



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

分类号

密级

太原理工大学

硕士学位论文

题目 微型厢式物流车主从式电池管理系统研究与设计

英文并列题目 Research and Design of Master-Slave Battery Management System for Mini Van Logistic Vehicle

研究生姓名: 慕振博

学号: 2015520037

专业: 机械工程

研究方向: 新能源汽车

导师姓名: 孙桓五

职称: 教授

论文提交日期 2018/06

学位授予单位: 太原理工大学

地址: 山西·太原

太 原 理 工 大 学

声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 慕振博 日期： 2018.6.18

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解太原理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

本人签名： 慕振博 日期： 2018.6.18

导师签名： 石永红 日期： 2018.6.18

微型厢式物流车主从式电池管理系统研究与设计

摘要

山西省是煤炭大省，是全国重要的能源基地，改变“一煤独大”产业结构，推动能源革命，实现经济转型是目前重要的课题。为此，山西省提出培育和壮大新能源汽车产业，加快新能源汽车的推广和应用的发展策略。2017年3月，山西省发布《山西省新能源汽车产业发展2017年行动计划》，着重强调做大纯电动汽车产业规模，推动新能源汽车重点项目建设。

近年来，随着电子商务的快速发展，纯电物流车的需求不断增长。电商传统物流车主要是使用柴油、汽油型的厢货车，随着我国新能源汽车的快速发展，纯电物流车逐渐成为山西省政府和新能源车企大力推广和研发的新型运载交通工具。

目前针对微型厢式纯电物流车的专项研究开发较少，导致这类车型的续航里程及电池使用寿命达不到最优效果。针对这种情况，本文结合微型厢式纯电物流车的车身电池布置使用情况及综合行驶工况，对锂电池荷电状态（SOC）估算算法及电池管理系统（BMS）进行了研究与设计。

主要完成了以下工作：

（1）提出了一种针对电池包的基于扩展卡尔曼滤波法的防扩散SOC估算算法。在扩展卡尔曼滤波算法基础上，考虑系统噪声和量测噪声的影响，添加噪声估值器；并在其基础上引入发散判据，当有状态变量估算误差变大而发散时，对卡尔曼增益矩阵构造一个自适应指数冻结因子，保障了估算误差控制在要求的精度范围内。

（2）完成了对车用动力锂电池建模及模型参数的辨识。使用递推最小二乘法，通过在不同的充放电倍率下得到电池模型中电阻及电容参数；并通过电池的充放电曲线，拟合出电池开路电压（OCV）与电池SOC间的多

项式公式。

(3) 设计了一种“一主多从”的电池管理系统结构。结合微型厢式纯电动物流车电池使用情况及行驶工况，对电池管理系统的功能及拓扑结构进行了深入分析，将电池管理系统设置为一个中央模块单元（CMU）以及多个采集模块单元（AMU）的主从式拓扑结构，实现对每块电池的监控。

(4) 完成了部分电池管理系统模块电路设计。主要设计了主板电源模块电路、控制模块电路、电池电压采集电路、均衡电路、通信电路等。主板采用飞思卡尔 MC9S12XS128 型芯片实现对系统整体的监控，从板采用凌特公司的 LTC6802-2 芯片完成对电池单体电压、电流、及温度的采集和均衡功能。

关键词：微型厢式纯电动物流车，SOC 估算，扩展卡尔曼滤波法，主从式电池管理系统，“一主多从”

RESEARCH AND DESIGN OF MASTER-SLAVE BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR MINI VAN LOGISTIC VEHICLE

ABSTRACT

Shanxi province is a major province of coal and an important energy base in the country. Changing the “one coal alone” industrial structure, promoting the energy revolution, and achieving economic restructuring are urgent issues at present. So Shanxi province proposed the development strategy of cultivating and expanding the new energy automobile industry and accelerating the promotion and application of new energy vehicles. In March 2017, the Shanxi Economic and Information Technology Commission issued the “New Energy Vehicle Industry Development in Shanxi Province in 2017”. The plan focuses on the expansion of the scale of the new energy automotive industry and the promotion of key projects.

In recent years, with the rapid development of e-commerce, the demand for pure electric logistics vehicles has continuously increased. E-commerce traditional logistics vehicles mainly are diesel and gasoline-type vans. With the rapid development of China's new energy vehicles, pure electric logistics vehicles have also become a new type of transport vehicle that Shanxi provincial government and new energy vehicle companies vigorously promote and develop.

At present, special research and development for mini-van pure electric logistics vehicles are few, which leads to the driving range and battery life of such models not achieving optimal results. In view of this situation, this paper combines the car battery layout and comprehensive driving conditions of a mini van-type pure electric vehicle, and studies and designs the state of charge(SOC) estimation algorithm and battery management system for lithium batteries.

This paper mainly completes the following work:

(1) Designed an anti-diffusion SOC estimation algorithm based on extended kalman filter algorithm. Based on the extended kalman filter algorithm, considering the effects of system noise and measurement noise, a noise estimator is added; And introducing the

divergence criterion, when the estimation error of the state variable becomes larger and diverges, an adaptive exponential freezing factor is constructed for the kalman gain matrix to ensure that the estimation error is within the required accuracy range.

(2) Completed modeling of vehicle lithium battery and identification of model parameters. Using the recursive least squares method, the resistance and capacitance parameters in the battery model are obtained under different charge and discharge rates; And fit the polynomial formula between the open circuit voltage (OCV) of the battery and the battery SOC through the charge and discharge curve of the battery.

(3) Designed the one-master multi-slave mode battery management system framework. Combined with the use of batteries in the mini-van pure electric logistics vehicles, the function and topology of the battery management system are analyzed in depth. The battery management system is set as a master-slave topology of a central module unit (CMU) and multiple acquisition module units (AMU) to monitor each battery.

(4) Completed part of the battery management system module circuit design. Mainly designed the motherboard power module circuit, control module circuit, battery voltage acquisition circuit, equalization circuit, communication circuit. The mainboard adopts Freescale's MC9S12XS128 chip to control the system. The LTC6802-2 chip from Linear Technology is used to complete the collection and equalization of battery cell voltage, current, and temperature.

KEY WORDS: micro-van pure electric logistics vehicles, soc estimation, extended kalman filter, master-slave battery management system, “one-master multi-slave”

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 纯电动车电池及电池管理系统发展现状	2
1.2.1 动力电池技术发展现状	2
1.2.2 电池管理系统研究现状	4
1.3 电池管理系统中 SOC 功能及 SOC 估算方法概述	7
1.3.1 SOC 与电池管理系统关系	7
1.3.2 锂电池 SOC 的定义及用途	7
1.3.3 锂电池 SOC 估算影响因素	9
1.3.4 SOC 估算方法研究	11
1.4 本文主要研究内容	12
第二章 基于扩展卡尔曼滤波的防发散 SOC 估算算法	13
2.1 锂离子电池模型与模型参数辨识	13
2.1.1 锂电池模型的选择	13
2.1.2 锂电池模型参数辨识	15
2.1.3 电池模型验证	21
2.2 防发散 Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波 SOC 估算算法	22
2.2.1 扩展卡尔曼滤波算法	23
2.2.2 防发散型 Sage-Husa 自适应滤波算	25
2.3 SOC 估算算法仿真验证	27
2.3.1 仿真工况的建立	27
2.3.2 实验仿真验证	30
2.4 本章小结	32
第三章 微型厢式物流车主从式电池管理系统硬件设计	33
3.1 基于总线型的电池管理系统总体方案设计	33

3.1.1 电池管理系统功能设计	34
3.1.2 电池管理系统硬件拓扑结构	35
3.2 中央控制单元硬件电路设计	37
3.2.1 主板电源模块电路	38
3.2.2 控制模块电路	39
3.2.3 绝缘监测模块电路	39
3.2.4 热管理模块电路	40
3.3 电池监控单元硬件电路设计	40
3.3.1 采集模块电路	41
3.3.2 均衡模块电路	43
3.3.3 主从板通信模块电路	44
3.4 硬件抗干扰设计	46
3.5 本章小结	46
第四章 微型厢式物流车主从式电池管理系统软件设计	47
4.1 BMS 系统软件架构及系统概述	47
4.1.1 BMS 软件系统架构	47
4.1.2 BMS 软件系统环境概述	48
4.2 BMS 中央控制系统软件设计	48
4.3 BMS 电池监控系统软件设计	49
4.3.1 锂电池 SOC 估算程序	50
4.3.2 采集监控模块程序	51
4.3.3 SPI 通信模块程序	54
4.3.4 EEPROM 读写子程序	54
4.4 本章小结	55
第五章 主从式电池管理系统功能仿真	57
5.1 BMS 系统硬件电路功能仿真软件	57
5.2 主板电源模块信号仿真	57
5.3 采集模块信号仿真	59
5.4 均衡模块信号仿真	61
5.5 本章小结	63

第六章 主从式电池管理系统试验验证	65
6.1 电池监控单元测试环境及方法	65
6.2 试验分析	66
6.3 本章小结	69
第七章 总结与展望	71
参考文献	73
致谢	79
攻读硕士学位期间发表的学术成果	81

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着全球经济的持续发展与人口规模的持续增加，能源和环境问题越来越突出，并成为了全球性问题。因此降低车用化石能源消耗、减少汽车尾气污染物排放，成为其中一个重要的解决途径。新能源汽车以零污染、零排放的优势逐渐成为各国以及车企追捧的对象。作为汽车工业发展的时代产物，从国家层面讲，美、日、欧等汽车工业较为发达的国家和地区以不同形式阐述了本国的新能源汽车发展计划及技术路线图，日本政府发布了《纯电动和插电式混合动力汽车指导方针》，美国政府发布了《电动汽车普及大挑战蓝图》，德国政府发布了《国家电动汽车发展计划》等，这些计划为各国的新能源汽车发展起到了明确的技术引领作用。从企业层面讲，美国、欧洲、日本以及中国的各大汽车集团，先后发布了各自的新能源战略，福特汽车发布了《移动出行蓝图 2050》，大众汽车发布了《共同战略 2050》，丰田汽车发布了《气候挑战 2050》等。

作为我国的战略新兴产业之一，新能源汽车的发展承载着缓解石油资源短缺压力，解决日益突出的环境污染问题，实现我国汽车产业结构调整和转型升级的历史使命。我国政府高度重视新能源汽车的技术和产业发展，先后发布的《节能与新能源汽车产业发展规划 2012-2020》、《中国制造 2025》等一系列战略规划和推进政策，为我国新能源汽车发展明确了方向。近年来，在国家、地方的积极推动下，作为新能源汽车的重要组成部分，纯电动汽车和插电式混合动力汽车技术和产业以及相关基础设施建设取得了重大进步。根据最新统计消息，2017 年 6 月，国内新能源专用车市场共计生产 6420 辆（全部为纯电动车型），比去年同期增长 152%；1-6 月，纯电动专用车市场累计产量达到 1.3 万辆，比去年同期 6806 辆增长一倍。

虽然我国已经跃居世界新能源汽车产销第一大国，但仍然存在大而不强的潜在问题，仍然面临严峻的国际竞争压力。因此，在新能源汽车的快速发展，技术链、产业链、产业生态以及全球竞争格局即将形成的关键时期，结合我国国情和国际竞争发展态势，发展我国新能源汽车的关键零部件技术，显得尤为重要和迫切^[1]。在《中国制造 2025》的指引下，研究制订技术路线图，突破核心关键技术，抢占汽车技术的国际制高点，推动我国新能源汽车产业持续健康快速发展，具有重大意义。

电池系统的动力性能、安全性、可靠性是确保纯电动汽车性能和安全的重要基础，

我国在电池管理系统集成开发方面与国际先进水平还存在差距，因此基于前瞻技术研究成果，开展电池管理系统的安全性、可靠性、电池均衡、热管理的开发，成为当前重点研究方向。

针对微型厢式纯电动物流车（车长小于等 3.5m，总质量小于等于 1800kg）的市场应用情况，目前主要有以下两个问题：

（1）当前纯电动汽车所用的电池逐渐趋于高能量密度、体积小型化的发展趋势。目前微型厢式物流车所用 BMS 多为乘用车上的 BMS 移植过来，由于乘用车用 BMS 多为集中式或模块式 BMS 拓扑结构，这种结构对于微型厢式物流车的电池情况适用性较差，这给电池的监控管理及整车的安全带来巨大挑战。

（2）纯电动汽车的能量来源于动力电池，电池电量并不与实际的使用情况呈现简单的线性关系，必须使用一定估算方法。目前针对电池 SOC 估算的算法有很多，主流使用的是安时积分结合开路电压法，但其精度一般；而滤波类估算方法精度能得到一定保证，但遇到复杂路况可能滤波发散，系统估算的稳定度不够；神经网络法则训练数据大，计算复杂，且移植性差。

因此，针对上述两个问题，在已有方法的基础上提出一种精确而稳定的电池 SOC 估算算法及设计一款针对微型厢式纯电动物流车的电池管理系统便是本课题研究的关键。

1.2 纯电动车电池及电池管理系统发展现状

1.2.1 动力电池技术发展现状

动力电池是新能源汽车的核心总成，关系到新能源汽车的安全性、动力性、经济性、续航里程寿命与充放电等，其性能的优劣直接影响新能源汽车的各项使用指标，如安全性、能量密度、比功率、寿命以及成本等^[2]。

1) 研究现状

从目前国内外动力电池公司量产的锂离子动力电池产品看，现有的锂离子电池产品基本分为两大类：一类是小容量圆柱形电池（以 18650 电池为典型代表产品，其他类型如 20700、21700 及 26650 等），电池系统需要采用多串并联的方式，以达到总电压与总容量的要求，此时电池的数量达到成百上千只，电池之间的连接以及热、电的管理复杂；另一类则采用大容量电池，容量可达数十安时甚至更高，通常采用铝塑膜封装或金属壳

体焊接封装。由于电池的容量大，电池模块和系统需要的单体电池数量大大减少，电池之间的连接以及热、电的管理相对简单。

高比容量、高比功率、高安全性和长循环寿命的电池已成为研究开发的热点，目前关于电池材料的研究情况主要包含三方面^[3]。

(1) 正极材料。目前已经规模化生产的电池正极材料主要包括层状结构的钴酸锂、镍钴锰三元材料（含镍钴铝）、尖晶石结构的锰酸锂和橄榄石型的磷酸铁锂等。钴酸锂能满足对高体积能量密度电池的要求，但价格贵、资源紧缺及安全性差，一般不应用；锰酸锂成本较低，电导率高，结构稳定，环境友好，但其具有较高的电级电位，容易导致电解液被氧化，高温性能不好，容量容易衰减。磷酸铁锂具有规则的橄榄石结构，其稳定性较好，具有良好的循环性能，但是它的振实密度与压实密度较低，低温性能较差。镍钴锰酸锂材料的高容量和高安全性是其他材料无法比拟的，但是三元材料压实密度低，是未来发展的趋势^[3]。

(2) 负极材料。现阶段负极材料主要研究方向有石墨化碳材料、无定形碳材料、氮化物、硅基材料、锡基材料、新型合金和其他材料。

(3) 电芯。电芯作为动力电池的关键技术，我国动力电池关键材料基本实现了国产化，形成了上下游相对完整的产业链，但材料的总体技术水平与国外还存在一定差距，在车用动力电池技术方面，我国锂离子动力电池的产业链初具规模，能量型动力单体电池技术指标达到国际领先水平，但锂离子电池的设计水平、锂离子动力电池生产设备与锂离子动力电池原材料的技术水平、锂离子动力电池大规模生产控制能力（一致性、可靠性）等还有赶超空间^[4]。

2) 部分国内电池厂商生产情况

国内主要锂电池及材料厂家有比亚迪、宁德时代、国轩高科、天津力神、中航锂电等^[3]。

表 1-1 部分国内厂商电池生产情况

Tab.1-1 Some domestic company battery production

公司	锂电池产品	主要参数	市场应用
比亚迪	电动车电池 VM 系列(磷酸铁锂电池)	型号：(24V、36V、48V) / (10Ah、12 Ah、20 Ah、24 Ah)。循环性能：>2000 次。	电动汽车
宁德时代	磷酸亚铁锂、镍钴锰三元、锰酸锂、钴酸锂等化学体系	型号：3.2V/(50~200Ah)、3.6V/(6~42Ah)	电动汽车、巴士

国轩高科	LFP40120200S LFP3.2V 10Ah LFP3.2V 20Ah LFP3.2V 50Ah	型号: 3.2V/(5~50)Ah。循环性能: >2000 次。	电动汽车、电动工具
天津力神	四大系列动力锂电池	型号: 3.2V/(8.5~13.5Ah)	电动汽车、混合动力汽车 潜艇、鱼雷、装甲车辆、无人机、电动汽车、城市公交
中航锂电	磷酸铁锂动力电池 SE40-400AHA	最大放电电流: 400A	

3) 技术路线

目前, 锂离子电池及电池包在比能量、能量密度、比功率、寿命以及成本等方面距离理想使用要求还有较大差距, 因此这几个方面将是未来电池发展的主要技术方向^[5]。

2016 年 10 月 26 日, 中国汽车工程学会发布了《节能与新能源汽车技术路线图》一书, 其中有专题板块对纯电动车(BEV)动力电池的主要技术指标进行了明确的规定, 具体的指标如表 1-2 所示。

表 1-2 我国纯电动汽车动力电池技术发展目标

Tab.1-2 Development goal of power battery for pure electric vehicle in China

电池指标	2020 年	2025 年	2030 年
电池比能量	350 Wh/kg	400 Wh/kg	500 Wh/kg
电池包比能量	250 Wh/kg	280 Wh/kg	350 Wh/kg
电池能量密度	650 Wh/L	800 Wh/L	1000 Wh/L
电池包能量密度	320 Wh/L	500 Wh/L	700 Wh/L
电池比功率	1000 W/kg	1200 W/kg	1500 W/kg
电池包比功率	700 W/kg	700 W/kg	700 W/kg
电池寿命	4000 次/10 年	4500 次/10 年	5000 次/10 年
电池包寿命	3000 次/10 年	3500 次/10 年	4000 次/10 年
电池成本	0.6 元/Wh	0.5 元/Wh	0.4 元/Wh
电池包成本	1.0 元/Wh	0.9 元/Wh	0.8 元/Wh

1.2.2 电池管理系统研究现状

随着技术创新, 市场对动力电池的要求也愈发的高, 但动力电池安全保障低、使用寿命短、功率小等问题却成为创新瓶颈。此时, 电池管理系统(BMS)作为衔接电池组、整车系统和电机的重要纽带, 逐渐被企业视为最核心技术。

1) 研究现状

电池管理系统是在使用过程中检测电池能量的消耗量并预测电池剩余电量的综合性电子控制系统。此外，它还具备故障诊断、短路保护、显示报警及实时监测电池运行状态参数等，功能越来越完善。具体功能如下^[6,7]：

(1) 电池组参数检测。总电压、总电流、电池包温度作为电池状态估算与热管理的重要数据来源，是整个系统的底层基础支撑；同时，还需要绝缘检测。

(2) 电池状态估算。荷电状态 (SOC, state of charge)，健康状态 (SOH, state of health)，功能状态 (SOP, state of power)。SOC 指电池剩余电量。SOH 是指电池的健康状态，它包括两部分：安时容量和功率的变化。SOP 有两个作用，第一个限制功率，保护电池，使电池永远工作在给定的工作区间；第二个是充分发挥电池的潜力。

(3) 故障诊断。主要是故障检测及故障定位。故障检测指通过采集到的传感器信号以及微处理器的识别判断，进行故障预警。BMS 系统识别的故障有充放电控制继电器故障、与充电机 CAN 通信故障以及其他各种软硬件故障等。

(4) 电池安全与报警。电池安全指电池组或单体电池的电压是否在安全的范围内，电池的热环境是否有效控制。电池报警主要有电池组过压报警、单体过压报警、电池组欠压报警、单体欠压报警、高压漏电报警、电池高温报警、均衡报警等。

(5) 充电控制。通过与充电机的通信，实现对电池的安全充电。

(6) 充放电继电器控制。电池包内继电器一般有主正、主负、预充继电器和充电继电器，通过 BMS 实现对继电器的顺序开断。在电池包外还有独立的配电箱对整个电流分配做更细致的保护。

(7) 热管理。当因电池使用过程中产生较多热量使电池包温度较高时，通过风冷或液冷进行快速的降温；当外部处于低温环境时（如-20℃），通过加热器使电池温度升高，使电池达到较好的放电温度。

(8) CAN 通讯。主要是 BMS 与整车控制器通信，以及内部 CAN 通信等。

(9) 信息存储。对电池电压、温度、SOC、SOH、SOP、故障码等重要数据实时存储。

2) 技术厂家

目前，新能源汽车正进入成长期，众多电子科技型公司进入该领域，其中主要的 BMS 厂家有惠州亿能，深圳科列，安徽力高等企业。将几家厂商的电池管理系统类型及产品特点总结如表 1-3 所示。

表 1-3 主要电池管理系统厂商产品对比

Tab.1-3 Comparison of major battery management system manufacturers

专业厂家	惠州亿能	深圳科列	安徽力高
产品类型	括纯电动、增程式、插电式和混合动力，涵盖商用车、乘用车和特种车	微型电动乘用车，电动乘用车/专用车，电动客车，双层电动客车	大中型车用 BMS，轻型车用 BMS，矿用 BMS
典型产品	EV05BCU，EV05 BMU-24S	BMS 一体机	B5 系列，B3 系列，B1 系列
产品特点	系统功能自检、高低压耐压、防护等级、冗余备份以及抗滥用性等方面进行重点设计和测试。	可靠的 SOC、SOH 估算。支持 CAN 网络唤醒，支持在线 CAN 升级，支持 UDS 协议升级	系统集成电压/电流/温度等电池信息采集功能，集成 SOC 估算、电池均衡等辅助功能，支持 CAN 通信，485 总线通信，继电器控制等管理特点

目前，众多国外大型汽车厂商规划未来新能源汽车生产计划，并在该领域做了大量的研发及投入，开发出各类型的电池管理系统。其中典型的有：美国通用汽车公司生产的“EVI”型电动汽车上应用的电池管理系统；美国 Aerovironment 公司研发的 Long-Life Battery Using Intelligent Modular Control System（通常称为 SmartGuard 电池管理系统）；德国 MentzerElectronic GmbH 和 Werner Retzlaff 研发的 BADICHEQ 电池管理系统和 BADICOaCH 电池管理系统；德国 B.Hauck 设计的 BATTMAN 系统；美国 AC Propulsion 公司开发的名为 BatOpt 的高性能电池管理系统^[8,9]。

表 1-4 国内外主流 BMS 供应商的技术参数

Tab.1-4 Technical parameters of mainstream BMS suppliers at home and abroad

主要指标	国内主流厂商	国外主流厂商
配套方案	主从结构	主从结构
技术指标	电压测量精度：0.5%FS	电压测量精度：0.1%FS
	电流测量精度：0.5%FS	电流测量精度：0.1%FS
	温度测量范围：-40℃~125℃	电流测量范围：0+-600A
	温度测量精度：0.5℃	SOC 估算精度：5%
	SOC 估算精度：5%	均衡方式：主动均衡
均衡方式：主/被动均衡		
车型应用范围	纯电动车、混合动力汽车	纯电动车、混合动力汽车

功能安全	电池过冲、过放、温升保护、绝缘保护、高压互锁、预充电	电池过冲、过放、温升保护、绝缘保护、高压互锁、预充电
工作温度范围	-40℃~85℃	-40℃~85℃
适用电芯范围	铅酸电池、镍氢电池、锂电池等	锰酸锂、三元材料

1.3 电池管理系统中 SOC 功能及 SOC 估算方法概述

1.3.1 SOC 与电池管理系统关系

锂电池 SOC 估算是电池管理系统中的一项关键功能。电池状态估算包括估算 SOC、SOP 和 SOH，其中 SOC 是 BMS 中最核心的一项参数，是电池管理系统对充放电等功能进行控制的依据，所以它的估算精度和鲁棒性极其重要。现以 SOC 对纯电动汽车的控制为例进行简要分析^[10]，如表 1-5 所示。

表 1-5 SOC 与整车控制策略关系

Tab.1-5 Relationship between SOC and vehicle control strategy

SOC /%	控制策略
<5	车辆被禁止启动，DC/DC 关闭
5~25	车用空调禁用，车辆功率限制，最大速度<45km/h
25~95	最适宜的驾驶区间
95~100	电动机的能量回收功能被禁止

1.3.2 锂电池 SOC 的定义及用途

1) 锂电池 SOC 定义

SOC(state of charge)表征电池的荷电状态，也用来表示电池的剩余电量。目前关于锂电池的剩余电量，国家还没有给出统一的定义，根据国内外电池厂商的制定的方法，通常电池的荷电状态 SOC 可以从电池所拥有的电量和当前能释放的电路进行定义。从其拥有的电量的角度出发可以将 SOC 定义为：电池在特定的充放电倍率下，电池的剩余电量与对应条件下电池额定容量的比值^[11]，如式 1-1。

$$SOC = \frac{Q_r}{Q} \quad (1-1)$$

式中： Q_r 表示当前电池剩余电量， Q 表示电池在一定电流和温度条件下所能释放的总电量。

2) 锂电池 SOC 的用途

动力电池的剩余电量 (SOC) 是驾驶者和纯电动汽车联系的纽带, 驾驶员通过该参数了解所驾驶电动汽车的剩余里程以及是否需要充电等操作。SOC 值是纯电动汽车的重要参数, 主要体现在以下几方面:

(1) 作为驾驶者对车辆剩余里程直观判断来源。驾驶者通常直观地通过 SOC 值对电动车剩余里程做出判断, 对整车的行驶控制等做出综合判断。

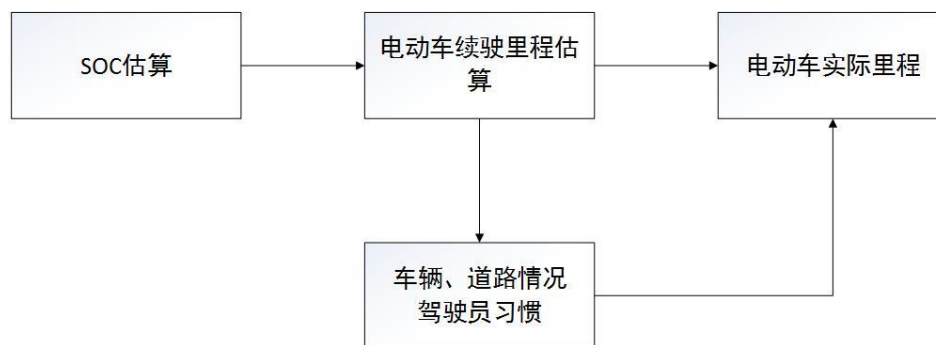


图 1-1 SOC 估算与行驶里程联系

Fig.1-1 SOC estimation and mileage

(2) 为整车控制策略做参考。整车控制策略要参考电池 SOC 值, 并据此对整车的行驶策略进行控制。当 SOC 比较低时, 限制电池输出功率; 当 SOC 比较高时, 能量回收要做限制。通过 SOC 对当前电池的功率特性做一定的控制, 可以对电池寿命进行较好的保护, 防止电池的过冲过放引起的寿命衰减。

