

极地科考船舶储能系统热管理模块设计

聂伟民, 陈自强, 周诗尧, 黄德扬, 车驰东

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: **目的** 设计一种适用于极地科考船储能系统的锂离子电池组热管理模块, 以降低低温对电池性能的影响, 并延长其使用寿命。**方法** 通过实验获得高寒环境下锂离子电池电气特性参数, 明确高寒条件下热管理模块的功能需求。在此基础上进行热管理模块硬件设计及策略开发, 并搭建电池低温测试实验平台进行验证。**结果** 将 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下电池表面温度预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以低倍率放电时, 电池的可用容量可提升至额定容量的 34.7%, 并且提高预热温度能够增加电池的可用容量。**结论** 该热管理模块能够有效地对锂离子电池组进行热管理, 提高高寒环境下科考船储能系统的可用容量。

关键词: 极地科考船舶; 热管理模块; 储能系统; 锂离子电池

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.12.009

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)12-0050-05

Design of Thermal Management Module for Energy Storage System of Polar Research Ship

NIE Wei-min, CHEN Zi-qiang, ZHOU Shi-yao, HUANG De-yang, CHE Chi-dong

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Objective To design a lithium-ion battery pack thermal management module suitable for high-cold environment to reduce the impact of low temperature on battery performance and extend its service life. **Methods** The electrical characteristics of lithium-ion battery in high-cold environment were obtained through experiments. The functional requirements of thermal management module under high-cold conditions could were determined. Based on this, the hardware design and strategy development of the thermal management module was carried out. And the experimental platform for low temperature test of battery was built to verify its feasibility. **Results** When the surface temperature of the battery was preheated to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ at an ambient temperature of $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the battery was discharged at a low rate, the available capacity of the battery might be improved to 34.7% of the rated capacity. And the usable capacity of the battery could be increased by increasing the preheating temperature. **Conclusion** The thermal management module can effectively manage the lithium-ion battery packs and improve the usable capacity of the polar research ship energy storage system in high-cold environment.

KEY WORDS: polar research ship; thermal management module; energy storage system; lithium-ion battery

随着科学考察的持续深入, 南北极地海洋资源价值被不断发现。南极大陆架蕴藏着极为丰富的石油、

天然气、矿产资源, 两极地区还具有丰富的风能、潮汐能等隐藏能源。因此极地成为了世界各国未来发展

收稿日期: 2018-09-28; 修订日期: 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51671119)

作者简介: 聂伟民(1995—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为动力电池故障诊断

通讯作者: 陈自强(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电池系统辨识与故障诊断。

必争的战略空间^[1]。

极地科考船舶是探索南北极的重要工具,而采用综合电力推进的科考船相比于传统柴油机船舶具有节能减排、降噪减振、舱室有效空间大、动态响应能力强等优点。综合电力推进系统主要由柴油发电机组、变压器、推进电动机、储能系统等设备组成,储能系统能有效缓解推进装置对船舶电网的冲击^[2]。储能系统选用体积、循环寿命、能量密度等性能均优于其他类型蓄电池的锂离子电池^[3]。极地科考船舶的航行区域气候恶劣,由 CCS 船级社发布的极地船舶指南所示,冬季南北极地区均温可达 $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]。在高寒环境下,锂离子电池的功率特性与容量特性均会显著下降,因此亟需开发一种适用于高寒环境下锂离子电池组热管理装置,来有效提高船舶电网的稳定性,有助于降低设备维护成本。

目前国内外机构对锂离子电池组热管理技术的研究主要还是针对散热方面,即通过风冷、液冷、相变材料等方式来降低锂离子电池的温度,而关于高寒环境下热管理技术的研究相对较少^[5]。Stuart 等^[6]采用交流电对铅酸电池、镍氢电池进行内部加热,该加热方式时间短、效率高,但交流电可能造成电池内部性能变化、减少其使用寿命。张承宁等^[7]提出的线金属膜加热法是将铜膜贴于锂离子电池表面后通以电流进行加热,该方法的加热效率高,温度分布更均匀,有助于提升电池的可用容量,但对控制系统的要求较高。Song 等^[5]采用热空气对电池组进行预加热,加热后电池性能提升明显,但结构较为复杂。

