

文章编号:1002-3682(2016)01-0001-15

# 波浪能振荡浮子转换方式实验装置的研究与设计\*

闻福三<sup>1</sup>, 伍时和<sup>1</sup>, 吴乐贤<sup>2</sup>, 李社蕾<sup>1</sup>, 王连胜<sup>1</sup>, 赵京明<sup>1</sup>, 丁学用<sup>1</sup>,  
任丙南<sup>1,3</sup>, 王玲玲<sup>1</sup>, 汪 源<sup>1</sup>, 何彦廷<sup>1</sup>, 李政清<sup>1</sup>

(1. 三亚学院 理工学院, 海南 三亚 572022; 2. 西安思源学院, 陕西 西安 710038;

3. 三亚学院 海洋研究所, 海南 三亚 572022)

**摘 要:**针对阵列式振荡浮子波浪能转换设备, 提出一种在实验室进行测试研究的实验装置。该实验装置由一组阵列柱形水槽组成, 水槽液面在水动力系统的驱动下, 按照计算机设定的函数做升降运动; 对该装置模型——柱形阵列水槽的假设, 依据波浪理论进行了论证; 对装置的工作原理、结构设计、技术参数、控制电路和操作运行等做了较详细的说明; 对实验装置实际运行和测试情况做了介绍。结果表明: 该实验装置设计合理可行, 模拟波浪高度, 远高于现有的造波水池, 构成了一种专用的模拟造波装置; 该装置为不同形式振荡浮子式波浪能转换设备的研制提供了一种多功能、大振幅、高效灵活的实验平台。

**关键词:**波浪能; 振荡浮子; 实验装置; 阵列水槽; 模拟造波

**中图分类号:** P743.2      **文献标识码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.01.001

海洋波浪能是一种储量丰富、分布广泛的可再生清洁能源, 开发利用波浪能具有广阔的应用前景。目前, 国际上提出的波浪能量转换技术按俘获技术分类主要有振荡浮子式(点吸收式)、鸭式、振荡水柱式、筏式、摆式和越浪式等, 其中振荡浮子式(点吸收式)技术近年来发展很快。该技术采用振荡浮子俘获波浪能, 通过与浮子连接的后续转换系统(比如机械机构、气动机构、液压机构、直线发电机构等)将波浪能转换成旋转机械能、液压能, 完成能量的一级转换, 然后将机械能转换为电能即完成能量的二级转换。最终能量一般通过发电机转换成电能。波浪能振荡浮子转换方式的特点是能量转换机构简单可靠, 转换效率高, 如进一步采用共振聚波方式提高转换效率, 不受来波方向影响, 理论研究一级转换效率可超过 100%, 实验研究也超过了 90%<sup>[1]</sup>。

现有的振荡浮子波浪能电站通常以一个振荡浮子为中心, 完成能量采集转换, 构成一个独立的发电系统, 其缺点是能量采集面小, 输出能量不均匀, 成脉动状态。点阵机械串并联浮子移动式波浪能电站, 其特点是将若干个浮子通过机械串联, 实现能量叠加, 将叠

\* 收稿日期: 2015-10-19

**资助项目:** 海南省自然科学基金项目——点阵机械串并联浮子移动式波浪能电站的研究(20154174); 海南省高等学院科学研究项目——波浪及流体测控实验装置的研究(HNKY2014-75); 三亚市院地科技合作项目——带超越离合器抗风浪移动式波浪能发电站研究(2012YD44)

**作者简介:** 闻福三(1949-), 男, 高级工程师, 副教授, 主要从事测控技术与仪器专业及新能源开发利用的教学科研方面研究. E-mail: wenfu3@126.com

(王 燕 编辑)

加后的机械能转换为电能,不仅俘获了更大范围能流的波浪能,而且使脉动不均匀的动能变成相对稳定均衡的动能,更有利于发电。

点阵机械串并联浮子移动式波浪能电站参考了南海北部常年的波浪资源特征<sup>[2]</sup>,从力学原理、结构强度、能量转换效率等方面综合考虑,提出了阵列分布的振荡浮子,即阵列式振荡浮子。阵列式振荡浮子及其能量转换点机械传动装置是波浪能电站的关键部分,也是设计的难点之一。对阵列式振荡浮子及其能量转换点机械传动装置,通过在实验室按照实际发电波浪高度(1~2 m 波高)进行模拟试验,完善设计,在此基础上进行实海况试验,可以提高效率,减少风险,降低成本。

利用现有造波水池,造波水槽等人为制造的模拟波浪进行试验,波高不够。目前世界先进的 MARINTEK 海洋深水实验水池,所造规则波最大波高为 0.9 m,不规则有义波高为 0.5 m<sup>[3]</sup>。现有的普通造波水池,造波水槽的波高只有 0.5 m 左右<sup>[4-9]</sup>;根据相似定律等方法,进行模型试验<sup>[10-15]</sup>,可以解决局部的试验,但难以解决整体方面特别是阵列浮子机械传动方面的问题。针对阵列式振荡浮子式波浪能转换装置,文中提出了一种在实验室进行测试研究的试验装置。该实验装置针对性强,可以在一定程度上满足阵列式振荡浮子波浪能转换实验,为进一步实海况实验做准备。

## 1 相关理论

### 1.1 波形传播与波动能量

本设计以小振幅重力波理论为基础展开。小振幅重力波即正弦波。其振幅相对于波长为无限小,重力是其唯一的外力。小振幅重力波的波动特性可近似地说明实际海洋波动的许多现象。

理论上解决的办法是:根据流体力学的连续方程、运动方程和边界条件,在假定流体无黏滞性,运动是无旋的,波面上的压力为常数的条件下求解。如图 1 所示,建立右手直角坐标系, $z$  轴垂直向上为正,将  $x-y$  平面放在海面上,图中  $H$  为波高, $h$  为水深,设小振幅重力波动是二维的,只在  $x$  方向传播,波剖面方程可用正弦曲线表示,本文定义为波阵面函数,即:

$$\zeta = a \sin(kx - \sigma t), \quad (1)$$

式中, $\zeta$  为波面相对平均水面的铅直位移; $a$  为波动的振幅; $k$  为波数; $\sigma$  为波浪的圆频率。

由式(1)知,当  $(kx - \sigma t) = \pi/2$  时, $\zeta = a$ ,即为波峰。相速表达式为  $c = \frac{\lambda}{T}$ ,  $T$  为周期。

