

充电极化电压特性建模及估算^①

王占国^② 温家鹏 文 锋 郭宏榆^③

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘 要 基于高阶阻容电学模型,对锂离子动力电池充电极化电压的幅值特征和变化规律进行了定量分析,在时域内给出了极化电压的综合模型,阐述了极化电压随电流、荷电状态、初始极化状态以及健康状态(SOH)在时域下的非线性。同时证明了极化电压随荷电状态的变化梯度具有拐点一致性,在此基础上提出了一种基于极化电压和荷电状态估算方法。

关键词 充电极化电压,时域特性, SOC 梯度, 拐点特性

0 引言

充电极化电压是锂离子动力电池的最重要参数之一,研究极化电压,对电池参数估算和优化使用具有重要意义。电池过电压分为内阻电压和极化电压。内阻电压源于电池内各部件之间的接触电阻且相对稳定,而极化电压表征电池在充放电过程中产生的电化学反应和浓差极化,与活性物质本性、电极结构、制造工艺以及工作条件都有关^[14],因此极化电压的研究是电池建模的核心问题。

目前已有学者采用简单模型、“Thevenin”模型、动态电池模型、组合模型、高阶模型、过电流模型等对电池进行建模^[5,51]。简单模型将内阻极化和化学极化等效为固定不变的电阻器件,组合模型考虑到等效内阻随荷电状态(state of charge, SOC)的变化而变化,建立了对应函数关系,上述两种建模方法均忽略了电池的极化延迟性能,所以动态响应效果不佳。高阶极化电压模型是在“Thevenin”模型基础上采用多阶 RC 对电池的极化电压进行建模,但由于模型阶次较高,解耦识别困难。

常用的极化电压识别法包括静置识别法^[7,8]和参数拟合法^[9-13]。前者需要较长时间的静置,后者基于电流响应,拟合参数多,运算量较大。特别极化参数随着电池状态参数的变化而变化,给识别带来更大困难。为了提高极化电压估算的实时性,便于

分析和控制,需要对极化电压进行在线辨识。因此,本文主要从充电极化电压的特性出发,分析充电极化电压的电流激励特性,提出了一种具有普适性的极化电压在线估算方法。

1 充电极化电压的时域特性分析

1.1 线性因子及高频饱和特性

如图 1 所示 Thevenin 模型采用极化电压等效电阻 R_p 和极化电压等效电容 C_p 并联对极化过电势进行建模。

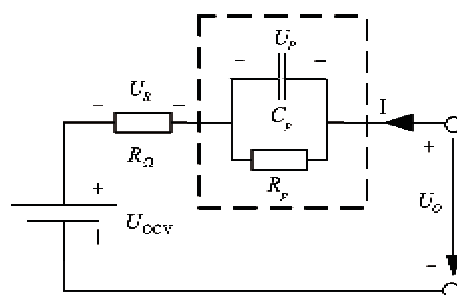


图 1 电池“Thevenin”等效模型

基于电池的 Thevenin 等效模型原理,得出电池的 n 阶阻容模型参见图 2,极化电压的表达式为

$$u_p(t) = \sum_{i=1}^n (U_{0i} e^{-\frac{t}{\tau_{R_i C_i}}} + i(t) R_{R_i} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{R_i C_i}}})) \quad (1)$$

① 863 计划(2011AA05A108)和国家科技支撑计划(2011BAA07B07)资助项目。

② 男,1970 年生,博士生,工程师;研究方向:电力电子技术;E-mail: zhgwang@bjtu.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: 07117320@bjtu.edu.cn

(收稿日期:2011-11-04)

其中 $u_p(t)$ 和 $i(t)$ 分别表示 t 时刻的极化电压和工作电流, U_{0i}, R_{pi}, C_{pi} 分别表示第 i 阶次阻容的初始电压,电阻常数和电容常数。

