

池组 SOC 的最大估计误差  $< 1\%$ ，详细统计结果见表 5-9。该算法满足应用计算精度要求，算法的收敛速度取决于收敛最慢的特征单体。

表 5-9 7 串动力电池组估计误差统计 (单位: %)

	最大值	平均值	方均根值
UDDS 工况	0.76	0.47	0.38
NEDC 工况	0.98	0.21	0.18

## 5.3 动力电池 SOP 预测

SOP 是在预定时间间隔内，动力电池所能释放或吸收的最大功率。进行动力电池峰值功率估计可评估动力电池在不同 SOC 和 SOH 下的充电、放电功率极限能力，最优匹配动力电池系统与汽车动力性能间的关系，以满足电动汽车加速和爬坡性能，最大发挥电机再生制动性能。受动力电池内部电动力学和热力学的影响，动力电池的实时峰值功率受其电压、电流、温度、可用容量以及 SOC 的制约。本节将详细讲述瞬时和持续峰值功率预测方法。

### 5.3.1 典型瞬时 SOP 预测方法

瞬时 SOP 是指在下一时刻动力电池所能充电或者放电的最大功率能力，瞬时 SOP 估计方法主要包括以下四类：

① 混合脉冲功率特性法 (HPPC)。该方法基于动力电池上下截止电压，计算动力电池的瞬时峰值电流和功率。由于算法简单，广泛应用于车辆能量管理领域。

② 基于 SOC 约束的预测方法。该方法基于许用最大和最小 SOC 约束实现动力电池峰值电流预测，常与其他方法组合使用。

③ 基于电压约束的预测法。该方法克服了 HPPC 法的不足，考虑了峰值功率预测周期内动力电池 OCV 的变化，预测结果更为可靠。

④ 多约束动态法 (Multi-Constrained Dynamic Method, MCD)。该方法综合多个约束变量，如端电压、电流、SOC 等，实时预测动力电池系统 SOP；同时综合考虑电动力学、热力学、迟滞效应等动态响应特性对 SOP 预测结果的影响。

上述四种 SOP 预测方法的实施细节如下：

#### 1. HPPC 法

HPPC 法是在美国“新一代汽车联合体”合作框架下由爱达荷国家工程与环境实验室提出的计算方法。该方法使用 Rint 模型估计动力电池单体的 SOP。动力电池系统中每个单体的端电压可以表示为

$$U_{i,m}(t) = U_{OC,m}[z_m(t)] - R_i i_{L,m}(t) \quad (5-17)$$

## 动力电池

### 管理系统核心算法

式中，下角  $m$  指的是第  $m$  个动力电池单体； $U_{OC,m}[z_m(t)]$  是单体  $m$  在 SOC 为  $z_m(t)$  处的 OCV 值； $i_{L,m}(t)$  为单体  $m$  的负载电流； $R_i$  为每一个单体在充电或放电时的内阻，其值的大小需根据电流方向而定。考虑到动力电池端电压受限于上下截止电压的约束，单体  $m$  的充放电峰值电流可以计算为

$$\begin{cases} i_{\max,m}^{\text{chg,HPPC}} = \frac{U_{OC,m} - U_{t,\max}}{R_{\text{cha}}} \\ i_{\min,m}^{\text{dis,HPPC}} = \frac{U_{OC,m} - U_{t,\min}}{R_{\text{dis}}} \end{cases} \quad (5-18)$$

式中， $U_{t,\max}$  和  $U_{t,\min}$  分别为动力电池的充电截止电压和放电截止电压； $i_{\min,m}^{\text{chg,HPPC}}$  和  $i_{\max,m}^{\text{dis,HPPC}}$  分别为单体  $m$  的峰值充电电流和峰值放电电流。假设动力电池组由  $n$  个单体组成，其中有  $n_s$  个模组串联，每个模组由  $n_p$  个单体并联组成，则动力电池组峰值功率可表示为

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{chg}} = n_s n_p \max_m (U_{t,\max} i_{\min,m}^{\text{chg,HPPC}}) \\ P_{\max}^{\text{dis}} = n_s n_p \min_m (U_{t,\min} i_{\max,m}^{\text{dis,HPPC}}) \end{cases} \quad (5-19)$$

HPPC 法可预测动力电池系统的瞬时 SOP，但是不能预测  $L \times \Delta t$  时间间隔的持续功率；另外所使用的 Rint 模型未能精确描述动力电池的动态电压特性，导致预测的 SOP 过大而引起过充和过放电问题，进而威胁到动力电池的使用安全。因此，该方法有两个主要缺点：

