

动力电池低温加热和优化充电

随着新能源汽车的日益普及，冬季高寒地区使用新能源汽车所面临的续航里程短、起动困难、充电难等问题变得日益严峻。锂离子动力电池工作特性对工作环境、工况和老化状态均较为敏感，特别是续航里程在低温环境会明显缩短，若使用热空调，续航里程会明显不足。此外，动力电池在低温环境充电难以实现满充，且会造成负极析锂，对动力电池造成永久性损伤。因此，动力电池的低温加热与优化充电方法是保障新能源汽车全气候、全工况应用的关键技术。

7.1 动力电池低温加热方法分类

如图 7-1 所示，国内外对动力电池低温加热的研究主要分为两类：内部加热和外部加热。其中，外部加热主要有空气加热法、宽线金属膜加热法以及其他的外部加热方式；内部加热则主要有交流电加热法和内部自加热法。

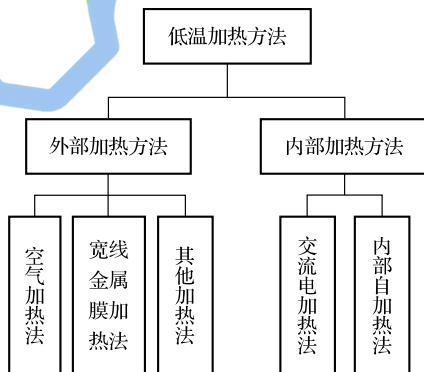


图 7-1 低温加热方法分类

7.1.1 空气加热法

该方法采用先对空气进行加热，再通过热空气对动力电池组进行加热的电池加热方法。加热空气的能量来自车内空气调节系统。常见的空气加热策略如图 7-2 所示。在低温情况下，外界空气经由车载加热器进行加热，在车内流动后再与动力电池组之间产生热交换，实现对动力电池组的加热。

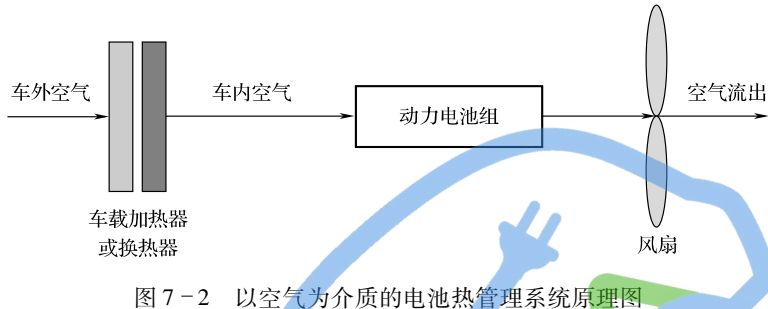


图 7-2 以空气为介质的电池热管理系统原理图

7.1.2 宽线金属膜加热法

该方法通过电流流经宽线金属膜时产生的热量对动力电池进行加热。如图 7-3 所示，宽线金属膜采用 1mm 厚的 FR4 板材，板材两面覆上 0.035mm 厚的铜膜，一面为完整矩形，另一面是由一条连续的、具有一定宽度的铜线组成的铜膜，电源与铜线的两端相接，在两铜膜表面覆上绝缘耐磨层。由于铜线具有电阻，电流通过铜线时，铜线发热，产生的热量通过另一侧的铜膜平面均匀地传给电池，从而实现对动力电池的加热。

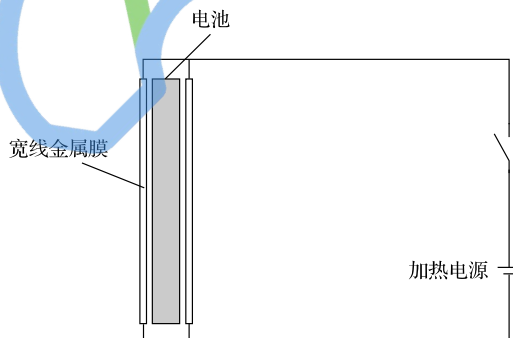


图 7-3 宽线金属膜加热法原理图

7.1.3 动力电池内部交流电加热法

该方法是一种通过交流电直接对电池内部进行加热的电池加热方法。如

图 7-4 所示,在低温情况下,交流电源输出交流电,使得电流不断流经电池内部的阻抗,产生热量,从而实现对电池内部的加热。交流加热有较长的发展历史,目前采用交流加热的温升速率可以达到 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$,是一类具有重要研究意义的动力电池低温快速加热方法。7.2 节将以该加热方法为例,详细叙述加热策略的设计。

