doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.03.005

船载波浪发电设备设计及其性能研究

温瑞峒,孙 雷,董 宇,姜宜辰

(大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:为解决小型无人船由于船体空间紧凑,携带燃料较少导致的续航力差、航程短等问题, 本文以三体船为平台,将摆式波浪能发电技术与多体船相结合,提出了一种新型船载波浪发电 设备设计方案。该发电设备可由主侧船体之间的波浪运动响应差异驱动,在海上航行时捕获波 浪能并转化为电能,以此来补充船上能源。通过数值软件对三体船进行性能预报,结果表明, 在四级海况下迎浪航行时,三体船平均波浪能捕获功率可达 3.57 kW,波浪能一级转换效率为 7.32%,能够有效地补充船上能源。同时,安装船载波浪发电设备具备减摇减荡的效果,提升了 三体船的航行稳定性,进一步体现了该装置的可行性和实用性。

关键词: 三体船; 新能源; 波浪能发电; 绿色船舶

中图分类号: P743.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 03-0037-09

水面无人艇是近些年来发展极其迅速的一种新 型船舶,其船体尺度通常较小,隐身性能极佳,搭 载具备智能控制技术的计算机系统,能独立地在海 上执行各种任务^[1-2]。但同时,其较小的船体导致船 上空间紧张,无法携带过多燃料,造成了航程短、 续航力差等问题^[3-4]。在海上航行的无人船面临能源 供给困难时,海洋中却存在着丰富的清洁能源,例 如风能、太阳能、波浪能、温差能等一系列可再生 能源。其中,波浪能因为蕴藏量大、分布广、传输 过程中能量损失较小等优点,被认为是一种高质量 的海洋资源[5-7]。自18世纪70年代第一台波浪发电 设备在法国诞生以来,波浪发电技术经过几百年的 研究已经得到了大幅发展,形成了诸如压力差式、 越浪式、浮体式和摆式等多种波浪能发电设备[8-10]。 部分国家还建立了试验性质或者商用性质的波浪 发电厂,例如英国建造的 LIMPET 500 kW 固定式 振荡水柱电站^[11]、澳大利亚建造的 500 kW漂浮式电 站^[12]和丹麦的 250 kW 波龙波浪发电设备原型机^[13]

等。因此,可以通过开发船载波浪发电技术的方 式,解决海上无人船燃料携带不足这一问题,将其 能源供给从单一的携带模式转变为携带捕获相结合 的多能互补模式。

目前,业内学者已经在船载波浪发电设备的研究上投入了大量精力^[14]。吴必军等^[15]设计了一款自航气动式振荡水柱波浪能发电船并进行了水池实验,在规则波的作用下,模型船的波能俘获宽度最高可达104.07%。研究团队随后又基于该水池模型设计了多款波能发电船,其中一款在深圳大亚湾海域进行试验并获得成功。熊玮等^[16]则通过在远洋鱿钓船上搭载摆式波浪发电设备供给渔船用电,并且通过共振原理设计了适用于该发电装置的浮子尺寸,利用WAMIT软件进行数值模拟,以优化发电装置在船体上的布局。LIB等^[10]在货船上设置质量块,利用质量块的惯性在货船发生横摇运动时,驱动发电机组运转,以此实现波浪发电的功能。SEN'KOV

收稿日期: 2023-01-13

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT22GF202, DUT20TD108);大连市重点领域创新项目(2020RT03) 作者简介:温瑞峒(1998—),男,硕士研究生,主要从事波浪能发电技术研究。E-mail:18004090761@163.com 通讯作者:姜宜辰(1984—),男,博士,教授,主要从事高性能船舶及海上新能源技术研究。E-mail:ycjiang@dlut.edu.cn 装置,该装置通过缆索和摆锤将船体吸收的波浪 能转换为机械轴的旋转能,最后转化为电能。发 电设备整体安装在双体船中,大大减少了其占用的 空间。

