

# 电机控制的双水下降落伞低速海流发电装置的设计

古亮<sup>1,3</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 熊晨果<sup>2</sup>, 张峻齐<sup>2</sup>, 李浩铭<sup>2\*</sup>

1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054

2. 重庆市巴蜀中学校, 重庆 401121

3. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054

**摘要** : 鉴于当前难于对流速低于2米每秒的海流能进行低成本开采并发电。为此设计了一种仅有两个水下降落伞的低速海流发电装置, 由通讯控制单元循环控制其中一个水下降落伞尾端开放使得水流自由泄放, 而同时控制另一个水下降落伞尾端闭合迎水, 利用两者的牵引拉力差, 驱动增速齿轮机构及发电机发电。在给出了发电装置的基本结构和工作原理的基础上, 运用CFD软件建立了水下降落伞的三维数值仿真模型, 选用k-ε湍流模型, 计算出了水下降落伞在不同结构参数及水流速度下的流场压力和速度分布, 得到了水下降落伞的静拉力与各影响因素之间的关系。最后, 在建立的拖拽试验平台上进行了拖拽实验验证。结果表明, 该发电装置在拉力变化周期内, 具有净剩电功率输出。

**关键词** : 海流发电; 低品位能源采集; 水下降落伞; CFD数值仿真

## Design Of Low-Speed Ocean Current Power Generation Device Of Double Underwater Parachute Controlled By Motor

Gu Liang<sup>1,3</sup>, Wang Jie<sup>1</sup>, Xiong Chenguo<sup>2</sup>, Zhang Junqi<sup>2</sup>, Li Haoming<sup>2\*</sup>

1.School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054

2.Chongqing Bashu secondary School, Chongqing 401121

3. Chongqing Energy Internet Engineering Technology Research Center, Chongqing 400054

**Abstract** : In view of the current difficulty in low-cost power generation from ocean current energy with a flow rate of less than 2 meters per second, a low-speed ocean current power generation device with only two underwater parachutes is designed. The communication control unit cyclically controls the tail end of one of the underwater parachutes to open, allowing the water flow to be released freely, while simultaneously controlling the tail end of the other underwater parachute to close to the water. The traction force difference between the two is harnessed to drive the speed-increasing gear mechanism and the generator to generate electricity. Based on the basic structure and working principle of the power generation device, a three-dimensional numerical simulation model of the underwater parachute is established using CFD software. The k-ε turbulence model is employed to calculate the flow field pressure and velocity distribution of the underwater parachute under various structural parameters and water flow velocities. The relationship between the static tension of the underwater parachute and its influencing factors is analyzed. Finally, a performance experiment was conducted on the established test platform. The results indicate that the power generation device exhibits a net power output during the tension change period.

**Key words** : ocean current power generation; low-grade energy collection; underwater parachute; CFD numerical simulation

## 引言

海流能是海洋中大规模定向流动水体所携带的动能。采集海流能用于发电是一种十分重要的可再生新能源开发方式, 这对早日实现“双碳”目标意义重大<sup>[1]</sup>。

目前国内外的海流能发电装置一般可分为三类: ①水平轴<sup>[2]</sup>水下降电装置, 以 T.Ueno 等<sup>[3]</sup>开发的具有导流罩的水平轴发电装置为代表。②垂直轴<sup>[4]</sup>发电装置, 如 Khan 等发明的水流涡轮机。③其他结构发电装置, 如翼振往复型<sup>[5-6]</sup>、水下风筝型<sup>[7]</sup>、柔性叶片型<sup>[8]</sup>、摆型<sup>[9]</sup>等创新型结构。它们的结构大、安装运维不方便、启动水速高、不易选址、成本高, 总效率低。

本文针对当前海流发电装置的不足, 设计了基于双水下降落伞<sup>[10]</sup>的低速海流发电装置。该装置在辅助机构的配合下, 采用步进电机交替控制水下降落伞尾端的闭合和敞开状态。利用两者巨大的拉力差可以驱动增速齿轮及发电机主轴旋转发电, 输出净剩电功率。

