

潮流发电装置运动衰减特性与不规则波响应¹⁾

马勇²⁾ 张亮 由世洲

(哈尔滨工程大学海洋可再生能源研究所, 哈尔滨 150001)

摘要 为了研究基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置的运动衰减特性与不规则波响应, 提出了基于船模拖曳水池的系泊试验方法, 设计了试验模型和装置, 构建了系泊试验平台, 进行了组合模型的自由衰减试验、系泊衰减试验和系泊状态下的不规则波响应试验. 衰减试验中测量了模型的摇动衰减特性, 不规则波响应试验中测量了系缆的拉力响应和组合模型的摇动响应. 试验研究得到了关于漂浮式潮流能发电装置的衰减运动特性和 4 级海况、0.6 m/s 流速时 1 号系缆的拉力响应以及组合模型的摇动响应. 研究可为基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置的理论研究和工程应用提供参考和借鉴.

关键词 潮流能, 漂浮式发电装置, 竖轴水轮机, 衰减运动, 不规则波响应, 试验

中图分类号: O352, P743.1 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-12-337

引言

基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置融合了竖轴水轮机和漂浮式载体的特点, 具有适应流向强, 对吃水要求低, 噪音低, 对船厂制造技术要求不高, 制造成本低, 安装、运输、维护和检修方便, 便于发电机组布置和人员操作, 后期维护、管理费用低等诸多优点^[1], 具有广阔的应用前景, 近年来成为研究的热点. 在国外, 意大利阿基米德桥公司开发了基于 Kobold 竖轴水轮机和碟形载体的漂浮式潮流能发电装置^[2], 英国海王星再生能源公司开发了 Neptune Proteus 漂浮式潮流能发电装置^[3]. 在国内, 哈尔滨工程大学^[4-8]和中国海洋大学^[9-11]等单位也开展过相关的工作. 但是, 上述关于该类型潮流能发电装置所开展的各项工作, 多限于对水轮机和载体结构的设计和各自性能的研究, 对载体、水轮机和系缆耦合作用下系泊系统总体性能的研究较少, 而这是深入研究系泊状态下漂浮式潮流发电装置性能的关键, 是保证基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置安全、稳定、高效工作的基础. 为了研究竖轴水轮机、载体和系缆耦合作用下漂浮式潮流能发电装置的衰减运动特性和不规则波响应, 文章将提出基于船模拖曳水池的系泊试验方法, 设计试验模型和装置, 选配试验仪器和设备, 构建试验平台, 进行组合模型的自由衰减试验、系泊衰减试验和不规则波响应试

验, 研究组合模型的自由衰减特性、系泊衰减特性以及在不规则波中响应情况, 为基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置的理论研究和工程应用提供参考和借鉴.

1 试验方法

为了研究基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置的总体性能, 建立了基于船模拖曳水池的系泊试验方法, 即由水池轨道上的拖车拖带模型, 形成模型与池水的相对运动, 模拟潮流, 通过改变拖车航速来模拟不同流速. 由池端的摇板式造波机生波模拟海浪. 由固定于拖车上, 并深入水下的立圆杆模拟系泊点, 建立系泊系统. 通过在系缆及模型上布置传感器, 构建测量系统, 进行组合模型的衰减运动特性与不规则波响应试验, 测量系缆的拉力响应和组合模型的运动情况.

2 试验平台构建

本文研究的试验平台包括试验模型、试验仪器设备和系泊系统.

2.1 试验模型

试验模型依据原型设计, 为载体模型和水轮机模型构成的组合模型, 缩尺比取 40:3. 水轮机模型为竖轴直叶水轮机, 叶片数 3 个, 叶片展长 0.658 m, 弦

2012-11-28 收到第 1 稿, 2013-02-25 收到修改稿.

1) 中央高校基本科研业务费专项资金 (HEUCF130112), 国家自然科学基金 (51209048) 和国家科技支撑计划 (2008BAA15B04) 资助项目.

2) 马勇, 博士研究生, 主要研究方向: 海洋能利用和流体力学测试技术. E-mail: mayong02@hrbeu.edu.cn

长 0.110m, 叶轮直径 0.6m, 水轮机模型重 23.96 kg; 载体模型为双体结构, 总长 1.8m, 型宽 1.043m, 型深 0.225m, 吃水 0.09m, 水线长 1.8m, 重心高 0.081m, 片体宽 0.165m, 片体间距 0.878m, 排水量 48.353 kg, 载体模型重 22.24 kg. 组合模型及其连接方式如图 1 所示.

