

【引用格式】唐春森, 冯馨怡, 孙昌文, 等. 高效水下无线电能传输技术研究进展[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 ( 1 ): 19-28.

# 高效水下无线电能传输技术研究进展

唐春森, 冯馨怡, 孙昌文, 费迎军, 胡宏晟  
(重庆大学 自动化学院, 重庆 401331)

**摘要** 随着海洋资源开发需求增加, 水下无人航行器在长时间作业时面临电池过重和充电不便等问题, 限制了其续航能力。水下无线电能传输技术为传统的湿插拔充电方式提供了新方案, 更重要的是, 其安全性和便捷性使得水下无人航行器能够在任务执行期间随时、快速地补充能量, 解决了续航瓶颈。为更好地了解技术研究动向, 对水下无线电能传输技术在效率优化方面的相关研究进展进行了综述。首先对水下无线电能传输系统的基本工作原理进行了简要介绍, 分析了海水环境对系统性能的影响; 其次, 重点围绕系统建模和系统效率优化 2 个方面总结了国内外研究进展; 最后对水下无线电能传输技术的发展趋势进行了展望。

**关键词** 无线电能传输; 海水涡流损耗; 效率优化

中图分类号 TM724 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2025)01-0019-10

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.003

## Research Progress of Efficient Underwater Wireless Power Transfer Technology

TANG Chunsen, FENG Xinyi, SUN Changwen, FEI Yingjun, HU Hongsheng  
(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 401331, China)

**Abstract** With the increasing demand for ocean resource development, unmanned underwater vehicles face problems such as heavy batteries and inconvenient charging during long-term operations, which limit their endurance. Underwater wireless power transfer technology provides a new solution for traditional wet plug charging methods. More importantly, its safety and convenience enable unmanned underwater vehicles to quickly replenish energy during mission execution, solving the bottleneck of endurance. In order to better understand the research trends of the related technology, the relevant research progress on efficiency optimization of underwater wireless power transfer technology is reviewed in this article. Firstly, the basic working principle of underwater wireless power transfer system is briefly introduced, and the impact of seawater environment on system performance is analyzed. Secondly, the research progress at home and abroad is summarized focusing on system modeling and system efficiency optimization. Finally, the development trend of underwater wireless power transfer technology is discussed.

**Key words** wireless power transfer; seawater eddy current loss; efficiency optimization

## 0 引言

海洋相较于陆地面积更为广阔, 蕴含着更为丰

富的资源。在海洋资源的探测与开发中, 水下无人航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 扮演着不可或缺的角色。然而, 为实现长时间水下作

业, UUV 通常需携带大量电池组, 这使得 UUV 重量增加, 成本上升。并且电量不足时需人工打捞充电, 导致充电灵活性差, 使得 UUV 无法长时间在水下连续作业。为了解决这一问题, 提高 UUV 的能源补给效率变得尤为迫切<sup>[1-3]</sup>。此外, 传统的湿插拔式充电方式存在连接口结构复杂、易磨损以及漏电等安全问题。随着科技不断发展, 人们对海洋的勘探和开发需求日益提高, 这也极大地刺激了对 UUV 的需求。因此, UUV 新的高效能源补给方式亟需得到更新与发展。

为了解决 UUV 的高效能源补给及续航问题, 近年来无线电能传输技术 (Wireless Power Transfer, WPT) 为 UUV 等水下设备提供了充电方案<sup>[4-5]</sup>。WPT 技术是指综合应用电工理论、电力电子技术、控制理论, 利用磁场、电场、微波等实现电能从电网或电池以非电气接触的方式传输至用电设备的技术。相较于传统导线输电, 其具有安全可靠、自动化程度高等优点<sup>[6-8]</sup>。其中, 应用较为成熟及较多的是磁场耦合式无线电能传输 (Magnetic Coupling Wireless Power Transfer, MC-WPT) 技术, 即利用线圈之间的磁场为载体来实现电能的非接触式传输, 目前 MC-WPT 技术已广泛应用于各个领域, 如水下无人航行器<sup>[9-12]</sup>、航空航天<sup>[13]</sup>、电动

汽车<sup>[14]</sup>、医疗设备<sup>[15]</sup>、智能穿戴<sup>[16]</sup>等。

水下航行器等水下无人设备对 MC-WPT 技术的应用需求激发了众多研究者对海水环境 MC-WPT 技术的研究<sup>[17]</sup>, 如图 1 所示。海水环境 MC-WPT 系统主要由直流电源、高频逆变设备、发射端补偿网络环节、磁耦合机构、接收端补偿网络环节、整流滤波环节以及用电设备组成, 如图 2 所示。MC-WPT 系统的每个组成部分承担着不同的功能。发射端中直流电源输出直流电, 经逆变器进行高频逆变, 转化成高频交流电, 进入补偿网络补偿掉系统无功, 最后经发射线圈通过高频电磁场的形式将能量传递给接收端。接收线圈由电磁感应原理接收到发射端的能量, 经过补偿、整流、滤波环节, 把高频交流电变成直流电供给用电设备。

