

基于超材料的高效率多源无线充电系统的研究

谢伟¹,王海华¹,贾和坤²,刘帅²,王忠²

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102;

2. 江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:对于多发射源无线充电系统来说,发射线圈与接收线圈间的错位会导致互感急剧下降,使得传输效率降低。为提升多源无线充电系统的效率,首先,分析多发射线圈间相对位置与传输功率的关系,找出取得最大功率输出的条件;然后,设计出一种新型宽边耦合正方形螺旋结构的电磁超材料,增强收/发线圈间消逝波强度,在不改变传输系统本身的情况下有效提升传输效率;最后,搭建双源磁谐振式无线电能传输系统实物平台进行验证。实验结果表明:相比于单源系统,双源系统传输效率提高约15%;当收/发端线圈夹角为40°时,双源系统传输效率达到最高,为41.4%;添加超材料可使系统传输效率有效提高约20%,添加三块超材料可提高约36%。

关键词:无线电能传输;磁谐振式;传输效率;多源系统;超材料

中图分类号: TM724 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21465

Research on High Efficiency Multi-source Wireless Charging System Based on Metamaterials

XIE Wei¹, WANG Haihua¹, JIA Hekun², LIU Shuai², WANG Zhong²

(1. China Energy Construction Group Jiangsu Electric Power Design Institute Limited Company,

Nanjing 211102, Jiangsu, China; 2. School of Automobile and Traffic Engineering,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: For the multi-input wireless charging system, the misalignment between the transmitting coils and the receiving coil will cause the mutual inductance sharply to decrease, which in turn will reduce the transmission efficiency. In order to improve the efficiency of the multiple-input system, the relationship between the relative positions of the multiple transmitting coils and the output power was analyzed to find out the conditions for obtaining the maximum power output, initially. Then, a new type of electromagnetic metamaterial with broadside coupled square-split resonators was designed to enhance the electromagnetic wave to improve the effectively without changing the transmission system itself. At last, an experimental verification platform was constructed. The results of the experiment confirm that two-transmitters system can improve efficiency about 15%, and efficiency is the highest about 41.4% when angle of transmitters and receiver is 40°, and addition of metamaterial can improve the efficiency by 20%, three metamaterials resulted in a higher improvement up to 36%.

Key words: wireless power transfer(WPT); magnetic resonance; transmission efficiency; multiple transmitters system; metamaterials

电动汽车是现代汽车工业的未来,而它的普及离不开充电技术的支持。无线充电技术作为新兴的一种充电形式,吸引了越来越多研究者的目光。无线电能传输(wireless power transfer,

WPT)通过电磁波传递能量,不仅摒弃传统充电线的束缚,省去了充电时拔插充电头的过程,更避免了电线老化导致的漏电等风险^[1-3]。而多源无线充电系统因为有多个能量发射线圈,具有更

基金项目:国家自然科学基金(51776089);江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目(BE2019006-3);

江苏省高等学校自然科学基金(18KJB470006)

作者简介:谢伟(1986—),男,硕士,工程师,Email:xiewei1850@jspdi.com.cn

强的电能供给能力,可以用在较大功率的充电场合中。

本文的研究对象是多发射线圈/单接收线圈组成的多源无线充电系统(multiple input/single output wireless power transfer, MISO-WPT),该系统具有多个发射线圈(transmitter coil, Tx),能够有效增强对接收线圈(receiver coil, Rx)的传输功率。但是,多个不重合的发射线圈在空间中与单个接收线圈的相位位置必然存在偏移,而位置偏移导致互感急剧下降,使得传输效率降低^[4]。

为提升传输效率,常用的方法主要有两种:

1) 优化收/发线圈参数及相对位置,增强互感。

无线传输系统的传输功率和效率都跟线圈间的互感息息相关。而互感由线圈的固有参数和相对位置决定,因此可以通过调节线圈的物理参数和位置优化输出能力。文献[5]研究了多个负载线圈的WPT系统,结果表明,合理地使用多负载线圈可增加传输效率。文献[6]通过使用绞合线制成的高 Q 值双层谐振线圈提高系统传输效率,最高可以达到88%。文献[7]通过增加中继线圈提升传输效率。文献[8-9]使用多源阵列提升系统传输效率,但只研究了发射端线圈均与接收端线圈这一种情况,未对线圈非平行的情况进行分析和研究。

