

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518620

车用动力电池组云边智控与高精度SOC估计*

郝振兴^{1,2} 李伟^{1,2} 杨瑞^{1,2} 徐要伟^{1,2} 郝用兴^{2,3}(1. 郑州科技学院机械工程学院 郑州 450064; 2. 郑州市智能装备工业设计中心 郑州 450064;
3. 华北水利水电大学材料学院 郑州 450045)

摘要: 为提高车用动力电池组监控系统的实时性、状态估计精度及智能化程度,提出一种基于云边协同的车用动力电池组监控系统架构,通过深度融合边缘计算实时响应与云端大数据分析能力,构建多层次协同监控体系。系统采用STM32系列芯片搭建高精度硬件架构,集成数据采集、均衡控制、绝缘检测及5G联网定位等模块;创新性提出动态补偿型开路电压-安时积分算法,融合温度、循环次数等多参数修正机制,实现SOC估计误差 $\leq \pm 1.2\%$ 。实验表明:系统电压、电流采集的动态精度分别为 $\pm 0.11\%$ 和 $\pm 0.4\%$,均衡后电芯电压方差降低99.1%,关键指标优于国标要求。研究成果为车用电池安全管控提供了高精度、低时延、可扩展的云边协同解决方案,具备一定的工程应用价值。

关键词: 云边协同;动力电池组;监控系统;均衡控制;SOC估计

中图分类号: TN98; TP273 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Cloud-edge intelligent control and high-precision SOC estimation for vehicle power battery pack

Hao Zhenxing^{1,2} Li Wei^{1,2} Yang Rui^{1,2} Xu Yaowei^{1,2} Hao Yongxing^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China; 2. Zhengzhou Industrial Design Center of Intelligent Equipment, Zhengzhou 450064, China; 3. School of Materials Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to improve the real-time performance, state estimation accuracy and intelligence degree of vehicle power battery pack monitoring system, a monitoring system architecture of vehicle power battery pack based on cloud-edge collaboration is proposed. By deeply integrating edge computing real-time response with cloud big data analysis capabilities, a multi-level collaborative monitoring system is built. The system utilizes STM32 series chips to build a high-precision hardware architecture, integrating data acquisition, equalization control, insulation detection, and 5G networking location modules. An innovative dynamic compensation open circuit voltage-ampere hour integration algorithm is proposed, incorporating multi-parameter correction mechanisms including temperature and cycle count, achieving SOC estimation error $\leq \pm 1.2\%$. The experimental results demonstrate that the system achieves dynamic accuracies of $\pm 0.11\%$ for voltage acquisition and $\pm 0.4\%$ for current acquisition, with cell voltage variance reduced by 99.1% after equalization. The key indicators are superior to the national standard requirements. This research provides a cloud-edge collaborative solution with high-precision, low latency, and scalability for vehicle batteries safety management. The system has certain engineering application value.

Keywords: cloud-edge collaboration; power battery pack; monitoring system; equalization control; SOC estimation

0 引言

随着全球能源正朝着低碳化、低污染方向发展的时代背景下,全球许多国家对新能源汽车给予了大力支持,而动

力电池组作为目前电能存储的核心,已被广泛应用于新能源汽车、储能电站、航空航天等领域^[1-3]。但动力电池组在工作时会因过充过放、单体间的不一致、温度过高等原因发生火灾、爆炸等安全事故,从而给人们的生命财产安全带来

收稿日期:2025-04-17

* 基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)计划(242102240005)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2023GGJ186)、河南省高等学校重点科研项目计划(25B460017, 23B480003)资助

一定的隐患,因此对动力电池组的安全管控具有十分重要的意义^[4-5]。动力电池组监控系统在电池工作时发挥着举足轻重的作用,用于对电池进行参数信息实时采集、状态估计、均衡控制以及故障预警等,从而延长电池的使用寿命和减少安全事故的发生^[6-7]。

近年来,随着储能系统智能化的快速发展,已有学者对动力电池的管理监控开展了较为深入地研究。Wang 等^[8]提出了一种基于云平台的电池组监控系统设计方法,通过从控模块完成了对电池组各信息参数的采集、荷电状态(state of charge, SOC)估计和安全保护,并经主控模块使用窄带物联网技术将电池组信息上传至云平台中,通过云平台便能完成对电池组的远程监控,最后通过实验验证了其设计的可行性。但未对 SOC 估计进行效果测试,且窄带物联网存在数据传输速率低、延迟较高等问题,影响系统的实时性。Juraj 等^[9]提出了一种基于 MATLAB/Simulink 的锂电池单体数字孪生模型构建方法,通过获取电池的电流信息便可估算出电池单体的 SOC、健康状态和电压。然而该模型并不适用于对电池组信息参数的估算,仅适用于对特定型号单体电池的估算,且模型的计算效率是否满足电池监控系统实时性的要求还需进一步讨论验证。Tang 等^[10]针对电池管理系统存在存储计算能力有限、数据共享困难等问题,设计开发了一种基于数字孪生的动力电池组管理系统,实现了由物理实体到孪生体的单向映射,并提出了一种分层插值滤波与粒子滤波相结合的混合滤波算法实现 SOC 的在线估计。但该系统可扩展性差,只能实现对多达 16 串单体电池的监测,管理系统硬件模块中的程序还不支持修改,且 SOC 估计最大误差接近 2%。Li 等^[11]提出了一种电池云管理系统的设计方案,通过采用树莓派物联网无线通信模块将电池的参数信息上传给云端,在云端便能在线完成对电池的管理监控,并提出了一种自适应扩展 H 无穷滤波算法实现对 SOC 的估计。但是存在算法模型相对较为复杂,会增加云端的负担和影响实时性,而且 SOC 估计的最大误差为 3%。文献[12]提出了一种基于 FreeRTOS 的电池管理系统设计方案,最终实现了对 6 串铁镍电池组的均衡控制与监测,但在扩展性设计、智能化程度提高等方面还需加强,且仿真表明 SOC 估计精度可达 2.7%。文献[13]提出并设计了一种基于 4 G 通信技术的拖拉机用动力电池监测系统,经验证其能够实现对电池状态关键参数的实时监测,但验证不够充分,未对电压、电流、温度及 SOC 估计的测量估计误差进行测试验证。从国内外学者对动力电池监控系统的研究可知,现有的动力电池监控系统多采用本地集中式架构设计、智能化程度有待加强,受限于嵌入式设备的存储资源与计算能力,难以实现全生命周期数据分析、多维度故障预警及高精度状态估计,尤其在面对电池集群监控时存在可扩展性差、实时性不足等挑战。

