

# 基于 ZYNQ 平台的测发控无线供电系统的设计与实现

张 坤, 柴 波, 王晓洁, 张 鑫, 马元元

(西安微电子技术研究所, 西安 710054)

**摘要:** 针对地面测发控系统电能有线传输的局限性, 以及人工操作带来的不便, 设计一种基于 ZYNQ 平台的无线供电系统; 系统采用感应式无线输电基本原理, 设计系统结构由发送端和接收端组成; 电能通过发送端传输到接收端, 经过 ZYNQ-7000 平台的控制管理, 将电能合理分配到负载, 由上位机进行电能配置和信息显示; 经实验测试实现了发送端 12 V 输入下与接收端 50 W 的负载在距离 12 mm 以内系统功率稳定传输, 并且负载电压在 4~10 V 范围可调, 效率可达 75% 以上, 并能够实现信息监测和智能化管理, 适用于测发控系统设备。

**关键词:** 测发控系统; 无线供电; ZYNQ; 控制管理

## Design and Implementation of Wireless Power System In Missile Launch Control Based on ZYNQ Platform

Zhang Kun, Chai Bo, Wang Xiaojie, Zhang Xin, Ma Yuanyuan

(Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Aiming at the limitation of power cable transmission and the inconvenience of manual operation, a wireless power system based on ZYNQ platform is designed. The system adopts the basic principle of induction wireless transmission to design the system structure, which is composed of sending end and receiving end. The power is transmitted to receiving end through sending end, and then through the control and management of ZYNQ platform, the power can be reasonably distributed to the load, and the upper computer can configure power and display information. Through the experimental test, the system power transmission between the transmitter and the receiver is stable within 12 mm under 12 V input, and the load voltage is adjustable in the range of 4~10 V. The efficiency can reach more than 75%, and can realize information monitoring and intelligent management, which is suitable for the equipment of missile launch control system.

**Keywords:** missile launch control system; wireless power; ZYNQ; control and management

## 0 引言

伴随着航空技术的发展, 航天电源需求不断增加, 在地面测发控系统中, 各种设备电能的传输主要通过线缆进行传输<sup>[1]</sup>。这种有线的传输方式带来很多不便。电能传输过程中可能因老化、摩擦等因素直接影响各种用电设备的安全和寿命, 随着测发控系统复杂度的提高, 各种设备的供电需求不同, 设备移动范围在供电时受有线的限制, 不仅使得系统臃肿, 在密闭绝缘的环境下带来各种不便。近几年无线电能传输受到越来越多的重视, 无线电能传输迅速发展, 为上述问题的解决带来很好的契机。

ZYNQ-7000 SoC 系列集成 ARM 处理器的软件可编程性与 FPGA 的硬件可编程性, 可实现重要分析与硬件加速, 使软硬件设计更加灵活、可靠。

本文根据无线电能传输理论<sup>[2]</sup>, 设计一种基于 ZYNQ 平台的无线供电方案, 有利于接口标准化, 便于实现自动化和无人操作, 可以避免高压触电危险, 实现密闭环境下供电, 也可适应多种恶劣环境和天气。

## 1 系统结构及原理

目前主要有 3 种无线电能传输方式: 电磁感应式、微波输能、电磁场谐振方式。在本文中, 系统利用电磁感应原理<sup>[3]</sup>, 实现电能以无线的方式从发射端传输到接收端, 发射端和接收端各有一个线圈, 电能通过发送端线圈产生交变磁场, 耦合到接收端线圈, 最后通过接收端输出到供电设备。可以将电能发送端与接收端的组成结构看作变压器。在某个确定频率下, 线圈工作在谐振频率点, 由于发送和接收端线圈的谐振频率相同, 所以能高效地传输能量。结构原理如图 1 所示。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 系统总体结构

如图 2 所示, 本系统采用模块化设计, 整个系统由发送端 (TX) 和接收端 (RX) 组成, 其中发送端由供电电源和 TI 公司的电源芯片 BQ500215 为核心的发射模块组成,

