

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.013

电场耦合式水下无线电能传输系统的耦合机构

高 镇¹,李雨朦¹,景晴晴¹,刘 宁²

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300110; 2. 国家海洋技术中心, 天津 300110)

摘要: 基于电场耦合原理对水下无线电能传输系统进行建模分析,并简述其基本工作原理。对水下无线电能传输系统的关键部分耦合机构进行重点研究,包括水下耦合机构等效电容值的计算、电场分布情况、传输距离对其影响及功率损耗分析,并与空气中耦合机构进行对比。得出结论如下:(a)水下耦合机构的等效电容值比在空气环境中大,并且不受传输距离的影响;(b)增大工作频率和接收端负载,可以减小耦合机构的损耗。设计水下电场耦合无线电能传输实验系统,验证了上述结论。
关键词: 无线电能传输;电场耦合;耦合机构;海水环境用电;等效电容值;电能传输距离
中图分类号: TM724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)04-0366-05

Study on the coupling structure of underwater wireless power transmission system via electric coupling

GAO Zhen¹, LI Yumeng¹, JING Qingqing¹, LIU Ning²

(1. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300110, China;
2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300110, China)

Abstract: This paper proposes a system of Electric-field Coupled Power Transfer working in the seawater environment. At first, the basic working principle of proposed system is briefly introduced. The electric field coupling is a key part to delivery power in this system, thus this study focus on the calculation of equivalent capacitance of the underwater coupling structure, the distribution of electric field, the influence of transmission distance on it and the power loss. Then, the result is compared with the air coupling structure. Based on this research, there are two important conclusions: (a) The equivalent capacitance of underwater coupling structure is larger than that in the air environment and not affected by the transmission distance; (b) Increasing the operating frequency or the load can reduce the power loss of coupling structure. Finally, the experimental system of electricfield coupled power transfer (ECPT) is designed to verify above conclusions.
Key words: wireless power transfer; electric field coupling; coupling structure; seawater environment; equivalent capacitance; transmission distance

无线电能传输是一种将电能从发送端以非接触的方式传送给用电设备的电能传输技术^[1-2]。由于这种传输技术在能量发送端和用电设备之间不存在直接电气连接,因而避免了传统供电方式存在的线缆老化、漏电、短路等安全隐患^[3-4]。将此技术应用于工作在海水环境的用电设备,例如海底基站对水下航行器(AUV)的供电^[5]、海洋浮标对水下设备的供电等^[6],可以满足传统设备实时供电需求,提高设备连续工作时间和工作效率^[7]。

目前无线电能传输主要有2种方式,磁感应式无线电能传输(inductive power transfer, IPT)和电场耦合无

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400501);全球变化与海气相互作用专项(GASI-02-SHB-01)
作者简介: 高镇(1982—),男,副教授,博士,主要从事无线通信研究。E-mail:zgao@tju.edu.cn
引用本文: 高镇,李雨朦,景晴晴,等. 电场耦合式水下无线电能传输系统的耦合机构[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):366-370.
GAO Zhen, LI Yumeng, JING Qingqing, et al. Study on the coupling structure of underwater wireless power transmission system via electric coupling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 366-370.

线电能传输 (electric-field coupled power transfer, ECPT) 技术。其中 IPT 技术较为成熟,它是利用耦合线圈之间形成的磁场来传递能量^[8-11],但将其应用在海水环境中会存在 2 个严重缺点:一是因为海水是一种良导体,耦合线圈之间的发散磁场会在海水中形成涡流现象,会消耗掉部分能量^[9-10];二是在 IPT 系统中,耦合线圈对结构和位置都有一定的要求,但在海水中,由于海水扰动及压力的影响,耦合线圈的结构和位置很容易发生变化^[11]。这 2 个缺点都会降低系统的电能传输效率。