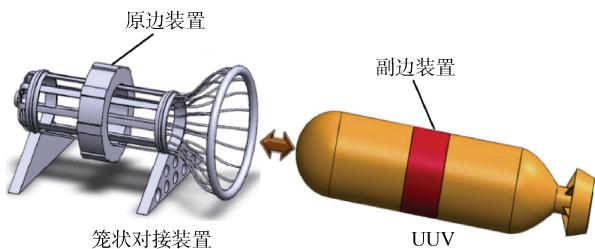


图 1 UUV 水下无线充电  
Fig. 1 UUV underwater wireless charging

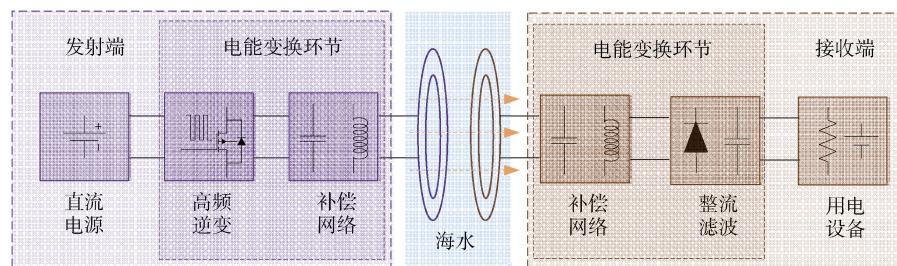


图 2 海水环境 MC-WPT 系统结构框图  
Fig. 2 Block diagram of MC-WPT system in seawater environment

目前, 国内外关于海水环境下的 MC-WPT 技术研究已取得一定进展。然而, 海水环境的复杂性及多变性, 使得 MC-WPT 技术在适用场景、系统高可靠性传输和效率提升等方面, 仍有大量研究空间待探索。特别地, 海水的高电导率会导致空气中高效传输系统产生显著的海水涡流损耗 (Seawater Eddy Current Loss, SECL), 导致效率明显下降, 从而影响系统的能量传输效率。为了探索 SECL 的

机理并提升水下 MC-WPT 系统的性能, 许多学者在理论模型的构建和效率的优化上展开了大量的工作。SECL 模型构建通常采用阻抗等效法, 即将 SECL 对 MC-WPT 系统的影响映射为等效阻抗参数。在效率的优化提升上, 一方面设计用于抗偏移的耦合机构, 以减小 UUV 等用电设备因洋流或对准偏差引起的效率波动; 另一方面, 通过 MC-WPT 系统电气参数的优化 (如频率、负载、

电流相位等), 来减少 SECL, 以提升系统效率。鉴于此, 本文主要对高效率水下无线电能传输技术研究进展进行综述, 针对海水环境下的磁耦合无线电能传输系统, 首先分析了海水环境对该系统性能的影响, 详细回顾了互感耦合模型和涡流损耗模型的构建过程; 接着, 从优化耦合机构和电气参数 2 个方面综述了目前提高传输效率的相关研究进展; 最后, 本文对水下无线电能传输技术的未来发展进行了前瞻性展望, 预测其在水下无人设备和海洋资源开采等重要领域具有广泛的应用前景。

## 1 海水环境 MC-WPT 系统模型

由于海水环境与空气环境不同, 多电磁参数对系统影响使得空气环境中的 MC-WPT 系统模型不再适用于海水环境。因此需要对海水环境建立适用于海水环境的 MC-WPT 系统模型。下面从互感耦合模型和涡流损耗模型 2 个方面展开论述。

### 1.1 互感耦合模型

与空气环境中 MC-WPT 系统相比, 海水环境 MC-WPT 系统仅是电磁波传输环境介质的不同。表 1 给出了空气环境与海水环境下的电磁参数, 较于空气环境, 海水环境的相对磁导率基本不变, 但相对介电常数约为空气的 81 倍<sup>[1]</sup>, 且电导率受温度及水深变化等影响, 大约为 2.8~5.4 S/m, 而空气电导率则为 0。

表 1 不同环境介质的电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters of different environmental media

介质	相对磁导率	电导率/(S/m)	相对介电常数
空气	1	0	1
海水	1	2.8~5.4	81

针对海水电导特性对系统的影响, 文献[18]从耦合机构线圈在海水环境中的电磁学机理出发, 建立了海水环境中的等效互感模型, 如图 3 所示, 将耦合机构等效跨接电容引入到电路系统, 但是该模型没有将海水涡流损耗产生的影响进行等效。

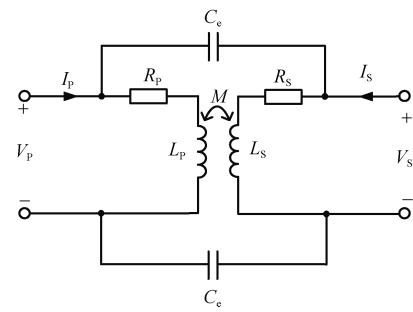


图 3 考虑介电常数影响的等效互感模型

Fig. 3 Equivalent mutual inductance model considering influence of dielectric constant

### 1.2 涡流损耗模型

海水环境对 MC-WPT 系统的影响主要源于其高电导率导致的海水涡流损耗。当发射线圈中通过高频交流电时, 交变电流在海水中产生的交变磁场引起感生电场, 该感生电场又会激发新的磁场, 与原磁场相互耦合, 从而影响系统参数; 此外, 海水涡流损耗会消耗系统的有功功率, 从而降低系统传输效率。一般情况下, 为了提升 WPT 系统的能量传输能力并确保系统的安全性和可靠性, 通常会在发射和接收线圈的外侧分别铺设磁芯和铝板, 来屏蔽线圈电流产生的高频磁场。因此, 在耦合机构铺设有磁芯和铝板的条件下, 线圈周围磁通密度分布主要集中在发射线圈和接收线圈之间的区域, 即海水涡流损耗只产生在该海水区域中。

