

摘 要

铅酸蓄电池是使用最广泛的一种电池。目前在电动车、UPS 不间断电源等领域，它已成为系统最重要的部件之一。

铅酸蓄电池常规充电模式中，有的充电效率低、充电不完全，有的则存在过充电和析气现象，导致电池寿命的缩短。因此，对既能高效充电又不影响电池使用寿命的新型充电技术的研究具有实际意义。

本文在铅酸蓄电池电化学机理的基础上，结合马斯定律，对比分析了各充电模式，比较其充电效率及对蓄电池寿命的影响。基于前面的分析，我们尝试采用变压间歇加适时负脉冲去极化的新型充电控制。在理论上分析了该充电方法的有效性和可行性，且对控制参数做了探讨。同时引入模糊控制，给出了模糊控制器的设计及相关的仿真。

同时由于电池间的不均衡是铅酸蓄电池组的实际使用寿命要远小于其设计寿命的一个主要因素，因此本文对充电均衡方法做了探讨，对比分析了常见的均衡电路结构，采用了一种动态、无损的均充电路。

关键词：铅酸蓄电池，快速充电，均衡充电，模糊控制

ABSTRACT

Lead-acid battery is one of the most widely used batteries. At present, it becomes one of the most important devices of a system in many fields such as electric vehicle, UPS.

For the traditional charging methods, some of them have low efficiency and incomplete charging and some of them lead to overcharge and gas-generation which result in shortening the battery life. Therefore, the research on charging technique that elevates the efficiency and prolongs the battery life has a significant meaning.

On the basis of knowledge of the electrochemistry mechanism of lead-acid battery, combined with study on rules proposed by J.A.Mas, typical charging methods were analyzed and balanced, meanwhile, discussion on the charging efficiency of these typical charging methods and influence on the battery life were presented in this paper. On the basis of all these analysis, the method of variable voltage controlled intermittent charging with negative pulse discharging was adopted. It was verified theoretically that this charging method could shorten charging time and had no side-effect on battery life. Some suggestions on choosing charging parameters were given from the theoretic view. Fuzzy logic control strategy was applied to control the fast charging process. The design of controllers and related simulation were presented.

For the fact that the service life of lead-acid battery group is greatly shorter than its design life and charging inequality among batteries is a main factor, discussion on charge equalization was also presented in this paper. On the basis of analysis on typical charge equalization circuits, a non-dissipative charge equalization circuit was introduced.

Keywords: lead-acid battery, fast charging, charge equalization, fuzzy logic control

原创性声明

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。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发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他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： 秦复辉 日 期： 2008.3.7

本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 秦复辉 导师签名： 李智平 日 期： 2008.3.7

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

铅酸蓄电池广泛应用于通信、电动自行车、电动汽车、铁路、电力和 UPS 电源等行业。蓄电池的充放电过程以及充放电持续性影响到系统运行的可靠性。且研究发现：电池充电过程对电池寿命影响最大，放电过程的影响较小。绝大多数的蓄电池不是用坏的，而是“充坏”的。据统计，在我国因为充电不当，许多蓄电池的实际使用寿命不到设计寿命的一半，大大提高了生产成本。因此，充电方法的选择至关重要。

目前，铅酸蓄电池充电技术得到普遍地关注。从传统的恒压、恒流充电发展到现在的智能充电。传统的充电技术充电时间过长，远不能适应生产和生活的需要。国内外陆续提出了一些新型的充电方法，如分级定流充电法、变电流间歇/定电压充电法、变电压间歇充电法等。这些充电方法都是在传统方法的基础上加以改进，以便使其充电电流能够更好得逼近蓄电池的可接受充电电流曲线。同时引入模糊控制技术，更好得处理蓄电池充电过程中的时变性和抗干扰性等常规控制方法所难以解决的问题。

铅酸蓄电池在使用中必须串联才能达到工作电压的需要。研究与实践表明，蓄电池组的寿命远远不及单体电池的寿命^{[1][2]}。串联电池组的不一致性将对电池组充电过程产生重要影响。单体电池不均衡是蓄电池组出现故障的主要原因。因此，探讨一种有效的充电均衡方法从而延长电池的使用寿命是十分必要的。

因此，国内外对电池充电的研究除了集中在充电方法上，对均衡充电也有一定的研究。按均衡电路结构来分大致有继电器结构、电容切换结构、多次级变压器结构和 DC-DC 转换器分布结构。

本课题的目的是对铅酸蓄电池充电系统的充电方法、能量均衡管理及其控制策略进行研究，进行有关理论分析和设计，并结合仿真技术，给出设计方案。

1.2 论文框架

本论文的基本结构如下：

第一章中阐述了课题研究的目的、意义。

第二章中介绍了铅酸蓄电池的工作原理及充电特性。

第三章中介绍了常规充电、去极化充电及快速充电法，比较其优缺点，且探讨不同充电方式对蓄电池寿命及充电效率的影响。同时探讨了均衡充电的必要性及对各均衡充电方法进行了分析比较。

第四章中尝试采用变电压间歇充电加入负脉冲去极化的新型充电控制。并对该充电方法的充电参数选择作了理论的探讨。最后给出快充阶段控制策略及均充控制策略。

第五章中主要基于第四章的控制策略探讨了该充电控制系统的设计与仿真。硬件部分主要介绍一种动态无损的充电均衡电路。控制部分引入模糊控制，设计模糊控制器。且通过对蓄电池模型的分析，来进一步阐述控制参数的获得。最后基于 MATLAB 搭建充电控制系统来对变压间歇加负脉冲去极化控制过程进行仿真。

第六章中总结所做工作，且指出有待进一步探讨的问题。

第二章 铅酸蓄电池的工作原理及充电特性

由于蓄电池充电本身涉及到许多相关的专业知识,为能更好地理解本课题,首先简要介绍铅酸蓄电池的工作原理及相关的充电理论。

2.1 铅酸蓄电池的电化学工作原理

铅酸蓄电池可大致分为四部分:正电极(二氧化铅)、负电极(海绵状铅)、电解液(硫酸)和隔离板。下图为其充放电示意图。

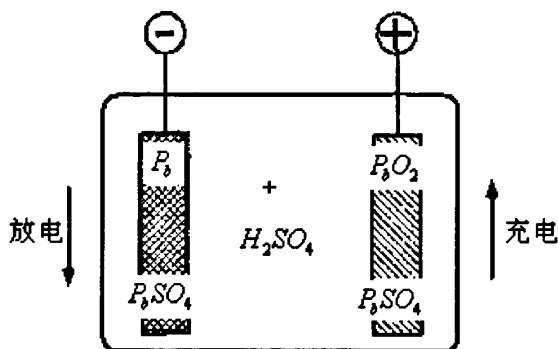
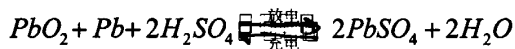


图 2-1 铅酸蓄电池充放电示意图

其充放电主反应化学表达式为:



铅酸电池的工作原理可以用“双硫酸化理论”来说明。铅酸蓄电池在放电时,两级活性物质与硫酸溶液发生作用,都变成硫酸化合物硫酸铅;充电时,两个电极上的硫酸铅又分别恢复为原来的物质铅和二氧化铅。这种转化过程是可逆的。

充电初始阶段主反应占主导地位,但随着电池端电压的升高,水开始被电解。端电压愈高,电解水反应也愈激烈。此时充入的大部分电荷参加水电解,形成活性物质很少。

2.2 基本概念

1. 电池单元，单个电池

一般来讲，每个电池由六个单元（cell）组成，单元之间串联。对于每个单元 2V 的电池来说，单个电池的电压为 12V。

2. 电动势和开路电压

当蓄电池用导体在外部接通时，正极和负极的电化学反应自发地进行。当电池中电能与化学能转换达到平衡时，正极的平衡电极电势与负极的平衡电极电势的差值即是电池电动势。

电池在开路状态下的端电压称为开路电压。电池的开路电压等于电池正极电极电势与负极电极电势之差。

可见电池电动势在数值上等于达到稳定时的开路电压。但电池电动势与开路电压意义不同。电动势是电池在理论上输出能量大小的度量之一^{[3][4]}。电动势可根据电池中的反应利用热力学计算或通过测量计算，有明确的物理意义。铅酸蓄电池的电动势大小取决于蓄电池正、负极板上的活性物质的电化学性质和电解液的浓度。而开路电压只在数字上近于电动势，需视电池的可逆程度而定。

3. 充电电压与放电电压

铅酸蓄电池的端电压是随着充电和放电过程的变化而变化的，可表示为：

$$\text{充电时： } U = E + \Delta\phi^+ + \Delta\phi^- + IR$$

$$\text{放电时： } U = E - \Delta\phi^+ + \Delta\phi^- - IR$$

式中：U-蓄电池的端电压；E-电动势； $\Delta\phi^+$ -正极板的超电势； $\Delta\phi^-$ -负极板的超电势；I-充放电电流；R-蓄电池内阻。

4. 充电终止电压

蓄电池充足电时极板的活性物质已达到保护状态，再继续充电蓄电池的电压也不会上升，而只是进行水的电解反应，此时电压称为充电终止电压。电池充满电后若不及时停止充电，则会过充电。过充电时，电池内部温度和压力急剧上升，造成对电池的损害。防止过充电是均衡充电的重要原因。

5. 电池容量与荷电状态

铅酸蓄电池的容量就是其蓄电能力，是蓄电池最重要的性能之一。通常用充足电的铅酸蓄电池在一定的放电条件下，放电至蓄电池的端电压达到规定的放电终止电压时可以从蓄电池中获得的总电量来表示，其单位为安时(AH)。在使用过程中，容量主要受放电率、电解液温度的影响。

关于电池状态经常用到荷电状态 SOC(State of Charge)的概念。一般定义为：

$$s_c = (c_0 \pm c_e) / c_m$$

其中， s_c —蓄电池的荷电状态， C_0 —蓄电池初始容量， C_m —蓄电池最大容量， C_e —蓄电池充电或放电量。蓄电池处于充电状态时， C_e 前面取“+”，蓄电池处于放电状态时， C_e 前面取“-”。

通常把在一定温度下电池充电到不能再吸收能量时的 SOC 定义为 100%，而将电池不能再放出能量时的 SOC 定义为 0%。充电过程中的荷电状态预测可见第五章。

6. 循环寿命

循环寿命是指蓄电池实际容量降低至某一规定值之前所经历的充放电循环的次数，通常用来定义蓄电池的使用寿命。

2.3 充电特性

2.3.1 可接受充电电流定律

1967 年，美国科学家马斯(J.A.Mas)提出以最低出气率为前提的蓄电池可接受充电电流定律：

$$I = I_0 e^{-\alpha t}$$

式中： I_0 — $t=0$ 时刻的最大起始电流； I —任意时刻 t 时蓄电池可接受充电电流； α —充电接受比。

假设某电池的初始充电电流为 50 安培，充电接受比为 0.0046 安培/分钟，则其可接受充电电流曲线如下图所示。

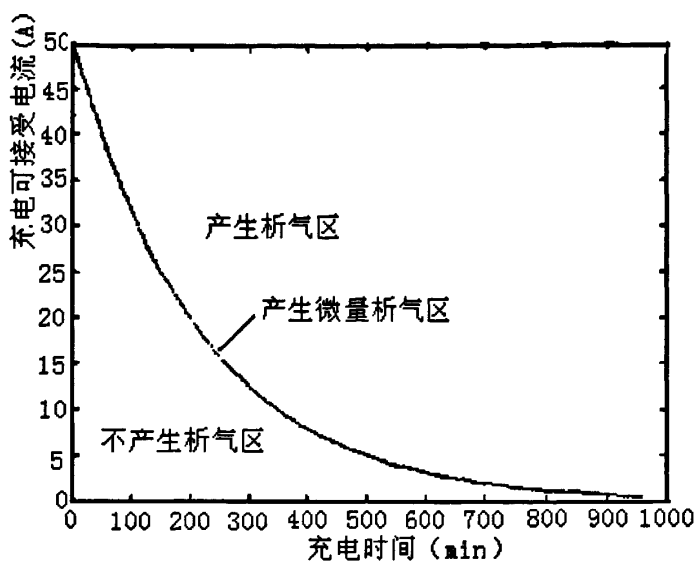


图 2-2 某电池可接受充电电流曲线

这条曲线说明了在充电过程中实际充电电流超过这条曲线的部分并不能转化为蓄电池的化学能存储起来，而只会促进电解水的反应，产生气体和引起温升，并不能提高充电速率。相反，若实际充电电流低于此曲线，则将延长充电时间。

如果遵循蓄电池充电接受电流曲线进行充电，设充电接受比 α 恒定，由可接受充电电流定律可得，在某一时刻已充入的电量为：

$$Q_c = \int_0^t I dt = \int_0^t I_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{I_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t})$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时，充入电量等于放出的电量 Q_d ：

$$Q_d = \frac{I_0}{\alpha} \quad (2-1)$$

图 2-3 给出了相同充电量下，不同充电接受比的可接受充电电流曲线。充电接受比越大，初始充电电流也越大，相应可接受充电电流曲线越陡。

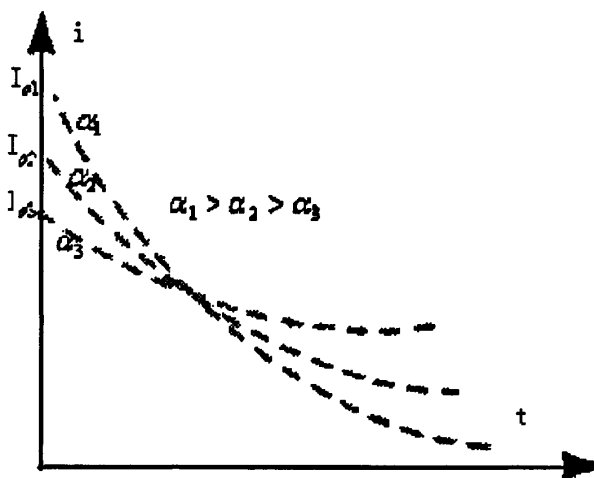


图 2-3 不同充电接受比的充电电流接受曲线

因此，最佳的充电方法是保证充电电流完全遵循可接受充电电流曲线。同时对于任何一定的待充电量，充电接受比愈高，初始充电接受电流愈大，充电速度就愈快。因此，充电接受比也是研究快速充电的关键。

2.3.2 充电接受比的三大定律

充电接受比与多个因素有关。麦斯根据大量实验数据提出了关于蓄电池充电接受比的三大定律。这三大定律为探寻快速充电提供了理论依据。

第一定律：蓄电池在经历任一放电电流后，充电接受比与放出电荷容量的平方根成反比，即：

$$\alpha = k / \sqrt{Q_d} \quad (2-2)$$

其中 k 为常数，可用实验的方法获得。 Q_d 为放电电量。

则根据式 (2-1)、(2-2) 得：

$$I_0 = Q_d \cdot \alpha = Q_d \cdot k / \sqrt{Q_d} = k \sqrt{Q_d}$$

由第一定律可看出，如果以相同大小电流放电，则放出电量越大，充电接受比越高，可接受的充电电流越大。

第二定律：对于任何给定的放电深度，蓄电池充电接受比与放电电流的对数成正比关系，即：

$$\alpha = \frac{k}{\sqrt{Q_d}} \lg(kI_d)$$

其中 I_d 为放电电流。

则可得：

$$I_0 = Q_d \cdot \alpha = k\sqrt{Q_d} \lg(kI_d)$$

可看出，以大电流短时间放电的蓄电池，充电接受比高。

第三定律：一个蓄电池经几种放电率放电，其充电接受电流是各种放电率下充电接受电流之和，即：

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots, \text{ 且 } \alpha = I/Q$$

其中， I 为总的充电接受电流， Q 为总放出电量， α 为总的充电接受比。

可看出，适当的放电将使 I 的增加比 Q 的增加快。则在充电前和过程中，适量放电将增加充电接受比。

上述 3 个基本定律为快速充电奠定了重要的理论基础，揭示了蓄电池可接受充电电流与放电量之间的内在联系，指出了在充电过程中对蓄电池实施一定深度的放电是提高充电电流接受比从而加快充电过程的有效途径。

2.3.3 温度补偿

电池铅板的腐蚀速度和外界温度有紧密的关系。温度越高，腐蚀速度越快。为了减小温度的影响，不论以何种模式充电，必须针对温度加以补偿^{[5][6][7]}。补偿后的充电装置输出电压按下式计算：

$$U = U_g \pm U_b$$

式中 U_g = 设定的充电电压；

U_b = 电池只数 $\times$ 单体电池补偿电压(mv)/ $^{\circ}\text{C}$ ；

通常充电曲线都是以 25°C 为基准。环境温度上升，应减小充电电压，防止过充电；环境温度降低，应提高充电电压，防止欠充电。

第三章 铅酸蓄电池充电方法

这章首先对常规充电方法进行介绍与分析，重点分析了去极化充电的发展及快速充电。同时由于蓄电池组在工作过程中，单体蓄电池间的充电不均衡是影响蓄电池组工作及其寿命的一个非常有害的因素，因此对均衡充电方法做了探讨。