ECPT 技术是利用耦合机构之间的高频电场来传递能量,有着轻便、低辐射、无阻碍传输、电磁干扰小、耦合机构多样等优点而成为无线电能传输领域新的研究热点^[12-14]。美国密西根大学设计了大功率 ECPT 系统,可传输 2.4 kW 功率,当传输距离为 150 mm 时,效率仍可达到 90.8%^[15],这使其可应用于小功率以及小至毫米级的距离。

日本 Urano 等设计了传输距离为 5 mm、负载功率为 3 mW 的水下无线电能传输系统^[16],该系统工作在 50 ~ 500 kHz 的频率范围时负载功率基本恒定。但该工作没有进行方向选择性的研究。由于在海水环境下,相对于空气中耦合机构发生明显变化;其次,在 ECPT 系统中,耦合机构是实现电能传输的关键部分,它对系统的输出功率、工作频率、电能传输效率等都有着直接的影响,因此有必要首先对耦合机构进行重点研究。本文首先简要介绍水下(研究是在海水条件下,下面简称水下)ECPT 系统的组成及工作原理;然后对水下耦合机构等效电容值的计算、电场分布、等效串联电阻及耦合机构的损耗进行重点研究;最后设计了水下 ECPT 系统,并对上面的理论分析进行了实验验证。

1 水下 ECPT 系统简介

通常 ECPT 系统由能量发送和能量接收 2 个部分组成,并通过耦合机构之间形成的高频电场来实现能量从发送到接收的过程。如图 1 所示。笔者设计的水下 ECPT 系统主要由直流电源、高频逆变、补偿电感、耦合结构、整流滤波及负载组成。工作原理是输入的直流电经高频逆变电路后变成高频交流电,然后通过补偿电感和耦合机构的串联谐振网络传送到系统的接收端,在接收端根据负载的用电方式进行相应的电力变换。耦合机构 2 块极板中间的海水厚度为 d ,也就是水下 ECPT 电能传输距离。

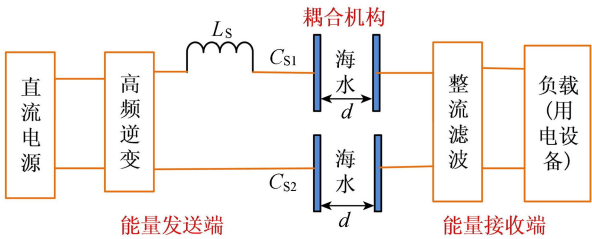


图 1 水下 ECPT 系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of a typical underwater ECPT system

2 耦合机构分析

2.1 耦合机构等效电容值计算

由图 1 可知,ECPT 系统有 2 个耦合机构,每个耦合机构由 2 块极板组成,分别是发射极板和接收极板,通常选取比较廉价的铜作为极板材料。发射极板和接收极板可以简单地等效为 1 个电容,在海水环境下耦合结构的模型如图 2 所示。为隔离海水与铜板,采用比较常见的 PVC (聚氯乙烯) 作为极板与海水之间的填充介质,其厚度为 d_1 。

由于海水具有良好的导电性,将海水视为导体^[17],则耦合机构的等效电容 C_{s1} (或 C_{s2}) 相当于 2 个相同的电介质的电容 C_1 串联而成^[18]。假设电极板面积为 S ,电介质部分电容为 $C_1 = \epsilon_r \epsilon_0 S / d_1$,那么耦合机构的等效耦合电容为: $C_{s1} = C_{s2} = C_1 / 2 = \epsilon_r \epsilon_0 S / (2d_1)$ (其中 ϵ_0 为真空的介电常数, ϵ_r 为电介质 PVC 的相对介电常数, S 为电极板面积, d_1 为 PVC 介质的厚度)。

由此可知,耦合机构的等效电容值只与电介质材料有关,系统的电能传输距离并不影响耦合机构等效电容值 C_s 的大小,即并不改变耦合机构的电能储存能力。并且补偿电感 L_s 和耦合机构组成的谐振网络的谐振频率点只与两者的值有关,所以当发射极板与接收极板之间的距离发生变化时,系统的谐振频率点并未改变,即水下 ECPT 系统稳定性较强。

