

磁共振式无线电能传输的基础研究 与前景展望

傅旻帆 张统 马澄斌 朱欣恩

(上海交通大学_密西根学院, 上海 200240)

摘要 近年以来,无线电能传输领域获得了国内外学者及工业界人士的广泛关注。基于磁共振的无线电能传输技术因其良好的中距离传输特性,被视为能有效解决现今各类消费电子设备储能不足、充电不便等问题的有效方案。本文围绕基于磁共振的 MHz 无线电能传输技术,介绍了本团队近年的一些相关积累与研究思路,其中主要包括:两线圈结构下系统的静态最优负载控制与动态最优负载跟踪,多接收线圈系统的特性及相关实验验证。最后,基于已有成果对无线电能传输将来的研究方向与工作进行了展望。

关键词: 无线电能传输 磁共振 负载控制 最优负载跟踪 多线圈系统

1 引言

麦克斯韦方程组理论地总结与描述了电与磁之间的相互关系,极大地推动了电磁波领域的发展,最终引发了无线通信领域的革命。而能量(作为电磁波除信号之外的另一种载体)的无线传输也开始为人们所关注。早在 1904 年,尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)就尝试通过耦合实现电能自由空间的无线传输^[1]。但是受限于当时的科技水平,他的实验由于效率方面等问题并未能引入实际应用领域。至此之后,人们将主要精力集中于发展无线通信,而无线电能传输则经历了一段漫长的沉寂。

近年来,由于各种消费类电子设备(智能手机、笔记本电脑、平板电脑、各种电脑外设等)对无线充电的实际需求(储能不足、充电不便等),人们对无线电能传输的研究与开发又重新给予了极大的关注。希望通过电能的无线传输,去掉移动电子设备的“最后”一根电缆(即电源线),从而使消费者能够从空间对信息和能量进行同时地接收,即泛在接入(Ubiquitous Access)。与此同时,由于功率器件,智能 IC,新型电路拓扑等的发展,为无线电能传输的发展奠定了很好的硬件基础。

目前,主流的无线电能传输技术主要包括基于远场的电能传输,和磁感应式耦合(Inductive coupling)及磁共振式耦合(Resonance coupling)。基

于远场的传输可以是广播模式,也可以是点对点模式。广播模式的能量与效率随传输距离的平方衰减,效率低,适合小功率的传输;点对点模式能进行大功率高效传输,但是需要对目标进行定位追踪,不适合应用于日常电子产品^[2]。感应式耦合技术在小距离(小于线圈直径)大功率传输上具有很高的效率,配合磁性材料目前可在 20cm 下以 90%左右效率实现数十千瓦的电量传输^[3]。基于磁耦合共振的无线充电技术自 2007 年 MIT 的 2m 外点亮灯泡实验而备受关注,该技术特别适合于中距离的电能传输(1~2 倍线圈直径),且其高频化有利于实现系统的轻量化,小型化,低成本与较高的空间自由度^[4]。

一个典型的 MHz 无线电能传输系统包括:功率放大器、耦合系统、整流器、DC-DC 变换器和负载。目前,该领域的研究主要包括:功率放大器的优化设计、高效耦合系统的分析与设计、DC/DC 的优化控制、匹配电路设计等^{[5]-[12]}。而面向实际应用的传输系统,需要考虑外部因素对原有无线电能传输系统的影响,例如,环境中存在的导体、线圈相对位置的改变、负载阻抗特性及功率需求的改变等。这些不确定性因素对保持整个系统的稳定与高效提出了诸多挑战。针对以上问题,本文将主要介绍本团队已有的成果,包括:基于级联 Boost-Buck 变换器的静态最优负载控制,用以消除负载变化的影响^[11];基于扰动观察法的最优动态负载跟踪^[13],用于