2) 增强电磁波强度,减少电磁损耗。

无线充电系统是依赖电磁波进行能量传输,而消逝波是电磁波能量的主要载体。然而,消逝波的强度随着传播距离的增加而急速衰减,导致WPT系统在长距离电能传输过程中的效率显著降低。

超材料是一种具有负磁导率、负介电常数超常物理特性的人造材料,他的负磁导率特性能够汇聚消逝波^[10-12],使得消逝波的强度在一定范围内得到增强,可用于提升WPT系统效率。文献[13-15]研究了不同的超材料对WPT系统提升效率的能力,但所用到的超材料均为各向异性,即只能放大某单一方向的消逝波,并不适用于线圈间存在偏角的WPT系统。

因此,针对上述方法中的问题,本文研究了一种MISO-WPT系统,该系统具有多个发射线圈,能够共同为接收线圈传输电能,显著提高传输能力。同时,为了提高传输效率,首先通过分析发射线圈间距及偏转角度与效率的关系,得到实现最优传输效率时发射线圈的最佳相对位

置区间。接着,设计并制作了电磁超材料,通过理论计算和仿真证明该超材料能够增强电磁波中的消逝波,减少WPT系统的损耗,达到提高效率的目的。最后,搭建双源MISO-WPT系统实物平台,通过实验验证了该系统能够有效地提高传输效率,同时提高了MISO-WPT系统对位置的适应能力。

本文首先设计并分析了可运用于电动汽车及移动电子设备无线充电的MISO-WPT系统。设计的电磁超材料能够在发射线圈偏转角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时发挥作用,传输效率最高可达72%。相比于传统单源无线充电系统,本系统通过多个发射线圈及电磁超材料共同作用使传输效率至少提高20%。

1 MISO-WPT系统效率分析

1.1 MISO-WPT系统基本原理

MISO-WPT的工作原理是:当具有相同固有频率的线圈处在同一空间时,若任意线圈中流过此频率的交变电流,该线圈周围会产生相同频率的交变磁场,处在磁场近场范围内的其他线圈就会发生谐振,进而产生相同频率交变电流,实现线圈间的能量交换^[16]。MISO-WPT系统电路模型如图1所示。

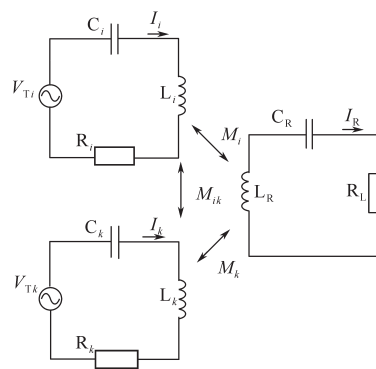


图1 MISO-WPT系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of MISO-WPT

图1中, V_{Ti} 和 V_{Tk} ($i \neq k$)分别代表第 i 个发射线圈(Tx_i)和第 k 个发射线圈(Tx_k)的电源电压, C_i , L_i , R_i , I_i 以及 C_k , L_k , R_k , I_k 则分别代表相应线圈的电容、电感、线圈内阻以及电流;接收线圈(Rx)的参数命名同理。 M_i , M_k 分别表示发射线圈 Tx_i , Tx_k 与接收线圈 Rx 之间的互感值; M_{ik} 是 Tx_i 和 Tx_k 之间的互感。

根据图1,列出基尔霍夫电压方程:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_T = \mathbf{M}_1 \mathbf{i}_T - \mathbf{M}_2 \mathbf{I}_R \\ \mathbf{R}_L \mathbf{I}_R = \mathbf{M}_2^T \mathbf{i}_T \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{i}_T = [I_1 \quad \cdots \quad I_n]^T$$

$$\mathbf{v}_T = [V_{T1} \quad \cdots \quad V_{Tn}]^T$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{1,2} & \cdots & j\omega M_{1,n} \\ j\omega M_{2,1} & \ddots & \cdots & M_{2,n} \\ M_{3,1} & M_{3,2} & \ddots & j\omega M_{n-1,n} \\ j\omega M_{n,1} & \cdots & j\omega M_{n,n-1} & Z_n \end{bmatrix}_{n \times n}$$

$$\mathbf{M}_2 = [j\omega M_1 \quad \cdots \quad j\omega M_n]^T$$

式(1)可以完整地描述 MISO-WPT 传输特性。其中向量 \mathbf{M}_1 包含不同发射线圈间的互感;向量 \mathbf{M}_2 为发射线圈与接收线圈之间互感。

