

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802376

存在金属障碍物无线电能传输特性分析*

刘伟 王贇

(广东工业大学华立学院 广州 511325)

摘要: 无线电能传输技术是特种机器人实现轻量化可持续工作的关键技术。通过磁耦合谐振式无线充电时,须考虑金属障碍物对无线电能传输系统影响。将金属涡流效应等效互感耦合电路,通过耦合电路理论对传输系统建模。推导出电压增益系数传输方程,以及金属障碍物对传输系统的能量损耗表达式。随着耦合系数的变化传输系统依然存在频率分裂,临界耦合、过耦合和欠耦合情况。在给定传输系统参数下,临界耦合系数 $K_c = 1.54 \times 10^{-4}$,当存在存在金属障碍物时, $K'_c = 1.09 \times 10^{-2}$ 。金属障碍物导致无线传输系统电压增益减少,谐振频率偏移,耦合系数增大,耦合性能下降。通过仿真得到该系统存在金属障碍情况下输出电压的变化。

关键词: 无线电能传输;磁耦合;金属障碍物;电压增益系数;仿真

中图分类号: TM133 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Analysis of wireless power transmission characteristics with metal obstacles

Liu Wei Wang Yun

(1.Huali College Guangdong University of Technology,Guangzhou 511325,China)

Abstract: Wireless power transmission technology is the key technology that enables special robots to achieve lightweight sustainable work. The magnetic coupling resonant wireless charging, must consider the impact of metal obstacles on the transmission system. The metal eddy current effect is equivalent to mutual inductance coupling circuit, and the transmission system is modeled by coupling circuit theory. The transmission equation of voltage gain coefficient and the expression of energy loss of metal obstacles to transmission system are derived. With the change of coupling coefficient, the transmission system still has frequency splitting, critical coupling, over-coupling and under-coupling. Given the parameters of the transmission system, the critical coupling coefficient $K_c = 1.54 \times 10^{-4}$. When there are metal obstacles, $K'_c = 1.09 \times 10^{-2}$, which lead to the reduction of voltage gain, the shift of resonance frequency, the increase of coupling coefficient and the decrease of coupling performance in wireless transmission system. The change of output voltage in the presence of metal barrier is obtained by simulation.

Keywords: wireless power transfer; magnetically couple; metal barriers; voltage gain coefficient; simulation

0 引言

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)是机器人实现在特种环境下持续地、轻量化、无线限制工作关键技术。2017年7月在哈弗大学从事研究微型机器人、仿生机器人的陈宇峰研发出了一款自重只有175 mg的扑翼机器人和一款1.6 g的四足机器人。这种机器人需要持续地获得能量的供给,然而在机器人安装化学电池通过线缆供电是不符合实际。所以这类机器人想要投入侦察、救援等方面的实际应用,还欠缺一个稳定的、轻盈的、功率大的能量供给装置^[1-2]。文献[3]提出磁耦合谐振式无线供电方式,通过改进的遗传算法对传输系统谐振频率、耦合系

数、线圈匝数、线圈半径、电容、互感等诸多因数进行优化,为胶囊机器人无线能量传输系统样机能效达到86.6 mV,传输效率达到8.01%。

接触式的无线电能传输(WPT)技术有多种,比如激光、微波、超声波、电磁感应等。磁耦合谐振式无线电能传输是基于电磁波辐射近场范围。该区域以磁场为主基本不辐射能量,被称为非辐射区域^[4-6]。通过电磁波辐射近场磁场频率与接收装置产生谐振实现传输。比如文献[7]通过电路理论建模分析提出无线电能传输中因为电路、环境等因素影响,谐振频率会发生偏移,在传输中处于过耦合状态时存在频率分裂现象,影响最高效率点和功率点的一致性。

收稿日期:2018-11

* 基金项目:2018年校级科研项目(HLKY-2018-ZK-04)、2017年校级科研项目(HLKY-2017-ZK-01)资助

文献阐明了无线电能传输系统传输的特性。文献[8-9]利用二端口理论分析了 LCL 和 TS 型无线传输谐振电路的功率与效率特点,在发射端和接收端加入调谐网络后,通过仿真和实验证明了 LCL 和 TS 型谐振网络具有电压放大特性,系统输出功率远高于传统的 SS 型、SP 型传输功率,对系统功率输出具有补偿作用。然而在实际应用中,因为高频电力的输入必须考虑电磁波的辐射对非工作区域的影响和优化,所以文献[10-12]分析了为了屏蔽电磁波的辐射对环境的影响,在线圈外侧加入屏蔽层,但是影响屏蔽层对传输系统参数,使传输效率降低,为此文献中提出了改进措施;此外,目前在医学上、特种机器人(如管道机器人、救援机器人等)充电必须考虑传输中间障碍物的存在对传输系统的影响和优化问题,文献[11]通过实验和软件仿真分析了金属屏蔽层在线圈两侧和中间时对系统传输功率和效率的影响。

