

磁共振耦合无线电能传输系统的低频化研究

罗俊豪, 蔡昌松, 代中余, 唐亚可, 王军华

(武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

Research on Lowering the Frequency of Magnetic Resonance Coupling Transmission System

LUO Junhao, CAI Changsong, DAI Zhongyu, TANG Yake, WANG Junhua

(College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: As a new wireless power transmission, magnetic resonance coupling wireless power transmission technology has aroused great attention around the world, while the related power, power electronic devices and other equipments supplied are difficult to meet the needs of its high-frequency at present, A lower frequency has become the trend of magnetic resonance coupling wireless power transmission. In this paper, we made a discussion on lowering the frequency of magnetic resonance coupling transmission system, presented several major methods to achieve this goal and mainly made a simulation study and analysis on the impact of copper strips in the system.

KEY WORDS: magnetic resonance coupling wireless power transmission; lower frequency; copper strips; simulation

摘要: 磁共振耦合无线电能传输技术作为一种新的无线电能传输方式引起了国内外的高度关注,而目前相关的电源、电力电子器件等设备不易满足其高频需求,磁共振耦合无线电能传输的低频化已经成为发展的趋势。本文针对磁共振耦合传输系统的低频化进行了相关讨论,提出了目前低频化的几种主要方式,并主要针对 Cu 贴片进行了相关仿真研究与分析。

关键词: 磁共振耦合无线电能传输; 低频化; Cu 贴片; 仿真

1 引言

近年来,无线电能传输技术的引入使电能的生产、输配和使用途径更加宽广、方式更加多样化。其中近场电磁感应耦合技术不依赖于电磁波传播,电动牙刷和“无线充电板”等都是其应用。这种技术效率较高,但是传输距离很近,该技术一般用于厘米级的短距离传输^[1-4];而近场 RFID 技术则通过牺牲效率来提高传输距离,它的传输距离可以达到几十厘米,但是效率只有 1%-2%;如果采用非定向微波辐射,由于接受端附近的功率密度很低,难以提供足够的能量^[5],而定向微波或飞秒激光形式的

能束有很高的功率密度,将对环境和人体安全造成未知的影响,因此这种传输方式只适用在特定的情况下。可见,现有的远场和近场无线电能传输技术均有其局限性,或者效率较低或者传输距离较近,难以满足应用需求。

2007 年,MIT 研究小组提出了基于磁共振的中距离无线能量传输技术,其工作原理是利用两个谐振频率一致的线圈工作于某一特定的频率时,两线圈之间发生电磁耦合,高频电磁能量在两个谐振线圈之间进行传输,从而实现了无接触的电能传输。该技术也被称之为 WiTricity^[6]。MIT 把基于磁共振耦合的无线电能传输技术命名为 WiTricity 技术,并定义: WiTricity 功率源和接收装置是经过专门设计的磁共振器,能够在较长距离有效地传输功率。这些源和装置以及控制它们的电子系统提供在源/装置本身尺寸多倍距离内的有效的传输能量。该技术具有传输距离远、效率高的特点,对环境影响小,安全性好,具有十分广阔的应用前景。

但因为磁共振系统中所采用的工作频率一般在 500kHz~15MHz,制造这种输出频率的大功率电源具有很大难度,当频率达到兆赫兹级别时器件和电路上存在大量的杂散损耗,电源外部的阻抗变化较大,难以以最高效率供应电能,大量的能量在电源内阻上消耗引起发热,进一步缩短高频器件的寿命,从而影响了能量传输的高效性与安全性。巨大的发热量迫使在制造时不得不设计更大的体积,并且需要散热设备配合使用,给设备体积的小型化制造了巨大难题。

无线电能传输技术的难点与传统的有线传输方式相比有较多差别,其中最主要的差别体现在传输使用的交流频率远高于工频,故产生了一系列需要解决的重大科学问题,这对各部分的功率、频率和工作寿命等方面有严格的要求,同时需要研究此

