



## 锂离子电池系统低温充电策略

王苏杭<sup>1</sup>, 李建林<sup>2</sup>, 李雅欣<sup>2</sup>, 熊俊杰<sup>3</sup>, 曾 伟<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620; <sup>2</sup>储能技术工程研究中心(北方工业大学), 北京 100144; <sup>3</sup>国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330000)

**摘 要:** 新能源汽车行业正迅猛发展, 电动汽车的销量也屡创新高, 而电动汽车在冬季低温下如何高效且经济地进行充电, 仍是一个亟待解决的问题。基于充电时电池自身内阻产热的原理, 提出了一种锂电池系统低温充电的策略, 并在此基础上进行了改进。以最小单体电池温度为判断条件, 使用多阶段恒流充电技术可以有效缩短充电时间, 并保证一定的充电容量。通过研究和实验表明, 该策略具有良好的充电效果, 且可以根据实际需求来制定具体的充电方案, 可有效解决锂离子电池系统在冬季低温下的充电问题。

**关键词:** 锂电池; 动力电池; 低温充电; 恒流充电; 电池加热

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0493

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 05-1537-06

## Research on charging strategy of lithium-ion battery system at low temperature

WANG Suhang<sup>1</sup>, LI Jianlin<sup>2</sup>, LI Yaxin<sup>2</sup>, XIONG Junjie<sup>3</sup>, ZENG Wei<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; <sup>2</sup>Energy Storage Technology Engineering Research Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China; <sup>3</sup>Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, Jiangxi, China)

**Abstract:** The new energy vehicle industry is developing rapidly, and the sales of electric vehicles have repeatedly hit new highs. How to charge electric vehicles efficiently and economically at low temperatures in winter is still an urgent problem to be solved. A charging strategy at a low temperature for lithium battery systems is proposed and improved based on the principle that the battery generates heat by itself during charging. Taking the minimum single battery temperature as the judgment condition, the use of multi-stage constant current charging technology can effectively shorten the charging time and ensure sufficient charging capacity. Research and experiments show that this strategy has a good charging effect, and specific charging schemes can be formulated according to actual needs, which can effectively solve the charging problem of lithium-ion battery systems at low temperatures in winter.

**Key words:** lithium battery; power battery; charging at low temperature; constant current charging; battery heating

新能源汽车行业正处于大力发展的时期, 由于对环境污染小、低噪音、低成本等优势, 越来越

多的消费者选择新能源汽车, 我国目前也正在大力扶持此行业的发展<sup>[1]</sup>。2020 年底, 我国保有的新能源

收稿日期: 2021-09-19; 修改稿日期: 2021-09-29。

基金项目: 北京市教育委员会科技计划重点项目 (21J026)。

第一作者: 王苏杭 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为动力电池、

储能技术, E-mail: 1158822549@qq.com; 通讯作者: 李建林, 教授, 研究方向为大规模储能技术, E-mail: dkyjl@163.com。

汽车数量达到492万辆，占总量的1.75%；与2019年相比，新增111万辆，增长率为29.18%<sup>[2-3]</sup>。其中，纯电动汽车有400万辆，占总量的81.30%。近年来，新能源汽车增量显著，目前仍处于高速增长的阶段<sup>[4]</sup>。

锂离子电池具有能量高、体积小、循环倍率高、无记忆性等优点<sup>[5]</sup>，成为新能源汽车的首选动力源。锂离子电池受温度变化的影响较为明显，在过高或过低的温度下，其会出现明显的内阻增大、容量衰减等问题<sup>[6]</sup>。文献[7]通过实验，验证了环境温度越低则电池内阻越大的结论，且温度低于一定程度的情况下，对电池充电会瞬间达到截止电压。锂电池的这种特性，使得新能源汽车在冬季寒冷的环境下充电时，会面临很多问题，这对新能源汽车在寒冷地区的推广也会造成很大阻碍。

电池温度降至-10℃时，锂电池内部电解液的电导率会急剧下降，SEI(Solid electrolyte interphase)膜阻抗和电荷转移阻抗也会不断增大，这些因素导致了锂电池低温性能显著下降<sup>[8]</sup>。改进负极材料虽然可以在一定程度上提升锂电池的低温充电性能，但是成本高且短时间难以大规模应用<sup>[9]</sup>。王泰华等<sup>[10]</sup>基于低温充电数据，建立了锂电池的低温老化充电模型，并引入了遗传算法对充电策略进行了优化；文献[11]通过对锂离子电池的一阶RC等效电路模型进行分析，提出了一种适用于低温条件下的多阶段恒流充电方法。但是这些方法大多针对单体电池，未解决充电时电池系统内部存在温度及电压不一致的问题，故这些充电策略不能直接用于电池系统。

