

一种高效率星载电源无线能量传输系统

陈 强,张俊亭,陶建秋,费春梅,周肖楠,卫 倩

(上海空间电源研究所,上海 200245)

摘 要: 无接触感应电能传输技术作为一种新型的电能传输技术,具有供电安全、方便灵活的优点。本文针对磁耦合谐振式无线能量传输技术进行研究,提出一种适用于星载电源的采用串联补偿拓扑的无线能量传输系统,具体介绍功率控制和转换电路及松耦合变压器的设计;设计了一种高效率无线能量转换电路,通过建立一个 220 W 原理样机对系统进行验证,实际测量在 10 cm 左右的传输距离,无线供电效率可达 82%。该研究对卫星电源无线供电技术具有一定的参考意义。

关键词: 无线能量传输;星载电源;磁耦合谐振;高效率

中图分类号: TM 724 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.02.019

A High Efficiency Wireless Power Transmission System for Spaceborne Power

CHEN Qiang, ZHANG Juntong, TAO Jianqiu, FEI Chunmei, ZHOU Xiaonan, WEI Qian

(Shanghai Institute of Space Power Supply, Shanghai 200245, China)

Abstract: As a new type of power transmission technology, contactless inductive power transmission has the advantage of convenient, flexible, and safe power supply. In this paper, the wireless power transmission (WPT) technology based on magnetic resonant coupling is studied. A WPT system for spaceborne power supply with series compensation topology is proposed. The power control, conversion circuits, and loosely coupled transformer design are introduced in detail. A high efficiency conversion circuit is designed. A 220 W principle prototype is set up to test the designed system. The results show that the WPT efficiency can reach 82% at the transmission distance of 10 cm. The research has certain reference significance to the WPT technology for satellites.

Key words: wireless power transmission (WPT); spaceborne power; magnetic resonant coupling; high efficiency

0 引言

目前,电能主要是导线经过电连接器直接接触进行传输的,由于存在物理接触和电气接触,电能传输在一些应用场景中会受到限制,且安全性和可靠性低。相比有线传输,无线能量传输具有成本低、适应性强、兼容性好、防水防尘等优点^[1-3]。2006年,磁耦合谐振无线能量传输技术被美国麻省理工学院(MIT)学者正式提出,现在,无线能量传输技术已经广泛应用于电动汽车充电、智能家居、医疗设备及航空航天等领域,是一种安全、可靠、灵活、高效的供电方式^[4-5]。

随着航天技术不断发展,空间应用不断深

入,对卫星的灵活性和抗风险能力的要求也越来越高,卫星载荷的形式也更加多样化,单一的电能直接传输的方式也越来越不能满足星载电源的应用需求^[6]。因此,对高传输功率和高效率的星载无线能量传输技术进行研究具有重要的科研意义。

实现磁耦合谐振无线能量传输的关键部分是初、次级可分离的耦合变压器,由于耦合变压器磁路中存在空气磁路,变压器漏感较大,耦合系数不高,严重影响了能量传输功率和效率,无线能量传输技术的应用因此受限^[7-8]。

文献[6]提出一种阻抗匹配网络模型,使系统

收稿日期:2019-12-25;修回日期:2020-01-07

作者简介:陈 强(1992—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为开关电源的设计。

通信作者:张俊亭(1980—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为开关电源的设计。

在不同负载条件下均能达到最大传输效率;文献[7]提出了一种垂直双中继级联系统,可使无线传输距离大幅增加;文献[8]提出一种基于逆变器输出电压和电流的频率跟踪方法,实施跟踪系统固有谐振频率,从而提高效率。

为解决上述问题,本文提出了一种可用于星载电源的无线能量传输系统,利用串联补偿谐振技术,采用平面螺旋线圈结构的耦合变压器,将直流输入 60 V 电压通过无线传输,转换为 31.5 V 电压输出,供给负载使用和蓄电池充电。搭建原理样机,在 220 W 工作条件下,测得无线传输环节效率可达 90%,整个无线能量传输系统的效率在 82% 以上。

1 系统设计和磁耦合谐振能量传输原理

1.1 无线能量传输系统设计

本文研究了具有 2 个相同频率的线圈,由于耦合作用产生谐振,进而生成能量传输的高速通道,最终实现能量的高效率传递。由于在此传播过程中非谐振物体几乎没有能量的传递,因此不会产生干扰,传输效率相应较高。本文的线圈采用螺旋线圈并在发射端加入了补偿电容,一旦发射线圈中有高频交流流过,同时对串联补偿电容进行充电,接收端便会产生相应的电流^[12]。但是如果想要产生“强耦合”的话就需要 2 个线圈的工作频率保持一致,保证电能持续输送到接收端,同时实现电能的无线高效传输。磁耦合谐振无线能量传输的原理框图如图 1 所示。

