

纯电动商用车电池脉冲加热及均衡加热技术研究

谭先华¹, 冯雪¹, 李鹏², 杨宽¹, 苑鑫阳¹, 张坤¹

(1. 比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118; 2. 长沙市比亚迪汽车有限公司, 长沙 410116)

摘要:针对纯电动商用车在低温环境下电池性能衰减问题,本文提出一种基于脉冲电流的加热技术,利用电机定子绕组的电感特性及IGBT的开关特性在电池中形成脉冲电流,通过协调控制多个电机和电控,实现车辆在驱动和充电时的脉冲加热功能,以及多个电池包间的均衡加热功能。为验证该技术的效果,在不同电流、不同频率下进行脉冲加热试验。结果表明,加热过程中电池电量损耗较低、加热效率高,平均温升速率达到 $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。该技术能有效提升纯电动商用车电池的低温性能。

关键词:纯电动; 商用车; 脉冲加热; 均衡加热; 电流; 频率

中图分类号:U469.72; TM912.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.03.002

Research on Pulse and Balanced Heating Technology for Pure Electric Commercial Vehicle Batteries

TAN Xianhua¹, FENG Xue¹, LI Peng², YANG Kuan¹, YUAN Xinyang¹, ZHANG Kun¹

(1. BYD Automotive Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China;

2. Changsha BYD Auto Co., Ltd., Changsha 410116, China)

Abstract: Aiming at the problem of pure electric commercial vehicle battery performance attenuation in low-temperature environments, this paper proposes a heating technology based on pulse current, which uses the inductance characteristics of the motor stator winding and the switching characteristics of the IGBT to form pulse current in the battery. By coordinating the control of multiple motors and electronic controls, which realizes the pulse heating function of the vehicle during driving and charging, and the balanced heating function between multiple battery packs. Carrying out Pulse heating tests at different currents and frequencies, the results show that the battery power loss during the heating process is low, the heating efficiency is high, and the average temperature rise rate reaches $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. This technology can effectively improve the low-temperature performance of pure electric commercial vehicle batteries.

Key words: pure electric; commercial vehicle; pulse heating; balanced heating; current; frequency

1 概述

磷酸铁锂电池是我国电动汽车动力电池的主要类型^[1-3]。锂离子电池的综合性能受环境温度影响显著,低温下,电池内部的化学反应会变得缓慢,电解液黏度增大,化学反应阻力增加,电池的循环能力也会下降,容易出现极化和锂离子沉积现象,导致充放

电容量降低、循环寿命衰减^[4-5]。在极低温度下,电池几乎无法进行常规充放电。因此,在低温环境下对动力电池进行加热,确保电池在合适温度范围内工作,对于提升电池低温下的充放电性能至关重要。

脉冲加热方法是解决锂离子电池在低温下性能衰减的有效方法之一。低温下采用脉冲加热能缓解

收稿日期:2024-11-07。

基金项目:湖南创新型省份建设专项(2023GK2044)。

第一作者:谭先华(1976—),男,工程师,主要从事新能源汽车开发工作。E-mail:tan.xianhua@byd.com。

通信作者:冯雪(1990—),女,硕士,工程师,主要从事新能源汽车开发工作。E-mail:512247894@qq.com。

极化问题^[6],减缓锂离子在负极界面处的堆积,改善锂离子电池在低温环境下的充放电性能。此外,脉冲加热热损失较小,热量直接在电池内部产生,减少了外部传递过程中的热损失。该方法消耗能量少,加热效率高,加热温均性好,加热系统结构简单^[7-11]。

虽然脉冲加热技术已在电动汽车领域广泛应用,但纯电动商用车因配置多个电池包和多个电机及电机控制器(本文简称电控),其脉冲加热面临协同和均衡加热难题,且现有技术无法在车辆驱动时实现脉冲加热。本文设计一种适用于纯电动大电量商用车电池的脉冲加热系统,通过协调控制多个电池包、电机及电控,能够在车辆行驶时进行脉冲加热,同时解决多个电池包间的均衡加热问题,并通过台架试验验证加热效果。

2 脉冲加热电池温升模型及实现原理

2.1 电池温升模型

锂离子电池在脉冲加热时,热量来源主要包括以下3种:一是焦耳热,即电池内部的电化学反应产生的热能;二是反应热,即正负极材料之间的化学反应释放的热量;三是电解液浓度变化热以及一些副反应产生的额外热能。其中电解液浓度变化热和副反应热的数值通常较小^[3]。由于动力电池在低温下具有高阻抗特性,其焦耳热比反应热高两个数量级左右。因此,电池产热主要来源于焦耳热,即内阻产热。

电池的焦耳热 Q 可表示为:

$$Q = Q_R + Q_p + Q_o - Q_L \quad (1)$$

$$Q_R = I^2 R_o \quad (2)$$

$$Q_p = I^2 R_p = U_p^2 / R_p \quad (3)$$

式中: Q_R 为电池欧姆内阻产热; Q_p 为电池极化产热; Q_o 为电池其他产热,包含混合热、副反应热; Q_L 为电池热损耗; R_o 为电池欧姆内阻; R_p 为电池极化内阻; U_p 为电池极化电压; I 为电流有效值。

为了更好地分析脉冲加热过程的主要影响因素,忽略产热量较小的因素 Q_o 。由于在加热过程中线路损耗值较小,因此忽略 Q_L 。此外,电池极化反应会影响电池的性能和寿命,为了保护电池,需要将锂离子电池极化电压控制在一定范围内,由于脉冲加热可以

