

基于最优路径选择的电池组主动均衡方法研究

王顺利¹, 安文倩², 夏承成¹, 屈 维¹, 蒋正钢¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 燕京理工学院, 河北 燕郊 065201)

摘要: 蓄电池应用过程中, 由于单体之间的材料差异会出现单体间剩余容量的不平衡问题, 进而会引发很多安全隐患; 针对此问题, 基于最优路径选择原理, 提出了一种主动均衡方法; 该方法通过蓄电池组使用过程中的实时反馈电压数据, 结合最优路径选择, 通过单体之间多对多的平衡方式, 实现了蓄电池组各个单体过充、欠充、过放、过温情况下相互之间的均衡; 实验结果表明, 该方法能够在蓄电池使用过程中, 针对单体之间的不平衡状况, 基于不平衡度计算进行最优均衡路径组合的确立, 针对不同充放电电流状况均衡效率均在 80% 以上, 能够快速高效地实现电池组的主动均衡。

关键词: 蓄电池组; 在线均衡; 最优路径选择; 单体; 均衡策略

Battery Active Equalization Method Based on Optimal Path Selection

Wang Shunli¹, An Wenqian², Xia Chengcheng¹, Qu Wei¹, Jiang Zhenggang¹

(1. School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Yenching Institute of Technology, Yanjiao 065201, China)

Abstract: During the battery application process, the remaining capacity imbalances problem will occur due to material differences between monomers, and thus will lead to a lot of security risks. To solve this problem, based on the optimal path selection principle, a kind of active equalization method was studied. In this method, the process of using batteries for real-time feedback voltage data, combined with optimal path selection, through a balance between monomers to many ways in case of every single battery overcharge, charge less, over discharge, over-temperature. Experimental results showed that the method could use the process in the battery for the imbalance between the monomer, based on calculations unbalance the establishment of optimal equilibrium path combination, for different charge and discharge current situation were balanced efficiency above 80% that being able to quickly and efficiently implement active balance of the battery pack.

Key words: battery; online equilibrium; optimal path selection; monomer; equilibrium strategies

0 引言

蓄电池作为一种比较安全稳定的供电能源在很多场合得到应用, 尤其是在航空航天以及电动汽车应用领域, 由于蓄电池单体电压和容量较小, 无法满足现场应用需求, 因此通过把多节单体电压进行串联, 进行更大容量和更大电压的能源供电这种方式得到较为普遍应用, 例如本课题研究的作为飞机备用能源的机载镍镉电池使用 24 节单体串联方式供电, 机载锂电池采用 12 节单体串联方式供电。

由于单体之间制作工艺的差别, 在使用过程中就会出现单体之间电压和剩余容量不平衡问题, 长时间的积累就会造成很大的安全隐患, 需要实时均衡处理。针对此问题, 很多研发人员进行了很多方法尝试研究^[1-6], 但是由于配套的 BMS 系统体积等限制, 只能应用比较简单快速的均衡方法。现行比较成熟的技术是使用被动均衡的方式通过把高出能量消耗掉从而达到均衡的目标, 这种方式简单可靠, 但是存在有效能源不能充分利用以及能量消耗的散热问题。

针对该问题的解决, 本研究基于把能量进行单体之间转移的方式进行主动均衡调节, 通过不太复杂的权衡运算, 进行最优均衡路径的选择, 能够高效快速地对单体之间的电压和剩余

容量进行均衡。

1 原理分析

1.1 在线均衡策略研究

为了进一步提高蓄电池使用时间, 研究了对电池组的主动均衡, 通过电容、电感等储能元件实现能量的转移、暂存与释放, 通过能量的存储和转移的方式达到均衡目标, 通过这种方式以提高能源利用效率。

提出的基于实时单体参量高精度检测与快速反馈调节的主动均衡方法是使用电感、电容等储能元件转移能量使电压、容量保持一致, 能够实现较大电流的均衡且具有较高的均衡效率。具体实现方法如下。

1.1.1 定时检测蓄电池电压

预设采样间隔时间进行定时蓄电池电压采样, 单体电压以及蓄电池组电压通过 EMI 滤波、信号调理、ADC 模块传入单片机参与运算处理;

1.1.2 分析决策

对采集到的电压进行综合分析, 评判不平衡的程度, 对充放电组合进行决策或修正, 调整 PWM 波的占空比和输出编码信号;