根据式(1)可得出系统的输入功率和输出功率,如下式:

$$P_{in} = (\mathbf{v}_T)^T \mathbf{i}_T \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_{out} &= \mathbf{I}_R^* \mathbf{R}_L \mathbf{I}_R \\ &= \frac{1}{R_L} (\mathbf{M}_2^T \mathbf{i}_T)^* (\mathbf{M}_2^T \mathbf{i}_T) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:“*”表示对应矩阵的共轭复数。

由式(2)和式(3)可得系统的效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\mathbf{M}_2^T \mathbf{i}_T)^* \mathbf{M}_2^T}{R_L (\mathbf{v}_T)^T} \quad (4)$$

从效率公式(4)可以看出,当发射线圈上的驱动电压 \mathbf{v}_T 和负载电阻 R_L 不变时, MISO-WPT 系统的效率仅与收/发线圈间的互感 \mathbf{M}_2 正相关。因此,当其他参数不变时,提高互感 \mathbf{M}_2 , 效率将得到提升。

1.2 MISO-WPT 效率与线圈相对位置的关系

为了简化分析系统传输效率与线圈相对位置的关系,我们建立了双源 MISO-WPT 系统模型。经研究, WPT 系统的最佳工作频率区间为 1 ~ 10 MHz^[9], 因此本文选取 4.7 MHz 作为系统谐振频率;发射线圈和接收线圈的大小参数完全相同, 为方便实验,线圈半径设为 80 mm, 由漆包线绕制,匝数为 10 匝。通过测量,绕制好线圈的电感为 15 μH , 为使线圈的固有频率等于 4.7 MHz, 经过计算,给线圈串联一个谐振 68 pF 的电容。负载端充电电池组采用一个 10 Ω 纯电阻代替, 以便于测量电流电压等参数。双源 MISO-WPT 系统的仿真参数为:谐振频率 $f=4.7$ MHz, 电容 $C_1 = C_2 = C_R = 68$ pF, 电感 $L_1 = L_2 = L_R = 15$ μH , 负载电阻 $R_L = 10$ Ω , 发射线圈驱动电压 $\mathbf{v}_T = 10 \cos(2\pi f)$ V, 线圈

半径 $r_{Tx1} = r_{Tx2} = r_{Rx} = 80$ mm, 线圈匝数 $N_{Tx1} = N_{Tx2} = N_{Rx} = 10$, 发射线圈间距 $t = 80$ mm, 发射线圈与接收线圈间距 $h = 160$ mm。

1.2.1 发射线圈偏转角 α 与效率的关系

为简化分析,令 T_{X1}, T_{X2} 位置关于 R_x 的平面法向量轴对称。收/发线圈空间相对位置如图 2 所示, α 表示发射线圈的偏转角, t 表示单个发射线圈到对称中心的距离, h 表示对称中心到接收线圈的轴向距离。

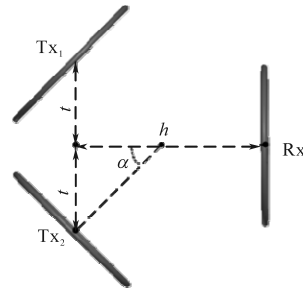


图2 双源系统模型

Fig.2 Model of dual-Tx WPT system

此时, T_{X1} 与 R_x 间互感可由下式求出:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{|M_1|}{L_1} \\ M_1 = \frac{\mu_0 N_{Tx1} N_{Rx}}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_{Tx1} r_{Rx} \cdot A}{\sqrt{B+C}} df d\varphi \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$A = \cos f \cos \varphi + \sin f \sin \varphi \cos \alpha$$

$$B = (r_{Tx1} \cos f - r_{Rx} \cos \varphi)^2$$

$C = (r_{Tx1} \sin f \cos \alpha + t - r_{Rx} \sin \varphi)^2 + (h - r_{Tx1} \sin f \sin \alpha)^2$
 式中: k_1 为 T_{X1} 与 R_x 间的耦合系数; N_{Tx1}, N_{Rx} 为线圈 T_{X1} 和 R_x 的匝数; r_{Tx1}, r_{Rx} 为 T_{X1} 和 R_x 线圈半径; μ_0 为真空中的磁导率。

由文献[17]可知,耦合系数 k_1 随 t 和 h 的增加而减小,且 h 对 k_1 的影响更大。本文重点分析 α 对 k_1 的影响。根据式(5)分析 α 与 k_1 间的关系, Matlab 仿真结果如图 3 所示。

