

电动汽车用锂离子电池荷电状态定义和估算方法<sup>①</sup>文 锋<sup>②\*</sup> 林 程<sup>\*</sup> 姜久春<sup>\*\*</sup> 张维戈<sup>\*\*</sup> 王占国<sup>\*\*</sup>

(\* 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081)

(\*\* 北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

**摘 要** 分析了现有电池荷电状态(SOC)定义方法的主要问题,基于电池的开路电压提出最大可用容量的概念,并对电池的 SOC 重新进行定义,从而实现了充放电容量与电池工况之间的解耦;通过更新电池的最大可用容量,避免了老化对 SOC 估算精度的影响;通过将电池的欧姆压降和极化电压折合到放电容量的损失上,得到电池和电池组实际可用容量的计算方法,并验证了其有效性和可行性。

**关键词** 电动汽车, 荷电状态(SOC), 最大可用容量, 实际可用容量

## 0 引言

合理地定义电池组的荷电状态(state of charge, SOC)是对电池组进行有效估计的基础。虽然人们在 SOC 估算方面进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>,但现有电池的 SOC 定义方法与工况严重耦合,并忽略了电池的老化问题,这增加了电池 SOC 估算的难度,甚至出现矛盾<sup>[9]</sup>。本文分析了当前电动汽车用锂离子电池 SOC 定义存在的主要问题,提出了电池最大可用容量的概念,并据此对 SOC 进行重新定义,实现了电池与其运行工况的解耦,在电池最大可用容量的基础上,通过实时更新电池的过电压并将其折算到容量损失上,得到电池的实际可用容量。实验验证了这种电池荷电状态估算方法的有效性。

## 1 现有 SOC 定义方法及主要问题

现在一般从容量的角度,将电池的荷电状态(SOC)定义为剩余容量( $Q_{rem}$ )与实际容量( $Q_N$ )的百分比,即

$$SOC = \frac{Q_{rem}}{Q_N} \times 100\% \quad (1)$$

## 1.1 与工况耦合

$Q_{rem}$  和  $Q_N$  是在某个特定的放电条件下,以电池外电压达到放电截止电压为放完电判断依据得到

的。然而,如电动汽车等运行场合,电池实际使用时不可能按照某个固定的电流和温度条件进行放电,所以当外电压达到放电终止电压前, $Q_{rem}$  和  $Q_N$  都不能确定,电池的 SOC 与其运行工况耦合,此时讨论电池当前的 SOC 及其估算精度并无实际意义,甚至出现矛盾。

## 1.2 忽略老化影响

电池在电动汽车上实际使用时,并不像电池循环测试那样按照某个固定的工况全充全放,所以实际容量并不容易得到,于是在 SOC 估算时,常以标称容量代替实际容量,这种估算方法忽略了电池老化后实际容量会下降的问题,从而导致电池 SOC 估算误差增大。

## 2 单只电池 SOC 定义方法

## 2.1 最大可用容量

不同工况下,电池的放电容量存在差异的原因在于:电池的欧姆压降  $U_R$  和极化电压  $U_p$  随工作环境温度及电流等参数的变化而变化(在低温、大电流、持续放电的情况下, $U_R$  和  $U_p$  更大),因此虽然放电终止时,电池外电压  $U_0$  都等于放电终止电压  $U_{Dch\_end}$ ,但是由于  $U_0 = U_{OCV} - U_R - U_p$ ,所以电池的开路电压  $U_{OCV}$  并不相同,即在放电结束时 SOC 不一样,所以放电容量势必存在差异,这是电池 SOC 与

① 863 计划(2011AA11A223)资助项目。

② 男,1980 年生,博士;研究方向:锂离子电池管理技术;联系人,E-mail: 05117295@bjtu.edu.cn  
(收稿日期:2011-09-27)

运行工况之间耦合起来的根本原因。

以不同电流对电池放电容量的影响为例进行证明如下:对同一只电池(标称容量 15Ah)按照表 1 分 3 种方式分别放电,得到放电过程曲线参见图 1。

表 1 3 种放电方式

|      | 步骤 1         | 步骤 2          |
|------|--------------|---------------|
| 方式 1 | 5A 放电至 3.3V  | 0.5A 放电至 3.3V |
| 方式 2 | 10A 放电至 3.3V | 0.5A 放电至 3.3V |
| 方式 3 | 15A 放电至 3.3V | 0.5A 放电至 3.3V |

