

新型波浪发电装置的研究与开发

苏凯凯¹, 刘阶萍^{1*}, 王东兴², 马丽梅¹, 陈宇航¹

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 为解决海上偏远而分散的小功率用电设施的供电问题, 满足波浪发电机在耐久性、蓄能性、高效率, 以及低成本和安全性等方面的更高要求, 设计了一种新型波浪发电装置, 该发电装置的箱体可以固定在用电设施内部并跟随其摆动, 利用发电装置内部的摆锤与箱体产生的相对摆动来收集波浪能, 经超越离合器将主动轴的往复转动转化为两侧发电机的单向旋转从而形成电能。详细阐述了该发电装置的机械设计过程及其电路设计过程, 并对实例进行了性能测试实验。性能测试实验结果验证了该装置设计的合理性与科学性。

关键词: 波浪能; 波浪发电; 超越离合器; 摆锤; 电能处理

中图分类号: TH122; TM612

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1491-04

Research and development of new type wave generator

SU Kai-kai¹, LIU Jie-ping¹, WANG Dong-xing², MA Li-mei¹, CHEN Yu-hang¹

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Electromechanical and Automobile Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In order to solve the power supply problem of small electrical facilities that located scattered at sea and far away from the coastline, considered to satisfy the new requirements in durability, storage, high efficiency, low cost and high security of wave power generation, a new wave generator was proposed, whose box could be fixed in the electrical equipment and swing with it. The generator could be gathered the wave energy by the relative movement between pendulum and the box, and generated electricity by translating the active axis's reciprocating motion to one-way rotation movement of generators located on both sides of the box using the overrunning coupler. The mechanical and electrical design procedure of the new wave generator was described in detail. A case study was evaluated on the actual test. The experimental results show that the new wave generator is reasonable and scientific.

Key words: wave energy; wave generator; overrunning coupler; pendulum; electricity processing

0 引言

随着化石燃料不断消耗, 能源危机日益严峻, 海洋能的利用越来越得到国内外研究者的关注^[1]。海洋覆盖了地球表面的 71%, 蕴藏着巨大的能量。太阳注入地球表面的能量换算为电功率约为 1.0×10^{13} kW, 其中约 2/3 为海洋能。海洋的潮流、潮汐、波浪、波流以及海水的温差都可用来发电^[2-4]。其中, 利用海洋波浪能发电是当前开发海洋资源的重要方式之一。波浪发电在经过了近百年的试验、研究和探索后, 已经由试验验证阶段发展

到商品化、商业化和国际贸易化的时代^[5], 因此对波浪发电装置的研发在理论和实际上都具有重大意义。波浪发电主要是将波浪的垂直运动、水平运动和波浪中水的压力变化产生的能量转化为电能的过程^[6-8]。

海上的监测浮标、灯塔、小型渔船等分散而远离海岸的用电设施, 电能的供给存在较大的困难。传统的供电方式多采用柴油机发电、燃料电池或其他电池, 但其质量大且更换不便。目前一些国家正在尝试用风能以及太阳能供电方面的研究, 但由于复杂程度高, 受外部环境影响大等原因, 制造和维护成本较高,

收稿日期: 2011-05-31

作者简介: 苏凯凯 (1987-), 男, 山东滨州人, 主要从事先进制造过程与系统方面的研究。E-mail: 10121486@bjtu.edu.cn

通信联系人: 刘阶萍, 女, 副教授, 硕士生导师。E-mail: jpliu@bjtu.edu.cn

实用性较差^[9-10]。

为此,笔者提出一种新的波浪发电设计方法,其结构简单灵活,可置于用电设施内部工作,避免了海水腐蚀和环境影响,可以有效地解决海上用电设施的供电问题,待技术成熟后,还可以实现海上大规模并网发电。

