

文章编号: 1674-5566(2010)05-0698-05

# 一种新型振荡浮子式海洋波浪能发电装置的设计

羊晓晟, 曹守启, 侯淑荣, 张丽珍

(上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 针对目前出现的全球能源短缺危机, 设计并研制了一种新型的运用海洋波浪能进行发电的振荡浮子式波浪能发电装置。简要介绍该装置的基本组成和确定转换装置的方案, 完成转换装置的结构设计, 并对装置的工作过程进行了说明。结合海浪理论与计算原理、海洋波浪能转换以及机械设计等知识并运用 MATLAB 软件编程计算装置的整机理论效率。假设装置在规则线性波浪的作用下, 通过理论计算, 该装置在波浪周期为 5 s, 波浪高度为 1.5 m, 浮子直径为 0.2 m, 长度为 0.3 m 的条件下, 整机理论效率可达 0.393。该装置具有很好的发电效率, 并且装置的结构可靠性高, 具有广阔的发展前景。

**关键词:** 波浪能; 发电装置; 振荡浮子; 效率

**中图分类号:** P 743.2      **文献标识码:** A

## Design of a new oscillating buoy ocean wave power generation device

YANG Xiao sheng, CAO Shou qi, HOU Shu rong, ZHANG Li zhen

(College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In view of the current global energy shortage crisis, a new oscillating buoy ocean wave power generation device is designed which uses the ocean wave energy. This paper briefly introduces the basic components of the device, determines the scheme of the conversion device, completes the structure design of the conversion device, and explains the working process of device. It combines the knowledge of wave theory and computation principle, ocean wave energy conversion, mechanical design, and uses the MATLAB software to compute the theoretical efficiency of the device. Suppose the device is under the action of regular linear waves, through the theoretical calculation, the theoretical efficiency of this device is up to 0.393 when the wave period is 5 s, wave height is 1.5 m, the buoy diameter is 0.2 m, and buoy height is 0.3 m. The device has good power generation efficiency and high reliability, which has a broad prospect for development.

**Key words:** wave power; generation device; oscillating buoy; efficiency

随着世界经济不断地高速发展, 人类对能源的需求量愈来愈大, 但是世界储存的资源是有限的, 生产周期远远慢于人类使用和开采的速度。按目前统计的年均开采量估算, 我国到 2040 年石油资源枯竭; 2060 年天然气耗尽; 2300 年煤炭存

储量开采完毕<sup>[1]</sup>。当前出现的全球能源危机已经深刻地提醒人们, 开发新型的、可再生的能源是世界各国当前必须解决的问题。

人类生存的陆地只占地球面积的 30% 左右, 而海洋占到了 70% 之多, 海洋中不仅蕴藏着已为

收稿日期: 2010-02-25

基金项目: 上海市科委地方院校能力建设项目 (08210511900); 上海市教育委员会科研创新项目 (10YZ129)

作者简介: 羊晓晟 (1986-), 男, 硕士研究生, 专业方向为机械设计及理论。E-mail: yx0422333@yahoo.cn

通讯作者: 张丽珍, E-mail: lzhang@shou.edu.cn

人们所熟知的水产、天然气、石油等资源,更贮藏着潮汐能、波浪能、海流能等形式的海洋能源。其中波浪能在海洋中无处不在,并且取之不尽,可以有效地加以利用为人类的生活造福。世界上许多国家已投入了大量的人力、物力和财力对其进行了多年的研究<sup>[2]</sup>,并且也开发出了几种典型的波浪能发电类型,例如:点头鸭式、振荡水柱式、振荡浮子式、摆式等<sup>[3-4]</sup>。目前日本、英国以及我国等国家已经先后成功地研制出一些波浪能发电站,并且投入生产使用<sup>[5]</sup>,但是大多数都是大型化、大功率的设备,并且装置建造费用昂贵,施工困难<sup>[6-7]</sup>,小型化的波浪能发电装置在市场上仍不多见,这一点极大地制约了波浪能发电装置的发展。

本文设计了一种新型的小型化、小功率波浪能发电装置,其类型属于振荡浮子式波浪能发电装置,可以有效地解决目前波浪能装置发电效率低以及成本高等不足,并且装置的可靠性也能得到保证。

