

# 波浪对潮流能水轮机性能测试影响的实验研究

路 宽<sup>1</sup>, 王花梅<sup>1</sup>, 韩林生<sup>1</sup>, 徐文和<sup>2</sup>, 靳志刚<sup>2</sup>, 苏 惠<sup>2</sup>

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 辽宁燕北海洋电力开发有限公司, 辽宁 沈阳 111211)

**摘 要:**随着潮流能开发利用技术日趋成熟, 对其测试工作也提出了更高的要求。然而, 在潮流能装置性能测试中, 波流相互作用的影响往往被忽略, 导致测试结果不准确。为了研究波流相互作用对测试的影响方式与程度, 采用物理模型试验的方法, 对垂直轴潮流能发电装置模型进行了试验研究。通过分析波流作用下装置的扭矩、转速及发电功率, 发现波流与发电装置耦合作用明显, 相比不存在波浪影响的情况下, 叶轮的转动、主轴的扭矩都变得不规则, 启动流速变小, 同时, 扭矩、转速及发电功率的瞬时值显著增大。测试结果表明, 波流相互作用对装置性能测试影响显著, 平均影响程度约 10%, 研究结果为今后潮流能发电装置性能测试标准的制定和完善提供了参考和依据。

**关键词:**实验室; 测试; 潮流能转换; 发电性能; 波流相互作用

**中图分类号:** P743.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-2029(2020)01-0064-06

近年来, 世界范围内的潮流能开发利用技术飞速发展, 一些潮流能装置已进入商业化阶段。我国潮流能资源丰富, 具有相当的开发利用价值<sup>[1-3]</sup>。潮流能开发利用技术经过多年的发展, 已日趋成熟, 特别是在国家的大力支持下取得了丰硕的成果。浙江大学、国电联合动力技术有限公司等单位研制的潮流能水轮机已陆续进入了示范应用阶段。这些项目的顺利实施, 标志着我国潮流能开发利用技术已经由研制阶段进入到示范应用阶段。

海洋能开发利用技术的发展对相关测试方法和技术也提出了更高的要求。目前, 我国还没有统一的测试标准, 测试工作一般都是由研发方自行开展, 无论是测试方法还是测试设备都不够规范。由于测试过程中忽视了很多问题, 使得研发者对实施结果的预期过于乐观, 造成了装置在海上运行一段时间后才发现各种可靠性、可维护性、生存性的问题。装置一旦布放到海里, 进行维修和改进都涉及一笔很大的投入, 致使很多项目都陷入到进退两难

的境地, 这样的例子屡见不鲜。因此, 在装置各个环节进行规范化、标准化的测试是非常必要的。

国际电工委员会(IEC)在 2013 年发布了潮流能水轮机发电性能的评价标准<sup>[4]</sup>, 由于目前我国并没有潮流能装置测试的标准, 因此在实际测试时主要参考此文件开展工作。该标准中提到在测试时应考虑波浪对潮流能装置的影响, 在标准的附录提到, 当波浪引起水质点运动速度大于额定流速的 20% 的时候, 应充分考虑到波浪对测试结果的影响。但是标准中并没有说明如何具体考虑, 这使得在实际开展测试时无法操作与执行。本文重点针对波流相互作用对潮流能水轮机发电性能的影响开展研究, 通过物理模型试验的方法<sup>[5-9]</sup>, 分析波流相互作用对装置的影响方式与程度, 从而提出在进行测试时, 该如何考虑并避免波浪的影响, 为实际测试工作的开展提出可具体操作的方法, 此项工作可为我国潮流能装置测试标准的制定及现有标准的完善提供科学依据。

**收稿日期:** 2019-09-11

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目“基于固定平台的海洋仪器设备规范化海上测试技术研究及试运行”(2016YFC1401200); 海洋经济创新发展示范项目“海洋观测监测仪器定型检测平台建设及测评方法研究”(BHSF2017-26)

**作者简介:** 路宽(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事海洋仪器设备及海洋能发电装置测试与评估工作。

E-mail: lukuan0322@163.com

## 1 波流相互作用对测试的影响

波浪是海岸工程和海洋工程领域的主要荷载,因为波浪引起的水体运动在很多方面对海洋结构物有很大的影响,如波浪荷载及运动响应等。此外,不同尺度的波与流之间都存在着相互作用<sup>[7-17]</sup>,涨潮时的顺流会使波浪变平,落潮时的逆流会使波浪变陡。不同尺度的长波与短波也会相互作用,产生波浪变形,而波浪破碎时,在破波线与岸线之间会形成沿岸流,如遇到特殊海底地形,还会产生一股向深海方向的窄带状流动,即离岸流。如果不考虑这些波流相互作用的影响,很可能会引起海洋结构物的损坏而发生事故。

