

高倍率脉冲放电锂电池的功率输出特性*

焦绍光¹, 柳应全², 鲁军勇²

(1. 海军工程大学 教研保障中心, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:由于电池内阻和极化现象的存在, 锂电池在放电的瞬间会出现较大的电压跌落, 高倍率脉冲放电锂电池更是如此。为了研究高倍率脉冲放电锂电池的功率输出特性, 探讨温度、荷电状态和老化等因素对电池功率性能的影响规律, 定义了锂电池的功率特性曲线, 搭建了高倍率电池测试平台, 并从温度、荷电状态和老化3个阻抗敏感因素开展实验研究。研究方法和结论对后期开展锂电池系统的峰值功率评估和功率曲线预测有一定的指导意义。

关键词:高倍率; 脉冲放电; 电压跌落; 功率性能; 电池老化

中图分类号:TM912 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2023)06-150-07

Power output characteristics of high-rate pulse-discharged lithium battery

JIAO Shaoguang¹, LIU Yingquan², LU Junyong²

(1. Teaching and Research Support Center, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Due to the existence of internal resistance and polarization, there will be a large voltage drop at the discharging moment of the lithium battery, especially the high-rate pulse-discharged lithium battery. The power characteristics of high-rate pulse-discharged lithium battery were studied, as well as the influence rules of temperature, state of charge and aging on battery power performance. The power characteristic curve of lithium battery was defined, a high-rate battery test plat-form was built, and experimental research was carried out from three impedance sensitive factors: temperature, state of charge and aging. The research methods and conclusions are of certain significance for the peak power evaluation and power curve prediction of lithium battery system.

Keywords: high-rate; pulse-discharged; voltage drop; power characteristics; battery aging

锂电池系统的功率性能评估正在成为先进电池管理系统中的关键技术之一^[1-3]。功率性能是指电池系统输入或输出功率的能力, 是决定整个能量系统安全性、可靠性和效率的主要因素。在电磁发射等超大功率应用场合, 电池系统输出功率短缺不仅会延长能量传输时间、降低连发效率, 严重时还可能导致任务失败甚至产生安全隐患或事故。因此, 进行功率性能分析是电磁发射用锂电池系统电池管理中必须解决的问题。

功率特性是评价动力电池性能的一项重要指标, 直接反映着电池接受电流和提供电流的能力。因此, 对锂离子动力电池的功率特性进行定量定性的研究是掌握动力电池性能、科学管理动力电池的必备环节。目前, 国外的动力电池功率测试标准有 USABC^[4] 提出的联邦城市驾驶工况

(federal urban driving schedule, FUDS) 测试、动态应力测试(dynamic stress test, DST) 和 INEEL^[5] 提出的混合脉冲功率特性(hybrid pulse power characterization, HPPC) 测试; 国内有孙逢春等^[6] 提出的北京客车动态应力测试(Beijing bus dynamic stress test, BBDST) 等。大体可以概括为控制功率脉冲和控制电流脉冲两种模式。其中, FUDS 测试、DST 和 BBDST 属于控制功率脉冲模式, HPPC 测试属于控制电流脉冲模式。针对两种测试模式的应用主要基于不同电池的实验研究进行。文献[7]对常见电化学储能器件在两种测试模式下的性能差异进行对比, 认为超级电容器和磷酸铁锂电池在两种测试模式下的性能相近。文献[8]综合分析了恒流和恒功率测试模式下磷酸铁锂电池的性能和工作特性, 认为恒功率模式

* 收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52307076, 92266202, 92266106)

作者简介: 焦绍光(1977—), 男, 河北辛集人, 副研究员, 硕士, E-mail: hgchengguo@126.com;

柳应全(通信作者), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士, E-mail: lauvictor@163.com

下由于电池不能充满电,倍率性能稍差。文献[9]认为应用 HPPC 测试法评价能量型锂离子动力电池的功率特性规律一致,且 HPPC 测试法所得的功率与脉冲时间及电流有关,脉冲时间越短、脉冲电流越大,相应的功率越大。

