

中图分类号:



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM 公开

学科分类号:

论文编号: 1000408122085

北京交通大学

硕士学位论文

混合动力汽车用锂离子电池管理系统的研制

作者姓名 蔡群英

学科专业 电气工程

指导教师 张维戈 副教授

培养院系 电气工程学院

二零一零年六月

北京交通大学

硕士学位论文

混合动力汽车用锂离子电池管理系统的研制

**Battery Management System of Li-ion Battery for
Hybrid Electric Vehicle**

作者：蔡群英

导师：张维戈

北京交通大学

2010年6月

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,提供阅览服务,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 李印天

签字日期: 2010年6月18日

导师签名: 张印天

签字日期: 2010年6月18日

中图分类号: U469
UDC: 621

学校代码: 10004
密级: 公开

北京交通大学

硕士学位论文

混合动力汽车用锂离子电池管理系统的研制

**Battery Management System of Li-ion Battery for Hybrid Electric
Vehicle**

作者姓名: 蔡群英

学 号: 08122085

导师姓名: 张维戈

职 称: 副教授

学位类别: 工学

学位级别: 硕士

学科专业: 电气工程

研究方向: 新能源

北京交通大学

2010年6月

致谢

本论文的工作是在我的导师张维戈教授的悉心指导下完成的，张维戈教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢三年来张老师对我的关心和指导。

姜久春老师、王占国老师悉心指导我们完成了实验室的科研工作，在学习上和生活中都给予了我很大的关心和帮助，在此向姜老师、王老师表示衷心的感谢。

李景新老师、王建强老师、黄勤河老师、孙丙香老师对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，牛利勇博士、文锋博士、温家鹏博士、郭宏榆博士、时玮博士、劳力、盛大双、张金灵、刘忠其、赵梦觉、张斌、安国平、关炆、刘宝、施韵、王有珺、邱慧、牛萌、刘浩、刘蔚、赵倩、林培峰、李索宇等同学对我论文中的电池特性、电路设计、系统集成等研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

在系统调试阶段，多次得到惠州市亿能电子有限公司员工的帮助，在此感谢他们。

另外也感谢我的家人，是他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

中文摘要

摘要：随着近年来不可再生资源短缺的威胁和环境保护呼声不断升温，人们正在寻找新的清洁替代能源。作为大众交通工具的汽车，是实现节能减排、保护环境的重要突破口，原先以石油为能量来源的汽车将向以清洁能源为能量来源的汽车方向转变，而混合动力汽车是这一演变中的过度产物，其中电池管理系统是混合动力汽车中关键的零部件，是电池和整车之间的联接纽带。

电池管理系统主要是通过实时监测电池参数，包括电压、电流、温度等，判断出电池的状态，并根据此时状态给出电池的使用策略，对电池进行优化的使用，既防止出现滥用，保障其安全有效地使用；又能最大限度地发挥电池的性能，提高能源利用效率，降低了汽车尾气排放量。

目前尚没有一套完整的适用于锂离子电池的混合动力汽车的电池管理系统，本文就这一课题进行研究，在已有的电池管理系统原型的基础之上，对混合动力汽车的行驶状况进行分析，提出一套适合于混合动力的汽车电池管理系统。

本文首先对应用于混合动力汽车的锂离子电池进行性能上的分析，了解其工作特性，然后根据其特性分析总结出适用于混合动力汽车电池管理系统的策略，其次设计了电池管理系统的软硬件，上位机监控软件等，最后对其系统性能进行验证，证明系统的可靠性。

关键词：混合动力汽车；电池管理系统；锂离子电池组；电池均衡

分类号：U469

ABSTRACT

ABSTRACT: Recently, people are searching for new clean alternative energy to face the shortage of non-renewable resources threaten as well as the pressure of environment protection.

Vehicles, as public transport, is the key breakthrough to realize energy conservation and environment protection.

Clean energy vehicles will substitute for traditional petrolic ones someday, and hybrid electric vehicle is just the milestone in this transition. What's more, battery management system which serves as the key parts will join battery and car.

BMS is mainly through real-time monitoring of battery parameters, including voltage, current, temperature, etc., to determine the status of the battery, and according to the state at this time given battery strategy to optimize the battery usage, both to prevent abuse, to ensure their safe and effective use; can maximize battery performance, increase energy efficiency, reduce vehicle exhaust emissions.

At present, Li-ion battery BMS for HEV is still imperfect. The paper is study on this issue base on original researches by analysis driving conditions, and finally proposing a suitable strategy.

This paper firstly analysis functions of Li-ion and understand its working statement, secondly figure out a suitable strategy, thirdly rebuild BMS software and hardware and so on, finally examine reliability of the system.

KEYWORDS: HEV; Battery Management System; Li-ion Battery; cell balancing

CLASSNO: U469

目录

中文摘要	iii
ABSTRACT.....	iv
1 绪论	1
1.1 混合动力汽车的发展	1
1.1.1 混合动力汽车简介	1
1.1.2 国内外混合动力汽车现状	2
1.2 混合动力汽车用动力电池	2
1.3 电池管理技术现状和主要问题	3
1.4 本课题的主要内容	3
2 锂离子电池特性分析	5
2.1 锂离子电池的组成及工作原理	5
2.2 锂离子电池的特点	6
2.3 锂离子电池的性能指标	6
2.3.1 电池的内阻	6
2.3.2 原电池的电动势	7
2.3.3 电池的开路电压	7
2.3.4 电池的工作电压	8
2.3.5 有效容量	8
2.3.6 有效能量	9
2.3.7 输出功率	9
2.3.8 充电效率	10
2.3.9 放电效率	10
3 电池管理系统策略研究	11
3.1 电池组均衡方法	11
3.1.1 电池串联的应用	11
3.1.2 锂电池组不一致性分析	11
3.1.3 均衡方法分析	13
3.1.4 本系统采用的方案	15
3.2 电池组的热管理	17
3.2.1 电池发热原理	17
3.2.2 电池热失控的危害	19

3.2.3	热管理方法	19
3.3	电池组的运行策略	21
3.4	电池组的安全性	23
3.4.1	锂离子电池安全性的含义与实质	24
3.4.2	电池组安全性控制策略	24
4	电池管理系统的实现	26
4.1	电池管理系统硬件部分	27
4.1.1	电源及 CPU	27
4.1.2	单体电压测量	27
4.1.3	电池组均衡	29
4.1.4	温度测量	30
4.1.5	总电压测量	31
4.1.6	总电流测量	32
4.1.7	绝缘测量	33
4.1.8	通讯部分	35
4.1.9	高压控制及其他	36
4.1.10	总结	36
4.2	电池管理系统软件部分	37
4.2.1	从板程序设计	37
4.2.2	主板程序设计	38
5	数据的采集及分析	40
5.1	上位机软件设计	40
5.2	数据分析	43
6	总结	46
6.1	全文总结	46
6.2	后期展望	47
	参考文献	48
	作者简介	49
	独创性声明	50
	学位论文数据集	51

1 绪论

作为温室气体排放量比较高的汽车越来越受到人们的重视，减少汽车的尾气排放成为建设低碳城市的标志。汽车自诞生以来，已经走过了 100 多年的发展历程，在现代社会的生活里已成为越来越重要的交通工具，对提高人们的生活质量、改善生活方式、提供便捷、舒适的出行服务，以及对拉动国民经济等方面都发挥了极其重要的作用。然而传统的燃油车辆在使用过程中排放出大量的有害废气，并且加剧了对不可再生石油资源的消耗。如果三分之一的人用骑自行车代替开车出行，那么每年将节省汽油消耗约 1280 万吨，相当于一家超大型石化公司全年的汽油产量。如果每月少开一天车，每车每年可节油约 44 升，相应减少二氧化碳 98 千克。如果全国 1947 万辆私人轿车的车主都做到，每年可节油约 9 亿升，减少二氧化碳 197 万吨。

进入新世纪以来，汽车动力改革表现在突飞猛进的新能源电动汽车技术。油电混合动力技术进入产业化，锂动力电池技术取得重大突破，车用燃料电池技术不断进步。这些技术非常适合在我国能源资源状况及交通结构条件下推广应用。我国目前每天有超过 9 亿度低谷电，可供 5000 万辆左右电动汽车充电。我国锂资源、稀土资源和镁资源丰富，可以为电动汽车关键部件提供原材料资源保障。我国电动自行车、电动摩托车等轻型电动车保有量已超过 5000 万辆，在世界上遥遥领先，为新能源汽车产业化奠定了良好基础。总之，新能源汽车技术变革为我国车用能源转型和汽车产业振兴提供了历史机遇。然而，纵使电动汽车有很多优点，但它一时间却无法取代传统的燃气动力模式，所以混合动力汽车是目前新型清洁动力汽车中最具有产业化和市场化前景的车型。

1.1 混合动力汽车的发展

1.1.1 混合动力汽车简介

混合动力汽车（HEV）是指采用两种以上动力源的汽车，其主要特点：

1. 采用小排量的发动机，降低了燃油消耗；
2. 可以使发动机经常工作在高效低排放区，提高了能量转换效率，从而降低了燃油排放；
3. 将制动、下坡时的能量回收到蓄电池中再次利用，降低了燃油消耗；

4. 电机和内燃机联合驱动提高了车辆的动力性;
5. 利用现有的加油设施, 具有与传统燃油汽车相同的续航里程。

目前世界各国研究开发的混合动力电动汽车, 根据驱动系统的配置和组合方式分为串联式、并联式和混联式三种方式。

另一种分析混合类型或级别的方法是基于电动机的强度、汽车配备的混合动力传动系统性能的多少。等级较低的混合称为微混合(Micro Hybrid), 等级较高的混合则称为强混合(Strong Hybrid)。

1.1.2 国内外混合动力汽车现状

日本丰田的普锐斯可谓混合动力汽车中的标志, 已经成为节能环保的代名词。丰田早在 20 世纪 70 年代就开始研究混合动力, 推出了丰田世纪 S800 燃气轮机混合动力车。1997 年, 第一代丰田普锐斯面市, 他成为了全球第一款量产的混合动力汽车。2004 年推出第二代丰田普锐斯。目前 2010 款的丰田普锐斯也已上市。

作为日本的另一个汽车厂商本田, 也已推出了 Civic 混合动力汽车, 其销量在北美也有不俗成绩。

可以说日本在混合动力方面已经占足了先机, 作为汽车业传统强国的德国, 也不甘示弱, 德国的几家汽车公司甚至联合起来开发混合动力技术, 奔驰推出 S400 Blue Hybrid 混合动力车, 宝马 7 系也推出了 Active Hybrid, 这两款都属于轻度混合动力车型。

纵观国内, 在国家政策的指导下, 以及几个科技计划的支撑下, 长安、奇瑞、吉利、一汽、东风、广汽、福田、长城等公司都已研制或正在研制中。

比较以上车型, 日系汽车厂商都是使用镍氢电池作为清洁能源的动力, 这与他们在镍氢电池技术上的领先地位分不开的, 但目前随着锂离子电池技术的改进, 他们也在研究用锂离子电池的混合动力车。德国和美国的企业, 由于起步较晚, 他们大多数选用的是锂离子电池作为清洁能源的动力, 这与锂离子电池的部分专利技术在美国也有一定关系。而国内的汽车制造商, 长安、奇瑞、一汽、东风等几大厂商都还在用镍氢电池作为清洁能源的动力, 这在一定程度上也是受普锐斯的影响。

1.2 混合动力汽车用动力电池

汽车用动力电池一般指具有较高的容量和输出功率的能力, 可用作电动车辆驱动电源的两次电池。一般情况下, 混合动力汽车用动力电池组进行的是频繁、

浅度的充放电循环。在充放电过程中，电压、电流的变化可能较大。针对这些使用特点，混合动力系统对其电池有以下特别要求：

第一，大功率充放电的能力。体积比功率和质量比功率是衡量电池快速充放电能力的指标，相对于对能量的要求，混合动力系统对电池比功率要求更高，混合动力系统在再生制动、能量回收或低功率调峰时要求其电池能够在较短时间内存储很多的能量。

第二，高充放电效率。混合动力汽车中相当一部分能量常常会经历从充电到放电的循环。充电效率的高低对整车的效率起到至关重要的作用。

第三，长时间的使用寿命。混合动力汽车用电池相对于纯电动车，其有很高的充放电循环，所以电池的循环寿命的高低也是衡量一部车好坏的标准。

1.3 电池管理技术现状和主要问题

经过前辈们惨痛的教训后，研究人员逐渐认识到技术水平和生产工艺仅仅能决定电池初始的性能，其中包括电池的种类、其成本、有无记忆效应、环境污染程度、电池电压等级、比能量、自放电性能、内阻、温度范围、倍率特性、电池一致性、功率密度、循环寿命、稳定性和安全性等。在使用过程中，电池性能会随其状态、运行环境以及老化程度等参数变化而变化，电池的使用策略也应当随之改变才能避免出现滥用和不合理使用，这可以通过对电池进行科学化的管理来实现。电池管理技术就是通过实时检测和估算电池状态（包括单体电压、温度、电流、直流内阻、极化电压、SOC、最大可用容量、老化程度以及一致性等），并据此提供电池（组）的优化使用方法，既防止电池（组）出现滥用和不合理使用，保障其使用寿命和安全性；又能最大限度的发挥其作用，提高车辆运行的效率，实现电池能量利用的高效。电池管理技术的重要程度逐渐受到人们的广泛关注和重视。

而目前国内还没有一套比较完善的混合动力汽车用锂离子电池的管理系统，本课题就是在以上问题进行系统的优化，使其可以应用于混合动力汽车，并保证其的安全、高效和长寿命。

1.4 本课题的主要内容

本课题是在原有的锂离子电池纯电动汽车电池管理系统和镍氢电池混合动力汽车电池管理系统的基础之上进行整合，研发出的适用于锂离子电池混合动力汽车的电池管理系统。对原有的系统进行优化整合。并就锂离子电池的应用环境提

出对电压测量和控制策略改进,使其更适用于混合动力汽车。

主要研究内容有:

一、电池特性:

由于之前的混合动力汽车使用的是镍氢电池,锂离子电池应用于混合动力汽车还没有成熟,在运行中所表现出的特性不是很了解,因此要想做好这套系统,就必须首先对锂离子电池的特性进行理论分析、实验测量、数据分析,熟悉其特性,然后依据其特性进行优化管理。

二、电压测量:

对电池特性的分析除了对电流和温度的测量,主要的测量环节就是单体电压的测量,而电流和温度的采集点与单体电压的采集点相比很少,在数据处理上基本能够实时反映采集点的信息。要想实时的并且同步的反映每节单体电池电压,其测量方案需要详细的设计,既要考虑到准确性,又要兼顾成本。

三、电池的均衡方案:

随着人们对电池的深入应用,越来越意识到电池均衡性的重要性。如果电池出现了不均衡的状况,电池的使用寿命也将大大的缩短。而混合动力汽车用电池是工作环境比较恶劣,并且很难得到定期的自身维护。当电池出现不均衡的情况,电池管理系统应该出于保护电池的目的,给予电池一定均衡,使各个单体之间特性基本一致,以延长整组电池的使用寿命。

四、电池箱的热管理:

由于电池的特性随温度的变化影响比较大,因此如何给电池一个很好的工作温度,这也应该是电池管理系统应该考虑的,应当时刻保持电池箱内的温度最适宜电池工作,这样可以尽可能的发挥电池的最大效率。

五、电池的控制策略:

电池在不同状态下对外表现的特性是不一样的,这就要求电池管理系统对电池的状态进行评估,并根据这一状态来决定整车如何来使用电池,如果不进行这一步,这样就会对电池造成及其恶劣的影响,缩短电池的使用寿命,甚至产生安全隐患。这就需要电池管理系统与整车控制器之间进行很好的配合协调,使电池工作在较为理想的工况下。

六、安全性:

作为人们日常使用品,安全性应该放在第一位来考虑的,内燃机车的安全性是经过了一个很长的过程才得以解决的,而作为新能源汽车,就不能重复以前曲折的道路,在最初的设计时就要把安全性放在首位来考虑。清洁能源动力这部分是以前不曾有的,所以电池的安全性就成为混合动力汽车的最大隐患,如何很好的解决这一问题,就依赖于电池管理系统。

