

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.4.219

中图分类号: TM724

文献标志码: A

# 兼顾抗旋转偏移和中心磁场抑制的三相 IPT 系统设计与分析

宋毅<sup>1</sup>, 罗颖<sup>1</sup>, 麦瑞坤<sup>1</sup>, 朱宸彦<sup>1</sup>, 肖静<sup>2</sup>(中国电源学会会员), 陈绍南<sup>2</sup>  
(1.西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2.南方电网无线传能联合实验室  
(广西电网有限责任公司), 南宁 530023)

**摘要:** 与传统接触式充电方式相比, 采用感应式电能传输 IPT(inductive power transfer)系统给自主水下航行器 AUVs(autonomous underwater vehicles)充电更加方便和安全。为了解决 AUV 船体中心磁场强和由波浪引起的旋转偏移导致传输功率剧烈波动的问题, 提出1种具有新型耦合结构的三相 IPT 系统。耦合器由3个发射线圈和4个反向交替串联的接收线圈组成, 该结构有利于抑制中心磁场并提高抗旋转偏移性能。Maxwell 仿真结果表明, 在船体旋转时, 等效互感  $M_{eq}$  波动小于2%, 同时 AUV 中心磁场始终保持在较低水平。此外, 为简化系统分析, 采用1种无源元件解耦的方法对3个发射线圈进行解耦。搭建了1台基于 LCC-S 补偿拓扑的实验样机来验证系统的可行性, 实验结果表明, 当 AUV 旋转时, 传输功率为 536~595 W, 最大波动率为 9.91%, 系统直-直最高效率为 86.28%。

**关键词:** 感应式电能传输; 自主水下航行器; 抗旋转偏移; 三相; 抑制中心磁场

## Design and Analysis of Three-phase IPT System with Anti-rotation Misalignment and Central Magnetic Field Suppression

SONG Yi<sup>1</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, MAI Ruikun<sup>1</sup>, ZHU Chenyan<sup>1</sup>, XIAO Jing<sup>2</sup>, *Member, CPSS*, CHEN Shaonan<sup>2</sup>  
(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Southern Power Grid Corporation Wireless Power Transmission Joint Laboratory, Guangxi Power Grid Co., Ltd, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Compared with the traditional plug-in charging method, it is safer and more convenient to employ an inductive power transfer (IPT) system to charge autonomous underwater vehicles (AUVs). To alleviate the strong magnetic field inside the AUV hull and the dramatic power fluctuation caused by the rotation misalignment of the AUV under the turbulent water, a three-phase IPT system with a novel coupling structure is proposed. The coupler is composed of three transmitting coils and four receiving coils connected in alternating reverse series, which can suppress the central magnetic field and improve the anti-rotation misalignment performance simultaneously. The Maxwell simulation results show that when the AUV hull rotates, the equivalent mutual inductance  $M_{eq}$  fluctuation is less than 2%, and the magnetic field of the AUV center always maintains a low level. In addition, to simplify the system analysis, a decoupling method based on a passive component is adopted to decouple the three transmitting coils. A laboratory-

scale prototype based on an LCC-S compensation topology was built to verify the feasibility of the system. Experimental results show that when AUV rotated, the output power varied from 536 W to 595 W with a maximum fluctuation of 9.91%. The maximum DC-DC efficiency of the system was 86.28%.

**Keywords:** Inductive power transfer (IPT); autonomous underwater vehicles (AUVs); anti-rotation misalignment; three-phase; suppression of central magnetic field

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-11-13, 2022-01-28,  
2022-03-03; 录用日期: 2022-03-04; 网络首发日期: 2022-04-26  
基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51977184); 无线供电及其应用四川省青年科技创新研究团队资助项目(2020JDT0004)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51977184; Sichuan Youth Science and Technology Innovation Research Team under the grant 2020JDT0004

感应式电能传输 IPT(inductive power transfer) 技术由于其无接触火花、无磨损磨耗及安全便捷的特性,被广泛应用于消费电子<sup>[1-2]</sup>、生物医疗<sup>[3-4]</sup>和电动汽车<sup>[5-6]</sup>等领域。在一些特殊场合(如水下充电),无线供电技术还具有不可替代的优势。由电池提供动力的自主水下航行器 AUVs(autonomous underwater vehicles)被广泛应用于近海测量<sup>[7]</sup>、深海考古<sup>[8]</sup>和水雷对抗<sup>[9]</sup>等领域,但受其体积和电池容量的限制,AUV 需要返回基地充电而无法在水底长时间执行任务。传统的有线充电方式在水下环境中遇到极大挑战,由于水的导电性,需要设计复杂的充电接口和密封结构以降低漏电的风险。而 IPT 技术利用电磁感应原理,能够实现电源侧到负载侧的无接触电力传输,确保了电路系统与水下环境的完全隔离,降低了系统漏电风险和制造成本。

