

DOI: 10.7652/xjtuxb201404013

浅水域探测型无人水下航行器 海洋动能发电装置特性研究

丁文俊^{1,2}, 宋保维^{1,2}, 毛昭勇^{1,2}, 赵晓哲³

(1. 西北工业大学航海学院, 710072, 西安; 2. 西北工业大学水下航行器研究所, 710072, 西安;

3. 海军大连舰艇学院训练部, 116013, 辽宁大连)

摘要: 为了解决浅水域探测型无人水下航行器探测模块长时连续工作时对能源的需求,设计了基于海洋动能的晃动发电装置,根据拉格朗日方程建立了航行器与晃动摆耦合的运动方程,最后根据简化的运动方程,采用龙格库塔方法求解并分析了影响晃动发电性能的因素,研究了不同海况下航行器运动幅度、周期、摆长、质量、转动惯量等参数以及不同运动耦合对发电性能的影响。在2级海况下,最佳电机阻尼系数为 $5.4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, 3种激励运动耦合时发电装置平均功率能够达到 0.5 W 。研究分析表明,提出的基于海洋动能发电装置模型是合理可行的,在一般海况下,能够满足探测模块的能源需求,同时发现运动幅度、周期、摆长、质量以及耦合横摇运动对发电性能影响较大,转动惯量以及耦合垂荡运动对其影响较小。研究结果为后期晃动发电机的研制、工程试验及优化,提供了一定的理论基础与借鉴。

关键词: 海洋动能;发电;晃动发电机;水下航行器

中图分类号: TK71; TJ61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0073-06

Research on Characteristics of Power Generation Device for Detection UUV by Ocean Kinetic Energy in Shallow Water

DING Wenjun^{1,2}, SONG Baowei^{1,2}, MAO Zhaoyong^{1,2}, ZHAO Xiaozhe³

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Underwater Vehicle, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Training Department, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116013, China)

Abstract: To deal with energy demand of detection module of a detection unmanned underwater vehicle (UUV) for long continuous operation in shallow water, a rocking energy generation device in terms of ocean kinetic energy is proposed. The coupled motion equations for the vehicle and the rocking pendulum are established according to Lagrange equation. The factors affecting rocking generation performance are analyzed by solving the simplified motion equation with Runge-Kutta method. The influence of parameters on the rocking generation is investigated over a range of sea state, such as vehicle movement amplitude, period, pendulum length, and mass and moment of inertia with different coupling motions. Under sea state 2, the optimum damping coefficient for maximum power output gets $5.4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, and the average power output under three coupling excited motions reaches 0.5 W . The proposed ocean kinetic energy generation device model is reasonable and feasible, which meets the energy demand of the

detection module under the general sea state. It is found that the amplitude, period, length, mass and the coupling rolling motion exert obvious impact on the rocking generator, but the moment of inertia and coupling heaving motion affect slightly.

Keywords: ocean kinetic energy; electricity power; rocking generator; underwater vehicle

为了实现航行器具有长时间执行任务的能力,国内外相关机构、学者对航行器新型能源技术异常重视,美国、俄罗斯等国已开展了多项围绕适合航行器的新型能源技术的研究工作,主要集中在温差能、太阳能等环境能源在航行器上的应用,并取得了一定的研究成果^[1-4]。如美国 Webb 实验室研制了温差能驱动的 Slocum Thermal 水下滑翔机^[2-3],俄罗斯研制了太阳能水下航行器^[4]。在国内,如天津大学、中国科学院沈阳自动化所、国家海洋技术中心、西北工业大学等一些研究所和高校也相继开展了有关航行器能源技术的研究工作^[5-8]。

目前对温差能的利用,水下滑翔机需要穿越不同的等差层,为了达到较大的温差需要穿越的深度比较深,且不适合定点监测。太阳能的利用随天气变化波动较大,另外采用太阳能,为了增加吸收太阳能的面积,航行器的外形结构比较特殊,同样不适合常规结构外形的水下航行器。

