

文章编号: 2095-2163(2019)03-0216-07

中图分类号: TM912

文献标志码: A

动力电池均衡控制系统设计

杨勇, 张菁, 钱潇潇

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对新能源汽车中动力电池串联成组使用存在的 inconsistency 以及电池管理系统中数据采集的实时性和精确性不高的问题, 设计了一套完整的电池管理均衡控制系统, 详细阐述了基于 TI 公司研发的专用电池监测芯片 BQ76940 为核心的电压采集电路、电流采集滤波、温度采集扩展电路、通信电路的设计, 并采用 Buck-Boost 型均衡控制电路和过充过放保护电路来改善动力电池一致性差、过充和过放等问题, 最后进行了实验测试, 结果表明系统的可行性, 实现了电池电压数据的准确实时采集, 误差仅有 ± 5 mV, 并且均衡控制效果明显, 延长了电池组的使用寿命。

关键词: 动力电池; Buck-Boost; BQ76940; 电压采集; 均衡控制

Design of power battery equalization control system

YANG Yong, ZHANG Jing, QIAN Xiaoxiao

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Aiming at the inconsistency of the series use of power batteries in new energy vehicles and the low real-time and accuracy of data collection in battery management systems, a complete battery management equalization control system is designed, which is based on TI. The special battery monitoring chip BQ76940 developed by the company is the core of voltage acquisition circuit, current acquisition filter, temperature acquisition and expansion circuit, communication circuit design, and uses Buck-Boost type equalization control circuit and overcharge and over discharge protection circuit to improve the poor power battery consistency and the problems of overcharge and over discharge. Finally, the experimental test is conducted, and the results show the feasibility of the system. The accurate real-time acquisition of battery voltage data is realized, and the error is only ± 5 mV, simultaneously the balance control effect is obvious, the battery pack service life is extended.

[Key words] power battery; Buck-Boost; BQ76940; voltage acquisition; equalization control

0 引言

伴随着社会经济的发展, 不可再生能源的消耗、环境污染问题接踵而至, 新能源电动汽车已成为全球车企及科研机构的重点研究对象。锂离子电池因其高能量密度、充放电能力强等一系列优点, 成为新能源汽车首选的动力源, 在新能源汽车领域得到广泛应用^[1-2]。但在汽车集成动力系统中一般需要高容量、高功率的动力源, 需要选择数十节、甚至上百节的电池串联使用才能满足电动汽车功率和能量的需求, 但由于锂电池自放电率、内阻、温度等特性差异所表现出的不一致性, 极易造成电池的过充、过放, 导致电池组的整体性能下降, 循环使用寿命也因此大大缩短, 电动车的维护成本增加, 安全性也无法得到保障^[3-8]。电池管理均衡控制系统主要用于对串并联连接的储能电池进行管理, 使其电压等性能

趋于一致, 保证电池充放电阶段的能量相对平衡, 因此设计合理的均衡控制系统对新能源汽车的研究与发展具有重要意义。

本文以 TI 公司研发的专用集成电池监测芯片 BQ76940 为核心, 实现电池组电压的实时高精度监测, 同时设计了温度采样扩展、电流采集滤波、保护电路、通信电路等硬件电路, 采用 Buck-Boost 型均衡拓扑结构, 并结合 STM32 单片机设计出了一套具有较高精度、可靠性的完整的电池管理均衡控制系统, 再从实际应用的角度, 测试了电压精度和均衡控制效果, 有效提高了电池组的一致性。

1 系统总体方案设计

系统主要由 MCU 主控单元、数据采集单元、均衡控制单元、电池单元几部分构成。本设计以 STM32F407VET6 为主控制芯片, 通过分析和处理由

基金项目: 2016 级上海工程技术大学研究生科研创新项目 (F3-0903-17-01047); 台区负荷测量仪数据缺陷处理技术的研发 (E4-6000-16-0024-(15)DZ-033)。

作者简介: 杨勇 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式、工业自动化、控制检测技术及应用等; 张菁 (1969-), 女, 副教授, 硕士生导师, 电气设计与楼宇智能化专业教学团队负责人, 主要研究方向: 电气工程及其自动化、工业自动化。

收稿日期: 2019-03-11

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

BQ76940 芯片为核心的数据采集单元实时监测到的电池工作参数,根据均衡控制策略判断电池组一致性状况,并产生相应的 PWM 控制信号控制均衡单元中的 MOSFET 开断,以此实现电池组的有效管理,均衡控制系统整体框架如图 1 所示。

