

多负载磁耦合谐振式无线电能传输特性研究

针对多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统模块之间耦合性强,参数确定困难的问题,首先建立了系统电路模型,阐述了无线电能传输原理,分析了影响效率和功率的主要因素;然后,详细讨论径向距离和角度偏移对线圈之间互感的影响,进而推导出在同时存在轴向距离和径向距离的情况下,合适的角度偏移会增强线圈之间的互感;最后,通过建立非线性规划模型设立相关仿真实验,实验结果验证了理论的正确性。

王 静 刘润杰 申金媛/郑州大学信息工程学院



王 静/硕士研究生

关键词/Keywords

多负载 ·
功率 ·
效率 ·
径向距离 ·
角度偏移 ·
互感 ·

磁耦合谐振式无线充电技术是当接收装置和发射装置调到相同频率时,或者在一个特定的频率上产生共振时,就可以传递能量^[1-2]。电能谐振技术不仅可以实现有目的的高效传递,而且可以实现中程距离,打破了对发射端距离上的依赖。

当今,磁耦合谐振式无线电能传输的研究大多固定在“单单”模式,随着电子产品的增多,对“单多”电能传输模式的需求日益增加。文献[3]针对旋转机械嵌入式监控功能系统,对一对多能量传输模式进行了研究,将多个LED点亮,但是系统发射端过于庞大,而且未考虑效率问题;文献[4]对两个负载线圈的情况进行了研究,但是均考虑的是同轴情况,未考虑线圈的“方向性”问题;文献[5]针对三种耦合情况,只对“单单”传输模式的角度偏移进行了分析。本文首先对“单多”能量传输模式的系统模型、效率和功率进行分析,然后在文献[5]的基础上,研究“单多”传输模式中,大发射小接收线圈情况下,

径向偏移和角度偏移对无线电能传输的影响,全面地考虑了方向性问题;最后,通过相关仿真实验验证了理论的正确性,并提出了系统整体设计的方案。

SS型多负载系统电路模型

1. 电路模型

磁耦合谐振式无线电能传输系统,是利用两个频率相同的电磁系统,通过强磁耦合,产生电磁波的“共鸣”,实现能量的传递,而对其他频率的物体基本无影响。

本文为了简化分析,仅研究其核心部件,发射线圈和接收线圈的电路模型,采用环形线圈,串联谐振,如图1所示。此处,仅研究两个接收线圈的情况,对于多个接收端时,可以以此类推。其中, V_s 为经过逆变的高频交流电源; L_1 为发射线圈的电感; R_1 为发射线圈的内阻; C_1 为串联的谐振电容; L_2 和 L_3 为两个接收线圈的电感; R_2 、 R_3 、 C_2 和 C_3 分别为其线圈内阻及串联的补偿电容; RL_2 和 RL_3 为线圈的负载电阻。

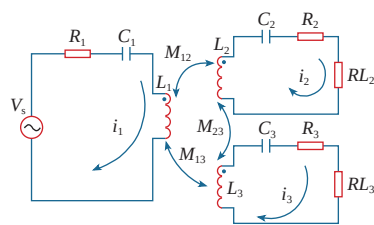


图1 两负载时谐振式无线电能传输电路模型

设发射端电源的频率为 f ,角频率为 ω ,发射线圈和第一个接收线圈的互感为 M_{12} ,和第二个接收线圈的互感为 M_{13} ,两个接收线圈之间的互感为 M_{23} ,一般

河南省郑州市科技创新资金项目(122PCXJJ771)。

情况下, SS型系统的参数应满足 $\omega L_i = 1/\omega C_i (i = 1, 2, 3)$, 令

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

$$Z_i = R_i + RL_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} \quad (i = 2, 3) \quad (2)$$

由电路原理可得

$$\begin{cases} V_s = Z_1 i_1 - j\omega M_{12} i_2 - j\omega M_{13} i_3 \\ 0 = Z_2 i_2 - j\omega M_{12} i_1 + j\omega M_{23} i_3 \\ 0 = Z_3 i_3 - j\omega M_{13} i_1 + j\omega M_{23} i_2 \end{cases} \quad (3)$$

