

注：国家自然科学基金项目 (NO. 51477010)

摘要：针对无线供电技术的广泛应用，设计了一种小型无线电能传输装置，着重介绍无线供电技术的实际应用及优势，说明了该小型系统的基本原理，并根据原理设计了其原边电路、副边电路以及耦合补偿部分，在 Matlab Simulink 中搭建了该小型系统的仿真模块，验证了系统的工作效率和功率。结果表明了所设计电路的正确性和有效性，可应用于多种小型无线电能传输装置中。

关键词：无线电能传输技术；感应耦合；小型电能传输装置

中图分类号：TM724

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)12-0014-06

收稿日期：2018-10-19

一种无线供电电路的设计与仿真研究

王嘉琪 李娟

北京信息科技大学自动化学院，北京 100192

一、引言

电 器设备传统的供电方式主要都是通过金属直接接触实现的，在易燃、易爆、高温、潮湿的环境中容易引发安全事故。无线供电方式可实现电能的非接触供电，在安全性和灵活性等方面显示更大的优势。

无线供电技术目前已经广泛应用于国内外各领域，例如医疗设备、工业监测设备、家用电器、智能设备，甚至是电动汽车等，其行业发展必将创造更多种可能。

本文基于该技术的优势，以感应耦合电能传输技术 (Inductive Coupled Power Transmission, ICPT) [1-3] 为核心，设计了一款小型无线电能传输装置。与传统的有线电能传输装置相比，该装置改善了直接金属接触供电系统的缺点，在实际生活中有着更实用的价值。系统具有以下几个优点：

- 1、避免了直接接触产生的摩擦，不会出现变形的情况，因此使用寿命更长；
- 2、解决了传统的有线电能传输装置在使用过程中由于金属外露而引发的接触不良、易燃易爆等安全事故问题，提高了使用安全性；
- 3、由于不直接接触，避免了磨损、腐

蚀等环境因素对输电传输的影响，可靠性更强。

二、小型无线电能传输系统原理分析

小型无线电能传输系统的基本工作原理是利用高频逆变环节将注入的直流电转变为高频交变电流注入到原边线圈，利用电磁感应将原边线圈中的高频交变电流产生高频交变磁场与副边线圈感应耦合产生感应电动势，该感应电动势又通过功率调节电路将得到的高频交流电转变为负载工作所需的直流电能 [4]，系统能量传输示意图如图 1 所示。

图 1 中的小型无线电能传输系统中的原边线圈与副边线圈之间空气间隙很小，因此耦合系数 K 较大。为了提高系统的能量传输效率以及功率传输能力，需

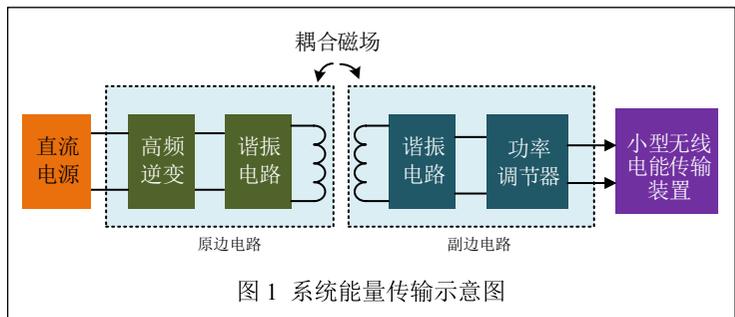


图 1 系统能量传输示意图

要对原、副边进行谐振补偿。功率调节器一般为直流—直流变换器，具体选择哪种变换器，要根据负载端的需求与副边线圈拾取的电压值来选择。

三、小型无线电能传输系统的设计

制定一个系统，首要的是要搞清楚系统的设计需求，从而才能根据需求制定设计方案，进而搭建仿真模型验证方案设计的合理性与可行性，该小型无线电能传输系统的设计需求如下：

- (1) 电源输入工作电压：5 V~10 V；
- (2) 原边电路电流： ≤ 2 A；
- (3) 接收输出电压：5 V \pm 10 %；
- (4) 接收输出电流：1 A \pm 2 %；
- (5) 工作频率：20 kHz~100 kHz；
- (6) 效率： ≥ 70 %。