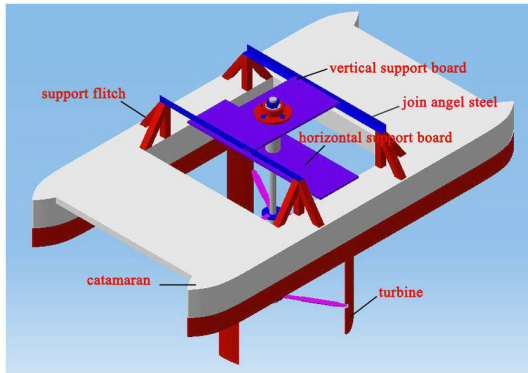


图 1 组合模型及其连接方式

Fig. 1 Combination model and its connection

2.2 仪器设备

试验平台主要包括以下仪器设备: (1) 船模拖曳水池 (哈尔滨工程大学): 池长 108m, 池宽 7m, 池深 4.0m, 水深 3.5m, 容水量约 2650t; (2) 拖车: 车速 0~6.5m/s, 稳定精度 0.5%, 给定精度 0.1%, 可通过计算机程序对拖车运行速度进行自动控制, 拖车上设有测量桥, 测量桥在垂直方向行程可调, 可调行程为 0.6m; (3) 东华 DH5920 动态信号测试分析系统: 工作通道数 16, 采样频率 10~100 kHz, 系统准确度小于 0.5%, 系统稳定度 0.05%/h, 可对时域、频域信号进行采集, 并可进行谱分析以及实时的数据处理; (4) 可调直流稳压供电电源: 供电范围 0~15V, 恒流值 0~10A, 电压调整率稳压 $\leq 0.2\%$, 负载调整率稳压 $\leq 1\%$, 恒流 $\leq 2\%$, 工作环境温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$; (5) WMC 系列小载荷拉压双向力传感器: 美国 Interface 测力传感器, 全不锈钢气密式结构, 供电电源小于 12VDC, 输出 2mV/V, 精确度小于 $\pm 0.2\%$, 工作温度 $-54^{\circ}\text{C} \sim 121^{\circ}\text{C}$, 量程 22.24~2224N; (6) InnaLab AHRS 系统: 美国制造, 包括姿态航向传感器和软件部分, 可测量航向角、纵摇角和横摇角. 采样频率 1~100Hz, 航向角测量范围 $\pm 180^{\circ}$, 纵摇角测量范围 $\pm 90^{\circ}$, 横摇角测量范围 $\pm 180^{\circ}$.

2.3 系泊方案

潮流发电装置通过 4 个系泊架 4 点系泊^[12-14], 系泊架呈倒 L 型, 一端由连接板与拖车底部的 T

型底材通过卡子固定, 一端深入水下, 连接系缆. 系缆利用尼龙绳和弹簧模拟, 弹簧弹性系数 $k = 0.277\text{N/mm}$, 预张力初设 15N. 为了减小弹簧和拉力传感器对发电装置运动和系缆拉力的影响, 将弹簧连于系泊点一侧, 拉力传感器连于发电装置一侧, 露出水面. 系泊点距水面 1.5m. 系泊架结构及其与拖车的连接见图 2, 系泊布置见图 3, 系泊状态下的组合模型如图 4 所示.

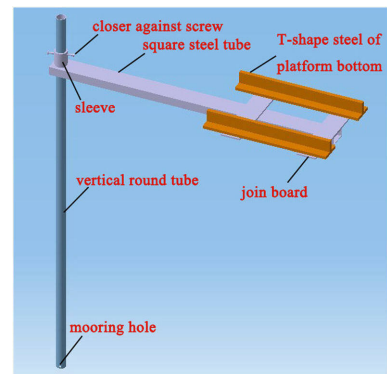


图 2 系泊架结构及其与拖车的连接

Fig. 2 Mooring frame structure and its connection with the trailer

2.4 传感器布置及数据采集方案

试验时 4 个拉力传感器布置在系缆距发电装置一端, 布置的位置关系见图 3. 拉力传感器由可调直流稳压电源供电, 供电电压 10V, 采用东华 DH5920 动态信号测试分析系统对系缆拉力^[15]进行实时数据采集和分析. 采用美国 InnaLab AHRS 系统测量发电装置运动的横摇、纵摇和艏摇. InnaLab AHRS 系统的传感器布置在距重心 100mm 高度处. 由 InnaLab AHRS 系统自带软件进行实时数据采集和分析.

