



长沙理工大学

CHANGSHA UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

毕业设计（论文）

题目：电动方程式赛车 BMS 系统设计

学生姓名：邓安福

学 号：202003130417

班 级：车辆 2002 班

专 业：车辆工程

指导教师：伍文广

2024 年 6 月

电动方程式赛车 BMS 系统设计

学生姓名: 邓安福

学 号: 202003130417

班 级: 车辆 2002 班

所在学院: 汽车与机械工程学院

指导教师: 伍文广

完成日期: 2024 年 6 月 1 日

诚 信 声 明

本人声明：

- 1、本人所呈交的毕业设计（论文）是在老师指导下进行的研究（设计）工作及取得的研究（设计）成果；
- 2、据查证，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，毕业设计（论文）中不包含其他人已经公开发表过的研究成果，也不包含为获得其他教育机构的学位而使用过材料；
- 3、我承诺，本人提交的毕业设计（论文）中的所有内容均真实、可信。

作者签名： 日期： 年 月 日

电动方程式赛车 BMS 系统设计

摘要

本文主要根据大学生电动方程式赛车电池管理系统(BMS)的设计进行展开叙述：

首先，以 FNX-23E 赛车使用的聚合物锂电池为研究对象，对电池进行混合脉冲功率性能测试获得电池外特性数据，建立了不同阶数的电池模型。利用 Simulink 内置的 Parameter Estimation Toolbox 辨识出模型中的参数。完成电池模型建立后，对模型进行仿真验证，仿真结果与实验测试数据的误差较小，证明了电池模型及其辨识参数的准确性。选择扩展卡尔曼滤波算法实现 SOC 估计，为了验证算法的有效性，在 Matlab/Simulink 上对该算法进行实现。

设计了适用于大学生电动方程式赛车的电池管理系统硬件和控制策略。硬件架构采用菊花链式主从分布式设计，由一个主控模块和五个从控模块构成。主控模块负责核心控制功能，包括 SOC 估计、继电器控制和通信等功能。从控模块负责监测与控制功能，包括电压采集、温度采集和均衡控制等。控制策略部分，完成了控制逻辑和 SOC 估计算法的设计，并将其与 Simulink/Simscape 中搭建的被控对象模型进行了集成。通过模型在环仿真验证，结果表明所设计的 BMS 能够满足设计目标。

关键词：聚合物锂电池；电池模型；电池管理系统；SOC 估计

BMS SYSTEM DESIGN FOR ELECTRIC FORMULA CAR

ABSTRACT

This paper focuses on the design of a battery management system (BMS) for formula student electric car:

First, the research object is the Li-Po battery used in the FNX-23E racing car, and the hybrid pulse power characteristic test is conducted to obtain the external characteristics data of the battery, and the battery model with different orders is established. The parameters in the model is identified using the Parameter Estimation Toolbox in Simulink. After completing the establishment of the battery model, the model is simulated and verified, and the error between the simulation results and the experimental test data is small, which proves the accuracy of the battery model and its identified parameters. The extended Kalman filter algorithm is selected to realize the SOC estimation, and in order to verify the effectiveness of the algorithm, the algorithm is implemented on Matlab/Simulink.

The hardware and control strategy of the battery management system applicable to college student electric formula racing cars are designed. The hardware architecture adopts a daisy-chained master-slave distributed design, which consists of one master control module and five slave control modules. The master control module is responsible for the core control functions, including SOC estimation, relay control and communication. The slave control module is responsible for monitoring and control functions, including voltage acquisition, temperature acquisition and equalization control. In the control strategy part, the design of control logic and SOC estimation algorithm is completed and integrated with the controlled object model built in Simulink/Simscape. Verified by model-in-the-loop simulation. The results show that the designed battery management system can achieve the design goals.

Key words: Li-Po battery; battery model; battery management system; SOC estimation

目录

1 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 电池管理系统国外研究现状	2
1.3 电池管理系统国内研究现状	3
1.4 本文主要研究内容	4
2 电池模型建立及 SOC 估计	6
2.1 动力电池测试	6
2.1.1 动力电池参数	6
2.1.2 动力电池测试	7
2.2 动力电池建模	8
2.2.1 电池模型	8
2.2.2 一阶 RC 模型	9
2.2.3 二阶 RC 模型	10
2.3 模型参数辨识	12
2.3.1 参数辨识方法	12
2.3.2 参数辨识结果	14
2.4 模型参数验证与分析	16
2.5 基于扩展卡尔曼方法的 SOC 估计	19
2.5.1 卡尔曼滤波算法	20
2.5.2 扩展卡尔曼滤波算法	21
2.5.3 扩展卡尔曼滤波算法估计 SOC 及算法实现	23

2.6 本章小结	26
3 电池管理系统硬件设计	28
3.1 电池管理系统主控模块设计	28
3.1.1 主控芯片选型	29
3.1.2 CAN 通讯电路	29
3.1.3 isoSPI 通讯电路	29
3.1.4 继电器控制电路	30
3.2 电池管理系统从控模块设计	31
3.2.1 模拟前端芯片选型	31
3.2.2 供电模块	31
3.2.3 隔离通讯模块	32
3.2.4 单体电压采集模块	33
3.2.5 温度采集模块	34
3.2.6 均衡模块	34
3.3 本章小结	35
4 电池管理系统策略设计	37
4.1 任务状态管理	37
4.1.1 待机状态	38
4.1.2 驾驶放电状态	38
4.1.3 充电状态	39
4.1.4 故障状态	40
4.2 故障诊断	41
4.3 被动均衡	42
4.4 模型在环验证	43
4.4.1 BMS 被控对象模型	43

4.4.2 策略验证	47
4.5 本章小结	52
5 总结与展望	53
5.1 总结	53
5.2 展望	53
参考文献	54
致 谢	56

1 绪论

1.1 课题研究背景与意义

随着经济建设的加速推进，中国汽车产业迎来了迅猛的发展浪潮。汽车保有量不断攀升，呈现出持续增长的趋势。随着汽车产业的迅猛发展，能源安全和环境污染等问题日益凸显，为中国汽车产业的未来发展带来了新的挑战和思考。因此，发展新能源汽车已成为汽车产业发展的必然趋势。根据《中国制造 2025》做出的规划，自主品牌纯电动和插电式混合动力汽车的年销量到 2020 年需突破 100 万辆，到 2025 年则需突破 300 万辆^[1]。因此中国新能源汽车上下游产业发展需要大量研发人才，正是在这样的背景下，中国大学生电动方程式大赛（FSEC）于 2015 年应运而生，不断为各新能源车企、新能源汽车核心零部件供应商企业输送人才。长沙理工大学方程式赛车队顺应中国未来汽车产业电动化与智能化的发展趋势，于 2019 年开始由燃油项目转型电动项目加入中国大学生电动方程式大赛的行列中。

电池技术、电动汽车电子控制系统技术和电机技术为新能源汽车中的三大关键技术。电池管理系统作为新能源汽车的核心部件，对电池进行监测与故障诊断，在电池安全与能量利用效率方面起到关键作用。

参加 FSEC 的赛车电池组电压通常在 300V-600V，电池单体数目多，设计变化多。我校方程式赛车队 2023 年赛车电池组电芯排布为 1P105S，由五个 1P21S 的模组串联组成，额定电压为 399V，最高电压为 451.5V，最大电量为 7.59kwh。电芯选择放电倍率为 10C 的 16800mAh 容量的锂聚合物软包电芯。电池管理系统使用由科列技术股份有限公司提供的分布式电池管理系统产品，其由一个主控模块和两个从控模块组成，最多能监控 108 串电芯。由于供应商提供的乘用车电池管理系统产品硬件与软件固定，无法随电池组设计变化而变化和应用高级算法。电池组设计因电池管理系统的设计和选择只能折衷而大大降低电池组的各项性能要求。同时参加 FSEC 的赛车在比赛中电池工作工况恶劣，以耐久赛项为例，弯道多，急加速急减速工况频繁，放电剧烈。同时由于对于轻量化的需求，无法使用乘用车所采用的大容量方形电池，选择使用小容量的

软包电池，因此对于电芯高倍率放电以及准确的能量管理有较高需求。

基于以上现实需求，本课题以长沙理工大学方程式赛车队赛车为基础，设计全新的电池管理系统。应用扩展卡尔曼滤波算法准确估计电池 SOC 从而充分利用电池能量，对电池管理系统控制策略设计进行探索，对电池管理系统硬件进行设计的探索与完善，以上工作中，通过对电芯进行测试以及参数辨识，在 Simulink 中建立了所使用电芯的等效电路模型，为实现准确的 SOC 估计，使用扩展卡尔曼滤波算法作为估计算法，对于均衡策略，从控硬件设计了使用电阻进行能量耗散的被动均衡电路，因此均衡策略使用基于电压比较的被动均衡策略，在 Matlab/Simulink 中搭建了 SOC 估计策略以及基于电压比较的被动均衡策略，同时在 Matlab/Simulink 实现了采样数据采样等其他策略。通过 Simulink 与 Simscape 搭建电池模型与均衡电路与控制策略进行模型在环仿真（MIL）验证控制策略的可行性与有效性。

1.2 电池管理系统国外研究现状

电池管理系统是一种用于对动力电池进行管理和控制的产品或技术，其核心任务是保证动力电池系统安全且长期有效的运行，并对电池故障做出处理。具有电池状态数据采集、状态估计、故障处理、充电控制、能量控制管理以及信息管理等几个方面的功能。目前国外典型的电池管理系统产品为：美国通用在 EV1 上搭载的 BMS 系统，美国 Aerovirnment 公司的 SmartGuard 系统，Tesla 公司在其纯电动汽车上搭载的自研 BMS，德国的 BATTMAN、BADCHEQ 系统^[2]。

Martin Bat'a 和 Dávid Mikle 设计了一种适用于小型大学生电动方程式赛车的分布式电池管理系统^[3]，使用了德州仪器的 BQ76PL455A-Q1 系列芯片完成电压和温度的测量，通过菊花链进行从控间通讯。Ghabech 等人设计了一种适用于使用圆柱电池的大学生电动方程式赛车电池组的分布式电池管理系统^[4]，对 768 颗电芯进行监控管理。Shell 等人设计了一种基于蓝牙技术的无线电池管理系统^[5]，最大限度地减少当前 BMS 中由于导线端接处失效引起的系统故障与失效，减轻了系统由于大量使用线束所带来的重量。

电池管理系统按照拓扑结构可分为两大类，分别是集中式与分布式。当电池监控单元和电池控制单元配置在一块 PCB 板上时，称为集中式 BMS，当配置在不同 PCB 板上时，称为分布式 BMS。分布式 BMS 适用于大型系统，如储能系统和电动汽车，但对于小型系统，集中式 BMS 更合适^[6]。

电池管理系统按计算平台可分为嵌入式平台电池管理系统和云端电池管理系统，相对于嵌入式平台电池管理系统可以在实际环境中训练机器学习方法，并获得更好的预测结果。但是需要大量计算和内存的方法可以通过云计算技术完成^[7]。嵌入式平台电池管理系统成本较低且部署方便。

SOC 估计算法基本可以分为四类，基于表征参数的方法，安时积分法，基于模型的方法，基于数据驱动的方法^[8]。其中安时积分法使用计算资源少，是最常用的算法。随着硬件计算能力的提升，基于模型的 SOC 估计方法和基于数据驱动的 SOC 估计方法也开始被产品应用。Verbrugge 等人采用加权融合算法，将安时积分得到的 SOC 和通过一阶 RC 模型得到的 SOC 按照一定权重相加得到 SOC，该算法已在 GM 的混合动力系统中得到应用^[9]。Charkhgard 等人使用卡尔曼滤波将安时积分法和神经网络模型法结合起来进行 SOC 估计^[10]。为了克服卡尔曼滤波方法的缺点，Kim 使用一种滑模观测器对 SOC 进行估计，该方法对模型参数的不确定性和干扰具有很强的鲁棒性^[11]。

1.3 电池管理系统国内研究现状

尽管国内电池管理系统的研发起步较晚，然而得益于国内新能源汽车迅猛发展以及储能产业的快速发展的需求，电池研发制造技术与电池管理系统技术得到快速发展，国内设计制造的 BMS 在功能和性能上与国外一流公司的 BMS 差距正在逐渐缩小^[12]。

整车企业，高校，电池生产企业以及电池管理系统供应商是国内电池管理系统的最主要研究力量。

国内整车企业以比亚迪集团、上汽集团、蔚来汽车以及吉利汽车等企业为代表，其中蔚来在其旗下车型上搭载了一种自主研发的电池管理系统。高校中，清华大学完成了 HEV6580 混合动力汽车上搭载的镍氢电池管理系统的设计工作^[13]，北京航空航天大学完成了一种具有电流电压及温度的采集、电池 SOC 估计、运行状态判断和保护等功能的镍氢电池管理系统的设计^[14]，北京理工大学完成了 EQ7200HEV 混合动力汽车上搭载的镍氢动力电池组及其电池管理系统的研发设计工作^[15]。电池企业中以宁德时代、蜂巢能源以及国轩高科等为代表。电池管理系统供应商中以科列技术股份有限公司、杭州高特电子、联合电子、华为以及协能科技为代表。虽然国内大部分纯电动汽车中分布式电池管理系统中主从控制板之间采用的通信方式为有线菊花链式通信方式，但是联合电子以及蜂巢能源等企业已经对无线 BMS 开发做出了尝试并具有了开

发与量产能力^[16]。

SOC 估计技术方面，哈尔滨理工大学的于智龙提出了一种考虑电池老化的 SOC 估计算法，通过加入遗忘因子模型和总容量校正模型解决变化的电池容量对 SOC 估计结果产生影响的问题，提高了 SOC 估计精度^[17]。北京理工大学的熊瑞提出了一种基于数据模型融合的 SOC 估计算法，能够达到同时精确估计动力电池组各单体参数和状态以及各单体可用容量^[18]。

电池建模方面，哈尔滨工业大学的王大方提出了一种改进的等效电池模型，解决常规等效电路模型在电池低 SOC 区间模型精度不足的问题^[19]。北京理工大学的汤爱华提出了一种改进的降维电化学机理-电气耦合模型，降低了模型复杂度从而减小了计算量，同时保证了足够精度^[20]。

1.4 本文主要研究内容

本课题将基于我校 FSEC 电动赛车平台，对所使用电池包采用的电芯进行测试建立电池等效电路模型，完成控制策略设计，使用 Matlab/Simulink 平台完成策略的搭建。为验证策略的有效性，将策略与 Simulink/Simscape 中搭建的被控对象模型进行集成，并执行模型在环仿真测试。

第一章是绪论，介绍了本课题的研究背景，概述了国内外电池管理系统的现状以及详细阐述了本文主要研究内容。

第二章是电池模型建立及 SOC 估计，通过对所使用电池包采用的电芯进行测试，得到电芯的外特性数据。介绍一阶 RC 模型与二阶 RC 模型，建立数学模型，并在 Matlab/Simulink 中实现这两种模型，根据测试得到电芯的外特性数据进行参数辨识，并对所建立的模型进行测试对比，选择二阶 RC 模型作为本文使用的电池模型用于 SOC 估计。介绍了卡尔曼滤波算法和扩展卡尔曼滤波算法特点并进行对比，根据电池和 SOC 的非线性特点，选择扩展卡尔曼滤波算法作为 SOC 估计使用的算法，在 Matlab/Simulink 中实现策略。

第三章是电池管理系统硬件设计，设计了电池管理系统主控模块以及从控模块的硬件电路。本文系统硬件架构为菊花链主从式分布式架构，由 1 个主控和 5 个从控构成。每个从控可以对 21 个串联电芯构成的模组进行监测。电池管理系统主控选用 STM32F407VGT6 作为微控制器，使用 CAN 与整车通讯，使用 SPI 通过 isoSPI 隔离式通信芯片 LTC6820 转换为 isoSPI 与从控通讯，根据中国大学生电动方程式大赛规则使

用低边驱动开关控制继电器吸合。电池管理系统从控模块使用两片 LTC6804-1 模拟前端芯片监测电池的电压与温度，通过变压器隔离的通讯电路实现板间通讯以及同一电路板上模拟前端芯片间通讯，通过 MOSFET 与电阻构成的被动均衡电路耗散电压过高电芯的能量实现电压一致性。

第四章是电池管理系统策略设计，策略包括任务调度策略，SOC 估计策略和电池均衡策略。SOC 估计策略在第二章中进行了实现与仿真，电池均衡策略为基于电压比较的被动均衡策略，通过对所有电芯与电压最低电芯的电压做差得到电压差值与预设目标偏差电压进行比较决定是否开启均衡电路中的 MOSFET 进行均衡。上述控制策略均在 Matlab/Simulink 中实现，并将策略与 Simulink/Simscape 建立的被控对象进行模型在环仿真进行验证。

第五章是总结与展望，对全文的总结与本课题未来工作的展望。

2 电池模型建立及 SOC 估计

本章将研究聚合物锂电池在 HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) 工况电流激励下的电压响应，建立本文所使用聚合物锂电池的精确的电池模型，以设计精确的 SOC 估计算法。使用 HPPC 工况数据对模型参数进行辨识，通过仿真验证和对比分析确定本文 SOC 的估计算法使用的电池模型类型。在 Matlab/Simulink 中实现 SOC 的估计算法，验证算法效果。

2.1 动力电池测试

2.1.1 动力电池参数

本文基于长沙理工大学方程式赛车队的 FNX-23E 赛车电池包设计电池管理系统，选用深圳市格瑞普电池有限公司的 GRP9975175-10C-3.8V 16800mAh 锂聚合物软包电芯。电池管理系统所管理的电池包由该型号电芯串联组成。软包电芯如图 2.1 所示，电芯具体参数如表 2-1 所示。



图 2.1 软包电芯

表 2-1 电芯参数表

电芯参数	数值
电芯型号	格瑞普/GRP9975175-10C-3.8V 16800mAh
标称电压 (V)	3.8
开路电压 (V)	4.30~4.35
标称容量(mA·h)	16800
最大持续放电电流 (mA)	168000
瞬时放电电流 (mA)	252000
交流内阻 (mΩ)	$\leq 1.0\text{m}\Omega$

2.1.2 动力电池测试

为了对使用的锂聚合物电芯进行充分的评估以及后续的建模工作进行,本文对所使用的锂聚合物电芯进行 HPPC(Hybrid PulsePower Characteristic)测试。HPPC 测试是一种用于评估动力电池性能的测试, 其通过在不同 SOC 点采用充放电脉冲电流激励对动力电池进行充放电操作, 以此获得不同 SOC 值下的动力电池的欧姆电阻与极化阻抗等动态特性参数^[21]。电池进行测试之前首先需要进行电池激活。根据制造商提供的规格书, 电池激活实验为将充电设备连接电芯正负极后, 0.2C 充电至 4.35V, 静置 5 分钟, 然后用 0.2C 放电至 3.0V, 静置 5 分钟, 然后用 0.2C 充电至 3.9V。完成电池激活过程后进行 HPPC 测试, HPPC 测试流程设计参考《美国 FreedomCAR 电池实验手册》以及制造商提供的规格书, HPPC 测试流程如表 2-2 所示。

表 2-2 HPPC 测试流程

序号	工步	截止条件	序号	工步	截止条件
1	静置	5min	6	2.25C 恒流充 电	10s
2	1/3C 恒流放电	18min	7	静置	40s

续表 2-2

序号	工步	截止条件	序号	工步	截止条件
3	静置	10min	8	0.15C 恒流充 电	50s
4	3C 恒流放电	10s	9	静置	10min
5	静置	40s	10	重复 2-9 工步 9 次	