- ① 不适于持续 SOP 的预测。
- ② 忽视了电流、功率、SOC 的约束，导致电池系统的安全性受到威胁。

### 2. 基于 SOC 约束的预测方法

该方法基于动力电池使用过程中最大 SOC 或最小 SOC 的限制获得动力电池的峰值充放电电流，进而计算出动力电池组的峰值功率。动力电池从当前某一时刻  $t$  开始，在给定时间  $\Delta t$  内以恒定电流放电（或者充电），第  $t + \Delta t$  时刻单体  $m$  的 SOC 可表达为

$$z_m(t + \Delta t) = z_m(t) - i_{L,m}(t) \left( \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \right) \quad (5-20)$$

式中， $\eta_i$  为充放电效率。考虑到 SOC 的上下限约束  $z_{\max}$  和  $z_{\min}$ ，单体  $m$  的充放电峰值电流为

$$\begin{cases} i_{\min,m}^{\text{chg,SOC}} = \frac{z_m(t) - z_{\max}}{\eta_i \Delta t / C_{\max}} \\ i_{\max,m}^{\text{dis,SOC}} = \frac{z_m(t) - z_{\min}}{\eta_i \Delta t / C_{\max}} \end{cases} \quad (5-21)$$

则基于 SOC 的动力电池系统的峰值电流为

$$\begin{cases} i_{\min}^{\text{chg,SOC}} = \max_m(i_{\min,m}^{\text{chg,SOC}}) \\ i_{\max}^{\text{dis,SOC}} = \max_m(i_{\max,m}^{\text{dis,SOC}}) \end{cases} \quad (5-22)$$

该方法假设电池系统中的每个单体的 SOC 是准确的。若该假设不满足，那么充放电峰值电流可以采用下式近似估算：

$$\begin{cases} i_{\min}^{\text{chg,SOC}} \approx \frac{z(t) - z_{\max}}{\eta_i \Delta t / C_{\max}} \\ i_{\max}^{\text{dis,SOC}} \approx \frac{z(t) - z_{\min}}{\eta_i \Delta t / C_{\max}} \end{cases} \quad (5-23)$$

基于动力电池 SOC 状态极限的计算方法考虑了  $\Delta t$  时间内的峰值功率，符合动力电池实际充放电过程。但研究表明，当 SOC 允许使用范围较大时，仅用 SOC 作为约束计算出的峰值电流结果偏大，一般将此方法与其他方法组合使用，尤其实现 SOC 临近操作边界时的峰值功率预测。

### 3. 基于电压约束的估计方法

HPPC 法可以预测一个采样间隔  $\Delta t$  内的瞬时峰值电流。若采样间隔  $\Delta t$  过长，则动力电池会面临过充电或者过放电的危险。为解决该问题，将 Rint 模型表达式 (5-17) 改写为下式：

$$U_{t,m}(t + \Delta t) = U_{\text{OC},m}[z_m(t + \Delta t)] - R_i i_{L,m}(t) \quad (5-24)$$

由于  $z_m(t + \Delta t)$  是动力电池电流的函数，并且由于 OCV-SOC 的非线性关系，峰值电流不能直接求解出，需将该方程进行泰勒级数展开：

$$\begin{aligned} U_{\text{OC},m}[z_m(t + \Delta t)] &= U_{\text{OC},m}\left[z_m(t) - i_{L,m}(t) \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}}\right] \\ &= U_{\text{OC},m}[z_m(t)] - i_{L,m}(t) \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \left. \frac{\partial U_{\text{OC}}(z)}{\partial z} \right|_{z=z_m(t)} + R_n\left[z_m(t), i_{L,m}(t) \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}}\right] \end{aligned} \quad (5-25)$$

$R_n(\cdot)$  为一阶展开的余项。因为每个采样间隔内 SOC 变化很小，OCV 变化可以忽略，所以  $R_n(\cdot) \approx 0$  成立。OCV 的导数  $\partial U_{\text{OC}}(z)/\partial z$  可以由 OCV-SOC 关系确定。以磷酸铁锂离子电池为例，其  $\partial U_{\text{OC}}(z)/\partial z$  值如图 5-17 所示。

基于电压约束的估计方法中峰值电流计算为

$$\begin{cases} i_{\max,m}^{\text{dis,volt}} = \frac{U_{\text{OC}}[z_m(t)] - U_{t,\min}}{\frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \left. \frac{\partial U_{\text{OC}}(z)}{\partial z} \right|_{z_m(t)} + R_{\text{dis}}} \\ i_{\min,m}^{\text{chg,volt}} = \frac{U_{\text{OC}}[z_k(t)] - U_{t,\max}}{\frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \left. \frac{\partial U_{\text{OC}}(z)}{\partial z} \right|_{z_m(t)} + R_{\text{chg}}} \end{cases} \quad (5-26)$$