基于较为成熟的摆式波浪能发电技术,本文提 出了一种新型船载波浪发电设备设计方案,充分结 合三体船的特征,在不影响其航行性能的情况下, 利用波浪能发电,使无人船在海上执行长期驻留任 务时,通过俘获波浪能的方式维持船载电子设备运 转,避免开启燃油机消耗推进燃料,从而增加无人 船的自持能力。

1 船载波浪发电设备设计

本文提出的船载波浪发电设备基本组成包括三 部分: 摇杆、齿轮变速箱和发电机组,其结构简图 如图1所示。发电设备的齿轮箱、发电机及摇杆架 均安装于主体上,主侧体之间通过摇杆连接。当船 只在波浪的激励下产生摇荡运动时,主侧体的水动 性能差异将导致两船体在垂荡方向上产生相对运 动¹⁹,进而带动摇杆摆动,推动发电装置发电。波浪 发电三体船的三维建模如图2所示。



图1 波浪发电设备机构简图



图 2 波浪发电三体船三维建模

波浪发电设备的摇杆两端分别与主侧船体铰 接,作为设备的捕能装置,将侧船体吸收的部分波 浪能转化为转轴的机械能,并输出给后续机构。摇 杆内置弹性限位器来控制其摆动幅度,防止摇杆摆 动幅度过大导致整船失稳。同时,弹性限位器的存 在也起到了一定的缓冲、储能作用,防止过大的冲 击损坏机构。

作为设备的动力输出(Power Take Off, PTO) 系统,齿轮箱主要有三个作用。首先,齿轮箱中内 置多级加速齿轮,能够将转速调整至发电机额定转 速附近。其次,齿轮箱的二级齿轮轴上安装了单向 轴承,可将摇杆摆动时输出轴的双向转动转化为单 向转动。最后,齿轮箱中安装了飞轮机构,通过飞 轮的惯性将输入的能量稳定下来,起到削峰填谷的 作用。

被俘获的波浪能由发电机转化为电能后,最终 将通过电路的稳压、整流处理,输送至蓄电池或船 舶电网,为三体船进行能源补充。

2 船载波浪发电设备性能评估

2.1 理论基础及计算方法

2.1.1 一阶速度势

对于浮体的频域分析,其流场的总速度势 ϕ 由 三部分构成,分别为波浪的入射势 φ_0 、浮体振荡运 动产生辐射势 φ_r 和波浪绕过浮体后的绕射势 φ_d 。

$$\phi = \varphi_0 + \varphi_d + \sum_{j=1}^6 \varphi_j \tag{1}$$

对于单向、单频率的平面入射波,其一阶入射 势表示如下。

$$\varphi_0 = \frac{Ag}{\omega} \cdot \frac{\operatorname{ch}(k(z+h))}{\operatorname{ch}(kh)} \exp(ik(x\cos\beta + y\sin\beta))$$
(2)

式中, *A* 为入射波波幅; g 为重力加速度; ω 为圆频率; *h* 为水深; β 为波浪入射角; *k* 为波数。 辐射势 φ, 满足的控制方程和边界条件如下。

$$\begin{bmatrix} [L] : \nabla^2 \varphi_{ij} = 0 \\ [F] : \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial z} - k \varphi_{ij} = 0 \\ [S] : \frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial n} = \vec{n}_j \\ [B] : \nabla \varphi_{ij} = 0 \\ [R] : \lim_{R \to \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial R} - ik \varphi_{ij} \right) = 0 \end{bmatrix}$$
(3)

绕射势 qa 满足的控制方程和边界条件如下。

$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} : \nabla^{2}\varphi_{d} = 0$$

$$\begin{bmatrix} F \end{bmatrix} : \frac{\partial\varphi_{d}}{\partial z} - k\varphi_{d} = 0$$

$$\begin{bmatrix} S \end{bmatrix} : \frac{\partial\varphi_{d}}{\partial n} = -\frac{\partial\varphi_{0}}{\partial n}$$

$$\begin{bmatrix} B \end{bmatrix} : \nabla\varphi_{d} \rightarrow 0$$

$$\begin{bmatrix} R \end{bmatrix} : \lim_{R \to \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial\varphi_{d}}{\partial R} - ik\varphi_{d} \right) = 0$$