论文分析了无线传输中间存在金属障碍物时系统参数变化引起传输性能改变。利用互感耦合电路理论将金属涡流产生效应采用等效电路处理方法,通过数学建模分析,推导出系统传输方程,从方程分析了传输系统电压增益、谐振频率变化。通过仿真得到了输出电压的变化,与传输方程分析一致,提出了通过调节谐振电路电容方式优化系统参数。

1 传输系统等效电路模型与传输方程计算

谐振式无线电能传输系统主要由以下四部分构成:电源模块、谐振器模块、发射模块以及接收模块。该系统将天线设计成多匝线圈,提高线圈的互感系数,对两个线圈的耦合效率和传输距离有积极影响。在对负载的分析中,分为电阻模型、电池模型、电机模型等不同负载模型^[13]。根据以上分析设计出磁耦合谐振式无线电能传输系统结构图其等效电路模型如图 1 所示。

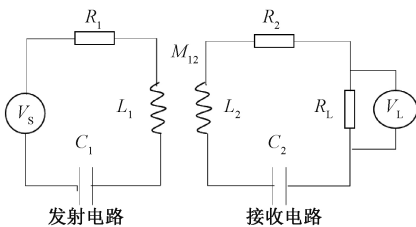


图 1 无线电能传输系统等效电路

根据图 1 等效电路可以列出基尔霍夫定律(KVL)传输方程如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1 & -j\omega M_{12} \\ -j\omega M_{12} & R_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \\ v_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

在谐振状态下,推导出无线传输电路电压增益如公式(2)所示,为了与仿真结果对比,本文主要研究传输系统电压增益与发射频率 ω 和耦合系数 $k = M_{xy} / \sqrt{L_x L_y}$ 的关

系,因为电压增益系数 s_{21} 与系统传输功率有直接关系。

$$s_{21} = \frac{v_i}{v_s} = \frac{\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} R_L}{Z_1(Z_2 + R_L) + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2} \quad (2)$$

式中: $Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1$, $Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2$, $Z' = \dot{U} \cdot \dot{I}$, 当系统处于谐振状态时,阻抗虚部为零,得到公式(3)^[14]

$$S'_{21} = \frac{v_i}{v_s} = \frac{\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} R_L}{R_1(R_2 + R_L) + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2} \quad (3)$$

在无线电能实际传输中,两线圈间会存在障碍物,本文主要讨论存在金属障碍物情况如图 2 所示。由于发射线圈依靠高频电流驱动产生电磁波,根据电磁波辐射原理在一个波长距离范围内属于非辐射场(近场),接收线圈可以通过耦合谐振高效率的接收能量。发射线圈产生的交变磁场与金属板发生电磁感应产生涡流,部分能量会以涡流的形式被损耗^[15]。根据楞次定律,由金属板涡流形成的电磁场阻碍原磁场的变化,引起发射和接收线圈阻抗、自感等参数的变化,导致整个电路能量损耗改变,如图 2 所示。

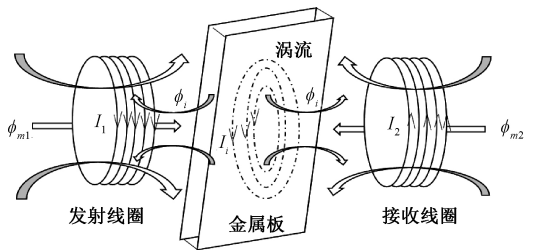


图 2 金属板位于谐振器中间

根据互感耦合电路原理,可以将金属板上感应出的涡流等效为一个具有内阻的短路环电流,与发射线圈形成耦合;同理,金属板上的涡流等效相同的电路与接收线圈形成耦合,等效电路如图 3 所示。