以上研究均是对动力电池的功率测试标准进行对比分析,未涉及对动力电池功率特性的影响因素的定性研究。由于应用背景的特殊性,对高倍率脉冲放电锂电池的研究更是罕见。在单个实验中固定电流条件可以排除由于电流波动对实验结果产生的影响,且相比恒功率控制,恒电流控制更能突显测试条件对输出功率的影响。因此,本文主要采用恒电流脉冲控制的测试方法分析高倍率锂离子动力电池的功率特性。阻抗是影响动力电池功率性能的决定性因素,而温度、荷电状态(state of charge, SOC)和老化被认为是导致电池阻抗变化的诱因^[10-11],因此,本文设计了温度、SOC 和老化 3 组实验进行定量的研究。其中,温度实验是基于同一种电池在不同温度下的放电实验,SOC 实验是基于两型不同体系电池在各自额定功率附近的放电实验,老化实验是基于同一支电池在寿命周期内的放电实验。为了更直观地表征输出功率的变化规律,本文采用相对功率 - SOC 曲线作为评估输出功率性能的指标,通过定量分析与实验结合的方式研究了温度、SOC 和老化 3 个因素对电池输出功率特性的影响。

1 锂电池的功率特性曲线

锂电池的功率特性可以通过 $V-I$ 曲线描述,如图 1(a) 所示。4 条红色虚线分别表示工作电流和电压的上下边界,蓝线表示动力电池的工作曲线,工作点可在蓝线和红虚线包围的灰色区域内移动。为了方便讨论,定义电池的放电电流和功率为正方向,充电电流和功率为负方向。

动力电池的功率 P 可表示为:

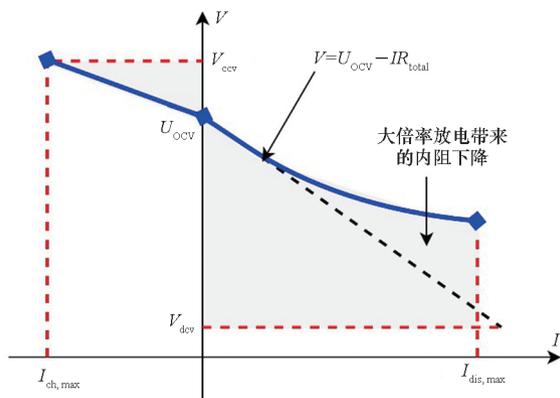
$$P = U_{OCV}I - I^2R_{total} \quad (1)$$

式中, U_{OCV} 表示电池开路电压, I 表示电池工作电流, R_{total} 表示电池直流阻抗, 可得如图 1(b) 所示 $P-I$ 曲线。为求解 P 的最大值, 可对电流 I 求偏导, 同时考虑 $R_{total} = R(I)$, 可得:

$$\frac{\partial P}{\partial I} = U_{OCV} - 2IR(I) - I^2R'(I) \quad (2)$$

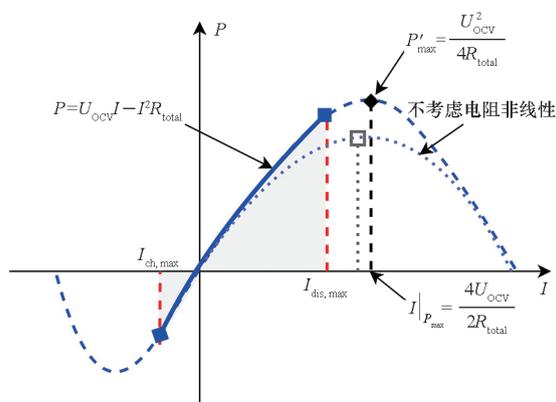
式中, $R'(I)$ 表示 R_{total} 对 I 的一阶导数。令式(2)为 0, 可求得峰值功率和峰值功率对应的电流值。通常锂离子动力电池的实际工作电流无法达到 $I|_{P_{max}}$, 图 1(b) 中的 P'_{max} 为理论峰值功率, 因此, 实

际的电池峰值功率为最大电流对应的工作点。



(a) $V-I$ 曲线

(a) $V-I$ curve



(b) $P-I$ 曲线

(b) $P-I$ curve

图 1 锂电池的 $V-I$ 曲线和 $P-I$ 曲线

Fig. 1 $V-I$ curve and $P-I$ curve of the lithium power battery

2 锂电池输出功率的影响因素

本节主要分析温度、SOC 和电池老化 3 个因素对电池输出功率的影响。

2.1 温度

电池的功率特性对温度有较高的依赖性,这是由于温度会影响锂离子的活度和电荷传输能力^[12]。此外,温度产生的熵变还会对动力电池的 OCV 特性产生影响,并间接影响电池的功率。温度对电池功率的影响如图 2 所示。

