基于负磁导率电磁材料的WPT效率提升研究

辛文辉*, 蒋猛, 贺飞, 华灯鑫, 刘凯凯

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048

* E-mail: xinwenhui@xaut.edu.cn

收稿日期: 2018-03-27; 接受日期: 2018-07-27; 网络版发表日期: 2018-09-27

国家自然科学基金(批准号: 61875162)资助项目

摘要 为提高无线电能传输(wireless power transfer, WPT)系统的传输效率, 提出一种由六边形双层螺旋线圈阵列构成的蜂巢结构的负磁导率人工电磁材料(negative permeability metamaterials, NPM). 通过对NPM基本单元的参数优化, 将其负磁导率工作频率调节至6.78 MHz. 仿真表明了该NPM的磁场再聚焦及增强特性, 实验测得NPM在6.2~6.7 MHz频段处其磁导率为负. 搭建了一个两线圈结构的WPT系统, 验证了该NPM的传输效率提升性能及在WPT系统中的结构、位置特性. 结果表明: 两层结构的NPM在WPT系统的中间位置具有最优的效率提升效果, 可将传输距离为30 cm的WPT系统的传输效率从1%提升到12.5%.

关键词 人工电磁材料, 无线电能传输, 磁导率, 传输效率

1 引言

当前, 电动汽车、便携式电子设备及植入式医学装置对无线充电的需求, 促使了无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术的迅速发展^[1,2]. 感应式、磁共振式及电容式是WPT的3种主要方式, 而提高电能传输效率一直是WPT研究的关注点. 对于磁共振式WPT来说, 电能传输线圈间的耦合系数、线圈品质因数及负载是影响传输效率的主要因素^[3].

人工电磁材料(左手材料或人工特异材料, metamaterials)是近年来获得极大关注的一种电磁材料, 因其负电导率、负磁导率, 从而具有负折射率、超透镜及隐身等超常物理特性^[4-6]. 通常情况下, 制作在MHz频段处电导率、磁导率同时为负的人工电磁材料具有

一定的挑战. NPM是一种只有磁导率为负的人造电磁材料, 按照麦克斯韦电磁场理论, 负磁导率可改变电磁场的衰减程度, 并对电磁场起再聚焦作用, 间接提高电能传输线圈之间的耦合系数, 从而提升WPT的传输效率^[7,8].

采用NPM来提高WPT系统效率已有一定的研究. Wang等人^[9]在RO4003C平板材料的上、下面构建了一种四边形NPM单元, 将由该单元构成的6×6阵列的NPM置于WPT系统中时, 与没有放置NPM的WPT系统相比, 其传输效率从17%提高到47%, 但该NPM的工作频率为27.12 MHz, 实际应用时会对WPT系统的逆变及整流提出挑战. 研究者Ranaweera等人^[10]设计了一种圆形NPM单元(three-turn spiral resonators, 3T-SR), 其负磁导率工作频率可降至6.5 MHz, 当将由此

引用格式: 辛文辉, 蒋猛, 贺飞, 等. 基于负磁导率电磁材料的WPT效率提升研究. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1234-1240

Xin W H, Jiang M, He F, et al. Study of efficiency improvement for wireless power transfer based on negative permeability metamaterials (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1234-1240, doi: 10.1360/N092017-00334

单元构成的 5×5 阵列NPM置于线圈直径、传输距离均为1 m的WPT系统中时, 可将传输效率提高至54.3%。此外, Li等人^[11,12]也设计了四边形NPM单元, 研究了由此单元组成的单层、双层及立体结构NPM的电能传输特性。田子建等人^[13]也设计了工作频率在22 MHz的圆形NPM单元, 并研究了不同条件下NPM对系统传输效率影响。

