

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242052

基于共面中继线圈的水下无线电能与信息并行传输系统

邓仁为¹ 苏玉刚^{1,2} 胡宏晟^{1,2} 杨雪峰¹ 费迎军¹

(1. 重庆大学自动化学院 重庆 400043

2. 国家无线电能传输技术国际联合研究中心 重庆 400043)

摘要 为了提升海水环境中共享通道式磁场耦合无线电能与信息并行传输系统的传输距离,并且实现水下环境中较大功率电能传输条件下信息的高速双向传输,该文提出一种基于共面中继线圈的水下无线电能与信息并行传输系统,给出了系统的电路拓扑;并通过建模分析,给出电能传输通道与信息传输通道的等效电路模型;在上述研究的基础上,给出系统的参数设计方法;最后搭建模拟海水环境下的实验装置,验证该文所提出的系统及方法能够较好地提升系统在水下环境中的传输距离、传输功率和信息的双向传输速度。实验结果表明,系统在模拟海水环境中实现了传输距离 50 cm,输出功率 5.33 kW,信息传输速度 5.68 Mbit/s。

关键词: 无线电能与信息并行传输 水下环境 磁场耦合 共面中继线圈

中图分类号: TM724

0 引言

近年来,海洋监测与海洋能源探测等技术的长足发展,对水下用电设备(例如,水下传感器、水下自主潜航器、水下遥控设备等)的灵活、安全供电提出了更高的要求。现有电能补给常采用线缆湿插拔、人工打捞上岸等方式^[1],这些方式存在寿命短、价格高以及维护不方便等不足^[2]。无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术因其方便、灵活等优点,成为一种新的解决方案,目前的研究主要为磁场耦合式无线电能传输(Magnetic-field Coupled Wireless Power Transfer, MC-WPT)技术^[3-5]和电场耦合式无线电能传输(Electric-field Coupled Wireless Power Transfer, EC-WPT)技术^[6-8]。MC-WPT技术因其起步较早,相关专家学者已经在全方位无线电能传输^[9]、金属对MC-WPT系统的影响分析与抑制^[10]、MC-WPT系统抗偏移设计^[11-12]以及水下特殊环境中的应用^[13]等方面取得了研究成果。同时,因水下用电设备需要与基站之间

进行信息交互从而实现指令下发、数据回传、闭环控制等,磁场耦合式水下无线电能与信息并行传输(Magnetic-field Coupled Underwater Simultaneous Wireless Power and Information Transfer, MC-USWPIT)技术成为了新的热点研究方向^[14-15]。

MC-USWPIT系统按照电能传输通道与信息传输通道是否共用唯一传输通道可分为共享通道式和分离通道式。目前在MC-USWPIT技术方面的研究主要是针对共享通道式。文献[16]针对机器鱼在海底电缆自主巡检时面临的电能补给和信息传输问题,基于时分复用方法提出了一种可重新配置谐振网络,搭建了具有无线充电功能和双向信息传输的MC-USWPIT系统,其可在不同的时间周期分别利用不同谐振网络传输电能和信息,实现了传输功率 300 W,信息正向和反向传输速度 41 kbit/s 和 10 Mbit/s。文献[17]针对无人潜航器应用中无线电能传输通道与信息传输通道之间的干扰以及信息传输通道的电压应力过大的问题,在螺线型耦合机构的基础上,提出了双侧LLCC谐振网络并采用部分线圈注入信息的方法,搭建了基于频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的MC-USWPIT系统,信息调制方式为频移键控,系统实现了传输距

离 3 cm、电能传输 518 W 条件下,信息正向和反向传输速度分别达到 500 kbit/s 和 700 kbit/s。在此基础上,文献[18]采用弧形耦合机构,利用高阶电路的固有特性进行信道构建,搭建了采用最小频移键控调制和相干解调技术的 MC-USWPIT 系统,实现了传输距离 6 cm、电能传输 1 kW,信息正向和反向传输速度均为 1 Mbit/s。文献[19]针对水下潜航器系统单发射多接收的应用需求,提出了一种新型多向发射线圈,为放置在不同方向的多个弧形接收线圈供电,利用阻波网络减少电能传输和信息传输通道间的干扰,并利用遗传算法对参数进行优化,实验装置实现了 4 个负载条件下,传输距离 5 cm,电能传输 200 W,信息传输速度 30 kbit/s。

从目前的研究成果可以看出,MC-USWPIT 系统在传输距离、传输功率以及信息的传输速度方面离很多工程需求相差甚远。本文针对水下环境中基站与用电设备之间的远距离、较大功率电能传输以及高速双向信息传输的需求,在现有研究的基础上提出一种基于共面中继线圈的水下无线电能与信息传输系统。首先阐述共面中继线圈型耦合机构及系统电路拓扑,然后对系统进行分析与建模,在此基础上给出系统的参数设计方法,最后通过搭建的实验装置,验证本文所提出的系统及方法的正确性和有效性。

1 系统耦合机构与拓扑

1.1 系统耦合机构

本文所采用的四线圈型耦合机构如图 1 所示。发射端耦合机构和接收端耦合机构均由两个方形线圈 (W_1 、 W_2 和 W_3 、 W_4) 在同一平面放置组成。在 MC-USWPIT 系统中, W_1 与发射端补偿电路、逆变器以及直流电源相连, W_4 与接收端补偿电路、整流滤波电路以及用电设备相连, W_2 与发射端中继补偿电路以及发射端信息注入/提取电路相连, W_3 与接收端中继补偿电路以及接收端信息提取/注入电路相连,四个线圈之间存在交叉耦合。相对于电能传输而言,采用此耦合机构的 MC-WPT 系统的等效电路、工作特性以及分析方法都与传统的多中继 MC-WPT 系统^[20]类似,因此文中称所采用的耦合机构为共面中继线圈型耦合机构,称 W_1 和 W_4 分别为发射端与接收端的功率线圈, W_2 和 W_3 分别为发射端与接收端的中继线圈。线圈均由线径为 l_m 的利兹线均匀绕制而成。 l_1 和 l_2 分别为发射端两个线圈的边长, l_3 和 l_4 分别为接收端两个线圈的边长, d 为