目前解决电池系统低温充电问题的主流解决方法是通过额外的加热系统使电池升温，使其恢复正常性能<sup>[12]</sup>。电池的外部加热方式主要分为空气加热、液体加热、相变材料加热和热电效应加热<sup>[13]</sup>。黄堪丰等<sup>[14]</sup>利用涡流管制热技术对动力电池进行热管理控制，高压空气进入涡流管形成涡流，可对电池系统进行有效的预热或者冷却；罗玉涛等<sup>[15]</sup>设计了一套以变压器油为介质的加热系统，电池平均温升速率约0.85℃/min，加热效果明显；Lei等<sup>[16]</sup>提出了一种集成了热管、喷雾冷却和相变材料的电池热管理设计，在-10℃的环境温度下，与没有任何热管支持的电池相比，放电容量提升了39.5%；张祚铭等<sup>[17]</sup>以电加热膜作为外部热源进

行了仿真分析，对不同的布置方式进行了分析实验，得出了在电池系统侧面和底面同时布置加热膜时效果良好的结论。但无论采用何种外部加热方式，都需要增设辅助加热装置，并提供额外电量给辅助加热系统，所以这种方式不仅使得电池包结构变得复杂，而且还会增加用户的充电成本，同时增加了汽车生产成本<sup>[18]</sup>。本文提出了一种基于电池系统充电时自身发热特性的低温充电策略，通过实验验证了此种策略具有较好的充电效果，且电池系统回温明显。

### 1 充电电流选择

本文选择的样品是一款磷酸铁锂电池系统，其样品标称信息如表1所示。

表1 实验所采用的电池系统样品信息  
Table 1 Battery system sample information used in the experiment

项目名称	项目参数
电池体系	磷酸铁锂
单体充电保护电压	3.65 V
单体放电保护电压	2.5 V(常温)
系统充电截止电压	350.4 V
系统放电终止电压	240 V(常温)
额定容量	104 Ah

低温环境下，锂电池的活性降低，作为负极材料的石墨，其嵌锂能力也会有所下降<sup>[19]</sup>，低温下电池电压的虚高也使得可充入电量大大减小。本实验先将电池系统在常温下以1.0 C电流放至空电，再分别进行了-10℃低温下的0.8 C、0.7 C、0.6 C、0.5 C电流充电实验，实验数据分别如图1~图4所示。