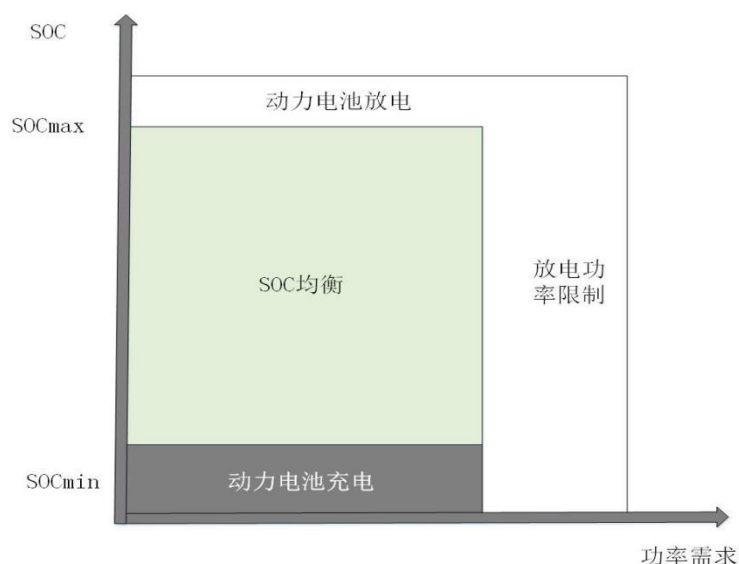


图 1-2 SOC 与功率需求关系

Fig.1-2 SOC and power requirements

(3) 保护动力电池。对于蓄电池而言, 过充电和过放电都可能对电池造成永久性

的损害，严重缩短电池的使用寿命。如果可以提供准确的 SOC 值，整车控制策略可以将 SOC 控制在一定范围内（20%~90%），起到对电池的保护作用，从而延长其使用寿命。

1.3.3 锂电池 SOC 估算影响因素

电池由其内部发生的化学反应而发生电荷的移动产生电。由于电池本身的化学构造，造成其各项参数如电池容量、内阻、端电压等会因为外界因素的影响而不具有稳定性，由此造成对电池 SOC 估算时出现误差；同时使用的 SOC 估算模型精度以及电流采集精度等也是影响 SOC 估算精度的重要因素。

1) 电池循环次数

当磷酸铁锂电池的充放电不断循环时，电池内部材料会不断的老化，电池电极的活性材料不断变少，电解液浓度不断降低，极板附近堆积了大量的反应物等等，这些都导致电池内阻的增大，活性离子的减少，电池容量的降低。图 1-3 为文献[12]的磷酸铁锂电池总容量与循环次数的关系。

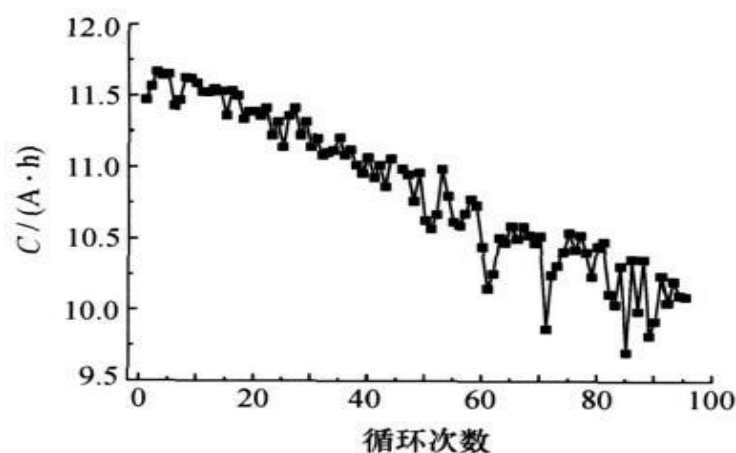


图 1-3 电池总容量与循环次数的关系^[12]

Fig.1-3 the total battery capacity and the number of cycles^[12]

2) 电池充放电倍率

电池的标称容量是指在 25℃ 室温环境下，将电池充到其上限截止电压后，然后以一定不变的电流进行持续放电，到达下限截止电压后停止放电，这个过程中电池放出的容量^[13]。

电池在不同充放电倍率放电情况下，电池变现出的充放电容量差异较大。一般，在大放电倍率下，电池可使用的容量会减小。但是，在恢复正常的情况下，电池的可用容量仍能够恢复到正常水平^[14]。

3) 电池环境温度

在不同环境温度下, 电池的放电总容量是不同的。当温度升高时, 锂离子的活性加强, 电池内部电化学反应加快, 电池的内阻变小, 使电池的端电压、输出的电量呈现增加的趋势。在较低环境温度下, 电池的内部物质活性降低, 使其能放出电量大大降低; 一般电池合适的放电温度在 $20\sim 60^{\circ}\text{C}$ 时, 合适的充电温度在 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ [13,14], 图 1-4 为文献 [12] 电池容量与温度关系, 图 1-5 为文献 [15] 中三种温度充放电的 OCV-SOC 关系曲线图。

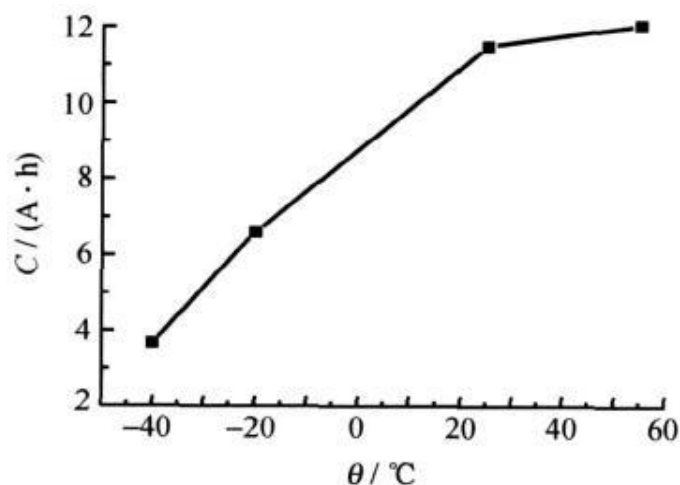


图 1-4 电池电量与温度的关系 [12]

Fig.1-4 battery power and temperature [12]

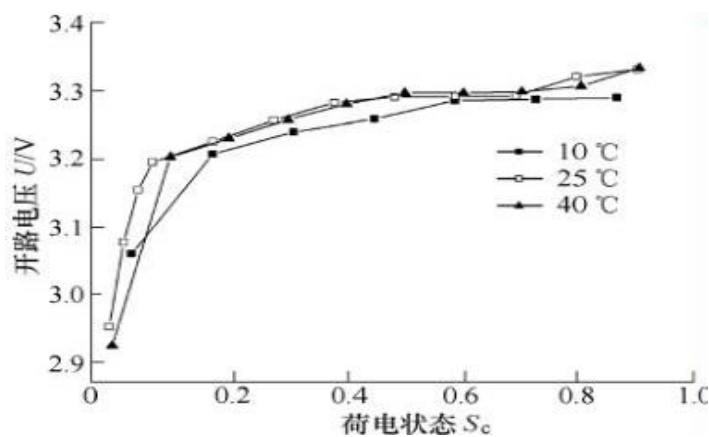


图 1-5 三种温度下电池放电 SOC-OCV 曲线 [15]

Fig.1-5 Battery discharging SOC-OCV curves at three temperatures [15]

4) 电流采集精度

由于在使用安时积分法或卡尔曼滤波法进行电池 SOC 估算时, 都要用到电流作为输入变量, 因此电流采集的精度会影响实时的 SOC 估算值。

5) 模型的精度

除去安时积分法和开路电压法等几个不需要模型来计算 SOC 的方法, 其它涉及模

型的，模型与电池特性的契合准确度都直接影响着最终 SOC 的估算精度。

1.3.4 SOC 估算方法研究

SOC 估算方法的研究随着纯电动车电池的应用而非常普遍，目前应用较多的是安时积分法、开路电压法，此外还有基于卡尔曼滤波法的各种自适应算法，神经网络模型法等。

1) 安时积分法

安时积分法的计算公式如下^[6]：

$$SOC = SOC_0 - \frac{\eta_1}{c\eta_2} \int_0^t I dt \quad (1-2)$$

式中： SOC_0 为充放电起始状态； C 为电池的额定总容量； η_1 为电池库伦效率； η_2 为电池的充放电效率； $\int_0^t I dt$ 表示电池的放电电流 I 在时间 $[0, t]$ 上的积分，放电过程中电池的电流 I 为非负值。

在起始荷电状态 SOC_0 比较准确情况下，安时积分法在一段时间内具有相当好的精度。但是，安时积分法的主要缺点为：电荷估算精度受起始 SOC_0 影响较大；库伦效率 η_1 受电池的工作状态影响大（如荷电状态、温度、电流大小等）， η_1 难于准确测量；电流测量精度误差会产生累计效应，随着时间积累误差会逐渐增大。

2) 自适应滤波法

自适应算法系统能在系统工作过程中，依靠各项设置指标参数不断地检测并判断，并根据测量参数的变化，改变运行步骤或参数，使系统处于良好稳定的工作状态^[16]。初始收敛速度、时变系统跟踪能力以及稳态失调是衡量自适应滤波算法优劣的三个重要技术指标^[17]。

(1) 自适应无迹卡尔曼滤波

无迹卡尔曼滤波是一种非线性滤波，它并不对非线性方程 f 和 h 在估计点处做线性化逼近，而是利用无迹变换在估计点附近确定采样点，用这些样本点表示的高斯密度近似状态的概率密度函数^[18,19]。

在此方法的基础上，针对锂电池模型参数，如极化电阻、极化电容等参数会因放电倍率、环境温度等因素的变化而变化，文献[20]中提出利用扩展卡尔曼滤波法（EKF）对电池欧姆内阻进行实时辨识并更新，一定程度上解决了模型参数的时变问题，提高了 SOC 估算的精度。文献[21]针对噪声时变问题，在算法中引入自适应协方差匹配技术，

通过对系统误差和观测误差的实时更新，使状态变量的估算更加准确。

(2) 自适应卡尔曼滤波算法

为了改进卡尔曼滤波器的性能，就需要考虑系统噪声和观测噪声的影响，给出时变噪声统计估值器及相应的自适应卡尔曼滤波器。Sage 和 Husa 给出了常值的噪声统计估值器，该值并不能自适应改变，因而改善效果有限；邓自立教授在此基础上，用指数加权方法联立给出了模型噪声和观测噪声两者的未知时变均值、协方差估值器及相应的自适应卡尔曼滤波器。

3) 神经网络模型法

神经网络法自学习能力较强，由于其采用并行处理结构，因此具有较好的处理高度非线性的系统问题的能力。神经网络法利用大量的试验数据及强大的自学习能力可以实现对电池各项重要参数进行准确模拟，即输入特定的输入变量，使用经过训练的神经网络模型，可得到电池的各主要参数值，如 SOC、内阻等。神经网络法的不足之处是神经网络训练需要大量筛选实验测量数据作为初始数据，训练时间较长，而且对于不同类型电池不具有可移植性^[22-24]。

1.4 本文主要研究内容

论文围绕微型厢式纯电动物流车电池管理系统展开，主要工作如下：

(1) 对现有锂电池 SOC 估算算法进行研究，设计一种新型防滤波发散的 SOC 估算算法，并结合太原市市内工况进行验证。

(2) 结合对电池组系统中的锂电池模型，通过递推最小二乘法实现模型参数辨识，并使用 Simulink 网络模型进行参数验证。

(3) “一主多从”的电池管理系统结构、部分模块硬件电路及软件的设计。

本文创新点：

(1) 对现有的 SOC 估算算法提出改进，针对在使用扩展卡尔曼滤波过程中发现滤波发散的情况下，通过对增益矩阵构造一个指数冻结因子，并通过迭代计算，使误差不超过安全阈值，防止发散。

(2) 主要针对当前电动汽车使用单体电池的情况，有针对性的设计电池管理系统的整体方案，包括拓扑结构与硬件电路。此方案在保证全面监控电池状态的情况下，既可以充分发挥 SOC 估算算法的作用，又保证了整体设计的安全性、易装配型及实用性。

第二章 基于扩展卡尔曼滤波的防发散 SOC 估算算法

电池管理系统是电动车能量管理中的重要单元，而 SOC 的估算技术又是电池管理系统中的关键一项。目前纯电动汽车受限于锂电池能量密度等因素，其续航里程距离消费者实际的需求仍有较大差距，而且车辆要频繁的进行起步、加速、减速、停车的步骤，行驶工况复杂。复杂多变的行驶工况容易引起较大的系统噪声，而且环境温度的改变会引起电池内部参数的变化，可能出现滤波发散。因此提高电池 SOC 估算精度并防止滤波发散是本章研究的重点。

2.1 锂离子电池模型与模型参数辨识

2.1.1 锂电池模型的选择

目前，针对锂电池建立的模型种类繁多，其中应用较多的如电化学模型，Rint 模型，戴维南模型，PNGV 模型，RC 网络模型等。

1) 电化学模型

电化学模型是根据电池内部一系列的化学反应，建立相应的电化学反应，由此表征电池的行为方式。由于电池的正负极区域化学反应复杂，完全表征出来会极大的增加模型的复杂度，因此一些学者将其过程简化，得到简化的电池模型，如 Peukert 方程模型、Shepherd 模型、Unnewehr 模型等^[25,26]。

2) 等效电路模型

(1) Rint 模型

Rint 模型结构比较简单，其等效电路如图 2-1 所示。该模型主要是三个元素：开路电源 E 、等效内阻 R 和端电压 U_0 。这种模型相对来说非常简单，它没有考虑内阻是随着温度、充放电倍率和电解液的浓度变化而变化的，不能表现电池内部的动态特性。因此，这种模型只适用于简单电池实验下的仿真，对于电动车中电池复杂的充放电使用情况，其不能满足准确估算 SOC 的要求^[27]。

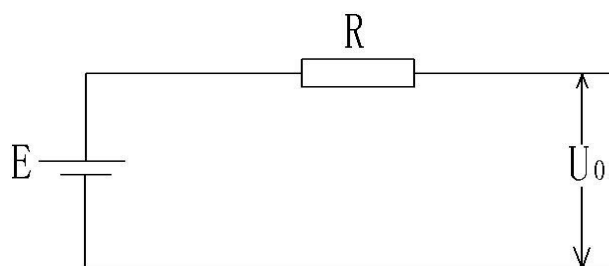


图 2-1 Rint 模型

Fig.2-1 Rint model

(2) 戴维南模型

戴维南模型在 R_{in} 模型的基础上增加了一个 RC 模型，使其能较好的反映电池内的动态特性，模型如图 2-2 所示。

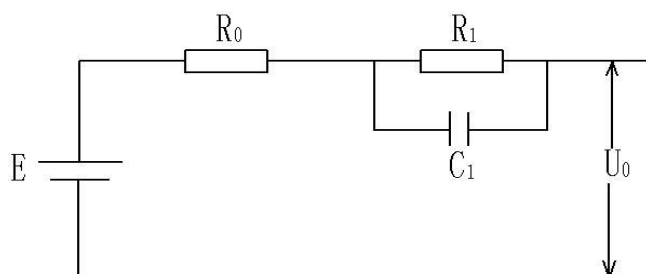


图 2-2 戴维南模型

Fig.2-2 Davidian model

该模型中， R_0 表示电池的欧姆内阻，反映电池恒流工况下的动态特性； R_1 表示电池的极化电阻，反映电池内部发生极化时的响应特性，但是对于电池的自放电等因素没有考虑^[21]。

(3) 二阶 RC 网络模型

二阶 RC 网络模型实在戴维南模型的基础上再串联一个 RC 回路，如图 2-3 所示。

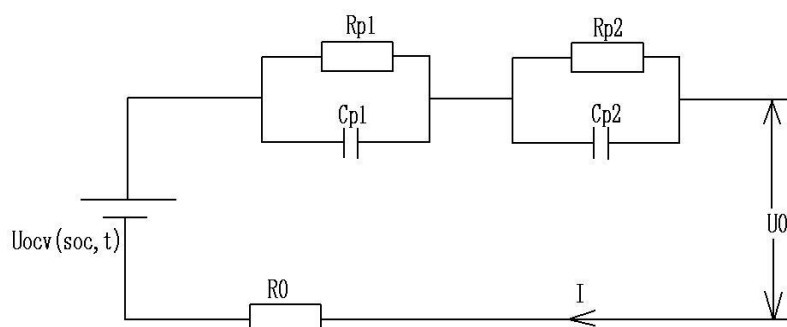


图 2-3 二阶 RC 电池模型

Fig.2-3 Second-Order RC battery model

图中， $U_{ocv}(SOC, t)$ 表示理想开路电压 OCV，它会随着环境温度，充放电倍率等变化而变化，在某一恒温下与电池的 SOC 有固定函数关系； U_0 表示动力电池实际工作电压； I 表示电池工作电流； R_0 表示电池欧姆内阻；两个 RC 并联网络 (R_{p1} 、 C_{p1} 、 R_{p2} 、

C_{p2}) 反映了短时间和长时间的极化效应^[28-30]。

根据上述对几种电池模型描述, 为了更好的展现电池的充放电特性, 通过对上述电池模型在模型准确度及算法实现复杂度的对比, 本文最终选用二阶 RC 网络等效电路模型。

2.1.2 锂电池模型参数辨识

目前现有的部分仪器能通过电池的充放电试验计算得到电池的内部电阻、电容等参数, 但其考虑因素比较简单, 电池的内部参数值会随着正、负极的反应状态发生相应的变化, 且计算结果有有较大误差。所以, 为了能准确得到这些参数, 通常采用参数辨识的方法来获取^[31]。

根据现有的模型参数辨识方法, 主要通过电池的外特性建立数学方程, 反推出电池内部参数值。锂离子电池参数辨识方法主要有非线性最小二乘法、高斯-牛顿法、以及多种智能优化算法, 如遗传算法和粒子群算法等等^[32,33]。几种方法的目标函数均是使拟合曲线和实测曲线的方差达到最小值。

1) 锂电池状态空间表达式

根据二阶 RC 网络等效电路模型, 由基尔霍夫定理, 建立如下表达式^[29,30,34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_0 = U_{ocv} - IR_0 - U_{p1} - U_{p2} \\ \dot{U}_{p1} = \frac{I}{C_{p1}} - \frac{U_{p1}}{R_{p1}C_{p1}} \\ \dot{U}_{p2} = \frac{I}{C_{p2}} - \frac{U_{p2}}{R_{p2}C_{p2}} \end{array} \right. \quad (2-1)$$

2) 递推最小二乘估算法

根据前面对电池模型的分析, 选用二阶 RC 网络模型, 本文采用递推最小二乘法估算 (Recursive Least Squares Method, RLS 算法) 实现模型参数的辨识^[35]。

递推最小二乘法是最小二乘法 (Least Squares Method, LS 算法) 的递推化。递推最小二乘法的基本思想是新估计值 $\hat{\theta}(k+1)$ 是在旧估计值 $\hat{\theta}(k)$ 的基础上, 利用新观测数据对老估计值 $\hat{\theta}(k)$ 进行修正得到的。该方法不需要存储数据, 因此占用空间较小, 而且可以实现对模型参数的实时辨识^[36,37]。

由图 10 可知, 模型的输入是电流 I , 输出 U 为开路电压 U_{ocv} 与端电压 U_0 之差, 通过对 2-1 式拉普拉斯变换得频域方程式:

$$U(s) = I(s) \left[R_0 + \frac{R_{p1}}{1+R_{p1}C_{p1}s} + \frac{R_{p2}}{1+R_{p2}C_{p2}s} \right] \quad (2-2)$$

将上式展开，得到差分方程：

$$U(k) = -k_1U(k-1) - k_2U(k-2) + k_3I(k) + k_4I(k-1) + k_5I(k-2) \quad (2-3)$$

式中： $U(k) = U_{ocv}(k) - U_0(k)$ 。

将上式以矩阵形式表示，令 $\theta = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]^T$ ，

$$H^T(k) = [-U(k-1) \ -U(k-2) \ I(k) \ I(k-1) \ I(k-2)]$$

得到最小二乘法形式：

$$U(k) = H^T(k)\theta + e(k)$$

式中： $e(k)$ 为误差函数。

然后可通过最小二乘法递推计算得到 θ ，流程如下。

$$K(k) = P(k-1)H(k)[H^T(k)P(k-1)H(k) + 1]^{-1}$$

$$P(k) = [H(k) - K(k)H^T(k)]P(k-1)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - H^T(k)\hat{\theta}(k-1)]$$

式中： $K(k)$ 为增益因子； $P(k)$ 是第 K 次测量的协方差阵^[30, 36, 37, 38]。

3) 锂电池模型参数辨识实验

实验所用单体锂电池为中航锂电的磷酸铁锂电池，目前电池总容量为 54AH，额定电压 3.2V，放电截止电压 2.7V，充电截止电压 3.7V，标准充电电流 18.9A，最大持续放电电流 54A。

本次实验设置不同的脉冲放电倍率，包含 0.3C，0.5C，1.0C，来获取电池在放电过程中不同时刻点处的开路电压及端电压。大电流设置为不同的放电倍率值，小电流设置为 0.01A，近似为电池处于断电。然后放电周期为 40S，PWM 为 25%。端电压取周期内的最小值，开路电压取周期内的最大值。

根据上面递推最小二乘法的基本步骤，在 MATLAB 中编写 m 文件。对电池充放电的实验数据导入到 MATLAB 中，通过以上算法计算出 θ 。借用文献[36]中的方法，由 θ 与 R_{p1} 、 C_{p1} 、 R_{p2} 、 C_{p2} 的关系计算得到其参数值。

对算法中未知初始参数进行设定， $\theta_0 = [0.001, 0.001, 0.001, 0.001]^T$ ， $P_0 = 10^6 * \text{eye}(4, 4)$ ，取相对误差 $E = 0.0000005$ ，以下为设置的放电电流图及在 MATLAB 中辨识出参数图表，其中图 2-4、2-7、2-10 为放电脉冲电流，图 2-5、2-8、2-11 为模型内阻的辨识曲线，图 2-6、2-9、2-12 为模型电容辨识曲线。

(1) 0.3C 单体脉冲放电电池模型参数辨识

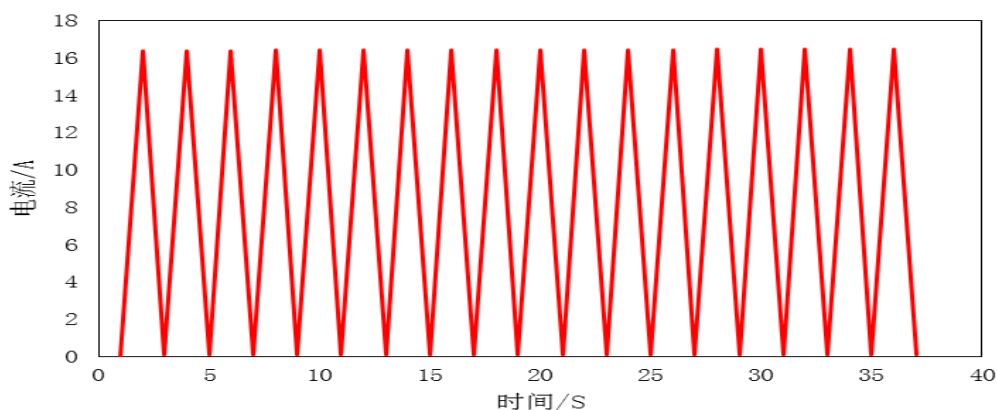


图 2-4 0.3C 单体脉冲放电局部电流图

Fig.2-4 0.3C single pulse discharge local current chart

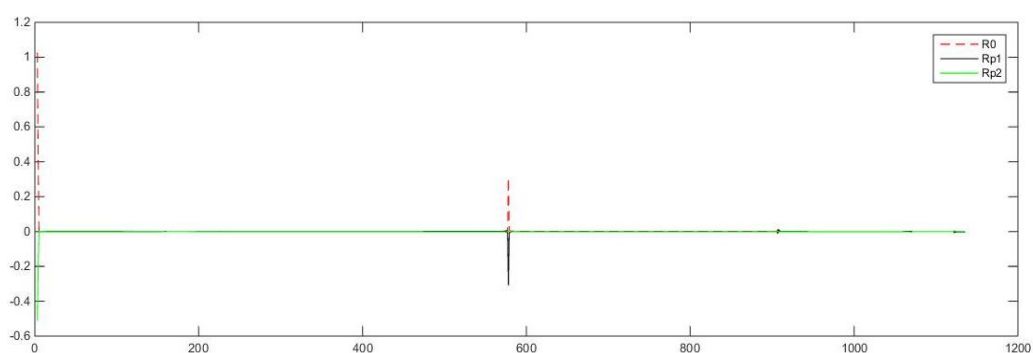


图 2-5 0.3C 单体脉冲放电电池模型内阻辨识曲线

Fig.2-5 0.3C single pulse discharge battery model internal resistance identification curve

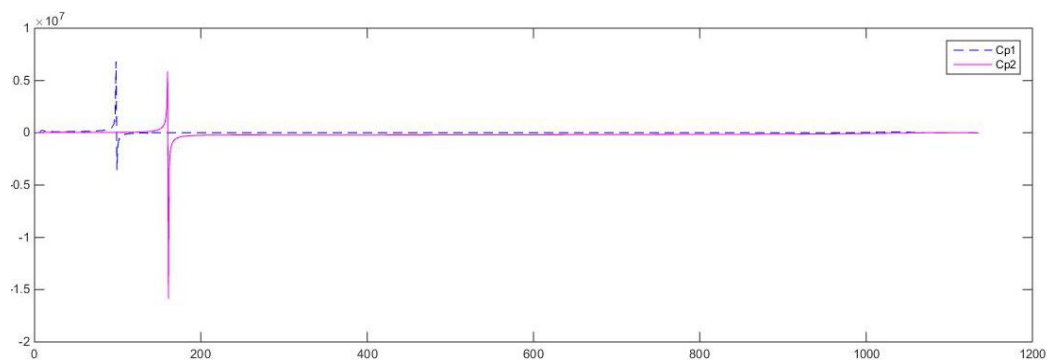


图 2-6 0.3C 单体脉冲放电电池模型电容辨识曲线

Fig.2-6 0.3C single pulse discharge battery model capacitance identification curve

表 2-1 0.3C 单体脉冲放电模型辨识参数

Tab.2-1 0.3C single pulse discharge model identification parameters

SOC	$R_0 * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p1} * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p2} * 10^{-4} / \Omega$	$C_{p1} * 10^6 / F$	$C_{p2} * 10^6 / F$
0.1	3.11	1.12	2.55	6.88	5.49
0.2	2.56	1.08	3.12	6.54	5.89
0.3	2.11	1.02	2.69	7.13	6.97
0.4	1.55	0.88	3.32	7.26	7.14
0.5	1.49	1.11	3.35	8.11	7.23

0.6	1.33	1.43	3.45	7.83	7.48
0.7	1.47	1.32	3.51	6.94	6.88
0.8	1.28	1.11	4.11	7.12	7.06
0.9	1.36	1.25	3.89	8.56	8.16