本文设计了一种可在常规FR4材料基板的上下两面制作的六边形多匝螺旋线圈NPM单元。与已有的四边形NPM单元相比, 可避免其尖锐部位的放电损耗; 与圆形NPM单元相比, 则更易构成一个较为均匀负磁导率磁场, 在实际应用中将会有诸多优势。设计中, 通过对NPM单元的优化, 将负磁导率工作频率调节到ISM波段(industrial scientific medical band, ISM)的6.78 MHz; 其次, 基于此电磁单元, 构建了一个蜂巢结构的NPM, 分析了NPM电磁场增强及聚焦效果; 最后, 搭建了实际的电能传输系统, 验证了其传输效率提升的有效性及在WPT系统中具有的结构、位置特性。

2 NPM单元设计及频率调节

本文设计的NPM单元如图1所示: 基板采用易于获得的FR4材料, 厚度 H 为0.5 mm, 两个六边形螺旋结构线圈Coil A及Coil B在基板的上下两表面呈反转 180° 对称分布, 并在内圈通过金属过孔相连, 外圈则呈开放状态, 并与其寄生电容构造开口谐振环(split-ring resonator)。线圈材料为铜箔, 厚度 L 为0.07 mm, 鉴于金属线圈的参数直接决定电磁单元是否具备负磁导率特性, 通过借鉴已有研究, 设定每层线圈匝数为9, 线圈相邻导线之间的间距 D 为2 mm, 线圈导线宽度 W 为扫描参数, 通过该参数调节线圈导线之间的间距, 以改变线圈间的寄生电容, 从而达到调节NPM单元谐振频率——即负磁导率频率的目的。

设计完成的NPM单元在ANSYS的HFSS(high frequency electromagnetic field simulation)中进行了仿真。仿真时, 设定平面波矢 $\mathbf{k}$ 沿着结构表面 y 轴平行入射, H 沿 z 轴方向传播, E 沿 x 轴方向传播。图2是仿真获得的 S 参数随线圈导线宽度变化曲线, 由图可以看出, 不同宽度导线的 S 参数在不同频段处发生剧烈变化, 这说明此NPM单元在该频段处具有某种特殊的电磁特性。

依据图2的数据, 采用参数提取法^[14,15]可以得到

NPM单元的等效磁导率, 如图3所示(由于磁导率的虚部表示材料的磁场损耗, 仅给出等效磁导率实部曲线)。由图可以看出, 当金属线的宽度在0.2~0.8 mm范围内, NPM单元的磁导率出现了负值, 并且负磁导率频段随着金属线宽度的增加在逐步变小, 这是因为随着金属线宽度的增加, 金属线之间的间距变形小, 寄

图1 (网络版彩图)NPM基本单元结构

图2 (网络版彩图)NPM单元 S 参数

图3 (网络版彩图)NPM单元等效磁导率

生电容增加所致. 因此, 可根据工作频率的需求, 对金属线宽度进行设定, 比如, 当要求负磁导率的频率为 6.78 MHz 时, 金属线的宽度应设定在 0.2 mm 左右.

3 NPM 磁场仿真

如前所述, NPM 是将具有负磁导率的 NPM 基本单元按一定规律周期性排列, 以构成二维或三维电磁材料. 图 4(a) 是将 19 个 NPM 基本单元在同一平面排列而成的类似蜂巢的 NPM 结构图, 其中, 相邻两个单元之间的中心间距为 65.82 mm, 构建完成的电磁材料的宽度为 282 mm. 构造完成的 NPM 在 HFSS 中对其磁场增强效果进行仿真验证. 图 4(b) 是仿真结构图, 图中圆形发射接、收线圈的半径设定 11.5 cm, 两者平行放置, 间距为 30 cm; 发射、接收线圈设定为集总参数: $L=5.51 \mu\text{H}$, $C=100 \text{ pF}$, 使其谐振频率为 6.78 MHz, 与金属线宽度为 0.2 的 NPM 基本单元的负磁导率频率一致. 仿真时, 将 NPM 置于电能传输线圈的中间位置, 在发射线圈的 lumped Port 注入工作频率为 6.78 MHz 能量, 并在接收线圈的 lumped Port 测量接收能量.

