

无线电能传输系统基于 Buck-Boost 拓扑的最大功率传输研究*

王喜升¹,侯钰慧²,郭波超²,崔振宇²,田子建²,王文清³

(1.中煤信息技术(北京)有限公司,北京 100029;

2.中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院,北京 100083;3.北京工业职业技术学院,北京 100042)

摘要:近年来,无线电能传输(WPT)技术迅速发展,并广泛应用于消费领域。影响无线电能系统传输效率有诸多因素,如负载变化、线圈偏移、频率分裂等。为解决接收端负载变化引起系统传输效率降低的问题,在接收端串入 Buck-Boost 电路拓扑,并建立 WPT 系统电路数学模型以及线圈偏移模型,推导线圈偏移互感关系式,最后通过仿真得到线圈同轴模型系统和线圈偏移模型系统传输功率与占空比对应的关系图。仿真结果表明调节 Buck-Boost 电路占空比可保证负载变化时线圈同轴模型系统和线圈偏移模型系统均可实现系统的最大传输功率,证明串入 Buck-Boost 电路拓扑结构可降低负载变化对传输效率的影响。

关键词:无线电能传输;负载变化;线圈的偏移;Buck-Boost;占空比

中图分类号: TN81

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222578

中文引用格式: 王喜升,侯钰慧,郭波超,等. 无线电能传输系统基于 Buck-Boost 拓扑的最大功率传输研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 129–134.

英文引用格式: Wang Xisheng, Hou Yuhui, Guo Bochao, et al. Research on maximum power transfer of wireless power transfer system based on buck-boost topology[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 129–134.

Research on maximum power transfer of wireless power transfer system based on buck-boost topology

Wang Xisheng¹, Hou Yuhui², Guo Bochao², Cui Zhenyu², Tian Zijian², Wang Wenqing³

(1.China Coal Information Technology(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100029, China;

2.School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing),
Beijing 100083, China;

3.Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: In recent years, wireless power transfer(WPT) technology has developed rapidly and is widely used in the consumer field. There are many factors that affect the transmission efficiency of wireless power systems, such as load variation, coil offset, frequency splitting, etc. In order to solve the problem of reducing the transmission efficiency of the system caused by the load change at the receiving end, in this paper, the buck-boost circuit topology is connected in series at the receiving end, and the mathematical model of the WPT system circuit and the coil offset model are established. Then the mutual inductance relationship of the coil offset is deduced. Finally, the relationship between the transmission power and the duty cycle of the coil coaxial model system and the coil offset model system is obtained through simulation. The simulation results show that adjusting the duty cycle of the buck-boost circuit can ensure that both the coil coaxial model system and the coil offset model system can achieve the maximum transmission power of the system when the load changes. It is proved that the buck-boost circuit topology in series can reduce the influence of load changes on the transmission efficiency.

Key words: wireless power transfer;load variation;offset of the coil;buck-boost;duty cycle

0 引言

19 世纪 90 年代初,著名科学家特斯拉就开始了无线电能传输技术(Wireless Power Transfer, WPT)的研究,

并隔空点亮了一盏磷光照明灯^[1]。到 2006 年,MIT 的科学家 Marin Soljacic 利用无线电能传输技术在距离 2 m 处隔空点亮了一盏 60 W 的灯泡^[2-3]。从此,国内外无数学者对 WPT 的研究进入了高潮期,并将其应用在各个领域。该技术作为一种无接触充电方式^[4],已经被广泛应用在电动汽车、植入式医疗设备、消费电子产品等各

* 基金项目:国家自然基金项目(52074305);北京市教委立项——双高建设技术技能创新服务平台及团队建设(11000022T000000481512)

个领域^[5-6]，给人们的生活带来了很大的便捷性和安全性。

随着电子设备种类的增加，负载阻抗变化引起系统传输效率降低的问题成为目前的主要研究方向之一。针对此问题各学者提出了不同的解决方法，目前有以下两种解决方法：(1)阻抗匹配网络，如T型补偿网络^[7]、π型补偿网络^[8]、LCC型补偿网络^[9]、基于神经网络自适应阻抗匹配^[10]等。虽然采用LCC补偿网络可以输出稳定电压，但当负载变化时，造成能量的损失。神经网络自适应阻抗匹配，随着负载变化改变阻抗匹配网络的参数解决LCC补偿网络的问题，但无法维持传输系统良好的性能。(2)线圈结构优化，如采用平面方形双线圈结构^[11]、平面圆形双线圈结构^[12]等。有学者推导出平面方形线圈结构耦合系数与线圈匝数及边长有关，因此提出改变线圈参数提高效率，但实际应用中改变线圈结构较为麻烦。因此本文提出采用一种带Buck-Boost变化拓扑结构的自适应调节网络，并通过仿真实验证明该结构的适用性。