## 1 装置基本组成

新型振荡浮子式海洋波浪能发电装置主要由波浪吸收装置、转换装置和输出装置 3 大部分组成,装置的基本结构如图 1 所示。波浪吸收装置主要由浮子和连杆组成,用于吸收波浪能。转换装置包括双面齿条、传动齿轮、棘轮式超越离合器、传动轴、空心套筒和输出齿轮和输出轴等构件,它把吸收装置吸收的波浪能转换为旋转运动的机械能。输出装置由电机轴、联轴器和发电机组成,把机械能转换成电能。整个装置除浮子和连杆外,封装在一个固定于海洋平台上的箱体

## 2 转换装置的结构设计

### 2.1 转换装置的方案

该发电装置通过吸收装置把波浪的起伏运动转换成双面齿条的上下直线运动,双面齿条带动左右两边的传动齿轮旋转,从而带动传动轴旋转,传动轴带动输出齿轮旋转,输出齿轮与发电机齿轮啮合,使发电机轴旋转,转换装置通过这一过程便把直线运动转换成了旋转运动,带动发电机工作。在图 1 中 A-A 所示位置的空心套筒

内安装有棘轮式超越离合器,超越离合器的结构如图 2 所示。两套筒内的超越式离合器同向安装,保证齿条上下运动时只有一个传动齿轮工作,同时也使发电机连续运转,提高发电效率。

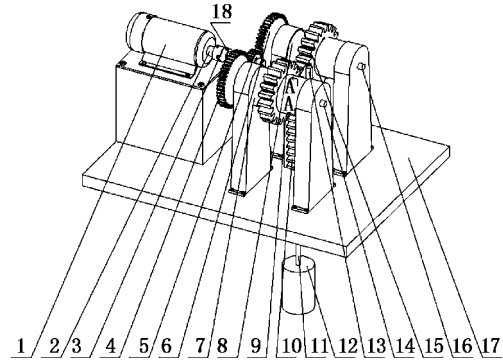


图 1 振荡浮子式海洋波浪能发电装置结构示意图

Fig. 1 The schematic of oscillating buoy ocean wave power generation device

1 发电机; 2 电机轴; 3 联轴器; 4、6 输出齿轮; 5 发电机齿轮; 7、8 空心套筒; 9、15 传动齿轮; 10 双面齿条; 11 连杆; 12 浮子; 13 滑槽; 14、16 传动轴; 17 平台; 18 输出轴。

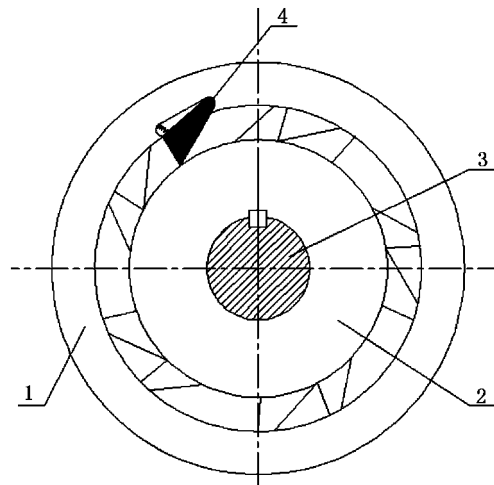


图 2 棘轮式超越离合器结构示意图

Fig. 2 The schematic of ratchet type clutch

1 空心套筒; 2 棘轮; 3 传动轴; 4 棘爪。

### 2.2 双面齿条的结构

为了使双面齿条能平稳地上下运动,在齿条两侧设计了滑槽,在滑槽的上下端部设置了限位块。双面齿条两侧装有滚轮机构,齿条通过滚轮在滑槽中上下移动,并且可以有效地限制齿条的左右摆动。限位块可以避免齿条由于海浪过大而超出理论行程,造成装置失效。

