

文章编号:1000-582X(2012)04-007-06

磷酸铁锂电池组的均衡充电研究与应用分析

胡银全,刘和平,刘平,张毅

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对车载磷酸铁锂动力电池组串联充电的需求,搭建了磷酸铁锂动力电池组管理系统,对动力电池组进行了串联充电试验。分析了电池组串联充电过程中单节电池电压和荷电状态不一致的情况,讨论了电池组单节电池的分散性对充电性能的影响,提出了对单节电池进行小电流补充充电的均衡方法,使电池组中单节电池的荷电状态基本相等。理论分析和试验验证表明,电池组串联充电末期,单节电池之间电压相差较大,荷电状态有一定差异,对单节电池补入少量电量(小于 5%)即可使得电池组荷电状态一致性得到较大的改善。提出一种阶段式动力电池组均衡充电方法,从而可以避免动力电池组个别电池过充,而其他电池充不满的问题。

关键词:锂离子电池;充电系统;电池组;串联充电;荷电状态

中图分类号:TM912

文献标志码:A

Equalization charging research and application of lithium iron phosphate batteries group

HU Yin-quan, LIU He-ping, LIU Ping, ZHANG Yi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Management system for Lithium iron phosphate(LiFePO₄) power batteries group is built, based on car battery series charge features. Series charge experiment of power batteries group is carried out using battery charger. Single cell voltage and state of charge(SOC) is analyzed in series charge for batteries group. Dispersivity influence of single cell is studied on charge performance of the battery packs, small current supplementary charge equalization is proposed, to make single cell battery state of charge is basically almost the same. Theoretical analysis and experimental results show that single cell voltage difference is very large, but SOC difference is very small in the end of battery series charge. A novel battery packs charge equalization method is presented, which avoids the problem of some batteries overcharge and other batteries less charged problem.

Key words: lithium ion batteries; charging systems; battery packs; series charge; state of charge

收稿日期:2011-08-30

基金项目:国家 863 计划资助项目(2003AA501350);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11151156)

作者简介:胡银全(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要从事电力电子与电力传动,电池充放电及容量检测研究,(Tel)023-60823276;(E-mail)hyq161@tom.com。

刘和平(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,从事电力传动、电动汽车、汽车电子、智能测试仪器、微机在电力系统在线应用等领域的研究工作,(E-mail)engineer@cqu.edu.cn。

动力电池是电动汽车中必不可少的重要组成部分,动力电池供电质量的好坏直接关系到电动汽车是否正常可靠运行^[1]。目前,应用在电动汽车上的动力电池主要有铅酸动力电池、锂离子动力电池^[2-4]、金属氢化物镍动力电池和磷酸铁锂动力电池^[5-6]等等。磷酸铁锂动力电池具有超长寿命、使用安全、大容量、绿色环保、无记忆效应、体积小、重量轻等其它动力电池无法比拟的优点,是未来汽车动力电池的发展方向之一^[7]。

从磷酸铁锂动力电池的特性分析,磷酸铁锂动力电池的能量密度和功率密度用于电动汽车已经足够了^[8-9]。然而影响动力电池应用的关键是电池的管理,动力电池管理不好将大大影响电池的使用效果,缩短电池的循环次数。

目前磷酸铁锂动力电池组常用的充电方法是恒流-恒压充电法,对动力电池充放电的管理需要考虑单节电池的电压、温度、荷电状态的变化情况。由于电池的制作工艺、初始充电的状态不一致、散热条件不同、环境气温的变化等因素,都会导致电池的分散性^[10-11],引起充放电特性不同。若不对动力电池组进行均衡充电,将减少电池组的容量有效使用范围,导致电池组中单节电池过充和过放问题,过充和过放是导致电池循环使用寿命缩短的主要原因。

目前对电池组进行均衡充电的方法主要有电阻能耗法、电感均衡法、电容均衡法、单节电池补充均衡法等^[12-13]。电阻能耗法只是将容量高的单节电池的能量消耗,存在能量浪费和热管理的问题。电感均衡法、电容均衡法属于能量非耗散型,但电路结构相对复杂。单节电池补充均衡法是均衡充电模块对各单节电池小电流补充充电的均衡方案,这样可以使得均衡充电模块的功率、体积、成本大大减小。

笔者对磷酸铁锂动力电池组串联充电进行了分析研究和试验。针对串联充电末期单节电池电压、荷电状态的变化情况,提出一种阶段式动力电池组均衡充电方法,以充分利用电池组容量的有效使用范围,延长动力电池组的循环使用寿命。