波流相互作用对海洋结构物动力荷载的影响不可忽略,波流作用于结构物浸没部分,应作为主要环境荷载予以考虑。而在我国当前研究阶段,针对潮流能水轮机在波流与装置耦合作用方面的考虑远远不够。具体体现在两方面:一方面,装置在结构设计方面,叶片、装置载体与系泊系统在设计阶段大多没有考虑波流之间的耦合相互作用的影响,这直接影响到了水轮机的生存性与环境适应性。另一方面,在发电性能(PTO)设计环节,也没有充分考虑波流的非线性作用改变了波流场,这也将影响水轮机的可靠性,使得实际的发电效果远低于预期。这类问题产生的影响将在今后水轮机大规模应用阶段有更为突出的体现。

对海洋能发电装置的测试工作而言,要有预见性的指导和规范来促进该技术的发展,在装置的测试阶段应充分考虑将来可能遇到的各种问题,并提出改进建议,这有利于该技术的成熟与产业化发展,因此应尽快将波流的相互影响因素作为测试的一个重要环节加以考虑。

## 2 测试设施及试验模型

波浪与水流的相互作用会影响到水轮机的结构安全与发电性能。结构安全可通过数值模拟进行计算,这方面工作有很多软件可以实现,这通常也是最为节约成本的一种方法。同时,我国也正在建设全尺度全链条的针对风机的测试平台,为结构安全、疲劳等测试提供了测试环境,而在海洋能领域目前还没有提出这样的建设方案,这也是今后需要

做的重点工作之一。而波浪对于发电性能的影响,更是鲜有研究,目前解决波浪与海洋结构物之间相互作用问题的研究手段主要有:理论分析、数值模拟、物理模型试验和现场观测4种方法。其中理论分析只能解决比较简单的问题,对于比较复杂的耦合问题显得无能为力。依托计算机和计算软件飞速发展的数值模拟方法已经成为最为主要的研究手段<sup>[18-22]</sup>,但目前并没有统一的模型可以采用。现场观测的成本和耗时也比较大,关键是潮流能电站现场条件非常复杂<sup>[18-22]</sup>,不利于研究分析。因此,本文主要采用物理模型试验的研究方法。

### 2.1 试验设施

试验在自然资源部国家海洋技术中心动力环境实验室(图1)中进行,主要包括下述试验设施及设备。

(1) 多功能水池:长130 m,宽18 m,池深6 m,试验水深4.5 m。

(2) 运动平台:最大速度4 m/s,稳速精度0.4%,由控制系统直接输入运行速度。平台安装有模型安装杆,可通过法兰连接试验模型,安装杆可沿水池横向和垂向伸展移动。

(3) 造波机:10单元伺服电机驱动式推板造波机,最大波高0.6 m,周期范围为0.5~5 s,由上位机软件进行控制,可模拟产生规则波和不规则波。

(4) ZH07型转矩转速传感器:转矩量程500 N·m,转速量程4 000 r/min,齿数1 440,准确度等级0.3级,可直接连接电脑采集转矩转速数据。

(5) 日置HIOKI 3390功率分析仪:最大电压量程1 500 V,电流量程20 A,功率范围为6.000 0~2.250 0 MW,测量精度:±0.05 %。

(6) 双线性型BG-II/1000MM波高传感器:量程0~1 m,精度0.2 %。

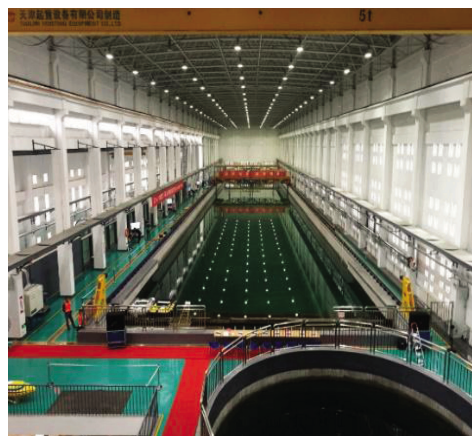


图1 海洋动力环境实验室

## 2.2 试验模型

试验模型(图 2)采用辽宁燕北海洋电力开发有限公司研制的可开合 4 叶片垂直轴潮流能水轮机模型,模型配有增速器和电机,测试负载为滑动变阻器,具体参数如表 1 所示。