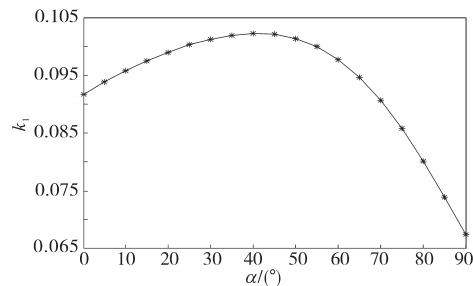


图3 耦合系数 k_1 与线圈间夹角 α 的关系

Fig.3 The relationship between k_1 and α

由图3可以看出,随着 α 增大, k_1 呈现先增大后减小的趋势。当 α 超过 45° 后, k_1 迅速下降。因此,可以得出结论:当轴向距离与径向距离一定时,调节收/发端线圈间夹角可使双源 MISO-WPT 系统传耦合系数达到最大,且 k_1 的最大值出现在 α 为 $40^\circ\sim 45^\circ$ 之间。

将图3得到的耦合系数结果与效率公式(4)连立,得到双源 MISO-WPT 系统效率 η 与夹角 α 的关系,如图4所示。从图4可以看出,当两发射线圈从 0° 旋转增大时,发射线圈的正面逐渐对准接收线圈, k_1 逐渐增大,此时发射线圈上的能量大部分传输到接收线圈中,传输效率在 α 为 $40^\circ\sim 45^\circ$ 时达到最大;继续增大 α ,两发射线圈逐渐互相正对,与接收线圈解耦,此时大部分能量在两个发射线圈间的振荡交换,传递到接收线圈上的能量显著下降,因此系统传输效率快速降低。

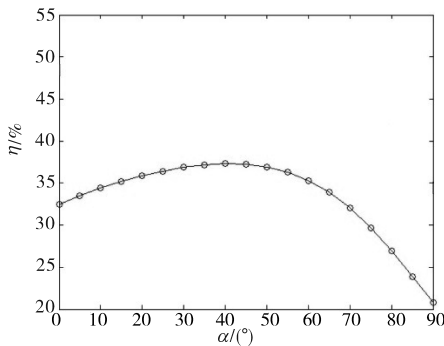


图4 双源发射线圈的偏转角 α 与效率 η 的关系
Fig.4 The relationship between α and η

综上所述,当两个发射线圈间距离 l 固定后,偏转角在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内系统能保持较高的传输效率,当发射线圈偏转角大于 45° 后,效率显著下降。因此在实际应用中,发射线圈最佳偏转区间为 $0^\circ\sim 45^\circ$ 。

1.2.2 发射线圈间互感与效率的关系

将式(1)中的 $\mathbf{v}_T = \mathbf{M}_1 \mathbf{i}_T - \mathbf{M}_2 \mathbf{I}_R$ 代入式(4)中:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{[\mathbf{M}_2^T \mathbf{M}_1^{-1} (\mathbf{v}_T + \mathbf{M}_2 \mathbf{I}_R)]^* \mathbf{M}_2^T}{R_L (\mathbf{v}_T)^T} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,当发射线圈上的驱动电压 \mathbf{v}_T 、负载电阻 R_L 以及收/发线圈间互感 \mathbf{M}_2 不变时,发射线圈之间的互感 \mathbf{M}_1 是影响无线充电效率的重要因素。

将双源 MISO-WPT 系统的仿真参数代入式(6)中,两发射线圈与接收线圈间的互感设为 $M_1 = M_2 = 1.5 \text{ mH}$,使用 Matlab 仿真两个发射线圈

圈间互感 M_{12} 与效率的关系,结果如图5所示。

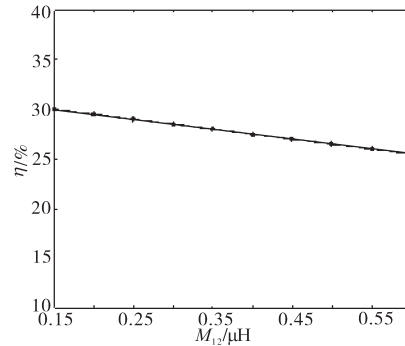


图5 发射线圈间互感 M_{12} 与效率 η 的关系
Fig.5 The relationship between M_{12} and η

从图5可以看出,随着发射线圈间互感 M_{12} 的增强,效率 η 逐渐下降。这是因为,当 M_{12} 增大时,两个发射线圈间的耦合增强,线圈间的能量交换增强。此时,更多的能量在两个发射线圈间振荡并逐渐消耗,而无法到达接收线圈,从而导致效率 η 的降低。因此,在系统运行中,要保持发射线圈间适当的间距,以达到提升效率的目的。

