

一对多无线电能传输理论分析研究*

王迪晟, 秦会斌, 范翠红

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 磁耦合谐振式无线电能传输具有距离较远、功率大、穿透性强等优点, 近年来一对多无线电能传输技术成为无线充电领域的热门研究方向。基于磁耦合谐振式无线电能传输的理论来对一对多无线电能传输系统进行研究, 建立电路仿真模型, 计算出系统谐振状态下的发射端电流、接收端电流、输出平均功率、电源内阻消耗平均功率、接收端平均功率以及传输效率等数学表达式, 并利用 MATLAB 对模型进行仿真分析。仿真模型通过修改每个接收端回路的耦合系数的比例和另外两个接收端线圈自感的乘积来调节该接收端的功率, 可以实现多个接收端的功率分配, 并使电能传输效率可达 90% 以上。

关键词: 一对多; 磁耦合谐振式; 无线电能传输; 功率分配

中图分类号: TM724

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211948

中文引用格式: 王迪晟, 秦会斌, 范翠红. 一对多无线电能传输理论分析研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 117-121, 126.

英文引用格式: Wang Disheng, Qin Huibin, Fan Cuihong. Theoretical analysis of multi load radio power transmission[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 117-121, 126.

Theoretical analysis of multi load radio power transmission

Wang Disheng, Qin Huibin, Fan Cuihong

(Institute of New Electronic Devices and Applications, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Magnetic coupling resonant wireless power transmission has the advantages of long distance, large power and strong penetration. In recent years, multi radio power transmission technology has become a hot research direction in the field of wireless charging. Based on the theory of magnetic coupling resonance radio power transmission, this paper studies the one to many radio power transmission system, establishes the circuit simulation model, calculates the mathematical expressions of the transmitter current, the receiver current, the average output power, the average power of the power internal resistance consumption, the average power of the receiver and the transmission efficiency under the resonant state of the system, and uses MATLAB to simulate the model and analyze. The simulation model adjusts the power of the receiver by modifying the ratio of the coupling coefficient of each receiver loop and the product of the coil self-inductance of the other two receivers. The power distribution of multiple receivers can be realized, and the power transmission efficiency can reach more than 90%.

Key words: multi radio; magnetic resonance coupling; radio power transmission; power distribution

0 引言

传统的电力输送采用有线输送的方式, 然而有线输送存在一定的局限性。例如家用电器插拔过程中容易产生插座松动, 产生火花甚至发生火灾。户外用电设备随着时间的推移, 线路会出现老化、磨损, 使其安全系数降低。此外在一些特定的场合有线供电方式不能满足其需求, 如植入式医疗器械, 需要定期更换其内部的电池, 而无线电能传输技术能够有效解决植入式医疗器械充电问题, 因此研究无线电能传输技术具有一定的现实意义和经济价值。

无线充电可分为小功率无线充电^[1-2]和大功率无线

充电。小功率无线充电常采用电磁感应式^[3-4], 一般用于手机的充电, 其传输距离只有几毫米, 限制用户在充电的时候使用手机, 也无法实现快充的效果。大功率无线充电常采用磁耦合谐振式^[5-9], 一般用于电动汽车充电, 具有传输距离远、功率大、效率高的优点^[9-11]。其原理主要是磁感应能量转换, 由交变的电流在发射线圈上产生交变的磁场, 接收线圈又由交变的磁场转换为电流, 且发射端的固有频率与接收端固有频率相同, 从而产生共振, 此时传输效果最好, 辐射损失的能量也小。

目前采用磁耦合谐振式的电动汽车充电的充电效率在 85%~90%, 且采用单负载系统。但是单负载系统也存在一些不足之处: 其一, 负载唯一, 使整个系统的利用率较低; 其二, 位置存在局限性, 接收线圈和发射线圈只

* 基金项目: 浙江省科技计划项目(2017C01027)

能共轴才能达到最高的传输效率^[12-13]。另外,由于无线充电的电子产品的增加,单负载也无法满足多台设备同时供电的需求。而一对多无线充电采用^[14]的是松耦合系统,具备便捷性、通用性、多用性的特点,且充电位置局限性小,传输效率可达90%的优点,因此在研究一对多无线充电也势在必行。

本文建立了一对三的无线充电系统模型,分析了两线圈比例、水平偏移距离、垂直距离对互感值的影响,进而分析了系统的传输效率、系统最佳状态以及负载的功率分配,证明了一对多系统的可行性。

