

一种波浪能振荡浮子转换方式的研究

闻福三¹,李政清¹,任 齐^{1,2},伍时和¹,吴乐贤³,

李社蕾¹,王连胜¹,丁学用¹,辛光红¹,任丙男²

(1.三亚学院 理工学院,海南 三亚 572022; 2.三亚学院 海洋研究所,海南 三亚 572022;

3.西安思源学院,陕西 西安 710038)

摘 要:提出了一种阵列式同步带传动波浪能振荡浮子转换方式发电装置,研制内容包括:将齿条传动改为同步带传动;对单个振荡浮子采用 2 套同步带和 2 个超越离合器组合,实现振荡浮子上下运行双向做功;设计了振荡浮子导向机构;采用桁架结构将 8 个水槽 8 个振荡浮子组成的 8 套能量转换装置连接成为一个整体;通过 8 个动力输出轴的串联,将动力叠加传递给一个发电机;将能量输出点采用逐级加载方式,串联叠加输出功率;对理论设计运行特性与实测运行特性进行比较分析;对该波浪能转换装置运行进行考核;结果证明由多个水槽组成的造波装置可行,用同步带传动振荡浮子波浪能转换装置可行。通过机械串联将多个独立能量转换装置输出动力合成发电,增加了动力平稳性;该项研究为进一步进行实海况振荡浮子波浪能发电提供了相关数据、参考实物和宝贵的经验。

关键词:波浪能;同步带传动;阵列振荡浮子;导向机构;机械串联

中图分类号:P743.2

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)01-0001-16

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.001

长期以来,世界许多国家投入了大量的人力和财力对波浪能技术进行了研究^[1]。国际波浪能发电技术在近几年取得了较快发展,基本进入了实海况示范试验阶段。波浪能发电技术类型较多,主要包括振荡水柱式、振荡浮子式和越浪式等,但基本还未具备商业化运行条件。如美国 OPT 公司的 Power Buoy 发电装置、英国绿色能源公司的 Oyster 发电装置等代表性技术,仍处于测试阶段。可以看出,波浪能发电装置的稳定性和生存性正在稳步提高,阵列化应用会更好降低开发成本和风险^[2]。我国研发了多种原理的发电装置并开展了长期海试,由中国科学院广州能源所完全自主研发的 100 kW 鹰式波浪能发电装置,累计发电量已超过 3 万度^[3]。

我国“十三五”海洋能发展目标和定位指出,要进一步提高波浪能装置的俘获效率、可靠性、生存性以及关键技术研究^[2]。波浪能转换装置的关键技术之一是动力摄取(power take-off, PTO),由于点吸收式振荡浮子波浪能转换装置简单可靠,能量转换效率高,抗风浪能力强,所以,已成为近年来 PTO 系统各国研究的热点,也是本团队研究的重点方向。

现有的波浪能振荡浮子转换装置主要有鸭式、筏式、浮子式和摆式等^[4-5]。从总体看我国在机械传动振荡浮子波浪能装置存在较大差距,对机械传动浮子式转换装置的研究多限于理论分析、仿真和实验室模型,在传动机构的设计方面没有突破性进展。我国海域特点是波浪资源分布不均匀,季节变化大;波功率密度整体较低,有季节性极端气候,如台风等。本团队的目标是:结合我国海域特点,充分利用海南海水水温高、海岸线丰富、便于下海实验的有利条件,以 PTO 为中心,发挥机械机构的特长,研制适合我国海域特别是南海的振荡浮子式波能转换装置。2016 年第 1 期《海岸工程》杂志刊登“波浪能振荡浮子转换方式实验装置的研究与设计”^[6]一文结论中,由本团队提出的阵列式机械串联波浪能振荡浮子转换方式实验装置已经制作完

收稿日期:2017-10-20

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)

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和波浪能、风能等新能源开发利用方面教学及研究。

E-mail:wenfu3@126.com

(王 燕 编辑)

成,进一步研制出了一种全新的阵列式同步带传动波浪能振荡浮子转换方式发电装置,对阵列式机械串联波浪能振荡浮子转换方式实验装置整体设备进行了多项实验,对观测现象、实测数据进行理论分析和说明,文中就该阶段研究进展情况做详细介绍。

1 阵列水槽造波装置的设计和制造

1.1 总体设计原理、要求及技术参数

本设计以小振幅重力波理论为基础^[7],根据微面域假设^[6],由阵列水槽的每个水槽水面中心点作为采样点,模拟连续波振面上不连续点(或间隔点)的运动;在波浪运动的一个周期内均匀设置 8 个采样点,相邻两个采样点的时间间隔为 $T/8$,相邻两个采样点的相位角差为 $\pi/4$,由此设计制造阵列水槽造波装置。本设计要求可以实现对单独水槽的实验,也可以实现阵列水槽模拟波浪运动的实验;为在水槽内可以进行振荡浮子能量转换装置的实验,对阵列能量转换装置输出动力进行机械串联实验打好基础,要求单个水槽具有一定的水面面积,以便承担一定体积的浮体,产生一定的浮力;设备尽量简洁可靠。基于已取得的经验成果,在总体设计上本装置采用将成对的水槽与水泵、电磁阀、通过管路连接,形成 U 形互通结构,组成单元水槽;再将单元水槽经过适当的组合,集中控制,形成阵列水槽造波装置。

单元水槽是阵列水槽的基本单元,由基本单元组成的阵列水槽构成了完整的阵列水槽造波装置。本设计由 4 个单元组成阵列水槽造波装置,主要技术参数如表 1 所示。

表 1 阵列水槽造波装置主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of the array flume wave making device

技术指标	参数值	技术指标	参数值
水槽尺寸(高×直径)/mm×mm	2 000×400	电磁阀/个	16(ZCM-100F)
单元数量/个	4		正弦波
水槽数量/个	8	模拟函数波形	三角波
水槽间距/m	1.5		其他波
最大模拟浪高/m	1.6		
升降最大速率/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.16	PLC 控制器/型号	FPX0L60MR
水泵最大流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	120	变频范围/Hz	5~100
水泵电机功率/kw	2.2	水泵电源/V	~380

1.2 阵列水槽及发电装置总体设计

单元水槽可以独立运行,加上振荡浮子及能量转换装置可以独立输出动力或发电,由若干个独立的动力输出装置进行机械串联,可以完成阵列式振荡浮子动力输出合成发电。图 1 是由 4 个单元 8 个水槽组合通过动力传递完成能量转换的总体设计图。图中绿色方框为水槽和一级能量转换部分,黑色方框为单元电控及执行元件部分,深蓝色方框为中心控制和总执行元件部分。

1.3 单元水槽设计

实验装置的单元水槽是阵列水槽的基本单元,电机驱动水泵提供了单元水槽的流体动力,驱动水槽中的液体并带动振荡浮子作垂直运动,用电磁阀控制水流的方向,通过透明水槽直接观察到浮子的运动情况。便于观察模拟海洋波浪能转换情况。图 2 为 1 单元水槽的管路结构,其余 3 个单元相同。

图 2 所示 1 单元水槽工作过程:

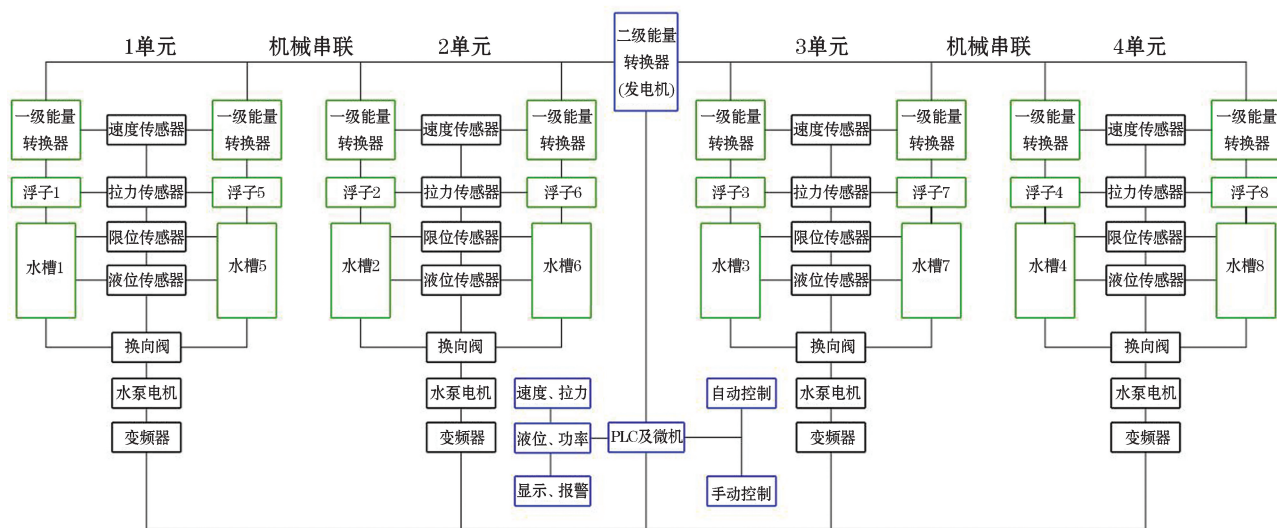


图1 阵列水槽及发电装置总体设计图

Fig.1 Overall design diagram of array flumes and power generation device

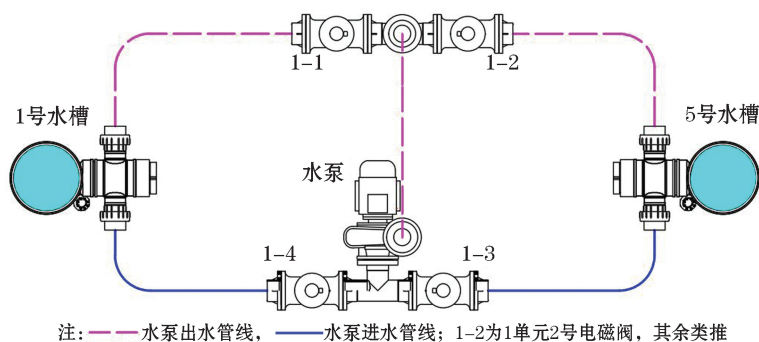


图2 单元水槽管路结构

Fig.2 Structure of the unit flume pipe

1) 初始准备阶段: 由系统外向 2 个水槽加水, 加注到水槽的中线为止。

2) 正常工作阶段: 打开电磁阀 1-1 和 1-3, 关闭电磁阀 1-2 和 1-4, 启动水泵, 则 5 号水槽中的液体向 1 号水槽流动; 打开电磁阀 1-2 和 1-4, 关闭电磁阀 1-1 和 1-3, 则左侧 1 号水槽中的液体向右侧 5 号水槽流动。电磁阀切换周期根据模拟波浪运动周期设定, 电磁阀的切换有手动和自动两种。

3) 停止结束阶段: 停止水泵, 断电, 关闭 4 个电磁阀(电磁阀设计为常闭型)。

照此规律循环往复, 设备正常运行。

单元水槽工作原理: 该装置用可编程控制器(PLC)进行控制, 通过变频器控制带电动机的变量水泵, 提供水流动力。通过电磁阀 1-1, 1-2, 1-3 和 1-4 控制经过管路的流体流动方向。流体通过管路分别与 1 号水槽和 5 号水槽相通。两个水槽如同连通器互为水源, 水位一个上升, 另一个相应下降, 相位正好相差 180° 。水位上升、下降的方向由电磁阀控制, 水位上升、下降的高度由液位传感器给出信号, 由 PLC 控制切换电磁阀改变流体流动方向; 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改变水泵电机的频率实现。因而该水槽液位可以实现按照给定函数运动。

1.4 阵列水槽实验装置总体设计

以单元水槽为基础, 进行适当的组合, 构成阵列水槽。如图 2 所示, 将 1 号 5 号水槽组成为一个单元, 定义为 1 单元, 同样定义 2-6, 3-7 和 4-8 水槽为 2, 3 和 4 单元, 图 3 为阵列水槽总体图(立面图和俯视图), 总体

设计共有 8 个水槽, 4 个单元, 4 套水泵, 模拟范围 $0 \sim 1 \frac{3}{4} \pi$ 。该装置通过改变控制器的输入程序, 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。

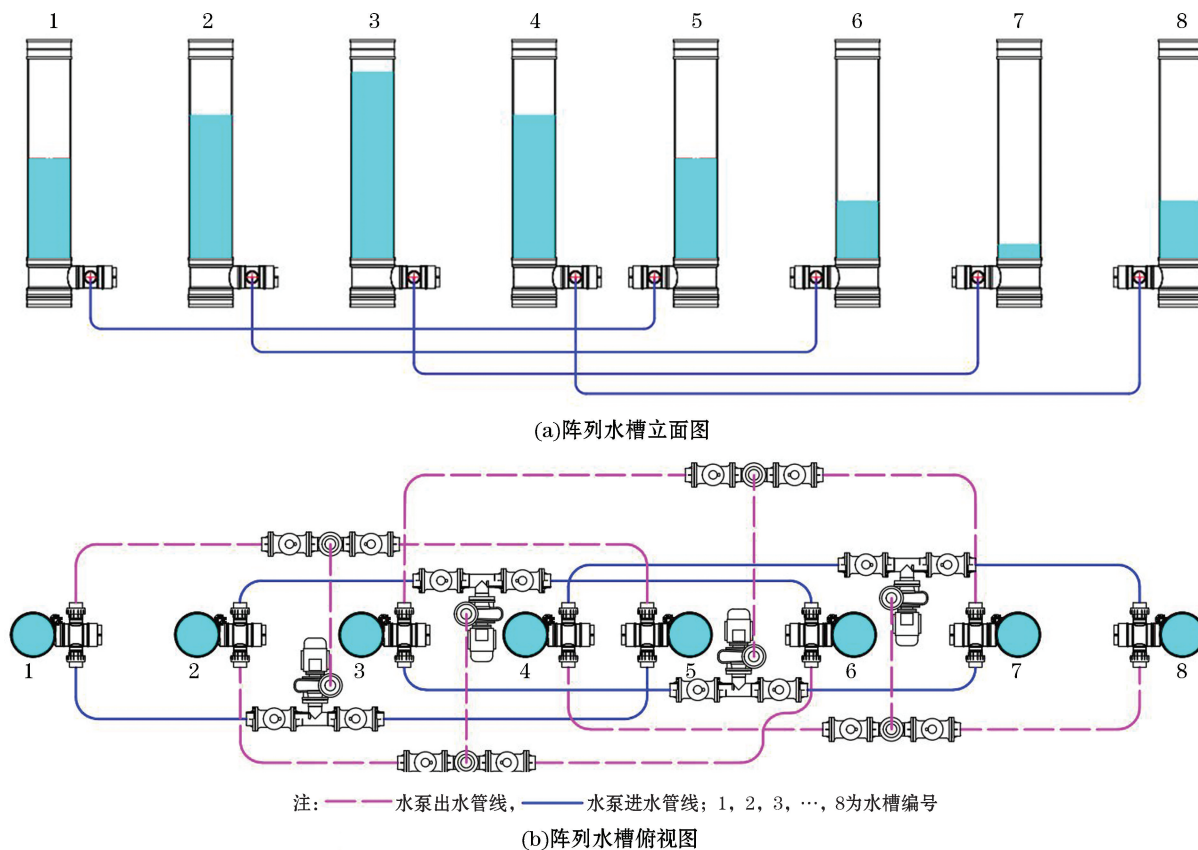


图 3 阵列水槽总体图

Fig.3 Overall map of the array flumes

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^[7], 每个水槽液面中心点可以认为是连续波阵面上的对应点。当 $\omega t = 0$ 时, 波阵面函数阵列水槽模型如图 4 所示, 将坐标系原点设在 1 号水槽底部, 波阵面函数为

$$Z = \frac{H}{2} \sin(\omega t + \theta_i) + C, \quad (1)$$

式中, ω 为角速度; θ_i 为第 i 个水槽的初相角; C 点为 $\omega t + \theta_i = 0$ 时 1 号水槽水位高度, 通过 C 点的水平线为中位线。图中每个水槽都有编号, 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, 采样点波阵面函数为

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{H}{2} \sin \omega t + C \\ Z_2 = \frac{H}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right) + C \\ \vdots \\ Z_n = \frac{H}{2} \sin \left[\omega t + \frac{(n-1)\pi}{4} \right] + C \end{cases} \quad (2)$$

当每个水槽液面按照相应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。

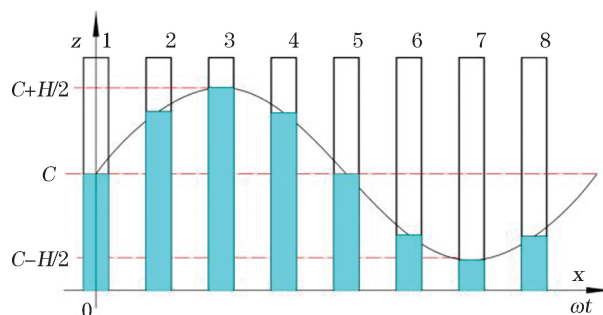


图4 波阵面函数阵列水槽模型图

Fig.4 Array flume model following the wave front function

2 波浪能振荡浮子能量转换装置的设计与制造

2.1 能量转换装置的工作原理及机构改进说明

本设计波浪能发电装置在进行发电时,包含两级能量转换,首先将波浪能转换为可供发电机利用的机械能形式,即一级能量转换;其次是通过发电机将机械能转换为电能,即二级能量转换。波浪能转换的核心问题是一级能量转换。波浪能属于一种机械能,由海水表面液体的运动所形成,这是一种不规则运动状态的机械能,很难直接利用;波浪能经过一次能量转换后的机械能是指物体按照一定的规律运动所具有的能量,如直线运动、旋转运动等;这样的机械能很容易直接利用,如驱动液压杆件做直线运动、驱动直线电机的动子做直线运动或带动轴做旋转运动;这里所述一级能量转换的实质是机械能表现形式的变换。