(2) 0.5C 单体脉冲放电电池模型参数辨识

对电池进行 0.5C 的脉冲电流放电，得到电池模型实时辨识曲线如图 2-7 所示。表 2-2 是其在 SOC 各个节点处的值。

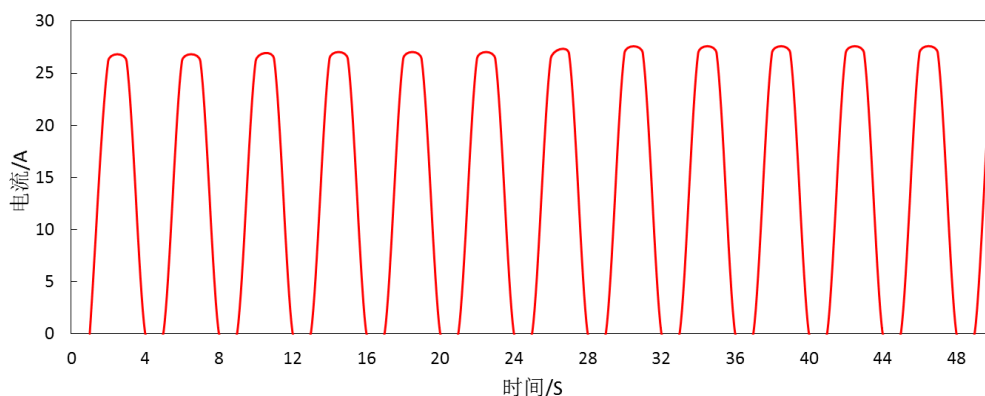


图 2-7 0.5C 单体脉冲放电局部电流谱图

Fig.2-7 0.5C single pulse discharge local current chart

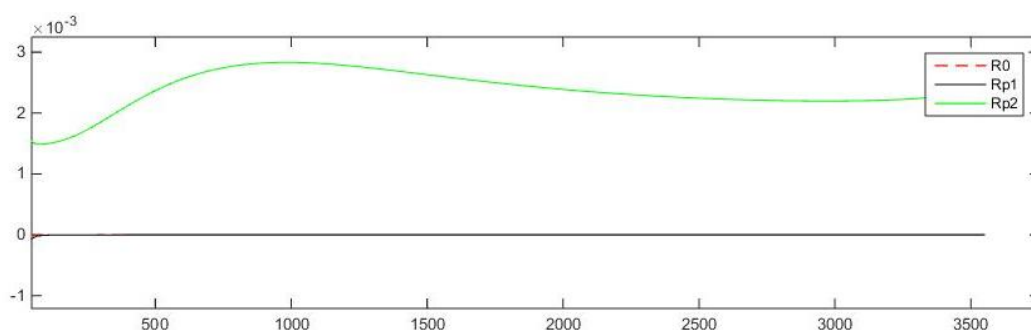


图 2-8 0.5C 单体脉冲放电电池模型内阻辨识曲线

Fig.2-8 0.5C single pulse discharge battery model internal resistance identification curve

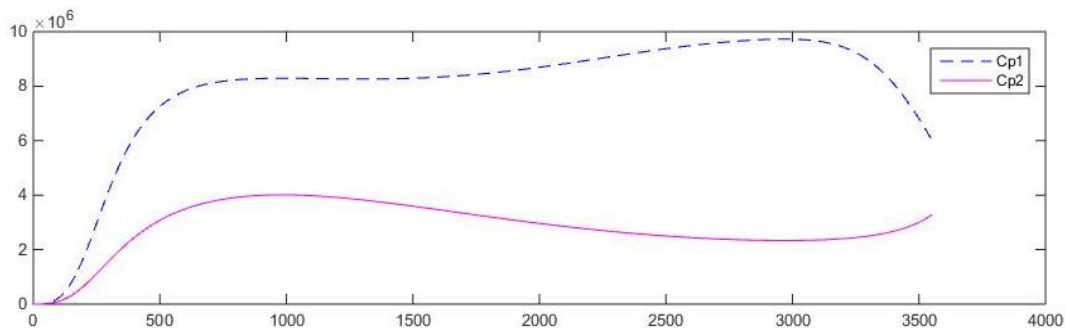


图 2-9 0.5C 单体脉冲放电电池模型电容辨识曲线

Fig.2-9 0.5C single pulse discharge battery model capacitance identification curve

表 2-2 0.5C 单体脉冲放电模型辨识参数

Tab.2-2 0.5C single pulse discharge model identification parameters

SOC	$R_0 * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p1} * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p2} * 10^{-4} / \Omega$	$C_{p1} * 10^6 / F$	$C_{p2} * 10^6 / F$
0.1	0.91	1.21	1.91	4.81	2.31
0.2	1.02	1.06	2.76	8.05	3.86
0.3	1.11	1.16	2.85	8.11	4.01
0.4	1.23	1.17	2.63	7.98	3.75
0.5	1.35	1.23	2.37	8.25	3.21
0.6	1.28	1.21	2.22	8.38	2.93
0.7	1.16	1.18	2.18	9.23	2.88
0.8	1.26	1.14	2.12	9.78	2.52
0.9	1.09	1.26	2.13	9.14	2.38

(3) 1.0C 单体脉冲放电电池模型参数辨识

对电池进行 1.0C 的脉冲电流放电，得到电池模型实时辨识曲线如图 2-10、2-11 所示。表 2-3 是其在 SOC 各个节点处的值。

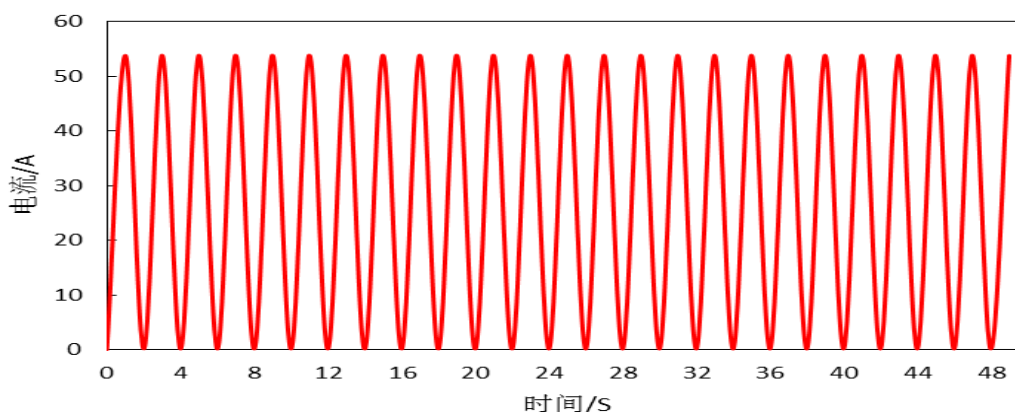


图 2-10 1.0C 单体脉冲放电局部电流谱图

Fig.2-10 1.0C single pulse discharge local current chart

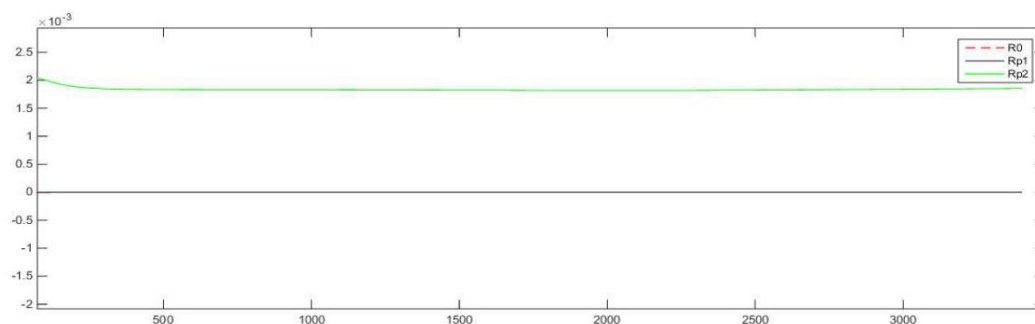


图 2-11 1.0C 单体脉冲放电电池模型内阻辨识曲线

Fig.2-11 1.0C single pulse discharge battery model internal resistance identification curve

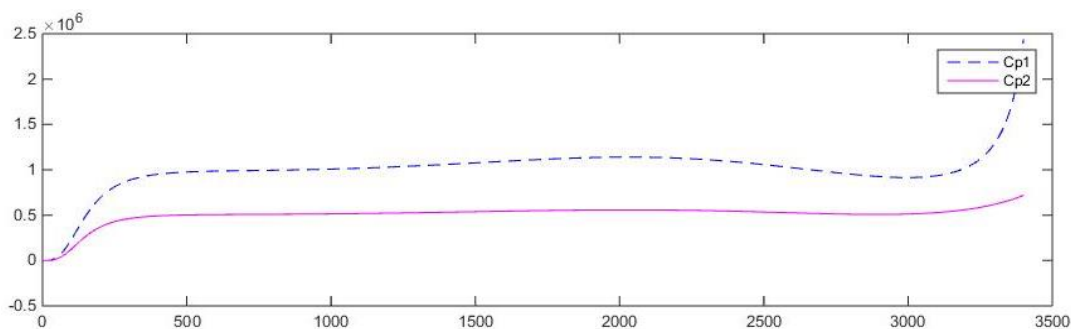


图 2-12 1.0C 脉冲放电电池模型电容辨识曲线

Fig.2-12 1.0C single pulse discharge battery model capacitance identification curve

表 2-3 1.0C 单体脉冲放电模型辨识参数

Tab.2-3 1.0C single pulse discharge model identification parameters

SOC	$R_0 * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p1} * 10^{-4} / \Omega$	$R_{p2} * 10^{-4} / \Omega$	$C_{p1} * 10^6 / F$	$C_{p2} * 10^6 / F$
0.1	1.11	0.89	1.83	0.93	0.47
0.2	1.21	0.91	1.82	1.02	0.51
0.3	1.35	1.23	1.82	1.05	0.52
0.4	1.26	1.15	1.81	1.11	0.51
0.5	1.08	1.36	1.86	1.13	0.53
0.6	1.22	1.27	1.89	1.22	0.57
0.7	1.25	1.06	1.91	1.02	0.56
0.8	1.09	1.32	1.92	0.83	0.53
0.9	1.21	1.02	1.92	1.26	0.59

4) OCV-SOC 关系曲线获取

研究发现，锂离子电池在静置 2-3h 后电压基本保持平衡状态。为准确获取该型电池的 OCV-SOC 关系曲线，本文使用以下方法获取。首先，将电池涓流充满，截止电压为 3.7V，然后断电。然后静置 1 小时，记录电池电压。然后按下述步骤获取 OCV-SOC 关系曲线。

A.对电池进行阶段式充放电，充放电电流 0.5C，每隔 10% 的电池电量后，将电池静置 1 小时^[39,40]。

B.在进行放电时，取静置时间段内的极大值点，然后进行曲线拟合。

C.在进行充电时，取静置时间段内的极小值点，然后进行曲线拟合。

D.最后取这两组曲线对应点处的平均值，得到 OCV 与 SOC 的关系曲线。

根据上述方法，最终拟合出 OCV-SOC 的关系曲线为如图 2-13 所示。

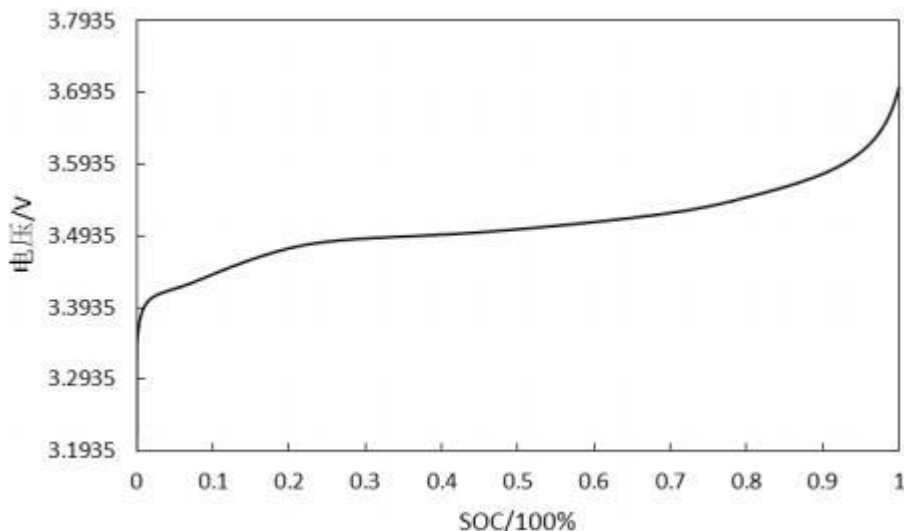


图 2-13 锂电池放电 OCV-SOC 关系曲线

Fig.2-13 Lithium battery discharge OCV-SOC relationship curve

其对应的五阶拟合曲线公式为：

$$y = 3.292x^5 - 8.063x^4 + 7.884x^3 - 3.813x^2 + 0.9917x + 3.377$$

2.1.3 电池模型验证

为检验模型参数辨识的准确与否，在 MATLAB 中搭建二阶 RC 网络模型，输入辨识的参数值，然后与实验条件下通过对端电压值进行比较后判断。本文主要通过对模拟充放电使用工况来对电池模型参数进行验证^[41-43]。

1) 模型验证

在 MATLAB / Simulink 中搭建如图 2-14 所示的等效电路模型，将图 2-15 所示电流作为输入信号进行加载，得到仿真电压^[44]，并与实测电压对比，得到如图 2-16 所示。

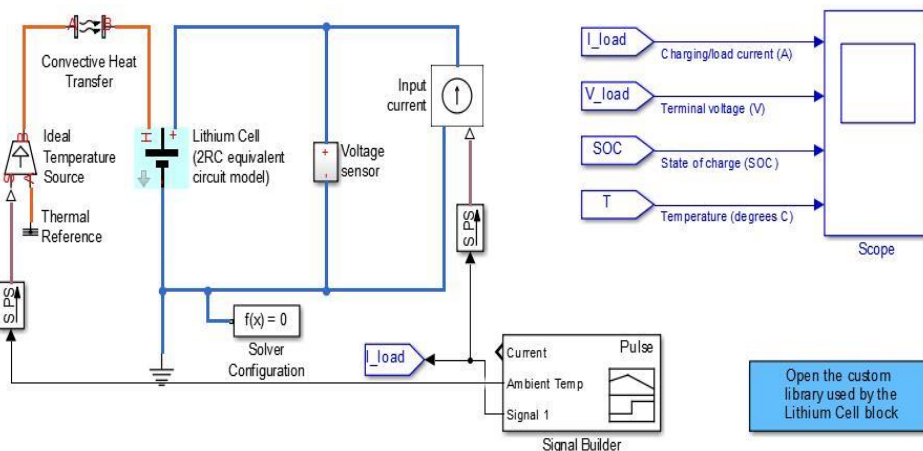


图 2-14 锂电池二阶 RC 网络模型

Fig.2-14 Second-Order RC Battery Model

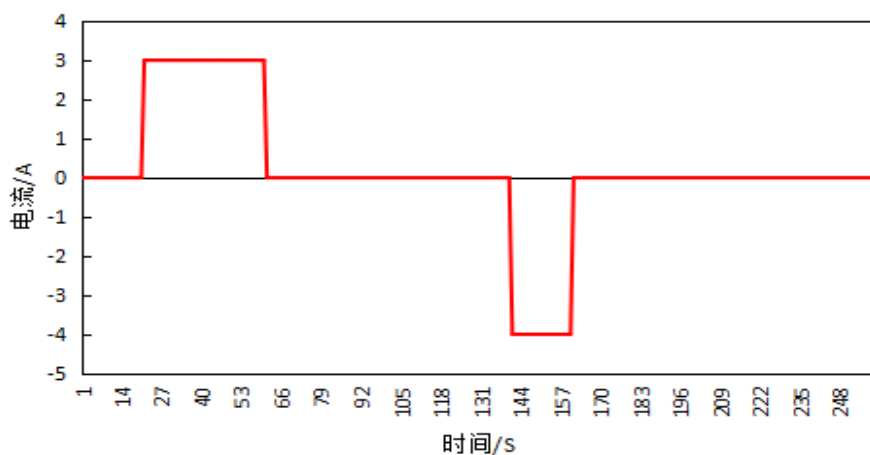


图 2-15 测试电流

Fig.2-15 Test current

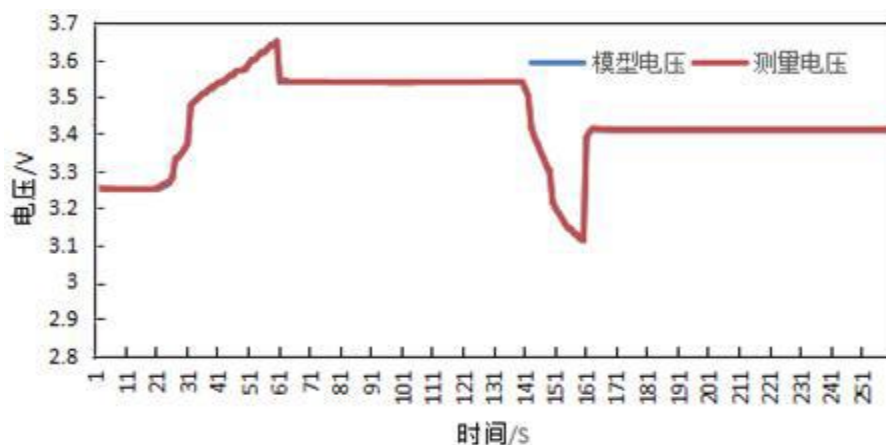


图 2-16 模型测电压与实测电压对比图

Fig.2-16 Model test voltage and actual voltage comparison chart

2) 仿真模型评价

由图 2-16 可看出，由模型得到的实时电压与实测电压值的差值很小，控制在 0.1V 以内，据此推断模型参数具有较高的精度^[43,45]。

2.2 防发散 Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波 SOC 估算算法

电池管理系统的核心在于底层算法部分，而底层算法的核心是 SOC 算法。由于锂离子电池特殊的属性，其特征参数呈现非线性的函数关系。扩展卡尔曼滤波(EKF)^[46-46]法利用非线性函数的局部线性特性，可将非线性模型局部线性化，使非线性问题得到良好解决。许多文献对此做了研究，然而对于算法中的噪声，EKF 算法将其按简单的均值为零的高斯白噪声处理^[49]，精度提高有限。邓自立教授提出了带有噪声统计估值器的自适应滤波算法^[50]，该方法实现对噪声均值以及协方差的实时估算，达到较好估算效果。

本研究在此方法的基础上,运用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法,并针对复杂工况可能使估算滤波发散,在其中加入滤波发散判据^[46,50],当出现误差增大乃至发散时,对卡尔曼增益矩阵构造一个指数冻结因子,在保证估算精度的情况下,能有效防止滤波发散。

2.2.1 扩展卡尔曼滤波算法

1) 卡尔曼滤波算法

Kalman 滤波的方法是由数学家 R.E. Kalman 在 1960 年左右建立起来的。其理论模型基础是使用状态空间方程的一种参数的最优估计的方法,现在已经广泛的应用于很多领域,如:目标跟踪、全球定位、动态系统的控制、导航以及通信系统中。Kalman 滤波的方法是一种实时的参数估计方法,它包括一系列的计算等式,我们将在后面的讨论中来具体的呈现这些等式。这些等式随着系统的运行而运行,它的最大优点在于每一步的计算都只和当前的系统状态有关。

对于大多数的系统而言,包括电池系统,系统的输出量是系统的历史状态和目前输入的函数。在控制理论中,将系统写成状态空间的形式^[51,52],如下所示:

$$X_{k+1} = AX_k + BU_k$$

$$Y_k = CX_k + DU_k$$

其中, X_k 称为系统的状态变量,它包含了系统当前的参量信息。A、B、C、D 都是由系统决定的四个矩阵,它们反映了系统的结构, Y_k 是系统的输出。在这个设计中,我们将对电池进行建模,把电池的模型写成 (2-4)、(2-5) 式所示的状态空间表达式,然后将 Kalman 滤波的方法应用于所建立的系统。目标是估算锂电池的 SOC,因此系统的 SOC 将作为系统的状态变量来处理,系统的输入数据主要是电池的充放电电流,系统输出数据是电池端电压^[53]。

2) 扩展卡尔曼滤波算法

扩展卡尔曼滤波器的中心思想是将非线性系统近似线性化,及将非线性函数展开成泰勒级数并略去二级及以上项,得到一个近似的线性化模型,然后使用卡尔曼滤波器进行迭代计算。因此可针对锂离子电池的特征量的化学变化,可使用 EKF 算法^[47,48]将非线性模型局部线性化,以实现对于电池各参数进行状态方程的搭建。

现有离散状态空间方程如下,假设 k 时刻的状态变量为 $X_k \in R^{nx1}$, 输入向量 $I_k \in R^{px1}$, 输出向量 $Y_k \in R^{qx1}$, 则有:

$$X_{k+1} = f(X_k, I_k) + W_k \quad (2-4)$$

$$Y_k = g(X_k, I_k) + V_k \quad (2-5)$$

式中： W_k 为系统噪声； V_k 为量测噪声。

将非线性函数 $f(X_k, I_k)$ 和 $g(X_k, I_k)$ 在预测值 $\hat{X}_{k/k}$ 进行泰勒级数展开，略去高次以上项，得到如下状态空间方程：

$$X_{k+1} = f(\hat{X}_k, I_k) + \frac{\partial f}{\partial \hat{X}_k}(X_k - \hat{X}_k) + W_k \quad (2-6)$$

$$Y_k = g(\hat{X}_{k/k}, I_k) + \frac{\partial g}{\partial \hat{X}_{k/k}}(X_k - \hat{X}_k) + V_k \quad (2-7)$$

$$\text{令 } \Phi_k = \frac{\partial f}{\partial \hat{X}_k}, \quad H_k = \frac{\partial g}{\partial \hat{X}_{k/k}},$$

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + (f(\hat{X}_k, I_k) - \Phi_k \hat{X}_k) + W_k \quad (2-8)$$

$$Y_k = H_k X_k + (g(\hat{X}_{k/k}, I_k) - H_k \hat{X}_k) + V_k \quad (2-9)$$

式中： Φ_k 为一步转移矩阵； H_k 为 K 时刻的 $m \times n$ 阶量测矩阵。

$$E[W_k] = q_k \quad \text{cov}[W_k, W_i] = Q_k \delta_{ki} \quad (2-10)$$

$$E[V_k] = r_k \quad \text{cov}[V_k, V_i] = R_k \delta_{ki}$$

$$\text{cov}[W_k, v_i] = 0$$

式中： E 为均值号； cov 为协方差号； δ_{ki} 为 Kronecker δ 函数； Q_k 为系统噪声协方差； R_k 为量测噪声协方差。

再令：

$$\Gamma_k I_k = f(\hat{X}_k, I_k) - \Phi_k \hat{X}_k$$

$$N_k I_k = g(\hat{X}_{k/k}, I_k) - H_k \hat{X}_k$$

即：

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + \Gamma_k U_k + W_k$$

$$Y_k = H_k X_k + N_k I_k + V_k$$

然后利用类似于线性 Kalman 滤波的方法进行计算，根据以下步骤进行计算，能得到电池荷电状态 SOC。递推过程如下^[54,55]：

$$(1) \quad \hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} U_{k-1} + \hat{q}_{k-1}$$

$$(2) \quad P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \hat{Q}_{k-1}$$

$$(3) \quad K_k = P_{k/k-1} H_k^T [H_k P_{k/k-1} H_k^T + \hat{R}_k]^{-1}$$

$$(4) \quad P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}$$

$$(5) \quad \hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Y_k - H_k X_k - N_k I_k)$$

2.2.2 防发散型 Sage-Husa 自适应滤波算

1) Sage-Husa 自适应滤波算

Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波算法是一种次优无偏极大后验噪声统计估值器的自适应扩展卡尔曼滤波算法。此算法的核心是利用量测变量数据对系统噪声和量测噪声的统计特性进行实时动态地估计，然后将其用于扩展卡尔曼滤波算法状态估计中^[56]。

现根据式 2-1，建立状态空间方程：

$$\begin{pmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{p1,k+1} \\ U_{p2,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T/\tau_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T/\tau_2) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_k \\ U_{p1,k} \\ U_{p2,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\eta T}{C_N} \\ R_{p1}(1 - \exp(-T/\tau_1)) \\ R_{p2}(1 - \exp(-T/\tau_2)) \end{pmatrix} * i_k$$

系统观测方程：

$$U_{o,k} = U_{ocv,k} - U_{p1,k} - U_{p2,k} - R_0 I_k$$

式中： SOC_k 为k时刻锂电池的荷电状态； $U_{p1,k}$ 和 $U_{p2,k}$ 分别为k时刻电容 C_{p1} 和 C_{p2} 上的电压； T 为系统采样时间； C_N 为锂电池的额定容量； $\tau_1 = R_{p1}C_{p1}$ ， $\tau_2 = R_{p2}C_{p2}$ ；电流 i_k 为k时刻系统输入， $U_{o,k}$ 为k时刻系统输出；其中，

$$\hat{X}_k = \begin{pmatrix} SOC_k \\ U_{p1,k} \\ U_{p2,k} \end{pmatrix}, \Phi_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T/\tau_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T/\tau_2) \end{pmatrix}, H_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_{ocv}}{\partial SOC} \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}, \Gamma_k = \begin{pmatrix} -\frac{\eta T}{C_N} \\ R_{p1}(1 - \exp(-T/\tau_1)) \\ R_{p2}(1 - \exp(-T/\tau_2)) \end{pmatrix}$$

对 Sage-Husa 自适应滤波算法进行简化^[47,49,57]，迭代步骤如下：

- (1) 系统初始化，赋予初值：

$$\hat{X}_0, P_0, \hat{Q}_0, \hat{R}_0, \hat{q}_0, \hat{r}_0$$

- (2) 一步状态预测：

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} U_{k-1}$$

- (3) 一步预测均方误差阵：

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \hat{Q}_{k-1}$$

- (4) 加权系数：

$$d_k = (1 - b)/(1 - b^{k+1})$$

- (5) 新息：

$$\begin{aligned} v_k &= Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} - N_k I_k \\ \hat{r}_k &= (1 - d_k) \hat{r}_{k-1} + d_k v_k \end{aligned}$$

(6) 量测噪声协方差矩阵:

$$\hat{R}_k = (1 - d_k)\hat{R}_{k-1} + d_k(v_k v_k^T - H_k P_{k/k-1} H_k^T)$$

(7) 卡尔曼滤波增益阵:

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T [H_k P_{k/k-1} H_k^T + \hat{R}_k]^{-1}$$

(8) 状态估计阵:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k v_k$$

(9) 状态估计均方误差阵:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k \hat{R}_{k-1} K_k^T$$

(10) 估计模型噪声:

$$\hat{q}_k = (1 - d_k)\hat{q}_{k-1} + d_k(\hat{X}_k - \Phi_{k/k-1}\hat{X}_{k-1});$$

$$\hat{Q}_k = (1 - d_k)\hat{Q}_{k-1} + d_k(K_k v_k v_k^T K_k^T + P_k - \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T)$$

式中: $d_k = (1 - b)/(1 - b^{k+1})$; b 为遗忘因子, 其范围为 $0.95 < b < 1$; $\hat{X}_{k/k-1}$ 为状态一步预测; \hat{X}_k 为状态估计; K_k 为滤波增益矩阵; $P_{k/k-1}$ 为一步预测均方误差阵; P_k 为估计均方误差阵。

2) 防发散型 SHEKF 自适应滤波算法

对于卡尔曼滤波过程, 通常判断滤波发散的判据^[46,50]为:

$$v_k v_k^T < \gamma \text{tr}[E(v_k v_k^T)] \quad (2-11)$$

式中, γ 为储备系数, $\gamma > 1$; tr 表示矩阵的迹; v_k 为新息序列; $v_k v_k^T$ 为更新序列的平方和, 其包含实际估计误差的信息。右端包含更新序列协方差矩阵的迹, 这里协方差矩阵的理论值为:

$$E(v_k v_k^T) = H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k \quad (2-12)$$

为了保证在最严格的条件下滤波过程保持收敛, 应当选取储备系数 $\gamma=1$ 。此时最严格的收敛条件为:

$$v_k v_k^T < \text{tr}[E(v_k v_k^T)] \quad (2-13)$$

若式 2-13 得不到满足, 表明实际估计误差超过理论值, 亦即滤波是发散的。根据新息序列特殊属性, 可以用其来判断状态变量估算是否出现过大大偏离。在算法中的实测新息序列为:

$$v_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} \quad (2-14)$$

因为新息反序列映了预测值和实际值之间的不一致程度, 在算法的迭代过程中, 状态估计阵 $\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k v_k$, 因此动力锂电池的 SOC 是与新息阵紧密相关的, 在出现

滤波偏差较大乃至发散的现象时,仍然直接对新息序列 v_k 乘以增益阵 K_k 将不利于解决滤波发散现象。所以如若出现滤波发散,为了减弱新息序列对估计值的影响,在每一迭代计算中都保证对 K_k 进行必要的修正。

