DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.254 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的 UUV 电场耦合无线电能传输系统

钱林俊，于博泉，刘亚兵，王元奎，胡利民
(中国船舶集团公司第 705 研究所昆明分部，昆明 650118)

摘要：针对现有水下无人航行器 UUV(underwater unmanned vehicle)电场耦合式无线电能传输 EC-WPT (electric-field coupled wireless power transfer)系统抗偏移性能差及漏电场辐射较大的问题，提出 1 种具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的 UUV 电场耦合无线电能传输系统。首先给出适用于 UUV 的五极板式新型耦合机构，将耦合机构产生的 10 个耦合电容进行化简，建立耦合机构等效模型；以双侧 LC 补偿的 EC-WPT 系统为例给出系统输出参数的计算方法，并进行电路仿真；根据仿真得到的极板电压对系统周围电场进行有限元分析，验证新型耦合机构的漏电场屏蔽特性，结果表明系统中 UUV 内部几乎无漏电场；最后搭建实验装置，从能量传输性能和抗偏移性能方面验证所提方案对 UUV 进行无线供电的有效性，实验中实现 74 W 的功率传输，效率为 85.6%，并且能量接收端从 3 个维度偏移时，系统的输出功率和效率变化较小。

关键词：电场耦合无线电能传输；水下无人航行器；抗偏移性；漏电场屏蔽

Electric-field Coupled Wireless Power Transfer System for UUV with Anti-offset and Leakage Field Shielding Characteristics

QIAN Linjun, YU Boquan, LIU Yabing, WANG Yuankui, HU Limin
(The 705 Research Institute Kunming Branch, China State Shipbuilding Corporation Limited, Kunming 650118, China)

Abstract: Aimed at the problems in an electric-field coupled wireless power transfer (EC-WPT) system for underwater unmanned vehicle (UUV) such as poor anti-offset performance and large leakage field radiation, a UUV EC-WPT system with anti-offset and leakage field shielding characteristics is proposed. First, a novel five-stage plate coupler suitable for UUV is given, the ten coupling capacitors generated by the coupler are simplified, and an equivalent model of the coupler is established. Second, the EC-WPT system with dual LC compensation is taken as an example, a calculation method for system output parameters is formulated, and circuit simulation is also carried out. The electric field around the system is analyzed using the finite element method according to the electrode plate voltage obtained from simulations, so as to verify the leakage field shielding characteristics of the novel coupler. Results show that there is almost no leakage field inside the UUV in the system. Finally, an experimental device was built to verify the feasibility of the proposed scheme for wireless power supply to UUV from the aspects of energy transmission performance and anti-offset performance. In the experiment, 74 W power transmission was achieved, with an efficiency of 85.6%. When the energy receiver was offset from three dimensions, the system's output power and efficiency changed little.

Keywords: Electric-field coupled wireless power transfer (EC-WPT); underwater unmanned vehicle (UUV); anti-offset; leakage field shielding

水下无人航行器 UUV(unmanned underwater vehicle)因具有机动性高、隐蔽性好、环境适应能力强等优势受到广泛研究[1-2]。目前的 UUV 采用蓄电池作为电源，续航能力不足导致其无法满足远距

收稿日期：2023-03-02；**修回日期**：2023-08-26；**录用日期**：2023-10-20；**网络首发日期**：2023-12-19

离、长航时的任务要求，传统的接触式充电在水下有短路的风险，安全性较低，因此对 UUV 进行安全稳定的能源补给是当前需要解决的关键问题之一[3]。

无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术通过磁场、电场、微波、激光等载体实现电能的非电气接触传输[4-6]，其可以解决传统电气接触带来的诸多问题，受到研究人员的广泛关注，具有广阔的应用前景[7-8]。电场耦合无线电能传输 EC-WPT (electric-field coupled wireless power transfer)技术利用高频交变电场作为能量传输载体，实现电能的无线传输，工作时在水中产生的涡流损耗小，耦合机构具有重量轻、可塑性强等特点，并且水中相对介电常数较空气中相对介电常数高，极大提高了耦合机构间的耦合电容，有利于提升系统的传输功率和效率。目前围绕 UUV 应用的 EC-WPT 系统研究较少，文献[9]耦合机构采用固定的 4 块金属极板正对，在同侧 2 块极板之间加上隔离挡板，用来降低同侧极板自电容的同时增加正对极板的互电容，UUV 与充电站之间的能量传输距离为 2 cm，文中给出了最大效率下的参数设计方法，实验中能量传输极板效率可达 90%；文献[10]提出了用于 UUV 的双向电场耦合无线电能传输系统，逆变器和整流器均采用 GaN 器件，耦合机构采用 4 块两两正对的方形金属铝板，一、二次侧均采用 LCLC 补偿拓扑，系统频率设置为 625 kHz，实验中双向传输了 100 W 的功率，效率达到 80%以上；文献[11]给出水下具有旋转耦合机构的 EC-WPT 系统，以输出功率和效率作为优化目标，对系统参数进行了多约束、多目标优化，样机实现了 311 W 的功率传输，效率为 87.4%。现有围绕 UUV 应用的 EC-WPT 系统研究中，大多数文献在发射极板和接收极板正对之后才能稳定传输能量，未考虑 UUV 与充电站接驳过程中耦合机构可能会发生错位，导致能量传输性能发生改变的情况。