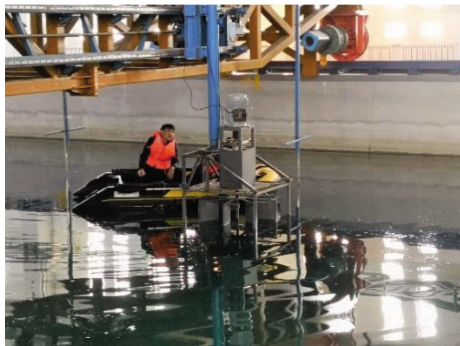


图 2 试验模型

表 1 潮流能水轮机模型参数

| 序号 | 名称                           | 数值   |
|----|------------------------------|------|
| 1  | 叶片展长/m                       | 0.6  |
| 2  | 叶片弦长/m                       | 0.3  |
| 3  | 叶轮直径/m                       | 1.04 |
| 4  | 模型总高/m                       | 2.3  |
| 5  | 模型重量/kg                      | 386  |
| 6  | 发电机额定功率/kW                   | 0.5  |
| 7  | 发电机额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$ | 100  |
| 8  | 增速器增速比                       | 1:10 |
| 9  | 负载功率/kW                      | 1    |
| 10 | 负载阻值/ $\Omega$               | 50   |

## 3 试验及数据分析

试验包括静水拖曳试验与造波拖曳试验,造波拖曳试验分为顺波与逆波两种情况。顺波时,波向与拖曳方向一致,即波流反向;逆波时,波向与拖曳方向相反,即波流同向。研究波浪对不同流速下潮流能装置发电性能的影响。

### 3.1 试验布局

测试布局如图 3 所示,首先将模型安装在运动平台的仪器安装杆上,运动起始位置距造波板的距离为 90 m,在距离造波板 20 m 处停止,用以保证最大运行距离与试验。通过运动平台搭载 2 支波浪传感器,用于测试模型前方波浪数据。在运动平台拖曳试验模型前,进行与拖曳时相同工况的造波,再将两支波浪传感器测得的波浪数据进行平均处理。转矩转速传感器安装在叶轮与增速器之间的

上,可测得装置增速前的扭矩与转速,直观地了解波浪对于能量捕获机构的影响。功率分析仪放置在运动平台上,连接到滑动变阻器的两端,测试最终输出的电功率。

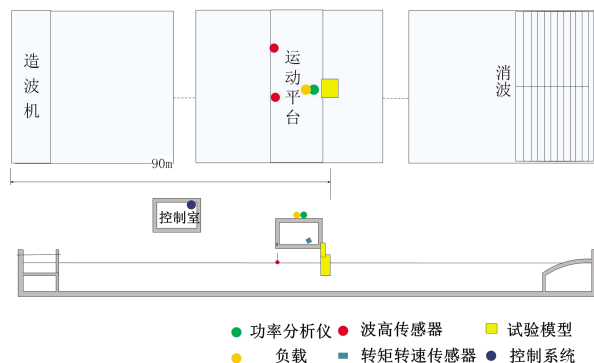


图 3 试验布局图

### 3.2 试验过程

试验前,首先对波高仪进行了标定,通过在量筒中选取不少于 4 个水深值分别测得读数,以读数为输入值,水深值为输出值,并对各传感器进行曲线拟合得到传感器的 K、C 值。然后再对造波机进行标定,即将规则波下的每个测试工况进行造波试验,将采集到的波高与目标波高进行比较,如存在误差,则需调整传递函数,使试验区波高满足试验要求。在造波机标定的同时,调整装置的发电负载,使装置处在最佳的发电状态。

静水试验时,平台速度为 0.5~1.8 m/s,间隔 0.1 m/s,共 14 组工况,每组工况重复 3 次。造波拖曳试验时,波高 0.1 m,波周期 2.45 s,平台拖曳速度仍然为 0.5~1.8 m/s,间隔 0.1 m/s,分顺波和逆波 2 种情况,共 28 组工况,同样,每组工况重复 3 次。