1 工作原理

本研究根据小型用电场所给出设计实例:首先在箱体内的主动轴上悬挂一个摆锤,如图 1 所示。图 1 中,整个机器跟随波浪摆动时,箱体在海浪的推动下左右摆动,设其单侧最大摆幅为 θ_1 ,摆锤在重力作用下趋于静止,设其单侧最大摆幅为 θ_3 。在摆锤摆动的过程中,取摆锤与箱的相对摆角为 θ 。

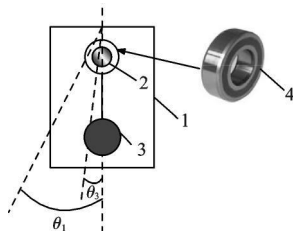


图 1 发电工作原理示意图

1—主动轴;2—重锤;3—箱体;4—超越离合器

摆锤提供给主动轴的转矩:

$$T = mgl \sin \theta \quad (1)$$

主动轴的输入功率为:

$$P = 2\pi n T / 60 \quad (2)$$

主动轴的转动周期:

$$S = \theta_{\text{平均}} / \pi \quad (3)$$

式中: m —重锤重量, l —摆杆长度, θ —摆锤与箱的相对摆角, n —轴的转速, $\theta_{\text{平均}}$ —箱体与摆锤的平均相对摆幅。

箱体和摆锤的相对摆动将海浪的波动转化为箱体内部主动轴的往复转动,利用两个超越离合器把主动轴的往复转动转化为两个同步带轮的单向转动,通过 3 级机械增速后分别带动两侧的发电机工作,经过电能处理,最终将电能储存在蓄电池中。

2 机械设计

2.1 发电机的选择

普通发电机的额定转速一般都在 2 000 r/min 以上,这样会使传动装置总传动比以及机器的尺寸过大,不适用于小型波浪发电设备。为了满足小型波浪发电机的需求,需要设计一台额定转速较低的小功率发电机。鉴于浮标等用电设施的功率较小,本研究为样机制作了一台 $P_w = 5 \text{ W}$ 的微型发电机。

2.2 机械结构设计

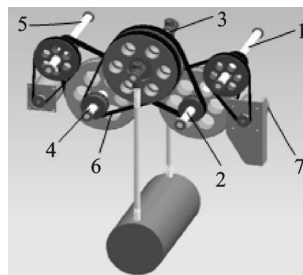


图 2 发电机的机械结构图

1—I 轴;2—II 轴;3—III 轴;4—IV 轴;5—V 轴;6—同步带;7—发电机

经过长期的海边观察,本研究实际测得波浪的周期约为 2 s,整个机器随海浪摆动,假设取箱体与摆锤的平均相对摆幅为 $\theta_{\text{平均}} = 15^\circ$,由式(3)得主动轴的转动周期 $S = 12 \text{ s}$ 。考虑传动比、效率以成本等方面的要求,通过查阅设计手册^[11-12],最终确定采用 3 级同步带增速的传动方式。在机械传动系统的设计过程中采用近似关于主动轴对称的结构,把轴依次排序(如图 2 所示),只需计算发电机轴和 I、II、III 轴的功率即可。发电总效率为:

$$\eta_{\text{总}} = (\eta_{\text{同步带}})^n \cdot (\eta_{\text{轴承}})^n \cdot \eta_{\text{发电机}} \quad (4)$$

主动轴的输入功率为:

$$P_3 = P_w / \eta_{\text{总}} \quad (5)$$

各轴之间的传递效率为:

$$\eta = (\eta_{\text{同步带}})^n \cdot (\eta_{\text{轴承}})^n \quad (6)$$

式中: $\eta_{\text{同步带}}$ —同步带的传动效率, $\eta_{\text{轴承}}$ —轴承的传动效率, $\eta_{\text{发电机}}$ —发电机的发电效率, P_w —发电机的发电功率, n —传动级数。

