

一种用于手机的无线充电系统设计



重庆大学硕士学位论文 (专业学位)

学生姓名：周娅娜

指导教师：苏玉刚 教授

兼职导师：李 聘 高 工

学位类别：工程硕士（控制工程领域）

重庆大学自动化学院

二〇一四年四月

Design of the Wireless Charging System for Mobile Phones



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Professional Degree

By
Zhou Yana

Supervisor by Prof. Su Yugang

Pluralistic Supervised by SE. Li Dan

Specialty: ME (Control Engineering Field)

College of Automation of
Chongqing University, Chongqing, China

April, 2014

摘 要

随着智能手机屏幕越来越大,功能越来越多,耗电量越来越大,手机充电也越来越频繁。杂乱的数据线和频繁的插拔使人们对充电过程感到不胜其烦,不仅如此,频繁的插拔还容易引起手机充电接口的损坏,因此,人们需要一种更加便捷可靠的充电方法。手机无线充电技术是一种依靠空间磁场耦合将供电端的电能传输给手机电池从而对其进行充电的技术,这是一种全新的充电方法,克服了传统手机充电方法的弊端,可以使充电更加灵活、方便、安全。这种新的充电方法具有广阔的发展和应用前景,目前已受到了相关研究机构和企业的高度关注,且已有一些相关产品面市。本文通过对无线充电技术的原理、电路、通信及耦合机构等方面进行研究,设计了一种用于手机的无线充电系统。本文所做的研究工作对无线充电技术的推广和应用有一定的促进作用,能为未来无线充电系统的设计提供一些参考和借鉴。

本文的主要研究工作有:阐述了无线充电系统的工作原理及系统的基本结构,分析了手机无线充电系统的需求,并提出了系统的主要设计要求;设计了系统的主电路和谐振电路,完成了控制芯片的选型,并阐述了系统的控制方法和流程;为了使接收端可以将其功率需求及充电状态等信息反馈回发射端,以实现更准确的控制,设计了从接收端到发射端的单向通信信号调制电路以及相关的数据包时序、格式和编码方式等,并用 Simulink 对信号调制电路进行仿真,以验证信号调制电路的调制效果;为了克服传统的绕线式耦合机构成本高、制作和装配工艺复杂、一致性不好等缺点,减轻耦合机构重量,并提高其可靠性,设计了一种 PCB 耦合机构;为了验证所设计的手机无线充电系统的性能,搭建了一个实验系统,实验结果表明所设计的系统满足一般的工程要求。

关键词: 手机无线充电, 磁场耦合, 单向通信, PCB 耦合机构

ABSTRACT

With the screen of phones getting bigger and functions more integrated, power consumption of mobile phones grow higher, so charging for mobile phones become more frequent. Cluttered wires and data lines have made the charging process very annoying, so we need to find a more convenient way of charging. Wireless charging technology for mobile phones is a technology that depends on magnetic coupling in the space to transmit electrical power from power supplies to mobile phone batteries. This is a brand new way of charging, which overcomes the disadvantages of traditional charging methods, and enables users to make full use of fragments of time to charge their phones, so it makes the charging process more flexible, convenient and safe. This new charging method has broad develop and implement prospects, so far it has received extensive attentions from research institutions and enterprises, and there are even some relevant products on the market now. Based on the researches of the wireless charging technology, this thesis designed a wireless charging system for mobile phones. The research works in this thesis have some promoting effect on popularizing and implementing the wireless charging technology, and can provide some references for the designing of wireless charging systems in the future.

The main work and achievements are summed up as followed: described the working principle of the wireless charging system, analyzed the functional and performance requirements of the system, and brought up the design specifications; designed the main circuit and resonant circuit of the system and selected the control IC; designed a simplex communication between the power receiver and power transmitter, which enables the power receiver to send back communication signals to inform the power transmitter about battery power needs and state of charge, the one way communication also formed a negative feedback closed loop in the system, which enables the controller to take more precise control and therefore improve the transfer efficient, and analyzed the modulation circuit in the Simulink to verify the modulation effect; in order to overcome the disadvantages of wire-wound coils like high cost, inconvenient to assemble, complicated production process, bad consistency and so on, the paper designed a kind of PCB coils, which cost less, easier to produce and more light and compact; designed an experimental wireless charging system for testing, the test results indicated that the designed wireless charging system has met the

engineering requirements.

Keywords: wireless charging, magnetic coupling, simplex communication, PCB coils

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
1 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	1
1.2 国内外现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	4
1.3 论文的研究目的和主要研究内容.....	5
1.3.1 研究目的.....	5
1.3.2 主要研究内容.....	5
1.4 本章小结.....	6
2 手机无线充电系统的基本结构及需求分析.....	7
2.1 手机无线充电系统的基本原理.....	7
2.2 手机无线充电系统的基本结构.....	8
2.2.1 能量发射端.....	8
2.2.2 能量接收端.....	10
2.3 需求分析及设计要求.....	11
2.3.1 需求分析.....	11
2.3.2 主要设计要求.....	11
2.4 本章小结.....	11
3 手机无线充电系统电路设计及控制.....	12
3.1 手机无线充电系统电路设计.....	12
3.1.1 手机无线充电系统发射端高频逆变电路.....	12
3.1.2 手机无线充电系统谐振网络.....	15
3.1.3 手机无线充电系统主电路.....	16
3.2 手机无线充电系统控制.....	16
3.2.1 手机无线充电发射端控制.....	19
3.2.2 手机无线充电系统接收端控制.....	24
3.3 本章小结.....	25

4 手机无线充电系统发射端与接收端之间的通信	26
4.1 信号调制电路	26
4.2 编码方案	27
4.2.1 位的编码	27
4.2.2 字节编码	28
4.2.3 数据包编码	28
4.3 各电能传输阶段的通信	29
4.3.1 Ping 阶段	29
4.3.2 识别和配置阶段	31
4.3.3 电能传输阶段	34
4.4 信号调制电路的仿真实验	36
4.5 本章小结	37
5 手机无线充电系统的耦合机构设计	38
5.1 PCB 线圈自感的影响因素分析	38
5.1.1 PCB 耦合机构基本形状分析	38
5.1.2 PCB 耦合机构尺寸分析	39
5.1.3 PCB 耦合机构线宽和线间距分析	41
5.1.4 PCB 耦合机构匝数分析	41
5.1.5 PCB 耦合机构阻值和品质因数分析	42
5.2 PCB 线圈之间互感的影响因素分析	43
5.3 PCB 耦合机构的设计	45
5.4 本章小节	47
6 实验验证	48
6.1 实验验证	48
6.1.1 手机无线充电系统输出电压测试	48
6.1.2 手机无线充电系统传输效率测试	49
6.1.3 发射端待机功耗测试	51
6.1.4 耦合机构温升测试	51
6.2 本章小结	52
7 总结与展望	53
7.1 全文总结	53
7.2 展望	54
致 谢	55
参考文献	56

附 录.....	59
A. 作者在攻读学位期间发表论文情况	59
B. 作者在攻读学位期间参与的科研项目	59
C. 攻读硕士学位期间获奖情况	59

1 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

进入 21 世纪信息化时代以后,各种电子设备如雨后春笋般冒出来并走进了千家万户,给人们的生活增添了很多乐趣,带来了极大的便利。智能手机、数码相机、平板电脑以及其它小型移动电子设备等在日常生活中比比皆是,电子设备正从单一化走向多样化。随着电子设备功能越来越强,屏幕尺寸越来越大,其耗电量也随之增长。但是电池技术的发展却没有跟上电子设备发展的脚步,因此,当人们一边享受着电子设备带来的便利的同时,一边也被频繁的充电过程困扰。此外,现代人们的生活和消费习惯与以前相比都已经发生了较大的改变,不再满足于电子设备的普通功能,而是希望电子产品在实现了基本的功能的同时还能有时尚的外观、前卫的设计、特色的功能和满意的用户体验。据了解,大多数消费者都对繁多的数据线和电源线感到烦恼,因此,能够随放随充的无线充电系统备受消费者欢迎。

由于有线充电方式一般都是一个电子产品配备一个充电器,除了充电器和数据线繁多外,还会造成资源浪费,由于电子设备的消费量巨大,所以在充电器和数据线上的消费也非常巨大,但是如果采用通用的无线充电方式的话,就可以大大减小这一部分消耗。此外,由于有线充电方式自身的原因,必须在电子设备上留一个专用的充电接口,经过多次插拔后这个接口很容易损坏,不仅如此,这个充电接口还有可能成为电子设备在有水环境中发生故障的原因。而如果采用无线充电方式,就不存在充电接口可靠性低的问题,生厂商可以将接收端封装在电子设备内部,实现安全、可靠、无束缚的充电,从而更加简化人们的生活,给消费者带来更加前卫和现代化的用户体验。

无线充电技术,是利用近场感应,也就是电感耦合,将电能从供电端传送至用电设备的电池来为其充电的技术,经过多年的发展和推广后,到如今已受到了广泛的关注。无线充电技术走进消费者视线开始于 2010 年,2011 年多家日本厂商率先展示其无线充电技术相关商用设备,并且在 2011 年下半年开始有一些消费电子厂商将其用于智能手机等便携设备的充电应用,如诺基亚、谷歌、三星、德州仪器、IDT 等公司都已加入研究和推广手机无线充电技术的行列,无线充电技术将逐渐走入大众的世界。

1.1.2 研究意义

论文通过查阅国内外关于手机无线供电系统相关的技术文献,并结合工程实

际, 考虑到成本、生产工艺、产品性能以及可靠性等因素, 设计了一种使用 PCB 耦合机构并具有从接收端到发射端的单向通信功能的手机无线充电系统。本文的研究工作可为无线供电技术在实际工程中的应用提供一定的参考与借鉴价值, 推动无线电能传输技术的实用化进程, 具有一定的理论意义和实用价值。

1.2 国内外现状

1.2.1 国外研究现状

早在上世纪 70 年代美国就有人提出了无线充电的概念。1974 年, Leon M 等人就申请了一项关于如何为电动牙刷进行无线充电的专利^[1]。该专利提出用无线供电技术为电动牙刷充电, 不用牙刷的时候只需将其放置在杯座内就可以进行充电。牙刷手柄和杯座内分别包含一个电能接收装置和电能发射装置, 接收装置和发射装置之间通过电磁感应耦合来传输电能。虽然该无线充电装置的传输功率和效率都不高, 但是已经能满足电动牙刷的功率要求, 并且能在潮湿多水的环境中实现安全、方便的充电。后来 Engel David 等人也提出了类似的进行无线充电的方法^[2]。到 1977 年, John E. Trombly 等人提出了基于电磁耦合的无线充电技术^[3], 一个充电器可以通过电磁耦合的方式给一个或多个电池充电。2001 年公开的 Jose M. Fernandez 等人的专利提出了带有无线通信功能的无线充电器^[4]。该无线充电器除了能为电子设备的电池提供电磁感应式无线充电功能外, 还实现了从发射端到接收端的单向信号传输, 从而使整个系统构成了一个负反馈的闭环控制系统, 使得控制更加准确, 大大提高了无线充电的效率。John Wendell 等人提出了一种无线充电器的接收端和发射端的对准方法^[5], 可以解决充电时发射线圈与接收线圈不容易对准的问题, 使充电效率提高。2005 年, Lily Ka Lai 等人提出了一种多线圈的无线充电器^[6,7]。文献[8]提出了一种多线圈发射端的线圈排列方法, 这种排列方法可以使发射端产生均匀的磁场分布。文献[9]提出了一种多线圈无线充电器的设计方法, 这种无线充电器可以同时给多个设备充电, 实现 M 个发射线圈给 N 个接收线圈充电。2009 年, Saunamaki 等人提出一种带有安全保护的无线充电器^[10], 这种充电器可以检测人体的靠近并自动减小充电电流或电压, 以降低周围的电磁辐射, 可以较好的对使用者进行保护。文献[11]提出了一种基于传输功率跟踪的负载检测方法; 文献[12,13]提出了一种通过改变接收端电路结构来提高无线充电器传输效率的方法, 有效的减小了由调制电阻消耗的能量。

在标准制定方面, 目前比较主流的无线充电标准主要有三个, 分别为 Qi 标准、PMA 标准和 A4WP 标准。Qi 标准^[14-16]是由全球首个推动无线充电技术标准化的组织 WPC (无线充电联盟) 推出的标准, 具备便捷性和通用性, 不同品牌的产品, 只要有一个 Qi 标志都可以用 Qi 无线充电器充电^[17]。PMA (Power Matters Alliance)

标准是由 Duracell Powermat 公司发起的, 致力于为符合 IEEE 协会标准的手机和电子设备打造无线供电标准, 在无线充电领域具有领导地位。A4WP (Alliance for Wireless Power) 标准是由高通、三星和 powermat 公司共同创建的无线充电联盟推出的, 致力于为包括便携式电子产品和电动汽车等在内的电子产品无线充电设备设立标准和行业对话机制。目前在手机充电领域最常用的标准为 Qi 标准, PMA 标准的支持者主要有 Google 和星巴克, 而 A4WP 标准由于起步较晚, 所以加盟者较少。



图 1.1 诺基亚在咖啡馆推出的无线充电器

Fig. 1.1 Wireless charging service in cafes provided by Nokia

在实际应用方面, 诺基亚于 2012 年 9 月首先推出了带无线充电功能的 Lumia 920 智能手机, 一上市即受到热捧, 同时诺基亚为了推广手机无线充电技术, 还将该技术引用到机场、咖啡馆、茶馆等公共场所, 并提供免费服务, 图 1.1 所示的是旧金山某咖啡馆桌子上的无线充电标志, 用户只要将具有无线充电功能的手机放在虚线框内就可以进行充电; 星巴克也已开始进行无线充电服务试点, 在波士顿地区的 17 家门店安装了无线充电器; 科技巨头谷歌公司也在其 Nexus 系列手机中加入无线充电技术, 并推出了第一款支持无线充电的平板电脑 Nexus7; 另外, 三星也已加入无线充电联盟, 并投资新西兰的无线充电初创公司 PowerbyProxi, 将于近期推出符合 Qi 标准的无线充电器和带无线充电功能的手机; 智能芯片制造巨头德州仪器已推出了多款无线充电器发射端电源芯片和接收端电源芯片, 恩智浦、IDT 等国际大公司也纷纷发布无线充电产品抢占市场; 在车载无线充电器方面, Delphi Automotive 所开发的车内无线充电系统可以对无线耳机、

智能手机、平板电脑等多种便携式电子设备充电，通用汽车（GM）也与 Powermat Technologies 合作开发车内无线充电系统。

由此可见，国外在无线充电技术方面的研究已经步入正轨，虽然面市的产品还不多，相信在不久的将来无线充电应用将会更加普及。

1.2.2 国内研究现状

相对于国外来说，国内对无线供电技术的研究起步较晚，到本世纪初才有团队开始研究。无线充电技术源于感应耦合非接触式电能传输技术，国内研究该技术的主要有重庆大学^[18,19]、北京邮电大学、电子科技大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、海尔集团等高校和企业。

文献[20]主要对无线充电器的电路结构和补偿电路做了较详细的分析，建立了发射端回路的闭环控制以使电路一直能工作在谐振点附近，从而提高整个系统的传输效率。文献[21]在对无线充电系统中的高频逆变电路和谐振变换电路拓扑进行分析的基础上，对系统在单负载和多负载情况下进行建模分析，并以线性负载的情况为例对系统电路参数变化和系统电压增益变化之间的关系进行研究，给出了一种基于电压增益的系统参数设计方法。文献[22]主要对用于无线充电系统的能量发射线圈进行研究，分析了线圈的大小、匝数、线宽、线间距等因素对线圈自感和互感的影响，并对线圈的电磁场进行了仿真分析。文献[23]在对无线充电系统电路等效模型进行分析的基础上，设计了锁相变频环节来跟踪电池负载变化，使得发射端可以根据电池负载的大小来调节传输功率的大小，从而提高系统的传输效率。文献[24]主要对无线充电系统的能量发射机构及其屏蔽方法进行了研究。论文首先对线圈自感和互感的计算给出了理论分析，在此基础上，通过仿真分析了线圈形状、线圈间垂直距离、中心点水平距离及偏转角对互感的影响，然后对系统的电磁屏蔽做了较详细的理论分析，并给出仿真结果来进行验证。文献[25]根据锂电池的充电特性对无线充电系统的接收端进行设计，能有效地防止过充、电流过大、温度过高等危险情况的发生。

在实际应用方面，海尔集团和重庆大学合作，共同推出了一系列采用无线供电技术的产品，如无尾电视、无尾厨房电器等。在手机无线充电器方面，海尔集团已经研制出可以同时给多部手机充电的无线充电器，图 1.2 所示的是海尔集团在 2013 年 IFA 展上推出的无线供电产品，可以同时为 4 部手机充电。IT 厂商华硕也推出了一款带有无线充电功能的台式电脑 M51AC，可以给带有无线充电功能的手机充电。另外，国内的智能芯片生产厂商也积极开展无线充电布局，凌通已率先推出量产的无线充电智能管理芯片，盛群的无线充电产品也已通过 WPC 认证，立錡也将推出无线充电产品。



图 1.2 2013 年 IFA 展上展出的海尔无线充电器

Fig. 1.2 Haier wireless charger exhibited on IFA

1.3 论文的研究目的和主要研究内容

1.3.1 研究目的

论文的主要研究目的是在学习和理解国内外关于无线充电技术的相关文献的基础上,设计一种用于手机的无线充电系统。并在系统的主电路和谐振电路设计、通信信号调制电路和数据包格式设计、PCB 耦合机构设计等方面给出一些指导方法,为未来手机无线充电系统的设计提供参考和借鉴。

1.3.2 主要研究内容

论文围绕手机无线供电系统的设计的相关问题展开研究,主要研究内容如下:

① 在分析了无线充电技术原理和基本结构的基础上,设计了手机无线充电系统的主电路和谐振电路拓扑,完成了控制芯片选型,并阐述了系统的控制方法和控制流程;

② 为了使接收端能将其功率需求信息和充电状态信息反馈到发射端以便实现更准确的控制,论文设计了从接收端到发射端的单向通信的信号调制电路,定义了数据包的时序、格式和编码方式,并用 Simulink 对信号调制电路进行仿真,以验证其调制效果;

③ 为了克服传统绕线式耦合机构成本昂贵、制作和装配工艺复杂、一致性差等缺点,论文在研究了 PCB 耦合机构各参数对其自感和互感的影响的基础上,设计了一种用于手机的 PCB 耦合机构;

