

58
学校代号 10532



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

S08073007

分类号 TP3

密 级 不保密



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

动力锂离子电池组管理系统的研究

学位申请人姓名 雷 晶 晶

培 养 单 位 湖 南 大 学

导师姓名及职称 李秋红 教授

学 科 专 业 微电子学与固体电子学

研 究 方 向 纳米器件

论文提交日期 2011年5月20日

学校代号：10532

学 号：S08073007

密 级：不保密

湖南大学硕士学位论文

动力锂离子电池组管理系统的研究

学位申请人姓名：雷晶晶

导师姓名及职称：李秋红 教授

培 养 单 位：物理与微电子科学学院

专 业 名 称：微电子学与固体电子学

论文提交日期：2011年5月20日

论文答辩日期：2011年5月27日

答辩委员会主席：曾云 教授

The Research on Power Li-ion Battery Management System

by

LEI Jingjing

B.E. (Changsha University of Science & Technology) 2007

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Science

in

Microelectronics and Solid State Electronics

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

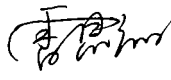
Professor LI Qiu-hong

May, 2011

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期：2011年 5月 27日


学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校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。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。


本学位论文属于

- 1、保密 ，在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期：2011年 5月 27日

导师签名：

日期：2011年 6月 1日

摘要

汽车的发展给人们的生活带来了极大的方便，但是也给人类生存环境带来了危害，同时传统汽车所消耗的燃油属于不可再生能源。随着人类的环保意识的增强以及能源危机的加剧，新能源汽车由于具备诸多优点，受到人们越来越多的关注，在许多国家已经上升到国家战略的层面。在我国，国家出台一系列的政策鼓励和支持新能源汽车发展。在几年前，由于电池技术的限制，新能源汽车并没有得到很好的发展，然而在这几年，随着锂电池技术的日益成熟，新能源汽车在这几年出现了“井喷”式的发展。锂电池以高性能、低污染或者无污染而受到汽车界的关注，被誉为最具发展潜力的能源载体之一，锂离子电池的管理已成为当前研究的热点之一。

本系统针对 74 节动力锂电池组，采用基于 CAN 总线的分布式架构，由电池包模块与主控单元组成，所有电池包模块与主控单元通过 CAN 总线进行数据交换，由主控单元统一控制电池组的充放电、均衡等等。这种架构可以很方便的增减电池的数量，具有很好的通用性和扩展性。本文从电池外部参数的采集、电池管理系统的架构及部分核心硬件设计、电池管理系统的电量计算方法及控制管理策略、管理系统的软件设计四个方面对所研究的系统进行了阐述。

文中对电池组单体电池电压的采集做了深入的研究，并提出一种低成本、高精度的电池组单体电池电压检测方法，该方法具有成本低、电路简单可靠、对电池影响小、精度高的特点，常温下误差低于 0.1%。

研究了电池组的电量计算方法和控制管理策略，在文中给出了具体的故障管理、状态管理、充放电控制策略、热管理等电池组管理策略，增强电池组在使用过程中的安全性能并提高电池组的使用寿命。

对电池管理系统的软件设计做了深入的研究，系统的软件设计采用多工序并行处理的程序结构，该程序结构设计简单、实时性较强，能够很好的应对管理系统对系统实时性和稳定性的要求。

最后，对本系统存在不足以及改进方案进行了详细说明。

关键词：电动汽车；动力电池；电池管理系统；电压检测；电池控制策略

Abstract

The development of automobile brought great convenience to human, but also brought harm to the environment we live. Meanwhile, the fuel consumption of traditional automobile is a non-renewable energy. With the increase of people's awareness of environmental protection and intensifies of energy crisis, new energy vehicles get more and more attention due to its advantages. The new energy vehicles have risen to the level of national strategy in many countries. In our country, the state has adopted series of policies to encourage and support the development of new energy vehicles. New energy vehicles include hybrid electric vehicles, pure electric vehicles and fuel cell vehicles. In a few years ago, due to limitations of battery technology, the development of new energy vehicles is not smoothly. In recent years, with the maturing of lithium battery technology, new energy vehicles got a "blowout" type of development. Lithium battery with high performance, low-pollution or non-pollution got more and more attention of the automobile industry, and was known as the most potential energy carries of new energy vehicles. The management of lithium ion battery has become one of the hot spot field.

This battery management system(BMS) for 74 series power lithium battery packs adopted distributed architecture based on CAN bus, consist of battery pack module and main control unit. The battery pack modules exchange data with main control unit through the CAN bus. The charger, voltage balance and discharger of Battery packs centralized controlled by the main control unit. This architecture can increase or decrease the number of cells with conveniently.

In this paper, this system is introduced from four aspects: the acquisition of external parameters of battery packs, battery management system architecture and core hardware design, battery management system SOC measure and control strategy, the battery management system software design.

The single voltage measure for battery packs was been researched in this paper. Put forward a kind of low cost, high precision single voltage measure methods for battery packs. This method features low cost, simple, reliable, smaller effect for battery, high precision and error of less than 0.1% at room temperature.

The method of SOC measure, control strategy was been researched. The fault manage, state manage, control strategy of charge and discharge, thermal management of battery packs was detailed in this paper. Enhanced the battery packs safety and

increased battery packs cycle number.

The battery management system software was been researched. The software structure of multi-node parallel processing program is been adopted in software design. It features simple, good real-time performance and stability.

Finally, the deficiencies of battery management system and improvement program are descried.

Key Words: Electric vehicle, Power battery packs, Battery management system, Single voltage detection, Control strategy of battery

目录

学位论文原创性声明和学位论文版权使用授权书	I
摘 要	II
Abstract	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 电动汽车技术	1
1.2 电池技术	2
1.3 锂电池管理系统	3
1.3.1 电池管理系统 SOC 估算研究现状	4
1.3.2 锂电池管理系统均衡方法及研究方向	6
1.3.3 锂电池管理系统的热管理	6
1.4 本论文的研究内容及安排	7
第 2 章 锂电池外部参数检测研究	8
2.1 锂电池单体电压检测	8
2.1.1 现有单体电池电压检测方法	8
2.1.2 单体电池电压精确检测方法的研究	13
2.1.3 电压检测实验结果	16
2.2 锂电池组温度检测	18
2.2.1 DS18B20 温度检测原理	18
2.2.2 温度传感器拓扑	19
2.3 锂电池组总电流的检测	19
2.3.1 电流检测方法	19
2.3.2 锂电池组电流检测硬件设计	21
2.4 锂电池组总电压检测	22
第 3 章 BMS 系统总体设计及 CAN 总线设计	23
3.1 BMS 系统总体方案设计	23

3.2 系统电源供应	24
3.3 单片机方案选择	25
3.4 主控单元硬件设计	26
3.5 电池包模块硬件设计	27
3.6 CAN 总线设计	28
3.6.1 内部 CAN 总线传输帧格式	28
3.6.2 内部 CAN 总线滤波器设置	29
第 4 章 锂电池管理控制策略及算法	30
4.1 SOC 估算算法	30
4.1.1 SOC 估算基本思想	30
4.1.2 电量的计量	31
4.2 锂电池管理系统管理控制策略	31
4.2.1 电池组故障管理	31
4.2.2 电池组均衡充电管理	34
4.2.3 电池组放电管理	36
4.2.4 电池组热管理	37
4.3 电池管理系统低功耗运行策略	37
第 5 章 锂电池管理系统软件设计	39
5.1 软件设计思想	39
5.2 主控单元程序设计	41
5.2.1 主控单元启动流程	42
5.2.2 CAN 总线发送服务程序	43
5.2.3 电池组单体电池电压温度数据传输	44
5.2.4 电流检测	45
5.2.5 BMS 程序设计	46
5.3 电池包模块程序设计	47
5.3.1 温度检测程序	47
5.3.2 电压检测及均衡控制程序	48

5.4 上位机显示及 CAN 总线通信数据	50
5.4.1 上位机显示	50
5.4.2 CAN 总线通信	51
结论	52
参考文献	54
致 谢	57
附录 A 攻读硕士学位期间所发表的论文	58
附录 B 系统照片	59

第 1 章 绪 论

1.1 电动汽车技术

自汽车发明以来，汽车给人们的生活带了极大的方便。但是自 1970 年以来发生的石油危机、伊拉克战争以及最近的石油价格持续上涨给汽车工业带来了前所未有的挑战。汽车在消耗燃油的同时，排放的尾气中含有大量 SO_2 等有毒气体，这些有毒气体已经成为大气污染重要来源之一；同时，尾气中的 CO_2 ，是加速全球气候变暖的重要因素之一。自 2009 年哥本哈根气候大会以来，各国政府大力提倡低碳、绿色的出行方式，很显然，传统的汽车并不符合。所以在能源危机、环境保护等压力下，各国政府和各大汽车制造厂商都致力于清洁、环保的新能源汽车的研究。到 2010 年，我国的石油对外依存度已经超过 50%，大量的石油需要进口，因此大力发展新能源汽车，是保证我国能源安全的战略措施。

电动汽车是一种以电为能源的新型环保新能源汽车产品，具有能源来源多样化、能源利用率高、低污染或无污染等特点^[1-2]，已经受到许多国家的高度重视。广义上说，电动汽车可以分为混合动力车、燃料电池汽车及纯电动汽车^[3]。

混合动力汽车是一种以内燃机为主、电驱动为辅的汽车，电池作为电驱动的能量载体，其能源可以来源于车载发电机、制动能量回收、电网等多种途径。可以显著降低汽车的燃油消耗和降低汽车的排放，目前已经实现了大规模生产。世界第一台量产的混合动力汽车是日本丰田公司 1997 年底推出的 Prius，该车在 1998 年就已经报道累积销售达到 100 万辆，该车可以达到比较好的省油效果。目前国内一些汽车厂商也推出了混合动力汽车，如长安推出的“杰勋”，但目前并没有进行大规模生产。混合动力汽车目前研究的热点是 PHEV（插电式混合动力汽车）、EHEV（增程式混合动力汽车），由中国比亚迪公司推出的“F3DM”和雪佛兰推出的“VOLT”都属于增程式混合动力汽车，这两款汽车的特点是在纯电动模式和混合动力两种模式下工作。

燃料电池电动汽车是以燃料电池产生电，用电机驱动的汽车，其能源来自氢气。由于燃料电池的可靠性、寿命有待改进，氢气的基础设施有待建立，氢气的来源和供应有待解决，所以燃料电池应用于电动汽车还有一段路要走。

纯电动汽车是一种完全以电为能源的汽车，是未来汽车的一个重要发展方向。纯电动汽车的电池可以使用二次电池和燃料电池存储能量。目前大规模生产并销售的有日产的“Leaf”、美国 Tesla 公司的 Tesla Roadster 等等。国内的汽车厂商也在积极参与电动汽车的研发，目前推上市场的有比亚迪公司推出的“e6”，目前该

车已经被深圳市政府采购作为出租车使用，也将于 2011 年登陆美国市场。

电动汽车的发展，得到了我国政府的重视和大力扶持，尤其是近几年，国家推出了一系列的政策鼓励和支持电动汽车的发展。国内各大汽车厂商也投入大量的人力物力积极参与电动汽车的研发，取得一系列的成果，也推出一些电动汽车，如长安的“杰勋”、比亚迪的“E6”和“F3DM”等等。但是总的来说，我国电动汽车与国外先进水平相比，还有不少的差距。

电动汽车的核心技术包括电池、电机及电机控制、能量管理等。电机和电机控制已经不是电动汽车发展的瓶颈，目前电动汽车的瓶颈在于电池及能量管理。

1.2 电池技术

自二次电池发明以来，电池产业经历了铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等的发展过程，这些电池统称为二次电池。电动汽车对电池的要求比较高：高可靠性及安全性、高的比能量、循环寿命长、低成本、环境友好。

铅酸电池由于技术成熟、成本较低、安全性相对较好、高倍率充放电等优点，在电动自行车使用较多，在一些低成本的电动汽车上也有应用。但是存在能量密度和功率密度低，无法达到比较好的续航里程，而且循环性能差，使用寿命短^[2]，同时铅酸电池中含有重金属铅，对环境有一定的污染，所以铅酸电池并不是未来电动汽车的最佳方案。

镍氢电池与铅酸电池一样，具有技术成熟，成本低，安全性较好等特点，目前在混合动力汽车中使用较多，如丰田的 Prius、长安的“杰勋”都是采用的镍氢电池。与铅酸电池相比，虽然能量密度和功率密度有所提升，但是作为电动汽车的电源仍然不够，而且镍氢电池的高温性能较差，自放电率高，电压平台低、有记忆效应等问题，限制了镍氢电池在电动汽车上应用。

锂离子电池首先在 1991 年由索尼公司商业化，与前两种电池相比，具有电压平台高、比能量高、无记忆效应、循环寿命长、无污染、自放电率小等特点^[4,5]，已经在便携式产品、电动工具、航空航天、电动自行车等领域得到了大量应用，同时也受到了汽车工业界的关注。

锂离子电池根据正极材料可以分为钴酸锂(LiCoO_2)、锰酸锂(LiMn_2O_4)、磷酸铁锂(LiFeO_4)以及多元复合物^[6]。在这几种材料中，由于钴元素属于稀有元素，产量有限，材料成本较高，所以以钴酸锂为正极材料的锂电池一般用于便携式设备中，如手机、MP4 等；以锰酸锂为正极材料的锂电池具有电压平台高、比能量高，大电流充放电性能好等特点，是日本、韩国大力发展的一种动力电池正极材料，目前应用的有：日产公司的 Leaf、通用的 Volt 汽车。以磷酸铁锂为正极材料的锂电池具有良好的循环性能和安全性，是我国大力发展的一种动力电池材料，但是

由于存在低温性能差、比能量低等问题，距真正的应用还有一段距离^[7,8]。

表 1.1 铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池比较

	铅酸电池	镍氢电池	锂电池
商品化时间	1890 年	1990 年	1991 年
工作电压	2.0V	1.2V	3.2V~3.7V
单位质量能量密度	<30Wh/kg	60-80Wh/kg	110~167Wh/kg
单位体积能量密度	100(Wh/L)	250(Wh/L)	270-466(Wh/L)
自放电率	4-5%/月	30-35%/月	<5%/月
循环寿命	400 次	500 次	500-2000 次
记忆效应	无	有	无
污染	是	否	否
价格	<0.2 \$ /Wh	0.5-1 \$ /Wh	0.3-1 \$ /Wh
优点	技术成熟；价格低	快速充放电；能量密度稍高；循环寿命长	快速充放电；能量密度高；循环寿命长
缺点	能量密度低；寿命短；环保问题	具有记忆效应；高温下性能差；充放电效率差	价格高；安全性问题
定位	用于电动自行车	HEV	便携式设备，自动工具，电动汽车

目前市场上推出了一系列基于锂离子电池的电动汽车，国际上的大品牌如日产的 leaf、通用汽车的 volt、Tesla 公司的 Tesla Roadster、CODA 公司的 CODA 电动汽车等等。在国内，各大汽车厂商也积极参与基于锂电池电动汽车的研发，目前已经推出市场上的有比亚迪的 E6、F3DM，除此之外，其他厂商的基于锂离子的电动汽车还没有上市，但是都已经处于上市筹备阶段了。

1.3 锂电池管理系统

单体锂电池在未加保护的情况下，会出现过充、过放、过流等问题，这些问题都会对电池造成不可逆的影响。锂电池对温度比较敏感，低温下，电池的充放电效率明显降低；高温下，锂电池寿命衰减加速，而且容易产生热失控，造成燃烧爆炸等安全事故^[9,10]。

锂电池应用于电动汽车、电动工具等大功率系统，一般需要将几十节甚至上百节电池串联而成，随着锂电池数量的增加，锂电池管理的难度加大。首先单体电池电压检测由于电池串联数量大、单体电池两端的共模电压高而变的非常困难；

再次，由于电池工艺的问题，电池组中电池一致性匹配差异将严重降低电池组的使用寿命；最后，电池组在使用过程中，电池组的一些参数，动力电池使用环境恶劣，工作电压高，电流变化迅速，也是增加电池管理难度的一个重要原因。一般来说，用于动力电池的电池管理系统具有以下功能^[11,12]：

- 电池组外部参数的检测，包括单体电池电压、温度，总电压总电流等；
- 电池组故障状态判断和剩余电量估计
- 电池组的充放电控制及保护功能
- 电池组的电量均衡
- 提供与外部设备的通信功能
- 电池组的热管理及保护功能

锂电池管理系统的核心在于电池的外部参数采集、电池组的剩余电量及健康状况估计、电池组的电量均衡以及电池组的热管理。

锂电池对电压检测精度较高，一般要求误差低于 1%。用于便携式产品的锂电池系统往往串联的电池数量较少，一般是 1~4 节，电池电压低，市场上成熟的方案非常多。而动力电池系统由于电池数量较多，电压较高，电压采集相对比较困难，所以用于动力电池系统的电池管理系统一般采用分布式的方案^[13,14,15]：即把整个电池组分成为若干个标准电池包模块，每个电池包 10~12 个电池；每个电池包配备一个电池数据采集单元；所有电池数据采集单元通过总线与一个主控单元；由主控单元统一控制电池组的充放电、均衡、SOC 估算等等。如图 1.1 所示。

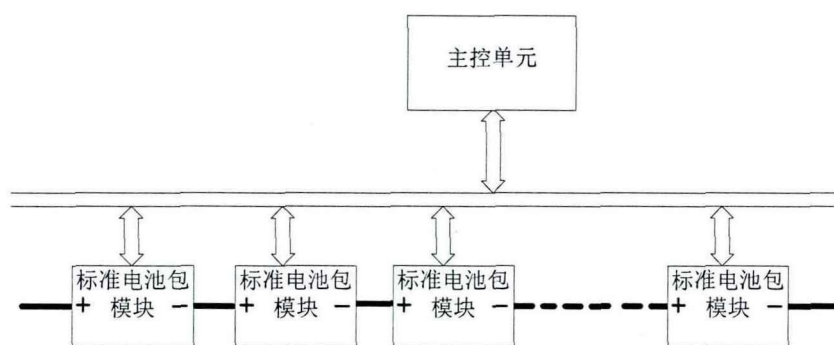


图 1.1 动力电池管理系统架构

1.3.1 电池管理系统 SOC 估算研究现状

锂电池组的荷电状态 SOC(state of charge)^[16,17]，可以反映当前电池组的剩余电量，由于动力电池组电池数量较多以及电池特殊的结构，同时锂电池组的 SOC 受诸多因素影响，包括工作电流、温度、自放电率、电池组的循环次数等等，所以要做到精确电池组的 SOC 估算非常困难^[18,19]。对于动力电池组的使用者来说，及时了解电池组的剩余电量非常重要。

目前，SOC 的检测使用比较多的方法有开路电压法、电流积分法、内阻法、

卡尔曼滤波法及神经网络法^[20]。

开路电压法是最简单的 SOC 的检测方法,其原理基于电池的开路电压与电池的容量存在一定的对应关系,通过精确检测电池组的开路电压,即可得到电池组的 SOC^[21]。由于锂电池的电压平台比较平坦,尤其是以磷酸铁锂为正极材料的锂电池,在 20%~80%的 SOC 区间内,电压变化在小于 100mV,所在这种方法只适合于充电初期和末期,且只适合于静态检测^[22,23]。

内阻法和开路电压法一样,有所不同的是,内阻法的原理基于电池的内阻与电池的 SOC 存在的一定的对应关系,通过检测电池的内阻,即可得到电池的 SOC^[24]。锂电池组的内阻非常小,为毫欧级,对检测精度要求非常高;锂电池组内阻在线测量包括了接触内阻以及单体电池的轮换选择,检测误差较大;当锂电池的 SOC 在 50%以上时,内阻变化不大,在 50%变化才相对比较明显;随着锂电池的循环次数的增加,锂电池的内阻有增加的趋势,所以内阻法并不适合于锂电池的 SOC 检测,一般用于铅酸电池和镍氢电池^[25]。

电流积分法通过监视锂电池组充入和放出的电量,估计 SOC 的变化,再与初始容量比较即可得知电池组 SOC。

$$SOC = \frac{Q_c - \int_{t_0}^t i dt}{Q_c} \quad (1.1)$$

式 1.1 中, Q_c 为电池组初始电量, i 为电池组的实时电流。这种方法理论上简单可行,但是实际使用中,检测精度受很多因素的影响:由于锂电池的特殊性,在不同的温度、工作电流下锂电池的充放电效率不同,在小电流及常温下,电池组的充放电效率高,而在低温及大电流工作状态下,充放电效率降低;在低温下,锂电池能放出的电量将显著减少;锂电池组自放电率也是影响 SOC 检测精度的一个重要因素,电池的自放电率与存放时间和温度有很大的关系^[26];锂电池组工作电流的检测误差会对电量计量的结果产生累计误差。

电流积分法由于以上因素的影响,在锂电池的 SOC 估算中,单纯的使用电流积分法并不多,一般需要后期校正或者与其他方法相结合。比较常用的方法是电流积分法与开路电压法的结合^[27]、卡尔曼滤波法^[28,29,30,31]、神经网络^[32,33,34]。通过开路电压校正 SOC 可以有效降低累积误差,可以在整个电池的电压使用区间内设几个点,比如当电池组充电充到截止电压时,无论此时 SOC 为多少,都置为 100%,而当电池组放电放到放电截止电压时,置为 0。一般情况下在静置时采用电压法校正 SOC,而电池工作时,使用电流积分法计算 SOC。电池组随着循环次数的增加,电池的容量有一定程度的衰减,同时电池组中存在电池电压不一致,所以以电池组的电压校正 SOC 的精度有一定的局限性。卡尔曼滤波法和神经网络考虑电池组循环变化、电池老化、温度、放电效率等影响, SOC 检测的精度有所提高,但是由于算法复杂,目前应用并不多,还处于实验室研究阶段,这两种方