解决线圈位移的所带来的问题；多接收线圈的电路分析与实验验证,为多线圈系统开发奠定理论基础。

本文的构成如下,第二部分主要介绍基于DC/DC的负载控制,包括静态负载控制及动态负载跟踪,第三部分重点分析多线圈系统的模型,实验验证结果等。第四部分将根据已有成果,提出未来展望与思路。最后是全文总结。

2 13.56 MHz 无线电能传输系统

2.1 系统简介与分析

本部分系统基本结构如图 1,包含:功率放大器、耦合系统、整流器、DC/DC 变换器及负载。全系统效率定义为(参考图 1):

$$\eta_{sys} = \frac{P_l}{P_i} = \eta_{tran} \eta_{coil} \eta_{rec} \eta_{dcdc} \quad (1)$$

其中, P_l 为最终负载消耗功率; P_i 为来自功放的入射功率; P_r 为因阻抗失配导致的反射功率; η_{coil} , η_{rec} , η_{dcdc} 分别代表耦合系统,整流系统与 DC/DC 变换器的传输效率; η_{tran} 为系统入射效率,可表示为

$$\eta_{tran} = \frac{P_i - P_r}{P_i} \quad (2)$$

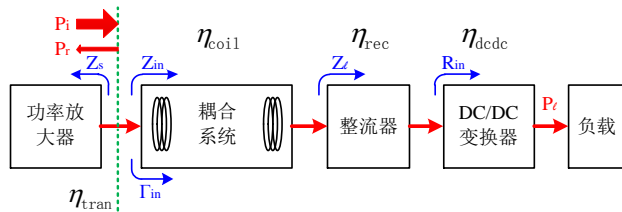


图 1 无线电能传输系统框图

图 2 为在 ADS 中建立的耦合系统模型与整流器模型。耦合模型为经典的 RLC 电路,整流器由 SPICE 模型建立,其参数见表 1,该模型用于分析系统在不同位置(k)及不同负载(R_{in})下的系统效率(η_{sys})。该效率不包括 DC/DC)。该效率为 R_{in} 上消耗功率与 P_i 的比值。基于该模型,ADS 下仿真结果如图 3 所示。可以有以下结论:

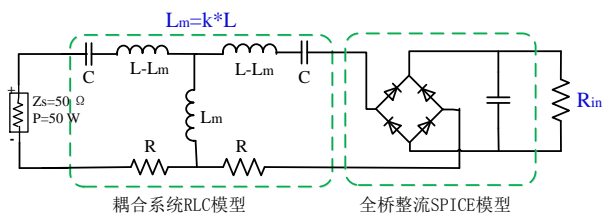


图 2 ADS 系统仿真电路模型

表 1 耦合系统参数

名称	值	名称	值
线圈结构	终端开路	L	7.8 uH
线圈直径	320mm	C	17.6 pF
共振频率	13.56 MHz	R	3.52 Ω

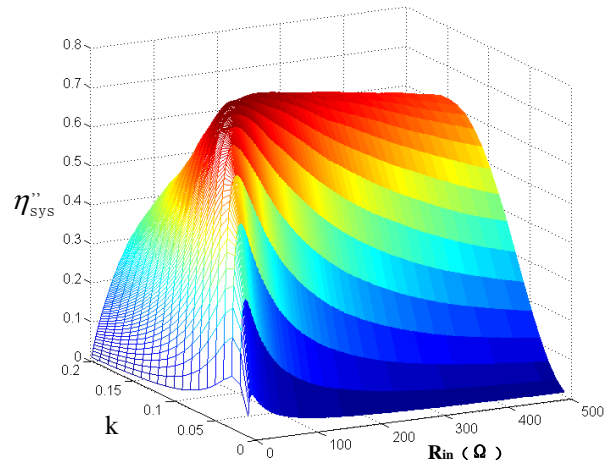


图 3 系统效率特性

- 系统在任意位置下均存在效率最大点;
- 每个位置下的系统最高效率不单调(某一 R_{in} 对应全局最优点);