从电磁学机理建模出发, 将线圈视为电流元回路, 第  $i$  匝电流元半径记为  $r_i$ , 最外匝电流元半径为  $r_n$ , 并假设发射端和接收端的电流元回路半径一致<sup>[19]</sup>, 如图 4 所示,  $e_\phi$  是单位周向矢量。

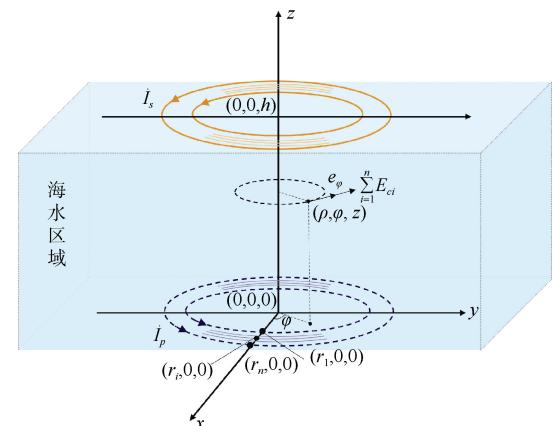


图 4 多匝耦合电流元回路电场强度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electric field strength of multi-turn coupled current element loop

假设  $\mathbf{E}_{ci}$  是第  $i$  匝发射端电流元和接收端电流元在点  $(\rho, \varphi, z)$  处产生的电场。那么,  $n$  匝耦合电流元回路在点  $(\rho, \varphi, z)$  处产生的电场强度为  $\mathbf{E}_m$

$$\mathbf{E}_m = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_{ci}(\rho, \varphi, z) \quad (1)$$

通过电场强度的对海水区域体积分, 可得到系统产生的 SECL 为

$$P_{\text{eddy}} = \iiint_V \sigma |\mathbf{E}_m|^2 dV = \int_0^{2\pi} \int_0^h \sigma |\mathbf{E}_m|^2 d\varphi d\rho dz \quad (2)$$

式中:  $V$  为电流元激发的磁场作用的海水体积;  $\sigma$  为海水电导率;  $h$  为传输距离。考虑到 SECL 为发射端电流元和接收端电流元作用的结果, 式 (2) 可进一步表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{eddy}} = & P_{p\text{-eddy}} + P_{s\text{-eddy}} + \Delta P_{ps\text{-eddy}} = \\ & \iiint_V \sigma \left| \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_{pi\varphi} \right|^2 dV + \iiint_V \sigma \left| \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_{si\varphi} \right|^2 dV + \\ & 2 \cos(\Delta\theta) \iiint_V \sigma \left| \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_{pi\varphi} \right| \left| \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_{si\varphi} \right| dV \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $P_{p\text{-eddy}}$  为发射端  $n$  匝电流元产生的涡流损耗;  $P_{s\text{-eddy}}$  为接收端  $n$  匝电流元产生的涡流损耗;  $\Delta P_{ps\text{-eddy}}$  为两边电流元耦合下产生的涡流损耗;  $\Delta\theta$  为发射端和接收端产生的电场强度相位差。又为了进一步研究两端电流元耦合产生的涡流损耗  $\Delta P_{ps\text{-eddy}}$ , 需要对电流元相位和其产生的电场强度相位之间的关系进行研究, 而两端电流元产生的电场的相位差与电流元相位差大致相等。因此, 可以通过改变线圈电流相位差和频率来实现对 SECL 的抑制。

从 SECL 产生的机理出发, 文献[20]在海水环境下对 MC-WPT 系统的传输机理特性和 SECL 进行了分析, 并给出了 SECL 与线圈半径、谐振频率、传输距离和磁感应强度的关系。为了详细描述 SECL 对系统的影响, 文献[21]提出了基于 Z 参数建模的一种分析方法, 考虑频率和海水电导率的线圈阻抗模型, 利用电磁分析和双端口网络分析, 可以得出海水环境下无线充电系统的等效电路, 如图 5 所示。利用所提出的等效电路, 可以准确预测 SECL。

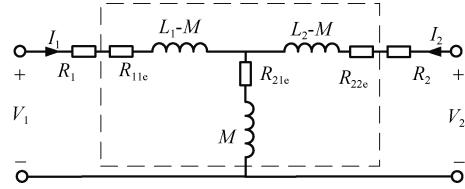


图 5 基于 Z 参数建模的等效二端口电路  
Fig. 5 Equivalent two-port circuit based on Z-parameter modeling

为了表征海水环境下系统参数的漂移, 文献[22]分析了 SECL 和谐振偏移现象, 进一步建立数学模型来计算 SECL, 提出了一种修正后的海水环境 MC-WPT 系统等效电路模型, 如图 6 所示。并采用在发射侧电路中添加补偿电感的方法, 使得海水中失谐的系统恢复谐振。

