

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311846

# 水下单线电能传输机理分析及实验研究\*

庞水<sup>1,2</sup>, 徐佳毅<sup>1,2</sup>, 李洪宇<sup>3</sup>, 李醒飞<sup>1,2</sup>, 李荣飞<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 深海技术科学太湖实验室 无锡 214084;  
3. 山东科技大学海洋科学与工程学院 青岛 266590)

**摘要:**为了实现缆系水下感知平台挂载传感器的低成本、非接触全天候供电,提出了一种以系泊缆和开放海水构成电能传输链路的水下单线电能传输系统。首先从电磁波在系泊缆和海水中的传播机理进行了分析,建立了麦克斯韦方程组并通过分析得到了电磁波束缚在系泊缆表面传播的结论;然后使用 Ansys/HFSS 软件建立了系泊缆在海水中的模型,仿真得到了电磁场分布情况以及坡印廷矢量分布情况,验证了理论分析的正确性;最后搭建了 50 m 单线电能传输实验样机,在海水中进行了电能传输实验。实验结果表明,提出的水下单线电能传输系统最高可以实现 187 W 的电能传输,系统最大效率可达 49.2%,证明水下单线电能传输系统具有为缆系水下感知平台挂载传感器非接触供电的可行性。

**关键词:** 海洋探测;水下单线电能传输;电磁波;感应耦合

**中图分类号:** TM72 TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Analysis and experimental study on the mechanism of underwater single wire power transfer

Pang Shui<sup>1,2</sup>, Xu Jiayi<sup>1,2</sup>, Li Hongyu<sup>3</sup>, Li Xingfei<sup>1,2</sup>, Li Rongfei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, China; 3. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to achieve low-cost, non-contact, and all-weather power supply for sensors on cable based underwater sensing platforms, this paper proposes an underwater single wire power transfer system that utilizing mooring cable and open seawater as the power transmission link. Firstly, the propagation mechanism of electromagnetic waves in the mooring cable and seawater is analyzed, and the Maxwell equations of system are established. It's found that electromagnetic beams propagate on the surface of the single wire according to analysis. Then, a model of the mooring cable in seawater is established using Ansys/HFSS software and the electromagnetic field distribution as well as Poynting vector distribution are simulated, which verifies the correctness of theoretical analysis. Finally, a 50 meter single wire power transfer experimental prototype is built and corresponding experiment is conducted in seawater. The experimental results show that the proposed underwater single wire power transfer system can transfer 187 W to the load, and the maximum efficiency of system can reach 49.2%. The feasible of single wire power transfer system for non-contact power supply of sensors on cable based underwater sensing platforms is verified.

**Keywords:** ocean exploration; underwater single wire power transfer; electromagnetic waves; inductive coupling

## 0 引言

海洋蕴涵大量的资源,探索海洋需要海洋观测网,海

洋观测网需要水下运动平台、通信导航设备以及各种类传感器。水下运动平台(浮标、滑翔机、AUV等)和传感器的电能供应是限制长时间海洋探测的重要因素。目前,水下平台和水下传感器多通过自身携带的蓄电池提

收稿日期:2023-08-28 Received Date: 2023-08-28

\*基金项目:国家自然科学基金(62203324)、中国博士后科学基金(2023M732611)、天津大学科技创新领军人才培养“启明计划”(2023XQM0018)、精密测试技术及仪器全国重点实验室基金(Pilq2305)、山东省自然科学基金(ZR2022MF336)项目资助

供电能,这种方式严格受限于蓄电池的容量和水下载体的体积限制。基于波浪发电、摩擦纳米发电等原理的自供能式传感器往往功率等级较小。传统的有线供电方式在水下应用存在安全隐患,而且传感器仅可以挂载在预留接线端,限制了水下探测的灵活性。

感应耦合电能传输(inductive power transfer, IPT)技术具有安全、灵活的特点<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于自主水下航行器、遥控水下航行器<sup>[4]</sup>、锚系浮标<sup>[5-7]</sup>等水下设备。对于自主水下航行器等水下设备的 IPT 系统,往往采用线圈式的结构,与陆地上便携式电子设备、新能源车的 IPT 线圈式系统<sup>[8]</sup>类似,线圈式 IPT 系统传输距离较小。海洋探测平台需要做沉浮运动,传感器需要挂载在不同深度进行探测工作。传统的 IPT 系统难以满足海洋探测平台及传感器的供电需求。目前,锚系浮标的水下传感器节点的供电也采用的 IPT 技术<sup>[6]</sup>,但其系泊缆是结构特殊的闭合回路,节点挂载位置预留出可挂载耦合器的绝缘导线,但是节点位置固定,因此不适合感知平台上下运动。锚系浮标水下节点的耦合器是采用磁环卡在系泊缆上的结构,该结构具有一定的参考价值。