2 锂离子电池特性分析

电池是一种将化学能与电能相互转换的装置。自 1859 年 R.G.Plante 发明铅酸蓄电池、1868 年 G.Leclanche 制成锌锰干电池以来，化学电源经历了 100 多年的发展历史，它已经成为人们生活中应用极为广泛的方便能源，在国民经济和国防工业中占有十分重要的地位。

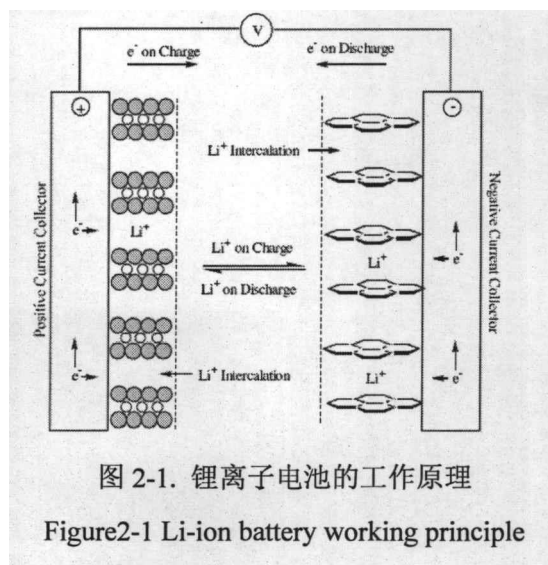
2.1 锂离子电池的组成及工作原理

一般意义上的电池主要由正极、负极、隔膜和电解质四部分组成。锂离子电池的正负极均为能够可逆嵌锂—脱锂的化合物。正极材料一般选择电势（相对 Li^+/Li ）较高且在空气中稳定的嵌锂过渡金属氧化物，主要有层状结构的 LiMO_2 和尖晶石型结构的 LiM_2O_4 化合物 ($\text{M}=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}, \text{V}$ 等过渡金属元素)。负极材料则选择电势尽可能接近金属锂电势的可嵌锂的物质，常用的有焦炭、石墨、中间相炭微球等炭材料，及锂过渡金属氮化物、过渡金属氧化物、复合氧化物等。

电解液一般为 LiClO_4 , LiPF_6 , LiBF_4 等锂盐的有机溶液。有机溶剂为 PC（碳酸丙烯酯）、EC（碳酸乙烯酯）、BC（碳酸丁烯酯）、DMC（碳酸二甲酯）、DEC（碳酸二乙酯）、EMC（碳酸甲乙酯）、DME（二甲基乙烷）等中的一种或几种的混合物。

隔膜材料一般为聚烯烃系树脂，常用的隔膜有单层或多层的聚丙烯（PP）和聚乙烯（PE）微孔膜。

锂离子电池的工作原理示于图 2-1。



由图可知,该电池的工作过程仅仅是锂离子从一个电极脱嵌,进入另一个电极嵌入的过程。

2.2 锂离子电池的特点

与其它二次电池相比,锂离子电池具有以下特点:

- (1) 高能量密度。锂离子电池比容量已达 140mAh/g,是 Ni/MH 电池的 1.5 倍、Cd/Ni 电池的 3 倍;锂离子电池的重量是相同容量的镍镉或镍氢电池的一半,体积是镍镉的 40-50%,镍氢的 20-30%。
- (2) 高电压。不同正极材料锂离子电池单体的工作电压为在 3.2—4.5V 之间,相当于三个串联的镍镉或镍氢电池。
- (3) 无污染。锂离子电池不含有诸如镉、铅、汞之类的有害金属物质。
- (4) 不含金属锂。锂离子电池不含金属锂,因而安全性能能得到一定的保证。
- (5) 循环寿命高。在正常条件下,锂离子电池的充放电周期可超过 500 次。
- (6) 无记忆效应。记忆效应是指镍镉电池在充放电循环过程中,电池的容量减少的现象。锂离子电池不存在这种效应。
- (7) 快速充电。锂离子电池在一至两个小时内可充满。

2.3 锂离子电池的性能指标

2.3.1 电池的内阻

电流通过电池内部受到的阻力,使电池的电压降低,此阻力被称为电池的内阻,电池的内阻不是常数,在放电过程中随放电时间不断变化,因为活性物质的组成、电解液的浓度、温度等都在不断变化。

电池的内阻包括欧姆内阻和极化内阻,二者之和为电池的全内阻,内阻的存在使电池放电时的端电压低于电池的电动势和开路电压,充电时端电压高于电池的电动势和开路电压。

欧姆内阻是电池在电传导方向上所遇到的阻力,主要由电极、电极材料、集流体、电解液、隔膜等的电阻以及各部分零件的接触电阻所组成,它与电池的尺寸、结构,电池的成型方式、装配松紧度等因素有关,欧姆内阻遵从欧姆定律。

正极、负极进行电化学反应时,因极化引起的内阻称为极化内阻,极化内阻与活性物质的本质、电极的结构、电池的制造工艺等因素有关,尤其与电池的工

作条件有关, 放电电流和温度对其影响很大。在大电流密度时候, 电化学极化和浓差极化均增加, 甚至可能引起负极的钝化; 温度降低对活化极化、离子的扩散均有不利影响, 故在低温条件下电池的全内阻增加, 极化内阻随电流密度的增加而增加, 但不是线性关系。^{[8][9]}

2.3.2 原电池的电动势

根据 $-\Delta_r G_m = W_r'$, 在恒温恒压下体系自由焓的减小等于体系的可逆非体积功。当电池在恒温恒压可逆条件下放电时, 体系所做的可逆非体积功, 就是可逆电功。

$$\text{所以: } -\Delta_r G_m = nFE \quad \dots(2-1)$$

式中, n 为电极在氧化或还原中电子的计量个数; F 为法拉第常数 (约为 96500 库伦); E 为可逆电流的电动势。

在实际电池放电时, 因各种不可逆方式的存在, 使得两极之间的点位差 E' 小于电动势 E 。

$$-\Delta_r G_m > nFE' \quad \dots(2-2)$$

式中揭示了化学能转变为电能的最大值, 为电池设计与改进提供了理论依据。

2.3.3 电池的开路电压

电池处于不放电的断路状态时, 电池两极之间的电位差被称为开路电压, 一般可用高内阻电压表和万用表测量。

电池的开路电压主要取决于构成电池材料的本性, 诸如正负极材料的本质及电解液的性质, 如果构成电池材料的本质完全相同的话, 那么无论电池体积多大, 几何结构如何变化, 其开路电压都是已知的。对于同一系列的电池, 由于材料来源不同, 晶体结构不同, 制成电池的开路电压是不完全相同的, 基本上只在一定范围内波动, 所以开路电压是电池体系的一种特征参数, 当然电池贮存过程中, 开路电压也会有所下降, 主要是电池的自放电等因素引起的, 只要下降幅度不大是正常现象。

此外, 开路电压的实质是正极稳定电位和负极稳定电位的差, 稳定电位是电极-溶液界面的电位差, 其反应的本质是固液界面的性质, 只要界面性质变化, 就影响电极的稳定电位值, 从而导致开路电压的变化, 稳定电位属于动力学的范畴, 所以开路电压也属于动力学的范畴。而电动势是热力学平衡体系下的参数, 在数值上是正负极两极平衡电极电位的差, 一般开路电压在数值上小于或接近电池电

动势的值。

2.3.4 电池的工作电压

电池的工作电压是指电池放电时电池两极之间的电位差，又被称为放电电压或端电压，由于电池存在的内阻，当电池工作电流流过电池内部时，必须克服由电极极化和欧姆内阻所造成的阻力，因此工作电压总是低于开路电压与电池的电动势。电池的工作电压受放电制度的影响很大，所谓放电制度是指电池放电时所规定的各种放电条件，主要包括放电方式是连续的还是间歇的，放电电阻是大是小，放电电流是高是低，放电时间是长是短，终止电压是高是低及放电环境温度的高低等。

放电曲线是指在一定的放电条件下，电池的工作电压随放电时间的变化曲线同一放电制度下，工作电压下降速度快，放电时间也短，会影响到电池的实际使用效果；工作电压下降速度慢，往往给出较多的容量。工作电压的下降变化速度有时被称作放电曲线的平稳度。

当电流流过电池内部时，必须克服由电极极化和欧姆内阻所造成的阻力，因此工作电压总是低于开路电压，当然也必定低于电动势。

$$V = E - IR_{\text{内}} = E - I(R_{\Omega} + R_L) \quad \dots(2-3)$$

或

$$V = E - \eta_+ - \eta_- - IR_{\Omega} = \varphi_+ - \varphi_- - IR_{\Omega} \quad \dots(2-4)$$

式中， η_+ 和 η_- 分别表示正极极化和负极极化的过电位； I 为电池的工作电流； φ_+ 和 φ_- 分别为流过电极正负极时的电极电位或者极化电位； R_{Ω} 表示电池的欧姆内阻。

2.3.5 有效容量

电池（或半电池）的理论容量可以根据法拉第定律用下式计算：

$$Q_T = x(nF) \quad \dots(2-5)$$

式中， x 表示电池的完全放电时反应的理论摩尔数。如果电池处于不平衡状态，用阳极值和阴极值中最低中最低值来计算 xnF ，如果活性物质不是 100% 地被利用，如由电池内的某些反应消耗了反应物，那么电池实际容量 Q_p 低于 Q_T 。电池的额定容量是在规定条件下，电池放电至预先设定的截止电压时的实际容量。

电池的库伦效率定义为 Q_p / Q_T ，它通常用来确定每个半电池的容量。由于使用上的原因，大部分实际电池阴极与阳极反应物的当量数都不等的。

为便于比较,一般采用比容量,比容量是这样定义的:电池单位质量(体积)的容量,单位为 $A \cdot h/kg$ 或 $A \cdot h/dm^3$ 。

2.3.6 有效能量

1mol 反应(不是完全放电)的理论有效能量为:

$$\varepsilon_T = -\Delta G = nFE_{cell} \quad \dots(2-6)$$

这里, E_{cell} 是电池电动势。1mol 反应的实际有效能量为:

$$\varepsilon_P = \int^m E dq = \int (Ei) dt \quad \dots(2-7)$$

ε_P 取决于电池的放电形式。能量的单位为 J(即 $W \cdot s$) 或 $W \cdot h$ ($1W \cdot h=3600J$), 电池的全部能量有时被称为“ $W \cdot h$ 容量”。随着电池放电倍率的提高, 电池电压 E 逐渐偏离其最大热力学值, 估能量效率 $\varepsilon_P/\varepsilon_T$ 是一个变量, 并与放电条件密切相关, 只有在确定放电条件下其值才有意义。

实际电池完全放电时的理论和实际能量用下式来表示:

$$\varepsilon_T = x(nFE_{cell}) \quad \dots(2-8)$$

$$\varepsilon_P = \int^m E dq \quad \dots(2-9)$$

这里, x 表示的也是完全放电时的反应摩尔数。能量密度(也称比能量)是一个用来评定电池性能的参数, 对于一个重 25g 的小型电池在特定放电电流条件下放出 40kJ ($0.012kW \cdot h$) 的能量, 那么其能量密度为 $480W \cdot h/kg$ 。同样, 能量密度也可以用体积比能量来表示, 单位是 $W \cdot h/dm^3$ 。

2.3.7 输出功率

电池输出的电流强度主要由其外部的负载电阻所决定。输出功率 P 由电流和电压所决定, 如下式:

$$P = i E \quad \dots(2-10)$$

电池的额定功率表明能否在不过分极化的情况下维持大电流输出。随着电池导出的电流越来越高, 功率开始上升, 达一最大值后, 由于极化影响, 电压下降导致功率 P 值减小。最大功率可由测定 $E-i$ 曲线来得到。一定条件下是可以计算最大功率值的, 例如如果电极极化非常微弱且电池内阻为已知。电池额定功率是在一定放电条件下电池的输出功率。

额定功率密度(比功率)也是一个比较不同电池体系的常用参数, 单位为 W/kg 和 W/dm^3 。额定功率密度和额定能量密度都是用于评定电池性能的决定性因素。

电池通常都有一个允许的最大持续输出功率,在此值以上继续放电容易导致电池过热和性能衰减。从另一方面来说,电池也具有一个最大瞬时额定功率。对于短时放电,电池不会达到一个热力学稳态,且如果其组分的热导率足够高,电池也可容纳释放的热量。进一步讲,短时放电时传质极化的影响并不十分显著。

2.3.8 充电效率

充电效率又称为二次电池充电时的电量(流)效率。法拉第定律是电化学科学的重要定律之一。从理论上揭示了电解时通过电极的电量与反应物质量的关系,与温度、压力、电解质浓度、溶剂的本性、电极材料等因素无关。但在实际电解过程中,通过电极的电量不能完全用于所需的反应上,即有一部分电量用于副反应的发生上,通常把用于发生所需反应的电量占通过电极总电量的比,叫电流效率或电量效率。

电池的充电过程也是一个电解过程,在充电的初期,由于没有或较少存在副反应的发生,通过电极的电量主要用于活性物质的转化,但在充电的后期,大部分放电产物已转化为电极活性物质,这时电极极化增加。电池充电效率为用于转化活性物质的电量或活性物质转化量与通过电极的总电量或理论上活性物质的转化量之比的百分数。

2.3.9 放电效率

电池放电时的电量效率——活性物质的利用率。虽然法拉第定律是电解条件下强制发生的电化学反应的定律,但对于自发地进行电化学反应的电池放电过程,反应物质的量(活性物质的消耗量)和通过电极的电量(放电电量)也符合法拉第定律的关系。在实际电池放电过程中,由于电极极化等原因,使电池工作电压逐渐下降,当电池工作电压下降到不能维持所要求的放电电流或输出功率的要求时,视为放电终止,这时电池内还存在一定量的电极活性物质,也就是说电池活性物质不能被完全利用,通常把电池实际放出的电量与电池内活性物质理论上应放出的电量之比叫做电池放电时的电量效率(也叫做放电效率),表示为:

$$k_1 = \frac{\text{实际放电容量}}{\text{理论容量}} \times 100\% \quad \dots(2-11)$$

根据法拉第定律,反应物质量与电量之间的关系,此电量效率表达了活性物质被利用的程度,通常被称为活性物质的利用率。活性物质利用率的高低是衡量电池设计、生产技术水平及管理水平的一个重要指标。

3 电池管理系统策略研究

3.1 电池组均衡方法

动力锂电池组在使用过程中,经过多个充放电循环后,可能对外表现出整组容量下降,电池组单体电压不一致等情况,使得电池组的使用和管理难度加大,而且可能出现危险情况,产生这种现象的原因是电池组内各个单只电池间状态不一致。

3.1.1 电池串联的应用

在实际使用电池时,常常需要较高的电压和较大的电流,这就要求将若干个单体电池通过串联、并联或复联(串并联)起来,我们称此为电池组合(电池组)。电池的组合是很讲究的,要考虑的条件也比较多,如果在组合时注意这些条件,电池组合合理,不仅可以获得较大使用的容量和功率,而且使用时也更加方便和安全。

在电池串联使用或串联的单体电池构成电池组使用时,依据法拉第定律,单位时间内每一个单体电池以及每一个电极上所通过的电量是相等的,如果单体电池之间容量不同,或某一单体电池中电极容量与其他单体电池的电极容量不同,那么该串联电路中组合电池所能放出的电量取决于容量小的单体电池,且可能导致容量较小单体电池的过放电,引起其气胀、漏液等不良现象的发生,进而影响到组合电池的使用效果,乃至报废。所以选择容量已知的单体电池进行串联组合,是保证单体电池串联使用或串联的单体电池构成高开路电压的电池(组)的基本要求。

3.1.2 锂电池组不一致性分析

由于电池本身制造存在的容量差异,或在组装时电池组的容量匹配没有做好,电池组在使用过程中,整组电池会出现不均衡的现象。如果不去管理,就会扩大这种差异,影响到整组电池的使用寿命。

电池组在使用过程中表现出不均衡的原因有以下几种:

一、电池组内电池容量基本一致,其中某几节电池的容量小于其余电池的容

量;

二、电池组内电池容量基本一致,其中某几节电池的容量大于其余电池的容量;

三、电池组内各节电池容量差异很大,这是最坏的情况。

造成这几种不均衡原因的因素有以下几种:

一、电池自身原因:电池制造时由于内部物质的量不一致造成的初始容量不一致,制造电池的过程中的制造工艺不同造成的初始容量不一致,电池的极耳与内部极片相连时的电阻值不一致,也就是内阻不同造成的在使用过程中的容量不一致;

二、外部连接原因:电池在串并联使用时连接的部件形状与材质不同造成的连接电阻不同,连接松紧程度的不一致造成的接触电阻不一致,导致在充放电时单体电池交换的能量不一致,表现为整组电池的不一致;

三、外部环境原因,电池在串并联使用时,整组电池布局造成的各点的温度、湿度或压强等因素不同,造成的各节单体电池所能使用的容量会随各种场分布的不同而不一致。

在充电过程中,电池容量小的电池会率先被充满,此时电池组仍需充电,因此容量小的电池会被过充,产生析气或发生不可逆的结构性损坏,电池容量进一步减小。

在放电过程中,电池容量小的电池电压下降最快,当这节电池能量耗尽时,电池两端甚至会出现反极性,相当于被其它电池反充电导致整组电池的放电能力减弱,同时过放也会使电池内部发生不可逆的化学反应,减小电池容量。

在实际使用中表现为,当电池充电时会有某一节电池电压高于其余电池电压先到充电截止电压,从而结束充电;在电池放电时会有某一节电池电压低于其余电池电压先到放电截止电压,结束放电。

例如:一组由十节 100Ah 的电池串联起来的电池组,其中第一至第九节电池的容量是 0Ah,第十节电池的容量为 10Ah,这是由于电池匹配不当造成的(暂不考虑使用过程中造成的容量差异,假设每一节电池的充放电效率都是一致的)。每次充电时总是第十节电池先到截止电压,而其他电池也都只充了 90Ah 的电量,为了提高电池组容量,我们会采取涓流的充电方式,再补进去一些电量,这样第十节电池一直是在电压较高的区间工作,这就会加快电池的老化,电池老化的表现就是容量的衰退,这就会加大电池组之间的容量差异,电池的可用容量加速减少,最后造成电池组的寿命缩短。

将整组电池差散开测试,只有第十节电池容量衰退的比较多,其余几节电池还是可以继续使用的,这就会造成了很大的浪费。电池组的使用寿命符合木桶原

理, 整组的容量取决于最小的那节单体电池。如果电池组采用均衡方案, 就可以让能量在电池组内各个单体电池之间进行流动, 这样就可以在电池的有效使用周期内充分的使用。

根据电池组不一致性对电池性能影响方式不同和作用原理不同, 可以把电池的不一致分为容量不一致、电阻不一致和电压不一致。

3.1.3 均衡方法分析

均衡的方法主要分为无损均衡和耗能均衡两类。无损均衡在实施过程中需要一个储能环节, 好让能量通过这个环节重新进行分配。耗能均衡就是将容量多的电池中那部分多余的能量消耗掉, 实现整组电池电压的均衡。

无损均衡根据能量的流动方式分为集中式和分散式^[26], 各种均衡方式的拓扑结构如图 3-1 所示。

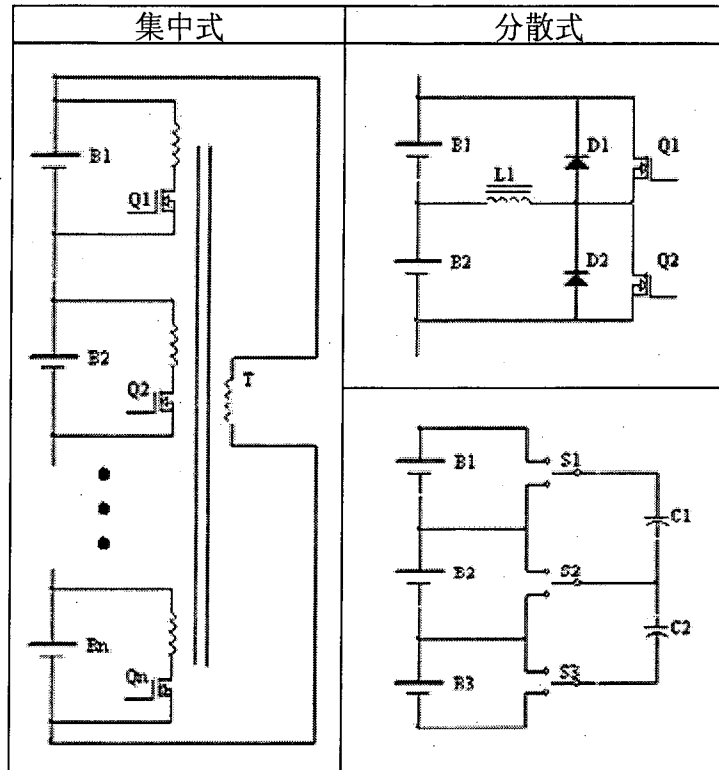


图 3-1 无损均衡方式分类

Figure3-1 The battery balancing way

集中式均衡方法就是从整组电池获取能量, 然后通过电能转换装置向能量少的电池补充电量, 并且可以通过调节开关管的占空比 D 来改变电池组中单体电池的充电容量。

分散式的均衡方法就是在相邻的电池之间存在一个储能环节, 这个储能环节

可以是电感也可以是电容，这样就可以让能量在相邻电池之间流动，能量多的电池就可以将能量传递到能量少的电池，这种方式的均衡控制起来比较繁琐，需要实时检测能量传递的情况，因为可能会存在能量的逆向流动，这样就可能造成不希望均衡的电池进行均衡，能量少的电池能量更少，出现不希望的情况。

通过比较发现，集中式的控制方法较为简便但是电能变换部分的硬件电路较为复杂，体积也比较庞大。分散式的方法在硬件电路上可能会比集中式的稍作简化，但是体积上也是比较大的，控制起来也不是很方便。例如，如果能量多的电池与能量少的电池恰好处在电池组的两端，这就需要将能量从电池组的一端向另一端流动，这其中的控制算法较为复杂，并且考虑到整体电路，储能环节的电感和电容选取不宜过大，所以每次能够传递的能量有限，在整个均衡的过程中，在各个环节的元器件上也会产生一定的消耗，这就会使得整体的均衡效率受到影响。

无损的均衡方式在电池的使用安全方面还存在比较大的问题，一旦控制信号处理不得当，或者信号收到干扰，出现误触发，就可能造成电池组内部短路，解决这个问题的办法可以让控制信号存在互锁的关系，或者在每个电池端加装硬件保险，这无疑又增加了整个系统的成本与体积。

耗能均衡方法就是通过在单体电池两端并联一个均衡电阻，通过开关管的状态选择需要均衡的电池，消耗掉电池的能量，从而使整组电池均衡。如图 3-2 所示。

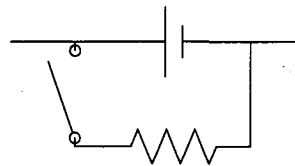


图 3-2 耗能均衡方式
Figure3-2 Energy equilibrium

均衡电流由欧姆定律表示如下：

$$i_{cell} = U_{cell} \div R_{cell} \quad \dots(3-1)$$

在整个的均衡过程中，均衡电阻 R 是不变的，电池电压根据电池的特性是在不断改变的，因此均衡的电流也是在随电池的电压正比例变化。当电池快充满时电池电压高，均衡电流就相应的增大，均衡掉的容量就多；而当电池快没电时，电池电压就会降低，随之均衡的电流就会减小，均衡容量就小。这样就可以做到在电池容量多时，均衡的程度就深，当电池容量少时，均衡的程度就浅，均衡的程度是随电池自身的容量改变的。这样可以防止电池过充和过放。

这种方法控制简单，体积小，安全，缺点就是浪费能量，有大量热量的产生，

并且需要考虑均衡电阻的散热问题。

3.1.4 本系统采用的方案

考虑到混合动力汽车本身车身设计的紧凑性，本系统采用采取体积小，成本低的耗能均衡方法。

均衡的等效的电路如图 3-3 所示。

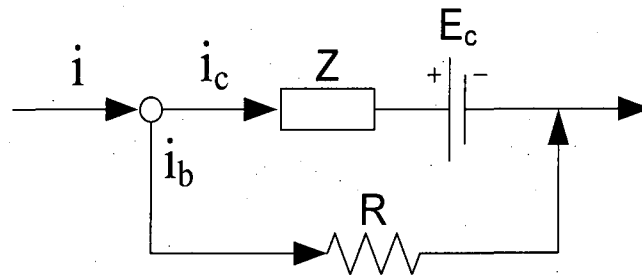


图 3-3 均衡等效电路

Figure3-3 The battery balancing equivalent circuit

图中， R 为均衡电阻， Z 为电池的内阻抗，包括欧姆内阻和极化内阻， E_c 为电池的电动势，其随电池的充放电曲线改变， i 为输入充电电流， i_c 为实际充电电流， i_b 为均衡电流。

根据基尔霍夫定律，可以得到以下公式：

$$\begin{cases} i = i_c + i_b \\ i_b R - i_c Z = E_c \end{cases} \quad \dots(3-2)$$

其中， i 是可以通过控制或者测量得到的， E_c 是随电池的 SOC 改变的， R 是可以确定的， Z 也是根据不同电池而定的，由此可以解出：

$$\begin{cases} i_b = \frac{iZ + E_c}{R + Z} \\ i_c = \frac{iR - E_c}{R + Z} \end{cases} \quad \dots(3-3)$$

这里我们重点分析均衡电流，先假设电池内阻抗 Z 一定，当恒流充电时，式中只有 E_c 是变量，均衡电流会随 E_c 变化而变化，又根据充电曲线可知， E_c 是不断增加的，所以均衡电流 i_b 也是不断增加的。而实际中电池的内阻抗是变化的，但是变化范围很小，一般在毫欧级，而均衡电阻是欧姆级的，相比可以忽略不计，在这里仅研究均衡电流对电池的影响，则式 3-3 可以简化为：

$$i_b = \frac{iZ + E_c}{R} \quad \dots(3-4)$$

当充电电流发生改变时，均衡电流也会发生改变，增加充电电流，均衡电流

就会随之增加，这样可以通过改变充电电流来改变均衡的电流。

当电池放电时， i 变为负数这样均衡电流就会随放电电流的增大而减小，而电池电动势 E_c 根据放电曲线，随放电时间而减小，从而均衡电流也会减小。

由此分析，放电过程中的均衡程度不如充电过程中的均衡程度深，并且在放电时进行均衡，就会增加电池的放电电流，可能会存在电池过放的危险，而在充电末期时均衡效果最佳，因此本方案在大电流放电时不进行均衡。

根据混合动力汽车的实际运行情况分析，电池是运行在电池状态的中间阶段，基本不会出现电池充满和放空的情况，因为那是很危险的情况，并且对电池的寿命也不利。

因此在混合动力系统中，是不存在根据容量去判定电池的均衡性，根据容量进行均衡恐难实现，所以采用根据单体电压进行均衡较为容易与实际。

在实际均衡测试中，均衡电路部分的温度特性如图 3-4 所示。

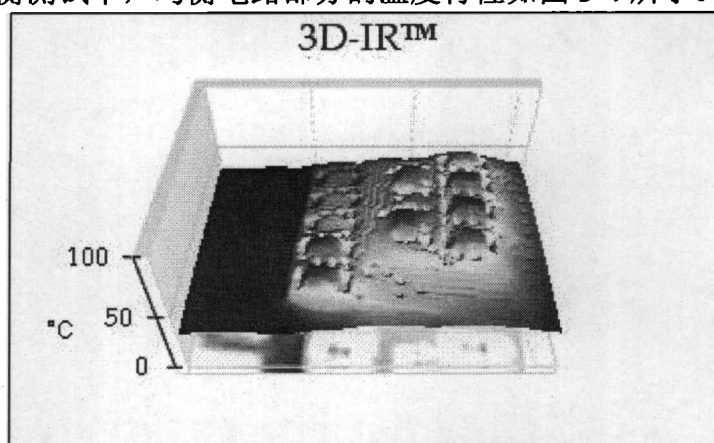


图 3-4 均衡电路的温度特性

Figure3-4 The temperature characteristics of balance circuit

由图可以看出，均衡电阻上发热量会比电路其他地方多很多，这一点可以通过均衡电阻上的温度表现出来。但是，其温度并没有超出电路本身所能承受的温度范围。

根据以上分析，具体均衡方法如下：

均衡开启条件：当单体电池电压超过最低单体电压 40mV 时，开启均衡。

均衡关闭条件：当放电电流超过 0.45C 时关闭均衡。

均衡时间：10 秒(10 秒后重新扫描电池电压，判断是否继续均衡)。

均衡间隔时间：10 秒。

考虑到均衡时的发热量和危险性来确定均衡的数量。

温度对均衡数量的限制：

$40^{\circ}\text{C} = < T$ ，禁止开启均衡

$35^{\circ}\text{C} = < T < 45^{\circ}\text{C}$ ，允许每个检测单元控制开启 1 路均衡

$20^{\circ}\text{C} \leq T < 35^{\circ}\text{C}$, 允许每个检测单元控制开启 2 路均衡

$10^{\circ}\text{C} \leq T < 20^{\circ}\text{C}$, 温度每下降 5°C , 允许每个检测单元控制多开启 1 路均衡

$T < 10^{\circ}\text{C}$, 温度每下降 2°C , 允许每个检测单元控制多开启 1 路均衡

温差对均衡数量的补偿:

$5^{\circ}\text{C} < \Delta T$, 禁止开启均衡

$3^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 5^{\circ}\text{C}$, 允许均衡的数量减至 50%

$\Delta T \leq 3^{\circ}\text{C}$, 允许均衡数量不减少

3.2 电池组的热管理

热管理是一种工作方法, 即对一特定的工程设计, 在设计中应使工作的电池保持在一定温度范围内充放电。通常电池有一个最高工作温度的工作指标, 在这个温度以上, 电池材料腐蚀及其他不可逆的破坏性副反应产生的速度加快。此外, 电池还有一最低工作温度, 在此温度以下电解液内阻过高, 或易于发生相变——这对于高温电池来说尤其重要。

3.2.1 电池发热原理

电化学电池所产生或吸收的热量由下列因素所决定: 首先是电池反应的热力学参数, 其次是电极反应过程的过电压、效率和电池体系内阻。热力学参数一般是充电状态及温度的简单函数, 而过电压、效率和内阻与许多变量(包括该电池的历史)有关。

近年来, 随着人们对驱动型及负载水平电池的日益关注, 热交换分析模型的研究也越来越重要。一旦了解了其热特性(热容, 热导等), 就可采用许多数学模型来分析计算不同工作时期下的温度分布。

大型电池(既具有低表面体积比的电池)在高倍率充放电下, 过热问题是最常遇到的问题。电池产生的热能可以通过以下方法散发至环境: 自然空气对流(尽可能增加电池间的散热片、散热槽及距离); 使用带循环气体或液体冷却剂的热交换器; 使用泵推动电解液通过一附加的冷却单元。电池内余下的能量会导致电池温度的升高。电池的连续额定功率水平应确定为: 是电池稳定温度不超过最大工作温度时的额定功率。

热失控一般用温度升高程度来表征, 如果热扩散速率高于热产生速率就不会发生热失控, 否则热量在电池内部积累, 可能出现不安全事故。电池中的热过程应遵守热量平衡, 表示为:

$$Q_p = Q_e + Q_a \quad \dots(3-5)$$

式中, Q_p 代表电池内各种过程产生的热量; Q_e 代表电池和环境交换的热量; Q_a 代表电池本身吸收的热量, 表现为电池温度的变化 ΔT 。电池吸收的热量表示为:

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i \Delta C_{p_i}\right) \Delta T = Q_a = Q_p - Q_e \quad \dots(3-6)$$

若在绝热条件下, 有 $Q_e = 0$, 则表示电池温升上式简化为:

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i \Delta C_{p_i}\right) \Delta T = Q_a = Q_p \quad \dots(3-7)$$

电池内各种过程产生的热量包括焦耳热合化学反应热。焦耳热主要决定于电池内阻, 包括电极与电解液界面、隔膜、电解液、集流体和金属极耳的电阻。化学反应热是指电池组成物质间的化学反应热, 可能是放热反应, 也可能吸热反应。这些反应的强烈程度随温度不同而变化, 在某一温度下可能被热激活。

