

朱慧东,李岳林,汤桃峰.磷酸铁锂动力电池低温差液冷方案[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2025,40(2):52-58.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.007

ZHU H D, LI Y L, TANG T F. On Low Temperature Difference Liquid-cooling Scheme of LiFePO₄ Traction Battery[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(2): 52-58. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.02.007

磷酸铁锂动力电池低温差液冷方案

朱慧东¹, 李岳林^{1*}, 汤桃峰²

(1.长沙理工大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410076; 2.江铃汽车股份有限公司,江西 南昌 330052)

摘要:为了控制磷酸铁锂电池包内的温度场,提高其安全性、寿命及功率性能,设计了一款适合工程化应用的新型液冷电池包,该电池包在设计工况下的峰值温度小于45℃,最大温差小于5℃.采用仿真与试验相结合的方法,通过热仿真确定设计方案的峰值温度满足要求,同时发现模组两端的电芯散热过强是导致电池包内温差较大的主要原因.基于分析结果提出多种改进方案,综合考虑温度场和结构的优劣性选择最佳改进方案,并通过试验验证仿真模型和设计方案的可行性.根据研究结果总结导致电池包产生温差的原因及有利于降低温差的热管理方案,为进一步研究高性能液冷电池包提供新的思路.

关键词: 电池;磷酸铁锂;液冷;热管理;热仿真

中图分类号:U463

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)02-0052-07

On Low Temperature Difference Liquid-cooling Scheme of LiFePO₄ Traction Battery

ZHU Huidong¹, LI Yuelin¹, TANG Taofeng²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. Jiangling Motors Co., Ltd., Nanchang 330052, China)

Abstract: In order to control the temperature field of the Li FePO₄ battery pack and improve its safety, lifetime, and power performance, this paper provides a new scheme for the liquid-cooling battery pack suitable for engineering applications. Under the design condition, the peak temperature of the battery is less than 45℃, and the maximum temperature difference of the battery is less than 5℃. The research adopts the method of combining simulation and experiment. Firstly, the result of thermal simulation confirms that the peak temperature meets the requirements, and shows that the strong heat dissipation of cells at both ends of the module is the main reason for the big temperature difference. Then, this paper proposes a variety of solutions that are based on the analysis results, and selects the best solution by considering the advantages and disadvantages of the temperature field and the structure. The experiment demonstrates that the simulation model is reliable and this solution is feasible. Finally, this paper, based on research results, summarizes the reasons for the temperature difference of liquid-cooling batteries and the thermal management scheme for reducing temperature difference, which provides new ideas for further researches on high-performance liquid cooling battery packs.

Keywords: battery; LiFePO₄; liquid cooling; thermal management; thermal simulation

发展新能源汽车既有利于我国调整能源结构,缓解能源紧张局势,也有利于降低环境污染,助力我国推行碳达峰和碳中和计划.动力电池作为新能源汽车的核心部件,各项性能的优劣直接关系到整车是否能高质量运营.ZHANG 等^[1-2]的研究表明:电池长期在高温或温度变化剧烈的环境中使用,会加速劣化并增加热失控的威胁;张良^[3]发现电池的可用容量和内阻受工作温度的影响,温度场的不一致会影响电芯间的一致性,进而降低整包的寿命和工作性能;PESARAN 等^[4-5]的研究表明:锂离子电池在温度为 15 ~ 35 °C 时能保持最佳的性能和使用寿命,同时,电池组的最大温差应保持在 5 °C 以内;于翔等^[6]发现小温差有助于缩短空调系统的工作时长,进而降低电池系统的冷却能耗.工程上,为了保证使用性能,将动力电池的最大工作温度设为 45 °C.