1.1.3 均衡调节

决策数据编码信号译码后控制多路选择器组, 对单体充放电进行组合, 并匹配对应的 PWM 波控制的升压幅度, 经过线性稳压后实现单体间的充放电。

1.2 最优路径选择方法研究

主动均衡策略对整个系统的调节起着关键性的作用, 针对构建的最优路径选择模型, 输入参数为各个单体以及整个蓄电

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-02-19。

基金项目: 自然科学基金(11176032); 西南科技大学实验技术项目(13syjs-43)。

作者简介: 王顺利(1985-), 男, 助教, 硕士, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

池组电压的电压, 针对 n 个单体的蓄电池组, 输出参数为针对每个单体的放电、充电、空置三态的决策 ($3 * n$)、单体间的组合决策以及 boost 升压电路的 PWM 波占空比的微调。

1.2.1 偏差度计算

单体电压和与总电压的比较: 比较单体电压 $V_s = V_1 + V_2 + \dots + V_n$ 与蓄电池组电压 V_T ,

- 如果 $V_s > V_T$, 则蓄电池处于放电状态;
- 如果 $V_s < V_T$, 则蓄电池处于充电状态;
- 如果 $V_s = V_T$, 则蓄电池处于充电状态。

原因在于单体电源中存在内阻 r , 在蓄电池组进行工作时, 内阻 r 进行串联分压。

同时计算二者的相对差值以确定工作电流的大小, 以判断工作状态是常态还是异态, 计算方法如公式 1 所示。

$$\delta = \frac{V_s - V_T}{V_s} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n - V_T}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (1)$$

式中, V_s 为各个单体电压之和, V_T 为蓄电池组检测到的端电压, n 为蓄电池组单体的个数。

通过对蓄电池组电压的判断确定蓄电池组正常放电工作状态、充电状态、闲置状态或临时大电流工作状态等工作状态, 进而确立主动均衡的采样及调节频率。

1.2.2 单体不平衡度计算

通过计算单体不平衡度进行平衡策略的确定以及所用到的 boost 升压电路的 PWM 波占空比的确立。

首先计算单体剩余容量的的平均值如公式 2 所示:

$$E(Q) = \bar{Q} = \frac{Q_i}{n} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \quad (2)$$

式中, Q_i 为各个单体的容量之和, n 为单体的个数。

接着计算所有单体剩余容量的的样本方差, 以确定均衡单体的数量和作为决定 boost 升压程度的 PWM 波占空比的参考参数之一, 计算过程如公式 (3) 所示:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - E(Q))^2 \quad (3)$$

然后计算每个单体电压的相对标准偏差, 以确定单体平衡组合以及作为 PWM 波占空比的调节参数, 计算过程如公式 (4) 所示:

$$q_i = \frac{Q_i - E(Q)}{E(Q)} \times 100\% \quad (4)$$

设定均衡条件阈值 q , 如果 $|q_i| > q$, 则第 i 节单体需要进行均衡, 根据不平衡度的大小确定所需 boost 升压值, 结合成对平衡以及总蓄电池能量可以为单个单体充电的特征, 最终确定充放电单体的数目和组合。

1.2.3 最优路径组合的确立

根据确定的均衡策略, 多路选择器动作, 确定充放电的单体组合和数量, 对单体间的电压不平衡情况进行调节。

2 设计与实现

2.1 硬件设计

基于主动均衡原理, 设计硬件控制系统, 通过形成闭环控制的方式, 在蓄电池组工作同时, 构建电池管理系统形成蓄电池组总电压对多个单体的主动均衡充放电模式。

通过均衡控制单元, 让蓄电池组对不同程度的不平衡单体进行充放电维护, 实时对单体电压与容量进行调节, 达到蓄电池工作过程中的主动均衡目标。

系统主要由参数检测模块、SOC 计算模块、均衡控制模块、主控单元模块、外部通信模块这六大单元构成。其中主控单元负责整个系统的协调, 涉及部分参数的处理、存储, 对均衡模块的控制, 以及通过外部通信接口实现输入输出, 设计主动均衡整体结构如图 1 所示。

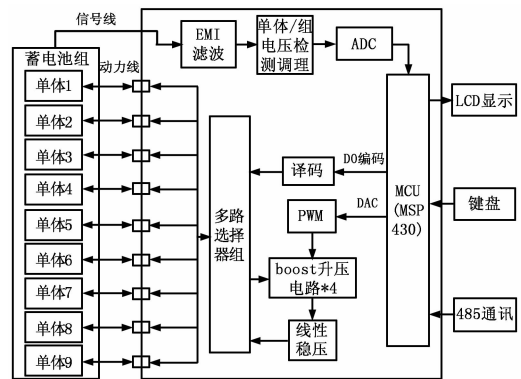


图 1 主动均衡结构框图

boost 升压电路的设计与实现是整个系统进行多对多均衡的重要部分, 能够实现对单体较低电压升压至指定可充电电压, 以实现大电压单体对小电压单体的充电功能, 升压原理如图 2 所示。