美国北卡罗来纳州立大学 Feezor M D 等<sup>[10]</sup>最先提出在 AUV 中使用无线充电技术,并设计了 1 种用于 AUV 电源和数据传输的无线供电系统,其由 2 个可分离的对称铁芯组成,线圈缠绕在倾斜表面,传输功率为 200 W 时的传输效率为 79%。为适应海面波动,1 种锥形线圈被开发并实现了 1 kW 的功率传输<sup>[11]</sup>。哈尔滨工业大学 Cheng Zhiyuan 等<sup>[12]</sup>提出 1 种半封闭磁芯结构以降低海水中的涡流损耗,效率为 91%情况下的传输功率为 10 kW。但是,上述设计均未考虑耦合器与船体外形的兼容性,从而增大了 AUV 的航行阻力,对航行速度和机动性产生了不利影响。为解决这一问题,文献[13]引入同轴线圈结构,较好地适应了 AUV 的船体,无需改变船体形状,然而同轴线圈产生的电磁场集中在船体中心,较强的电磁场可能会干扰 AUV 内部电力电子器件或控制电路的正常工作,导致 AUV 系统发生故障。为抑制 AUV 内部磁场,文献[14-15]提出采用偶极线圈磁力耦合器或三发射线圈结构的无线充电系统,2 种结构均能将磁场约束在线圈附近,但系统传输功率和效率对旋转偏移十分敏感,而受洋流影响,船体在充电时不可避免地发生旋转,为保证 AUV 在任何角度下均能得到有效

的充电,系统的抗旋转偏移能力至关重要。Kan Tianze 等<sup>[16]</sup>基于文献[15]中的三发射线圈结构,提出 1 种反向绕制的接收线圈以提高系统抗旋转偏移能力,实验结果表明系统功率为 321~745 W,DC-DC 效率为 76.24%~86.19%,功率最大波动率为 56.91%。此外,西北工业大学 Yan Zhengchao 等<sup>[17]</sup>提出了 1 种双反绕接收线圈,2 个接收线圈的磁通相互垂直从而维持总互感恒定,该系统在旋转时的输出功率为 485~664 W,功率最大波动率为 26.95%,系统效率约保持在 92%。但是,上述这些具有抗旋转偏移的无线供电系统并未对 AUV 内部磁场做过多的优化。

为了同时兼顾船体中心磁场小和系统抗旋转偏移这 2 项性能,本文提出 1 种原边为三相发射线圈,副边为 4 个反向交替串联的接收线圈的耦合结构。其中,原边每相线圈被分成 2 段,相对放置,串联在三相逆变器的某相输出,三相发射线圈间存在交叉耦合,可能会破坏系统平衡,增加逆变器容量,导致系统效率下降<sup>[18]</sup>。对此,本文介绍了 1 种采用无源元件来消除原边三相线圈互感的方法,并对解耦后的三相 IPT 系统进行了理论推导和分析,使用有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对所提结构进行了磁场仿真,最后搭建了 1 台 595 W 的实验样机来验证理论分析的正确性。

## 1 电路设计

三相 IPT 系统的电路拓扑如图 1 所示, $E$  为直流源,经三相逆变器逆变后得到  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  这 3 个有效值相等、相位互差  $120^\circ$  的交流电压。系统采用 LCC-S 补偿拓扑,补偿电感  $L_{fA}$ 、 $L_{fB}$ 、 $L_{fC}$  分别与补偿电容  $C_{fA}$ 、 $C_{fB}$ 、 $C_{fC}$  谐振;原边线圈  $L_{pA}$ 、 $L_{pB}$ 、 $L_{pC}$  分别与补偿电容  $C_{fA}$ 、 $C_{fB}$ 、 $C_{fC}$ 、 $C_{pA}$ 、 $C_{pB}$ 、 $C_{pC}$  及解耦电容  $C_M$  组成谐振回路;副边线圈  $L_s$  和补偿电容  $C_s$  谐振。 $M_{AB}$ 、 $M_{BC}$  和  $M_{CA}$  为发射线圈之间的互感, $M_{AR}$ 、 $M_{BR}$  和  $M_{CR}$  为三相发射线圈与接收线圈之间的互感。全桥整流器将交流转换为直流,AUV 电池用直流负载电阻  $R_L$  代替。

