

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106703

电池管理系统研究与设计*

王彪¹ 李永红¹ 岳凤英²

(1. 中北大学 仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中北大学 电气与控制工程学院 太原 030051)

摘要: 随着新能源车辆的普及,针对市场对电池管理系统越来越多的要求,设计了应用于纯电动车辆上的BMS。系统兼顾成本和功能,以STM32单片机为主控制芯片,使用模拟前端芯片,实时检测单体和总体电压。热敏电阻搭配多路复用器实现对单点温度采集。霍尔元件可非接触式收集电流信息。均衡电路依据系统采集回来的信息自动均衡各电池之间的容量差异。此外系统还具有绝缘检测和通信功能。使用扩展卡尔曼滤波算法对系统SOC进行估计。研究实验表明,系统对电压、电流和温度检测以及SOC参数估计均具有较高的精度和可靠性,提高了电池安全性和使用效率。该系统功能完善可靠,具有一定的实际工程意义。

关键词: 电池管理系统;卡尔曼滤波;SOC;BMS;单片机

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

Research and design of battery management system

Wang Biao¹ Li Yonghong¹ Yue Fengying²

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the popularization of new energy vehicles, in response to the market's increasing requirements for battery management systems, BMS applied to pure electric vehicles has been designed. The system takes both cost and function into consideration, with STM32 single-chip microcomputer as the main control chip, using analog front-end chip, real-time detection of monomer and overall voltage. The thermistor is matched with a multiplexer to realize single point temperature collection. The Hall element can collect current information in a non-contact manner. The equalizing circuit automatically equalizes the capacity difference between the batteries according to the information collected by the system. In addition, the system also has insulation detection and communication functions. Use the extended Kalman filter algorithm to estimate the system SOC. Research experiments show that the system has high accuracy and reliability for voltage, current and temperature detection and SOC parameter estimation, which improves battery safety and efficiency. The system has complete and reliable functions, and has certain practical engineering significance.

Keywords: battery management system; Kalman filter; SOC; BMS; single chip microcomputer

0 引言

传统汽车数量的日益增长带来的能源过度消耗和环境污染等问题。因此安全、清洁、高效的新能源汽车在近些年来得到快速的发展。伴随新能源汽车的相关技术也得到了快速发展,由于锂电池的能量密度高、充放电性能好、重量小、寿命长、绿色环保等优点,在新能源汽车中得到广泛的应用^[1-5]。

电池管理系统(battery management system, BMS)负责时刻监测电池组的电压、电流和温度,防止电池组的过

充、过放和过流,在保证锂电池组的安全性,使电池组更好地发挥出效率,延长电池使用寿命具有非常重要的意义^[6-10]。

在新能源兴起之初, BMS受资源限制,所测信息参数不全面,数据采集间隔长,缺少实时性状态检查,也无法对电池真实使用状态开展分析研究。在传感器的采集精度、电池状态估计技术、电池均衡技术、安全充电和故障诊断技术等方面有待进一步改进和提高^[11-13]。

本文针对电动汽车上使用的锂电池组,基于STM32f103v8t6单片机设计了电池管理系统,实现了电池

收稿日期:2021-05-16

* 基金项目:山西省面上自然基金项目(201901D111158)资助

电压、电流和温度参数的监测,基于参数完成对电池组的过充保护、过放保护、充放电电流保护,短路保护,提高电池的安全性能。均衡管理功能提高电池的使用效率。并结合卡尔曼滤波算法实现对电池 SOC 的测量,为驾驶人员提供准确的电池续航信息。

1 电池管理系统硬件设计

如图 1 所示,整个电池管理系统以 STM32f103v8t6 单片机为控制核心,该芯片拥有多达 80 个控制 IO 口,64 kB 的 flash 和 20 kB 的 SRAM 存储空间,72 MHz 的主频可以 1.25 DMIPS/MHz 的速度执行指令,具有 USART、SPI、CAN 等多种通信方式和睡眠、停止和待机等多种工作模式。高性能、低成本的特点被广泛应用于嵌入式设计中。