动力电池的冷却方式主要有风冷、液冷、冷媒直冷和相变材料(PCM)冷却.风冷的结构简单,但散热能力较低,温度场均衡性的管理较差,仅在小电量和小功率电池包上应用.相变材料的潜热高,导热性能较差,需内嵌金属翅片和石墨泡沫等加强散热^[7-8],但填充 PCM 和布置导热结构均占用较大空间.PARK 等^[9]的研究发现,得益于冷媒较高的换热速率和潜热恢复速度特性,在动力电池循环工况的条件下,与相变材料相比,冷媒直冷具有更好的持续冷却能力.但是,换热速率高也会导致换热界面的温度梯度大,在大电量电池包上易产生较大温差,因此,冷媒直冷多应用于微混汽车和插电混动汽车的大功率小电量电池中.采用更高效的冷却介质可以提升散热能力,LIU 等^[10]认为与水相比,使用液态镓锡锡(GaInSn)作为冷却剂的散热器具有更好的传热性能,有助于控制系统温差;AN 等^[11]采用沸点为 34 °C 的氢氟醚液体作为冷却介质,通过沸腾传热可以有效降低电池的峰值温度和温差,但受限于成本、可靠性和使用便捷性等,该方法暂不被工程所接受;MONIKA 等^[12]在电芯大面之间布置独立的微通道液冷板,可以保证 3 支电芯构成的电池组的温差小于 0.34 °C;田晟等^[13]在电芯大面之间增加均温板,使单个模组的温差不超过 3.2 °C;千年妃等^[14]通过液冷管道与电芯侧面接触面积的梯次化设计,将 21 个 18650 电芯组成的电池模块的温差降低至 3.72 °C.将类似方案扩展到电池包中,大量的冷却零件和转接管路不仅占用较大空间,也增加了系统的潜在失效点.

设计电池包冷却方案的难点是在满足空间利用率、可靠性和成本等工程要求的前提下,实现对电池包温度场的控制.本文基于大容量磷酸铁锂(LFP)电芯,利用热仿真研究电芯的传热路径,进而设计简洁的液冷方案,使电池包在设计工况下的峰值温度小于 45 °C,最大温差小于 5 °C.液冷方案的结构简单、可靠性高、设计灵活,是当前电池系统中应用最广泛的热管理方式.本文基于电池包温度场的特征,研究更适合工程实施的液冷电池包方案.

1 建立热仿真模型

1.1 电池包模型

电池包结构如图 1 所示.电池包的箱体由多块铝合金型材进行拼焊,型材内腔贯通构成冷却液流动道,冷却液流动道如图 2 所示.冷却液流动道具有重量轻、成本低、可靠性高和空间利用率高的优点.电池包内含 3 个模组,每个模组各 15 支电芯,模组两端为铝合金端板,端板与电芯之间布置厚度为 1 mm 的 PP 绝缘片.端板、绝缘片和电芯之间均通过胶黏连接,胶层厚度为 0.2 mm.模组与箱体间双重固定:一是利用螺杆将端板与箱体固定,端板与箱体紧密贴合;二是模组底部与箱体间布胶黏接,起固定和导热作用.

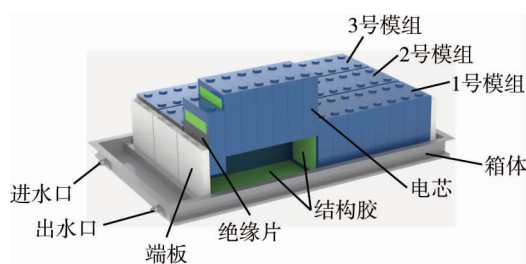


图 1 电池包结构

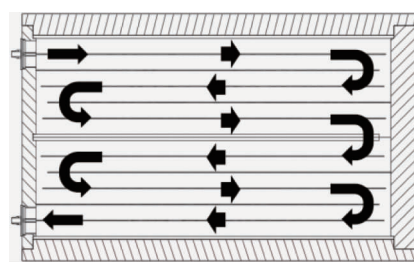


图 2 冷却液流动

电芯的极耳温度略高于本体温度,因此,将极耳温度作为特征温度有利于保护电池的安全.选取 9 个

温度监测点来反映电池包的温度场特征,温度监测点位置如图 3 所示.电芯间的胶层和箱体上的焊缝等对仿真结果的影响较小,其零件和特征在网格划分时不体现,因此,采用多面体网格进行模型离散,有限元网格如图 4 所示.温度监测点位置与电芯的对应关系如表 1 所示.