振荡浮子也称为吸波浮体,它漂浮于水面随着波浪的起伏而运动。利用振荡浮子驱动机械传动元件做功是波浪能一级能量转换的一种方式;这种方式有多种传动机构可以实现,将随波浪上下运动的振荡浮子与齿条固定,通过齿条驱动齿轮,将波浪的上下运动变换成齿轮的旋转运动,齿条传动机构是现有技术中典型的能量转换机构^[6,8-10]。浮子及固定于浮子上的齿条随波浪上下运动,当波浪推动浮子向上运动时,齿条就会向上伸出齿轮(即传动齿轮),当浮子到达最高点时,齿条伸出齿轮高度大约为一个波高;当浮体下降到最低点时,齿条悬挂于齿轮下长度同样约为一个波高。通常设计波高为 2 m(此波高发电较为理想),若装置按最大波高 3 m 设计,那么此时齿条就会向上伸出 2 m 以上,其状态为垂直悬臂状态,由于齿条伸出量过大,就造成了整个装置不稳定和抗风浪能力差的问题。同步带传动保持了啮合传动的优点,克服了齿条的刚性和 V 带传动打滑的缺点。本设计将齿条传动机构改为同步带传动机构,这样就完全解决了因齿条杆件向上悬伸过长造成装置不稳定和抗风浪能力差的问题。

2.2 同步带传动振荡浮子波浪能转换装置的设计

本设计同步带传动振荡浮子波浪能转换装置如图 5 所示,该装置的工作原理如下:原动力来自于在造波水槽内模拟海洋波浪上下运动的水动力。波浪上下运动的动能首先被振荡浮子吸收,同步带的一条边通过同步带调节器和拉力传感器与振荡浮子固定,同步带从振荡浮子上下端面的通孔穿过,当水位上升或下降时,振荡浮子随水位上下运动,该振荡浮子带动着左右两套同步带传动系统,分别绕过左传动带轮、右传动带轮和对应的换向同步带轮,穿过振荡浮子运动。当振荡浮子向上运动,同步带驱动右传动同步带轮将动力通过超越离合器箱,再通过增速变速器及其上的皮带轮将动力输出,左传动同步带轮空转。当振荡浮子向下运动时,同步带驱动左传动同步带轮通过同样路径将动力输出,而右传动同步带轮空转。不论振荡浮子向上运动还是向下运动,都以同样的旋转方向输出动力,这样就完成了波浪能—机械能的变换和传递。本设计采用圆弧齿形 5M 型耐水、耐腐蚀同步带。

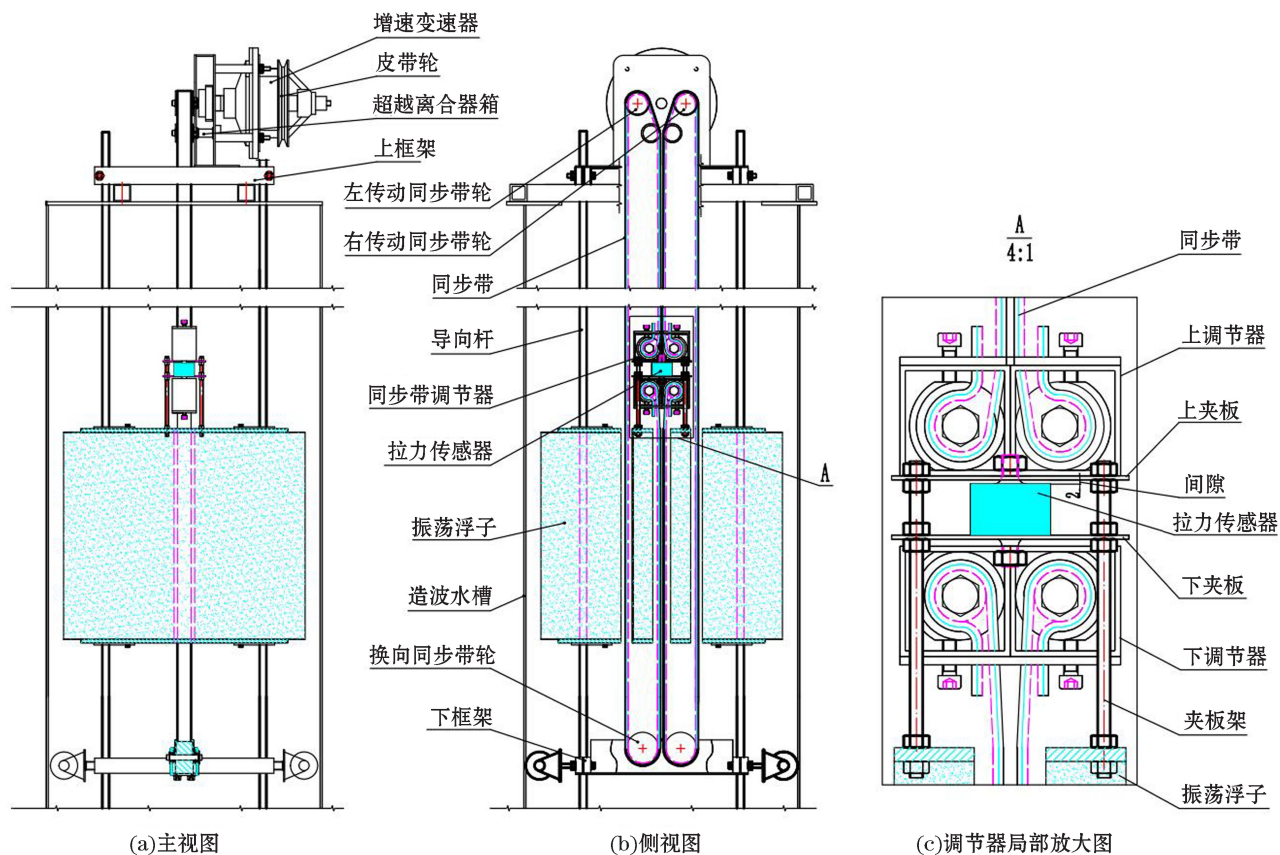


图5 同步带传动振荡浮子波浪能转换装置主视图、侧视图及同步带调节器局部放大图

Fig.5 The main and side views of the synchronous belt drive oscillating float wave energy conversion device and the partial enlarged drawing of the belt tensioner

2.3 测量装置和导向装置的设计

本装置在实验中主要测试数据有同步带的拉力,变速器的转速,发电机的电压电流,水槽的液位等参数,需要相应特殊的测量装置,在此就一些关键装置做一介绍。

2.3.1 拉力传感器的选用和测力装置设计

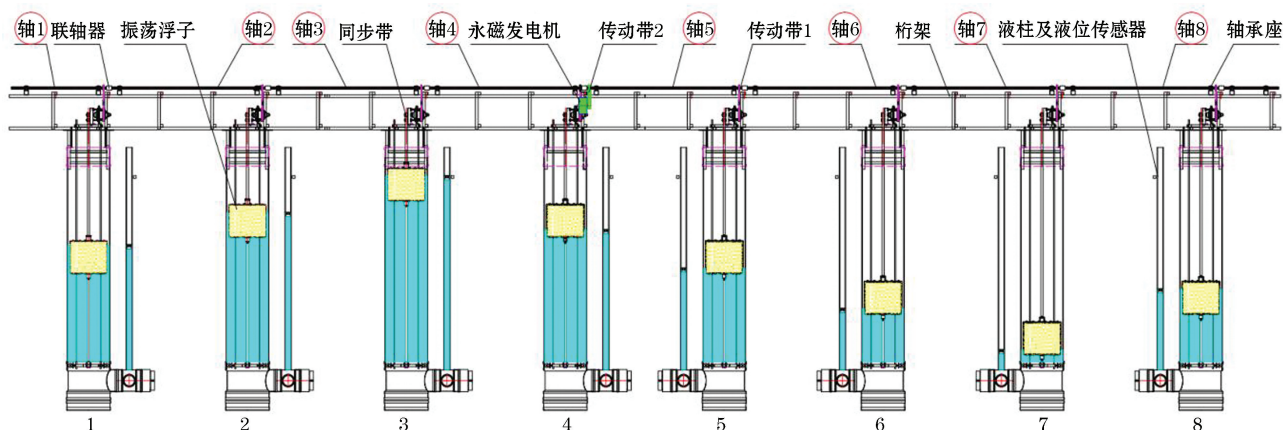
拉力传感器选用了 30~50 kg 防水型拉力传感器^[11-12],其输出灵敏度为 1~2 mV/V,综合灵敏度为 $\pm 0.2\% F \cdot S$,线性误差为 $< 0.1\% F \cdot S$,变送器输入为 mV 级电压,输出为 0~5 V,4~20 mA。本设计采用了同步带调节器(简称调节器),既可以调节同步带的松紧,又可以将传感器串联接入同步带,实时测得同步带的张紧力。由调节器、拉力传感器和夹板架构成测力装置,如图 5c 同步带调节器局部放大图所示。