1 磁耦合谐振电路模型

磁耦合谐振电能传输是高频谐振,接收线圈和发射线圈耦合谐振时,由于具有处于松耦合的状态下,传输效率比较低,为了提高传输能力,通常会对谐振电路进行一定的补偿,补偿有四种基本拓扑结构,即PP(并联-并联)、PS(并联-串联)、SP(串联-并联)和SS(串联-串联)。一般来说,串联谐振是等效于一个电压源,则其输出的内阻等效于0,而并联谐振等效于一个电流源,其内阻等效于无限大。发射线圈的谐振电容与负载无关,所以在选择电路的拓扑结构时通常采用SS拓扑结构。

系统的谐振电路主要包含线圈L和谐振电容C,在忽略电源内阻与谐振电容C等效电阻时,一对三无线电能传输系统的电路模型如图1所示。

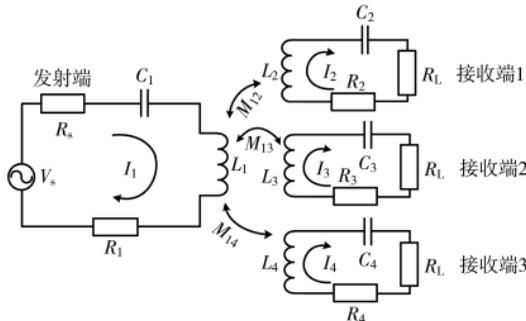


图1 无线电能传输等效电路

其中:Vs为交流电源,Rs为交流电源的内阻,R1、R2、R3、R4为发射端和三接收端线圈内阻,RL为负载电阻,L1为发射线圈电感,L2、L3、L4为接收线圈电感,C1、C2、C3、C4为谐振电容,M12、M13、M14为发射线圈与三接收线圈的互感。

2 一对多电路模型分析

无线电能传输系统相当于一个传输介质为空气的耦合变压器,通常根据耦合、互感、漏感等建立电路模型^[15-16],数学上则通过建立一系列的微分方程组,来求解方程组各个单元的状态,从而分析整个系统的电气性能。在耦合状态下,基于基尔霍夫定律的理论,忽略电容等效内阻和电感自身损耗,从图1的等效电路图中可以列出KVL的回路方程(1)和(2):

$$Z \cdot I = V \tag{1}$$

$$Z = \begin{bmatrix} N_1 & -j\omega M_{12} & -j\omega M_{13} & -j\omega M_{14} \\ -j\omega M_{12} & N_2 & 0 & 0 \\ -j\omega M_{13} & 0 & N_3 & 0 \\ -j\omega M_{14} & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中 $N_i = (R_i + R_s) + j(\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i})$, $N_i = (R_i + R_L) + j(\omega L_i - \frac{1}{\omega C_i})$

($i=2,3,4$)。 $I = [I_1, I_2, I_3, I_4]^T$, $V = [V_s, 0, 0, 0]^T$, I_n 分别为线圈n的回路电流,当处于谐振状态时, $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}}$ (其中 $n=1,2,3,4$)。

可以计算出系统的发射平均功率如式(3)所示、交流电源负载功率如式(4)所示、负载接收的平均功率如式(5)所示:

$$P_{im} = \frac{\text{Re}(\dot{V}_s \dot{I}_1^*)}{2} = \frac{|V_s|^2 (R_2 + R_L)(R_3 + R_L)(R_4 + R_L)}{2H} \tag{3}$$

$$P_s = \frac{|\dot{I}_1|^2 R_s}{2} = \frac{|V_s|^2 (R_2 + R_L)^2 (R_3 + R_L)^2 (R_4 + R_L)^2 R_s}{2H^2} \tag{4}$$

$$P_n = \frac{|\dot{I}_n|^2 R_L}{2} = \frac{|V_s|^2 \omega^2 M_{1n}^2 R_L \prod_{m=2, m \neq n}^4 (R_m + R_L)^2}{2H^2} \tag{5}$$

其中: $H = (R_1 + R_s) \prod_{m=2}^4 (R_m + R_L) + \omega^2 \sum_{n=2}^4 M_{1n}^2 \prod_{m=2, m \neq n}^4 (R_m + R_L)$ 。

