

基于改进型飞渡电容的电池组动态 均衡控制方法研究

赵汉宾¹, 马 锋², 叶晓东¹, 于海武¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 江苏常州 213164;
2. 江苏晶浩电子科技有限公司, 江苏常州 213000)

摘 要: 为了改善由于电池单体之间差异而导致的电池组在充放电过程中的失衡问题, 在对飞渡电容和辅助充电电源均衡方法深入研究的基础上, 通过改进储能电路设计, 搭建了一种新型电池组管理系统, 给出了电池组处于放电和充电两种状态下的均衡控制方法, 并将该系统用于胃肠道机器人外部无线接收器进行实验研究. 研究结果表明该系统可工作于辅助充电电源均衡和能耗均衡两种模式下, 与改进前相比, 电池组实际容量及其利用率均提高2倍以上.

关键词: 飞渡电容; 电池组; 均衡控制; 胃肠道机器人

中图分类号: TM91

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)04-0819-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.04.008

Battery Dynamic Balance Control Algorithm Based on Modified Flying-Capacitor

ZHAO Han-bin¹, MA Feng², YE Xiao-dong¹, YU Hai-wu¹

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou, Jiangsu 213164, China; 2. Jiangsu Jinghao E-Technology Co. Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China)

Abstract: In order to improve the unbalancing problem of battery caused by the difference between single cells during the charging and the discharging processes, an improved energy storage circuit and a new type of battery management system were designed based on the study of flying-capacitor and charging power balance method, while at the same time, a balance control method was developed. A test was carried out on the wireless receiver of gastrointestinal robot, showing that the battery management system can work on the type of assisted charging balance as well as the type of energy consumption balance, and has more than twice the actual capacity of the battery pack and its utilization, compared to the previous balanced control method.

Key words: flying-capacitor; battery; balance control; gastrointestinal robot

1 引言

在便携式设备研发过程中, 电池管理技术是已被公认的技术瓶颈. 胃肠道机器人外部无线接收器是一个典型的便携式设备, 需要较高的工作电压和较长的工作时间(一般要求6h以上), 并且要求电池组的输出电压、输出电流和剩余容量等参数及时反馈给接收器, 以便及时报警并保存数据到SD卡中. 为了满足胃肠道机器人无线接收器对电池组的特殊要求, 研发一款智

能电池管理系统是很有必要的. 锂电池在能量密度、重量体积方面相比于铅酸电池、镍氢电池以及碱性电池都有很大的优势, 因此, 选用锂电池作为电池组的电芯. 由于锂电池单体电压较低(一般3.6V左右), 为了满足接收器的高电压供电要求, 需要多节锂电池串联使用. 但是锂电池受原材料品质、生产工艺、工作环境等因素的影响, 电池组在经过多次充放电过程后, 电池间差异将逐步显现^[1,2], 导致的过充或过放会严重损害电池的性能和寿命, 严重时还会发生起火或爆炸的情况. 因此,

收稿日期: 2016-11-24; 修回日期: 2017-05-15; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 江苏省自然科学基金(No. BK20141160); 中国科学院青年创新促进会(No. 2016387); 国家青年科学基金(No. 61401437)

在锂电池组使用时,需采用均衡技术来消除电池间的性能差异.目前,均衡控制技术主要有稳压管法^[3,4]、开关电阻法^[5]、buck-boost 变换器法^[6~8]、飞渡电容法^[9]和辅助充电电源法^[10].其中稳压管法和开关电阻法只可用于充电过程中的电压均衡,且稳压管和电阻会发热,耗费能量^[11],目前只在一些要求较低场合(如电动工具)使用.buck-boost 变换器法虽然能量损耗少,并在充放电过程中均可以均衡,但是使用的功率器件众多,成本高,实际应用较少.飞渡电容法由于具有结构简单,能量损耗少的优点,并且可在充放电过程中均可均衡,是目前广泛采用的一种均衡方式.该方法均衡电流的大小受到均衡电容和被均衡电芯电压差的限制,随着均衡过程进行,均衡速度会越来越慢^[11].辅助充电电源法是飞渡电容法的一种改进.该方法采用隔离型的辅助充电电源代替飞渡电容法中的均衡电容,均衡电流的大小取决于电源输出电流的大小,不再受电芯电压的限制,均衡速度可以得到有效提高.同时,该方法可以在待机、放电和充电状态进行均衡,但是在充电过程中容易出现电芯过压现象.鉴于此,本文以提高均衡速度和避免电芯过压为目标,对辅助充电电源法进行了进一步改进,并设计了均衡控电路以及控制方法.