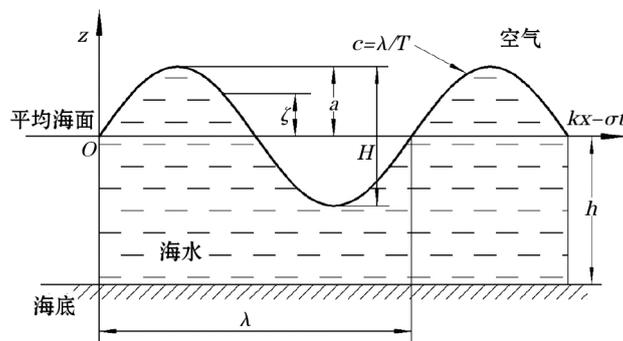


图 1 具有正弦外形的小振幅重力波

Fig. 1 The small amplitude gravity wave with a sine shape

相速是波形的传播速度,它仅仅是形状的移动,而不是液体质点的移动,如同漂浮在波浪水面木块,只作上下起伏和摇摆运动,而不随波形水平移动一样。

水深大于波长的一半( $h/\lambda \geq 0.5$ ),称为深水波,水质点在  $x$  与  $z$  方向上速度分量  $u, w$  分别为

$$\begin{cases} u = ack \exp(-kz) \sin(kx - \sigma), \\ w = -ack \exp(-kz) \cos(kx - \sigma). \end{cases} \quad (2)$$

比较式(1)与(2),有水质点在波峰处( $kx - \sigma t = \frac{\pi}{2}$ )具有正的最大水平速度,在波谷处( $kx - \sigma t = \frac{3\pi}{2}$ )具有负的最大水平速度,且铅直速度分量  $w$  皆为零。而且波峰前部为正(向上),波峰后部为负(向下)。因此,波峰前部为水质点的辐聚区,波面未来上升,而波峰后为辐散区,未来的波面下降,从而使得波形不断向前传播,而水质点却只围绕自己的平衡位置作圆周运动,水质点的水平速度与垂直速度的分布<sup>[11]</sup>见图 2。

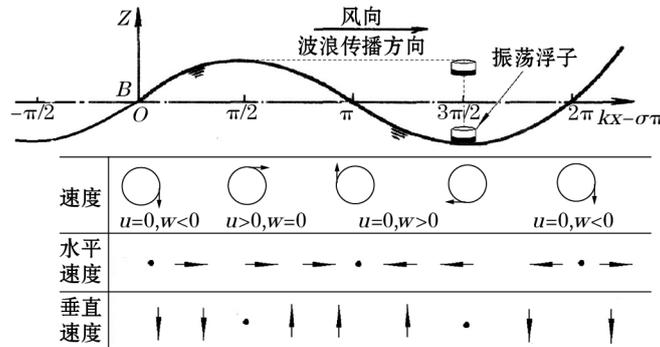


图 2 水质点的水平速度与垂直速度的分布

Fig. 2 Distributions of horizontal velocity and vertical velocity of the water particle

由波浪理论知波动的能量包括势能  $E_p$ 、动能  $E_k$ ,沿波峰线单位宽度在一个波长内的总能量为

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda. \quad (3)$$

能量的时空分布在海水内部是不断变化的,由于波动随深度迅速减小,所以总能量主要集中在海面附近。在某种意义上称这种波动为表面波<sup>[11]</sup>。依据相关波浪理论和有关海洋试验,展开了实验装置的设计。

### 1.2 波浪能的转换与振荡浮子几何形状设计

图 3 给出了一种垂荡式振荡浮子波浪能发电系统。在起伏运动的波浪驱动下,振荡浮子受到导向机构的约束,只能上下运动,固定于浮子上的齿条随之做上下运动并带动齿轮转动,再经过单向离合器和变速器,将齿条上下直线运动转变成变速器输出轴单一转向的高速旋转运动,进而带动发电机发电,完成波浪能—机械能—电能的转换。浮子通过齿条带动机械机构运动,机械传动系统阻力与输出动力之和称为负载阻力,用  $F_z$  表示,该力的方向总是与振荡浮子的运动方向相反,当浮子向上运动时  $F_z$  向下,当浮子向下运动

时  $F_z$  向上,用浮体静力学和动力学方法近似分析<sup>[12]</sup>。波形随相速  $c$  从左向右移动,相角  $kx - \sigma t$  从  $-\pi/2$  到  $3\pi/2$  一个周期内波形经过了 2 个阶段(图 2)。

第一阶段:相角从  $-\pi/2$  移动到  $\pi/2$ ,浮子靠浮力从波形的波谷上升漂移到波峰,克服负载阻力  $F_z$ ,上升距离为  $h \uparrow$ ,该段平均阻力为  $\overline{F_z}$ ,浮子做功为  $A \uparrow = \overline{F_z} \times h \uparrow$ ;第二阶段:相角从  $\pi/2$  移动到  $3\pi/2$ ,浮子靠自重从波形的波峰下降到波谷,克服负载阻力  $F_z$ ,下降距离为  $h \downarrow$ ,该段平均阻力为  $\overline{F_z}$ ,浮子做功为  $A \downarrow = \overline{F_z} \times h \downarrow$ 。

波浪运动一个周期,浮子共做功  $A_1 = |A \uparrow| + |A \downarrow|$ ,在正弦波的作用下,浮子连续上下振荡。正弦波幅值  $a$  为常数,浮子上下运动距离必然相等,且为常数,即  $h \uparrow = h \downarrow = h$ 。