图 2.2 为 HPPC 测试数据曲线。

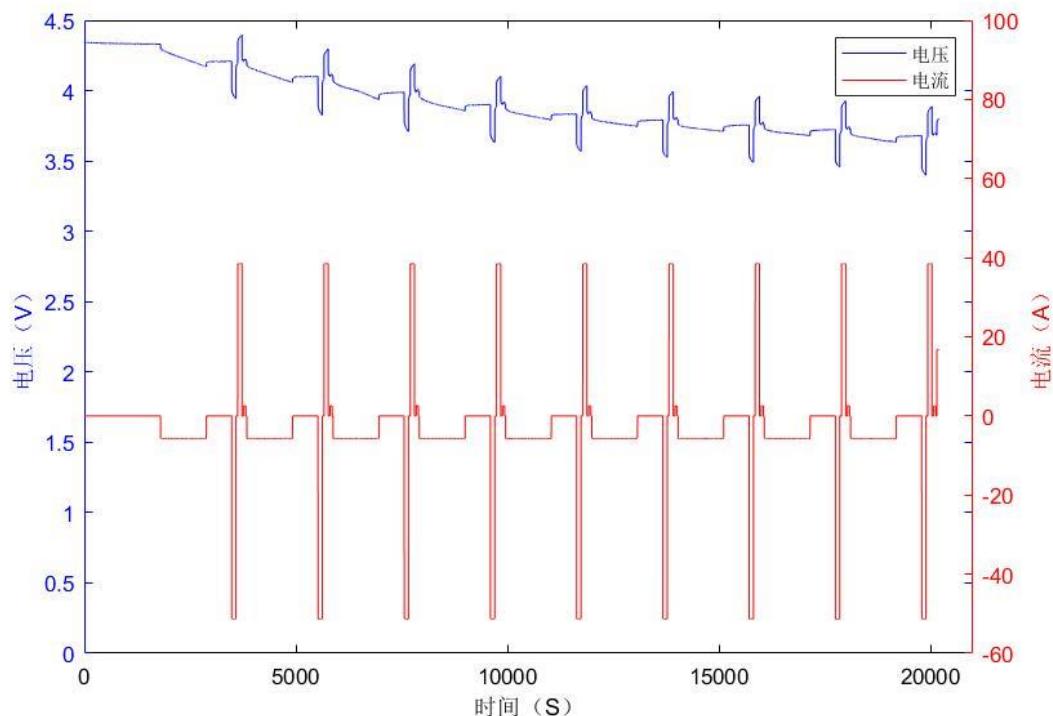


图 2.2 HPPC 测试数据曲线

2.2 动力电池建模

2.2.1 电池模型

等效电路模型复杂度低，计算量小，参数易辨识，精度高，由于本文设计的动力
第 8 页 共 56 页

电池管理系统部署在计算资源有限的应用平台上，等效电路模型在复杂度与精度的平衡上相较于其他类型的电池模型展现出了明显的优势。因此，本文仅讨论等效电路模型。等效电路模型使用电阻、电容和电压源构建电路网络，以表征动力电池的外部特性。使用 RC 网络表现动力电池的动力学特性，有效模拟了电池在充放电过程中的极化反应以及瞬态电压变化等动态特性。

2.2.2 一阶 RC 模型

一阶 RC 模型，也称 Thevenin 模型，是一种经典并被广泛使用的等效电路模型^[22]。由电压源，欧姆内阻和一组 RC 并联网络组成。一阶 RC 模型结构如图 2.3 所示。

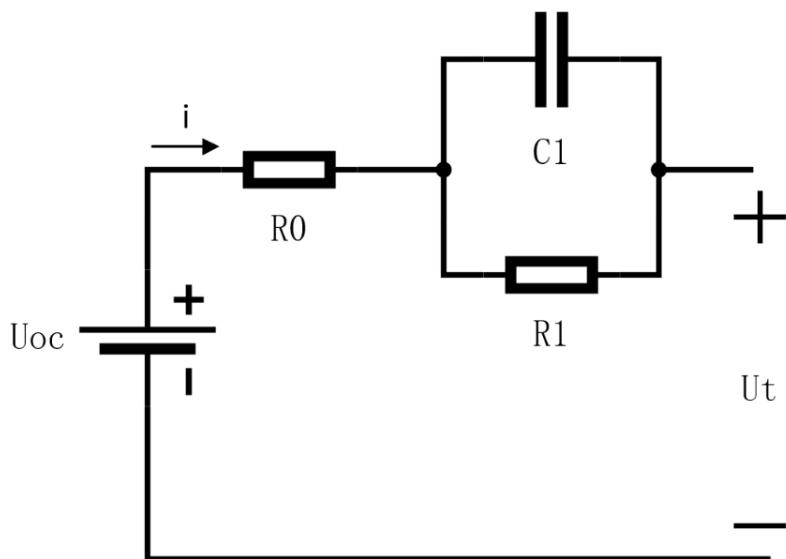


图 2.3 一阶 RC 模型

图 2.3 中：i 表示动力电池的电流（本文规定，放电时 i 取正值，充电时 i 取负值）， U_{oc} 表示动力电池的开路电压， U_t 表示动力电池的端电压， R_0 表示动力电池的欧姆电阻， R_1 表示动力电池的极化电阻， C_1 表示动力电池的极化电容。根据基尔霍夫定律可得：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\frac{U_1}{C_1 R_1} + \frac{i}{C_1} \\ U_t = U_{oc} - U_1 - i R_0 \end{cases} \quad (2-1)$$

电池荷电状态 SOC 直观反映了电池当前剩余电量状态，其表达式为：

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_N} \int \eta i dt \quad (2-2)$$

式中：

SOC_0 ——SOC 的初值；

Q_N ——电池的额定容量 (Ah)；

η ——库伦效率，本文不对库伦效率进行讨论，取值为 1。

将式 (2-1) 与 (2-2) 写成状态方程的形式为：

$$\begin{pmatrix} SOC \\ \dot{U}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1 R_1} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_0 \\ U_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\eta T}{Q_N} \\ \frac{1}{C_1} \end{pmatrix} * i \quad (2-3)$$

其中：

T ——采样时间 (s)。

观测方程为：

$$U_t = U_{oc} - U_1 - iR_0 \quad (2-4)$$

将方程(2-3)与 (2-4) 离散化，得到电池对象的离散状态空间方程为：

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{C_1, k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_k \\ U_{C_1, k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{Q_N} \\ R_1 \left(1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)\right) \end{pmatrix} * i_k \\ U_{t, k+1} = U_{oc}[SOC_k] - U_{C_1, k} - i_k R_0 \end{cases} \quad (2-5)$$

式中：

Δt ——采样周期 (s)。

2.2.3 二阶 RC 模型

二阶 RC 模型，也称 DP 模型。由电压源，欧姆内阻和两组 RC 并联网络组成，二阶 RC 模型在一阶 RC 模型的基础上增加了一组 RC 网络^[23]。二阶 RC 模型结构如图 2.4 所示。

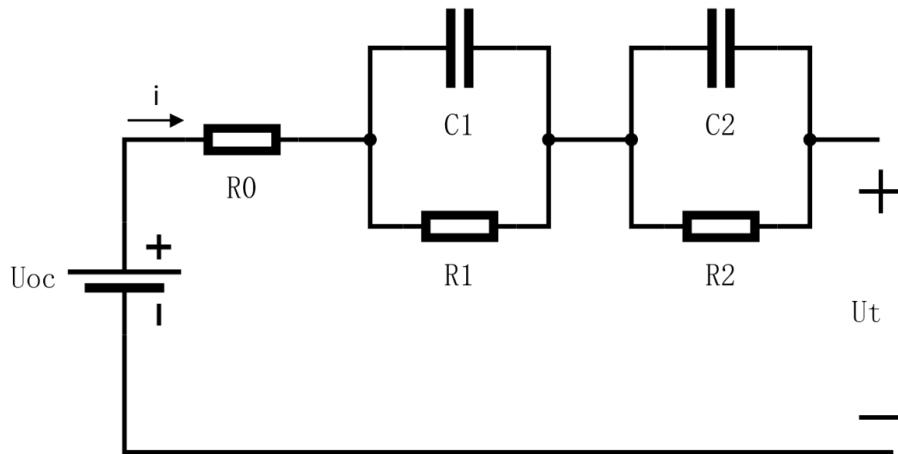


图 2.4 二阶 RC 模型

图 2.4 中: i 表示动力电池的电流, U_{oc} 表示动力电池的开路电压, U_t 表示动力电池的端电压, R_0 表示动力电池的欧姆电阻, R_1 与 R_2 表示动力电池的极化电阻, C_1 与 C_2 表示动力电池的极化电容。根据基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\frac{U_1}{C_1 R_1} + \frac{i}{C_1} \\ \dot{U}_2 = -\frac{U_2}{C_2 R_2} + \frac{i}{C_2} \\ U_t = U_{oc} - U_1 - U_2 - iR_0 \end{cases} \quad (2-6)$$

将式 (2-1) 与 (2-5) 写成状态方程的形式为:

$$\begin{pmatrix} SOC \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1 R_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_2 R_2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\eta T}{Q_N} \\ \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{pmatrix} * i \quad (2-7)$$

其中:

T ——采样时间 (s)。

观测方程为:

$$U_t = U_{oc} - U_1 - U_2 - iR_0 \quad (2-8)$$

将方程离散化, 得到电池对象的离散状态空间方程为:

$$\begin{cases}
 \begin{pmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{C_1, k+1} \\ U_{C_2, k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_k \\ U_{C_1, k} \\ U_{C_2, k} \end{pmatrix} + \\
 \begin{pmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{Q_N} \\ R_1 \left(1 - \exp\left(\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)\right) \\ R_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)\right) \end{pmatrix} * i_k \\
 U_{t, k+1} = U_{oc}[SOC_k] - U_{C_1, k} - U_{C_2, k} - i_k R_0
 \end{cases} \quad (2-9)$$

其中：

Δt ——采样周期 (s)。

2.3 模型参数辨识

2.3.1 参数辨识方法

经过上文的推导分析，一阶 RC 模型需要对欧姆电阻 R_0 ，极化电阻 R_1 ，极化电容 C_1 参数进行辨识，二阶 RC 模型需要对欧姆电阻 R_0 ，极化电阻 R_1 ，极化电容 C_1 ，极化电阻 R_2 ，极化电容 C_2 参数，以上模型参数通过参数辨识获取。常见的参数辨识方法分为在线辨识和离线辨识，在线辨识依赖电池运行时实时采集的电流、电压等数据，用以动态更新模型参数。离线辨识依赖离线实验测试数据更新模型参数。本文使用离线辨识方法，下面详细介绍该方法的具体实施步骤。

本文使用 Simulink 内置的 Parameter Estimation Toolbox 辨识电池等效电路模型的参数。为精确估计参数，优化方法选择工具箱内置的非线性最小二乘法，算法选择内置的信赖域-反射算法。参数辨识过程中将仿真数据与实验数据在相同输入条件下持续进行对比匹配。通过对比匹配，不断优化和迭代模型参数，直至仿真输出与实验数据达到一致。其基础主界面如图 2.5 所示。

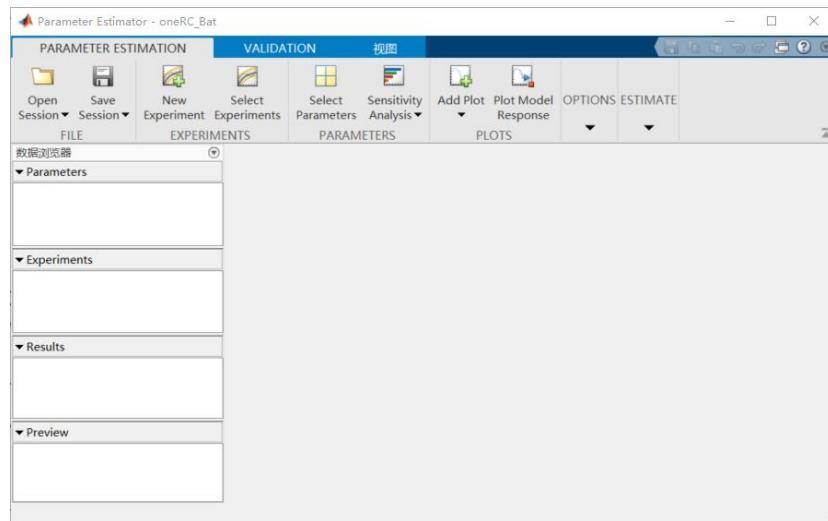
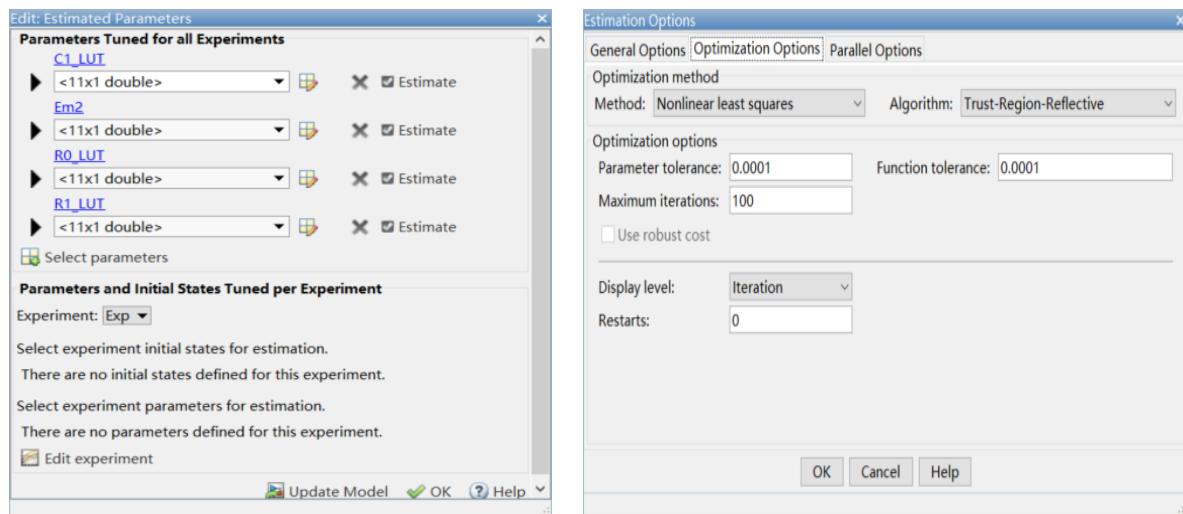


图 2.5 Parameter Estimation Toolbox 主界面

使用 Parameter Estimation Toolbox 辨识模型参数的具体步骤如表 2-3 所示。

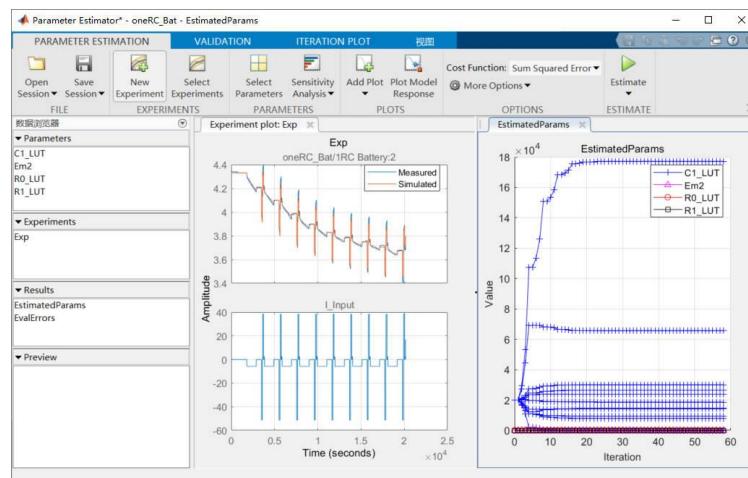
表 2-3 参数辨识具体步骤

步骤	操作
1	在 Simulink 中建立电池的等效电路模型。
2	在 Parameter Estimation Toolbox 中建立一个新实验，并导入辨识使用的测试数据，本文使用 HPPC 实验数据中的输入电流作为模型激励，测得的电池端电压作为模型输出端电压的辨识匹配对象，数据如图 2.2 所示。
3	选择需要辨识的参数。如图 2.6 (a) 所示。
4	设置优化选项，包括优化方法和最大迭代次数等。如图 2.6 (b) 所示。
6	运行实验，辨识数据与测试数据误差在设定误差内时结束辨识，输出模型参数。辨识过程如图 2.6 (c) 所示。
7	将辨识得到的模型参数更新到模型中，并对模型进行验证。



(a) 辨识参数选取

(b) 优化选项设置



(c) 辨识过程

图 2.6 参数辨识

2.3.2 参数辨识结果

一阶 RC 模型离线辨识得到的参数结果如图 2.7 所示。

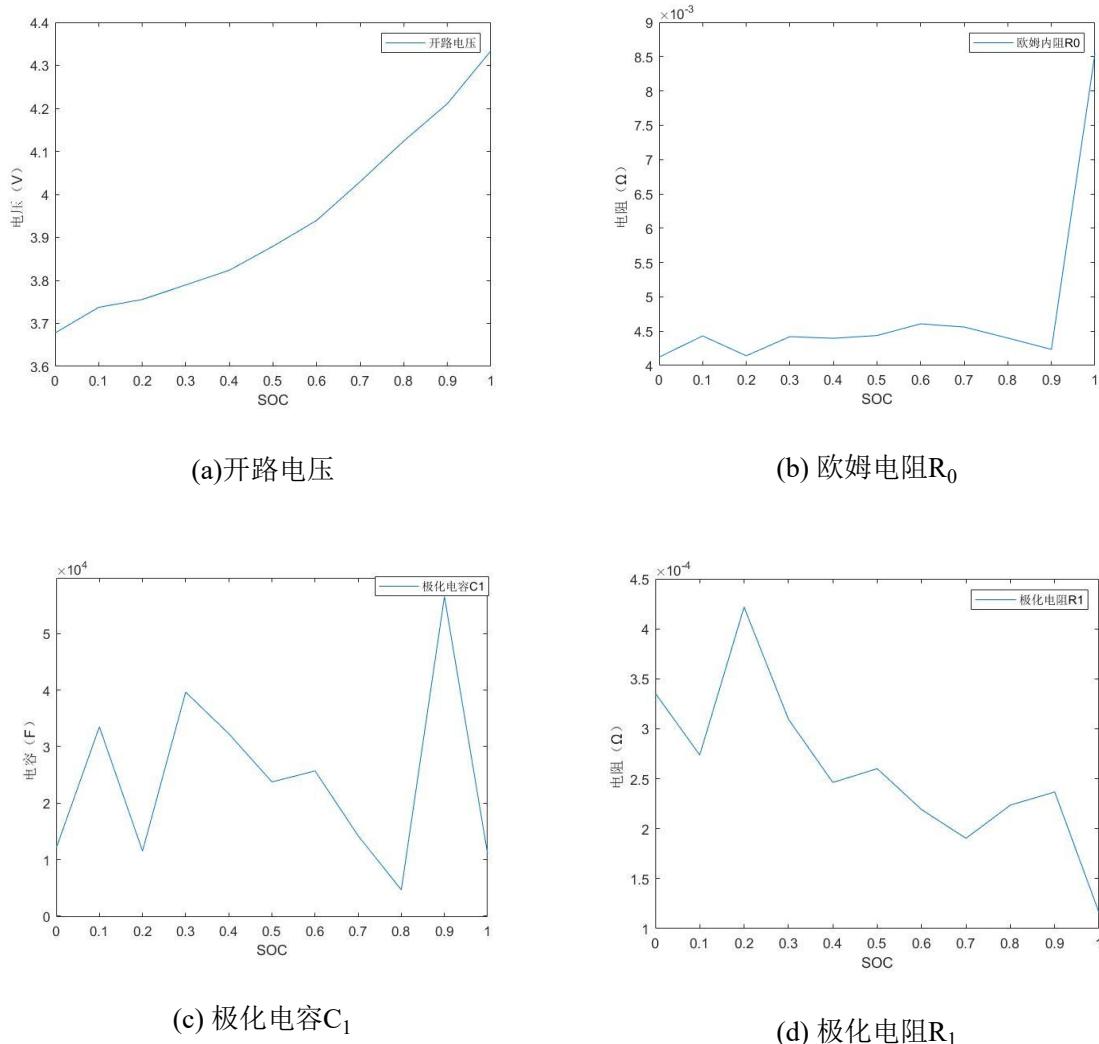
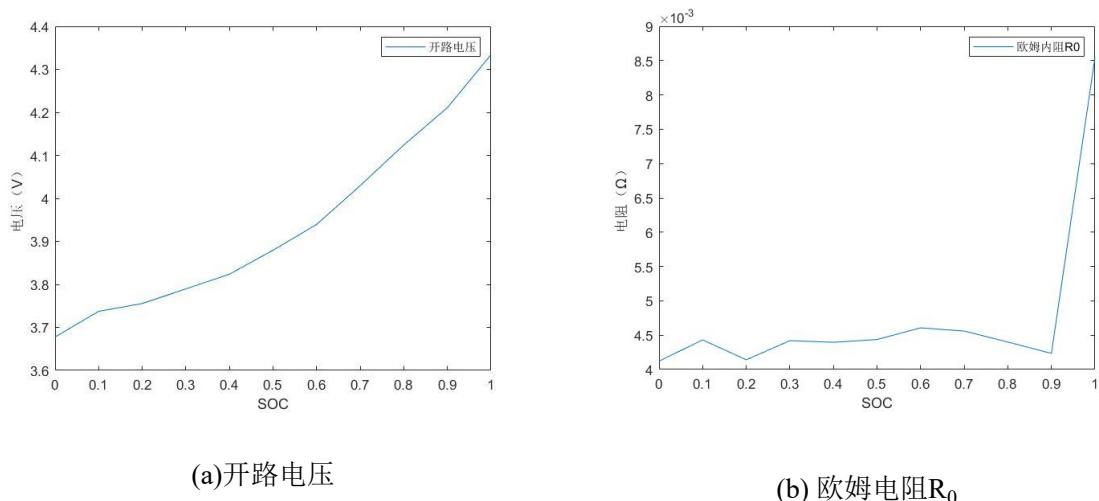