则系统的效率和功率分别为

$$\eta = \frac{i_2^2 RL_2 + i_3^2 RL_3}{i_1^2 Z_1 + i_2^2 Z_2 + i_3^2 Z_3} \quad (4)$$

$$P_L = i_2^2 RL_2 + i_3^2 RL_3 \quad (5)$$

其中

$$i_2 = \frac{\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{12} Z_3}{Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2} i_1 \quad (6)$$

$$i_3 = \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} + j\omega M_{13} Z_2}{Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2} i_1 \quad (7)$$

$$i_1 = \frac{V_s}{Z_1 + \frac{(\omega M_{12})^2 Z_3 + (\omega M_{13})^2 Z_2 - j2\omega^3 M_{12} M_{13} M_{23}}{Z_2 Z_3 + (\omega M_{23})^2}} \quad (8)$$

2. 系统效率和功率分析

一般情况下, 系统的频率和负载大小是不变的, 由式(4)和式(5)可知, 系统的效率和功率主要是由每个线圈的电流决定的, 由式(6)~式(8)可知, 线圈的电流又受到收发线圈之间的互感、接收线圈之间的互感以及线圈自身内阻的影响。根据以上关系, 现固定线圈的内阻, 设发射线圈同两个接收线圈之间的互感 $M_{12} = M_{13} = M$, 做出系统效率和功率随其收发线圈互感及两个接收线圈互感的曲面图, 如图2所示。

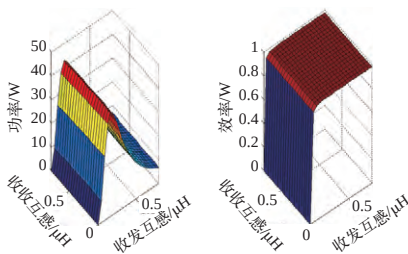


图2 系统的功率和效率随 M 和 M_{23} 的关系图

由图2可知, 发射和接收线圈之间的互感对系统的功率和效率起主要作用, 系统的效率随发射和接收线圈之间的互感逐渐上升, 而系统的功率随发射和接收线圈之间的互感先上升后下降, 且系统功率的峰值点并不是效率的最大点。

系统的方向性问题

图3为空间任意位置两个单匝线圈之间的互感, 其计算公式为

$$M_{rt} = \frac{\mu_0 Rr}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \theta_r \sin \theta_t + \cos \alpha \cos \theta_r \cos \theta_t}{d_{rt}} d\theta_r d\theta_t \quad (9)$$

$$d_{rt} = \left[(R \cos \theta_t - r \cos \theta_r)^2 + (R \sin \theta_t - r_0 - r \sin \theta_r \cos \alpha)^2 + (d_0 - r \sin \theta_r \sin \alpha)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, R 和 r 分别为两个线圈的半径; θ_r 和 θ_t 为收发线圈参数方程的参数; d_{rt} 为两个线圈之间的距离。当两个线圈的匝数分别为 N_1 和 N_2 的时候, 总互感为 $M = N_1 N_2 M_{rt}$ 。

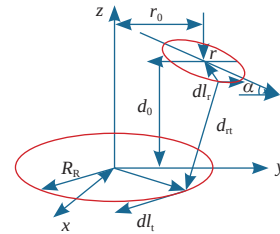


图3 空间任意位置两圆环线圈之间的互感

由文献[6]可知, 对于单个接收线圈, 收发线圈应该同轴放置, 且不应该存在径向和角度偏移, 以此保证收发线圈之间的互感最大; 而对于多负载系统, 以两个接收线圈为例, 由于实际应用中很多情况并不允许接收线圈在发射线圈两侧同轴放置, 而两个接收线圈均与发射线圈同侧同轴的时候, 会因为两个收发线圈一前一后时各自同发射线圈之间的互感大小差别过大或者相距很近的时候两个接收线圈之间的互感过大而影响系统的效率和功率, 因此, 本文研究其同侧对称放置, 假设两个接收线圈的参数完全相同, 保持收发线圈的轴向距离不变, 则收发线圈的互感随径向距离和角