法都是 SOC 研究的方向。

1.3.2 锂电池管理系统均衡方法及研究方向

动力锂电池系统中，由于串联电池数量较多，单体电池之间存在电压、容量及内阻的差异，这些差异经多次循环之后，会更加明显。造成这种差异的主要原因有：1) 工艺的因素，电池与电池之间无法做到绝对的一致性；2) 电池组中单体电池之间自放电率不一致的影响；3) 电池工作过程中，热管理不均匀，使电池组中，电池与电池之间长期存在温度差异，造成电池不一致；4) 电池组电压采集电路的影响。

在电池生产过程中，可以通过提高工艺和自动化水平降低电池的一致性差异；也可以在电池成组时，尽量选择一致性好的电池；在电池热管理方面，尽量降低电池与电池之间的热失衡，保持所有电池温度的一致性也是降低一致性差异的方法。除此之外，可以使用均衡电路使电池保持一致。

目前，电池组的均衡方法主要分为两种：被动耗能式均衡和主动能量转移/转换式均衡。被动耗能式均衡通过在单体电池并联一个功率电阻和一个开关，在充电过程中，对达到截止电压的电池进行分流，从而使电池达到一致。由于电阻会发热，会造成局部温度过高，给热管理造成困难；电阻均衡只限于充电均衡，无法改变电池组中由于个别电池容量过低造成整个电池组容量无法得到充分利用的局面；另外电阻均衡是将电压高的电池的能量通过电阻消耗掉，造成一定的能源浪费，与目前节能减排的大环境不相符，所以电阻均衡方法未来将被淘汰。但是电阻均衡由于其控制简单、成本低、可靠性好，仍然是电池组均衡的主要方法。

主动能量转移/转换式均衡通过使用电容、电感等储能器件组成 DCDC 转换电路，对电池组中单体与单体之间、单体与电池组之间进行电量转移或者能量转换^[35,36,37,38]。这种均衡方式具有效率高、发热量少等优点，缺点是成本高、控制复杂，只适合电池数量较少的电池组的均衡。由于动力电池系统电池数量多、电压高，主动均衡控制更加困难，动力电池管理系统都采用图 1.1 中的架构，可以在电池包内、包与包之间采用主动均衡，这种结构很复杂，成本也非常高。目前也有一种基于总线的均衡架构，即每一个电池配置一个均衡单元，均衡单元把电压高的电池的能量能过 DCAC 变换，再通过变压器耦合，传递到总线上，总线上电压低的电池的均衡单元接收能量，使用 ACDC 模块把电量充入电压低的电池，这种方式易于模块化，适合串联数量比较大的电池组，但是成本比较高。

1.3.3 锂电池管理系统的热管理

锂电池对温度比较敏感，在低温下，电池的放电效率明显下降，而且能放出

的电量也较少；在高温下，电池的寿命衰减将加快，容易出现热失控，发生安全事故，主要原因是电池的负极材料、隔膜和电解液均为易燃有机物质；电池组中，电池温度不一致会造成电池组单体之间充放电效率、自放电率等不一致，从而影响电池一致性。锂电池在最佳工作温度为 25~40 度。锂电池管理系统的热管理的主要任务为^[39]：最大限度地减少电池之间的温差；维持电池箱内的温度，使电池保持在最佳的工作状态。一般可以使用车载空调器、相变材料等实现对电池温度的控制，也可以采用风扇和加热板对电池温度进行控制。热管理对电池组的风道设计要求较高，风道设计的不好，容易造成风道入口和风道出口的温度相差过大，从而影响电池的温度一致性。

1.4 本论文的研究内容及安排

本文的目标是根据设计要求，设计一个针对 74 节锂离子电池组动力锂电池管理系统，根据设计要求，实现的系统有如下特点：

1、系统采用分布式的管理系统架构，将电池组分为 7 个电池包，所有电池包与主控单元通过 CAN 总线连接，采用此架构可以方便增加或者减少电池数量。

2、单体电压检测方案采用 LTC6802 的电压检测芯片，完成对电池组单体电池电压的精确检测，检测误差低于 0.1%。

3、在精确电压检测的基础上，实现精确的充电均衡以及 SOC 估算。

4、对锂电池组的故障进行管理，及时处理锂电池所遇到的故障。

5、对锂电池组的充放电进行管理，避免出现过充、过放、过温、欠温、过流等影响电池组寿命的状态，延长电池组的使用寿命。

本文章节安排如下：

第一章介绍电动汽车、电池技术及锂电池管理系统目前的研究热点。

第二章重点研究锂电池组外部参数的检测，包括单体电池电压、电池温度、电池组总电压、总电压。提出一种高精度单体电池电压检测方法，常温下，精度优于 LTC6802 锂电池组电池电压专用检测芯片。

第三章详细介绍了管理系统的总体方案设计，并介绍了主控单元、电池包模块的硬件设计及 CAN 总线的设计。

第四章重点介绍了本系统所采用的充放电控制策略、SOC 估算方法、热管理策略、故障管理、均衡管理等。

第五章介绍了管理系统的软件设计，重点介绍了软件设计思想，该程序结构设计简单，实时性较强，能够很好的应对管理系统对系统实时性的要求。

最后对本系统进行总结，对存在的不足之处予以阐述，并提出了修改方案。

第 2 章 锂电池外部参数检测研究

锂电池外部参数测量是电池管理系统的一个重要功能，通过测量锂电池的各种外部参数，可以判断电池的工作状态和健康情况。锂电池的外部参数一般包括：单体电池电压、电池温度、电池组总电压、电池组总电流等。电池温度、电池组总电压及总电流比较方便测量，一般使用相应的传感器，再通过 AD 转换即可。锂电池组中单体电池电压的测量由于电池两端存在比较高的共模电压，超出了 AD 的输入范围，不能直接测量，需要通过一定的手段来测量。在本章中，将详细介绍目前使用比较多的电压检测方法，重点介绍一种高精度的电压检测方法，最后介绍温度、电池组总电压总电流的检测。

2.1 锂电池单体电压检测

在大功率电池组中，要获得比较高的电压，需要将电池串联在一起，这样造成每个电池的电位不一样，电池的两端都存在较大的共模电压，这样给电压检测造成了困难。单体电压检测的思想一般是消除共模电压，再通过 AD 采样得出电池实际电压，各种方法的不同点在于消除共模电压的方法不一样。

2.1.1 现有单体电池电压检测方法

2.1.1.1 电阻分压法

电阻分压法，也有的文献中称为共模电压法，如图 2.1 所示，基本思想是使用精密电阻将对各个电池的正极电压进行电阻分压，以达到 AD 采样的范围。通过 AD 采样之后，将采样的结果逐一相减，即得到每一个电池的电压。

这种方法受电阻精度影响，精度比较低，而且容易产生累积误差；同时，AD 采样的分辨率因为电阻分压而降低。以 12 串的锂电池组为例，总电压范围是 30~50V，AD 为 10 位，且采样范围是 0~5V，那么需要使用电阻分压 1/10，AD 才能直接进行采样，AD 的初始分辨率为 4.9mV，经分压后，分辨率将降低到 49mV，极大的降低了测量的精度。

电阻分压法对电池组的一致性影响比较大。如图 2.1 所示，电池 2, 3, 4 的分压电流为别 I_2, I_3, I_4 。那么流过电池 1, 2, 3, 4 的电流分别为 $I_2+I_3+I_4, I_2+I_3+I_4, I_3+I_4, I_3+I_4$ 。长期下去将造成电池组不一致，电池组单体电池的电压从低端到顶端呈现递增趋势，这对电池组是非常不利的，电池组的不一致将会在后面的章节进行分析。

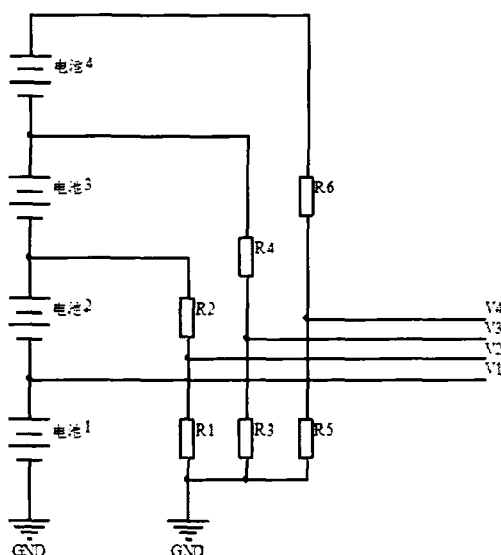


图 2.1 电阻分压

电阻分压法的优点在于成本低，简单可靠，一般用于对成本要求高、电池数比较小的串联电池组中。

2.1.1.2 差模电压法

差模电压法的基本思想是使用运放或分立器件消除电池两端的共模电压，使电压达到 AD 采样的范围。运算放大器与 MOS 管结合的方法^[40]，如图 2.2 所示，每个检测通道由运算放大器、PMOS 管和 3 个精密电阻构成。

以 BT6 电池为例，由于 OP1D 的反相端电压大于同相端的电压，则 OP1D 输出低电平，Q1 导通，根据运算放大的特性，在达到平衡之后，流过 MOS 管 Q1 的电流 I 为：

$$I = \frac{V_{BT6} \pm V_{os}}{R_{13}} \quad (2.1)$$

V_{os} 为运算放大器的失调电压，一般为 1-5mV，对精度影响较大；运算放大器的输入偏置电流为纳安级的，对检测精度的影响极小，不予考虑；由于 MOS 管的栅源级的漏电流极小，所以也不用考虑漏电流对测量精度的影响。所以 R16 上的电压为：

$$V_6 = (V_{BT6} \pm V_{os}) \times \frac{R_{16}}{R_{13}} \quad (2.2)$$

当 $R_{16} = R_{13}$ 时，在不考虑电阻精度和运算放大器的输入失调电压的影响时， V_6 的电压即为电池 BT6 的电压。但是当电阻误差较大时，测量的结果也将产生较大的偏差，在这个电路中，需使用 0.1% 甚至精度更高的电阻。

另外，由于运算放大器的供电由电池供电，当电池数量较多的时候，需要使用多个运算放大器，会消耗一定的电量，长期下去，会对电池的一致性也造成一定的影响^[41]。所以需要在与电池连接处使用开关控制，这里可以采用继电器或者

PHOTOMOS (光电 MOS 管)。

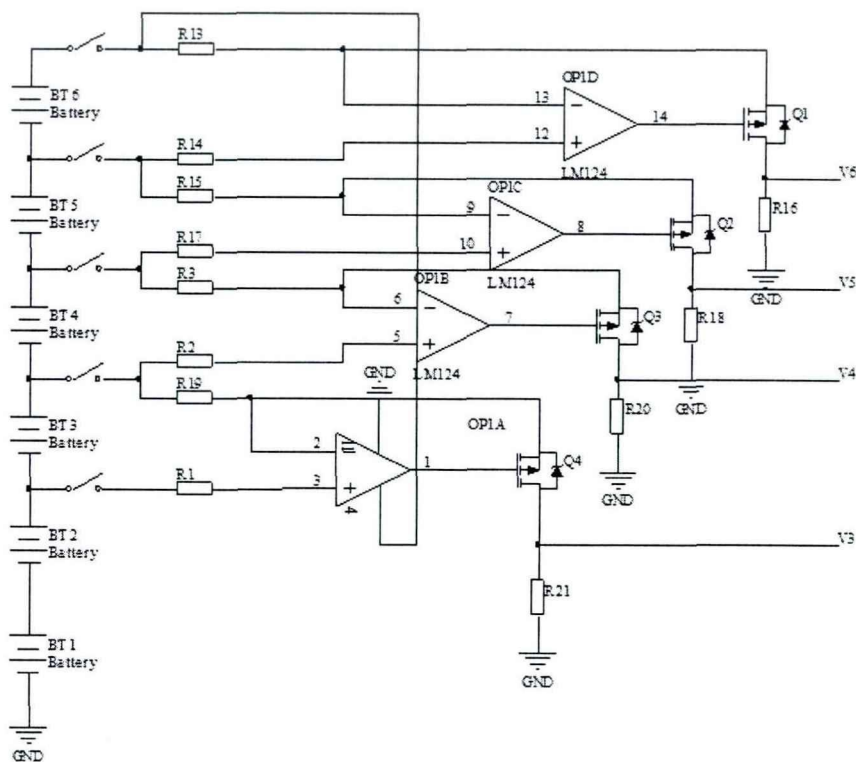


图 2.2 基于运算放大器和 MOS 管的电压检测方法

在使用开关控制后，该电路即保证了精度，同时又降低了对电池的影响，是一种比较实用的测量电路。但是随着电池数量的增加，需要用到的继电器或者 PHOTOMOS 数量较多，成本也随之上升。

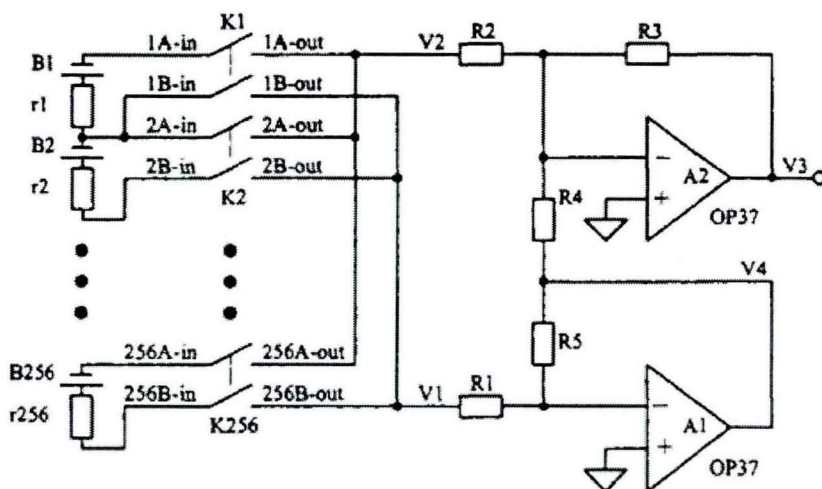


图 2.3 基于光电继电器和运放的抗共模电路

图 2.3 是一种基于光电继电器和运放的抗共模电路，光电继电器用于选通不同的电池，运算放大器 A1、A2 和电阻 R1~R5 构成了抗共模电压电路。

V3 即为输出的电池的电压。根据运算放大器的特性得知：

$$V_3 = \left(\frac{V_1}{R_1} \times \frac{R_5}{R_4} - \frac{V_2}{R_2} \right) \times R_3 \quad (2.3)$$

$$V_4 = -\frac{V_1}{R_1} \times R_5 \quad (2.4)$$

取 $R_1=R_2=R_3=500K\Omega, R_4=R_5=15K\Omega$; 则 $V_3=V_1-V_2$, $V_4=-0.03V_1$, V_3 即为电池电压。在运算放大器的电源为 $\pm 15V$ 时, 该抗共模电路的输入范围可以达到 $500V$ 。但是由于分压比较大, 该电路对电阻的精度要求非常高, 需要 0.1% 以上精度的电阻, 该电路的精度才能保证。

2.1.1.3 飞电容法

如图 2.4 所示, 飞电容法检测电路由开关阵列、电容、缓冲器和 AD 组成。测量的时候, 首先通过开关阵列, 选通一节电池, 让电容与电池连接, 电池对电容进行充电, 经过一定时间之后, 电容的电压与电池电压基本一致; 断开开关阵列对电池的选通, 闭合开关 S_1 和 S_2 , 缓冲器输出即为电池的电压^[42]。缓冲器须选择偏置电流较小的运算放大器, 以减少对测量精度的影响。

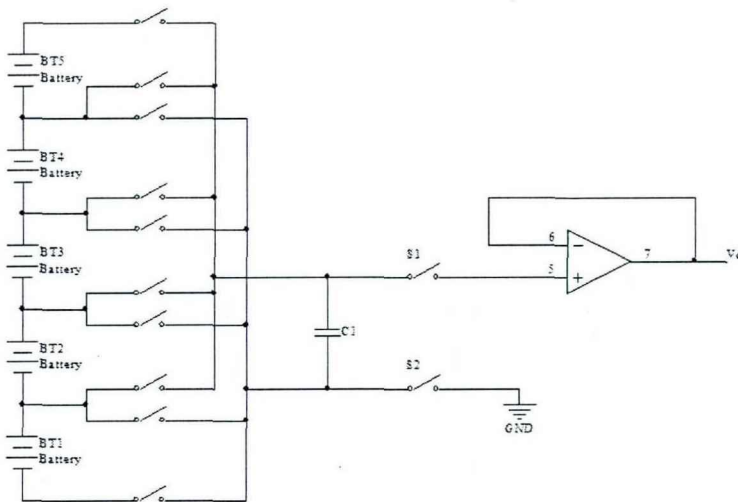


图 2.4 飞电容电压检测法

为避免由于开关不当操作而造成的短路和电容充电初期电流过大, 需要在每一个开关串联一个限流电阻, 一般为 $1K$ 欧, 这样也增加了电容的充电时间, 需根据实际情况改变电阻的阻值。

飞电容法对电池影响较小, 精度也比较高。当电池数量较少, 可以采用一般的模拟开关, 当电池数量较多时, 可以采用继电器作为开关, 受继电器的开关速度和寿命影响, 这种方法检测速度慢, 而且继电压动作的时候有噪声。另外也可以采用 PhotoMOS 继电器, 但由于需要的 PhotoMOS 继电器数量较大, 所以成本相对较高。

2.1.1.4 V/F 转换无触点采样法

这种方法的原理是每个电池都有一个电压/频率转换系统, 检测时首先对电池电压进行降压, 再经电压/频率转换系统将降压后的电压转换成对应的脉冲信号,

经过光耦隔离，传送到模拟开关，单片机通过控制模拟开关，接收不同电池的脉冲频率信号，获取电压值^[43]。该方法具有抗干扰性能强的优点，可以用于电池数量较少的情况下。在电池数量较多的时候，由于每个电池都需要一个 V/F 转换系统和光耦隔离器件，且都需要单独供电，造成成本过高，也比较复杂，所以该方法不适合数量较多的电池组使用。

2.1.1.5 分立器件电压转换方法

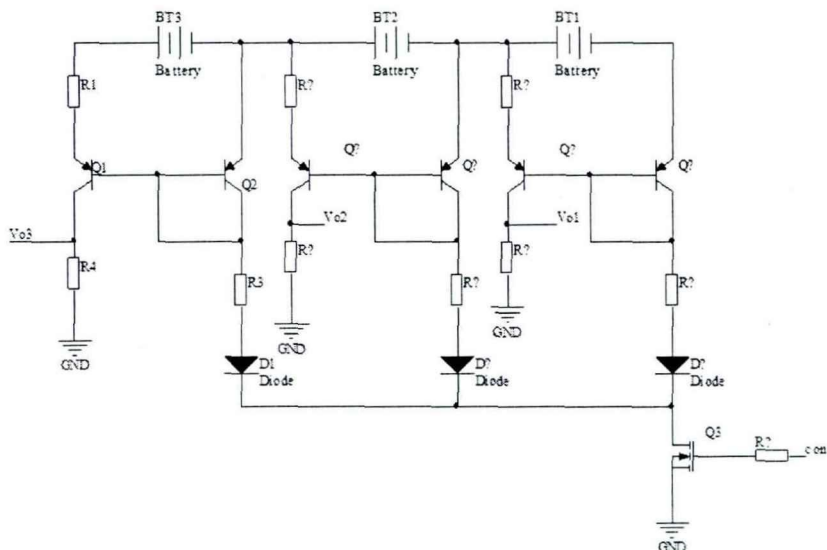


图 2.5 分立器件转换电路

如图 2.5 所示，它的原理是利用差分电路两边电流对称来检测电池电压^[44]。设 V_{eb1} 、 V_{eb2} 分别为 Q1 和 Q2 基极和发射极的压降， I_{b1} 为 Q1 发射极和集电极的电流， V 为电池 BT3 的电压，则当 Q3 导通时，有：

$$V_o = \left(\frac{V + V_{eb2} - V_{eb1}}{R_1} - I_{b1} \right) \times R_4 \quad (2.5)$$

理想状态下，不考虑电阻的误差，Q1 管的放大倍数足够大且 $V_{eb2} = V_{eb1}$ 。有 $V_o = V$ ；由于三极管的参数分布不均，容易受到温度的影响，且单个三极管的放大倍数有限，无法完全忽略基极电流的影响，所以不能达到理想检测效果。优点在于成本较低，当 Q3 管关闭时，漏电流较小，适合对成本要求较高的场合。

2.1.1.6 浮动地测量技术

测量时通过模拟开关选通电池，使被测电池的电位信号进行差分放大器和窗口比较器，窗口比较器判断当前地电位是否合适，如果正好，启动 A/D 进行测量，如果太高或太低，则通过控制器经 D/A 对地，对电位进行浮动控制^[45]。

目前，Linear 公司推出了专门针对锂电池组单体电压检测的芯片 LTC6803 (LTC6802 升级版)，可以对 4~12 串锂离子电池组进行电压检测，大大降低了电压检测的复杂度，广泛用于动力锂电池组的电压检测中。

2.1.2 单体电池电压精确检测方法的研究

前文介绍了目前锂电池管理系统中使用较多的电压检测方法，在这些方法中，或多或少存在一些精度低、成本高、体积大等缺点。在这一小结中，将重点介绍一种锂电池组单体电池电压的精确检测方法，该方法基于高共模差分运算放大器 and 高压模拟开关。