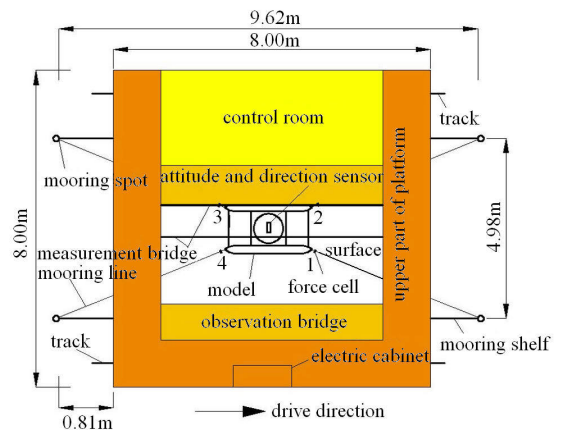


图 3 系泊布置示意图

Fig.3 Mooring layout schematic diagram

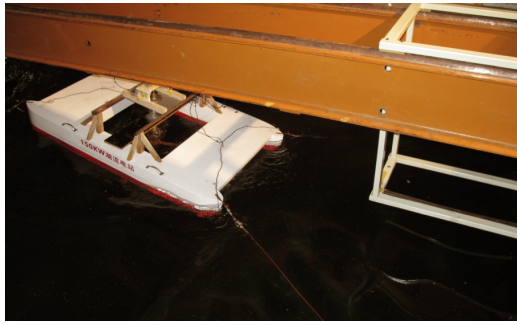


图 4 系泊状态下的组合模型

Fig. 4 Combination model in mooring state

3 试验内容及方案

试验包括组合模型自由衰减试验、组合模型系泊衰减试验和系泊状态下组合模型的不规则波响应试验。

(1) 组合模型自由衰减试验, 包括组合模型的自由横摇衰减试验和组合模型的自由纵摇衰减试验. 试验时需要在外力矩的作用下使模型形成一个初始倾斜角度, 待外力矩撤除后, 组合模型自由衰减运动, 测得组合模型的自由衰减运动情况. 为了消除池壁微幅反射波的影响, 横摇自由衰减试验时, 模型位于水池中央, 船长方向与池壁垂直, 纵摇自由衰减试验时, 模型也位于水池中央, 船长方向与池壁平行。

(2) 组合模型的系泊衰减试验, 包括组合模型的系泊横摇衰减试验、系泊纵摇衰减试验和系泊艏摇衰减试验. 与组合模型的自由衰减试验相似, 试验时也需要使组合模型在外力矩的作用下形成一个初始倾斜角度, 待外力矩撤除后, 组合模型在系缆的约束作用下开始衰减运动, 测得系泊状态下组合模型的衰减运动情况. 试验时组合模型位于水池中央, 这样可以最大限度的降低池壁反射波的影响. 另外, 本文中研究中, 池壁反射波为微幅波, 且与系泊系统相比, 对模型衰减运动影响较小, 试验中忽略这种微幅反射波的影响。

(3) 不规则波响应试验, 即测量 4 级海况系泊状态, 组合模型在波流作用下系缆的拉力响应和运动响应. 试验中流速设为 0.6 m/s, 不规则波模拟采用 ITTC 双参数谱 (国际船模实验水池推荐的标准波能谱 ISSC 谱), 谱函数

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{173H_{1/3}^2}{T_1^4\omega^5} \exp\left(\frac{-6.91}{T_1^4\omega^4}\right)$$

式中 $H_{1/3}$ 为有义波高, T_1 为波浪的特征周期, $T_1 =$

$2\pi m_0/m_1$, m_0 和 m_1 分别为波能谱对原点的 0 阶矩和 1 阶矩. 试验中需要在造波机造波控制软件内输入有义波高 $H_{1/3}$ 、特征周期 T_1 和缩尺比 λ , 本文取 4 级海况的有义波高 2.5 m, 特征周期 6.2 s。