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-01-10。

**作者简介:** 张 坤(1997-), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 主要从事计算机科学与技术方向的研究。

柴 波(1963-), 男, 陕西西安人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事空间计算机及容错技术方向的研究。

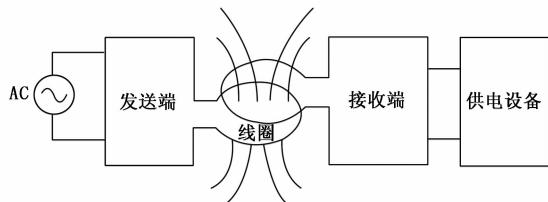


图 1 电磁感应原理

接收端主要以赛灵思公司 (Xilinx) 的 Zynq-7000 soc 为核心的控制模块和以 TI 的电源芯片 BQ51025 为核心的接收模块组成。

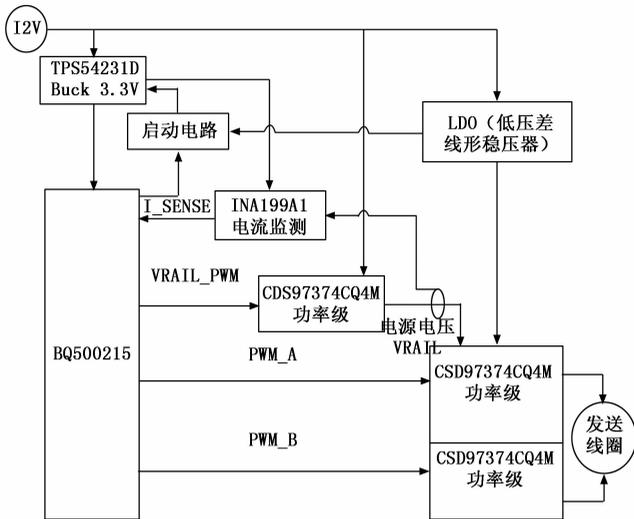


图 2 系统总体结构原理图

BQ500215 和 BQ51025 是美国德州仪器公司 (Ti) 制造的无线电源芯片, 符合无线电源联盟 WPC 标准<sup>[4]</sup>, 经过 Qi 认证<sup>[5]</sup>。BQ500215 为无线功率发射模块芯片, BQ51025 为无线功率接收芯片。

系统为满足测发控设备要求, 对小型功率器件进行无线供电, 主要设计参数要求能够为负载输出 10 W 以内功率, 并可调节负载电压 4~10 V 的范围变化, 使得接收端在 10 mm 以内的供电传输效率能够至少满足 60% 以上。

整个方案以接收端为控制中心, 一方面发送端能够自动探测识别接收端的信息; 另一方面可以控制接收模块向发射器进行识别匹配、功率申请, 设置接收模块的输出电压, 建立传输协议, 并实时收集负载的功率信息, 计算处理后可以得知系统状态, 通过系统频率、传输效率等信息, 分析处理发射端与接收端不同距离位置下的供电变化情况。此外, 系统外接 LED 指示灯指示供电状态。

### 2.2 发射端电路结构

图 3 为发射端电路结构框图, 电路主要包括电源、数字控制器 BQ500215、发送线圈、全桥式逆变电路和反馈电路。

1) 在本系统中, 输入电源电压为 12 V, 在电源输入端加入 LDO (低压差线性稳压器), 它通常具有极低的自有噪声和较高的电源抑制比, 以保证电源电压的恒定和实现有源噪声滤波。发射端线圈为符合无线充电联盟 WPC 标准的

线圈, 适用于 12 V 系统输入电压。

BQ500215 需要 3.3 V 电压运行, 电源通过降压转换器 TPS54231D 将电源电压转换为 3.3 V。

2) 无线功率发射模块的作用是将直流电逆变成交流电并调制相应的数据信息以便通过发射线圈传输给无线功率接收模块。系统无线供电的逆变电路为全桥式逆变电路。逆变电路将 DC 直流输入逆变成 AC 交流波形, 进而驱动由发射线圈与谐振电容组成的谐振电路。