单线电能传输(single wire power transfer, SWPT)系统最早是特斯拉提出的,后来经过几十年的研究和改进,电能传输性能较好的系统是大连理工大学陈希有教授团队研制的 SWPT,其结构是使用特斯拉线圈顶部具有金属球体<sup>[9-10]</sup>,单导线连接两个特斯拉线圈起到电磁波导引作用<sup>[11]</sup>。该结构 SWPT 系统的最佳电能传输参数如下:传输距离为 100 m 时,传输功率可达 300 W,效率为 41%;传输距离为 200 m 时,功率可达 135 W,效率 23%。该团队此结构基础上改进提出了多层特斯拉线圈接地的 SWPT 系统<sup>[12]</sup>,在 70 m 的传输距离时的传输功率为 5 kW,效率为 90%;5 km 传输距离时的功率为 1 150 W,效率为 87%。基于特斯拉线圈的 SWPT 系统体积较大,仅适合陆地使用。单线串联多个平面线圈和利用海水与导线形成回路的方式传输距离有限<sup>[13]</sup>。单线串联喇叭口式的收发器可以提高系统的传输效率<sup>[14]</sup>,但其谐振频率较高而且传输距离不超过 10 m,不适合水下应用。单线电容耦合电能传输系统仅实现了短距离的电能传输,在水下工作的可行性有待验证<sup>[15-16]</sup>。

利用海水与单线形成回路的方式进行电能传输具有水下应用的潜质,而且采用磁环耦合器获取能量的结构具有极高的灵活性,适用于缆系水下感知平台。锚系浮标的单线多节点 IPT 系统已经得到了实验室水池试验验证,并且通过频率匹配和增加节点个数来提高系统效率,但未提及单线长度<sup>[17]</sup>。水下单线电能传输(underwater single wire power transfer, USWPT)系统的能量传输机理尚未明确,并且在海水中电能传输的可行性和性能尚未验证。

为实现缆系水下感知平台挂载传感器的低成本、非接触式全天候供电,本文提出了一种以系泊缆和开放海水构成电能传输链路的 USWPT 系统,从电磁波传播的角度揭示了 USWPT 系统能量传输的机理,并通过 Ansys/HFSS 仿真验证了能量传输机理的正确性,最后搭建了 USWPT 样机并开展了电能传输实验,验证了提出系统电能传输的可行性和电能传输的功率和效率,为海洋探测应用奠定基础。

## 1 理论分析

### 1.1 缆系水下感知平台结构

缆系水下感知平台的总体结构如图 1 所示,其主要分为水上部分和水下部分,水上部分包括水面浮体,装有太阳能电池板用来给浮体内部的蓄电池充电,该蓄电池连接 DC-DC 变换器和逆变器,逆变器输出端分别连接水面电极和系泊缆的一端;水下部分包括系泊缆及其连接的水底电极,卡在系泊缆上的感知平台,感知平台通过套在系泊缆上的耦合器获取电能并给其内部的锂电池组充电,感知平台通过运动滚轮与系泊缆的相对运动实现剖面测量。

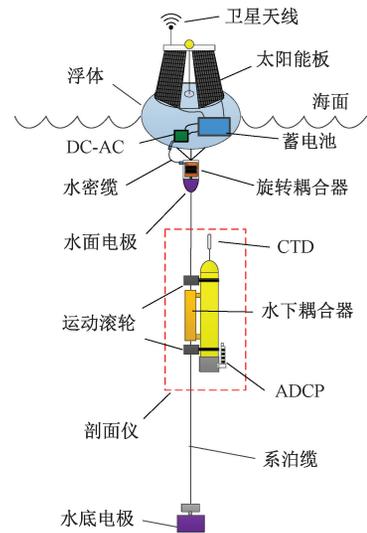


图 1 缆系水下感知平台结构示意图

Fig. 1 The structure of the cable sensing platform

该系统的优势是利用太阳能不间断地为系统提供电能,可保证水下感知平台的运行时长,水下电能传输部分利用系泊缆和电极与海水构成的回路,降低系统复杂性和成本,且非接触的供电形式更适合缆系水下感知平台的运动。