④ 搭建了一个实验装置,对所设计的手机无线充电系统的性能进行验证。

1.4 本章小结

本章首先介绍了论文的研究背景和研究意义，然后详细说明了手机无线充电技术的国内外研究和应用现状，最后介绍了论文的研究目的和主要研究内容。

2 手机无线充电系统的基本结构及需求分析

本章旨在对手机无线充电系统的基本原理、基本结构进行介绍，对其在实际应用中的需求进行分析，并提出主要的设计要求，为后面的研究和设计提供目标。

2.1 手机无线充电系统的基本原理

本文研究的手机无线充电技术指的是不通过物理连接，而是通过空间中的电磁场的变化来将供电端的电能传输给手机电池的技术。根据法拉第电磁感应理论可知，导体在磁通量变化的磁场中会产生感应电动势，如果该导体是闭合回路中的一部分，则会产生感应电流。电磁耦合式手机无线充电技术就是根据这个原理工作的，与传统变压器工作原理类似，区别在于变压器的原副边线圈之间的耦合为紧耦合，即原副边之间的耦合非常紧密，往往将原副边线圈绕在同一个磁芯上，磁芯可以增加磁导通率减少损耗，故变压器的传输效率较高传输功率也可以做得很大，但是也正是由于原副边绕在同一个磁芯上，使得变压器的原副边位置相对固定，灵活性差；而手机无线充电系统的原副边之间采用松耦合，即原副边线圈之间的耦合比较弱，为了减小系统的体积和重量，通常不采用磁芯，而且原副边线圈之间位置不固定，副边可以在一定范围内自由移动，但是由于空气磁阻远远大于磁芯，很大一部分磁动势降分布在空气磁路上，导致传输效率偏低。由于松耦合结构漏磁大、原边线圈和副边线圈之间耦合系数小，所以不满足变压器原副边线圈电压和电流的匝比关系^[26-28]。根据楞次定律和电磁感应理论可知，可以通过提高原边线圈电流变化率，即提高原边线圈电流频率，来增强原副边线圈之间的电磁感应强度，以提高传输功率密度，降低损耗，提高系统效率。但是频率过高又会增强电磁辐射，给电磁屏蔽设计造成困难，所以一般还需对原边能量发射机构和副边能量接收机构的耦合线圈进行补偿^[29]。因此，感应耦合式无线充电系统的结构就比普通变压器系统结构更加复杂，其结构示意图如图2.1所示。

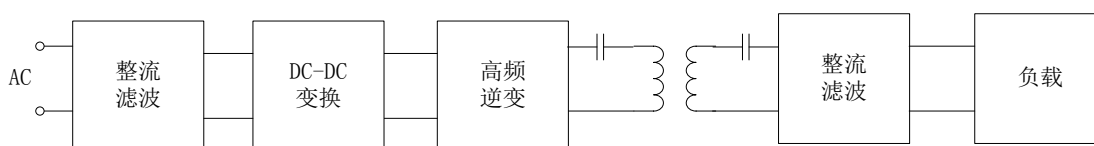


图 2.1 手机无线充电系统结构示意图

Fig. 2.1 Schematic diagram of the wireless charging system for mobile phones

图2.1所示的系统结构示意图主要分为两个部分，即能量发射部分和能量接收部分。能量发射部分包括整流滤波环节、DC-DC变换环节高频逆变环节和能量发射机构。220V的工频交流电经过整流滤波环节变换成稳定的直流电，然后经过DC-DC变换环节将电压调节到一个固定值供给高频逆变电路，本文研究的手机无线充电系统经DC-DC变换后的电压为5V。高频逆变电路将5V的直流电逆变成100K-200K的高频交流电，供给能量发射机构。能量发射机构由一个谐振网络组成，高频电信号经过谐振网络后产生交变磁场分布在耦合电感（线圈）附近的空间中，离耦合电感越近磁感应强度就越强。能量接收端包括能量接收机构、能量变换环节和用电设备。能量接收机构一般由一个谐振网络组成，该谐振网络中的谐振电感可以在发射端产生的交变磁场中拾取电能，转变为高频的交流电，该电能经过能量变换环节（如整流、滤波等）后，供给用电设备，本文中的用电设备为手机电池。

2.2 手机无线充电系统的基本结构

2.2.1 能量发射端

手机无线充电系统的能量发射端由整流滤波环节、DC-DC变换环节、高频逆变环节、谐振网络、检测电路和控制器组成。各功能模块连接图如图2.2所示。

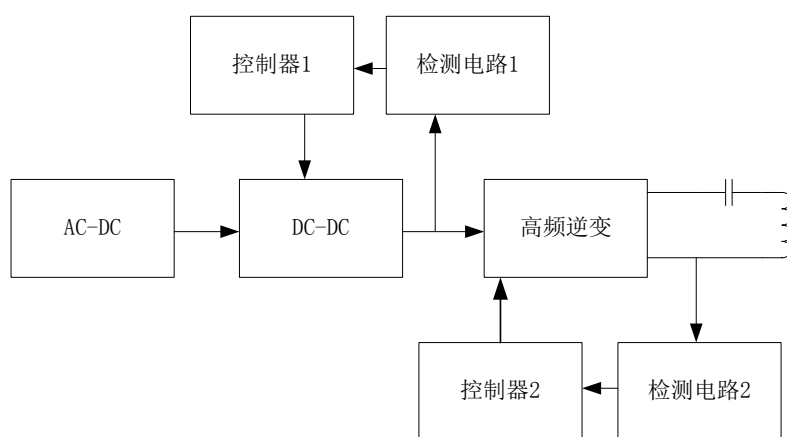


图 2.2 发射端各功能模块连接框图

Fig. 2.2 Functional block diagram of power transmitter

整流滤波环节由整流桥和滤波电路组成，整流桥的作用是将220V的工频交流电转换成单向波动的直流电，其波动的幅值仍然非常大。滤波电路的作用就是将波动较大的直流电转换成比较平稳的直流电。

经过整流滤波后的直流电还需经过DC-DC变换电路后才能供给高频逆变电路。DC-DC变换电路一方面使输入到高频逆变电路的电压为设定的某一固定值，

另一方面使该电压更加稳定可控。手机无线充电系统中使用的 DC-DC 变换电路实现的功能主要是降压，将经过整流滤波后的直流电降为 5V 的稳定直流电。

把 DC-DC 变换电路的输出（5V 直流电）作为高频逆变电路的输入。高频逆变电路的作用是在控制信号的驱动下，将 5V 直流电变换成频率为 100KHz-200KHz 的高频交流电。这种高频交流电作用于谐振网络后就会产生高频的交变磁场，能量发射机构和接受机构之间的电能感应耦合就是通过这种高频的磁场变化来实现的，因此为能量发射机构提供高频交流信号的逆变电路就是系统电路的关键部分之一，同时该逆变电路的效率和稳定性对整个系统的性能也有很大的影响^[30]。因此，要求逆变电路有如下特征：

① 能为能量发射机构提供足够大的励磁电流。只有发射机构上的励磁电流足够大才能允许发射端和接收端之间有一定的传输距离。另外，由于无线电能传输系统接收端放置的位置、所带负载的大小等都具有一定的不确定性，因此需要逆变电路上的电流具有较强的鲁棒性。

② 具有较低的瞬间电压峰值、损耗值。保持较低的瞬间电压峰值有利于保证系统的稳定性，保持较低的损耗值有利于提高系统的传输效率。

5V 直流电经过高频逆变电路后输出给发射端谐振网络，发射端的谐振网络由耦合电感 L_p 和补偿电容 C_p 组成。由于手机无线充电系统的发射端线圈和接收端线圈耦合方式为松耦合，两个线圈之间存在一段空气间隙，为了使系统保持较高的传输效率，减少损耗，除了采用高频逆变电路提高发射线圈电流频率外，还需采用补偿容，补偿电容可以与发射线圈串联或并联，具体见第 3 章分析。

检测电路 1 用来检测 DC-DC 变换电路的输出电压，检测结果传送到控制器 1，使控制器 1 根据当前的检测结果做出合适的控制决策；检测电路 2 主要检测发射线圈工作电流，检测结果传输到控制 2。检测发射线圈的工作电流一方面可以了解发射端当前的工作状态，便于控制器 2 计算控制误差，以实现更精确的控制；另一方面可以了解系统的工作是否正常，一旦检测到发射线圈电流超过正常范围，则可以马上使系统停止工作。因此对于发射线圈电流的检测要求有较高的快速性和准确性。

除了以上介绍的几个模块之外，发射端还有一个非常重要的模块，即控制模块。发射端控制模块包含两个控制器，图 2.2 中的控制器 1 为 DC-DC 变换电路的控制器，通过控制 DC-DC 变换电路中的开关管来调节输出电压的大小，使其稳定在 5V。控制器 2 是发射端的主控制器，其作用主要有以下几点：

① 接收检测电路反馈的信号，判断系统是否正常工作并计算当前发射线圈电流的实际值；

② 解调从接收端发送的数据包，并根据数据包携带的信息做出相应的控制；

③ 根据接收端反馈的误差信息和当前发射线圈电流的实际值计算控制信号，并将控制信号传送给驱动电路用来控制高频逆变电路的工作。

④ 控制发射端的指示灯、蜂鸣器等。

2.2.2 能量接收端

由2.1节可知，能量接收端由谐振网络、AC-DC变换模块、检测模块、控制模块、通信信号调制电路和用电设备组成。其各功能模块的连接框图如图2.3所示。

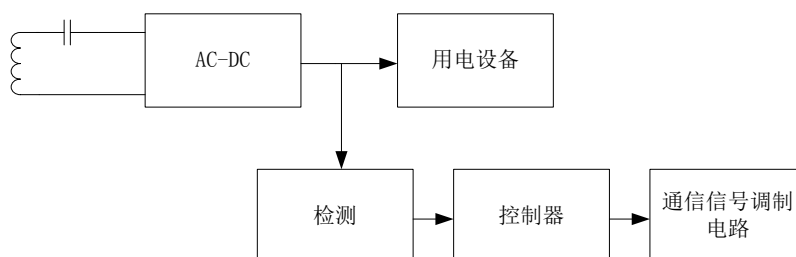


图 2.3 接收端各功能模块连接框图

Fig. 2.3 Functional block diagram of power receiver

接收端的谐振网络主要作用为从发射端谐振网络产生的交变磁场中拾取电能，并将该电能转换为高频交变电流。与电能发射端的谐振网络类似，为了增强电能拾取能力，提高系统传输效率，电能接收端的谐振网络也采用了补偿电容，即该谐振网络也由一个耦合电感 L_s 和补偿电容 C_s 组成。

AC-DC变换模块用于将接收线圈接收到的高频交流电转换成较为平稳的直流电，并输送给用电设备。

检测电路检测AC-DC变换电路输出的电压值并将该信号传送给控制器，便于控制器及时了解当前传输功率的大小并及时给发射端发送误差信息。

通信信号调制电路用于将接收端的控制信号调制到发射端的发射线圈电流波形上，使发射线圈电流波形的幅值随信号波形的变化而变化。常用的信号调制电路有电容式调制电路和电阻式调制电路。

接收端的控制器是接收端的重要组成部分，其功能主要有：

① 监视用电设备电池的充电状态，如充电完成、充电异常等，并根据这些状态做出相应的控制，并将这些信息发送给发射端，以控制充电过程的开始或终止；

② 根据整流电路的检测信号计算当前传输功率的实际大小，并与目标值进行比较，将得到的误差信息通过数据包发送给发射端；

③ 控制接收端的指示灯的工作状态。

2.3 需求分析及设计要求

2.3.1 需求分析

如今随着智能手机的普及,手机电量消耗快,充电次数逐渐增多,每次都要使用数据线进行充电不免有些麻烦,本文研究的手机无线充电系统可以随放随充,随取随停,大大地方便了充电过程,不需要用手机的时候就把手机放在充电板上进行充电,需要用的时候只要拿起来可以停止充电过程,不仅可以保证手机电量充足,也可以免受边充电边打电话所遭受的辐射。

本文设计的手机无线充电系统要求电能发射端小巧、轻薄,放置在桌面上不占空间,或者可以方便的嵌入安装在公共场合的桌面上;要求电能接收端嵌入到手机内部而不明显地增加手机的体积和重量;要求手机无线充电器发射端可以自动识别手机并对其进行充电,当不需要充电时自动进入待机模式;要求手机充电异常时有适当的提示;要求充电过程中输出电压稳定,不会对手机电池造成损害;要求在充电过程中,耦合机构温度不能过高。

2.3.2 主要设计要求

手机无线充电系统的设计要求如下:

- ① 系统轻薄小巧,不占空间;
- ② 发射端的输入为220V工频交流电;
- ③ 接收端输出电压为稳定的5V直流电,额定输出电流为0.5A;
- ④ 工作在额定状态时,有较高的传输效率;
- ⑤ 发射端表面没有接收端或接收端不需要充电时,自动进入待机状态;
- ⑥ 待机功耗较低;
- ⑦ 不同的工作状态有不同的指示灯提示,当充电不正常时有警示音;

2.4 本章小结

本章首先对手机无线充电系统的基本工作原理进行分析,然后分别介绍了手机无线充电器发射端和接收端的基本结构和实现的功能,最后对手机无线充电系统的需求进行了分析并阐述了系统的主要设计要求。

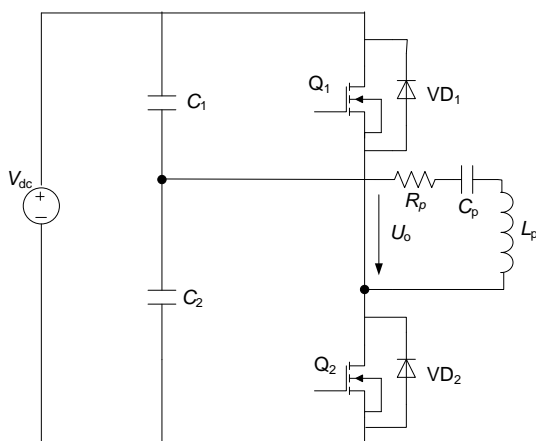
3 手机无线充电系统主电路设计及控制

3.1 手机无线充电系统主电路设计

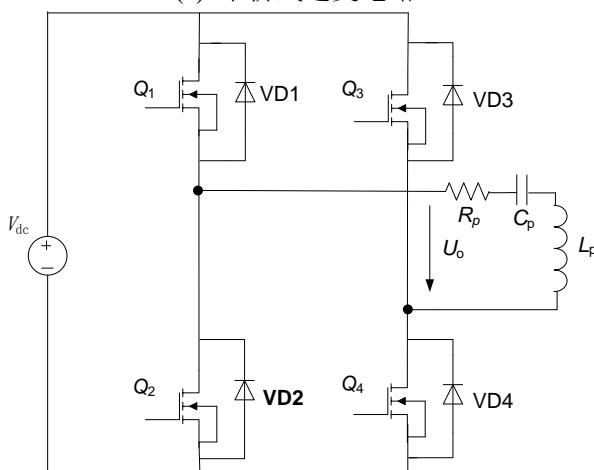
手机无线充电系统主要分为发射端和接收端两部分，发射端主要由整流滤波电路、DC-DC 变换电路、高频逆变电路和谐振网络组成，接收端电路主要由谐振网络、整流滤波电路和负载组成。整流滤波技术和 DC-DC 变换技术已比较成熟，故本文电路设计的重点为高频逆变电路和谐振网络电路。

3.1.1 手机无线充电系统发射端高频逆变电路

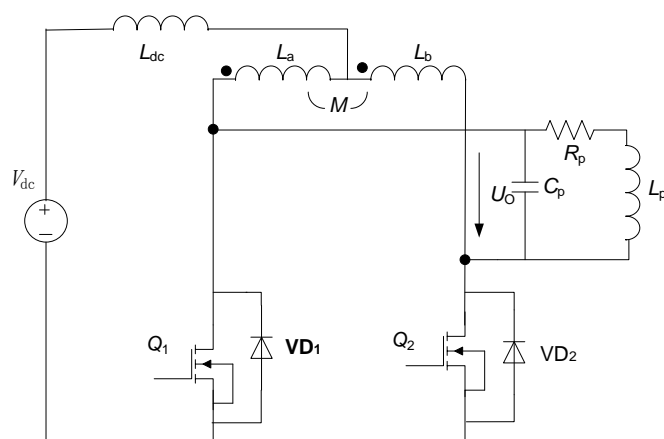
目前常用的高频逆变电路主要有全桥逆变电路、半桥逆变电路、推挽式逆变电路等。这三种逆变电路的拓扑如图 3.1 所示。



(a) 半桥式逆变电路



(b) 全桥式逆变电路



(c) 推挽式逆变电路

图 3.1 常见的逆变电路

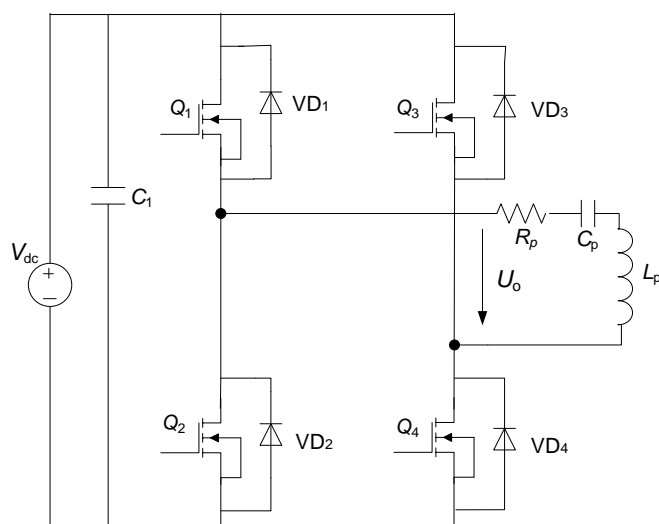
Fig. 3.1 Topology of commonly used inverter circuit

半桥逆变电路电路图如图 3.1(a)所示,可以看出,这种电路拓扑结构简单,使用的元器件比较少,但是由于其输出电压的幅值仅为输入电压的一半,故不太适用于大功率的应用场合。另外,直流侧还串联了两个电容,在工作过程中还需保证这两个电容两端的电压相等,增加了控制难度。同时,由于开关管的管压降和所能承受的最大电流的限制,也使得半桥逆变电路只适用于小功率的应用场合。

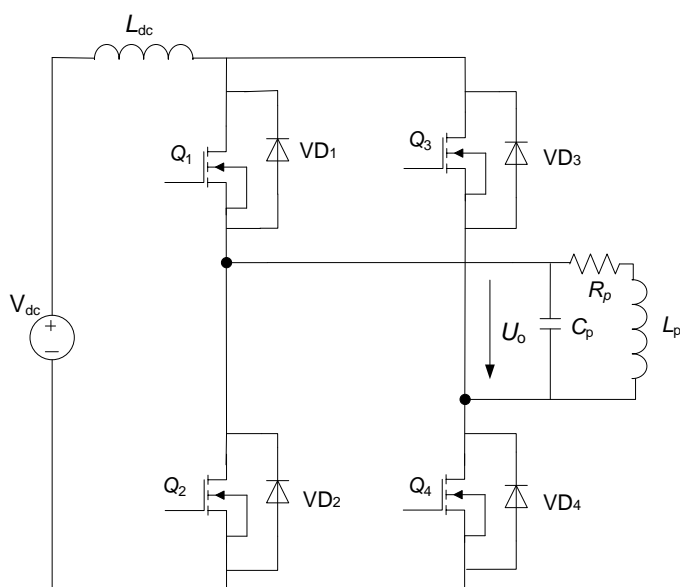
推挽式逆变电路的拓扑如图 3.1(c)所示,可以看出这种电路的结构也比较简单,但是电路中存在一个相分电感,这不仅使得电路的成本大大增加,同时也由于其铁损带来的能量损耗使得逆变电路的变换效率降低,故也只适用于小功率且对逆变电路的变换效率要求不高的应用场合。