电池和环境交换的热量是通过辐射、传导和对流三种方式进行的。热辐射主要发生在电池表面。可用斯特潘—玻耳兹曼 (Stenfan-Boltzman) 公式描述灰体辐射本领:

$$P_r(T) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) \quad \dots(3-8)$$

式中, P_r 表示辐射功率; ε 表示热辐射率; 对于黑体, $\varepsilon = 1$; σ 表示 Stenfan-Boltzman 常数; T_s 表示环境温度。热辐射与电池表面材料的性质相关。

热传导是指物质直接接触部分之间的热传递。电池内的电极、电解液、集流体等都是热传导介质, 而将电池作为整体的话, 由电池和环境界面层的温度和环境热传导性质决定了环境中的热传导。热传导服从傅里叶定律:

$$q_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad \dots(3-9)$$

式中, q_n 表示热流密度, 单位为 W/m^2 ; k 表示热导率, 单位为 $W/(m \cdot ^\circ C)$; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 表示电极等温面法线方向的温度梯度, $^\circ C/m$ 。

热对流是指电池表面的热通过环境介质 (一般为流体) 的流动交换热量, 它和温差成正比, 可以用牛顿公式表示:

$$Q = \alpha F (T_w - T_f) = \alpha F \Delta T \quad \dots(3-10)$$

式中, Q 表示热流量, 单位为 W ; α 表示对流换热系数, 单位为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F 表示面积, 单位为 m^2 ; T_w 表示壁面温度, 单位为 $^\circ C$; T_f 表示流体温度, 单位为 $^\circ C$ 。

应当指出, 对电池内部而言, 热辐射和热对流的影响很小, 主要由热传导决定。电池自身吸热的大小与其材料的比热有关, 比热越大, 吸热越多, 电池的温升越小。

3.2.2 电池热失控的危害

电池正常工作时的突发事件或滥用会产生一个初始能量扰动，并在电池内转化为热量，使电池产生温升，而温升的大小取决于初始扰动产生热量和散逸热量之差。如果散逸的热量大于或等于产生的热量，则电池不会产生温度升高的情况，初始扰动对电池的工作状态不产生影响，电池是安全的。如果散逸的热量小于所产生的热量，热量将会在电池体内产生热积累，若这种热量数值不大，温升有限，不能引发导致电池失控的热产生反应，则电池仍是安全的。以上两种情况对应于电池的正常使用状态。若初始扰动产生的电池温升能触发电池内新的产热反应，但是只是导致电池部分功能失效，尚未引起着火、爆炸，电池还是被认为是安全的。若电池温升触发电池内其他放热反应和过程，引发电池的温度继续升高，随后触发新的热反应等。如此即形成热产生-温升的正反馈循环，当温度升到一定数值时，电池会发生鼓胀、泄漏、起火，甚至爆炸，则电池被认为是不安全的。

3.2.3 热管理方法

温度过高或过低都会直接影响电池的性能，电池温度过高会有很大的潜在危险存在，原理上文已经分析，另外如果电池的发热量过大，本身也是对能量的一种浪费，他会减少其应供给的能量，使得电池的使用效率降低，增加制造成本。同样电池的温度过低也会降低电池的使用效率，因为低温下电池内部的活性材料无法充分进行充放电反应，这就会造成电池本身有能量却放不出来，外部有能量却充不进去，造成了很大的能源浪费。如何保证电池的工作温度，这正是热管理所要做的。

热管理从性质上可以分为降温过程和升温过程。

1. 降温热管理

降温热管理的最为直接也是最为简单的目的是防止电池组的温度超过电池工作的最高温度，进一步的要求还包括，控制电池组的温升，均衡电池箱内各点的温度，保持各个单体电池的温度一致，防止因温度不同而造成的电池组间的电池性能差异。

按照降温介质可以分为：

- (1) 空气冷却法
- (2) 液体冷却法
- (3) 相变材料冷却法

比较以上三种介质，空气冷却是最为便宜的方法，液体冷却除了需要盛放冷

却介质的空间，还需在体外有额外的循环系统，相变材料冷却的方法较为昂贵。

空气冷却是比较安全的方法，它在电池箱内没有额外的设备，不会因为外加设备而对电池的性能造成影响，所以它本身也不会过多的增加电池箱的体积和质量，对于整车的轻量化设计较为有利，但是这种冷却方法需要进出风口来保证空气的流动性，因此对有防水性要求的，需要增加一些额外的措施。这种方法的缺陷在于他对电池箱发生意外情况的抑制能力不足，无法阻燃和防爆，在发生起火的情况下，无法将火势抑制，甚至可能会将热量通过通风口传递到其他环节，造成连锁反应，造成更大的损失。这种方法的缺点是因为空气的导热率较低会造成电池箱内各点的温度不均衡。

液体冷却是效果比较好的一种方法，该方法需要在电池之间增加液体介质来进行热交换，但是又不能将电池侵入该液体中，因为这将为电池箱设计提出了很大的难题，这就需要一些管路来储存这些液体，一般液体冷却的方法都是将液体流动循环起来，让它经过两次的热交换将电池的热量散发到周围环境中去，液体的循环系统需要借助外力来实现，一般采用泵，来推动液体的流动，这对电池箱内的温度均衡很有利，因此采用液体冷却这种方法，将会为系统增加一个很大的附加冷却系统，增加了整体系统的成本消耗，增加了电池箱的体积和质量，这就会额外的增加了整车的能源消耗。一旦载有液体的管路因为压力或者温度等原因而发生漏液，这些液体就会造成电池的极间短路，而发生意想不到的后果。

相变材料冷却的方法是采用相变材料来进行热传递，利用相变材料的状态变化吸收电池散发出来的热量，这种方法需要在电池之间填充相变材料，这将增加整体的质量，填充的越紧密，交换的热量越多，这就会造成电池箱在组装时的困难，在电池箱进行调试与维修时也会因为相变材料的覆盖而造成不必要的麻烦，另外相变材料的这种性质也为电池箱的设计提出了一个难题。

2. 升温热管理

升温热管理就是当电池所处的环境温度过低时，升高电池箱的温度，让电池内的活性物质发挥其效应，提高电池的利用率。

另外，电池箱的隔热保护设计也很重要，它既可减慢热空气进入电池箱的速度，又可防止在寒冷环境下电池箱的热量散发出去不利于电池的启动。

鉴于以上的分析，本系统采用空气作为热传递的介质，考虑到空气的热传递系数过低，应该适当的增加空气的流动性，本系统加装了风机作为空气流动的动力。

对于温度过高时采取增加对流传导的风冷的方法，对于低温时采取预加热的方法进行升温。

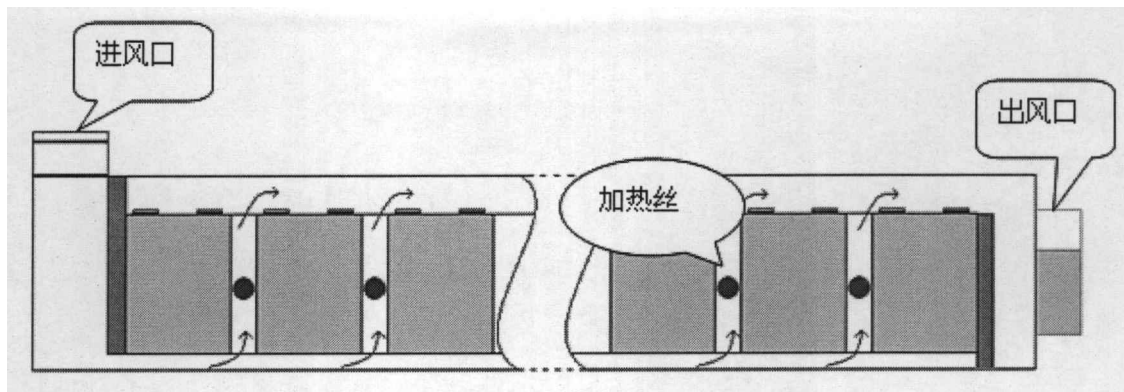


图 3-5 结构

Figure3-5 The structure

电池箱的结构如图 3-5 所示, 在本系统中, 电池是架起来的, 并不和箱体底部相接, 并且空气也是通过电池箱的底部进入电池箱的, 这样做的目的就是使得电池与空气可以充分的接触, 让空气流过一整块电池, 充分带走电池所散发出来的热量, 电池箱的出风口是一个轴流风机进行抽风, 来推动电池箱内的空气流动。当电池箱内的温度过低时, 将开启加热丝来进行加热, 同时开启风机加快箱内空气流动, 来增加加热的效果。

在一些条件允许的情况下可以将汽车的空调风接到进风口, 这样可以引入外界设备来增加热交换的效果。

温度是一个惯性比较大的环节, 因此本系统对温度的管理使用滞环的方法来控制, 这样可以避免因为温度在临界点波动时造成设备频繁启停。

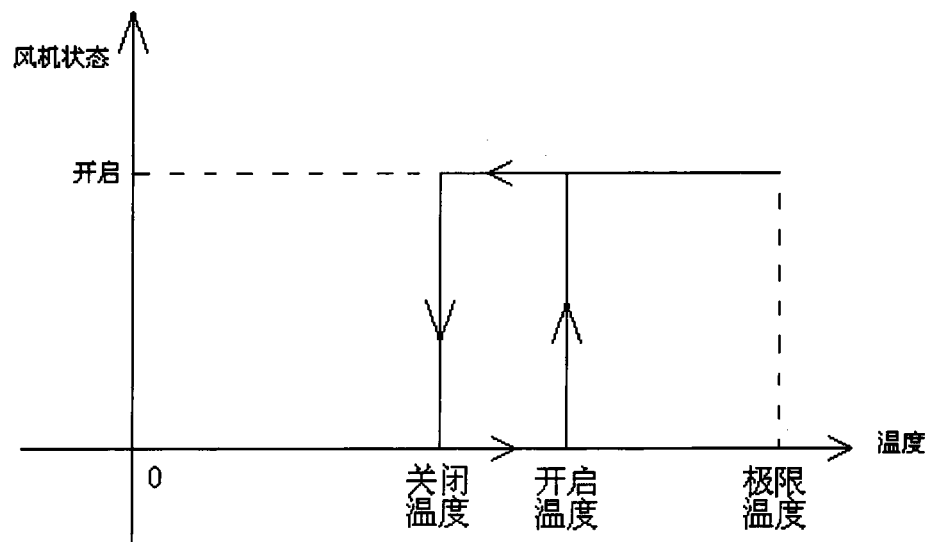


图 3-6 控制温度策略

Figure3-6 The temperature control way

具体的策略如图 3-6 所示。

3.3 电池组的运行策略

电池都是有一个适用范围的，一旦在这个范围外去使用它，就属于电池的滥用，这样将产生意想不到的后果，存在安全的隐患，所以电池管理系统就要控制用电设备，使电池在这个合理的范围内工作。

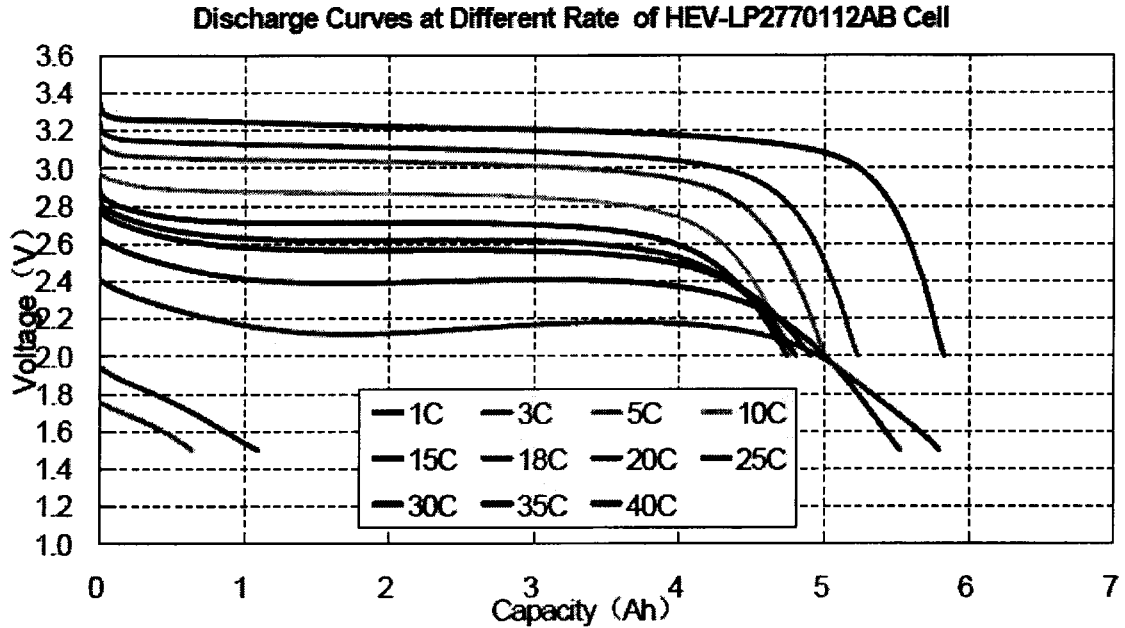


Figure 3-7 Discharge curves at different rate

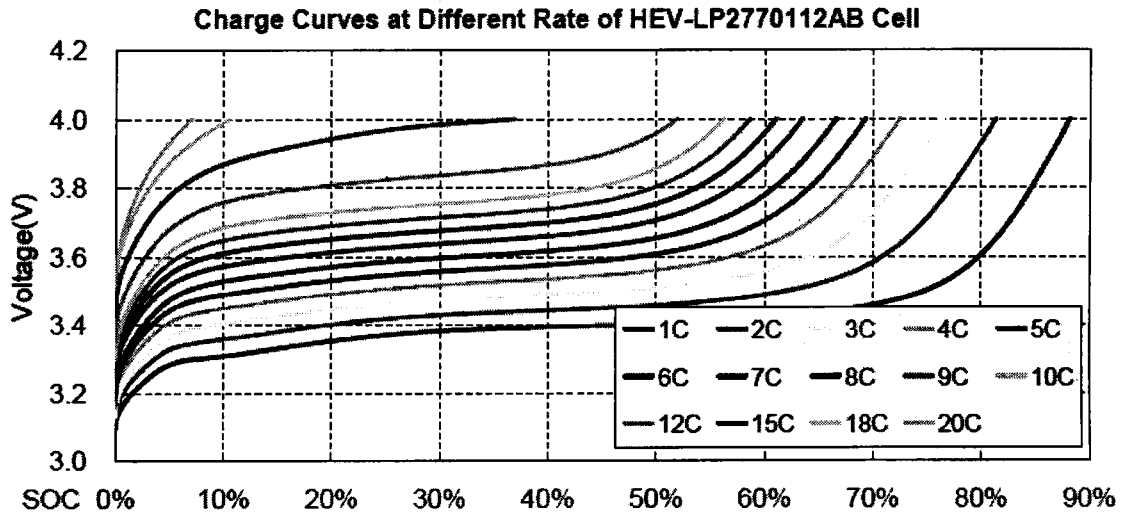


Figure 3-8 charge curves at different rate

如图 3-7、图 3-8 所示，曲线与横坐标围成的区域是该电池所能放出来的能量，在不同的电流下电池所能放出的能量是不同的，应该根据当前的电池状态来判断电池的能力，而不能超过这个范围，如果不这样的话就会对电池造成不可恢复性的损坏，造成无法挽回的损失。

除此之外，在不同温度下，电池所能释放出来的功率也是不同的，因此要根据电池的不同状态来判断电池当前所能使用的功率。

本系统就是根据电池状态和温度这两个参数来判断电池当前所能使用的功率，然后将此功率上报给整车控制器，由整车控制器来进行动力的分配，并且由整车控制器来限制电池的使用功率，从而起到保护电池的作用，具体运行策略如图 3-9 所示。