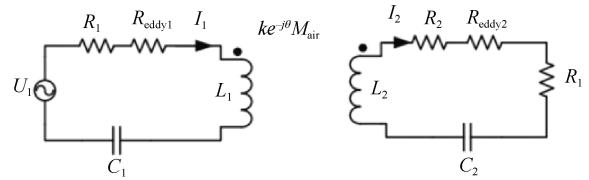


图 6 海水环境介质中的等效电路模型  
Fig. 6 Equivalent circuit models in seawater environmental media

海水感生涡流电场在产生 SECL 的同时, 激发的磁场也会与原磁场相互耦合。针对这一影响, 文献[23]考虑了感生涡流回路的二次交叉耦合作用, 将其引入空气中的电路模型, 即为海水环境中的等效电路模型, 如图 7 所示。

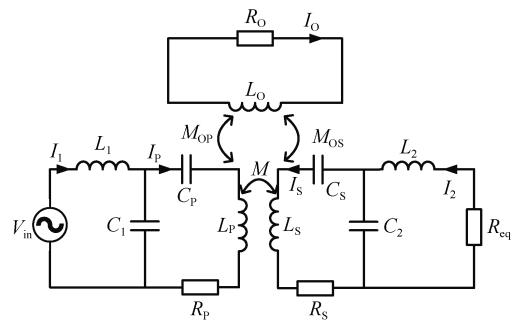


图 7 海水环境双边 LCC 系统等效电路模型  
Fig. 7 Equivalent circuit of double-sided LCC system in seawater environment

文献[24]在已有的研究上, 给出了一种更加精确的海水环境系统模型。通过计算线圈电流在感生

电场中产生的复功率, 得到等效涡流电阻和海水介质条件下系统互感系数的表达式。对互感系数进行分解, 得到了互阻系数“ $r$ ”, 它是电流控电压源的系数, 在此基础上给出了海水环境 MC-WPT 系统电路模型, 如图 8 所示。

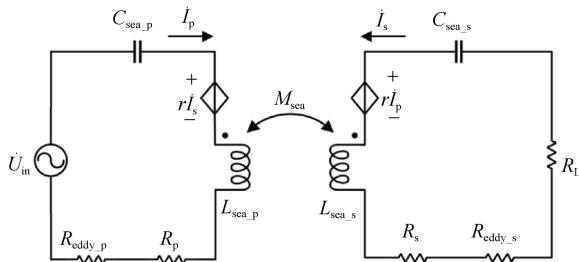


图 8 海水环境 MC-WPT 系统电路模型  
Fig. 8 Circuit model of MC-WPT system in seawater environment

总体来看, 国内外研究逐步深化了海水环境下 MC-WPT 系统的建模理论, 为应对水下无线电能传输系统性能的影响提供了有效的理论框架。除了海水涡流损耗, 海水环境 MC-WPT 系统的损耗还包括逆变损耗、绕组损耗、磁芯损耗、整流损耗和补偿网络损耗。系统传输效率与系统损耗息息相关, 因而想要实现系统效率的提升, 就必须对系统的损耗给出相应抑制措施。

## 2 海水环境 MC-WPT 系统效率优化

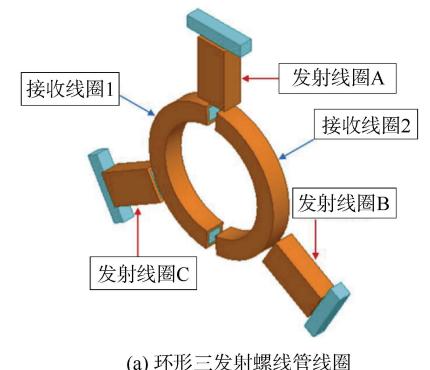
海洋环境的复杂性给 MC-WPT 系统的能量传输效率带来了严峻挑战, 其中, 海底洋流扰动和海水涡流损耗是 2 大关键影响因素。为克服这些难题, 国内外学者纷纷致力于系统效率的优化研究。针对海底洋流扰动, 研究者们通过对耦合机构进行抗偏移设计等, 增强系统的稳定性。同时, 针对海水涡流损耗, 研究者们通过调整系统参数和控制策略等, 减少了能量损失。这些成果为提升 MC-WPT 系统在海洋环境中的能量传输效率提供了新的思路和解决方案。

### 2.1 耦合机构优化

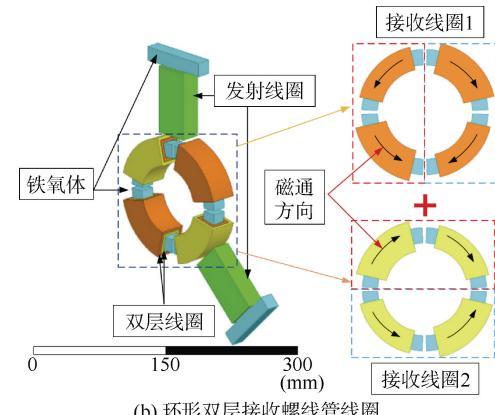
在水下环境中, 洋流的随机波动以及设备因海底地形变化或自身运动引起的位置变动, 都可能导致无线充电装置与接收设备之间的相对对准出现偏移。这种偏移不仅会导致电磁耦合系数降低, 而