### 1.2 USWPT 系统能量传输机理分析

为了证明 USWPT 系统的可行性,将系统的能量传输

部分简化,如图2所示,并建立坐标系进行分析。在该系统中,高频电磁波主要在系泊缆和海水两种介质中传播。系泊缆可以使用内部为导体,表面具有良好绝缘的单根线缆,以下称其为单线。单线两端连接电极,电极导电性良好的金属,两个电极在任何时候都有相反的电流,可以近似为一对偶极子。电磁波主要在单线和海水中传播,因此建立了单线和海水中的麦克斯韦方程。

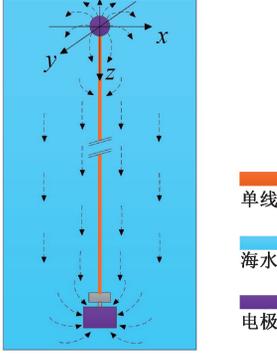


图2 USWPT系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of USWPT system structure

假设单线中为正弦电流,因此电磁场是时谐电磁场<sup>[18]</sup>。海水中的稳态电磁波应满足如下麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{\mathbf{H}}_{sea} = j\omega \dot{\mathbf{D}}_{sea} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{E}}_{sea} = -j\omega \dot{\mathbf{B}}_{sea} \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}}_{sea} = 0 \\ \nabla \times \dot{\mathbf{E}}_{sea} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\dot{\mathbf{D}}_{sea} = \varepsilon_1 \dot{\mathbf{E}}_{sea}$  是电位移通量,  $\dot{\mathbf{B}}_{sea} = \mu_1 \dot{\mathbf{H}}_{sea}$  是磁感应强度,  $\dot{\mathbf{E}}_{sea}$  和  $\dot{\mathbf{H}}_{sea}$  分别是海水中的电场强度和磁场强度,  $\varepsilon_1$  代表海水的介电常数,  $\mu_1$  是海水的电导率,  $\omega$  是系统的角频率。  $\dot{\mathbf{H}}_{sea}$  的表达式为:

$$\dot{\mathbf{H}}_{sea} = \dot{\mathbf{H}}_1 e^{-jk_1 \cdot \mathbf{r}} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$  表示单位向量半径,  $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$ 、 $\mathbf{e}_z$  是直角坐标系中的单位向量,  $\dot{\mathbf{H}}_1$  是一个依赖于边界条件的矢量常量,与空间坐标无关。  $\mathbf{k}_1 = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y + k_z \mathbf{e}_z$ , 表示海水中的传播矢量,  $k_1^2 = \omega^2 \mu_1 \varepsilon_1$ 。  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  都是常数。

单导线内的电流密度满足  $\dot{\mathbf{J}}_w = \sigma_2 \dot{\mathbf{E}}_w$ ,  $\sigma_2$  是导体的电导率,  $\dot{\mathbf{E}}_w$  为单导线内的电场强度。单导线中的时谐电磁波应满足如下麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \dot{\mathbf{H}}_w = \sigma_2 \dot{\mathbf{E}}_w + j\omega \dot{\mathbf{D}}_w \\ \nabla \times \dot{\mathbf{E}}_w = -j\omega \dot{\mathbf{B}}_w \\ \nabla \times \dot{\mathbf{H}}_w = 0 \\ \nabla \times \dot{\mathbf{E}}_w = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\dot{\mathbf{D}}_w = \varepsilon_2 \dot{\mathbf{E}}_w$  是电位移通量,  $\dot{\mathbf{B}}_w = \mu_2 \dot{\mathbf{H}}_w$  是磁感应强度,  $\dot{\mathbf{E}}_w$  和  $\dot{\mathbf{H}}_w$  分别是单导线中的电场强度和磁场强度,  $\varepsilon_2$  代表导体的介电常数,  $\mu_2$  是导体的电导率。  $\dot{\mathbf{H}}_w$  的表达式为:

$$\dot{\mathbf{H}}_w = \dot{\mathbf{H}}_2 e^{-jk_2 \cdot \mathbf{r}} \quad (4)$$

其中,  $\dot{\mathbf{H}}_2$  是一个依赖于边界条件的矢量常量,  $\mathbf{k}_2$  是单导线中的传播矢量,  $k_2^2 = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 - j\omega \mu_2 \sigma_2$ 。

