

水下航行器感应式无线电能传输技术研究综述

闫争超¹, 胡谦宇¹, 赵晨旭¹, 伍敏¹, 文海兵², 张克涵³, 王来利^{1*}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049; 2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710048; 3. 西北工业大学航海学院, 陕西省 西安市 710072)

Review on Inductive Wireless Power Transfer Technology for Underwater Vehicles

YAN Zhengchao¹, HU Qianyu¹, ZHAO Chenxu¹, WU Min¹, WEN Haibing², ZHANG Kehan³, WANG Laili^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China;

3. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The inductive power transfer (IPT) technology provides an effective solution to the power supply of underwater vehicles for the long-time and continuous work, which has a good application prospect. This paper discusses the current hot issues of the underwater IPT technology from the theoretical and applied research aspects, mainly including eddy current loss in seawater calculation, system modeling, magnetic coupler design, and underwater anti-misalignment system design. Finally, the potential future development trends of the IPT technology are discussed from four aspects: deep-sea environmental adaptability, system interoperability, power and data hybrid transfer, and system-level optimization design.

KEY WORDS: inductive power transfer (IPT); underwater vehicle; eddy current loss; anti-misalignment; magnetic coupler

摘要: 感应式无线电能传输技术(inductive power transfer, IPT)为水下航行器长时间连续工作的电能补给问题提供了有效的解决方式,具有很好的应用前景。文中分别从理论和应用研究两方面对水下IPT技术的研究热点问题进行讨论,主要包括海水涡流损耗计算、系统建模、磁耦合机构设计和抗偏移系统设计。最后,从深远海环境适应性、系统互操作性、电能数据混合传输及系统级优化设计4个方面探讨该技术未来可能的发展趋势。

关键词: 感应式无线电能传输; 水下航行器; 涡流损耗; 抗偏移; 磁耦合机构

0 引言

我国在十四五规划中明确提出,将瞄准深远海

基金项目: 国家自然科学基金项目(52201405, 52171338); 台达电力电子科教发展计划(DREG2021004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52201405, 52171338); The Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Group (DREG2021004).

等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目;加快壮大海洋装备产业;坚持陆海统筹,发展海洋经济,建设海洋强国;提高海洋资源、矿产资源开发保护水平^[1]。水下航行器是指用于水下侦察、遥控猎雷和作战等可以回收的小型水下无人智能自航载体,具有自主能力强、载荷能力大及使命功能广等特点,已成为人类探测海洋、利用海洋及保卫海洋的重要装备之一,在水下目标监测、地形地貌观测、水下目标预警及海洋资源开发等方面具有极大的应用空间,也是未来空地海一体化网络中一个重要的移动节点^[2]。

能源问题是制约水下航行器长时间连续工作的重要因素。由于航行器自身携带能源有限,进行电能补给时需要上浮到海面,通过水面母船、平台或近岸线缆进行能源补给,在此过程中浪费了大量能源,同时这种工作方式存在工作连贯性差、隐蔽性差等问题,大大限制了水下航行器长时间连续工作的能力。此外,通过湿插拔接口进行充电也存在操作复杂、接口易磨损、成本高等不足^[3]。

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)研究始于20世纪80年代,主要包括磁场耦合^[4-5]、电场耦合^[6]、声场耦合^[7]及电磁辐射^[8]等方式。基于电场耦合的电能传输方式,由于海水电导率大,用于传输电能的4个极板为等势体,海洋环境下较难使用^[9];基于超声波声场耦合与电磁辐射的电能传输方式,在海洋环境中衰减较大,因此传输效率较低^[10];而基于磁场耦合的无线电能传输(又称感应式无线电能传输(inductive power transfer,

IPT))技术,适用于中短距离,并且在海洋环境中也能很好的传输电能,非常适合水下航行器等水下装备的电能补给^[11-13]。

感应式无线电能传输技术为水下航行器的能源问题提供了很好的解决方法。水下航行器在海洋环境下进行无线充电,航行器和海底基站间不存在直接电气连接,可避免传统接触式电能补给方式的安全隐患,提高了系统安全性;航行器与基站之间的传输功率可达千瓦级,能很好解决水下航行器的能源补给问题;同时整个充电过程在海洋环境下进行,海洋环境的复杂性有利于水下航行器的隐蔽。

近年来,水下 IPT 技术取得了一定的进展,研究热点主要集中在海水涡流损耗计算、系统建模、磁耦合机构优化设计及水下抗偏移系统设计等方面。本文将从水下 IPT 技术基本工作原理出发,针对海洋环境的特殊性阐述近年来研究成果现状,重点讨论水下 IPT 技术热点问题及未来的发展趋势。

1 水下 IPT 技术基本原理

无线电能传输系统建立在法拉第电磁感应理论基础之上,通过发射线圈和接收线圈之间的电磁耦合实现电能的无线传输。图 1 给出水下 IPT 系统结构原理图。系统发射端置于水下电能补给基站,接收端安装在水下航行器电能接收舱段。发射端直流电经过高频逆变器转换为高频交变电流为发射线圈提供激励,在发射线圈和接收线圈的电磁耦合作用下,将在磁耦合机构的接收线圈感应出同频率的交变电流,电能在不需要电气连接的情况下便可传输到系统接收端,再通过整流滤波处理后,便可满足水下航行器的电能补给需求。

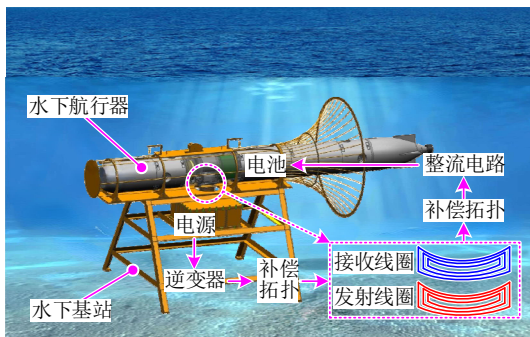


图 1 水下航行器 IPT 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the underwater vehicle IPT system

现有的水下 IPT 技术研究主要基于线圈互感电路模型^[14-15],互感电路模型利用感应电压来描述发

射端和接收端之间的耦合状态,发射线圈电流会在接收线圈上产生感应电压,同时接收线圈电流也会在发射线圈上产生感应电压,感应电压通过互感进行表达。图 2 给出 IPT 系统互感电路模型,其中: L_1 和 L_2 分别为系统发射端和接收端线圈自感; R_1 和 R_2 分别为发射端和接收端线圈等效电阻; U_1 和 U_2 分别为输入电压和输出电压交流侧有效值; I_1 和 I_2 为发射端和接收端线圈电流有效值; M 为发射端和接收端线圈之间的互感。

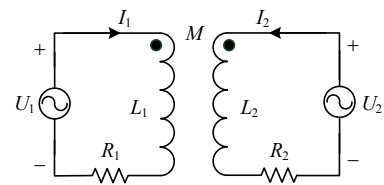


图 2 IPT 系统互感电路模型

Fig. 2 Mutual inductance circuit model of the IPT system

2 研究热点

2.1 理论研究

由于海水介质的特殊性及其海洋环境的复杂性,航行器通过水下能源基站进行无线电能补给时面临着新的难题和挑战。首先,相对于空气介质,海水介质的电磁物理参数大为不同。海水电导率和介电常数均比较大,产生寄生电阻、寄生电容等寄生参数,使得系统传输效率降低,并且增加了系统复杂程度。其次,由于水下航行器体积重量受限,随着对水下 IPT 系统传输功率需求的不断提高,耦合机构增大体积的需求与航行器有限空间之间的矛盾愈加突出,因此需要在有限空间进行适用于航行器的磁耦合机构设计。最后,水下航行器与基站对接采用完全自主方式,在电能补给过程中,电能稳定传输显得尤为重要。

