

摆动叶片式波浪能发电装置在船舶上的应用研究

李保^{1,2}, 李国富¹, 刘剑¹, 杨少增¹, 应小刚¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 介绍了摆动叶片式波浪能发电装置在船舶上的工作原理, 基于线性波理论研究了装置的水动力学性能, 推导出了装置中叶片波能拾取率的公式。基于 Gambit 和 Fluent 软件, 在最优摆角的情况下, 模拟仿真了装置模型在变流速下的转矩和轴向力, 为分析装置的波能效率和抗风浪能力奠定了基础。通过对装置试验研究, 得到了装置的平均波能拾取率约为 4.37%。研究表明: 该装置在船舶上应用良好, 为波浪发电技术在船舶上的开发利用提供参考依据。

关键词: 波浪发电装置; 水动力特性; 最优摆角; 摆动叶片; 叶片波能计算; 模拟仿真; 船舶

中图分类号: TV7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2015)06-0137-05

Research on application of wave energy generating device of oscillating blade type to ship

LI Bao^{1,2}, LI Guofu¹, LIU Jian¹, YANG Shaozeng¹, YING Xiaogang¹

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

2. Key Laboratory of Roll Forming Technology of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: The paper introduced the working principle of a new wave energy generating device of oscillating blade type on ship. Based on the linear wave theory, it studied the hydrodynamic performance of the device and derived the wave energy formula of blades. By using Gambit and Fluent software, the paper simulated torque and axial force under variable velocity, which could lay a foundation for the analysis of wave energy efficiency and the ability of resisting wind and wave. The result shows that the average wave energy acquisition rate of the device is 4.37 percent. The application of the device to ship is good, which can provide the reference basis for the development and utilization of wave energy technology to ship.

Key words: wave energy generating device; hydrodynamic characteristics; optimal swinging angle; swinging blade; wave energy formula of blades; simulation; ship

工业革命以来,全球能源消耗量剧增,石油、煤、天然气等化石资源被大量地使用,生态环境不断恶化,特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化,人类社会的可持续发展受到严重威胁^[1]。一直以来,人们都认为海上运输是最清洁的运输方式,但新的研究数据表明,船舶运行也会产生非常严重的污染^[2]。随着经济全球化的持续发展,世界各国的物资运输更加频繁,需要的船舶数量也越来越多,因此,船舶对生态环境的影响也日趋严重。根据国际海事组织(IMO)估计,2012年船舶的CO₂排放量占全球总

排量的2.7%,排放量达9.5亿t^[3]。2013年1月1日,船舶能效设计指数(EEDI)正式实施,它对船舶设计和建造提出了新的要求。为了船舶工业的发展,我国应当利用新能源提高船舶的能效水平。

目前,新能源已经开始在船舶中使用,国内学者主要在风能、太阳能及核能等方面进行了研究。何建海等^[4]分析介绍了风能在船舶上的几种应用形式,并重点阐述了目前风帆助航在国内外研究的进展情况及现状。贺圣强等^[5]阐述了太阳能船舶的应用现状,分析了太阳能船舶的发展特点,剖析了

收稿日期:2015-07-14; 修回日期:2015-06-28

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY12E09001); 宁波自然科学基金项目(2015A610150); 浙江省新苗人才计划(2015R405072); 宁波市重点学科项目(XK115D223)

作者简介:李保(1988-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向:海洋波浪能应用。

通讯作者:李国富(1966-),男,浙江台州人,教授,硕士生导师,主要从事机电测控、制造系统等方面的研究。

其发展的限制因素,并对其研究发展方向及应用前景进行了展望。赵洪冉等^[6]阐述了核动力在民用船舶上应用的必要性,将核动力船舶与常规内燃机动力船舶的各项性能进行了比较,指出了核动力应用于民用船舶的局限性和可行性。而对于波浪能,国内大多数还局限于近海岸或者漂浮的航标灯,在船舶上还未开始应用。