图 2 的 R_{in} 为后级 DC/DC 变换器的等效输入电阻,而通过控制 DC/DC 可将最终负载的实际阻抗转换为 R_{in} 所需的最优值。根据该思路,论文^[11]提出了基于级联式 Boost-Buck 变换器的负载控制。如图 4 所示,该变换器由 Boost 与 Buck 级联而成,该电路的基本转换关系为:

$$V_{out} = \frac{D_2}{1 - D_1} V_{in} \quad (3)$$

$$R_{in} = \frac{1 - D_1}{D_2} R_L \quad (4)$$

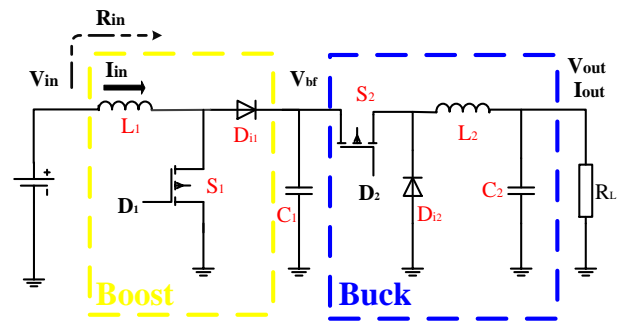


图 4 Boost-Buck 变换器拓扑

其中, V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out} , R_L 分别为 DC/DC 的输

入电压，输入电流，输入电压，输出电流与最终负载阻值。通过动态控制占空比 D_1 及 D_2 ，可实现系统所需最优负载。该 DC/DC 变换器可进行单开关运作（单独 boost 或 buck 工作），也可双开关下级联运行，理论可实现所有阻值的变换。

2.2 静态最优负载控制

基于 DC/DC 变换器的静态负载控制平台如图 5 所示，该实验平台除了图 1 中所有子系统，还包括双向耦合器、DC/DC 的控制器及采样电路、不同特性的负载。静态控制是指在线圈位置不变的情况下（ k 为常数），可以推导出系统最优 $R_{in, opt}$ ，该值为一确定值。通过 DC/DC 级联控制的控制实现静态负载控制，即控制 V_{in} ， I_{in} 的比值为 $R_{in, opt}$ 即可。面对不同特性可变负载（可变电阻，电池及超级电容），分别进行了以下三组实验。实验中入射功率为 40W。

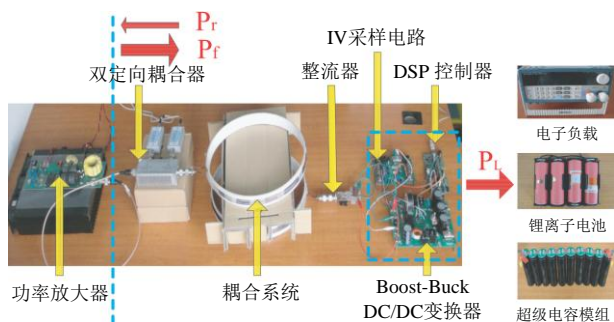
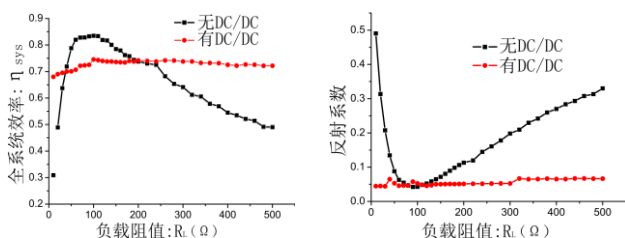


图 5 静态最优负载控制实验平台

图 6 为针对可变阻性负载的实验结果，红线为带 DC/DC 负载控制，黑线为没有 DC/DC 的情况，实验结果说明负载的控制使电能传输系统对负载变化的敏感性大大降低。图中也有红线低于黑线的情况，这是由于该阻值区间为 $R_{in, opt}$ 所在区域，而 DC/DC 的使用引入了额外的效率损耗。