系统传输距离,为减少磁泄漏,提升线圈之间的耦合性能,在发射端和接收端耦合机构的背面铺上磁心。

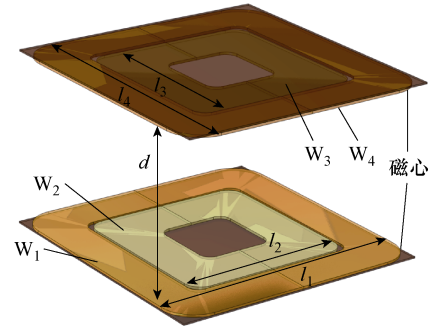


图 1 共面中继线圈型耦合机构

Fig.1 Coplanar double-coil coupler

1.2 系统拓扑

本文所提出的基于共面中继线圈的水下无线电能与信息并行传输系统拓扑如图 2 所示,因串联-串联 (Series Series, SS) 型补偿电路具有结构简单、功率密度大以及成本低等优势^[21],故本文采用 SS 型补偿。该系统主要由直流电源 U_{dc} 、电压型全桥逆变器 $S_1 \sim S_4$ 、发射端功率线圈电感 L_1 、发射端中继线圈电感 L_2 、接收端中继线圈电感 L_3 、接收端功率线圈电感 L_4 、发射端补偿电容 C_1 、发射端中继补偿电容 C_2 、接收端中继补偿电容 C_3 、接收端补偿电容 C_4 、不可控整流桥 $VD_1 \sim VD_4$ 、滤波电容 C_L 、负载等效电阻 R_L 、发射端中继串联 LC 电路 (L_{s1} 、 C_{s1})、接收端中继串联 LC 电路 (L_{s2} 、 C_{s2})、发射端信息发射电路 TX_1 、发射端信息接收电路 RX_1 、发射端阻波电容 C_{ss1} 、接收端阻波电容 C_{ss2} 、接收端信息接收电路 RX_2 、接收端信息发射电路 TX_2 以及发射端切换电路与接收端切换电路组成。

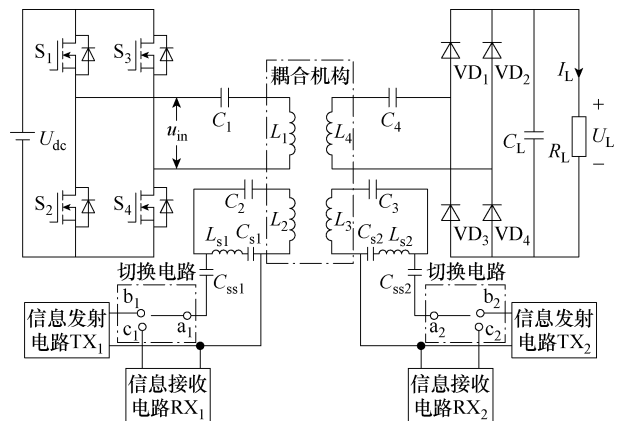


图 2 无线电能与信息并行传输系统拓扑

Fig.2 Topology of simultaneous wireless power and information transfer system

本文选择采用半双工的通信方式,主要是因为其具有容错性好、成本低、更有利于减小电能与信息

息之间的串扰等优点。信息正向传输时切换电路中的 a_1 端连接 b_1 端, a_2 端连接 c_2 端; 信息反向传输时切换电路中的 a_1 端连接 c_1 端, a_2 端连接 b_2 端。信息传输方向的切换可以通过选通芯片 CD4051、74HC153 等多路开关芯片实现。

2 系统分析与建模

MC-USWPIT 系统依赖线圈中的高频交流电产生的交变磁场在发射端和接收端之间传输电能与实现信息交互。水介质对磁场传输影响较大的因素主要是电导率, 空气、淡水和海水参数对比见表 1。从表 1 中可以看出, 海水介质与空气的电导率存在显著差异, 对于 MC-USWPIT 系统, 时变磁场在高导电性的海水中会引起较大的涡流损耗, 目前文献 [22-23] 的分析常将涡流损耗等效为涡流损耗电阻上的损耗。

表 1 空气、淡水和海水参数对比

Tab.1 Comparison of air, fresh water, and seawater parameters

	相对磁导率	电导率 ρ /(S/m)
空气	1.000 04	$10^{-15} \sim 10^{-9}$
淡水	0.999 991	0.01
海水	0.999 991	4~6

2.1 电能传输通道分析与建模

电压型全桥逆变器可将直流电压转换为方波电压, 采用基波分析法, 将其等效为电压源 u_{in} , 整流滤波电路与负载等效电阻 R_L 等效为 R_{eq} , 信息发射电路等效为电压源 u_{s1} 和 u_{s2} , 信息接收电路等效为电阻 R_{s1} 和 R_{s2} [24]。 u_{in} 与 R_{eq} [25] 分别表示为

$$\begin{cases} u_{in} = \frac{4}{\pi} U_{dc} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \\ R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \end{cases} \quad (1)$$

根据上述分析, 由图 2 的拓扑可以得到无线电能与信息并行传输系统等效电路如图 3 所示。图 3 中, $M_{12} \sim M_{34}$ 为水下环境中耦合机构线圈之间的互感, $r_1 \sim r_4$ 为考虑了海水涡流损耗的等效内阻, r_{s1} 、 r_{s2} 为串联 LC 电路的等效内阻。本系统中信息传输通道为对称结构, 信息正向传输与反向传输特性类似, 因此本文仅以信息正向传输为例进行分析。根据叠加定理, 在电能传输时, 将信息源视为短路, 列写基尔霍夫电压方程为