设计系统时，原边线圈与副边线圈之间的间隙使得系统存在漏电感，在能量传输的过程中产生无功功率，为减少系统无功功率的消耗，通常采用补偿容抗的方法来抵消系统中的感抗，从而为原边线圈提供质量较好的高频交流电，满足系统的参数需求是最基本的，其次还要考虑系统设计的合理性，因此成本和体积成为不可或缺的考虑因素，设计体积应尽可能的小，成本也应尽可能的低，可靠性高、稳定性强的系统。

1、小型无线电能传输系统的补偿拓扑选择

根据补偿电路的复杂程度，小型无线电能传输系统可分为基本无功补偿和混合型无功补偿，基本的补偿拓扑又可分为有电容串联补偿（S）和电容并联补偿（P）2种形式。根据原边功率补偿环节以及副边功率补偿环节的结构不同，可以分为SS、SP、PS、PP这4种最基本的补偿结构。

每种拓扑结构都有着各自的优势，在进行拓扑结构选择的过程中，应综合考虑各方面需求，最终选择能达到自己需求的拓扑结构。综合比较来说，SP拓扑结构更容易控制，而且也能达到一个较为理想的耦合功率传输效果，同时原边的谐振电流也不会很大，是比较理想的结构，因此系统选用SP拓扑^[5-6]。

2、小型无线电能传输系统的补偿拓扑参数计算

本文设计的小型无线电能传输系统的补偿拓扑参

数计算分析步骤如下：

- (1) 考虑到该装置的体积与重量，线圈不可能绕太多，原边电感值定为20 μ H，副边电感值定为30 μ H；
- (2) 原边电容不可能太大，因此频率不能太小，频率太大也会增加开关器件的损耗，因此规定为实验室常用频率85 kHz；
- (3) 系统属于紧耦合，取耦合系数 $K=0.7$ ；
- (4) 匹配的参数应满足整体效率 ≥ 70 %。

由于线圈的内阻很小，在计算时忽略不计，根据补偿结构的拓扑形式，计算补偿电容值，其结构如图2所示。

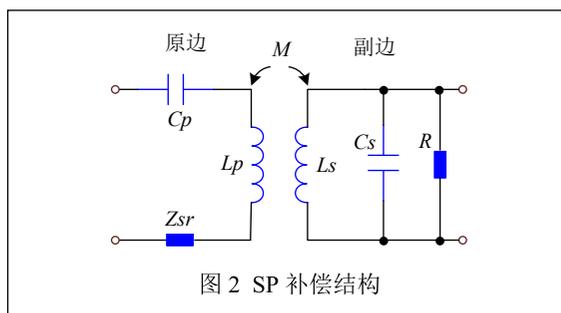


图2 SP补偿结构

图2中，原边阻抗 Z_p 为：

$$Z_p = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + Z_{sr} \quad (1)$$

其中， ω —谐振角频率；

L_p —原边能量发送线圈的电感；

C_p —补偿电容；

Z_{sr} —原边的反射阻抗，有：

$$Z_{sr} = \frac{\omega^2 M^2 R}{R^2(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + \omega^2 L_s^2} - j \left[\frac{\omega^3 M^2 [C_s R^2 (\omega^2 L_s C_s - 1) + L_s]}{R^2(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + \omega^2 L_s^2} \right] \quad (2)$$

其中， M —互感系数；

L_s —副边能量拾取线圈电感；

C_s —副边补偿电容；

R —负载。

要使原边谐振，即使原边阻抗 Z_p 的虚部为零，由公式（1）和（2）得：

$$\frac{(\omega^2 L_p C_p - 1)}{\omega C_p} = \frac{\omega^3 M^2 [C_s R^2 (\omega^2 L_s C_s - 1) + L_s]}{R^2(1 - \omega^2 L_s C_s)^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (3)$$