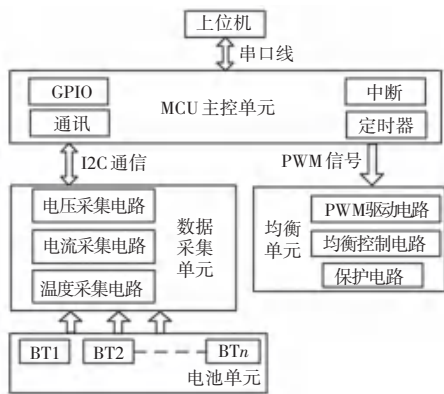


图 1 系统总体方案结构
Fig. 1 Overall system structure

2 系统硬件电路设计

2.1 MCU 主控单元

主控芯片选择了 ST 公司 M4 系列的 32 位高性能微处理器 STM32F407VET6,该单片机具有高性能、低成本和低功耗的优势,拥有 192 KB 的 SRAM 以及 512 KB~1 MB 的 FLASH;包括 2 个可用于电机 PWM 控制的高级定时器、12 个基本定时器等资源;还具有多达 15 个标准和高级功能的通信接口,支持 UART/USART、SPI、I2C 以及 CAN 通信;提供 3 个 12 位 ADC,2 个 12 位 DAC,一个低功耗的 RTC,很好地满足了控制系统的设计要求^[9-11]。

2.2 电源电路

系统外接 12 V 的直流稳压电源,通过 DC-DC 降压芯片 TPS5431 将 12 V 转变成 5 V,5 V 为运算放大器、数字器件供电;利用 LDO 芯片 AMS1117 将 5 V 电源转变 3.3 V,为 MCU 及其他控制电路供电,如图 2 所示,其中电源地和模拟地之间串联一个 0 Ω 的电阻,能够有效抑制环路电流,抑制噪声,同时也为了在 PCB 布线的时候更容易区分数字地和模拟地。

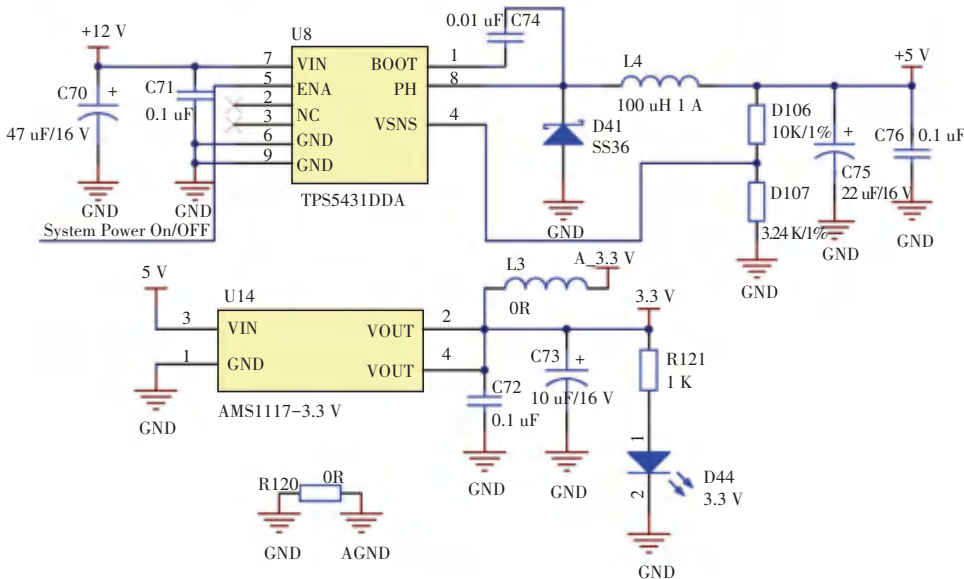


图 2 电源电路
Fig. 2 Power circuit

2.3 电压采集电路

本设计选用 BQ76940 作电压采集,这是 TI 公司针对电池管理系统而研发的专用集成芯片,单个芯片可测量多达 15 节电池电压值,并且具有平衡电量、输出电源稳压等独有特性。每个 BQ769x0 系列芯片都集成 14 位 ADC,可获取电芯电压、热敏电阻、芯片或锂电池温度等关键系统技术参数。对于