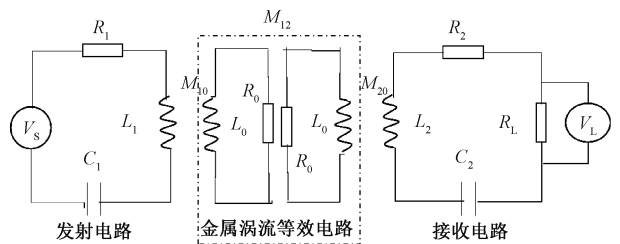


图 3 金属板产生涡流等效电路模型

根据等效电路图 3 由 KVL 定律列出电路方程如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} R_0 + j\omega L_0 & j\omega M_{10} & 0 & 0 \\ j\omega M_{10} & R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & j\omega M' & 0 \\ 0 & j\omega M' & R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} & j\omega M_{20} \\ 0 & 0 & j\omega M_{20} & R_0 + j\omega L_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可以解得,在两传输线圈中间放置金属障碍物的情况。系统输出电压增益变为:

$$s_{21} = \frac{v_1}{v_3} = \frac{\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2} R_L}{Z'_1 (Z'_2 + R_L) + \omega^2 k_{12}^2 L_1 L_2} \quad (5)$$

Z' 表示整个电路的等效阻抗,可以解得该情况下系统阻抗变化为:

$$Z'_1 = \left(R_1 + \frac{\omega^2 M_{10}}{(R_0 + \omega L_0)^2} R_0 \right) + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 M_{10}^2}{(R_0 + \omega L_0)^2 L_0} \right) + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (6)$$

$$Z'_2 = \left(R_2 + \frac{\omega^2 M_{20}}{(R_0 + \omega L_0)^2} R_0 \right) + j\omega \left(L_2 - \frac{\omega^2 M_{20}^2}{(R_0 + \omega L_0)^2 L_0} \right) + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (7)$$

无线能量传输过程中,发射和接收线圈变化的电磁场导致金属障碍物产生涡流,引起发射和接收电路中的阻抗变化。经过计算可以得到变化后的阻抗如式(6)、(7)。从式中可知,变化后的阻抗 Z' 实部变大,虚部变小,即意味着传输能量损耗增大。当系统处于谐振状态时,发射电路和接收电路阻抗虚部为零,系统损耗等于(8)式和(9)式。

$$P_{1耗} = I_1^2 |Z'_1| = I_1^2 \frac{\omega^2 M_{10}}{(R_0 + \omega L_0)^2} R_0 \quad (8)$$

$$P_{2耗} = I_2^2 |Z'_2| = I_2^2 \frac{\omega^2 M_{20}}{(R_0 + \omega L_0)^2} R_0 \quad (9)$$

以上两式是因存在金属障碍物产生涡流效应而损耗的能量表达式。从式中可以分析因涡流效应造成的损耗与金属板等效电阻 R_0 、金属板的互感系数 M_{10} 、以及电流和发射频率 ω 有关。让(5)式对 k_{12} 求导,并且令它等于零,在谐振状态下,可以解得当 k_c 满足(10)式时,系统处于临界耦合状态,此时系统输出电压增益取极值。即代入表 1 参数,在不存在障碍物时,即 $K_c = 1.54 \times 10^{-4}$; 当存在存在障碍物时, $K_c = 1.09 \times 10^{-2}$, 耦合系数增大。

$$k_c = \frac{\omega}{L_1 L_2 [L_1 L_2 R_1 (R_2 + R_L)]^{1/2}} \quad (10)$$

2 传输方程分析与仿真

根据输出电压增益公式(5)~(7),带入表 1 中电路参数数值,可得到电压增益与发射频率、耦合系数关系图如图 4 所示。

从图 4 中可以分析出引入金属障碍物的无线电能传输系统依然存在文献[11]中提到的频率分裂现象,频率分裂是指谐振无线电能传输系统在耦合系数较大时,最大输出功率对应频率不止一个,如图 4 可知在大于临界耦合系统处于过耦合状态时,最大输出电压对应有两个频率。电压

表 1 电路参数数值

参数	数值
R_{source}, R_{Load}	10 Ω
L_1, L_2	0.92 μH
C_1, C_2	235 pF
R_1, R_2	0.1 Ω
K_1, K_2	0.3
f_0	1 MHz

