

分类号_____

UDC _____

密 级_____公开_____

学校代码_____10497_____

武汉理工大学

学 位 论 文

题 目 蓄电池节能充放电智能控制系统的设计

英 文 Study and Design on Energy Saving Charge-Discharge

题 目 Control System for Lead-Acid Batteries

研究生姓名 周 会 坤

指导教师 姓名 邓燕妮 职称 教授 学位 博士

单位名称 武汉理工大学 邮编 430070

申请学位级别 硕士 学科专业名称 控制科学与工程

论文提交日期 2011 年 5 月 论文答辩日期 2011 年 5 月

学位授予单位 武汉理工大学 学位授予日期 2011 年 6 月

答辩委员会主席 曾春年 评阅人 吴友宇

陈跃鹏

2011 年 5 月



独创性声明

本人声明,所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名: 周会坤 日期: 2011年5月30日

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名): 周会坤 导师(签名): 邓建明 日期 2011.5.30

摘 要

随着电子类产品以及电动车的日益普及,二次电池在人们的生活中得到了越来越广泛的应用。铅酸电池历史悠久,以其突出的特点在电动车、UPS 不间断电源等领域应用十分广泛。在铅酸电池生产过程中,电池出厂一般会经过化成和老化过程,对生产设备来说,则主要是蓄电池的充放电系统。由于数量庞大,传统的老化和化成方法不仅耗能严重,而且设备产生的热量会影响到测试环境的进行,影响到车间的工作温度。

针对这一状况,本文首先阐述了铅酸蓄电池在充放电过程中的电化学反应,详细分析了电池端电压变化内在机理和外在表现。然后以节约能源为导向,基于铅酸电池的生产过程,通过对铅酸电池充放电过程中模块的耗能分析,研究节能型充放电系统的节能途径并分析了传统系统模式和回馈电网型模式。考虑到实际生产过程中的可行性,设计出公共母线型节能充放电系统。在分析铅酸蓄电池特性,传统充放电方式与控制策略的基础之上提出了分阶段脉冲快速充放电的方法,同时为了减少高频开关损耗,加入软开关技术。该系统不仅节约能源,还能测试电池的温度和容量,并通过上位机的控制,可以实现电池老化数量的大幅增加和智能控制,以适应工业中规模化需求,极大的提高了生产效率。

本文所设计的电池节能控制系统,由上位机 PC 控制端、节能充放电主回路单元、信号采样调理单元、单片机控制单元和保护电路构成。采用高频开关电源技术,主回路由三相整流电路、快速充放电变换电路和能量回馈电路组成。核心控制单元采用 AVR 系列芯片,通过采集电池组的端电压、温度以及电流等信息,送入单片机进行分析和处理,得到相应的控制信号。针对该系统,设计出了具体的软硬件电路,提出具体控制策略,详细的介绍了其中硬件电路主要器件选型和各单元的工作原理。最后通过 Matlab 软件对整流部分和主电路部分进行仿真及特性测试。仿真以及测试结果表明该节能充放电系统和充放电策略符合给定要求,具有良好的性能和较好的应用前景。

关键词: 铅酸蓄电池, 节能, 充放电系统, 软开关

ABSTRACT

With the popularization of electronic product and Electric vehicle, secondary batteries have been widely used in people's life. Lead-acid battery is widely used in Electric vehicle and UPS because of its outstanding advantages and long history. In the battery production procedure, the battery need to be maturing and formation, and to the production equipment, it's the battery charge and discharge system. Because of the huge amount of production, the traditional formation and maturing cause not only serious energy cost problem, but also cause the product quality problem due to the heat which comes from the machines and effect the temperature environment in the workshop.

In order to remedy the situation, first this thesis expands the electrochemical mechanism of Lead-acid battery in the process of charge and discharge, and detailed analyze how voltage changes from both the inner and outer aspects. Then this dissertation is directed by energy saving, based on the productive process of Lead-acid battery. It analyze the energy consuming condition of the charge and discharge module and then introduce the effective ways of energy saving and emphasisly introduces electricity net feedback type energy saving mode. Considering the feasibility in the actual production procedure, this dissertation design saving battery charging and discharging system with common DC bus. And based on Lead-acid characteristic, traditional method of charging and discharging and its control strategy, this thesis advances pulse current charge method in different periods. Meanwhile in order to reduce high frequency switch ullage, add soft-switching technology. This system not only can save energy, but also can test the temperature and capacity of the battery. Through PC control, it can realize the battery number of greatly increased and intelligent control, to adapt to industry scale needs, thus greatly enhancing the production efficiency.

The energy saving control system designed in this thesis consists of PC control terminal, energy saving charging and discharging main loop unit, sampling control unit, SCM control unit and protection circuit unit. With high frequency switching technique, the main circuit is composed of the three-phase controlled bridge circuit, rapid charging and discharging transform circuit and energy feedback circuit unit. And the control system is based on AVR chip. Through analyzing and processing the detected terminal voltage of battery and current in AVR, acquiring how to control the gate of the circuit changer. In this system, designed a specific hardware circuit and control strategy and software parts, detailed introduces the hardware circuit of main parts selection and the working principle of each unit. The simulation and the experiment with matlab show the main circuit proposed in this paper was proved to have the good characters and has an optimistic perspective of application.

Key Words: lead-acid battery, Energy saving, charge and discharge system, Soft-switching

目 录

第1章 前 言.....	1
1.1 课题研究背景和来源.....	1
1.1.1 铅酸蓄电池概述.....	1
1.1.2 课题的提出.....	2
1.2 国内外研究状况.....	3
1.3 本课题研究的意义.....	4
1.4 论文主要研究工作.....	5
第2章 铅酸蓄电池特性和充放电控制策略.....	6
2.1 铅酸蓄电池工作原理.....	6
2.2 铅酸蓄电池的基本概念.....	6
2.3 铅酸电池的充电特性.....	8
2.3.1 蓄电池可接受充电电流曲线.....	8
2.3.2 蓄电池充电过程中电压变化关系.....	10
2.4 铅酸电池的放电特性.....	11
2.4.1 放电过程曲线.....	11
2.4.2 放电率对放电曲线影响.....	13
2.4.3 温度对放电曲线影响.....	13
2.5 蓄电池充电方法概述.....	14
2.5.1 恒流充电方式.....	14
2.5.2 恒压充电方式.....	15
2.5.3 恒压和恒流相结合阶段式充电法.....	15
2.5.4 脉冲式充电法.....	15
2.5.5 变电流和变电压充电法.....	16
2.6 电池充电方法控制技术.....	17
2.6.1 温度控制法.....	17
2.6.2 时间控制法.....	17
2.6.3 最高电压控制法.....	18
2.6.4 电压负增量法.....	18
2.6.5 电池电压二次导数控制法.....	18
2.6.6 综合控制法.....	18
2.7 放电方法及控制技术.....	19
2.8 本章总结.....	19
第3章 节能充放电系统的总体设计.....	20
3.1 蓄电池充放电系统耗能分析.....	20
3.2 回馈电网型节能充放电系统.....	20
3.3 直流总线型充放电系统工作原理和节能途径.....	21

3.4 充放电控制系统硬件原理架构	23
3.5 PWM 控制技术.....	24
3.6 双向 DC/DC 模块.....	25
3.7 软开关技术	30
3.8 充放电方式和控制方法的选择	32
3.9 本章小结	33
第 4 章 系统硬件设计	34
4.1 系统硬件框架	34
4.2 系统主电路设计	35
4.3 信号采集电路设计	37
4.3.1 直流母线电压检测电路.....	37
4.3.2 电池组电压检测电路.....	38
4.3.3 电流检测电路.....	38
4.3.4 温度采样电路.....	39
4.3.5 IGBT 驱动电路	40
4.4 本章小结	40
第 5 章 系统软件设计	41
5.1 系统控制算法的选择	41
5.1.1 常规 PID 控制	41
5.1.2 智能控制算法.....	42
5.2 软件设计	43
5.2.1 PC 人机界面的的设计	43
5.2.2 下位机软件设计.....	44
5.3 本章小结	47
第 6 章 系统特性仿真	48
6.1 三相不可控整流部分特性仿真	48
6.2 主电路充放电过程仿真	49
6.2.1 蓄电池模型.....	49
6.2.2 充放电过程仿真测试.....	50
6.3 本章小结	54
第 7 章 总结与展望	55
参考文献	56
作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文	59
致 谢	60

第 1 章 前 言

1.1 课题研究背景和来源

1.1.1 铅酸蓄电池概述

电池是一种化学能源,是通过能量转换而获取电能的器件^[1],通常分为两类:一次电池是指一次性应用的电池,二次电池是指可反复多次使用的电池。二次电池在放电结束后,可进行充电,然后放电,反复使用多次。对于二次电池的种类,目前市场上主流产品有四类电池,即铅酸(LA)电池、镍镉(NiCd)电池、镍氢(NiMH)电池和锂离子(Li-ion)电池^[2-3]。

铅酸蓄电池历史最悠久,目前应用十分广泛,由普兰特(Plante)于 1859 年发明,100 多年来,铅酸电池的工艺、结构、生产和性能等都在不断的发展。因其可靠性高、成本低、原料易得、使用温度和电流范围较大,铅酸电池一直是电动车上使用最广泛的动力电池。可分为两类:一类为深循环使用阀控密封铅酸蓄电池 VRLAB(Value regulated lead-acid battery),另外一类为注水式铅酸电池 FLAB(Flooded lead-acid battery)。前者通过安全控制阀门自动调节密封电池体内充放电或者工作异常产生的多余气体,可免维护。后者价格低廉,但需要经常维护,补充电解液等。课题中讨论的铅酸电池主要是指阀控式铅酸电池,它具有重量轻、体积小、自放电小、维护少、寿命长、使用方便、无记忆效应、对环境无污染等优良特性。与传统铅酸电池相比有着明显的优势,阀控式铅酸蓄电池^[5]以二氧化铅作正极,铅作负极,用硫酸来做电解液。单体额定电压 2V,以中等放电率放电时截止电压为 1.75V,以高放电率放电时截止电压可达到 1V,其比能量超过 40Wh/kg,能量密度超过 80Wh/L 并可以实现快速充放电。

铅酸蓄电池在整个国民生活中起着非常重要的作用,尤其是二次可重复循环使用的电池。由此对铅酸蓄电池进行充放电的控制技术就显得尤为重要,传统的充电方法^[4]非常多,主要是恒流、恒压和分阶段充电方式等。刚开始发展阶段由于这些方法易于实现,便于控制得到了广泛的应用。但是随着蓄电池技术和控制技术的不断发展,这些充电方式需要很长的时间来进行充电,效率较慢,同时控制的对象和过程比较单一,容易引起不当的控制从而影响电池使用寿命。放电方法较为简单即对于固定性阀控型铅酸电池对负载进行恒流放电,在放电

过程中定期测试电池两端的电压，其端电压达到某一个放电终止电压时便认为放电终止，最后累积放电量达到 100%者为合格。

随着铅酸电池的进一步发展，充电技术得到不断提高，很大程度上缩短充电时间、提高充电效率和改进充电效果。根据马斯提出三大定律和电池可接受充电电流曲线为基本原理，在传统充放电技术的基础之上，提出了许多新型的充放电方法。目前国内中小型工厂大多采用分级恒流方式的充电方，分级定流充电方式相对恒流、恒压这些传统的充电方法来说，充电曲线更加有效的接近电池可接受电流曲线，充电效率得到了一定的提高。但是在充电的过程中会发生电池极化等现象，从而导致电池充电电压较高，浪费电能，降低效率。为了进一步提高充电效果可以采用间歇充电或者脉冲充电的方式达到去除极化的效果，同时这种充电方式可使充电效率大大提高，又可以对电池起到一定的修复作用，延长电池的使用寿命。随着高频开关电源技术的快速发展和节能减排的要求，这种脉冲式的充电方式将是未来发展的趋势。电池放电方式一般要求不高，多为采用恒流放电。在电池充放电过程中，采用时间、温度和截止电压等综合检测来达到有效的控制方式，提高电能的利用率。除了以上措施之外，还需要考虑电池的状态包括容量、温度以及荷电状态等，改进电池充放电的方式和控制技术。随着高频开关电源技术和嵌入式先进的智能控制技术的发展，出现了许多智能型充放电控制方式。

1.1.2 课题的提出

随着我国工业化程度的提高，后备电源的需求量越来越大，作为后备电源重要组成部分的铅酸蓄电池需求量也越来越大。铅酸蓄电池得到大量生产，为了保证出厂时电池的质量，在出厂之前都必须经过一套程序，其中蓄电池的化成和老化是生产过程中一个重要的环节，该过程主要是由铅酸电池的充放电系统来完成。铅酸蓄电池传统的充放电式大多采用分阶段恒流充电，然后采用恒流放电，蓄电池放出的电能通过电阻发热的方式消耗掉，这种采用电阻能耗方式结构简单，容易实现。然而这种方式存在着严重的系统耗能和排热问题，极大的造成了能源浪费，同时放电系统排出的热量使车间环境温度波动大，影响设备测试精度和操作员工的舒适性。同时在充电方式上应用最多的是三级恒流充电，虽然控制简单，但是这种方式并没有很好的跟踪电池的可接受电流大小。

在电池充放电的控制技术上也多采用时间控制法，并不能准确有效判断电池的充放电状态而且存在严重的过充过放现象，从而直接影响电池的循环使用寿命。

针对这些问题，有必要设计一套新的充放电控制系统达到节约能源，改善车间环境温度的目的。同时采用新的智能充电方式和控制技术使实际电流能动态跟踪电池可接受充电电流，做到既节约用电又可以提高电池寿命，从而大大提高生产效率。

1.2 国内外研究状况

铅酸电池节能充放电系统在国内也有不少电池设备生产厂家和一些科研机构 and 院校在进行研究，一些新型产品不断出现。例如湖万州电气集团有限公司 WDY 系列铅酸蓄电池化成充放电机采用有源逆变技术可实现放电电流回馈到电网，达到电能的再次利用。任丘市先导科技电子有限公司在公用母线电池充放电系统方面也有很深刻的研究并得到了一定的应用。不少科研单位也在进行一些相关的绿色节能型充电系统的设计和研究。由于国家对回馈电网型的电能需要再次收费，使得一些回馈电网型的设备并未得到大范围的应用，尤其是在中小型电池生产厂家。同时这些推出来的产品还存在着许多的问题，不能得到大范围推广应用。目前国内铅酸电充放电过程仍然以传统的方式为主，充放电方式主要也是以恒流方式进行，其它许多铅酸电池生产厂家在在节能设备方面的研究也都刚刚起步。

同时在电池充电技术和控制方式上多为沿着传统的方式进行改造，陆续提出了一些新型的充电方法，如脉冲式充电法、定化学反应状态法、变电流间歇/定电压充电法等，在充电效率上有了很大的提高。近几年又提出了更加新颖的充电方法：模糊控制充电，利用其本身适合处理多输入多输出非线性系统优势，能更好解决电池可接受充电电流曲线和充放电过程中时变性和抗干扰等常规方法难以解决的问题。目前国内对快速智能充放电技术的研究多为采用恒流递减式的改进型充电方式来弥补传统恒流恒压充电方式的不足，并未能真正实现充电电压对电池可接受电流曲线的跟踪技术。

国外在这方面的技术比较成熟，充放电装置的智能化程度较高，例如德国迪卡隆公司的 500V/300A 充放电电动车测试系统就是比较成熟的设备，但它主要是针对动力电池组的测试，只有一个通道，并不适合大数量电池设备的进行。

该设备的充放电整流器和转化器均由可控硅构成，放电过程中的能量也是反馈回电网。日本片冈公司在中小电池方面已经有相对成熟的样机，然而这些国外设备的价格较高，难以为国内铅酸电池生产厂家所接受。

近年来，国内外人士正致力于节能充放电设备的智能化研究，使充电电流始终与可接受充电电流保持良好的匹配关系，整个过程都在最佳状态下进行。同时对于放出电能进行再次利用，比常规模式可节约 40%-60% 电能，极大的提高了充电质量和效率，为节能充放电的智能化和节能型闯出了一条新道路^[5-7]。

1.3 本课题研究的意义

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础，地位举足轻重。随着我国经济持续高速发展，缺煤、缺电、缺油几乎同时出现。我国能源人均较低，分布不均，浪费现象严重，如何开发并合理利用能源具有重要的意义。随着全球经济的迅猛发展，能源呈现出越来越紧张的趋势，根据美国能源信息署（EIA）最新预测结果，未来世界能源需求量将继续增加。预计 2020 年达到 128.89 亿吨油当量，而全球石油储量仅可供生产 40 多年，天然气和媒体则分别是 67 年和 164 年。煤电油供应紧张的局势已经成为我国经济和社会发展的制约瓶颈，同时能源利用率低，浪费严重的现象较多。我国人均能源占有量少，而能源效率比国际先进水平低 10 个百分点。随着人口增加、工业化和城镇化进程的加快，我国的能源需求量将大幅度增加，经济发展面临着能源约束将会越来越突出。

近年来，政府大力提倡节能减排，大力发展循环经济，提倡合理用电，节约用电，将一些废弃能源转化为电能已经成为节能减排工作中的重中之重。很多工矿企业的大型机电设备因为工业生产的原因存在着严重的耗能现象，其节电率在经过专业节能改造后，在不影响正常生产的情况下大多可以节约电能约 20% 以上，这是一笔巨大的能源财富。这些节能方法的研究和节能产品的开发成为我国重视的课题之一。

电力电子技术^[8]是能源技术的一个重要方面，是建立在电子学、电工原理和自动控制三大学科上的新兴学科。通过电力电子技术对电能的处理，一般节能效果可达 10%-40%，一些发达国家 70% 以上电能经过电力电子装置处理后可节约电能约 20%，带来了非常显著的效果。

对于铅酸电池生产厂家来说，大量的电池在放电过程中放出的电能消耗在电阻上，不仅极大的浪费能源，同时影响车间的工作环境。如果能利用电力电

子技术以及相关知识对充放电系统进行优化,采用智能充放电方式,开发出节能型充放电设备,使电池放出浪费电能得到有效的再次利用,同时采用先进的充放电方式,一方面可以节约能源,另外一方面可以大大节省成本,提高工作效率。