文中设计了一种极地科考船储能系统锂离子电池组热管理模块及其控制策略,并通过实验验证,该模块能够有效提高锂离子电池组在高寒环境下的总放电量。

1 锂离子电池电气特性

获取锂离子电池在高寒环境中的热特性,包括低温对锂离子电池容量、欧姆内阻、极化内阻以及放电深度等性能的影响是研究与开发储能系统热管理模块的基础。文中以国内某厂生产的 10 Ah 软包(120 mm×65 mm×13 mm)镍钴锰酸锂离子电池来进行锂离子电池的低温热特性测试。其额定电压为 3.7 V,质量比能量为 182 Wh/kg。

1.1 容量特性

根据锂离子电池的放电容量随温度以及放电倍率发生变化的特性,分别测试了镍钴锰酸锂离子电池在 $-35\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,以 0.5、1、2 C 放电倍率放电时能放出的最大容量值。不同环境温度下的可用容量数据见表 1。

表 1 不同环境温度与放电倍率下电池可用容量

温度/ $^{\circ}\text{C}$	可用容量/Ah		
	0.5 C	1 C	2 C
25	9.301	8.893	8.814
0	7.926	7.681	4.741
-15	6.844	6.856	0.173
-25	5.971	0.353	0
-35	0.032	0	0

由表 1 数据可知,在相同的放电倍率下,镍钴锰酸锂离子电池的可用容量随温度的降低而不断减小。在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,电池以 1 C 倍率的放电量超过 0.5 C 倍率,可知在低温环境下,较大倍率放电时,电池由于其自发热效应在一定程度上可以提升其放电性能。在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,镍钴锰酸锂离子电池无法以 1 C 与 2 C 倍率进行放电。若温度继续下降,锂离子电池基本失去放电能力。

1.2 内阻特性

根据锂离子电池的欧姆内阻以及极化内阻会随着温度变化而改变的特性,将锂离子电池在 $-35\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行混合脉冲功率特性测试(HPPC)^[8],并利用放电结果离线辨识电池的欧姆内阻 R_s 与极化内阻 R_p 。

表 2 不同温度与 SOC 下电池的欧姆内阻

温度/ $^{\circ}\text{C}$	欧姆内阻/ $\text{m}\Omega$		
	30%	50%	70%
25	9.689	8.928	8.452
0	23.179	21.625	20.466
-25	46.281	47.768	46.264
-35	/	81.603	76.766

表 3 不同温度与 SOC 下电池的极化内阻

温度/ $^{\circ}\text{C}$	极化内阻/ $\text{m}\Omega$		
	30%	50%	70%
25	2.251	2.634	2.559
0	12.327	7.751	3.101
-25	136.95	96.486	54.362
-35	/	286.851	183.701

由表 2、表 3 的数据可知,在相同的荷电状态(State of Charge, 简称 SOC)下电池的欧姆内阻与极化内阻随温度降低而增大。随着温度降低,欧姆内阻与极化内阻的增大速率也在不断增大,其中极化内阻的增长趋势更加明显。

2 热管理模块硬件设计

动力电池的热管理模块硬件设计需要根据高寒

环境下热管理模块进行。首先要确保电池温度信息采集的准确性；其次设计热管理驱动电路对锂离子电池进行热管理；选择高效的加热片加热电池组以及合适的保温材料来防止电池箱内热量散失过快；最后还需要安装换热器来预防电池箱内温度过高的情况发生。

2.1 温度采集电路

温度采集电路如图 1 所示，由正温度系数热敏电阻（PTC）、分压电路、滤波电路、跟随器组成。热敏电阻用于监测各个测点的温度。热敏电阻 R_{T1} 与电阻 R_2 分压后输出电压模拟信号，输入跟随器 U_{1A} 进行阻抗隔离，提高带负载能力。滤波电路用于提高电路的抗干扰能力。