电磁场在海水和单线中的传播需要在两种介质的边界处获得边界条件来求解麦克斯韦方程组。图2是电磁波的简化示意图,当电磁波从海水入射到单线表面时,会发生反射和折射。定义  $\mathbf{k}$ 、 $\mathbf{k}'$ 、 $\mathbf{k}''$  分别为入射波、反射波和折射波的传播矢量,从而得到传播矢量的边界条件。一般情况下,边界界面两侧的磁通密度分量相等,因此电磁波传播到两介质界面时,传播矢量的边界条件满足:

$$\begin{cases} k_x = k'_x = k''_x \\ k_z = k'_z = k''_z \end{cases} \quad (5)$$

为了简化分析,考虑电磁波沿  $z$  轴方向的传播和衰减规律,忽略  $y$  方向的电磁波分量。电磁折射波的传播矢量为:

$$\mathbf{k}'' = k''_x \mathbf{e}_x + k''_y \mathbf{e}_y + k''_z \mathbf{e}_z = k_x \mathbf{e}_x + k''_z \mathbf{e}_z \quad (6)$$

其中,  $k_x = k_1 \sin \theta$ ,  $\theta$  是电磁波的入射角。当折射波在单线中传播时,  $\mathbf{k}''$  是一个复矢量。不妨假设  $\mathbf{k}'' = \beta - j\alpha$ ,  $\beta = \text{Re}(\mathbf{k}''_z) > 0$ , 且  $\alpha$  是一个实数。在同一介质中,传播矢量是相等的,如式(7)。

$$|\mathbf{k}''|^2 = |\mathbf{k}_2|^2 \quad (7)$$

求解式(7)可以得到系数  $\beta$  和  $\alpha$  的表达式:

$$\begin{cases} \beta = m + \sqrt{m^2 + \omega^2 \mu_2^2 \sigma_2^2} \\ \alpha = \omega^2 \mu_2^2 \sigma_2^2 / 2(m + \sqrt{m^2 + \omega^2 \mu_2^2 \sigma_2^2}) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $m = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2$ 。根据式(8),当电磁波以固定角度入射到单导线上时,  $\beta$  和  $\alpha$  都是常数。

假设系统的磁场方向为  $-\mathbf{e}_y$ , 则单导线内的磁场强度为:

$$\dot{\mathbf{H}}_w = \dot{\mathbf{H}}_2 e^{-jk_2 \cdot \mathbf{r}} = -\dot{\mathbf{H}}_w = \dot{\mathbf{H}}_2 e^{-jk_1 x \sin \theta} e^{-(\alpha + j\beta)z} \quad (9)$$

将式(9)代入式(3)可以得到单导线中的电场强度为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_w = & \frac{(\omega \varepsilon_2 + j\sigma_2) \dot{\mathbf{H}}_2 k_1 \sin \theta}{\sigma_2^2 + \omega^2 \varepsilon_2^2} e^{-jk_1 x \sin \theta} e^{-(\alpha + j\beta)x} \mathbf{e}_x - \\ & \frac{[(\beta \omega \varepsilon_2 + \alpha \sigma_2) + j(\beta \sigma_2 - \alpha \omega \varepsilon_2)] \dot{\mathbf{H}}_2}{\sigma_2^2 + \omega^2 \varepsilon_2^2} e^{-jk_1 x \sin \theta} e^{-(\alpha + j\beta)z} \mathbf{e}_z \end{aligned} \quad (10)$$

单导线中的坡印廷矢量为:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{E}}_w \times \dot{\mathbf{H}}_w^* = \frac{(\omega \varepsilon_2 + j\sigma_2) \dot{\mathbf{H}}_2 k_1 \sin \theta}{2\sigma_2^2 + 2\omega^2 \varepsilon_2^2} e^{-2\alpha x} \mathbf{e}_z +$$

$$\frac{[(\beta\omega\epsilon_2 + \alpha\sigma_2) + j(\beta\sigma_2 - \alpha\omega\epsilon_2)]\dot{H}_2}{2\omega^2\epsilon_2^2 + 2\omega^2\epsilon_2^2} e^{-2\alpha x} e_x \quad (11)$$

由式(11)可知,电磁波在  $x$  轴和  $z$  轴两个方向上都有分量,电磁波在  $x$  方向上的振幅随着  $x$  的增大而减小,这说明电磁波沿单线  $z$  轴方向传播。电磁波在  $y$  方向传播的分析过程与式(5) ~ (11) 相似,也可以得到电磁波在  $y$  方向的分量随着  $y$  的增大而减小。因此,在海水和单根导线中,电磁波被束缚在导线表面并沿导线传播。