很好地消除极化现象,因此也忽略极化产热 Q_p 。最终,产热量主要来自 Q_R ,主要与电流和内阻相关,且与其成正比,电阻和电流越大,产热量越高。

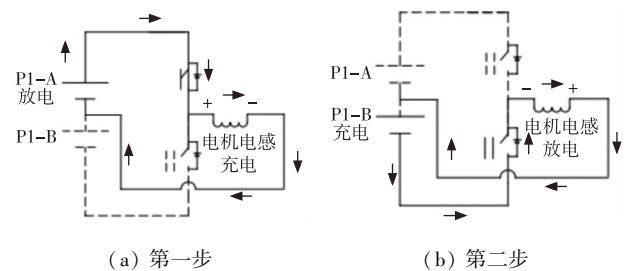
文献[12]建立了电池的电化学-热耦合模型,对电池阻抗的影响因素进行了研究,通过实验分析得知,电池内部阻抗随着脉冲电流频率的降低而增大,且温度越低电池内部阻抗增加得越快。

综上所述,脉冲加热方法利用锂离子电池在低温环境下较大的内部阻抗来产热,在不同温度和电流频率下,电池内部的阻抗不同。温度越低或频率越低,阻抗增加越快;脉冲电流越大,阻抗越大,产生的热量越多,加热速率越快。因此,可以通过调整脉冲电流的大小和频率来控制加热效果。

2.2 实现原理

脉冲加热的原理是通过周期性地对电池进行脉冲充放电来实现电池温度的调节。首先,电池进行脉冲放电,利用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开关控制电机中的电感储能;然后,利用电感中电流方向保持不变的特性,通过 IGBT 开关控制电机中的电感放电,为电池进行脉冲充电。这种周期性的脉冲充放电过程使电池锂离子在正负极之间穿梭,通过欧姆内阻和电化学反应产生热量,从而对电池加热,改善电芯活性,提高电池在低温下的性能。

本文通过增加电池中线,将每个电池包分为 P1-A 和 P1-B 两组。脉冲加热过程一共分为 4 步。第一步:上桥臂导通,下桥臂断开, P1-A 放电,电感充电进行储能;第二步:上桥臂断开,下桥臂断开,电感放电释放能量, P1-B 充电;第三步:上桥臂断开,下桥臂导通, P1-B 放电,电感充电进行储能;第四步:上桥臂导通,下桥臂断开,电感放电释放能量, P1-A 充电,上述 4 个步骤不断重复执行。脉冲加热原理如图 1 所示。



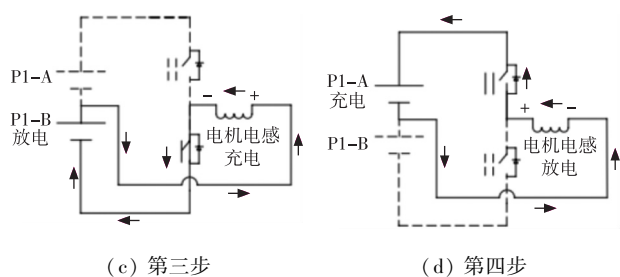


图1 脉冲加热原理示意图

3 脉冲加热系统电路设计及策略

3.1 脉冲加热系统电路设计

本文脉冲加热系统的电路原理图如图2所示,包含3个电池包、多合一控制器、3个电机、1个充电口、3个正极接触器、3个负极接触器、3个加热接触器、9个控制接触器(K1-K9)、6个均衡接触器(K11/K12/K13/K21/K22/K23)、6个充电接触器(K1a/K1b/K1c/K2a/K2b/K2c)。