2.2 SOC

锂电池的电气参数在 SOC 区间呈现波动,其中,欧姆内阻 R_{Ω} 大体呈两端高中间低的马鞍形分布,电气参数的变化必然会引起输出电压的变化,从而体现在输出功率上。然而, SOC 对电池功率的影响最主要体现在开路电压的单调变化。随着 SOC 的下降,开路电压减小,尤其是在 SOC

的低区间,如图 3 所示。

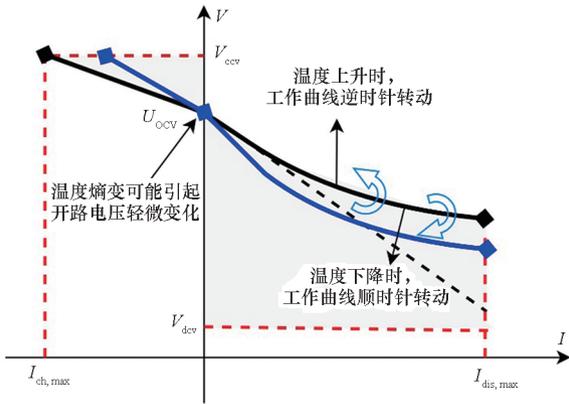


图 2 温度对锂电池工作曲线的影响
Fig. 2 Influence of temperature on the lithium battery work curve

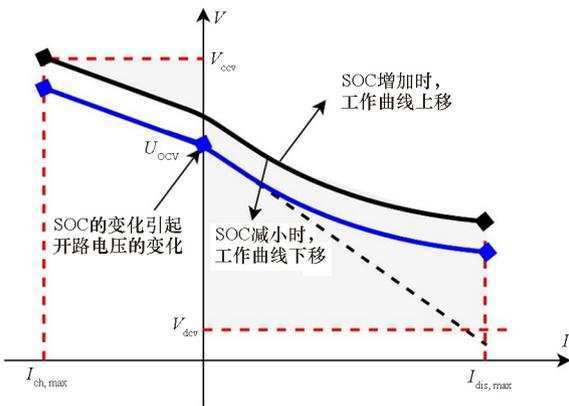


图 3 SOC 对锂电池工作曲线的影响
Fig. 3 Influence of SOC on the lithium battery work curve

2.3 电池老化

锂离子电池的性能随着时间(日历老化)和使用(循环寿命)而下降^[13-14],这是由发生在电极/电解质界面和活性材料中的大量反应过程引起的。当电池达到寿命终点时,电池内阻大幅上升,且伴随着容量和功率的衰减,带来工作过程中欧姆热的增加和能量效率的下降。此外,电极材料的流失还会引起电极电势的下滑,加剧输出功率的衰减^[15]。对纯电动汽车而言,功率衰减会引起加速和制动阶段驾驶性能的恶化^[16],Saxena 等指出,电池老化会带来纯电动汽车加速时间的延长,尤其是在 SOC 较低时^[17]。老化对电池功率的影响如图 4 所示。