由实验测得自制发电机的功率 $P_w = 5 \text{ W}$, $\eta_{\text{发电机}} = 0.5$,查得同步带的传动效率 $\eta_{\text{同步带}} = 0.98$,轴承的传动效率 $\eta_{\text{轴承}} = 0.99$ 。

$$\eta_{\text{总}} = (\eta_{\text{同步带}})^3 (\eta_{\text{轴承}})^3 \eta_{\text{发电机}} = 0.456 6$$

$$\Rightarrow P_3 = P_w / \eta_{\text{总}} = 10.95 \text{ W} \quad (7)$$

$$\eta_{23} = \eta_{\text{同步带}} \cdot \eta_{\text{轴承}} = 0.970 2$$

$$\Rightarrow P_2 = \eta_{23} \cdot P_3 = 10.624 \text{ W} \quad (8)$$

$$\eta_{13} = (\eta_{\text{同步带}})^2 (\eta_{\text{轴承}})^2 = 0.941 3$$

$$\Rightarrow P_1 = \eta_{13} \cdot P_3 = 10.307 \text{ W} \quad (9)$$

主动轴转速:

$$n_3 = 1/S = 5 \text{ r/min}$$

$$\Rightarrow i_{\text{总}} = n/n_3 = 44.6 \quad (10)$$

取 $i_{32} = 3$, $i_{21} = 3.6$, $i_{14} = 4.1$, 则各从动轴转速:

$$n_2 = n_3 \cdot i_{32} = 15 \text{ r/min} \quad (11)$$

$$n_1 = n_2 \cdot i_{21} = 54 \text{ r/min} \quad (12)$$

发电机轴转矩为:

$$T_d = 9\ 550 P_w / n \eta_{\text{发电机}} \quad (13)$$

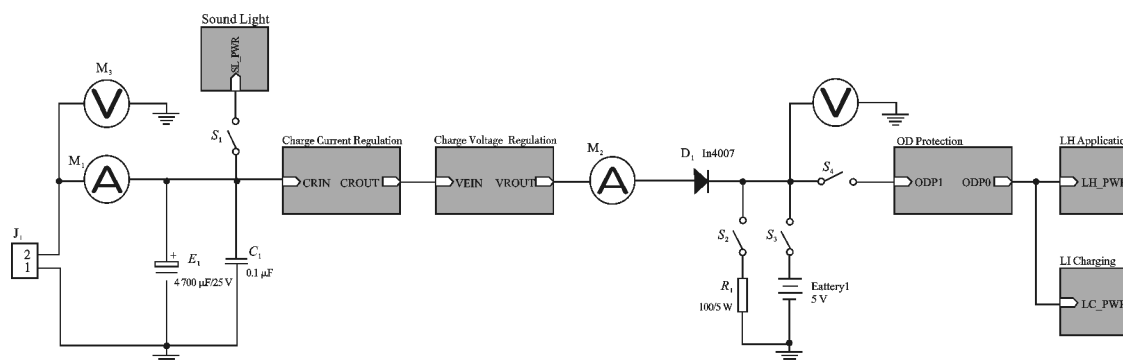


图 3 电能处理、储存及应用电路层次图

式中: P_w —发电机的发电功率, n —发电机额定转速, $\eta_{\text{发电机}}$ —发电机的发电效率。

由实验测得自制发电机的额定转速 $n=223 \text{ r/min}$, $P_w=5 \text{ W}$, $\eta_{\text{发电机}}=0.5$ 。

由式(13)得:

$$T_d=0.856 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (14)$$

取 $\eta_1=\eta_{23}$, 则:

$$T_1=T_d i_{10} / \eta_1=3.618 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (15)$$

$$T_2=T_1 i_{21} / \eta_{21}=13.424 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (16)$$

$$T_3=T_2 i_{32} / \eta_{32}=40.509 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (17)$$

得到的相关参数如表 1 所示。

表 1 相关参数

轴序号	功率 P/W	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	传动比 i	效率 η	转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$
电机	10.00	223	4.1	0.500 0	0.856
I 轴	10.31	54	3.6	0.970 2	3.618
II 轴	10.62	15	3.0	0.970 2	13.424
III 轴	10.95	5			40.509