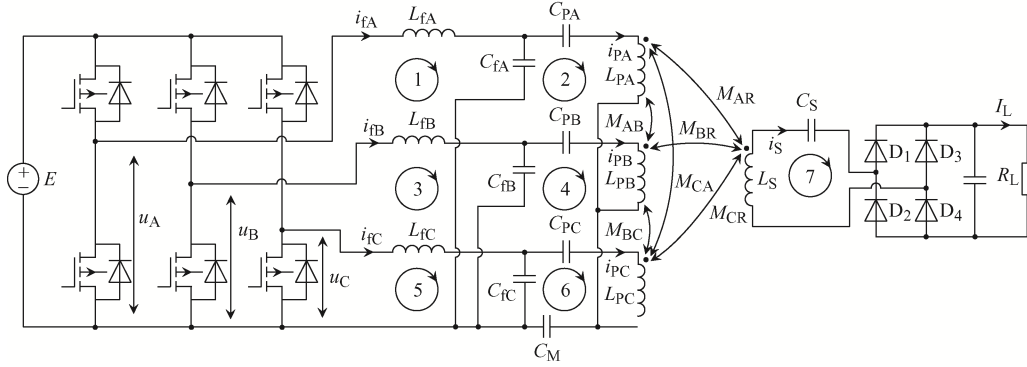


图1 LCC-S拓扑

Fig. 1 LCC-S topology

为简化系统, 设计  $L_{fA} = L_{fB} = L_{fC} = L_f$ , 则  $C_{fA} = C_{fB} = C_{fC} = C_f$ , 同时  $L_{PA} = L_{PB} = L_{PC} = L_P$ ,  $C_{PA} = C_{PB} = C_{PC} = C_P$ 。设  $\omega$  为谐振角频率, 系统参数关系可表示为

$$\begin{cases} j\omega L_f = \frac{1}{j\omega C_f} \\ j\omega L_P = \frac{1}{j\omega C_P} + \frac{1}{j\omega C_f} + \frac{1}{j\omega C_M} \\ j\omega L_S = \frac{1}{j\omega C_S} \end{cases} \quad (1)$$

### 1.1 解耦分析

原边线圈之间的交叉耦合会影响系统的稳定性, 同时增加系统分析的复杂度, 因此本文需要对3个原边线圈进行解耦。在现有学者提出的双线圈解耦方法<sup>[19]</sup>的基础上, 本文推导了三线圈结构通过无源元件解耦的条件。

图2为三线圈解耦电路, 根据基尔霍夫电压定律, 各线圈两端口间的电压表达式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{PA} = (j\omega L_{PA} + \Delta X)\dot{I}_{PA} + (j\omega M_{AB} + \Delta X)\dot{I}_{PB} + (j\omega M_{CA} + \Delta X)\dot{I}_{PC} \\ \dot{U}_{PB} = (j\omega L_{PB} + \Delta X)\dot{I}_{PB} + (j\omega M_{AB} + \Delta X)\dot{I}_{PA} + (j\omega M_{BC} + \Delta X)\dot{I}_{PC} \\ \dot{U}_{PC} = (j\omega L_{PC} + \Delta X)\dot{I}_{PC} + (j\omega M_{CA} + \Delta X)\dot{I}_{PA} + (j\omega M_{BC} + \Delta X)\dot{I}_{PB} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\dot{I}_{PA}$ 、 $\dot{I}_{PB}$  和  $\dot{I}_{PC}$  为流经各线圈的电流;  $\Delta X$  为解耦元件的等效阻抗。

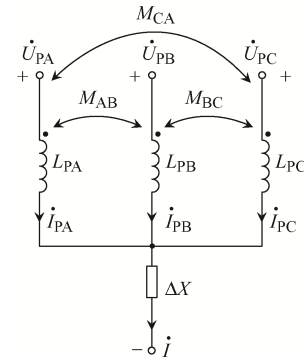


图2 三线圈解耦电路

Fig. 2 Three-coil decoupling circuit

解耦后, 线圈的端口电压仅与流经该线圈的电流有关。因此, 实现3个线圈的解耦, 式(2)应满足

$$\begin{cases} j\omega M_{AB} + \Delta X = 0 \\ j\omega M_{BC} + \Delta X = 0 \\ j\omega M_{CA} + \Delta X = 0 \end{cases} \quad (3)$$

