

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.188

中图分类号: TM724

文献标志码: A

海洋环境无线电能系统的参数设计 及优化方法

张克涵¹, 李鑫阳¹, 代凡¹, 冯佳明¹, 闫争超², 毛昭勇¹
(1.西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2.西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 针对涡流损耗问题, 提出海水中无线电能传输系统参数的设计优化方法, 能使系统电能传输效率最优。首先, 在海水中通电线圈电磁场分析的基础上, 利用涡流损耗等效阻抗, 得到海洋环境无线电能传输系统的等效互感模型。其次, 在初、次级侧线圈位置固定时, 建立涡流损耗等效阻抗与系统工作频率及线圈匝数的关系表达式, 并利用传输系统两侧线圈验证了涡流损耗等效阻抗计算方法的可行性。最后, 以海水中 LCC/S 型无线电能传输系统的能量模型为基础, 采用粒子群优化算法进行最大传输效率寻优。利用优化参数, 搭建实验测试系统, 结果显示, 在模拟海洋环境中, 当传输功率为 1 kW 时实验系统整体效率可达 84%。

关键词: 海洋环境; 磁耦合谐振; 涡流损耗; 涡流损耗等效阻抗; 粒子群优化算法

Design and Optimization Method for Parameters of Wireless Power Transfer System in Marine Environment

ZHANG Kehan¹, LI Xinyang¹, DAI Fan¹, FENG Jiaming¹, YAN Zhengchao², MAO Zhaoyong¹
(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aimed at the problem of eddy current loss, a method for the parameter design and optimization of a wireless power transfer (WPT) system in seawater is proposed to optimize the power transmission efficiency of the system. First, based on the analysis of the electromagnetic field of coils under operation in seawater, the equivalent mutual inductance model of the WPT system in a marine environment is obtained by using the equivalent impedance of eddy current loss. Second, when the positions of the primary- and secondary-side coils are fixed, the corresponding relationship between the equivalent impedance of eddy current loss and the operating frequency of the system and the number of coil turns is established, and the feasibility of the calculation method for the equivalent impedance of eddy current loss is verified by using the coils on both sides of the WPT system. Finally, based on the energy model of an LCC/S-type WPT system in seawater, the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the transmission efficiency. A test system was built with the optimized parameters, and results show that when it transmitted 1 kW of power in a simulated marine environment, its overall efficiency can reach 84%.

Keywords: Marine environment; magnetically coupled resonance; eddy current loss; equivalent impedance of eddy current loss; particle swarm optimization algorithm

无人自主水下航行器 AUV (autonomous underwater vehicle) 能够完成监测、预警和采样等任务, 在

军事领域中应用广泛, 但 AUV 本身带电量有限, 需通过水下基站进行电能补给, 增加续航时间及作业范围^[1]。磁耦合谐振无线电能传输技术可将用电设备与电源隔离^[2], 成为了 AUV 与基站主要的电能交换方式。国内^[3-5]和国外^[6-8]对水下磁耦合谐振无线电能传输技术的研究几乎同时展开, 发展到现在都具备了 AUV 水下大功率、高效率无线电能供给的能力。

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-08-13, 2022-09-08;

录用日期: 2022-09-14; 网络首发日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52171338)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52171338

磁耦合谐振无线电能传输技术应用于海洋环境时, 涡流损耗是导致传输功率和效率下降的主要原因。文献[9]分析了圆形线圈在不同导电介质中的涡流损耗, 并通过实验证明了介质电导率越高, 涡流损耗越大, 传输系统能量损失就越严重; 文献[10]设计了 1 种喇叭形的线圈, 能够有效降低涡流损耗对传输系统效率的影响, 与传统的平面线圈相比, 其在水中的传输功率提高了 10%; 文献[11]利用解析法对海洋环境中方形线圈的涡流损耗进行了分析, 证明了涡流损耗与电流平方之比的固定关系; 文献[12]分析了不同间隙时电流频率与无线电能传输系统中涡流损耗的关系, 证明了海水中的涡流损耗随谐振频率的增加而急剧增大; 文献[13]对无铁芯的磁耦合谐振系统进行了海水中的建模分析, 证明了系统的最佳工作频率应大于传输系统的谐振频率, 并给出了海水中磁耦合谐振系统最佳工作频率的选择方法。涡流损耗问题是解决海水中无线电能系统传输效率、功率偏低的关键, 但目前国内外对此研究得较少。