根据相对运动原理, 采用模型动而水不动的方法模拟潮流冲击发电装置的过程, 即利用拖车拖曳模型模拟潮流冲击发电装置时, 为了消除池壁反射波和池端反射波对模型运动和受力的影响, 对不规则波采取分段造波和分段测量的方法获得试验数据, 并根据试验数据特征衔接波浪和和衔接测量数据信号。

4 试验结果及分析

4.1 组合模型衰减试验

图 5 为组合模型自由横摇衰减曲线, 图 6 为组合模型自由纵摇衰减曲线. 图 5 和图 6 中, 纵坐标 θ_R 为模型的横摇角度, θ_P 为模型的纵摇角度, θ_S 为模型的艏摇角度, 横坐标 t 为响应时间. 由图 5 可知, 给定 4° 的初始横摇右倾角, 组合模型在初始力矩、水弹力及水轮机叶片的流力作用下, 第 1 个衰减周期右倾角度增加到约为 5.7° , 之后组合模型的横摇衰减运动经过 12 个周期后趋于稳定. 从衰减曲线及衰减趋势可以发现, 组合模型横摇运动衰减较快, 这是由于双体船本身型宽较大, 并且, 因为水轮机的存在, 组合模型在双体船模型的中纵剖面上形成了较大的投影面积, 令组合模型水下部分横摇阻尼较大. 从图 5 中还可以发现, 组合模型的横摇运动衰减并不是完全的线性衰减, 且相邻衰减的右倾角大于左倾角, 以及第 1 个衰减周期右倾角增大现象, 这都是由于衰减运动过程中, 水轮机叶片的耦合作用造成的, 尤其是叶片相位发生一定改变, 影响质量分布, 并且叶片还形成了不对称的流体作用力. 试验中测得组合模型的衰减周期为 0.766 s. 由图 6 可知, 给定 3° 的初始艏倾角, 组合模型的衰减运动经过 7 个衰减周期后呈脉动衰减, 衰减平稳. 从衰减曲线及衰减趋势可以发现, 组合模型纵摇运动衰减较快, 这是由于水轮机的存在, 使组合模型在双体船模型的中横剖面上形成了较大的投影面积, 令组合模型水下部分纵摇阻尼较大. 从图 6 中也可以发现, 组合模型的纵摇运动衰减也并不是完全的线性衰减, 且相邻衰减的艏倾角略大于艏倾角, 以及第 1 个衰减周期艏倾角增大现象, 这都是由于衰减运动过程中, 水轮机叶片的耦合作用造成的, 尤其是叶片相位发

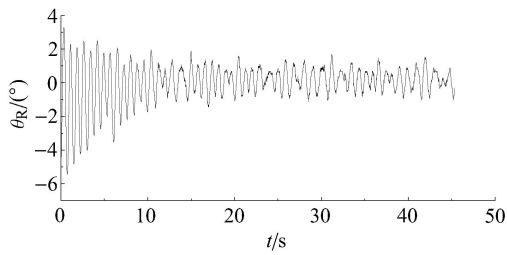


图 5 组合模型自由横摇衰减曲线

Fig. 5 Roll attenuation curve for free combination model

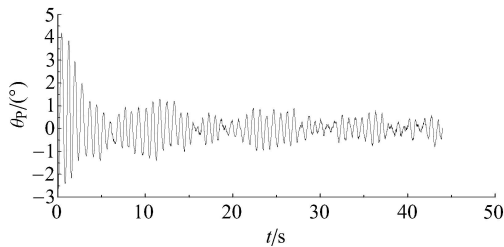


图 6 组合模型自由纵摇衰减曲线

Fig. 6 Pitch attenuation curve for free combination model

生一定改变,影响质量分布,并且叶片还形成了不对称的流体作用力. 试验中测得组合模型衰减周期为 0.806 s.