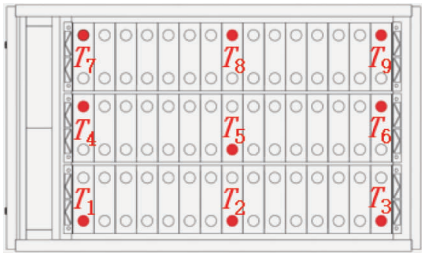


图 3 温度监测点位置

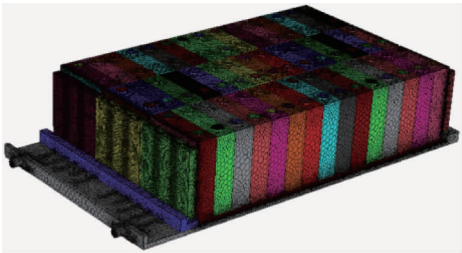


图 4 有限元网格

表 1 温度监测点位置与电芯的对应关系

温度监测点	电芯位置	温度监测点	电芯位置	温度监测点	电芯位置
T_1	1 号模组 1 号电芯	T_4	2 号模组 1 号电芯	T_7	3 号模组 1 号电芯
T_2	1 号模组 8 号电芯	T_5	2 号模组 8 号电芯	T_8	3 号模组 8 号电芯
T_3	1 号模组 15 号电芯	T_6	2 号模组 15 号电芯	T_9	3 号模组 15 号电芯

1.2 电芯产热模型

电芯是电池包的主要热源,其产热量的公式为^[15]

$$Q = Q_j + Q_p + Q_r + Q_s. \tag{1}$$

式中: Q_j 为欧姆热; Q_p 为极化热; Q_r 为可逆反应热; Q_s 为副反应热.

对流散热和辐射换热对仿真结果的影响较小,可以忽略,因此,电芯的能量守恒方程为

$$\rho m \Delta T = Q + \lambda_x A_x \frac{\partial T}{\partial X} + \lambda_y A_y \frac{\partial T}{\partial Y} + \lambda_z A_z \frac{\partial T}{\partial Z}. \tag{2}$$

式中: ρ 为电芯比热容; m 为电芯质量; ΔT 为电芯温升; λ 为电芯的各向导热系数; A 为电芯的各向导热面积.

电芯的产热模型分为 2 类^[16]:一是基于电池的工作原理建立的电化学生热模型,多用于电芯的开发过程,在电池包的仿真模型中使用时会导致计算量过大;二是根据专业仪器测得的电芯热特性参数建立的模型,一般通过等温量热法或绝热量热法测得电芯在不同工况下的产热参数^[17],有利于减少计算量,提高仿真效率.本文将电芯作为均匀的产热体,测得 1 C 充电产热功率为 26.22 W,0.05 C 充电产热功率为 0.56 W,0.33 C 放电产热功率为 5.15 W,导入已测得的产热功率即获得产热模型.

1.3 电池包循环工况

电池包在使用时往往进行复杂的充放电工作,因此,难以获得贴合实际的特征工况.本文参考《电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第 2 部分:高能量应用测试规程》(GB/T 31467.2—2015)^[18]中的能量和容量测试方法,制定电池包单循环工况如表 2 所示.仿真工况中的充放电时长基于经验确定,单循环共历时 19 440 s.静置时认为电芯不产热.

表 2 电池包单循环工况

序号	试验工况	仿真工况	仿真时刻/s
1	1 C 充电至电芯截止电压	1 C 充电 1 h	3 600
2	静置 5 min	静置 5 min	3 900
3	0.05 C 充电至电芯截止电压	0.05 C 充电 25 min	5 400
4	静置 30 min	静置 30 min	7 200
5	0.33 C 放电至截止电压	0.33 C 放电 3 h	19 440

1.4 零件物性参数及初始条件

冷却液为 50%(体积分数)的乙二醇水溶液,设置冷却液的进口流量为 10 L/min,进口处的水温为 10 ℃.定义启动冷却条件为电池包的最高温度 $T_{\max} \geq 35$ ℃,关闭冷却条件为电池包的最低温度 $T_{\min} \leq 26$ ℃.仿真

得到该流量液冷板流速云图如图 5 所示.