当副边工作在谐振频率点时，原边传输能量的效率最大，谐振角频率 ω 为：

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (4)$$

其中， ω_0 —电路固有谐振角频率，由电路本身参数 L_s 、 C_s 决定。

将 (4) 代入 (3) 得：

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 (L_p - \frac{M^2}{L_s})} \quad (5)$$

互感耦合系数 K 为：

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (6)$$

由于 $f = \frac{\omega_0}{2\pi} = 85\text{kHz}$ ， $L_s = 30\mu\text{H}$ ， $L_p = 20\mu\text{H}$ ， $K = 0.7$ ，根据公式 (4) ~ (5) 可以得出： $C_s = 11.7 \times 10^{-8}\text{F}$ ， $C_p = 34.38 \times 10^{-8}\text{F}$ ， $M = 17.15 \times 10^{-6}\text{H}$ 。

3、小型无线电能传输系统原边电路的设计

原边电路用于实现电能的高频变换与电磁波能量转换，主要是由高频逆变电路和谐振电路组成，因此涉及高频逆变电路和谐振电路的选择，谐振电路在上节已经进行了选择，现在需要选择合适的高频逆变电路，这是整个原边电路很重要的部分，逆变过后的交流电的质量直接影响后面谐振电路电能的输出质量，而且还需考虑体积、质量、成本以及转换效率等因素。

高频逆变电路的拓扑结构可以分为桥式变换拓扑、能量注入型变换拓扑，以及自激振荡式变换拓扑。全桥式逆变电路开关管电压不高，输出功率大，宜采用软开关工作方式。半桥式逆变电路和推挽式逆变电路所用的开关器件少，电路驱动简单，但功率管承受电源电压和电流较大，逆变电路损耗也大，因此选用全桥拓扑结构。

高频逆变电路根据直流侧电源性质不同主要分为电压型和电流型的全桥拓扑结构。电压型逆变电路是指由电压型直流电源供电的逆变电路，它的直流侧为电压源，或并联有大电容，相当于电压源，直流侧电压基本无脉动，直流回路呈现低阻抗。电流型逆变电路的直流侧串联有大电感，相当于电流源，直流侧电压基本无脉动。由于本文设计的是小型无线电能传输

装置，考虑装置的实际体积、重量、成本、效率等因素，串联大电感不太现实，因此本文采用电压型单相全桥式逆变电路，如图 3 所示。

图 3 中通过控制 4 个开关管的导通，实现从直流到交流的逆变，为了减小功率管的开关损耗以及电磁干扰，本文采用软开关技术，其控制电路方框图如图 4 所示。

软开关技术的原理就是在原来的电路上加上小电感、电容等谐振元件，在开关过程的前后加入谐振过程，从而消除了电压和电流的重叠部分。软开关技术有效地提高了开关频率，降低了开关损耗和开关噪声，得到了广泛的应用。

图 4 中的软开关控制电路将原边电流作为采样信号，通过采样比较电路、逻辑组合形成驱动信号，进而驱动单相全桥逆变电路中的四个开关管的导通与关断，使驱动信号与电流过零信号一致，从而实现开关管零电流关断，零电压开通，即软开关谐振。

4、小型无线电能传输系统副边电路的设计

在副边电路中，通过整流装置可以将副边线圈得到的交流电整流成直流电，再通过滤波电路、稳压电路得到负载所需的直流电压与电流。通过原、副边电路的参数计算，副边拾取电压规定为 $10\text{V} \pm 2\text{V}$ ，为达

