

图 7-20 循环加热后动力电池充放电容量

## 7.4 动力电池优化充电

优化充电是针对锂离子动力电池充电时间长、寿命周期短、对温度敏感等特性开展的一系列充电优化方案。动力电池充电方法主要有恒流恒压充电、多阶恒流充电、脉冲充电、智能充电等。

### 7.4.1 恒流恒压充电

充电时，先采用设定好的固定电流对电池进行充电，当电池的电压达到预设值时，转为恒压充电，直至充电电流降低至预定值后，充电过程结束，充电曲线如图 2-11 所示。该方法结合了恒流和恒压两种充电方式的优点，克服了恒流充电不足的问题，避免了恒压充电初期电流过高对电池的损伤。该方式是目前动力电池充电的主要方式。国内外对这种充电方式的研究较早，主要集中在充电截止电压和充电倍率对动力电池寿命的影响。

提升 CCCV 充电速度的途径包括以下几种：

- ① 提升恒流阶段充电电流的倍率可有效地提升充电速度，但充电容量减少。
- ② 提升电池的上截止电压，不同的上截止电压对电池的充电速度影响较大，但是使用较高的上截止电压对电池进行恒压充电会使得电池的寿命缩短，并且可能造成安全隐患。

因此提升恒流段的电流值是 CCCV 方法中一种较为普遍的缩短充电时间的方法。

### 7.4.2 多阶恒流充电

该方法是一种应对 CCCV 充电方法中 CC 段充电时间过长的解决途径。该方

法按充电电流递减的趋势将整个充电过程分成若干段（一般为4~5段），对每段充电过程的电流给出预设边界。通过设定优化目标，选取优化方法，确定每段充电过程的电流取值。在充电过程中，当达到充电截止电压时，充电过程跳转至下一阶段，充电曲线如图7-21所示。各阶段电流值的计算流程为：

① 建立目标函数，目标函数可以是关于充电时长、充电温升以及寿命衰退的单目标函数或者多目标联合函数。

② 设置每一阶段电流的范围，优化充电的跳转条件为达到上截止电压，所以每一阶段的电流值逐级降低。为保证动力电池充入的电量，最后一阶段充电电流值不能设置过大。

③ 使用优化算法对目标函数进行求解，得到优化充电曲线。

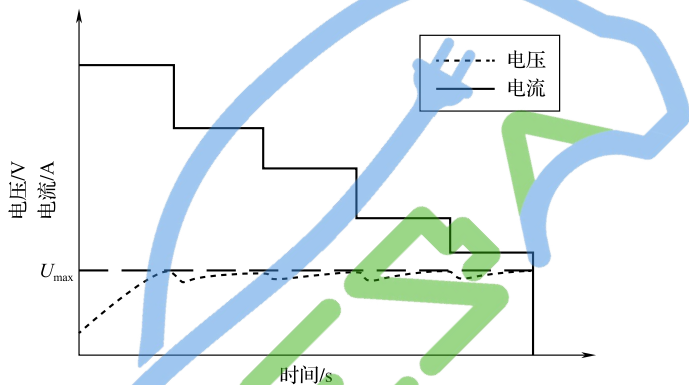


图7-21 5阶恒流优化充电曲线

若将动力电池充满，需要降低最后一阶段的电流，无疑会增加动力电池的充电时间，因此该方法适用于非满充的充电场合，一般SOC低于80%为宜。

### 7.4.3 脉冲充电

该方法起初应用于铅酸电池，因为铅酸电池的极化电压较大，在充放电过程中表现明显，所以在恒流充电的过程中插入放电或者间歇过程，消除电池内部生成的氧气和氢气，以降低极化现象。随后，该充电方法在锂离子动力电池上也得到应用。一些特殊脉冲充电的优势为：

① 脉冲充电可通过短时间的放电或者间歇过程减小极化电压，使得电池内部离子浓度趋于均匀，这样可保证充电过程中，电池内部处于比较平衡的状态，有利于提高充放电功率，缩短电池的充电时间。