此外，无线充电系统产生的漏电场可能会干扰 UUV 内部的设备，并对周围环境造成影响，在常规 EC-WPT 系统的漏电场屏蔽方面，文献[12]提出 1 种六电容耦合机构，在传统四极板耦合机构上方和下方分别加额外的屏蔽极板，在无偏移情况下，将漏电场安全区域从 0.9 m 缩短为 0.1 m；文献[13]中耦合机构垂直排列，内侧极板为高压极板，外侧极板为低压极板，配合使用提出的系统参数设计方法，在保证系统具有良好传输性能的同时，能够有效抑制系统耦合机构周围漏电场的大小。上述研究主要围绕空气环境中对周围环境漏电场的抑制，对于水下 EC-WPT 系统电场屏蔽研究较少。

针对上述问题，本文提出 1 种具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的 UUV 电场耦合无线电能传输系统，给出五极板式新型耦合机构，对耦合电容进行分析并化简，建立耦合机构模型；以双侧 LC 补偿的 EC-WPT 系统为例给出系统输出参数计算方法，并进行电路仿真，根据仿真得到的极板电压对系统发射的电场进行有限元分析，验证新型耦合机构的电场屏蔽特性，并在极板激励电压相同的情况下，与传统耦合机构的电场屏蔽效果进行对比；最后搭建实验装置，验证系统的能量传输性能及 3 个维度的抗偏移效果，通过实验验证方案的可行性和有效性。

1　新型耦合机构及建模

新型耦合机构由 5 块极板组成，其示意图如图 1 所示，其中 P_1~P_4 极板用于能量传输，P_5 极板用于电场屏蔽。耦合机构剖面如图 2 所示，图中：P_1 和 P_2 为瓦形电能发射极板，位于电能发射端，2 块发射极板相互对称，圆弧半径为 r_1，圆心角为 α，长度为 l_1；P_3 和 P_4 为瓦形电能接收极板，位于电

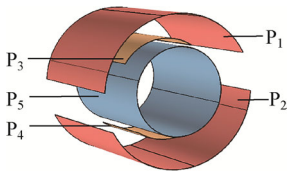


图 1　新型耦合机构示意

Fig. 1 Schematic of novel coupler

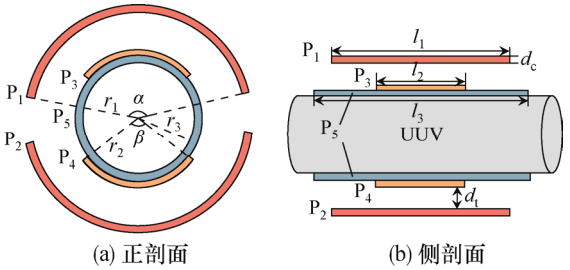


图 2 耦合机构剖面

Fig. 2 Cross-section of coupler

能接收端，2 块接收极板相互对称，圆弧半径为 r_2，圆心角为 β，长度为 l_2；P_5 为圆柱形电场屏蔽极板，环绕于 UUV 表面，长度为 l_3；极板厚度均为 d_c，P_1~P_3 和 P_2~P_4 之间的距离为 d_t，即能量传输距离。

在实际应用中，电能发射极板 P_1 和 P_2 固定于充电基站，电能接收极板 P_3 和 P_4 及屏蔽极板 P_5 固定在 UUV 上，随 UUV 自由移动，如果实际情况中 UUV 的外壳为金属，则金属壳体可以直接充当屏蔽极板 P_5。为了避免极板与水直接接触导电，需要在每块极板表面加上绝缘层，接收极板与屏蔽极板间距较小，可以在它们之间用 1 层绝缘材料来保证绝缘。耦合机构的耦合电容主要与极板正对面积有关，而发射极板比接收极板大，并且发射极板的圆心角 α 比接收极板的圆心角 β 大，因此能量接收端在一定范围内移动或者旋转时，发射极板与接收极板之间的正对面积仍然保持不变，有利于提高系统抗偏移性；耦合机构的漏电场主要集中在 P_1 和 P_2 之间的区域，而设备内部仪器位于圆柱屏蔽极板 P_5 中间，且屏蔽极板的长度 l_3 大于发射极板的长度 l_1，有利于消除高频电场对设备内部仪器的影响。

文中所述的金属极板表面均进行了绝缘处理，不与水直接接触，2 块极板在水中形成交变电场实现能量传输，与空气中 EC-WPT 系统的区别在于传输介质变成了水介质，因此在水下的建模方法与空气中建模方法类似。由于水的相对介电常数为 81，对于 2 块极板例如 P_3 和 P_4，即使它们之间无正对面积，但是由于边缘效应，它们之间仍然会产生交叉耦合电容，因此在对耦合机构进行建模时要考虑所有的交叉耦合电容。耦合机构 5 块极板共形成 10 个电容，如图 3 所示，图中：C_{13} 和 C_{24} 分别为极板 P_1、P_3 和 P_2、P_4 形成的电容，它们构成能量传输通道，其大小对系统能量传输有着重要影响；C_{12} 和 C_{34} 分别为极板 P_1、P_2 和 P_3、P_4 形成的电容，它们能够补偿发射端和接收端的一部分电感；C_{14} 和 C_{23} 分别为极板 P_1、P_4 和 P_2、P_3 形成的电容，它们的存在会对能量传输造成干扰，但是由于屏蔽极板 P_5 的隔断，它们的值很小；C_{15}、C_{25}、C_{35} 和 C_{45} 为屏蔽极板 P_5 与其他 4 块极板形成的电容，进一步得到图 4 所示电容模型。

