

文章编号: 2095-4980(2020)03-0435-04

## 非铁磁性介质中的磁谐振无线传能系统仿真

石磊, 黄卡玛, 杨阳\*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 理论上磁谐振无线能量传输可以做到很高的效率, 然而在实际情况下由于各种各样介质的影响, 实测效率与理论值难以保持良好的一致性。为了解决实测效率与理论效率偏差较大的问题, 提出了基于等效电路模型的非铁磁性介质中的磁谐振无线能量传输系统。从计算与仿真角度分析了不同介质的对线圈阻抗与谐振频率的影响, 且计算与仿真结果吻合良好。提出了介质中高效率系统的设计步骤, 优化后仿真结果表明可以提高30%以上的效率。

**关键词:** 等效电路; 非铁磁性介质; 磁耦合谐振; 传输效率; 无线能量传输

**中图分类号:** TN751.2; TM15

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019461

## Simulation of magnetic resonance wireless power transfer system in non-ferromagnetic medium

SHI Lei, HUANG Kama, YANG Yang\*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** Theoretically, magnetic resonance wireless power transmission can achieve high efficiency. However, due to the influence of various media, a large deviation exists between the measured efficiency and the theoretical efficiency. A magnetic resonant wireless power transmission system in non-ferromagnetic medium is proposed based on the equivalent circuit model. The influences of different media on the coil impedance and resonance frequency are analyzed by calculation and simulation, and the results of calculation and simulation are in good agreement. The design steps of the high efficiency system in the medium are proposed, and the simulation results show that the efficiency can be improved by more than 30% after optimization.

**Keywords:** equivalent circuit; non-ferromagnetic medium; magnetic coupling resonance; transmission efficiency; wireless power transmission

自从 2007 年美国麻省理工学院提出了磁谐振无线能量传输(Magnetic Coupling Resonance Wireless Power Transmission, MCR-WPT)后<sup>[1]</sup>, 就引起了人们的广泛关注。近年来, MCR-WPT 在消费电子设备、电动汽车以及医疗植入设备<sup>[2-3]</sup>等领域得到了广泛应用, 并且研究热点主要集中在提升传输距离、提高传输效率等方面<sup>[4-8]</sup>。然而在实际应用中, 介质的存在让效率和谐振频率等在理论设计与实际电路间存在着较大的差距。特别是在医疗植入设备方面<sup>[9]</sup>, 如心脏起搏器等, 人体组织影响植入设备的性能表现, 故人体的电参数也是在理论设计时必须考虑的因素。现有的理论研究中, 少有关于非铁磁性材料介质对 MCR-WPT 影响的研究。Taofeek Orekan 等分析了海水对线圈电阻和电感等的影响<sup>[10]</sup>, 实现了 10 cm 以内 40%的效率。Cancan Rong 等分析了超介质材料对系统阻抗、效率的影响<sup>[11]</sup>, 实现了 40 cm 以内 40%的效率。本文详细分析了非铁磁性介质对 MCR-WPT 的影响, 提出了将非铁磁性介质的等效电路模型加入线圈的等效电路模型中, 从而构造成更加贴合实际的数学模型。在有限元软件中进行了建模仿真, 得到了介质对线圈电阻、电感、谐振频率、效率等的影响。提出了具体的设计步骤, 用以指导非铁磁性介质中的高效率 MCR-WPT 系统的设计。

收稿日期: 2019-11-14; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 四川科技计划资助项目(2019YFG0419); 国家自然科学基金资助项目(61971295)

作者简介: 石磊(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线能量传输。email:shilei950512@163.com