Ti 公司的 CSD97374Q4M 功率器件是经过高度优化的设计, 用于高功率、高密度场合的同步降压转换器, 支持三态 PWM 输入。两个对称的半桥功率级组成一个全桥逆变电路, BQ500215 通过驱动全桥功率级来驱动线圈组, 全桥电路的 PWM 频率由 BQ500215 产生的 PWM-A 和 PWM-B 信号控制, 同时 BQ500215 产生 PWM 信号 (VRAIL\_PWM) 控制外部功率级电路来调节电源电压。

3) 电流监测器 INA199A1 将全桥电流信息反馈给 BQ500215, 确保电流处于合理的动态范围内, 具有过流保护作用。

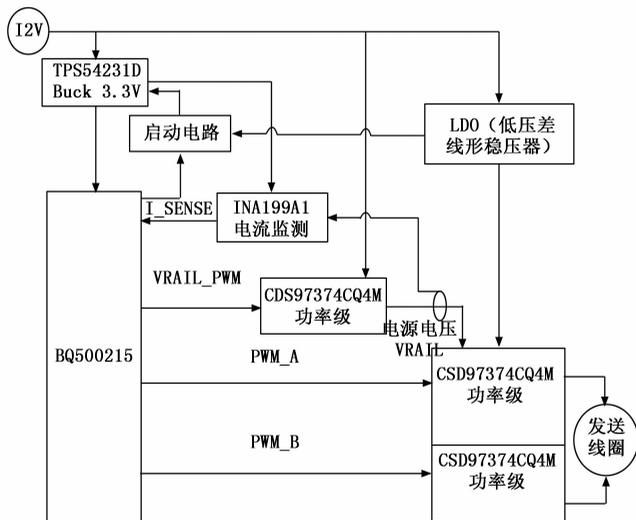


图 3 发射端电路结构

### 2.3 接收射端电路结构

图 4 为接收端电路结构, 主要包括接收线圈、功率接收电路和 ZYNQ-7000 控制电路。

功率接收电路的核心芯片为 BQ51025, BQ51025 具有输出电压调节和最大电流限制等功能。

ZYNQ-7000 系列是一种基于 Xilinx 全可编程的可扩展处理平台结构, 其内部主要为双核 ARM Cortex-A9 多核处理器的处理系统 PS (Processing System), 基于 Xilinx 可编程逻辑资源的可编程逻辑系统 PL (Programmable Logic)。PS 包含片上存储区、外部存储器和丰富功能的外设, PL 提供了用户可配置能力的丰富结构, 可通过 PS-PL 接口实现 PL 内定制的外设 (IP 核) 与 PS 内 Cortex-A9 双核处理器及相关资源的连接。

ZYNQ 处理器可通过 C 的 IP 核与 BQ51025 进行通讯, 可完成一系列电源控制管理功能, 例如设置输出电压, 对

电流限制引脚 ILIM 进行编程设置最大电流限制，读取系统线圈频率、接收功率、整流电压等。

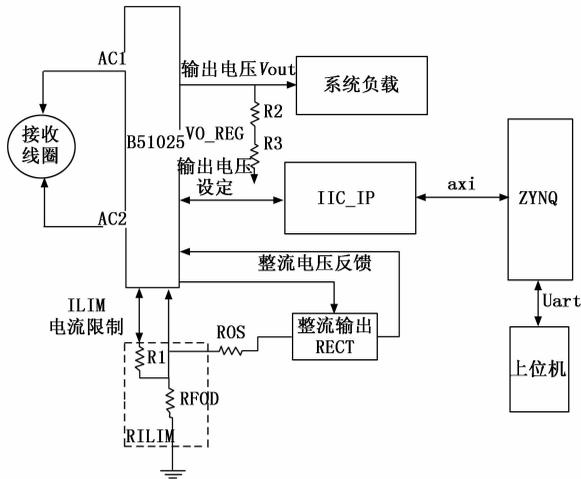


图 4 接收射端电路结构

在本系统设计中，Zynq-7000 Soc 的 PS 端包含处理器，DDR 存储器控制器和 UART 接口，在 PL 中，实现 C 总线接口。通过 AXI 接口，PS 端处理器与 PL 端的 C IP 互联，从而与设备 Bq51025 进行通信，同时通过 UART 传送信息和中断处理，完成系统无线供电的控制管理。基于 Zynq-7000 Soc 的硬件结构设计如图 5 所示。