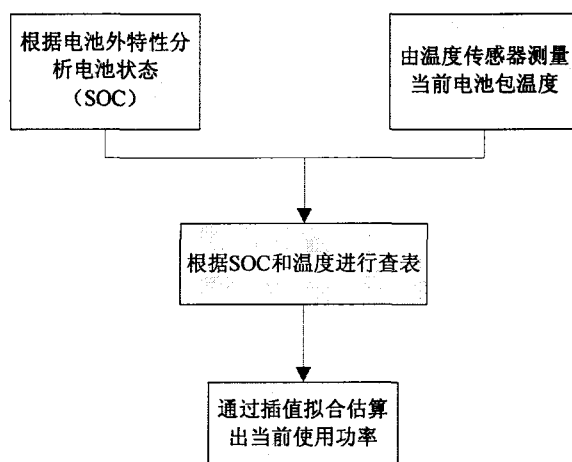


图 3-9 运行策略
Figure3-9 The strategy

3.4 电池组的安全性

锂离子电池的安全性之所以备受关注，是由于自身的特点所决定的。电池的能量密度很高，如果发生热失控反应，放出很高的热量容易导致不安全的行为发生。另外，锂离子电池具有高的输出电压，但是由于采用有机电解质体系，有机溶剂是碳氢化合物，在 4.6V 左右易发生氧化，并且溶剂易燃，若出现泄漏等情况，会引起电池着火，甚至燃烧、爆炸。再者，对密封镉镍蓄电池和金属氢化物镍蓄电池来说，充电时正极上生成的氧在负极上得以还原，正电极发生的反应用负电极来抵消，过充电反应只限于内部氧循环，所消耗的电流不会改变蓄电池的化学状态。而对于锂离子电池，过充电反应会使正极材料结构发生改变，使材料具有很强的氧化性，可能将电解液中溶剂氧化，并且这过程是不可逆的，反应引起的热量如果积累会引起发热失控的危险。同时，锂离子电池在使用过程中还可能存在着金属锂析出的可能，尤其对于大电池，因热失控而致安全性问题会很严重。

原则上，锂离子电池在正常使用条件下通常是安全的，人们关注的是在误用或滥用条件下如何保证安全。电池在滥用时，由于特定的能量输入，导致电池内部组成物质发生物理或化学反应而产生大量的热，而热量不能及时散逸，进而导致电池热失控。热失控会使电池发生损坏，如猛烈地泄气、破裂，并伴随起火，

造成安全事故。一般电池必须遵照出厂标准在限定的条件下工作，即一定的使用温度、充放电倍率、充放电终止电压等，以及采用以定外加辅助安全措施。但是在实际使用过程中仍然可能发生滥用或偶发事件，超出安全使用限制，导致不安全事故。

3.4.1 锂离子电池安全性的含义与实质

锂离子电池的安全性是指电池在正常使用或滥用时，能抑制外界初始扰动而引起的不安全行为，其中外界初始扰动可以是电、热、光、机械等过程。电池不安全主要是由电池的热失控造成的，如电池发生诸如内部短路、大电流放电、过充电，电池内部将会产生大量的热，导致体系的温度增加。当电池体系达到较高温度时，会激发电池内部的物理和化学过程，这些过程产生的热量造成电池热失控，加上电解液易燃，可能发生着火，甚至爆炸。当产生的热量不多时，电池内部的温度不高，此时电池处于安全状态。

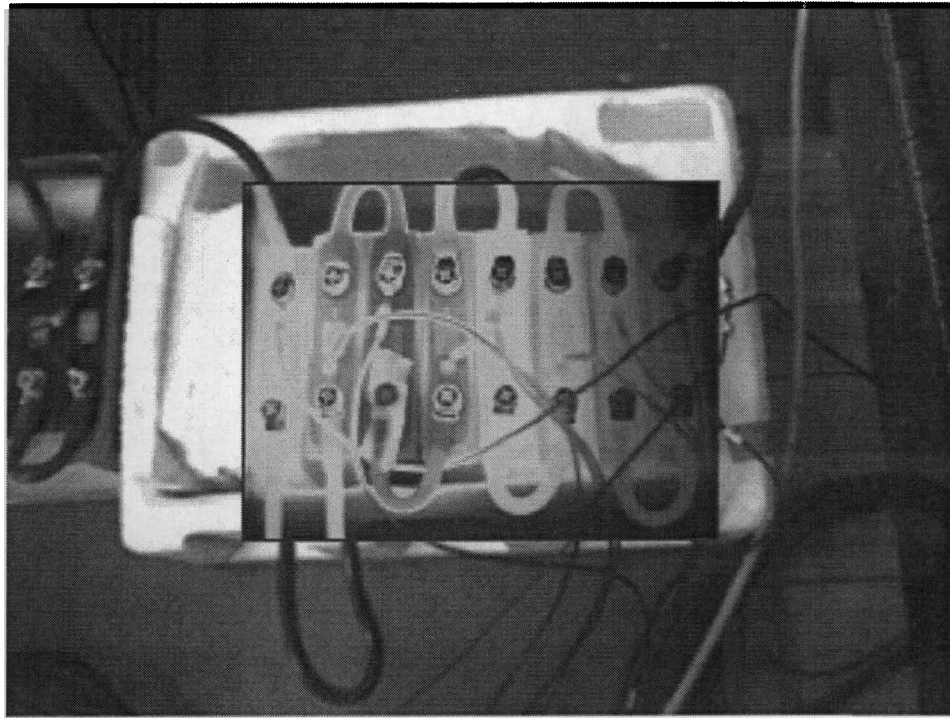


图 3-10 电池损坏

Figure3-10 Damage to the battery

图 3-10 所示的是电池损坏后的温度特性，颜色越深代表温度越高，其中颜色最深的那节是过放后造成了不可恢复的电池，他的温度已经明显高于其他电池的温度，因此通过电池的一些外特性，是可以保证电池的安全使用。

3.4.2 电池组安全性控制策略

电池管理系统就是要实时的检测与电池相关的物理量，并根据这些测量的量来判断电池是否处于安全的状态下。

根据电池特性的分析，和对安全性能的考虑，对电池包提出如下一些故障报警值：

- (1) 总电压过高
- (2) 总电压过低
- (3) 电流过高
- (4) 电流过低
- (5) 单体电压过高
- (6) 单体电压过低
- (7) 单体电压不均衡
- (8) SOC 过高
- (9) SOC 过低
- (10) 温度过高
- (11) 温度不均衡

4 电池管理系统的实现

由于整车设计要求，电池是分箱安装的，每个电池箱安装在车体的不同位置，考虑到连接线和系统可靠性，整个系统采用分布式的电池管理系统，分为从控模块和主控模块两部分，从控模块主要用来采集测量单体电池的电压和温度，兼做分箱热管理的控制，主控模块主要用于分析、计算、电气部分控制和整车进行通讯兼顾采集电流和总电压等信息，并分析绝缘性能。系统的结构框图如图 4-1 所示。模块间通过内部 CAN 总线进行通信。

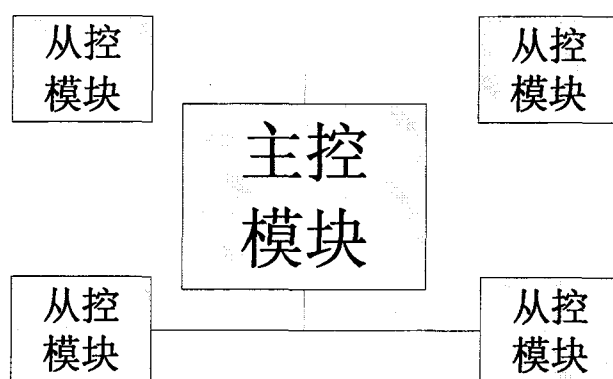


图 4-1 系统的结构

Figure4-1 The system structure

根据要求电池管理系统基本功能如下：

- (1) 单体电池电压测量；
- (2) 电池温度的测量；
- (3) 电池组总电压的测量；
- (4) 电池组电流的测量；
- (5) 绝缘性能的检测；
- (6) 与车载控制器进行通讯，向整车控制器提供电池状态信息；
- (7) 电池组 SOC 的估算；
- (8) 电池包故障分析及报警；
- (9) 电池包电气部分控制。

根据对电池的分析和管理需要，现对电池管理系统的测量精度与估算精度要求如下：

工作电压：直流 12V (8~18V) 或 24V(18V-32V)

电压测量精度：0.5%

温度测量范围：-40℃~70℃

共模测量法是相对同一参考点，用精密电阻等比例衰减测量各点电压，然后依次相减得到各节电池电压，也称为电阻分压法。该方法电路简单，但缺点是大阻值电阻的漂移误差和电阻上的漏电流导致测量精度低且影响电池组的一致性，因此只适合串联电池数较少或者对测量精度要求不高的场合。

可以给每一个单体电池用一个隔离运算放大器，这种运算放大器可以把电池电压转换为统一参考地的电压，就能避免用电阻分压造成的漂移误差和漏电流的问题；但是它的体积大且价格高，适合于测量精度要求高且不考虑漏电流和成本的场合。

二、差模测量法

即通过继电器选通单节电池进行直接测量。当串联电池数较多而且对测量精度要求较高时，只能采用差模测量。由于两端存在较高的共模电压，超出了标准模拟开关产品和一般光电隔离开关的工作电压范围，所以不能采用模拟开关选通而代之以机械继电器或光电继电器选通，因此带来生产成本低和电路尺寸过大的问题。该方法控制开关复杂，且开关具有一定的导通阻值，会影响电压测量的精度。

三、使用专用电池组测量芯片进行测量

考虑到电压采集的时间，本方案采用 LTC6802 专用电池组测量芯片进行单体电压的测量。LTC6802 是 Linear 公司推出的一款专门用于串联电池组的单体电压测量芯片。

其主要性能有：

- (1) 一片最多可以测量 12 路单体电池；
- (2) 可以通过菊花链的结构串联使用，最高可以测量 1000V 的系统；
- (3) 最大测量误差只有 0.25%；
- (4) 测量全部系统最快只需 13ms；
- (5) 自带电池均衡功能；
- (6) 最快支持 1MHz 的 SPI 通讯频率；
- (7) 很好的电磁兼容性；
- (8) 内置的 12 位 $\Delta-\Sigma$ AD 转换器自带滤波功能；
- (9) 芯片自带开路检测功能；
- (10) 具有低功耗休眠模式。

该部分的硬件原理图如图 4-3 所示。

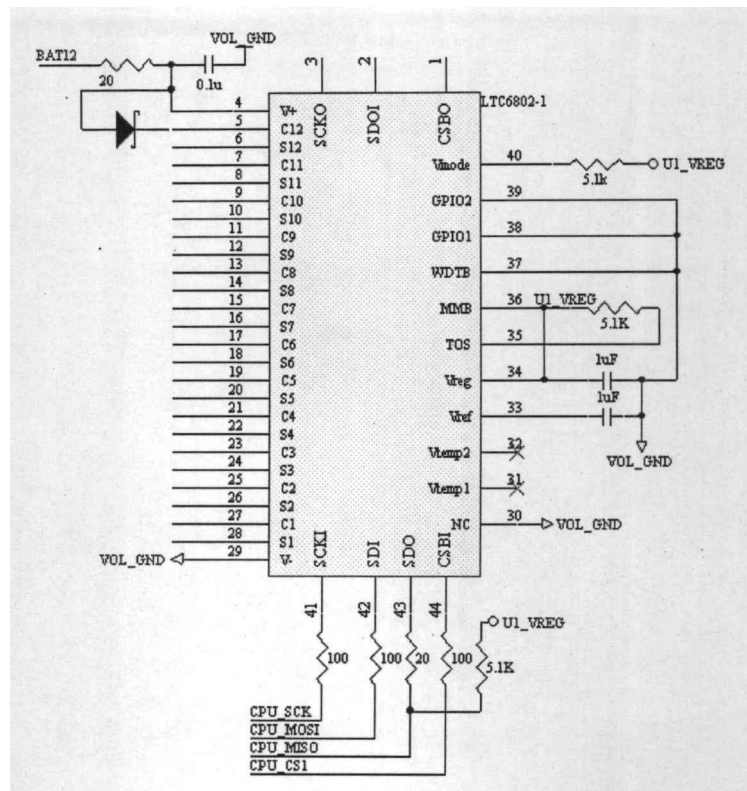


图 4-3 LTC6802 硬件原理图

Figure4-3 The LTC6802 circuit

硬件电路十分简单，基本无需外围电路，管脚 CSBO、SDOI、SCKO 是用来和其他 LTC6802 进行级联使用的，C1—C12 是电池电压测量管脚，S1—S12 是均衡控制管脚。

4.1.3 电池组均衡

本系统的均衡方法采取体积小，成本低的耗能均衡方法，通过 MOS 管来切入与切出均衡电阻，MOS 管旁配有保护作用的稳压管。

均衡部分的硬件原理图如图 4-4 所示，通过芯片的 S1—S12 管脚控制导通 MOS 管，放电电阻根据均衡电流的大小来选取适当的电阻，并且配有二极管指示，当某一 MOS 管导通，这一节电池就进行均衡，二极管就会点亮作为指示。

当均衡电路工作时，电阻上的发热量并不是很大，只有 50℃ 左右，其温度可以控制在管理系统的工作温度范围内，不会影响到系统的稳定运行。

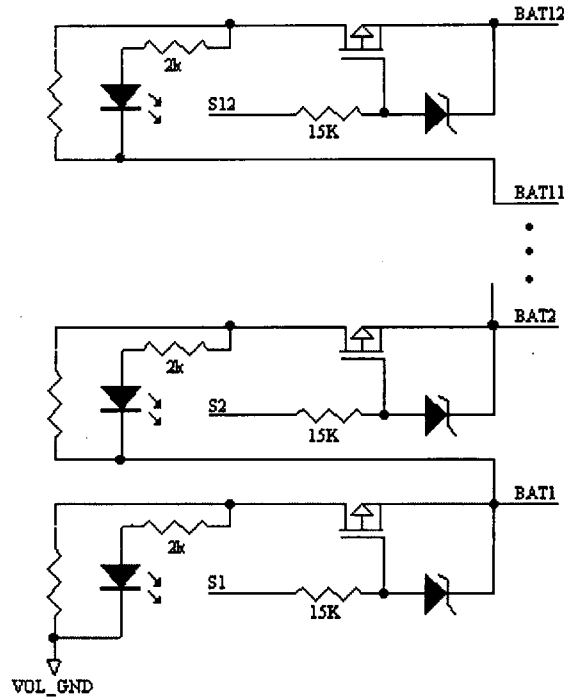


图 4-4 均衡硬件原理图
Figure4-4 The cell balancing circuit

4.1.4 温度测量

在测控模块的设计中，需要连接多个温度传感器，考虑到温度传感器是连接到电池箱内部的，所以要与其他电路进行隔离，保证整体系统的安全性，仅仅光耦是不能满足驱动电流的要求，因此使用一片 7407 作为驱动电路。其电路如图 4-5 所示。

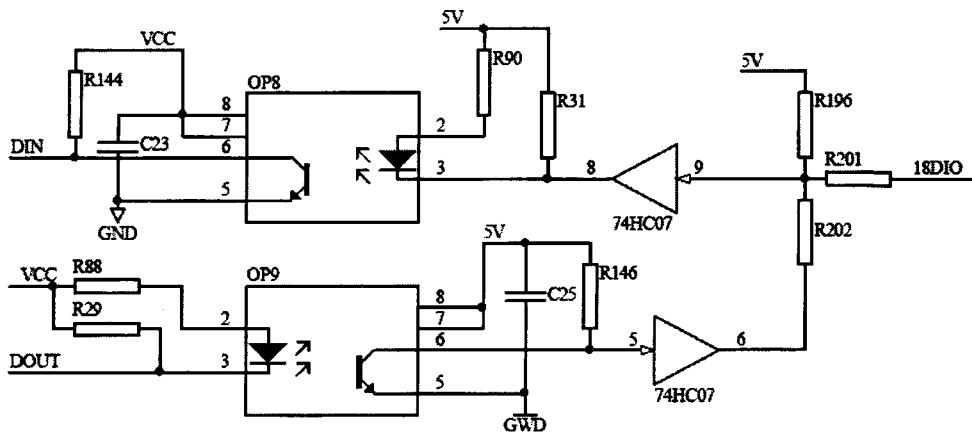


图 4-5 温度部分电路
Figure4-5 The temperature circuit

由于 DS18B20 与 CPU 之间的通讯采用的是其独创“1-Wire”通讯结构，只需要一根信号线就可以连接多个传感器。这样可以减少对 CPU 管脚的要求，同时也