3.1 常规充电法

3.1.1 恒压充电

恒定电压充电方式是一种传统的充电方式。它是在充电全过程保持充电电压为某一恒定值的情况下进行充电。此充电方法在充电初期蓄电池电势较低，充电电流较大。随着充电的进行，电流逐渐减小，具有一定的自适应性。实际上它是一种变流充电。铅酸蓄电池恒压充电时其充电电流和蓄电池端电压曲线如图 3-1 所示。

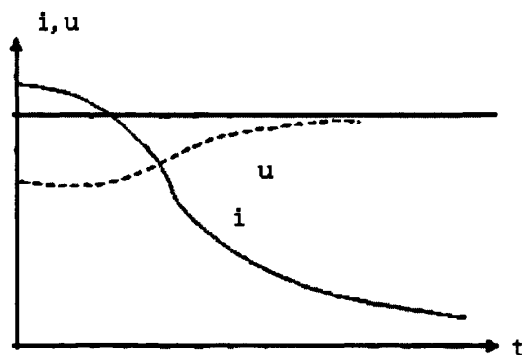


图 3-1 恒压充电特性曲线

恒压充电法是对铅酸电池最有效的充电方法之一。对最高电压设限，以 14.7 到 15V 定电压充电，大概可以在 16 个小时内将一个放完电的铅酸蓄电池充完电。如果放电量少于 100%，则定电压充电的时间便可以相对减少。例如一个放电量为 50% 的电池，以 15V 定电压充电，最小电流上限 0.33C，大约可以在 8

到 10 小时之间将电池充完电。

恒压充电的不足在于：

(1) 在充电初期，如果蓄电池放电深度过深，充电电流很大，电池可能因过流而受到损伤。

(2) 若充电电压选择过低，后期充电电流又过小，充电时间过长，不适宜串联数量多的电池组充电。

(3) 蓄电池端电压的变化很难补偿，充电过程中对落后电池的完全充电也很难完成。

3.1.2 恒流充电

恒流充电是用一个电流源对电池充电，充电电流保持在一个阶段恒定。它包括单一恒流充电和分段恒流充电，其充电曲线如图 3-2 示。单一恒流充电为避免后期过大的充电电流对电池损害，恒定值设定较低。充电时间一般较长，使得充电过程中蓄电池内部析气较多，能耗高，效率低。分段恒流充电虽然可以根据充电状态调整，先以较大电流充电并逐步减小，电流趋势类似恒压充电，但是转换电流时需要合理选择。目前常用的转换条件包括电池电压和温升等，控制相对复杂，国外已经很少使用这种充电方法。

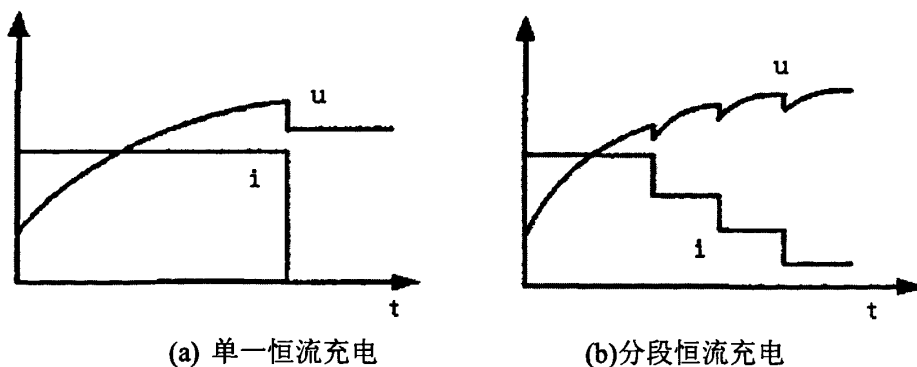


图 3-2 恒流充电曲线

3.1.3 阶段充电

阶段充电法包括二阶段充电法和三阶段充电法。

二阶段法采用了恒流和恒压充电相结合。首先，以恒电流充电至预定的电

压值，然后改为恒压完成剩余的充电。一般两阶段之间的转换电压就是第二阶段的恒电压。其充电曲线如下图。

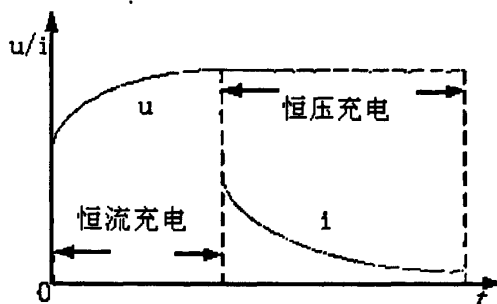


图 3-3 二阶段法充电曲线

三阶段充电法是在充电开始和结束时采用恒流充电，中间用恒压充电，其充电曲线见图 3-4。当电流衰减到预定值时，由第二阶段转换到第三阶段，即涓流充电。这种方法实现简单，基本能满足电池充电的要求。缺点在于不能区别电池的放电深度而恰如其分地充电，对充电的控制较弱，对电池电解液的保持欠佳，易造成失水，从而影响电池寿命。

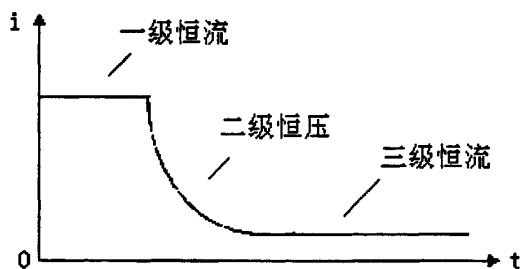


图 3-4 三阶段充电曲线

3.2 去极化充电的提出及发展

3.2.1 极化现象及其在充电过程中的影响

极化现象是所有二次电池共有的现象。蓄电池极化现象的外观表现在于，当电池放电或充电时，由于电池中有电流通过导致电池的电动势偏离平衡值，这种相对平衡电动势的偏离称为电极的极化，有时也称过电势和过电压。一般

来说,产生极化现象有浓差极化、电化学极化、欧姆极化三方面的原因。

(1) 浓差极化

随着电极化学反应的进行,生成物以及反应物的扩散迁移速度赶不上化学反应的速度,以致造成从电极表面到中部溶液电解质浓度分布不均匀,这种现象称为浓差极化。在没有接通充电电路时,不存在浓差极化。在快速充电初期,由于蓄电池正、负极板的真实表面积很大,真实电流密度很小,而且电解液内部离子浓度很低,离子扩散速度很快,浓差极化并不严重。加大充电电流,浓差极化也增大,当充电电流密度接近极限扩散电流密度时,蓄电池的充电过程被电解水的过程替代,产生氢气和氧气。充电停止后,浓差极化由于扩散作用而逐渐消失。这个过程相对较慢,一般需要 200 毫秒以上。浓差极化的结果导致电池开路电压升高、电池温度升高(确切地讲是电极的温度升高)、充电效率降低以及过早地进入析气反应。

(2) 电化学极化

铅酸蓄电池的充放电过程中,由于电极反应过程中的迟缓特性,阻碍了整个电极反应的进行,引起电极电势的变化,称为电化学极化。切断充电电流后,电化学极化经过几个微秒可以显著降低。

(3) 欧姆极化

在充电过程中,离子迁移不可避免地受到一定的阻力,外加电压就必须额外施加一定的电压克服阻力,这种现象称为欧姆极化。

铅酸蓄电池的极化现象在充电过程中的负面影响主要表现在以下几个方面:

①极化产生的过电压会阻碍充电电流增加,减缓电池的化学反应速度。

②极化现象使化学反应过程中的水解加剧,产生大量气体。产生的气体不仅会延缓充电过程,而且对极板有严重的腐蚀作用。

③电池内部水解将产生大量的热量,使电解液的温度升高。当电池温度升高到一定的程度时,会引起极板受热变形,以致损坏。

可见极化产生的过压、析气、温升等对蓄电池都是极为不利的。且充电电流愈大,极化现象愈严重。研究铅酸蓄电池快速充电技术的主要任务就是使蓄

电池的充电过程做到高效、迅速且无损。为实现这一目标，除蓄电池自身应采取改进电池设计来降低欧姆内阻和提高反应离子的扩散速度等措施外，另一重要措施就是改进充电方法，解决蓄电池在充电过程中存在的极化问题。

3.2.2 去极化充电的提出

电池的极化是电池充放电过程中不可避免的但是可以加以控制的现象。所以新型高效无损快速充电方法的研究方向是：寻找每一时刻最能充分利用活性物质且又不产生析气的电流，即得到可接受充电电流曲线，且在装置的设计中要采取消除极化的措施。

结合前面对极化现象的分析可知，欧姆极化和电化学极化只需电池电流下降到足够小或停止即可在毫秒或微秒内减小或消除，而浓差极化消除时间较长。当停止充电时，欧姆极化消失，浓差极化和电化学极化也逐渐减弱。若为蓄电池提供一条放电通道让其反向放电，则浓差极化和电化学极化将迅速消失，同时蓄电池内温度也因放电而降低。

因此，目前去极化的方式主要有两种：

①自然去极化。即采用中途停止充电，间歇的方式。

②强制去极化。即在大电流充电过程中，强制电流反向，即对蓄电池实施瞬时的一定深度的放电。

两种方式都能够实现减小极化量的目的。国内外很多研究者认为，间歇充电和放电脉冲能够在更短的时间内实现减小内阻，提高电池充电接受能力。

在实际应用去极化措施时须遵循以下原则：

①在整个充电过程中，应始终适时地采取去极化措施。充电开始后，蓄电池可接受电流随时间呈指数规律下降。若采用大电流充电，会因可接受电流的下降而产生析气。故充电前期也应有去极化措施，始终不使极化过分严重。

②去极化措施应能自动地适应整个充电过程中的不同极化情况。如果只选择适合某一阶段的去极化措施，则必然不能适合其它阶段的去极化作用。

③在充电过程中，极化现象达到一定程度时，就应停止充电，去极化电压上限应选在低于出气点电压，即去极化措施应能抑制过电势，使其达不到气体

析出的电势。

④去极化是有限度的，当电动势降至一定值时，就应适时的停止去极化，转到下阶段的充电中。

遵循上述原则可使充电全过程去极化效果适当，并能以较高的充电平均电流进行充电，还可有效的抑制气体析出^{[8][9][10]}。

3.3 快速充电法

3.3.1 脉冲充电

脉冲充电方式是用脉冲电流对电池充电，然后让电池停充一段时间，如此循环，其充电曲线如图 3-5 所示。充电脉冲使蓄电池充满电量，而间歇期使蓄电池经化学反应产生的氢气和氧气有时间重新化合而被吸收掉，使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行，使蓄电池可以吸收更多的电量。间歇脉冲使蓄电池有较充分的反应时间，减少了析气量，提高了蓄电池的充电电流接受率，从而打破蓄电池指数充电接受曲线的限制。

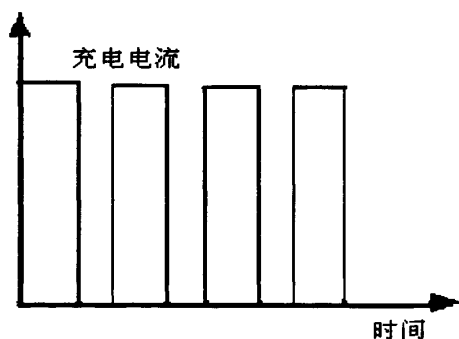


图 3-5 脉冲充电曲线

采用脉冲充电方法时，虽然蓄电池的析出气体总量减少，但因出气率高，活性物质易冲刷脱落，所以对蓄电池的寿命有一定影响。因此，目前蓄电池充电机市场上仅仅使用脉冲充电法的并不是很多，大多数是采用脉冲充电和其它充电法相结合的方法，将充电过程分几段曲线，每段曲线分别采用恒流脉冲充电或恒压脉冲充电的方法。

基于脉冲充电，出现了 ReflexTM 快速充电。这是美国的一项专利技术，主

要面对的充电对象是镍镉电池。ReflexTM 充电法的一个工作周期包括正向充电脉冲，反向瞬间放电脉冲，停充维持 3 个阶段^{[11][12]}，如图 3-6 示。

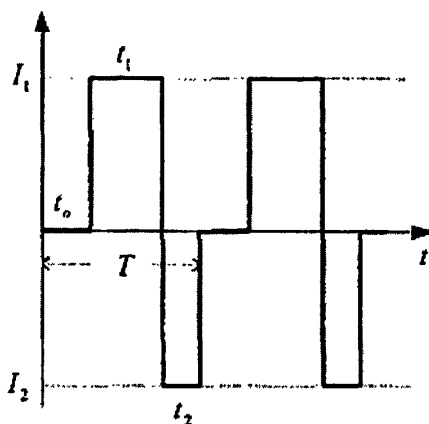


图 3-6 ReflexTM 充电电流曲线

该充电方法大大降低了蓄电池的充电时间。铅酸蓄电池的充电方法与镍镉电池有很大的不同，但它们之间可以相互借鉴。

3.3.2 间歇充电

近几年厦门大学的陈体衍教授提出间歇充电法^[13]，该法建立在恒流充电和脉冲充电的基础上采用限压变电流间歇充电，其充电曲线见图 3-7。充电前期的各段采用变电流间歇充电的方法，保证加大充电电流，获得绝大部分充电量。充电后期采用定电压充电段，获得过充电量，将电池恢复至完全充电态。通过间歇停充，减轻蓄电池的内压，使蓄电池可以吸收更多的能量。陈教授提出的在充电前期尽可能多的充电思想非常好，但所采用的变电流方法实质上就是多阶段恒流递减充电，因此还没有达到真正意义上的最佳电流充电。

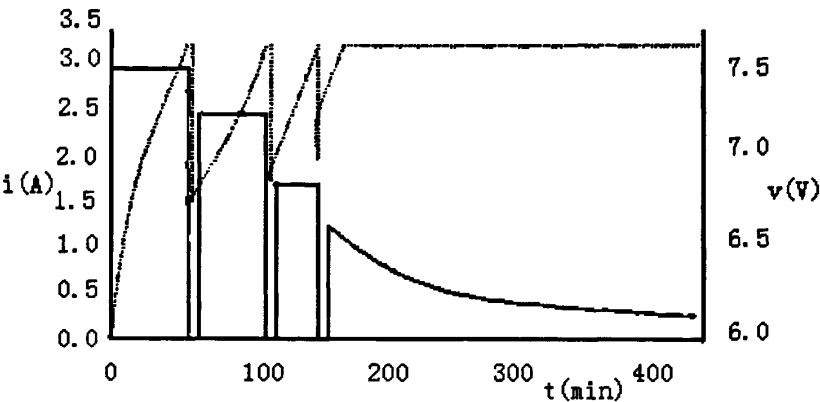


图 3-7 变电流间歇充电曲线

在变电流间歇充电基础上，中国农业大学的王库教授提出了变压间歇充电法^{[14][15]}，差别就在于采用间歇恒压。在每个恒压充电阶段，充电电流自然按照指数规律下降，更加符合最佳充电曲线，其充电电压电流曲线如图 3-8 所示。

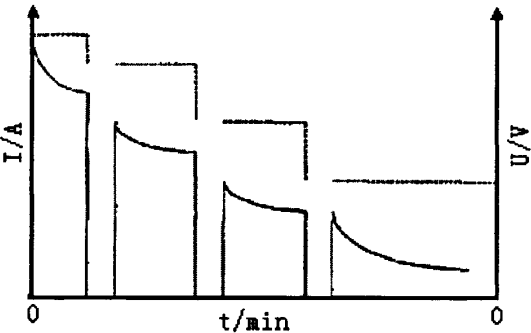


图 3-8 变压间歇充电曲线

由变压间歇充电曲线和变流间歇曲线相比较可看到，变压间歇充电曲线能够模拟最佳充电曲线。试验结果验证，这种充电方法的确能够有效地提高充电效率。且从工程角度来看，恒压控制更容易实现。

3.3.3 变电压变电流波浪式间歇正负零脉冲快速充电

综合脉冲充电法、ReflexTM 快速充电法、变电流间歇充电法及变电压间歇充电法的优点，变电压变电流波浪式正负零脉冲间歇快速充电法得到发展应用。脉冲充电法充电电路的控制一般有两种，一种是脉冲电流的幅值可变，而驱动

充放电开关管的频率是固定的，另一种是脉冲电流幅值固定不变，开关频率可调。而该法采用了一种不同于这两者的控制模式如图 3-9 示。脉冲电流幅值和驱动充放电开关管的频率均固定，PWM 占空比可调，在此基础上加入间歇停充阶段，这样能够在较短时间内充进更多的电量，提高蓄电池的充电接受能力。