通过转矩转速传感器测量模型的转矩与转速,采用功率分析仪获取模型输出电功率。图 4 为试验现场图片。

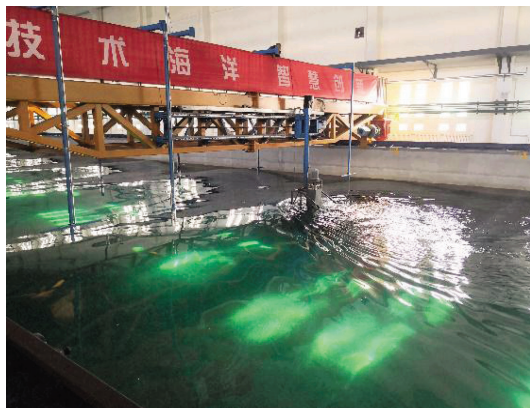


图 4 试验现场

### 3.3 试验结果分析

本文将以 1.8 m/s 流速为例,进行扭矩、转速与发电功率的分析。在静水、顺波与逆波情况下,测得的主轴扭矩曲线如图 5 所示。可以看出,在静水试验时,装置主轴的扭矩变化曲线比较规则,在 50~120 N·m 之间。当顺波和逆波试验时,两者的情况比较相似,主轴的扭矩受波浪的作用影响明显,曲线的波峰与波谷也不再规则,最大瞬时扭矩达到了 140 N·m,平均扭矩也增加了约 15 %。

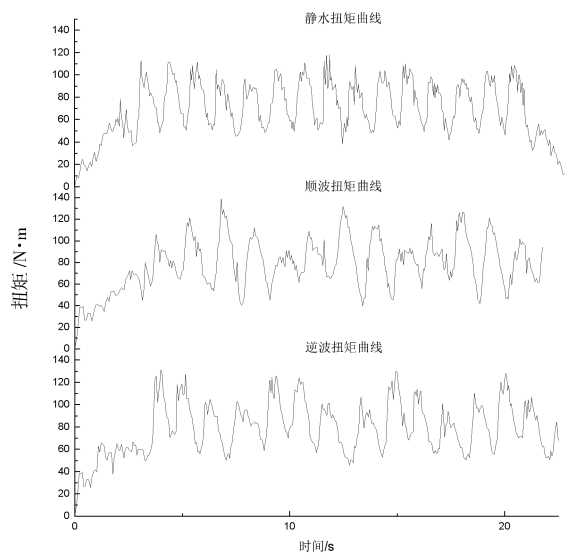


图 5 3 种不同情况下的主轴扭矩曲线

扭矩的增加提高了能量捕获能力,进而提高发电性能,这是积极的影响。但同时,加速了主轴的磨损,降低了装置的使用寿命,特别是在实际海洋环境中,随机波的存在会造成主轴受到不规则的扭矩、弯矩等随机荷载,这些因素在装置设计和测试试验时应加以考虑。

转速的情况与扭矩类似,如图 6 所示。静水时,主轴的转速在 8~15 r/min 之间变化,这种非匀速的转动主要是装置本身特性决定的,由于是可开合的叶片,叶轮的阻力是在不断变化的,因此造成了转速的规则变化。在顺波和逆波的时候,在波浪的作用下,最大转速提高到 20 r/min,曲线也变得不规则,平均转速增加了约 10 %。

发电机的输出功率如图 7 所示,功率在 30~120 W 之间变化,平均发电功率 66 W。顺波时,最大瞬时发电功率 193.3 W,平均发电功率 77 W。逆波时,最大瞬时发电功率 185.2 W,平均发电功率 79 W。