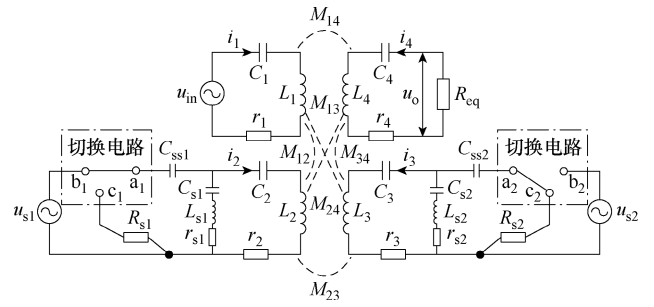


图 3 无线电能与信息并行传输系统等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of simultaneous wireless power and information transfer system

$$\begin{bmatrix} Z_1 & j\omega_p M_{12} & j\omega_p M_{13} & j\omega_p M_{14} \\ j\omega_p M_{12} & Z_2 & j\omega_p M_{23} & j\omega_p M_{24} \\ j\omega_p M_{13} & j\omega_p M_{23} & Z_3 & j\omega_p M_{34} \\ j\omega_p M_{14} & j\omega_p M_{24} & j\omega_p M_{34} & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, ω_p 为电能传输通道角频率。发射端功率线圈、发射端中继线圈、接收端中继线圈以及接收端功率线圈上的回路阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 分别为

$$\begin{cases} Z_1 = j\omega_p L_1 + \frac{1}{j\omega_p C_1} + r_1 \\ Z_2 = j\omega_p L_2 + \frac{1}{j\omega_p C_2} + r_2 + \left(j\omega_p L_{s1} + \frac{1}{j\omega_p C_{s1}} + r_{s1} \right) // \frac{1}{j\omega_p C_{ss1}} \\ Z_3 = j\omega_p L_3 + \frac{1}{j\omega_p C_3} + r_3 + \left(j\omega_p L_{s2} + \frac{1}{j\omega_p C_{s2}} + r_{s2} \right) // \left(\frac{1}{j\omega_p C_{ss2}} + R_{s2} \right) \\ Z_4 = j\omega_p L_4 + \frac{1}{j\omega_p C_4} + r_4 + R_{eq} \end{cases} \quad (3)$$

式中, “//” 代表并联。系统谐振条件满足

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} = \frac{1}{\sqrt{L_4 C_4}} \quad (4)$$

由图 3 可知, 系统电能传输通道的功率损耗 P_{loss} 主要在电感内阻上, P_{loss} 表示为

$$P_{loss} = I_1^2 r_1 + I_2^2 (r_2 + r_{s1}) + I_3^2 (r_3 + r_{s2}) + I_4^2 r_4 \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 为了减少串联 LC 电路引入的功率损耗, L_{s1} 和 L_{s2} 的内阻应尽量小, 串联 LC 电路谐振条件满足

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_{s1}C_{s1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{s2}C_{s2}}} \quad (6)$$

在满足式(6)和电感内阻 r_{s1} 、 r_{s2} 足够小的条件下,发射端和接收端中继回路串联LC电路(L_{s1} 、 C_{s1} 和 L_{s2} 、 C_{s2})在电能传输通道分析时近似短路,由此得到电能传输通道的等效电路如图4所示。

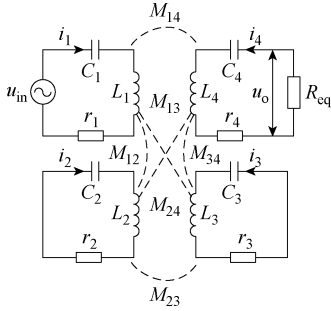


图4 电能传输通道的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of the power transfer channel

为简化系统设计,可以使用对称结构的耦合机构,即 $L_1=L_4$ 、 $L_2=L_3$ 、 $M_{12}=M_{34}$ 和 $M_{13}=M_{24}$ 。在这种情况下,系统的输出功率 P_o 与电压增益 G_p 分别为

$$\begin{cases} P_o = \left[\frac{u_{in} Y}{X^2 - Y^2 + X(R_{eq} + r_4)} \right]^2 R_{eq} \\ G_p = \frac{u_o}{u_{in}} = \left| \frac{Y R_{eq}}{X^2 - Y^2 + X(R_{eq} + r_4)} \right| \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} X = j\omega_p L_1 \left[r_1 - \frac{(k_{12}^2 + k_{13}^2)r_2 - 2k_{12}k_{13}k_{23}}{r_2^2 - k_{23}^2} \right] \\ Y = j\omega_p L_1 \left[k_{14} - \frac{-(k_{12}^2 + k_{13}^2)k_{23} + 2k_{12}k_{13}r_2}{r_2^2 - k_{23}^2} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中, k_{ij} 为耦合系数, $k_{ij} = M_{ij} / \sqrt{L_i L_j}$ 。

从上述建模与分析中可以看出,该系统的电能传输与中继线圈 L_2 和 L_3 密切相关,且通过仿真可以证明,采用该耦合机构与采用尺寸、线径以及总匝数等相同的双线圈耦合机构的电能传输系统相比较,在相同条件下以及同样的传输效率情况下,采用共面中继线圈耦合机构的系统更有利于提升系统的传输距离和传输功率。

2.2 信息传输通道分析与建模

以信息正向传输为例,根据叠加定理,在对信

息传输通道分析时,电压型全桥逆变器可视为短路。信息正向传输等效电路如图5所示。

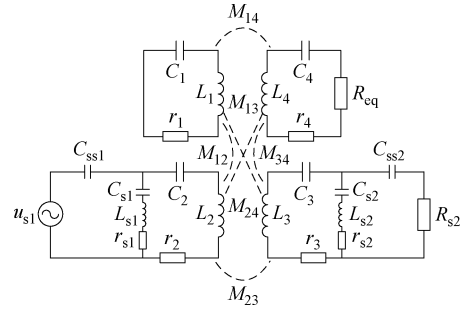


图5 信息正向传输等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of the forward information transmission

定义 γ 为电能传输通道角频率 ω_p 和信息传输通道角频率 ω_s 的比值,即

$$\gamma = \frac{\omega_p}{\omega_s} \quad (9)$$

由式(9)可得,中继线圈串联LC电路(L_{s1} 、 C_{s1} 和 L_{s2} 、 C_{s2})关于信息传输的阻抗 Z_5 和 Z_6 分别表示为

$$\begin{cases} Z_5 = j\omega_s L_{s1} + \frac{1}{j\omega_s C_{s1}} = j\omega_s L_{s1} (1 - \gamma^2) \\ Z_6 = j\omega_s L_{s2} + \frac{1}{j\omega_s C_{s1}} = j\omega_s L_{s1} (1 - \gamma^2) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,当 γ 趋近于0时,中继线圈串联LC电路在信息传输频率下的阻抗近似为电感 L_{s1} 和 L_{s2} 。