针对误差变化情况,主要有以下三种情形:

(1) 误差在要求范围内,则不改变任何计算得到的 k 时刻值,继续进行 $k+1$ 时刻计算。

(2) 估算误差不断增大,估计值小于实际值,且不满足滤波发散判据,这里用 v_k 来表示,误差增大表征实际值与估计值之差增大,此时采取冻结滤波器的增益矩阵 K_k ^[12],引入指数冻结因子 e^{λ_1-1} ($1 < \lambda_1 < 1.1$),此时卡尔曼滤波增益阵取如下值:

$$K'_{k+1} = e^{\lambda_1-1}K_k$$

(3) 估算误差不断增大,估计值大于实际值,且不满足滤波发散判据,则引入 e^{λ_2-1} ($0.9 < \lambda_2 < 1$),此时卡尔曼滤波增益阵取如下值:

$$K''_{k+1} = e^{\lambda_2-1}K_k$$

采用这种算法,减小了模型和噪声统计不准确造成的误差,在滤波出现较大误差时,通过调整卡尔曼增益达到逐步归正的目的,提高了系统的可靠性。

2.3 SOC 估算算法仿真验证

2.3.1 仿真工况的建立

汽车行驶工况是描述在某一环境道路下,汽车行驶速度与时间的曲线,它主要用于确定车辆污染物排放量和燃油消耗量,为新车型的技术开发和评估等提供参考依据^[59]。

世界各国也根据自己的情况开发出具体的工况,典型的有:美国的 FTP-75 实际行驶工况(瞬态工况),欧洲的 ECE+EUDC 合成工况和日本的 10-15 工况等^[58,59]。

1) 美国道路测试工况

1972年,美国环保局根据汽车在市区道路的行驶情况得到一条速度与时间的关系曲线,后被用于车辆排放认证的程序(简称 FTP-72)。后来在其基础上又加入了热浸车和热态过渡工况,构成了 FTP-75 工况。该工况主要由四块构成,分别是冷态过渡工况、稳定阶段、热浸、热态过渡工况,图 2-17 为文献^[59]中的美国 FTP-75 工况图。

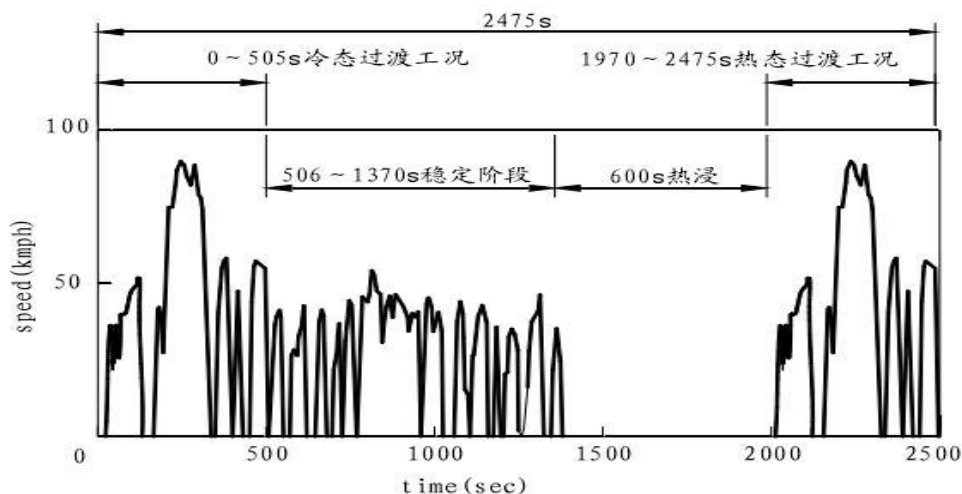


图 2-17 美国 FTP-75 工况^[59]

Fig.2-17 U.S. FTP-75 operating conditions^[59]

2) 欧洲道路测试工况

欧洲境内的行驶工况较为复杂，因此根据道路车流量等，将其划分为市区、郊区和高速等层级。并合理的堆叠产生不同的应用工况。在 2000 年之后，由于更严格的欧III/IV 排放法规的规定，因此将排放采样与运转循环同步，采用完整的运转循环，并称之为新欧洲运转循环(简称 NEDC)。其持续时间为 1220s，平均速度为 32.12km/h，最大加速度为 1.06m/s²，图 2-18 来自文献[59]中的欧洲 ECE+EUDE 合成工况。

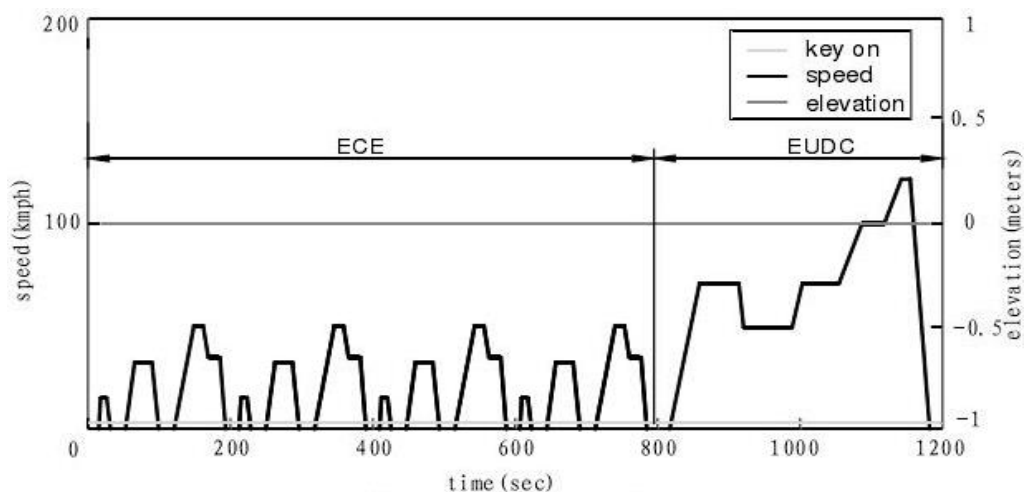


图 2-18 欧洲 ECE+EUDE 合成工况^[59]

Fig.2-18 European ECE+EUDE synthesis conditions^[59]

3) 日本道路测试工况

Janpan10-15 工况运行时间是 660s，最高速度为 70km/h，平均速度为 22.7km/h，由三个 10 工况循环和 15 工况一个循环构成，图 2-19 为来自文献[59]重点日本 10-15 工况。

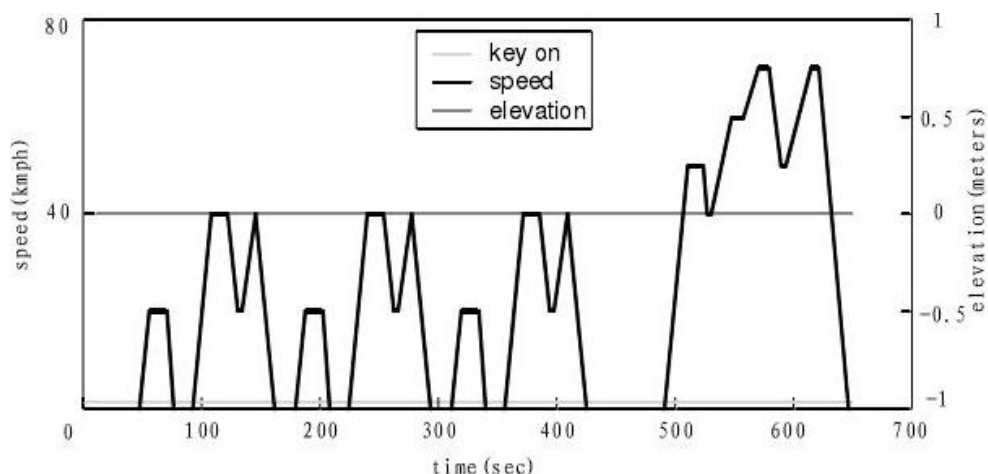


图 2-19 日本 10-15 工况^[59]

Fig.2-19 Japan 10-15 working conditions^[59]

4) 太原市内道路工况

建立某地的行驶工况，首先需要大量的车速数据，然后按照一定的方法从原始大量数据中提炼出有代表性的车速数据，因此为确定出针对太原市的纯电动汽车汽车实验行驶工况，应首先确定太原市燃油汽车的行驶工况，具体通过以下步骤实现^[58-60]：

(1) 工况数据采集：选取试验城市处燃油汽车作为载体，并在汽车上安装汽车速度采集仪器，实时采集工况数据。

(2) 工况数据分析处理：使用滤波器对原始数据进行初步处理，然后将此行驶工况数据分块，以某一特征参数为依据进行恰当的划分。

(3) 行驶工况拼接：对分块后的行驶工况数据，去除极端的数据，并合理选取工况数据进行拼接，构建出当地典型工况。

(4) 分析验证：使用滤波函数对所采集的工况数据进行降噪预处理；预处理后的数据划分为工况块，从工况块中提取能够反应行驶状况的区块。

依据上述实验流程，对太原市区内的道路工况数据进行大量的采集，并依次分析、处理、拼接，初步得到太原市瞬态工况数据，如图 2-20 所示。

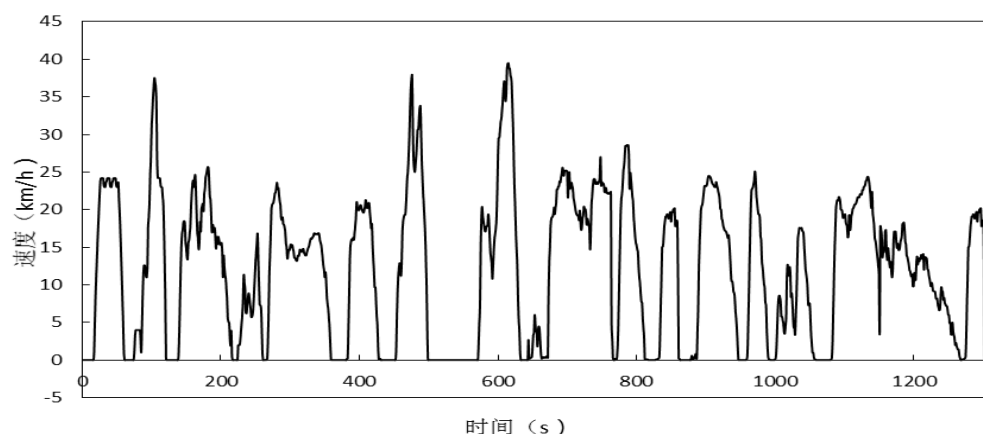


图 2-20 太原市内道路瞬态工况

Fig.2-20 Taiyuan city road transient conditions

将上面的瞬态工况图转换成适合于电动汽车的模式工况，合成工况采用时常为 1200s,采用大电流与小电流交错的脉冲放电电流，局部电流工况如图 2-21 所示。

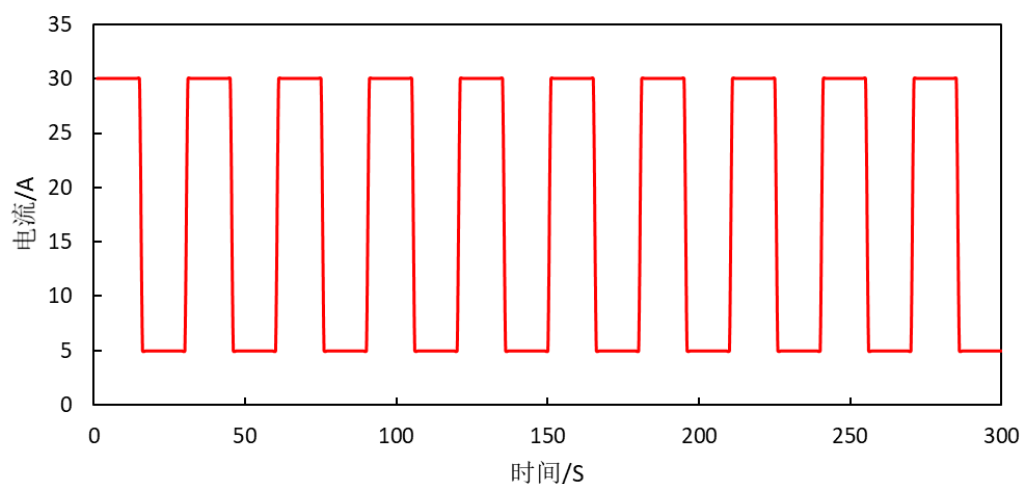


图 2-21 模拟工况电流

Fig.2-21 Analog current

2.3.2 实验仿真验证

选用上述型号的电池并对其进行模拟工况放电实验，按图 2-21 所示的工况电流对电池进行多次循环放电实验，该工况中的变化宽度范围达到 0~2.6C，能较好模拟电动车实际行驶过程中出现的电流情况。根据上述实验获得的阻容参数表，通过求取各参数的均值进行选定，现选用 $R_0=0.005\Omega$ ， $R_{p1}=0.0001\Omega$ ， $C_{p1}=10000F$ ， $R_{p2}=0.00025\Omega$ ， $C_{p2}=300000F$ 。

1)采用防发散型 SHEKF 算法通过 MATLAB 仿真进行实时 SOC 估算并与实测单体电池放电所得 SOC 曲线进行比较，如图 2-22 所示。然后将两个 SOC 求差，得到算法的

估算误差^[61]，如图 2-23 所示。

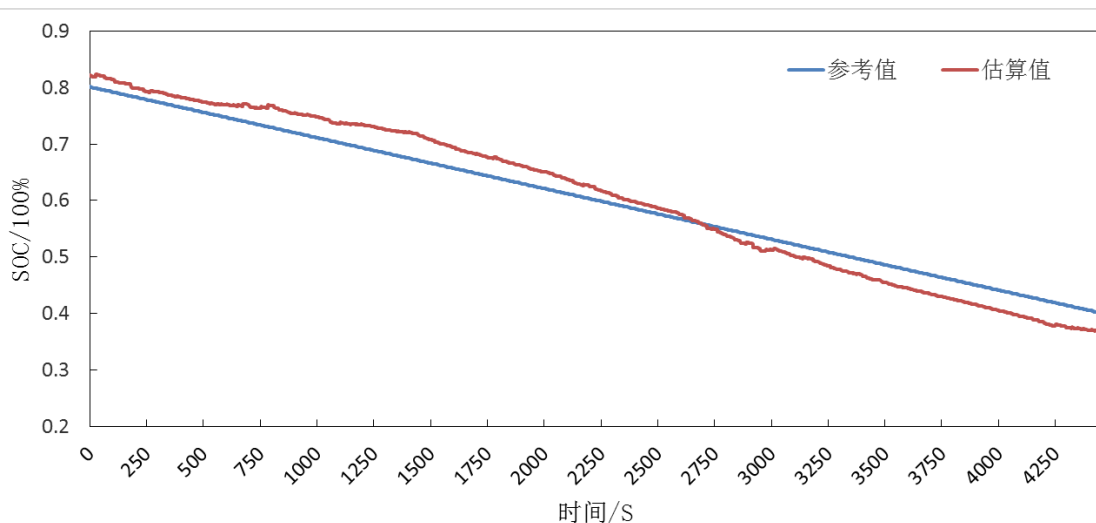


图 2-22 防发散 SHEKF 算法估计曲线

Fig.2-22 Anti-divergence SHEKF algorithm estimation curve

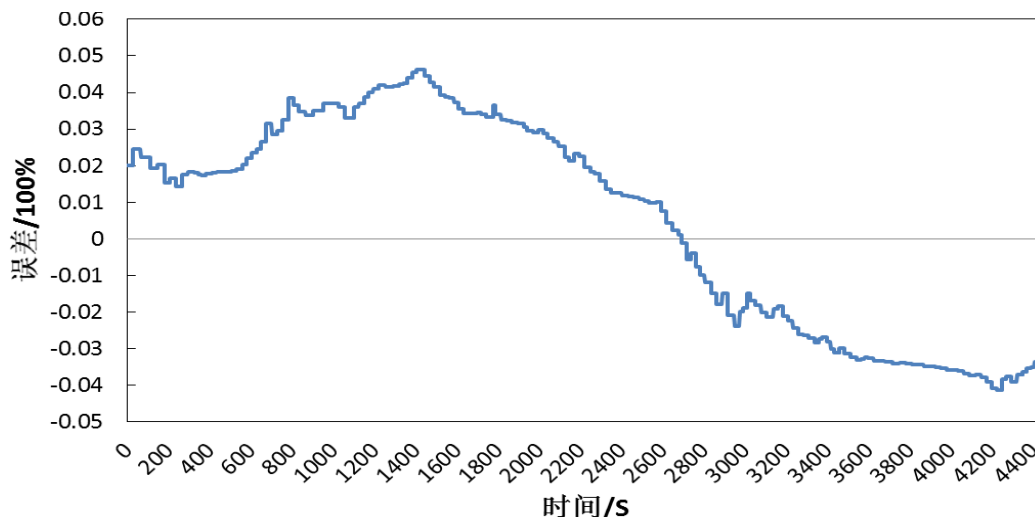


图 2-23 防发散 SHEKF 算法估计误差曲线

Fig.2-23 Anti-divergence SHEKF algorithm estimate the error curve

从图 2-22、2-23 观察可得，在对单体电池进行工况模拟放电过程中，开始阶段估算误差较小，估算误差在±2.5%以内。随着脉冲放电的继续，估算误差逐渐增大，但使用防发散型 SHEKF 算法的误差控制在 5%以内，并且后续误差减小。由此可以看到该算法具有较高的估算精度。

2) 现通过改变两个噪声协方差阵初值 \hat{Q}_0 ， \hat{R}_0 以及 P_0 ，使状态估算过程出现滤波发散，检验是否能通过算法实现收敛的效果，估算曲线如图 2-24 所示，两者的求差曲线如图 2-25 所示。

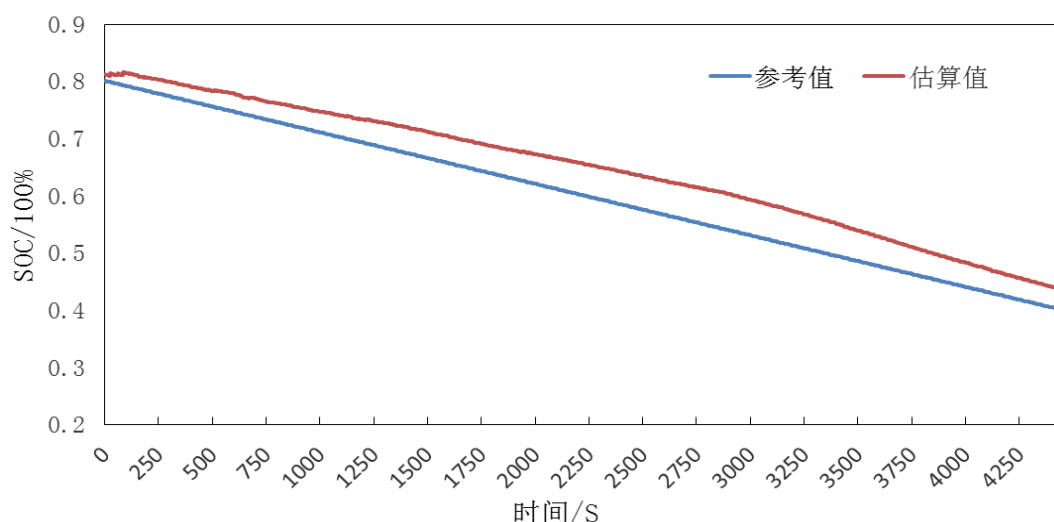


图 2-24 改变初值后的防发散 SHEKF 算法估计曲线

Fig.2-24 Anti-divergence SHEKF algorithm estimation curve after changing the initial value

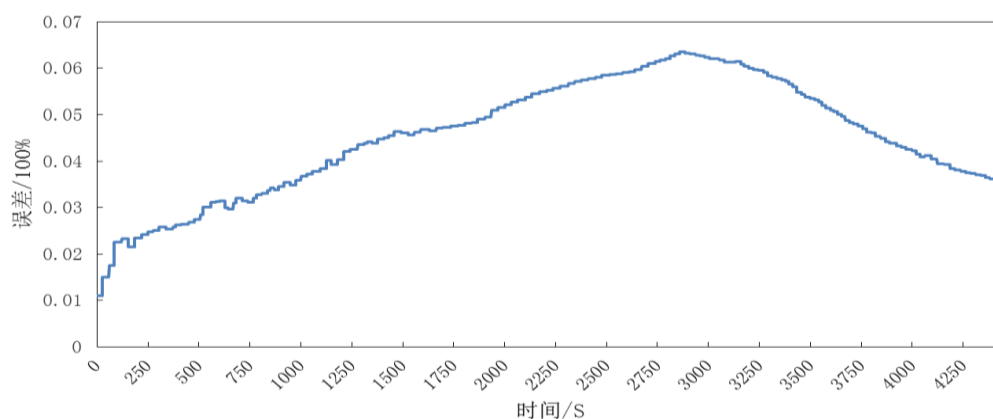


图 2-25 改变初值后防发散 SHEKF 估计偏差曲线

Fig.2-25 Anti-divergence SHEKF algorithm estimation error after changing initial value curve

从图 2-24、2-25 可得，在刚开始随着时间的积累，滤波偏差逐渐增大，在接近 3000s 时，滤波偏差达到最大的 6.4%，但随后状态估算的偏差逐渐减小，达到正常的估算误差范围，可以看出算法在抑制偏差的增大，并使估算误差逐渐缩小到要求的范围内。

综上所述，新算法在保证估算精度前提下，能有效防止误差增大出现发散的情况出现。

2.4 本章小结

本章主要讲述提出的基于 Sage-Husa 的自适应扩展卡尔曼滤波算法；首先对电池模型进行选型，然后针对实验所用的锂电池进行充放电实验，获取其内部参数，如内阻、电容；将三组实验中获取的参数求取每个参数的均值作为最终模型参数，并将其运用到 SOC 估算算法的模型计算中，通过 MATLAB 仿真与实验对比检验提出算法的精确度。

第三章 微型厢式物流车主从式电池管理系统硬件设计

BMS 系统是电动汽车核心部分，它是衔接电池组、整车控制系统、充电机的重要纽带，是保证电动汽车电池寿命和行车安全的关键环节。因此 BMS 系统硬件设计最重要的是要满足各项功能要求，同时在复杂的电磁干扰环境中保持较好的稳定性与数据计算准确度。

3.1 基于总线型的电池管理系统总体方案设计

目前，18650 型电池是最早、最成熟、最稳定的锂离子电池，其已被广泛的应用到纯电动汽车领域。相较于其他类型的锂电池，18650 电池具有更好的一致性，这对电动汽车的充放电使用至关重要。因此其成为许多电动汽车厂商以及电池包制造商的首选电池，且目前在电动乘用车、电动专用车中广泛使用。图 3-1 为摘自网络的动力电池包解剖图。



图 3.1 18650 型动力电池包

Fig.3-1 18650 power battery pack

以这种小型单体电池作为电池包的基本单位时，因其单体容量较小，一般在 2600~3000mAh，因此需要将上百块的电池并联作为一个基本的模组，然后以多个该基本模组为单位进行串联，提高其整体电池电压；因此在满足电池箱大电压、大容量的前提下，该类型小型电池使用量将非常庞大。

针对此种情况，设计一种安全监控、实用合理的电池管理系统则显得非常重要。本

文设计的电池管理系统使用“一主多从”的主从式电池管理模式，可针对单体电池及电池模组的电压、电流、温度等参数进行实时采集监控，并对过压、欠压等进行故障预警。其具体框架结构如图 3-2 所示。

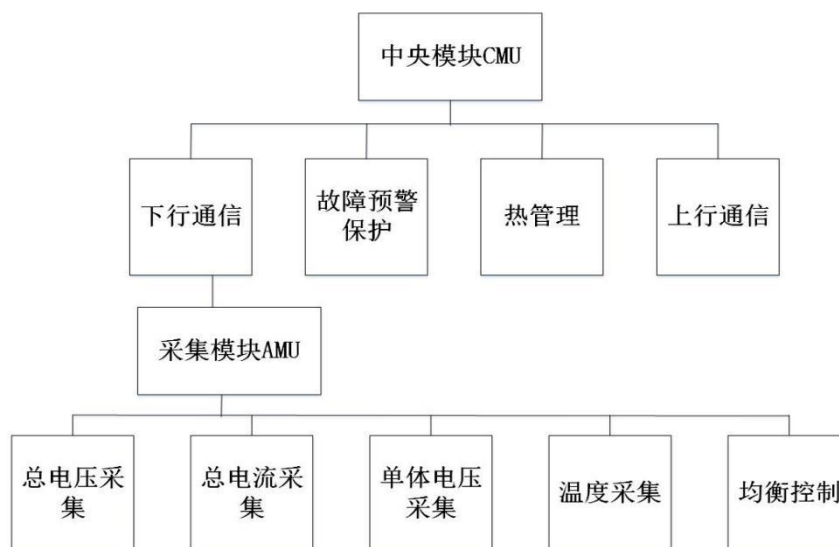


图 3-2 电池管理系统框架结构图

Fig.3-2 Battery management system framework

3.1.1 电池管理系统功能设计

根据 BMS 功能划分，将以上的功能模块进行划分，将其分成五个模块，分别是：信息监测、信号通信、热管理、故障预警与诊断、其他功能。

1) 信息监测

(1) 基本信息测量：电池电压、电流信号的监测，电池包温度的检测。电池管理系统最基本功能就是测量电池单体的电压、电流和温度，这是所有电池管理系统顶层计算、控制逻辑的基础。

(2) 绝缘电阻检测：电池管理系统内需要对整个电池系统和高压系统进行绝缘检测。

(3) 状态参数估算：荷电状态 SOC、功率状态 SOP (State Of Power)、健康状态 SOH (State of Health) 估计。SOC 是电池剩余电量；SOH 是指电池的健康状态，其包含两部分：按时容量和功率的变化；SOP 是下一时刻比如下一个 2 秒、10 秒、30 秒以及持续的大电流的时候电池能够提供的最大的放电和被充电的功率。

2) 信号通信

下级通信：主板为从板的 LTC16802-2 采集芯片进行地址分配，并通过 SPI 通信，

实现各类采集信息的交互。

上级通信：主板根据得到的信息，汇总传给上级，如整车控制器等，据此对整车的控制作为依据。

3) 热管理

电池包在使用过程中主要会遇到以下两种特别温度情况：

(1) 锂电池内部随着放电电流的变化会导致其温度升高，热量由内部传到外表面，在电池包的中心位置会出现温度最高点。

(2) 在冬天电池包在放置较长时间后其内部温度较低，在高纬度地区电池包温度会在 0℃ 以下。

对于上面的第一种情况会导致电池单体较大的温差，使电池间放电不均匀，严重的可能导致电池燃烧爆炸，因此可通过风冷/液冷达到使电池均匀降温的目的；对于第二种情况，低温使电池内阻增大，放电能力严重降低，影响汽车的正常使用，因此在电池包中加入 PTC 模块。

4) 故障预警与诊断

故障预警：电池在使用过程中遇到极限工况时，可能出现单体电池或局部电池的热失控，以及在电池循环使用后单体电池间的差异使电池电压的压差超过安全阈值，因此对电池的过压、欠压、压差及温度等进行预警。

5) 其他功能

(1) 继电器控制：包括电池包主+、电池包主-，充电继电器+、充电继电器-、预充继电器、PTC 用继电器等。

(2) 均衡：对单体电池之间出现容量与电压不均衡的时候，通过被动均衡电路对电池进行单独操作使压差减小。

(3) 电池功率限制：电池包的 SOC 值在低于 25% 时，进行电池放电功率的限制以保证电动车的续驶里程不至快速衰减。

3.1.2 电池管理系统硬件拓扑结构

电池管理系统拓扑方案有：集中式、模块式、主从式及分布式四种^[62]。集中式 BMS 将主控芯片与采集芯片等集中在一起，采用多板并联的方式，优点是可针对具体情况做软件设计改变，缺点是安全性和通用性较低，器件开销和维护开销较大。模块式 BMS 与集中式 BMS 类似，但是模块式 BMS 被分为多个相同的子模块。其优点是易于扩展，