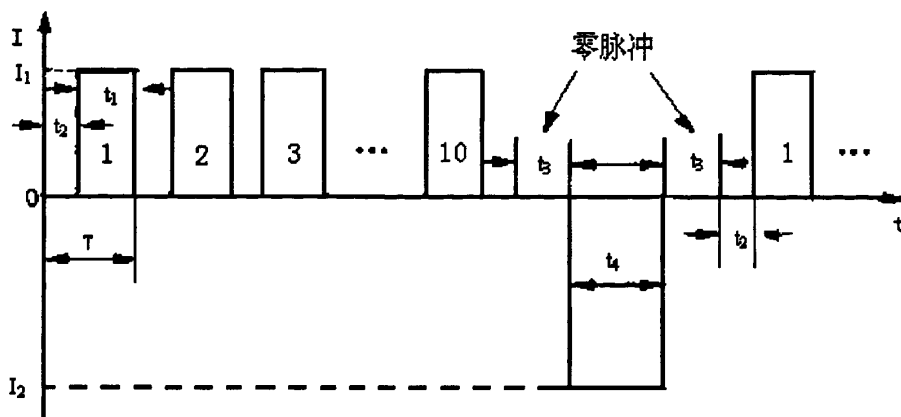


图 3-9 波浪式间歇正负零脉冲快速充电曲线

3.4 充电模式对温升、循环寿命的影响

在电池快速充电的研究中，很多人认为大电流充电对电池的寿命会带来影响，其实这种说法是片面的。大电流充电本身不会影响电池的寿命，而是大电流充电引起的温度升高真正影响电池寿命。因此在电池允许的电压范围内，采用大电流充电，并没有坏处。温升是快速充电所要解决的一大问题。

由恒压充电特性可知，恒压充电具有自适应性，随着充电的进行，其端电压在上升同时充电电流也在减小。根据相关试验数据^{[16][17][18]}，下图为恒压和恒流充电温度变化比较曲线。

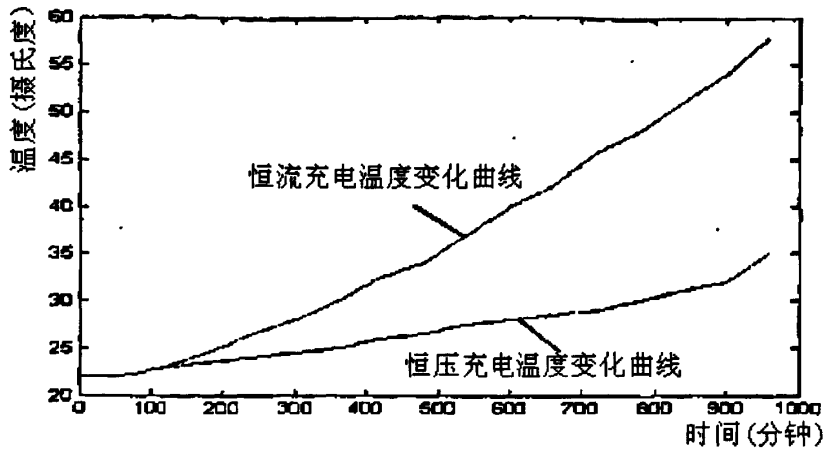


图 3-10 恒压充电和恒流充电温度变化比较图

从图可看出，恒压充电过程中电池温度缓慢上升，这是由于其充电电流曲线和充电可接受电流曲线非常接近。而对于恒流充电，充电后期充电电流比可接受充电电流大很多，产生剧烈的副反应，生成大量的热量，温度一直在增加，尤其在充电后期温度上升速率更大。这对电池的寿命是不利的，也存在安全隐患。

影响电池寿命的因素还有充电电压与充电时间、放电深度与放电方式以及电池工作环境等。充电电压、充电时间与电池寿命的关系^{[19][20]}如图 3-11 示。

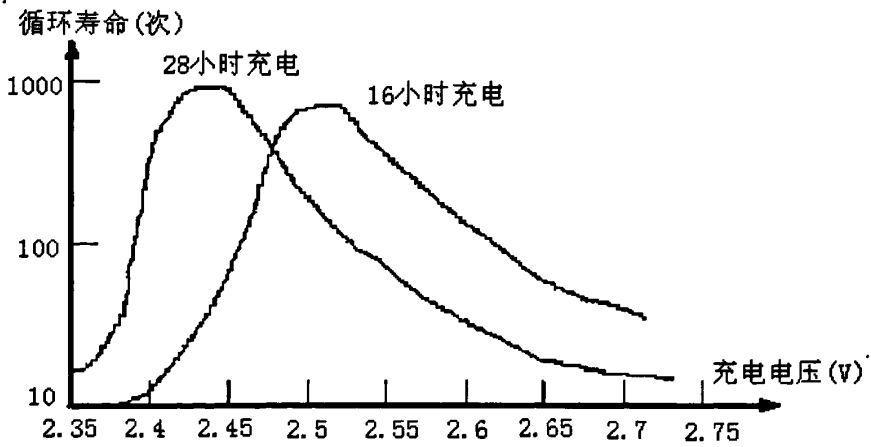


图 3-11 充电电压、充电时间与电池寿命的关系曲线

由图看出，对应某一充电时间，电池寿命有一个对应的最佳充电电压值。充电时间长，最佳充电电压值低，但寿命延长不太明显。所以，在恒压充电中

只要充电电压选择合理，还是可以在较快的充电方式下获得满意的循环寿命的。

同时为探寻充电期间适当的去极化放电对充电效率、温升的影响，对变电流充电、变电流间歇充电及具有去极化放电的变电流间歇充电进行实验比较^[21]，结果见表 3-1。

表 3-1 充电实验结果比较

充电方法	充电效率	温升(°C)
变电流充电	71.4%	21.4
变电流间歇	80.2%	22.8
具有去极化放电的变电流间歇	82.4%	22.1

通过比较可见，充电过程中采用间歇及适当的去极化放电控制显著提高充电效率，且在变电流间歇基础上增加去极化放电措施，总体温升有所下降。

3.5 均衡充电的必要

前面充电思想主要是针对串联蓄电池组充电，而没有考虑由于蓄电池间性能差异造成的充电不均衡^[22]。充电不均衡的原因在于：

① 电池组是串联形式，而各电池单体的容量和性能不相同，这就造成充放电的不均衡，会造成某些单体电池的过充电和过放电；

② 电池组在使用过程中，各单体受温度场不一致等因素的影响，使得老化过程不一致；

③ 不断重复的充放电过程更加剧了不均衡现象。由于“水桶原理”，性能差的电池寿命缩短会引起所在的电池组的寿命缩短。

因此，在蓄电池实际使用过程中，蓄电池组中的各个蓄电池单体的寿命差异很大。且研究与实践表明，蓄电池组的寿命远远不及单体电池的寿命。充电不均衡是影响铅酸蓄电池组寿命的主要因素之一。

所谓的均衡充电是指蓄电池组在串联充电过程中通过一定的装置和控制规则使每个单体电池都能充到其最大电量而又不过充。充放电均衡技术能够减弱电池组中不均衡现象。研究结果表明^[23]达到 10mv 的均衡精度的电池均衡能明显延长电池寿命。

研究有效的充电均衡方法, 弥补蓄电池在使用过程中电池的不一致性, 对蓄电池组进行有效的容量均衡管理, 保证蓄电池拥有基本一致的循环寿命, 不仅能有效保障系统的工作可靠性, 也能节省大量财力。因此充放电均衡问题一直备受关注。

3.6 常见的均衡充电方法分析

实现均衡充电主要有以下几点要求: ①串连电池组中每个电池都能充足电; ②所有电池都同时充足电; ③每个电池的温升正常。

开始提出的被动均衡技术需要在常规充电后额外的充电, 是以小电流进行 1-3h 的过充电过程。该法主要用来消除一组浮充运行的蓄电池在同样运行条件下, 全组电池不均衡形成的差别, 以达到全组电池的均衡。此方法一般不能频繁使用。且被动均衡的代价就是电压高的电池会失水, 周期性均衡对电池造成损害, 使电池容量下降, 甚至造成电池热失控。

现被广泛使用的主动均衡技术是非耗能, 且能够动态均衡充放电过程。即致力于研究高效、无损的均充电路。

均衡电路一般可被分为以下四类: 继电器结构、电容切换结构、多次级变压器结构和 DC-DC 转换器分布结构。

1. 继电器结构

与电池组连接的继电器网络在必要时通过辅助电源(图 a 示) 或能量转换电容(图 b 示)传输额外的能量。两种基本结构如图 3-12 示。

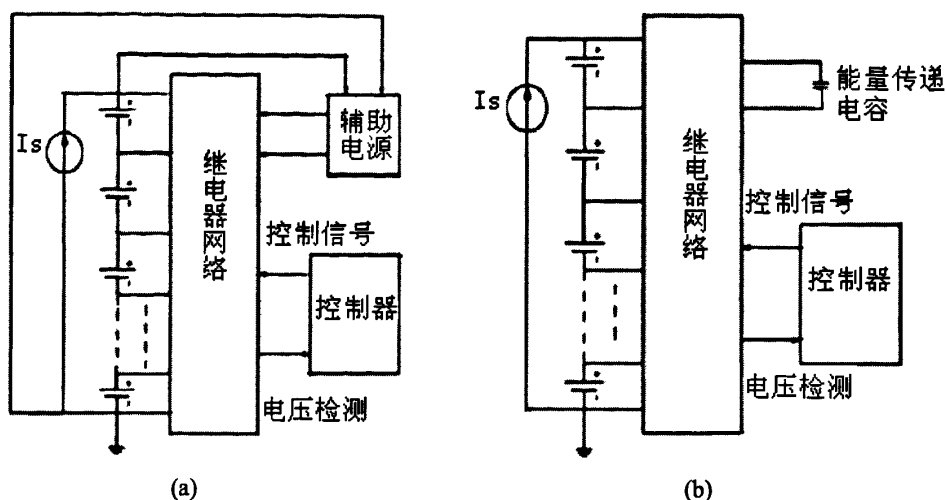


图 3-12 继电器结构均衡电路

电池单体电压被检测后，额外的能量通过继电器传输。在图 a 中，通过比较和逻辑判断后，额外的充电电流从辅助电源流入最低电压电池。图 b 中，额外的能量从电压最高的电池通过电容转移到电压最低的电池。这样电池间不平衡被减弱。这类结构的均衡控制算法很简单并且容易实现。但是这类均衡装置大，且连线复杂，控制精度低，动态均衡性也比较差。

2. 电容切换结构

这种方法利用串联电容在单体电池间来回切换来实现电压均衡充放电。通过单刀双掷的双向开关切换，每个电容都可与两个相邻的电池相连，其结构如图 3-13 示。通过电容切换来转移临近电池间能量。能量从高电压单体电池转移到低电压电池。最终所有电池的电压达到均衡值。这方法容易实现，且损耗低。但是由于引进电容使得电路的均衡频率受到限制，同时单刀双掷的实现比较复杂。

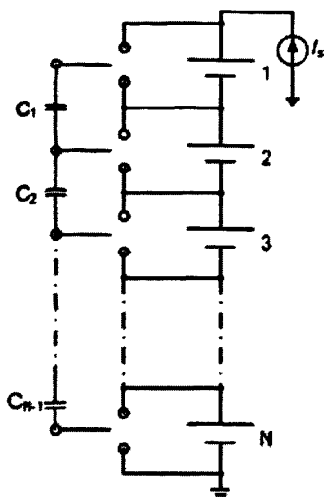


图 3-13 电容切换结构均衡电路

3. 多次级变压器结构

在这类结构中，多余能量是通过多次级变压器直接转移到最低电压的电池，所以该法均衡速度快。典型结构是 flyback 和 forward 转换器结构，如图 3-14 示。

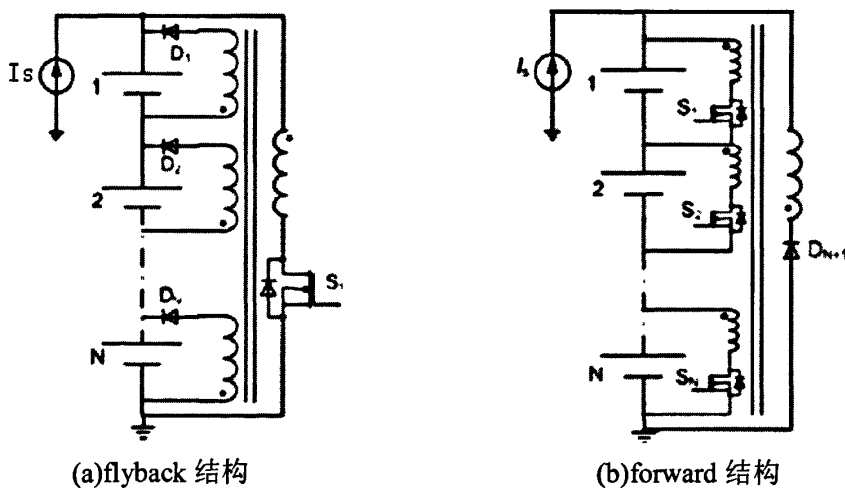


图 3-14 多次级变压器结构均衡电路

在 flyback 结构中，当 S_1 开通，能量存储在变压器中，当 S_1 关断，能量传递到变压器次级。由于二极管作用，使得大部分能量传递到电压最低的电池中。在 forward 结构中，当检测到较大的电压差时，最高电压单体电池连接的晶体管开通，通过变压器和反并联的二极管使得能量从该电池单体转移到其它电池中去。

4. DC-DC 转换器分布结构

基于 DC-DC 转换器分布结构均衡电路有隔离式（图 3-15(a)）和非隔离式结构（图 3-15(b)），用来单向或双向传递能量。具有升压降压功能的分布式变换器是无损的。可能被运用的有反激式变换器、升降压变换器和 Cuk 变换器等。

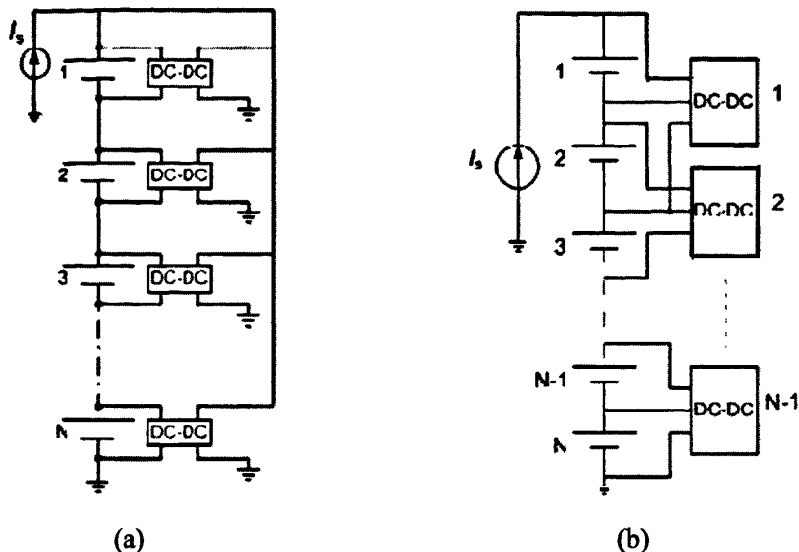


图 3-15 基于 DC-DC 转换器分布结构均衡电路

用在隔离式结构中的 flyback 转换器可单向也可双向传递能量。如下图示。

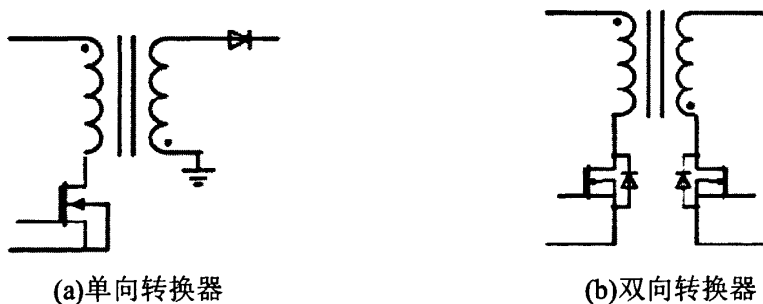


图 3-16 隔离式结构中的 flyback 转换器

可看出双向的 DC-DC 变换器比单向结构能更灵活得传递能量，所以双向转换器被广泛运用在非隔离结构中。见下图。

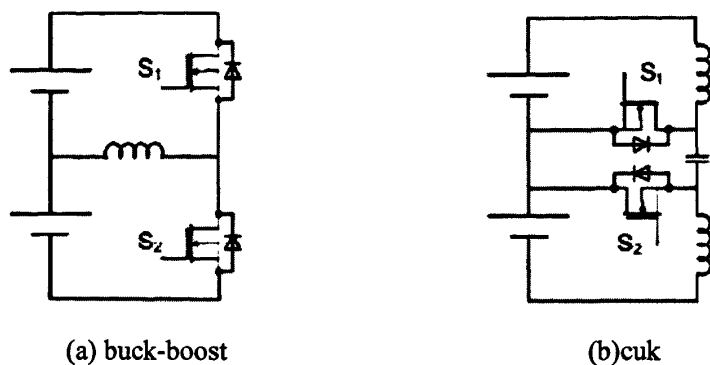


图 3-17 非隔离式结构中的双向转换器

对于连接能量双向转换器的一对电池，根据相应电压，能量在两电池间独立传递。主要的缺点在于当能量需要从第一个电池转移到最后一个电池时，即使 DC-DC 变换器效率高，但是能量传输效率低。为克服这缺点，从非隔离式结构中出现了一些特定的结构，如下列图。

