

# 基于磁耦合谐振式的AC/DC功率变换器研究

杜吉飞<sup>1,2</sup>, 穆云飞<sup>1</sup>, 李小滨<sup>2</sup>, 王子尧<sup>3\*</sup>, 王冠敬<sup>3</sup>, 李博文<sup>3</sup>

<sup>1</sup>天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津

<sup>2</sup>珠海泰坦电力电子集团有限公司, 广东 珠海

<sup>3</sup>天津农学院工程技术学院, 天津

收稿日期: 2023年2月23日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

## 摘要

本文设计的无线充电模组利用磁耦合谐振式无线充电原理, 采用直流供电方式通过逆变电路转化成所需的交流电, 产生高频正弦振荡电流驱动发射线圈, 令发射电路处于谐振状态, 再通过高频电磁场把能量传递给接收电路, 带动接收回路进入谐振, 最后通过整流滤波电路为负载提供较为稳定的直流电, 由此完成电能的无线传输。本研究主要针对无线充电模组、功率器件驱动、逆变和整流滤波电路进行设计和工作过程分析, 使设计的系统整体运行稳定可靠, 实现无线输电的功能。

## 关键词

无线充电, 磁耦合谐振, 整流滤波, 能量传递

# Study on AC/DC Power Converter Based on Magnetic Coupling Resonance

Jifei Du<sup>1,2</sup>, Yunfei Mu<sup>1</sup>, Xiaobin Li<sup>2</sup>, Ziyao Wang<sup>3\*</sup>, Guanqing Wang<sup>3</sup>, Bowen Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin

<sup>2</sup>Zhuhai Titans Power Electronics Group Co., Ltd., Zhuhai Guangdong

<sup>3</sup>College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

The wireless charging module designed in this paper uses the principle of magnetic coupling resonant wireless charging, uses DC power supply mode to convert into the required alternating current through the inverter circuit, generates high-frequency sinusoidal oscillation current to drive the transmitting coil, makes the transmitting circuit in a resonant state, transmits energy to

文章引用: 杜吉飞, 穆云飞, 李小滨, 王子尧, 王冠敬, 李博文. 基于磁耦合谐振式的 AC/DC 功率变换器研究[J]. 电路与系统, 2023, 12(1): 1-7. DOI: 10.12677/ojcs.2023.121001

the receiving circuit through the high-frequency electromagnetic field, drives the receiving circuit into the resonance, and then provides relatively stable DC power for the load through the rectifier filter circuit, thereby completing the wireless transmission of electric energy. The project mainly designs and analyzes the working process of wireless charging module, power device drive, inverter and rectifier filter circuit, so that the overall operation of the designed system is stable and reliable, and the function of wireless power transmission is realized.

## Keywords

Wireless Charging, Magnetically Coupled Resonance, Rectifying Filter, Energy Transfer

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会电气化的高度发展,电气设备的充电方式成为了人们日益关注的问题,有线充电因其电能转化效率高,产品生产测试相对成熟,应用范围广泛,依旧是当前大部分设备主要的充电方式。但随着技术的进步有线充电的弊端也逐渐暴露出来,其一就是不同的接口不互通,Lightning、Micro USB、Type C 是市场上最为常见的三种接口,充电时因其接口差异要使用相匹配的传输线,导致各种类型的数据线占用了大量的生活空间浪费了资源。除此之外,有线充电方式因为充电设备与被充电设备必须接触,所以一定会有插头、插座之类的结构,存在易产生火花、漏电,易磨损,触点可能发热、着火,功率受限等问题。基于以上原因,有线充电方式已给人们的生活带来不便,无线充电的需求也随着人们对电子产品的增多而逐渐增加[1] [2]。相较于传统的有线充电,无线充电解决了有线充电易缠绕、出现接触不良,充电接口不统一的问题,同时避免了电火花产生,减少了许多安全隐患,进而防范火灾、爆炸以及重大危险事故的发生,在一些特种作业,例如石油开采,矿井下钻的情况下提高了作业的安全性。