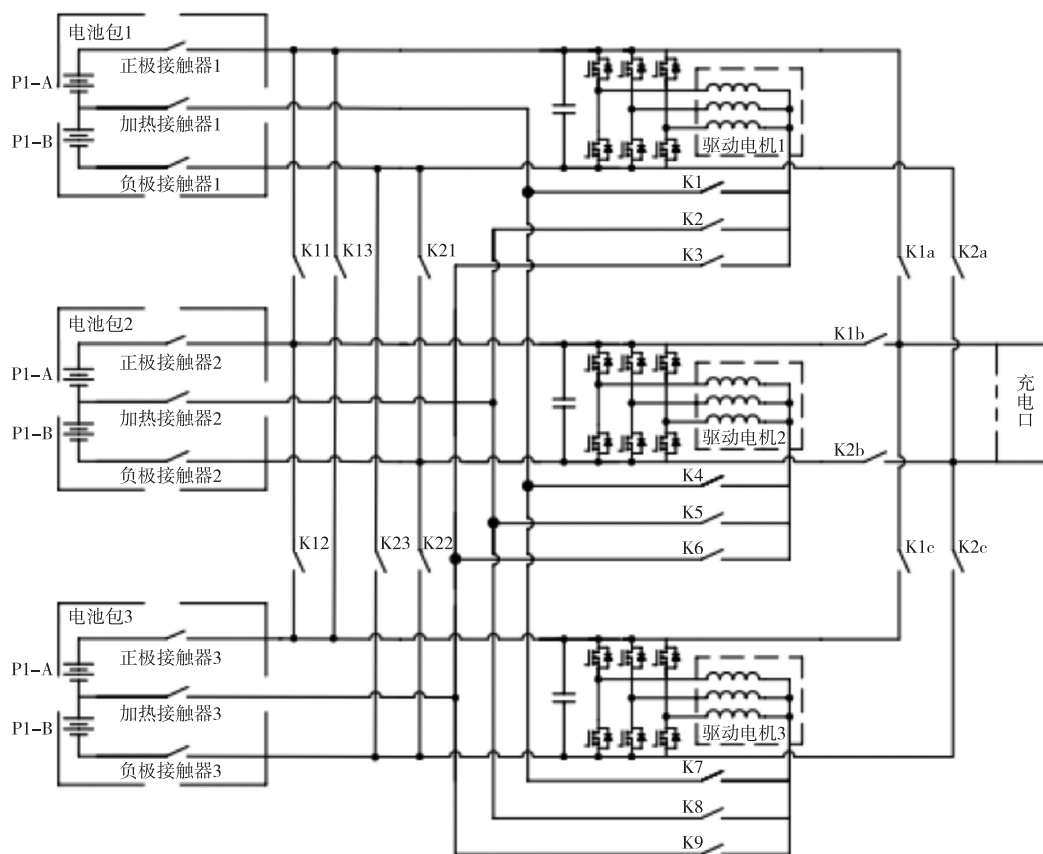


图2 脉冲加热系统电路原理图

各个元器件的作用如下:

1) 电池包。电池包是车辆的动力和用电设备供电来源,可通过脉冲加热技术进行加热。本方案采用3个并联电池包,其他车型可根据自身需求选择配置电池包的数量。

2) 多合一控制器。用于控制 IGBT 通断以形成脉冲波。本方案含3个并联电控,集成 IGBT、电容和电机控制器等部件。另外,本方案未具体设定为几合一,各车型可根据自身需求进行配置。

3) 电机。电机将电能转化为机械能,通过传动

装置或直接驱动车轮工作,为车辆提供动力。本方案包含3个并联电机,利用电机定子绕组电感不能突变的特性,通过控制 IGBT 开关,形成脉冲电流流经电池,使电池通过内阻产生热量。

4) 充电口。用于给车辆电池包充电,将外部充电桩与充电口连接即可为车辆充电。

5) 正/负极接触器。正/负极接触器 1/2/3 分别控制电池包 1/2/3 的正/负极的通断,用于车辆正常驱动和脉冲加热流程。

6) 加热接触器。加热接触器 1/2/3 分别控制电

池包 1/2/3 加热的通断。这些接触器是脉冲加热流程的专用部件,非脉冲加热时,系统中没有这些接触器及相应线路。

7) K1-K9 控制接触器。用于控制不同加热回路的通断,实现多种脉冲加热回路。K1-K9 是脉冲加热流程的专用接触器,非脉冲加热时,系统中没有这些接触器及相应线路。本系统为防止电机或电控故障导致电池无法加热,设计了多路备用回路。具体功能如下:①K1 控制驱动电机 1 给电池包 1 加热回路的通断;②K2 控制驱动电机 1 给电池包 2 加热回路的通断;③K3 控制驱动电机 1 给电池包 3 加热回路的通断;④K4 控制驱动电机 2 给电池包 1 加热回路的通断;⑤K5 控制驱动电机 2 给电池包 2 加热回路的通断;⑥K6 控制驱动电机 2 给电池包 3 加热回路的通断;⑦K7 控制驱动电机 3 给电池包 1 加热回路的通断;⑧K8 控制驱动电机 3 给电池包 2 加热回路的通断;⑨K9 控制驱动电机 3 给电池包 3 加热回路的通断。

8) 均衡接触器。用于实现电池包间的均衡功能,通过闭合 K11/K12/K13/K21/K22/K23,可将电池包的正极和负极分别并联。正极、负极和加热接触器集成在各自的电池包内,均衡接触器则布置在电池包的总成系统中。脉冲加热时,需要先根据流程判断是否需要均衡,再通过控制均衡接触器的通断来实现均衡,属于被动均衡;在非脉冲加热时,均衡接触器始终闭合,当出现不平衡时,电流通过并联高压线流动实现自动均衡,属于主动均衡。

9) 充电接触器。用于实现充电功能,通过控制 K1a/K1b/K1c/K2a/K2b/K2c 实现各电池包的充电控制,既能同时对全部电池包充电,也能对部分电池包充电。充电接触器集成在多合一控制器中。

3.2 脉冲加热控制策略

3.2.1 脉冲加热控制策略主流程

脉冲加热控制策略主流程如图 3 所示。程序初始化后,读取存储器内的信息,并接收电池包电量、温度数据。首先进行车辆状态判断,根据车速和停车时间判断车辆是属于停车、行车还是临时停车状态。然后进入脉冲加热判断流程;若无需加热,车辆进入正常充放电流程;若需要加热,则进入充/放电加热判断

