

文章编号:1672-9331(2017)02-0075-05

## 基于 MATLAB/SimScape 的摆式波浪能发电系统建模与仿真

刘代飞<sup>1,2</sup>, 杨宏佳<sup>1,2</sup>, 寇方党<sup>2</sup>, 孙 健<sup>2</sup>

(1.可再生能源电力技术湖南省重点实验室,湖南 长沙 410004;

2.长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410004)

**摘要:** 为了分析摆式波浪能发电过程的运行状态,采用 SimScape 构建了波浪能发电系统的仿真模型,结合不同海况情况研究了连续发电和蓄能间歇发电 2 种模式下的系统运行,仿真结果与系统实际运行状态一致。仿真结果表明,在连续发电状态下,蓄能器能削弱波浪引起的能量波动,使发电机端电压保持在 380 V,起到稳压的作用;在间歇发电状态下,系统处于间歇期,蓄能器蓄积液压能,当液压压力达到 2.4 MPa 后释放能量发电,使发电机端电压在一段时间内保持在 380 V。

**关键词:** 摆式波浪能发电;连续发电;蓄能间歇发电;SimScape;系统建模;过程仿真

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

## Pendulum wave power system modeling and simulation based on MATLAB/SimScape

LIU Dai-fei<sup>1,2</sup>, YANG Hong-jia<sup>1,2</sup>, KOU Fang-dang<sup>2</sup>, SUN Jian<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province,

Changsha 410004, China; 2.School of Energy and Power Engineering, Changsha

University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to analyze operating states of pendulum wave power generation process, a system model of wave power system is established by using MATLAB/SimScape under the actual operating condition, and the operating states of the two modes including continuous and intermittent generation are analyzed. The simulation results are consistent with the results of actual working. The simulation results show that accumulator is used to weaken the energy fluctuation induced by waves under the continuous generation mode, and the terminal voltage is maintained at 380 V due to the voltage regulation of accumulator. Then under the intermittent generation mode, the accumulator stores up hydraulic energy. When the hydraulic pressure reaches 2.4 MPa, the electromagnetic valve is opened to release hydraulic

**收稿日期:** 2017-03-20

**基金项目:** 可再生能源电力技术湖南省重点实验室开放基金资助项目(2016ZNDL006);湖南省研究生科研项目(CX2017SS16);海南省社会发展科技专项(2015SF37)

**作者简介:** 刘代飞(1977-),男,湖南临武人,长沙理工大学讲师,博士,主要从事复杂工业过程建模、仿真及优化方面的研究。

energy, and the terminal voltage is maintained at 380 V for some time.

**Key words:** pendulum wave power generation; continuous power generation; intermittent power generation; SimScape; system modeling; process simulation

随着经济的快速发展,社会对能源依赖越来越大,而作为主要能源的化石能源(煤、石油、天然气)日益枯竭,因此人们意识到寻求可再生绿色能源的必要性。占地球表面积 71% 的海洋中蕴含着丰富的可再生能源,其中波浪能是开发品位最高的海洋能。据世界能源委员会的调查显示,全球有 20 亿 kW 的波浪能可利用,相当于目前世界总发电量的 2 倍,因而它已成为各海洋国家研究的重点<sup>[1, 2]</sup>。

各国科研人员建立了多种波浪能发电装置,如:振荡水柱式、筏式、鸭式、聚波水库式、振荡浮子式和摆式等<sup>[3-6]</sup>。其中,摆式波浪能发电装置结构简单,设备构建方式多样,系统投运便捷适应性强,具有很大的应用前景。弄清发电过程的运行特性对系统优化非常关键,受海况和系统设备布置条件的制约,实际系统全工况下的运行特性的获取存在困难。随着计算机和数值模拟技术的发展,利用先进计算机仿真平台对复杂的过程系统进行综合分析是一种非常重要的技术手段。肖文平<sup>[7]</sup>利用 MATLAB/Simulink 建立了一种摆式波浪能发电装置自适应模糊 PID 功率控制优化模型。陈韦<sup>[8]</sup>提出了一种新型的球形摆式波浪发电装置,并通过 AQWA 对波浪发电装置进行模拟仿真。李威等<sup>[9]</sup>应用 ADAMS/MATLAB 的耦合仿真技术,研究了浮力摆安装海域海况和浮力摆运行参数变化对浮力摆运动规律的影响,分析了各参数对浮力摆运动的影响趋势。H.C.Pedersen 等人<sup>[10]</sup>建立了 PTO-system 数学模型,并设计了一种用于波浪能量转换系统测试的全比模型仿真系统平台。