## 2 USWPT 系统单线电磁场仿真

为了验证 USWPT 系统中电磁波传播机理分析的准确性,使用 Ansys/HFSS 软件建立了单线在海水中的模型如图 3 所示,为了清晰的分析电磁波分布,将单线横向放置(横向为  $z$  轴)。单导线为外径 2 mm 的铜导线,绝缘层为厚度 1 mm 的 PVC 聚乙烯材料,导线长 50 m。电极材料是不锈钢,尺寸为 20 cm×20 cm×0.2 cm。激励采用电流源集总端口激励。仿真域设置为海水,尺寸为 6 m×6 m×70 m。

单线的磁场强度和电场强度分布如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,单线表面的磁场强度较大,距离单线较远的空间场强极低,随着导线长度增加,磁场强度略有减弱,该现象符合式(9)的结论,磁场沿  $x$  轴逐渐减小,同时沿  $z$  轴也有所减小。电场强度分布符合式(10),沿  $x$  轴急剧减小,远离导线的空间几乎不存在电场。

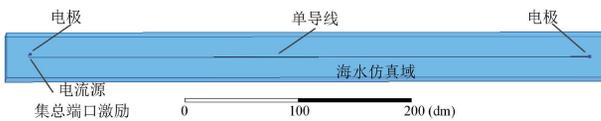
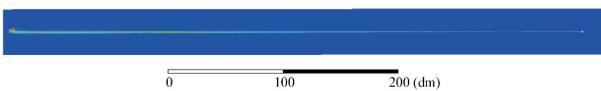


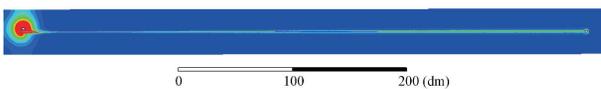
图 3 单线 HFSS 模型

Fig. 3 HFSS model of single wire



(a) 单线磁场分布

(a) Magnetic field distribution in single wire



(b) 单线电场分布

(b) Electric field distribution in single wire

图 4 单线电磁场分布情况

Fig. 4 Distribution of electric and magnetic fields in single wire

USWPT 系统单线的坡印廷矢量分布情况如图 5 所示。可以看出,坡印廷矢量完全沿着单导线从一个电极

指向另一个电极,而远离单线的空间几乎不存在坡印廷矢量。证明了电磁波是束缚在单线表面传播的,验证了理论分析的正确性。

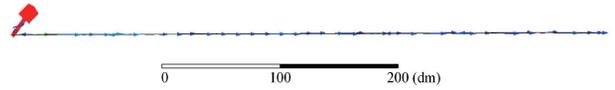
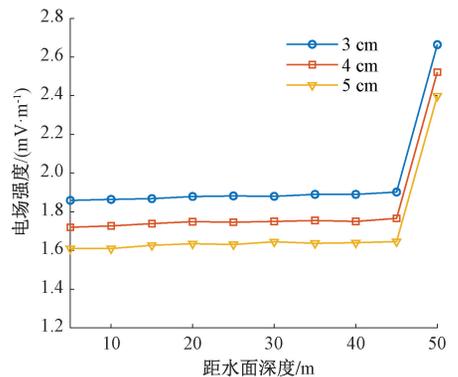


图 5 单线坡印廷矢量分布

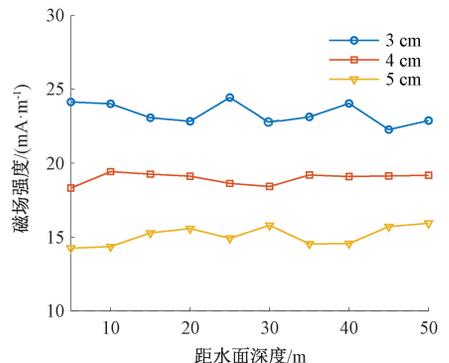
Fig. 5 Single wire Poynting vector distribution

USWPT 系统的负载端是通过磁环线圈与单导线的感应耦合获取能量,由于水下感知平台在海水中的沉浮运动,耦合器位置经常发生变化,由于耦合磁环半径为 3~5 cm,所以进一步测量了距离导线中心 3~5 cm 的导线表面的磁场强度和电场强度在不同水深的分布情况,如图 6 所示。明显看出随着距离导线间距变大,电场强度和磁场强度都变小,进一步验证了上述理论分析。



(a) 电场强度分布情况

(a) Distributions of electric field intensity



(b) 磁场强度分布情况

(b) Distribution of magnetic field intensity

图 6 电磁场强度在不同水深的分布情况

Fig. 6 The distribution of electric and magnetic field strengths at different water depths

图 6(a) 是不同水深的电场强度分布情况,可以看出 5~45 m 水深电场强度基本不受深度影响,50 m 深度由

于接近电极表面电场强度较大。图 6(b) 是不同水深的磁场强度分布情况,很明显场强波动较小,说明接收端耦合磁环在不同水深时的耦合系数变化较小,系统具有稳定传输电能的可行性。