针对上述涡流损耗问题, 本文以电能传输效率最优为目标, 对海水中磁耦合谐振无线电能传输系统进行了参数优化。首先, 分析了海水中通电线圈的涡流损耗, 利用涡流损耗等效阻抗建立了海洋环境无线电能传输系统的等效互感模型。其次, 在初、次级侧相对位置不变时, 分析涡流损耗等效阻抗与系统工作频率及线圈匝数的关系, 并利用粒子群算法对海水中无线电能传输系统的参数进行优化设计。最后, 搭建了磁耦合谐振无线电能传输系统进行验证。

1 海洋环境中线圈涡流损耗分析

1.1 线圈涡流损耗计算方法

交变电流在海水中传播时, 需对空间中任一点的电场强度进行计算。为方便叙述, 将能量发射端称为初级侧, 能量接收端称为次级侧。在无线电能传输系统中, 某点的总电场强度是系统中所有单匝线圈共同作用的结果, 为区分电场强度的来源, 将

空间中某点 Q 的总电场强度分为初级侧线圈在该点产生的电场强度 E_p 和次级侧线圈在该点产生的电场强度 E_s , 如图 1 所示。图中: I_p 、 I_s 分别为初、次级侧线圈的电流; r_{p1} 、 r_{s1} 分别为初、次级侧线圈的内径; r_{p2} 、 r_{s2} 分别为初、次级侧线圈外径; h 为两线圈的中心距离。

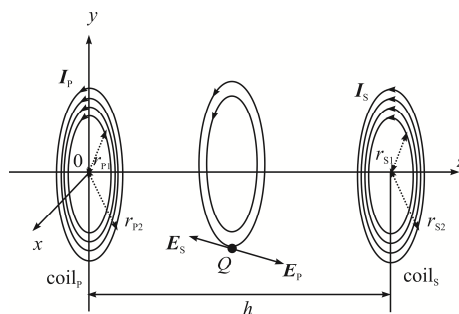


图 1 耦合线圈的合成电场

Fig. 1 Synthetic electric field of coupled coils

为计算 Q 点的电场强度, 建立海水中单匝线圈柱面坐标系的计算模型, 如图 2 所示。

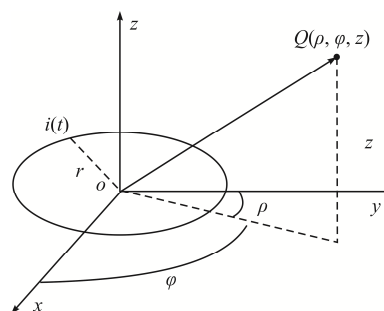


图 2 单匝线圈电场强度计算模型

Fig. 2 Electric field strength calculation model of single-turn coil

假定线圈在 xoy 平面, $Q(\rho, \varphi, z)$ 是空间任意一点, 当线圈通过电流 $i(t)$ 时, 利用麦克斯韦方程, 单匝线圈在空间 Q 点产生电场强度的表达式^[14]为

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\rho, \varphi, z) = -\frac{j\omega\mu r \mathbf{I}}{2} \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda}{\mu} J_1(\lambda r) J_1(\lambda \rho) e^{-\mu|z|} d\lambda \mathbf{e}_\varphi \\ \mu = \sqrt{\lambda^2 - k^2} \\ k^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为系统的角频率; μ 为海水的磁导率; r 为线圈半径; \mathbf{I} 为通入线圈的矢量电流; λ 为波长; J_1

为一阶贝塞尔函数； σ 为海水的电导率； ε 为海水的介电常数。

根据式(1)，可得到初、次级侧多匝线圈在空间中某点的电场强度 \mathbf{E}_p 和 \mathbf{E}_s 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_p(\rho, \varphi, z) = -\frac{j\omega\mu\mathbf{I}_p}{2} \left[N_p r_p + \frac{dN_p(N_p-1)}{2} \right] \cdot \\ \int_0^\infty \frac{\lambda}{\mu} J_1 \left\{ \lambda \left[r_p + \frac{d(N_p-1)}{2} \right] \right\} J_1(\lambda\rho) e^{-\mu|z|} d\lambda \mathbf{e}_\varphi \\ \mathbf{E}_s(\rho, \varphi, z) = -\frac{j\omega\mu\mathbf{I}_s}{2} \left[N_s r_s + \frac{dN_s(N_s-1)}{2} \right] \cdot \\ \int_0^\infty \frac{\lambda}{\mu} J_1 \left\{ \lambda \left[r_s + \frac{d(N_s-1)}{2} \right] \right\} J_1(\lambda\rho) e^{-\mu|h-z|} d\lambda \mathbf{e}_\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中： N_p 、 N_s 分别为初、次级侧线圈的匝数； d 为线圈每增加或减少 1 匝时半径的变化量，取值应考虑线圈散热及实际线缆的弯曲性能； r_p 、 r_s 分别为初、次级侧线圈的最内侧半径。