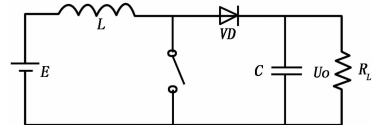


图 2 主动均衡软件模块框图

当开关闭合时, 对电感进行充电, 当开关断开时, 基于电感 L 的电流保持、不能突变的特性, 向电容充电, 进行储能和升压, 基于 TPS40210 设计升压电路如图 3 所示。

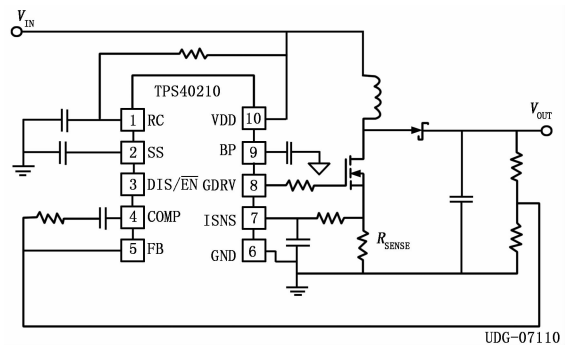


图 3 主动均衡软件模块框图

输出电压经过串联线性稳压电路后给指定单体充电, 直至下次均衡调节信号的发出。

对各个模块的主要处理过程如下所述:

(1) 电压和温度等参数检测:

在主动均衡过程中, 通过对蓄电池组各个参数信息的周期性采样, 达到输入参数并分析的 MCU 处理需求, 主要参数指标如表 1 所示。

表 1 检测参数表

参数	单体电池电压	单体电池温度(°C)	电池组电流(A)	电池组电压	电池组容量(%)
误差	≤0.5%	±1	±1	±5 mV	≤5
测量范围	0~5 V	-30~85	0~350	0~45 V	0~100

表 2 采样结果表

P	Av	Var	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
CT11	3.003	3 001.18	1.84	3 003.08	3 003.62	2 999.04	3 001.10	3 001.48	2 998.66	3 003.23	3 002.78	2 999.73
CT12	3.004	3 001.67	2.46	2 999.88	2 998.35	2 999.27	3 002.78	3 003.77	3 000.18	3 001.78	3 004.53	3 006.29
CT13	3.005	3 003.37	1.73	3 000.34	3 000.72	3 003.16	3 005.98	3 002.09	3 004.46	3 004.15	3 004.76	3 003.54
CT14	3.005	3 002.43	0.87	3 003.46	3 002.32	3 002.85	3 003.54	3 001.48	3 003.62	3 002.17	3 002.24	3 001.63
CT15	3.005	3 003.21	1.17	3 002.40	3 002.01	3 004.00	3 000.95	3 004.99	3 004.07	3 003.69	3 002.55	3 004.38
CT16	3.005	3 003.51	1.38	3 002.70	3 005.07	3 004.99	3 002.47	3 004.91	3 005.07	3 001.10	3 002.24	3 002.62
CT17	3.006	3 004.06	1.47	3 002.01	3 002.78	3 004.99	3 005.07	3 004.38	3 003.23	3 002.85	3 006.21	3 002.70
CT18	3.006	3 003.78	1.45	3 003.23	3 002.78	3 005.14	3 003.62	3 005.91	3 006.13	3 001.94	3 002.09	3 004.30
CT19	3.001	3 001.01	2.70	3 002.62	2 996.37	3 001.79	2 996.67	3 001.79	3 004.68	3 003.77	3 003.01	2 999.42
CT10	3.001	3 000.63	2.37	2 998.73	3 004.46	3 003.62	3 002.70	2 997.36	3 000.72	2 997.21	3 001.17	3 000.95

(2) 信号的抗干扰处理:

针对信号的高保真采样需求, 主要采用以下措施进行抗干扰处理。

首先, 对供电与信号采样地线进行分离, 经过实验发现, 如果对模拟信号的输入信号, 如果采用电压电流信号的地线与电源线的地线进行共地的话, 会引入电平干扰, 影响采样精度, 因此, 采用地线分离的措施进行解决。