摆式波浪能发电装置的物理实现具有多样化的特点,采用数学模型描述系统过程既不直观也不利于模块的系统集成。而数学模型结合 SimScape 建模能清晰地显示出物理系统的结构关系,非常适合复杂工业过程的物理仿真。本研究中的波浪能发电系统为近岸式上下摆结构,具有连续/间歇两种系统发电状态,因此需要弄清不同海况下系统的能量转换过程和运行特性。作者基于

SimScape 建立近岸摆式波浪能发电系统过程物理模型,深入分析不同海况下的系统运行特性,寻找关键设备工况运行区间的合适参数,以期为后续控制系统参数的优化提供研究基础。

## 1 摆式波浪能发电装置系统的结构与原理

本研究的摆式波浪能发电系统主要由采集浮板、液压蓄能器、液压马达和发电机等装置组成,其系统结构如图 1 所示。该装置包括三级能量转换:①一级能量转换装置为摆板,它通过与波浪的直接接触捕获波浪的势能与动能,并转换为摆板的机械能;②二级能量转换装置为液压传动系统,摆板的机械能通过液压系统转换为液压能,然后通过液压马达将液压能转换为旋转机械能;③三级能量转换装置为发电机,通过切割磁感线将旋转机械能转换为电能<sup>[11, 12]</sup>。

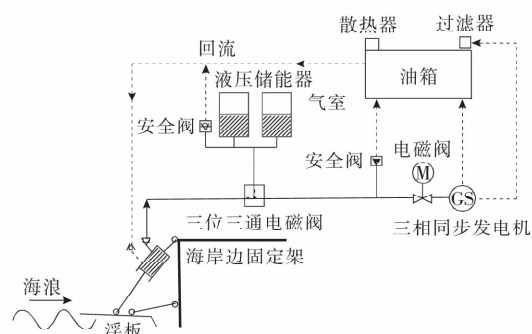


图 1 摆式波浪能发电装置系统结构

Fig. 1 The schematic of pendulum wave energy power generation device

该系统的工作流程是:摆板捕获的波浪能转换为轴杆的机械能,将油槽的液压油压入蓄能器并经过电磁阀流入液压马达,液压马达带动发电机发电,做功后的液压油通过管路回流至油槽中,构成循环回路。由于波浪能的随机性导致系统输入功率不稳定、不连续,因此采用蓄能稳压装置来削弱波浪频率及浪高变化引起的能量波动。当海况良好,输入能量平均值与系统所带负载功率相当时,通过蓄能器的调节可实现系统连续稳定发

电;当海况不理想,输入能量平均值小于系统所带负载功率时,则采用间歇模式运行,输入的能量通过高压蓄能储存在蓄能器内,当压力达到某一设定值时控制电磁阀动作,液压马达驱动发电机旋转发电<sup>[13,14]</sup>。

## 2 摆式波浪能发电系统的 SimScape 建模

采用 SimScape 对摆式波浪能发电系统进行过程建模。SimScape 采用物理拓补网络方式构建系统模型,每一个模块都对应一个实际物理元器件,模块之间的连线代表元件之间能量的传递和装配。这种模型构建方式自动计算出系统的动态特性数学方程,代替了利用复杂数学公式建模的方法,直观地显示出物理系统的结构关系,非常适合对复杂过程开展物理建模和计算求解<sup>[15]</sup>。摆式波浪能发电系统的建模主要包括波浪能采集、液压蓄能发电等环节。

### 2.1 波浪能采集环节

自然海况下波浪运动状态和能量分布情况非常复杂,波浪能流密度与海浪的浪高、频率密切相关。本研究采用波浪能信号和液压泵流量相结合的方式,对波浪采集浮板进行适当简化处理。波浪能流密度采用文献<sup>[16]</sup>所述模型:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \approx (0.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) H_{m0}^2 T_e. \quad (1)$$