当前,通过云计算赋能为动力电池的智能化监控提供

了一种技术路径。但是单一的云端监控完全依赖于网络,而且在数据传输方面容易延迟,在电池安全监控方面存在实时性不佳的弊端。与此同时,通过终端模块将部分计算任务在边缘侧进行计算,可以使系统的响应时间明显缩短,但对于算法模型较为复杂时存在边缘节点算力难以支撑的情形。在此背景下,通过云边协同的方法实现云端分析和边缘侧的实时响应的深度结合,为动力电池组的监控系统设计提供了一种思路。

因此,本文提出了一种基于云边协同的车用动力电池组监控系统设计方案。系统通过边缘节点获取感知信息,并在本地实现对电池的监控与故障诊断,同时也能通过云端完成对电池的远程监控与协同优化。实验结果表明,该系统在保证实时性的同时,可将电池 SOC 估计误差降低至 $\pm 1.2\%$ 以内,且工程实用效果佳、可扩展性强。

1 动力电池组监控系统架构

本文设计的动力电池组监控系统架构如图 1 所示,整个系统架构由感知层、传输层、应用层三部分组成。感知层中的从控单元作为系统的耳朵和眼睛,能够对动力电池组的状态参数进行实时采集,单个从控单元能够完成多达 48 串单体电池的监测并带有均衡功能,可在各串联单体电池电压压差较大的情况下启动均衡,使各单体电池的剩余容量接近一致。传输层作为应用层与感知层的中间桥梁,能够完成应用层与感知层之间的数据交换。应用层主要通过云平台对动力电池组进行远程监控、数据备份、数据分析、信息融合等。

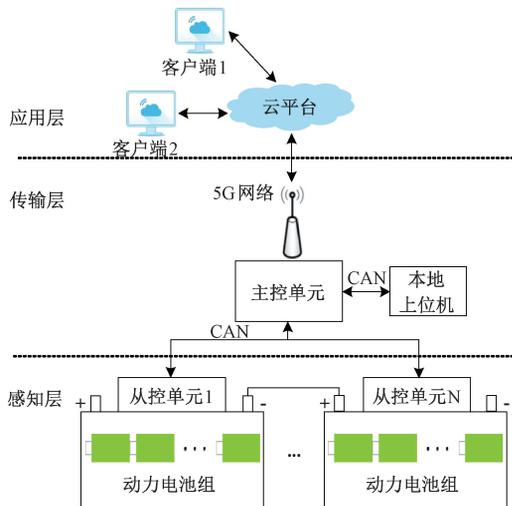


图 1 动力电池组监控系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of power battery pack monitoring system

在基于云边协同的车用动力电池组监控系统架构中,各从控单元通过控制区域网络(controller area network, CAN)总线通信将采集到的信息数据上传给主控单元,主控单元通过 CAN 总线能够实现扩展与多达 15 个从控单元

的连接,从而可以组成一款高效的高压动力电池监控系统。主控单元根据安全监测预警与实时处理的需要,采用边缘计算,并通过CAN总线与本地上位机进行通信,从而实现动力电池组的本地监控。同时,信息数据通过5G网络上传给云平台,当本出现无人值守时,便可通过云平台查询动力电池组的运行状态,进而实现对动力电池组的远程定位与监控。

2 系统关键技术及实现

本设计提出了一种基于云边协同的车用动力电池组监控系统,系统主要由上位机单元、主控单元和从控单元组成,其结构框图如图2所示。上位机单元主要由本地管理上位机和云平台组成。主控单元主要由MCU(microcontroller unit, MCU)、采集模块、充放电控制模块、掉电存储模块、物联网定位模块、绝缘检测模块等组成。

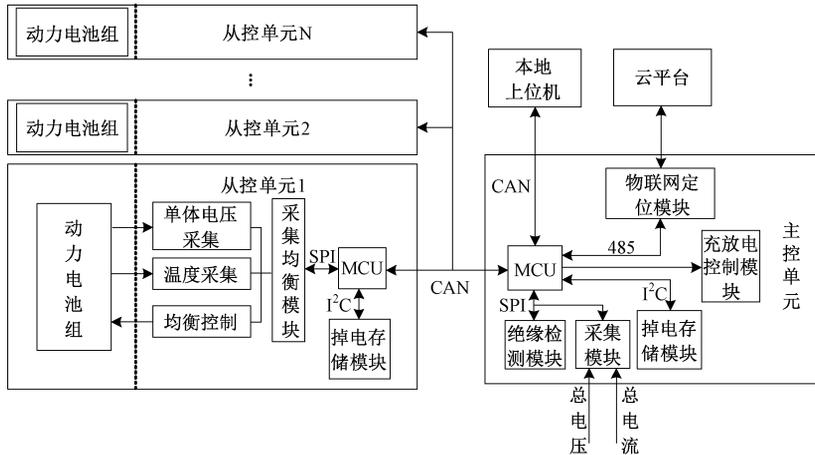


图2 动力电池组监控系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of power battery pack monitoring system

2) 采集模块

采集模块用于对动力电池组的总电压和总电流进行实时采集,采集模块以CS5463芯片为核心,芯片内集成有24位的A/D转换器,该芯片支持一路电压采集和一路电流采集,采集模块将采集的数据通过SPI通信的方式上传给主控MCU。采集模块的总电压总电流采集电路如图3所示。