1.4 论文主要研究工作

本文面向对象为电动车行业铅酸蓄电池,结合工厂普通铅酸蓄电池充放电系统

的工作原理和充放电模块的具体环节,设计出可行的节能充放电系统,并对充放电的模式进行智能化的改进,结合实际工厂情况和经验选取一种最具有应用价值和推广价值的节能模式进行详细的方案设计和软硬件设计,并通过仿真论证其效果。

根据课题要求,主要开展以下几个方面的工作:

1) 介绍铅酸蓄电池工作原理以及相关的铅酸蓄电池基本概念,研究各种快速充电技术,三阶段充电模式结合脉冲充电的快速充电方法。同时了解蓄电池的各项参数和充放电控制方法,并提出本课题中采用的充电方式和控制策略。

2) 针对铅酸电池传统充放电设备能耗现状,介绍节能充放电系统的节能途径和工作原理以及实现方案,并对相关部分使用的技术进行原理分析。

3) 进行节能型充放电系统的硬件设计,包括硬件原理图架构以及硬件电路,并分析各个模块的作用,同时对电路主要器件进行参数计算和选型。

4) 在智能 PID 控制的基础之上,提出分阶段变参数 PI 控制策略,并进行方案的软件设计,分析各个软件模块的流程和所实现的功能。

5) 通过 Matlab 对整流部分和充放电部分进行建模,并以电动车用铅酸蓄电池作为对象,进行相关仿真,验证提出的方案的可行性。

第2章 铅酸蓄电池特性和充放电控制策略

2.1 铅酸蓄电池工作原理

铅酸电池虽然经历了 100 多年的发展,但其工作原理基本上没什么变化,一般正常的电化学反应方程式^[9-10]:



铅酸蓄电池在充电时,上述化学方程式由右向左进行,正极由硫酸铅转化为二氧化铅,然后将电能转化为化学能存储在正极板中;而负极又将硫酸铅转化为海绵状铅后将电能转化为化学能存储在负极板上。放电时,上述化学方程式由左向右进行,正极上二氧化铅变成硫酸铅将化学能转换成电能向负载供电,负极由海绵铅变成硫酸铅将化学能转换成电能向负载供电。

在该过程中,正极和负极必须同时以同量、同状态进行电化学反应才能实现上述充放电过程,任何情况下不能单独完成。当上述化学反应方程式从左向右进行时为铅酸蓄电池的放电反应,放电放出100AH的电量,根据当量化学方程式可以知道必须消耗4146克二氧化铅和3387克海绵铅,这是重量大的铅酸蓄电池比重量轻的电池质量好的原因所在。当上述化学反应方程式从右向左进行时,此时为电池的充电反应,铅酸蓄电池在充电时由于其内部伴随有其它许许多多的化学反应,经常会有气体析出^[11]

2.2 铅酸蓄电池的基本概念

由于铅酸蓄电池充放电过程中涉及到各个方面的专业知识,需要简要介绍有关概念:

(1) 电池的容量

将充满电的蓄电池按照一定的条件放电,当放到电池两端的电压达到放电终止电压时,此时放出来的电量为电池的容量。铅酸蓄电池的容量计算公式为:

$$C = \int I dt \quad (2-2)$$

其中 C 为容量 (A·h); I 为放电电流 (A); t 为放电时间 (h)。

(2) 充放电速率

为了方便对不同容量的电池比较, 电池的充放电速率用电池的额定容量 C 和时间 t 的比值来表示。比如一个额定容量 C 为 80Ah 的电池, 在四个小时之内充完电, 则它的充电速率可以表示如下:

$$I=C/4=0.25C(A) \quad (2-3)$$

若放电 2 个小时放完, 则放电电流为:

$$I=C/2=0.5C(A) \quad (2-4)$$

(3) 工作电压和充放终止电压

铅酸蓄电池的工作电压^[12]指蓄电池在放电时正负极两端的电位差, 也称放电电压。充电终止电压是指电池经过充电后, 其两端的端电压不会继续上升时的电压, 此时对电池继续充电会产生过充, 要避免在充电过程中出现这种情况。蓄电池可放电的最低电压为放电终止电压, 在低于电池放电终止电压时继续放电就会形成过放电现象, 这种现象会严重的损害电池, 降低电池的使用寿命。

(4) 电池过充电

电池过充电是指在电池充满电之后没有及时结束充电过程, 对电池继续进行充电, 这样会使大电流对电池产生过充问题。过充会导致电池温度升高, 对电池产生损害。所以应当在充电后期采用小电流进行慢充, 可以使电池热量及时散发出去, 同时此时的极化现象较少, 这样对电池的损害非常小。

(5) 电池内阻

电池内阻^[13]包括的成分比较多, 从结构来看由内部电极、隔膜、电解液、连接条部分和极柱等这些零部件的电阻组成, 主要是欧姆内阻、极化内阻和浓度极化产生内阻三大部分组成。一般在每次检测的过程中可以认为电池内阻是基本不变的, 铅酸蓄电池的内阻非常小用毫欧级来表示。

(6) 充电状态 (SOC)

充电状态是指电池剩余电量与电池总容量的比值, 用 C_r 来表示剩余电量, C 来表示电池的总容量, 则有

$$\text{SOC}=(C_r/C)\times 100\% \quad (2-5)$$

充电过程开始的首要任务便是需要尽可能快的恢复电池的额定容量，到充电后期由于电池本身自放电会放出一部分电量，就需要采用小电流进行浮充补充这部分损失的电量。只有合理的充电方法才能让电池的寿命得到有效的利用，一般电池的寿命有两种：循环寿命和浮充寿命。蓄电池的容量降低到一定值之前，电池能够充放电循环的次数为循环寿命。而浮充寿命是指在正常工作条件下，浮充供电的时间，一般铅酸蓄电池的浮充寿命都比较长。

(7) 极化现象

极化现象^[14-15]是指当电池充放电时，充电电流超过了电池可接受能力，导致端电压与正常的平衡值不一致，温度升高，有大量的水份分解，气体析出。若充电速率较低，产生的氧气可以被吸收，则极化现象较轻。极化产生的过电压会阻碍充电电流增加，减缓电池反应速度，同时产生大量气体延缓充电过程、腐蚀极板、产生大量的热量、降低电能效率。一般充电电流越大则极化现象越明显，这也是人们长期以来用小电流进行常规充电的原因。

2.3 铅酸电池的充电特性

给电池充电开始阶段用大电流进行充电，使电池最大程度尽快地充到额定容量，可以快速提高充电效率。此后由于电池自身的自放电现象会损失一部分能量，需要对电池进行小电流的涓流充电。在充电阶段，电池的端电压和电流随着时间会产生变化，它们之间的关系对认识电池的充电特性有着重要的意义

2.3.1 蓄电池可接受充电电流曲线

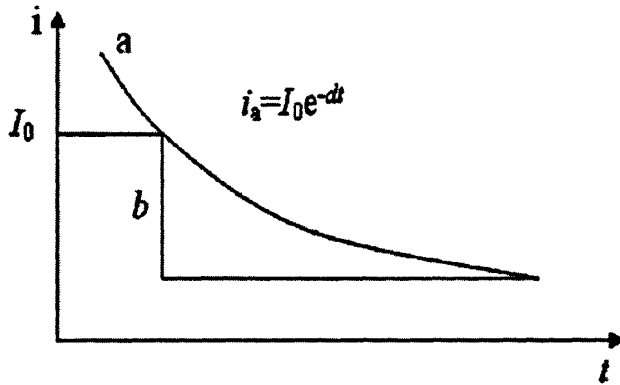


图 2-1 铅酸蓄电池可接受充电电流曲线

很早美国科学家马斯就提出了马斯三定律^[16]，其中还提到以最低出气率为前提的条件下，蓄电池可接受的充电电流曲线。如图 2-1 所示，在该曲线之上的电流值进行充电基本上会产生气体析出的现象。如果用曲线上的值进行充电即充电电流与可接受的电流值完全相等进行充电，那么在整个充电过程当中蓄电池不仅没有气体析出而且可以使电池充电时间减少到最低程度。上述可接受充电电流曲线的轨迹是一个指数函数曲线，可以用函数来表示如下：

$$I = I_0 e^{-at} \quad (2-6)$$

式中： a —衰减常数，定义为蓄电池充电电流可接受比； I_0 —最大初始电流 ($t=0$)。

通过该函数曲线可以知道，曲线之上的电流进行充电会增加析出气体量，而充电速率又得不到有效的提高，相反在曲线之下的电流进行充电会极大的增加充电时间。所以最大程度的沿着该可接受充电电流曲线进行充电是最好的充电方式。马斯提出的快速充电三个基本定律为电池快速充电奠定了重要的理论基础，马斯三定律如下：

(1) 第一定律

指蓄电池电流可接受比与放电容量之间的关系，有公式如下：

$$\partial = k / \sqrt{c} \quad (2-7)$$

其中 ∂ 为可接受比， c 为电池容量，通过该式可以知道电池容量越大，可接受初始充电的电流值也越大，可以把电池的容量作为参考确定初始电流大小的一项依据。

(2) 第二定律

蓄电池充电电流可接受比与放电电流有如下关系：

$$\delta = k * \lg kI \quad (2-8)$$

其中 I 为放电电流大小， k 为常数，通过该定律可知蓄电池放电电流的大小可以影响蓄电池可接受充电电流的大小。

(3) 第三定律

蓄电池可接受充电电流 I_s 与各个阶段放电率下的可接受充电电流 I_N 之间有如下关系：

$$I_s = I_1 + I_2 + I_N \quad (2-9)$$

马斯三定律通过具体的理论公式指出了蓄电池可接受充电电流与电量等其它因素的内在联系，为蓄电池的充放电提供了重要的计算依据。

2.3.2 蓄电池充电过程中电压变化关系

铅酸蓄电池在充电的过程中，两端的电压会发生一系列的变化，通过恒流对电池充电，可以得出其两端电压变化的规律曲线^[17]如图 2-2 所示。

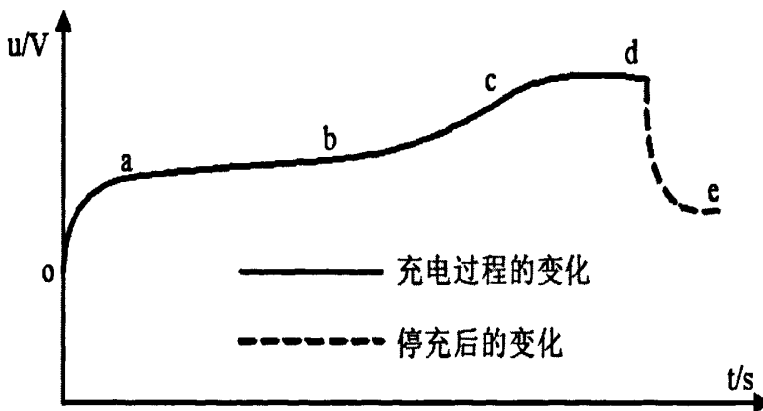


图 2-2 充电过程中电压变化曲线

在图中曲线 oa 段可知，刚开始阶段充电池内部硫酸铅发生的化学反应产生的二氧化铅和硫酸使电解液的浓度升高，又不能及时的向外扩散，所以电池两

端的电压迅速上升。随着充电的进一步进行,到图中曲线 ab 段,电池内部电解液开始互相慢慢扩散,浓度不再快速上升,活性物质等逐步转换成铅化合物之类,孔率也开始增加,端电压开始缓慢上升。在曲线 b 点时,随着活性物质的不停转换,导致极板上的硫酸铅减少,此时如果继续进行充电,会导致水份大量的分解,冒出气体。这部分气体不能及时释放而吸附在极板表面,使电池的内阻增大,从而电池两端的端电压又开始迅速的升高了,如曲线中 bc 段。随着水份的大量分解,会逐渐的趋向饱和,电压就开始稳定不变至 d 点。在 d 点处应当结束充电,因为此时不管怎样充电,端电压都不会升高,如果继续充电只是进行无谓的水份分解,浪费电能。在 d 点停止充电后,内部的活性物质以及硫酸等开始扩散,最终电解液浓度相等,端电压稳定在某个电压值不变。

通过该实验可知,电池的终止电压与充电电流的大小有一定的关系,如果充电电流小则电池内电压也小,水份的分解变少,极板周围气体也会相应的变少,充电末期的终止电压也就稍微低一些。如果充电电流过大,末期的终止电压会发生变化,同时过大的电流会使大量的气体析出而影响电池的性能。所以在充电末期一般都需要采用较小的电流进行浮充,电池的终止电压也并不能决定电池已经完全冲完电,而是需要根据电池已经充入的电池量和极板颜色等现象来综合判断。

2.4 铅酸电池的放电特性

电池在放电过程中,电压与电流有着密切的关系,放电方式大多采用恒流方式,对恒流放电模式下电压和电流的曲线关系的研究有助于对其特性的了解。

2.4.1 放电过程曲线

充足电的铅酸电池进行老化过程中,一般以恒流方式进行放电,其端电压放电特性曲线^[18]如图 2-3 所示。

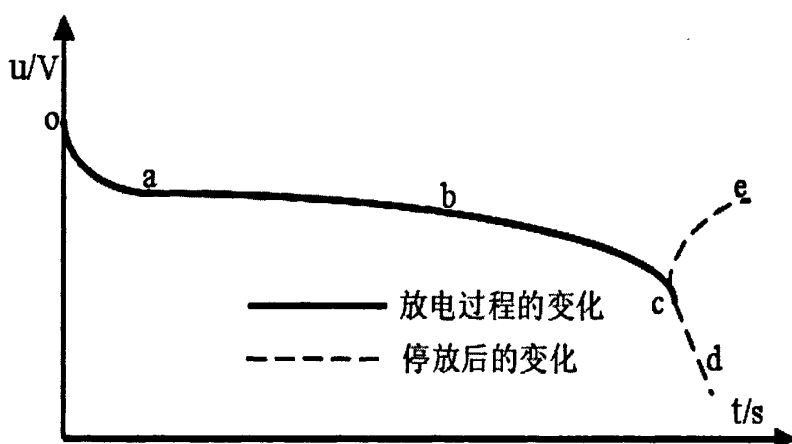


图 2-3 铅酸蓄电池放电时端电压变化曲线

在开始放电之前，电池的电动势与其两端的电压是相等的，放电开始之后，活性物质微孔上的硫酸溶液等消耗很快，此时电解液浓度扩散也比较缓慢，反应过程中又生成不少的水份，导致微孔内电解液的浓度大幅度的下降，所以电池端电压也就开始迅速降低，如图中曲线 oa 段所示。曲线 ab 段端电压又开始缓慢下降，此时由于活性物质表明电解液与主体电解液之间浓度差促进硫酸的扩散运动，此时各个部分的浓度都比较稳定，电压变化也比较缓慢。但是在放电的整个过程中是需要不断的消耗硫酸的，电解液的浓度就会慢慢变低，所以电池的端电压也会呈现出慢慢降低的趋势，即 ab 段所示。随着放电的进一步进行，到放电末期电池中活性物质大部分成为了硫酸铅，体积变大，孔率降低。同时硫酸铅不断的向各个部分开始扩散，导致电解液越来越难及时的扩散到那些稀释的电解液中去，电解液的浓度也变低，增加了电解液的电阻。硫酸铅的不断增多，导电性能差，极板内阻变大也增加了电解液的电阻。这两个方面的主体因素导致电池端电压迅速下降，如图中 bc 段曲线所示。到了 c 点时，此时电压已经降到一定值了，如果结束放电，蓄电池两端的端电压立即回升，内部电解液互相扩散，电压回升到一个稳定值不变，如图中 ce 段所示。如果此时不结束放电而是继续放电，则会产生过放。此时活性物质微孔内的电解液不能得到极板外主体外电解液的及时补充，微孔内几乎是水份，则电池端电压开始急剧的下降，如曲线中 cd 所示。这样放电完成之后，电池会出现硫化或者反极的现象，导致电池容量的丧失。这种过放电的现象一定要避免发生，因为放电到 c 点之后继续放电，电池已经给不出多少容量了。一般把铅酸蓄电池端电压降到 c 点就开始停止放电，此时电压称为放电终止电压。

不同类型的蓄电池由于其构成材料、结构以及种类的不同，放电终止电压是不同的。对于固定的铅酸蓄电池，放电过程中电解液的浓度一般变化比较小，端电压变化也不大，所以对于放电终止电压都定的稍微高一点，防止过放电现象的发生。

2.4.2 放电率对放电曲线影响

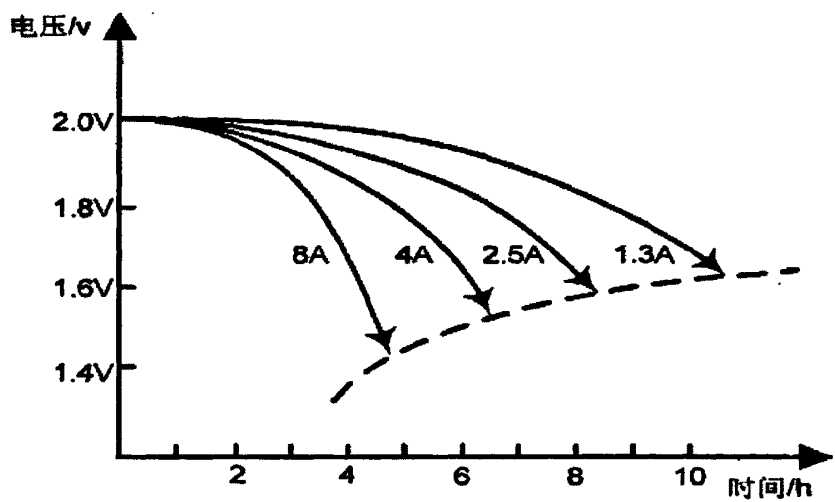


图 2-4 铅酸蓄电池常温不同放电率下放电曲线

如上图 2-4 所示为蓄电池电压与电流在常温下放电关系，如果放电电流越大则电压开始阶段下降越明显，放电电流越小则电压开始下降越平缓。放电电流小，电池内部硫酸浓度等导致的变化相对缓慢的多，所以体现在电池两端的电压变化曲线倾斜程度越小。