本文中, 由于原边3个线圈完全相同且对称放置, 因此  $M_{AB}$ 、 $M_{BC}$  和  $M_{CA}$  的值相同, 设为  $M_{AB} = M_{BC} = M_{CA} = M_{tt}$ , 则解耦条件为

$$j\omega M_{tt} + \Delta X = 0 \quad (4)$$

根据式(4)可知, 电容元件  $C_M$  应满足

$$\Delta X = -j\omega M_{tt} = \frac{1}{j\omega C_M} \quad (5)$$

因此无源解耦元件  $C_M$  的值可表示为

$$C_M = \frac{1}{\omega^2 M_{tt}} \quad (6)$$

需要注意的是, 采用此电容解耦方式时, 3个

线圈的同名端必须相连,如图 2 所示,否则不能采用该方法进行解耦。此外,解耦元件参数是针对固定系统频率设计的,在系统频率发生变化时,需要重新配置无源解耦元件参数。

## 1.2 LCC-S 拓扑分析

设直流负载  $R_L$  和全桥整流器构成的等效交流负载为  $R_{eq}$ ,根据基尔霍夫电压定律列出图 1 的网孔方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ 0 \\ \dot{U}_B \\ 0 \\ \dot{U}_C \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{27} \\ 0 & 0 & 0 & Z_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{43} & 0 & 0 & 0 & Z_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{65} & 0 & Z_{67} \\ 0 & Z_{72} & 0 & Z_{74} & 0 & Z_{76} & R_{eq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_{fA} \\ \dot{i}_{pA} \\ \dot{i}_{fB} \\ \dot{i}_{pB} \\ \dot{i}_{fC} \\ \dot{i}_{pC} \\ \dot{i}_S \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $Z$  表示互阻抗,其中

$$Z_{12} = Z_{21} = -\frac{1}{j\omega C_f}$$

$$Z_{34} = Z_{43} = -\frac{1}{j\omega C_f}$$

$$Z_{56} = Z_{65} = -\frac{1}{j\omega C_f}$$

$$Z_{27} = Z_{72} = -j\omega M_{AR}$$

$$Z_{47} = Z_{74} = -j\omega M_{BR}$$

$$Z_{67} = Z_{76} = -j\omega M_{CR}$$

求解式(7)可得原、副边电流的表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{fA} \\ \dot{i}_{pA} \\ \dot{i}_{fB} \\ \dot{i}_{pB} \\ \dot{i}_{fC} \\ \dot{i}_{pC} \\ \dot{i}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega^4 C_f^2 M_{AR} (\dot{U}_A M_{AR} + \dot{U}_B M_{BR} + \dot{U}_C M_{CR})}{R_{eq}} \\ -j\omega C_f \dot{U}_A \\ \frac{\omega^4 C_f^2 M_{BR} (\dot{U}_A M_{AR} + \dot{U}_B M_{BR} + \dot{U}_C M_{CR})}{R_{eq}} \\ -j\omega C_f \dot{U}_B \\ \frac{\omega^4 C_f^2 M_{CR} (\dot{U}_A M_{AR} + \dot{U}_B M_{BR} + \dot{U}_C M_{CR})}{R_{eq}} \\ -j\omega C_f \dot{U}_C \\ -\frac{j\omega^2 C_f (\dot{U}_A M_{AR} + \dot{U}_B M_{BR} + \dot{U}_C M_{CR})}{R_{eq}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  分别为 A 相、B 相、C 相电

压;  $\dot{i}_S$  为副边电流。

根据式(8),输出功率  $P_{out}$  表示为

$$P_{out} = |\dot{i}_S|^2 R_{eq} = \frac{\omega^4 C_f^2 |\dot{U}_A M_{AR} + \dot{U}_B M_{BR} + \dot{U}_C M_{CR}|^2}{R_{eq}} \quad (9)$$

由于  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  有效值和频率相同,相位相差  $120^\circ$ , 设其基波有效值为  $U$ , 则有

$$\begin{cases} \dot{U}_A = Ue^{j0} \\ \dot{U}_B = Ue^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{U}_C = Ue^{-j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 可得

$$P_{out} = \frac{\omega^4 C_f^2 U^2 M_{eq}^2}{R_{eq}} \quad (11)$$

其中,  $M_{eq}$  的表达式为

$$M_{eq} = \left| M_{AR} e^{j0} + M_{BR} e^{j\frac{2}{3}\pi} + M_{CR} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \right| = \sqrt{M_{AR}^2 + M_{BR}^2 + M_{CR}^2 - M_{AR} M_{BR} - M_{BR} M_{CR} - M_{CR} M_{AR}} \quad (12)$$