式中:  $P$  为每米宽波浪所蕴藏的能流密度;  $H_{m0}$  为波高;  $T_e$  为波浪周期;  $\rho$  为海水密度;  $g$  为重力加速度。式(1)表示每米海岸线生产电能的大小与波浪波高的平方以及波浪周期成正比。

液压马达输入、输出功率公式为:

$$P_i = T_i \omega. \quad (2)$$

$$P_o = p q. \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为输入功率;  $T_i$  为输入扭矩;  $\omega$  为泵轴角速度;  $P_o$  为输出功率;  $p$  为液压泵实际输出压力;  $q$  为液压泵实际输出流量。

本研究通过编写 S 函数构建波浪采集子系统。在 Simulink 系统建模与仿真中,对模型中数学运算比较复杂的部分一般难以用普通的 Simulink 模块来搭建,通常需要用编程的形式设计出

S 函数来描述输入与输出信号之间的代数运算,将其嵌入系统中进行调用。S 函数具有固定的程序格式,用 MATLAB 语言可以编写初始化程序、状态方程及模块的计算输出部分<sup>[17]</sup>。通过波浪能量与定量泵的输入、输出功率以及排量和转速之间的关系,将 S 函数模块设定 3 个输入信号,分别为浪高、周期和排量。设定转速为输出信号,并加入随机扰动量来模拟真实海况下波浪的随机性,结合理想角速度源模块为定量泵提供扭矩带动泵轴旋转。在仿真的过程中,可以通过改变 3 个输入信号来模拟各种海况下的波浪能的能量输入。波浪能采集环节的模型如图 2 所示。

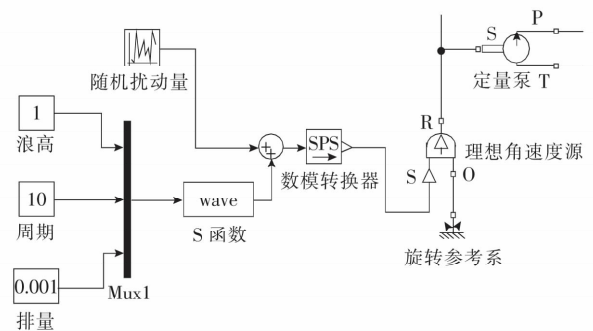


图 2 波浪能采集环节的模型

Fig. 2 The model of wave energy harvesting part

### 2.2 液压蓄能发电环节

由于波浪的随机性,能量过高时会对发电系统造成冲击,甚至会损坏设备,因此通常使用气囊式蓄能器和泄压阀等装置来缓冲能量波动和保证系统安全。为了使同步发电机能发出具有稳定质量的电能,对液压马达的转速,液压马达入口压力和同步发电机端电压、端电流进行监测。本研究在 SimScape 建模中采用气囊式蓄能器、永磁同步发电机、液压马达、转速传感器、液压压力传感器、电流传感器、电压传感器、星型负载和示波器等模块。发电部分使用永磁同步发电机模块,并用星型连接负载模拟实际负荷,模型如图 3 所示。

## 3 发电运行的仿真与分析

MATLAB 中的 SimScape 为仿真提供了十分方便的工具,根据波浪能实物模型可以直接建立系统的物理仿真模型,通过调整仿真时间和仿真算法等参数可以进行系统的仿真。

