



分类号 _____

学校代码 10487

学号 M201471158

密级 _____

华中科技大学

硕士学位论文

电动汽车电池管理系统 测试平台的设计和研究

学位申请人： 唐晓峰

学科专业： 新能源科学与工程

指导教师： 李顶根 副教授

答辩日期： 2017年5月16日

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree for the Master of Engineering**

**Design and Research On Electric Vehicle
Battery Management System Test Platform**

Candidate : TANG Xiaofeng

Major : New Energy Science and Engineering

Supervisor : Associate Prof.LI Dinggen

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

April, 2017

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，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结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文授权使用授权书

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，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技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。

本论文属于 保密， 在_____年解密后适用本授权书。
 不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

华中科技大学硕士学位论文

摘要

电池管理系统 (Battery Management System, 简称 BMS) 作为电动汽车电池系统的“大脑”，在电动汽车安全运行、续航里程、使用寿命等方面起着至关重要的作用，因此国内外众多高校企业以及科研院所对电池管理技术做了长期且深入的研究，且大量研究成果已经应用于电动汽车上。我国的电池管理系统产业也初具规模，随着电池管理系统产业化的到来，对其在出厂、选型、定期维护阶段进行测试就显得十分必要。

本文以电动汽车电池管理系统测试平台为研究对象，在详细了解电池管理系统各个功能单元及其具体实现基础上，制定了针对电池管理系统测试平台硬件的实现方案。测试平台采用主从设计结构，涵盖了控制器局域网(Controller Area Network, CAN)通信单元、单体电压模拟单元、温度模拟单元、总电压模拟单元、总电流模拟单元、绝缘电阻模拟单元、驱动检测单元。硬件方面：本文对方案中各个硬件单元的设计原理、电路原理图、印刷电路板进行详细介绍。软件方面：本文制定了上位机和底层硬件的详细通信协议，并对各个测试单元底层单片机软件原理框架和具体的实现流程以及代码进行了详细的剖析。上位机开发选用的 LabWindows/CVI 开发平台，并对其基本的设计流程、核心技术难点和上位机界面进行介绍。

最后对各个硬件功能单元的输出进行了校准并结合开发的上位机对样品 BMS 进行试验，校准试验数据表明测试平台各个硬件单元具有较高的输出精度，且输出稳定；样品 BMS 的试验数据验证了平台的设计功能和实际使用效果，文末对测试平台的不足之处进行了指出，并提出了改进建议。

关键词： 电池管理系统 测试平台 CAN LabWindows/CVI

华中科技大学硕士学位论文

Abstract

Battery Management System (BMS) as the electric vehicle battery system "brain", it plays an important role in the electric vehicle safe operation, recharge mileage and life, so many domestic and foreign universities and Enterprises and research institutes take a long term research on the battery management technology, and a large number of research results have been applied to electric vehicles. China's battery management system industry has begun to take shape. With the arrival of the battery management system industry, its necessary to take a rigorous test before it put into practical.

In this paper, it take the electric car battery management system test platform as the research object. Under a detail understanding about the battery management system, it develope the hardware implementation program of battery management system the test platform. The test platform adopts the master-slave design structure, which covers the controller area network (CAN) communication unit, the single voltage simulation unit, the temperature simulation unit, the total voltage simulation unit, the total current simulation unit, the insulation resistance simulation unit, Detection unit. In hardware aspects: This article give a detailed description on design of the hardware unit, circuit schematics, printed circuit board of the test platform. In hardware aspects: This paper develope a detailed communication protocol between the host computer and the underlying hardware, and analyze the software framework and the concrete realization process and the code of the chip in each test unit. The human interface selecte LabWindows / CVI development platform, and it introduces the basic design process and the core technical difficulties and the computer interface.

Finally, the paper give the detailed calibration and testing process of the test platform. The calibration test data show that each hardware unit of the test platform has high output precision and the output is stable. The test data of the BMS verifies the

华中科技大学硕士学位论文

function of the test platform. At the end, It point out the shortcomings of the test platform, and give the recommendations for improvement.

Keywords : Battery Management System Test Platform CAN
LabWindows/CVI

华中科技大学硕士学位论文

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 绪论	
1.1 研究背景及意义.....	(1)
1.2 国内外研究现状.....	(1)
1.3 论文主要研究内容.....	(4)
2 BMS 的结构以及功能分析	
2.1 BMS 的结构.....	(6)
2.2 BMS 的功能.....	(6)
2.3 本章小结.....	(19)
3 电池管理系统测试平台硬件设计	
3.1 需求分析.....	(20)
3.2 整体方案设计.....	(20)
3.3 功能单元设计.....	(23)
3.4 本章小结.....	(41)
4 测试平台的软件设计	
4.1 系统协议.....	(43)
4.2 底层程序设计.....	(46)
4.3 上位机软件设计.....	(51)
4.4 本章小结.....	(55)
5 测试平台的校准以及功能试验	
5.1 校准试验.....	(56)
5.2 BMS 样品试验.....	(59)

华中科技大学硕士学位论文

5.3 本章小结.....	(61)
6 总结和展望	
6.1 全文总结.....	(62)
6.2 本文展望.....	(62)
致 谢.....	64
参考文献.....	65
附录 1 在校期间发表的论文.....	69
附录 2 热敏电阻分度表.....	70
附录 3 部分 PCB 图纸.....	72
附录 4 核心代码.....	74
附录 5 试验数据.....	83

华中科技大学硕士学位论文

1 绪论

1.1 研究背景及意义

由于能源危机和环境污染问题，以及节能环保的观念深入人心，电动汽车已然是大势所趋。电动汽车动力源绝大部分是锂离子电池组，该电池组通过大量的单节电芯串并联，其容量大、需要工作在特定的安全区间，因此需要电池管理系统进行管控，以此来保证电池组的安全和高效使用^[3]。

电池管理系统作为电动汽车的核心技术，国内外高校以及科研院所和企业对其进行了广泛深入的研究，我国的研究始于上世纪 90 年代，经过 20 年的发展，目前 BMS 产业初具规模，业内认为，在新能源汽车快速放量的推动下，电池管理系统市场规模将同步扩张，预计到 2020 年将达 220 亿元以上^[1]，拥有广阔的前景。

在这样的背景下，市场上出现了纷繁复杂各式各样的 BMS，部分产品质量很难保证，因此对 BMS 进行有效的质量检测和评估非常必要。

国家工信部于 2012 年 7 月份颁布实施了《电动汽车用电池管理系统技术条件》代号 QC/T897-2011^[4]，经过近年的发展，BMS 测试平台取得了阶段性的成果，然而核心技术仍掌握在国外的公司手里，采用国外的测试平台价格昂贵，不利于 BMS 测试平台的推广，国内其他一些测试平台则功能单一，多数不能满足全面测试的要求，因此设计一个功能全面，价格适中，操作简便的 BMS 测试平台具有巨大的价值。因此本文的主题是--BMS 测试平台的设计和研发。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外 BMS 发展现状：

BMS 作为新能源汽车的核心技术难点，一直作为国内外研究的焦点。BMS 致力于提高电池组整体的效率，增加电池的使用时间，保证整包电池的安全和可靠使用。随着电池使用场景的变化，作为电动汽车上的动力源使用，BMS 的要求提升到

华中科技大学硕士学位论文

了汽车级，功能方面，由之前的简单的监测，开始向智能化方向发展，如安全监测、故障诊断，系统健康度、电池剩余电量估算等。通过 CAN 通信网络与整车控制器、充电机进行信息交互和智能充电，为了提高汽车的驾驶体验，通过仪表盘实时了解电池组的关键参数信息，防止过放和过充，保护电池系统提高使用寿命，电池管理系统将更加可靠，安全，智能^[5]。

BMS 的研究起源于美国，目前美国也一直走在前沿，美国能源部在 1991 年就成立专门机构从事 BMS 方面的研究工作。美国 A123 的电池管理系统可以检测出锂离子电池单体的电压、模块温度，采用高低压分离模块高压板通过风流器对电流进行高精度检测、过流硬件保护、充放电高压检测，通过数字信号处理单元对电池组系统进行控制。

亚洲方面发展最好的是日本，其丰田、本田等企业一直着力推进电池管理系统研究。韩国方面利用研究院所和学校的优势开发出了许多 BMS 相关产品，其研制的 BMS 如 SAMSUNGSDI，其可以实现 40 串单体的热电参数检测，此外还能实现动态均衡功能^[6]。

欧洲方面，成绩最为显著的是德国，其成型的产品很多，如 BADICHEQ 和 BADICOaCH，以及 B.H auck 设计的 BATTMAN 电池管理系统^[6]。

除上述 BMS 产品有了飞速发展，BMS 相关的专用电子器件也获得了飞速发展，如 Linear、AD、TI 等公司提供专用采集芯片，Maxim、Semitec、GE 等提供传感器芯片，Maxim、ADI、TI 提供 A/D 转换芯片^[2]。

总体而言，海外 BMS 已经实现规模化、产业化。

我国电动汽车方面的研究，开始于十五期间，其中关于 BMS 主要做了如下方面的研究，电池组热电数据的采集、电池组剩余电量估算、电池组各个单体一致性及均衡控制、总线通信、电池组充放电控制、热管理、故障诊断等^{[11][12]}。

我国通过产学研紧密合作，催生了一批优质企业^[10]，这些企业主要有三类，其中专做 BMS 厂商，如均胜电子、惠州亿能电子、杭州杰能动力、新能源科技有限公司、杭州杰能动力，上海中科深江等，依托自主研发及技术积累，拥有众多核心科技及自主知识产权，专业 BMS 厂商占据着 6 成的市场份额；第二类主要是

华中科技大学硕士学位论文

电池厂，如亿纬锂能、宁德新能源、深圳比克等，这部分企业占 10%。此外作为电动汽车生产企业为了提高市场竞争力，掌握核心技术，加大了电池管理系统的研发投入，康迪、比亚迪、长安新能源占据了市场的前三的位置，将电动汽车和 BMS 系统研发集于一身，有效的降低了成本，提高了研发效率^[13]。

总体而言，随着政府的扶持以及国内各界的努力，新能源汽车在国内得到了很好的推广，也涌现出一批专业的电池管理系统生产厂家。但相较于国外还有很长的路要走。

在国外车企，BMS 作为整车生产的一个汽车零件，从功能定义、产品设计开始由车企研发主导，寻求技术可靠的第三方研发机构进行设计，最后寻找制造生产企业，整个环节有车企、研发机构、生产公司三方共同参与。研发测试生命周期少则 1~2 年，多则长达数 10 年。国内车企技术研发投入匮乏，多数车企扮演的仅仅是“买家”身份，电池管理系统多事电池生产商和第三方电子厂设计生产，从设计到量产周期通常不到一年，此外国家没有统一强制的检测标准，因此产品良莠不齐^[7]。

1.2.2 BMS 测试设备国内外研究现状

我国 BMS 相关的标准实施于 2012 年，该标准是国家工信部联合相关技术组织制定，标准文件中规范了 BMS 的测试条件^[4]，此举极大的刺激了 BMS 测试的发展，测试方法的也从传统的实车测试，或者实际电池包的测试，慢慢的独立成单独的 BMS 测试设备。以往 BMS 的测试没有独立出来，是包含在电池包的整体进行测试，这种测试方案周期长成本高，存在一定的危险性，不能模拟某些极限工况，而现在一般的方案是使用电池模拟单元并整合其他信号模拟单元或专用测试设备搭建专业的 BMS 测试平台。近几年，国内外在测试平台方面都取得了比较快的进步。

英国 Pickering 公司研制的电池模拟器 41-752，41-752 是 6 通道电池模拟器，每个通道能够为负载提供高达 7V 和 300mA 的电流，每个通道都有独立的检测线，每个通道与地面完全隔离，并且允许通道串联连接，一个机箱可扩展到 108 串，一个模拟器的价格需要 2 万 7 千元，该模拟器是该公司专为电池管理系统测试设计，可通过集成实现 BMS 的热电参数精度综合测试。

华中科技大学硕士学位论文

类似的有德国的 dSPACE 公司研发的 EV1077,4 通道,仿真范围为 0 到 6 V,整个工作温度范围内的精度达到 ± 1.5 mV,每个通道电流为 1 安培,可以并行运行,可扩展,单个机架可扩展到 32 通道,实现 32 节电池的串联模拟。

国内方面,从测试平台的专利申请情况来看,测试平台大都是针对 BMS 的部分功能进行测试,全面的测试设备较少,比较有代表性的如哈尔滨工业大学联合企业申请的专利方案,该方案以美国国家仪器公司产品 PXI 系统为核心搭建了底层硬件,并结合虚拟仪器开发平台,搭建了符合国家测试标准的全面的 BMS 测试平台,同济大学申请的一种电池管理同的硬件在环测试装置,该装置包括上位机、xPC 工控机,故障模拟电路板、CAN 通讯板卡、两个编程电源、模数和数模输出输入板卡等,该装置能够实现设定故障的模拟。

惠州市亿能电子有限公司研制的便携式储能电池管理系统测试装置,该装置包括电压采集功能测试单元、电流采集功能测试单元、温度采集功能测试单元、绝缘功能测试、以及输出单元。该装置可以对特定的 BMS 进行测试。

合肥国轩高科研制的电池管理系统的验证测试平台,其包括公共测试用件和专用测试用件,共用测试用件包括多个电池模块、CAN 分析仪、PC 上位机、信息触摸屏、高压箱和低压供电电源,以及专用测试用件包括直流充电桩、电池充放电测试柜和打耐压测试设备。该装置属于传统的电池管理系统测试方法。

中国科学院电工研究所研制的一种用于电池管理系统的测试装置,该装置能够模拟电池组单体电池电压、总电压、总电流和温度状态,能够完成完成电池管理系统与整车 MCU 之间的通讯测试。该装置可以实现对电池管理系统数据采集和通信方面的测试。

1.3 论文主要研究内容

(1) BMS 结构以及功能。此部分介绍了 BMS 的常见结构,并对 BMS 各个功能单元的实现进行了详细的阐述,针对 BMS 的重点功能单元, SOC 估算结合了当下实用的卡尔曼滤波算法^[8]进行了详细的理论和应用分析。

(2) 硬件设计。依据 BMS 的结构和功能对硬件的整体方案进行了设计,并对

华中科技大学硕士学位论文

各个功能单元的硬件设计原理、电路图、印刷电路板等详细过程进行了剖析。

(3) 软件设计。此部分主要阐述了底层软件设计，依据整体硬件设计方案，对上位机和下位机的通信协议和软件框架进行了设计，并对各个框架的关键代码进行了分析，简要的介绍了上位机部分。

(4) 试验分析。首先对测试平台各个硬件单元的输出进行了校准工作，然后针对实际的样品 BMS 进行了测试，给出了具体的实验数据，并对结果进行了分析。

华中科技大学硕士学位论文

2 BMS 的结构以及功能分析

在制定 BMS 测试平台的硬件设计方案之前，BMS 作为被测对象，对其通用的结构和功能进行分析必不可少，因此本章将围绕这两点展开。

2.1 BMS 的结构

目前常用的 BMS，依据具体的应用场景不同，分为集中式和集散式两种^[13]，如结构紧凑电池数目较少的小车一般使用集中式即一块核心控制板承担电池管理系统的所有功能，而大客车、货车等电池数目庞大、布局相对分散的电动汽车则一般采用分布式，分布式主要由一个主控单元和若干个从控单元组成，主控单元负责全局的功能如电池组剩余容量估算、整体的热管理、电池包总电压、总电流的采集等，而从控单元则负责电池单体方面的功能，如单体热管理、SOC 估算、热管理等，同时受主控单元的控制，结构图如下，由于采用主从这种结构，因此集中式结构扩展功能强，可以方便的裁剪和增加从控单元来适应不同应用场景。

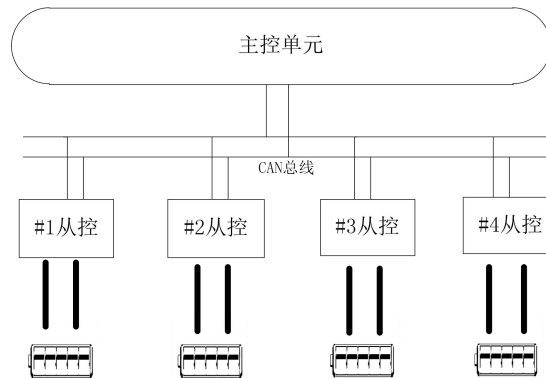


图 2-1 集中式 BMS 结构图

2.2 BMS 的功能

BMS 包括如下功能：

- (1) 数据采集功能

华中科技大学硕士学位论文

总电压、电流、电池模块电压和温度、绝缘电阻等状态参数的采集。

(2) 状态估计

电池状态估计包括 SOC(State Of Charge)估计和 SOH(State of Health)估计。

(3) 数据通信

数据通信是指车上其它设备以及上位机等与 BMS 进行数据交互的功能。

(4) 充电管理

电池组的充电管理是通过 BMS 与充电机的信息交互来实现。

(5) 热管理

热管理指 BMS 依据相关的控制管理算法进行加热或者冷却处理使电池组有一个合适工作温度。

(6) 均衡控制功能

单个锂离子电池达不到实际应用需求，而串联的电池组存在短板效应，因此需要均衡各个模块的容量，以提高电池组的利用效率。

(7) 故障诊断

故障诊断是利用相关的技术手段及时诊断电池组或者各个电池单元的故障，除此之外还有 BMS 本身的故障，并进行预警或采取断路等紧急处理。

2.2.1 数据采集功能

(1) 单体电压测量：

锂离子电池单体电压低，需要串联才能达到车用电压等级，串联的电池单体存在较高的共模电压^[15]，在测量时需要防止其危害测量电子器件。目前常用的方法如下：

方法一浮动地技术检测^[17]、方法二压频转换 V/F 法^[14]、方法三直接电压检测^[16]。

方法四专用芯片法，常用到的产品有 LTC680X 系列，bq76pl536、AD7802、ATA6870、MAX11068^[18]。该方法精度高、体积小、减少了电阻匹配以及温漂等问题，缺点是成本高，单片价格昂贵，但是随着批量化生产，这个方法将成为主流。

(2) 温度测量：

华中科技大学硕士学位论文

电池组充放电能力受到温度工况的影响，此外电池组的工作状况也会从电池组温度上体现。因此准确的温度测量有助于电池组能量的充分利用，并能及时发现可能的异常。常用的电池组温度测量方式有热电阻法、集成温度感应器法^[19]。

(3) 总电压测量

常见的电池组总电压测量方式分为两种：直接测量法和间接测量法。直接测量法：采集总电压常用的方法有电压传感器法和串联电阻分压法两种方式。间接测量法：采集总电压是通过累加所有串联电池的电压值；

(4) 总电流测量

BMS 测量的电流主要用于电池组充放电控制、SOC 估算等，常见的电池组电流测量方式有两种：霍尔传感器和分流器法。

(5) 绝缘电阻测量

依据国标中的规定，可以用绝缘电阻描述电动汽车绝缘状况，电动汽车绝缘电阻的定义：如图 2-2 中，动力正母线和负母线对地的阻值，两者中最小的阻值作为绝缘电阻，由图可见绝缘电阻 R_p 和 R_N 是一个抽象等效的电阻，并不是真实存在的电阻。目前提出的主要研究的几种方法分别是电桥式绝缘检测方法、变频法绝缘检测、漏电流绝缘检测方法、开关式变电桥绝缘电阻检测方法^[23]。国家标准 GB/T 18384 -2011^[22] 中介绍的方法是开关变电桥法。

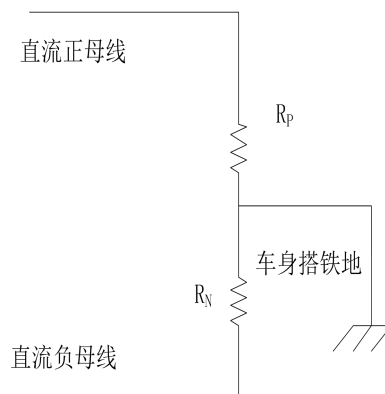


图 2-2 绝缘电阻示意图

华中科技大学硕士学位论文

2.2.2 状态估计功能

(1) SOC 估算功能^{[20][21][24]}

SOC 在数值上定义为电池储存的能量占电池标称容量的比值^[26]，其公式如下：

$$SOC = Q_r / Q_l \tag{2-1}$$

式中： Q_r 为电池储存的能量， Q_l 为电池放出的最大能量以某一恒定电流 I 。

SOC 也可以用下面的式子定义， Q_d 为电池从满电状态释放出来的电量。

$$SOC = 1 - Q_d / Q_l \tag{2-2}$$

锂电池组荷电状态直接反映了电池组的剩余可用容量，是估算电动汽车当前可行驶里程的重要参数，精确的电池 SOC 的估计，可以防止电池过充和过放，对电池具有保护作用，使电池工作在很好的状态下，有利于延长电池的使用寿命，降低维护成本，提高安全性，进一步提升整车性能。

常用的 SOC 估计算法以及优缺点如下表

表 2-1 SOC 估算方法汇总表

方法	算法描述	优点	缺点
放电试验法 ^{[25][26][27]}	通过放出来的电量	准确、简单、易实现	耗时长、不能在线估计、浪费能量
安时积分法 ^{[25][27]}	通过计算电流与时间的积分得到流入和流出的电量，从而计算出 SOC 值	易于实现，在 SOC 初始值、电流和充放电倍率确定的情况下计算准确	需要知道准确的 SOC 初始值，充放电效率和准确的电流值，由于传感器测量不可能完全准确，因此存在误差累积。
开路电压法 ^{[27][30]}	依据开路电压和 SOC 的对应关系，从而计算出 SOC 的值	易于实现，与 SOC 关系密切	需要长时间静置
神经网络法 ^{[25][26][27][30]}	非线性预测，通过输入信号的差异寻求最优处理后得到需要的输出信号，也就是估测值	适用于所有种类的电池	需要大量的试验数据训练
模糊逻辑法 ^{[25][30]}	通过大量的数据建立知识库，通过输入电池直接测量到状态参数，通过模糊推理得到对应的 SOC 估计值	与人类的思维方式接近，可以实现定性分析和推理	依赖于大量的试验数据，且各个不同型号的电池不能实现通用

华中科技大学硕士学位论文

内阻法 [26][27][30]	通过内阻和SOC之间的对应关系，从而估算出SOC	与SOC存在对应关系	内阻很难精确的测量。
卡尔曼滤波法 [25][26][27]	将电池看做一个非线性的动态系统，SOC作为该系统的一个状态，建立电池模型，根据模型的状态方程和观测方程，估算SOC值。	准确性高，可在线估计，对噪声以及初始SOC误差不敏感	对模型依赖，存在较大的计算量

由上表可知，通过某一种算法来实现精准的SOC估计几乎不肯能，工程实际中，一般通过开路电压法^{[28][29]}和安时积分融合的算法来实现，常利用卡尔曼滤波实现测量误差最小化，以使算法具有足够强的鲁棒性。

卡尔曼(Kalman)滤波原理是通过求取最小均方误差来实现最优化。其信号模型包括两类方程，其一量测方程，其二状态方程。其本质是通过量测值对系统的状态向量进行重构，并采取顺序递推的方法，实现对随机误差的消除。

基本的实施步骤：

状态方程：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \tag{2-3}$$

式中， x_k ——k时刻的状态变量；

A ——状态转移矩阵；

x_{k-1} ——k-1时刻的状态变量；

B ——输入矩阵；

u_{k-1} ——K-1时刻的系统激励；

w_{k-1} ——系统激励噪声；

量测方程：

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \tag{2-4}$$

式中， z_k ——k时刻的量测变量；

H ——量测矩阵；

v_k ——量测噪声；

华中科技大学硕士学位论文

如上述 2-3 和 2-4 公式可知，卡尔曼滤波器的分为预测和更新两个阶段，采用递推的方法，此处结合具体的二阶戴维南^[31]等效电路模型进行分析。

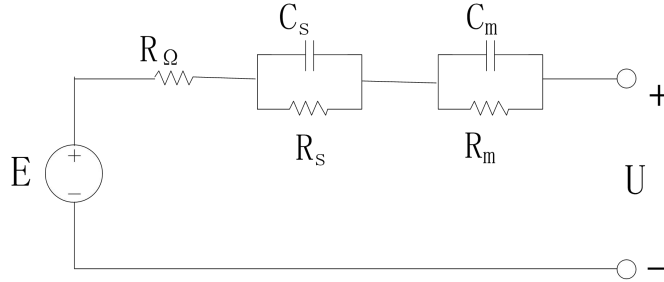


图 2-3 电路模型图

对上述二阶电路模型进行电路原理分析：

令主回路电流为 I_B

$$\begin{aligned} u_{\Omega} &= I_B R_{\Omega} \\ \frac{C_s \cdot du_s}{dt} + \frac{u_s}{R_s} &= I_B \\ \frac{C_m \cdot du_m}{dt} + \frac{u_m}{R_m} &= I_B \end{aligned} \quad (2-5)$$