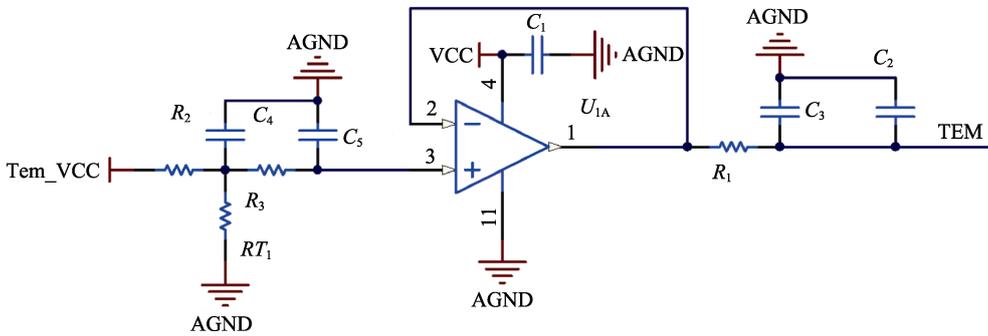


图 1 温度采集电路

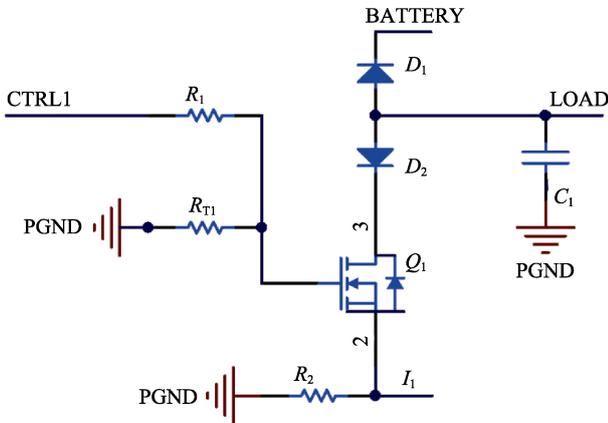


图 2 热管理驱动电路

2.3 加热片与保温材料

该设计拟采用新型石墨烯加热片对电池组进行加热，其厚度为 0.2 mm，额定功率为 1 W/cm²。与传统的硅胶加热片（PI 膜）相比，具有质量轻、厚度小、单位面积加热功率大等特点。石墨烯加热片产生的热量主要以热辐射形式传递给外界，而传统硅胶加热片产生的热量则是依靠热传导传递给外界。由于加热器与电池组间存在的空隙会导致电池组温度分布不均，所以石墨烯加热片的加热效率更高、加热速度更快，产生的温度场也更加均匀。在加热片布局上，除了在电池组箱体四周布置加热片外，还在电池与电池之间

2.2 热管理驱动电路

热管理驱动电路如图 2 所示，由微控单元（Microcontroller Unit, 简称 MCU）发出脉冲宽度调制波（Pulse Width Modulation, 简称 PWM）到达 Q_1 来控制其通断。电路中设有负温度系数热敏电阻 R_{T1} ，能够对 MOSFET 管进行过热保护。 D_1 为泄放二极管，防止 MOSFET 管关断时，负载产生的反激电动势损坏控制电路。电阻 R_2 为电流采样电阻，对电阻反馈的电压模拟量信号放大处理后，得到实时电流信号。MCU 基于电流信号、环境温度和电池表面温度计算热管理装置目标电流大小，通过自适应 PID 算法调节 PWM 波的占空比来控制热管理模块电流大小。

夹入石墨烯加热片，使加热片能够紧密包裹电池组。电池箱内采用 EVA 泡膜作为保温材料，该泡棉表面的铝塑膜可将石墨烯加热片热辐射的能量反射到电池组的表面，在提高加热速度的同时也减少了热量的耗散。加热片与保温材料布置如图 3 所示。

