

# 一种智能无线充电系统设计

叶先万<sup>1</sup>, 蒋碧波<sup>1</sup>, 李跃伟<sup>2</sup>

(1. 湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430000; 2. 中粮糖业辽宁有限公司, 辽宁 营口 115000)

**摘要:** 针对目前市场上存在的大部分无线充电系统充电效率低、充电电量可控性差等问题, 文章设计了一种全新的智能无线充电系统; 该系统在电池模块中嵌入电量采集模块、低功耗主控芯片和 2.4 G 通信模块, 充电模块中嵌入同样的主控和通信模块; 充电模块可通过 2.4 G 无线通信接收电池的实时电压和充电电流等信息, 根据内置的智能算法, 通过振幅调制载波功率限制, 实现自适应动态输出; 实验表明, 在有效距离内, 该系统具有较高的充电效率, 具体充电情况可根据电池实时电量信息进行智能控制, 有效地预防了电池过充和过放等问题; 该智能无线充电系统具有低功耗、转换效率高、能够对充放电智能管理等特点, 可广泛应用于智能家居、智能医疗、智能穿戴等领域, 具有良好的社会价值和经济价值。

**关键词:** 低功耗; 无线充电; 无线通信; 智能管理

## Design of an Intelligent Wireless Charging System

Ye Xianwan<sup>1</sup>, Jiang Bibo<sup>1</sup>, Li Yuewei<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430000, China;

2. China Grain Sugar Industry Liaoning Co., Ltd., Yingkou 115000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low charging efficiency and poor controllability of charging power in most wireless charging systems at present, a new intelligent wireless charging system is designed. The system is embedded in the battery module, the power acquisition module, the low-power master chip and the 2.4 G communication module. The charging module is embedded with the same main control and communication module. The charging module can receive the real-time voltage and charging current information of the battery through 2.4 G wireless communication. According to the built-in intelligent algorithm, the adaptive dynamic output can be realized by amplitude modulation carrier power limitation. Experiments show that the system has high charging efficiency within the effective distance, and the specific charging can be intelligently controlled according to the real-time battery information, which effectively prevents battery overcharge and over discharge. The intelligent wireless charging system has the characteristics of low power consumption, high conversion efficiency and intelligent management of charge and discharge. It can be widely applied in smart home, intelligent medical treatment, smart wear and other fields, and has good social and economic value.

**Keywords:** low power consumption; wireless charging; wireless communication; intelligent management

## 0 引言

近年来, 随着科技的快速发展, 人们生活水平得到了很大的提高, 日常生活日趋智能化。目前大部分电器依旧使用传统有线充电方式供电, 操作繁琐且存在触电隐患, 针对此现状, 文章自主设计了一种转换效率高并且可以对充放电过程进行智能管理的无线充电系统。

## 1 总体设计

### 1.1 总体设计框图

系统分为充电设备和电池设备两个部分。充电电源由外部市电接入, 经过内部控制电路连接至发射线圈, 电池设备接收线圈获得的能量经过内部控制电路为锂电池进行充电。两个部分的控制电路都连接 2.4 G 通信模块作为外设, 可以通过无线通信实时监测锂电池电量情况并进行及时有效的充放电, 进而实现智能管理。设计框图如图 1 所示。

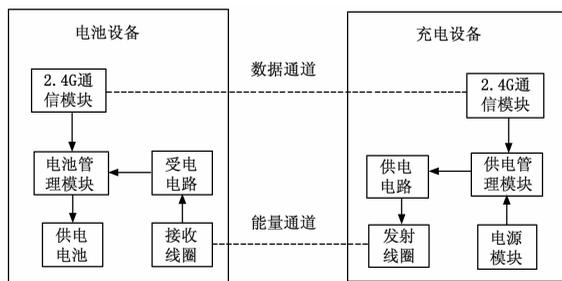


图 1 总体设计框图

### 1.2 模块方案选型

#### 1.2.1 供电电池选型

目前主流的供电电池有: 1) 普通化学干电池, 更换方便但容量小, 不能反复使用; 2) 纽扣电池, 体积小但不可反复使用, 报废污染环境; 3) 锂电池, 容量合适, 可反复使用, 且体积小, 环保; 通过多次实验反复对比论证, 最终选择可反复充电的 3.7 V 锂电池<sup>[1]</sup>为电源。