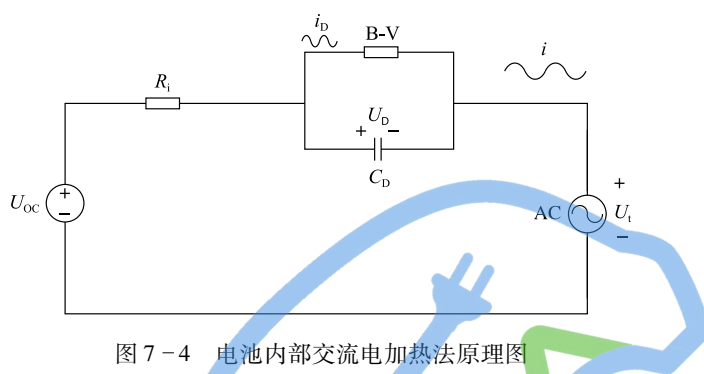


图 7-4 电池内部交流电加热法原理图

7.1.4 动力电池内部自加热法

如图 7-5 所示,该方法是一种通过电流流经电池内部加设的镍片产生欧姆热实现对电池自身加热的电池加热方法。采用在电池内部加装一片镍片的结构,当温度低于设定温度时,开关断开,电流流经镍片产生热量;当温度高于设定值时,开关闭合,停止加热,从而实现对锂离子动力电池低温加热的可控性。该方法由美国宾夕法尼亚州立大学王朝阳教授在其发表在 Nature 的一篇文章中提出。实验结果表明,该方法可在 1min 内将动力电池从 -30°C 加热到 0°C 以上,温升速度极高,但是该方法需要改变动力电池内部结构,实施过程具有挑战性。

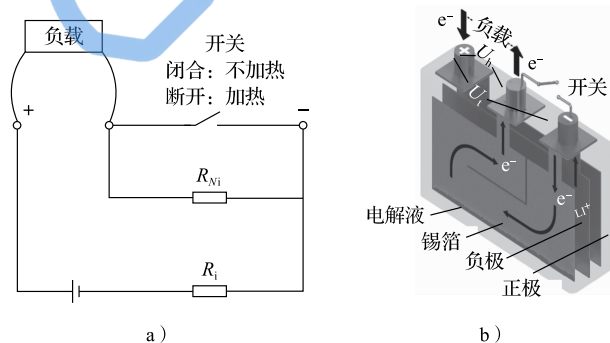


图 7-5 动力电池内部自加热法原理图及结构示意图

a) 原理图 b) 结构示意图

7.1.5 其他加热法

除上述的加热策略之外，还有帕尔贴效应加热和热泵加热等低温加热策略。

图 7-6 所示的帕尔贴效应加热是一种通过帕尔贴效应对动力电池进行加热的方法。帕尔贴效应是指当有电流通过不同的半导体组成的回路时，在两个接头处随着电流方向的不同会出现吸热、放热现象。图 7-7 所示的热泵加热是一种利用热泵原理，通过消耗电能从外界空气中获取热量对电池进行加热的方法。热泵是一种以逆循环方式迫使热量从低温物体流向高温物体的机械装置，它仅消耗少量的逆循环净功，就可以得到较大的供热量，可以有效地把难以应用的低品位热能利用起来，从而达到节能的目的。

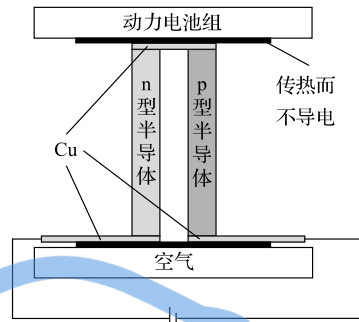


图 7-6 帕尔贴效应加热法原理图

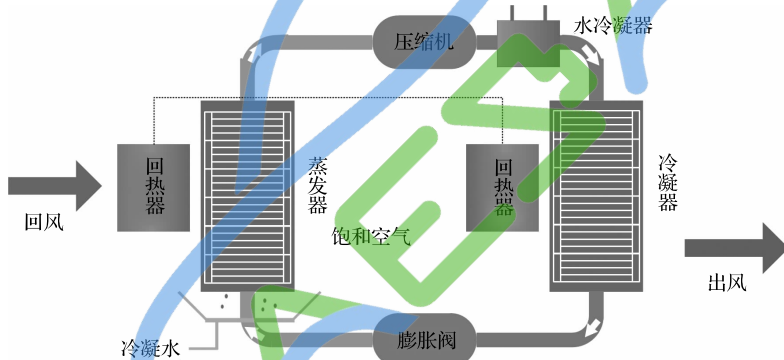


图 7-7 热泵加热法原理图

7.2 交流加热原理

7.2.1 动力电池生热机理

锂离子动力电池的热量由反应热、焦耳热、极化热和副反应热 4 部分组成。

1. 反应热

反应热是锂离子动力电池在充放电过程中，锂离子嵌入和脱出电极时发生电化学反应所产生的热量，表达式为

$$Q_r = \int i_L T \frac{dE_{ocv}}{dT} dt \quad (7-1)$$

式中, E_{ocv} 为电极材料的开路电势; $\frac{dE_{ocv}}{dT}$ 为电极材料的熵热系数。

2. 焦耳热

焦耳热是电流流经动力电池时, 电池欧姆内阻产生的热量。电池欧姆内阻包括导电电极耳、集流体、活性物质间的接触电阻, 电极内阻和电解液内阻。焦耳热是电池充放电过程中生热量的主要部分, 表达式为