但安全性一般以及维护开销较高。主从式 BMS 具有多个相同功能的子模块，每个模块测量一些单体电池的电压。具有较好的抗噪能力，且器件开销较低。分布式 BMS 具有检测质量好，抗噪能力强，但装配开销大。

现根据 BMS 的布放位置情况，采用主从式（CMU+多个 AMU 方式）BMS 系统方案，即将 BMS 系统设计为“一主多从”的格局，即一块主控制板，多块从控制板；其中中央模块单元（CMU，Central Module Unit）采用飞思卡尔 MC9S12XS128 总控处理器，从控采集模块单元（AMU，Acquisition Module Unit）采用凌厉尔特 LTC16802-2 作为信息采集处理器。

CMU 主要负责两大功能，一是收集来自从板的信息，包括电池电压，电流，温度，预警等，并据此进行电池 SOC 估算，电池均衡管理等；二是接收来自整车的信号，实现对高压控制箱、充电器等的控制。

AMU 负责对单体电池信息的采集，将相应的信息传送给 CMU，同时接收来自 CMU 发送的信号指令，完成对电池均衡等操作。

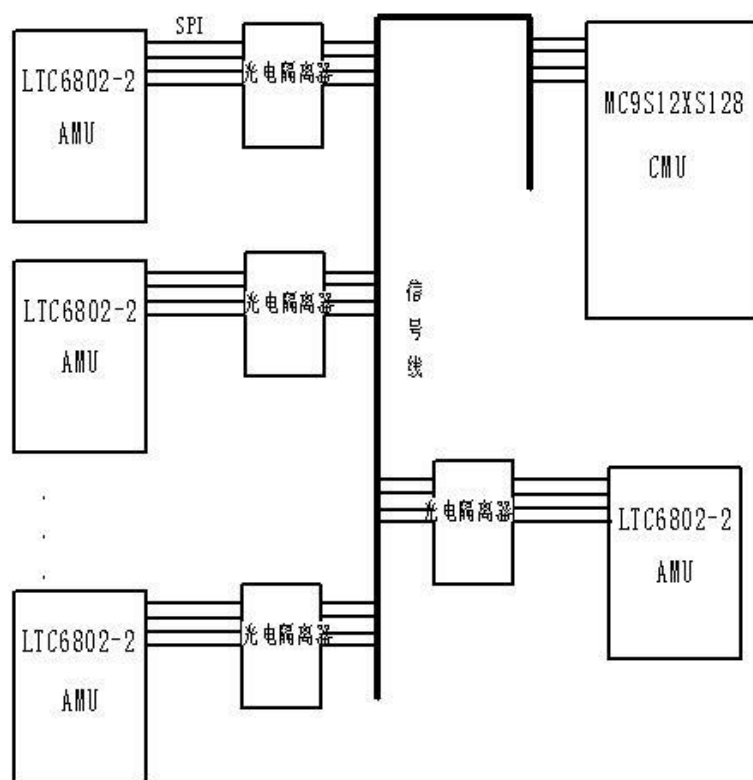


图 3-3 BMS 电池管理系统拓扑图

Fig.3-3 BMS battery management system topology

采用此种结构设计优势主要是：

- (1) 系统分工合理，工作效率高。由于主从拓扑结构将 BMS 系统各功能模块化，

在平均的硬件水平条件下,提高系统工作效率,保证系统实时性。

(2) 对电池包容量较大,单体电池模组较多的情况,更易于实现对电池模组信息的采集。

(3) 系统可靠性好。由于将 BMS 各个功能分开设立在不同的硬件模块中,这样不会因为其中某一模块的故障而影响整个系统的运行,提高了系统的可靠性^[35]。

3.2 中央控制单元硬件电路设计

中央控制单元主要包括主板电源模块电路、控制模块电路、绝缘监测模块电路、热管理模块电路、通信电路等,实现对收集信息的处理以及安全控制等功能,是整个 BMS 系统的控制中枢。

对于以上几个模块电路功能的实现,需要较强大的中央处理器进行对各路信息进行综合处理,本文结合市场主流使用的一些控制器,比较后选用飞思卡尔的 MC9S12XS128 控制器。

MC9S12XS128 是 S12XS 系列 16 位微控制器。S12XS 系列保留了 S12XE 系列的许多功能,包括纠错码 (ECC),一个单独的数据闪存模块,用于代码或数据存储;频率调制锁定环 (IPLL),可提高 EMC 性能,并提供快速 ATD 转换器。S12XS 系列提供 32 位性能,具有 16 位 MCU 的所有优点和效率。外围设备包括 MSCAN, SPI, 两个 SCI, 8 通道 24 位周期中断定时器, 8 通道 16 位定时器, 8 通道 PWM 和 16 通道 12 位 ATD 转换器。其主要特点如下。

- (1) 宽泛的电源供电电压: 3.135V ~ 5.5V。
- (2) 40MHz 最大 CPU 总线频率。
- (3) 环境温度范围: -40°C~125°C。
- (4) 串行外设接口模块 (SPI): 可配置 8 或 16 位数据大小。
- (5) 中断模块 (INT): 七级嵌套中断; 将中断源灵活地分配给每个中断级别。
- (6) 16 通道, 12 位模数转换器。
- (7) MSCAN: 每秒 1 Mbit, CAN 2.0 A, B。

MC9S12XS128 芯片最小系统原理图主要包括时钟电路,复位电路等组成,如图 3-4 所示^[63]。

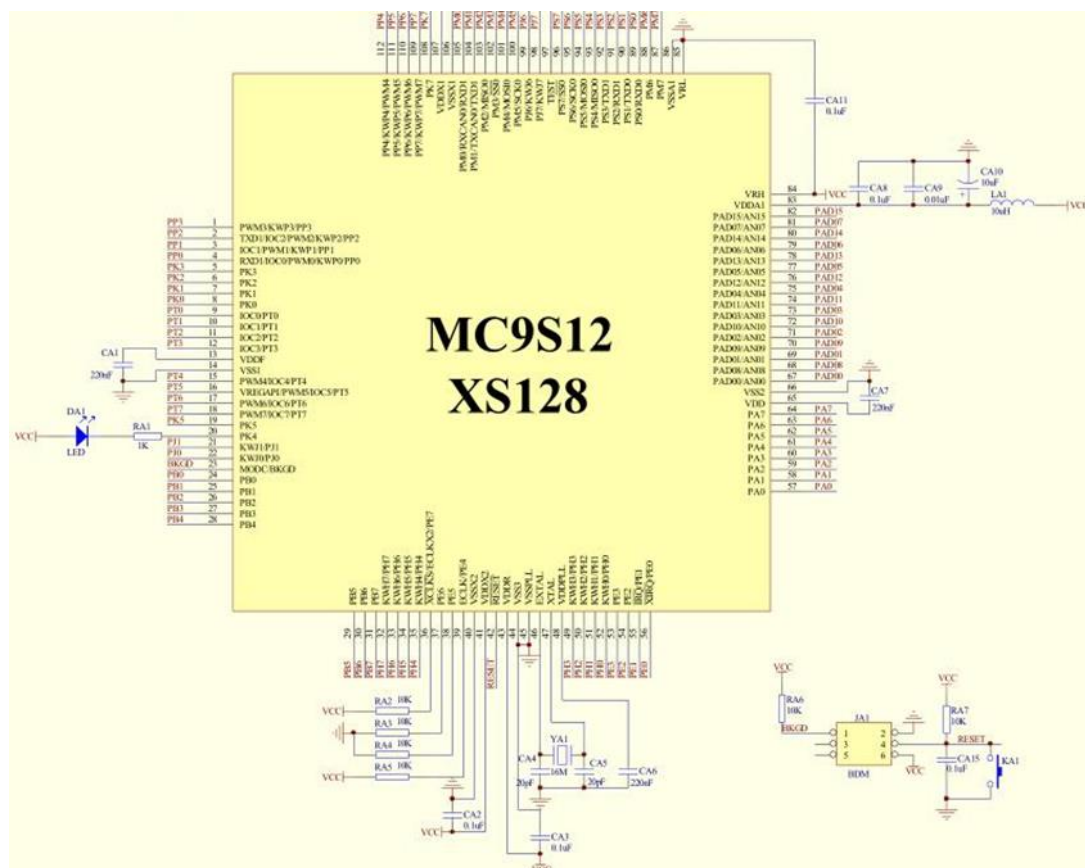


图 3-4 MC9S12XS128 最小系统原理图

Fig.3-4 MC9S12XS128 minimum system schematic

3.2.1 主板电源模块电路

主板上的控制芯片较多，需要的工作电压从 2V~5V 不等，因此对电源电路的设计比较复杂。

LM2940 是一个 1.25A 的高精度，低降压稳压器，轻负载时只有 40mV 和典型的 240μA 的低静态电流。LM2940 是专为需要较低的压差电压和更快的瞬态响应低电压应用而设计的。其只需要较低的压差，可以应用于快速瞬态响应中，可以调节从+2.5 至 +3.8v 的电源，还可以应用于后期监管开关电源中。

LM2940-N / LM2940C 和所有稳压电路均设计用于车载应用，不受反向电池安装或双电池跳线的影响。在输入电压瞬间超过规定的最大工作电压时，在线路瞬变（如负载突降）期间，稳压器将自动关闭，以保护内部电路和负载。LM2940 / LM2940C 不能被暂时的镜像插入所伤害，还提供调节器功能，如短路和热过载保护^[63]，图 3-5 为主板电源模块电流图。

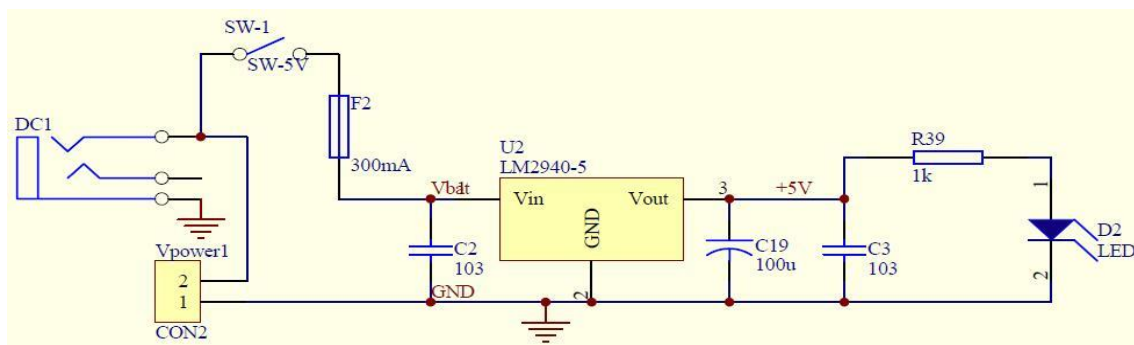


图 3-5 主板电源电路

Fig.3-5 Motherboard power circuit

3.2.2 控制模块电路

控制模块电路主要负责对电池包内以及高压盒内的几个继电器实施控制，通过用小电流来控制大电流的方法，提高操作安全性。

BMS 控制的大电流继电器主要为总负继电器，预充继电器，总正继电器。在整车上电后，BMS 及 MCU 上电使能并自检后，先由 BMS 控制闭合总负继电器，在整车发送高压上电指令后，闭合预充继电器，当电容上预充电电压达到电池电压 80%后，闭合总正继电器并断开预充继电器。

3.2.3 绝缘监测模块电路

在纯电动汽车上，电池组的电压一般高于 200V，对连接线路、功转换器、电动机等与车辆底盘之间的绝缘性能要求较高。为保证车上成员的安全和电气设备的正常工作，需要实时监测电池组相对车辆底盘的绝缘性能^[13]。

绝缘监测的方法主要有辅助电源法、电流传感法、变阻抗网络法，本文采用变阻抗网络法。假定电池组的总电压为 U_0 ，待检测的正、负极与底盘之间的绝缘阻抗分别为 R_1 、 R_2 ，其上面的电压分别为 U_1 、 U_2 ，则等效电路模型如下图所示，其中 R_{c1} 、 R_{c2} 为测量用的已知电阻值的标准电阻。

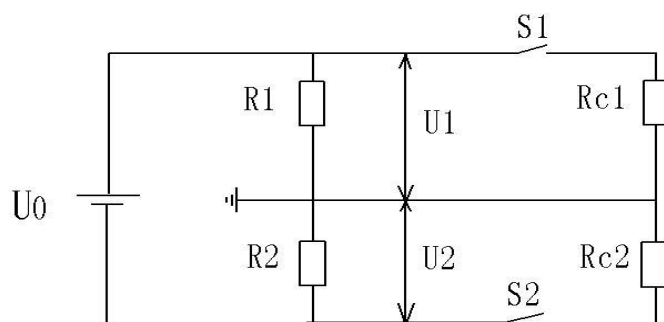


图 3-6 变阻抗网络监测原理图

Fig.3-6 Variable impedance network monitoring schematic

3.2.4 热管理模块电路

电池包的热管理主要包括高温以及低温的温度管理。对于高温环境，采用液体冷却技术，将专业设计的换热板放置于电池箱内，在主机内对液体介质进行冷却，再将液体送入换热板内，通过内部流转的液体进行循环换热^[64]。

对于低温环境，则通过 PTC 加热器，通过空气传热对电池包进行升温。由于电动车在 0°C 以下经常出现不能正常上电启动的问题，因此在电池包中加入 PTC 加热器，在电动汽车上电自检阶段，通过温度传感器收集电池包中环境温度，当其低于 0°C ，通过控制电路，闭合开关电路，利用电池包电池作为 PTC 供电来源。

3.3 电池监控单元硬件电路设计

电池监控单元负责的任务是对电池信息的采集，因此从实用与节约成本考虑选用 LTC6802-2 芯片。该单元模块主要完成对电池电压、充放电电流和温度等参数的采集，并提供电池均衡、故障预警的功能。

LTC6802-2 是一款完整的电池监控 IC 包括 12 位 ADC，精密电压基准，高压输入多路复用器和串行接口。每 LTC6802-2 可以测量 12 个串联的电池，总输入电压高达 60V。所有电压 12 输入通道可以在 13ms 内测量。许多 LTC6802-2 器件可以堆叠来测量每个电池在长电池串中的电压。每个 LTC6802-2 具有单独可寻址的串行接口，允许最多 16 个 LTC6802-2 设备可以连接到一个控制处理器并同时操作。为了最大限度地降低功耗，LTC6802-2 提供了一种测量模式监视每个单元的过电压和欠压条件，还提供待机模式以减少电源电流为 $50\mu\text{A}$ 。每个单元输入都具有相关的 MOSFET 功率管，对电压高的电池进行放电^[63]，如图 3-7 所示。

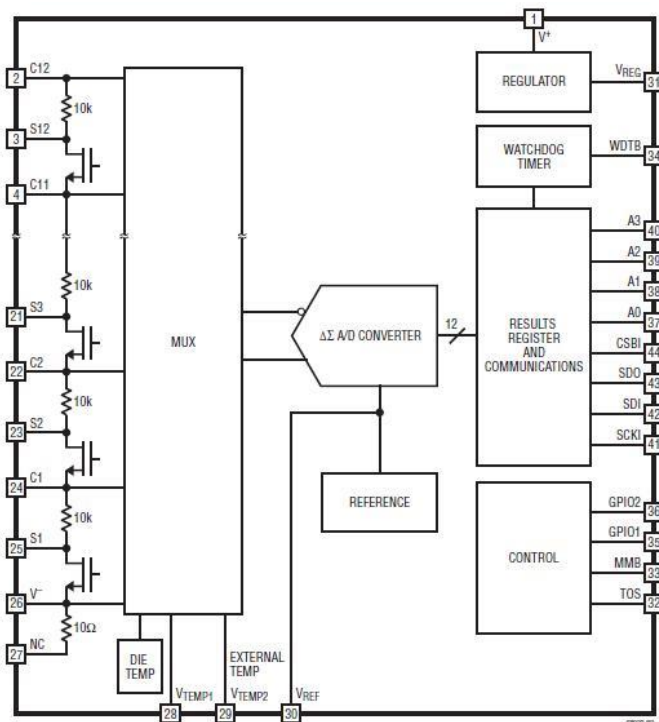


图 3-7 LTC6802-2 内部框架图

Fig.3-7 LTC6802-2 internal frame diagram

3.3.1 采集模块电路

该类型纯电动物流车电池数量较多，以山西成功汽车某型纯电动物流车为例，电池包为三元锂电池，额定电压 360V，电池总容量 121.5AH，单体电池 45 个并连然后 100 组串连，实现预充功能，预充电动电容为 3000 μ F；单体 18650，3.6V，2700mAH。对于如此庞大的单体电池数量，采用具有 12 通道的 LTC6802-2 智能数据采集芯片，通过多片进行集体采样。

LTC6802-2 有两种链接通信方式：1、菊链式模块通信；2、分布式模块通信。分布式通信采用点与点的连接，即每个 LTC6802-2 采集模块直接与 MC9S12XS128 微控制器相连接；菊链式连接采用串行通信总线连接每个 LTC6802-2 采集模块，然后由第一个采集模块经过光电隔离器后与 9S12XS128 微控制器相连接。该链接方式因为只需要一个光电隔离器而使成本更低，因此主要采用此链接方式。

1) LTC6802-2 工作采集电路

其直流电压输入的电压范围：+12 ~ +60V，可由被测量的 12 节电池作为其外部电源通过 V+与 V-端口对其供电，并利用 1 μ f 电容将 V+旁路至 V-。

其中 C0~C12 为电池电压采集端口，每路差分电池输入可承受高达+/-65V 电压，单

极性模式下，ADC 输入满量程范围是 0 ~ 5V，双极性模式下为-2.5V ~ +2.5V。

LTC6802-2 采用了采样系统执行其模数转换，并且提供在 0.5ms 转换窗口上基本上是平均值的转换结果，前提是在 512kHz 的 Δ - Σ 调制器速率方面没有噪声混叠。这表明在 500kHz 有用衰减的低通滤波器可能是有益的。由于 Δ - Σ 积分带宽约为 1kHz，过滤角不必低于此值以确保准确的转换。100 Ω 系列电阻可以插入到输入路径中，而不会引入测量误差，只要使用外部放电开关 FET 即可。并联电容可以从单元输入端添加到 V-，从而产生 RC 滤波，电阻 R 取 100 Ω ，电容 C 取 100nf^[65]。图 3-8 为其采集电路图。

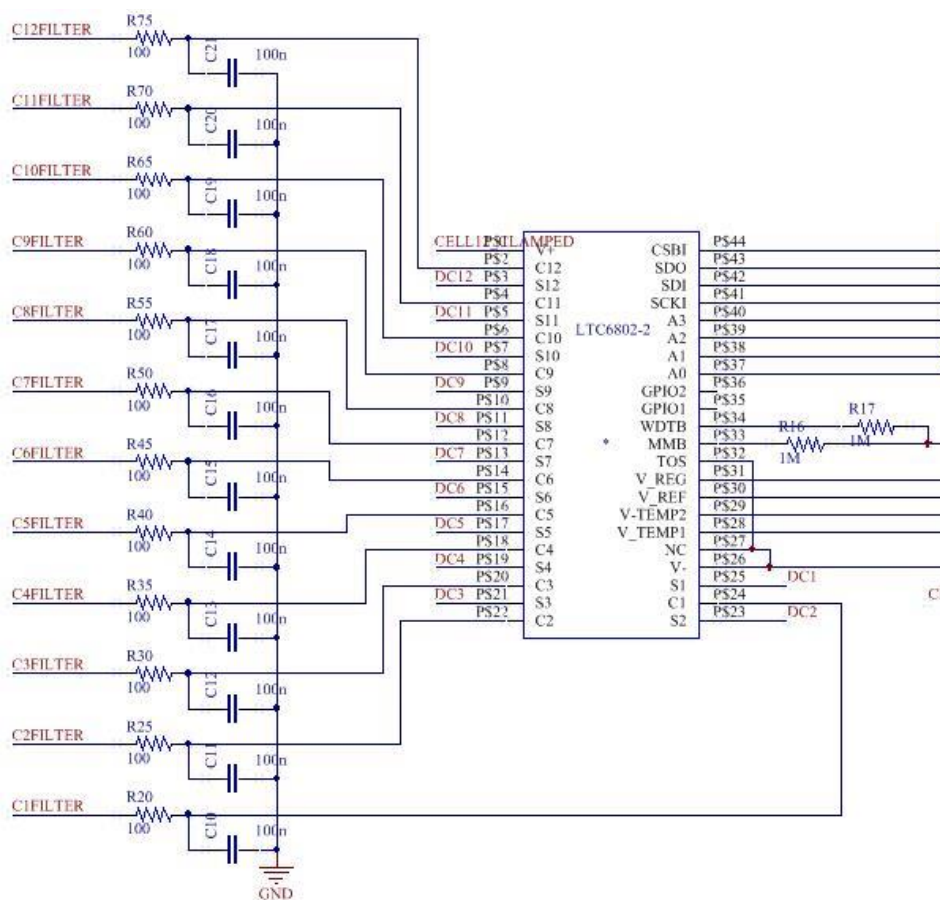


图 3-8 LTC6802-2 采集部分电路

Fig.3-8 LTC6802-2 collection part of the circuit

2) 温度采集

由于电池在进行大电流放电或快充时，各个电池单体会产生大量的热量，将造成电池组局部温度快速上升，使电池的一致性恶化，使用寿命大大缩短，严重时会造成某些电池单体热失控，产生燃烧爆炸的严重事故。因此对电池组进行温度监测，当温度超过规定上限阈值时，对电动汽车的功率进行限制^[66]。

温度采集器选用 DS18B20，这款温度传感器具有结构简单、操作方便，支持多点

组网功能，多个 DS18B20 可以并联在唯一的三线上，最多能并联 8 个，可实现电池组的多点分布测量。

利用 LTC6802-2 的 GPIO1 引脚，其是通用的 I/O 引脚，可用于与 DS18B20 的一线通信。通过读取每个 DS18B20 唯一的 ROM 序列码，区分每个传感器，并获取相应的测量温度值。图 3-9 为 DS18B20 的分布连接图。

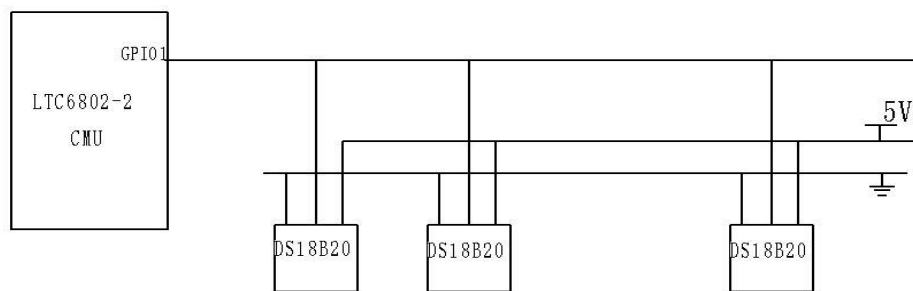


图 3-9 DS18B20 分配布置图

Fig.3-9 DS18B20 distribution layout

3) 电流采集

电流作为 SOC 估算算法的输入变量，是动力电池 SOC 估算中的重要参数，因此电流的采集精度直接影响着 SOC 的估算精度。

霍尔效应传感器基于霍尔效应原理，测量载流导体中电流的大小。其具有测量范围广，测量精度高，响应速度快，可靠性好，体积小等优点。

本设计将霍尔效应传感器置于高压盒中的电池总正端线束上，使用车载 12V 电源作为其电源，并将采集到实时电流信号直接送到主板飞思卡尔芯片中，进行 SOC 的算法估算。

3.3.2 均衡模块电路

电池由于生产的批次、工艺等的差别，使得电池组中的单体电池的化学特性呈现一些微小的差异，在经历温度不均匀以及重复的充放电后，单体电池间会出现容量不等的情况^[67]；

电池间电压均衡主要有主动均衡和被动均衡。主动均衡虽然具有能量不损失等优点，但考虑到其占用体积较大以及成本高昂等因素，本设计使用被动均衡模式。

采集芯片 LTC6802-2 提供电池均衡功能。S 输出引脚内部包含一个 10K 的上拉电阻，因此当给其加载一个高阻抗时，S 引脚将会做数字输出使用。在应用时，对于需要对电池进行大电流放电的要求，可以连接一个 PMOS 开关器件以及合适的阻值，这个外部电

阻应该用于限制由 MOSFET 消耗的功率。该 MOSFET 的最大功耗受到 LTC6802-2 可以容忍的热量限制，过热导致芯片温度升高，其电气特性高达 85℃。

选用 3.3K 的电阻作为 MOSFET 管功率限制用电阻，同时在当 MOSFET 管导通后，与电池组成的回路选用低阻值电阻，以使在回路中产生相对更大的电流使电池更快的放电，并选用 2512 封装的电阻，增大接触面积，使电阻更快放热，如图 3-10 所示。

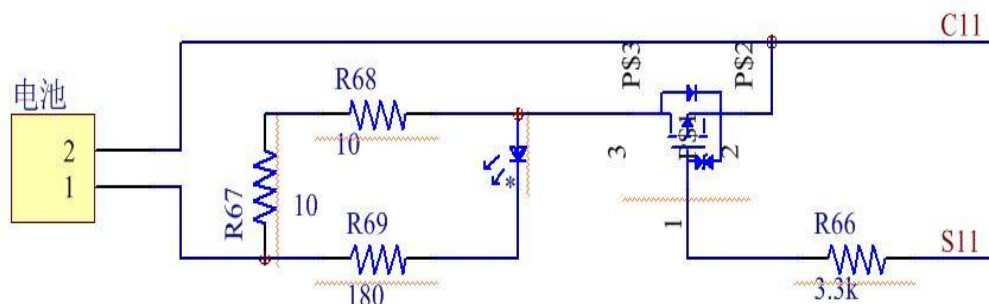


图 3-10 电池均衡模块

Fig.3-10 Battery equalization module

3.3.3 主从板通信模块电路

从板与主板通过四线制 SPI 通信，SPI 同步串行接口信号线包括：串行时钟输入引脚 SCK，串行数据输入引脚 SDI，串行数据输出引脚 SDO，SPI 片选输入引脚。SPI 的主要作用是进行同步串行通信，它使单片机具备了与外围设备以及其他微处理器进行同步通信的功能，也能够多主系统中实现处理器间的通信。SPI 特性如下：（1）可设置成主模式或从模式。（2）单个数据引脚的双向模式。（3）一个主 MCU 和一个或几个从 MCU。（4）几个 MCU 互相连接构成多主机的系统。

在主电路与控制电路通信时，为有效抑制系统噪声，消除接地回路干扰，可通过以光为媒介传送信号，对输入和输出电路可以进行隔离。常用的隔离方法有三种：光电、电容、电感耦合。选用以光电隔离技术为主，其具有响应速度较快、寿命长、体积小耐冲击等优点。