2.1.1 海水涡流损耗计算

传输效率是衡量无线电能传输系统传输性能的重要指标,对技术的应用有着非常重要的意义。在海水环境中进行无线电能传输,海水介质电导率约为 4S/m ,IPT 系统在海水会产生较大的涡流损耗,影响系统传输效率^[16-17]。当系统频率或线圈电流增大时,海水中涡流损耗越来越显著。为此,研究人员基于定性和定量方法分别分析了海水介质中 IPT 系统的涡流损耗。

文献[18]采用有限元仿真方法定性分析了基于罐型磁心的磁耦合机构涡流损耗分布,研究表明,

磁心窗口附近涡流损耗最大,因而提出采用磁心窗口绝缘灌封的方法来降低涡流损耗;文献[19]分别分析了空气、淡水和海水介质中IPT系统线圈损耗、磁损及涡流损耗随工作频率的变化关系,结果表明,3种介质中系统线圈损耗和磁损基本相同,然而空气介质中涡流损耗为零,淡水介质中涡流损耗远小于海水介质中涡流损耗,当工作频率超过一定值后,海水中涡流损耗超过线圈损耗和铁损,成为系统最主要的损耗;文献[20]基于磁心无限大假设,提出一种海水中IPT系统涡流损耗计算方法,该方法基于麦克斯韦方程组,建立不同介质中电磁场计算模型,再结合边界条件得到计算域中任意点的电场强度,最后通过体积分得到海水中涡流损耗。结果表明,海水中IPT系统涡流损耗随着工作频率和线圈电流的增加而增加。

为了得到更准确的计算结果,研究人员提出图3所示的柱坐标系下无磁心单匝线圈电场强度计算模型^[21-22],从 z 轴负方向看,电流沿顺时针方向。

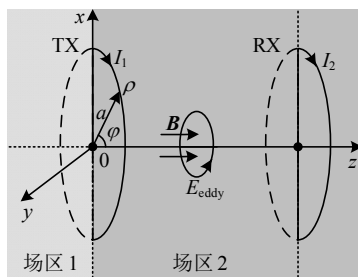


图3 单匝线圈电场强度计算模型

Fig. 3 Single-turn calculation model of the electric field strength

由此可得,发射线圈和接收线圈电流共同作用产生的涡流损耗 P_{eddy} 可以表示为

$$P_{\text{eddy}} = \int_V \sigma |\mathbf{E}|^2 dV = \int_V \sigma |\mathbf{E}_t + \mathbf{E}_r|^2 dV \quad (1)$$

式中: σ 为海水介质电导率; \mathbf{E}_t 和 \mathbf{E}_r 分别为发射线圈和接收线圈在海水域中任意点处产生的电场强度;电场强度 \mathbf{E} 是由发射线圈电流和接收线圈电流产生的电场强度矢量和。文献[21]基于此提出一种海水中螺线管线圈涡流损耗计算方法,分析了水下IPT系统损耗分布,从而选择出适用于水下无线电能传输系统的拓扑结构和工作频率;文献[23]提出IPT系统发射线圈和接收线圈发生侧向偏移情况下海水中涡流损耗计算方法,该方法运用坐标变换和叠加原理,求得海水中涡流损耗表达式。结果表明,在较小的侧向偏移情况下,涡流损耗基本不变,随着侧向偏移继续增加,涡流损耗会急剧增大。

海水介质中IPT系统的涡流损耗不可忽视,因此研究抑制涡流损耗的方法显得非常重要^[24-25]。文献[25]提出一种三线圈结构,该结构虽然使涡流损耗区域变大,但在传输相同功率情况下,两发射线圈电流仅为传统两线圈结构发射线圈电流的1/2,而涡流损耗与电流平方成正比,因此可以降低涡流损耗。结果表明,相较于传统两线圈结构,该三线圈结构发射线圈电流产生的涡流损耗降低了约1/2。

表1总结了海水涡流损耗的计算方法,有限元仿真方法可以定性得到海水涡流损耗分布,但却不能反映各工作参数与涡流损耗的定量关系;基于罐型磁心结构的电磁场建模方法是建立在磁心无限大假设之上,需引入一定的补偿方法进行修正;基于无磁心耦合机构的电磁场建模方法虽然可以得到精确的电磁场解析解,但是缺少磁心聚磁,系统工作时的磁场比较发散,会在水下航行器壳体及周围大范围海水区域产生涡流损耗,同时可能对航行器内部电子元件产生电磁辐射。为了兼顾电磁场解的精确性及电磁兼容性,可以通过建立较为精确的有磁心无线电能传输系统电磁场计算模型,得到系统涡流损耗,为系统建模及优化设计奠定基础。

表1 海水涡流损耗计算方法对比

Table 1 Comparisons among different eddy current loss calculation methods in seawater

文献	耦合机构形式	计算方法	分析方法	研究结论
[18]	EE型磁心结构	有限元仿真海水涡流损耗分布	定性	磁心窗口附近涡流损耗最大
[19-20]	罐型磁心结构	电磁场建模,理论计算海水涡流损耗	定量	涡流损耗随着工作频率和线圈电流的增加而增加
[21-25]	无磁心耦合机构	电磁场建模,理论计算海水涡流损耗	定量	涡流损耗与工作频率平方成正比,与线圈电流平方成正比

2.1.2 系统建模

海水电导率和相对介电常数远大于空气,IPT系统工作时会在周围空间产生时变电磁场,进而产生涡流。涡流激发的磁链会反过来影响耦合机构参数,造成原有系统失谐。同时涡流还会造成额外铜损,导致海水中传输效率降低,并且增加了系统的复杂程度。因此,空气中电路模型不再完全适用,需要建立海水介质中IPT系统电路模型^[26]。

根据电磁场理论,两个导体之间存在电位差时将表现出电容性。电容大小与导体形状、两导体间的距离及电介质有关。因此,发射线圈和接收线圈

之间存在跨接等效电容。空气介质的相对介电常数为 1，而海水介质的相对介电常数为 81，因此海水中线圈之间的等效电容比空气中大得多。文献[27]以 IPT 系统互感模型为基础，将水下 IPT 系统耦合机构等效电容引入到模型中，建立了图 4 所示的系统全互感模型，进而研究了水下系统耦合机构分布电容对系统传输特性及稳定性的影响，但是该模型没有对海水涡流损耗产生的寄生参数进行等效。

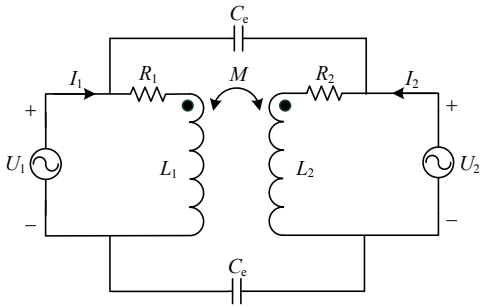


图 4 水下 IPT 系统磁耦合机构全互感模型
Fig. 4 Full mutual inductance model of the magnetic coupler of the underwater IPT system

基于电磁场解析计算结果，可将海水介质 IPT 系统涡流损耗分离独立考虑，一部分由发射线圈电流在海水中产生的电场强度产生，另一部分由接收线圈电流在海水中产生的电场强度产生^[28-29]。考虑涡流损耗对 IPT 系统的影响，在空气介质中互感电路模型的发射端和接收端分别引入一个电阻 R_{eddy1} 和 R_{eddy2} ，称之为涡流损耗等效电阻。然后根据空气中和海水中接收线圈感应电压的差异，得到海水中发射线圈接收线圈互感的复数表达形式，进而建立如图 5 所示的海水介质中 IPT 系统等效电路模型。

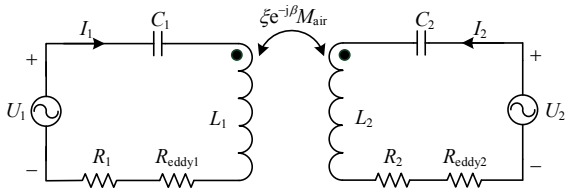


图 5 引入涡流损耗等效电阻水下 IPT 系统等效电路模型
Fig. 5 Equivalent circuit model of the underwater IPT system with the equivalent resistance of eddy current loss introduced

