磁耦合共振单发双收系统传输特性分析

李炜昕,张合,李长生,丁立波

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室 南京 210094)

摘要 针对电器设备、武器系统等应用中存在一个能量发送端同时为多个负载非接触供能的 情形,基于磁耦合共振的无线能量传输原理,建立了磁耦合共振"单发双收"理论模型,求解出 "单发双收"系统输出总功率的数学计算公式。理论分析发现"单发双收"系统传输特性与"单 发单收"性质类似,即当发送线圈和接收线圈距离的耦合系数较大时,系统存在共振频率分叉现 象,并随收发端距离的增大,频率分叉现象逐渐消失。当系统存在两个接收端时,共振频率随径 向距离的变化而变化,并且两接收端耦合越强,偏移现象越明显。利用 OrCAD 仿真软件和实验 手段对系统传输特性进行仿真分析和实验研究,结果显示,实验、仿真结果与理论分析结论相吻 合,文中所建磁耦合共振"单发双收"理论模型能准确描述系统传输特性。

关键词:磁耦合共振 多负载 频率分叉 无线能量传输

中图分类号: TM724; TN919

Analysis of Transmission Characteristics of Single-Emission and Double-Receiving System Based on Magnetic Resonant Coupling

Li Weixin , Zhang He, Li Changsheng, Ding Libo

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory Nanjing University of Science and Technology Nanjing 210094 China)

Abstract In order to study on the situation that there is an energy sender to provide energy for multi-loads in electrical equipment and weapons systems applications, the circuit model of wireless power transmission system is established based on the theory of magnetic resonant coupling, and the expression of transmission power and transmission efficiency are derived. Theoretical analysis shows that the transmission characteristics of "single-emission and double-receiving system" is similar to the nature of "single-emission and single receiving system". Resonance frequency bifurcation was existed in the system when the coupling coefficient between the transmitting and receiving coils is large, and frequency bifurcation phenomena gradually disappears with the distance of the two coils increasing. The resonance frequency is varied with the changes in the radial distance when there are two receiving coils, and the more offset, the more obvious. The transmission characteristics of this system are researched by OrCAD simulation software and experiments. The results show that theoretical analysis is consistent with simulation analysis and experiments, and the theoretical model which is built in the paper can accurately describe the transmission characteristics of the system.

Keywords: Magnetic resonance coupling, multi-loads, frequency bifurcation, wireless power transmission

1 引言

当今大多数仪器设备都是采用接触的方式获得 所需的信息和能量。在能量收发端之间存在相对运 动,或者在恶劣的工作环境中,由于传统的电能直 接接触传输技术存在摩擦、电火花和接收端部署不 灵活等问题,影响了电气设备的用电安全和应用场 合(人工器官、植入装置、胶囊内窥镜等)^[1-3]。因 此,研究其能量的供给技术很有必要。

随着无线能量传输技术的发展,非接触式供电 设备已经逐渐走进人们的生活,在很多场合具有接 触式电能传输不可比拟的优势。该技术在航空航天、 电动车辆、武器和侦察系统、人工器官及电器设备 等诸多方面有广泛的应用前景^[4]。但是,由于传统 的电磁感应技术基于变压器松耦合作用机理,传输 系统存在初、次级耦合线圈的有效工作距离近、线 圈匝数多及传输效率低等缺点,在一些特殊的场合 (耦合距离较远、铁磁环境较复杂等),无法满足供 电装置与设备之间可靠的能量和信息的传输。因此, 迫切需要能量和信息可在中远距离进行高效、可靠 的传输。

2007年, MIT 的研究团队利用磁耦合共振技术 成功点亮了 2m 外的 60W 灯泡,标志着大距离能量 无线传输技术的开始,并成为学术界研究的热点。 但因该技术出现时间较短,目前还主要集中在静态 工作条件下的"单发单收"的磁耦合共振能量传输 技术研究。事实上,在实际应用中会遇到一个能量 发送端能同时为两个或多个接收负载供能的情况。 国内外学者们针对多负载系统进行了初步研究,并 取得了一定的进展。文献[5]用实验手段将一个负载 推广到两个小负载线圈,但未在理论上进行深入分 析; 文献[6]对多个共振线圈进行了研究, 证明了中 继器可以增加传输距离,但是没有考虑拾取线圈与 共振线圈的相对位置; 文献[7-10]研究了与发送 端共轴的多个负载在不同位置的传输特性,但是 所建模型中忽略了驱动线圈和拾取线圈对共振线 圈的影响。本文基于磁耦合共振原理, 对应用更为 普遍的多个负载位于同一平面时的"单发双收"系 统进行更为精确的理论建模,通过仿真分析和实验 验证了所建模型的正确性,为工程化设计提供理论 指导。