#### 1.2.2 电池管理模块选型

电池管理模块的功能为: 1) 接收线圈获得的能量经过管理电路提供给锂电池为其充电, 自主设计的电路图在硬件部分设计给出; 2) 通过 AD 采样获取锂电池电量信息, ARM 核内部编

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-04-03。

作者简介: 叶先万(1996-), 男, 湖北广水人, 大学, 主要从事无线通信方向的研究。

通讯作者: 李跃伟(1972-), 男, 辽宁营口人, 大专, 助理工程师, 主要从事仓储自动化方向的研究

表 1

充电方式	工作原理	充电距离	充电效率/%	一般用途	备注
电磁感应式	初级线圈与次级线圈电磁感应 <sup>[2]</sup>	厘米级别	70	数码产品的充电板、充电垫。	充电距离和效率不理想
磁共振式	通过阻抗匹配使震荡源发射电磁信号与接收震荡信号产生共振 <sup>[3]</sup>	数十厘米到数米间	80	于个人电脑、智能手机的无线充电设备。	比较符合作品要求
电场耦合式	通过沿垂直方向耦合两组非对称偶极子产生的感应电场来传输电能 <sup>[4]</sup>	超短距离	难测	只能在特定的位置才能精确地充电,在生活中应用领域有限。	很难实现
无线电波式	通过硅整流二极管天线将微波转换为电能 <sup>[5]</sup>	10 米以上	38	太空太阳能发电为卫星供电	不符合作品要求

程算法实时监测的反馈信息传递给 2.4 G 通信模块输出, 控制电路设计及编程思路在后面给出。

### 1.2.3 电源模块选型

充电设备的电力由 220 V 转 15 V 的电源适配器外接市电提供, 将得到的直流电经过 ZVS 模块变为交流电, 通过供电电路传递给发射线圈使其产生变化的磁场进行无线充电。

### 1.2.4 供电管理模块选型

供电管理模块作用为利用 PWM 功能控制输出。控制信号由 ARM 控制板输出, 输入信号为 2.4 G 模块传来锂电池的电量消息, 内部具体算法由后面软件部分给出。

### 1.2.5 充电方式选型

目前主要存在的无线充电方式有 4 种, 可总结如表 1 所示。

综合考虑充电距离和效率等因素, 通过理论和实际论证, 本产品采用磁共振式无线充电方式进行无线充电。

## 1.3 具体器件确定

经过理论设计和实验验证, 根据理论框图设计出具体电路模块如图 2 所示。最终对作品的有效器件及电路参数进行确定。

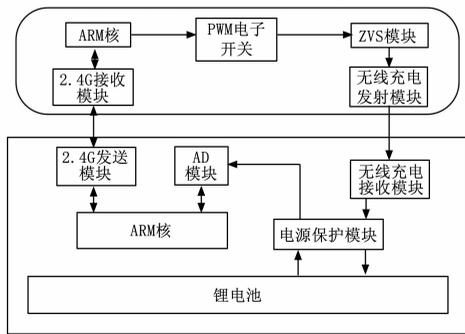


图 2 具体电路模块

1) 供电电池: 经过市场调研和实验测试, 最终选择容量为 2000 mAh 的 3.7 V 可自由充放电达到上千次的聚合物锂电池作为供电电池。

2) ARM 控制芯片: 采用 ARMv6M 的 Cortex M0 平台的 STM32L073, 具有超低功耗、操作简便等特点, 广泛应用于工控领域, 符合本产品的要求, 实现低功耗。

3) ZVS 模块: ZVS 模块主要使用了两个 UTC50N06 芯片、磁芯、稳压管, 该芯片带有两个大功率 MOS 管, 可以将直流信号转换成交流信号后传输给无线充电模块。

4) PWM 电子开关: PWM 电子开关模块选用的芯片型号

为 EL-817\_4DIP4, 它是常用的线性光耦, 在各种要求比较精密的功能电路中被普遍使用, 能够使上下级电路完全隔离且相互之间不产生影响<sup>[6]</sup>。

