



水下无线电能传输研究进展

摘要

首先对水下无线电能传输技术进行了分类,然后给出了磁感应式水下无线电能传输的基本结构和工作原理,讨论了该技术的最优工作频率、传输距离、线圈结构选择、涡流损耗与频率分裂现象.随后简要给出了磁谐振式水下无线电能传输技术和电场耦合式水下无线电能传输的研究现状.最后对水下无线电能传输技术有待研究的问题进行了展望.

关键词

水下无线电能传输;工作频率;线圈结构;涡流损耗;频率分裂;磁感应式;磁谐振式;电场耦合式

中图分类号 TM724;TM15

文献标志码 A

0 引言

水下无线电能传输可以将电能以非接触的方式从发送器提供给接收器.这种传输方式不存在发送器和接收器的直接电气连接,避免了传统湿插拔供电方式由于金属接插件接触引起的火花、漏电、腐蚀等缺点,提高了水下电能传输的安全性^[1],可用于海底基站对水下航行器(AUV)的供电^[2-4]、海洋浮标对水下设备的供电^[5-6]、AUV对水下传感器的电池补电以及对水处理节点的供电^[7-8]等环境.

目前文献中尚没有水下无线电能传输的综述,有文献的一些章节^[9-10]涉及到水下无线电能传输的研究进展.水下无线电能传输的分类如图1所示^[11].本文主要给出磁感应式水下无线电能传输的研究进展,简单涉及到磁谐振式水下无线电能传输与电场耦合式水下无线电能传输.

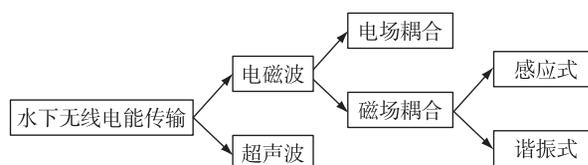


Fig. 1 Classification of underwater wireless power transfer

1 磁感应式水下无线电能传输

1.1 基本结构与工作原理

磁感应式水下无线电能传输系统可以用电路互感模型来描述^[12-15].图2是两线圈串联谐振水下无线电能传输系统的电路模型, L_1 和 L_2 是线圈电感, R_{p1} 和 R_{p2} 是一次侧和二次侧内阻, C_1 和 C_2 是串联谐振电容, M 是线圈间互感, R_L 是负载电阻, V_{in} 是信号源电压.

两侧的电压回路方程是

$$\begin{cases} I_1 Z_1 + I_2 M_{12} = V_{in}, \\ I_2 Z_2 + I_1 M_{12} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

I_1 是一次侧电流, I_2 是二次侧电流. Z_1 是一次侧的回路阻抗:

$$Z_1 = R_{p1} + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = R_1 + jX, \quad (2)$$

收稿日期 2016-11-29

资助项目 工信部联装[2016]26号“自升式平台中央控制系统研制与应用示范”资助

作者简介

牛王强,男,博士,讲师,主要研究方向为无线电能传输技术、混合动力港机和船舶电控技术.wqniu@shmtu.edu.cn

¹ 上海海事大学 航运技术与控制工程交通行业重点实验室,上海,201306

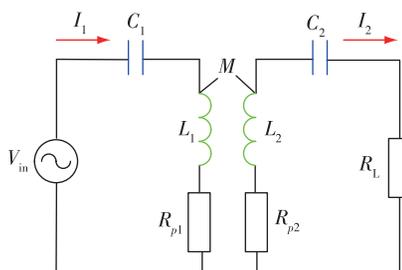


图2 串联谐振水下无线电能传输系统的电路模型

Fig.2 Circuit model of a series-tuned underwater wireless power transfer system

X 是 Z_1 的虚部, ω 是系统工作频率. Z_2 是二次侧的回路阻抗:

$$Z_2 = R_{p2} + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = R_2 + jY, \quad (3)$$

R_2 是 Z_2 的总电阻, Y 是 Z_2 的虚部. M_{12} 是回路间互阻抗, $M_{12} = j\omega M$, $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, k 是一次侧和二次侧的耦合系数.