目前WPT技术可通过磁感应理论、磁谐振理论、电场耦合理论、微波辐射理论、激光及超声波理论实现^[13]。磁感应传输距离较小，当接收端与发射端距离过大时，造成能量损耗过大^[14]。磁耦合谐振式传输机理的无线能量传输系统，具有传输距离远、传输功率和效率较高的优点。微波辐射主要应用于传输距离较大的场合。因此，本文在磁谐振理论模型下进行研究，通过仿真实验证明接收线圈在任何位置该电路拓扑结构均可实现系统最大功率传输。

1 磁耦合谐振WPT系统的电容补偿和最大传输功率

1.1 电容补偿电路模型

磁耦合谐振式WPT系统可通过耦合模理论模型以及电路理论模型进行分析。两种模型在近场耦合时，传输效率、功率等参数具有等效性；但耦合模理论模型计算过程较繁琐，参数也不是电气参数，故本文采用电路理论模型进行分析研究^[15]。

WPT系统中Tx、Rx线圈电容值很小，无法使电路工作在谐振状态，需加入额外的电容进行阻抗匹配。电容补偿电路分为4类：串联—串联(SS)、串联—并联(SP)、并联—串联(PS)、并联—并联(PP)^[16]。通过数学公式推导SS阻抗匹配电路频率固定不变时，匹配电容值只与电感有关^[17]。且该电路结构简单，便于计算，因此本文采用SS电容阻抗匹配电路。图1所示为WPT系统的电路简

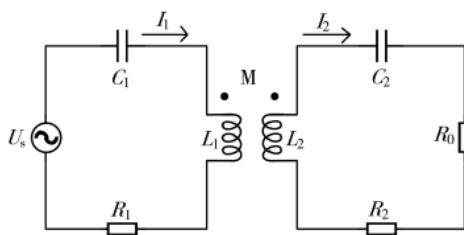


图1 等效电路模型

化模型，一次侧由串联补偿电容C₁、Tx线圈电感L₁、电阻R₁组成；二次侧由串联补偿电容C₂、Rx线圈电感L₂、电阻R₂以及等效输出负载R₀组成。

由等效电路模型得Z_r反射阻抗为：

$$Z_r = \frac{(\omega M)^2}{j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2} + R_2 + R_0} \quad (1)$$

根据KVL定律，可求解得Tx、Rx线圈电流I₁、I₂：

$$\begin{bmatrix} \frac{U_s}{0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_1 & -j\omega M \\ -j\omega M & R_2 + R_0 + jX_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{U_s}{\left[\frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_0 + jX_2} + R_1 + jX_1 \right]} \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{j\omega M U_s}{[(\omega M)^2 + (R_1 + jX_1)(R_2 + R_0 + jX_2)]} \quad (4)$$

电路工作在谐振状态时， $\omega = \sqrt{L_1 C_1} = \sqrt{L_2 C_2}$ ， $X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 0$ ， $X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} = 0$ 。可得电路传输功率及效率为：

$$P_0 = \frac{(\omega M)^2 U_s^2 R_0}{[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_0)]^2} \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{(\omega M)^2 R_0}{[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_0)](R_2 + R_0)} \quad (6)$$

式中U_s为原边电路等效交流电压。

由式(5)、式(6)得，当系统参数WPT系的谐振频率ω、R₁、R₂固定不变时，系统传输功率P₀与效率η₀只与Tx线圈和Rx线圈之间的互感M及等效输出负载R₀有关。