本文涉及的浅水域探测型无人水下航行器为常规外形,采用舰艇常规水下发射方式发射,当其进入工作地点后,通过锚链系留或者悬停于近水面,并转换工作状态进入探测模式。其主要工作为在沿海浅水域完成信息收集、环境监测、情报侦查等军事或民用任务。探测模块的功耗一般为 150 mW,常规能源模式为电池供电,服务期多为半年。为了延长服务期,上述新型能源方式无法应用到本探测型航行器上,因此本文开展了基于海洋动能的晃动发电装置的研究。

本文根据浅水域探测型无人水下航行器的特点,设计了基于海洋动能的晃动发电装置,以解决探测型无人水下航行器在探测模式下的能源自给问题。此发电装置能够利用海洋中波浪起伏、海流扰动、潮汐等海洋动能,通过晃动摆的惯性作用将其转化并储存,为航行器内部探测模块电子设备提供能源补给。本文的理论研究以及分析结果可以指导海洋动能晃动发电装置的理论研究,并为随后的工程应用提供依据。

1 海洋动能晃动发电装置设计

海洋动能晃动发电装置主要由晃动摆和永磁发

电机组成,其结构如图 1 所示。永磁发电机固定安装在航行器内部支承板上,晃动摆固定安装在永磁发电机的转子上,见图 2。其主要作用是通过晃动摆的惯性收集海洋动能,两者中间可以增加增速机构以提高转速,改进永磁发电机的发电性能。

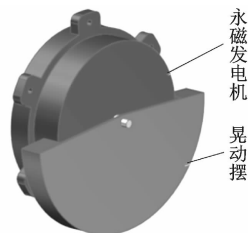


图 1 晃动发电装置结构图

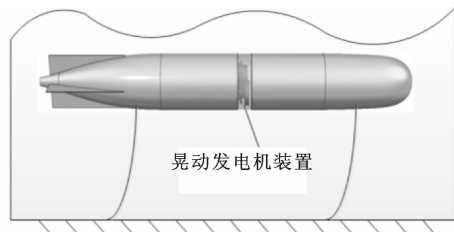


图 2 晃动发电装置安装及航行器系留图

晃动发电装置工作原理为:航行器在近水面将受到波浪、潮汐、洋流等海洋动能的扰动,通过惯性使晃动摆摆动,从而旋转永磁发电机转子,切割永磁发电机定子,使之产生感应电动势。该发电装置有如下优点。

(1)该装置结构简单,无需改变航行器的结构外形,所有零部件可以作为一个独立部件安装在航行器内部,这样可以使该发电装置与外部海洋环境隔离,保护其不受海水腐蚀、动密封、海洋生物附着等影响,这将大大降低其成本。

(2)该装置的晃动摆是一个圆弧形偏心惯性摆,能够围绕旋转轴作整圈旋转,而且不损毁航行器和发电装置,即使在恶劣的海况下,该发电装置也拥有极强的生存能力。

2 航行器与晃动摆运动方程

假设入射扰动为二维扰动,且垂直于航行器,晃动摆旋转轴线与航行器纵轴重合,在此假设下航行器的纵荡、首摇和纵摇运动对晃动摆的运动不产生

影响,因此航行器与晃动摆的耦合运动只与航行器的垂荡、横荡和横摇有关。

在水平面建立地面坐标系 xoy ,令 x 为航行器的横荡运动, y 为航行器的垂荡运动,假设航行器重心 G 位于航行器纵轴上, θ 为航行器的横摇运动, γ 为晃动摆相对于航行器的摇摆运动,见图 3。晃动发电装置的发电性能主要取决于晃动摆相对于航行