安时积分法公式：

$$soc = soc_0 - \frac{\int idt}{C_{cap}} \quad (2-6)$$

将上面的式子按照步长 1S 进行离散化

$$\begin{aligned} u_k^{\Omega} &= i_{k-1} R_{\Omega} \\ u_k^s &= i_{k-1} \frac{R_s}{1 + R_s C_s} + \frac{R_s C_s}{1 + R_s C_s} u_{k-1}^s \\ u_k^m &= i_{k-1} \frac{R_m}{1 + R_m C_m} + \frac{R_m C_m}{1 + R_m C_m} u_{k-1}^m \\ SOC_k &= SOC_{k-1} - i_{k-1} \frac{1}{C_{cap}} \end{aligned} \quad (2-7)$$

将其改写为矩阵形式

华中科技大学硕士学位论文

$$x_k = i_{k-1} \begin{pmatrix} \frac{R_\Omega}{R_s} \\ \frac{1}{1+R_s C_s} \\ \frac{R_m}{1+R_m C_m} \\ -\frac{1}{C_{cap}} \end{pmatrix} + x_{k-1} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s C_s}{1+R_s C_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_m C_m}{1+R_m C_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

进一步简化

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s C_s}{1+R_s C_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_m C_m}{1+R_m C_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-9)$$

$$B = \left(R_\Omega \quad \frac{R_s}{1+R_s C_s} \quad \frac{R_m}{1+R_m C_m} \quad -\frac{1}{C_{cap}} \right)^T$$

$$x_k = Ax_{k-1} + Bi_{k-1} \quad (2-10)$$

确定量测方程：

$$u_k = E_k^B - u_k^\Omega - u_k^s - u_k^m \quad (2-11)$$

由开路电压法可得 2-12 的公式：

$$E_k^B = g(SOC_K) \quad (2-12)$$

公式 2-12 的函数方程为非线性方程，因此不能使用经典的卡尔曼滤波，需要用扩展卡尔曼滤波算法^{[27][30][31]}，两者区别在于扩展的算法需要对非线性的部分做线性处理，采取的方法是通过泰勒级数展开，去掉高阶项。

Step1: 设置初始值。 SOC_K 即初始值可以用开路电压法得到，其余状态参数设为 0；

Step2: 如式 2-13 通过 K-1 时刻递推得到 K 时刻的初始估计状态。

$$\hat{x}_{k|k-1} = A \hat{x}_{k-1|k-1} + Bi_{k-1} \quad (2-13)$$

华中科技大学硕士学位论文

Step3: 如式 2-14 递推得到初始协方差估计矩阵。

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q \quad (2-14)$$

Step4: 如式 2-15 观测矩阵。

$$G_k = \frac{\partial g}{\partial x} \quad (2-15)$$

Step5: 计算 k 时刻的测量余量。

$$\tilde{y}_k = u_k - g(x_{k|k-1}, 0) \quad (2-16)$$

Step6: 计算 k 时刻测量余量协方差。

$$S_k = G_k P_{k|k-1} G_k^T + R \quad (2-17)$$

Step7: 计算 k 时刻的卡尔曼增益。

$$K_k = P_{k|k-1} G_k^T S_k^{-1} \quad (2-18)$$

Step8: 计算 k 时刻的最终估计状态。

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (2-19)$$

Step9: 如式 2-20 计算需要的协方差矩阵。

$$P_{k|k} = (I - K_k G_k) P_{k|k-1} \quad (2-20)$$

Step10 递增到下一时刻，重复上面的 2 到 9 步。

(2) SOH 估计^[32]

SOH (state of health)，一般称为健康状况，其描述有两种形式，一种是容量描述形式，另一种是内阻描述形式，功率是不能直接检测的，但是电池对外输出功率的能力与其内阻相关，所以这里也说其反应了功率的性能，其常用的数学定义如下面两条：

$$SOH = \frac{C_m}{C_n} \quad (2-21)$$

其中 C_m 为测量容量， C_n 为电池标称容量。

华中科技大学硕士学位论文

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R}{R_{EOL} - R_{new}} \tag{2-22}$$

式中， R_{EOL} ——电池寿命终止时的内阻^{[30][33][35]}；

R_{NEW} ——电池出厂时的标称内阻；

R ——当前实际所测内阻；

目前应用在实车上的为第二条数学定义，其主要原因为第一条不能实现实时测量。

国内外的关于 SOH 的研究主要分三个方面：通过研究电池容量的衰减来估计 SOH^{[33][34]}；通过研究电池内阻来估计 SOH^{[33][34][35]}；通过对电池的使用情况如充放电次数估计电池 SOH^[33]；

2.2.3 数据通信功能

汽车网络技术最早提出是在二十世纪八十年代，目前已经拥有各种不同功能侧重的汽车网络标准，BMS 的数据通信属于其中的 C 类，这类通信网络侧重于高速闭环控制，在 C 类协议中 CAN 总线^[39]出色的表现在被广泛接受并成为主流协议，目前广泛使用的 CAN 总线高层协议^[38]主要有以下几种：DeviceNet、CANopen、SAE J1939、CAL、PCAL、SDS 及 CAN Kingdom；从实际使用中，总体来看，SAE J1939^[37]是目前最适合应用于汽车车身控制系统的汽车总线协议^[38]。

表 2-2 J1939 协议定义格式

CAN	ID																												
	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
J1939	P			R	DP	PF								PS															SA

J1939 协议与 CAN 协议的 29 位 ID 的对应关系如上表 2-2。

SAEJ1939 和其他协议一样，协议模型包括多个层^[38]，在工程实际设计过程需要熟知和操作的为物理层和应用层。

华中科技大学硕士学位论文

(1) 物理层^[39]

物理层主要描述了电气接口和物理介质，J1939 的信号有以下主要特征：当有数据传输时，CAN_H 和 CAN_L 的压差在 2V 左右。无数据传输时，CAN_H 和 CAN_L 的压差为 0V。

(2) 应用层

制定应用层协议的规则^[39]：保留位 R 不需要动，其默认为 0。DP 即 DATA PAGE 的缩写，中文即数据页，PDU 即 PROTOCOL DATA UNIT 其包括 PF(FORMAT)和 PS(SPECIFIC)，总共包括 16 位，PF 和 PS 各占 8 位，各个数据段代表着不同的含义具体参看 J1939，源地址（Source Address，SA）。在编写协议时，在整个 CAN 网络中，不同的设备对应不同的 SA，且 SA 对应的十进制数值越小则该设备越重要。下面是某车型各个设备对应的源地址。

表 2-3 某电动汽车 CAN 网络分配表

结点名称	地址 SOURCE ADDRESS(SA)
电机控制器	6
电池管理系统	36
车载充电机	64
EPS	70
整车仪表系统	23

优先级（Priority，P）。优先级共有 8 级，最高级 0 和最低级 7，报文优先级可以设置，实际应用过程中，产品序列信息使用最低优先级 7，从控制源发出的报文默认优先级 3，依据实时性可以对优先级进行参数组编码（Parameter group number，PGN）^[39]的确定按照参数组的重要程度来分配，PGN 号有协议数据单元格式（Protocol data unit format，PF）和协议数据单元特定域（Protocol data specific，PS）两个因素来共同决定，按照传输方式^[38]（广播或者一对一传输）的不同可以分配不同的 PGN 号。

2.2.4 充电管理功能

充电过程的管理是通过 BMS 和充电机之间进行数据交互来实现的，GBT 27930-2015^[43]国标中规定充电机和电池管理系统之间通信方式是基于控制器局域网（Control Area Network）简称 CAN 通讯，且规定其通信速率为 250 kbit/s，具体

华中科技大学硕士学位论文

各个位的定义遵从 SAEJ1939 中的规定。为了防止各个不同的通信回路之间的报文干扰，BMS 均配有专门的充电 CAN 接口。

整个充电过程分为六个阶段：如下图 2-4。

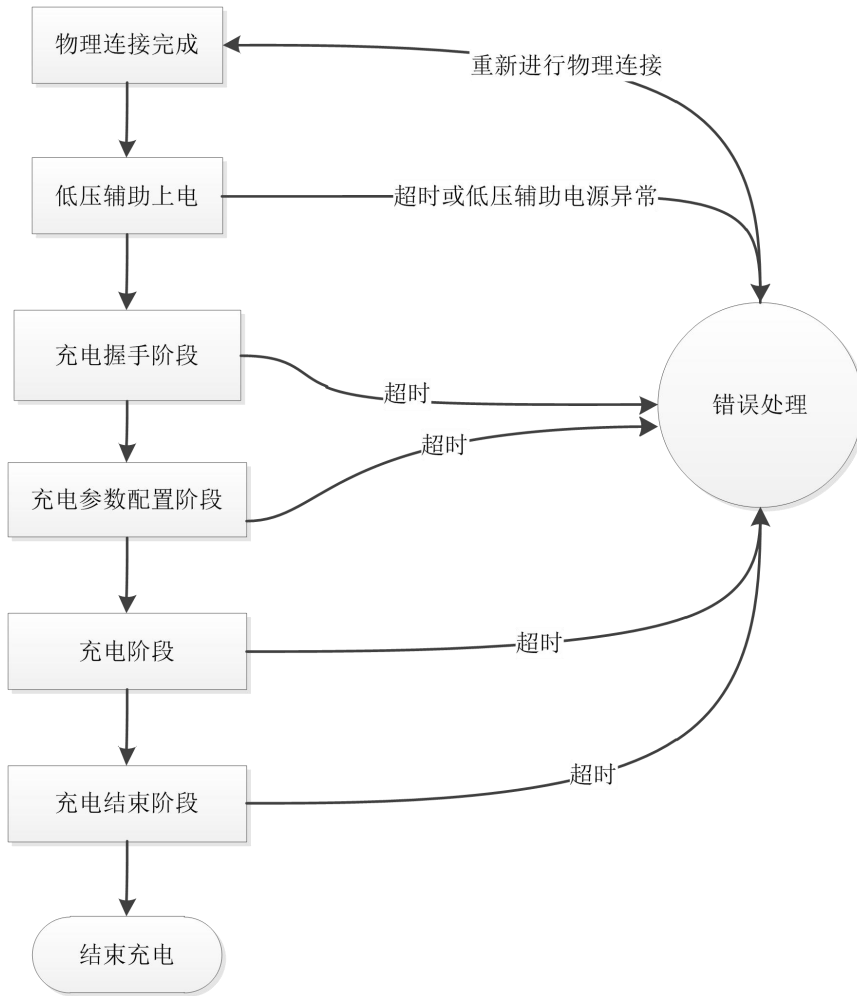


图 2-4 充电管理流程图

2.2.5 热管理功能^{[40][41]}

锂离子电池组需要工作在适宜的温度，其工作温度要求为 25 摄氏度上下浮动 10 度的范围，而电动汽车则是在路上跑，日晒雨淋，其温度范围在 -30 到 50 摄氏度的范围内浮动，以上只针对一般情况。此外锂电池组封装在密闭的电池包金属外壳内，电池在充放电过程会产生热量，靠近电池包外壳部分的电池与外界环境发生热交换，解决外界环境温度，而分布在中心部位的电池，在没有辅助热管理装置的情况下，温度会明显高于其他部分的电池，长时间的这种温度不一致的状态，会致使

华中科技大学硕士学位论文

电池的一致性变差，从而影响到整组电池的性能和使用效率，严重的情况可能发生燃烧起火，目前已经有类似事故在新闻中报道，因此需要热管理装置。

电池热管理的目标包括：使电池工作在厂家指定的适宜的温度范围内；使各个电池单体处于均匀的温度场中^[44]，一般认为电池组中各个单体的温度差异应小于 5°C ；保证空气流动性，及时排走电池使用过程中产生的有害物质，保证整个电池环境的安全。

电池组的热管理是通过配套相应的冷却和加热装置来实现。其分类通常依据冷却介质来划分，大体分为3类^[45]，空气冷却^[42]，液体冷却和相变材料冷却^[44]。

2.2.6 均衡管理功能^{[46][48][49]}

驱动电动汽车需要的电池电压高达上百甚至数百伏特，比如说大巴车的工作电压一般在400V以上，而单节的锂离子电池电压不能满足上述需求，此外功率方面单节电池也不能满足需求，因此实际使用过程需要将单节电芯先并联增大输出电流，后串联增加输出电压。串联的各个模组间自然存在木桶原理，且电池在生产过程中各个电池不可能保持完全一致，除了生产过程中会产生不一致，电池的工作环境也会造成上述情况，比如温度、振动等，温度是主要因素，比如电池内部温度场的分布不均匀，温度又影响到电池充放电特性，致使不一致性的出现。

由于个体的差异的存在，导致在充电的时候容量小的容易发生过度充电，放电时容量小的个体则容易发生过度放电^[26]，锂离子电池长期的过充过放会使电池产生不可逆转的损耗，直接影响电池的性能和使用寿命，严重的时候过充过放产生大量热量，引起电池燃烧或爆炸等危险，如果不管则容易发生恶性循环；

均衡方面的研究主要聚焦在均衡控制策略中均衡变量的选取，目前在实际中使用最多的均衡变量是电池的电压，此外还有SOC，由于SOC估算比较复杂，所以基本还是以电池单体电压为目标来均衡，以及均衡电路拓扑结构的研究，其研究的重点在于均衡电路结构的设计和进步，使其控制结构相对简单，均衡效率高，成本相对较低。

电路的拓扑结构如下图的四中可以分为两类，一类通过并联电阻的能量耗散型

华中科技大学硕士学位论文

的均衡结构，另一类是利用储能元件如电感和电容或者能量转移元件如变压器的区别于第一类的非耗散型均衡结构，通过并联电阻消耗能量的结构简单易实现，目前已经有很多专用芯片集成了该结构，其具有代表性的有美信 MAX11068，以及凌力尔特 LTC680x 系列电池管理芯片。

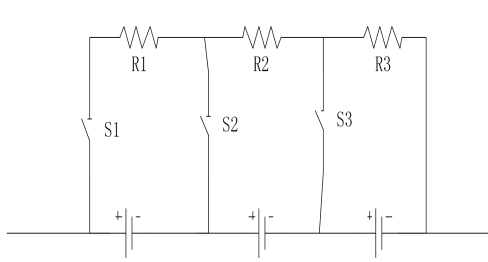


图 2-5 并联电阻

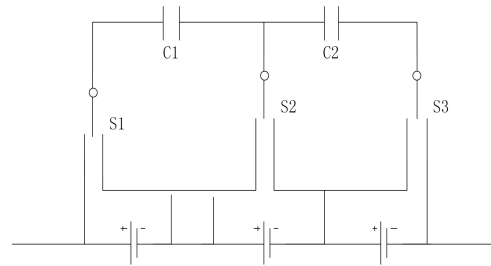


图 2-6 电容均衡

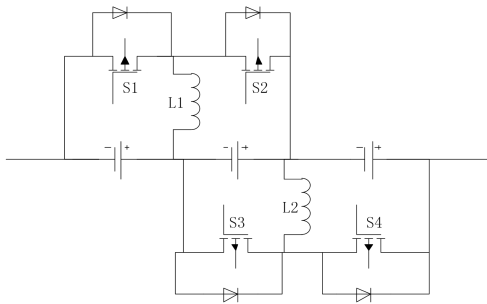


图 2-7 电感均衡

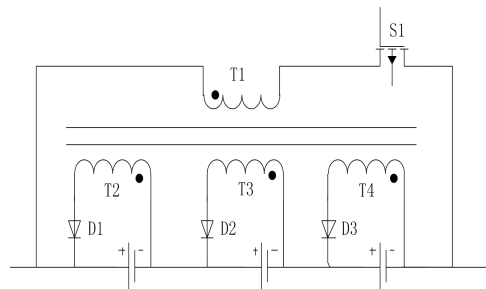


图 2-8 变压器均衡

2.2.7 故障诊断功能

故障诊断技术是系统安全的必要技术，行业标准 QC/T897-2011 明确规定 BMS 必须具备故障诊断功能，具体的诊断项目见表 2-4，故障方面总体分为两类，一类 BMS 自身故障，这主要是由于管理系统的零部件复杂，且绝大多数为电子元器件，存在故障的可能性，比如 BMS 主控芯片故障，温度或者电流传感器故障，采集单元通信故障，BMS 与整车 CAN 通讯故障等；第二类是电池单体以及模组的故障。常用的故障诊断以及预测方法有，基于数学解析模型的方法^[47]，基于信号处理技术的方法，基于模糊逻辑神经网络等知识库的方法^[47]。

华中科技大学硕士学位论文

表 2-4 电池管理系统故障诊断基本要求项目

序号	故障状态	电池管理系统的故障诊断项目
1	电池温度大于温度设定值 1	电池温度高
2	电池温度小于温度设定值 2	电池温度低
3	单体（模块）电压大于电压设定值 1	单体（模块）电压高
4	单体（模块）电压小于电压设定值 2	单体（模块）电压低
5	单体（模块）一致性偏差大于设定条件	单体（模块）一致性偏差大
6	充电电流（功率）大于最大充电电流（功率）值	充电电流（功率）大
7	放电电流（功率）大于最大放电电流（功率）值	放电电流（功率）大

表 2-5 可扩展的故障诊断项目

序号	故障状态	电池管理系统故障诊断项目
1	绝缘电阻小于绝缘电阻设定值	绝缘薄弱
2	SOC 值大于 SOC 设定值 1	SOC 高
3	SOC 值小于 SOC 设定值 2	SOC 低
4	总电压小于总电压设定值 1(与放电电流、温度等参数有关)	总电压低
5	总电压大于总电压设定值 2(与充电电流、温度等参数有关)	总电压高
6	外部通信接口电路故障	外部通信接口故障
7	内部通信接口电路故障	内部通信接口故障
8	电池系统内部温度差大于温度差设定值	电池系统温差大
9	内部通信总线脱离	内部通信网络故障
10	电池连接电阻大于设定值（或者其他等效的判断条件）	电池连接松动

2.3 本章小结

本章对 BMS 的结构和功能做了详细介绍，并结合具体的电路模型和时下流行的卡尔曼滤波算法对 SOC 估算进行详细的理论推算，本章的这些结构和功能的分析是后面测试平台方案制定以及软硬件设计的依据。

华中科技大学硕士学位论文

3 电池管理系统测试平台硬件设计

硬件设备是测试平台的根基, BMS 测试平台硬件系统的功能为接收来自上位机的指令模拟输出电池组的热电参数。本章将围绕这一功能, 并结合前一章的内容展开具体的设计工作。

3.1 需求分析

依据第二章介绍, 电池管理系统的主要作用, 采集电池组各个参数, 如单体电压、温度、总电压、总电流、绝缘电阻, 通过采集到的基本的电池信息, 做出决策, 如是否启动风扇或者其他执行机构进行热管理、均衡管理、故障处理; 并对相关的参数如 SOC 和 SOH 进行估计, 并将信息整理发送出去, 同时和整车控制器以及充电机进行通信实现数据共享和控制。因此作为其测试平台, 需要能模拟其测试的各项参数, 并能对其输出信号如控制风扇或其他执行机构的信号进行检测, 同时能够对其通信进行检测和数据共享, 并对数据进行分析 and 存储。因此作为其硬件单元需要具备如下几个部分的功能:

- (1) 单体电压模拟
- (2) 单体温度模拟
- (3) 总电压模拟
- (4) 总电流模拟
- (5) 绝缘电阻模拟
- (6) 通信功能 (整车控制器和充电机)
- (7) 驱动单元检测

3.2 整体方案设计

本硬件系统包括单体电池电压模拟、单体电池温度模拟、电池组绝缘电阻模拟、数字量 IO、供电电压的过压欠压测试、电池组电流检测、CAN 分析功能等。系统

华中科技大学硕士学位论文

与 PC 间采用以太网通信, PC 发送控制指令, 实现对电压、温度、绝缘电阻的模拟, 充放电电流的检测, 供电电压的过压欠压检测, 以及对数字量 IO 的控制。电压、温度、绝缘电阻的模拟输出端接入 BMS 对应的检测端口, 待 BMS 检测完成后, 将信息通过 CAN 发送至 PC, PC 将 BMS 的检测结果与本系统的设定值比较, 从而评估 BMS 的性能。为了系统的方便扩展, 系统采用了主从控制设计, 如果有功能需要添加, 只要将实现对应功能的从控模块添加进入主控模块即可。

围绕某公司的 BMS 检测设备系统测试要求以及上述分析设计如下硬件结构框图

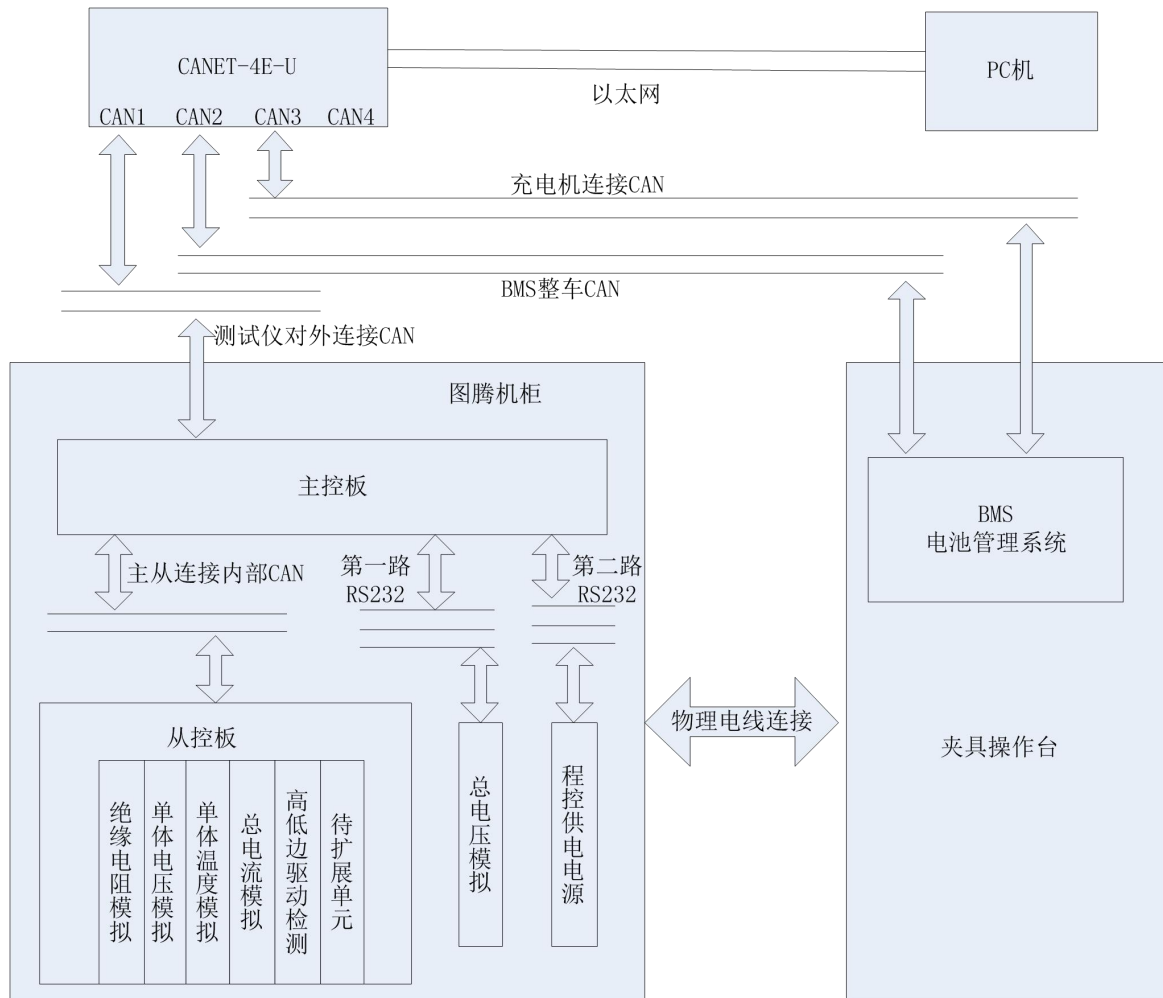


图 3-1 电池管理系统测试平台硬件结构框图

华中科技大学硕士学位论文

表 3-1 BMS 检测设备系统测试要求

检测项目	参数
软件上位计算机	监控软件
系统工作电压范围	DC9~32V
系统工作电流	≤5A (@24V)
5 路继电器高边驱动	9~32V /2A
5 路继电器低边驱动	9~32V /2A
风扇驱动输出	9~32V /5A
预留驱动输出	9~32V /5A
霍尔传感器供电电源检测	5V, 75mA
霍尔方法电流检测	-400~400A 精度: ≤±2%FS
路单体电压模拟	5-60 串电池电压
测量精度反馈	测量范围 0~5V 精度≤±10mv
总电压检测范围	0~800VDC
浮空电压检测	0~800V 内测量精度≤0.5% FS
绝缘模块检测	可实现 10K、20K、30K、51K、100K、200k、510k 绝缘模拟
20 路温度模拟	-40℃~125℃ (电阻模拟)
BMS 采集反馈	精度±1℃
分流器温度采样输入	10K Ω 电阻模拟
充电机检测	与充电机实现数据共享
3 路 CAN 接口	250K 及 500Kbps 可设置, 3 通道支持 SAE J1939、ISO15765 及 ISO14229 协议充电 CAN 通信协议符合标准 QCT842 或 GBT27930
数据保存功能	保存成 EXCEL 格式
工装夹具要求	能同时满足 3 家以上不同 BMS 产品的切换