1.2 基于Buck-Boost电路的最大功率传输

基于Buck-Boost的WPT系统的电路模型如图2所示，主要由逆变电路、谐振电路、整流电路以及升降压Buck-Boost电路组成。U_{in}为该系统输出的直流电源。四个MOSFET管S₁~S₄组成了全桥逆变电路。D₁~D₄、C₃构成整流电路。Buck-Boost电路由S_r、L_r、D_r、C_r组成。

根据整流器以及升降压的特性可得到以下电压关、电阻关系式：

$$U_r = 1.1 U_0 \quad (7)$$

$$U_{II} = \frac{D}{1-D} U_{II} \quad (8)$$

$$R_r = \frac{\pi^2}{8} R_0 \quad (9)$$

$$R_{II} = \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 R_r \quad (10)$$

由式(1)得当R₀=R_{max}可实现最大功率传输：

$$R_{max} = \frac{(\omega M)^2 - R_1 R_2}{R_1} \quad (11)$$

由式(9)、式(10)、式(11)得占空比与负载阻抗的等式关系为：

$$D = \frac{\sqrt{8\pi^2 R_{max} R_{II}} - 8R_{II}}{\pi^2 R_{max} - 8R_{II}} \quad (12)$$

式中 R_{11} 为负载阻抗, R_r 为 DC-DC 电路及负载等效电阻, U_0 为等效输出电压, U_r 为 DC-DC 电路两端电压, U_{11} 为输出电压, D 为升降压 Buck-Boost 电路的占空比。

负载阻抗 R_{11} 改变时, 由式(12)计算得到相应的 Buck-Boost 电路占空比的值。保证 R_{max} 的值不变而系统满足最大功率传输。通过仿真, 如图 3 所示, 可知无论负载如何变化, 均可找到相对应的占空比, 使系统的传输效率维持在一个定值。将系统参数设置为 $U_{in}=17$ V, $L_1=L_2=0.02$ mH, $C_1=C_2=320$ pF, 得到如下结果: $D=0.3$, $R=28.9$ Ω, 输出功率 $P_0=183.465$ W; $D=0.4$, $R=69.9$ Ω, 输出功率 $P_0=183.465$ W; $D=0.5$, $R=157.2$ Ω, 输出功率 $P_0=183.465$ W;

$D=0.6$, $R=353.8$ Ω, 输出功率 $P_0=183.465$ W。负载阻抗发生变化时, 改变占空比, 使系统输出效率均达到最大值 183.465 W。

1.3 闭环控制的最大功率传输

实际应用中, 为保证 WPT 系统工作状态的稳定性, 所以将其设计为闭环控制系统。图 4 所示为 WPT 闭环控制系统组成结构图, 该系统的工作方式是将负载两端电压以及通过负载电流值反馈至控制器, 当控制器中相关模块判断出 U 、 I 发生变化时, 计算得到现有负载 R_{11} 的值, 然后通过式(12)负载与占空比对应关系式, 计算出满足最大功率传输时占空比的值, 进而改变 Buck-