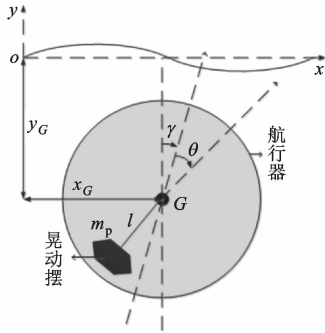


图 3 晃动摆坐标系

器的摇摆运动 γ 。令 I 为航行器的转动惯量, I_p 为晃动摆的转动惯量, l 为晃动摆的摆动旋转中心点到晃动摆质心的距离, m 为航行器的质量, m_p 为晃动摆的质量, g 为重力加速度。

设 $\mathbf{r}=(x,y,\theta,\gamma)^T$ 为位置矢量,在时域内,根据拉格朗日方程推导建立系统的运动方程为

$$(\mathbf{M}+\boldsymbol{\lambda})\ddot{\mathbf{r}}=\mathbf{F}_{\text{ex}}(\mathbf{r})-\mathbf{F}_{\text{H}}-\mathbf{F}_{\text{m}}-\mathbf{F}_{\text{g}}-\mathbf{F}_{\text{c}}-\mathbf{F}_{\text{PTO}} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{ex}}$ 为激励力及力矩矩阵,主要由入射波、衍射波、潮汐等海洋动能因素产生; $\mathbf{F}_{\text{H}}$ 为航行器在黏性流体中运动受到的阻尼力及力矩矩阵; $\boldsymbol{\lambda}$ 为航行器的附加质量矩阵,与航行器的外形有关; $\mathbf{F}_{\text{m}}$ 为锚链作用力及力矩矩阵(悬停时为零矩阵); $\mathbf{F}_{\text{PTO}}$ 为永磁发电机产生的电磁力及力矩矩阵; $\mathbf{M}$ 为航行器与晃动摆系统的质量矩阵,包含了航行器与晃动摆的耦合运动项,其表达式如下

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix} m+m_p & 0 & -m_pl\cos(\theta+\gamma) & -m_pl\cos(\theta+\gamma) \\ 0 & m+m_p & m_pl\sin(\theta+\gamma) & m_pl\sin(\theta+\gamma) \\ -m_pl\cos(\theta+\gamma) & m_pl\sin(\theta+\gamma) & I+I_p+m_pl^2 & I_p+m_pl^2 \\ -m_pl\cos(\theta+\gamma) & m_pl\sin(\theta+\gamma) & I_p+m_pl^2 & I_p+m_pl^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$\mathbf{F}_{\text{g}}$ 为重力作用力

$$\mathbf{F}_{\text{g}}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_pg\sin(\theta+\gamma) \\ m_pg\sin(\theta+\gamma) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$\mathbf{F}_{\text{c}}$ 为由于旋转运动产生的科氏力

$$\mathbf{F}_{\text{c}}=\begin{bmatrix} -m_pl(\dot{\theta}+\dot{\gamma})^2\sin(\theta+\gamma) \\ -m_pl(\dot{\theta}+\dot{\gamma})^2\cos(\theta+\gamma) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$\mathbf{F}_{\text{PTO}}$ 为永磁发电机产生的电磁转矩,在永磁发电机后端负载确定的情况下,可以假设电磁阻矩为一个阻尼器^[9],其后端负载等影响可以简化为阻尼系数 C 对晃动发电系统的影响,表达式为

$$\mathbf{F}_{\text{PTO}}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C\dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{5}$$

其晃动发电功率 P 便可以表示为

$$P=C\dot{\gamma}^2 \tag{6}$$

$\mathbf{F}_{\text{ex}}, \mathbf{F}_{\text{H}}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}_{\text{m}}$ 矩阵只与航行器的参数有关,与

晃动摆的运动方程无关,它们的表达式可以参照相关专业书籍及文献建立^[10-12]。本文侧重于发电装置特性研究,分析各种参数对其发电性能的影响,探索发电装置技术方案的可行性。本文初步研究时,参考文献[13]的相关研究结果,航行器在波浪中的流体特性有待进一步研究。因此,系统的运动方程可以简化为多参数激励下的晃动摆的非线性运动方程

$$(I_p+m_pl^2)\ddot{\gamma}+C\dot{\gamma}+m_pg\sin(\theta+\gamma)=m_pl\cos(\theta+\gamma)\ddot{x}-m_pl\sin(\theta+\gamma)\ddot{y}-(I_p+m_pl^2)\ddot{\theta} \tag{7}$$