图 5 是仿真得到的 NPM 置入的对 WPT 系统磁场强度改变的效果. 其中 1-slab 为图 4(a) 所示的平板型 NPM, 2-slab 是将两个平板型 NPM 平行排列 (间距为 10 mm) 的情况. 鉴于系统的对称性, 图中仅给出了中心平面切面一半的分布图. 由图可以看出, 相比于未置入 NPM 的 WPT 系统, NPM 的引入延缓了发射端到接收端的电磁场衰减程度, 并对电磁场进行了再聚焦, 使得接收端

的磁场强度得到增强. 仿真结果同时显示, 2-slab 电磁材料的磁场增强效果更为明显, 这也预示着这种结构的 WPT 效率提升更加显著.

图 6 是蜂巢结构的 NPM 在发射线圈激励下的磁场分布情况, 可以看出, 这种结构的 NPM 可在较大的区域内产生较为均匀的磁场, 当接收线圈尺寸较发射线圈小时, 在偏离中心位置一定范围内, 仍能获得稳定的能量.

4 实验研究

为了对以上设计及仿真进行验证, 实际制作了 NPM 并搭建了 WPT 实验系统, 如图 7 所示. 其中, NPM 以印刷电路板的方式制作, 其外形尺寸与图 1 和 4(a) 所描述完全一致; WPT 系统的发射、接收线圈为 7 匝的树脂包层铜导线制作, 线圈平均半径为 15 cm, 线圈之间的距离为 30 cm. 实验中, 以网络分析仪 (KEYSIGHT, 5072A) 作为激励、测量仪器.

首先, 对 NPM 的负磁导率特性进行了验证. 实验中, 将网络分析仪的激励端口、负载端口分别与发射线圈、接收线圈连接 (发射线圈、接收线圈勿需接谐振电容), 由激励端口产生渐变波激励发射线圈, 所传输的电磁能量为负载端口接收. 由于与网络分析仪激励端口、负载端口相连接的 WPT 系统可等效为一个二端口系统, 所以, 可以用二端口理论对其传输性能进行分析.

图 8 是实验中获得的 WPT 系统在无 NPM, 1-slab

图 4 (网络版彩图)NPM 结构及仿真结构

图5 (网络版彩图)有/无NPM情况下WPT的磁场强度

图6 (网络版彩图)NPM的磁场强度分布图

图7 (网络版彩图)实验装置

NPM情况下的 S 扫描参数. 其中, S_{11} 表示激励端口的反射系数, S_{21} 表示从激励端口到负载端口的传输系数. 可以看出, 对于无NPM的WPT系统, 随着扫描频率的增大, S_{11} 基本未变, S_{21} 出现较小的下降, 这是因为随着频率的增加, 线圈的损耗也在增大的缘故. 对于NPM置入的情况, 在6.4 MHz附近, S_{11} 及 S_{21} 发生了剧烈的变化: S_{11} 从0.025 dB降到了-0.077 dB, S_{21} 则从-57 dB上升到-42 dB. 显然, 实际制作的NPM在6.4 MHz附近具

图8 (网络版彩图)NPM的 S 参数

有了某种特性.

同理, 采用参数提取法对图8中的 S 参数进行反演, 可以得到NPM的等效磁导率, 如图9所示. 其中, 单层NPM的负等效磁导率的频率范围为6.1~6.8 MHz, 双层NPM的负等效磁导率的频率范围为6.2~6.7 MHz, 这一结果证实了所设计的NPM磁导率的负特性.

需要说明的是, 图9为NPM的整体等效磁导率曲线, 而图3的仿真结果为一个NPM基本单元的等效磁导率, 两者虽然基本一致, 但叠加效应使得NPM的负磁导率频带宽度较NPM基本单元的负磁导率频带宽度有所拓展; 另一方面, 基板材料的杂散性、金属线宽度的误差也导致两者的中心频率不尽相同.