2.4.3 温度对放电曲线影响

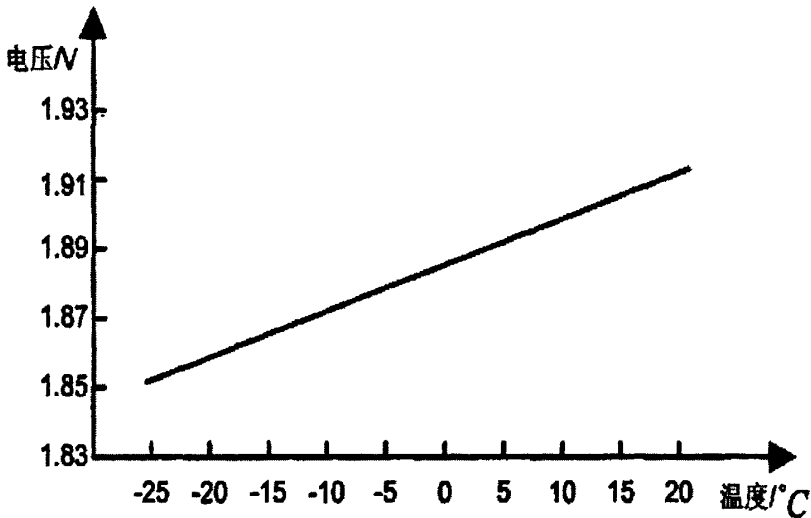


图 2-5 电解液温度与放电平均电压的关系

电池的特性曲线^[19]温度不同而变化, 电解液温度低则放电的平均电压也低, 充电电压则升高。反之, 电解液温度若越高, 则放电均压也高, 充电电影则低, 二者关系如图 2-5 所示。

2.5 蓄电池充电方法概述

传统的充电方法^[20-22]恒压限流和先恒流后恒压充电方式等, 传统方法充电控制电路比较简单, 功率一般也较小。但是效率比较低、安全性能差、充电时间也较长。针对这些缺点, 国内外又陆续出现了一些其它的充电方法, 如分级定流、脉冲式、定化学反应式等充电方法。

2.5.1 恒流充电方式

在蓄电池试验和使用过程中, 大部分采用恒流方法进行充电, 这种方式是指在充电过程中, 一直采用恒定不变的电流值对电池进行充电。从上面所了解的内容可知电池在整个充电过程中两端的电压会不断的发生变化, 所以采用恒流方式充电需要在充电过程中不断的调整才能达到恒流。这种方法比较适合电池组串联进行充电, 可以补充个别落后的电池容量, 提高单位时间内充电电池的数量。

从蓄电池的可接受电流曲线可以看出, 采用恒流方式开始阶段电流过小,

不利于充电的快速性，导致充电时间比较长，而后期相对来说充电的电流又过大，对电池有一定的损害，能量损耗高。一般这种充电方式效率都较低，所以目前仅仅采用这种恒流方式充电方式比较少见。

2.5.2 恒压充电方式

恒压充电是指对电池采用某一恒定不变的电压进行充电，这种方法在充电初期充电的电流值比较大，随着充电的不断进行，电流也会慢慢变小。由于只用恒定电压，不用调整电流的大小，充电过程中气体析出量也比较少，能耗低，效率高。同时在充电的末期会是小电流通过电池，对电池不会造成太大的伤害，一般在 8 小时之内可以完成电池的充电。

恒压充电方式在充电初期充电的电流比较大，如果电池放电深度比较高的话，此时就会使充电器处于不安全的位置，同时电流过大也会对电池产生一定的损伤。如果开始定的充电电压比较低，在充电后期充电的电流过小，电池因为自放电而损失的能量不能得到补偿，充电时间就会过长。这种方式一般适应与单体电池或者端电压不高的电池组。

2.5.3 恒压和恒流相结合阶段式充电法

这种充电方式采用恒压和恒流的优点，互相结合，在前期采用恒流方式进行快速充电，后期为了保护电池不被过充或者少充，采用恒压方式进行充电。也有在电路之间串联电阻，限制电流的大小，使电池两端的电压变小，可以起到一个调节的作用，补救了恒压充电的缺点。

采用这种方式典型的有三阶段充电法，目前应用非常广泛，即在第一级和第三级采用恒流方式充电，第二阶段采取恒压的方式进行充电。开始第一阶段采取大电流进行快速充电，第二阶段采取恒压的方式使电池充电状态逐渐过渡到第三阶段的小电流充电方式。这样可以最大限度的发挥恒流和恒压的各自优势，即不损伤蓄电池又可以在短时间内给电池快速充电。

2.5.4 脉冲式充电法

脉冲式充电方式如图 2-6 所示，指充电电流或者电压以脉冲的方式加在电池两端进行充电。这种方式是在充电的过程中短时间内停止充电或者让充电电流

反向放电，这样做的目的是可以及时通过硫酸铅溶解生产铅和二氧化铅，并提高其浓度，可以加快电池充电速度，同时可以很好的消除极化现象。脉冲式充电法是最近开始兴起的一种快速充电方式，由于可以降低电池的浓度极化差，使得充电的电流在前期可以很大，这样充电的速度和效率更加快速有效。

单独采用脉冲充电方式的充电方法并不多见，由于在充电初级电池极化现象并不是很明显，所以前期一般采取大电流进行恒流充电，使电池的容量恢复到一定的程度。然后当电池的电影达到一定值是就开始采取脉充电流进行充电，这样水份开始分解并有微量气体停止充电。停止充电后，欧姆极化现象消失，浓度差极化也会因为扩散而部分地消失。为了进一步使极化程度显著减慢，停充后可以采用放电或者通过一个与充电方向相反的大电流脉冲，然后再停充。按着正脉冲充电-停止-负脉冲瞬间放电-停止-正向充电的循环过程，这样可以使极化程度显著减慢，有效的解决快速充电影响电池寿命的问题。

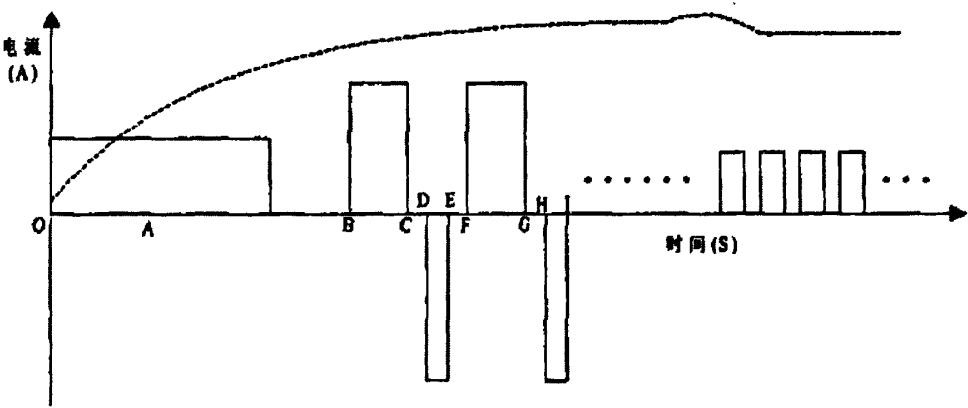


图 2-6 脉冲充电策略

采用脉冲充电可以大大减少充电时间，效率高。常规充电对于新的蓄电池初次充电一般需要 70 小时以上，而这种快速充电方式不超过 4 个小时。同时可以消除极化，使化学反应更加充分，去“硫化”效果良好，增加电池容量。

2.5.5 变电流和变电压充电法

传统恒电流和定电压充电方法，分为前期恒流充电和后期定电压充电，若充电电压过高，正极出氧气速度快，超过吸收速度，从而引起电池失水，出现

极化现象损害电池。充电电压定的过低则会减少充电时间和放电容量，也是不合适的。近些年就提出了变电流间歇充电和变电压相结合的充电方法。这种充电方法是建立在脉冲充电和恒流充电方式基础之上，将恒电流阶段改为变电流间歇充电，此时限定给定电压大小，采用大电流进行充电，这样可以缩短充电时间，快速高效充电。

在变电流间歇充电为基础之上又产生了变电压间歇充电法，与变电流间歇充电类似，即在充电的过程中适时的间歇停止充电，使得蓄电池的反应进行重新缓和恢复到做好的充电状态，吸收更多的电量。

2.6 电池充电方法控制技术

分析了各种充电方式，各种分阶段式充电法等，如何判断电池的充电状态就显的尤为重要。蓄电池充足电，如果继续充会形成过充现象，没充足又不能使电池发挥出最大的效果。为了保证电池能充足电而又不损害自身，就必须采取一系列的充电控制技术。目前常用的控制技术非常多，基本上都是根据电池的电压、温度和时间参数来进行综合控制等。

2.6.1 温度控制法

蓄电池充满电时，内压比较大，此时有气体开始析出，产生大量的热量，使电池的温度上升比较快。如果测量电池的温度发生了一定的变化时，就可以断定电池的充电状态需要改变。为了有效排除环境因素的影响，一般常采用温升控制法来进行判定，温度控制法对环境和测量仪器的精度依赖性比较高。

2.6.2 时间控制法

充电过程中，通过预定电池充电的时间来控制电池是否停止充电或者改变充电的方式。这种方法是根据电池的容量和充电电流的大小来确定充电所需的时间，简单有效，避免了长时间大电流对电池进行过冲的现象。该方法的缺点是不能自动调整电池充电的状态，同时精确度较低，有可能导致电池充电不足或者过充。虽然操作简单易行，由于充电时间固定不能作为蓄电池充电完成或者改变充电方式的精确判断方式。

2.6.3 最高电压控制法

这种方法目前依然是应用最广泛的一种，它是根据电池两端的最高电压来判断电池充电的状态。该方法操作简单，易于控制，然而电池的最高充电电压会根据环境温度和充电电流的大小发生变化，导致不能精确的判断电池的状态。比如在高温时，电池充足电后，最高电压较常温下低，此时继续进行充电会发生过充现象；当环境温度较低时，又会提前检测出最高电压，导致电池又不能充足电。所以最高电压法控制可以采用温度补偿措施，或者与其它的一些控制方法，采取各自的优点进行综合控制会达到更好的效果。

2.6.4 电压负增量法

这种方法是目前公认的比较先进的控制方法。根据蓄电池特性可知，对电池充电时，电压会逐渐的上升，电池端电压会达到一个最大值，充满之后如果继续充电，那么电压就会下降，如果检测到此时电压值比上次电压值小即出现了电压负增量($-\Delta U$)，就认为电池已经充满电。然后就可以改变电池的充电方式，采用小电流浮充，与其它的一些温度和时间控制方法相比，这种控制方法响应快，并且对环境温度没要求，不会因为温度影响电池端电压产生误差，可以对多组电池组进行检测。该方法唯一的缺点就是环境温度过高时，在电池充满电后，电池电压负增量不是很明显，如果检测精度不是很高的话基本上能满足一般的要求。

2.6.5 电池电压二次导数控制法

通过检测电池电压的二次导数来实现控制。当电池在充足电时， d^2v/d^2t 将达到某一个确定的值时结束充电。电压二次导数控制法由于要测试的量比较多比较复杂，虽然更加安全可靠。随着测试技术的不断发展，这种方法将会得到广泛的应用。

2.6.6 综合控制法

以上控制方法各有优缺点，在要求比较高的场合下，为了保证任何情况下均能可靠地检测出电池充电状态，可以采用具有温升控制、时间控制以及电压

负增量控制的综合控制法。近年来,随着仪器精度的不断提高,控制方法和技术不断更新,国内外采用的综合控制法也越来越好。

2.7 放电方法及控制技术

蓄电池的放电主要有两种,电阻式放电和采用功率变换设备进行恒流放电。电阻式放电主要是将蓄电池与电阻丝或者变阻箱连接,通过人工的方法调整电阻大小来调整放电电流大小。这种方式蓄电池端电压会不断发生变化,必须靠人工进行监测,不能做到恒流放电,而且容易过放电,电阻发热量大,能耗高。但是结构简单,可靠性高。采用功率变换装置,依靠高频开关技术实现蓄电池恒流放电,既可以减少能耗,同时控制灵活方便,效果好。

蓄电池出厂为了确保电池的性能,对蓄电池进行定期的维护保养和容量测试等都需要进行放电。所以蓄电池的放电控制技术也显得尤为重要。放电时必须考虑蓄电的放电速率和放电终止电压,特别是不同环境温度下的终止电压和放电速率的设定。不同的环境温度会影响电池中电解液的冰点和活性物质的活性。为了使化学反应能够充分进行,电池的最低温度最好控制在 -20°C 之上,最好是 25°C 左右。放电终止电压的设定可以防止过放电,如果过放电严重,对下次充电电池容量的回复就会产生更多的影响,甚至严重威胁电池的寿命。所以为了更好的确保电池属性,不影响电池的寿命,必须结合环境温度和放电速率等多方面的因素综合考虑放电的终止电压。目前放电方法的控制技术一般采用时间控制、温度控制以及最低电压相结合的综合控制法。

2.8 本章总结

本章介绍了铅酸蓄电池的内部工作原理和相关的一些基本概念,然后详细的介绍了蓄电池充放电特性。根据特性引出目前一些常用的电池充电模式如恒压充电、恒流充电、分阶段充电、脉冲充电等。接着概述一些常用充电控制模式策略,然后对放电方式和控制技术进行了相关的介绍。

第 3 章 节能充放电系统的总体设计

3.1 蓄电池充放电系统耗能分析

在普通铅酸蓄电池充放电系统上，充电模块采用 AC/DC 硬开关技术线性充电电源，效率约 75%。到蓄电池上也是线性充电电源效率约 60%左右，而蓄电池放电电能基本上通过线性电阻负载完全耗掉。

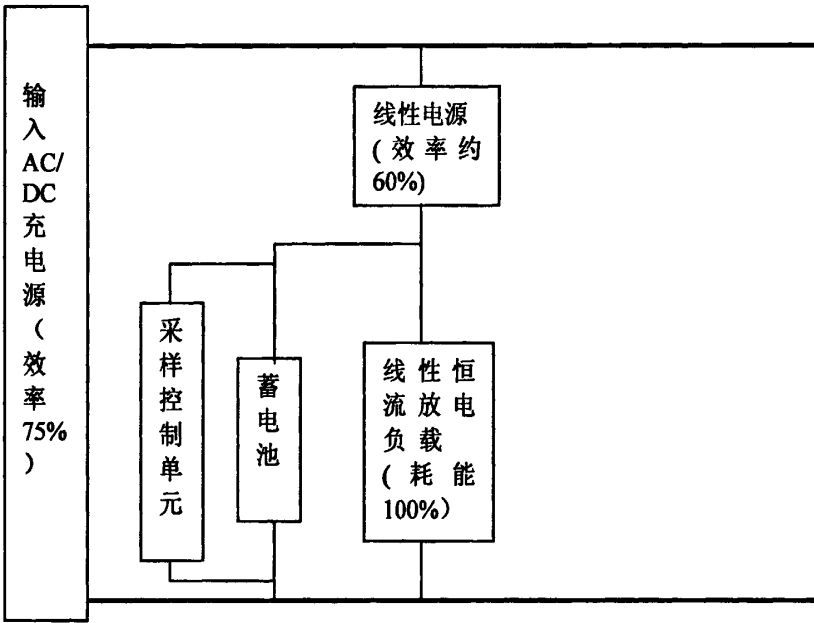


图 3-1 普通蓄电池充放电耗能示意图

上图 3-1 为普通蓄电池充放电系统电池耗能示意图，该系统存在如下缺点：

- （1）充电电源模块效率较低，最终达到蓄电池的效率为： $75\% \times 60\% = 45\%$ 。
- （2）放电电能完全消耗在放电电阻上，极大的浪费能源，同时这个热量散发到周围空间，影响仪器和环境。
- （3）传统充放电模式，采用简单的恒流方式对单个电池充放电，效率较低。

3.2 回馈电网型节能充放电系统

为了能有效利用电池放出的电能，人们提出了一种回馈电网型^[22-23]节能充放电系统，如图 3-2 所示。三相电源经过 AC/DC 变换成直流通过 DC/DC 给电池

充电，采用高频开关电源可以大大提高能源利用率。对于电池放出的电能则通过 DC/AC 逆变回电网，可以回收将近 60% 的能量。然而逆变电网型存在诸多技术难点，技术难度大，要达到较好效果需要合理配比局域电网内相关参数，同时会产生开关纹波噪声到电网中。目前国家政策也不允许逆变回电网，即使可以逆变电网也会收取费用，这样对于企业又产生了一大笔开支。所以目前很多中小企业依然采用负载型电阻耗电放出来的电能。

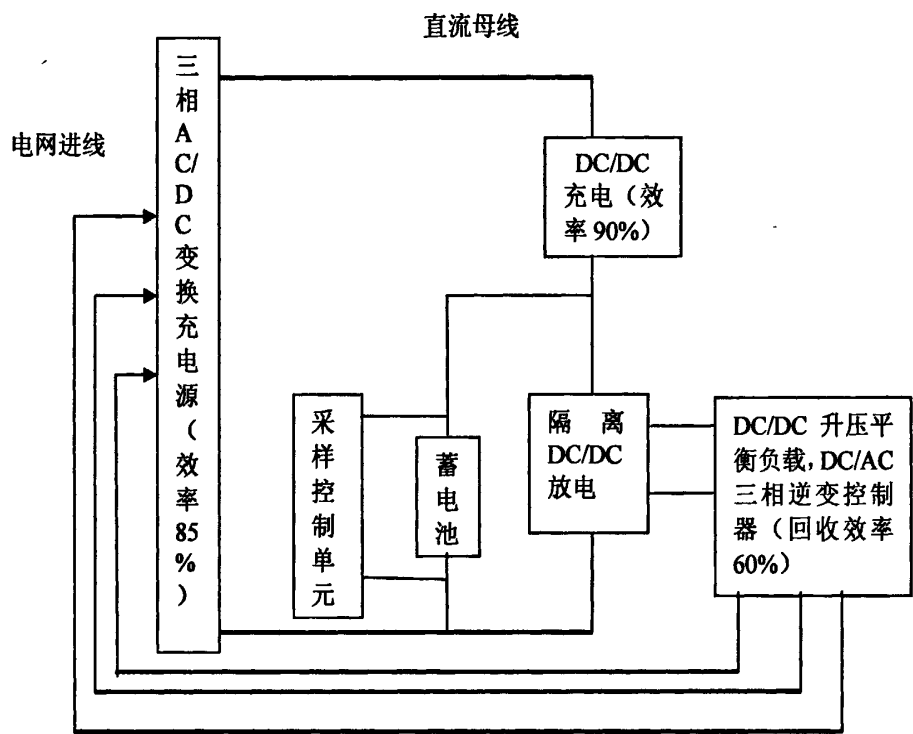


图 3-2 回馈电网型充放电系统结构图

3.3 直流总线型充放电系统工作原理和节能途径

针对普通蓄电池充放电系统能耗浪费严重，效率不高的状况，而电网回馈型节能充放电系统无法得到很好的实际利用，设计出了直流母线式充放电系统。结构图如图 3-2 所示，该系统主要包括由三相电压至直流电压转换的 AC/DC 模块和双向 DC/DC 充放电转换模块。三相电网进线，采用同步整流技术把交流电压变成所需要的直流电压供电。为了提高效率，可以采用多组铅酸蓄电池串联