图 7 ~ 图 9 分别为系泊状态下组合模型的横摇衰减曲线、纵摇衰减曲线和艏摇衰减曲线. 图中纵坐标 θ_R 为模型的横摇角度, θ_P 为模型的纵摇角度, θ_S 为模型的艏摇角度, 横坐标 t 为响应时间. 由图 7 可知, 系泊状态下, 给定组合模型初始左横倾角 3.5° 后, 模型迅速衰减到平衡位置附近, 并在平衡位置附近做微幅横摇运动, 呈强非线性的衰减特性. 与图 5 中的自由衰减相比, 反映出系缆对组合模型横摇衰减运动影响明显, 对组合模型的大幅横摇具有较强的抑制作用. 由图 8 可知, 给定组合模型艏倾角 3° 后, 模型弱非线性纵摇衰减, 并在第 9 个周期左右开始微幅纵摇运动. 纵摇衰减运动的周期为 0.785 s. 与图 6 中的自由纵摇衰减相比, 衰减运动的周期变

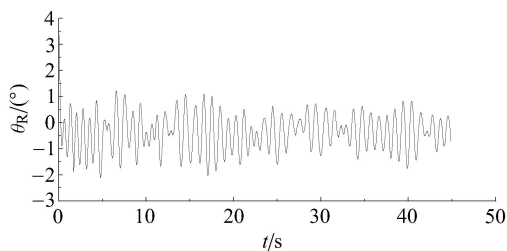


图 7 组合模型系泊横摇衰减曲线

Fig. 7 Roll attenuation curve for combination model in mooring state

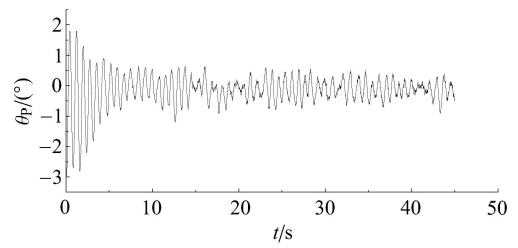


图 8 组合模型系泊纵摇衰减曲线

Fig. 8 Pitch attenuation curve for combination model in mooring state

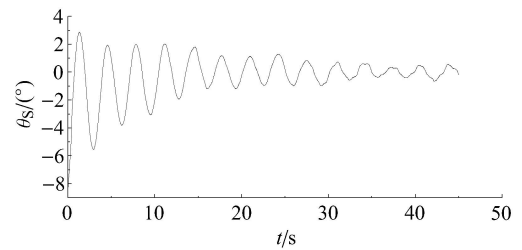


图 9 组合模型系泊艏摇衰减曲线

Fig. 9 Yaw attenuation curve for combination model in mooring state

短,这也是由于系缆约束作用的结果. 由图 9 可知, 组合模型在 8° 初始右偏角后发生艏摇衰减运动, 衰减运动周期为 3.25 s. 图 9 表明艏摇衰减的左偏角幅较小, 这是由于在初始有偏角形成时, 组合模型产生了右偏移, 初始力矩消失后组合模型同时伴有衰减运动和横荡运动造成的.

4.2 不规则波响应试验

试验发现, 来流侧 1 号系缆的拉力大于 2 号、3 号、4 号系缆的拉力, 尤其在水轮机转动时, 1 号系缆的拉力更是远大于 2 号、3 号和 4 号系缆的拉力. 这是由于, 漂浮式潮流能发电装置的载体虽为对称的双体船结构, 但是水轮机为三叶片形式, 叶片为 NACA 翼型, 漂浮式载体及水轮机等构成的发电装置, 在水流的冲击下 (或拖曳状态), 水流体力作用于水轮机叶片, 在叶片升力作用下叶轮旋转, 根据作用力反作用力原理, 发电装置受到流向力和侧向力, 发生流向和侧向位移, 并拉伸系缆, 使 1 号和 2 号系缆拉力增大, 尤其是 1 号系缆拉力增大更多, 1 号系缆的拉力远大于 2 号、3 号和 4 号系缆. 为此, 试验中只研究 1 号系缆的拉力响应.

图 10 为 4 级海况下 1 号系缆拉力不规则波响应曲线. 图中 10 中纵坐标 R 为缆绳拉力, 横坐标 t 为响应时间. 由图 10 可知, 4 级海况下, 1 号系缆的最大拉力响应为 59.51 N, 最小拉力响应为 21.94 N, 平均拉力响应为 38.39 N. 图 11、图 12、图 13 分别为 4 级