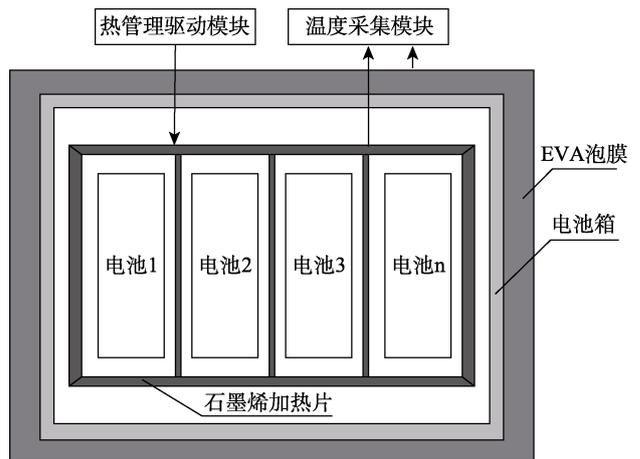


图 3 加热片与保温材料布置

2.4 散热模块

电池以不同的倍率进行放电时，电池表面温度与核心温度存在平衡状态，平衡状态的温度过大时就需要对电池组进行散热。文中借助式（1）简化后的电

池热模型^[9]来解释该平衡状态。

$$I^2 R + \frac{T_a - T_s}{R_1} = C_c \frac{dT_i}{dt} + C_s \frac{dT_a}{dt} \quad (1)$$

式中: I 为电流大小, A; R 为电池的欧姆内阻与极化内阻之和, Ω ; T_a 、 T_s 、 T_i 分别为环境温度、电池表面温度以及电池核心温度, K; R_1 为电池表面与环境的对流换热热阻, K/W; C_c 与 C_s 分别为电池的核心热容与表面热容, J/K; t 为时间, s。

对锂离子电池完成预热后进行放电测试, 此时电池内阻相对减小, 电池表面散热功率大于内阻的发热功率, 导致电池表面温度降低, 电池核心温度也随之降低。电池内阻开始增大, 其发热功率也随之增大直至与散热功率平衡, 此时电池表面温度与核心温度也达到新的平衡^[10]。

该设计中增加的保温材料相当于增大了电池表面与环境的对流换热热阻, 会提高电池表面的平衡温度, 使电池在较大放电倍率下放电时具有较高的表面温度与核心温度。当该温度过高时, 同样也需要对锂离子电池进行散热。该设计采用水冷散热的方式, 将水冷散热片放入电池组保温箱中, 水泵驱动管路内液体循环流动, 带走箱内多余的热量进入换热器中。最后换热器上的风扇将流入空气中的热量带走, 完成散热过程。电池箱与散热装置的实物如图 4 所示。



图 4 电池箱与散热装置实物

3 热管理策略设计

电池组加热装置由若干个石墨烯加热片组成。每个加热片附近布置若干个热敏电阻温度测点, 来检测锂离子电池温度。首先设定预热温度为 T_0 , 散热温度为 T_m 。当温度测点的温度 T_i 小于加热临界温度 T_0 时, 热管理驱动模块开始对锂离子电池组持续加热, 直至超过 0°C 。当测点温度 T_i 大于等于预热温度 T_0 时, 热管理驱动模块断开, 该温度测点边上的加热片电流输入, 停止加热。锂离子电池在 0°C 以上开始正常工作。当电池放电倍率较大时, 电池组自发热增大。由于电池组保温箱内的保温材料使得热量难以散发出去, 从而导致锂离子电池组温度上升。当测点温度

T_i 超过散热温度 T_m 时, 开始对锂离子电池进行水冷散热, 使其恢复到正常工作温度范围内。当放电倍率较小时, 电池组平衡温度下降。当测点温度低于预热温度 T_0 时, 热管理驱动模块重新接通加热片给锂离子电池组加热。热管理策略流程如图 5 所示。