(a) 系统效率比较 (b) 系统反射系数比较

图 6 可变阻性负载实验

图 7 为针对可变容性负载的实验结果（参数见表 2, 3），红线，黑线分别比较了有无 DC/DC 的情况。可发现负载的控制很好的提升了充电效率。同时电容在无 DC/DC 下效率比电池低，这是因为电容在充电过程中端电压上升快，其阻抗变化率远大于

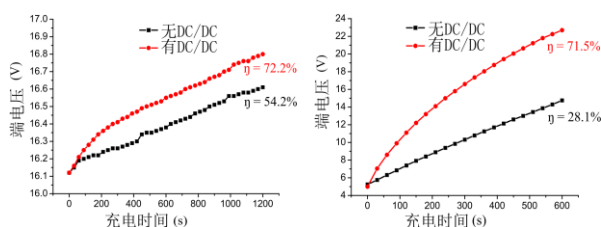
电池所致。

表 2 电池组参数

名称	值
单节电池容量	2.5 Ah
单节电池端电压范围	3.7-4.2 V
实验电池数量	4
连接方式	串联

表 3 超级电容模块参数

名称	值
单个电容容量	700F
单个电容最大端电压	2.7 V
实验电容数量	10
连接方式	串联



(a) 电池 (b) 超级电容

图 7 可变容性负载实验

2.3 动态最优负载跟踪

根据图 3 的结论，任意耦合系数下，系统有其对应的 $R_{in, opt}$ ，而该值会随线圈相对位置的变化时刻变化，面对这一动态跟踪问题，可以采用扰动观察法 (O&B) 来控制 DC/DC，动态跟踪最优负载^[13]。该方法不仅可以用于应对 k 的变化，对于负载的变化也能实现最优跟踪。

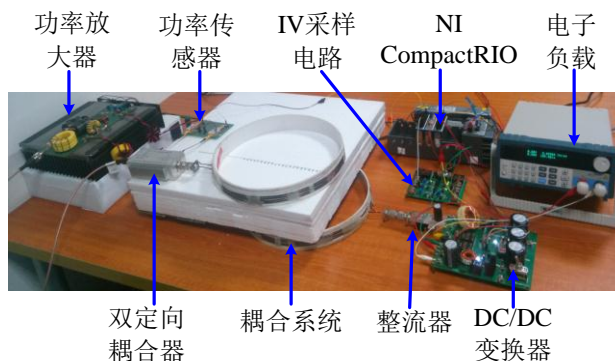


图 8 动态最优负载跟踪实验平台

图 8 中实验平台较于图 5 加上了用于输入功率检测的功率传感器，将输入功率信号 (P_i) 反馈给后级控制器 (NI CompactRIO) 进行负载追踪。其算法将时刻跟踪 $V_{out} \cdot I_{out}$ (见图 4) 与 P_i 的比值 (即全系统效率)，通过扰动观察控制 DC/DC 占空比使

其最大化。DC/DC 变换器将工作在单开关状态，即任意时刻只有 Boost 或 Buck 在工作。定义整体占空比：

$$D=D_1+D_2。 \quad (5)$$

控制器只需控制 D 即可，两组模式下 D 分别为：

- Boost 模式：Buck 开关常开，即 $D_1=1$ ；Boost 开关接收 PWM 波， $D=1+D_2$ ；
- Buck 模式：Boost 开关常闭，即 $D_2=0$ ；Buck 开关接收 PWM 波， $D=D_1$ 。