测力装置的工作原理:上调节器和下调节器分别与同步带的开口两端连接。拉力传感器与上、下调节器装配成为一个整体,拉力传感器处在夹板架上夹板和下夹板之间,并且与上下夹板之间有 2 mm 间隙,夹板架与振荡浮子固定。当振荡浮子上浮时,夹板架与传感器的间隙在下方,夹板架推动上调节器,上调节器拉动传感器及下调节器带动同步带向上运动;当振荡浮子向下运动时,间隙在传感器上方(如图 5c 所示间隙位置),夹板架推动下调节器,下调节器拉动传感器及上调节器带动同步带向下运动。

2.3.2 水槽液位探测装置

本装置由 4 个单元,8 个水槽组成阵列,每个水槽水面中心点作为采样点,模拟连续波振面上不连续点(或间隔点)的运动;要实现相邻 2 个采样点的时间间隔为 $T/8$,相邻两个采样点的相位角差为 $\pi/4$ 。如图 6

所示,本装置设计与水槽连通的透明液位检测水柱,即液柱,在液柱上装有液位传感器,其作用是:第一、可以实时检测水槽的液位;第二、可以定位和调节波高;第三、可以实现安全限位,指令电磁阀换向或指令水泵电机停止。具体设计有两部分,其一是由压力式液位传感器提供实时变换的液位信号;其二是在液柱内放置漂浮的圆柱形聚苯乙烯泡沫块,在泡沫块上装一圈永磁铁,随液面上下移动;在液柱外有可调高低位置的液位传感器,即液位开关,本设计采用了干簧管,能够可靠地接收水位信号。



(a)阵列式振荡浮子发电装置总体立面图



(b)阵列式振荡浮子发电装置实物图

图6 阵列式振荡浮子发电装置总体立面图和实物图

Fig.6 The overall vertical map and the physical picture of the array oscillating float power generation device

2.3.3 导向装置

在图5中,通过上框架和下框架固定圆柱形导向杆,圆柱形导向杆穿过振荡浮子的圆孔组成了一套圆柱面接触式移动副^[13],由该机构构成了振荡浮子的导向装置,其作用是:第一、保证振荡浮子沿直线轨迹规则运动;第二、提供了上框架和下框架的支撑杆件,上下框架上分别装有传动同步带轮和换向同步带轮,同步带正常工作必须要有一定的预紧力,而这个预紧力正是有由导向杆来承担。该移动副是滑动导轨式移动副,在实海况运行的振荡浮子还可以设计成滚动导轨式移动副,以便减小摩擦力提高能量转换效率。

3 阵列式波浪能振荡浮子发电装置机械串联的设计

3.1 阵列式振荡浮子发电装置的设计原则和意义

由波浪理论^[2]知沿波峰线单位宽度在一个波长 λ 内,波高为 H 的波其总能量为 $E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda$,在相同样波

高下,波浪所具有的能量与其所占海面投影面积成正比^[14-16],在一定范围内振荡浮子所能俘获的波浪能与其所占海面面积成正比,振荡浮子的直径设计得过大,会降低振荡浮子的灵敏度,降低能量利用率,同时会在整体结构的设计和制造上带来很大困难。根据麦考密克分析^[17]:在满足浮子的横向尺寸长度 L (或直径 D) 远远小于波长 λ 的条件下,浮子可以获得最大振幅,近似与波表面同步运动。故阵列式振荡浮子的设计原则是:直径 $D \leq \lambda/5$ 。采用适当直径阵列分布的振荡浮子发电装置意义在于:第一、采用阵列式波浪能发电装置,可以采集利用较大面域海面的波浪能,可以有效地扩大发电量;第二、利用大跨度支撑原理^[17]使发电装置机架在海面上更加稳定,从而提高整体发电装置的效率和安全性;第三、对点阵上各个独立的波浪能转换装置进行机械串联,再将合成的动能发电,可以减少动力的波动性,简化整体设备,更有利于发电机发电。第四、与相同功率的独立式振荡浮子发电装置相比在设计和制造上比较容易,还可以实现不同形式的组合^[18-19]。

3.2 阵列式振荡浮子发电装置设计

3.2.1 总体布置与动力输出形式

在阵列水槽的每一个水槽上都安装一套振荡浮子能量转换装置,将每一套能量转换装置与桁架固定连接,每一套能量转换装置都有动力输出轴(轴1~轴8),在桁架上用轴承和联轴器将8个动力输出轴串联连成一体,在串联轴的一端或中间设计输出机构,可以直接带动发电机,也可以通过带传动再驱动发电机,这样就构成了机械串联阵列式波浪能振荡浮子发电装置。本设计采用的是在4号、5号水槽中间的输出轴上加皮带轮,通过带传动驱动发电机,完成发电。其总体立面图和实物图见图6。

3.2.2 桁架、机械串联及发电机的设计

阵列式振荡浮子发电装置是由桁架将各个独立的振荡浮子能量转换装置连接成为一个整体,本设计采用方管焊接制造桁架,桁架3 m长为一个模数,共4个桁架安装在透明水槽顶部,单元输出轴长度为1.49 m,水槽间隔1.5 m,在桁架上部用轴承和联轴器将8个动力输出轴连接起来,实现了机械串联。桁架、机械串联及动力输出部分结构详见图7。联轴器采用弹性螺纹绕线夹紧联轴器,传动平稳可靠,对在实际海上波浪能电站的机械串联是值得借鉴的。相邻两个动力输出轴之间有20 mm的间隙,在间隙处正好可以安装拆卸传动带1和传动带2,当安装或拆卸传动带完毕,通过轴向移动联轴器将其安装于正确位置。动力输出带轮通过传动带2与发电机带轮连接,驱动发电机实现发电功能。

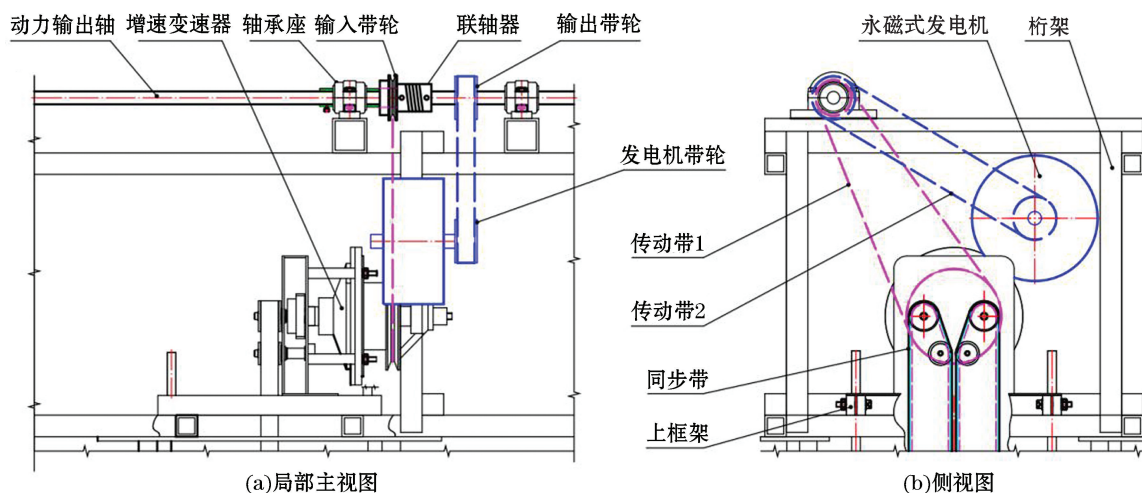


图7 桁架、机械串联及动力输出部分结构局部主视图和侧视图

Fig.7 The local main and side views of the truss, the mechanical series connection and the power output section

该设计采用 NR300 型永磁发电机,其额定转速为 700 r/min,本设计超越离合器箱升速比为 2,升速变

速器采用单级行星齿轮变速,升速比为 4.5,总升速比为 9,针对转速波动问题可以加飞轮及机械串联可以解决^[20]。这样就可以满足电机发电体积小、重量轻、比功率大,中、低速发电性能好,效率高的要求^[21]。