减少了现场安装时的布线数量，提供了很大的方便，可以灵活配置温度测量点的数量。

4.1.5 总电压测量

总电压的测量是通过电阻分压，然后通过线性隔离光耦 HCPL7800 放大后进入 AD 转换器进行采样，最后将数据上报给处理器，再通过 CPU 换算成实际的电压值，电路如图 4-6 所示。

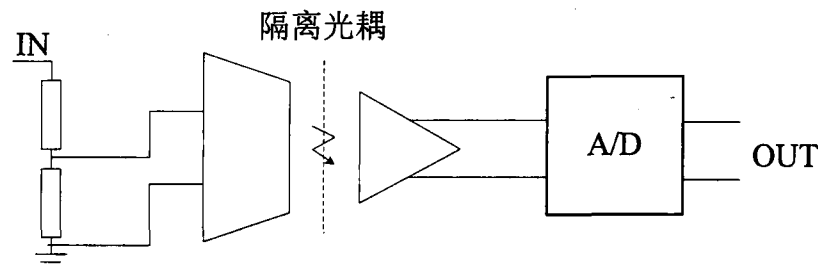


图 4-6 总电压测量电路
Figure4-6 The sum voltage circuit

考虑到正负极之间的绝缘要求和功耗的要求，以及自身的测量范围，选取 5 个 510k 的电阻串联后分压，作为采样电压。

HCPL7800 是具有高共模抑制的隔离光耦，其在存在 1000V 共模电压的情况下可以有每微秒 15 千伏的共模抑制率，温漂只有 $4.6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，输入端只有 0.9mV 的零漂，并且有 85kHz 的带宽，仅有 0.1% 的非线性度，自身内部有先进的 $\Sigma \Delta$ 的 A/D 转换技术，它自身可以提供 8 倍的放大倍数。

AD 转换器采用的是德州仪器生产的 16 位 AD 转换器 ADS1110，该芯片具有以下优点：

1. 封装小，所占电路板的空间很少；
2. 芯片集成了基准电压，精度可以达到 $\pm 0.05\%$ ，温漂只有 $5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ；
3. 内置晶体振荡器；
4. 具有 16 位的错误校验码；
5. 具有自校准功能；
6. I²C 的通讯总线；
7. 2.7V 至 5.5V 的宽电压供电范围；
8. 低功耗，只有 $240 \mu\text{A}$ 的工作电流。

ADS1110 本身也自带发达功能，但是随着放大倍数的增加，输入阻抗会相应的降低，有考虑到测量范围是 0~1000V，所以 ADS1110 自身只选取一倍的放大倍数。

HCPL7800 本身也有离散性, 其自身的放大倍数也有区别, 从 7.85 至 8.01, 分压电阻本身也有离散性, 所以电压测量回来以后需要软件做进一步的处理校正, 需要在测量之前做电压的校准。

4.1.6 总电流测量

电流测量的测量方法有分流器和电流传感器两种。分流器是通过将电流信号转换为电压信号进行测量, 即测量电流通过分流器的电压。一般分流器的满度值为 75mV, 当通过满度电流时, 在分流器两端将产生 75mV 的压降, 并且这压降是线性变化的, 这样就可以通过测量分流器两端的电压来计算得出电流值。电流传感器是基于霍尔原理的闭环电流传感器, 可以很好的做到电器的隔离, 因为其本身是非接触式的, 但是由于它是根据磁场进行测量的, 所以其对电磁环境十分的敏感, 因此下列因素直接影响传感器是否受外部电磁场干扰。

- (1) 传感器附近的外部电流大小及电流频率是否变化;
- (2) 外部导线与传感器的距离、外部导线的形状、位置和传感器内霍尔电极的位置;
- (3) 安装传感器所使用的材料有无磁性;
- (4) 所使用的电流传感器是否屏蔽。

另外电流传感器需要有一个磁场建立的过程, 所以其线性度也不是很好。

所以, 本系统采用规格为 300A/75mV 的分流器进行电流测量, 结合双积分高分辨率的 ADC 模块 CS5460 进行转换, 其余 CPU 通讯部分采用光耦隔离, 该方法较为有效地克服了电流传感器检测时带来的温漂、零点漂移等问题, 具有测量精度高, 温度新能稳定, 易于安装调试等优点, 尤其在大电流流经电池时有良好的测量效果, 符合电流测量的精度要求。

电流测量的原理如图 4-7 所示, 分流器将电流转换为 0~75mV 的电压信号, 滤波联接到仪用放大器 AD620, 然后经 A/D 转换器 CS5460 转换为数字信号后经过光耦隔离电路传给 CPU。

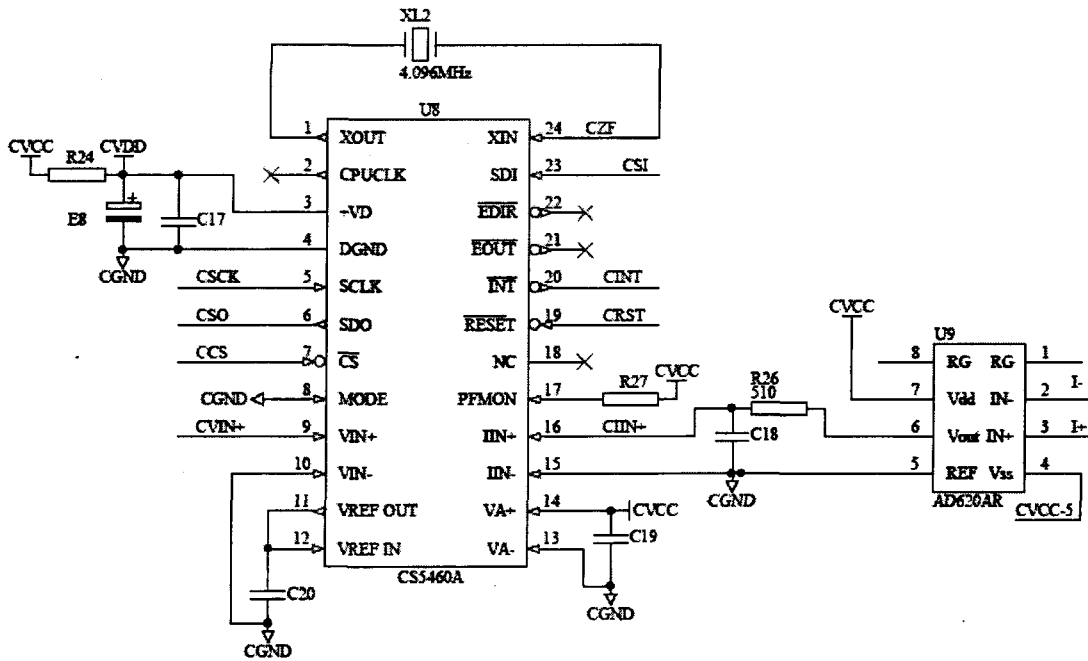


图 4-7 电流测量电路
Figure4-7 The current circuit

4.1.7 绝缘测量

因为电池组的电压比较高，超出了人体所能承受的电压，一般在 300~700V 范围内，并且还和其他强电设备相连，包括有电动机、发电机等，处于对乘客安全方面的考虑，应当对车体与电池组正负母线之间的绝缘电阻进行测量，保障乘客的乘坐安全。

在我国的国标 GB/T 18384.1-18384.3-2001《电动汽车安全要求》中，对电动汽车绝缘状况的定义、测量方法与安全要求都做出明确的规定。电动汽车的绝缘状况由直流正负母线对车体的绝缘电阻来衡量。定义为：如果动力蓄电池与地（电底盘）之间的某一点短路，最大（最坏情况下的）泄漏电流所对应的电阻。电动汽车的国际标准和我国国家标准规定：绝缘电阻值除以电动汽车直流系统标称电压 U ，结果应大于 $100 \Omega/V$ ，才符合安全的要求。这个值是通过下列条件来选定的：“如果人或其他动物构成动力电池系统与地之间的外部电路，最坏的情况下泄漏电流不超过 2mA，这是人体没有感觉的阈值”。

绝缘电阻的测量原理如图4-8所示， R_p 和 R_N 分别为假设的正负母线对地绝缘电阻， U_N 和 U_p 分别为正负母线对地电压， U 为电池总电压， R_{P1} 、 R_{P2} 、 R_{N1} 、 R_{N2} 为已知电阻值的偏置电阻，设开关 S 开通时测得正负母线对地电压为 U_p 、 U_N ， S 闭合时测得的正负母线对地电压为 U_p' 、 U_N' 值。

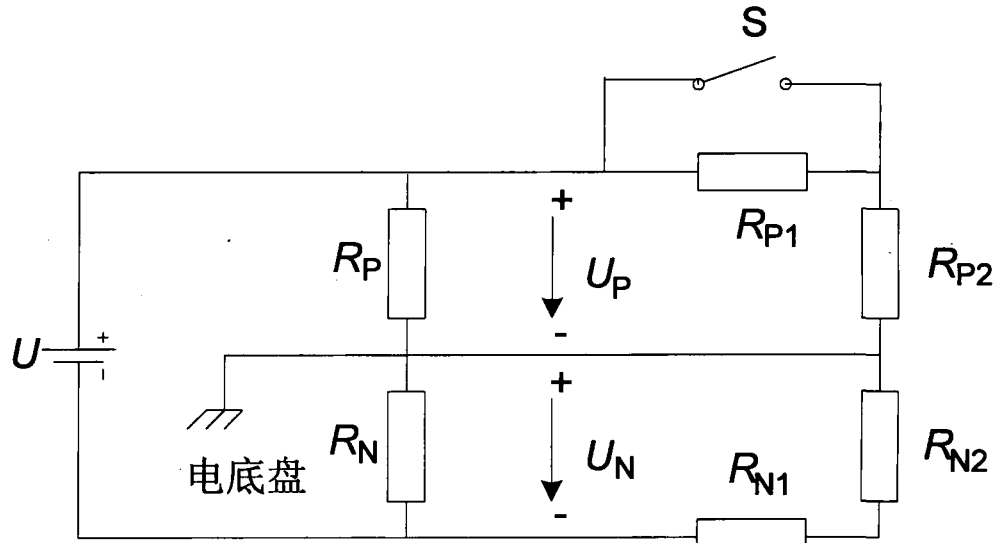


图 4-8 绝缘电阻测量原理
Figure4-8 The principle

根据电路原理知:

当 S 断开时, 有:

$$\frac{U_P}{R_P} + \frac{U_P}{R_{P1} + R_{P2}} = \frac{U_N}{R_N} + \frac{U_N}{R_{N1} + R_{N2}} \quad \dots(4-1)$$

当 S 闭合时, R_{P1} 被短路, 有:

$$\frac{U_P'}{R_P} + \frac{U_P'}{R_{P2}} = \frac{U_N'}{R_N} + \frac{U_N'}{R_{N1} + R_{N2}} \quad \dots(4-2)$$

①②联立解方程:

$$R_P = \frac{R_{P2}(R_{P1} + R_{P2})(U_P U_N' + U_P' U_N)}{U_P' U_N (R_{P1} + R_{P2}) - U_P U_N' R_{P2}} \quad \dots(4-3)$$

$$R_N = \frac{(R_{N1} + R_{N2})(R_{P1} + R_{P2})R_{P2}(U_N' U_P - U_N U_P')}{U_P' U_P (R_{N1} + R_{N2}) - R_{P2}(R_{P1} + R_{P2})(U_N' U_P - U_P U_P')} \quad \dots(4-4)$$

为简化电路选取 $R_{P1} = R_{P2} = R_{N1} = R_{N2}$, 则有:

$$R_P = \frac{2R_{P1}(U_P U_N' - U_P' U_N)}{2U_P' U_N - U_P U_N'} \quad \dots(4-5)$$

$$R_N = \frac{2R_{P1}(U_N' U_P - U_N U_P')}{U_P' U_P - (U_N' U_P - U_P U_P')} \quad \dots(4-6)$$

从公式可知, 只要测出 S 开通和闭合时正负母线对地电压, 就可以测出正负

4.1.9 高压控制及其他

电池管理系统还要对电池包的一些电气部分进行控制，其控制信号较为简单，不会涉及量的测量，仅仅是一些开关量的控制，因此，电池管理系统还要有一些外设的开关量输出口。考虑到驱动外部器件的功率较大，又不能因此增加系统的体积，所以采用低压继电器驱动高压继电器的方法。高压继电器安装在车身的高压箱内。

继电器的驱动信号是 CPU 通过 MC1413 驱动继电器的。如下图所示。

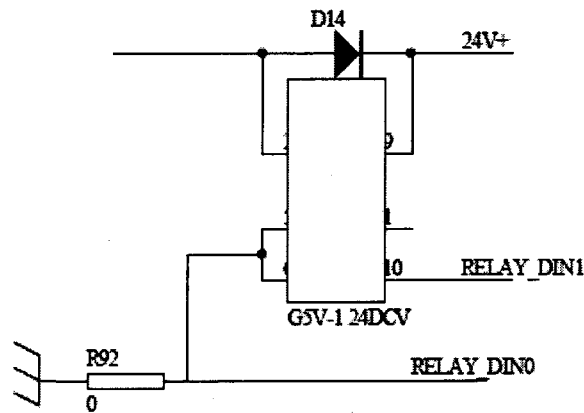


图 4-10 继电器电路图
Figure4-10 The relay circuit

4.1.10 总结

硬件部分内容比较繁杂，涉及到很多知识领域，每一块的设计都是经过深思熟虑后的结果，硬件不像软件那样可以在线的改动，确定以后就很难修改，如果改动，周期和费用都会花费很多。

硬件的设计要和软件的编程配合好，不能因为硬件设计上的一点点缺陷，而造成软件上很大的开销，能用硬件完成的绝不用软件，硬件是比较可靠的，软件可能会产生意想不到的结果。例如在总电压测量部分，就是通过硬件将被测量转换到可以测量的范围内，方便芯片测量，如果不经过转换，而直接测量就会造成测量不准，或者分辨率不够等问题。

硬件的布局也是十分关键的，它关系到系统运行的稳定性。在整体布局上要考虑高低压的隔离问题，二者之间的距离不宜过近，因为高压所含的能量比低压所含的能量大，这样高压部分会干扰到低压部分，如果排列过近也会有安全隐患。布局方面还要考虑绝缘的问题，因为高压信号是要引到电路板上，然后转化测量的，所以要考虑输入端之间的绝缘特性，输入信号间的距离应该尽可能的大，根

据应用的环境来选择适当的爬电比距，在一些有必要的情况下进行了开槽处理。考虑到机械震动的存在，整体电路板的布局应该在质量上均匀分配，这样可以减少电路板所受到的机械应力，将一些质量较大的器件安排在固定孔周围，这样可以将少机械振动带来的机械应力。整块板的散热也是布局时要考虑的，易发热的器件不要布置在一起，尽量远离，发热较大的器件周围不要安置其他较高的器件，以免影响器件的散热，安排出一条空气通道，便于发热器件的散热。

电路板的布线会影响到整体系统的电磁兼容性。导线的布设应尽可能的短，导线的拐弯应成圆角，电路板上下两层走线宜相互垂直、斜交、或弯曲走线，避免平行，以减小寄生耦合，电路的输入及输出用的印制导线应尽量避免相邻平行，以免发生回授，在这些导线之间最好加接地线。还要考虑导线通过的电流来选择导线的宽度。芯片之间的通讯线要密集并列排布，减少包围的面积，电源线和地线之间的面积也要尽可能的小。覆铜除了可以增加电磁兼容性外，还可以帮助发热器件散热。