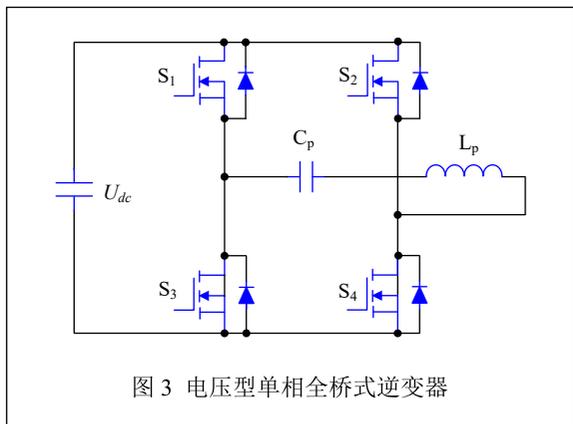


图 3 电压型单相全桥式逆变器

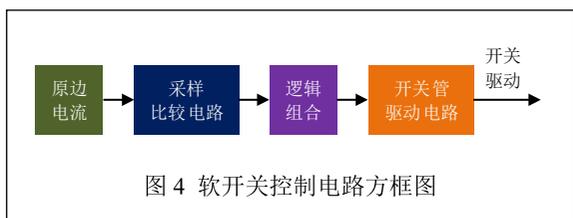
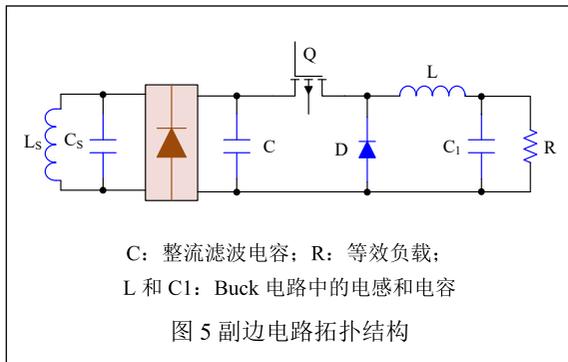


图 4 软开关控制电路方框图



到负载端所需求的电压，调压电路采用 Buck 电路，具体拓扑结构如图 5 所示。图中 $R=5\ \Omega$ ，考虑到实际应用中的尺寸要求，电容和电感的值不可能取太大，此外还要保证负载接收电能的稳定性与快速性，尽量减少纹波，输出高质量的电能。

四、小型无线电能传输系统仿真验证

1、系统的仿真实验

为了验证该小型无线电能传输系统的原、副边谐振电路参数匹配的合理性与正确性，在 Simulink 中搭建仿真模型进行验证。

图 6 为在 Matlab Simulink 中搭建的仿真模型，包括直流输入电压、单相全桥逆变电路、耦合补偿电路、整流电路以及用于调压稳压的 Buck 电路，另外的一些模块用于测量电压、电流的有效值以及系统的效率。表 1 中的参数为理论计算值，将这组参数值运用到仿真系统中，通过仿真结果验证参数设置的正确性。