实际上，当 IPT 系统在海洋环境下工作时，线圈感应磁场在海水中产生涡流，而涡流产生的磁场又会同线圈磁场二次交叉耦合。因此，海洋环境中 IPT 系统的电路模型建立需要在空气环境中电路模型的基础上再引入一个涡流回路，将海水的影响等效成具有一定内阻的涡流回路，如图 6(a)所示。为

了便于模型的计算，可将涡流回路的阻抗映射到耦合线圈中，从而等效成耦合线圈校正阻抗值的增大或减小，进而得到图 6(b)所示的水下 IPT 系统简化电路模型^[30]。

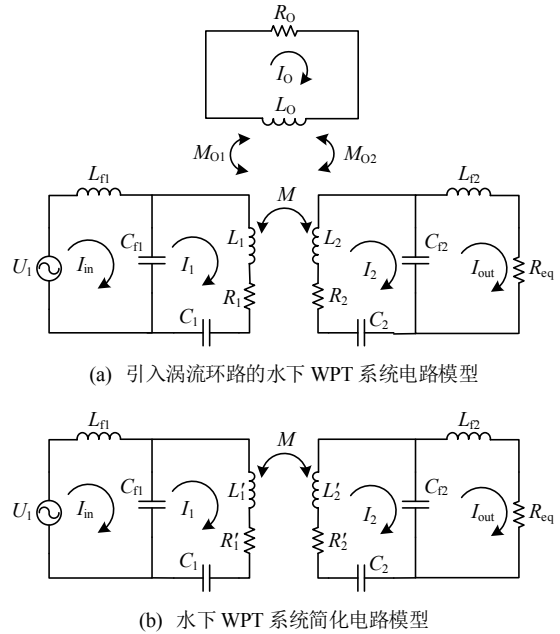


图 6 水下 IPT 系统等效电路模型
Fig. 6 Equivalent circuit model of the underwater IPT system

通过比较可以看出，图 5 和图 6(b)两种水下 IPT 系统电路模型形式和原理上是一致的，均是海水介质对 IPT 系统的影响进行阻抗等效，最终得到水下 IPT 系统电路模型。

2.1.3 磁耦合机构设计

IPT 系统中磁耦合机构的结构和几何形状至关重要，决定着磁耦合机构性能和磁场分布。磁耦合机构性能直接决定了系统的性能指标，因此，磁耦合机构设计是整个系统的关键。为了延长传输距离，提高传输效率和增大传输功率，国内外学者从不同方面进行了磁耦合机构设计。从材料角度，采用高磁导率材料(如铁氧体)和铝片来引导磁通和屏蔽杂散电磁场，这样可以有效提高耦合系数，进而增大传输功率和提高传输效率^[31]。同时，采用多股绝缘导线组成的利兹线作为发射线圈和接收线圈的绕制导线，可以有效减小耦合线圈的集肤效应和邻近效应^[32]。

从线圈结构角度，通过改变感应磁场分布情况，即使线圈具有相同的外部尺寸，不同的内部几何形状也可以得到不同的磁耦合效果。同时还需考虑其安装、对接等需求和抗海流冲击干扰等多种因素。

针对水下航行器的无线电能补给，国内外学者已设计出多种磁耦合机构。文献[33]提出了基于锥形线圈的磁耦合机构。该机构可将线圈间隙的高频磁场限制在磁心柱体内，电磁干扰抑制能力强，发射线圈和接收线圈可以获得较高的耦合系数。文献[20,34]从水下航行器与海底充电基站的接驳结构出发，设计出了多种适应性磁耦合机构，如图7(a)、(b)所示的基于罐型磁心和PM型磁心的磁耦合机构。这两种机构与普通的无磁心耦合器相比，具有更小的结构体积和更低的功率损耗。为了使这种传统磁心更适用于水下航行器回转体外壳结构，文献[35]设计了图7(c)所示的基于弧形EE型磁心的磁耦合机构。

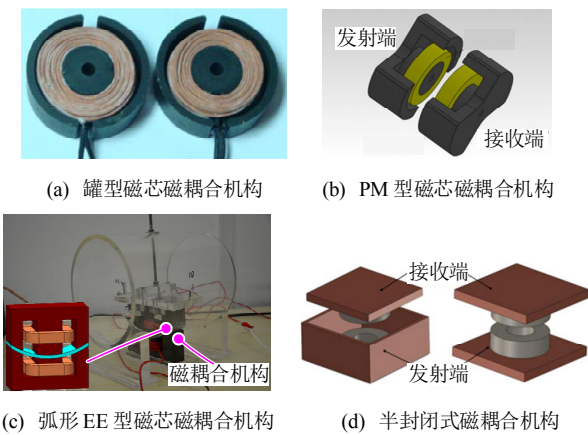


图7 水下IPT系统磁耦合机构

Fig. 7 Magnetic couplers of the underwater IPT system

上述研究均是基于传统的磁心结构，线圈需绕制在磁心柱之上，磁心结构尺寸大大限制了线圈的绕制尺寸，耦合系数随着传输距离增大而剧烈减小。为了保证传输功率，系统只能在较近的传输距离下工作。此类磁耦合机构传输距离在毫米级，传输功率在百瓦级。为了进一步提升IPT系统功率传输能力，文献[19]设计了图7(d)所示的基于半封闭式磁心的磁耦合机构，该机构基于大体积磁心在厘米级传输距离下实现了千瓦级输出功率。

磁耦合机构优化设计可以提高IPT系统抗偏移能力^[36-37]。为了提高水下IPT系统抗旋转偏移能力，基于水下航行器回转体外壳，文献[38]设计了图8(a)所示的基于弧面单极型线圈的磁耦合机构，并且以系统接收端重量最小为优化准则，针对单极型弧面线圈和双极型弧面线圈，进行了磁耦合机构优化设计，实现了千瓦级功率输出。文献[39]提出了基于弧面螺线管线圈磁耦合机构，通过耦合机构优化设计使得接收端重量显著减小，同时将磁场限制在耦合机构附近，减小了系统电磁辐射，然而上

述两种磁耦合机构只能解决水下航行器IPT系统局部旋转偏移问题。为了解决全周向旋转偏移问题，文献[40-42]设计使用图8(b)所示的同轴螺线管线圈作为能量传输线圈，接收线圈安装在航行器壳体周围，可以很好地适应航行器外壳，保证其流体动力特性，同时可解决航行器旋转偏移引起的功率传输不稳定问题。文献[43]基于同轴螺线管线圈提出了图8(c)所示的磁耦合机构。固定在充电基站的发射线圈呈锥面形状，水下航行器上的接收线圈为圆形螺线管线圈。通过理论推导去寻找发射线圈的锥面最佳倾角，使得在充电平面周围产生圆形且均匀的磁场区域，系统在旋转偏移和侧向偏移影响下也可具备稳定的输出功率。