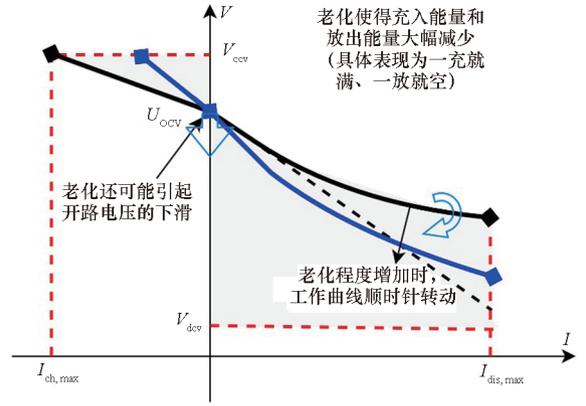


图 4 老化对锂电池工作曲线的影响
Fig. 4 Influence of aging on the lithium battery work curve

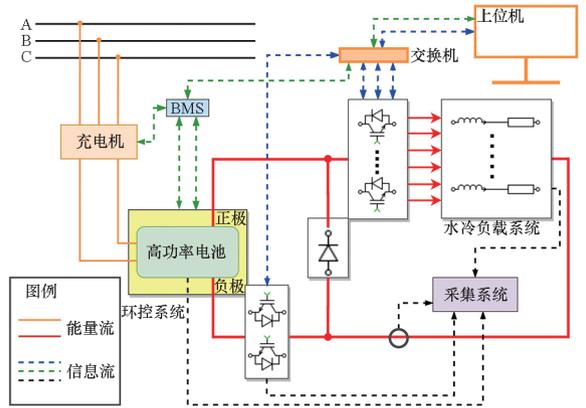


图 5 高倍率电池测试平台
Fig. 5 Test platform of high-rate battery

3 实验设置和结果

搭建高倍率单体电池测试平台,平台架构和拓扑结构如图 5 所示。实验的温控条件和测试对象如图 6 所示。



图 6 温控条件和测试对象
Fig. 6 Temperature control condition and test battery

4 实验结果和分析讨论

4.1 温度实验

为研究温度对锂电池功率输出特性的影响,

设计一组 10%、30% 和 50% SOC 电池在不同温度 (15 °C、25 °C、30 °C) 下的脉冲放电实验,实验对象为 9 支高倍率 LiFePO₄/C 电池,容量 20 Ah。实验步骤如下:

步骤 1: 电池 1 C 充满电至 3.65 V,分 3 组 (每组 3 支)。

步骤 2: 1 C 恒流放电,截止条件实际容量 10% SOC (30% SOC 和 50% SOC)。

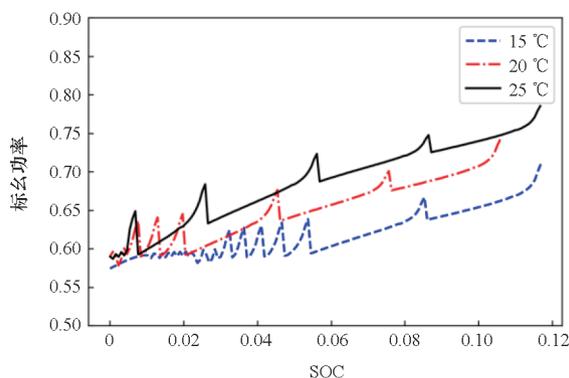
步骤 3: 以 15 °C 为例,15 °C 静置 8 h,记录静置电压 (连接充放电电机)。

步骤 4: 400 A 恒流放电 4 s,停 1 s,循环脉冲直至截止电压 2.0 V,数据采集周期 0.1 s (放电倍率 20 C)。

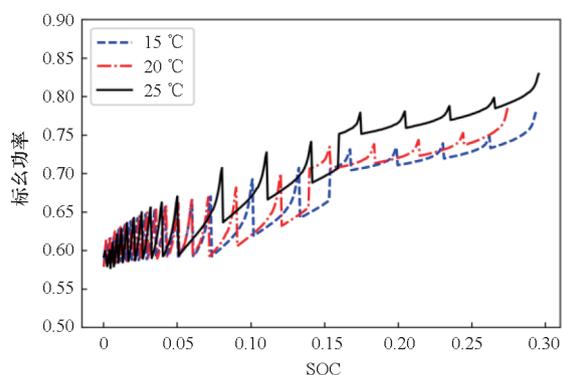
步骤 5: 在 20/25 °C 下重复步骤 3~4。

实验得到 9 支电芯的电池电压和电流曲线,将二者的乘积作为输出功率曲线,并折算成峰值功率 (P_{peak}) 的倍数,如图 7 所示。

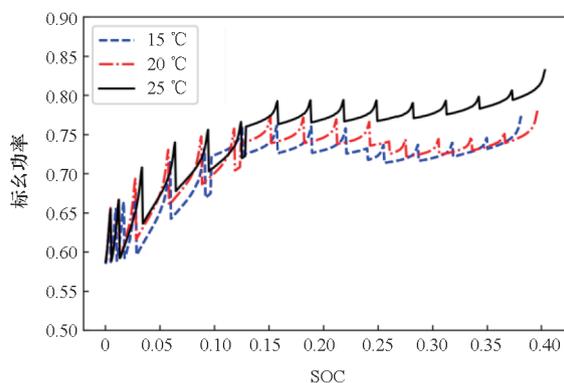
从图 7 可以看出:①当 SOC 低于 10% 时,电池功率对温度十分敏感;②当 SOC 高于 30% 时,25 °C 条件下的电池功率明显高于 15 °C 和 20 °C。因此,在冬季为提高电池的输出功率和能量效率,应通过加热使电池温度至少达到 25 °C。不同 SOC 条件下,电池平均输出功率曲线如图 8 所示。