海况下组合模型的横摇响应曲线、纵摇响应曲线和艏摇响应曲线. 图 11、图 12 和图 13 中纵坐标 θ_R 为模型的横摇角度, θ_P 为模型的纵摇角度, θ_S 为模型的艏摇角度, 横坐标 t 为响应时间. 由图 11 可知, 4 级海况、0.6 m/s 流速下, 组合模型具有明显的右倾现象, 横摇具有低频波动现象, 左向横摇角度极值为 0.65° , 右向横摇角度极值为 -3.76° ; 由图 12 可知, 4 级海况、0.6 m/s 流速下, 组合模型具有平均 2.60° 的艏倾, 纵摇运动中的埋艏运动角度极值为 -12.72° , 抬艏运动角度极值为 7.07° . 由图 13 可知, 4 级海况、0.6 m/s 流速下, 组合模型具有明显的低频艏摇和右偏航现象, 左向低频艏摇角度极值为 -1.78° , 右向低频艏摇角度极值为 -5.89° , 平均右偏航角

度为 3.80° .

5 结论

为了研究漂浮式潮流能发电装置的衰减运动特性和不规则波响应, 本文首次利用船模拖曳水池开展漂浮式潮流能发电装置组合模型的自由衰减试验、系泊衰减试验和系泊状态下的不规则波响应试验. 试验研究得到了漂浮式潮流能发电装置衰减运动特性和 4 级海况、0.6 m/s 流速时 1 号系缆的拉力响应以及组合模型的摇动响应. 试验研究在得到有益试验结果的同时也证明了基于船模拖曳水池的系泊试验方法的可行性, 所构建的试验平台可作为漂浮式潮流能发电装置性能研究的基础平台. 本文的研究工作可为基于竖轴水轮机的漂浮式潮流能发电装置的理论研究和工程应用提供参考和借鉴.

参 考 文 献

- 1 马勇, 张亮, 马良等. 竖轴水轮机式潮流能发电装置开发现状与发展趋势. 科技导报, 2012, 30(12): 5-9 (Ma Yong, Zhang Liang, Ma Liang, et al. Developing status and development trend of vertical axis turbine-type tidal current energy power generation device. *Science & Technology Review*, 2012, 30(12): 5-9 (in Chinese))
- 2 Ponte di Archimede International [EB/OL]. http://www.pontediarchimede.com/language_us/. [2011-12-11].
- 3 Tidal Technology-The Neptune Proteus NP1000 [EB/OL]. http://www.eptunerenergy.com/tidal_technology.php. [2011-12-11].
- 4 张洋. 漂浮式潮流电站锚泊系统的设计和计算. [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004. 8-66 (Zhang Yang. The design and the calculation of the mooring system of the floating tidal power station. [Dissertation]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004. 8-66 (in Chinese))
- 5 曹浩. 130kW 漂浮式潮流电站锚泊系统设计. [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007. 19-67 (Cao Hao. The mooring system design of 130kW floating tidal current power stations. [Dissertation]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. 19-67 (in Chinese))
- 6 顾春江. 潮流电站平台选型及锚泊系统设计研究. [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. 12-89 (Gu Chunjiang. Study on lectotype of tidal current power platform and mooring system design. [Dissertation]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. 12-89 (in Chinese))
- 7 荆丰梅, 盛其虎, 张亮. 漂浮式潮流电站总体设计. 见: 中国可再生能源学会海洋能专业委员会第三届学术讨论会文集. 浙江温岭, 2010. 1-7 (Jing Fengmei, Sheng Qihu, Zhang Liang. Overall design of floating tidal current power station. In: Proceeding of the Third Seminar Collection of China Association for Ocean Energy. Wenling, 2010. 1-7 (in Chinese))
- 8 张楠. 漂浮式潮流电站叶轮与锚泊系统设计研究. [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. 11-77 (Zhang Nan. Design and