充电放电，采用公共充放电总线，通过 DC/DC 模块给电池组降压充电。电池组放电时通过 DC/DC 升压把放出去的电传输到公共母线给其它组电池组充电，达到内部各个电池组放出的电能转移利用的目的。同时采用分阶段脉冲充电模式，有效的减少极化现象和能量消耗，极大的提高了充电效率。

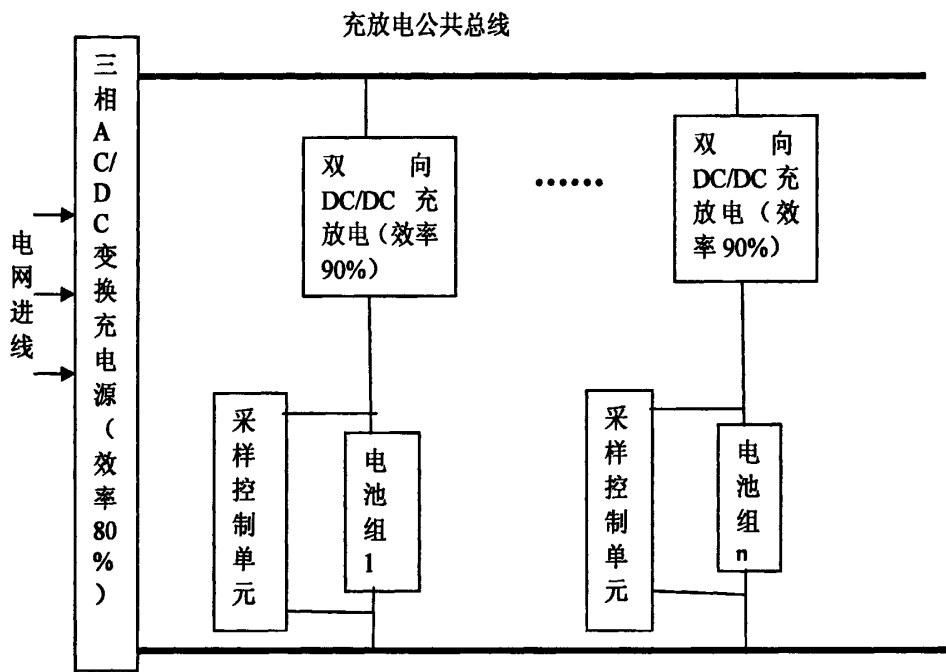


图 3-3 直流总线式充放电系统结构图

通过以上节能型充放电系统工作原理的分析，该系统节能途径主要有以下几个方面：

- 1) 输入 AC/DC 整流模块采用同步整流技术代替硬开关技术，转换成直流电压的效率提高到 80%以上。同时给电池充电的线性电源也改用高频开关电源技术和软开关技术将该部分的电能利用率提高到 90%以上，从而大大的提高了电能利用率。
- 2) 在放电模块上，通过 DC/DC 升压模块替代原来的线性恒流电阻负载，使电池放电的能量从 100%消耗回收至少 90%以上能量。这部分回收的能量通过直流公用总线提供给其它组通道电池组使用。
- 3) 采用分阶段脉冲充电方式，减少极化现象，使电池充电电流更加接近可接受充电电流曲线，减少电池无效的能耗，同时提高了充放电效率。
- 4) 多组电池组串联充电，根据电池组充放电所需时间，来错步实行能量转

移利用，同时根据各部分电池组充放电所需时间，通过上位机合理安排各组电池充放电时间，达到最大化利用放出电能，大大提高了工作效率和生产效率。

5) 由于放出的电能得到再次有效利用，取消了放出电能电阻上的消耗，系统对外排热量减少，从而可以减少设备上散热风机的数量。同时降低工作环境的温度，减少了空调等其它所需的能耗。

3.4 充放电控制系统硬件原理架构

鉴于逆变电网型回收效率不是很高，同时技术难度大，同时逆变电网电能需再次收费在企业中得不到很好的应用。因此本文采用设计的直流母线型充放电控制系统，其硬件原理框图如 3-4 所示。

本系统主要由前级 AC/DC 整流器和后级双向 DC/DC 控制模块组成，多组后级双向 DC/DC 控制器并联实现对多组电池组充放电，都有各自的下位机独立控制单元。根据电池组充放电各自的时间通过上位机来安排电池组之间的错步充放电过程。该系统节能措施主要通过三相 AC/DC 整流电路设计、双向 DC/DC 模块设计、充放电策略的选择和软开技术基础之上来实现。

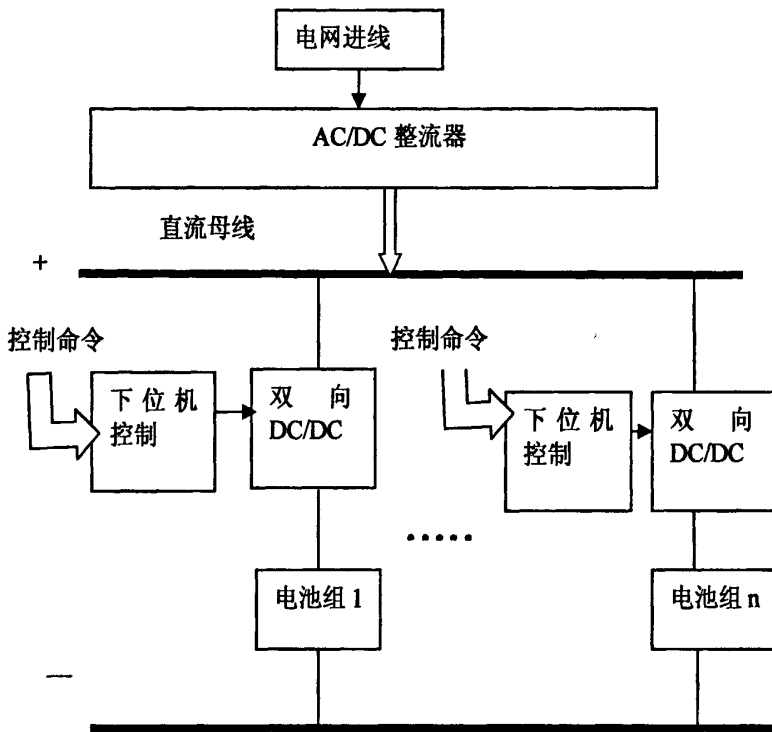


图 3-4 直流总线型充放电系统硬件原理框

3.5 PWM 控制技术

为了获得一定的稳定输出，达到最大程度减少能耗，需要用到开关电压控制技术。脉宽调制技术^[24]（PWM）是目前应用最广泛的一种控制技术，所谓 PWM(Pulse Width Modulation)指在固定时钟频率下，通过控制开关管控制信号的占空比进行脉冲宽度的调制，从而实现对输出电压的调整。PWM 控制技术应用的范围广，在很多范围内都具有较高的效率，而其又容易实现。因此 PWM 技术在通信电源，电力电子方面应用非常广泛。

采样控制理论有这样的一个结论：惯性环节上，加载脉冲相等而形状不同的窄脉冲，那么输出的响应波形也基本相同，也称为面积等效原理是 PWM 控制技术重要理论基础。按照反馈采样方式不同，PWM 控制方式可以分为电压型和电流型模式，目前应用最多的几乎都是电压型模式。PWM 的控制方法主要是 PWM 波形的生成，跟踪控制法即把实际输出的反馈信号与给定的波形进行比

较, 根据两者的大小来控制电路上各器件的通断, 常用的有滞环比较方式与定时比较方式等。

(1) 滞环比较方式

这种方式分为电流跟踪控制和电压跟踪控制, 电流跟踪控制指把给定的电流和实际输出的电流的差值作为滞环比较器的输入, 若导通则输出电流增大, 截止电流减少, 不断的控制开关器件的导通和截止使电流在一定的纹波范围内。这种方式硬件电路比较简单, 实时性好, 响应快速。只是滞环环宽对于频率的影响较大。所谓的电压跟踪控制, 把实际电压与给定的电压进行比较, 把电压的变化量送入滞环比较器, 从而来实现开关的通断。与电流控制方式相比, 仅仅只是把电流换成电压的方式, 这种方式含有较高的谐波成分。

(2) 定时比较方式

这种方式不采取滞回比较器, 设置一个固定的时钟信号, 在固定的时间内对信号进行采样来与给定的值进行比较, 直接控制开关的通断。如果频率较高, 就可以较好的控制稳定度, 采用这种方式操作方式简单, 但是器件的最高频率受时钟频率的制约。和滞环比较方式相比, 由于误差没有一定的环宽裕度, 该方式控制精度较低。

3.6 双向 DC/DC 模块

在电池组上充放电是通过直流母线电压提供和接受能量的转移, 即将直流电压变为另外一适合大小电压或者可调的电压输出。而输出电流大小受输出电压控制, 从而双向 DC/DC 升降压电路可以满足系统要求。DC/DC 直流斩波^[25-26]电路的种类很多包括降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk 斩波电路等^[27-29]。以下介绍基本的升压和降压电路, 然后基于这两种基本电路引出双向 DC/DC 控制电路。

(1) 降压 Buck 电路

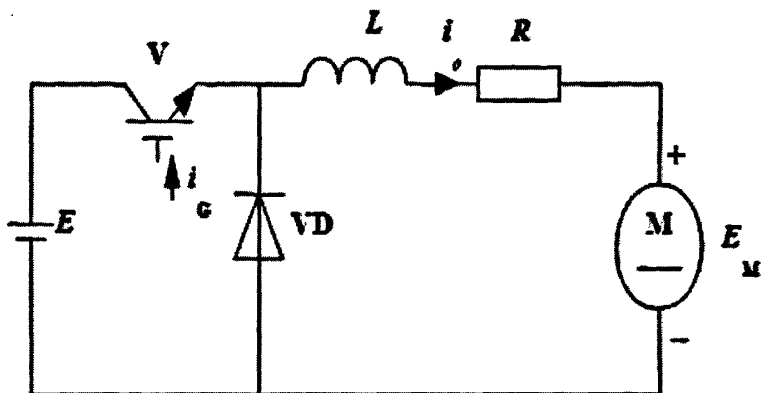


图 3-5 Buck 降压电路

如图 3-5 为降压斩波电路（Buck Chopper）原理图，采用 IGBT 全控型器件 V 来控制电路通断。当 V 关断时，存储在电感 L 上的电能通过二极管续流，该二极管称续流二极管。该电路的典型应用可以是带电动机或者蓄电池当负载，都会出现反电动势 E_M ，若无反电动势可以令其为零。以下分析电流连续时的波形以及电流电压值。

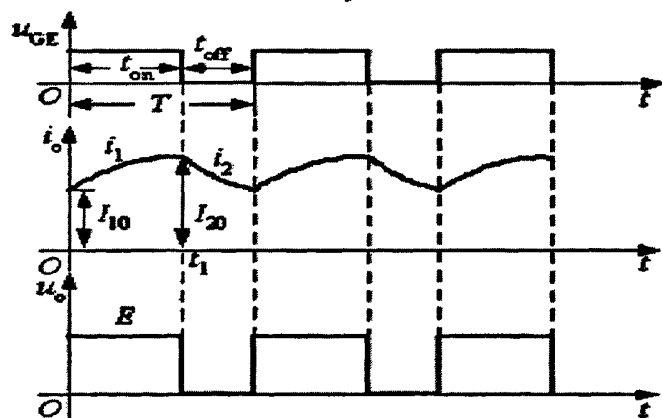


图 3-6 电流连续时的波形

如图 3-6 所示为电流连续时的波形，图中 U_{GE} 驱动开关 V，在 t_{on} 时间内开关管导通，电源向负载供电，电流呈指数曲线上升，负载电压为 E；在 t_{off} 时间内，V 关断，负载电压为 0，电流通过续流二极管续流呈指数曲线下降。为了达到电流的连续和平稳，一般串接大电感使电流脉动变小。下一个周期内继续这样的过程，稳定状态下电流初始和末期值相等。由图可知道，负载电压下的平均值 U_0 为：

$$U_0 = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T} = \alpha E \quad (3-1)$$

其中 t_{on} 为 V 处于通态时间, t_{off} 为处于关断时间, T 为开关周期由此可确定开关管的开关频率, α 为导通占空比 ($0 < \alpha < 1$), 通过该公式知道调节 α 的大小可以控制输出电压大小, 由于 $0 < \alpha < 1$, 因此该电路为降压电路。为了使电流连续, 一般在电路中串接一个电感, 电路中电流也是一个关键的量, 根据电路基础知识可以求出电流的平均值和瞬时值;

负载中电流的平均值为:

$$I_0 = \frac{U_0 - E_M}{R} \quad (3-2)$$

开关处于通态时, 设此阶段电流初始值为 I_a , 电流瞬时值为 i_1 , $\tau = L/R$ 可方程式:

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + E_M = E \quad (3-3)$$

有
$$i_1 = I_a e^{\frac{t}{\tau}} + \frac{E - E_M}{R} (1 - e^{\frac{t}{\tau}}) \quad (3-4)$$

当开关处于断态时, 设此阶段电流初始值为 I_b , 负载电流瞬时值为 i_2 , 列出方程式:

$$L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 + E_M = 0 \quad (3-5)$$

有
$$i_2 = I_b e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}} - \frac{E_M}{R} (1 - e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}}) \quad (3-6)$$

若电感 L 足够大, 电流连续, 此时有:

$$I_a = i_2(t_2) \quad I_b = i_1(t_1) \quad (3-7)$$

可知通态时的电流初值为断态时结束阶段电流值, I_a , I_b 分别是电路中最小值和最大值。由上述公式, 根据泰勒公式级数近似有:

$$I_a \approx I_b \approx \frac{(\alpha - \frac{E_M}{E})E}{R} = I_0 \quad (3-9)$$

由该公式可以看出, 当平波电抗器 L 为无穷大时, 负载的电流可以近似为一平

稳的直流。然而在实际设计中电感不可能无穷大，同时过大的话能耗也非常严重，过小则电流不能续流，所以有必要设计出合适的电感大小。利用前述公式，可以得出电流连续的临界条件为：

$$\frac{E_M}{E} = \frac{e^{\alpha} - 1}{e^{\rho} - 1} \quad (3-10)$$

其中 $\rho = T/\tau$ ， α 为占空比， $\tau = L/R$ ，由此可确定出电感的临界值。

(2) 升压斩波电路

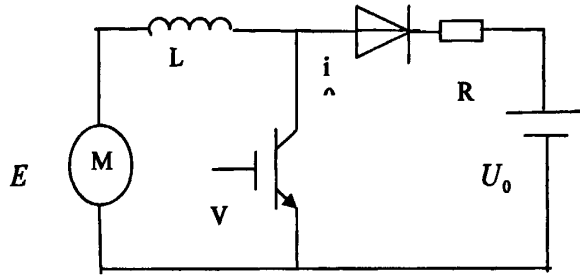


图 3-7 升压斩波电路

升压斩波电路如图 3-7 所示，假若电路中电感和电容值都足够大，与降压斩波电路类似，此时反电动势 E 相当于电源，右边当 V 开通时，电源 E 向电感提供能量存储，同时电容 C 向负载恒压供电提供能量，负载上的电压也基本恒定，充电电流基本恒定为 i 不变。当 V 断开时，储存的能量同时向电容和负载供电。设开通时间为 t_{on} ，则电感存储的能量为 $E I_1 t_{on}$ ，断开时间为 t_{off} ，电容上的电压为 U_0 ，则此时由电感释放能量提供给负载和电容，释放的能量为 $(U_0 - E) I_1 t_{off}$ ，电路工作稳态条件下，在一个周期内根据能量守恒定律有：

$$E I_1 t_{on} = (U_0 - E) I_1 t_{off} \quad (3-11)$$

有

$$U_0 = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E \quad (3-12)$$

由于 $\frac{T}{t_{off}} > 1$ ，可见输出的电压大于电源电压，达到升压效果。令 $\beta = \frac{t_{off}}{T}$ ，通过改变其大小，可以调节输出升压大小。与降压斩波电路一样，当 L 无穷理想大时，设电流的平均值为 I_0 ，也可以看成直流变换器。根据能量守恒有：

$$I_0 = \frac{E - \beta U_0}{R} \quad (3-13)$$

该升压电路之所以能提升电压主要是由于电感的储能之后，使电压得到提升，而大电容主要是保证输出电压的稳定。

(3) 双向 DC/DC 升降压电路

系统中，给电池组充电过程需要降压，而放电过程通过升压放到母线上。双向 DC/DC^[30-31]升降压电路刚好能满足这个条件。升降压电路也基本上是在升压电路和降压电路的基础上构建过来的组合电路，典型的有 Sepic 斩波电路，Cuk 斩波电路和 Zeta 斩波电路等。上面降压电路和升压电路中，电流均只能单向流动，为了在控制电路中能实现电流方向的改变和电压的升与降，设计出电流可逆斩波电路，如图 3-8 所示。

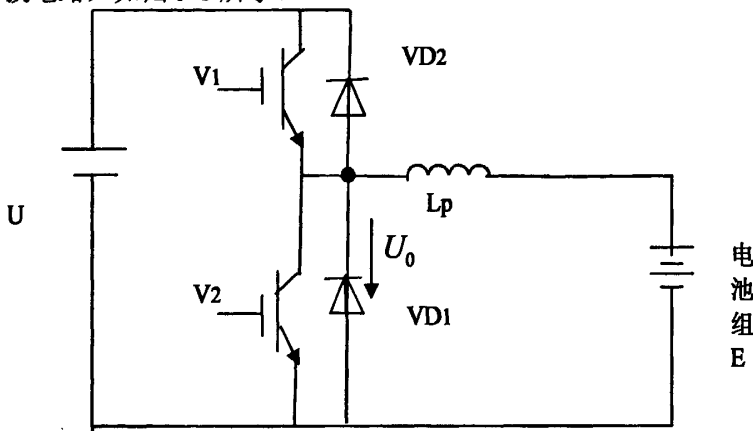


图 3-8 双向可逆斩波电路

根据 V_1 、 V_2 、 VD_1 和 VD_2 通断关系该电路有三种正常的工作方式，其中 V_1 和 V_2 同时导通时，将会导致工作在短路状态，一定要避免这种情况的发生。其它三种工作方式如下：