\*通信作者: 杨阳 email:yyang@scu.edu.cn

1 MCR-WPT 概述

1.1 空气中的 MCR-WPT

MCR-WPT 系统由信号源、放大器、线圈系统、整流电路和负载组成。线圈系统包含源线圈、发射线圈、接收线圈和负载线圈。图 1 给出了一般情况下线圈系统的等效电路，各个线圈之间通过磁耦合谐振连接。令  $R_0 = R_S = R_L = 50 \Omega$ 。源线圈的阻抗为  $Z_1 = R_0 + R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1$ ，同理可有  $Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2$ ，根据基尔霍夫电压定律，可以得到正向电压增益  $S_{21}$  与效率如式(1)和式(2)：

$$S_{21} = 2 \frac{U_L}{U_S} = \frac{j\omega^3 k_{12} k_{23} L_1 L_2^2 R_0}{(\omega^2 k_{12} L_1 L_2 + Z_1 Z_2)^2 + (\omega k_{23} L_2 Z_1)^2} \quad (1)$$

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (2)$$

式中： $k_{12}$  为源线圈和发射线圈间的耦合系数； $k_{23}$  为发射线圈和接收线圈间的耦合系数。

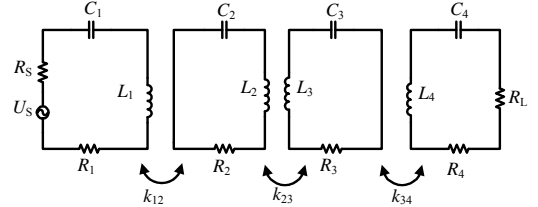


Fig.1 Equivalent circuit model of four-coil system  
图1 四线圈系统等效电路模型

1.2 介质中的 MCR-WPT

相对于空气中的 MCR-WPT，介质中的无线传能过程造成更大的损耗。完全埋入非铁磁性介质中的线圈系统见图 2，此时将介质设为海水，即将整个线圈系统浸没在海水中，利用有限元软件建模仿真得到 100 mm 处效率从 90.2%(空气中)下降到了 7.9%，相比于空气，海水的相对介电常数大，对线圈的电抗部分存在影响；并且海水拥有较大的电导率，这使得线圈的损耗电阻增大<sup>[12]</sup>，故海水对 MCR-WPT 的传输效率影响很大。

一般情况下，在介质中的 MCR-WPT 需要考虑不同介质对传输效率的影响。对于电介质，普遍存在着导电损耗和涡流损耗。介质的损耗特性一般与介电常数和电导率有关。介电常数是衡量电介质在电场中的极化行为和存储电荷能力的重要参数；电导率则表示介质中电荷流动的难易程度<sup>[13]</sup>。

导电媒质在外电场作用下，内部的自由带电粒子将发生定向运动而形成电流，对于体积为  $v$  的导电媒质内导电损耗功率为： $P_D = \int_v J E d v = \int_v \sigma E^2 d v$ 。涡流损耗则是由于导电媒质处于交变磁场中，导体产生的感应电流在内部形成了闭合回路，造成了功率的损失。由  $I_E = -\int_v j \omega \sigma d v$  可知，涡流损耗为  $P_E = I_E^2 R_E$ 。若负载得到的功率为  $P_{out}$ ，那么传输效率则为  $\eta = P_{out} / (P_{out} + P_E + P_D)$ 。

介质的存在不仅对线圈电阻有影响，其产生的涡流磁场而且会与线圈的磁场交叉耦合，即对线圈的电抗部分也有影响。于是采用基于涡流损耗形式的松耦合变压器模型，将非铁磁性导电介质等效为电感、电容和电阻的环路<sup>[13-15]</sup>，即图 3 等效电路。并且介质对每一个线圈都有影响，即每一个线圈的自感、分布电容以及电阻都会变化，且线圈间的互感也会变化。以源线圈为例求解等效阻抗公式，代入介质等效电路参数，等效后的源线圈阻抗为：

$$Z_{eq1} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega M_{15}^2}{R_5 + j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5}} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (3)$$

