doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.048

波浪能点吸收器结构设计与数值优化

孙崇飞¹ 罗自荣¹ 朱一鸣² 卢钟岳¹ 吴国恒¹ 尚建忠¹ (1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073; 2. 曼彻斯特大学机械、航天与土木工程学院, 曼彻斯特 M17JR)

摘要:无人海洋探测器作为开发海洋资源的重要装备,普遍缺乏高效可靠的供电方式。波浪能作为一种分布广泛 的可再生海洋能,有望成为探测器的理想供电能源。波浪能的高能量密度特性有利于装置小型化,使其便于作为 供电模块集成到无人海洋探测器。提出了一种基于反转自适应机理的新型波浪能点吸收器。该点吸收器可以实 现叶片对水流的自适应偏转,并自动平衡装置的整体转矩。通过数值分析发现,点吸收器的功率和效率特性受吸 收器叶片倾角、相对流速、转速及双层吸收器相互作用的影响很大,合理选择系统参数有助于优化装置的整体性 能。试验桶及造波池试验分别验证了数值分析的准确性和工作原理的可行性。

关键词:波浪能;点吸收器;性能特性;优化设计

中图分类号: TK01; TK79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)09-0406-08

Structural Design and Numerical Optimization of Novel Wave Energy Point Absorber

SUN Chongfei¹ LUO Zirong¹ ZHU Yiming² LU Zhongyue¹ WU Guoheng¹ SHANG Jianzhong¹
(1. College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
2. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, Manchester M17JR, UK)

Abstract: Unmanned ocean detector, as an important tool for the development of marine resources, generally lacks efficient and reliable power supply. Wave energy is the most widely distributed renewable ocean energy, and it is expected to be the ideal energy source for the detectors. A novel wave energy point absorber was presented based on the counter-rotating self-adaptable mechanism. The new point absorber can achieve the self-adaptable deflection of the blades to the water flow and automatically balance the overall torque of the absorber. A comprehensive numerical analysis and experimental verification of the new point absorber were conducted, and the influence rules of structure and system parameters on the power and efficiency characteristics were obtained. Through numerical analysis, it was found that the power and efficiency characteristics of the point absorber were greatly affected by the inclination angle of the blade, the relative flow velocity, the rotational speed and the interaction between the upper and lower absorbers. The high-value range of power of the absorber was in the high relative velocity range, and the corresponding optimal blade inclination angle was $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$; the high-value range of efficiency was in the low relative velocity range, and the corresponding optimal blade inclination angle was $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$. A rotational speed of $50 \sim 90$ r/min was suitable for most typical sea conditions. Large blade inclination angle can weaken the interaction between the upper and lower absorbers, and small blade inclination angle can improve the performance of the single-layer absorber. Selecting suitable structure and system parameters can help further optimize the performance characteristics of the novel point absorber. In addition, validation experiments in test pool and wave tank were conducted respectively to verify the accuracy of numerical analysis and the feasibility of the novel point absorber. **Key words**: wave energy; point absorber; performance characteristics; optimization design

收稿日期: 2018-07-11 修回日期: 2018-08-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51475465)和湖南省研究生科研创新项目(CX2015B014)

作者简介:孙崇飞(1988—),男,博士生,主要从事波浪能发电技术研究,E-mail: sunchongfei@ yeah. net

通信作者:尚建忠(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事智能机械和波浪能发电技术研究,E-mail: jz_shang_nudt@163.com

0 引言

海洋中蕴含丰富的矿物资源、渔业资源和可再 生能源等海洋资源^[1-3]。由于海洋资源开发的需 求,水面航行器、海洋机器人、海洋浮标等先进无人 海洋探测器大量出现并投入应用^[4-5]。这些探测器 大多采用电池或电缆方式供电^[6]。电池供电限制 了单次最大工作时间^[7],而电缆供电限制了工作范 围和机动性^[8]。缺乏高效供电方式是制约各类无 人海洋探测器商用化的技术瓶颈之一,解决其供电 问题具有重大现实意义。