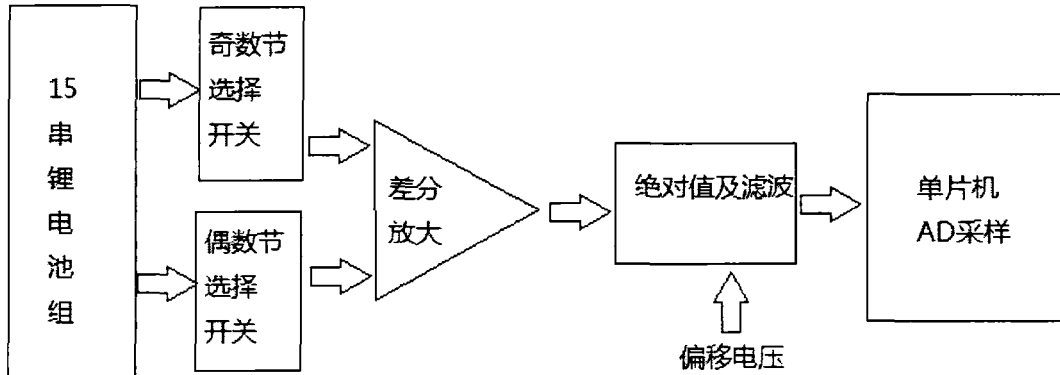


图 2.6 锂电池组单体电池电压的精确检测方法框图

如图 2.6 所示，图中是一个用于 15 串或者 15 串以下电池组的电压检测原理框图。主要由 3 部分组成：用于选择电池通道的模拟开关、高共模差分运算放大器及绝对值电路、单片机 AD 采样。检测原理：首先单片机控制模拟开关选择相应的电池，经过差分运算放大器，消除共模电压，再经绝对值电路及滤波，通过 AD 采样，即可得到单体电池的电压值。

在 15 串的锂电池组中，需要 16 个通道用于对电池进行选通，同时由于串联锂电池组的电压比较高，超出普通模拟开关的工作范围，在这里可以选择高压 PhotoMOS 和 MAXIM 公司的 MAX14752 8 选 1 多路模拟复用器。

MAX14752 模拟复用器可以支持 20~72V 的单电源供电，模拟输入范围最高可达 72V,具有典型值为 60Ω 的导通电阻（最高为 120Ω）和 0.03Ω 的导通电阻平坦度；在导通状态下，具有低于 20nA 的漏电流（最大值）；且每个输入口具有钳位保护二极管，实现过压保护和欠压保护。可以满足锂电池组电池通道选择开关的要求。

为满足 15 串电池组的电压检测要求，在这里采用两片 MAX14752，分别用于奇数节电池和偶数节电池(地看作是第 0 节电池)的选通。模拟开关由电池组供电，为减少电池工作过程中噪声对模块开关的影响，电池组通过一个 RC 滤波器与 MAX14752 连接。MAX14752 功耗非常低，工作状态下最大电流为 600uA,休眠模式下最大电流为 25uA，且漏电流低于 20nA，对电池组的影响非常小。

电路如图 2.7 所示，U1 用于对电池 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 进行选通，U2 用于对电池 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 及 GND 进行选通。

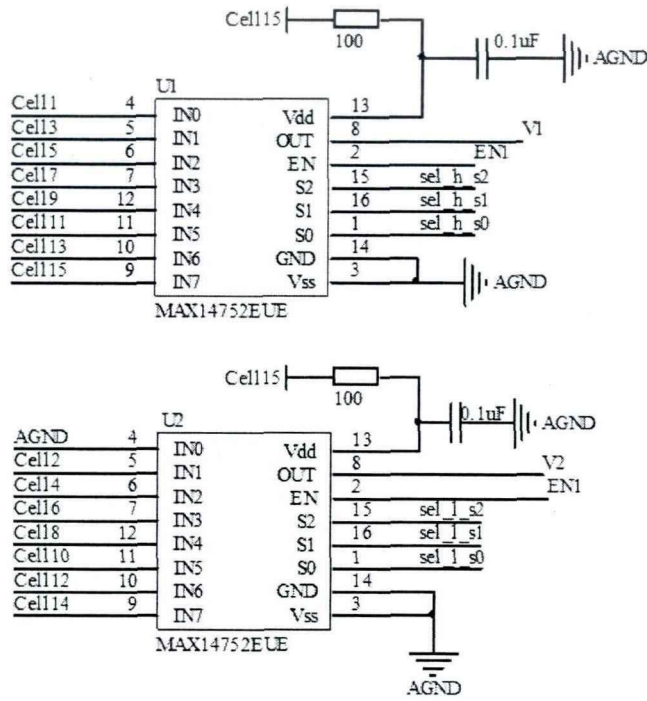


图 2.7 MAX14752 模拟开关原理图

表 2.1 模拟开关选通真值表

电池 序号	U1 控制			U2 控制			电池 序号	U1 控制			U2 控制		
	S1-0	S1-1	S1-2	S2-0	S2-1	S2-2		S1-0	S1-1	S1-2	S2-0	S2-1	S2-2
1	0	0	0	0	0	0	9	1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	0	1	10	1	0	0	1	0	1
3	0	0	1	0	0	1	11	1	0	1	1	0	1
4	0	0	1	0	1	0	12	1	0	1	1	1	0
5	0	1	0	0	1	0	13	1	1	0	1	1	0
6	0	1	0	0	1	1	14	1	1	0	1	1	1
7	0	1	1	0	1	1	15	1	1	1	1	1	1
8	0	1	1	1	0	0							

如果需要对第 N 节(N=2~15)进行电压检测,选通第 N 节和第 N-1 节电池;当检测第一节电池电压检测时,则选通电池 1 和 GND。U1 和 U2 的输出的电压差即为当前电池的电压。详细的模拟开关选通真值表见表 2.1。两个电池之间的切换过程以第 2 节和第 3 节电池为例说明:检测第 2 节电池时,U1 选择第一个通道,输出第 1 节电池上的电压,U2 选择第二个通道,输出第 2 节电池上的电压,这样,两个电压的差即为第 2 个电池电压的负值;切换到第三个电池时,U2 不变,仍然输出第 2 个电池上的电压,而 U1 切换到第二个通道,输出到第 3 个电池上的电压,这样两个模拟开关输出的电压即为第 3 个电池的电压。

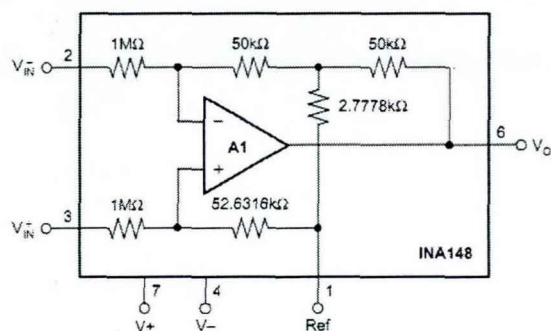


图 2.8 INA148 差分放大原理图

为消除共模电压，在模拟开关的后端采用一个高共模电压输入的差分放大电路。在这里直接采用 TI 公司的 INA148UA 高共模差分运算放大器，该运算放大器具有一个分压比为 20:1 电阻网络，且这些电阻经过激光校准，精度极高，不必担心电阻匹配的问题。 $\pm 15\text{V}$ 的电源下，输入范围可以达到 $\pm 200\text{V}$ ，且增益误差低于 $\pm 0.075\%$ ，共模抑制比高达 86dB，非常适用于本设计。

INA148UA 具有非常高的共模输入电阻和差模输入电阻，分别为 $1\text{M}\Omega$ 和 $2\text{M}\Omega$ 。所以可以忽略 MAX14752 内阻对检测精度的影响。由于 INA148UA 的最大输入失调电压为 $\pm 5\text{mV}$ ，为保证电压检测的精度，所以增加了一个偏置电路，以抵消输入失调电压对测量精度的影响。

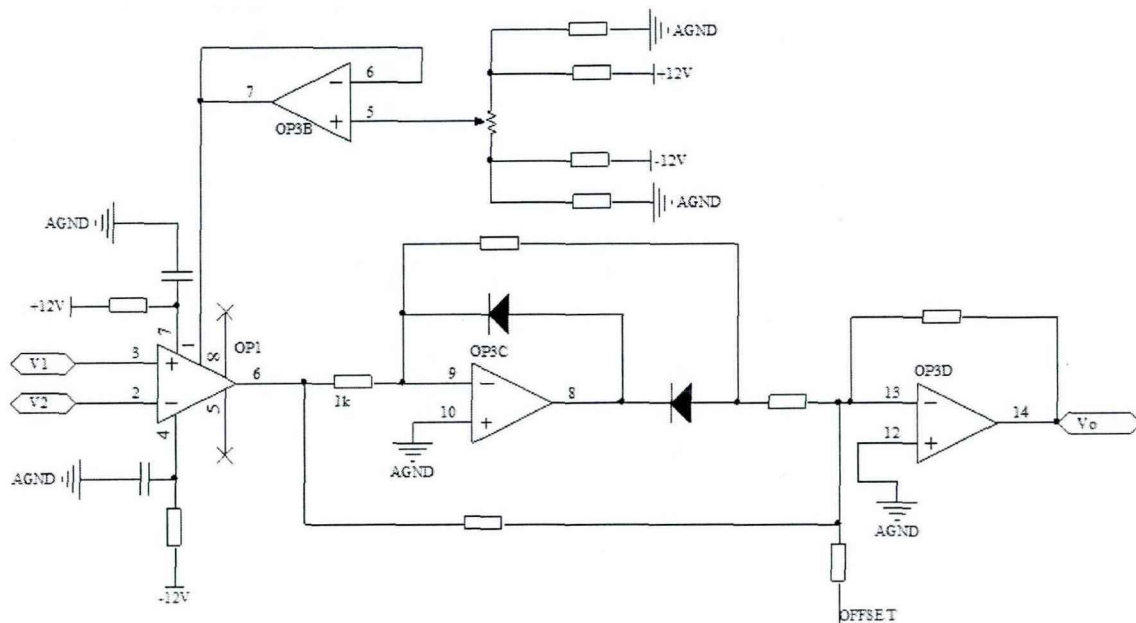


图 2.9 差分放大电路及绝对处理电路

检测时，当电池通道选择为偶数电池时，V1 输出比 V2 的输出电压高，此时差分运算放大器输出为单体电池的负值，所以在差分运算放大器后端，采用一个高精度绝对值处理电路，差分放大器和绝对值处理的具体电路图如图 2.9 所示。

运放 OP3B 和四个电阻构成偏置电路，为减少电源噪声的影响，在 INA148UA 的电源输入端使用两个 RC 滤波器。理想状态下，可以得出式 2.6。

$$V_o = |V_1 - V_2| - offset \quad (2.6)$$

正常情况下，磷酸铁锂电池的电压范围为 2V~3.8V，以锰酸锂为正极材料的锂电池最高电压达到 4.2V 或者更高，而单片机 AD 采样的参考电压为 3.3V，电池电压超出了单片机 AD 采样的范围，所以在绝对值处理电路中加入了偏移电压 offset。在实验板上，offset 可以通过一个 CD4051 模拟开关选择 0V、1.25V、3.3V 三种电压，参考电压采用 REF3012 和 REF3033 两种芯片。实际做成产品时，可以根据电池的类型选择 offset 电压。

绝对值的电阻匹配是影响检测精度的重要因素之一，电阻匹配不好，将产生比较大的误差，所有在绝对值电路中，所有电阻均采用 0.1% 高精度电阻。

模拟信号采集对电源噪声比较敏感，信号处理的电源供应由三输出（+15V、-15V、5V）隔离电源模块提供，+15V 和 -15V 经过 L7812 和 L7912 电源芯片供给运算放大器，这样可以极大降低模拟电源的噪声，提高电压检测的精度。AD 检测采用 MSP430F149 自带的 12 位 AD 模块，AD 参考电压为 3.3V。电压每秒检测一次，每次检测采样 16 次，采样频率为 100kpbs，采用定时器触发。检测流程图如图 2.10 所示。

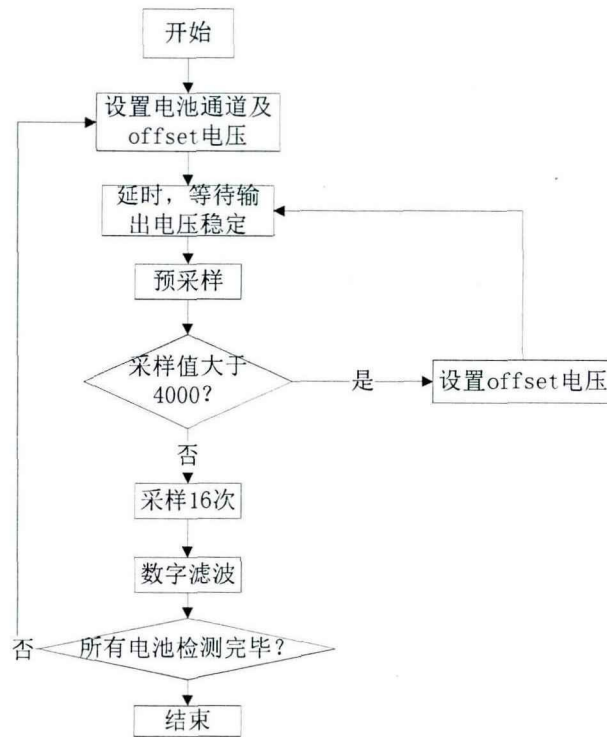


图 2.10 电压检测软件流程图

2.1.3 电压检测实验结果

本次实验采用的电池为 10AH 的磷酸铁锂电池，为了更好的观察电压检测结果，特意选了 15 个电压不一致的电池。实验结果如表 2.2 所示。数据中，AD 采样值为单片机实际采样的结果，其他数据均由 Agileng34410a 6 位半万用表测量，

测量温度为 26 度。

从单体电压检测结果上可以看出,奇数节电池的模拟前端总误差 1~2mV,偶数节的模拟前端总误差总为-1~-2mV,个别达到-3mV,造成奇数节与偶数电模拟前端误差不一致的原因是绝对值电路的电阻匹配问题。因为选择奇数节电池时,输出为正值,而选择偶数节电池时,输出为负,根据绝对值电路的原理,正电压和负电压通过的路径不同,所以造成这种差异。随着电池两端共模电压的升高,误差呈现增加的趋势。从最终结果来看,总的检测误差为±3mV。

表 2.2 单体电池电压检测数据

电池序号	电池电压	模拟前端输出	模拟前端总误差	AD 采样值	总误差
1	3.221	3.222	0.001	3.222	0.001
2	3.15	3.149	-0.001	3.149	-0.001
3	3.222	3.223	0.001	3.222	0.001
4	3.229	3.228	-0.001	3.228	-0.001
5	3.231	3.232	0.001	3.232	0.001
6	3.193	3.192	-0.001	3.192	-0.001
7	3.236	3.237	0.001	3.237	0.001
8	3.234	3.233	-0.001	3.233	-0.001
9	3.231	3.233	0.002	3.232	0.001
10	3.219	3.217	-0.002	3.218	-0.001
11	3.184	3.186	0.002	3.185	0.001
12	3.183	3.18	-0.003	3.181	-0.002
13	3.13	3.133	0.002	3.132	0.002
14	3.023	3.023	0	3.023	0
15	3.165	3.168	0.002	3.168	0.003

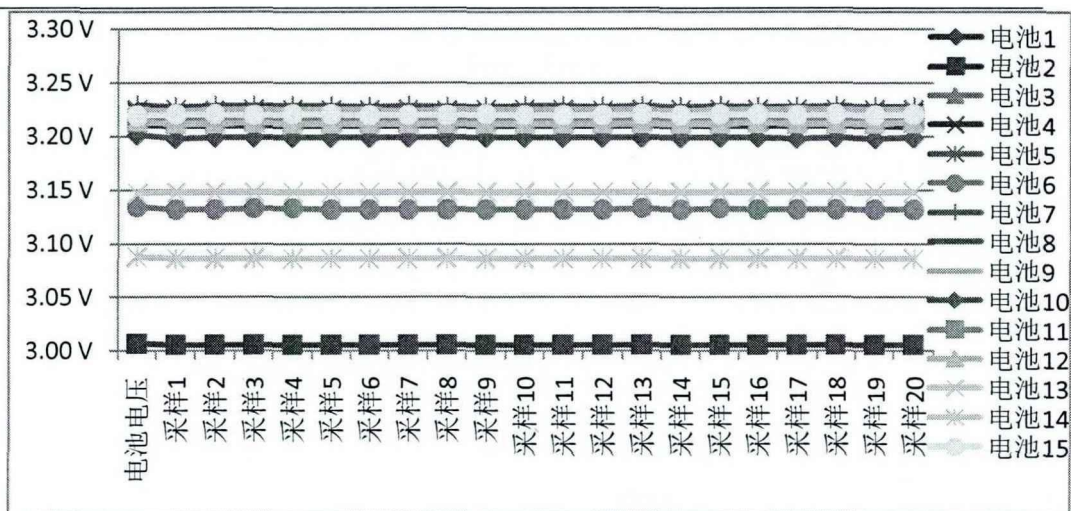


图 2.11 多次采样的结果

图 2.11 为连续检测 20 次的结果，可以看出，电压检测的结果稳定，波动较小。

2.2 锂电池组温度检测

锂电池组的热管理要求测量电池包内电池的温度，电池温度的检测一般可以采用热敏电阻和数字温度传感器。在本系统中采用 DS18B20 单总线数字温度传感器，与热敏电阻检测相比，电路设计简单，但是编程稍复杂。

2.2.1 DS18B20 温度检测原理

DS18B20 是 MAXIM 公司推出的数字温度传感器，该传感器采用单总线方式，只需要一条数据总线即可完成单片机与传感器的通信。而且 DS18B20 支持多点组网功能，可以在一条单总线上，挂载多个传感器，每个传感器都有一个固定的地址。DS18B20 的测温范围为 $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，在 $-10^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 时，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。可编程的分辨率为 9~12 位，对应的可分辨温度分别为 0.5°C 、 0.25°C 、 0.125°C 和 0.0625°C ，可实现高精度测温。

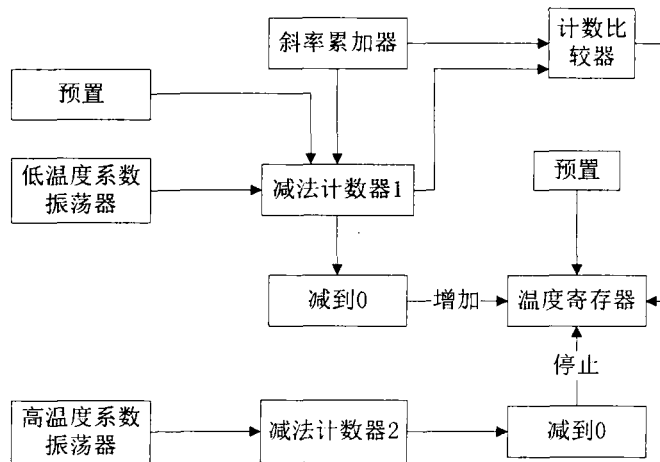


图 2.12 DS18B20 原理图

DS18B20 数字温度传感器的测温原理如图 2.12 所示。图中的低温系数振荡器的振荡频率受温度影响极小，用于产生固定频率的脉冲信号给减法计数器 1，而高温系数晶振受温度影响大，其振荡频率随温度变化而改变，所产生的脉冲信号作为减法计数器 2 的脉冲输入。计数器 1 和温度寄存器被预置在 -55°C 所对应的一个基数值，计数器 1 对低温系数晶振产生的脉冲信号进行减法计数，当计数器 1 的预设值减到 0 时，温度寄存器的值将加 1，计数器 1 的预置将重新被装入，计数器 1 重新开始对低温系数晶振产生的脉冲信号进行计数，如此循环直到计数器 2 计数到 0 时，停止温度寄存器值的累加，此时温度寄存器中的数值即为所测温度。图中的斜率累加器用于补偿和修正测温过程中的非线性，其输

出用于修正计数器 1 的预置值。

2.2.2 温度传感器拓扑

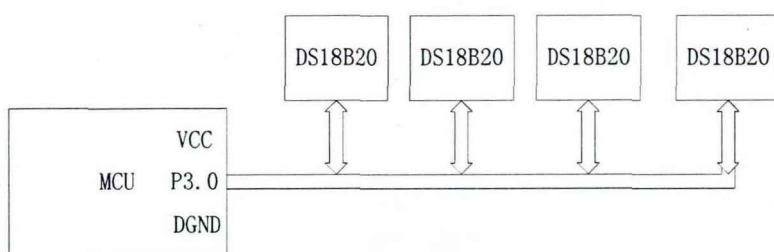


图 2.13 DS18B20 拓扑图

根据系统要求，每个电池包配置 4~8 个温度传感器，温度传感器的拓扑图如图 2.13 所示。DS18B20 的数据线 DQ 需接 4.7K 的上拉电阻。

2.3 锂电池组总电流的检测

锂电池组的工作电流是锂电池的一个重要参数。SOC 估算、充放电控制都需要精确的电池检测。目前电流检测一般有两种方法：分流电阻法和霍尔传感器。

2.3.1 电流检测方法

2.3.1.1 分流电阻法

分流电阻法根据分流电阻在主回路中的位置，可以分为低压侧和高压侧电流检测，图 2.14 所示的是低压侧电流检测，它的特点是分流电阻连接在地与负载之间。这种方式的优点在于共模电压比较低，输出的电压容易测量，且电源比较容易设计。但是也存在以下问题：受电阻压降的影响，负载接地不可靠。当负载电流变化时，负载的地电位跟着发着变化容易受到负载的影响。

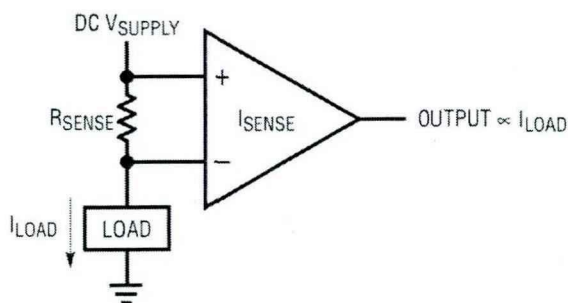


图 2.14 低压侧电流检测

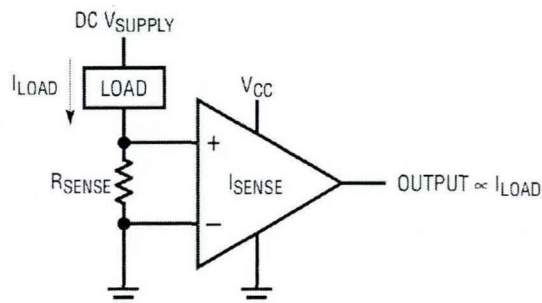


图 2.15 高压侧电流检测

为了消除低压侧的问题，可以将电流检测电阻器连接在电池组正电源和负载之间，这就是所谓的“高压侧电流检测”，如图 2.15 所示。相对于低压侧的电流检测方法，高压侧电流检测方法中，负载具有可靠的地连接，但是存在挑战是电阻