已知 PVC 相对介电常数 $\epsilon_r = 3$,当铜板半径 $r = 51$ mm、PVC 厚度 $d_1 = 1.5$ mm 时,下耦合机构的等效电容

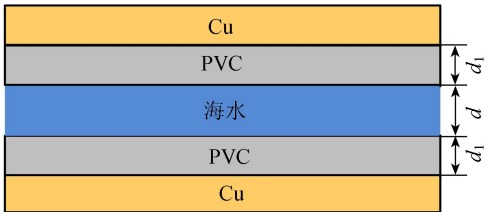


图 2 水下耦合机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of underwater coupling structure

值为 72.3 pF。相同条件下,这比空气中耦合机构的等效电容值要大得多,其储能能力也会增加,进而增加系统能量的传输能力。

2.2 耦合机构电场仿真分析

根据图 2 中的水下耦合机构示意图,在仿真软件 Maxwell 中建立耦合机构模型,如图 3 所示。发射极板和接收极板半径为 51 mm 的圆盘形电极,厚度均为 3 mm,极板材料为铜,中间是海水,其相对介电常数为 81,体积电导率为 4 S/m,电介质材料是 PVC,厚度为 1.5 mm。仿真时,发射极板所加电激励压为 2 V,接收极板激励电压为 0 V。

图 4 为不同传输距离情况下的耦合机构电场分布,可以看到随着传输距离的变化,耦合机构的等效电容值几乎不发生变化,验证了理论分析的正确性。由于理论计算时忽略了电场的边缘效应,所以仿真中得到的等效电容值比理论值略大些^[19]。传输距离 $d=1\text{ mm}$ 时电场强度的最大值为 722.53 V/m,耦合电场基本局限于耦合区域之内,耦合区域之外的部分,其电场强度仅为耦合区域内的 1/300 左右,说明近距离下 ECPT 耦合机构的能量耗散相当少,传输能量的效率很高,对外的电磁也干扰很小。但随着距离增加,电场强度呈下降趋势,在 $d=20\text{ mm}$ 时电场强度的最大值为 600.57 V/m,耦合电场也逐渐向边缘扩散。这说明当传输距离增加时,传输能量的效率逐渐降低,对外的电磁干扰会增加,所以在设计水下 ECPT 系统时,也要像空气环境中的 ECPT 系统那样考虑传输距离对系统电能传输效率的影响。