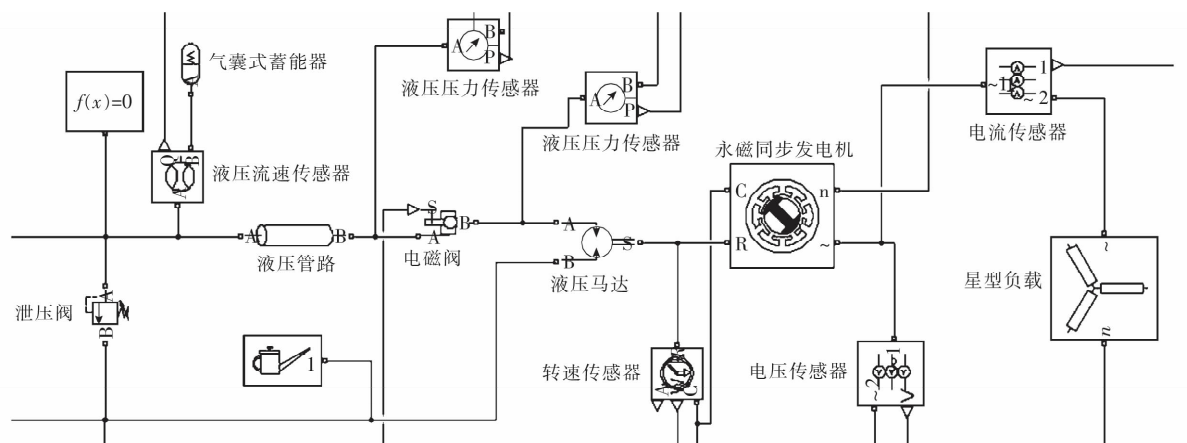


图3 摆式波浪能发电系统模型

Fig. 3 The model of pendulum wave energy power system

本研究通过对电磁阀的关断来实现2种不同的发电方式:当波浪能充足时,电磁阀一直打开,系统为连续发电状态;当波浪能不足时,电磁阀关断100 s,使蓄能器蓄积液压能,然后再打开电磁阀,系统实现间歇式蓄能发电。

模型在连续发电状态下仿真后得到的端电压及液压马达入口压力曲线如图4所示。

模型在间歇发电状态下波浪能不够充足,其仿真后端电压及液压马达入口压力曲线如图5所示。

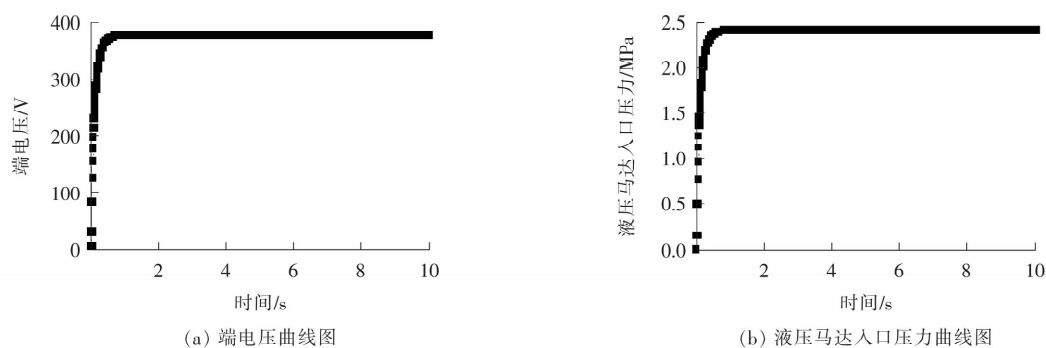


图4 端电压及液压马达入口压力曲线图(连续发电)

Fig. 4 Graph of terminal voltage and hydraulic motor inlet pressure(continuous generation)

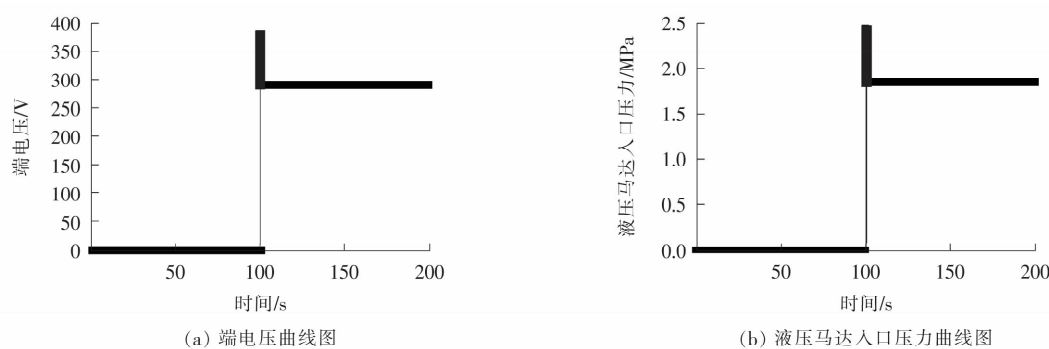


图5 端电压及液压马达入口压力曲线图(间歇发电)

Fig. 5 Graph of terminal voltage and hydraulic motor inlet pressure(interval generation)