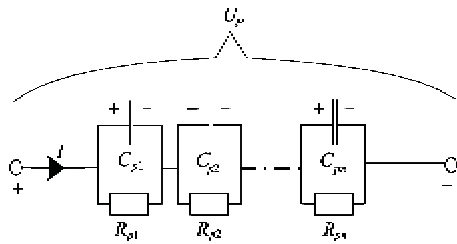


图2 极化电压 n 阶模型

电池在不同 SOC 阶段产生的极化电压恢复特性参见图 3。可见虽然极化电压建立幅值和消退时间随 SOC 变化,但除 SOC = 100% 以外,在其他 SOC

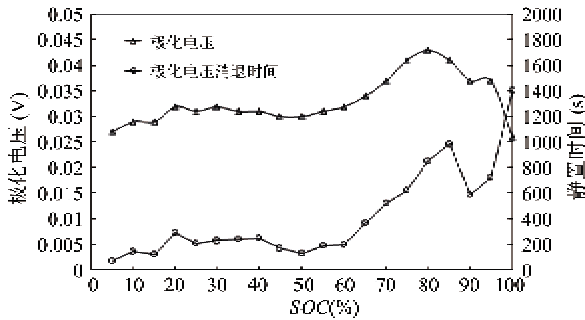


图3 不同 SOC 区间脉冲充电极化电压幅值及消退时间曲线

区间,极化电压完全消退的时间均小于 1000s,特别在 SOC 从 0% 到 70% 的范围内,更可缩短至 600s 内,即在此 SOC 区间极化电压的高频成分占主要部分。换言之,对于 SOC 在 0% ~ 70% 区间,低频分量很小。因此,依据高阶阻容模型时域特性,当充电电流激励时间为 T 时,且 T 满足: $\text{Max}\{3R_{p1}C_{p1}, \dots, 3R_{pk}C_{pk}\} \leq T \leq \text{Max}\{3R_{p(k+1)}C_{p(k+1)}, \dots, 3R_{pn}C_{pn}\}$ 。电池高频分量占主要部分,此时极化电压初始系数

有 $\sum_{j=1}^k U_{0j} \approx 0$, $\sum_{j=k}^n U_{0j}$ 认为恒定不变,令 $U_{p0} = \sum_{j=k}^n U_{0j}$, 则极化电压 U_p 可表示为

$$U_p = U_{p0} + I \times R_{p1} + I \times R_{p2} + \dots + I \times R_{pk} + I \times R_{pk}(1 - \exp(-T/R_{pk}C_{pk})) + \dots + I \times R_{pn}(1 - \exp(-T/R_{pn}C_{pn})) \quad (2)$$

令

$$A_i = \begin{cases} R_{pi}, & 0 < i < k \\ R_{pi}(1 - \exp(-T/(R_{pi}C_{pi}))), & k < i < n \end{cases}$$

则 $A_1 \dots A_n$ 为各阶次极化电压的阻容系数,即同一电流对不同阶次模型产生的响应。充电电流 I 在 T 时间段内的极化阻抗分为饱和与未饱和极化阻抗。前者只与阻抗参数中电阻部分相关,后者在 T 时间段内建立的极化电压由极化阻抗参数和时间衰减因子共同决定,衰减频率与时间 T 和时间常数 $R_{pi}C_{pi}$ 的比值呈指数关系,因此可得

$$U_p = U_p(0) + (A_1 + A_2 + \dots + A_n) \times I \quad (3)$$

1.2 初始极化状态畸变因子

在电池电流和初始 SOC 相同、放完电后到充电开始之间的静置时间(简称为初始静置时间)不同的情况下建立的极化电压的计算值如表 1 所示。

表1 不同初始静置时间建立极化电压数值

充电前静置时间(h)	时刻 T 极化电压(mV)
0	12
0.5	15
1	25
2	26
5	25

由表 1 可见,静置时间在 0 ~ 1h 之间时,建立的极化电压随初始静置时间的增加而增加;但静置时间在 1 ~ 5h 之间时,建立的极化电压基本相同。因此将初始极化状态畸变因子 B_{p0-} 作用下的极化电压修正为

$$U_p(t) = I \times (A_1 + A_2 + \dots + A_n) + B_{p0-} \quad (4)$$

B_{p0-} ——受初始静置时间影响,根据电流方向的不同可分为

$$U_{p0} = B_{p0-} = \begin{cases} B & \text{前一时刻为充电态} \\ 0 & \text{前一时刻为充分静置态} \\ -B & \text{前一时刻为放电态} \end{cases}$$