无人海洋探测器大多远离海岸且长期无人维 护,利用环境能源可从根本上解决供电问题。波浪 能作为一种分布广泛且能流密度很大的可再生能 源^[9],是无人海洋探测器供电的理想能源。近 20 年,波浪能技术逐步走向成熟,部分技术成果实现了 商业化应用^[10-11]。当前波浪能发电技术研究主要 集中在大型装置上,其主要部署在海岸或近海。英 国 Aquamarine 电力公司的 OYSTER 摆式发电装置 的波浪能阵列可以为 12 000 户家庭提供生活用 电^[12]。澳大利亚 Oceanlinx 公司的 MK3 振荡水柱 式波浪能装置实现了并网发电,其产生的电能被送 往当地的 Intergal Energy 电力公司^[13]。

无人海洋探测器的电能需求较小,且大多工 作在远海^[14].很难直接采用现有波浪能技术。此 外波浪能发电装置需作为供电模块集成到探测器 中,对尺寸有限制。在诸多类型的波浪能发电装 置中,点吸收器的尺寸相对于入射波波长最 小^[15-16]。点吸收器研究的典型产品有美国 Ocean Power Technologies 公司的 PowerBuoy 系列和英国 Finavera Renewables 公司的 AquaBuOY 系列。其中 PowerBuoy PB3 的浮体响应波浪运动产生相对于 阻尼板的线性往复运动,通过内置机械系统把线 性运动转换为发电所需的旋转运动^[17];AquaBuOY 2.0则使用二冲程软管泵对海水进行加压,利用加 压海水冲击涡轮机发电^[18]。上述两种点吸收器的 结构设计复杂且尺寸巨大。如 PowerBuoy PB3 的 浮标尺寸为 2.7 m, 整体高度为 14.3 m^[19]。所以 上述点吸收器的工作原理和装置尺寸使其不便于 作为供电模块集成到小功率海洋探测器,需进一 步简化和优化。

结合当前小功率海洋探测器普遍缺乏高效供电 方式的现状和点吸收器在装置小型化上的技术优势,本文提出一种基于反转自适应机理的波浪能点 吸收器。

1 结构设计和工作原理

海浪是一种表面波,其振幅随水深的增加急剧 衰减^[19]。在一定深度下的海水是相对平静的,这为 点吸收器提供了一种相对参考体。据此设计了一种 可作为海洋探测器供电模块的新型波浪能点吸收 器,如图1所示。当无人海洋探测器(比如水面航 行器)漂浮于海面时,可以释放其供电模块(即波浪 能点吸收器)到水面以下。点吸收器中的双层吸收 器通过冲击静水产生旋转运动,驱动电机发电为水 面航行器供电或蓄能。



图 1 点吸收器的概念图 Fig. 1 Conceptual map of point absorber 1. 无人海洋探测器 2. 系绳 3. 供电模块

如图 2 所示,该点吸收器主要包括水面浮体和 水下能量摄取(Power take-off, PTO)系统两部分,并 通过系绳连接。由于点吸收器被集成到无人海洋探 测器中,其水面浮体由探测器充当。水下 PTO 主要 包括上下层吸收器、传动轴和内置减速器的小型发 电机等。吸收器是 PTO 的核心,主要由内环、叶片 和外环组成。内环和外环之间由径向布置的 8 根支 撑轴连接。8 片具有限位装置的扇形叶片被安装在 相应的支撑轴上,采用中心对称的圆周阵列布置。



图 2 点吸收器的结构图

Fig. 2 Structure diagram of point absorber 1. 水面浮体 2. 系绳 3. 水下 PTO 4. 小型发电机 5. 上层吸 收器 6. 传动轴 7. 下层吸收器 8. 限位装置 9. 支撑轴 10. 叶 片 11. 外环 12. 内环