的两端存在共模电压，而通常在大功率系统中，共模电压常常比较高。所以要对高压侧电阻器上的电压进行测量需要消除电阻器上的共模电压，一般可以采用差分放大器，目前一些一线的半导体厂商都推出了专门用于高压侧电流检测的电流检测放大器，如凌特公司的 LTC6101HV、TI 公司的 INA146 等等，这些电流检测放大器的共同点是高共模输入电压。INA146 的输入电压可以超过电源电压，可用于 200V 以上的情况下。

2.3.1.2 霍尔传感器法

霍尔电流传感器一种基于霍尔效应的电流传感器。一般可分为两类：一类为开环（或称为直测式、直检式）霍尔电流传感器；另一类为闭环（或称为零磁通式、磁平衡式）霍尔电流传感器。

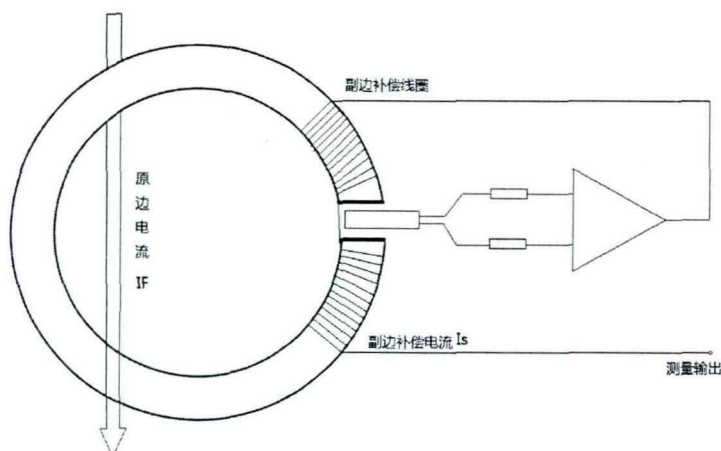


图 2.16 闭环霍尔电流传感器

开环霍尔电流传感器即通过测量霍尔元件的输出电压来测量原边电流的大小，这种方法结构简单、成本较低，但是存在精度和线性度较差、温度漂移大和响应时间慢等缺点。闭环霍尔电流传感器的工作原理基于磁平衡式，如图 2.16 所示，由副边补偿电流产生的磁场抵消原边电流产生的磁场，使霍尔器件始终处于零磁通的状态。再通过测量副边补偿电流并根据式 2.7 即可得知原边电流。

$$N \times I_F = n \times I_S \quad (2.7)$$

(N 为原边线圈匝数， I_F 为原边电流，n 为副边线圈匝数， I_S 为副边补偿电流)

闭环霍尔电流传感器的性能大大优于开环霍尔电流传感器，主要有以下特点：

- 1) 副边测量回路与原边回路之间完全电气隔离；
- 2) 可以测量任意波形的电流；
- 3) 跟踪速度(dI/dt)高于 50A/μs；
- 4) 电流测量范围宽(1mA~50kA)；
- 5) 响应时间小于 1μs；
- 6) 频率响应范围为 0 kHz~100kHz。
- 7) 线性度优于 0.1%；

目前半导体公司也推出了一些电流传感器单芯片解决方案，在这些芯片中集成了霍尔器件，如 ALLEGRO 公司的 ACS70X 系列，该系列最大可支持 200A 的电流检测，且隔离电压在 3000V 以上。

分流电阻法与霍尔电流传感器比较：

- 1、分流电阻法比霍尔电流传感器成本上更有优势，且精度更高，受温度影响小，但是分流电阻有一定的功率损耗。
- 2、霍尔电流传感器最大的优势是原边与副边完全隔离，安全性较好，一般用于大电流的检测。

2.3.2 锂电池组电流检测硬件设计

考虑霍尔电流传感器原边与副边完全隔离，具有很好的安全性，所以在本系统中，采用霍尔电流传感器作为充放电电流的检测器件。由于在本系统中，充电电流较小，一般小于 5A，而放电电流比较大，最大 200A。为了保证检测的精度，采用两个霍尔电流传感器，两个传感器的额定值分别 200A 和 20A。所以额定值 200A 的电流传感器主要用于检测放电电流，而额定值为 20A 的电流传感器用于测量充电电流。

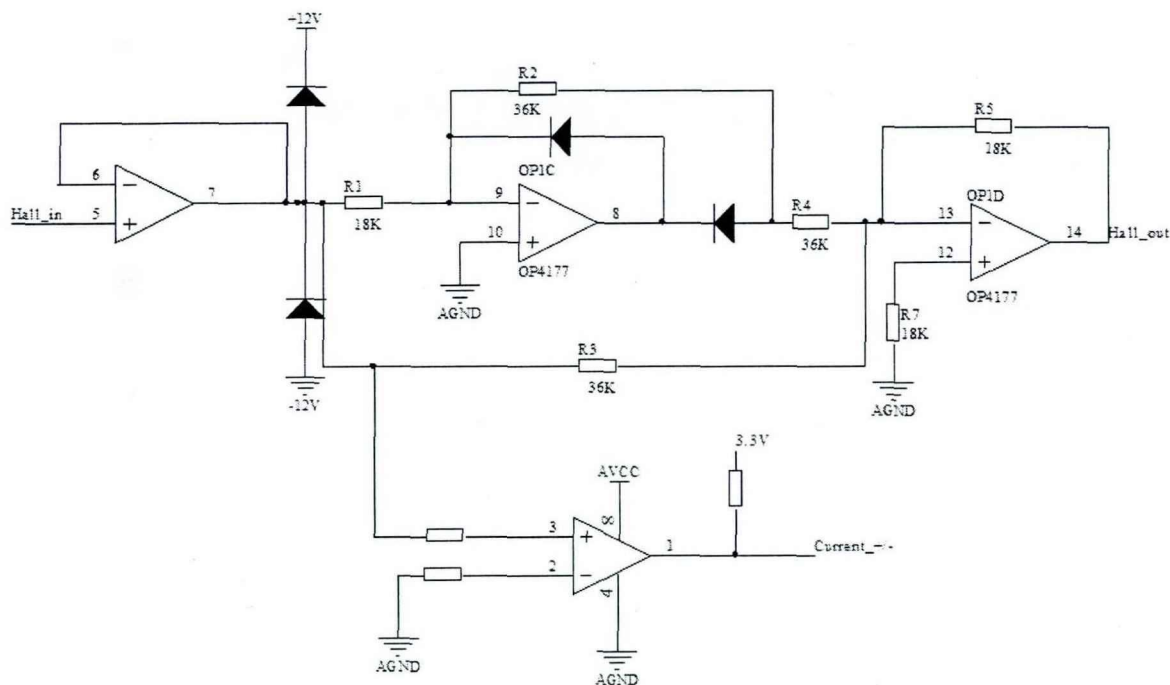


图 2.17 充放电电流信号调理

图 2.17 为一路电流信号的调理电路，在主控单元上，共有两路电流调理电路。霍尔电流传感器输出信号是电流信号，原边副边匝数比为 1:2000，即原边电流与输出电流的比为 2000:1，当原边电流为 200A 时，输出电流为 100mA。根据系统设计要求，电池组的最大放电电流为 200A，采样电阻为 50 欧，所以电流传感器满载输出为 5V。

根据设计要求，定义电池充电电流为正，放电电流为负；而 AD 的电压采样范围为 0~2.5V，不能对负电压进行采样，所以在信号调理电路中，传感器输出信号后端，有一个绝对值电路。由于传感器满载时，输入信号的为 5V，超过单片机的采样范围，所以绝对值电路中，通过电阻匹配，实现对信号的降幅处理。

电流信号经绝对值电路处理后，并不能分辨出原始电流信号的正负，所以采用一个比较器，使原始电流信号与 AGND 比较，如果原始电流信号为正，输出低电平，否则为高电平，单片机通过判断比较器的电平即可判断电流信号的正负。

在信号调理电路中，电阻的精度和运算放大器的输出失调电路、输出偏置电流都会影响电流检测的精度。为了减少这些因素对电流检测影响，信号调理电路中的电阻均采用 0.1%精度的电阻；同时，运算放大器采用 AD 公司的 OP4177 运算放大器，该运算放大器是 AD 公司 OP07 系列运算放大器的第四代产品，是一种具有低输入偏置电流、低输入失调电压、低温漂、低噪声、高精度的高性能四通道运算放大器。OP4177 的偏置电流低于 2nA、输入失调电压低于 100uV，且失调电压的温漂为 0.3~0.9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，可以极大的减少信号调理对检测精度的影响。

2.4 锂电池组总电压检测

在系统中，电池组的总电压检测同样采用霍尔电压传感器，霍尔电压传感器的原理图如图 2.18 所示，原边电压(即被测电压)经匹配电阻 R_1 ，产生原边电流，从而产生磁场；则霍尔元件输出信号控制的补偿电流 I_M 流过次级线圈产生磁场抵消原边电流所产生的磁场，当磁场达到平衡时，补偿电流即可精确反映原边电压值。通过一个精度采样电阻，把电流转换成电压值，再使用 AD 采样，通过计算即可得到被测电压。由于匹配电阻（一般为兆欧级）的限制，流过原边线圈的电流非常小，所以对电池组的影响非常小。

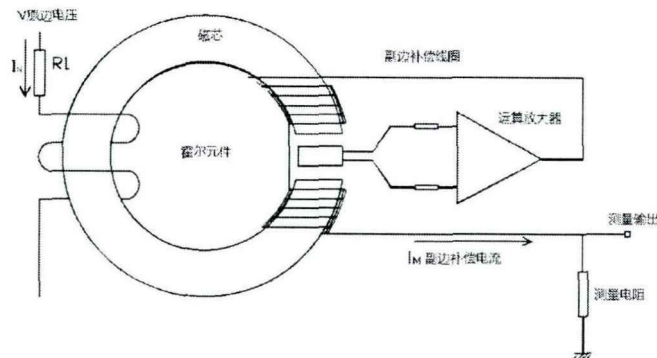


图 2.18 霍尔电压传感器原理图

在本系统中，总电压的范围为 148~272V，选用的霍尔电压传感器是 CHV-350P，输出信号为电压信号，最大可测 350V 的电压，对应的满载输出为 5V。同样需要在信号处理电路中进行降幅处理。

第 3 章 BMS 系统总体设计及 CAN 总线设计

3.1 BMS 系统总体方案设计

本系统主要用于 74 串动力锂电池组的管理,锂电池组为 10AH 的磷酸铁锂电池,总电压为 148~270V。充电电源为车载 270V 发电机,充电电流小于 5A;电池组主要为车载发动机起动电机及其他设备供电,放电最大电流 200A。

电池管理系统需要实现以下功能:

- 1、电池组单体电池电压检测、电池组温度检测。
- 2、电池组总电流、总电压的检测。
- 3、根据电池参数完成对电池组的 SOC 估算。
- 4、锂电池组的充放电管理,实现对锂电池组的保护。
- 5、锂电池组的充电均衡。
- 6、锂电池组的热管理
- 7、与车载中央控制系统的通信。

由于电池组电池数量比较多,总体电压高,所以管理系统采用分布式结构,这样有利于系统的扩展,可以在不改变硬件结构的情况下,增加或减少电池的数量。系统结构如图 3.1 所示。

整个系统主要由电池包模块、主控单元、充放电控制接触器组成。电池包模块与 10~12 节电池绑定在一起,完成包内电池单体电压检测、4~8 个温度检测点的温度检测、被动充电均衡及与协助主控单元完成 SOC 估算。主控单元完成电池组总电压总电流检测、SOC 估算、电池组充放电管理、上位机通信及与外部车载中央控制器通信等功能。充放电控制接触器作为电池组的主开关,包括总负开关、放电接触器、充电继电器等,由主控单元控制,总负和放电接触器由于通过的电流比较大,所以采用国外进口的泰科 EV200 的接触器,最大电流 400A,充电接触器电流较小,采用普通继电器。电池包与主控单元通过 CAN 总线连接。为减少对电池的影响,整个管理系统的供电由车载 24V 电源供电。

整个电池系统的充电回路和放电回路相对比较独立,充电电流比较小($<5A$),而放电电流大($<200A$),所以采用两个霍尔电流传感器(CHB-20A、CHB-200SF),分别用于检测充电电流和放电电流。电压传感器同样采用霍尔传感器。

系统共有 74 个电池,采用了 7 个电池包模块和 1 个主控单元。电池包 1 和电池包 2 均为 12 个电池,其他电池包均为 10 个电池。

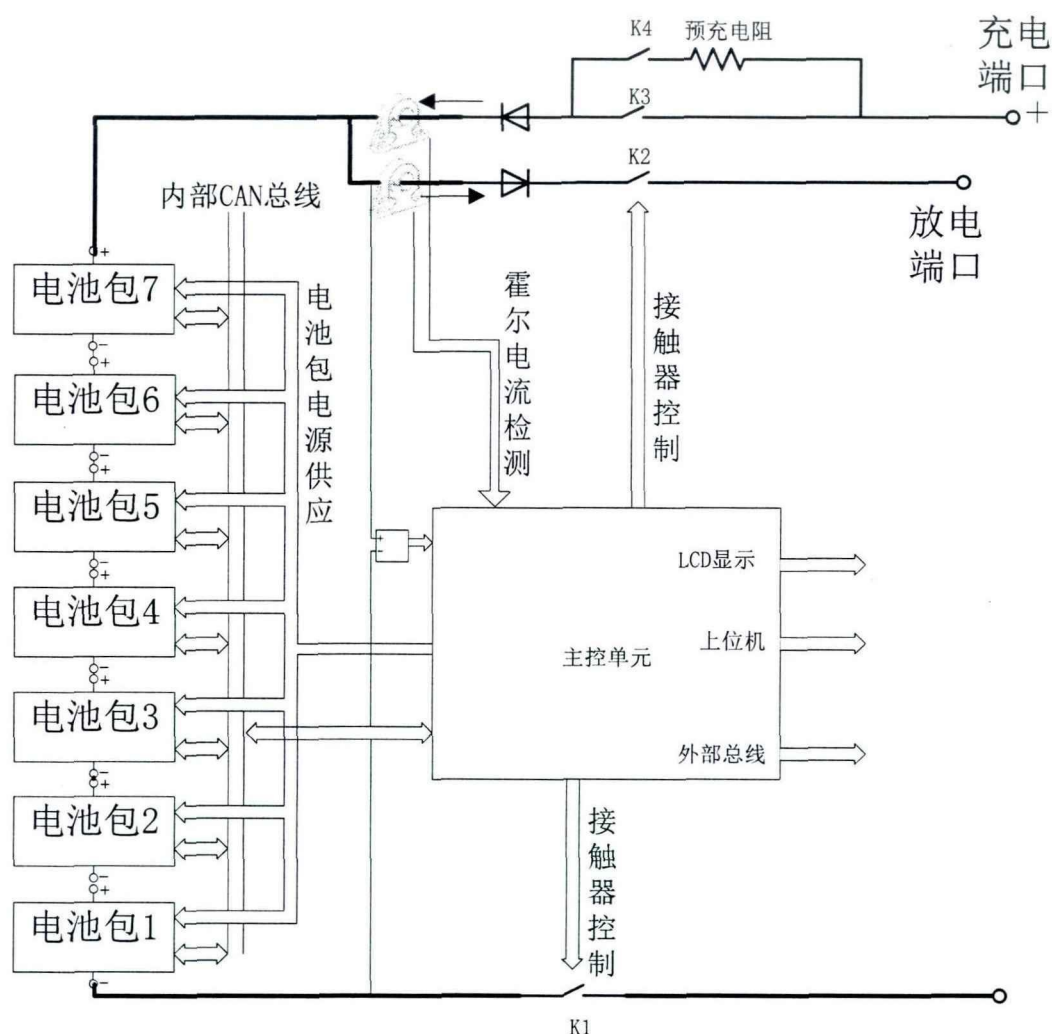


图 3.1 系统总体结构图

3.2 系统电源供应

电源在电路中的重要性就相当于循环系统对于人体的重要性^[46]。循环系统直接关系到人体各个部位的健康，同样，电源的稳定性直接影响系统的工作情况，一个稳健系统必须要有一个稳定可靠的电源系统。

为了减少管理系统对电池组本身的影响，管理系统的电源由车载 24V 电源供应。根据管理系统各个模块的电源需求，将系统的电源分为以下几个部分：

1、±12V 电源：±12V 主要为霍尔传感器、信号调理电路供电。在系统中有 3 个霍尔传感器(2 个霍尔电流传感器、1 个霍尔电压传感器)及 3 路信号调理电路，信号调理电路主要包括了运算放大器等模拟器件，功耗较低，但是对电源噪声比较敏感，要求电源噪声尽可能的低，这样才能保证电压电流检测的精度和数据的可靠性。如果电源噪声不符合要求，AD 采样的结果会波动较大。系统所选择的

两种电流传感器分别是 CHB-20A 和 CHB-200SF, 消耗的电流分别为 $10+I_M$ 毫安和 $28+I_M$ 毫安, 满载情况下, 功耗为 2W。电压传感器选用的是 CHV350P, 输出信号为电压输出, 满载下, 功耗为 0.42W。综合考虑功耗和噪声的因素, 在系统中 $\pm 12V$ 的电源采用一个 5W 的 24V 转 $\pm 15V$ 的 DCDC 模块, 并在后端采用 LM7812 和 LM7912 电源芯片转换成 $\pm 12V$, 降低电源噪声。

2、5V 电源: 管理系统中除单片机以外的数字部分电源均为 5V 电源。5V 电源采用一个 5W 的 24V 转 5V 的 DCDC 隔离电源模块供电。另外电池包模块的电源主要为 5V 电源和 3.3V 电源, 为了减少成本, 电池包模块的供电也由主控单元的 5V 电源供电。

3、3.3V 电源: 3.3V 电源为单片机供电电源, 系统所选的单片机为 TI 公司的 MSP430F149 单片机, 电源供电电压为 1.8V~3.6V。主控单元和电池包模块均包括了 3.3V 的电源, 3.3V 电源由 LDO 电源芯片供应。

4、24V 电源: 24V 电源主要用于控制接触器吸合, 接触器对电源要求不高, 直接由车载 24V 电源供电。

为进一步提高系统抗干扰能力, 在电源模块的输入端增加共模滤波器和 LC 滤波器。

3.3 单片机方案选择

系统中的电池包模块与主控单元均采用 TI 公司的 MSP430F149 单片机。除了考虑片上资源和低功耗等因素, 还有一个原因是笔者对 MSP430 单片机比较了解, 选择熟悉的工具对减少产品的开发周期有很大的帮助。

MSP430F149 单片机是由 TI 公司推出超低功耗 16 位单片机, 具有如下特点:

- 供电电压 1.8V~3.6V
- 极低的电源消耗:
 - 活动模式下, 2.2V 供电, 1M 的工作频率, 工作电流为 280uA
 - 待机模式: 1.6uA
 - 关断模式(内存保留):0.1uA
- 高达 5 种省电模式
- 从待机模式唤醒时间低于 6us
- 16 位精简指令结构, 指令周期为 125ns
- 12 位 AD 转换电路, 具有内部参考电压, 采样保持及自动扫描
- 16 位定时器 Timer_B, 具有捕获/比较功能, 并具有 7 个捕获/比较寄存器
- 16 位定时器 Timer_A, 具有捕获/比较功能, 并具有 3 个捕获/比较寄存器
- 片内比较器

- 串行在线编程
- 60KB+256B flash 存储器
- 2K RAM

3.4 主控单元硬件设计

主控单元是整个系统的控制中心，原理框图如图 3.2 所示，主控单元主要由以下几个部分组成：单片机、电流调理模块、电压调理模块、1 路内部 CAN 总线、两路外部 CAN 总线、接触器控制模块、实时时钟及数据存取模块、LCD 显示及电源模块。

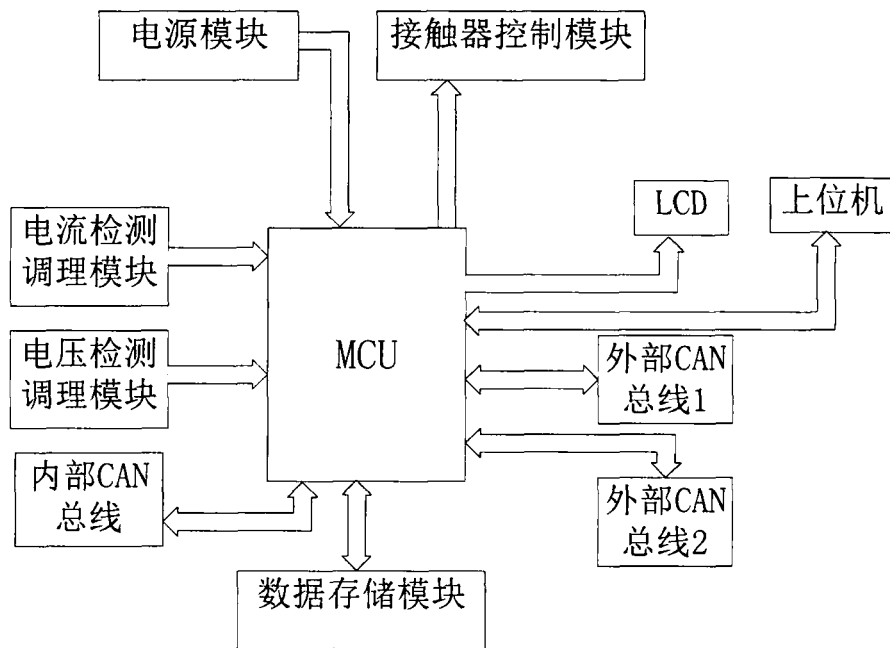


图 3.2 主控单元框图

电流、电压调理模块对霍尔传感器输出信号进行变换，以适应 AD 的采样范围；内部 CAN 总线用于主控单元与电池包的通信，两路外部 CAN 总线用于与车载 ECU 通信；上位机用于在 PC 显示电池实时工作状态；接触器控制模块用于控制充电电接触器和总负接触器；数据存储模块用于存储电池组的实时数据，有助于后期分析。