4 控制系统及电路设计

4.1 控制系统总体设计

本系统将 4 个单元 8 个水槽,8 套能量转换装置,8 个输出带轮,8 个输出轴,固定在整体桁架上,经过联轴器串联,汇集于一个输出带轮,将动力传递给一个永磁式发电机,完成整体设备的能量转换。可编程控制器是综合了计算机技术,自动控制技术和通信技术的一种工业应用计算机。通过编程软件来改变控制过程,是微机技术与常规继电器接触器控制技术的有机结合。本装置总体设计方案如图 1 所示。本控制系统设计了手动控制和自动控制两套功能。当手动调试完成可切换为自动控制运行,即正常工作状态。PLC 可编程控制器与普通顺序控制和单片机控制相比抗干扰能力强,更稳定可靠,适应较为复杂恶劣的工况,本装置所选 PLC 有个 60 端口,交流 220 V 供电^[22]。该 PLC 接口电路及设备控制面板图如 8 所示。

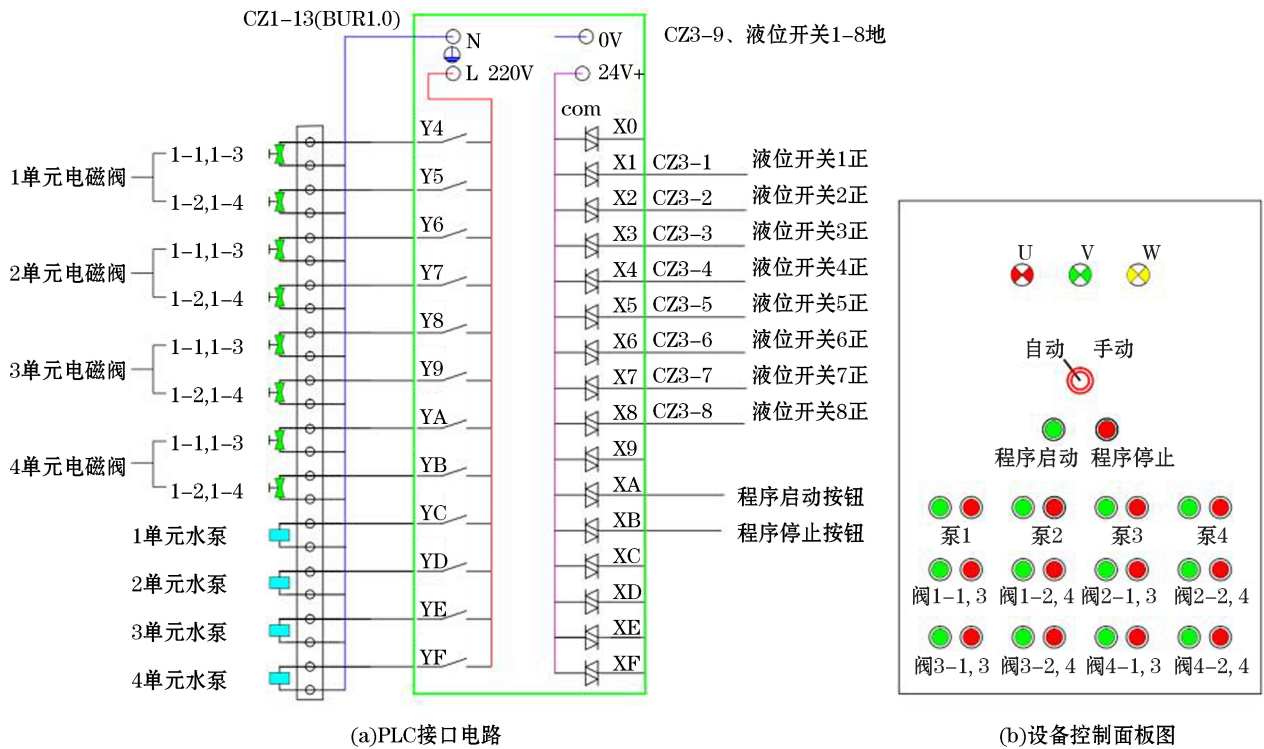


图 8 PLC 接口电路及控制面板图

Fig.8 PLC Interface circuit and control panel

4.2 控制系统工作过程及电路设计

手动启动过程:启动前 1~8 号水槽水位齐平,均在槽水水位中线。转换开关扳向手动,1 单元首先启动。按 SB5 启动按钮,其启动程序过程与 1.5 节所述相同。1 号水槽开始自动循环,周期工作。2,3 和 4 单元启动:1 单元启动后八分之一周期,按照 1 单元程序,按压 2 单元对应按钮,启动 2 单元;1 单元启动八分之二周期,按照 1 单元程序,按压 3 单元对应按钮,启动 3 单元;1 单元启动后八分之三周期,按照 1 单元程序,按压 4 单元对应按钮,启动 4 单元。至此 4 个单元 8 个水槽及对应能量转换装置全部按照顺序启动进入正常工作状态。

自动启动过程:当手动控制启动调试完毕,可以正常运行后,即可采用自动启动。其方法是将转换开关转向自动,整个装置就会从静止状态按照上述手动启动的顺序完全自动启动,使设备进入正常工作状态,无需人为干预,如有报警信号设备会自动停机。系统控制原理及软件设计流程见图 9 和图 10。

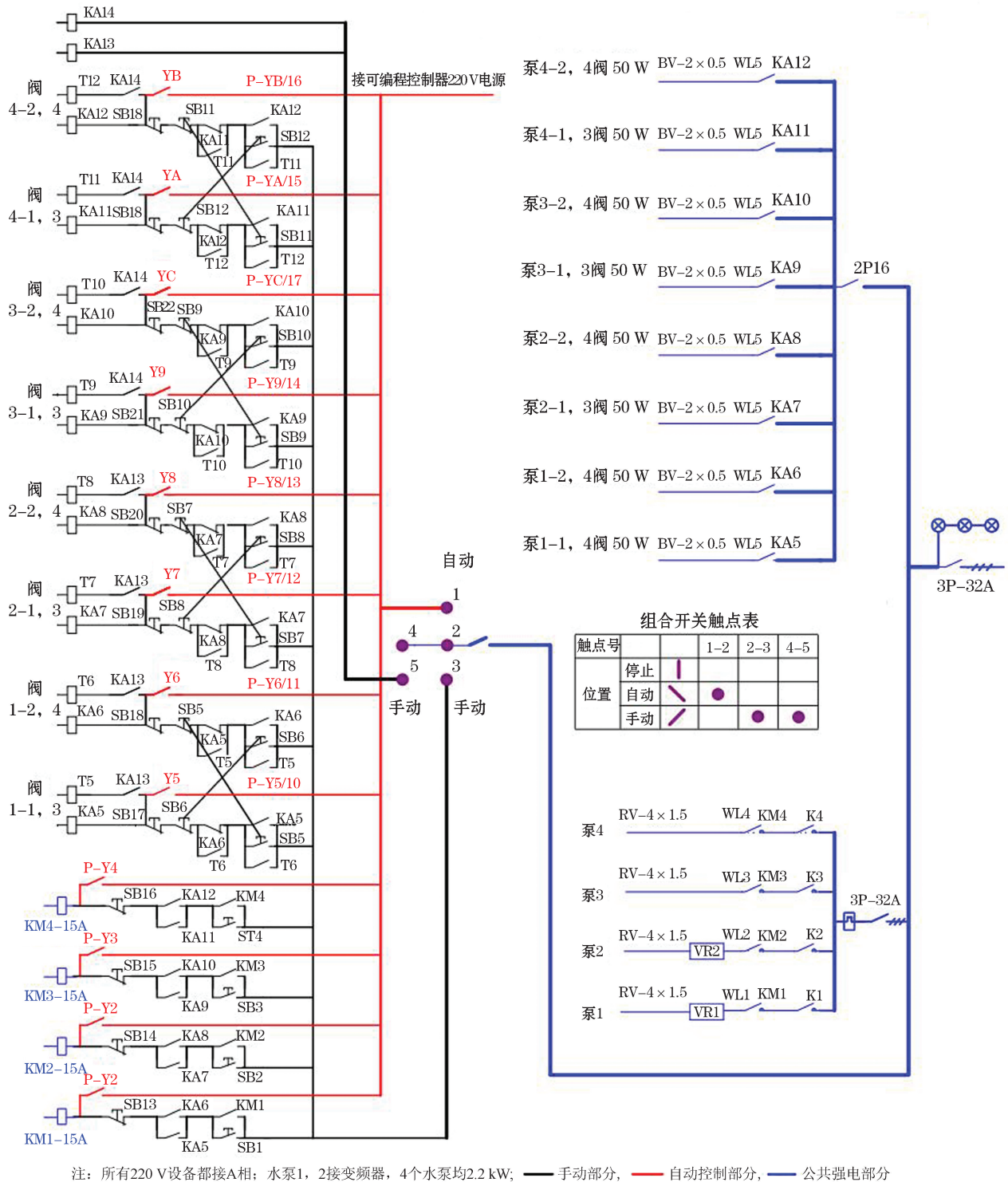
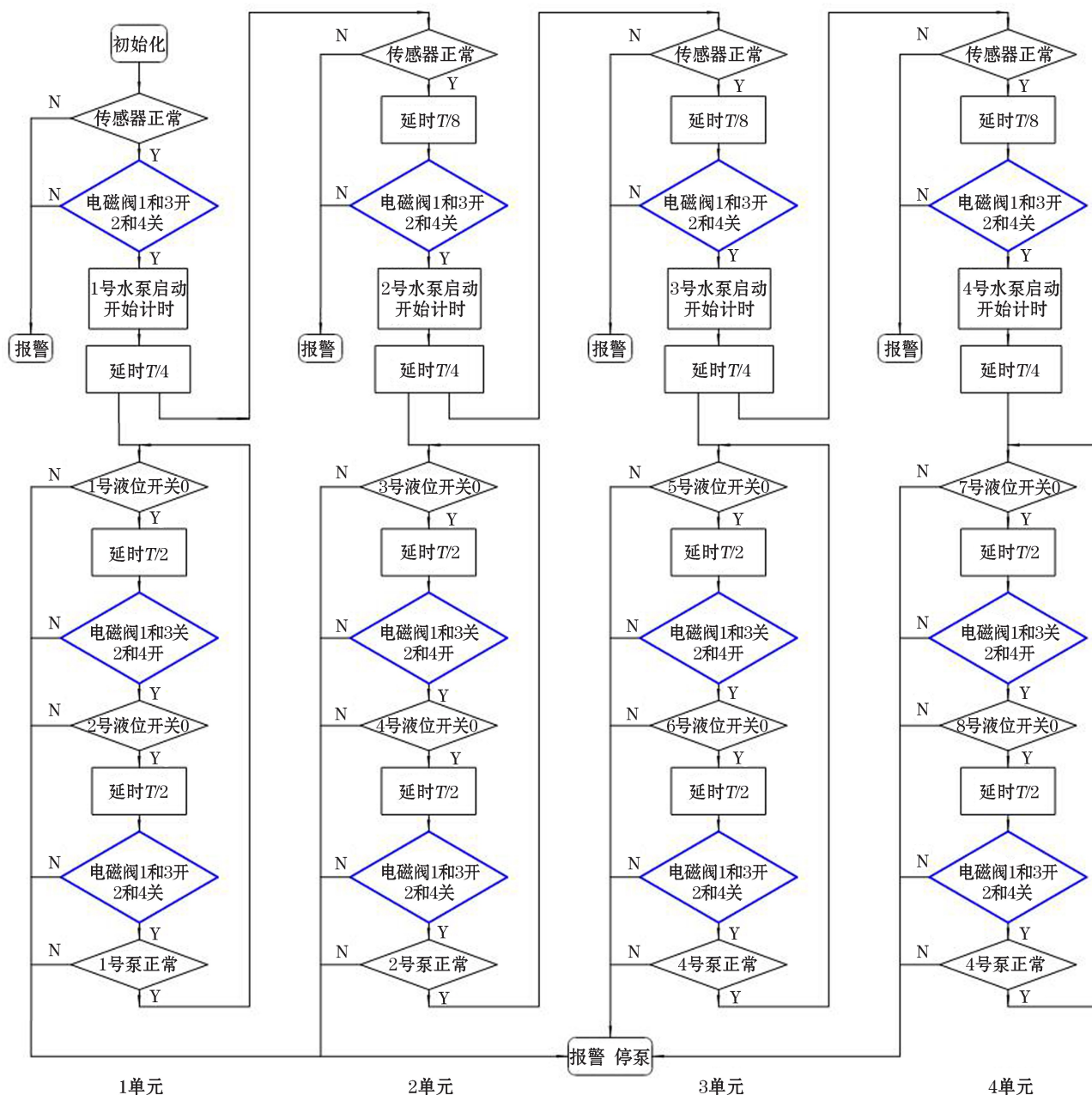