1.3 非线性因子

1.3.1 倍率畸变因子

提取样本电池在不同电流下作用相同时间建立的极化电压参见表 2。

表2 不同电流建立的极化电压

充电电流(A)	极化电压(V)	极化电压电流梯度(V)
12	0.064	—
24	0.030	-0.0028
36	0.039	0.00075
48	0.046	0.00058
72	0.076	0.00125

可见,当充电电流发生变化时,极化电压幅值发生变化,但单位电流对应极化电压变化并不一致,即 $(U_{P2} - U_{P1}) / (I_2 - I_1) \neq (U_{P3} - U_{P2}) / (I_3 - I_2)$, 因此对充电电流影响因子 K_I 作用下的充电极化电压修正为

$$U_P(t) = K_I \times I \times (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) + B_{P0-} \quad (5)$$

1.3.2 初始 SOC 状态畸变因子

对样本电池进行同一电流不同初始 SOC 下建立的极化电压进行计算得到表 3。

表 3 不同初始 SOC 下建立的极化电压数值	
起始 SOC (%)	极化电压 (V)
10	0.012
30	0.004
50	0.017
70	0.014
90	0.039

随着 SOC 的增加,同一电流建立的极化电压幅值逐渐增加。因此将 SOC 影响因子 K_{SOC} 作用下的极化电压线性表达式修正为

$$U_P(t) = K_{SOC} \times I \times (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) + B_{P0-} \quad (6)$$

1.3.3 电池老化畸变因子

对样本电池进行同一电流、相同初始 SOC、相同初始静置时间、不同老化程度下建立的极化电压进行在线计算得到图 4。当电池容量衰退后,极化电压平台有所增加。因此考虑健康状况 (state of health, SOH) 老化畸变因子 B_{SOH} 作用下的极化电压修正为

$$U_P(t) = I \times (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) + B_{P0-} + B_{SOH} \quad (7)$$

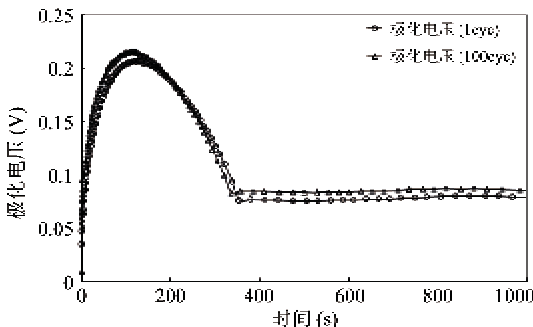


图 4 不同老化状态下的极化变化曲线

综上所述,极化电压的建立幅值除了跟固有阻容参数具有线性关系外,同时受充电倍率、初始 SOC

状态、初始静置状态和电池老化状态四个非线性因素影响,因此在时域范围内建立充电极化电压的影响因素的综合表达式为

$$\begin{aligned} U_P &= f_{V_P-t}(I, t, K_{SOC}, K_I, K_{SOH}, B_{P0-}) \\ &= K_{SOC} \times K_I \times I \times (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) \\ &\quad + B_{P0-} + B_{SOH} \end{aligned} \quad (8)$$

2 充电极化电压的 SOC 域特性分析

2.1 充电极化电压 SOC 梯度的拐点一致性

定义充电极化电压 SOC 梯度 L 表达式为

$$L = \frac{\partial U_P}{\partial SOC} \quad (9)$$

即极化电压随 SOC 的变化率。

2.1.1 不同初始电流下的 SOC 梯度拐点

提取不同初始电流建立的极化电压数值,并计算得到极化电压 SOC 梯度的变化曲线如图 5。

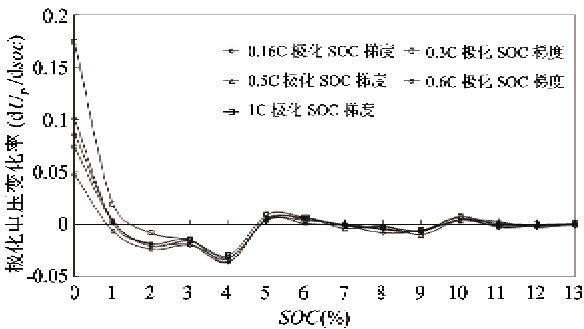


图 5 不同初始电流建立的极化电压 SOC 梯度

可见虽然初始充电时极化电压的 SOC 梯度各不相同,但充入容量约 3% 后,极化电压随 SOC 的变化梯度都会发生拐点,而且充入容量约 5% 后此变化梯度数值趋于稳定。