(a) 10% SOC



(b) 30% SOC



(c) 50% SOC

图 7 温度和 SOC 对锂电池功率 - SOC 曲线的影响
Fig. 7 Influence of temperature and SOC on the lithium battery power - SOC curve

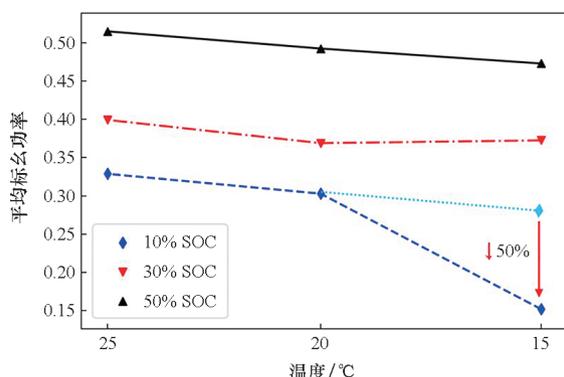


图 8 温度和 SOC 对动力电池平均功率的影响
Fig. 8 Influence of temperature and SOC on the average power of power battery

从图 8 可以看出:①SOC 处于 50% 条件下,平均标幺功率与温度的关系满足 Arrhenius 关系式,即近似呈线性关系;②SOC 处于 30% 条件下,15 °C 和 20 °C 工作温度时平均功率相当,即电池功率对温度的依赖性较小;③SOC 处于 10% 条件下,15 °C 工作温度时,电池功率对 SOC 更敏感,由于 SOC 的不足使得平均功率的衰减增加了 50%。因此,高倍率动力电池应避免深度放电,尽量保证电池的工作 SOC 在 20% 以上。

4.2 SOC 实验

对两种锂离子动力电池 (A 型 Li(Ni_{1-x-y}Co_xMn_y)O₂/Li_xC₆ 和 B 型 LiFePO₄/C) 进行恒电流脉冲控制,室温条件下测试倍率分别为 0.5 C 和 22 C,实验步骤如下:

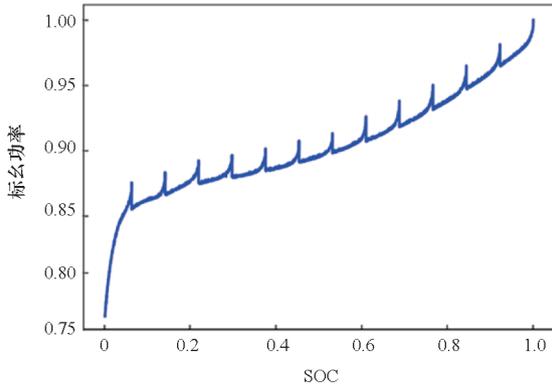
步骤 1: 25 °C 下电池 1 C 充至满电状态 (A 型 4.2 V 截止, B 型 3.65 V 截止)。

步骤 2: 25 °C 静置 8 h,记录静置电压 (连接充放电电机)。

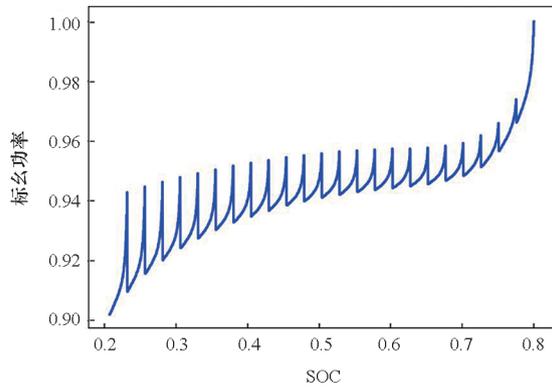
步骤 3: A 型电池 1 A 恒流放电 1 200 s, 停 600 s, 循环脉冲直至截止电压 3.0 V, 数据采集周期 1 s (放电倍率 0.5 C)。