试验结果表明,波浪对装置的影响显著,如果只是关注装置的统计数据,这种影响往往会被忽

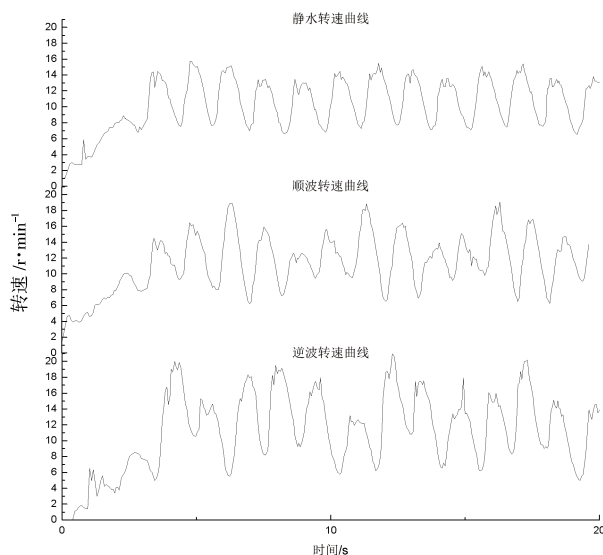


图 6 3 种不同情况下的主轴转速曲线

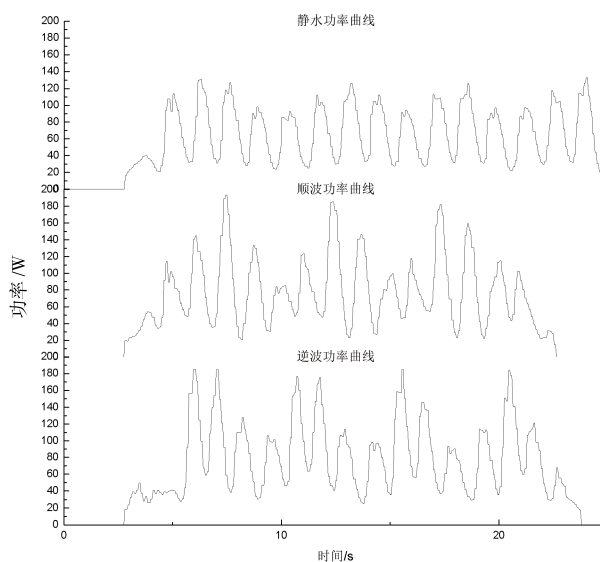


图 7 3 种不同情况下的输出功率曲线

视。但是当研究者关注瞬时值时就会发现,波浪对于装置的影响远超之前的想象。如本次试验,存在波浪作用时,最大扭矩提高了 17 %,最大转速提高了 33 %,而瞬时发电功率更是提高了 58 %。

其他流速情况如图 8 所示,图中为平均输出功率,至于瞬时值,每个流速的情况与 1.8 m/s 流速的情况类似,都有显著增大。静水时,该模型在流速 0.8 m/s 时开始启动,而存在波浪的时候,启动发电所需的流速更低,甚至在 0.6 m/s 的时候就已经存在输出功率了,这可以考虑为波流相互作用下的改变发电性能的一种表现。可以看出,每个流速下,波浪对输出功率都有不同程度的影响,平均影响程度在 10 %左右。

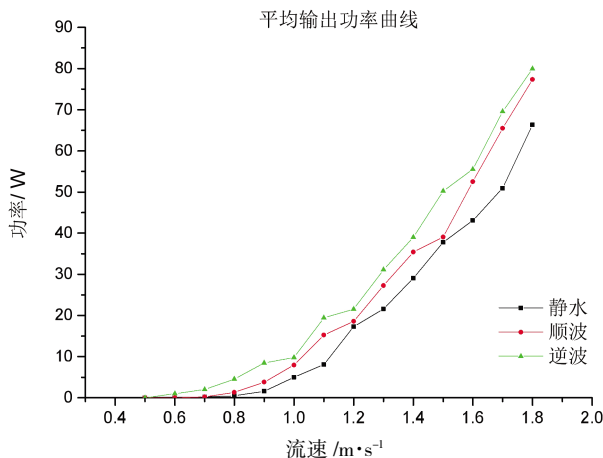


图8 3种不同情况的功率特性曲线

波浪的存在一方面提高了装置的发电性能,另一方面又对装置的控制系統、结构安全、寿命等方面提出了更高的要求,如果在设计装置时作为积极因素加以考虑,可作为提高装置性能的一种手段。从测试试验角度出发,如果装置运行在波流环境中,波流相互作用的测试试验应作为规范化试验的一个重要环节。

## 4 结论

国际电工委员会的 TS62600-200 标准提到了测试试验时应考虑波流相互作用的影响,并将波浪对潮流能水轮机测试影响作为下一步研究的重点。对于本文试验的对象——垂直轴水轮机,由于它不受入射方向的限制,波浪的存在会增加输出功率,但另一方面,瞬时值的变大,也对结构安全性提出了更高的要求。但是对于水平轴水轮机来说,波浪的影响可能更为不利,这些可作为后续的研究内容加以考虑。

因此,本文建议在进行潮流能水轮机测试时,考虑波浪的影响时应加入以下两项内容:(1)除了坐底式这类不受波浪影响的装置,其他装置在室内模型阶段应进行波流及结构物耦合测试试验。(2)现场测试工作应尽可能在该海域常规海况下进行,如不可避免地需要在高海况下进行测试,即波浪对发电功率影响大于 10 % 时,则应充分考虑并排除波流相互作用对测试结果的影响。