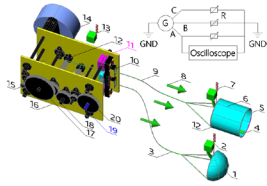
## 一、双水下降落伞发电装置的结构和原理

设计的双水下降落伞海流发电装置如图1所示, 主要由获能单元、牵引缆索、通讯控制单元、增速速齿轮组、发电机组成。其中获能单元包含两个呈圆柱形管状的水下降落伞1和2, 由高强度

\* 作者简介: 古亮(1976.02), 男, 副教授, 研究方向为高电压绝缘新技术、水电、风电新技术等

尼龙布料制作。其进水口边沿内嵌圆形刚性骨架，由尼龙绞线缆索穿过排线器后，连接于增减速齿轮组的排线轴1、2上。其出水口，即伞尾端的敞开或闭合状态受通讯控制单元的控制。通讯控制单元由含 GPS 系统的无线 MCU 模块、驱动器、防水步进电机及伞尾束缚线等组成，装载在浮箱内。浮箱确保驱动控制单元和天线在水面之上，其余部分在水下且不触海床，由缆索内电缆供电。束缚线连接防水步进电机与伞尾扣眼，电机旋转时，伞尾状态随之改变。增减速齿轮组包括排线器、排线轴和齿轮组，减速齿轮组驱动排线器，增速齿轮组驱动发电机发电。

当水下降落伞1处于尾端闭合状态时，降落伞2则处于尾端敞开状态。当水流冲击尾端闭合的降落伞1时，与其相连的主缆索将承受极大的拉力。该缆索通过排线器拉动排线轴1旋转，然后经增速齿轮组加速带动由通过与联轴器相连的发电机旋转发电。同时齿轮组同步带动排线轴2及排线器螺纹轴减速旋转。由于降落伞2处于尾端敞开状态，其主缆索2承受伞2的拉力相对很小。该主缆索2被排线轴2往回卷并整齐的缠绕在排线轴2上。如此就能实现对尾端敞开的伞2回收。



>图1 水下降落伞牵引式水流发电装置三维模型

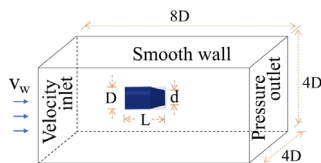
1- 水下降落伞1（伞尾端闭合状态）、2- 通讯控制单元1（浮箱）、3- 主缆1、4- 收缩绳口、5- 收缩绳带、6- 水下降落伞1（伞尾端开放状态）、7- 通讯控制单元2、8- 水流方向、9- 主缆2、10- 排线器、11- 直线轴承、12- 排线轴2、13- 通讯控制单元0、14- 永磁发电机、15- 增速齿轮2(18:100)、16- 增减速齿轮箱、17- 增速齿轮1(18:50)、18- 排线轴1、19- 排线器丝杆、20 减速齿轮(10:1)

当降落伞1在水流的推动下到达 GPS 指定距离时，通讯控制单元通过控制浮箱里的防水步进电机1反转，释放该伞1尾端的束缚线，使其在水流作用下尾端敞开。同时控制另外一个伞2尾端的束缚线收缩，使尾端收拢、闭合呈球桶状。通过交替控制两伞尾端的敞开和闭合状态，就能实现尾端闭合的伞主动拉动和回收另外一个尾端敞开的伞，同时驱动增速齿轮组带动发电机旋转输出电力。

## 二、模型搭建

### （一）模型建立

设置水下降落伞伞体直径为  $D$ ，伞尾的扣眼数量为 20，计算域为长方体，长为  $8D$ ，宽为  $4D$ ，高为  $4D$ ，如图2所示。



>图2 计算域示意图

### （二）湍流模型和边界条件

水下环境的复杂性使得水流呈现出高度动态和非线性的特征。因此，这里选用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型对水下降落伞周围流场进行模拟数值计算，其湍动能方程和湍动耗散率方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial X_i} = \frac{\partial[\mu(\frac{\partial(u k)}{\partial X_j} + \frac{\partial(u_j)}{\partial X_i})]}{\partial X_j} + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial X_i} = \frac{\partial[(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon})(\frac{\partial u \varepsilon}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i})]}{\partial X_j} + \frac{C_{1\varepsilon} P_k}{k} - \frac{C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2}{k}$$