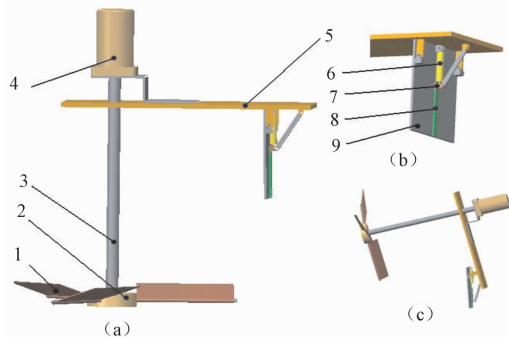
我国现有渔船 106 万艘,是民用运输船舶数量的 7 倍^[7],而捕捞业又是能源消耗较高的产业。随着渔业资源的减少,渔船每年都有 2~3 个月的休渔期;另一方面,为了躲避沿海台风和其他极端天气,渔船经常需要停泊。如果渔船能够利用停泊时海面的波浪能进行发电,并且将电能储存起来,当渔船需要出海时,柴油机就不必负载日常使用的发电机,从而节省燃料。另外,渔船在海上停留捕鱼时,也可利用波浪能进行发电。

文中设计了一种用于渔船的波能发电装置,通过对其进行水动力学分析,证明了该装置在渔船上的可行性较好,并通过试验进行了验证。该波能发电装置不仅能够为渔船提供照明等基本用电,并且对环境无任何污染,有利于生态环境的改善,关系着广大渔民的切身利益。

1 波浪发电装置的工作原理

由于该波浪能发电装置依靠波浪的上下波动发电,所以装置可以在沿岸布置,也可以安装在近海区域的固定桩或船舶上。如图 1 所示,是安装在船舶的情况,它主要有叶片、传动轴、发电机、支撑板和船体固定板组成。整个装置通过船体固定板安装在船体上,当船舶停泊时,通过控制液压缸活塞杆的位置,使传动轴处于竖直状态,叶片接触波浪并开始旋转,从而带动发电机发电,图 1(a) 是船舶停泊时的工作状态。当船舶准备行驶时,控制液压缸活塞杆的位置,曲柄顺时针转动,使叶片和传动轴脱离海面,图 1(c) 是船舶航行时的工作状态。至于电能的

转换和储存,暂不做考虑。



1-叶片; 2-旋转支架; 3-传动轴; 4-发电机; 5-支撑板;
6-液压缸; 7-滑块; 8-导轨; 9-船体固定板

图 1 发电装置的模型示意图

波浪在传播过程中,波面是不断地变化的,当波浪作用在叶片上时,对叶片有向上或向下的力,又由于安装的叶片有一定的倾斜角,所以叶片受到沿切线方向的分力后绕中心轴旋转,从而带动发电机的主轴旋转发电。该装置的核心部件为叶片,叶片并不是固定在旋转支架上,而是可以绕着旋转支架轴上下摆动。并且叶片旋转受到上下极限位置的限制,这个功能可以通过机械机构在叶片的绕轴上实现。根据到达叶片上波形的不同,叶片所在的位置也不同。当下一刻波浪的幅值变大时,即波浪垂直向上地流动时,叶片位于最上侧,如图 2 所示。当下一刻波浪的幅值变小时,即波浪垂直向下流动时,叶片位于最下侧,如图 3 所示。无论是位于最上侧还是最下侧,自上而下看,波浪力沿着轴切向方向都是顺时针的。因此叶片可以使传动轴始终绕着同一个方向旋转,这不仅有利于发电机的发电,并且可以降低发电系统的成本。

2 理论分析

欲研究波能发电装置在船舶上的性能,需要研究船舶在波浪下的运动状态和波浪自身的运动方式。在建立波浪运动方程时,由于边界条件是非线性的,求解波浪速度比较复杂。当波幅相对于波