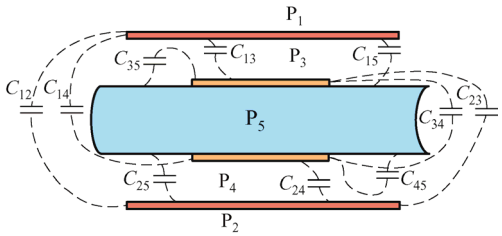


图 3 极板间交叉耦合电容

Fig. 3 Cross coupling capacitance between plates

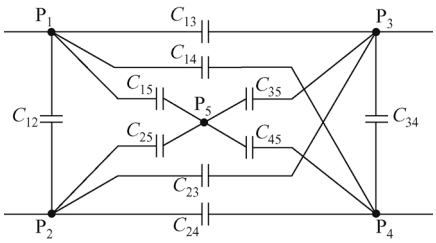
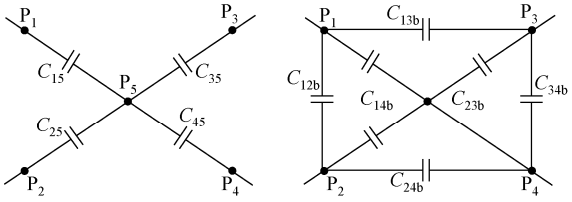


图 4 耦合机构交叉耦合电容模型

Fig. 4 Cross coupling capacitance model of coupler

与文献[13]所示 EC-WPT 系统的六电容模型相比，图 4 所示的交叉耦合电容模型增加了由极板 P_5 引入的 4 个电容，为了对系统进行分析，需要对其进行化简。屏蔽极板 P_5 与其他 4 块极板形成的四端星型如图 5(a)所示，可以将其化简为图 5(b)所示的四端网型电容网络，图中：C_{12b}、C_{13b}、C_{14b}、C_{23b}、C_{24b} 和 C_{34b} 为极板 P_5 与其他 4 块极板的网型等效电容。四端星型–四端网型电容网络变换可表示为

$$\begin{cases} C_{12b}=\dfrac{C_{15}C_{25}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \\ C_{13b}=\dfrac{C_{15}C_{35}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \\ C_{14b}=\dfrac{C_{15}C_{45}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \\ C_{23b}=\dfrac{C_{25}C_{35}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \\ C_{24b}=\dfrac{C_{25}C_{45}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \\ C_{34b}=\dfrac{C_{35}C_{45}}{C_{15}+C_{25}+C_{35}+C_{45}} \end{cases} \tag{1}$$



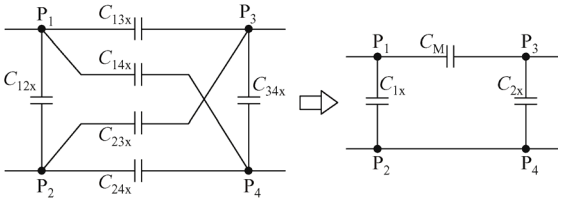
(a) 四端星型　　(b) 四端网型

图 5　P_5 与能量极板形成的电容网络模型

Fig. 5 Capacitive network model formed by plate P_5 and other plates

由图 5(b)可见，屏蔽极板 P_5 与 4 块能量传输极板 P_1~P_4 等效的四端网型电容模型结构与 4 块能量传输极板 P_1~P_4 之间形成的电容模型结构一致，因此可以对其进行叠加，得到图 6(a)所示的耦合机构六电容等效模型，图中：C_{12x}、C_{13x}、C_{14x}、C_{23x}、C_{24x} 和 C_{34x} 为 5 块极板形成的网型等效总电容，其计算式为

$$\begin{cases} C_{12x}=C_{12}+C_{12b}，\ C_{13x}=C_{13}+C_{13b} \\ C_{14x}=C_{14}+C_{14b}，\ C_{23x}=C_{23}+C_{23b} \\ C_{24x}=C_{24}+C_{24b}，\ C_{34x}=C_{34}+C_{34b} \end{cases} \tag{2}$$



(a) 六电容模型　　(b) π型模型

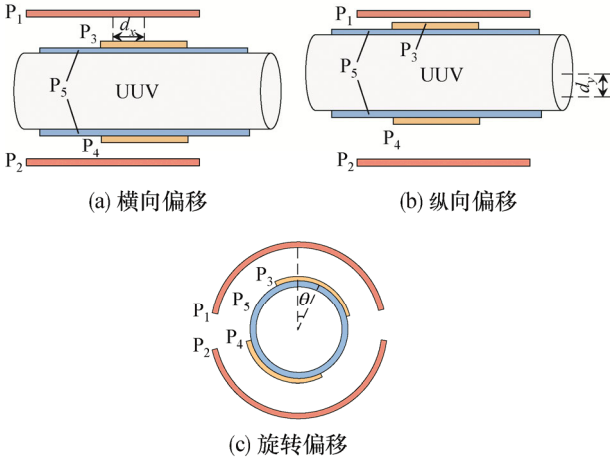
图 6　耦合机构等效模型

Fig. 6 Equivalent model of coupler

进一步将六电容模型等效为 π 型模型，如图 6(b)所示，图中：C_{1x} 和 C_{2x} 为自电容，可以用于补偿外部电感；C_M 为互电容，其大小是能量传输的重要影响因素，其计算式[14]为

$$\begin{cases} C_M=\dfrac{C_{13x}C_{24x}-C_{14x}C_{23x}}{C_{13x}+C_{14x}+C_{23x}+C_{24x}} \\ C_{1x}=C_{12x}-C_M+\dfrac{(C_{13x}+C_{14x})(C_{23x}+C_{24x})}{C_{13x}+C_{14x}+C_{23x}+C_{24x}} \\ C_{2x}=C_{34x}-C_M+\dfrac{(C_{13x}+C_{23x})(C_{14x}+C_{24x})}{C_{13x}+C_{14x}+C_{23x}+C_{24x}} \end{cases} \tag{3}$$

