

【工程与技术】

低温下梯次动力锂电池高效放电控制策略

李珺凯¹, 张持健²

(1. 安徽国防科技职业学院 汽车技术学院, 安徽 六安 237005;

2. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002)

摘要:为解决退役电池在低温下放电容量衰减的问题,设计了一种退役电池高效放电控制系统,并通过 proteus 搭建了系统模型。实验结果表明:在低温环境中,高效放电控制系统使随机选取的退役电池分别多放出 0.032 4 Ah、0.032 2 Ah、0.023 9 Ah、0.020 6 Ah、0.025 4 Ah 的电量;另外经过系统激活后的电池再次放电时,容量衰减分别减少了 0.011 3 Ah、0.013 5 Ah、0.025 7 Ah、0.007 0 Ah、0.008 6 Ah。说明该系统可以精准地控制放电电流和放电时间,在低温下激活退役电池的电芯,释放更多电量。该系统克服了主流加热方法加热不均衡、不精准等问题。

关键词:退役电池;梯次利用;低温激活;高效放电

中图分类号: TM 911.3 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.010

0 引言

新能源产业在我国政策的扶持下蓬勃发展^[1],但现役电池容量衰减到其原来容量的 80% 时,就必须将其退役下来,梯次利用可以解决大量退役电池的堆积问题,以达到锂电池的最大利用率^[2]。温度是影响电池容量变化的重要因素^[3],在低温环境下,锂电池正负极化学反应变慢以及电解液变稠导致电池容量衰减^[4],为更好地实现退役电池梯次利用,必须解决低温下退役电池容量衰减的问题。文献[5]采用一种依靠热源利用热传导或热对流来加热锂电池。文献[6]通过逆变电路把电池的直流电转变为交流电加热锂电池。文献[7]建立了电热丝的换热模型,通过加热空气来提高电池的温度。文献[8]构建了液冷动力电池包低温加热和保温系统来加热电池,效果较好。但这些方法并没有同时兼顾电池的受热均衡性、热量利用率、经济成本等因素。本文在分析退役电池性能参数的基础上,考虑经济性和安全性,设计了一种退役电池高效放电控制系统,让退役电池在每一级利用层上都能发挥出最大的低温放电性能。

1 实验平台搭建

本文以退役 18650 锂电池为研究对象,该电池来源于某汽车企业的退役电池组,18650 锂电池容量一般约为 2.2~2.3 Ah,退役下来的 18650 锂电池容量基本保持在 1.7~2.0 Ah。针对退役电池容量等参数特性,搭建由 BTS-5V6A 电池测试仪、恒温箱、DW-40 低温试验箱与电脑 PC 端组成的实验平台。本文采用的 BTS8.0X 电池检测系统,能够实现单体电池电压、电流、容量、内阻等参数的测量,电池检测界面

收稿日期:2024-01-10

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(2023AH052742)

第一作者简介:李珺凯(1994—),男,安徽六安人,助教,硕士,主要从事人工智能与锂电池应用研究。

E-mail:1094119842@qq.com

如图 1 所示,该实验平台为后续实验数据的精准性提供了保障。

常规显示	充电	放电	搁置	保护	停止	暂停	完成	默认
恒压充电 CH 1-1 工步序号 1 循环序号 24 工步时间 02:23:15 电压(V) 3.737 2 电流(A) 0.400 2 充电容量 955.4 (mAh) 充电能量 3.446 7 (Wh)	恒压充电 CH 1-2 工步序号 1 循环序号 24 工步时间 03:19:23 电压(V) 3.877 7 电流(A) 0.389 9 充电容量 1328.1 (mAh) 充电能量 4.860 1 (Wh)	恒压充电 CH 1-3 工步序号 1 循环序号 25 工步时间 02:00:47 电压(V) 4.200 4 电流(A) 0.234 3 充电容量 1 773.3 (mAh) 充电能量 6.924 9 (Wh)	恒压充电 CH 1-4 工步序号 3 循环序号 25 工步时间 01:23:44 电压(V) 3.367 7 电流(A) -1.001 1 充电容量 1 397.0 (mAh) 充电能量 5.084 5 (Wh)	停止 CH 1-5 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	停止 CH 1-6 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	停止 CH 1-7 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	完成 CH 1-8 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	
恒流放电 CH 2-1 工步序号 3 循环序号 15 工步时间 02:23:33 电压(V) 3.621 3 电流(A) -0.400 6 放电容量 957.4 (mAh) 放电能量 3.686 2 (Wh)	恒流放电 CH 2-2 工步序号 3 循环序号 15 工步时间 00:47:19 电压(V) 3.934 4 电流(A) -0.400 2 放电容量 315.3 (mAh) 放电能量 1.270 1 (Wh)	完成 CH 2-3 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	完成 CH 2-4 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	完成 CH 2-5 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	完成 CH 2-6 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	完成 CH 2-7 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	完成 CH 2-8 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 放电容量 (mAh) 放电能量 (Wh)	
保护 CH 3-1 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	保护 CH 3-2 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	保护 CH 3-3 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	保护 CH 3-4 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	保护 CH 3-5 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	完成 CH 3-6 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	完成 CH 3-7 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	完成 CH 3-8 工步序号 循环序号 工步时间 电压(V) 电流(A) 充电容量 (mAh) 充电能量 (Wh)	