华中科技大学硕士学位论文

3.3 功能单元设计

围绕上述总体设计方案，对各个功能单元的硬件设计原理，原理图以及设备选型的具体参数展开设计工作。

3.3.1 供电设计

本系统有多个用电单元：BMS 供电；设计的电路板的供电；电路板上的芯片供电；CANET-4EU 供电；总压模拟编程电源编程电源的供电；应用现场能提供电源只有交流 220V 市电，CANET-4E-U 通信模块和电路板的供电都是 24V，BMS 供电要求可以编程控制，电路板上芯片的供电电压为 5V，总压模拟编程电源供电为市电交流 220V。

(1) 24V 输出选用台湾明纬开关电源 NES-100-24，其输入为 220V AC，输出恒压 24V，最大输出功率 100W



图 3-2 台湾明纬开关电源 NES-100-24

(2) BMS 供电电源，一般 BMS 的供电电压在 9 到 32V 之间，不考虑其驱动外部负载如风扇，主继电器等情况下的功率一般小于 10W，由于其电压要求可以配置所以系统选择编程电源，综合价格，体积以及通讯接口等选用了汉晟普源公司的 HSPY-40V/8A，具体参数如下：

输出电压范围：从 0-40V 连续可调

输出电流范围：从 0-8A 连续可调

华中科技大学硕士学位论文

输出最大功率：320W

电压/电流显示：液晶四位显示

负载调整率：电压 0.5%+ 20mV 电流 0.5%+ 2mA

设定值精度：电压 0.1% 电流 0.1%

显示值精度：电压 0.1% 电流 0.1%

设定值分辨率：电压：10mV，电流：1mA

显示分辨率：电压：10mV，电流：1mA

纹波及噪声：电压 $\leq 5\text{mVrms}$

通讯接口：RS232

电流 $\leq 3\text{mA}_{\text{rms}}$

机身 185*85*120mm

(3) 芯片供电电源：权衡电路板上器件的功耗需求以及器件体积和成本方面，选择了德州仪器公司的 LM2576-5.0。

主要参数如下：

输入电压：8 到 40V；

输出电压：5V；

输出电流：3A；

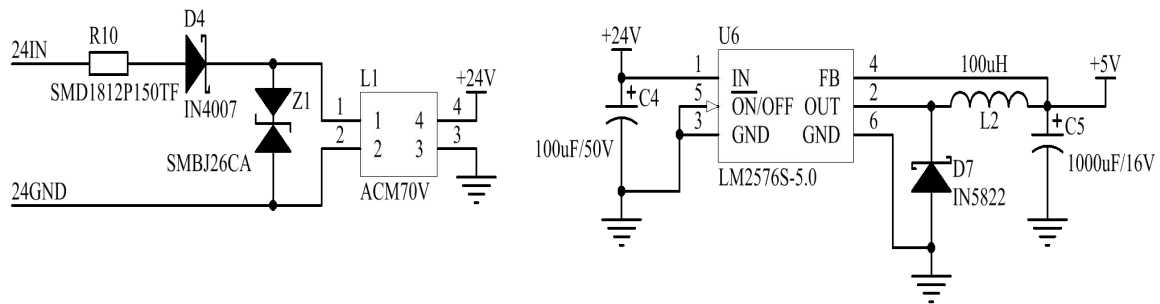


图 3-3 直流 24V 转 5V 电路原理图

上述电路的输入端的电取自明纬开关电源 NES-100-24。经过测试，该电路可靠，而且输出能力能够达到 3A，测试仪器为周立功公司的电子负载 ZEL6011；

华中科技大学硕士学位论文



图 3-4 ZEL6011 电子负载

3.3.2 主从控制芯片

(1) 主控芯片选择的是 MC9S12XDP512MAL，其结构框图如下：

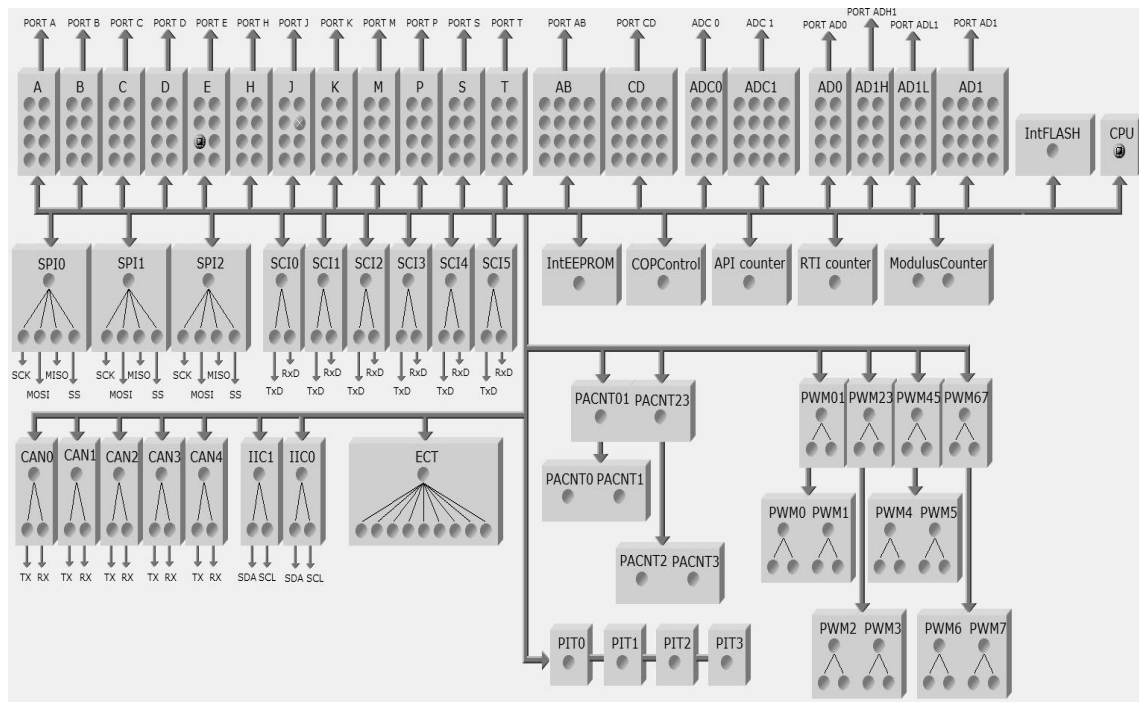


图 3-5 MC9S12XDP512 资源结构框图

MC9S12XDP512 单片机属于恩智浦半导体公司 S12X 系列，该系列是 16 位单片机的主要产品。该芯片的具有宽电压供电范围，可以工作在 3.15V-5.5V 的电压范围内；芯片的使用温度在-40~125℃，达到工业应用温度等级；在处理速度上，该芯片的总线频率可达 50MHz，并且增加了 XGATE 协处理器模块，该模块可以独立

华中科技大学硕士学位论文

提供 80MIPS 的处理能力，主要用于处理各种中断任务，能够直接访问主 CPU 的 RAM、FLASH 和 I/O 口，分担主 CPU 的工作，使 MC9S12XDP512 单片机具有可与 32 位单片机相比的处理能力；在存储空间上，该单片机具有 512K 的程序存储空间，4KB 的 EEPROM 以及 32K 的 RAM，足以满足一般的工业控制系统的需求；在通讯资源上，该单片机提供了 6 个异步串行通讯接口模块 (SCI)，3 个串行外设接口模块(SPI),5 个与 CAN2.0 协议兼容的 MSCAN 通讯模块,2 个 IIC 总线模块；该芯片运行模式多种多样，指令系统强大，寻址方式先进，使得编程方便快捷；正常工作时功耗较低，并设有低压检测复位、看门狗、时钟监视等自我监测手段保证单片机的正常工作。

(2) 从控芯片选择的是 PIC18F2580，其价格便宜，片上资源丰富，PIC18F2580 是微芯公司的 8 位单片机，片上集成了多种通讯接口，异步串行通讯接口模块(SCI)，串行外设接口模块 (SPI)，CAN2.0 协议兼容通讯模块，IIC 总线模块；主频可以达到 40M，可工作在 2.0V 到 5.5V 的电压范围内，拥有 32K 的 Flash，256 bytes 的 EEPROM，8 路 10 位 AD，以及 3 个 16 位定时器。

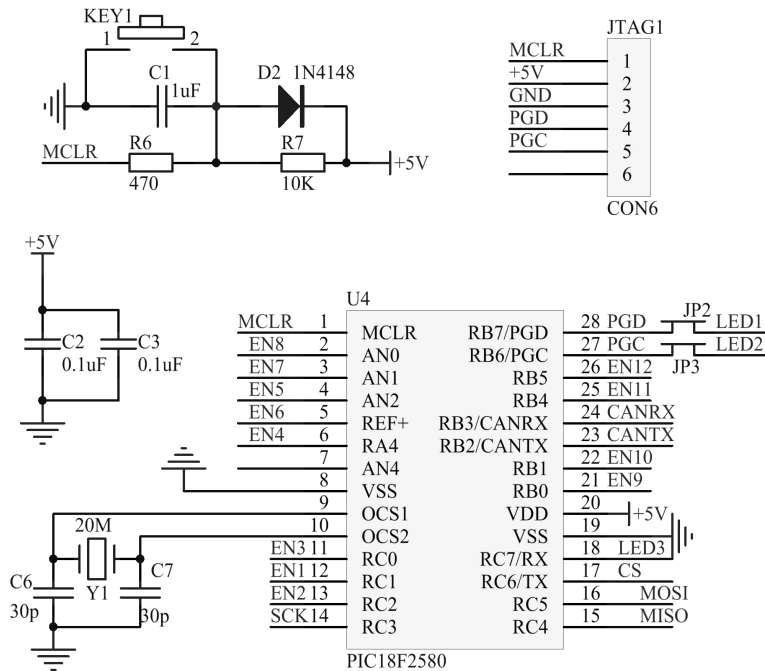


图 3-6 从控板 PIC18F2580 最小系统图

华中科技大学硕士学位论文

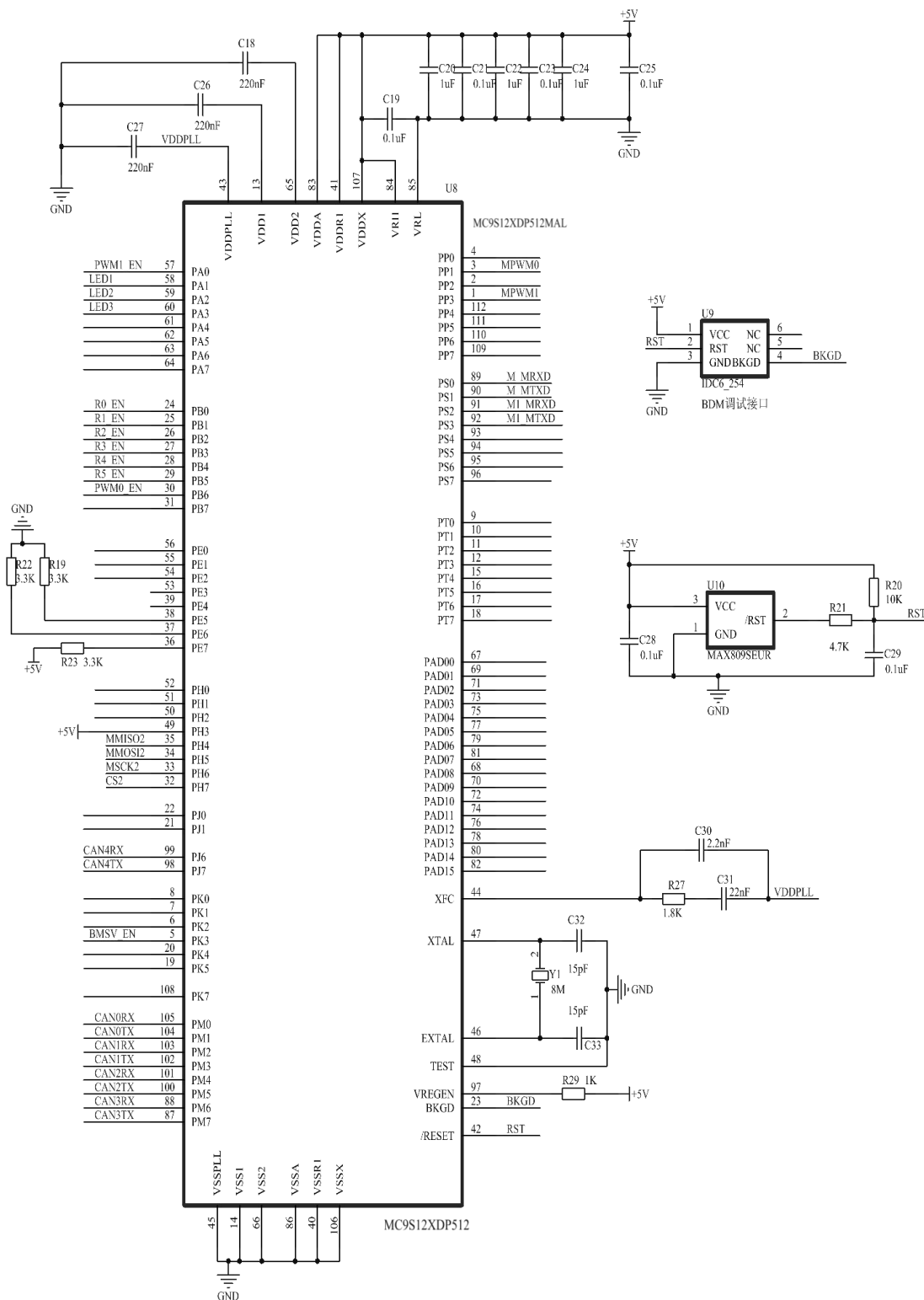


图 3-7 主控板 MC9S12XDP512 最小系统

华中科技大学硕士学位论文

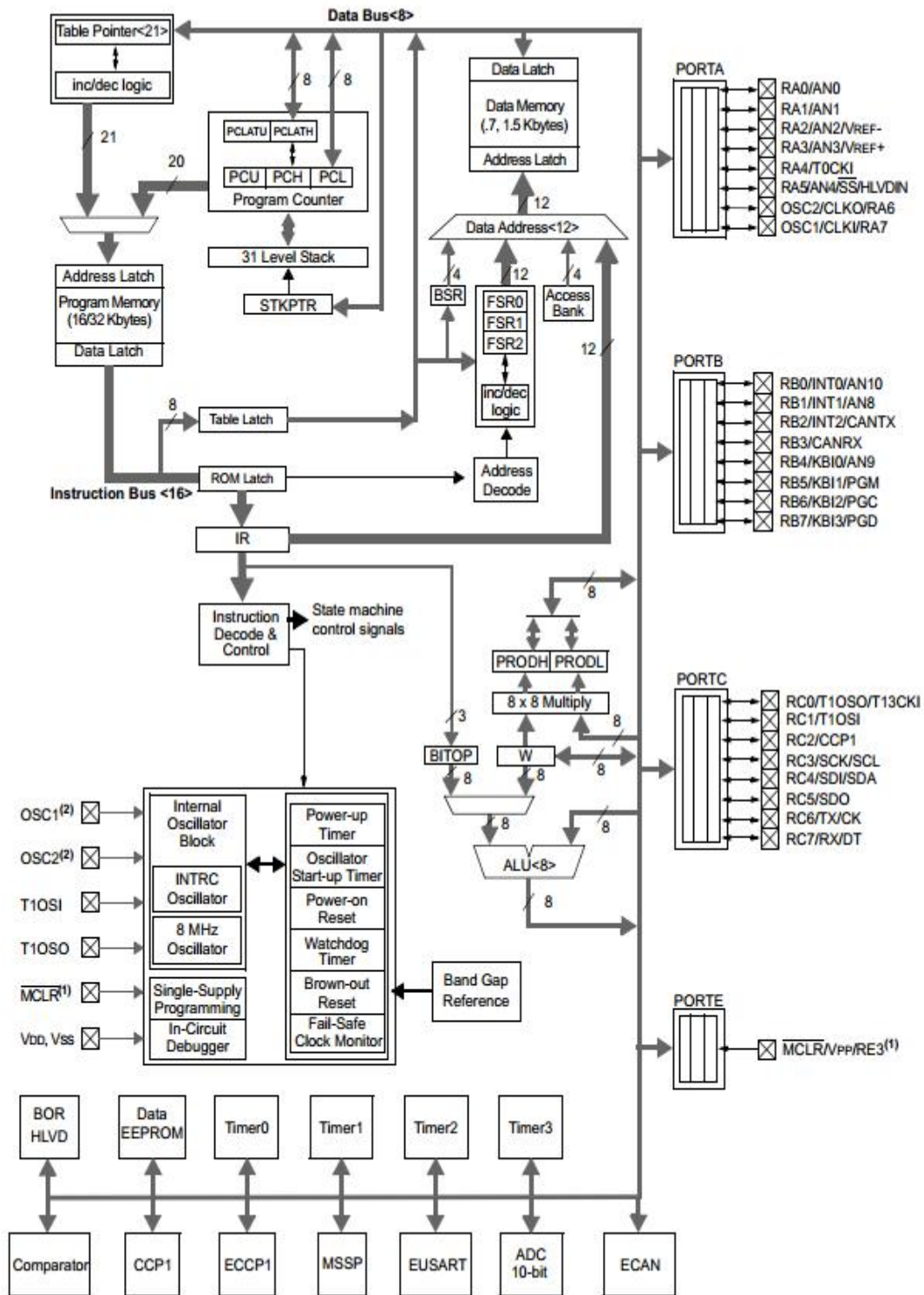


图 3-8 PIC18F2580 资源结构框图

华中科技大学硕士学位论文

3.3.3 通信功能设计

(1) 通信模块选用周立功公司的 CANET-4E-U 模块；
该模块可以实现以太网转 CAN 通信，其支持 4 通道的 CAN 通信，如下图 3-9，这 4 路 CAN 相互独立，可以进行单独配置。



图 3-9 CANET-4E-U 通信模块

(2) 芯片 CAN 通讯：

选择的控制芯片为 PIC18F2580 和 MC9S12XDP512，这两款芯片的信号电平都是 TTL，其高电平为 5V，低电平为 0V，但是 CAN 总线使用的是差分电平：

- 1: 有信号 CANH=3.5V, CANL=1.5V
- 2: 没有信号 CANH=2.5V, CANL=2.5V

因此需要 CAN 驱动器才能实现和外部 CAN 设备的通信。

系统选用恩智浦公司的 TJA1050,其特性如下：

- 1: 与 ISO11898 标准完全兼容
- 2: 高速率（最高可达 1Mbps）
- 3: 总线与电源及地之间有短保护

华中科技大学硕士学位论文

- 4: 输入电平与 3.3V 器件兼容
- 5: 可在强电磁干扰条件下正常运行，具有宽共模范围的差动接收能力
- 6: 过热保护
- 7: 可支持高达 110 个连接节点

驱动电路如下图所示，为了提高电路的稳定性，增强电路的抗干扰能力，并保护主芯片，系统选用了 2 个东芝集团的 6N137，特性如下：

- 1 单通道的高速光学耦合器
- 2 供电电压 5V
- 3 转换速率高达 10MBit/s
- 4 可实现 2500V 电压隔离

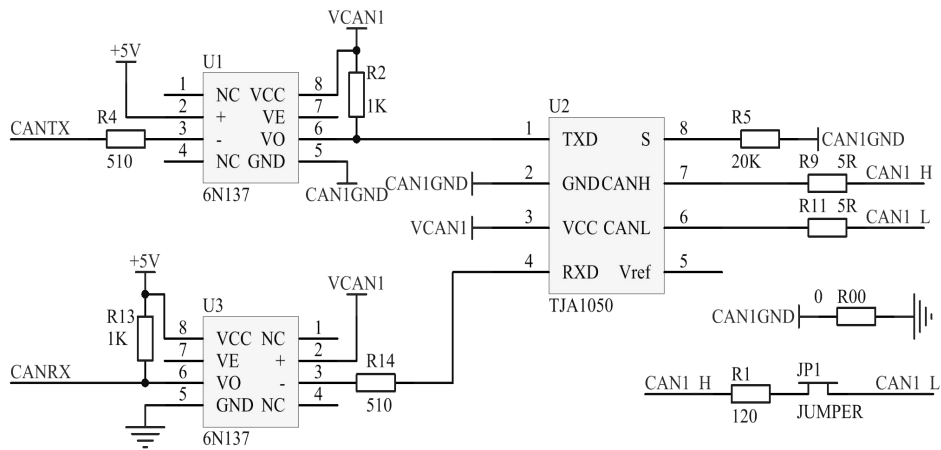


图 3-10 CAN 驱动电路

3.3.4 总电压模拟

综合总电压模拟的精度，以及电压可调节范围，体积大小，通讯接口，以及价格等综合因素，总电压模拟模块选择汉晟普源的编程电源 HSPY-1000V/1A 该电源的技术指标如下：

输出电压范围：0-1000V（连续可调）

输出电流范围：0-1A（连续可调）

功率：1000W

华中科技大学硕士学位论文

电压/电流显示：液晶四位显示

负载调整率：电压 0.02% 2mV 电流 0.02% 2mA

设定值精度：电压 0.1% 电流 0.5%

显示值精度：电压 0.1% 电流 0.5%

设定值分辨率：电压：0.1V 电流 1mA

显示分辨率：电压：0.1v 电流：1mA

纹波及噪声：电压 $\leq 2\text{mVrms}$ 电流 $\leq 3\text{mA rms}$

通讯接口：RS232

机身尺寸：235*85*120mm

该电源可以手动调节也可以通过编程控制，实际使用中，通过 RS232 通讯方式，控制电源的启停，以及输出对应的电压设定值。

3.3.5 单体电压模拟

实际应用过程需要将单个的电池串联起来，所以这里的单体电压模拟，需要模拟这种串联起来的电压结构，且串联起来的各个单体模拟单元又需要能够独立控制，由于需要的只是可以独立编程的单体电压对功率方面没有特殊要求。因此系统选了亚德诺公司的 AD5640，其原理如下图 3-11。

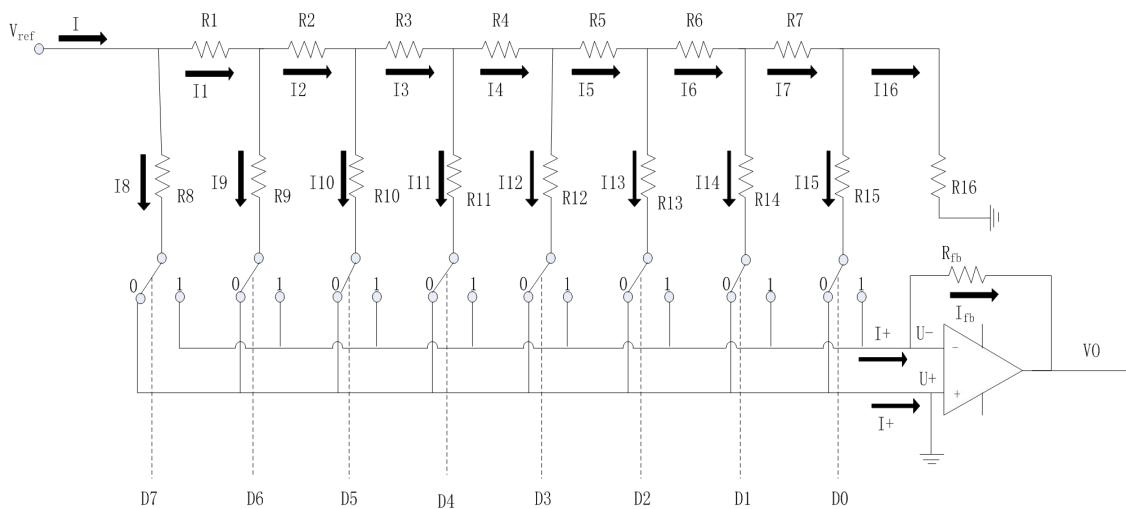


图 3-11 八位的 T 型电阻网络图

华中科技大学硕士学位论文

如上图是一个 8 位 T 型电阻网络，在设计的时候，令 R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7、R_{fb} 的电阻相等，假定都为 R，令 R8、R9、R10、R11、R12、R13、R14、R15、R16 的阻值也相等且为 R1 的 2 倍，假定都为 2R；在分析运放的时候存在一个基本的原则，即虚短和虚断。对上述电路可以列出如下公式：

$$\begin{aligned} U_+ &= U_- = 0 \\ I &= V_{ref} / (((((((R16 // R15 + R7) // R14 + R6) // R13 + R5) // R12 + R4) // R11 + R3) \\ & // R10 + R2) // R9 + R1) // R8) \\ R1 &= R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = R7 = R \\ R8 &= R9 = R10 = R11 = R12 = R13 = R14 = R15 = R16 = 2R \\ R16 // R15 &= \frac{R16 * R15}{R16 + R15} = R \end{aligned} \tag{3-1}$$