### 3 实验验证

为了验证 USWPT 系统传输电能的可行性,根据系统电路结构(图 7)搭建了实验样机,在胶州湾海域开展了电能传输实验。经测量海水盐度约为 2.45%,密度约为  $1.02 \text{ g/cm}^3$ 。单导线采用铜导线截面积为  $4 \text{ mm}^2$ ,绝缘层为  $1 \text{ mm}$ ,导线长度为  $50 \text{ m}$ 。两个尺寸为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ,厚度为  $2 \text{ mm}$  的不锈钢板作为电极。耦合磁环尺寸为  $52 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的锰锌铁氧体磁环,为增加耦合,3 个磁环上缠绕  $0.1 \text{ mm} \times 200$  股的利兹线 10 匝。接收端耦合器置于密封件中且密封件沉入海水中,通过水密缆将电能传到水上。单线回路使用电容箱作为补偿电容,可以根据逆变器输出电压电流的相位差调整实现阻性负载;接收端采用 CBB 电容串联补偿。直流电源使用 PSW160-21.6,全桥逆变器用来将直流电转换成高频交流电,接收端使用整流器将交流电转换为直流电驱动电子负载 IT8512B+。使用示波器 DSOX2014A 观察电压电流波形,电压探头为差分探头 ETA5002,电流探头为 CT-CO.1-BNC。功率和效率使用功率计 PA323 H 测量。实验样机硬件如图 8 所示。

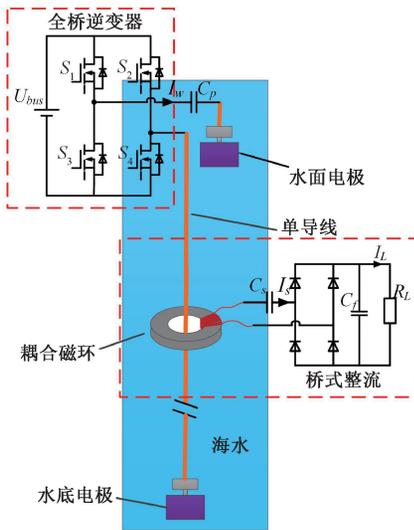
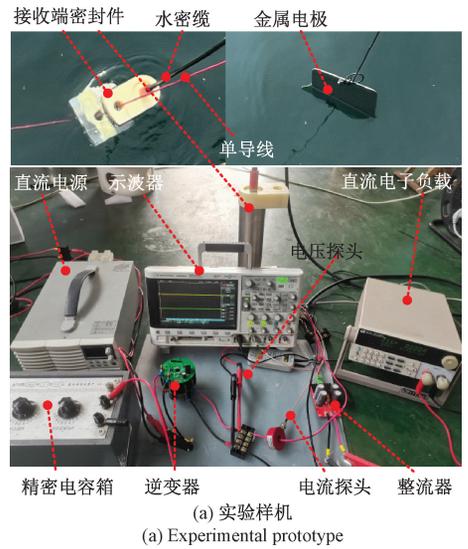


图 7 USWPT 系统电路结构  
Fig. 7 The structure of USWPT system

#### 3.1 系统频率选择

为了确定系统中高频交流电的频率,使用 LCR 表 TH2840B 分别测量单线回路和耦合磁环的品质因数  $Q$ ,



(a) 实验样机  
(a) Experimental prototype



(b) 实验海域  
(b) Experimental sea area

图 8 USWPT 实验样机和实验海域

Fig. 8 The experimental prototype of USWPT system and experimental sea area

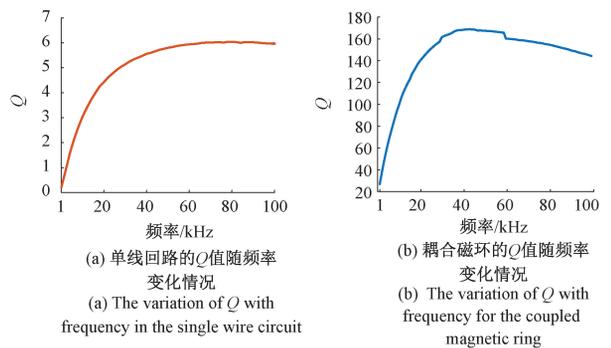


图 9 USWPT 系统的  $Q$  值测量

Fig. 9 The  $Q$ -value measurement results of the USWPT system

以高  $Q$  值为原则确定系统频率。测量结果如图 9 所示,图 9 (a) 为单线回路的  $Q$  值随频率变化的情况,随着频率的增加单线回路的  $Q$  值先增大后减小,在  $80 \text{ kHz}$  左右达到最大值。单线回路  $Q$  值小的原因是回路中电感较小,当串联电阻较大。耦合器的  $Q$  值同样随着频率的增加先增加后减小,在  $41 \text{ kHz}$  达到最大值  $168.58$ 。综合二者的  $Q$  值,选择系统中交流电频率为  $41 \text{ kHz}$ 。