2.1.2 不同初始容量下的 SOC 梯度拐点

提取不同初始 SOC 建立的极化电压数值,并计算得到极化电压 SOC 梯度的变化曲线如图 6 所示。

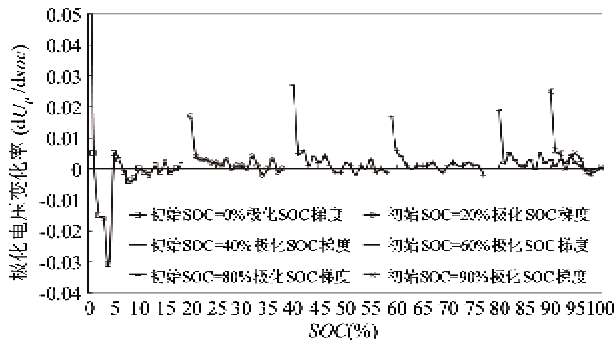


图 6 不同初始容量下的极化电压 SOC 梯度

由图 6 可见,初始充电时刻电池的 SOC 不同,但充入容量约 3% 后,极化电压随 SOC 的变化梯度都会发生拐点,而且充入容量约 5% 后此变化梯度数值趋于稳定。

2.1.3 不同初始极化状态下的极化电压梯度拐点
提取不同初始静置时间建立的极化电压并得到极化电压 SOC 梯度的变化曲线如图 7。

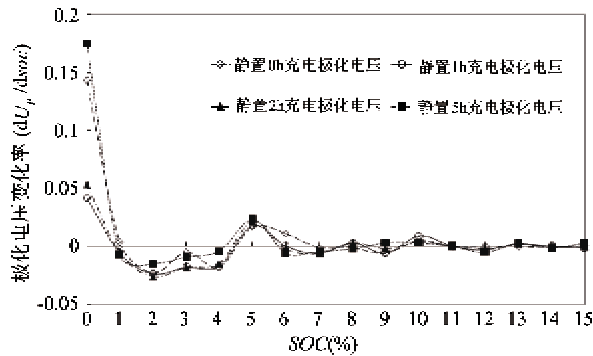


图 7 不同初始静置状态下极化电压 SOC 梯度

放电后静置时间越短,极化电压的 SOC 梯度初始值越小,反之越大。但充入容量约 3% 后,极化电压随 SOC 的变化梯度都会发生拐点,而且充入容量约 5% 后此变化梯度数值趋于稳定。

2.1.4 不同老化程度下的极化电压梯度拐点
提取不同老化程度电池建立的极化电压数值,并同理得到极化电压 SOC 梯度的变化曲线如图 8。

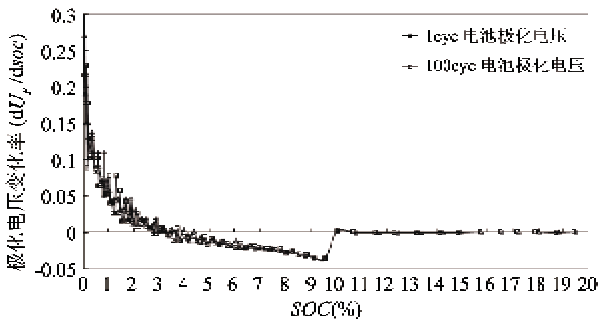


图 8 不同老化状态下的极化电压 SOC 梯度

随着电池老化程度加深,极化电压的初始值和极化电压的 SOC 梯度增大。但充入容量约 3% 后,极化电压随 SOC 的变化梯度仍会发生拐点,而且充入容量约 5% 后此变化梯度数值趋于稳定。