$$Q_J = \int i_L^2 R_i dt \quad (7-2)$$

3. 极化热

电流流经锂离子动力电池时, 电池会因负载电流的通过而出现电极电位偏离平衡电极电位的现象, 在此过程中产生的热量即为极化热, 表达式为

$$Q_D = \int i_D^2 R_D dt \quad (7-3)$$

4. 副反应热

副反应热包括动力电池的电解液分解、自放电、过充电、过放电等过程中产生的热量。锂离子动力电池在正常工作范围内的副反应热可以忽略不计。

综上, 锂离子动力电池的总生热量为

$$Q_Z = Q_r + Q_J + Q_D = \int i_L^2 R_i dt + \int i_D^2 R_D dt + \int i_L T \frac{dE_{ocv}}{dT} dt \quad (7-4)$$

7.2.2 交流加热机理

交流加热是一种对动力电池正负极施加一定频率和幅值的交流激励以实现动力电池加热的方法, 其原理是利用动力电池的自身阻抗产生热量。该方法可以实现动力电池快速、高效的预热, 且动力电池内部温度分布较为均匀。

在低温情况下, 因锂离子在电解液和隔膜之间的传输阻力增加且石墨负极活性材料颗粒中锂的固相扩散系数降低, 对锂离子动力电池进行直流充电会引发析锂, 从而严重影响动力电池的循环寿命和使用安全。交流加热方式在一个周期内嵌锂过程和脱锂过程交替进行, 因此可以有效避免锂金属析出。

在低温环境下直流充电时, 动力电池的电极反应机理模型如图 7-8 所示。因锂在石墨负极活性材料颗粒中的固相扩散系数降低, 导致电化学反应生成的锂不能及时向颗粒内部扩散而在负极活性材料颗粒表面积累, 造成析锂 (只发生在负极)。

动力电池加载交流激励时, 锂离子在电极活性材料颗粒中的扩散过程交替进行, 即动力电池发生嵌锂反应后, 随即发生脱锂反应。嵌锂反应所生成的锂被随

后发生的脱锂反应所消耗。因为每个周期生成和消耗的锂相平衡，所以可以降低容量永久性损伤的可能性，即该激励方法不会明显影响动力电池的使用寿命。

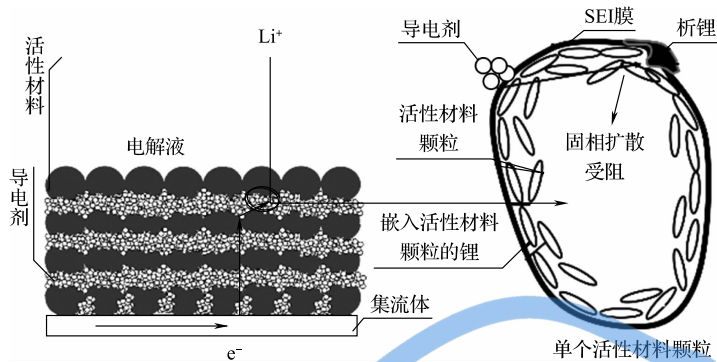


图 7-8 直流充电时动力电池的电极反应机理

但是，若激励电流过大，就会造成动力电池端电压超过其最大允许阈值，进而影响动力电池的使用寿命。此外，由于大电流在动力电池负极材料表面某些不平整位置形成强电场，吸引大量锂离子在该处析出，形成较多的析锂。该部分锂金属由于在下半个周期内无法还原成锂离子而形成“死锂”，并造成电极的可用锂离子数下降，进而造成动力电池容量不可逆的衰减。因此，在交流激励过程中需要对动力电池的激励电流进行限制，将动力电池端电压控制在许用范围内。

锂离子动力电池在低频交流激励下的电极反应模型机理示意图如图 7-9 所示。此时虽然嵌锂和脱锂交替进行，但由于激励频率过低，电化学反应的周期过长，在嵌锂过程中析出大量的锂乃至形成锂枝晶；在脱锂过程中，部分析出的锂由于从靠近负极一侧开始反应，导致部分锂脱离负极，无法再参与电极反应，形成“死锂”，对动力电池容量造成永久损伤，影响动力电池的使用寿命。