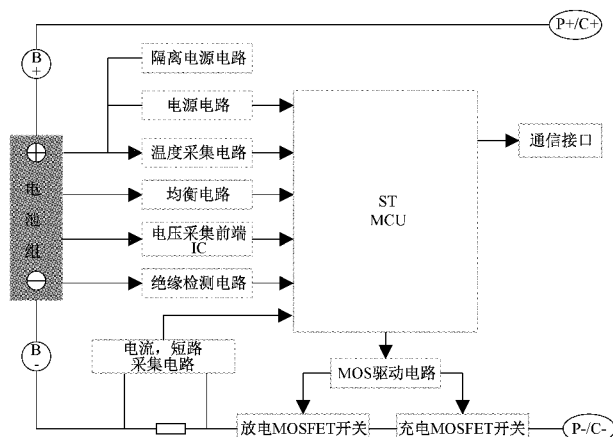


图 1 电池管理系统总体硬件电路

外围电路由隔离电源电路、电源电路、温度采集电路、均衡电路、电压采集前端 IC 电路、MOS 驱动电路和电流、短路采集电路组成。通信接口通过 CAN 总线连接主控电路,UART 接口连接上位机。

主要实现的功能包括如下几个部分:

- 1) 电池检测功能:实现对电池组的单体和总体的电压、电流和温度的检测。绝缘检测电路防止电路短路。
- 2) 充放电均衡功能。
- 3) 报警和保护功能:根据采集到的电池组参数判断电池组状态,如若出现电池的过放、过流和温度过高、过低的情况,系统完成报警和自动断开通路来保护系统的安全。
- 4) 电池状态估计功能:完成对电池组的 SOC 参数的估计。
- 5) 具有低功耗休眠方式:当电池组没有充放电的任务时,系统自动进入休眠状态降低功耗。
- 6) 通信功能:通过 CAN 总线将电池的整体信息发送给车载主控系统;通过 UART 完成与上位机的通信。可初始化设置过充、过放、过流和短路等保护参数。

1.1 电压采集电路

精确测量电池组的单体和总体电压,能有效防止电池

过充过放,保证电池工作在安全的范围内。而传统的电压和温度检测电路是将电压输入线和温度传感器通过隔离运放和滤波电路输入到 ADC 中,再经过微控制器处理数据得出真实的电压和温度值。但由于单体检测数目过多,每个电池单体都需要有一个调理电路,给成本和空间造成压力,也会占用大量的 IO 口和 CPU 资源。故采用了模拟前端芯片 BQ76930 来实现对电池组的电压的采集。BQ76930 可以检测多达 10 节串联电池,两个温度检测点,电流检测,内部集成有场效应管驱动,通过 I²C 接口完成数据传输。搭建电路如图 2 所示。

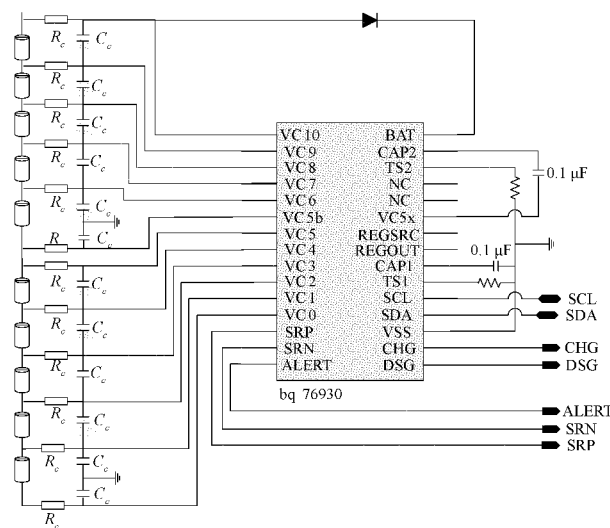


图 2 电压采集电路

在采集通道上,为了提高电压的采集精度,在电压的输入前端使用低通滤波器进行滤波,取 $R_c = 10 \text{ k}\Omega$, $C_c = 0.1 \mu\text{F}$,对大于截止频率 160 Hz 的噪声进行滤除。主控芯片通过 I²C 接口完成对模拟前端芯片的初始化,通过读取芯片中 ADC 寄存器数据得到单体电池的电压。

1.2 温度采集电路

温度的变化会很直观地影响电池的性能。系统使用热敏电阻加电阻串联的方式来检测电池温度,如图 3 所示,NTC 对温度敏感,随着温度的变化而带来阻值变化。面对所有的单体电池温度检测点,单片机内部 ADC 无法满足要求。系统将温度采集电路的输出电压 VOUT 通过多路复用器 ADG1406,后经过运放和低通滤波器输入至单片机。单片机控制多路复用器轮询各个温度采集点,通过计算 VOUT 的值得到 NTC 的阻值,然后根据热敏电阻的阻值和温度的对应关系得到实际温度值。