对于MC-USWPIT系统而言,系统谐振频率 f_p 一般设置为20 kHz以下,可以有效地降低海水对MC-USWPIT系统电能传输的影响^[26]。为了减少信息传输通道与电能传输通道的串扰,提升信息传输速度和传输稳定性,信息传输通道的工作频率一般设置在MHz以上^[27]。因此 γ 满足趋近于0的条件。

在满足 γ 趋近于0的条件下,信息传输通道谐振条件满足

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_{s1}C_{ss1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{s2}C_{ss2}}} \quad (11)$$

电容 C_{ss1} 和 C_{ss2} 在电能传输通道频率下的阻抗分别为

$$\begin{cases} Z_{s1} = \frac{1}{j\omega_p C_{ss1}} = \frac{1}{j\omega_s \gamma C_{ss1}} \\ Z_{s2} = \frac{1}{j\omega_p C_{ss2}} = \frac{1}{j\omega_s \gamma C_{ss2}} \end{cases} \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 当 γ 趋近于 0 时, 电容 C_{ss1} 和 C_{ss2} 在电能传输通道频率下的阻抗非常大, 有助于减小电能传输通道与信息传输通道之间的串扰, 简化较大功率电能传输条件下信息传输通道的设计。

电容 $C_1 \sim C_4$ 通常为 nF 级, 对频率为 MHz 级的信息载波而言, 可视为短路^[28]。基于以上分析, 可以得到简化的信息传输通道的等效电路如图 6 所示。图中, $r_{eq1} = r_1 + r_2$, $r_{eq2} = r_3 + r_4$ 。

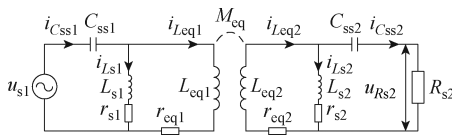


图 6 简化的信息传输通道的等效电路
Fig.6 Equivalent circuit of the information transfer channel

根据文献[29]的分析方法, 发射端等效自感 L_{eq1} 、接收端等效自感 L_{eq2} 、等效互感 M_{eq} 的表达式为

$$\begin{cases} L_{eq1} = L_1 + L_2 + 2M_{12} \\ L_{eq2} = L_3 + L_4 + 2M_{34} \\ M_{eq} = \frac{R_{s2}}{\omega_s} \left| \frac{u_{s1}}{u_{Rs2}} \right| \end{cases} \quad (13)$$

为了简化分析, 忽略线圈内阻, 可以得到信息传输通道的电压增益 G_s 为

$$G_s = \left| \frac{M_{eq} R_{s2}}{j\omega_s L_{s1}^2 - (L_{eq2} + L_{s1}) R_{s2}} \right| \quad (14)$$

3 系统参数设计方法

本文所提出的系统设计方法, 根据系统输出功率 P_o 、传输距离 d 的需求及耦合机构安装尺寸的限制, 给出系统的谐振频率 f_p , 系统工作频率 f , 信息传输频率 f_s , 耦合机构线圈匝数 $N_1 \sim N_4$, 耦合机构边长 $l_1 \sim l_4$, 线圈自感 $L_1 \sim L_4$, 补偿电容 $C_1 \sim C_4$, 线圈互感 $M_{12} \sim M_{34}$ 、串联 LC 电路的 L_{s1} , C_{s1} 和 L_{s2} , C_{s2} , 阻波电容 C_{ss1} , C_{ss2} 。基于第 2 节的分析, 给出系统的参数设计流程如图 7 所示。

图 7 中, 系统谐振频率 f_p 根据文献[26]的分析方法进行设置; 系统工作频率 f 按照文献[20]中多中继线圈工作频率的计算方法, 选用输入输出电压比 $G_p=1$ 的较低的频率点为系统的工作频率; 系统信息传输通道频率 f_s 根据文献[27]的分析方法进行设置, 尽量满足 γ 较小的条件。

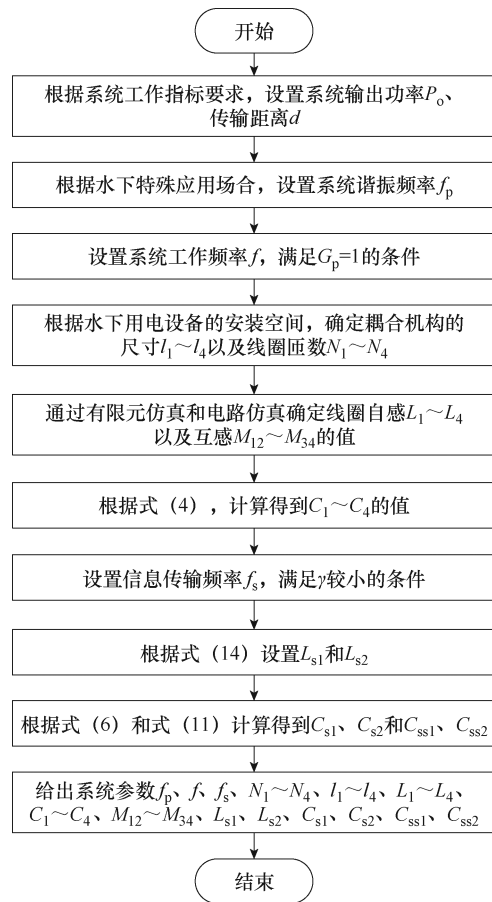


图 7 系统的参数设计流程

Fig.7 Flow chart of the system parameter design

4 实验验证

4.1 实验装置

为验证本文所提出的基于共面中继线圈的水下无线电能与信息并行传输系统及参数设计方法的正确性和有效性, 根据图 2 的系统拓扑和图 7 的参数设计方法搭建了一套输出功率为 5 kW 的实验装置, 该实验装置的系统参数见表 2。表中, 自感 $L_1 \sim L_4$ 以及互感 $M_{12} \sim M_{34}$ 采用水密引出线, 将耦合机构置于水中, 由 LCR-8230 电桥测试仪测量得到; 其他元件参数在空气环境中测量得到。为了减小海水引起的涡流损耗, 以及尽量满足系统设计中要求 γ 尽量小的条件, 使系统具有更好的能信同传性能, 系统的工作频率选择 10.7 kHz。实验装置在空气中的示意图如图 8 所示, 可以直观地说明系统的组成。

