

文章编号: 1004-7271(2007)02-0196-05

· 研究简报 ·

## 振荡浮子式波浪能转换装置的优化计算

苏永玲, 余克志

(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

**摘要:**对振荡浮子式波浪能转换装置进行初步设计,并通过数值计算对装置结构进行优化,找出影响装置性能的主要因素,确定出在中国南海工况下装置性能最优的参数。结果显示,在中国南海常波周期5~6 s附近,前港长 $L_{fp}$ 和浮子长 $L_b$ 对装置性能影响最大,是决定装置性能的主要因素;浮子吃水深度 $D$ 和港内水深 $D_p$ 是影响装置性能的次要因素,通过调整这两个参数,可在局部范围内改善装置性能;等深域水深 $H$ 对装置性能几乎没有影响,建造装置选址时可不考虑这方面的因素。使装置性能最优的参数取值依次为: $L_{fp} = 4$  m,  $L_b = 3$  m,  $D = 2.5$  m,  $D_p = 4.3$  m。

**关键词:**波浪能转换装置; 振荡水柱式; 振荡浮子式; 俘获宽度比

**中图分类号:** P 743.2      **文献标识码:** A

## Optimal calculation of the oscillating buoy wave power device

SU Yong-ling, YU Ke-zhi

(Food College, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In this paper, a primary design of an Oscillating buoy wave power Device (OD) is conducted firstly, then a numerical calculation is carried out to find the main parameters that affect the performance of the OD, and find the optimal parameters of the OD when it works in South China Sea. The result shows that the length of the forepart of the port ( $L_{fp}$ ) and the length of the buoy ( $L_b$ ) are the primary parameters that affect the performance of the OD; the draft of the buoy ( $D$ ) and the water depth in the port ( $D_p$ ) are the secondary parameters, the performance of the OD can be improved partly by adjusting them; and the water depth in the region of constant depth ( $H$ ) is irrelevant to the performance of the OD, It means that the water depth in the region of constant depth ( $H$ ) can be left out of account when selecting a site to build the OD. The optimal parameters are shown below:  $L_{fp} = 4$  m,  $L_b = 3$  m,  $D = 2.5$  m,  $D_p = 4.3$  m around the usual wave period of 5-6 s in South China Sea.

**Key words:** wave power device; oscillating water column; oscillating buoy; capture width ratio

海洋波浪能作为一种清洁的可再生能源,长期以来,世界各国投入了大量的人力和财力进行了研究。振荡水柱(OWC)式波浪能转换装置就是利用海洋波浪能来发电的一种波能装置。由于这种装置具有较高的可靠性,在一些附近海域波能密度高的国家,如许多欧洲国家都得到重点发展,并出现了一些很有影响力的工程实例<sup>[1-2]</sup>。但这种装置的缺点主要表现在:①建造费用昂贵、施工困难。②装置总转换效率低,约为10%~30%<sup>[3-4]</sup>。这两大缺点大大限制了装置的发展,很难在市场上形成竞争力。

收稿日期:2006-05-09

基金项目:上海水产大学青年科研基金(科04-14)

作者简介:苏永玲(1974-),女,内蒙古呼和浩特人,讲师,主要从事流体机械工程、暖通空调工程方面的研究。E-mail:ylsu@shfu.edu.cn

中国附近海域的波能密度与欧洲国家相比要低得多,约为他们的 20% ~ 25%<sup>[5]</sup>,在中国采用振荡水柱式波能装置就显得不太理想。为此,本文研究了一种新型的岸式波能装置——振荡浮子式波能装置(OD),它用一个放在港内的浮体作为波浪能的吸收载体,然后将浮体吸收的能量通过一个放在岸上的机械或液压装置转换出去,用来驱动发电机发电。与振荡水柱式装置相比较,它节省了庞大的气室建造费用,成本大大降低。其次,将浮子吸收的能量转换为电能的效率也远高于振荡水柱式波能装置中的威尔透平效率,从而使装置总效率高于振荡水柱式装置的总效率<sup>[6]</sup>。本文利用数值计算方法,对振荡浮子波能转换系统中从波浪中吸收能量部分进行优化,目的在于:一方面研究装置各参数对装置性能的影响程度,找出决定装置性能的主要参数,为以后的设计、研究工作提供参考;另一方面通过对装置参数的优化,找出一组参数,在这组参数下,装置的性能最优,即装置的俘获宽度比(浮子输出功率与浮子宽度域内波浪输入功率之比)最大。