1.1.1 最大传输功率分析

求解式(1), 则负载功率 P_L 是^[14]

$$P_L = \text{Re}(V_L I_2^*) = \frac{\omega^2 M^2 V_{in}^2 R_L}{(\omega^2 M^2 + R_1 R_2 - XY)^2 + (R_2 X + R_1 Y)^2}, \quad (4)$$

V_L 是负载电压. ω_0 是一次侧和二次侧线圈的自然谐振频率, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$. 在 ω_0 处, $X = Y = 0$, 负载功率 P_L 可简化为

$$P_L = \frac{\omega_0^2 M^2 V_{in}^2 R_L}{(\omega_0^2 M^2 + R_1 R_2)^2}, \quad (5)$$

当 ω_0 趋向 0 时, P_L 也趋向 0; 当 ω_0 趋向 ∞ 时, P_L 也趋向 0. 故存在极值, 令 $\frac{\partial P_L}{\partial \omega_0} = 0$, 求得 $\omega_0^{\text{optimal}}$ 为

$$\omega_0^{\text{optimal}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{L_1 L_2}}, \quad (6)$$

即当线圈结构、负载阻抗、传输距离都固定时, 存在最优的自然谐振频率, 使负载获得最大功率. 该最大功率为

$$P_L^{\text{max}} = \frac{V_{in}^2}{4R_1 R_2} R_L, \quad (7)$$

P_L 与线圈的品质因数密切相关, P_L 也可以表示为

$$P_L = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(k^2 Q_1 Q_2 + 1)^2} \frac{V_{in}^2}{R_1 R_2} R_L, \quad (8)$$

Q_1 和 Q_2 是线圈的品质因数:

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_2}.$$

当 k 趋向 0 时, P_L 也趋向 0; 当 k 趋向 1 时, P_L 也趋向 0. 故存在极值, 令 $\frac{\partial P_L}{\partial k} = 0$, 求得 k^{optimal} 为^[16]

$$k^{\text{optimal}} = \sqrt{\frac{1}{Q_1 Q_2}}, \quad (9)$$

即当线圈结构、负载阻抗、自然谐振频率都固定时, 存在最优的传输距离, 使负载获得最大功率. 该最大功率也是式(7).

1.1.2 最大传输效率分析

令一次侧的输入功率 P_{in} 为 $P_{in} = \text{Re}(V_{in} I_1^*)$, 则系统的传输效率 η 为^[17]

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{\omega^2 M^2 R_2 + R_1 (R_2 + Y^2)}. \quad (10)$$

在 ω_0 处, $Y = 0$, η 可简化为

$$\eta = \frac{\omega_0^2 M^2}{\omega_0^2 M^2 + R_1 R_2} \frac{R_L}{R_2}, \quad (11)$$

由式(11), η 与自然谐振频率大致呈正相关, ω_0 越大, η 越大. η 与线圈的品质因数密切相关, η 也可以表示为^[17]

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{k^2 Q_1 Q_2 + 1} \frac{R_L}{R_2}. \quad (12)$$

1.1.3 涡流损耗

水下无线电能传输与空气中无线电能传输的一个重要区别是存在涡流损耗, 特别是在海水中. 西北工业大学张克涵等^[1]认为涡流损耗主要发生在圆形发送线圈和圆形接收线圈之间的圆柱体内, 巧妙利用圆柱的对称性, 求解了 Maxwell 方程, 得到了涡流损耗 P_{eddy} 的分析表达式:

$$P_{\text{eddy}} \approx \frac{2\omega^2 |B_{\text{zav}}|^2 \pi h r^4 \sigma}{3}, \quad (13)$$

B_{zav} 是圆柱体轴向截面的平均磁感应强度, h 是线圈间距离, r 是线圈半径, σ 是水的电导率. 涡流损耗 P_{eddy} 近似与频率的平方成正比, 与磁场强度 B_{zav} 的平方成正比. B_{zav} 可以用线圈的一次侧和二次侧电流来估计.

1.2 最优工作频率

水下无线电能传输系统工作频率的选择是一个重要的研究课题.