新型点吸收器基于反转自适应机理,工作原理 如图 3 所示。①当水面浮体上升时,水下 PTO 受到 系绳拖拽而上升,如图 3a 所示。上层吸收器叶片的 上表面受水流冲击,自适应性下摆。叶片受限位装 置限制在达到最大倾角后,停止下摆并呈倾斜状态。 水流继续冲击倾斜的叶片,产生推力向前推动叶片。 由于叶片是圆周阵列布置,上层吸收器逆时针旋转。 同理,下层吸收器顺时针旋转。②当水面浮体处于 波峰或波谷时,叶片处于偏转过程而无法提供推力, 如图 3b 所示。吸收器由于惯性会保持一定转速。 ③当水面浮体下沉时,水下 PTO 受重力作用而下 沉,如图 3c 所示。上层吸收器叶片的下表面受水流 冲击,自适应性上摆,达到最大倾角后呈倾斜状态。 水流继续冲击叶片,产生推力向前推动叶片。叶片 的水平受力方向不变,上层吸收器保持逆时针旋转。 同理,下层吸收器保持顺时针旋转。



由点吸收器的工作原理可得:吸收器叶片可根 据水流冲击方向自适应地调整叶片偏转方向,并保 持单层吸收器的单向旋转。叶片布置方向相反的双 层吸收器自动平衡 PTO 的整体转矩,并为发电机发 电提供反向旋转运动。

2 能量转换过程及性能评估理论

结合新型点吸收器的工作原理和性能特性的分析,分析其能量转换过程如图 4 所示。点吸收器通过水面浮体把波浪运动转换为线性运动形式的机械能,再通过双层吸收器将其转换为旋转运动形式的机械能,最终驱动发电机产生电能。当前关于水面浮体的研究较多^[20],在此不多做分析。PTO 系统作为核心部件,主要由双层吸收器和小型发电机组成。





点吸收器的能量转换过程分别涉及到浮体捕获 效率 η_{cap} 、吸收器水力效率 η_{hyd} 和发电机发电效率 η_{gen} 。点吸收器的总效率 η 可以表述为

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_{cap} \boldsymbol{\eta}_{hyd} \boldsymbol{\eta}_{gen} \tag{1}$$

吸收器输入功率 P_{in}可以用单位时间内吸收器 水平截面通过的流体动能来表示,即

$$P_{in} = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2}\rho\pi r^2 hv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3$$
(2)

式中 E_k——时间 t 内通过吸收器水平截面的圆柱 体状流体动能

h-----圆柱体状流体高度

r——圆柱体状流体半径,即吸收器半径

v——吸收器和水体之间的相对流速

吸收器输出功率 Pout 为

$$P_{out} = T\omega = T\frac{2\pi n}{60} = \frac{1}{30}\pi nT \qquad (3)$$

式中 T----输出转矩, N·m

ω——角速度,rad/s

n——转速,r/min

吸收器水力效率 η_{hyd} 为输入功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 之比,即

$$\eta_{hyd} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{1}{30}\pi nT}{\frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3} = \frac{nT}{15\rho r^2 v^3}$$
(4)

3 数值计算方法与配置

选用 Fluent 16.0 对点吸收器的水动力学特性 进行数值分析。波浪运动是一种随机的不规则振荡 运动^[21],点吸收器升沉运动的瞬时速度不恒定且存 在波动。吸收器叶片的自适应性摆动使得叶片存在 换向过程,期间叶片并非处于最大偏转角,水流无法 提供推力。另外吸收器的转速受电机负载转矩波动 和系统运行状态的综合影响,也存在波动。为便于 评估点吸收器的性能特性,取叶片相对水流的冲击 速度、叶片相对水平面的最大偏转角和吸收器转速 等典型的系统参数在单组数值分析中为常数,即对 点吸收器在典型海况下的最大瞬时功率和效率进行 数值分析。

采用滑移网格^[22]来模拟双层吸收器与水体之间 的相对旋转运动。SST $k - \omega$ 模型兼具了 standard $k - \omega$ 模型在边界层逆压梯度区间和 $k - \varepsilon$ 模型在自由剪 切流上的计算优势^[23],是本文数值优化采用的湍流 模型。点吸收器的标准模型如图 5 所示,其中吸收器 直径为400 mm,上下层吸收器间距为400 mm,吸收器 的整体高度约为 560 mm。为减少次要特征对计算 资源的过度消耗及其造成的网格畸变,用于数值分 析的模型在标准模型的基础上进行了合理简化。