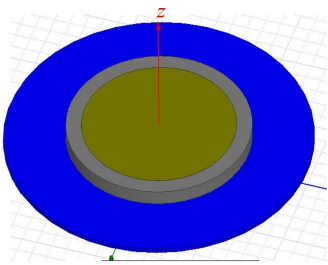


图 3 耦合机构仿真模型
Fig. 3 Simulating model of the coupling structure

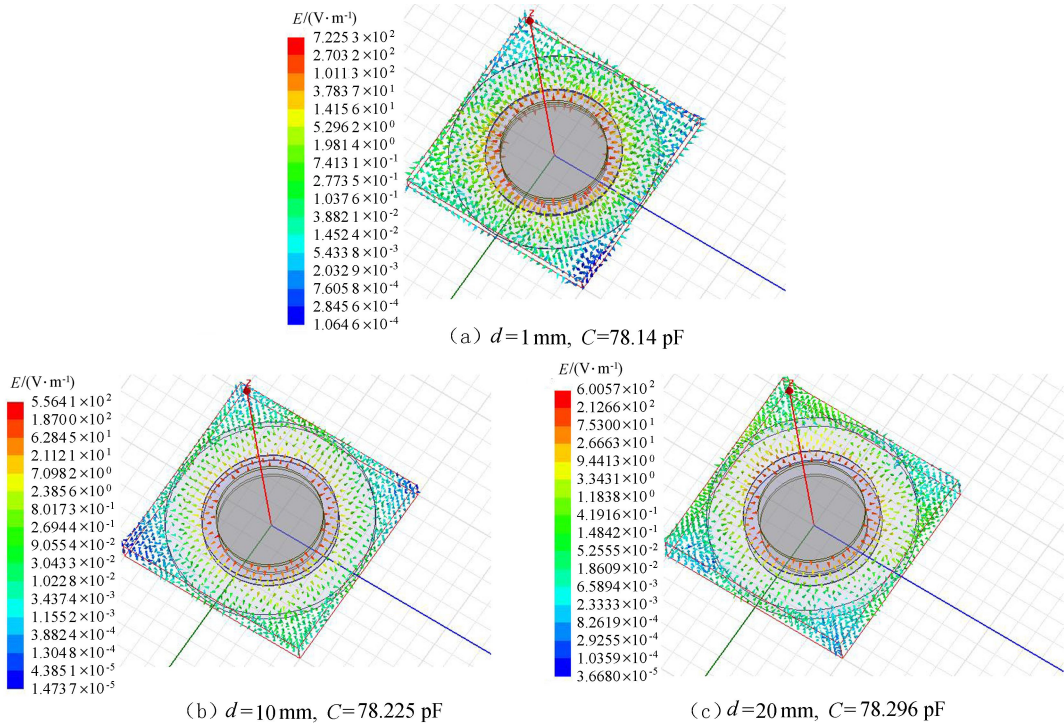


图 4 不同传输距离时的耦合机构电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of coupling structure with different transmission distance

2.3 耦合结构损耗分析

由于耦合结构存在等效串联电阻,而且等效串联电阻的值是与电介质材料有关的,所以有必要对等效串联电阻存在而造成功率损耗进行重点分析。根据图 1,将系统中其余元器件进行简化,可得图 5 所示的水下 ECPT 系统等效电路。其中: V_{in} 为系统输入的高频交流电, L_s 为串联谐振网络的补偿电感, $C_s = C_{S1} C_{S2} / (C_{S1} + C_{S2})$, $L_{CS} = L_{CS1} + L_{CS2}$, $R_{CS} = R_{CS1} + R_{CS2}$ 。当系统工作在谐振点时,此时耦合机构的介质损耗为: $P_{loss} = R_{CS} V_{in}^2 / (R_{CS} +$

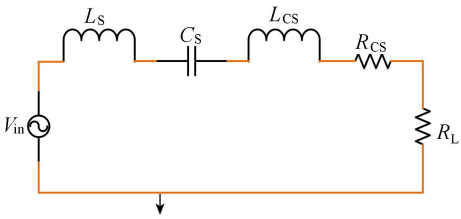


图 5 水下 ECPT 系统等效电路图
Fig. 5 Equivalent circuit model of underwater ECPT

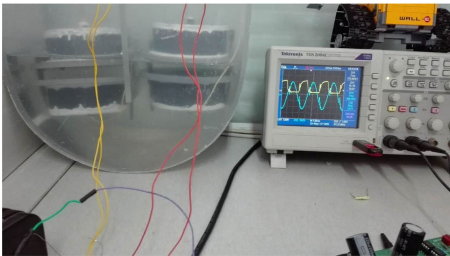
$R_L)^2$,系统输出功率为: $P_{out}=R_L V_i^2/(R_{CS}+R_L)^2$,根据文献[19],等效串联电阻为 $R_{CS}=\tan \delta/(\omega C_s)$, δ 为介质损耗角,当介质为 PVC 时,有 $\tan \delta=0.03$,故效率为

$$\eta=\frac{\omega C_s R_L}{\omega C_s R_L+\tan \delta} \times 100 \%=\frac{2 \pi f C_s R_L}{2 \pi f C_s R_L+\tan \delta} \times 100 \%=\frac{2 \pi f C_s R_L}{2 \pi f C_s R_L+0.03} \times 100 \% \quad (1)$$