文献[18]用实验方法结合有限元仿真研究了外径为 30 cm 的平面螺旋线圈构成的水下无线电能传

输系统的最优工作频率问题,如图3所示.实验考察了25.5、40、51、85、100、200 kHz 6个工作频率,随着工作频率增大,系统的传输效率也逐渐增大,在100 kHz时最大效率为61%,在200 kHz传输效率减小为48%.结合25.5到300 kHz范围的有限元仿真结果,他们提出75~125 kHz是水下无线电能传输系统的最优工作频率,当传输距离为5 cm时,系统效率在60%~70%.他们认为当频率较低时,线圈间的耦合系数 k 较小,是效率下降的主要原因.当频率较高时系统效率下降的原因是海水的涡流损耗较大.由式(12),频率较低时系统效率较低的原因也可能是线圈的品质因数较低.

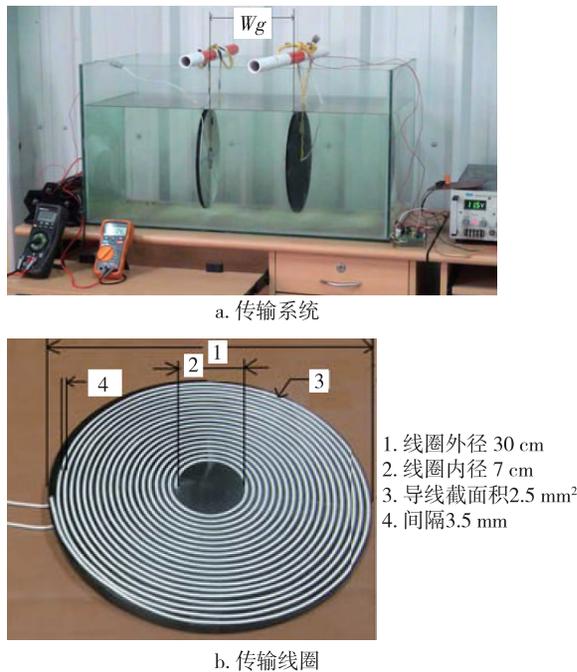


图3 印度学者的水下无线电能传输系统与传输线圈^[18]

Fig. 3 Indian scholars' underwater wireless power transfer system and their transmitting coil^[18]

美国Bana等^[19]用VNA测量了3匝圆形线圈和18匝螺线管在10 kHz到1 MHz的阻抗、电感、品质因数.他们发现小于100 kHz时,两类线圈在水下、空气中的电气参数几乎无差别;在100 kHz到1 MHz,两类线圈在空气中的电气参数优于水下的电气参数.在另一项相关研究中,他们的水下无线电能传输系统发送线圈外径14 cm,工作在118 kHz,负载功率为75 W,在0.25 cm的传输距离,效率为88%^[20],在3.8 cm的传输距离,效率为48%.该系统在水下和空气中的传输效率几乎没有差别(图4).

日本Ogihara等^[21]研究了直径11 cm螺线管构

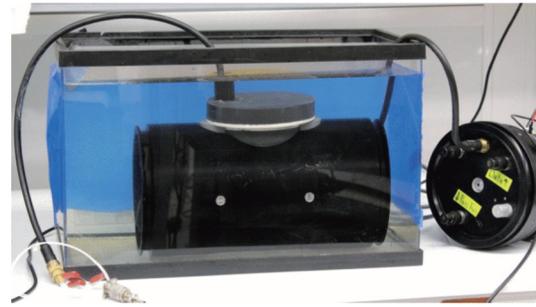


图4 美国学者的水下无线电能传输系统^[20]

Fig. 4 USA scholars' underwater wireless power transfer system^[20]

成的水下无线电能传输系统的传输性能.他们发现在110 kHz,该系统的传输效率在空气、淡水、海水中几乎没有差别.意大利Pessoa等^[22]的工作表明在100 kHz,他们的15 cm外径的平面螺旋线圈或螺线管构成的水下无线电能传输系统的传输效率在空气、淡水、海水中几乎没有差别.文献[23]用数值方法研究了海水中涡流损耗的影响因素,指出较小的电流、较低的工作频率、较小的传输距离、较小的匝数将引起较小的涡流损失.这些观察与式(13)的理论分析是一致的.他们设计了传输距离为5 mm,功率为300 W的带铁芯水下无线电能传输系统.铁芯外径为7 cm,如图5所示.实验研究表明,在150 kHz时,系统在空气、淡水、海水中的传输效率分别为88.1%、86.6%、85.8%,这时,海水中系统的最优工作频率有5 kHz偏移.在258 kHz时,系统在空气、淡水中的传输效率分别是81.1%、78.2%,放入海水中后,系统的最优工作频率是295 kHz,传输效率是75.8%.他们认为效率下降是因为水中的涡流损耗较大,频率偏移的原因是受涡流的影响使得线圈的等效电感减小.