本文采用 MATLAB 中的四阶龙格库塔法对该参数激励下的非线性方程进行数值求解。

本文直接采用文献[13]中水下航行器模型,并引用文中的研究结果(见表 1)来分析晃动摆在多参数激励下的运动响应、晃动发电装置的发电性能及对晃动发电性能的影响因素。

表 1 水下航行器近水面悬停受波浪的影响

海况	晃动幅度/m	晃动周期/s
2 级	0.178 6	2.6
4 级	0.778 4	5.3

3 晃动发电性能研究

根据文献[13]的研究结果,水下航行器悬停时,其横荡与垂荡周期及幅度都差别不大,不考虑初始相位,并假设横摇的激励周期与横荡、垂荡相同,则可假设各自的激励方程,其中横荡运动方程为

$$x = x_G + X\cos(2\pi t/T)$$

垂荡运动方程为

$$y = y_G + Y\sin(2\pi t/T)$$

横摇运动方程为

$$\theta = \Theta\sin(2\pi t/T)$$

3.1 晃动频率与幅度对发电性能的影响

首先分析水下航行器只有横荡运动的情况,选取表 2 中数据,并适当变动相应参数,分析水下航行器晃动发电装置中晃动摆的运动响应,以及横荡幅度、横荡周期、电机阻尼系数对发电性能的影响。假设 l 为 0.25 m, m_p 为 10 kg, I_p 为 0.03 kg/m²。

表 2 横荡参数比较

海况	横荡幅度/m	横荡周期/s
2 级(变动)	0.178 6	2.0
2 级	0.178 6	2.6
2 级(变动)	0.250 0	2.6
4 级	0.778 4	5.3

由图 4 可知,航行器横荡幅度和周期的变化对装置平均发电功率均有影响,具体分析如下。

- (1)当横荡幅度增大时,平均发电功率增大。
- (2)当横荡周期变小时,平均发电功率增大,而且增大非常明显。
- (3)当海况级别增大时,平均发电功率反而减小,其原因是海况增加,虽然横荡幅度增大,但是横荡周期同样也增大,周期对发电性能的影响比幅度的影响大,所以平均发电功率反而减小。
- (4)不管横荡幅度和周期的变化,平均发电功率

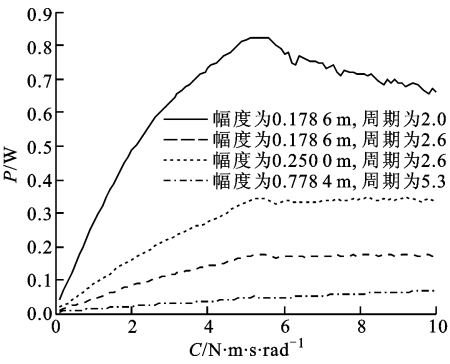


图 4 横荡运动下平均发电功率图

在电机阻尼系数为 5.4 时达到最大值,在 2 级海况下,能够达到 0.2 W。在变动周期为 2 s 时,其平均发电功率可以达到 0.8 W。在变动幅度为 0.25 m 时,其平均发电功率可以达到 0.3 W,基本上都满足探测模块的功率需求。

在横荡幅度为 0.178 6 m、周期为 2.6 s 的 2 级海况条件下,假设 l 为 0.25 m、 I_p 为 0.03 kg/m²、 m_p 为 10 kg、 C 为 5.4 N·m·s/rad 时,晃动摆的运动响应图及其功率图如图 5 和图 6 所示。