3) 绝缘检测模块

动力电池的绝缘性能是其安全工作的重要指标之一。一旦出现动力电池的绝缘性能不符合要求,就会产生漏电现象,进而就会存在引发安全风险。因此,对动力电池的绝缘状况进行检测意义重大。本设计中动力电池绝缘检测采用AD7705芯片,AD7705是一款位数为16位,2通道的模数转换器芯片。主控MCU以隔离式SPI通信的方式读取AD7705采集的电池绝缘信息数据,进而计算出其绝缘阻值,绝缘检测的模数转换采集电路如图4所示。

4) 物联网定位模块

系统为了实现对动力电池组的智慧联网与定位,以便

从控单元主要由采集均衡模块、MCU、掉电存储模块等组成。

2.1 主控单元设计

1) 主控MCU

本文主控MCU采用STM32F407VET6芯片为主控核心,该芯片内核为具备高速运算处理能力的ARM Cortex-M4内核^[14],是一款工作频率高达168MHz的32位高性能芯片。STM32F407VET6具有2路CAN通信^[14],3路四线制串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)通信,3路相互集成电路(inter-integrated circuit, I²C)通信,6路串口通信。同时,其还支持待机、睡眠和停止3种低功耗模式。主控MCU作为整个动力电池组监控系统的大脑,其在信息数据传输和接收中发挥着重要作用,能够与一个或多个从控单元进行通信,接收从控单元上传的数据,并与上位机平台进行实时通信。

对动力电池组进行有效安全管理和主动安全防护。设计了以STM32F103C8T6单片机为核心的物联网定位模块,STM32F103C8T6单片机作为一款ARM Cortex-M3内核的32位微控制器,具有丰富的外设,在许多领域应用十分广泛,其通过RS485接口与主控MCU实时通信进行数据的交换。其中,智慧联网功能采用移远通信公司的5G模组RG500U-CN加以实现,该模组同时向下兼容4G和3G网络,其内部集成了丰富的网络通信协议,支持通用异步收发传输器(universal asynchronous receiver/transmitter, UART)、SPI、I²C等多种通信方式,能够满足智慧储能、工业互联网、车联网等行业领域的应用需求。定位功能采用L76K定位模组实现,L76K是一款支持多卫星导航定位的专用定位模组,其支持全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)、格洛纳斯卫星导航系统和准天顶卫星导航系统,同时支持辅助全球导航卫星系统(assisted global navigation satellite system, AGNSS)功能,

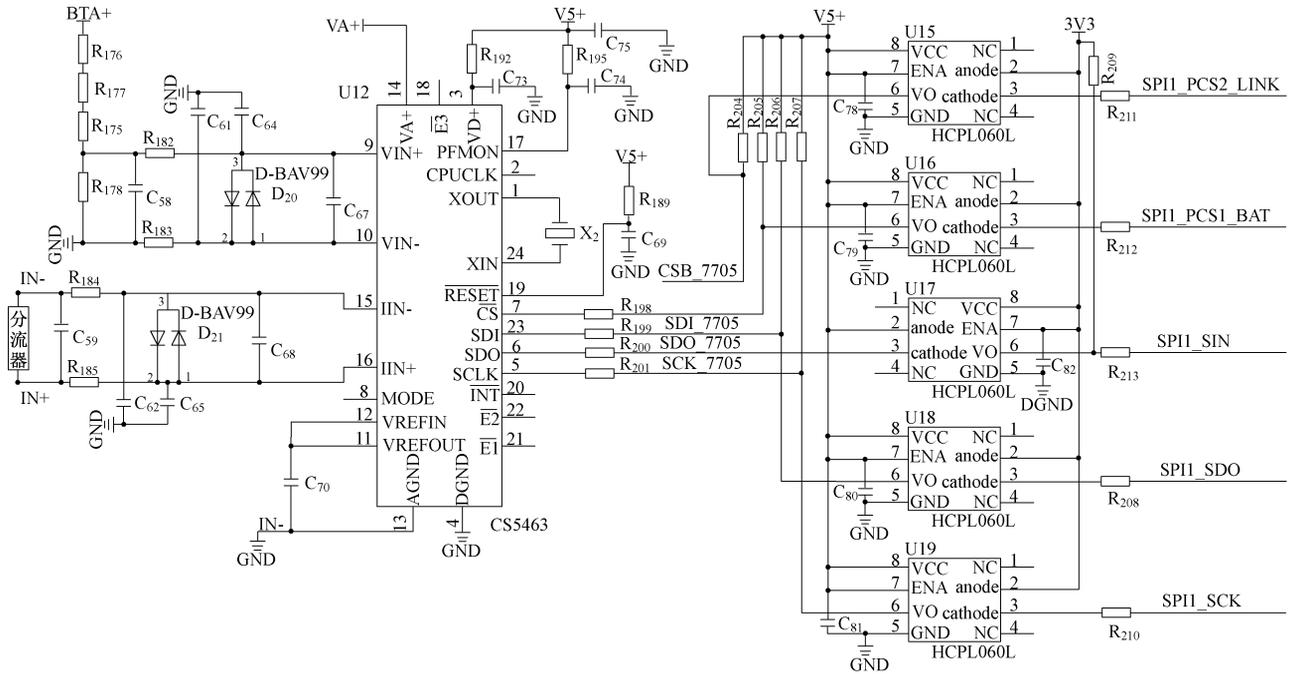


图 3 总电压总电流采集电路图

Fig. 3 Total voltage and current acquisition circuit diagram

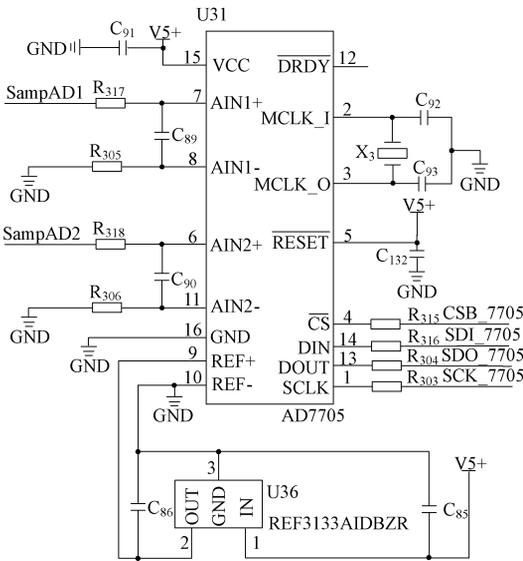


图 4 绝缘检测的模数转换采集电路图

Fig. 4 Analog to digital conversion acquisition circuit diagram for insulation detection