由式(11),系统的工作频率较小,则传输效率也较小.常用空心线圈的品质因数 Q 一般小于100.当频率较大时,线圈的交流电阻也快速增大, Q 会变小.由式(12),系统的工作频率也不宜太高.另外,由式(5),当频率较大时,负载功率也变小.由式(13),较高的工作频率对应较高的涡流损耗,因此,系统的工作频率也不宜太高.

表1给出了各项研究的关键技术参数.由表1,大部分研究的工作频率集中在100 kHz左右,最小的工作频率11.3 kHz,最大的工作频率是754 kHz.由以上分析,结合表1,我们认为100 kHz左右是磁感应式水下无线电能传输最优的工作频率.另外,式

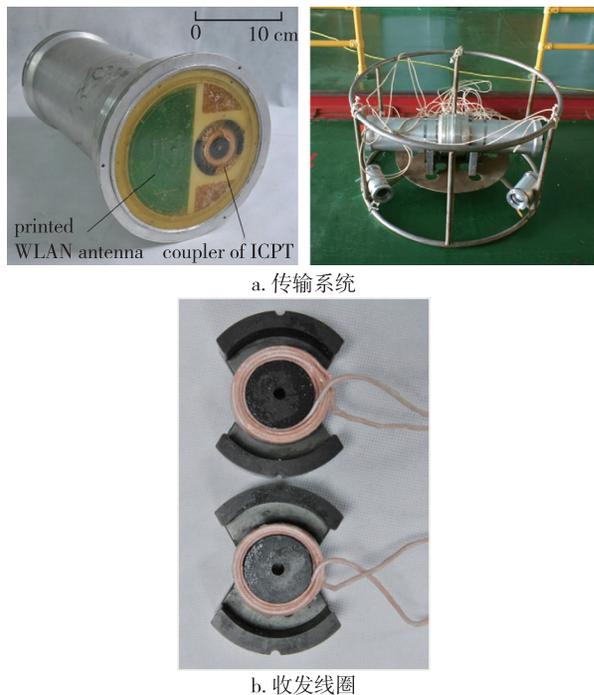


图5 浙江大学陈鹰等^[23]的水下无线电能传输系统与收发线圈

Fig.5 Zhengjiang University scholars^[23] underwater wireless power transfer system and their transmitting and receiving coils

(6)是磁感应式水下无线电能传输最优工作频率的上限值。

意大利 Assaf 等研究了类七鳃鳗鱼形机器人的水下无线充电问题^[24],他们的工作频率为 50 Hz,当传输距离是 2 mm 时,传输效率是 16%。由式(11),较低的工作频率对应较低的传输效率,这是他们传输效率较低的原因。

1.3 传输距离

稍早期水下无线电能传输系统的传输距离多在毫米级。2007 年,日本 Yoshioka 等研究了海面浮标对水下传感器的无线供电系统^[5],发送线圈和接收线圈同时绕在锚泊线上,工作频率为 100 kHz,次级线圈可得到 180 mW 的功率。估计该系统的传输距离在毫米级。2007 年,美国 McGinnis 等研究了水下锚泊站对 AUV 的无线供电系统^[2],系统工作频率为 50 kHz,发送线圈的功率为 250 W,在 5 mm 的距离时,接收线圈的效率约为 70%。2010 年,天津科技大学张强等研究了利用海洋浮标给水下设备进行非接触供电问题^[6]。海洋浮标的钢缆构成了一匝初级绕组,钢缆外套着铁氧体磁芯构成的圆型耦合器,耦合