当水下移动设备进入充电区域时可能会偏离能量发射基站的中心位置，从而产生图 7(a)所示横向偏移、图 7(b)所示纵向偏移及图 7(c)所示旋转偏移，其中横向偏移距离为 d_x，纵向偏移距离为 d_y，旋转偏移角度为 θ。极板 P_1、P_3 和 P_2、P_4 正对面积最大、相隔距离较近，且水介质相对介电常数较大，因此所形成的 C_{13} 和 C_{24} 电容较大，当发生一定范围内横向偏移和旋转偏移时，极板 P_1、P_3 和 P_2、P_4 正对面积和距离均未改变，因此 C_{13} 和 C_{24} 几乎无变化；纵向偏移时，极板 P_1、P_3 和 P_2、P_4 正对面积未改变，距离变化趋势相反，导致 C_{13} 和 C_{24} 变化趋势相反。上述变化均与极板 P_5 无关，结合电容计算式(2)和式(3)，在计算互电容 C_M 时变化量刚好可以抵消，因此从理论分析文中耦合机构在一定范围内偏移时，互电容 C_M 变化较小，对传输功率和效率影响较小。



(a) 横向偏移　　(b) 纵向偏移

(c) 旋转偏移

图 7　耦合机构偏移示意

Fig. 7 Schematic of coupler offset

2 系统建模及仿真

双侧 LC 补偿网络的 EC-WPT 系统具有拓扑结构简单、无功元件较少等优势[15]，因此本文采用其作为谐振拓扑。图 8 为用于 UUV 的双侧 LC 型 EC-WPT 系统拓扑，电能发射端由供电电源 E_{dc}、全桥型逆变器、谐振电感 L_1、谐振电容 C_1、P_1 和 P_2 发射极板组成；电能接收端由 P_3 和 P_4 接收极板、谐振电容 C_2、谐振电感 L_2、整流滤波器与负载电阻 R_L 组成。图中：u_{in} 为谐振拓扑输入等效电压，即逆变输出等效电压；i_{in} 为谐振拓扑输入电流；C_f 为输出滤波电容。结合上文对耦合机构的分析，利用式(1)~式(3)对耦合机构进行等效，得到图 9 所示等效电路，图中：u_1 和 u_2 分别为谐振电容 C_1 和 C_2 两端的电压；u_o 为系统输出电压；Z_{in} 为系统等效总输入阻抗；Z_1~Z_4 为不同节点的二端口等效阻抗；R_{L_1} 和 R_{L_2} 为补偿电感 L_1 和 L_2 的内阻；R_{eq} 为整流滤波和负载的等效电阻，$R_{eq}=8R_L/\pi^2$。

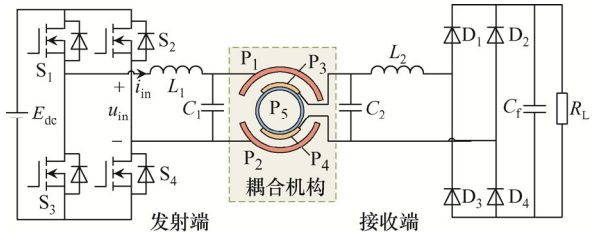


图 8 用于 UUV 的 EC-WPT 系统拓扑

Fig. 8 Topology of EC-WPT system for UUV

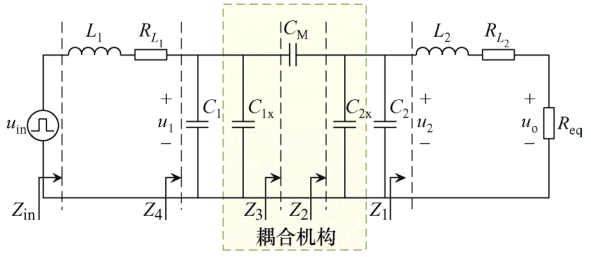


图 9 等效电路

Fig. 9 Equivalent circuit

为了使系统工作在零相角 ZPA(zero phase angle)状态，结合式(3)，令 $C_{11}=C_1+C_{1x}$、$C_{22}=C_2+C_{2x}$，系统参数应满足谐振关系[13]，即

$$\begin{cases}\omega=\dfrac{1}{\sqrt{L_1C_{p1}}}=\dfrac{1}{\sqrt{L_2C_{p2}}}\\ C_{p1}=\dfrac{C_{11}C_{22}+C_{11}C_M+C_{22}C_M}{C_M+C_{22}}\\ C_{p2}=\dfrac{C_{22}C_{11}+C_{22}C_M+C_{11}C_M}{C_M+C_{11}}\end{cases}\tag{4}$$

式中：$\omega=2\pi f$，f 为系统工作频率；C_{p1} 和 C_{p2} 分别为发射端和接收端等效总补偿电容；C_{11} 和 C_{22} 分别为发射端和接收端实际补偿电容与耦合机构自电容的叠加。

系统工作时处于谐振状态，谐振补偿网络可滤除电路中的大部分高次谐波，因此采用基波近似 FHA(fundamental harmonics approximation)法进行分析，逆变输出电压 u_{in} 的基波分量 u_p 的均方根可以表示为 $U_p=2\sqrt{2}E_{dc}/\pi$，结合图 9 等效电路，得到各部分的阻抗分别为

$$\begin{cases}Z_1=R_{eq}+\mathrm{j}\omega L_2+R_{L_2}\\ Z_2=Z_1//\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{22}}\\ Z_3=Z_2+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_M}\\ Z_4=Z_3//\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_{11}}\\ Z_{in}=Z_4+\mathrm{j}\omega L_1+R_{L_1}\end{cases}\tag{5}$$