如图 6 所示,选取圆柱形计算域覆盖吸收器,并 采用四面体网格对计算域进行分区划分。计算域内 的网格按照与点吸收器的距离进行分区,与吸收器 越近的区域的网格尺寸越小。中间区域①被细化为 4 个子区域,其中标号为②、③的区域的运动形式设 置为沿传动轴旋转。滑移网格方法通过旋转上述特 定的网格区域来求解双层吸收器与水体作用的时间 精确解。区域②、③与其周围区域之间的交界面设 置为 Interface,其他区域之间的交界面设置为 Interior。



4 数值计算结果与分析

基于上述对性能评估理论和数值配置方法的研 究,对点吸收器的功率和效率特性进行了数值优化 分析。

4.1 相对流速对点吸收器性能特性的影响

图 7 显示了相对流速对点吸收器性能特性的作 用规律。不同叶片倾角的上层吸收器功率均随相对 流速的增加而加速增大。不同叶片倾角的上层吸收 器的效率均随相对流速的增加而最终减少,但具体变 化规律有所不同。在低流速区(≤1.2 m/s),20°叶片 倾角的性能特性最优;在中高速区(≥1.4 m/s),35° 叶片倾角的性能特性最优。

图 8 显示了 35°叶片倾角的上层吸收器叶片受 到水流冲击时的压力云图。与水轮机的运行原理相



似,吸收器叶片在受到水流冲击后,其压力侧和吸力 侧之间产生压差。该压差对叶片的推力最终形成吸 收器的转矩。叶片压力侧和吸力侧的压力分别主要 为正压力和负压力。压差沿着弦长方向逐渐减小, 在叶片后缘趋近于零。叶片的高压差区主要集中在 前缘,因此输出转矩主要由前缘提供。对比1.0 m/s 和2.0 m/s 相对流速的叶片压力云图发现,两者叶 片压力分布规律类似,但后者的压差明显大于前者。 因此,提高相对流速来提高吸收器功率主要是通过 增大叶片前缘的压差绝对值和作用面积来实现的。



图 8 不同相对速度下的上层吸收器叶片压力分布 Fig. 8 Pressure distribution of upper absorber blades with different relative velocities

4.2 叶片倾角对点吸收器性能特性的影响

图9显示了叶片倾角对点吸收器性能特性的作 用规律。点吸收器的功率和效率随叶片倾角的增加 而呈抛物线式变化。随着相对流速增加,最高性能 取值的最佳倾角变大。也就是说,点吸收器所在海 域的海况等级越高,水流冲击速度越大,其最佳倾角 越大。此外,功率的最大值随相对流速增加而增加, 而效率的最大值却随之减少。即点吸收器所在海域 的海况等级越高,输出功率越高而效率反而越低。 根据不同海况调整叶片倾角,可以优化点吸收器的



under different blade angles

4.3 相对流速和叶片倾角对点吸收器性能特性的 综合影响

图 10 显示了相对流速和叶片倾角对点吸收器 性能特性的作用规律。可以看出,吸收器的功率高 值区在高流速区(≥1.8 m/s),其对应的最佳叶片倾 角取值范围为 30°~45°;吸收器的效率高值区在低 流速区(≤1.2 m/s),其对应的最佳叶片倾角取值范 围为 20°~35°。



Fig. 10 Combined effect of relative velocity and blade angle on performance of upper absorber

4.4 转速对点吸收器性能特性的影响

图 11 显示了转速对点吸收器性能特性的作用 规律。35°叶片倾角的点吸收器具有较好的水动力 学特性,选其为本组数值优化的研究对象。在中低 流速区,转速对吸收器功率的作用有限,功率随转速 增加变化平缓;在高流速区,转速对吸收器功率的作 用显著,功率随转速增加而大幅提升。吸收器效率 在不同流速区间均随转速的增加而先增加后降低。 相对流速越大的情况下,取得最大效率的最佳转速 也越大。也就是说,点吸收器所在海域的海况等级 越高,需适当提高转速来使吸收器功率和效率最大 化。而吸收器转速的调整可以通过改变电机负载扭 矩和减速箱传动比来实现。