将上述式子简化得到：

$$\begin{aligned} I &= V_{ref} / R; I_8 = I_1 = \frac{I}{2}; I_9 = I_2 = \frac{I}{4}; I_{10} = I_3 = \frac{I}{8} \\ I_{11} = I_4 &= \frac{I}{16}; I_{12} = I_5 = \frac{I}{32}; I_{13} = I_6 = \frac{I}{64}; I_{14} = I_7 = \frac{I}{128} \\ I_{15} = I_{16} &= \frac{I}{256} \\ I_+ &= I * \sum_{i=0}^7 \frac{D_i * 2^i}{2^8} \\ V_0 &= -I_+ * R_{fb} = -V_{ref} * \sum_{i=0}^7 \frac{D_i * 2^i}{2^8} \end{aligned} \tag{3-2}$$

上述式子得到的是一个负的电压值，再跟一级反向放大器则电压值变为正数，AD5640 的内部结构图如下，从图中可知其输出计算公式为：

$$V_{OUT} = 2 * V_{ref} * \left(\frac{D}{2^{14}}\right) \tag{3-3}$$

其中 D 为寄存器的输出值，AD5640 有两个参考电压，分别是 1.25 和 2.5V，由于需求的单体电压是 0 到 5V 变化，因此选择 2.5，即 V_{ref}=2.5V，因此最小的电压分辨率为 5V/2¹⁴ 即 0.305mV，则理论精度为 0.006%FS，实际要求精度为 0.2%FS，因此设计理论上满足要求。

华中科技大学硕士学位论文

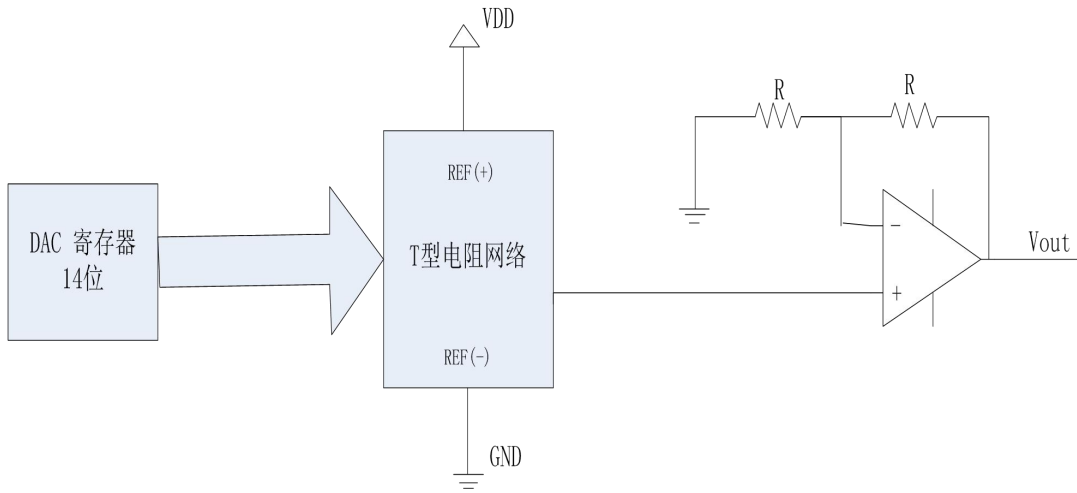


图 3-12 AD5640 内部结构图

完成其理论推算之后，使用 ALTIUM DESIGNER，设计了原理图如下：

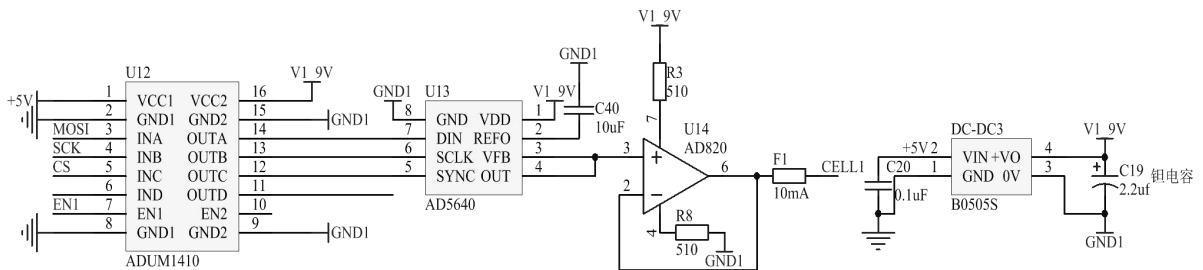


图 3-13 AD5640 单体电池模拟电路图

从图中可以知道 AD5640 采用的串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)，其通信需要 4 根线，它们是数据输入线、数据输出线、时钟线、片选线。

系统只使用了 3 根线，由于系统只需要对 AD5640 的寄存器执行写操作，所以此处没有数据输出的线，为了保证主芯片的安全，选用了金升阳的电源隔离模块，通信隔离此处选用了亚德诺公司的通信隔离模块 ADUM1410，该模块特性如下：

- 1: 双向通信
 - 2: 工作温度最高可达 105℃
 - 3: 数据速率最高可达 10 Mbps (NRZ)
 - 4: 5 V 电源
- 每个通道 4.0 mA (最大值, 10 Mbps)

华中科技大学硕士学位论文

- 5: 可编程默认输出状态
- 6: 16 引脚宽体 SOIC 封装, 符合 RoHS 标准
- 7: VIORM = 560 V 峰值 (最大重复峰值绝缘电压)

综合上述, 电路结构具有较高的安全性能。

以上还只是对单路进行了说明, 实际电池是串联起来的, 因此电路也需要将各个单节的模块串联起来, 为了能够串起来, 各个模块的结构和上面的第一路结构一样, 它的通信和电源都是隔离开来的, 而且这些隔离模块能够耐受至少 500V 的电压, 实际模块的输出电压为 5V, 60 个单体, 最大总压为 300V, 因此可以将各个模块串联起来, 其整体电路图如下:

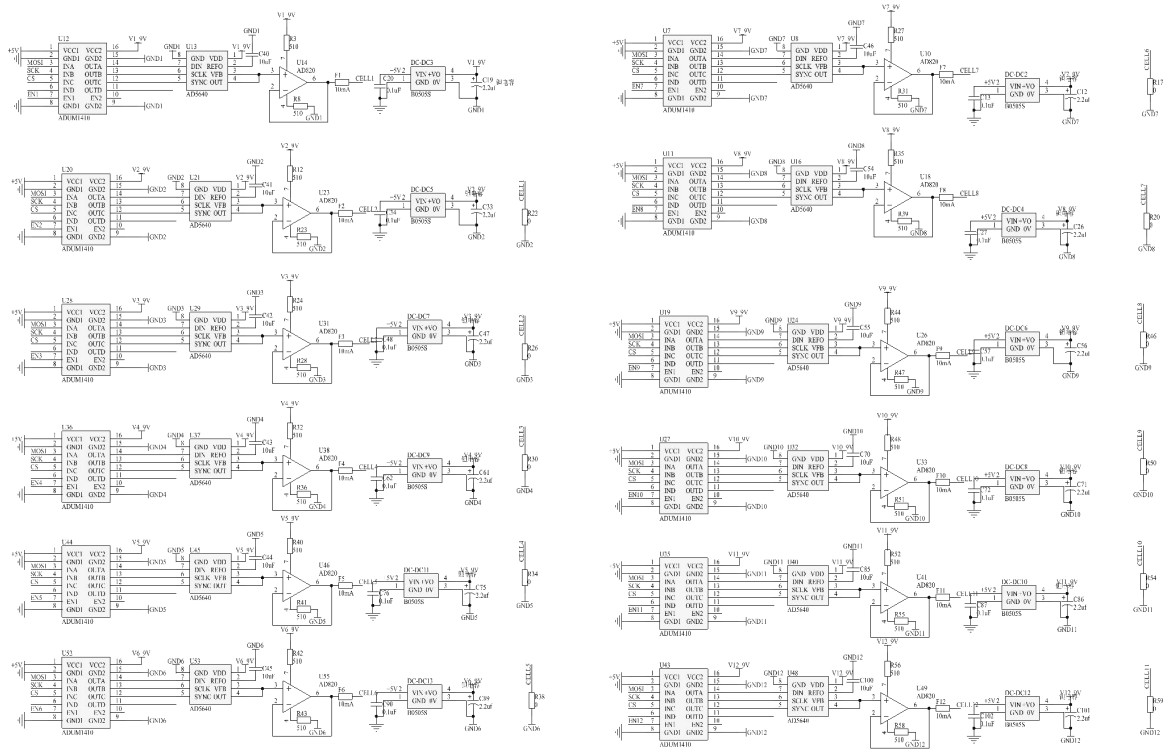


图 3-14 十二路电压模拟模块电路原理图

实际需要的 60 串单体电压, 而上图只有 12 路, 该电路板可以扩展, 将上述的这种电路板选择 5 块, 然后把其按照电池串联的方式连接起来即可, 至此完成了单体电压模块的整体设计。

华中科技大学硕士学位论文

3.3.6 单体温度模拟

从第二章的介绍温度传感器有很多种，温度模拟通过模拟其传感器的输出信号来实现，这些信号总的分三种，第 1 种是数字信号类如 DS18B20；第 2 种是电阻如 PT1000，热敏电阻；还有一种是电动势如热电偶，因为误差比较大，一般不用在电池管理系统中；因此设计温度模拟模块只需模拟上述两类信号，本系统通过电阻值实现温度模拟，实际走访了解许多 BMS 厂商实际选择基本都是电阻这一类，其中 NTC (Negative Temperature Coefficient) 使用最多，NTC 即负温度系数的热敏电阻。其近似公式为：

$$R_T = R_{T_0} * e^{(B_n * (1/T - 1/T_0))} \tag{3-4}$$

式中 RT、RT0 分别为温度 T、T0 (绝对温度) 时的电阻值，Bn 为材料常数；待测 BMS 所用的温度传感器的分度表见附表，该表只列举了从-40 到 123℃所对应的阻值，模拟阻值的方案有多种，1 数字电位器，2 模拟电位器，3 固定阻值的电阻。

数字电位器可以通过单片机控制其输出，如果采用这种方案可以实现各个温度点在线可调，价格相对会比较昂贵，模拟电位器价格便宜，可以通过手动控制模拟多个温度点，固定阻值的电阻则只能实现一个点的模拟；系统选用固定的电阻模拟。通过选择 4 个温度点进行模拟，挑选 1 个高温点和 2 个低温点和一个正常温度点；由于不是所有阻值的电阻都是常用的，结合这样的考虑选择了如下 4 个阻值：

表 3-2 温度和阻值对应关系

T(°C)	R(KΩ)	实际选择电阻 (KΩ)
-15	66.92	68
1	30.25	30
25	10	10
52	3.328	3.3

为了实现一个通道 4 种不同的阻值模拟，在每个通道上配用了 3 个继电器。采集温度的结构图如下，因模拟电阻不需要过高压或者大电流，所以在器件选型或者布线方面没有特殊需求，所以系统继电器选择了常用的 HFD3/5；其工作特性如下：
继电器类型：单稳态继电器

华中科技大学硕士学位论文

线圈电压：DC 5V

动作电压： \leq DC 3.75V

释放电压： \geq DC 0.5V

线圈电阻： $178 \times (1 \pm 10\%) \Omega$

线圈额定功耗：140mW

最大电压：DC 7.5

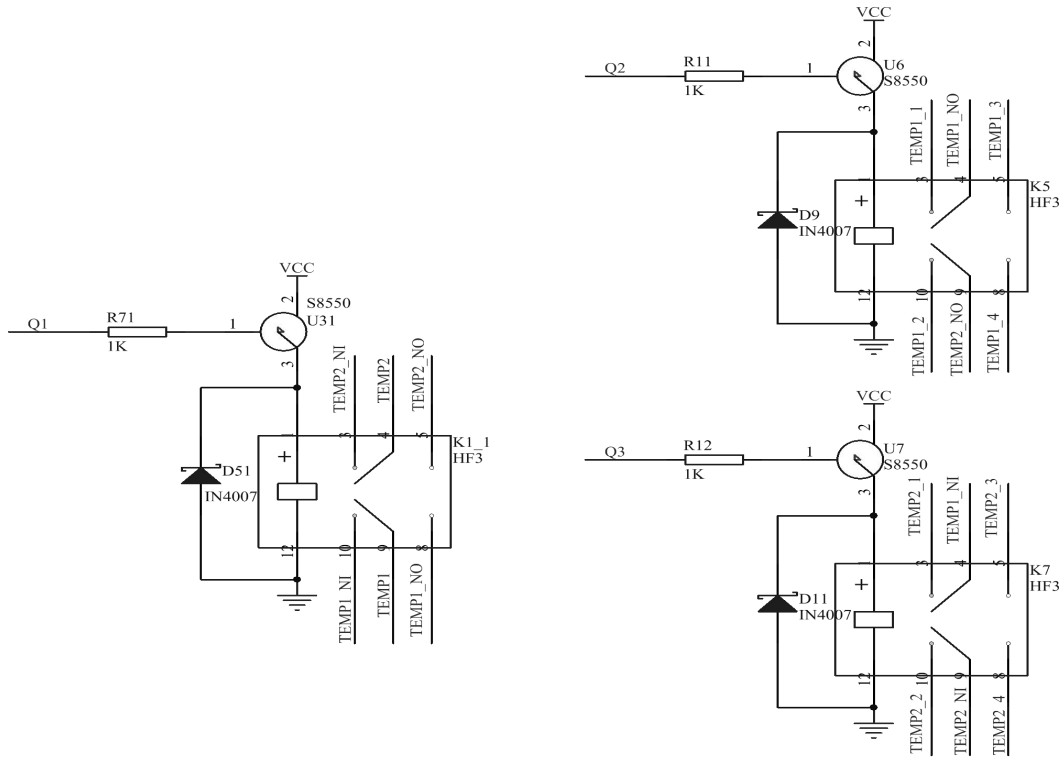


图 3-15 一路温度模拟原理图

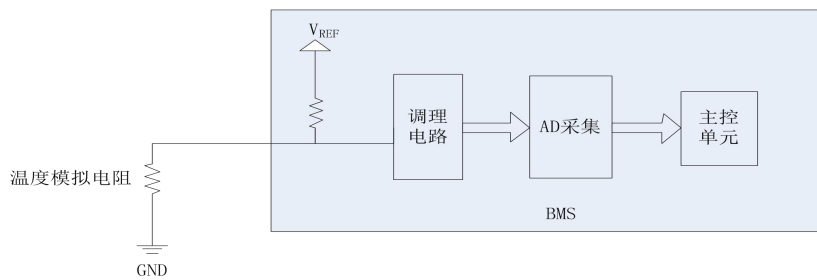


图 3-16 温度采集结构图

华中科技大学硕士学位论文

实际需要 24 路温度模拟，因此需要 3 块上面这种电路板才能满足要求。

3.3.7 绝缘电阻模拟

我国工信部制定的 QCT 897-2011 电动汽车用电池管理系统技术条件标准中谈到的绝缘电阻部分，且绝缘阻值不低于 2M 欧姆。结合第 2 章中谈到的绝缘电阻部分，可以了解到这个绝缘电阻实际上是电池总正和总负对地的电阻，虽然实际这个电阻是个等效的电阻，不是实际在正极对地和负极对地之间串联一个电阻，但是此处需要模拟绝缘检测，此处采用实际的电阻，此电阻连接在正极对地以及负极对地。此处采用继电器控制方案，由于此处属于高压部分，因此选择继电器的时候需要其能实现 DC 1000V 切换，而且能够耐受一定的电流，基于此考虑选择了 HVR05-2A06，其参数如下：

- 1: 线圈电压 (V DC) 5
- 2: 线圈电阻 (Ohm) 150
- 3: 触点形式 1A (一路常开)
- 4: 额定功率 (W) 100
- 5: 切换电压 (V DC) 1000
- 6: 切换电流 (A) 0 至 1.0
- 7: 通电电流 (A) 0 至 2.5
- 8: 击穿电压 (V DC) 高达 6000
- 9: 触点吸合时间: 1ms
- 10: 触点断开时间: 0.1ms

由于其存在两个阻值，即正极对地和负极对地，所以此处分为两个电阻值进行模拟。其绝缘阻值以 $2M\Omega$ 为界限，为了模拟其绝缘电阻偏低故障，选择了 $2M\Omega$ 以下的电阻，总共有如下几个阻值 10K、20K、30K、51K、100K、200k、510k。

如图 3-17 是负极对地 10K 电阻模拟的电路原理图，为了防止继电器失效，高压部分威胁主芯片的安全，此处选用了 TLP521-1，该器件为光耦隔离器件，其能实现 DC 2500V 的隔离，因此能够保证系统的安全。

华中科技大学硕士学位论文

上述电路只有 5 路，但实际上需要 15 路，与之前的一样这个电路部分可以扩展，只需要再增加两块上面的电路板，即可以满足要求。

3.3.9 总电流模拟

测量总电流的传感器分为两类，其一：分流器；其二：霍尔传感器，此处所做模拟不是模拟一个真实的电流，而是模拟传感器的输出信号。分流器输出的信号是 $\pm 75\text{mV}$ 的电压，霍尔传感器输出的信号是 0 到 5V 的电压，或者 4 到 20mA 的电流信号，输出信号均为弱电信号，没有功率要求；单体电压模拟单元已实现 0 到 5V 的电压模拟，此处只需模拟 $\pm 75\text{mV}$ 的电压和 4 到 20mA 的电流信号，具体实现如下：

(1) 4 到 20mA 的电流模拟选择亚德诺公司的 AD5420，其特性如下：

- 1: 16 位分辨率和单调性
- 2: 电流输出范围：4 至 20mA、0 至 20mA 或 0 至 24mA
- 3: 灵活的串行数字接口
- 4: 电源 (AVDD) 范围 10.8V 至 60 V;
- 5: 温度范围： -40°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$

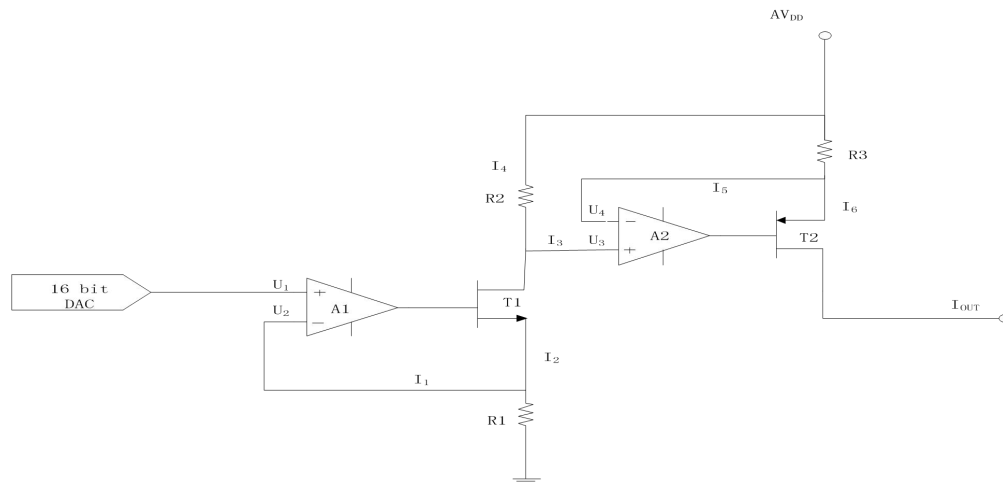


图 3-19 AD5420 芯片内部原理图

AD5420 实现电流可调是通过电流源的原理，如上图依据虚短和虚断，以及场效应管工作原理，可以列出如下公式：

华中科技大学硕士学位论文

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \\ U_3 &= U_4 \\ I_2 &= I_4 \\ I_4 &= I_6 = I_{OUT} \\ I_1 &= I_3 = I_5 = 0 \\ I_2 &= \frac{U_2}{R1} \end{aligned} \tag{3-5}$$

由于 U2 可调可以推出 I2 可调, I2 等于 Iout 因此可以实现电流连续可调, 如果需要将电流约束在 0 到 20mA 只需要选择合适的精密电阻即可。

依据上面的特性可以选择这个器件作为电流模拟单元, 其电路设计如下:

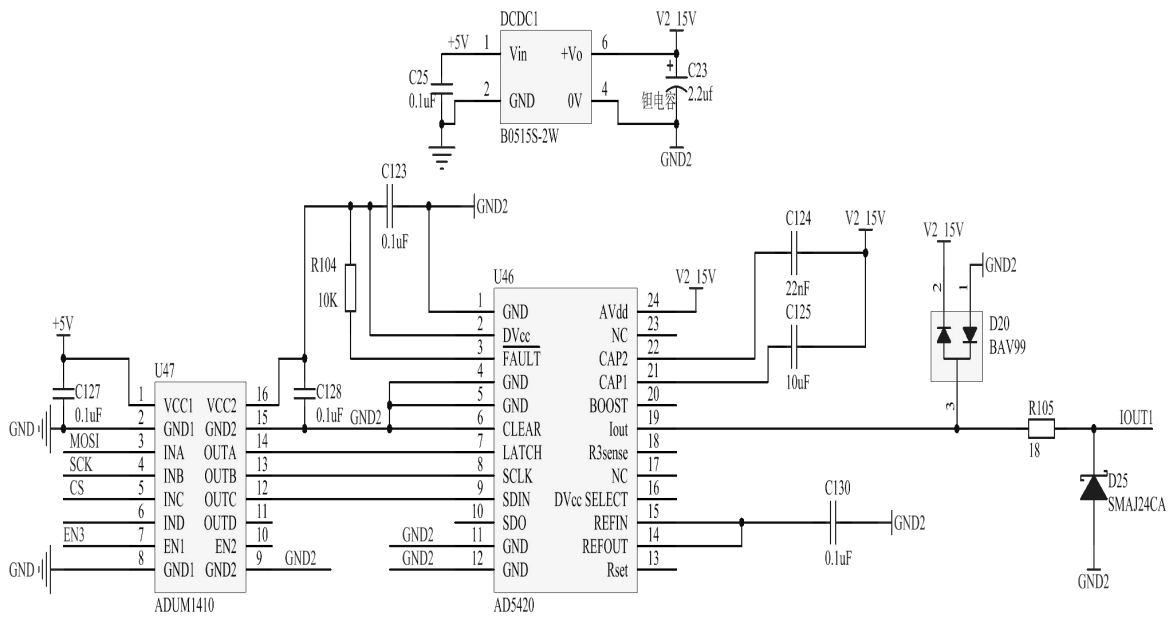


图 3-20 4 到 20mA 电流模拟电路原理图

在 AD5420 的前一级电路也使用了 ADUM1410 作为通信隔离和保护模块。

(2) ±75mv 的电压模拟:

此模拟拆成两部分, 首先必须解决要模拟电压正负问题, 此外还要解决电压范围是 75mV, 拆解成两个问题, 所以首先选择运放必须双电源供电, 即一个正电源一个负电源, 系统已经实现了 0 到 5V 编程可调, 要实现 75mV 的范围内变化, 只需要采用精密电阻分压即可, 考虑到分压后驱动能力的问题, 分压后得到的电压再