式中， $\rho$  是流体密度， $k$  是湍动能， $t$  是时间， $u$  是速度矢量， $X$  是空间坐标， $\mu$  是动力粘度， $P_k$  是湍动能输运项， $\varepsilon$  是湍动能耗散率， $\mu_t$  是湍流黏度， $\sigma_\varepsilon$  是湍动耗散率抑制函数， $C_{1\varepsilon}$  和  $C_{2\varepsilon}$  是经验常数。

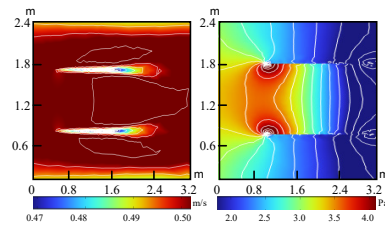
计算仿真过程中，左侧为流场入口，设置水速为  $V_w$ (m/s)，右侧为压力出口，压力设为 0Pa，采用 SIMPLE 算法求解压力与速度耦合，在迭代的过程中，对速度场进行预测，再通过压力场进行修正。

## 三、仿真结果分析

在相同水速情况下，伞衣直径越大，充满水时投影直径也越大，阻力也随之增大。图3、4、5分别给出了在水速 0.5m/s，伞尾端口  $d$  全敞开、半敞开、闭合状态时水下降落伞侧面速度场和压力场云图，图中颜色越深表示速度或者压力越大。

### （一）伞尾端全敞开下的静态流场特性

由图3a可以看出，由于水下降落伞尾端处于全敞开状态，水分子与伞面的接触面积很小，产生的阻力很小，此时回收伞的拉力也是最小的，能极大减少耗电量。从图3b可以看出由于水下降落伞不兜水，形成水流通路，所以在伞面位置受水压力非常小，只是靠近缆绳方向有往回的拉力，与水产生挤压，所以靠近绳的一端伞面压力较其他位置大。



(a) 侧面速度场 (b) 侧面压力场

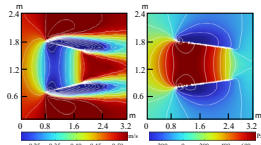
图3 尾端全敞开状态下降落伞侧面场云图

### （二）伞尾端闭合过程中某时刻的静态流场特性

图4a 看出水下降落伞在尾端打开至闭合的过程中，尾端口部分打开，形成水流通路。水流因内聚力尽量从尾端口流出，减少表面张力阻碍。尾端口水流维持原速度和方向，而伞面阻力使中间部分速度随接触面积减小而增大。当尾端口与伞面无接触时，水流因惯性维持原速度。

图4b 显示水下降落伞表面压力分布中间大两头小，这是流体

静压力、动压力与伞形状共同作用的结果。伞底部面积小，静压力大；顶部面积大，静压力大且流速快，动压力也大。因此，伞在水中表面压力呈现两头大中间小的现象。

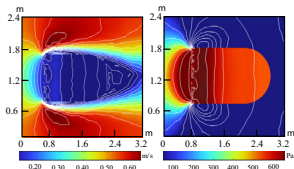


(a) 侧面速度场 (b) 侧面压力场  
图4 尾端半敞开状态下降落伞侧面场云图

### (三) 伞尾端彻底闭合下的静态流场特性

由图5a 看出水下降落伞因其较大的接触面积而频繁受到水分子碰撞，导致和伞面接触前水流速度降低，从而产生显著阻力，使速度减缓。根据流体连续性原理，伞面后方水流因受到伞面形状阻碍而流速逐渐增大，维持流体流动的连续性。

由图5b 可以看出由于水下降落伞受缆绳拉力的作用，伞头部会受到很大的压力，而当水流冲击伞底部时，部分动能转化为压力冲量，由流体动量定理得出会受到与水流的动量变化率大小相等、方向相反的力，即压力。另外由于水的不可压缩性，所以水流在冲击伞底部时，水的压力会传递到伞底部的表面，形成额外的压力分布。