流程,并根据判断结果进入充电/放电脉冲加热均衡流程。

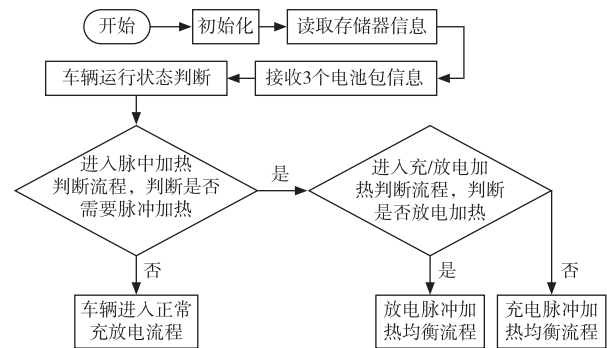


图3 脉冲加热控制策略主流程

车辆在正常充放电时,只需控制正负极接触器 1/2/3、IGBT 上下桥臂的开关。车辆正常放电行驶时,3 个电池包全部供电,3 个电机均用于车辆驱动功能。

3.2.2 脉冲加热判断

脉冲加热的判断依据是电池包的实时温度 $T_{ac,i}$ 及电量,具体判断流程如图 4 所示。本方案使用磷酸铁锂电池,其中,加热温度 T_{Le} 为 5°C ,极低温度 T_{LL} 为 -30°C 。 T_{Le} 、 T_{LL} 及各个电池包进行脉冲加热的最低电量和总电量 SOC 值可根据电池特性进行设置。在判断各电池包是否需要加热后,记录各电池包电量及脉冲加热信息。

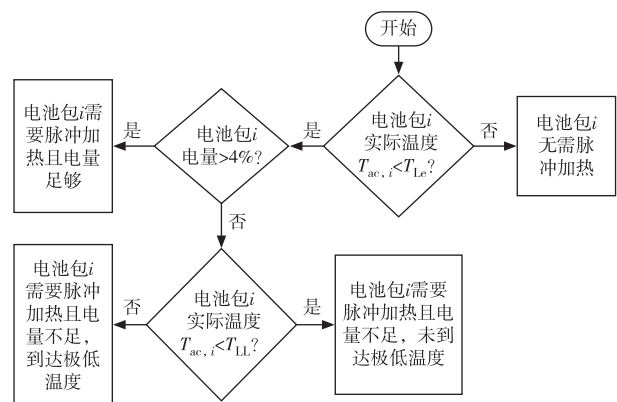


图4 脉冲加热判断流程

对于需要脉冲加热的电池包,根据表 1 确定其脉冲加热的最长允许时间。表 1 中的最长加热时间是根据电池的特性及经验获得,可以根据不同电池的特性进行调整。本方案最长加热时间为 40 min,表中未

标注的电量可以通过插值法获取。

表1 脉冲加热电量与最长加热时间

SOC 电量/%	最长加热时间/min
0	0
10	5
30	20
50	40
100	40

3.2.3 充/放电加热判断

充/放电加热判断流程需根据车辆的充放电状态

来确定。当车辆处于放电状态,则需判断车辆是否智能充电(即24 h检测电量,当检测到蓄电池有亏电风险时,自动启动动力电池给蓄电池充电)、是否允许放电、系统是否存在故障、各电池包电量或总电量是否足够加热等条件;当车辆处于充电状态,则需判断各电池包电量或总电量是否足够加热、环境温度是否满足要求等条件。若满足条件,则先进行充/放电脉冲加热功能划分,再进入充/放电加热及均衡流程;若不满足条件,则进行记录、仪表提示或流程跳转等操作。具体判断流程如图5所示。本文环境温度限值 T_{LE} 设置为 0°C 。