且会直接影响能量传输的效率, 从而对水下无人设备或航行器的正常运行造成潜在的不利影响。

为了提高系统的抗偏移性, 文献[25]提出了一种同轴螺线管式的耦合机构, 该结构拥有较高的抗旋转偏移能力, 能够在耦合机构产生一定偏移时保证系统输出功率变化率稳定在 5.7% 以内, 同时实现了传输距离为 2 cm、效率为 85%、输出功率为 70~90 W 的技术指标。此外, 文献[26]设计了一种贴合 UUV 船体形状的磁耦合机构, 如图 9 (a) 所示, 该设计在系统完全对准时, 可以实现系统 745 W 功率输出的同时到达 86.19% 的 DC-DC 效率。在抗偏移的基础上, 为了提升功率密度, 文献[27]提出了一种环形双层接收螺线管线圈结构的旋转无线电能传输系统, 如图 9 (b), 该线圈结构能够实现稳定的输出功率和效率, 并且具有高旋转失准度, 弥补水下航行器充电易旋转偏移的缺点。该设计在航行器船体发生旋转偏移的条件下可实现系统 485~664 W 的输出功率, 并且 DC-DC 效率基本能维持在 92%。



(a) 环形三发射螺线管线圈



(b) 环形双层接收螺线管线圈

图 9 环形螺线管式耦合机构  
Fig. 9 Annular solenoid coupling mechanism

再者, 文献[28]设计了一种适用圆柱形航行器的 360° 折叠空间单极线圈结构, 如图 10 所示, 并设计了一种适用于水下航行器的 MC-WPT 系统。采用 LCC/S 谐振网络搭建了模拟海水条件下的 5 kW 输出功率的 MC-WPT 系统实验装置。在模拟海水中实现了传输距离 10 mm、效率为 96.8%、输出功率 5.18 kW 的指标, 同时实现了良好的抗旋转偏移性。

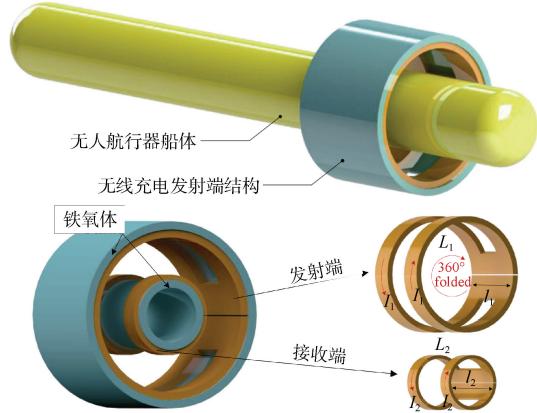


图 10 单极线圈耦合机构  
Fig. 10 Single pole coil coupling mechanism

上述同轴型的耦合机构虽然有效解决了系统偏移问题, 确保了稳定的能量传输, 但与此同时, 这一设计也增加了磁屏蔽设计的难度。磁屏蔽的复

杂化可能导致额外的能量损耗, 进而影响系统效率。针对该问题, 文献[29]提出了一种平面卷曲形单线圈结构, 如图 11 所示, 在实现耦合机构轻量化、抗偏移的同时, 实现了千瓦级的功率输出, 并且系统效率高达 95%。

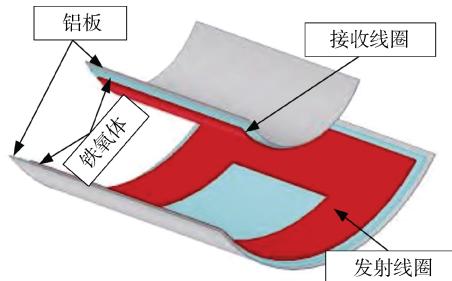
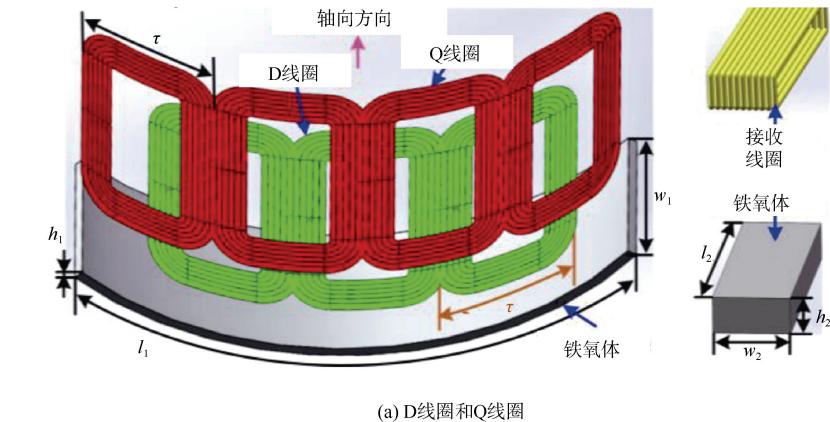


图 11 曲形平面线圈  
Fig. 11 Curved planar coils

同样为了实现接收端的轻量化, 文献[30]设计了一种具有 4 个发射线圈, 2 个交叉偶极子接收线圈的新型耦合机构, 其最大输出功率波动系数与旋转和轴向失准的关系分别为 12.1% 和 20.2%, 实现了系统平均功率为 964.7 W, UUV 的 DC-DC 效率为 90.9% 的参数指标。同样的, 文献[31]设计了一种具有重叠正交的 (D-Q) 型发射线圈的混合型耦合机构, 如图 12 (a) 所示。在该线圈结构中, D