无线电能传输系统在海水中的任意一点的总电场强度可由式(2)中初、次级两侧电场强度合成，当 \mathbf{E}_p 、 \mathbf{E}_s 二者的相位差接近 90° 时，两线圈在海水中的涡流损耗 P_{eddy} 可计算^[15]为

$$P_{\text{eddy}} = \iiint_V \sigma (\mathbf{E}_p^2 + \mathbf{E}_s^2) dV \quad (3)$$

式中，积分区域 V 表示涡流损耗区，主要是两线圈周围的海水空间。

1.2 涡流损耗等效阻抗

在进行系统参数优化时，可以通过式(1)~式(3)计算出电场强度 \mathbf{E} 和涡流损耗，二者都包含积分项，每次迭代都需要重新计算，过程复杂，需耗费大量时间。

从式(1)和式(2)可以看出， \mathbf{E} 的计算式中存在 2 类参数：第 1 类是与传输系统线圈结构及工作状态相关的参数，即线圈匝数 N 、工作频率 f 和通过线圈的电流 I 等，由文献[16]可知， N 、 f 、 I 与电场强度大小均成正比；第 2 类是与 Q 点的空间位置相关的参数，即 Q 点的柱坐标 (ρ, φ, z) 和两线圈中心距离 h 。在式(2)中，只要 Q 点和两线圈的相对位置不变，与第 2 类参数相关的计算结果就不会改变，将该部分计算结果记为变量 k_{EP} 、 k_{ES} ，再利用第 1 类参数与 \mathbf{E} 的正比关系，可实现对式(2)的近似估

算，减少计算复杂度。估算关系表示为

$$\begin{cases} |\mathbf{E}_p(\rho, \varphi, z)| \approx k_{\text{EP}}(\rho, \varphi, z) \mathbf{I}_p N_p f \\ |\mathbf{E}_s(\rho, \varphi, z)| \approx k_{\text{ES}}(\rho, \varphi, z) \mathbf{I}_s N_s f \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，初级侧和次级侧线圈的涡流损耗 $P_{\text{eddy,P}}$ 和 $P_{\text{eddy,S}}$ 可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{eddy,P}} = \iiint_V \sigma [k_{\text{EP}}(\rho, \varphi, z) N_p f \mathbf{I}_p]^2 dV = \\ I_p^2 N_p^2 f^2 \iiint_V \sigma k_{\text{EP}}^2(\rho, \varphi, z) dV \\ P_{\text{eddy,S}} = \iiint_V \sigma [k_{\text{ES}}(\rho, \varphi, z) N_s f \mathbf{I}_s]^2 dV = \\ I_s^2 N_s^2 f^2 \iiint_V \sigma k_{\text{ES}}^2(\rho, \varphi, z) dV \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)，类比电阻功率计算方法，引入等效涡流阻抗 $R_{\text{eddy,P}}$ 和 $R_{\text{eddy,S}}$ 的概念，其表达式为

$$\begin{cases} R_{\text{eddy,P}} = N_p^2 f^2 \iiint_V \sigma k_{\text{EP}}^2(\rho, \varphi, z) dV = \\ k_{\text{eddy,P}} N_p^2 f^2 \\ R_{\text{eddy,S}} = N_s^2 f^2 \iiint_V \sigma k_{\text{ES}}^2(\rho, \varphi, z) dV = \\ k_{\text{eddy,S}} N_s^2 f^2 \\ k_{\text{eddy,P}} = \iiint_V \sigma k_{\text{EP}}^2(\rho, \varphi, z) dV \\ k_{\text{eddy,S}} = \iiint_V \sigma k_{\text{ES}}^2(\rho, \varphi, z) dV \end{cases} \quad (6)$$

只要传输线圈相对位置不变，线圈半径增量不变， $k_{\text{eddy,P}}$ 和 $k_{\text{eddy,S}}$ 可近似为常数，只需进行一次涡流损耗等效阻抗的计算或测量，就能通过式(5)和式(6)得到 $k_{\text{eddy,P}}$ 和 $k_{\text{eddy,S}}$ ，并根据式(6)求出该种空间状态下不同匝数和工作频率的涡流损耗等效阻抗，继而根据电流估算出涡流损耗。