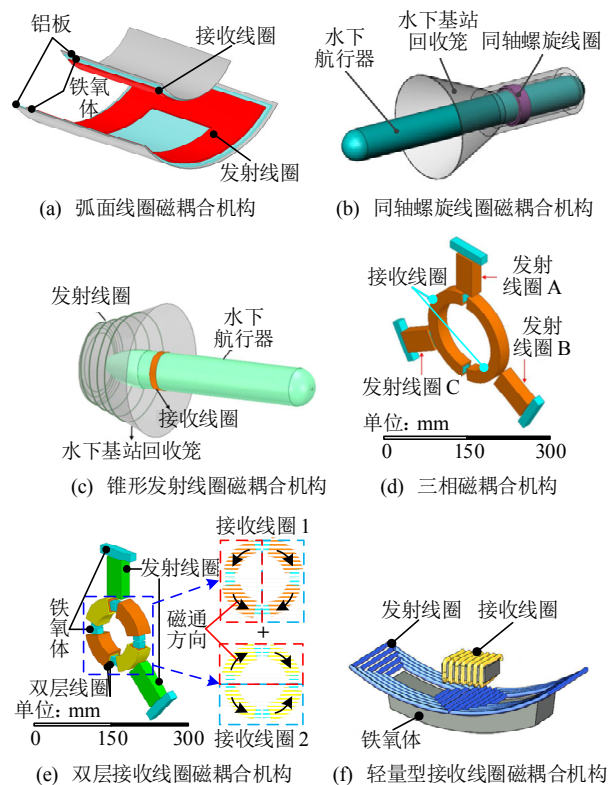


图8 水下抗偏移IPT系统磁耦合机构

Fig. 8 Magnetic couplers of the underwater anti-misalignment IPT system

然而根据文献[44]的研究，同轴螺线管线圈在交变电流激励下产生的电磁场相对发散，在充电过程中有可能对水下航行器内部的电子元器件产生影响，因此该文献提出了一种图8(d)所示的基于三相线圈结构的磁耦合机构。该机构产生的电磁场主要集中在线圈附近，不会发散到水下航行器内部，且该机构包含3个发射线圈和一个接收线圈，在全周向旋转偏移情况下可较稳定地传输功率。文献[45]提出图8(e)所示的基于单相双层接收线圈的磁耦合

机构。该机构包含一个发射线圈和两个双层接收线圈，两个接收线圈产生的磁通方向相互垂直，并且可以保证旋转偏移发生时发射线圈和两个接收线圈之间的互感相互补偿，因此两个接收线圈是解耦的，并且系统总互感基本保持不变，从而实现系统全周向偏移情况下功率的稳定传输。

为了同时解决旋转偏移和轴向偏移导致的互感剧烈变化问题，文献[46]提出了图 8(f)所示的基于轻量螺线管接收线圈的磁耦合机构，并对该机构进行优化设计，接收线圈远小于双极型发射线圈，可在一定偏移范围内有效提高系统抗旋转和轴向偏移能力。文献[25]提出了基于螺旋三线圈的磁耦合机构，该机构包括两个发射线圈及一个接收线圈，接收线圈放置在两个发射线圈中间。通过计算两个发射线圈电流激励产生的合成电场在空间的分布规律，建立多目标优化数学模型优化了两个发射线圈间距和线圈匝数，使得合成电场在接收线圈轴向移动区域内基本恒定，在一定范围内发生轴向偏移时，接收线圈上的感应电压可以基本保持不变，从而达到功率稳定传输的目的。

表 2 对比了不同水下 IPT 系统磁耦合机构的电气性能，可以看出，根据线圈数量可以分为单线圈耦合机构和多线圈耦合机构两类。单线圈耦合机构结构简单，广泛应用于水下 IPT 系统，可以实现毫米级到厘米级的传输距离，百瓦级到千瓦级的传输功率。然而这类耦合机构产生的磁场方向比较单一，当发射端和接收端发射偏移时，正对面积减少，有效磁通减少，耦合系数会急剧减小，从而影响系

表 2 水下 IPT 系统不同磁耦合机构对比

Table 2 Comparisons among different magnetic couplers of underwater IPT systems

文献	耦合机构形式	传输距离/mm	耦合系数	功率等级/W	抗偏移能力
[33]	锥形线圈	6	0.640	1000.0	低
[20]	罐型磁心	2	0.765	400.0	低
[34]	PM 型磁心	5	0.640	300.0	低
[35]	弧面 EE 型磁心	5	0.430	200.0	低
[19]	半封闭式磁心	25	0.540	10000.0	低
[38]	弧面单极型线圈	10	0.784	1000.0	中
[41]	弧面螺线管线圈	8	0.440	630.0	中
[42]	同轴螺线管线圈	9	0.740	500.0	高
[43]	同轴锥面线圈	10	0.190	89.4	高
[44]	分段多螺线管线圈	2	0.160	745.0	高
[45]	分段多螺线管线圈	4	0.170	664.0	高
[46]	弧面双极型线圈	8	0.534	1050.0	高

统功率传输的稳定性。为了提高系统抗偏移能力，研究人员提出多线圈耦合机构，通过磁场叠加方式实现磁场塑造，可有效增加耦合面积，实现偏移情况下耦合的稳定，从而有效提升水下 IPT 系统的抗偏移能力。然而多线圈耦合机构只能在某一方向或者两个方向提升系统抗偏移能力，同时多线圈耦合机构会增加系统构造成本，在实际使用时应根据具体应用场景选择最优的耦合机构形式。

2.1.4 水下抗偏移 IPT 系统设计

水下航行器在海洋环境下进行无线电能补给，由于海水流动性以及海底暗流等不稳定因素不可避免地会使线圈产生旋转偏移、轴向偏移和水平偏移，导致 IPT 系统发射端和接收端之间的互感剧烈变化，进而影响电能稳定传输。现有的抗偏移 IPT 系统设计方法主要有 3 种。第 1 种是通过磁耦合机构优化设计实现功率的稳定传输^[47]。设计中可采用多线圈耦合机构，通过磁场叠加方式实现磁场塑造，能有效增加耦合面积，实现偏移情况下耦合的稳定，从而可有效提升水下 IPT 系统的抗偏移能力。文献[48-49]通过多发射线圈的交叠设计，得到发射线圈上方较均匀的磁场，提高了水下航行器水平偏移容忍度。具体内容在 2.1.3 节已详细讨论，单线圈耦合机构抗偏移能力较弱，多线圈耦合机构可在某一方向或者两个方向提升系统抗偏移能力，因此，单从磁耦合机构优化设计角度提升水下 IPT 系统抗偏移能力是有限的，需要通过和其他方式结合，多种方式协同配合提升多方位抗偏移能力。

第 2 种是通过混合补偿拓扑设计实现电能的稳定传输。尽管合理的补偿拓扑参数设计能够提升系统抗偏移能力，但会额外引入无功功率，影响系统传输性能^[50]。因此，研究人员从混合补偿拓扑角度出发，设计了多种组合式补偿拓扑，在提升系统抗偏移能力的同时，降低系统无功功率。新西兰奥克兰大学最早提出图 9 所示的混合补偿拓扑^[51]，该拓

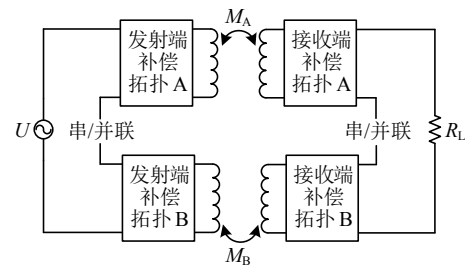


图 9 混合补偿拓扑结构

Fig. 9 The hybrid compensation topology

扑由补偿拓扑 A 和 B 组成。IPT 系统发射端和接收端发生偏移时，两个补偿拓扑中的互感 M_A 和 M_B 随之减小，补偿拓扑 A 的增益正比于互感，而补偿拓扑 B 的增益反比于互感，通过参数的合理设计可使两拓扑增益之和在一定范围偏移时保持基本恒定。

文献[52]利用 SS 补偿拓扑输出功率随耦合系数减小而增大和 LCC-LCC 补偿拓扑输出功率随耦合系数减小而减小的性质，巧妙结合这两种补偿拓扑，实现了偏移情况下系统输出功率的相互弥补，提高了系统抗偏移性能，保证了功率的稳定传输。文献[53]提出了图 10 所示的基于双耦合 LCC-S 补偿拓扑的 IPT 系统。研究表明，偏移情况下补偿线圈和接收接收线圈之间的耦合可以弥补偏移导致的主线圈之间传输功率的降低，从而实现整个 IPT 系统功率的稳定传输，提高水下航行器 IPT 系统抗旋转偏移能力。

