

动力锂电池阶梯电流充电方法研究^①

张彩萍^② 刘秋降 姜久春

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 基于恒流-恒压(CC-CV)充电模式,研究了动力锂离子电池充电的边界特性。采用极化电压、充电时间、充电容量作为电池充电性能的量化评价指标,提出了基于电池充电边界曲线的阶梯电流充电方法,对比分析了恒流阶段阶梯电流充电模式和恒压阶段阶梯电流充电模式的充电性能。结果表明,与CC-CV充电法相比,采用阶梯充电方法,其充电时间缩短了28.83%,充电容量提高了3.32%,充电极化电压降低了34.65%。

关键词 动力锂电池,倍率充电,边界特性,阶梯电流充电模式

0 引言

我国鼓励发展新能源汽车的相关补贴政策促进了电动汽车的发展^[1],电动汽车用高性能动力电池就显得特别急需。但是,目前动力锂电池充电技术依然是电池性能提高的瓶颈,也是锂电池电动汽车应用不能快速推广的原因之一。锂电池充电技术是锂电池应用关键技术之一。锂电池充电技术研究是当前研究的热点,主要集中于锂离子电池充电速度和充电寿命的研究。目前动力锂电池充电广泛采用恒流恒压(constant current-constant voltage, CC-CV)模式,即恒流充电阶段用0.33C恒定电流充电,当电池端电压达到限定电压值时(通常LiMn₂O₄电池为4.2V)转入恒压充电阶段。恒压充电阶段通过降电流充电保持电池端电压不变,直至充电电流降至预设值时充电结束。按此策略充电,电池一次满充要耗时3h以上。为此,研究人员提出了不同的改进方法:文献[2]提出一种基于极化电压控制的快速充电方法;针对电池充放电的非线性、多变量、强耦合性等特点,研究人员采用现代智能充电技术^[3-8],设计了稳态和动态性能合乎要求的控制器。文献[5-7]分别运用进化计算方法如遗传算法、蚁群算法以及粒子群算法获得最优的充电参数,但用进化计算方法时如何选择合适的参数如粒子数目以及学习因数给设计者带来了困难和挑战。文献[8]将锂离子电池看作灰色系统,采用灰色预测算法估计的

充电曲线替换常规的恒压充电模式改进电池的充电特性,该充电方法使锂离子电池的充电时间和充电效率分别提高了23%和1.6%。然而,上述方法计算量大、实现复杂,并且需要实时控制。还有一种方法是阶梯电流充电法,该方法具有循环寿命长、充电效率高、充电时间短的优点^[9,10],而且便于工程应用。本文以LiMn₂O₄动力电池为研究对象,基于极化电压特性和充电数据统计分析,分析了CC-CV充电模式下,不同倍率充电的充电特性,研究了不同倍率充电的充电边界曲线,在此基础上,研究了电池阶梯电流充电方法,并从极化电压、充电时间、充电容量三个方面全面评价电池的充电性能。

1 实验平台

实验采用额定容量90Ah的LiMn₂O₄电池,将电池放在恒温箱中,温度设定为25℃。充放电设备采用美国Arbin动力电池测试系统,测试平台构成如图1所示。电池放电截止电压为3V,充电截止电压为4.2V。由于电池在初始充电阶段,极化电压呈现上升快、幅值大的特点,有峰值出现,因此初始荷电状态(SOC)阶段,电池宜采用小电流预充电^[11]。在本研究中,所有实验均采用0.33C充电至10%。具体充放电实验包括:(1)不同充电倍率(0.33C, 0.5C, 0.65C, 0.8C, 1C)CC-CV充电实验;(2)恒流阶段采用1C充电,恒压阶段采用不同倍率充电

① 国家自然科学基金(51277010)资助项目。

② 女,1982年生,博士,讲师;研究方向:动力电池应用技术研究;联系人,E-mail: cpzhang@bjtu.edu.cn
(收稿日期:2012-09-24)