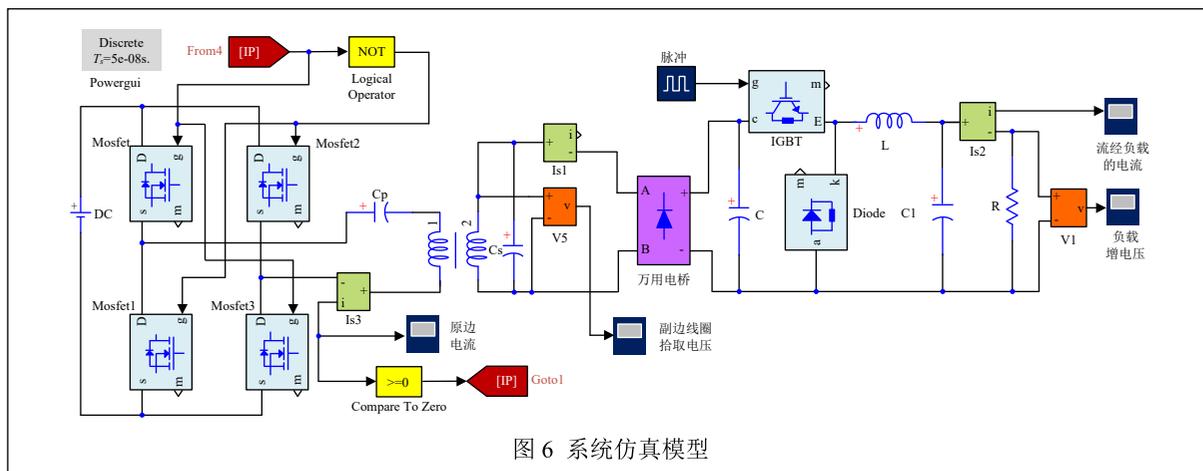
表 1 仿真参数表

物理参数	参数值
原边输入直流电压 $U_{DC}(V)$	5
原边谐振电容 $C_p(\mu F)$	0.34
原边谐振电感 $L_p(\mu H)$	20
副边拾取电容 $C_s(\mu F)$	0.12
副边拾取电感 $L_s(\mu H)$	30
原、副边互感 $M(\mu H)$	17.15
原边开关频率 $f(kHz)$	85
耦合系数 K	0.7
电容 $C(\mu F)$	1
电感 $L(\mu H)$	15
电容 $C_1(\mu F)$	30

2、仿真结果及结果分析

Matlab Simulink 中搭建的仿真模型中设置参数，在频率为 85 kHz 的情况下进行仿真，并对原边电路电流、副边电路电压和电流、负载两端的电压、流过负载的电流进行采样，并分析是否符合设计要求。

图 7 为原边电路电流波形图。设计需求中要求原边电路电流值不超过 2 A，而仿真模型中测得原边电流的有效值为 1.095 A，符合系统的设计需求。图 8 为副边线圈拾取电压波形图，波形在 0.0035 s 时趋于稳定，根据原边与副边的参数匹配，将副边线圈的拾取电压设置在 $10\ V \pm 2\ V$ ，经仿真模型中有效值模块测得副边拾取电压的有效值为 9.814 V，在设定值的范围内，并可以推算出 Buck 电路的占空比应设置在 50 % 左右，进而系统在 Buck 电路后输出所需的电压 5 V。