实验装置中所采用的直流电源型号为 IT-M3912D-800-48, 电子负载的型号为 N35218-1500-40, 电压型全桥逆变器采用的开关管 MOSFET 的型号为 C3M0021120K, 整流器由 4 个 SiC 的二极管 GHXS030A120S 组成, 采用 100 mm×100 mm×5 mm

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

参 数	数 值
l_1/mm	1 000
l_2/mm	720
l_3/mm	720
l_4/mm	1 000
d/mm	500
P_0/kW	5
f/kHz	10.7
$L_1/\mu\text{H}$	221.97
$L_2/\mu\text{H}$	166.89
$L_3/\mu\text{H}$	166.13
$L_4/\mu\text{H}$	219.53
C_1/nF	792.31
C_2/nF	1053.45
C_3/nF	790.98
C_4/nF	1 059.03
R_1/Ω	10
C_{ss1}/pF	1.22
N_1	9
N_2	10
N_3	10
N_4	9
l_m/mm	7.5
$M_{12}/\mu\text{H}$	83.01
$M_{13}/\mu\text{H}$	20.73
$M_{14}/\mu\text{H}$	30.35
$M_{23}/\mu\text{H}$	16.48
$M_{24}/\mu\text{H}$	21.15
$M_{34}/\mu\text{H}$	84.98
$L_{s1}/\mu\text{H}$	91.36
$L_{s2}/\mu\text{H}$	92.57
$C_{s1}/\mu\text{F}$	2.45
$C_{s2}/\mu\text{F}$	2.44
f_s/MHz	15
C_{ss2}/pF	1.32

的铁氧体磁心满铺于线圈背面。发射端和接收端的信息发射/接收电路选择两块型号为 LW-MPA223 电力通信模块，模块通过网线与上位机（Personal Computer, PC）相连，模块上的 L 线与 N 线双绞后通过滤波网络与中继线圈相连，模块与 PC 整体构

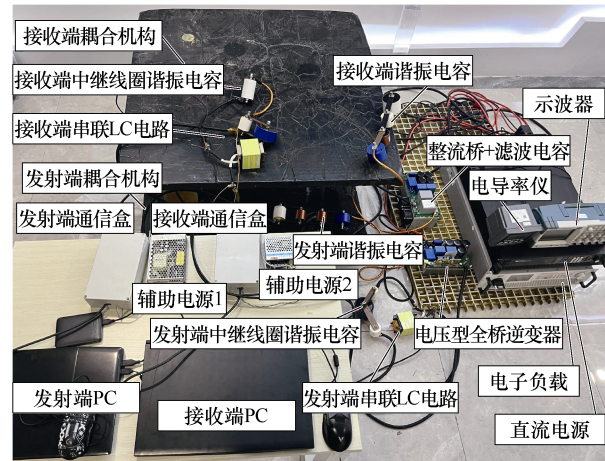


图 8 实验装置在空气中的示意图

Fig.8 Experimental setup in air

成信息发射/接收部分。本文信息调制方式采用正交 OFDM，OFDM 为多载波调制技术的一种，其将单载波串行信息流转换为多载波并行信息流，有利于提升信息传输速度^[30-31]。实验中信息传输方向的改变通过手动方式切换。

置于模拟海水测试环境的耦合机构如图 9 所示，发射端和接收端的功率线圈与中继线圈均采用 Ausbond150 双组份环氧树脂灌封胶进行水密处理，采用在淡水中加入海盐的方式模拟海水，电导率由型号为 SUP-8.0 的电导率仪测量。

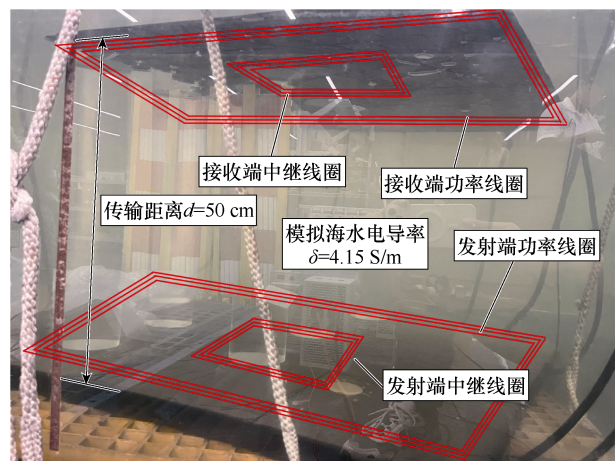


图 9 置于模拟海水环境中耦合机构

Fig.9 Coplanar double-coil coupler in simulated seawater

4.2 实验结果

在电导率为 4.15 S/m，传输距离为 50 cm 的模拟海水实验环境中，仅有电能传输通道的电压型全桥逆变器输出电压和电流及整流器前的输入电压和电流波形如图 10 所示，系统工作于较好的谐振状态。电流波形略微滞后于电压波形，系统呈现弱感

性，便于系统实现零电压软开关（Zero Voltage Switching, ZVS）^[7]。

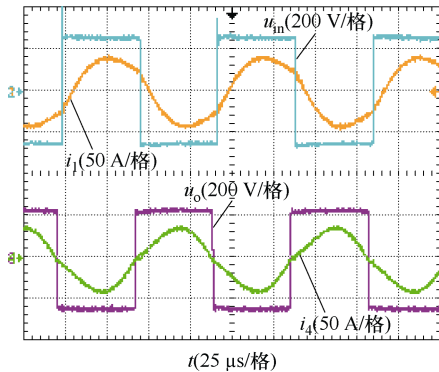


图 10 电压 u_{in} 、 u_o 和电流 i_1 、 i_4 波形（无信息传输通道）

Fig.10 Voltage u_{in} , u_o and current i_1 , i_4 waveforms (without information transfer channel)

系统传输功率及效率由型号为 PW8001 的功率分析仪测量，功率分析仪显示界面如图 11 所示。系统输入功率为 6.082 6 kW，系统输出功率为 5.179 4 kW，电能传输效率为 85.150%。

U_{dc6}	228.145 V	输出电压
I_{dc6}	22.7006 A	输出电流
P_6	5.1794 kW	输出功率
U_{dc7}	222.626 V	输入电压
I_{dc7}	27.3241 A	输入电流
P_7	6.0826 kW	输入功率
η_1	85.150%	系统传输效率