则有  $A_1 = 2(\overline{F_z} \times h)$ 。随着波浪连续运动,振荡浮子周而复始做功;波浪运动  $n$  个周期,振荡浮子做功为  $A_n = nA_1$ ,故得出振荡浮子将波浪能转换成机械能的能量转换基本公式

$$A_n = 2n(\overline{F_z} \times h) \quad (4)$$

根据能量转换基本公式(4),在相同波高、周期和相同负载阻力条件下,要提高能量转换效率,重点在于设法提高浮子克服负载阻力  $F_z$  的能力和移动的行程  $h$ ,其中,浮子的尺寸和几何形状是影响行程  $h$  的重要因素。对于式(1)正弦波形,浮子的横向尺寸长度  $L$  (或直径  $D$ )与波长  $\lambda$  之关系如下<sup>[13]</sup>:

当  $\lambda = L$ ,波峰与波谷同时作用于浮子全长,所以不会发生垂荡运动;

当  $L = N\lambda$ ,同理由于波峰增加的浮力被波谷减小的浮力所抵消,因此也没有垂荡运动;

当  $L = N\lambda/2, N=1,2,3\cdots$ ,会偶然发生垂荡;

当  $L < \lambda/2$ ,浮子垂荡振幅小于波高  $H$ ,大于零;

当  $L \ll \lambda$ ,浮子几乎完全随波阵面垂振,当浮子质量及其他参数合适时,会产生共振现象,其振幅更高,因而振幅最大。

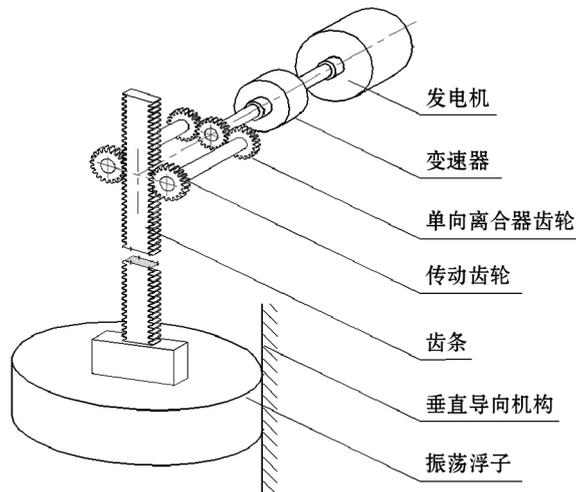


图 3 垂振式振荡浮子波浪能发电系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a vertical vibration type oscillating buoy wave power generation system

在满足浮子的横向尺寸长度  $L$  (或直径  $D$ ) 远远小于波长  $\lambda$  的条件下,可以获得最大振幅。振荡浮子有多种形状,典型的几何形状有长方体、垂直盘状圆柱体,垂直柱状圆柱

体、水平圆柱体和仿锥形五种。根据波浪理论和浮力定律可知,在相同波高、周期和相同负载阻力条件下,同样排水量的浮子垂直运动所做的功,垂直盘状圆柱体大于其他几种几何形体,其绕流最小<sup>[14-17]</sup>。因此,本项目设计波浪能电站的振荡浮子采用垂直盘状圆柱体。其实验装置也按照垂直盘状圆柱体设计,如图 3 中所示的振荡浮子。

### 1.3 绕流阻力和惯性力

振荡浮子作为一个孤立实体泊漂浮于海洋,波浪和潮流沿流动方向给浮子上的作用力即绕流力,该力可分为绕流阻力和绕流惯性力。总绕流力为

$$F = \frac{1}{2}C_D\rho S U^2 + C_M\rho V_0 \frac{dU}{dt} \quad (5)$$

式中, $C_D$ 为阻力系数; $U$ 为流体未受绕流影响前的速度; $S$ 为孤立柱体在垂直于流速方向上的迎流投影面积; $\rho V_0$ 为柱式物体的排水质量; $C_M$ 为截面形状的质量系数(或惯性系数)。蒋德才<sup>[18]</sup>给出了各种典型形状物体的阻力系数 $C_D$ 和质量系数 $C_M$ 的值,其中圆柱体系数值较小。式(5)适用于流体恒定均匀的流动,但是,从图 2 可见,实际波浪运动中水质点的水平速度与垂直速度分布并不是均匀的。定义实体的尺度(本文指浮子的直径 $D$ )与波长 $\lambda$ 的比值,即 $\frac{D}{\lambda} \leq 0.2$ 时,则称其为小尺度的孤立柱体,可以近似地将绕流范围视为均匀场。本文设计装置所针对的振荡浮子属于该范围,因此可以应用式(5)。式(5)所适用的对象为小尺度的孤立柱体,其长径比远大于振荡浮子的长径比,因而,其计算结果误差不容忽视。用其他计算方法,如:压力积分法,能量动量守恒法以及切片理论法等进行计算比较,用实验法进行验证等是必要的。本文所针对实际的阵列式振荡浮子波浪能电站所用的振荡浮子,具有垂直导向机构,该浮子在波浪力的作用下只能做上下垂直运动,水平的绕流由导向机构和机架来承担。因此本文设计的波浪能振荡浮子转换方式实验装置可以忽略绕流力。这一点为简化设计实验装置,提供了重要依据。

## 2 实验装置原理

### 2.1 微面域圆柱水槽假设

假设自由水面是小振幅重力波,其曲面可以用式(1)表达。根据 1.2 分析,在满足浮子的横向尺寸长度 $L$ (或直径 $D$ )远远小于波长 $\lambda$ 的条件下,浮子可以获得最大振幅,近似与波表面同步运动。定义该尺度面积为微面域,显然,在曲面上微面域服从小振幅重力波波阵面函数式(1)。微面域铅垂投影的柱形空间称为微面域水柱,根据图 2 水质点的水平速度与垂直速度分布,可知,该微面域水柱水面做垂直振荡运动。假设将微面域水柱从水面向下截取适当高度,构成水槽(亦称为水柱),由一系列水槽组成阵列,将水槽脱离原波阵面所存在的水域,用真实容器构成水槽,置于实验室,用人为动力驱动,使水槽液面按照波阵面函数作垂直运动,于是就形成了微面域海面的模拟。由于振荡浮子具有垂直导向机构,所以在真实波浪力的作用下只能做上下垂直运动,在试验水槽中振荡浮子以与真实波浪相同的频率和幅值随水面上下运动,如同在实海况波阵面上下运动一样,完成相关的实验,该假设如图 4 所示。