$R_{eq}$  与  $R_L$  的关系<sup>[15]</sup>可表示为

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (13)$$

由于采用三相半桥逆变,逆变器每相的输出电压脉宽恒为  $180^\circ$ ,  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  的基波有效值  $U$  与直流电压  $E$  的关系<sup>[20]</sup>可表示为

$$U = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{2}{\pi} E = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(11), 输出功率可表示为

$$P_{out} = \frac{\omega^4 C_f^2 E^2 M_{eq}^2}{4R_L} \quad (15)$$

根据式(15)可以得出,当输入电压、元件参数和负载一定时,系统输出功率仅与  $M_{eq}$  相关。因此,当 AUV 旋转时,若  $M_{eq}$  保持稳定,则系统输出功率恒定。

## 2 线圈设计

### 2.1 理想线圈设计

本文提出的耦合结构及尺寸如图 3 所示,耦合

器由 3 个相同的发射机和 1 个接收机组成。整体系统结构如图 3(a)所示, 发射和接收线圈排布如图 3(b)所示, 每个发射机由 2 个正对的线圈串联而成, 发射线圈 TAI 与 TAI 串联组成发射机 A, 发射线圈 TBI 与 TBII 串联组成发射机 B, 发射线圈 TCI 与 TCII 串联组成发射机 C。3 个发射机由 3 个有效值相同、相位互差  $120^\circ$  的三相供电。接收机由 RI、RII、RIII、RIV 这 4 个正反交替排布的接收线圈串联而成, 其中 RI 与 RIII 绕向一致, RII 与 RIV 绕向一致且与 RI、RIII 绕向相反。耦合器的尺寸及接收线圈的电流方向如图 3(c)所示, AUV 外壳半径为 100 mm, 内半径为 94 mm, 壳体厚 6 mm; 原、副边均采用直径为 3 mm 的利兹线, 绕制 16 匝, 宽 48 mm; 铁氧体磁芯高 48 mm, 厚 15 mm; AUV 壳体与发射线圈之间的间隙为 10 mm。

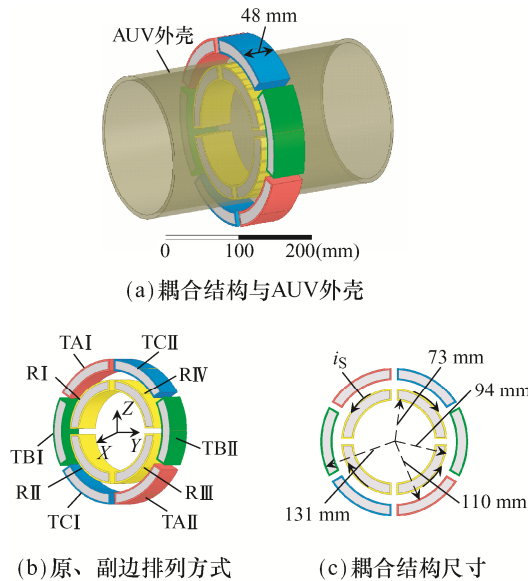


图 3 耦合结构

Fig. 3 Coupling structure

由于海水的相对磁导率非常接近 1, 因此海水可被近似为空气<sup>[15]</sup>, 对 AUV 的分析也均在空气中进行。为了验证所提线圈的抗旋转偏移性能, 通过有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对线圈进行仿真分析。旋转方式规定为发射机固定不动, 接收机顺时针旋转。当 AUV 无线充电系统完全对准时, 位置如图 3(c)所示。

根据式(12),  $M_{AR}$ 、 $M_{BR}$ 、 $M_{CR}$  及  $M_{eq}$  的仿真变化曲线如图 4 所示。结果表明,  $M_{eq}$  在 AUV 发