2 单发双收磁耦合谐振系统模型与分析

2.1 系统电路模型

电磁共振耦合无线能量传输系统中发送线圈形成的磁场具有一定的方向性和区域性,当多个与能量发送端具有相同固有频率的能量接收端处于发送 线圈形成的磁场有效范围内时,即可实现一个能量 发送端为多个用电负载同时供能的状况。

"单发双收"情况下要考虑两接收线圈的交叉 耦合^[4],同时忽略驱动线圈回路与接收线圈、拾取 线圈间的直接耦合作用,同理拾取线圈与发送线圈 间的直接耦合也忽略,并忽略两拾取线圈的直接耦 合。共振系统等效电路模型如图1所示。



图 1 "单发双收"电路模型

Fig.1 Circuit model of "single-emission and double receiving system"

图 1 中 L_a、L_s、L_{d1}、L_{d2}、L_{b1}、L_{b2}分别为驱动、 发送、接收、拾取线圈的自感; C_s、C_{d1}、C_{d2}为发 送线圈和接收线圈的谐振补偿电容; R_s、R_{d1}、R_{d2} 分别为发送、接收线圈回路等效电阻,为线圈回路 考虑趋附效应后的交流电阻与辐射电阻之和; R_a为 驱动电路中功率放大电路输出电阻与驱动线圈电阻 之和; R_{L1}、R_{L2}分别为系统两等效负载; V_a为激励 电压源, M_{ij}为两回路间互感。

2.2 理论分析

为简化图 1 模型的数学分析难度,采用映射阻 抗的方法,将驱动线圈回路电参量映射到发送线圈 中,两拾取线圈回路参数分别映射到对应的接收线 圈中。驱动线圈回路参数映射到发送线圈回路中的 映射参数为

$$\dot{V}_{s} = \frac{j\omega M_{as}}{R_{a} + j\omega L_{a}} \dot{V}_{a} \qquad R'_{a} = \frac{R_{a}(\omega M_{a})_{s}^{2}}{R_{a}^{2} + (\omega L_{a})^{2}}$$
$$C'_{a} = \frac{R_{a}^{2} + (\omega L_{a})^{2}}{\omega^{2} L_{a}(\omega M_{as})^{2}}$$

两拾取线圈回路电参量映射至各自对应接收线 圈中的等效电阻和电容分别为

$$R'_{L1} = \frac{R_{L1}(\omega M_{db1})^2}{R_{L1}^2 + (\omega L_{b1})^2} \qquad C'_{b1} = \frac{R_{L1}^2 + (\omega L_{b1})^2}{\omega^2 L_{b1}(\omega M_{db1})^2}$$
$$R'_{L2} = \frac{R_{L2}(\omega M_{db2})^2}{R_{L2}^2 + (\omega L_{b2})^2} \qquad C'_{b2} = \frac{R_{L2}^2 + (\omega L_{b2})^2}{\omega^2 L_{b2}(\omega M_{db2})^2}$$

因此,图1电路模型可等效为图2所示的计算 模型。

 $\dot{I}_{\rm dd2} = \frac{1}{Z_{\rm dd2} - Z_{\rm dd2$





Fig.2 Calculation model of the equivalent circuit 由基尔霍夫定理可列出回路电压方程

$$\begin{pmatrix} Z_{\rm ss} & -j\omega M_{\rm sd1} & -j\omega M_{\rm sd2} \\ -j\omega M_{\rm sd1} & Z_{\rm dd1} & -j\omega M_{\rm dd} \\ -j\omega M_{\rm sd2} & -j\omega M_{\rm dd} & Z_{\rm dd2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{\rm ss} \\ \dot{I}_{\rm dd1} \\ \dot{I}_{\rm dd2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{V}_{\rm s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)中的 Z_{ss}、Z_{dd1}、Z 路阻抗,可分别用下列各式表 $R_{dd1}+iX_{dd1}$, $Z_{dd2}=R_{dd2}+iX_{dd2}$, 式中各电阻、电抗表达 式如下

$$R_{ss} = R'_{a} + R_{s} \qquad X_{ss} = \omega L_{s} - \frac{C'_{a} + C_{s}}{\omega C'_{a} C_{s}}$$

$$R_{dd1} = R'_{L1} + R_{d1} \qquad X_{d \ d} = \omega L \quad \frac{1}{d} \frac{C'_{b \ 1} + C_{d}}{1 \omega C'_{b} C'_{d}}$$

$$R_{dd2} = R'_{L2} + R_{d2} \qquad X_{d \ d} = \omega L \quad \frac{1}{d} \frac{C'_{b \ 2} + C_{d}}{2 \omega C'_{b} C'_{b} C_{d}}$$