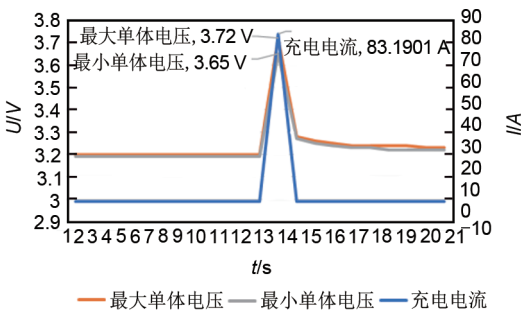


图1 -10℃下0.8 C充电实验数据  
Fig. 1 Experimental data of 0.8 C charging at -10℃

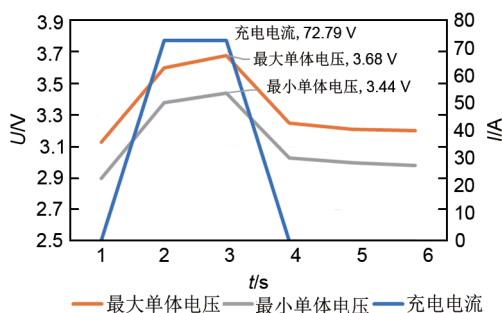


图2 -10 °C下0.7 C充电实验数据

Fig. 2 Experimental data of 0.7 C charging at -10 °C

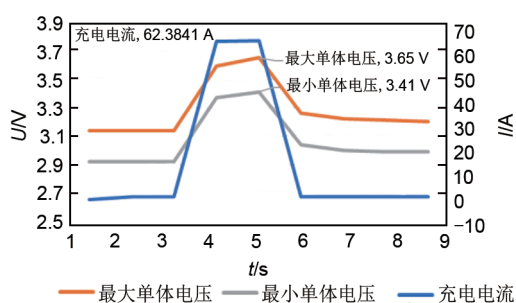


图3 -10 °C下0.6 C充电实验数据

Fig. 3 Experimental data of 0.6 C charging at -10 °C

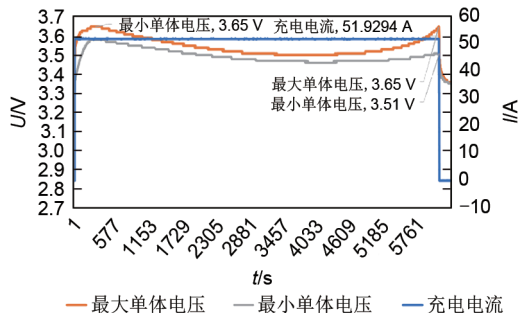


图4 -10 °C下0.5 C充电实验数据

Fig. 4 Experimental data of 0.5 C charging at -10 °C

由图1、图2、图3可以看出,在-10 °C的低温环境下,使用大于0.5 C的电流会使电池电压激增并且很快超过保护电压使得充电终止,几乎无法充入电量。由图4可以看出,采用0.5 C电流充电时,电池电压的突变在允许范围内,单体电池电压从刚施加充电电流时的高点逐渐下降并维持平稳,可持续充入电量,因此选用0.5 C电流进行充电实验。

## 2 低温下0.5 C充电时电池参数变化

通过对低温环境下不同电流充电的电池单体电压变化进行对比,已经验证了以0.5 C充电的可行性,在此过程中,电池的温度变化如图5所示,充

电容量如图6所示。

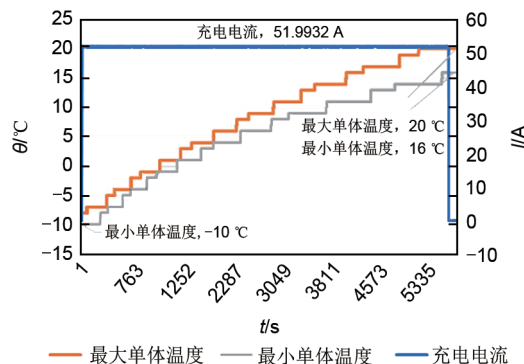


图5 低温0.5 C充电时电池的温度变化

Fig. 5 Temperature change of 0.5 C charging at low temperature

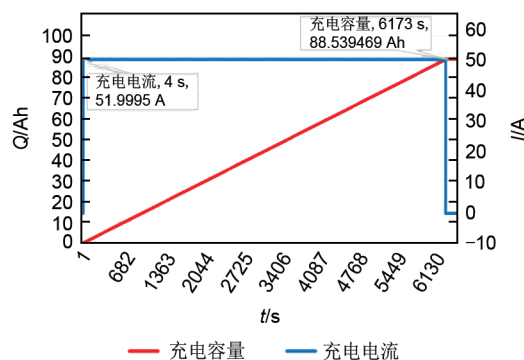


图6 低温0.5 C充电容量

Fig. 6 Battery capacity of 0.5 C charging at low temperature

由图4和图5可以看出,在充电过程中由于电池自身的产热特性,电池温度不断上升,在充电电流不变的情况下,电池电压得以从刚施加电流时的高电压点逐步降至限制电压以下,并在较长时间内保持稳定,从而使电池系统可以充入较多电量。

由图6可以看出,在0.5 C充电电流下,充电时长为6169 s,最终充入的容量约为88.54 Ah,达到了额定容量的85.13%以上。而且,由图5可以看出,充电完成时最小和最大的单体电池温度已分别回升至16 °C和20 °C,基本可以满足正常使用需求。

## 3 改进的低温充电策略

虽然在低温下无法使用大电流充电,但低温下小电流充电时可使电池温度回升,因此可以考虑当电池温度回升至一定程度时更换大电流进行充电,

用以缩短充电时间。

由图4可以看出,低温下使用0.5 C充电时,电流施加的初始阶段最大单体电压会先达到单体充电保护电压3.65 V再趋于平缓,有过充的风险。经过多次实验,为保险起见,此策略采用0.4 C作为初始充电电流进行充电,分别以最小单体温度达到0 ℃和10 ℃作为转折点进行换电流充电。当最小单体温度达到0 ℃时,进行了1.0 C、0.7 C、0.6 C的充电测试,分别如图7~图9所示。