(1) V_1 和 VD_1 处于工作状态， V_2 和 VD_2 一直处于关断状态，此时电路为降压斩波电路，电源通过 V_1 和 VD_1 向电池降压充电， VD_1 起着续流作用，通过 V_1 的不停关断与导通改变占空比 α 的大小来控制输出电压和电池组充电电流的大小。

(2) V_2 和 VD_2 处于工作状态， V_1 和 VD_1 一直处于关断状态，此时电路工作再升压斩波电路方式，电池组通过 V_2 和 VD_2 向电源放电，控制 V_2 关与断改变 β 的大小来控制放电大小。

(3) 该种方式指在一个周期内，升压电路和降压电路交替工作，降压工作方式下当 V_1 关断后，由于电感存储的能量不够释放完毕，此时电流断续为零。

此时使 V_2 导通, 电感 L 又开始积蓄能量将会使 VD_2 导通, 这样工作再反向释放能量。当反向电流释放为零时又继续开通 V_1 , 电路又开始正向降压工作, 如此循环, 升压和降压交替进行电路中电流不停的正负两个方向流通, 响应也非常快。

该 DC/DC 电流可逆斩波电路可以方便的实现充电和放电方式的进行, 电路简单, 器件少, 可以在很大程度上节省器件的损耗。本课题中需要控制的是输出电流, 通过对采集电流与给定电流的差值来调节功率开关管的关断和导通时间的占空比来控制输出电流, 根据对输出的调节方式不同有三种控制方式:

1) 保持开关管的周期 T 不变, 调节开关导通时间, 这种方式为我们常说的 PWM 或者脉冲调宽型;

2) 使开关管导通时间不变, 改变开关管的频率从而来改变占空比成为频率调制;

3) 开关导通时间和周期都可以改变, 这种方式调制灵活, 成为混合型。

以上调节方式最终目的都是通过改变占空比的大小来改变输出的大小。第一种方式 PWM 方式实现方便, 应用最多, 通过这种方式的控制实现高频开关关断, 与线性电源相比, 这种高频开关控制方式可以极大的提高电源利用效率, 目前国外的一些商品电源中, 有的 DC/DC 变换器^[32-33]最高效率可达 95% 以上, 可见采用高频开关电源技术在很大程度上可以节约能源的损耗。

3.7 软开关技术

随着电力电子设备的不断小型化和轻量化的发展, 电力设备的效率和电磁兼容性要求也越来越高。同时为了提高能源的利用率, 高频开关技术得到大力应用, 本方案中 DC/DC 转换电路以高频开关技术来达到高效率节能作用。然而随着频率的增高, 开关损耗也会变大, 电磁干扰也较大, 从而降低电源效率。仅仅只是一味的提高开关频率是不可能达到很好的效果的。而软开关技术^[34-35]正好解决了电路中这些开关损耗和噪声干扰这些问题。

在实际过程中, 开关元件在门极的控制下导通与关断, 电流或者电压比较高的情况下并不是理想状态下瞬间完成的。在开关过程中其电压和电流均不会瞬间为零, 其典型的开关过程如图 3-9 所示。

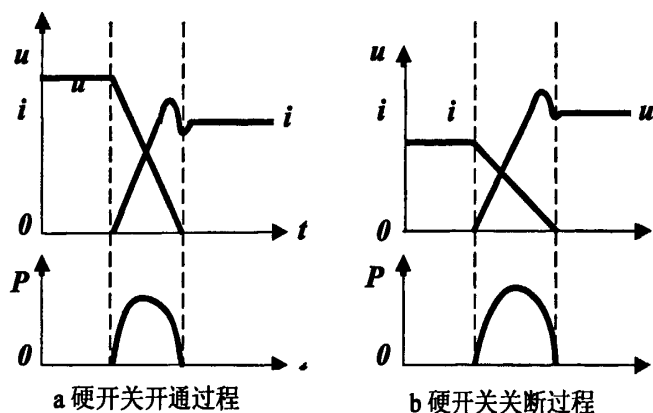


图 3-9 硬开关的开关过程

这种开关一般称为硬开关，由图可以看出开关在开关过程中电压和电流出现了重叠，从而导致了开关损耗。而且电压和电流的快速变化会产生明显的过冲现象，导致了开关噪声。这种开关噪声会随着频率的提高会越来越明显，从而降低电路效率，阻碍开关频率的提高，同时会带来严重的电磁干扰，影响周边器件的工作环境。

为了改变硬开关的不足，提出了软开关，即在电路中加上很小的电感和电容等谐振元件，组成辅助换流网络，引入谐振环节。如图 3-10 所示使开关在开通或者关断之前先让电压或者电流变为零，这样就可以消除电压和电流的同时重叠，从而大大减小了开关损耗，同时可以减小电压或者电流的过冲现象，从而大大减小了开关噪声的产生，极大的消除了电磁干扰等现象。

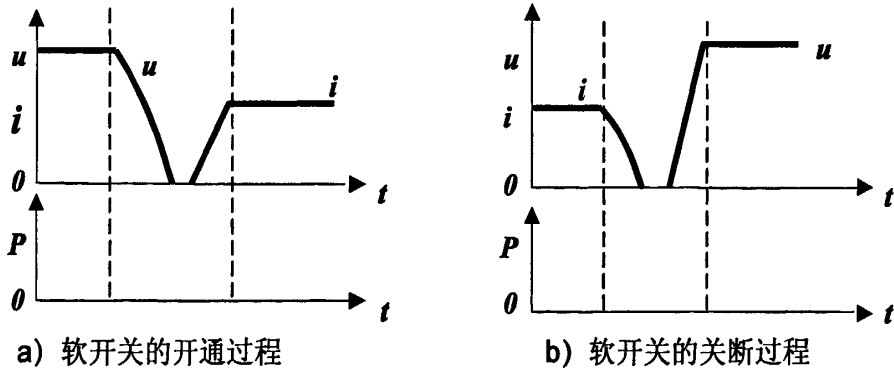


图 3-10 软开关的开关过程

随着软开关技术的不断发展以及新型开关电源技术的应用，软开关的设计技术也在不断的发展。由于各自的特点和应用的场合有必要进行分类了解，一般软开关电路安装发展的历程可以分为准谐振电路、零开关 PWM 电路和零转换

PWM 电路。

(1) 准谐振电路

通过引入谐振环节降低开关损耗和开关噪声，由于电路中的电流和电压均为正弦波，这就使得在谐振时刻电压的峰值比较大，要求开关管的耐压值也必须较大。同时在谐振时刻，电流值也很大，导致大量的无功功率的交换，使开关的导通损耗也比较大。由于谐振周期的不稳定，这种方式只能适用于脉冲频率调制方式来控制，不利于高频开关的设计。

(2) 零开关 PWM 电路

通过引入辅助开关管来控制谐振开始的时刻，使谐振时刻发生在开关过程的前后。这种方式与准谐振相比由于电压和电流基本上是方波，所以上升沿和下降沿比较小，产生的开关噪声也少，同时开关所承受的电压可以大大的降低。这种电路比较适合于固定频率的 PWM 控制方式，零开关 PWM 电路按着电压电流一般可分为零电压开关 PWM 电路(ZVS PWM)和零电流开关 PWM 电路(ZCS PWM)两种^[36]。

(3) 零转换 PWM 电路

这种电路与零开关电路一样也是引入辅助开关来控制谐振开始的时刻，只是把谐振电路与主开关并联起来，这样输入电压和负载电流对电路的谐振影响非常小，电路能在很宽的范围内工作在软开关方式。同时也可以大大减少无功功率的交换，提高了电路的转换效率。这种方式同样也有零电压转换 PWM 电路(ZVT PWM)和零电流转换 PWM 电路^[37-38](ZCT PWM)。

在电池充放电电路中，最重要的一个过程便是通过功率开关管的高频关断来实现充放电的控制过程，引入软开关技术将会极大的减小开关损耗，提高电能转换效率。同时软开关的引入使电路的开关噪声明显降低，对周围环境的电磁干扰也降低了很多。

3.8 充放电方式和控制方法的选择

传统蓄电池的充电方法，比如恒压、恒流、恒压限流充电方法等基本上充电电流低于电池的可接受充电电流曲线，效率低而其充电时间长。由于没有考虑到电池温度、内阻等影响，极化现象严重，对电池会造成很大的伤害，缩短电池寿命。针对这些充电方法的效率低，耗时长，安全性能低的缺点，提出了

一些新的快速充电方法。分阶段恒流充电法由于控制简单得到了广泛的应用，典型的有三段式充电法，其基本原理是使充电曲线接近电流的可接受电流曲线。但是该方法在恒流充电后期会产生电池析气，这些引起析气的能量会使电池温度升高，引起寿命下降，充电效率降低。而脉冲充电法可以很好的减少蓄电池析出的气体，有利的消除极化现象带来的能量浪费。脉冲充电法还可以去硫化充电速率快，对电池还有修复作用，延长电池寿命。同时这种方法充电快速，一般 4 到 5 个小时就可以充完，极大的提高了工作效率。脉冲充电的缺点是因为其出气率高，活性物质易脱落，在一定的程度上会影响电池寿命，所以单单采用脉冲充电的方法并不能得到很好的利用。

本文针对这两种方法各自的优缺点，为了提高电能的利用率和充电快速有效性，提出了脉冲充电和三级充电相结合的充电方式。即在充电初期采用小电流对电池进行预充电，充电中期采用大电流进行脉冲快速充电，充电后期又采用小电流进行涓流浮充电。这两者充电方法相互结合，使电池的充电电流最大范围内接近蓄电池可接受充电曲线，既提高电池寿命又可以达到快速充电的目的，安全高效。

充放电控制技术也极为关键，目前常用的是最高电压控制法，即根据电池两端最高电压来判断充电状态。由于最高电压会受温度的影响而发生变化，这种方法不能得到很好的利用。而电压负载量法是根据电压的变化量来判断电池充电状态，这样与温度绝对无关，可以对电池数不同的电池组充电。该方法是比较先进的控制方式，操作也方便。电池的放电方式要求不高，一般采用恒流放电的工作方式，采用时间控制和最低电压相结合的控制方式来判定放电是否完毕。

3.9 本章小结

先针对当前蓄电池充放电系统和回馈电网型系统进行分析，提出节能充放电系统的设计方案和具体各部分模块的节能原理和实现技术。对于双向 DC/DC 转换电路的构建和具体理论基础进行详细的介绍。其中在系统设计过程中，软开关技术和 PWM 技术的应用极大提高了开关效率，达到节能效果，对这两种技术的原理和常用方式分别做了详细的介绍。最后提出了本课题具体采用的充放电方式和控制策略。

第 4 章 系统硬件设计

本章在提出充放电控制系统的基础上，构造系统的硬件框架，首先设计三相整流电路，然后设计出基于 PWM 技术双向 DC/DC 充放电电路。多组电池组并联充放电，以下为其中一组电池的充放电电路设计。在电路基础上根据充放电系统控制参数，对主要元器件进行选型，完成硬件电路的设计。

4.1 系统硬件框架

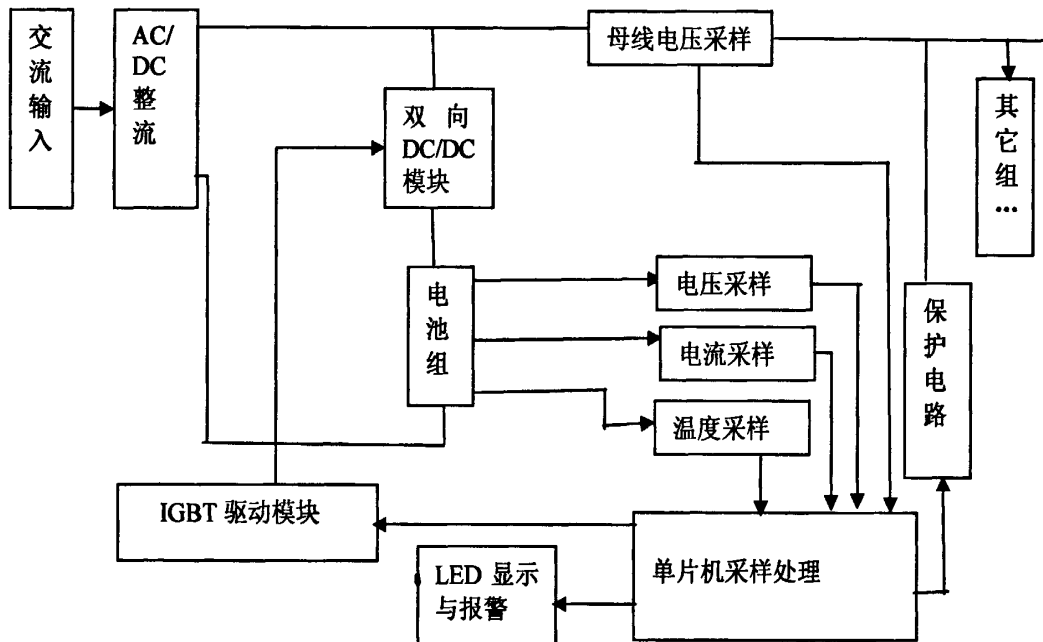


图 4-1 系统硬件框架

为了便于设计充放电控制系统的硬件以及器件选型，有必要确定一些充放电控制系统的基本参数以及控制对象。

1) 铅酸蓄电池采用台州某企业电动车铅酸蓄电池（6-DZM-10）额定电压 12V，额定容量为 10Ah。采用 10 节串联成电池组充放电，10 节串联相当于 120V，100Ah 电池，每组电池经过充三次放两次检验合格之后方可出厂，一共采取 12 路电池组组成一个内部“局域网”。

2) 铅酸蓄电池充电一般要求大于 0.1C，小于 0.25C，这里选择充电最大电流

为 20A, 放电 20A 恒流放电。直流母线电压最大超调量应小于 20%, 电池组最大充电电压为 $13.2\text{V} \times 10 = 132\text{V}$, 最低放电电压为 $10.8 \times 10 = 108\text{V}$ 。

3) 输入交流电压 380 通过工频变压器降压到 80V, 50HZ。三相 AC/DC 整流器输出电压为 200V 左右, 整流器和双线 DC/DC 电路选择 PWM 方式控制, 功率开关管选择 IGBT。它集中了 MOSFET 和 GTR 的优点, 具有输入阻抗高、速度快, 通态压降低, 稳定性好和耗能少等特点, 同时适合高电压和大电流方向。

4.2 系统主电路设计

供电电压经过三相不可控整流电路之后, 获得一定的直流电压给每组电池组供电, 采用双向升降压电路控制电池组上的电流和电压, 该部分电路是完成充放电过程能量双向流动的关键部分。对于电池组电压、电流和温度采样送入单片机当中, 根据这些采样信号计算出控制快速脉冲充电, 电路工作交替工作在升压和降压之间, 同时为了有效减少高频开关损耗, 加入软开关电路。系统主电路部分如图 4-2 所示。

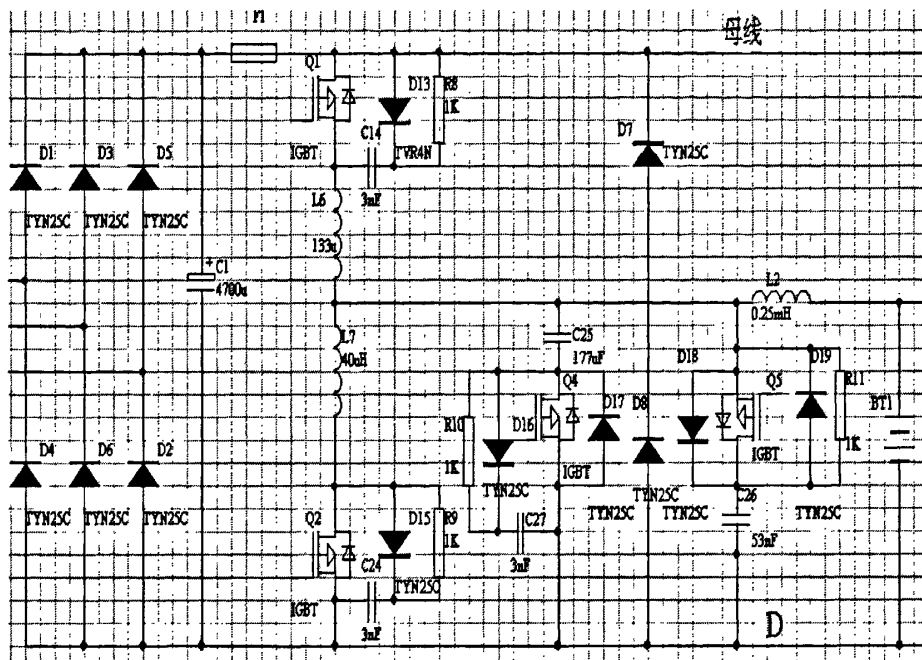


图 4-2 系统主电路

充电第一阶段采用小电流（小于 5A 电流）涓流充电，使其充电到可用脉冲大电流充电的安全范围之内，通过检查该阶段电池组两端电压来确定是否转入下一阶段。第二阶段进行大电流脉冲快速充电，在脉冲充电前停歇一段时间，这样充电电流消失，可以消除欧姆极化现象，浓度差会因扩散而渐渐消失。然后反向放电，在反方向产生一个较大的放电电流，可以及时消除板极中形成的气体，使浓度差进一步的消失，更好的消除极化。同时放出的电流能量通过母线可以给其他组电池继续充电，实现在电池充电过程中，反向放电可以得到再次利用。可见脉冲充电的加入不仅消除极化，达到快速充电的目的，而且效率也极高。为了使充电曲线能更好的接近蓄电池特性中可接受电流曲线，在脉冲充电阶段，同样将充电电流分为三级，每级加入正反脉充电流大小一致，脉冲宽度不同的脉冲，各级逐渐减小。随着充电的不断进行，充电量的大小直接反应在电池两端电压上，根据端电压的大小来确定充电是否进入下一个阶段。第三阶段进入浮充电阶段，此时电池电量基本充满，主要是用来补充电池自身放电所消耗的能量。此时电流非常小，最后根据浮充电压的值来确定充电过程的结束与否。