在摆锤摆动的过程中,笔者要求当摆锤偏离超过 10° 时发电机达到额定功率。于是,取相对摆角 $\theta=10^\circ$, 主轴的转速 $n=5 \text{ r/min}$, 由式(1)、式(2)得输入功率为 $P=10.95 \text{ W}$, 则有 $ml=12.0 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 。取摆锤质量 $m=30 \text{ kg}$, 则摆长 $l=0.40 \text{ m}$ 。

3 电路设计

3.1 硬件电路总体设计方案

在设计过程中,笔者给出了灯塔以及锂电池充电的电路实例。其中,电能处理及储存电路采用了模块化设计,包括:声光演示电路、充电电流调节电路、充电电压调节电路、过放保护电路、灯塔控制电路以及锂电池充电电路(如图 3 所示)。由交流发电机发出的电能经过整流、滤波后变为直流电,一部分流入声光演示电路,表明发电机已经发出了电能,另一部分电流经过充电电流自动调节和充电电压自动调节后送到蓄电池中储存,并为用电设备提供电能。其中,充电

自动调节充电电流,实现发电功率与充电功率的匹配,充电电压调节电路的功能是使加到蓄电池上的电压稳定在浮充电电压值(不超过 6.75 V)上。

蓄电池后接有过放保护电路,时刻监测着蓄电池电压,当蓄电池的电压低于 5.01 V 时,此电路截止,防止过放,保护蓄电池。

从过放保护电路输出的电能,一部分进入灯塔控制电路,另一部分电能进入锂电池充电管理电路,可用于为小型渔船等上面的手机、MP3 等小功率用电设备充电。

3.2 功能电路单元设计过程

海浪发电机是利用海浪的波动发电的,海浪的波动是没有规律的,所以发出的电压也是不稳定的。为了处理不稳定的电压和电流,本研究设计了充电电流调节电路和充电电压调节电路。其中,充电电流调节电路的作用是随发电机输出电压高低不同自动调节充电电流(如图 4 所示),实现发电功率与充电功率的匹配。充电电压调节电路(如图 5 所示)的功能是使加