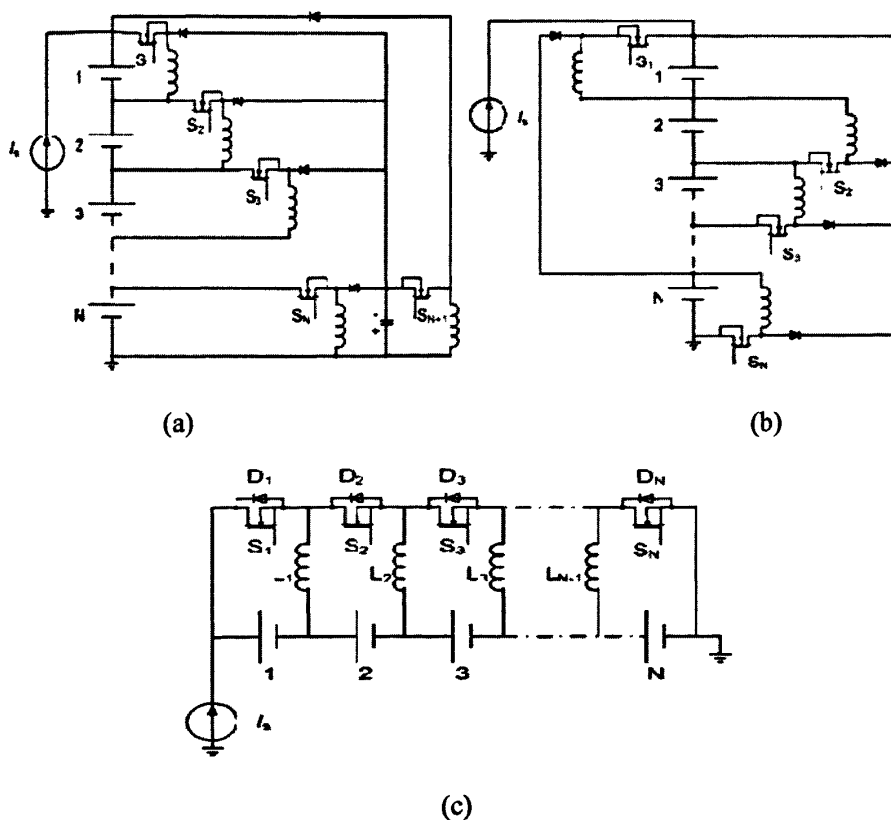


图 3-18 三种特定结构的均衡电路

所有这些都是基于双向升降压变换器。能量在一个电池和其余电池间传递。这些结构运用更少的元件,使得比分布式结构具有更高的效率且有更好的动态均衡特性。对于分布式的带有 DC-DC 变换器的结构,因为变换器能独立工作且具有相同的结构,所以具有高模块性。开关的高频使得模块体积小而适合使用在有限的空间。而且当电池数增加,均衡模块也便于扩展。

3.7 充电终止控制

铅酸蓄电池在充满电后,如不及时停止充电,则蓄电池的温度和内部压力将会迅速上升。温度的升高将加速蓄电池板栅腐蚀速度及电解液的分解,从而缩短电池寿命,使容量下降,甚至引起蓄电池爆炸。因此需要采取一种可靠的充电终止判决方法来保证电池充足电又不会引起过充电。对于铅酸蓄电池,有定时控制、蓄电池电压控制、蓄电池温度控制和综合控制等多种充电终止判断法。

1. 定时控制法

该方法适用于恒流充电。采用恒流充电法时,根据蓄电池的容量和充电电流,可以很容易的确定所需充电时间。这种控制方法较简单。缺点在于充电时蓄电池的容量无法准确知道,而且蓄电池和一些元器件的发热使充电电能有一定的损失,实际的充电时间很难确定。且该方法充电时间是固定的,不能根据蓄电池充电前的状态而自动调整,则使有的蓄电池可能充不足电,有的可能过充电。

2. 蓄电池温度控制法

该法即当蓄电池温度上升到规定数值后停止充电。常用的温度控制有:

最高温度控制:通常规定当蓄电池温度达到 45°C 时停止充电。

温度变化率控制:铅酸蓄电池充足电后电池温度迅速上升,且上升速率基本相同。当蓄电池温度每分钟上升 1°C 时停止充电。

3. 蓄电池电压控制法

常用的电压控制有:

最高电压控制:充电过程中,当蓄电池电压达到规定值后停止充电。该控

制方法缺点在于，蓄电池充满电时的最高电压随环境温度、充电速率的改变而改变，且电池组中各单体蓄电池的最高电压也有差别。因此该法不能非常准确地判断蓄电池是否充足电。

电压负增量控制：由于蓄电池的电压负增量与绝对电压无关，且不受环境温度和充电速率等因素影响，因此该法可较准确地判断蓄电池是否已充足电。该控制方法的缺点在于，从多次充电试验中发现，蓄电池充足电之前也有可能出现局部电压下降的情况，这使得在未充足电时由于检测到负增量而提前停止了充电。而且当环境温度较高时，电池充足电后电池电压的负增量不明显。因此该法一般与其它控制方法配合应用。

电压零增量控制：为避免等出现电压负增量时间过久而损坏电池，通常采用零增量控制。该方法缺点是：充足电前电池电压在某段时间内可能变化很小，很可能误操作。为此，目前大多数铅酸蓄电池快速充电器采用高灵敏零增量检测，当电池电压略有降低时停止充电^{[24][25]}。

电压二次导数控制：该法是通过检测电池电压的二次导数来实现控制。实验证明，当电池在充足电时 d^2V/dt^2 将达到某一确定值，此时可结束充电。这种方法适用于恒流充电模式^[26]。

上述各控制方法各有优缺点。目前快速充电器通常采用包括时间控制、电压控制和温度控制的综合控制法。本文采用电压零增量控制和温度变化率控制相结合的方法。

第四章 新型快速充电控制

4.1 变压间歇加负脉冲去极化快速充电

根据前面对蓄电池工作原理、快速充电理论分析及各充电模式的比较分析可知,为实现高效、快速、无损的充电须遵循以下原则:

①为提高充电速度,缩短充电时间,需要加大充电电流值,然而加大充电电流值是有一定限度的。

②充电电流应随着充电的进行而逐渐降低,即遵循蓄电池的可接受充电电流曲线,否则会造成析气和温升问题。

③充电过程中采取适当的去极化措施。

因此根据上述分析,从高效、快速、无损等方面综合考虑,我们尝试采用在变压间歇基础上加入负脉冲去极化来实现快速充电。原因归结如下。

根据恒压充电特性可知,由于极化和环境温度的影响,恒压充电电流的大小随充电的进行不会完全符合电池的可接受充电电流曲线,但经实验验证很是接近。且从工程角度来看,恒压控制更容易实现。同时根据第三章中对恒压充电过程中电池温升的分析可知,由于其充电电流曲线和充电可接受电流曲线非常接近的原因,电池的温度缓慢上升。而且从循环寿命的角度分析,在恒压充电中,只要充电电压选择合理,是可以在较快的充电方式下获得满意的循环寿命的。

同时根据麦斯理论可知,在充电过程中对蓄电池实施一定深度的放电是加快充电过程的有效途径。在充电过程中实时改变蓄电池的放电历史,就可以提高充电接受电流,从而打破指数曲线的自然接受特性的限制,按照上移后的曲线所能接受的充电电流进行充电,则可以缩短充电时间,且充电性能优良。

而且根据对蓄电池充电过程中阻碍电反应的极化现象的分析及对去极化方法的探讨可知,间歇充电和放电脉冲能够在短时间内有效抑制气体析出量,减小内阻,提高电池充电接受能力,且蓄电池内温度也因放电而降低。

4.2 充电参数探讨

在变压间歇加负脉冲去极化的充电控制中，分几个阶段比较合适，恒充电压取值等充电参数对充电时间和质量有重要影响。同时去极化的量应当掌握，这具体反映在充电和停充时间比，脉冲放电的深度和宽度等方面。脉冲幅值太小则对极板的积累电荷没有消除作用，不能有效地消除极化现象。脉冲幅值太大将对蓄电池极板形成强大冲击，严重缩短蓄电池寿命。

文献[27]中针对某型号铅酸蓄电池(12V4AH)进行了负脉冲去极化实验。研究分析了在排除其它因素的影响下，停歇时间、负脉冲宽度、负脉冲幅度分别对去极化效果的影响。在实际应用中，我们可针对特定型号容量的电池通过类似实验确定合理的参数。在这，其参数选择范围及实验结果可作为参考。

在对间歇时间影响的实验中发现，在 25ms-1s 时间内，蓄电池端电压差值变化不大。当间歇时间大于 1s，则消除过电势的作用明显增加。但若间歇时间选择过长，会影响充电过程的效率。因此可选择 25ms 作为间歇时间。

在对负脉冲幅度影响的实验中，针对该型号电池设置负脉冲幅值参数分别为：-24A、-20A、-16A、-12A、-8A。在初始电压为 11.73V 条件下，将负脉冲放电前后的电压降作为去极化效果进行比较分析。实验结果表明，对于该型号电池，当负脉冲幅度选为-24A 时，脉冲放电前后电压降平均值最大，则可认为负脉冲宽度取该值时消除极化效果最明显。

在对负脉冲宽度影响的实验中，针对该型号电池设置负脉冲宽度分别为 16ms、25ms、50ms、75ms、100ms。实验结果表明，消除极化的作用随脉宽的增加而增加。

在实际应用中，去极化的具体方法和去极化的量不尽一致。充电时蓄电池出气率和温度高低不一，对于不同电压和容量的蓄电池去极化的量各不相同。则不能以固定的方法去对待不同的充电对象，应当切合不同蓄电池的实际情况。下面主要基于麦斯理论和曲线，用数学的方法推导在变压间歇加负脉冲去极化充电中参数间的基本关系式。

在分析中停充暂不考虑，且认为充电设备所能产生的负脉冲电流大小 I_{dis}

是确定的。这里主要需要确定恒压充电时间和负脉冲电流宽度。在各负脉冲去极化段后，各段的最大可接受充电电流与蓄电池固有可接受充电电流曲线的最大充电电流相差不大。为便于分析，将各段的最大可接受充电电流取为相等值 I_0 。

根据麦斯定律，为保持最高充电接受电流 I_0 ，若在恒压充电段充电接受电流下降 ΔI ，经过停充检测，加入合适的负脉冲，需使充电接受电流上升 ΔI 。其充电特性曲线见图 4-1。

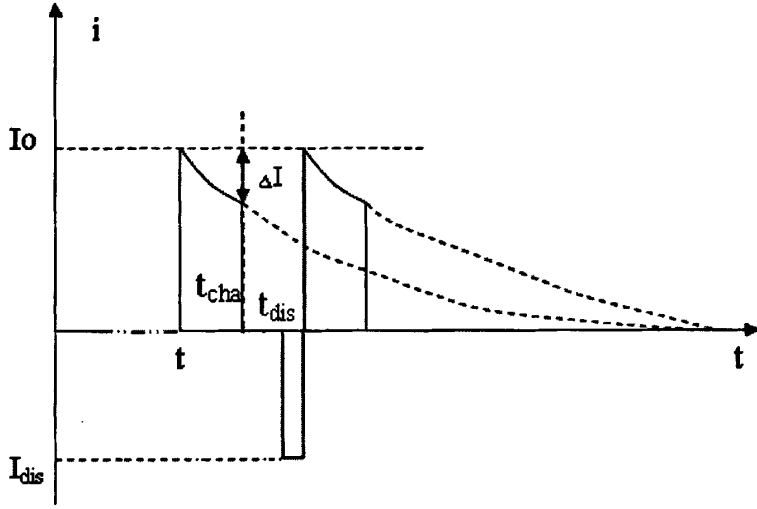


图 4-1 变压间歇加负脉冲去极化的充电特性曲线

这里考虑 t 时刻开始的恒压停充加负脉冲放电段（停充影响暂不考虑）。把 t 时刻充电接受率记为 $\alpha(t)$ ，恒压段充电时间 t_{cha} ，放电脉冲宽度 t_{dis} 。

根据麦斯理论，在恒压段充电接受电流的下降可表示为：

$$\Delta I = I_0 - I_0 e^{-\alpha(t)t_{cha}} \quad (4-1)$$

恒压段充入电量：

$$Q_{cha} = \int_t^{t+t_{cha}} I_0 e^{-\alpha(t)t} dt = \frac{I_0}{\alpha(t)} (e^{-\alpha(t)t} - e^{-\alpha(t)(t+t_{cha})}) \quad (4-2)$$

根据麦斯第二定律，放电段贡献的充电接受电流应等于恒压段可接受充电电流的下降，即：

$$\Delta I = k \sqrt{I_{dis} t_{dis}} \lg(k I_{dis}) \quad (4-3)$$

当 I_{dis} 为常数时，则可得放电脉冲宽度：

$$t_{dis} = \frac{1}{I_{dis}} \left[\frac{\Delta I}{k \lg(k I_{dis})} \right]^2 \quad (4-4)$$

负脉冲段放电量：

$$Q_{dis} = I_{dis} t_{dis} = \left[\frac{\Delta I}{k \lg(k I_{dis})} \right]^2 \quad (4-5)$$

由麦斯第三定律可知， t 时刻的充电接受率：

$$\alpha_{(t)} = I_0 / Q_{(t)} \quad (4-6)$$

其中放电容量 $Q(t)$ 是初始放电容量减去前 $t-1$ 个周期内充入的总电量：

$$Q_{(t)} = Q_{(0)} - \sum_{i=1}^{t-1} [Q_{cha}(i) - Q_{dis}(i)] \quad (4-7)$$

随着充电的进行，电池放电容量逐渐减少，充电接受率 α 增加，可接受充电电流衰减得越快。

由式 (4-1)、(4-6) 可得放电容量与恒压充电时间的关系：

$$Q(t) = \frac{I_0}{\ln\left(\frac{I_0}{I_0 - \Delta I}\right)} t_{cha} \quad (4-8)$$

上述给出了一些基本关系式，但具体控制参数需经大量充放电实验，同时需要注意环境温度等的影响，以总结较合理的充电参数，从而达到最佳充电效果。

4.3 充电控制策略

对于变压间歇加负脉冲去极化的快速充电，其控制策略具体分析如下。下图为常规充电过程中极化电流和充电电流的比率与荷电状态之间关系的曲线 [28][29]。

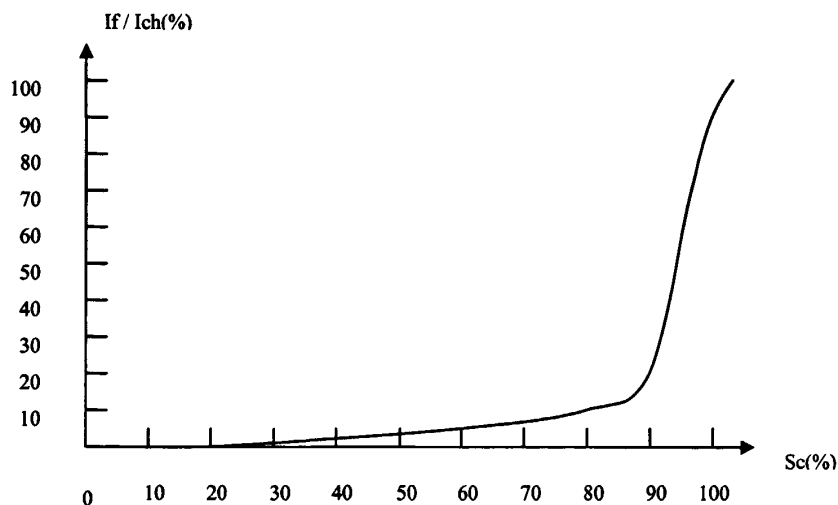


图 4-2 极化电流和充电电流的比率与荷电状态的关系图

由图可见，在荷电状态 $Sc > 88\%$ 以后，极化电流增加非常快。这时即使引入负脉冲去极化后，蓄电池可接受的充电电流仍然很小。所以这时采取去极化措施的意义已不大。此后可设定蓄电池单体充电电压为 $2.30V$ ，进行恒压控制。