从图4可以看出,当海况良好、波浪能足够大时,曲线有短暂的逐渐增大过程。此阶段是因为

仿真开始阶段液压压力和液压马达转速逐渐增大,发电机的转速和液压马达入口压力也会逐渐

增大,所以发电机发出的电压出现逐渐增大的趋势。随后端电压及液压马达入口压力趋于稳定。

电磁阀在前 100 s 关闭,系统通过 100 s 的蓄能,液压压力增大到 2.4 MPa,液压马达、发电机不工作,端电压、电流为 0。在电磁阀打开后,蓄能器将蓄积的液压能释放,发电部分开始正常工作,此时发电机端电压为 380 V,满足发电质量要求。随着蓄能器蓄积的液压能的释放,2 条曲线呈下滑的趋势。最后,当蓄能器设定压力等于液压管路中的压力时,蓄能器不再释放液压能,曲线趋于稳定,此时发电端电压明显低于 380 V,不能满足发电质量的要求。

#### 4 结论

作者构建了摆式波浪能发电装置的 SimScape 模型,通过改变波浪能采集环节的浪高、频率等参数,实现了不同海况下系统运行状态的仿真,得到如下结论。

1) 当海况良好、波浪能充足时,模型能实现连续发电,且发电质量满足要求。蓄能器在连续发电情况下削弱了波浪频率及浪高变化引起的能量波动,实现了稳压作用。

2) 当波浪能不足时,蓄能器蓄积液压能,通过设定适当的关键设备参数值,系统可间歇发出满足发电质量要求的电能。在系统发电的间歇期间,可采用蓄电池补充供电。若采集的波浪能过大,可向蓄电池进行充电。此种状态下系统连续稳定发电。

模型仿真可以对系统关键参数的设值、运行模式和设备参数进行系统的分析和优化。构建的过程模型与仿真模型框架为摆式波浪能发电系统的状态参数分析提供了新途径,并为后续发电装置参数优化和设备匹配优化工作奠定了基础。

#### 〔参考文献〕

- [1] 刘延俊,贾瑞,张健.波浪能发电技术的研究现状与发展前景[J].海洋技术学报,2016(5):100-104.  
LIU Yan-jun, JIA Rui, ZHANG Jian. Research status and prospect of the wave power generation technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2016(5): 100-104.
- [2] 蔡男,王世明.波浪能利用的发展与前景[J].国土与自然资源研究,2012(6):92-94.  
CAI Nan, WANG Shi-ming. The development and prospect of wave energy utilization[J]. Territory and Natural Resources Study, 2012(6): 92-94.
- [3] 高大晓,王方杰,史宏达,等.国外波浪能发电装置的研究进展[J].海洋开发与管理,2012,29(11):21-26.  
GAO Da-xiao, WANG Fang-jie, SHI Hong-da, et, al. Abroad research progress of wave energy generation device [J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(11): 21-26.
- [4] 顾煜炯,谢典,耿直.波浪能发电技术研究进展[J].电网与清洁能源,2016(5):83-87.  
GU Yu-jiong, XIE Dian, GENG Zhi. Progress of research on wave energy generation technology [J]. Power System and Clean Energy, 2016(5): 83-87.
- [5] Emre Ozkop, Ismail H Altas. Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: a review of the technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(67): 106-115.
- [6] Lin Yong-gang, Bao Jing-wei, Liu Hong-wei, et, al. Review of hydraulic transmission technologies for wave power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(50): 194-203.
- [7] 肖文平.摆式波浪发电系统建模与功率控制关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2011.  
XIAO Wen-ping. Pendulum wave power system's pivotal problems research on the simulation and optimization [D]. Guangzhou: South China University of Technology.
- [8] 陈韦.一种球形摆式波浪发电装置的研究[D].厦门:集美大学,2014.  
CHEN Wei. The research of a spherical pendulum wave power device [D]. Xiamen: Jimei University.
- [9] 李威,潘卫明,杨戈尔,等.浮力摆式波浪能发电装置运动学仿真分析[J].海洋技术学报,2014(2):52-60.  
LI Wei, PAN Wei-ming, YANG Ge-er, et, al. Analysis on the kinematic simulation of buoyant pendulum wave power generation device [J]. Journal of Ocean Technology, 2014(2): 52-60.
- [10] H C Pedersen, R H Hansen, A H Hansen, et, al. Design of full scale wave simulator for testing power take off systems for wave energy converters[J]. International Journal of Marine Energy, 2016(13): 130-156.