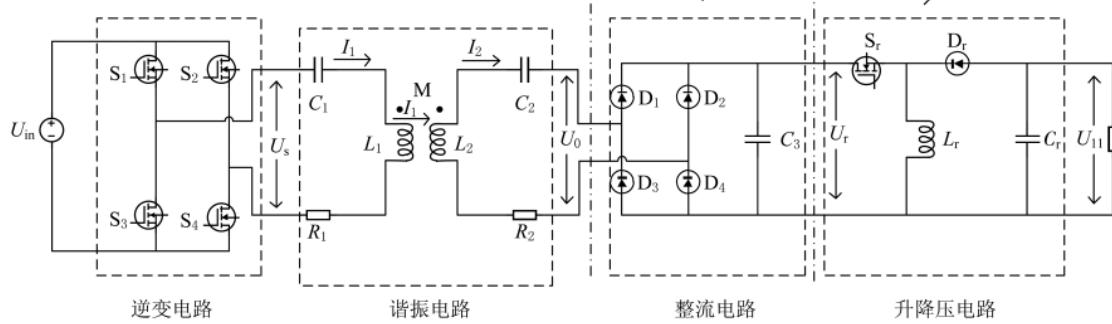


图 2 基于 Buck-Boost 的电路模型

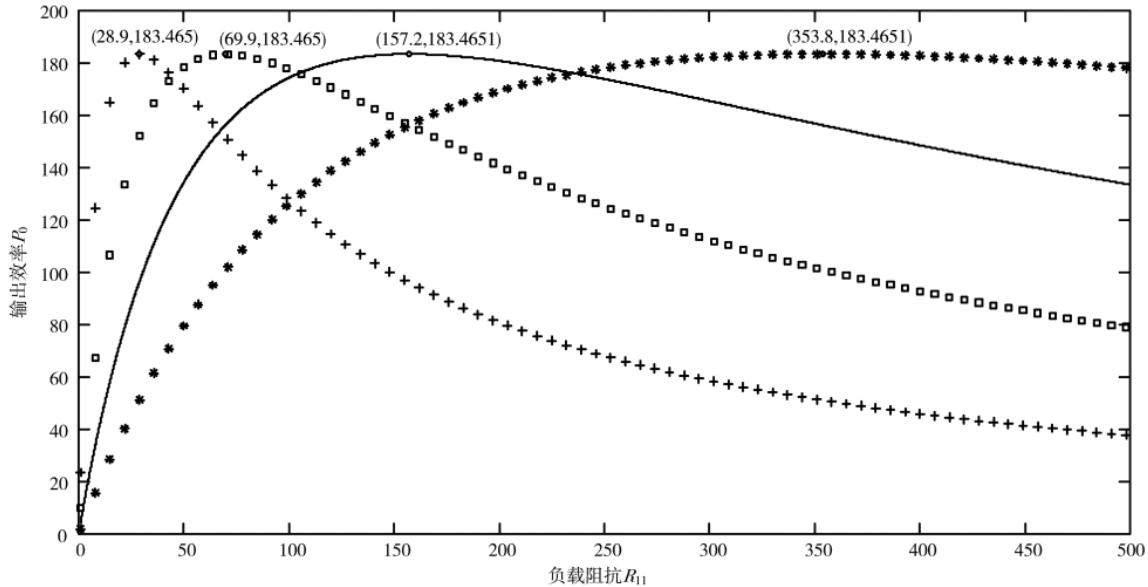


图 3 负载阻抗与占空比对应关系

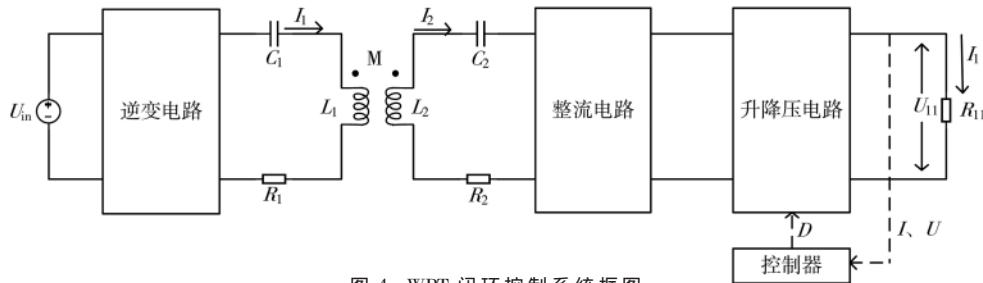


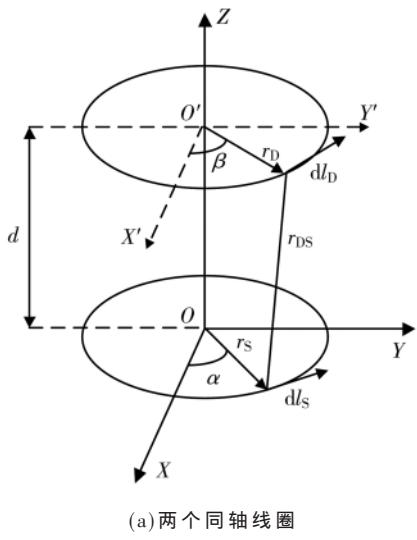
图 4 WPT 闭环控制系统框图

Boost 电路占空比的值,控制负载两端电压,使该系统工作在最大功率传输状态,减小负载变化对效率的影响。

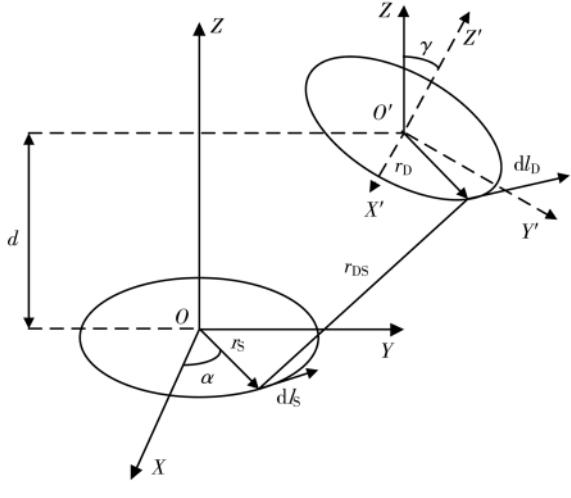
由式(4)、式(5)可知系统的传输功率及效率与谐振频率、两线圈间互感及负载阻抗有关。为分析带 DC-DC 的 Buck-Boost 变换器的 WPT 系统是否在线圈互感发生变化时仍然满足最大功率传输,本文将研究两线圈发生偏移时的模型系统。

2 偏移线圈的互感

理想的 WPT 系统中两线圈为同轴线圈,位置关系如图 5(a)所示,此时传输效率最大。但实际生活中接收线圈会因为自身及外界各种因素发生横向或角度偏移,如图 5(b)所示,影响两线圈之间的传输效率^[18]。为进一步分析该 WPT 系统在线圈发生偏移时的工作状况,本文推导出两线圈发生偏移时互感的变化公式。



(a) 两个同轴线圈



(b) 发生横向及角度偏移的同轴线圈

图 5 线圈位置方向关系

根据诺伊曼公式:

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \oint_{l_s} \oint_{l_D} \frac{dl_s \cdot dl_D}{r_{DS}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} dl_s = (-r_S \sin \alpha \hat{x} + r_S \cos \alpha \hat{y}) d\alpha \\ dl_D = (-r_D \sin \beta \hat{x} + r_D \cos \beta \hat{y}) d\beta \end{cases} \quad (14)$$

则有:

$$dl_s \cdot dl_D = r_S r_D \cos(\alpha - \beta) d\alpha d\beta \quad (15)$$