### 参考文献:

- [1] 李允武. 海洋能源开发[M]. 北京:海洋出版社,2008.
- [2] 汤天浩. 新能源与可再生能源的关键技术与发展趋势[J]. 电源技术应用,2007,10(2):60-64.
- [3] 戴军. 潮流水轮机的研究进展[J]. 可再生能源,2010,28(4):130-133.
- [4] TS62600-200: Marine energy-wave, tidal and other water current converters Part 200: Power performance assessment of electricity producing tidal energy converters[S]. IEC, 2013.
- [5] EquiMar. D3.3-Assessment of current practice for tank testing of small marine energy devices[R]. EU, 2010.
- [6] 马勇, 由世洲, 张亮, 等. 漂浮式潮流能发电装置振动与波浪响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(2):14-17.
- [7] 王涛, 李家春. 波流相互作用研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(3):331-343.
- [8] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 邱大洪. 波浪理论及其在工程上的应用[M]. 北京:高等教育出版社,1986.
- [10] Liu Zhen, Teng Bin, Ning Dezhi, et al. Wave-current interactions with three-dimensional floating bodies[J]. Journal of Hydraulics, 2010, 22(2):229-240.
- [11] 吴永胜, 练继建, 王兆印, 等. 波浪-水流相互作用模型[J]. 水利学报, 2002, 33(4):13-17.
- [12] Zhang H, Madsen O S, Sannasiraj S A, et al. Hydrodynamic model with wave-current interaction in coastal regions [J]. Coastal and Shelf Science, 2004, 61:317-324.
- [13] Yang S Q, Tan S K, Lim S Y, et al. Velocity distribution in combined wave-current flows[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29: 1196-1208.
- [14] Jian Y J, Zhang J M, Zhu Q Y. Short crested wave-current forces around a large vertical circular cylinder [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2008, 27:346-360.
- [15] Sen D. Time-domain computation of large amplitude 3D ship motions with forward speed [J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 973-1002.

- [16] Shi J Z, Wang Y. The vertical structure of combined wave-current flow[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35:174–181.
- [17] Kim D J, Kim M H. Wave-current interaction by a large 3D body by THOBEM[J]. *Journal of Ship Research*, 1997, 41(4):273–285.
- [18] 李玉城,滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京:海洋出版社,2002.
- [19] Khan M J, Bhuyan G, Iqbal M T, et al. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal application: A technology status review[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(10):1823–1835.
- [20] Luznik L, Flack K A, Lust E E, et al. The effect of surface waves on the performance characteristics of a model tidal turbine[J]. *Renewable Energy*, 2013, 58:108–114.
- [21] 冯建军,朱国俊,王淮,等. 二阶斯托克斯非线性潮波对潮汐贯流式水轮机性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2):48–54.
- [22] 王项南,张原飞,夏海南,等. 我国自主研发潮流能发电装置的现场测试与评价分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 226–235.

## Performance Test Research of Tidal Current Energy Convertors Subjected to Wave-Current Interaction

LU Kuan<sup>1</sup>, WANG Hua-mei<sup>1</sup>, HAN Lin-sheng<sup>1</sup>, XU Wen-he<sup>2</sup>, JIN Zhi-gang<sup>2</sup>, SU Hui<sup>2</sup>

1. *National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China;*

2. *Liaoning Yanbei Ocean Electric Power Development Co. Ltd, Shenyang 111211, Liaoning Province, China*

**Abstract:** With the development and utilization of tidal current energy technology becoming increasingly mature, higher requirements have been put forward for its testing work. However, the influence of wave-current interaction is often neglected in the performance test of tidal energy convertors (TECs), leading to inaccurate test results. In order to study the way and extent of influence of wave-current interaction, a physical model experiment is carried out on the vertical-axis TEC. Through a series of static water towing tests and wave-making towing tests, the effects of waves on the power generation performance of TECs at different flow rates are studied. Through the analysis of the torque, rotational speed and output power of device under the wave-current interaction, it is found that the wave-current and device coupling effect each other significantly, compared with no wave effect, and the rotation of the impeller and shaft torque is irregular, startup velocity decreases. At the same time, torque, rotational speed and output power of instantaneous value increase significantly. The test results show that the wave-current interaction has a significant impact on the performance test of the device, with an average impact of about 10%. The research results provide a reference and basis for the formulation and improvement of the performance test standards for TECs in the future.

**Key words:** laboratories; testing; tidal current energy conversion; power generation performance; wave-current interaction