每个连续的 5 个单元组 (VC1~VC5, VC6~VC10, VC11~VC15),当该特定组中的单元没有被平衡时,每个单元 50 ms 测量一次,并且每 250 ms 可获得完整更新。50 ms 的测量时间大大有助于消除嘈杂环境中出现的混叠效应。其中输入电压与 ADC 读数转换公式可表示为:

$$V_{(cell)} = GAIN \times ADC(cell) + OFFSET$$

其中, *GAIN* 和 *OFFSET* 分别以 $\mu\text{V}/\text{LSB}$ 、 mV 为单位存储。基于专用集成电路电压采集原理如图 3 所示。

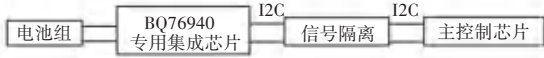


图 3 BQ76940 电压采集原理框图

Fig. 3 BQ76940 voltage acquisition principle block diagram

为滤除高频杂波成分,保证采集信号的稳定性和有效性,每一路采集到的电压信号都需要经过一个 1K 电阻与 $1\ \mu\text{F}$ 电容组成的 RC 低通滤波电路引入到 VC_x 引脚后进行 A/D 转化,同时为了避免过充电压和浪涌电流对 A/D 集成电路或者芯片产生损害,在芯片每两个 VC_x 引脚之间都连接了一个稳压二极管,电路如图 4 所示。