生旋转偏移时可维持稳定, 偏差在 2%以内, 且以  $30^\circ$  为最小周期变化。

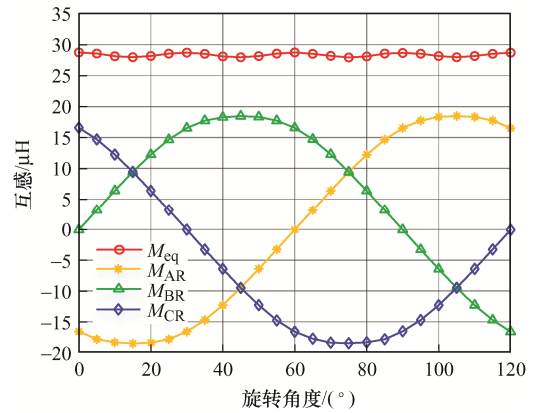


图 4 旋转偏移时  $M_{eq}$  波动

Fig. 4  $M_{eq}$  fluctuation during rotation misalignments

### 2.2 磁场分布分析

为了研究和比较磁场, 搭建了文献[15-16]中提出的三相线圈结构和本文所提出的线圈结构。为了比较的公平性, 设 3 种线圈结构的接收线圈占据相同体积, 即副边固定在大小一致的空心圆柱内<sup>[15]</sup>, 且副边匝数一致。为了方便对比, 设计 3 种线圈结构在相同的互感下, 以 10 A 交流充电电流传递 1 kW 功率。通过改变原边线圈匝数, 以获得相同的互感, 仿真参数见表 1, 励磁电流和匝数见表 2, 表中  $I_p$  为发射线圈电流有效值,  $I_s$  为接收线圈电流有效值。 $M$  在文献[15]中代表发射线圈与相邻接收线圈之间的互感, 在文献[16]和本文中指  $M_{eq}$ 。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

参数	数值		
	本文	文献[15]	文献[16]
单个发射线圈自感 $L_p/\mu\text{H}$	94.60	71.35	49.46
单个接收线圈自感 $L_s/\mu\text{H}$	222.65	401.96	227.05
互感 $M/\mu\text{H}$	28.69	29.45	28.82

表 2 仿真激励参数

Tab. 2 Simulation excitation parameters

参数	数值		
	本文	文献[15]	文献[16]
发射线圈电流 $I_p/\text{A}$	3.70	3.60	3.72
单个发射线圈匝数	16	19	16
接收线圈电流 $I_s/\text{A}$	10.00	3.33	10.00
单个接收线圈匝数	16	48	16
副边匝数	160	160	160

3种线圈结构在YZ平面、XY平面、XZ平面的磁场分布分别如图5~图7所示,图中的刻度条一致,

均为  $1 \times 10^{-4} \sim 2.45 \times 10^{-3}$  T, 虚线框框出的部分代表 AUV 中心位置。通过比较可以看出, 本文线圈结