器的绕组(次级线圈)完成钢缆和水下设备之间的能量传输。电能传输的工作频率为 40 kHz,钢缆和圆型耦合器的距离估计在毫米级别。2010 年,杭州电子科技大学刘敬彪等研究了水下 GU50 铁氧体磁芯绕组的电能传输问题^[32-33]。他们利用有限元仿真研究了输入电压、匝数对传输功率和传输效率的影响,进而建立了实验系统,在 100 kHz 的工作频率,传输距离为 5 mm 时,实现了 350 W 的最大输出功率,2 A 的最大输出电流。

浙江大学陈鹰等的水下无线电能传输系统,铁芯外径为 7 cm,传输距离为 5 mm^[23]。浙江大学李德骏等的 AUV 水下无线电能传输系统^[3],传输距离为 9 mm。哈尔滨工业大学朱春波等的 10 kW 大功率水下无线电能传输系统^[27],传输距离为 2.5 cm,如表 1 所示。

AUV 水下充电系统,当传输距离在毫米级时,需要较精致的机械结构保证 AUV 和充电站有合适的距离,并对 AUV 和充电站的对位有较高的位置精度要求。近年来,10 cm 级传输距离的工作多了起来。较大的传输距离,给了 AUV 更大的空间自由,降低了 AUV 与充电站间的对位精度要求^[9,26]。表 1 的工作发送线圈的直径都在 10~50 cm 不等,传输距离在 10 cm 左右。多数工作传输距离在发送线圈直径的一半左右。文献[28]采用多层平面螺旋线圈,系统的传输距离可以达到发送线圈直径的 1 倍。如果想进一步提高传输距离,需要采用磁谐振式水下无线电能传输技术。

1.4 线圈结构

水下无线电能传输线圈结构主要是平面圆螺旋和螺线管两类。也有锥形、方形螺旋、多层螺旋等。意大利 Pessoa 等比较了平面圆螺旋和螺线管的传输性能^[22],发现在过耦合区,平面圆螺旋线圈系统的传输效率比螺线管系统的传输效率略高些,最多高 12%;在欠耦合器,两者的传输效率无差别。印度 Manikandan 等比较了平面螺旋、螺线管、锥形线圈、C 型铁芯构成的水下无线电能传输系统的传输性能^[25],发现负载变化时,四类系统的传输效率从高到低为:C 型铁芯系统、平面螺旋系统、螺线管、锥形线圈,效率差别最大为 25%。

由式(11)和(12)知,系统的传输效率与工作频率、传输距离、线圈品质因数、负载电阻、线圈外径、线圈匝数等都相关。由表 1 知,各类线圈结构都有其特点,都可以用于水下无线电能传输。

表 1 各相关工作的比较

Table 1 Comparison of published underwater wireless power transfer systems

文献/发表年份	频率/kHz	线圈直径/cm	传输距离/cm	效率/%	线圈类型	铁芯
文献[18]/2016	25.5	30	15	39	平面螺旋	无
	40			50		
	51			53		
	85			58		
	100			61		
	200			48		
文献[11]/2016	260	20	10	24	螺线管	无
	490			39		
	754			49		
文献[22]/2016	100	15	7	68	平面螺旋	无
	100	15	7	68	螺线管	无
文献[25]/2016	14.33			71.1	平面螺旋	无
	17.86			71	螺线管	无
	13.04			71.8	锥形	无
	11.3			75.1		C型
文献[26]/2016	85	50	15	80		
文献[21]/2015	110	11	5	55	螺线管	无
文献[20]/2015	118	14	3.8	48	螺线管	无
文献[27]/2015	39	20	2.5	91	螺线管	铁芯
文献[28]/2015	50	30	35	60	4层平面螺旋	无
	40	30	35	45	2层平面螺旋	无
文献[29]/2014	100	30	15	88	2层平面螺旋	无
文献[30]/2014	200	24	10	60	方形螺线管	无
文献[23]/2013	147	7	0.5	85	螺线管	铁芯
文献[3]/2013	167	30	0.9	83	螺线管	无
文献[24]/2013	0.05	5	0.2	16	螺线管	无
文献[7]/2012	50	20	10	15	螺线管	无
文献[31]/2010	295	18	9	15	螺线管	无

1.5 涡流损耗

浙江大学陈鹰等用数值方法研究了海水中涡流损耗的影响因素^[23],指出较小的电流、较低的工作频率、较小的传输距离、较小的匝数将引起较小的涡流损失.这些观察与文献[1]式(13)的理论分析是一致的.