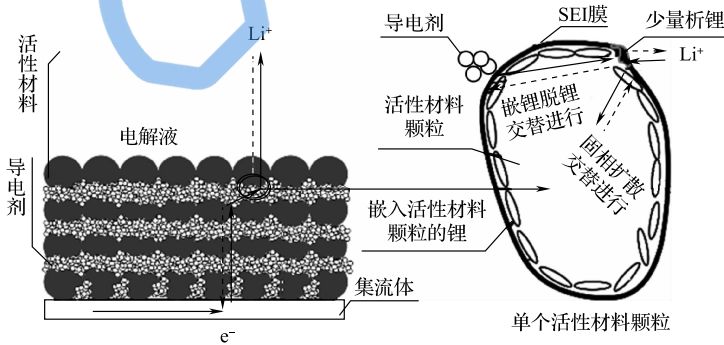


图 7-9 低频交流激励时的动力电池电极反应机理

在限定激励电流幅值的前提下，随着交流激励频率的提高，电化学反应周期

变短。无论正向反应还是逆向反应，反应生成物的积累量和反应消耗物的消耗量均变小，前半周期内积累较少的反应生成物，在后半周期内能够被完全消耗掉，形成可逆析锂过程。因此，动力电池在整个交流激励的过程中不会有析锂的积累。该反应过程模型机理如图7-10所示。

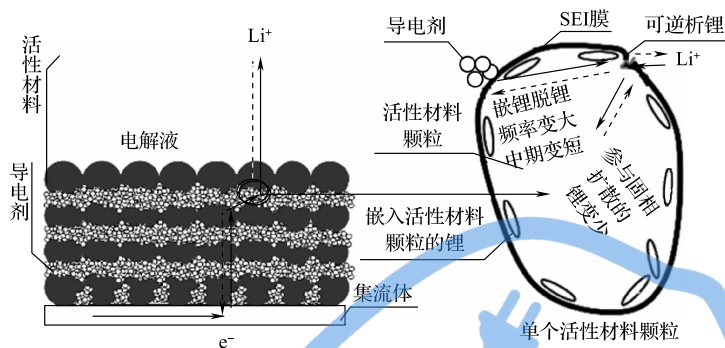


图7-10 限定电流的中频交流激励动力电池的电极反应机理

在限定激励电流幅值的前提下，随着交流激励频率的继续提升，周期继续缩短，前半周期内嵌锂反应产生的锂，因量少还未达到析锂的浓度时，即被后半周期的脱锂反应过程所消耗。整个交流激励过程中不会出现析锂，不会对动力电池的容量造成永久性损伤。该反应过程模型机理如图7-11所示。

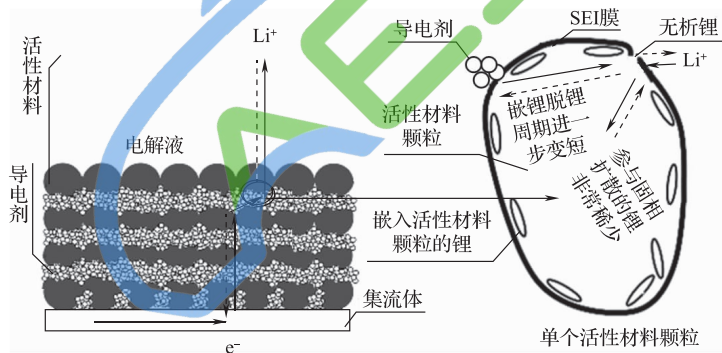


图7-11 限定电流的高频交流激励动力电池的电极反应机理

7.3

自适应梯度加热方法

7.3.1 问题描述

如图7-12所示，在低温交流加热过程中，动力电池的温升速率随激励电流

幅值增大而升高。但是激励电流幅值过大，当动力电池端电压超过许用电压值时，会影响动力电池循环寿命，严重时导致热失控等安全隐患。

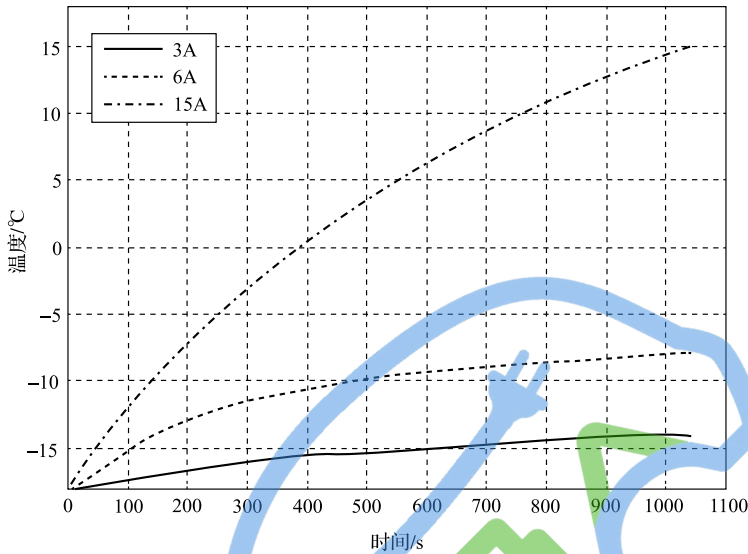


图 7-12 激励电流幅值对温升速率的影响

另一方面，如图 7-13 所示，动力电池的温升速率随激励电流频率的减小而升高。但是在低温环境下，若激励电流的频率过小，易发生析锂现象。严重时，还会造成动力电池内部短路，危害动力电池安全。