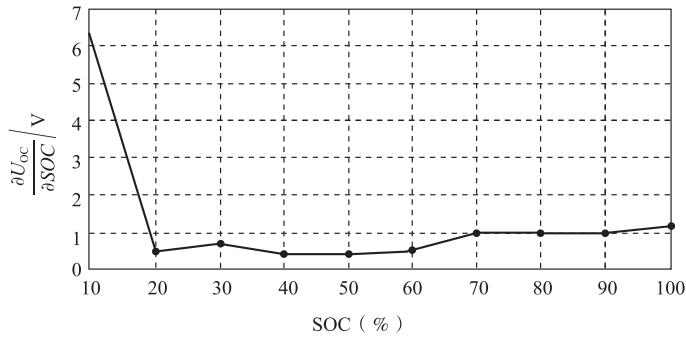


图 5-17  $\frac{\partial U_{oc}}{\partial z}$  变化曲线

式中,  $i_{\min,m}^{\text{chg,volt}}$  和  $i_{\max,m}^{\text{dis,volt}}$  分别为由电压约束法计算出的峰值充电电流和峰值放电电流。对多数电池, 在整个 SOC 工作区间均有  $\frac{\partial U_{oc}(z)}{\partial z} > 0$ 。因此, 在相同 SOC 条件下, 由式 (5-26) 计算出的峰值电流要小于式 (5-18) 的计算值。与 HP-PC 法相比, 电压约束的方法考虑到 SOC 的变化, 并且容许更长的采样间隔  $\Delta t$ 。但是, 由于 Rint 模型的静态性, 该方法忽视了动力电池动态极化和迟滞等特性对峰值电流的影响。

#### 4. MCD 法

基于第 3 章的结论, 相比 Rint 模型, Thevenin 模型使用 RC 网络描述动力电池的动态电压特性, 能够精确模拟动力电池的极化、迟滞等现象, 应用于动力电池的 SOP 预测, 将能够进一步提升预测结果的合理性。由 5.2.2 节可知, 动力电池充放电过程中欧姆内阻有一定的差异性, 在动力电池 SOP 预测工作站需要单独考虑。本节将单独考虑充放电内阻, 改进第 3 章中的 Thevenin 模型, 其中欧姆内阻  $R_i$  由充放电内阻  $R_{\text{chg}}$  和  $R_{\text{dis}}$  替换, 如图 3-18 所示。

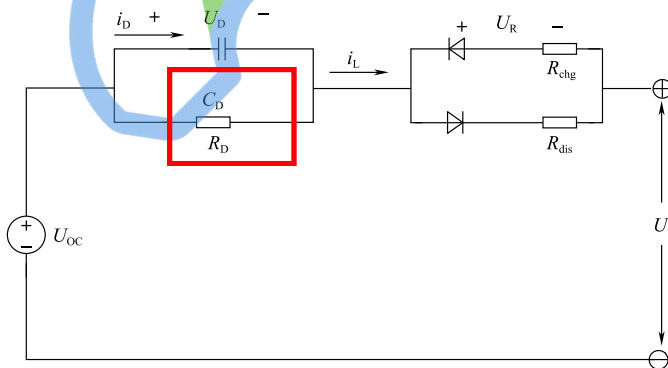


图 5-18 改进的 Thevenin 模型

类似地, 该模型也由三部分构成: 开路电压  $U_{oc}$ 、内阻和等效电容。内阻包括欧姆内阻  $R_{\text{chg}}$  和  $R_{\text{dis}}$ , 以及极化内阻  $R_D$ , 理想极化电容用于描述暂态响应。 $U_D$

和  $U_R$  分别是流经极化内阻和欧姆内阻的压降。 $i_D$  是流经  $C_D$  支路的电流。该模型的状态空间方程为

$$\begin{cases} U_t = U_{OC} - U_D - R_i i_L \\ \dot{U}_D = \frac{i_L}{C_D} - \frac{U_D}{C_D R_D} \end{cases} \quad (5-27)$$

进一步离散化为

$$U_{D,m}(t + \Delta t) = e^{-\Delta t/\tau} U_{D,m}(t) + R_D(1 - e^{-\Delta t/\tau}) i_{L,m}(t) \quad (5-28)$$

式中, 极化的时间常数可定义为  $\tau = R_D C_D$ 。与基于 Rint 模型的电压约束法相似, 基于改进模型的峰值电流计算为

$$\begin{cases} i_{\max,m}^{\text{dis,MCD}} = \frac{U_{OC}[z_m(t)] - U_{D,m}(t)e^{-\Delta t/\tau} - U_{t,\min}}{C_{\max} \left. \frac{\eta_i \Delta t \partial U_{OC}(z)}{\partial z} \right|_{z_m(t)} + R_D(1 - e^{-\Delta t/\tau}) + R_{\text{dis}}} \\ i_{\min,m}^{\text{chg,MCD}} = \frac{U_{OC}[z_m(t)] - U_{D,m}(t)e^{-\Delta t/\tau} - U_{t,\max}}{C_{\max} \left. \frac{\eta_i \Delta t \partial U_{OC}(z)}{\partial z} \right|_{z_m(t)} + R_D(1 - e^{-\Delta t/\tau}) + R_{\text{chg}}} \end{cases} \quad (5-29)$$