步骤 4: B 型电池 400 A 恒流放电 4 s, 停 1 s, 循环脉冲直至截止电压 2.0 V, 数据采集周期 0.1 s (放电倍率 22 C)。

实验得到一个循环周期内的电池电压和电流曲线, 将二者的乘积作为输出功率曲线, 并折算成峰值功率 (P_{peak}) 的倍数, 如图 9 所示。



(a) 三元聚合物电池的脉冲功率输出
(a) Pulse power output of ternary polymer cell



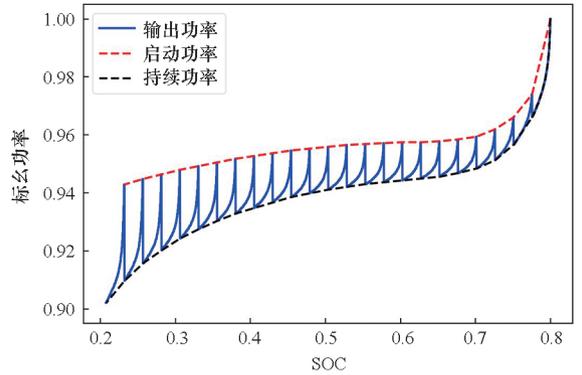
(b) 高倍率 LFP 电池的脉冲功率输出
(b) Pulse power output of high-rate LFP battery

图 9 两种锂离子动力电池的功率 - SOC 曲线
Fig. 9 Power - SOC curve of two types lithium-ion power battery

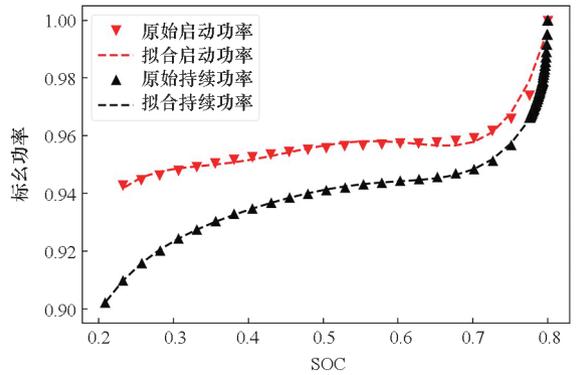
可以看出, 由于脉冲放电特性, 输出功率在每个脉冲的上升沿会出现一个抬升, 并在数秒内沿指数衰减到稳定值, 称脉冲上升沿的瞬时功率为启动功率 P_{ign} , 稳定下来的工作功率为持续功率 P_{con} , 如图 10 (a) 所示。分别对磷酸铁锂 (LiFePO₄, LFP) 电池高倍率放电过程中启动功率和持续功率曲线进行多项式拟合可以得到:

$$\begin{cases} P_{ign} = f(x_{soc}) = 24.173x_{soc}^5 - 56.915x_{soc}^4 + 51.921x_{soc}^3 - \\ \quad 22.952x_{soc}^2 + 4.958x_{soc} + 0.5271 \\ P_{con} = f(x_{soc}) = 11.955x_{soc}^5 - 27.879x_{soc}^4 + 25.693x_{soc}^3 - \\ \quad 11.878x_{soc}^2 + 2.863x_{soc} + 0.6368 \end{cases} \quad (3)$$

启动功率和持续功率的拟合结果如图 10 (b) 所示。从图 10 (b) 可以看出, 拟合多项式可以很好地描述启动功率和持续功率的特性。利用该拟合公式可以对负载的功率耐受能力进行前期评估, 防止出现由能源功率波动引起的性能下降。



(a) 脉冲放电锂电池的输出功率、启动功率和持续功率
(a) Output power, ignition power, continue power of pulse-discharged lithium battery



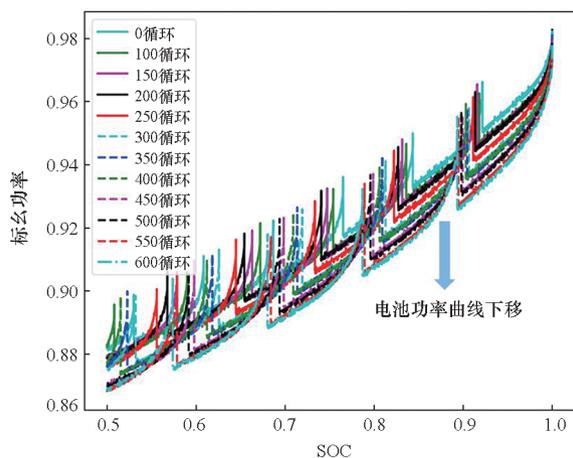
(b) 启动功率和持续功率的拟合结果
(b) Polynomial fitting results of the ignition power and the continue power