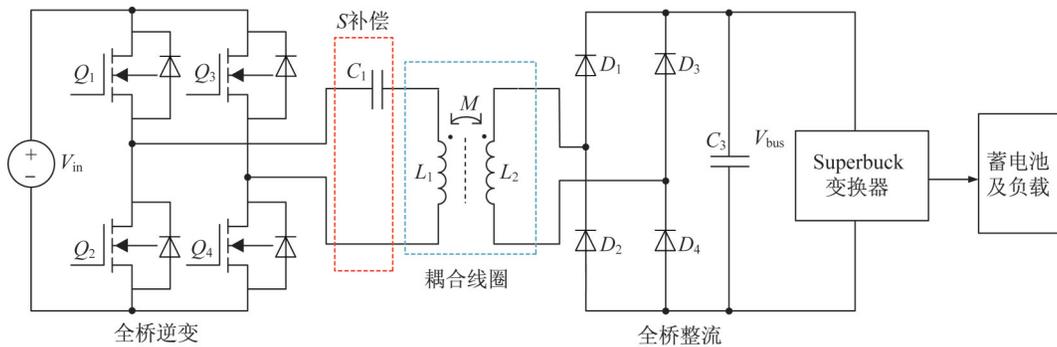


图 1 磁耦合谐振无线能量传输原理框图

Fig.1 Schematic diagram of WPT based on strongly coupled magnetic resonances

1.2 磁耦合谐振能量传输等效模型

发射线圈串联谐振的无线能量传输系统等效电路如图 2 所示。

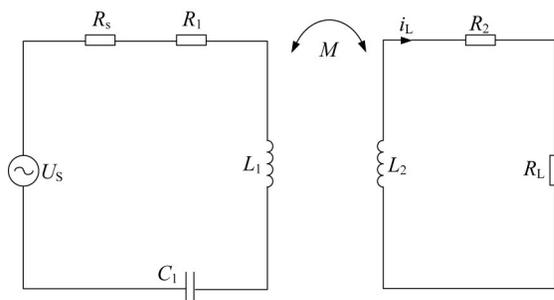


图 2 无线能量传输系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuits of WPT

图中: U_s 为交流激励电源; R_s 为电源内阻; R_1 、 R_2 为线圈等效内阻; L_1 、 L_2 为线圈的电感; M 为两个

线圈之间的耦合系数; C_1 为串联谐振电容; R_L 为负载电阻。

$\omega = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ 为系统的谐振频率,根据环路电流定理,得到接收线圈的回路电流 i_L 为

$$i_L = \frac{j\omega U_s M}{\omega^2 M^2 + (R_1 + R_s)(R_2 + R_L)} \quad (1)$$

负载功率 P_L 为

$$P_L = \frac{\omega^2 U_s^2 M^2 R_L}{[\omega^2 M^2 + (R_1 + R_s)(R_2 + R_L)]^2} \quad (2)$$

式中: ω 为谐振频率; M 为耦合线圈的互感系数。

通过输出功率表达式可以看出:无线能量传输的输出功率与输入电压、供电直流源内阻、耦合线圈的内阻、负载、谐振频率 ω 和耦合线圈的互感系数 M 有关。其中, ω 由谐振电容的容值决定, M 则与耦合线圈之间的相对位置及耦合介质有关。

2 无线能量传输系统的设计与实现

2.1 无线能量传输发射调节器设计

无线能量发射调节器主要包括全桥逆变电路和驱动电路组成,如图 3 所示。

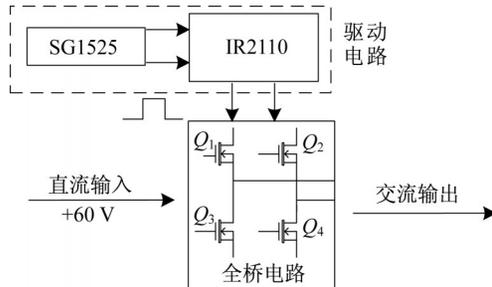


图 3 发射调节器电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of emission regulator circuit