2 电池管理系统概述

2.1 电池组设计

胃肠道机器人外部无线接收器所用电池组采用 16 个磷酸铁锂电芯(即单个电池)串联作为动力电源,如图 1 所示.每个锂电芯的工作电压范围 2.5~3.85V,容量为 5Ah.电池组的工作电压范围为 40~61.6V,存储容量可达 308Wh.电池组输出分为两路,一路输出 48V,为无线接收器的无线供电部分提供电源;另一路输出 5V,为无线接收器的控制系统供电.

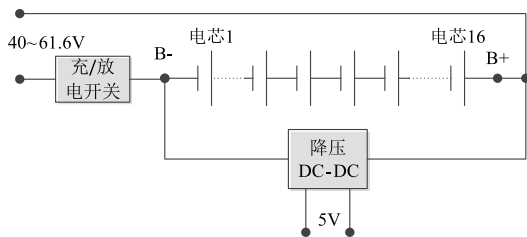


图1 电池组串联示意图

2.2 电池组管理系统设计与实现

飞渡电容均衡电路如图 2 所示.其中,开关 SW1、SW2 和 SW3 均为联动双刀开关,最高压电芯为电池组中电压最高的电芯,最低压电芯为电池组中电压最低的电芯.工作原理如下:首先,断开 SW3,依次测量电池组所有电芯电压,找出其中的最高压电芯和最低压电芯,然后通过闭合 SW1 和 SW3 使最高压电芯与均衡电

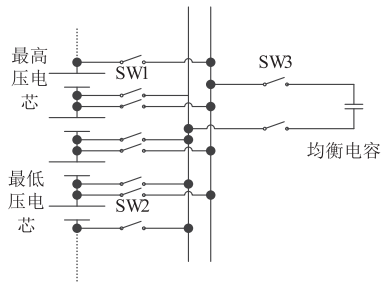


图2 飞渡电容均衡电路原理图

容并联,最高压电芯开始为均衡电容充电,经过一段时间延时,最高压电芯与均衡电容电压达到相同,切断均衡电容与最高压电芯的电气连接.最后,闭合双刀开关 SW2 使低压电池与均衡电容并联,均衡电容开始为最低压电芯充电,经一段时间延时后均衡电容与最低压电芯电压达到相同.从以上均衡过程中可以看出:均衡电容与被均衡电芯之间的电压差决定了均衡速度.在均衡电容内阻和电芯内阻一定的情况下,电压差越小均衡速度越慢.为了获得较高的均衡电流,需要提高均衡电容与被均衡电芯之间的电压差,然而均衡电容的电压受最高压电芯电压值的限制,总小于或等于最高压电芯的电压.根据文献[11]中的电流计算公式,并将本文所用充电电芯等效成大电容,通过计算可以得到如下结论:飞渡电容法的均衡电流按照指数衰减且最大值只有 100mA.因此,要提高均衡电流,需要对均衡电容部分进行一定的改造.

为了消除均衡电容电压的限制,辅助充电电源法采用一个辅助充电电源代替均衡电容,工作原理如图 3 所示.充电器为电池组专用充电器,从外部电网获取电能.辅助充电电源一般由隔离型 DC-DC 模块实现,从电池组获取电源,其输出电压远高于电池组内所有电芯的电压,并且输出保持恒定,不受被均衡电芯电压的影响,可以维持较高的充电均衡电流.但是该方法仅能对电池组中的电压较低的电芯进行充电升压,却对于电压较高的电芯无法实现放电降压,从而易发生电芯电压充电过压现象.

为了解决电芯充电过压问题,在辅助充电电源的输出端并联一个能耗均衡电路,在易出现电芯过压的恒压充电阶段关闭辅助充电电源,转而使用能耗均衡电路实现放电降压,其工作原理如图 4 所示.