图 9 系统控制原理图

Fig.9 Schematic diagram of system control



注: 图中电磁阀未标注单元号, 根据单元位置可以确定, 例如电磁阀1-1, 3, 标注为电磁阀1和3

图 10 软件设计流程图

Fig.10 Flow chart for software design

5 测试及结果

5.1 理论设计理想状态与实测结果对比

本设计的 8 个能量转换装置, 均为浮子上下运动双行程做功装置。当波浪液面上升, 浮子受浮力作用向上运动, 通过传动带驱动带轮输出动力做功。当波浪液面下降, 浮子失去了浮力, 依靠自身的重力向下运动,

通过传动带驱动带轮输出动力做功。最大做功状态为:当浮子上浮时几乎或刚好被全部淹没,可以获得最大浮力;当浮子下降时,浮子几乎或者刚好脱离水面,这样,可以获得最大重力。由此可以导出,当浮子的浮力 $F_{\text{浮}}$ 为 2 倍浮子重力 $F_{\text{重}}$, 即 $F_{\text{浮}} = 2F_{\text{重}}$, 具有最大做功条件。依据最大做功条件可以实现双向做功最大俘获波浪能状态,如图 11 所示, Z_1 函数曲线是波高为 1.6 m 的波阵面函数,见公式(2),浮子高度 0.3 m,假设浮子设计符合最大做功条件,因此浮子的最大垂直行程为 $1.6 - 0.3 = 1.3$ m,为了突出问题的主要特征,简化运动模型,将浮子的运动轨迹由非线性简化成为直线,故速度为常数,由此得出 1 单元浮子传动带速 V_1 , 传动带拉力 F_1 , 由功率 $P = FV$, 可得到 1 单元输出功率 P_1 。根据设计相邻两单元相位差为 $\pi/4$, 同理可以求出 2, 3 和 4 单元的输出功率 P_2 , P_3 和 P_4 。图 11 给出了 1 单元振荡浮子运动轨迹模型、给出了在相同时序下 4 个单元的输出功率图及理论叠加功率图,这就是理论计算下的理想状态。

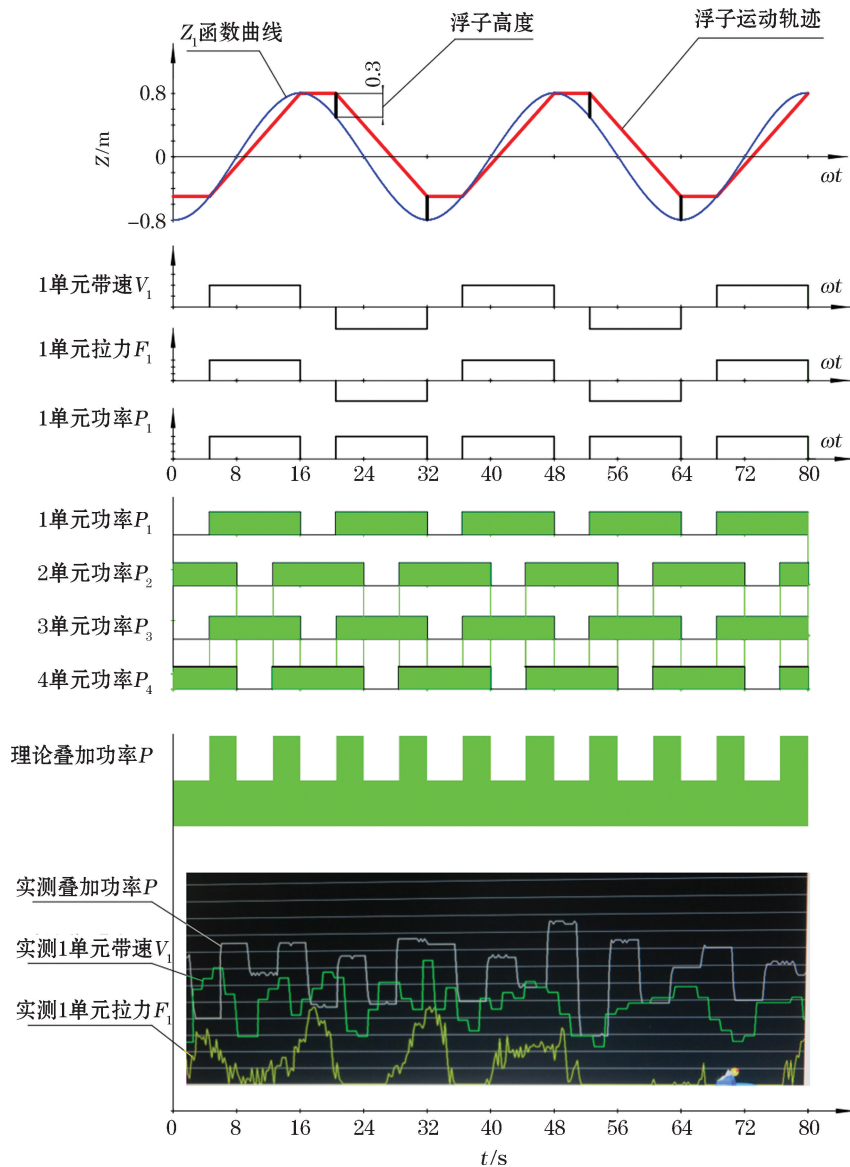


图 11 振荡浮子运动模型及理论叠加功率与实测情况比较图

Fig.11 Comparison between the motion model and theoretical superposition power of the oscillating float and the actual measurements