图 10 启动功率和持续功率及多项式拟合结果
Fig. 10 Ignition power, continue power and polynomial fitting results

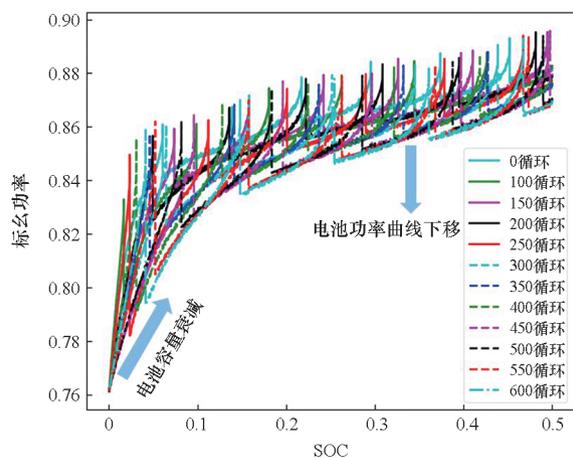
4.3 电池老化实验

在 Bole 等提供的开放数据集^[18]中, 一组 18650 电芯在室温下随机脉冲放电循环, 每间隔 50 个大循环在满电情况下进行一次脉冲放电测试, 实验进行 600 个大循环, 将脉冲放电过程中得到的电压和电流的乘积作为输出功率曲线, 并折

算成峰值功率(P_{peak})的倍数,如图 11 所示。



(a) SOC: 0.5 ~ 1.0



(b) SOC: 0 ~ 0.5

图 11 不同循环次数下电池的功率-SOC 曲线

Fig. 11 Power-SOC curve of battery in different cycles

从图 11 可以看出,随着电池老化程度的增加,电池功率曲线明显下移,并且伴随着电池容量的衰减。不同循环次数下,电池的平均功率曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出,在前 600 个循环,电池平均功率衰减不是很明显,衰减比例大约占 2.7%。在电池寿命的终点,电池的内阻可能会加倍^[19-20],平均功率会衰减至 50% 左右,因此,在 SOC 较低时启动或者放电会变得十分糟糕。

5 结论

在电磁发射应用锂电池系统中,对功率性能的研究不仅仅是为了电池的寿命安全,更多的是出于对发射任务安全的考虑。本文定义了锂电池的功率特性曲线,并通过放电实验和对比分析,从温度、SOC 和电池老化 3 个角度开展研究,得到了高功率脉冲放电锂电池功率输出的以下几点

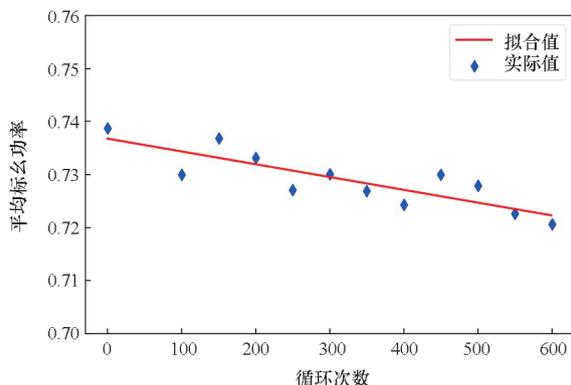


图 12 电池老化对锂电池平均功率的影响

Fig. 12 Influence of battery aging on the average power

规律:

1) 不同于普通的放电工况,脉冲放电锂电池的输出功率包括电池启动功率 P_{ign} 和持续功率 P_{con} , 其与 SOC 的关系可以通过多项式拟合;

2) SOC 为 50% 时,温度对电池功率的影响符合 Arrhenius 关系式,平均标幺功率变化率约为 0.5%/K,若 SOC 低于 10% 且工作温度低于 20 °C,需严格考虑 SOC 不足引起的功率剧降;

3) 在前 600 个循环,电池老化对电池功率的影响较小,平均功率变化率约为 0.5%/100 Cycles。

参考文献 (References)

[1] 柳应全,鲁军勇,龙鑫林,等. 储能用蓄电池模型参数的动态辨识[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 87-92.
LIU Y Q, LU J Y, LONG X L, et al. Dynamic identification of model parameters for energy storage batteries[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 87-92. (in Chinese)

[2] LONG X L, LU J Y, WU Y T, et al. Research on high rate lithium-ion batteries for electromagnetic launcher [C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.