式中,  $i_{\min,m}^{\text{chg,MCD}}$  和  $i_{\max,m}^{\text{dis,MCD}}$  分别为用 MCD 计算单体  $m$  的峰值充电电流和峰值放电电流。当动力电池放电时, 极化电压  $U_D > 0$ , 充电时极化电压  $U_D < 0$ 。故在欧姆内阻相同时, 由式 (5-29) 计算出的值小于式 (5-26) 的计算结果。因为在 SOC 全区间的  $\partial U_{OC}(z)/\partial z$  不是常数, 尤其是在高 SOC 区和低 SOC 区, 所以基于电压约束的 SOP 计算方法得到的峰值电流更加准确可靠。

考虑到动力电池单体电流的限制, 动力电池系统的峰值电流受到下式约束:

$$\begin{cases} i_{\max}^{\text{dis}} = \min(i_{\max}, \min_m i_{\max,m}^{\text{dis,SOC}}, \min_m i_{\max,m}^{\text{dis,MCD}}) \\ i_{\min}^{\text{chg}} = \max(i_{\min}, \max_m i_{\min,m}^{\text{chg,SOC}}, \max_m i_{\min,m}^{\text{chg,MCD}}) \end{cases} \quad (5-30)$$

式中,  $i_{\max}^{\text{dis}}$ 、 $i_{\min}^{\text{chg}}$  分别为峰值放电电流和峰值充电电流。动力电池系统的峰值电流是所有并联单体的峰值电流之和:

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{chg}} = n_p \sum_{m=1}^{n_s} i_{\min}^{\text{chg}} U_{t,m}(t + \Delta t) \approx n_p \sum_{m=1}^{n_s} i_{\min}^{\text{chg}} \left\{ U_{OC}[z_m(t)] - i_{\min}^{\text{chg}} \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \right\} - \\ \quad e^{-\Delta t/\tau} \times U_{D,m}(t) - [R_i + R_D(1 - e^{-\Delta t/\tau})] \left. \right\} i_{\min}^{\text{chg}} \\ P_{\max}^{\text{dis}} = n_p \sum_{k=1}^{n_s} i_{\max}^{\text{dis}} U_{t,m}(t + \Delta t) \approx n_p \sum_{m=1}^{n_s} i_{\max}^{\text{dis}} \left\{ U_{OC}[z_m(t)] - i_{\max}^{\text{dis}} \frac{\eta_i \Delta t}{C_{\max}} \right\} - \\ \quad e^{-\Delta t/\tau} \times U_{D,m}(t) - [R_i + R_D(1 - e^{-\Delta t/\tau})] \left. \right\} i_{\max}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (5-31)$$

其中每一个并联单体的功率等于预测电压和最大许用电流相乘。另外，若已知最大单体和最小单体的功率限制，那么 MCD 方法也可以将它们考虑其中。需要注意的是，在 MCD 方法中所有的参数  $U_{OC}$ 、 $C_{max}$ 、 $U_{t,max}$ 、 $U_{t,min}$ 、 $z_{max}$ 、 $z_{min}$ 、 $I_{L,max}$ 、 $I_{L,min}$ 、 $R_{chg}$  和  $R_{dis}$  都可能受温度、SOC 和其他与工况相关的因素影响。

5. 应用算例分析

使用磷酸铁锂锂离子电池组 ( $n_s = 1, n_p = 9$ ) 评价动力电池的瞬时 SOP 预测方法。动力电池参数见表 2-6，其单体容量为  $3A \cdot h$ ，额定电压为  $3.2V$ 。该电池的 SOC、端电压、电流约束见表 5-10。

表 5-10 锂离子电池约束值

参数	下限	上限
SOC (%)	35	85
$U_t/V$	2.65	3.65
$i_t/A$	-135	270

为综合比较 HPPC 法、SOC 约束法、电压约束法、MCD 法，需先分析改进 Thevenin 模型的精度。该模型的端电压误差如图 5-19 所示，其统计结果见

