

文章编号: 2095-4980(2021)02-0286-05

## 基于磁谐振式无线输能系统频率调谐的效率优化

王志远, 胡太平, 杨 阳

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 磁耦合谐振式无线输能系统理论上可在临界耦合的一段区间内达到高效率能量传输, 但还存在远距离弱耦合区效率急剧衰减, 近距离强耦合区出现谐振频率分裂现象的问题。为此, 仿真并设计制作附有铁氧体磁芯的平面螺旋耦合线圈, 在传输系统中做频率跟踪调谐, 使传输距离在强耦合区变化时, 依旧保持系统高效率传输。测试表明, 整个系统可实现传输距离在 5~20 cm 变化时, 都能保证无线输能效率高于 80%。

**关键词:** 磁耦合谐振; 无线能量传输; 频率调谐

**中图分类号:** TN751

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020602

## Efficiency improvement of magnetic resonant wireless power transmission system based on frequency tuning

WANG Zhiyuan, HU Taiping, YANG Yang

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

**Abstract:** Theoretically, the magnetic coupling resonance wireless power transmission system can be designed to achieve high efficiency within the critical coupling zone. However, the system efficiency will decrease sharply when the distance is in the weak coupling zone and the resonance frequency will split when the distance is in the strong coupling zone. Therefore, a planar spiral coupling coil with ferrite core is designed and fabricated. Then the frequency tuning system is designed to keep the high transmission efficiency even when the transmission distance changes in the strong coupling zone. Measurement results demonstrate, when the transmission distance changes between 5–20 cm, the designed wireless power transmission system can guarantee an efficiency above 80%.

**Keywords:** magnetic coupling resonance; wireless power transmission; frequency tuning

2007 年美国麻省理工学院基于磁耦合谐振原理设计无线输能系统<sup>[1]</sup>, 磁耦合谐振式系统因其中距离、高效率的优点, 成为最有市场应用前景的无线能量传输技术<sup>[2-3]</sup>。目前无线能量传输系统设计需要解决一些应用场景中的动态问题, 如某些消费电子产品希望在脱离充电平台不同距离处都可提供高效无线供电; 对于无线充电的电动汽车, 不同电动汽车与供电平台之间的传输距离是动态变化的<sup>[4]</sup>。这些传输距离动态变化的应用需求已成为制约磁耦合谐振式系统广泛应用的重要因素。在磁耦合谐振式无线能量传输系统设计中, 一般把线圈之间的临界耦合点作为无线输能系统的目标应用距离<sup>[5]</sup>。但当充电距离在弱耦合区增大时, 系统效率会快速衰减; 当充电距离在强耦合区发生变化时, 系统在原工作频率下能量传输效率将大幅波动, 最佳工作频率将发生偏移<sup>[6]</sup>。文献[7]采用发射端和接收端相互通信, 通过即时效率比较来改善系统效率波动。文献[8]中测量传输距离得到耦合系数后, 对可重构线圈阵列做相应切换来缓解效率衰减。

本文推导双线圈磁耦合谐振式系统的等效电路, 探究系统效率的影响因素。在耦合线圈中设计铁氧体磁芯, 减缓当传输距离在线圈弱耦合区时的系统效率衰减。当传输距离在强耦合区发生变化时, 在传输系统中引入频率跟踪调整策略, 使系统在强耦合区时也能保持谐振状态传输。与无频率调谐系统相比, 设计的磁耦合谐振式系统可在强耦合区显著提高传输效率。

收稿日期: 2020-11-07; 修回日期: 2021-01-27

作者简介: 王志远(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线能量传输。email:zhiyuan6455@163.com

### 1 磁耦合谐振式无线输能等效电路模型

双线圈磁耦合谐振式无线能量传输系统的等效电路如图 1 所示，发射和接收回路都为串联谐振式电路。其中  $U_1$  为发射端高频逆变电源的输出电压， $R_1$  和  $R_2$  分别为发射线圈和接收线圈的等效内阻， $R_L$  为接收端负载阻抗， $L_1$  和  $L_2$  分别为发射线圈和接收线圈的自感， $M$  为收发线圈之间的互感， $C_1$  和  $C_2$  分别为发射和接收回路的串联补偿电容。 $\omega$  为系统的工作频率。

磁耦合系统的发射回路和接收回路都满足基尔霍夫电压定律：

$$\left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) I_1 + j\omega M I_2 = U_1 \tag{1}$$

$$j\omega M I_1 + \left( R_L + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) I_2 = 0 \tag{2}$$