5) 2.4 G 无线传输模块: 采用 NRF24L01+ 模块设计, 射频芯片为 BK2425, 内部集成了所有与 RF 协议相关的高速信号处理部分, 易于开发, 经过实验验证, 传输效果良好。

6) AD 模块: 采用超小型 16 位 4 通道 ADS1115 精密模数转换器, 通常用于对精密度要求比较高的电路中, 工作性能良好, 适用于本设计电路。

7) 无线充电线圈设计: 经过反复实验筛选, 最终设计出导线线径为 0.5 mm 的外部绝缘铜线绕成的直径为 4 cm 的螺旋式线圈, 实测磁共振频率为 136 kHz 时充电效果最为理想<sup>[7]</sup>有效距离可达 10 cm。

## 2 硬件系统设计

### 2.1 硬件系统框图

硬件系统主要包括控制部分和驱动部分。控制部分以 ARM 为核心, 包括由 ARM 控制的 AD 和 2.4 G 发送模块。驱动部分包括电源、ZVS、PWM 电子开关、2.4 G 接收模块、无线充电发射等模块。整体结构如图 3 所示。

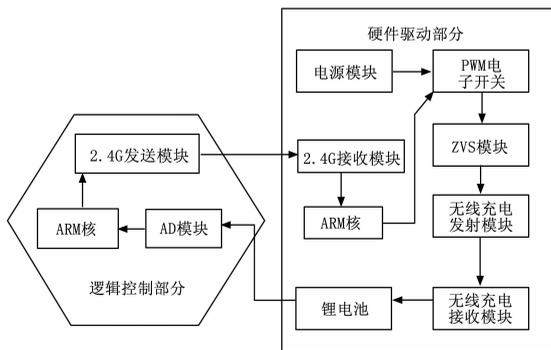


图 3 整体结构图

### 2.2 逻辑控制部分设计

逻辑控制部分由电源电路和主控电路两个部分组成, 主要作用为实时采样监测锂电池电量变化信息, 通过 ARM 核将反馈的信息由 2.4 G 模块发送给硬件驱动电路, 其工作原理如图 4 所示。

#### 2.2.1 电源电路设计

电源电路的作用为将感应线圈接收到的电能经过系列变换后为锂电池充电。电路采用双电源输入保证充电效果的高效性, 线圈接收的能量经过整流和滤波电路后传递给降压电路。降压

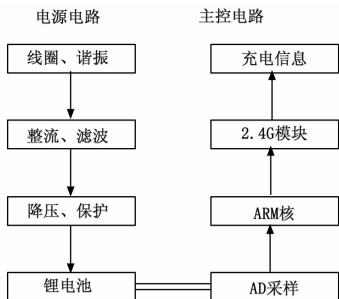


图 4 控制部分电路原理图

模块采用 MP1584 作为核心芯片, 内含可变电阻可以使输入电压降到 3.7 V 为锂电池供电。电池接入两端并接了包含 8205 和 DW01 两款电源保护 IC 芯片的锂电池保护电路, 进一步保证了电池充电的稳定性。该部分自主设计的电路图如图 5 所示。

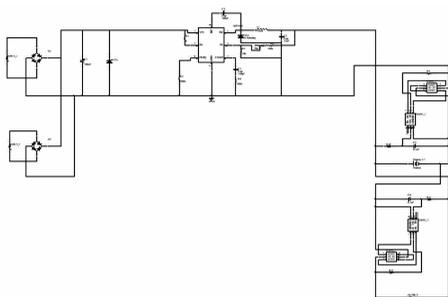


图 5 电源电路

### 2.2.2 主控电路设计

主控电路的作用为将采集到的电池电量信息做出相应的反馈。主控 ARM 芯片连接 AD 和 2.4 G 等外设, AD 实时监测锂电池电量情况, 并及时将信息反馈给主控芯片。当电池电量低于自己预先设定的预警值时, 主控芯片内部算法就会发出充电信息, 通过外设连接的 2.4 G 模块, 将信号经无线通信传送到外部充电设备, 使其开启 PWM 电子开关, 对电池进行无线充电; 同理, 当电池电量高于预设的电压值时, 主控芯片就会发出断电信号及时将充电断开, 从而避免了电池过充保证了电池正常充放电。该部分结构和自主设计电路<sup>[8]</sup>如图 6 所示。