其次, 对均衡电路的总开关控制均采用 PC817C 光隔器件进行光电隔离, 以排除电路中的电压纹波对整个采样回路的电压信号影响。

然后, 针对接地端子, 均采用反向二极管的连接方式对地线端的不平衡状态进行放电操作, 以保持整个系统的地线达到等零位电势的目标。

最后, 对于电路中的滤波处理, 采用 100 μF/50 V、10 μF/50 V、100 nF/50 V、100 pF/50 V、22 pF/50 V 多个电容并联的方式, 消除不同频率的干扰信号的影响。

2.2 软件设计

根据主动均衡方法设计软件功能整体结构如图 4 所示。

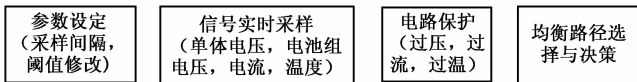


图 4 在线均衡软件结构

软件处理主要包括内容如下。

2.2.1 SOC 容量估计

系统对蓄电池单体容量估算采用融合开路电压修正 (OCV-SOC) 的分段安时法, 通过查表的方式获得蓄电池的初始容量作为初始值, 通过安时积分的方式进行容量的估算, 计算公式如公式 (5) 所示:

$$SOC = SOC_0 + \frac{\eta \int_0^t I_t dt}{C} \quad (5)$$

式中, SOC_0 表示起始时刻的值; C 为额定容量, η 是库仑效率 (放电=1, 充电<1)。 I_t 为电池充放电电流, 充电为正, 放电为负。

2.2.2 电路保护

通过信号的实时采样, 得到电压、电流、温度信号量值, 通过对量值的判断, 确定系统工作的状态, 进而对容易出现的过热、过压、过流现象进行自我保护。

3 结果与分析

针对该方法研制的均衡系统进行实验分析研究, 对采样的

精度, 运行的可靠性, 环境的适用性进行实验测试, 以达到该方法的性能测试验证目标。

系统采用 16 位的 A/D 对模拟信号进行采样, 通过对系统输入线性电源的标准信号, 验证系统的采样精度是否达到预期指标, 实验结果如表 2 所示。表中, P 表示通道, Av 代表 10 次采样的平均值, Var 代表方差值, Cx 代表第 x 次采样的模拟量值。从表中数据可以看出, 采样模拟数据的绝对误差低于 10 mV, 相对误差约为 0.3%, 满足模拟量采样精度要求, 同时, 综合考虑性能考察目标, 测试过程均为从电池近端 (均衡系统远端) 输入的方式, 以保证测试结果的正确性。

在基础信号采样测试完成后, 系统从适用性的角度出发, 考验不同蓄电池单体状态和不同电流充放电过程进行电池应用现场的性能测试, 测试结果表明, 该主动均衡方法能够较快地实现对不同应用的单体电压和容量条件进行均衡调节, 最终使得单体剩余容量的在线自动调节。

4 结语

该基于最优路径选择的单体电压主动均衡方法能够实现对 9 节单体串联的蓄电池组单体电压均衡, 通过多对多的均衡方式和最优路径选择的均衡决策判断实现单体间多对多的充放电调节, 能够较快速实现单体电压的均衡。同时, 考虑成本及优化问题, 后续针对优化 boost 升压电路的个数以及结合蓄电池组总电压对较低电压充电方式进行更优化决策设计进行理论分析和实验研究。

参考文献:

[1] 张 宾, 郭连兑, 李宏义. 电动汽车用磷酸铁锂离子电池的 PNGV 模型分析 [J]. 电源技术, 2009, 33 (5): 417-421.
 [2] 杨春雷, 刘志远. 一种电动汽车动力电池均衡控制方法的设计 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45 (8): 1186-1190.
 [3] 宋海飞, 曹 亚, 王 艳. 一种新颖的动力电池均衡方法研究 [J]. 电力电子技术, 2013, 47 (4): 6-10.
 [4] 侯中峰, 谢利理, 茹 芬. 航空蓄电池温度控制器的设计和实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1373-1376.
 [5] Hu X S, Sun F C, Cheng X M. Recursive calibration for a lithium-iron phosphate battery for electric vehicles using extended Kalman filtering [J]. Zhejiang University - Science Article, 2011, 12 (11): 828-825.
 [6] 梁 伟, 王建华, 卢 刚. 基于 BQ24032 的锂电池充电管理电路设计 [J]. 兵工自动化, 2010, 29 (6): 37-40.