其中,功率电阻和开关 SW3 构成能耗均衡电路,辅助充电电源为可控直流电源,引脚 CTR 可以控制该电源的电压输出.当电芯电压高于某一设定值(具体值根据电芯参数设定),微控制器通过拉低 CTR 引脚关闭辅助充电电源,并闭合 SW3 接通能耗均衡电路,被均衡电芯电压得以降低,避免了电芯过压现象的发生;当低于该设定值时,断开能耗均衡电路,通过拉高 CTR 引脚开

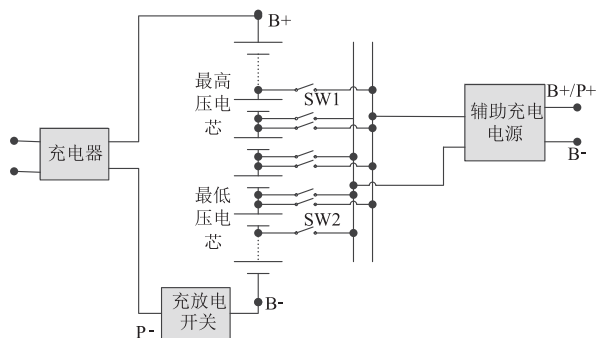


图3 辅助充电电源均衡原理图

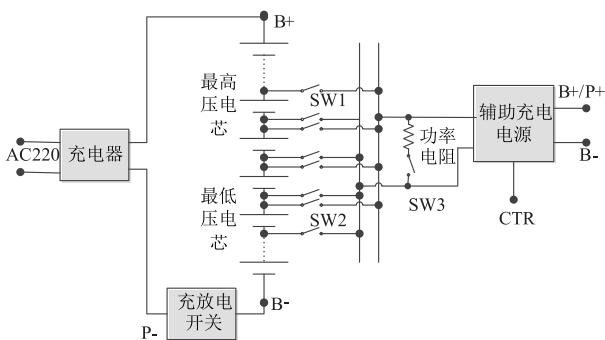


图4 改进型飞渡电容均衡电路原理图

启辅助充电电源,为最低压电芯进行充电,进而提高该电芯电压.能耗均衡方式只可能发生在充电状态下,能量由外部充电器提供,因而不会损耗电池组的能量.为了简化电压测量电路,系统的电源地时刻与被测量电芯负端相连,如图5所示.

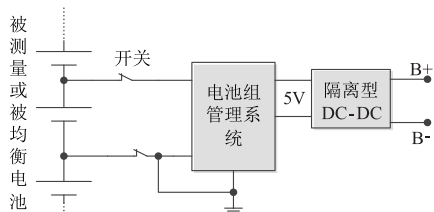


图5 电池组管理系统动态共地示意图

为了实现上述均衡控制策略,所对应的电池组管理系统需包含以下功能:多路电芯电压测量、隔离电源供电、均衡电路控制、充放电开关控制以及电芯温度检测.此外,由于胃肠道机器人无线接收器需要两路输出(一路48V,一路5V),同时还需要显示环境温度、电池组总电压等参数,因此,系统需要增加大功率直流降压、温度检测以及LCD显示等功能.胃肠道机器人无线接收器电池组管理系统框图如图6所示.

电池管理系统主要由隔离型 DC-DC 模块、微控制器、LCD 显示屏、按键阵列、ADC 模块、电压测量电路、均衡电路、光耦继电器开关阵列、隔离型 MOS 管驱动电路、温度传感器、16 串电池组、充放电开关、充电器和大

