

新能源汽车电池管理系统设计

王永亮

惠州亿纬锂能股份有限公司 广东 惠州 516000

摘要: 本文围绕新能源汽车电池管理系统(BMS)设计展开研究,阐述动力电池核心特性、BMS核心功能与架构及关键技术原理,遵循相关标准与设计约束,完成硬件模块化设计、软件分层开发及系统测试验证。硬件聚焦主控、采集等模块,软件优化SOC估算算法,测试覆盖软硬件及实车工况,实现BMS精准采集、安全控制与高效交互,解决单体均衡等关键问题,为BMS设计提供可靠参考与技术支持。

关键词: 新能源汽车; 电池管理; 系统设计

引言: 随着新能源汽车产业快速发展,动力电池作为核心部件,其安全性、稳定性直接决定车辆性能与使用寿命,电池管理系统作为动力电池的“智能管家”,承担参数采集、状态估算、安全保护等关键职责。当前BMS存在估算精度不足、抗干扰能力待提升等问题,制约动力电池性能发挥,基于此,本文开展BMS设计研究,优化软硬件架构与算法,满足车载复杂工况需求。

1 新能源汽车电池管理系统相关理论基础

1.1 动力电池核心特性

(1) 工作原理: 锂电池通过正负极电化学反应实现能量转换,放电时正极锂离子经电解液迁移至负极,电子通过外电路形成电流(化学能转电能);充电时过程反向,完成电能存储,核心是锂离子嵌入与脱嵌循环。(2) 关键参数: 容量决定储电能力,内阻影响充放电效率与电压稳定,充放电特性限定工作速率,温度敏感性会导致高低温下容量、内阻变化,影响电池性能与寿命。(3) 老化机制与影响因素: 分为日历老化和循环老化,受充放电深度、速率、温度等影响,老化后容量衰减、内阻增大,对BMS设计提出精准监测、自适应控制要求。

1.2 电池管理系统的核心功能与架构

(1) BMS的核心功能: 数据采集实时获取电池电压、电流、温度等参数;状态估算精准判断电池状态;安全保护防范各类异常工况;均衡控制减小单体电池差异;通信交互实现与整车控制器的数据传输。(2) BMS的硬件架构分类: 集中式架构集成度高、成本低,适用于小型车辆;分布式架构布线灵活、扩展性强,适配大容量电池包;模块化架构兼顾两者优势,便于维护与升级。(3) BMS的软件架构组成: 底层驱动负责硬件设备控制,核心算法支撑状态估算与均衡控制,应用层控制逻辑实现整车协同控制,三层架构协同保障BMS稳定运行^[1]。

1.3 电池管理系统关键技术原理

(1) 状态估算技术基础: SOC指剩余电量,SOH指健康状态,SOP指功率状态,核心估算原理基于安时积分法、卡尔曼滤波等,结合电池参数动态修正估算精度。(2) 安全保护技术原理: 通过检测电池参数,触发过充、过放、过流、过温及绝缘保护机制,切断回路或调节工况,避免电池损坏或安全事故。(3) 电池均衡技术原理: 被动均衡通过电阻消耗高电量单体电能,结构简单但能耗高;主动均衡通过能量转移实现单体均衡,效率高但成本高、结构复杂。

1.4 相关标准与设计约束

(1) 相关标准与规范: GB/T34131明确BMS的安全性、检测方法等核心要求,此外还有行业规范约束BMS设计、生产与测试全流程,保障产品一致性与安全性。(2) 设计约束: 性能约束要求BMS具备高可靠性、实时性;成本约束需控制硬件与软件研发成本,设计中需兼顾安全性、可靠性与经济性,实现最优设计平衡。

2 新能源汽车电池管理系统硬件设计

2.1 硬件系统总体设计方案

(1) 硬件设计目标与性能指标: 核心目标是实现电池参数精准采集、安全可靠控制及整车高效交互,性能指标明确: 电压采集精度 $\leq \pm 10\text{mV}$,电流采集精度 $\leq \pm 1\%\text{FS}$,温度采集精度 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$,系统响应速度 $\leq 10\text{ms}$,满足车载复杂工况下的稳定运行需求。(2) 硬件总体架构设计: 采用模块化架构,主控单元为核心,通过总线连接采集单元、均衡单元、安全保护单元及辅助模块,采集单元实时传输电池参数,主控单元处理数据并下发指令,各模块分工协作、接口标准化,提升系统扩展性与可维护性。(3) 硬件选型原则: 遵循“性能适配、成本可控、可靠性优先”原则,核心元器件选用车规级产品,兼顾抗温、抗干扰性能与成本控制,避免过度设计,实现性能与经济性的平衡^[2]。