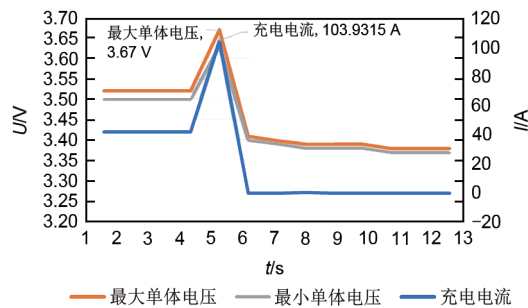


图7 0 ℃下1 C充电实验数据  
Fig. 7 Experimental data of 1 C charging at 0 ℃

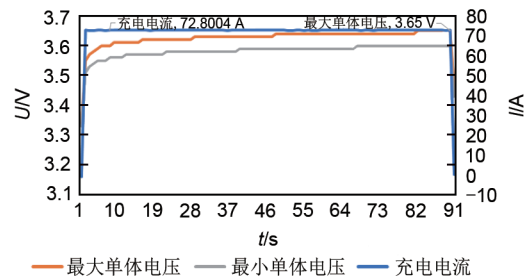


图8 0 ℃下0.7 C充电实验数据  
Fig. 8 Experimental data of 0.7 C charging at 0 ℃

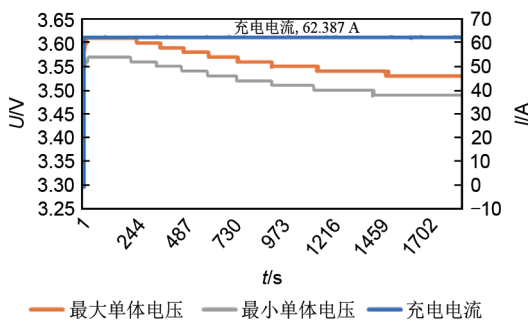


图9 0 ℃下0.6 C充电实验数据  
Fig. 9 Experimental data of 0.6 C charging at 0 ℃

当最小单体温度达到0 ℃时,由图7可以看出,在施加1.0 C充电电流的瞬间,电池电压激增,最大单体电压瞬间超过保护电压,使得充电中止,电

池系统无法以1.0 C的电流充入电量;由图8可以看出,虽然在施加0.7 C电流的瞬间电池电压未超过保护电压,但是随着充电的进行单体电池电压持续升高,仅用了90 s就达到了充电保护电压,使得充电终止,充电时间过短,电池系统并未充入足够电量,因此0.7 C的充电电流也不可取;由图9可以看出,施加0.6 C的充电电流时,电池电压没有超过3.65 V的充电保护电压,且随着充电的进行,单体电池电压由刚开始的激增值逐渐下降并维持平稳,使得电池系统有足够的充电时长,能充入较多电量。

综上所述,当最小单体温度回升至0 ℃时,可以选用小于等于0.6 C的电流进行充电,为尽量加快充电速率,采用0.6 C电流进行充电。具体充电策略如表2所示,实验所得数据如图10~12所示。

表2 改进的低温充电策略

Table 2 Improved charging strategy at low temperature

步骤	截止条件
恒流0.4 C充电	最小单体温度为0 ℃
恒流0.6 C充电	最小单体温度为10 ℃
恒流1.0 C充电	最大单体电压为3.65 V

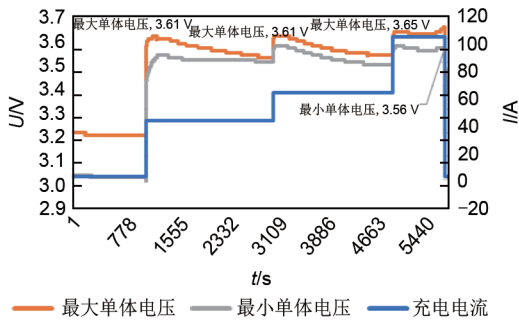


图10 充电过程中电池电压变化  
Fig. 10 Change of battery voltage in charging method

由图10可以看出,在充电完成前,单体电池电压始终在限制范围内,且每个阶段都保持了较长的充电时间,故此充电方式可行。由图11可以看出,充电完成时最小和最大的单体电池温度已分别回升至19 ℃和24 ℃,与0.5 C恒流充电时相比温度更高,更接近常温,可使电池发挥出更佳的性能。由图12可以看出,最终充入的容量约为82.24 Ah,是0.5 C恒流充电容量的93%;充电所花费的时间为4726 s,是0.5 C恒流充电下的77%。



