

【电子与信息科学 / Electronics and Information Science】

基于 MCS D2P 的动力锂电池管理系统主控软件

王秋霞

福建船政交通职业学院机械工程系, 福建福州 350007

摘要: 为克服传统的电池管理系统 (battery management system, BMS) 开发方法不仅不利于先进算法的软件实现, 且存在开发周期长和费用高的缺点, 基于 MCS D2P 快速控制原型开发平台搭建 BMS 硬件, 针对动力锂电池由多节电芯串联而成的特点, 分析 BMS 对电池组总电压、电流、电芯电压和温度的实时测量, 对电池剩余电量实时评价的功能, 以及由主控模块、检测模块和均衡管理模块构成的主要硬件结构. 设计主控软件数据流、主程序流程图、数据采集程序流程图和荷电状态 (state of charge, SOC) 估算程序流程图. 以由 15 节电芯构成的 48 V、50 Ah 磷酸铁锂电池组为试验对象, 设计周期性充放电测试试验, 得到电池总电压和电流的测量误差均在 $\pm 0.5\%$ 内, 温度的测量误差在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内, SOC 实测值与理论值差值小于 8%, 验证了主控软件设计的可行性.

关键词: 信息处理技术; MCS D2P 开发平台; 动力锂电池; 电池管理系统; 数据采集; 荷电状态估算
中图分类号: TP 274 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2018.05473

The master control software for power lithium battery management system based on MCS D2P development platform

WANG Qiuxia

Mechanical Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, Fujian Province, P. R. China

Abstract: The traditional battery management system (BMS) development method not only is not conducive to the software implementation of advanced algorithms, but also has the disadvantages of long development cycle and high cost. To overcome these problems, the BMS hardware is built based on the MCS D2P rapid control prototype development platform. The power lithium battery is made up of multiple battery cells in series. In view of this characteristic, ① the BMS real-time measurements of battery voltage, current, cell voltage and temperature, ② the BMS real-time evaluation of battery residual power, ③ the main hardware structure composed of main control module, detection module and equalization management module are analyzed. On this basis, the data flow of master control software, the main program flow chart, the data acquisition flow chart and the state of charge (SOC) estimation flow chart are designed. Taking a 48 V, 50 Ah lithium iron phosphate battery pack consisting of 15 cells as the test object, the periodic charging and discharging test is designed. The test results show that both the measurement errors of the battery total voltage and current are less than $\pm 0.5\%$, the measurement error of temperature is less

Received: 2018-05-18; **Accepted:** 2018-07-13

Foundation: Science and Technology Development Plan Project of Fujian Transportation Department (201322); Education and Scientific Research Projects for Young and Middle-aged Teachers of Fujian Education Department (JAT170956)

Corresponding author: Lecture WANG Qiuxia. E-mail: wang_qiuxia_81@aliyun.com

Citation: WANG Qiuxia. The master control software for power lithium battery management system based on MCS D2P development platform [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, 35(5): 473-479. (in Chinese)



<http://journal.szu.edu.cn>

than $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the difference between the measured value of SOC and the theoretical value of SOC is also within 8%, which verifies the feasibility and the correctness of the design of the master control software.

Key words: information processing technology; MCS D2P development platform; power lithium battery; battery management system; data acquisition; state of charge (SOC) estimation

动力锂电池技术对电动汽车的发展至关重要,而动力锂电池的高效使用依赖电池管理系统(battery management system, BMS)。成熟的 BMS 可有效保证电芯成组后的安全和寿命,避免由于电芯局部温度过高引发的自燃等事故。对 BMS 的研究,以美国 TI 和 Linear 等为代表的半导体企业,早已研制出体积小且集成度高的专业电池管理芯片;在中国,以清华大学和同济大学等科研院校为首,也对 BMS 进行了相应的研究,并已投入奥运会和世博会期间使用的电动大巴中^[1]。然而,目前对 BMS 的研究还存在系统处理的数据量大、电池非线性工作特性导致的剩余电量估算不准确等问题^[2]。美国 Woodward 公司的 MCS D2P 开发平台是一款基于 Matlab/Simulink 和开发版电子控制单元(electronic control unit, ECU)的快速控制原型开发平台,能够实现开发过程的半实物仿真,被广泛用于汽车、航空航天以及军事装备等控制系统的研发中。将 MCS D2P 开发平台用于 BMS 的设计开发,在虚拟环境中设计产品,可缩短开发周期、降低开发费用。本研究基于 MCS D2P 开发平台,依据 BMS 的功能和结构,研究了 BMS 主控软件的构成和数据流,并给出了各部分程序的流程图,最后通过实验验证了其可行性。