无线充电是以非接触方式,在用电设备和电源中间实现能量传输,以此对用电设备进行充电,该技术称为无线充电技术又称无接触能量传输技术,其优势在于充电器与用电装置之间以磁场传送能量,两者之间不用电线连接,因此充电器及用电装置都可以做到无导电接点外露。如今无线充电方式共有六种,包括电磁感应、磁共振、无线电波、超声波、红外激光以及电场耦合[3]。目前世界上大部分无线充电方案都是电磁感应式和磁共振式[4],小功率无线充电通常采用电磁感应式,而大功率无线充电通常采用谐振式。电磁感应技术目前是世界范围内使用最广泛的无线充电技术,其能在短距离以电磁波为媒介进行传输,但需要发射和接收设备有很强的辨别能力,而且电磁波的方向不能改变,除此之外它的传输距离较近且功率较小[5] [6],会向四周发射,因此造成的损失较大。磁共振式传输距离更远、效率也更高、功率能达到电磁感应式的数十数百倍,潜在的实用价值相对更高[7]。为了满足人们的需求,无线充电发展迅速,广泛应用于手机等数码产品、智能穿戴设备以及电动汽车等行业,其使用率也在迅速提高[8]。

## 2. 系统设计理念与传输原理

### 2.1. 无线电能传输系统的设计理念

无线充电模组采用磁耦合谐振无线充电原理,使用直流电源为 DC/AC 逆变电路供电,产生高频正弦振荡电流驱动发射线圈,发射电路由此进入谐振状态,再通过高频电磁场把能量传递给接收电路,带动

接收回路进入谐振，整流滤波电路把交流电转换成较为稳定的直流电提供给负载，由此完成电能的无线传输。主要内容包括：

- 1) 原理图设计与绘制：本原理图包括驱动电路、逆变电路发射电路和接收电路、整流滤波电路等。
- 2) 高频逆变电路的设计：通过 DC/AC 转换，将直流电逆变为高频的交流电，磁耦合式无线充电系统工作频率一般在 100 kHz~10 MHz 之间。
- 3) 驱动电路的选择：选择低功耗的振荡器 LTC6900。振荡器频率由单个外部电阻器编程，运行电压可以在 2.7~5.5 V 之间，并且有 50% 的占空比方波输出。频率范围可控，可以控制在 1 kHz~20 MHz 之间。

## 2.2. 磁耦合谐振式无线电能传输原理

磁耦合谐振式无线充电系统，由能量发送和接收装置组成，使用磁共振原理。主要包括：逆变电路，整流滤波电路两大部分，直流电经过 DC/AC 电路逆变后变成交流电，来驱动电路，交流电再经过发射线圈将能量转化为电磁能量，从而传递给接收线圈，实现能量转换，在接收线圈中产生电能，最后通过整流滤波的作用，转换成直流电，从而来让负载获得合适的电压，电流来正常工作，最终实现无线电能传输的效果。发射端如图 1 所示，接收端如图 2 所示。