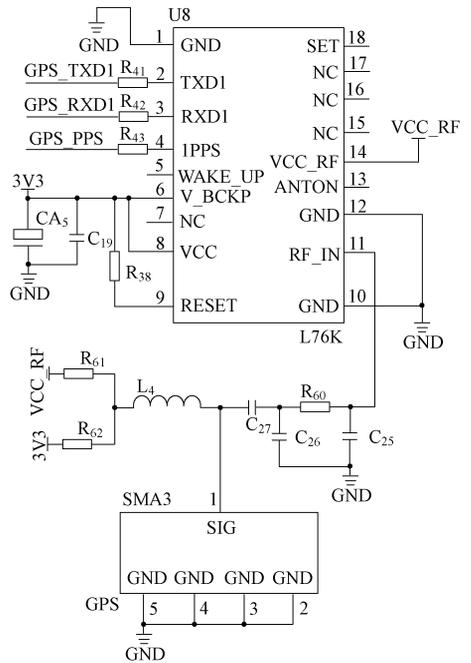


图 5 L76K 导航定位电路

Fig. 5 L76K navigation and positioning circuit

并通过 UART 串口与 STM32F103C8T6 单片机建立通信连接,其内置低噪声放大器,能够完成高精度、高灵敏度定位以及对定位信号的快速跟踪与捕获。L76K 导航定位电路如图 5 所示。

2.2 从控单元设计

本文设计的从控单元的 MCU 与物联网定位模块的主控核心一样,同样也采用 STM32F103C8T6 单片机。采集

均衡模块采用车规级电池管理芯片 LTC6811 为核心进行设计,单个 LTC6811 芯片支持多达 12 节串联电池单体电压的采集和均衡控制,16 位的 A/D 转换器保证了电压采集的精确性,5 路通用的 I/O 口支持温度传感器信号的采集输入,而且其带有隔离式 SPI 接口等功能。本文中的每

个从控单元通过隔离式 SPI 接口,采用菊花链方式相互连接 4 片 LTC6811,从控 MCU 通过四线隔离式 SPI 的方式读取控制 4 片菊花链式连接的 LTC6811,从而使每个从控单元能够实现多达 48 串动力电池单体的监管。

为降低动力电池之间的不一致性,提高动力电池在使用过程中的安全性和可靠性,需对动力电池进行均衡控制。本文通过 LTC6811 芯片采用开关电阻耗能的被动均衡方式对动力电池进行均衡控制,该均衡方式具有稳定性高、应用广泛和结构简单等优点^[15-16]。

单个 LTC6811 芯片含有 12 个专门用于控制电池均衡的引脚接口,各单体电池两端连接有 MOS 管和均衡用电阻,均衡接口通过输出控制信号控制 MOS 管的通断,从而实现动力电池的均衡控制。

此外,所设计的从控单元还具备 12 路温度检测、1 路 CAN 通信、1 路 RS485 通信和 2 路继电器控制等功能,方便系统后续的优化升级,所设计的从控单元实物如图 6 所示。

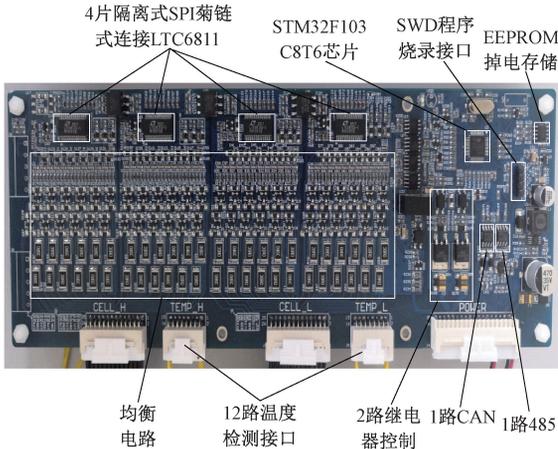


图 6 从控单元实物
Fig. 6 Physical object of slave control unit

2.3 SOC 估计算法设计

准确的对动力电池进行 SOC 估计不仅能够为电动自行车、电动汽车等电动装备的稳定运行提供保障,而且也有助于使用者合理规划行程路线,避免电量不足的现象发生,同时对提高动力电池的使用寿命和安全也有着深远的意义。目前动力电池的 SOC 估计算法主要有安时积分法、开路电压法、卡尔曼滤波法、神经网络法等^[17-18]。基于安时积分法的 SOC 估计是实际应用中最为广泛的,但存在一定程度的累计误差,估计精度还不够高^[19-20]。开路电压法不适用于对动力电池 SOC 的动态估计。基于神经网络的 SOC 估计对硬件要求较高及对训练数据样本依赖性强^[21]。卡尔曼滤波法对动力电池模型依赖性强,且运算较为复杂。综合考虑到 SOC 估计的复杂性和实际产业化应用效果后,本文设计出一种动态补偿型开路电压-安时积分法对动力电池的 SOC 进行估计。

本文所提出的动态补偿型开路电压-安时积分法实现动力电池 SOC 估计的基本原理为:首先采取开路电压法和上次断电时的 SOC 来计算 SOC 的初值 $SOC(t_0)$,其次再通过安时积分法联合估计出 SOC 的动态变化,同时再将充放电效率、充放电倍率、温度、循环次数、自放电率对 SOC 估计的影响考虑进去,从而来提高 SOC 的估计精度,式(1)为本文所提出的 SOC 估计的计算公式。所提出的 SOC 估计算法流程如图 7 所示。

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t \eta i(t) dt}{\alpha_i \alpha_t \alpha_h Q_c} - k(t - t_0) \quad (1)$$