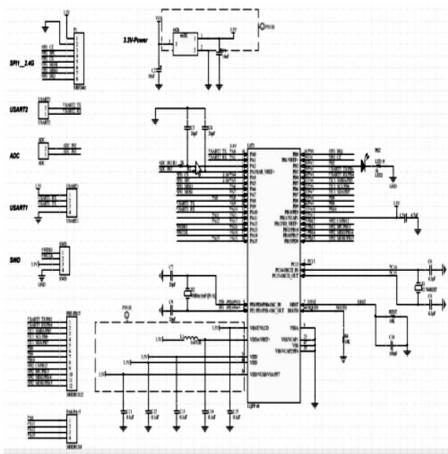


图 6 主控电路

### 2.3 硬件驱动部分设计

硬件驱动部分的主要作用是对主控板进行外部无线充电。该部分硬件电路连接可分为充电电路和控制电路两个部分, 充电电路的工作原理为由 220 V 转 15 V 的电源适配器外接市电输入, 经过降压模块得到 5 V 的工作电压, 再经过 ZVS 模块将直流电转换为交流电提供给发射线圈产生变化的磁场, 使其与接收线圈之间发生磁共振式感应进而实现无线充电。控制电路的工作原理为 2.4 G 接收模块的充放电信号输入给外部 ARM 主控板使之产生控制 PWM 电子开关工作的高低电平, 进而控制充电电路的工作, 实现了智能控制充放电。该部分的工作流程图如图 7 所示。

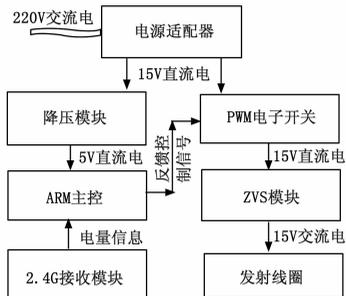


图 7 硬件驱动部分工作流程图

## 3 软件系统设计

### 3.1 软件系统构架

本作品的软件构架<sup>[9]</sup>可分为设备驱动层和系统调用层两个部分。设备驱动程序主要负责初始化 AD、SPI、GPIO 等基本外设, 系统调用层主要负责具体的功能设计, 给模块加入指定功能。软件系统构架如图 8 所示。

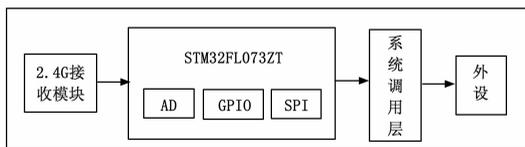


图 8 软件系统构架框图

### 3.2 设备驱动层设计

此部分设计主要完成以下三个功能:

- 1) 用于初始化。主要包括 GPIO 配置初始化、NVIC 配置初始化、AD 配置初始化、SPI 配置初始化以及完成一些基本电路如 LED 指示灯的初始化工作;
- 2) 用于读取信号。读取程序控制模块中正在输入和输出的控制信号的信息;
- 3) 用于数据保存。主要为硬件数据的保存, 以便设备在使用时出现故障能够及时恢复。

电池管理模块与充电管理模块的 ARM 主控板通过 2.4 G 无线通信进行智能连接, ARM 驱动程序流程框图如图 9 所示。

### 3.3 系统调用层设计

系统调用层<sup>[10]</sup>的功能设计主要需要完成两个功能, 一是通过调用 ST 官方函数库中的 AD、SPI 函数用来控制 ARM 核, 从而实现 AD 数据采样和 SPI 实时通信等功能, 二是根据需求的特定功能添加或删减功能函数以确保 AD 和 SPI 模块能