放电过程则通过检测电池组上电流，通过开关的开关来控制恒流放电，放出电能输入母线上给其他组电池组继续充电。当检测到电池两端电压达到放电

结束标准就可停止放电。充放电过程实际上是电路在 Buck 和 Boost 之间来回执行，因此主电路器件的选择按照电流连续模式下的升降压电路来设计。

(1) 开关管 IGBT 的选择

开关频率越高可以减小电路中电感和其它一些装置的体积，控制的电流或者电压波形波动小。然而频率过高，会导致开关管和驱动电路的驱动损耗加大。由于加入了软开关技术，可以很好的减少高频开关损耗，所以频率可以适当选取高一点，本电路中选取 40KHZ。母线输出电压在 200V 左右，最大电流为 20A 左右，一般开关管耐压值和最大电流按照 2.5 倍的裕量来选。故选择耐压值 500V，电流 50A 的 IGBT 便可满足要求

(2) 滤波电感的设计

滤波电感起着存储电能，平缓电流的作用，在电路中起着很重要的作用。为了使电路瞬态响应快，假设纹波电流峰峰值为电路中电流的 20%，即 $\Delta I = 4A$ 。同时母线电压有 20% 的波动有 $U_{\max} = 240V$ ，根据电路方程式可以推出电感 L 的计算值：

$$L = \frac{(1 - \frac{U_{in}}{U_{\max}}) \times U_{in}}{f \cdot \Delta I} = \frac{(1 - 0.833) \cdot 240}{40 \cdot 4} = 0.25mH \quad (4-3)$$

4.3 信号采集电路设计

控制芯片采取 AVR 单片机^[39-40] ATMEGA48 系列芯片，将检测到的电量信号通过 A/D 接口送到单片机，然后通过控制算法控制 PWM 输出从而驱动 IGBT 来调节输出电压和电流的大小。

ATMEL 公司的 AVR 单片机采用 RISC 结构，内部集成有模拟比较器，保密性好，与 DSP，ARM 类芯片相比最大的一个优势价格低廉。ATMEGA48 系列单片机具有 6 路 PWM 接口，23 路通用 I/O 口、6 路 10 位精度的逐次逼近型 A/D 转换器、精度高、功耗低、处理速度快，这些性能完全满足系统设计所需要的特性^[41]。

4.3.1 直流母线电压检测电路

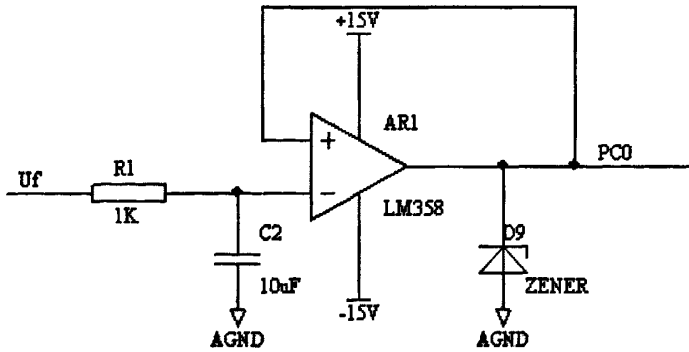


图 4-3 直流母线电压检测电路

此处母线电压要求采样的频率和精度不是很高，综合成本因素采用直流电压互感器，额定电压 500V，额定输出 5V。如图电路 4-3 所示，采集电压经过电压互感器输出对应的值经过一阶滤波和电压跟随器的抗干扰措施送入单片机 A/D 接口，输出端加了一个稳压管，防止输出电压超出 A/D 接口所能承受的最大电压。其中跟随器采用 LM358，互感器采用型号为 JLBV500FA 型。

4.3.2 电池组电压检测电路

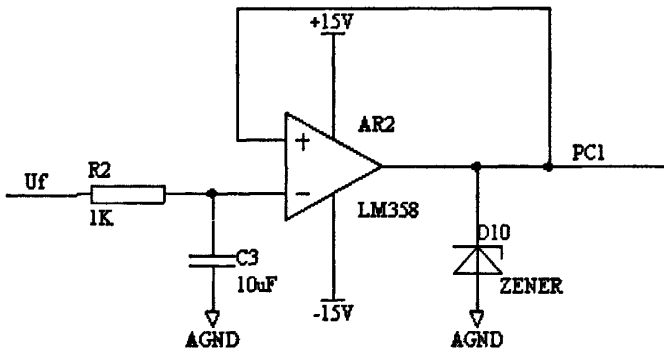


图 4-5 电池组电压检测电路

电池组电压是很重要的一个检测量，与直流母线电压采样电路一样。采用电压互感器，型号为 JLBV300FA，送至单片机 PC1 接口，将模拟电压信号转换为数字信号，用于算法的控制。

4.3.3 电流检测电路

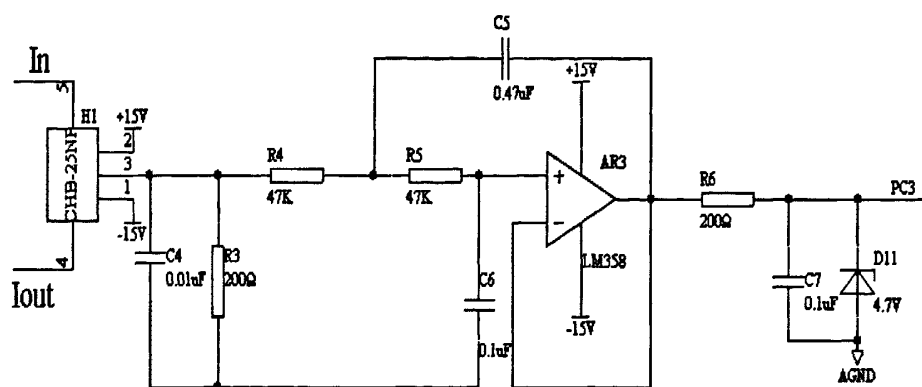


图 4-6 电流检测电路

系统充放电主要是通过恒流来实现，电流是系统控制最重要的对象，所以对电流的采样要求精度高，频率快。采用霍尔电流传感器来检测，选 CHB-25NP 型号。霍尔传感器^[42]利用霍尔效应，测量电路和输出电路完全绝缘，脉动电流频率范围可达 100KHZ，应用范围广。如图 4-6 所示，为了保证准确度和高的抗干扰能力，采取二阶滤波电路，其中 R_3 为采样电阻，将采样到的电流转换为电压经过二阶滤波和电压跟随之后送入单片机。

4.3.4 温度采样电路

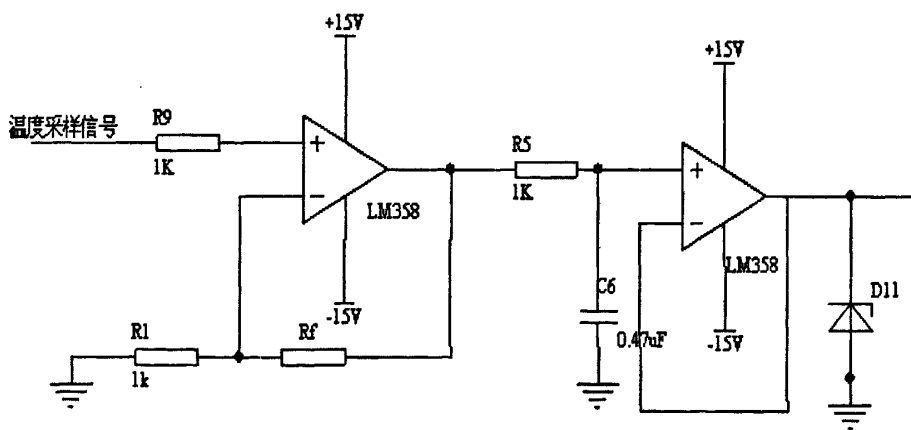


图 4-7 温度采样电路

温度采集选用 LM35 系列集成温度传感器，以摄氏温度为标准，这种温度传感器的测量精度可达 0.5 度、非线性误差为 ± 0.5 度、测量精度高、输出电阻低等特点，完全能满足系统要求。如图 4-7 所示，由于 ATMEGA48 单片机的 A/D

模块最高输入电压为 5V，而温度传感器最高输出电压为 0.6V，所以为了使输出电压能达到合适的范围，提高精度，在电路中采取比例放大器。其输出电压转换公式为：

$$V_{out} = (\frac{R_f}{R_i} + 1)V_{in} \tag{4-4}$$

经过二阶整流滤波和限压电路后得到合适的平稳直流电压送入单片机的 A/D 模块，转换为数字信号。

4.3.5 IGBT 驱动电路

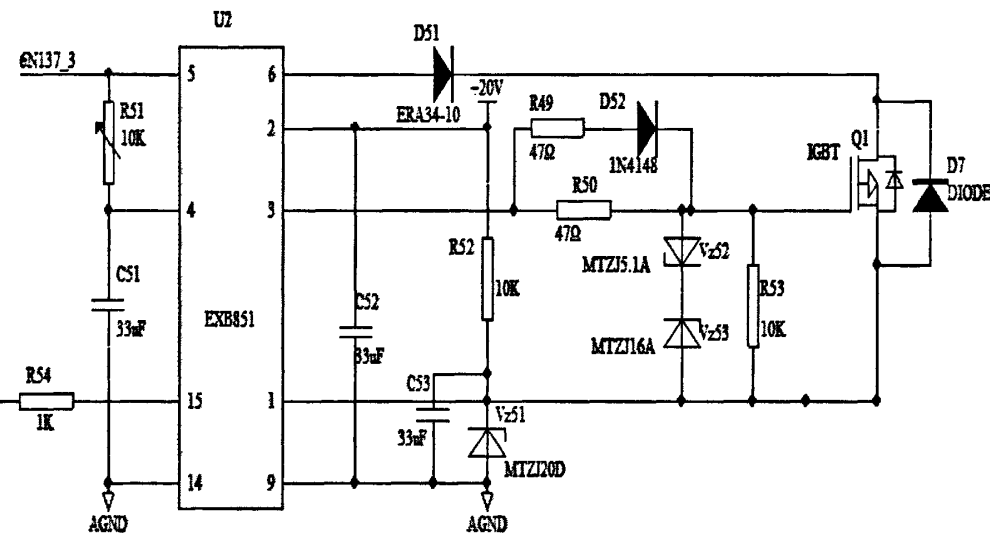


图 4-8 IGBT 驱动电路

本课题驱动芯片选用富士混合 IC 驱动器 EXB851 系列，其开关频率可达 40KHZ，内部包含有光电隔离器件和过流保护电路，驱动电路如图 4-8 所示。

4.4 本章小结

提出了系统硬件框架，然后进行系统整流电路和充放电电路的设计。分析了三段快速快速充放电工作原理，计算出主电路电感和功率开关管 IGBT 的大小并选型。最后分别设计了蓄电池电压、电流、温度和母线直流电压采集检测电路，实现对充电过程的控制和状态的详细了解。

第 5 章 系统软件设计

5.1 系统控制算法的选择

PID(比例-积分-微分)控制器由于结构简单易懂,鲁棒性强等特点,在工业控制中,一直得到广泛的应用。

5.1.1 常规 PID 控制

常规 PID 控制器原理是根据给定值与实际输出值构成控制偏差来进行控制,通过把偏差的比例 P、积分 I 和微分 D 组合成线性关系进行控制。

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (5-1)$$

其中 k 为采样序号,取值范围: 0、1、2、3等; $u(k)$ 为第 k 次采样时的输出值; $e(k)$ 为第 k 次采样时控制器输入的偏差值; $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样输入的值;

k_p 为比例系数,即将输入偏差成比例关系,控制快速,系统响应快。如果比例系数过大,则会容易引起系统振荡,加长调节时间,过小则调节响应慢,达不到预期的理想。在保证系统稳定的前提下,选择适当的比例参数,则会有利于减小系统误差,提高精度和灵敏度。

k_i 为积分系数,即将输出与输入误差的积分构成比例关系,积分部分主要是针对系统的稳态误差,随着这些误差的累积会逐渐变大,引入积分项可以减小这些误差。同样积分系数过大会导致振荡加多而使系统不稳定,太小则不能有效的消除稳态误差,选择合适的积分参数可以及时的消除稳态误差,获得高的控制精度。

k_d 为微分系数,此时控制器输出与输入误差的微分成比例关系,主要是针对大惯性组件比例过程中存在的一些振荡失稳现象,提前预测误差变化趋势,使控制器能够提前抑制误差的控制作用等于零,这样避免了严重超调。该系数过大过小都会使超调量变大,加长调节时间,选择合适的参数可以有效的提高系统动态性能和控制精度,主要是针对大惯性或滞后环节具有很好的效果。

如上式中 5-1 中是全量输出的，每次计算都要与过去的状态进行累加，而且会因为异常情况下控制器出现故障，就会产生很大的变化，导致控制不准确。由此改进了增量式 PID，其关系式为：

$$\Delta u(k) = k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (5-2)$$

其中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, $\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$ 。

5.1.2 智能控制算法

随着工业化的不断发展，控制系统越来越复杂，同时需要控制的对象控制的不确定性也变大，需要控制的精度要求也越来越高，导致常规 PID 控制难以很好的满足需求。而本课题中的铅酸蓄电池充放电过程中，电池两端的电压和充放电过程当中的电池内阻都是不断变化的，使得控制的对象难以确定。为了能够取得良好的控制效果，本课题提出智能控制的变参数 PI 控制法，这种控制方法是根据智能控制思想，在常规 PID 控制的基础之上，针对充放电各个阶段的特性改变控制的各项参数提出不同侧重点控制策略。这种变参数分区域控制 PI 算法控制^[43]效果显著同时又易于实现，非常适合本课题充放电系统中的控制方案。采用四个阶段分区变参数来控制，其具体控制原理和算法如下：

令 $e(k)$ 表示采样到离散的误差值， $e(k-1)$ 表示前一个采样时刻的误差值， $e(k-2)$ 表示前两个采样时刻的误差值有：

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1), \quad \Delta e(k) = \Delta e(k-1) - e(k-2) \quad (5-3)$$

1) 第一阶段中 $|e(k)| > \theta_1$ （误差很大的一个下限值），当误差到达这个阶段，说明误差很大，需要迅速的调整误差大小。不管此时误差的变化趋势如何应当是优先考虑控制器的输出，该阶段采用比例控制使比例控制参数较大，其它的积分控制参数为零，相当于一个开环控制。

2) 第二阶段， $\theta_2 \leq |e(k)| \leq \theta_1$ （ θ_2 为误差较大的一个下限值），当误差值在这个范围之内时，表明误差也较大，但不是很大。此时需要实施较强的控制作用，使系统能够在短时间内迅速达到稳定环节，根据本系统特性把比例、积分参数设置在一个合适的数值之内，可以起到很好的调节作用。

3) 第三阶段， $\theta_3 \leq |e(k)| \leq \theta_2$ （ θ_3 为系统即将进入稳态时的下限值），当误

差值在该范围之内时,表明系统已经进入稳定状态的过程中,但不是最终的稳定状态。该过程减小比例和积分参数的大小,对系统进行小量调整,使系统向最终的稳定状态方向发展。

4) 第四阶段, $\theta_3 \leq |e(k)|$, 当误差值在该范围内时,表明系统已经进入稳定状态,此时系统各项指标是较为理想状态,该阶段进一步减小比例积分系数的值到很小阶段。该阶段只是进行微量调整阶段,进行很弱的调节,使系统能够很好的达到稳定的状态。

采用本控制算法,与常规的控制算法对铅酸蓄电池进行恒流充放电效果较为明显。这种分阶段变参数的 PI 控制法超调量更小,动态响应速度也快,精度高,具有良好的应用特性。

5.2 软件设计

硬件完成之后,良好的算法和控制策略是非常重要的,同时要有很好的软件系统。本课题中,如图 5-1 所示,上位机通过串行接口控制各路下位机的工作,同时各路下位机完成各自模块中的充放电过程。所以系统软件设计主要包括上位机显示界面和下位机控制软件两个大部分。下位机软件设计是基于 AVR 单片机的软件系统,包括下位机软件主体程序、软件滤波子程序和判断是否充满子程序。而由众多下位机控制的电池组的信息,以及各项参数都是由上位机进行显示,上位机方面主要是完成 PC 上的界面显示程序,通过 VC 来完成。

5.2.1 PC 人机界面的设计

人机界面的设计可以很好的帮助人们进行快捷方便的控制,同时操作易懂。本课题中,上位机需要同时控制好 12 路下位机的充放电过程,同时及时反馈下位机传送过来的信息并显示下位机工作状态。VC++^[44-45]是 Windows 平台下构建 32 位应用程序的用得对多的开发工具之一,在此平台下进行人机界面的开发非常方便。

在本课题中,人机界面主要完成各路下位机的控制按钮,以及各路下位机充放电状态显示按钮和系统初始值设置。同时与下位机进行串行通信,实时监控各路下位机工作状态。为了能够很好的利用能量,对多路充放电进行有效的安排,尽力确保放出的电能大致在同一时间内被其它组充电电池消耗掉。采用

这种上位机统一控制多路下位机的方式，使设备更加的智能化，高效性。

5.2.2 下位机软件设计

该部分是控制的关键部分，蓄电池充放电控制精度和效果都有该部分控制来实现。根据本课题中充放电控制方法和控制的要求，要达到高效而又快速的充电，同时能够有效的保护蓄电池，必须有一个很好的控制程序。在每一路下位机控制充放电系统中，根据采集到的电流、电压和温度信号，在经过系统软件进行分区 PI 算法之后产生 PWM 控制信号驱动 IGBT 进行关和断。由于采用的三阶段定脉冲放电的控制策略，必须保证不同阶段能够实现各个阶段的自动转换，能够实时显示各部分充放电状态和充放电电流的大小，同时具有报警保护的功能。