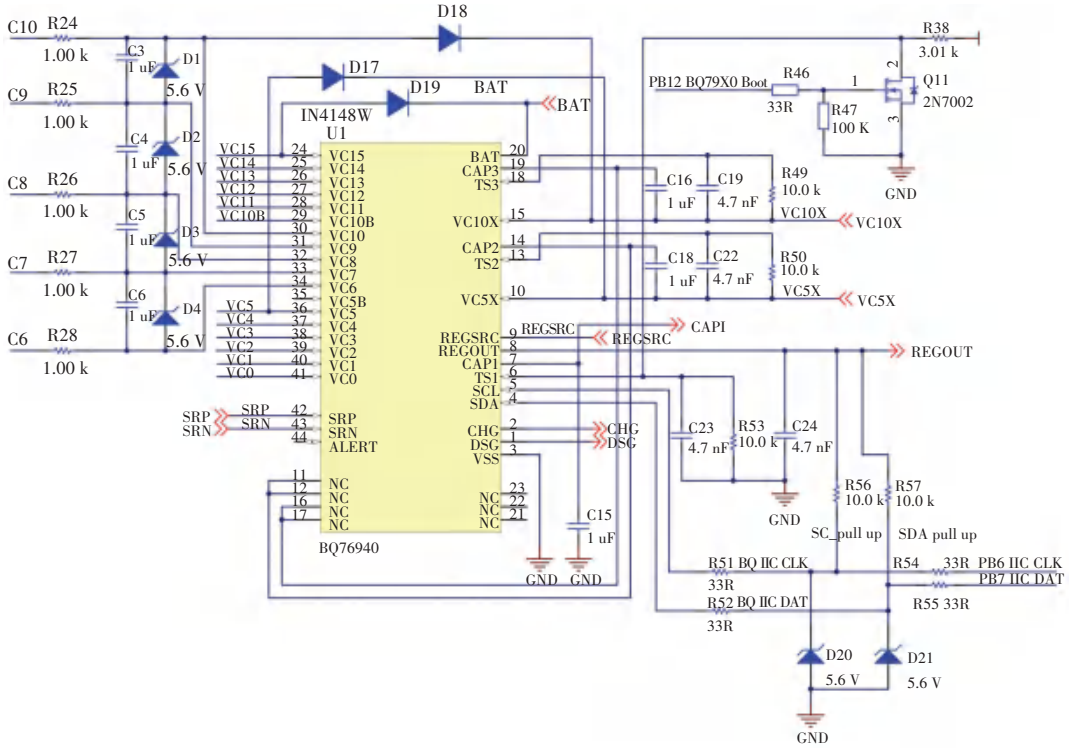


图 4 电压采集电路

Fig. 4 Voltage acquisition circuit

2.4 电流采样滤波电路

电流信号经精密采样电阻分压输入至放大器同相输入端,采集数据通过 LM358 双运放组成的多阶

低通滤波器输入至 MCU 的 PA0 引脚中,多阶滤波器的设计使得采集精度大大提高,电路如图 5 所示。

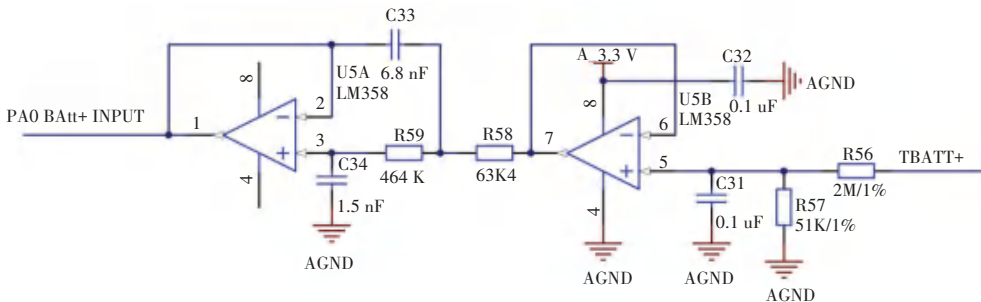


图 5 电流采样滤波电路

Fig. 5 Current sampling filter circuit

2.5 温度采样扩展电路

在充放电阶段,无论是工作状态温度、还是环境温度的变化都对锂电池的性能有着较大的影响,导致电池电压的检测出现较大的偏差,均衡效果受到

影响。BQ76940 最多直接支持 3 个热敏电阻的连接,如果需要多温度点的采集则必须选用多路选择器拓展温度通道,所以本设计将热敏电阻作为传感器,采用 74HC4051 高速 CMOS 器件设计了 8 路温

度采集通道,通过3个数字选择端和1个低有效使能端选择温度采集点,合成信号由LM358组成的跟

随器进行缓冲送入PA1引脚,如图6所示。

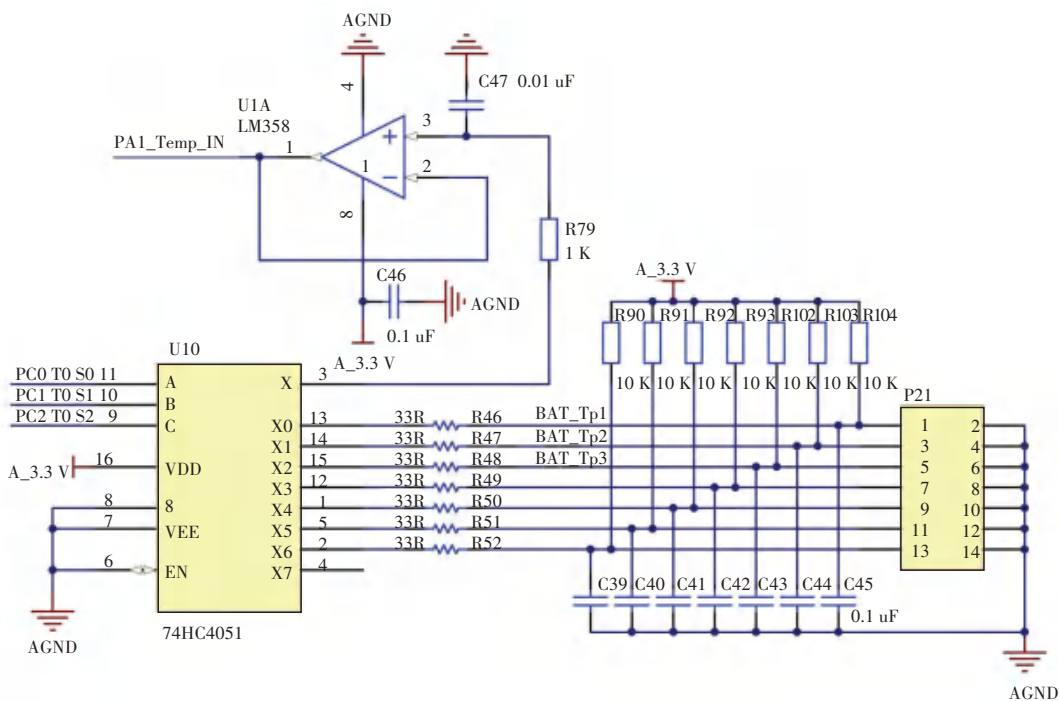


图6 温度采样扩展电路

Fig. 6 Temperature sampling expansion circuit

2.6 均衡电路

本设计采用基于单个 Buck-Boost 电路联合改进形成的控制电路,如图7所示。该拓扑结构的优点在于:开关器件少,拓扑结构简单,控制策略有效易行;损耗低,效率可观;能实现动态均衡;易于扩展和模块集成化。