式中: α_i 、 α_t 、 α_h 分别为充放电倍率、温度和循环次数对动力电池容量的修正系数; Q_c 为动力电池的额定容量; η 为库伦效率; k 为自放电率修正系数; α_i 、 α_t 、 α_h 、 η 、 k 通过对动力电池组进行相应的测试实验得到; $i(t)$ 代表电流; $SOC(t_0)$ 为 SOC 估计的初始值,其由开路电压、温度查表获得的 SOC_{OCV} 与上次离线保存的 SOC_{last} 二者联合计算得到。

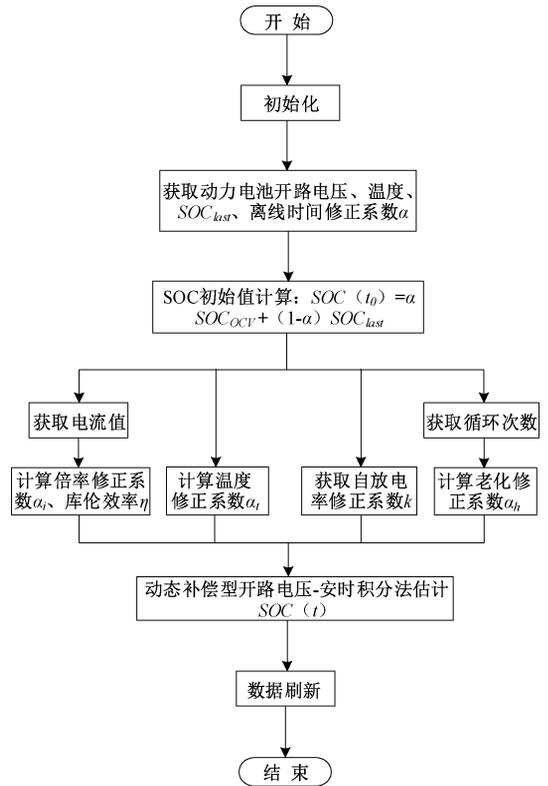


图 7 SOC 估计算法流程
Fig. 7 SOC estimation algorithm flow

2.4 软件设计

1) 下位机程序设计

动力电池组下位机程序基于 Keil μ Vision5 开发环境下的 C 语言编写实现,主要包括主控单元软件程序设计和从控单元软件程序设计两部分。主控单元主要完成数据采集与处理、SOC 估计、故障诊断、本地上位机 CAN 通信、从控

单元 CAN 通信、物联网定位模块通信及与云平台进行数据传输等任务,主控单元程序流程如图 8 所示;从控单元主要完成数据采集与处理、均衡控制及与主控单元进行 CAN 通信数据传输等任务,从控单元程序流程如图 9 所示。

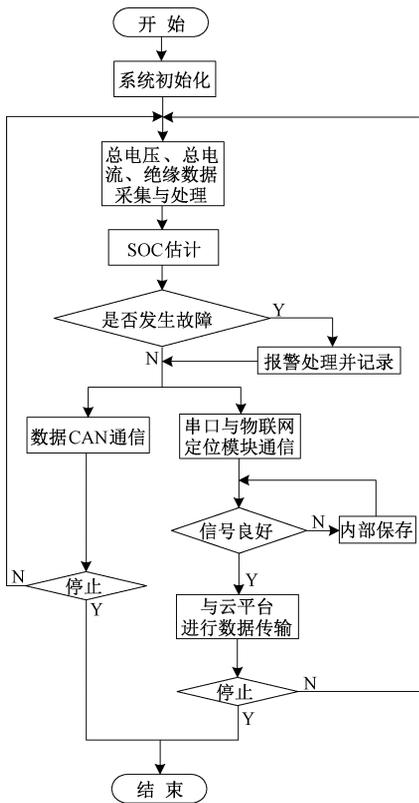


图 8 主控单元程序流程图

Fig. 8 Main control unit program flow chart

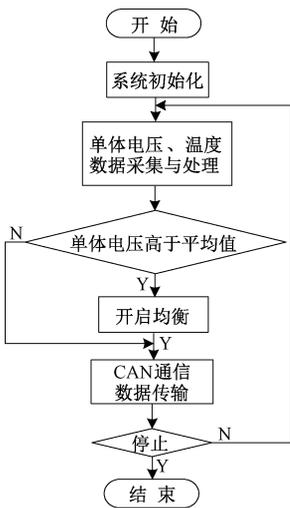


图 9 从控单元程序流程图

Fig. 9 Slave control unit program flow chart

2) 本地上位机软件设计

为了便于在本地实现对动力电池组的监控,设计了基

于 LabVIEW 的本地上位机动力电池组监控软件,本地上位机与主控单元之间通过通用串行总线 (universal serial bus, USB) 转 CAN 通信总线分析仪相互连接,分析仪的一端通过 USB 数据线和本地上位机连接,另一端通过导线与主控单元的 CAN_H 和 CAN_L 通信接口连接。连接好后,通过基于 LabVIEW 开发的上位机软件即可实现对动力电池组的监控,软件能够实现对动力电池组基础参数信息的采集、SOC 估计、故障诊断显示等功能,本地上位机监控交互界面如图 10 所示。

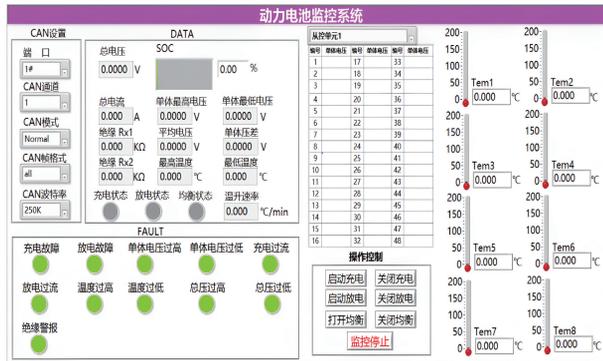


图 10 本地上位机监控交互界面

Fig. 10 Local host computer monitoring and interaction interface

3) 远程监控云平台

本文的远程监控云平台采用 OneNET 进行设计,OneNET 云平台支持 MQTT、Modbus、HTTP 等多种通信协议,可以满足物联网设备通信协议适配、大数据分析、数据存储等任务需求。物联网定位模块将动力电池组相关数据信息发送至 OneNET 云平台,云平台能够主动创建与之对应的数据流,通过云平台增值服务中的数据可视化 View 调用数据流的应用程序接口,从而最终将电压、电流、温度等数据信息在云平台中可视化显示。用户通过在云平台中操作监控人机界面即可实现对动力电池组的远程监控,可视化云平台监控界面如图 11 所示,通过操作该监控界面能够实现对动力电池的 SOC 估计、均衡控制、定位跟踪及参数监测等。