## 1 理论与方法

### 1.1 优化理论

在对装置的优化计算中,要计算装置的俘获宽度比,首要的是计算浮子受到的波浪力,而波浪力的计算是基于对浮子附近的水域做如下假设进行的:①流体是不可压缩的、无粘性的,运动是无旋的。②波浪是小振幅的,即  $\lambda \gg h$ ,其中  $\lambda$  为波长, $h$  是波高。③入射波是谐波。④只考虑浮子的向上运动。⑤远离装置的外海是等深、无界的,装置附近的地形是任意的(图 1)。计算理论采用船在波浪中的运动理论<sup>[7]</sup>。

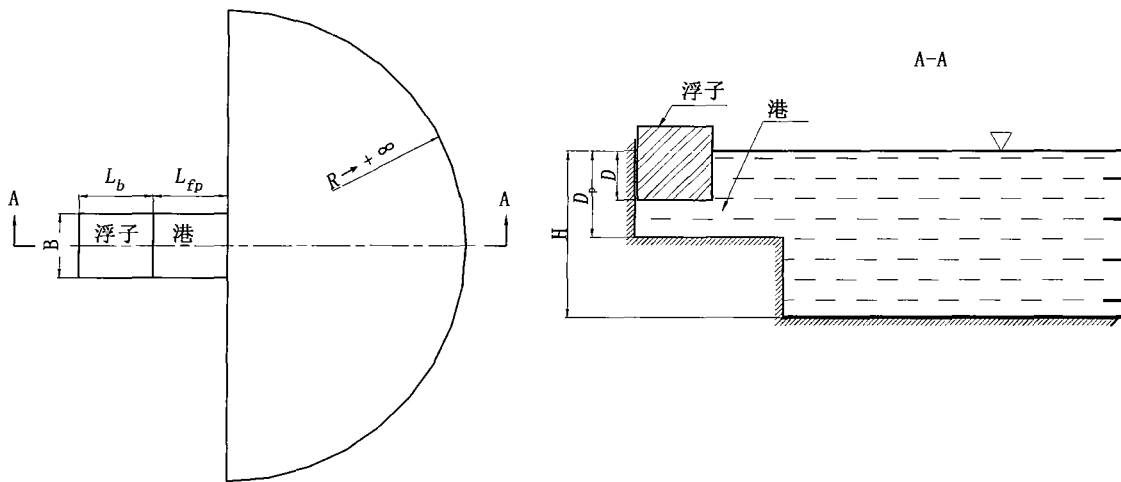


图 1 计算水域

Fig. 1 Water domain for calculation

$L_{fp}$ :前港长, $L_b$ :浮子长, $B$ :港宽度=浮子宽度=4 m, $D_p$ :港内水深, $R$ :等深水域半径, $D$ :浮子吃水深度, $H$ :等深域水深

因为流体运动是无旋的非定常运动,可以用拉格朗日积分来决定流场中的压力分布,不可压缩流体势流的拉格朗日方程为:

$$z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

因为假定波浪是小振幅的,对微振幅波,流体质点速度的平方为二阶小量,可忽略。所以上公式可化为:

$$z + \frac{p}{\rho} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2)$$

根据上式可看出,只要求出速度势分布,就可根据上式求出流场中的压力分布。从而求出波浪作用

在浮子上的力。在对速度势的求解中,为了简化计算,将其中的时间因子提出,使包含时间、空间的分析问题简化为单一的空间分析问题。

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \{ \phi(x, y, z) \exp(-i\omega t) \} \quad (3)$$

而对速度  $\varphi$  势的求解是根据拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial^2 z} = 0 \quad (\text{控制体内}) \quad (4)$$