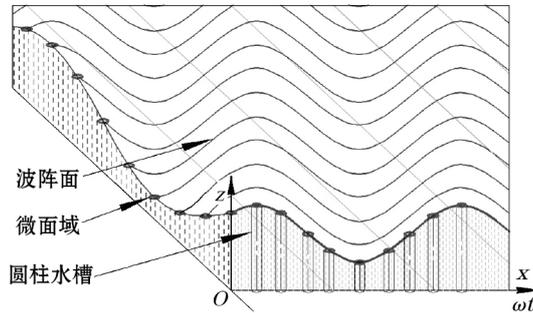


图4 波阵面、微面域与圆柱水槽假设

Fig. 4 Assumptions made for wave front, minivan domain and cylindrical flumes

因为振荡浮子为垂直圆柱形,故水槽设计成圆柱形,水槽内径大于振荡浮子的外径,留出合适的间隙,这样就可以用阵列圆柱水槽代替普通造波水池或造波水槽,对阵列式振荡浮子及其组合进行试验了。

## 2.2 微面域水槽阵列模型

将圆柱水槽排成阵列,以水槽液面圆心点为基准点,每一点都遵守波阵面函数(1),每个微面域水槽液面中心点都可以找到其在波阵面上的对应点。对微面域水槽阵列模型设计如图5所示。为了设计方便,针对图5,将 $z$ 坐标原点移到水槽底部,式(1)可以改写为

$$z = \frac{H}{2} \sin(\omega t + \theta_i) + C, \quad (6)$$

式中, $\omega$ 与式(1)中 $\sigma$ 相同,为角速度; $\theta_i$ 为第 $i$ 个水槽的初相角; $C$ 为 $z$ 坐标原点上下移动值。 $C$ 点设定为 $\omega t + \theta_i = 0$ 时水槽水位高度,通过 $C$ 点的水平线为中位线。图中每个水槽都有编号,图中每个相邻的水槽相位差为 $\pi/4$ 。1号水槽、2号水槽…… $n$ 号水槽各水槽函数如下:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{H}{2} \sin(\omega t) + C, \\ z_2 = \frac{H}{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{4}) + C, \\ \dots, \\ z_n = \frac{H}{2} \sin[\omega t + \frac{(n-1)\pi}{4}] + C. \end{cases} \quad (7)$$

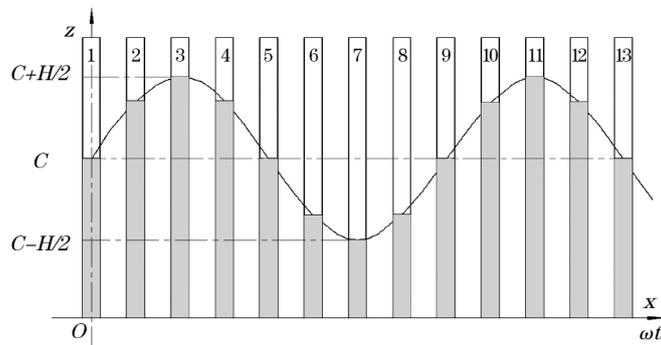


图5 微面域水槽阵列模型图

Fig. 5 Diagram of the flume model in the minivan domain

当每个水槽液面按照波阵面函数上下运动时,整个阵列的水槽液面模拟波浪将会以相速  $c$  水平移动。

### 3 总体结构设计

#### 3.1 双水槽实验装置总体设计框图

由一双水槽构成实验装置的基本单元,其总体结构设计框图见图 6。

用电机驱动水泵作为流体动力,驱动水槽中的液体并带动振荡浮子作铅垂运动,用电磁阀控制水流的方向,当水槽不透明时,可以通过透明液位计和副浮子直观地观察到主浮子的运动情况。便于观察模拟海洋波浪能转换情况。

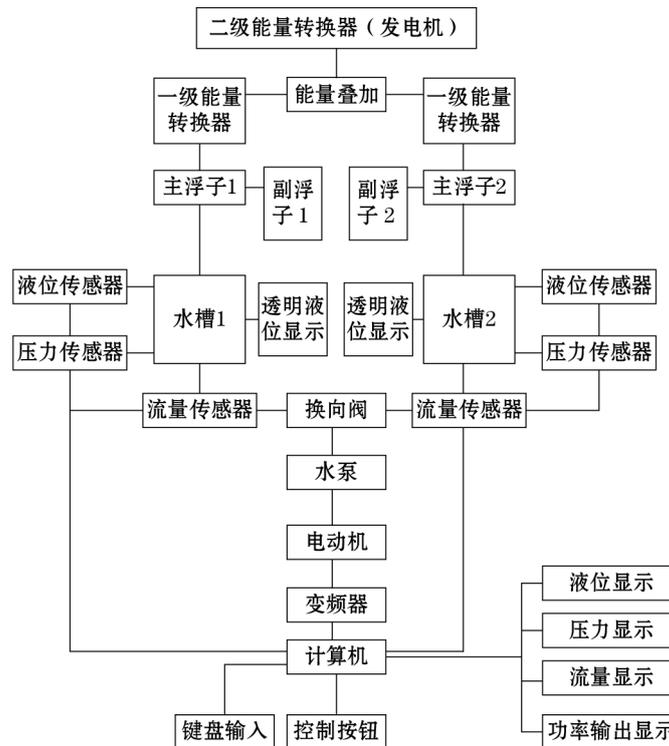


图 6 双水槽实验装置总体结构框图

Fig. 6 The overall structure diagram of a double flume experimental apparatus

#### 3.2 双水槽实验装置工作原理

根据总体设计图,双水槽振荡浮子实验装置总图或具体结构图<sup>[19-20]</sup>如图 7 所示。工作过程如下:

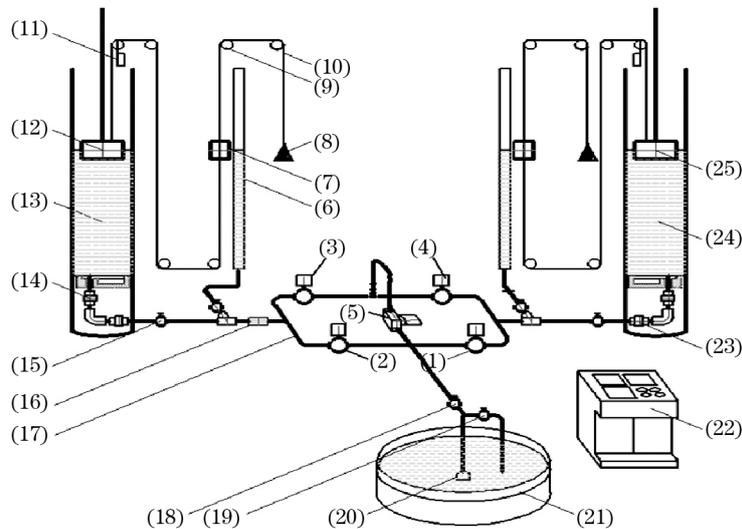
初始准备阶段:关闭电磁阀(1)(2),打开电磁阀(3)(4)和手动阀(18),启动水泵(5),抽取水源水池(21)之液体。通过透明液位计(6)观察,当液位达到中位线时,停止水泵(5),关闭手动阀(18)。

正常工作阶段:启动水泵(5),打开电磁阀(1)(3),关闭电磁阀(2)(4),则右水槽(13)中的液体向左水槽(24)流动;打开电磁阀(2)(4),关闭电磁阀(1)(3),则左水槽(24)中的液体向右水槽(13)流动。振荡浮子(12)(25)在水槽(13)(24)内随液面做升降运动;左右

水槽外的副浮子(7)通过定滑轮组(9)及与主浮子(12)(25)和配重(8)连接的绳索(10),指示出了主浮子在左右水槽内的准确位置及实时运动状况。通过水槽外与水槽相通的透明液位计(6)可以观察到水槽内的水位状况。

停止结束阶段:停止水泵(5),关闭4个电磁阀。

工作原理:该装置用计算机控制,通过变频器控制带电动机的变量水泵(5),提供水流动力。通过电磁阀(1)(2)(3)(4)控制经过管路(17)的水流流动方向。流体通过管路(17)分别与左水槽(13)和右水槽(24)相通。两个水槽水位一个上升,另一个必然下降,相位正好相差 $180^\circ$ 。水位上升、下降的方向由电磁阀控制,水位升降速度由变量泵控制,变量泵由计算机控制的变频器驱动。因而该水槽液位可以实现按照给定函数运动。



(1)电磁阀1;(2)电磁阀2;(3)电磁阀3;(4)电磁阀4;(5)变量水泵;(6)透明液位计;(7)副浮子;(8)平衡锤;(9)定滑轮组;(10)绳索;(11)上液位计;(12)左振荡浮子;(13)左水槽;(14)左压力传感器;(15)手动阀1;(16)流量传感器;(17)管路;(18)手动阀2;(19)手动阀3;(20)底阀;(21)水源水池;(22)控制台;(23)右压力传感器;(24)右水槽;(25)右振荡浮子

图7 双水槽振荡浮子实验装置总图

Fig. 7 A general drawing of a double flume oscillating buoy experimental device

### 3.3 阵列水槽实验装置总体设计

以双水槽为一个单元,进行适当的组合,如图8a所示,将1号至5号组成一个单元,定义为1~5单元,同样定义2~6,3~7,4~8,5~9,6~10,7~11,8~12,9~13单元……,将这些单元排成阵列,每个相邻水槽的液面相位差为 $\pi/4$ ,每个单元都同时按照函数式(9)运行,这样就可以实现阵列水槽水面的二维正弦运动波形。为了简化水泵管路系统,如图8a所示,图中将1~9,2~10,3~11,4~12,5~13,6~14,7~15,8~16进行并联。总体设计共有16个水槽,相邻水槽间隔 $\pi/4$ ,4套水泵,模拟范围 $0\sim 2\frac{3}{4}\pi$ 。该装置通过改变输入计算机的程序,可以实现不同升降高度、不同运动规律的液面升降运动,可以满足阵列式振荡浮子的实验要求。图8b为模拟正弦波波浪起伏升降运动规律的总体效果。

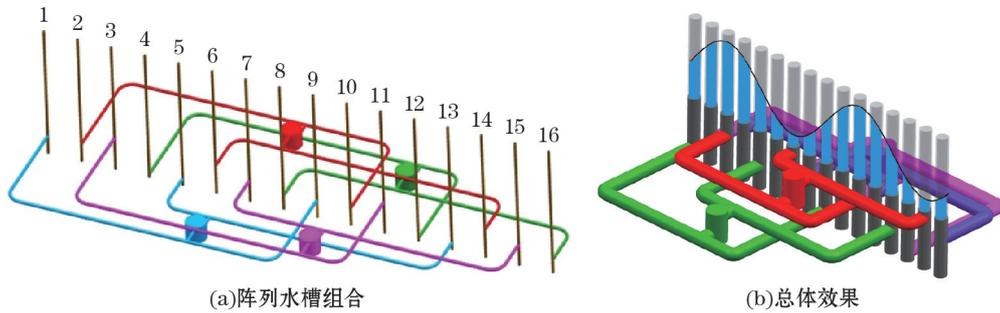


图 8 阵列水槽总体图

Fig. 8 General diagram of the array flumes

每个水槽内的主浮子上可以装配齿条或者直线电机等机构,实现能量转换(图 3)。多个能量转换装置可以串联,实现能量的叠加,为最终设计阵列式振荡浮子波浪能发电站提供必要的实验参数。

### 3.4 技术参数

双水槽实验装置是阵列水槽试验装置的最基本单元,由基本单元组成的阵列水槽构成了完整的实验装置。双水槽实验装置的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Table 1 The main technical parameters

技术指标	参数值	技术指标	规格或类型
水槽尺寸 (高×直径)	2 000 mm×320 mm	电磁阀	2w-50
水槽数量/个	2	模拟函数波形	正弦波 三角波 其他波
最大模拟浪高/m	1.6	CPU	61 系列
升降最大速率/ $m \cdot s^{-1}$	0.16	变频器/Hz	5~100
水泵最大流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	35	电源/V	~220
水泵电机功率/kw	2		