考虑三个接收端线圈采用相同规格材料的线圈,且大小长短一致,因此 $R_2 = R_3 = R_4$,此外三个接收端线圈相对于接收线圈的位置来说一致,因此 $M_{12} = M_{13} = M_{14}$, $P_2 = P_3 = P_4$,从而可得到传输效率如式(6)所示:

$$\eta = \frac{\sum_{n=2}^4 P_n}{P_{im} - P_s} \tag{6}$$

根据推算出来的公式可以看出,系统输出平均功率与接收回路所接负载和两线圈的互感M有关,源内阻消耗的平均功率还与电源内阻有关,而与谐振频率无关,接收回路负载所接收到的功率则与负载、互感值、谐振频率有关,因此需要对互感值进行分析以消除谐振频率所带来的影响。

3 系统参数的推导与分析

3.1 互感M的分析与推导

根据式(3)~(5)可得,系统功率、源内阻消耗功率以及负载接收到的功率与互感系数M有关,因此其传输效率关系也应计算互感系数M的关系。三个接收线圈处于同一平面的水平位置,且相对于发射线圈的位置相同。接收线圈与发射线圈平行,且两圆心不在同一垂直于两线圈的平面上,位置如图2所示。

两个线圈的互感量M根据诺伊曼公式^[11,13,16]获取,于是可以得到:

$$M = \frac{\mu N_1 N_2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{A d\phi d\theta}{\sqrt{B+C}} \tag{7}$$

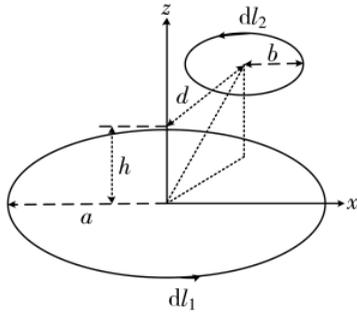


图2 两线圈坐标图

其中 $A = abc \cos(\varphi - \theta)$, $B = (a \cos \varphi - b \cos \theta)^2$, $C = (a \sin \varphi - b \sin \theta - d)^2 + h^2$, N_1 、 N_2 为接收线圈、发射线圈的匝数, a 为接收线圈的半径, b 为发射线圈的半径, d 为两线圈水平的偏移距离, h 为两线圈的垂直距离。

由式(7)可以看出互感大小与接收线圈和发射线圈的半径、水平偏移距离、垂直偏移距离有关。为具体研究其对互感系数的影响,假设 $N_1 = N_2 = 1$, $M_0 = \frac{2\mu_0}{\pi}$, 发射线圈的半径 $a = 1 \text{ m}$, $b/a = 0.5$, 垂直距离与互感的关系如图3所示,从图中可以看出当偏移距离一定时,两线圈平面垂直距离越大,互感 M 越小,当两线圈的垂直距离小于特定距离时,偏移距离对互感值影响不大。当 $d/a = 0.4$ 时,垂直距离与互感的关系如图4所示,从图中可以看出当偏移距离一定时,互感随两线圈平面垂直距离增大而减小,当两线圈一样大且重叠的时候,互感达到最大。

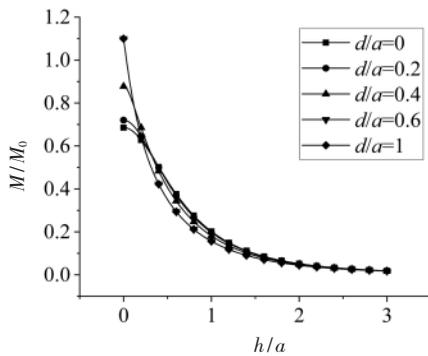


图3 不同水平偏移距离互感值与垂直之间的关系

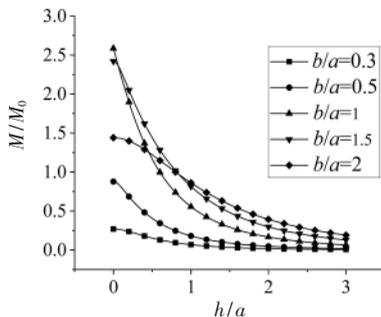


图4 不同线圈比例互感值与垂直距离之间的关系

3.2 传输距离对系统的影响

线圈的缠绕方式是螺线柱型,其缠绕非常紧密,线圈的自感可由式(8)推导出:

$$L = \mu_0 \cdot r \cdot \left(\ln \frac{8r}{a} - 2 \right) \cdot N^2 \quad (8)$$