3 系统功能验证与测试

为了验证与测试所设计的动力电池组监控系统是否满足要求,需搭建测试验证平台对其进行检验。图 12 所示为所搭建的测试验证平台实物,其主要包括一个主控单元、两个从控单元、48 节 21700 锂电池单体串联构成的动力电池组、程控电源、可编程直流电子负载及上位机等组成。通过平台对动力电池组进行充放电测试来验证所设计的监控系统是否满足要求。

3.1 系统功能验证

测试验证平台搭建好后,通过启动本地上位机监控软件和云平台分别对动力电池组进行可视化监控,以验证展

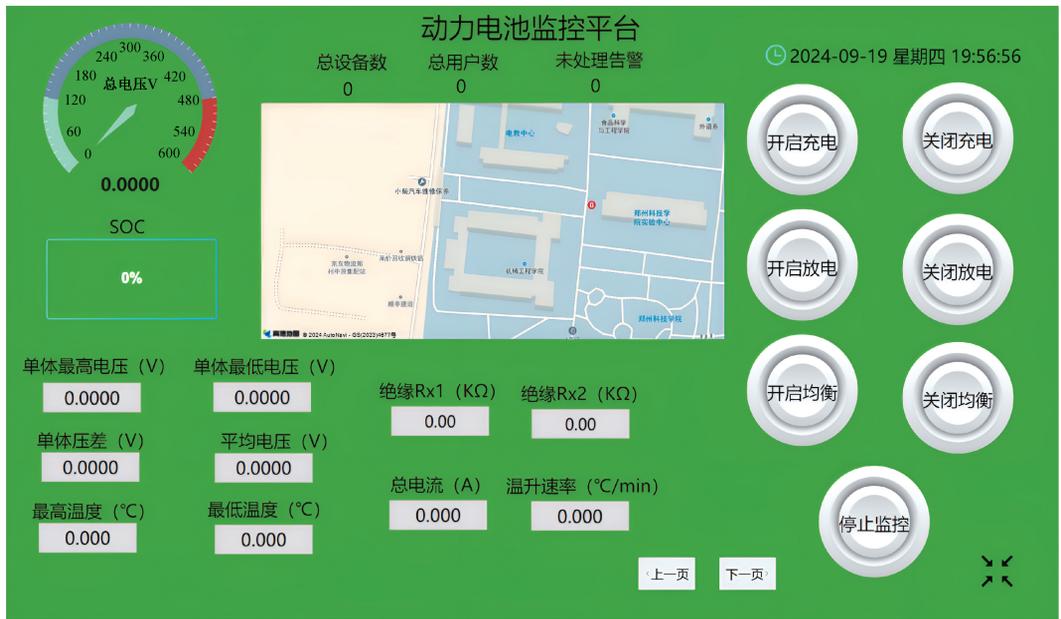


图 11 云平台监控界面

Fig. 11 Cloud platform monitoring interface

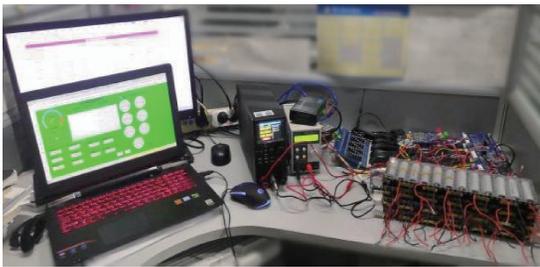


图 12 测试验证平台实物

Fig. 12 Physical test and verification platform

现其功能是否正常。通过本地上位机和云平台监控界面显示表明,系统各项功能正常,均能实现对动力电池组的本地监控和云平台远程监控。

3.2 系统功能测试

1) 数据采集功能测试

(1) 电压采集测试

在对动力电池组进行放电时,通过采用高精度数据采集板卡和系统同时对动力电池组的单体动态电压进行实时采集。将高精度数据采集板卡采集的单体电压作为参考真值,并与系统采集的同一电池单体的电压进行对比分析,电压对比曲线如图 13 所示。经 MATLAB 软件对电压对比曲线分析计算可得,电压采集的动态误差为 $\pm 0.11\%$,电压采集精度能够满足要求。

(2) 电流采集测试

在对动力电池组进行 1 A 的恒定电流充电时,系统采集的电流值与程控直流稳压电源输出的电流值进行对比,电流采集测试对比结果如图 14 所示。经分析计算可得,电流采集精度为 $\pm 0.4\%$ 。

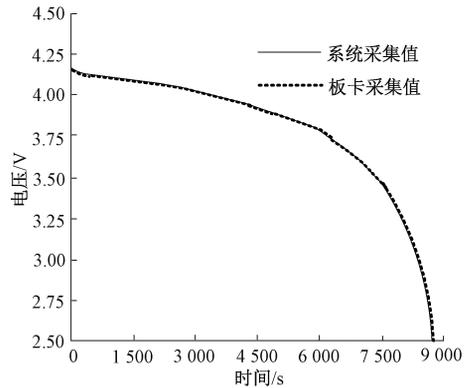


图 13 电压对比曲线

Fig. 13 Voltage comparison curve

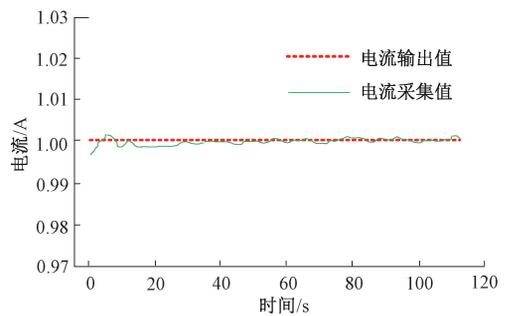


图 14 电流采集测试

Fig. 14 Current acquisition test

(3) 温度采集测试

温度采集测试主要为了验证系统的温度采集功能是否正常,以监测确保电池保持在允许的工作温度范围内。

温度采集测试通过在室温为 $26\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中以 0.4 C 的放电倍率下进行测试,动力电池组的各检测点的温度监测结果如图 15 所示。由图 15 可知,温度采集结果能正常反映动力电池组在放电状态时的温度变化情况。