图 1 电池检测界面

2 退役电池容量衰减特性

为明确退役电池在低温下的容量变化特性,在《电动汽车用电池管理系统技术条件》(QC/T 897—2011)^[9]的基础上,针对退役锂电池的实际情况进行实验,实验步骤:(1)将退役 18650 锂电池以 1 C 的倍率进行恒压充电,充电至终止电压 4.2 V;(2)静置 1 h;(3)再将退役 18650 锂电池以 1 C 的倍率进行恒流放电,放电至截止电压 2.75 V;(4)再静置 1 h;(5)将退役 18650 锂电池分别置于 -20 ℃、-15 ℃、-10 ℃、-5 ℃、0 ℃、5 ℃的环境中重复步骤(1)~(4)。随机选取 5 节未进行任何充放电实验的退役 18650 锂电池进行上述实验,观察其容量的变化情况,结果见表 1。图 2 为不同电池在低温下的容量变化。

表 1 低温下退役电池充放电容量表

序号	环境 温度/℃	充电 容量/Ah	放电 容量/Ah	容量 衰减率/%	序号	环境 温度/℃	充电 容量/Ah	放电 容量/Ah	容量 衰减率/%	
1 号	5	1.924	1.866	96.98	3 号	-10	1.750	1.614	92.22	
	0	1.840	1.771	96.25		-15	1.533	1.388	90.54	
	-5	1.825	1.763	96.60		-20	1.099	0.931	84.71	
	2 号	-10	1.789	1.624	90.77	4 号	5	1.824	1.786	97.91
		-15	1.506	1.368	90.83		0	1.801	1.755	97.44
		-20	1.143	0.978	85.56		-5	1.525	1.477	96.85
3 号		5	1.902	1.833	96.37	5 号	-10	1.511	1.444	95.56
		0	1.870	1.765	94.38		-15	1.498	1.308	87.31
		-5	1.865	1.759	94.31		-20	1.010	0.708	70.09
	3 号	-10	1.777	1.620	91.16	5	1.633	1.466	89.77	
		-15	1.510	1.370	90.72	0	1.601	1.341	83.76	
		-20	1.101	0.957	86.92	-5	1.586	1.300	81.96	
3 号	5	1.899	1.801	94.83	-10	1.549	1.224	79.01		
	0	1.822	1.715	94.12	-15	1.419	1.064	74.98		
	-5	1.792	1.678	93.63	-20	0.994	0.678	68.20		

由表 1、图 2 可以看出,对退役 18650 电池进行充放电实验,随着环境温度的降低,它们的充电容量和

放电容量衰减率均呈现下降趋势, 当温度达到 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 它们的容量由平缓下降变成了急剧下降。这说明在低温环境下, 退役电池的容量是衰减的, 而且环境温度越低, 衰减的幅度越大。

3 退役电池高效放电控制系统设计

针对退役电池在低温下放电容量衰减的问题, 设计了一种低温下退役锂电池高效放电控制系统, 整个系统结构如图 3 所示。锂电池的输入端连接温度传感器, 开关模块的输入端与主控单元连接, 主控单元控制切换开关模块分别连接正常放电电路和大电流放电电路。主控单元的输入端连接用于检测锂电池所处环境温度的温度传感器, 第一开关模块串接在主控单元和正常放电电路之间用于控制锂电池与主控单元的连接, 第二开关模块串接在在大电流放电电路之间用于控制锂电池和大电流放电电路之间的通断, 其中第一开关模块、第二开关模块为电控开关。