第二, 对NPM的WPT传输效率提升进行验证. 实验时, 首先要对发射端与接收端进行调谐, 将发射线圈、接收线圈以“串-串”方式与谐振电容相连接, 精心调节谐振电容的取值, 使发射端、接收端谐振. 实验中, 应将WPT的谐振频率设定在NPM的负磁导率频段, 以使NPM可对WPT产生的电磁场起到再聚焦的作用. 根据以上数据, 将WPT的工作频率设定在6.4 MHz.

图10是实验中获得WPT系统在3种情况下的 S 参数. 其中, 当未引入NPM时, 在6.4 MHz附近 S_{11} 出现较小的波谷, 而 S_{21} 出现较小波峰, 这说明在此频率处, WPT系统达到了谐振. 当分别将1-slab和2-slab结构的NPM置入发射线圈与接收线圈的中间位置时, S_{11} 的波谷、 S_{21} 的波峰都出现较大的改变. 与未使用NPM情况相比, 1-slab结构的NPM使得WPT的 S_{21} 增大到了-1.0 dB, 而2-slab结构的NPM使其增大到-0.01 dB. 由于 S_{21} 代表发射端到接收端的传输电能, 这一结果表明

图9 (网络版彩图)NPM的等效磁导率

图10 (网络版彩图)WPT系统S参数

NPM的引入增大了电能传输效率. 与1-slab相比, 2-slab结构的NPM的传输效率提升效果更显著, 这一实验结果也与图4的磁场增强仿真结果一致.

最后, 对NPM在WPT中的位置特性进行了实验研究, 图11是NPM在电能传输系统中不同位置处的电能传输效率曲线(依据二端口网络效率公式), 图中, d 表示电磁材料距离发射线圈的距离. 可以看出, 在电能传输系统的大部分位置, NPM的引入均能提高电能传输效率. 本研究中, 在未对线圈参数及补偿电路进行优化的情况下, 当1-slab和2-slab结构的NPM处于发射线圈与接收线圈的中间位置时, 可将传输效率分别提高到3%和12.5%.

为了验证NPM对WPT传输效率的实际提升效果, 将图7中WPT系统的发射端及接收端分别连接逆变电路及负载, 原理如图12所示. 其中, 逆变电路采用Class-E结构, Q_1 为高速开关管, 选用IXYS公司的

图11 (网络版彩图)NPM传输效率

图12 基于Class-E的WPT实验系统原理图

IXFH12N100F, Q_1 驱动则采用德州仪器公司(Texas Instruments)的UCC27524A. 根据Class-E的逆变要求, 设置合适的 C_1 及 C_r 值, 使其与 L_1 组成的逆变电路在NPM的负磁导率频率6.4 MHz处谐振.

实验时, 首先务必保证Class-E能工作在6.4 MHz波段, 同时逆变电路工作在软开关状态, 这一目标是通过选择合适的线圈参数及电容 C_1 的值来实现的. 实验发现, 尽管选择了高频的 Q_1 作为逆变开关, 设置了软开关参数, 但实验中发现逆变电路的损耗依然较大. 为了排除其对NPM传输效率提升性能测试的影响, 可通过测量 U_{ab} 及 U_{cd} 的电压、电流值来获得系统传输效率.

图13(a)所示为驱动电路UCC27524A输入到IXFH12N100F的栅极逆变控制信号 U_g 以及加载在发射谐振电路 U_{ab} 上的电压波形. 由图可以看出, Class-E实现了6.4 MHz的有效驱动. 图13(b)所示为发射端谐振电路a-b端口及接收端谐振电路c-d端的电压波形(发

图 13 (网络版彩图)实验波形

射端与接收端间距为30 cm, 2-slab结构的NPM置于两线圈的中间位置).

表1所示为实验参数及不同NPM结构对传输效率的影响. 其传输效率与网络分析仪测定的结果基本一

表 1 实验参数

NPM结构	接收功率	传输效率	发射端输入功率	逆变频率
无NPM	0.23 W	0.009%		
1-slab NPM	0.71 W	2.8%	2 W	6.409 MHz
2-slab NPM	3.10 W	12.2%		

致, 这反映了NPM对提升WPT传输效率方面确有效果. 实验数据与网络分析仪测定结果有一定差别, 其可能的原因在于逆变电路产生的驱动波形有一定的畸变所导致.