1 BMS 功能与结构

由多节电芯串联的电动汽车动力锂电池,在其使用过程中出现的过度充放电,以及发热等现象都会破坏电池组的一致性,使电池提前失效。因此, BMS 应能对电池各运行参数进行实时且准确的测量,通过实时评价其运行状态,解决电芯的过度充放电问题,实现均衡管理,提高电池组的一致性,延长电池使用寿命。

基于 MCS D2P 开发平台的 BMS,其硬件主要包括主控模块、检测模块和均衡管理模块^[3]。检测模块主要由各传感器和监控保护器芯片构成的电路组成,对电芯和电池组的电压、电流和温度进行实时数据采集,并将采集到的数据送往主控模块。主控模块使用的是 MCS D2P 开发平台中的 112PIN 开

发版 ECU,对来自检测模块的数据进行相关的数据分析和处理,并据此对电池的实时运行状态做出评价。若各电芯之间存在电压和容量等不一致,会缩短电池组的使用寿命,所以必须通过专用模块采取均衡管理措施。依据由主控模块计算处理的数据,均衡管理模块能够控制各电芯的充电操作,从而保证各电芯的一致性。另外,主控模块还负责与相关控制器、设备终端等进行通讯任务,能够实现安装配置、显示查询等功能。BMS 结构框图如图 1。

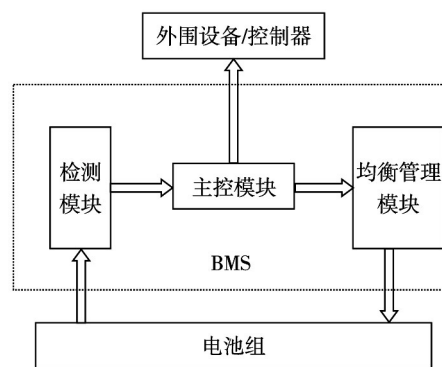


图 1 BMS 结构框图

Fig. 1 The block diagram of BMS structure

2 主控软件数据流设计

根据上述对 BMS 功能和结构的分析可知, BMS 将电芯的电压和温度、电池组的电流和总电压、电池箱的环境温度等数据采集后,分别做 SOC 估算等数据处理。SOC 估算值将被输出给车载仪表进行显示,以便驾驶员在驾驶过程中及时掌握电池信息。若有电脑与 BMS 相连,则电池状态还将被传输给电脑,用于对 BMS 监测和设置等。BMS 的数据处理包括 3 个方面: ① 将处理后的温度值输入整车控制器和风冷电机,作为整车控制器驱动电机和控制车速的条件之一,并控制是否启动对电池箱的冷却管理; ② 将处理后的电压值和电流值输入均衡充电电路,以实现锂电池的均衡充电,防止电池过充; ③ 由电脑进行系统配置,根据配置数据产生预/报警阈值,数据处理通过此阈值来产生预/报警数据。预/报警数据是 SOC 估算的重要依据之一,