(0.8C,0.65C,0.5C,0.33C);(3)恒流阶段采用不同倍率(1C,0.8C,0.65C,0.5C,0.33C),恒压阶段采用0.33C充电。

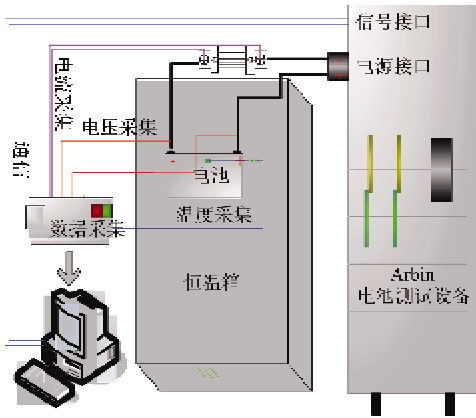


图1 电池测试系统示意图

2 不同倍率充电边界曲线研究

2.1 基于一阶等效电路模型的恒极化分析

极化电压依据产生原理不同可分为电化极化^[12]过电压和浓差极化^[13]过电压。极化电压受到温度、电池老化状态、充电倍率等因素的影响,具有影响因素众多、变化复杂的特点,并且具有滞后性。极化电压会影响电池充放电性能。极化大则电池充放电效率低、电池发热大,极化小则充电时间长、充电电流大、电池极化大,因此极化是联系电池充电和电池性能的桥梁,合理控制电池极化水平是充电过程的关键。本文采用一阶 RC 等效电路模型^[14]模拟锂离子电池的充放电动态过程,如图 2 所示, U_p 表示电池极化电压, U_t 表示电池端电压, OCV 表示电池开路电压, I 表示充电电流, R 表示电池欧姆内阻, R_p 表示电池极化内阻。 U_t, I 通过实时测量得到, OCV 通过 $OCV-SOC$ 曲线插值得到, R 通过电池脉冲测试计算得到,并认为恒温条件下,整个充电过程中近似恒定^[15]。电池充电极化电压计算公式为 $U_p = U_t - OCV - IR_o$ 。

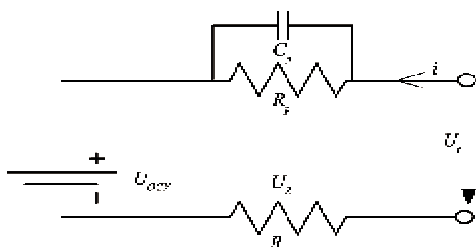


图2 电池一阶 RC 模型

假设模型中极化电压的初始值为 $U_p(0)$, 当电流 i 流过时,根据电路模型,有

$$\begin{cases} C_p \frac{du_p(t)}{dt} + \frac{u_p(t)}{R_p} = i(t) \\ u_t(t) = u_{OCV}(t) + i(t) \times R + u_p(t) \end{cases} \quad (1)$$

解得

$$\begin{cases} u_p(t) = U_p(0)e^{-t/(R_p C_p)} + \frac{e^{-t/(R_p C_p)}}{C_p} \int_0^t i(t) e^{-t/(R_p C_p)} dt \\ u_t(t) = u_{OCV}(t) + i(t) \times R + u_p(t) \end{cases} \quad (2)$$

假设在充电过程中极化电压恒定保持在 a , 由式

$$\int_0^t i(t) e^{-t/(R_p C_p)} dt = \frac{C_p(a - U_p(0))e^{-t/(R_p C_p)}}{e^{-t/(R_p C_p)}}$$

可知,在 $t(n)$ 到 $t(n+1)$ 的 Δt 时间里,认为 C_p, R_p 是不变的,等式两边对时间微分得到:

$$i(t) = \frac{2C_p U_p(0)}{\tau} (e^{-t/\tau} - a) = y_0 + Ae^{-t/\tau} \quad (3)$$

公式(3)是一条单调递减指数函数,若控制极化电压在某一水平,则总充电曲线为 n 段指数充电曲线组合。

2.2 不同倍率充电边界特性实验研究

按照第 1 节充放电实验(1)所述的充电策略进行不同倍率充电实验。充电电流波形如图 3 所示。从图 3 可以看出充电电流不同,电池恒流阶段和恒压阶段的充电时间比例不同,其转折点的坐标也不同。充电电流越大,电池越早到达充电截止电压进入恒压充电阶段,同时,由于电流大造成电池极化严重,对应的恒压阶段充电时间增加。