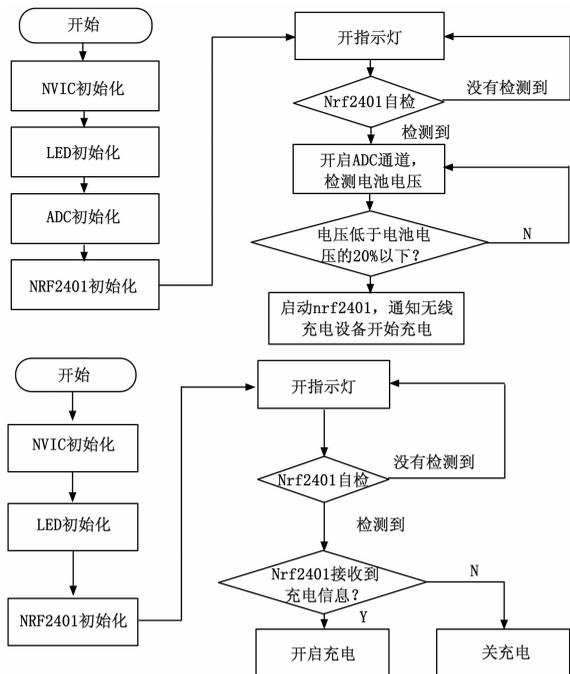


图 9 软件驱动层程序框图

够符合系统的设计要求。

## 4 电池充电性能分析

### 4.1 可充电电池充电原理

我们知道，为了使一般镍电池具有最佳的性能，必须在其电量全部放完之后才能开始进行下一轮充电，即需要用完一次充一次。锂电池不具备“记忆效应”，可以随时充电，但必须严格按照其自身特性曲线工作才能达到良好的性能。锂电池充电对充电电压精密度要求较高，当充电电压比额定电压小 0.1 V 时会导致充电不足，大于 0.1 V 时又会影响其安全性能<sup>[11]</sup>。正是由于锂电池独特的充电性质，分析其充电特性曲线并找到一种合适的充电策略是十分有必要的。

### 4.2 建立充电模型及仿真

目前常用的锂电池充电方法主要有：1) 分段式充电法；2) 限流恒压充电法；3) 分级定电流充电法三种。本部分采用对分级定电流充电法进行模拟与实际自主设计的无线充电性能进行对比，用来检测设计系统性能的好坏

#### 4.2.1 等效模型建立

由于锂电池内部的电化学反应是受温度影响的非线性过程，且其性能受极化深度、工况及老化程度的影响，故很难建立一个完美的模型来精确表现出锂电池的所有性能。在不考虑温度对模型的影响，目前常用的电路模型如图 10 所示。

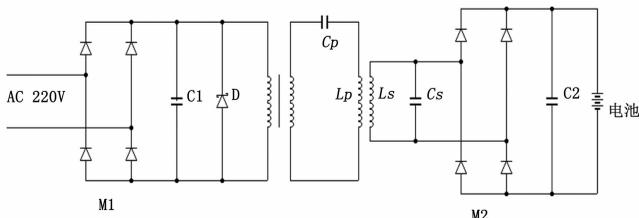


图 10 锂电池充电模拟电路

#### 4.2.2 模型参数选择

- 1) 整流模块  $M_1$  采用 MBIOS 0.5 A/1000 V SOP4 模块；
- 2) 滤波电容  $C_1$ ：由下式可得：

$$\frac{1}{2}C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2) = \frac{P_o}{2\eta f_{AC}} \quad (1)$$

其中： $P_o = 2.5 \text{ W}$ ， $U_{\max} = 311 \text{ V}$ ， $U_{\min} = 310 \text{ V}$ ， $\eta = 50\%$ ， $f_{AC} = 50 \text{ Hz}$ ，代入数据，取  $C_1 = 200 \mu\text{F}$ ；