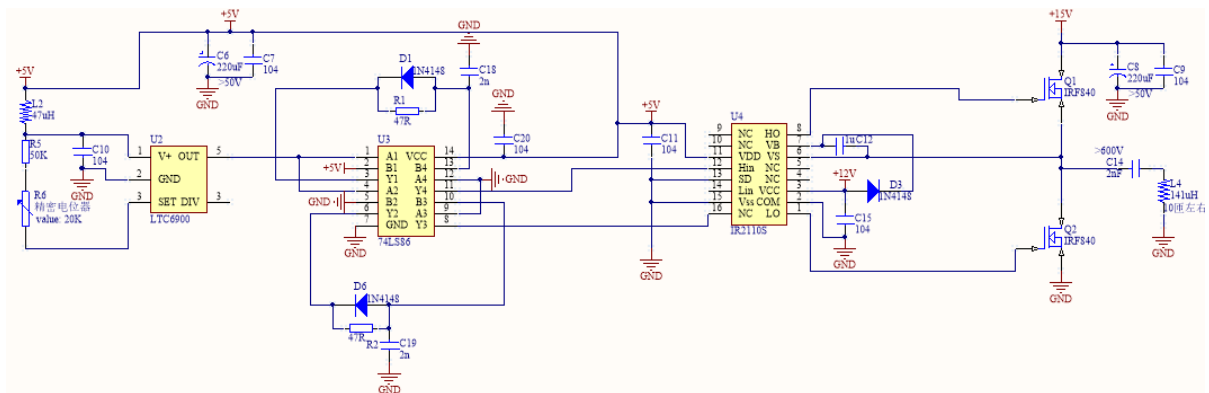


Figure 1. Schematic diagram of the transmitting end

图 1. 发射端原理图

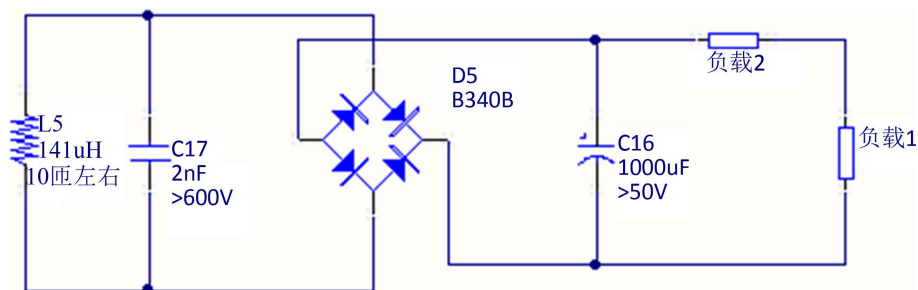


Figure 2. Schematic diagram of the receiving end

图 2. 接收端原理图

## 3. 无线电能传输系统设计

### 3.1. E 类谐振式逆变电路

由于磁耦合无线充电系统的工作频率在 100 kHz~10 MHz 之间，所以逆变电路选择高频逆变技术。通过比较全桥逆变电路、半桥逆变电路、自激逆变电路和 E 类谐振式逆变电路，最终选择 E 类谐振式逆

变电路，其兆赫兹级别的输出频率恰好满足实验要求，不但工作频率和工作效率高，而且是单管工作，成本较低，维护检修时更加方便。其原理图如图 3，选取一个电感值远大于  $L$  的大电感  $L_0$ ，为电路提供比较大的电流，电路中将  $R$  视为整个电路的等效电阻。

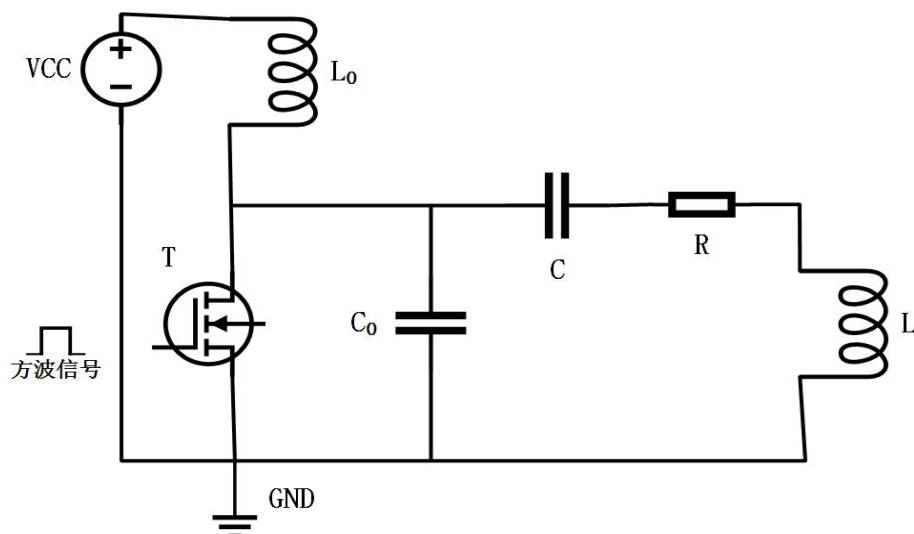


Figure 3. Class E resonant inverter circuit  
图 3. E 类谐振式逆变电路

### 3.2. 驱动电路

由于本设计的电路工作频率为 MHz 级别，所以为了达到实验要求，选择的振荡器须为高频芯片，因此本设计选择 LTC6900 低功率振荡器，它是一种精密、低功耗的振荡器，使用方便，占用空间小。振荡器频率由单个外部电阻器编程，运行电压可以在 2.7~5.5 V 之间，并且有 50% 的占空比方波输出。频率范围可控，可以控制在 1 kHz~20 MHz 之间，电路图如图 4。