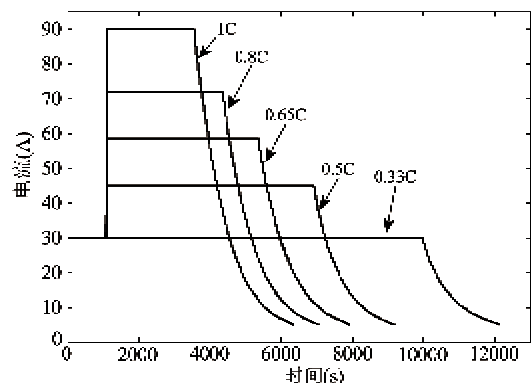


图3 不同倍率充电电流波形图

对充电各个阶段的充电数据统计如表 1 所示。由表 1 可知,在 0.33C - 1C 范围内,随着充电电流增加,恒压阶段充电时间比例显著增大,而总充电时间

是减少的。1C 总充电时间为 0.33C 充电时间的 1/2 倍,而不是 1/3 倍,表明提高充电电流并不能成比例地缩短电池总充电时间,这主要是恒压充电阶段对总充电时间的影响造成的。不同倍率充电下的总充电容量差异较小,在 90.4 ~ 92.4Ah 范围内。恒流阶段充电容量随电流增大而降低,因为充电电流越大,电池极化越大,导致充电效率降低,充电容量减小;

而恒压阶段充电容量随电流增大而增大,这是因为一方面恒压充电阶段的平均电流增大,另一方面充电时间也在增加。就平均充电倍率而言,恒压阶段的平均充电倍率小于总的平均充电倍率,因此,恒压充电阶段是影响电池充电速度的一个重要环节,提高恒流阶段充电效率,缩短恒压阶段充电时间,是提高电池充电速度的关键所在。

表 1 不同倍率充电数据统计

倍率(C)	0.33	0.50	0.65	0.80	1.00
总时间(s)	12157.00	9181.00	7933.00	7052.00	6344.00
CV 与 CC 时间百分比(%)	21.40	32.20	47.10	61.00	77.50
充电容量(Ah)	90.44	91.98	92.71	91.93	92.50
CC 容量(Ah)	83.21	82.11	78.89	74.79	71.17
CV 容量(Ah)	7.23	9.87	13.82	17.14	21.33
平均倍率(C)	0.30	0.39	0.45	0.51	0.57
CV 倍率(C)	0.13	0.17	0.21	0.25	0.30

提取图 3 中不同倍率充电曲线的恒流至恒压转折点坐标,如表 2 所示。对表 2 进行数据拟合,结果如图 4 所示。可以看出,拟合曲线符合如式

$$i = i_0 + \alpha e^{-t/\beta} \quad (4)$$

所示的指数规律,形式上与式(3)相同。则充电电流与恒流至恒压转折时间点函数表达式为

$$i = 23.60 + 227.87 \times e^{-t/2868.89}$$

表 2 不同倍率充电恒流恒压转折点的坐标统计

电流倍率(C)	转折点坐标(time, i)
0.33	(10015, 30)
0.5	(6947, 45)
0.65	(5393, 58.4)
0.8	(4378, 71.5)
1	(3574, 90)

图 4 给出了转折点拟合及误差分析结果。由图 4(b)可知,数据最大拟合绝对误差在 ±2A 以内。

通过图 4 所示曲线,可以预测不同电流充电恒流阶段时间。实际应用中,电池大部分工作在 20% ~ 80% 的 SOC 区间内,而 0.5C 恒流充电即可以充电 90% 以上,所以恒压充电阶段可以根据实际情况略去。此时总充电时间就等于恒流阶段充电时间。通过图 4 所示曲线,可进一步预测不同充电电流下的恒流转至恒压充电时的荷电状态即转折点 SOC。由式(4)得到:

$$t = -\beta \ln \frac{i - i_0}{\alpha}$$

$$SOC_c = \frac{I(t - t_0)}{C \times 3600} + SOC_e$$

$$= \frac{I(-\beta \times \ln \frac{i - i_0}{\alpha} - 1080)}{3600 \times C} + SOC_e \quad (5)$$