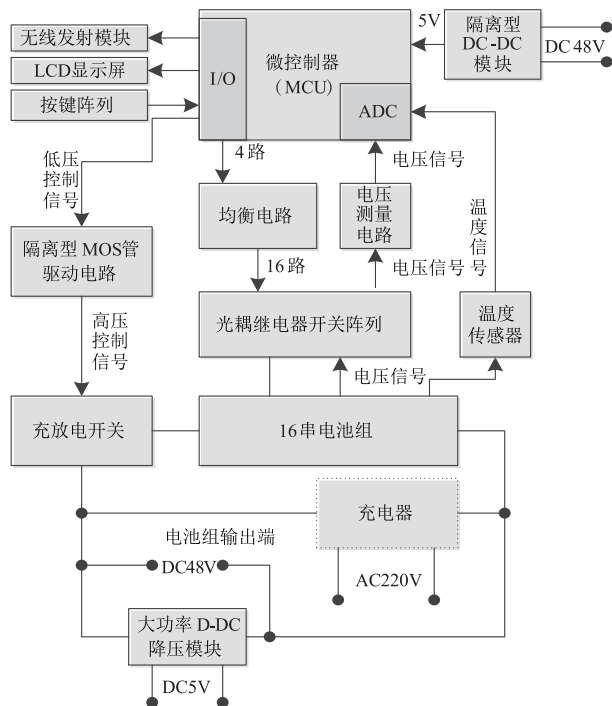


图6 无线接收器电池组管理系统框图

功率 DC-DC 降压模块构成。其中,隔离型 DC-DC 模块为整个系统提供电源,其中包含均衡电流,所以功率要尽可能大一些;微控制器完成数据采集和均衡控制策略实现;无线发射模块用于上传数据给远程 PC 机;LCD 显示屏用于显示 16 串电芯电压、总电压、电池组温度等信息;按键阵列用于人机交互,系统参数可通过按键输入;ADC 模块和电压测量电路共同完成电芯电压测量;均衡电路和光耦继电器开关阵列实现均衡功能,在恒压充电阶段能耗均衡电路起作用,其他状态,驱动电路中的辅助充电电源提供均衡充电电流;均衡电路中的能耗均衡回路由 MOS 管和大功率能耗电阻构成,能耗电阻一般选用绕线电阻、水泥电阻等功率电阻器件,并且其安放位置应该远离温度敏感器件(如热敏电阻)。隔离型 MOS 管驱动电路为充放电开关 MOS 管提供驱动电流,实现充放电的通断操作,同时保证充放电开关电路与管理系统电气隔离;温度传感器组采用两个 NTC 热敏电阻构成,分别采集电芯温度和环境温度;锂电池组输出分为两部分,一部分直接为胃肠道机器人无线接收器中的无线供电电路提供电源,另一部分通过大功率 DC-DC 降压模块降压后为接收器控制系统提供 5V 电源。

3 均衡控制方法及实现

3.1 辅助充电电源的选型

辅助充电电源由隔离型的 DC-DC 模块和高效的降压模块构成. 电芯均衡时要通过光耦继电器将辅助充

两个并联 51K 的电阻构成),换成阻值为 34.3K 的电阻即可。

3.2 控制算法

该电池组均衡管理系统软件控制方面包括电池组参数数据采集(电芯电压、充/放总电流、电池组温度)、均衡控制、充/放电控制、过/欠电压保护和 LCD 显示 5 部分。在这里只介绍均衡控制的实验方法。

电池组管理系统的工作状态一般有待机、放电和充电 3 种状态。但对于改进型辅助充电电源均衡控制而言,待机和放电状态可以归为同一种状态,待机状态可认为是小电流放电状态。因此下面从放电和充电两种状态进行分析。

(1) 电池组处于放电状态时,控制流程图如图 9 所示。图 9 中, $U_{\max}(t)$ 为某一时刻串联电池组中最高压电芯的电压, $U_{\min}(t)$ 为某一时刻串联电池组中最低压电芯的电压, $\Delta V(t)$ 为某一时刻电池组中电芯间最大偏差电压,即满足 $\Delta V(t) = U_{\max}(t) - U_{\min}(t)$, ΔV_c 为均衡开启时的电压差值, ΔV_c 设置越小电芯间电压一致性越好,反之,则电芯间电压一致性越差。均衡时间主要由延时时间决定,根据电芯容量的大小适当调整延时时间。保持均衡状态的延时时间决定了被均衡电芯的充电时间,延时时间越长充电时间越长,电芯电压上升速度也就越快,反之,则电压上升速度变慢,但是过快的电压变化速度会影响均衡电路的电压控制精度。设置的一般原则是:电芯容量越大延时时间越大,具体数值可根据实验确定。放电状态下均衡控制流程如下:首先,关闭所有均衡回路并采集串联电池组中所有电芯的电压数据,然后从采集的电压数据找出串联电池组中最低压电芯和最高压电芯,并根据两电芯电压之差判断是否需要启动辅助充电电源为最低压电芯充电。如果此时 $\Delta V(t) > \Delta V_c$ 则启动辅助充电电源为最低压电芯充电并保持一段时间,反之则不进行任何均衡操作直接进入下一循环。在每一次循环中被均衡电芯通常不是同一个电芯,其位置是动态变化的,经多次循环后电池组中所有电芯的电压将均衡作用下趋于一致。