同时，在充电过程中后期电池间充电不均衡问题明显。所以当荷电状态 $Sc > 88\%$ 后，均衡充电阶段开始。

整个充电控制流程如下图。

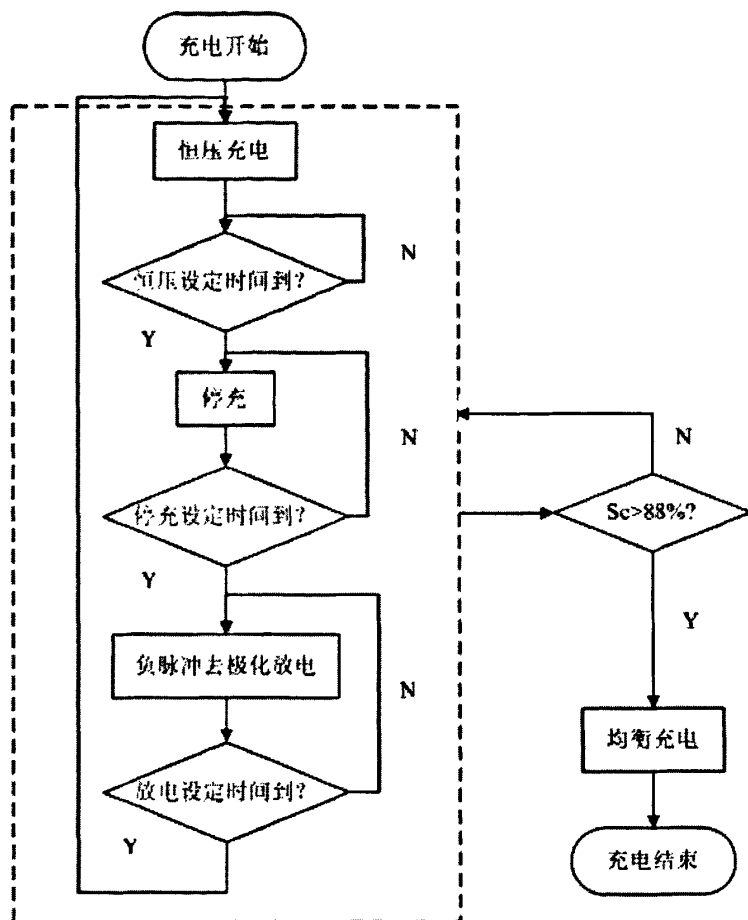


图 4-3 充电控制流程图

对于充电终止判断，我们采用电压零增量控制和温度变化率控制相结合的方法。对于电压零增量控制，可避免因等出现电压负增量时间过久而损坏电池。缺点在于充足电前电池电压在某段时间内可能变化很小，很可能误操作。因此为消除误检测，同时考虑其温度变化率。若蓄电池温度每分钟上升 1°C 则认为检测到的零增量有效，则结束充电。

对于充电控制流程中的均衡充电控制分析具体见下节。

4.4 均充控制策略

选择反映电池充电状态的参数是均衡充电首先要讨论的问题。在可实测参数中，电池端电压是电池本身体现出的参数，是最能反应电池充电状态的参数。

且有实验数据表明^[16]，状态差和状态好电池在恒压充电过程中端电压的差别很大，可以作为均衡控制的参数。根据研究分析可知^[30]，在电池组中单体电池间参数一致性比较好的前提条件下，在充电末期（电流较小时），电压的均衡可以近似认为是容量的均衡。然而在大电流充电阶段，电压均衡作为容量均衡的手段并不可行。因此，在充电控制后期即均衡阶段，采用单体电池端电压值作为参数标准来确定开启均衡电路的时刻。其中单体电压的检测在第五章中说明。

因此在均衡充电阶段，检测单体电池端电压 V_i 并求其与电池组平均电压差，当其达到设定阈值 V 时开启均衡电路，计算 PWM 信号占空比给相应触发模块，否则关断。此控制流程可见下图，其中 T_{eq} 为设定的均充段时间。

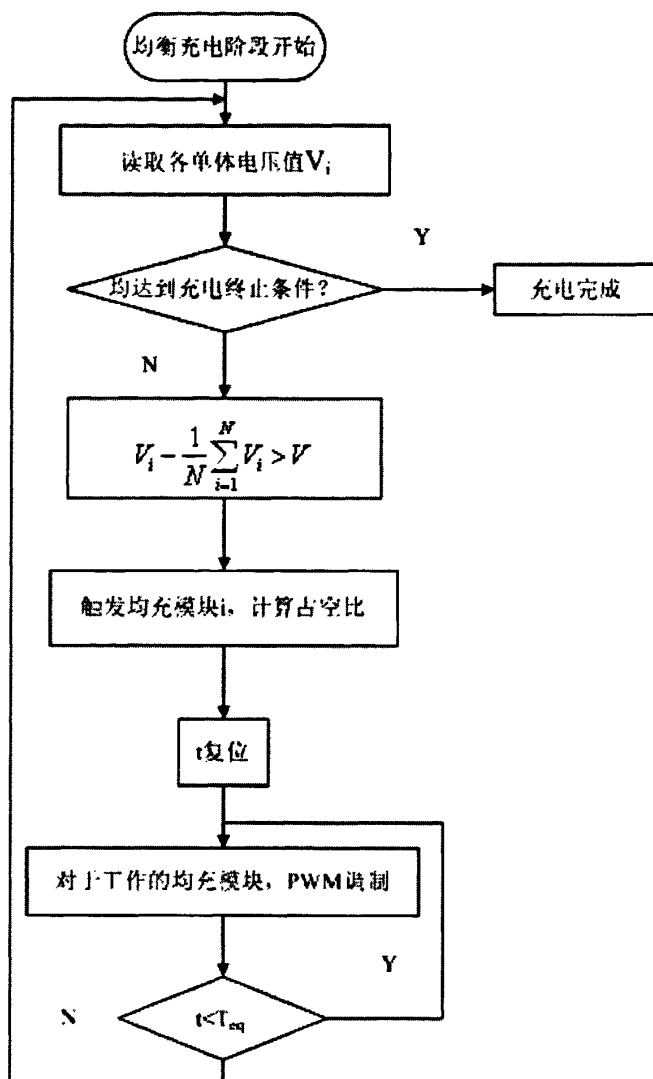


图 4-4 均充控制流程图

第五章 充电模糊控制系统设计及仿真

5.1 充电系统硬件设计

5.1.1 系统总体框图

系统硬件部分主要包括：主充电模块、检测模块、控制模块、均衡控制模块。如图 5-1 示。

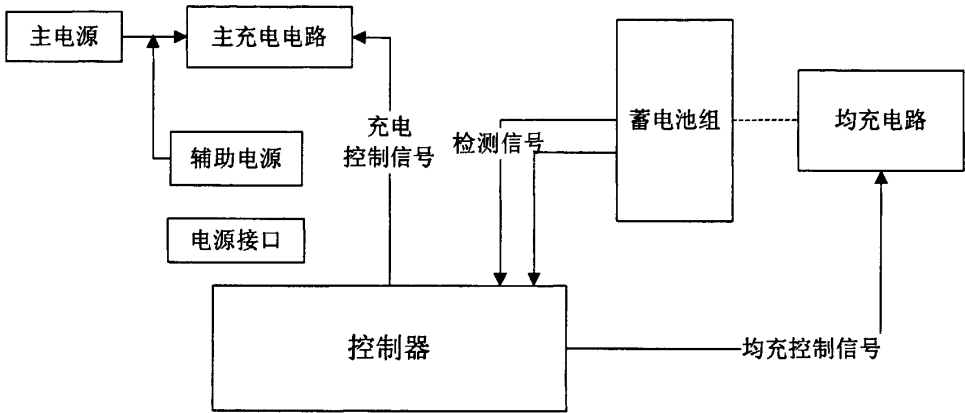


图 5-1 充电系统模块图

充电电源采用开关电源。开关电源是将交流输入电压变换成所需的直流电压的装置。开关电源一般由功率变换主回路和控制回路两部分组成。主回路有多种不同的拓扑结构。控制回路是实现电源各种性能要求的核心，其控制机理有调频、调幅、调宽、谐振等。调节开关电源占空比可使输出电压基本上不随负载变化或输入电压变化而变化。这种方法实质是对晶体管导通脉宽进行调节和控制，即脉宽调制法。

典型的智能型蓄电池充电电源的结构如图 5-2 示。其中开关电源控制器一般为脉宽调制 IC，如 TL494 等，是整个开关电源部分的核心。充电功率控制电路用于维持充电电压或电流的恒定。

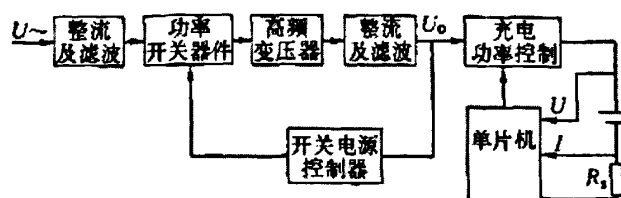


图 5-2 智能型蓄电池充电电源结构图

同时，系统中的各个电气元件需要有稳定的直流电源才能正常工作，而且工作电压一般都较低。由于存在一些敏感器件如温度传感器等对于电源质量要求较高。因此还需要有可靠的辅助电源为系统中的元器件供电。

对于第四章中叙述的充电控制策略，主电路必须具备充、放电功能，可采用双向 DC-DC 变流器实现能量双向流动。双向 DC-DC 变流器是指保持变流器两端直流电压不变的情况下，能根据需要调节能量双向传输的直流到直流变换器^[31]。一个好的双向 DC-DC 结构应该具有结构简单，控制方便，动态性能好，响应快，效率高等特点。其具体拓扑结构有很多。在实际应用中可根据具体电路特点来选择合适的拓扑结构。

检测模块检测蓄电池端电压、电池温度、充电电流等参数。其中，关于温度和电流的测量都属常规测量，而且这些方面的测量技术都已成熟。其中对蓄电池组中单体电压的检测上，人们进行了大量的研究工作。对单体电压的检测有使用继电器切换选通电池、模拟开关结合光电隔离选通电池和使用高精度差分放大器结合模拟开关选通电池等^[32]。5.1.2 节将详细介绍单体电压检测模块。

控制模块对采集到的参数进行分析计算，得出控制信号控制主回路开关元件实现充电。通过调节开关电源占空比对晶体管导通脉宽进行调节和控制。同时经过反馈电路形成闭环及时调节电压值，通过检测电池的端电压、充电电流以及温度等充电条件进行决策。

均衡控制模块主要针对串连电池组中的每个单体电池进行监控，必要时对其进行均衡充放电。从而保证各单体蓄电池有较均衡的电池状态，提高整个电池组的可靠性。5.1.3 节将详细介绍均衡控制模块。5.1.4 节介绍相应的均充能量回送算法。

5.1.2 单体电压检测模块

蓄电池组为设备供电，各单体电池对地的电位都不相同，其最高的共模电压可达 60V。对于一般的多路模拟开关来说难以承受。因此，需对浮地信号做共地处理或采取隔离措施。

在解决如何测量蓄电池组中单体电压问题上，为消除共模电压的影响，早期的方法是用继电器切换电池组中的单体电池电压通道。这种电路由于前级依赖于继电器的切换，而电磁继电器的寿命不超过 10⁵ 次，动作时间约为 10ms，不适合长时间的测量，难免增加产品的维修率。应用较多的方法是采用模拟开关进行选通单体电池电压通道，在模拟信号的转换上采用可编程定时器的 V/F 转换器。其中，在解决输入信号电压高于芯片的最大工作电压的问题上存在技术难点。对于构造电阻网络提取电压或 V/F 转换无触点采样方法存在误差积累，电路参数匹配和温度影响等问题。也有提出用光电隔离器件和大电解电容器构成采样保持电路测量蓄电池组中单只电池电压。此电路的缺点是：在 A/D 转换过程中，电容上的电压能发生变化，使其精度趋低，而且电容充放电时间及晶体管 and 隔离芯片等器件动作延迟等因素，决定采样时间长等缺点。

因此我们采用光继电器无触点切换，实现对每个测量端口隔离，保证了测量有良好的安全性。由于对电池端电压为直接采样，不需要大量的分压电阻，没有误差积累的情况，也没有压频转换中受温度影响的问题，从而保证了测量精度。下图为电池单体电压采样电路原理框图。

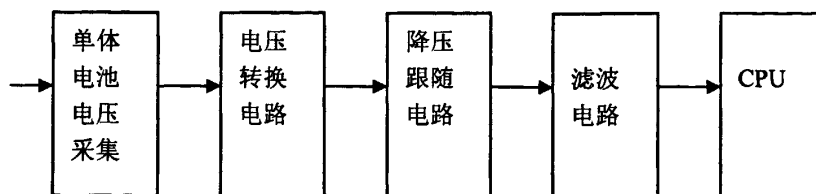


图 5-3 电池单体电压采样电路原理框图

5.1.3 均衡控制模块

均衡控制模块电路如图 5-4 示。单体电池电压经由多路选择和 A/D 转换器转换为数字信号。根据均充控制策略，即将各单体电压与电池组平均电压比较。若单体电压值与电池组平均电压间差值超过设定值，则经控制器输出门控制信号来触发对应均衡电路模块。

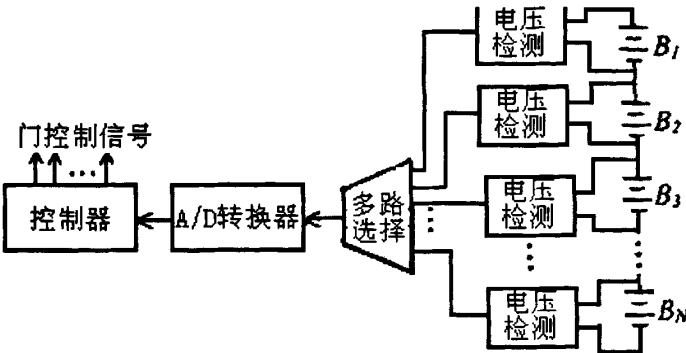


图 5-4 均衡控制模块电路图

我们采用的动态无损均充电路是基于 buck-boost 变换器的^[33]。该电路如图 5-5。单体电池并联的子电路起到分流作用，使能量从高能量电池转移到其它电池中。通过能量的动态分配来实现有效的均衡充电。图中 $B_1 B_2 \dots B_N$ 为串联蓄电池组，主充电源由电流源 I_{ch} 替代。电池组中每个单体电池并联一个均衡模块。这些均衡模块都是由一个 MOSFET 管 S_n 、电感 L_n 和二极管 D_n 组成。在均衡模块中，由于二极管的单向导通作用，当 M_2 到 M_N 模块开通时，能量从对应模块的单体电池传输到其上面的电池中去。而当 M_1 模块开通时，能量是向下传输的。

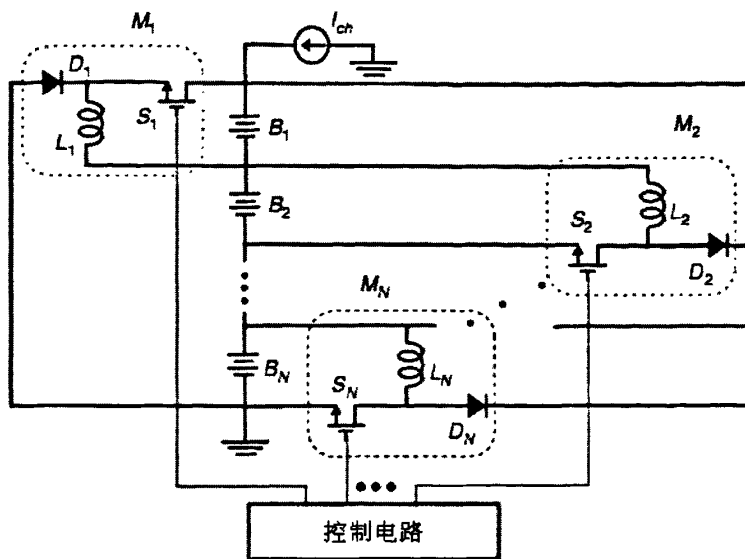


图 5-5 动态无损均充电路

均衡控制过程可分为电压检测和均衡充电两个阶段。在电压检测阶段，所有 MOSFET 管断开，均充旁路不工作。只有从主电源来的充电电流对蓄电池组进行充电。同时由巡检模块检测蓄电池组中各单体电池电压，根据能量回送算法（下一节具体介绍）计算 MOSFET 管的占空比。在均衡充电阶段，旁路中被触发的 MOSFET 管根据计算出的占空比来控制开关状态，对蓄电池组中各单体电池进行能量转移。

下面具体说明均衡模块工作原理。假设当模块 M_N 开通。在 S_N 开通期间，部分能量从电池 B_N 转移存储到 L_N 。在 S_N 关断期间，能量从 L_N 转移到上面的电池组 $B_1, B_2, \dots, B_{N-1}$ 中去。在这过程中，能量是从能量最高电池 B_N 转移到其它电池中去。这个能量的重新分配过程减小了单体电池间 SOC 的不均。

当 M_2 到 M_{N-1} 模块被开通时，其工作原理类似。而当 M_1 模块被开通，其能量的传输路径有所不同。当 M_1 模块中开关 S_1 开通，部分能量从 B_1 转移存储到 L_1 。当 S_1 关断， L_1 中能量转移到下面的电池组 $B_2, B_3, \dots, B_N$ 中去。

