场整体质量。

(3)创新性提出倒挂式推摇组合式造波方式,并基于体积守恒原理分析造波装置的执行机构与波浪要素的关系,完成了造波装置的控制设计,很大程度上减少了造波过程中对水流的阻挡影响,同时造波面始终垂直于水面,有效地提高了造波质量。

该实验系统具有稳定运行的能力,能够独立实现造波、造流及波流耦合环境的模拟,实验时长较长,可以方便实验观察,且能够实时读取数据,可有效地进行实验环境调整,其装置的设计思路及原理具有实际参考价值。未来工作将围绕主动吸收式造波进行深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 邹艳荣. 波浪运动及其对近海岸桥梁下部结构作用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [2] 沈超, 钟桂辉, 刘曙光. 波浪运动特性实验教学改革的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4):164-167.
- [3] 钟桂辉, 刘曙光, 匡翠萍, 等. 波流水槽模拟系统在本科教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(8):33-36.
- [4] 姜楚华, 陈俊华, 孔正泰, 等. 一种波流耦合模拟实验水槽[P]. CN202110666890.X, 2021-09-21.
- [5] HAVELOCK T H. Forced surface-waves on water[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1929, 8(51):569-576.
- [6] 李俊, 陈刚, 杨建民, 等. 双边多单元造波机造波性能分析[J]. 海洋工程, 2012, 30(2):32-37.
- [7] 杨洪齐, 李木国, 柳淑学, 等. 伺服电机驱动的水槽主动吸收式造波机原理与实现[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(3):423-428.
- [8] 吴哲. 基于伺服驱动的多板主动吸收造波控制系统开发研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [9] 李广年, 杜林, 李振琦, 等. 波流循环水槽教学实验平台建设与水动力模型实验方案探讨[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3):177-181.
- [10] WU N J, HSIAO S C, CHEN H H, et al. The study on

- solitary waves generated by a piston-type wave maker[J]. Ocean Engineering, 2016, 117:114-129.
- [11] THORIMBERT Y, LATT J, CAPPIETTI L, et al. Virtual wave flume and oscillating water column modeled by lattice Boltzmann method and comparison with experimental data[J]. International Journal of Marine Energy, 2016, 14:41-51.
- [12] 陈林雅. 波流荷载作用下桩基周围海床响应的实验研究及数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [13] 韩阳, 范毅伟, 郭春雨, 等. PIV 技术在孤立波流场测量教学实验中的应用[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(4): 117-121.
- [14] 陈俊华, 王丁一, 程少科, 等. 摇板式造波实验台的设计及实验[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(9):67-72.
- [15] 贺铭, 徐万海, 高喜峰, 等. 基于楔体入水的孤立波制造理论及其 SPH 验证[C]//中国海洋工程学会. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上), 2019:148-155.
- [16] 苏绍娟, 王有志, 王天霖, 等. 数值波浪水槽波浪传递性能研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(5):61-65.
- [17] 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.
- [18] 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.

## Design and research of wave-current circulating flume with push-shake combined wave making

WU Siru<sup>1</sup>, JIANG Chuhua<sup>2</sup>, CHEN Junhua<sup>1,2</sup>, BAO Lingjie<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, WANG Shenghu<sup>1</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Applied Technology, College of Science & Technology Ningbo University, Ningbo 315300, China )

**Abstract:** In view of the interference between the flow making device and the wave making device in the experimental wave flume, a wave-current circulating flume with push-shake combination is developed. The design and verification are carried out from two aspects of flow making and wave making respectively. The circulation channel, flow making drive device and steady-flow outlet are designed comprehensively to ensure the stability and controllability of water flow in the experimental area; The upside-down swing structure is adopted, combined with the movement characteristics of parallelogram structure, to realize the upside-down push-swing combined wave making, so as to ensure the waveform quality and reduce the influence on the flow channel. A mathematical model is established to analyze the relationship between the push block motion and wave elements. Based on Siemens PLC, the measurement and control system of experimental test platform is developed, and the whole experimental platform is built to complete the performance tests of the flume. The results show that the platform can realize the maximum flow velocity of  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  alone, the period of 1–4 s, the wave height range of 0.1–0.6 m and the required wave-flow coupling, which can meet the relevant scientific and educational application requirements

**Key words:** marine experimental equipment; wave-current circulating flume; wave making; experimental test platform

( 责任编辑 章践立 )