2.2 拐点时刻极化电压幅值与充电电流和 SOC

2.2.1 极化幅值与倍率电流

依据极化电压的 SOC 梯度特性,提取充入容量

为 3% 时刻(即 $\partial U_p/\partial SOC$ 出现拐点)对应的极化电压数值 U_{PD} 如图 9。

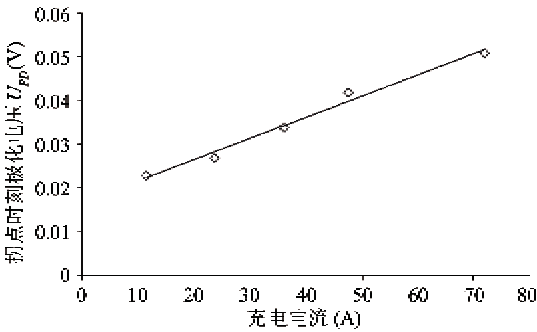


图 9 不同充电电流下极化电压 U_{PD} 随 I 变化曲线

不同倍率电流下,当 $\partial U_p/\partial SOC$ 出现拐点时刻,极化电压幅值与充电电流之间存在单调线性关系。利用数据拟合技术对此时 $U_{PD} = f(I)$ 进行拟合,得到:

$$U_{PD} = 0.00005 \times I + 0.0169 \tag{10}$$

其中 U_{PD} 表示拐点时刻极化电压的幅值, I 表示充电电流。

上式表明在极化电压 SOC 梯度出现拐点时刻,极化电压的幅值表现出线性变化特性,数值与充电电流呈一次函数关系。

2.2.2 极化幅值与 SOC

不同初始 SOC 充入容量为 3% 时刻(即 $\partial U_p/\partial SOC$ 趋于平稳)对应的极化电压数值 U_{PD} 如图 10。同一电流作用于 SOC 状态不同的同一电池,

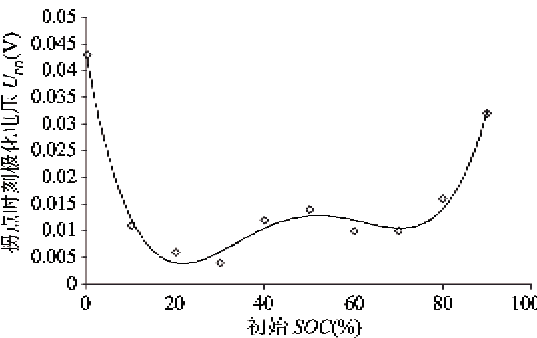


图 10 不同初始 SOC 下极化电压随 SOC 变化曲线

产生的极化电压不同。当 $SOC_0 < 10\%$ 或 $SOC_0 > 80\%$ 时,建立的 U_{PD} 数值较大;而当 $10\% < SOC_0 < 70\%$ 时, U_{PD} 数值较小,且比较接近。提取稳定时刻极化电压幅值,并对 $U_{PD} = f(SOC_0)$ 进行拟合,得到:

$$U_{PD} = 0.00000001 \times SOC_0^4 - 0.000003 \times SOC_0^3 + 0.0002 \times SOC_0^2 - 0.0048 \times SOC_0 + 0.04 \quad (11)$$

其中 U_{PD} 和 SOC_0 分别表示拐点时刻极化电压值和剩余容量。

2.2.3 极化幅值与电池历史状态

从式(7)可知,初始极化状态和老化程度都是在初始充电过程中对极化电压叠加效应,不随 SOC 而变化。

3 基于充电极化电压 SOC 梯度特性的极化估算方法

3.1 极化电压高频等效内阻

如上所述充电极化电压的 SOC 梯度存在拐点一致性,且在其他因素固定的前提下,充电极化电压拐点时刻的幅值与充电电流具有如下关系:

$$\frac{(U_{PD1} - U_{PD2})}{(I_1 - I_2)} = R_{P_{SOC}} \quad (12)$$

定义 $R_{P_{SOC}}$ 为极化电压高频等效内阻。由于不同电流建立的极化电压拐点幅值与 $R_{P_{SOC}}$ 成正比关系,因此在 SOC 域范围内, $R_{P_{SOC}}$ 具有电阻特性。利用极化电压的高频效应和 SOC 特性,可以在充电过程中利用两阶梯电流交替作用产生的极化电压拐点幅值变化求取极化电压在 SOC 域内的 $R_{P_{SOC}}$,进而求得拐点时刻的极化电压幅值,原理如图 11 所示。