(a) D线圈和Q线圈

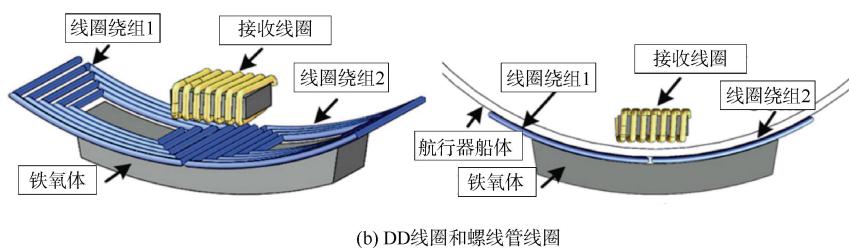


图 12 混合型磁耦合机构  
Fig. 12 Hybrid magnetic coupler

线圈和 Q 线圈相互解耦, 在调制机制下可以抑制耦合机构未对准时的输出波动, 该设计在旋转不对中 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 和轴向不对中 $[-30 \text{ mm}, 30 \text{ mm}]$ 范围内实现稳定输出, 同时实现了 1.2 kW 系统输出功率, 90% 的系统输出效率。而文献[32]为了简化耦合机构结构、提高系统效率, 设计了一种混合型的磁耦合机构, 发射线圈是弧形“DD”线圈结构, 而接收线圈为螺管线圈结构, 如图 12 (b) 所示。该系统可以向 UUV 以 DC-DC 为 95.1% 的效率提供 1.05 kW 功率。

## 2.2 系统电气参数优化

上述在海水环境 MC-WPT 系统效率优化时, 主要考虑洋流的影响。从提高系统抗偏移性能出发, 并为了提升系统效率, 采用了较近距离、强耦合的方式, 弱化了 SECL 对系统的影响。但在较远距离下, 这个影响将显著增大, 如文献[33]采用基于多中继线圈的方法来实现大气隙无线充电, 实现了水下传输距离 10 m, 输出功率 100 W 的指标, 但传输效率最高仅为 25.9%。因此, 必须考虑海水高电导率带来的海水涡流损耗对系统传输效率的影响。

在 SECL 抑制方法的研究上, 国内外的研究学者也给出了不同的方案。文献[34]为了研究 SECL 的分布情况, 搭建了罐型磁芯的磁耦合机构模型, 并通过仿真给出 SECL 的分布情况, 表明 SECL 最大的区域分布在罐型磁芯窗口附近, 为了提升效率, 文中采用环氧树脂对耦合器磁芯窗口进行灌封方法降低了 SECL。

除了使用物理方法对 SECL 进行抑制, 针对 SECL 的影响特性, 还可以通过优化系统的电气参数(如频率、负载和线圈电流相位差), 有效降低系统的海水涡流损耗, 进而提高整体系统效率。文献[35]以效率优化为导向, 在考虑了 SECL、开关元件及整流器损耗等条件下, 分析了不同频率和负载下的 WPT 系统传输性能, 如图 13 所示。随后, 文献[36]在确定的耦合机构结构下, 提出了一种通过选择设计合适的系统工作频率和耦合机构参数的方法, 实现了对 SECL 的抑制, 该系统能在 5 mm 间隙下保持 92% 的 DC-DC 效率。此外, 文献[37]建立了 SECL 等效阻抗与系统工作频率和匝数的对应关系, 采用粒子群算法进行最大传输效率寻优, 实现了效率为 84% 的 MC-WPT 系统。

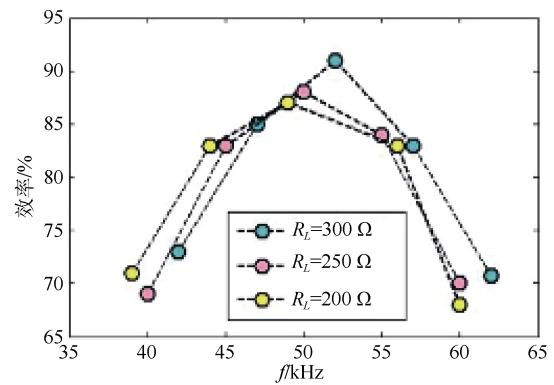


图 13 不同频率和负载下的系统最优效率  
Fig. 13 Optimal efficiency of system under different frequencies and loads

在分析 SECL 特性的基础上, 文献[38]研究了 SECL 与发射和接收线圈电流相位差的关系, 并设计了一种水下双边 LCC 双向传输 MC-WPT 系统, 通过移相控制策略调节发射线圈和接收线圈电流之间的相位差, 从而实现对 SECL 的抑制, 海水涡流损耗占比实验曲线如图 14 所示。在传输距离 11 cm 下, 实现了输出功率为 3.2 kW、效率为 91.1% 的指标。而文献[19]基于 S/SP 型 WPT 系统给出了一种参数设计方法, 实现了系统恒压输出; 同时进一步分析了发射和接收端电流相位差特性, 给出了一种实现 SECL 抑制的系统效率优化方法。通过对发射线圈和接收线圈电流相位差的优化, 实现了在海水电导率 5.1 S/m 环境下、传输距离 15 cm、输出功率 8.01 kW、DC-DC 效率 94.64% 的技术指标, 进一步提升了系统传输效率。