上述硬件设计通过 vivado 软件进行设计，包括 ZYNQ-7000 系统的搭建、综合、布局布线、约束生成 bit 文件等步骤。软件部分通过 SDK 来设计，最后嵌入式系统联合调试。

接收线圈接收到发射线圈产生的能量后发生电磁感应，从而产生振荡电压，即获得 AC 交流电，图 4 中，AC1 和 AC2 为接收交流电输入接口，振荡电压通过 AC1 和 AC2 输

入 BQ51025 进行整流调制后输出。获得的直流电一方面给接收端上的元器件供电以组成电源回路，另一方面供给负载电路使用。

通过 BQ51025 输出的负载电压  $V_{out}$  可以通过反馈电阻分路来设置，即设置 VO\_REG， $V_{out}$  与 VO\_REG 的电压存在如下式关系，

$$K_w = \frac{VO\_REG}{V_{out}} \quad (1)$$

$$R_3 = \frac{K_w \times R_2}{1 - K_w} \quad (2)$$

式中， $R_2$  和  $R_3$  为分压反馈电阻，当  $VO\_REG=0.5\text{ V}$  时，选  $R_3=10\text{ K}$ ， $R_2=130\text{ K}$ ， $K_w=\frac{1}{14}$ 。利用这个比值，对 VO\_REG 的值进行编程时，相应地对输出电压进行编程设置。

### 3 系统软件设计

#### 3.1 系统工作流程

整个系统工作流程如图 6 所示有 4 个阶段。

1) 选择阶段：该阶段 TX 会探测线圈上是否有金属物体存在，一旦探测到有金属物质存在就进入 Ping 阶段。具体探测方法如下：在该阶段 TX 定时在发射线圈发送一个短时间的 PWM 输入，然后关闭发送信号后延迟  $0\sim 1\ 000\ \mu\text{s}$  再采样线圈上的电流值，如果采样到的电流值大于实验设定的阈值，则判定线圈上有金属物体存在，否则不存在。

2) Ping 阶段：在该阶段，TX 会给发射线圈一定时间的供电，RX 会在一定时间内返回一个数字 Ping 信号，当 TX 收到正常的 ping 信号后就进入识别与配置阶段，否则就取消 ping 信号，系统就返回到选择阶段。