图 11 功率分析仪显示界面（无信息传输通道）

Fig.11 Power analyzer display interface (without information transfer channel)

有信息传输通道并有信息正向传输时，电压型全桥逆变器输出电压和电流及整流器前的输入电压和电流波形如图 12 所示。从实验波形可以看出，加

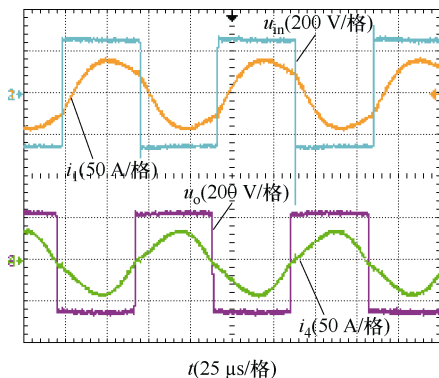


图 12 电压 u_{in} 、 u_o 和电流 i_1 、 i_4 波形（有信息传输）

Fig.12 Voltage u_{in} , u_o and current i_1 , i_4 waveforms (with information transfer)

入信息传输对电能传输的影响很小。

具有信息传输时功率分析仪的显示界面如图 13 所示。加入信息传输通道后，系统输入功率为 6.377 3 kW，系统输出功率为 5.329 9 kW，电能传输效率为 83.577%。

U_{dc6}	231.493 V	输出电压
I_{dc6}	23.0213 A	输出电流
P_6	5.3299 kW	输出功率
U_{dc7}	228.338 V	输入电压
I_{dc7}	27.9317 A	输入电流
P_7	6.3773 kW	输入功率
η_1	83.577%	系统传输效率

图 13 功率分析仪显示界面（有信息传输）

Fig.13 Power analyzer display interface (with information transfer)

由于实验系统的信号载波频率很高，而且采用的是 OFDM 调制方式，难以直接从实验测试波形中直接观察到信息的传输速度和误码率，所以本文参考文献[25]中的展示方法，在实验中通过两台 PC 开展系统信息并行传输工作性能的测试。为直观展示信息传输速度，在两台 PC 间利用信息传输通道构建局域网，基于此局域网构建共享文件夹，进行文件的上传与下载，通过观察接收文件夹写入文件的传输速度以及核对源文件与接收文件是否一致来验证系统信息传输通道的工作性能。

在电能输出功率为 5.33 kW 情况下，信息接收端 PC 显示界面如图 14 所示，可以看出 PC 测得的信息传输速度为 710 KB/s（5.68 Mbit/s）。

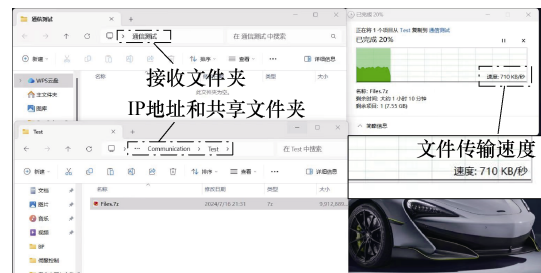


图 14 信息接收端 PC 显示界面

Fig.14 The PC display interface of the information receiver

进一步地，模拟海水电导率为 4 S/m，并保证系统输出功率基本保持在 5 kW，测试了系统传输距离为 30、40 和 50 cm 条件下的工作性能；同时也测试了系统在传输距离为 50 cm，并保证系统输出功率基本保持在 5 kW，模拟海水电导率为 4、5 和 6 S/m 条件下的工作性能，测试结果见表 3。值得一提的是，在做传输距离改变的实验时，由于系统的

耦合情况会随传输距离改变发生较大变化,系统的参数需要按照本文所提出的设计方法进行重新设置。

表3 系统在不同条件下的工作性能

Tab.3 Performance of the system under different conditions

电导率/ (S/m)	传输 距离/cm	传输功率/kW	传输效率(%)	传输速度/ (Mbit/s)
4	30	5.14	89.84	8.72
4	40	5.11	87.10	7.07
4	50	5.14	85.54	5.69
5	50	5.12	82.10	3.10
6	50	5.13	81.38	2.38

从表3中可以看出,在同样的输出功率以及电导率不变的情况下,系统的电能传输效率和信息传输速度都随距离的减小而增加,特别是信息传输速度,在30 cm时达到了1 090 KB/s (8.72 Mbit/s)。而在同样的输出功率以及传输距离不变的情况下,随着模拟海水电导率的增加,海水引发的涡流损耗增大,系统的电能传输效率和信息传输速度都随着电导率的增加而下降,但是电能传输效率仍达到81.38%,信息传输速度达到298 KB/s (2.38 Mbit/s),系统仍然具有较好的电能传输性能和较高的信息传输速度。上述实验也进一步证明了在海水环境下,同时提升系统的传输功率、传输距离和信息传输速度的难度非常大。

本文在实验过程中通过手动切换的方式改变信息的传输方向,对上述信息正向传输时的实验内容也同样进行了测试,信息反向传输下的测试结果与信息正向传输下的测试结果类似。

表4给出了本文所提出的系统工作性能与目前相关参考文献中所提出的水下环境中共享通道式系统的工作性能比较。从表4中可以看出,本文提出的系统在传输距离、电能传输功率以及信息传输速度方面都得到了较大提升。当然,目前发表的文献关于MC-USWPIT系统的应用背景和耦合机构都存在较大差异,难以在相同的情况下进行比较。本文的耦合机构与文献[18]较为接近,可以通过距径比(传输距离与耦合机构半径或边长的比值)的大小进行比较,一般情况下,距径比越大,系统性能的提升难度越大。本文耦合机构距径比约为0.5,而文献[18]耦合机构距径比约为0.28,可以看出,本文所提出的系统在较高距径比的条件下实现了系统的传输距离、电能传输功率以及信息传输速度的同时提升。

表4 性能比较

Tab.4 Performance comparison

文献	传输 距离/cm	电能传输 功率/W	信息传输速度/ (kbit/s)
[17]	3	518	500, 700
[18]	6	1 000	1 000
[19]	5	200	30
本文	50	5 330	5 550