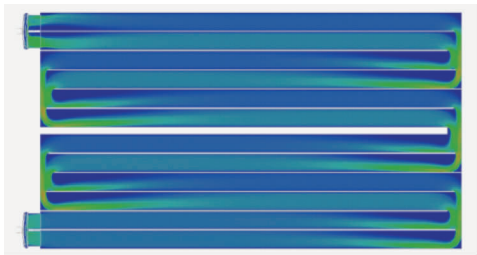


图 5 液冷板流速云图

零部件材料属性如表 3 所示.电芯可视为具有各向异性导热系数的均质材料,同时忽略因温度变化产生的热变形^[19].统计中部 4 个城市(武汉、南昌、南京和镇江)近 5 a 的 5 月—10 月的日最高温度的平均值,约为 30 ℃,并将此温度作为设计的环境温度.

表 3 零部件材料属性

名称	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/(m·K))	比热容/(J/(kg·K))	黏度/(mPa·s)
箱体	2 700	167	896	
端板	2 700	167	896	
绝缘片	900	0.21	1 900	
电芯	2 220	9(X),3(Y),11(Z)	960	
结构胶	1 650	1	550	
冷却液	1 075	0.377	3 261	4.63

2 电池包温度场特征分析

仿真计算 2 个循环工况,得到电池包的温度特性如图 6 所示.由图 6 可知:峰值温度低于 45 ℃,满足设计要求;全程最高温度为监测点 T_2 ,最低温度为监测点 T_7 ,第 1 个循环最大温差为 10.35 ℃,第 2 个循环最大温差为 11.59 ℃,远超设计目标的要求.冷却工作时长为 203 min,电池包的温差 ΔT 分别在时间 t 为 4 245, 15 585, 23 505, 35 385 s 时达到峰值,3 个模组内的温度分布如图 7 所示.电池包温差大的原因是模组内的温差比模组间的温差大,且模组内越靠近两侧,温差的变化越剧烈.

综合图 6 和图 7 的分析得到:(1)3 个模组中间电芯的温度高于两端,这是因为模组中间的热积聚严重,两端电芯通过端板和箱体散热;3 个模组靠近箱体水口侧的电芯温度更低,这是因为该侧箱体的材料较多,更利于散热.(2)充电过程中的温差持续增大,冷却开启后温差的变化加剧;放电过程中未开启冷却时的温差逐渐缩小,开启冷却导致温差增大.综上分析可知,箱体结构和水冷导致电芯间的散热不均衡是产生温差的主要原因.因此,修改箱体结构和差异化冷却性能可以均衡模组内的散热性能,从而降低电池包的温差.