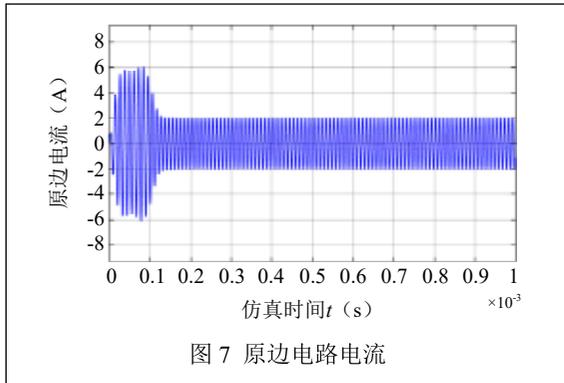


图7 原边电路电流

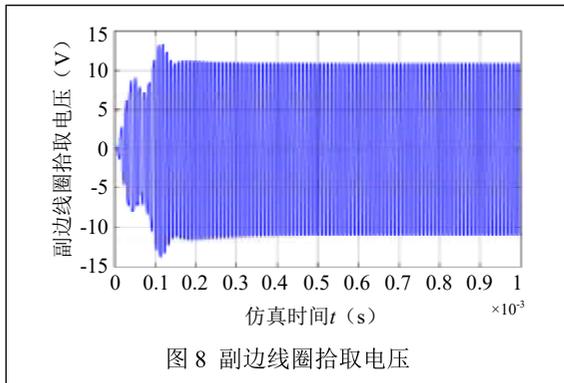


图8 副边线圈拾取电压

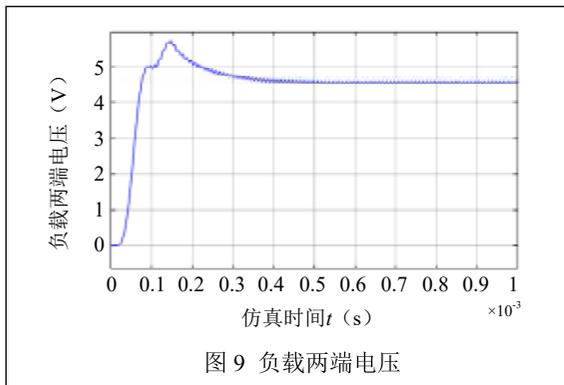


图9 负载两端电压

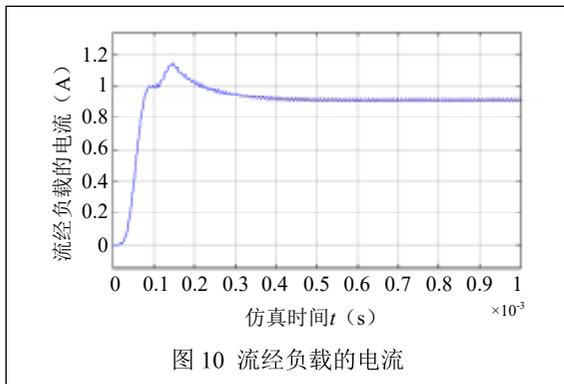


图10 流经负载的电流

图9、图10分别为负载两端的电压波形图与负载的输入电流波形，在0.025 s时，电压和电流都达到稳定值，电压值稳定在4.6 V，纹波小于0.5 V，满足接收端电压的设计需求 $5\text{ V} \pm 10\%$ ；电流值稳定在0.922 A，纹波小于0.01 V，满足接收输出电流的设计需求 $1\text{ A} \pm 2\%$ 。

3、与设计指标对比情况

接收端的输出电流与电压、原边电路电流等指标都已达到本文的设计需求，具体参数值由表2所示。

表2 参数对比表

指标	原定设计参数	实际参数
接收端输出电压 (V)	5	4.552
接收端输出电流 (A)	1	0.9104
效率 (%)	70	75.65
原边电路电流 (A)	≤ 2	1.095

通过仿真可以得到该小型电能传输系统的输出功率为4.144 W，输入功率为5.477 W，进而可以得到系统的运行效率，通过计算得出，系统的效率为75.65%，与原定指标70%相比，已经达到了设计需求。

五、结论

本文以一种小型无线电能传输系统的设计为背景，对无线电能传输技术在该系统中的应用进行了简单的介绍和分析。着重阐述单相全桥逆变电路在该系统中的使用意义，对补偿结构的选型和补偿参数计算进行了详尽的介绍，所设计的电路可用于多种小型无线供电装置。本文采用Simulink搭建仿真模型，通过结果波形验证了各参数指标，满足了设计需求，但电路的实用化还需要研究耦合距离、结构封装等问题，因此该技术仍然有着广阔的研究空间。

参考文献

- [1] 杜博文. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2017.
- [2] 唐玲. 磁耦合谐振式无线电能传输装置的系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(03): 64-65.
- [3] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的

- 发展 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
- [4] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [5] 吴卓坪. 小型无线电能传输装置设计与实现 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [6] 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.

Design and Simulation of a Wireless Power Supply Circuit

WANG Jia-qi, LI Juan

(School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the wide application of wireless power supply technology, a small wireless energy transmission device is designed. The practical application and advantages of wireless power supply technology are introduced. The basic principle of the small system is explained. The primary side circuit and secondary side are designed according to the principle. In the circuit and the coupling compensation part, the simulation module of the small system is built in Matlab Simulink, which verifies the working efficiency and power of the system. The results show that the designed circuit is correct and effective, and can be applied to a variety of small wireless energy transmission devices.

Key words: radio energy transmission technology; inductive coupling; Small power transmission device

作者简介

王嘉琪: 北京信息科技大学自动化学院, 硕士研究生, 研究方向为电力系统次同步振荡模态辨识分析。

通信地址: 北京市海淀区清河小营东路 12 号

邮编: 100192

邮箱: 863699806@qq.com

李娟: 北京信息科技大学自动化学院, 副教授, 博士, 研究方向为传感检测技术及其在电力系统中的应用。