<http://journal.szu.edu.cn>

同时它还将与故障自诊断电路诊断的系统电路故障一起被写入预/报警记录。主控软件数据流如图2。

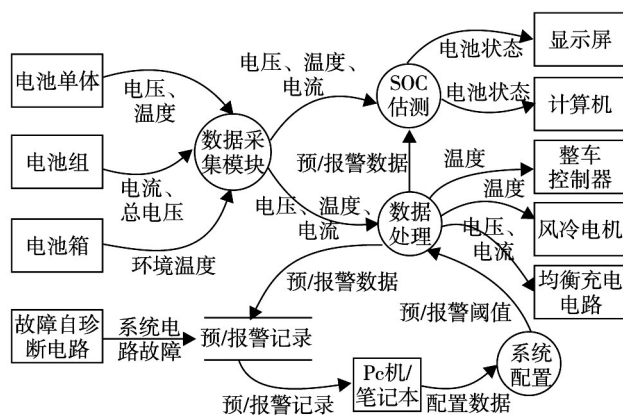


图2 主控软件数据流示意图

Fig. 2 Data flow of the master control software

3 主控程序设计

3.1 开发工具与平台

MCS D2P 快速控制原型开发平台的软件部分集成了 MotoTron 的 ControlCore 底层操作系统, 具有产品级的软件架构, 主要包括建模软件 MotoHawk、刷写软件 MotoTune 及编译软件 Green hill^[4]。其中, MotoHawk 是基于 Matlab/Simulink/Stateflow/RTW 图形化的语言平台, 可将底层相关软件、标定/监测变量接口、诊断管理接口等进行封装管理, 成为底层软件应用模型库, 并在编程过程中被自由调用, 生成基于该体系结构的应用软件。

3.2 主程序设计

作为主控模块的 MCS 112PIN 开发版 ECU 要周期性地完成数据采集、数据处理、状态分析和通信等功能, 因此采用定时中断的实现方式。主程序包括初始化程序和定时中断程序两部分(图3)。初始化程序用来初始化系统各个工作模块以及参数, 包括校准参数和定时器等信息, 并诊断系统工作状态。定时中断程序的主要任务是以循环方式进行实时检测、分析和处理数据。

3.3 数据采集程序设计

如前所述, BMS 的数据采集包括对电池组电流和总电压的检测, 以及对各电芯电压和温度的检测。使用电流传感器和电压传感器检测电池组电流和总电压, 将采集到的数据送入 ECU 上 12 bit 的模拟量输入通道, 由 MotoHawk 中的模拟量输入模块进行读取。但是, 由于该模块的输出值代表的是模