1 电池管理系统的组成

电动汽车电池管理系统是电动汽车重要的组成部分,优良的电池管理系统可以增加电动汽车的续航里程,延长动力电池的循环使用寿命。磷酸铁锂动力电池组管理系统(BMS)的整体结构框图如图 1 所示。

电池管理系统分别对单节电池的电压、温度和电池组总电压、总电流进行检测,并对电池组的充放

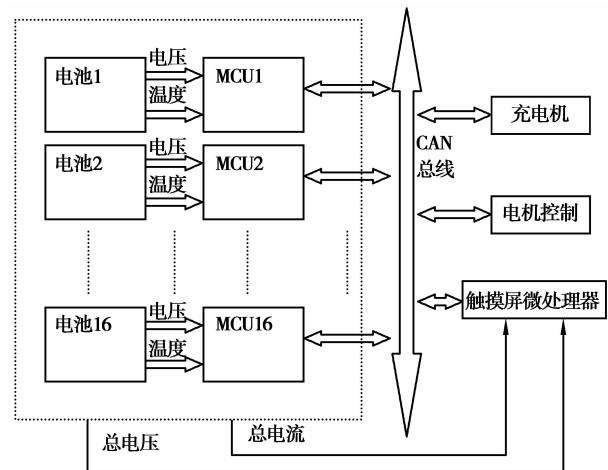


图 1 电池管理系统整体结构框图

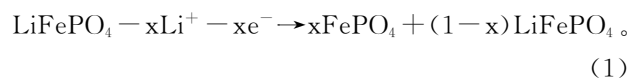
电进行控制。低电压电动汽车每组电池的电池数为 16 节,串联在一起,总电压约为 48 V。单节电池配备一个检测模块,检测模块由微控制器芯片 dsPIC30F4012 和外围元件组成。此芯片具有 10 位模拟量输入、数字量输入输出以及 CAN 通信等;单节电池检测单元通过 CAN 总线与触摸屏模块相连接,触摸屏模块采用微控制器 PIC32MX460F512L,接收 CAN 总线上的单节电池电压和温度等信息显示在触摸屏上。

电池组总电压、总电流检测电路的模拟信号直接送到触摸屏模块的微控制器引脚上进行 A/D 转换,触摸屏模块检测电池组总电压、总电流,并在触摸屏模块上把电池组总电压、总电流、单节电池电压、温度等重要信息实时显示出来。触摸屏模块同时通过 CAN 总线与充电机和电机控制器进行通信,对动力电池组的充放电进行监测和控制。

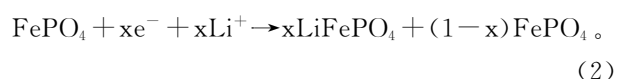
2 磷酸铁锂动力电池充放电机理

磷酸铁锂动力电池在自然界以磷铁锂矿的形式存在,具有规则的橄榄石型结构,文献^[14-15]对磷酸铁锂动力电池的结构和特性进行了大量研究。其充放电反应机理为

充电反应:



放电反应:



从式(1)、式(2)可以看出,其充放电反应是在 LiFePO_4 和 FePO_4 两相之间进行。充电过程中,锂

离子从 LiFePO_4 中脱出形成 FePO_4 相;放电过程中,锂离子嵌入 FePO_4 中形成 LiFePO_4 。由于充放电过程中铁氧配位关系变化很小,所以在脱嵌锂过程中虽然存在物相变化,但是没有影响其电化学性能的体积效应产生。这是磷酸铁锂动力电池材料具有良好循环性能的原因之一。另外, LiFePO_4 和 FePO_4 在结构上很相似,这正是 LiFePO_4 具有优异循环性能的主要原因。 LiFePO_4 脱锂后得到 FePO_4 , 体积只减少 6.81%, 密度增加 2.59%, 而且, 如果其与碳负极配对, 充电过程中碳负极体积变大, 与正极恰好相反, 这样可以使整个电池内部材料的总体积变化很小, 减少应力。

3 电池组串联充电研究

试验使用标称容量为 200 Ah、额定电压 3.2 V 的磷酸铁锂动力电池, 16 节电池串联。以 25 A 电流恒流充电, 当单节电池电压达到充电电压上限值时再降低电流进行充电, 记录 16 节单节电池电压、温度等信息。