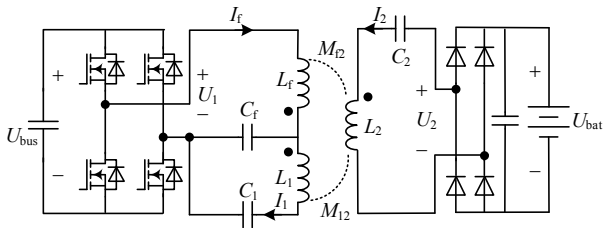


图 10 基于双耦合 LCC-S 补偿拓扑的 IPT 系统
Fig. 10 The IPT system based on dual-coupled LCC-S compensation topology

第 3 种是通过系统控制方法实现电能稳定传输。IPT 系统分为发射端装置和接收端装置，如图 11 所示。发射端装置由直流电源、DC/DC 电路、逆变电路、发射端补偿拓扑和发射线圈组成，接收端装置由接收线圈、接收端补偿拓扑、整流电路、DC/DC 电路和负载组成。发射端和接收端的 DC/DC 电路可以根据实际工作要求引入。

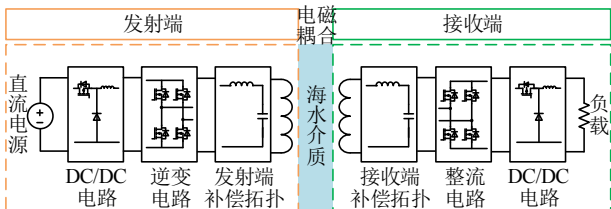


图 11 水下 IPT 系统架构
Fig. 11 The structure of the underwater IPT system

当发射端和接收端发生偏移时，通过调节各电路模块的可控变量，可以实现负载两端电能稳定输出。在实际工作过程中，可以从逆变电路控制^[54]、

补偿拓扑控制^[55]、整流电路控制^[56]及 DC/DC 电路控制^[57] 4 个方面进行调制。基于逆变电路控制的抗偏移技术通过控制脉冲宽度、脉冲密度及脉冲频率等变量，实现对系统传输增益的控制，具有低成本、小体积等优势，但是该控制技术会引起软开关丢失、电流振荡及频率分叉等问题，增大系统损耗的同时造成系统的不稳定。

基于补偿拓扑控制的抗偏移技术采用开关切换控制的可变电感或电容来调整系统传输增益，但该方法增加了 IPT 系统开关损耗。

基于整流电路的抗偏移技术通过控制有源整流电路的脉冲宽度、脉冲密度及电压电流相位差等变量，实现对系统传输增益的控制，具有低成本、小体积等优势，但是该控制技术会对接收端交流侧等效参数产生影响。

基于 DC/DC 电路控制的抗偏移技术根据采集的负载信息调节占空比，实现对传输增益的调控，具有高精度控制、宽范围调节等优势，但该技术增加了系统级数和体积，系统效率较低且成本较高。文献[58]提出一种水下 IPT 系统最大效率跟踪控制方法，通过实时监测耦合系数来改变接收端 DC/DC 变换器占空比，从而实现传输效率和功率的稳定。研究结果表明当发射端和接收端之间的间隙增大时，该方法保证系统传输效率始终跟踪到 85% 的最大传输效率，输出功率始终可以达到 34W。

基于系统控制的抗偏移技术对于系统输出量的控制较为精准，但是通常需要通过发射端和接收端通信获得系统的状态信息，而通信精度和速度可能降低系统的可靠性。特别在水下应用中，发射端和接收端之间充满海水介质，导电海水使得数据传输困难，系统闭环控制难度大。同时针对宽范围控制情况，该技术可能需要多变量协同控制，增大了系统控制复杂性。因此，可以通过与耦合机构优化设计和补偿拓扑设计等方式结合使用，来降低系统控制的复杂度。

2.2 应用研究

国外较早开始水下无线电能传输技术的应用研究。2001 年，美国麻省理工学院和伍兹霍尔海洋研究所率先研制出通过海底观测网络向 Odyssey IIb 自主水下航行器充电的无线电能传输系统^[59-60]。该系统可在两千多米海水深度下向水下航行器提供 200W 功率，传输效率可达 79%，同时可通过以太网向水下航行器进行数据传输。2004 年，日本东

北大学和 NEC 公司合作研制出适用于为水下航行器“Marine Bird”供电的无线电能传输系统^[33,61]。该系统传输功率可达 1kW，效率在 90%以上。2007 年，美国华盛顿大学在 ALOHA-MARS 海底观测网络基础上，设计完成了为锚系海洋剖面观测器供电的无线电能传输系统^[62]。该系统可传输 240W 的电能，效率达到 70%。2012 年，美国巴特尔纪念研究所为解决轻量级水下航行器续航时间有限的问题，研发了以重量级无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV) Proteus 作为水下充电平台，为轻量级水下航行器进行无线电能补给的充电坞站系统^[63]。该系统电能传输功率为 450W，数据传输速率为 400kbps。

2019 年日本松下公司^[64]针对水下航行器远距离无线电能补给需求，设计了图 12(a)所示的多中继线圈 IPT 系统。该系统发射线圈和中继线圈的直径为 3.4m，在发射线圈上方每隔 1.7m 布置一个中继线圈，发射线圈和接收线圈传输距离可达 10m，系统输出功率可达 100W，最大传输效率为 25.9%。然而水下航行器大多采用金属外壳，水下航行器放置在发射线圈和中继线圈建立的磁场空间，会在水下航行器金属外壳产生很大的涡流损耗，设计团队为减小损耗，提出在航行器表面覆盖一层磁性材料，可在提高系统耦合的同时实现磁场屏蔽。

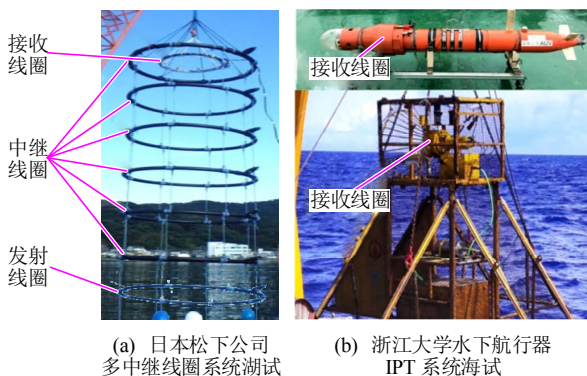


图 12 水下 IPT 系统应用研究

Fig. 12 The applied research of the underwater IPT system

国内相关应用研究起步较晚，但发展迅速，已取得了一定的成果。浙江大学于 2017 年研制出了图 12(b)所示的水下航行器及水下充电基站^[65]。该系统分别在 50 和 105m 水深下进行了海试，水下航行器可顺利与水下基站对接，输出功率为 682W，电磁耦合器效率可达 92%，系统效率可达 78.5%。2021 年浙江大学改进了水下航行器对接系统^[66]。搭

载该系统的水下能源基站由水面船只通过缆绳悬吊在水下，最大深度为 100m。水下航行器与基站距离在 0.03~3km 范围时通过声导引方式为航行器导航，当距离在 30m 以内时，通过光传感器和 WiFi 模块解算航行器位置与姿态，并完成对接。该系统分别在 31 和 72m 水深完成了湖试，在作业深度超过 30m 时，水下航行器共尝试对接 39 次，24 次完全进入对接站末制导结构，其余 15 次顺利进入锥形入口，但不能进入末节制导结构。对接完成后，在无线电能功率传输的启动阶段会因过载而导致电源故障。针对这一问题，研究团队设计了一种浪涌电流抑制模块，需要降低启动阶段的线圈电流峰值，避免功率需求超过电源最大输出能力而故障断电。实验结果表明当输出功率为 680W 时，电流峰值降低至 7.2A，系统无断电故障^[67]。

2018 年西北工业大学针对水下航行器与海底基站对接的电能补给问题，设计了一套水下无线充电系统，并搭建了充电基站，已完成了湖试试验^[68]。水下航行器和水下基站顺利完成了对接，并实现了对航行器的无线电能补给，输出功率为 1kW，系统效率可达 80%。