[3] LU J Y, LIU Y Q, LONG X L, et al. Mathematical modeling and frequency-domain characteristics of a periodic pulse-discharged lithium-ion battery system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1801-1809.

[4] USABC. USABC electric vehicle battery test procedures manual; DE96009671[R]. Rev. ed. USA: Department of Energy, 1996.

[5] Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. FreedomCAR battery test manual for power-assist hybrid electric vehicles; Doe/Id-11069[R]. USA: Department of Energy, 2003.

[6] 孙逢春,孟祥峰,林程,等. 电动汽车动力电池动态测试工况研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(3): 297-301.
SUN F C, MENG X F, LIN C, et al. Dynamic stress test profile of power battery for electric vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(3): 297-301.

- (in Chinese)
- [7] 王超, 郭继鹏, 钟国彬, 等. 电化学储能器件恒流与恒功率充放电特性比较[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1313 – 1320.
WANG C, GUO J P, ZHONG G B, et al. Comparisons on the characteristics of electrochemical energy storage devices with the constant current testing and constant power testing[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(6): 1313 – 1320. (in Chinese)
- [8] 郭继鹏, 钟国彬, 徐凯琪, 等. 磷酸铁锂电池恒流和恒功率测试特性比较[J]. 蓄电池, 2017, 54(3): 109 – 115.
GUO J P, ZHONG G B, XU K Q, et al. The characteristics of LiFePO₄ batteries by comparison constant power test with constant current test [J]. Chinese LABAT Man, 2017, 54(3): 109 – 115. (in Chinese)
- [9] 陈绪杰, 李连兴, 苏岭. 电动汽车用锂离子动力电池的功率性能研究[C]//2013 中国汽车工程学会年会论文集, 2013: 1132 – 1135.
CHEN X J, LI L X, SU L. Study on the power performance of lithium ion battery for EV [C]//Proceeding of 2013 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering, 2013: 1132 – 1135. (in Chinese)
- [10] LI M J, YANG J X, SHI Y Q, et al. Soluble organic cathodes enable long cycle life, high rate, and wide-temperature lithium-ion batteries [J]. Advanced Materials, 2022, 34(5): 2107226.
- [11] FARMANN A, WAAG W, SAUER D U. Adaptive approach for on-board impedance parameters and voltage estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2015, 299: 176 – 188.
- [12] CHIN C S, GAO Z, ZHANG C Z. Comprehensive electro-thermal model of 26650 lithium battery for discharge cycle under parametric and temperature variations[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101222.
- [13] VETTER J, NOVÁK P, WAGNER M R, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1/2): 269 – 281.
- [14] AMINE K, CHEN C H, LIU J, et al. Factors responsible for impedance rise in high power lithium ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2001, 97/98: 684 – 687.
- [15] BARCELONA S, PIEGARI L. Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101310.
- [16] SONG J, ANDERSON R D, OLIVER D A, et al. System and method for managing a power source in a vehicle: US8698348B2[P]. 2014 – 04 – 15.
- [17] SAXENA S, LE FLOCH C, MACDONALD J, et al. Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models [J]. Journal of Power Sources, 2015, 282: 265 – 276.
- [18] BOLE B, KULKARNI C S, DAIGLE M J. Adaptation of an electrochemistry-based li-ion battery model to account for deterioration observed under randomized use [C]// Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2014.
- [19] PAI H Y, LIU Y H, CHEN G J, et al. A novel parameters identification method of lithium-ion battery equivalent circuit model under dynamic stress test [C]//Proceedings of International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, 2023.
- [20] LIU J L, DUAN Q L, MA M N, et al. Aging mechanisms and thermal stability of aged commercial 18650 lithium ion battery induced by slight overcharging cycling[J]. Journal of Power Sources, 2020, 445: 227263.