3.1 不同荷电状态串联充电试验

为了讨论在不同荷电状态情况下, 磷酸铁锂动力电池的充电过程是否相同, 设计了完全放电完成(即放电较深)再进行恒流充电的试验和未完全放电(即放电较浅)再进行恒流充电的试验, 试验曲线如图 2-3 所示。

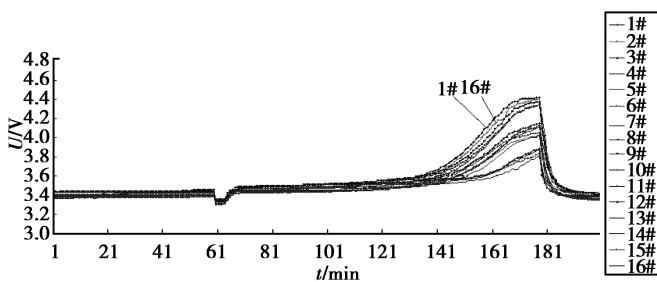


图 2 完全放电再充电试验

图 2 中, 第 59 min 到第 64 min, 由于停充, 电池电压从 3.44 V 迅速回落到 3.33 V 左右, 继续充电时, 电压又逐渐回升到 3.44 V。之后电池电压缓慢上升, 直到单节电池电压上升到 3.60 V, 单节电池电压才有迅速上升趋势。当第 178 min 充电结束时, 电池电压迅速回落到 3.45 V 以下。图 3 中, 单节电池电压上升到 3.55 V 时, 单节电池电压就迅速上升, 电池电压上升的速率高于图 2 中电池电压上升的速率。当第 94 min 充电结束时, 电池电压回落较慢, 在第 176 min 电池放电时, 电池电压才迅速回

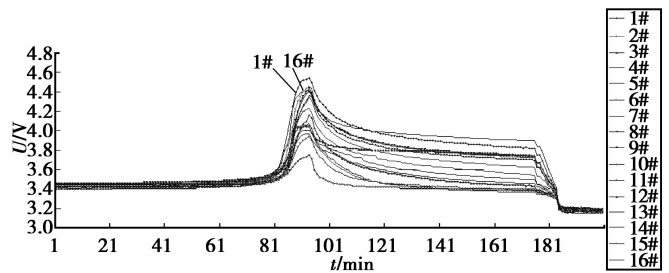


图 3 第一次未完全放电循环充电试验

落到 3.4 V 以下。

图 2 中, 串联充电后期电压上升较快的 1 号电池电压变化率为:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{4.0 - 3.6}{22} = 0.018 \text{ V/min.} \quad (3)$$

图 3 中, 串联充电后期电压上升较快的 1 号电池电压变化率为:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{4.0 - 3.6}{5} = 0.08 \text{ V/min.} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)可以看出, 完全放电再充电试验与未完全放电再充电试验比较, 完全放电再充电在充电后期电压上升比较缓慢, 电压上升率仅为 0.018 V/min。未完全放电再充电在充电后期电压上升比较迅速, 电压上升率为 0.08 V/min。

重复完全放电再充电试验和未完全放电再充电试验得到的结果相同, 且充电时电池组荷电状态越低, 充电后期单节电池电压上升越缓慢。

3.2 电池串联充电分散性试验

为了研究磷酸铁锂动力电池在充放电循环过程中电池的分散性, 做了未完全放电再充电试验。试验以恒流 60 A 放电, 放电约 40 min, 采用恒流-阶段式降低电流进行充电, 同时设置较高的充电电压上限值, 并将所测数据进行比较。图 3 是第一次未完全放电再充电试验, 图 4 是第十次未完全放电再充电试验。

图 4 中, 第 57 min 开始对电池组进行充电, 由于是未完全放电, 所以单节电池电压迅速上升到 3.4 V 以上。和第一次充电试验相比, 单节电池电压也是在 3.55 V 左右开始迅速上升, 电池组充电结束时, 单节电池电压缓慢回落。第 184 min, 在负载作用下才迅速回落到 3.4 V 以下。

从图 3、图 4 可以看出, 提高充电电压上限值进行充电只能同时为电池组中单节电池补入电量, 并不能达到均衡充电的作用。先达到充电电压上限值的单节电池, 重复试验中还是会先达到充电电压上