以上这些都是硬件设计时考虑的，这样才能设计出优质可靠的电路板，保障系统的安全稳定的运行。

本系统经过在汽车上这样的复杂的电磁环境中测试，没有出现问题，是可以安全使用，稳定运行的。

4.2 电池管理系统软件部分

软件部分是系统的灵魂，它决定了系统将如何去工作，如何更好的工作。

4.2.1 从板程序设计

从板的主程序流程图如图 4-11 所示。

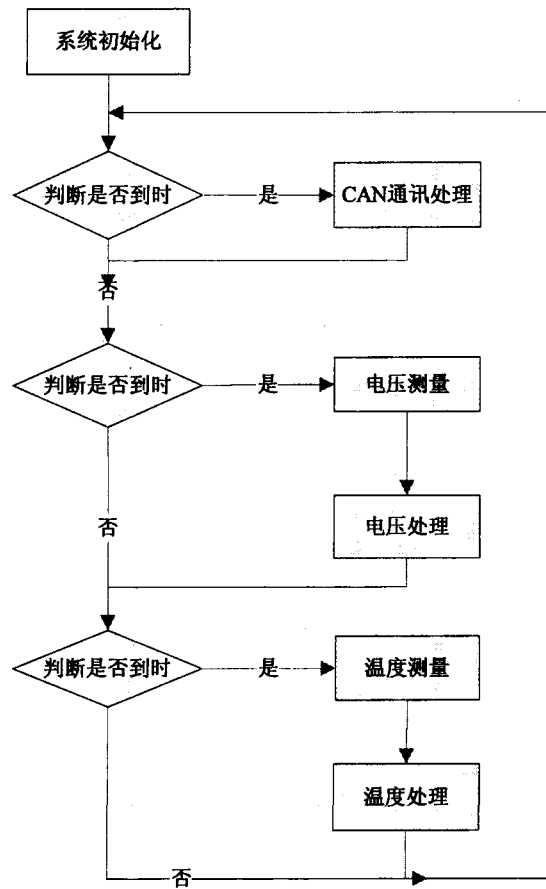


图 4-11 从板主程序流程图

Figure4-11 The main program diagram

从板还负责单体电压的采集测量，其相应的程序流程如图 4-12 所示。

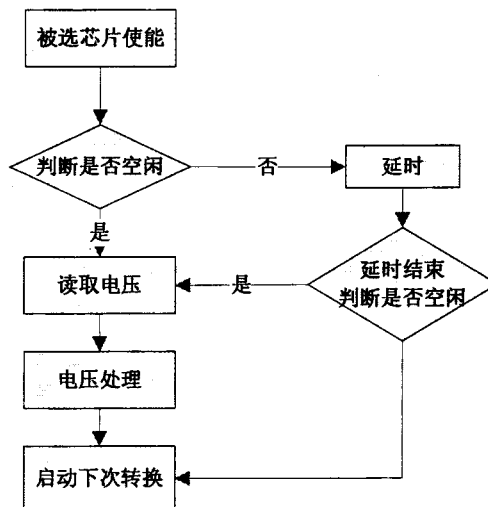


图 4-12 单体电压采集流程图

Figure4-12 The voltage measurement diagram

4.2.2 主板程序设计

主板主程序的流程图如图 4-13 所示。

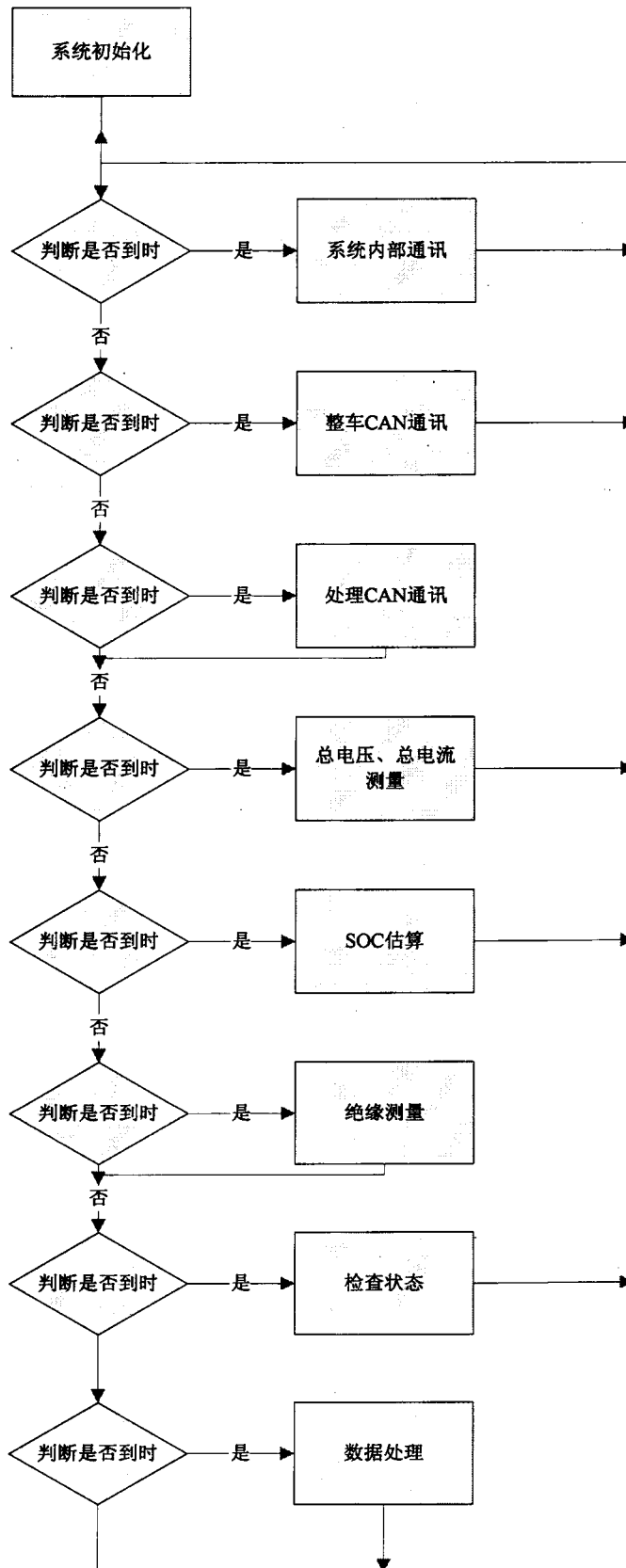


图 4-13 主板主程序流程图
Figure4-13 The main program diagram

5 数据的采集及分析

安装在电池模块上的各个数据采集模块采集电池管理系统需要的电压、温度等数据。监控系统通过与电池管理系统之间通过 CAN 通讯完成数据的传递。

5.1 上位机软件设计

上位机系统以 LabVIEW8.20 为软件平台搭建整个系统结构, LabVIEW 是美国 NI (National Instrument) 公司推出的一种基于 G 语言 (Graphics Language, 图形化编程语言) 的虚拟仪器软件开发工具, LabVIEW 的全称是 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (实验虚拟仪器工程平台), LabVIEW 能够与一系列高性能的数据采集硬件一起协调工作, 对实验数据进行采集、分析、显示。

LabView8.20 是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言。传统文本编程语言根据语句和指令的先后顺序决定程序执行顺序, 而 LabVIEW 则采用数据流编程方式, 程序框图中节点之间的数据流向决定了 VI 及函数的执行顺序。VI 指虚拟仪器, 是 LabVIEW 的程序模块。它与其他计算机编程语言的显著区别是: 其他语言都是基于文本产生代码, 而 LabView8.20 使用的是基于图形化编程语言 G 语言编写程序, 产生框图的形式程序。这种图形化编程方式彻底改变了开发形式。与传统的计算机编程语言比较, 图形化的编程方式能够节省 85% 以上的开发时间, 其运行速度几乎不受影响, 体现出了极高的工作效率。

系统通过 CAN 总线进行数据接口, 实现命令的发送和数据的接收。CAN 总线采用 CAN2.0B 的标准, ID 使用扩展帧的形式, 根据数据的数据量和重要程度来设置 ID 中的优先级, 并根据 ID 中定义的目标地址和源地址来区分数据类型并分类进行储存。

数据以文本 (逗号分隔符) 的形式存储, 这种格式方便进行分析。程序设计主要分为以下五个部分:

一、程序初始化。通过调用 DLL 库函数的命令, 初始化 CAN 卡的通信并初始化各项数据值, 设置需要显示和存储的电池组参数, 初始化程序如图 5-1 所示。

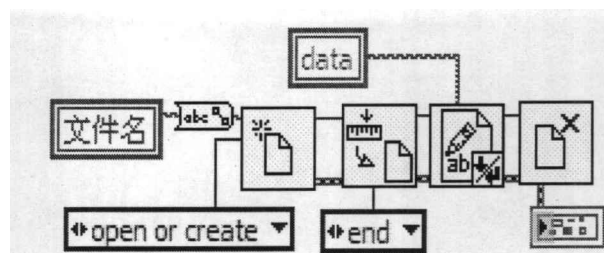


图 5-3 存储数据

Figure 5-3 Stored data

四、错误纠正。在程序运行时经常会因为外在或内在的原因产生一些异常状态，这是避免不了的，当程序运行错误时、CAN 卡连接不良或者出现其他异常时，需要重新启动，复位 CAN 卡，以保证系统继续正常的工作。程序如图 5-4 所示。

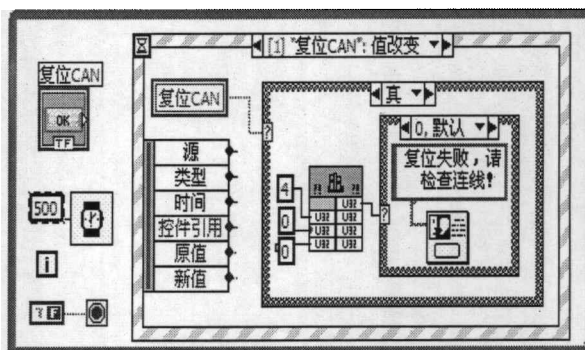


图 5-4 复位程序

Figure 5-4 Reset program

五、界面设计。一个程序的好坏除了它自身的结构合理可以保障程序良好的运行外，交互界面的合理布局也是一个重要的指标，因为界面是别人对你的程序评价的第一影响，往往使用者是不会关心程序的内部，仅仅单单从界面来判定程序的好坏，如果界面做出来对使用者使用很不方便，即使你程序的架构再优良，容错程度再强，抗干扰能力再好，也不会被用户所接受。

界面的上方放置一些总信息，这样可以让人一目了然，清楚了解到电池的状态，包括总电压，电流，SOC，最高电压，最低电压，最大温度，最小温度和故障代码等，每一组电池模块的数据分别用一张选项卡来显示，主要包括显示每个单体电池电压、每个温度传感器的温度值、每组电池组的最高电压和最低电压及其对应位置、每组电池组的最大温度和最小温度及其对应位置、箱体信息等，具体的故障信息也有一张选项卡来显示，这样可以方便用户查询故障信息。