回路的电 流计

$$\dot{I}_{ss} = \frac{V_s}{Z_{ss} - \frac{Z_{sd1}^2 Z_{dd2} + Z_{sd1} Z_{sd2} Z_{dd}}{Z_{dd1} Z_{dd2} - Z_{dd}^2} - \frac{Z_{sd2}^2 Z_{dd1} + Z_{sd1} Z_{sd2} Z_{dd}}{Z_{dd1} Z_{dd2} - Z_{dd}^2}}$$
$$I_{blm}^2 = I_{b2m}^2$$

$$\dot{I}_{ss} = \frac{V_s}{Z_{ss} - \frac{Z_{sd1}^2 Z_{dd2} + Z_{sd1} Z_{sd2} Z_{dd}}{Z_{dd1} Z_{dd2} - Z_{dd}^2} - \frac{Z_{sd2}^2 Z_{dd1} + Z_{sd1} Z_{sd2} Z_{dd}}{Z_{dd1} Z_{dd2} - Z_{dd}^2}$$

$$\left| \left(\dot{I}_{dd2}
ight)
ight| \left(0
ight)$$

 Z_{dd2} 分别为图 2 中三回
示: $Z_{ss} = R_{ss} + j X_{ss}$, $Z_{dd1} =$

两拾取线圈负载阻抗吸收的有功功率即为系统 传输功率

 $\begin{cases} \dot{I}_{a} = \dot{I}_{ss} \frac{\omega M_{as}}{\sqrt{R_{a}^{2} + (\omega L_{as})^{2}}} \\ \dot{I}_{b1} = \dot{I}_{dd1} \frac{\omega M_{db1}}{\sqrt{R_{L1}^{2} + (\omega L_{b1})^{2}}} \\ \dot{I}_{b2} = \dot{I}_{dd2} \frac{\omega M_{db2}}{\sqrt{R_{L2}^{2} + (\omega L_{b2})^{2}}} \end{cases}$

 $\dot{I}_{dd1} = \frac{\frac{Z_{dd}Z_{sd2} + Z_{dd2}Z_{sd1}}{Z_{ss}Z_{dd2} - Z_{sd2}^2} \dot{V_s}}{Z_{dd1} - \frac{Z_{dd}^2Z_{ss} + Z_{sd1}Z_{sd2}Z_{dd}}{Z_{ss}Z_{dd2} - Z_{sd2}^2} - \frac{Z_{sd1}^2Z_{dd2} + Z_{sd1}Z_{sd2}Z_{dd}}{Z_{ss}Z_{dd2} - Z_{sd2}^2}$

其中, $Z_{sd1} = j\omega M_{sd1}$, $Z_{sd2} = j\omega M_{sd2}$, $Z_{dd} = j\omega M_{dd}$ 。

与所在映射回路中功率相同,可求得驱动线圈回路

和两拾取线圈回路电流表达式为

利用电阻 Ra、RL1、RL2 在各自回路中消耗功率

 $\frac{\frac{Z_{dd}Z_{sd1} + Z_{dd2}Z_{dd1}}{Z_{ss}Z_{dd1} - Z_{sd1}^2}\dot{V_s}}{\frac{Z_{dd}^2Z_{ss} + Z_{sd1}Z_{sd2}Z_{dd}}{Z_{ss}Z_{dd1} - Z_{sd1}^2} - \frac{Z_{sd1}^2Z_{dd2} + Z_{sd1}Z_{sd2}Z_{dd}}{Z_{ss}Z_{dd1} - Z_{dd1}^2}$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{load1}} + P_{\text{load2}} = 0.5(I_{\text{b1m}}^2 R_{\text{L1}} + I_{\text{b2m}}^2 R_{\text{L2}})$$
(4)
系统输出总功率及传输效率分别为

$$P_{\text{zong}} = 0.5 (I_{\text{ssm}} \ I_{\text{dd1m}} \ I_{\text{dd2m}}) (R_{\text{ss}} \ R_{\text{dd1}} \ R_{\text{dd2}})^{-1} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{zong}}} \times 100\% \tag{6}$$