### 2.3 转换装置各部分尺寸确定

浮子与齿条通过连杆刚性连接,在规则线性波的作用下,为简化计算,设浮子的上升和下降过程均是匀速直线运动且运动速度相等,齿条的理论位移等于浮子的理论位移,由参考文献[8]可知浮子的理论位移为

$$Z_0 = 0.842H \quad (1)$$

式中:  $Z_0$  为浮子的理论位移 (m);  $H$  为波浪波高 (m)。

浮子上下的理论速度为

$$V = \frac{2Z_0}{T} \quad (2)$$

式中:  $V$  为浮子上下过程的理论速度 (m/s);  $T$  为波浪周期 (s)。

通过式(1)计算得出齿条的理论位移,从而设计齿条的长度。本装置是小型化、小功率波浪能发电装置,因此选用额定功率较小的发电机,通过选定发电机的铭牌参数得出发电机轴的额定转速,从而得到发电机齿轮的转速。输出齿轮与传动齿轮同轴,两齿轮的转速相同,传动齿轮的转速由齿条运动速度确定,齿条的运动速度由式(2)计算得出。根据齿条与齿轮之间的传递啮合关系和设计的齿条与齿轮的结构参数,可以确定输出齿轮的转速,并与发电机齿轮的转速相比,选择最优化设计,最终确定合适的齿轮结构参数。

### 3 装置的工作过程

设浮子的重量为  $G$  (包括连杆、齿条),海面平静时,浮子所受的静浮力等于重力,静吃水深度为  $d$ 。浮子在波浪中所受的力由静浮力和波浪力组成。当波浪上升时,往上的波浪力使浮子上升,带动双面齿条向上运动,双面齿条带动左右两边传动齿轮转动,右边空心套筒内的棘爪在棘轮齿背上划过,传动齿轮的运动没有传递给右边传动轴,只有左边的传动齿轮通过棘轮式超越离合器把运动传递到左边传动轴上,左边传动轴带动左边输出齿轮逆时针转动,从而带动发电机齿轮顺时针转动,通过联轴器带动发电机工作,当浮子上升至最大行程时,吃水深度回到初始状态  $d$ 。浮子不脱离海水。当波浪下降时,向下的波浪力使浮子下降,带动双面齿条向下运动,左边空心套筒内的棘爪在棘轮齿背上划过,传动齿轮不

能把运动传递到左边传动轴上,只有右边传动齿轮通过棘轮式超越离合器把运动传递到右边传动轴上,带动右边输出齿轮逆时针转动,从而带动发电机齿轮也顺时针转动,当浮子下降到最大行程时,吃水深度回到初始状态  $d$ 。

浮子上升过程和下降过程中,发电机齿轮都是顺时针转动,使发电机始终向一个方向旋转发电,这样便可防止发电机因为正反转的交替导致发电机烧坏的现象,并且从理论上提高了装置的发电效率达 50%。

### 4 整机理论效率的计算

该波浪能发电装置的能量转换过程分为 3 个部分:一级转换(波浪能—机械能:在纯垂荡运动中,浮子运动产生的机械能主要是由于波浪的波浪力所引起)、二级转换(机械能—机械能)和三级转换(机械能—电能)。一级转换主要是浮子部分吸收能量,二级转换是指浮子吸收的能量通过机械传动方式传递的过程;三级转换是通过机械传动方式输出的机械能转换成电能输出的过程。波浪能发电装置的整机理论发电效率取决于这三级分别的转换效率<sup>[9]</sup>,设发电装置的整机理论效率为  $\eta$ ,

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (3)$$

式中:  $\eta_1$  为一级转换效率(%);  $\eta_2$  为二级转换效率(%);  $\eta_3$  为三级转换效率(%).

#### 4.1 一级转换效率的计算

根据海浪线性波动理论<sup>[10]</sup>,在线性波中,波浪是单一频率并且没有运动变化。浮子在海水中运动,根据海洋的实际情况,用海浪理论对一级转换效率进行计算。根据中国海域的实际情况并参考相关资料<sup>[11]</sup>,设定波浪周期 5 s,波高 1.5 m 来进行相关计算。

##### 4.1.1 波浪能量的计算

根据线性波动中二维深水进行波的波动理论,可以得出波长  $L$  为

$$L = \frac{2\pi}{\kappa} = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

式中:  $g$  为重力加速度 (m/s<sup>2</sup>);  $T$  为波浪周期 (s);  $\kappa$  为波浪波数。

当波浪周期  $T$  为 5 s 时,波长  $L \approx 40$  m,波动圆频率  $\omega^2 = \kappa = 1.58$   $\omega \approx 1.26$ 。