主控单元的实时时钟芯片采用 MAXIM 公司的 DS1302 芯片，该芯片可以提供秒、分、时、日期、月份和年份信息，采用一条串行总线与单片机相连。为了保证系统掉电之后，实时时钟依然能够工作，在电路设计中，采用双电源供电的方式，系统上电时，由 3.3V 电源供电，系统掉电时，由 3V 锂电池供电。

数据存储模块主要用于存储电池组的历史充放电数据，包括：总电压、总电流、当前环境温度、当前时间、电池组单体电压、电池组温度数据，有利于后期

分析。数据存储采用 K9F1208U0M, K9F1208U0M 采用并口的方式与单片机相连, 电路简单, 数据存储量, 可以满足管理系统对电池数据存储的要求。

3.5 电池包模块硬件设计

管理系统的电池包模块主要完成: 包内电池单体电压检测、包内温度检测、包内充电均衡、与主控单元数据交换等。

电池包模块的原理框图如图 3.3 所示, 主要包括以下几个模块: 均衡控制外围电路、LTC6802 电压检测单元、隔离芯片及单片机、温度传感器、CAN 总线、电源供应。

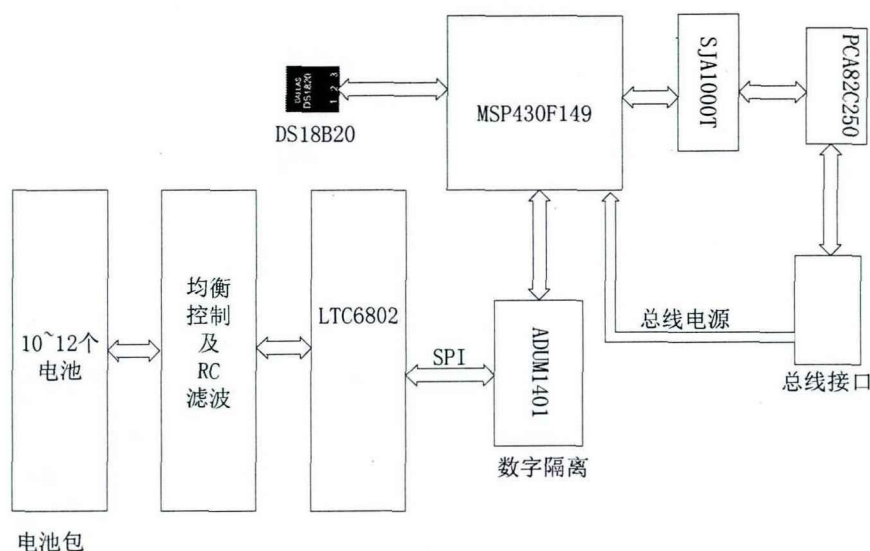


图 3.3 电池包模块原理框图

在本文的第二章中, 详细介绍了目前使用较多的电池组单体电压检测方法, 分析了各种方法的优点及缺点, 同时也提出一种电压检测方法, 结果显示这种方法具有成本低、体积小、精度高等特点。LTC6802 是一种锂电池组电压检测专用芯片, 可以实现对 4~12 节的锂电池进行电压检测, 全温度范围内误差低于 10mV。且带有均衡控制端口, 具备驱动高端均衡 MOS 管的功能, 只要向芯片内部的寄存器写入数据, 即可实现对均衡 MOS 管的操作。由于在本系统中, 采用的均衡方式是被动充电均衡, 综合考虑两种方法的特点及管理系统的实际情况, 在本系统中电压检测方案采用 LTC6802 的方案。

LTC6802 和单片机采用 SPI 通信, 两者之间采用 ADUM1401 数字隔离芯片。ADUM1401 是 ADI 公司采用 icoupler 技术的四通道数字隔离器, 与普通光耦合器相比, 具有功耗低的特点。相同的信号速率下, 功耗只有光耦合器的 1/10 到 1/6。

温度检测采用 DS18B20 单总线数字温度传感器, 软件设置每一个电池包可以支持 4~8 个温度传感器。由于在电池包模块中, 单片机的 IO 口富余, 所以为每

个温度传感器分配一个 IO 口，这样有利于分辨出温度异常的传感器。

在开发初期，为了降低系统的开发难度，电池包采用与主控单元的相同的 MSP430F149 单片机，电池包模块电源由主控的 5V 电源供应。

3.6 CAN 总线设计

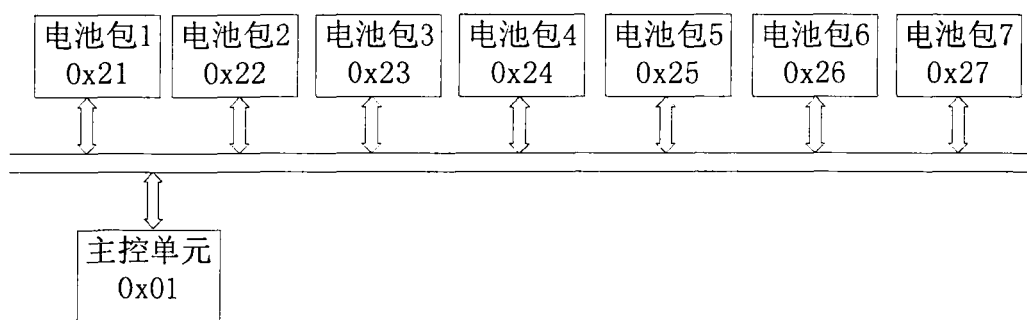


图 3.4 内部 CAN 总线拓扑

在内部 CAN 总线中，主要有主控单元和电池包模块。主控单元的地址为 0x01，电池包模块地址分配从 0x21 开始。为保证总线工作可靠性，在总线两端增加两个 120 欧的匹配电阻。

系统所有的 CAN 总线节点的总线控制芯片均采用 SJA1000T，驱动芯片采用 PCA82C250。电池包中电池检测部分与数字部分已经采用 ADUM1401 隔离，电池包的数字部分与主控单元共地，所以在内部 CAN 总线的硬件设计中，并没有隔离。而外部 CAN 总线，用于与车载中央控制器进行信息交换，在总线控制器与收发器之间，采用 6N137 光耦进行隔离，并且两个外部总线驱动芯片使用两个独立的 5V 转 5V 的 DCDC 隔离电源。

3.6.1 内部 CAN 总线传输帧格式

管理系统内部 CAN 总线的数据传输速率为 200kbps，SJA1000T 的工作模式采用 PeliCAN 模式，数据传输采用 CAN2.0B 扩展帧格式，由 29 位标识符与传输数据部组成。

表 3.1 29 位标识符分配

29 位标识符	28~26	25	24	23~16	15~8	7~0
分配	优先级	D1	D0	地址 add	命令 cmd	SA 源地址

29 位标识符中：28~26 为优先级，数值越低，优先级越高；25 和 24 位保留；23~16 为 8 位地址位，主控单元的地址为 0x01，电池包的地址从 0x20 开始分配，当目标地址为 0xFF 时，表明此消息为广播信息；15~8 为 8 位命令；7~0 为发送数据设备的源地址。

3.6.2 内部 CAN 总线滤波器设置

SJA1000 的验收滤波器由 4 个验收码寄存器(ACR0,ACR1,ACR2,ACR3)和 4 个验收屏蔽寄存器(AMR0,AMR1,AMR2,AMR3)组成,这 8 个寄存器在 CAN 总线初始化时设置,只能在 SJA1000 复位模式下设置。

AMR 寄存器与 ACR 寄存器配合工作,当 AMR 为 0 位的,ACR 和 CAN 信息帧对应的位相同才能接收;而所有 AMR 为 1 的位,ACR 对应位的验收滤波功能予以屏蔽,CAN 信息帧中的相关位与验收结果无关。

通过设置 SJA1000 的模式寄存器(MOD)和这 8 个寄存器,可以实现单滤波和双滤波。单滤波模式中,只能设置 1 个滤波器,29 位标识符及 RTR 位对应 4 个 ACR 和 4 个 AMR,其中,ACR3 和 AMR3 的低 2 位未使用。双滤波模式中,可以设置两个滤波器,只要通过了两个滤波器中的任意一个,均可通过验收,并接收。双滤波模式中,由寄存器 ACR1、ACR0 和 AMR1、AMR0 组成滤波器 1,ACR3、ACR2 和 AMR3、AMR2 组成滤波器 2,两个滤波器都只比较扩展标识码第 28~13 位。

在本系统中,需要发送和接收点对点 and 广播信息(地址为 0xFF),所以使用双滤波模式,并且只对 23~16 位标识符进行滤波,滤波器 1 用于对点对点信息的滤波,滤波器 2 用于对广播信息的滤波。

第 4 章 锂电池管理控制策略及算法

4.1 SOC 估算算法

4.1.1 SOC 估算基本思想

SOC(State of Charger)荷电状态是电池组的一个重要参数,通常情况下,不能直接进行测量,需要通过测量电池的一些外部参数并采取一定的算法来估算。一般可以使用开路电压法、阻抗法、电流积分法、卡尔曼滤波法等。动力锂电池组由于工作环境复杂、电池数量多、电压高, SOC 估算一般采取电流积分法和开路电压法结合的方式。电流积分法容易产生累积误差,而锂电池由于充放电平台比较平坦,在平台内电压变化不大,只在电池充电末端和放电末端能做到比较准确的估算。通过采取电流积分法和开路电压法相结合的方法,在充放电平台内使用电流积分法,在充放电末端使用开路电压法进行校准,可以取长补短达到比较高的精度。

开路电压法根据电池的开路电压估算电池的 SOC,由于电池 SOC 和电池的开路电压存在一定对应关系,而开路电压法正是利用了这一个特性。要对电池组做到准确的 SOC 估算,需要通过大量的实验得到电池组的 OV-SOC(开路电压-SOC)曲线。

对于动力锂电池组来说,由于电压平台高、电池串联数量多,要得到 OV-SOC 曲线并不容易,而要得到单体电池的 OV-SOC 曲线就容易的多;另外由于动力锂电池组中存在电池电压不一致的问题,总电压并不能体现每个单体电池的电压;同时串联锂电池组的 SOC 遵循“短板效应”,即电池组的 SOC 由 SOC 最少的电池决定。基于以上几点考虑,所以在本系统中,将采取一种分布式的 SOC 估算方法,其思想是:

- 由主控单元定时计算电池组充入或者放出的电量,并采用一定的算法,考虑充放电效率,对数据进行校正,把电量数据通过 CAN 总线传送给电池包模块;
- 由电池包模块根据包内单体电池的电压,以电流积分法和开路电压法相结合的方法计算每个电池的 SOC;
- 计算的 SOC 定时传送给主控单元,主控单元根据一定的算法确定电池组的 SOC。

4.1.2 电量的计量

电量计量以 100ms 为一个时间单元，由主控单元每间隔 10ms 对电池组的工作电流进行采样，定义充电电流为正、放电电流为负，根据式 4.1 累加 10 次，即为 100ms 内的电量累计。当电量累加次数达到 10 次时，创建 CAN 总线发送任务，把数据发送到电池包，并对 cloub_counting 和 count 进行清 0。

式 4.1 中 coul_b_counting 为累加寄存器，I 为实时电流。

$$cloub_counting = cloub_counting + I * 0.01 \quad (4.1)$$

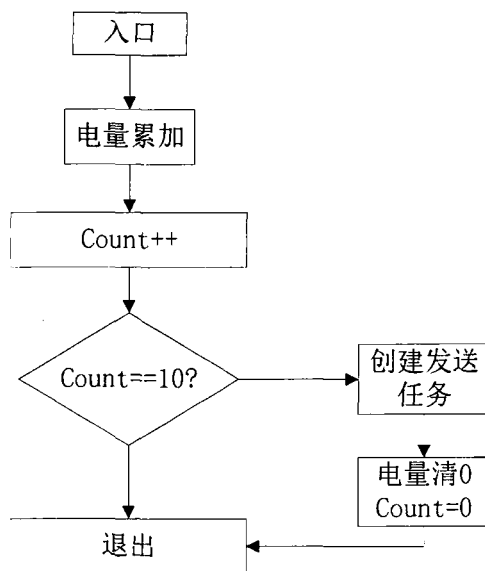


图 4.1 电量累计流程图

4.2 锂电池管理系统管理控制策略

管理控制策略是电池管理系统比较核心的部分，主要包括了以下几个模块：电池组故障管理、电池组充电管理、电池组放电管理、电池组热管理。在本小节中，对各个模块进行详细说明。

4.2.1 电池组故障管理

根据设计要求、锂电池的特性以及电池组的实际使用情况，将故障分为 12 种情况，见表 4.1。在表中详细定义了 12 种故障下，充放电及均衡的情况，并定义了解除故障标志的条件。

在系统软件设计中，使用一个 16 位整型数据标定故障标志，当电池组出现故障时，相应的位置 1，故障解除时，相应的位清 0。电池的充放电及均衡管理严格根据表 4.1 执行。

表 4.1 故障状态表

故障代码	故障类型	充电	放电	均衡允许	解除条件	备注
0x01	总电压过压	禁止	允许	允许	总电压降低到正常范围内	—
0x02	总电压欠压	允许	禁止	禁止	总电压上升到正常范围内	—
0x03	单体过压	禁止	允许	允许	所有单体电池电压降低到正常范围内	—
0x04	单体欠压	允许	禁止	禁止	所有单体电池电压上升到正常范围内	允许预充电
0x05	温度过温	禁止	禁止	禁止	温度降低正常范围内	—
0x06	温度欠温	禁止	允许	禁止	温度加热到正常范围内	—
0x07	放电过流	允许	禁止	禁止	手动解除	提醒用户 检查线路
0x08	充电过流	禁止	允许	允许	自动解除	减挡或者 停止充电
0x09	短路	允许	禁止	禁止	手动解除	提醒用户 检查线路
0x0A	温度不一致	禁止	禁止	禁止	不可解除	—
0x0B	电压不一致	禁止	禁止	禁止	不可解除	提醒用户 检查电池
0x0C	单体电压过低	禁止	禁止	禁止	不可解除	提醒用户 检查电池

4.2.1.1 电池过压故障

电池组过压保护，当电池组总电压超过预设的总电压上限或者某一单体电池电压超过单体电池上限电压时，则判定为电池过压，一般只出现在充电过程中。在本系统中，使用的电池为磷酸铁锂电池，电池组由 74 节电池串联组成，所以单体电池的电压上限设为 3.8V，总电压上限设为 280V。由于电池组中，电池的一致性存在差异，所以在充电过程中，单体电池电压出现的过压机率比较大。当电池组出现过压时，首先应关闭充电接触器，放电接触器根据当前的温度及车载中央控制单元的命令决定是否打开。

当电池出现过压之后，充电接触器关闭，此时，电池电压应不再上升，静置一段时间之后，电池电压会出现下降的趋势，当电池总电压及单体电池电压均下降到故障解除电压时，解除电池过压标志位。系统中，单体电池过压解除电压设为 3.7V，总电压设为 270V。

4.2.1.2 电池欠压故障

电池组欠压包括总电压欠压和单体电池电压欠压，当电池组总体或者单体电池电压低于预设的值，则判定为电池欠压，一般出现在电池的放电及长期静置过程中。出于保护电池的目的，当电池出现欠压时，应关闭放电接触器，此时，预充接触器应及时打开，允许电池组充电。

由于电池组存在内阻和接触电阻，所以在电池组放电时，采集的电池电压并不能及时反应电池的实际电压；同时，电池组在低温下，由于电池内部化学物质活性降低，锂离子在电解液中的迁移速度降低，造成电池内阻增大。所以在大电流放电及低温下，要适当降低电池组欠压保护范围。

4.2.1.3 电池过温及欠温故障

当电池组内部温度超过预设的温度上限时，则判定为电池过温，一般出现在电池的放电及充电过程中。当电池组出过温时，应停止电池的一切活动，并保证风扇打开(在热管理中，排热风扇应早已经打开)。在本系统中，电池的上限为 60 度，过温故障解除温度为 40 度。

当电池组内部温度低于预设的温度下限时，则判定为电池欠温。电池温度过低时，仅允许放电。系统中电池的下限为-20 度，故障解除温度为 10 度。

4.2.1.4 电池过流及短路故障

电池组的过流分为充电过流和放电过流，当电池出现过流时，电池的温度会迅速上升，导致热失控，引发安全问题。当检测到电池过流时，延时一段时间(预设 100ms)，延时后，如果电流仍然过流时，由判断为过流。充电时发生过流，充电管理可以关闭普通充电通道，使用预充电通道充电。而放电时发生过流，系统应及时切断放电接触器。充电过流可以自动恢复，而放电过流需要通过手动解除。

当电流急剧上升，并超过预设的电流时，则判定为短路，短路必须手动解除。

4.2.1.4 温度不一致及电压不一致故障

温度不一致指电池组中局部温度过高，电压不一致指电池组中单体电池电压差异过大，此时，系统应关闭充放电接触器，停止充放电，并提醒用户检查电池。温度不一致和电池电压不一致一般出现在电池组的使用后期，随着电池循环次数的增加，造成电池的劣化程度不一样，在充放电过程中，表现为局部温度过高，电池组不一致性加剧。

4.2.1.5 单体电池电压过低

单体电池电压过低一般主要出现在电池组长期静置，在此故障状态下，系统禁止充放电，并向用户提示故障状态。

静置状态下,在不存在禁止充电的故障情况下,并且电池组总电压、单体电池电压均低于充电开启电压时,开启预充通道,关闭普通充电通道,这样可以防止电池组受到电流的冲击,尤其是电池组电压较低的时候。

预充电状态下,当检测到充电电流低于预充切换电流时,开启普通充电通道。

在充电状态下,当检测到充电电流过流时,关闭普通充电通道,进入预充状态;如果检测到单体电池电压超过充电上限或者充电电流低于预设的电流时,则停止充电。

禁止充电的故障包括:总电压过压、单体电池过压、温度过温、温度欠温、充电过流、温度严重不一致、电池电压严重不一致、单体电池严重电压过低。

在本系统中,总电压上限设为 280V,单体充电上限电压设置为 3.7V;充电开启总电压设为 245V,充电开启单体电压设为 3.3V。由于发电机本身的电压为 272V 所以一般情况下不会出现总电压过压的情况。

4.2.2.2 均衡管理

在串联电池组中,由于生产工艺的问题,各个单体电池之间存在电压、内阻和容量的差异。在电池组中,这些差异会加快电池组寿命的衰减。通过提高工艺的方法,或者在电池成组的时候,选择一致性比较好的电池,可以降低电池间的差异,同时也可以使用均衡电路把电池调整到一致。

如第一章所述,目前均衡的方法各种各样,根据基本原理可以分为被动耗能式均衡和主动能量转移/转换式均衡。目前,主动能量转移/转换式均衡虽然性能优异,但是受成本、可靠性、控制复杂性等因素影响,并没有得到大规模应用。相反,被动耗能式均衡虽然存在能量浪费、热管理等问题,但是由于其简单可靠,成本低得到大规模应用。在本系统中,同样采用被动式耗能式均衡。

在本系统中,均衡电阻选择 30 欧、2W 的电阻,控制开关为 IRLML6401,均衡电阻电流最大为 120mA,;控制信号由电压检测芯片 LTC6802 提供。

在本系统中,由于采用被动耗能式均衡,只有在电池处于充电或者静置时,才开启均衡。在均衡控制程序中,首先检测故障位,检测是否存在禁止均衡的故障,如表 4.1 所示,禁止均衡的故障有总电压欠压、单体电池欠压、温度过温、温度欠温、放电过流、短路、温度严重不一致、电池电压严重不一致以及及单体电池电压严重过低等,如果存在以上故障或者电池处于放电状态,将所有电池包的均衡标位清除;如果不存在禁止均衡的故障,同时电池处于充电或者静置的情况下,需同时满足以下两个条件即可开启均衡:单体电池电压高于 3.3V、单体电池电压与最低电池的压差超过 50mV;设置完所有电池包的均衡标位之后,主控通过 CAN 总线向各个电池包发送均衡标志位;电池包收到均衡标志位之后,向 LTC6802 的均衡寄存器写入相应的数据,即可对相应的电池进行被动耗能式均衡。

制。在系统启动后,管理系统首先对电池组的总电压、单体电压、温度进行巡检,并向车载中央控制单元 ECU 发送自检信息,此时,放电接触器保持关闭状态;当电池管理系统收到开启放电接触器的命令时,检查电池组故障状态,确定是否打开接触器。放电接触器的控制流程如图 4.4 所示。禁止放电的故障类型有:总电压欠压、单体电池欠压、温度过温、放电过流、短路、温度严重不一致、单体电池电压严重不一致以及单体电池电压严重过低。

在本管理系统中,正常情况下,放电总电压下限为 148V,单体电池放电下限为 2V。但是在电流放电的情况下,由于电池内阻的存在,造成电池电压虚低,如果放电下限设置不变的话,会提前结束电池组的放电,从而使电池组的电量得不到有效的利用。所以在电池组放电电流较大的时候,应充分考虑内阻的影响,降低电池的放电下限。