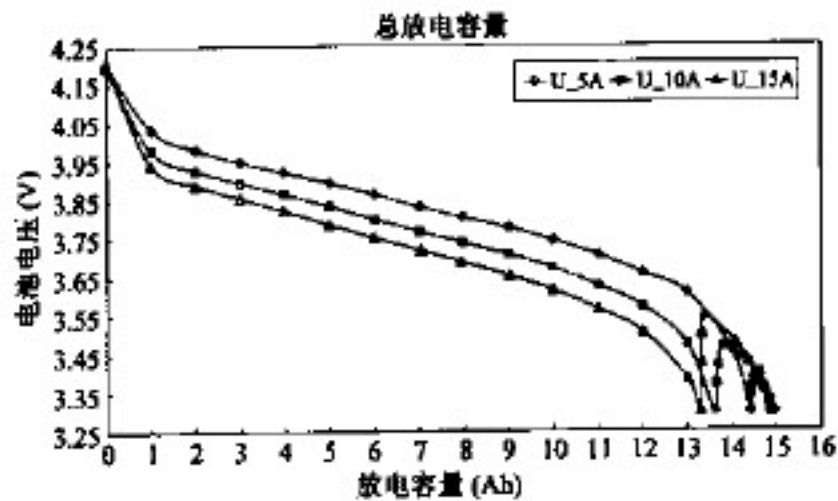


图 1 3 种方式下的放电曲线

各自的第一步放电结束时,放电容量分别为 14.4Ah、13.6Ah 和 13.3Ah。但是第二步放电结束时,三次的总放电容量都为 14.9Ah。可见,以不同电流放电至放电终止电压后,降低放电电流,电池能继续放电,且总放电容量一样。

基于此,将电池最大可用容量定义为电池从充满电状态以足够小的电流放电至放电终止电压过程中的总放电容量。与实际容量不同的是,最大可用容量要求在放电结束时,电池开路电压达到放电终止电压。在不同电流、温度<sup>[10]</sup>和放电模式下<sup>[11]</sup>,电池的放电容量虽然存在差异,但是最大可用容量是不变的。

2.2 单只电池 SOC 新的定义方法

依据上述最大可用容量的定义方法,当电池的开路电压达到放电终止电压时,定义为放完电,此时 SOC = 0%;当电池的开路电压达到充电终止电压时,定义为充满电,此时 SOC = 100%。这样电池从充满电状态放电至放完电状态过程中的放电容量即为电池的最大可用容量  $Q_{max}$ ,从当前状态放电至放完电状态过程中的放电容量为电池的剩余容量  $Q_{rem}$ ;电池的 SOC 定义为

$$SOC = \frac{Q_{rem}}{Q_{max}} \times 100\% \tag{2}$$

在低温、大电流和持续放电情况下,虽然外电压达到了放电终止电压,且出于使用安全和长寿命的考虑,电池不能以该电流继续放电,但是开路电压并未达到放电终止电压,所以电池的 SOC ≠ 0%。这只是说明此时的放电电流超出了电池在当前状态下的最大放电能力,放电电流需要减小,车辆需要降功率行驶。当电池电流减小、恢复到常温或者静置一段时间,待欧姆压降和极化电压减小后,电池剩余容量还能释放出来。这样就能将电池的 SOC 与运行工况之间实现解耦,从而有效地避免了传统 SOC 定义方式存在的问题和矛盾。

3 单只电池 SOC 估算方法

通过对 SOC 的定义进行推导可得:

$$SOC_{end} = Q_{rem}/Q_{max} = SOC_{ini} + \Delta Q/Q_{max} \tag{3}$$

其中  $SOC_{ini}$  为初始荷电状态,  $SOC_{end}$  为当前荷电状态,  $\Delta Q$  为初始态到当前态的充放电容量变化,所以 SOC 的估算需要确定的参数包括  $\Delta Q$ 、 $SOC_{ini}$  和  $Q_{max}$ 。