### 3.2 电能传输实验

在实验过程中观察示波器显示的逆变器输出的电压和电流相位差,实时调整补偿电容箱的容值保证系统总阻抗为纯阻性,当输入直流电压为 48 V 时,逆变器的输出电压和电流波形如图 10 所示。

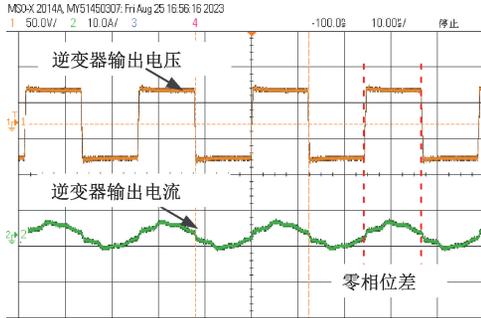


图 10 逆变器输出的电压和电流波形

Fig. 10 The voltage and current waveforms output by the inverter

为了测试 USWPT 系统的电能传输性能,设定输入直流电压为 48 V,调整负载电阻从 25  $\Omega$  增加到 1 000  $\Omega$ ,负载功率和系统总效率变化情况如图 11 所示。可以看出随着电阻的增大,功率先增大后减小,当负载电阻为 175  $\Omega$  时,功率达到最大,为 83.6 W,此时系统效率为 40.4%。系统效率随着电阻增大也呈现先增大再减小的趋势,在电阻为 325  $\Omega$  时达到最大效率约 46%。实验结果证明 USWPT 系统可以传输电能,且只要电阻匹配,系统效率可以超过 45%。

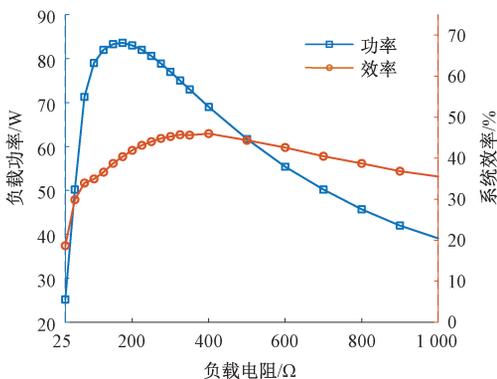


图 11 负载功率和效率随着电阻变化情况

Fig. 11 Load power and system efficiency vary with load resistance

增大直流输入电压,测量输出功率和系统效率,结果如图 12 所示。显然,当负载电阻为 325  $\Omega$  时,直流输入电压从 52 V 增加到 76 V,负载功率从 84.2 W 增加到 187.3 W,系统效率从 44.5% 增加到 49.2%。证明了提

出的 USWPT 系统可以通过增大输入电压,提高传输功率,样机实验的最大负载功率为 187.3 W。系统效率随着输入电压的增加具有增大的趋势,说明效率具有提高的潜力。

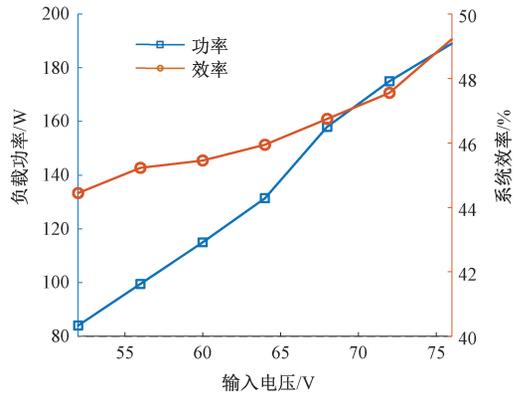


图 12 负载功率和效率随着输入电压变化情况

Fig. 12 Load power and system efficiency increase with input voltage

## 4 结 论

本文提出了一种以系泊缆和海水构成电能传输回路的 USWPT 系统为缆系水下感知平台挂载传感器进行低成本、非接触的全天候供电。通过建立电磁波在系泊缆和海水中的麦克斯韦方程组,揭示了电磁波沿着单线表面传播的机理,并仿真 USWPT 系统电磁场分布和坡印廷矢量分布情况,验证了电磁波传播理论的正确性。50 m USWPT 系统的电能传输实验结果表明,系统最大传输功率为 187.3 W,最大效率为 49.2%,证明了 USWPT 系统具电能传输的可行性。后续研究 USWPT 系统的电路模型建立以及提高系统效率来推进工程应用的进程。