1.3 总电流采集电路

时刻了解电池组母线上的电流大小,可以防止过流、过放和短路的发生,及时止损。检测电流值的方法常用的方法有:1)是使用固定阻值的分流电阻串联到被测支路,通过测量分流电阻两端的压差,根据欧姆定律得到被测电流。2)使用电流传感器,如霍尔传感器、光纤传感器等测量电流

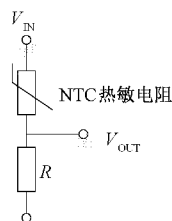


图 3 温度采集电路

值^[14]。第 1 种方法会产生较高的共模电压干扰和 GND 不稳的情况, 后续电路还需要隔离放大和处理电路, 使电路的复杂度提高。本系统采用霍尔电流传感器。根据霍尔效应, 当有电流垂直通过霍尔传感器的外磁场时会发生偏转, 聚集形成电压。霍尔元件不与测量点直接接触, 不会产生共模、高频干扰。具有响应快、精度高、线性度好等优点。后经过运放芯片 OP07 输入至单片机, 根据采集到的电压以及霍尔元件输出电压和测量电流的计算关系得到总电流值。

1.4 均衡管理功能

均衡管理的设计是为了保证各单体电池容量和性能的一致性, 避免因某块电池的电压过高或过低而出现充电或放电停止的情况。均衡功能分为主动均衡和被动均衡, 主动均衡是利用高电压单体为低电压单体充电以达到整体平衡的状态。能量利用率高, 均衡效果好, 但控制电路复杂, 成本昂贵。被动均衡是将高电压的单体能量通过电阻释放掉来减少电池之间的容量差异^[15]。被动均衡电路简单, 技术成熟。系统采用被动均衡管理。如图 4 所示, 系统根据电池组的总电压值, 除以电池单体数目得到电池均值, 当单体电池高于均值 0.05 V, 系统控制晶体管的开断, 电池通过一 100 Ω 的电阻释放多余的能量, 均衡电流在 35 mA 左右, 避免大热量的产生。

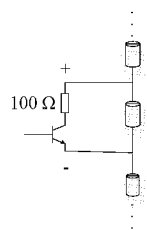


图 4 均衡电路

1.5 绝缘检测

电芯经串联后, 会组成高压回路。而电池系统的金属壳体、BMS 的金属壳体和乘客人员是直接连接车身的地, 构成低压回路^[16]。为了防止触电, 高低压回路之间往往是隔离的, 但由于器件老化、线路损坏等因素, 高低压回路之间可能会产生短路和漏电, 危害人员的生命安全。故有必要对高低压回路之间的绝缘性进行实时监测。系统采用不平衡电桥法来监测车身地相对于高压回路和低压回路的绝缘电阻值得大小来判断系统的绝缘性。

1.6 通信模块

系统通过 CAN 总线实现 BMS 和车辆总控制器、上位机之间信息的交互。根据先定的数据帧, CAN 接收模块等待接收允许, 判断帧头、帧 ID 以及发送方地址和次数, 接收完报文后, 进行数据校验。将数据分析、重组得到电池的各个参数。

2 SOC 估算

SOC(state of charge)定义为在一定放电倍率下, 电池剩余电量与相同环境下总的可用容量的比值, 用百分数表示:

$$SOC = \frac{C_{\text{剩余}}}{C_{\text{额定}}} \times 100\% \quad (1)$$

SOC 的精确估算能更有效地利用电池能量, 避免过充过放, 延长电池寿命, 也能准确预测车辆的续航里程^[17]。影响电池 SOC 测量精度的因素有很多, 如充放电倍率、温度和电池老化带来的电池额定容量的降低等, 给 SOC 的估算带来的诸多困难。目前常使用的 SOC 估算方法有开路电压法、安时积分法、放电实验法、卡尔曼滤波法和神经网络法等。而开路电压法要在母线中电流在阈值以下的情况下才能使用, 且容易受到温度的影响。安时积分法依赖初始 SOC, 存在累计误差的问题, 测量精度小。放电实验法会中止电池工作, 需要大量时间, 只适用于车辆检修。神经网络法需要进行庞大复杂的数据处理, 难以得到推广^[18]。故系统采用扩展卡尔曼滤波算法对 SOC 估算, 使用电池数学模型对电池状态进行预测, 并在观测值的基础上对预测值进行修正, 得到最优估计值。