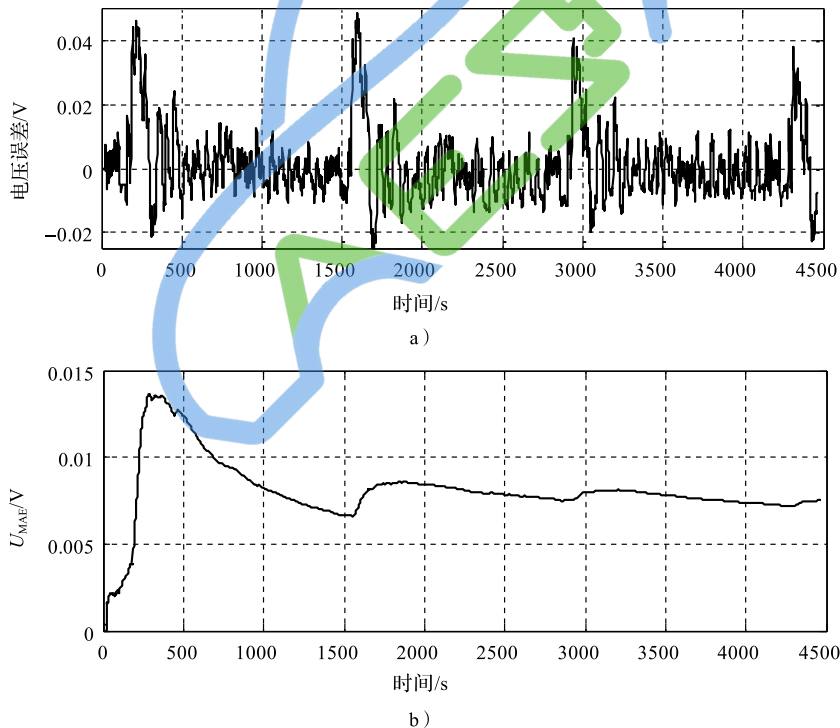


图 5-19 FUDS 工况下改进 Thevenin 模型输出曲线  
a) 电压误差曲线 b) 电压 MAE 曲线

表 5-11。其中平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 按下式定义:

$$U_{MAE,k} = \frac{1}{k+1} \sum_{j=0}^k |e_j - \hat{e}_j| \quad (5-32)$$

式中,  $e_j$  为第  $j$  步长时的端电压误差;  $\hat{e}_j$  是截止到  $k$  步的端电压平均误差。图 5-19b 所示为 MAE 结果, 可看出改进的 Thevenin 模型精度较高, 可用于 SOP 估计。

表 5-11 电压误差统计结果

最大误差/V	最小误差/V	平均误差/V	误差方差/V <sup>2</sup>
0.0489	-0.0263	$8.3797 \times 10^{-4}$	$1.1987 \times 10^{-4}$

峰值电流估计结果如图 5-20 所示。图 5-20a 所示为由 HPPC 法和电压约束法预测的放电峰值电流。由于考虑了在  $\Delta t$  内对电流的影响, HPPC 法预测的峰值电流大于电压约束法的预测值; 由于增加了对图 5-17 所示的  $\partial U_{oc}/\partial z > 0$  的考虑, HPPC 法预测的峰值电流也要大于基于电压约束法。然而, 基于  $R_{int}$  模型的电压约束法忽略了动力电池的极化特性, 而在 MCD 法中, 由于放电时  $U_D > 0$ , MCD 法得到的峰值电流小于 HPPC 和电压约束法。图 5-20b 表明 SOC 约束法预