主控单元采用单片机来实现控制, 单片机连接计时单元, 用于计算单片机的控制开关模块的时间信息, 也可以通过单片机内部的计时器来进行计时。

具体运行流程如图 4 所示。首先通过主控模块实时采集电池温度, 判断采集的温度是否低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 若监测采集的温度高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则启动第一开关模块, 连接正常放电电路; 若监测采集的温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则断开第一开关模块, 启动第二开关模块, 连接大电流放电电路, 持续设定时间, 大电流短暂激活电芯, 使其高效放电。

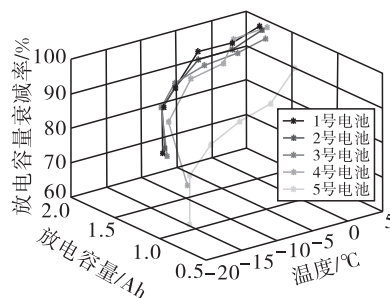


图 2 不同电池在低温下的容量变化图

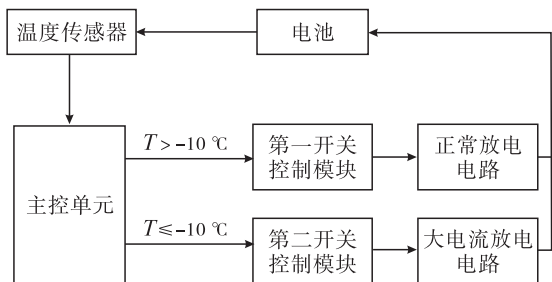


图 3 系统结构图

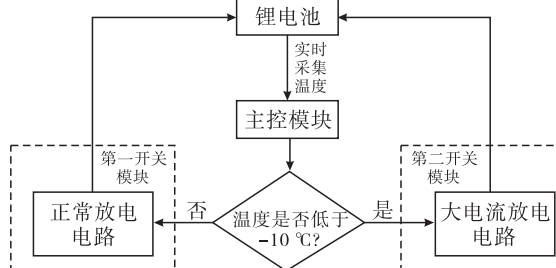


图 4 系统运行流程图

该系统可以适用于不同应用领域的锂电池, 尤其针对退役电池, 只需增加单片机、大电流放电电路及对应的控制开关即可实现。以电动车锂电池为例, 一般电动车锂电池为车载用电器或电机供电, 在锂电池与电机之间一般设置有主正继电器用于控制。为了实现低温下的高效放电, 锂电池通过第一开关模块连接主正继电器, 主正继电器连接电机, 锂电池通过第二开关模块连接大电流放电电路, 单片机用于控制第一开关模块、第二开关模块的断开闭合。单片机通过温度传感器获取锂电池环境温度, 如锂电池为车载电机供电, 采集主正继电器的状态即可, 当采集主正继电器处于闭合状态则说明此时整车控制器需要锂电池向车载电机供电, 或采集整车上电信号来说明此时锂电池需要向外部供电。当采集到锂电池需要向负载电机供电的信号后, 判断温度是否大于设定温度阈值, 若是, 则说明此时电池未处于低温状态, 控制第一开关模块直接闭合, 锂电池正常放电, 第二开关模块始终处于断开。当温度小于设定温度阈值, 说明此时锂电池处于低温状态, 此时先控制第一开关模块断开, 第二开关模块闭合, 并持续设定时间, 设定时间达到后, 断开第二开关模块, 同时闭合第一开关模块, 然后正常放电。

为了验证系统的可行性, 基于 proteus 搭建低温高效放电系统模型(图 5)。该模型主要包含主控最小系统模块、温度采集模块与大电流放电模块。当接收到触发信号后, 温度检测模块会检测电池所处的环境温度。若环境温度低于设定阈值, 再点击开关, 大电流放电模块会启动, 激活电池后, 再接通正常的放电电