高频滤波电容,在能量传输转移的过程中为均衡系统滤除杂波,同时在电路中并联消磁电阻 R1, R2, 加强均衡控制电路的稳定性,做到双重保护。

2.7 MOSFET 驱动电路

因为 MOS 管有一定的开断时间,在高频开关电路中会有较大开关损耗,而且 MCU 芯片的输出 IO 口的 PWM 波电平电压较低,达不到 MOSFET 的驱动电压,所以需要加入驱动电路设计。

设计采用高速驱动芯片 1EDI20N12AF,该芯片具有单通道隔离门极驱动,输出电流峰值可达 4A,驱动能力满足要求。MCU 产生的 PWM 波经 1EDI20N12AF 的 2 号脚输入,6 脚与 7 脚输出驱动 FDD8424 型功率开关,由于 MOS 管栅源级之间存在寄生电容,所以并联电阻 R1,使 MOS 管在关断期间能快速放电,防止 MOS 管误导通现象发生,电路如图 8 所示。

2.8 通信电路

BQ76940 与 MCU 之间是通过 I2C 进行通信的,本设计采用 TCA9517 双通道双向缓冲器提高数据传输的有效性和抗干扰性。TCA9517 驱动芯片不仅能够缓冲 I2C 双向线上的串行数据(SDA)和时钟(SCL)信号,同时还能保持 I2C 系统所有的工作模式和特性,实现信号稳定有效的传输,电路如图 9 所示。

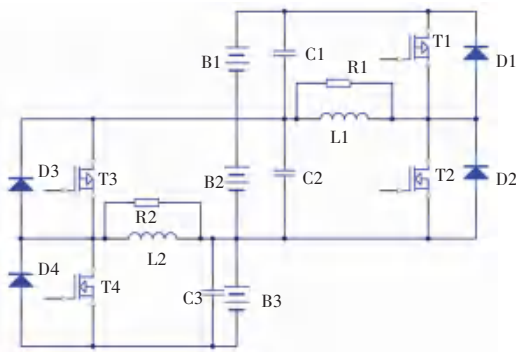


图7 均衡控制电路

Fig. 7 Equalization control circuit

以3节电池为例,其基本原理是将电感作为储能和能量转移元件,当单体电池 B1 电压高于 B2 时,MCU 产生占空比和频率一定的 PWM 信号施加在 MOSFET 上,当 T1 闭合时,电池 B1、开关管 T1 和电感 L1 组成通路,L1 在 T1 闭合期间储能,电感电流持续上升,当 T1 截止关断时,L1 储藏的能量会经过续流二极管 D2 为 B2 充电。其中,C1、C2、C3 为

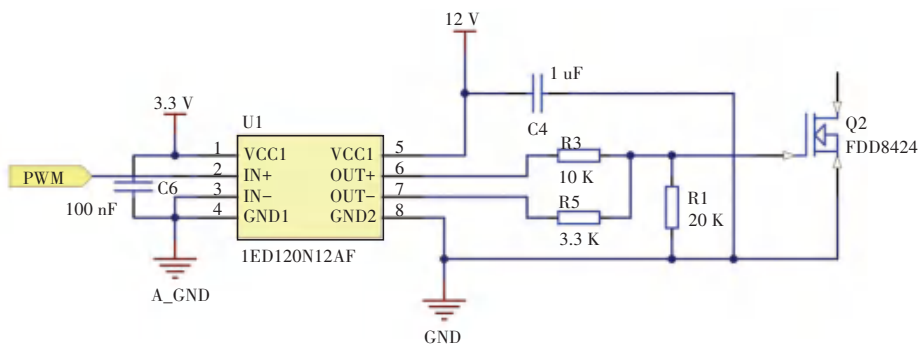


图8 MOSFET 驱动电路

Fig. 8 MOSFET drive circuit

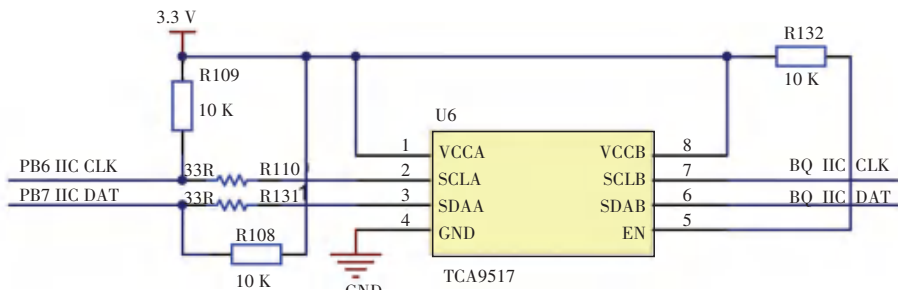


图9 I2C 通信电路

Fig. 9 I2C communication circuit

2.9 保护电路

由于均衡充放电过程中可能会出现过电流等现象,致使系统的稳定性得不到保障,所以必须设计保护电路,如图10所示。S-8255A是一款具有内置高精度的电压检测电路和延迟电路的芯片,该芯片可以监测3~5节串联电池,过充检测电压范围在3.5~