4.2.4 电池组热管理

锂电池的热管理(包括降温 and 加热)对电池系统起着非常重要的作用。长期工作在高温下的电池的会加快电池寿命的衰减,而低温下,无法发挥电池的最大性能。一般情况下,电池应工作在 5~40℃ 之间^[47]。锂电池热管理的三个目标:限制电池温度,使电池的温度低于电池的最大工作温度;最大限度地减少电池之间的温差;维持电池箱内的温度,使电池保持在最佳的工作状态。在本系统中,采用空气对流和加热板加热的方式对电池进行热管理,当电池温度低于 5℃ 时,开启加热板,对电池进行加热,当电池温度加热到 20℃ 时,即停止加热;当电池温度高于 35℃,开启排热风扇,电池组两端形成空气对流,低于 30℃ 即停止。

4.3 电池管理系统低功耗运行策略

管理系统的供电由车载 24V 电源提供,系统中包含有接触器、继电器等能耗比较高的器件。为降低系统功耗,将系统的工作状态分为休眠(sleeping)、工作(runing)、静置状态(standing)。每个状态的详细说明如下:

- 休眠状态:汽车停止工作时,电池即停止工作;此时管理系统的电池包模块除定时检测电池电压、温度之外,停止工作;主控单元进入休眠,充放电接触器全部关闭;内部 CAN 总线停止工作,外部 CAN 总线正常运行。

- 工作状态下:此时,电池包模块开始工作;系统根据电池电压,并根据充放电控制策略确定是否打开充放电触器;内部 CAN 正常运行,外部 CAN 总线正常运行。

- 静置状态:如果系统持续一段时间未检测到工作电流,电池持续处于静置状态,关断电池包模块的电源供应;主控单元实时监测电池组的工作状态,充放

电接触器根据充放电控制策略确定是否打开；内部 CAN 总线关闭，外部 CAN 总线正常运行。

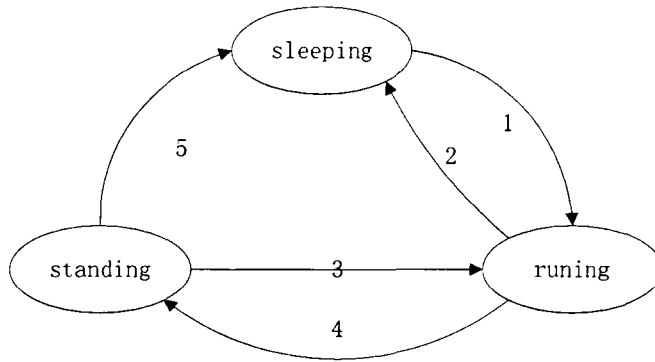


图 4.5 系统低功耗管理

各个状态的相互转换：

- 1、休眠状态转换到工作状态：当主控单元收到车载中央控制器的命令时，系统即进入工作状态，系统首先对电池电压进行巡检，出现异常报警，否则根据充放电控制策略确定是否打开充放电接触器。
- 2、工作状态转换到休眠状态：当系统处于工作状态时，收到停止工作的指令；如果此时电池正处于均衡状态，则均衡完成之后，系统即进入休眠状态，否则立即进入休眠状态。
- 3、静置状态转换到工作状态：主控单元在静置状态下，实时检测电池组的工作状态(即检测电池组的电流)；当检测到电池工作时，系统即进入工作状态。
- 4、工作状态转换到静置状态：当系统处于工作状态时，持续一段时间监测到电池组工作在静置状态，并持续 1 分钟，系统即进入静置状态。
- 5、静置状态转换到休眠状态：当主控单元处于静置状态下，收到车载中央控制器的停止工作的命令即进入休眠状态。

第 5 章 锂电池管理系统软件设计

在这一章将介绍管理系统的软件设计，管理系统的主控芯片均采用 MSP430F149 单片机，软件开发环境选择 IAR 公司专为 MSP430 系列单片机开发的 IAR Embedded Workbench for TI MSP430 集成开发环境，开发语言采用 C 语言。

5.1 软件设计思想

在基于单片机的嵌入式系统中，最常用的程序结构是顺序调度机制，其特点是：主程序按照一定的顺序，轮流查询各个功能模块的使能标志；如果有效就执行相应的模块；执行完之后就再继续执行下一个程序；全部模块执行完成之后，回到主程序处，如此循环不止，周而复始。这种方式的缺点是某些模块无法得到及时响应，也无法预料某个程序下一次执行的时间。由于管理系统对系统的实时性要求比较高，所以在管理系统的软件设计中，将采取一种的多工序并行处理程序的结构，其基本思想如下：

- 将系统分为多个独立的功能模块，每个模块都看成一个任务。以主控单元为例，主控单元的程序里包括了如下任务：LCD 显示、CAN 总线发送程序、主控向电池包请求电压温度程序、上位机数据上传程序、总电流总电压采样、环境温度检测、SOC 估算程序、充放电控制模块等等，每一个程序都是一个独立的任务模块。
- 每个任务有一个任务控制模块，包括了以下参数：
 - ◇ 任务原始优先级 `pri_ori`
 - ◇ 当前优先级 `pri`
 - ◇ 等待时间计时 `wait_timing`
 - ◇ 等待时间 `wait_time`
 - ◇ 休眠时间计时 `sleep_timing`
 - ◇ 休眠时间 `sleep_time`
 - ◇ 运行状态 `task_state`
- 每个任务具有停止(stop)、休眠(sleep)、等待(wait)、就绪(ready)、运行(run)五个状态。当任务处于停止时，需要外部事件唤醒，才会执行；任务处于休眠时，后台对休眠时间进行计时，当休眠计时 `sleep_timing` 大于或者等于 `sleep_time` 时，自动转换成就绪状态；任务处于等待时，后台对等待时间进行计时，当等待时间 `wait_timing` 大于或者等于 `wait_time` 时，自动转换成就绪状态；任务就绪时，系统根据优先级决定是否运行该任务。

- 在任务初始化时，需要对任务的原始优先级 pri_ori 进行初始化；对于原始优先级为 16~32 的任务，当任务处于就绪状态时，任务每等待 10ms，优先级自动提高一级，最高不能超过 10；当任务被任务调度程序选中时运行时，优先级自动复位。对于一些实时性要求非常高的任务，创建的时候分配的优先级低于 10（越低优先级越高）。
- 将运行时间较长或者运行时会出现等待的任务分割成几个阶段，每个阶段用状态标志位标定；当任务出现等待时，设定等待时间，交出 CPU 的控制；当任务下次运行的时候，根据标志位标定的状态运行。这样可以提高系统的利用率和系统的响应。
- 当任务完成时，根据任务需要设置任务的状态；对于一些需要外部事件触发的任务(如 CAN 发送程序)可以设置成 stop；其他任务可以设置为休眠，并设置休眠的时间。

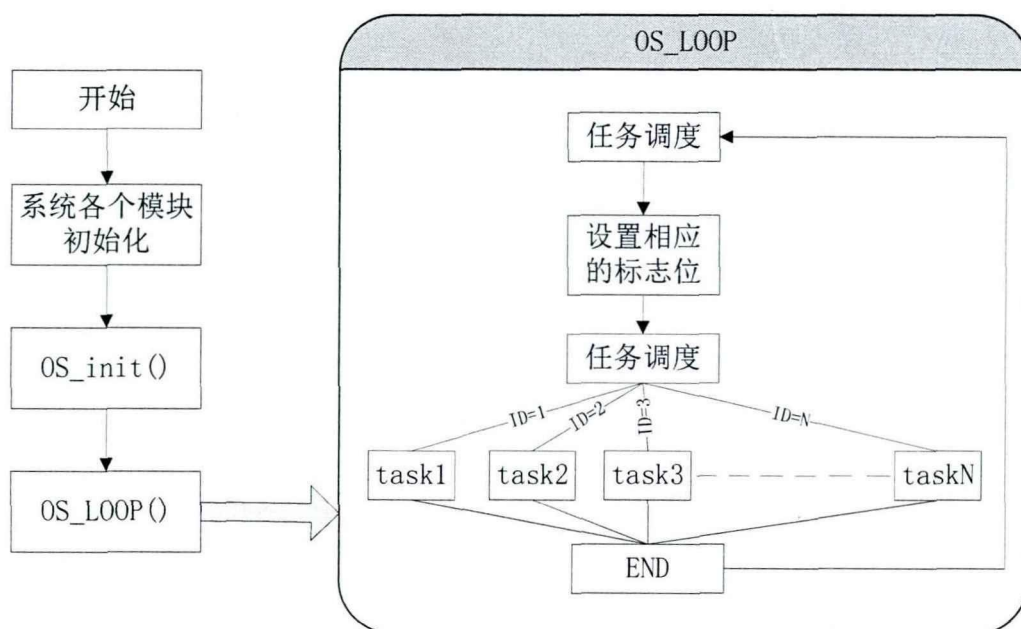


图 5.1 多工序并行处理程序的结构示意图

系统程序由 3 部分组成，OS 初始化、OS 主循环和后台计时程序组成。OS 初始化主要完成 OS 时钟的初始化和所有任务的初始化，在程序设计中，使用单片机的定时器 A 作为 OS 计时器，OS 时钟初始化即对定时器 A 进行初始化，最小计时单位为 1ms；任务初始化对所有任务的优先级、运行间隔时间、任务初始状态进行初始化。OS 主循环如图 5.1 所示，包括任务调度、标志位的设置以及任务切换，任务调度主要完成查找就绪任务中优先级最高的任务，如果当前没有就绪任务，则系统进入低功耗模式，直到在定时器 A 中断服务函数中被唤醒；在选定任务之后，对任务的相关标位进行设置：1)任务的状态变成运行状态，2)任务的等待时间清 0，3)任务的优先级恢复到原始优先级；任务切换根据任务的代号，调用不同程序执行，任务运行完毕之后，需将任务设置为运行以外的状态。

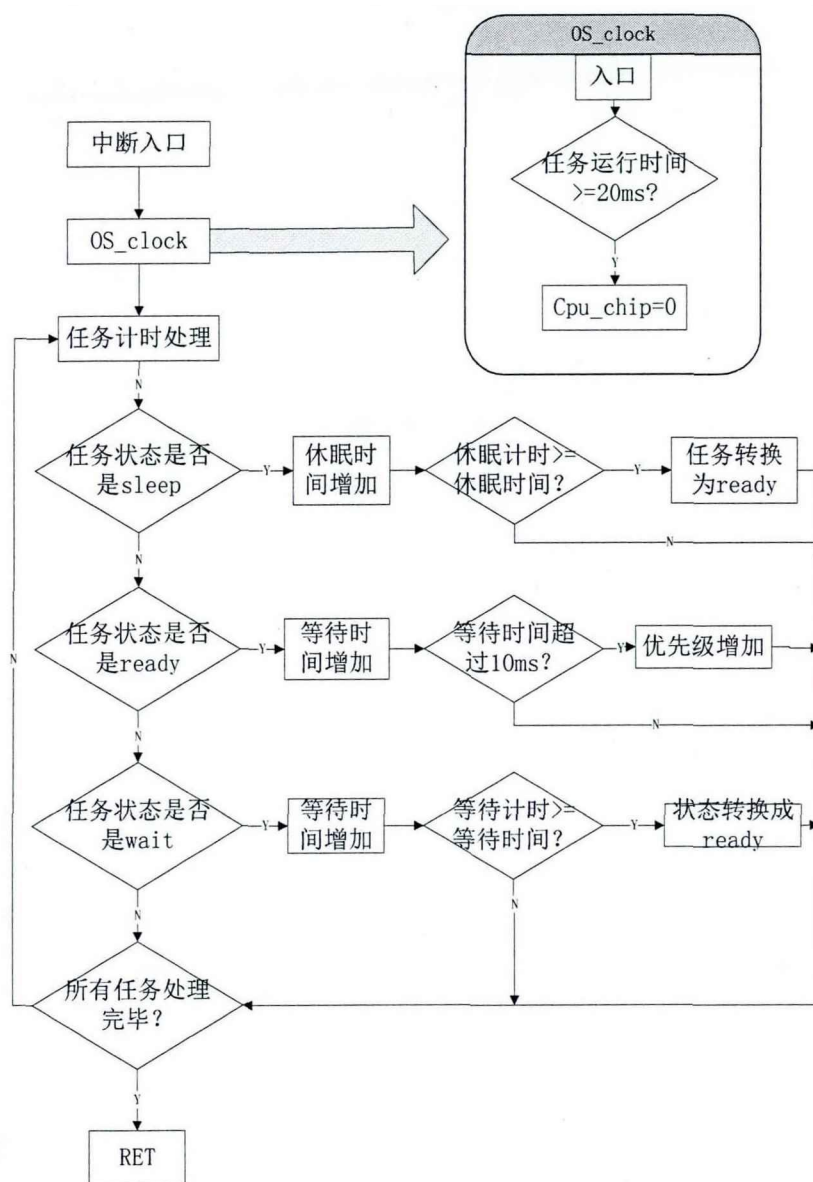


图 5.2 任务后台计时流程图

5.2 主控单元程序设计

主控单元中所有子程序均采用模块化设计，遵循多工序并行处理程序的结构。大部分程序由系统根据优先级调度，对于实时性要求非常高的模块，如电流定时检测模块、过流判断程序，则在中断中执行。

主控单元的程序由三部分组成：系统初始化程序、中断服务程序及各个任务相关的程序。初始化程序包括单片机初始化、外围模块初始化及 OS 的初始化；中断服务程序有定时中断、端口中断、AD 中断等；任务相关的程序即包括了系统所有的任务模块，这些任务可以定时运行，或者由其他任务触发运行。

主控单元的程序结构图如图 5.3 所示：

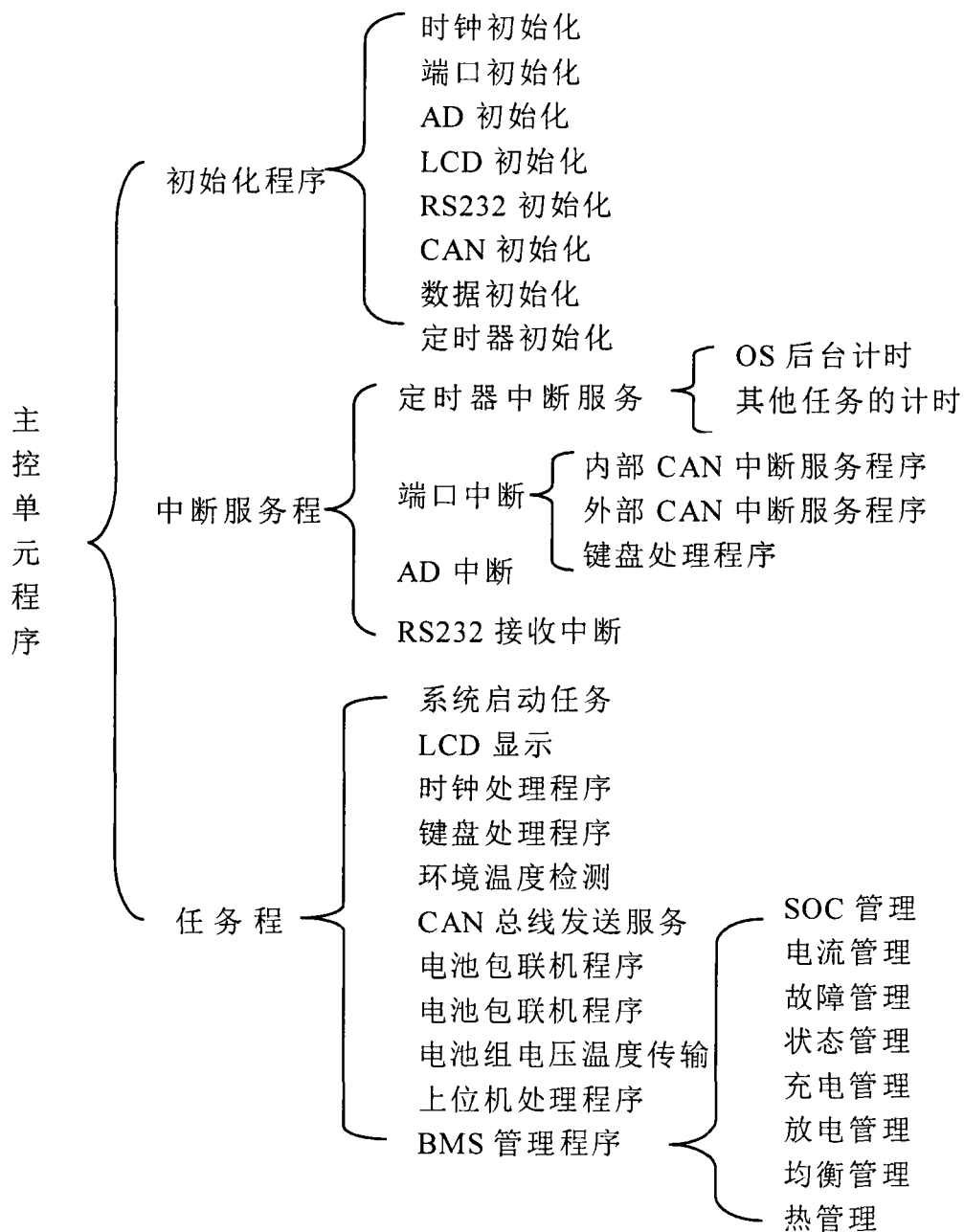


图 5.3 主控单元程序结构图

5.2.1 主控单元启动流程

主控单元启动流程图如图 5.4 所示，首先系统初始化，对单片机时钟、各个端口的定义、单片机外围模块及系统各个功能模块的初始化；系统初始化的最后一步是 OS 的初始化，OS 中包括了每个任务的初始化，初始化包括给任务分配原始优先级、任务的状态的初始化等。所有任务除了 init_task 任务之外，初始化时的状态均为停止(stop)状态，不会马上执行，需要外部条件触发才能执行。init_task 的初始状态为 ready，即系统初始化完成之后，运行的第一个任务程序是 init_task

任务。

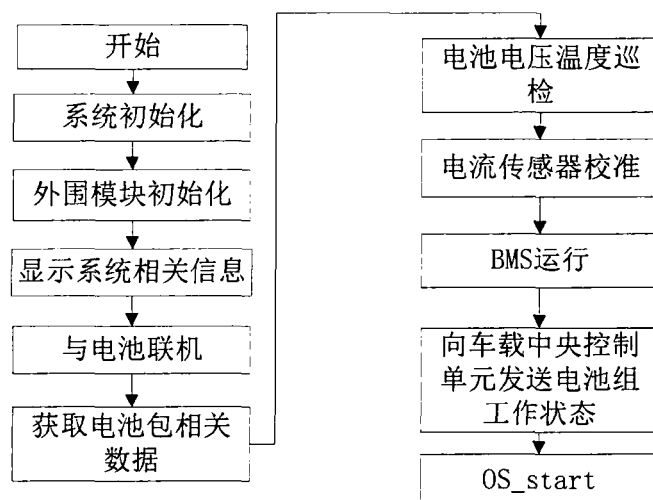


图 5.4 主控单元启动顺序流程图

init_task 任务中，规定了各个任务的起动顺序。第一步执行的任务为主控与电池包联机程序(cwb)，由于每个电池包中电池的数量不一样，所以要获取每一个电池包中电池和温度传感器的数量。第二步主控向各个电池包发送数据请求命令，包括电池包中单体电池的电压、温度及 SOC。第三步为电流电压和环境温度的巡检，此时放电接触器和充电接触器均关闭，电流采样应为 0，但是由于在系统中选用的是霍尔电流传感器，存在 0 点漂移，所以当前检测到的电流数据即为传感器 0 点漂移的数据，利用此数据可以对电流传感器进行校准。第四步运行电池管理系统程序，最后向车载中央控制单元发送电池组的工作状态。执行完 init_task 中所有任务之后，在 init_task 程序的最后，对所有任务进行重新初始化，定义任务的状态，执行的间隔时间等，并把 init_task 的状态设为 stop。

执行完成 init_task 之后，系统即进入正常的循环工作状态；在此状态下，系统各个任务根据初始化的间隔时间运行。

5.2.2 CAN 总线发送服务程序

CAN 总线发送服务程序由 3 个部分组成：发送任务创建函数(creat_sent_task)、发送服务函数(incan_sent_service)、发送报文缓存区(incan_sent_buffer)。其他任务需要向 CAN 总线发送报文时，直接调用发送任务创建函数即可，发送任务创建函数自动将报文写入发送报文缓存区，并使发送任务的状态置为 ready。系统根据优先级，调用发送服务函数。

在发送服务函数中，分为两个状态：发送状态和等待发送成功状态。一次成功的发送过程如下：首先检查 CAN 总线控制器的状态寄存器(SR)，是否允许向发送寄存器写数据，如果允许，即向发送寄存器写入数据，并向 CAN 的 CMR 寄存

器置发送命令；然后检查 CAN 总线控制器的状态寄存器(SR.3)，如果为 1，则发送成功；发送成功之后，删除已经发送的报文，同时检查是否还有报文未发送，如果还有，则在 CPU 允许的情况下，开始新的发送。