(2) 电池组处于充电状态,控制流程图如图 10 所示。图 10 中,充电状态下的均衡控制流程如下:首先,关闭所有均衡回路并采集电芯电压,然后找出该时刻最高压电芯和最低压电芯,判断该电芯所对应的 $U_{\max}(t)$ 与 U_q 的大小。如果 $U_{\max}(t) < U_q$ 则进入辅助充电电源均衡模式,具体流程和放电状态时相同;如果 $U_{\max}(t) \geq U_q$ 则进入能耗均衡模式,最高压电芯通过能耗电路实现降压。最后,均衡状态保持一段时间后,进入下一循环。在充电过程中,需要保证辅助充电电源均衡和能耗均衡回路不能同时开启。

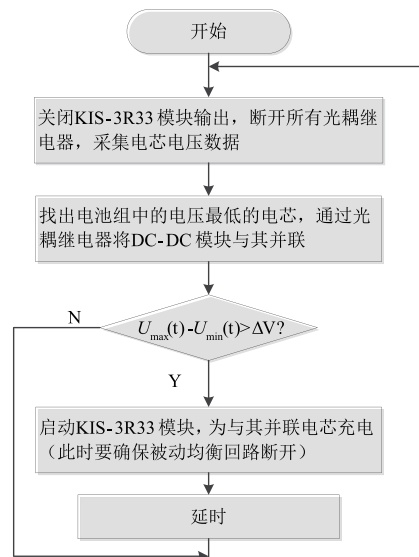


图9 放电时均衡控制流程图

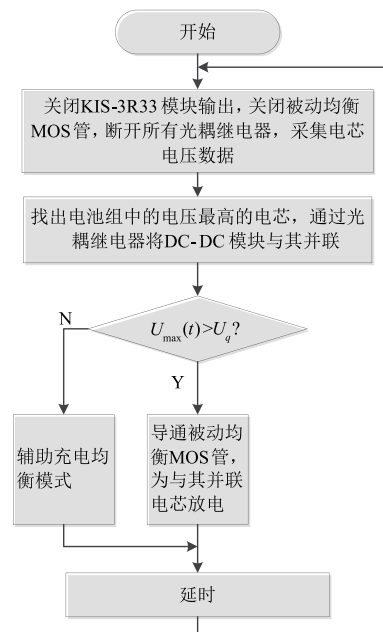


图10 充电时均衡控制流程图

4 实验结果与讨论

针对上述系统,用 2.1 节所述的 16 个电芯串联成电池组,整个胃肠道机器人外部无线接收器电池管理系统如图 10 所示。

图 11 中,电池管理系统分为两部分,左线路板为充/放电开关电路板,右线路板为采集均衡电路板。由于在均衡过程中均衡电流会造成电芯内阻发生变化,进而会给电芯电压采集带来测量误差,因此需要将电压采集和均衡过程分开。在本文中以 1s 为均衡周期,其中 0.2s 用于电压采样,0.8s 用于均衡,并设定均衡开启

电压差 $\Delta V_c = 0.02\text{V}$. 由于电芯电压决定了被均衡的电芯, 因此均衡实验开始前需验证系统的电压采集精度. 在电池组充满电, 并待机 10min 后电芯电压采样值和实测值的对比数据如表 1 所示. 实验中采用电压测量精度为 5‰ 的万用表 (FLUKE-15B) 获得电芯电压实测值, 而通过 LCD 实时显示电芯电压采集值. 经测量系统在待机状态下的自身功耗在 20mA 左右. 从表 1 数据可以看出: 电芯电压采集精度可达 7‰, 最小分辨电压 0.02V, 满足均衡控制要求.