(4)

在已知入射波基本参数后,通过式(2)求得入射势 φ_0 ,并通过求解式(3)和式(4)得到辐射势 φ_d ,进而通过式(1)求得流场的一阶总速度势 ϕ_o

2.1.2 频域运动分析

在一阶波频载荷作用下,浮体的波频运动方 程如下。

$$\left[-\omega^{2}(\boldsymbol{m}_{ij}+\boldsymbol{u}_{ij}(\boldsymbol{\omega}))-i\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\xi}_{ij}+\boldsymbol{c}_{ij}\right]x_{j}(\boldsymbol{\omega})=f_{j}(\boldsymbol{\omega}),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 6; j = 1, 2, 3, \dots, 6$$
 (5)

式中, *m* 为浮体的质量矩阵; *u* 为附加质量矩 阵; *ξ* 为阻尼矩阵; *c* 为刚度矩阵; *f* 为浮体所受的 一阶波浪载荷。

通过公式(6)可以计算频域内单位幅值的波 浪激励下,浮体运动的幅值响应算子。

$$RAO(\omega) = \frac{x_j(\omega)}{A}$$
 (6)

式中, A 为波幅。

2.1.3 时域运动分析

本文采用延时函数法,将浮体的运动看成一系 列脉冲运动的叠加,将浮体受到的力看作一系列线 性力的叠加,可以建立起力与各时刻运动的关系, 从而建立其浮体的运动方程。

$$(\boldsymbol{m} + \boldsymbol{u})\ddot{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{c}\boldsymbol{x}(t) + \int_{0}^{t} H(t - \tau)\dot{\boldsymbol{x}}(t)d\tau = \boldsymbol{F}(t)$$
(7)

式中, *H* 为系统的延迟函数; *F* 为浮体上受到的所有力的矩阵。

2.2 三体船数值建模

本文数值计算内容主要基于商用软件 ANSYS-AQWA 开展。ANSYS-AQWA 软件主要用于研究波 浪、风和流等环境载荷对海上固定及浮式结构物的 作用,具备较为成熟的理论基础和数值算法,被国 内外诸多设计公司应用于大型海洋结构物、波浪能 发电装置和船舶等的水动力性能计算分析中,适用 于工程应用研究。本次数值计算将按照实尺度的三 体船进行建模,数值模型的相关参数如表1所示。

表 1 三体船数值模型船型参数

主要参数	主体模型	侧体模型
总长/m	45.00	20.05
型款/m	3.99	2.80
设计水线长/m	44.59	19.66
设计水线宽/m	3.11	2.24
设计吃水/m	2.24	0.75
排水量/m ³	188.25	26.60
方形系数	0.468	0.305
主侧体中线面间距/m	5	.00
主侧体尾端点间距/m	6	.25
发电设备摇杆臂长/m	3	.00

在数值模型中,三体船的波浪发电设备及连接桥结构由主侧体之间的铰接约束代替,并通过在铰接约束上施加线性弹性力来模拟发电设备摇杆弹性限位器的弹性力,施加线性阻尼来模拟发电设备PTO系统的阻尼。并通过将 PTO 系统的阻尼乘以摇杆的摆动速度来计算波浪发电设备吸收波浪能的功率。

建立模型后对其进行网格划分,其最大单元尺 寸为0.5 m,网格单元总数为10633个。如图3所示, 三体船模型上大部分都是四边形网格,且网格大小 均匀,边界部分网格过度平滑,没有畸变的单元。



图 3 波浪发电三体船数值模型网格划分

为保证网格质量不会对数值模拟结果造成影 响,在正式开始计算之前,需要对数值模型进行网 格无关性验证,共设置3种尺寸的网格,分别为粗 糙网格(网格单元总数5832个)、中等网格(网格 单元总数10361个)和精细网格(网格单元总数 15466个),在3种网格设置下求解主船体的垂荡 幅值响应算子并进行对比,结果如图4所示。