3.1 充放电变化容量( $\Delta Q$ )的计算

由于锂离子电池具有很高的充放电容量效率,所以  $\Delta Q$  可以通过电流对时间的积分获得:

$$\Delta Q = \int_{t_{SOC_{ini}}}^{t_{SOC_{end}}} i dt \tag{4}$$

其中,  $t_{SOC_{ini}}$  和  $t_{SOC_{end}}$  分别为电流积分的初始化时间和结束时间,  $i$  为电池的工作电流。

3.2 初始荷电状态  $SOC_{ini}$  的估算

安时积分不能有效地解决累积误差问题,所以需要定期利用开路电压 (OCV)-SOC 得到新的  $SOC_{ini}$ 。结合电动汽车运行模式,在以下几种情况下可以得到  $U_{ocv}$ :

(1) 车辆长时间搁置。如夜间停驶后,电池的极化电压  $U_p$  能得到充分的消退,此时可对电池的  $SOC_{ini}$  进行修正。

(2) 充满电时。此时,一方面开路电压对 SOC 变化率较大;另一方面,此时充电电流较小,所以可以忽略欧姆压降和极化电压,直接依据电池的外电压实现  $SOC_{ini}$  的修正。

(3) 电池充电前。文献[11]详细论述了在电池充电初期对极化电压进行快速识别从而得到  $U_{ocv}$  的方法,据此可修正  $SOC_{ini}$ 。

3.3 最大可用容量  $Q_{max}$  的估算

从 SOC 定义可知,考虑老化对  $Q_{max}$  的影响,定



期修正  $Q_{\max}$  是必要的。完全充放电可以简单准确地得到  $Q_{\max}$ , 但需要大量时间, 也会浪费能源且不符合车辆实际运行模式而增加维护工作量。

从电池的 SOC 定义可知, 最大可用容量  $Q_{\max}$  可以通过下式进行计算:

$$Q_{\max} = \frac{\Delta Q}{SOC_{\text{end}} - SOC_{\text{ini}}} = \frac{\int_{t_{\text{ini}}}^{t_{\text{end}}} idt}{SOC_{\text{end}} - SOC_{\text{ini}}} \quad (5)$$

如上所述, 电池在实际充放电过程中的  $\Delta Q$  可以在线进行累积, 只要在这个过程中能有效地得到  $SOC_{\text{ini}}$  和  $SOC_{\text{end}}$  即可实现对  $Q_{\max}$  的估算。为了达到更好的估算效果, 需要  $SOC_{\text{ini}} - SOC_{\text{end}}$  尽可能大, 采用充电前和充满电两个时刻进行电池最大可用容量的修正更有效, 且这两个点都在单次充电过程出现, 所以充电过程即可完成对  $Q_{\max}$  的修正。

#### 4 电池实际可用容量计算方法

上文通过将开路电压与充放电终止电压比较来判定电池是否充满电或者放完电, 实现了 SOC 与工况之间的解耦, 但是这些量在充放电电流足够小的情况下才能得到, 这与实际使用工况存在差异。为了保障电池在使用过程中的安全性和长寿命, 当  $U_0$  达到放电终止电压时, 电池就不能继续以此电流工作, 并最终导致实际放电容量少于最大可用容量, 所以实际可用容量的估算对于使用者而言具有重要现实意义。

##### 4.1 实际可用容量估算方法

欧姆压降方面, 由于  $U_R$  与直流内阻  $R_0$  和工作电流  $I$  直接相关, 且有  $U_R = R_0 \times I$ ,  $I$  可实时测量得到,  $R_0$  主要受到环境温度和老化两个参数的影响, 而这两个参数都不会突变。极化电压方面, 虽然  $U_p$  随着环境温度、SOC、电流、老化以及持续工作时间等因素的变化而变化, 但是  $U_p$  有逐渐建立和消退的过程, 也不会突变。所以一段时间内,  $R_0$  和  $U_p$  基本不变, 影响电池过电压  $U_{ov}$  ( $U_R$  和  $U_p$  之和) 的因素就是工作电流。

在车辆运行过程中,  $U_0$  可在线测量得到。加上上文已论述了  $Q_{\max}$  和 SOC 在线估算方法, 所以依据 OCV-SOC 表可实时得到电池的  $U_{ocv}$ , 于是利用  $U_0 = U_{ocv} \pm U_{ov}$  (充电时取减号, 放电时取加号) 便可计算出  $U_{ov}$ 。