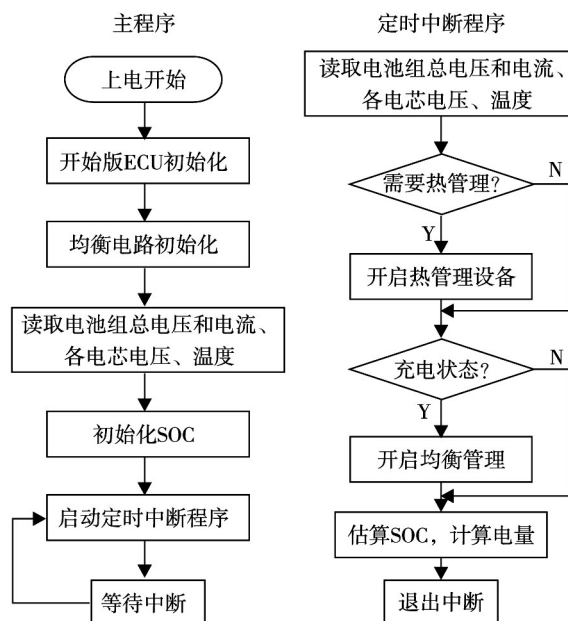


图3 主程序流程图

Fig. 3 Main program flow chart

拟资源的电压与参考电压的比值, 而 ECU 的参考电压是 5 V, 因此要对该模块的输出值做换算处理, 才能直观地显示检测结果。换算程序如图4。

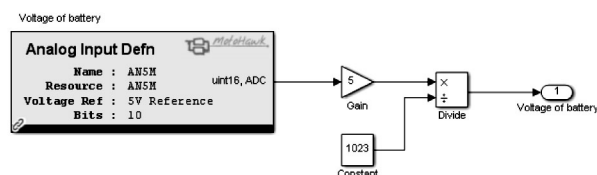


图4 模拟量输入模块换算程序

Fig. 4 Conversion program of analog input module

使用德州仪器的 bq76PL455A-Q1 专业电池管理芯片对各电芯的电压和温度进行检测。该芯片具备 16 个 $-0.3 \sim 5.5$ V 的差模模拟输入通道、8 个 $0 \sim 5$ V 的辅助(模拟)输入通道, 模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 分辨率高达 14 bit, 电压测量精度可达 ± 1 mV, 且具有菊花链接口, 最多可级联 16 个芯片^[5], 为后续扩容后电池组的监控提供便利条件。

采用无限循环方式进行数据采集^[6]。上电伊始先对开发版 ECU 和 bq76PL455A-Q1 芯片进行初始化, 对电池组总电压、电流及各电芯电压、温度有一个初步的检测值。之后, 进入正式的数据采集阶段。芯片 bq76PL455A-Q1 完成 1 次数据采集后, 向 ECU 发送数据, 供 ECU 进行数据分析和处理。当

ECU 完成 SOC 估算等工作后, 先判断是否需要开启均衡管理. 若需要开启, 则 ECU 将数据发送给均衡电路, 开启均衡管理, 在均衡管理结束后再进入下一次数据采集; 若不需开启均衡管理, 则程序直接进入下一次数据采集. 数据采集流程图请扫描文末二维码.

3.4 SOC 估算程序设计

3.4.1 SOC 的定义

SOC 被美国先进电池联合会定义为在一定放电倍率下, 电池剩余电量与相同条件下额定容量的比值^[7], 用来反映电池的剩余电量, 预测电动汽车的续航里程. 但在动力电池应用场所, 电池工况变化复杂, 负载、环境温度和电池组电压的变动范围都很大, 影响电池容量的因素包括电池的充放电电流 I 、电压 U 、温度 t 、电池健康状态 (section of health, SOH)、自放电因数 K_{dis} 以及充放电效率 η 等, 因此, 严格讲 SOC 定义应是上述参数的函数^[8], 即 $SOC = f(U, I, t, SOH, K_{dis}, \eta)$.

3.4.2 扩展卡尔曼滤波算法的数学建模

扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 算法通过改进卡尔曼滤波器, 使其适用于参数之间的非线性关系^[9]. 其实质是根据上一个状态和当前状态的测量值来估计当前状态, 从而重新估计一个最接近真实状态的值, 因此可得到较其他估算方法更高的精度^[3].

使用 EKF 算法估算电池的 SOC, 首先需要有一个合适的电池模型. 受控电压源电路模型属于综合电气模型, 使用两个 RC 环节模拟电池的极化效应, 抓住了电池包括非线性开路电压、电流、温度、循环寿命和暂态响应等多动态特征, 模型结构简洁、精度高且易计算, 被广泛用于电动汽车^[10]. 受控电压源电路模型如图 5. 其中, C_b 为聚苯乙烯电容, 代表电池的剩余容量; R_s 表征电池自放电的电阻; I_s 为受控电流源的电流; U_{oc} 为受控电压源的电压, 开路电压, 与电池 SOC 相关; R_0 为电池内阻^[10];

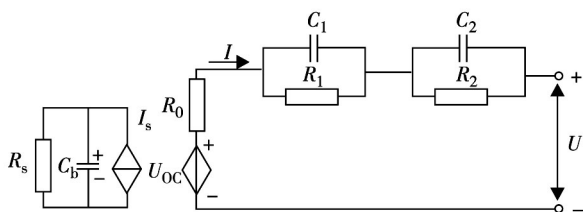


图 5 锂电池受控电压源电路模型

Fig. 5 Circuit model of controlled voltage source of lithium battery

I 为干路电流; R_1 和 C_1 为第 1 个 RC 并联环节, 模拟电化学反应; R_2 和 C_2 为第 2 个 RC 并联环节, 模拟浓度差极化反应^[11]; U 为电池正负极间的端电压.