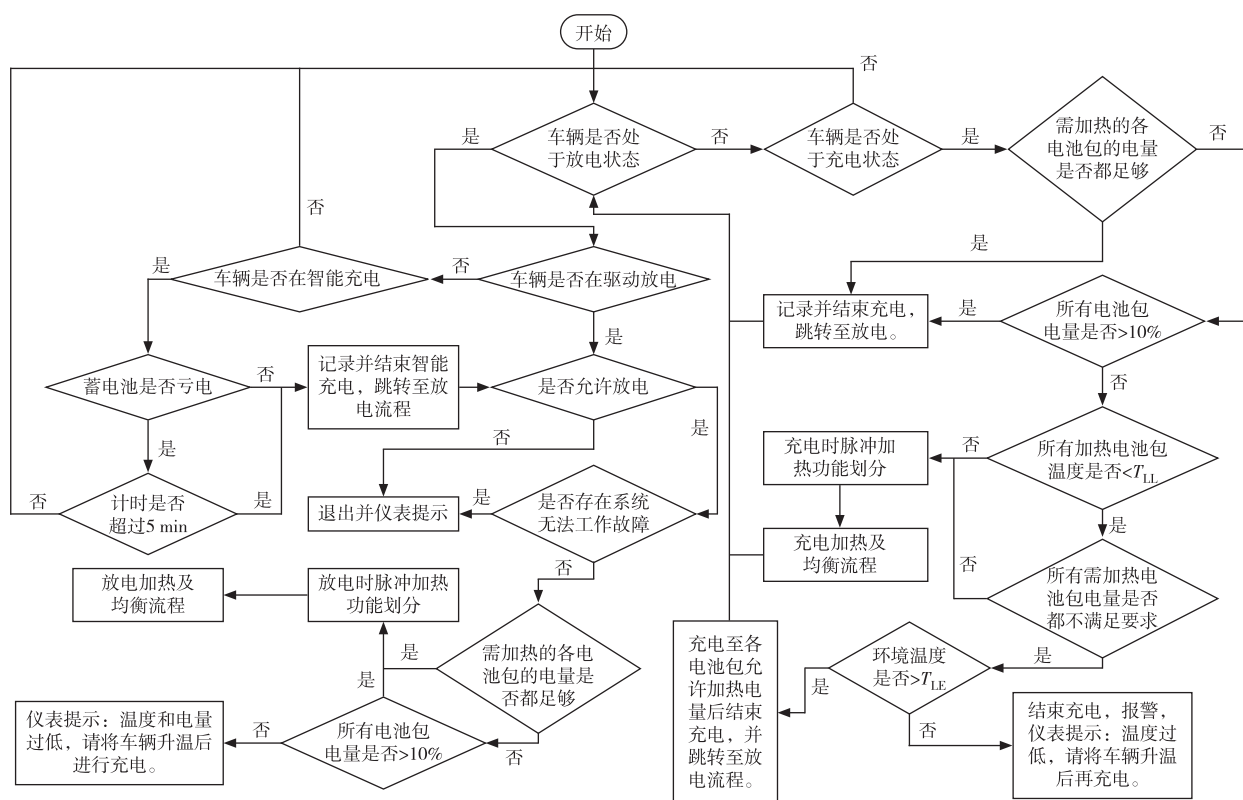


图5 充/放电加热判断流程

车辆充电时必须处于停车状态,否则无法进行充电。因此本流程默认车辆停车时进入。由于低温下电池性能较差,车辆正常情况下不允许边充电边加热,只有当电量低于脉冲加热允许值且电池温度未达到极低温度时,才允许进入充电加热流程。充电时为了增强加热效果,所有电机全部用于脉冲加热。电池根据温度和电量进行功能划分:低于极低温度的电池不工作,电量最多的电池用于脉冲加热,剩下的电池用于充电。车辆放电时,若在停车状态下,所有电机

和电池包全部用于脉冲加热;若在行车状态下,则需要根据坡度、载重、加速度、阻力等综合因素实时计算车辆所需驱动力,进而确定电机是用于驱动还是加热。若电机驱动力不足,则根据需求驱动力增加用于驱动的电机数量,电机可动态切换加热和驱动功能。此外,临时停车时电机保持原功能状态,不切换加热与驱动功能。行车状态下电池根据其电量和最大允许功率进行功能划分,单个电池包足够则单包用于行车供电,单包不够继续增加电池包,剩下的电池包用

于脉冲加热。

3.2.4 充/放电脉冲加热均衡

脉冲加热需要控制正极接触器、加热接触器、负极接触器、K1-K9 控制接触器、6 个均衡接触器 (K11/K12/K13/K21/K22/K23)、6 个充电接触器 (K1a/K1b/K1c/K2a/K2b/K2c)、IGBT 开关。在进行脉冲加热均衡流程时,需要对电池、电机、电控、接触器进行故障判断。如有故障,则需进行故障处理。具体方式如下:

1) 情况一:电池、电机、接触器无故障。此时利用电机 1 给电池包 1 加热,电机 2 给电池包 2 加热,电机 3 给电池包 3 加热。

第一步:控制正极接触器 1、正极接触器 2、正极接触器 3、加热接触器 1、加热接触器 2、加热接触器 3、K1、K5、K9 闭合,IGBT 上桥臂导通,下桥臂断开,电机中的电感储能,P1-A 放电;第二步:负极接触器 1、负极接触器 2、负极接触器 3、加热接触器 1、加热接触器 2、加热接触器 3、K1、K5、K9 闭合,上桥臂断开,下桥臂断开,电机中的电感放电,P1-B 充电;第三步:负极接触器 1、负极接触器 2、负极接触器 3、加热接触器 1、加热接触器 2、加热接触器 3、K1、K5、K9 闭合,上桥臂断开,下桥臂导通,电机中的电感储能,P1-B 放电;第四步:正极接触器 1、正极接触器 2、正极接触器 3、加热接触器 1、加热接触器 2、加热接触器 3、K1、K5、K9 闭合,上桥臂断开,下桥臂断开,电机中的电感放电,P1-A 充电。

其中,实现电池包 1 加热的接触器为正极接触器 1、负极接触器 1、加热接触器 1;实现电池包 2 加热的接触器为正极接触器 2、负极接触器 2、加热接触器 2;实现电池包 3 加热的接触器为正极接触器 3、负极接触器 3、加热接触器 3。电机 1 可通过 K1 给电池包 1 加热,通过 K2 给电池包 2 加热,通过 K3 给电池包 3 加热;电机 2 可通过 K4 给电池包 1 加热,通过 K5 给电池包 2 加热,通过 K6 给电池包 3 加热;电机 3 可通过 K7 给电池包 1 加热,通过 K8 给电池包 2 加热,通过 K9 给电池包 3 加热。可通过以上接触器组合,协调控制多个电池包、电机和电控,进而实现多个电池包的加热,以及边加热边充电/驱动的协调功能。

通过充电口给各个电池包充电的方式为:通过 K1a 和 K2a 给电池包 1 充电,通过 K1b 和 K2b 给电

池包 2 充电,通过 K1c 和 K2c 给电池包 3 充电。

此外,通过闭合 K11 和 K21 可实现电池包 1 和电池包 2 间的均衡功能;通过闭合 K12 和 K22 可实现电池包 2 和电池包 3 间的均衡功能;通过闭合 K13 和 K23 可实现电池包 1 和电池包 3 间的均衡功能;同时闭合 K11/K21、K12/K22、K13/K23 中的任意两组可实现所有电池包间的均衡功能。