边界条件:

$$\Phi_{,z} = \omega^2 \Phi / g + i\omega p / r \quad (\text{自由液面上}) \quad (5)$$

$$\Phi_{,n} = 0 \quad (\text{固体壁面上}) \quad (6)$$

和以下压力方程:

$$p(x, y) - p_c \quad (\text{浮子正下方水域}) \quad (7)$$

$$p(x, y) = 0 \quad (\text{其他水域}) \quad (8)$$

来进行求解的,在求解中采用的计算方法是边界元法<sup>[8]</sup>。

## 1.2 优化方法

装置优化是通过调整影响装置性能的各参数值来获得在实际海域情况下较理想的俘获宽度比。需调整的参数包括:前港长( $L_{fp}$ ),浮子长( $L_b$ ),浮子吃水深度( $D$ ),港中水深( $D_p$ ),为了证明等深域水深不影响装置性能,本文中对等深域水深( $H$ )也进行了“优化”。在优化过程中取浮子宽度  $B = 4.0 \text{ m}$ 。

在对参数的优化过程中,首先对每一参数给定一初值,由于南中国海波浪周期约在  $5 \sim 6 \text{ s}$ <sup>[9]</sup>,通过数值计算调整各参数值,直到在周期  $5 \sim 6 \text{ s}$  附近,装置的俘获宽度比曲线变化比较平缓且俘获宽度比最大。

## 2 分析与结果

### 2.1 对前港长的优化

在对前港长度的优化中,取  $L_b = 3 \text{ m}$ ,  $D = 2.5 \text{ m}$ ,  $D_p = 4.3 \text{ m}$ ,  $H = 8.5 \text{ m}$ ,在优化过程中,依次取  $L_{fp} = 2 \text{ m}$ 、 $L_{fp} = 3 \text{ m}$ 、 $L_{fp} = 4 \text{ m}$ 、 $L_{fp} = 5 \text{ m}$  和  $L_{fp} = 6 \text{ m}$ ,经过计算,在不同的前港长度下,装置的俘获宽度比如图2所示。从图中可以看出,尽管在周期  $8 \text{ s}$  附近装置的俘获宽度比最大,但此处俘获宽度比曲线变化剧烈,到  $9 \text{ s}$  处已减半,在此处工作会造成装置输出不稳定,大大影响装置的可靠性。观察在周期  $5 \sim 6 \text{ s}$  附近的各条俘获宽度比曲线,可看出  $L_{fp} = 4 \text{ m}$  和  $L_{fp} > 4 \text{ m}$  的曲线在此处变化比较平缓,且俘获宽度比较大,都是较好的选择。由于南中国海台风时海浪的周期约为  $8 \sim 10 \text{ s}$ <sup>[9]</sup>,而  $L_{fp} > 4 \text{ m}$  在周期为  $8 \sim 10 \text{ s}$  附近的俘获宽度比较大,从而在台风到来时易造成装置的损坏,这是在装置的设计中应尽量避免的。所以选  $L_{fp} = 4 \text{ m}$ 。其他参数的优化过程与此类似。

### 2.2 对浮子长的优化

图3是在不同的浮子长度下装置的俘获宽度比曲线图。可以看出在周期  $5 \sim 6 \text{ s}$  附近,  $L_b = 2 \text{ m}$  的俘获宽度比较其他的要大,但是我们之所以选择  $L_b = 3 \text{ m}$ ,是因为当浮子尺寸太小时,装置在波浪中的振幅会很大,从而装置的稳定性较差。选择  $L_b = 3 \text{ m}$  尽管会牺牲装置的俘获宽度比,但是装置的稳定性会大大提高,这是非常值得的。

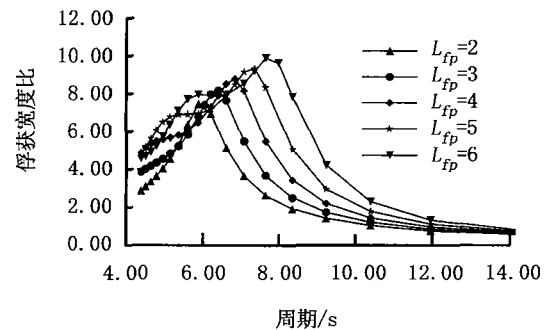


图2 不同前港长下的俘获宽度比  
Fig.2 Capture width ratio for different length of forepart of port