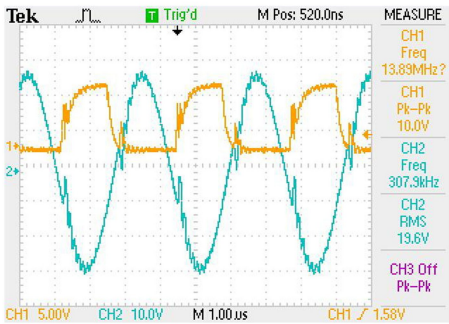
在耦合机构的半径 $r=51 \text{ mm}$ 、PVC 厚度 $d=1.5 \text{ mm}$ 时,求出 $C_{s1}=C_{s2}=72.3 \text{ pF}$,则 $C_s=36.2 \text{ pF}$,将其带入式(1),并利用仿真软件 MATLAB 得出系统效率随系统工作频率和负载的变化情况,即, $f<200 \text{ kHz}$ 、 $R_L<1\,000 \, \Omega$ 时,系统效率还不到 20%,所以有必要增大工作频率 f 或负载 R_L 来提升系统效率。但是当系统工作频率过高时会增加 MOS 管的开关损耗,所以适当增大负载是提升系统效率较好的方法。

3 水下 ECPT 实验系统设计

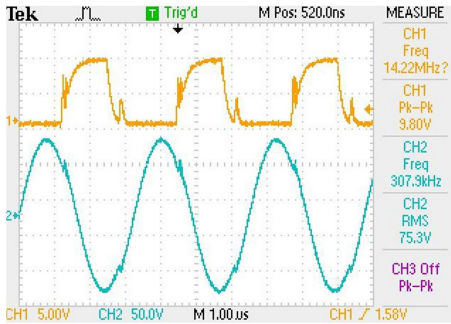
按照图 1 中的 ECPT 系统框图,搭建了适用于水下环境的 ECPT 实验平台,如图 6(a) 所示。图 6(a) 中左侧是盛有盐水的 U 形水槽,里面是 2 个密封好的耦合机构,每个耦合机构由上下 2 个圆盘形铜板构成,铜板外面由绝缘材料 PVC 包围起来,并通过灌环氧保证耦合机构与海水的隔离。右侧是示波器测量的波形图(黄色方波是高频逆变电路中驱动波形,蓝色正弦波是负载两端的电压波形)。系统输入直流电压 24 V,工作频率 307 kHz,然后当负载 $R=1.2 \text{ k}\Omega$ 和 $R=3.6 \text{ k}\Omega$ 时得到图 6(b)(c) 所示的实验结果。



(a) 水下ECPT系统



(b) $R=1.2 \text{ k}\Omega$



(c) $R=3.6 \text{ k}\Omega$

图 6 水下 ECPT 系统及实验结果

Fig. 6 Experimental prototype of a underwater ECPT system and results

在 $R=1.2 \text{ k}\Omega$ 时,输入电流为 0.12 A,输入功率 P_{in} 为 2.88 W,由图 6 知输出电压有效值为 19.6 V,故输出功率 P_{out} 为 0.32 W,则系统效率为 11.1%;同理, $R=3.6 \text{ k}\Omega$ 时系统效率为 32.9%,由此可知适当增加负载可以提升系统电能传输效率。在实验过程中,通过调整耦合机构上下极板之间的间距来改变系统的电能传输距离 d ,实验测量了 $d=1 \text{ mm}$ 和 $d=20 \text{ mm}$ 时系统工作频率比较稳定,始终在 307 kHz 处,几乎不受传输距离的影响。这结果验证了理论分析中耦合机构的等效电容值不受传输距离的影响,进而系统中串联谐振网络谐振点并未改变的结论。

4 结 语

研究水下 ECPT 系统的耦合机构,包括其等效电容值的计算、电场分布情况、传输距离对耦合机构的影响以及耦合机构的等效串联电阻对系统电能传输效率的影响。通过对耦合结构模型的仿真和实测验证了第 1 个结论:在极板尺寸、传输距离等条件相同时,水下耦合机构的等效电容值要比空气中耦合机构的等效电容值大并且不受传输距离的影响;通过水下 ECPT 系统实验平台验证了第 2 个结论:增加负载阻值可以提高