图 4 不同网格数量下主体垂荡幅值响应算子

根据图 4 中结果,中等网格模型与精细网格模型的计算结果基本一致,相对误差在 3%以内,而 粗糙网格模型与精细网格模型的计算结果在某些波 浪频率区间内存在一定的差异。因此,为保证计算 精度的同时提高计算效率,选择中等网格模型进行 后续数值模拟,即采用最大网格单元尺寸 0.5 m,



网格单元数量为10633个的数值模型。

2.3 频域特性分析

本文中的三体船为一种高速穿浪三体船,30 kn 航速迎浪航行的工况为其典型高速巡航工况之一。 因此,为探究设备运转对三体船高速航行时航行性 能的影响,并分析船载波浪发电设备的发电性能, 本次数值模拟的工作主要为:三体船以30 kn 航速 迎浪航行时,其波浪发电设备吸收波浪能的功率及 船体的垂荡、纵摇运动响应。

2.3.1 水动力系数

不同周期波浪下主侧体的附加质量、辐射阻尼 如图 5 所示。本次计算工况为迎浪航行工况,且两 侧体对称布置于主体两侧,两侧体在迎浪作用下的 水动力特性相同,因此只给出右侧单个侧体的水动 力系数数据,以保证图片简洁。



图 5 水动力系数

主侧体的垂荡附加质量、纵摇附加惯性矩在同 一个量级上,但是侧体要明显小于主体。主侧体的 垂荡附加质量随着波浪周期的增大不断增大,最后 趋近于一固定值。纵摇附加惯性矩则随着波浪周期 的增大而增大。主侧体的辐射阻尼随着波浪周期的 增大迅速增大到极值,之后不断减小。装置运动不 仅受到辐射阻尼的作用,同时还受到其他阻尼作 用,例如由于水的黏性阻尼,且黏性阻尼对船体的 横摇运动影响较大无法忽略,因此本文通过在船体 上添加黏性阻尼矩阵的方法来修正数值模型。 2.3.2 一阶波浪载荷

一阶波浪力包括 F-K 力与绕射波浪力, F-K 力 是由未被扰动的入射波引起的,绕射波浪力是由于波 浪经过结构物而发生变形引起的,船体在线性微幅波



由图 6 可知,主体的垂荡波浪力和纵摇波浪力 矩要远大于侧体,主侧体的垂荡一阶波浪力随着波 浪周期的增大先迅速增大后平稳;主体的纵摇一阶 波浪力矩在波浪周期为 8 s 时出现了极大值。

2.3.3 幅值响应算子

幅值响应算子(Response Amplitude Operator,



RAO)的含义是浮体对应自由度运动幅值与波幅的 比,表明在线性波浪作用下浮体的运动响应特征, 是浮体结构的一项重要水动性能参数。不同周期波 浪下,船体的垂荡、纵摇 *RAO* 变化如下图 7 所示。

分析图 7(a) 可得,随着波浪周期增大,主体 及侧体的垂荡 *RAO* 均呈现先增大后减小的趋势,





主体垂荡 RAO 在波浪周期为 8.2 s 时达到峰值 1.32,侧体的垂荡 RAO 在波浪周期为 7.0 s 时达到 峰值 1.51。其峰值是由于遭遇波浪周期接近船体自 身垂荡固有周期而导致共振引起的,由此可根据遭 遇波浪周期计算公式(8)得到主侧体各自的垂荡 固有周期。

$$T_e = \frac{\lambda}{C + v \cdot \cos\beta} \tag{8}$$

式中, λ 为波长 (单位: m); C 为波速 (单位: m/s); v 为船只航速 (单位: m/s); β 为船只航向与 浪向夹角 (单位: (°))。将上述数据代入公式,即 可得到主体的垂荡固有周期为 3.64 s, 侧体的垂荡 固有周期为 2.90 s。 分析图 7 (b) 可得,随着波浪周期的增大,主体的纵摇 *RAO*呈现先增大后减小的趋势,在波浪周期为 7.8 s 时达到峰值 0.92 (°)/m,这同样是由于共振现象导致的,可以通过公式(8)计算出主体的纵摇固有周期为 3.43 s。侧体的纵摇 *RAO*在波浪周期为 5.9 s 时由于共振出现一个小峰值 0.39 (°)/m,根据式(8)可得侧体的纵摇周期为 2.20 s。