其中 SOC_c 表示电池充电转折点的荷电状态。

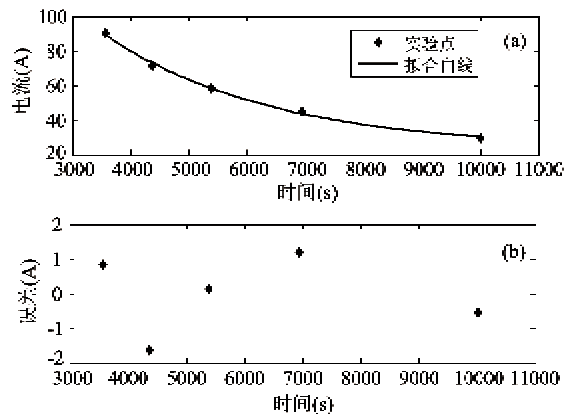


图 4 转折点拟合及误差分析

转折点 SOC 随电流变化的曲线如图 5 所示。可以看出,随着充电电流的提高, SOC_c 逐渐减小。在减小的过程中速率是不断变化的,整个曲线呈现 S 型。通过此方法,可以根据实际应用中电池需要充电的 SOC 区间来选择充电电流。如电池要以某

一恒定电流充电至 80%, 根据图 5, 则应采用 80A 以下的电流充电。

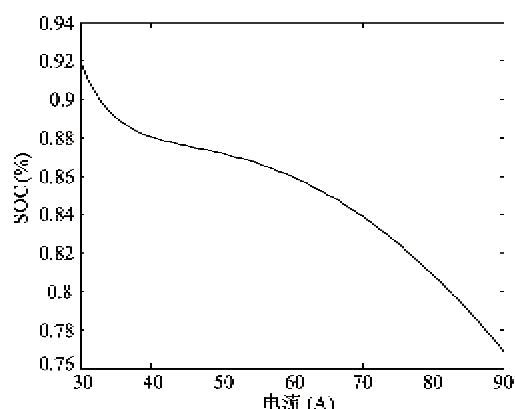


图 5 转折点 SOC 随电流变化曲线

同时, 图 4 所示曲线是电池充电电流的一条边界曲线。采用恒流恒压充电法, 在某一电流 I_1 充电下, 在 T_1 时刻电池端电压会达到上限电压, 若以 $i < I_1$ 电流充电, 达到恒压点的时刻 $t > T_1$; 反之, $i > I_1$, 到达恒压点的时刻 $t < T_1$ 。另外我们假设在 $i(1)$ 条件下充电是安全的, 那么在 $i(n) < i(1)$ 条件下充电也是安全的。所以图 4 所示曲线包络范围内是可充电区域, 而曲线右上部分是不可充电区域。

3 阶梯电流充电方法

提高充电速度的一种方法是采用阶梯充电的方法。即在一段时间内采用大电流, 另一段时间内采用较小电流, 这样平均电流增加了, 充电时间降低了, 又相对降低了电池极化水平, 使充电时间和电池寿命得到兼顾。本部分内容包括两组实验, 实验(2)与实验(3)。即实验是在边界曲线的基础上设计的, 整个充电过程中, 不论电流如何变化, 都在充电边界曲线内部。

3.1 基于恒压转折点的阶梯电流充电法

按照图 3 所示, 如果电池以 1C 恒流充电到达恒压点时, 降电流为 0.8C 恒流, 以后依次类推, 则理想条件下充电轨迹即是边界曲线, 可以实现充电速度最大化。实验结果如图 6 所示。

通过表 3 的充电参数对比发现, 1C 恒流恒压充电与恒压阶段阶梯电流模式充电参数相差无几, 即恒压阶段阶梯电流模式充电并没有明显改进充电性能, 也没有达到图 4 所示拟合的边界曲线, 相差甚

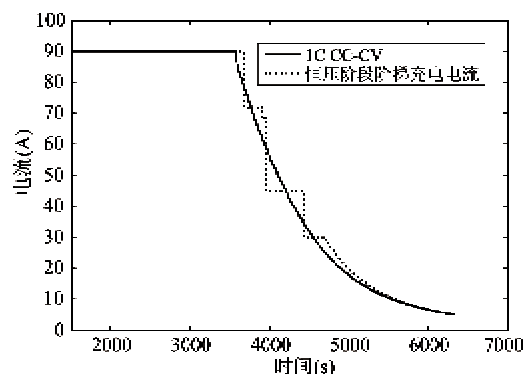


图 6 恒压阶段阶梯充电模式与 1C CC-CV 充电对比

远。分析原因如下: (1) 因为电池极化是与充电电流有密切关系的, 并且极化电压有很强的时滞性, 电流变化后, 极化电压并没有立即做出相应变化; (2) 电池充电倍率不同, 相等时间内充入电量不同导致 OCV 不同。上述两点原因造成电池从 1C 充电到 4.2V 降到 0.8C 时的电池状态与电池 0.8C 充电到 4.2V 的状态大不相同。