当发射和接收回路都处于谐振状态时，系统处于最佳工作状态，此时工作频率为  $\omega_0$ ，可求得系统传输效率为：

$$\eta = \frac{(\omega_0 M)^2 R_L}{(R_2 + R_L) \left[ R_1 (R_2 + R_L) + (\omega_0 M)^2 \right]} \tag{3}$$

线圈的损耗电阻都较小，对效率影响较小。因此影响系统效率最大的 3 个因素是线圈互感、接收端负载阻抗和系统工作频率。

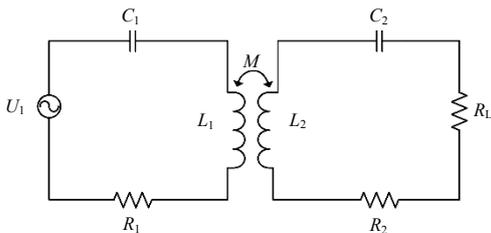


Fig.1 Equivalent circuit model of two-coil system  
图 1 双线圈耦合系统等效电路模型

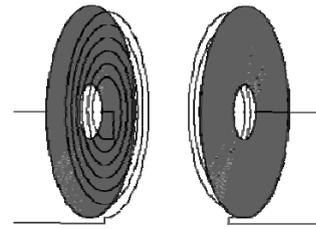


Fig.2 Coupling coil structure with ferrite core  
图 2 附有铁氧体磁芯的耦合线圈结构

### 2 磁耦合谐振系统设计

使用基于矩量法的三维电磁仿真软件 Feko 仿真设计收发线圈，收发线圈为参数相同的对称结构。选用平面螺旋线圈，线圈内径为 3 cm，外径为 12.5 cm，匝数为 25。

系统的传输效率与线圈之间的互感有关，为提高传输距离，需要增大线圈的自感。故在线圈设计中加入铁氧体磁芯，平面磁芯可以增大线圈自感，并将磁场聚集在收发线圈之间，提高系统的传输效率<sup>[9]</sup>。平面铁氧体磁芯的内径和外径设计与平面线圈参数相同，厚度为 0.2 mm，如图 2 所示。铁氧体磁芯结构紧贴在螺旋线圈后面，实测两种线圈的自感，加入铁氧体磁芯后线圈电感从 72  $\mu\text{H}$  增大到 110  $\mu\text{H}$ 。

表 1 为双线圈耦合系统仿真模型参数，收发线圈的自感为 110  $\mu\text{H}$ ，串联谐振回路的工作频率为 103 kHz，串联谐振补偿电容为 22 nF，实测线圈损耗电阻为 0.5  $\Omega$ 。线圈的互感与线圈自感及耦合系数的关系为  $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ ，在已知收发线圈自感的条件下，线圈之间的距离将影响线圈之间的耦合系数  $k$ ，即影响线圈之间的互感。系统设计的目标传输距离为 5~20 cm，此工作距离下相对应的线圈耦合系数将小于 0.3。将设计的系统参数代入式(3)，计算在不同耦合系数下的系统效率，来确定接收端负载阻抗。

图 3 为接收端负载与系统效率关系图，在不同耦合系数条件下，当接收端功率电阻增大时，系统效率都是先增大后减小。故选择阻抗 10  $\Omega$  作为系统接收端负载电阻。

表 1 仿真模型参数

Table1 Simulated system parameters

parameter	$L_1(L_2)/\mu\text{H}$	$C_1(C_2)/\text{nF}$	$R_1(R_2)/\Omega$	$f_0/\text{kHz}$
value	110.0	22.0	0.5	103.0

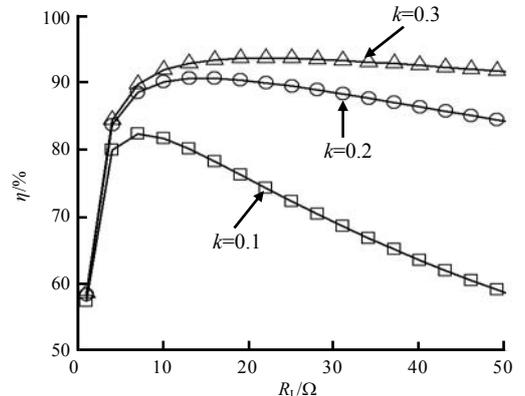


Fig.3 Simulated efficiency varying with receiving load  
图 3 接收端负载对系统效率的影响

### 3 磁耦合谐振系统的频率跟踪调谐原理

当无线能量传输系统传输距离发生变化, 原系统工作在谐振状态的最佳工作状态将被打破。系统将处于失谐状态, 通过调整系统的工作频率, 希望找到适应于新传输距离下的最佳工作频率。衡量传输系统的工作状态, 选择当系统的发射回路处于谐振状态时, 系统处于高效传输状态。当发射回路处于谐振状态时, 回路的电压相位和电流相位将同相; 当系统处于失谐状态时, 回路的电压相位和电流相位将会存在相位差。图 4 给出系统频率跟踪调谐的原理框图, 提出通过比较电压相位和电流相位, 优化调整系统工作频率的大小。