根据流体力学相关知识<sup>[12]</sup>,波浪假设如下:

(1)流体是理想不可压缩的、无粘性,重力不能略去不计;(2)运动是无旋的,具有速度势;(3)波浪波长 $\gg$ 波浪波高。

结合海浪理论<sup>[10]</sup>可以得出深水二维进行波的波动动能和波动势能。

一个波长范围内的波动动能为

$$E_k = \frac{1}{4} \rho g A^2 L \quad (5)$$

波动势能为

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g A^2 L \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为海水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $A$ 为波浪振幅( $\text{m}$ ), $A = \frac{H}{2}$ 。

由式(5)和(6)可知,在一个波长范围内,波动动能和波动势能相等,则波动总能量 $E$ 为

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} \rho g A^2 L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (7)$$

浮子宽度域内的波浪输入能量 $E_i$ 为

$$E_i = \frac{2 \times R \times E}{L} \quad (8)$$

式中: $R$ 为浮子半径( $\text{m}$ )。

#### 4.1.2 浮子振荡能量的计算

当浮子与线性波浪共振时,纯垂荡系统的总能量 $E_z$ <sup>[13]</sup>可以表示为

$$E_z = \frac{1}{2} [(m + m_w) \omega^2 + \rho g A_w] Z_0^2 \quad (9)$$

式中: $m$ 为浮子质量( $\text{kg}$ ); $m_w$ 为附加质量( $\text{kg}$ ), $m_w = \frac{\rho D^3}{6}$ , $D$ 为浮子直径( $\text{m}$ ); $A_w$ 为浮子水面截面积( $\text{m}^2$ ), $A_w = \pi \times R^2$ 。

把各个参数值代入式(9),可得出纯垂荡系统总能量 $E_z$ 的值。

#### 4.1.3 一级转换效率的计算

根据波浪能转换技术的理论<sup>[13]</sup>,一级转换效率 $\eta_1 = \frac{E_z}{E_i}$ ,把式(8)、(9)代入,可得:

$$\eta_1 = \frac{\frac{1}{2} [(m + m_w) \omega^2 + \rho g A_w] Z_0^2}{\frac{2 \times R \times E}{L}} \quad (10)$$

综合考虑发电装置的整体结构和尺寸,浮子的半径和长度设计为 $R = 0.1 \text{ m}$ , $h = 0.3 \text{ m}$ ;代入式(10)中进行计算得出,装置的一级转换效率 $\eta_1 = 0.477$ 。

## 4.2 机械传动机构的效率估算

查阅国家机械设计手册<sup>[14]</sup>,确定各个机构的机械传动理论效率,齿条轨道 $0.98$ ;齿条齿轮 $0.98$ ;轴承 $0.98$ ;棘轮式超越离合器 $0.98$ ;水平轴传动副 $0.98$ ;齿轮啮合 $0.98$ ;联轴器 $0.98$ 。可以估算出整个机械传动部分的传动效率 $\eta_2$ , $\eta_2 = 0.98^7 \approx 0.868$ 。

## 4.3 三级转换效率

为了衡量发电机将输入的机械能转变为电能的效率,将发电机的输出功率与输入功率之比,称为发电机效率。

一般小功率的同步发电机的效率<sup>[15]</sup>为 $85\% \sim 95\%$ ,大、中功率的同步发电机的效率为 $95\% \sim 98\%$ ,结合本文的振荡浮子式波浪能发电装置,选择发电机的效率 $\eta_3$ 为 $0.95$ 。

振荡浮子式波浪能发电装置的整机效率为装置三部分的效率乘积,把 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 的值代入式(3),得出 $\eta = 0.393$ 。

## 5 小结

(1)本文设计的振荡浮子式波浪能发电装置的整机理论效率略高于常见的波浪能发电装置,常见的波浪能发电装置的理论效率一般为 $30\%$ 左右,因此是一种高效的发电装置。

(2)转换装置和输出装置都设置于平台上,主要机械传动部件不与海水直接接触,装置的可靠性得到保证。

(3)从整机理论效率 $\eta$ 的计算过程中看出,吸收装置的一级转换效率对整机理论效率的影响是至关重要的,因此设计一个合理、高效并且可靠的吸收波浪能的装置尤其重要。今后在本装置的整体结构的基础上,通过试验和仿真优化,并结合实际海况的波浪对浮子的形状和尺寸作进一步的研究,以便得出最优化的结构数据和尺寸,进一步提高装置的发电效率。

## 参考文献:

- [1] Zhang Dehai, LiWei, Lin Yonggang. Wave energy in China: Current status and Perspectives [J]. Renewable Energy, 2009 (34): 2089-2092.
- [2] 刘全根. 世界海洋能开发利用状况及发展趋势 [J]. 能源工程, 1999 (2): 5-8.
- [3] 李允武. 海洋能源开发 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.