4.5 上层和下层吸收器的相互作用

上述4.1~4.4节中数值分析的研究对象为处



于上升过程中的上层吸收器。即上层吸收器受到 的冲击水流竖直向下,且没有受到扰动。但水流 在流过上层吸收器后流态会发生改变,冲击下层 吸收器的流向并非竖直向下。可见上下层吸收器 的流场存在相互影响,这会影响装置的能量转换 特性。由于点吸收器在上升和下沉过程中运动的 相似性,本节中仅对处于上升过程中的双层吸收 器进行分析。

图 12 显示了双层吸收器在相互作用后的性能 特性。其中图 12a、12b、12c 分别为 35°、45°、55°叶 片倾角的双层吸收器的功率和效率:图 12d 为上述 3组双层吸收器的总功率和效率的对比。可以看 出:① 35°叶片倾角的上层吸收器的功率及效率在3 组中最高,但其下层吸收器的功率和效率最低。其 总的功率和效率在低流速区(≤1.2 m/s)是3组中 最高的,并在相对流速为1.2 m/s 时取得3组中的最 高效率 25.5%。② 45°叶片倾角的上层吸收器的功率 和效率轻微降低,但下层吸收器的性能上升幅度很大。 其总功率和效率在高流速区(≥1.8 m/s)是3组中最 高的,基本稳定在 20%~25%。③ 55°叶片倾角的 上层吸收器的性能继续下降,其下层吸收器性能则 继续上升。整体性能低于 45°叶片倾角的吸收器。 但其上下层吸收器的性能接近,利于上下层吸收器 转矩的配平。

图 13 为相对流速为 2 m/s 的点吸收器流场的 竖截面速度云图。可以看出,35°叶片倾角的双层吸 收器中间有一个明显的低速水流区,区域内的水流 速度仅为周围水域流速的 50% 左右。相比之下, 55°叶片倾角的双层吸收器所形成的低速水流区要 小很多。

图 14 显示了上述情况下的点吸收器流场的竖 截面速度矢量图。可以看出,35°叶片倾角的点吸 收器存在一个明显的涡流区。涡流区形成了一个 直径接近吸收器直径、高度接近双层吸收器间距 的圆柱体状的循环流区。循环流区改变了冲击下



相互作用

Fig. 12 Interaction between upper and lower absorbers under different blade angles







图 14 不同叶片倾角点吸收器的竖截面速度矢量图 Fig. 14 Velocity vector plots of vertical section of point absorberunder different blade angles

层吸收器的水流流态,降低了冲击水流流速,造 成下层吸收器性能远低于上层吸收器。相比之 下,55°叶片倾角的双层吸收器产生的涡流小很 多,且仅存在于传动轴附近流场。55°叶片倾角 的上下层吸收器之间的相互作用被弱化,两者性 能接近。

上述双层吸收器之间相互作用对总体性能影响的分析,主要是指两者相互作用充分的情况。 当吸收器的运动幅值较小,位于水流上游的吸收 器产生的尾流并不能扩散到水流下游的吸收器。 此时下游吸收器在未受到扰动时就反向运动,两 者的相互作用就很弱。这种情况下,上游和下游 吸收器的性能差异不大,即均接近于图 12 中深红 色区域所表示的吸收器性能值。因此,当点吸收 器处于较高海况时,其运动幅值大且相互作用明 显;处于较低海况时,运动幅值小且相互作用弱。

通过上述分析可得出:当点吸收器处于较高海况宜采用大于等于45°的叶片倾角。此时双层吸收器相互作用较充分,较大的叶片倾角可以弱化两者的相互作用,提高点吸收器的总体性能并有利于装置的转矩配平;当点吸收器处于较低海况宜采用小于等于35°的叶片倾角。此时吸收器之间的相互作用较弱,上下层吸收器之间的性能接近,具有较小叶片倾角的单层吸收器的性能更高,有利于提高点吸收器的总体性能。

5 试验

为验证新型点吸收器工作原理的可行性及数值 分析的准确性,制作了点吸收器的物理样机并进行 了试验桶和造波池试验。样机如图 15 所示,吸收器 的内外环使用铝合金,支撑轴和传动轴的套管为碳 纤维管,吸收器叶片采用 PE 材质,其余部分主要采 用 304 不锈钢。点吸收器采用内置减速器的小型永 磁直流发电机,最大功率为 30 W。