② 在脉冲充电过程中，动力电池的阻抗较小，产热量低，充电效率高。

图7-22所示为三种不同形式的恒振幅恒频率的脉冲优化充电模式，研究表明这三种方式并不能明显缩短充电时长。若关注充电时间，则可以考虑使用

图7-23所示的恒振幅变频率充电模式和变振幅恒频率充电模式。从文献中可知该模式能够明显改善电池的使用寿命,且缩短充电时长。为进一步加快锂离子电池的充电速度,可使用自适应变频和变占空比的充电方法,通过动力电池模型计算可以接受的电流和带宽,自适应更新频率与占空比,可进一步缩短充电时长,且不会引起明显的发热。

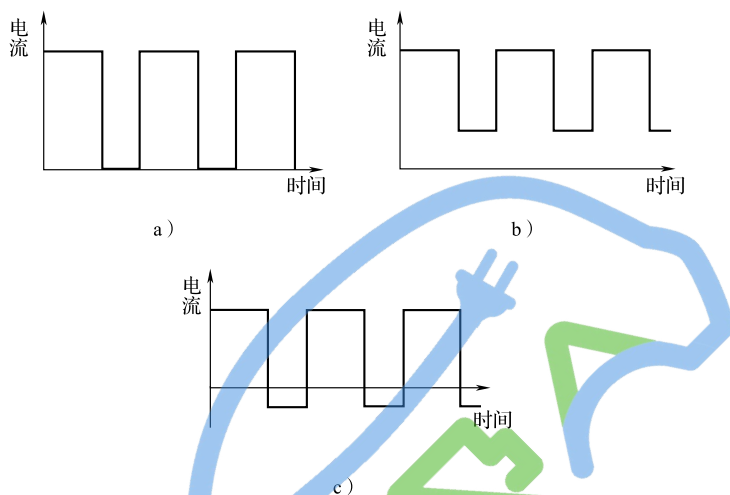


图7-22 三种不同形式的恒振幅恒频率的脉冲优化充电模式  
a) 充电模式1: 间歇过程 b) 充电模式2: 小电流间隙 c) 充电模式3: 放电间隙

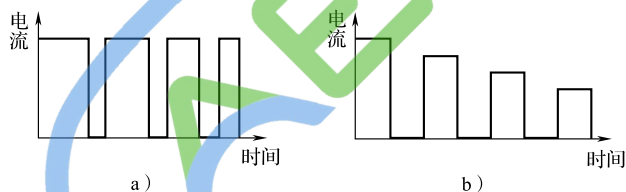


图7-23 变频率和变振幅的脉冲优化充电形式  
a) 充电模式1: 变频率恒振幅 b) 充电模式2: 恒频率变振幅

#### 7.4.4 基于模型的充电方法

该方法是一种使用等效电路模型或电化学机理模型计算动力电池优化充电电流的方法,恒定产热充电方法是其中的一种。为使动力电池每一时刻的产热率恒定,该方法基于电池模型计算充电电流。在动力电池的工作过程中,产热和散热是同步进行的。如果产热时间较为集中,会导致散热不完全,温升较大。尽可能均匀化充电过程的产热,可降低动力电池的温升。

如果使用单阶恒定产热充电方法,为缩短充电时长,需增大充电电流,导致动力电池达到上截止电压时的充入电量减少。因此,需要使用多阶段的产热率逐

级递减的恒定产热充电方法对电池进行充电。当较大的第一阶产热率导致端电压达到上截止电压时，跳转至下一阶较小的产热率对应的较小的充电电流曲线继续充电，以保证电池充入的电量。而为了确定恒定产热充电方法的各阶产热率，需要建立充电时间和温升的适应度函数。

以 Thevenin 模型为例，以充电时间与充电温升为优化目标，使用遗传算法求解。基于式 (7-4) ~ 式 (7-6)，温度的递推关系为

$$T_k = e^{-\frac{hS_{sur}}{mc_p}} T_{k-1} + [1 - e^{-\frac{hS_{sur}}{mc_p}}] \frac{Q_{z,k} + hS_{sur} T_{amb}}{hS_{sur}} \quad (7-23)$$