华中科技大学硕士学位论文

跟一级电压跟随器提高驱动能力，具体电路设计如下图：

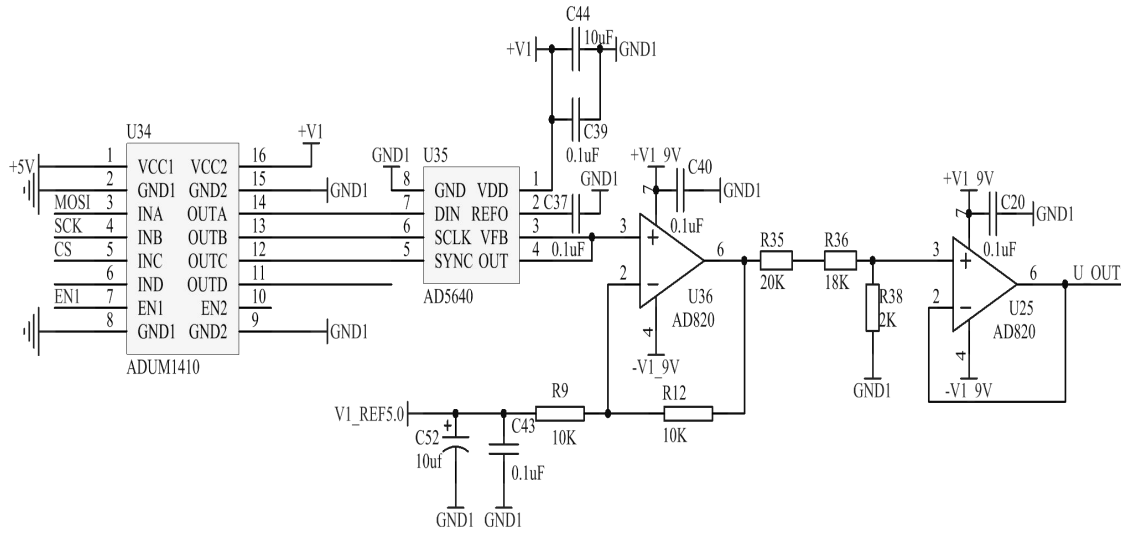


图 3-21 ±75mV 输出电路原理图

令 U36 代表的 AD820 运放的第 2 脚的电压为 U₂，第 6 脚的电压为 U₃，第 6 脚的输出电压为 U₆，令 U25 代表的 AD820 运放的第 2 脚的电压为 U₂₂，第 6 脚的电压为 U₃₃，第 6 脚的输出电压为 U₆₆，利用虚短，虚断的原则，结合上面你的电路，列出如下公式：

$$\begin{aligned} U_3 &= U_2 \\ U_6 - U_2 &= U_2 - 5 \\ U_{66} &= U_{33} = U_{22} = U_6 / 20 = U_{OUT} \end{aligned} \tag{3-6}$$

U₃ 是 AD5640 的输出电压，其值可以在 0 到 5V 变化，调节 U₃ 在 0 到 2.5V 变化的时候，U₆ 的输出值为负数，调节 U₃ 的值在 2.5 到 5V 变化的时候，U₆ 的输出值为正数。倒推 U_{OUT} 的电压值需要在 ±75mV 变化，依据上面的公式，即 U₆ 需要在 ±1.5V 变化，即 U₃ 需要在 1V 到 4V 变化，而 AD5640 可以实现这一功能，因此上述电路理论上可行。

3.4 本章小结

依据第 2 章对 BMS 结构和功能的分析，本章展开了对 BMS 测试平台的硬件的

华中科技大学硕士学位论文

设计。本章首先给出 BMS 测试平台硬件结构框图，然后围绕结构框图中的各个硬件单元展开了设计，设计过程侧重于硬件电路，以及各个功能模块的选型搭配。设计过程充分考虑了实际的应用环境，且接口以及硬件单元均做成可扩展的形式，可以满足不同串数电池管理系统的测试需求。

华中科技大学硕士学位论文

4 测试平台的软件设计

本章聚焦在底层单片机程序设计，一个好的单片机程序应具有一个合理的架构，架构中各个功能分块。程序可以方便的实现各个功能模块的扩充和裁剪。围绕这些原则进行各个单元的软件设计。

4.1 系统协议

为了实现上位机和测试设备的通信，需要制定一套通信协议，协议的制定参照了 J1939 的框架，由于底层设备数量存在变动，比如 BMS 存在多种规格，有的可能是 36 串，有的可能 48 串，所以协议也需要具有可扩展性，此外协议采用应答的方式，即一方发送指令，另一方收到并回应对应格式的信息，基于这样的原则，设计了如下的协议：

表 4-1 通讯协议

模块名称	对应功能	发送 ID	应答 ID	特殊说明
主控模块 (A0)	BMS 供电设置	18C000A0	18D000A0	(A0) 这个代表其板卡地址，每一块电路板在系统中，都有唯一的板卡地址编号。下面括号中符号都是代表同样的含义。
	总电压模拟 800V	18C001A0	18D001A0	
	#1 PWM 波输出	18C002A0	18D002A0	
	#2 PWM 波输出	18C003A0	18D003A0	
	2 路电阻输出	18C004A0	18D004A0	
继电器驱动模块	第 1 块 5 路驱动模拟板 (C0)	18C000C0	18D000C0	此处可以继续扩展，只需要按照表格中的规律往下递增即可，当然也可以裁剪
	第 2 块 5 路驱动模拟板 (C1)	18C000C1	18D000C1	
	第 3 块 5 路驱动模拟板 (C2)	18C000C2	18D000C2	
温度模拟模块	第 1 块 8 路温度模拟板 (D0)	18C000D0	18D000D0	此处可以继续扩展，只需要按照表格中的规律往下递增即可，当然也可以裁剪
	第 2 块 8 路温度模拟板 (D1)	18C000D1	18D000D1	
	第 3 块 8 路温度模拟板 (D2)	18C000D2	18D000D2	

华中科技大学硕士学位论文

	模拟板 (D2)			
第 1 串 12 路电压模拟板 (E0)	模拟 1 到 12 串电压	18C000E0 18C001E0 18C002E0	18D000E0 18D001E0 18D002E0	此处可以继续扩展, 只需要按照表格中的规律往下递增即可, 当然也可以裁剪
第 2 串 12 路电压模拟板 (E1)	模拟 13 到 24 串电压	18C000E1 18C001E1 18C002E1	18D000E1 18D001E1 18D002E1	
第 3 串 12 路电压模拟板 (E2)	模拟 25 到 36 串电压	18C000E2 18C001E2 18C002E2	18D000E2 18D001E2 18D002E2	
第 4 串 12 路电压模拟板 (E3)	模拟 37 到 48 串电压	18C000E3 18C001E3 18C002E3	18D000E3 18D001E3 18D002E3	
第 5 串 12 路电压模拟板 (E4)	模拟 49 到 60 串电压	18C000E4 18C001E4 18C002E4	18D000E4 18D001E4 18D002E4	
绝缘检测模块 (F0)		18C000F0	18D000F0	
总电流模拟模块 (B0)	电压采样	18C000B0	18D000B0	
	-75mV 到+75mV 输出	18C001B0	18D001B0	
	0-5V 电压输出	18C002B0	18D002B0	
	0-20mA 电流输出	18C003B0	18D003B0	
读写板卡地址指令		18000000	180100XX	XX 代表对应的板卡地址编号

系统采用的是主从结构, 上位机操纵的对象是主控板, 主控得到对应的指令, 再操纵从控板, 因此还应该有一套主控板和从控板之间的通信协议, 由于命令都是来自上位机的, 主控板只是起到转发作用, 所以此处主控和从控之间共用上面的主控和上位机之间的通信协议。通过上述协议可知, 区分相同的电路板是通过其板卡编号, 这个板卡编号不是通过硬件的方法实现, 如有些工程师采用拨码开关或者对应的跳线帽来区分各个不同的模块, 这种叫做硬件的方法, 该系统通过软件编号方法实现, 具体流程见图 4-1。

广播读写板卡地址 发送帧

报文 1: (ID: 0x18000000)

华中科技大学硕士学位论文

表 4-2 发送帧

位置	数据名	备注
BYTE1	读写标志位	0X00 读数据 0X01 修改板卡地址
BYTE2	板卡地址位	当第一字节数据为 1 时，将此数写入内存

2、返回读广播帧的命令 返回帧

报文 2: (ID: 0x180100XX) 返回帧 XX 其中 XX 为板卡地址

表 4-3 返回帧

位置	数据名	备注
BYTE1	板卡地址	此处数据为板卡地址
BYTE2	读写状态	0 位读 1 位写

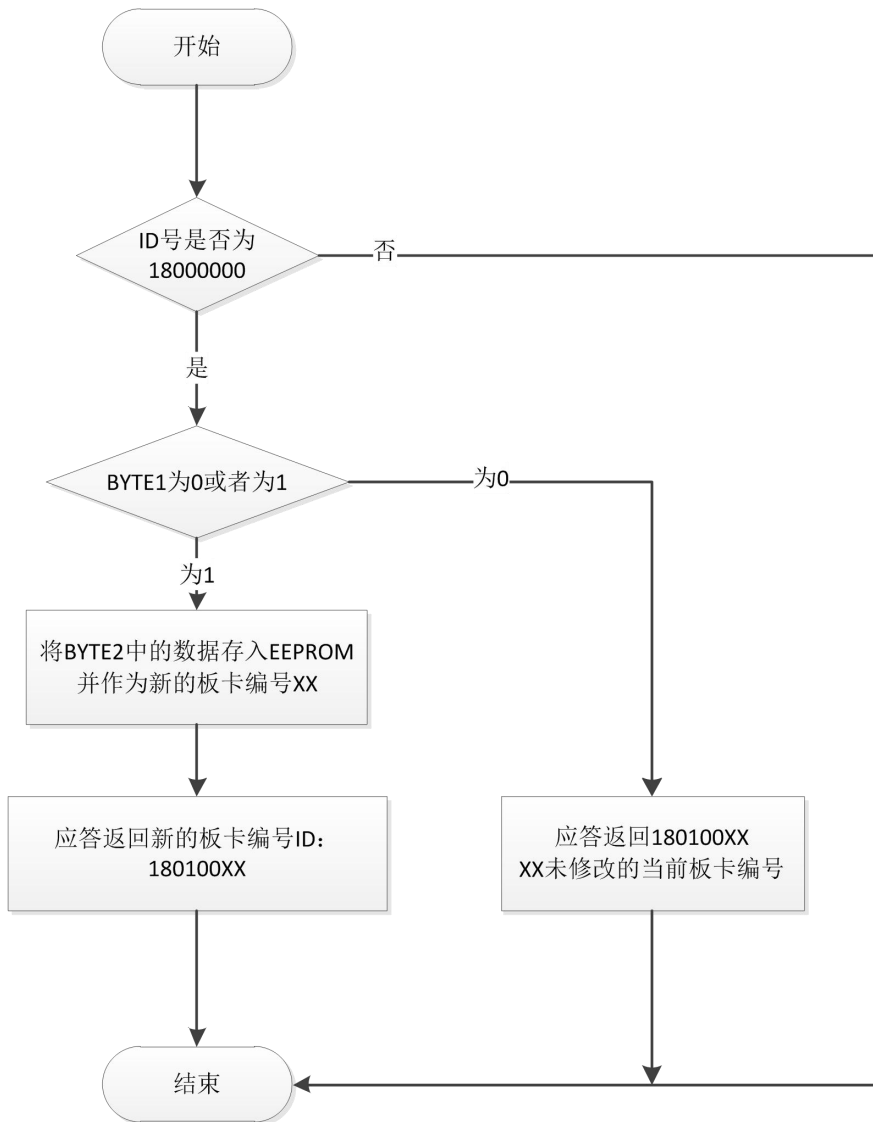


图 4-1 板卡地址修改流程图

华中科技大学硕士学位论文

4.2 底层程序设计

4.2.1 设计原则

底层单片机程序编写和上位机程序编写不同，后者是建立在成熟的操作系统上面的纯软件操作，单片机程序设计是在裸机的情形下进行设计，其设计需要结合底层的硬件，不同的底层硬件相应的程序需要做对应的调整，其一般的设计流程如下：

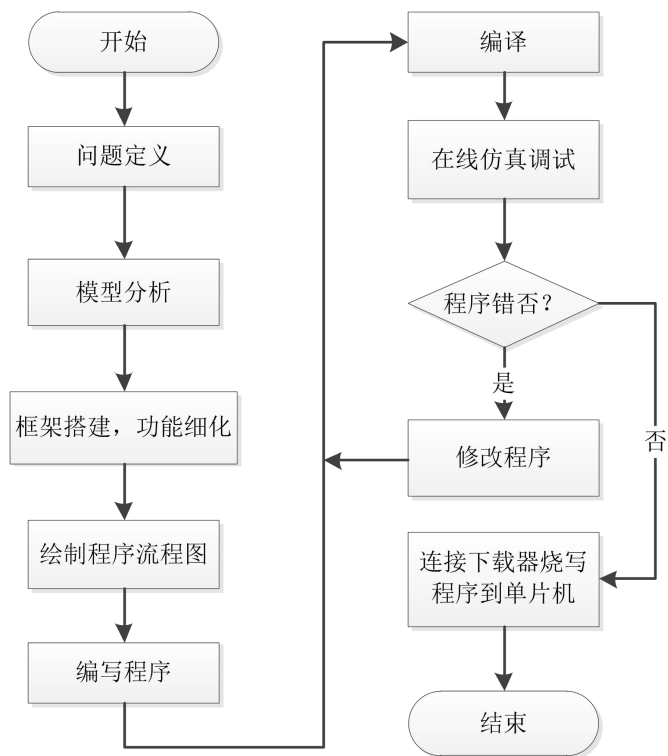


图 4-2 单片机程序设计流程图

问题定义阶段是需求分析即软件需要解决哪几部分问题，明确问题之后是软件架构的搭建。

合理的软件架构是单片机应用软件性能的保障，在明确需求之后，可以把整个系统划分为不同的功能模块，然后依据这些模块的前后逻辑结构，设定一个合理的软件架构，这样 CPU 就可以合理有序的调度各个功能模块。单片机程序一般由一个 main 函数即主程序和各个功能模块对应的中断服务程序所组成，依据各个模块任务的轻重缓急，设定不同的优先级。明确以上基本设计思想之后，就可以开始流程图的绘制，以及软件编程和调试。

华中科技大学硕士学位论文

4.2.2 开发环境以及调试工具介绍

本系统主控板和从控板使用的是不同款控制芯片，所以使用了两个开发环境，两个开发环境分别是：

(1) CodeWarrior

CodeWarrior 系列集成开发环境是 Metrowerks 公司为嵌入式微处理器设计的软件开发工具。本系统使用的软件版本是 CodeWarrior V5.1, 调试工具选择的 USBDM。

(2) MPLAB XIDE

MPLAB X IDE 是 MICROCHIP 公司开发的集成开发环境，本系统使用的软件版本是 MPLAB XIDE V3.26, 开发语言为 C 语言，调试工具本系统使用的 PICKIT 3。

4.2.3 主控板程序设计

主控板的功能：接收来自上位机的指令；回应上位机的指令；解析来自上位机的指令，并依据解析指令种类发给协议规定的对象（从控板、编程电源、主控板上模拟功能单元）；

总结其功能，本质为 CAN 通信数据接收以及转发，围绕此本质，本系统设计如下架构。

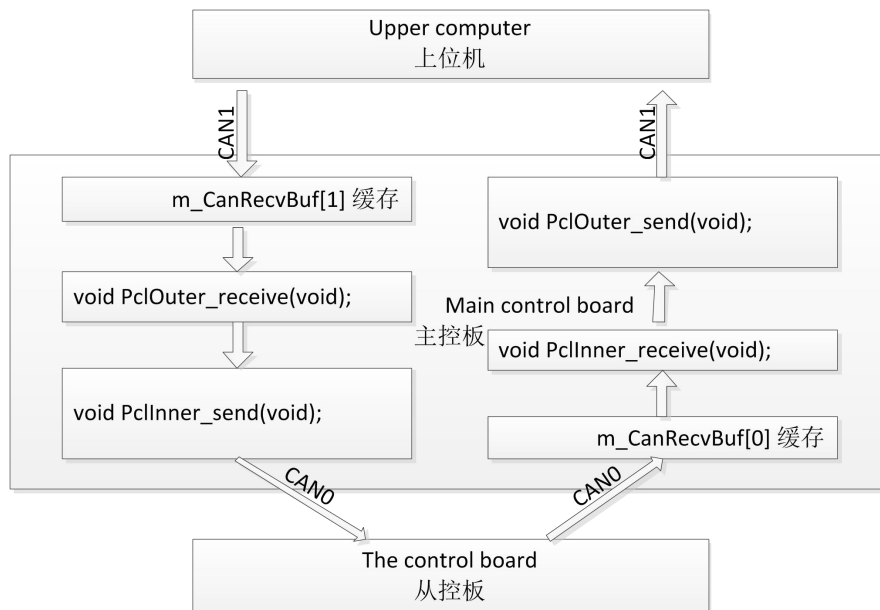


图 4-3 主控板程序架构图

华中科技大学硕士学位论文

主控板的架构中包括 4 个函数，功能分别如下：

表 4-4 主控板框架函数

函数名称	功能
void PclOuter_receive(void);	接收来自上位机的命令，并解析
void PclOuter_send(void);	应答来自上位机的指令
void PclInner_receive(void);	接收来自底层从控板的应答指令
void PclInner_send(void);	发送指令给底层从控板

main 函数设计：

单片机程序包含一个主函数和若干个功能模块中断服务子程序，主函数即 main 函数，在 main 函数中主要实现系统初始化，以及系统日常活动的加载。主函数流程图如下图 4-3：

中断服务子程序说明如下表：

表 4-5 主控板中断服务函数

函数名称	功能
void TI1_Interrupt(void);	产生系统时钟滴答
void CAN0_InterruptTx(void);	接收 CAN0 上面的信息，并将其存入建好的缓存
void CAN0_InterruptRx(void);	将 CAN0 中发送缓冲区中的数据发送出去
void CAN1_InterruptTx(void);	接收 CAN1 上面的信息，并将其存入建好的缓存
void CAN1_InterruptRx(void);	将 CAN1 中发送缓冲区中的数据发送出去
void CAN2_InterruptTx(void);	接收 CAN2 上面的信息，并将其存入建好的缓存
void CAN2_InterruptRx(void);	将 CAN2 中发送缓冲区中的数据发送出去
void CAN3_InterruptTx(void);	接收 CAN3 上面的信息，并将其存入建好的缓存
void CAN3_InterruptRx(void);	将 CAN3 中发送缓冲区中的数据发送出去
void CAN4_InterruptTx(void);	接收 CAN4 上面的信息，并将其存入建好的缓存
void CAN4_InterruptRx(void);	将 CAN4 中发送缓冲区中的数据发送出去

如图 4-4，系统更新时间为 40ms，单片机复位周期为 65ms，此处起到一个双重保护的作用，保护系统的正常运转。

系统日常事务函数说明：

CAN0 和 CAN1 的收发函数基本相同，此处以 CAN1 的收发函数进行讲解，具体参看附表 4。

华中科技大学硕士学位论文

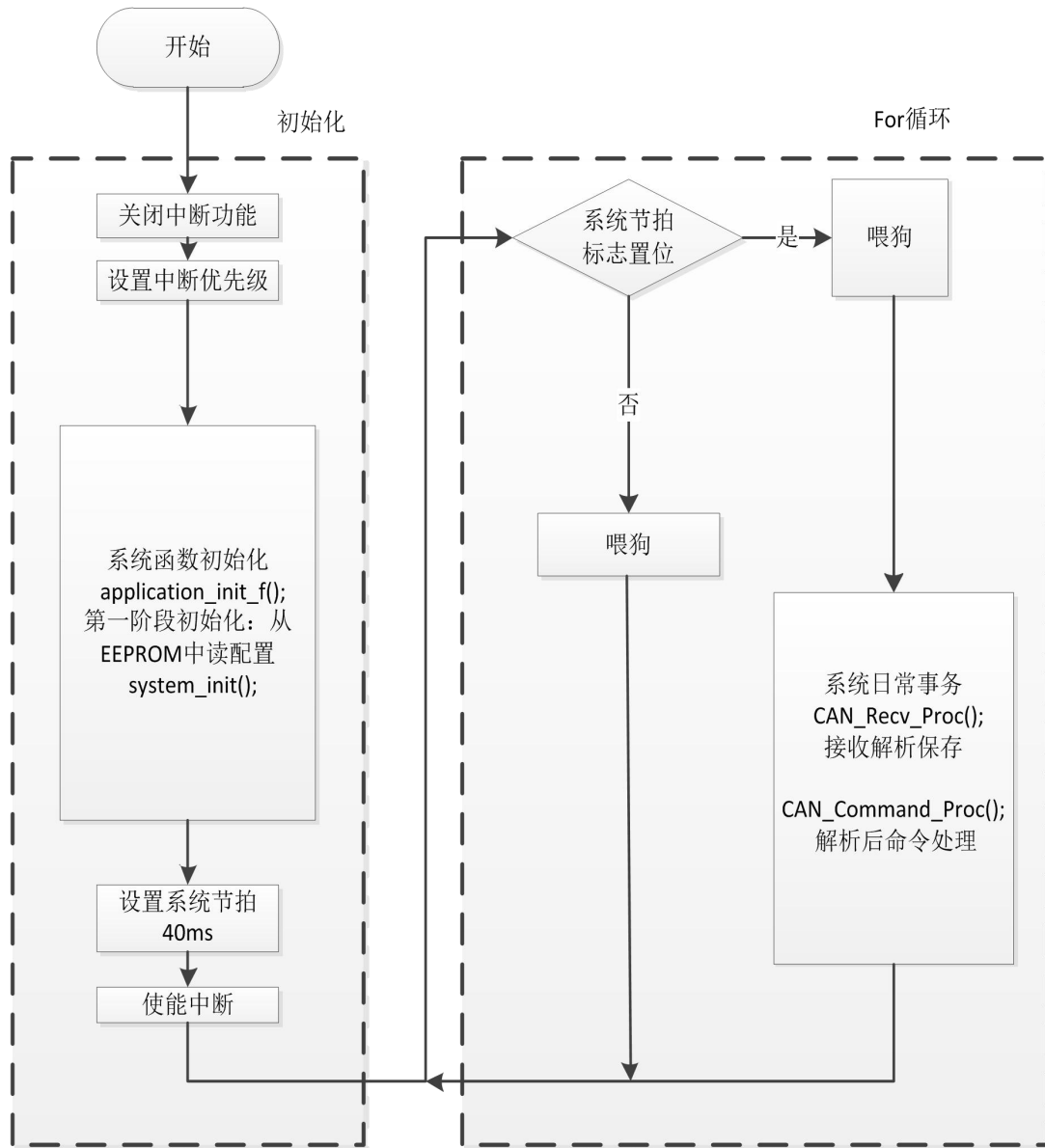


图 4-4 主控板主函数流程图

4.2.4 从控板程序设计

参照主控板的程序设计原则，先列出从控板的程序框架如下图 4-6。从控板功能单一，其功能框架是接收来自主控板的命令，操作对应的功能单元，输出对应的模拟量，同时给予应答。