1.3 涡流损耗等效阻抗的实验验证

当线圈中通入一定频率的交流电，周围环境由空气变为海水时，线圈电阻的增量即为该种频率下线圈的涡流损耗等效阻抗。本文所涉及的 AUV 外壳为圆柱体，选用方弧形线圈，与圆形线圈类似，其尺寸可用匝间距和圆弧段半径表示。2 种线圈涡流损耗推导过程一致，故方弧形线圈相对位置不变时，其涡流损耗等效阻抗的估算公式应与式(6)形式类似，再通过实验验证了二次方的关系适用于方弧形线圈。式(6)中，在初级侧线圈匝数 15、频率 200 kHz

时测量得到 $k_{\text{eddy,p}}$, 在次级侧线圈匝数 18、频率 200 kHz 时测得 $k_{\text{eddy,s}}$, 以这 2 个值为基础, 通过式(6)来估算各种频率及匝数下的涡流损耗等效阻抗, 并与实际测量值相比较, 结果如图 3 所示。

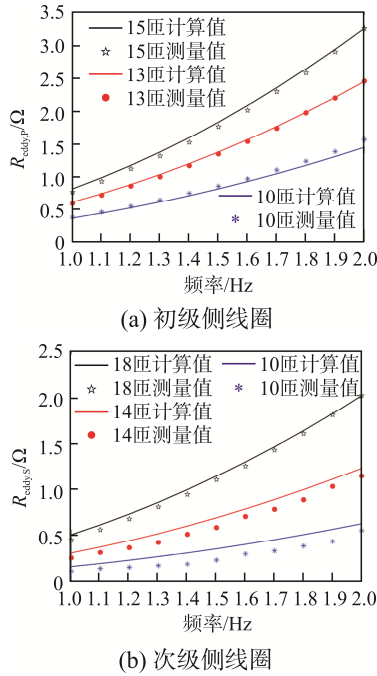


图 3 线圈涡流损耗等效阻抗的测量值与计算值对比
Fig. 3 Measured and Calculated values of equivalent impedance of eddy current loss in coils

由图 3 可见, 初、次级侧线圈涡流损耗等效阻抗的计算值与测量值接近, 误差在可接受范围内, 并且变化趋势一致, 满足二次方关系, 证明了式(6)适用于本文线圈涡流损耗的估算。

2 海洋环境无线电能系统建模分析

2.1 海水中 LCC-S 型系统的等效模型

无线电能系统传输环境由空气转换至海水时, 可将涡流损耗等效阻抗视为传输线圈阻抗的增量, 则无线电能系统两侧线圈在海水中的等效阻抗可表示为

$$\begin{cases} R_{p,\text{sea}} = R_p + R_{\text{eddy,p}} \\ R_{s,\text{sea}} = R_s + R_{\text{eddy,s}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_{p,\text{sea}}$ 、 $R_{s,\text{sea}}$ 分别为初、次级侧线圈等效阻抗; R_p 、 R_s 分别为初、次级侧线圈阻抗。

本文采用 LCC-S 型谐振补偿结构, 可视其为

恒压源, 为用电设备提供稳定的电压^[17], 其在海水中的等效模型如图 4 所示。其中初级侧的补偿结构由补偿电感 L_f 、补偿电容 C_p 、 C_f 和初级侧耦合线圈 L_p 构成; 次级侧的补偿结构采用常见的串联式补偿结构, 仅用 1 个补偿电容 C_s 对次级侧耦合线圈 L_s 的电感进行补偿。图中: R_L 为等效负载电阻; V_p 为交流供电电压。

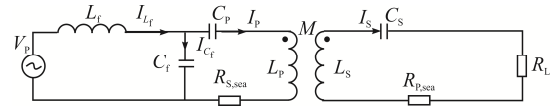


图 4 海洋环境中 LCC-S 系统等效模型
Fig. 4 Equivalent model of LCC-S system in marine environment

根据图 4 可得, 系统处于谐振状态时次级侧输出功率 P_{out} 及系统整体传输效率 η 分别为

$$P_{\text{out}} = I_s^2 R_L = \frac{M^2 V_p^2 / L_f}{Z_2^2 / R_L} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{Z_{Cf}^2 \omega^2 M^2 R_L}{Z_{in} Z_S^2 (R_{p,\text{sea}} + R_{\text{ref}})^2} \times 100\% \quad (9)$$