在发射端使用可频率调节的逆变开关电源。逆变开关电源由 4 个开关管构成全桥逆变器, 由信号发生器输出信号控制 4 个开关管导通和断开, 直流电源提供输出的高频电能, 逆变器将把设定频率的交流电输送到发射线圈<sup>[10]</sup>。

图 5 提出频率跟踪的调整策略, 比较回路中电压相位和电流相位, 得到回路的失谐状态。当电压相位超前于电流相位时, 回路呈感性, 系统应当减小工作频率。当电压相位滞后于电流相位时, 回路呈容性, 系统应该增大工作频率。

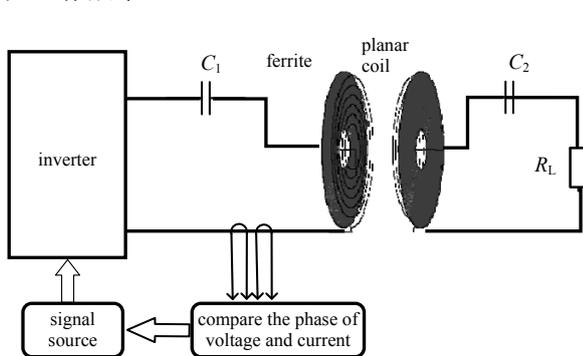


Fig.4 Diagram of proposed magnetic coupling resonance system with frequency tuning  
图 4 磁耦合谐振系统频率跟踪实验框图

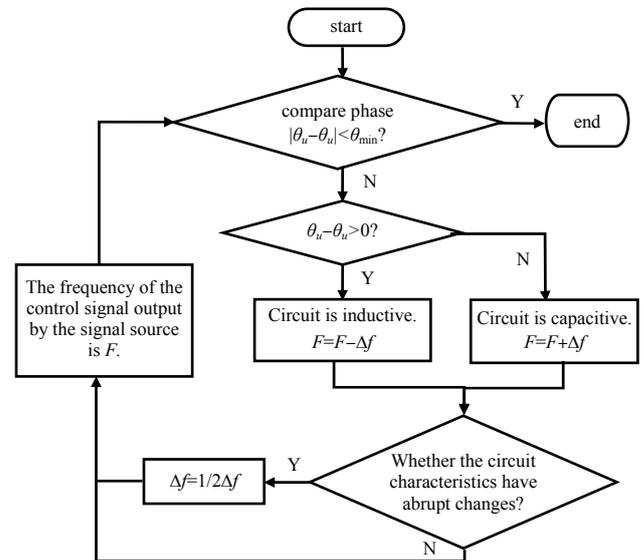


Fig.5 Block diagram of frequency tuning algorithm  
图 5 频率跟踪调节算法框图

### 4 无线输能系统的仿真分析和实验验证

在电磁仿真软件中模拟线圈磁耦合系统, 在不同传输距离下, 仿真计算系统的传输效率。得到系统在中心固定频率下的效率和在频率参数扫描后得到修正频率下的最佳传输效率。

搭建的无线能量传输实验系统如图 6 所示, 将信号发生器、直流电源、逆变电路与发射端回路相连, 直流电源显示发射功率, 示波器显示发射回路电压电流相位信号; 接收端回路接  $10\ \Omega$  功率负载, 得到接收功率后计算传输效率。图 7 给出在传输距离变化的情况下, 系统发射回路的电压电流相位关系, 图中方波为电压信号, 正弦波为电流信号, 通过判断回路失谐状态后进行频率跟踪调整。当系统处于某一初始状态, 其传输距离为  $18\ \text{cm}$ , 工作频率  $103\ \text{kHz}$ , 如图 7(a)所示系统回路谐振。当传输距离减小到  $13\ \text{cm}$  时, 如图 7(b)所示, 系统失谐, 电流相位超前于电压相位, 根据频率调整策略, 应逐步增大系统工作频率。当系统调整频率后, 发射回路再次处于谐振状态, 此时跟踪到工作频率为  $108\ \text{kHz}$ , 系统频率调谐完成, 如图 7(c)所示。同理, 如图 7(d)~(f)所示, 当系统传输距离从  $10\ \text{cm}$  增大到  $13\ \text{cm}$  后, 系统失谐, 电流相位滞后于电压相位, 根据频率调整策略, 应逐步减小系统工作频率。当系统工作频率调整后, 系统发射回路再次处于谐振状态, 此时跟踪到工作频率为  $108\ \text{kHz}$ , 系统频率调谐完成。不断改变耦合线圈之间的距离, 记录系统在中心固定频率下的效率。然后根据频率跟踪调谐方案, 不断使发射回路处于谐振状态, 并记录传输效率。