4.4 V左右,精度可达±20 mV。正常工作状态下,CO和DO端输出电压都为“H”状态,MOSFET导通,发光二极管关闭,当电池超过额定电压时,CO端输出“L”状态,DO输出“H”状态,此时Q2截止,Q4导通,发光二极管点亮报警,并禁止电池充电。

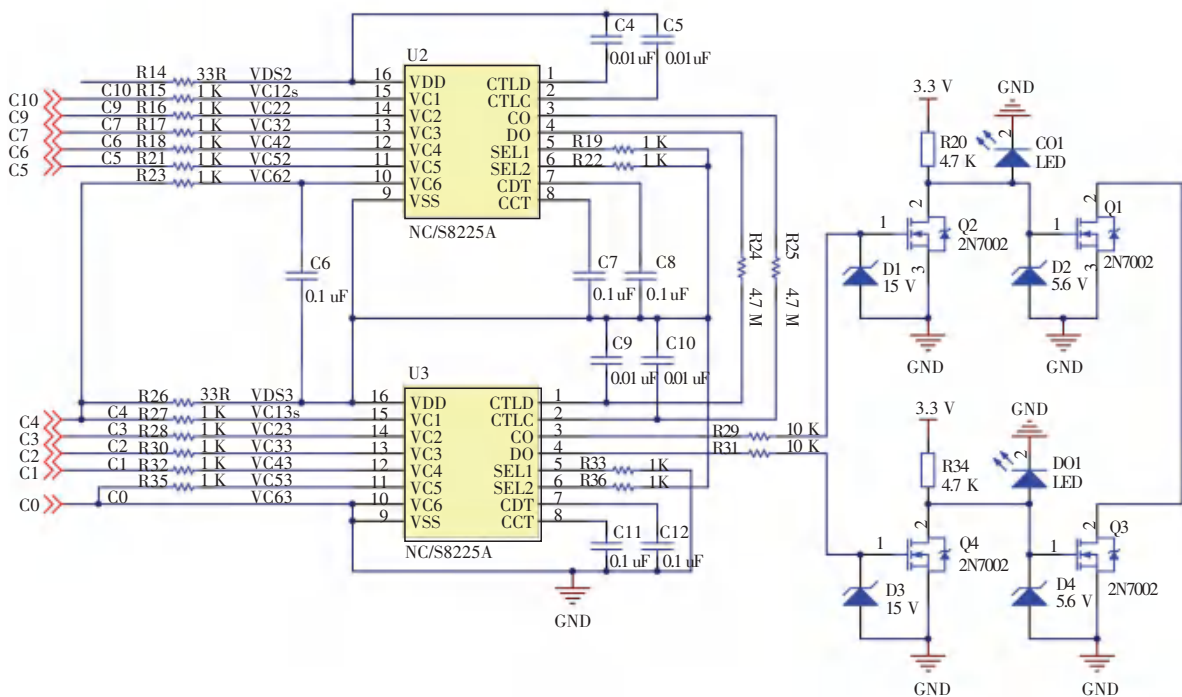


图10 保护电路

Fig. 10 Protection circuit

3 软件设计

本设计选用了 8 节标称电压约为 3.7 V, 2 600 mAh 的 18650 圆柱形锂电池, 其充放电截止电压分别为 4.2 V、2.7 V。定义 V_{B_1} 、 V_{B_2} 、 \dots 、 V_{B_n} 为各电池电压实时监测值, 极差 $\sigma = V_{B_{\max}} - V_{B_{\min}}$, 相邻电池间的偏差绝对值 $\Delta V_{B_{xy}} = |V_{B_x} - V_{B_y}|$ 。以充电均衡

为例, 采用分组均衡的方式, 每相邻 2 节电池分为一组, 首先找出 $V_{B_{\max}}$ 对应的电池 V_{B_i} , 分别计算与其相邻的电池电压 $V_{B_{i+1}}$ 和 $V_{B_{i-1}}$ 之间的差值, 选择差值中较大者对应的电池进行组间均衡, 即输出 PWM 波控制相应 MOSFET, 直至所有 $\Delta V_{B_{xy}} < k$ 且 $\sigma < \sigma_{set}$, 则结束均衡。放电均衡则只需寻找出最低电压的电池, 其余流程一致, 控制程序流程如图 11 所示。