2.2 核心硬件模块设计

(1) 主控单元设计: MCU选用车规级32位单片机, 兼顾运算能力与低功耗; 设计最小系统电路, 电源电路采用线性稳压芯片实现稳定供电, 时钟电路保证时序精准, 复位电路实现上电复位与手动复位, 保障MCU稳定运行。(2) 数据采集模块设计: 电压采集选用专用电芯电压检测芯片, 通过串联分压电路实现多电芯同时检测, 提升采集效率; 电流采集采用霍尔电流传感器, 隔离测量避免干扰, 确保数据准确; 温度采集选用NTC热敏电阻, 合理布局于电池包关键位置, 通过分压电路将温度信号转换为电信号传输。(3) 安全保护模块设计: 设计高压继电器控制电路, 实现电池包高压回路的通断控制; 选用快慢速保险丝, 应对不同程度过流故障; 搭建绝缘检测电路, 实时监测高压回路绝缘状态, 避免漏电隐患。

2.3 辅助硬件模块设计

(1) 电池均衡模块设计: 采用被动均衡方案, 选用功率电阻与MOS管组成均衡电路, 元器件选型兼顾功耗与体积, 当单体电芯电压差异超过阈值时, 启动均衡电路消耗高电压电芯电能, 实现电压一致性调节。(2) 通信模块设计: 基于CAN总线协议设计通信电路, 选用车规级CAN收发器, 搭配终端电阻匹配总线阻抗, 实现BMS与整车控制器、充电桩之间的双向数据交互, 保障指令与状态信息稳定传输。(3) 电源模块设计: 输入采用车载12V电源, 通过DC-DC转换器转换为5V、3.3V等不同规格电压, 搭配滤波电容与稳压电路, 为MCU、传感器、通信模块等提供稳定、无干扰的供电^[3]。

2.4 硬件PCB设计与抗干扰措施

(1) PCB布局与布线设计: 严格遵循高压与低压分离、模拟与数字分离原则, 高压回路布线粗短, 模拟信号布线远离数字信号与功率器件, 减少干扰; 关键元器件就近布局, 缩短布线长度, 提升电路稳定性。(2) 抗电磁干扰(EMI)措施: 在电源输入端添加滤波电路, 抑制电源干扰; 对高压回路进行屏蔽设计, 减少电磁辐射; 采用单点接地与多点接地相结合的方式, 降低接地干扰, 确保系统抗干扰能力符合车载标准。(3) 硬件调试方案: 明确调试步骤, 先对各模块单独调试, 测试电源输出、采集精度等参数; 再进行模块联调, 验证各模块协同工作效果; 最后进行整机调试, 模拟车载工况, 排查故障并优化性能。

3 新能源汽车电池管理系统软件设计

3.1 软件系统总体设计

(1) 软件设计目标与功能模块划分: 设计目标为实现硬件协同控制、电池状态精准估算、安全可靠运行及

整车数据交互。基于模块化设计思想, 将软件划分为底层驱动、核心算法、应用层控制及调试四大模块, 各模块职责明确、接口清晰, 方便开发调试与后期升级维护。(2) 软件开发环境与编程语言选择: 选用KeilMDK开发环境, 其支持车规级MCU编程、仿真与调试, 适配BMS软件开发需求; 编程语言采用标准C语言, 兼具可读性、可移植性与高效性, 便于编写底层驱动和复杂算法, 降低跨平台适配成本。(3) 软件流程图设计: 绘制主程序流程图, 明确系统初始化、循环检测、数据处理、指令执行的核心流程; 同步设计各子模块流程图, 涵盖采集、算法、安全模块的核心流程, 确保各流程逻辑严谨、衔接顺畅^[4]。

3.2 底层驱动软件设计

(1) GPIO驱动设计: 配置各硬件模块对应的IO口为输入或输出模式, 编写IO口初始化、电平设置与状态读取函数, 实现对均衡模块MOS管、高压继电器、指示灯等设备的精准控制, 保障硬件模块正常启停。(2) 采集模块驱动设计: 开发ADC接口驱动, 配置采样精度、采样速率与通道, 实现电芯电压、NTC温度信号的模拟量转换; 编写霍尔电流传感器等外设驱动, 完成数据采集、滤波与传输, 确保采集数据的准确性与实时性, 为后续算法运算提供可靠数据源。(3) 通信模块驱动设计: 基于CAN总线协议, 编写CAN控制器初始化、数据发送与接收函数, 配置波特率与通信协议帧格式, 实现BMS与整车控制器、充电桩之间的双向数据交互, 保障电池状态、充放电指令等信息的稳定传输。

3.3 核心算法设计与实现

(1) SOC估算算法设计: 结合安时积分法与卡尔曼滤波算法, 安时积分法实现SOC初步估算, 卡尔曼滤波算法修正估算误差, 补偿温度、充放电速率对估算结果的影响, 使SOC估算误差控制在5%以内, 保障续航预测准确性。(2) 电池均衡算法设计: 基于单体电芯电压差异触发均衡, 设定合理均衡阈值, 编写均衡判断、触发与停止逻辑, 实时检测各单体电压, 当电压差异超过阈值时, 启动均衡模块, 直至各单体电压趋于一致, 提升电池包整体容量与寿命。(3) 安全保护算法设计: 采用基于阈值判断的多级保护逻辑, 预设过充、过放、过流、过温及绝缘异常的阈值, 实时比对采集数据与预设阈值, 依次实现预警提示、限流调节、紧急断电的分级控制, 避免电池损坏与安全事故^[5]。