为能更精确地模拟电池的动态特性, 本系统采用 Thevenin 等效电路来作为电池数学模型, 其等效电路如图 5 所示。使用 RC 并联构成的回路来模拟电池的动态极化过程, 模型电路结构简单稳定可靠, 也可提高模型的阶数来提高 SOC 值的精度。

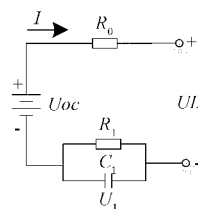


图 5 Thevenin 等效电路

图 5 中 R_0 为电池的内阻, R_1 为电池极化电阻, C_1 为电池极化电容, U_1 为极化电压, U_L 为电池端电压。两者并联模拟电压渐变的电容特性。根据基尔霍夫定律, 电路中存在着数学表达式:

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{dt} = \frac{1}{C} - \frac{U_1}{R_1 \times C} \\ U_L = U_{oc} - U_1 - I \times R_0 \end{cases} \quad (2)$$

结合安时积分法, 该电池数学模型为:

$$\begin{cases} I_{(t)} = \frac{U_{1(t)}}{R_1} + C_1 \frac{dU_1}{dt} \\ UL_{(t)} = U_{oc(t)} - R_0 \times I_{(t)} - U_{1(t)} \\ S_{(t)} = S_{(t_0)} - \int_{t_0}^t \frac{I_{(t)}}{Q_0} dt \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_{(t)}$ 为当前的电池荷电状态； $S_{(t_0)}$ 为电池荷电的初始值； Q_0 为电池的额定容量； $I_{(t)}$ 为系统的实时电流。选取 SOC 和电池模型中极化回路电压 U_1 作为状态量，电池端电压作为观测量，电流为输入控制量。根据上述电池模型构建电池的离散状态下的观测方程为：

$$\begin{bmatrix} S_{(k+1)} \\ U_{1(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{(k)} \\ U_{1(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta T \\ Q_0 \\ \beta \end{bmatrix} I_{(k)} \quad (4)$$

$$[UL_{(k)}] = \begin{bmatrix} \partial U_{oc} \\ \partial S \end{bmatrix} - 1 \begin{bmatrix} S_{(k)} \\ U_{1(k)} \end{bmatrix} + R_0 \times I_{(k)} \quad (5)$$

其中，

$$\begin{cases} \alpha = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) \\ \beta = R_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) \end{cases} \quad (6)$$

离散系统状态空间的状态和观测方程如下所示，其中考虑了过程噪声 w_k 和观测噪声 V_k 。

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \\ y_k = C_k x_k + D_k u_k + V_k \end{cases} \quad (7)$$

对比式(7)和式(4)、(5)，可到状态空间的矩阵系数分别为：

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}, B_k = \begin{bmatrix} -\Delta T \\ Q_0 \\ \beta \end{bmatrix}, C_k = \begin{bmatrix} \partial U_{oc} \\ \partial S \end{bmatrix} - 1, \quad (8)$$

$$D_k = R_0$$

根据系统的状态预测方程来递推卡尔曼滤波的 SOC 值，其具体步骤如下所示。

1) 初始化等效模型参数，为方便滤波方程收敛，取 $P_0 = 1, \hat{S}_{(0)} = 0$ 。

2) 根据状态预测方程式(4)得到 SOC 的先验估计值，记为 $\hat{S}_{(k+1/k)}$ 。

3) 根据式(5)计算出电池端电压的先验值 $\hat{UL}_{(k+1)}$ 。

4) 计算状态矩阵先验值的协方差矩阵： $\hat{P}_{k+1} = \mathbf{A}P_k\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$ ，式中 P_k 是后验估计值的协方差矩阵， Q 为高斯白噪声 w_k 的方差矩阵。

5) 根据步骤 4) 中得到协方差矩阵 \hat{P}_{k+1} 计算卡尔曼增益 $K_k = \hat{P}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \hat{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$ 。其中 \mathbf{H} 为状态变量到观测变量的转换矩阵， \mathbf{R} 为高斯白噪声 V_k 的方差矩阵。