### 2.3 对浮子吃水深度的优化

在不同的浮子吃水深度下,装置的俘获宽度比如下图4所示。从图4可看出,俘获宽度比随浮子吃水深度变化很小。但总的趋势是随着吃水深度的减小,俘获宽度比逐渐变大。出于同样原因的考虑,为了提高装置的稳定性,选浮子吃水深度  $D = 2.5$  m。

### 2.4 对港内水深的优化

在不同的港内水深下,装置的俘获宽度比如图5所示。观察在周期5~6 s附近的各条俘获宽度比曲线,可看出俘获宽度比随港内水深变化不大, $D_p = 4.3$  m 是较好的选择。

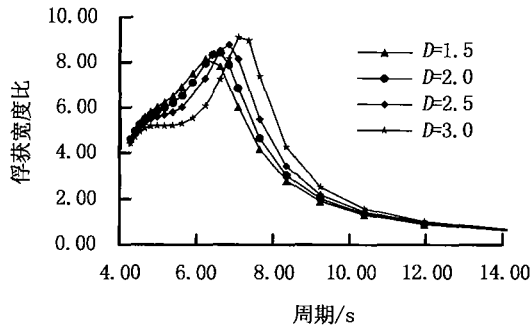


图4 不同浮子吃水深度下的俘获宽度比  
Fig.4 Capture width ratio for different draft of byoy

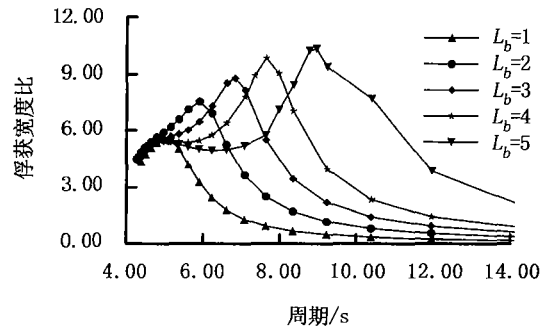


图3 不同浮子长度下的俘获宽度比  
Fig.3 Capture width ratio for different length of buoy

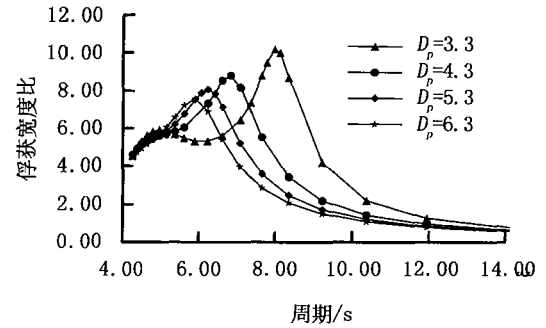


图5 不同港内水深下的俘获宽度比  
Fig.5 Capture width ratio for different water depth in port

### 2.5 等深域水深对装置性能的影响

从图6可以看出装置的俘获宽度比在周期5~6 s附近随等深域水深变化很小,这意味着前面的优化结果在不同的等深域水深下都适用。在实际工程中,等深域水深由当地海域的实际情况决定。

### 2.6 优化结果

通过以上优化计算,影响装置俘获宽度比的各参数最优取值为: $L_{fp} = 4$  m,  $L_b = 3$  m,  $D = 2.5$  m,  $D_p = 4.3$  m, 等深域水深  $H$  对装置性能几乎没有影响,本计算中取  $H = 8.5$  m。在上述最优参数下装置俘获宽度比随入射波周期变化的曲线如图7所示。从图7可以看出,尽管在周期7 s附近装置的俘获宽度比最大,但此处俘获宽度比曲线变化剧烈,在此处工作会造成装置输出不稳定,大大影响装置的可靠性,是装置设计中应该尽量避免的。在周期5~6 s附近,曲线变化平缓,可见优化计算结果是可行的。