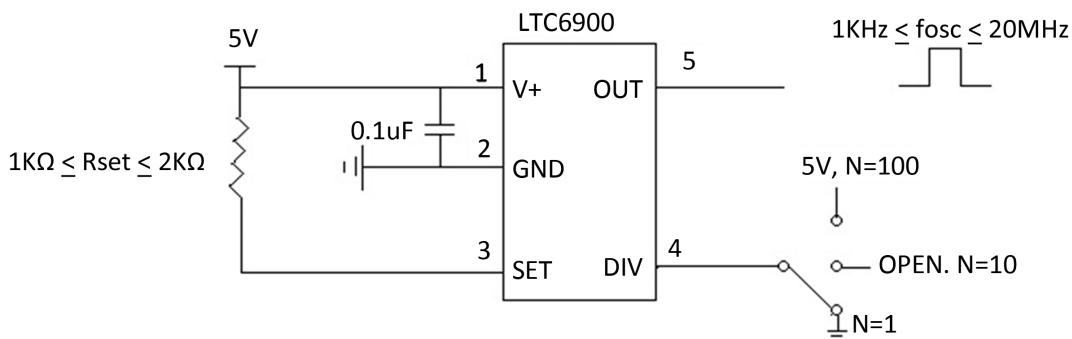


Figure 4. LTC6900 oscillator circuit diagram  
图 4. LTC6900 型振荡器电路图

### 3.3. 整流滤波电路

整流滤波电路部分是通过观察接收端的负载是否能够正常工作来判断实验是否成功，本实验负载为 LED 灯，实验现象为 LED 灯能否正常发光。而 LED 灯需要的电压较低，所以需要整流电路来将高频交流电压转化为 LED 灯所需电压。半波整流电路电路结构简单，只运用了一个二极管，因此它的输出电压只有半周，并且半波整流电路的利用率很低，不能达到理想效果。全波整流电路由两只二极管组成，电

路也相对简单，但效率却大幅度提升，而且整流器件所承受的反向电压较高。桥式整流电路有四只二极管首尾连接而成，桥式整流是对二极管半波整流的一种改进。半波整流利用二极管单向导通特性，在输入为标准正弦波的情况下，输出获得正弦波的正半部分。

桥式整流器利用四个二极管，两两对接。输入正弦波的正半部分是两只管导通，得到正的输出；输入正弦波的负半部分时，另两只管导通，由于这两只管是反接的，所以输出还是得到正弦波的正半部分，如图 5 所示。桥式整流器对输入正弦波的利用效率比半波整流高一倍。桥式整流是交流电转换成直流电的第一个步骤，该方式效率是三种整流方式里最高的，所以最终选择桥式整流作为接收电路的整流方式。

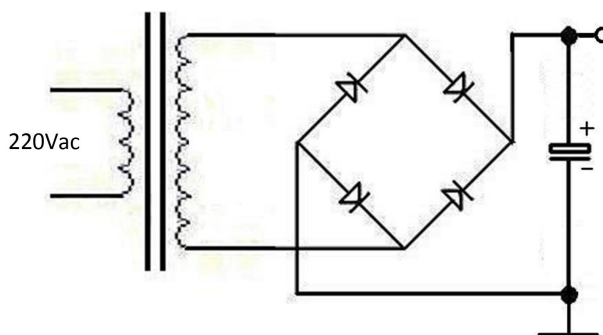


Figure 5. Bridge rectifier circuit  
图 5. 桥式整流电路

#### 4. 磁耦合谐振式无线充电模块波形测试

基于所构建的实验样机进行实验测试，接入 16 V 直流电压，本设计的测试主要是对发射端、接收端以及负载端进行输入输出波形的测试，通过对在不同端点得到的实验波形进行分析，验证是否达到设计的预期目标。

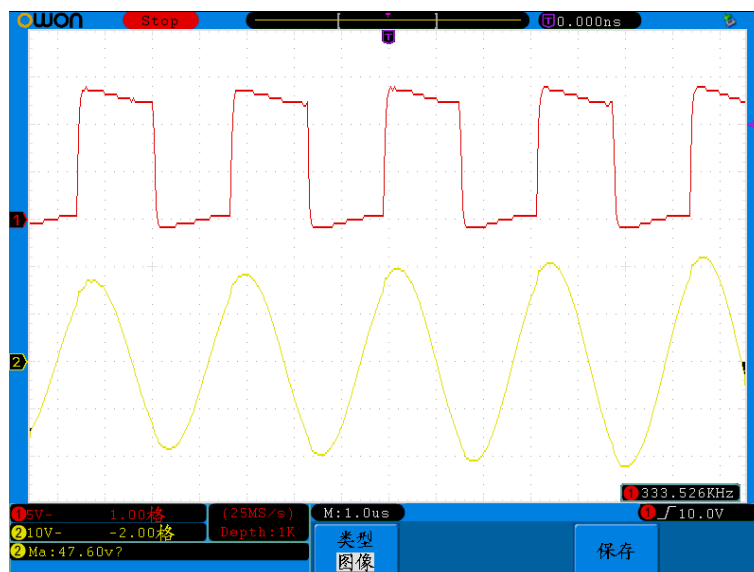


Figure 6. Waveforms on both sides of the transmitting coil capacitance  
图 6. 发射端线圈电容两侧波形图