2 运用超材料提升传输效率

2.1 超材料的制作

传统结构电磁超材料具有各向异性,只能增强某一个特定传播方向上的消逝波(通常只能增强超材料板垂线方向),因而使得超材料在 WPT 系统中的应用受到了极大的限制。通过研究,本文设计了一种基于螺旋谐振结构(split resonator, SR)的电磁超材料,它通过4个SR螺旋单元组成 2×2 中心对称结构,能够使得超材料对来自更多方向的消逝波进行增强。另外,一种电磁超材料结构通常只能对单个特定频率的消逝波产生响应,即频率选择效应。本文提出的 MISO-WPT 的工作频率为 4.7 MHz 。因此要通过对结构参数设计和 CST 仿真软件,设计出响应频率为 4.7 MHz 的电磁超材料以配合 MISO-WPT 系统。

本文运用宽边耦合正方形SRs作为超材料的基本单元。将8匝铜线同轴蚀刻在底板两侧以形成宽边耦合^[18]。每个SRs在底板中间连接一个正方形铜片,两侧铜线通过钻孔相接,通过改变铜片上电荷的分布来增加耦合电容,从而调整响应频率。超材料基本单元的规格参数为:铜线宽度 $a=1 \text{ mm}$,铜线间距 $b=1 \text{ mm}$,铜线厚度 $e=0.035 \text{ mm}$,最外层铜线长度 $g=78 \text{ mm}$,正方形贴片边长 $d=8.5 \text{ mm}$,钻孔半径 $r=2 \text{ mm}$,基本单元边长 $l=$

80 mm,外形如图6a所示。

基本单元设计好后,将4个基本单元按照中心对称排列组成超材料面板。面板材质采用FR-4环氧玻璃布层压板,边长160 mm,厚度1 mm,相对介电常数为4.3,两侧铜线均为顺时针蚀刻,以确保当消逝波多角度入射时,超材料具有良好的响应,基本单元间距离为2 mm,阵列结构如图6b所示。

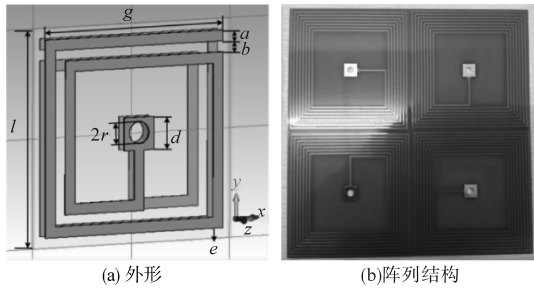


图6 超材料的基本单元结构和超材料完整结构
Fig.6 The structure of the cell and the complete structure of metamaterial

2.2 超材料的性能验证

本文利用CST软件仿真进行验证。首先通过仿真得到超材料的S参数,用以计算谐振频率f和磁导率 μ 。如图7所示,超材料在4.595~4.820 MHz频率范围内出现电磁响应, S_{11} 参数在4.595 MHz和4.655 MHz处分别达到低谷,大小分别为-29.12 dB和-30.27 dB。这意味着,该结构超材料能够对此频率的入射电磁波产生响应。

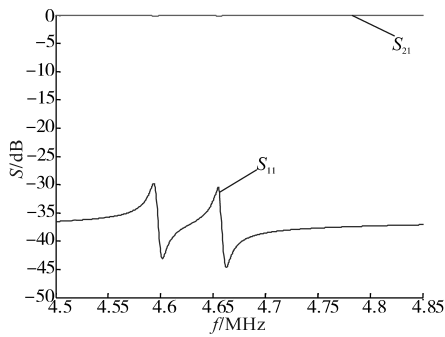


图7 超材料的S参数
Fig.7 S parameter of metamaterial

接着,利用 S_{11} 并结合反演算法计算出超材料板在不同频率下的磁导率 μ ,如下式:

$$\mu = nz = \frac{1}{pq} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] z \quad (7)$$