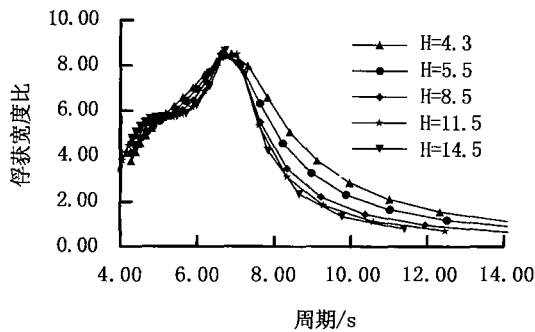


图6 等深域不同水深下的俘获宽度比  
Fig.6 Capture width ratio for different depth of water in region of constant depth

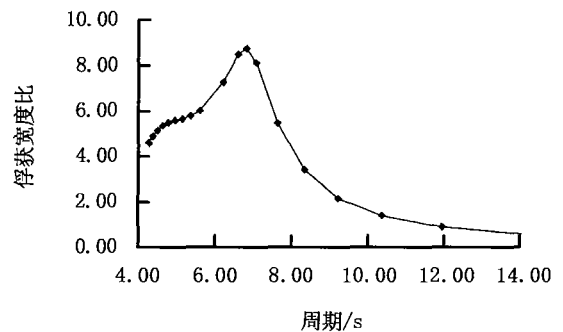


图7 优质结果下的俘获宽度比  
Fig.7 Capture width ratio for the optimal parameters

### 3 讨论

通过以上优化计算可以看出,各参数对装置俘获宽度比的影响程度不同,具体来讲:①前港长  $L_p$  和浮子长  $L_b$  对装置俘获宽度比影响最大,装置的性能主要由这两参数决定,通过调整这两个参数值,可以使装置性能大大改善。②浮子吃水深度  $D$  和港内水深  $D_p$  是影响装置性能的次要因素,通过调整这两个参数,可在局部范围内改善装置性能;如浮子吃水深度  $D$  由浮子重量决定的,浮子重则浮子吃水深度深,浮子轻则吃水深度浅,而浮子的轻重又会影晌浮子在波浪中的振动幅度,从而影晌装置的稳定性。所以在某些情况下,为了提高装置的稳定性,可适当增加浮子重量。对于港内水深  $D_p$ ,尽管他对俘获宽度比的影响不大,但是对它的选择应该慎重:当港内水深太浅时,浮子在振动幅度较大时容易撞底,对装置的可靠性不利;反之,当港内水深太深时,从图5可看出,装置俘获宽度比总体上随港内水深的增加而减小,同时增加港深也会相应的增加施工时的工程量,所以港内水深也不宜太深。③对于等深域水深  $H$ ,从图6可看出,装置的俘获宽度比几乎不随等深域水深的变化而变化,这就为我们在实际工程中进行装置选址提供了一个参考原则:当地海域的水深对装置性能影响很小,在选址时可不考虑这方面的因素。

#### 参考文献:

- [1] Bonke K. Building of Wave Energy Power Station in Norway [C]// Report of Norwegian Hydrodynamic Lab. Trondheim (Norway), 1985.
- [2] Whittaker T J T. Learning from the Islay wave power plant [C]// Proceedings of the 1997 IEE Colloquium on wave power: An Engineering and Commercial Perspective. London, 1997.
- [3] Yu Z, Jiang N, You Y. Power Output of an Onshore OWC Wave Power Station at Dawanshan Island [C]// Proceedings of the European Wave Energy Symposium. Edinburgh (England), 1993: 271 - 276.
- [4] Hotta H. R&D on wave power in Japan [C]// Proceedings of the second European wave power conference. Glasgow (England), 1996: 12 - 13.
- [5] Claeson L. Energi från havets vågor [M]. Stockholm (Sweden): Published by Energiforskningsnämnden, 1987: 175 - 193.
- [6] 苏永玲,谢晶,葛茂泉. 震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 - 343.
- [7] 刘应中,缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987: 56 - 62.
- [8] You Y. Hydrodynamic analysis on wave power devices in near-shore zones [J]. Journal of hydrodynamics, 1993, Ser. B (3): 42 - 54.
- [9] Lu Wei, Su Qiucheng. The analysis on the wave power resources of 100KW shoreline wave power station at Zhelang [C]// Proc. the third European wave power conference. Greece, 1998.