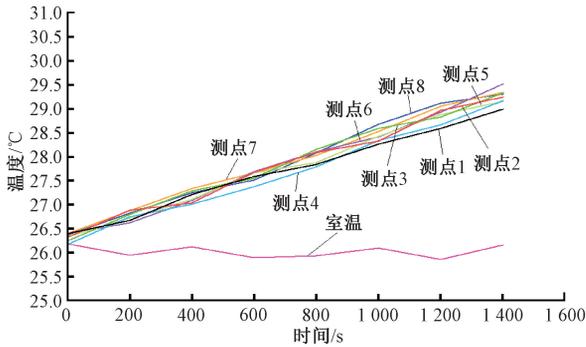


图 15 温度监测结果

Fig. 15 Temperature monitoring results

2) 均衡效果测试

测试均衡效果前,通过充电使电池单体的电压存在一定程度的不一致,然后对动力电池组进行恒流充电,经过一定时间的均衡后,记录各单体电芯均衡前后的电压,均衡前后电芯电压对比如表 1 所示。由表 1 可知,经过均衡后,各电芯电压的差异显著减少,电芯电压的方差由 $2\ 445.67\text{ mV}^2$ 减少为 21.12 mV^2 ,表明设计的系统能够实现动力电池组的均衡,且具有较好的均衡效果。

3) SOC 估计效果测试

为了检验本文所提出的动态补偿型开路电压-安时积分法实现 SOC 估计的效果。在室温为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,将动力电池组充满电后,然后以 0.25 C 的倍率对其进行恒流放电。在放电时系统根据采集到的电压、电流、温度等数据能够实时在线估算出动力电池组的 SOC。并将获取的电池相关信息导入到 MATLAB/Simulink 的仿真模型中进行仿真验证,SOC 仿真与实验的对比结果如图 16 所示。

表 1 均衡前后电芯电压对比

Table 1 Comparison of cell voltages before and after balancing

单体序号	均衡前 /mV	均衡后 /mV									
1	3 582.3	4 201.3	13	3 642.7	4 213.8	25	3 702.9	4 209.3	37	3 584.7	4 205.1
2	3 601.7	4 202.7	14	3 661.3	4 214.2	26	3 721.5	4 210.6	38	3 603.5	4 206.7
3	3 620.5	4 203.5	15	3 680.8	4 215.9	27	3 739.8	4 211.2	39	3 622.1	4 207.8
4	3 639.8	4 204.8	16	3 699.5	4 200.7	28	3 581.9	4 212.8	40	3 641.6	4 208.3
5	3 658.2	4 205.2	17	3 718.4	4 201.9	29	3 600.2	4 213.1	41	3 660.4	4 209.7
6	3 677.6	4 206.9	18	3 737.2	4 202.4	30	3 619.7	4 214.7	42	3 679.2	4 210.9
7	3 696.4	4 207.1	19	3 588.4	4 203.7	31	3 638.4	4 215.4	43	3 698.7	4 211.5
8	3 715.9	4 208.4	20	3 607.1	4 204.1	32	3 657.1	4 200.4	44	3 717.3	4 212.3
9	3 734.1	4 209.6	21	3 626.8	4 205.8	33	3 676.3	4 201.8	45	3 736.5	4 213.6
10	3 585.6	4 210.3	22	3 645.3	4 206.2	34	3 695.8	4 202.1	46	3 587.2	4 214.8
11	3 604.9	4 211.7	23	3 664.7	4 207.5	35	3 714.6	4 203.9	47	3 606.8	4 215.2
12	3 623.2	4 212.5	24	3 683.6	4 208.9	36	3 733.9	4 204.5	48	3 625.4	4 200.9

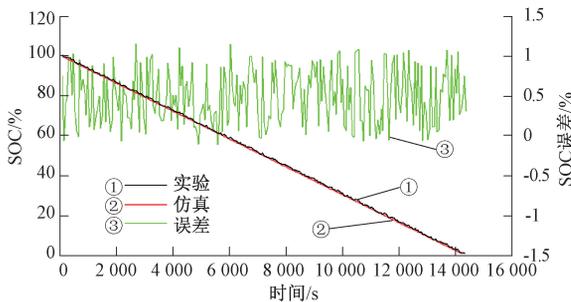


图 16 SOC 对比结果

Fig. 16 SOC comparison results

由图 16 能够看出,本文采用的动态补偿型开路电压-安时积分法实现 SOC 估计的实验结果十分接近仿真结果,

实验和仿真之间的误差总体保持在 $\pm 1.2\%$ 之内,最大误差为 1.16% ,其误差符合 GB/T 38661—2020 标准^[22]规定的 SOC 估计误差不大于 5% 的要求。可见本文所提出的 SOC 估计算法,能够完成对动力电池组 SOC 的实时准确估计,该算法实用可靠精度高。

4 结 论

本文设计了一种基于云边协同的车用动力电池组监控系统,通过感知层、传输层和应用层之间的协同工作,实现了对动力电池组的实时监控与远程管理,得出如下结论:系统采用 CAN 总线通信技术和 5 G 网络通信技术实现数据交换,通过 OneNET 云平台实现远程监控、数据备份和分析等,并提出了一种动态补偿型开路电压-安时积分