- 3) 稳压二极管  $D$  采用 12 V 的 IN4742 系列；
- 4) 变压器：功率为 10 W，频率为 190 kHz；
- 5) SP 型补偿电容<sup>[12]</sup>：

$$C_p = 19 \text{ nF}, C_s = 16 \text{ nF} \quad (2)$$

- 6) 发射、接收线圈耦合系数由串联耦合测试法得到。将两线圈串联正接：

$$L_1 = L_p + L_s + 2M \quad (3)$$

串联反接：

$$L_2 = L_p + L_s - 2M \quad (4)$$

得两线圈互感：

$$M = \frac{L_1 - L_2}{4} \quad (5)$$

耦合系数：

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

- 7) 接收电路振流桥  $M_2$  由 IA/20 V 的 B5817W 的二极管组成；

- 8) 滤波电容  $C_2$ ：由：

$$C = \frac{3 \sim 5}{2fR_L} \quad (7)$$

其中： $f = 192.5 \text{ kHz}$ （工作频率）， $R_L$  为等效负载电阻， $R_L = 10 \Omega$ ，带入数据，取：

$$C_2 = 10 \mu\text{F} \quad (8)$$

#### 4.2.3 电路仿真

用 PSPICE 软件对等效电路进行闭环仿真，得到锂电池的电压与充电电流的波形如图 11 所示。

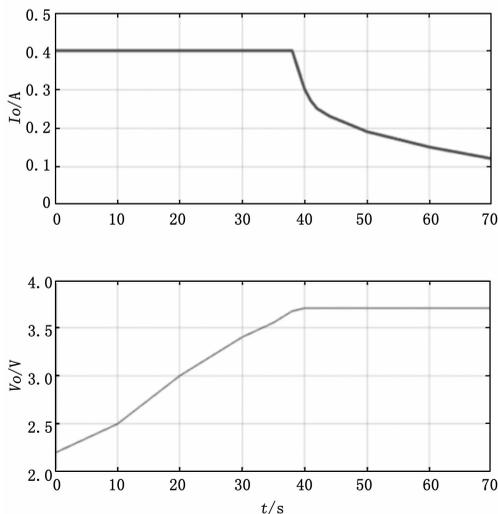


图 11 电路仿真图

### 4.3 实测充电数据对比

为检验本系统充电效果，在充电过程取样十个点的电压电流值，与模拟曲线对比，实测数据如表 2。

表 2

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实测	(0.2, 0.36)	(0.9, 0.37)	(1.7, 0.37)	(2.6, 0.36)	(3.0, 0.37)	(3.5, 0.37)	(3.7, 0.37)	(3.7, 0.31)	(3.7, 0.2)	(3.7, 0.14)
模拟	(0.2, 0.4)	(0.9, 0.4)	(1.7, 0.4)	(2.6, 0.4)	(3.0, 0.4)	(3.5, 0.4)	(3.7, 0.4)	(3.7, 0.3)	(3.7, 0.2)	(3.7, 0.12)

4.4 充电性能综合探讨

由模拟充电电压和电流的关系曲线可知, 当锂电池的电压小于 3.7 V 时, 对电池以 0.4 A 的电流进行恒流充电, 电池电压会缓慢增加到额定电压, 当电池电压达到 3.7 V 时就会对电池进行恒压充电, 此时充电电流就会缓慢下降。理论分析、仿真结果、实际检测三者基本一致, 实验误差很小。由数据分析也进一步验证了本系统充电的有效性和高效性。

5 实验测试结果与产品性能分析

本智能无线充电系统设计流程为: 社会现象—设计思想—理论设计—电路仿真—硬件连接—软件联调—性能测试。在测试方面遵循从单元测试到集成测试再到系统测试的思路。

5.1 硬件模块测试与性能分析

底层的硬件电路测试包括对磁共振式无线充电的性能测试、充电电路测试、控制电路测试及电池的充电性能测试。

本设计采用磁共振式无线充电方式, 并自主设计螺旋式电感线圈代替传统的平面线圈, 可以消除充电过程的涡流效应使电能传输效率大大提高, 经实测, 本设计的无线充电距离可达 10 cm, 充电效率可达 75% 左右; 充电电路采用分模块测试方法, 将各模块工作状态单独测试性能并逐个优化, 使电路整体工作性能达到最佳; 控制电路测试主要测试其需要实现的功能是否实际有效, 通过多次接通低电量和满电量的锂电池接入充电系统, 控制电路都会及时做出对应的充电和断电操作, 满足性能要求; 验证锂电池续航能力, 经过多次测试, 选用锂电池的充放电曲线都符合图 8 仿真图, 能够得到预期的充电效果。