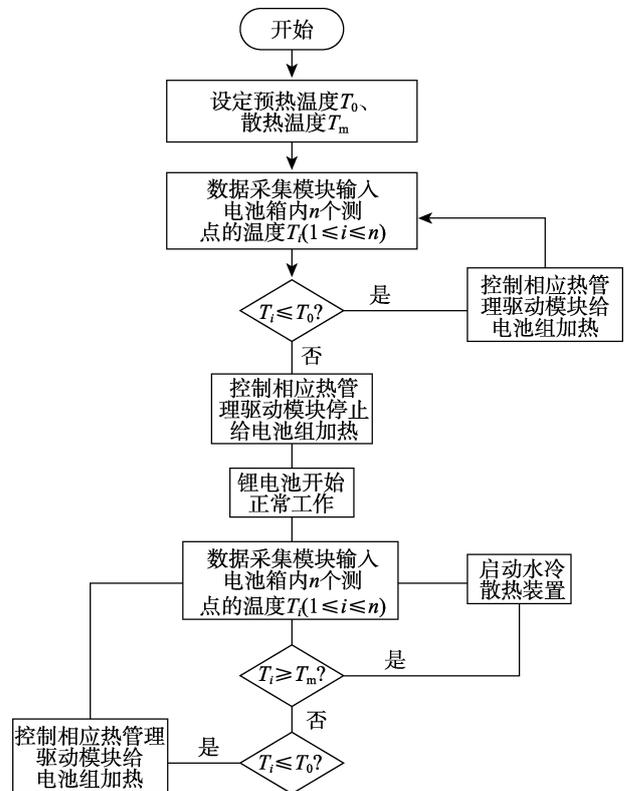


图 5 热管理策略流程

4 实验结果

实验分别让镍钴锰酸锂离子电池组在以下 5 种温度条件下做放电实验, 并记录锂离子电池的放电容量, 进行对比。温度条件分别为: 1) 锂离子电池在环境温度为 -35°C 时以 0.5、1、2 C 的放电倍率进行放电实验; 2) 锂离子电池在环境温度为 0°C 时, 以 0.5、1、2 C 的放电倍率进行放电实验; 3) 锂离子电池在环境温度为 25°C 时, 以 0.5、1、2 C 的放电倍率进行放电实验; 4) 在环境温度为 -35°C 时, 将电池表面温度预热至 0°C 后, 以 0.5、1、2 C 的放电倍率进行放电实验; 5) 在环境温度为 -35°C 时, 将电池表面温度预热至 25°C 后, 以 0.5、1、2 C 的放电倍率进行放电实验。实验结果如图 6 所示。

由图 6 所示实验结果可得, 镍钴锰酸锂离子电池在预热后其放电性能得到提高。在 -35°C 的环境温度下, 镍钴锰酸锂离子电池基本无法放出电量。通过热管理策略将电池表面温度预热至 0°C 以上, 以 0.5、1 C 的倍率放电时, 电池的可用容量可达额定容量的 34.7%, 锂离子电池在低倍率下的放电能力得到明显

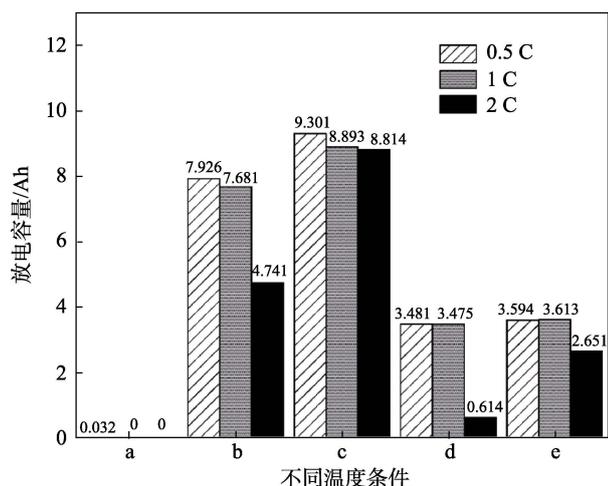


图6 不同条件下放电容量对比

改善。

锂离子电池组由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比于预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 0.5 C 放电时,电池的可用容量增加了 0.113 Ah ;由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比于预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 1 C 放电时,电池的可用容量增加了 0.138 Ah ;锂离子电池组由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比于预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 2 C 放电时,电池的可用容量增加了 2.037 Ah 。由此可知,提高对锂离子电池组的预热温度能增加放电容量,尤其是锂离子电池组进行大倍率放电时提升效果显著。