全桥逆变电路拓扑如图 3.1(b)所示,可以看出全桥逆变电路由四个开关管组成,每个开关管承受的电压为输入电压的一半,且可以直接通过对开关的控制来调节输出功率的大小,容易实现软开关控制。缺点是四个开关管的控制比较复杂,而且需要设计四个驱动电路,增加了系统的成本和复杂性。但是由于其转换效率较高,功率密度较大,因而有较广泛对的应用^[31]。

将交流信号从 50Hz 的工频交流电转换为 100kHz 到 200kHz 的交变电流的过程中,最常用的方法是 AC-DC-AC 间接变换法,由于所带的负载常常是感性的,所以电源和逆变电路之间必然会产生无用功,要解决这个问题就需要在逆变电路的直流侧采用无功功率缓冲元件来缓冲无功功率。如果所采用的方式是在直流侧并联一个大电容,则组成的是电压型逆变电路,如图 3.2(a)所示;如果所采用的方式是在直流侧串联一个大电感,则组成的电流型逆变电路,如图 3.2(b)所示。



(a) 电压型逆变电路



(b) 电流型逆变电路

图 3.2 电压型和电流型逆变电路

Fig. 3.2 Voltage-fed and current-fed inverter circuit

电压型逆变电路的直流侧可以看成是一个电压源。电压型逆变电路的谐振网络必须采用电容和电感串联的方法来实现电压转换，因此在谐振状态时整个回路的阻抗较小，流过开关管的电流较大，会导致电路开关损耗偏大。

电流型逆变电路的直流侧可以看成是一个电流源，然而在实际应用中不存在独立的电流源，而专门为逆变电路设计一个电流源又会大大增加系统的复杂度和成本，而且还会使系统的体积变大。在工程应用中，为了节约成本，常采用直流电源串联一个大电感的方法构成准电流源，但是这种方法会增加系统的阶数，从

而可能导致系统动态特性的不稳定。另外，电流型逆变电路工作时需保证电流值的稳定，这也增加了控制和保护电路的复杂性。

由前面的分析可知，半桥逆变电路虽然结构简单，所需的元器件少，但其直流侧的分压电容的电压平衡很难控制，不适用于手机无线充电系统；推挽式逆变电路由于相分电感的存在，使得系统的体积变大，重量增加，成本提升，跟手机无线充电器小巧、轻便、价格便宜的特点不符，故也不适宜采用。全桥逆变电路克服了以上两种逆变电路的缺点，传输效率高、易于控制、功率密度大，非常适用于手机无线充电系统。

3.1.2 手机无线充电系统谐振网络

无线充电系统通过松耦合连接方式实现了无线供电，但是也正是由于松耦合的特点，使得电能接收端可以自由移动，当发射端和接收端之间的距离增大时，两个耦合机构之间的磁路漏感变大、耦合系数变低，使系统的传输效率降低，接收端接收到的功率偏小，导致系统工作失常。

为了解决上述问题，实际应用中常采用谐振补偿技术对原副边耦合机构进行补偿。补偿技术不仅能减小功率器件上的电流和电压应力，从而延长器件的使用寿命，还可以减少系统中的无用功，从而提高整个系统的传输效率和传输能力，增大接收端的移动自由度。只在一侧进行补偿的电路为单谐振补偿电路，在两侧都进行补偿的电路为多谐振补偿电路，研究表明，在提高无线电能传输系统的传输效率和传输能力方面，多谐振补偿比单谐振补偿更有优势^[32-35]。常用的谐振补偿电路拓扑主要有串联补偿（用 S 表示）和并联补偿（用 P 表示）。

并联谐振补偿的电路结构中，补偿电容和耦合电感并联，流过电容的电流补偿了电感电流，降低了开关管上的电流应力。在相同的开关管电流的情况下，这种结构可以获得更大的电感电流，从而提高系统的传输能力。并联补偿的缺点是对开关管的电压承受能力要求较高，系统频率随着负载的变化而变化，系统启动和关闭时控制较难。这种补偿方式常用于负载功率比较固定的无线电能传输系统。

串联谐振补偿的电路结构中，补偿电容和耦合电感串联，电容电压对电感压降进行补偿，减少了开关管上的电压应力，同时也使得电源电压最大地加在阻抗的两端，使系统工作频率保持稳定，不会随着负载的变化而改变。这种补偿方式的缺点是电感电流含有较多的谐波。

由于本文设计的无线充电器采用频率控制来控制传输功率的大小，因此频率的大小不能随着负载的变化而变化，故系统发射端采用 s 结构；而手机无线充电系统的接收端由于需要保持输出电压稳定，故也应采用 s 结构。系统的谐振网络电路图如图 3.3 所示。

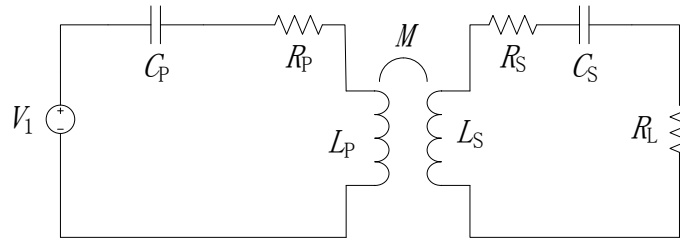


图 3.3 ss 结构电路图

Fig. 3.3 SS topology circuit

图 3.3 中, L_p 、 L_s 、 R_p 及 R_s 分别为发射端和接收端线圈的等效电感和等效阻抗, C_p 、 C_s 分别为发射端和接收端的补偿电容, M 是两边线圈之间的互感。

3.1.3 手机无线充电系统主电路

由 3.2.1 节和 3.2.2 节的分析可知, 系统发射端的高频逆变电路采用全桥逆变电路, 系统谐振网络采用 SS 结构, 故设计的系统主电路如图 3.4 所示。

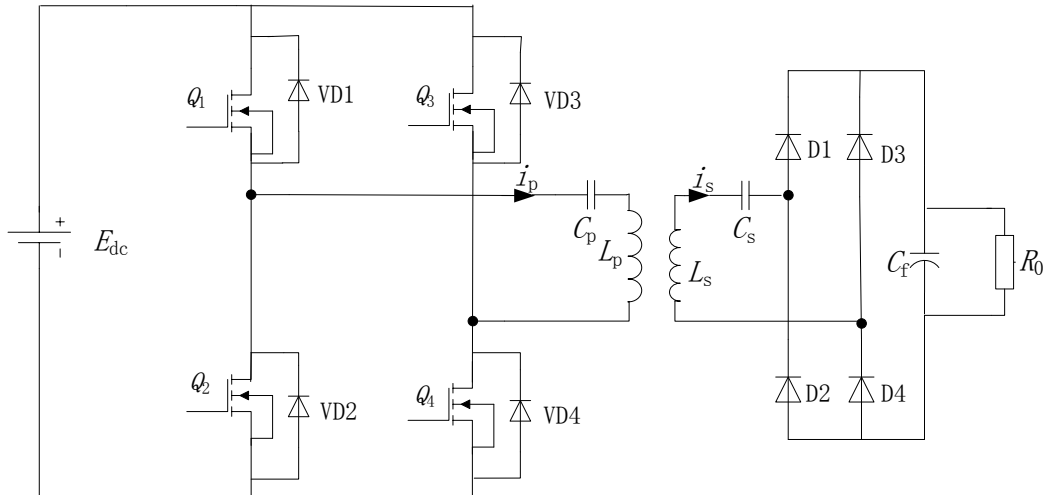


图 3.4 用于手机的无线充电系统主电路图

Fig. 3.4 Main circuit of wireless charging system for mobile phones

图 3.4 中, L_p 、 L_s 、 R_p 及 R_s 分别为原副边线圈等效电感和等效阻抗, C_p 、 C_s 分别为原副边补偿电容, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 为四个开关管, 它们构成高频逆变电路的全桥逆变电路, Q_1 、 Q_4 与 Q_2 、 Q_3 两组开关管互补循环导通, VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 为四个续流二极管, 为 Q_1 、 Q_4 与 Q_2 、 Q_3 提供电流通道, 起到使负载电流连续的作用。

3.2 手机无线充电系统控制

手机无线充电系统由电能发射端和电能接收端组成, 电能发射端通常集成在

充电板上，而电能接收端则集成在手机上。系统发射端采用德州仪器的 bq500211 控制器来控制，接收端用 bq51013 控制器来进行控制，这两个芯片都是德州仪器专门为无线充电系统开发的配套智能管理芯片，具有以下特点：

- ① 是用于无线充电系统的专用芯片，符合 Qi 标准；
- ② 集成度高，功能强大；
- ③ 传输效率高，经测试，为已有的同类芯片中最高；
- ④ 待机功耗小，发热少。

系统的控制框图如图 3.5 所示。

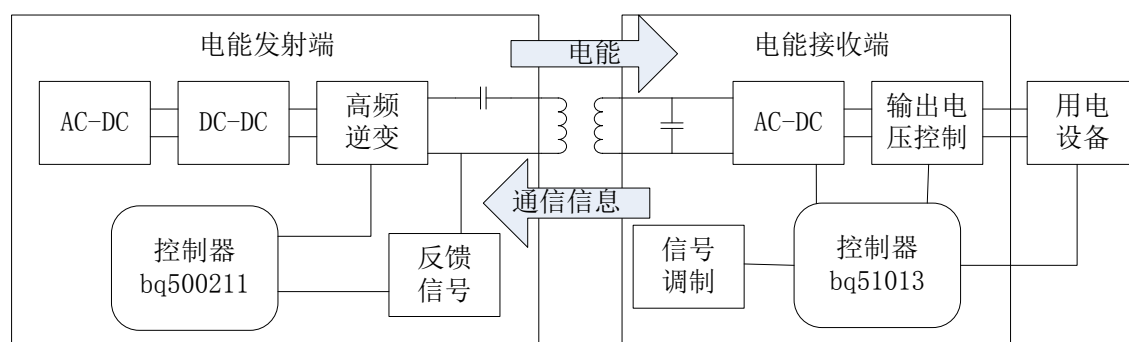


图 3.5 无线充电系统控制框图

Fig. 3.5 Control diagram of wireless charging system

如图 3.5 所示，电能发射端控制器根据接收端发送的通信信息和检测到的发射线圈上的反馈信息进行决策，然后将控制信息传送给高频逆变电路，通过控制逆变电路的工作频率来控制传输功率的大小。接收端的控制器检测整流电路的输出电压并根据这个电压的大小向发射端发送数据包，以调整传输功率的大小。

手机无线充电系统所传输的功率的大小是通过调节发射端的工作频率来实现的。设定系统的谐振频率为 100KHz，当系统开始传输电能后，其工作频率一般在 112KHz 到 205KHz 之间，频率越高，偏离谐振点越远，传输的电能就越小。在改变系统工作频率的过程中，系统的占空比保持 50% 不变，只有当工作频率达到 205KHz 时，才会通过减小占空比来减少能量的传输。

电能从发射端到接收端的传输主要分为 4 个阶段，即等待阶段、Ping 阶段、识别阶段和能量传输阶段。各个阶段的执行顺序如图 3.6 所示。

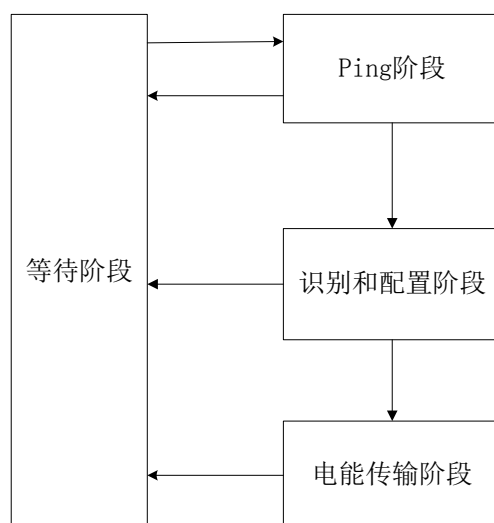


图 3.6 电能传输的阶段

Fig. 3.6 Power transfer phases

电能传输各阶段系统的主要活动为：

等待阶段：在这个阶段，发射端主要检测其表面是否有物体。发射端每隔一段时间发送一个能量信号，并检测流过发射线圈的电流值。如果发射端表面没有物体，则发射线圈上的电流值最大，假设其大小为 I_1 ，如果发射端表面有物体，则发射线圈上的电流值必定小于 I_1 ，当检测到的发射线圈电流值小于阈值 I_2 时就可以判定发射端表面上有物体。一般要求发射端每隔 400ms 发送一个能量信号，因为 Qi 标准规定发射端必须在 500ms 时间内识别接收端，如果发送能量的时间间隔大于 400ms，则可能使发射端无法在 500ms 识别接收端，但如果发送能量的时间间隔小于 400ms，则会导致系统的待机功耗增大。

Ping 阶段：在这个阶段，发射端向接收端发射能量，如果能接收到接收端的响应信号，则发射端继续保持发送该能量，并进入下一个阶段，否则返回等待阶段。

识别和配置阶段：在这个阶段发射端根据接收到的数据包，识别接收端的身份，并根据接收到的配置包所携带的信息，建立一个电能传输约束条件集。在电能传输阶段，发射端将根据这个约束集中的条件来进行能量传输。如果所接收到的数据包顺序不正确、包含的信息有误或无法识别其中的信息，则系统返回等待阶段，否则进入下一个阶段。

能量传输阶段：在这个阶段，发射端根据接收端的要求来进行功率传输。在整个传输过程中，发射端根据接收端发送的控制误差信息来调整发射功率的大小，监视电能传输约束条件集中的各变量是否超出正常范围。一旦检测到一个非正常的变量系统就立即停止供电并返回等待阶段。

在能量传输阶段，发射端与接收端之间的电能传输控制框图如图 3.7 所示。

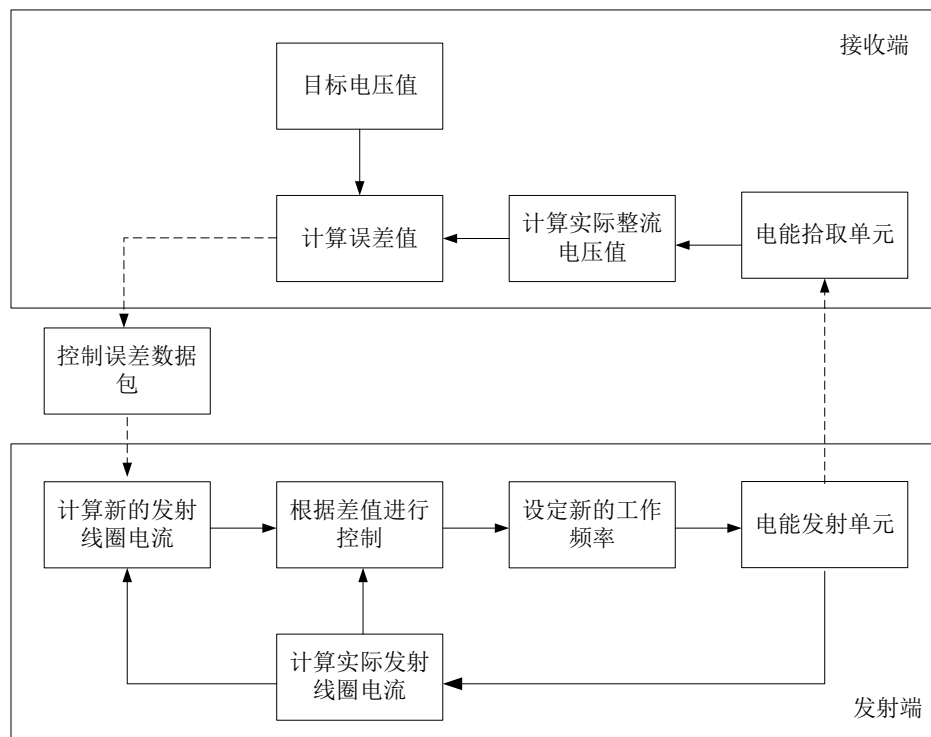


图 3.7 电能传输控制框图

Fig. 3.7 Power transfer control loop

由图 3.7 表明，手机无线充电系统的电能传输控制过程为：接收端根据检测到的整流电路输出电压值与设定的目标控制点值进行比较，算出误差值，再将该误差值通过控制误差数据包发送给发射端。发射端计算当前的发射线圈电流值和根据控制误差数据包的信息计算出新的发射线圈电流值的差值，并根据该差值设定新的工作频率，以调节传输功率的大小。这样，在发射端和接收端之间就构成了一个闭环控制系统。

3.2.1 手机无线充电发射端控制

发射端控制芯片由 8 个功能模块组成，分别为控制模块、数字解调模块、LED 控制模块、PWM 模块、12 位模数转换器、蜂鸣器控制模块。各功能模块之间的连接图如图 3.8 所示。

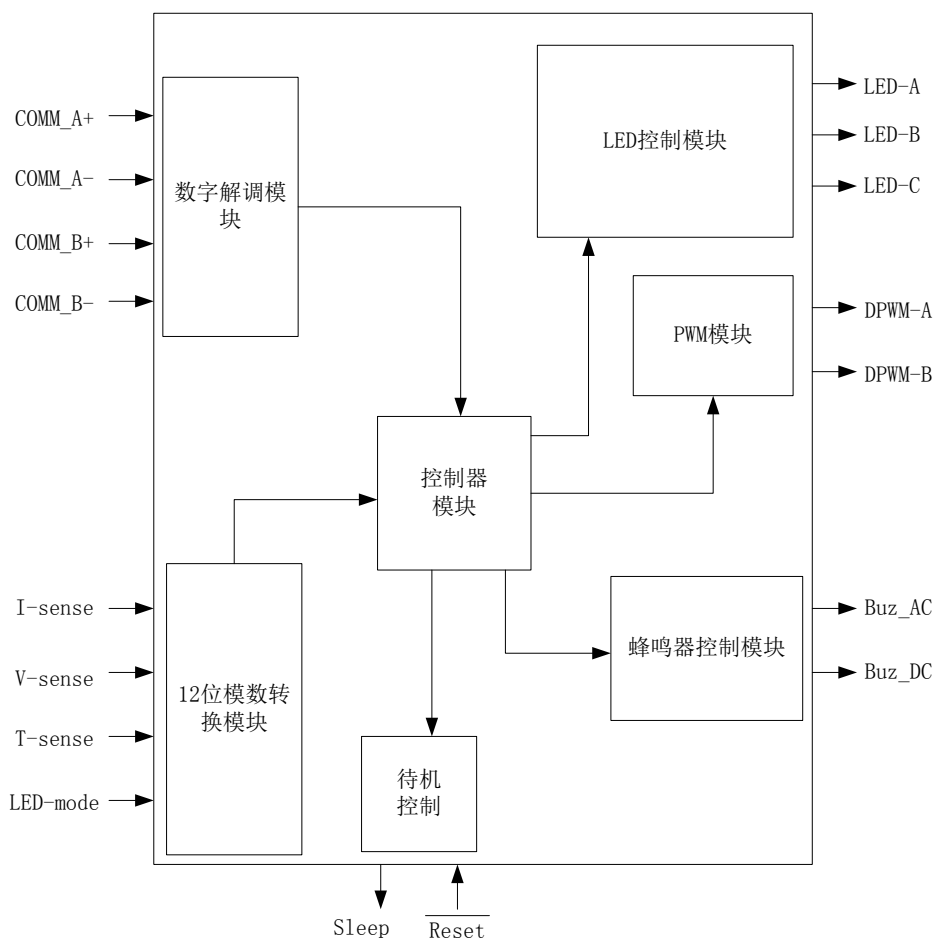


图 3.8 发射端控制器各功能模块示意图

Fig. 3.8 Functional block diagram of power transmitter controller

图 3.8 中，控制模块接收并处理各模块传送过来的数据，并给相应模块发送控制信号；解调模块负责解调接收端发送的数据包，并将解调出来的信息传送给控制模块；LED 控制模块接收控制模块发出的控制信号，并根据控制信号点亮或熄灭相应的指示灯；PWM 模块根据控制模块发出的控制信号对高频逆变电路的开关管进行控制，以改变发射线圈的工作频率；12 位模数转换器用来将电压检测电路、电流检测电路和温度检测电路检测到的模拟信号转换成数字信号，并将这些数字信号传送给控制模块；待机控制模块根据控制器的控制发送待机信号，使系统进入待机状态，同时也接收外部输入的复位信号，并将该信号传送给控制器；蜂鸣器控制模块接收控制模块发送的控制信息，并控制蜂鸣器的工作，一般当系统开始工作或出现故障的时候会有蜂鸣器提示音。