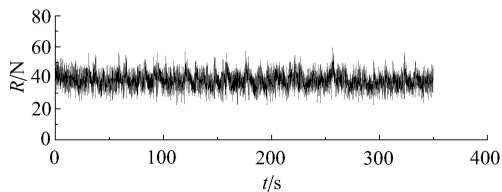


图 10 1 号系缆不规则波响应曲线

Fig. 10 Response curve for irregular wave in No.1 mooring state

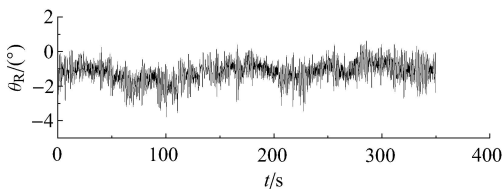


图 11 组合模型横摇响应曲线

Fig. 11 Roll response curve for combination model

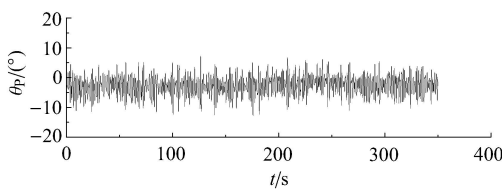


图 12 组合模型纵摇响应曲线

Fig. 12 Pitch response curve for combination model

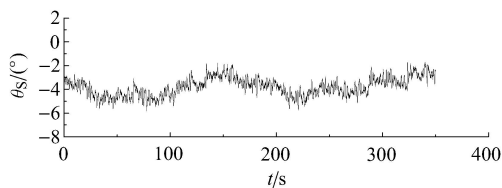


图 13 组合模型艏摇响应曲线

Fig. 13 Yaw response curve for combination model

- research of the turbine and mooring system of floating station for marine current energy generation. [Dissertation]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. 11-77 (in Chinese))
- 9 王树杰. 柔性叶片潮流能水轮机水动力性能研究. [学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 44-65 (Wang Shujie. Study on hydrodynamic performances of a tidal current energy conversion device with flexible blade turbine. [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. 44-65 (in Chinese))
- 10 王树杰, 李冬, 赵龙武等. 柔性叶片水流发电模型实验研究. 太阳能学报, 2010, 31(3): 362-366 (Wang Shujie, Li Dong, Zhao Longwu, et al. Experimental research on current energy model with flexible vanes. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(3): 362-366 (in Chinese))
- 11 王树杰, 赵龙武, 李冬等. 柔性叶片水轮机数值模拟研究. 太阳能学报, 2011, 32(3): 281-287 (Wang Shujie, Zhao Longwu, Li Dong, et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of flexible blade turbine driven by tidal energy. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(3): 281-287 (in Chinese))
- 12 陈杰诚. 海洋工程系泊技术的新进展. 见: 2005 中国广州国际海事技术论坛论文集. 广州: 中国造船工程学会, 2005. 85-91 (Chen Jiecheng. New progress of the department of ocean engineering parked. In: Proceeding of International Maritime Expo-China Forum 2005. Guangzhou: Chinese Society of Naval Architecture and Marine Engineering, 2005. 85-91 (in Chinese))
- 13 刘晓丰. 影响锚泊安全的因素分析. [学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2009. 1-6, 17-32 (Liu Xiaofeng. Analysis of factors for affecting anchoring safety. [Dissertation]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. 1-6, 17-32 (in Chinese))
- 14 刘琪. 海洋工程模型试验中系缆张力测试技术研究. [学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 8-14, 34-44 (Liu Qi. Study on mooring tension test technology of ocean engineering model test. [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. 8-14, 34-44 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

THE TEST STUDY ON THE ATTENUATION MOTION CHARACTERISTICS AND IRREGULAR WAVES RESPONSE OF THE FLOATING TIDAL POWER GENERATION DEVICE¹⁾

Ma Yong²⁾ Zhang Liang You Shizhou

(Institute of Ocean Renewable Energy System, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract In order to study the attenuation motion characteristics and irregular wave response of the floating tidal power generation device with vertical-axis tidal turbine, the experimental model is designed and mooring test platform is built to conduct the free attenuation test, mooring attenuation test and irregular waves response test based on the mooring trial carried out in ship model test towing tank. The model's shaking attenuation characteristics is measured in attenuation test and also the tensile response of mooring line and shaking response of the combined model are measured in irregular wave response test. Finally the attenuation motion characteristics of the floating tidal power device is acquired and the tensile response of mooring line 1 and shaking response of combined model under the four-grade oceanic condition when the flow velocity is 0.6m/s are achieved which can provide the reference to theoretical research and engineering application of the floating tidal power device with vertical-axis tidal turbine.

Key words tidal current energy, floating power generation device, vertical-axis tidal turbine, damping motion, irregular waves response, test

Received 28 November 2012, revised 25 February 2013.

1) The project was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HEUCF130112), the National Natural Science Foundation of China (51209048) and the National Science and Technology Support Program (2008BAA15B04).

2) Ma Yong, PhD candidate, research interests: ocean energy and test technology. E-mail: mayong02@hrbeu.edu.cn