图 5-6 为该均充电路在模块 M_N 工作时相关的波形。为减小开关损耗，所有的均充模块电路都是工作在电流断续模式(DCM)。这样当开关关断时，工作的模块中的开关只承受单体电池电压。一般来说，电池间电压差与电池电压相比较都是在一个很小的范围内。因此，在分析中定义一个统一的电压 V_B 。

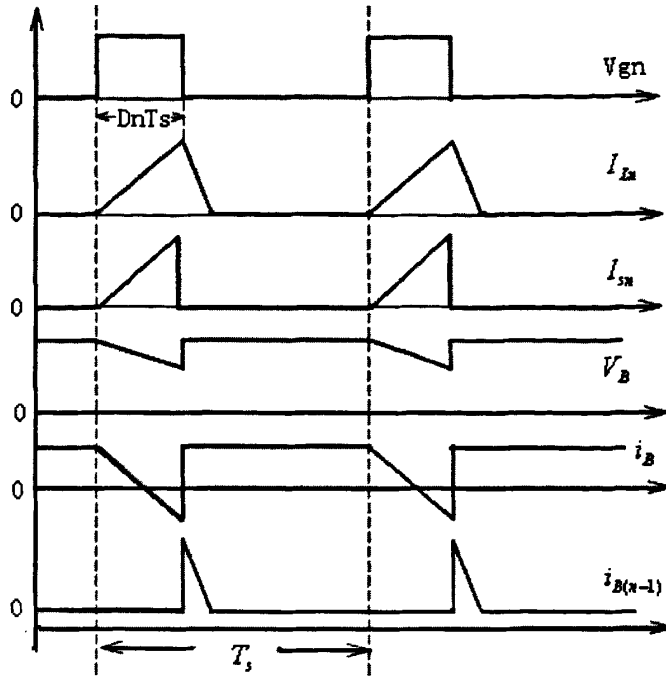


图 5-6 充电均衡子电路相关波形

5.1.4 均充能量回送算法

在开关开通期间，部分能量从电池转移到电感。电感电流线性增加并且在开关关断时达到最高值。

$$\begin{cases} I_L = \frac{V_B}{L} t, 0 \leq t \leq D_n T_s \\ I_L = 0, D_n T_s < t \leq T_s \end{cases} \quad (5-1)$$

其中， T_s 为开关周期， D_n 为占空比。

在一个开关周期内从单体电池 B_i 转移的平均电流可表示为：

$$I_{dis,i} = \frac{1}{T_s} \int_0^{D_n T_s} \frac{V_B}{L} t dt = \frac{V_B T_s D_n^2}{2L} \quad (5-2)$$

其中下标 i 为工作模块所对应电池的编号。

开关关断后，电感电流线性减小，其减小率取决于所承受的电压。对于 M_2 到 M_N 模块，附加到电感上电压为其上面电池组的电压和。对于 M_1 模块，电感上承受的电压为其下面电池组电压和。同时根据式(5-2)，第 j 个均衡模块

的回送电流平均值可表示为：

$$I_{rec,j} = \frac{V_B T_s D_j^2}{2L(j-1)} \quad (5-3)$$

根据电路结构可知，电池 B_1 得到的回送能量可来自其下面的电池，而其它电池得到的回送能量可来自电池 B_1 及其以下的电池。因此电池 B_i 得到的总的回送能量可表示为：

$$\begin{cases} I_{obt,i} = I_{rec,1} + \sum_{j=i+1}^N I_{rec,j}; i \neq 1 \\ I_{obt,i} = \sum_{j=2}^N I_{rec,j}; i = 1 \end{cases} \quad (5-4)$$

在这先可通过电流积分加校正来估算恒压段电池存储容量 $Q_{est,i}$ 。均充过程中，正常充电电量为电流在均充设定时间段的积分。为使得均充结束后各电池达到相同的存储容量，则在均充阶段的目标充电量可这样表示：

$$Q_{tar} = \int_0^{t_0+T_{eq}} I_{ch} dt + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{est,i} \quad (5-5)$$

其中 T_{eq} 为设定的均充时间。

而通过均充，期望存储的容量可表示为：

$$Q = Q_{est,i} + \int_0^{t_0+T_{eq}} I_{ch} dt + (I_{obt,i} - I_{dis,i}) T_{eq} \quad (5-6)$$

控制目标即使期望存储容量等于目标充电量。则由式(5-3)~(5-6)可得：

$$D_i = \begin{cases} \left[\frac{2L(Q_{est,i} - Q_{tar} + \int_0^{t_0+T_{eq}} I_{ch} dt)}{V_B T_s T_{eq}} + \frac{D_1}{N-1} + \sum_{i=n+1}^N \frac{D_i^2}{i-1} \right]^{1/2}; i \neq 1 \\ \left[\frac{2L(Q_{est,i} - Q_{tar} + \int_0^{t_0+T_{eq}} I_{ch} dt)}{V_B T_s T_{eq}} + \sum_{i=n+1}^N \frac{D_i^2}{i-1} \right]^{1/2}; i = 1 \end{cases} \quad (5-7)$$

我们采用倒推法求各开关器件的占空比^[34]。在式(5-7)中，当 $i=N$ 即计算最后一个电池放电的占空比时，考虑到对最后一个蓄电池进行能量回送的只有 1 号电池，且 1 号电池需要回送能量给除 1 号外其它所有电池。因此每个蓄电池接受到的回送能量最少。为分析方便且不至于产生较大的误差，所以在计算最

后一个蓄电池均衡占空比时，忽略 1 号电池可能回送的能量。同时对于变电流充电的情况，在这用恒电流代替进行分析。即用下式估算：

$$D_N = \left[\frac{2L(Q_{est,i} - Q_{tar} + I_{ch}T_{eq})}{V_B T_s T_{eq}} \right]^{1/2} \quad (5-8)$$

则当 $i=N-1$ 即计算倒数第二个均衡模块占空比时，可用下式计算：

$$D_{N-1} = \left[\frac{2L(Q_{est,i} - Q_{tar} + I_{ch}T_{eq})}{V_B T_s T_{eq}} + \frac{D_N^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (5-9)$$

计算其余均衡模块占空比则可按下式类推：

$$D_i = \left[\frac{2L(Q_{est,i} - Q_{tar} + I_{ch}T_{eq})}{V_B T_s T_{eq}} + \sum_{i=n+1}^N \frac{D_i^2}{i-1} \right]^{1/2} \quad (5-10)$$

对于不工作的均衡模块其占空比为 0。

5.2 模糊控制

5.2.1 模糊控制引入

实践和理论研究证明，蓄电池的充、放电过程是一个十分复杂的电化学过程。该过程具有以下特点：

①多变量：影响充电效果的因素有很多，诸如电解液浓度、极板活性物质的浓度、环境温度等变量的不同都会使充电效果产生很大差异。

②非线性：一般来说，蓄电池的可接受充电电流随时间呈指数规律下降。

③离散性：随着放电状态、使用和保存的历史不同，即使是两块相同工艺的蓄电池也具有不同的充电特性。

因此，对于这样一个非线性、多变量、强耦合的控制对象，我们可采用模糊控制技术实现如前所述的充电控制策略。

模糊控制的核心在于模糊控制器。其工作过程可描述为：首先将模糊控制器的输入量转化为模糊量供模糊逻辑决策系统用，模糊逻辑决策根据控制规则决定模糊关系，应用模糊逻辑推理算法得出控制器的模糊控制量输出。最后经精确化计算得到精确的控制值去控制被控对象。即其设计过程可分为三个部分：

精确量的模糊化、模糊推理、控制量的清晰化。

5.2.2 模糊控制器设计

我们采用两个模糊控制器来实现整个充电控制过程。两个模糊控制器均采用两输入一输出的二维结构。

模糊控制器 1 主要用于充电电压的输出控制。在恒压控制方式下，模糊控制器 1 的两个输入分别为：

$$e(n) = u(n) - u_r(n)$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1)$$

式中： $u_r(n)$ —电压给定值；

$u(n)$ —蓄电池端电压的实际值；

$e(n)$ —电压误差；

$\Delta e(n)$ —电压误差变化率；

输出为：

$$\Delta z(n) = z(n) - z(n-1)$$

式中： $\Delta z(n)$ 为控制量 $z(n)$ 的变化率。

e 和 Δe 的模糊集取为 {NB NS ZE PS PB}。

z 的模糊集取为 {NB NM NS ZE PS PM PB}。

模糊集中各量的含义分别为：

NB-Negative Big(负大)；NM-Negative Medium(负中)；NS-Negative Small(负小)；ZE-Zero(零)；PS-Positive Small(正小)；PM-Positive Medium(正中)；PB-Positive Big(正大)。

e 、 Δe 和 Δz 的隶属函数均取三角形。 e 和 Δe 的隶属函数如图 5-7。 Δz 的隶属函数如图 5-8。

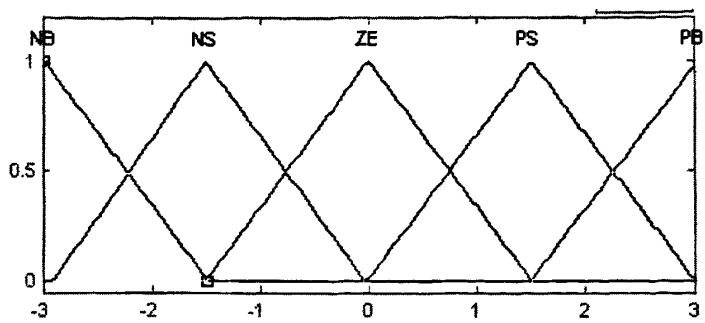


图 5-7 e 和 Δe 的隶属函数图

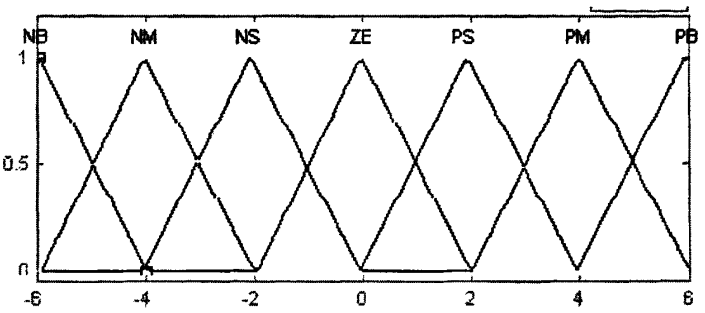


图 5-8 Δz 的隶属函数图

其模糊控制规则需根据对蓄电池充电的控制过程和操作经验总结得到。

去极化反向放电脉冲的宽度由模糊控制器 2 实现。在恒压充电段结束后停充期间，通过检测来判断蓄电池极化情况（5.3 节中将结合对蓄电池动态模型的分析来具体说明）。模糊控制器 2 把极化电压 U_j 和荷电状态 Sc 作为模糊控制器 2 的输入变量，以去极化脉冲的宽度作为模糊控制器 2 的输出变量 δ_1 ，经温度修正得到真正的去极化脉冲宽度 δ_2 ，从而控制蓄电池的去极化放电。其结构如下图。

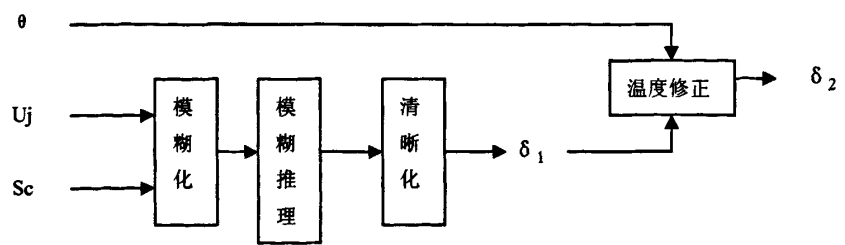


图 5-9 模糊控制器 2 结构图

输入和输出的模糊集取为 $\{PZ PS PM PB PV\}$ 。其含义为：

PZ-Zero (零); PS-Positive Small (正小); PM-Positive Medium (正中);
PB-Positive Big (正大), PV-Positive Very Big (正很大)。

输入和输出的隶属函数均取三角形。其隶属函数见下列图。

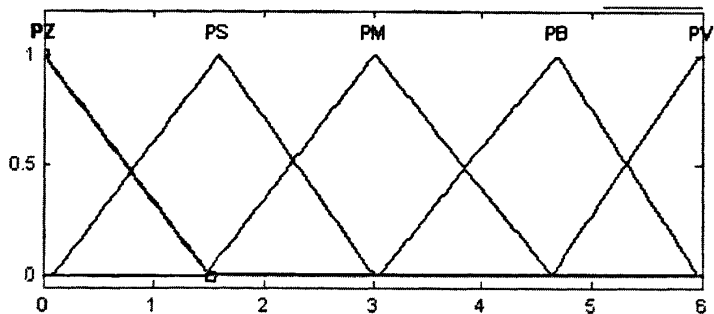


图 5-10 U_j 的隶属函数图

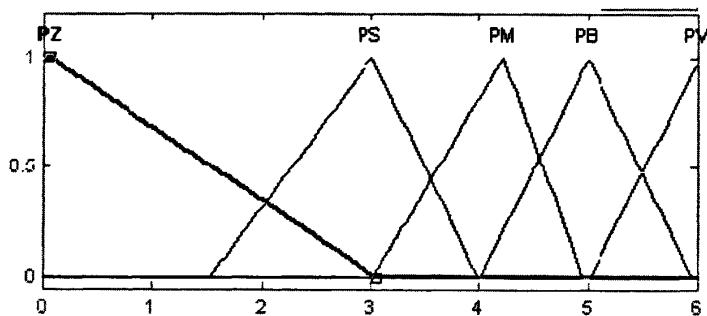


图 5-11 Sc 的隶属函数图

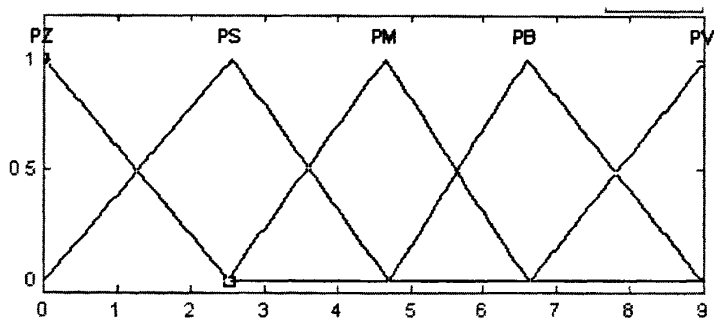


图 5-12 δ_1 的隶属函数图

根据蓄电池的充电特性和参考相关文献^[28], 模糊控制器 2 的充电模糊控制规则如表 5-1 示。

表 5-1 δ_1 和 U_j 、 S_c 的模糊控制规则表

	PZSc	PSSc	PMSc	PBSc	PVSc
PZ U_j	PZ δ_1	PZ δ_1	PZ δ_1	PS δ_1	PS δ_1
PS U_j	PZ δ_1	PS δ_1	PS δ_1	PM δ_1	PM δ_1
PM U_j	PS δ_1	PS δ_1	PM δ_1	PB δ_1	PB δ_1
PB U_j	PM δ_1	PM δ_1	PB δ_1	PV δ_1	PV δ_1
PV U_j	PB δ_1	PB δ_1	PV δ_1	PV δ_1	PV δ_1

最后根据模糊控制规则决定模糊关系，应用模糊逻辑推理算法得出控制器的模糊输出控制量，经精确化后得到精确的控制值去控制被控对象。

5.3 蓄电池动态模型分析

在上述模糊控制器 2 的设计中，关键一步是获取极化电压。本节通过对铅酸蓄电池的动态模型^{[35][36][37]}分析来说明。其模型见图 5-13。由于蓄电池充放电过程的复杂性，因此模型中各个变量都受诸多参数的影响，并且表现出非常强的非线性。

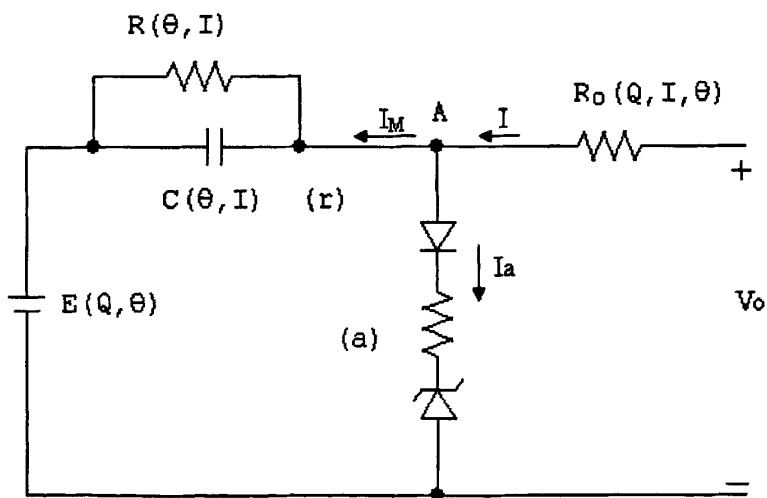


图 5-13 铅酸蓄电池电路模型

其中， E ：电池的电动势；

C ：极化等效电容；

R : 极化等效电阻;