以电池 SOC、两电容上的电压 U_1 和 U_2 作为状态变量, 电池状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dSOC}{dt} = -\frac{\eta I}{3600Q} \\ \frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \\ \frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, η 为电池的充放电效率; Q 为电池容量 (单位: Ah).

量测方程为

$$U = U_{oc} + U_1 + U_2 + R_0 I \quad (2)$$

$$U_1 = U_1(0) e^{-\frac{t}{\tau_1}} + IR_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (3)$$

$$U_2 = U_2(0) e^{-\frac{t}{\tau_2}} + IR_2(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (4)$$

其中, τ_1 为 R_1 和 C_1 并联环节的时间常数, $\tau_1 = R_1 C_1$; τ_2 为 R_2 和 C_2 并联环节的时间常数, $\tau_2 = R_2 C_2$.

根据文献[12], U_{oc} 与 SOC 之间的关系函数可以用 6 阶多项式加 1 项指数函数来表示

$$U_{oc} = f(SOC) = \sum_{i=0}^6 a_i SOC^i + b_0 e^{b_1 SOC} \quad (5)$$

其中, a_i 、 b_0 和 b_1 是与电池本身特性相关的参数, 可由最小二乘法拟合得到.

在锂离子动力电池工作中, 常以电池的工作电流 $I(k)$ 作为系统激励信号^[13], 令 $E(k) = I(k)$, 以电池端电压 $U(k)$ 作为观测变量^[13], 令 $Z(k) = U(k)$. 设系统采样时间为 Δt , Q_l 为电流 I 放电时电池所具有的容量, 结合方程 (2), 并令 $A =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{Q_l} \\ R_1(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}}) \end{bmatrix}, \text{可建立电池}$$

在 $k+1$ 时刻的状态变量估计值^[12, 14]为

$$X(k+1) = AX(k) + BI(k) + W(k) \quad (6)$$

量测方程为

$$U(k) = U_{oc}[SOC(k)] + I(k)R_0 + U_1(k) + U_2(k) + V(k) \quad (7)$$

设 $W(k)$ 的协方差矩阵为 $Q(k)$, 则可得到完成状态递推后的协方差矩阵为

$$P(k+1) = AP(k)A^T + Q(k) \quad (8)$$

量测-状态转换矩阵为

$$C(k) = \left\{ \frac{dU_{oc}[SOC(k)]}{dSOC(k)}, 1, 1, 1 \right\} \quad (9)$$

设卡尔曼增益矩阵为 K , 则

$$K(k+1) = P(k+1)C^T(k+1)[C(k+1)P(k+1)C^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (10)$$

其中, $R(k+1)$ 是观测噪声 $V(k+1)$ 的协方差矩阵.

根据卡尔曼增益修正状态向量的估算值及相应的协方差矩阵, $k+1$ 时刻系统状态变量的最优估计值为

$$X(k+1) = X(k) + K(k+1)[U(k+1) - C(k+1)X(k+1)] \quad (11)$$

$k+1$ 时刻系统状态的协方差矩阵为

$$P(k+1) = [I - K(k+1)C^T(k+1)]P(k) \quad (12)$$

其中, I 为单元矩阵.

至此完成了 $k+1$ 时刻的 SOC 最优估算值, 下一时刻重复此循环就可得到相应的 SOC 最优估值.

3.4.3 算法实现程序设计

图 6 为本研究设计的基于 EKF 算法的 SOC 估算程序流程图.

4 测试试验

选用由 15 节电芯构成的 48 V、50 Ah 磷酸铁锂电池组为试验对象, 用 ZHCH518D 型智能蓄电池充放电一体机对试验电池组进行周期性充放电测试, 计算放电时的电流、总电压、温度检测精度及充电时 SOC 的估算精度. 测试平台实验现场图可扫描文末二维码获取.