1) 对于光电隔离器件的选取应考虑：

（1）要使发光二极管导通，必须在其输入侧提供足够大的导通电流，以使发光二极管发光。

（2）受发光二极管和光敏元件响应时间的影响，光电隔离器件只允许一定频率以下的信号通过，因此在传送高频信号时，选择通过频率较高的光电隔离器件。

（3）光电隔离器件输出端的灌电流不能超过额定值，否则会发生损坏。一般输出

端额定电流在 mA 级，不能驱动大功率的外部设备，因此需要在外设和隔离器件之间设置驱动电路。

综上，选用光电耦合器 ACSL-6410。ACSL-6410 是真正隔离，多通道和双向的，高速光电耦合器，如图 3-11 所示。

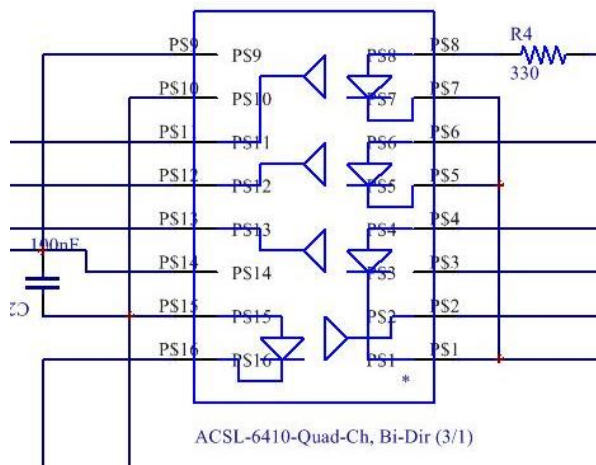


图 3-11 ACSL-6410 block diagram

Fig.3-11 ACSL-6410 block diagram

2) 控制电路端驱动电路

由于在光电隔离器一侧的电流值较小，难以实现对 ACSL-6410 内部器件的驱动，因此加入驱动电路，使用 5V 驱动电源。

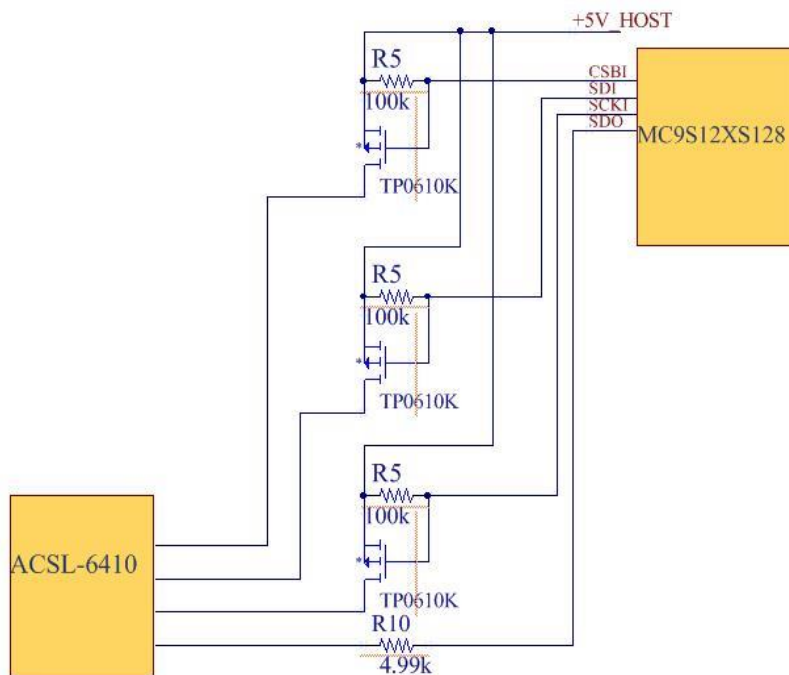


图 3-12 驱动电路示意图

Fig.3-12 Drive circuit diagram

3.4 硬件抗干扰设计

数字 IC 充当噪声源，噪声经由信号线、电源线和 GND 线传导。当流经这些导线的噪声直接从 PCB 辐射，或通过充当天线的 I/O 电缆或电源电缆辐射时，就会出现噪声干扰。采用 EMI 静噪滤波器抑制噪声是通过消除流经这些传输线的噪声来实现的。

如果 PCB 上的 GND 布局相对较小，GND 布局具有电感，信号的回流将导致 GND 端子发生电压。可以认为这是产生共模噪声的原因。

为了抑制共模噪声，有效的措施是通过增强 GND 以降低 GND 阻抗，或者在信号线和电源线上采用 EMI 静噪滤波器，以减小回流。因此在 PCB 布线过程中，增加采集模块 C1~C12 引脚输入线的线宽，以及电源线线宽等。

3.5 本章小结

本章根据当前主要电动汽车所用电池包中电池多而难以监控的情况，设计一种“一主多从”主从式的电池管理系统，相较市面已有的电池管理系统，该设计具备更可靠的监控管理功能，以及更加的经济性与实用性。对设计的电池管理系统 CMU 和 AMU 中各个主要部分电路进行分析，主要有电源模块，通信模块，采集模块，控制模块等。

第四章 微型厢式物流车主从式电池管理系统软件设计

电池管理系统是电动车控制管理中的重要一环，负责对各类数据进行分析、运算及处理，以及与整车控制器进行通信等任务。因此要满足相应的规范与标定协议等，软件功能需求较多，架构也比较复杂。本章将主要针对电池管理系统的底层基础软件（BSW）进行设计。

4.1 BMS 系统软件架构及系统概述

4.1.1 BMS 软件系统架构

电池管理系统软件系统分为底层基础软件（BSW，Base Soft Ware）及应用层软件（App，Application），基础软件主要有初始化程序、信息采集、在线计算、故障诊断及上下级通信等。应用层软件主要是使用 Labview 作为上位机，实现对电池电量，以及充放电等的控制^[68]。

根据芯片的功能不同，将电池管理系统软件系统分为中央控制软件及电池监控系统软件。其中中央控制软件主要是 BMS 系统初始化程序和系统控制流程程序。电池监控系统软件主要是采集模块程序、SOC 估算模块程序、均衡模块程序、SPI 通信模块程序，软件框架如 4-1 所示。



图 4-1 BMS 软件系统架构

Fig.4-1 BMS software system architecture

4.1.2 BMS 软件系统环境概述

MC9S12X 系列单片机的开发环境是 CodeWarrior，改型版本很多，其中飞思卡尔 16 位单片机使用的开发环境主要有 V4.6、V4.7、V5.0、V5.1。本文使用 V5.1 版本进行开发，开发界面如图 4-2 所示。

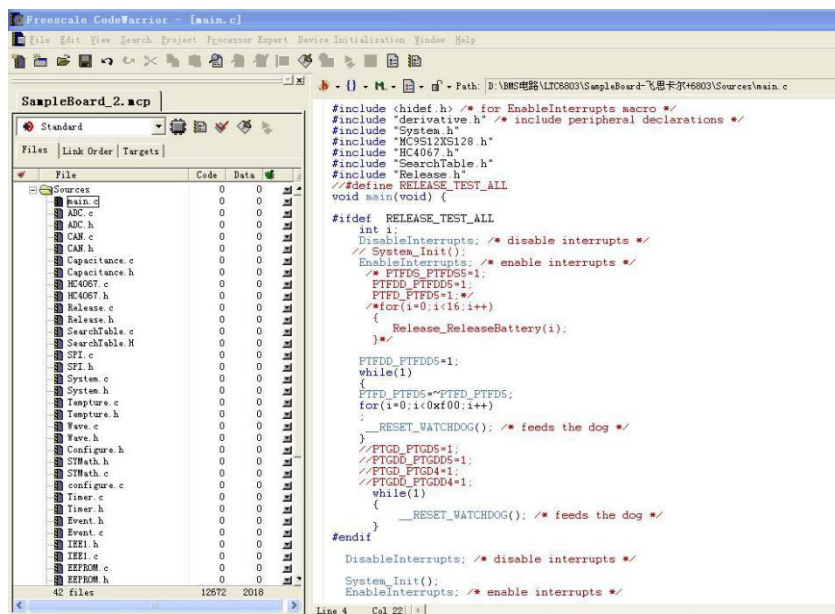


图 4-2 Codewarrior 操作界面

Fig.4-2 Codewarrior operation interface

4.2 BMS 中央控制系统软件设计

电池管理系统的上层软件主要实现 SOC 与 SOH 的估算，与整车、快速充电设备、慢充电设备的信号交互，完成对系统的充放电高压回路控制，实现电池组系统的充放电。同时要实时对电池组系统的荷电状态进行估算，对电池组系统的故障进行检测及处理，保证系统的正常工作^[68]。

本系统软件是基于飞思卡尔 MC9SXS128 使用 C 语言实现的，模拟前端 (AFE) IC 执行艰难的测量每节电池电压、电流和温度的任务，并向控制电路传递数据。控制器通过电池数据计算电池组的电荷状态和健康状态。控制器命令前端 IC 给某些电池充电或放电，以在电池组内保持平衡的电荷状态。

系统初始化程序主要是对 LTC6802-2、端口、时钟等的初始化操作配置。其中 LTC6802-2 初始化首先需要对配置寄存器进行设置。配置寄存器分别为 CFGR0、CFGR1、...CFGR5，其主要配置看门狗、MOS 管放电开关、电池的使能中断、过压值、

欠压值，初始化流程如图 4-3 所示。

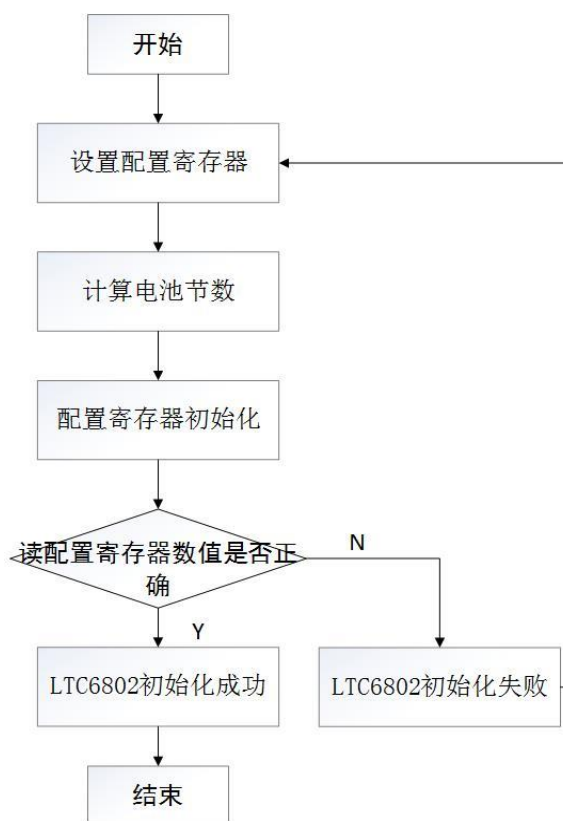


图 4-3 LTC6802-2 初始化流程

Fig.4-3 LTC6802-2 initialization process

4.3 BMS 电池监控系统软件设计

LTC6802-2 具有三种工作模式：待机，测量和监测。待机模式是省电状态除串行接口以外的所有电路均关闭。在测量模式下，LTC6802-2 用于测量单元电压并将结果存储在存储器中。测量模式也将监测每个电池电压的过电压（OV）和欠压（UV）条件，在监视模式下，设备将只监视单元的 UV 和 OV 条件。从实际运用角度考虑，只使用待机模式和测量模式^[63]。

（1）待机模式

LTC6802-2 默认（上电）进入待机模式。待机模式是可能的最低电源电流状态，除串行接口外，所有电路都关闭稳压器。LTC6802-2 可以被编程通过设置配置位 CDC [2:0] 进入待机模式，如果零件正在进行 ADC 测量，测量将会进行被中断，电池电压寄存器将在一个不确定的状态。退出待机模式，CDC 位必须写入 0 以外的值。

（2）测量模式

当 CDC 位编程 1 到 7 的值时，LTC6802-2 处于测量模式。IC 监视每个电池的电压，

并在 SDO 引脚会产生一个中断信号指示所有电池电压的在 UV 和 OV 限制内。

UV/OV 限制要求由在配置寄存器中的 VUV 和 VOV 值设定。当电池电压超过在标志寄存器中设置的 UV/OV 限制阈值时，该电池的 UV 和 OV 标志状态即变为 1，通过读/写标志寄存器组来确定/修改。

LTC6802-2 可以持续监测 UV 和 OV 情况。在启动电池电压测量模式时，A/D 转换和轮询状态命令必须发送。命令发送完之后，LTC6802-2 将使用其中一个来发送 A/D 转换器状态如所描述的切换轮询或级别轮询方法。如果 CELL10 位高，那么由此将仅测量前 10 个电池的电压，以降低功耗和测量时间。通过 CELL10 位默认为低电平，可以测量全部 12 个电池电压。在电池电压测量命令期间，UV 和 OV 标志的情况也被更新。

4.3.1 锂电池 SOC 估算程序

锂电池 SOC 估算流程采用 OCV-SOC 曲线与估算算法相结合的方法，由于 OCV-SOC 曲线对相同输入（充放电工况，温度，SOC 等）具备一定的稳定性，因此能够作为校正初始 SOC 的依据^[38]，同时通过之前存储的 SOC 值进行联合校正。

在电池充放电过程中，主板芯片通过霍尔效应传感器采集电流信号，并将采集到的电流值放入 SOC 估算程序中，实现对 $k+1$ 时刻 SOC 的估算。

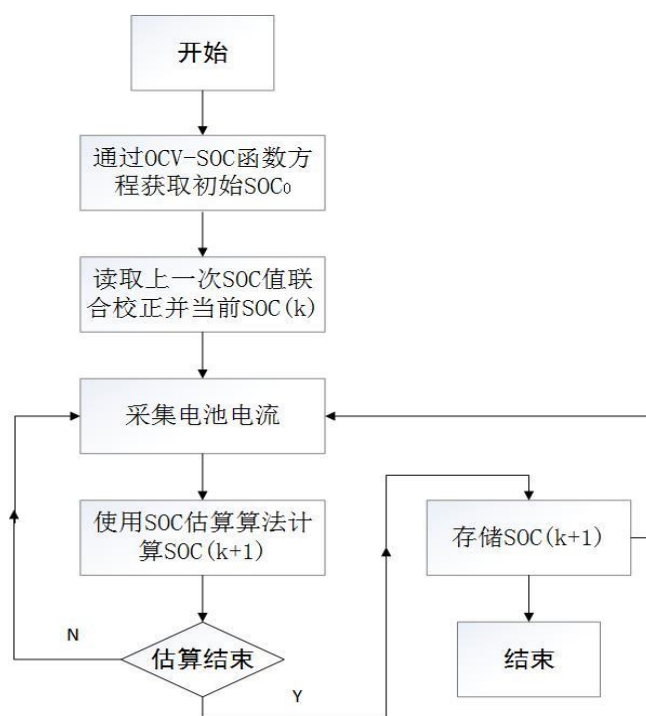


图 4-4 锂电池 SOC 估算流程

Fig.4-4 Lithium battery SOC estimation process

4.3.2 采集监控模块程序

C1 至 C12 是监视电池单元的输入电压，最多可以监视 12 个单元，最低电位引脚连接到 V-引脚。

LTC6802-2 是一款能够测量的数据采集 IC12 串联电池的电压。输入多路复用器将电池连接到一个 12 位 Δ - Σ 模数转换器 (ADC)，内部的 5ppm 的电压基准与 ADC 结合在一起。LTC6802-2 与主处理器之间的通信由 SPI 兼容的串行接口处理。

首先，输入 STOWAD (Start open-wire A/D conversions and poll status) 命令，开启 A/D 转换和轮询状态，具体数据可以是 0x20 (12 块电池都使能输入)，0x21 (仅第 1 块电池使能输入)，0x22, ..., 0x2C。为了可靠地检测打开的连接，命令提供 STOWAD。用这个命令，两个 100 μ A 电流源连接到 ADC 输入和在所有单元格转换期间打开。

1) 启动电池电压 A/D 转换和轮询状态 (带切换轮询的广播命令)

- (1) 将 CSBI 拉低。
- (2) 发送 STCVAD 命令字节 (堆栈中的所有器件同时启动 A/D 转换)。
- (3) 所有器件的 SDO 输出并行拉低约 12ms。
- (4) SDO 输出在 1kHz 速率下切换，表明所有设备的转换完成。
- (5) 将 CSBI 拉高以退出轮询。

2) 读取 LTC6802-2 电池电压寄存器

LTC6802-2 内部有专用的电池电压寄存器，寄存器分别是 CVR00、CVR01、CVR02...CVR17。通过 SPI 发送指令 RDCV，读取寄存器内的值。将读取到的数值存放在定义的电池电压寄存器数组，每 3 个电池电压寄存器对应 2 个电池电压。最后需要将电池电压寄存器数组内数字重组以得到电池实际电压。

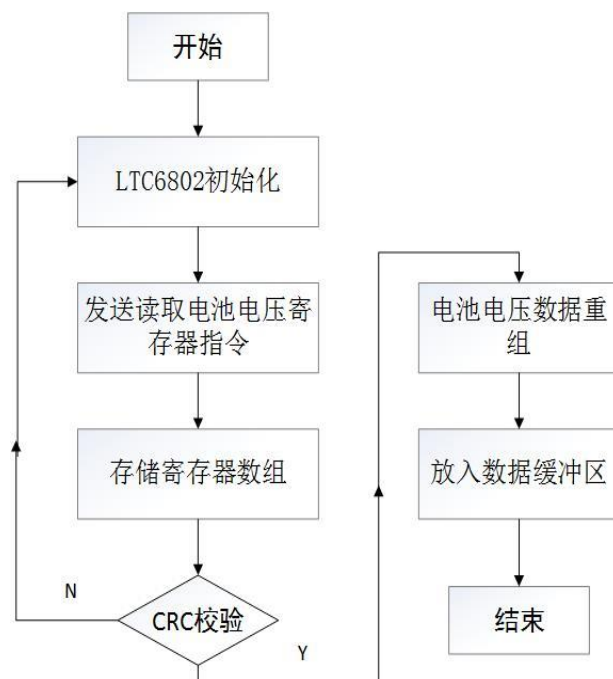


图 4-5 读取电压寄存器流程图

Fig.4-5 Read voltage register flow chart

3) 读取电池温度

LTC6802-2 内部有 5 个温度寄存器，分别是 TMPR0、TMPR1、TMPR2、TMPR3、TMPR4、TMPR5。要获取温度值，需要使用启动温度 A/D 转换 (STTMPAD) 命令和读取温度寄存器 (RDTMP) 命令，具体流程见下图。

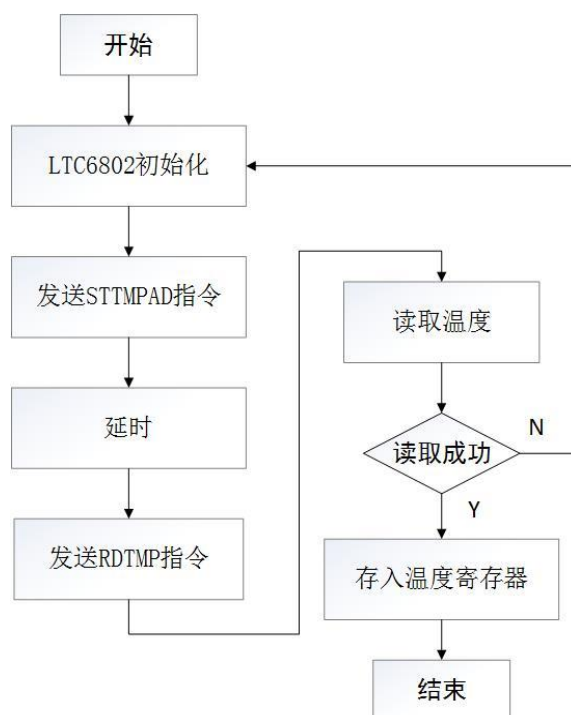


图 4-6 读取温度流程图

Fig.4-6 Read temperature flow chart

4) 电池均衡

LTC6802-2 内部 MOSFET 可用于放电单元，也可以用来控制外部平衡电路。LTC6802-2 并不决定内部 MOSFET 的开/关，而是由上级主控处理器来控制。主机处理器将值写入 a 配置 LTC6802-2 内部的寄存器来控制开关。LTC6802-2 上的看门狗定时器可以是用于通讯时关闭放电开关与主处理器中断。

首先，默认情况下电路均衡模块处于关闭状态，并只在充电状态开启该功能。根据采集到的电压信息在线寻找电池电压最小/最大的电池，如果检测到某电池电压超出最小/最大电压阈值，则开启均衡功能，直到其在设定的阈值范围内则停止均衡功能。

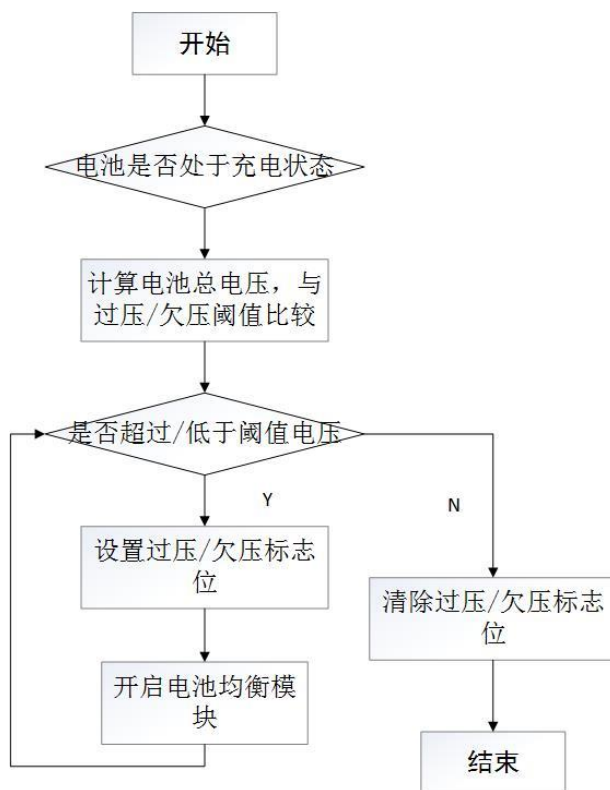


图 4-7 电压均衡流程图

Fig.4-7 Voltage equalization flow chart

5) 电池过压/欠压状态监控

外部故障（如充电器等）可能导致电池过充过放的情况，此时电池内化学反应剧烈，将释放大量的热和气体，使电池严重鼓胀变形，甚至出现爆炸，缩短电池包的使用寿命，并且威胁行车安全^[58]。因此，对电池过压/欠压状态的监控非常重要。

过压/欠压以检测串联电池的总电压为准，当电池的总电压超过额定总电压的 50% 时，则视为过压；当电池的总电压低于额定总电压的 50% 时，则视为欠压。

4.3.3 SPI 通信模块程序

LTC6802-2 具有 SPI 总线兼容串行端口。设备可以使用数字隔离器并联连接。多个设备由部件地址唯一标识由 A0~A3 引脚决定^[63]。

时钟相位和极性：与 LTC6802-2 SPI 兼容接口被配置为在系统中运行使用 CPHA = 1, CPOL = 1。因此，SDI 的数据必须在 SCKI 的上涨期间保持稳定。

数据传输：每个字节由 8 位组成。字节是先传送最高有效位 (MSB)。在一个写入，SDI 上的数据值被锁存到设备上 SCKI 的上升沿。同样，在阅读时，SDO 输出的数据在上升期间有效 SCKI 的边沿和 SCKI 的下降沿跳变。

1) 写命令—配置寄存器 (广播命令)

- (1) 将 CSBI 拉低。
- (2) 发送 WRCFG 命令字节。
- (3) 发送 CFGR0 字节，然后发送 CFGR1, CFGR2, ... CFGR5 (总线上的所有设备接收相同的数据)。
- (4) 拉高 CSBI, 数据锁存在 CSBI 上升沿的所有器件中。

2) 读命令—读取电池电压寄存器 (地址命令)

- (1) 将 CSBI 拉低。
- (2) 发送底部设备的地址字节。
- (3) 发送 RDCV 命令字节。
- (4) 读取底部器件的 CVR00 字节，然后读取 CVR01 (B), CVR02 (B), ... CVR17 (B)，然后读取 PEC (B)。
- (5) 拉高 CSBI。
- (6) 对中间设备和顶部设备重复步骤 (1) - (5)。

4.3.4 EEPROM 读写子程序

本文选用的 BMS 主控芯片 MC9S12XS128 内置 4KB 的 EEPROM，可以用于在线改写、掉电保护、存储实时更新数据等^[22]。

可以通过字节、对齐的字和非对齐的字的方式来访问 EEPROM。EEPROM 内所有的编程和擦出都被一个状态机控制，其读写操作流程如下。

- (1) 配置 EEPROM 的寄存器，初始化后发送写命令。
- (2) 写入 EEPROM 块中高地址和低地址字节。确认地址后，MCU 将向 EEPROM 中写入数据。每写入八位数据，EEPROM 向 CPU 发送一个响应。

(3) CPU 根据 EEPROM 发送的个数来判定数据是否写入完成；完成以后，向 EEPROM 写入完成命。

4.4 本章小结

本章主要是针对电池管理系统的软件部分进行详细解读，其中锂电池 SOC 估算程序的原理主要由自己实现，其他几个软件程序实现原理则主要依据使用芯片的功能来进行编写实现。总体设计在保证基本功能以及稳定的情况下，减少不必要的功能控制。

第五章 主从式电池管理系统功能仿真

5.1 BMS 系统硬件电路功能仿真软件

BMS 硬件电路仿真测试主要为测试 BMS 的各部分电路设计合理性、准确性等。通过仿真测试系统可以快速开发和验证 BMS 的控制功能和诊断功能，尽早发现 BMS 产品在设计 and 开发过程中存在的各种缺陷，不断完善和提高 BMS 产品的功能和性能。

NI Multisim 软件结合了直观的捕捉和功能强大的仿真，能够帮助用户快速、轻松、高效地对电路进行设计和验证，具有以下几个显著特点：

- (1) 直观的图形界面。
- (2) 丰富的元器件。
- (3) 众多虚拟仪表。

Multisim 12 还提供多种分析功能，常用的分析工具有：直流工作点分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析、失真分析、噪声分析和直流扫描分析。利用这些分析工具，可以了解电路的基本状况、测量和分析电路的各种响应。

5.2 主板电源模块信号仿真

1) 电源模块

主板电源模块使用的是 LM2940 稳压器。LM2940-N / LM2940C 正电压稳压器的特点是能够输出 1A 的输出电流，其压差一般为 0.5V，最大值为 1V 的整个温度范围内。此外，还包括一个静态电流减小电路，当输入电压和输出电压之间的差值超过大约 3V 时，减少接地电流。静止输出电流为 1A 的电流和 5V 的输入输出差分仅为 30mA。只有在稳压器处于欠压模式 ($V_{IN} - V_{OUT} \leq 3V$) 时，才会有较高的静态电流^[70]。搭建的仿真电路如图 5-1 所示，图 5-2 为示波器的显示图像，从中可以看出其能得到稳定的+5V 电压。