表 3 恒压阶段阶梯充电模式与 1C CC-CV 参数对比

充电模式	1C CC-CV	电压阶梯
总充电时间(s)	6344.96	6326.07
CC 时间(s)	3574.26	3677.80
CV 时间(s)	2770.70	2648.27
总时间小时(h)	1.76	1.76
充电容量(Ah)	92.50	93.21
CC 容量(Ah)	71.17	73.76
CV 容量(Ah)	21.33	19.45
预备阶段容量(Ah)	8.97	8.97

3.2 恒流阶段阶梯电流充电法

图 7 是实验(3)恒流阶段阶梯电流模式与不同倍率 CC-CV 充电极化电压比较。SOC 从 0 到 25% 阶段内, 恒流阶段阶梯电流模式极化电压与 1C CC-CV 模式相同。因此重点分析充电中后期极化电压变化。除 1C 倍率外其他阶梯倍率充电下的极化电压水平小于相应的恒流阶段阶梯电流模式。在 SOC 为 55% 之后的时段阶梯模式的极化电压比 0.33C 条件下的 CC-CV 模式的极化电压还要小, 是整组实验的最低水平。恒流阶段阶梯电流模式整个充电过程的极化水平大部分稳定在在 30 ~ 40mV 之内。可见恒流阶段阶梯电流充电法能够有效降低电池充电过程中的极化水平。

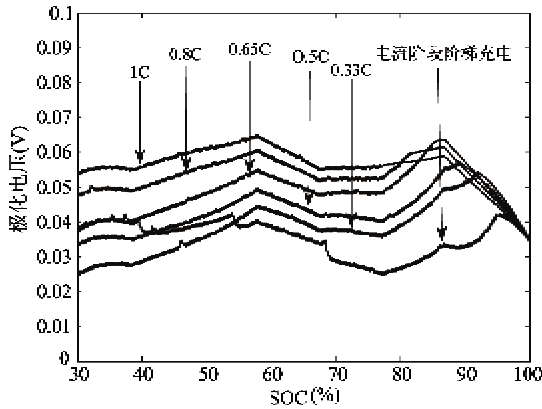


图 7 恒流阶段阶梯电流模式与 CC-CV 充电极化电压随 SOC 变化

恒流阶段阶梯电流模式的参数统计如表 4 所示。通过对比表 1 和表 4 数据可知,恒流阶段阶梯电流充电模式 CV 阶段时间大大缩短,均小于各倍率下的 CC-CV 充电模式,有效提高了恒压阶段的充电速度。这是因为在恒流阶段阶梯电流模式后期,极化水平小,更有利于充电。据测算,整个充电平均倍率为 0.42C。

表 4 恒流阶段阶梯充电模式统计

阶梯倍率	充电时间(s)	充电容量(Ah)	阶段 SOC (%)
预备	1083.94	8.97	9.60
1C	540.06	13.49	14.43
0.8C	720.00	14.38	15.39
0.65C	840.01	13.63	14.58
0.5C	1079.30	13.46	14.41
0.33C	2970.61	24.68	26.41
CV	1418.95	4.83	5.17

表 5 所示恒流阶段阶梯电流模式与不同倍率 CC-CV 模式的充电性能参数对比。实验结果表明充电时间相对 0.33C、0.5C CC-CV 分别缩短了 28.83%、8.74%; 充电容量相对 0.33C、0.5C、1C CC-CV 分别提高了 3.32%、1.60%、1.02%, 充电极

表 5 恒流阶段阶梯充电与 0.33C CC-CV 对比

模式	充电时间(s)	充电容量(Ah)	充电总极化(V) (对时间积分)
恒流阶段 阶梯电流	8652.87	93.45	352.44
0.33C CC-CV	12158.71	90.44	539.31
0.5C CC-CV	9481.81	91.98	459.76
1C CC-CV	6344.96	92.50	404.95