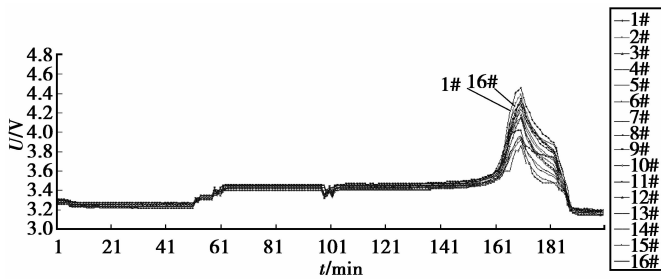


图 4 第十次未完全放电循环充电试验

限值,同样后达到充电电压上限值的电池,重复试验中还是会后达到充电电压上限值。

从未完全放电再充电循环试验数据分析,电池在 10 次循环试验过程中,电池组中各个单节电池分散性不明显,如图 3-4 所示。具体在电动汽车上使用过程中各个单节电池分散性是否会增大,需要上车做进一步试验才能得出。

3.3 电池组串联充电结束判定

从电池组串联充电试验可以看出,各节电池虽然串联充电末期电压差异较大,但电压都有迅速上升的趋势,说明电池都接近充满状态,如图 4 所示。当上升较快的 1 号电池(上升率 $\Delta V/\Delta t=0.12 \text{ V/min}$)达到充电电压上限值时,其它电池也处于迅速上升阶段(如图中相对上升较慢的 10 号电池上升率也达到了 $\Delta V/\Delta t=0.015 \text{ V/min}$),如再给几分钟对电池充电,那么所有单节电池电压都会迅速上升,达到充电电压上限值。这个重要结论在后面的补充充电中也得到了验证。

因此,提出将单节电池电压上升率作为电池组串联充电结束的判据,串联充电结束时,电池组已经充入 95% 以上的电量,此判据在工程上容易实现。根据电池组串联充电试验,电池组串联充电结束的判据公式如下

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} \geq K \cdot f(\text{SOC}) \quad (5)$$

式中: $\Delta V/\Delta t$ 为单节电池电压上升率; K 为完全放电的单节电池充满电时的电压上升率,可取 0.018 V/min ;SOC 为电池组充电时的荷电状态; $f(\text{SOC})$ 为 SOC 的函数,荷电状态越多, $f(\text{SOC})$ 越大,这里取 $f(\text{SOC})=\text{SOC}+1$ 。

根据电池组串联充电结束判据公式(5),先判定充电时电池的荷电状态,然后得到串联充电结束时电池电压变化率的边界条件 $K \cdot f(\text{SOC})$,当单节电池电压变化率 $\Delta V/\Delta t$ 大于等于 $K \cdot f(\text{SOC})$ 时,判定电池组串联充电结束,电池组总体充入 95% 以上

的电量。电池组串联充电结束程序流程图如图 5 所示。

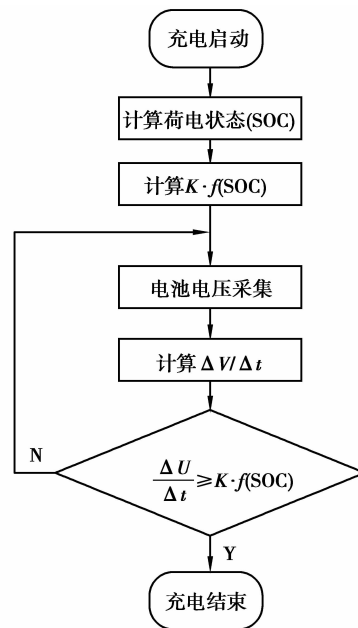


图 5 串联充电结束程序流程图

通过编程可以实现对电池组串联充电过程的控制。试验结果表明电池组单节电池电压变化率大于等于边界条件 $K \cdot f(\text{SOC})$ 时,可以停止充电,此时已充入 95% 以上的电量。

3.4 电池组补充充电试验

当电池组串联恒流充电结束时,各单节电池电压相差较大,而容量又相差有多大呢?为此设计了补充充电试验,补充充电试验如图 6 所示。图 6 中,第 21 min 到第 48 min,对电池进行了 60 A 恒流放电,之后对电池组进行 25 A 串联恒流充电,直到第 213 min 串联充电结束,开始对电压较低的 4#、10#、13#、14#、15# 电池分别进行补充充电。