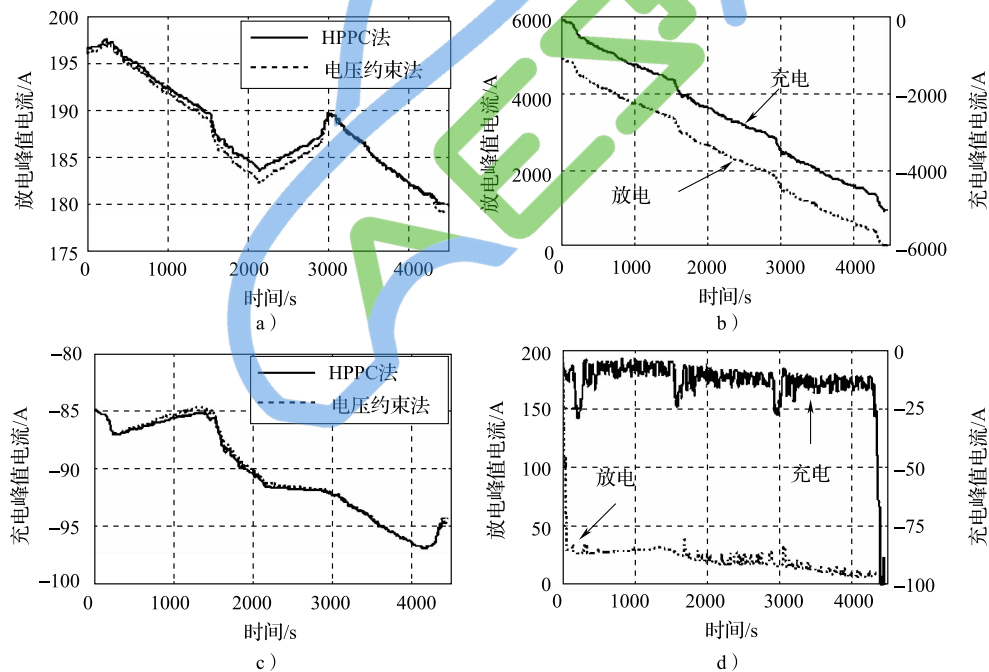


图 5-20 峰值电流估计结果

- a) 基于 HPPC 和电压约束法的放电峰值电流 b) 基于 SOC 约束法的充放电峰值电流  
 c) 基于 HPPC 和电压约束法的充电峰值电流 d) 基于 MCD 法的充放电峰值电流

测的峰值电流较大，当 SOC 接近上下截止约束时，峰值电流迅速下降至合理约束区间，而 HPPC 法和电压约束法无法实现 SOC 边界条件的峰值功率约束，因此 SOC 约束预测法能够与其他方法组合提高 SOP 预测的可靠性。图 5-20c 表明由 HPPC 法预测的充电峰值电流要小于电压约束法得到的峰值电流，同样，这也是受到了  $\partial U_{oc}/\partial z$  的影响。图 5-20d 所示为基于改进 Thevenin 模型的 MCD 法计算的充放电峰值电流曲线。在 SOC 达到上限时，充电峰值电流会变小，而放电峰值电流会增大。因此该方法能优化电池的使用区间，延长电池的使用寿命。同时，当电池在高倍率电流放电时，预测出的峰值放电能力会严重降低，而峰值充电能力会提高，这与动力电池真实的使用特点十分吻合。

式 (5-19) 和式 (5-31) 给出了采用 HPPC 法和 MCD 法的 SOP 预测方法。图 5-21 所示为这两种方法预测出的 SOP 曲线。

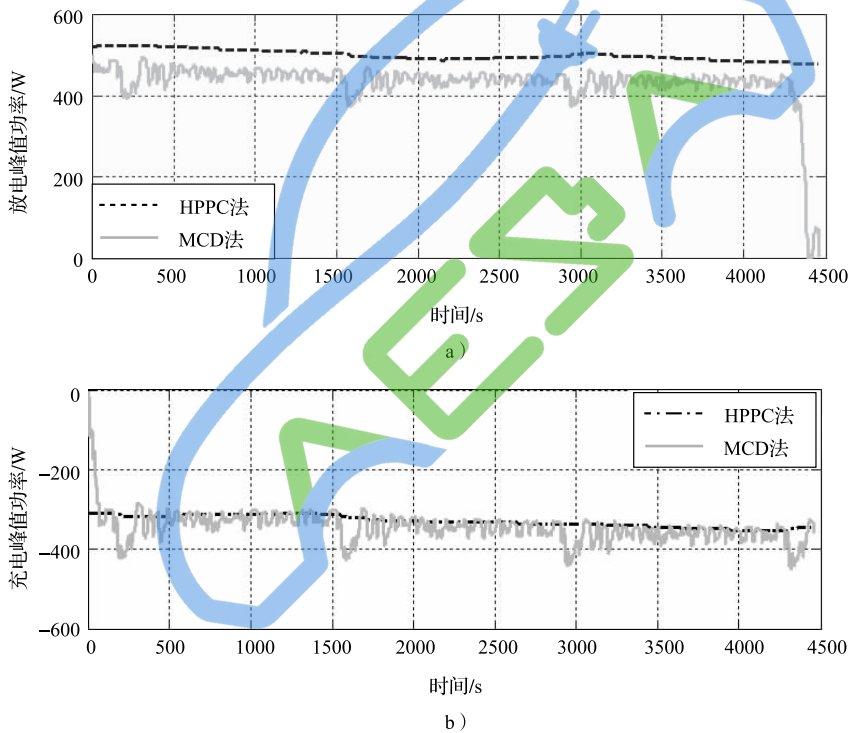


图 5-21 瞬时 SOP 估计结果  
 a) 放电峰值功率 b) 充电峰值功率

图 5-21a 所示为由 HPPC 法和 MCD 法计算出的放电过程的 SOP 预测值，可见由 HPPC 法得到的放电峰值功率明显大于由 MCD 法得到的，这是因为 HPPC 法仅考虑了动力电池电压的约束，没有考虑动力电池电流和 SOC 工作范围限制，以及忽视了  $\partial U_{oc}(z)/\partial z$  的影响，因此该方法估计值偏大。此外，由于 HPPC 法