本系统的 5 类功能板都是上面的架构，其区别在于不同的功能响应函数。这里以电池的主要特征单体电压模拟板进行介绍：

华中科技大学硕士学位论文

12 路单体电压模拟：

承接上面的设计方案，先介绍主程序流程图：

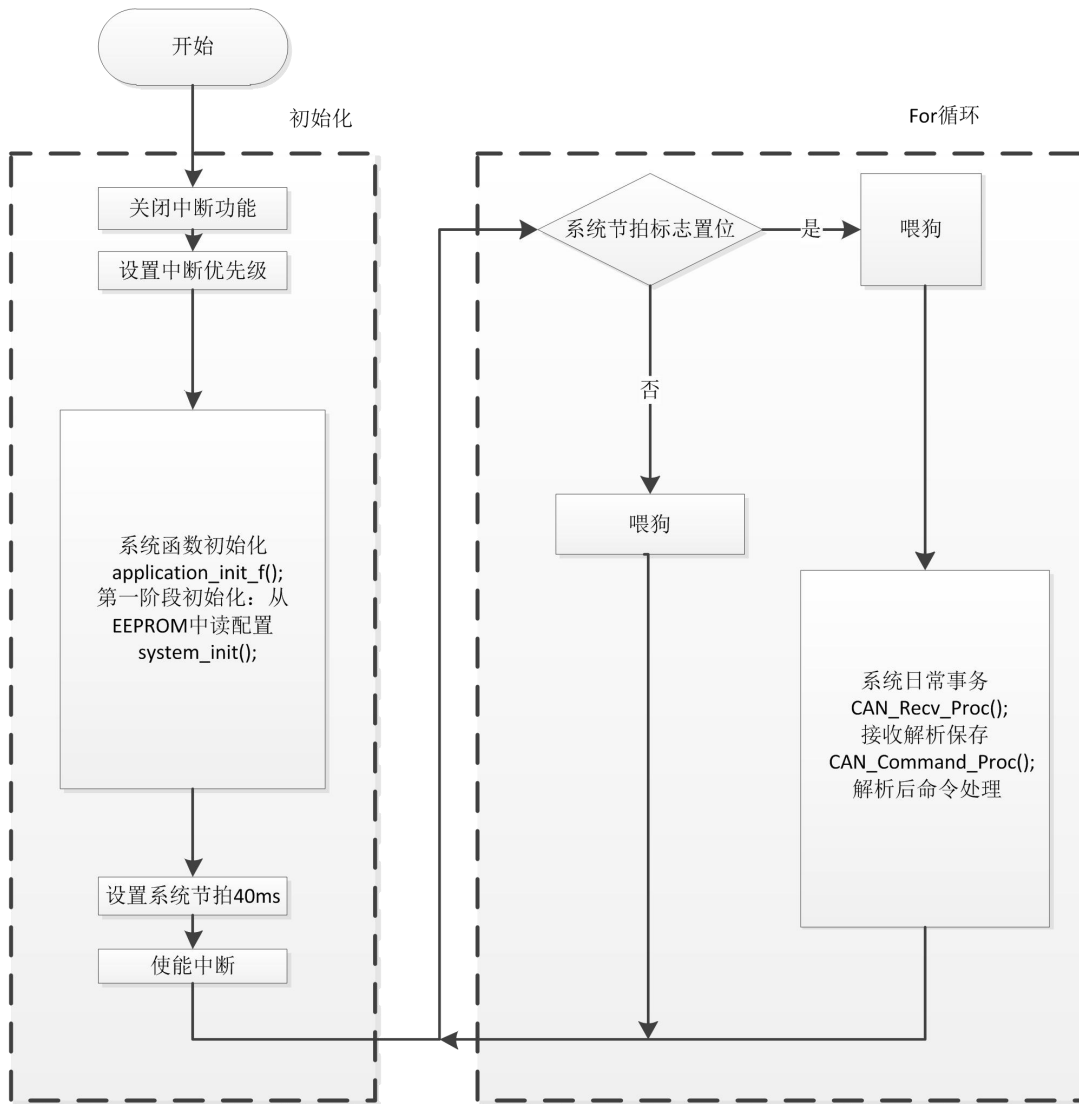


图 4-5 从控板主函数流程图

中断服务子程序：

函数名：void CAN_rcv_isr(void); 功能：接收来自主控板的命令，并将其保存到建立好的缓存中。

系统日常事务说明请参看附表 4。

华中科技大学硕士学位论文

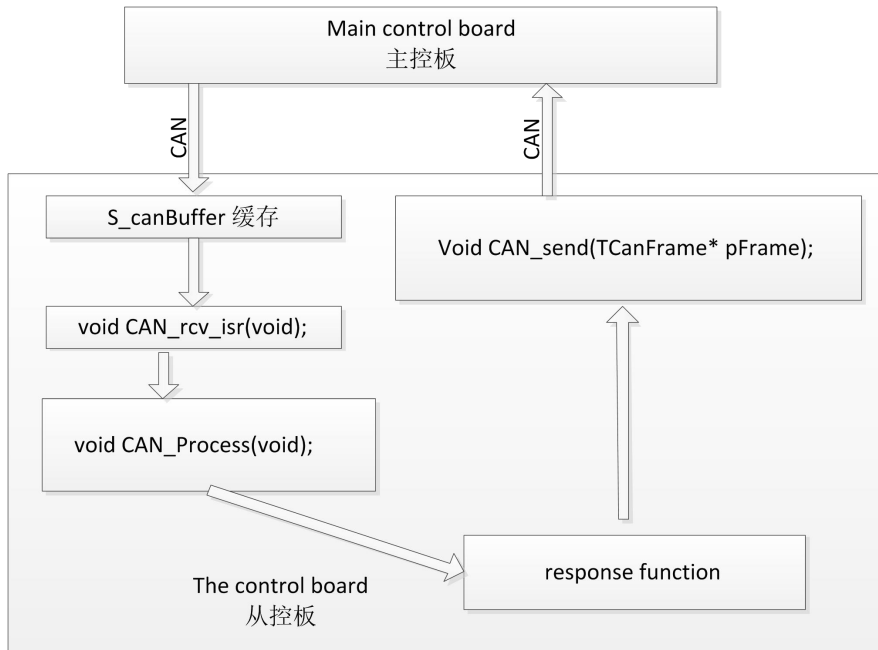


图 4-6 从控板程序架构图

4.3 上位机软件设计

4.3.1 开发平台介绍

LabWindows/CVI 是美国 NI (National Instruments) 公司开发的用 C 语言操作的虚拟仪器开发平台，该平台对于没有十分熟练掌握文本语言编程的技术人员来说，LabWindows/CVI 更加实用^[50]，因此本文采用此开发平台。

4.3.2 软件开发流程

在 LabWindows/CVI 虚拟仪器软件开发平台上，开发分为两个部分前面板界面的设计和后面板对应的 C 代码，前后面板之间通过回调函数联系，利用其丰富的函数库和强大的接口功能^[50]，使用 LabWindows/CVI 编程的基本步骤如下：

- (1) 制定程序的基本框架
- (2) 创建用户界面
- (3) 源代码的编写
- (4) 创建工程文件并运行

将上述所有文件，按照模块化的思想，有序组合添加到工程文件，然后编译调试，

华中科技大学硕士学位论文

调试正常，则可以生成对应的.exe 文件。

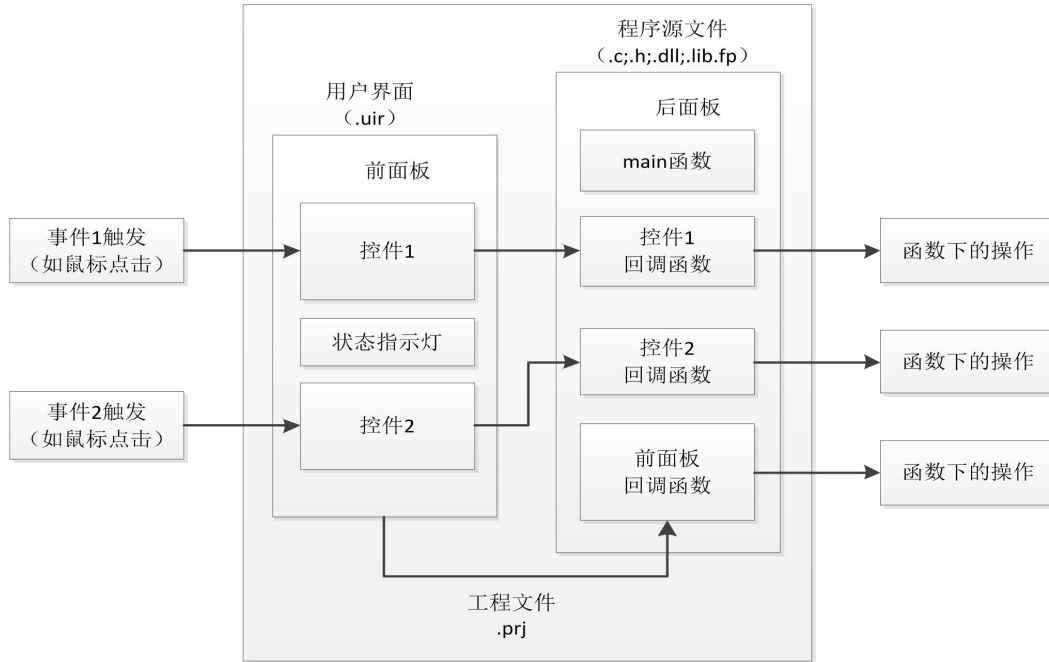


图 4-7 事件触发过程框架图

4.3.3 关键技术

(1) 多线程技术^{[51][52]}：

多线程好比并行。如采用单线程执行所有操作，对于简单的数据采集系统还能支撑，但对于实时控制系统中，多任务的情形，则效率会大大降低，因此需要采用多线程技术。LabWindows/CVI 提供了如下两种多线程机制。

线程池：

方法：通过调用实用库（Utility Library）中的 CmtScheduleThreadPoolFunction 函数，把想要在次线程中执行的已经编写好的函数的函数名，通过其形参传递给它，如果有多个函数则依次添加即可。

异步定时器：

方法：通过调用 NewAsyncTimer，并将对应需要放在线程中执行的函数名称传递给该函数。

(2) Excel 报表^[52]

华中科技大学硕士学位论文

上位机需要实现对采集数据以及其他各种信息记录汇总生成 Excel 报表，本文利用 LabWindows/CVI 中与 Excel 相关的功能函数来实现，首先需要在工程中添加 excelreport.fp 仪器驱动文件，接下来调用其中 Excel 相关函数。

具体实施步骤如下表：

表 4-6 Excel 功能函数

步骤	函数	功能
1	ExcelRpt_ApplicationNew	引用 Excel 对象
2	ExcelRpt_WorkbookOpen	引用 Excel 工作簿
3	ExcelRpt_GetWorksheetFromIndex	引用 Excel 工作表
4	ExcelRpt_SetCellValue	写入数据
5	ExcelRpt_DiscardObjHandle	退出工作表
6	ExcelRpt_WorkbookClose	退出工作簿
7	ExcelRpt_ApplicationQuit	关闭 Excel

4.3.4 前面板界面设计

虚拟仪器的界面即传统仪器的操作面板，依照硬件可以实现的功能，以及需要测试对象，本系统的设计界面需要包含：配置界面（用于配置主从控制板的输出），登录界面，测试界面（显示 BMS 的信息，显示报警信息，显示测试结果，设定的各个配置参数），依照需求设计各个界面如下：



图 4-8 登录界面

华中科技大学硕士学位论文

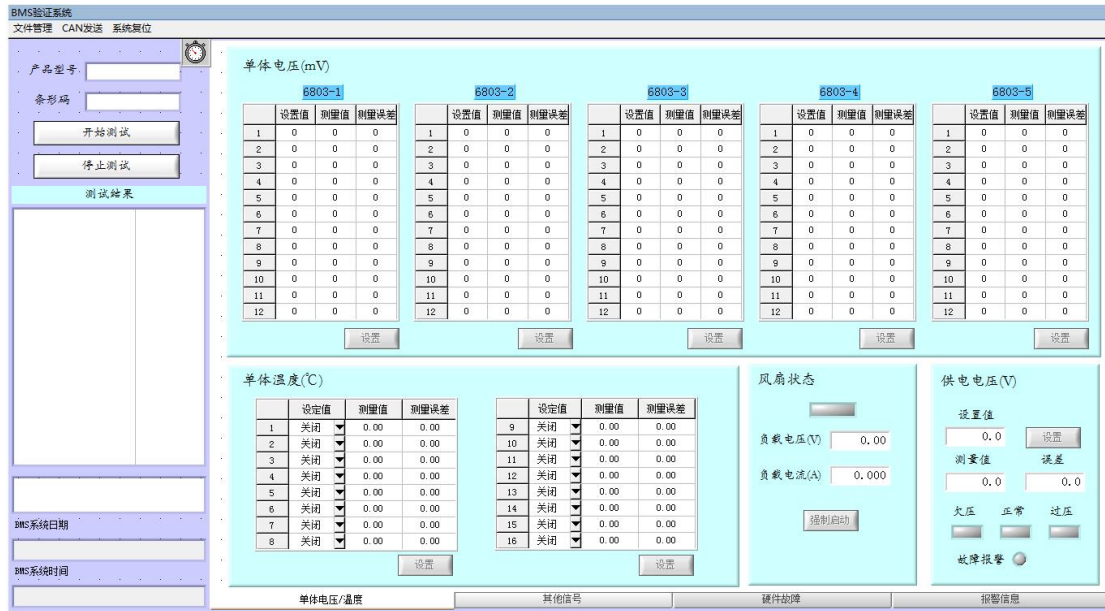


图 4-9 测试界面



图 4-10 配置界面

4.3.5 后面板程序设计

后面板程序功能包括：发送命令给底层设备，接收来自 BMS 的信息，刷新主界面数据，保存数据，此处对其主要的线程函数进行说明

界面刷新定时器函数：此函数负责对界面上面显示的 BMS 测量数据进行更新

华中科技大学硕士学位论文

并显示在界面上，具体如下：

```
int CVICALLBACK timer (int panel, int control, int event,void *callbackData, int  
eventData1, int eventData2);
```

数据采集线程函数：此线程负责对采集到的 BMS 的数据进行保存，保存到对应的缓存中，具体如下：

```
CmtScheduleThreadPoolFunction (DEFAULT_THREAD_POOL_HANDLE,  
DataAcqThreadFunction, NULL, &functionId1);
```

测试后结论以及数据的保存线程函数：此线程用于对测试后的结果存入指定的 EXCEL 表格中，具体如下：

```
CmtScheduleThreadPoolFunction (DEFAULT_THREAD_POOL_HANDLE,  
DataSaveThreadFunction, NULL, &functionId2);
```

4.4 本章小结

本章在测试平台硬件设计完成的基础上，设计了测试平台的底层控制程序和上位机程序，由于本人在此部分主要负责底层控制程序以及协议的编写工作，所以本章主要讲述的是底层程序和协议部分，上位机程序则只对其关键点进行了说明，本章设计工作的完成标志着测试平台的设计工作初步完成。

华中科技大学硕士学位论文

5 测试平台的校准以及功能试验

测试平台一个重要的功能是充当电池组热电数据的高精度模拟信号源，在测试 BMS 之前，需要保证测试平台的精度，因此需要校准，本章围绕校准试验和样品 BMS 测试试验展开。

5.1 校准试验

5.1.1 校准试验概述

本平台校准仪器采用的是福禄克 FLUKE F8808A 五位半数字多用表，测试内容涵盖了所有的底层设备输出量，包括总电压模拟单元，总电流模拟单元，绝缘电阻模拟单元，以及温度模拟单元，单体电压模拟单元等；各个单元的校准流程基本相同如下图，因此本章以单体电压校准为例进行进行具体流程介绍以及数据分析，其余各个单元的校准试验数据及误差请参看附表 5。

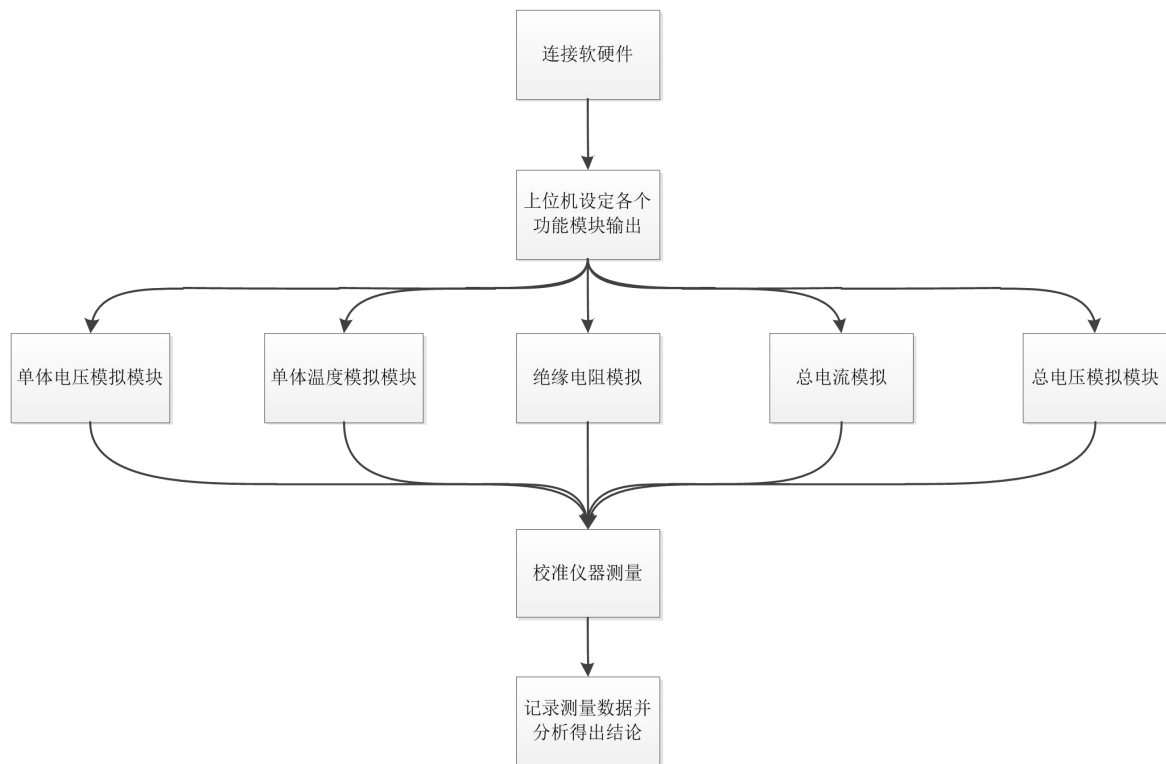


图 5-1 校准流程

华中科技大学硕士学位论文



图 5-2 福禄克 FLUKE F8808A 五位半数字多用表

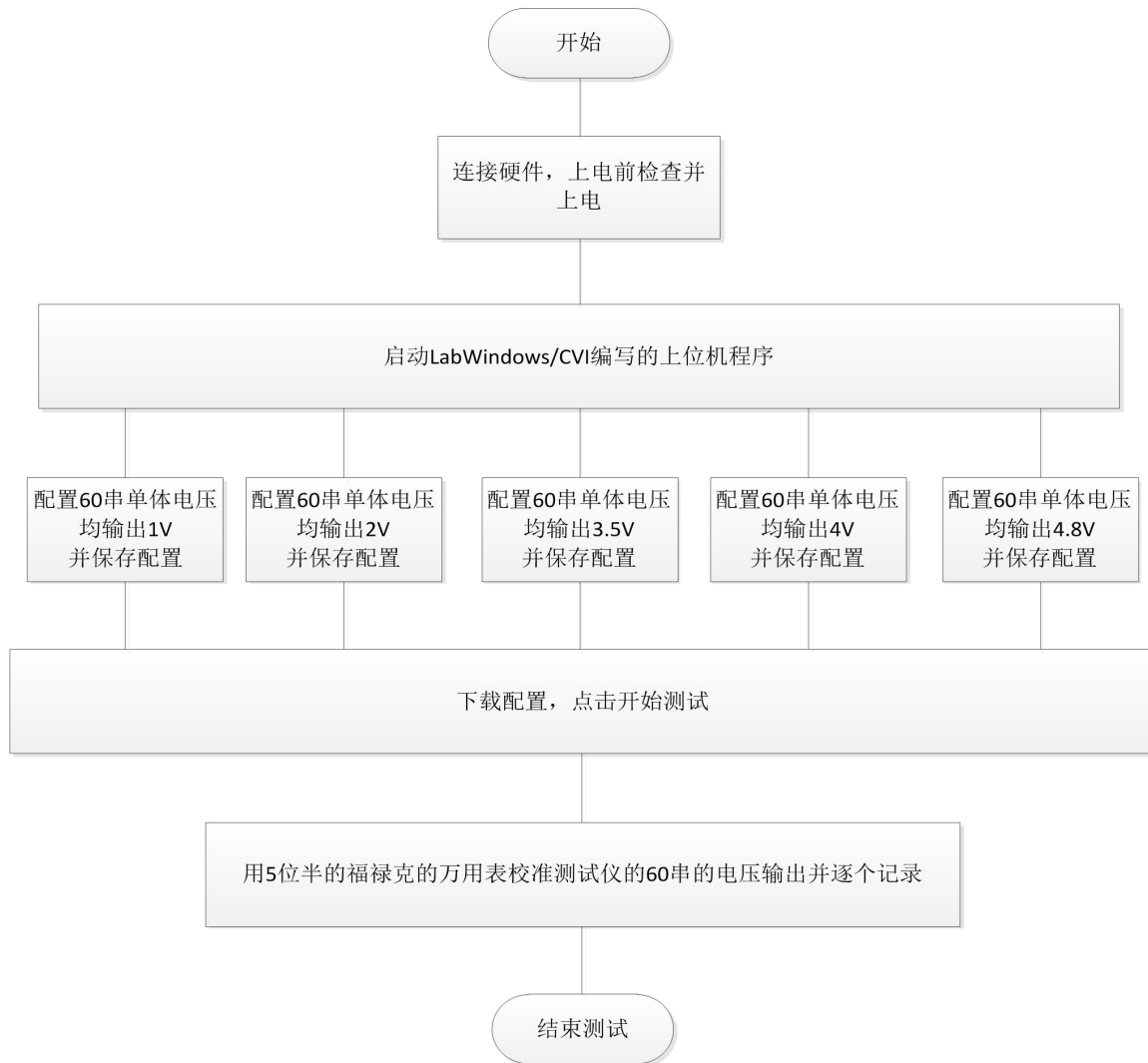


图 5-3 单体电压校准流程

华中科技大学硕士学位论文

(2) 单体电压校准试验数据及分析

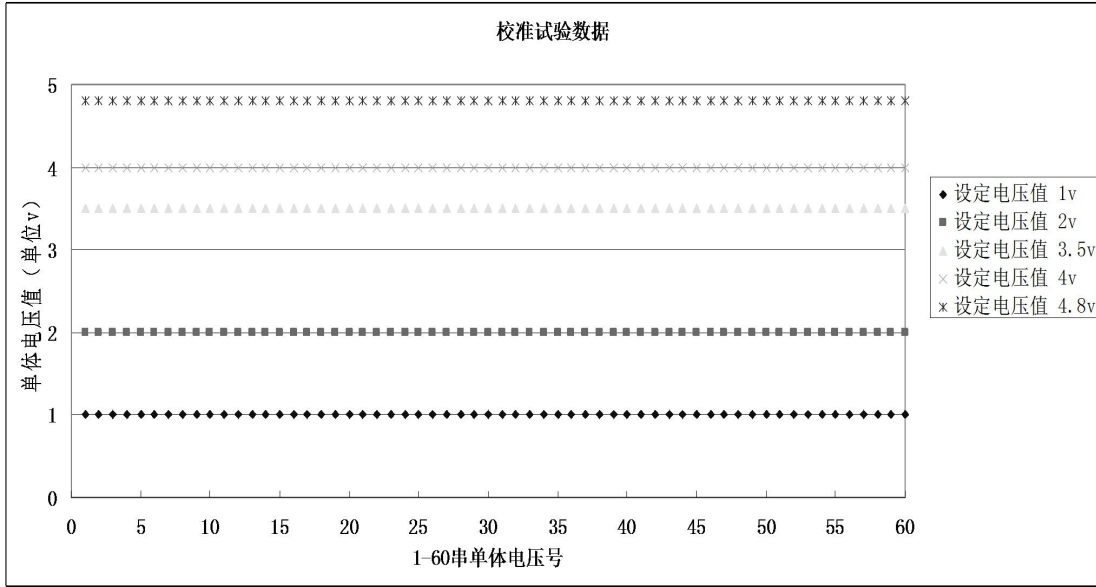


图 5-4 60 串单体校准试验数据图

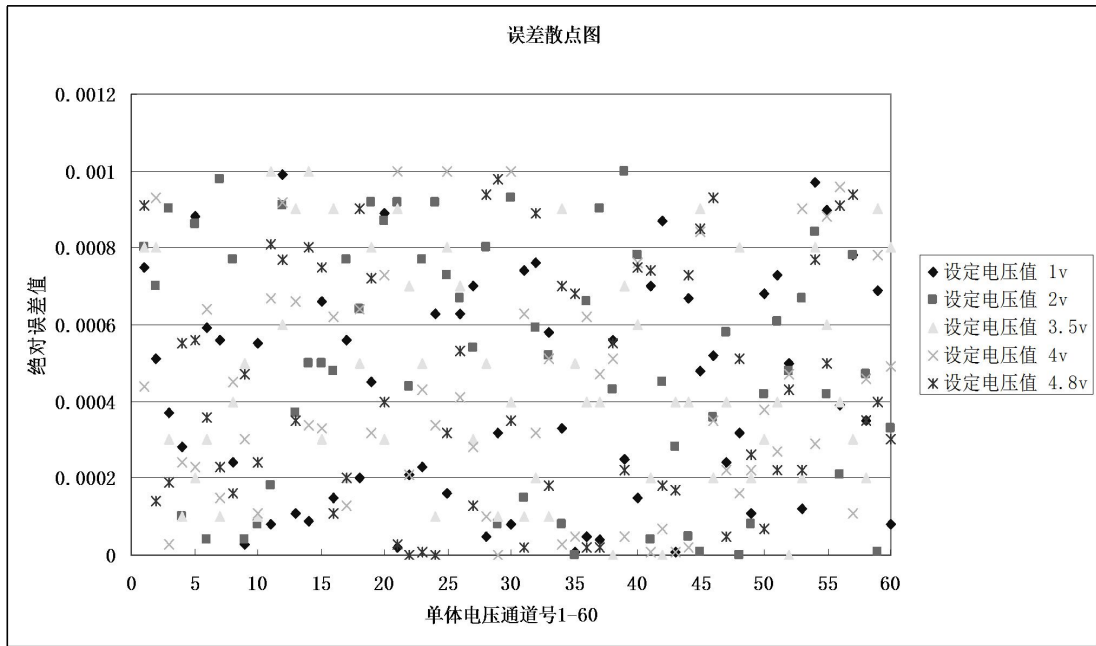


图 5-5 60 串单体绝对误差数据图

由上图可知，单体电压误差最大不超过 1mV，满量程误差^[53]为 0.02%，远高于需求的 0.2%，附表 5 中其它各个单元误差也均在满足测试精度要求，因此可以作为测试仪器。