3.4 应用层软件设计与调试

(1) 应用层控制逻辑设计: 整合各底层驱动与核心算法, 编写应用层主控制程序, 实现数据采集、算法运

算、硬件控制、通信交互的协同工作，处理整车指令与反馈信息，确保BMS与整车系统高效联动。(2) 软件调试方法：采用仿真调试与硬件联调相结合的方式，先通过Keil仿真调试排查软件语法错误与逻辑漏洞；再连接硬件实物，进行联调测试，模拟整车各类工况，验证软件功能有效性，定位并修复软硬件交互故障。(3) 软件优化方案：优化算法运算逻辑，减少冗余代码，降低MCU资源占用；优化数据采集与传输时序，提升软件运行效率；增加异常处理机制，避免软件死机，进一步提升软件运行的稳定性与可靠性，适配车载复杂工况需求。

4 系统测试与验证

4.1 测试方案设计

(1) 测试目标与测试范围：测试目标是验证BMS硬件、软件及整体系统的性能、可靠性与安全性，确保符合设计要求。测试范围覆盖硬件各模块、软件各功能模块及软硬件协同的整体系统，全面检测各环节运行效果。(2) 测试环境搭建：分别搭建硬件测试平台（连接BMS硬件与测试仪器）、软件仿真平台（利用Keil仿真模拟运行场景）及实车测试环境（将BMS搭载于目标新能源汽车，模拟实际行驶工况）。(3) 测试指标与测试方法：明确各测试项目判定标准，制定标准化测试流程，针对不同测试内容采用对应方法，保障测试规范、数据准确，为系统性能评估提供可靠依据。

4.2 硬件模块测试

(1) 各硬件模块的性能测试：测试采集模块的电压、电流、温度采集精度，验证均衡模块的均衡效果与速度，检测通信模块的CAN总线数据传输稳定性，确保各模块性能达标。(2) 硬件抗干扰测试：模拟车载电磁干扰、电压波动等复杂环境，测试硬件系统的运行稳定性，验证抗干扰措施的有效性，确保硬件在车载环境下正常工作。(3) 硬件故障测试：模拟元器件损坏、接触不良等故障场景，观察安全保护模块的响应速度与动作准确性，验证其能及时触发保护机制，避免系统损坏。

4.3 软件模块与整体系统测试

(1) 软件算法测试：通过仿真与实测，验证SOC估算精度是否控制在允许范围，均衡算法能否有效减小单

体电芯差异，安全保护逻辑是否准确无误。(2) 整体系统联调测试：整合硬件与软件模块，测试两者协同工作效果，验证数据采集、算法运算、指令执行、通信交互等整体功能的完整性与连贯性。(3) 实车测试：将BMS搭载于新能源汽车，模拟起步、加速、制动、充电等实际工况，测试系统在不同场景下的运行性能，验证其适配实际车载需求。

4.4 测试结果分析与优化

(1) 测试数据整理与分析：汇总所有测试数据，对比测试指标与设计目标，分析数据偏差原因，找出硬件、软件及系统层面存在的不足与隐患。(2) 系统优化方案：针对测试中发现的问题，制定针对性优化措施，如调整硬件布线、优化算法参数、完善保护逻辑，提升系统性能与可靠性。(3) 优化后验证测试：对优化后的系统重新进行对应测试，验证优化措施的有效性，确保系统各项性能均达到预设设计要求，保障BMS稳定可靠运行。

结束语

本文完成新能源汽车电池管理系统的全流程设计与测试，从理论基础出发，实现硬件模块选型与调试、软件算法设计与优化，通过多场景测试验证系统性能达标，有效解决电池状态估算、单体均衡等核心问题。本次设计兼顾安全性、可靠性与经济性，仍有优化空间，未来可结合AI技术提升智能化水平，适配新型动力电池，推动BMS技术迭代。

参考文献

- [1]王浩,李娜.新能源汽车电池管理系统关键技术研究[J].汽车工程学报,2024,14(3):21-30.
- [2]张伟,刘芳.基于先进算法的电池管理系统设计与优化[J].电子技术应用,2023,49(10):56-62.
- [3]陈明,赵丽.新能源汽车电池热管理系统的研究进展[J].能源研究与利用,2022,35(5):45-52.
- [4]方明耀.新能源电池管理系统(BMS)优化策略研究[J].南方农机,2025,56(9):135-138.
- [5]陈虎.新能源汽车电池管理系统的优化设计与技术实现[J].时代汽车,2025,(10):95-97.