2) 情况二:接触器故障。将 K1-K9 控制接触器分为 6 组,第一组:K1、K5、K9,第二组:K1、K6、K8,第三组:K2、K6、K7,第四组:K2、K4、K9,第五组:K3、K4、K8,第六组:K3、K5、K7。当某组控制接触器故障时,可替换成其他组无故障的接触器,以上几组接触器可以相互替代。如果以上几组接触器都有故障,则无法使用 3 个电机同时给 3 个电池包加热。此时,可使用 2 个电机或 1 个电机给多个电池包加热,控制方式等同于电机故障,但加热速率会降低。若正极接触器、负极接触器、加热接触器任何一个有故障,则对应电池包无法加热,控制方式等同于电池故障。

3) 情况三:电机故障。当某个电机出现故障时,使用其他无故障电机对电池进行加热。断开故障电机对应的控制接触器,电机 1 故障断开 K1、K2、K3,电机 2 故障断开 K4、K5、K6,电机 3 故障断开 K7、K8、K9,除上述控制接触器的控制方式外,脉冲充放电的其他控制方式同情况一。若电机全部故障则无法加热。

4) 情况四:电池故障。当电池出现故障时,故障电池无法加热,但可使用电机对无故障电池进行加热。断开故障电池对应的正极、负极和加热接触器,电池 1 故障断开正极接触器 1、负极接触器 1 和加热接触器 1,电池 2 故障断开正极接触器 2、负极接触器 2 和加热接触器 2,电池 3 故障断开正极接触器 3、负极接触器 3 和加热接触器 3,除上述接触器的控制方式外,脉冲充放电 4 个阶段的其他控制方式同情况一。若电池全部故障则无法加热。若电池故障的同时电机也出现故障,则在情况四的基础上参照情况三断开对应的控制接触器。

完成故障判断并闭合对应接触器后,进行边加热边充电/放电功能。加热计时超过 5 min 开启内循环。此时,计算温度平均值 T_{av} 和偏差率 ε_i ,根据偏差率判断是否退出内循环,根据实际温度 $T_{ac,i}$ 判断是