5.1 试验桶试验

试验桶试验平台如图 16 所示,主要包含试验



图 15 点吸收器的物理样机

Fig. 15 Physical prototype of point absorber 1.发电机罩 2.内置发电机 3.上层吸收器 4.下层吸收器 5.内环 6.外环 7.传动轴 8.叶片 9.支撑轴



图 16 试验桶试验 Fig. 16 Test platform with test pool 1. 电动缸 2. 试验桶 3. 点吸收器样机 4. 数据采集卡 5. 计 算机 6. 控制器

桶、电动缸、控制器、数据采集卡和运行 LabVIEW 的 计算机等。基于现有的试验条件,测试了低流速下 的不同叶片倾角的点吸收器功率。叶片倾角分别设 置为 10°、15°、20°、25°。设置电动缸的运动方式为 幅值 S = 150 mm、周期为 t = 2 s 的正弦曲线,其最高 速度 $V_{\text{max}} = 0.47 \text{ m/s}$ 。

试验输出物理量为电压 U,电路电阻 R 为 10 Ω ,瞬时功率 P 可由 $P = U^2/R$ 求得。如图 17a 所 示,瞬时功率 P 在 0 ~ 8 W 之间波动。为了便于试 验和数值分析的数据比较,对上述瞬时输出功率数 据处理得出时均功率。再对双层吸收器在最高速度 V_{max} 下进行数值计算,获得输出的机械总功率。对 比试验中获取的时均功率和数值分析获取的机械功 率,如图 17b 所示。

通过试验桶试验和数值计算获取的两种功率 曲线在变化趋势上非常一致,但取值有所不同。 原因如下:①试验输出量为吸收器后端发电机的



电流信号,而数值分析输出量为吸收器的水动力 学性能,两种输出量是从不同方面反应吸收器的 功率特性。②试验中获取的时均功率为发电机对 吸收器输出机械能的二次转化,存在能量损失。 ③试验中获取的时均功率为瞬时功率经处理后得 到的,而仿真中获取的机械功率是在升沉运动中 最大的相对流速下得到的。试验桶试验和数值分 析中获取的功率曲线高度一致,验证了两种分析 方法的合理性及准确性。

5.2 造波池试验

试验桶由于尺寸限制具有阻塞效应,可能对 吸收器性能产生加强作用,有必要补充造波池试 验。图 18 为造波池试验平台,造波池长、宽、高分 别为 40、1.0、0.8 m。点吸收器样机高度为 0.56 m。为避免样机与池底的碰撞并模拟海底静 水层,在池底挖有 0.8 m 深的正方体坑体。测试平 台由数据采集卡、运行 LabVIEW 的计算机和其他 电路元件组成。试验中的波浪谱为规范波谱,波 高 0.3 m,水深 0.6 m。



图 18 造波池试验平台 Fig. 18 Test platform with wave tank

基于当前试验条件,对不同波浪周期下的点吸 收器的电压数据进行采集处理,如图 19 所示。分析 电压曲线得出:①该新型点吸收器可以稳定输出电 能,其机构设计和工作原理可行。②当前试验条件 下产生的电压峰值主要在 3 ~4 V 之间。③不同波 浪周期值与电压峰值数量具有明显的对应关系,但 是对电压峰值的影响并不明显。



本次的造波池试验还出现了电压偏低及电压曲 线中波谷偏大的现象。原因如下:①造波池的尺寸 较小且波高仅为 0.3 m。考虑到浮子对波浪的响 应,点吸收器的升沉运动幅值不会超过 0.15 m。 ②吸收器叶片换向占用了较大的运动行程,且换向 过程中水流无法对叶片产生推力,点吸收器的设计 在大行程中的优势没有充分发挥出来。

6 结论

(1)新型点吸收器的工作原理可行。带限位装 置的叶片设计可以实现在升沉运动中自适应地调整 偏转方向,并保持吸收器的单向连续旋转。旋转方 向相反的双层吸收器可以实现 PTO 的整体转矩配 平,且不受升沉运动中运动行程的限制。