其中

$$z = \sqrt{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2} / (1 - S_{11})^2 - S_{21}^2$$

$$p = 2\pi/\lambda$$

式中: q 为超材料的厚度,1 mm; λ 为电磁波的波长。

图8为超材料磁导率 μ 与电磁波频率 f 的关系。可以看出,超材料具有两个磁导率为负的频率区间,分别是4.595~4.626 MHz和4.655~4.820 MHz。磁导率为负值,就意味着超材料对这两个频率范围区间内的电消逝波有“增强”作用。通过观察,超材料在第2个区间拥有更宽的频率范围,易于实验调试,因此本文选择第2个频率区间作为研究重点。

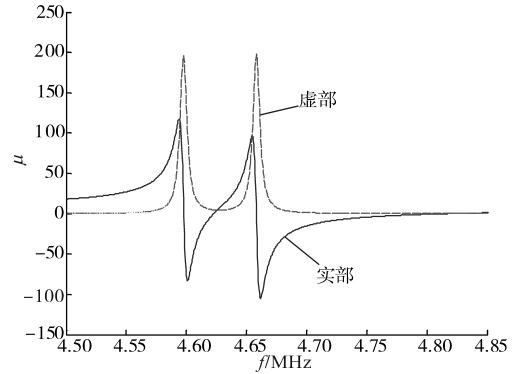


图8 超材料磁导率与频率的关系

Fig.8 Relationship between μ and f of metamaterials

根据2.1节的研究,双源MISO-WPT系统发射线圈的最佳工作倾角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 。所以在本节中,利用CST软件测试当电磁波的入射角 θ 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时,超材料的频率响应情况。 θ 为电磁波入射方向与超材料平面法线的夹角。结果如图9所示,当 θ 从 0° 增大时,超材料的响应频率 f 产生偏移,偏移量约为0.2 MHz。同时,随着偏转角度增大,超材料会在5 MHz左右出现异常磁响应,但是幅值较小,且不会影响本文研究的负磁导率区间,因此将此忽略。

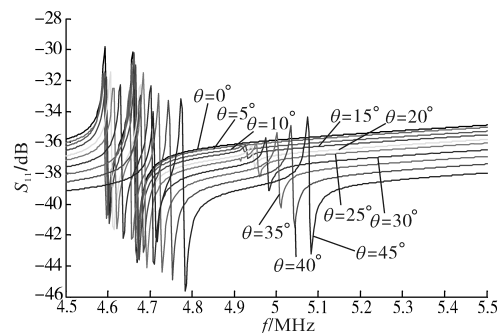


图9 不同入射角时超材料S参数

Fig.9 S parameter with different incident angles

为了更好地观察频率偏移的程度,我们以偏转角 θ 为横坐标,响应频率 f 为纵坐标绘制出图10。可以看出,虽然 θ 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时响应频率产生偏移,但是对于4.7 MHz的工作频率来说,偏移量不足5%。而5%的频率偏差并不会对WPT系统

的传输性能造成显著的影响。这意味着,本文所设计的超材料对入射角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的电磁波具有良好的响应能力。

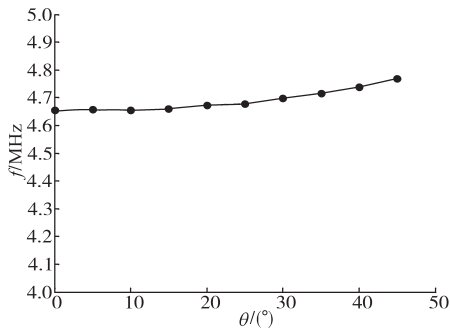


图10 不同 θ 所对应的响应频率 f

Fig.10 Incident angle θ with different f

3 试验验证

为验证设计的电磁超材料是否具有提升效率的能力,本文搭建了双源 MISO-WPT 系统及单源 WPT 的对比系统。图 11 为双源 MISO-WPT 系统实验电路图,图 12 为实验装置图。