5 讨论及结论

人工电磁材料具有的超常物理特性, 利用NPM的磁场再聚焦特性可用来提高无线电能的传输效率. 本文设计了一种蜂巢结构的NPM, 可在6.2~6.7 MHz范围内实现等效磁导率为负, 将该结构的NPM置于WPT系统中, 可显著提升电能传输效率.

与已有研究相比, 本文提出的蜂巢结构的NPM可在ISM的较低频段工作, 也更具结构优势, 可在其区域产生较为均匀的增强磁场, 这在实际应用中将更有价值.

参考文献

- 1 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. 中国电机工程学报, 2013, 33: 1–13, 21
- 2 Bi Z, Kan T, Mi C C, et al. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. *Appl Energy*, 2016, 179: 413–425
- 3 Song M, Belov P, Kapitanova P. Wireless power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics. *Appl Phys Rev*, 2017, 4: 021102
- 4 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*, 1968, 10: 509–514
- 5 Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 1999, 47: 2075–2084
- 6 Smith D R, Vier D C, Padilla W, et al. Loop-wire medium for investigating plasmons at microwave frequencies. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 1425–1427
- 7 姚辰, 马殿光, 唐厚君. 超颖材料在无线电能传输中的应用方法. 电工技术学报, 2015, 30: 110–119
- 8 Li W, Zhang Y, Yao C, et al. Simulations on shifting medium and its application in wireless power transfer system to enhance magnetic coupling. *J Appl Phys*, 2016, 119: 194901
- 9 Wang B, Teo K H, Nishino T, et al. Wireless power transfer with metamaterials. In: Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 11–15 April, 2011. Rome, 2011. 3905–3908
- 10 Ranaweera A L A K, Duong T P, Lee J W. Experimental investigation of compact metamaterial for high efficiency mid-range wireless power transfer applications. *J Appl Phys*, 2014, 116: 043914
- 11 Li W W, Wang P, Chen Y, et al. Experimental investigation of 1D, 2D, and 3D metamaterials for efficiency enhancement in a 6.78 MHz wireless

- power transfer system. In: 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 5–6 May, 2016. Aveiro, 2016. 1–4
- 12 Dong Y, Li W, Cai W, et al. Experimental investigation of 6.78 MHz metamaterials for efficiency enhancement of wireless power transfer system. In: 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 5–8 December, 2016. Auckland, 2016. 1–5
- 13 田子建, 陈健, 樊京. 基于磁负超材料的无线电能传输系统. 电工技术学报, 2015, 30: 1–11
- 14 Baena J D, Marqués R, Medina F, et al. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators. *Phys Rev B*, 2004, 69: 014402
- 15 Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Phys Rev E*, 2005, 71: 036617

Study of efficiency improvement for wireless power transfer based on negative permeability metamaterials

XIN WenHui, JIANG Meng, HE Fei, HUA DengXin & LIU KaiKai

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

In order to enhance the transmission efficiency of wireless power transfer (WPT), a negative permeability metamaterials (NPM) with a structure of honeycomb composed by units of hexagon-shaped spirals copper is proposed in this paper. The unit parameters of the NPM are optimized, to make sure the negative permeability at 6.78 MHz. The *S*-parameters of the designed NPM are measured by a network analyzer and the permeability is extracted. It shows that the honeycomb NPM have a negative permeability at 6.2–6.7 MHz. A two-coil WPT is setup and the transmission efficiency of WPT embedded with NPM at the different position and with different structure are investigated. The measured results show that the 2-slab honeycomb NPM have a good performance compared with the 1-slab NPM, and the efficiency can be increased up to 12.5% at a distance of 30 cm.

negative permeability metamaterials, wireless power transfer, permeability, transmission efficiency

doi: [10.1360/N092017-00334](https://doi.org/10.1360/N092017-00334)