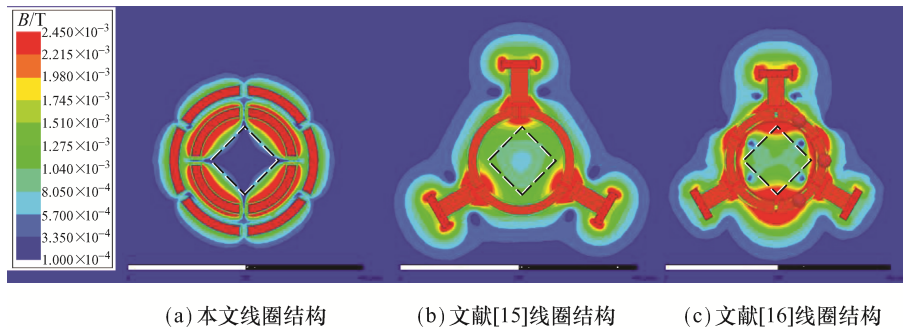


图 5 YZ 平面磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution in YZ plane

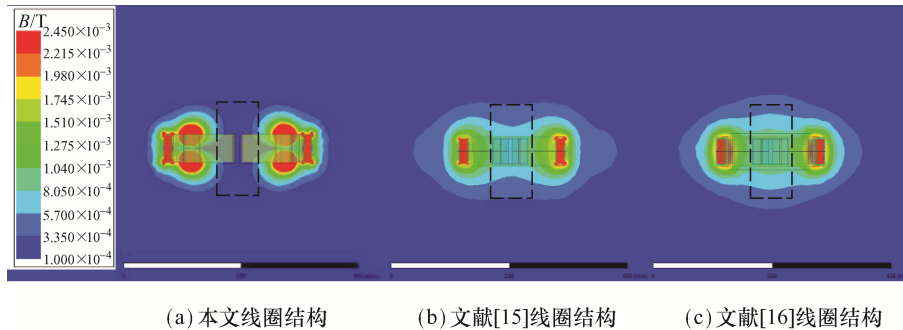


图 6 XY 平面磁场分布

Fig. 6 Magnetic field distribution in XY plane

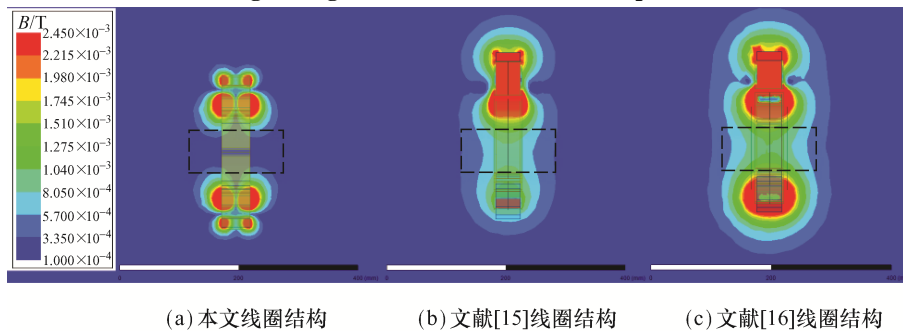


图 7 XZ 平面磁场分布

Fig. 7 Magnetic field distribution in XZ plane

构在 AUV 中心区域的磁场更小, 磁通更加集中于线圈本身。在同样充电电流和传输功率条件下, 本文结构的中心磁场强度约为文献[15]结构的 1/5, 约为文献[16]结构的 1/8。

旋转时 YZ 平面磁场分布如图 8 所示, 可见 AUV 在偏移  $15^\circ$ , 即互感波动最大的情况下, AUV 中心的磁场分布与完全对齐时一致。这说明当 AUV 发生旋转时, 中心磁场的抑制效果不会发生变化。因此, 该系统既实现了功率的抗旋转偏移, 也保证了中心磁场强度处于较低水平。

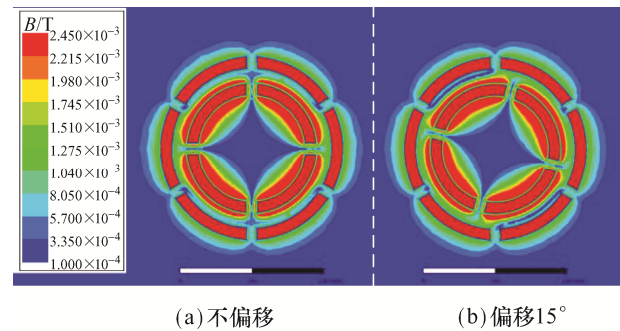


图 8 旋转时 YZ 平面磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution in YZ plane during rotation



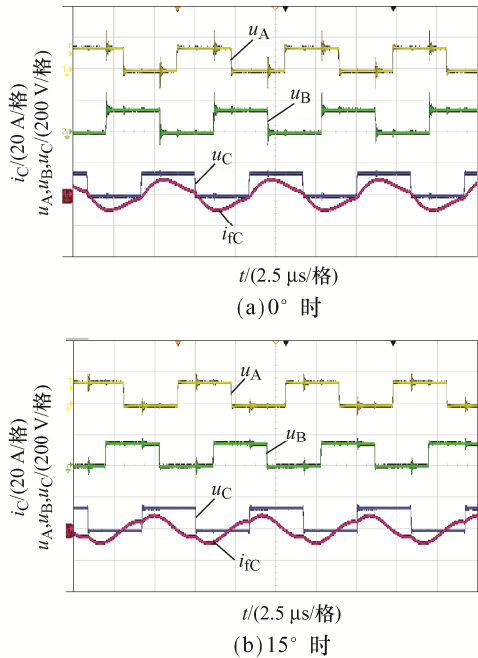


图 12  $0^\circ$  和  $15^\circ$  时三相电压  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  和逆变器输出电流  $i_C$  波形

Fig. 12 Waveforms of three-phase voltage  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  and inverter output current  $i_C$  when rotation misalignments are  $0^\circ$  and  $15^\circ$ , respectively

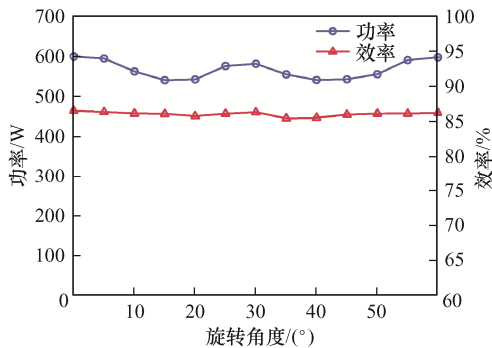


图 13 旋转时功率效率波动曲线

Fig. 13 Power and efficiency fluctuation curves during rotation

## 4 结语

本文提出 1 种用于 AUV 的新型三相 IPT 系统, 原边三相发射线圈每相分 2 段正对放置, 副边为 4 个反向交替串联的接收线圈, 通过原边三相供电和副边接收线圈反向交替串联, 系统的抗旋转偏移性能得到了显著改善, 同时 AUV 中心磁场始终保持在较低水平。通过有限元分析软件 Maxwell 验证了所提耦合结构的性能, 在 AUV 旋转过程中  $M_{eq}$  波动