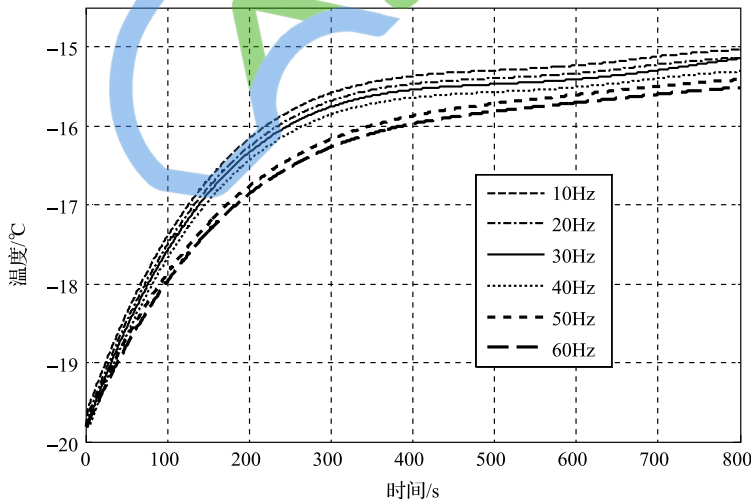


图 7-13 激励频率对温升速率的影响

因此,应用交流激励对动力电池加热时,激励电流幅值和激励频率的取值不应仅关注其对温升速率的影响,还需兼顾动力电池安全性能和健康状态。由图7-12和图7-13可见,激励电流幅值远大于激励电流频率对动力电池温升速率的影响。为降低计算复杂度,同时兼顾动力电池的温升速率和寿命安全,下一节将详细介绍一种定频率自适应梯度加热方法。

7.3.2 自适应梯度加热方法

1. 动力电池热平衡方程

18650型动力电池内部和表面的温升速率基本一致,因此可将18650型动力电池视为一个整体,根据傅里叶热力学公式,动力电池的温升速率表达式为

$$mc_p \frac{\partial T}{\partial t} = q - q_n \quad (7-5)$$

式中, m 为单体质量; c_p 为比热容; T 为温度; t 为时间; q 为生热率; q_n 为散热率。

q_n 的计算公式为

$$q_n = hS_{\text{sur}}(T - T_{\text{amb}}) \quad (7-6)$$

式中, h 为对流系数; S_{sur} 为动力电池表面积; T_{amb} 为环境温度。

2. 最优激励电流幅值的计算

交流激励时,产热率 q 的计算公式为

$$q = \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \right)^2 R_Q \quad (7-7)$$

式中, i 为激励电流幅值; R_Q 为实部阻抗(与温度有关,可由EIS离线获取)。

根据B-V方程,极化电流 i_D 的数学表达式为

$$i_D = Si_0 \left\{ e^{\frac{\alpha_a F \eta}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}} \right\} \quad (7-8)$$

由于 $e^{\frac{\alpha_a F \eta}{RT}} \gg e^{-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}}$,式(7-8)可化为

$$\ln\left(\frac{i_D}{Si_0}\right) = \frac{\alpha_a F}{RT} \eta \quad (7-9)$$

根据有理逼近原理,式(7-9)可变换为

$$\ln\left(\frac{i_D}{Si_0}\right) = \frac{2 \frac{i_D}{Si_0} - 2}{1 + \frac{i_D}{Si_0}} \quad (7-10)$$

$$\frac{2 \frac{i_D}{Si_0} - 2}{1 + \frac{i_D}{Si_0}} = \frac{\alpha_a F}{RT} \eta \quad (7-11)$$

$$i_D = \frac{i_0 S \left(2 + \frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right)}{2 - \frac{\alpha_a F}{RT} \eta} \quad (7-12)$$

极化电压 U_D 可以表达为

$$U_D = U_{OC} - U_t - R_i i \approx \eta \quad (7-13)$$

$$C_D \frac{dU_D}{dt} = i - i_D \quad (7-14)$$

在 $t + \Delta t$ 时刻的动力电池端电压 U_t 、极化电压 U_D 可以表示为

$$\frac{(U_{D,t+\Delta t} - U_{D,t})}{\Delta t} = \frac{i_t}{C_D} - \frac{i_0 S \left(2 + \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right)}{C_D \left(2 - \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right)} \quad (7-15)$$

$$U_{t,t+\Delta t} = U_{OC,t+\Delta t} - U_{D,t+\Delta t} - i_{t+\Delta t} R_i \quad (7-16)$$