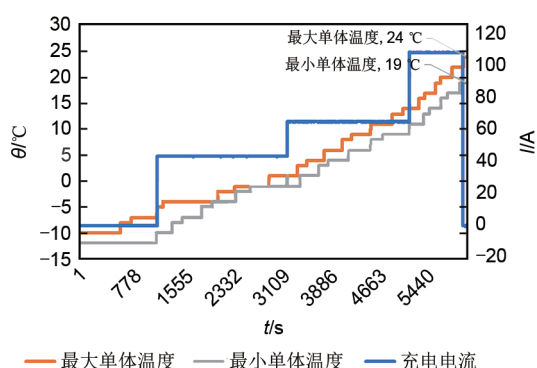


图11 充电过程中电池温度变化  
Fig. 11 Change of battery temperature

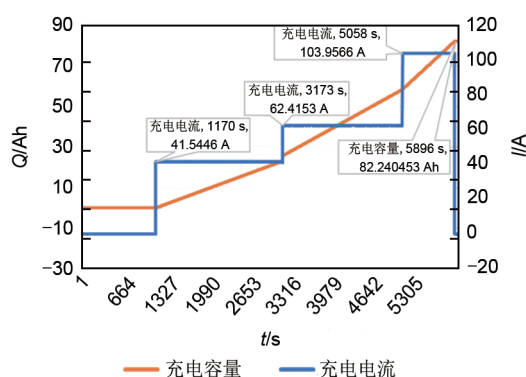


图12 充电过程中充电容量变化  
Fig. 12 Change of capacity in charging method

## 4 结 语

本文以磷酸铁锂电池系统作为实验对象,提出了一种基于电池自身产热特性的低温充电策略。在低温下通过较小的电流充电使得电池温度回升,从而可以向电池系统中持续充入电量。在此基础上进一步提出了一种改进的充电策略,在电池系统温度回升至一定程度后,更换大电流进行充电,可加快充电速度。通过实验验证,得出如下结论。

(1) 对于此电池系统而言,在低温 $-10^{\circ}\text{C}$ 环境下,0.5 C为可正常充电的临界电流,将电池系统充满共耗时6169 s,充电容量约为88.54 Ah,达到了额定容量的85%以上,具有良好的充电效果;充电完成时最大和最小单体温度分别回升至 $16^{\circ}\text{C}$ 和 $20^{\circ}\text{C}$ ,基本可以直接投入使用。

(2) 在低温 $-10^{\circ}\text{C}$ 环境下,以最小单体温度为换电流的条件,采用0.4 C转0.6 C再转1.0 C电流的充电方式,将电池系统充满共耗时4726 s,是0.5 C恒流充电下的77%;充电容量约为82.24 Ah,是0.5 C恒流充电容量的93%。虽然充电容量

有所下降,但是充电时间有了大幅缩短,而且充电完成时最大和最小单体温度分别回升至 $19^{\circ}\text{C}$ 和 $24^{\circ}\text{C}$ ,更接近常温,可使电池发挥出更好的性能。

本文提出的低温充电策略,免除了充电前电池加热的步骤,从而节省了用户的充电成本,同时也保有较高的充电容量,而且充电结束时电池的温度接近常温,可直接投入使用。通过在合适的温度点切换大电流进行充电,还可以在原方法的基础上加快充电速度。根据实际场景的需要,还可以在大电流充电结束时切换小电流进行补电,以达到充入更多电量的目的。因此,该低温充电策略可作为锂电池低温充电的一种解决办法,具有较好的实用意义。未来通过更多的理论以及实验,来选择更合适的温度点进行电流切换,可更进一步地缩短充电时间,提升充电效率。