$$r_{DS} = \sqrt{r_S^2 + r_D^2 - 2r_S r_D \cos(\alpha - \beta) + d^2} \quad (16)$$

将式(15)、式(16)代入式(13)得:

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_S r_D \cos(\alpha - \beta) d\alpha d\beta}{\sqrt{r_S^2 + r_D^2 - 2r_S r_D \cos(\alpha - \beta) + d^2}} \quad (17)$$

当接收线圈发生横向及角度偏移时:

$$\begin{cases} dl_s = (-r_S \sin \alpha \hat{x} + r_S \cos \alpha \hat{y}) d\alpha \\ dl_D = (-r_D \sin \beta \hat{x} + r_D \cos \beta \hat{y} - r_D \sin \gamma \hat{z} - r_D \cos \beta \sin \gamma \hat{z}) d\beta \end{cases} \quad (18)$$

$$dl_s \cdot dl_D = r_S r_D (\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma) d\alpha d\beta \quad (19)$$

将式(19)代入诺伊曼公式得出接收线圈发生横向及角度偏移时的互感公式:

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_S r_D (\sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma) d\alpha d\beta}{r_{DS}} \quad (20)$$

$$r_{DS} = \sqrt{(r_S \cos \alpha - r_D \cos \beta)^2 + (r_S \sin \alpha - r_D \sin \beta \cos \gamma - l)^2 + (-r_D \sin \beta \sin \gamma + d)^2} \quad (21)$$

式中 N_1, N_2 分别为发射线圈、接收线圈的匝数, μ_0 为真空中磁导率, l 为收线圈横向偏移距离, r_D, r_S 分别为两线圈的半径, γ 为接收线圈的旋转角度。式(20)表明, 偏移线圈互感与横向偏移距离、角度偏移有关。