图 6 为发射端线圈电容两侧波形图，根据电容特性以及图示可以分析出，在零到四分之一周期时，

电压从 0 到峰值，电压对电容进行正充电，四分之一到二分之一周期，电压从峰值到 0，电压对电容进行正向放电，二分之一到四分之三周期，电压从零到负峰值，电压对电容反向充电，四分之三到周期结束，电压从负峰值到 0，电压对电容反向放电，如此循环，达到一个正弦波的效果，来输出给线圈。

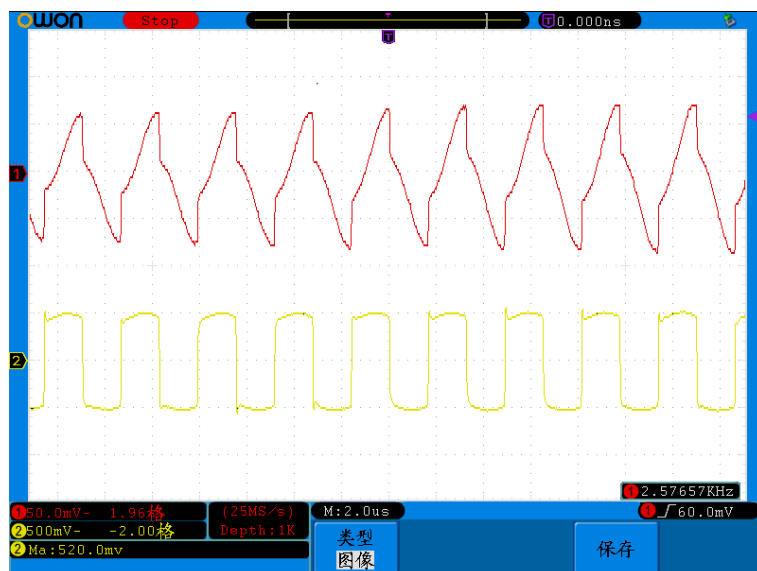


Figure 7. Waveforms on both sides of the receiving coil capacitance  
图 7. 接收端线圈电容两侧波形图

接收端线圈波形图如图 7 所示，接收端的电容主要是起滤波的作用，根据电容的特性，可以过滤掉三角波和方波等直流分量，再输出一个比较稳定的正弦波给到整流端，为整流做准备。考虑到实验中存在无线传输距离的影响，以及实验室电子设备高频干扰等因素，实际测试中输出波形趋向于方波和交流波的叠加交替出现。

## 5. 结论

本文所提系统搭建完成之后，对其进行了测试，实验结果显示发光二极管发亮，电路实现了短距离小功率的无线传输，且二极管的亮度与两线圈的距离成反比。综上所述，磁耦合谐振式变换器是无线电能传输系统的重要组成部分，本文主要介绍了无线电能传输系统的设计理念以及磁耦合谐振式无线电能传输原理，并对整流电路逆变电路和驱动电路进行了介绍，利用互感耦合模型搭建等效电路，通过谐振特性分析，提出了电压调节及频率跟踪控制策略，最后搭建了试验控制平台。由试验结果验证了理论分析的正确性与可行性，具有一定的参考价值。

## 基金项目

国家级大学生创新训练计划项目(202210061014)。

## 参考文献

- [1] 中国科协学会学术部. 无线电能传输关键技术问题与应用前景[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [2] 刘瑞. 小功率磁耦合谐振式无线电能传输特性及其实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [3] 古丽萍. 令人期待的无线电力传输及其发展[J]. 中国无线电, 2012(1): 27-30.
- [4] Shinohara, N. (2012) The Wireless Power Transmission: Inductive Coupling, Radio Wave, and Resonance Coupling.

---

*Wiley Interdisciplinary Reviews Energy & Environment*, **1**, 337-346. <https://doi.org/10.1002/wene.43>

- [5] 谢利涛, 赵志强, 王彦莉. 无线充电技术及其应用[J]. 河南科技, 2011(3): 68-69.
- [6] 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 1-13.
- [7] Kiani, M. and Ghovanloo, M. (2012) The Circuit Theory Behind Coupled-Mode Magnetic Resonance-Based Wireless Power Transmission. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, **59**, 2065-2074. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2011.2180446>
- [8] 王洪博, 朱轶智, 杨军, 等. 无线供电技术的发展和前景[J]. 电信技术, 2010(9): 56-59.