锂离子电池组由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,均以 0.5 C 放电时,电池的可用容量减少了 5.707 Ah ;均以 1 C 放电时,电池可用容量减少了 5.280 Ah ;均以 2 C 放电时,电池的可用容量减少了 6.163 Ah 。该部分的能量消耗值大于电池总容量的 50% 。

此外,锂离子电池组由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 0.5 C 放电,相比于环境温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 0.5 C 放电,电池的可用容量减少了 4.098 Ah ;以 1 C 放电,电池的可用容量减少了 3.857 Ah 。锂离子电池组由 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 0.5 C 放电,相比于环境温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以 2 C 放电,电池的可用容量减少了 4.065 Ah 。该部分能量是由于电池组为热管理装置供电而造成的消耗,该消耗值约占电池总容量的 40% 。可见,预热温度越大,对能量的消耗也越大。

5 结语

综合电力推进船舶在排放性和经济性都优于传

统柴油机船舶,并且其可靠性更高,将成为极地科考船舶的最佳选择之一。文中针对综合电力推进科考船的储能系统中锂离子电池组在低温环境下性能衰减的问题,设计了一种锂离子电池热管理模块,包括硬件电路设计以及热管理策略设计。实验表明,该模块能够有效提高锂离子电池在高寒环境中的放电容量,有助于延长极地科考船储能系统的使用寿命。

由于该系统采用锂离子电池组为热管理装置供电,消耗了一定的储能系统自身能量。后期研究将考虑采用船舶废气锅炉产生的热蒸汽参与储能系统热管理,进一步提高储能系统的综合利用效率。

参考文献:

- [1] 朱建钢, 颜其德, 凌晓良. 南极资源及其开发利用前景分析[J]. 中国软科学, 2005(8): 17-22.
- [2] DIVYA K C, OSTERGAARD J. Battery Energy Storage Technology for Power Systems—An Overview[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.
- [3] 陈琳, 田彬彬, 林伟龙, 等. 影响锂离子电池 SOC 因素的灰色关联分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 5-9.
- [4] 赵振华, 杨宇超, 卫涛, 等. 极地自破冰科学考察船防寒设计研究[J]. 船舶, 2017, 28(5): 1-8.
- [5] SONG H S, JEONG J B, LEE B H, et al. Experimental Study on the Effects of Pre-heating a Battery in a Low-temperature Environment[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference. [s.l.]: IEEE, 2012.
- [6] STUAR T A, HANDE A. HEV Battery Heating Using AC Currents[J]. Journal of Power Sources, 2004, 129(2): 368-378.
- [7] LEI Zhi-guo, ZHANG Cheng-ning, LI Jun-qiu, et al. A Study on the Low-temperature Performance of Lithium-ion Battery for Electric Vehicles[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(10): 927-933.
- [8] UNKEHAEUSER T, SMALLWOOD D. FreedomCAR Battery Test Manual for Power-assist Hybrid Electric Vehicles[J]. U S Department of Energy, 2003, 4(1): 3-6.
- [9] DAI H, ZHU L, ZHU J, et al. Adaptive Kalman Filtering Based Internal Temperature Estimation with an Equivalent Electrical Network Thermal Model for Hard-cased Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 293: 351-365.
- [10] SUN J, WEI G, PEI L, et al. Online Internal Temperature Estimation for Lithium-ion Batteries Based on Kalman Filter[J]. Energies, 2015, 8(5): 4400-4415.