6) 得出状态变量的最优估计 $\hat{S}_{(k+1/k+1)} = \hat{S}_{(k+1/k)} + K_k (UL_{(k+1)} - \mathbf{H} \hat{S}_{(k+1/k)})$ 。

7) 根据得到的最优估计值和协方差矩阵，重新代入预测方程迭代。

系统根据电池数学模型，结合上一次的 SOC 最优估计值 $\hat{S}_{(k/k)}$ 和 SOC 协方差 P_k ，代入预测方程判断下一时刻 SOC 的预测值及其协方差值。得到检测电池的端电压，即测量值 UL 。根据卡尔曼滤波的更新方程式，修正预测值，得到下一时刻最优估计值 $\hat{S}_{(k+1/k+1)}$ 及其协方差。预测方程和更新方程不断迭代，每次更新都会重新计算协方差，调整卡尔曼增益，使 SOC 快速收敛，得到最贴合实际的 SOC 值。

3 试验仿真及分析

3.1 系统参数测试精度

为测试系统电压、电流和温度等参数，采用 10 串额定电压为 3.6 V 单体电池串联成的锂电池包进行充放电试验。用数字万用表和温度计测回的数据作为系统的参考真值。BMS 检测到的数据通过 UART 传输到 PC 机，通过对比参考真值，得到 10 组随机测试点的测试结果，如表 1~3 所示。

表 1 电压参数检测结果

测试点	电压测量值/V	电压参考值/V	相对误差/%
1	34.84	34.88	-0.12
2	33.56	33.63	-0.21
3	31.66	31.62	0.13
4	28.96	29.02	-0.21
5	26.54	26.48	0.23
6	25.55	25.48	0.27
7	23.89	24.01	-0.50
8	21.58	21.68	-0.46
9	20.52	20.57	-0.24
10	20.11	20.05	0.30

表 2 电流参数检测结果

测试点	电流测量值/A	电流参考值/A	相对误差/%
1	9.58	9.45	1.37
2	9.15	9.24	-0.97
3	9.24	9.35	-1.17
4	8.95	8.85	1.12
5	9.12	8.98	1.56
6	8.89	9.05	-1.77
7	8.92	9.02	-1.11
8	9.42	9.55	-1.36
9	8.87	8.96	-1.00
10	9.02	8.94	0.90

表 3 温度参数检测结果

测试点	电压测量值/V	电压参考值/V	相对误差/%
1	27.5	27.2	1.10
2	27.6	27.5	0.36
3	28.4	28.7	-1.05
4	29.2	28.9	1.04
5	31.5	30.9	1.94
6	33.2	32.8	1.22
7	34.2	33.8	1.18
8	35.5	34.9	1.72
9	34.8	34.2	1.75
10	35.4	35.7	-0.85

由表 1~3 可知,在锂电池包持续放电过程中,其电压在不断下降,随放电时间的延长,温度会逐步上升,而持续放电电流比较均匀。其端电压测量精度误差在 0.12%~0.5% 之间,电流测量精度相对误差小于 1.8%,温度测量误差在 2% 之内。表明该 BMS 对电压、电流和温度具有较高的测量精度,性能稳定可靠。

3.2 SOC 算法验证

为了验证 SOC 算法的可行性,使用锂电池包作为试验对象,将采集到有关电池的电压、电流和时间等信息输入到 MATLAB 中卡尔曼滤波算法中。设置 SOC 初始值为 98%,理论的初始 SOC 值为 100%,循环时间为 4 h,经过 SOC 算法迭代,得到 SOC 最优估计值和理论值对比曲线以及估计值和理论值误差曲线如图 6、7 所示。

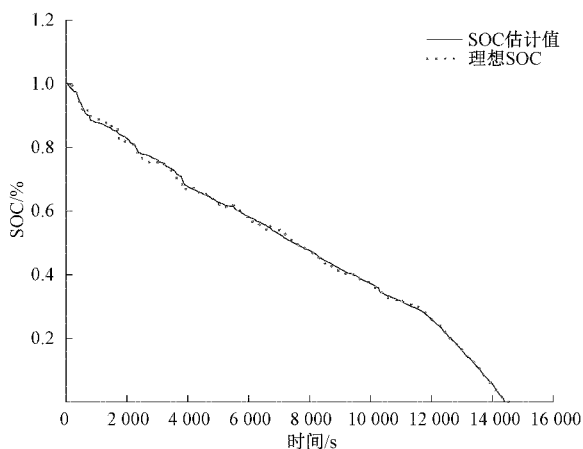


图 6 SOC 估计值和理论值对比曲线

由图 6 可知,采用基于卡尔曼滤波所得到 SOC 曲线可以很好地跟踪理论上的 SOC 曲线,两者误差维持在 $\pm 2\%$ 左右,峰值误差在 3%,而常见的 SOC 估算方法所能达到的精度在 5% 左右,可见采用拓展卡尔曼滤波算法,能在一定误差范围内追随理论值的走向,可实现对 SOC 值的准确实时估计,算法稳定可靠误差小。