实际测试按照逐级施加驱动力,串联叠加输出的方式进行试验,首先将 1 个能量转换装置(即 1 个驱动点)用传动带输入传动轴,单独将动力输出驱动发电机,其余 7 个能量转换装置未接传动带;然后将 2 个能量转换装置用传动带输入传动轴,由 2 个驱动点串联输出驱动发电机,其余 6 个能量转换装置未接传动带;以此类推,最后将 8 个能量转换装置全部用传动带输入传动轴,串联输出驱动发电机。实验状况如表 2 所示。

表 2 逐级驱动、串联输出发电试验状况表

Table 2 Power generation tests by stepwise driving and series output

状 况	1 个点驱动	2 个点驱动	3 个点驱动	4 个点驱动	5 个点驱动	6 个点驱动	7 个点驱动	8 个点驱动
发电机运行状况和观测现象	全脉动,有浮子悬挂和浮子全淹现象(较多)	全脉动,有浮子悬挂和浮子全淹现象(较少)	全脉动,有浮子悬挂和浮子全淹现象(很少)	无脉动,无浮子悬挂和浮子全淹现象(波动大)	无脉动,无浮子悬挂和浮子全淹现象(波动大)	无脉动,无浮子悬挂和浮子全淹现象(波动小)	无脉动,无浮子悬挂和浮子全淹现象(波动小)	无脉动,无浮子悬挂和浮子全淹现象(波动很小)

注:全脉动指发电机时转时停,无脉动指发电机连续转动;浮子悬挂指浮子下降速度慢于水位下降速度,有完全悬挂于水面之上的现象;浮子全淹是指浮子上升速度慢于水位上升速度,出现浮子完全低于水面以下的现象;波动是指传动轴和发电机转速不均的程度,这里仅做了定性说明

图 11 给出的单元功率输出是脉动的,叠加后逐步变为连续输出功率,随着叠加轴数量增加输出功率波动的现象逐步减小与理论设计相符。理论设计浮子运动轨迹与实测浮子运动轨迹基本一致。图 11 还给出了与理想状态对应的时序下实测叠加功率 P ,实测 1 单元带速 V_1 ,实测 1 单元拉力 F_1 曲线。从实测叠加功率 P 的曲线可以看出其变化的时序节拍与设计理想曲线一致。综上对比情况说明对独立的能量转换装置进行机械串联,合成发电是可行的、有效的。

5.2 实测不同负载下的输出功率

本研究还进行了不同负载下的输出功率测试,如图 12、图 13 和表 3 所示,负载电阻从 $50\ \Omega$ 到 $10\ \Omega$ 之间改变,发电机输出功率随负载变化而变化。从输出功率平均值看, $25\ \Omega$ 负载时输出最高,平均功率为 $11.4\ \text{W}$;然后随负载增加或者降低,输出功率都逐渐降低。

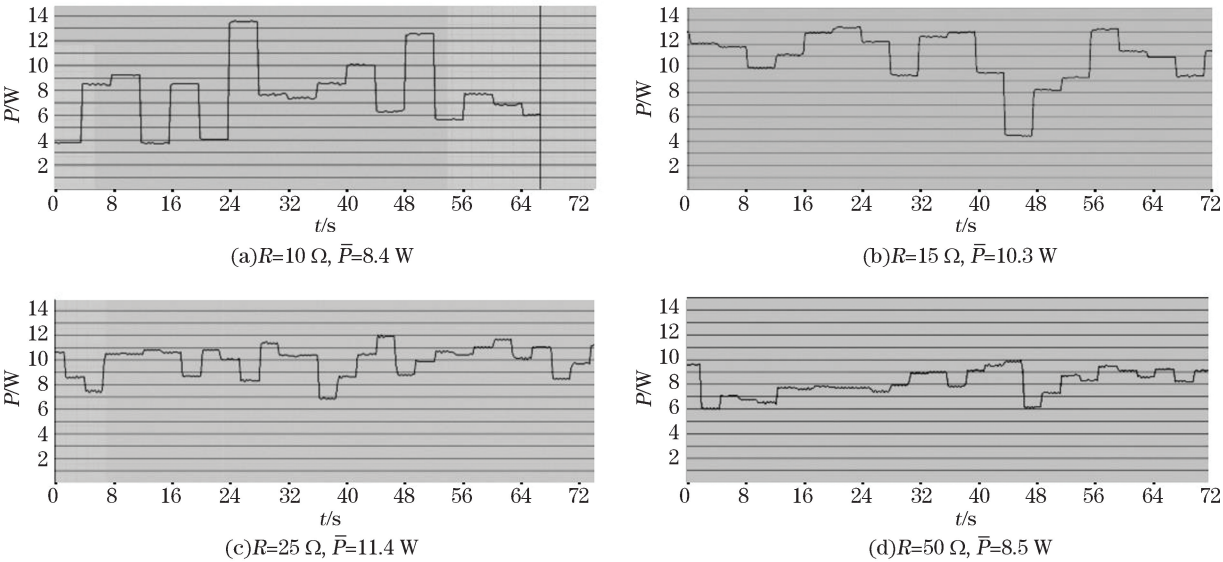


图 12 实测功率曲线及平均功率值

Fig.12 The curve of measured power and the average power values

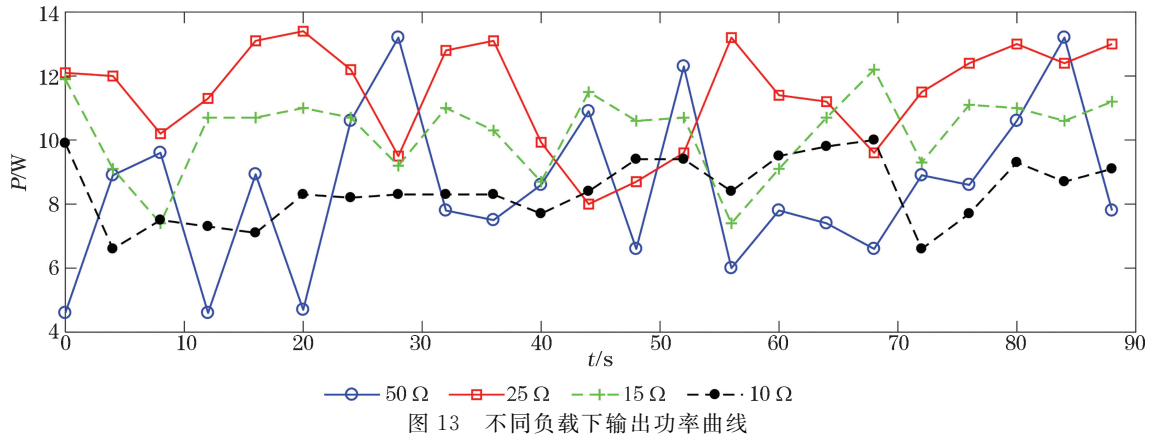


Fig.13 The curve of output power under different loads

表 3 不同负载下输出功率(W)采样数据

Table 3 The data of output power sampled under different loads (W)

负载	采样时序/s																		均功
/Ω	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	率/W
50	4.6	8.9	9.6	4.6	8.9	4.7	10.6	13.2	7.8	7.5	8.6	10.9	6.6	12.3	6.0	7.8	7.4	6.6	8.5
25	12.1	12.0	10.2	11.3	13.1	11.3	12.2	9.5	12.8	13.1	9.9	8.0	8.7	9.6	13.2	11.4	11.2	9.6	11.4
15	11.9	9.1	7.4	10.7	10.7	11.0	10.7	9.2	11.0	10.3	8.7	11.5	10.6	10.7	7.4	9.1	10.7	12.2	10.3
10	9.9	6.6	7.5	7.1	7.1	8.3	8.2	8.3	8.3	8.3	7.7	8.4	9.4	9.4	8.4	9.5	9.8	10.0	8.4

5.3 数据分析与说明

1) 实测输出波形与理论设计波形相似,时序节拍相吻合,说明该机械串联振荡浮子波浪能发电装置的设计和制造基本达到要求。

2) 输出功率的大小与负载有关系,负载过大会造成振荡浮子悬挂和全淹没现象;机械的速度波动性是由振荡浮子能量转换装置机制所决定。因此,在设计实海况的波浪能发电装置中应根据电机的负载特性选择最佳负载;应对振荡浮子的几何形状进行优化;应根据最大做功条件对振荡浮子的浮力和重力进行合理配置;应根据等效构件的平均角速度 ω_m 及许用速度波动系数 $[\delta]$ 增加速度调节装置^[20],从而实现较高的能量转换效率。