实验入射功率为 40W，线圈位置定义如图 9。

O 为发射线圈圆心并始终固定在坐标原点，O' 为接收线圈圆心，实验过程位移均为平移无角度旋转。首先，实验验证了耦合系数突变的情况，该实验通过将 O' 位置固定在 $z=7\text{cm}$ ， $y=0\text{cm}$ 处，通过水平移动（x 方向）实现 k 的突变，算法步长 $\Delta D=0.05$ 。如图 9 所示，黄，红，黑线分别代表了不同位置（ $x=0$ 代表正对）对应不同 D 的系统特性，系统在 t_0 时刻初始化（初始条件： $x=12\text{cm}$ ， $D_1=0$ ， $D_2=1$ ， $D=1$ ），开始扰动观察，于 t_1 时刻找到最优点，而 t_2 时刻发生位置突变（x 变为 6），再次于 t_3 找到最优点， t_4 时刻再次发生位置突变（x 变为 0），最终 t_5 找到该位置下的最优点。系统在控制过程中由于采样，存在部分系统特性曲线平坦等因素，有一定扰动。

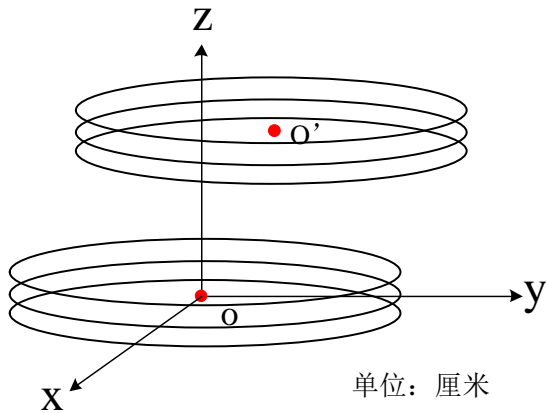


图 9 线圈相对位置示意图

类似实验也可用于位置固定，负载变化的控制，实验设置为 O' 固定在 $x=0$ ， $y=0$ ， $z=10\text{cm}$ 处，入射功率 40W。初始条件同上一组实验一致，初始负载为 20 欧姆。图 10 中实验结果表明该方法很好地消除了负载突变对系统的影响。

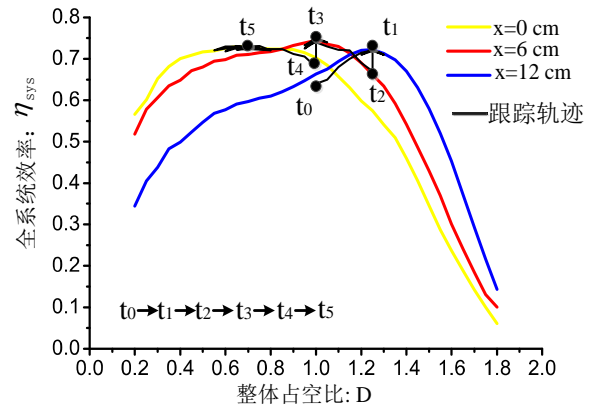


图 10 耦合系数突变下最优负载跟踪

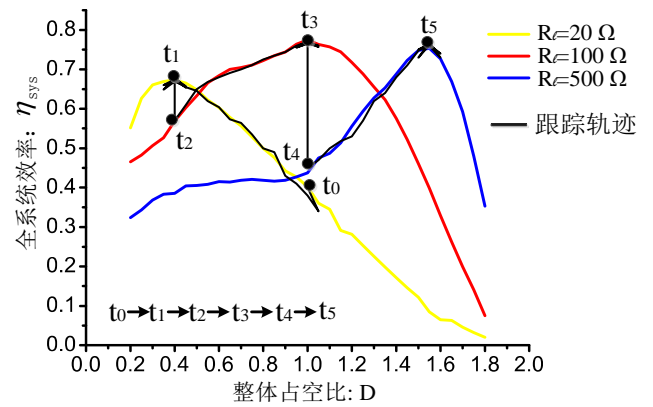


图 11 负载突变下最优负载跟踪

3 多接收线圈系统基础研究

3.1 3.1 电路模型与系统分析

多接收线圈系统能够解决多个设备共同充电的需求，但却对耦合系统的各个接收负载、源阻抗提出了复杂的设计要求。通过研究两接收线圈系统能够揭示多接收线圈系统在优化条件下的很多能量传递性质，且避免了在求解多接收线圈最优负载中遇到的复杂表达形式。因此，推导将以两接收线圈为基础，最终延伸至多接收线圈系统。