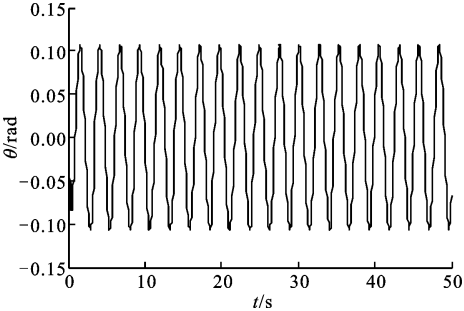


图 5 晃动摆运动响应

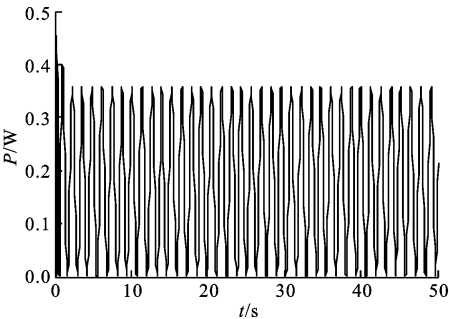


图 6 发电功率图

由图 6 可知,在 2 级海况下,发电功率能够达到 0.35 W,但是功率波动比较大,表明该发电装置需要较高的过载能力,并需要增加电子系统来减少功率波动。

在分析水下航行器只有横摇运动时,选取 2 级海况下的 3 种工况,幅度为 $\pi/18$ 、周期为 2 s,幅度为 $\pi/18$ 、周期为 2.6 s,幅度为 $3\pi/36$ 、周期为 2.6 s,来分析横摇幅度、横摇周期以及电机阻尼系数对装置发电性能的影响。分析中假设 l 为 0.25 m, m_p 为 10 kg, I_p 为 0.03 kg/m²。

从图 7 中分析可知,在横摇运动影响下,幅度与周期对装置发电功率均有影响,具体如下。

- (1)当横荡幅度增大时,平均发电功率增大。
- (2)当横荡周期变小时,平均发电功率也增大。
- (3)与图 4 相比可知,装置的最佳功率点发生在阻尼系数为 5.4 N·m·s/rad 时,并且其阻尼系数不随激励条件而改变。同时,在 2 级海况下,幅度为

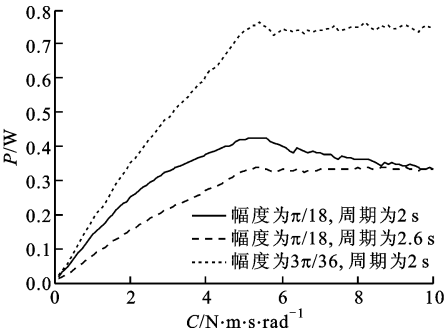


图 7 横摇运动下平均发电功率图

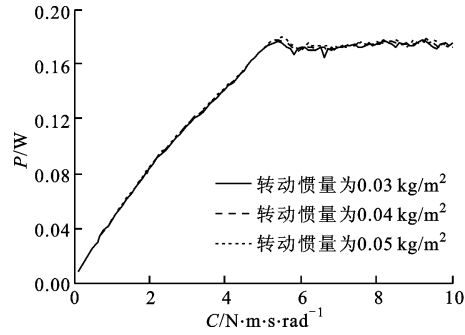


图 9 转动惯量对装置平均发电功率的影响

$\pi/18$ 、周期为 2.6 s 时装置的最低功率能够达到 0.35 W,能够满足其探测模块要求。

3.2 晃动摆质量对发电性能的影响

在横荡幅度为 0.178 6 m、周期为 2.6 s 下, l 为 0.25 m, I_p 为 0.03 kg/m^2 ,不同质量对装置发电性能的影响如图 8 所示。从图 8 中分析可知,在 2 级海况、不同质量条件下,当电机阻尼系数在 $0\sim 2\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 范围内时,质量的影响基本上可以忽略,当电机阻尼系数大于 $2\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 后,质量对平均发电功率的影响随质量增加而增大,在电机阻尼系数达到一定值时,影响比较明显。