随后，建立关于充电时间、温升的多目标函数，适应度函数的表达式为

$$F(i_L) = \frac{(1 - \beta)t(i_L)}{a} + \frac{\beta T_c(i_L)}{b} \quad (7-24)$$

式中， $\beta$  为充电温升的权重系数； $t$  为充电时间； $T_c$  为温升； $a$ 、 $b$  为归一化处理的系数。

$T_c$  计算表达式为

$$T_c = \max(T_k) - T_{initial} \quad (7-25)$$

式中， $T_{initial}$  为电池初始温度。优化问题的约束条件为

$$\begin{cases} 0 < i_L < I_{c,max} \\ U_{t,min} < U_t < U_{t,max} \\ T_c < T_{max} \\ |SOC_{end} - SOC_f| < \varepsilon_c \end{cases} \quad (7-26)$$

式中， $SOC_f$  为充电的目标 SOC； $SOC_{end}$  为充电结束时刻的电池 SOC； $T_{max}$  为动力电池温度上限； $I_{c,max}$  为充电过程的许用最大电流值。

优化策略的实施流程如图 7-24 所示。

① 初始化每阶段的产热率，并判断产热率是否逐阶递减。如果是，则通过模型求得充电时间和温升，再计算适应度函数；否则淘汰当前子代。

② 在产生的子代种群中执行选择、交叉、变异运算，实施参数优化。

③ 得出充电时间和充电温升优化结果相对应的多阶恒定产热率。每一时刻的电流通过当前时刻的产热、极化电压、极化内阻、欧姆内阻计算获得，具体表达式为