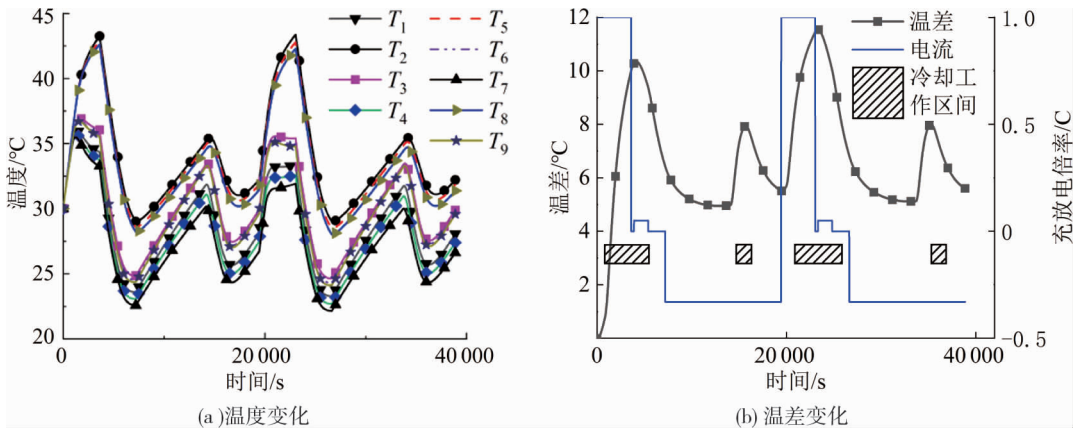
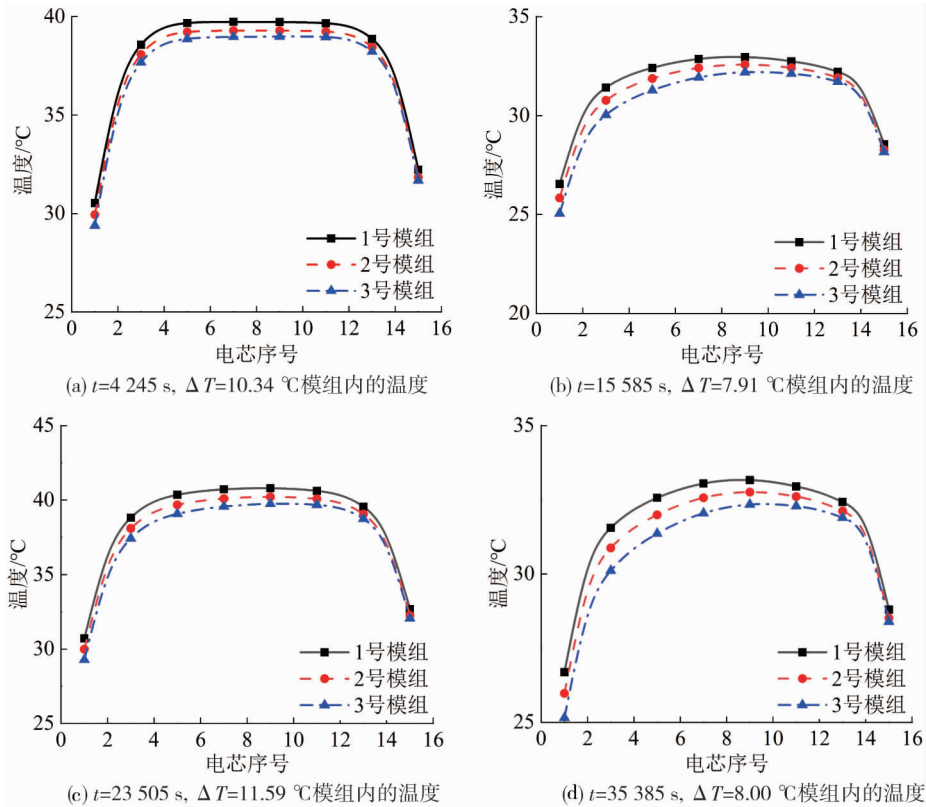


图 6 电池包温度特性

图 7 ΔT 达到峰值时模组内的温度分布

3 方案改进及验证

3.1 改进方案及效果对比

均衡模组内散热性的改进有 2 个方面:一是提高中间电芯的散热性,二是抑制两端电芯的散热性.设计 3 种改进方案如图 8~图 10 所示.改进方案一如图 8 所示,模组两侧结构胶 1 的导热系数为 $0.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,宽度 H 为电芯厚度的 3.5 倍,中间结构胶 2 的导热系数为 $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;改进方案二如图 9 所示,端板与电芯之间通过增加厚度为 5 mm 的隔热板来抑制散热,隔热板为玻纤板(FR-4),导热系数为 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;改进方案三如图 10 所示,端板与箱体之间设计隔热座,厚度为 5 mm,材质与隔热板相同.

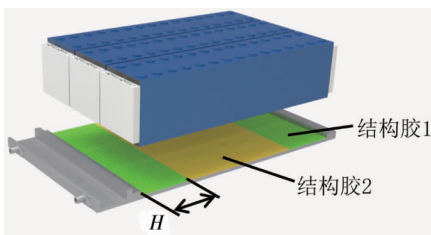


图 8 改进方案一

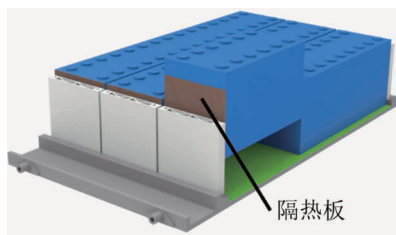


图 9 改进方案二

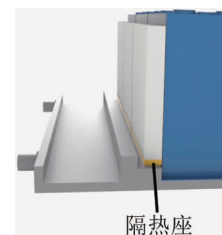


图 10 改进方案三

3 种改进方案的温差对比如图 11 所示.由图 11 可知:方案一没有降低电芯通过端板的散热强度,方案二因换热面积较大导致改善的效果不佳,方案三的改善效果明显,对电池包结构的影响最小,易于工程化应用.在改进方案三的基础上进一步研究隔热座厚度(t_s)的最佳值,不同隔热座厚度下的温差对比如图 12 所示.由图 12 可知:隔热座厚度大于 5 mm 时,对缩小温差的作用逐渐减小.隔热座厚度为 5 mm 的改进方案三可以明显降低电池包的温差,同时,对端板结构的影响较小,因此,将其作为最佳改进方案.