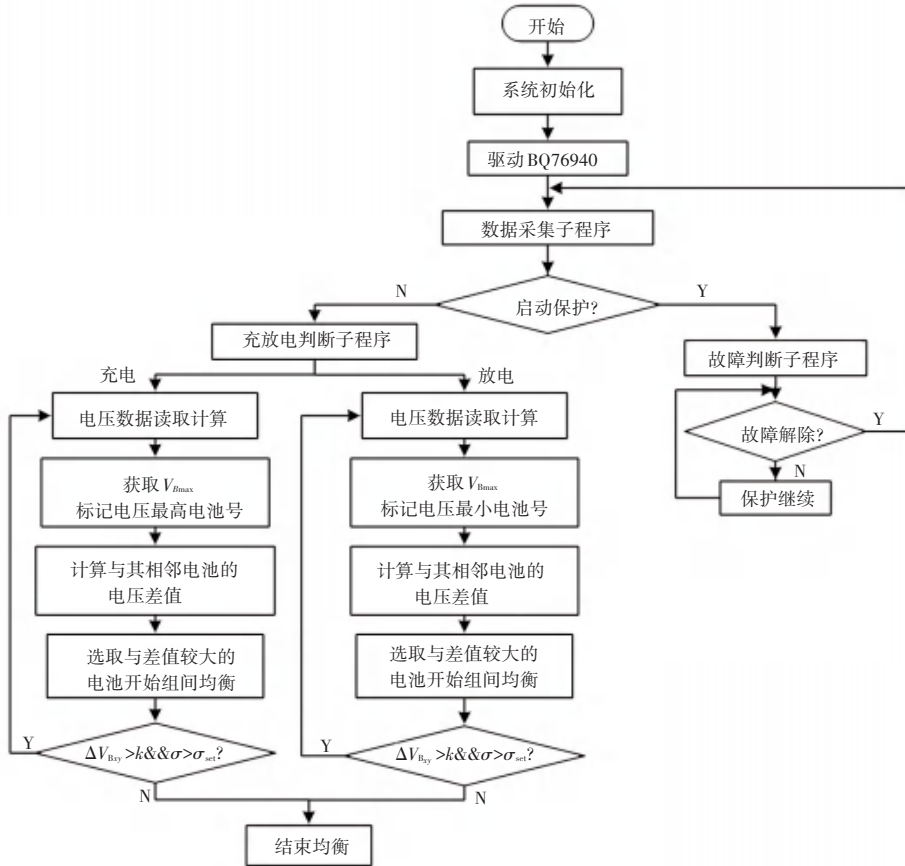


图 11 系统软件流程图

Fig. 11 System software flow chart

采用极差值法能够最大化地提高电池容量利用率, 通常情况下为保证系统能快速进入工作状态, k 值应设定较小, 但考虑到系统的稳定性, 避免反复出现均衡条件的判定, 而且受电压采集精度的限制, k 值不宜取太小, 一般选择采样精度的 2 倍左右, 本系统中设定值为 10 mV。

4 系统实现与实验结果分析

4.1 系统设计实现

本文以 8 节电池组成的电池组作为实验研究对象, 测试平台构建如图 12 所示。实验中, 稳压电源可以通过编程实现恒压、恒流、恒功率、脉冲电流等多种充放电形式, 所以既可作为系统的供电电源, 也可以作为电池组的充放电电源。



图 12 系统测试平台构建

Fig. 12 System test platform construction

4.2 电池电压精度测试

实测电池电压值是最直观反映动力电池当前工作状态的精确量,其测量的准确性会直接影响均衡效果。分别用精密万用表以及以 BQ76940 为核心的电压采集单元采集的电池电压值,数据对比见表 1。采集误差在 ± 5 mV 之内,精度在 $\pm 0.15\%$ 以内,满足设计指标要求。

表 1 电压测量数据对比

Tab. 1 Comparison of voltage measurement data

电池序号	万用表测量 数据/mv	采集单元测量 数据/mv	偏差/mv	精度 FS/%
1	3 666	3 671	5	0.14
2	3 685	3 681	-4	-0.11
3	3 659	3 664	5	0.14
4	3 686	3 684	-2	-0.05
5	3 653	3 656	3	0.08
6	3 678	3 674	-4	-0.11
7	3 672	3 675	3	0.08
8	3 654	3 659	5	0.14