$$i_L = \sqrt{\frac{J - \frac{U_D^2}{R_D}}{R_i}} \quad (7-27)$$

式中， $J$  为该时刻的恒定产热率。

图 7-25 为以三阶恒产热充电方法对动力电池进行充电的示意图，通过恒定的产热率来计算动力电池的充电电流，通过电池模型求出各阶的充电电流，进行离线充电。

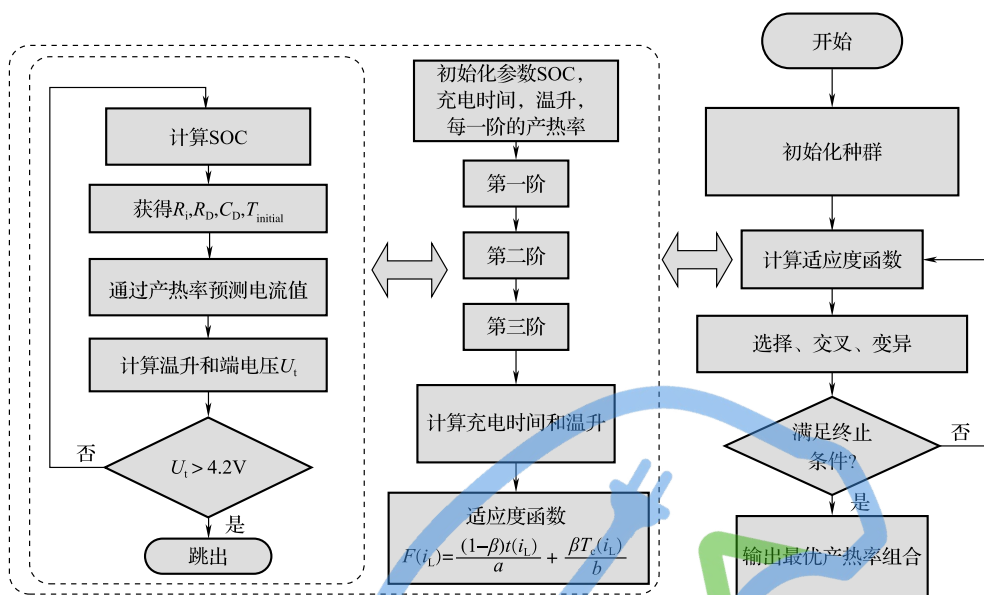


图 7-24 遗传算法优化过程

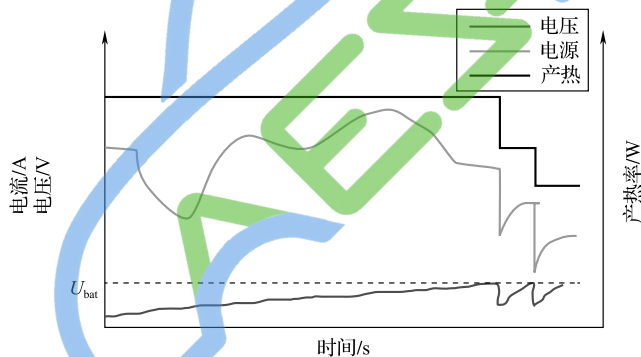


图 7-25 充电电流、电压、产热曲线图

### 7.4.5 应用算例

本节以三阶恒产热充电方法为例， $\text{SOC}_f$  取 0.9， $\varepsilon_c$  取 0.05， $T_{\max}$  取  $50^\circ\text{C}$ ， $I_{c,\max}$  取 2.4A，对动力电池 8-单体 06 进行分析。

#### 1. 仿真结果分析

本例取  $\beta$  为 0.24，使用遗传算法优化得到三阶恒定产热率分别为 0.36W、0.27W 和 0.19W。使用式 (7-27) 得到电池的充电曲线如图 7-26 所示。此时动力电池的充电时间为 3563s，温升为  $1.07^\circ\text{C}$ 。

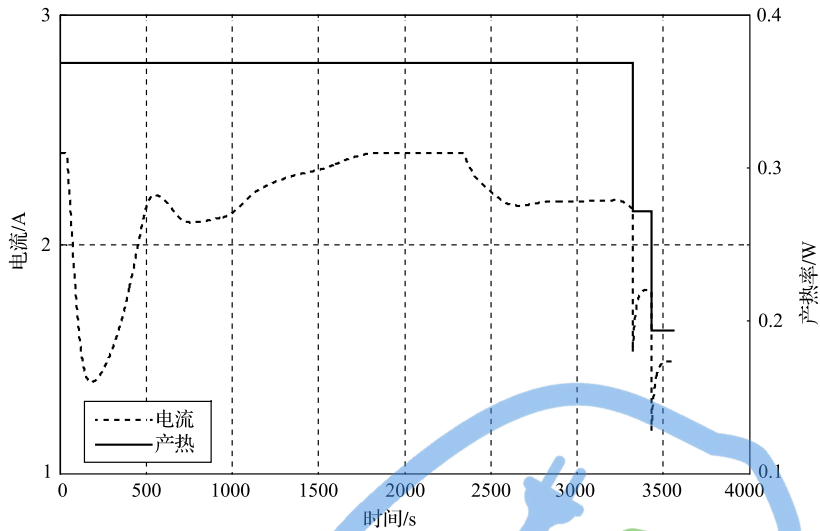


图 7-26 3 阶恒定产热率与充电电流

## 2. 实验结果分析

为了评价该充电方法相比于 CCCV 方法的优越性，本例采用图 7-27 所示的实验平台对动力电池 7 单体 01、02 在 25℃ 下进行充电对比实验，结果如图 7-28 所示。