式中: M 为初、次级侧线圈互感; V_p 为级侧电压; Z_{in} 和 Z_2 分别为输入和输出等效阻抗; Z_S 为次级侧阻抗; R_{ref} 为次级侧折算到初级侧的反射阻抗。

2.2 海水中 LCC-S 系统传输特性

在海水环境中, 初、次级侧线圈匝数不变时, 不同等效负载下工作频率与传输效率的关系如图 5 所示。由图 5 可见, 当等效负载不变时, 传输效率会随着工作频率的增加呈现先增加后下降的趋势, 且整个系统存在使得传输效率最大的工作频率。

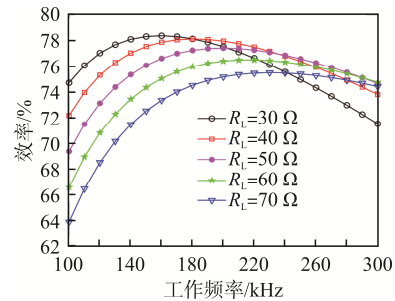
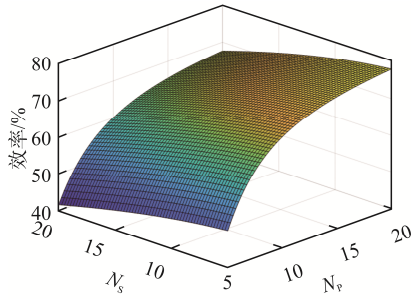
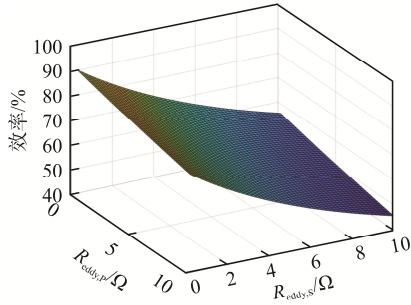


图 5 海水中工作频率与传输效率关系
Fig. 5 Relationship between operating frequency and transmission efficiency in seawater

工作频率不变时,线圈匝数和涡流损耗等效阻抗与传输效率的关系如图 6 所示。由图 6(a)可见,当工作频率固定时,系统传输效率最高点并不是出现在线圈匝数最大处,这是因为初、次级两侧的线圈匝数会同时影响互感大小和涡流损耗等效阻抗,互感的增加会提高无线电能传输性能,但是线圈匝数越多,涡流损耗等效阻抗越大,整个系统的能量损耗就越多。由图 6(b)可见,如果两侧线圈涡流损耗等效阻抗为 0,那么系统传输性能接近于空气中的状况,所以系统存在 1 组线圈匝数可以使传输效率最高。



(a) 两侧线圈匝数与效率关系



(b) 涡流损耗等效阻抗与效率关系

图 6 线圈参数与传输效率关系

Fig. 6 Relationship between coil parameters and transmission efficiency

3 参数优化方案设计

3.1 优化目标

优化设计目标表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta(f, N_p, N_s, d) \\ & f \in [f_{\min}, f_{\max}]; dN_p < r_{p,\max}; dN_s < r_{s,\max}; \\ & P_{\text{out}} > 1 \text{ kW}; f, d \in \mathbb{R}; N_p, N_s \in \mathbb{Z} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: f_{\max} 、 f_{\min} 分别为系统工作频率 f 的上、下限,取 $f_{\max}=300 \text{ kHz}$ 、 $f_{\min}=100 \text{ kHz}$; $r_{p,\max}$ 、 $r_{s,\max}$ 分别为初、次级侧最外层线圈圆弧段半径的最大值,由供电基站及 AUV 形状尺寸决定,取 $r_{p,\max}=440 \text{ mm}$ 、 $r_{s,\max}=230 \text{ mm}$,线圈由最大尺寸往内铺设,即可遍历所有线圈匝数组合; P_{out} 为输出功率。

3.2 带有约束因子的粒子群算法

海水中的无线电能传输系统参数设计优化,其实是对初级侧线圈匝数 N_p 、次级侧线圈匝数 N_s 、工作频率 f 进行组合,找到使得系统传输效率最优的 1 组值 $(N_{\text{Popt}}, N_{\text{Sopt}}, f_{\text{opt}})$ 。一般方法是以一定步长搜索所有可能的组合,比较后找到效率最优的组合,这种方法需要计算解空间中的几乎所有组合,计算量巨大。