5 结论

本文的研究工作主要围绕海水环境下无人潜航器等用电设备的快速无线电能补给以及高速双向信息传输展开,希望在较大的传输距离下,同时实现较大功率的电能传输和信息的高速双向传输。

针对上述需求,本文提出了一种基于共面中继线圈的水下无线电能与信息并行传输系统,并给出了系统的电路拓扑;提出了在中继线圈实现信息的传输,既降低了信息传输电路的电压应力,又有利于减小电能传输通道与信息传输通道之间的串扰;通过在信息传输通道采用串联LC电路注入信息的方法,将LC电路在电能传输频率下进行完全补偿,且仅采用容值较小的阻波电容进一步地减小了电能传输通道与信息传输通道之间的串扰以及信息传输通道的电压应力,降低了系统的设计难度;在系统建模分析的基础上,给出了电能传输通道与信息传输通道的等效电路模型和系统的参数设计方法,通过该方法,既降低了海水环境引起的涡流损耗,又有助于减小较大功率的电能传输对信息传输速度的影响。

在上述研究的基础上,搭建了实验装置,验证了所提出的系统及方法的正确性和有效性。在电导率为4.15 S/m的模拟海水实验环境中,系统的传输距离达到了50 cm,电能传输功率达到了5.33 kW,信息传输速度达到了5.68 Mbit/s。研究成果表明,本文所提出的MC-USWPIT系统及方法可以使系统的传输距离、传输功率和信息传输速度得到较大提升。

参考文献

- [1] 文海兵,宋保维,张克涵,等.水下磁耦合谐振无线电能传输技术及应用研究综述[J].水下无人系统学报,2019,27(4):361-368.
Wen Haibing, Song Baowei, Zhang Kehan, et al.

- Underwater magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology and its applications: a review[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2019, 27(4): 361-368.
- [2] 吴旭升, 孙盼, 杨深钦, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(8): 1559-1568.
Wu Xusheng, Sun Pan, Yang Shenqin, et al. Review on underwater wireless power transfer technology and its application[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(8): 1559-1568.
- [3] Painter H, Flynn J. Current and future wet-mate connector technology developments for scientific seabed observatory applications[C]//OCEANS 2006, Boston, MA, USA, 2006: 1-6.
- [4] 丰利军, 朱春波, 张剑韬, 等. 水下无人飞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 underwater vehicle[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(23): 159-162.
- [5] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8): 1547-1568.
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(8): 1547-1568.
- [6] 刘哲, 苏玉刚, 邓仁为, 等. 基于双边 LC 补偿的单电容耦合无线电能传输系统[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(17): 4306-4314.
Liu Zhe, Su Yugang, Deng Renwei, et al. Research on single capacitive coupled wireless power transfer system with double-side LC compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(17): 4306-4314.
- [7] 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-field coupled wireless power transfer system with rotary coupler and parameter optimization method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(10): 2399-2410.
- [8] 周玮, 郑宇锋, 陈泽林, 等. 基于副边解耦极板的电容式无线电能传输系统拾取端失谐评估[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(3): 142-149.
Zhou Wei, Zheng Yufeng, Chen Zelin, et al. Detuning estimation of pickup loop in capacitive wireless power transfer system based on secondary-side decoupled capacitive coupler[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(3): 142-149.
- [9] 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.
- [10] 苏玉刚, 刘家鸣, 王智慧, 等. 磁耦合机构拾取线圈平面金属的影响及其抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 578-588.
Su Yugang, Liu Jiaming, Wang Zhihui, et al. Influence analysis of metal in the same plane with pickup coil on magnetic coupler and suppression method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 578-588.
- [11] 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.
- [12] 贾亚辉, 陈丰伟, 王智慧, 等. 考虑线圈参数变化的失谐型无线电能传输系统抗偏移方法[J/OL]. *电工技术学报*, 2024, <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240847>.
Jia Yahui, Chen Fengwei, Wang Zhihui, et al. Anti-misalignment method of detuned wireless power transfer system considering coil parameters variations[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024,

- 6753.tces.240847.
- [13] 闫争超, 胡谦宇, 赵晨旭, 等. 水下航行器感应式无线电能传输技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9668-9682.
- Yan Zhengchao, Hu Qianyu, Zhao Chenxu, et al. Review on inductive wireless power transfer technology for underwater vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(24): 9668-9682.
- [14] Yao Yousu, Sun Pengfei, Liu Xiaosheng, et al. Simultaneous wireless power and data transfer: a comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3650-3667.
- [15] 李建国, 张波, 荣超. 近场磁耦合无线电能与信息同步传输技术的发展(上篇): 数字调制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3487-3501.
- Li Jianguo, Zhang Bo, Rong Chao. An overview of simultaneous wireless power and information transfer via near-field magnetic links (part I): digital modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3487-3501.
- [16] Chen Guodong, Sun Yue, Huang Junxin, et al. Wireless power and data transmission system of submarine cable-inspecting robot fish and its time-sharing multiplexing method[J]. Electronics, 2019, 8(8): 838.
- [17] Wang Yijie, Li Tao, Zeng Ming, et al. An underwater simultaneous wireless power and data transfer system for AUV with high-rate full-duplex communication[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 619-633.
- [18] Li Tao, Sun Zhichao, Wang Yijie, et al. An underwater simultaneous wireless power and data transfer system with 1-Mbps full-duplex communication link[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2620-2631.
- [19] Zeng Yingqin, Lu Conghui, Liu Renzhe, et al. Wireless power and data transfer system using multidirectional magnetic coupler for swarm AUVs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1440-1444.
- [20] Hou Xinyu, Su Yugang, Zuo Zhiping, et al. A novel analysis method based on quadratic eigenvalue problem for multirelay magnetic coupling wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 9907-9917.
- [21] Yang Lei, Huang Jingjing, Feng Baoxiang, et al. Undersea wireless power and data transfer system with shared channel powered by marine renewable energy system[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1): 242-250.
- [22] 王得安, 张剑韬, 朱春波, 等. 海洋环境对水下无线电能传输系统的影响机理研究进展[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 653-675.
- Wang De'an, Zhang Jiantao, Zhu Chunbo, et al. Review of progress in the study of marine environment effects on underwater wireless power transfer systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 653-675.
- [23] Zhang Kehan, Ma Yunshan, Yan Zhengchao, et al. Eddy current loss and detuning effect of seawater on wireless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 909-917.
- [24] 靖永志, 付康, 谯柯, 等. 基于积分解调的无线能量与信号同步传输方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4270-4281.
- Jing Yongzhi, Fu Kang, Qiao Ke, et al. Simultaneous transmission method of wireless power and signals based on integral demodulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4270-4281.
- [25] 苏玉刚, 邓晨琳, 胡宏晟, 等. 基于电场耦合的电能信号并行传输系统串扰抑制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1613-1626.
- Su Yugang, Deng Chenlin, Hu Hongsheng, et al. Crosstalk suppression method for electric-field coupled power and signal parallel transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1613-1626.
- [26] Askari A, Stark R, Curran J, et al. Underwater wireless power transfer[C]//2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Boulder, CO, USA, 2015: 1-4.
- [27] Yao Yousu, Tang Chengxiong, Gao Shenghan, et al. Analysis and design of a simultaneous wireless power and data transfer system featuring high data rate and signal-to-noise ratio[J]. IEEE Transactions on Indu-