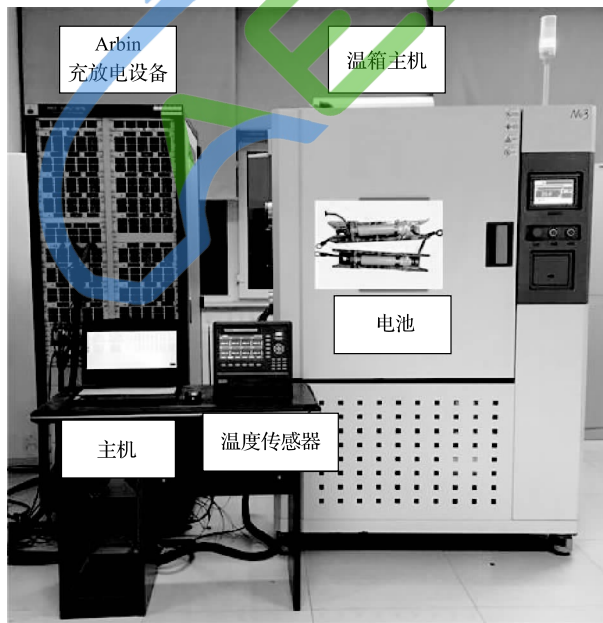


图 7-27 实验平台

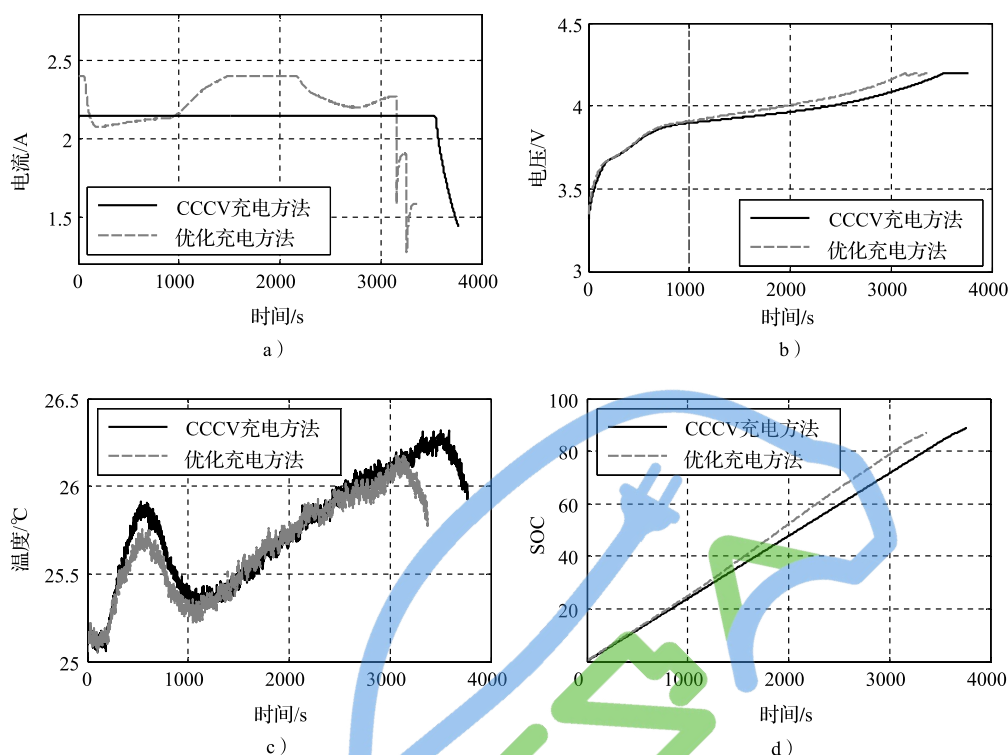


图 7-28 优化充电方法与 CCCV 的对比

a) 电流曲线 b) 电压曲线 c) 温升 d) SOC

表 7-1 优化充电方法与 CCCV 充电方法的充入电量、时间和温升

室温	充入电量/A·h	时间/s	温升/°C
优化充电策略	2.07	3376	1.01
CCCV 充电方法	2.07	3665	1.65

结果表明,相比于传统 CCCV 充电方式,多阶恒定产热充电方法能够减少 7.89% 的充电时间并降低 38.8% 的温升,是一种可行的优化充电方式。

## 7.5

## 本章小结

本章介绍了动力电池低温加热的常用方法及分类,并简要分析了各种方法的实现途径;详细描述了实现交流电加热的理论依据;介绍了一种自适应梯度加热