发射端控制器的控制流程如图 3.9 所示。

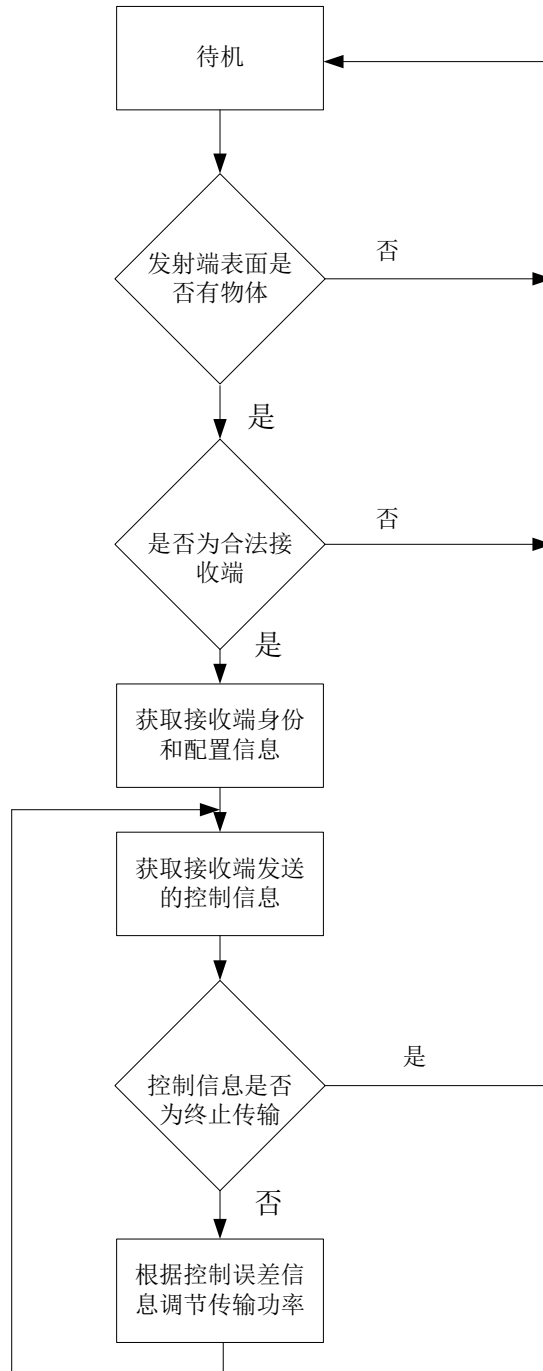


图 3.9 发射端控制流程图

Fig. 3.9 Control flow chart of power transmitter

图 3.9 所示的流程图表明，发射端在待机状态时不断检测其表面是否有物体，如果没有检测到物体则返回待机状态并继续检测，如果检测到有物体则执行下一步，判断该物体是否为合法的接收端。如果该物体不是合法的接收端，则发射端返回待机状态，如果该物体为合法的接收端，则执行下一步，获取该接收端的身

份信息和配置信息。然后发射端获取从接收端发出的控制信息，如果该控制信息为终止电能传输，则发射端返回待机状态，如果接收到的控制信息为控制误差值，则发射端根据该误差值调节发射端的工作频率，以调节传输功率的大小。

发射端待机时，每隔 400ms 发送一个能量来检测其表面上是否放置了物体，在其不发送能量时控制芯片处于断电状态，而在其发送能量时控制芯片通电正常工作，发射端控制芯片的电源电路如图 3.10 所示。

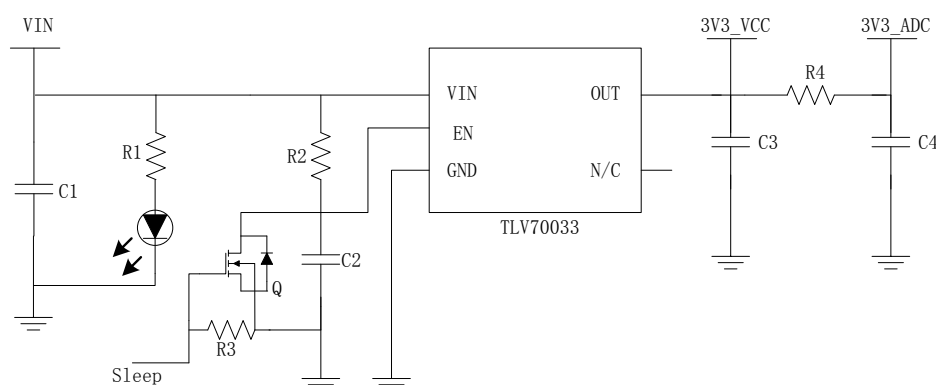


图 3.10 发射端控制器电源电路

Fig. 3.10 Power source circuit of power transmitter controller

图 3.10 所示的电路为控制芯片的电源管理电路，该电路的输入为 5V 直流电，经过电源芯片 TLV70033 后输出稳定的 3.3V 电压供给控制芯片。在待机状态时，发射端控制器通过 Sleep 信号控制开关管 Q 的导通，Q 导通后，电容 C2 放电，使电源芯片 EN 端电压降低，当 EN 端电压降到 0V 时，电源芯片被关断，输出电压为 0V，使控制器停止工作；控制器停止工作后，开关管 Q 关断，电容 C2 充电，当 C2 两端电压增大，电源芯片 EN 端电压增大，芯片输出 3.3V，控制器重新开始工作。如此不断循环，直到发射端识别到合法的接收端并对其进行充电，循环的周期由 R2 和 C2 决定。

发射端在执行图 3.9 所示的流程的同时也要监视 I-sense、V-sense、T-sense 信号，如果其中的任何一个信号超出了限制值，则发射端进入待机状态。

I-sense 信号是反映发射线圈电流大小的信号，发射线圈电流值的大小直接影响传输功率的大小，监视该信号有两个作用：一是在待机时用来判断发射端表面是否有物体，有物体时该信号值比没有物体时小；二是在功率传输过程中，该信号值的大小反映当前传输功率的大小，是控制器的输入变量之一，可以影响控制器的决策结果。LMV931 运算放大器常用于便携式电子设备的电流检测，本设计就是采用这种运算放大器来检测发射线圈电流的，其电路图如图 3.11 所示。

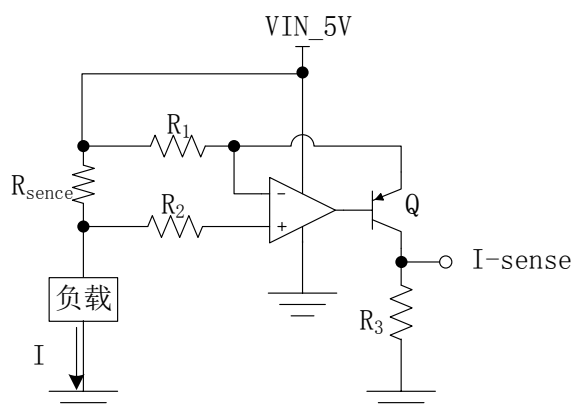


图 3.11 发射线圈电流检测电路

Fig. 3.11 Primary current sensing circuit

该电路的输出为一个随着电流 I 变化而变化的电压值 $I\text{-sense}$ ， $I\text{-sense}$ 与 I 的关系为：

$$I\text{-sense} = \frac{R_{\text{sense}} R_3}{R_1} I \quad (3.1)$$

由式(3.1)可以看出，信号 $I\text{-sense}$ 与发射线圈电流成正比关系， $I\text{-sense}$ 随着 I 的增大而增大。

$V\text{-sense}$ 是反映发射端的逆变电路输入电压大小的信号。逆变器输入电压过大会造成逆变电路器件的损坏，而过小又会影响正常的功率传输，因此对逆变器输入电压的检测主要是为了保证系统的正常工作及系统器件的安全。逆变器输入电压的检测采用电阻分压法进行，电阻分压采样法是利用电阻网络将电压信号按比例进行分压采用的方法，其电路图如图 3.12 所示。

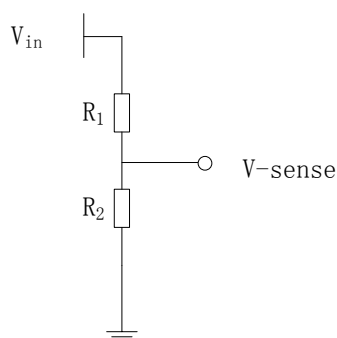


图 3.12 输入电压检测电路

Fig. 3.12 Input voltage sensing circuit

电压信号 $V\text{-sense}$ 与输入电压 V_{in} 的关系为:

$$V\text{-sense} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3.2)$$

由式(3.2)可以看出, 电压信号 $V\text{-sense}$ 与输入电压 V_{in} 成比例关系, 比例系数的大小由电阻 R_1 和 R_2 决定。

$T\text{-sense}$ 信号是反映发射端耦合机构温度高低的信号。耦合机构由于自身有一定的阻值, 因而, 当工作持续时间长且流过的电流比较大时就会发热。耦合机构温度过高不仅影响用户体验, 还可能产生不安全因素, 所以要对耦合机构的温度进行检测, 如果该温度超过了限定值, 就使系统暂停工作。芯片的温度检测主要通过微型温度传感器来实现, 温度传感器可以将温度信号转换成电信号传送给控制器, 以便控制器进行控制。

3.2.2 手机无线充电系统接收端控制

接收端控制器 bq51013 是一款适用于便携式应用无线电源传输的集成芯片, 内部集成了 AC/DC 电源转换, 而且还具有符合 Qi 标准的数字控制功能。该芯片集成了一个低阻抗完全同步整流器、低压降压稳压器和数字控制器。同步整流器将次级线圈拾取的交流电转换成直流电, 经过整流和降压稳压处理后供给用电设备。数字控制器根据检测到的整流电压和负载反馈的信息, 经过计算生成控制信号和误差信号, 并控制调制电路生成数据包传送给发射端。其控制流程如图 3.13 所示。

图 3.13 所示的流程图中, 接收端拾取到电能后, 首先与发射端进行通信, 发送信号强度数据包、身份标识数据包和配置数据包, 如果发射端未终止电能的传输, 则发射端开始发送控制误差数据包, 并继续拾取电能。控制器根据检测电路反馈的信号判断整流滤波后的输出电压是否正常。如果整流后的电压超出预定的范围, 则控制器应马上向发射端发送终止电能传输信号, 结束电能的传输; 如果整流电压在正常范围内, 则控制器检查用电设备反馈的信息, 判断充电是否完成。如果用电设备反馈的信息为充电完成, 则应向发射端发送充电结束信号, 结束充电过程; 否则应根据整流电压值和控制目标值的差值计算控制误差值的大小, 并将该控制误差信号发送给发射端, 以调节传输功率, 然后控制器继续判断整流电压值是否正常。

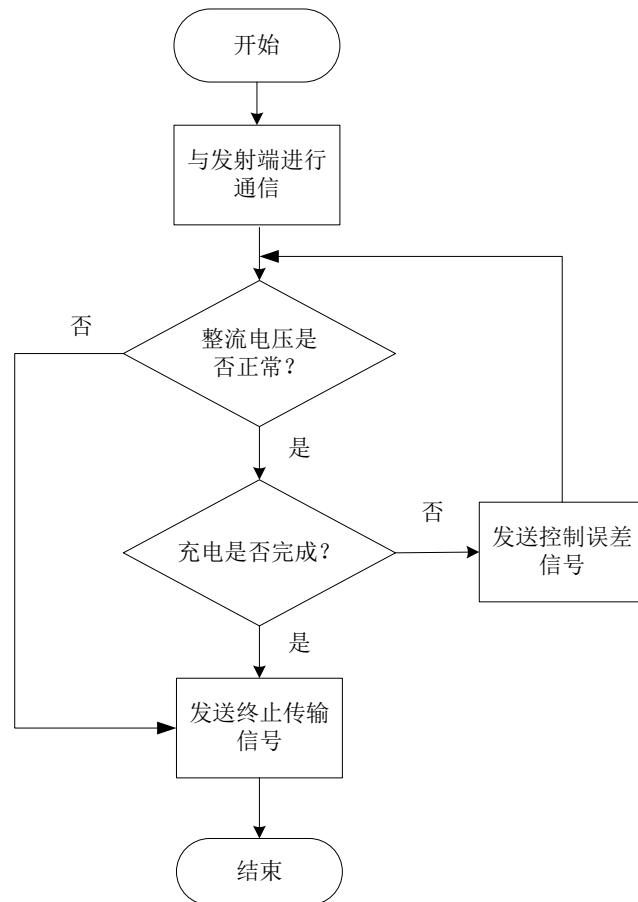


图 3.13 接收端控制流程

Fig. 3.13 Control flow chart of power receiver

3.3 本章小结

本章首先介绍了常用的高频逆变电路和谐振网络拓扑，分析了各种拓扑的特点，并根据手机无线充电系统的实际需求确定了合适的电路拓扑。完成了发射端和接收端的控制芯片选型，阐述了手机无线充电系统的控制方法以及电能传输各个阶段的控制目标，然后详细地分析了发射端的控制流程，设计了发射端的电源控制电路、发射线圈电流检测电路和逆变器输入电压检测电路，最后详细地分析了接收端的控制流程。

4 手机无线充电系统发射端与接收端之间的通信

为了使手机无线充电系统的接收端将其功率需求信息和电池充电状态信息反馈回发射端，以便发射端进行更准确的控制，需要接收端和发射端之间能进行通信。由于通信的信息都是从接收端传到发射端，故只需要进行简单的单向通信即可。为此，本章首先设计了接收端的通信信号调制电路，然后定义了数据包的编码方式、格式和传输时序，最后用 *simulink* 对信号调制电路进行了仿真分析。

4.1 信号调制电路

接收端通过调节从发射端拾取的电能来对传输信息进行编码，接收端拾取的电能变化会引起发射端线圈电流的变化，发射端通过检测发射线圈电流的幅值来解调信息。因此，从接收端到发射端的通信是通过幅值调制进行的。

在手机无线充电系统中，常用的幅值调制方法有电容调制和电阻调制两种方式。电容调制电路如图 4.1(a)所示，在接收端整流电路的交流侧并联两个电容，两个电容各有一个开关管与之串联，开关管的开关状态由调制信号控制。开关管断开时，系统的谐振曲线如图 4.1(b)中曲线 1 所示，当开关管闭合后，系统的谐振曲线如图 4.1(b)中曲线 2 所示，故电容调制的原理是通过改变接收端的并联电容来使谐振曲线发生偏移，从而使发射线圈的电流幅值改变。图 4.1(b)中逻辑 1 表示未并联电容时发射线圈电流幅值，逻辑 0 表示并联了电容后发射线圈电流的幅值。

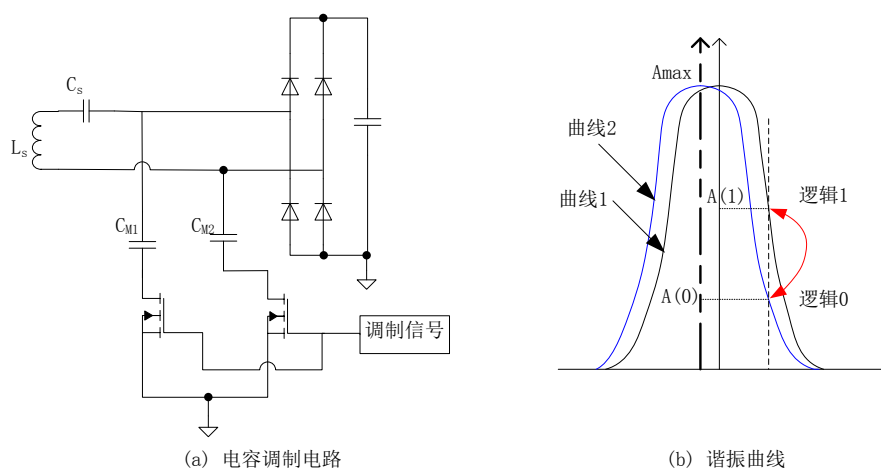


图 4.1 变电容式调制电路

Fig. 4.1 Capacitive modulation circuit

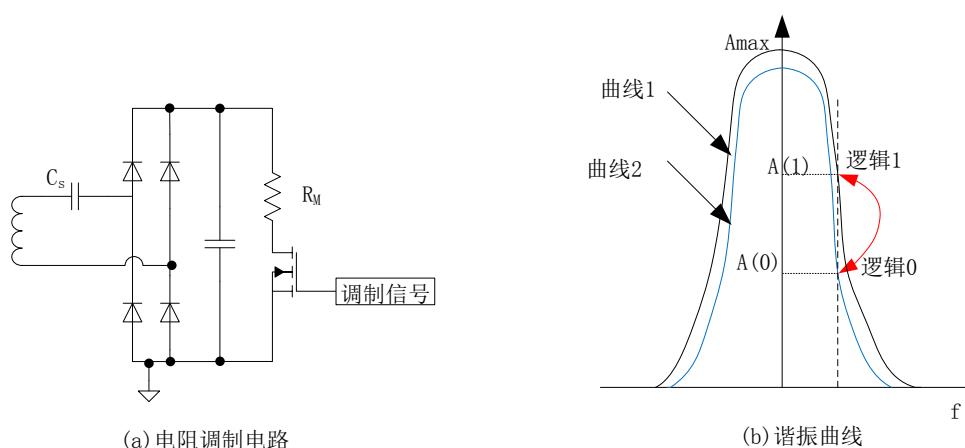


图 4.2 变电阻式调制电路

Fig. 4.2 Resistive modulation circuit

电阻调制电路如图 4.2(a)所示，在接收端整流电路的直流侧并联一个电阻，该电阻与一个开关管串联，开关管的开关状态由调制信号控制。开关管关断时，系统的谐振曲线如图 4.2(b)中的曲线 1 所示，开关管闭合时，系统的谐振曲线如图 4.2(b)中的曲线 2 所示，可以明显的看出，黑色曲线与蓝色曲线的幅值不同，故电阻调制的原理是通过改变品质因数 Q 的大小来改变谐振曲线的幅值，从而使发射线圈的电流幅值发生变化。图 4.2(b)中逻辑 1 表示未并联电阻时发射线圈电流幅值，逻辑 0 表示并联了电阻后发射线圈电流的幅值。