条件下系统的设计优化和控制策略,验证传输的安全性。

在中短距离的无线电能传输方面,高效率、大功率的应用要求电源不仅拥有足够的高频电能转换能力,亦需要具有稳定可控的输出频率,因为电源的构造是一个巨大的难点。降低线圈的谐振频率,能够降低对电源输出频率的要求,从而使系统更容易制造,整体更加稳定安全,也降低了控制电力电子器件的难度。如果合理地对共振传输的低频化进行设计,可以在大大节约电源成本同时缩小系统的体积,低频化已经成为目前磁共振耦合无线电能传输发展的趋势。

2 磁共振耦合无线电能传输低频化的具体方式

自然中有许多地方有共振的现象,科学发展的过程中借助或者避开共振现象的先例都有很多,共振现象也普遍存在于日常生活中。通常情况下一个物理系统中存在着数个共振频率,当振动频率等于这些频率时,能量损耗会比较小。如果振动中包含较多的共振频率,这个物理系统中的物体会对其中某个频率十分敏感,而其他频率对物体振动的影响被弱化。当线圈有数个谐振频率时,这些频率间也有主次之分,系统对不同阶模态的响应程度大小是不同的。

无论是螺旋线圈还是平面螺旋线圈,不同形状、大小的线圈中存在匝间电容、对地电容等多种多样的分布电容,导致不同频率下系统都会处于类似的谐振状态即频率分裂现象。尤其是系统中使用多个线圈时,这些不同的谐振频率会相对更加接近,进行本征模分析的时候,一阶与二阶模态之间差别很小,系统容易在效率相对较低的另一个频率上发生谐振。

但多个谐振频率的存在说明可以通过改变线圈本身的结构和材质,通过改变这些分布电容的数值来人为调整线圈系统的谐振频率,使谐振频率降低到原先的50%甚至更多,极大地降低电能变换模块和控制模块的设计难度。

具体的方式包括以下几点:

(1) 改变线圈的几何尺寸

谐振线圈的几何尺寸是与其谐振频率关系较大的因素,线圈匝数升高时能够在一定程度上降低线圈的谐振频率,在穿戴式和植入式医疗设备的充电等应用领域,接收端线圈跟发射端线圈的尺寸相

比可能会有非常大的差异,而几何形状不一样的数个线圈所构成系统的谐振频率亦会发生偏移,采用增加匝数的方法也会存在极限,随着线圈匝数的增多,谐振频率的改变会越来越微小,同时线圈匝数过多也会造成实际应用的不便。

(2) 改变线圈的形状和结构

在发射端线圈的结构上进行调整,例如加入一种具有电容的电流控制线圈,将传统的单匝线圈绕成一个回型,并且在中间开口接入电容,采用这种线圈之后,通过调整电容值,可以控制正向和反向的循环电流的比例,通过这种方式解决传输距离变化带来的阻抗不匹配问题,在一定的距离内可以保持60%的传输效率,而并不需要接入额外的匹配电路。类似的有一种不敏感的传能线圈结构,将馈电线圈加入发射端的高 Q 值线圈中,起着谐振耦合方式中阻抗匹配的关键作用。接收端线圈与其补偿回路线圈摆放呈 120° 能够有效降低谐振频率并且增大磁共振传输允许的浮动范围。还有一种双螺旋结构的磁共振传能模式,并且线圈适合印制于廉价基材例如薄膜上。双螺旋谐振线圈可以提供更高的峰值传输效率和更远的距离,该方式涉及的关键参数较多,通过理论分析解释双螺旋结构效率更高的原因十分复杂,实际设计中参数配合也比较困难。

(3) 改变线圈的材料

在磁共振系统中,由于线圈上分布参数的缘故,磁共振性能与设计方案相比会有一些的偏差,增加谐振传输的损耗。采用超导线圈、空心铜管或者表面镀银的单股铜线,经过适当调整之后可以有降低谐振频率的效果。

(4) 采用贴片

用一些具有某些电磁特性的材料制成薄片,置于线圈外侧,贴片的材料可以是铜,铜贴片除了降低谐振频率,还可以提供一定的磁屏蔽作用,使得传输通道外侧的人更加安全。然而可能会导致系统中增加不可忽视而且不太稳定性的分布电容,输出功率和效率波动,品质因数和耦合系数也会出现变化。