(1) 下位机主体软件设计

下位机控制主体软件主要是完成以下过程：首先是实时采集铅酸蓄电池温度、端电压和充放电电流的大小等状态信息，然后送入到单片机控制单元进行算法和控制措施的确定，及时驱动功率开关管，从而控制输出电流，电压以及充放电状态的转换，完成蓄电池高效，快速无损的智能充放电。

系统充放电主体程序流程图如图 5-2 所示，先进行系统初始化，然后对母线电压进行检查，判断是否超出最大电压，否则开启母线电压保护电路，使多出的电能放到储备蓄电池中存储。然后连续检查电池组两端的电压，判断电池组是否充满；如果没充满，则检测电池温度，如果温度不在正常范围内，则报警显示，否则就开始第一阶段的涓流充电阶段并显示此时充电状态，并不断检测电压判断电压值是否超过第一阶段的临界电压值。然后在满足第二阶段电压值，就转入第二阶段进行快速脉冲充电状态并显示出来，同时不断检测电池组两端电压的变化值以便进入第三阶段的浮冲状态。浮充过程中，用小电流进行充电，当电池充满后显示充满状态，同时显示是否已完成电池的检测，从而决定换下一组电池组。

以上是电池充电过程，当电池检测到充满时，同时判断是否已经完成检测，如果没有完成则进行放电。放电过程主要是恒流放电，直接检测两端电压来判断是否放完，过程比较简单。初始化，然后检测电池组两端电压判断电池是否放完，如果放完则 LED 显示放完并标明是第几轮放电状态。如果没放完则持续

检测电池组两端的电压，随着恒流放电的进行，直到放完电为止。在整个过程中，通过显示灯可以对充放电过程有着详细的了解。

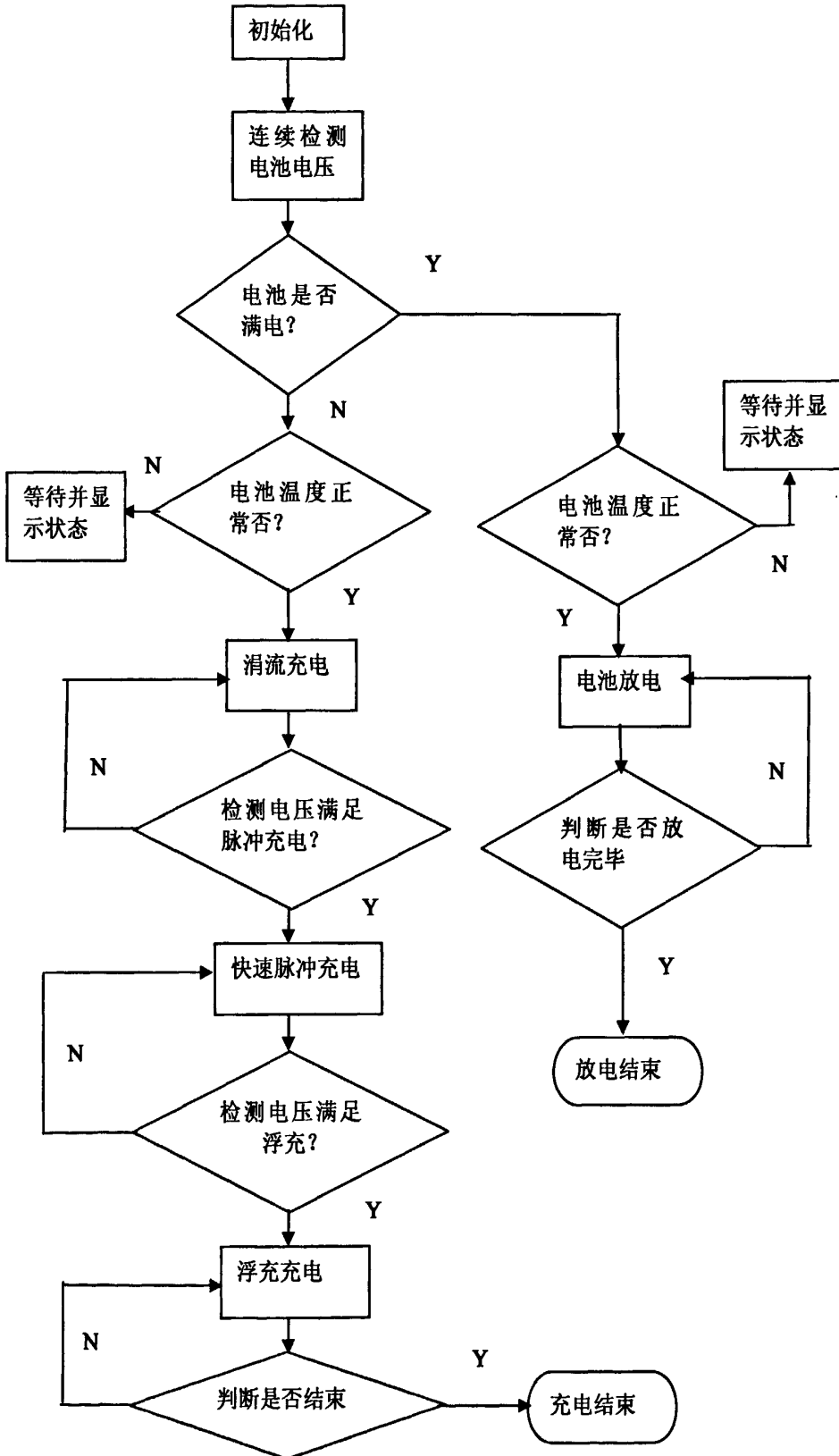


图 5-1 系统主程序流程图

(2) 软件滤波子程序

为了能够消除系统干扰，在硬件当中加入了一阶和二阶抗干扰网络，实现对信号的滤波。同时，通过软件也可以实现模拟滤波的功能，这种不需要增加硬件，只需在软件程序上进行相应的处理。在蓄电池系统中电流、电压和温度的检测过程中，由于辅助电压和外在环境的干扰会影响采样的准确性。只是采用简单的一阶或者二阶硬件滤波措施，并不能达到非常好的效果，同时为了尽量减轻设备的自身重量，减少额外的开支，不适宜额外的增加硬件滤波设备。所以采用适当的软件滤波方式进行滤波可以有效减少干扰，增强系统抗干扰能力。

常见的软件滤波方式^[46]有算术平均法、比较法、中值滤波法和防脉冲干扰平均值法等等。针对本系统，对于电池组电压两端电压和充放电电流以及电池组温度的采样则采用特定的滤波程序进行处理，因为它们在每个周期中的变化量并不高，同时要求控制的精度和准确度比较高。而对于母线电压的检查则采取平均值滤波法，因为母线电压要求的波动范围比较大，有一个比较大的误差范围可以波动。

(3) 判断充放电是否完成子程序

判断电池组是否充放电完成分别采用了各自特定的控制策略，主要是根据电池组两端的温度和电池组两端电压的最大变化量来进行判断是否充电完成。采用这种综合方式的判断可以保证及时在系统发生异常的情况下也可以及时的切断电源，达到保护铅酸蓄电池的目的。

电池放电是否放完主要是根据时间和端电压来判断，主要依据电池组端电压，如果端电压达到放电完成的标志就表明放电结束。同时如果充电时间达到一定的时间量，则也判断电池放电结束，二者配合完成放电结束的标志。

5.3 本章小结

本章主要包括两大部分：系统控制算法和软件系统。针对系统充放电控制策略提出 PID 控制算法，为了操作方便，控制简单，结合本系统充放电系统提出智能分阶段 PI 控制算法，对系统所要控制的量进行 4 个阶段进行 PI 调节，在控制器上实现对电流的有效控制。第二部分主要是完成系统软件的设计，包括上位机人界界面和下位机控制程序的设计，并提出充放电系统主流程图。

第 6 章 系统特性仿真

对控制系统进行仿真，首先应当建立系统模型，然后根据模型编制仿真程序，利用计算机对数据求解并将结果加以显示，通常在仿真模型中，十分耗费时间与精力。而 MATLAB 的出现为系统仿真提供了强有力的支持，是一个非常先进而且使用便利的优秀仿真软件。目前，在动态建模和仿真等方面，与传统的用微分方程和差分方程的仿真软件包相比，MATLAB^[47-49]具有更直观、方便、灵活等优点。同时 SIMULINK 的仿真精度高，得出的结果可信。MATLAB 以其模块化的技术方法、可视化与智能化的人机交互功能、丰富快捷的工具包成为最受控制系统设计和仿真领域的软件系统。

通过前面基本电路的硬件设计和控制策略，需要对系统特性进行仿真，以了解系统各项性能是否满足设计要求。本章采用 Matlab 软件主要针对整流部分和其中一路充放电电路充放电过程进行仿真和特性测试。

6.1 三相不可控整流部分特性仿真

通过对整流电路功能测试，可以判断其拓扑结构和控制方式是否能够满足所需电压的要求。其仿真模型块如图 6-1 所示，

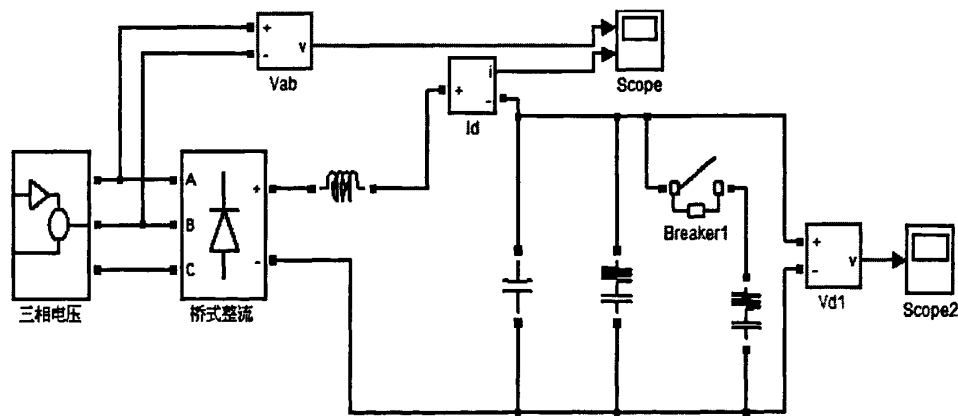


图 6-1 三相整流仿真平台控制模型图

整流器仿真主要测试空载运行输出电压和负载以及负载变化时输出电压。空载输出电压波形如图 6-1 所示，空载时对大电容进行充电，电压稳定时间为 0.004S，达到 188V 左右，满足三相不可控整流输出电压在范围，同时纹波非常

小。图 6-2 为负载发生变化时输出电压波形，在 0.4S 时负载发生变化，电压下降不到 1V，满足系统母线电压 20%波动量的要求。

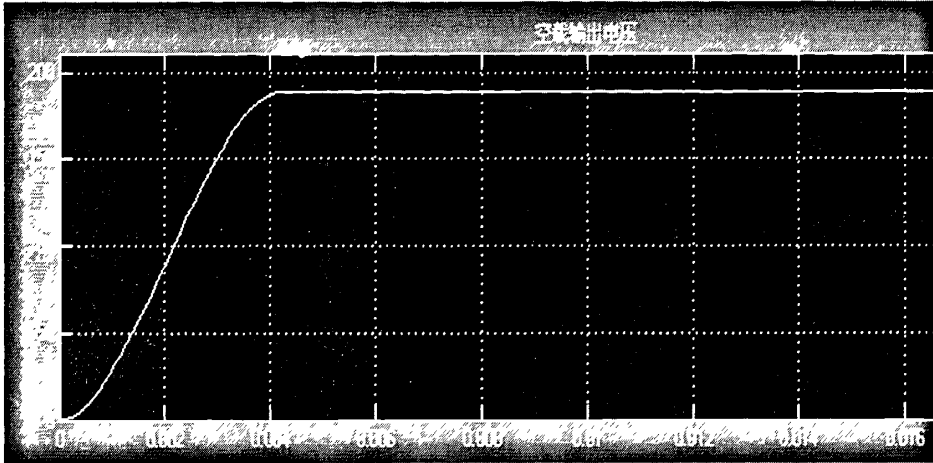


图 6-2 空载输出电压波形

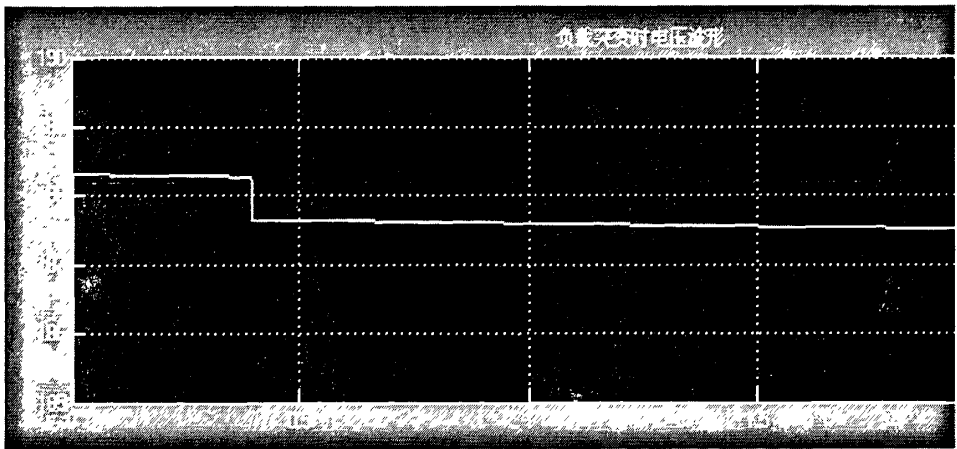


图 6-3 负载突变时电压波形

6.2 主电路充放电过程仿真

6.2.1 蓄电池模型

为了能够对充放电系统进行仿真，需要建立一个合适的蓄电池的模型，铅酸蓄电池内部进行的是一个电化学反应非常复杂的过程。需要在了解电池在不同工作状态下电池特性的变化趋势，才能将这种化学过程用一个数学模型表示出来。通过前面对铅酸蓄电池化学反应过程的转化过程可知化学反应的速率是

很多因素决定的，包括充电状态、电池容量、充放电速率、环境温度等。早期一般把电池模型描述为一个电动势和内阻串联的结构。事实上由于电池特性是非线性的，其内部电动势和阻抗等 SOC 和温度都有很大的关联。考虑到蓄电池电压过渡的过程，可以近似用一系列函数曲线来表示电池模型。其数学表达式为：

$$V(t) = E + R_i I \tag{6-1}$$

$$V(t) = E + R_1 I \bullet e^{\frac{t}{\tau_1}} + \dots + R_n I \bullet e^{\frac{t}{\tau_n}} \tag{6-2}$$

其中 $\tau_i = R_i \bullet C_i$ ， $R_i = R_0 + \sum_{i=0}^n R_i$ 。

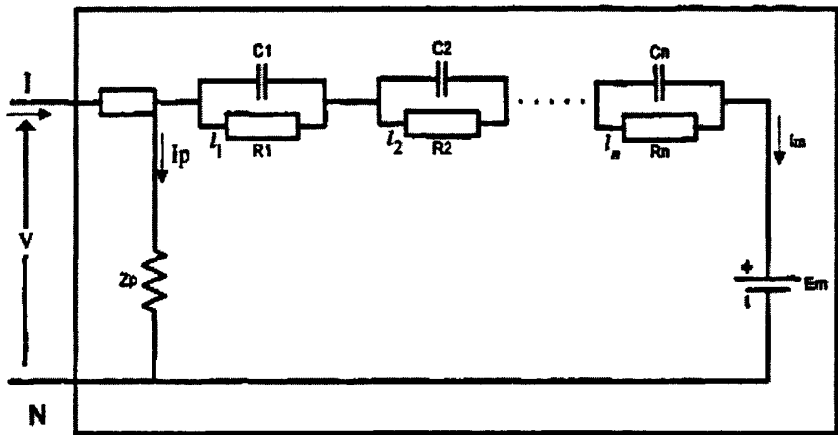


图 6-4 蓄电池电气等效电路

图 6-4 描述等效电气网络和蓄电池具有相同的电流阶跃响应过渡过程，可以用来模拟电池外特性。图中 RC 模块越多，对电池模型的模拟越精确。为了简化过程，电池在一般特定的场合下，可以用一个或者两个 RC 网络来代替，就足以精确地描述电池状态。

本课题铅酸蓄电池模型采用一个等效 RC 网络替代，根据具体型号电池参数和提供的电池数据可知等效的串联电阻 R_s 、并联电阻 R_p ，等效电容 C_{bat} 值按着每 100AH 容量 2.5uF。当 10 节电池串联成电池组时候，其等效阻抗等效为：

$$Z_{bat} = 10[R_s + (R_p + \frac{1}{S \bullet C_{bat}})] \tag{6-3}$$

6.2.2 充放电过程仿真测试

对铅酸蓄电池的充放电，基本上通过 DC-DC 升降压电路的恒流过程来实现，脉冲充电方式先在一个充放电周期内先通过 Buck 电路恒流充电，停止一段时间，

然后通过 boost 电路恒流放电以消除极化。蓄电池的放电过程通过 Boost 电路进行恒流放电，所以通过对 Buck 和 Boost 电路进行恒流仿真测试就能确定是否能满足所要求。

设计采用 IGBT 开关频率为 40Khz, 电流控制原理如图 6-5 所示，采样输出电流与参考电流进行比较，经过误差信号补偿放大和 PWM 调制之后，驱动 IGBT 进行关断与导通，实现电流的恒定。