3 技术挑战与发展趋势

从以上分析可以看出，水下 IPT 技术衍生于空气中 IPT 技术，二者传输原理与系统结构基本一致。尽管近年来水下 IPT 技术取得了一定进展，但由于海水介质的特殊性及其海洋环境的复杂性，目前水下 IPT 技术面临着新的难题和挑战。

3.1 深远海环境适应性

水下 IPT 系统在深远海工作，海洋环境参数(如盐度、海水压力、温度)在不同海域、不同水深、不同季节差异较大，这些环境参数的变化会影响海水介质电磁参数和 IPT 系统磁耦合机构相关参数。同时水下 IPT 系统长期工作时，海洋微生物附着生长变化会导致系统周围电磁参数非均匀分布。这些变化会影响系统的传输特性及稳定性。

当软磁材料磁心处于深海环境中，受到海水压力、环境外力作用、海水腐蚀等导致的压磁效应影响，其初始磁导率会随着海水压力的增大而减小，磁滞回线也会发生变化。磁心的磁性变化会导致系统的传输功率、整机效率剧烈波动，严重影响水下 IPT 系统性能。在铁磁性物理学的角度来看，磁畴结构的改变均可以引起铁磁材料磁性的变化。掌握

铁磁性材料的磁性受压磁效应影响机理有助于为深海环境下 IPT 系统建立物理模型提供理论依据^[34,69]。然而目前压磁效应对于铁磁材料的影响仍处于离线检测的水平,不能根据力与磁的定量关系建立统一的检测标准,难以在复杂工况中实现工程应用。因此需要研究深海环境下铁磁材料的磁性受压磁效应影响机理,为磁心冗余设计提供理论指导。

海水温度变化会影响海水介质的电导率和介电常数,随着温度的升高,电导率增大而介电常数减小,进而影响海水中 IPT 系统的传输特性^[70-71]。在深海环境中,一些海底生物会寄生于耦合机构或产生一定的生物污染影响耦合机构性能^[72]。由于生物化学反应繁多且成分复杂,其对耦合机构的影响尚无系统级分析。因此,研究复杂海水成分及随时间和空间变化的环境参数及 IPT 系统周围微生物附着生长对海水介质电磁参数的影响规律,然后对整个系统进行建模分析,进而针对不同工况的水下 IPT 系统提出相应的环境适应性策略,具有很重要的实际意义。

3.2 电能和数据混合传输

IPT 系统在海水环境工作过程中,蓄电池电量及发射端和接收端线圈相对位置的变化,都会直接影响系统的传输功率和效率。为了确保电能稳定、高效传输,必须实现发射端和接收端的实时通信,进而运用相应的控制策略实现系统的闭环控制。同时,水下航行器在执行完探测任务返回海底无线电能补给基站后,需要将采集的大量探测数据通过水下基站上传到岸上监测中心。因此,需要研究适用于海洋环境中高速率、高可靠性通信方式^[73]。现有的通信方式中,水声通信传输速率慢且硬件成本较高^[74-75],激光通信不易对准^[76],而采用电磁场通信方式在近距离内通信可兼具传输速率高、适用性强、成本低等优点。

现有的 IPT 系统电能和数据混合传输技术中主要为以下两种。第 1 种是通过设计多谐振耦合机构,取其中低频谐振点用于电能传输,高频谐振点用于数据传输^[77-78]。通过设计无源器件的参数,使电能传输通道的谐振频率尽可能远离数据传输通道的高频段以优化信噪比,同时兼顾数据传输通道的幅值与带宽。另一种是利用电能传输频率作为数据传输的高频载波,通过幅移键控^[79]、频移键控^[80]、相移键控^[81]等调制方式产生低频调制波传递数据。根据数据传输速率和解调复杂度选择合适的调制方

式与调制深度以优化信噪比。

水下航行器在海底需要承受高压,因此将系统电能和数据传输模块集成到航行器上的同时,需要保证不破坏自身抗压性。多通道传输必然会增加水下航行器设计的复杂性,而单通道传输是利用电能传输线圈进行通信,大大简化了系统复杂度,但是可能存在电能和数据多路传输的干扰问题,信号的调制和解调难度大。

目前,水下无线电能和数据混合传输技术仅仅停留在初步阶段,亟需建立系统的、精确的模型,为不同功率等级和传输速度的混合传输系统设计,以及信噪比和传输效率等参数优化提供理论依据。

3.3 水下 IPT 系统互操作性

水下航行器种类繁多,为了适应不同种类和型号的航行器供电需求,存在不同种类、规格 IPT 系统,因此系统的互操作性问题成为新的研究方向。互操作性是指无人系统在执行和完成任务时的协同能力^[82]。水下 IPT 系统的互操作性应具备通信互操作性、补偿拓扑互操作性、线圈互操作性、对接系统互操作性。不同于空气中 IPT 系统互操作性,水下环境中基站和航行器成功对接后,才能进行电能的无线补给,因此需要考虑对接系统互操作性。

通信互操作性是指不同型号、不同种类的海底基站和 underwater 航行器之间可以实现信息的互联互通。水下航行器可通过声、光、高频电磁波等多种方式进行通信,因此海底基站的通信模块应具备相应的互操作性且兼容多种通信协议,并识别水下航行器机载设备的工作特性与功率需求。

补偿拓扑互操作性是指通过补偿拓扑使不同耦合机构谐振于工作频率,提升系统的功率传输能力。当原副边分别采用 S 型、P 型、LCC 型谐振拓扑时,优化谐振电容或通过可变电容器提升系统的互操作性^[83]。

线圈互操作性是指海底基站可兼容不同结构、参数的接收线圈,如回转体线圈、弧形线圈、矩形线圈、圆形线圈、DD 线圈等规格线圈及其他具有特定结构的不规则形状线圈。目前的研究集中于平面线圈的互操作性研究,通过优化线圈的尺寸、形状、结构提高系统的互操作性^[84]。

对接系统互操作性是指海底基站的机械结构可以保证对不同尺寸、结构的水下航行器均能准确可靠地完成对接,使 IPT 系统在电能传输时保持稳定。水下航行器尺寸和结构多样化给对接系统的互

操作性带来了极大挑战, 对接系统的准确度和稳定性同时影响 IPT 系统的功率传输能力与效率。

目前, IPT 系统的互操作性评价标准仍处于探索阶段。在电动汽车领域中广泛应用的互操作性表征参数有传输功率、效率、耦合系数、线圈品质因数、端口阻抗和线圈互感值等^[85]。然而受海水介质的电导率和介电常数影响, 水下 IPT 系统的端口阻抗难以准确测量, 其线圈互感值的测量也会受到不同深度下的海水压磁效应影响。因此水下 IPT 互操作性的评价方法仍需进一步的研究和探索。

3.4 系统级优化设计

水下航行器在海洋环境中工作并进行电能补给, 水下基站和航行器无线电能补给舱段需要解决对接及高压强问题, 同时航行器外壳大都采用金属合金加工而成, 当水下基站向航行器进行无线充电时, 发散的电磁场会在金属壳体以及大范围海水中产生涡流损耗, 从而降低系统传输效率, 并且会影响附近电气电子系统工作的可靠性, 因此, 水下 IPT 系统需要兼顾耐压性能和电磁屏蔽。另外, 航行器内部空间和可附加重量有限, 需要提高磁耦合机构和高频变换器的空间利用率并进行轻量化设计。系统电磁屏蔽设计和轻量化设计耦合在一起, 需要综合考虑水下特殊安装结构、海水涡流损耗抑制、屏蔽材料选择(铁氧体、金属、纳米晶材料或电磁超材料)等^[86]。