目前,基于磁共振的中距离无线电能传输技术的发展和追求线圈的小型化,通过改变线圈的形状和结构在实际设计中的参数配合有较大难度,改变线圈的材料可能在一定程度上增加经济成本,采用贴片进行磁共振耦合无线电能传输的低频化设计是较为优良的选择,本文主要就Cu贴片展开

了相关研究与分析。

3 磁共振耦合无线电能传输低频化的仿真验证

ANSYS HFSS 在磁共振耦合无线电能传输系统的设计与仿真中处于极其重要的地位,其 Eigenmode 求解器能够用于谐振问题的设计分析,计算谐振结构的谐振频率以及在这些谐振频率处所对应的场分布,也可用于计算谐振腔体的 Q 值。HFSS 不仅可以用于线圈结构和线圈新材料的尝试,而且能够给控制线圈系统应对频率漂移的设计和线圈传输频率分裂问题的研究提供参考。

3.1 未经过 Cu 贴片处理线圈的本征模分析

本文中仿真涉及的线圈主要是一种平面螺旋线圈,为了在 FEM 仿真时有效地限制剖分单元数,在建模时对线圈的外形做了简化工作。经过验证这种简化方式对传输通道上的磁场强度分布影响不大。简化包括采用方形截面替代导线的圆截面,线圈环绕的形状是用 36 边形代替圆形,在仿真软件中绘制的线圈模型如图 1 所示,截面是边长 5mm 的正方形,匝数为 8,最大外径约 38cm,匝间距离 7mm。

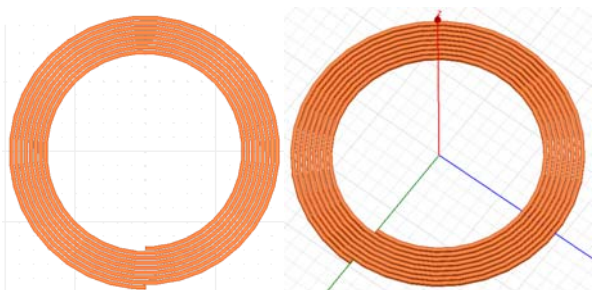


图 1 绘制的线圈 3D 模型

HFSS 中的求解区域是金属中存在的一个立方体空腔,腔体内的电磁波在某一频率下,恰使存在于此腔体中的电场能量与磁场能量相等时,则认为这个频率为系统的谐振频率,本征模求解结果如图 2 所示。同时通过 ANSYS Maxwell 可以求得等效电感值为 $34.52\mu\text{H}$,分布电容为 12.72pF 。

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	0.00760859 +j 1.23346...	3084.24
	Mode 2	0.00761850 +j 9.29003...	410.037
	Mode 3	0.00817664 +j 6.20325...	659.061
	Mode 4	0.0241456 +j 6.48006e...	186.307

图 2 本征模求解结果和对应频率下的线圈 Q 值

一阶模态的频率实部表示的即为系统的谐振频率,对于没有经过贴片处理和补偿电容的平面螺旋线圈,谐振频率为 7.6MHz。二阶至四阶模态即为频率的其他谐振峰值,二阶及三阶模态频率和一阶相近但是品质因数却要低很多,相应的传输效率也较低,在自动跟踪系统的最优传输频率时很容易使工作点落到这些次峰值上,这种现象就是频率分裂导致的。

仿真计算结果中频率是复数的原因是因为在麦克斯韦方程组中,如果各个介质的 ϵ 是实数,那么计算中相对的波常数就是纯虚数;然而综合考虑介质中产生的各项能量损耗, ϵ 应该用复数来表示,那么按照这个 ϵ 仿真求解中的波常数也会变成复数,即分别拥有实部和虚部,而谐振频率就是直接由波常数计算得到,所以本征模求解器仿真计算结果的各个模态下的谐振频率也是复数。HFSS 里计算的复数结果中,取实部即为所求的谐振频率,在这种情况下等于系统的谐振频率。计算结果中的虚部其实是与介质的各项损耗有联系的物理量。