4.1 检测精度测试

在该测试过程中, 设置充放电机的放电电流为 5 A, 电池组的电压上下限分别为 54 V 和 42 V. 使用高精度 3 位半数字万用表和钳形交直流电流表对电池组的总电压和电流进行测量, 并将测量结果作为真值, 以计算检测精度. 取 5 个时刻进行测量, 结果如表 1.

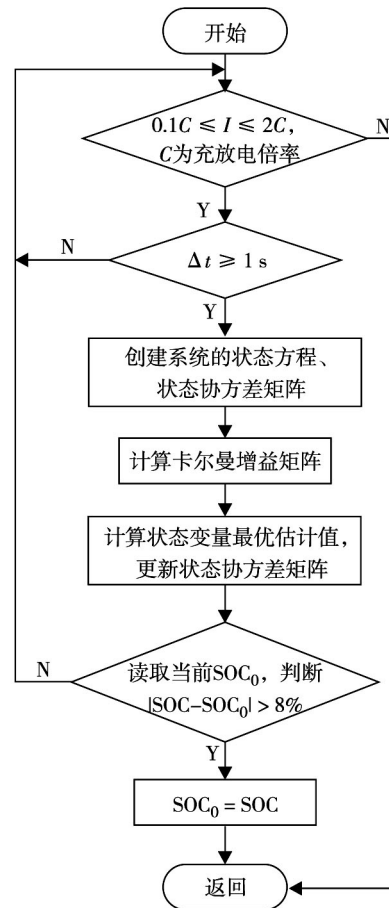


图 6 SOC 的 EKF 算法实现流程图

Fig. 6 Flow chart of EKF algorithm of SOC

表 1 总电压、电流的检测结果

Table 1 Detection results of total voltage and current

测量时刻点	总电压			电 流		
	测量值/V	真值/V	误差/%	测量值/A	真值/A	误差/%
1	51.89	51.91	-0.04	4.98	4.99	-0.20
2	49.59	49.58	0.02	4.96	4.95	0.20
3	46.81	46.79	0.04	4.99	4.99	0
4	44.19	44.17	0.05	5.00	4.98	0.40
5	43.96	43.94	0.05	4.98	4.98	0

在电池组内布置如图 7 的 8 个测温点来测量温度. 由图 7 可知, 测温点 1 和测温点 7 分别布置在电芯 1 和电芯 15 的电极上, 即整个电池组的正极和负极, 其余测温点布置在两块电芯之间以及电池组最底面, 故取电芯 1 和电芯 15 的电极做温度检测精度的测试. 用数字式测温仪对两个电极测温, 其

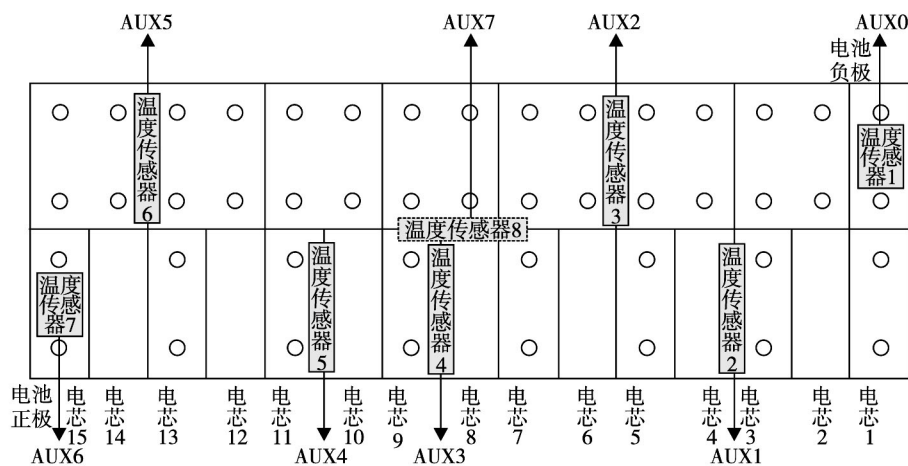


图 7 温度传感器布点图

Fig. 7 Point map of temperature sensors

结果作为温度的真值. 每 30 min 测 1 组数据, 取 5 组数据作为检测结果, 结果如表 2.