图 2.7 一阶 RC 模型参数辨识结果



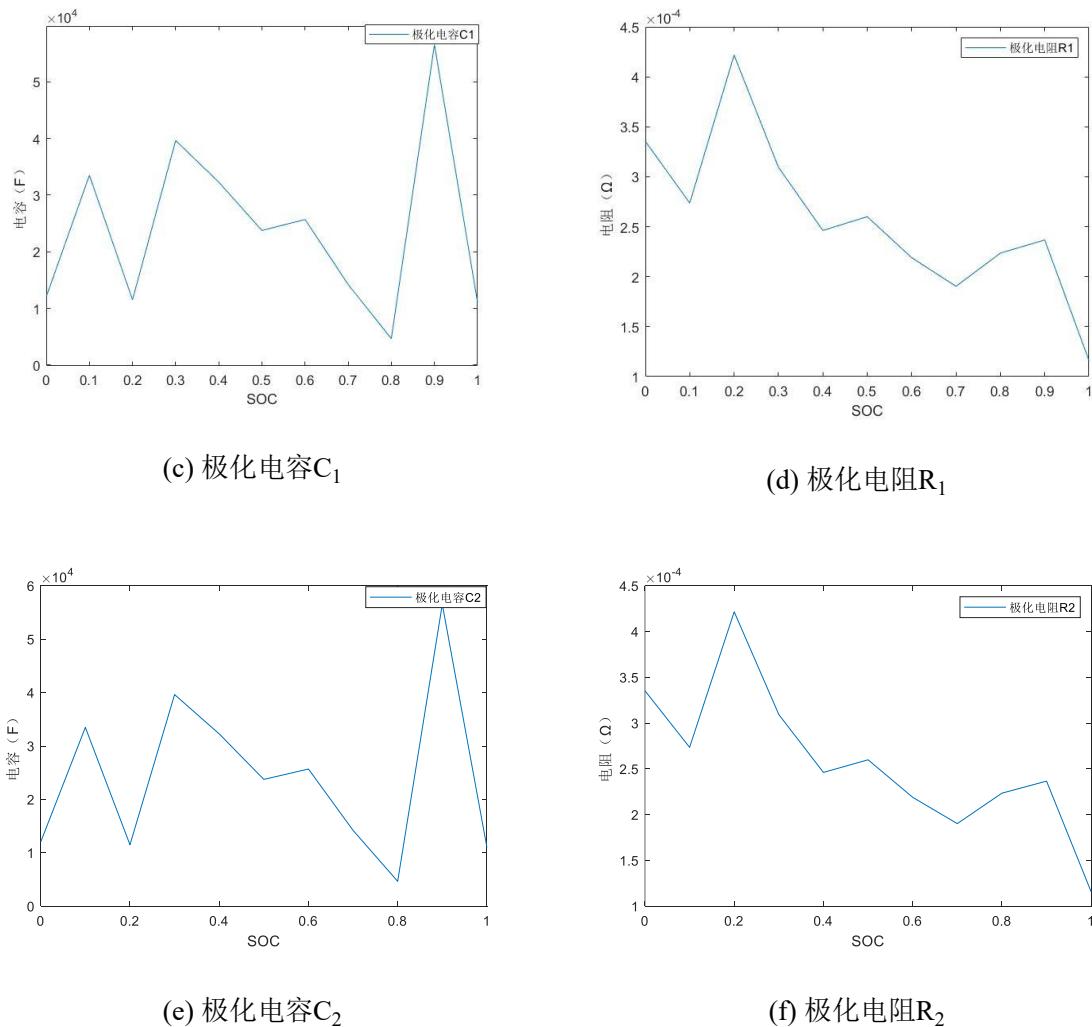


图 2.8 二阶 RC 模型参数辨识结果

2.4 模型参数验证与分析

将参数辨识获得的参数值输入到电池模型中，使用 HPPC 工况数据作为验证数据集进行仿真分析。通过仿真结果的平均误差、均方根误差和最大误差等指标，评估模型的精度。参数验证模型如图 2.9 所示。

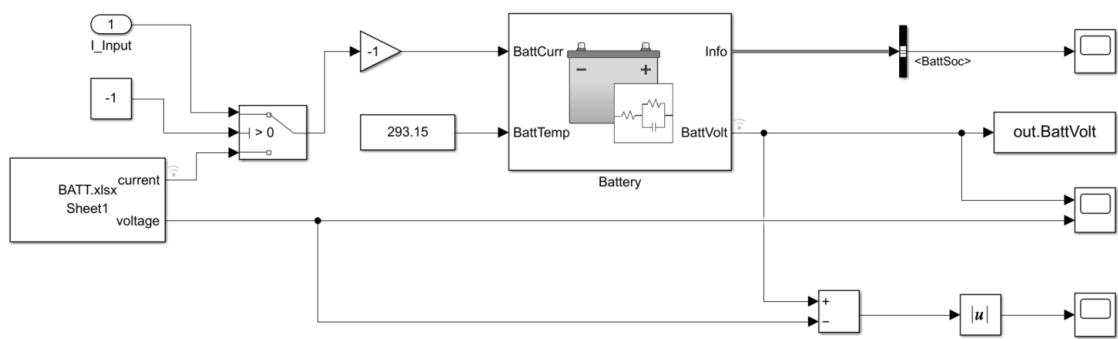


图 2.9 参数验证模型

一阶 RC 模型的电压仿真结果对比与误差数据分别如图 2.10 和图 2.11 所示。二阶 RC 模型的电压仿真结果对比与误差数据分别如图 2.12 和图 2.13 所示。电池等效电路模型的模拟电压与测试电压误差的统计表如表 2-4 所示。

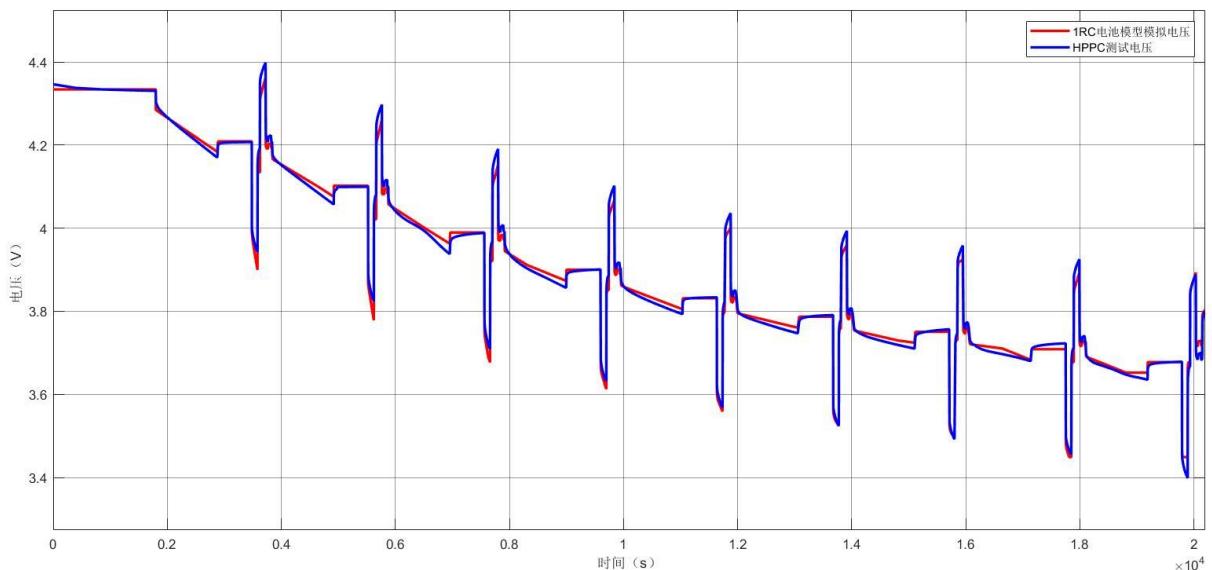


图 2.10 一阶 RC 模型的电压仿真对比结果

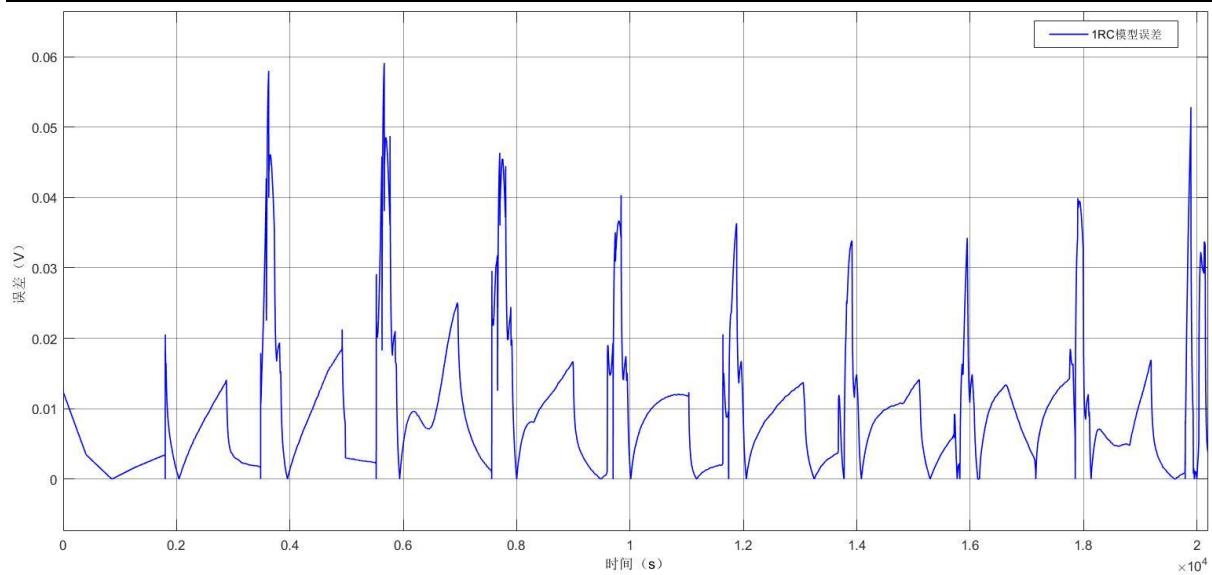


图 2.11 一阶 RC 模型的电压误差

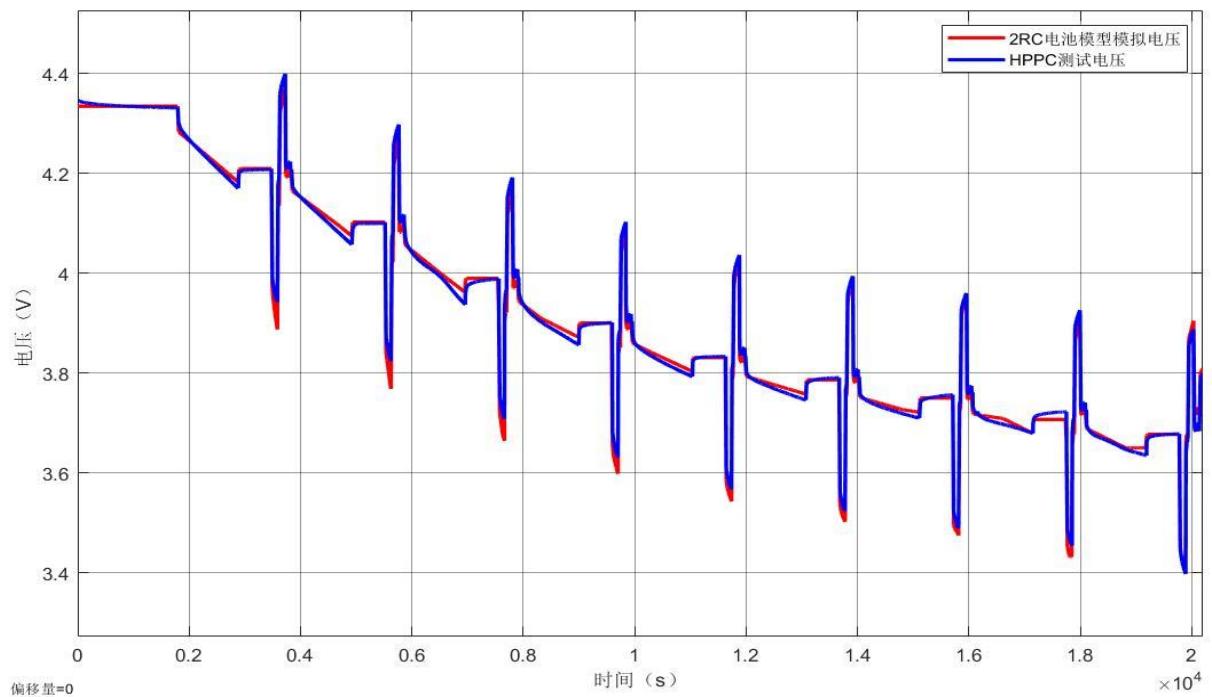


图 2.12 二阶 RC 模型的电压仿真对比结果

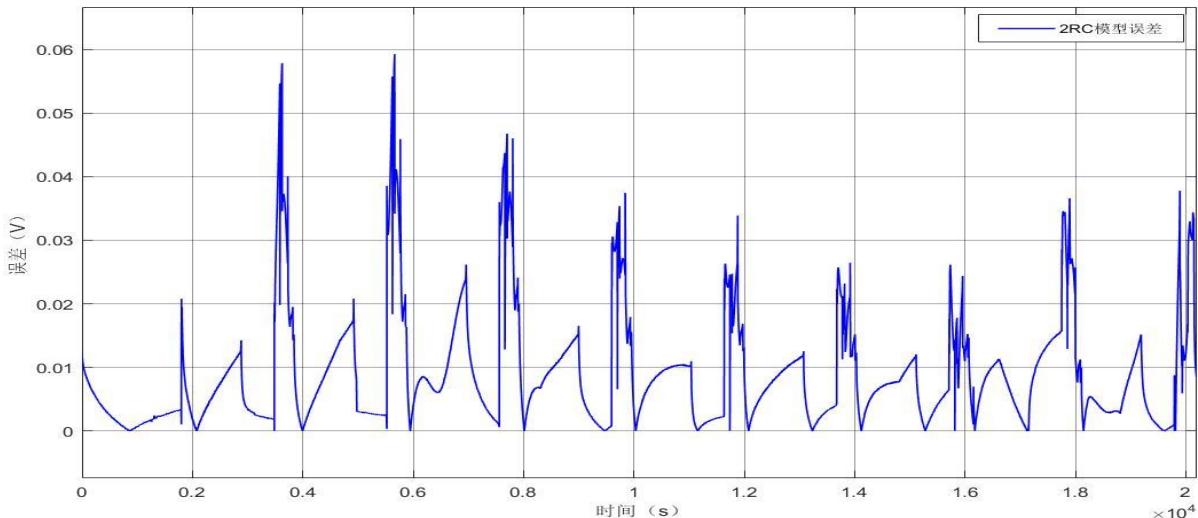


图 2.13 二阶 RC 模型的电压误差

表 2-4 电池等效电路模型的模拟电压与测试电压误差

模型	最大误差(mV)	最小误差(mV)	平均误差(mV)	均方根误差(mV)
一阶 RC 模型	59.09	0	11.68	16.1
二阶 RC 模型	59.25	2.277×10^{-6}	8.89	12.5

根据模拟电压与测试电压之间的拟合程度以及误差，本文最终选取偏差程度小且平均精度高的二阶 RC 模型作为使用的电池模型。

2.5 基于扩展卡尔曼方法的 SOC 估计

SOC 是评价电池剩余容量的一项重要指标，是对电池状态的直观反映，其大小影响驾驶员对当前车辆续航里程的判断。因此实现高精度，强鲁棒性的 SOC 估计算法非常重要。高精度的 SOC 估计对整车能量管理优化，解决驾驶员续航里程焦虑，防止过充电或过放电，提高动力电池能量利用率，确保动力电池的安全以及延长使用寿命等方面起重大作用。由于动力电池具有可测参数量少，自放电，容量与寿命衰减，非线性和时变性等特征，SOC 同样具有非线性和时变性的特点。实现高精度，强鲁棒性的 SOC 估计算法一直是行业攻关的难点以及学术界研究的热点问题。

本文根据动力电池的非线性特征选用了扩展卡尔曼方法作为 SOC 估计的算法。

2.5.1 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法的状态方程与测量方程如下：

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k, w_k \sim N(0, Q_k) \quad (2-10)$$

$$y_{k+1} = C_k y_k + D_k u_k + v_k, v_k \sim N(0, R_k) \quad (2-11)$$

其中：

x_k ——系统状态变量；

y_{k+1} ——系统观测变量；

u_k ——系统激励；

A_k ——状态 x 从 k 时刻到 $k+1$ 时刻的传递矩阵；

B_k ——输入矩阵；

C_k ——测量矩阵；

D_k ——前馈矩阵；

w_k ——状态方程噪声；

v_k ——测量方程噪声；

Q_k ——状态噪声 w_k 的协方差；

R_k ——测量噪声 v_k 的协方差。

式 (2-10) 为状态方程，式 (2-11) 为测量方程。其中 w_k 和 v_k 为独立的高斯白噪声。

卡尔曼滤波算法的基本过程如下：

- (1) 算法初始化：定义 \hat{x}_{k-1} (-代表先验，上标^代表估计) 为 $k-1$ 时对系统状态变量 x_{k-1} 的最优估计值。 $k-1$ 时：

$$\hat{x}_{k-1} = E[x_{k-1}] \quad (2-12)$$

$$P_k = E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \quad (2-13)$$

(2) 预测过程:

$$\hat{x}_{k-1} = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (2-14)$$

状态预测协方差方程为:

$$P_k^- = A_{k-1}P_k{A_{k-1}}^T + Q_k \quad (2-15)$$

(3) 校正过程:

反馈增益方程为:

$$K_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + R_k)^{-1} \quad (2-16)$$

滤波方程为:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - C_k \hat{x}_k^- - D_k u_k) \quad (2-17)$$

状态估计协方差矩阵更新方程为:

$$P_k = (I - K_k C_k) P_k^- \quad (2-18)$$

其中:

\hat{x}_{k-1} ——前一时刻的状态最优估计值;

\hat{x}_k^- ——前一时刻所得的预测结果;

\hat{x}_k ——当前时刻状态最优估计值;

I——单位矩阵。

2.5.2 扩展卡尔曼滤波算法

扩展卡尔曼滤波算法的状态方程与测量方程如下:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k, w_k \sim N(0, Q_k) \quad (2-19)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k, v_k \sim N(0, R_k) \quad (2-20)$$

其中:

$f(x_k, u_k)$ ——系统状态方程函数;