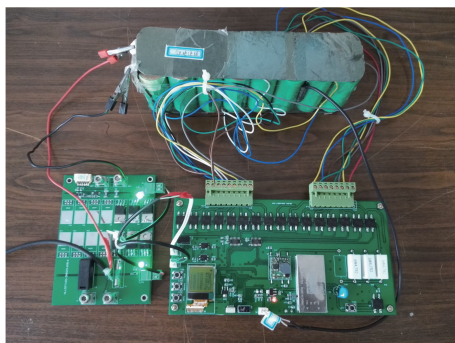


图11 胃肠道机器人外部无线接收器电池管理系统实物图

表 1 电芯电压采样和实测值的对比数据

电芯序号	采集电压 (V)	实测电压 * (V)	绝对误差 (V)	相对误差 (‰)
1	3.34	3.328	0.012	3.6
2	3.35	3.332	0.018	5.4
3	3.35	3.327	0.023	6.9
4	3.35	3.329	0.021	6.3
5	3.35	3.330	0.020	6.0
6	3.35	3.329	0.021	6.3
7	3.35	3.329	0.021	6.3
8	3.35	3.335	0.015	4.5
9	3.34	3.327	0.013	3.9
10	3.35	3.328	0.022	6.6
11	3.35	3.330	0.020	6.0
12	3.35	3.329	0.021	6.3
13	3.35	3.328	0.022	6.6
14	3.35	3.330	0.020	6.0
15	3.35	3.330	0.020	6.0
16	3.35	3.329	0.021	6.3

在确保电芯电压采集准确后, 依据 2.1 节所介绍的磷酸铁锂电芯特性, 通过人机交互按键设定能耗均衡开启电压 $U_q = 3.50\text{V}$, 并在系统放电和充电 2 种状态下对均衡控制算法进行实验验证.

(1) 放电状态实验

为了确保改进前和改进后均衡对比实验起始点保持一致, 在放电实验开始前应先对电池组充满电, 并待机 10min 后, 然后才开始放电实验. 由于处于待机状态的电芯电压一般在 3.3V 左右, 小于 3.5V, 即满足 $U_{\max} < U_q$ 条件, 系统处于辅助充电电源均衡模式, 均衡电流

由辅助充电电源提供. 采样时间、均衡周期等参数和上面验证电压采集精度实验所用参数相同, 放电负载采用阻值为 10Ω 的大功率电加热丝代替胃肠道机器人外部无线接收器, 放电电流约 5A. 对于改进前的飞渡电容均衡控制策略参考文献 [11], 在将锂电池等效成大容量电容的前提下, 均衡电容器的容量为电芯等效电容容量的 3/4, 其电压等级与单体电容组相同^[11], 考虑到电芯的容量和均衡系统的整体体积, 决定选用容值为 $1000\mu\text{F}$ 的电解电容作为均衡电容, 其他均衡参数同改进后的均衡控制参数相同. 在放电过程开始后, 系统会定时 (周期 1s) 将采集到的 16 串电芯电压数据通过无线发射模块上传到 PC 机上, PC 机记录并保存数据到指定文件里. 在放电过程中电芯间最大偏差实时电压 $\Delta V(t)$ 的变化曲线如图 12 所示.