由式 (7-15) 和式 (7-16) 可以得到 $t + \Delta t$ 时刻的交流激励电流幅值 $i_{t+\Delta t}$ 为

$$i_{t+\Delta t} = \frac{(U_{OC,t+\Delta t} - U_{t,t+\Delta t})}{R_i} - \frac{U_{D,t}}{R_i} - \frac{i_t \Delta t}{C_D R_i} + \frac{i_0 S \left(2 + \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right) \Delta t}{C_D R_i \left(2 - \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right)} \quad (7-17)$$

$$U_{t,\min} \leq U_t \leq U_{t,\max} \quad (7-18)$$

结合式 (7-17) 和式 (7-18) 得到许用激励电流上下幅值 $i_{upper_max,t+\Delta t}$ 、 $i_{lower_max,t+\Delta t}$ 为

$$i_{upper_max,t+\Delta t} = \frac{(U_{OC,t+\Delta t} - U_{t,\max})}{R_i} - \frac{U_{D,t}}{R_i} - \frac{i_t \Delta t}{C_D R_i} + \frac{i_0 S \left(2 + \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right) \Delta t}{C_D R_i \left(2 - \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right)} \quad (7-19)$$

$$i_{lower_max,t+\Delta t} = \frac{(U_{OC,t+\Delta t} - U_{t,\min})}{R_i} - \frac{U_{D,t}}{R_i} - \frac{i_t \Delta t}{C_D R_i} + \frac{i_0 S \left(2 + \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right) \Delta t}{C_D R_i \left(2 - \frac{\alpha_a F}{RT} U_{D,t} \right)} \quad (7-20)$$

最优激励电流幅值 $i_{opt,t+\Delta t}$ 为

$$i_{opt,t+\Delta t} = \min(i_{upper_max,t+\Delta t}, i_{lower_max,t+\Delta t}) \quad (7-21)$$

需要说明的是, R_i 、 C_D 、 i_0 由参数辨识方法得到, 具体计算流程参考第 3 章。模型的离散化表达式为

$$\begin{cases} U_t(t) = U_{OC} - i(t)R_i - U_D(t) \\ U_D(t) = U_D(t - \Delta t) + \Delta t \frac{i(t - \Delta t)}{C_D} - \Delta t \frac{i_0}{C_D} \sinh\left(\frac{\alpha_a F}{RT} U_D(t - \Delta t)\right) \end{cases} \quad (7-22)$$

7.3.3 自适应梯度加热流程

该方法是在保证动力电池使用寿命和操作安全的前提下，尽量减小供能系统能量损耗并缩短加热时间。该方法根据传感器获取当前动力电池的温度、端电压及环境温度等数据信息，及时计算和更新交流激励电流幅值并施加给动力电池，使激励电流处于动力电池允许的承载电流范围内，以确保动力电池的端电压不超限，提高动力电池低温工作性能，保障动力电池的可靠运行。其加热流程如图7-14所示，具体实施步骤如下：

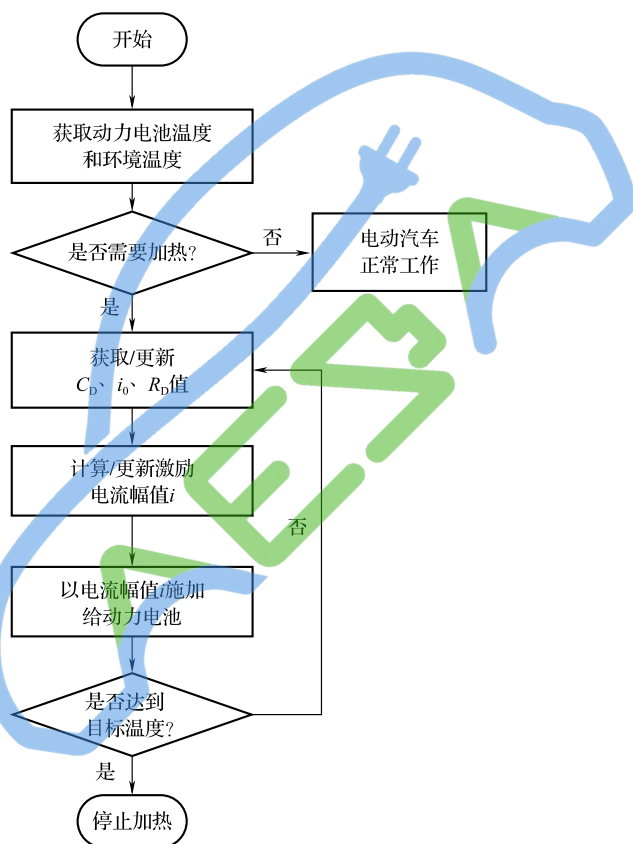


图7-14 自适应梯度加热流程图

① 动力电池数据实时采集。开展交流加热前，传感器测量当前动力电池温度和环境温度。

② 交流加热预判断。判断是否需要进行交流加热：当动力电池的温度高于设定阈值时，不需要进行交流加热，汽车可正常启动或工作；当动力电池的温度低于设定阈值（阈值一般为0℃、5℃、10℃等）时，则需要进行交流加热。