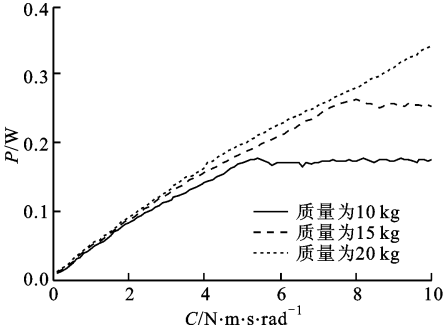


图 8 质量对装置平均发电功率的影响

3.3 晃动摆转动惯量对发电性能的影响

在横荡幅度为 0.178 6 m、周期为 2.6 s 的条件下, l 为 0.25 m, m_p 为 10 kg,不同转动惯量 I_p 对装置发电性能的影响如图 9 所示。从图 9 中分析可知,在 2 级海况下,晃动摆的转动惯量对装置平均发电功率的影响可以忽略。

3.4 晃动摆摆长对发电性能的影响

在横荡幅度为 0.178 6 m、周期为 2.6 s 下, m_p 为 10 kg, I_p 为 0.03 kg/m^2 ,不同摆长对装置发电性能的影响如图 10 所示。从图 10 中分析可知,在 2 级海况下,晃动摆的摆长变化在电机阻尼系数为 $0\sim 4.3\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 范围内时,对平均发电功率的影响不大,但在阻尼系数达到 $4.3\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 后,随摆长增大,其平均发电功率相应增大。

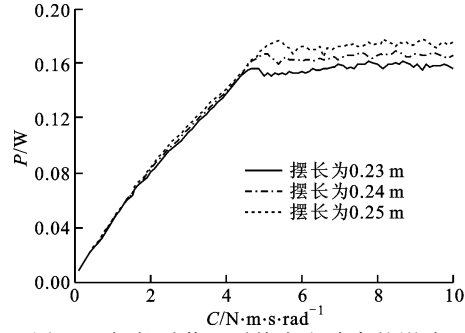


图 10 摆长对装置平均发电功率的影响

3.5 航行器耦合运动对发电性能的影响

取 l 为 0.25 m、 I_p 为 0.03 kg/m^2 、 m_p 为 10 kg。在 2 级海况下,航行器横荡幅度为 0.178 6 m,周期为 2.6 s;垂荡幅度为 0.178 6 m,周期为 2.6 s;横摇幅度为 $\pi/18$,周期为 2.6 s。在横荡、垂荡、横摇相互耦合作用下,对装置的发电性能影响的比较如图 11 所示。

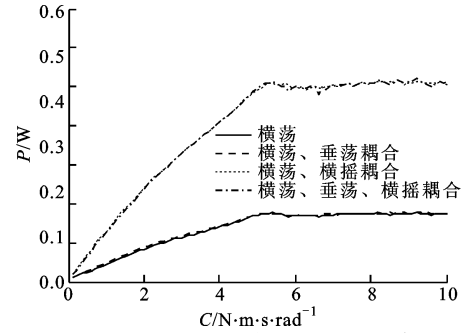


图 11 2 级海况下装置的平均功率

在 4 级海况下,航行器横荡幅度为 0.778 4 m,周期为 5.3 s;垂荡幅度为 0.778 4 m,周期为 5.3 s;横摇幅度为 $\pi/18$,周期为 5.3 s。在横荡、垂荡、横摇相互耦合作用下,对装置的发电性能影响的比较如图 12 所示。

从图 11 和图 12 中分析可知,在 2 级海况和 4 级海况下,在航行器横荡运动的基础上,航行器垂荡运动和横摇运动与其耦合对发电性能的影响中,横摇的影响比较大,垂荡的影响基本上可以忽略。