3.2 最佳改进方案与原方案的对比

最佳改进方案与改进前的电池包温度数据对比如图 13 所示.由图 13 可知:(1)改进方案温差的变化趋势与原方案大致相同,第 1 个循环最大温差为 $4.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$,较原方案降低 61%,第 2 个循环最大温差为

4.75 ℃,较原方案降低 59%。(2)改进方案开启液冷后的温差没有明显增加,因此,改进方案不存在明显的散热薄弱点。(3)改进方案抑制了电池包的散热,导致冷却时间增加。2 个循环工况过程中启动 3 次冷却,总历时 282 min,相较原方案增加 39%。

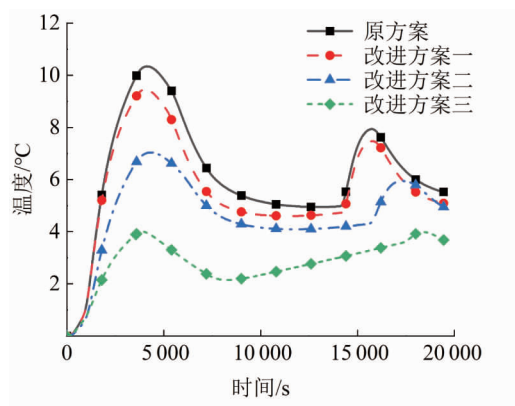


图 11 3 种改进方案的温差对比

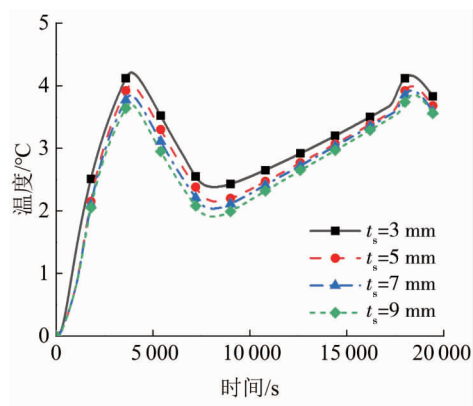


图 12 不同隔热座厚度下的温差对比

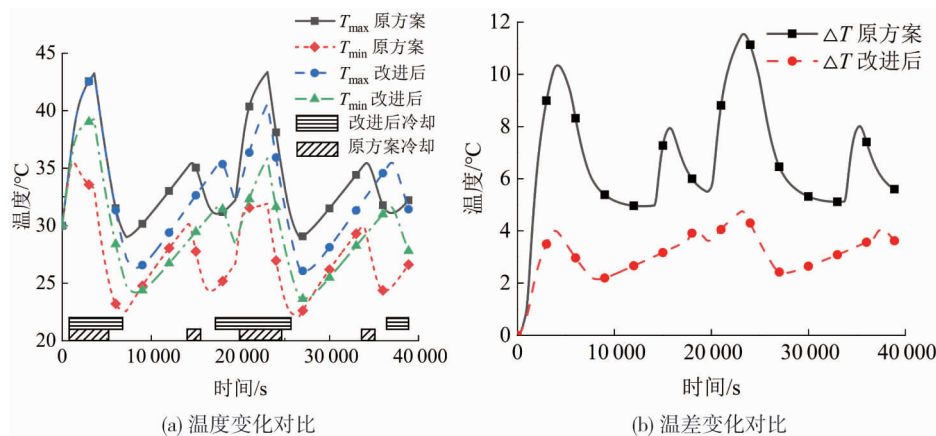


图 13 改进前后电池包温度数据对比

3.3 最佳改进方案与试验结果的对比分析

按照最佳改进方案制作电池包样品,通过电池管理系统采集电池温度.将电池包与冷却机组和充放电设备之间的管路和线束可靠连接,试验布置如图 14 所示,试验步骤及控制策略均按照设计工况设置。