华中科技大学硕士学位论文

5.2 BMS 样品试验

5.2.1 试验概述

待测试的 BMS 如下图 5-6，正中央的这款 BMS，测试过程先进行上电检查，检查完毕后，推动夹具滑杆将 BMS 与夹具相连接，然后在上位机配置对应的信号单元进行输出，然后点击开始测试，待测试完成后会生成对应的检测 Excel 表，具体请参看附表 5，基本流程如下图 5-7。



图 5-6 待测 BMS 样品

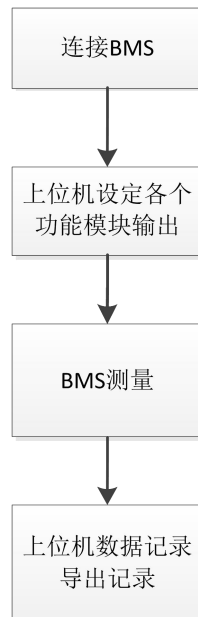


图 5-7 BMS 样品测试流程

华中科技大学硕士学位论文

5.2.2 试验数据及结论

测试的 BMS 为时下市场占有率较高的一款，该款 BMS 能够测量 40 串单体电压，试验数据包括多项，具体请参看附表 5，此处以单体电压进行具体数据分析。

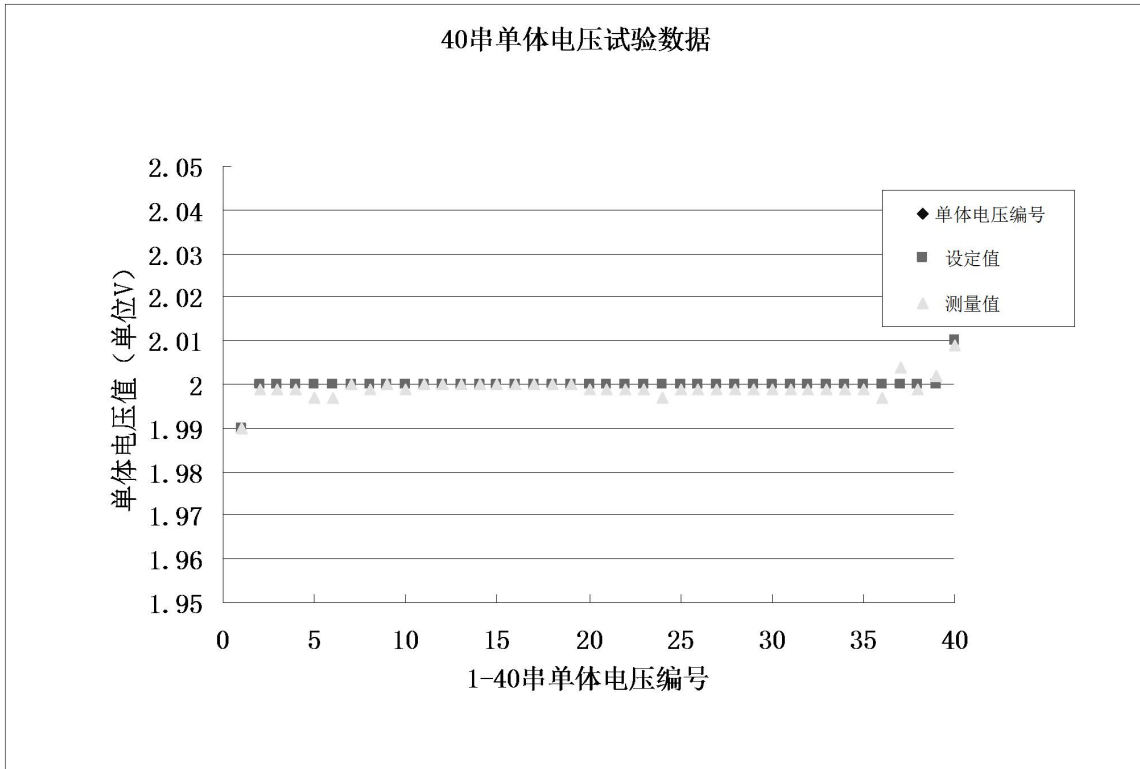


图 5-8 单体电压试验数据

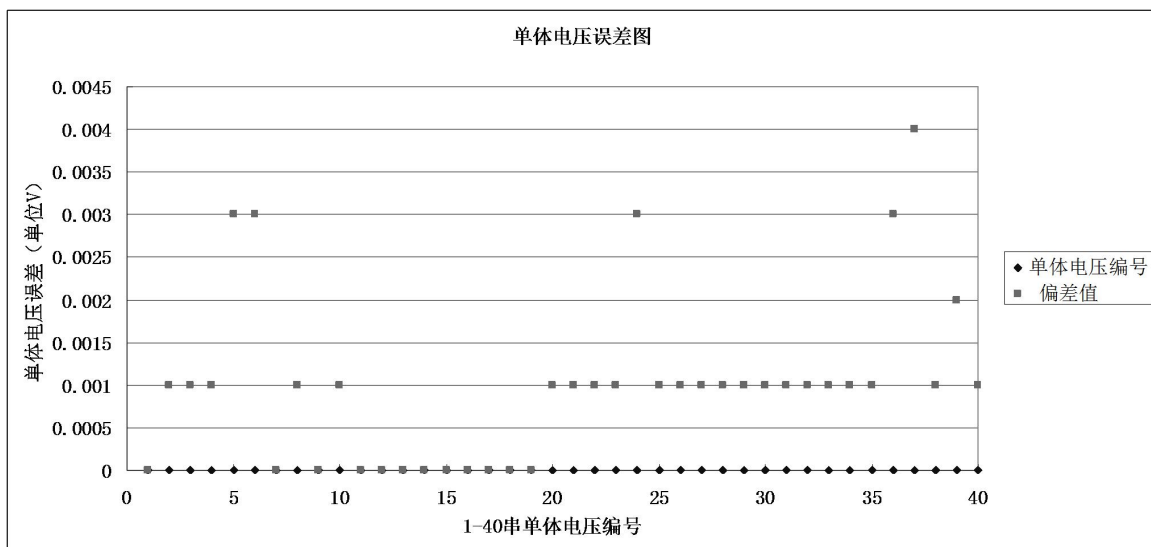


图 5-9 单体电压试验误差

华中科技大学硕士学位论文

从上图可知该款 BMS 的单体电压测量最大绝对值误差为 4mV，国标中允许的误差为 10mV，结合附表中其它测试数据，综合表明该款 BMS 符合国家规定，为合格的 BMS。

5.3 本章小结

本章围绕两个方面展开，一测试平台各个硬件单元的校准，二针对实际的样品 BMS 进行试验，本章给出了这两部分的具体操作流程以及试验数据，数据结果表明测试平台满足测试精度要求，被测 BMS 为符合国家规定的合格 BMS。

华中科技大学硕士学位论文

6 总结和展望

6.1 全文总结

BMS 是电动汽车的核心技术之一，性能优良的 BMS 可以增加电池组的使用寿命，保证电池的使用安全，并能够提高电池组的利用率。而目前 BMS 产品琳琅满目，质量参差不齐，因此开发一套能够有效评估 BMS 各项功能的测试平台显得尤为重要。

本文在 BMS 测试平台的研究和开发上，主要完成了以下工作：

(1) 深入分析了 BMS 各项功能的具体实现，并据此制定了 BMS 测试平台的硬件总体方案。

(2) 依据制定的方案，完成了测试平台的硬件系统设计，硬件系统包括，60 串单体电压模拟板，24 路温度模拟板，7 种阻值的绝缘电阻模拟板，0 到 1000V 的总电压模拟，2 种原理的总电流传感器信号模拟，15 路驱动模拟板，4 路 CAN 接口，硬件系统模拟资源丰富，且可以扩展，可以满足绝大部分 BMS 测试的需求。

(3) 依据硬件总体方案，设计了方便易扩展的上位机和底层设备的通信协议，构建了灵活通用的底层软件架构。

(4) 对底层硬件设备的输出进行了校核，精度符合要求，其中单体电压输出精度为 0.02%FS，0 到 5V 调节范围内误差小于 1mV，较之于同类型设备具有领先优势。

(5) 针对某款市场占有率较高的 BMS 进行了实际测试，通过各个单元的功能测试，评估了该款 BMS。该产品目前服务于江西、深圳等多家企业，从反馈情况来看，该产品具有较高的可靠性。

6.2 本文展望

由于本人时间、能力以及经验所限，该测试平台还存在以下几个方面不足：

(1) 测试平台目前测试是各个静态的点的模拟，还不能像实际的电池其电压电流

华中科技大学硕士学位论文

等呈现一定的规律连续变化的模拟。

(2) 测试平台不能实现 SOC 和 SOH 评估。

针对以上的不足，本人也做了实际的研究，具体表现在第 2 章，但是由于各方面的限制，还未完成，此处提出如下改进建议：

(1) 对上位机进行改进，改成由模型导入实现各个参数的自动配置，比如由二阶电路模型导入，导入后各个电压电流以及其他具体参数则存在依赖关系，并以这种依赖关系对输出的参数进行设置，结合实际的 BMS 测量数据进行动态追踪评估。

(2) 通过第一步的办法，依据对应的模型，结合当下的算法可以实现对 SOC 和 SOH 等的在线估算，并对 BMS 这两项参数进行动态在线评估。

(3) 在完成上述任务后，可以考虑把噪声如电压噪声添加进去，用于检测 BMS 抵抗噪声和干扰的能力

华中科技大学硕士学位论文

致 谢

时光荏苒，白驹过隙，不知不觉间我的研究生生涯也即将结束，回想着三年来我经历了许多崎岖坎坷，也学到了许多经验教训，在此我深深的感谢大家对我的鼓励和支持！

首先我要衷心感谢我的导师李顶根副教授。李老师直率认真，具有实干精神，身体力行的为学生创造多样的实践平台。李老师除开在科研方面给予了我实际的帮助，也经常给我讲做人和处事的方法，在李老师多元化的帮助下，我获得了极大的提高。值此论文完成之际，特向李老师致以真挚的感谢和崇高的敬意！

其次要感谢中欧能源学院全体的老师同学以及朋友，也同样感谢课题组的一起奋斗的朋友们，特别感谢 235 的室友们唐诗、区家隽、喻修成，感谢大家在科研以及生活学习的方方面面所给予我的帮助，希望学院、课题组、寝室的伙伴们发展越来越好！

最后还要感谢我的父母和妻子楚攀，有她们在我身后默默的关心和支持，我才能在人生的道路上积极坚强的前行！

衷心感谢所有帮助和关心过我的老师、同学、朋友和家人！

华中科技大学硕士学位论文

参考文献

- [1] 徐伟平.电池管理系统迎来产业黄金时代[N].中国证券报,2016.
- [2] 姜久春.解读电动汽车动力电池管理系统产业[J].高科技与产业化,2015.
- [3] 卢兰光,李建秋,华剑锋,欧阳明高.电动汽车锂离子电池管理系统的核心技术[J].科技导报,2016,34(6).
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部,电动汽车用电池管理系统技术条件[S].in QC/T 897-2011.
- [5] 张勇.车用锂离子电池管理系统研究与设计[D].上海交通大学, 2014.
- [6] 罗诗韵,汪洋.电池管理系统的研究现状[J].企业技术开发,2015,34(27):127.
- [7] 金鹏.浅析我国电池管理系统(BMS)发展现状及未来[J].改革与开放,2017,04(058):124,126.
- [8] J. Han, W. Sun. State of charge estimation of lead-acid batteries using an adaptive extended Kalman filter [J]. Journal of Power Sources, 2009, 188(2): 606-612.
- [9] 耿海洲.电动汽车电池管理系统设计及电池健康状态估算[D].天津大学, 2014.
- [10] 王天英.电动汽车电池管理系统研究[D].安徽理工大学, 2014.
- [11] 符晓玲,商云龙,崔纳新.电动汽车电池管理系统研究现状及发展趋势[J].电力电子技术,2011,45(12):27-30.
- [12] 王博.电动汽车动力电池管理系统(BMS)设计[D].吉林大学, 2016.
- [13] 刘和平,杨飞,胡银全.EV用LiFePO₄电池管理系统的研究与实现[J].电源技术,2011,35(3):252-254.
- [14] 李树靖,林凌,李刚.串联电池组电池电压测量方法的研究[J].仪器仪表学报,2003,24(4):212-213.
- [15] 吴赞,蒋新华,解晶莹.串联电池组电压检测电路的精度研究[J].仪器仪表学报,2008,29(8):165-168.
- [16] 蒋新华,雷娟,冯毅,解晶莹.一种新的串联电池组电压检测电路[J].仪器仪表学报, 2008,24(4): 212-215.
- [17] 蒋新华,冯毅,解晶莹.电压检测电路对锂离子电池组的影响[J].电池, 2005,35(2):135-136.

华中科技大学硕士学位论文

- 古启军,陈以方,吴知非.串联电池组电压测量方法的研究[J].电测与仪表,2002,39(5):26-29
- [18] 李志雨,杨春稳,刘子胥.基于 MAX11068 芯片的锂离子电池管理系统的设计[J].河北科技大学学报,2013,34(5):441-445.
- [19] 李志雨,杨春稳,刘子胥.基于 DS18B20 的电池组温度测量装置[J].电气应用,2013,32(20):109-112.
- [20] Liu G, Ouyang M, Lu L, et al. Online estimation of lithium-ion battery remaining discharge capacity through differential voltage analysis[J]. Journal of Power Sources, 2015, 274: 971-989.
- [21] Zheng Y, Lu L, Han X, et al. LiFePO₄ battery pack capacity estimation for electric vehicles based on charging cell voltage curve transformation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 33-41
- [22] 李晓宇.电动汽车电池管理系统测试平台的研制[D].哈尔滨工业大学,2013.
- [23] 杨春雷.电动汽车电池管理系统关键技术的研究[D].哈尔滨工业大学,2011.
- [24] R. H. Milocco, B. E. Castro. State of charge estimation in Ni-MH rechargeable batteries[J].Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 558-567
- [25] 陈立文.电动汽车锂离子电池管理系统研究与设计[D].电子科技大学,2013.
- [26] 汤恩恩.纯电动汽车电池管理技术的研究[D].武汉理工大学,2014.
- [27] 李旭军.锂离子电池能量估算与转换均衡控制应用研究[D].湘潭大学,2016.
- [28] Roscher M A, Sauer D U. Dynamic electric behavior and open-circuit voltage modeling of LiFePO₄-based lithium ion secondary batteries[J].Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 331-336.
- [29] Chiang YH,Sean WY, Ke JC. Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources. 2011,196(8): 3921-3932.
- [30] 陈峭岩.电动汽车电池状态估计及均衡管理研究[D].天津大学,2013.
- [31] He H, Xiong R, Zhang X, et al, State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model, IEEE transactions on vehicular technology, 2011, 60(4): 1461-1469
- [32] Gould C R, Bingham C M, Stone DA, et al. New battery model and state-of-health determination through subspace parameter estimation and state-observer techniques[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2009, 58(8):3905-3916.

华中科技大学硕士学位论文

- [33] 康燕琼.纯电动汽车锂电池组健康状态(SOH)的估计研究[D].北京交通大学, 2015.
- [34] 周修文.电动汽车锂离子电池健康状态化计及寿命预测方法研究[D].吉林大学, 2016.
- [35] 颜湘武,郭琪,杨漾等.动力电池组健康状态评价方法的研究[J].湖南大学学报, 2015,42(2):93-99.
- [36] NAVET N. Controller area network [CANs use within automobiles] [J].Potentials, IEEE. 1998,17(4):12-14.
- [37] Hu J, Li GY, Yu XP, et al. Design and application of SAE J1939 communication database in City-Bus Information Integrated Control System development[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2007(8): 3429-3434.
- [38] 卢雷.CAN 总线汽车车身控制系统通信的研究[D].哈尔滨工业大学, 2009.
- [39] 贾琳.电动汽车电池管理系统中 CAN 通信技术的研究[D].合肥工业大学, 2013.
- [40] Daowd M, Omar N, Van Den Bossche P, et al. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation[C].Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-7.
- [41] Jin L W, Lee P S, Kong X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1786-1794.
- [42] Fan L, Khodadadi J M, Pesaran A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 301-312.
- [43] 中华人民共和国国家标准,电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议 [S].in GB/T 27930-2015.
- [44] 王迪.电动汽车锂电池温度场研究及优化设计[D].南京航空航天大学, 2015.
- [45] 葛子敬.电动汽车磷酸铁锂电池组风冷散热系统研究[D].华南理工大学, 2016.
- [46] Zheng Y, Ouyang M, Lu L, et al. On-line equalization for lithiumion battery packs based on charging cell voltages: Part 2. Fuzzy logic equalization[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 460-466.
- [47] 檀斐.车用动力锂离子电池系统故障诊断研究与实现[D].北京理工大学, 2015.

华中科技大学硕士学位论文

- [48] Zheng Y, Ouyang M, Lu L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 676-686.
- [49] Park S H, Park K B, Kim H S, et al. Single-magnetic cell-to-cell charge equalization converter with reduced number of transformer windings[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2012, 27(6): 2900-2911.
- [50] 王洪瑞.基于 LabWindows 的交流永磁同步电机控制系统研究[D].山东大学, 2012.
- [51] 李敏智.基于 Labwindows/CVI 的数据采集与监控系统的设计与实现[D].武汉理工大学, 2009.
- [52] 关萍萍,翟正军,姜红梅.基于 LabWindows/CVI 测控系统通用报表的设计与实现[J].计算机工程与设计,2010,31(1):203-206
- [53] 费业泰, 误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社, 2010.

华中科技大学硕士学位论文

附录 1 在校期间发表的论文

- [1] 李顶根, 唐晓峰, 刘世杰. 基于CAN通信的电动汽车电池管理系统测试平台的设计. 电源技术 (已录用)

华中科技大学硕士学位论文

附录 2 热敏电阻分度表

表 1 NTC 分度表

Resistance		10k Ohms at 25deg. C					
B Value		3950K at 25/50 deg. C					
T(°C)	R(KΩ)	T(°C)	R(KΩ)	T(°C)	R(KΩ)	T(°C)	R(KΩ)
-40	277.2	1	30.25	42	4.915	83	1.128
-39	263.6	2	28.82	43	4.723	84	1.093
-38	250.1	3	27.45	44	4.539	85	1.059
-37	236.8	4	26.16	45	4.363	86	1.027
-36	224.0	5	24.94	46	4.195	87	0.996
-35	211.5	6	23.77	47	4.034	88	0.965
-34	199.6	7	22.67	48	3.880	89	0.936
-33	188.1	8	21.62	49	3.733	90	0.908
-32	177.3	9	20.63	50	3.592	91	0.881
-31	167.0	10	19.68	51	3.457	92	0.855
-30	157.2	11	18.78	52	3.328	93	0.830
-29	148.1	12	17.93	53	3.204	94	0.805
-28	139.4	13	17.12	54	3.086	95	0.782
-27	131.3	14	16.35	55	2.972	96	0.759
-26	123.7	15	15.62	56	2.863	97	0.737
-25	116.6	16	14.93	57	2.759	98	0.715
-24	110.0	17	14.26	58	2.659	99	0.695
-23	103.7	18	13.63	59	2.564	100	0.674
-22	97.9	19	13.04	60	2.472	101	0.656
-21	92.50	20	12.47	61	2.384	102	0.638
-20	87.43	21	11.92	62	2.299	103	0.620
-19	82.79	22	11.41	63	2.218	104	0.603
-18	78.44	23	10.91	64	2.141	105	0.586
-17	74.36	24	10.45	65	2.066	106	0.569
-16	70.53	25	10.00	66	1.994	107	0.554
-15	66.92	26	9.575	67	1.926	108	0.538
-14	63.54	27	9.170	68	1.860	109	0.523
-13	60.34	28	8.784	69	1.796	110	0.508

华中科技大学硕士学位论文

-12	57.33	29	8.416	70	1.735	111	0.494
-11	54.50	30	8.064	71	1.677	112	0.480
-10	51.82	31	7.730	72	1.621	113	0.467
-9	49.28	32	7.410	73	1.567	114	0.454
-8	46.89	33	7.106	74	1.515	115	0.441
-7	44.62	34	6.815	75	1.465	116	0.429
-6	42.48	35	6.538	76	1.417	117	0.417
-5	40.45	36	6.273	77	1.371	118	0.406
-4	38.53	37	6.020	78	1.326	119	0.394
-3	36.70	38	5.778	79	1.284	120	0.384
-2	34.97	39	5.548	80	1.243	121	0.373
-1	33.33	40	5.327	81	1.203	122	0.363
0	31.77	41	5.117	82	1.165	123	0.353

华中科技大学硕士学位论文

附录3 部分PCB图纸

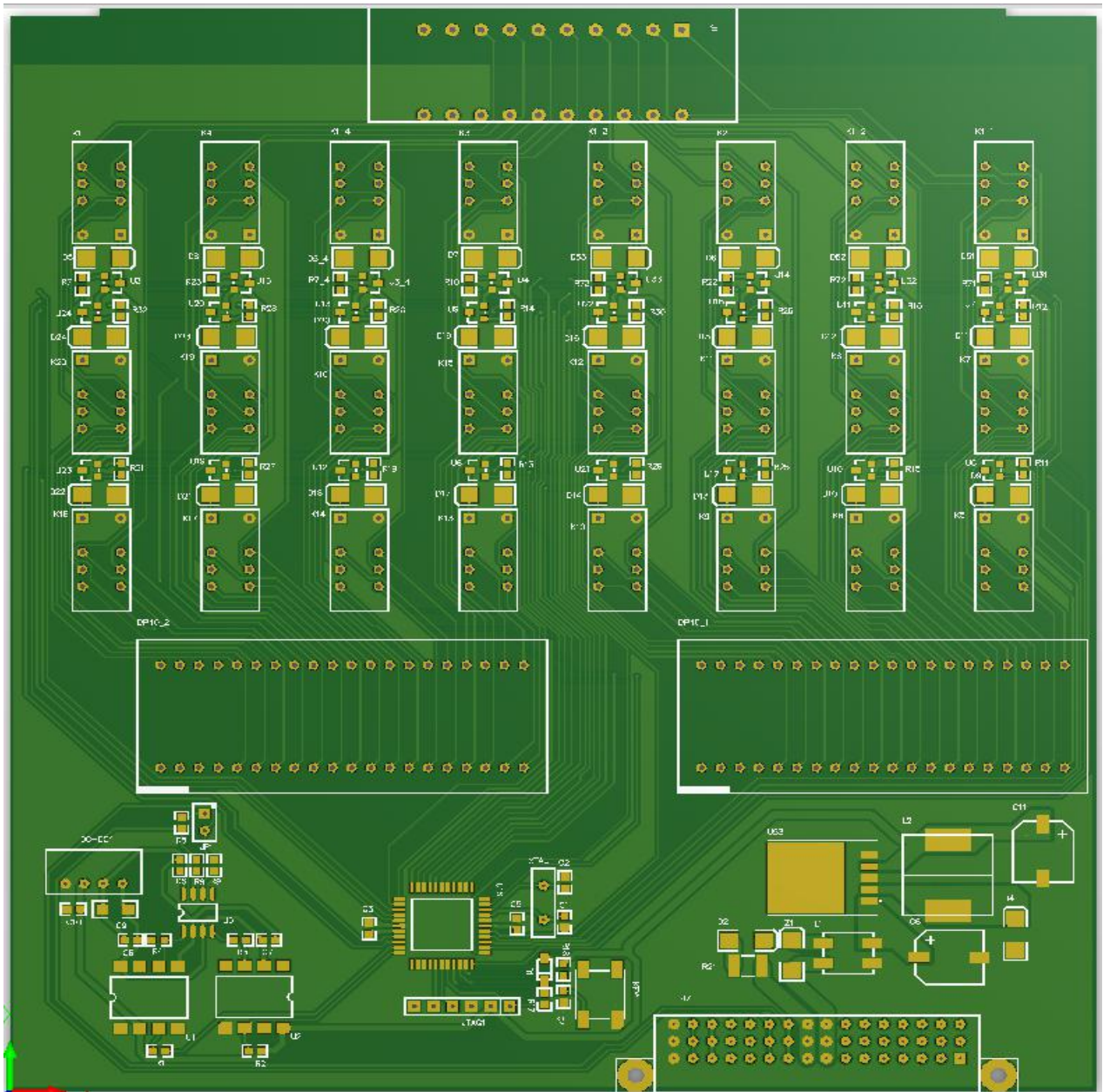


图1 八路温度模拟PCB图纸

华中科技大学硕士学位论文

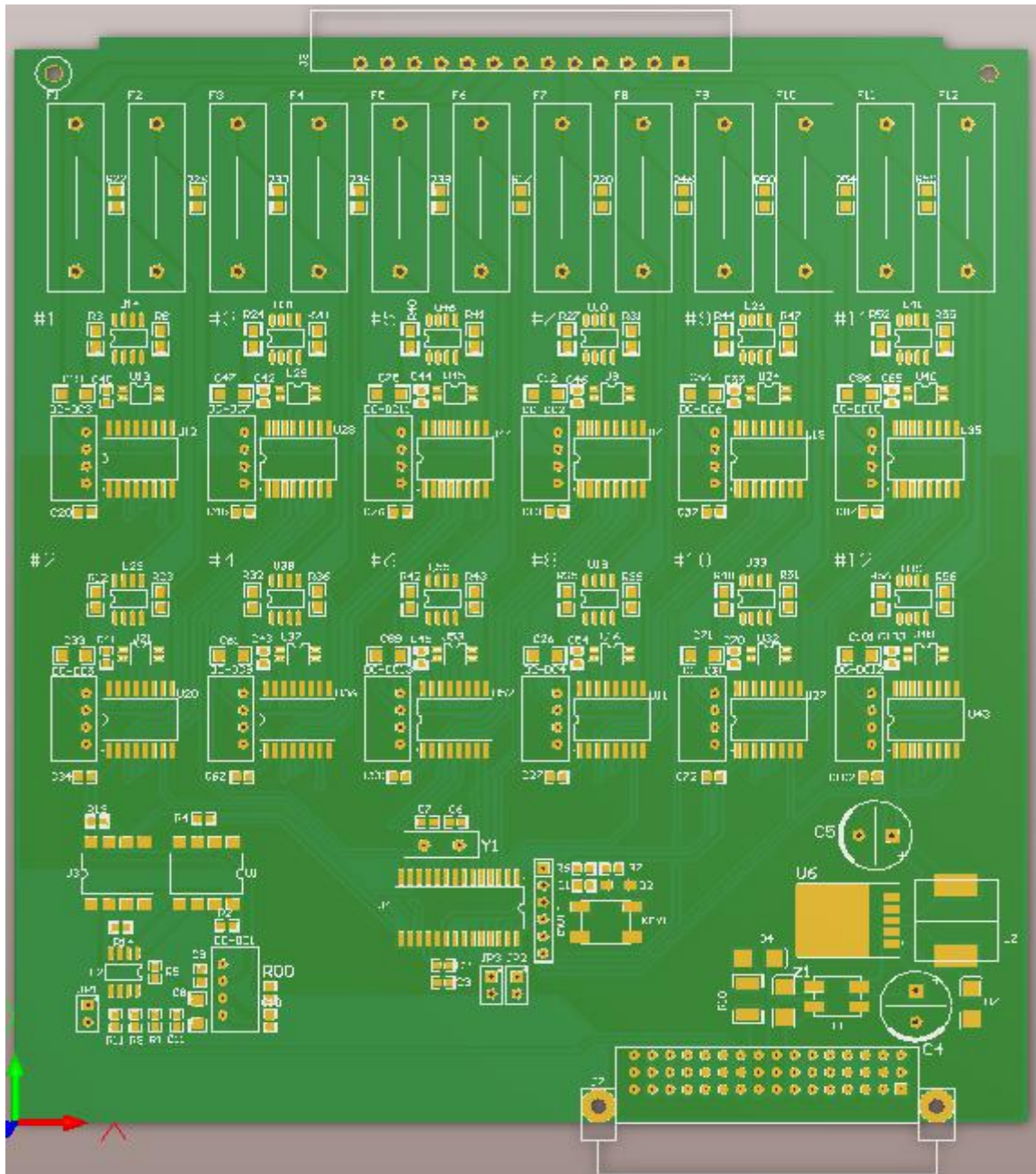


图 2 十二路电压模拟 PCB 图纸 (Print circuit board, PCB)