## 参 考 文 献

- [1] 王苏杭,李建林. 退役动力电池梯次利用研究进展[J]. 分布式能源, 2021, 6(2): 1-7.  
WANG S H, LI J L. Research progress on echelon utilization of retired power batteries[J]. Distributed Energy, 2021, 6(2): 1-7.
- [2] 胡建成. 我国纯电动汽车发展概况及展望[J]. 南方农机, 2020, 51(22): 126-127.
- [3] 李建林,李雅欣,吕超,等. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 172-183.  
LI J L, LI Y X, LYU C, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183.
- [4] 杨政威. 匹配纯电动汽车的无级变速器参数研究[J]. 时代汽车, 2021(17): 135-136.  
YANG Z W. Research on parameters of continuously variable transmissions matching pure electric vehicles[J]. Auto Time, 2021(17): 135-136.
- [5] AJANOVIC A, HAAS R. Economic and environmental prospects for battery electric- and fuel cell vehicles: A review[J]. Fuel Cells, 2019, 19(5): 515-529.
- [6] 靳素芳,胡芳芳,房晓,等. 新能源汽车严寒环境下充电性能测试研究[J]. 汽车实用技术, 2020(15): 13-14.  
JIN S F, HU F F, FANG X, et al. Research on charging performance test of new energy vehicles in severe cold environment[J]. Automobile Applied Technology, 2020(15): 13-14.
- [7] 梁欣. 电动汽车锂离子电池低温性能研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(8): 118-121.  
LIANG X. Study on low temperature performance of Li-ion batteries for electric vehicles[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2020, 58(8): 118-121.
- [8] 韦连梅,燕溪溪,张素娜,等. 锂离子电池低温电解液研究进展[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 69-77.

- WEI L M, YAN X X, ZHANG S N, et al. Progress of low-temperature electrolyte for lithium-ion battery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2017, 6(1): 69-77.
- [9] 徐智慧, 阮海军, 姜久春, 等. 温度自适应的锂离子电池低温自加热方法[J]. *电源技术*, 2019, 43(12): 1989-1992, 2043.
- XU Z H, RUAN H J, JIANG J C, et al. Temperature-adaptive internal heating strategy for lithium ion battery at low temperature[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(12): 1989-1992, 2043.
- [10] 王泰华, 张书杰, 陈金干. 锂离子电池低温充电老化建模及其充电策略优化[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(4): 1137-1146.
- WANG T H, ZHANG S J, CHEN J G. Low temperature charging aging modeling and optimization of charging strategy for lithium batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(4): 1137-1146.
- [11] 梅尊禹, 吴晓刚, 胡宸. 一种适用于低温环境的锂离子动力电池充电方法[J]. *汽车技术*, 2018(6): 11-16.
- MEI Z Y, WU X G, HU C. A charging method of power Li-ion battery for low temperature[J]. *Automobile Technology*, 2018(6): 11-16.
- [12] 尹安东, 赵韩, 周斌, 等. 基于行驶工况识别的纯电动汽车续航里程估算[J]. *汽车工程*, 2014, 36(11): 1310-1315.
- YIN A D, ZHAO H, ZHOU B, et al. Driving range estimation for battery electric vehicles based on driving cycle identification[J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(11): 1310-1315.
- [13] 肖军. 新能源汽车低温电池热管理方法研究[J]. *汽车文摘*, 2020(10): 34-40.
- XIAO J. Research on the battery heating methods of new energy vehicle in cold climate[J]. *Automotive Digest*, 2020(10): 34-40.
- [14] 黄堪丰, 陈才敏, 李锦和. 基于涡流管技术的动力电池热管理系统研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(19): 96-99.
- HUANG Kanfeng, CHEN Caimin, LIN Jinhe. Research on power battery thermal management system based on vortex tube technology[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(19): 96-99.
- [15] 罗玉涛, 郎春艳, 罗卜尔思. 低温环境下锂离子电池组加热系统研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(9): 100-106.
- LUO Y T, LANG C Y, LUO B. Investigation into heating system of lithium-ion battery pack in low-temperature environment[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(9): 100-106.
- [16] LEI S R, SHI Y, CHEN G Y. A lithium-ion battery-thermal-management design based on phase-change-material thermal storage and spray cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168: 114792.
- [17] 张祚铭, 李强伟, 张正杰, 等. 电动汽车用锂离子电池模组低温加热仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(5): 85-89.
- ZHANG Z M, LI Q W, ZHANG Z J, et al. Pre-heating simulation of lithium-ion battery module for electric vehicles[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(5): 85-89.
- [18] 马绪, 马天翼, 陈立铎, 等. 一种低温充电策略在电池系统层级的效果验证[J]. *电源技术*, 2020, 44(3): 377-380.
- MA X, MA T Y, CHEN L D, et al. Effect verification test of a low temperature charging strategy at battery system level[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(3): 377-380.
- [19] 焦红星, 张延星, 冯世杰. 新型动力电池低温加热策略[J]. *汽车工程师*, 2021(8): 22-25, 29.
- JIAO H X, ZHANG Y X, FENG S J. A new low temperature heating strategy for power battery[J]. *Automotive Engineer*, 2021(8): 22-25, 29.