度的变化曲线如图4所示,两个接收线圈之间的互感随径向距离和角度的变化曲线如图5所示。

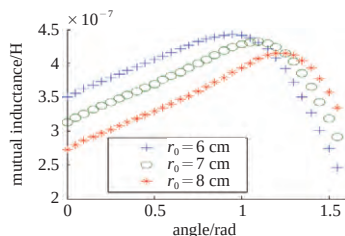


图4 收发线圈互感随径向距离与角度的变化曲线

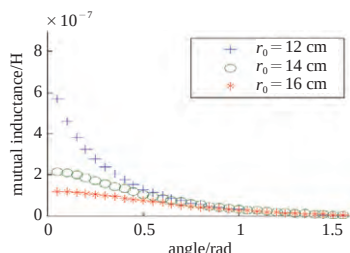


图5 接收线圈之间互感随径向距离与角度的变化曲线

从图4可以看出,当收发线圈之间同时存在轴向距离和径向距离的时候,合适的角度偏移不但不会减弱互感,反而可以增强收发线圈之间的耦合,使互感更大,但是随着径向距离的增大,收发线圈之间的互感最大值呈逐渐减小的趋势,即接收线圈存在一个“最佳方向”,因此,本文以接收线圈的半径作为接收端的径向偏移,以保证收发线圈之间互感的最大化;由图5可知,由于对称放置,当接收端的两个线圈只存在径向距离和角度的时候,互感随两个线圈之间的角度增加而下降,当两个线圈成0.5弧度角的时候,接收线圈之间的互感已很小且随轴向距离的变化下降的很缓慢。综合图4和图5可以得出,多负载时,使接收线圈存在一定的角度和径向偏移,即当接收线圈存在一定的方向时,有利于能量更有效地传输,但是径向距离和角度并不是越大越好,完全避免接收线圈之间的互感并不是最佳策略,而是存在一个搭配的最佳值。

仿真实验验证

1. 线圈内阻

对于环形线圈,其损耗电阻 R_{11} 和辐射电阻 R_{rad}

分别为

$$R_{11} = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \frac{Nr}{a} \quad (11)$$

$$R_{rad} = 320\pi^4 N^4 \left(\frac{\pi r^2}{\lambda^2}\right)^2 \quad (12)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$; ω 为谐振角频率; σ 为铜的电导率; N 为线圈匝数; r 为线圈半径; a 为铜线线径; λ 为电磁波波长。

设 R_{ii} 和 R_{radi} 分别为各个收发线圈的损耗电阻和辐射电阻,则每个线圈的内阻 $R_i = R_{ii} + R_{radi}$ 。

因此,结合互感的计算公式可以看出,线圈的半径和匝数越大,线圈之间的互感越强,但是线圈的内阻也越大,即线圈自身的能量损耗增强,所以选择一个线圈匝数和半径的最佳匹配值,也是非常重要的。

2. 效率最高目标及仿真实验

由于影响系统功率和效率的因素较多,且接收线圈与发射线圈同轴的时候并无角度和径向偏移,为了得到系统仿真的参数,本文先利用人工蜂群算法找出多负载时接收端在存在轴向距离、径向距离和角度偏移时,系统的全部最佳参数,再设立相关仿真实验。首先,以接收端的功率要求和收发端元器件的安全阈值为约束条件,通过把影响线圈互感和内阻的因素代入,以系统的效率为目标,建立系统的非线性规划模型,如式(13)所示

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && -\eta \\ & \text{Subject To} && \begin{cases} i_2^2 RL_2 + i_3^2 RL_3 \geq G \\ i_1 < i_{\max 1} \\ i_2 < i_{\max 2} \\ i_3 < i_{\max 3} \\ R > r \\ r_0 = r \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, G 为接收端要满足的功率; $i_{\max 1}$ 、 $i_{\max 2}$ 和 $i_{\max 3}$ 分别为收发端需要满足的电流的安全阈值。 $R > r$ 是满足接收端小型化的要求, $r_0 = r$ 是使接收线圈的径向距离等于其半径,保证收发线圈之间的互感最大。