忽视了 SOC 设计限制, 在实际使用时会导致严重的问题, 该问题同样也会出现在持续峰值电流预测中; 同时该方法也未考虑到动态极化效应, 因此该预测方法可能导致动力电池组出现过放隐患。与之不同, MCD 法的显著特点是在实时估计中考虑到了模组的全动态特性, 因此当出现大倍率放电时, 端电压会产生突降, 相比 HPPC 法而言, MCD 法预测的放电 SOP 会较小。HPPC 法和 MCD 法的充电 SOP 比较如图 5-21b 所示。由于忽略了动力电池的 SOC 约束和动态性能, HPPC 法预测结果较高, 当有大电流出现时, 动力电池的许用充电功率变大, 而 HPPC 估算结果无明显变化。因动态极化效应, MCD 法实时预测的结果有一定波动, 这符合动力电池的实际工作特点, 故 MCD 法能预测出较为满意 SOP 值。

### 5.3.2 持续 SOP 预测方法

由式 (5-29) 计算出的峰值电流受 BMS 采样间隔影响, 若需要持续采样间隔的 SOP 预测, 则上述方法未必能奏效。针对该问题, 本节详细讲述了针对多采样间隔的持续 SOP 预测方法, 该方法是定采样间隔 MCD 法的延伸。

#### 1. 持续峰值电流估计

Thevenin 模型中 OCV 可以表示为 SOC 的函数, 表达式为

$$U_{OC} = K_0 + K_1 \ln \text{SOC} + K_2 \ln(1 - \text{SOC}) \quad (5-33)$$

模型的状态空间表达方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{X}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{Y}_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{X}_{k+1} + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + v_k \end{cases} \quad (5-34)$$

式中, 各个矩阵的定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \begin{pmatrix} U_{D,k} \\ z_k \end{pmatrix}, \mathbf{Y}_k = U_{L,k}, \mathbf{u}_k = I_{L,k}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{D} = [-R_i] \\ \mathbf{B} &= \begin{pmatrix} R_D(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) \\ \frac{\eta_i \Delta t}{C_a} \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial X} \right|_{X=\hat{X}_{k+1}} = \left[ -1 \quad \left. \frac{dU_{OC}(z)}{dz} \right|_{z=z_{k+1}} \right] \end{aligned} \quad (5-35)$$

假设在第  $k$  至  $k+L$  采样间隔中系统输出是恒流,  $L$  为持续采样时间长度, 即  $\mathbf{u}_{k+L} = \mathbf{u}_k$ , 采用 Thevenin 模型能估计在第  $k+L$  采样时刻的电压, 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+L} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k+L-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k+L-1} \\ \mathbf{Y}_{k+L} = \mathbf{C}\mathbf{X}_{k+L} + \mathbf{D}\mathbf{u}_{k+L-1} \end{cases} \quad (5-36)$$

为便于计算, 将  $L \times \Delta t$  的持续时间内的动力电池预测模型视为定常系统, 即模型参数保持不变可以进一步推导出:

$$\mathbf{X}_{k+L} = \mathbf{A}^L \mathbf{X}_k + \left( \sum_{j=0}^{L-1} \mathbf{A}^{L-1-j} \mathbf{B} \right) \mathbf{u}_k \quad (5-37)$$

为求解出最大放电电流  $I_{\max,L}^{\text{dis}}$  和最小充电电流  $I_{\min,L}^{\text{chg}}$ ，电池模型的输出应当满足下面两个方程：

$$\begin{aligned} U_{\text{OC}}(z_{k+L}) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L - I_{\min,L}^{\text{chg}} \left[ R_i + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} \right] - \\ U_{\text{t},\min} = 0 \end{aligned} \quad (5-38)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{OC}}(z_{k+L}) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L - I_{\max,L}^{\text{dis}} \left[ R_i + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} \right] - \\ U_{\text{t},\max} = 0 \end{aligned} \quad (5-39)$$

动力电池在  $L \times \Delta t$  时间内的持续峰值电流估计方程为

$$\begin{cases} I_{\max,L}^{\text{dis}} = \frac{U_{\text{OC}}(z_k) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L - U_{\text{t},\min}}{\frac{\eta_i L \Delta t}{C_{\max}} \left. \frac{dU_{\text{OC}}(z)}{dz} \right|_{z_k} + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} + R_i} \\ I_{\min,L}^{\text{chg}} = \frac{U_{\text{OC}}(z_k) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L - U_{\text{t},\max}}{\frac{\eta_i L \Delta t}{C_{\max}} \left. \frac{dU_{\text{OC}}(z)}{dz} \right|_{z_k} + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} + R_i} \end{cases} \quad (5-40)$$