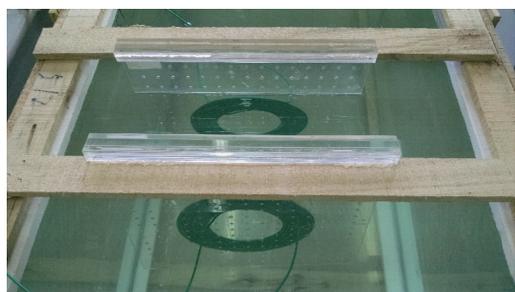
西北工业大学张克涵等也发现随工作频率增大,涡流损耗先变大,再变小^[1].这一实验观察与式(13)的理论预测不一致.他们给出了该观察的定性解释,随着工作频率增大,二次侧的反射阻抗增大,导致一次侧电流减小,进而导致磁感应强度减小,涡流损耗减小.海水中无线电能传输系统涡流损耗机制仍有待进一步研究.

1.6 频率分裂

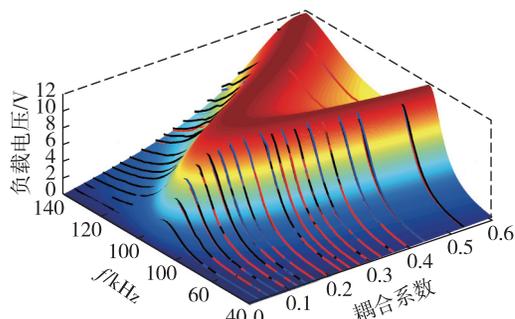
当传输距离变化时,线圈的耦合系数发生变化,空气中的无线电能传输系统会出现频率分裂现象.频率分裂现象是指,耦合系数从零开始逐渐增大,当耦合系数大于频率分裂临界点时,负载功率从单峰曲线突变为多峰曲线^[12,14-15,34],如图6b所示.如果保持工作频率不变化,系统的负载功率将大幅下降.这时,可以让工作频率自动跟随奇分裂频率(较小的峰值频率),维持系统的负载功率基本恒定^[14].

多项工作表明,在100 kHz左右,无线电能传输系统在空气、淡水、海水中的传输特性差别很小.我们对水下无线电能传输系统的频率分裂进行了数值仿真^[13]和实验研究,确认了水下无线电能传输系统

仍存在频率分裂现象(图6).具体的分裂模态、控制方法、消除方法仍有待进一步研究.



a. 传输系统



b. 分裂现象

图6 我们课题组的水下无线电能传输系统与其频率分裂现象(连续曲面是电路模型的理论值,曲线是实验值.黑色曲线:空气中;蓝色曲线:淡水中;红色曲线:海水中)

Fig. 6 Our underwater wireless power transfer system (a) and its frequency splitting phenomenon (b). The continuous surface is the theoretical values of circuit model and the lines are measured data in air (black lines), freshwater (blue lines) and seawater (red lines)

2 磁谐振式水下无线电能传输

2007年,美国 Kurs 等提出了米级中距离磁谐振式无线电能传输的概念^[35].中距离的定义是:发送线圈和接收线圈之间的传输距离是线圈最大外形尺寸的2~3倍.他们的圆形立体螺旋线圈直径是60 cm,工作频率为9.9 MHz,当传输距离是2 m时,接收线圈的最大接收功率为60 W,效率为40%.

磁谐振式无线电能传输系统在水下传输性能的工作刚刚起步.2014年以来,日本 Awai 等^[36-37]对磁谐振式无线电能传输系统对水的穿透能力进行了系统研究,主要的研究频率为1和2 MHz,线圈尺寸有40和30 cm等.他们研究了不同厚度的水对线圈品质因数、谐振频率、系统传输效率的影响,并提出用双层螺旋线圈来限制电场分布,以减少涡流损耗.他

们仍然用外接电容来构成谐振电容,暂时没有研究利用线圈的分布电容来构成谐振电容以提高线圈的品质因数.另外,他们的线圈是在空气中,暂时没有将线圈完全浸入在水中的研究.