2.4 时域特性分析

2.4.1 三体船在规则波下的时域特性

时域数值计算中时间步长设置为 0.1 s,进行持续时间长达 1 000 s 的时域数值模拟,直至三体船的运动趋于稳定。规则波为波高 2 m,波周期 9 s 的线性微幅波,入射方向为 180°,三体船以 30 kn

航速迎浪航行,其发电设备摇杆弹性限位器线性弹 性系数设定为 20 000 N·m/(°), PTO 系统线性阻尼 系数设定为 50 000 N·m/((°)·s⁻¹)。

同时,本文还通过改变主侧体之间的约束方式 来探究发电设备正常运转时主侧体之间的相对运动 对三体船航行性能造成的影响,主侧体之间施加铰 接约束来模拟搭载波浪发电设备的发电三体船,施 加刚固约束来模拟普通的三体船。三体船主侧船体 的垂荡运动、纵摇运动及发电设备摇杆摆动数据时 历曲线节选如图 8 所示。



当三体船以 30 kn 航速迎浪航行在波周期 9 s, 波高 2 m 的规则波上时,根据多普勒原理,船只的 遭遇波浪周期为 4.29 s,更接近主体的垂荡固有周 期, 主侧体的垂荡 RAO 存在较大差值, 因此主侧 体之间产生了 0.22 m 的垂荡运动幅度差。且由于侧 船体布置于主船体中后部, 主侧体的垂荡运动之间 存在 0.49 rad 的相位差。幅度和相位上的差异导致 主侧体之间产生了相对运动, 带动发电设备摇杆摆 动, 使船载波浪发电设备成功俘获了波浪能, 其吸 收波浪能的平均功率可达 17.01 kW。

表 2 波浪发电三体船航行性能及发电性能

主侧体间	主体垂荡	主体纵摇	摇杆摆动	波浪能平均	一级转换
约束方式	幅度/m	幅度/(°)	幅度/(°)	吸收功率/kW	效率/%
铰接约束	0.975	0.576	4.676	17.005	10.873
固定约束	1.098	0.615	_	_	_

本文通过波能捕捉宽度比(Capture Width Ratio, CWR)来衡量波能转换装置一级能量转化效率,其 基本计算公式如下。

$$CWR = \frac{\overline{P}}{P_{\text{Wave}} \cdot L} \tag{9}$$

式中, *P*为船载波浪能发电设备在单位时间内 吸收的波浪能量(单位:kW); *P*_{Wave} 为波浪在接触 装置之前的能流密度(单位:kW/m); *L* 为波能转 换装置在波浪入射方向上的特征长度(单位:m), 在三体船迎浪航行工况下, *L* 即为两侧体设计水线 宽度总和。

对于无限水深的单向线性微幅波,其波浪能流 密度如下。

$$P_{\rm RW} = \frac{\rho_{\rm g} H^2}{8} \cdot \frac{C}{2} \tag{10}$$

式中, *H* 为波高(单位: m); *C* 为波速(单位: m/s)。将数据带入式(9)和式(10)便可得到船载 波浪发电设备的平均波浪能一级转换效率为10.87%。

在航行过程中,安装了船载波浪发电设备的三体船主体垂荡幅度为 0.975 m,纵摇幅度为 0.576°, 与主侧体之间刚固约束的传统三体船相比,其主体 垂荡运动幅度减小了 11.20%,垂荡运动幅度减小 了 6.30%。由此可见,在该工况下,波浪发电设备 在运行时主侧体之间的相对运动能一定程度上改善 三体船的航行性能。这是由于船载波浪发电设备将 三体船船体吸收的波浪能中的一部分转化为电能, 降低了波浪对船体摇荡运动的能量输入,从而达到 了减摇减荡的效果。