图 12 为一个串联共振的两接收线圈系统，系统中每两个线圈通过磁共振耦合在一起。当各个接收线圈之间的耦合相比发射接收耦合较小时，接收线圈间的互感在理论推导中可以忽略。通过基尔霍夫定律可得到每一个线圈上电压电流关系为

$$\begin{cases} I_1(R_1+j\omega L_1+\frac{1}{j\omega C_1})-I_2j\omega M_{12}-I_3j\omega M_{13}-V_s=0 \\ I_2(R_2+j\omega L_2+\frac{1}{j\omega C_2}+Z_2)-I_1j\omega M_{12}=0 \\ I_3(R_3+j\omega L_3+\frac{1}{j\omega C_3}+Z_3)-I_1j\omega M_{13}=0 \end{cases} \quad (6)$$

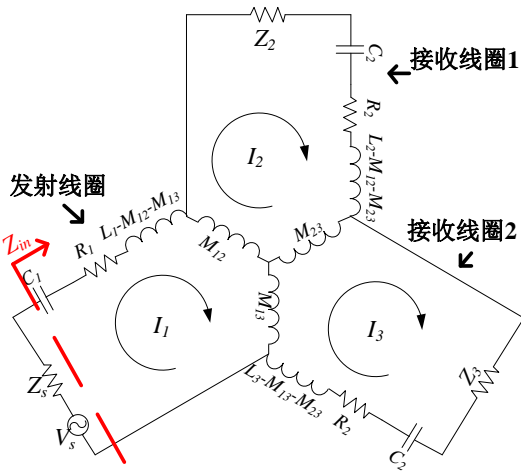


图 12 两线圈耦合系统等效电路模型

根据 (6) 和各个线圈上电容电感共振关系，耦合系统总体效率 E_{ffi} 可定义为每个接收线圈负载上吸收的能量总和与进入发射线圈总能量的比值，其中 Z_{in} 为输入阻抗即从发射线圈开始后续电路的等效阻抗，在线圈共振条件下为纯阻性：

$$E_{fi} = \frac{I_2^2 Z_2 + I_3^2 Z_3}{I_1^2 Z_{in}} = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2 + Z_2}} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_3 + Z_3}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{fi}}{\partial Z_2} = 0 \\ \frac{\partial E_{fi}}{\partial Z_3} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

通过 (8) 可以求解出耦合系统效率 E_{ffi} 最优时对应各接收线圈的负载为 Z_{2opt} 和 Z_{3opt} 。

$$\begin{cases} Z_{2opt} = R_2 \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 R_3}} = R_2 A \\ Z_{3opt} = R_3 \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 R_3}} = R_3 A \end{cases} \quad (9)$$

$$A = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 R_3}} \quad (10)$$

$$Z_{inopt} = R_1 \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 R_3}} = R_1 A \quad (11)$$

$$E_{ffiopt} = \frac{A-1}{A+1} \quad (12)$$

在负载优化条件下，耦合系统效率和输入阻抗可以化简为 A 的表达式 (11) (12)。由 (9) (11) 可以得出各个最优负载与最优输入阻抗之间的比值与其寄生电阻比值相同。从 (12) 可以清楚的看到，耦合系统的最优效率与 A 成正比例关系。两线圈系统的 A 值高于单一接收线圈，因此两线圈系统的最优效率高于单一接收线圈最优效率。在一个多线圈系统中 A 的值还影响各个最优负载与源阻抗的取值。对 A 的深入展开可以得到 (13) - (15) 由此可以将两个接收线圈等效为一个接收线圈。

$$A = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_1 R_2} + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_1 R_3}} = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M_{ef}^2}{R_1 R_{ef}}} \quad (13)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{\omega^2 (\frac{R_2}{R_2 + R_3} M_{12}^2 + \frac{R_3}{R_2 + R_3} M_{13}^2)}{R_1 (\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3})}} \quad (14)$$