R_0 : 电池的欧姆电阻;

支路(r): 充放电过程的可逆反应, 也是主反应;

支路(a): 一定条件下的析气反应支路;

I : 充电电流;

I_M : 实际充电电流;

I_a : 析气支路电流;

θ : 蓄电池电解液温度($^{\circ}\text{C}$);

Q : 蓄电池已放出电量;

V_o : 蓄电池端电压。

由铅酸蓄电池的动态模型可看出, 充放电时极化效应由极化等效电阻和极化等效电容并联支路决定。由于极化电容很大^[28], 铅酸蓄电池的极化电压在静态即停充时变化缓慢。同时为使充电电流较为平滑, 更紧密跟踪蓄电池的可接受充电电流曲线, 可在充电主电路中加平滑电抗器, 使电流在停充时不马上为零。由于时间常数非常小, 则电流下降到零的时间相对停充时间来说非常短。因此可得出, 在蓄电池停充至充电电流为零时, 蓄电池端电压的下降值就是蓄电池的欧姆压降。则我们可通过实时检测蓄电池的端电压和充电电流得到蓄电池的欧姆压降, 从而得到蓄电池的电动势与极化电压之和即图中 A 点电压。在蓄电池电动势一定的情况下, 该点电压大小能够反应蓄电池的极化情况, 用于去极化放电控制。

然而蓄电池在不同的荷电状态下, 其电动势也不同。由第一章中蓄电池的化学特性可知, 铅酸蓄电池的电动势取决于蓄电池正、负极板上的活性物质的电化学性质和电解液的浓度。因此, 蓄电池从完全放电状态到完全充电状态, 其电解液浓度逐渐变化, 其电动势也在变化。其荷电状态也随着电解液浓度的变化而发生变化。可通过试验的方法, 得到蓄电池的电动势与其荷电状态之间的近似线性关系。

综上所述, 可根据充电过程中对荷电状态的估算, 由蓄电池的电动势与荷电状态的线性关系得出电动势, 然后根据测量端电压的下降值得到电动势与极

化电压之和，从而得到蓄电池的极化情况。

同时，等效模型也说明了变压间歇加负脉冲去极化控制的优势。蓄电池的实际电量为其电动势支路电流的积分。在充电过程中，理想的就是没有任何化学极化和浓差极化产生。但实际上只要在充电过程中有充电电流的增加，电池电动势 E 会增加，且电容两端电压逐渐升高。随着充电电流的增加，变化也越来越明显。通过短时间地停充反向大电流放电，泄放掉电容上积累的电荷，可有效缓解极化，提高电池的充电接受能力，使下一轮的恒压充电更加顺利地进行，从而大大提高充电速度。

5.4 荷电状态估算

目前智能化充电方法的一个研究方向就是基于荷电状态检测的智能化充电^{[31][38]}。常规的充电技术之所以存在诸多缺陷，归根到底是因为它们都没有一套检测蓄电池荷电状态的机制。蓄电池的充电状态得不到反馈，就无法实现充电控制的调节与蓄电池的实际情况相适应，因此就谈不上充电过程的最优化。

在本文的充电控制过程中，荷电状态计算用于：

- ①计算蓄电池电动势进而估算极化情况。
- ②作为控制去极化放电脉冲宽度的参数。
- ③作为不同阶段充电结束的参考。
- ④均衡充电期，用于均充能量回送算法中对 PWM 信号占空比的计算。

因此，在充电控制过程中荷电状态(SOC)是重要参数。所以采取何种方法估算荷电状态很重要。SOC 是多因素的函数，不可能直接对其精确计算或测量。现有多种方法估算 SOC^[39]，常用的方法有：密度法、内阻法、开路电压法、恒定电流电压法、电流积分法等，几种方法各有优缺点。

a. 密度法

有些蓄电池电解液密度的变化取决于电解液浓度的变化，相应地会引起 SOC 的变化，密度法适合于测量这些蓄电池。电解液的密度一般用液体密度计来测量。尽管这种方法在估算 SOC 时具有合理精度，但当蓄电池连续工作或蓄电池密封时就无法使用了。而且只有在蓄电池稳定后才能用这种方法来测量

SOC。然而电解液的扩散速度非常慢，蓄电池在充电或放电后需很长时间才能稳定。因此也不适用与实时估算。

b. 内阻法

研究表明，电池的内阻与荷电状态之间有较高的相关性^[40]。美国 GNB 公司曾对容量 200~1000AH，电池组电压 18~360V 的近五百个电池进行了测试。实验结果表明，内阻与电池容量的相关性非常好，相关系数可以达到 88%。因此，通过测量电池内阻可较准确地预测其剩余容量。蓄电池完全充电和完全放电时，其内阻相差 2~4 倍左右。随着充电过程的进行，内阻逐步减小；随着放电过程的进行，内阻逐步增大。另外，随着电池老化，其内阻也逐渐增大，其剩余电量也随之下降。虽然内阻测试法是目前电池容量检测最有效的方法，但检测时需要采用专用的内阻检测仪，则系统较复杂。

c. 开路电压法

该法是根据铅酸蓄电池的 SOC 与电池的稳态开路电压的线性关系，通过测量电池的稳态开路电压来得到电池的 SOC。图 5-14 为某型号电池 SOC 与电池电压的关系曲线^[41]。从图中可看出两者之间有非常好的线性关系。

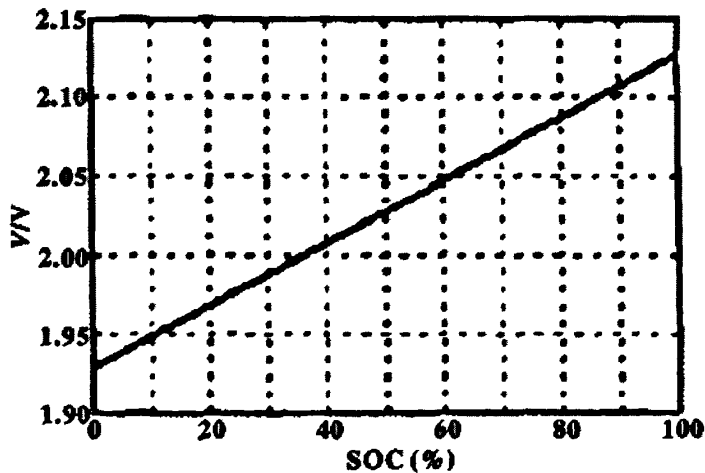


图 5-14 开路电压与荷电状态关系曲线

利用开路电压预测 SOC 较准确，且可避免进一步误差的产生。缺点在于该法实时性不好，电池在动态过程中很难得出上述结论。蓄电池在充电或放电之后，开路电压需要很长的时间才能稳定。在充、放电状态下，其开路电压无法

直接测量。且随着电池老化、剩余容量下降时，开路电压变化不明显，因此也就无法准确预测剩余容量。

d. 恒定电流电压法

该法假定负载电流不变，则负载电压与开路电压成正比。由此可估计电池的 SOC。然而恒流的条件对于一些变化的负载而言就不适用了。

e. 电流积分法

根据第二章中荷电状态的定义可知，SOC 估算的本质是对充放电电流进行实时积分。可用如下公式表示：

$$Sc = \frac{C_0 \pm \int_0^{t_0+it} idt}{C_m}$$

其中，Sc 为蓄电池的荷电状态， C_0 为蓄电池初始容量， C_m 为蓄电池最大容量。蓄电池处于充电状态时，积分项前取“+”，蓄电池处于放电状态时，积分项前取“-”。

蓄电池总容量受到放电电流、温度和放电终止电压的影响。电池的有效容量与放电电流之间的关系式可用 Peukert 方程表示：

$$C_m = KI^{(1-n)}$$

式中 k 和 n 为常数，其中

$$n = \frac{\lg(t_2/t_1)}{\lg(I_1/I_2)}$$

$$K = I_1^n \cdot t_1 = I_2^n \cdot t_2$$

式中 I_1 为最高放电电流， I_2 为最低放电电流， t_1 为与 I_1 对应的放电时间， t_2 为与 I_2 对应的放电时间。

因此，只要由 Peukert 方程表示的被测蓄电池的总容量已知，就可以采用这种方法来计算电池的 SOC。这种方法对蓄电池 SOC 的短时估计具有合理的精度，但对于电池在长时间 SOC 的估计，有较大的累积误差。

通过上述比较分析，在这我们可这样估算 SOC。首先由所测蓄电池的开路电压预测其初始荷电状态和初始电量。在快充阶段和均充阶段，采用对充电电流的积分来估算，并通过其它因素的校正来提高估算精度。在这主要用充电效

率及环境温度来校正。

在不同的充电阶段充电效率是不同的。根据不同的充电效率对电池充入电量估计进行校正，则可得充电阶段电流积分的修正形式如下：

$$Sc = \frac{C_0 + \int_0^{t_0+\Delta t} K_{ch} idt}{C_m}$$

同时，电池的荷电状态受环境温度的影响。环境温度越高，电池剩余电量越大。由于环境温度对电池荷电状态的影响在不同放电率下是相同的。可利用电池在不同温度下的放电曲线拟合得到荷电状态与环境温度之间的关系^[42]：

$$\frac{1}{k_T} = -0.0102T^2 + 0.09082T + 84.137$$

则可得充电阶段电流积分的修正形式如下：

$$Sc = \frac{C_0 + \int_0^{t_0+\Delta t} \frac{1}{K_T} K_{ch} idt}{C_m}$$

5.5 基于 MATLAB 的系统仿真^{[43][44][45]}

5.5.1 蓄电池电路模块仿真分析

Simulink 中的电气系统仿真模块集 SimPowerSystems 提供了一种类似电路建模的方式进行模型绘制。在仿真前自动将电路模型变化成状态方程描述的系统形式，然后在 Simulink 下进行仿真分析。我们利用 SimPowerSystems 工具箱搭建蓄电池动态电路模型作为蓄电池模块，利用受控电压源接受 simulink 中的控制信号，同时模拟充电过程中电压电流等信号。当蓄电池模型以图 5-15 所示的变压间歇加负脉冲电压信号充电时，可得其电流波形如图 5-16 示。

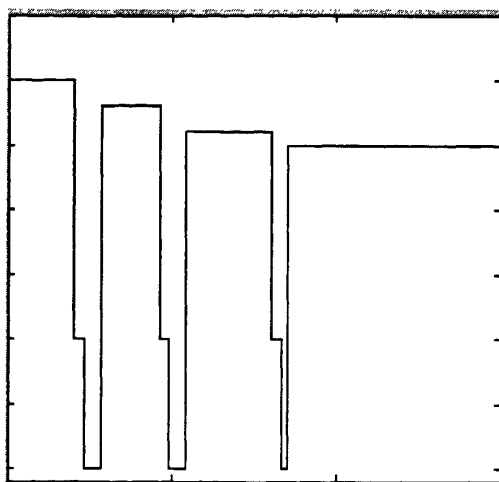


图 5-15 变压间歇加负脉冲电压曲线

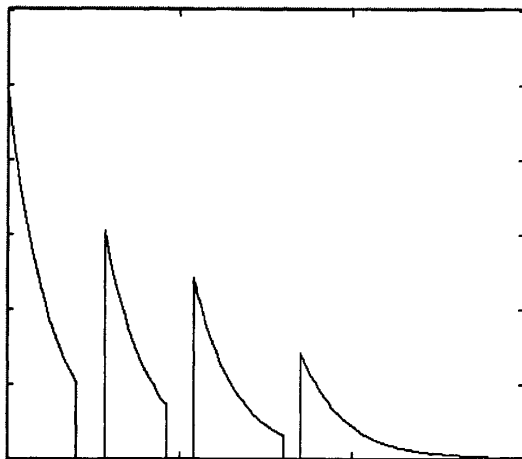


图 5-16 变压间歇加负脉冲充电时电流曲线

由图可见，蓄电池模块模拟的电流信号与前面理论分析符合。各恒压段充电电流随时间而衰减，接近蓄电池固有的可接受充电电流曲线。通过间歇停充及反向放电去极化，避免了恒压充电过程后期充电电流过小而延长充电时间的问题。因此从总体上其充电电流曲线逼近其可接受充电电流曲线，且平均充电电流增大，实现了快速充电。

因此，这里采用此蓄电池模型来模拟实际的蓄电池组充电对象。

5.5.2 模糊推理模块仿真分析

对于模糊控制系统，由于在高级语言中模糊控制器程序实现比较复杂，因此引入模糊控制存在一定困难，程序代码的过于复杂也严重影响模糊控制系统的开发周期。MATLAB 的 Fuzzy Logic Toolbox 提供了一套完善的模糊控制系统设计方案，使用图形交互界面设计 FIS (Fuzzy Inference System 模糊推理系统)，支持模糊聚类 (Fuzzy Clustering) 和自适应模糊神经技术(Adaptive Neuro-Fuzzy Techniques)自动生成 FIS。与 Simulink 结合可在框图仿真环境中测试所设计的 FIS。因此在模糊控制系统仿真分析中得到了广泛的应用。其中 fis 文件是由 MATLAB 生成的模糊推理系统记录文件。文件完整记录了模糊推理系统的结构信息，包括输入输出变量、隶属函数、控制规则等。下图为模糊控制器 1 的 fis 文件 c1.fis 的图形交互界面。

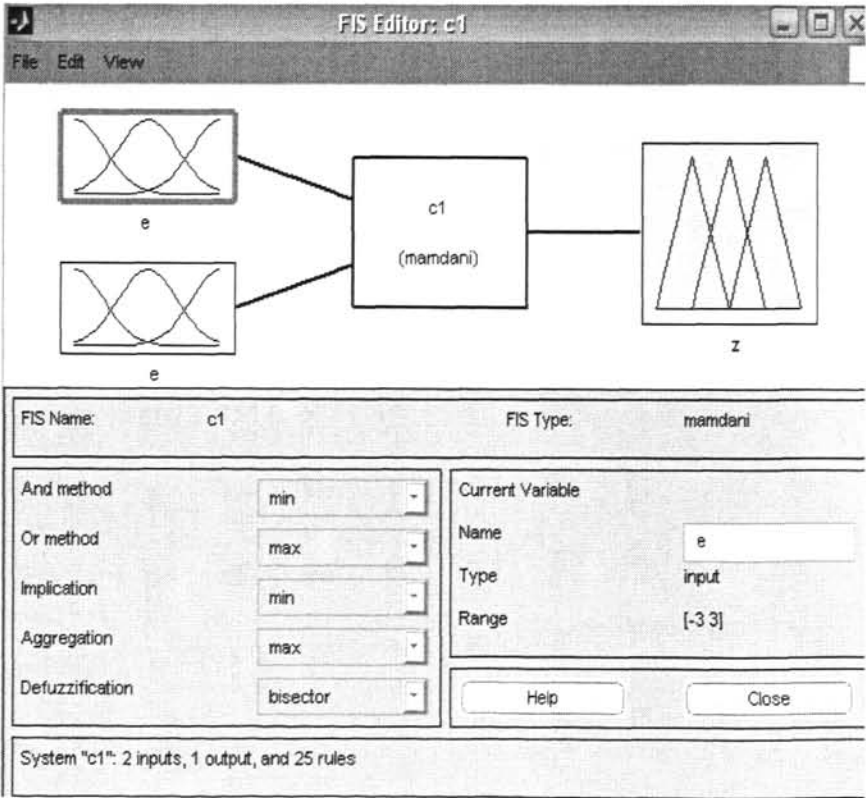


图 5-17 模糊控制器 1 图形交互界面

要完成将模糊推理系统与 simulink 的连接，只要使模糊逻辑控制器方块图的模糊推理矩阵名称与建立的模糊推理系统名称相同即可。在 MATLAB 窗口通

过 `readfis` 命令可显示模糊推理系统的结构信息。

```
>> c1=readfis('fuzzy controller 1.fis')
```

```
c1 =
```

```
    name: 'c1'
```

```
    type: 'mamdani'
```

```
andMethod: 'min'
```

```
orMethod: 'max'
```

```
defuzzMethod: 'bisector'
```

```
impMethod: 'min'
```

```
aggMethod: 'max'
```

```
    input: [1x2 struct]
```

```
    output: [1x1 struct]
```

```
    rule: [1x25 struct]
```