(a) 侧面速度场 (b) 侧面压力场  
图5 尾端闭合状态下降落伞侧面场云图

## 四、水下降落伞实验结果及分析

### (一) 单个伞的静态拉力实验

选择长江某段没有明显水流流动的河段进行单个伞尾端闭合、尾端半敞开和尾端敞开的静态拉力实验。实验结果如图6所示。

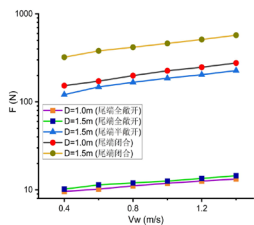


图6 不同伞衣长度所受拉力大小

结果表明伞尾端三种状态下拉力都是随着水流速度增大而增大，不过尾端全敞开的伞在不同直径下拉力变化很小，而尾端闭合状态下拉力变化较大。所以拉力的大小跟尾端口的大小非常有关，尾端口越大，拉力越小，反之拉力越大。

### (二) 水下降落伞牵引式水流发电装置发电实验

根据设计的三维模型，制作了实物装置，其中降落伞的直径为D=1.2米，伞体长L=1.5米。其中示波器用于测量100欧可调负载R上的相电压，以便计算300W 三相永磁发电机输出功率。实验区域为长江某江心小岛下游，试验区的水速Vw=1.0m/s，较

为稳定，如图7所示。

为了得到发电机的最大功率，通过改变可调负载R的阻值，测得在不同负载下发电机单相电压波形，进而得到负载-功率特性曲线如图8所示。表明当R=12时，负载可以获得最大功率P<sub>max</sub>=68W。此最大功率在扣除各通讯驱动单元最大功耗之后，具有净剩电功率输出。



图7 实验平台图

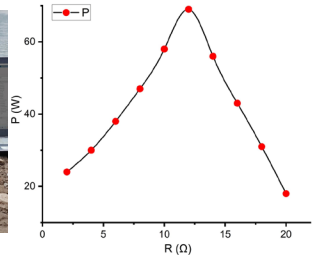


图8 负载-功率曲线图

## 五、结论

a. 通过仿真单个水伞拉力实验，证明低速水流对尾端开放的水下降落伞的拉拽力极小，而对尾端闭合的水下降落伞的拉拽力很大，完全实现其差值拖动发电机发电。

b. 试制双水下降落伞发电原型机，置于长江某流域进行试运行，证实本装置能输出净剩电功率。适用于有大量定向流动水体的沿江、沿海、海岛等地区，具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 黄加勉, 蔡学志. 双碳背景下新能源在新型电力系统中的实践运用 [J]. 工程技术, 2023(S1): 111-113. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.25.039.
- [2] Chen Z, Liu Y, Zhao C, et al. Numerical simulations and analysis on wake flows of axial-flow tidal current turbines [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015. DOI: 10.11660/slfdbx.20151016.
- [3] T.Ueno, S.Nagaya, M. Shimizu, H. Saito, S. Murata and N. Handa, Development and Demonstration Test for Floating Type Ocean Current Turbine System Conducted in Kuroshio Current, 2018 OCEANS - MTSIEEE Kobe Tech.
- [4] Jiang D L L H M Y. Hydrodynamic Performance Analysis of the Vertical Axis Twin-Rotor Tidal Current Turbine [J]. Water, 2018, 10(11): 1694-1694.
- [5] L. I. Lago, F. L. Ponta, and L. Chen. Advances and trends in hydrokinetic turbine systems, Energy for Sustainable Development [J], 2010, 14(4), 287-296.
- [6] Diangui Huang, Jihua Zhang, Xiaojing Sun, New method for harvesting energy from fluid flow based on undulatory motion, International Journal of Green Energy [J], 2017, 14(6): 540-547.
- [7] S.Costello, G. François and D. Bonvin, Real-Time Optimizing Control of an Experimental Crosswind Power Kite, IEEE Transactions on Control Systems Technology [J], 2018, 26(2): 507-522.
- [8] Hoerner, S., Abbaszadeh, S., Cleynen, O. et al. Passive flow control mechanisms with bioinspired flexible blades in cross-flow tidal turbines. Exp Fluids 62, 104 (2021). https://doi.org/10.1007/s00348-021-03186-8.
- [9] M. N. Hidayat, A. N. Musthofa and B. Setiawan, "Review of Perpetual Motion Machine Using Pendulum Force Method as DC Power Generation," 2022 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), Malang, Indonesia, 2022, pp. 251-254, doi: 10.1109/IEIT56384.2022.9967867.
- [10] Liang Gu, Pei Jin and Lei Feng, et al. Umbrella power generation device with dual motor switching control [P]. Chongqing: CN211623610U, 2020-10-02.