法进行SOC估计,提高了估计精度,为电池组的云端监控提供了一种思路和方法;测试结果表明,系统在电压、电流和温度采集方面表现出色,电压采集动态误差仅为±0.11%,电流采集精度达到±0.4%,温度采集结果准确反映了电池组的温度变化。均衡效果显著,SOC估计误差控制在±1.2%以内,符合国家标准要求;该监控系统具有精度高、实时性强和良好的可扩展性,能够有效满足动力电池组的安全监控需求,具备广泛的应用前景。

此外,本文未对电池健康状态进行研究,在未来的工作中将对电池健康状态开展研究,并融入人工智能技术和数字孪生技术来进一步提高系统的智能化水平。

参考文献

- [1] HAN SH CH, HU B, ZHENG ZH Y, et al. Research on electrolyte structure and interface design for solid state Lithium-Sulfur batteries; Challenges, strategies and prospects [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 636: 236575.
- [2] WANG B, YIN Y W, DENG H Y, et al. Migration, transformation, and management of fluorine-containing substances in lithium-ion batteries during recycling-A review [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 358: 130283.
- [3] 李博文,杨续来,葛肖尽,等. 锂离子电池极片表面缺陷检测方法研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(1): 125-146.
LI B W, YANG X L, GE X J, et al. Research progress on defect detection methods for electrode surface of lithium-ion battery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(1): 125-146.
- [4] WENG Y Q, ABABEI C. AI-assisted reconfiguration of battery packs for cell balancing to extend driving runtime [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110853.
- [5] 彭自然,王顺豪,肖仲平,等. 一种精确估算电动汽车动力电池SOC&SOH的循环门控模型[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(9): 11-23.
PENG Z R, WANG SH H, XIAO SH P, et al. Cycle gating model for accurate estimation of SOC&SOH of power battery in electric vehicles [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(9): 11-23.
- [6] CHEN P CH, LIU SH CH, CHAOUI H, et al. Asynchronous deep reinforcement learning with gradient sharing for state of charge balancing of multiple batteries in cyber-physical electric vehicles [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2024, 361(6): 106717.
- [7] 杨世春,周思达,周新岸,等. 动力电池云端管理关键技术研究综述 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(10): 134-151.
- [8] WANG L J, WANG CH G, LU X, et al. A design for a lithium-ion battery pack monitoring system based on NB-IoT-ZigBee [J]. *Electronics*, 2023, 12(17): 1-17.
- [9] JURAJ B, MILAN L, MAREK P, et al. Improved digital twin of li-ion battery based on generic MATLAB model [J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1194.
- [10] TANG H, WU Y CH, CAI Y F, et al. Design of power lithium battery management system based on digital twin [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 47: 103679.
- [11] LI W H, RENTEMEISTER M, BADEDA J, et al. Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101557.
- [12] 何玉聪,张信义. 基于FreeRTOS的铁镍电池管理系统的设计与开发 [J]. *现代电子技术*, 2023, 46(13): 153-157.
HE Y C, ZHANG X Y. Design and development of NiFe battery management system based on FreeRTOS [J]. *Modern Electronics Technique*, 2023, 46(13): 153-157.
- [13] 沈凤梅,陈凡,方镛城,等. 电动拖拉机电池数据监测系统的设计 [J]. *农机化研究*, 2024, 46(11): 239-244.
SHEN F M, CHEN F, FANG R CH, et al. Design of battery data monitoring system for electric tractors [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(11): 239-244.
- [14] 李丹丹. 多波位测量通用波控分机研究与应用 [J]. *电子测量技术*, 2024, 47(17): 89-96.
LI D D. Research and application of universal wave control machine for multi-beam measurement [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(17): 89-96.
- [15] BATOOL D, MAJEED F, KIM J. Advancing battery energy storage system: State-of-health aware state-of-charge balancing in multilevel inverters for electric transportation [J]. *Energy Storage*, 2024, 6(2): 1-17.
- [16] WANG Y Q, HU X W, DENG X L, et al. Design and experiment of a low-temperature charging preheating system for power battery packs with an integrated dissipative balancing function [J]. *Journal of*

- Power Sources, 2023, 588: 1-12.
- [17] ANINAKWA P T, WANG SH L, LIU G CH, et al. An enhanced lithium-ion battery state-of-charge estimation method using long short-term memory with an adaptive state update filter incorporating battery parameters[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 132: 107946.
- [18] BAO X Y, CHEN L P, LOPES A M, et al. Joint estimation of state-of-charge and state-of-energy of lithium-ion batteries at different ambient temperatures based on domain adaptation and unscented Kalman filter[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 231: 110284.
- [19] 郝振兴,段朋,赵豪杰,等. 车用超级电容器模组智能监控系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11): 113-120.
- HAO ZH X, DUAN P, ZHAO H J, et al. Design and implementation of intelligent monitoring system for vehicle supercapacitor module [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(11): 113-120.
- [20] 柳博,吴松荣,付聪,等. 基于改进白鲸算法优化 BiTCN-BiGRU 的锂电池 SOC 估计[J]. 电子测量技术, 2025, 48(9): 75-83.
- LIU B, WU S R, FU C, et al. SOC estimation of lithium batteries based on BiTCN-BiGRU optimized by improved beluga whale algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(9): 75-83.
- [21] 杨宇飞,王高杰,郑艳萍. 双自适应 CKF 锂电池荷电状态估计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15): 53-63.
- YANG Y F, WANG G J, ZHENG Y P. Estimation of state of charge of lithium battery dual adaptive CKF[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15): 53-63.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车用电池管理系统技术条件: GB/T 38661—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- China National Standardization Administration. Technical specifications for battery management system for electric vehicles: GB/T 38661—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

作者简介

郝振兴(通信作者), 硕士, 副教授, 主要研究方向为储能管理系统、电液比例控制技术。

E-mail: 379288173@qq.com

李伟, 硕士, 教授, 主要研究方向为电池包结构设计与分析。

E-mail: 249584256@qq.com

杨瑞, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电池管理系统设计、新型磁性材料。

E-mail: 877971104@qq.com

徐要伟, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能检测与控制。

E-mail: 327892893@qq.com

郝用兴, 博士, 教授, 主要研究方向为电化学能源材料、数字化设计。

E-mail: haoyongxing@ncwu.edu.cn