进一步计算得到各部分电压为

$$\begin{cases}u_1=\dfrac{Z_4}{Z_4+\mathrm{j}\omega L_1+R_{L_1}}\cdot u_p\\ u_2=\dfrac{\mathrm{j}\omega L_2Z_2}{\mathrm{j}\omega L_2Z_2+1}\cdot u_1\\ u_o=\dfrac{R_{eq}}{R_{eq}+\mathrm{j}\omega L_2+R_{L_2}}\cdot u_2\end{cases}\tag{6}$$

结合式(4)化简得到输出电压 u_o 的计算式为

$$u_o=\frac{\omega C_MR_{eq}U_p}{a\omega^2(R_{eq}R_{L_1}+R_{L_1}R_{L_2})+b\omega^2-1}\tag{7}$$

式中：$a=C_1C_2+C_1C_M+C_2C_M$；$b=C_2L_2+C_ML_2$。

输出功率和系统效率的计算式分别为

$$P_{out}=\frac{\omega^2C_M^2R_{eq}U_p^2}{a\omega^2(R_{eq}R_{L_1}+R_{L_1}R_{L_2})+b\omega^2-1}\tag{8}$$

$$\eta=\frac{R_{\mathrm{eq}}C_{\mathrm{M}}^2}{a[a\omega^2(R_{\mathrm{eq}}R_{L_1}+R_{L_1}R_{L_2})+b\omega^2-1](R_{\mathrm{eq}}+R_{L_2})} \tag{9}$$

为了验证系统的传输功率和效率，设计 1 组耦合机构参数见表 1，在 COMSOL 中进行有限元仿真，仿真时将传输介质设置为淡水，并在耦合机构极板与水接触的部分设置 1 层绝缘材料，仿真得到 10 个交叉耦合电容，结合式(1)~式(3)的推导，得到自电容 C_{1x} 和 C_{2x}、互电容 C_{M} 的值，再根据式(4)的谐振关系，得到系统参数见表 2。基于图 8 所示拓扑，在 LT-Spice 中建立系统仿真模型，将表 2 所示系统参数代入进行仿真，得到仿真结果如图 10 所示。

表 1　耦合机构尺寸参数

Tab. 1 Size parameters of coupler

参数	数值
发射极板半径 r_1/cm	15
发射极板圆心角 α/(°)	150
发射极板长度 l_1/cm	30
接收极板半径 r_2/cm	10
接收极板圆心角 β/(°)	90
接收极板长度 l_2/cm	20
屏蔽极板半径 r_3/cm	9
屏蔽极板长度 l_3/cm	40
极板厚度 d_c/mm	1
能量传输距离 d_t/cm	5

表 2　系统参数

Tab. 2 System parameters

参数	数值	参数	数值
E_{dc}/V	80	C_1/pF	300
f/MHz	1	C_2/pF	300
L_1/μH	35.4	C_{M}/pF	391
L_2/μH	45.5	C_{1x}/pF	256.1
R_{L_1}/Ω	1.6	C_{2x}/pF	26.4
R_{L_2}/Ω	1.9	R_{L}/Ω	300

图 10 为仿真逆变输出的电压和电流及系统的输出电压波形，从图中可以看出，逆变后的电压和电流相位基本一致，表明电路中无功功率很小，当直流输入电压为 80 V 时，系统输出电压为 153 V，输出功率为 78 W，系统效率为 88.6%。仿真结果说明了上文耦合机构建模方法的正确性，同时表明本文所设计的系统具有良好的传输性能。

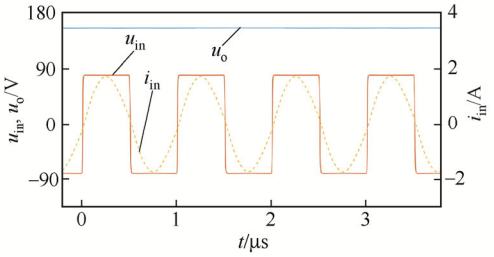


图 10　仿真逆变输出电压/电流和系统输出电压

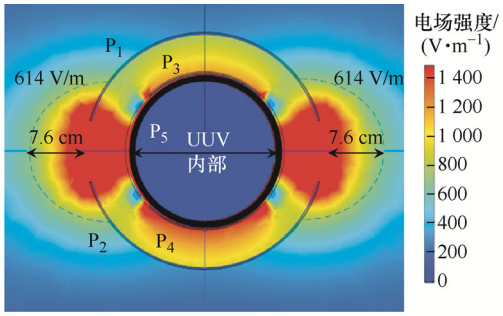
Fig. 10 Simulated inverter output voltage/current and output voltage from system

3　系统漏电场屏蔽

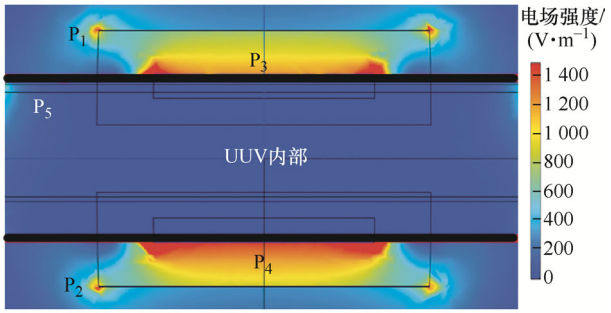
EC-WPT 系统向 UUV 内部及周围环境发射的电场关系到该技术在实际应用中的安全性。在本设计中，为了避免对 UUV 内部的仪器设备造成影响，EC-WPT 系统在 UUV 内部产生的电场强度应该很小；同时为了减小对水下生物造成的影响，系统外部产生的漏电场应尽可能小。由于能量极板分布在 UUV 的上下两侧，是漏电场的主要来源，用圆柱形金属极板包覆在 UUV 四周，相当于在 UUV 外侧形成 1 层金属屏蔽；能量传输时，电场主要集中在能量极板之间，沿屏蔽极板轴向的漏电场很小，且衰减很快，即便屏蔽极板没有形成密闭空腔，从圆柱形屏蔽极板端面进入的漏电场也会很小。综上所述，屏蔽极板起到类似于静电屏蔽的效果。