(2)点吸收器的性能特性受相对流速、叶片倾 角、转速的影响很大。功率高值区在高流速区,相应 的最佳叶片倾角为30°~45°;吸收器的效率高值区 在低流速区,相应的最佳叶片倾角为20°~35°。在 典型海况下,50~90 r/min 的转速是合适的。点吸 收器性能受转速的影响还需考虑相对流速,相对流 速越高其最佳转速越高。

(3)上下层吸收器的相互作用对点吸收器的总 体性能有重要影响。当点吸收器处于较高海况时, 叶片倾角官大于等于 45°。较大的倾角可以弱化上 下吸收器之间的相互作用,利于转矩平衡并最大化 总体性能。当点吸收器处于较低海况时,叶片倾角 宜大于等于 35°。较小倾角的单层吸收器性能更 优,利于提高总体性能。

文 献

- DINCER I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 1 2000, 4(2): 157 - 175.
- 楼东, 谷树忠, 钟赛香. 中国海洋资源现状及海洋产业发展趋势分析[J]. 资源科学, 2005, 27(5):20-26. 2
- 3 THÉBAUD O, DOYEN L, INNES J, et al. Building ecological-economic models and scenarios of marine resource systems: Workshop report [J]. Marine Policy, 2014, 43: 382-386.
- WANG X, SHANG J, LUO Z, et al. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 1958 – 1970.
- ERIKSEN C C, OSSE T J, LIGHT R D, et al. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research 5 J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 424-436.
- 6 KINSEY J C, EUSTICE R M, WHITCOMB L L. A survey of underwater vehicle navigation: recent advances and new challenges [C] // IFAC Conference of Manoeuvering and Control of Marine Craft. 2006, 88: 1-12.
- MENDEZ A, LEO T J, HERREROS M A. Current state of technology of fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles [J]. Energies, 2014, 7(7): 4676-4693. 7
- HENDERSON E, PANTELAKIS T, AN E. Energy systems for FAU AUVs (autonomous underwater vehicles) [C] // The Workshop 8 on Autonomous Underwater Vehicles, 2002:5-10.
- 0
- 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. LÓPEZ I, ANDREU J, CEBALLOS S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment [J]. 10 Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 413-434.
- CLÉMENT A, MCCULLEN P, FALCÃO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives [J]. Renewable & 11 Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5):405-431. WHITTAKER T, FOLLEY M. Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster[J]. Philosophical
- 12 Transactions of the Royal Society A, 2012, 370(1959): 345-364.
- FALCÃO A F O. Modelling of wave energy conversion [C] // Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2014. 13 ANTONIO F O. Wave energy utilization: a review of the technologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14 14(3): 899 - 918.
- 15 DREW B, PLUMMER A R, SAHINKAYA M N. A review of wave energy converter technology [J]. Proc. IMech E, Part A-Journal of Power & Energy, 2009, 223(8):887-902.
- 16 WANG L, ENGSTRÖM J, GÖTEMAN M, et al. Constrained optimal control of a point absorber wave energy converter with linear generator[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2015, 216(4):415-423. Ocean Power Technologies[EB/OL]. [2018-08-09]. https://www.oceanpowertechnologies.com/pb3.
- 17
- WEINSTEIN A, FREDRIKSON G, PARKS M J, et al. AquaBuOY-the offshore wave energy converter numerical modeling and 18 optimization [C] // OCEANS04. MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN04. IEEE, 2004, 4: 1854-1859.
- 19
- 冯士笮, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社, 1999. WANG Y L. Design of a cylindrical buoy for a wave energy converter[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 350-355. 20
- SWAMP GROUP. Ocean wave modeling [M]. Springer Science & Business Media, 2013. 21
- 22 BUFFA A, MADAY Y, RAPETTI F. Calculation of eddy currents in moving structures by a sliding mesh-finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1356-1359.
- 23 ADHIKARI R C, VAZ J, WOOD D. Cavitation inception in crossflowhydro turbines [J]. Energies, 2016, 9(4): 237.