系统电能传输效率,并且改变传输距离时系统的谐振工作点并未改变。这些结论为今后水下 ECPT 系统的工程化设计奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王司令,宋保维,段桂林,等. 水下航行器非接触式电能传输技术研究[J]. 电机控制学报,2014,18(6): 36-41. (WANG Siling, SONG Baowei, DUAN Guilin, et al. Study on non-contact power transmission of underwater unmanned vehicle[J]. Electric Machines and Control,2014,18(6): 36-41. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 富一博,于渊. 无线电能传输技术的发展及其水下应用趋势浅析[J]. 大连大学学报,2014,35(6): 30-33. (FU Yibo, YU Feng. Development and a simple analysis of wireless power transfer using underwater[J]. Journal of Dalian University,2014,35(6): 30-33. (in Chinese))
- [4] 张凯. 非接触供电技术及其水下应用研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.
- [5] 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(Computers & Electronics), 2014,15(1): 51-62.
- [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. Non contact power and data delivery for ocean observation mooring buoy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(11): 2615-2621. (in Chinese))
- [7] 梁彬,李醒飞,房诚,等. 海洋浮标非接触电能传输电磁耦合器设计[J]. 电源技术,2016,40(2): 419-422. (LIANG Bin, LI Xingfei, FANG Cheng, et al. Design for ocean buoys contactless power transmission electromagnetic couplers[J]. Journal of Power Technology,2016,40(2): 419-422. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] DAI Jiejian, LUDOIS D. A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications[J]. IEEE Trans Power Electron,2015,30(11): 6017-6029.
- [10] 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.
- [11] 李思奇,代维菊,赵晗,等. 电场耦合式无线电能传输的发展与应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2016,40(3): 76-84. (LI Siqi, DAI Weiju, ZHAO Han, et al. Development and application of electric-field coupled wireless power transfer [J]. Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition),2016,41(3): 76-84. (in Chinese))
- [12] CHAO L, AIGUO-PATRICK H, NIRMAL K C, et al. Nair coupling study of a rotary capacitive power transfer system[C]//IEEE. Proceeding of 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. New York:IEEE,2009: 1-6.
- [13] 苏玉刚,徐健,谢诗云,等. 电场耦合型无线电能传输系统调谐技术[J]. 电工技术学报, 2013,28(11):189-194. (SU Yugang, XU Jian, XIE Shiyun, et al. A tuning technology of electrical-field coupled wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(11): 189-194. (in Chinese))
- [14] 苏玉刚,周川,闫琳,等. 基于电场耦合方式的无线电能传输技术综述[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(2): 177-180. (SU Yugang, ZHOU Chuan, LYU Lin, et al. Reviews on wireless power transmission technique based on electrical field coupled mode[J]. World Science-Technology Research and Development,2013,35(2): 177-180. (in Chinese))
- [15] LU F, ZHANG H, HOFMANN H, et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6011-6014.
- [16] URANO M, TAKAHASHI A. Study on underwater wireless power transfer via electric coupling[C]//IEEE. Proceeding of 2016 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai(IMFEDK), New York:IEEE,2016: 1-2.
- [17] 陈国华. 海水电导[M]. 北京:海洋出版社, 1981:1-5.
- [18] 赵晓云. 伴有电介质的平行板电容器电容的计算分析[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版),2013,30(3):29-31. (ZHAO Xiaoyun. Calculation of parallel-plate capacitor with a dielectric[J]. Journal of Fuyang Teachers College(Natural Science), 2013,30(3): 29-31. (in Chinese))
- [19] NISHIYAMA H, NAKAMURA M. Form and capacitance of parallel-plate capacitor[J]. IEEE Transaction Components Packaging & Manufacturing Technology(Part A), 1994, 17(3): 477-484.