$g(x_k, u_k)$ ——系统观测变量方程函数;

在每一个时刻, 对 $f(x_k, u_k)$, $g(x_k, u_k)$ 使用一阶泰勒展开以线性化。则有:

$$f(x_k, u_k) \approx f(\hat{x}_k, u_k) + \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) \quad (2-21)$$

$$g(x_k, u_k) \approx g(\hat{x}_k, u_k) + \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) \quad (2-22)$$

定义 $A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k}$, $C_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k}$, 将式(2-21)带入(2-19), 将式(2-22)带入(2-20)可得线性化后的表达式为:

$$x_{k+1} \approx A_k x_k + [f(\hat{x}_k, u_k) - A_k \hat{x}_k] + w_k \quad (2-23)$$

$$y_k = C_k x_k + [g(\hat{x}_k, u_k) - C_k \hat{x}_k] + v_k \quad (2-24)$$

扩展卡尔曼滤波算法的基本过程如下:

(1) 算法初始化: 定义 \hat{x}_{k-1} (-代表先验, 上标 $\hat{\cdot}$ 代表估计)为 k-1 时对系统状态变量 x_{k-1} 的最优估计值。k-1 时:

$$\hat{x}_{k-1} = E[x_{k-1}] \quad (2-25)$$

$$P_k = E[(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1})^T] \quad (2-26)$$

(2) 系统状态预估为:

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) \quad (2-27)$$

(3) 状态估计误差协方差矩阵更新为:

$$P_k^- = \hat{A}_{k-1} P_k \hat{A}_{k-1}^T + Q_k \quad (2-28)$$

(4) 卡尔曼增益矩阵为:

$$K_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + R_k)^{-1} \quad (2-29)$$

(5) 根据卡尔曼增益 K_k 修正状态向量:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - g(\hat{x}_k^-, u_k)) \quad (2-30)$$

(6) 状态估计误差协方差矩阵的更新为:

$$P_k = (I - K_k \hat{C}_k) P_k^- \quad (2-31)$$

2.5.3 扩展卡尔曼滤波算法估计 SOC 及算法实现

2.5.3.1 根据电池模型确定 EKF 的状态空间方程

由于动力电池和 SOC 具有非线性特征, 本文选择扩展卡尔曼滤波算法作为 SOC 估计算法。根据测量的输入的电流和输出的端电压估计 SOC。根据式(2-9), 并考虑状态方程噪声 w_k 和测量方程噪声 v_k , 得到电池对象的离散状态空间方程:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{C_1, k+1} \\ U_{C_2, k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & exp\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right) & 0 \\ 0 & 0 & exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} SOC_k \\ U_{C_1, k} \\ U_{C_2, k} \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{Q_N} \\ R_1 \left(1 - exp\left(\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)\right) \\ R_2 \left(1 - exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)\right) \end{pmatrix} * i_k + w_k \\ U_{t, k+1} = U_{oc}[SOC_k] - U_{C_1, k} - U_{C_2, k} - i_k R_0 + v_k \end{cases} \quad (2-32)$$

根据 EKF 对状态空间方程 (2-32) 进行线性化处理, 得到以下式子:

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & exp\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right) & 0 \\ 0 & 0 & exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right) \end{pmatrix} \quad (2-33)$$

$$B_k = \begin{pmatrix} -\frac{\eta \Delta t}{Q_N} \\ R_1 \left(1 - exp\left(\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)\right) \\ R_2 \left(1 - exp\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)\right) \end{pmatrix} \quad (2-34)$$

$$C_k = \frac{\partial g(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} = \left[\frac{\partial U_{oc}[SOC]}{\partial SOC} \Big|_{SOC = \widehat{SOC}} , -1, -1 \right] \quad (2-35)$$

$$D_k = -R_0 \quad (2-36)$$

其中，OCV-SOC 的关系通过参数辨识得到的线性表表示。线性化处理后各式的参数值通过前文的参数辨识得到。

2.5.3.2 基于 EKF 的 SOC 估计算法的仿真验证

基于 EKF 的 SOC 估计算法的仿真模型如图 2.14 所示。

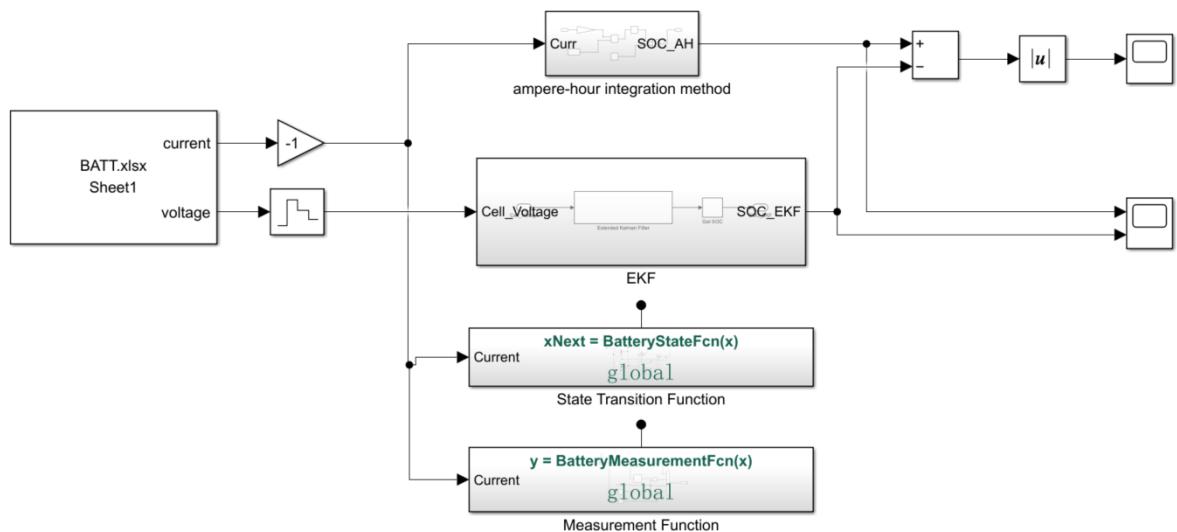


图 2.14 SOC 估计算法仿真模型

对 SOC 估计方法进行仿真验证，使用 HPPC 工况数据为验证数据集，使用安时积分法计算得到 SOC 的作为 SOC 真实值。

HPPC 工况中 SOC 初值真实值为 1。设定 EKF 估计算法中的 SOC 初值为 1 时，EKF 估计 SOC 仿真对比结果如图 2.15 所示，误差如图 2.16 所示。

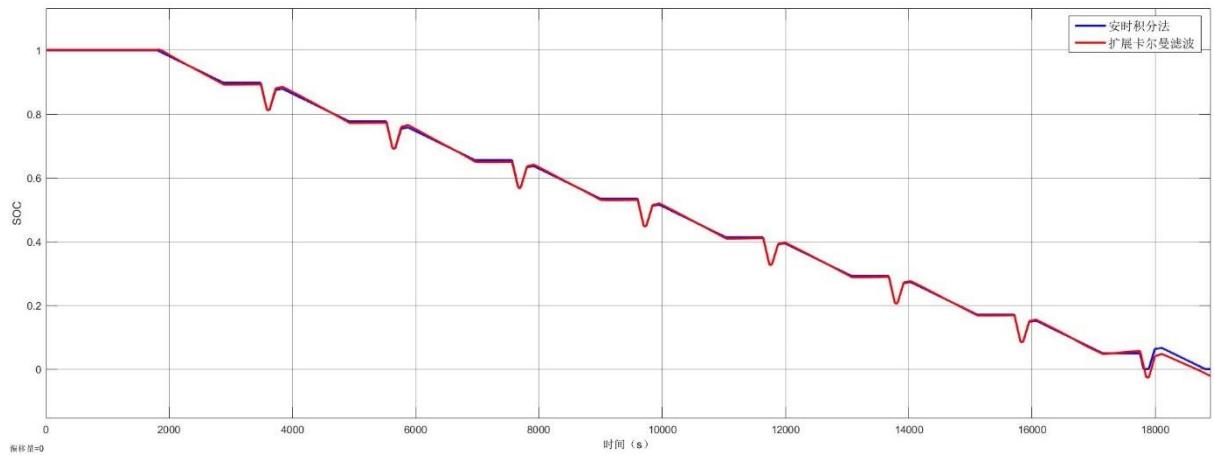


图 2.15 EKF 估计 SOC 仿真对比结果

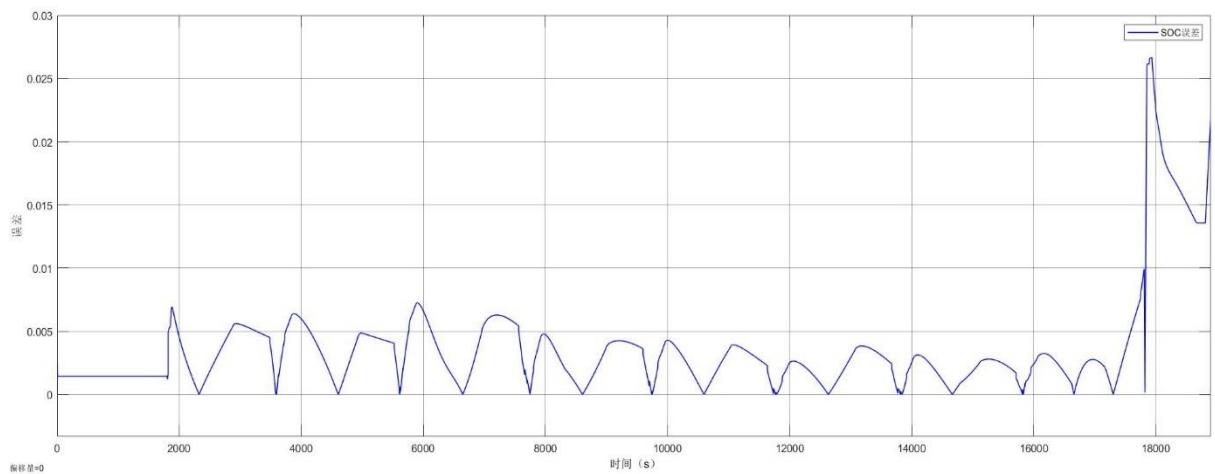


图 2.16 EKF 估计 SOC 仿真误差

EKF 初值设定为 1 时, EKF 估计 SOC 仿真最大误差为 2.668%, 平均误差 0.3619%, 估计精度高。为了验证 EKF 对不精确 SOC 初值的收敛性能, 设定 SOC 从不精确初值第一次收敛至 0.95 所用时间为收敛时间, 设定 SOC 为 1、0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 进行仿真, 不精确 SOC 初值下 EKF 估计 SOC 的仿真对比结果如图 2.17 所示, 误差如图 2.18 所示

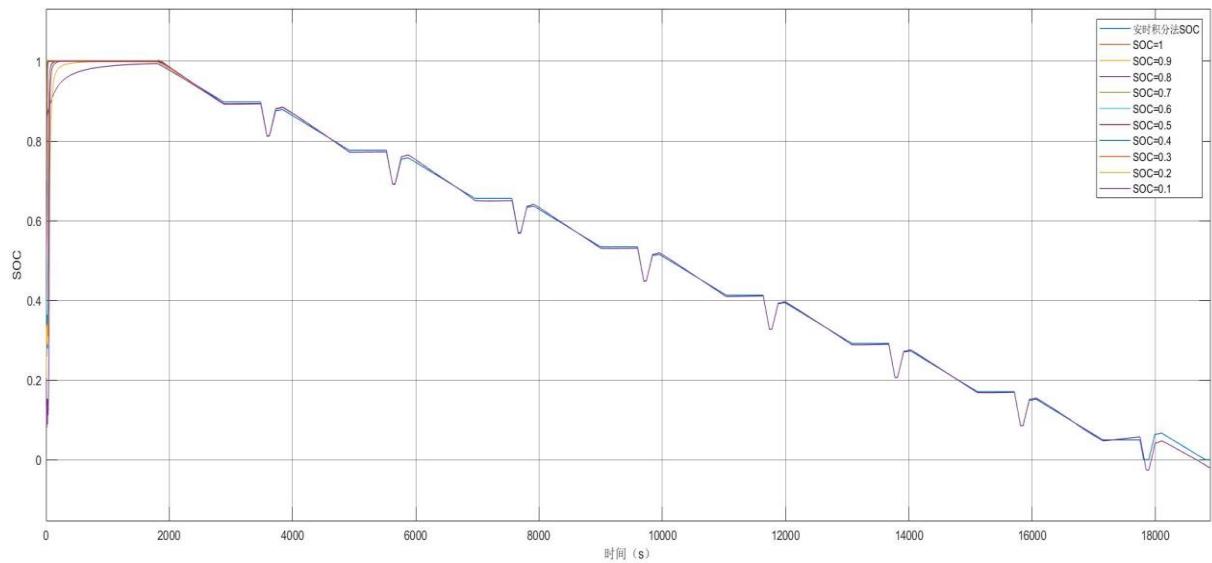


图 2.17 不精确 SOC 初值下 EKF 估计 SOC 仿真对比结果

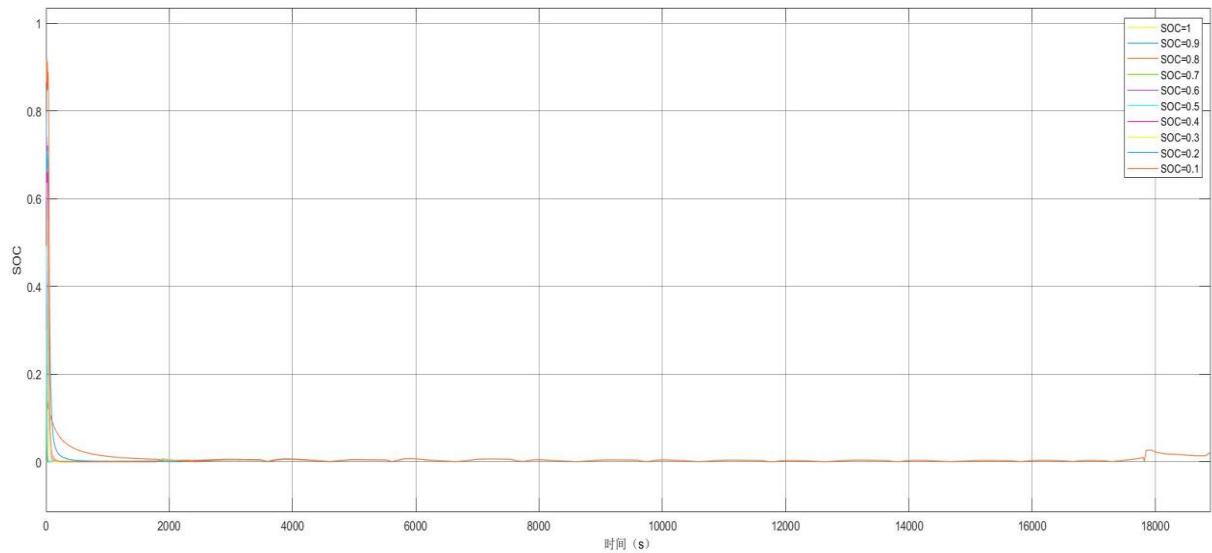


图 2.18 不精确 SOC 初值下 EKF 估计 SOC 仿真误差

初值不准确情况下，所用最长收敛时间为 $SOC=0.1$ 时的 253 秒，收敛较快。收敛后 SOC 估计误差在 5% 以下。从仿真结果可以得出，EKF 估计 SOC 对精确的 SOC 初值依赖程度低，对不精确的 SOC 初值具有修正能力，收敛到真实 SOC 值附近所用的时间较短。

2.6 本章小结

本章为电池模型建立及 SOC 估计，通过对所使用电池包采用的电芯进行测试，得

到电芯的外特性数据。介绍一阶 RC 模型与二阶 RC 模型，建立数学模型，并在 Matlab/Simulink 中实现这两种模型，根据测试得到电芯的外特性数据进行参数辨识，通过施加电流激励对所建立的模型进行测试对比，选择二阶 RC 模型作为本文使用的电池模型用于 SOC 估计。介绍了卡尔曼滤波算法和扩展卡尔曼滤波算法特点并进行对比，根据电池和 SOC 的非线性特点，选择扩展卡尔曼滤波算法作为 SOC 估计使用的算法，并进行公式推导，在 Matlab/Simulink 中实现策略。

3 电池管理系统硬件设计

本文设计的电池管理系统硬件架构为菊花链式主从式分布式架构，整体由1个主控和5个从控构成。主控负责对接收的外部输入信号进行处理和判断，控制继电器开闭从而实现对电池进行管理，通过通讯电路传输信息。从控负责对电池状态进行测量，并将测量信息上报主控，每个从控可以监测21个电芯。电池管理系统使用隔离CAN与整车以及外部设备通讯，使用isoSPI通讯方式进行内部通讯。电池管理系统硬件架构如图3.1所示。

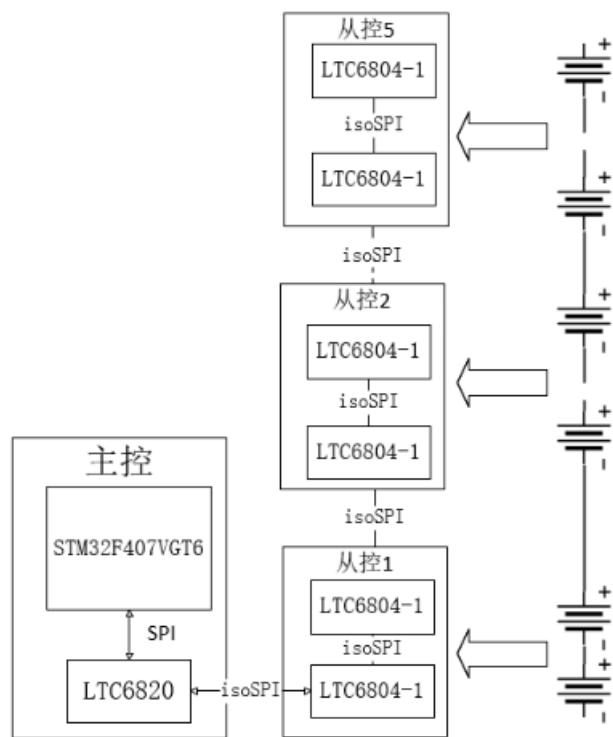


图 3.1 电池管理系统硬件架构图

3.1 电池管理系统主控模块设计

主控对接收的外部输入的电流传感器信号，绝缘检测模块信号，电压传感器信号以及从控上报的电池温度与电压信号进行处理和判断，控制继电器开闭从而实现对电

池进行管理。并经由通讯电路将电池信息发送至整车或外部设备，将控制指令发送给从控。

3.1.1 主控芯片选型

主控芯片承担电池管理系统中数据处理运算、外部器件控制以及任务调度等功能。本文选用 ST 公司的 32 位微控制器 STM32F407VGT6 作为电池管理系统主控的控制芯片，具有 168 MHz 的工作频率，具有高达 196KB 的 SRAM 和 1MB 的闪存。提供多个 ADC/DAC 以及包括两路 CAN 2.0B 接口在内的多个通信接口。该芯片能够满足本文设计的电池管理系统的需求。

3.1.2 CAN 通讯电路

主控中设计两路 CAN 通讯电路，根据功能划分为整车 CAN 和调试 CAN。整车 CAN 用于与整车控制器等控制器进行通信，调试 CAN 用于标定调试以及与充电桩进行通讯。

本文使用 NXP 的 TJA1052i 芯片作为 CAN 收发器。TJA1052i 内部集成了隔离器和收发器，因此无需额外使用隔离芯片或光耦进行独立的隔离，PCB 板占用面积减少，同时还改善了 CAN 通讯电路可靠性。CAN 总线与收发器之间串联一个共模电感，用于抑制总线上的共模干扰。使用两个 60.4Ω 电阻串联作为终端电阻，中间连接一个 $4.7nF$ 对地电容，以抑制干扰。使用 ESD 保护二极管防止静电损坏 CAN 通讯电路中的电子元器件。CAN 通讯电路如图 3.2 所示。