其中: r 是线圈的半径, N 是线圈匝数, μ_0 是真空磁导率, 为 $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, a 是线圈线的半径。设发射线圈 $r = 5.5 \text{ cm}$, $N = 4$, $a = 0.63 \text{ mm}$, 可以计算出其电感值为 $5.03 \mu\text{H}$, 若与 50 pF 电容进行匹配, 那么可以得出谐振频率约为 10 MHz 。接收线圈 $r = 2.75 \text{ cm}$, $N = 4$, $a = 0.61 \text{ mm}$, 则接收线圈的电感值为 $2.13 \mu\text{H}$, 匹配电容值为 118.9 pF 。根据前面互感的分析, 可以得到互感 M 与传输距离 h 之间的关系如图5所示。

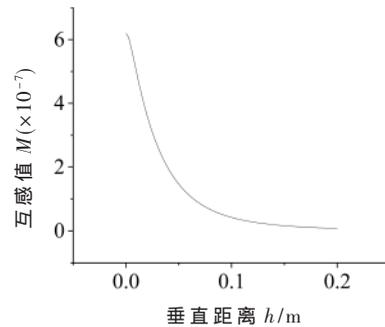


图5 互感值与垂直距离之间的关系

简化各个功率的公式, 引入:

$$\begin{cases} R_1 + R_s = r_1 \\ R_2 + R_L = R_3 + R_L = R_4 + R_L = r_2 \\ M = M_{12} = M_{13} = M_{14} \end{cases} \quad (9)$$

发射线圈和接收线圈的半径不同, 其电阻值都比较小且阻值相近, 所以设接收发射线圈的内阻为 $R_s = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \Omega$, 源阻抗为 $R_1 = 49 \Omega$, 负载 $R_L = 49 \Omega$, V_s 为家庭用电电压 220 V , 则可以得到系统发射功率、源电阻消耗功率和接收功率以及系统的传输效率与传输距离之间的关系如图6所示。从图中可以看出随着两线圈之间的距离增加, 系统发射功率和源电阻消耗功率先急剧增加最后趋向于稳定, 负载所接收到的功率先增加后减少, 两线圈距离在 3.5 cm 内(其发射线圈大小 5.5 cm), 传输效率可达到 90% 以上。

3.3 系统最佳状态的分析

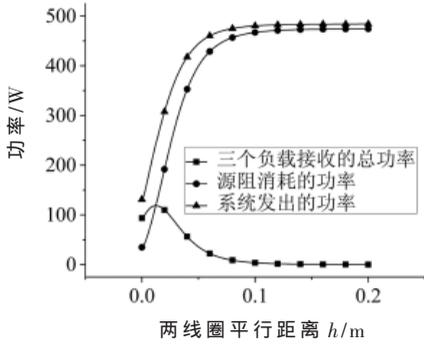
在整个系统中, 发射端所产生的功率有一部分被电源内阻以热量的形式消耗掉, 从而降低了整个系统的传输效率, 因此要分析系统的最优阻抗匹配, 则该系统可以简化为如图7所示。

系统处于谐振状态时, 可得:

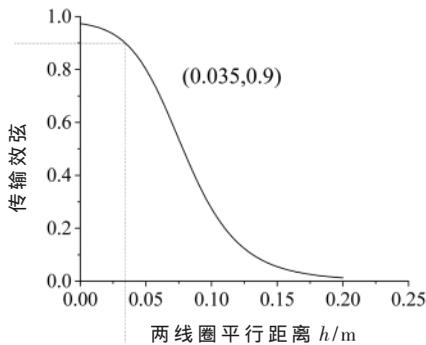
$$\dot{V}_s = (R + Z_0) \dot{I}_1 - j\omega_0 M_{12} \dot{I}_2 - j\omega_0 M_{13} \dot{I}_3 - j\omega_0 M_{14} \dot{I}_4 \quad (10)$$

$$-j\omega_0 M_{1n} \dot{I}_1 + r_n \dot{I}_n = 0 \quad n = 2, 3, 4 \quad (11)$$

根据式(10)、式(11)可得:



(a) 功率与距离关系



(b) 传输效率与距离关系

图6 各个功率、传输效率与距离之间的关系

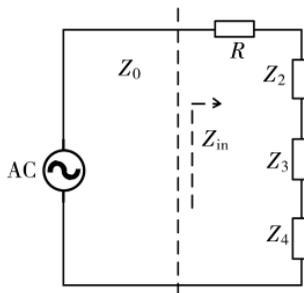
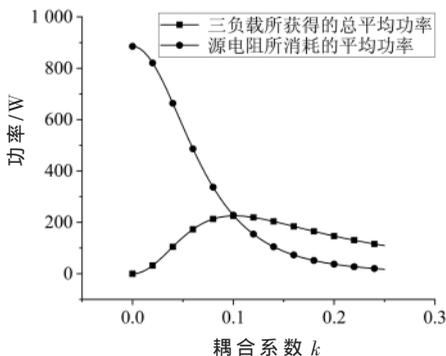


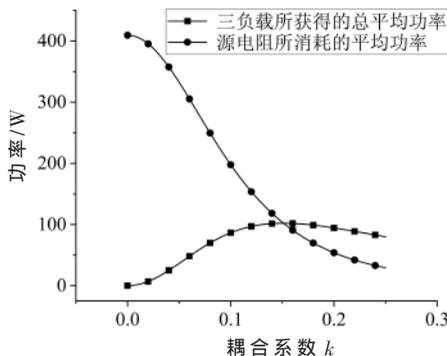
图7 等效电路图

$$\frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_1} = Z_0 + R + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (12)$$

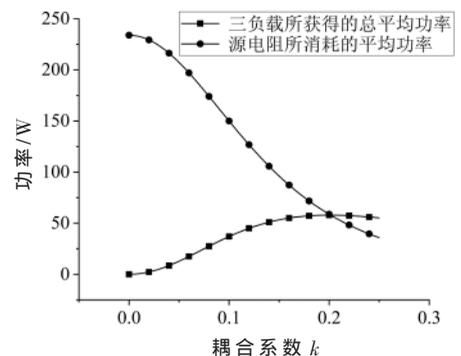
根据式(12)可以了解到, $Z_0 + R + Z_2 + Z_3 + Z_4$ 为系统输入



(a) 功率 P_m 与耦合系数 k 关系图



(b) 功率 P_s 与耦合系数 k 关系图



(c) 功率 P_2 与耦合系数 k 关系图

图9 阻抗匹配源电阻消耗与负载接收功率

阻抗, $\frac{\omega_0^2 k_{1n}^2 L_1 L_n}{R_{1n} + R}$ ($n=2, 3, 4$) 为线圈 n 的等效阻抗 Z_n , 并且系统电源阻抗匹配时与负载阻抗之间应满足:

$$R_s = Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (13)$$

由 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 可得到耦合系数 k 与距离 h 之间的关系, 如图8所示。

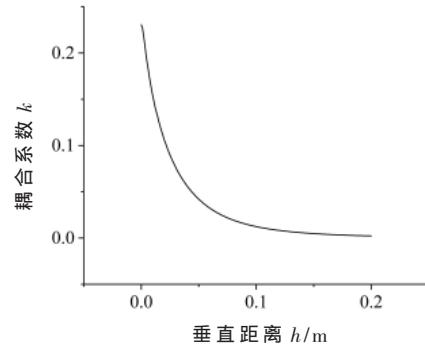


图8 耦合系数 k 与距离之间的关系图

从图8中可以看到 k 的值范围在 $0 \sim 0.23$, 设负载为 49Ω 时, 线圈的内阻为 1Ω , 分别求 $K_{12} = K_{13} = K_{14}$ 为 0.1 、 0.15 、 0.2 时的情况, 则可以得到匹配电阻为 26.3Ω 、 58.1Ω 、 102.5Ω 。在分析的过程中, 为了准确分析整个系统的性能, 还需引入电路的品质因素 Q , 用于消除发射功率、源内阻消耗功率、接收负载接收功率中的无关因素 ω , 而在该串联谐振的电路中, 品质因素的公式 $Q = \frac{\omega L}{r_1} = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{L}{C}}$, 可以得到在阻抗匹配时 Q_1 分别约为 12.06 、 5.46 、 3.0944 , $Q_2 = 2.68$, 以及各个功率表达式:

$$\begin{cases} P_m = \frac{|V_s|^2}{2(3k^2 Q_1 Q_2 r_1 + r_1)} \\ P_s = \frac{|V_s|^2 R_s}{2(3k^2 Q_1 Q_2 r_1 r_2 + r_1 r_2)^2} \\ P_2 = \frac{|V_s|^2 k^2 Q_1 Q_2 r_1 r_2 R_1}{2(3k^2 Q_1 Q_2 r_1 r_2 + r_1 r_2)^2} \end{cases} \quad (14)$$