在 1 个循环工况的条件下,电池包的最高温度为 42 ℃,最大温差为 5 ℃.试验与仿真结果的对比如图 15 所示.由图 15 可知:试验与仿真温度的变化趋势一致.充电阶段试验与仿真的温差为 1 ℃,放电阶段的试验温度高于仿真温度,最大温差为 3 ℃.由于仿真热源仅为电芯,因此,忽略其他零部件的产热,当电芯的产热功率较小时,仿真结果的偏差将增大。



图 14 试验布置

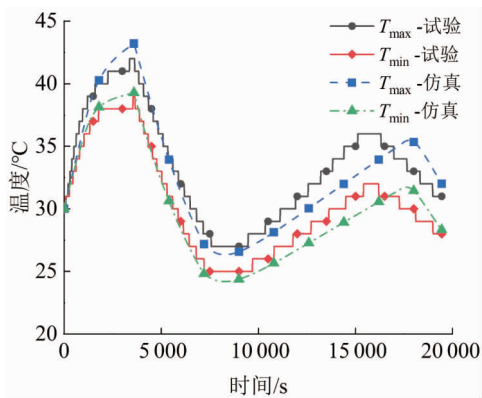


图 15 试验结果与仿真结果对比

4 结论

1) 在电池的使用过程中,模组内的温差比模组间的温差更大,电池包结构和水冷导致的电芯散热条件不均衡是模组内温差大的主要原因。

2) 通过在端板底部增加厚度为 5 mm 的隔热座可以减少电芯从端板处的散热,电池包的温差可降低 59%。改进后的电池包在工作过程中的峰值温度小于 45 °C,最大温差小于 5 °C。

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y, WANG J Y, FENG X, et al. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 443–463.
- [2] 陈雪莲,张存善,安然.电池热管理及电池安全技术[J].*电源技术*,2020,44(8):1177–1181.
- [3] 张良.纯电动汽车锂离子电池的热分析及散热结构设计[D].镇江:江苏大学,2017.
- [4] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 377–382.
- [5] YE Y H, SAW L H, SHI Y X, et al. Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86: 281–291.
- [6] 于翔,易勇,赵文天,等.纯电动乘用车动力电池冷却策略优化研究[C]//中国汽车工程学会.2019 中国汽车工程学会年会论文集.北京:机械工业出版社,2019:1324–1329.
- [7] CHOUDHARI V G, DHOBLE A S, PANCHAL S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120434.
- [8] 卢梦瑶,章学来.电动汽车动力电池冷却技术的研究进展[J].*上海节能*,2019(10):801–809.
- [9] PARK S, JANG D S, LEE D C, et al. Simulation on cooling performance characteristics of a refrigerant-cooled active thermal management system for lithium ion batteries[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 131–141.
- [10] LIU H L, AN X K, WANG C S. Heat transfer performance of T-Y type micro-channel heat sink with liquid GaInSn coolant[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 120: 203–219.
- [11] AN Z J, JIA L, LI X J, et al. Experimental investigation on lithium-ion battery thermal management based on flow boiling in mini-channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 117: 534–543.
- [12] MONIKA K, CHAKRABORTY C, ROY S, et al. An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO₄ batteries for electric or hybrid vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 35: 102301.
- [13] 田晟,肖佳将.锂离子电池模组热管-铝板嵌合式散热结构温度仿真分析[J].*湖南科技大学学报(自然科学版)*,2021,36(2):67–72.
- [14] 千年妃,孙长乐,刘东旭,等.变接触面液冷系统的电池模组温度一致性研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2020,47(6):34–42.
- [15] 杨洋.纯电动汽车锂离子电池组液冷散热系统研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [16] 王帅林,盛雷,苏林,等.车用大尺寸软包锂离子电池在高低温升工况下的生热率测定[J].*仪器仪表学报*,2021,42(8): 87–94.
- [17] 白广利,温浩然,余八一,等.动力电池热特性参数研究综述[J].*汽车文摘*,2021(3):23–27.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.电动汽车用锂离子动力电池包和系统 第 2 部分:高能量应用测试规程:GB/T 31467.2—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [19] 邹晓辉,李翔晨,张继龙,等.动力电池模组热管流道变结构研究[J].*电源技术*,2020,44(4):527–531.