3) 输出功率小于预测值,其原因是机械传动环节效率低,导向杆与浮子之间的摩擦阻力较大且不均匀等因素造成。

4) 由于4套水泵的流量虽然标称流量相等,但是实际流量相差较大,以及变频器变频不完全一致,造成波形相位的误差和叠加不一致,未达到理想波形。在实海况串联式发电装置中,其相邻的2个发电装置的相位差不会是标准的,而是随机的。因此对于相位差的要求不必太严。

5) 本设计对理论曲线的假设存在一定的原理误差,实验模型与实际海浪谱差距很大。实际海洋中的波动是一种十分复杂的现象,它们都不是真正的周期性变化。但是作为最低的近似可以把实际海洋的波动看作是简单波(正弦波)或简单波的叠加,从研究简单波入手来研究实际海洋的波动^[7,23],研究波浪能的转换,进一步在实际的海浪谱^[24]中验证,最终研制出在实海况不规则波中高效的波浪能转换装置。

6 结 语

本文详细介绍了波浪能振荡浮子转换方式研究进展情况,在2014—2016年期间设计制造的单元振荡浮子发电装置的基础上,新研制的4单元8组合机械串联式振荡浮子发电装置,可以正常运行,能够开展不同形式的实验,通过测试和实验数据说明:作为吸波浮体能量转换的传动环节,用同步带传动代替齿轮齿条传动,实现

双行程做功,是可行的,可以克服由齿条传动带来的不稳定因素,进而提高波浪能电站的抗风浪能力。

经过对装置的全面的运行和测试,证明由 8 个水槽组成的造波装置可行,同步带传动振荡浮子波浪能转换装置^[25]可行,通过机械串联将 8 个独立能量转换装置输出动力合成发电,效果显著;整个设计制造的过程和成果为进一步进行实海况振荡浮子波浪能发电装置的设计提供了宝贵的经验。

致谢:向为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,中国科学院能源研究所游亚戈研究员和盛松伟、张运秋副研究员表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] WANG C K. The development and prospect of marine energy technology at home and abroad[C]//New Energy Equipment Professional Committee. The 40th annual meeting of the China Institute of Dynamic Engineering. Shanghai: China Institute of Dynamic Engineering, 2004: 121-131. 王传崑. 国内外海洋能技术的发展与展望[C]//新能源设备专业委员会,中国动力工程学会成立四十周年年会. 上海:中国动力工程学会,2004: 121-131
- [2] JIN X L. Several Considerations on the development of China's marine renewable energy industry during the 13th Five-Year plan period [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(5): 1-4. 金翔龙. “十三五”期间我国海洋可再生能源发展的几点思考[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(5): 1-4.
- [3] National Marine Technology Center. China sea energy technology progress 2015[M]. Beijing: Ocean Press, 2015. 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展 2015[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [4] LI C K, LIAO W J, WANG Y X. World ocean wave energy generation technology research progress[J]. Equipment Machinery, 2012, 2: 68-73. 李成魁, 廖文俊, 王宇鑫. 世界海洋波浪能发电技术研究进展[J]. 装备机械, 2012, 2: 68-73.
- [5] YANG S H, HE H Z, LI H, et al. Research status and prospect of point absorber wave power generation technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(3): 8-16. 杨绍辉, 何宏舟, 李晖. 点吸收式波浪能发电技术的研究现状与展望[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 8-16.
- [6] WEN F S, WU S H, WU L X, et al. Research and design of oscillating buoy wave energy conversion experimental apparatus[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(1): 1-15. 闻福三, 伍时和, 李政清, 等. 波浪能振荡浮子转换方式实验装置的研究与设计[J]. 海岸工程, 2016, 35(1): 1-15.
- [7] FENG S Z. Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014: 181-188. 冯士筭. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 181-188.
- [8] SHI H D, Q U N, CAO F F, et al. Experimental study on movement performance of oscillating buoy WEC[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2017, 47(6): 124-130. 史宏达, 曲娜, 曹飞飞, 等. 振荡浮子波能发电装置浮子运动性能的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 124-130.
- [9] Shanghai Ocean University. Ocean wave energy power generation device; CHN, 2016 87642 U[P]. 2010-12-29. 上海海洋大学. 海洋波浪能发电装置: 中国, 2016 87642 U[P]. 2010-12-29.
- [10] Ocean University of China. A mechanical combined oscillating buoy wave energy power generation device; CHN, 103114958 A[P]. 2013-15-22. 中国海洋大学. 一种机械式组合型振荡浮子波浪能发电装置: 中国, 103114958 A[P]. 2013-15-22.
- [11] WU J P. Principle and application of sensor[M]. 3rd ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2016: 23-43. 吴建平. 传感器原理及应用[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 23-43.
- [12] ZHAO T C. The physical principle and application of sensors and detectors[M]. Beijing: Science Press, 2008: 169-214. 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: 169-214.
- [13] RONG H, FU T, YANG M C, et al. Mechanical design basis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 43-47. 荣辉, 付铁, 杨梦辰, 等. 机械设计基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 43-47.
- [14] XU W D. Fluid mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 199-209. 许维德. 流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 199-209.
- [15] JIANG D C. Ocean wave dynamics[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1992: 35-60. 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.
- [16] HE G Y, YANG S H, HE H Z. Hydrodynamic analysis of array-type device of wave energy generation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015(2): 118-124. 何光宇, 杨绍辉, 何宏舟. 阵列式波浪能发电装置的水动力分析[J]. 水力发电学报, 2015(2): 118-124.
- [17] McCORMICK M E. Ocean wave can transform[M]. Beijing: Ocean Press, 1985: 49-65. 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.
- [18] Jimei University. The array wave energy generating device: CHN, 20112 0422862. 5.[P]. 2012-07-04. 集美大学. 阵列式波浪能发电装置: 中国, 20112 0422862.5.[P]. 2012-07-04.
- [19] University of Sanya. Marine and fluid measurement and control device: CHN, 2013 2 0368812.2[P]. 2014-04-16. 三亚学院. 海洋及流体测控装置: 中国, 2013 2 0368812.2[P]. 2014-04-16.
- [20] ZHANG C. Mechanical principles and mechanical design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011: 312-329. 张策. 机械原理与机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 312-329.
- [21] SU S Y, GAO H X. Mechanism, design and application of permanent magnet generator[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015: 157-165. 苏绍禹, 高红霞. 永磁发电机机理、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 157-165.
- [22] GAO W Z, XU J P. The second edition of Panasonic PLC programming and processing method[M]. 2nd ed. Beijing: mechanical industry press, 2015: 100-135. 高伟增, 徐君鹏. 松下 PLC 编程加工方法[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 100-135.
- [23] YANG D R. Oceanography[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986: 207-226. 杨殿荣. 海洋学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 207-226.
- [24] WEN S C, ZHANG D C, GUO P E, et al. Improved theoretical wind and wave spectrum[J]. Haiyang Xuebao, 1990, 12(3): 271-283. 文圣常, 张大错, 郭佩芳, 等. 改进的理论风浪频谱[J]. 海洋学报, 1990, 12(3): 271-283.
- [25] LI Z Q, WEN F S, REN Q, et al. A synchronous belt-driven oscillating float wave energy conversion device: CHN, 201711176216.3 [P]. 2017-11-22. 李政清, 闻福三, 任齐, 等. 一种同步带传动振荡浮子波浪能转换装置: 中国, 201711176216.3[P]. 2017-11-22.

Research on Wave Energy Oscillating Float Conversion Mode

WEN Fu-san¹, LI Zheng-qing¹, REN Qi^{1,2}, WU Shi-he¹, WU Le-xian³, LI She-lei¹,
WANG Lian-sheng¹, DING Xue-yong¹, XIN Guang-hong¹, REN Bing-nan²

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

2. *The Institute of Oceanography of San Ya University*, Sanya 572022, China;

3. *Xi'an Siyuan University*, Xi'an 710038, China)

Abstract: A power generation device with an array type synchronous belt drive wave energy oscillating float conversion mode is proposed. The research mainly include: to change rack driving to synchronous belt driving; to use a combination of two sets of synchronous belts and two overrunning clutches for a single oscillating float to achieve the oscillating float running up and down bidirectional work; to design the guiding mechanism for the oscillating float; to connect eight sets of energy conversion devices consisting of eight flumes and eight oscillating floats into a whole by using truss structure; to superpose and transfer the power to one generator through series connection of eight power output shafts; to use a stepwise loading mode and series superposition output power for the energy output points; to carry out comparison and analysis between the theoretical design and operation characteristics and the measured operating characteristics; and to examine the operation of this wave energy conversion device. It is proved that the wave-making device consisting of multiple flumes is feasible; and that the wave energy conversion device which uses synchronous belt drive oscillation float is also feasible. Through mechanical series connection, output power of multiple independent energy conversion devices is synthesized to generate electricity so that the power stability is increased. This research provides data, references and valuable experiences for the further researches on the oscillating float wave energy generation in the sea.

Key words: wave energy; synchronous belt drive; array oscillating float; guiding mechanism; mechanical series connection

Received: October 20, 2017