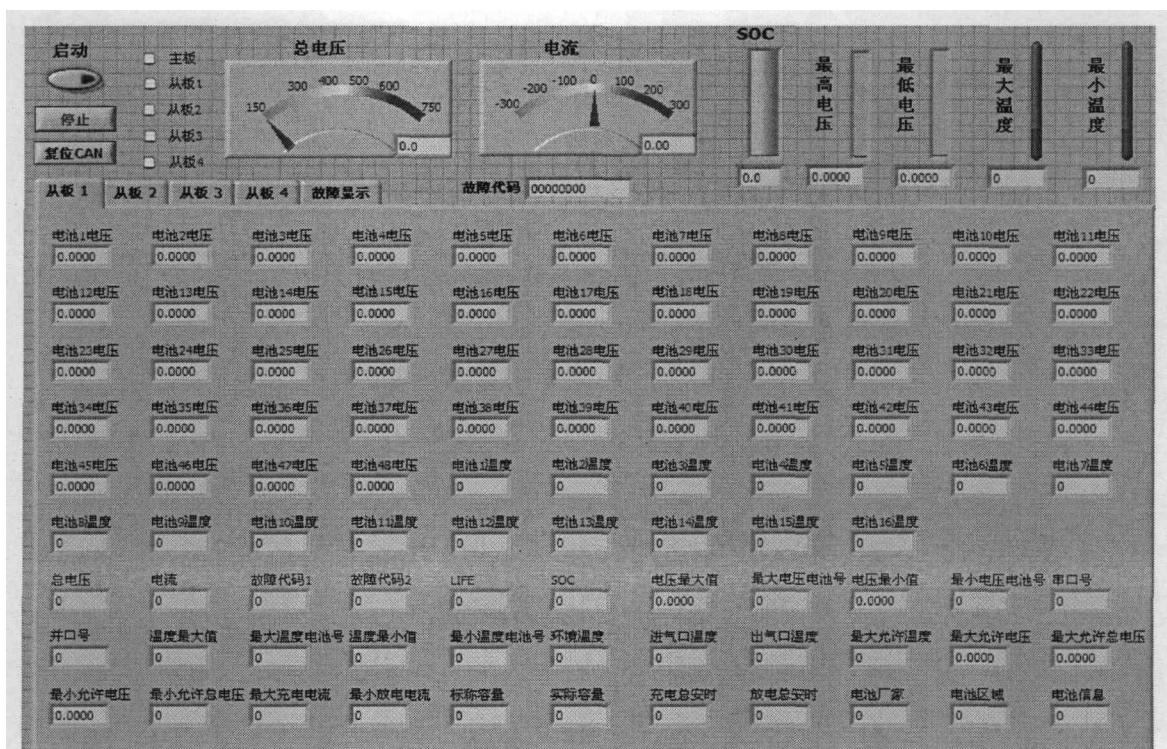


图 5-5 交互界面
Figure5-5 The interface

5.2 数据分析

以前应用于混合动力汽车上的电池管理系统采集到单体电压的数据如图 5-6 所示。

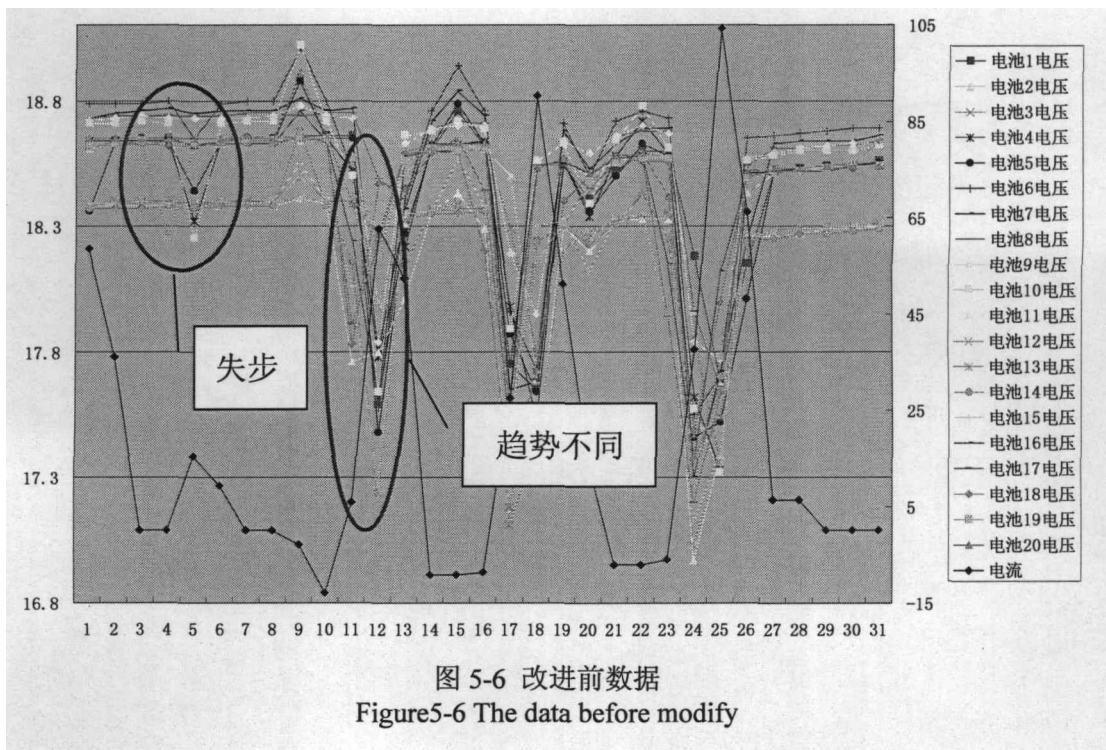


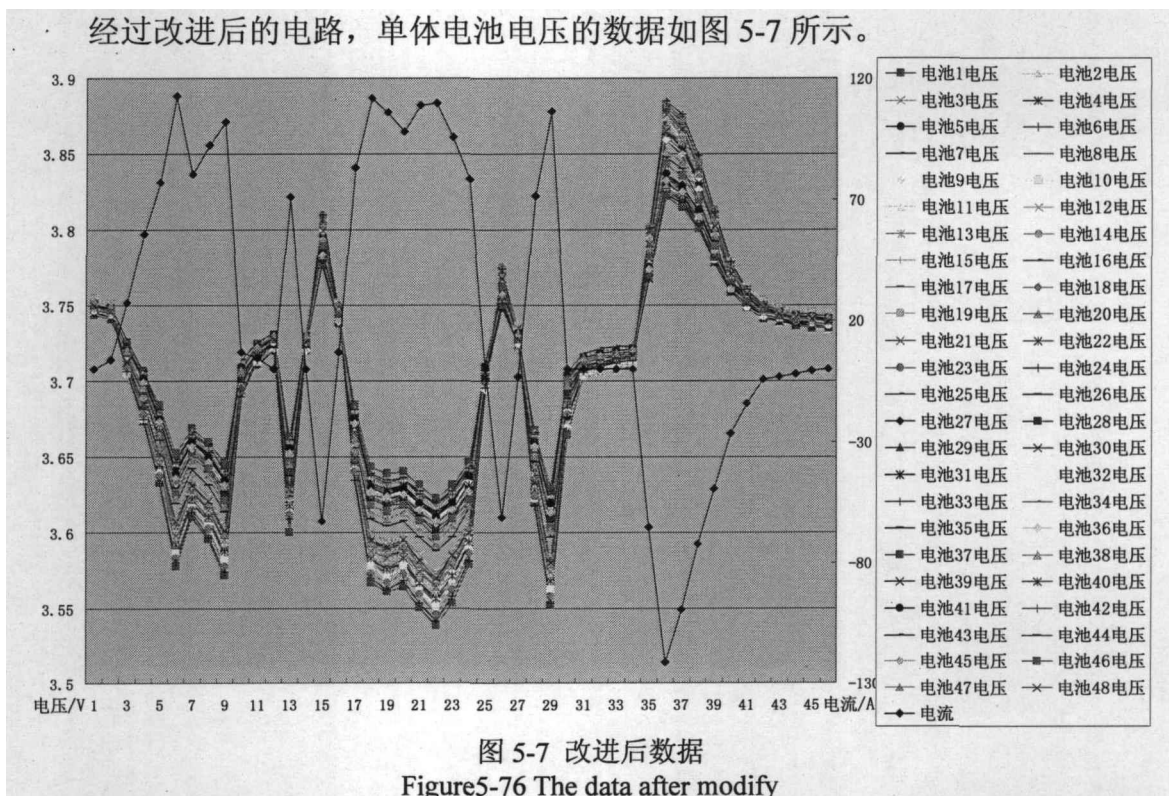
图 5-6 改进前数据
Figure5-6 The data before modify

由图可以看出，单体电池电压之间明显出现了不同步的现象，有些时候地方表现为电池电压的变化趋势不同，甚至相反；有些时候单体电压的变化趋势相同，但是变化的幅度不同。从整体上看，电池电压的变化有些时候与电流也呈现出相反的趋势。

产生这种现象的原因是：单体电压采集的时间较长，并且采集一路电压所需要的稳定时间较长。

一、在采集第一节电池电压与最后一节的电池电压时，时间上已经相差很多，外部的环境已经发生了变化，电池的状态已经改变；

二、在采集某一节电池电压时，可能出在电池状态变化的过程，不是其稳定的状态。



由图可以看出，现在的数据采集点也比以前的采集点多了许多，采集周期也比以前提升了许多，并且从各方面来看，数据的变化趋势都是符合实际情况的，没有出现异步或失步的现象，基本可以如实地反应电池的状态，为正确判断电池状态和使用的安全性提供了保证，从整体看，电池的电压也是随电流的改变而改变，很好的与电流数据吻合。

另一方面，为了保证电池管理系统在合理的环境范围内可靠的运行工作，现对电池管理系统在不同温度下的电压采集精度进行考证。

测试的温度范围为 -40°C — 70°C 。

测试方法为：将电路板置于高低温箱内，将测量、通讯和电源线引出，待测

电池置于 25℃ 环境下，设置高低温箱内的温度，待温度带到设定值并稳定半个小时后，通过通讯线读取芯片测量的电池电压值得到测量值，再通过万用表测量电池电压值得到基准值，将测量值与基准值进行比较，二者做差得出误差值，绘图见图 5-8 所示。

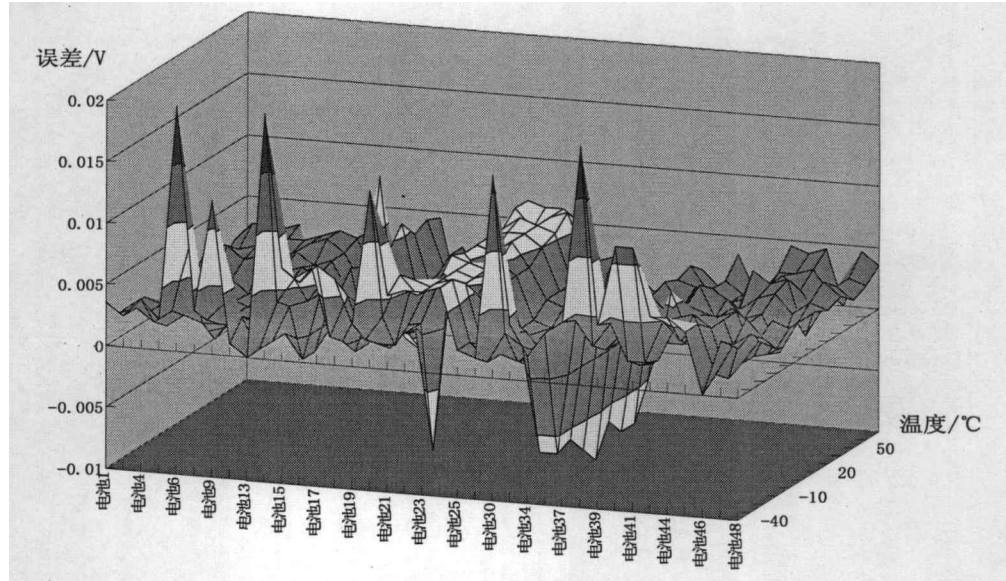


图 5-8 LTC6802 温度测试
Figure5-8 The test of LTC6802

由数据可以看出误差值整体在零点之上，这可能是与万用表的校准精度有关，总体来看误差在+20mV 至-10mV 范围内，基本可以满足测量的精度要求，除去-40℃时误差有一些大以外，其余各个温度情况下都可以将测量误差控制在±10mV 以内。这种引起的误差可以通过外加基准电压源的方法加以改进。

使用 LTC6802 测量电池组单体电压，在测量精度与速度上都显示出比较好的特性。

总电压和总电流的测量经过软件校准后与基准值进行比对，精度均符合要求。

6 总结

6.1 全文总结

混合动力汽车依据其对环境的友好性被人们所接受，电池管理系统是其关键的零部件，其性能的优良直接关系到整车的运行状况和节能效果。而混合动力汽车的其他零部件均已较为成熟，唯独电池管理系统涉及了电路与化学的交叉学科，还没被得到批量生产，该领域的科研机构和公司还是很少，科研投入力度不足。

本文提出的电池管理系统只是适用于锂离子电池应用到混合动力汽车的一个雏形，还有很多地方可以改进，并且随着深入的研究可以对一些方案进行优化。

为了完成本文的研究，主要做了以下工作：

一、对基于锂离子电池的纯电动汽车的电池管理系统进行深入研究，理解并熟悉其工作原理，安装调试等过程，为进一步了解电池管理系统的作用打下了一定的基础。

二、对基于混合动力汽车镍氢动力电池管理系统进行现场的安装调试，并进行跟车实验，了解了混合动力汽车的工作运行情况，熟悉其对电池的使用需求，为开发基于锂离子电池的混合动力汽车的电池管理系统的控制策略提供一定的参考作用。

三、了解了锂离子电池的原理，熟悉了应用于混合动力汽车的高功率型锂离子电池的特性，试着提出对其有效并符合要求的控制策略，改善了电池的使用效果。

四、针对混合动力汽车的特点，提出了单体电池测量的新方案，使其能有效的高速的测量出整组单体电池的电压，为进一步分析电池状态提供了数据参考。在使用过程中，该方案遇到了功耗，干扰等问题，在深入分析后都予以解决。

五、根据混合动力汽车的运行特点，提出了电池均衡和电池箱热管理等控制策略，为锂离子电池跟好的配合混合动力汽车做出了贡献，并在现场对这些方案进行了功能性的验证。

六、绘制印刷电路板，编写底层驱动程序，提高系统的抗干扰能力，规划系统的安装位置，并进行现场的安装调试，验证系统的可靠性。

七、使用该系统与配合电池厂家进行试验，得出不同电池类型在不同工况下的数据，为其电池在具体应用提供了有力的凭证。

6.2 后期展望

古语有云：活到老，学到老。对学问的探究是无止境的，电池管理系统从功能到形式还有很多地方值得改进和优化的，它只有暂时的适用性，而不会永久的适用。本系统仅是就现有的应用于不同电池体系和不同车型的电池管理系统进行了整合和适当的改进，只起到了抛砖引玉的作用，并不是一个成熟的系统，限于本人时间和精力有限，不能在有限的时间内做出很好的电池管理系统，但是在今后的无限的时间里会对以下几点做进一步的研究，并会提出更多更好的方法，不断完善电池管理系统的功能：

一、对延长电池寿命的一些方法，例如电池组均衡技术，电池包的热管理，电池的使用策略等，这些是需要时间去验证的，我这里仅是通过理论的推导做出一些假设，试验也只是一些简单的模拟性试验，不能很好的耦合实际的使用情况，也不能完全再现实际运行中的一些情况。所以，我会继续将这些策略使用到更多的实际情况中去，并在实际情况中不断发现自身的问题，和悟出更好的控制策略，在进行更多的试验，只有在这种实验——发现问题——解决问题——提出新方案——再实验的不断循环中，系统才可以得到不断地改进。

二、新时期会有新的变化，我会时刻关注新能源汽车这个行业，按照其对电池的要求不断地改进管理系统，例如安时这个衡量电池特性的单位是电化学里的单位，属于历史遗留问题，现在已经不能符合实际的应用，在汽车这个行业里，对动力的评价习惯使用瓦这种功率单位，二者之间是存在关系的，但是这种关系并不能对应起来，这就造成在使用过程中的交流不畅通，经常会造成误会，在控制策略上也会产生不便的麻烦。电池管理系统的使命就是在电池包与汽车之间建立一个沟通的桥梁，如何将电池的容量这种单位转换为汽车上更宜使用的功率这种单位，这也是今后去研究的方向。

三、本研究的目的是为人类寻找一种新的能源替代方式，希望新能源可以有效地减少污染的排放。另外，传统汽车是没有这部分新能源供给的，加上了这部分能源供给本身也是加重能源的消耗，其总的能源消耗是否就一定配置的得当，可以在今后继续研究，可以提出增加电池的使用效率的方法来抵消这部分能源的消耗。本系统的设计之初的要求是稳定运行，并没有考虑到自身的能源消耗，今后可以在多次实验后提出更加节能的方案。

四、多学科多领域的交叉融合，已经成为当今科技发展的趋势，学科之间的界限划分已经越来越模糊，学科之间的壁垒也逐渐削弱，今后我也应该在立足本领域的同时多涉猎其他领域的知识，将本领域与其他学科相结合，使其更有利的造福人类。

参考文献

- [1]. 姜久春. 电池管理系统的概况和发展趋势. 新材料产业[J], 2008. 7: 40-43.
- [2]. 文锋. 纯电动汽车用锂离子电池组若干应用基础研究, 博士学位论文[D]. 北京. 北京交通大学, 2010
- [3]. 劳力. 动力蓄电池管理系统 SOC 算法研究, 硕士学位论文[D]. 北京. 北京交通大学, 2005.
- [4]. 吉国光. 我国混合动力电动汽车技术现状与发展对策[J]. 客车技术, 2008. 6: 3-6.
- [5]. Greg Zimmer. 用于大功率锂电池组的电池管理设计[J]. 今日电子, 2009. 2: 61-62.
- [6]. Colin A. Vincent, Bruno Scrosati 著. 屠海令, 吴伯荣, 朱磊 译. 先进电池——电化学电源导论(第二版)[M]. 冶金工业出版社, 2006 年五月第一版: 60.
- [7]. 黄可龙, 王兆翔, 刘素琴. 锂离子电池原理与关键技术[M]. 化学工业出版社, 2008 年 2 月.
- [8]. 杨军, 解晶莹, 王久林. 化学电源测试原理与技术[M]. 化学工业出版社, 2006 年 6 月: 7.
- [9]. 李秉宇. 混合动力汽车镍氢动力电池管理系统的研究, 硕士学位论文[D]. 北京. 北京交通大学, 2008.
- [10]. 葛少伟. 燃料电池汽车镍氢电池管理系统的研究, 硕士学位论文[D]. 北京. 北京交通大学, 2008.
- [11]. 盛大双. 基于 CCP 协议的电池管理标定系统研究, 硕士学位论文[D]. 北京. 北京交通大学, 2009.
- [12]. 李红林, 张承宁, 孙逢春, 李军求, 张旺. 锂离子电池组均衡充电和保护系统研究[J]. 北京理工大学学报, 2004. 3: 210-213.
- [13]. 张宾, 林成涛, 陈全世. 电动汽车用 LiFePO₄/C 锂离子蓄电池性能[J]. 电源技术, 2008. 2: 95-98.
- [14]. GU Q J, CHEN Y F, WU ZH F. A voltage measuring method of series battery[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2002. 39(5): 26-29.
- [15]. 陈守平, 张军, 方英民, 梁毅. 动力电池组特性分析与均衡管理[J]. 电池工业, 2003. 12: 265-271.
- [16]. H. Sakamoto, K. Murata, E. Sakai and K. Nishijima, K. Harada, S. Taniguchi, K. Yamasaki and G. Ariyoshi. Balanced Charging of Series Connected Battery Cells. IEEE, 1998: 311-315.
- [17]. LTC6802-1 Data Sheets[Z]. Linear Technology Corporation, 2009.
- [18]. 冯旭云. 混合动力汽车动力电池(Ni-MH)管理系统的研究现状与发展[J]. 电源技术应用, 2008. 8: 1-5.
- [19]. Antonio Affanni, Alberto Bellini, Giovanni Franceschini, Paolo Guglielmi, and Carla Tassoni. Battery Choice and Management for new-Generation Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2005, 52 (5): 1343-1349.
- [20]. WANG Zhen-po(王震坡), SUN Feng-chun(孙逢春). 电动汽车电池组连接可靠性及不一致性研究[J]. Vehicle & Power Technology(车辆与动力技术), 2002, (4): 11-15.
- [21]. 吴红杰, 齐铂金, 郑敏信, 刘永喆. 基于 Kalman 滤波的镍氢动力电池 SOC 估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 945-948.
- [22]. 麻友良, 陈全世, 齐占宁. 电动汽车用电池 SOC 定义与检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 95-97.
- [23]. GB/T2900.41-2008. 电动汽车用动力蓄电池的循环性能要求[S].

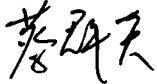
作者简历

2008.9—2010.7 北京交通大学 电气工程及其自动化 硕士学位

2004.9—2008.7 北京交通大学 电气工程及其自动化 学士学位

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，文中未加标注的引用材料均在参考文献中提及，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通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。

学位论文作者签名： 签字日期：2010年6月13日

学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
混合动力汽车	公开	U461		
学位授予单位名称*	学位授予单位代 码*	学位类别*	学位级别*	
北京交通大学	10004	工学	硕士	
论文题名*	并列题名			论文语种*
混合动力汽车用锂离子电池管理系统研究				
作者姓名*	袁行远	学号*	08121085	
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮编	
北京交通大学	10004	北京市海淀区西 直门外上园村 3 号	100044	
学科专业*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
电气工程	新能源	两年	2010	
论文提交日期*				
导师姓名*	张明	职称*	副教授	
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员		
	张小青			
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者	电子版论文出版 (发布) 地		权限声明	
论文总页数*	50			
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。				