3.2 采用 Cu 贴片后对谐振频率的影响

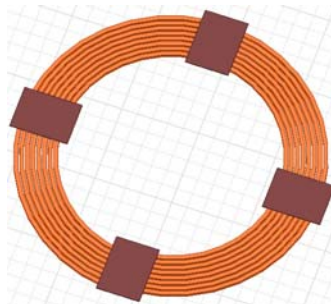


图 3 带有铜贴片的线圈模型

在线圈传输通道的外侧放置四个位置完全对称的铜片作为贴片,铜片长 75mm 宽 56mm 高 1mm,与线圈相距 2mm,带有铜贴片的线圈模型如图 3 所示。由于贴片后有限元剖分变得更加复杂单元数增加,为了提升计算速度,在求解器设置中仅计算到二阶模态,得到求解结果如图 4 所示。

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	0.00636329 +j 4.43084...	7180.67
	Mode 2	0.00637191 +j 8.79722...	362.155

图 4 采用贴片后的本征模求解结果

从仿真结果可以看出,采用 Cu 贴片后系统的谐振频率为 6.36MHz,谐振频率下降了 16.3%,并提高了无载 Q 值,线圈的性能有了一定的提升。同时通过 HFSS 分别对一相同匹配条件下的磁共振系统采用 Cu 贴片前后的情况进行了仿真,得到系统

相应的散射参数 S_{21} ，如图 5 所示。 S_{21} 在散射矩阵中表示插入损耗，物理意义上是一个表示有多大的能量被输送到输出端口的参数， S_{21} 越大代表系统的传输效率越高，通常在传输系统设计时建议保证 $S_{21} > 0.7$ 。根据微波网络理论，从发射端到接收端的传输效率^[7]为：

$$\eta = |S_{21}|^2 \quad (1)$$

图 5 中是在线圈相距 50cm 时，加入 Cu 贴片前后的 S_{21} 曲线对比结果图，可以看出采用 Cu 贴片后谐振频率在一定程度上得到了降低，在 HFSS 中可以得知采用 Cu 贴片前后谐振点的 S_{21} 分别为 0.9633 与 0.9472，即效率分别为 92.79% 和 89.72%，可见加入 Cu 贴片后不会对系统的效率产生太大影响。

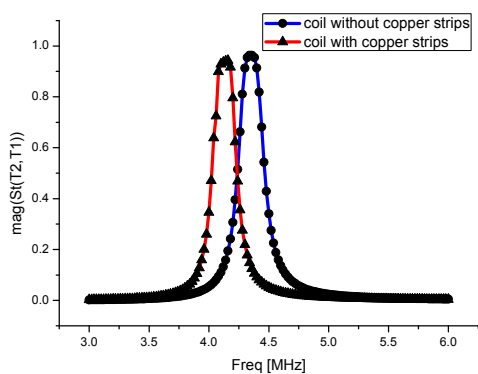


图 5 加入 Cu 贴片前后的 S_{21} 曲线

3.3 Cu 贴片的布置位置及大小对谐振频率的影响

在铜贴片不同的布置方式下，系统的谐振频率和线圈 Q 值会有所区别，本文在 HFSS 中对此进行了仿真研究，建立的模型中贴片的两种位置的摆放示意图如图 6、图 7 所示。通过 Maxwell 能够求得图 6 中等效电感值为 $33.81\mu\text{H}$ ，分布电容约为 18.54pF ，说明加 Cu 贴片后对系统的电感值亦具有一定的作用，但是相对比较微弱。图 7 中所示错位放置的情况下系统的谐振频率为 6.5MHz ，系统等效电感值为 $33.96\mu\text{H}$ ，分布电容为 17.68pF ，可见这种情况下贴片对整体分布电容的增加相比于图 6 中略少。在相同贴片的条件下，寻找其最佳的布置位置，即使得分布电容增加最大的放置方式，能够有效节约材料，提高其经济性。