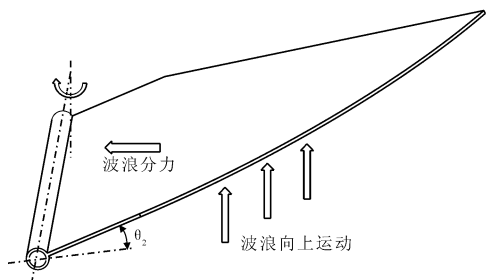


图 2 波浪向上运动时,叶片的运动状态示意图

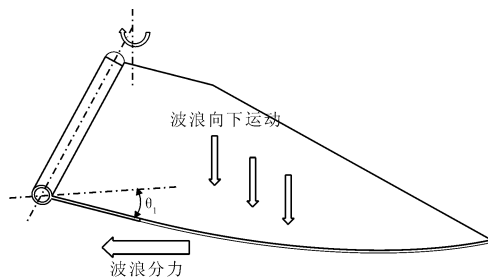


图 3 波浪向下运动时,叶片的运动状态示意图

长是无限小,流体质点的运动速度比较缓慢时,波动的自由表面所引起的非线性影响可以忽略,即非线性的自由表面运动边界条件和动力边界条件可以简化为线性的自由表面边界条件,在此假定条件下的波浪理论即为线性波理论。文中装置的工作性能就是建立在线性波理论的基础上进行研究的。

根据波浪发电装置与船舶的结构和位置关系,船舶的运动状态即为波浪发电装置的运动状态,而发电装置叶片的运动状态是波浪运动和船舶运动叠加产生的。首先把船体和发电装置看作一个整体,研究作为一个自由漂浮水面的整体在规则入射波作用下所产生的摇振运动方程。船舶运动方程是由六个自由度(横摇、纵摇、首摇、横荡、纵荡、垂荡)耦合的运动微分方程,船体在波浪上的摇荡运动时,不考虑推进力、操纵力和与粘性有关的外力,只保留与摇荡运动有关的流体作用力。已知流场中压力 $p(x, y, z, t)$, 则

$$m \left(\frac{\partial v_{0i}}{\partial t} + \varepsilon_{ijk} \omega_j v_{0k} \right) = \iint_S p n_j dS \quad (1)$$

$$I_{ij} \frac{\partial \omega_j}{\partial t} + \varepsilon_{ijk} \omega_j I_{kl} \omega_l = \iint_S p n_{i+\varepsilon} dS \quad (2)$$

式中: i, j, k, l 分别为 1, 2, 3, 4; m 为船体的质量, kg; v_0 为质心的运动速度, m/s; ω 为绕过质心的某瞬时轴转动的角速度, rad/s; ε_{ijk} 为交变张量, 无量纲; p 为流场中压强, Pa; n 为广义法线矢量的分量, 无量纲; S 为船体的瞬时湿表面, m^2 。

若方程精确到一阶, 运动方程可记为:

$$m \frac{\partial v_{0i}}{\partial t} = \iint_{S_0} p n_j dS \quad (3)$$

$$I_{ij} \frac{\partial \omega_j}{\partial t} = \iint_{S_0} p n_{i+\varepsilon} dS \quad (4)$$

式中: 瞬时湿表面 S 改为平均湿表面 S_0 。经过缩写以后, 船体的位移表达式为^[8]

$$m_{ij} \ddot{x}_0 = \iint_{S_0} p n_i dS, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

然后, 讨论波浪自身的运动, 由线性波理论, 可知波面方程:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

由 Laplace 方程和边界条件可知, 速度势函数的表达式为:

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

波浪运动的速度场的表达式为^[9]:

$$u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{gHk}{2\omega} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (8)$$

由线性弥散关系式:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (9)$$

把公式(9)代入公式(8), 整理可得:

$$u_z = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (10)$$

叶片上的垂直速度在一个波浪周期内的平均速度为:

$$\bar{u}_z = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k \left(\frac{L \sin \theta}{2} + d \right)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

结合船舶的运动方程(5), 叶片的速度可以表示为:

$$v = |x_0 - \bar{u}_z| \quad (12)$$

由工程流体动量定理, 把水体控制体看作一个整体, 即满足公式^[10]

$$F_1 - F_2 - F_z = \rho Q (V_2 - V_1) \quad (13)$$

式中: F_1 为入口处对水体控制体的力, N; F_2 为出口处对水体控制体的力, N; F_z 为叶片对水体控制体的力, N。又 $V_1 = v, V_2 = 0$, 水体控制体的力 F 数值大小等于 F_z , 假设叶片数为 N ; θ 为叶片摆角, rad; R_2 为矩形叶片外侧距中心的距离, m; R_1 为矩形内侧距中心的距离, m; 因此, 所有叶片受到的合转矩为:

$$T = N \int_{R_1}^{R_2} F t \cos \theta \sin \theta dt \quad (14)$$

在一个波长、单位长度范围内叶片拾取的有效波能为

$$E_{\text{有}} = \frac{\pi T v}{\omega R_2^2} \quad (15)$$

波浪自身具有的能量为

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (16)$$

所以叶片拾取能量的效率为

$$\eta = \frac{E_{\text{有}}}{E} \quad (17)$$

3 模拟仿真分析

为了验证模型的可行性, 文中采用 Gambit 和 Fluent 相结合的方式对模型进行仿真研究。由于波浪水平速度对模型影响很小, 这里只讨论波浪垂直速度产生的轴向力和转矩。由于波浪向上速度是时刻变化的, 且以周期形式呈现, 假设模型受到的流速 $v = 1 + \sin(\pi t / 10)$, 其中 t 为迭代时间。

模型尺寸数据如下： $R_2 = 350 \text{ mm}$ ， $R_1 = 50 \text{ mm}$ ， $B = 200 \text{ mm}$ ， $s = 5 \text{ mm}$ ， $R = 1\ 000 \text{ mm}$ ， $h = 350 \text{ mm}$ ， $\theta = 33^\circ$ 。其中 s 为叶片厚度， R 为流域半径， h 为流域长度， θ 为叶片最优摆角。

假设条件如下：水流为定常不可压缩流；忽略摩擦力影响；叶片简化为矩形；叶片模型的边界可以简化为圆柱面；

首先利用 CREO 建立三维模型，如图 4 所示。然后用 Gambit 划分网格，最后导入到 Fluent 中进行计算流体力学仿真。由于该流域入口流速为非定常流，利用 UDF 以入口速度为参数进行编程，再把程序导入到 Fluent 进行仿真分析，结果如图 5 所示。由仿真计算结果可得，第 20s 时，叶片受到的 Y 方向轴向力为 363.5 N，叶片受到的绕 Y 方向驱动力矩为 46.1 N·m。利用 Fluent 监视器，得出出口流速随时间的变化曲线，如图 6 所示，结果表明，模型出口流速也是呈现周期性变化。

4 试验分析

为了验证理论分析和仿真模拟的正确性，制造

出了波浪能发电装置，并安装在漂浮的平台上，然后对装置的运动响应数据进行采集，如图 7 所示，研究装置在一定的波况下的波能拾取率。发电装置上安装有微型直流发电机，试验的负载为一个普通电阻，阻值恒定，并用示波器并联测量电阻两端的电压，另外，电路中还加一个发光二极管，用于指示电路的通断。试验的波况条件：线性入射波，波长为 1.5 m，波浪周期为 2 s，波高为 0.16 m。采用的电阻为 5 Ω ，测量的电压波形如图 8 所示。

根据示波器得到的数据，利用 Matlab 软件进行数据的提取和计算，得出电压和功率随时间的变化图，如图 9 和 10 所示。由图形可知，发电机的输出功率也是和波浪一样按周期变化的，最大的瞬时功率为 2.83 W。然后，计算功率关于时间轴的积分，可以得到发电机的平均输出功率为 0.48 W。由公式(17)和周期 T 可知，在 $L = 0.7 \text{ m}$ ， $H = 0.16 \text{ m}$ 的条件下，波浪自身具有的功率为 10.97 W。因此，该装置的平均波能拾取率为 4.37%。从试验的数据可以看出，该波能发电装置利用率在波能利用领域相对较高，装置结构较其他发电装置简单，且具有减