基于表 1 的耦合机构尺寸，将 COMSOL 仿真中得到的 10 个耦合机构电容代入图 8 所示拓扑，仿真得到各个极板的电压，进一步有限元仿真得到耦合机构场强分布如图 11 所示，图中均采用相同大小的刻度和范围。

由图 11 可见，由于 P_5 极板的屏蔽作用，使得 UUV 内部的电场强度很小，趋近于 0。耦合机构泄漏到周围环境的电场很小，并随着距离的增加，漏电场迅速减小，国际安全标准中对于漏电场要求为小于 614 V/m[16]，由图 11 可知，耦合机构周围 7.6 cm 以外，场强均小于 614 V/m。



(a) *X*-*Y*截面



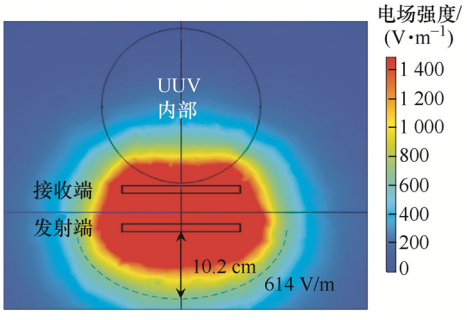
(b) *Y*-*Z*截面

图 11 新型耦合机构场强分布

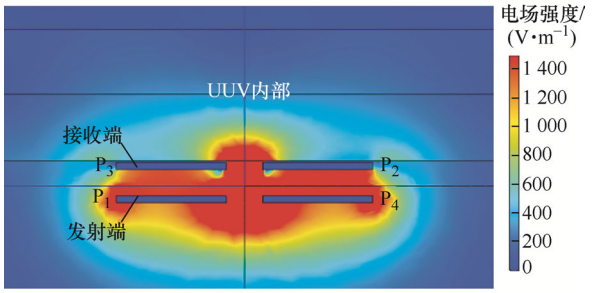
Fig. 11 Field strength distribution of novel coupler

为进行对比分析，采用文献[10]所示的耦合机构分析其漏电场的分布情况，该耦合机构由 4 块正方形极板两两正对组成，边长设置为 15 cm，传输距离 d_t 与上文保持一致，极板 P_1~P_4 的电压与新型耦合机构情况下的极板电压一致，在 COMSOL 中进行仿真，得到采用文献[10]耦合机构的系统场强分布如图 12 所示。

由图 12 可见，采用文献[10]耦合机构的系统漏电场已经泄漏到 UUV 内部，可能会对内部的仪器造成干扰，影响 UUV 的正常工作，此外，在耦合机构周围大部分区域均存在漏电场。结果表明，本文所提耦合机构对漏电场具有更好的电场屏蔽特



(a) *X*-*Y*截面



(b) *Y*-*Z*截面

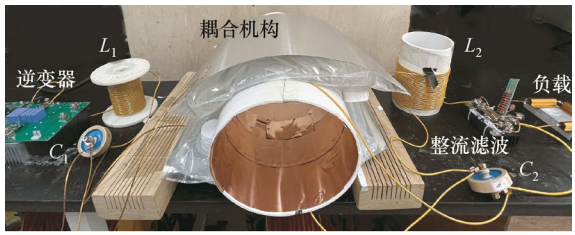
图 12 文献[10]中漏电场分布情况

Fig. 12 Distribution of leakage field of coupler in Ref. [10]

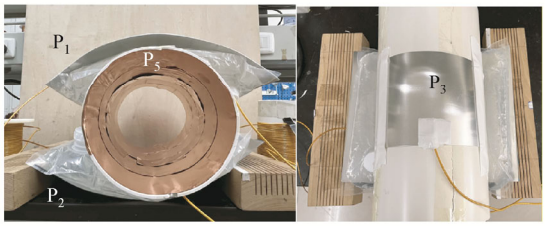
性，在保证 UUV 内部仪器不受到电场干扰的同时，对周围的漏电场也有一定的抑制效果。

4 实验验证

为进一步验证系统的能量传输性能及抗偏移性，基于图 8 所示拓扑和表 1、表 2 参数，搭建面向 UUV 的电场耦合无线电能传输实验装置如图 13(a)所示，其中耦合机构如图 13(b)所示。



(a) 实验装置



(b) 耦合机构

图 13 用于 UUV 的 EC-WPT 系统实验装置

Fig. 13 Experimental devices used in EC-WPT system for UUV

实验中使用塑料圆筒模拟 UUV 无线供电的应用场景，耦合机构尺寸见表 1，文中搭建的仅为原理样机，耦合机构尺寸比实际状况有一定比例的缩小，4 块能量传输极板采用铝板，具有重量轻、成本低、可塑性好等优势，在塑料圆筒的内部贴上 1

层铜箔，用来充当屏蔽极板 P_5，在发射极板和接收极板之间用装满淡水的储水袋隔绝，使得传输介质为淡水。除此之外，逆变器中采用了型号为 C2M0080120D 的 SiC MOSFET，具有较低的导通电阻及良好的高频特性；补偿电感 L_1 和 L_2 采用 0.04 mm×800 股的利兹线绕制而成的空心电感，可以使能量传输过程中的损耗降低；补偿电容 C_1 和 C_2 采用多层陶瓷电容，在高频下能保持容值不变，同时能承受高电压；整流器由型号为 GHX015A120S 的二极管组成。