说明:本设计针对常见的中浪和小浪,模拟波浪高度为 1.6 m,根据水槽高度取值,可以容易地实现更高模拟浪高。这一点,对于其他造波装置是难以实现的。

## 4 控制系统及电路设计

### 4.1 控制系方案设计

双水槽振荡浮子实验装置控系统总体设计如图 9 所示。

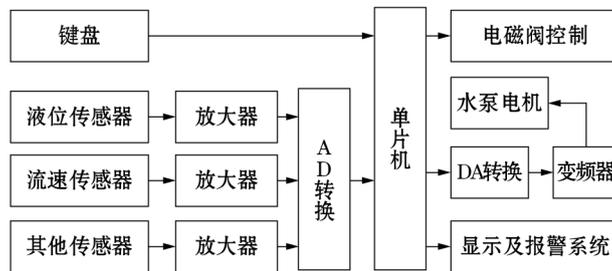


图 9 控制系统总体设计框图

Fig. 9 Overall design block diagram of the control system

控制系统设计简要说明如下:

1)控制系统以单片机为核心。通过键盘可以将预定函数程序存入,也可以对程序进行修改、调试和切换;单片机输出信号通过变频器使驱动电机的频率变化,导致水泵流量变化,从而达到使水槽液位按照设定函数规律升降运动的目的;

2)电磁阀在两种情况下动作,第一,按照程序,达到极值时自动切换;第二,当液位达到水位上限时(由传感器给信号)切换方向;

3)通过传感器实时采集的信号,实现闭环控制,实现运行状态显示和报警;通过调整传感器位置或参数,可以改变中位线上下限宽度,水位上限等;

4)显示报警系统还包括通过数字显示器和发光二极管光柱实时显示液位,通过水槽透明液位计可以直接观察水槽液位,通过副浮子可以间接观察到水槽内主浮子的运行情况;通过传感器可以对故障情况报警;

5)该系统留有接口,可以扩展,可以灵活更换不同器件,安装各种不同的流量计,液位计,压力计等传感器,例如:超声波流量传感器、电磁流量计、涡轮流量计、雷达液位计、超声波液位计、霍尔式液位计、差压式流量计等,通过更换不同的传感器,既可以实现对该传感器的测试,又可以实现对流体静态和动态测试。因而该装置也可完成部分测控技术,流体力学实验,具有示教等功能<sup>[21-23]</sup>。

#### 4.2 电路设计

根据控制系统方案,针对双水槽振荡浮子实验装置电路设计图如下:

图10为变频器与单片机接口电路,利用变频器内部电路和外接功能,单片机将设定程序通过转矩设定和磁通设定送入比较器,经脉冲优化选择器改变水泵电机的频率,从而达到变频、变速的目的。该电路具有自适应电机控制模块,可以实现闭环自动控制。

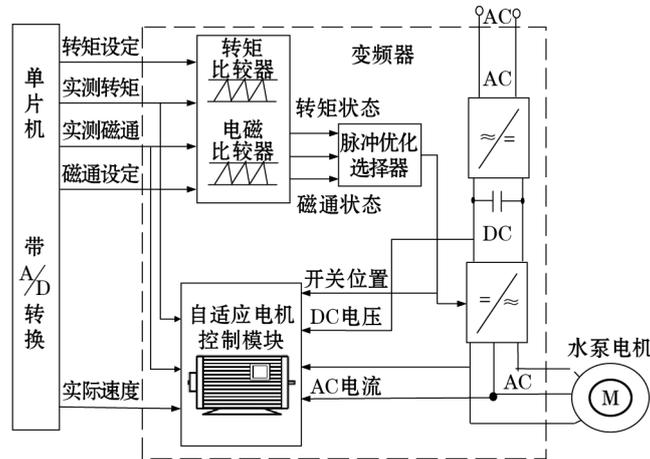


图10 变频器与单片机接口电路

Fig. 10 Interface circuit of inverter and single chip microcomputer

图11为继电器与单片机的接口电路,实现单片机与中间继电器的连接,二极管D1~D4为续流二极管,起着低压电路开关工作过程的过压保护作用。以免中间继电器线圈与

电源连接通断工作时造成过电压对周围电器的损坏。图中三极管工作于开关状态,单片机 I/O 口输出高电平,导通,中间继电器线圈通电,反之截止。

图 12 是电磁阀通断控制电路,用中间继电器的常闭、常开触点实现电磁阀的打开与闭合以及动作的互锁。

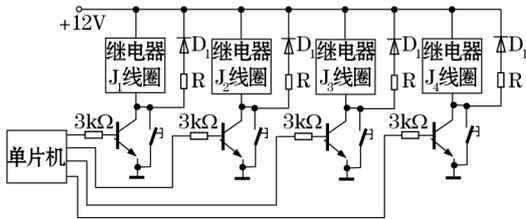


图 11 继电器线圈接口连接电路图

Fig. 11 Connection circuit diagram of the relay coil interface

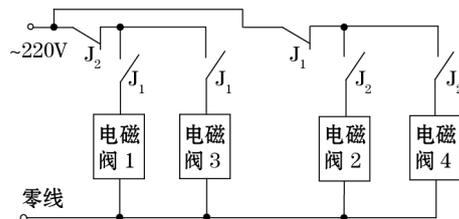


图 12 电磁阀连接图

Fig. 12 Connection diagram of the electromagnetic valve

图 13 为手动点动控制与单片机正常控制的互锁转换电路,当手动控制时,单片机控制无效。反之,单片机控制时,手动控制无效,这一部分仅仅对水泵运行状态的控制。手动点动控制主要用于调试时使用。

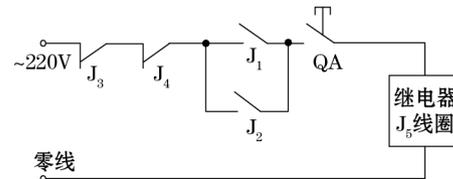


图 13 手动控制电路图

Fig. 13 The manual control circuit diagram

图 14 是水泵电动机的机电接触控制电路及变频器与单片机的接口连接电路。单片机控制时,正常起动运行时,KM<sub>1</sub> 先于 KM<sub>2</sub> 闭合,反之,水泵电机停止时,KM<sub>2</sub> 先于 KM<sub>1</sub> 断开,避免电动机产生的瞬时电压变化对变频器的冲击<sup>[24]</sup>。