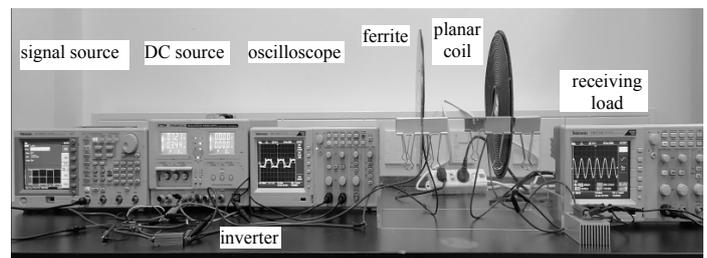


Fig.6 Photograph of the experiment test setups  
图 6 系统实验测量图

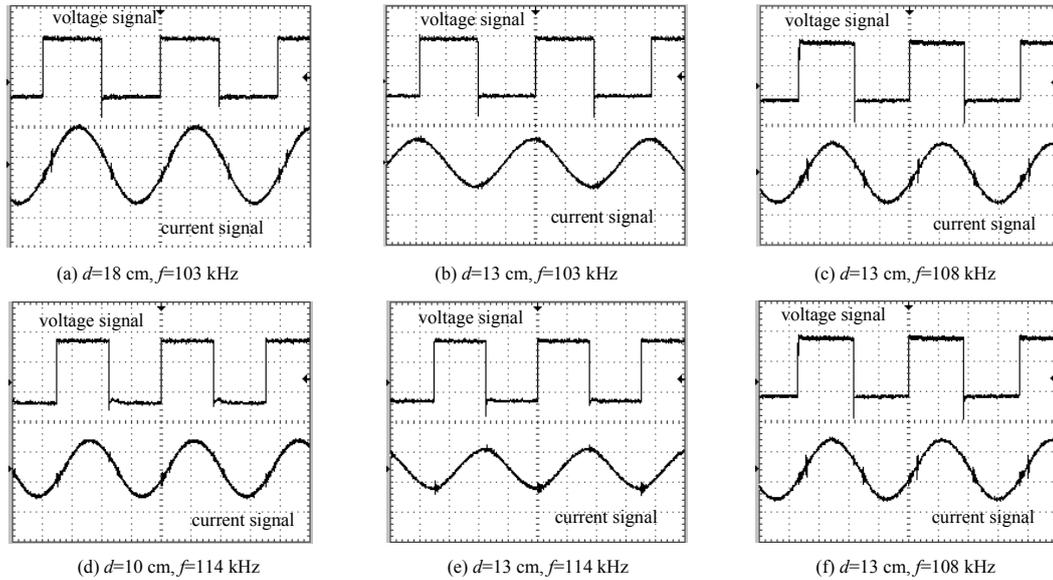


Fig.7 Waveforms of voltage and current phase in frequency tuning experiment  
图 7 频率跟踪调节实验电压电流相位波形图

图 8 给出了在电磁仿真软件中模拟计算的系统效率随传输距离变化的仿真结果，分别是在固定频率下传输效率和频率扫描后得到的修正频率下最佳传输效率。当传输距离  $d$  大于 15 cm 时，耦合距离处于弱耦合区，仿真和实测都显示系统在固定频率下可达到最大传输效率，且效率高于 80%。当传输距离  $d$  从 15 cm 开始减小时，耦合距离将从临界耦合转向强耦合区，在仿真计算中固定频率下系统效率低于修正频率后的最佳传输效率，传输距离越近，固定频率下的仿真效率越低。图 9 给出了固定频率下的实测效率和频率跟踪调谐下的实测效率随距离变化的结果。实测无线传输系统效率时，传输距离越小，固定频率下的实测效率下降越大，并远低于仿真效率。造成这一结果的原因是系统失谐严重，降低了发射端输出功率，系统损耗占比加大，使整个系统效率进一步下降。在频率跟踪调谐下的实验测量中，系统发射回路处于谐振状态，传输效率较高，实测效率大致稳定在 80%以上。由于频率调谐考虑的是发射回路处于谐振状态，与系统理想的最佳传输状态有一定误差，故实测效率将低于仿真计算的系统最佳效率。从图 9 可以看出，相较于频率固定的系统初始工作频率，通过频率跟踪调谐，可明显提高系统的传输效率，在传输距离 5~10 cm 范围内，传输效率可提高 20%以上。