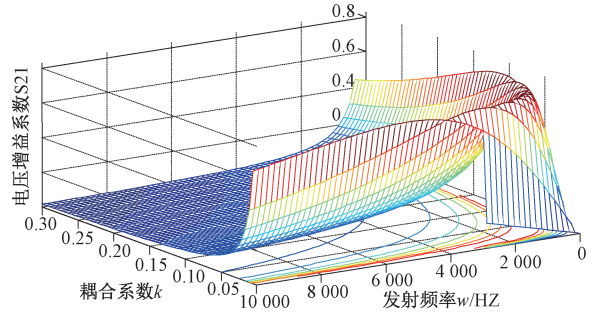


图 4 输出电压增益系数与耦合系数、发射频率关系

增益系数 S_{21} 与发射频率(ω)和耦合系数(k)的关系描述如下:当耦合系数 k 大于某个值(k_c)时,产生频率分裂,随着耦合系数 K 值的减少,频率分裂也减少并收敛在谐振频率处,而 k_c 值称之为临界耦合;当 $k > k_c$ 时,虽然存在频率分裂,但不管在哪个谐振频率,系统输出电压增益系数都能达到最大值,即最大传输效率,我们把这个情况成为过耦合;当 $k < k_c$ 时,我们称之为欠耦合,在欠耦合范围系统输出电压迅速下降,传输效率迅速下降。

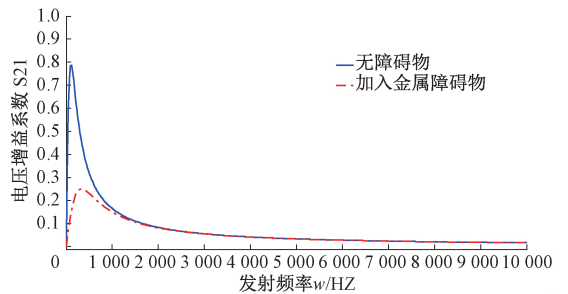


图 5 系统输出电压增益系数与发射频率关系

从图 5 中分析可知,在相同的发射频率情况下,加入金属障碍物系统电压增益系数减少,根据谐振频率公式 $f_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$,引入金属板后,线圈中的自感系数减少,谐振频率向右偏移。系统传输特性对谐振频率十分敏感,谐振频率的变化将会影响传输系统最佳传输效率和输出功率,对负载电压产生直接影响。为了补偿这种影响,可以调谐谐振电路的电容,以确保电路处于谐振状态。

图 6 中,两曲线的峰值对应耦合系数分别是两种情况

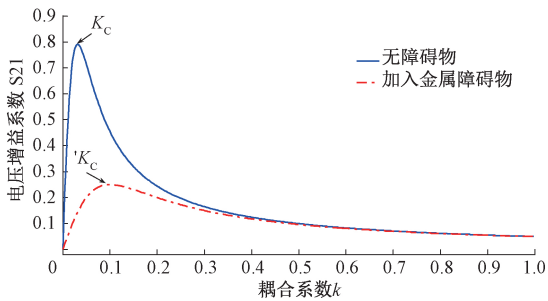


图6 系统输出电压增益系数与耦合系数关系

下的临界耦合点 k_c 和 k'_c 。分析可得,耦合系数相同(即参数相同,传输距离相同)的传输系统引入金属障碍物后,电压增益系数明显减小,即系统输出功率和传输效率相应减少。如图6所示,两线圈自感系数减少,根据 $k = M_{xy} / \sqrt{L_x L_y}$, 临界耦合系数 k_c 向右偏移。

以上分析表明,谐振式无线电能传输系统对工作频率要求比较高,必须满足发射线圈频率与接收线圈固有频率一致,才能使系统处于谐振状态,无线电能传输才能实现最佳传输。但是,因为金属障碍物的存在,在传输过程中存在特有的传输特性,比如频率分裂现象、欠耦合等。导致系统出现失谐现象,改变了系统的传输效率和输出功率的一致性^[16]。

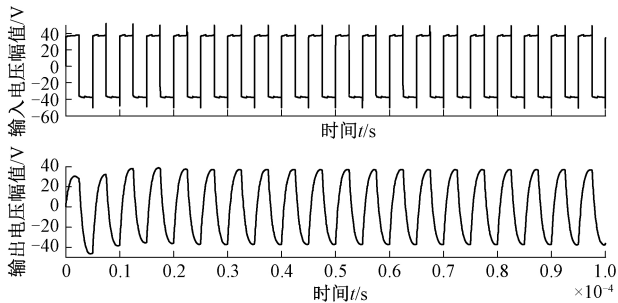


图7 无线传输系统输入电压与输出电压仿真

从MATLAB仿真结果可以看出,发射线圈电路输入电压等于50V,经过谐振电路和线圈间的耦合输出给负载的电压约为40V。考虑电路系统损耗,包括电磁波在发射器和接收器之间空气传播,两线圈的耦合属于松耦合,能量损耗较大,导致输出电压减低。仿真结果与传输方程推导结果一致。