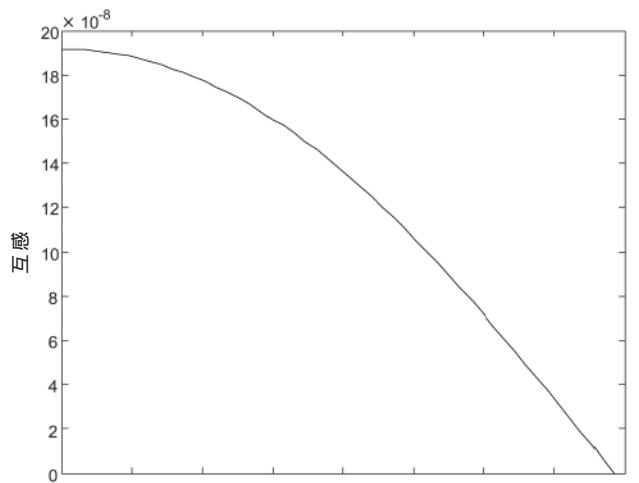
如图 6 所示,(a)、(b)、(c) 分别表示为旋转角度与互感、横向偏移距离与互感、偏移角度以及横向偏移距离与互感的关系图像。利用 MATLAB 仿真软件进行仿真, 参数设置如下: 接入交流电源 $U_{in}=17$ V、发射线圈和接收线圈的匝数 $N_1=N_2=10$ 、电感 $L_1=L_2=0.02$ mH, 补偿电容 $C_1=C_2=320$ pF, 线圈半径 $r_S=r_D=10$ cm, 线圈电阻 $R_1=R_2=0.3$ Ω, 线圈中心相距 $d=10$ cm。

3 仿真实验

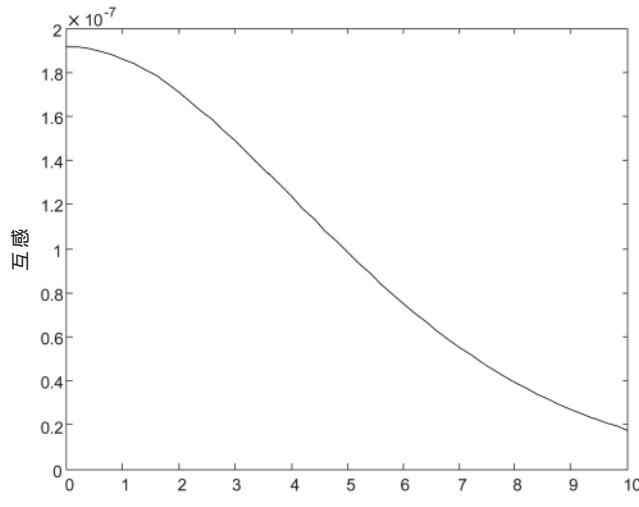
为验证带 Buck-Boost 变换器的 WPT 系统在线圈互感发生变化时仍然满足最大功率传输, 建立了如图 7 所示的实验平台。该实验模型由线圈结构、逆变桥、电气隔离、整流器、升降压模块组成。本次实验主要对负载线圈发生角度旋转、横向偏移、角度旋转及横向偏移这三种情况下, WPT 系统在负载阻抗发生变化时, 系统输出效率的变化情况进行研究。通过线圈补偿得到系统谐振频率

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = 2.0 \text{ MHz.}$$

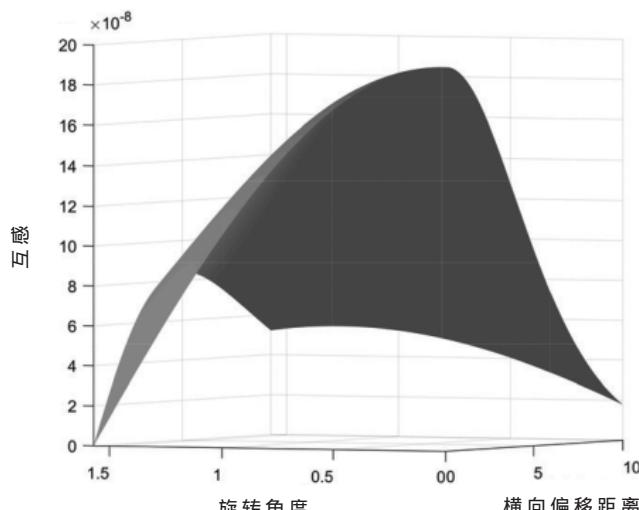
通过实验得到如图 8 所示的结果, 该图分别表示接收线圈在不同的旋转角度和横向偏移情况以及负载阻抗变化时, 占空比与输出效率的关系。图 8(a)接收线圈无任何角度、横向偏移; 图 8(b)接收线圈旋转角为 30°,