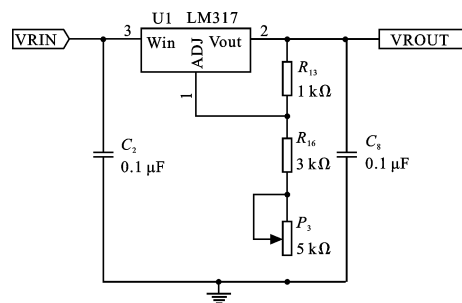


图 4 充电电流调节电路

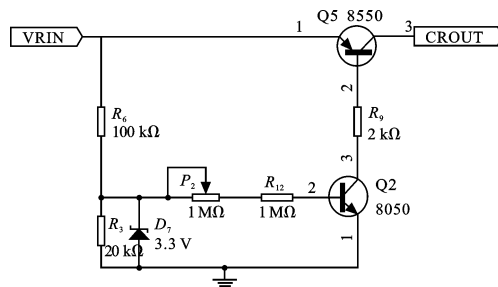


图 5 充电电压调节电路

到蓄电池上的电压稳定在浮充电电压值（不超过 6.75V）上。

蓄电池后连接过放保护电路如图 6 所示,实时监控蓄电池电压,当蓄电池的电压低于 5.01 V 时,此电路截止,防止过放,保护蓄电池。

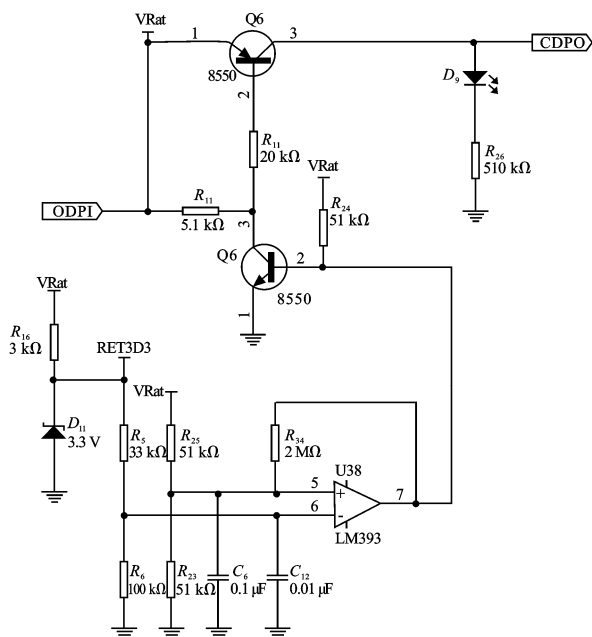


图 6 过放保护电路

4 实例验证

为了测试样机的性能,笔者进行了相关测试实验。通过改变发电装置的波动幅度和波动周期,得到输出电压和输出电流的相关数据,如表 2 所示。经计算,发电装置的发电功率和净输出功率均与理论计算结果相吻合,表明该发电装置的设计方法是合理的、科学的。

表 2 性能测试结果

波动幅度 / $^{\circ}$	波动周期 /s	输出电压 /V	输出电流 /mA	净输出 功率/W	发电功率 /W
15	4	8.05	55	0.44	0.65
15	2	10.14	68	0.70	1.02
20	4	12.30	70	0.86	1.20
20	2	15.43	84	1.30	1.79
30	4	17.80	105	1.87	2.64
30	2	19.67	148	2.91	4.44

5 结束语

面对能源紧缺和环境污染的巨大压力,海洋波浪能源的研究开发具有重要的战略意义。笔者提出的新型波浪发电设计,一方面该装置不与海水接触,避免

了海水腐蚀和恶劣环境的影响,有效延长了使用寿命,降低了维护成本;另一方面该装置利用灵活简单的结构,降低了制造成本,扩大了适用范围,并创新性的解决了海上用电设施的供电难题。并且基于新的波浪发电设计构想,设计了发电装置的机械部分与电路部分,通过对样机的性能验证,证明了该装置的合理性与科学性。

同时,作为一种新的波浪发电理念,该研究具有深入研究和大规模推广的现实意义。新型波浪发电装置的研制,对有效的解决海上用电设施供电问题,以及能源危机和环境问题都具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 周浩波,林勇刚,徐晓峰,等. 便携式船用海流能发电机[J]. 机电工程,2009,26(11):5-8.
- [2] 孙景力. 海浪发电-取之不尽的能源[J]. 电器工业,2005(1):51-53.
- [3] WEBER J W, THOMAS G P. An investigation into the importance of the air chamber design of an oscillating water column water wave energy device [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference,2001:630-633.
- [4] MUELLER M, BAKER N J. A low speed reciprocating permanent magnet generator for direct drive wave energy converters[C]. Power Electronics,Machines and Drives,2002. International Conference on (Conf. Pub.,No.487),2002.
- [5] 李建心. 一种用于海浪发电机的液压系统设计[J]. 液压与气动,2008(4):25-26.
- [6] KORD E,UMESH A. Use of oscillation constraints in Providing a reaction for deep water floating wave energy devices [C]//Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2000:366-372.
- [7] JUNG S Y, KWAK S Y,HONG S K. Design consideration of steel-cored PMLSM for short reciprocating travel displacements [C]// Electric Machines and Drives Conference,2003. IEMDC'03. IEE International,2003:1061-1067.
- [8] 焦永芳,刘寅立. 海浪发电的现状 & 前景展望[J]. 中国高新技术企业,2010(12):89-90.
- [9] 曹乃峰,陈世哲,刘世萱. 浮标气象站上的光伏供电系统设计[J]. 山东科学,2010,23(2):79-82.
- [10] 唐 歆,兰雅梅,宋秋红,等. 海洋资料浮标风能自充电装置:中国,201020541446.2[P].2011-05-18.
- [11] 吴宗泽. 机械零件设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [12] 王文斌. 机械设计手册(第一卷)[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:张 翔]