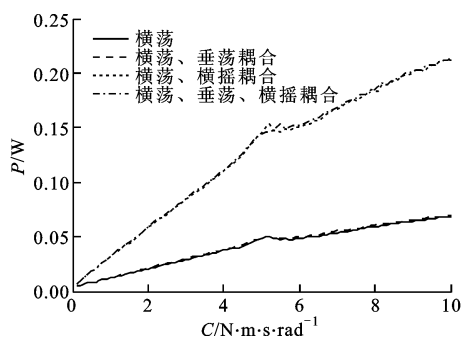


图12 4级海况下装置的平均发电功率

在近水面波浪作用下,航行器与系泊系统联合作用,产生的耦合运动是十分复杂的,本文未对其进行深入分析,同时水深、系泊长度对耦合运动的影响也未加以考虑,这些问题有待于进一步研究。

4 结 论

本文根据浅水域探测型无人水下航行器的特点,提出了基于海洋动能的晃动发电技术,以解决探测型无人水下航行器探测模块的能源自给问题。研究了不同海况,运动幅度、周期、摆长、质量、转动惯量等参数以及不同运动耦合对发电性能的影响,结果如下。

(1)随着运动幅度的增大,该装置平均发电功率增大;随着运动周期的减小,其平均发电功率是增大的,而且周期的变化对平均发电功率的影响较幅度变化的影响大。

(2)在该装置结构参数不变的情况下,各种工况中随着阻尼系数的增大,其平均发电功率先增大,在某个位置会达到最大值,且该阻尼系数的值不随工况变化而改变,只与结构参数有关。

(3)在激励条件一定时,改变装置的质量、摆长对平均发电功率的影响较大,而改变转动惯量对其影响较小。

(4)在耦合运动激励下,横摇对装置平均发电功率影响比较大,而垂荡的影响基本上可以忽略。同时,在2级海况下,3种运动耦合时装置平均发电功率能够达到0.5 W,基本能够满足探测模块的能源需求。

参考文献:

[1] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation: part 1 Concepts, materials and modellization [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 31-55.

[2] ERIKSEN C C. Gliders [C]// Encyclopedia of Ocean Sciences. London, UK: Elsevier Inc, 2009: 59-66.

[3] FRAJKA-WILLIAMS E, RHINES P B, ERIKSEN C C. Physical controls and mesoscale variability in the Labrador sea spring phytoplankton bloom observed by seaglider [J]. Deep Sea Research: Part I Oceanographic Research Papers, 2009, 56(12): 2144-2161.

[4] KOMERSKA R J, CHAPPELL S G. A simulation environment for testing and evaluating multiple cooperating solar-powered UUVs [C]// OCEANS 2006. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1-6.

[5] 王延辉, 王树新, 谢春刚. 基于温差能源的水下滑翔器动力学分析与设计 [J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 133-138.

WANG Yanhui, WANG Shuxin, XIE chugang. Dynamic analysis and system design on an underwater glider propelled by temperature difference energy [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 133-138.

[6] 倪园芳. 温差能驱动水下滑翔机性能的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[7] KONG Qiaoling, MA Jie, XIA Dongying. Numerical and experimental study of the phase change process for underwater glider propelled by ocean thermal energy [J]. Renewable Energy, 2010, 35(4): 771-779.

[8] 宋保维, 丁文俊, 毛昭勇. 基于波浪能的海洋浮标发电系统 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 139-144.

SONG Baowei, DING Wenjun, MAO Zhaoyong. Conversion system of ocean buoys based on wave energy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 139-144.

[9] JOSSER C, BABARIT A, CLEMENT A H. A wave-to-wire model of the SEAREV wave energy converter [J]. Engineering for the Maritime Environment, 2007, 221(2): 81-93.

[10] 李天森. 鱼雷操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 19-31.

[11] 张宇文. 鱼雷弹道与弹道设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999: 54-82.

[12] 严卫生. 鱼雷航行力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 24-45.

[13] 宋保维, 杜晓旭, 胡海豹, 等. 近水面悬停远航程AUV受波浪的影响 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 482-485.

SONG Baowei, DU Xiaoxu, HU haibao, et al. Effect of wave on AUV hovering near sea surface [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(4): 482-485.

(编辑 杜秀杰)