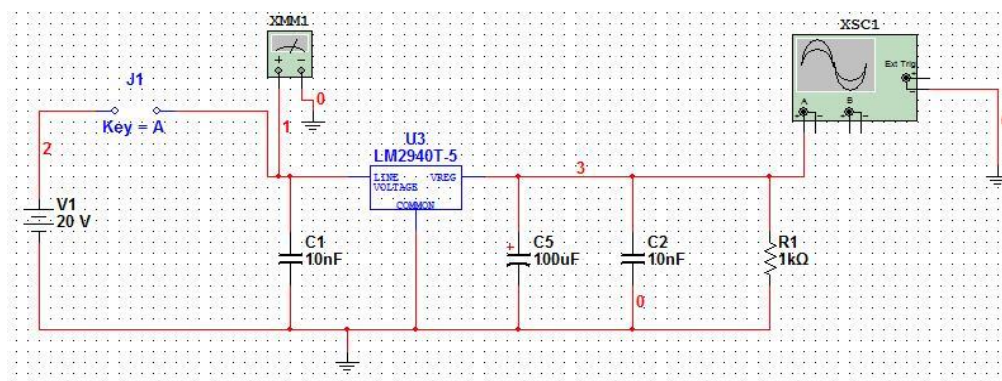


图 5-1 主板电源仿真模块电路

Fig.5-1 Motherboard power simulation module circuit

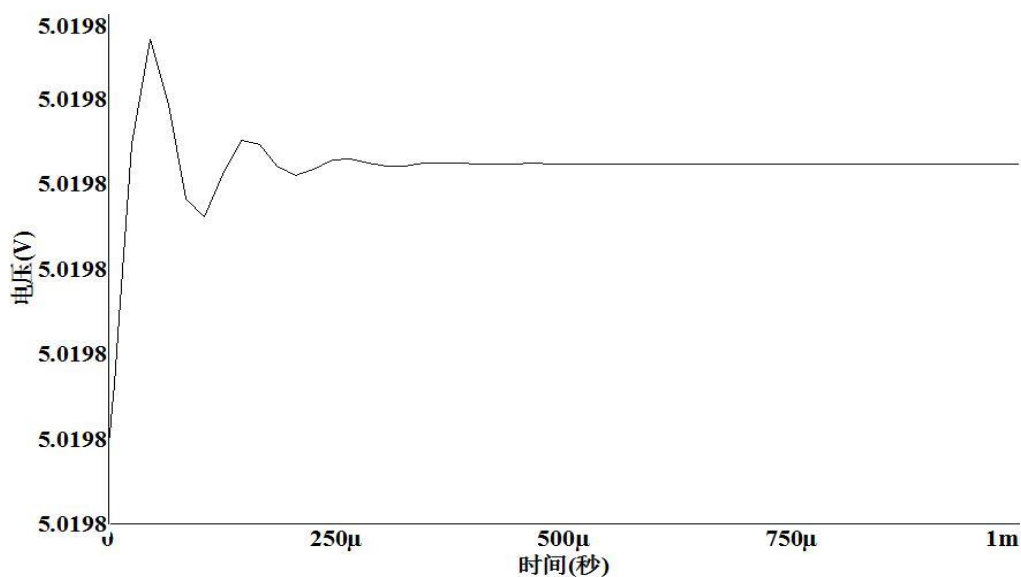


图 5-2 示波器电压输出信号

Fig.5-2 Oscilloscope voltage output signal

2) 电源模块噪声分析

噪音是电或电磁能量，降低了信号的质量。噪声影响数字、模拟和所有通信系统。为了详细了解电路设计的噪声环境，需要对其进行噪声分析。噪声分析是指电路中出现的非信号项电压或电流，是影响实际电路性能的随机因素之一，其计算每一个电阻或半导体器件对指定输出节点的噪声贡献。

对噪声分析参数进行设置，输入噪声参考源设置为电源处节点 2，输出节点选 V3，参考节点选地节点 V0，开始频率 1Hz，终止频率 10GHz。输出变量添加输入噪声频谱 (inoise_spectrum)、输出噪声频谱 (onoise_spectrum)、地源参考噪声频谱 (onoise_rr1)。

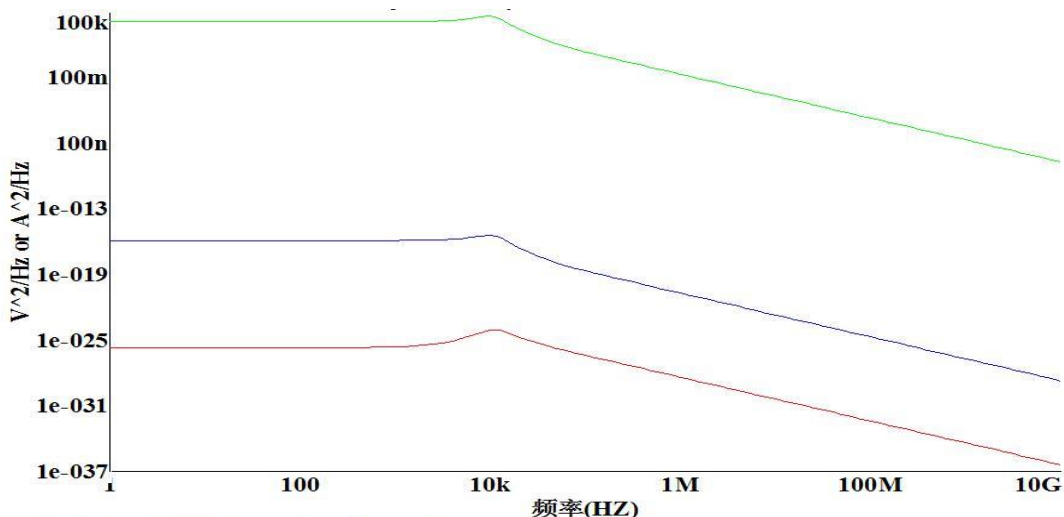


图 5-3 主板电源噪声谱密度曲线

Fig.5-3 Mainboard power noise spectral density curve

这三条曲线表示不同点处的噪声频谱，其中绿线表示 V3 节点输入噪声频谱，蓝线表示 V3 节点输出噪声频谱，红线表示地源参考噪声频谱。

从上图的图谱可以明显看出，在输入电源正极附近的噪声电压最高，经过滤波电容及稳压芯片之后，输出噪声电压有明显降低，达到较合理的范围内，接近参考地的噪声电压。图表显示了较低频率的噪声电压是恒定的，对于较高频率，噪声电压显着下降。

5.3 采集模块信号仿真

采集模块使用的主芯片是 LTC6802-2，其内部主要集成有多路复用器、A/D 转换器、控制器、寄存器等，同时还集成有光电隔离器件，具体如下图所示^[71,72]。

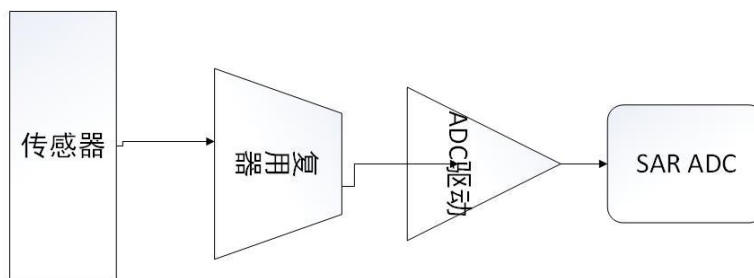


图 5-4 采集系统框图

Fig.5-4 Acquisition System Block Diagram

1) 噪声滤波

如图 5-5 所示为一阶低通 RC 滤波电路，对节点 1 进行噪声分下，得到图 5-6，其中绿线表示节点 1 输入噪声频谱，蓝线表示节点 1 输出噪声频谱。从图 5-6 可以看出在 0-10KHz 低频段，有用的低频信号保持通过；在 10KHz-10GHz 高频段，干扰信号保持

较好的被抑制效果。

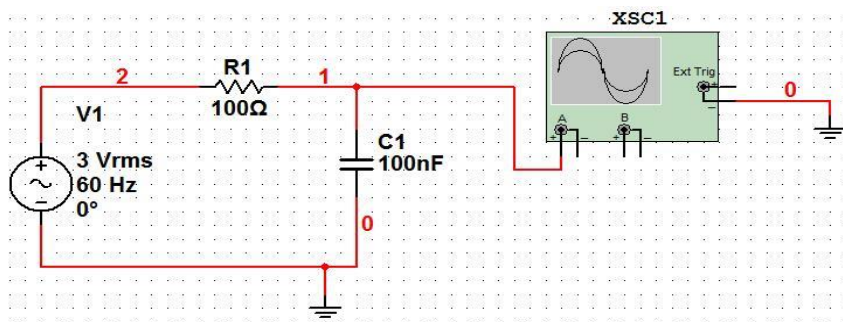


图 5-5 一阶低通 RC 滤波电路

Fig.5-5 First-order low-pass RC filter circuit

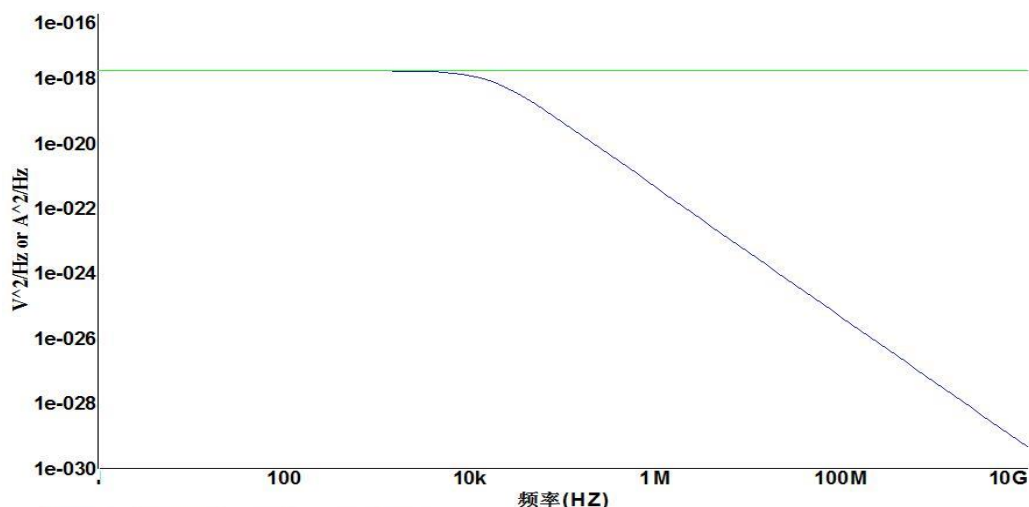


图 5-6 RC 滤波电路噪声分析

Fig.5-6 RC filter circuit noise analysis

2) 多路复用器采集系统

LTC6802-2 有 12 个输入通道，其对应内部功能器件为多路复用器，多路复用器能同时接收多个输入信号，按每个输入信号可恢复方式合成单个输出信号。

多路复用数据采集系统要求采用宽带放大器，以便驱动 ADC 的满量程(FS)输入范围时可以快速建立。此外，对多路复用通道进行开关和顺序采样必须与 ADC 转换周期同步。相邻输入之间的巨大电压差使这些系统易受通道间串扰的影响。为了避免产生误差，完整的信号链(包括多路复用器和放大器)必须建立所需精度，一般以串扰误差表示。

开关多路复用器的输入通道时，ADC 驱动放大器必须在指定的采样周期内建立一个电压阶跃。选用 ADG408 高性能多路复用器，作为数据输入通道。ADC 功能模拟选用 ADS8320EB。

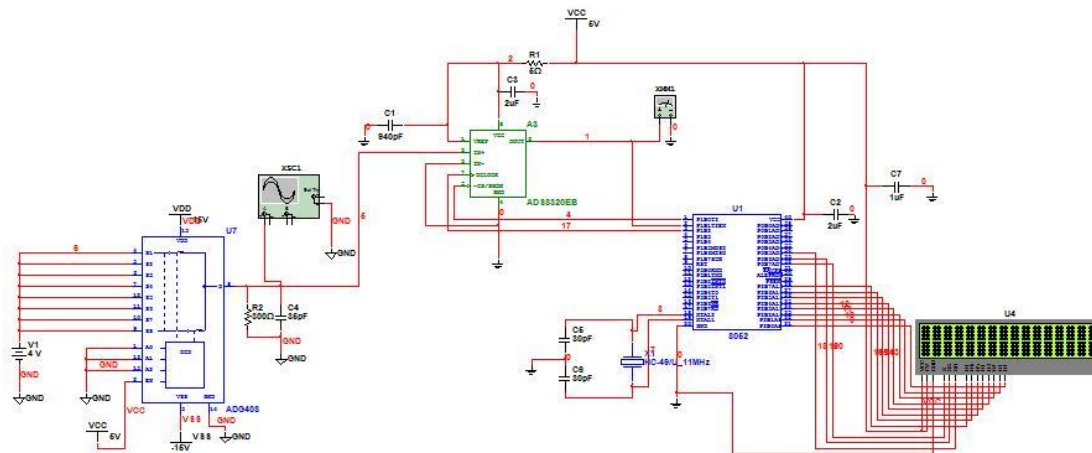


图 5-7 多路复用器数据仿真采集系统

Fig.5-7 Multiplexer data simulation acquisition system

5.4 均衡模块信号仿真

均衡的功能主要是为了更好的实现电池间的一致性，均衡电路设计的好坏主要体现在均衡效率上，即能在最快的时间里达到均衡的目的。如图 5-8 所示，搭建仿真模块中的一路均衡电路进行电路的仿真验证。使用电流源作为 LTC6802-2 中 S 通道的信号源，使用 PMOS 管作为开关管，通过对各点电压等参数值的变化判断均衡过程。

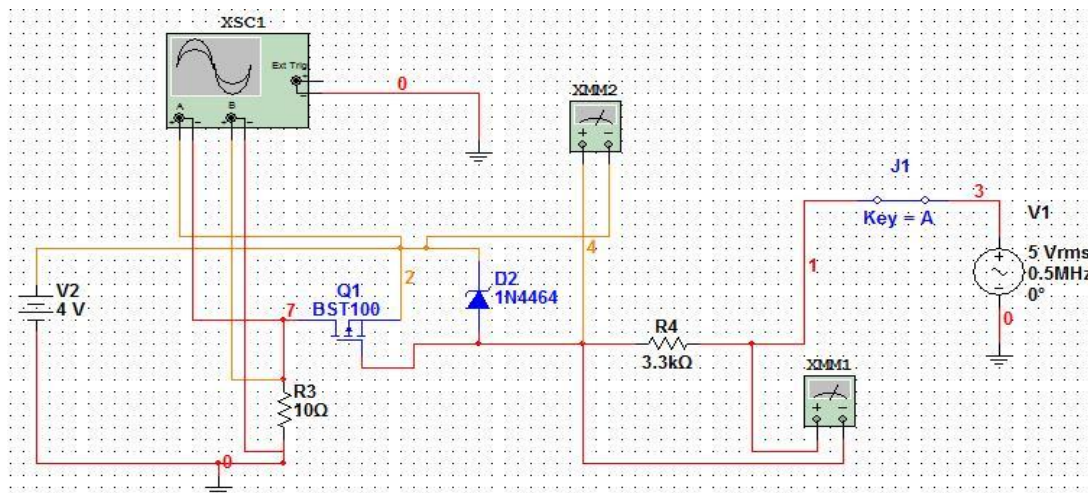


图 5-8 均衡模块仿真电路

Fig.5-8 Equalization module simulation circuit

按照上面对节点 2、节点 7、节点 4 的电压及节点 V2 的电流值进行瞬态分析，如下图所示，其中浅蓝线表示节点 2 的电压曲线，绿线表示节点 4 的电压曲线，红线表示节点 7 的电压曲线，紫线表示节点 V2 处的电流曲线。从其图谱可以看出，电压 $U_{27}=2.77V$ ， $U_{70}=1.23V$ ，从各个电压值可以看出，此时，PMOS 管处于导通状态，电池与 PMOS 管及 10 欧姆电阻组成的回路电流为 $I_{v2}=123.406mA$ 。

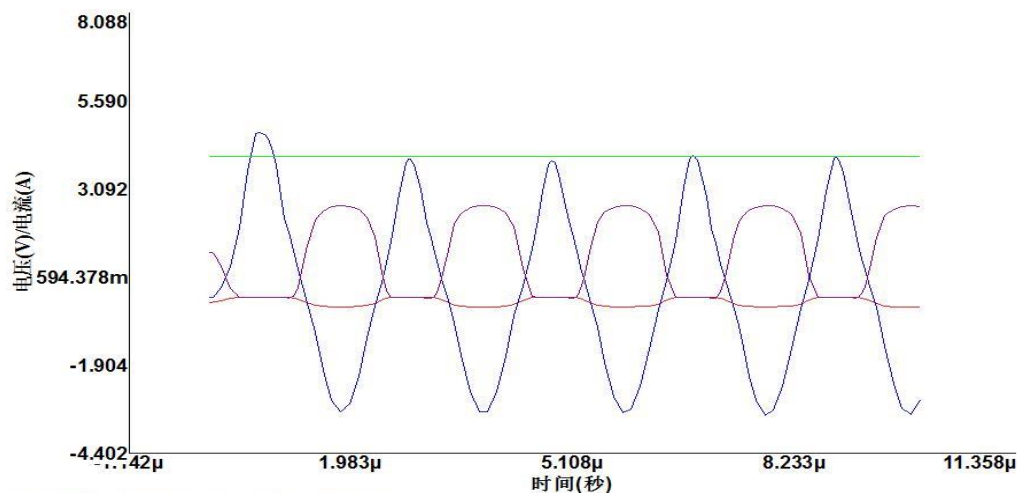


图 5-9 几个节点处的瞬态分析

Fig.5-9 Transient analysis at several nodes

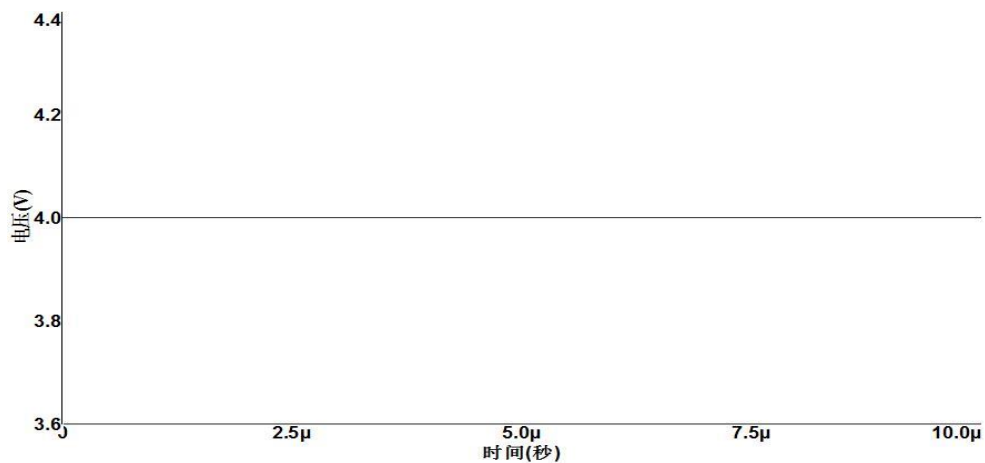


图 5-10 节点 2 处的电压谱

Fig.5-10 Voltage spectrum at node 2

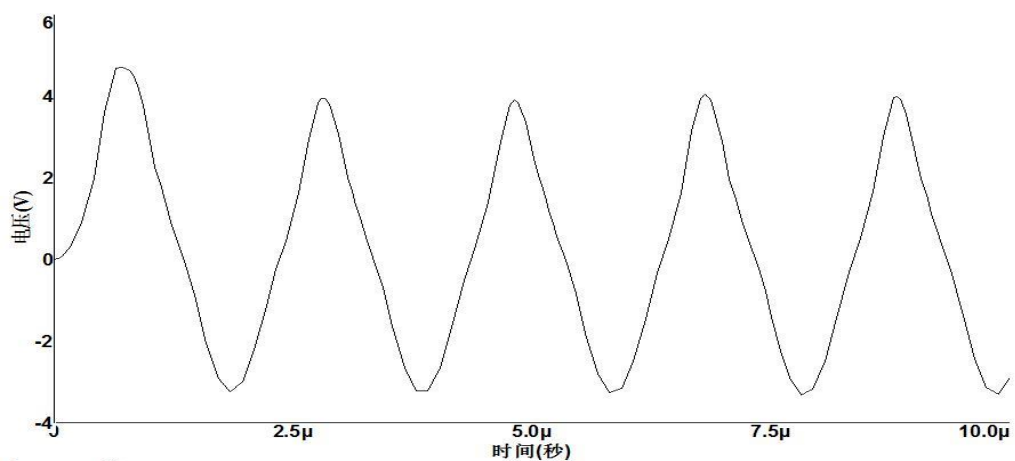


图 5-11 节点 4 处的电压谱

Fig.5-11 Voltage spectrum at node 4

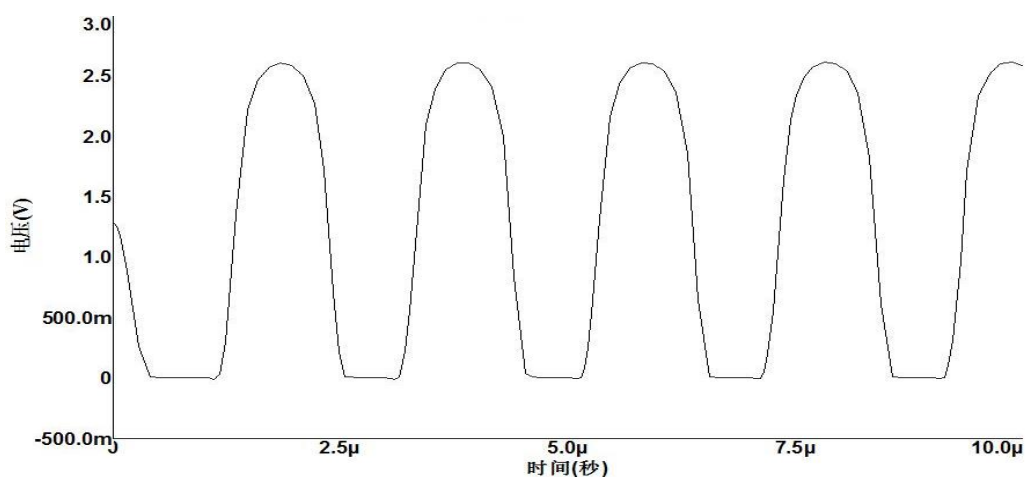


图 5-12 节点 7 处的电压谱

Fig.5-12 Voltage spectrum at node 7

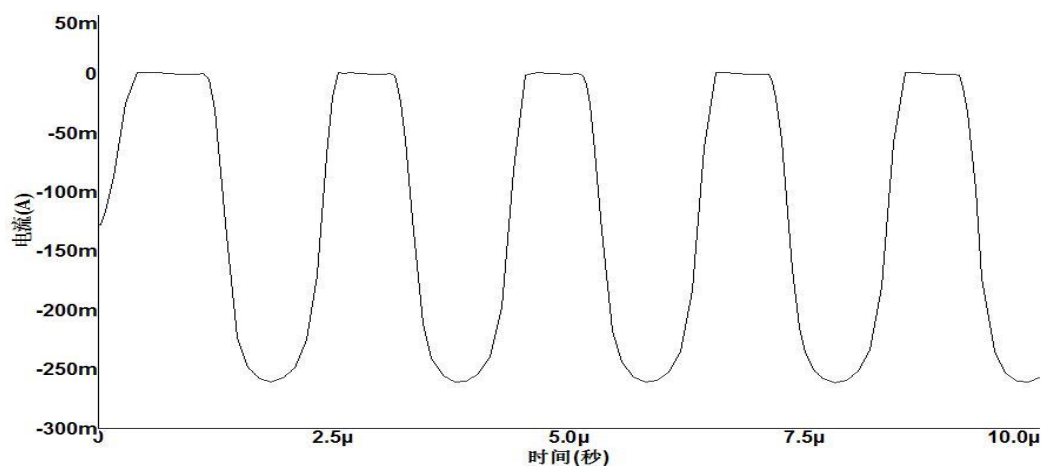


图 5-13 节点 V2 处的电流谱

Fig.5-13 Voltage spectrum at node V2

由以上的仿真结果可以看出，电路起到均衡的作用，从图 5-13 看到均衡电流不是特别大，在 250mA 左右，能满足最基本的均衡需求。

5.5 本章小结

本章主要通过 Multisim 仿真软件对 BMS 的部分硬件电路进行仿真，据此验证了各部分电路设计的正确合理与否。仿真结果表明，各模块电路能较好的满足基本功能要求。

第六章 主从式电池管理系统试验验证

通过前面第三、四章电池管理系硬件、软件的设计描述，本章将主要针对设计系统的采集、监测、SOC 估算等充分的试验验证，以保证设计的正确性。

6.1 电池监控单元测试环境及方法

1) 测试环境

试验平台使用的是费思科技的大功率可编程直流电子负载（FT6800系列）与可编程直流开关电源（FTP020系列）。FT6800系列电子负载具有定态测试、瞬态测试、自动测试、远程控制等功能，具有电压最大1000V，电流最大1000A，功率2600W-52000W的负载能力，能精确实现对电池的控制及信息的采集。



图 6-1 BMS 硬件测试平台

Fig.6-1 BMS hardware test platform

2) 测试方法

现结合太原市内工况及较为严苛试验条件，设定如下工况：试验工况时常1500s，为脉冲放电电流，其中大电流28A，小电流10A，PWM为10%，具体如图6-2所示。通过该工况对电池管理系统的采集模块等进行试验验证。测试分析内容主要有以下几项：

- (1) 电压采集精度分析。
- (2) SOC估算精度分析。
- (3) 电压均衡效果分析。

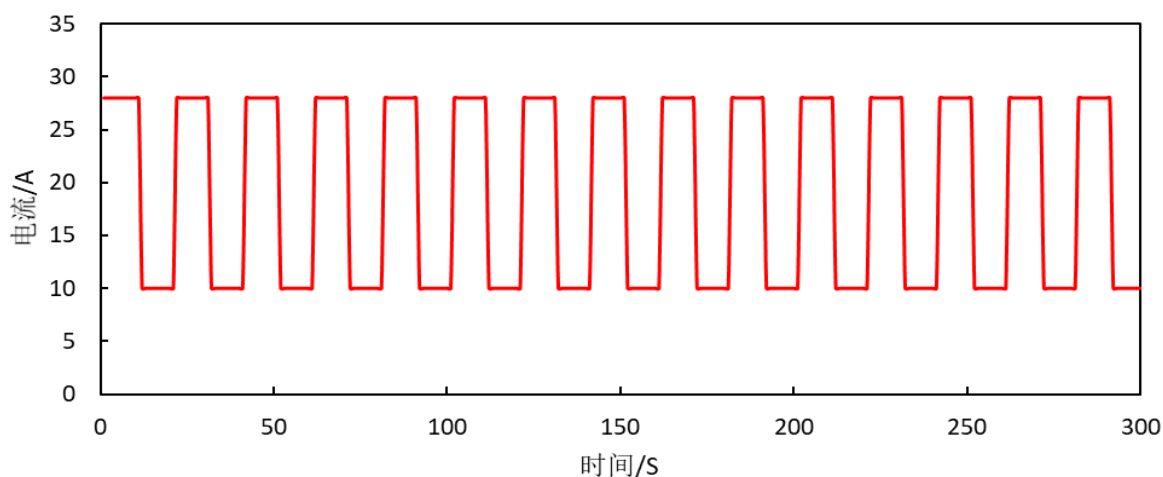


图 6-2 试验工况局部电流

Fig.6-2 Experimental condition local current

6.2 试验分析

现按照上节的试验方法，对设计的 BMS 进行电压采集精度分析，SOC 估算精度分析，均衡控制分析三个部分。

1) 电压采集精度分析

按照图 6-2 工况对电池进行放电试验，对电池组的每块电池电压进行采集，采集电压数据图如图 6-3 所示，图 6-4 为采集误差图。

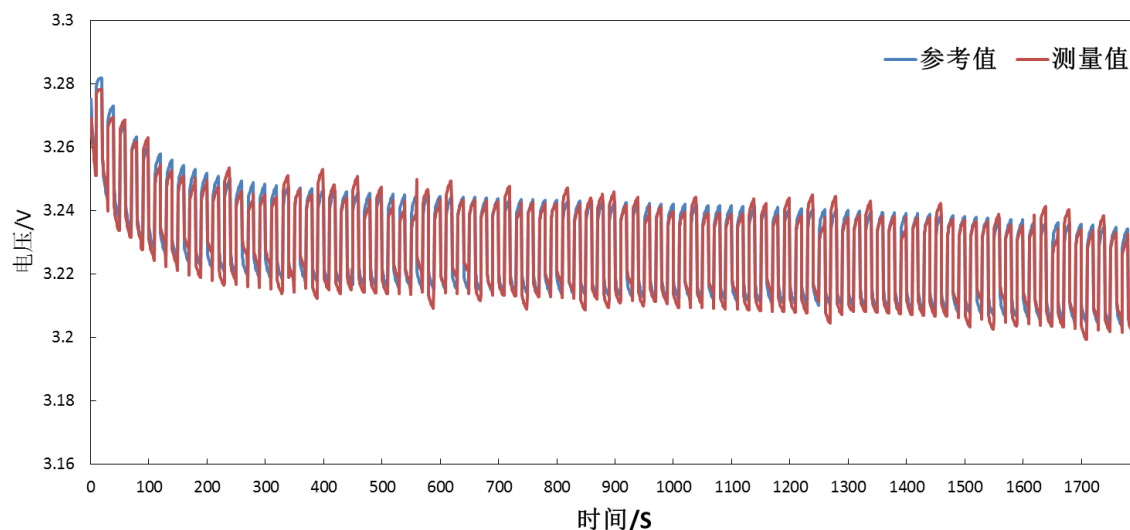


图 6-3 参考电压与测量电压曲线

Fig.6-3 Reference voltage and measurement voltage curve

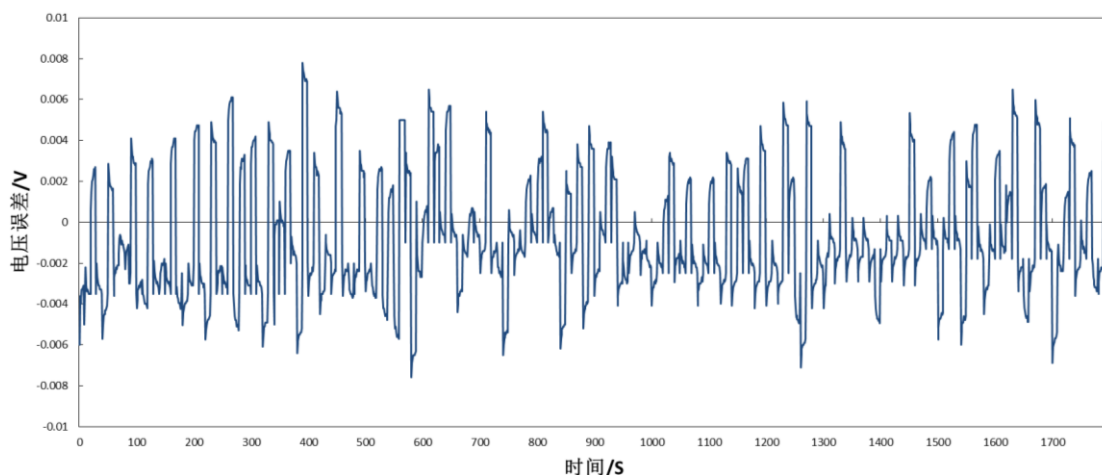


图 6-4 测量电压与参考电压误差曲线

Fig.6-4 Measuring voltage and reference voltage error curves

在图 6-3 中，蓝线为参考值，由放电设备测量得到的电压曲线；红线为设计系统测量得到的电压曲线。从图 6-4 可知，系统电路具有较高的采集精度，误差 8mV 之内，达到了设计使用要求。