对式(3)分离实部和虚部后可以得到介质对源线圈电阻和电感的影响。由文献[16]可得等效电阻与电抗为式：

$$R_{eq} = \omega \mu a n^2 \left[ \frac{4}{3}(\beta a)^2 - \frac{\pi}{3}(\beta a)^3 + \frac{2\pi}{15}(\beta a)^5 - \dots \right] \quad (4)$$

$$X_{eq} = \omega \mu a n^2 \left[ K(k) - 2 - \frac{\pi}{3}(\beta a)^3 + \frac{4\pi}{15}(\beta a)^4 - \dots \right] \quad (5)$$

式中： $K(k) = \int_0^{\pi/2} d\Phi / (1 - k^2 \sin^2 \Phi)$ ， $\Phi$  为雅克比振幅， $k$  为椭圆模量，取  $k^2 \approx 1$ ； $\beta = (\mu \omega \sigma / 2)^{1/2}$ ， $\mu$  为介质的相对磁导率， $\sigma$  为介质的电导率， $\omega$  为角频率； $a$  为线圈半径， $n$  为线圈匝数。

系统中的每个线圈都会受到这样的影响，故用公式计算介质对系统的影响，并使用有限元软件进行建模仿真来进行验证。

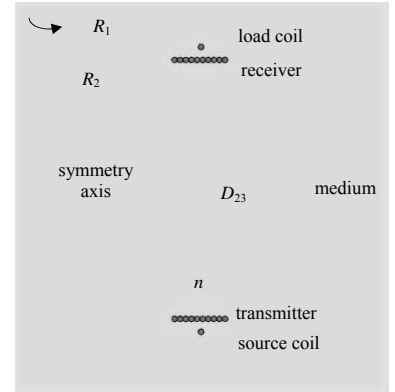


Fig.2 MCR-WPT coil structure in medium  
图 2 在介质中的 MCR-WPT 线圈结构

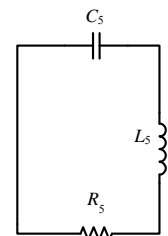


Fig.3 Equivalent circuit model in medium  
图 3 介质等效电路模型

2 计算与仿真

表 1 给出了仿真模型参数，其中  $R_1$  为源/负载线圈半径， $R_2$  为发射/接收线圈半径， $D_{12}$  为源线圈到发射线圈的距离， $D_{23}$  为发射线圈到接收线圈的距离， $n$  为发射/接收线圈的匝数， $b$  为线圈的线径， $C$  为补偿电容， $f_0$  为理论谐振频率。表 2 给出了几种材料的电导率、相对介电常数以及相对磁导率。得到理论的等效电路后，代入表 1 和表 2 中的参数计算发射线圈的等效阻抗。并在有限元软件中进行建模仿真，仿真模型见图 2。可以得到介质对于线圈自感、电阻、谐振频率以及传输效率的影响。

分别计算仿真介质为空气、海水以及肌肉 3 种情况，从图 4 和图 5 可以看出，计算与仿真结果吻合良好，阻抗变化趋势一致且误差较小。随着频率的增加，空气对线圈阻抗基本没有影响，线圈电感保持在  $51 \mu\text{H}$  以上且电阻保持在  $1 \Omega$  以下，这说明空气对无线传能效率影响较小。然而对于海水和肌肉，随着频率的增加，介质对电感和电阻影响都很大。海水中的电感不断减小至  $46 \mu\text{H}$ ，而且电阻不断增大至  $142 \Omega$ ；肌肉中的电感减小至  $51 \mu\text{H}$ ，电阻增大至  $63 \Omega$ 。随着电导率和相对介电常数的增加，线圈电感减小的更多，线圈电阻增大的更多。这是因为海水的电导率和相对介电常数大于肌肉的值，近距离时，相对介电常数大对电抗影响大，而且较大的电导率使得线圈两端串联的电阻变大，因此海水对电感和电阻的影响更大。高于  $1 \text{ MHz}$  以后，海水的电阻急剧增大且电感急剧减小，这会导致传输效率迅速减小，这也是海水中的无线传能频率普遍低于  $1 \text{ MHz}$  的原因。