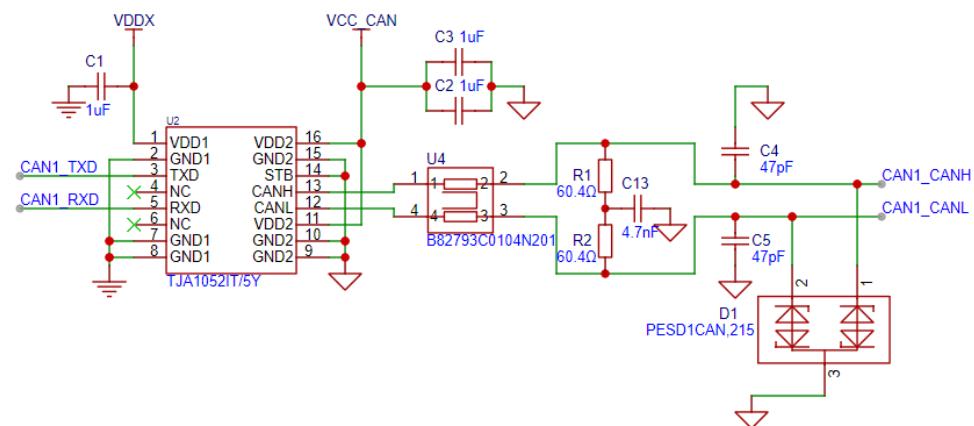


图 3.2 CAN 通讯电路原理图

3.1.3 isoSPI 通讯电路

本文中主控与从控之间的内部通讯使用两线式的 isoSPI 进行通讯。主控使用 LTC6820 将 SPI 转换 isoSPI 实现主从控之间的通讯，使得从控上不再需要使用微控制器和 CAN 控制器与主控之间进行 CAN 通讯，降低了制造成本的同时还减少了从控 PCB 的使用面积。isoSPI 通讯电路如图 3.3 所示。

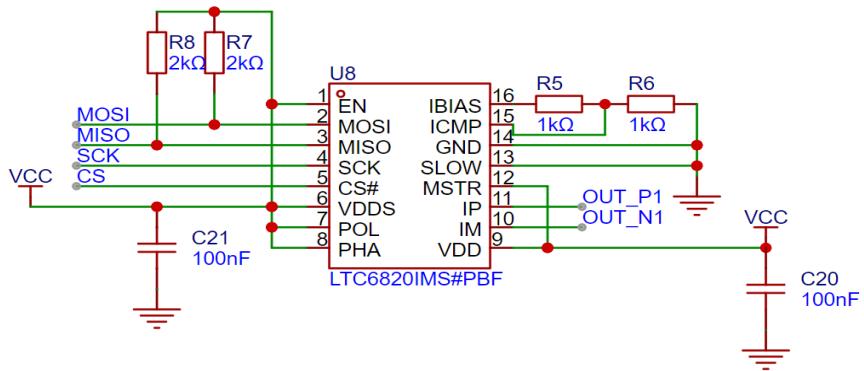


图 3.3 isoSPI 通讯电路图

3.1.4 继电器控制电路

电池包中主正继电器和主副继电器选用深圳巴斯巴汽车电子有限公司的带辅助触点的 EVC250A-1AD 继电器，其最大启动电流为 3.6A，保持电流为 0.13A。预充继电器选用其带辅助触点的 EVC100A-1AD 继电器，其最大启动电流为 1.5A，保持电流为 0.12A。根据中国大学生电动方程式大赛赛事规则要求和继电器启动的大电流，继电器驱动芯片应选择负载电流大于等于 3.6A 的低边驱动芯片。因此，本文继电器控制电路选择 ST 公司的 VNL5090S5TR-E 低边驱动芯片，其最大电流为 13A，具有短路保护、过载保护、热关断以及过电压保护等功能。

继电器关断时，线圈会在芯片驱动口产生一个很高的反向的感应电动势。为保护芯片的驱动口不被该感应电动势损害，将一个二极管和一个 TVS 二极管串联后接在芯片驱动口处，感应电动势通过二极管泄放，TVS 二极管钳位芯片驱动口电压，加快线圈能量释放的速度，从而加快了继电器断开。

MCU 控制引脚与驱动芯片使能引脚之间串联 $1\text{K}\Omega$ 的电阻，进行限流，防止大电流冲击。MCU 输入信号侧增加了一个 $10\text{K}\Omega$ 的下拉电阻，防止在 MCU 上电初始化过程中的数字输出管脚处于不受控的状态导致输出脚误动作从而导致继电器误动作^[24]。继电器控制电路如图 3.4 所示。

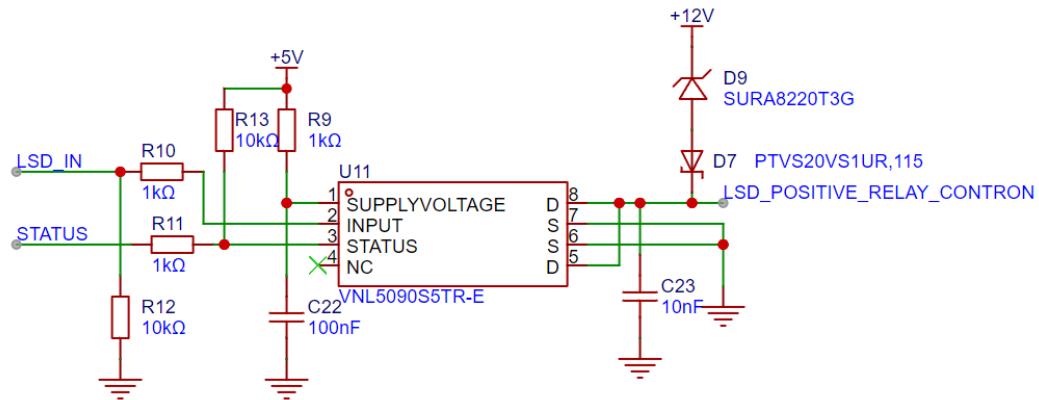


图 3.4 继电器控制电路图

3.2 电池管理系统从控模块设计

电池管理系统的从控负责监测与控制功能，包括对电池的电压、温度进行监测以及均衡电池能量。从控模块主要由供电模块、隔离通信模块、单体电压采集模块、温度采集模块和均衡模块组成。

3.2.1 模拟前端芯片选型

现有技术中，电池管理系统采样与控制方案包括基于分立式元器件的方案以及基于模拟前端芯片的方案。经过市场验证以及芯片厂商方案更新，基于模拟前端芯片的方案已经足够成熟。本文选取 ADI 的 LTC6804-1 作为本电池管理系统从控单元的模拟前端芯片。该模拟前端芯片最多可测量 12 个串联电池的电压，具有低睡眠电流、支持级联组合监控大量电池、支持 isoSPI 菊花链通讯、低至 1.2mV 最大总测量误差以及低于 290us 的测量时间等特点^[25]。

3.2.2 供电模块

常见从控供电方案包括外部供电方案和被监视的电池组供电方案。本系统选取被监视的电池组供电方案。本系统采用 DRIVE 引脚和少量附加的外部组件形成一个分立式稳压器从被监视的电池组取电为芯片供电，使用 NPN 晶体管进行缓冲。如图 3.5 所示。集电极连接一个由 100Ω 电阻与 100nF 电容组成的 RC 去耦网络保护 NPN 免遭浪涌电流的损坏。供电模块电路如图 3.5 所示。

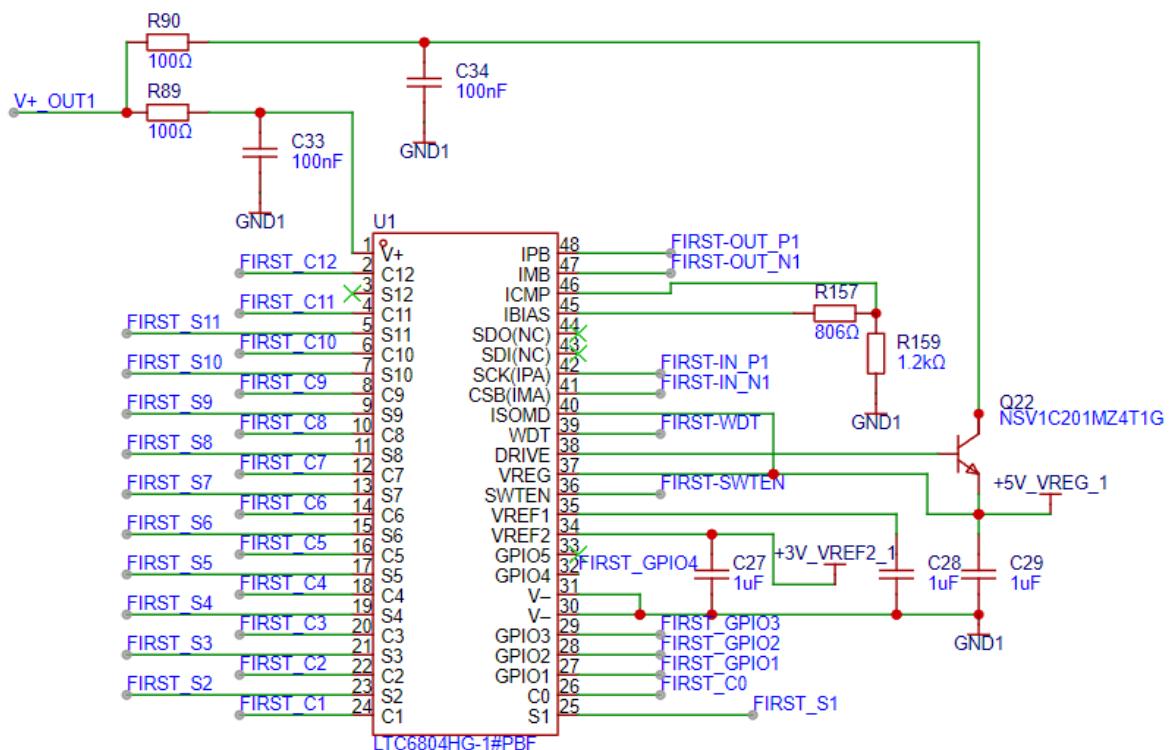


图 3.5 供电模块电路图

3.2.3 隔离通讯模块

本文设计的从控模块使用的通信方式是 isoSPI 通信，由于系统中存在高压部分，所以对系统的通讯做隔离处理。本系统采用两个变压器来对 isoSPI 收发端口进行隔离。为了优化共模噪声抑制，选择集成共模扼流圈且带中心抽头的变压器 HM2102NLT。为了获得最佳的电磁兼容性(EMC)性能，参考芯片手册设计隔离通讯电路如图 3.6 所示。为了有效衰减共模信号，变压器的中心抽头连接一个 100pF 电容器。

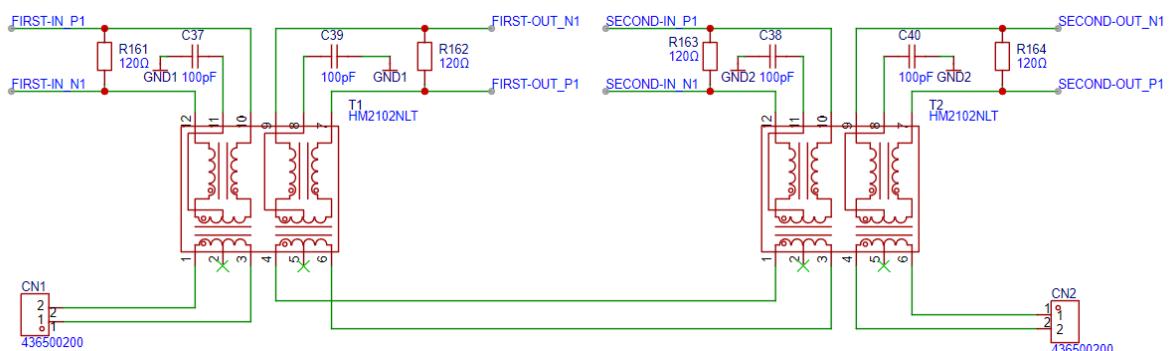


图 3.6 隔离通讯电路图

3.2.4 单体电压采集模块

从控的单体电压采集电路主要是让电池的电压信号经过一定处理到达模拟前端芯片的引脚上，主要的需求就是保护芯片不受外界影响冲击损坏，减小外部噪声干扰以保障到达模拟前端芯片的信号是干净的。

基于单体电压采集电路的功能需求，所有电压采样线上都布置了一个 0.375A 的保险丝。当从控单体电压采集电路发生短路时，保险丝熔断，保证电池安全，正常工作时采样线上经过的最大电流不超过 130mA，因此 0.375A 的保险丝拥有足够的设计余量避免误动作，保证从控正常工作。其自身的阻值为 1.882Ω ，阻值低，不会影响到电压采样精度。采样线上保险丝电路如图 3.7 所示。

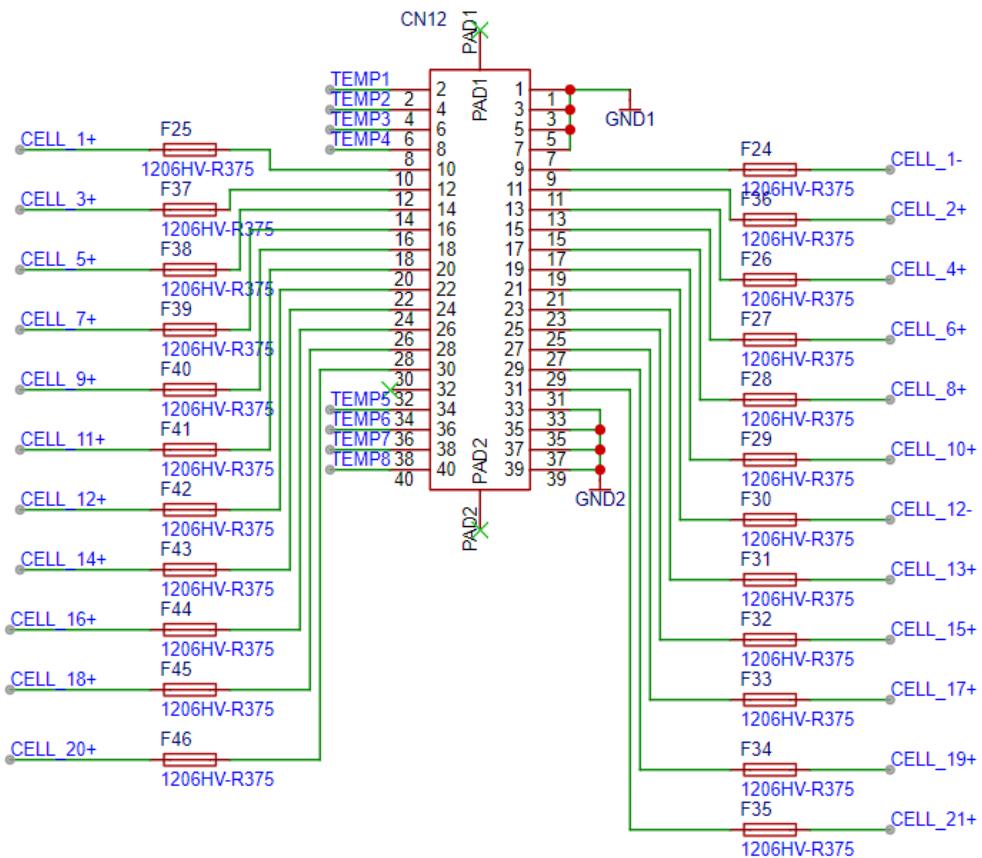


图 3.7 采样线保险丝电路图

根据ADI提供的芯片手册进行电压采集电路设计，模拟前端芯片中相邻单体电压采集电路接入了电容，构成差分电容器滤波器电路，以减少采集到的电池单体电压信号受到的干扰。单体电压采集电路如图3.8所示。

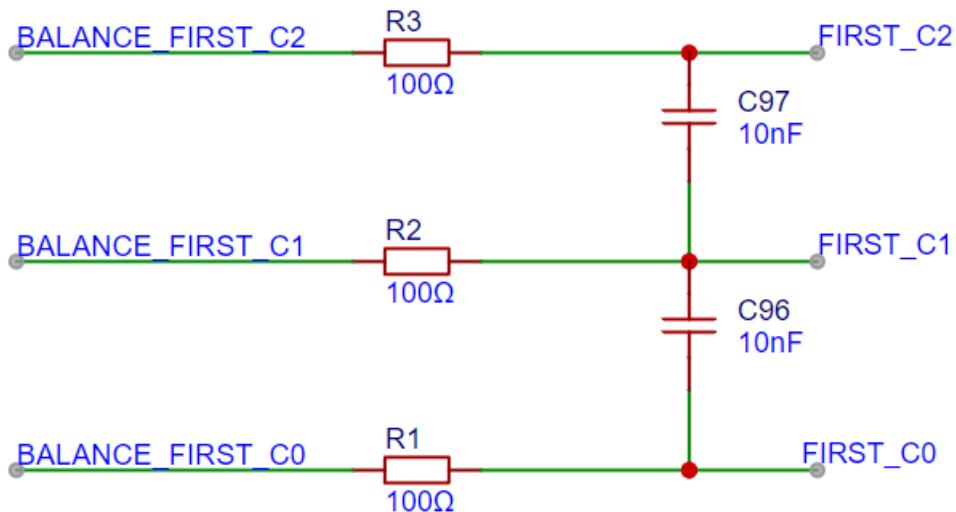


图 3.8 单体电压采集模块局部电路图

3.2.5 温度采集模块

LTC6804 芯片拥有 5 个可以配置的 GPIO 口，将其用于配合温度传感器进行温度采集。每一路温度采集电路为一个分压电路，由一个通过连接器相连的 $10k\Omega$ 的上拉电阻和一个外部的 NTC 热敏电阻传感器，该电路能将温度变化转换为电压变化。根据 LTC6804 采集到的电压信号，计算出 NTC 的当前阻值，通过查表的方式得到当前电芯极耳温度。温度采集电路如图 3.9 所示。

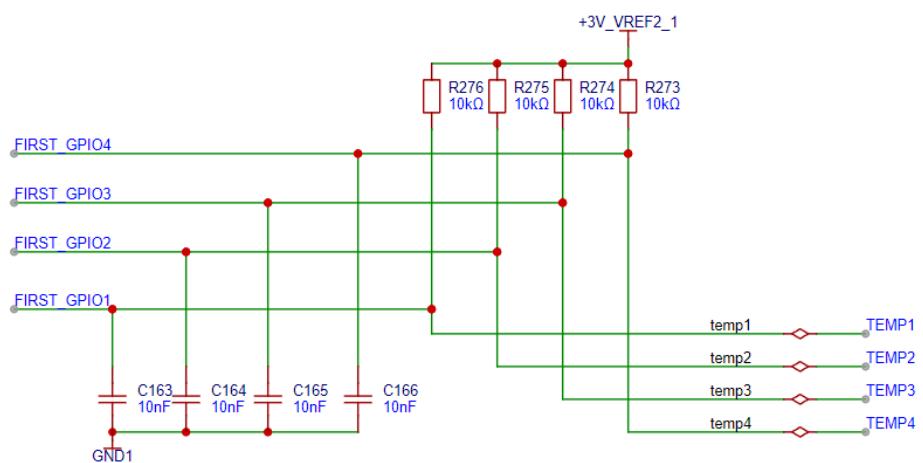


图 3.9 温度采集模块局部电路图

3.2.6 均衡模块

本系统均衡模块采用被动均衡方式，该均衡方式使用元器件少，占用 PCB 面积少，成本低。在体积小且追求轻量化的大学生方程式电池包中，使从控布置难度减小。

本系统中，均衡电阻阻值为 33Ω ，当电池电压为 4.3V 时开启均衡时，均衡电流最大，峰值电流为 130mA 左右。峰值功率为 0.56W。考虑到在高温情况下电阻功率下降，参考电阻的数据手册，在 80°C 的时候，电阻的功率约为额定功率的 88.2%，为了确保电阻正常工作，电阻的功率应至少大于 0.64W。本系统中选择功率为 1W 的 2512 封装均衡电阻，拥有充足的裕量。