##### 4.1.1 恒流工作模式分析

如果电池工作在恒流放电模式下, 由于  $R_0$  和

$U_p$  都不会突变, 所以在接下来的一段时间内 (如 10s 或 SOC 变化小于某个限定值), 可认为  $U_{ov}$  不变, 于是将其折算到相应容量损失  $Q_{\text{LOSS}}$  上<sup>[12]</sup> (折算方法参见图 2), 得到电池的实际可用容量。循环进行以上估算, 即在线得到接下来一段时间内的  $U_{ov}$ 、 $Q_{\text{LOSS}}$  损失, 并更新电池的实际可用容量, 为电池的使用提供数据支持。

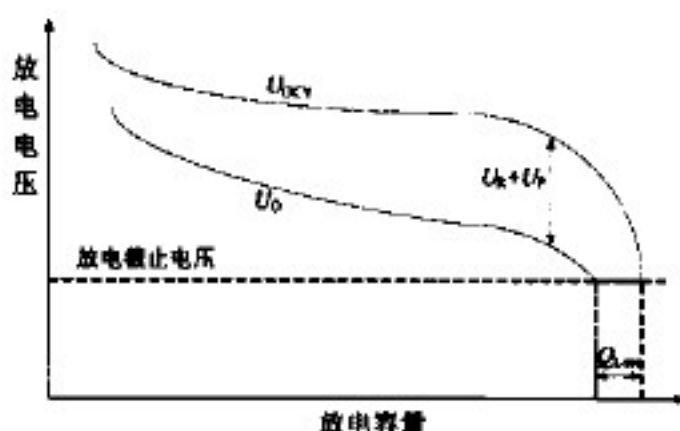


图2 实际可用容量的折算方法

##### 4.1.2 变电流工作模式分析

在变电流工作模式下, 虽然  $U_p$  不会突变, 但是  $U_R$  随工作电流变化而变化。突然的大电流放电, 特别是电池接近放完电时, 可能瞬时出现  $U_0 < U_{\text{Deh\_end}}$ , 导致放电结束, 甚至损坏电池。为了避免这样的现象出现, 电池使用过程中需要实时得到电池的最大允许放电电流<sup>[13]</sup>, 为整车控制器提供数据支持。当然, 当这个电流低于电动汽车运行时所需的最小工作电流  $I_{\min}$  时, 设备或者车辆就不能继续工作或行驶, 此电流决定了电池在该工作场合的放电终止点。该电流确定后, 即可得到放电终止时的  $U_R = R_0 \times I_{\min}$ , 此时  $U_{ov} = U_R + U_p$  就可确定, 将其折算到  $Q_{\text{LOSS}}$  上, 即可得到电池的实际可用容量。

综上所述, 电池的实际可用容量 ( $Q_{\text{Av}}$ ) 计算方法参见图 3。

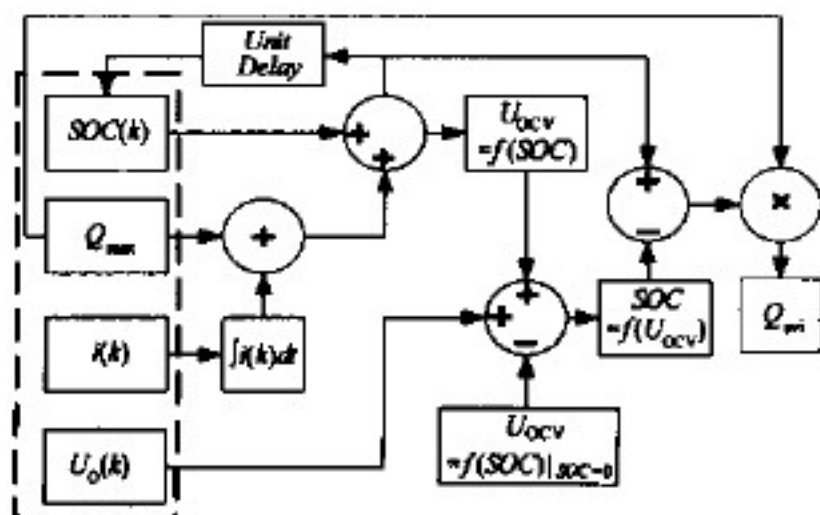


图3 电池实际可用容量计算方法

4.2 效果验证

采用 15Ah 电池进行如下测试,验证实际可用容量估算的效果:

- (1)采用恒流恒压充电方式将电池充满电;
- (2)静置 10min;
- (3)以 2C 放电至电池电压达到 3.3V。

将电池充满电后, SOC 修正为 100%。在放电过程中,估算电池的过电压、容量损失和实际可用容量。

计算方法如下:

- (1)直接测量得到电池的工作电压;
- (2)利用电池最大可用容量减去放电容量得到电池的剩余容量和电池的放电深度 (depth-of-dis-

- charge, DOD);
- (3)利用  $SOC = 1 - DOD$  得到 SOC, 并利用 OCV-SOC 得到开路电压;
- (4)将电池的开路电压减去工作电压得到电池的过电压;
- (5)将电池的过电压折算到容量损失;
- (6)利用电池的剩余容量减去容量损失得到实际可用容量。

该电池的 OCV-SOC 曲线参见表 2。按照上述方法估算电池的过电压、容量损失和实际可用容量,数据参见表 3。放电过程中,电池的电压、开路电压、剩余容量、过电压、容量损失和实际可用容量变化曲线参见图 4。

表 2 电池 OCV-SOC 对应表

|         |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SOC (%) | 0     | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    |
| OCV (V) | 3.3   | 3.622 | 3.707 | 3.734 | 3.774 | 3.807 | 3.832 |
| SOC (%) | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    | 66    |
| OCV (V) | 3.852 | 3.865 | 3.881 | 3.902 | 3.928 | 3.955 | 3.98  |
| SOC (%) | 71    | 76    | 81    | 86    | 91    | 96    | 100   |
| OCV (V) | 3.999 | 4.018 | 4.031 | 4.052 | 4.089 | 4.154 | 4.22  |

表 3 电池实际可用容量估算数据

| DOD (%) | 工作电压 (V) | 剩余容量 (Ah) | 开路电压 (V) | 过电压 (mV) | 容量损失 (Ah) | 实际可用容量 (Ah) |
|---------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-------------|
| 0       | 4.094    | 15.0      | 4.213    | 119      | 0.3       | 14.7        |
| 9       | 3.805    | 13.6      | 4.079    | 274      | 0.7       | 12.9        |
| 19      | 3.727    | 12.1      | 4.025    | 298      | 0.7       | 11.4        |
| 29      | 3.663    | 10.6      | 3.992    | 329      | 0.9       | 9.7         |
| 39      | 3.601    | 9.1       | 3.95     | 349      | 1.1       | 8.0         |
| 50      | 3.532    | 7.6       | 3.896    | 364      | 1.2       | 6.3         |
| 60      | 3.439    | 6.1       | 3.861    | 422      | 2.2       | 3.9         |
| 70      | 3.315    | 4.5       | 3.828    | 513      | 4.1       | 0.4         |
| 71      | 3.3      | 4.4       | 3.823    | 523      | 4.4       | 0.0         |