(a) 旋转角度与互感的关系



(b) 横向偏移距离与互感的关系



(c) 偏移角度以及横向偏移距离与互感的关系

图 6 旋转角度、横向偏移距离对互感的影响

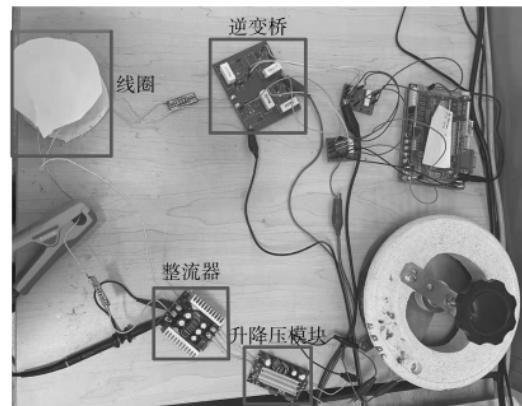


图 7 无线电能传输实验平台

横线偏移为 0 cm; 图 8(c)接收线圈旋转角度为 0°, 横向偏移距离为 2 cm; 图 8(d)接收线圈旋转角度为 60°, 横线偏移距离为 2 cm。由图可得当线圈发生任何位置偏移, 该 WPT 系统在负载阻抗发生改变时通过改变 Buck-Boost 变换器的占空比, 总能满足最大功率传输。

4 结论

针对负载变化引起 WPT 系统传输效率降低的问题, 应用电路理论分析得到以下结论。

(1) 本文推导负载与 Buck-Boost 电路占空比的对应关系, 通过 MATLAB 仿真实验证明了无论无线电能传输系统负载如何变化都能找到与之对应的占空比值, 改变占空比可使系统满足最大功率传输。

(2) 该 WPT 系统在负载线圈发生角度旋转、横向偏移、角度旋转及横向偏移的变化时, 负载变化时, 通过实验证明改变 Buck-Boost 电路占空比仍能实现最大功率传输。

参考文献

- [1] 黄学良, 曹伟杰, 周亚龙, 等. 磁耦合谐振系统中的两种模型对比探究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 13-17.
- [2] 张波, 疏许健, 吴理豪, 等. 无线电能传输技术亟待解决的问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 7-26.
- [3] 郑盼龙, 迟冬祥. 一种小型磁谐振式无线电能传输系统的实验研究[J]. 机电工程, 2014, 31(10): 1333-1338.
- [4] 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, 21.
- [5] 罗成鑫, 丘东元, 张波, 等. 多负载无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2499-2516.
- [6] Zhang Xian, Meng Hao. Mutual inductance calculation for coils with misalignment in wireless power transfer[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1041-1044.
- [7] 李树凡, 王丽芳, 郭彦杰, 等. 基于整流性负载补偿的无线充电系统 T 型阻抗匹配网络设计方法的优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 9-16.
- [8] 冉超, 黄文美, 翁玲. 磁致伸缩超声换能器阻抗匹配网络的设计[J]. 应用声学, 2021, 40(2): 249-254.