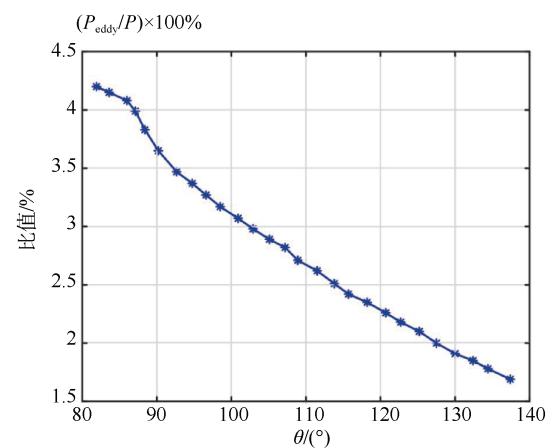


图 14 电流相位差与海水涡流损耗占比实验结果  
Fig. 14 Experimental results on proportion of current phase difference and seawater eddy current loss

文献[39]和[40]从 SECL 产生的源头出发,为了降低线圈电流,提出了一种三线圈结构,即“二对一”结构,如图 15 所示。通过 2 个发射线圈给一个接收线圈充电,该结构虽然使产生 SECL 的区域变

大,但相比传统双线圈结构而言,在传输相同功率情况下,线圈电流变小,降低了 SECL,使得系统效率提高了 10%。增加线圈的方式虽然能够实现 SECL 抑制,提升系统效率,但其应用场景比较受限。

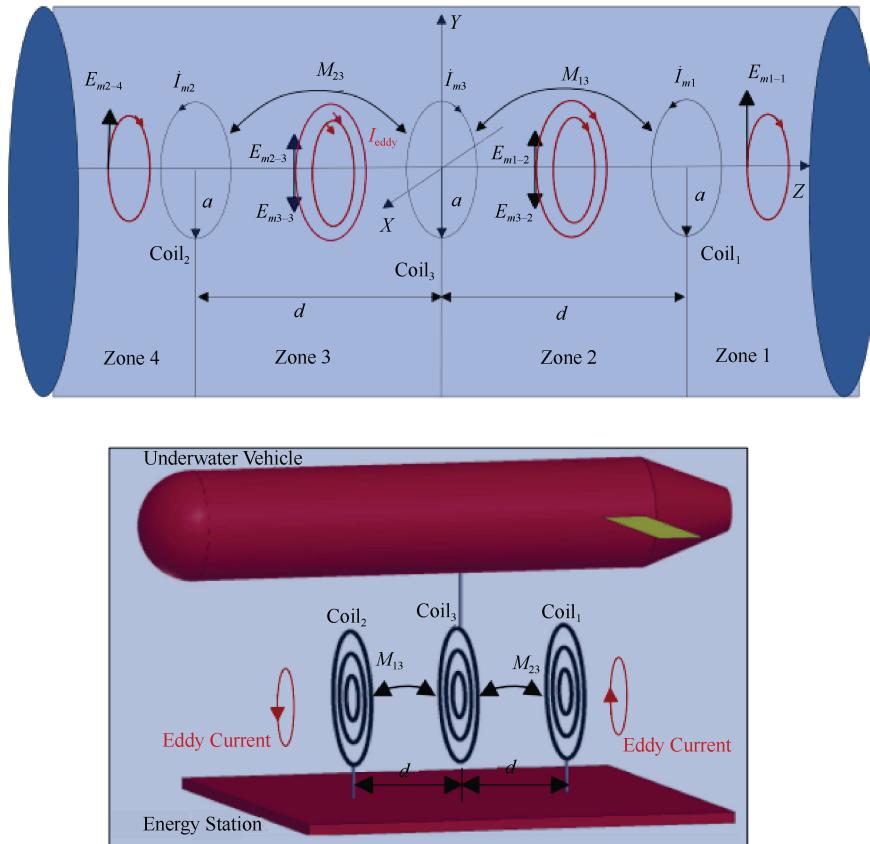


图 15 三线圈结构能量传输示意图  
Fig. 15 Schematic diagram of energy transmission in three-coil structure

### 3 结束语

无线电能传输技术对水下无人航行器进行电能补给的方式因其安全、高效和可靠性,得到了迅速发展。相较于空气环境,海水环境的水流波动、电导率等复杂因素对系统的功率传输产生了显著的影响,前期人们从海水涡流损耗的建模分析,耦合机构的设计以及电气参数的优化等方面对海水环境下系统传输特性的认识与优化做了大量的工作并取得了显著的进步。未来,新型磁芯材料及抗压壳体材料等的优化及应用,将进一步提高耦合机构的电磁耦合特性及参数稳定性,基于新型半导体器件的电能变换拓扑及参数优化方法的进步,将进一步提高水下电能传输的功率容量及功率密度,而智能控制技术的研究及应用将进一步提高水下无

线电能传输系统的综合能效指标及环境变化适应性,使其能在更宽距离范围以及功率范围内实现稳定、可靠、高效的电能传输,从而推进水下装备技术的发展,促进海洋资源的开发与利用。

### 参考文献

- [1] 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): 9668-9681.
- [2] TEENETI C R, TRUSCOTT T T, BEAL D N, et al. Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 46 (1): 68-87.
- [3] 宋保维,潘光,张立川,等.自主水下航行器发展趋势及关键技术[J].中国舰船研究,2022, 17 (5):