路;若环境温度不低于设定阈值,大电流电路不启动,接通正常放电电路。

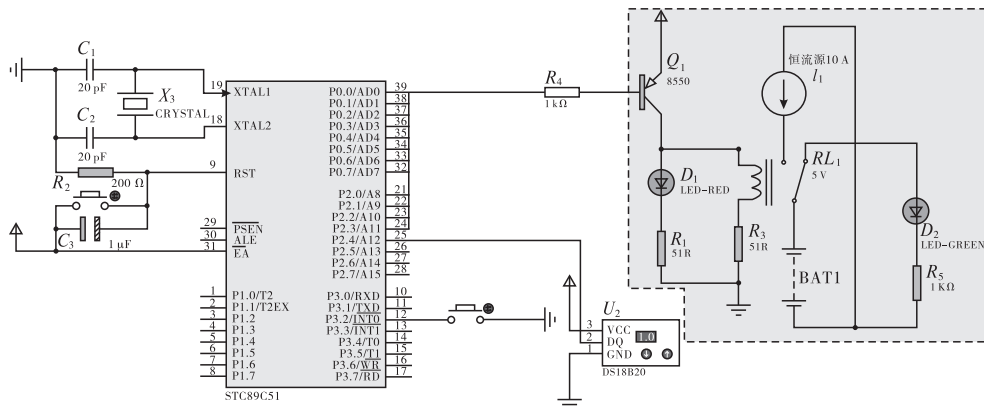


图 5 系统电路原理图

图 5 虚线框内为大电流放电电路,恒流源模块负责为电池低温激活提供大电流,当继电器控制的单刀双掷开关与右边开关接通时即为第一开关控制模块开启,启动正常放电电路为负载供电;当单刀双掷开关与左边开关接通时即为第二开关模块开启,先启动大电流放电电路,达到设定的放电时间后,第二开关控制模块断开,第一开关控制模块接通,继续正常放电。

4 实验验证

为了验证系统可靠性,以国内某汽车企业退役下来的 18650 锂电池为实验对象,随机选取 5 节 18650 锂电池,按照国家标准^[9]在 -10℃ 下对它进行第一次 1 C 倍率正常充放电实验,再以 1 C 倍率正常充满,静置 6 h 后,再以 2 C 倍率的电流快速放电 4 s,紧接着以 1 C 倍率的电流继续放电,最后以 1 C 倍率正常充电,以 1 C 的倍率放电,实验结果见表 2。

表 2 -10℃ 下退役电池容量对比表

样本 序号	第一次充放电 (未加装本系统)			第二次激活充放电 (加装本系统)			第三次充放电 (未加装本系统)		
	充电电量 /Ah	放电电量 /Ah	衰减电量 /Ah	激活充电 电量/Ah	激活放电 电量/Ah	增加电量 /Ah	充电电量 /Ah	放电电量 /Ah	衰减电量 /Ah
1	1.518 1	1.478 5	0.039 6	1.480 3	1.512 7	0.032 4	1.517 9	1.489 6	0.028 3
2	1.710 2	1.667 0	0.043 2	1.679 7	1.711 9	0.032 2	1.717 4	1.687 7	0.029 7
3	1.697 8	1.654 1	0.043 7	1.666 8	1.690 7	0.023 9	1.691 2	1.673 2	0.018 0
4	1.599 5	1.578 4	0.021 1	1.582 1	1.602 7	0.020 6	1.601 8	1.587 7	0.014 1
5	1.605 5	1.575 6	0.029 9	1.584 9	1.610 3	0.025 4	1.607 9	1.586 6	0.021 3

由表 2 可知,随机选取的 5 节退役锂电池在低温下放电容量均出现明显的衰减,在采用本文设计的放电系统以后,5 节电池的放电容量出现了明显的增加。利用第二次的激活放电电量减去第二次的正常充电电量,可以发现 5 节电池的容量增幅分别为 0.032 4 Ah、0.032 2 Ah、0.023 9 Ah、0.020 6 Ah、0.025 4 Ah,当修复正常充放电以后,其放电容量仍然出现明显衰减,由此可以说明本文提出的放电系统可以使退役锂电池在低温下高效地放电。另外,通过对比第一次和第三次的充放电的衰减电量,发现在经过本系统一次充放电过后,尽管后面不再使用本系统充放电,电池的整体充放电容量相比原来普通充放电都得到一定的提升,容量衰减分别减少了 0.011 3 Ah、0.013 5 Ah、0.025 7 Ah、0.007 0 Ah、0.008 6 Ah。这说明本系统确

实能够在低温下提高退役电池的放电性能,使其放出更多电量,同时也能激活电池自身放电性能,即使不采用本系统,后续依然能够高效放电。

图6为退役电池梯次利用图。在实现梯次利用过程中,大多数寒冷地区的通信基站以及储能电站地处空旷偏远的位置,周围无遮挡建筑,电池所处的环境温度极低,其容量衰减现象更为严重。光伏储能和家庭储能、电动车等均有低温环境下的使用场景,也会出现电池容量衰减的现象。因此,将该系统嵌入需要退役电池供能的各级设备中,可以最大限度地提高电池在低温下的放电性能,提高退役电池梯次利用率,保障退役电池能够在低温下安全高效的运行。