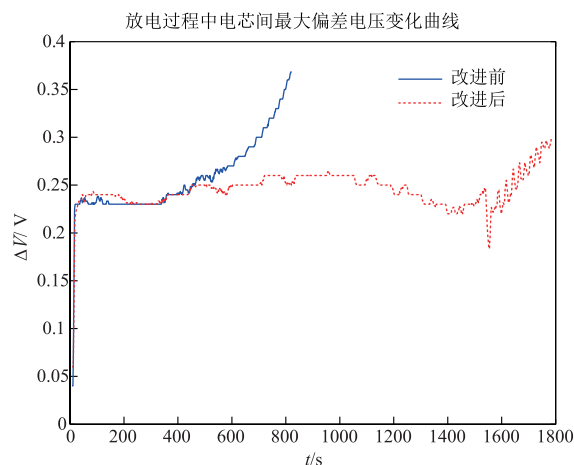


图12 放电过程中电芯间最大偏差电压变化曲线

从图 12 中可以看出, 在放电开始前, 电芯间电压差异较小, 在 0.05V 以下. 在放电开始后, 改进前的均衡系统中, 电芯间最大偏差电压迅速上升, 并在 800s 时由于某个电芯电压过低, 系统提前停止放电; 而在改进后的均衡系统中放电过程一直持续了 1800s 才停止, 放电持续时间是改进前的 2.25 倍. 通过实测测得改进后的均衡电流维持在 1000mA 左右, 而改进前的均衡电流仅有 2mA 左右, 改进后的均衡电流约是改进前的 500 倍. 通过放电时间的长短可以推出: 改进后的均衡系统能有效地抑制了电芯间电压差异的变化, 电池组的整体容量能被更好地利用, 并且由于在整个放电过程系统处于主动均衡模式下, 电池组自身能量损耗较低.

(2) 充电状态实验

和放电过程一样, 为了确保改进前和改进后均衡对比实验起始点保持一致, 在充电实验开始前应先对电池组放电, 等放电结束并待机 10min 后, 然后才开始充电实验. 根据最高压电芯的电压值将充电状态分为两个阶段: 辅助充电均衡阶段和能耗均衡阶段. 当电池

组中的最高压的电芯电压 $U_{\max} < U_q$ 时,电池组处于辅助充电电源均衡模式,而 $U_{\max} \geq U_q$ 则进入能耗均衡模式.在辅助充电均衡模式下,均衡参数和放电过程所用参数相同;在能耗均衡模式下,能耗电阻的阻值为 1.6Ω ,由三个 4.7Ω $5W$ 的水泥电阻并联实现,其他参数和辅助充电均衡模式相同.在充电过程中,采用恒流恒压式智能充电器,恒流阶段充电电流 $4A$,恒压阶段充电电压 $59.2V$.PC 机通过无线模块远程接收系统发出的 16 串电芯的电压数据,记录并以文件的形式保存下来.电池组中电芯间最大偏差电压 $\Delta V(t)$ 的变化曲线如图 13 所示.

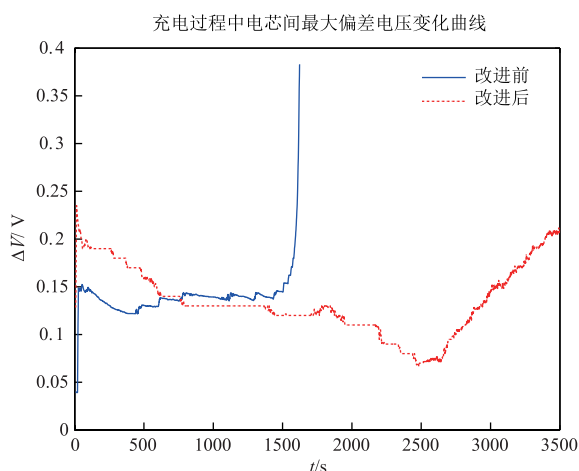


图13 充电过程中电芯间最大偏差电压变化曲线

从图 13 可以看出,改进前的均衡系统持续充电时间约 $1500s$,而改进后的均衡系统持续充电时间约 $3500s$,是前者 2.33 倍.在相同充电条件下,改进后的电池实际容量是改进前的 2.33 倍,也即电池容量利用率提高了 2.33 倍.提前结束充电是由于改进前的均衡系统未及时抑制电芯间电压差异的变大,致使其中一个电芯的电压值很快达到电芯过压保护值,从而触发过压保护,充电中止.提前结束充电意味着电池组中的电芯并没有全部充满,电池组的容量并未被充分利用.通过实测测得改进前的均衡电流仅有 $1.5mA$ 左右,而改进后的均衡电流维持在 $900mA$ 左右,是改进前的 600 倍左右.从整个充电过程可以看出:改进后的均衡系统其均衡电流保持较高值,在整个充电过程中未出现因电芯过压而导致的充电提前结束现象,可以有效提高电池组容量的利用率.