磁谐振式无线电能传输系统的最佳工作频率、传输距离、涡流损耗机制、频率分裂机制等问题有待进一步研究.

3 电场耦合式水下无线电能传输

电场耦合式无线电能传输利用两个电极板间电场的变化传递电能.它的一个突出优点是无方向选择性.例如,二次侧接收电极板旋转90°,负载功率几乎不变^[9].日本 Urano 等^[38]的水下无线电能传输系统,电极板间距离为5 mm,传输效率为85%,负载功率为37 mW.淡水中在50到500 kHz的频率范围,负载功率几乎恒定,几乎不受工作频率变化的影响.该工作没有进行方向选择性的研究.

电场耦合式水下无线电能传输系统的模型描述、最佳工作频率、传输距离、涡流损耗机制、频率分裂机制等问题也有待进一步研究.

4 结论

从以上给出的研究现状可以看到,磁感应式水下无线电能传输是目前的研究热点,其工作频率集中在100 kHz左右,在该频段水下无线电能传输系统在空气、淡水、海水3种介质中的传输特性几乎相同;传输距离已经从毫米级发展到厘米级,可以达到线圈外径的一半左右;平面螺旋线圈和螺线管线圈都有着不错的传输效率;涡流损耗机制和频率分裂现象有待进一步研究.磁谐振式水下无线电能传输技术和电场耦合式水下无线电能传输的研究刚刚起步,其工作频率、传输距离、具体线圈结构、涡流损耗与频率分裂现象等都有待进一步研究.

参考文献

References

- [1] 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):334-342
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):334-342
- [2] McGinnis T, Henze C P, Conroy K. Inductive power system for autonomous underwater vehicles [C] //