表 2 温度的检测结果

Table 2 Detection results of temperature

室温: 28.7℃ 单位: ℃

序号	测温点 1			测温点 7		
	测量值	真值	差值	测量值	真值	差值
1	29.7	29.6	0.10	29.7	29.5	0.20
2	31.1	31.2	-0.10	31.1	31.4	-0.30
3	32.7	32.9	-0.20	32.9	32.8	-0.10
4	34.8	34.9	-0.10	34.9	34.7	0.20
5	37.1	36.8	0.30	37.2	37.3	-0.10

由表 1 和表 2 可知, 总电压和电流的测量误差均在 $\pm 0.5\%$ 内, 温度的测量误差也均在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 内, 检测精度满足 BMS 设计要求.

4.2 SOC 估算精度测试

在充电过程中对试验电池组做 SOC 测试. 设置充放电一体机的电芯充电电压上限为 3.6 V, 充电电流为 10 A. ZHCH518D 智能蓄电池充放电一体机的充电功能完全按照恒流-恒压-涓流浮充 3 阶段进行, 因此可模拟动力锂电池的实际充电状态, 充电结束时可认为电池已被充满. 按照前述方法可计算各时刻的 SOC 理论值. 将实测值与理论值进行比较, 可获得 SOC 的估算精度, 结果如图 8.

由图 8 可知, SOC 实测值与理论值的曲线比较接近, 最大误差出现在 10%~20% 时, 其差值也在 8% 以内, 符合 BMS 要求的 SOC 估算精度.

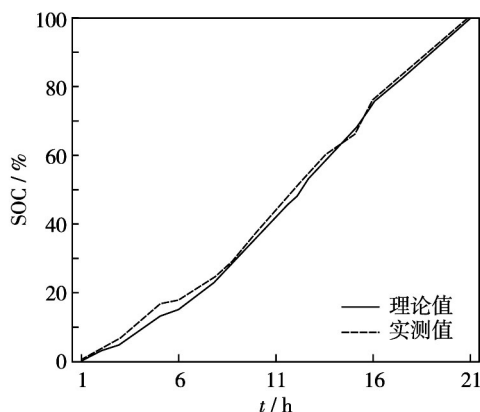


图 8 SOC 实测值与理论值的对比曲线

Fig. 8 Comparison curve between SOC measured value and theoretical value

结 语

基于 MCS D2P 快速控制原型开发平台的 BMS 由主控模块、检测模块和均衡管理模块构成, 负责对电池各运行参数进行实时、准确的测量, 评价电池实时运行状态. 通过均衡管理, 杜绝电芯过度充放电的发生, 可延长电池使用寿命. MCS D2P 开发平台是一套由硬件和软件包组成的开发工具, 适用于快速控制原型仿真. 本研究选用 MCS 112PIN 开发版 ECU 为主控模块, 设计 BMS 的主控软件数据流, 及主控软件的主程序、数据采集程序和 SOC 估算程序, 分别给出流程图. 以 48 V、50 Ah 磷酸铁锂电池组为试验对象, 研究设计了电池组的周期性充放电测试实验, 计算了放电时的电流、总电压和温度检测精度, 以及充电时 SOC 的估算精度, 验证了该设计能够较精确地实现对总电压、电流和温度

的数据采集,较精准估算了SOC,验证了设计的可行性。

基金项目: 福建省交通运输厅科技发展计划资助项目(201322); 福建省教育厅中青年教师教育科研资助项目(JAT170956)

作者简介: 王秋霞(1981—),女,福建船政交通职业学院讲师。研究方向: 工业自动化检测与控制。
E-mail: wang_quixia_81@aliyan.com

引文: 王秋霞. 基于 MCS D2P 的动力锂电池管理系统主控软件[J]. 深圳大学学报理工版, 2018, 35(5): 473-479.