小于 2%, 同时, 在相同充电电流和传输功率下, AUV 中心磁场强度约为文献[15]的 1/5, 约为文献[16]的 1/8。本文搭建了三相 IPT 系统原型样机, 在旋转偏移时, 输出功率波动范围为 536~595 W, 最大波动率为 9.91%, 系统直-直最高效率为 86.28%, 最低为 85.24%。仿真和实验结果表明, 所提三相 IPT 系统 AUV 船体中心磁场强度较小, 抗旋转偏移能力较强, 发生旋转偏移时输出功率基本稳定, 且效率始终保持较高水平, 故本文提出的方法有效且可行。

## 参考文献:

- [1] Hui S Y. Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi [J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1290-1301.
- [2] 王登辉, 张波. 便携式设备无线充电技术发展及关键技术[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 163-172.  
Wang Denghui, Zhang Bo. Development and key technologies of wireless charging for portable devices [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 163-172 (in Chinese).
- [3] 邝帅, 颜国正, 王志武, 等. 无线胶囊内窥镜新型接收线圈结构设计与分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 55-63.  
Kuang Shuai, Yan Guozheng, Wang Zhiwu, et al. Design of novel structure and analysis method for receiving coil of wireless capsule endoscopy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 55-63 (in Chinese).
- [4] Wu Rongxiang, Li Wei, Luo Heping, et al. Design and characterization of wireless power links for brain-machine interface applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5462-5471.
- [5] 葛凯梁, 仇钧, 朱海. 基于中继线圈的电动汽车静态无线充电系统抗偏移性能提升研究[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 35-42.  
Ge Kailiang, Qiu Jun, Zhu Hai. Research on improvement of anti-misalignment capacity of static wireless charging system for electric vehicles based on relay coil [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 35-42 (in Chinese).
- [6] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 用于电动汽车动态供电的多初级绕组并联无线电能传输技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4445-4453.  
Song Kai, Zhu Chunbo, Li Yang, et al. Wireless power

- transfer technology for electric vehicle dynamic charging using multi-parallel primary coils [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4445-4453 (in Chinese).
- [7] Matsuda T, Maki T, Sato Y, et al. Experimental evaluation of accuracy and efficiency of alternating landmark navigation by multiple AUVs [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(2): 288-310.
- [8] Bingham B, Foley B, Singh H, et al. Robotic tools for deep water archaeology: Surveying an ancient shipwreck with an autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(6): 702-717.
- [9] Prins R, Kandemir M. Time-constrained optimization of multi-AUV cooperative mine detection [C]// OCEANS. Quebec City, QC, Canada, 2008: 1-13.
- [10] Feezor M D, Yates Sorrell F, Blankinship P R. An interface system for autonomous undersea vehicles [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 522-525.
- [11] Kojiya T, Sato F, Matsuki H, et al. Construction of non-contacting power feeding system to underwater vehicle utilizing electro magnetic induction [C]// Europe Oceans. Brest, France, 2005: 709-712.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Kan Tianze, Mai Ruikun, Mercier P P, et al. Design and analysis of a three-phase wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6622-6632.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Kissin M L G, Boys J T, Covic G A. Interphase mutual inductance in polyphase inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2393-2400.
- [19] Mai Ruikun, Luo Ying, Yang Bin, et al. Decoupling circuit for automated guided vehicles IPT charging systems with dual receivers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6652-6657.
- [20] Jia Shuran, Chen Changsong, Duan Shanxu, et al. Dual-side asymmetrical voltage-cancellation control for bidirectional inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8061-8071.



宋毅

## 作者简介:

宋毅(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 1415600349@qq.com。

罗颖(1995—), 女, 博士。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 2395420301@qq.com。

麦瑞坤(1980—), 男, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 无线牵引供电技术研究及其在轨道交通中的应用、无线电能传输技术及其应用、电力电子技术及其应用、动态同步相量测量技术及其工程实现、广域测量系统 PMU 数据在电力系统中的应用、系统低频振荡定位与控制方法。E-mail: mairk@swjtu.edu.cn。

朱宸彦(1996—), 男, 博士。研究方向: 无线电能传输技术。E-mail: 742816561@qq.com。

肖静(1988—), 男, 中国电源学会会员, 硕士, 高级工程师。研究方向: 无线电能传输技术应用。E-mail: xueshudaniu@163.com。

陈绍南(1987—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向: 无线电能传输技术应用。E-mail: 451310528@qq.com。