③ 算法启动，系统参数获取。获取动力电池当前 SOC、温度、端电压等信息，根据理论模型及实验数据，获取 C_D 、 i_0 、 R_D 值。车辆起动机预热前，一般经过至少 6h 的泊车时间，此时动力电池的端电压值趋近于开路电压值。因此，将预热前的动力电池端电压作为当前时刻的开路电压初始值。

④ 最优激励电流幅值计算。根据式 (7-19) ~ 式 (7-21)，计算最优的激励电流幅值。

⑤ 执行交流激励。将步骤④中得到的最优激励电流幅值施加给动力电池，开展交流激励。

⑥ 加热终止条件判定。判断动力电池是否达到目标温度，若是，则停止交流加热；若否，则跳转执行步骤③。

7.3.4 算例分析

以动力电池 8-单体 01（初始 SOC = 50%）及单体 02 ~ 05 组成的四串动力电池组（初始 SOC = 50%）开展定频率自适应梯度加热方法的评估（为保证动力电池较快的温升速率，同时兼顾动力电池的寿命安全，选取 10Hz 定频加热）。本示例使用的实验测试平台如图 7-15 所示，双极性电源提供交流激励，恒温箱提供稳定的低温外部环境，配套测试设备实时测量电流、电压、温度。

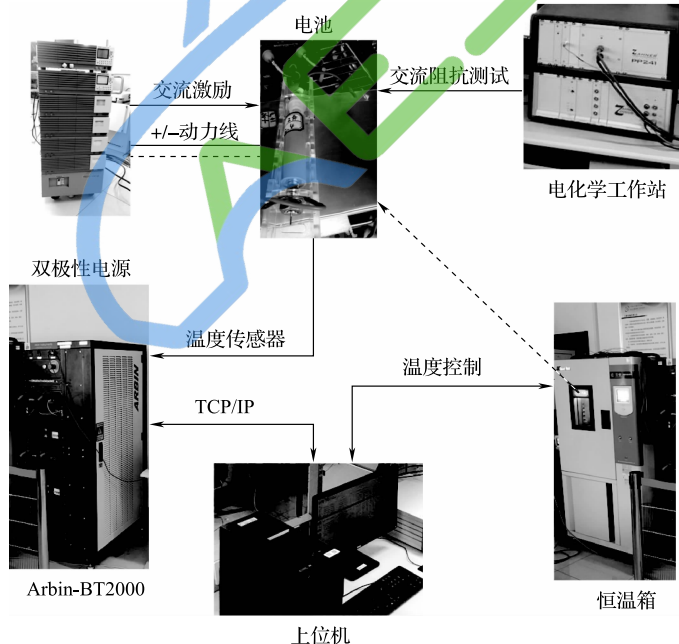


图 7-15 低温加热测试平台

EIS 实验数据（见图 7-16）在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 温度区间（每隔 2°C ）下获得，以计算 10Hz 不同温度下动力电池的实部阻抗。

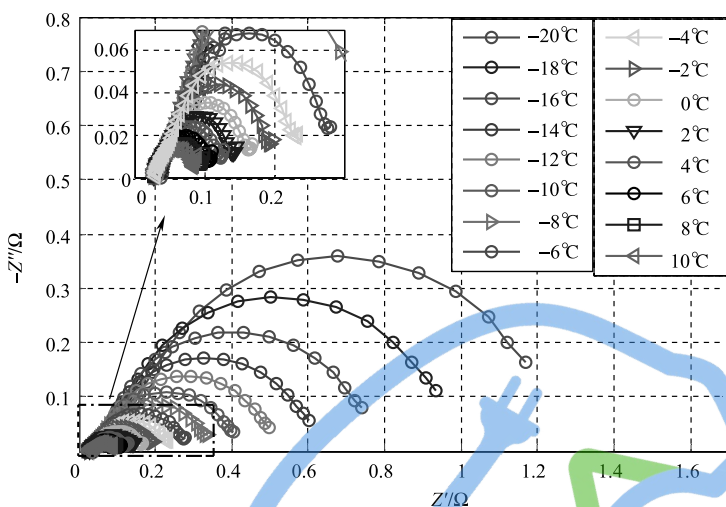


图 7-16 不同温度下的 EIS 实验结果（见彩插）

交流加热前，将动力电池在 -20°C 静置 4h 以上，以确保动力电池内外部温度分布一致，然后开展自适应梯度加热方法评估，记录动力电池的温升。每经历 10 个加热循环，测试一次动力电池容量。需要说明的是，因交流加热设备无法实现自动控制，故开展每隔 2°C 计算更新一次激励电流幅值的加热实验。图 7-17 所示为动力电池 8-单体 01 在不同温度下的激励电流曲线。图 7-18 所示为加热温升曲线。