驱动信号发生电路选择 SG1525 脉宽调制芯片,可以通过调节 PWM 波的输出频率,控制耦合器的谐振频率。电压型全桥逆变电路上管所需要的驱动是浮地的,因此,驱动电路选择 IR2110 驱动芯片,每个 IR2110 芯片可以输出两路交替的驱动信

号。MOS 管选择 771 所生产的 LCS7583T1RH 型抗辐射 N 沟道场效应晶体管, MOS 管是为空间环境应用研制的高可靠场效应晶体管,该器件开关速度快、易于并联、温度稳定性好,具有低导通电阻和低栅电荷特点,可有效降低开关损耗,提高系统供电效率。

2.2 无线能量传输接收调节器设计

无线能量传输接收调节器的原理框图如图 4 所示,主要包括全桥整流滤波电路和 Superbuck 变换器。整流后 Superbuck 变换器的输入电压范围为 60~90 V,输出稳压点设置为 31.5 V,输出额定电流 7 A。控制电路采用电压电流反馈控制^[12],考虑到载荷含有蓄电池,因此,在控制电路加入了限流保护功能,当输出电流小于 7.5 A 时,电压环输出,电流环不输出,电路实现稳压的功能;当输出电流超过 7.5 A 时,电压环不输出,电流环输出,实现对电路的限流保护。Superbuck 的特点是输入端电感有利于减小输入电流纹波,同时具有较好的浪涌抑制效果,有利于抑制电路的电流冲击。

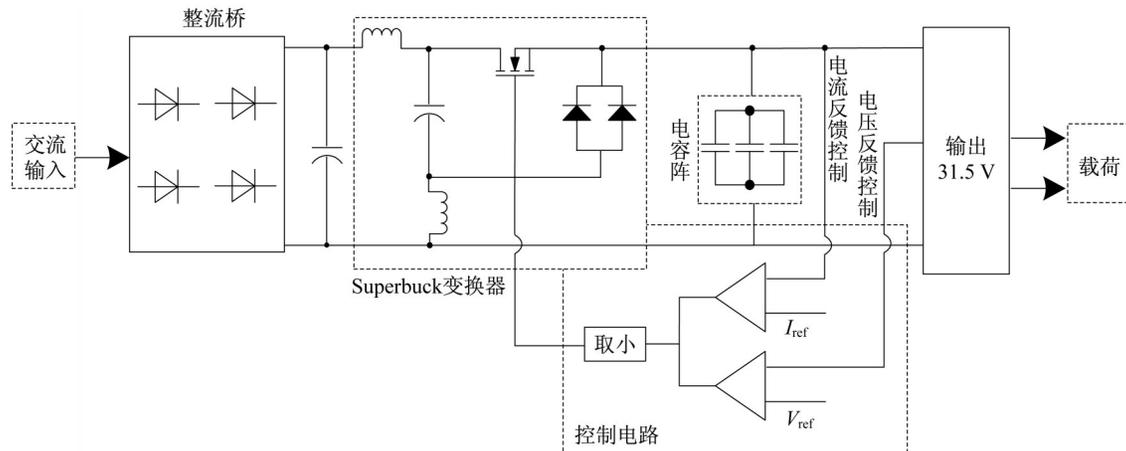


图 4 接收调节器电路原理图

Fig.4 Schematic diagram of receiver-regulator circuit

2.3 无线能量传输耦合机构设计

无线能量传输的关键部分之一在于耦合机构的设计。耦合机构的线圈一般分为两种形式:一种称为平面螺旋线圈,即导线呈螺旋形绕线并布满整个线圈面积;另一种称为空间螺旋盘式线圈,当盘式螺旋线圈在谐振状态时,其磁场具有较强的方向性,即磁场强度随线圈轴向距离的衰减速度较慢。

因此,在长距离大功率能量传输场合多采用这一类线圈^[13]。但是,具有相同电感量的空间螺旋线圈,其所耗材料与占用空间均高于平面盘式线圈,因此限制了这类线圈在某些领域的应用。本设计中采用的平面螺旋线圈如图 5 所示。在发射线圈和接收线圈安装面上,分别增加了 8 个对称分布的 L 型磁芯,以此对线圈产生的磁场增加束缚作用,有利于能量从发射线圈到接收线圈的传输。