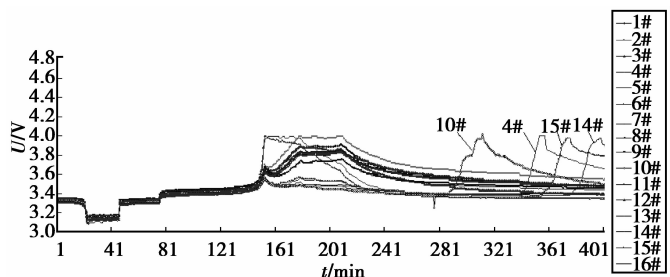


图 6 串联充电后部分补充充电试验

从图 6 可以看出,串联恒流充电结束时,4#、10#、13#、14#、15# 都没有达到充电电压上限值,

最高电压只有 3.57 V,那么这几个电池如果也达到 4 V 的充电电压上限值,需要再充入多少电量呢?为此,对这几个电池进行了 5 A 恒流补充充电试验(充电电压上限值设置为 4 V),充电数据见表 1。

表 1 补充充电数据表

电池	充电电流 I/A	充电时间 t/min	充入电量 C/Ah
10#	5	25	2.08
4#	5	13	1.08
15#	5	21	1.75
14#	5	22	1.83
13#	5	18	1.5

从表 1 和图 6 可以看出,串联充电结束后,电压较低的 5 节电池在 5 A 的小电流充电下,电压很快就上升到 4 V 充电电压上限值,也就是电池很快就充满了。说明串联充电结束时,部分电池电压虽然低于充电电压上限值,但容量却接近于电池充满状态。

为了验证补充充电后的效果,给电压较低的几节电池补充充电后,又进行了未完全放电再充电的试验。串联充电结束时,除了 10 号电池电压较低(3.5 V),其它 4 节补充的电池电压都达到了 3.6 V 以上,说明对电池补充充电是成功的。但此时,没有补充的几节电池串联充电结束时,电池电压没有达到充电电压上限值。

为了观测全部都达到充电电压上限值后,电池的充电情况,设计了全部补充充电试验,之后再行未完全放电试验,放置 40 min 后,再对电池进行恒流充电,如图 7 所示。图 7 中,第 1 min 到第 160 min 是 5 A 恒流对 16 节电池补充充电的过程,补充充电的充电电压上限值设置为 4 V。第 316 min 到第 396 min 是电池串联放电和静置过程,第 396 min 到第 477 min 是电池组串联恒流充电过程。

从图 7 电池电压曲线可以看出,电池组全部补充充电过程中,在 5 A 的恒流电流充电下,单节电池电压上升都是比较快的,充入电池的电量都非常小,充入电池电量都在 2.5 Ah 以下。电池组放电后再串联恒流充电,充电结束时,除了 3#、5#、6# 电池外,其它电池电压都迅速上升至 3.65 V 以上。此时,3#、5#、6# 电池电压也处于迅速上升

阶段。

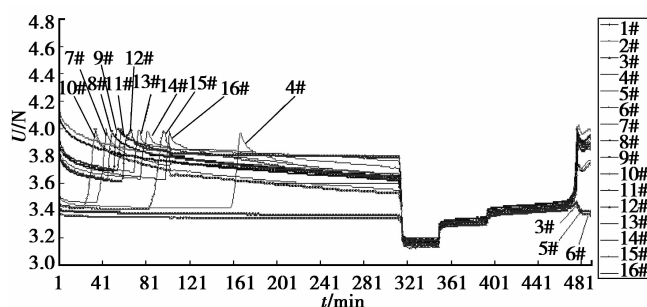


图 7 全部补充充电后再充电试验

从未完全放电后的充电试验和补充充电试验分析,当串联恒流充电结束时,各单节电池都接近充满状态。如果不考虑均衡充电,以第一节电池达到充电电压上限值作为停止充电标准,大部分电池都已经充入 95% 以上的电量。但循环多次后,电池之间的差异会增大,这时就要考虑均衡充电,以保证每节电池都能充满电。

4 结 论

从前面磷酸铁锂动力电池组串联充电研究可以看出,未完全放电再充电后期电压上升率要比完全放电再充电后期电压上升率要大,在充电结束的判断上需要注意电池的这个特性。从未完全放电再充电的试验可以看出,电池在 10 次循环充放电过程中,电池组中各个单节电池分散性不明显,说明电池组中单节电池的分散性较小。各节电池虽然充电末期电压差异较大,但电压都有迅速上升的趋势,通过补充试验证明电池组中各单节电池都接近充满状态。这就说明,在电池组串联充电末期没有必要为电池电压不一致而每次均衡充电,但循环多次后,电池之间的差异逐渐增大,这时就要考虑进行一次均衡充电。