3) 信息配置阶段：在该阶段，RX 会传输配置信息，主要为配置信息包，TX 在收到正确的配置信息后进入功率

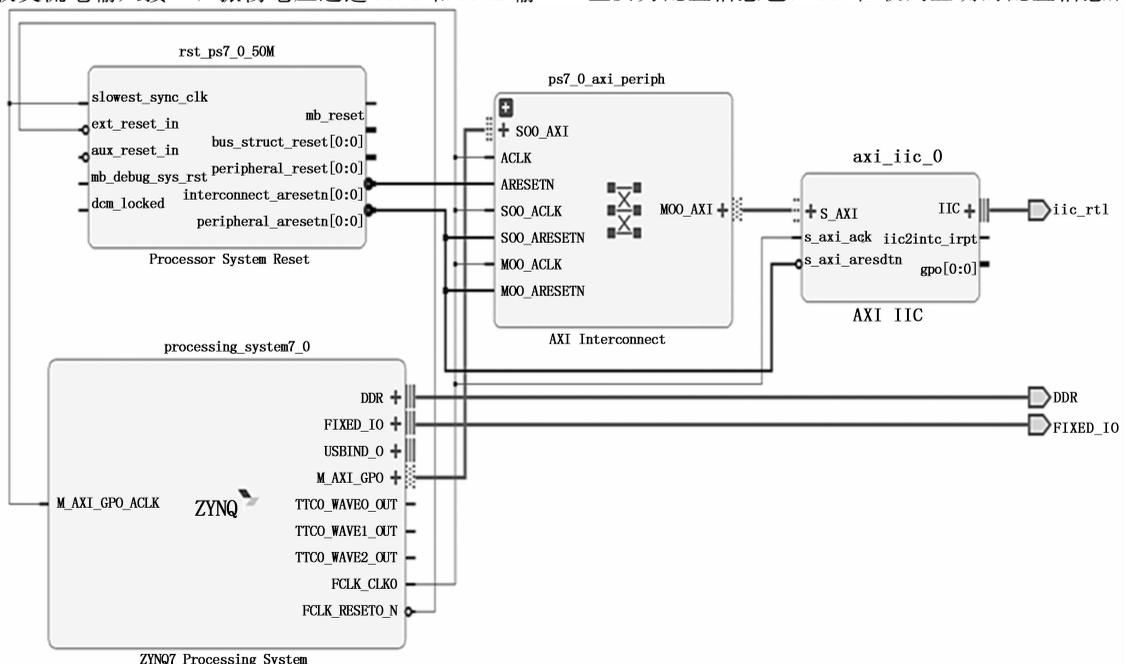


图 5 ZYNQ 控制电路结构

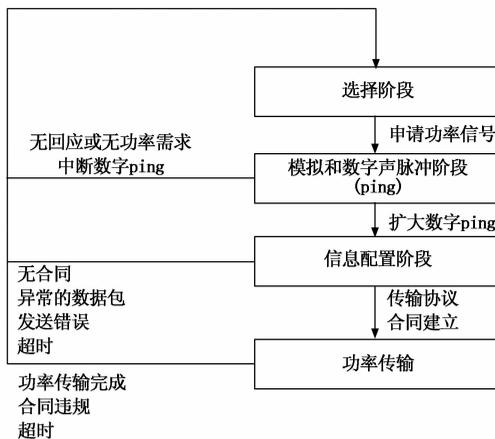


图 6 系统工作流程

传输阶段, 如果没有收到信息或者数据信息不正确, 系统状态就返回到选择阶段。

4) 功率传输阶段: 此阶段系统处于正常的能量传输阶段。在此过程中如果出现信息包传输错误、供电完成的情况, 系统就返回到选择阶段。

能量传输中, TX、RX 形成闭环, 通过 TX 调节占空比来控制能量传输。

上述中的数据包格式如表 1 所示, 由以下几部分组成: Preamble: 引导码, 为 11~25 个二进制数字“1”。

Header: 包头, 一个字节;

Message: 数据信息, 由包头信息决定;

Checksum: 校验码, 一个字节。

表 1 数据包格式

Preamble	Header	Message	Checksum
----------	--------	---------	----------

系统通主要通过软件中断来读取数据包并解析, 然后保存并发送。主要数据包有: 整流数据包、错误数据包、供电状态包、能量传输结束包、专有数据包、保留数据包。

在功率传输阶段, 系统控制回路如图 7 所示。

功率传输中通过 PID 算法控制工作频率和占空来使系统达到期望的工作点。发射模块与接收模块之间主要通过错误数据包来进行调节。错误数据包为接收模块当前的实际控制点与期望控制点差值, 即为系统误差值, 功率接收模块将错误数据包反馈到发射模块。发射模块通过系统误差值调节发射线圈的交流信号的幅值、频率、占空比等使系统工作在期望的工作点。

### 3.2 ZYNQ 控制程序流程

当功率发送器识别到接收设备存在时, 以 ZYNQ-7000 为控制核心的接收端程序流程如图 8 所示。

当发送端识别到接收端时, 程序开始进入初始化, 主要对底层过 C 的 IP 核以及接收端的各种寄存器进行初始化。然后接收端进入低功率等待状态, 一方面减少不必要的损耗; 另一方面程序进入串口中断, 并等待输入接收端的配置信息, 表示如下:

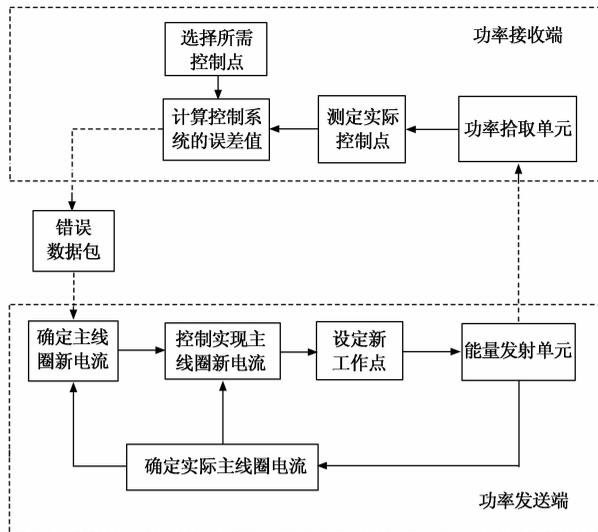


图 7 系统控制回路

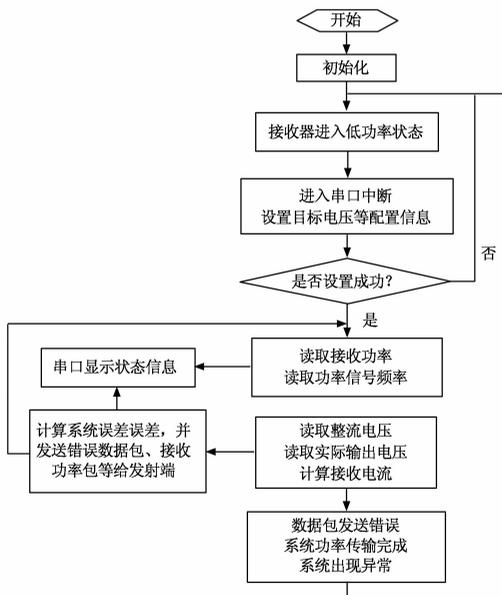


图 8 ZYNQ 控制程序流程

功率模式: PMode:  $A_w$ , 即最大接收功率。A 为输入值。

目标电压值,  $V_{out}$ :  $B_v$ 。B 为输入值。

最大电流限制,  $I_{lim}$ :  $C\%$ , C 为输入值, 系统输出电流最大为  $I_{max}$ , 这里 C 为最大电流的百分比, 具体可为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80%, 和 100%。

上述阶段相当于系统的识别和配置阶段。当配置信息设置成功后, 自动建立传输协议, 系统进入功率传输阶段。在这个阶段, 程序会依次按一定的时间间隔, 不断采集系统的供电状态信息, 主要包括以下:

- 1) 接收功率采集;
- 2) 功率信号频率采集;
- 3) 整流电压值采集;
- 4) 输出电压值采集。

以上各信息的采集均通过封装的单个函数来实现。这

些状态信息会通过串口发送到上位机显示，同时程序会发送控制错误包、接收功率包，以达到在功率传输阶段能够调整供电设备的能量需求。

在功率传输的同时，如果出现数据包发送错误、功率突异常状态或者传输结束时，系统中断功率传输，返回初始等待状态。其中功率传输结束的指令可以直接在上位机通过串口输入发送。如果接收端已经断开了它的输出负载，那么接收端仍旧需要确保它能够从发射端得到足够的功率，以便接收端对发射端的通信依旧能够正常进行。

#### 4 实验结果与分析

将发射端接入 12 V 的稳压源，此时供电指示灯正常点亮，绿灯快速不停闪烁，表示发射器正在探测是否有接收器存在，在不接入负载的情况下，将接收装置置于发射端线圈的中间位置。发射端绿灯闪烁减慢同时发出哔哔声，接收端指示灯亮起，表明正确识别到接收设备。

接收设备接入最大功率 50 W，阻值 10 的负载，设置电流限制为  $100\%I_{max}$ 。实验主要对输出电压控制和系统传输效率进行验证分析。

图 9 表示接收端的整流电压和输出电压调制状态，从图中可以看出整流电压、输出负载电压分别与期望目标电压近似 1:1，表明输出电压控制符合预期效果。由于整流电压直接将发射端传输的交流电压进行整流调制，所以略大于接收端输出电压。