### 参考文献

- [1] HUI S R, YANG Y, ZHANG C. Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2412-2427.
- [2] 杨庆新, 章鹏程, 祝丽花, 等. 无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 1-8.  
YANG Q X, ZHANG P CH, ZHU L H, et al. The key foundations and technical bottlenecks of radio energy transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 1-8.
- [3] 徐佳毅, 李洪宇, 谢子铭, 等. 面向最优效率的潜标耦合电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 75-82.

- XU J Y, LI H Y, XIE Z M, et al. Submerged buoy coupling power transfer system for optimal efficiency[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 75-82.
- [4] PANG S, XU J, LI H, et al. Dual-Frequency Modulation to Achieve Power Independent Regulation for Dual-Load Underwater Wireless Power Connector [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 2377-2389.
- [5] XU J, LI X, LI H, et al. Maximum efficiency tracking for multitransmitter multireceiver wireless power transfer system on the submerged buoy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1909-1919.
- [6] XU J, LI X, XIE Z, et al. Design and analysis of inductively coupled power transfer system on mooring buoy with double ultracapacitor chargers using indirect control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4836-4845.
- [7] CUI X, XU J, PANG S, et al. Design and implementation of inductively coupled power and data transmission for buoy systems [J]. Energies 2023, 16: 4417.
- [8] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907-3916.  
Wang Y J, LU K X, YAO Y S, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3916.
- [9] LI T, CHEN X, LANG Z, et al. Modeling and analysis of single-wire power transfer system using distributed parameter resonant coil [C]. 2021 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference, 2021: 141-145.
- [10] 张泽然, 陈希有, 周宇翔, 等. 单线电能传输的实验研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(10): 69-74.  
ZHANG Z R, CHEN X Y, ZHOU Y X, et al. Experimental research of single line power transmission [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(10): 69-74.
- [11] SHU X, ZHANG B. Single-wire electric-field coupling power transmission using nonlinear parity-time-symmetric model with coupled-mode theory [J]. Energies, 2018, 11(3): 532.
- [12] JIN X, CHEN X, QI C, et al. Investigation on the electromagnetic surface waves for single-wire power transmission [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2497-2507.
- [13] JIN X, CHEN X, QI C, et al. Modeling and construction of single-wire power transmission based on multilayer tesla coil [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6682-6695.
- [14] LI Y, WANG R, ZHAI Y, et al. A novel single-wire power transfer method for wireless sensor networks [J]. Energies, 2020, 13(19): 5182.
- [15] ZOU L J, ZHU Q, VAN NESTE C W, et al. Modeling single-wire capacitive power transfer system with strong coupling to ground [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 2295-2302.
- [16] LI Y, HU T, WANG X, et al. Design and optimization of novel transceiver device for one-way single-wire power transfer [J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(5): 1594-1604.
- [17] ZHENG Y, ZHANG S, FEI C, et al. A method to improve multi-node power transmission efficiency of inductively coupled mooring cable [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(5): 54705.
- [18] 文远, 吴文. 高频电磁波在海水中的传播特性[C]. 2013年全国天线年会, 2013: 1038-1041.  
WEN Y, WU W. Propagation characteristics of HF waves in seawater [C]. Proceedings of the 2013 National Antenna Annual Conference, 2013: 1038-1041.

### 作者简介



庞水, 2017年于大连海事大学获得学士学位, 2020年于大连海事大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为水下耦合电能传输技术。

E-mail: p\_shui@tju.edu.cn

**Pang Shui** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Dalian Maritime University in 2017 and 2020, respectively. Now he is a Ph. D. candidate at Tianjin University. His main research interest is underwater coupling power transfer technology.



徐佳毅(通信作者), 2018年于天津大学获得硕士学位, 2022年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学助理研究院员, 主要研究方向为水下耦合电能传输技术。

E-mail: xjy0125@tju.edu.cn

**Xu Jiayi** (Corresponding author) received his M. Sc. degree and Ph. D. degree from Tianjin University in 2018 and 2022, respectively. Now he is an assistant researcher at Tianjin University. His main research interest is underwater coupling power transfer technology.