$$M_{ef}^2 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} M_{12}^2 + \frac{R_3}{R_2 + R_3} M_{13}^2 \quad (14)$$

$$R_{ef} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (15)$$

在多接收线圈系统中利用递归思维，多个接收线圈最终可以等效为一个接收线圈，其等效寄生电阻为各个接收线圈电阻并联的等效电阻，其等效互感抗平方为各个互感抗平方的加权平均值，权数为寄生电阻与寄生电阻总和的比值。可以推导出多接收线圈的 A 表达式为：

$$A = \sqrt{1 + \sum_{k=2}^n \frac{\omega^2 M_{1k}^2}{R_1 R_k}} \quad (16)$$

3.2 两接收线圈实验验证

为验证 (9) - (12)，在同一块电路板上印制了两个尺寸不同的接收线圈和一个发射线圈，表 4 列出了各线圈寄生参数。实验中 (见图 13) 用网络分析仪对三个线圈进行 S 参数测量，线圈间的互感以及寄生电阻可以从测量的 Z 参数提取，进而可以得到理论计算得出的个接收线圈最优负载和耦合系统效率。在 ADS 中各个端口阻抗可以在一定范围内按步长扫描，从实验测量的 S 参数中找到最优效率下每个接收线圈所需的负载。表 5 总结了实验与理论结果，对比显示，理论计算域实验数据非常接近。

表 4 线圈在 13.56Mz 的参数

名称	R (ohm)	L (nH)	C (pF)
发射线圈	1.930	3920	35.1
接收线圈 1	1.148	1920	71.7
接收线圈 2	1.973	3928	35.1

表 5 实验数据与理论计算

名称	实验	计算
M_{12} (nH)		138
M_{13} (nH)		168
M_{23} (nH)		7
Z_{inopt} (ohm)	20.939+0.58j	21.012
Z_{2opt} (ohm)	12.462	12.498
Z_{3opt} (ohm)	21.417	21.480
E_{ffiopt}	0.8316	0.8317