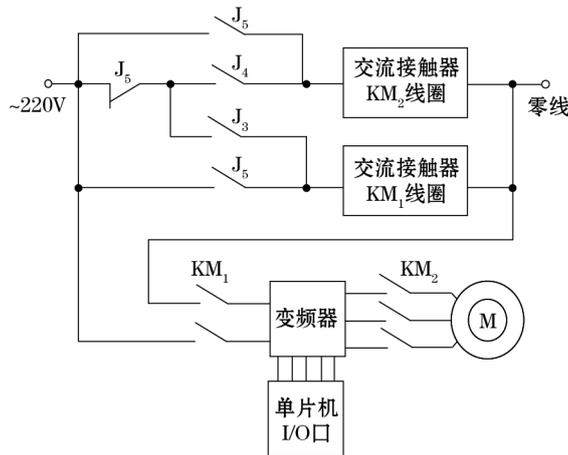


图 14 电动机控制电路图

Fig. 14 The motor control circuit diagram

### 4.3 软件设计流程图及流程图说明:

针对双水槽振荡浮子实验装置软件设计流程图如图 15 所示。流程图说明如下:

1)初始化:主要包括单片机 I/O 口,中断和定时器等相应单片机功能部件的初始化设计。

2)选择不同的波形,设置振幅、周期和初相角。

3)参看图 7,打开电磁阀 1,2,3,4。

4)如图 5 所示,中位线即通过 C 点的水平线,振幅  $H/2$  以该坐标为中线上、下变换。中位线上、下间隔 15 mm 设有中位线上限和中位线下限,分别装有液位传感器。当液位低于中位线下限,则由系统外向水槽注水;当液位高于中位线上限时,则将水向系统外放出。

5)当液位处于中位线上、下限之间时,启动水泵。

6)在水泵动力的驱动下,液体按照设定程序上下运动,若程序停止结束,则转向停机报警,若程序继续循环,则继续检查水泵电机。

7)通过传感器检测水泵电机,若有问题,则停机报警,若无问题则继续检查水位上限。

8)通过水槽水位传感器检测水位是否超过水位上限,若没有超过,则继续运行函数程序;若已超过则停机报警。

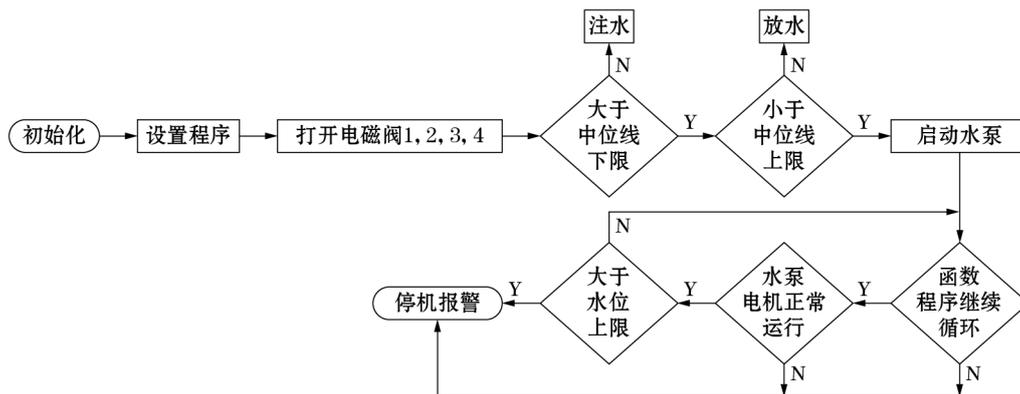


图 15 软件设计流程图

Fig. 15 Flow chart for software design

## 5 测试及结果

### 5.1 双水槽振荡浮子实验装置测试步骤

1)分项调试,对弱电部分、强电部分、执行动作部分逐项调试。

2)整机调试,包括整机空转运行、加水运行、点动、短期运行、连续运行、检验软件流程图执行情况。

3)在该试验装置上加载单个振荡浮子波浪能发电系统,进行振荡浮子波浪能发电试验。其原理可参考图 3。

### 5.2 测试结果

1)通过 3 组连续 4~6 h 运行,对主要项目的测试结果见表 2。

表 2 测试结果

Table 2 The test results

技术指标	状态	技术指标	测试结果
水槽升降运动	正常	最大模拟浪高/m	1.6
水槽水位换向	顺畅	升降最大速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.08
水泵电机工况	正常	水泵最大流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	18
电磁阀	正常	压力式液位传感器误差/mm	15
模拟函数波形	正弦波 三角波	超声波液位传感器误差/mm	10
控制系统	正常		

2)加载小型点阵式振荡浮子波浪能转换装置进行试验。试验结果表明可以发电,功率为 20W。连续运行,效果良好。

图 16 为在该实验装置一个单元的 2 个水槽上分别安装了振荡浮子能量转换机构,发电机正在运行的情况,其中发光二极管字幕的电源是振荡浮子发电装置利用水位升降发电所提供。

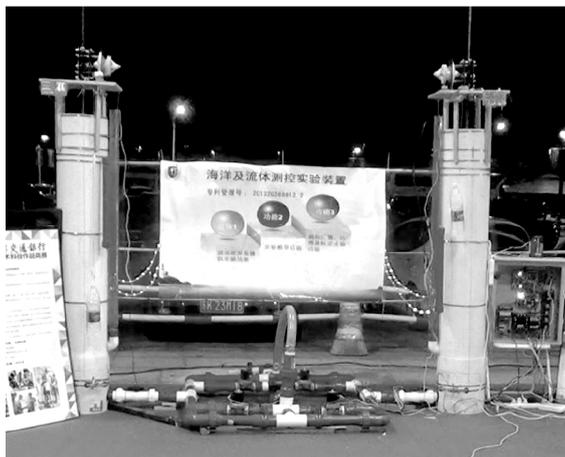


图 16 波浪能振荡浮子转换方式实验装置运行状况

Fig. 16 Running status of the oscillating buoy wave energy conversion experimental apparatus