本文设计的手机无线充电系统采用电阻调制方法进行信号的调制，因为从成本的角度来讲，电阻调制方法使用的器件更少；从控制的角度来讲，电阻调制方式只要控制一个开关管，因而更简单。

4.2 编码方案

4.2.1 位的编码

接收端采用差分双相编码方法将数据信号调制到能量上。发射端应确保其发送的每一位都与内部时钟的一个周期相对应，即每一位的起始时刻都与内部时钟的一个上升沿相对应，Qi 标准规定该内部时钟的频率为 2KHz。位信号的编码规则为一个时钟周期内有跳变的代表 1，没有跳变的代表 0，为编码示例图如图 4.3 所示。

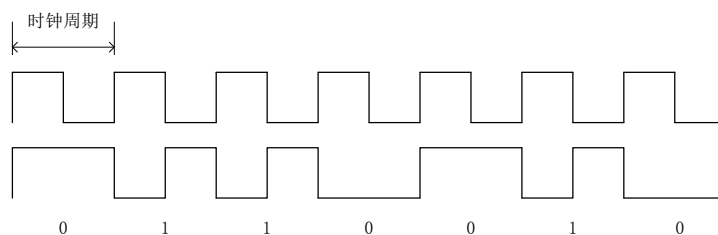


图 4.3 位编码示例图

Fig. 4.3 Example of bit encoding

4.2.2 字节编码

一个字节由 11 个位组成，其中包含 1 个起始位、8 个数据位、1 个校验位和 1 个截止位。起始位为 0；数据位的排列次序为低位在前；奇偶校验位由数据位中 1 的个数确定，如果数据位中包含偶数个 1，则校验位为 1，否则校验位为 0；截止位为 1。字节的编码示例图如图 4.4 所示。

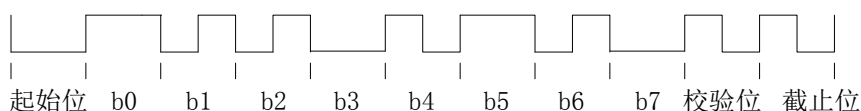


图 4.4 字节编码示例图

Fig. 4.4 Example of byte encoding

4.2.3 数据包编码

接收端和发射端之间的通信通过数据包来传递，一个数据包由 4 个部分组成：前导、报头、信息、校验和，其格式如图 4.5 所示。其中前导由 11~25 个 1 组成，前导的作用是使发射端能与该数据包同步，并准确的检测到报头的起始位。报头由一个字节组成，其作用是定义数据包的类型。信息指的是数据包所要传递的信息，由 1 个或多个字节组成，跟在报头后面的字节序列依次为 B_0 、 B_1 ... B_n 。校验和由一个字节组成，其作用是供发射端检验传输差错，如果算得的校验和与数据包携带的校验和不一致，则说明传输出现错误。校验和的计算方法如式(4.1)所示。

$$C = H \oplus B_0 \oplus B_1 \oplus \dots \oplus B_n \quad (4.1)$$

式(4.1)中，C 代表计算得的校验和， B_0 ， B_1 ，... B_n 代表信息字节。

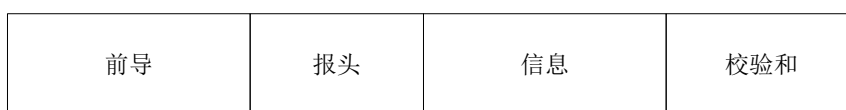


图 4.5 数据包格式

Fig. 4.5 Packet format

发射端可以从以下几个方面来判断数据包是否正确接收：

- ① 在检测到起始位之前，发射端至少要检测到 4 个前导位；
- ② 发射端没有检测到数据包里任何字节的校验位错误；
- ③ 发射端能检测到校验和的截止位；
- ④ 发射端计算的校验和与数据包携带的校验和一致。

如果发射端检测到以上 4 条中有任何一条不符，就应该立即丢弃该数据包，且不能使用里面携带的任何信息。

4.3 电能传输各阶段的通信

无线充电器工作时，各阶段的通信数据包如下表 4.1 所示。在 Ping 阶段，发射端发送的数据包为信号强度包或停止电能传输包；在识别和配置阶段，发射端发送的数据包为身份识别包和配置包；在电能传输阶段，发射端发送的数据包为停止电能传输包、控制误差数据包和已接收功率包。

表 4.1 电能传输各阶段数据包类型

Table 4.1 Packet types in each power transfer phase

阶段	报头	数据包类型	信息大小（字节）
ping	0x01	信号强度包	1
	0x02	终止传输包	1
识别和配置	0x51	配置包	5
	0x71	身份标识包	7
	0x02	终止传输包	1
电能传输	0x03	控制误差包	1
	0x04	已接收功率包	1

4.3.1 Ping 阶段

在 Ping 阶段，发射端以 175KHz 的工作频率发送能量，如果发射端在开始发送能量后 t_p 时间内检测到信号强度数据包的起始位且该信号强度数据包被正确接收，则发射端进入识别和配置阶段；否则，如果发射端应该在 t_{mt} 内停止发送能量。发射端在 ping 阶段的工作时序图如图 4.6 所示。

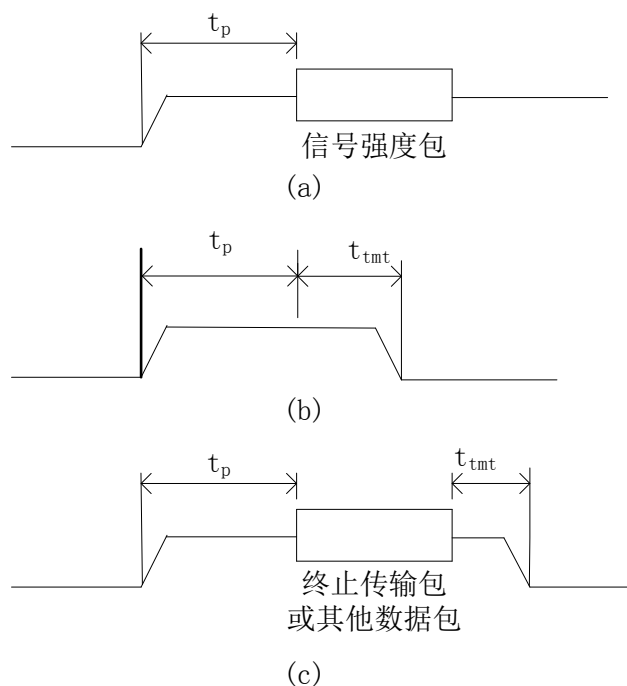


图 4.6 发射端在 Ping 阶段工作时序图

Fig. 4.6 Power transmitter timing in ping phase

图 4.6(a)表示发射端在发送能量后 t_p 时间内正确接收到信号强度包，并维持该能量的发送，同时入识别和配置阶段。图 4.6(b)表示发射端在发送能量后 t_p 时间内没接收到任何数据包，因此发射端应在 t_{tmt} 时间内停止发送能量。图 4.6(c)表示发射端在发送能量后 t_p 时间内接收到了数据包，但是所接收到的数据包是终止传输包或不是信号强度包，发射端也应在 t_{tmt} 时间内停止发送能量。图中 t_p 的时长为 65ms， t_{tmt} 的时长为 30ms。

信号强度包的信息长度为 1 个字节，其格式如表 4.2 所示。

表 4.2 信号强度数据包信息格式

Table 4.2 Signal strength message format							
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0				信号强度值			

信息强度值是一个无符号整数，其数值的大小代表接收端拾取到的能量的强弱。其数值可以通过式 4.2 算得：

$$\text{信号强度值} = \frac{U}{U_{\max}} \cdot 256 \quad (4.2)$$

式(4.2)中， U 代表接收端检测到的整流电压值， U_{\max} 代表接收端期望的最大

整流电压值，当 $U \geq U_{\max}$ 时，信号强度值为 255。

终止传输包所包含的信息长度为 1 个字节，其格式如表 4.3 所示。

表 4.3 终止传输数据包信息格式

Table 4.3 End power transfer message format							
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0				终止传输代码			

终止传输代码表示请求终止电能传输的原因，每个代码表示的意思如表 4.4 所示。

表 4.4 终止传输代码表示的原因

Table 4.4 Reasons for end power transfer values	
代码	原因
0x00	未知原因
0x01	充电完成
0x02	内部错误
0x03	过温
0x04	过压
0x05	过流
0x06	电池出错
0x07	重新配置约束条件
0x08	发射端无响应
0x09-0xFF	保留数值

终止传输代码可以是 0x00-0x08 中的任意一个数值，但是不能使用保留数值，否则发射端应将该终止传输包丢弃。

4.3.2 识别和配置阶段

在识别和配置阶段，发射端继续发送 175KHz 的能量，识别接收端并获取配置信息。在这个阶段发射端接收到的数据包为接收端的身份标志包和配置包。发射端在识别和配置阶段接收数据包的时序限制为：

① 如果发射端在信号强度包的截止位后 t_n 时间内接收到接收端的身份标志包的起始位，然后在接收端的身份标识包截止位后 t_n 时间内接收到配置包的起始位，且两个数据包都正确接收，则发射端根据配置包携带的信息创建电能传输约

束条件集，并进入电能传输阶段。

② 如果发射端在信号强度包的截止位后 t_n 时间内未接收到接收端的身份标识包的起始位，或在接收端的身份标识包截止位后 t_n 时间内未接收到配置包的起始位，或任何一个数据包未正确接收，则在 t_{mt} 时间内停止发送能量。

③ 如果发射端在上面规定时序内接收到的数据包不是身份标识包或配置包，或者两则顺序错误，则应在 t_{mt} 时间内停止发送能量。

发射端在识别配置阶段的工作时序如图 4.7 所示。

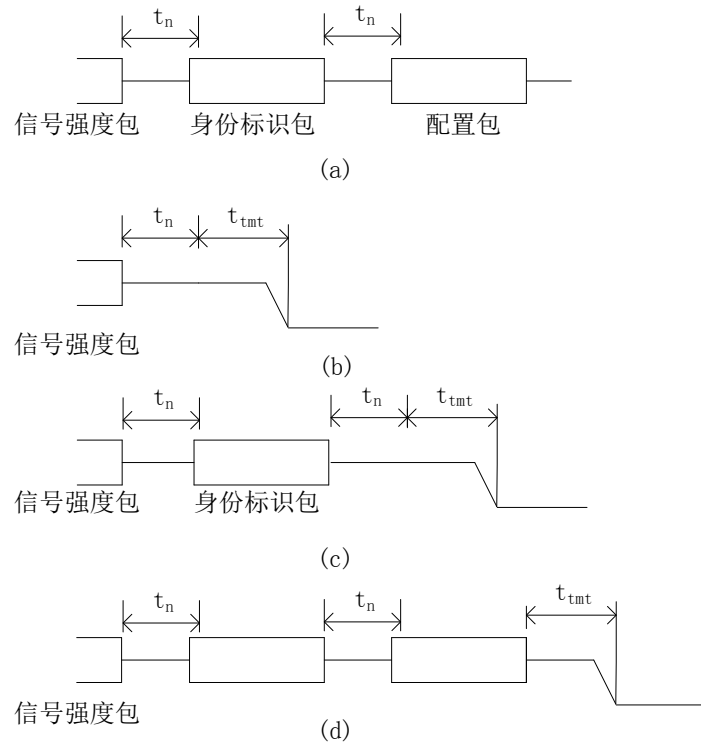


图 4.7 发射端在识别配置阶段的时序图

Fig. 4.7 Power Transmitter timing in the identification & configuration phase

图 4.7(a)表示发射端在信号强度数据包的截止位后 t_n 时间内正确接收到了身份标识包，并在身份标识包截止位后 t_n 时间内正确接收到了配置包，说明系统工作正常，发射端继续发送能量。图 4.7(b)表示发射端在信号强度数据包的截止位后 t_n 时间内未接收到身份标识包，故在时间 t_{mt} 内停止了能量的发送。图 4.7(c)表示发射端在身份标识包截止位后 t_n 时间内未接收到配置包，故在时间 t_{mt} 内停止了能量的发送。图 4.7(d)表示发射端在信号强度数据包的截止位后 t_n 时间内接收到了别的数据包，故也在 t_{mt} 时间内停止了能量的发送。其中 t_n 的时长为 21ms。

身份标识包的信息包含 7 个字节，其格式如表 4.5 所示。

表 4.5 身份标识数据包信息格式

Table 4.5 Identification packet message format								
	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0	主版本				兼容版本			
B1	生产商代码							
B2								
B3	设备代码							
B4								
B5								
B6								

表 4.5 中，字节 B0 中的主版本表示接收端所符合的 WPC 标准的版本；字节 B1 和 B2 代表接收端生产商的代码；B3-B7 代表设备代码；厂商应确保每个接收端的生厂商代码加设备代码都是唯一的。

配置包的信息长度为 5 个字节，其组成格式如表 4.6 所示。

表 4.6 配置包信息格式

Table 4.6 Configuration packet message format								
	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0	功率等级		最大功率					
B1	保留							
B2	控 制	保留				个数		
B3	时长					间隔		
B4	保留							

表 4.6 中，功率等级代表接收端接收功率的功率等级，在手机无线充电系统中，该数值设为 0；最大功率表示接收端期望输出到负载的最大功率；控制位代表的是发射端控制方法的选择，如果控制位为 0，则表示发射端应采用标准规定的控制方法来控制传输功率的大小，如果控制位为 1，则表示发射端可以采用自带的控制方法来控制传输功率；时长表示接收端计算平均接收功率的时间窗口大小，以 4ms 为一个单位；间隔表示接收端计算已接收功率和将该信息发送给发射

端的时间间隔，以 4ms 为一个单位。

4.3.3 电能传输阶段

在电能传输阶段，系统通信过程中传输的数据包主要为控制误差包、接收功率包和终止传输包。控制误差包是这个阶段传输最多的数据包，接收端通过控制误差包将误差信息反馈给发射端，以便发射端进行及时的调整。发射端在这个阶段所接收的数据包时序为：

① 如果发射端在接收到配置包的起始位后 t_{to} 时间内没有正确接收到控制误差数据包的起始位，则发射端在 t_{mt} 时间内停止发送能量；如果发射端没有在前一个控制误差数据包的起始位后 t_{to} 时间内检测到下一个控制误差数据包的起始位，则发射端在 t_{mt} 时间内停止能量的发送。

② 如果发射端在接收到配置包的起始位后 t_{pw} 时间内没有正确接收到已接收功率数据包的起始位，则发射端在 t_{mt} 时间内停止发送能量；如果发射端没有在前一个已接收功率数据包的起始位后 t_{pw} 时间内检测到下一个已接收功率数据包的起始位，则发射端在 t_{mt} 时间内停止能量的发送。

发射端接收到的数据包时序图如图 4.8 所示。图 4.8(a)表示发射端在接收到配置包的起始位 t_{to} 时间内没接收到控制误差数据包，故发射端在 t_{mt} 时间内停止了能量的发送。图 4.8(b)表示发射端在接收到前一个控制误差数据包的起始位之后的 t_{to} 时间内没接收到下一个控制误差数据包，故发射端在 t_{mt} 时间内停止了能量的发送。图 4.8(c)表示发射端在接收到一个控制误差数据包之后的 t_{to} 时间内没有接收到控制误差数据包，而是接收到了除接收功率数据包和终止传输包之外的数据包，故发射端在 t_{mt} 时间内停止了能量的发送。图 4.8(d)表示发射端在接收到前一个接收功率数据包之后 t_{pw} 时间内没接收到下一个接收功率数据包，故发射端在 t_{mt} 时间内停止了能量的发送。图 4.8(e)表示发射端只要接收到了终止传输包，就应在 t_{mt} 时间内停止能量的发送。图 4.8(b)和 4.8(c)中， t_d 的作用是使发射端电流从信号调制的波动中恢复平稳，以便发射端进行更准确的控制； t_a 是发射端调整工作频率的时间； t_s 是发射端调节完后的一段延时，这段时间可供接收端检测整流电压的大小，并计算下一个控制误差数据包的误差数值大小。 t_{to} 时长为 1500ms， t_a 时长为 20ms， t_d 和 t_s 时长为 5ms， t_{pw} 时长为 23000ms。

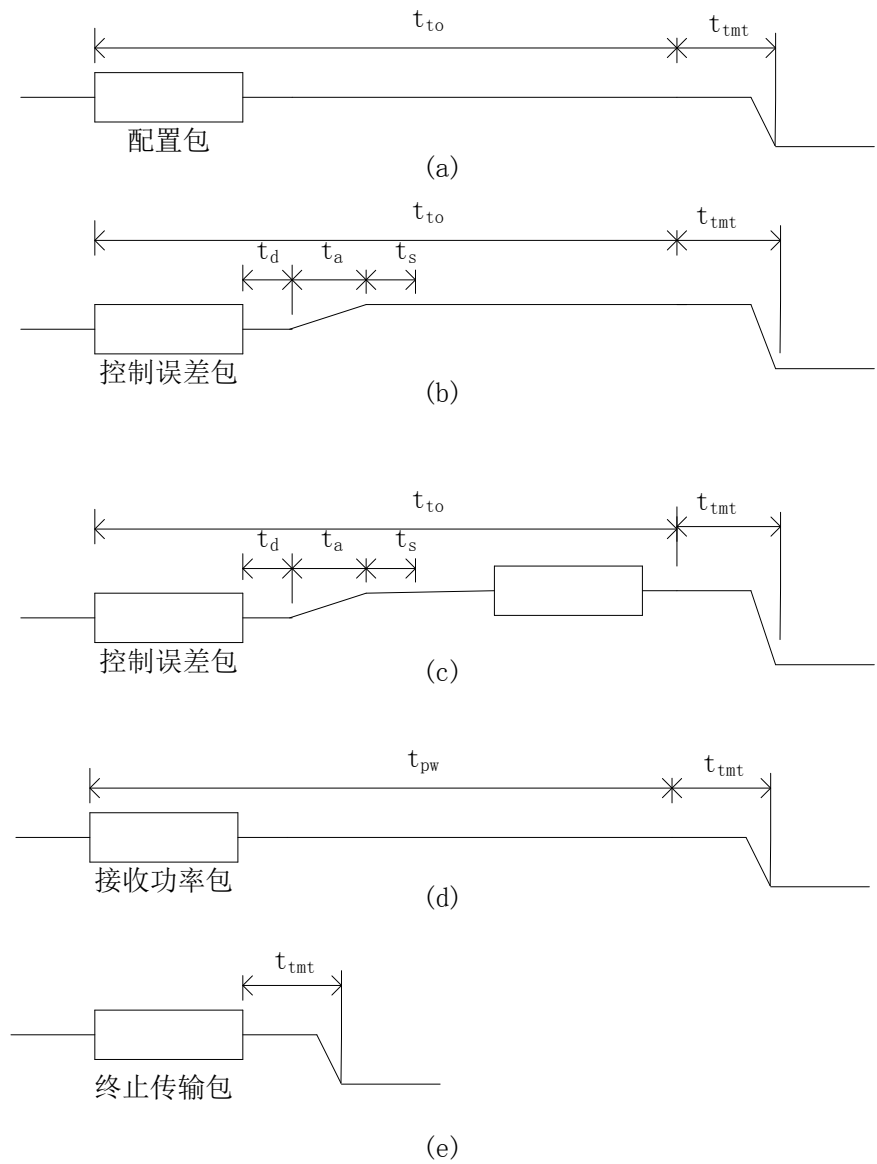


图 4.8 电能传输阶段发射端时序图

Fig. 4.8 Power transmitter timing in power transfer phase

控制误差数据包的信息长度为 1 字节，其格式如表 4.7 所示。

表 4.7 控制误差数据包信息格式

Table 4.7 Control error packet message format

b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0				控制误差值			

控制误差值是一个有符号整数值，其变化范围为-128~+127，该值的大小和正

负反映控制误差的大小和调节方向，是发射端控制器的一个输入参数。

接收功率数据包的信息长度为 1 个字节，其组成格式如表 4.8 所示。

表 4.8 接收功率数据包信息格式

Table 4.8 Received power packet message format							
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0
B0				接收功率值			