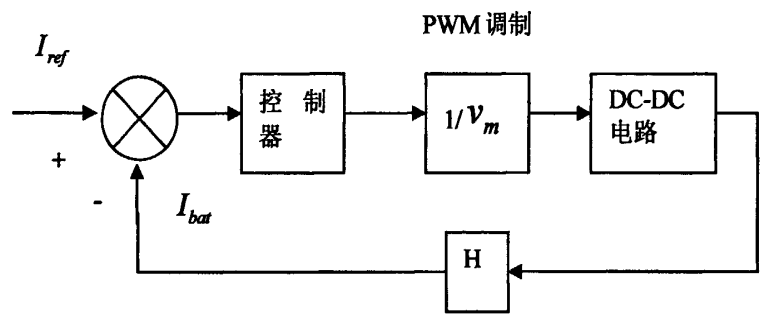


图 6-5 主电路控制原理框图

电池处于正向充电时，系统工作于 Buck 电路，通过调节 IGBT 开关管的关断进行恒流充电，此时仿真模型如图 6-6 所示：

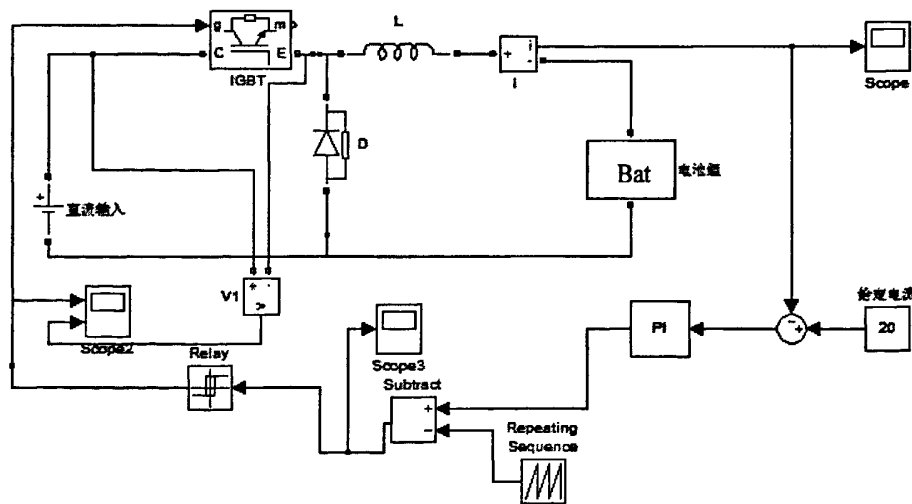


图 6-6 Buck 模式仿真模型

当电池反向放电时，系统工作在 Boost 电路中，此时既可以在电池脉冲快速充电过程中反向充电，也可以在电池组恒流放电中工作。此时仿真模型如图

6-7 所示。

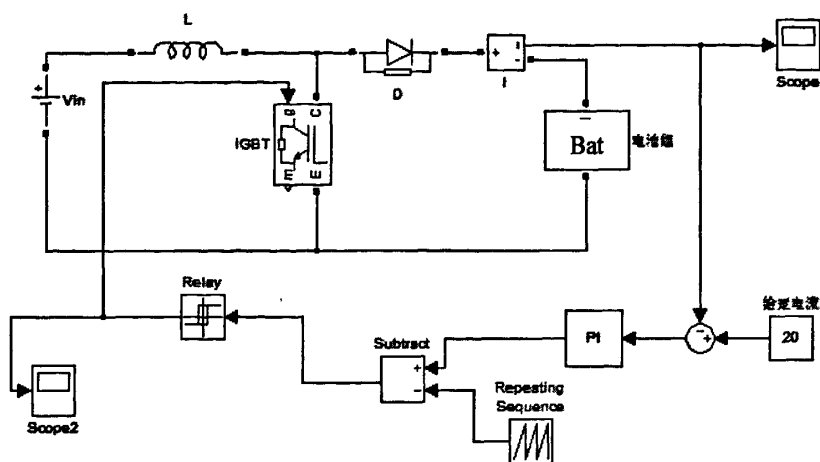


图 6-7 Boost 模式仿真模型

在充放电过程中，以充电电流 20A 进行仿真实验，其它反向恒流充电和恒流放电基本类似，只是充放电电流幅值不同。以 Buck 电路模式为例，采用定部长仿真，其中电流环 PI 参数采用分阶段 PI 控制策略，仿真波形：

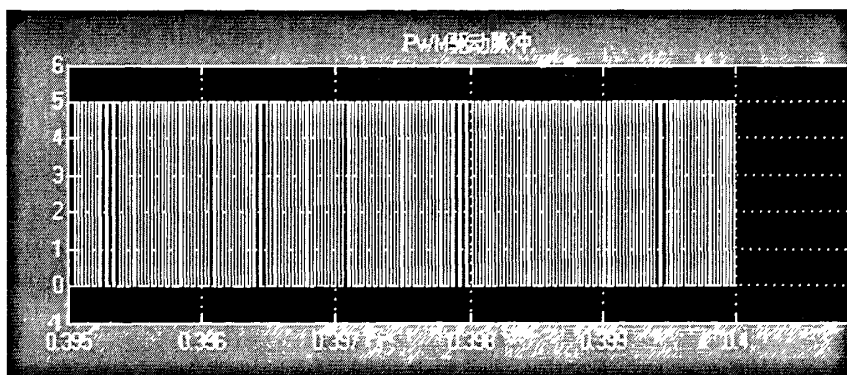


图 6-8 开关管 PWM 驱动脉冲

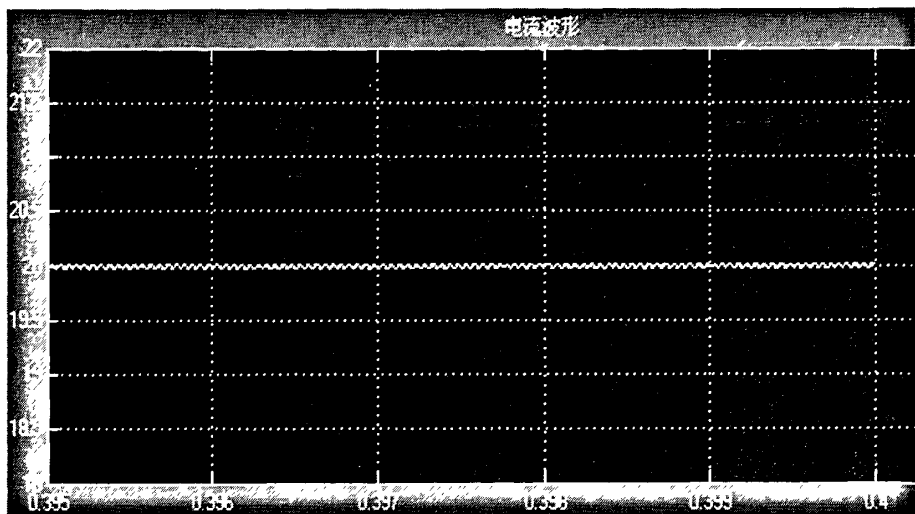
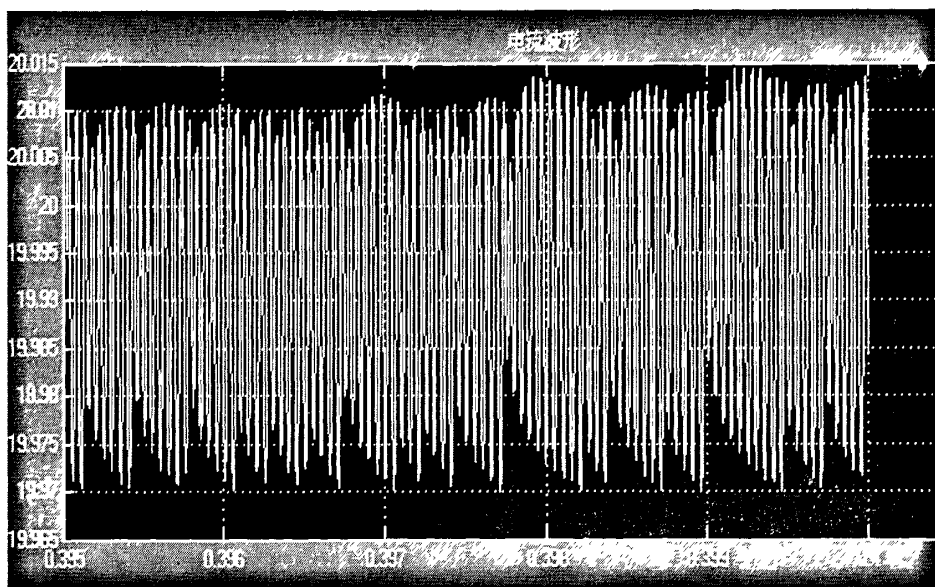


图 6-9 恒流充电波形



6-10 电流局部放大图

图 6-8 为 IGBT 开关管 PWM 驱动脉冲波形，通过与给定电流比较，经过 PI 控制与锯齿波时钟信号相比较，进而决定开关管器件的导通与截止。图 6-9 为经过调节之后的恒流波形，基本上在 20A 左右恒定。图 6-10 为电流的局部放大图，由图可知电流脉动最大不超过 0.05A，并工作在电流连续模式下，基本上实现了恒流充放电。

6.3 本章小结

先简介 matlab 仿真软件，然后通过 matlab 软件对整流部分和主电路 DC\DC 部分进行仿真。对整流部分和升降压电路分别设计了仿真模型，按照给定的恒定电流进行平台仿真，测试系统恒流充放电运行情况，验证了该充放电系统能满足课题提出的要求。

第 7 章 总结与展望

在中小型铅酸蓄电池工厂中, 电池出厂之前一般都需要经过三充两放的一个老化过程, 为了有效的利用放电过程中放出来的电能, 设计出节能型充放电控制系统, 主要完成以下工作:

(1) 在分析国内外充放电装置系统的基础之上, 以节能降耗为导向提出了合适的节能型充放电系统

(2) 在详细了解电池充放电方法和控制技术的基础之上, 提出了适合本系统的三段式分阶段脉冲充电法和控制技术。

(3) 根据提出的系统, 设计出以双向 DC-DC 电路为主电路, 以 AVR 单片机芯片为控制核心的可多路充放电的控制电路。

(4) 通过 PWM 方式控制 DC-DC 开关电源, 获得合适的充放电电流, 同时为了有效减少高频开关的损耗, 加入软开技术, 极大的节约能耗。

(5) 以智能 PID 控制思想为基础, 提出了适合本系统的变参数 PI 控制方式。通过上位机对多路电池组进行充放电的控制。通过充放电完成所需时间, 设置合适的充放电电池组比例, 更易最大化的实现放出电能的再次利用。

(6) 通过 matlab 对系统主电路和整流电路部分分别进行模型建立和仿真, 详细分析了系统运行的可行性、稳定性。

同时由于时间和水平的有限, 在课题进展过程中, 存在许多实际问题。提出的方案只是进行了方案和软硬件电路的设计。仿真特性测试表明能满足系统要求, 需要进一步的进行设备制作并进行试验。同时上位机的主界面需要进一步进行具体的设计与制作。

参考文献

- [1] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 充电器电路设计与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.5~68
- [2] 徐海明, 周艾兵. 阀控密封铅酸蓄电池[M].北京: 中国电力出版社, 2010. 3~78
- [3] 李俊. 蓄电池快速充电技术研究.: [D].成都: 西南交通大学, 2009
- [4] 王源. 电动车用动力铅酸蓄电池快速充电技术研究[D].北京: 中国农业大学.2000
- [5] 王鸿钰. 实用电源技术手册[M].上海: 上海科学技术出版社, 2002.43~68
- [6] 张乃国. 电源技术[M].北京: 中国电力出版社, 2003.7~18
- [7] 钱良国. 智能充电技术和智能充电机[J].铁道标准设计, 1999-1-1
- [8] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M].北京: 机械工业出版社, 2000.6~89
- [9] 陆名彰, 李中齐. 煤矿常用铅酸蓄电池及应用[M].北京: 煤矿工业出版社, 1993.56~72
- [10] T.Masami, S.hiroshi. Analysis for electrolytic oxidation and reduction of $PbSO_4/Pb$ electrode by electrochemical QCM technique[J]. Journal of Power Source, 2001.44~67
- [11] 李俄收, 吴文民. 铅酸蓄电池的充电方法与充电工艺[J].电源技术, 2004,28 (5): 3~6
- [12] 陈全世, 林拥军, 张东民. 电动汽车用铅酸蓄电池放电特性的研究[J].汽车技术, 2005 (8) :35~39
- [13] S.Alvin, A.Terrill. Dynamic characterization of small lead-acid cells[J]. Jouranl of Power Source.2001, 96(1):151~159
- [14] Bernardi.Dawn M.Study of charge kinetics in valve-regulates lead-acid cells[J]. Journal of the Electrochemical Society.2004,151(1):85~100
- [15] Ramm.Friderich, Niepraschk, Harald. Phenomena of recombination andolarization for VRLA batteries in gel technology[J]. Internatinal Telecommunications Energy Conference.1999:2~6
- [16] Wing-Chi So, Chi K. Tsc, Yim-Shu Lee. Development of a Fuzzy Logic Controler for DC/DC Converters. Design Simulation and Experimental Evaluation.IEEE Transactions on Power Electronics[J], Vol.11, No1, January 1996:24-31
- [17] 郭亮. 电动车用蓄电池充电技术的进展[J]. 电池, 2002,32 (4): 245~247
- [18] 王刚. 基于晶闸管的铅酸蓄电池充放电系统的研究[M].哈尔滨: 哈尔滨理工大学.2007
- [19] D.Pavlov. Development of Lead-acid Batteries in the First Decade of the New Millennium[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2001,25(1):2~9

- [20] M.Marcos,J.Dios, A.M.Cao. Fast Lead-acid Battery Charge Strategy[J]. Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition,2006,(1-3):610~613
- [21] 陈静谨,余宁梅. 阀控铅酸蓄电池分段恒流充电特性的研究[J].电源技术, 2004,28(1): 32~33
- [22] 王坚.慢速脉冲快速充电控制电池极化的研究[J].蓄电池, 2003,33(6): 366~368
- [23] 万仁俊. 节能型二次锂电池充放电系统的研究与开发[D].广州: 华南理工大学.2010
- [24] 李龙文.最新开关电源设计程序与步骤[M].北京: 中国电力出版社.2008.88~122
- [25] 吴磊涛,杨兆华,胥布工.DC-DC 开关变换器的无源控制方法[J]. 电工技术学报, 2004,19(4): 66~69
- [26] 沙占友,文环明. DC/DC 电源变换器的拓扑类型[J].电源技术应用.2006.9(6): 1~4
- [27] 曲学基,王增福,曲敬恺. 新编高频开关稳压电源[M]北京: 电子工业出版社, 2005.78~106
- [28] 周嘉农,曾小平.DC-DC 开关变换器的建模与分析的动态评估[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2000,28(8): 111~116
- [29] Middlebrook R.D, Cuk S.A General Unified Approach to Modeling switch Converters Power Stages[J].IEEE Power Electronics Specialists Conf Rec.1996:18~31
- [30] L.Palma, M.Harfman Todorovic et al. Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications[J].Annual IEEE Applied Pwer Electronics Conference and Exposition, APEC Mar 2006:1263~1269
- [31] Tetsuya Etoh, Tarek Ahmed et al.32V-300a-600khz Edge Resonant Soft Switching PWM DC-DC Converter with DC Rail Series Switch-Parallel Capacitor Snubber Assisted by High-frequency Transformer Parasitic Component[J].IEEE Power Electronics Conf Rec.2005:4~9
- [32] Ahmed R, Chouikh M F. Design and Analysis of Fuzzy Controllers for DC-DC Converters[J]. Proceedings IEEE International Symposium on Control, Communications and Signal Proceesing 2004,479~483
- [33] Forsyth A.J, Molloy S.V, Modeling and Control of DC-DC Converters[J]. Power Engineering Journal, 1998, 12(5):229~236
- [34] 马宪民,陈全世. 高频软开关技术再电动汽车中的应用现状与发展[J].电气传动, 2002 (1): 8~12
- [35] Satoshi Hamada, Mutsuo Nakaoka. A Novel Zero-Voltage and Zero-Voltage and Zero-Current Switching PWM DC-DC Converter With Reduced Conduction Losses[J].IEEE

Transactions on Power Electronics, 2002,17(3):413~419

[36] Wu T F, Chen Y K. Modeling PWM DC-DC Converters Out of Basic Converter Unit[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2001,12(4):870~881

[37] Enu-Soo Kin, Yoon-Ho Kim. A ZVZCS PWM FB DC-DC Converter using a Modified Energy-Recovery Snubber[J]. IEEE Transactions on industrial Electronics, 2002,49(5):1120~1126

[38] 孙铁成, 公茂忠, 唐迎春. 零电流准谐振开关电源的设计[J].电力电子技术.2000,(1): 34~36

[39] 于正林.AVR 单片机原理及应用[M].北京: 国防工业出版社.2009.4~56

[40] 刘海成.AVR 单片机原理及测控工程[M].北京: 北京航空航天大学.2008.122~132

[41] 王幸之, 王雷, 钟爱琴等. 单片机应用系统电磁干扰与抗干扰技术[M].北京: 北京航空航天大学出版社.2005.132~156

[42] 杨明, 狄卫国, 段淑凤. 霍尔电流传感器在不间断电源中的应用[J].现代电子技术, 2003,148(5): 98~99

[43] 陶永华, 伊怡新. 新型 PID 控制及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.56~65

[44] 孙鑫, 余安萍. VC++深入详解[M].北京: 电子工业出版社, 2007.23~125

[45] 贾振华. VC++程序设计项目实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.49~87

[46] 顾永红.综述单片机应用系统的抗干扰设计[M].技术机自动测量与控制, 2000,8 (8): 51~53

[47] 张德丰.MATLAB 控制系统与仿真[M].北京: 电子工业出版社, 2009.135~178

[48] 陈晓平, 李长杰. MATLAB 及其在电路与控制理论中的应用[M].合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.41~190

[49] 刘同娟, 郭健, 刘军.MATLAB 建模、仿真及应用[M].北京: 中国电力出版社, 2009.113~182

作者在攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 周会坤, 邓燕妮. 基于 WinCE 的警车智能仪表控制器的设计. 仪表技术, 2010, 5: 43-45, ISSN 1006-2394

致 谢

在完成论文之际，向许多关心、帮助和支持过我的人表示衷心的感谢！感谢我尊敬的导师邓燕妮教授，在这三年的研究生学习期间，邓老师严谨的治学态度、渊博的专业知识以及忘我的工作热情对我的一生都有着非常深远的影响，激励我不断努力学习和工作，向着更高的人生目标奋斗！同时邓老师在学术上给予我很多指导和帮助，为我们创造良好的学习氛围，正是在这种环境下我才能够顺利完成学位论文。此外，邓老师平易近人和朴实无华的人格魅力对我影响深远。

在实验室学习期间得到实验室兄弟姐妹的帮助和指导，大家一起营造良好的学习氛围，在此一并表示衷心的感谢。

感谢父母多年的养育之恩和家人背后默默的支持，让我顺利安心的完成学业，在此对父母无私的奉献表示感激。

最后，对评审论文的各位专家、学者表示衷心的感谢！

周会坤

2011年5月于武汉理工大学