均衡电路通过芯片的均衡控制端口驱动外部均衡电路中的 MOSFET 打开来实现均衡的开启。为了直观展示电池的均衡状态，每路均衡电路中都接入了一个 LED 灯，当某节电池进行均衡操作时，其对应控制均衡的 MOSFET 导通，对应的 LED 灯亮起。均衡电路如图 3.10 所示。

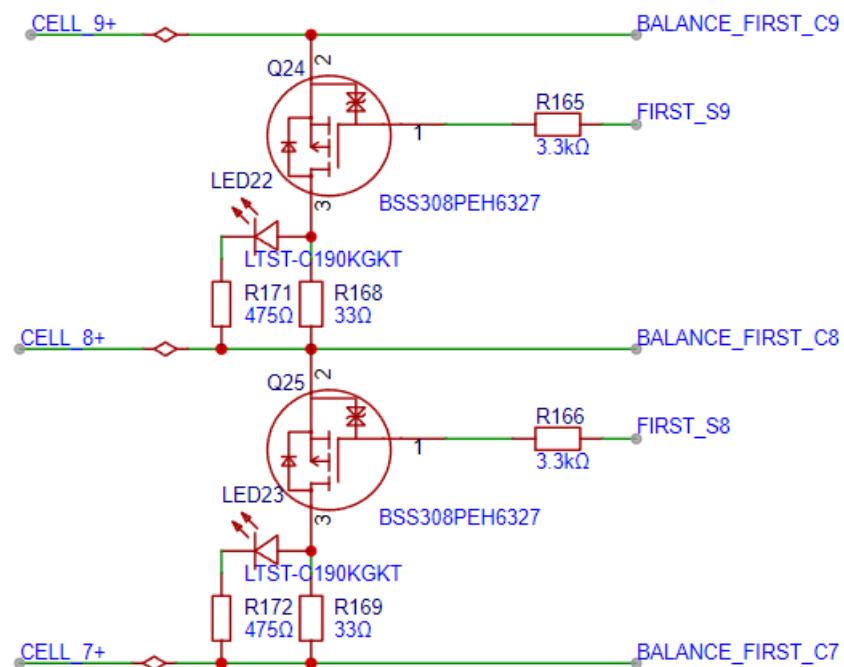


图 3.10 均衡模块局部电路图

3.3 本章小结

本章是电池管理系统硬件设计，设计了电池管理系统主控模块以及从控模块的硬件电路。电池管理系统硬件架构为菊花链主从式分布式架构，由 1 个主控和 5 个从控构成。每个从控可以对 21 个串联电芯构成的模组进行监测。电池管理系统主控选用 STM32F407VGT6 作为微控制器，使用 CAN 与整车通讯，使用 SPI 通过 isoSPI 隔离式通信芯片 LTC6820 转换为 isoSPI 与从控通讯，根据中国大学生电动方程式大赛规则使用低边驱动开关控制继电器吸合。电池管理系统从控模块使用两片 LTC6804-1 模拟前

端芯片监测电池的电压与温度，通过变压器隔离的通讯电路实现板间通讯以及同一电路板上模拟前端芯片间通讯，通过 MOSFET 与电阻构成的被动均衡电路耗散电压过高电芯的能量实现电压一致性。

4 电池管理系统策略设计

4.1 任务状态管理

任务状态管理策略通过使用 Stateflow 设计状态机实现功能。任务状态管理策略将 BMS 任务状态划分为 4 个互斥的状态，分别是表示待机状态的 Standby，表示驾驶放电状态的 Drive，表示充电状态的 Charge，表示故障状态的 Fault。任务状态管理策略状态机如图 4.1 所示。

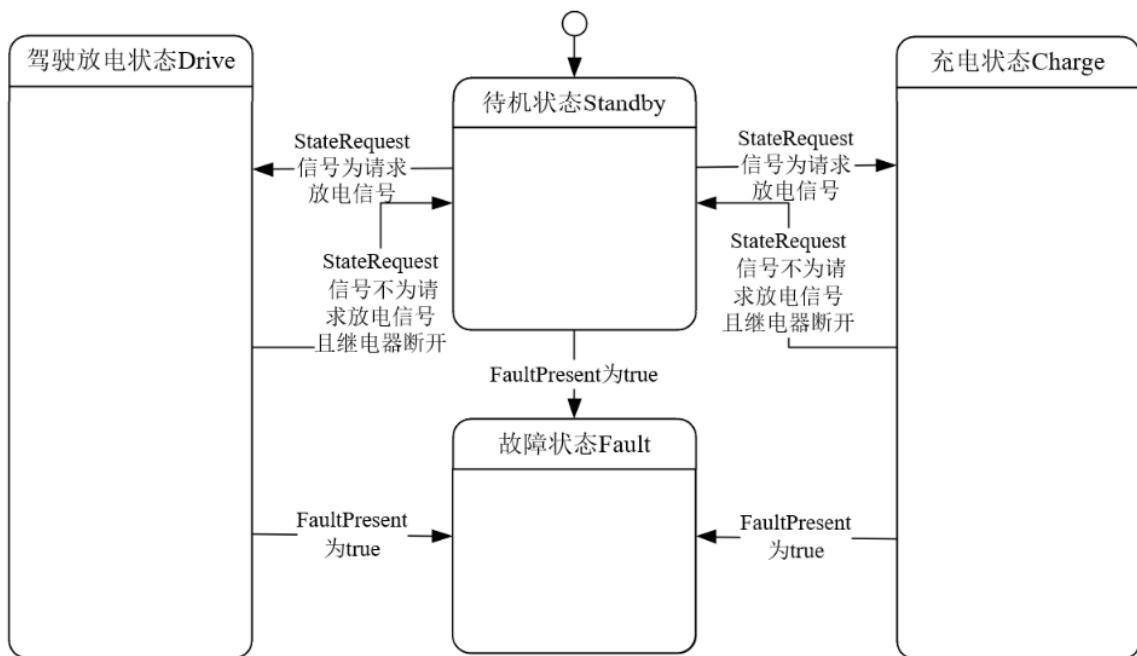


图 4.1 任务状态管理策略状态机

BMS 任务状态的起始状态为 Standby 状态。通过对外部输入的状态请求信号 StateRequest 和继电器吸合状态进行判断是否进行状态切换以及所切换的状态。切换条件如表 4-1 所示。

表 4-1 BMS 任务状态切换

BMS 状态切换	切换条件
待机状态切换为驾驶放电状态	StateRequest 信号为请求放电信号
待机状态切换为充电状态	StateRequest 信号为请求充电信号
驾驶放电状态切换为待机状态	StateRequest 信号不为请求放电信号且继电器断开
充电状态切换为待机状态	StateRequest 信号不为请求充电信号且继电器断开
其他状态切换为故障状态	当前故障信号 FaultPresent 为 true 将其他状态切入故障状态

4.1.1 待机状态

BMS 任务状态的起始状态为 Standby 状态。进入后输出 BMS 状态 BMS_State 表明 BMS 处于待机状态。

4.1.2 驾驶放电状态

驾驶放电状态负责驾驶放电过程中预充继电器的开启与闭合以及高压继电器的开启与闭合管理，该状态包含 2 个互斥状态，起始状态为继电器断开状态。当 StateRequest 信号为请求放电信号且无故障时，状态转移到放电上电流程。预充过程的作用是给电机控制器中的母线电容进行充电，以减少高压继电器闭合时的火花拉弧，避免高压冲击损坏高压回路零部件以及浪涌电流产热损坏主正和主负继电器导致继电器粘连，提升高压系统安全性^[26]。出现故障时当前故障信号 FaultPresent 置位为 true，继电器全部开启以下电。驾驶放电状态运行逻辑如图 4.2 所示。

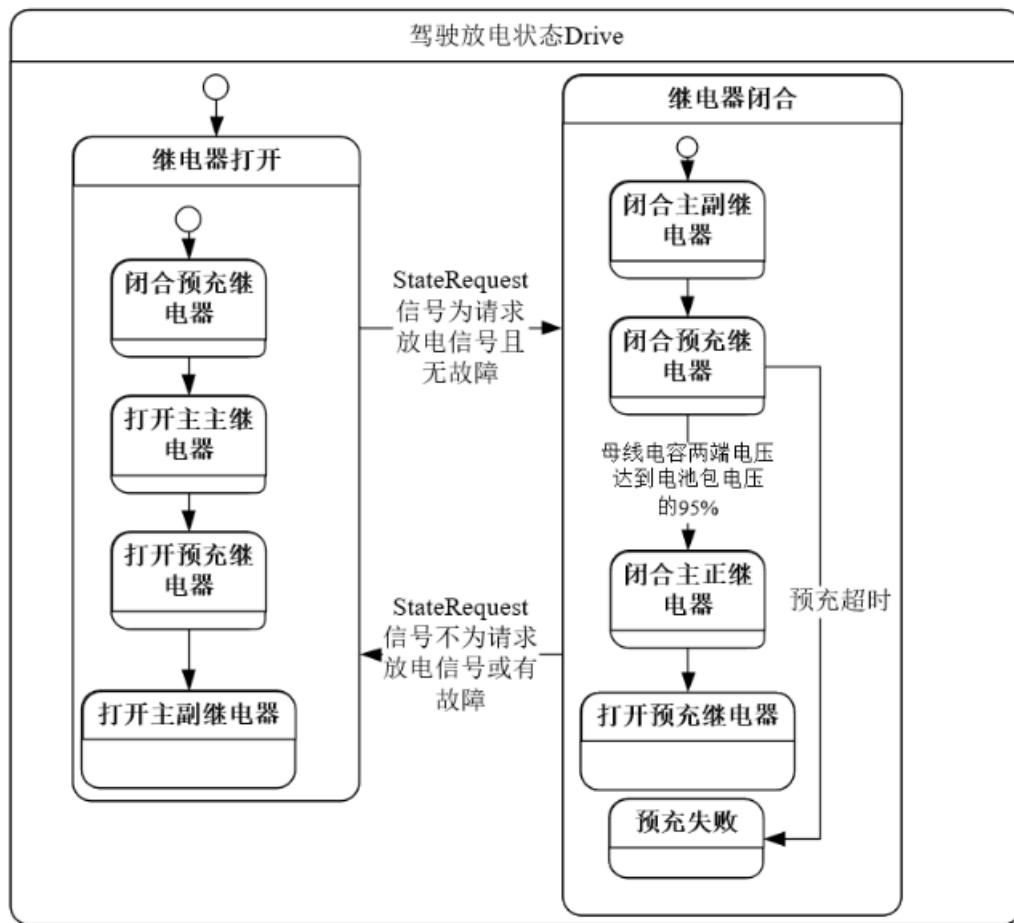


图 4.2 驾驶放电状态

4.1.3 充电状态

充电状态负责充电电过程中预充继电器的开启与闭合以及高压继电器的开启与闭合管理，该状态包含 2 个互斥状态，起始状态为继电器断开状态。当 StateRequest 信号为请求充电信号且无故障时，状态转移到充电上电流程。出现故障时当前故障信号 FaultPresent 置位为 true，继电器全部开启以下电。充电状态运行逻辑如图 4.3 所示。

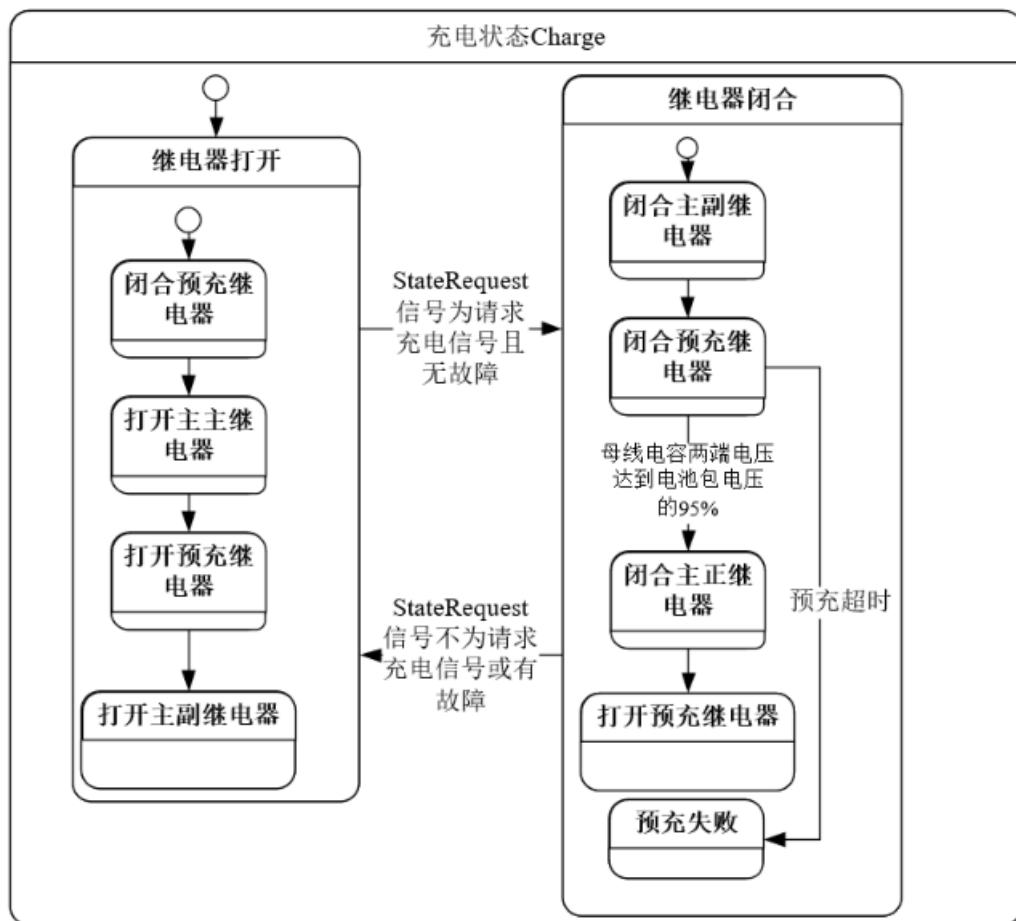


图 4.3 充电状态

4.1.4 故障状态

状态机运行过程中当当前故障信号 FaultPresent 置位为 true 时，其他状态切换进入故障状态。故障状态中，主正、主负继电器和预充继电器依次全部闭合完成下电。故障状态运行逻辑如图 4.4 所示。

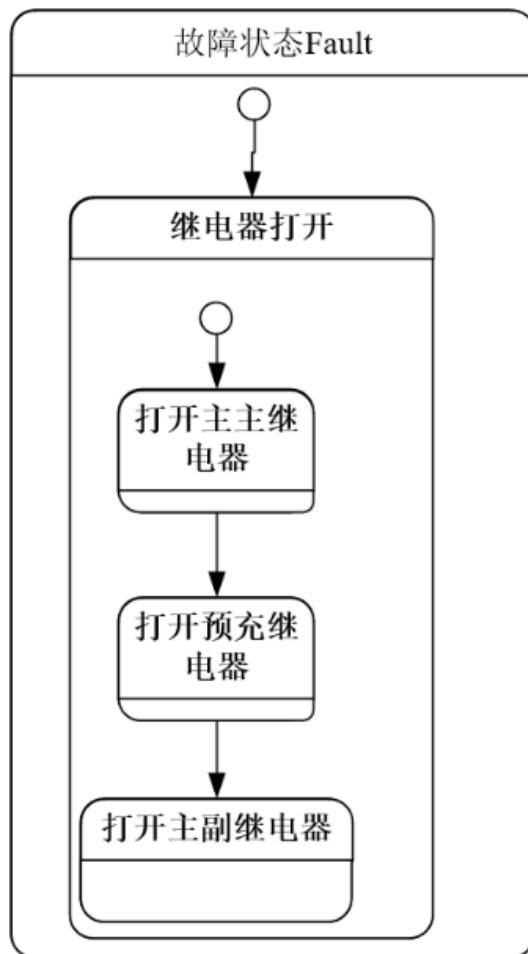


图 4.4 故障状态

4.2 故障诊断

故障诊断策略通过将输入的信号与设定值进行比较，通过对故障判断信号的逻辑值以及持续时间进行判断输出故障类型和当前故障信号 FaultPresent，并对 FaultPresent 信号进行锁定。最后对当前故障信号 FaultPresent 进行逻辑判断输出最终的当前故障信号 FaultPresent。故障诊断策略部分模块如图 4.5 所示。

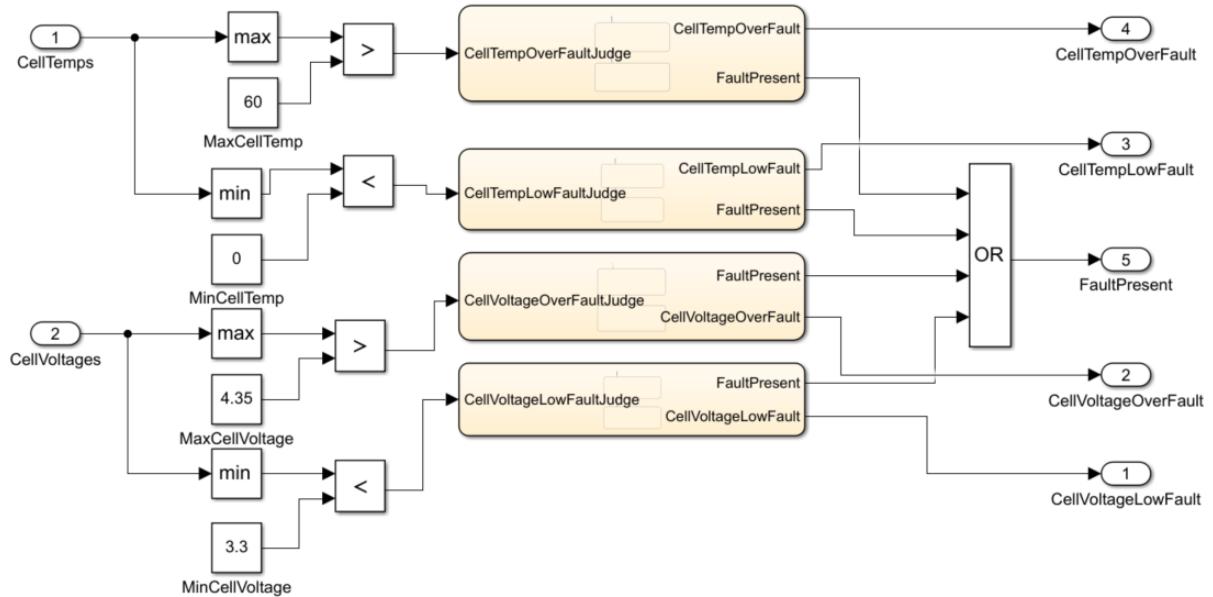


图 4.5 故障诊断策略部分模块

4.3 被动均衡

本文使用基于电压比较方法的被动均衡策略，其通过使用 Stateflow 设计状态机实现功能。策略设计监测最高电池单体电压与最低电池单体电压的差值，当差值大于设定的目标值且持续时间超过设定值时，被动均衡由均衡关闭状态 BalancingOFF 转移到均衡开启状态 BalancingON，然后进入均衡激活状态 BalancingActive，将所有电池单体电压与最低电池单体电压之间作差得到差值，差值超限的电池单体开始均衡。差值小于设定的目标值时，均衡停止，状态转移至均衡休眠状态 BalancingSleep。被动均衡策略运行逻辑如图 4.6 所示。