由  $f_0 = 1/\sqrt{2\pi\sqrt{LC}}$  可以计算出谐振频率的变化，从图 6 可以看到其变化趋势与不同介质下的线圈电感值变化对应：海水和肌肉中的电感值一直在下降，而谐振频率则是一直增加。对于一个系统而言，谐振频率是固定的，即信号频率增加导致了系统失谐，从而导致 MCR-WPT 效率降低。

对于效率而言，由于模型谐振频率高，阻抗变化大，损耗大，即从表 3 可以看到介质的存在会明显影响效率。

为了在非铁磁性介质环境下得到一个高效率的 MCR-WPT 系统，需要首先确定工作频率、线圈的形状、匝数、导线半径等，用以满足设计条件的尺寸要求；然后在有限元软件中建立 3D 模型，求解计算自感、互感等参数，根据工作频率选择合适的补偿电容；下一步则是进行线圈优化，获得不同距离下的效率，得到最优解。

以海水介质为例，初步优化后的模型为线圈匝数 20，半径  $100 \text{ mm}$ ，线径  $0.5 \text{ mm}$ ，传输距离为  $100 \text{ mm}$ 。采用上述方法，首先考虑海水介质的影响，估算出其对应工作频率下线圈阻抗后，再进行建模等操作，表 3 中最后一栏是采用优化设计后的结果，可看出采用上述方法后效率可以提升约 30% 以上。

表 1 仿真模型参数

Table1 System parameters

parameter	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$D_{12}/\text{mm}$	$D_{23}/\text{mm}$	$n$	$b/\text{mm}$	$C/\text{nF}$	$f_0/\text{kHz}$
value	110	100	10	100	10	1	2.0	500

表 2 非铁磁性介质参数

Table2 Parameters of non-ferromagnetic medium

medium	conductivity/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	relative permittivity	relative permeability
air	0	1.00	1
sea water	4.00	81.00	1
muscle	1.28	60.33	1

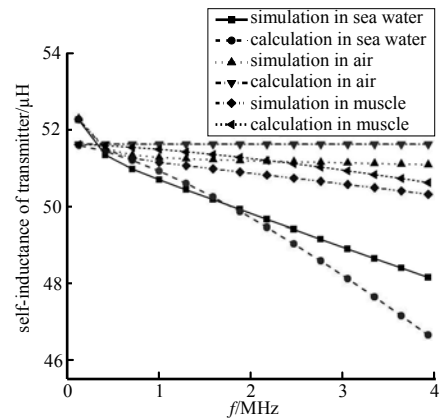


Fig.4 Relationship between self-inductance of transmitter and frequency in different mediums  
图 4 不同介质下发射线圈自感与频率的关系

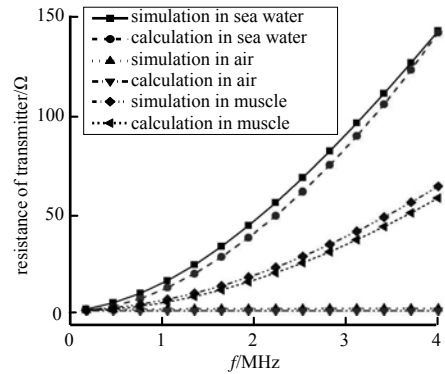


Fig.5 Relationship between resistance of transmitter and frequency in different mediums  
图 5 不同介质下发射线圈电阻与频率的关系

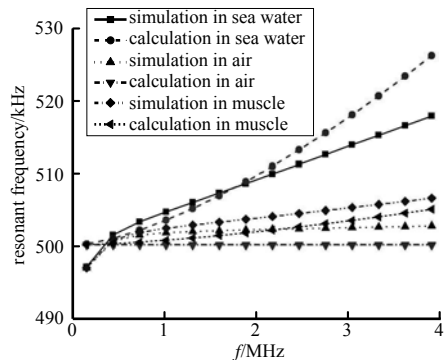


Fig.6 Relationship between resonant frequency of transmitter and signal frequency in different mediums  
图 6 不同介质下发射线圈谐振频率与信号频率的关系