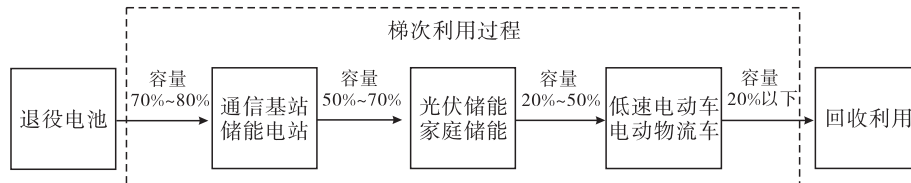


图6 退役电池梯次利用图

5 结论

在实现退役电池梯次利用的过程,存在低温下电池容量大幅度衰减的现象,常见的加热电池方法尽管可以暂时减缓这一问题,但是存在需要较高的温控精度以及温度均衡性控制、结构设计较复杂、成本较高、安全性差的缺点。基于此,本文设计了低温高效放电系统。该系统包含了主控最小系统模块、温度采集模块与大电流放电模块等,核心原理是当电池处于低温下时,采用设计的大电流放电电路,设定合适的放电时间,以较大电流激活低温下的电池,使其高效放电。实验数据表明,在低温环境中,随机选取的退役电池均能释放更多的电量;经过系统激活后的电池再次放电时,容量衰减均有所减少,该系统使得退役电池在低温下的放电性能得到了提高。因此,各级设备可以根据使用退役电池的真实情况设计相关参数,实现退役锂电池的高效梯次利用。

参考文献:

- [1] 张业佳. 中国新能源汽车的“优”与“忧”:中国新能源汽车产业发展现状与建议[J]. 智能网联汽车, 2023(5):64-67.
- [2] 许青,滕婕. 退役动力电池多场景梯次利用优化研究[J]. 太阳能学报, 2023,44(10):541-549.
- [3] 余杰,廖思阳,徐箭,等. 考虑环境温度的磷酸铁锂电池 SOC 实时修正及频率控制方法[J]. 电工技术学报, 2023,38(17):4564-4573.
- [4] 袁子贺. 低温条件下锂离子动力电池的动态放电特性研究[D]. 天津:河北工业大学, 2021.
- [5] HU X, ZHENG Y, HOWEY D A, et al. Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: recent advances and perspectives[J]. Progress in energy and combustion science, 2020,77:100806.
- [6] XIONG R, SUN F C, CHEN Z, et al. A data-driven multi-scale extended Kalman filtering based parameter and state estimation approach of lithium-ion polymer battery in electric vehicles[J]. Applied energy, 2014,113(1):463-476.
- [7] 王发成,张俊智,王丽芳. 车载动力电池组用空气电加热装置设计[J]. 电源技术, 2013,37(7):1184-1187.
- [8] 李罡,黄向东,符兴锋,等. 液冷动力电池低温加热系统设计研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017,44(2):26-33.

- [9] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用电池管理系统技术条件:GB/T 38661—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.

Efficient discharge control strategy of echelon power lithium battery at low temperature

LI Junkai¹, ZHANG Chijian²

(1. School of Automotive Technology,

Anhui Vocational College of Defense Technology, Lu'an 237005, China;

2. School of Physics and Electronic Information,

Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: In order to solve the problem of decommissioned batteries' capacity attenuation when discharged at low temperature, an efficient discharge control system for decommissioned batteries is designed, and the system model is built by proteus, and the experimental results show that; in the low-temperature environment, the high-efficiency discharge control system makes randomly selected decommissioned batteries discharge more than 0.032 4 Ah, 0.032 2 Ah, 0.023 9 Ah, 0.020 6 Ah, respectively, 0.025 4 Ah of electricity, and in addition, when the battery activated by the system was discharged again, the capacity attenuation was reduced by 0.011 3 Ah, 0.013 5 Ah, 0.025 7 Ah, 0.007 0 Ah, 0.008 6 Ah, respectively, which indicates that the system can accurately control the discharging current and the discharging time, and activate the retired battery's electric core at low temperature to release more electricity. The system overcomes the problems of uneven and imprecise heating of mainstream heating methods.

Keywords: decommissioned batteries; echelon utilization; low temperature activation; high-efficiency discharge control system

(责任编辑:王新亮)

引用格式 李珺凯,张持健. 低温下梯次动力锂电池高效放电控制策略[J]. 山东航空学院学报,2025,42(2):73-78.

LI J K,ZHANG C J. Efficient discharge control strategy of echelon power lithium battery at low temperature[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics,2025,42(2):73-78.