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

PclOuter_analysisInsulation(pCanFrame, &g_CommandBuffer); break;	块
case CMD_TOTAL_CURRENT: //B0 PclOuter_analysisTotalCurrent(pCanFrame, &g_CommandBuffer); break;	总电流模拟模块
case CMD_MASTER_CARD: //A0 PclOuter_analysisMasterCard(pCanFrame, &g_CommandBuffer); break;	主控模块
}	
CAN_removeFromHead(OUTER_CAN_PORT);	将上面被读取的缓存数据移除缓存
}	

表 3 主控板 CAN1 发函数代码

CAN1 发函数	代码说明
void PclOuter_send(void)	函数名称
{	
TCommand* pCommand = &g_CommandBuffer.command;	将接收函数中保存数据的全局变量赋值给本地局部变量
TResponse* pResponse = &g_CommandBuffer.response;	同上
if(!pResponse->enabled) return;	状态判断，是否有发送函数在执行，如果有则跳出函数，没有则继续
if(getTimeSpan(m_lastOuterSendTime) < 5) return;	用于保证两次发送函数之间的时间间隔大于 5ms
switch(pResponse->address & 0x000000F0)	读取各个板卡地址
{	
case CMD_RELAY_DRIVE: //C0 PclOuter_assembleRelayDrive(&g_CommandBuffer); break;	继电器驱动模块，将从 CAN0 上面

华中科技大学硕士学位论文

	接收的数据组合并对通过 CAN1 进行应答
<pre>case CMD_SINGLE_TEMPERATURE: //D0 PciOuter_assembleSingleTemperature(&g_CommandBuffer); break;</pre>	温度模拟模块
<pre>case CMD_SINGLE_VOLTAGE: //E0 PciOuter_assembleSingleVoltage(&g_CommandBuffer); break;</pre>	单体电压模拟板
<pre>case CMD_INSULATION: //F0 PciOuter_assembleInsulation(&g_CommandBuffer); break;</pre>	绝缘检测模块
<pre>case CMD_TOTAL_CURRENT: //B0 PciOuter_assembleTotalCurrent(&g_CommandBuffer); break;</pre>	总电流模拟模块
<pre>case CMD_MASTER_CARD: //A0 PciOuter_assembleMasterCard(&g_CommandBuffer); break;</pre>	主控模块
<pre>}</pre>	
<pre>}</pre>	

表 4 从控板 CAN 收函数代码

CAN 收函数	代码说明
void CAN_Recv_Proc(void)	函数名称
{	
TCanFrame* pFrame;	结构体指针局部变量
if(m_appStatus.can_proc_status != CMD_IDLE) return;	判断 CAN 处理是否处于空闲，空闲则继续，否则跳出函数
pFrame = CAN_getRecvFrame();	将缓存空间中的数据赋值给本地局部变量
if(pFrame!=0)	判断是局部变量数据是否有效，有效则进入函数内，否

华中科技大学硕士学位论文

	则跳过
{	
<pre> m_appStatus.can_proc_status = CMD_EXECUTING; </pre>	将 CAN 处理状态置为正在处理，阻止其他 CAN 命令的执行
<pre> if(pFrame->canID == RADIO_ID) { switch(pFrame->data[0]) { case FUN_code0: m_appStatus.radio_activated = 1; m_appStatus.eeprom_status = 0; //读板卡地址 break; case FUN_code1: m_appStatus.radio_activated = 1; m_appStatus.eeprom_status = 1; //写板卡地址 m_appStatus.board_address = pFrame->data[1]; break; } } </pre>	此处用于将板卡地址的读取和更改命令存入全部变量
<pre> else { switch(PDUf(pFrame->canID)) { case FUN_code0: { m_appStatus.volt_activated = 1; m_appStatus.volt_group = 0; if((pFrame->data[0] == 0xFF)&(pFrame->data[1] == 0xFF)) m_appStatus.volt[0] = 0; else m_appStatus.volt[0] = pFrame->data[0]+(pFrame->data[1])*256; if((pFrame->data[2] == 0xFF)&(pFrame->data[3] == 0xFF)) m_appStatus.volt[1] = 0; else m_appStatus.volt[1] = pFrame->data[2]+(pFrame->data[3])*256; if((pFrame->data[4] == 0xFF)&(pFrame->data[5] == 0xFF)) m_appStatus.volt[2] = 0; </pre>	<p>此处用于将各个单体电压设置信息存入全局变量</p> <p>此处针对 1 到 4 串电池单体信息</p>

华中科技大学硕士学位论文

<pre>else m_appStatus.volt[2] = pFrame->data[4]+(pFrame->data[5])*256; if((pFrame->data[6] == 0xFF)&(pFrame->data[7] == 0xFF)) m_appStatus.volt[3] = 0; else m_appStatus.volt[3] = pFrame->data[6]+(pFrame->data[7])*256; } break;</pre>	
<pre>case FUN_code1: { m_appStatus.volt_activated = 1; m_appStatus.volt_group = 1; if((pFrame->data[0] == 0xFF)&(pFrame->data[1] == 0xFF)) m_appStatus.volt[4] = 0; else m_appStatus.volt[4] = pFrame->data[0]+(pFrame->data[1])*256; if((pFrame->data[2] == 0xFF)&(pFrame->data[3] == 0xFF)) m_appStatus.volt[5] = 0; else m_appStatus.volt[5] = pFrame->data[2]+(pFrame->data[3])*256; if((pFrame->data[4] == 0xFF)&(pFrame->data[5] == 0xFF)) m_appStatus.volt[6] = 0; else m_appStatus.volt[6] = pFrame->data[4]+(pFrame->data[5])*256; if((pFrame->data[6] == 0xFF)&(pFrame->data[7] == 0xFF)) m_appStatus.volt[7] = 0; else m_appStatus.volt[7] = pFrame->data[6]+(pFrame->data[7])*256; } break;</pre>	<p>此处用于将各个单体电压设置信息存入全局变量 此处针对 5 到 8 串电池</p>
<pre>case FUN_code2: { m_appStatus.volt_activated = 1; m_appStatus.volt_group = 2;</pre>	<p>此处用于将各个单体电压设置信息存入全局变量 此处针对 9 到</p>

华中科技大学硕士学位论文

<pre>if((pFrame->data[0] == 0xFF)&(pFrame->data[1] == 0xFF)) m_appStatus.volt[8] = 0; else m_appStatus.volt[8] = pFrame->data[0]+(pFrame->data[1])*256; if((pFrame->data[2] == 0xFF)&(pFrame->data[3] == 0xFF)) m_appStatus.volt[9] = 0; else m_appStatus.volt[9] = pFrame->data[2]+(pFrame->data[3])*256; if((pFrame->data[4] == 0xFF)&(pFrame->data[5] == 0xFF)) m_appStatus.volt[10] = 0; else m_appStatus.volt[10] = pFrame->data[4]+(pFrame->data[5])*256; if((pFrame->data[6] == 0xFF)&(pFrame->data[7] == 0xFF)) m_appStatus.volt[11] = 0; else m_appStatus.volt[11] = pFrame->data[6]+(pFrame->data[7])*256; } break; default:break; }</pre>	12 串电池
<pre>} CAN_removeOneFrame();</pre>	将从缓存中读取的经过上述处理后的指令移除缓存
<pre>}</pre>	

表 5 从控板处理响应函数代码

处理响应函数	代码说明
<pre>void CAN_Command_Proc(void)</pre>	函数名称
<pre>{</pre>	
<pre>TCanFrame frame;</pre>	结构体指针局部变量
<pre>if(m_appStatus.volt_activated == 1) { m_appStatus.volt_activated = 0; switch(m_appStatus.volt_group) { case 0:</pre>	对全局变量的状态进行判断,看是否电压设置模块处于激活状态,激活则执行设

华中科技大学硕士学位论文

<pre>{ VOLT1_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[0]); VOLT2_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[1]); VOLT3_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[2]); VOLT4_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[3]); frame.canID =CAN_ID(g_sysConfig.boardAddress, m_appStatus.volt_group, 0xD0, 0x00, 0x00, 0x06); frame.extra.RTR = 0; frame.extra.DataLength frame.data[0] = 0xaa; CAN_send(&frame); m_appStatus.can_proc_status = CMD_IDLE; } break;</pre>	<p>置操作并发送对应的CAN信息给主控板 此处针对1到4串电池的单体电压进行设置</p>
<pre>case 1: { VOLT5_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[4]); VOLT6_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[5]); VOLT7_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[6]); VOLT8_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[7]); frame.canID =CAN_ID(g_sysConfig.boardAddress, m_appStatus.volt_group, 0xD0, 0x00, 0x00, 0x06); frame.extra.RTR = 0; frame.extra.DataLength = 1;</pre>	<p>对全局变量的状态进行判断，看是否电压设置模块处于激活状态，激活则执行设置操作并发送对应的CAN信息给主控板 此处针对5到8串电池的单体电压进行设置</p>

华中科技大学硕士学位论文

<pre>frame.data[0] = 0xAA; CAN_send(&frame); m_appStatus.can_proc_status = CMD_IDLE; } break;</pre>	
<pre>if(m_appStatus.volt_activated == 1) { case 2: { VOLT9_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[8]); VOLT10_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[9]); VOLT11_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[10]); VOLT12_EN(); delay(TIME_CS); ad5640_write16bit(m_appStatus.volt[11]); frame.canID = CAN_ID(g_sysConfig.boardAddress, m_appStatus.volt_group, 0xD0, 0x00, 0x00, 0x06); frame.extra.RTR = 0; frame.extra.DataLength = 1; frame.data[0] = 0xAA; CAN_send(&frame); m_appStatus.can_proc_status = CMD_IDLE; } } break; } }</pre>	<p>对全局变量的状态进行判断，看是否电压设置模块处于激活状态，激活则执行设置操作并发送对应的CAN信息给主控板 此处针对9到12串电池的单体电压进行设置</p>
<pre>if(m_appStatus.radio_activated == 1) { m_appStatus.radio_activated = 0; switch(m_appStatus.eeprom_status) { case 0: frame.canID = CAN_ID(g_sysConfig.boardAddress, 0x00, 0x01, 0x00,</pre>	<p>对全局变量的状态进行判断，看是否板卡地址模块处于激活状态，激活则对应操作并发送对应</p>

华中科技大学硕士学位论文

<pre>0x00, 0x06); frame.extra.RTR = 0; frame.extra.DataLength = 2; frame.data[0] = g_sysConfig.boardAddress; frame.data[1] = m_appStatus.eeprom_status; m_appStatus.can_proc_status = CMD_IDLE; CAN_send(&frame); break; case 1: application_init_r(m_appStatus.board_address); frame.canID =CAN_ID(g_sysConfig.boardAddress, 0x00, 0x01, 0x00, 0x00, 0x06); frame.extra.RTR = 0; frame.extra.DataLength = 2; frame.data[0] = g_sysConfig.boardAddress; frame.data[1] = m_appStatus.eeprom_status; m_appStatus.can_proc_status = CMD_IDLE; CAN_send(&frame); break; } }</pre>	的CAN信息给 主控板
}	

华中科技大学硕士学位论文

附录 5 试验数据

表 6 60 串单体电压校准试验数据

单体电压板卡号	通道号	设定电压值				
		1v	2v	3.5v	4v	4.8v
1	1	1.00075	1.9992	3.4992	4.00044	4.80091
	2	1.00051	1.9993	3.4992	4.00093	4.80014
	3	1.00037	2.0009	3.4997	3.99997	4.79981
	4	1.00028	2.0001	3.4999	3.99976	4.80055
	5	0.99912	1.99914	3.4998	3.99977	4.79944
	6	1.00059	2.00004	3.4997	3.99936	4.79964
	7	1.00056	2.00098	3.4999	3.99985	4.79977
	8	1.00024	2.00077	3.4996	3.99955	4.79984
	9	1.00003	2.00004	3.4995	4.0003	4.80047
	10	0.99945	1.99992	3.4999	4.00011	4.80024
	11	1.00008	2.00018	3.499	4.00067	4.80081
	12	1.00099	2.00091	3.4994	4.00092	4.80077
2	1	1.00011	2.00037	3.4991	3.99934	4.80035
	2	1.00009	2.0005	3.499	3.99966	4.7992
	3	0.99934	2.0005	3.4997	3.99967	4.79925
	4	1.00015	2.00048	3.4991	3.99938	4.79989
	5	1.00056	2.00077	3.4998	4.00013	4.8002
	6	0.9998	2.00064	3.4995	4.00064	4.8009
	7	1.00045	2.00092	3.4992	4.00032	4.79928
	8	1.00089	2.00087	3.5003	3.99927	4.7996
	9	1.00002	2.00092	3.4991	4.001	4.80003
	10	1.00021	2.00044	3.4993	4.00021	4.8
	11	1.00023	2.00077	3.4995	4.00043	4.80001
	12	0.99937	2.00092	3.4999	4.00034	4.8
3	1	1.00016	2.00073	3.49920	3.999	4.80032
	2	0.99937	2.00067	3.49930	4.00041	4.80053

华中科技大学硕士学位论文

	3	1.0007	2.00054	3.49970	4.00028	4.80013	
	4	1.00005	2.0008	3.49950	3.9999	4.79906	
	5	0.99968	1.99992	3.49990	4	4.80098	
	6	0.99992	1.99907	3.49960	3.999	4.79965	
	7	0.99926	1.99985	3.49990	3.99937	4.79998	
	8	1.00076	2.00059	3.49980	3.99968	4.79911	
	9	1.00058	2.00052	3.49990	3.99949	4.79982	
	10	1.00033	2.00008	3.49910	4.00003	4.8007	
	11	0.99999	2	3.49950	4.00005	4.80068	
	12	1.00005	2.00066	3.49960	3.99938	4.79998	
	4	1	1.00004	2.0009	3.49960	4.00047	4.79998
		2	1.00056	2.00043	3.50000	4.00051	4.80055
3		0.99975	1.999	3.49930	4.00005	4.80022	
4		1.00015	2.00078	3.49940	4.00076	4.80075	
5		0.9993	1.99996	3.49980	3.99999	4.79926	
6		0.99913	1.99955	3.50000	4.00007	4.80018	
7		1.00001	2.00028	3.50040	3.99999	4.79983	
8		1.00067	2.00005	3.49960	3.99998	4.79927	
9		1.00048	2.00001	3.50090	4.00084	4.80085	
10		1.00052	1.99964	3.50020	3.99965	4.80093	
11		1.00024	2.00058	3.50040	3.99978	4.80005	
12		0.99968	2	3.49920	3.99984	4.80051	
5	1	1.00011	2.00008	3.49980	4.00022	4.80026	
	2	1.00068	2.00042	3.49970	3.99962	4.79993	
	3	1.00073	2.00061	3.49960	4.00027	4.80022	
	4	0.9995	1.99952	3.50000	4.00047	4.80043	
	5	0.99988	2.00067	3.49980	3.9991	4.79978	
	6	1.00097	2.00084	3.49920	3.99971	4.79923	
	7	1.0009	2.00042	3.49940	4.00088	4.7995	
	8	0.99961	1.99979	3.49960	4.00096	4.80091	
	9	1.00078	2.00078	3.49970	4.00011	4.80094	
	10	0.99965	1.99953	3.50020	3.99954	4.79965	

华中科技大学硕士学位论文

	11	1.00069	2.00001	3.49910	3.99922	4.7996
	12	0.99992	1.99967	3.49920	3.99951	4.7997
最大值		1.00099	2.00098	3.50090	4.00100	4.80098
最小值		0.99912	1.999	3.49900	3.99900	4.79906
最大误绝对值		0.00099	0.001	0.001	0.00100	0.00098

表 7 24 路单体温度校准试验数据

温度测试板卡	通道号	设置电阻值			
		3.3k	10k	30k	68k
1	1	3.296	9.9638	29.795	67.9261
	2	3.3213	9.9444	29.8405	67.9871
	3	3.3077	9.9477	29.8858	68.3901
	4	3.3171	9.9624	29.9538	67.9027
	5	3.3147	9.948	29.906	68.0177
	6	3.3107	9.9478	29.8219	68.33
	7	3.3042	9.9884	29.9038	67.9335
	8	3.3232	9.9254	29.8464	68.1214
2	1	3.307	9.9987	29.98	67.9974
	2	3.3149	9.9545	30.0038	68.12
	3	3.3052	9.9556	29.8448	68.2127
	4	3.3066	9.9488	29.9791	68.1104
	5	3.2979	9.9456	30.009	68.2987
	6	3.3144	9.9941	29.983	68.171
	7	3.3153	10.0006	29.839	68.2231
	8	3.307	9.9414	29.9585	68.0954
3	1	3.3075	9.9868	29.9379	68.173
	2	3.3173	9.9311	29.8541	67.685
	3	3.3035	9.9952	30.053	68.1323
	4	3.2991	9.9907	29.9172	67.8904
	5	3.3083	10.0384	29.9404	67.741
	6	3.3076	9.95	29.8905	68.207
	7	3.3027	9.9342	29.9694	68.2289
	8	3.3087	9.9425	29.9827	67.921

华中科技大学硕士学位论文

最大值	3.3232	10.0384	30.053	68.3901
最小值	3.296	9.9254	29.795	67.685
最大绝对值误差	0.0232	0.0746	0.205	0.3901

表 8 总电压校准试验数据

总电压模块						
设定值	50V	75V	100V	200V	500V	800V
测量值	49.983	75.025	100.086	200.022	500.019	800.1
误差	0.017	0.025	0.086	0.022	0.019	0.1

表 9 总电流校准试验数据

总电流模拟模块	霍尔电流 (4-20mA)		霍尔电压 (0-5V)		分流器模拟 ($\pm 75\text{mV}$)			
设定值	5mA	15mA	1V	4V	-75	-10	10	75
测量值	4.9992	14.9925	0.99916	3.99932	-75.0002	-10.0004	0.9992	75.0002
最大误差	0.0008	0.0075	0.00084	0.00068	0.0002	0.0004	0.0008	0.0002

表 10 绝缘电阻校准试验数据

绝缘模拟模块								
正极对地	设定值	10k	20k	30k	51k	100k	200k	510k
	测量值	10.0877	19.9072	29.9002	51.0305	99.8173	199.03	510.1
	误差	0.0877	0.0928	0.0998	0.0305	0.1827	0.97	0.1
负极对地	设定值	10k	20k	30k	51k	100k	200k	510k
	测量值	10.0912	20.0072	30.0102	51.0004	99.9244	200.02	510.055
	误差	0.0912	0.0072	0.0102	0.0004	0.0756	0.02	0.055

表 11 样品 BMS 试验数据

协议	YT02-CM-48-12				
版本信息: 车型——E160	硬件号——EV05	日期——2017年3月6日, 备注——			
项目	设定值	偏差设定值	测量值	偏差值	测量结果
总电压(V)	200	3	200.4	0.4	合格
总电流(A)	100	1	100.5	0.5	合格
电池模块 SOC(%)	24.8	5	24.8	0	合格
充电循环次数	0	0	0	0	合格
电池组最高单体电压(V)	2.01	0.005	2.009	0.001	合格

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

电池组最高单体电压串号	40	0	40	0	合格
电池组最低单体电压(V)	1.99	0.005	1.99	0	合格
电池组最低单体电压串号	1	0	1	0	合格
电池组最高温度(°C)	0	0	57	57	合格
电池组最高温度串号	0	0	1	1	合格
电池组最低温度(°C)	0	0	56	56	合格
电池组最低温度串号	0	0	2	2	合格
正极绝缘阻值(KΩ)	20	2	20	0	合格
负极绝缘阻值(KΩ)	20	2	20	0	合格
SOH 值	100	5	100	0	合格
单体电池 1 电压(V)	1.99	0.005	1.99	0	合格
单体电池 2 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 3 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 4 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 5 电压(V)	2	0.005	1.997	0.003	合格
单体电池 6 电压(V)	2	0.005	1.997	0.003	合格
单体电池 7 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 8 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 9 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 10 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 11 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 12 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 13 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 14 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 15 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 16 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 17 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 18 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 19 电压(V)	2	0.005	2	0	合格
单体电池 20 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 21 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 22 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 23 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 24 电压(V)	2	0.005	1.997	0.003	合格
单体电池 25 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 26 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格

华中科技大学硕士学位论文

单体电池 27 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 28 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 29 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 30 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 31 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 32 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 33 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 34 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 35 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 36 电压(V)	2	0.005	1.997	0.003	合格
单体电池 37 电压(V)	2	0.005	2.004	0.004	合格
单体电池 38 电压(V)	2	0.005	1.999	0.001	合格
单体电池 39 电压(V)	2	0.005	2.002	0.002	合格
单体电池 40 电压(V)	2.01	0.005	2.009	0.001	合格
仪表盘温度 1(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 2(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 3(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 4(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 5(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 6(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 7(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 8(°C)	25	1	25	0	合格
仪表盘温度 9(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 10(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 11(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 12(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 13(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 14(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 15(°C)	0	0	0	0	合格
仪表盘温度 16(°C)	0	0	0	0	合格
单体过充					假
单体过放					真
温度过高					假
放电过流					假
绝缘低					假
绝缘过低					假

华中科技大学硕士学位论文

通讯中断					假
总压过高					真
总压过低					假
充电过流					假
温度过低					假
温差过大					假
压差过大					假
温升过快					假
短路保护					假
放电继电器状态					断开
充电继电器状态					断开
预充电继电器状态					断开
充电连接状态					断开
充电状态					未充电
BMS 系统故障					正常
继电器粘连					粘连
结论					合格