5 结论

本文在深入研究飞渡电容和辅助充电电源均衡方法的基础上,通过对储能模块进行电路改进,并对相关控制算法进行设计,最终,将其应用于胃肠道机器人外部无线接收器上进行充、放电的实验研究,研究结果表

明:利用改进后的飞渡电容方法的均衡策略拥有较大均衡电流,可以有效减小充、放电过程中电芯之间的电压差异,与改进前相比,电池组实际容量及其利用率均提高 2 倍以上.本研究成果也可以在其他便携式设备上应用.

参考文献

- [1] 王震坡,孙逢春,张承宁.电动汽车动力蓄电池组不一致性统计分析[J].电源技术,2003,27(5):438-442.
WANG Zhen-po, SUN Feng-chun, ZHANG Cheng-ning. Study on inconsistency of electric vehicle battery pack[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2003, 27(5): 438-442.
- [2] 刘有兵,齐铂金,宫学庚.电动汽车动力电池均衡充电的研究[J].电源技术,2004,28(10):649-651.
LIU You-bing, QI Bo-jin, GONG Xue-geng. Research on the equalizing charge of EVs' traction batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2004, 28(10): 649-651.
- [3] Linzen D, Buller S, Karden E, et al. Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability and lifetime of super-capacitor systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1135-1141.
- [4] Haerri VV, Martinovic D. Supercapacitor module SAM for hybrid busses: An advanced energy storage specification based on experiences with the TOHYCO-rider bus project [A]. IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. Taipei, TW: IEEE, 2007. 268-273.
- [5] Okamura M. A basic study on power storage systems (translation of Japanese paper by the author with updating comments) [J]. Electrical Engineering in Japan, 1996, 115(3): 40-51.
- [6] Barrade P, Pittet S, Rufer A. Energy storage system using a series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages [A]. IPEC-International Power Electronics Conference [C]. Tokyo: IEEE, 2000. 149-154.
- [7] Barrade P. Series connection of supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltages [A]. 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems [C]. Montreal, QC: IEEE, 2002. 381-407.
- [8] Kutkut NH, Divan DM. Dynamic equalization techniques for series battery stacks [A]. 18th International Telecommunications Energy Conference [C]. Boston, MA: IEEE, 1996. 514-521.
- [9] Baughman A, Ferdowsi M. Double-tiered capacitive shuttling method for balancing series-connected batteries [A]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [C]. Chi-

cago, IL: IEEE, 2005. 109 – 113.

- [10] 杨威, 杨世彦, 郭伟峰. 基于 FPGA 的超级电容组均衡充电系统监控单元的研究[J]. 电子器件, 2006, 29(3): 755 – 758.

YANG Wei, YANG Shi-yan, GUO Wei-feng. Monitoring unit based on FPGA for ultracapacitor equalization charging system[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2006, 29(3): 755 – 758.

- [11] 逯仁贵, 王铁成, 朱春波, 王祁. 基于飞渡电容的超级电容组动态均衡控制算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(9): 1421 – 1425.

LU Ren-gui, WANG Tie-cheng, ZHU Chun-bo, et al. Dynamic equalization algorithm based on switched capacitor applied in super-capacitor stacks[J]. Chinese Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(9): 1421 – 1425.

作者简介



赵汉宾 男, 1982 年生, 工程师, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 主要研究方向为信号检测与机器人控制.

E-mail: zhb19820430@163.com



马 锋 男, 1976 年生, 副高级工程师, 就职于江苏晶浩电子科技有限公司, 主要研究方向为应用电子技术.

E-mail: mafeng@jing-hao.cn



叶晓东 男, 1973 年生, 高级工程师, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 主要研究方向为机器人控制和工业自动化.

E-mail: xdye@iamt.ac.cn



于海武(通讯作者) 男, 1982 年生, 副研究员, 就职于中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 主要研究方向为工业自动化控制与信号检测.

E-mail: hwyu@iamt.ac.cn