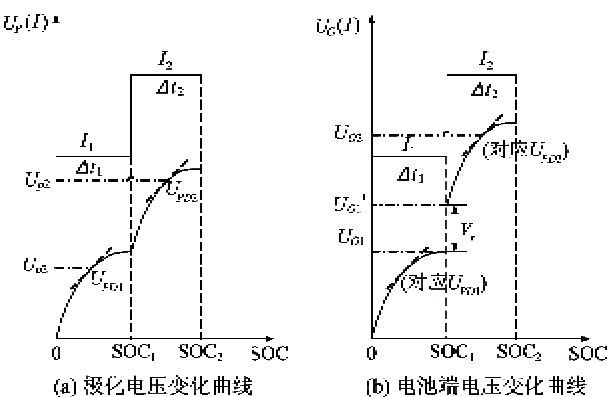


图 11 电流阶梯变化下的极化特性

3.2 极化电压与端电压梯度拐点的同步性

如前所述,充电过程中端电压表达式为

$$U_o = OCV(SOC) + I \times R_o + I \times R_{P_{SOC}} \quad (13)$$

其中 U_o 为电池端电压, $OCV(SOC)$ 为电池充分静置后的端电压(即内电势), R_o 为电池直流内阻,则有

$$\Delta U_o = \Delta OCV(\Delta SOC) + \Delta I \times R_o + \Delta I \times R_{P_{SOC}} \quad (14)$$

其中

$$R_o = \frac{U_{o1}' - U_{o1}}{I_2 - I_1} \quad (15)$$

由此可得电池在电流阶梯变化时的极化高频等效内阻的算法表达式为

$$R_{P_{SOC}} = \frac{\Delta V_o - OCV(\Delta SOC)}{I_2 - I_1} - R_o \quad (16)$$

于是可得到极化高频等效内阻,从而得出电流变化时刻的电池极化电压数值,进而推出此时的 SOC 值。

4 效果验证

为验证该方法在不同 SOC 下的适用性,本文选取电池的初始预设容量分别为 10%, 30%, 50% 和 70% 进行实验。步骤如下:

- (1) 对样本电池进行恒流放电(1C)直至电池起始剩余容量为初始预设容量。
- (2) 进行 0.3C 恒流充电,直至充电容量达到 5%。
- (3) 将电流变为 1C,直至充电容量再次达到 5%。
- (4) 重复进行步骤(1) - (3),抽取得到图 12 所示的 4 组充电极化电压变化曲线。

利用极化电压等效内阻对充电极化进行估算,进而估算得到的 SOC 值,如表 4 所示。

表 4 利用极化高频等效内阻估算 SOC 误差表

起始 SOC(%)	估算时刻真实值(%)	极化高频等效内阻 $R_{P_{SOC}}$ (Ω)	估算值(%)	SOC 误差(%)
10	16.1	0.00083	17.6	-1.4
30	35	0.00084	36.6	-1.6
50	55	0.00070	57.5	-2.5
70	74.4	0.00078	78.1	-3.6