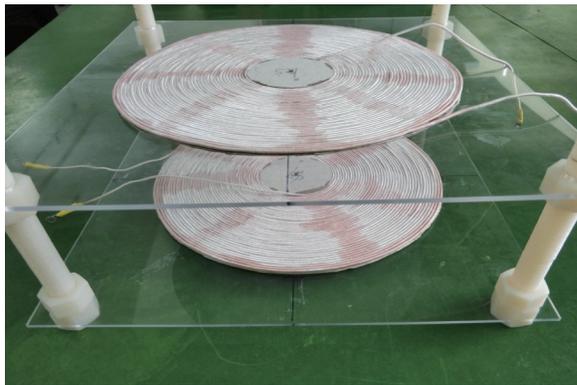


图 5 平面螺旋线圈耦合机构设计

Fig.5 Coupling mechanism design of plane spiral coils

3 实验

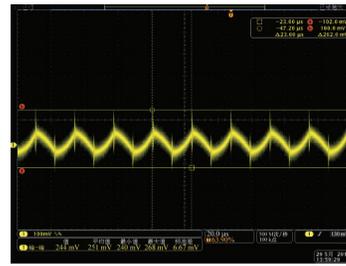
基于上述设计理论分析,设计并搭建了一个 220 W 的无线能量传输系统的原理样机。该原理样机的发射调节器输入电压为 60 V,输出负载电流从空载到 7.5 A 可调,输出电压恒定为 31.5 V。本设计中所绕制平面螺旋线圈发射线圈的电感值 118 μH ;接收线圈电感值为 143 μH ,两线圈距离设置为 10 cm,谐振电容 C_1 选择的是 4326 厂的 CBB22 型金属化聚丙烯薄膜电容器,容值为 0.2 μF ,耦合器的谐振频率为 43 kHz,滤波电容 C_3 容值为 270 μF 。在两个耦合线圈正对的条件下,调节负载变化,测量无线能量传输系统的输入输出电压和电流,测试数据见表 1。

表 1 无线能量传输系统效率测试

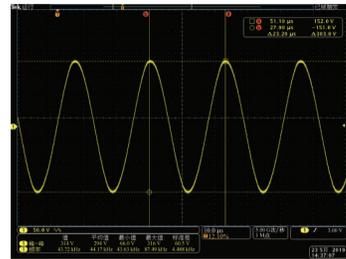
Tab.1 Efficiency test results of WPT

输入电压/V	输入电流/A	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W	传输效率/%
60	0.76	31.5	1	31.5	69.1
60	1.31	31.5	2	73.0	80.2
60	1.89	31.5	3	94.5	83.3
60	2.45	31.5	4	126.0	85.7
60	3.12	31.5	5	157.5	84.1
60	3.76	31.5	6	189.0	83.8
60	4.45	31.5	7	220.5	82.6

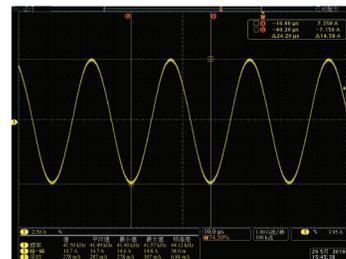
测得负载在 7 A 时的电路工作波形,如图 6 所示。图 6(a)是负载母线纹波波形,实测为 244 mV;图 6(b)和图 6(c)分别是谐振电容两端电压波形和谐振电流波形,可以看出,谐振电流和电压波形呈现出很好的正弦波,此时谐振电路传输效率最高。



(a) 母线电压纹波波形



(b) 谐振电容两端电压波形



(c) 谐振电容两端电流波形

图 6 无线能量传输系统主要工作波形

Fig.6 Main working waveforms of WPT

由表中测试数据分析可知:本文所设计的无线能量传输系统在轻载时传输效率较低;随着负载增加,传输效率也随着增加,在负载为 4 A 时传输效率达到最大 85.7%;随着负载再增加时,传输效率又稍微有点降低,但始终在 82% 以上。对原理样机进行分析计算,Superbuck 变换器的工作效率在 94% 左右,全桥逆变电路的 4 个 MOS 管也有一定的开关损耗,而对传输效率影响最大的是耦合器的能量传输,耦合器的形状、线圈匝数与大小、磁芯材料、系统频率等都影响着系统的传输效率。

4 结束语

本文对磁耦合谐振式无线能量传输系统进行了研究,对无线传输系统基本模型的等效电路进行了理论分析;推导出基于发射端串联补偿电路的输出功率关系式,对无线能量传输系统进行理论分析及硬件电路设计;最后搭建无线能量传输系统的原理样机。经过测试,本文所设计的无线能量传输系