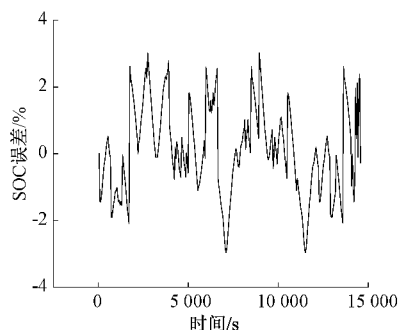


图 7 SOC 最优估计值与理论值误差曲线

4 结 论

本电池管理系统设计实现了对电池组的电压、电流和温度状态的检测,能量均衡管理,绝缘检测和通信等功能。实验结果可说明,系统对电压、电流检测误差均在 ± 0.2 V/A 以内,温度检测误差在 ± 0.6 °C 以内,可满足系统对基本参数检测精度的要求。结合卡尔曼滤波算法实现对 SOC 最优估计,通过仿真结果证明了该算法可结合电池模型预测值和观测值修正减少估计误差,使 SOC 最优估计值更符合实际值,算法可行有效。

参考文献

- [1] 李志鹏,赵杨. 纯电动汽车电池管理系统及 SOC 精确估计[J]. 电源技术,2016,40(5):1090-1093.
- [2] 吕杰,宋文吉,冯自平. 电池管理系统的设计与实现[J]. 电池,2019,49(6):499-501.
- [3] 李欣阳,李立伟,刘含筱. 基于 STM32 的分体式电池管理系统 SOC 估算和软件控制设计[J]. 计算机与数字工程,2020,48(2):456-460,483.
- [4] 徐东. 电动汽车动力电池管理系统数据采集方法分析[J]. 汽车电器,2017(6):5-8.
- [5] 查懿伦. 电动车的电池能量管理系统研究与设计[D]. 重庆:重庆理工大学,2020.
- [6] 卢兰光,李建秋,华剑锋,等. 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] 林靖雄,李振鹏,叶远茂. 基于 STM32 和 BQ76940 的电池管理系统设计[J]. 广东工业大学学报,2020,37(6):78-84.
- [8] 杨乔木,李立伟,杨玉新,等. 基于 STM32 的电池管理系统主控单元设计[J]. 电子设计工程,2021,29(1):177-180,186.
- [9] 仇士玉,王娟. 基于单片机的纯电动汽车电池管理系统设计[J]. 电子测试,2018(19):16-17.
- [10] 赵熙,候亚虹,汪贵平,等. 基于云平台的电池管理系统设计与实现[J]. 机械与电子,2019,37(12):51-55.
- [11] 尤勇,罗丙寅. 锂电池管理系统 BMS 硬件保护系统架构设计实现[J]. 集成电路应用,2018,35(8):63-66.
- [12] 黄瑞,赵春莲,明鑫,等. 电池管理系统测试平台设计与

- 实现[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(1): 62-67.
- [13] 彭香园, 唐传雨, 孙金磊, 等. 基于扩展卡尔曼滤波及容量校准的锂电池 SOC 估计方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(5): 51-56.
- [14] 潘莹, 朱武, 张佳民. 基于 STM32 的锂电池组 SOC 管理系统的设计[J]. 科技创新与应用, 2017(31): 26-27.
- [15] 张利, 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.
- [16] 赵天意, 彭喜元, 彭宇, 等. 改进卡尔曼滤波的融合型锂离子电池 SOC 估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1441-1448.
- [17] 史永胜, 李珏, 朱冉. 锂离子电池自放电电流检测系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(11): 104-108.
- [18] 张秋艳, 高平安, 李天鹏, 等. 基于 MSP430 的锂电池组能量均衡控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 142-145.

作者简介

王彪, 工学硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统、电子与通信。

E-mail: wangbiaocmail@qq.com