接收功率值的大小反映接收端接收到的功率大小。其值的大小可由式(4.3)算得:

$$P_{received} = \left(\frac{\text{接收功率平均值}}{128} \right) \times \left(\frac{\text{最大功率}}{2} \right) \quad (4.3)$$

式(4.3)中，接收功率平均值为接收端在某一段时长内接收到的功率的平均值，这一段时长的大小由配置包的时长字段规定。最大功率指的由配置包的最大功率字段规定。

4.4 信号调制电路的仿真验证

为了验证所设计的信号调制电路的调制效果，用 Matlab/Simulink 对其进行仿真，仿真模型如图 4.9 所示。

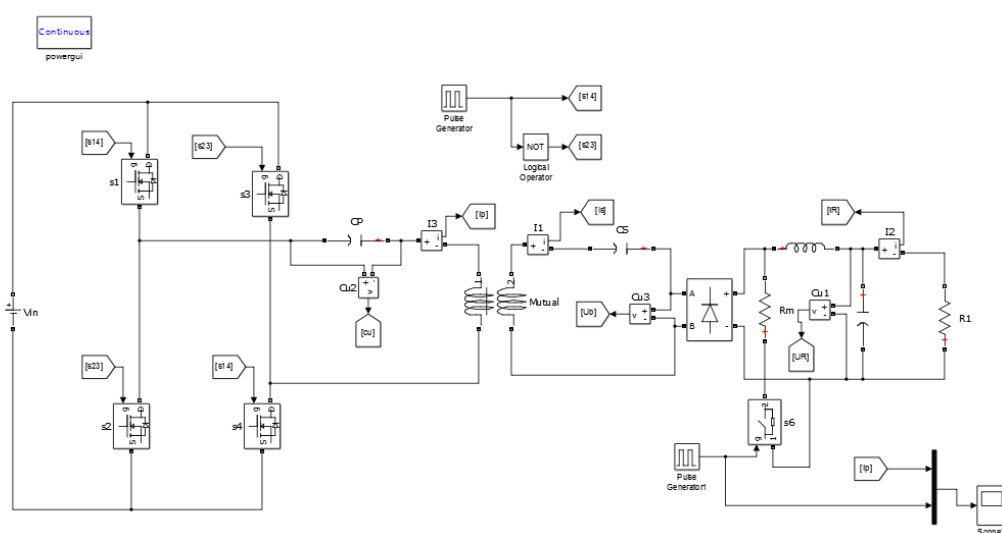


图 4.9 信号调制电路仿真模型

Fig. 4.9 Simulation model of the modulation circuit

仿真模型中，发射线圈自感 L_p 为 $6.5\mu\text{H}$ ，原边补偿电容为 $0.4\mu\text{F}$ ，接收线圈自感 L_s 为 $12.4\mu\text{H}$ ，接收端补偿电容 C_s 为 $0.2\mu\text{H}$ ， t 调制电阻 R_m 为 33Ω ，系统工作频率为 175KHz （ Q_i 标准规定系统启动频率为 175KHz ）。仿真出来的初级线圈电流波形和调制信号波形如图 6.2 所示。

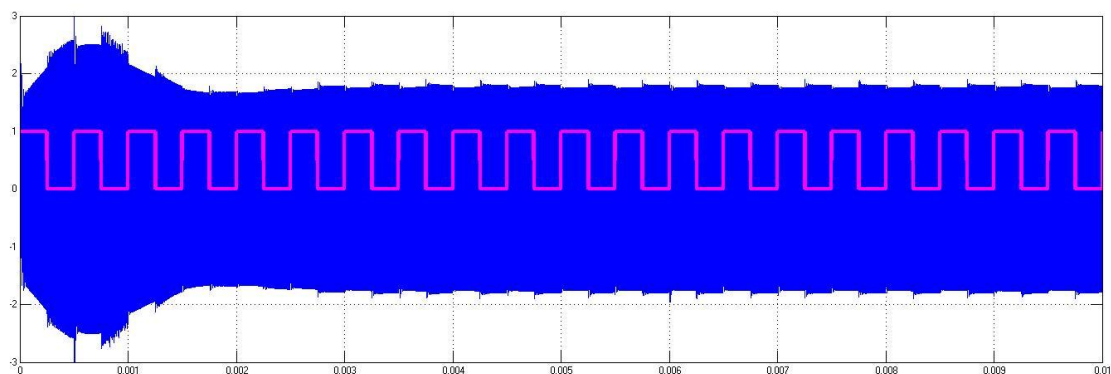


图 4.10 调制信号波形和初级线圈电流波形

Fig. 4.10 Modulation signal and primary current waveform

图 4.10 中，蓝色波形为初级线圈电流波形，红色波形为接收端的信号波形。由图 4.10 可以看出，经过调制电路调制后，初级线圈的电流幅值随着接收端信号波形的跳变而变化，即接收端的信号波被准确的调制到了初级线圈的电流波形上。

4.5 本章小结

为了使手机无线充电系统的接收端将其功率需求信息和电池充电状态等信息反馈回发射端，以便发射端进行更准确的控制，实现能量和信号的同步传输，本章在对常用的通信信号调制电路进行分析的基础上确定了适用于手机无线充电系统的通信信号调制电路，设计了通信过程中的数据包编码方式，数据包格式以及电能传输各个阶段的数据包发送时序，并用 Simulink 对通信信号调制电路进行仿真分析，仿真结果表明所设计的信号调制电路具有良好的调制效果。

5 手机无线充电系统的耦合机构设计

耦合机构，即原边能量发射线圈和副边能量接收线圈，是无线充电系统中的关键部分之一，耦合机构设计的合理与否直接影响系统的传输效率、传输能力和可靠性^[36]。而对于手机无线电能传输系统来说，耦合机构需要满足体系小、质量轻、传输效率高等特点。目前无线充电系统常用的耦合机构都是由李兹线或细铜线绕制而成的，这种线圈不仅成本昂贵，制作工艺复杂，而且还增加了模具成本以及装配的复杂性。为了解决上述问题，本文设计了一种 PCB 耦合机构，不仅解决了成本问题，而且简化了制造的复杂度，可以一次成型，同时也可以克服机械绕制线圈一致性差的缺点，使耦合机构的可靠性大大提高，并减轻整个系统的重量。

5.1 PCB 线圈自感的影响因素分析

本节将采用电磁场仿真软件对 PCB 耦合机构的参数对自感的影响进行分析，主要从 PCB 耦合机构的形状、尺寸、线宽、匝数、电阻等几个方面着手。

5.1.1 PCB 耦合机构基本形状分析

本文研究的耦合机构为平面型耦合机构，不包括立体型。无芯 PCB 线圈的绕线形状可以采取矩形、六边形、圆形等。示意图如图 5.1 所示。

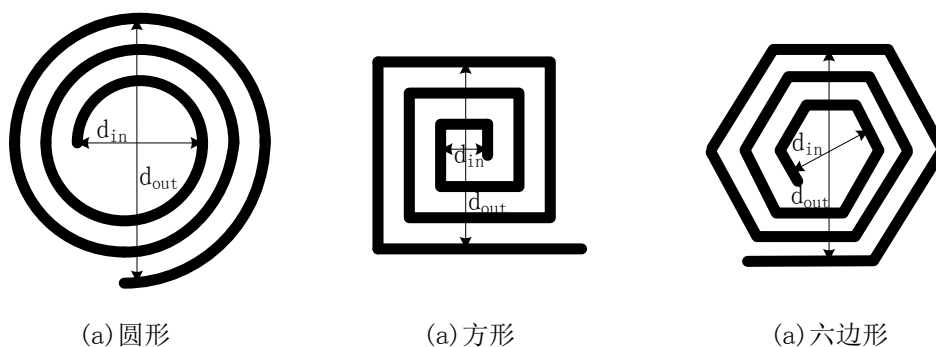


图 5.1 常见的 PCB 线圈形状

Fig. 5.1 Common shape of PCB coils

图 5.1 中， d_{out} 表示 PCB 线圈的外尺寸， d_{in} 表示 PCB 线圈的内尺寸，另外本文用 w 表示 PCB 线圈的线宽， s 表示 PCB 线圈的线间距， N 表示线圈的匝数。这几个参数是线圈设计中的主要参数，它们对线圈电感值的影响将在后面几节进行介绍。

文献^[37]表明在以上几种绕线形式中,以矩形和圆形线圈最为常见,因为矩形线圈易于制作,可以很好的控制电感的个体参数,而圆形线圈的品质因素 Q 较高。在相同面积、相同线宽和线间距的条件下,矩形线圈的电感值比圆形线圈大,但是圆形线圈的品质因素比矩形线圈高。其原因是圆形绕线所占用的面积大,而在相同面积时,矩形线圈的有效长度大于圆形线圈,因而它的电感量也大于圆形线圈。也正因为矩形线圈的有效绕线长度大于圆形线圈,使其绕线电阻也大于圆形线圈,故其品质因素小于圆形线圈,当然品质因素还会受线间分布电容、涡流损耗等因素的影响。在耦合机构的设计过程中,应该根据具体情况(应用设备的外观、性能要求等)确定所需形状。

在实际应用中,矩形和多边形线圈由于彼此之间可以紧密排列而常被用于可以自由定位的无线充电器中^[38]。图 5.2 所示的是多个六边形线圈用于自由定位充电器的排列示意图。

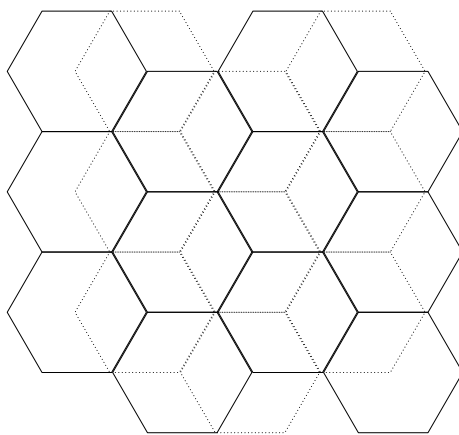


图 5.2 多个六边形线圈阵列

Fig. 5.2 Multiple hexagon coil array

如图 5.2 所示,多个六边形紧密排列可以做到无缝连接,双层错开排列后可以形成均匀的磁场分布,非常适用于自由定位的无线充电器。但是由于这种结构使用的线圈较多,成本高,控制复杂,制作难度较大,故还未能得到广泛应用。

5.1.2 PCB 耦合机构尺寸分析

本节主要分析线圈的外尺寸和内尺寸对线圈电感值的影响,假设线圈匝数保持不变,对圆形线圈进行仿真,分别分析线圈内径不变外径改变时线圈自感的变化规律、线圈外径不变内径变化时线圈自感的变化规律和线圈内外径同时变化时线圈自感的变化规律。仿真结果如图 5.3, 5.4 和 5.5 所示。

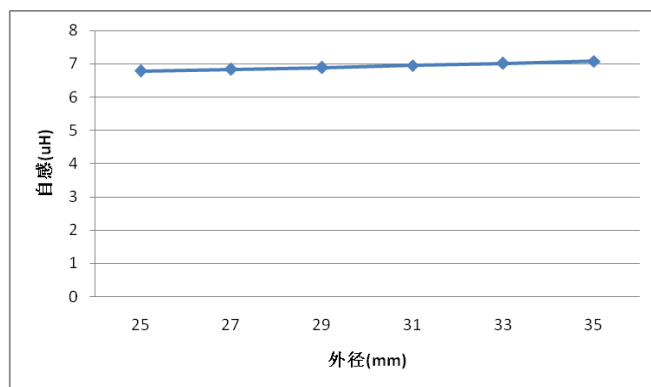


图 5.3 自感随外径变化曲线

Fig. 5.3 Curve of self inductance varying with outer diameter

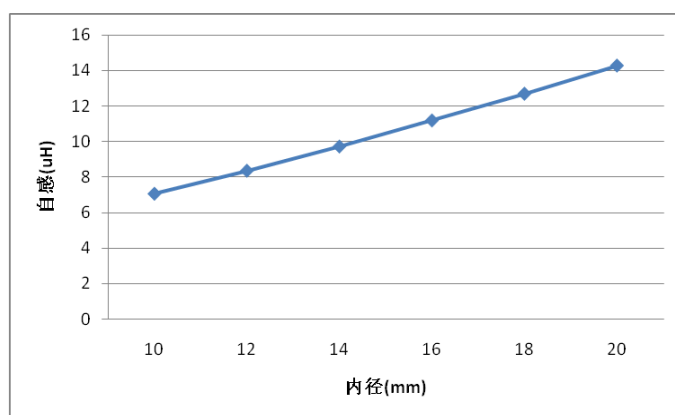


图 5.4 自感随内径变化曲线

Fig. 5.4 Curve of self inductance varying with inner diameter

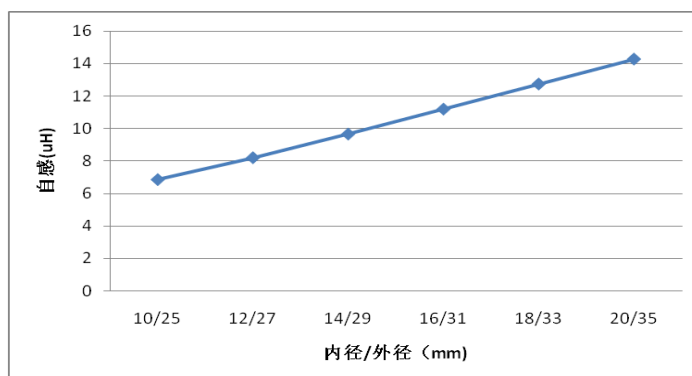


图 5.5 自感随线圈尺寸的变化曲线

Fig. 5.5 Curve of self inductance varying with the coil size

由图 5.3, 5.4 和 5.5 可以看出, 当线圈的内径不变时, 随着外径的增大, 线圈自感几乎保持不变; 当线圈外径不变, 随着线圈内径的增大, 线圈自感也随之增大; 当线圈的内径和外径同步增大时, 线圈的自感也随之增大。由此可见线圈

内尺寸对自感的影响大于线圈外尺寸，在实际设计中，一般将允许的最大尺寸作为 PCB 线圈的外尺寸，而内尺寸则还需根据布线的线宽、线间距和匝数来确定。

5.1.3 PCB 耦合机构线宽和线间距分析

PCB 线圈的线宽设计主要需考虑线圈载流能力、趋肤效应、线圈自身阻值等几个方面问题。线圈载流能力是指线圈所能承受的最大电流，PCB 线圈的载流能力和线宽、铜厚的关系可由经验值表或经验公式确定。趋肤效应是指导体中有交流电时，导体内部电流分布不均匀，电流集中在导体的表面，使导体内部电流流过的实际面积减小、导线电阻增加的现象。为了减小导体的趋肤效应，通常用多股很细的铜导线来代替一根粗导线^[39,40]。线圈的阻值是指线圈本身电阻的大小，会对系统的传输效率产生影响，其值越小对系统越有利。

在 PCB 线圈设计过程中，为了使线圈具有一定的载流能力并尽可能减小趋肤效应和电阻，通常采用多层板设计。每层板都布有一样的线圈，然后将这几层上的线圈并联起来，连成一个线圈，这样可以在减小线圈趋肤效应的同时使线圈具有一定的载流能力。

由于手机无线充电系统的耦合机构布线面积有限，且线圈的内尺寸不能太小，所以布线时线间距的选取原则为越小越好。根据目前 PCB 制造厂家的工艺水平，最小线间距可达 0.2mm。

5.1.4 PCB 耦合机构匝数分析

本节分两种情况对线圈的匝数影响进行分析：① 线圈的内尺寸和外尺寸保持不变，通过改变线宽来改变匝数；② 线圈的线宽保持不变，内尺寸随着匝数的增多而变小。分别对这两种情况进行仿真分析，得到的结果如表 5.1 和 5.2 所示。仿真模型为圆形线圈，其外半径固定为 35mm。

表 5.1 圆形线圈内外半径不变时线圈自感与线圈匝数的关系

Table 5.1 Relationship between self inductance and turns with inner and outer diameter fixed

线宽 (mm)	内径 (mm)	匝数	自感 (uH)
0.80	20	15	14.28
0.74	20	16	16.24
0.68	20	17	18.34
0.63	20	18	20.56
0.59	20	19	22.91
0.55	20	20	25.38

表 5.2 圆形线圈外径和线宽不变时线圈自感与匝数的关系

Table 5.2 Relationship between self inductance and turns with outer diameter and line width fixed

线宽 (mm)	内径 (mm)	匝数	自感 (uH)
0.8	20	15	14.28
0.8	19	16	15.34
0.8	18	17	18.26
0.8	17	18	18.58
0.8	16	19	17.95
0.8	15	20	17.16

由表 5.1 可以看出, 当线圈的内外半径固定不变, 通过改变线圈的线宽来改变线圈匝数时 (这里假设布线宽度可以随意选择, 不用考虑线圈的载流能力), 线圈的自感随着线圈的匝数增加而增大。

由表 5.2 可以看出, 当线圈的外径和线宽保持不变, 通过使线圈的内半径减小来增加圈数时, 线圈的自感随匝数的增加先变大后变小。其原因是由于线圈内径的减小会使其自感值变小, 当内径小到一定程度后, 其变化对自感的影响程度会超过匝数对自感的影响, 因而使线圈自感变小。

5.1.5 PCB 耦合机构阻值和品质因数分析

PCB 线圈内阻 R 的计算公式为:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (5.1)$$

式 (5.1) 中, ρ 为铜箔电阻率, l 为铜箔长度, s 为铜箔横截面积^[41]。由于铜箔的电阻率一定, 我们能控制的就是铜箔的长度 l 和横截面积 s 。如果 PCB 线圈的外尺寸确定, 则其铜箔的长度就与线圈匝数相关, 匝数越多, 绕线长度就越大, 铜箔的内阻越大。横截面积与铜箔的厚度和线宽有关, 厚度越厚, 线宽越宽, 横截面积就越大, 铜箔的内阻越小。所以在 PCB 线圈的设计中, 在自感值和互感值满足要求的情况下, 从减小线圈自感的角度考虑应尽量减小线圈匝数、增加铜厚和线宽。