粒子群算法能够对多变量问题进行快速求解,整个搜索过程通过跟踪 2 个极值实现,其中:一个极值为迭代过程中粒子自身在解空间中搜索到的最优解,称为个体极值 p_{best} ;另一极值为该种群整体搜索到的当前全局最优解,称为全局极值 g_{best} 。则粒子速度及位置更新方程表示为

$$V_{k+1} = \omega_1 V_k + \alpha [c_1 r_1 (p_{\text{best}k} - X_k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}k} - X_k)] \quad (11)$$

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (12)$$

式中: V_{k+1} 为第 $k+1$ 代的迭代速度; ω_1 为惯性因子; V_k 为第 k 代的迭代速度; α 为约束因子; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 0~1 之间随机数; $p_{\text{best}k}$ 为第 k 代个体的最佳方案; $g_{\text{best}k}$ 为第 k 次迭代后种群的全局最优方案; X_k 为第 k 代种群的位置; X_{k+1} 为第 $k+1$ 代种群的位置。

优越的约束因子能够引导粒子在最优解粒子周围来回振荡,使算法更快速地收敛,则有

$$\begin{cases} \alpha = 2 / |2 - \varphi - (\varphi^2 - 4\varphi)^{1/2}| \\ \varphi = c_1 + c_2 & \varphi > 4 \end{cases} \quad (13)$$

本文以 (f, N_p, N_s) 为个体位置,在解空间内对系统海水中的效率进行最大寻优,当迭代次数 G_{en} 达到最大迭代次数 G_{enmax} ,且相邻数次优化结果的差距小于 1% 时,输出全局最优解,寻优

过程如图 7 所示。负载电阻根据设计要求选择为 50Ω , 线圈半径变化量 $d=4.5 \text{ mm}$, 初级侧线径 4.0 mm , 次级侧线径 2.5 mm , 若要对初级侧线径和次级侧线径也进行寻优, 根据实际需要增加算法中适应度和速度的维数即可。

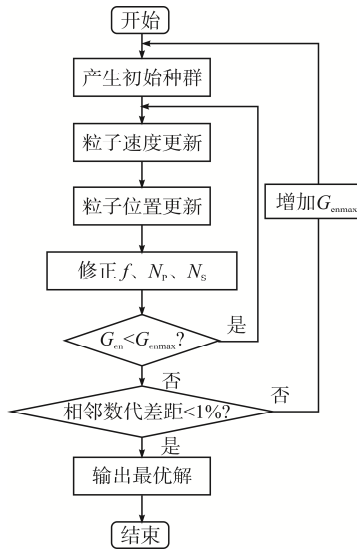


图 7 粒子群优化算法优化流程

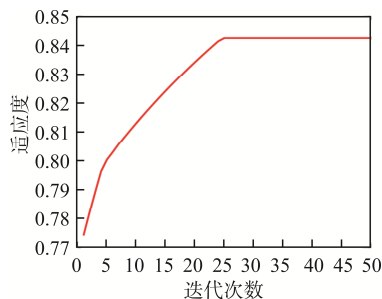
Fig. 7 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

3.3 参数优化结果

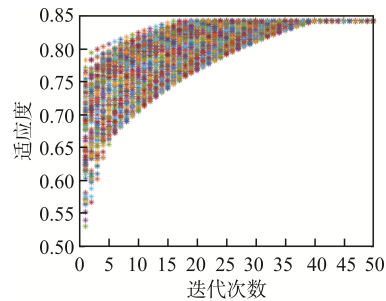
通过仿真软件, 以海水中最高传输效率为目标对系统进行参数优化, 最大迭代次数为 100, 每代 100 组数据, 优化结果如图 8 所示。

由图 8(a)可见, 全局最佳适应度能在 25 代以内趋于稳定, 找到真正的全局极值 g_{best} , 大大减小了优化难度, 缩短了优化时间。由图 8(b)可见, 在迭代至 40 代时就可以做到所有种群个体的 P_{best} 均达到最优位置, 整个优化算法的收敛速度很快。

经过 100 次迭代后, 系统全局极值 g_{best} 的位置即为最终优化参数, 初级侧线圈匝数 $N_p=13$, 次级



(a) 全局最优适应度



(b) 个体极值 P_{best}

图 8 优化过程中适应度变化情况

Fig. 8 Changes in fitness during optimization process

侧线圈匝数 $N_s=17$, 工作频率 $f=150 \text{ kHz}$ 。考虑实际应用的电容型号、耐压等问题, 对频率进行微调, 最终得到传输系统的参数, 见表 1。