4.3 均衡实验测试

第一次测试不加入均衡控制系统,直接接入电子负载进行恒流放电试验,每隔 5 min 记录上位机显示的数据,测试时间 60 min。第二次实验将 8 节电池充放电微调至与初始试验时相同大小的电压,然后加入均衡控制系统,对比数据见表 2。

表 2 放电均衡前后数据对比

Tab. 2 Data comparison before and after discharge equalization /V

电池序号	单体电压	未均衡电压	均衡后电压
1	3.671	2.961	3.008
2	3.674	2.815	2.999
3	3.675	2.854	3.012
4	3.675	2.971	2.998
5	3.778	3.121	2.996
6	3.674	2.780	3.015
7	3.676	3.063	3.012
8	3.673	2.712	3.008

可以看出,未均衡组电压最大值为 3.121 V,最小值 2.712 V,其差值已达将近 0.4 V,与之对应的均衡电池组,极差仅在 20 mV 之内,一致性得到明显改善。为了更直观观察均衡效果,将所有时间点记录进行数据统计并计算电压标准偏差值,来反映电池组的离散程度,趋势如图 13 所示。

可以观察到,加入均衡控制单元后,在其放电阶段,各电池之间的电压差距明显减小,且稳定在一定范围内,保障了电池组的一致性,避免了过放现象的出现。

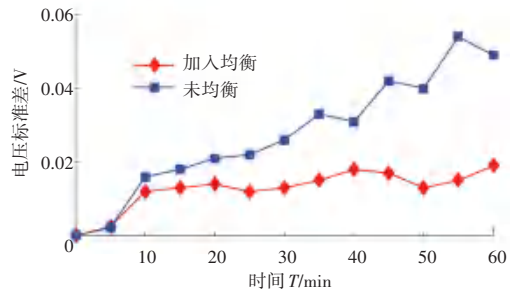


图 13 电池离散程度对比

Fig. 13 Comparison of battery dispersion

5 结束语

针对串联成组使用的电池存在的不一致性以及电池管理系统中数据采集单元精确性不高的问题,本文以 STM32F407 和 BQ76940 芯片为核心,采用 Buck-Boost 非能耗型均衡拓扑结构设计了数据采集和均衡控制系统,并搭建了 8 节 18650 锂电池测试平台进行实验,实验结果表明系统稳定性好、测量误差小,精度高,且均衡效果显著,极大地提高了电池组一致性。使用专用集成电路监测芯片可以大大减少元器件数量的使用,简化电路板设计的空间,对新能源汽车的电池管理系统研究具有一定的参考意义和工程应用价值,但在均衡效率方面还有进一步研究和优化的空间。

参考文献

- [1] 李建辉,王彩申,林心笑.基于 Buck-Boost 锂离子电池组均衡电路设计[J].自动化与信息工程,2017,38(1):13-17.
- [2] 鲁文凡,吕帅帅,倪红军,等.动力电池组均衡控制系统的研究进展[J].电源技术,2017,41(1):161-164.
- [3] 安富强.电动车用锂离子电池的一致性研究[D].北京:北京科技大学,2017.
- [4] 谢凯,潘明,张向文.电动汽车动力电池主动均衡控制设计[J].计算机仿真,2017,34(6):156-161.
- [5] 窦汝振,翟世欢,赵钢.动力电池组电压采集及均衡控制策略研究[J].电测与仪表,2015,52(2):90-94.
- [6] 李锐华,李冀,胡波,等.基于 Buck-Boost 变换器的磷酸铁锂电池串联电压均衡优化策略[J].电气技术,2018,19(3):1-7.
- [7] 李文辉,冉峰,徐浩,等.一种动力锂电池管理系统的研究与设计[J].工业控制计算机,2015,28(8):161-162,164.
- [8] 张彦会,孟祥虎,肖婷,等.一种主从式电池管理系统的设计[J].广西科技大学学报,2015,26(3):60-64.
- [9] 肖林京,常龙,张瑞雪,等.基于 LTC6803 串联锂电池组电压检测及均衡系统[J].测控技术,2015,34(4):43-46,50.
- [10] 夏骏,杜明星,刘斌.基于 LTC6802 的电动汽车电池管理系统均衡控制及硬件设计[J].天津理工大学学报,2016,32(4):20-23,33.
- [11] 杨洁,廖俊杰,谷肖飞,等.基于 STM32F407+BQ76PL536 的电池管理系统设计[J].电源技术,2018,42(11):1640-1643.