根据上面的分析, 分别画出 k 不同时功率分配情况, 如图9所示。从图中可以看出源电阻所消耗的平均功率

与三负载所获得的总平均功率分别在对应的 k 值相等, 并且在对应的位置三负载所获得的总功率最大。图 10 为 k 取不同值时阻抗匹配所得到源电阻不同的传输效率, 可以看出其传输效率曲线图是重合的, 因此无论系统源电阻如何变化, 整个系统的传输效率是不变的。

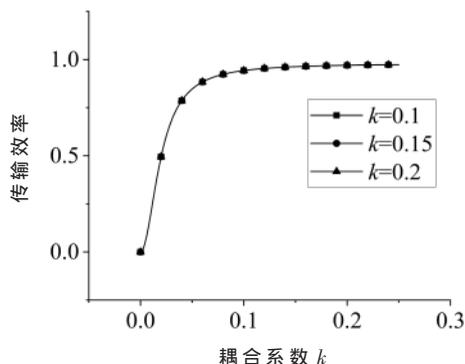


图 10 不同源电阻的传输效率

3.4 接收端功率分配研究

在实际电路设计中, 由于负载不同所需的功率大小也不同, 因此需要对功率分配进行研究。在前面已经推导出系统最佳状态的阻抗分配, 得出三个接收端 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的公式, 则可以认为三个接收端的等效阻抗即为三个接收端回路所获得的平均功率。因此研究三个接收端负载所获得功率只需研究如何分配 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 上所获得的平均功率即可。

根据平均功率 $P = \frac{|I|^2 R}{2}$, 由于等效阻抗都源于发射端回路, 且三个接收端都相互独立, 所以每个接收端的电流均为发射回路电流 I_i , 于是可以认为它们所获得功率之比就是 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 之比:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{K_{12}^2 L_2 (R_{L_1} + R)}{K_{13}^2 L_3 (R_{L_2} + R)} = \frac{M_{12}^2 (R_{L_1} + R)}{M_{13}^2 (R_{L_2} + R)} \quad (15)$$

$$\frac{P_1}{P_3} = \frac{M_{12}^2 (R_{L_1} + R)}{M_{13}^2 (R_{L_3} + R)} \quad (16)$$

从上式可以看出, 任意两个接收回路负载所获得的功率之比, 与接收回路互感之比的平方成正比, 与接收回路内阻和的比值成反比, 因此可以通过改变每个接收端回路的耦合系数的比例, 或者改变另外两个接收端线圈互感的乘积来调节每个接收端负载所获得功率, 根据前面的分析可得到通过改变线圈的水平偏移距离从而改变线圈的互感值大小。

4 结论

一对多无线电能传输是基于磁耦合谐振式一对一无线电能传输的扩展, 通过该原理对一对多系统进行理论分析。由于每个接收端回路之间没有关联, 相互独立, 因此该方法便于分析整个系统的性能。利用基尔霍夫定

律对电路进行分析得到一系列数学方程组, 从而得到系统的输出功率、源内阻的消耗功率、接收回路负载所获得功率、传输效率的相关公式, 根据公式可以看出影响整个系统的性能的因素有两线圈的互感值、谐振频率、回路中的内阻, 从而通过求解互感得到传输性能与距离之间的关系, 证明在有效的传输距离内传输效率达 90% 的可行性。且系统在最佳状态阻抗匹配时, 可以得到此状态下负载的接收功率可达到最大值, 源电阻的变化并不会影响系统的传输效率。而在负载功率分配上, 主要与线圈的互感值和负载有关, 互感值可通过改变水平偏移距离, 不需要改变线圈的规格, 因此实际操作也更加简单。