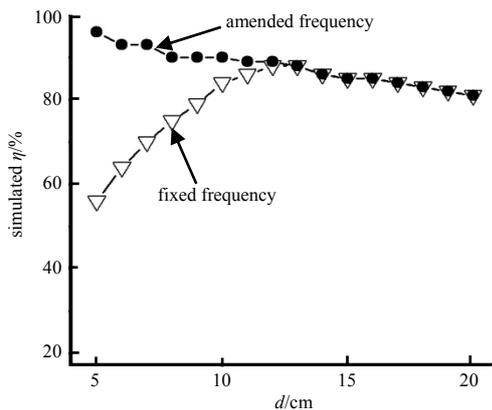


Fig.8 Simulated efficiency varying with distance  
图 8 仿真系统传输效率随距离变化

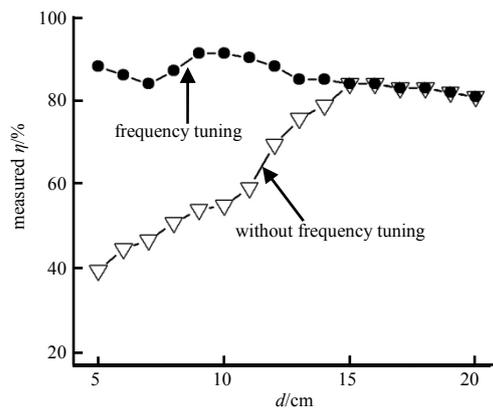


Fig.9 Measured efficiency varying with distance  
图 9 实验测量系统传输效率随距离变化

## 5 结论

根据磁耦合谐振电路原理，探究双线圈磁耦合传输系统效率的影响因素，在耦合线圈中设计铁氧体结构并制作传输系统。针对系统传输距离变化的动态需求，提出频率跟踪调谐的优化方法，可有效缓解系统效率的急剧波动。仿真并实测系统传输距离在 5~20 cm 之间变化时的传输效率，设计的磁耦合谐振式无线输能系统传输

效率都高于 80%。通过频率跟踪调谐稳定发射回路的谐振状态,优化磁谐振系统输能效率,为今后作深入设计动态无线能量传输系统提供了指导。

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 ] SHIN J,SHIN S,KIM Y,et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014,6(3):1179-1192.
- [ 3 ] MUDE K N,BERTOLUZZO M,BUJA G,et al. Design and experimentation of two-coil coupling for electric city-car WPT charging[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2016,30(1):70-88.
- [ 4 ] KNAISCH K,HUCK T,GRATZFELD P. Analysis and optimization of a solenoid coupler for wireless electric vehicle charging[J]. Wireless Power Transfer, 2017,4(1):13-20.
- [ 5 ] 李阳,杨庆新,闫卓,等. 磁耦合谐振式无线电能传输方向性分析与验证[J]. 电工技术学报, 2014(2):197-203. (LI Yang, YANG Qingxin,YAN Zhuo,et al. Analysis and validation on characteristic of orientation in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014(2):197-203.)
- [ 6 ] 张波,疏许健,吴理豪,等. 无线电能传输技术亟待解决的问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2019,43(18):1-20. (ZHANG Bo,SHU Xujian,WU Lihao,et al. Problems to be solved urgently in wireless power transmission technology and counter-measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(18):1-20.)
- [ 7 ] HUANG Z C,WONG S C,TSE C K. Control design for optimizing efficiency in inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(5):4523-4534.
- [ 8 ] SHI L,RASOOL N,ZHU H C,et al. Design and experiment of a reconfigurable magnetic resonance coupling wireless power transmission system[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020,30(7):705-708.
- [ 9 ] MOHAMMAD M,CHOI S,ELBULUK M E. Loss minimization design of ferrite core in a DD-coil-based high-power wireless charging system for electrical vehicle application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019,5(4): 957-967.
- [10] 王雯雯,赵芯跃,黄卡玛,等. 基于磁感应频率跟踪的逆变电源研究与设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5): 825-831. (WANG Wenwen,ZHAO Xinyue,HUANG Kama,et al. Design on frequency-tracking of inverter based on magnetic induction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):825-831.)