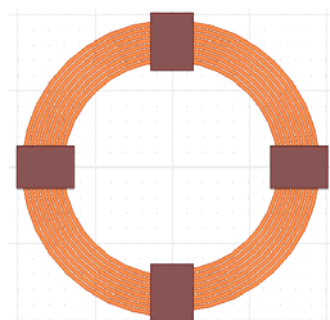


图 6 铜质贴片在线圈上的摆放位置

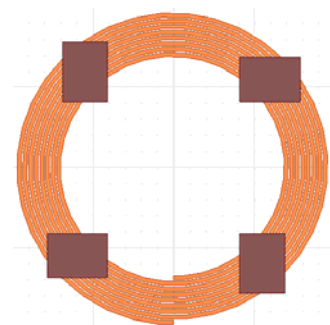
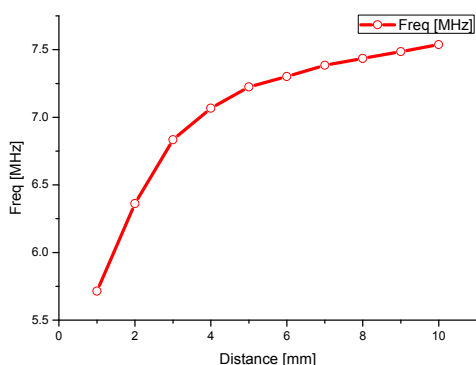
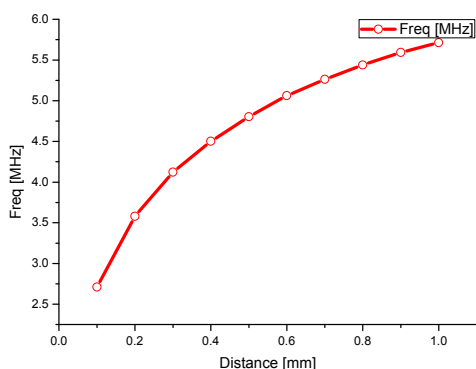


图 7 铜质贴片的错位摆放

同时本文针对贴片与线圈之间距离以及贴片大小对线圈谐振频率的影响作了相关研究，谐振频率与贴片和线圈间距的关系曲线如图 8 所示，图 8(a) 中间距从 1mm 变化到 10mm ，图 8(b) 中间距从 0.1mm 变化到 1mm 。可见贴片和线圈之间的距离越近，谐振频率越低，当间距为 0.1mm 时，谐振频率更是降到了 2.72MHz ，相比于未加贴片的情况下其谐振频率下降 64.2% ，这也说明此时其分布电容更大，表明了贴片对于磁共振系统低频化的有效性。但仍需注意，由于金属对电磁波具有屏蔽作用，如果 Cu 贴片与线圈之间的距离过小，会对电磁波的传播造成一定影响，甚至造成线圈部分磁场分布畸变，在保证电能传输高效性与稳定性的前提下合理控制贴片与线圈的间距是磁共振电能传输低频化必须要注意的问题。



(a) 贴片与线圈距离 1-10mm



(b) 贴片与线圈距离 0.1-1mm

图 8 谐振频率与贴片距离的关系曲线

为研究贴片大小对谐振频率的影响，分别保持贴片的长度和宽度不变，谐振频率随贴片宽度和长度变化的关系曲线分别如图 9、图 10 所示。可以看到随着贴片宽度和长度的增加，系统的谐振频率随之下降，但是这种变化也具有较大的局限性，当贴片长、宽超过线圈的宽度，其对谐振频率的改变作用将变得微弱，图 10 中贴片长度在 70-75mm 左右时比线圈内外径的间距略大，这时低频化的作用更加明显，而当贴片距离过大时，反而会导致系统的不太稳定，引起谐振频率出现一定的波动。低频化需要控制好贴片的多项变化因素和布置方式，从而在保证系统稳定性的同时最大化降低谐振频率。合理控制线圈的大小不仅能够提高低频化处理的经济性，亦能够保证无线电能传输的高效性与稳定性。