参考文献

- [1] 程杰, 王冬青, 温超. 低功率两线圈的磁共振无线电能传输研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2017, 32(1): 48-51.
- [2] 周俊巍, 吴军基, 张旭东, 等. 小功率磁耦合谐振式无线电能传输装置研究[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 175-180.
- [3] ATLURI S, GHOVANLOO M. A wideband power-efficient inductive wireless link for implantable microelectronic devices using multiple carriers[C]//2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2006.
- [4] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
- [5] 薛超. 磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [6] 贾媛媛. 谐振式无线电能传输系统磁耦合机构的分析及优化设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [7] 薛雪, 刘晓文, 刘成磊, 等. 基于谐振原理的无线电能传输实验研究[J]. 实验技术与管理, 2017, 36(5): 42-46, 53.
- [8] 焦宇峰, 李锐杰, 宋国兵. 磁耦合谐振无线传输系统传输特性的研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 112-120.
- [9] 季乐乐. 基于磁耦合谐振的电动汽车无线充电技术的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019.
- [10] 高琳琳. MCR-WPT 及其在电动汽车无线充电中的应用研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
- [11] 张建, 程志江, 陈星志, 等. 基于 CLC 型无线电能传输系统研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 59-62.
- [12] 方学林, 王重阳, 李洪谊. 非对称式磁耦合谐振无线能量传输系统[J]. 信息与控制, 2017, 46(2): 243-247.
- [13] 宋显锦, 刘国强, 李艳红, 等. 错位螺旋管线圈时谐电磁场的解析式[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 90-94.
- [14] 叶逢春. 基于多负载的无线电能传输技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [15] RAJU S, Wu Rongxiang, Chan Mansun, et al. Modeling of mutual inductance for planar inductors used in inductive link applications[C]//2012 IEEE International Conference

(下转第 126 页)

682-687.

[3] CHOI T, HWANG B U, KIM B Y, et al. Stretchable, transparent and stretch-unresponsive capacitive touch sensor array with selectively patterned silver nanowires/reduced graphene oxide electrodes[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(21): 18022-18030.

[4] VALASMA R, BOZO E, PITKNEN O, et al. Grid-type transparent conductive thin films of carbon nanotubes as capacitive touch sensors[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(30).

[5] HE Z, YUAN W. Adhesive, stretchable, and transparent organohydrogels for antifreezing, antidrying, and sensitive ionic skins[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 13(1): 1474-1485.

[6] LEE Y, KIM J, JANG B, et al. Graphene-based stretchable/wearable self-powered touch sensor[J]. *Nano Energy*, 2019, 62: 259-267.

[7] CATALDI P, DUSSONI S, CESERACCIU L, et al. Carbon nanofiber versus graphene-based stretchable capacitive touch sensors for artificial electronic skin[J]. *Advanced Science*, 2017, 5(2): 1870011.

[8] SCHWARTZ G, TEE C K, MEI J, et al. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1859.

[9] WANG X, CU Y, XIONG Z, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26

(9): 1336-1342.

[10] SUN Q, SEUNG W, KIM B J, et al. Active matrix electronic skin strain sensor based on piezopotential-powered graphene transistors[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(22): 3411-3417.

[11] HOU C, WANG H, ZHANG Q, et al. Highly conductive, flexible, and compressible all-graphene passive electronic skin for sensing human touch[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5018-5024.

[12] SARWAR M S, DOBASHI Y, PRESTON C, et al. Bend, stretch, and touch: locating a finger on an actively deformed transparent sensor array[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): 1-8.

[13] YE Z, WONG M, NG M T, et al. High precision active-matrix self-capacitive touch panel based on Fluorinated ZnO thin-film transistor[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(1): 22-29.

[14] LIU G Y, KONG D Y, HU S G, et al. Smart electronic skin having gesture recognition function by LSTM neural network[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(8): 1-5.

[15] 贾世海, 李沛玉, 胡守扬, 等. 基于 Qt 框架的 APV25 数据采集系统研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(6): 1041-1046.

(收稿日期: 2021-06-29)

作者简介:

艾凯旋(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 电路设计以及电子元器件 DPA 技术。



扫码下载电子文档

(上接第 121 页)

on *Electron Device and Solid State Circuit*, 2012.

[16] BATENIN V M, KAZARYAN M A, KARPUKHIN V T, et al. Design and physical features of inductive coaxial copper vapor lasers[J]. *Plasma Physics Reports*, 2016, 42(11): 1057-1065.

(收稿日期: 2021-07-16)

作者简介:

王迪晟(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电路与系统。

秦会斌(1961-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力工业、自动化技术、电信技术。

范翠红(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力工业、自动化技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所