(下转至第 97 页)

- terials and Interfaces, 2015, 4(3): 1273-1280.
- [5] Sun H, Liu Y, Yu Y, et al. Mesoporous Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, nanosheets-3D graphene networks hybrid materials for high-performance lithium ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 118(2): 1-9.
- [6] Peng Zhao, Wenbo Yue, Zexuan Xu, et al. Graphene-based Pt/SnO<sub>2</sub> nanocomposite with superior electrochemical performance for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017(704): 51-57.
- [7] Shu J, Shui M, Huang F, et al. Comparative study on surface behaviors of copper current collector in electrolyte for lithium-ion batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(8): 3006-3014.
- [8] Myung S T, Sasaki Y, Sakurada S, et al. Electrochemical behavior of current collectors for lithium batteries in non-aqueous alkyl carbonate solution and surface analysis by ToF-SIMS[J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 55(1): 288-297.
- [9] Zhao M, Kariuki S, Dewald H D, et al. Electrochemical stability of copper in Lithiumion battery electrolytes [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(8): 2874-2879.
- [10] Soon A, Todorova M, Delley B, et al. Oxygen adsorption and stability of surface oxides on Cu(111): a first-principles investigation[J]. *Physical Review B*, 2006, 73(16): 165424.
- [11] Nadler R, Sanz J F. First-principles molecular dynamics simulations of the H<sub>2</sub>O/Cu(111) interface [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2012, 18(6): 2433-2442.
- [12] Forster M, Raval R, Hodgson A, et al. c(2×2) water-hydroxyl layer on Cu(110): a wetting layer stabilized by Bjerrum defects[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(4): 046103.
- [13] Jiang B, Ren X, Xie D, et al. Enhancing dissociative chemisorption of H<sub>2</sub>O on Cu(111) via vibrational excitation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109(26): 10224-10227.
- [14] Straumanis M E, Yu L S. Lattice parameters, densities, expansion coefficients and perfection of structure of Cu and of Cu-In  $\alpha$  phase[J]. *Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*, 1969, 25(6): 676-682.
- [15] Phatak A A, Delgass W N, Ribeiro F H, et al. Density functional theory comparison of water dissociation steps on Cu, Au, Ni, Pd, and Pt[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(17): 7269-7276.
- [16] Gu X K, Li W X. First-principles study on the origin of the different selectivities for methanol steam reforming on Cu(111) and Pd(111)[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(49): 21539-21547.

(上接第 79 页)

- [11] 张文喜, 叶家玮. 摆式波浪能发电技术研究[J]. *广东造船*, 2011, 30(1): 20-22.  
ZHANG Wen-xi, YE Jia-wei. Research overview on pendulum wave power generation technology [J]. *Guangdong Ship Building*, 2011, 30(1): 20-22.
- [12] 李居跃, 何宏舟. 波浪能采集装置技术研究综述[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(10): 67-71.  
LI Ju-yue, HE Hong-zhou. A review on wave energy collection device technology [J]. *Ocean Development and Management*, 2013, 30(10): 67-71.
- [13] 吴必军, 邓赞高, 游亚戈. 基于波浪能的蓄能稳压独立发电系统仿真[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(5): 50-56.  
WU Bi-jun, DENG Zan-gao, YOU Ya-ge. Simulation of pressure-maintaining storage isolated generating system based on wave energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(5): 50-56.
- [14] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 等. 海洋能发电技术的发展现状与前景[J]. *电力系统自动化*, 2010(14): 1-12.  
YOU Ya-ge, LI Wei, LIU Wei-min, et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010(14): 1-12.
- [15] 吴涛, 张跃辉. Simscape 在电路分析教学中的应用[J]. *实验科学与技术*, 2013, 11(4): 313-315.  
WU Tao, ZHANG Yue-hui. Application of Simscape in circuit analysis teaching [J]. *Experiment Science and Technology*, 2013, 11(4): 313-315.
- [16] Herbich John. Handbook of coastal engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 117.
- [17] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计: MATLAB 语言与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 223-231.  
XUE Ding-yu. Computer aided control systems design using MATLAB language [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 223-231.