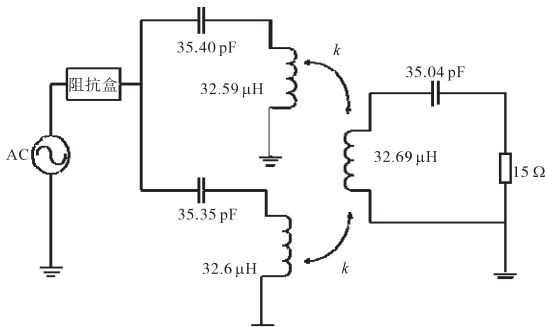


图 11 双源 MISO-WPT 系统实验电路图

Fig.11 Circuit diagram of dual-Tx MISO-WPT system

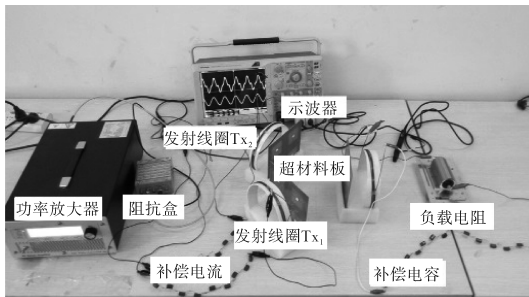


图 12 带超材料的双源 MISO-WPT 系统实验装置图

Fig.12 Picture of experimental dual-Tx MISO-WPT system

使用信号发生器和功率放大器产生高频交流电,输入功率 50 W,工作频率 4.7 MHz。单源 WPT 系统与双源 MISO-WPT 系统谐振频率相同。WPT 系统参数与仿真模型参数相同。

3.1 双源系统与单源系统效率对比

首先,通过实验验证双源 MISO-WPT 系统是

否比单源 WPT 系统具有更高的效率。

双源 MISO-WPT 系统相对位置图见图 2, $h=160 \text{ mm}$, $t=80 \text{ mm}$ 。单源 WPT 系统为发射线圈与接收线圈同轴正对,相对距离为 $h=160 \text{ mm}$,其余参数与双源 MISO-WPT 系统相同。图 13 是两个 WPT 系统的效率对比, η_1 为单源系统效率曲线, η_2 为双源 MISO-WPT 系统的效率曲线。能够看出,双源系统可显著提升传输效率:当 $0^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$ 时, η_2 可保持在 40% 左右。对于单源系统,当 $15^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ 时, η_1 仅能保持在 25%~27%。因此,双源 MISO-WPT 系统对收发线圈间存在角度偏移的容错性更好,这也从另一方面表明双源 MISO-WPT 系统优于单源 WPT 系统。

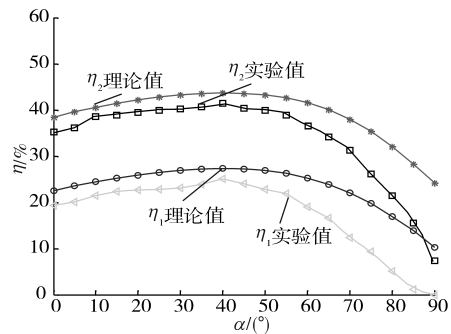


图 13 α 与 η 的关系图($t=80 \text{ mm}$, $h=160 \text{ mm}$)

Fig.13 Relationship of α and η ($t=80 \text{ mm}$, $h=160 \text{ mm}$)

3.2 仅接收端线圈前添加超材料

在 Rx 前添加超材料,探究超材料对双源 MISO-WPT 系统传输效率的影响,相对位置如图 14 所示。图中 z 为超材料板与接收端线圈间的距离,取 $z=50 \text{ mm}$ 。

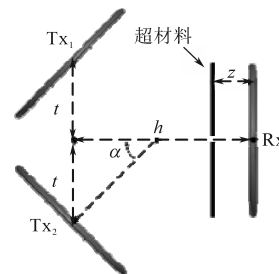


图 14 在接收线圈前加入超材料的双源系统模型

Fig.14 Model of dual-Tx WPT system with a metamaterial on Rx side

令 α 从 0° 增加至 90° ,超材料对传输效率影响的实验结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,添加超材料的双源 MISO-WPT 系统传输效率整体增加约 20%,最高可达到 62%,当收/发线圈间夹角超过 60° 后,系统传输效率不再显著增加。总的来说,应用超材料可以在一定范围内显著提升双源 MISO-WPT 系统的传输效率。

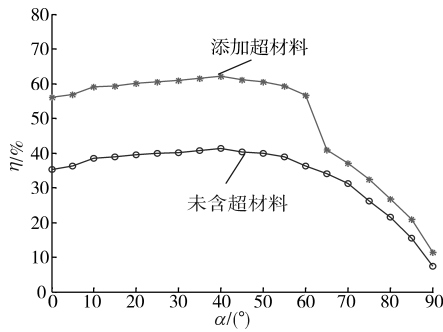


图15 超材料对传输效率的影响

Fig.15 Effect of metamaterials on the efficiency

图16为超材料与线圈间距 z 与传输效率 η 的实验结果图。从图中可以看出,超材料距离线圈过近或过远均会减弱其增益效果,当 z 取50 mm时,超材料对系统传输效率的增益效果最优。