化分别降低了 34.65%、23.34%、12.97%。可见,采用恒流阶段阶梯电流充电方法,电池充电性能得到了显著改善。

4 结论

本文在 CC-CV 充电模式基础上,对不同倍率充电数据进行了分析,通过对恒压转折点拟合提出了充电边界曲线。根据该边界曲线,得到了不同倍率充电的可充电区域及其恒流恒压充电转折点 SOC。在此基础上,对比研究了恒压阶段阶梯电流充电、恒流阶段阶梯电流充电、CC-CV 充电模式的充电性能,结果表明,恒流阶段阶梯电流充电方法与 0.33C CC-CV 充电方法相比,其充电时间缩短了 28.83%,充电容量提高 3.32%,充电极化电压降低了 34.65%,即提高了充电速度并有效降低了电池中后期极化电压和总极化电压。

电池充电特性受温度和老化状态(内阻增加,容量衰退)的影响较大,本研究将温度设定为常温,极化电压也是在该特定温度条件下对比分析,没有考虑到电池老化带来的充电差异。因此研究温度和老化状态对电池不同倍率充电的影响是下一步要研究的重点。

参考文献

- [1] 杜纪栋. 十城千辆: 加速纯电动车产业化. 中国科技财富, 2010, (19): 10-14
- [2] 温家鹏. 纯电动汽车用锂离子动力电池优化充电理论研究: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2011. 85-86
- [3] Hsieh G C, Chen L R, Huang K S. Fuzzy-controlled Li ion battery charge system with active state-of-charge controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(3): 585-593
- [4] Lyn C E, Rahim N A, Mekhilef S. DSP-based fuzzy logic controller for a battery charger. In: *Proceedings of IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*. Beijing, China, 2002. 1512-1515
- [5] Hasanién H M, Abd-Rabou A S, Sakr S M. Design optimization of transverse flux linear motor for weight reduction and performance improvement using response surface methodology and genetic algorithms. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2010, 25(3): 598-605
- [6] Liu Y H, Teng J H, Lin Y C. Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using ant colony

- system algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1328-1336
- [7] Wang L, Singh C. Multi criteria design of hybrid power generation systems based on a modified particle swarm optimization algorithm. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2009, 24(1): 163-172
- [8] Chen L R, Hsu R C, Liu C S. A design of a grey-predicted Li-ion battery charge system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(10): 3692-3701
- [9] Ikeyaa T, Sawadab N, Murakamic J I, et al. Multi-step constant-current charging method for an electric vehicle nickel/metal hydride battery with high energy efficiency and long cycle life. *Journal of Power Sources*, 2002, 105(1):6-12
- [10] Svoboda V, Doering H, Garche J. The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries. *Journal of Power Sources*, 2005, 144 (1): 244-254
- [11] Zhang S S. The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 1385-1391
- [12] 司云森,杨显万. 电化学极化过程实验数据处理分析的研究. 昆明理工大学学报(理工版),2003,28(1): 164-167
- [13] 裴皓天,张永军,李文鹏. 钎膜分离氢过程中浓差极化的数学建模. 天然气化工(C1 化学与化工),2009,34(1):46-50,53
- [14] 王占国,金新民,孙丙香等. 基于电路暂态分析的功率型电池建模. 北京交通大学学报,2012,36(2):91-94
- [15] 文锋. 纯电动汽车用锂离子电池组管理技术基础问题研究:[博士学位论文]. 北京:北京交通大学电气工程学院,2009.16-18

Study of a step-current charging method for power lithium-ion batteries

Zhang Caiping, Liu Qiujiang, Jiang Jiuchun

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

The charging boundary characteristics of power lithium-ion batteries were investigated based on the traditional constant current-constrant voltage (CC-CV) charging pattern. By taking the parameters of polarization voltage, charging time and charging capacity as the indexes for quantitative assessment of the batteries' charging performance, a charging boundary curve based step-current charging method was proposed, and the charging performance of the step-current charging at the constant current stage and that of the step-current charging at the constant voltage stage were comparatively analyzed. The experimental results showed that the obtained charging pattern decreased the charging time by 28.83%, increased the charging capacity by 3.32%, and reduced the polarization voltage by 34.65% compared to the CC-CV charging mode.

Key words: lithium-ion battery, rate charging, boundary characteristics, step-current charging pattern