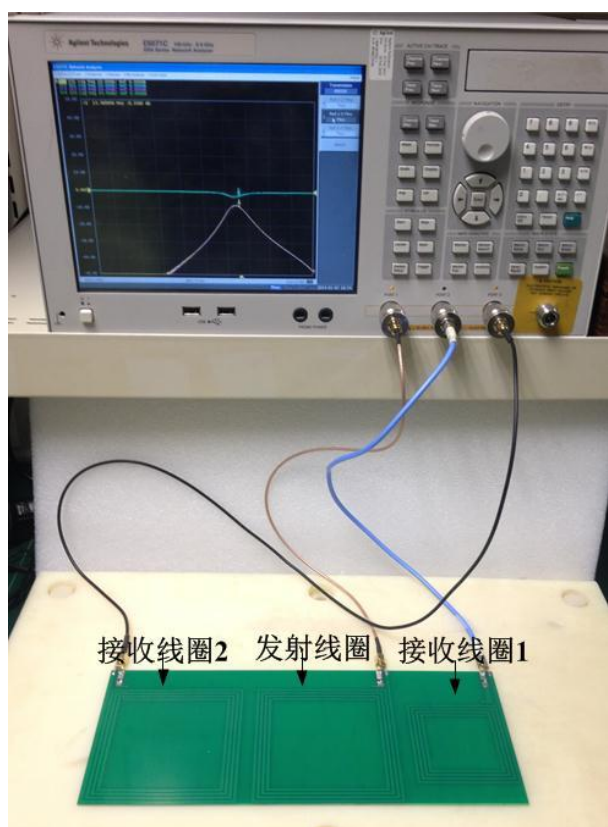


图 13 两接收线圈系统测量

4 技术展望

基于以上的 MHz 磁共振无线电能传输基础研究，可以进一步探索从系统层次研究兆赫兹无线电能传输系统的优化设计与控制方法。在讨论特定子系统传输特性的同时，更强调结合全系统层次的目标需求，优化各子系统的参数与设计目标。进而通过优化控制的方法，实现各级子系统彼此统筹协调和配合的高效率无线电能传输系统。具体而言，可在以下方面同时展开：研究功率放大器的设计与优化，耦合系统建模、分析与优化设计，高频整流器的设计与分析，基于 DC/DC 变换器的最优负载控制，阻抗匹配及控制，最后提出全系统的整体优化控制方案。未来还可将两线圈耦合系统的成果拓展至多线圈耦合系统的研究。通过对多线圈耦合系统的仿真建模与理论分析计算，得出该系统的优化设计思路，并研究基于博弈理论的多耦合系统多目标功率优化分配方法。

标需求，优化各子系统的参数与设计目标。进而通过优化控制的方法，实现各级子系统彼此统筹协调和配合的高效率无线电能传输系统。具体而言，可在以下方面同时展开：研究功率放大器的设计与优化，耦合系统建模、分析与优化设计，高频整流器的设计与分析，基于 DC/DC 变换器的最优负载控制，阻抗匹配及控制，最后提出全系统的整体优化控制方案。未来还可将两线圈耦合系统的成果拓展至多线圈耦合系统的研究。通过对多线圈耦合系统的仿真建模与理论分析计算，得出该系统的优化设计思路，并研究基于博弈理论的多耦合系统多目标功率优化分配方法。

5 结论

本文回顾无线电能传输的发展历史，并对现有不同无线电能传输技术进行对比，重点探讨了磁共振式方法的特点与其在中距离上的优势。通过分析该技术在国内外的近期发展及技术难点，重点回顾了磁共振式无线电能传输的负载控制方法及多接收线圈的系统特性。并基于已有成果，对未来研究的方向提出了合理的规划。

参考文献

- [1] N. Tesla, "The transmission of electric energy without wires," *Electrical World and Engineer*, March 5, 1904.
- [2] Strassner B, Chang K. *Microwave Power Transmission: Historical Milestones and System Components*[J]. 2013.
- [3] Covic G A, Boys J T. *Inductive power transfer*[J]. 2013.
- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [5] Sample A P, Meyer D A, Smith J R. *Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer*[J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2011, 58(2): 544-554.
- [6] Chen L, Liu S, Zhou Y C, et al. *An optimizable circuit structure for high-efficiency wireless power transfer*[J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2013, 60(1): 339-349.

- [7] 朱春波, 于春来, 毛银花, 陈清泉. 磁共振无线能量传输系统损耗分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 13-17.
- [8] 傅文珍, 张波, 丘东元, 王伟. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 21-29.
- [9] Zhang F, Hackworth S A, Fu W, et al. Relay effect of wireless power transfer using strongly coupled magnetic resonances[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2011, 47(5): 1478-1481.
- [10] Fu M, Ma C, Zhu X. A Cascaded Boost-Buck Converter for High Efficiency Wireless Power Transfer Systems[J]. Accepted by Industrial Informatics, IEEE Transactions on.
- [11] Fu M, Zhang T, Zhu X, Ma C. A 13.56 MHz wireless power transfer system without impedance matching networks. 2013 Wireless Power Transfer Conference, Perugia, Italy.
- [12] Beh T C, Kato M, Imura T, et al. Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 60(9): 3689-3698.
- [13] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2005, 20(4): 963-973.

作者简介

傅旻帆 男, 1987 年生, 现博士在读, 研究方向为无线电能传输系统设计与优化。

张 统 男, 1990 年生, 现硕士在读, 研究方向无线电能耦合线圈建模与优化设计。

马澄斌 男, 1975 年生, 博士, 助理教授, 研究方向, 机电系统、混合能源与无线电能传输系统。

朱欣恩 男, 1981 年生, 博士, 助理教授, 研究方向, 射频微波电路, 无线电能传输, 环境能量采集