在此基础上, 还需采用集成化、微小型电力电子器件, 减小系统封装体积, 进行系统级优化设计, 从而真正意义上实现深远海环境水下航行器的无线电能补给。

4 结论

本文首先论述了水下 IPT 系统工作原理, 然后针对海洋环境以提升水下电能传输功率和效率为出发点, 在理论研究方面介绍了水下 IPT 系统涡流损耗分析方法; 基于涡流损耗计算结果, 讨论了不同的电路模型之间的等效关系; 总结了磁耦合机构优化设计方法, 进而提升 IPT 功率传输能力及抗偏移能力; 讨论了磁耦合机构优化设计、混合拓扑设计及系统控制方法在提高系统抗偏移能力方面的优势和不足, 进而提出多方式结合的抗偏移系统设计理念。在应用研究方面介绍了水下航行器 IPT 系统应用案例。最后探讨了水下 IPT 技术未来可能的发展趋势。

综上所述, 水下 IPT 技术已经取得了一定进展, 但由于海水介质的特殊性 & 海洋环境的复杂性, 目前水下 IPT 技术仍面临着新的难题和挑战。为了加快水下 IPT 技术的发展及应用, 可重点突破深远海环境适应性、系统互操作性及电能数据混合传输等方面, 为系统级优化设计奠定基础。

参考文献

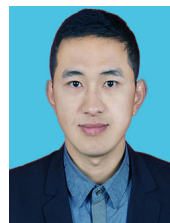
- [1] 李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 829-849.
LI Jialin, SHEN Manhong, MA Renfeng, et al. Marine resource economy and strategy under the background of marine ecological civilization construction[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(4): 829-849(in Chinese).
- [2] MCMAHON J, PLAKU E. Autonomous data collection with timed communication constraints for unmanned underwater vehicles[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 1832-1839.
- [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 underwater vehicle[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(23): 159-162(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).
- [5] ZHANG Yiming, CHEN Shuxin, LI Xin, et al. Design methodology of free-positioning nonoverlapping wireless charging for consumer electronics based on antiparallel windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 825-834.
- [6] 武帅, 陈星维, 孟祥尧, 等. 具有强抗偏移及轻量化特性的电场耦合式无人机无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2404-2412.
WU Shuai, CHEN Xingwei, MENG Xiangyao, et al. An electric-field coupled wireless power transfer system with misalignment-tolerance and light-weight characteristics for unmanned aerial vehicle applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2404-2412(in Chinese).
- [7] KAR B, WALLRABE U. Performance enhancement of an ultrasonic power transfer system through a tightly coupled

- solid media using a KLM model[J]. *Micromachines*, 2020, 11(4): 355.
- [8] JIN Ke, ZHOU Weiyang. Wireless laser power transmission: a review of recent progress[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3842-3859.
- [9] ZHANG Hua, LU Fei. Insulated coupler structure design for the long-distance freshwater capacitive power transfer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5191-5201.
- [10] 许康, 陈希有, 刘丹宁. 海下超声耦合无线电能传输系统电学阻抗变换技术[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17): 4461-4467.
XU Kang, CHEN Xiyong, LIU Danning. Electrical impedance transformation techniques for an ultrasonic coupling wireless power transfer system under sea water [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4461-4467(in Chinese).
- [11] 牛王强. 水下无线电能传输研究进展[J]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2017, 9(1): 46-53.
NIU Wangqiang. The state of the art of underwater wireless power transfer[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 9(1): 46-53(in Chinese).
- [12] 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(3): 778-788.
- [13] ZHOU Jie, LI Dejun, CHEN Ying. Efficiency improvement of underwater midrange inductive contactless power transmission via a relay resonator[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2014, 48(3): 73-87.
- [14] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(3): 1-13.
ZHAO Zhengming, ZHANG Yiming, CHEN Kainan. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(3): 1-13(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 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): 048401.
ZHANG Kehan, YAN Longbin, YAN Zhengchao, et al. Modeling and analysis of eddy-current loss of underwater contact-less power transmission system based on magnetic coupled resonance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 048401(in Chinese).
- [17] 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: IEEE, 2020.
- [18] 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.
LI Zesong. Underwater contactless power transmission based on electromagnetic induction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010(in Chinese).
- [19] 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): 1-10.
- [20] ZHOU Jie, LI Dejun, CHEN Ying. Frequency selection of an inductive contactless power transmission system for ocean observing[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 60: 175-185.
- [21] LIN Mingwei, LI Dejun, YANG Canjun. Design of an ICPT system for battery charging applied to underwater docking systems[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 145: 373-381.
- [22] 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.
- [23] YAN Zhengchao, SONG Baowei, ZHANG Kehan, et al. Eddy current loss analysis of underwater wireless power transfer systems with misalignments[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(10): 101421.
- [24] ZHANG Kehan, DUAN Youyou, ZHU Zhengbiao, 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, China: IEEE, 2017.
- [25] ZHANG Kehan, ZHANG Xinyi, ZHU Zhengbiao, 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.
- [26] 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.
- [27] 程志远. 水下大功率无线电能传输系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [28] 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.
- [29] LIU Zhimeng, LI Fang, TAO Chengxuan, et al. Design of wireless power transfer system for autonomous underwater vehicles considering seawater eddy current loss[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(10): 3783-3792.
- [30] SUN Pan, WU Xusheng, CAI Jin, 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.
- [31] WANG C S, STIELAU O H, COVIC G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1308-1314.
- [32] ZHANG Wei, WHITE J C, ABRAHAM A M, et al. Loosely coupled transformer structure and interoperability study for EV wireless charging systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(11): 6356-6367.
- [33] KOJIYA T, SATO F, MATSUKI H, et al. Construction of non-contacting power feeding system to underwater vehicle utilizing electro magnetic induction[C]//*Oceans 2005*. Brest, France: IEEE, 2005.
- [34] LI Zesong, LI Dejun, LIN Lin, et al. Design considerations for electromagnetic couplers in contactless power transmission systems for deep-sea applications[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2010, 11(10): 824-834.
- [35] YAN Zhengchao, ZHANG Kehan, WEN Haibing, et al. Research on characteristics of contactless power transmission device for autonomous underwater vehicle [C]//*Oceans 2016-Shanghai*. Shanghai, China: IEEE, 2016.
- [36] WU Shuai, CAI Chunwei, CHAI Wenping, et al. Uniform power IPT system with quadruple-coil transmitter and crossed dipole receiver for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(1): 1289-1297.
- [37] QIAO Kangheng, SUN Pan, RONG Enguo, et al. Anti-misalignment and lightweight magnetic coupler with H-shaped receiver structure for AUV wireless power transfer[J]. *IET Power Electronics*, 2022, 15(16): 1843-1857.
- [38] YAN Zhengchao, ZHANG Yiming, ZHANG Kehan, et al. Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for AUVs[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(10): 2559-2565.
- [39] CAI Chunwei, ZHANG Yanyu, WU Shuai, et al. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 65432-65442.
- [40] SHI Jianguang, LI Dejun, YANG Canjun. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(1): 51-62.
- [41] WEN Haibing, SONG Baowei, ZHANG Kehan, et al. A novel electromagnetic actuator in an inductive power transmission system for autonomous underwater vehicle [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(9): 1-6.
- [42] 程志远, 陈坤, 李东东, 等. 旋转式无线充电系统偏移特性研究[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(22): 4648-4657. CHENG Zhiyuan, CHEN Kun, LI Dongdong, et al. Research on offset characteristics of rotary wireless charging system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(22): 4648-4657(in Chinese).
- [43] ZENG Yingqin, RONG Cancan, LU Conghui, et al. Misalignment insensitive wireless power transfer system using a hybrid transmitter for autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(1): 1298-1306.
- [44] KAN Tianze, ZHANG Yiming, YAN Zhengchao, et al. A rotation-resilient wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(8): 6935-6942.
- [45] YAN Zhengchao, SONG Baowei, ZHANG Yiming, 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*, 2019, 34(5): 4005-4008.
- [46] CAI Chunwei, WU Shuai, ZHANG Zhipeng, 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.
- [47] HE Zhiqiang, WANG Yang, DING Liqin, et al. Research on three-dimensional omnidirectional wireless power transfer system for subsea operation[C]//*Oceans 2017-Aberdeen*. Aberdeen, United Kingdom: IEEE, 2017.
- [48] YANG Canjun, WANG Tianlei, CHEN Yanhu. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(8): 2108-2117.
- [49] SATO N, KIFUNE H, KOMEDA S. A coil layout of wireless power transfer systems based on multicoil arrangement for underwater vehicles[J]. *Electrical*