3 结 论

本文分析了特种机器人实现轻量化采用磁耦合谐振式非接触的无线电能传输方式。加入金属障碍物后,磁耦合谐振式无线电能传输系统的电压增益系数、谐振频率、输出功率、传输效率有影响。将金属产生的涡流效应用互感耦合电路等效处理。论文分析了引入金属障碍物的磁耦合谐振式无线电能传输系统的电压增益系数、谐振频率、输出

功率、传输效率影响。将金属产生的涡流效应用互感电路等效处理。利用互感耦合电路理论对系统进行建模分析,推导出系统传输方程。计算了加入金属障碍物后发射和接收等效电路阻抗,从中分析出阻抗实部的增大导致电路损耗增大。从图4可知,传输装置电压增益系数与发射频率、耦合系数关系。即在 $k \geq k_c$ 处,系统工作在临界耦合和过耦合区域,负载均能接收到电压最大值。金属障碍物使系统自感系数减少,导致系统谐振频率的偏移,从图5中可以分析出,谐振频率发生右移。为了稳定系统谐振频率本文提出调整调谐电容以稳定系统谐振频率的方法。从图6中可分析出受金属板的影响,系统耦合系数降低,电压增益系数减少,临界耦合点发生右移。本文对工作在金属内部的设备采用磁耦合谐振式能量供给方式进行研究,具有一定的参考价值,今后还可以采用不同的原理方法对传输系统进行传输特性分析。

参考文献

- [1] 李旻,刘丹,刘修泉.微机器人胶囊能量无线传输系统的优化设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(11):78-83.
- [2] 赵争鸣,刘方,陈凯楠.电动汽车无线充电技术研究综述[J].电工技术学报,2016,31(20):30-37.
- [3] 黄学良,王维,谭林林.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J].电力系统自动化,2017,41(2):2-14.
- [4] 胡楚锋,郭丽芳,李南京,等.球面多探头天线近场测试系统校准方法研究[J].仪器仪表学报,2017,(5):1061-1070.
- [5] 翟渊,孙跃,戴欣,等.磁共振模式无线电能传输系统建模与分析[J].中国电机工程学报,2012,33(3):1-13.
- [6] SAMPLE A P, MAYER D T, 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.
- [7] 李阳,张雅希,杨庆新,等.磁耦合谐振式无线电能系统最大功率效率点分析与实验验证[J].电工技术学报,2016,31(2):18-24.
- [8] LIU W, WANG Y, LU X H, et al. An analysis and optimization on circuit characteristics of non-contact wireless charging system for electric vehicles with the TS resonant network [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018, (382): 032043. doi:10.1088/1757-899X/382/3/032043.
- [9] 孙跃.LCL型非接触电能系统电路特性分析及参数配置方法[J].电力系统自动化,2016,40(8):103-107.
- [10] LU W G, LI H R, CHEN W M, ET AL. Numerical analysis of magnetic-shielding effectiveness for

- magnetic resonant wireless power transfersystem [J]. CHIN.PHYS.LETT,2017,34(8):08881-1-4.
- [11] 陈琛 黄学良 孙文慧 谭林林 强浩 金属障碍物对磁耦合谐振无线电能传输系统的影响[J].电工技术学报,2014,29(9):22-26.
- [12] 刘伟,陈俞强,王赞,加入电磁屏蔽层的磁耦合谐振式无线电能传输系统优化[J].湘潭大学自然科学学报,2018,40(2):54-57.
- [13] ZHU C, LIU K, YU C, et al. Simmulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonances[C].Proc.IEEE VPPC, Sep,2008:1-4.
- [14] 傅义诊,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.
- [15] 陈琛,黄学良,孙文慧,等.金属障碍物对磁耦合谐振无线电能传输系统的影响[J].2014,29(9):22-25.
- [16] 胡昆明,李高升,王晖.天线方向性测量系统设计与实现[J].电子测量技术,2012,35(1):112-115.

作者简介

刘伟,讲师,硕士,主要从事无线电能传输方面研究。

E-mail:liuweihlxy@163.com

王赞,讲师,硕士,主要从事电气工程及其自动化方面研究。

E-mail:269531756@qq.com