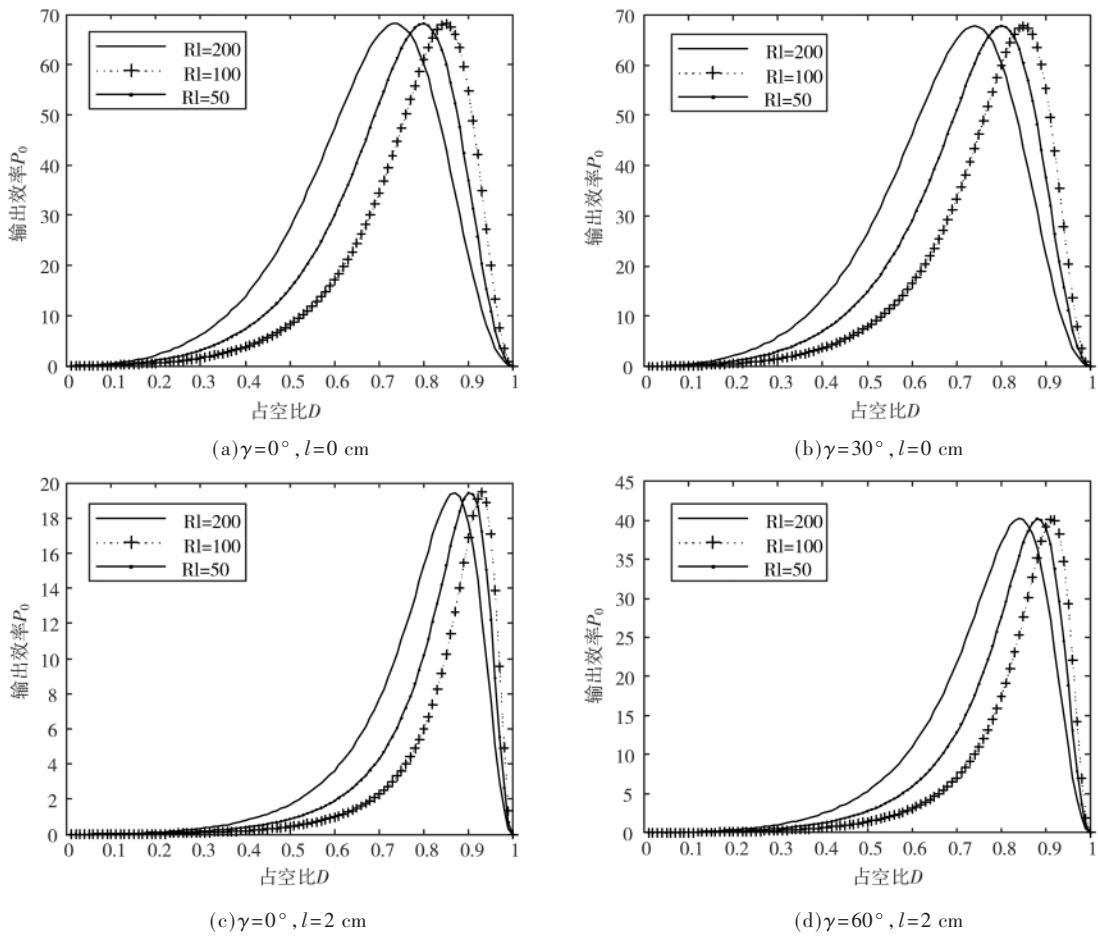


图 8 占空比与输出效率的关系

- [9] 万祖岩, 陈星, 张永超. 基于 LCC 的谐振式无线电能传输负载无关性研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(10): 52–55.
- [10] Li Yang, Dong Weihao, Yang Qingxin, et al. An automatic impedance matching method based on the feedforward-backpropagation neural network for a WPT system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3963–3972.
- [11] 刘言伟, 卢闻州, 董一帆, 等. 电动汽车无线电能传输用方形线圈仿真优化研究[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 180–190.
- [12] 张智娟, 郑龙飞, 杨瑞. 限定尺寸的无线电能传输线圈优化设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3626–3632.
- [13] 蔡进, 吴旭升, 孙盼, 等. 磁耦合无线电能传输技术研究进展及其大功率实现方法[J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(5): 19–27.
- [14] 刘代荣, 田子建, 刘斌, 等. 基于 MCR-WPT 系统拓扑与负载匹配研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(10): 191–194.
- [15] 廖承林, 李均锋, 陶成轩, 等. 无线电能传输系统控制方法综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(6): 1–6.
- [16] Dai Xin, Li Xiaofei, Li Yanling, et al. Maximum efficiency

tracking for wireless power transfer systems with dynamic coupling coefficient estimation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5005–5015.

- [17] 陈晶晶. 双负载磁耦合谐振式无线电能传输建模与控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [18] LIN D, HUI S, ZHANG C. Omni-directional wireless power transfer systems using discrete magnetic field vector control[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015.

(收稿日期: 2022-01-18)

作者简介:

王喜升(1983-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 智能化矿山和新能源。

侯钰慧(1997-), 通信作者, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线电能传输技术, E-mail: 13994007876@163.com。

郭波超(1993-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 无线电能传输。



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