### 3 结论

提出了非铁磁性介质的等效模型,更好地分析非铁磁性介质对 MCR-WPT 系统的影响,利用 RLC 回路等效模型,与每一个线圈进行耦合,得到了基于等效电路模型的非铁磁性介质中的 MCR-WPT 系统,可以更好地应对非铁磁性介质下的仿真与设计。在计算软件中进行了理论计算以及在有限元软件中进行了仿真设计,进一步分析明确了非铁磁性介质对线圈电感、电阻、谐振频率与效率的影响,验证了等效电路的正确性。总结了非铁磁性介质下高效率 MCR-WPT 系统的设计步骤,提升了海水中的传输效率,为今后的设计与实验提供了指导。

#### 参考文献:

- [ 1 ] KURS A,KARALIS A,MOFFATT R,et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007,317(83):83-86.
- [ 2 ] MOMENEH A,CASTILLA M,MORADI Ghahderijani M,et al. Analysis, design and implementation of a residential inductive contactless energy transfer system with multiple mobile clamps[J]. IET Power Electron, 2017,10(8):875-883.
- [ 3 ] WU R,LI W,LUO H,et a. Design and characterization of wireless power links for brain-machine interface applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(10):5462-5471.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] DUONG T P,LEE J W. Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011,21(8):442-444.
- [ 6 ] LEE G,WATERS B H,SHIN Y G,et al. A reconfigurable resonant coil for range adaptation wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016,64(2):1-9.
- [ 7 ] 曾孝平,王茂,于安宁,等. 基于磁耦合谐振的动态无线传能系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6):1014-1019. (ZENG Xiaoping,WANG Mao,YU Anning,et al. Design of dynamic wireless power transmission system based on magnetic resonance coupling[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):1014-1019.)
- [ 8 ] 马菁勛,钟贻,陈星. 四线圈并联谐振磁耦合无线传能系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):452-456. (MA Jingxu,ZHONG Yi,CHEN Xing. Design of a four-coil parallel resonant magnetic coupled wireless power transmission system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):452-456.)
- [ 9 ] REZA K S,CHOI G S. Optimization of planar strongly coupled wireless power transfer system for biomedical applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016,58(8):1861-1866.
- [10] OREKAN T,ZHANG P,SHIH C. Analysis, design, and maximum power-efficiency tracking for undersea wireless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017,6(2):843-854.
- [11] RONG C,LU C,HU Z,et al. Analysis of wireless power transfer based on metamaterial using equivalent circuit[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):2032-2035.
- [12] BENNING C. Impedance of a loop antenna in a conducting medium[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966,14(2):242-243.
- [13] 景无为. 非铁磁性导电介质影响下无线传能系统的分析及优化[D]. 南京:东南大学, 2016. (JING Wuwei. Research on characteristic and optimization design of wireless power transfer through non-ferromagnetic conductive medium[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2016.)
- [14] 司怀吉,崔占忠,张彦梅. 电磁感应引信探测原理研究[J]. 北京理工大学学报, 2005,25(1):75-78. (SI Huaiji,CUI Zhanzhong,ZHANG Yanmei. Study of electromagnetic fuze detection principle[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005,25(1):75-78.)
- [15] NIU W,GU W,CHU J. Analysis and experimental results of frequency splitting of underwater wireless power transfer[J]. The Journal of Engineering, 2017(7):385-390.
- [16] KRAICHMAN M B. Impedance of a circular loop in an infinite conducting medium[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards D:Radio Propagation, 1962,66(4):499-503.

表 3 不同介质下的效率

Table3 Efficiency in different mediums

medium	efficiency/%
air	90.2
seawater/	7.9
muscle	6.0
seawater(optimized)	42.5