否退出加热。在充/放电过程中,需要根据电池包间的电量误差判断是否进行均衡处理,完成均衡后再继续加热或充电/正常启动。充电和放电脉冲加热均衡

具体流程分别如图6和图7所示。其中, $T_{\max}$ 为退出脉冲加热温度值,根据不同的电池特性进行取值,本方案设计值为40℃。

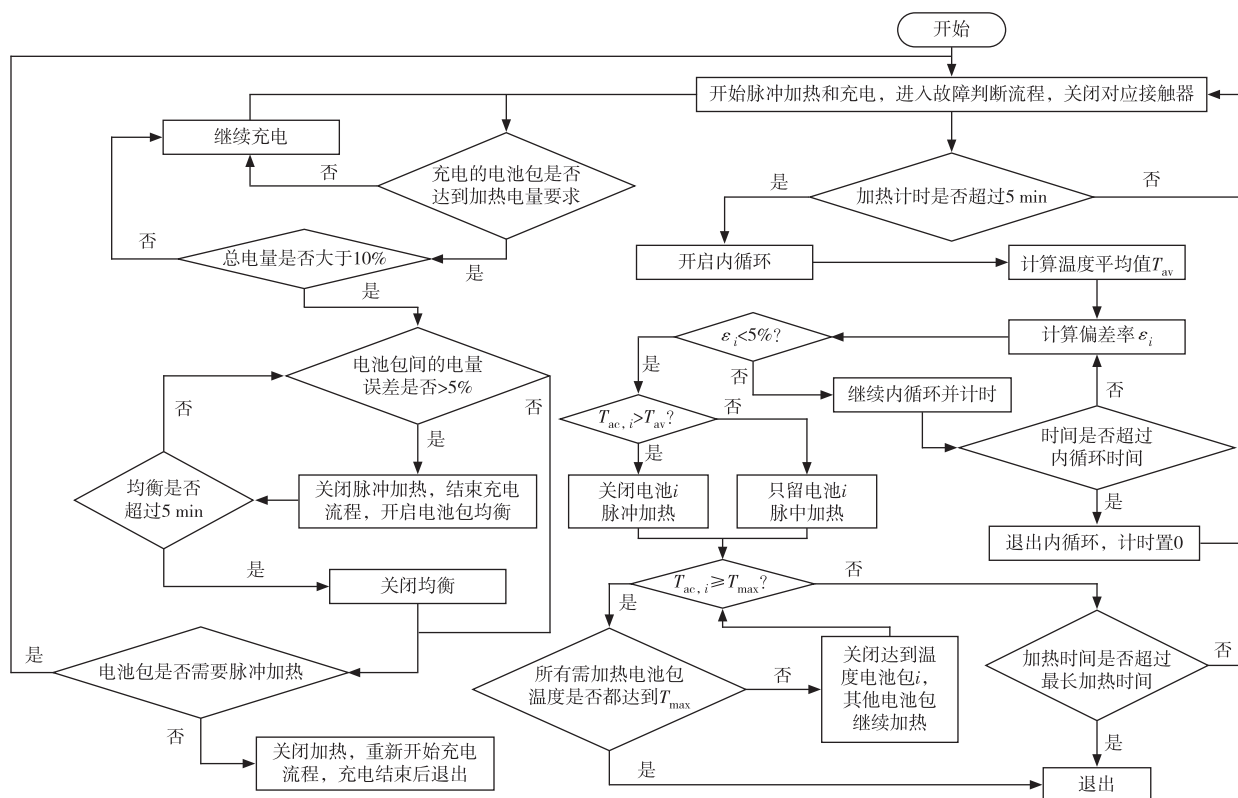


图6 充电脉冲加热均衡流程

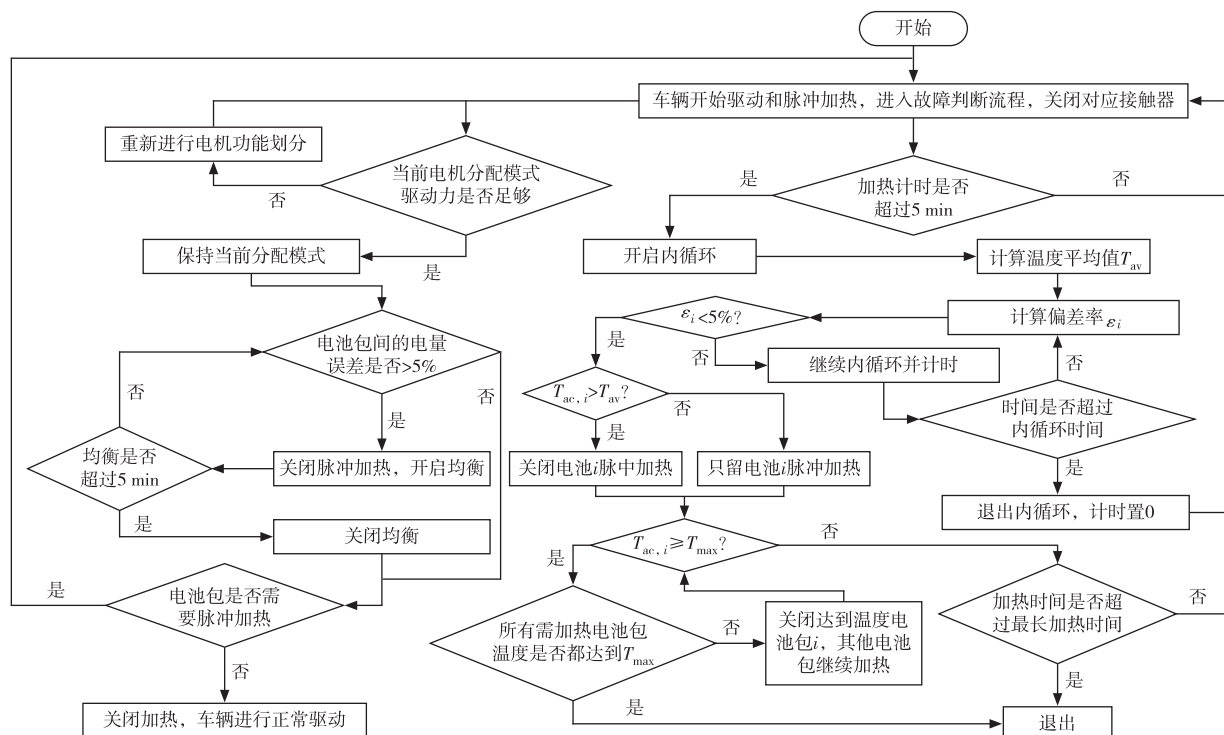


图7 放电脉冲加热均衡流程

电池包温度平均值计算公式见式(4)。

$$T_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ac,i}$$
 (4)

式中: T_{av} 为所有电池包温度的平均值; n 为电池包个数; $T_{ac,i}$ 为电池包 i 的实际温度值,通过电池管理控制器采集并解析出来的整个电池包平均温度。

温度偏差率计算公式见式(5)。

$$\varepsilon_i = (T_{ac,i} - T_{av}) / T_{av}$$
 (5)

式中: ε_i 为第 i 个电池包的温度偏差率。

内循环时间根据偏差值查询表 2 获得,表 2 的值是根据经验标定得出,不同车辆可以根据情况调整。

表 2 偏差率与内循环时间关系表

偏差率/%	内循环时间/min
0	0
5	5
10	8
50	15
100	15

4 试验方案及结果分析

4.1 试验方案

为更好地对脉冲加热进行研究,同时验证所设计脉冲加热系统的可行性,建立了脉冲加热试验台。脉冲加热试验各元件连接示意图如图 8 所示,包含电池包、动力域控制器、多合一控制器、电机驱动桥、水冷

机、上位机、数据采集仪、示波器、充放电柜。其中,上位机用于发送脉冲加热命令、频率、电流,并监控电池包、控制器和电机的信息,主要包含 SOC 值、单节电压、温度、电流、定子温度等。水冷机可调节温度、流速、水压,提供所需的低温冷却液,并通过管路输送到系统中,进而对多合一控制器、电机进行冷却。数据采集仪用于采集电机转子热电偶的温度。示波器用于实时观测电池正负极、中线、三相线电流及频率。充放电柜用于给电池包充电。上位机、示波器、充放电柜放在环境舱外。其他设备布置在环境舱内,通过设定环境舱的温度、湿度和大气压,可模拟现实环境低温工况。