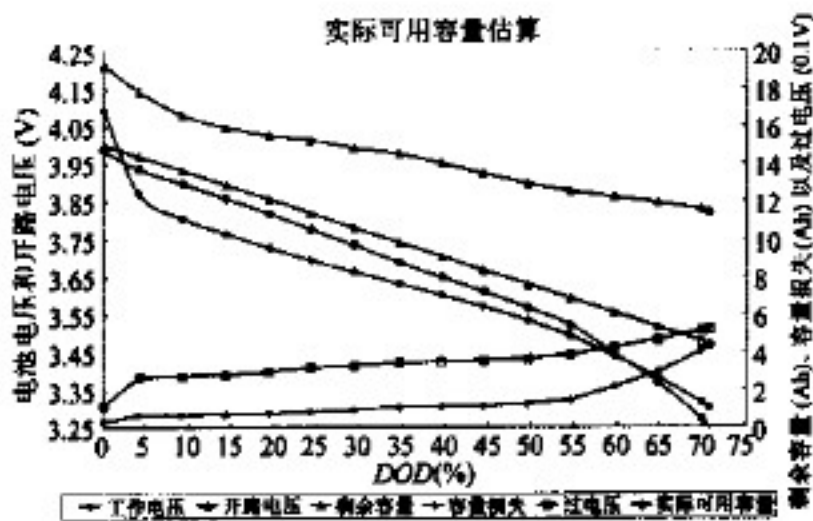


图 4 电池实际可用容量估算

可见,电池的容量损失随着过电压的变化而变化,当电池的外电压达到放电终止电压(3.3V)时,估算得到的电池实际可用容量未达到 0Ah,但是由于电池的开路电压(3.823V)并没有达到放电终止电压,所以电池的剩余容量和 SOC 都没有达到 0,而分别为 4.4Ah 和 29%。

5 结论

基于电池在标准充放电条件下对电池容量和 SOC 进行定义的方法直接应用于电动汽车用电池

时,会使得电池容量与运行工况耦合,导致 SOC 估算难度大为增加且精度不便度量。针对这一问题,本文基于电池开路电压,提出了电池最大可用容量的概念,并据此对电池的 SOC 进行定义,实现与运行工况的解耦。在此基础上,提出了一种电池实际容量的计算方法,并论证了其可行性和有效性。

#### 参考文献

- [1] Li I Haum, Wang W Y, Su S F, et al. A merged fuzzy neural network and its applications in battery state-of-charge estimation. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 2007, 22(3): 697-708
- [2] Chau K T, Wu K C, Chan C C. A new battery capacity indicator for lithium-ion battery powered electric vehicles using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45: 1681-1692
- [3] Rodrigues S, Munichandraiah N, Shukla A. A review of state-of-charge indication of batteries by means of AC impedance measurements. *Journal Power Sources*, 2000, 87(1/2): 12-20
- [4] Salkind A, Fennie C, Singh P, et al. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal Power Sources*, 1999, 80(1/2): 293-300
- [5] Singh P, Fennie C, Reisner D, et al. Fuzzy logic-enhanced electrochemical impedance spectroscopy (fleeis) to determine battery state of charge. In: *Proceedings of the 15th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, Long Beach, USA, 2000. 11-14
- [6] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1. Background. *Journal of Power Sources*, 2004, 134: 252-261
- [7] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification. *Journal of Power Sources*, 2004, 134: 262-276
- [8] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 3. State and parameter estimation. *Journal of Power Sources*, 2004, 134: 277-292
- [9] 麻友良, 陈全世, 齐占宁. 电动汽车用电池 SOC 定义与检测方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2001, 41(11): 95-97
- [10] Chen S X, Tseng K J, Choi S S. Modeling of lithium-ion battery for energy storage system simulation. In: *Proceedings of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China, 2011. 357-360
- [11] 姜久春, 文峰, 温家鹏等. 纯电动汽车用锂离子电池的建模和模型参数识别. *电力科学与技术学报*, 2010, 25(1): 67-74
- [12] Pop V, Bergveld H J, Notten P H L, et al. Accuracy analysis of the state-of-charge and remaining run-time determination for lithium-ion batteries. *Measurement*, 2008, 42(8): 1131-1138
- [13] Plett G L. High-performance battery-pack power estimation using a dynamic cell model. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 2004, 53(5): 1586-1592

## SOC definition and estimation for EV Li-ion batteries

Wen Feng\*, Lin Cheng\*, Jiang Jiuchun\*\*, Zhang Weige\*\*, Wang Zhanguo\*\*

(\* School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

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

#### Abstract

The main problems of existing SOC (state of charge) definition methods were analyzed, the concept of maximum available capacity was proposed based on the open circuit voltage (OCV) of a battery, and the battery SOC was redefined, thus the decoupling of a battery's charge/discharge capacity and work condition was realized. Through updating the maximum available capacity of a battery, the effect of aging on the SOC estimation accuracy was avoided. By converting the internal resistance voltage drop and the polarization voltage into the loss of discharge capacity, a method for calculating the actual available capacity of a battery or a battery pack was achieved, and its validity and feasibility were verified.

**Key words:** electric vehicles, state of charge (SOC), maximum available capacity, actual available capacity