2) SOC 估算精度分析

准确而稳定的 SOC 估算可以获知车辆的运行状态，保证行车的安全性。为了验证本文提出的基于改进的 Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波算法，使用费思系列充放电设备，根据图 6-2 设定的模拟工况，选取 5 节串联电池作为小型电池包进行放电试验。估算曲线如图 6-5 所示，图 6-6 为估计误差曲线。

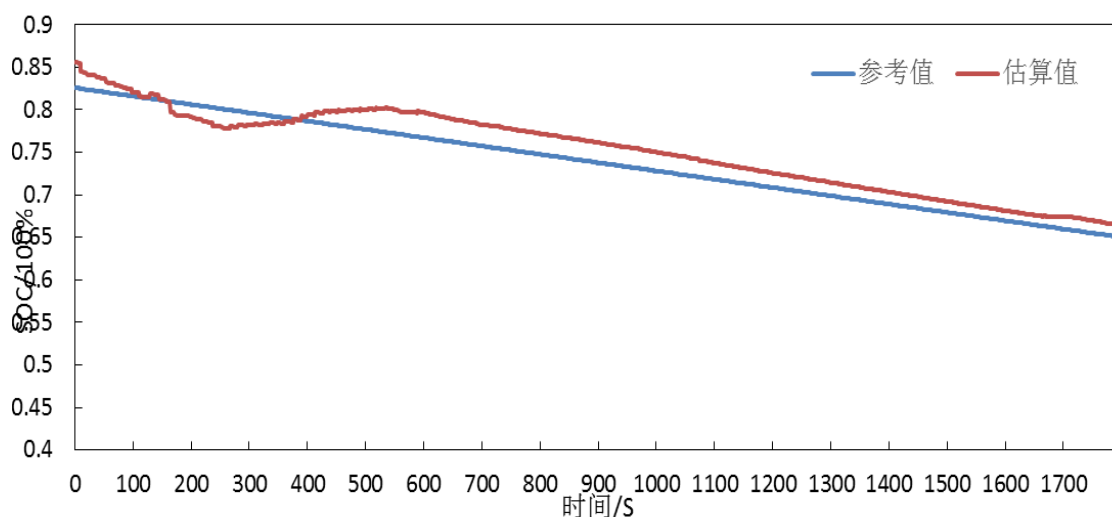


图 6-5 参考 SOC 与估算 SOC 曲线

Fig.6-5 Reference SOC and estimated SOC curve

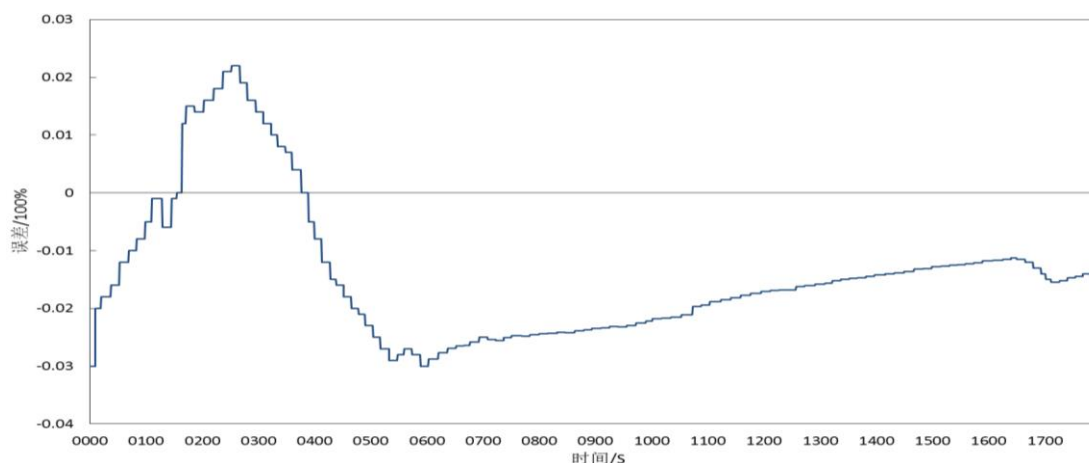


图 6-6 估算 SOC 与参考值的误差曲线

Fig.6-6 Estimating the error curve of SOC and reference value

图 6-5 中蓝线为参考 SOC 值,通过放电设备得到;红线为设计系统得到的估算 SOC 值。从图 6-6 分析可知,系统估算值与设备的参考值间的 SOC 误差在 3% 以内,且没有出现滤波发散的情况,达到了设计使用要求。

3) 均衡控制分析

通过被动均衡方案,对电池单体在慢充电过程中进行调节,减少因单体容量不一致所带来的系统容量降低,提高系统组单体一致性。测试设备:费思充放电设备、上位机、数字万用表等。

测试过程:选取四块单体电压有一定差异的电池,将四块电池串联,并将每块电池的正负极连接到 BMS 采集板的输入通道;然后以 0.3C 电流对电池组进行充电,在这个过程中测试电路均衡功能。测试结果如图 6-7、6-8、6-9 所示。

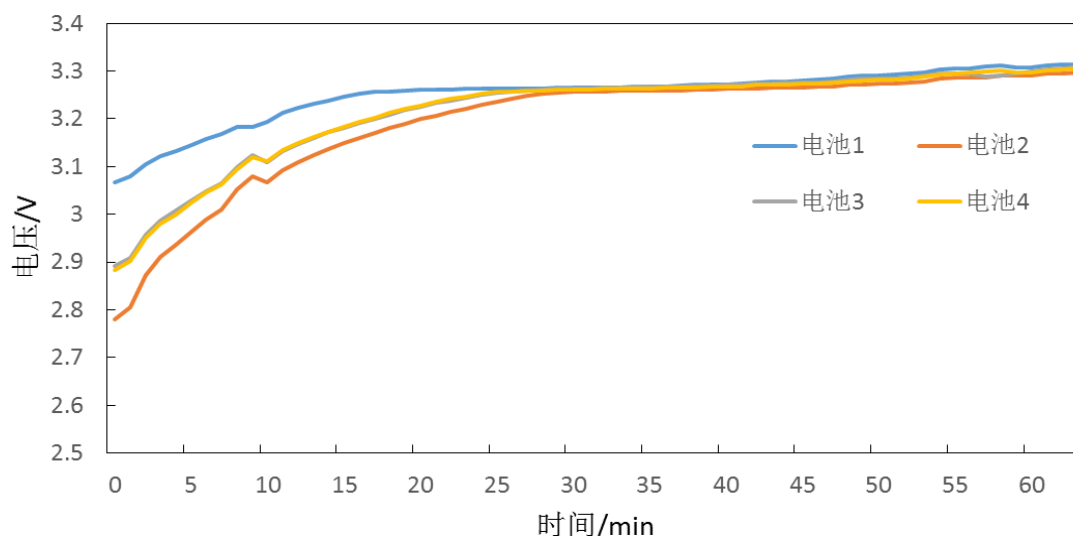


图 6-7 四节电池电压均衡曲线

Fig.6-7 Four cell voltage equalization curves

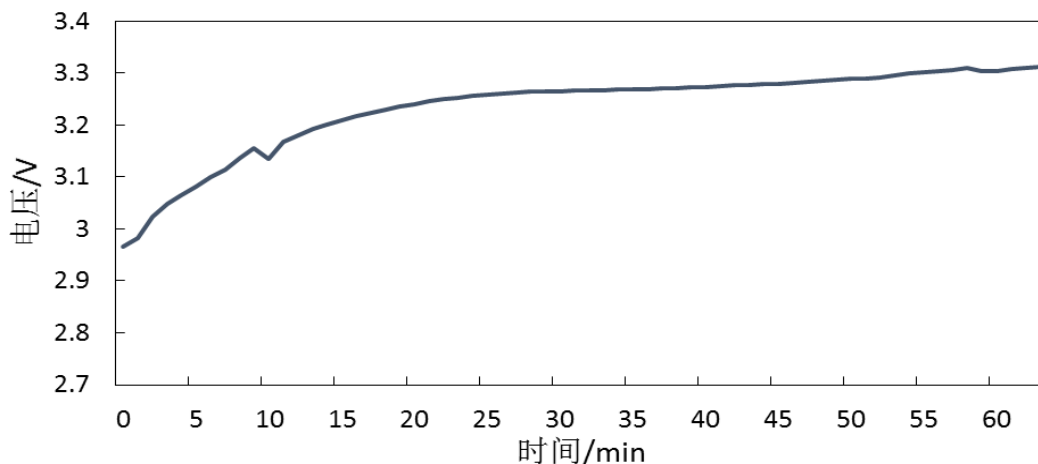


图 6-8 平均电压变化曲线

Fig.6-8 Average voltage curve

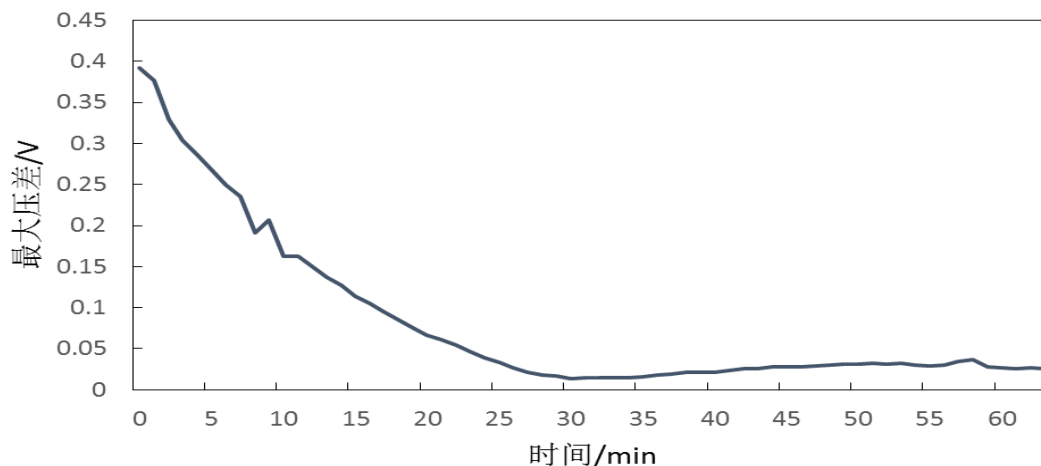


图 6-9 电池最大误差变化曲线

Fig.6-9 Battery maximum error curve

由以上三幅图分析可得，在刚开始四块电池间有较大的压差，电池 1 和电池 4 间的最大压差达 0.4V。随着均衡的进行，在 30min 时，各电池间的压差逐渐缩小，且电池电压趋向一致，向 3.3V 靠近，最大压差减小到 0.05V 以内。据此可知电路均衡效果明显，达到设计要求。

6.3 本章小结

本章对电池管理系统的几个主要功能进行试验验证，通过对电压的采集精度、SOC 估算精度、均衡效果等情况通进行试验，验证了电池管理系统可以实现单体电池电压测量、电池实时 SOC 高精度估算、电池电压被动均衡的功能。系统的基本功能完备且可用于大数量电池的主从式分配布置，具备较高的灵活性、可配置性及成组性能。

第七章 总结与展望

论文主要对纯电动汽车锂电池的 SOC 估算算法以及电池管理系统的软硬件部分进行了研究。

本文首先设计完成了针对目前微型纯电动物流车的快速发展情况,对其所用的电池管理系统以及 SOC 估算算法进行专项开发工作。在参照国内外相关系统开发的基础上,依据国家相关标准,设计并实现了一体化电池管理系统的设计。主要工作成果如下:

(1) 设计了一种基于扩展卡尔曼滤波算法防扩散 SOC 估算算法。通过在算法中加入 Sage-Husa 自适应噪声估值器,降低系统噪声和量测噪声对估算的影响;并在其基础上引入发散判据,当有状态变量估算误差变大而发散时,对卡尔曼增益矩阵构造一个自适应指数冻结因子,有效防止了滤波发散,提高了系统稳定性。

(2) 完成对车用锂离子电池建模及模型参数的辨识。使用递推最小二乘法,通过在不同的充放电倍率下得到电池模型中电阻及电容参数,并通过电池的放电曲线,拟合出电池 OCV-SOC 多项式公式。

(3) 设计一套一主多从的电池管理系统框架。结合微型厢式纯电动物流车电池使用量多的情况,对电池管理系统的功能及拓扑结构进行了深入分析,将电池管理系统设置为一个中央模块单元(CMU)以及多个采集模块单元(AMU)的总线型主从式拓扑结构,实现对每块电池的监控。

(4) 电池管理系统的硬件设计实现。主要设计实现了主板电源模块电路、控制模块电路、绝缘检测电路、电池电压采集电路、均衡电路、通信电路等。主板采用飞思卡尔 MC9S12XS128 型芯片实现对系统的控制,从板采用凌特公司的 LTC6802-2 芯片完成对电池单体电压、电流、及温度的采集和均衡功能,并通过增强型 SPI 通信将实现主从模块单元的通信与控制。

不足之处:

(1) 电池 SOC 估算算法许多地方不够完善,算法没有对电池在寒冷环境下其容量降低做出改变以及 OCV-SOC 曲线未针对不同环境温度下出现变化而做相应的实验充放电。

(2) 未对电动车在刹车的能量回馈做 SOC 变化的调整,上级 CAN 通信尚未搭建、故障记录处理不够完善等

(3) 软件系统的整个框架还处于初级阶段,稳定性及可靠性还不高。

对于上述情况，还需针对该型电池管理系统做深入的改进，以使其达到基本的使用要求与安全规范。

参考文献

- [1] 付于武,董扬,马春生等. 节能与新能源汽车技术路线图[M].北京:机械工业出版社, 2017.
- [2] Rahman.Md, Wang Xiaojian, Wen, Cuie. A review of high energy density lithium - air battery technology [J].Journal of Applied Electrochemistry, 2016, 44 (1): 5-22.
- [3] 王青松, 平平, 孙金华. 锂离子电池热危险性及安全对策[M].科学出版社, 2017年.
- [4] 华政, 梁风, 姚耀春. 电动汽车电池的发展现状与趋势[J].化工进展, 2017, 36(8): 2874-2881.
- [5] 严武渭, 柳永宁, 崇少坤等. 高能量密度锂离子电池用富锂正极材料[J].化学进展, 2017, 29(C2): 27-38.
- [6] 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关键技术[J].科技导报 2016, 34(6): 39-51.
- [7] Chunxue Wen, Zhenguo Huo, Zhengxi Li .Research on PV and battery control system with energy management technology in stand-alone DC micro grid[C]. 2015, International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, 陕西西安.
- [8] 刘午. 超微型电动车动力铅酸电池管理与充电一体化设计与开发[D].重庆: 重庆大学, 2015.
- [9] 催伯雄, 隋欣, 赵景焕等. 电池管理系统重点专利技术分布:适用于纯电动汽车[J].电子知识产权, 2010, 6: 62-66.
- [10] 符兴锋, 周斯加, 翟艳霞. 电池管理系统 CAN 信号不同步对于插电式混合动力电动汽车控制策略与安全性的影响分析[J].机械工程学报, 2014, 50(8): 102-109.
- [11] 邓凯峰. 增程式电动汽车电池电量估算策略及管理系统设计[D].湖南, 湖南大学, 2015.
- [12] 李 哲, 卢兰光, 欧阳明高. 提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较[J].清华大学学报, 2010, 50(8): 1293-1296.
- [13] 谢广. 基于无迹卡尔曼滤波的磷酸铁锂电池的估算研究[D].安徽: 合肥工业大学, 2015.
- [14] 何灵娜. 基于卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计算法设计[D].浙江: 浙江工业大学, 2014.

- [15] 李 哲, 韩雪冰, 卢兰光等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 115-120.
- [16] 麻友良, 严运兵. 电动汽车概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 106-107
- [17] Zhaohui Gao, Dejun Mu, Shesheng Gao, Yongmin Zhong, Chengfan Gu. Adaptive unscented kalman filter based on maximum posterior and random weighting[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 12-24.
- [18] Fan Si, Yan Zhao, Yanghao Lin. Adaptively tuning sampling weights of the unscented Kalman filter in starlight refraction navigation[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics , 2017, 148: 300-311.
- [19] 张红梅, 韩万刚. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法研究及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 08(36): 1822-1830.
- [20] 魏克新, 陈峭岩. 基于自适应无迹卡尔曼滤波算法的锂离子动力电池状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 445-451 .
- [21] 刘伟龙, 王丽芳, 廖承林等. 基于模型融合与自适应无迹卡尔曼滤波算法的锂离子动力电池 SOC 估计[J]. 汽车工程, 2017, 09(39): 997-1003.
- [22] 陈立文. 电动汽车锂离子电池管理系统研究与设计[D]. 四川: 电子科技大学, 2013.
- [23] Heegon Kim, Chunchun Sui, Kevin Cai, Bidyut Sen, Jun Fan. An efficient high-speed channel modeling method based on optimized design-of-experiment (DoE) for artificial neural network training[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility , 2018: 1-7.
- [24] K. S. Kasiviswanathan, K. P. Sudheer. Methods used for quantifying the prediction uncertainty of artificial neural network based hydrologic models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment , 2017, 31 (7): 1659-1670.
- [25] 施天珍. 基于高阶 PNGV 模型的动力电池 SOC 估计[D]. 江苏: 南京理工大学, 2014.
- [26] 王杰. 基于扩展卡尔曼滤波的动力锂电池 SOC 估算算法研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2015.
- [27] 何军. 动力锂电池组管理系统 SOC 估算研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [28] 刘树林, 崔纳新, 李岩. 基于分数阶理论的车用锂离子电池建模及荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 189-195.
- [29] Daiming Yang, Guoguang Qi, Xiangjun Li. State-of-charge estimation of LiFePO₄/C battery based on extended kalman filter[J].

- [30] 陈息坤, 孙冬, 陈小虎. 锂离子电池建模及其荷电状态鲁棒估计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 141-147.
- [31] CHEN Xikun, SUN Dong. Research on Lithium-ion battery modeling and model parameter identification methods[J]. 中国机电工程学报, 2016, 36 (22) .
- [32] 张立强. 锂离子电池多物理模型参数辨识及健康特征提取[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [33] 孙婷. 锂离子电池模型仿真及参数辨识的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [34] 邓佳. 基于 DSP 的磷酸铁锂电池 SOC 预测方法的实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [35] 郭军. 延长电池循环寿命的电池管理系统研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [36] 李思. 电动汽车锂离子电池等效电路模型的参数辨识研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [37] 刘艳莉, 戴胜, 程泽等. 基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 221-228.
- [38] 曹夏令, 费亚龙, 孙绍博等. 基于自适应无迹卡尔曼滤波器的锂电池 SOC 估计[J]. 电力电子技术, 2017, 51(7): 69-72.
- [39] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [40] 孙利, 刘帅帅, 刘征宇等. 锂离子电池自适应参数辨识与 SoC 估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 45-51.
- [41] 杨阳, 汤桃峰, 秦大同等. 电动汽车锂电池 PNGV 等效电路模型与 SOC 估算方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 24(4): 938-942.
- [42] 潘海鸿, 吕治强, 李君子等. 基于灰色扩展卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 1-8.
- [43] 刘新天, 孙张驰, 何耀等. 基于环境变量建模的锂电池 SOC 估计方法[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2017, 47(2): 306-312.
- [44] 杨 阳, 汤桃峰, 秦大同等. 电动汽车锂电池 PNGV 等效电路模型与 SOC 估算方法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(4): 938-942.
- [45] 王琪, 孙玉坤, 倪福银等. 一种混合动力电动汽车电池荷电状态预测的新方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 189-196.
- [46] 杨海学, 张继业, 张晗. 基于改进的 Sage-Husa 的自适应无迹卡尔曼滤波的锂离子

- 电池 SOC 估计[J].电工电能新技术, 2016, 35(1): 30-35.
- [47] 赵琳, 王小旭, 孙明等. 基于极大后验估计和指数加权的自适应 UKF 滤波算法[J].自动化学报, 2010, 36(7): 40-42.
- [48] 周勇, 张玉峰, 张超等. 基于 Sage-Husa 的线性自适应平方根卡尔曼滤波算法[J].西北工业大学学报, 2013, 31(1): 89-93.
- [49] 宗长富, 胡丹, 杨肖, 潘钊, 徐颖. 基于扩展 Kalman 滤波的汽车行驶状态估计[J].吉林大学学报, 2009, 39(1): 10-12.
- [50] 鲁平, 赵龙, 陈哲. 改进的 Sage-Husa 自适应滤波及其应用[J].系统仿真学报, 2007, 19(15): 3503-3505.
- [51] 王杰. 基于扩展卡尔曼滤波的动力锂电池 SOC 估算研究[D].浙江: 浙江工业大学, 2014.
- [52] Pawel Malysz, Ran Gu, Jin Ye, Hong Yang, Ali Emadi.State-of-Charge and State-of-Health estimation with state c and current sensor bias correction for electrified powertrain vehicle batteries[J].the Institution of Engineering,2016, 6 (2): 136-144.
- [53] 顾晓莉. 基于铅酸电池的整车电源管理系统的设计[D].上海: 上海交通大学, 2011.
- [54] Congzhi Liu, Weiqun Liu, Lingyan Wang, Guangdi Hu, Luping Ma, Bingyu Ren. A new method of modeling and state of charge estimation of the battery [J]. Journal of Power Sources, 2016, 320: 1-12.
- [55] Xiaoqiang Zhang, Xiaocheng Wang, Weiping Zhang, Geyang Lei.a simplified li-ion battery SOC estimation methord[J].Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2016, 17 (1): 13-17.
- [56] 李刚, 赵德阳, 解瑞春等. 基于改进的 Sage-Husa 自适应扩展卡尔曼滤波的车辆状态估计[J].汽车工程, 2015, 37(12): 1426-1432.
- [57] 徐田来, 崔平远, 崔祜涛. 组合导航自适应交互多模型算法研究[J].系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2070-2074.
- [58] 詹森. 基于工况与驾驶风格识别的混合动力汽车能量管理策略研究[D].重庆: 重庆大学, 2016.
- [59] 张津涛. 电动汽车城市道路行驶工况自学习方法的研究[D].天津: 天津大学, 2008.
- [60] 王国林. 电动汽车模态行驶工况构建方法研究[D].江苏: 江苏大学, 2015.
- [61] 何耀, 张陈斌, 刘兴涛等. 基于信息融合的 LiFePO₄ 动力电池组 SOC 估计[J].控制

与决策, 2014, 29(1): 188-192.

[62] Davide Andrea. Battery management systems for large lithium-ion battery packs[M]. 机械工业出版社, 2016.

[63] 凌厉而特. LTC6802-2 数据手册.

[64] Jialin Liang, Yunhua Gan, Yong Li. Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 155: 1-9.

[65] 姜海斌. 纯电动车整车控制策略及控制器的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

[66] 雷治国, 张承宁, 李军求. 电动车辆用锂离子电池热特性研究[J]. 电源学报, 2014, 4: 83-87.

[67] 王坤. 动力锂电池 SOC 估算及电池组管理系统的设计[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2014.

[68] 张勇. 车用锂离子电池管理系统研究与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[69] 王宏伟, 邓爽, 肖海清等. 不同环境温度下锂离子动力电池过充过放研究[J]. 电源技术, 2014, 38(3): 431-433.

[70] 谭道良, 姚纓英. 基于 Multisim 13 的心电信号滤波器设计[J]. 电子技术设计与应用, 2017: 65-68.

[71] 陈因, 韩丽俊. 基于 Multisim 的电力电子线路仿真与设计[J]. 电力学报, 2010, 25(4): 318-319.

[72] 程秀英, 侯卫周. 基于 Multisim 的高频电子线路同步检波器的设计与仿真分析[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(7): 116-119.

致谢

在读硕士研究生的三年中，学到了许多体会到了许多，个人知识技能的增长，逻辑思维能力的提高，都为日后的工作学习提供一层保护盾。在这里要感谢的人非常多，首先，感谢我的导师孙桓五教授。孙老师学识渊博，治学严谨，是他指引我进入当前的研究领域，遇到问题和不懂的领域，孙老师都会给予帮助。在此，对孙老师表示衷心的感谢！

感谢王铁教授，牛志刚教授，张翠平教授在平时学习中在各方面给予的指导与帮助，感谢车辆系各位老师的无私付出。论文的完成还得到了张东光讲师，王晓佳讲师及其他学生朋友的支持与帮助，在此，向他们表示衷心感谢！

最后，感谢我的父母，姐姐的帮助与支持，是你们的精神鼓励与物质支持让我顺利的完成学业！

攻读硕士学位期间发表的学术成果

慕振博, 孙桓五. 基于指数冻结因子的锂电池 SOC 估算算法. 机械设计与制造 (已录用)

孙桓五, 慕振博, 段海栋. 一种防滤波发散的锂电池 SOC 估算方法. 专利 (在审)