PCB 线圈品质因数 Q 的计算公式为:

$$Q = \omega \frac{L}{R} \quad (5.2)$$

式 (5.2) 中 ω 为系统工作角频率, L 为线圈自感值, R 为线圈内阻。在线圈设计中, 应尽可能减小 R 值, 以提高线圈的品质因数。

5.2 PCB 线圈之间互感的影响因素分析

影响 PCB 线圈之间的互感的主要因素为两线圈之间垂直距离、中心点水平距离以及两线圈各自的自感。线圈间的垂直距离和中心点水平距离示意图如图 5.6 和 5.7 所示。

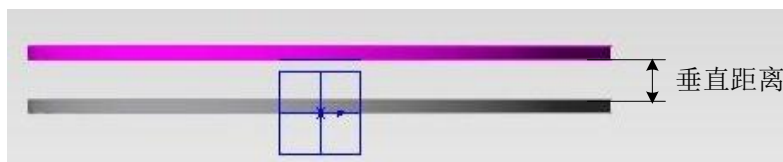


图 5.6 线圈间垂直距离

Fig. 5.6 Vertical distance between coils

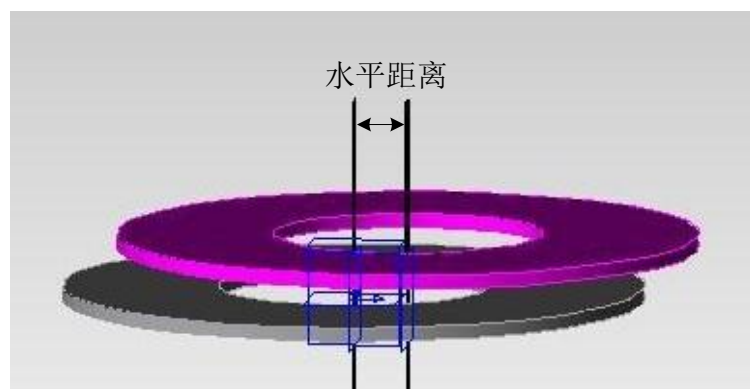


图 5.7 线圈间水平距离

Fig. 5.7 Horizontal distance between coils

通过对两个参数完全相同且同轴的圆形线圈进行仿真，可得线圈间的垂直距离与互感的关系曲线如图 5.8 所示。

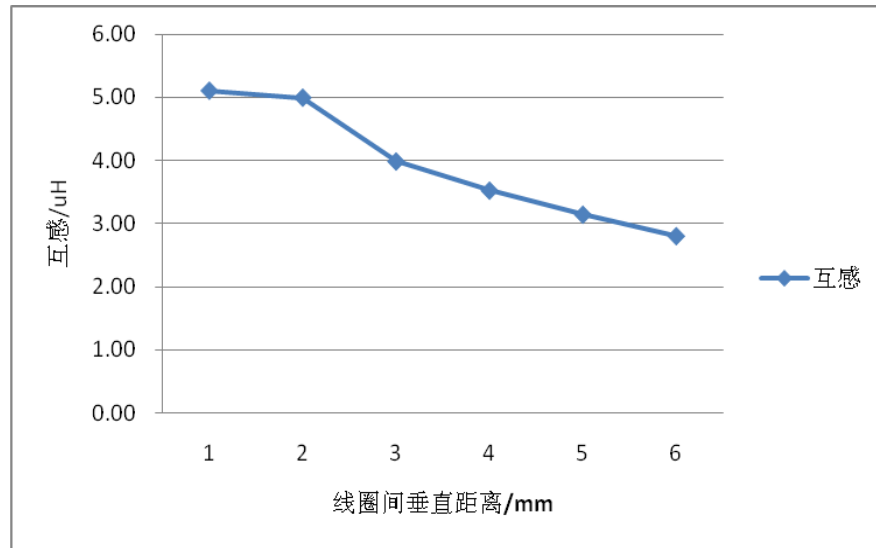


图 5.8 垂直距离对互感的影响

Fig. 5.8 Vertical distance effect on mutual inductance

通过对两个参数完全一样的线圈进行仿真，使它们之间的垂直距离固定为 3mm，得到中心点之间的水平距离和互感的关系曲线如图 5.9 所示。

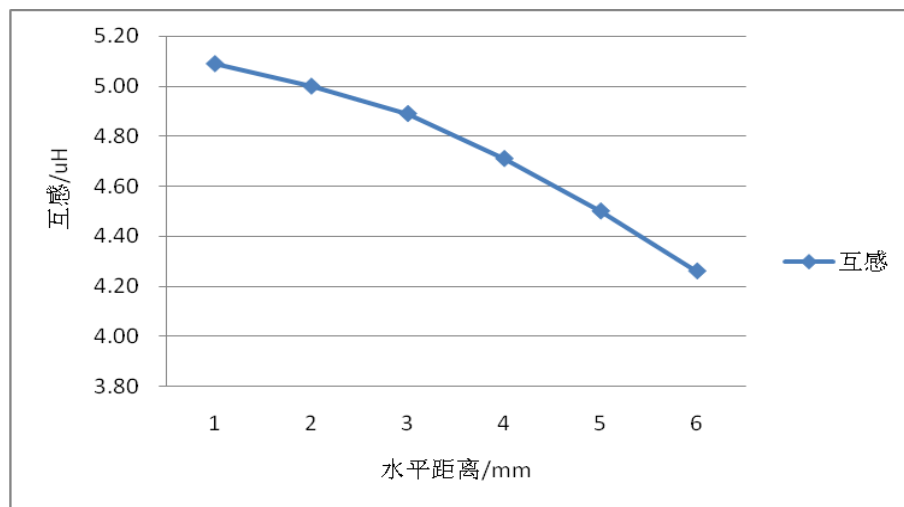


图 5.9 水平距离对互感的影响

Fig. 5.9 Horizontal distance effect on mutual inductance

对两个同轴放置且垂直距离固定为 3mm 的圆形线圈进行仿真，得到其自感对互感的影响曲线如图 5.10 所示，仿真模型中两个线圈的自感同时变化。

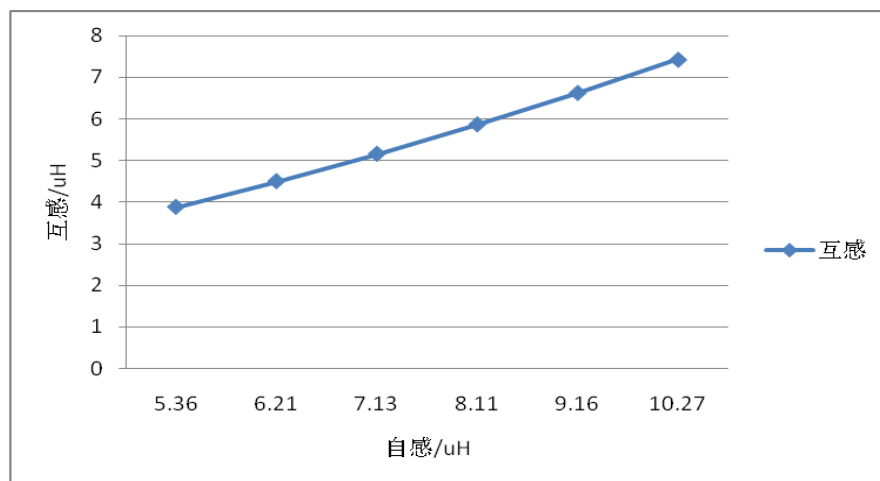


图 5.10 线圈自感对互感的影响

Fig. 5.10 Self inductance effect on mutual inductance

由图 5.8, 5.9, 5.10 可以看出, 线圈间的互感随着线圈间垂直距离和水平距离的增大而变小, 随着线圈自感的增大而增大。由于手机无线充电系统在用过程中两个线圈间的垂直距离一般固定, 其大小由发射端上表面的厚度和手机背的厚度确定, 一般为 3mm 左右, 故在 PCB 线圈设计时, 一般按照垂直距离为 3mm 来考虑。由于线圈之间的水平距离对互感也有较大影响, 因此在充电系统发射端的表面应该有明显可见的标记来引导用户将接收备放置在合理的位置 (即发射线圈上方), 而在设计时一般只考虑两线圈同轴的情况。当线圈的垂直距离和水平距离都定了以后, 主要考虑线圈自感对互感的影响, 通过增大线圈的自感来增加互感, 直到线圈间的传输效率满足要求。

5.3 PCB 耦合机构的设计

根据前面几节的分析可以总结出 PCB 耦合机构的设计流程, 流程图如图 5.11 所示。

图 5.11 所示的流程图中, PCB 线圈外尺寸主要是根据布线面积的大小来确定的, 而线圈的形状则根据布线区域的形状和线圈对品质因数的要求来确定的, 在手机无线充电器的应用中, 一般采用圆形形状。PCB 板的层数主要根据设定的线圈电感值的大小和具体的应用场合来确定, 用于手机无线充电的单个 PCB 线圈一般采用双层板布线, 铜厚一般为 1oz, 即每层 0.5oz。PCB 线圈的布线宽度则根据线圈要承载的最大电流来设计, 且需要考虑一定的裕量。确定了线圈的外尺寸、层数和线宽以后, 再根据仿真结果来确定线圈的匝数和内尺寸大小。对于线圈自感值和互感值都满足要求的几组数据, 应选择线圈匝数少的一组。

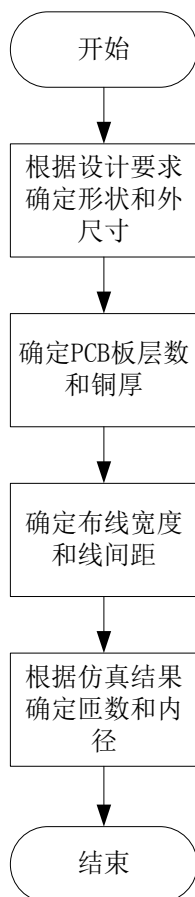


图 5.11 PCB 耦合机构设计流程图

Fig. 5.11 Flow chart of PCB coil designing

下面以手机无线充电器接收端 PCB 耦合机构的设计为例，详细介绍 PCB 耦合机构的设计过程。接收端 PCB 耦合机构的设计目标为：布线面积为 $40*40\text{mm}$ ，流过接收端耦合机构的最大交流电峰-峰值为 3A ，自感为 $12\mu\text{H}$ 左右，与 Qi 标准中定义的 A11 发射线圈之间的互感不小于 $6\mu\text{H}$ 。具体设计步骤为：

① PCB 耦合机构形状和外尺寸设计：接收端耦合机构的布线区域为一个 $40*40\text{mm}$ 的正方形区域且由 4.2 节分析可知，圆形线圈具有更高的品质因数，而品质因数又会影响线圈的传输效率，故将发射端线圈设计成圆形。线圈的外径可以根据布线区域的大小再减掉一定的装配裕量来确定，一般留 1mm 宽的装配裕量，故接收端 PCB 耦合机构的外尺寸为 38mm ，即最大半径为 19mm 。

② PCB 耦合机构的层数确定：考虑到生产工艺、成本等因素，手机无线充电系统的 PCB 耦合机构一般采用双层板布线，两层线圈并联连接；另外，考虑趋肤效应的影响，PCB 耦合机构的铜厚为每层 0.5oz 。

③ PCB 耦合机构布线宽度和线间距确定：接收端耦合机构上的电流为正弦交流电，峰-峰值为 3A ，所以铜箔承受的最大电流为 1.5A 。为了保证系统的安全

工作，保留 20% 的裕量，按照最大电流为 1.8A 来设计线宽。根据经验值表可知，铜厚为 1oz 时，线宽只要大于 0.6mm 就满足设计要求了。根据目前 PCB 板生产厂家的工艺水平，线间距为 0.2mm。

④ PCB 耦合机构匝数和内径的确定：对多组不同匝数和内径的数据进行仿真，计算接收端耦合机构的自感和与 A11 线圈的互感值，仿真数据如表 5.3 所示。

表 5.3 接收端 PCB 耦合机构仿真数据

Table5.3 Simulation data of power receiver PCB coil				
匝数	外半径(mm)	内半径(mm)	线圈自感(uH)	互感(uH)
10	19	11.0	8.098	4.447
11	19	10.2	8.994	4.749
12	19	9.4	9.883	5.045
13	19	8.6	10.738	5.350
14	19	7.8	11.528	5.695
15	19	7.0	12.237	6.005
16	19	6.2	12.869	6.237

由表 5.3 可以看出，当接收端耦合机构匝数为 15 匝时，与 A11 线圈的自感已满足要求，且是满足要求的数据中匝数最少的，故将接收端 PCB 耦合机构定为 15 匝。

依照上述方法设计的发射端耦合机构的参数为：形状为圆形，外半径为 21.5mm，采用双层板布线，每层铜厚为 0.5oz，线宽为 0.8mm，线间距为 0.2mm，匝数为 10 匝。

5.4 本章小节

为了克服传统绕线式耦合机构成本昂贵，制作和装配工艺复杂，一致性差等缺点，本章设计了一种适用于手机无线充电系统的 PCB 耦合机构。首先分析了 PCB 耦合机构的参数对其自感和互感的影响，得出了 PCB 耦合机构的自感和互感随耦合机构的形状、尺寸、线宽、线间距和匝数等参数的变化曲线，并在此基础上给出了 PCB 耦合机构的设计流程，最后以手机无线充电系统的接收端耦合机构为例，设计了一个具体的 PCB 线圈。

6 实验验证

6.1 实验验证

为了对所设计的手机无线充电系统性能进行验证，搭建了一个如图 6.1 所示的实验系统。

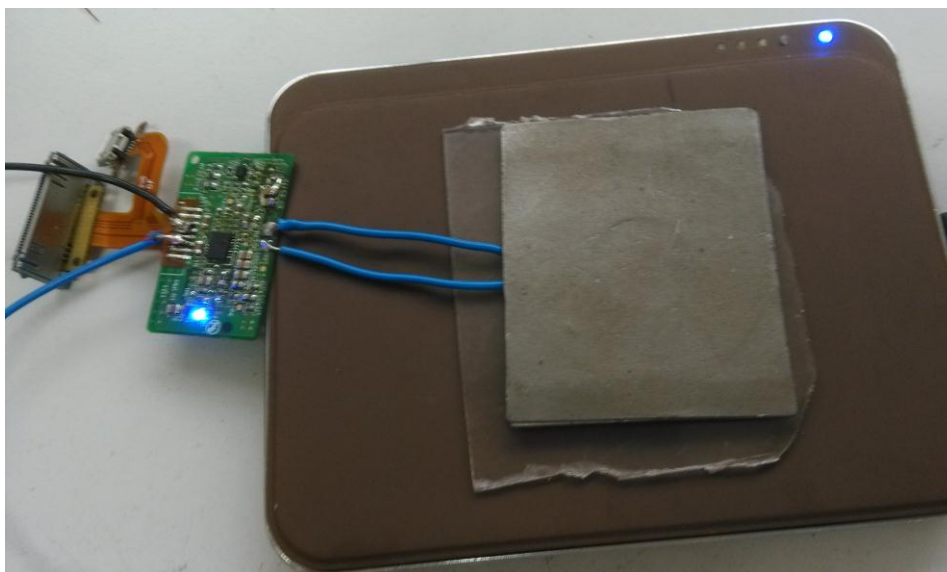


图 6.1 手机无线充电系统实物图

Fig. 6.1 Experimental wireless charging system

图 6.1 中，发射端的输入为 220V，50Hz 的交流电。放置在发射端上面的为接收端，接收端通过接收线圈拾取到电能后，通过整流滤波形成稳定的 5V 直流电给手机电池充电，图中的接收端带有 Iphone 充电接口，但是实验测试时一般将输出端直接接到电子负载上。实验时，发射端有外壳覆盖，接收端下面也垫了一块 1mm 厚的垫片用来模拟手机后壳的厚度，因此实验时发射端线圈和接收端线圈之间的垂直距离为 3mm 左右。

6.1.1 手机无线充电系统输出电压测试

利用如图 6.1 所示的测试系统，测试系统在不同的负载条件下输出电压的变化情况，负载的大小用输出电流的大小来反映。实验时，发射线圈和接收线圈之间的垂直距离为 3mm，线圈中心点之间的水平距离为 0mm。所得的测试结果如表 6.1 所示。

表 6.1 不同负载时的输出电压值

Table 6.1 Output voltage with different load

输出电流(A)	输出电压(V)
0.1	4.97
0.2	4.96
0.3	4.95
0.4	4.94
0.5	4.94
0.6	4.93
0.7	4.92
0.8	4.91

输出电压随输出电流的变化曲线如图 6.2 所示。

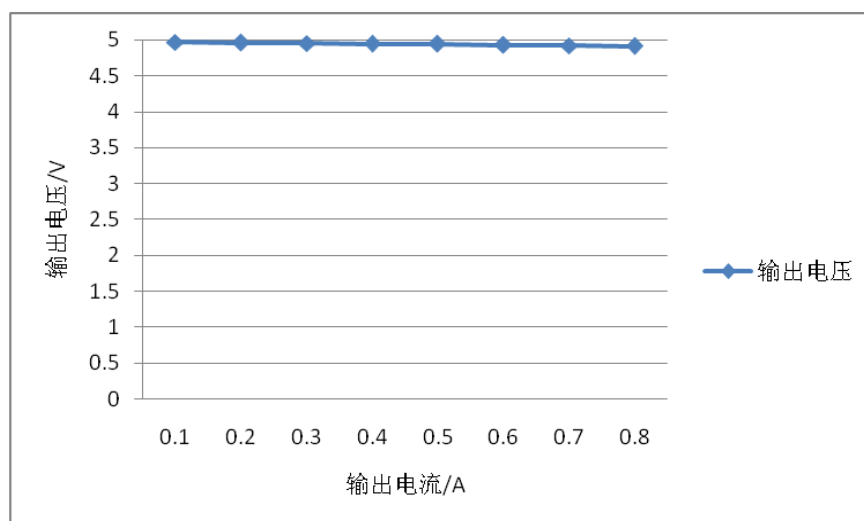


图 6.2 手机无线充电系统输出电压随输出电流的变化曲线

Fig. 6.2 Output voltage waveform of the wireless charging system

由表 6.1 和图 6.2 可以看出,随着系统输出电流的增大,即随着系统输出功率的增大,系统输出电压始终保持在 4.9V 以上,说明系统输出电压具有很好的稳定性。输出功率从 0.5W 增加到 4W 的过程中,输出电压的波动仅为 1.8%,符合设计要求。

6.1.2 手机无线充电系统传输效率测试

测试如图 6.1 所示的手机无线充电系统的传输效率,结果如表 6.2 所示。测试时负载使用电子负载,设定其输出电流为从 0.1A 到 0.8A 逐渐增大,发射线圈和

接收线圈之间的距离为 3mm，发射端的输入电压为 5VDC。

表 6.2 手机无线充电系统效率测试结果

输入电压(V)	输入电流(A)	输出电压(V)	输出电流(A)	效率%
5.02	0.40257	4.97	0.1	24.59%
5.01	0.44509	4.96	0.2	44.49%
4.99	0.51416	4.95	0.3	57.88%
4.95	0.64056	4.94	0.4	62.32%
4.92	0.73217	4.94	0.5	68.57%
4.88	0.88666	4.93	0.6	68.36%
4.84	1.04349	4.92	0.7	68.19%
4.78	1.20631	4.91	0.8	68.12%