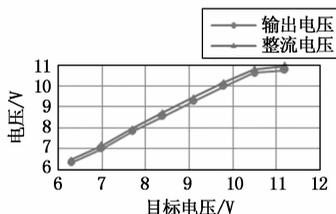


图 9 接收端电压

电路功率包括发射端的发送功率、接收端的接收功率及接收端的输出功率。接收端的接收功率是从发射端传输到接收端的，接收端的输出功率是从接收端输出给负载的，由于电路中存在各种损耗，一般来说，发送功率 > 接收端的接收功率 > 接收端的输出功率。随着负载的不同情况下的变化，系统传输效率变化情况如图 10 所示。

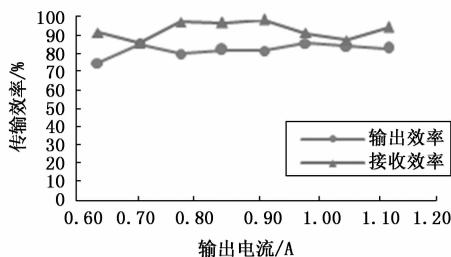
在图 10 (a) 中可以看出在发送端和接收端线圈表面贴近的距离下接收效率平均在 90% 以上，输出效率平均在 80% 以上，达到了很好的电能传输效果。

当逐渐增大发送端和接收端线圈表面距离时，传输效率变化如图 10 (b) 所示，可以看出随着距离增大，效率降低，当间距超过 1.5 cm 后效率骤降，当达到 2 cm 时效率几乎为 0。

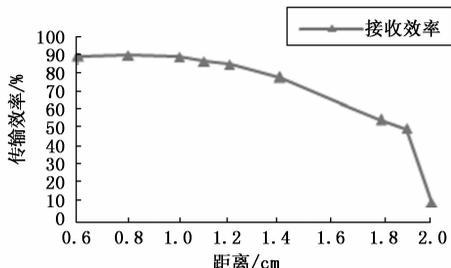
上述说明电磁感应式传输在距离较短时传输效率非常高，但同时距离变化非常敏感。

#### 5 结束语

本文针对测发控系统中各种设备有线电能传输的带来



(a) 不同电流传输效率变化



(b) 不同距离传输效率变化

图 10 功率传输效率变化

的不便和问题，以无线电能传输理论为基础，利用 TI 的无线电源芯片设计一种无线功率传输设备，并通过 ZYNQ-7000 SOC 的控制管理，实现了一种便携化、智能化的无线供电系统，通过系统验证，证明系统能够完成很好的电能传输控制，并且达到了较高的效率。由于目前的研究只是小功率条件下的机理验证，在未来的工程应用中还需增大功率、加长传输距离，同时也可以利用蓝牙、wifi 等无线的通信方式实现远程的控制。

#### 参考文献:

- [1] 支 晶. 运载火箭测发控系统远距离供电设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 房 聪. 无线电能传输技术的研究综述 [J]. 智慧工厂, 2018 (7): 35-36.
- [3] 姚韶臣. 探究电磁感应定律及其简单应用 [J]. 科技风, 2018 (27): 220, 242.
- [4] 刘 晖, 段利艳, 周静丽. 无线充电技术联盟认证解析 [J]. 安全与电磁兼容, 2015 (3): 47-49.
- [5] 寇 宏. Qi 认证与测试 [J]. 信息技术与标准, 2018 (11): 40-43.
- [6] 陈焕波, 杨本全, 袁 杰, 等. 基于 MSP430F149 的蓝牙无线充电系统设计 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (10) 107-110.
- [7] 杨培凯, 石 雄. 一种无线充电管理系统的电路设计 [J]. 电子与封装, 2016, 16 (4): 29-33.
- [8] 孔德琛, 胡海宁, 王 莹. 一种无线充电装置的设计与制作 [J]. 大学物理实验, 2015, 28 (2): 63-65.
- [9] 李星宇. 便携式小功率移动终端无线充电模块研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [10] Samanta S. Analysis and design of current-fed half-bridge (C)(LC)-(LC) resonant topology for inductive wireless power transfer application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 4 (53): 3917-3926.