从式(3)、式(5)可以看出,系统传输功率除 了受到谐振频率、发射线圈和接收线圈耦合系数的 影响外,还受到两个接收线圈之间耦合系数的影响。 为简化分析难度,假设两个接收线圈参数完全一致, 可得电流的表达式为

$$=\frac{(\omega^{2}M_{dd}M_{sd2} + \omega^{2}M_{sd1}X_{dd2})^{2} +}{(R_{dd1}R_{dd2}R_{ss} - R_{dd1}X_{dd2}X_{ss} + R_{dd1}\omega^{2}M_{sd2}^{2} - R_{ss}X_{dd1}X_{dd2} - R_{dd2}X_{dd1}X_{ss} - R_{ss}\omega^{2}M_{dd}^{2} + R_{dd2}\omega^{2}M_{sd1}^{2})^{2} +}{(\omega M_{sd1}R_{dd2})^{2}}$$

$$=\frac{(\omega M_{sd1}R_{dd2})^{2}}{(R_{dd1}R_{ss}X_{dd2} + R_{dd1}X_{dd2}X_{ss} + R_{dd2}R_{ss}X_{dd1} - X_{dd1}X_{dd2}X_{ss} + X_{dd1}\omega^{2}M_{sd1}^{2} + X_{ss}\omega M_{dd}^{2} + X_{dd2}\omega^{2}M_{sd1}^{2} + 2\omega^{3}M_{sd1}M_{sd2}M_{dd})^{2}}$$

$$(7)$$

表达式(7)较为复杂,需要借助于数学计算工具进行定性讨论,本文针对应用较普遍的共面多负载系 统作以下分析:

(3)

(1)假设两接收线圈耦合系数 K_{dd}不变,接收位置对称分布在发射线圈中轴线上,即K_{sd}=K_{sd1}= K_{sd2}。 计算参数: L_a=L_{b1}=L_{b2}=8µH, L_s=L_{d1}=L_{d2}=210µH, R_{L1}=R_{L2}=50Ω, R_s=R_{d1}=R_{d2}=4Ω, C_s=C_{d1}=C_{d2}=4pF, K_{as}=K_{db1}=K_{db2}=0.4, K_{dd}=0.1。由图 3a 计算结果可以看出,"单发双收"与"单发单收"^[9-11]负载功率具有 相似性,对系统激励频率表现出一定敏感性,存在共振频率分叉现象,随收发端耦合系数的减小,分叉现 象消失,最终汇聚为一个共振频率。

(2) 假设接收端线圈与发射线圈接收位置对称分布,发射线圈与接收线圈耦合系数 K_{sd1}=K_{sd2}不变。计算参数: K_{sd}=0.15,其余参数与上述参数一致,计算结果如图 3b 所示。"单发双收"传输系统存在共振频率偏移现象,当两接收端距离较近、耦合较强时,这种共振频率偏移现象更为明显,随两接收端耦合系数的减小,共振频率偏移现象逐渐减弱直至消失。



3 仿真分析

基于"单发双收"理论分析,采用 OrCAD 电路仿真软件,针对"单发双收"电磁共振耦合无线能量 传输系统建立了仿真模型。通过仿真分析,得到拾取线圈回路电流幅值随激励频率变化曲线,如图 4 所示。 仿真参数: k_{dd}=0.02,其余参数与上节计算参数一致。





Fig.4 Current of pickup coil varies with frequency

由图 4 可知,在保证发送线圈和接收线圈固有频率相同的条件下,可以利用一个发送端同时为多个用 电设备无线供给能量: 当发送线圈和接收线圈距离较近, 耦合系数较大时, 系统存在共振频率分叉现象, 并随收发端距离的增大,频率分叉现象逐渐消失,因两能量接收端与发送端耦合系数不一定相同,故两拾 取回路负载功率峰值处频率也不一定相同;能量的高质量传输同样依赖于合适的工作频率,在共振频率处 负载获得峰值功率。

实验验证 4

为了验证"单发双收"系统的理论分析的正确性,本文建立磁耦合谐振系统实验系统如图 5 所示。实 验中采用直径 113mm 线圈作为发送端, 直径 51mm 线圈作为接收端, 两接收端参数相同, 导线直径 0.9mm 漆包线, 线圈 A、S、D、B 分别为 2 匝、5 匝、5 匝、2 匝, 负载阻值 50Ω。图 6 为 d₂=35mm, d₁₂=55.6mm, D12=30mm 时的系统功率传输特性,图中"单独"表示仅存在一个接收端的情况,"同时"为两接收端同 时存在。图7为多负载的加入对系统共振频率的影响。