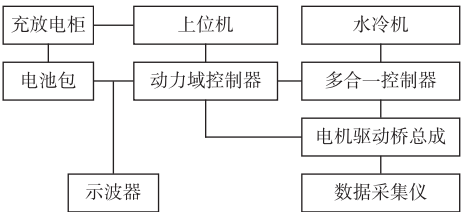


图 8 试验元件连接示意图

4.2 测试结果

使用上位机设定脉冲加热的中线电流和频率。中线电流设定为 312 A、500 A,测试频率设定为 50 Hz、100 Hz,电池包分别在 -25 ℃ 和 -10 ℃ 下进行试验。本试验在每种工况下重复进行 8 组,试验结果见表 3。

表 3 不同工况下的测试结果

环境 温度/℃	频率/ Hz	中线 电流/A	电芯 温差/℃	电池耗能均值/ (kW·h)	转子 温度/℃	温升速率均值/ (℃·min ⁻¹)	温升速率 标准差/%	加热效率 均值/%	加热效率 标准差/%
-25	50	312	[1,3]	4.2	50~60	0.45	2.3	48.7	2.5
-25	50	500	[1,4]	9.1	75~90	1.05	2.6	54.6	1.4
-25	100	312	[2,3]	5.0	50~60	0.41	1.8	43.5	2.0
-25	100	500	[1,4]	10	70~80	1.01	3.7	49.2	1.8
-10	50	312	[2,3]	4.0	55~70	0.4	4.1	44.2	4.5
-10	50	500	[2,4]	8.4	75~90	0.95	3.7	53.0	2.1
-10	100	312	[2,3]	4.1	60~70	0.38	4.2	43.3	4.8
-10	100	500	[1,3]	7.8	70~85	0.88	2.1	51.5	1.3

根据试验数据计算相应的温升速率,并进行多维度对比(包括不同电流、频率以及温度条件)。在环

环境温度 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、频率 50 Hz 、中线电流 500 A 的加热工况下,加热效果最好,其电芯温差不超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温升速率最快($1.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$),同时加热效率最高(54.6%)。其中,电流大小对温升速率的提升最为显著。由数据分析可知, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 50 Hz 时,中线电流从 312 A 增加到 500 A ,温升速率提高了 133% ,加热效率提高了 12.1% ; $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 500 A 时,频率从 100 Hz 降至 50 Hz ,温升速率提高了 4% ,加热效率提高了 11% ; 50 Hz 、 500 A 时,环境温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,温升速率提高了 11% ,加热效率提升了 3% 。此外,不同工况下的温升速率和加热效率的标准差均在 5% 以内,表明温升速率和加热效率数据稳定可靠。综上所述,脉冲电流、脉冲频率和温度对电池加热均有较为明显的影响。随着初始加热温度的降低、加热频率的降低以及加热电流的增大,其温升速率和加热效率逐渐上升,且电流对温升速率的影响最大。

5 结束语

本文通过脉冲加热台架试验,复用电机定子绕组的电感特性及IGBT的开关通断在电池中形成脉冲电流,并通过上位机监测不同电流和频率下的脉冲加热试验。试验结果表明,本文所设计的脉冲加热系统可以实现脉冲加热功能。该系统可在较短时间内将电池加热到一定温度,且加热过程中电池耗能较小,加热效率高,实现了低功耗、高效率的电池自加热。此外,通过协调控制多个电机和电控,实现了多个电池包间的均衡加热功能,显著提升了车辆的低温性能与充放电效率,进一步提高了运营经济性和环境适应性,使车辆更加安全可靠。本方案对车辆整体布局改动较小,容易实现,可以在电动汽车上规模化使用。

虽然脉冲加热技术具有较高的加热效率和温升速率,但其功能的安全性、噪声振动特性及长期运行情况尚未有充分的试验数据,且本次试验电池保温效

果并非最优。因此,需进一步开展脉冲加热性能试验,并研究长期运行对电池性能的影响。

参考文献:

- [1] 李靖. 中国电动汽车产业发展战略研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2012.
- [2] 李雨芹. 磷酸铁锂电池在电动汽车中的应用与回收[J]. 化工管理,2019(1):61-62.
- [3] 邹岱江,唐小波,秦宇迪,等. 电动汽车动力电池低温脉冲加热技术研究[J]. 时代汽车,2024(9):95-97.
- [4] LIU H Q, WEI Z B, HE W D, et al. Thermal issues about Lithium ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2017(150):304-330.
- [5] 林彭勇. 锂离子电池健康状态与火灾安全研究[J]. 客车技术与研究,2025,47(2):6-9.
- [6] 杨璐. 动力锂离子电池的低温双向脉冲充电方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [7] 廉玉波,凌和平,马晴婵,等. 电动汽车锂离子电池脉冲加热技术研究进展[J]. 汽车工程,2023,45(2):169-174.
- [8] 重庆长安新能源汽车科技有限公司. 一种动力电池脉冲加热系统及其控制方法:202110483750.9[P]. 2022-06-14[2024-11-05].
- [9] 吴晓刚,李凌任,高鑫家,等. 锂离子电池脉冲频率优化的低温预热[J]. 电机与控制学报,2021,25(11):56-65.
- [10] 重庆长安新能源汽车科技有限公司. 一种动力电池脉冲加热过程中的电机转子位置控制方法:202111451994.5[P]. 2023-05-02[2024-11-05].
- [11] 邢俊亚,许心一,彭杨茗,等. 脉冲电流加热电池技术在整车上的应用[C]//中国汽车工程学会. 2023 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2023:689-694.
- [12] LI J Q, SUN D N. Lithium ion batteries modeling and optimization strategies for sinusoidal alternating current heating at low temperature[J]. Energy Procedia, 2018(152):562-567.