表 1 磁耦合谐振系统的实际参数

Tab. 1 Actual parameters of magnetically coupled resonance system

resonance system			
参数	数值	参数	数值
f / kHz	150.60	C_s / nF	11.73
$L_f / \mu\text{H}$	18.29	$L_p / \mu\text{H}$	119.90
C_f / nF	61.06	$L_s / \mu\text{H}$	95.20
C_p / nF	10.91	$M / \mu\text{H}$	24.72

4 实验验证

本文搭建了 LCC-S 型无线电能传输系统, 如图 9 所示, 进行功率电路部分及海水环境中的实验, 此实验中两线圈距离为 120 mm 。图 9 中, 实验系统的初级侧补偿电路及其他电子器件固定在防水外壳内部, 初级侧线圈被非金属壳体包裹, 底座为金属壳体, 兼具支撑固定、耐压与散热的作用, 供电线路通过防水接口与电源相连; 次级侧的结构与初级侧类似, 非金属壳体包裹次级侧线圈, 金属外壳能够与 AUV 拼接, 实验时次级侧输出通过防水线缆与外部负载相连。

系统的工作状态波形及在空气和海水中的实验效率变化情况如图 10 所示。图 10 中: V_p 为初级侧补偿电路的输入电压; I_{L_f} 为初级侧电感 L_f 上流过的电流; V_s 为整流器的输入电压; I_s 为整流器的输入电流。实验时, 系统在空气中与海水中的输入电压保持一致, 逐步升高输入电压直到输出功率高于

1 kW, 记录实验数据。

由图 10 可见, 实验中工作频率为 150.6 kHz 时, 系统处于谐振状态, 达到理论上的最优输出; 随着系统输出功率的不断升高, 在海水中的效率维持在 82%~84%, 与图 8 的结果接近, 达到海水中无线电能传输系统的最大效率。

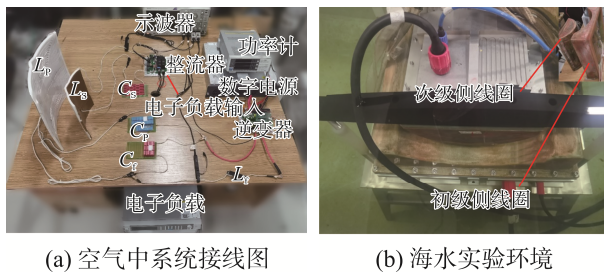


图 9 无线电能传输系统实验

Fig. 9 Experiment of wireless power transfer system

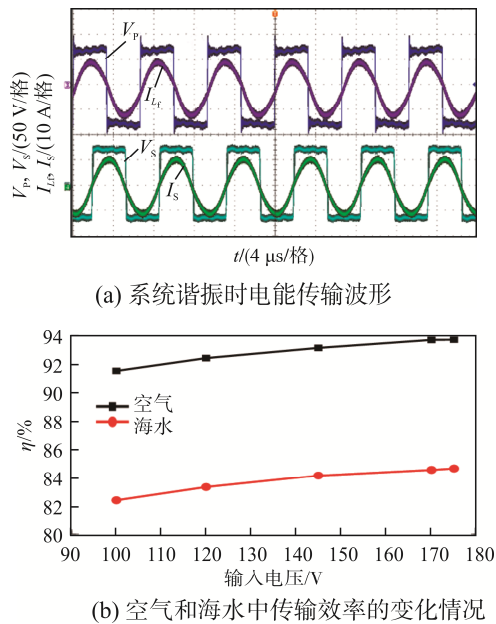


图 10 系统传输性能

Fig. 10 Transmission performance of system

对比空气和海水这 2 种环境, 涡流损耗导致系统在海水中的传输效率下降 8.9% 左右, 并且随着输入电压的上升, 系统的电能传输效率基本不变, 证明了耦合线圈位置、工作频率和线圈参数不变时, 涡流损耗等效阻抗基本不变, 符合前文分析结果。故无线电能传输系统向海水环境扩展时, 可利用等效涡流阻抗的方法建立海洋环境模型, 并利用优化粒子群算法快速设计出系统最优参数。

5 结语

针对磁耦合谐振无线电能传输系统应用于海洋环境时的涡流损耗问题, 本文对磁耦合谐振系统的工作频率及线圈匝数进行了优化设计, 使系统的电能传输效率达到最优。首先, 对海水中通电线圈的涡流损耗进行了分析, 搭建了海洋环境无线电能传输系统的等效互感模型。其次, 利用系统工作频率及线圈匝数估算线圈相对位置不变时的涡流损耗等效阻抗, 并实验验证了估算方法的可行性。最后, 在磁耦合谐振系统海水中能量模型的基础上, 采用粒子群算法对系统参数进行优化。实验结果显示, 优化后的系统在海水中传输功率为 1 kW 时, 整体效率可达 84%。