[&]quot;单发双收"功率传输特性 图 6





图 7 双负载的加入对系统共振频率的影响

Fig.7 The influence of resonance frequency with double-loads

由图 6 可看出,收发端相对位置确定条件下,同时存在两个接收端时的负载功率传输特性与仅存在一 个接收端时的不同,额外接收端的加入会改变原系统功率传输特性;当收发端距离较近,耦合系数较大时 会存在两个功率输出峰值,随收发端耦合系数的减小,分叉现象消失;"单发双收"传输系统在收发端距 离较远时,在共振频率处获得峰值功率输出,随激励频率偏离共振频率传输功率下降。

由于两接收端线圈回路的电磁耦合作用,会引起原传输系统共振频率的改变,如图7所示,图中"原 统 " 系 指 仅 存 在 接 收 端 1 时 的 共 振 频 率 特 性 系统仅存在一个能量接收端时,共振频率不随收发端径向位置的变化而变化,但当存在两个接收端时,因 两接收线圈的电磁耦合,共振频率随径向距离的变化而变化,并且当两接收端距离较近、耦合较强时,这 种共振频率偏移现象更为明显,随两接收端距离增大、耦合减弱,共振频率偏移现象逐渐减弱直至消失。

5 结论

本文基于磁耦合共振的无线能量传输原理,建立了磁耦合共振"单发双收"理论模型。理论分析发现 在保证发送线圈和接收线圈固有频率相同的条件下,可以利用一个发送端同时为多个用电设备无线供给能 量。"单发双收"系统传输特性与"单发单收"性质类似,即当发送线圈和接收线圈距离的耦合系数较大 时,系统存在共振频率分叉现象,并随收发端距离的增大,频率分叉现象逐渐消失。当存在两个接收端时, 因两接收线圈的电磁耦合,共振频率随径向距离的变化而变化,并且当两接收端距离较近、耦合较强时, 这种共振频率偏移现象更为明显。通过仿真分析和实验验证,文中所建磁耦合共振"单发双收"理论模型 能准确描述系统传输特性,为该技术的工程化应用奠定理论基础。

参考文献

[1] 李长生,张合.引信无线供能系统电磁耦合结构外围金属介质涡流损耗分析[J].南京理工大学学报,2011,35(3): 347-351.

Li Changsheng, Zhang He. Eddy current loss analysis of exterior metal dielectric for electromagnetic coupling structure in fuze wireless power supply system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(3): 347-351.

- [2] Cannon Benjamin L, Hoburg James F, Stancil Daniel D, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1819-1825.
- [3] Lee C K, Zhong W X, Hui S Y R. Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino-resonator systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1905-1916.
- [4] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.

- [5] Kim Jin-Wook, Son Hyeon-Chang, Kim Do-Hyun, et al. Analysis of wireless energy transfer to multiple devices using CMT[C]. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, 2010: 2149-2152.
- [6] Yoon Ick-Jae, Ling Hao. Investigation of near-field wire-less power transfer under multiple transmitters [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 662-665.
- [7] 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, 40(10): 152-158.
 Zhang Bo, Zhang Qing. Characteristic analysis of magnetic resonant coupling-based wireless power transfer system with two receivers[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(10): 152-158.
- [8] Watfa M K, Al-Hassanieh H, Selman S. Multi-hop wireless energy transfer in WSNs[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12): 1275-1277.
- [9] Hamam Rafif E, Karalis A, Joannopoulos J D, et al. Efficient weakly-radiative wireless energy transfer: An EIT-like approach[J]. Annals of Physics, 2009, 324(8): 1783-1795.
- [10] 黄学良,吉青晶,谭林林,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究[J].电工技术学报,2013,28(3):
 171-176.
 Huang Xueliang, Ji Qingjing, Tan Linlin, et al. Study on series-parallel model of wireless power transfer via magnetic

resonance coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 171-176.

[11] 李阳,杨庆新,阎卓,等.无线电能有效传输距离及其影响因素分析[J].电工技术学报,2013,28(1):106-112.
 Li Yang, Yang Qingxin, Yan Zhuo, et al. Analysis on effective range of wireless power transfer and its impact factors[J].
 Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 106-112.

作者简介:李炜昕 男,1986年生,博士研究生,研究方向为武器系统信息交联技术。张合 男,1957年生,教授,博士生导师,研究方向为引信智能与灵巧化。