图 14 为实验中逆变器输出的电压和电流，以及系统输出的电压波形，实际的 L_1 参数比仿真的 L_1 稍大，使得逆变输出电流稍滞后于逆变输出电压，有利于实现零电压开关 ZVS(zero voltage switching)[15]。从图 14 中可以看到，实验波形与仿真波形基本一致，实验中直流电源输入电压为 80 V 时，电源上显示输入电流为 1.08 A，可计算得到输入功率为 86.4 W；此时输出电压为 149 V，结合负载电阻计算得到输出功率为 74 W，系统效率为 85.6%。实验结果与仿真结果基本一致，表明系统具有良好的能量传输性能。实验参数下系统补偿元件的电压仿真波形如图 15 所示。

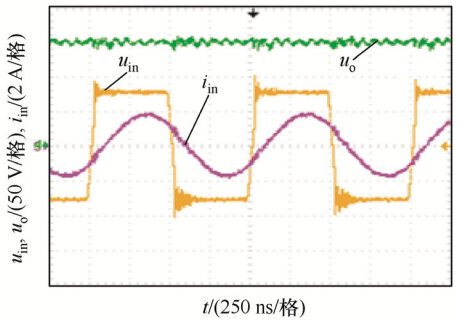


图 14　实验中逆变输出电压/电流及系统输出电压

Fig. 14 Inverter output voltage/current and output voltage from system in experiment

实验对系统的抗偏移性能进行了研究，由于耦合机构具有对称性，因此在偏移实验中对每个方向仅进行了正偏移实验，图 16 为耦合机构纵向偏移、横向偏移及旋转偏移时，系统输出功率和效率的变化。由图 16 可见，耦合机构横向偏移 4 cm 时，输出功率和效率均几乎保持不变；纵向偏移 4 cm 时，输出功率从 74.0 W 变为 72.9 W，效率从 85.6%变为 84.6%；旋转偏移 30°时，输出功率变为 72.4 W，效率变为 82.1%。综上所述，系统在偏移情况下，输出功率变化在 2 W 以内，效率变化在 2%以内，说明具有该耦合机构的 EC-WPT 系统抗偏移性能良好。

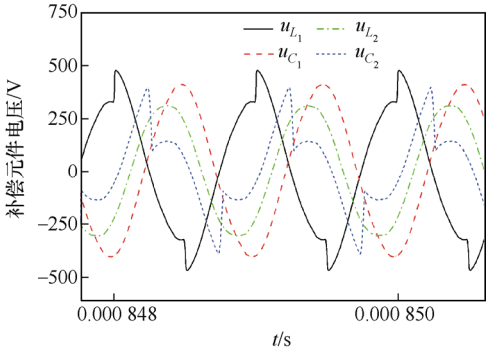
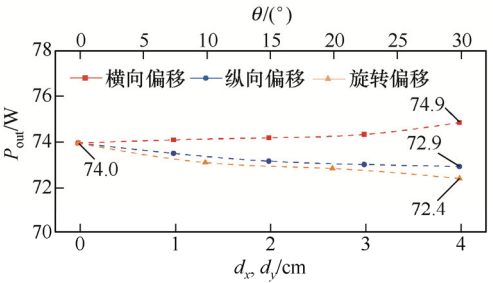
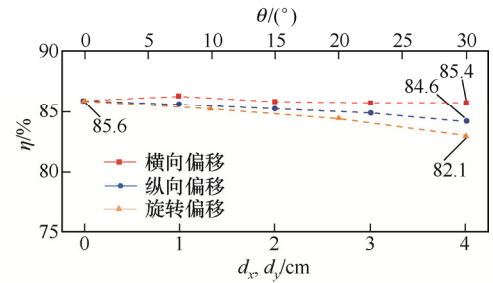


图 15　补偿元件电压波形

Fig. 15 Voltage waveforms of compensation element



(a) 输出功率随偏移变化



(b) 系统效率随偏移变化

图 16　系统能量传输性能随偏移变化

Fig. 16 Changes in energy transmission performance of system with offset

电场耦合无线电能传输技术在 UUV 应用中具有诸多优势，但是目前在该领域的研究仍相对较少，因此本文围绕 UUV 无线充电过程中抗偏移和漏电场屏蔽问题给出了 1 种解决方案。表 3 将文中系统与现有部分文献研究成果进行对比，由于传输功率及效率不同，进行抗偏移性能对比时对耦

合机构尺寸及偏移下的功率跌落进行综合评估，从传输功率、效率、抗偏移性、漏电场屏蔽等方面进行了对比，可以看出，本文给出的系统在抗偏移性和漏电场屏蔽方面具有优势。

表 3 水下 EC-WPT 系统对比

Tab. 3 Comparison among different underwater EC-WPT systems

参数	文献[10]	文献[11]	文献[17]	本文
功率/W	100.0	311.0	3.7	74.0
DC-DC 效率/%	80.15	87.40	—	85.60
输入电压/V	100	100	10	80
输出电压/V	80	106	14	149
抗偏移性能	弱	强	弱	强
漏电场屏蔽性能	弱	弱	弱	强