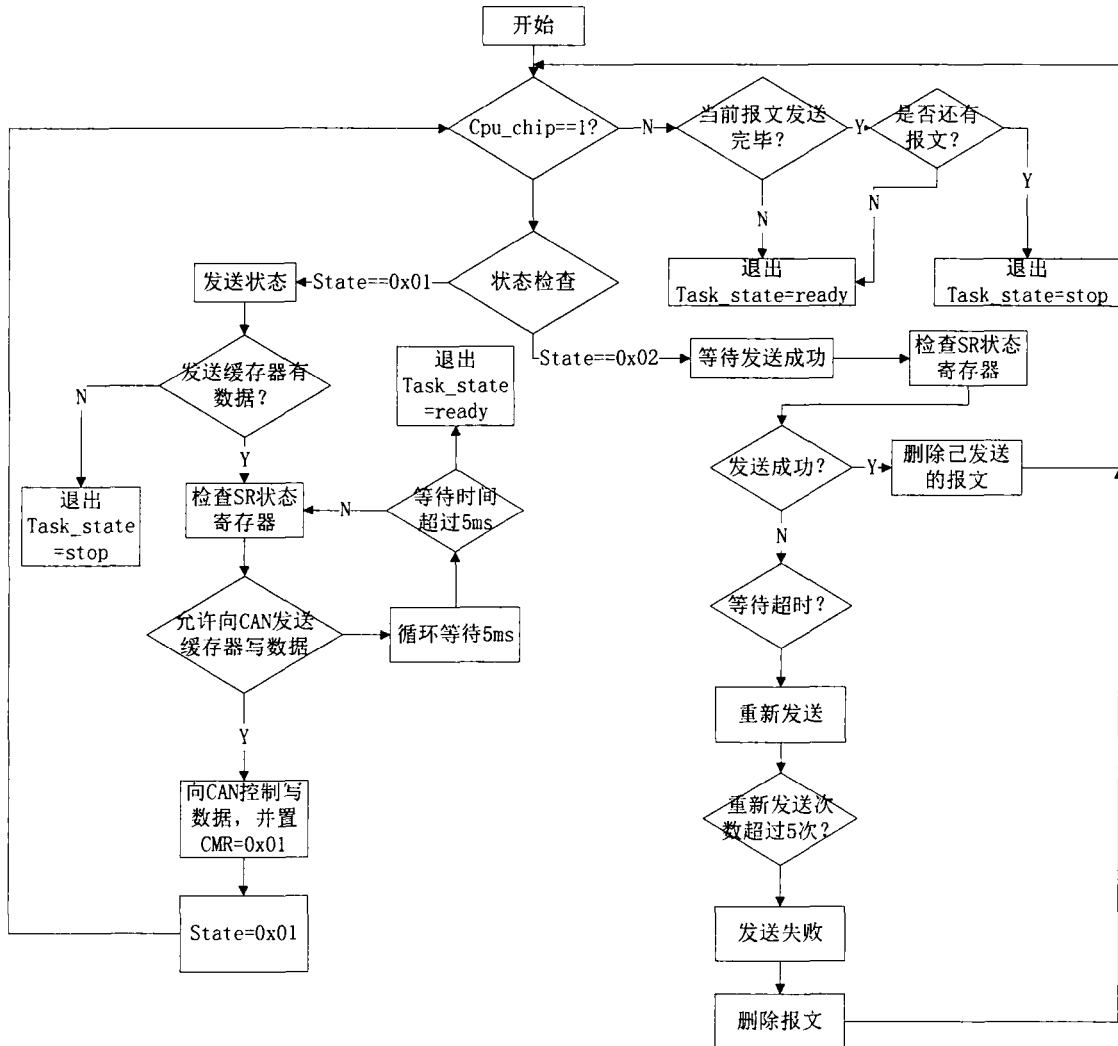


图 5.5 CAN 发送服务程序

5.2.3 电池组单体电池电压温度数据传输

电池组单体电池数据传输主要包括单体电池电压、电池温度、单体电池的 SOC 等。在电池组处于工作状态下，主控单元定时向电池包发送 VTR 命令。

程序分为两个状态：发送状态和等待状态。发送状态下，主控单元向电池包模块发送命令；在等待状态下接收电池包的数据，并将 CAN 总线报文转换成实际的电压、温度数据。

电池组单体电池数据传输过程如下：

- 1、首先主控单元通过 CAN 总线向电池包发送数据请求命令(VTR 命令)；
- 2、电池包收到 VTR 命令后，向主控发送电池电压、温度等数据
- 3、主控单元接收完成后，向下一个电池包发送 VTR 命令。

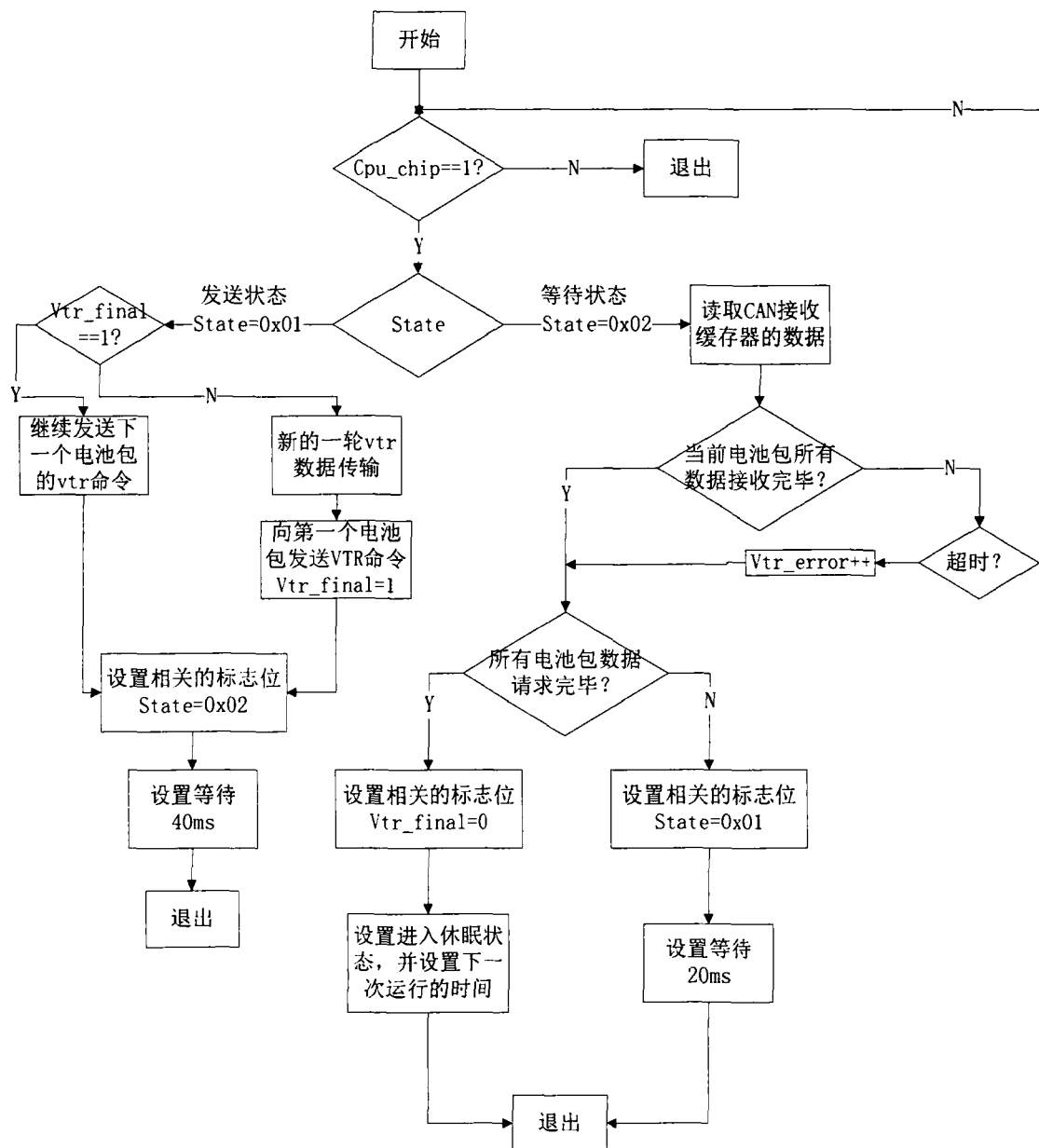


图 5.6 电池包数据传输流程图

5.2.4 电流检测

系统电流检测由单片机的 AD 采样完成，AD 的参考电压为 2.5V。系统有两路电流采样通道，通道 1 用于对小电流进行检测，通道 2 用于对大电流进行检测。当通道 1 检测的值大于 2.5V 时，由取通道 2 的采样值，否则取通道 1 的采样值。AD 采样的触发信号由定时器提供，检测的频率是 10ms 一次，每一次采样 16 次，并对采样的数据进行数字滤波处理。

由于霍尔电流传感器存在一定的零点漂移，所以在系统上电时，需要检测霍尔电流传感器在零电流情况下的输出，以作为校准的数据。实际检测电流时，减去零点漂移值。

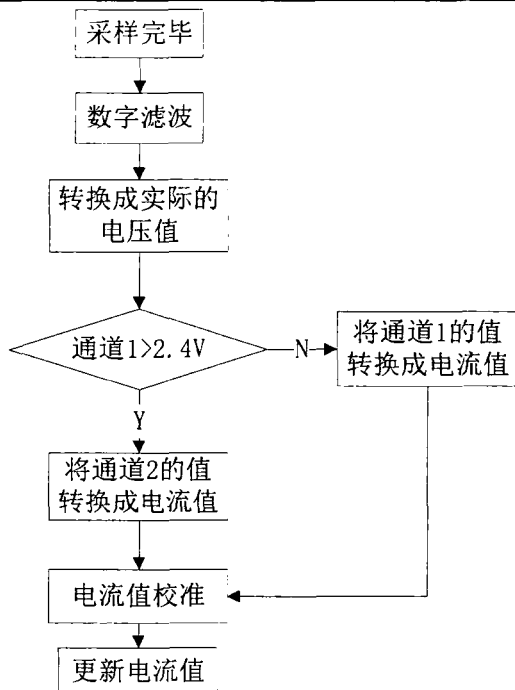


图 5.7 电流检测流程图

5.2.5 BMS 程序设计

在 BMS 程序包中，包括了 SOC 管理程序、电流管理程序、故障管理程序、状态管理程序、充电管理程序、放电管理程序、均衡管理程序及热管理程序。

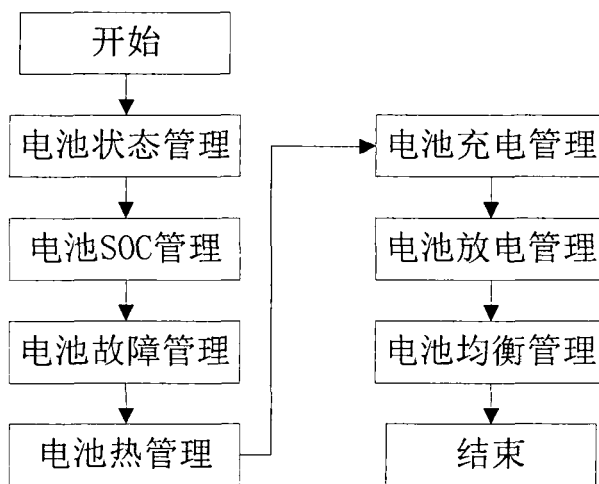


图 5.8 电池管理程序运行流程图

图 5.8 是电池管理程序的流程图，所有程序 100ms 运行一次。状态管理程序对电池组的工作状态进行判断，并对电池组中单体电池电压、电压一致性、电池包温度、温度一致性进行分析，获取相关的数据作为其他程序的参考；SOC 管理程序通过与电池包进行数据交换，计算电池组的剩余电量；故障管理程序根据电池组的外部参数和工作状态，判断电池的故障状态，电池组的故障代码见表 4.1；充电管理程序通过监控电池组电压、电流、温度，实现对电池组整个充电过程的

安全管理，当电池电压较低的时候，及时打开充电接触器，当电池充满时，控制充电触器停止充电；放电管理主要对电池的放电接触器进行管理，通过接收车载中央控制单元的命令或者上位机的命令，根据电池的状况，决定是否开启放电接触器，在电池出现过放的时候，及时断开放电接触器。均衡管理程序通过对电池组 74 节单体电池一致性分析，在静置和充电的时候，对所有电池包的均衡进行统一的管理；热管理主要通过监控电池组的温度，控制加热板和排热风扇，使电池组的温度维持在电池的最佳工作温度。每个管理模块的程序设计按照第四章的控制策略实现，在这里不再详述。

5.3 电池包模块程序设计

为了减少程序开发的时间，电池包模块主体程序与主控单元基本一致，同样也采用多工序并行处理程序的结构。电池包模块的程序主要包括：电池电压检测、包内温度检测、均衡处理、LTC6802 底层驱动、单体电池 SOC 处理程序及总线发送服务程序。电池包模块的程序结构如图 5.9 所示：

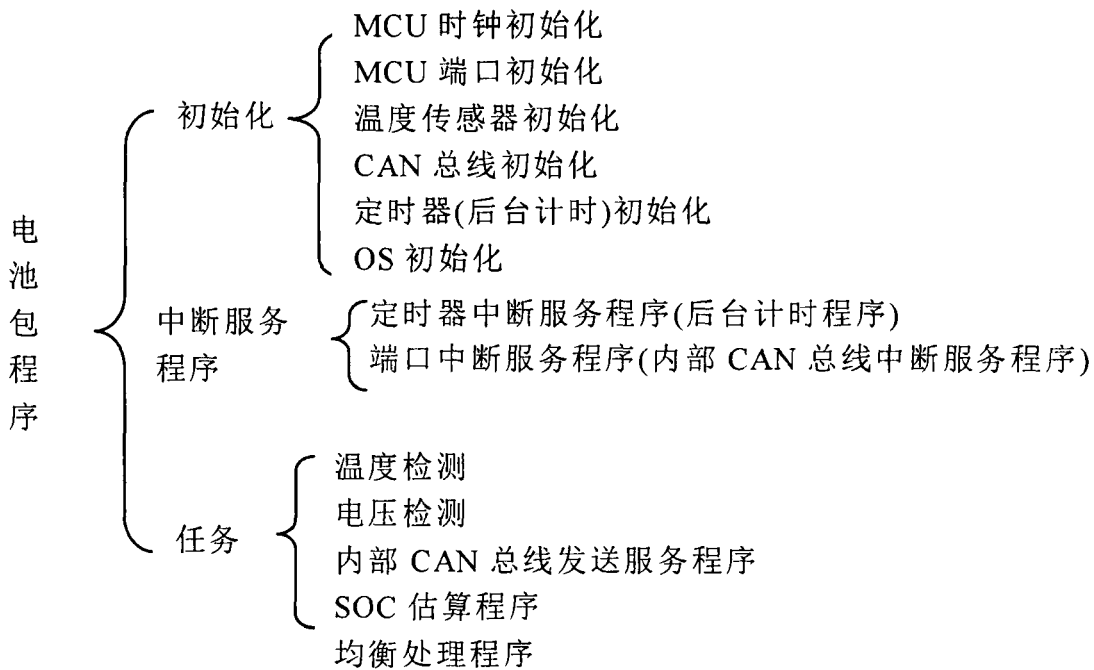


图 5.9 电池包程序结构图

5.3.1 温度检测程序

温度传感器采用 DS18B20 数字温度传感器，通信方式采用单总线方式，每个 DS18B20 内部均有一个唯一的 64 位 ROM 编码，相当于总线上每个器件都有一个唯一的地址，如果需要对某个器件进行操作，首先发送该器件的地址，匹配成功即可对该器件进行操作。

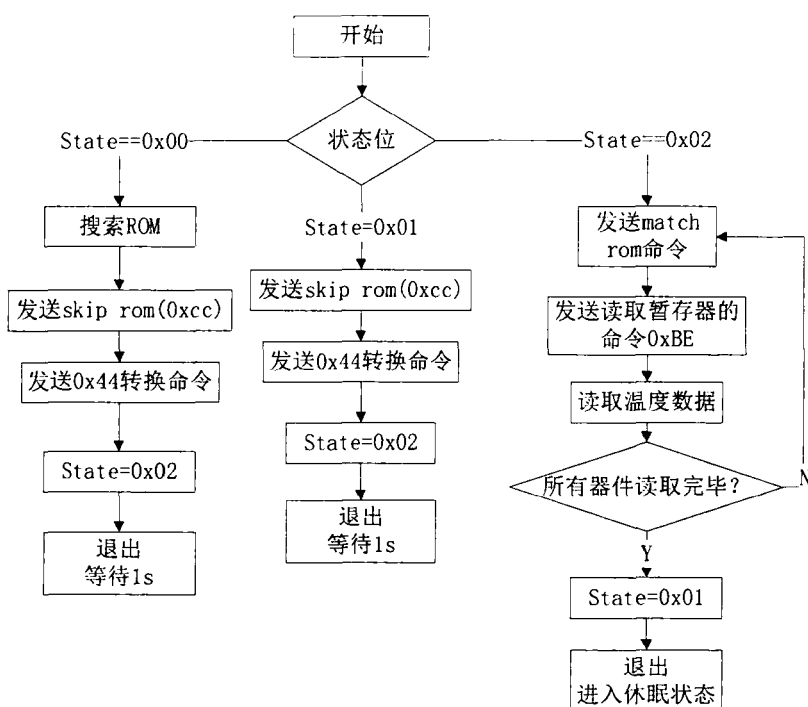


图 5.10 温度检测程序流程图

在系统启动之初，State=0x00，首先搜索每个器件的 ROM；转换时，首先发送 skip rom 命令，即对总线上所有器件进行操作，然后发送转换命令，由于转换时间比较长，正常情况下，转换时间为 750ms，所以发送完转换命令之后，将 state 置为 0x02，退出程序，并设置等待时间 1s；当再次运行程序时，根据 state 的值，进入读取数据的阶段，读取数据时，首先发送匹配 ROM 命令(0x55)，然后向总线发送 ROM 地址，匹配成功之后，即读取当前器件的温度值，循环读取所有器件的温度值，读取完毕之后，将 state 设为 0x01，退出进入休眠状态，等待下一次转换的时间；系统启动之后，不再需要搜索 ROM，直接发送 skip rom 和转换命令。系统设置温度转换的间隔的时间是 2s。

5.3.2 电压检测及均衡控制程序

管理系统的电压检测方案采用 LTC6802 锂电池组电压检测芯片。在系统启动时，需对 LTC6802 进行配置，在 LTC6802 的配置寄存器里，可以分为几个部分：工作模式、看门狗、通用 IO 口设置、电池组电池数量、均衡控制位、过压预设值、欠压预设值。

在这里没有使用 LTC6802 的监视模式，只使用了测量模式，则 CDC 设为 1。LTC6802 内部具有一个看门狗电路，如果 SCKI 引脚在 2.5s 内没有检测到活动状态，芯片内部的配置信息将全部复位到初始状态，同时均衡控制输出为 0，所以看门狗提供了一种当管理系统断电或者停止活动时，关闭均衡的方法。LTC6802 可以支持 4~12 节锂电池的锂电池组，当锂电池低于 12 节时，应将高位没有使用

电池通道屏蔽掉。在本系统中，总共有 74 节锂电池，将 74 节锂电池分为 7 个包，第一个包和第二个包均有 12 节电池，其余 5 个电池包有 10 个电池，所以其余只有 10 个电池的电池包需要将高 2 位电池通道屏蔽掉，也可以在配置寄存器 0 的 BIT3 设为 1。在本系统中没有使用 LTC6802 的比较功能，所以过压预设值和欠压预设值不需要设置。

在电池均衡时，由于电池与电路板之间连接线的存在压降，板上的电池并不能反映电池的真实电压，所以在电压转换时，不允许电池均衡放电。正常情况下，电池转换时间为 13ms。

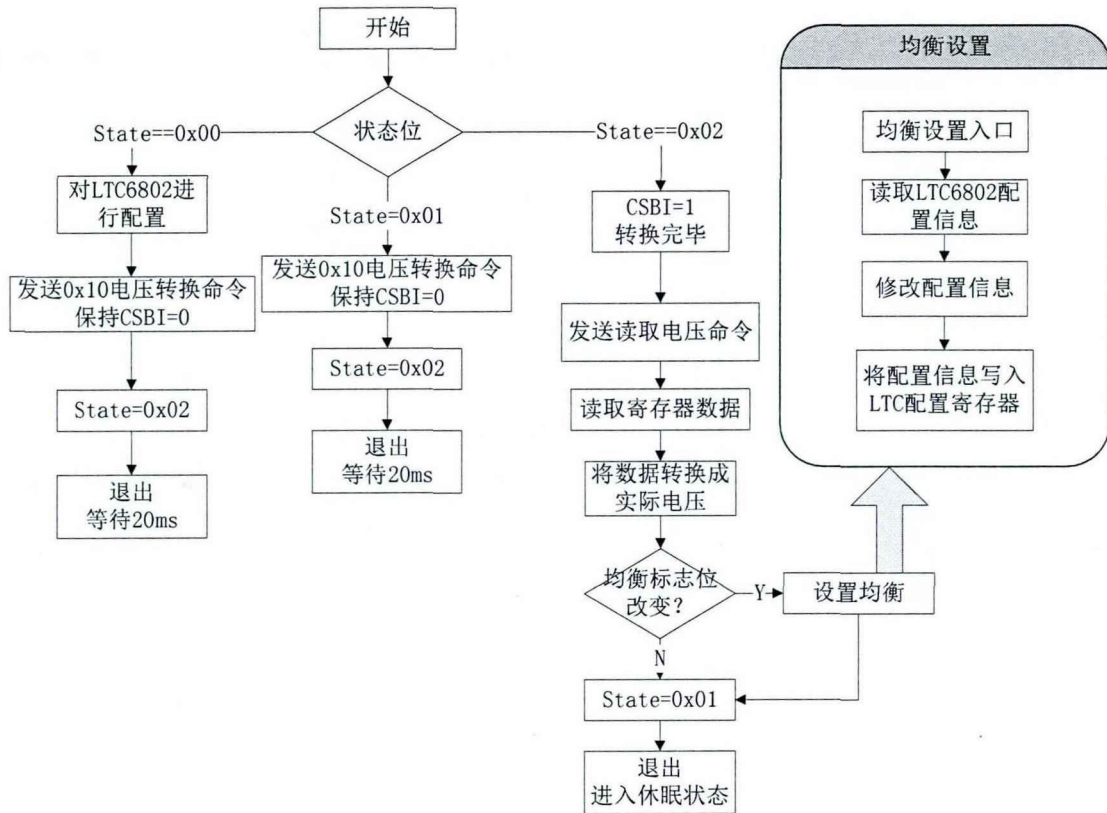


图 5.11 电压检测及均衡程序流程图

电压检测程序分为三个阶段，第一个阶段用于系统启动时，首先对 LTC6802 进行配置，然后发送电压转换命令 0x10，对所有电池电压进行检测，将 state 设为 0x02(第三个阶段)，退出等待 20ms，在等待检测完成的过程中，保持 CSBI 输出为 0。