注意，若  $L$  为 1，则上式可以退化为式 (5-29) 所示的峰值电流计算式。

## 2. 持续 SOP 估计

为提高动力电池系统的安全性，当 SOC 接近下限  $z_{\min}$  时，应当对最大的放电电流进行约束，充电电流应当最大化，否则动力电池系统会面临过放的危险。相反当 SOC 接近上限值  $z_{\max}$  时，应当对最大充电电流进行约束，放电电流应当最大化，否则会面临过充电的危险。采用 SOC 约束是峰值电流估计的一个关键原则，其方程表述为

$$\begin{cases} I_{\min,L}^{\text{chg,SOC}} = \frac{z_k - z_{\max}}{\eta_i L \Delta t / C_{\max}} \\ I_{\max,L}^{\text{dis,SOC}} = \frac{z_k - z_{\min}}{\eta_i L \Delta t / C_{\max}} \end{cases} \quad (5-41)$$

式中， $I_{\min,L}^{\text{chg,SOC}}$  和  $I_{\max,L}^{\text{dis,SOC}}$  分别为在采样间隔  $L \times \Delta t$  中的最小的充电电流和最大的放电电流。一旦求出约束电流，则峰值电流表达式为

$$\begin{cases} I_{\max}^{\text{dis}} = \min(I_{\max}, I_{\max,L}^{\text{dis,SOC}}, I_{\max,L}^{\text{dis}}) \\ I_{\min}^{\text{chg}} = \max(I_{\min}, I_{\min,L}^{\text{chg,SOC}}, I_{\min,L}^{\text{chg}}) \end{cases} \quad (5-42)$$

式中， $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为动力电池许用最大放电电流约束值和最小许用充电电流约束值； $I_{\min}^{\text{chg}}$  和  $I_{\max}^{\text{dis}}$  分别为考虑所有约束下的最小充电电流和最大放电电流。基于 Thevenin 模型的持续功率能力可以由下式进行估计：

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{chg}} = \max(P_{\min}, U_{t,k+L} I_{\min}^{\text{chg}}) \\ P_{\max}^{\text{dis}} = \min(P_{\max}, U_{t,k+L} I_{\max}^{\text{dis}}) \end{cases} \quad (5-43)$$

然后推导出充放电峰值功率  $P_{\min}^{\text{chg}}$  和  $P_{\max}^{\text{dis}}$  估计结果为

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{chg}} \approx \max \left\{ P_{\min}, \left\{ U_{\text{OC}}(z_{k+L}) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L \right. \right. \\ \quad \left. \left. - I_{\min}^{\text{chg}} \left[ R_i + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} \right] \right\} I_{\min}^{\text{chg}} \right\} \\ P_{\max}^{\text{dis}} \approx \min \left\{ P_{\max}, \left\{ U_{\text{OC}}(z_{k+L}) - U_{\text{D},k} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^L \right. \right. \\ \quad \left. \left. - I_{\max}^{\text{dis}} \left[ R_i + R_D \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \sum_{j=0}^{L-1} \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)^{L-1-j} \right] \right\} I_{\max}^{\text{dis}} \right\} \end{cases} \quad (5-44)$$

式中,  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别是动力电池放电功率设计约束和充电功率设计约束。

### 5.3.3 动力电池 SOC 与 SOP 联合估计

由于动力电池多参数之间存在耦合关系, 不准确的 SOC 难以获得精确的参数。为解决动力电池 SOC 对峰值功率能力估计结果制约的问题, 本节重点讨论动力电池峰值功率能力与 SOC 的联合估计方法, 并给出详细的应用算例。准确的峰值功率能力估计受限于 SOC 和模型参数的准确性, 在第4章中详细阐述了基于模型的状态估计方法的实施流程, 基于数据模型融合的 RLS-AEKF 参数状态联合估计算法能够解决噪声和初值不确定性问题, 在状态估计方面具备较强的鲁棒性。采用 5.3.2 节持续峰值功率计算方法对 SOP 进行预测, 可以获得 SOC-SOP 联合估计算法。

#### 1. 动力电池 SOC 与 SOP 联合估计算法

以基于模型的动力电池 SOC 估计方法和式 (5-44) 所示的持续峰值功率估计计算方法为依据, 提出图 5-22 所示的基于模型的动力电池 SOC 和 SOP 联合估计方法, 具体操作步骤如下:

- ① 实时动力电池数据采集。
- ② 模型的在线参数辨识。
- ③ 基于 AEKF 算法的 SOC 估计。
- ④ 持续峰值功率能力估计。

首先, 基于更新的模型参数和 SOC 估计值, 分别实施基于动力电池模型的峰值电流估计和基于动力电池 SOC 的峰值电流估计。由式 (5-42) 推断出动力电池多参数约束条件下持续峰值电流估计值。然后, 由式 (5-44) 估计动力电池多约束持续峰值功率。最后, 获得动力电池 SOC 和峰值功率的联合估计结果。

需要指出的是, 操作流程图中的详细实施过程请参见 4.2.2 节内容。