## 6 结 论

经过对振荡浮子的实海况定性试验,经过对波浪能振荡浮子转换方式实验装置一个单元的单项目调试、分部调试、及系统的总调试,总体达到了技术指标,主要功能、辅助功能基本可以实现。结论如下:

1)在波浪理论的基础上,对于线性波建立波阵面函数,在波阵面空间假设微面域水槽,将微面域水槽隔离、移出,形成阵列模拟波浪的水槽,针对具有导向装置的阵列式振荡浮子波浪能发电站的模拟研究,这一假设是可行的;

2)实验装置将成对水槽与水泵、电磁阀、通过管路形成 U 形互通结构,该结构无水源水池,省水省电,实践证明该设计可行;

3)在现已完成的基础上,进一步完善和改进,继续完成由 16 个水槽,相邻水槽间隔

$\pi/4$ , 4套水泵, 模拟范围  $0 \sim 2\frac{3}{4}\pi$  的完整的实验装置, 对水槽上能量输出点进行机械串联装置的试验, 已经具备条件;

4) 该实验装置可以构成一种专用的模拟造波装置, 该装置为不同形式振荡浮子式波浪能转换设备的研制提供了一种多功能、大振幅、高效灵活的实验平台。

**致谢:** 在此向为本项目和本文给予中肯指导和帮助的上海交通大学(兼三亚学院海洋研究所所长)朱继懋教授、中国科学院广州能源研究所游亚戈研究员、盛松伟、张运秋副研究员表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 吴必军,刁向红,王坤林,等. 10kW 漂浮点吸收直线发电电力装置[J]. 海洋技术 2012, 31(3):68-73.
- [2] 郑崇伟,游小宝,陈晓斌,等. 西北太平洋海域风浪、涌浪、混合浪波浪能资源特征[J]. 气象科学, 2014, 34(4):408-413.
- [3] 李宏伟. 造波理论与研究方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 杨志国. 国内外水池造波设备与造波技术的发展现状[J]. 黑龙江科技信息, 2003(9):99.
- [5] 马玉麟,孙永明,王帅军. 水池造波技术及发展概况[J]. 科技资讯, 2012(10):55.
- [6] 刘月琴,尹尚生. 实验室造波设备及波浪模拟技术的探讨[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000, 28(6):105-109.
- [7] 顾挺锋. 海洋工程水池波浪生成的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [8] REMINDERS L N G. The development of a new segmented deepwater wave generator[J]. Ocean Wave Measurement and Analysis, 2014:1209-1217.
- [9] BUCHNER B, WICHERS J E W, DE WILDE J J. Features of the state-of-the-art deepwater offshore basin[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1999:1-11.
- [10] 许维德. 流体力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1979:199-209.
- [11] 冯士筮. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2014:181-188.
- [12] [美]E. 约翰芬纳莫尔, [美]约瑟夫 B. 弗朗兹尼. 流体力学及其工程应用[M]. 钱翼稷, 等. 译. 北京:机械工业出版社, 2005:35-69.
- [13] [美] M. E 麦考密克. 海洋波浪能转换[M]. 许适, 译. 北京:海洋出版社, 1985:49-65.
- [14] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津:天津大学出版社, 1991:125-137.
- [15] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社, 1984:31-44, 276-296.
- [16] 勾艳芬,叶家玮. 振荡浮子式波浪能转换装置模型[J]. 太阳能学报 2008, 29(4):498-501.
- [17] 苏永玲,余克志. 振荡浮子式波浪能转换装置的优化计算[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(2):196-200.
- [18] 蒋德才. 海洋波动动力学[M]. 青岛:青岛海洋大学出版社, 1992:35-60.
- [19] 闻福三,伍时和,王连胜,等. 海洋及流体测控装置:中国, 2013 2 0368812. 2[P]. 2014-04-16.
- [20] 何光宇,杨绍辉,何宏舟,等. 阵列式波浪能发电装置的水动力学分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2):118-120.
- [21] 闻福三,赵京明,王玲玲. 霍尔效应和霍尔传感器的教学方法研究[J]. 电气电子教学学报, 2012, 34(2):118-120.
- [22] 吴建平. 传感器原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2013:103-113.
- [23] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京:科学出版社, 2008:216-266.

[24] 孔凡才. 自动控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2013:200-210.

## Research and Design of Oscillating Buoy Wave Energy Conversion Experimental Apparatus

WEN Fu-san<sup>1</sup>, WU Shi-he<sup>1</sup>, WU Le-xian<sup>2</sup>, LI She-lei<sup>1</sup>, WANG Lian-sheng<sup>1</sup>,  
ZHAO Jing-ming<sup>1</sup>, DING Xue-yong<sup>1</sup>, REN Bing-nan<sup>1,3</sup>, WANG Ling-ling<sup>1</sup>,  
WANG Yuan<sup>1</sup>, HE Yan-ting<sup>1</sup>, LI Zheng-qing<sup>1</sup>

(1. *Polytechnic Institute of Sanya University*, Sanya 572022, China;

2. *Xian Siyuan University*, Xian 710038, China;

3. *Ocean Institute of Sanya University*, Sanya 572022, China )

**Abstract:** For the array-type oscillating buoy wave energy conversion device, an experimental apparatus that can be used for test research in the laboratory is proposed. This experimental apparatus consists of a group of cylindrical array flumes, and under the drive of hydrodynamic system the water level of the flumes can moves up and down according to the function set by computer. The assumptions made for the apparatus model, i. e. the cylindrical array flumes, is argued based on wave theory. The working principle, structure design, technical parameters, control circuit and operating practices of the apparatus are introduced in detail and its actual running and testing are presented. The results show that the design of the apparatus is reasonable and feasible, and the simulated wave height is far higher than that in the existing wave pool, forming a special simulating wave making device. This apparatus could provide a kind of multi-function, large amplitude, high efficiency and flexible experimental platform for developing different forms of oscillating buoy wave energy conversion equipment.

**Key words:** wave energy; oscillating buoy; experimental apparatus; array flume; simulated wave making