系统传输效率随输出电流的变化曲线如图 6.3 所示。

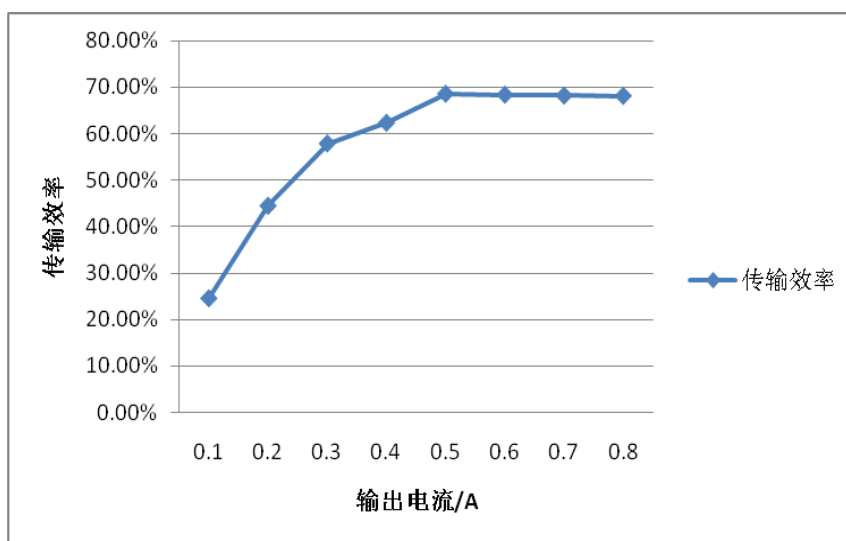


图 6.3 手机无线充电系统传输效率随输出电流变化曲线

Fig. 6.3 Curve of transfer efficiency of the wireless charging system varying with output current

由表 6.2 和图 6.3 可以看出，当系统的输出电流达到额定电流之前，系统的传输效率随着输出电流的增大而提高，当系统的输出电流达到额定电流后，系统的传输效率基本保持不变，随着输出电流的增大稍有降低。其原因是当系统传输功率较小时，系统损耗占传输功率的比重较大，故传输效率相对较低，而当系统传输功率较大时，虽然损耗也会变大，但是损耗占传输功率的比重减小，所以传

输效率会有所提高。从表 6.2 可以看出, 当系统以额定功率输出时, 传输效率为 68.57%, 已达到设计要求。

6.1.3 发射端待机功耗测试

对如图 6.3 所示的手机无线充电系统发射端进行待机功耗测试, 测试时发射端表面不放置接收端, 测得的结果如表 6.3 所示。

表 6.3 发射端待机功耗测试结果

Table 6.3 Test results of standby power

输入电压(V)	输入电流(mA)	待机功耗(mW)
5.16	7.02	36.22

如表 6.3 所示, 发射端待机时的输入电压为 5.16V, 输入电流为 7.02mA, 故可算得其待机功耗为 36.22mW, 满足设计要求。

6.1.4 耦合机构温升测试

采用点温仪对发射线圈和接收线圈的温升进行测试, 测试时发射线圈和接收线圈间的垂直距离为 3mm, 系统输出为 5V, 0.5A (额定输出), 测试时长为 3.5 小时, 所得的发射线圈和接收线圈的温度曲线如图 6.4 所示。

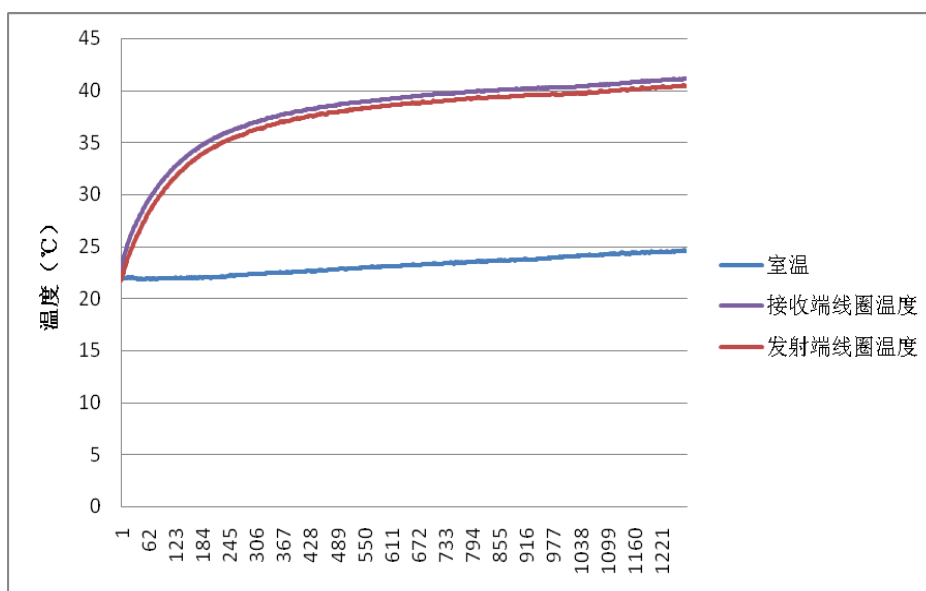


图 6.4 无线充电系统耦合机构温度变化曲线

Fig. 6.4 Curve of the temperature of the coils of the wireless charging system

由图 6.4 可以看出, 发射线圈和接收线圈的最高温度都为 40°C 左右, 相对应的室温为 25°C, 故发射线圈和接收线圈在额定状态下工作 3.5 小时的温升为 15°C,

基本符合设计要求。图中接收线圈的温度比发射线圈稍高，其原因是接收线圈的内阻比发射线圈大。

6.2 本章小结

本章搭建了一个手机无线充电系统的实验装置，进行了不同负载时手机无线充电系统的输出电压和传输效率测试、发射端待机功耗测试、额定工作状态时耦合机构的温升测试，测试结果表明该系统的输出电压稳定，额定状态下传输效率为 68.57%，待机功耗为 36.22mW，耦合机构温升 15℃，均能够满足一般的工程要求。

7 总结与展望

7.1 全文总结

进入信息化时代以后,各种便携式电子设备纷纷走入人们的生活,给人们的生活带来了很大的便利,但频繁的充电过程和杂乱的数据线却时时困扰着人们,使人们感到不胜其烦,不仅如此,频繁的插拔还容易损坏手机的充电接口,使其可靠性降低。另外,用有线充电方式充电时,每个电子设备都配备了专门的充电器,这样不仅充电不方便,还会造成巨大的浪费。为了解决传统有线充电方式的这些弊端,人们开始探寻新的充电方式,随着无线电能传输技术的发展,无线充电技术受到了研究机构 and 企业的广泛关注。无线充电技术通过磁场耦合将电能从供电端传输到用电设备来为其电池充电,具有充电灵活、方便、通用性好等特点,有广阔的发展和应用前景。本文通过对无线充电技术的研究设计了一种用于手机的无线充电系统,本文的研究工作有利于进一步推动无线充电技术的发展和运用,为后续无线充电系统的设计提供参考和借鉴,具有一定的理论意义和实用价值。

本文主要从手机无线充电系统的主电路和谐振电路的拓扑设计、控制器选型、通信信号调制电路设计、数据包时序和编码设计、耦合机构设计等几个方面展开研究,论文的主要内容可以总结为以下几点:

① 介绍了常用的高频逆变电路和谐振网络拓扑,分析了各种拓扑的特点,并根据手机无线充电系统的实际需求确定了合适的电路拓扑。完成了发射端和接收端的控制芯片选型,阐述了手机无线充电系统的控制方法以及电能传输各个阶段的控制目标,然后详细地分析了发射端的控制流程,设计了发射端的电源控制电路、发射线圈电流检测电路和逆变器输入电压检测电路,并详细地分析了接收端的控制流程。

② 为了使手机无线充电系统的接收端将其功率需求信息和电池充电状态等信息反馈回发射端,以便发射端进行更准确的控制,实现能量和信号的同步传输,本文在对常用的通信信号调制电路进行分析的基础上确定了适用于手机无线充电系统的通信信号调制电路,设计了通信过程中的数据包编码方式,数据包格式以及电能传输各个阶段的数据包发送时序,并用 Simulink 对通信信号调制电路进行仿真分析,仿真结果表明所设计的信号调制电路具有良好的调制效果。

③ 为了克服传统绕线式耦合机构成本昂贵,制作和装配工艺复杂,一致性差等缺点,论文设计了一种适用于手机无线充电系统的 PCB 耦合机构。在分析了 PCB 耦合机构的参数对其自感和互感的影响,得出了 PCB 耦合机构的自感和互感随耦合机构的形状、尺寸、线宽、线间距和匝数等参数的变化曲线的基础上给

出了 PCB 耦合机构的设计流程，并以手机无线充电系统的接收端耦合机构为例，设计了一个具体的 PCB 线圈。

④ 搭建了具体的实验装置，对不同负载时手机无线充电系统的输出电压和传输效率、发射端的待机功耗、额定工作时耦合机构的温升等参数进行了测试，测试结果表明所设计的手机无线充电系统能够满足一般的过程要求。

7.2 展望

虽然本文所设计的手机无线充电系统已满足工程要求，但仍有一些不足之处有待改进，后续可以改进的地方主要有：

① 通信信号调制问题。本文采用幅值调制方法将通信信号调制到能量上进行传输，这难免会影响系统的传输效率，未来可以尝试采用别的方法来进行信号调制，使信号传输对能量传输不产生影响；

② PCB 耦合机构的内阻问题。本文设计的 PCB 耦合机构虽然已满足设计要求，但其内阻还是比绕线线圈大，未来可以尝试增加 PCB 板的层数或改变各层铜箔之间的连接方式等来降低 PCB 耦合机构的内阻并使其维持一定的自感。

致 谢

本论文的研究工作是在我的导师苏玉刚教授和校外指导老师李聃高工的精心指导下完成的。

感谢苏老师对我的学业和论文研究工作的关心和指导,导师严谨的治学态度、渊博的知识和无私的奉献精神使我深受启迪。从尊师的身上,我不仅学到了扎实、宽广的专业知识,也学到了很多做人的道理。在此,我要再次向我的导师致以最衷心的感谢!

感谢海尔集团技术研发中心李聃高工对论文研究工作给予的帮助和指导。他让我在实践中学会了独立和坚强,培养了我的责任心和使命感,让我明白了企业和学校的差别,为我踏出校园做好了准备,使我成长为一个更好的人。在此向李聃工程师表示崇高的敬意和衷心感谢!

研究生期间的工作和学习也得到了孙跃教授、戴欣教授、王智慧副教授和唐春森副教授的关心和帮助,他们严谨的工作作风、精益求精的科研态度及富于开拓的创新精神深深地影响着我,使我在科研及学习中受益匪浅,在此表示诚挚的感谢!

感谢海尔集团技术研发中心同事黄学涛、董秀莲、张丛鹏等对论文研究工作的帮助和指导!

感谢张宁、石佳、伏思庆、曹伟华等同学在论文写作过程中无私的帮助!

感谢所有参考文献的作者,他们的工作为我的研究打下了基础!

感谢各位评审专家百忙之中评阅我的论文,感谢各位答辩组的老师们参加我的论文答辩工作,谢谢!

周娅娜

二〇一四年四月 于重庆

参考文献

- [1] Roszyk, L.M.,L.A. Barnas Jr. Hand Held Battery Operated Device and Charging Means Therefore[P]. US Patent 3840795, 1974.
- [2] Engel, D., D. Giuliani,R.W. McMahon. Pacing Toothbrush[P]. US Patent 5544382, 1996.
- [3] Trombly, J.E. Electromagnetically Coupled Battery Charger. US Patent 4031449, 1977.
- [4] Fernandez, J.M.,J.A. Borrás. Contactless Battery Charger with Wireless Control Link[P]. US Patent 6184651, 2001.
- [5] Oglesbee, J.W. Contact less Charger with Alignment Indicator [P]. US Patent 7271569, 2007.
- [6] Cheng, L.K.L., J.W. Hay,P.G.W. Beart. Contactless Power Transfer [P]. US Patent 6906495, 2005.
- [7] Cannon, B.L., J.F. Hoburg,D.D. Stancil, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2009. 24(7): p. 1819-1825.
- [8] Casanova, J.J., Z.N. Low,J. Lin, et al. Transmitting coil achieving uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system[C]. Radio and Wireless Symposium, 2009. RWS'09. IEEE. 2009.
- [9] Casanova, J.J., Z.N. Low,J. Lin. A loosely coupled planar wireless power system for multiple receivers[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009. 56(8): p. 3060-3068.
- [10] Saunamäki, E.I. Safety feature for wireless charger[P]. US Patent 20110057606A1, 2009.
- [11] Low, Z.N., J.J. Casanova,P.H. Maier, et al. Method of load/fault detection for loosely coupled planar wireless power transfer system with power delivery tracking[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2010. 57(4): p. 1478-1486.
- [12] Boscaino, V., F. Pellitteri,G. Capponi, et al. A wireless battery charger architecture for consumer electronics[C]. Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin), 2012 IEEE International Conference on. 2012: IEEE.
- [13] Pellitteri, F., V. Boscaino,R.L. Rosa, et al. Improving the efficiency of a standard compliant wireless battery charger[C]. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International. 2012: IEEE.
- [14] System description wireless power transfer , Volume I: Low Power, Part 1: Interface Definition[s].
- [15] System description wireless power transfer , Volume I: Low Power, Part 2: Performance Requirements[s].

- [16] System description wireless power transfer , Volume I: Low Power, Part 3: Compliance testing[s].
- [17] Van Wageningen, D.,T. Staring. The Qi wireless power standard[C]. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International. 2010: IEEE.
- [18] 戴欣,孙跃. 单轨行车新型供电方式及相关技术分析[J]. 重庆大学学报, 2003. 26(1): 50~53.
- [19] 孙跃, 苏玉刚,戴欣等. 适用于感应耦合电力传输系统的软开关模式功率变换器[C]. 四川省电工技术学会第七届学术年会论文集, 2003.
- [20] 梁美富. 非接触式感应充电电路的研制 [D], 武汉科技大学, 2010.
- [21] 孙轩. 非接触式手机充电平台的设计 [D], 浙江大学, 2010.
- [22] 王欢. 基于无芯 PCB 变压器的无线充电系统的研究 [D], 西安电子科技大学, 2010.
- [23] 杨唐纯. 无线感应充电模块的研制[D], 哈尔滨工业大学, 2010.
- [24] 朱美杰. 感应式无线充电技术的研究[D], 南京信息工程大学, 2012.
- [25] 潘力. 一种锂电池无线充电模块的设计[D], 电子科技大学, 2013.
- [26] 夏晨阳. 感应耦合电能传输系统能效特性的分析与优化研究 [D], 重庆大学, 2010.
- [27] 孙跃, 夏晨阳,戴欣等. 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化 [J]. 中国电机工程学报, 2010. 30(33): 44~50.
- [28] Takeno, K. Wireless power transmission technology for mobile devices[J]. IEICE Electronics Express, 2013. 10(21): 2003~2010.
- [29] Wang, C., G.A. Covic,O.H. Stielau. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2004. 51(1): 148-157.
- [30] 侯洁. 中小功率等级感应耦合电能传输系统的设计与实现[D], 重庆大学, 2013.
- [31] 钱照明, 汪桶生,徐德鸿, 中国电气工程大典一第二卷电力电子技术[M], 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [32] Guo, Y.X.,R. Jegadeesan. Analysis of inductive power link for efficient wireless power transfer[C]. High Speed Intelligent Communication Forum (HSIC), 2012 4th International. 2012: IEEE.
- [33] Ni, B., C.Y. Chung,H.L. Chan. Design and comparison of parallel and series resonant topology in wireless power transfer[C]. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on. 2013: IEEE.
- [34] Fan, H.,W. Jianqiang. Investigation on full bridge inductively coupled power transfer system[C]. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International. 2012: IEEE.
- [35] Jegadeesan, R.,Y. Guo. Topology selection and efficiency improvement of inductive power

- links[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2012. 60(10): p. 4846-4854.
- [36] Kim, J., S. Kong,H. Kim, et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system[J]. 2013.
- [37] 唐晓莉,苏桦. 一种新型无芯 PCB 平面电感器研究[J]. 电子器件, 2002. 25(4): 319~323.
- [38] Liu, J., L. Wang,Y. Pu, et al. A magnetically resonant coupling system for wireless power transmission[C]. Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012 10th International Symposium on. 2012: IEEE.
- [39] 张小壮. 磁耦合谐振式无线能量传输距离特性及其实验装置研究 [D], 哈尔滨工业大学,2009.
- [40] 吴卓坪. 小型无线电能传输装置设计与实现[D],重庆大学,2012.
- [41] 董辉. 基于小波矩量法的 PCB 平面螺旋电感研究[D], 大连海事大学, 2008.

附 录

A. 作者在攻读学位期间发表论文情况

- [1] 苏玉刚, 周娅娜, 唐春森, 谢诗云. 宽压开关电源的三电平变换器建模与控制, 吉林大学学报.

B. 作者在攻读学位期间参与的科研项目

- [1] 无线供电系统异物检测方法研究.海尔实习参与项目。
- [2] 无线充电器自动测试系统开发.海尔实习参与项目。
- [3] 手机无线充电系统 PCB 线圈设计.海尔实习承担项目。

C. 攻读硕士学位期间获奖情况

- [1] 2013 年 12 月, 重庆大学优秀研究生。

一种用于手机的无线充电系统设计

作者: [周娅娜](#)
学位授予单位: [重庆大学](#)
被引用次数: 1次

参考文献(14条)

1. [戴欣, 孙跃](#) 单轨行车新型供电方式及相关技术分析[期刊论文]-[重庆大学学报\(自然科学版\)](#) 2003(01)
2. [孙跃, 苏玉刚, 戴欣, 杜雪飞](#) 适用于感应耦合电力传输系统的软开关模式功率变换器[会议论文] 2003
3. [梁美富](#) 非接触式感应充电电路的研制[学位论文]硕士 2010
4. [孙轩](#) 非接触式手机充电平台的设计[学位论文]硕士 2010
5. [王欢](#) 基于无芯PCB变压器的无线充电系统的研究[学位论文]硕士 2010
6. [杨唐纯](#) 无线感应充电模块的研制[学位论文]硕士 2009
7. [朱美杰](#) 感应式无线充电技术的研究[学位论文]硕士 2012
8. [夏晨阳](#) 感应耦合电能传输系统能效特性的分析与优化研究[学位论文]博士 2010
9. [孙跃, 夏晨阳, 戴欣, 苏玉刚](#) 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2010(33)
10. [侯洁](#) 中小功率等级感应耦合电能传输系统的设计与实现[学位论文]硕士 2013
11. [唐晓莉, 苏桦, 张怀武](#) 一种新型无芯PCB平面电感器研究[期刊论文]-[电子器件](#) 2002(04)
12. [张小壮](#) 磁耦合谐振式无线能量传输距离特性及其实验装置研究[学位论文]硕士 2009
13. [吴卓坪](#) 小型无线电能传输装置设计与实现[学位论文]硕士 2012
14. [董辉](#) 基于小波矩量法的PCB平面螺旋电感研究[学位论文]博士 2008

引证文献(1条)

1. [张宽, 李金婧, 蒋帆](#) 基于电磁共振的无线充电器设计与验证[期刊论文]-[无线互联科技](#) 2015(09)

引用本文格式: [周娅娜](#) 一种用于手机的无线充电系统设计[学位论文]硕士 2014