5.2 软件模块测试与性能分析

本作品中涉及到的软件部分主要包括: ARM 编程和 ARM 驱动编程设计。现阶段各模块的软件测试都是黑盒测试, 以输入输出是否达标为检测标准, 对整体软件架构的可行性做实践测试, 程序健壮性和安全性暂不作为主要测试目标。将软件设计程序移植到 ST 同系列开发板上测试功能, 可以得到相同的验证效果, 从而检测了软件部分的可行性。

5.3 系统测试与性能分析

硬件和软件模块测试完成后进行产品实际性能测试, 现从以下几个方面进行测试用来分析设计系统的性能:

1) 整个设备可以续航工作两天—主控芯片采用 STM32L 低功耗芯片—设计系统具有低功耗和高续航性能。

2) 充满一块容量为 2 000 mAh 的 3.7 V 锂电池只需要 150 分钟—采用磁共振式无线充电方式—设计系统具有较高转

(上接第 283 页)

[15] Wu Y, Shen B, Ling H B. Visual tracking via online nonnegative matrix factorization [A]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24 (3): 374-383.  
 [16] Kieritz H, Becker S, et al. Online multi-person tracking using integral channel features [A]. 13th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS) [C]. 2016, 122-130.

换效率的性能。

3) 在电池电量低于最低预警值时能够自动进行无线充电, 在电池电量高于预设值时充电自动断掉—采用 ARM 芯片控制用 AD 实时采样电量信息通过 2.4 G 模块进行无线通信—设计系统具有能够对充电设备充放电进行智能管理的性能。

6 结语

经过多次实验、调试、改良, 本系统基本可以实现对无线充电进行智能管理。在性能上, 经过实验实测充电效率实际可高达 75%, 一块 3.7 V 的锂电池充满电需要 150 分钟; 在结构上, 可以做到 3 cm \* 4 cm \* 5 cm 大小, 可以附着到大部分电器上为其供电; 在用途上, 可以用于小型家电、智能手表、智能医疗等方面。本产品在现有无线充电技术上加以改造和智能管理, 使无线充电技术更趋于“智能化”, 能为大众生活带来更有效更方便的享受, 具有很好的社会前景!

参考文献:

[1] 闫俊美, 杨金贤, 贾永忠. 锂电池的发展与前景 [J]. 盐湖研究, 2001, 9 (4): 58-63.  
 [2] 王国辉. 无线充电技术及其特殊应用前景 [J]. 电子产品世界, 2014 (7): 21-24.  
 [3] Kesler M. Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance [J]. Witricity Corp, 2013.  
 [4] 胡睿. 浅谈无线充电技术 [J]. 科技资讯, 2015, 13 (33): 23-24.  
 [5] 万飞, 张继松. 浅谈无线充电技术及磁性材料在其中的应用 [J]. 磁性材料及器件, 2014, 45 (3): 73-75.  
 [6] 王效华, 牛思先. 基于单片机 PWM 控制技术的实现 [J]. 武汉理工大学学报, 2010 (1): 94-98.  
 [7] 窦延军. 一种磁耦合谐振式无线充电系统的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
 [8] 马文秀, 时维铎, 徐磊, 等. 基于 STM32 无线充电电路的设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (11): 130-132.  
 [9] Brown S, 邓钢. 程序员必读之软件架构 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.  
 [10] 毛晓惠, 王雅丽, 姚列英, 等. 嵌入式预充电电源控制系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (6): 82-84, 100.  
 [11] 王秋石. 基于无线电能传输的锂电池充电装置设计 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.  
 [12] 刘振来, 郑立波, 姚刚, 等. 功率逆变充电器控制系统设计 [J]. 电力电子技术, 2003, 37 (3): 63-65.  
 [17] Danelljan M, Khan F S, et al. Adaptive color attributes for real-time visual tracking [A]. 2014. Computer Vision & Pattern Recognition [C]. 2014: 1090-1097.  
 [18] Chen S Y. Kalman filter for robot Vison [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (11): 4409-4420.  
 [19] Zhang K H, Zhang L, Yang M H, et al. Fast tracking via spatio-temporal context learning [J]. Computer Science, 2013.