2.4.2 三体船在非规则波下的时域特性

本文前面章节已对三体船在规则波下的性能进行了研究,但三体船的工作条件是在真实的海洋环境中,实际的海浪较少以规则波的形式出现,大部分为非规则波。因此,为了更加切合实际,需要对随机波下三体船的性能进行分析,这样才能更加真实反映出其在实际海浪环境的状态。假定三体船遭遇海况为四级海况,非规则波浪谱为JONSWAP 谱,波浪有义波高为1.88 m,谱峰周期为8.8 s,谱 峰因子为3.0^[20]。三体船仍以30 kn 航速迎浪航行, 其波浪发电设备摇杆吸收波浪能摆动时传递给PTO 系统的功率如图9 所示。



通过对功率曲线进行数值积分可以求得发电设备在 500 s 内吸收的总波浪能,进而求得设备吸收 波浪能的平均功率为 3.57 kW。

根据美国电力研究协会(Eletric Power Research Institute, EPRI)的波浪资源评估算法,非规则波的波浪能流密度^[21]可表示为式(11)。

$$P_{\rm IRRW} = 0.5 \cdot H_s^2 \cdot \overline{T} \tag{11}$$

式中, H_s^2 为有义波高, 单位为 m; \overline{T} 为平均波 浪周期, 单位为 s, 其与谱峰周期 T_p 可通过式(12) 进行换算。

$$\overline{T} = T_p \sqrt{\frac{5+\gamma}{11+\gamma}} \tag{12}$$

式中,γ为波浪谱峰因子。

由此,可以求得三体船在四级海况的非规则波

中迎浪航行时,其船载波浪发电设备吸收波浪能的 平均功率 3.57 kW,波浪能一级转化效率为 7.32%。 假设船载波浪发电设备平均一天能工作 12 h,其发 电量可达到 42.88 kW · h,若同时搭配太阳能光伏发 电系统使用,能够满足无人船在海上值守期间电子 设备的电能消耗,从而避免启用燃油机而消耗推进 燃料,增加无人船的自持能力。

3 结 论

本文以无人三体船为平台设计了一种适用于多 体水面艇的摆式波浪发电设备,文中阐述了摆式波 浪发电设备的工作原理,即利用多体船船体之间的 波浪响应的差异性,推动波浪发电设备摇杆摆动, 进而捕获波浪能产生电能。与常规的船载波浪发电 设备相比,该设计方案并未改变三体船的水动构 型,对船舶航行的影响较小。本文通过数值软件对 波浪发电三体船展开了多种工况下的数值模拟,并 评估了该船载波浪发电设备设计方案的可行性与实 用性,主要研究结论如下。

(1) 三体船主侧船体的水动力性能之间存在一 定差异,因此三体船在波浪中航行时,可以通过主 侧体之间的波浪响应差异,推动波浪发电设备运转,捕获波浪能补充船上能源。

(2)在规则波下,以 30 kn 航速迎浪行驶的波 浪发电三体船垂荡运动、纵摇运动幅度相较传统三 体船均有一定程度的减小,这是由于发电设备将船 体吸收的波浪能部分转化为电能,从而降低了波浪 对船体摇荡运动的能量输入,因此安装船载波浪发 电设备具备一定的减摇减荡效果。

(3) 在四级海况下,三体船以 30 kn 航速迎浪 航行时,船载波浪发电设备吸收波浪能的平均功率 可达到 3.57 kW,波浪能一级转化效率为 7.32%, 能够有效地对船上能源进行补充,具备一定的可行 性和实用性。

参考文献:

- [1] 顾颖闽. 水面无人艇艇群技术发展概述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(12): 35-38.
- [2] 孔维玮,冯伟强,诸葛文章,等.美军大中型水面无人艇发展现状及启示[J].指挥控制与仿真,2022,44(5):14-18.
- [3] SURYANARAYANAN S, CARTES D, SIDLEY R. Energy scavenging modes from renewable sources for unmanned surface vehicles: A survey of concepts[C]//Unmanned Systems Technology VII. Orlando, US: SPIE, 2006, 6230: 878–884.
- [4] WANG X, SONG X, DU L. Review and application of unmanned surface vehicle in China[C]//2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Liverpool, UK: IEEE, 2019: 1476–1481.
- [5] 李文清,罗祾,齐晓曼,等.海洋能技术发展现状及其在上海地区的适应性[J].电力与能源,2022,43(6):518-520.
- [6] 路晴, 史宏达. 中国波浪能技术进展与未来趋势[J]. 海岸工程, 2022, 41(1): 1-12.
- [7] GU Y J, HUANG J H, ZHAO L J, et al. Progress of generating technologies on oceanic wave energy[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 71–78: 2452–2457.
- [8] 樊后朋,孙亮,韩松林,等.摆式波能发电装置在不规则波中的性能分析[J].太阳能学报,2022,43(2):82-87.
- [9] 赵金峰, 黄筱云, 陈理. 波浪能发电技术及研究现状[J]. 湖南水利水电, 2022, 239(3): 7-11.
- [10] HANDOKO C R. The development of power take-off technology in wave energy converter systems: A review[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bandar Lampung, Indonesia: IOP Publishing, 2021, 739(1): 12–81.
- [11] BOAKE C B, WHITTAKER T J T, FOLLEY M, et al. Overview and initial operational experience of the LIMPET wave energy plant[C]//The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan: OnePetro, 2002.
- [12] CLÉMENT A, MCCULLEN P, FALCÃO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2002, 6(5): 405-431.
- [13] KOFOED J P, FRIGAARD P, FRIIS-MADSEN E, et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon[J]. Renewable energy, 2006, 31(2): 181–189.
- [14] 熊玮,谷汉斌,刘海源,等.波浪能发电技术在船舶上的应用[J].水运管理,2018,40(3):30-33.
- [15] 吴必军,张芙铭,龙正翔,等.自航气动式振荡水柱波浪能发电船技术[J].太阳能学报, 2022, 43(8): 458-462.
- [16] 熊玮. 远洋鱿钓船波浪能发电装置设计研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2018.
- [17] LI B, ZHANG R, ZHANG B, et al. A new energy recovery device by utilizing the merchant ship rolling[J]. IEEE Access, 2020, 8: 162049–162065.
- [18] SEN'KOV A P, KALMYKOV A N, SEN'KOV A A, et al. On advanced versions of wave-power plants[J]. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(12): 783-787.
- [19] 张大朋,严谨,赵博文,等.多体船在波浪中的运动响应及片体间兴波干扰研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(9): 33-39.
- [20] HASSELMANN K, BARNETT T P, BOUWS E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A, 1973: 1–95.
- [21] 郑崇伟,林刚,孙岩,等.近22年南海波浪能资源模拟研究[J].热带海洋学报,2012,31(6):13-19.

Design and Performance Analysis of Ship-Borne Wave Energy Converter

WEN Ruitong, SUN Lei, DONG Yu, JIANG Yichen

(School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to the compact hull space, small unmanned surface vehicle can only carry a small amount of fuel, resulting in poor endurance and short range. This paper combines bottom-hinged flap wave energy converter with multi-hull ship, and takes the trimaran as the platform to design a new type of ship-borne wave energy converter. The wave energy converter can be driven by the difference of wave motion response between main and side hulls, capture wave energy and convert it into electric energy to replenish onboard energy when sailing at sea. According to the prediction results based on numerical software, the average power of wave energy captured by the converter can up to 3.57 kW when the trimaran is sailing in head sea under degree 4 sea state, the primary conversion efficiency can reach 7.32%, this can effectively supplement the energy on board. Meanwhile, the installation of ship-borne wave energy converter has the effect of reducing the pitch and heave of main hull, improves the navigation stability of trimaran, it further reflects the feasibility and practicability of this device.

Key words: trimaran; new energy resources; wave energy converter; green ships