- 138—178
- [ 4 ] 刘寅立, 焦永芳. 波浪能开发与利用研究进展 [ J ]. 中国高新技术企业, 2009 ( 2 ): 19—20
- [ 5 ] 任建莉, 钟英杰, 张雪梅, 等. 海洋波能发电的现状与前景 [ J ]. 浙江工业大学学报, 2006 34 ( 2 ): 69—73
- [ 6 ] 苏永玲, 谢晶, 葛茂泉. 振荡浮子式波浪能转换装置研究 [ J ]. 上海水产大学学报, 2003 12 ( 4 ): 338—342
- [ 7 ] 苏永玲, 余克志. 振荡浮子式波浪能转换装置的优化计算 [ J ]. 上海水产大学学报, 2007 16 ( 2 ): 196—200
- [ 8 ] 王树春, 车仁炜, 胡长胜, 等. 浮筒式海浪发电机理研究 [ J ]. 太阳能学报, 2007, 28 ( 11 ): 1266—1271
- [ 9 ] 崔琳, 王海峰, 熊焰, 等. 波浪能发电系统转换效率实验室测试技术研究 [ J ]. 海洋技术, 2009 28 ( 2 ): 115—118
- [ 10 ] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1984 31—44
- [ 11 ] You Yagē, Zheng Yonghong, Shen Yongming, et al. Wave energy study in China: advancements and Perspectives [ J ]. China Ocean Engineering 2003 17 ( 1 ): 101—109
- [ 12 ] 朱立明, 柯葵. 流体力学 [ M ]. 上海: 同济大学出版社, 2009
- [ 13 ] McCormick M E. Ocean wave energy conversion [ M ]. New York: Dover Publications, 1981 45—58
- [ 14 ] 杨晓辉. 简明机械实用手册 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2006
- [ 15 ] 吴宗泽. 机械设计实用手册 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2003

## 欢迎订阅 2011年《水产科技情报》

《水产科技情报》是由上海市水产研究所、上海市水产学会主办的水产技术类杂志, 是中文核心期刊、中国期刊方阵双效期刊、上海市优秀科技期刊、上海市广告业先进单位。本刊坚持“以技术性为主, 兼容学术性、普及性和动态、信息性”的办刊方针以及“立足上海、服务全国、面向市场, 积极参与国际间渔业科技和信息交流”的办刊目标, 注重学科的前瞻性, 技术的先进性, 动态信息的及时性, 市场的导向性以及文字的可读性, 把普及与提高结合起来, 较好地适应了水产界多层次读者的需求, 发行面遍及全国 (包括港台地区), 并涉足东南亚地区。主要栏目: 综述、海水养殖、淡水养殖、水产饲料、病害防治、渔业环境、专题讲座 (以特种水产养殖为主)、观赏鱼和水族生态、渔业简讯等。

本刊为双月刊, 逢双月 1号出版。国际标准大 16开, 52页。读者可向当地邮局办理订阅手续, 也可直接汇款至编辑部订阅。欢迎来电来函垂询。

本刊承接各类渔业商品广告, 封页涂塑, 彩版采用进口铜版纸印刷, 并有彩色、双色、单色插页, 设计独到, 制作精良, 收费合理, 欢迎广大厂商惠顾。

邮发代号: 4—204 每册定价: 5.00元 全年订费: 30.00元

编辑部地址: 上海市佳木斯路 265号 上海市水产研究所 邮编: 200433

电话: 021—65483215—631, 65489796(直线) 传真: 021—65508504 联系人: 李住

E-mail: fishmag@163.com, fishmag@online.sh.cn 网址: <http://www.shfishery.net>