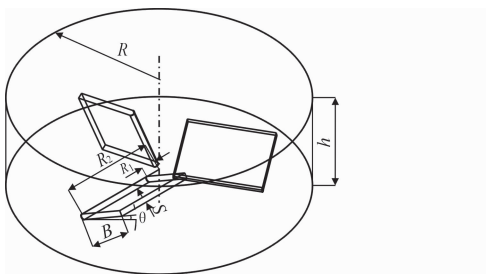


图 4 仿真模型示意图

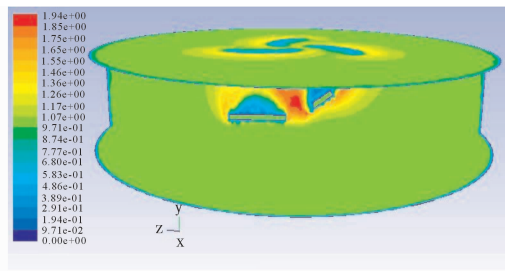


图 5 模拟仿真的速度云图

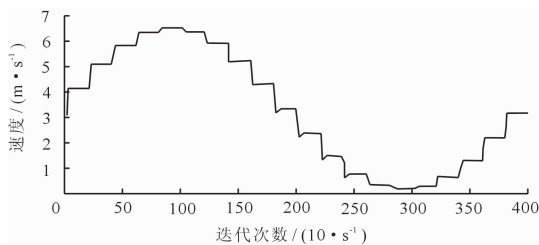


图 6 流速随时间变化图

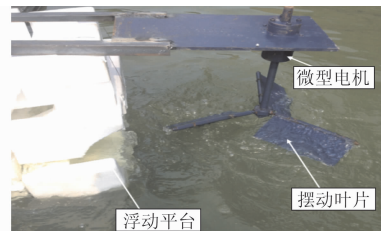


图 7 试验装置实物图

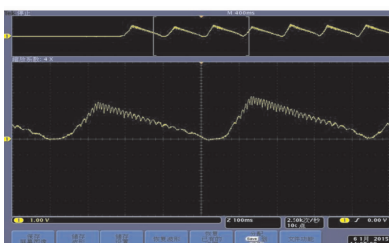


图 8 示波器波形图

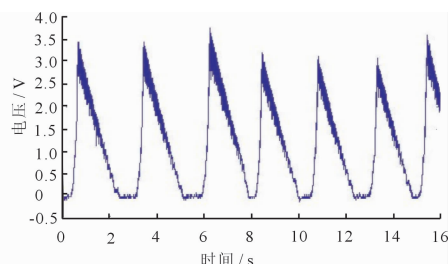


图 9 电压随时间的变化图

小船体摇晃的效果。

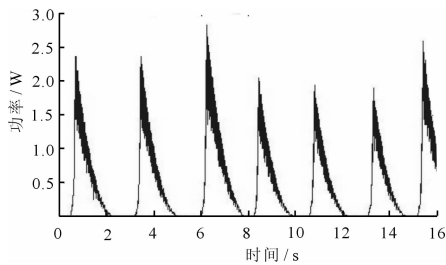


图10 功率随时间的变化图

5 结 语

通过理论分析、模拟仿真和试验研究,可以得出以下3个结论:

(1) 结合波浪运动和船体运动的特点,基于线性波理论,推导了该波浪发电装置在一个波长、单位长度范围内叶片波能拾取率的公式。

(2) 通过 Fluent 模拟仿真可知,在第 20s 时,装置叶片受到轴向力为 363.5 N 和驱动力矩为 46.1 N·m,且模型的出口流速也呈现周期变化。

(3) 通过试验数据分析,得到该装置的平均波能拾取率为 4.37%。

由于装置的输出功率不仅与自身发电能力有关,而且和发电机的功率及所带负载有密切的联系,

因此,该实验条件下得到的波能拾取率只是装置在该发电机和负载下的发电性能,欲得到该装置的最大波能拾取率,还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划[J]. 可再生能源, 2007, 25(5): 1-5.
- [2] 叶丹. 低碳经济对我国航运业的影响[J]. 水运管理, 2010, 32(9): 17-19.
- [3] Haakon Lindstad. The third IMO GHG study[R]. London: International Maritime Organization, 2015.
- [4] 何建海, 胡以怀, 张建霞, 等. 风能在船舶上的应用现状及展望[J]. 船舶工程, 2013, 35(5): 112-115.
- [5] 贺圣强, 魏 骁, 于安斌, 等. 太阳能在船舶上应用现状及展望[J]. 新能源, 2014, (9): 42-44+41.
- [6] 赵洪冉, 赵智萍. 核动力在民用船舶上的应用[J]. 中国水运, 2014, 14(9): 8-10.
- [7] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴 2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [8] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [9] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
- [10] Finnemore E John, Franzini Joseph B. (钱翼稷, 周玉文译). 流体力学及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.