- OCEANS 2007, Vancouver, BC 2007:1-5
- [3] Shi J G, Li D J, Yang C J. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications [J]. Journal of Zhejiang University-Science C (Computers & Electronics), 2014, 15(1): 51-62
- [4] Han J, Asada A, Ura T, et al. Noncontact power supply for seafloor geodetic observing robot system [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2007, 12(3): 183-189
- [5] Yoshioka D, Sakamoto H, Ishihara Y, et al. Power feeding and data-transmission system using magnetic coupling for an ocean observation mooring buoy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 37(6): 2663-2665
- [6] 张强, 王玉峰. 海洋浮标的非接触式电能与数据传输 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2615-2621
ZHANG Qiang, WANG Yufeng. Noncontact power and data delivery for ocean observation mooring buoy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2615-2621
- [7] Kuipers J, Bruning H, Bakker S, et al. Near field resonant inductive coupling to power electronic devices dispersed in water [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2012, 178(5): 217-222
- [8] Kuipers J, Bruning H, Yntema D, et al. Self-capacitance and resistive losses of saline-water-filled inductors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(5): 2356-2361
- [9] Carvalho N, Georgiadis A, Costanzo A. European contributions for wireless power transfer technology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2016: 1-26(accepted)
- [10] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547
- [11] 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, 21
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, 21
- [12] Niu W Q, Gu W, Chu J X, et al. Frequency splitting patterns in wireless power relay transfer [J]. IET Circuits, Devices and Systems, 2014, 8(6): 561-567
- [13] Niu W Q, Gu W, Chu J X, et al. Frequency splitting of underwater wireless power transfer [C] // 2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics, Nanjing, China, 2016: 1-4
- [14] Niu W Q, Chu J X, Gu W, et al. Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(6): 1670-1677
- [15] Niu W Q, Gu W, Chu J X, et al. Coupled-mode analysis of frequency splitting phenomena in cpt systems [J]. Electronics Letters, 2012, 48(12): 723-724
- [16] Li H L, Hu A P, Covic G A, et al. Optimal coupling condition of ipt system for achieving maximum power transfer [J]. Electronics Letters, 2009, 45(1): 76-77
- [17] Chen C J, Chu T H, Lin C L, et al. A study of loosely coupled coils for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2010, 57(7): 536-540
- [18] Vittal D P, Arunachalam U, Narayanaswamy V, et al. Analysis of subsea inductive power transfer performances using planar coils [J]. Marine Technology Society Journal, 2016, 50(1): 17-26
- [19] Bana V, Anderson G, Xu L, et al. Characterization of coupled coil in seawater for wireless power transfer [R]. SPAWAR Systems Center Pacific Technical Report, 2013: 1-18
- [20] Bana V, Kerber M, Anderson G, et al. Underwater wireless power transfer for maritime applications [C] // 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2015: 1-4
- [21] Ogiwara M, Ebihara T, Mizutani K, et al. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles [C] // OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington, 2015: 1-5
- [22] Pessoa L M, Pereira M R, Santos H M, et al. Simulation and experimental evaluation of a resonant magnetic wireless power transfer system for seawater operation [C] // OCEANS 2016-Shanghai, 2016: 1-5
- [23] Zhou J, Li D J, Chen Y. Frequency selection of an inductive contactless power transmission system for ocean observing [J]. Ocean Engineering, 2013, 60(3): 175-185
- [24] Assaf T, Stefanini C, Dario P. Autonomous underwater biorobots: A wireless system for power transfer [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2013, 20(3): 26-32
- [25] Manikandan J, Vishwanath A, Agrawal V K, et al. Indigenous design and development of underwater wireless power transfer system [C] // 2016 Twenty Second National Conference on Communication (NCC), 2016: 1-6
- [26] Kesler M, McCarthy C. Highly resonant wireless power transfer in subsea applications [R]. WiTricity Corporation White Paper, 2016: 1-9
- [27] Zhu C B, Cheng Z Y, Lei Y, 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
- [28] Futagami D, Sawahara Y, Ishizaki T, et al. Study on high efficiency wpt underseas [C] // 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2015: 1-4
- [29] Sawahara Y, Futagami D, Ishizaki T, et al. Development of underwater wpt system independent of salinity [C] // 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, 2014: 1363-1365
- [30] Shizuno K, Yoshida S, Tanomura M, et al. Long distance high efficient underwater wireless charging system using dielectric-assist antenna [C] // 2014 Oceans-St John's, 2014: 1-3
- [31] Tibajia G V, Talampas M C R. Development and evaluation of simultaneous wireless transmission of power and data for oceanographic devices [C] // 2011 IEEE Sensors, Limerick, Ireland, 2011: 254-257
- [32] 刘敬彪, 陈貽想, 于海滨. 基于电磁耦合的水下无线能量传输系统 [J]. 电子技术应用, 2010, 36(9): 90-92
LIU Jingbiao, CHEN Yixiang, YU Haibin. Underwater wireless energy transmission system based on electromag-

- netic coupling[J].Application of Electronic Technique, 2010,36(9):90-92
- [33] 苏晨,刘敬彪,章雪挺.水下无线感应耦合传输系统中线圈的研究[J].杭州电子科技大学学报,2011,31(3):5-8
SU Chen,LIU Jingbiao,ZHANG Xueting.Research of coil in an underwater wireless inductively coupled link transmission system [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University,2011,31(3):5-8
- [34] Sample A P, Meyer D A, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554
- [35] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science,2007,317(5834):83-86
- [36] Awai I,Sawahara Y,Ishizaki T.Choice of resonators for a wpt system in lossy materials[C]//2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC),2014:106-109
- [37] Itoh R, Sawahara Y, Ishizaki T, et al. Wireless power transfer to moving ornamental robot fish in aquarium[C]//2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE),2014:459-460
- [38] Urano M, Takahashi A. Study on underwater wireless power transfer via electric coupling[C]//2016 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK),2016:1-2

The state of the art of underwater wireless power transfer

NIU Wangqiang¹

¹ Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering,
Ministry of Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306

Abstract Classification of underwater wireless power transfer (UWPT) is given first and then basic topology and operation principle of inductive UWPT are presented followed by its optimal operational frequency, transfer distance, choice of coil structure, eddy current loss and frequency splitting. Next, magnetic resonance UWPT and electrical coupling UWPT are described briefly. Finally the future challenges of UWPT are introduced.

Key words underwater wireless power transfer (UWPT); operational frequency; coil structure; eddy current loss; frequency splitting; inductive UWPT; magnetic resonance UWPT; electrical coupling UWPT