参考文献 / References:

- [1] 王秋霞. 基于 MCS 112PIN 开发平台的锂动力电池管理系统设计[J]. 重庆理工大学学报自然科学版, 2017, 31(10): 204-210.
WANG Qiuxia. Li-ion power battery management system design based on the MCS 112PIN Development platform [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2017, 31(10): 204-210. (in Chinese)
- [2] 邓金伟. 电动汽车用锂电池高效运行管理技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
DENG Jinwei. Research of efficient operation management techniques of electric vehicle lithium battery [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [3] 王秋霞. 电动汽车锂电池管理系统的设计研究[C]//福建省科协第15届学术年会: 交通运输分会场. 福州: 福建省交通运输协会, 2015: 35-38.
WANG Qiuxia. Research on the design of Li-ion battery management system for EV [C]// The 15th Annual Conference of Fujian Science and Technology Association: Compilation of Papers for Traffic and Transportation Conference. Fuzhou: Fujian Association for Traffic and Transportation, 2015: 35-38. (in Chinese)
- [4] Wood Ward. MotoHawk development and prototyping system resource guide & product manual 36333 (Revision A) [M]. Fort Collins: Wood Ward, 2012.
- [5] Texas Instruments Incorporated. Bq76PL455A-Q1 16-Cell EV/HEV integrated battery monitor and protector [M]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2016.
- [6] 詹从来, 龙伟, 丁远超, 等. 基于FPGA的多路数据采集与处理系统设计[J]. 深圳大学学报理工版, 2016, 33(2): 127-133.
ZHAN Conglai, LONG Wei, DING Yuanchao, et al. Design of multi-channel data collection and processing system based on FPGA [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2016, 33(2): 127-133. (in Chinese)
- [7] Feder D O, Hlavac M J. Analysis and interpretation of conductance measurements used to assess the state-of-health of valve regulated lead acid batteries [C]// Proceedings of the 16th International Telecommunications Energy Conference. [S. l.: s. n.], 1994: 282-291.
- [8] 季迎旭, 杜海江, 孙航. 蓄电池SOC估算方法综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 18-22.
JI Yingxu, DU Haijiang, SUN Hang. A survey of state of charge estimation methods [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(4): 18-22. (in Chinese)
- [9] 肖雪峰, 肖伸平, 彭琼林. 基于 $\mu C/OS-II$ 操作系统纯电动汽车锂电池管理系统[J]. 湖南工业大学学报, 2013, 27(5): 72-75.
XIAO Xuefeng, XIAO Shenping, PENG Qionglin. Lithium battery management system for pure electric vehicle based on $\mu C/OS-II$ operating system [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 72-75. (in Chinese)
- [10] 杨阳. 电动汽车用磷酸铁锂电池模型研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
YANG Yang. Study on model of $LiFePO_4$ batteries used by electric vehicles [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [11] 陈岚, 张谦, 万国春, 等. 一种多采样率EKF的锂电池SOC估计[J]. 电源技术, 2015, 39(7): 1381-1410.
CHEN Lan, ZHANG Qian, WAN Guochun, et al. Stage-of-charge estimation of $LiFePO_4$ battery using multirate extended Kalman filter [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1381-1410. (in Chinese)
- [12] 袁学庆, 张阳, 赵林. 基于EKF的锂电池SOC估算与试验研究[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2587-2615.
YUAN Xueqing, ZHANG Yang, ZHAO Lin, et al. Li-ion battery SOC estimation and test research based on EKF [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(12): 2587-2615. (in Chinese)
- [13] 谭晓军. 电池管理系统深度理论研究——面向大功率电池组的应用技术[M]. 广州: 中山大学出版社, 2014: 5-6.
TAN Xiaojun. Battery management systems on power batteries: applied technology and advanced theories [M]. Guangzhou: Publishing House of Zhongshan University, 2014: 5-6. (in Chinese)
- [14] 黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用——Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
HUANG Xiaoping, WANG Yan. The principle and application of Kalman filter: Matlab simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)

【中文责编: 英子; 英文责编: 木柯】



论文补充材料

<http://journal.szu.edu.cn>