- ustrial Electronics, 2021, 68(11): 10761-10771.
- [28] Fan Yuanshuang, Sun Yue, Deng Pengqi, et al. A simultaneous wireless power and high-rate data transfer system based on transient responses regulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 9362-9366.
- [29] Fei Yingjun, Xiao Jing, Tang Chunsen, et al. Improving the transmission distance of wireless power transfer systems using coplanar double-coil coupler[C]//2022 IEEE 9th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, China, 2022: 1-5.
- [30] Akyildiz I F, Wang Pu, Sun Zhi. Realizing underwater communication through magnetic induction[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11): 42-48.
- [31] Li Yuzhou, Wang Shengnan, Jin Cheng, et al. A survey of underwater magnetic induction communications: fundamental issues, recent advances, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2466-2487.
-
- 作者简介
- 邓仁为 男, 1997 年生, 博士研究生, 研究方向为无线电能传输技术、电力电子技术。
E-mail: 20211301008@stu.cqu.edu.cn
- 苏玉刚 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线电能传输技术、电力电子技术、控制理论与自动化系统集成。
E-mail: su7558@qq.com (通信作者)

Underwater Simultaneous Wireless Power and Information Transfer System with Coplanar Double-Coil Coupler

Deng Renwei¹ Su Yugang^{1,2} Hu Hongsheng^{1,2} Yang Xuefeng¹ Fei Yingjun¹

(1. School of Automation Chongqing University Chongqing 400043 China

2. China National Center for International Research on Wireless Power Transfer Technology Chongqing 400043 China)

Abstract In underwater applications, such as underwater robots, autonomous underwater vehicles (AUVs), and remotely operated vehicles (ROVs), magnetic-field coupled wireless power transfer (MC-WPT) enables the transmission of electrical energy without electric contact, improving the flexibility and security of power transfer. Underwater electrical devices and base stations must achieve long-distance and high-power wireless power transfer while realizing high-speed bidirectional wireless information exchange to enable command transmission, data feedback, and closed-loop control. Many scholars have researched shared-channel magnetic-field coupled underwater simultaneous wireless power and information transfer (MC-USWPIT) technology. However, there is still a gap between the transmission distance, power transfer capacity, information transfer speed, and the requirements of engineering applications. Therefore, this paper proposes an underwater simultaneous wireless power and information transfer system with a coplanar double-coil coupler. The research focuses on rapid wireless power replenishment and high-speed bidirectional information transmission for AUVs in seawater. The goal is to achieve high-power energy transfer and high-speed bidirectional information transmission over long transmission distances.

The coupler with a coplanar double-coil and the MC-USWPIT system topology are proposed. Using the relay coil for information transmission reduces the voltage stress on the information transmission circuit and helps mitigate the crosstalk between the power and information transfer channels. By employing an injecting information method with a series of LC circuits in the information transmission channel, the LC circuit is fully compensated at the power transmission frequency. Furthermore, smaller capacitance-blocking capacitors further reduce the crosstalk between the power transmission channel and the information transmission channel, as well as the voltage stress on the information transmission channel, thereby reducing the difficulty of system design.

Subsequently, the system is analyzed and modeled, and equivalent circuit models for the power and

(下转第 3786 页)

within a serial communication bit rate range from 240 to 800 kbit/s. The BERs can be maintained at a low level, and the effects of the pole plate offset on the signal and power transmission are verified. The transverse drift ratio reaches 87.5.0%. In the case of the pole plate offset with an 87.72% lateral drift ratio, the signal transmission efficiency of the system is only 22.66%. Under the magnetic shielding function of the metal pole plate, the signal transmission is robust under extreme working conditions, improving the reliability of the power transmission process. The shielding pole plate reduces the power transmission efficiency but has a significant shielding effect on electromagnetic leakage. Compared with the existing wireless energy and data synchronous transmission technology in transmission efficiency, transmission distance, signal rate, and BER, the correctness and feasibility of the proposed method are verified.

Keywords: Wireless power transmission (WPT), simultaneously wireless power and data transfer (SWPDT), capacitor shield plate, full-duplex communication

(编辑 陈 诚)

~~~~~  
(上接第 3769 页)

information transfer channels are provided. A parameter design method for the MC-USWPIT system is proposed. The method reduces the eddy current losses induced by the seawater and minimizes the impact of high-power energy transmission on the information transfer speed. It enables the simultaneous improvement of transmission distance, power transfer capacity, and information transfer speed in a frequency-division multiplexed MC-USWPIT system.

Finally, a 5 kW experimental setup in simulated seawater is constructed. In an environment with a seawater conductivity of 4.15 S/m, the system achieved a transmission distance of 50 cm, an output power of 5.33 kW, and an information transfer speed of 5.68 Mbit/s. Furthermore, under varying seawater conductivities (4, 5, and 6 S/m) and transmission distances (30, 40, and 50 cm), the system still demonstrates good power transfer performance and high information transfer speed. The experimental results confirm that the proposed MC-USWPIT system and method can effectively improve the transmission distance, power transfer capability, and bidirectional information transfer speed in simulated seawater.

**Keywords:** Simultaneous wireless power and information transfer, underwater environment, magnetic-field coupled, coplanar double-coil coupler

(编辑 陈 诚)