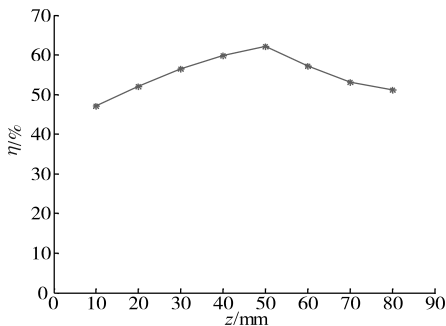


图16 距离 z 与传输效率 η 的关系

Fig.16 Relationship between z and the η

3.3 Tx,Rx前均添加超材料

在所有线圈前均添加超材料,探究增加超材料数量对系统传输效率的影响。每块超材料距离相应线圈的距离均为50 mm,实验装置见图12。实验结果如图17所示,当 α 从 0° 增加至 90° 时,加入3块超材料的系统效率得到进一步提升。相比于上一节中仅在接收线圈Rx前加入超材料的情况,提升幅度达到20%。

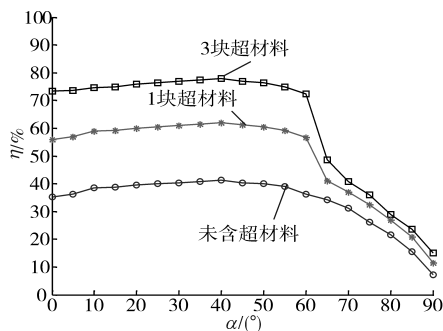


图17 不同数量超材料板对传输效率的影响

Fig.17 Effect of different number of metamaterials on the efficiency

3.4 发射线圈间距与最佳传输角度的关系

通过图3、图4的分析以及图13的实验结果,证明了双源MISO-WPT系统的最佳效率传输角度

α 为 45° 。然而, α 不仅与超材料有关,还与发射线圈的间距有关。以图14所示结构为例,测量发射线圈间距与最佳传输角度 α 的关系,如图18所示。当发射线圈间距增大时(图14中 t 为发射线圈到中心点的距离), α 也随之增大。这是由于当发射线圈间距增加后,为保证较好的传输效率,必须增大 α 使发射线圈尽可能面向接收线圈。可以看出,随着距离增加, α 增加的趋势放缓,当 $t=160$ mm时, α 约为 57° 。

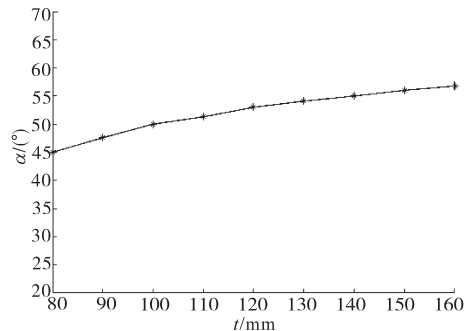


图18 发射线圈间距 t 与最佳传输角度 α 关系

Fig.18 The relationship between the distance t of Tx and the optimal angle α

4 结论

本文首先通过研究MISO-WPT系统的特性,分析互感 M 及耦合系数 k 与传输效率间的关系。着重研究了发射线圈偏转角 α 对效率的影响,并通过仿真及实验得到收发端线圈间的最佳偏转角范围。接着研究了超材料对MISO-WPT系统的增强作用,设计了一种以宽边耦合正方形SRs为基本单元的新型超材料。从仿真和实验数据看出,该超材料可实现对多角度入射消逝波的放大作用,有效提升系统传输效率(约20%)。增加超材料数量、合理选择线圈的相对位置可进一步增加传输效率。本文所得结论可为后续对MISO-WPT系统的工程化设计提供较好的理论和实践支持。

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[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):1-13.
- [2] Kim N Y, Kim K Y, Kim C W. Automated frequency tracking system for efficient mid-range magnetic resonance wireless power transfer[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(6):1423-1428.
- [3] 周洪,蒋燕,胡文山,等. 磁共振式无线电能传输系统应用的电磁环境安全性研究及综述[J]. 电工技术学报,2016,31(2):1-12.