统在输出 220 W 的条件下,整个系统的无线传输效率可以达到 82% 以上。本文所提出的无线能量传输系统,适用于卫星上特殊负载的供电及蓄电池充电,电源与负载间无电气连接和物理连接,供电可靠性高,同时传输功率较大、效率高,对今后无线能量传输系统在卫星上的应用具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张智娟,张湘雨.磁耦合谐振式无线能量传输理论研究
与实验验证[J].科学技术与工程,2018,18(33):53-58.
- [2] 程海松,姚友素.基于双边 LCC 补偿的无线能量数据传
输系统设计[J].电工技术学报,2018,33(2):295-304.
- [3] 朱国荣,林鹏.无线能量传输系统双 LCC 谐振补偿电
路研究[J].华中科技大学学报,2017,45(5):104-109.
- [4] 张庆岩,周士贵.磁耦合谐振式无线能量传输系统的频
率特性[J].电子科学技术,2017,5(4):50-56.
- [5] 刘珍珍,谢阳.磁谐振耦合式无线能量传输系统的特性
分析[J].机电工程技术,2017,46(9):108-111.
- [6] 苏翔.磁耦合谐振无线电能传输关键技术研究[D].杭
州:杭州电子科技大学,2018.
- [7] 刘小畅.磁耦合谐振式无线能量传输若干关键技术研
究[D].武汉:武汉大学,2015.
- [8] 刘尚江,沈艳霞.磁耦合谐振式无线电能传输系统频率
跟踪研究[J].电力电子技术,2019,53(2):47-50.
- [9] 陈庆彬,张伟豪.基于漏感补偿的可变恒流输出补偿网
络参数确定方法及其特性分析[J].电工技术学报,
2017,32(22):22-33.
- [10] 郑颖楠,陈红.非接触电能传输系统的松耦合变压器实
验研究[J].电工电能新技术,2011,30(1):64-68.
- [11] 李小磊,秦会斌.磁耦合谐振式的电动汽车无线充电系
统研究[J].通信电源技术,2018,35(9):1-7.
- [12] 程新,薛鸿翔.基于 superbuck 变换器的双闭环控制策
略[J].微电机,2017,50(2):41-44.
- [13] 杜玉洁,刘宜成.平面螺旋线圈的无线电能传输特性研
究[J].电子测量技术,2017,40(8):48-52.
- [4] AKELLA M R, ALFRIEND K T. The probability of
collision between space objects [J]. Journal of
Guidance, Control, and Dynamics, 2000, 23(5): 769-
722.
- [5] 白显宗.空间目标碰撞预警中的碰撞概率问题研究
[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [6] 白显宗,陈磊.空间目标碰撞概率计算方法研究[J].宇
航学报,2008,29(4):1435-1442.
- [7] CHAN F K. Spacecraft collision probability [J]. EL
SEGUNDO, CA: The Aerospace Press, 2008.
- [8] 冯昊,向开恒.美俄卫星碰撞事件验证及其对我国卫星
的影响分析[J].航天器工程,2009,18(5):20-27.
- [9] HOOTS F R, ROEHRICH R L. Space track report
No.3: models for propagation of NORAD element sets
[R]. Peterson: Aerospace Defense Command, United
States Air Force, 1980.
- [10] HOOTS F R, SCHUMACHER P W, GLOVER R
A. History of analytical orbit modeling in the U. S.
space surveillance system [J]. Journal of Guidance,
Control, and Dynamics, 2012, 27(2):174-185.
- [11] 张海涛,张占月,吴帅.地球静止轨道卫星碰撞碎片
短期演化风险分析[J].上海航天,2019,36(1):
66-77.
- [12] 郭超,陈勇.基于 ABM 方法的空间碎片网捕体系结构
建模[J].指挥控制与仿真,2012(5):11-15.
- [13] 刘贺龙,何英姿,谈树萍.带偏置点的绳系拖拽离轨系
统动力学研究[J].空间控制技术与应用,2017,43(1):
42-48.
- [14] 杨丽薇,温泉,赵尚弘.天基平台激光清除小尺度空间
碎片降轨特性研究[J].应用光学,2018,39(2):
268-273.
- [15] 汪轶俊,古艳峰,唐明亮.长征四号乙/丙运载火箭末级
空间碎片减缓技术研究与应用[J].上海航天,2017
(6):1-6.

(上接第 143 页)