不需要每一次串联充电都进行均衡,而是检测到单节电池之间容量差异达到某一设定值时才用均衡充电模块对各单节电池进行一次小电流补充充电,这样可以满足电池都能基本充足电,以充分利用电池组容量的有效使用范围,延长动力电池组的循环使用寿命。这种方法本文定义为阶段式动力电池组均衡充电方法。

电池组串联充电时电池组荷电状态不一样时,串联充电后期单节电池电压上升速率也是不一样的,荷电状态越低,充电后期单节电池电压上升越缓慢。

磷酸铁锂动力电池组串联充电过程中,单节电池电压上升率可以作为串联充电结束及电池充满电的判据,此判据在工程上也是容易实现的。

参考文献:

- [1] 林成涛,张宾,陈全世,等. 典型动力电池特性与性能对比研究[J]. 电源技术,2008,32(11):735-738.
LIN CHENG-TAO, ZHANG BIN, CHEN QUAN-SHI, et al. Comparative research on characteristics and performance of typical tractive battery [J]. Chinese Journal of Power Surces,2008,32(11):735-738.
- [2] TU J, ZHAO X B, ZHUANG D G, et al. Studies of cycle ability of LiMn_2O_4 and $\text{LiLa}_{0.01}\text{Mn}_{1.99}\text{O}_4$ as cathode materials for Li-ion battery[J]. Physical B: Condensed Matter,2006,382(1-2):129-134.
- [3] KANG H K, AHN W, LEE S G, et al. Eutectic self-mixing method for the preparation of LiMn_2O_4 without any artificial mixing procedures[J]. Journal of Power Sources,2006,163(1):166-172.
- [4] ZENG R H, LI W S, LU D S, et al. A study on insertion/removal kinetics of lithium ion in $\text{LiCr}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ by using powder microelectrode [J]. Journal of Power Sources,2007,174(2):592-597.
- [5] OU X Q, LIANG G C, WANG L, et al. Effects of magnesium doping on electronic conductivity and electrochemical properties of LiFePO_4 prepared via hydrothermal route [J]. Journal of Power Sources, 2008,184(2):543-547.
- [6] MOSHURCHAK L M, BUHRMESTER C, WANG R L, et al. Comparative studies of three redox shuttle molecule classes for overcharge protection of LiFePO_4 -based Li-ion cells [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(11):3779-3784.
- [7] JIN B, GU H B. Preparation and characterization of LiFePO_4 cathode materials by hydrothermal method [J]. Solid State Ionics,2008,178(37-38):1907-1914.
- [8] 陈召勇,张建利,朱华丽,等. LiFePO_4 的制备及其充放电过程中的结构演变和性能研究[J]. 合成化学,2009, 17(4):422-427.
- CHEN ZHAO-YONG, ZHANG JIAN-LI, ZHU HUA-LI, et al. Preparation of LiFePO_4 and its structure change and performance study in the charge-discharge cycles [J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2009,17(4):422-427.
- [9] KIM J K, CHERUVALLY G, CHOI J W, et al. Effect of mechanical activation process parameters on the properties of LiFePO_4 cathode material [J]. Journal of Power Sources,2007,166(1):211-218.
- [10] SONG M S, KANG Y M, KIM J H, et al. Simple and fast synthesis of LiFePO_4 -C composite for lithium rechargeable batteries by ball-milling and microwave heating [J]. Journal of Power Sources,2007,166(1): 260-265.
- [11] SHIN H C, PARK S B, JANG H, et al. Rate performance and structural of Cr-doped LiFePO_4/C during cycling [J]. Electrochimica Acta,2008,53(27): 7946-7951.
- [12] XU A G, XIE S J, LIU X B. Dynamic voltage equalization for series-connected ultracapacitors in EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2009,58(8):3981-3987.
- [13] BAUGHMAN A C, FERDOWSI M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008,55(6):2277-2285.
- [14] ZHANG M, JIAO L F, YUAN H T, et al. The preparation and characterization of olivine LiFePO_4/C doped with MoO_3 by a solution method [J]. Solid State Ionics,2006,177(37-38):3309-3314.
- [15] SUN C S, ZHOU Z, XU Z G, et al. Improved high-rate charge/discharge performances of LiFePO_4/C via V-doping [J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(2): 841-845.

(编辑 张小强)