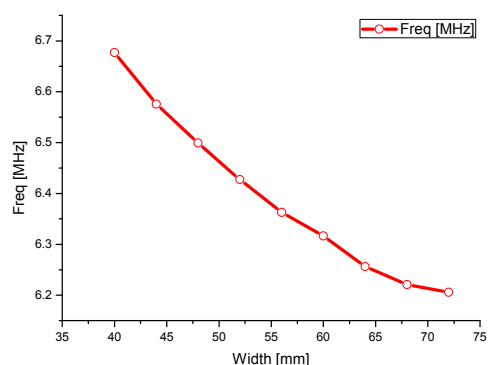


图 9 谐振频率随贴片宽度变化的关系曲线

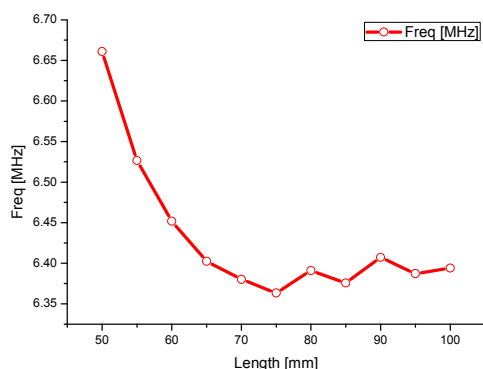


图 10 谐振频率随贴片长度变化的关系曲线

4 结论

磁共振耦合无线电能传输技术作为一种安全、可靠、便捷的非定向传输方式^[8-10]引起了国内外的高度关注，该项技术的低频化能够有效降低它对电源输出频率的要求，从而使系统更易制造，整体更加稳定安全，也降低了相应电力电子器件的控制难度，这样便能够在大大节约电源成本同时缩小整体系统的体积，低频化已经成为目前磁共振耦合无线电能传输发展的趋势。

本文针对磁共振耦合传输系统的低频化进行讨论，提出了目前低频化的几种主要方式，主要包括改变线圈的几何尺寸、线圈的形状和结构、在线圈制造上引入新型材料和采用贴片等方式降低谐振频率，其中主要针对 Cu 贴片展开了仿真研究与分析。本文对贴片的放置方式、贴片与线圈间距以及贴片大小改变的情况进行了仿真，得到了系统谐振频率随之变化的关系曲线，根据 HFSS 的仿真计算的结果，认为贴片能够有效降低线圈的谐振频率，基于仿真结果为线圈谐振频率的低频化选择最

佳的贴片施加方式奠定了基础。通过 HFSS 分析了采用贴片前后传输效率的变化,发现采用合理采用 Cu 贴片能够在一定程度上降低谐振频率,同时系统的传输效率基本不受影响,但同时必须注意控制好贴片的大小和布置位置,在保证磁共振耦合无线电能传输的高效性与稳定性的同时提高其经济性。

但同时,在研究中也必须考虑到增加 Cu 贴片之后,有可能会使系统中增加不可忽视而且不太稳定的分布电容,输出功率和效率波动,系统等效电感值、品质因数和耦合系数也会出现变化,这在进行控制系统设计时需要注意。因此,为了增强采用贴片的磁共振耦合传输系统的稳定性,上述问题必须充分处理,下一步将综合考虑多方面因素的影响,尤其是对于较大距离或者较大功率的能量传输,并通过采用复合材料贴片等方式进行更加精细的低频化设计。

参考文献

- [1] 戴卫力. 无线电能传输技术综述及应用前景[J]. 电气技术, 2010:7
- [2] J.T.Boys, A.P.Hu, G.A.Covic, "Critical Q analysis of a current-fed resonant converter for ICPT applications, " in Proc. Electronics Letters, 2000:1440-1441.
- [3] J.T.Boys, G.A.Covic, "Pick-up transformer for ICPT applications, " in Proc. Electronics Letters, 2002:1276-1278.
- [4] A.P.Hu, J.T.Boys, "Frequency analysis and computation of a current-fed resonant converter for ICPT powersupplies" in Proc. international conference on powersystem technology, 2000:327-332.
- [5] 张茂春. 无线电能传输技术综述[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2009:10
- [6] AndréKurs, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances[J]. Science Magazine, 2007, (5834):83-86.
- [7] 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.
- [8] 朱忠尼, 林洁, 宋庆国等. 磁耦合谐振式无线电能传输技术发展和应用研究[J]. 空军预警学院学报, 2014, (1):37-43.
- [9] 黄学良, 谭林林, 陈中等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报 ISTIC EI PKU, 2013, 28(10).
- [10] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 磁耦合谐振无线电能传输的研究现状及应用[J]. 电工技术学报, 2013, (12):75-82.



罗俊豪

作者简介:

罗俊豪(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线电能传输技术方面的研究工作, junhao_l@foxmail.com;

蔡昌松(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线电能传输技术方面的研究工作, finccs@126.com