- 27-44.
- [4] 邱志明, 马焱, 孟祥尧, 等. 水下无人装备前沿发展趋势与关键技术分析[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31 ( 1 ): 1-9.
- [5] 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.
- [6] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 ( 10 ): 2584-2600.
- [7] 黄学良, 谭林林, 陈中, 等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28 ( 10 ): 1-11.
- [8] 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.
- [9] 陈国东. 水下电缆巡检机器人无线充电关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [10] 王忠达. 自主水下航行器磁耦合式无线充电系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [11] CAI C W, LI J P, WU S, et al. A bipolar and unipolar magnetic channel multiplexed WPT system with simultaneous full-duplex communication for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38 ( 12 ): 15086-15090.
- [12] OREKAN T, ZHANG P, SHIH C. Analysis, design, and maximum power-efficiency tracking for undersea wireless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 6 ( 2 ): 843-854.
- [13] 郭海潮, 张献, 杨庆新, 等. 空间全向无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 ( 24 ): 9006-9021.
- [14] JAYALATH S, KHAN A. Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: a review[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9 ( 5 ): 6196-6218.
- [15] HONG S, JEONG S, LEE S, et al. Cochlear implant wireless power transfer system design for high efficiency and link gain stability using a proposed stagger tuning method[C]// 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference ( WPTC ). Seoul: IEEE, 2020.
- [16] 韩笑迎. 穿戴设备电能无线传输距离延伸方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [17] 程志远, 张智超, 眭清洋, 等. 基于无迹卡尔曼滤波水下 WPT 系统副边关键参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44, ( 11 ): 4470-4479.
- [18] 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.
- [19] 孙昌文. MC-WPT 系统海水涡流损耗抑制及系统效率优化方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
- [20] 张克涵, 阎龙斌, 闫争超, 等. 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析[J]. 物理学报, 2016, 65 ( 4 ): 330-338.
- [21] KIM J, KIM K, KIM H, et al. An efficient modeling for underwater wireless power transfer using Z-parameters[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61 ( 6 ): 2006-2014.
- [22] ZHANG K H, MA Y S, YAN Z C, 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, 2018, 8 ( 1 ): 909-917.
- [23] SUN P, WU X S, CAI J, et al. Eddy current loss analysis and frequency optimization design of double-sided LCC-IPT system in seawater environment[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65 ( 2 ): 407-418.
- [24] XU F L, HUANG H C. Frequency selection for underwater wireless power transfer based on the analysis of eddy current loss[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2023, 163: 154618.
- [25] ZENG Y Q, RONG C C, LU C H, et al. Misalignment insensitive wireless power transfer system using a hybrid transmitter for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58 ( 1 ): 1298-1306.
- [26] KAN T, ZHANG Y, YAN Z, et al. A rotation-resilient wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67 ( 8 ): 6935-6942.
- [27] YAN Z C, SONG B W, ZHANG Y M, et al. A rotation-free wireless power transfer system with stable output power and efficiency for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34 ( 5 ): 4005-4008.
- [28] MOSTAFA A, WANG Y, TANGIRALA S, et al. A 5 kW hull-compatible inductive charging system with 360° folded spatial unipolar coupler for autonomous underwater vehicles ( AUVs )[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59 ( 6 ): 7001-7012.
- [29] YAN Z C, ZHANG Y M, ZHANG K H, et al. Underwater wireless power transfer system with a curly

- coil structure for AUVs[J]. IET Power Electronics, 2019, 12 ( 10 ): 2559-2565.
- [30] WU S, CAI C W, CHAI W P, et al. Uniform power IPT system with quadruple-coil transmitter and crossed dipole receiver for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58 ( 1 ): 1289-1297.
- [31] WU S, CAI C W, WANG A B, et al. Design and implementation of a uniform power and stable efficiency wireless charging system for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70 ( 6 ): 5674-5684.
- [32] CAI C W, WU S, ZHANG Z P, et al. Development of a fit-to-surface and lightweight magnetic coupler for autonomous underwater vehicle wireless charging systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 ( 9 ): 9927-9940.
- [33] HASABA R, OKAMOTO K, KAWATA S, et al. Experimental study on over 10 meters magnetic resonance wireless power transfer under sea with coils[C]// 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference ( WPTC ). Montreal: IEEE, 2018.
- [34] 李泽松. 基于电磁感应原理的水下非接触式电能传输技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [35] 周杰. 海水环境下非接触电能传输效率的优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [36] ZHOU J, YAO P Z, CHEN Y Q, et al. Design considerations for a self-latching coupling structure of inductive power transfer for autonomous underwater vehicle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 57 ( 1 ): 580-587.
- [37] 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/OL]. 电源学报, 2022: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20221205.1552.003.html>.
- [38] 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.
- [39] ZHANG K H, ZHANG X Y, ZHU Z B, et al. A new coil structure to reduce eddy current loss of WPT systems for underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68 ( 1 ): 245-253.
- [40] ZHANG K H, DUAN Y Y, ZHU Z B, et al. A coil structure applied in WPT system for reducing eddy loss[C]// 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer ( WoW ). Chongqing: IEEE, 2017.

(责任编辑: 张曼莉)