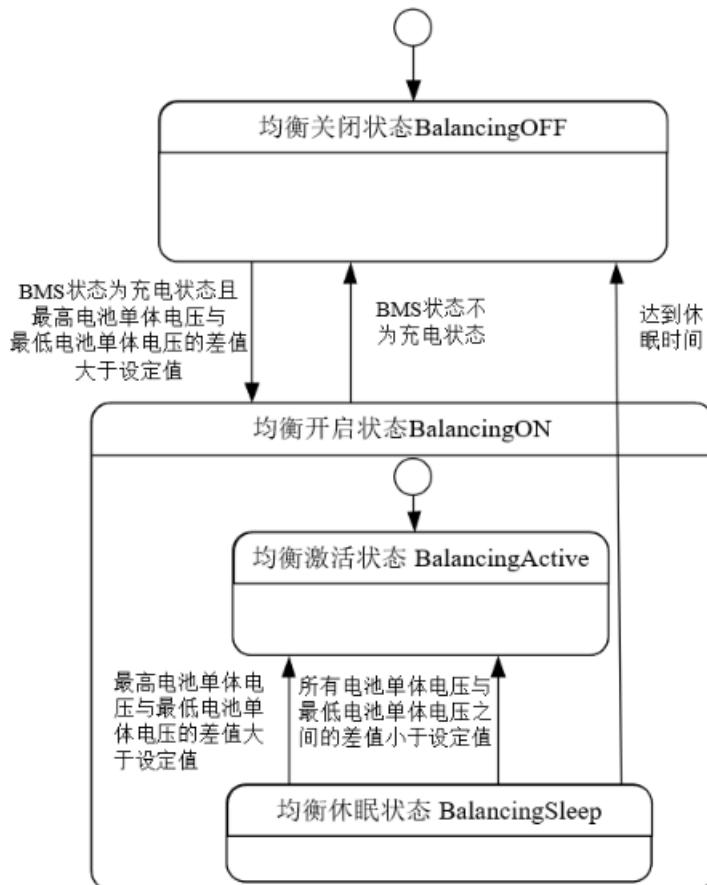


图 4.6 被动均衡

4.4 模型在环验证

模型在环验证就是将控制策略算法和被控对象模型集成为闭环仿真模型对单个或集成模型进行测试。在进行模型在环测试时，通常使用仿真平台来模拟实际系统的工作环境。这样可以避免在早期开发阶段中对实际硬件的依赖，降低开发成本和风险^[27]。模型在环中控制器和物理对象都在 PC 机上运行，是一种在基于模型的开发环境中运行的非实时仿真过程。

本文中使用模型在环验证对单个 BMS 策略模块分别进行验证。

4.4.1 BMS 被控对象模型

为完成策略模块模型在环测试，根据 BMS 策略模块所涉及的被控对象搭建其模型。本文 BMS 策略模块的被控对象主要是电池包、驱动电路。其中电池包模型用于模拟电池单体电压变化，驱动电路模拟继电器开闭状态以及通过母线电容模拟电机控制器上电状态。

4.4.1.1 电池包模型

电池包模型包括电池组模型与均衡电路模型两部分。

使用 Simscape 建立电池单体模型，后期基于测试需求对不同数目的电池单体模型进行串并联来组成电池组模型，提高模型可扩展性。本文使用 Simscape 中 Battery (Table-Based)模块与 Voltage Sensor 模块建立电池单体模型，电池单体模型对外输出正负极信号以及电池单体电压信号，设置电池单体电压值小于 3.3V 时截止放电。电池单体模型如图 4.7 所示。电池单体模型参数使用第二章对二阶 RC 模型辨识得到的参数，如图 4.8 所示。

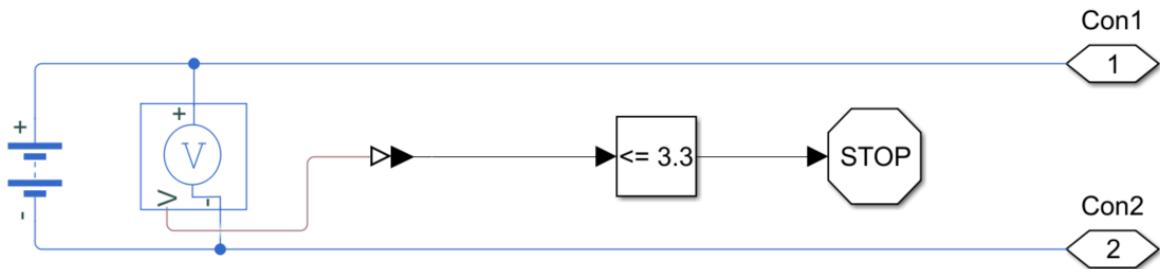


图 4.7 电池单体模型

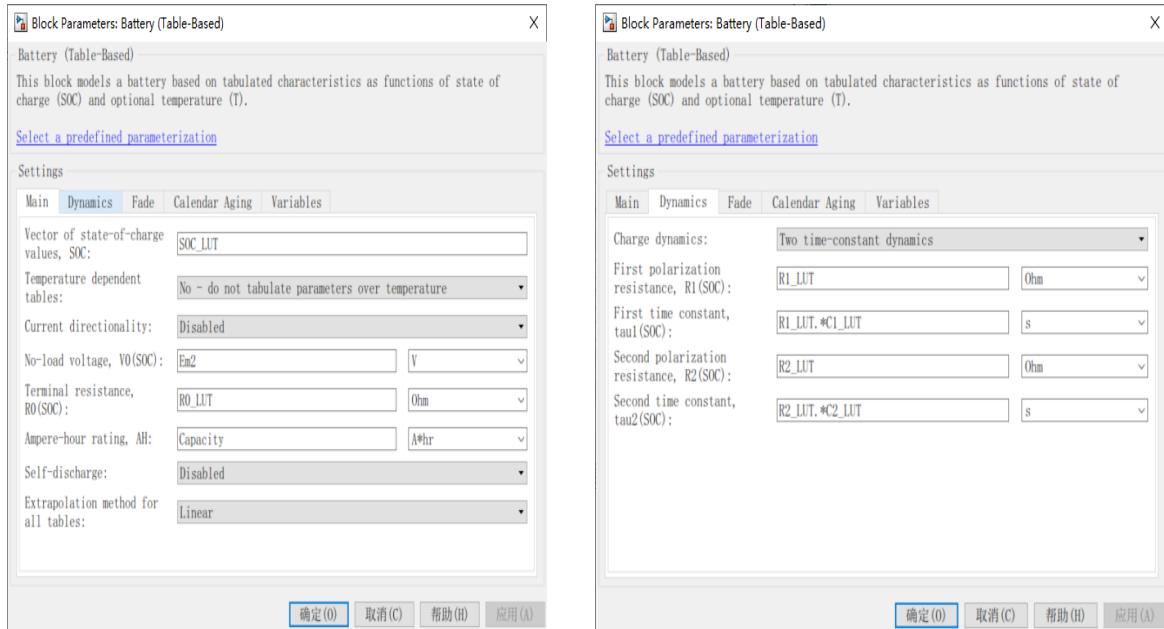


图 4.8 电池单体模型参数

本文使用电池包模型用于被动均衡策略测试，为了便于直观观察被动均衡电压变化情况，只使用 4 个前文搭建的电池单体模型串联组成测试使用的电池组模型。测试使

用的电池组模型组成如图 4.9 所示。

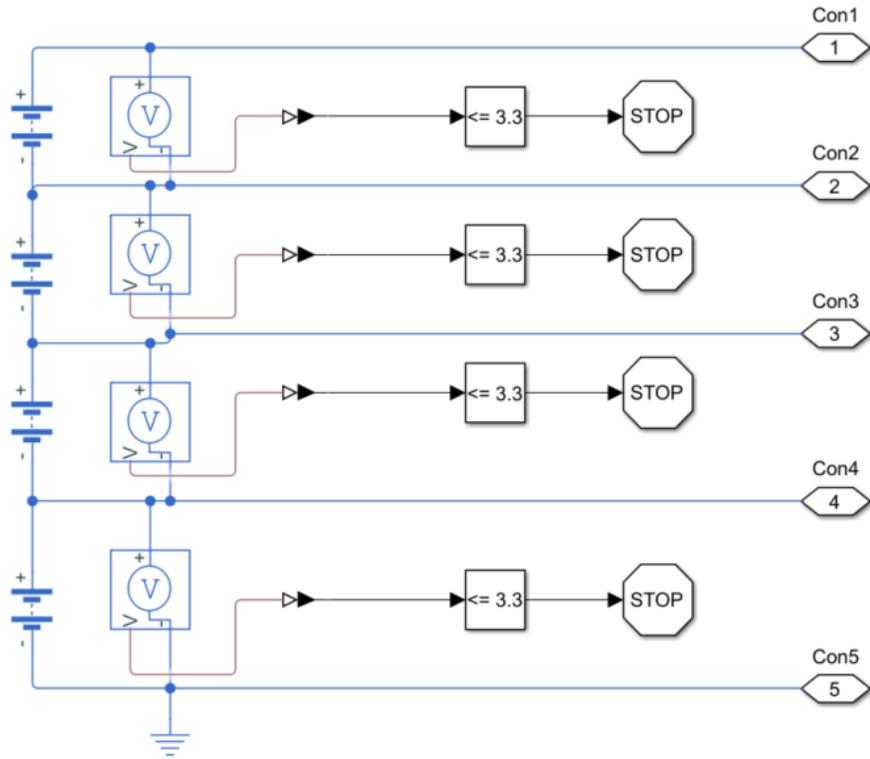


图 4.9 电池组模型

均衡电路模型同样由电池单体均衡电路模型组成，根据电池组模型中单体电池模型数量以及串并联关系进行匹配。电池单体均衡电路模型使用 Simscape 中的 Resistor 模块和 Switch 模块模拟被动均衡电路中的电阻和 MOSFET，使用 Voltage Sensor 模块测量电池单体端电压提供给均衡策略。电池单体均衡电路模型如图 4.10 所示。

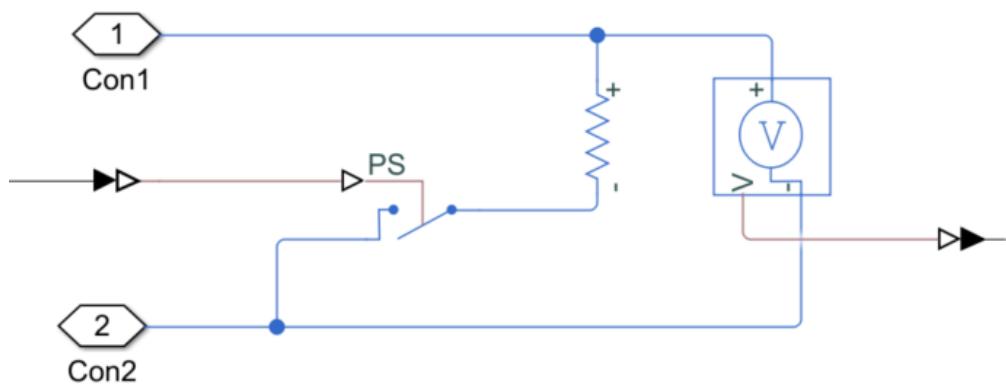


图 4.10 电池单体均衡电路模型

匹配的均衡电路模型如图 4.11 所示。

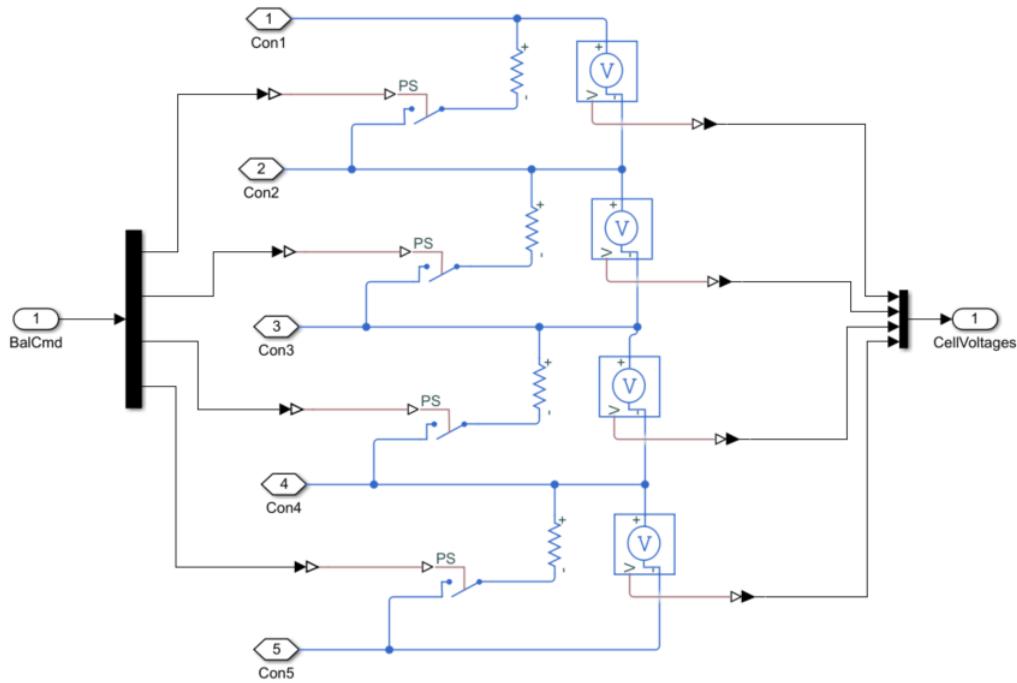


图 4.11 均衡电路模型

把上述电池组模型与均衡电路模型集成为一个测试用 1P4S 电池包模型，实现模拟电池单体的电压输出、电压检测、被动均衡的功能。电池包模型如图 4.12 所示。

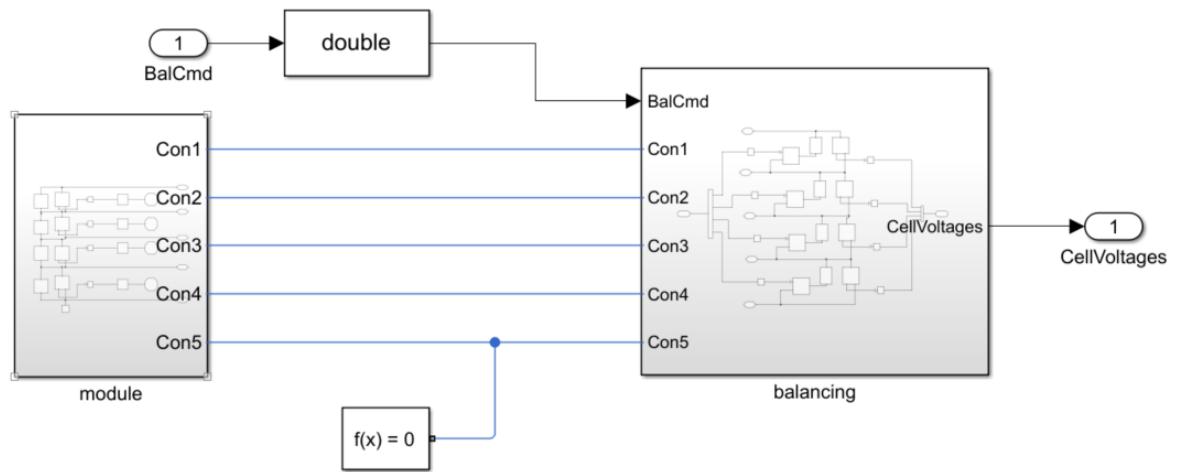


图 4.12 电池包模型

4.4.1.2 高压电路模型

驱动电路模型基于 Simscape 进行搭建，预充继电器、主正继电器、主负继电器使用 Switch 模块模拟，电池包使用 Battery 模块进行模拟，电机控制器中的母线电容模型使用 Capacitor 模块进行模拟。模型根据外部输入的预充继电器控制信号、主正继电器控

制信号、主负继电器控制信号模拟电池管理系统不同工作状态下驱动电路继电器的开闭动作以及高压元件的工作情况。通过 Voltage Sensor 模块监控驱动电路模型中输出的高压信号。驱动电路模型如图 4.13 所示。

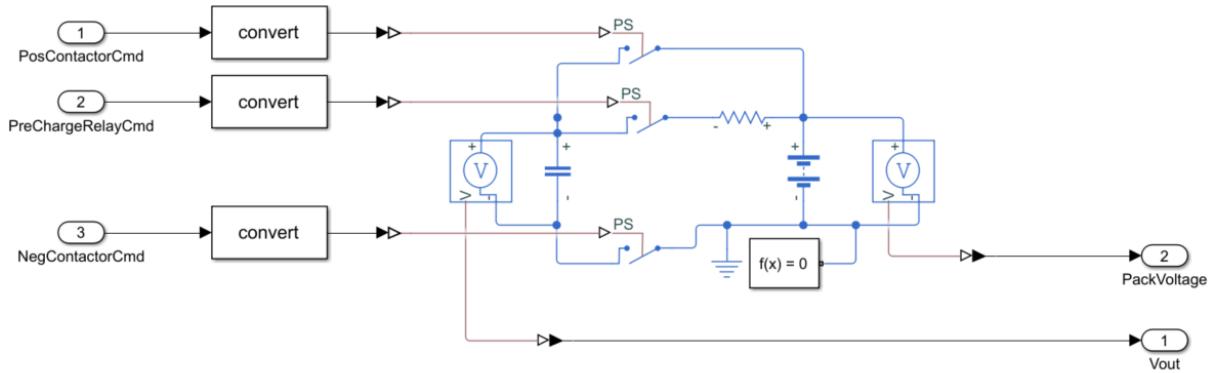


图 4.13 驱动电路模型

4.4.2 策略验证

4.4.2.1 均衡策略验证

被动均衡策略模型在环验证通过将被动均衡策略模型与电池包模型连接，设定目标电压差值以及不同测试工况，验证模型表现判断策略的可行性与有效性。被动均衡策略模型在环验证结构如图 4.14 所示。

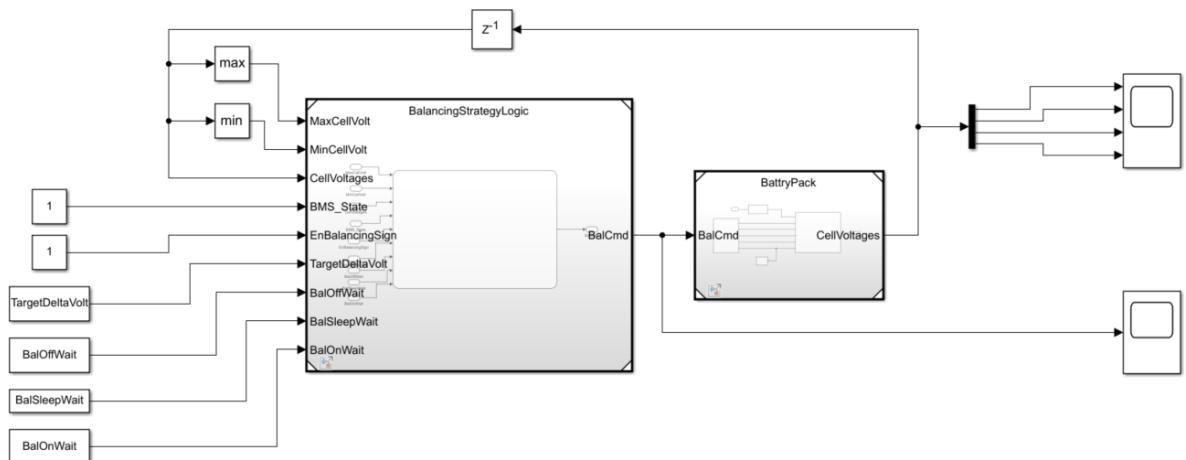


图 4.14 被动均衡策略模型在环验证结构

验证方法如表 4-2 所示。

表 4-2 被动均衡策略验证方法

序号	测试设置	预期结果	测试目的
1	目标电压差值为 100mv, 电芯 1 设置为 4.2V, 电芯 2 设置为 4.16V 电芯 3 设置为 4.13V, 电芯 4 设置为 4.1V	均衡不开启	验证策略能否判断是否进入均衡
2	目标电压差值为 2mv, 电芯 1 设置为 4.18V, 电芯 2 设置为 4.17V 电芯 3 设置为 4.16V, 电芯 4 设置为 4.15V	均衡开启, 并在均衡完成后退出均衡	验证策略能否判断是否进入均衡, 并在均衡完成后退出均衡

验证方法 1 结果如图 4.15 所示。在最高电池单体电压与最低电池单体压差小于策略设定电压目标差值时, 策略能够判断不进入均衡, 验证实际结果与预期结果均衡不开启相符合。验证方法 2 结果如图 4.16 所示。在最高电池单体电压与最低电池单体压差大于策略设定电压目标差值时, 策略能够判断进入均衡, 通过电压降低表现出电池单体经过均衡后能量耗散, 直到电池单体电压与最低电池单体压差小于设定电压目标差值时退出均衡, 验证实际结果与预期结果均衡开启并在均衡完成后退出均衡相符合。经过验证, 本文设计的被动均衡策略有效可行。