第二阶段用于系统启动之后，此时不需要再对 LTC6802 进行配置，直接发送转换命令，state=0x02 退出等待 20ms，同样在等待过程中保持 CSBI 输出为 0。

第三阶段读取转换的电压值，首先将 CSBI 设为 1，然后发送读取电压命令读取寄存器，并将寄存器的数据转换成实际电压值。在第三个阶段中，还需对电池包的均衡进行设置，由 CAN 总线的接收程序接收主控发送的均衡标志位，如果 CAN 总线持续 2s 内没有接收到均衡设置，则将所有电池的均衡设置 0，如果均衡

标志位有所变化，标记 equ_change=1。均衡设置之前，对 equ_change 进行检查，如果为 1，则调用均衡设置程序，否则不调用，这样可以有效的避免重复对 LTC6802 进行均衡设置。在均衡设置程序中，首先读取 LTC6802 的配置信息，修改配置信息中的均衡标志位，然后将修改后的配置信息重新写入 LTC6802。

5.4 上位机显示及 CAN 总线通信数据

5.4.1 上位机显示



图 5.12 数据采集界面

上位机数据每 2 秒刷新一次，从图中显示的是 1-5 个电池包的数据，可以看出目前电池组处于静置状态，总电流为 0，总电压为 245V，当前 SOC 为 40%；充电接触器闭合，放电接触器断开。放电接触器断开原因在于没有收到车载控制器的命令。

可以通过按钮控制充放电接触器，当手动控制充放电接触器之后，系统即转入手动控制模式。在电池组没有遇到故障时，接触器的状态完全由手动控制；当电池组遇到故障，根据充放电控制策略关闭充电或者放电接触器。如果需要转入自动控制模式，点击释放按钮即可。

5.4.2 CAN 总线通信

序号	传输方向	第几路CAN	时间标识	帧ID	帧格式	帧类型	数据长度	数据
0x000000e9	接收	1	0x0121725a	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
0x000000eb	接收	1	0x01217278	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	cc f0 0c 00 00 00 04 00
0x000000ed	接收	1	0x01217296	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	cb e2 0c 00 00 00 04 00
0x000000ee	接收	1	0x012172ad	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	ca e2 0c 00 00 00 04 00
0x000000ef	接收	1	0x012172c3	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c9 e1 0c 00 00 00 04 00
0x000000f0	接收	1	0x012172d9	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c8 e2 0c 00 00 00 04 00
0x000000f1	接收	1	0x012173bb	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c7 e2 0c 00 00 00 04 00
0x000000f2	接收	1	0x012173d0	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c6 e2 0c 00 00 00 04 00
0x000000f3	接收	1	0x012173e4	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c5 f6 0c 00 00 00 04 00
0x000000f4	接收	1	0x012173f8	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c4 ed 0c 00 00 00 04 00
0x000000f5	接收	1	0x0121740c	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c3 ed 0c 00 00 00 04 00
0x000000f6	接收	1	0x0121741f	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c2 f6 0c 00 00 00 04 00
0x000000f7	接收	1	0x01217432	18014120	数据帧	扩展帧	0x08	c1 de 0c 00 00 00 04 00
0x000000f8	接收	1	0x01217510	18214901	数据帧	扩展帧	0x00	
0x000000f9	接收	1	0x01217545	18014221	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
0x000000fa	接收	1	0x0121755f	18014221	数据帧	扩展帧	0x08	44 f2 00 00 00 00 00 00
0x000000fb	接收	1	0x01217579	18014221	数据帧	扩展帧	0x08	43 f0 00 00 00 00 00 00
0x000000fc	接收	1	0x01217592	18014221	数据帧	扩展帧	0x08	42 ec 00 00 00 00 00 00
0x000000fd	接收	1	0x012175ab	18014221	数据帧	扩展帧	0x08	41 ed 00 00 00 00 00 00

图 5.13 内部 CAN 总线数据传输

图 5.13 是利用周立功 USB-CAN 截获的内部 CAN 总线数据传输的报文，当前传输的第一个电池包的电压、温度数据。

结论

新能源汽车由于其污染小、能源利用率高，而受到汽车工业界的重视。电池及电池管理属于新能源汽车的核心技术之一，是近年来的研究热点之一。

本文对动力锂电池管理系统进行了研究，并设计了一套针对 74 节锂离子电池组的动力锂电池管理系统。文章从电池组外部参数检测、管理系统硬件设计、电池控制策略、SOC 估算及系统软件设计 5 个方面对所研究的系统进行论述，得出结论如下：

- 1、文中采用了两种方法对电池组电压检测进行了研究，达到了非常好的精度，本文所提出的基于高压模拟开关和差分放大器的电压检测方式在常温下误差低于 0.1%。在本系统中采用的 LTC6802 电压检测芯片常温下误差低于 0.1%，全温度范围内误差低于 0.2%。这种高精度的电压检测方法对锂电池管理非常有意义。
- 2、系统采用了基于 CAN 总线的分布式架构，可以很方便的增加或者减少电池包的数量，在本系统中使用了 7 个电池包模块和一个主控模块。
- 3、在电池组管理方面，结合电池组的实际使用情况，对电池组的故障管理、充放电管理策略、均衡策略、热管理等进行了深入的研究。避免电池组出现过放、过充、过流、短路、过温、欠温等情况，并对电池组的 SOC 估算进行的一定的研究。
- 4、对管理系统的软件进行了深入的研究，采用了一种多工序并行处理的程序结构，该结构程序简单，可以充分利用单片机的资源。所有子程序采用状态机处理的方式，将需要执行很长时间或者执行过程中需要等待的任务进行分段处理，极大地减少程序等待时占用 CPU。具有很好的实时性，能够很好的应对管理系统对系统实时性的要求。

试验结果表明，该系统达到设计要求，在系统开发过程中，由于经验的欠缺，系统或多或少存在一些问题。

- 1) 在硬件方面，还有优化的余地；目前的硬件设计过于复杂，对成本没有做太多的考虑。
- 2) 采用了 LTC6802 作为电压检测芯片，由于隔离芯片 ADUM1401 的供电由 LTC6802 芯片内部的线性电源供电。检测时，LTC6802 的工作电流为 1.58mA，静态电流为 0.9mA。可以通过控制 ADUm1401 的电源供应，进一步降低电压检测电路对电池本身的影响。
- 3) 由于系统电流检测采用了霍尔电流传感器，霍尔电流传感器本身存在温漂、

非线性等问题, 电流检测的精度有所降低, 对 SOC 检测精度有非常大的影响。

下一步的计划是使用低温度系数的分流电阻来做电流检测, 可以极大的提高电流检测的精度, 从而提高 SOC 估算的精度。

- 4) 特别是 SOC 估算方法, 系统采用的 SOC 算法过于简单, 检测精度有所欠缺。
- 5) 整套系统与外部设备衔接太过简单, 下一步希望做到系统与充电设备、用电设备有更好的衔接。

这些问题希望在下一步的改进中, 能够对进行改进。

参考文献

- [1] 蒋瑞斌, 谭理刚. 电动汽车的发展及面临的挑战. 机械工程师, 2009(2): 23-25
- [2] 亢风林, 李军民. 电动汽车发展分析, 农业装备与车辆工程, 2008(11): 63-65
- [3] 张荣贵. 我国电动汽车发展前景. 机电技术, 2008. 4: 81-84
- [4] 吴宇平, 万春荣, 姜长印等. 锂离子二次电池. 北京: 化学工业出版社, 2002: 100-103
- [5] 王海明, 郑绳植, 刘兴顺. 锂离子电池的特点及应用. 电气时代, 2004, (3): 132-134
- [6] 杨萍, 苏金然. 锂离子电池技术与应用发展. 电源技术, 2009, 33(11): 1037-1039
- [7] 曹云平. 电动车动力电源的发展现状. 化工时刊, 2001(10): 13-16
- [8] 崔萌佳, 戴永年, 姚耀春等. 电动车用动力电池的研究概况. 昆明理工大学学报(理工版), 2004. 29(6): 122-126
- [9] 王峰, 李茂德. 电池热效应分析. 电源技术, 2010, 34(3): 288-291
- [10] 张国庆, 张海燕. 相变储能材料在电池热管理系统中的应用研究进展. 材料导报. 2006, 20(8): 9-12
- [11] Johnson A A, Mohammed H, Helio V, et al. Precision Battery Management System. In: Instrumentation and Measurement Technology conference. Ottawa, 2005: 1317-1320
- [12] 雷晶晶, 李秋红, 陈立宝等. 动力锂离子电池管理系统的研究进展. 电源技术. 2010. 34(11): 1192-1196
- [13] 张承宁, 朱正, 张彩萍等. 电传动车辆动力电池组分布式管理系统设计. 兵工学报. 2007. 28(4): 396-401
- [14] 李顶根, 李竟成, 李建林. 电动汽车锂离子电池能量管理系统研究. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1522-1527
- [15] 郑敏信, 齐铂金, 吴红杰. 基于双 CAN 总线的电动汽车电池管理系统. 汽车工程, 2008. 30(9): 788-791
- [16] 麻友良, 陈全世, 齐占宁. 电动汽车用电池 SOC 定义与检测方法. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(11): 95-97
- [17] 杨静, 张朝晖. 基于单片机及可编程器件的电动汽车电池管理系统. 机电一体化, 2004, 6: 60-63
- [18] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用. 电池, 2004, 34(5): 376-378

- [19] 王震坡, 孙逢春. 锂离子动力电池特性研究. 北京理工大学学报. 2004. 24(12): 1053-1057
- [20] Dong T T, Wei X Z, Dai H F. Research on High-Precision Data Acquisition and SOC Calibration method for Power Battery. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin, 2008: 1-5
- [21] Kazuo Y, Tsuyonobu H, Takashi T, et al. Battery Capacity Calculating Method. U.S. Patent, US7091698B2, Aug.15,2006
- [22] Dai H F, Sun Z C, Wei X Z. Online SOC Estimation of High-power Lithium-ion Batteries Used on HEVs. In: Vehicular Electronics and Safety 2006. Beijing, 2006:342-347
- [23] 林成涛, 张宾, 陈全世等. 典型动力电池特性与性能的对比研究. 电源技术, 2008, 132(11) :735-738
- [24] 李革臣, 古艳磊. 电化学阻抗谱法预测锂电池荷电状态. 电源技术, 2008. 132(9): 599-602
- [25] 赵徐成, 张磊, 黄卫星. 基于动态电子负载的航空蓄电池内阻与容量关系. 电源技术. 2006. 130(2): 149-151
- [26] 刘雪省, 史鹏飞, 吕军等. MH-NI 蓄电池自放电规律及其应用. 电源技术, 2006, 3: 45-48
- [27] 李顶根, 邓杰, 陈军. 电动汽车车载 SOC 测量及续驶里程的研究. 工业仪表与自动化装置. 2008. 5: 91-94
- [28] 黄文华, 韩晓东, 陈全世, 林成涛. 电动汽车 SOC 估计算法与电池管理系统的研究. 汽车工程. 2007.29(3):198-202
- [29] Yan J Y, Li C G, Xu G Q, et al. A Novel On-line Self-learning State-of-charge Estimation of Battery Management System for Hybrid Electric Vehicle. In: Intelligent Vehicles Symposium. 2009 IEEE. Xi'an,2009:1161-1166
- [30] Yan J Y, Xu G Q, Xu Y S, et al. Battery State-of-charge Estimation based on H_∞ Filter for Hybrid Electric Vehicle. In: 2008 10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision. Hanoi,2008: 464-469
- [31] 杨朔, 何莉萍, 钟志华. 电动汽车蓄电池荷电状态的卡尔曼滤波估计. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2004, 33 (2): 99-103
- [32] 陶兴华, 陈彪, 张俊洪. 模糊逻辑与神经网络的蓄电池容量预测. 电源技术, 2004, 28(9): 578-582
- [33] 李德伟, 陈实, 吴锋等. 基于神经网络的动力电池荷电状态的预测. 计算机应用与软件, 2007. 24(9): 102-104
- [34] Cheng K W E, Divakar B P, Wu H G, et al. Battery-Management System (BMS)

- and SOC Development for Electrical Vehicles. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. 2011. 60(1): 76-88
- [35] Cesar P, Philip T K. Switched Capacitor System for Automatic Series Battery Equalization. In: Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '97 Conference Proceedings. Twelfth Annual . Atlanta, 1997(2): 848-854
- [36] Lee Y S, Chen G L. ZCS Bi-directional DC-to-Dc Converter Application in Battery Equalization for Electric Vehicles. In: Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. Aachen, Germany, 2004: 2766-2772
- [37] 逯仁贵, 王铁成, 朱春波等. 基于飞渡电容的超级电容组动态均衡控制算法. 哈尔滨工业大学学报. 2008. 9(40): 1421-1425
- [38] Stephen W M, Peter J S. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. <http://evdl.org/docs>, 2011-01-09
- [39] Raji M, Chanwoo P. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature. Uniformity Journal of Power Sources. 2011. 196(7): 5685-5696
- [40] 蒋新华, 雷娟, 冯毅等. 串联电池组电压测量的新方法. 仪器仪表学报. 2007. 28(4): 734-737
- [41] 蒋新华, 冯毅, 解晶莹. 电压检测电路对锂离子电池组的影响. 电池. 2005. 35(2): 135-136
- [42] 古启军, 陈以方, 吴知非. 串联电池组电压测量方法的研究. 电测与仪表. 2002. 5(39): 26-29
- [43] 张利国, 蒋京颐. 一种串联蓄电池组电压巡检仪的设计. 现代电子技术. 2006, 29(20): 7-12
- [44] Garrett D B, Stuart T A. Transfer circuit for measuring individual battery voltage in series packs. IEEE Aerospace and Electronic Systems. 2000, 36(1): 933-940
- [45] 欧阳斌林, 董守田. 电池组智能监测仪中的浮动地技术. 电测与仪表, 1998. 35(12): 35-37
- [46] 王玮. 感悟设计-电子设计的经验与哲理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 145-166
- [47] Park C, Jaura A K. Dynamic Thermal Model of Li-ion Battery for Predictive Behavior in Hybrid and Fuel Cell Vehicles, SAE transactions. 2003, 112(3): 1835-1842

致 谢

本论文是在我的导师李秋红教授的悉心指导下完成。非常荣幸成为李教授的弟子，读研期间，李教授对我们要求严格，扩大了知识面，教会我很多搞科研所必备的东西和方法，所谓“授人以鱼不如授人以渔”，这些知识和做科研方法将对我终身受益。虽然研二、研三期间在外实习做项目，但是李教授还是给我力所能及的帮助。在此，谨向我的导师李秋红教授致以崇高的敬意和由衷的感谢。同时，感谢湖南大学微纳中心主任王太宏教授，是您让我进入了电池管理这个领域，让我有了发挥自己特长的机会。

感谢中国北方车辆研究所国家 863 电池实验室的龙泽主任，给我们提供了一个非常好的锻炼机会。龙泽主任不管在工作上和生活上都给予我们非常大的帮助，他在电池方面深厚的理论知识和丰富的工程经验令我受益匪浅。在做项目的过程中，得到了专用车公司各位同事、5 位学弟、高途高级工程师以及搭档张金顶的帮助，在此说声谢谢。

感谢我的父母，感谢你们 20 多年来对我无微不至的照顾，是你们在精神上、物质上支持，才让我能够顺利走到今天。感谢我的女友，一直陪伴着我，给我精神上的鼓励和支持。

最后，感谢各位参与评审、答辩的专家，由于个人水平有限，论文存在很多不足之处，请各位专家予以指正。

雷晶晶

2011 年 4 月 26 日 于 湖南大学

附录 A 攻读硕士学位期间所发表的论文

- [1] 雷晶晶, 李秋红, 陈立宝等. 动力锂离子电池管理系统的研究进展. 电源技术. 2010. 34(11): 1192-1195
- [2] 雷晶晶, 李秋红, 龙泽, 张金顶. 锂电池组单体电压精确检测方法的研究. 电源技术 (已录用).
- [3] 张金顶, 王太宏, 雷晶晶, 龙泽, 李进. 基于 MSP430 单片机的 12 节锂电池管理系统. 电源技术(已录用)
- [4] 白立朋, 雷晶晶, 邓积微等. 便携式设备中的文件系统建立方法. 单片机与嵌入式系统应用, 2010, 8: 69-70

附录 B 系统照片

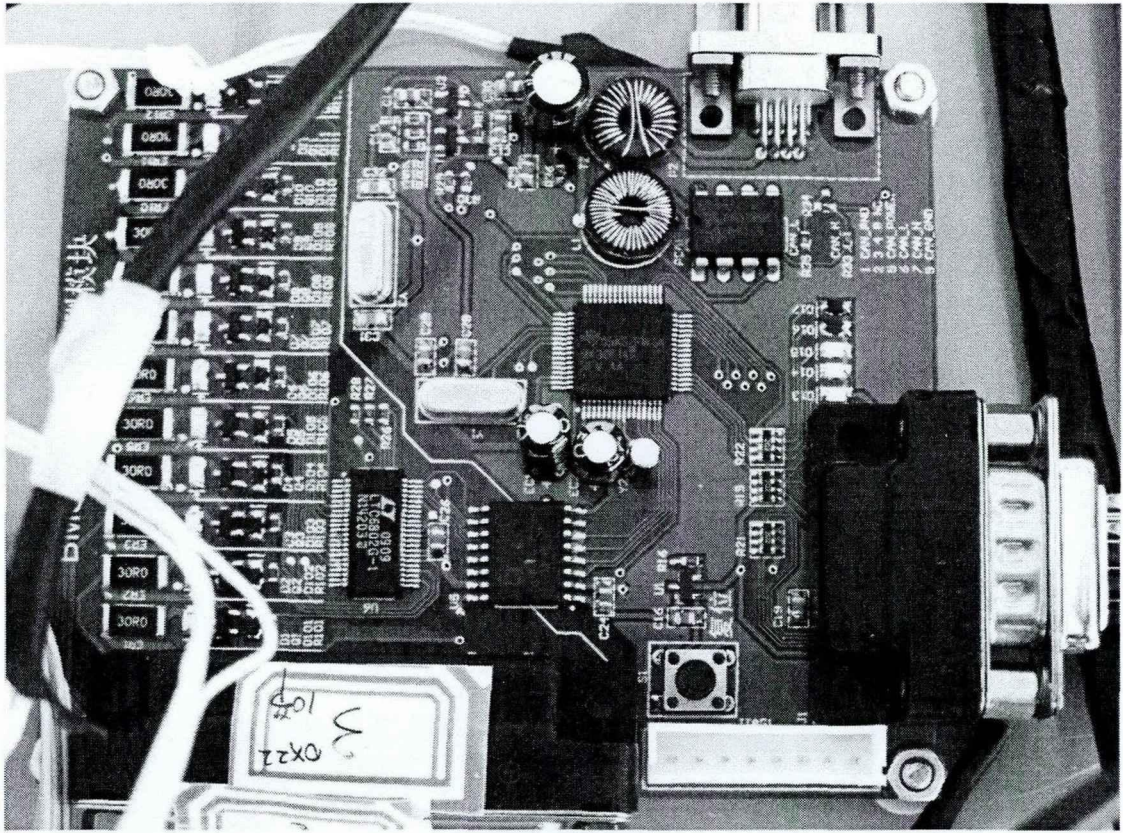


图 B.1 电池包照片

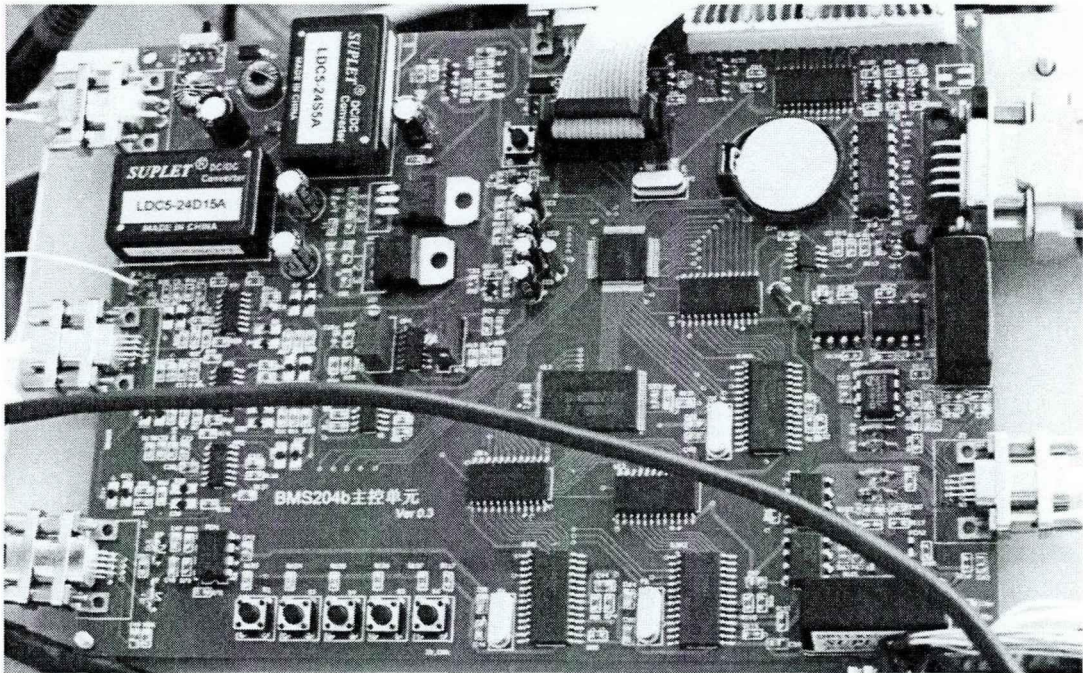


图 B.2 主控单元照片