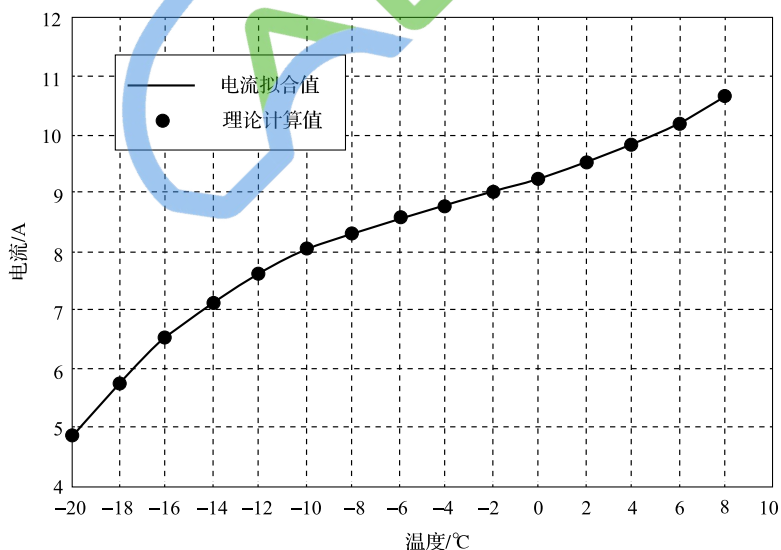


图 7-17 动力电池单体激励电流曲线

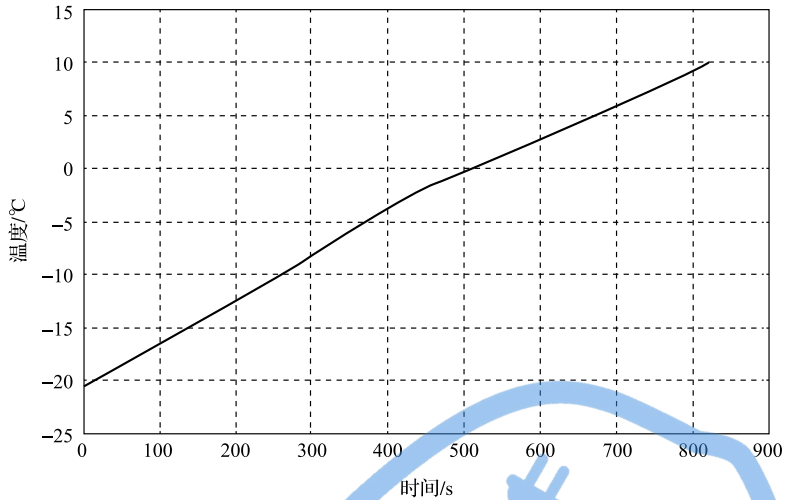


图 7-18 动力电池单体加热温升曲线

图 7-19 所示为四串动力电池组的加热温升曲线。图 7-20 所示为 40 次加热循环后动力电池充放电容量的衰减情况。

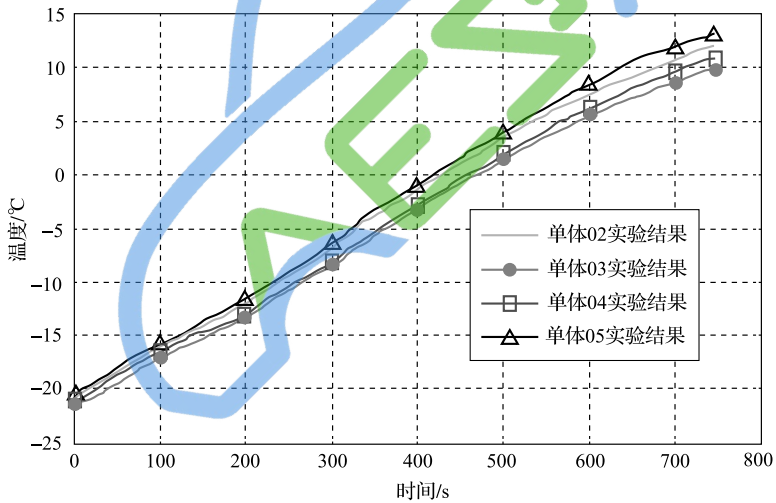


图 7-19 四串动力电池组加热温升曲线（见彩插）

如图 7-18 和图 7-19 所示，自适应梯度加热方法在 13.7min 和 12.4min 内分别将单体动力电池和四串动力电池组从 -20.3°C 加热到 10.02°C ，温升速率分别为 $2.21^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $2.47^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，且四串动力电池组的温升一致性较好。因此，自适应梯度加热方法可以实现较为理想的短时高效的温升效果，同时对动力电池寿命无明显影响，可以考虑作为动力电池在低温环境下应用的预热方法。