利用人工蜂群算法自动寻优,在满足接收端传输距离和功率要求的前提下最大化效率,即通

过自动寻找参数，使其在满足接收端的最小功率50 W，最低传输距离8 cm的情况下，最大化效率，其中 $i_{\max1}=15\text{ A}$ ， $i_{\max2}=i_{\max3}=4\text{ A}$ ， $RL_2=30\ \Omega$ ， $RL_3=10\ \Omega$ ，寻找到的最佳参数如表1所示。

本文利用上述人工蜂群算法寻找到的最优参数，分别研究多负载时，接收线圈处于发射线圈

表1 最佳参数表

轴向距离	角度偏移	发射线圈	接收线圈	发射线圈	接收线圈
d/cm	$^\circ/\text{rad}$	半径 R/m	半径 r/m	匝数 N	匝数 N
13.0	0.51	0.19	0.07	2	14

同侧的时候，各种情况下的系统效率，结果如表2所示。

表2 接收线圈都在发射线圈同侧时仿真结果（都存在轴向距离）

接收端线圈摆放情况（接收线圈均在发射线圈同侧）	发射线圈 电流 i_1/A	接收线圈1 电流 i_2/A	接收线圈2 电流 i_3/A	接收端 总功率 G/W	系统效率 $\eta\%$
两个接收线圈均与发射线圈同轴，且同位置	31.16	0.64	0.69	17.05	8.65
两个接收线圈均与发射线圈同轴，一前一后	22.47	1.08	1.64	61.88	39.33
一个接收线圈与发射线圈同轴，另外一个不存在角度偏移	13.45	1.26	2.01	88.03	70.90
一个接收线圈与发射线圈同轴，另外一个存在角度和径向偏移	5.78	0.99	2.16	76.06	89.59
两个接收线圈均存在角度和径向偏移	4.39	0.75	2.15	63.10	91.27

由表2可知，当两个接收线圈与发射线圈同轴，同位置及一前一后时发射端的电流均过大，超过了安全阈值，且效率较低。当两个接收线圈均存在径向距离和角度偏移时系统的效率最大，即系统存在一个“最佳方向”，验证了上述理论分析。但是此时系统的效率虽然最大，却牺牲了系统的功率，不过仍能满足系统的额定功率50 W的要求。由于充电电流大，系统也会产生额外的能量甚至损坏系统，如手机充电的时候会发烫，因此多负载时，在快速充电的场合，可以使一个接收线圈与发射线圈同轴，另外的接收线圈存在角度和径向偏移，以达到效率和功率的最佳折中；在不要求充电速率和不希望产生过多能量以免不安全的场合，应该使接收端均存在一定的径向和角度偏移，以便最大化的节省能量。

结束语

本文分析了多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统的特点，阐述了影响效率和功率的主要因素，并详细讨论了接收线圈的径向和角度偏移对系统的影响，建立了系统模型，以人工蜂群算法为基础，自动寻找最优参数，对电能传输系统进行设计，并对接收线圈均处于发射线圈同侧时的情况进行了仿真分析。仿真实验结果表明了理论的正确性，验证了多负载时无线电能传输中的方向性问题。所设计的参数能保证能量高效地

传输，且均在系统的额定要求之内，在实际应用中具有一定的指导意义，有助于系统的实际工程设计。

参考文献

[1] Sample A P, Meyer D A, Smith J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2) : 544-554.

[2] 傅文珍, 张波, 丘东元, 等. 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) : 21-26.

[3] 王磊, 杨拥民, 钱彦岭. 基于磁耦合谐振的旋转机械嵌入式监控供能技术研究 [J]. 工程设计学报, 2011 (5) : 391-395, 400.

[4] 张波, 张青. 两个负载接收线圈的谐振耦合无线输电系统特性分析 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2012 (10) : 152-158.

[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.

[6] 李杨, 黄平. 体内微机电系统的三维无线能量传输装置的设计和实验 [J]. 现代制造工程, 2012 (1) : 126-130.

(收稿日期: 2014-12-10) EA