参考文献:

- [1] Matsuda T, Maki T, Masuda K, et al. Port experiments of the docking and charging system using an AUV and a seafloor station: Towards long-term seafloor observation [C]// 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). Porto, Portugal, 2018: 1-5.
- [2] 李阳, 石少博, 刘雪莉, 等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(zk2): 389-403. Li Yang, Shi Shaobo, Liu Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(zk2): 389-403. (in Chinese)
- [3] 林麟. 水下非接触电能传输装置的设计、试验与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. Lin Lin. Design, test and research of underwater contactless power transmission device [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [4] 于乐. 面向水下应用的无线能量传输系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. Yu Le. Research on key technologies of wireless energy transmission system for underwater applications [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [5] 马云山. 抗海流冲击的水下 WPT 系统多线圈结构设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.

- Ma Yunshan. Design and research on multi-coil structure of underwater wireless power transmission system against the seawater flow vibration [D]. Xi'an: Northwestem Polytechnical University, 2020. (in Chinese)
- [6] Bagchi A C, Saha T, Kamineni A, et al. Analysis and design of a wireless charger for underwater vehicles fed from a constant current distribution cable [C]// 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Padua, Italy, 2018: 1-8.
- [7] Duarte C, Gonçalves F, Silva M, et al. Experimental evaluation of coupling coils for underwater wireless power transfer [C]// 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). London, UK, 2019: 557-560.
- [8] Hasaba R, Okamoto K, Kawata S, et al. Magnetic resonance wireless power transfer over 10 m with multiple coils immersed in seawater [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(11): 4505-4513.
- [9] Kim J, Kim H, Kim D, et al. Analysis of eddy current loss for wireless power transfer in conductive medium using Z-parameters method [C]// 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). Seoul, Korea (South), 2020: 432-434.
- [10] Zeng Yingqin, Rong Cancan, Lu Conghui, et al. Coil optimization design of the horn shape for underwater wireless power transfer [C]// The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). Online Conference, 2020: 2310-2314.
- [11] Liu Zhimeng, Wang Lifang, Guo Yanjie, et al. Eddy current loss analysis of wireless power transfer system for autonomous underwater vehicles [C]// 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Seoul, Korea (South), 2020: 283-287.
- [12] Yan Zhengchao, Zhang Yiming, Kan Tianze, et al. Eddy current loss analysis of underwater wireless power transfer system [C]// 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Long Beach, CA, USA, 2018: 881-884.
- [13] Yan Zhengchao, Zhang Yiming, Kan Tianze, et al. Frequency optimization of a loosely coupled underwater wireless power transfer system considering eddy current loss [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3468-3476.
- [14] Zhang Kehan, Du Luona, Zhu Zhengbiao, et al. A normalization method of delimiting the electromagnetic hazard region of a wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(4): 829-839.
- [15] Cheng Zhiyuan, Lei Yang, Song Kai, et al. Design and loss analysis of loosely coupled transformer for an underwater high-power inductive power transfer system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(7): 8401110.
- [16] Zhang Kehan, Zhu Zhengbiao, Du Luona, et al. Eddy loss analysis and parameter optimization of the WPT system in seawater [J]. Journal of Power Electronics, 2018, 18: 778-788.
- [17] Sasikumar S, Deepa K. Comparative study of LCL-S and LCC-S topology of wireless EV charging system [C]// 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). Vellore, India, 2019: 1-6.



张克涵

作者简介:

张克涵(1971—),男,通信作者,博士,副教授。研究方向:无线电能传输技术,电机控制系统。E-mail: zhangkehan210@163.com。

李鑫阳(1997—),男,硕士研究生。研究方向:无线电能传输技术。E-mail: 2020200617@mail.nwpu.edu.cn。

代凡(1998—),男,硕士研究生。研究方向:电力电子技术,无线电能传输。E-mail: daifan098@163.com。

冯佳明(1996—),男,硕士研究生。研究方向:电力电子技术,无线电能传输。E-mail: fjm369@mail.nwpu.edu.cn。

闫争超(1991—),男,博士,助理教授。研究方向:电力电子、无线电能传输。E-mail: yanzc1991@163.com。

毛昭勇(1980—),男,博士,教授。研究方向:水下航行器总体优化与能源动力推进技术。E-mail: maozhaoyong@nwpu.edu.cn。

(责任编辑:陈国珍)