5 结语

本文针对 UUV 在无线供电过程中易出现位置偏移，以及系统漏电场对 UUV 内部电子设备可能造成电磁干扰的问题，提出 1 种具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的电场耦合式无线电能传输系统，设计了 1 种新型五极板式耦合机构，并建立了耦合机构模型。以双侧 LC 补偿结构的 EC-WPT 系统为例，推导了关键系统参数的计算方法，并通过电路仿真验证了方案的可行性。基于仿真获得的极板电压分布，对系统周围漏电场进行有限元分析，在极板电压相同的条件下，与传统耦合机构对比，结果表明，采用新型五极板结构的系统在 UUV 内部几乎无漏电场，展现出优异的漏电场屏蔽性能。进一步搭建实验样机，实现 74 W 的功率传输，整体传输效率达 85.6%，能量接收端沿 3 个维度偏移测试时，系统输出功率与传输效率波动较小，表现出良好的鲁棒性与抗偏移能力。实验结果验证了所提方案对 UUV 进行无线电能传输的可行性和有效性，为复杂水下环境中 UUV 的非接触式供电提供了技术支撑。

参考文献：

[1] 冯天旭, 史可, 孙跃, 等. 基于互感识别及移相角优化的全方位无线电能传输系统靶向传能方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6581-6595.
Feng Tianxu, Shi Ke, Sun Yue, et al. Targeted power transfer method for omnidirectional wireless power transfer system based on mutual inductance identification and phase-shift angle optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6581-6595. (in Chinese)

[2] 张克涵, 李鑫阳, 代凡, 等. 海洋环境无线电能系统的参数设计及优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 188-195.
Zhang Kehan, Li Xinyang, Dai Fan, et al. Design and optimization method for parameters of wireless power transfer system in marine environment [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 188-195. (in Chinese)

[3] 丰利军, 朱春波, 张剑韬, 等. 水下无人航行器水下无线充电关键技术研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(23): 159-162.
Feng Lijun, Zhu Chunbo, Zhang Jiantao, et al. Research on key technology based on wireless charging technology for unmanned underwate vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(23): 159-162. (in Chinese)

[4] 江炳蔚, 魏斌, 蒋成, 等. 电力巡检机器人移动式无线充电系统分析与验证[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 360-368.
Jiang Bingwei, Wei Bin, Jiang Cheng, et al. Analysis and verification of dynamic wireless charging system for substation inspection robot [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 360-368. (in Chinese)

[5] 郑小瑶, 江彦伟, 疏许健, 等. 宇称−时间对称电场耦合无线电能传输系统电场分布特性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 60-66.
Zheng Xiaoyao, Jiang Yanwei, Shu Xujian, et al. Study on electric-field distribution characteristics of parity-time symmetric electric-field coupled wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 60-66. (in Chinese)

[6] 王维, 王硕, 吕晓飞, 等. 电动船舶无线充电新型螺线管磁耦合机构设计与优化[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 247-257.
Wang Wei, Wang Shuo, Lü Xiaofei, et al. Design and optimization of novel solenoid magnetic coupler for electric boats wireless charging [J]. Journal of Power

Supply, 2025, 23(6): 247-257. (in Chinese)

[7] 谢诗云, 杨奕, 李恋, 等. 基于双极性耦合磁场调控的高抗偏移偏转无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4838-4852.
Xie Shiyun, Yang Yi, Li Lian, et al. Wireless power transfer system with high misalignment tolerance based on bipolar coupling magnetic-field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4838-4852. (in Chinese)

[8] 刘宇鑫, 高飞, 刘鑫, 等. 深海无人航行器双向无线充电系统的涡流损耗分析与效率优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5599-5609.
Liu Yuxin, Gao Fei, Liu Xin, et al. Analysis of eddy current loss and efficiency optimization for bidirectional underwater wireless power transfer of AUVs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5599-5609. (in Chinese)

[9] Tamura M, Murai K, Matsumoto M. Design of conductive coupler for underwater wireless power and data transfer [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(1): 1161-1175.

[10] Yang Lei, Ju Minna, Zhang Ben. Bidirectional undersea capacitive wireless power transfer system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 121046-121054.

[11] 苏玉刚, 钱林俊, 刘哲, 等. 水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2399-2410.
Su Yugang, Qian Linjun, Liu Zhe, et al. Underwater electric-filed coupled wireless power transfer system with rotary coupler and parameter optimization method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2399-2410. (in Chinese)

[12] Zhang Hua, Lu Fei, Hofmann H, et al. Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 665-675.

[13] 苏玉刚, 傅群锋, 马浚豪, 等. 电场耦合电能传输系统层叠式耦合机构漏电场抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 130-136.
Su Yugang, Fu Qunfeng, Ma Junhao, et al. Fringing electric field suppression method of electric-field coupled power transfer system with four-plate coupler [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 130-136. (in Chinese)

[14] Huang L, Hu A P. Defining the mutual coupling of capacitive power transfer for wireless power transfer [J]. Electronics Letters, 2015, 51(22): 1806-1807.

[15] Lu Fei, Zhang Hua, Hofmann H, et al. A double-sided LC-compensation circuit for loosely coupled capacitive power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1633-1643.

[16] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz: IEEE C95.1-2005 [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.

[17] 李争, 高世豪, 张岩, 等. 基于电场感应的水下无线电力传输[J]. 河北科技大学学报, 2018, 39(6): 552-558.
Li Zheng, Gao Shihao, Zhang Yan, et al. Underwater radio power transmission based on electric field induction [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(6): 552-558. (in Chinese)



钱林俊

作者简介：

钱林俊(1998—　)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：水中兵器能源技术。E-mail：921187520@qq.com。

于博泉(1987—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：水中兵器能源技术。E-mail：15969418330@139.com。

刘亚兵(1989—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：水中兵器能源技术。E-mail：864992671@qq.com。

王元奎(1978—　)，男，博士，研究员。研究方向：水中兵器能源技术。E-mail：1656392500@qq.com。

胡利民(1971—　)，男，硕士，研究员。研究方向：水中兵器能源技术。E-mail：18223093393@163.com。

(责任编辑：耿越)