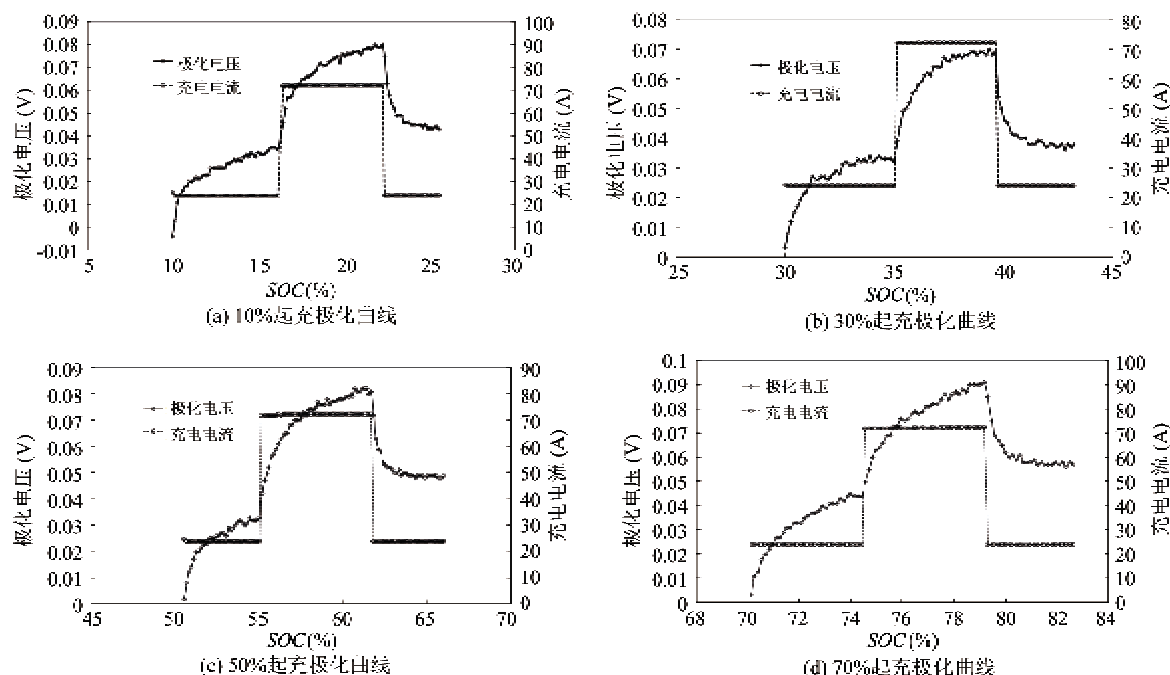


图12 识别测试极化曲线

5 结论

通过上述实验可知,阶梯电流激励后在 $SOC < 5\%$ 范围内,电池极化电压出现拐点,利用端电压电压变化和拐点极化与充电电流的线性对应关系,可求出极化高频等效电阻,从而计算此时的极化电压和 SOC 值。计算结果表明用此种方法可以保证在初始 SOC 在较大范围内估算当前高频等效内阻和激励时刻 SOC ,且估算误差都在 5% 以内,完全可以证明根据这种识别方法计算当前充电极化电压,进而求得 SOC 的一种在线估算方法,具有一定的稳定性和准确性。

参考文献

- [1] Newman J, Thomas K E, Hafezi H, et al. Modeling of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2003, 119-121(1): 838-843
- [2] Nelson P, Bloom I, Amine K, et al. Design modeling of lithium-ion battery performance. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 437-444
- [3] Buller S, Thele M, De Doncker R, et al. Impedance-based simulation models of supercapacitors and li-Ion batteries for power electronic applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(3): 742-747
- [4] Abu-Sharkh S, Doerffel D. Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2004, 130: 266-274
- [5] Chan H, Sutanto D. A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicle power systems. In: *Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, 2000 (1): 470-475
- [6] Gao L J, Liu S Y, Roger A. Dynamic lithium-Ion battery model for system simulation. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2003, 25(3): 495-505
- [7] 魏学哲, 孙泽昌, 田佳卿. 锂离子动力电池参数辨识与状态估计. *同济大学学报: 自然科学版*. 2008, 36(2): 231-235
- [8] Plett G L. High-performance battery pack power estimation using a dynamic cell model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(5): 1586-1592
- [9] 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
- [10] Coleman M, Hurley W G, Lee C K. An improved battery characterization method using a two-pulse load test. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 708-713
- [11] Benini L, Castelli G, Macii A. A discrete-time battery model for high-level power estimation. In: *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*, Paris, France, 2000. 35-39
- [12] Snihir I, Rey W, Verbitskiy E. Battery open-circuit volt-

- age estimation by a method of statistical analysis. *Journal of Power Sources*, 2006, 159: 1484-1487
- [13] Funato H, Forrai A, Yanagita Y. New estimation method of state of batteries based on system identification. In:

Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drive, Atlanta, USA, 2003. 345-348

Modeling and estimation of charging polarization voltage in SOC Domain

Wang Zhanguo, Wen Jiapeng, Wen Feng, Guo Hongyu
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

Based on the high-level R-C electrical model, the amplitude characteristics and variation of the charging polarization voltage of lithium-ion power batteries are analyzed quantitatively in the state of charge (SOC) domain and the time domain. So a new model for charging polarization is given, which describes the relationship between polarization voltage with current, SOC, initial polarization state and state of health (SOH), and it is proved that the inflection point of polarization voltage gradient with SOC is constant. Finally, a new method to estimate SOC based on the features of charging polarization gradient with SOC is proposed and verified, the estimation error of which is less than 5%.

Key words: charging polarization voltage, time domain characteristics, SOC gradient, inflection point characteristics