下图即为 `simulink` 环境下模糊控制处理子模块 1。该子模块输入电压设定值及蓄电池模块反馈的蓄电池端电压，输出即模糊控制器 1 的控制量。

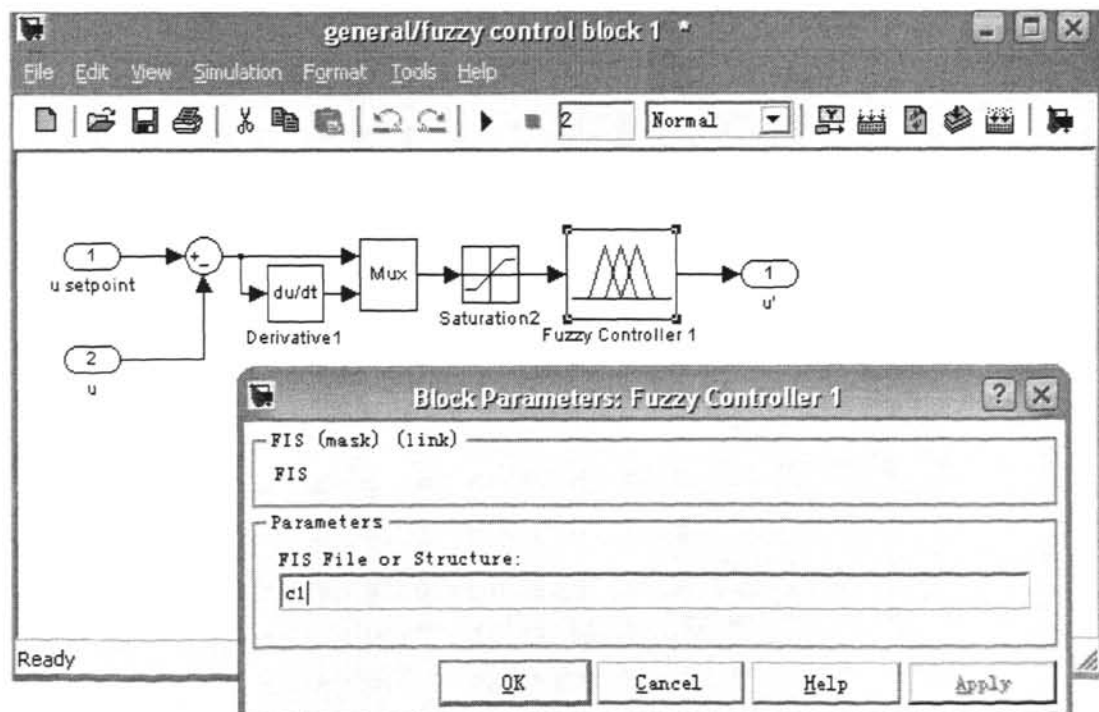


图 5-18 模糊控制处理子模块 1

5.5.3 充电控制系统仿真分析

控制系统一般由控制器、执行器、对象组成。如下图示。

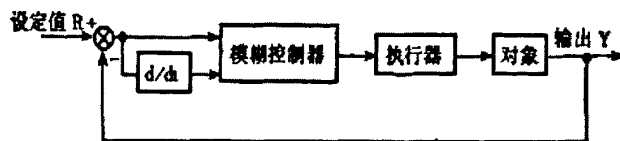


图 5-19 控制系统原理图

在我们的充电系统中，控制部分由两个模糊控制器组成，执行器为主充电电路，对象为蓄电池。在 MATLAB 中利用图形用户界面建立模糊推理系统(FIS)及在 SIMULINK 环境中对模糊控制系统仿真。其系统仿真图如下所示。

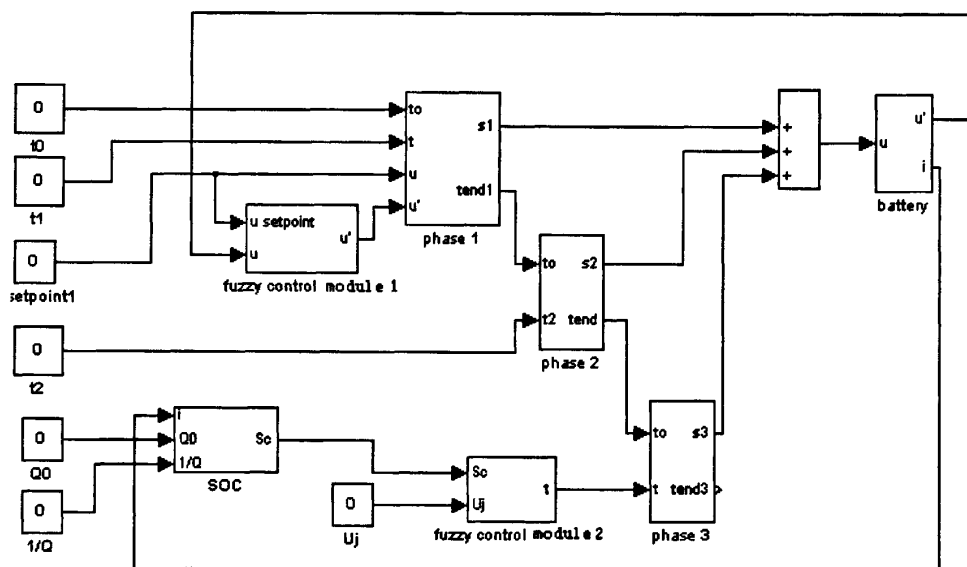


图 5-20 系统仿真图

由图可见，系统主要由这几个模块组成。各模块具体功能及模型输入输出参数说明如下。

恒压段充电控制主要由模糊控制模块 1（fuzzy control module 1）和恒压信号处理模块（phase 1）来实现。输入参数有恒压段开始时间 t_0 ，恒压段充电时间 t_1 ，恒压充电值 u_{setpoint} 。模糊控制模块 1 通过蓄电池模块端电压反馈来修正充电电压。

间歇控制由间歇信号处理模块 (phase 2) 实现。输入参数为间歇段时间 t_2 。

去极化放电控制模块主要由模糊控制模块 2 (fuzzy control module 2) 和去极化信号处理模块 (phase 3) 来实现。通过充电电流的反馈来预测荷电状态。模糊控制模块 2 通过对荷电状态和极化情况的估算来实现对去极化脉冲宽度的控制。仿真结果如图 5-21 示。在相同荷电状态下, 图(b)极化情况比图(a)极化情况严重时, 则在第二种情况下模糊控制器 2 输出控制量即去极化脉冲宽度有所增加。由前面的分析可知去极化脉宽越宽, 消除极化的作用越明显。这里即体现了模糊控制器 2 的调节作用。

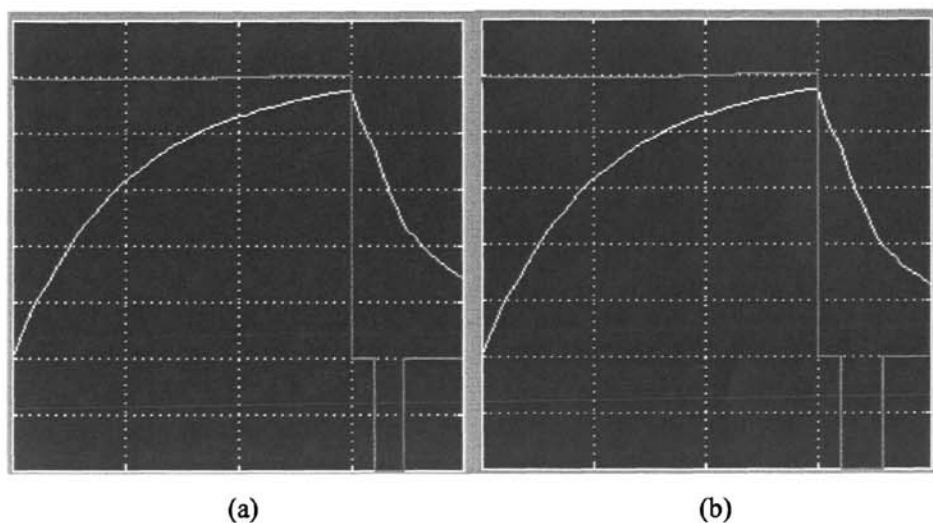


图 5-21 模糊控制器 2 的调节控制仿真

因此, 在变压间歇加去极化放电的充电控制的具体应用中, 可通过理论的探讨结合仿真模拟及实验验证来总结得到不同型号蓄电池的最优控制参数。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本课题主要针对铅酸蓄电池充电系统的充电方法、能量均衡管理及其控制策略进行研究。全文主要完成了以下工作：

1. 对铅酸蓄电池电化学工作原理、充电特性、极化的产生及去极化方法做了介绍与归纳。比较分析了现阶段各充电方法的优缺点，且探讨了各充电模式对充电效率及蓄电池寿命的影响。在这基础上尝试采用变压间歇加适时负脉冲去极化的新型快速充电。

2. 针对蓄电池组充电过程中的不均衡现象，对均充电路结构进行了比较分析，采用了一种无损的动态均充电路，且探讨了均充过程中能量回送算法。

3. 采用新型充电控制策略：变压间歇加适时负脉冲去极化的快速充电控制，直至荷电状态达到 88%以上，充电后期定电压补足及适时均衡充电至电池恢复至完全充电态。采用电压零增量控制和温度变化率控制相结合作为充电终止判断。

4. 对上述充电控制的实现作了探讨。从理论上探讨了充电控制参数选择的一些基本关系。同时引入了模糊控制技术。文中给出相关模糊控制器的设计，且在 MATLAB 环境中完成相关仿真。

6.2 展望

由于时间和水平有限，很多方面只是进行了初步的探讨及设计，更深层次的问题还有待进一步研究和解决。

1. 充电方法的具体实现还有待进一步的研究，需要做大量的实验来总结。

2. 目前尚未建立起有效的方法来分析和设计模糊控制系统，主要还是依靠经验，给设计带来了许多不便。因此结合神经网络控制的自学习特性，通过对系统的自学习生成完善的控制规则，这需要进一步研究。

3. 在电池荷电状态的预测上，其精确度有限，一定程度上影响快速充电及均充的效果。

参考文献

- 【1】. 张家友. 串联蓄电池组充电均衡系统研究[D]. 合肥工业大学硕士学位论文. 2006
- 【2】. 刘春梅, 朱世宁. 汽车动力铅酸电池的充放电特性及均衡管理技术的研究[J]. 柳州职业技术学院学报, 2005,5(4): 94-98
- 【3】. 舒新. 蓄电池监测系统研究与开发[D]. 河海大学硕士学位论文. 2007
- 【4】. 卢汉辉. 蓄电池组充电管理系统关键技术的研究[D]. 上海交通大学硕士学位论文. 2007
- 【5】. 郭丽芳. 智能充电装置及其控制技术[D]. 河海大学硕士学位论文. 2003
- 【6】. 赖宜章. 免维护铅酸蓄电池智能快速充电系统[J]. 电源世界, 2004(8): 21-23
- 【7】. 姚爱娣. 基于 DSP 的电池充电系统研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文. 2006
- 【8】. 王源. 电动汽车用动力铅酸电池快速充电技术研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2006
- 【9】. 钟静宏, 张承宁, 张旺. 电动汽车的铅酸蓄电池快速脉冲充电系统[J]. 电源技术, 2006,30(6): 504-506
- 【10】. 杜飞龙. 电动汽车铅酸蓄电池智能快速充电方法的研究[J]. 变流技术与电力牵引. 2004,4: 34-36
- 【11】. Chih-Chiang Hua, Meng-Yu Lin. A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles[C]. IEEE, 2000: 135-138
- 【12】. 王举. 智能蓄电池充放电测控系统[D]. 沈阳工业大学硕士学位论文. 2005
- 【13】. 陈体銮, 甄春花. VRLA 蓄电池变电流间歇快速充电方法[J]. 蓄电池, 1999, 1: 6-8
- 【14】. 王库, 冯义. 快速充电技术的探讨[J]. 中国农业大学学报, 2001,6(2): 62-67
- 【15】. 冯义. 一种智能充电系统的初步研究[D]. 中国农业大学硕士学位论文. 2000
- 【16】. 王吉华. 电动车电池组串联充电分流均衡控制实验研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文. 2004
- 【17】. C.S. Moo, Y.C. Hsieh, I.S. Tsai, J.C.Cheng. Dynamic charge equalization for series-connected batteries[J]. IEE Proc-Electr. Power Appl, 2003,150(5): 501-503
- 【18】. CHIN S.Moo, YAO C.HSIEH, I S.TSAI. Charge equalization for series-connected batteries[J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2003,39(2): 704-709
- 【19】. 罗光毅. 蓄电池智能管理系统[D]. 浙江大学硕士学位论文. 2003
- 【20】. 江莉. 阀控式密封铅酸蓄电池在线监测系统的研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文. 2007
- 【21】. 向德军. 用于铅酸蓄电池的大容量智能充电系统的研究[D]. 武汉大学硕士学位论文. 2004
- 【22】. 袁翔, 黄威, 何彦平, 黄鹏. 铅酸蓄电池的充放电均衡方法[J]. 长沙交通学院学报, 2005,21(3): 11-15
- 【23】. 冉建国, 陈胜军. 通过电池均衡提高铅酸蓄电池组寿命[J]. 电源技术, 2006,30(7): 576-579
- 【24】. 王伟. 基于模糊控制的 VRLA 蓄电池智能充电系统的研究[D]. 吉林大学硕士学位论文. 2007

- 【25】. 胡玉祥, 孙德辉. 基于 DSP 的软件脉宽调制型蓄电池充电器开关电源[J]. 电气应用. 2006,25(8): 64-66
- 【26】. 李坤. 智能充电器及蓄电池维护系统设计与研究[D]. 天津工业大学硕士学位论文. 2007
- 【27】. 王源. 电动汽车用动力铅酸电池快速充电技术研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2006
- 【28】. 李敬兆. 采用神经网络预测和变结构模糊控制的铅酸蓄电池最优充电技术研究[D]. 合肥工业大学博士学位论文. 2003
- 【29】. 陈长琦, 叶进星, 朱武, 谢源, 周连延. 基于 Matlab 的模糊控制系统的设计与仿真[J]. 计算机时代. 2003,1: 26-31
- 【30】. 邱志远. 蓄电池智能分只均充控制系统研究及应用[D]. 贵州大学硕士学位论文. 2007
- 【31】. 丁昂. 阀控式免维护铅酸蓄电池脉冲充电技术及其智能管理[D]. 浙江大学硕士学位论文. 2006
- 【32】. 王举. 智能充/放电测控系统[D]. 沈阳工业大学硕士学位论文. 2005
- 【33】. Yao C.Hsieh, Chin S.Moo, I S.Tsai. Balance charging circuit for charge equalization[C]. IEEE, 2002: 1139-1142
- 【34】. 孙频东. 串联蓄电池均衡充电系统[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2006,6(1):14-15
- 【35】. 彭金春, 陈全世, 韩曾晋. 电动汽车铅酸电池充放电过程建模[J]. 汽车技术, 1997, 6: 6-7
- 【36】. Massimo Ceraolo. New dynamical models of lead-acid batteries[J]. IEEE transactions on power systems. 2000,15(4)
- 【37】. Stefano Barsali, Massimo Ceraolo. Dynamical models of lead-acid batteries : Implementation issues[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2002,17(1)
- 【38】. 朱元, 韩晓东, 田光宇. 电动汽车动力电池 SOC 预测技术研究[J]. 电源技术. 2000,24(3): 153-156
- 【39】. 赵兴福. 电动汽车蓄电池的建模与仿真研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文. 2004
- 【40】. 俞静. 铅酸蓄电池均衡控制的研究[D]. 重庆大学硕士学位论文. 2007
- 【41】. 冉建国, 陈胜军. 通过电池均衡提高铅酸蓄电池组寿命[J]. 电源技术, 2006,30(7): 576-579
- 【42】. 于凤新, 周强, 王玉铭. 基于 DSP 的纯电动汽车电量监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 增刊: 334-335
- 【43】. 张宏立. MATLAB 中复杂非线性模块的构造[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2004,11(1): 419-422
- 【44】. 张建仁, 王莉. 基于 MATLAB 的模糊控制系统的仿真[J]. 自动化与仪器仪表. 2003,1: 5-8
- 【45】. 李博, 龚晓宏. 基于 MATLAB 的模糊控制系统的优化设计与仿真[J]. 机械工程与自动化. 2005,4(2): 78-83

作者在攻读硕士学位期间公开发表的论文

- 【1】. 李智华, 秦爱辉, 张青春, 高贵顺. 大电流电感工作特性的改进. 磁性材料及器件, 2007, 38 (3)
- 【2】. 李智华, 秦爱辉, 张青春. 基于数字示波器的高频磁芯损耗测量. 电测与仪表, 2007, 44 (503)
- 【3】. LI Zhi-hua, ZHANG Qing-chun ,QIN Ai-hui. Research On DC Operating Characteristic Improvement Of High-frequency Choke.2007 International Conference On Life System Modeling And Simulation.

致 谢

本文是在导师李智华的悉心指导下完成的。承蒙李老师的亲切关怀和精心指导，虽然有繁忙的工作，但仍抽出时间给予我学术上的指导和帮助，使我从中获益不浅。李老师对学生认真负责的态度、严谨的科学研究方法、敏锐的学术洞察力、勤勉的工作作风以及勇于创新、勇于开拓的精神是我学习的榜样。在此，谨向李老师致以深深的敬意和由衷的感谢。

还要感谢我的父母，他们在生活上给予我很大的支持和鼓励，是他们给予我努力学习的信心和力量。

最后，感谢所有关心我、支持我和帮助过我的同学、朋友、老师和亲人。在这里，我仅用一句话来表明我无法言语的心情：感谢你们！