- Engineering in Japan, 2019, 207(2): 38-48.
- [50] 陈阳, 杨斌, 彭云尔, 等. 感应式无线电能传输系统抗偏移技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5537-5556.
CHEN Yang, YANG Bin, PENG Yun'er, et al. Review of anti-misalignment technology in inductive wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5537-5556(in Chinese).
- [51] ZHAO Lei, THRIMAWITHANA D J, MADAWALA U K. A hybrid bi-directional IPT system with improved spatial tolerance[C]//2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). Taipei, China: IEEE, 2015.
- [52] ZHAO Lei, THRIMAWITHANA D J, MADAWALA U K. Hybrid bidirectional wireless EV charging system tolerant to pad misalignment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7079-7086.
- [53] YAN Zhengchao, ZHANG Yiming, ZHANG Kehan, et al. Fault-tolerant wireless power transfer system with a dual-coupled LCC-S topology[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11838-11846.
- [54] ZHANG Zhen, SHEN Shen, LIANG Zhenyan, et al. Dynamic-balancing robust current control for wireless drone-in-flight charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3626-3635.
- [55] ZHANG Kehan, GAO Wei, SHI Rui, et al. An impedance matching network tuning method for constant current output under mutual inductance and load variation of IPT system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 11108-11118.
- [56] LIU Yeran, MADAWALA U K, MAI Ruikun, et al. An optimal multivariable control strategy for inductive power transfer systems to improve efficiency[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8998-9010.
- [57] XIA Chenyang, WANG Wei, REN Siyuan, et al. Robust control for inductively coupled power transfer systems with coil misalignment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8110-8122.
- [58] OREKAN T, ZHANG Peng, 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, 2018, 6(2): 843-854.
- [59] FEEZOR M D, SORRELL F Y, BLANKINSHIP P R. An interface system for autonomous undersea vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 522-525.
- [60] BRADLEY A M, FEEZOR M D, SINGH H, et al. Power systems for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 526-538.
- [61] KOJIYA T, SATO F, MATSUKI H, et al. Automatic power supply system to underwater vehicles utilizing non-contacting technology[C]//Oceans '04 MTS/IEEE Techno. Kobe, Japan: IEEE, 2004.
- [62] MCGINNIS T, HENZE C P, CONROY K. Inductive power system for autonomous underwater vehicles[C]//Oceans 2007. Vancouver, Canada: IEEE, 2007.
- [63] PYLE D, GRANGER R, GEOGHEGAN B, et al. Leveraging a large UUV platform with a docking station to enable forward basing and persistence for light weight AUVs[C]//2012 Oceans. Hampton Roads: IEEE, 2012.
- [64] HASABA R, OKAMOTO K, KAWATA S, et al. Magnetic resonance wireless power transfer over 10m with multiple coils immersed in seawater[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(11): 4505-4513.
- [65] LIN Ri, LI Dejun, ZHANG Tao, et al. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24(3): 902-916.
- [66] LIN Mingwei, LIN Ri, YANG Canjun, et al. Docking to an underwater suspended charging station: systematic design and experimental tests[J]. Ocean Engineering, 2022, 249: 110766.
- [67] YANG Canjun, LIN Mingwei, LI Dejun. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(2): 430-441.
- [68] SONG Baowei, WANG Yushan, ZHANG Kehan, et al. Research on wireless power transfer system for torpedo autonomous underwater vehicles[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(9): 1-8.
- [69] 柏树壮. 循环拉伸荷载作用下深海管线钢压磁磁场演变规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
BAI Shuzhuang. Research on evolution of piezomagnetic field of deep sea pipeline steel under cyclic tensile load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019(in Chinese).
- [70] 马运季. 磁耦合谐振式无线电能传输特性的分析与研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
MA Yunji. Analysis and research on the transmission characteristics of magnetic coupling resonant wireless transmission system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [71] LIANG Ce, YANG Guang, YUAN Feng, et al. Modeling and analysis of thermal characteristics of magnetic coupler for wireless electric vehicle charging system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 173177-173185.
- [72] OILER J, ANDERSON G, BANA V, et al. Thermal and biofouling effects on underwater wireless power transfer [C]//2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference

- (WPTC). Boulder, United States: IEEE, 2015.
- [73] 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.
CHEN Guodong. Research on key technologies of wireless charging for underwater cable inspection robot [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019(in Chinese).
- [74] 王南朔, 李醒飞, 房诚, 等. 浮标水下传感器非接触供电及通讯系统设计[J]. 电源技术, 2017, 41(1): 131-133, 145.
WANG Nanshuo, LI Xingfei, FANG Cheng, et al. Design of contactless power and data transmission system for buoy's underwater sensors[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(1): 131-133, 145(in Chinese).
- [75] 傅文韬. 载人潜水器-水下多平台信息交互技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
FU Wentao. Research on manned submersible-underwater multi-platform information interaction technology[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020(in Chinese).
- [76] 刘兴, 吴应明, 罗广军, 等. 水下大容量无线光通信技术最新研究现状[J]. 光通信技术, 2017, 41(7): 52-54.
LIU Xing, WU Yingming, LUO Guangjun, et al. Latest research status of large capacity underwater wireless optical communications[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(7): 52-54(in Chinese).
- [77] SUN Yue, YAN Pengxu, WANG Zhihui, et al. The parallel transmission of power and data with the shared channel for an inductive power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5495-5502.
- [78] 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.
- [79] 刘浩洋. 磁耦合谐振水下无线能量与信息同步传输关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU Haoyang. Research on key technologies of underwater simultaneous wireless information and power transmission in magnetic resonance coupling[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).
- [80] 李哲. 基于磁耦合谐振的无线携能通信系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Zhe. The research of simultaneous wireless information and power transfer based on coupled magnetic resonances[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015(in Chinese).
- [81] 朱勇. 基于高效调制的无线携能通信系统及其在 RFID 中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZHU Yong. Efficient modulation based SWIPT system and its application to RFID[D]. Nanjing: Southeast University, 2017(in Chinese).
- [82] 张献, 陈志鑫, 沙琳, 等. 基于三参数表征电动汽车无线充电系统互操作性评价方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1569-1581.
ZHANG Xian, CHEN Zhixin, SHA Lin, et al. Research on interoperability evaluation method of electric vehicle wireless power transfer system based on three parameters characterization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1569-1581(in Chinese).
- [83] 韩秀. 电动汽车无线充电系统 LCC 型谐振补偿网络参数设计方法及其互操作特性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
HAN Xiu. Research on parameter design and interoperability of networks with LCC Topology for EV wireless charging system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019(in Chinese).
- [84] AHMAD A, ALAM M S, MOHAMED A A S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 934-945.
- [85] 杨光, 宋凯, 黄晓华, 等. 用于电动汽车无线充电线圈互操作性评价的量规设备研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 363-370.
YANG Guang, SONG Kai, HUANG Xiaohua, et al. Research on the gauge device for coil interoperability evaluation of wireless electric vehicle charging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 363-370(in Chinese).
- [86] WANG De'an, CUI Shumei, ZHANG Jiantao, et al. A novel arc-shaped lightweight magnetic coupler for AUV wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 1315-1329.



闫争超

在线出版日期: 2022-10-25。

收稿日期: 2022-07-15。

作者简介:

闫争超(1991), 男, 博士, 助理教授, 硕士生导师, 研究方向为水下无线电能传输技术, yanzc1991@163.com;

*通信作者: 王来利(1982), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽禁带功率半导体器件封装集成及无线电能传输技术, llwang@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)