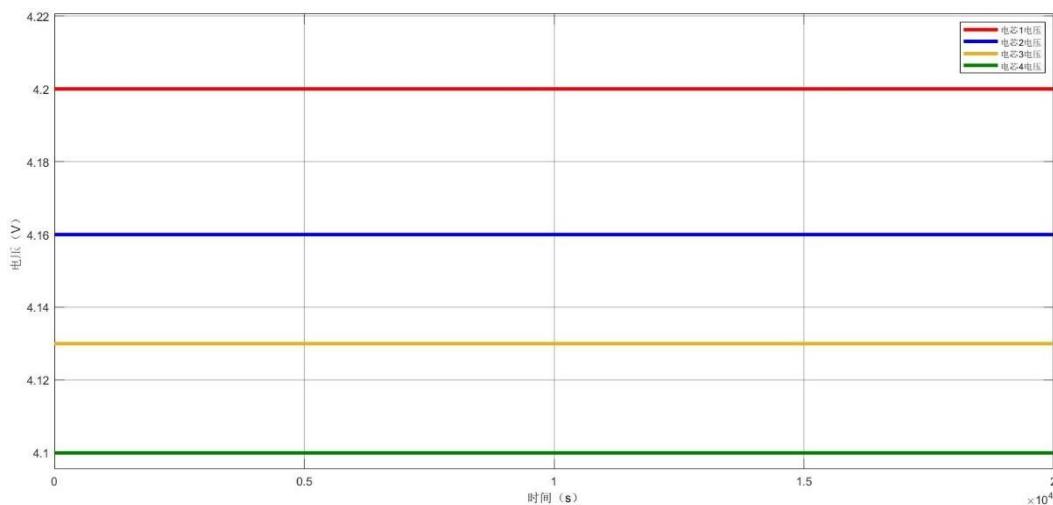


图 4.15 验证方法 1 结果

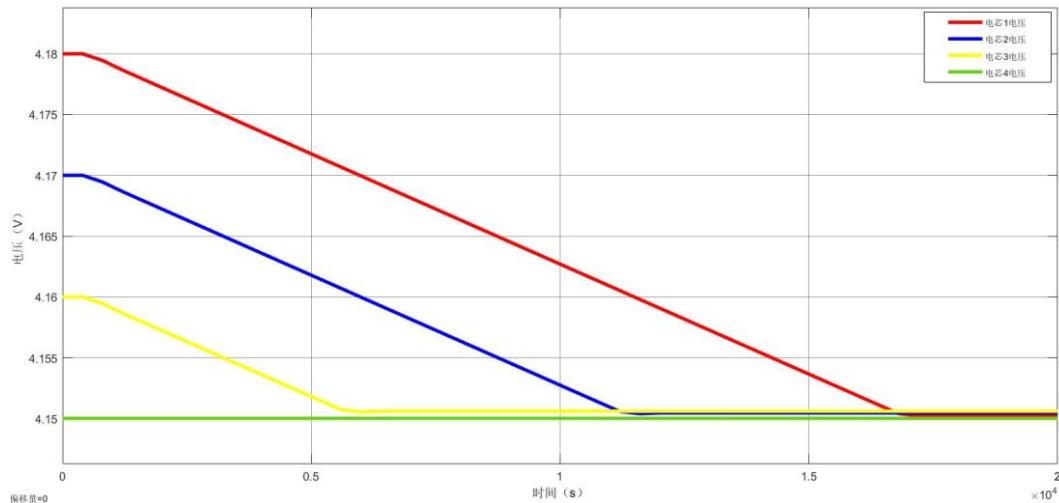


图 4.16 验证方法 2 结果

4.4.2.2 任务状态管理与故障诊断验证

任务状态管理策略与故障诊断策略关系紧密，任务状态管理策略中多个状态切换过程根据故障诊断策略输出的当前故障信号 FaultPresent 进行，因此将任务状态管理策略与故障诊断策略合并验证。任务状态管理策略与故障诊断策略模型在环验证将任务状态管理策略与故障诊断策略模型与驱动电路模型连接进行验证，其结构如图 4.17 所示。

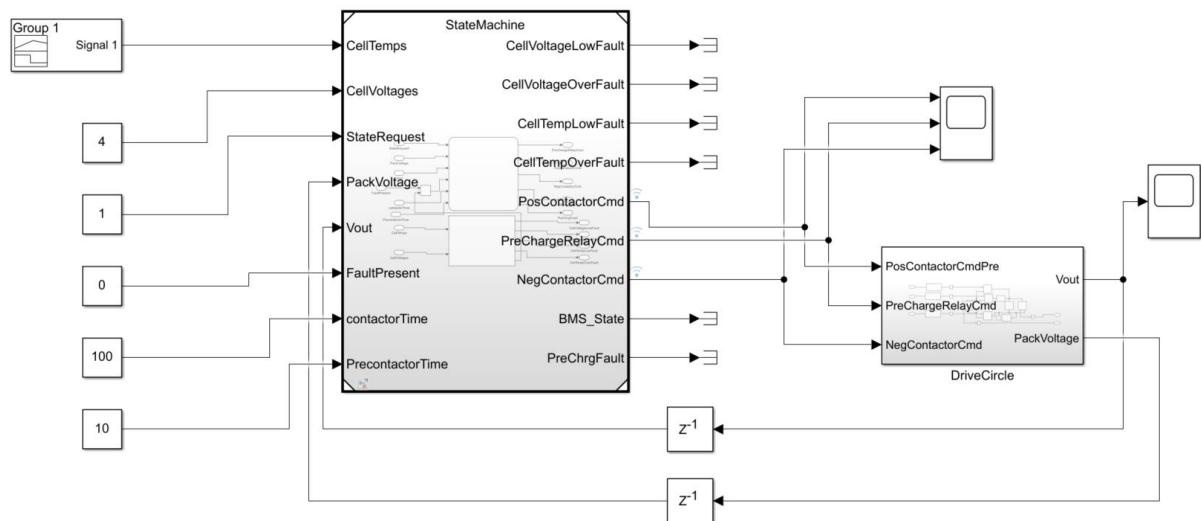


图 4.17 任务状态管理策略与故障诊断策略模型在环验证结构

验证方法如表 4-3 所示。

表 4-3 任务状态管理策略与故障诊断策略模型在环验证方法

序号	测试设置	预期结果	测试目的
1	输入值为正常范围, StateRequest 信号为充电请求信号, 当前故障信号 FaultPresent 置为 0	正常上电, 继电器按策略顺序依次动作	验证外部输入正常时能否进行正常上电, 继电器按策略顺序依次动作
2	输入温度信号如图 4.18, 前 6s 为正常范围内的 25°C, 第 6s-8.5s 温度上升, 在 8s 时温度超过设定值 60°C, 8.5s 后温度剧降至 25°C, StateRequest 信号为充电请求信号, 当前故障信号 FaultPresent 置为 0。	前 8s 正常上电, 继电器按策略顺序依次吸合, 在 8s 时温度超过设定值 60°C, 处于故障状态, 继电器按策略顺序依次打开。8.5s 后, 温度剧降至 25°C, 继电器依旧吸合。	验证策略能否判断故障, 按策略顺序依次打开继电器打开高压下电。

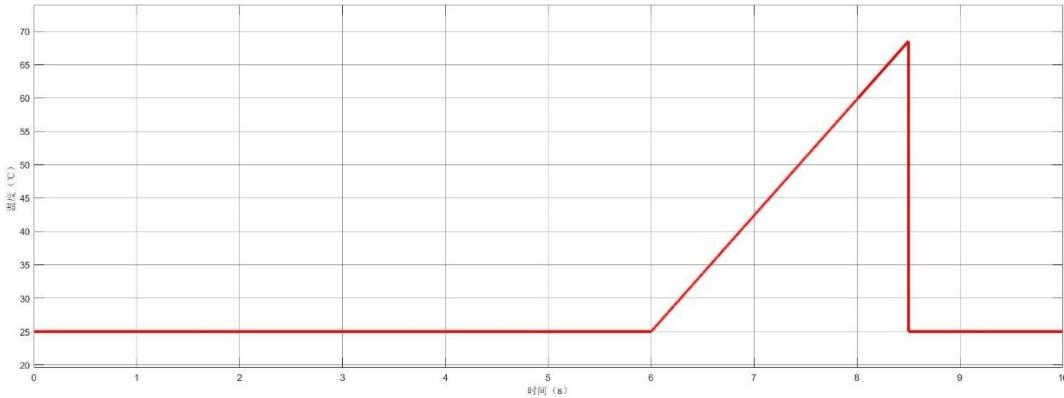


图 4.18 验证输入温度信号

验证方法 1 结果如图 4.19 所示。外部输入正常时, 主负和预充继电器闭合, 完成预充电后主正继电器闭合, 最后预充继电器打开, 完成高压上电。实际结果与预期结果相符。验证方法 2 结果如图 4.20 所示。前 8s 正常上电, 主负和预充继电器闭合, 完成预充电后主正继电器闭合, 最后预充继电器打开, 在 8s 时温度超过设定值 60°C, 处于故障状态, 继电器按策略顺序依次打开。8.5s 后, 温度剧降至 25°C, 故障状态锁

定，继电器依旧吸合，实际结果与预期结果相符。经过验证，本文设计的任务状态管理策略与故障诊断策略有效可行。

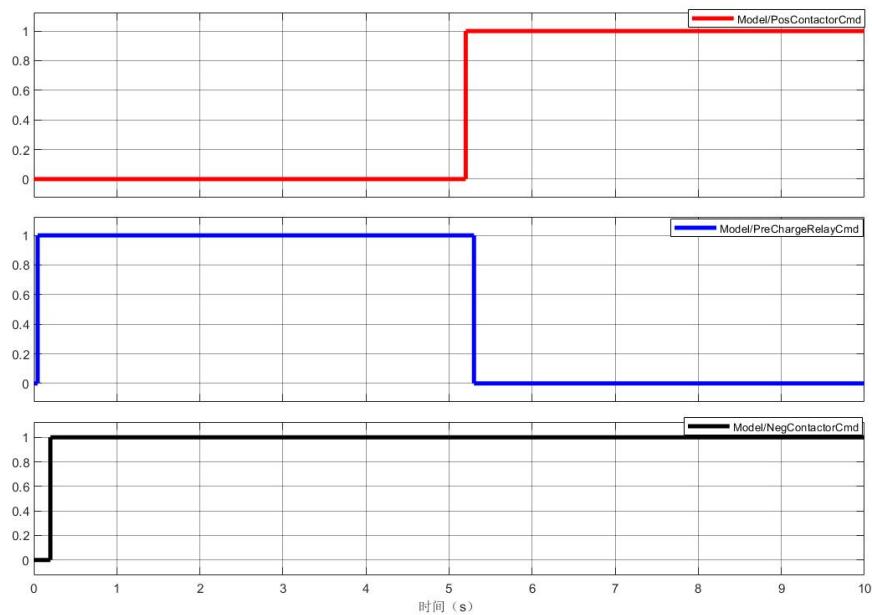


图 4.19 验证方法 1 结果

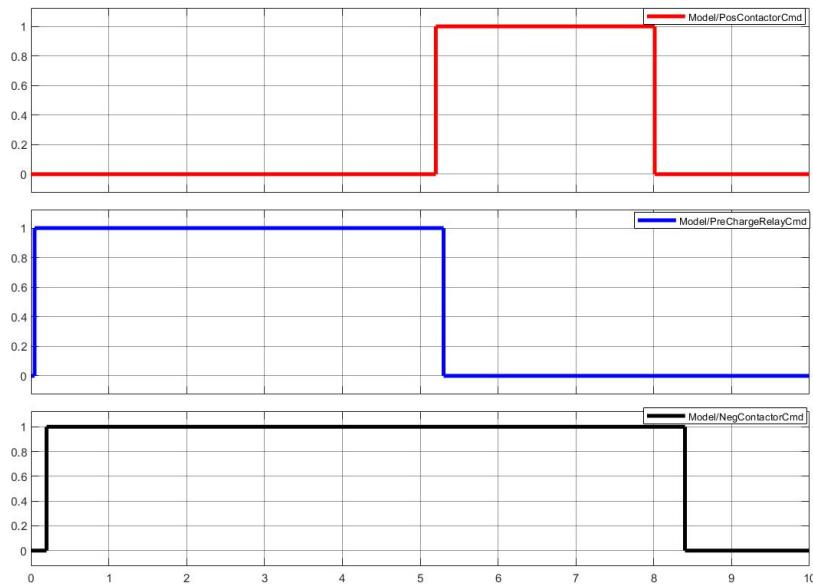


图 4.20 验证方法 2 结果

4.5 本章小结

本章是电池管理系统策略设计，策略包括任务调度策略，SOC估计策略和电池均衡策略。SOC 估计策略在第二章中进行了实现与仿真，电池均衡策略为基于电压比较的被动均衡策略，通过对所有电芯与电压最低电芯的电压做差得到电压差值与预设目标偏差电压进行比较决定是否开启均衡电路中的 MOSFET 进行均衡。上述控制策略均在 Matlab/Simulink 中实现，并将策略与 Simulink/Simscape 建立的被控对象进行模型在环仿真进行验证。

5 总结与展望

5.1 总结

本文设计与验证了一款适用于大学生电动方程式赛车的电池管理系统。研究内容包括建立适合的准确电池模型，实现与测试基于 EKF 的 SOC 估计算法，设计电池管理系统的硬件以及设计与验证控制策略。本文已经完成的工作如下：

- (1) 通过对所使用电芯进行测试得到电芯外特性数据，在 Matlab/Simulink 中对两种电池模型进行建模。通过对 HPPC 工况下的仿真结果进行对比分析，最终选取二阶 RC 模型作为本文使用的模型用于 SOC 估计算法。
- (2) 设计并验证了基于扩展卡尔曼滤波算法的 SOC 估计算法。
- (3) 设计了电池管理系统主控模块以及电池管理系统从控模块的硬件电路，其外部通讯使用 CAN 通讯，内部通讯使用 isoSPI 菊花链通讯，使用模拟前端芯片进行电芯数据采集，均衡形式为被动均衡。
- (4) 完成电池管理系统策略设计，策略包括任务调度策略，SOC 估计策略和电池均衡策略。
- (5) 使用 Simulink/Simscape 建立的被控对象，与策略联合进行模型在环仿真进行验证。

5.2 展望

由于时间与客观条件的限制，本文所作出的设计有几处本可以做的更加完善但是未能进行，希望在未来的研究中可以进行完善：

- (1) 本文使用电芯测试工况较少，无法对算法和模型进行考虑温度补偿以及放电倍率方面的分析研究。
- (2) 本文使用模型在环验证的方式验证电池管理系统的算法与控制策略，没能将算法与控制策略部署至嵌入式硬件平台上进行测试以及实车验证。未来的研究中希望可以将算法与控制策略部署至硬件上进行实车及台架测试，以完善存在的问题。

参考文献

- [1] 窦伟杰. 商用车行业的变革与重构[J]. 商用汽车, 2015,(07):26-28.
- [2] 刘舟. 基于实时操作系统 μ C/OS-II 的电池管理系统的工作原理与设计[D].湖南大学, 2017.
- [3] BAŁA M, MIKLE D. Battery Management System Hardware Design for a Student Electric Racing Car[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019: 74-79.
- [4] Ghabech C, Yadav A K, Khaligh A, et al. Systematic Modelling and Design of a Battery Pack for Formula Electric Vehicles[R]. SAE Technical Paper, 2021.
- [5] SHELL C, HENDERSON J, VERRA H, et al. Implementation of a wireless battery managementsystem (WBMS)[C]//2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Pisa, Italy. 2015, 2015:1954-1959.
- [6] Lee D, Lee P Y, Baek I, et al. Deriving the optimized battery model for battery pack and anomaly detection based on the cloud battery management system[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109338.
- [7] XIONG R, LI L, TIAN J. Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods[J]. Journal of Power Sources, 2018:18-29.
- [8] 熊瑞. 动力电池管理系统核心算法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 104-108.
- [9] VERBRUGGE M, TATE E. Adaptive state of charge algorithm for nickel metal hydride batteries including hysteresis phenomena[J]. Journal of Power Sources, 2004: 236-249.
- [10] CHARKHGARD M, FARROKHI M. State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Neural Networks and EKF[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010: 4178-4187.
- [11] KIM I S. The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer[J]. Journal of Power Sources, 2006, 163(1): 584-590.

- [12] 赵盼龙. 基于实时操作系统的电池管理系统软件设计[D]. 北京交通大学, 2022.
- [13] 齐安宁. 微型电动车电池管理系统研究及其硬件实现[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2012.
- [14] 容毅楠. 电动汽车锂离子电池荷电状态估计方法研究[D]. 北京理工大学, 2016.
- [15] 王君君. 锂离子动力电池管理系统的工作原理与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [16] 邵明宽. 基于无线通信的电动汽车锂电池管理系统的硬件设计和实现[D]. 东南大学, 2021.
- [17] 于智龙, 李龙军, 韦康. 考虑老化的修正 EKF 算法估计锂电池 SOC[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(04): 125-132.
- [18] 熊瑞. 基于数据模型融合的电动车辆动力电池组状态估计研究[D]. 北京理工大学, 2014.
- [19] Wang D, Li X, Wang J, et al. Lithium-ion battery equivalent model over full-range state of charge based on electrochemical process simplification [J]. Electrochimica Acta, 2021, 389: 1-12.
- [20] 汤爱华. 车载锂离子动力电池 SOC/SOH 估计方法研究[D]. 北京理工大学, 2017.
- [21] 曹铭. 电池管理系统关键技术研究及测试系统构建[D]. 南昌大学, 2020.
- [22] 胡敏康. 基于改进卡尔曼滤波算法的锂离子动力电池荷电状态估计算法研究[D]. 合肥工业大学, 2021.
- [23] 樊世鑫. 磷酸铁锂电池荷电状态的研究[D]. 安徽理工大学, 2020.
- [24] 陈卓. 新能源汽车电池管理系统硬件设计及验证[D]. 华南理工大学, 2019.
- [25] 夏达兴. 电动汽车动力电池组均衡系统设计与研究[D]. 湖南大学, 2018.
- [26] 李鹏伟. 大学生方程式电动赛车电气控制系统设计[D]. 长安大学, 2017.
- [27] MÜLLER J, BESSER N, HERMSEN P, et al. Virtual Development of Advanced Thermal Management Functions Using Model-in-the-Loop Applications[J]. Energies, 2023, 16(7): 3238.

致 谢

行文至此已是本科时代的末尾，让人不禁感叹四年时间也不过弹指一挥间。四年前刚入学的我，现在已经要踏出校门迎接未来的挑战。四年里，我学到了很多专业知识，交到了很多意气相投的朋友，开拓了自己的眼界。

首先最要感谢的是伍文广老师，伍老师的课堂教学清晰明了，为人随和，治学严谨。在进行毕业设计期间，不仅对我的毕业设计进行了指导，也对我生活以及人生方向的困惑进行了解答。在大学生电动方程式比赛中也给予了我和队友们大量的帮助，让我们得以获得好的成绩与实践机会。

非常非常感谢父母家人对我的照顾支持和理解，他们是我求学道路以及迎接未来挑战上的精神支柱。他们让我不断得到自身的完善。在我处于人生的挫折与迷茫中时，他们为我指引方向给予鼓励。在我做出选择时，他们给予我坚定的支持与理解。

感谢我的好朋友和室友们对我的陪伴帮助和包容。

大学四年里可以说与车队密不可分，从大一刚加入到毕业设计选题，车队已经渗透进了我本科求学生涯的每个角落。尽管刚开始对这个困难的选题有些不自信，但是最终还是为我刚入队立下的我们队一定要有自制的 BMS 这个目标进行了第一步的探索以及做出了一些工作。感谢吴师傅、晓坤哥、泽哥、宝哥、达哥以及车队的其他小伙伴们在车队工作和做研究上的给予帮助与陪伴，给了我一个难忘的大学记忆。希望大家都能找到自己的目标并在自己的道路上不断向前。