

新能源汽车动力电池热管理系统优化研究

张照硕^{*}, 张恩硕, 焦学瑞, 鞠恒宇, 董志轩

烟台南山学院, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/UAID.2026030007

摘 要 : 随着新能源汽车产业的持续发展, 动力电池作为整车能量的来源, 其运行状态直接关系到车辆的性能与使用安全。在电池充放电过程中, 大量热量不断累积, 若不能有效控制, 将导致电池性能衰减、寿命缩短甚至引发安全问题。本文围绕动力电池热管理系统展开分析, 在梳理电池发热机理及温度影响因素的基础上, 构建了简化热模型, 并结合典型工况进行仿真分析。在此基础上, 从冷却结构、流体分布以及导热路径等方面对系统进行优化。结果表明, 优化方案能够有效降低电池最高温度并改善温度分布均匀性, 为动力电池热管理系统设计提供了一定参考。

关 键 词 : 新能源汽车; 动力电池; 热管理; 温度控制; 系统优化

Research on Optimization of Thermal Management System for New Energy Vehicle Power Batteries

Zhang Zhaoshuo^{*}, Zhang Enshuo, Jiao Xuerui, Ju Hengyu, Dong Zhixuan

Yantai Nanshan University, Yantai, Shandong 264000

Abstract : With the continuous development of the new energy vehicle industry, the power battery, as the source of energy for the entire vehicle, has its operating state directly related to the vehicle's performance and safety. During the battery charging and discharging process, a large amount of heat is continuously accumulated. If not effectively controlled, it will lead to battery performance degradation, shortened lifespan, and even safety issues. This paper analyzes the thermal management system of the power battery. Based on the analysis of the battery heating mechanism and temperature influencing factors, a simplified thermal model is constructed, and simulation analysis is conducted combined with typical operating conditions. On this basis, the system is optimized from aspects such as cooling structure, fluid distribution, and thermal conduction path. The results show that the optimized scheme can effectively reduce the maximum temperature of the battery and improve the uniformity of temperature distribution, providing a certain reference for the design of the thermal management system of the power battery.

Keywords : new energy vehicle; power battery; thermal management; temperature control; system optimization

引言

近年来, 随着全球对气候变化问题的关注不断增加, 以及锂离子电池技术的快速发展, 电动汽车和混合动力汽车逐渐成为汽车行业的重要发展方向。动力电池是新能源汽车的核心部件, 其性能不仅影响车辆的续航里程, 还直接关系到车辆运行的安全性与稳定性。电池在充放电过程中会产生并积累热量, 特别是在高倍率充放电条件下, 电池温度会迅速升高。若产生的热量不能及时排出, 将造成电池性能下降, 甚至引发热失控等安全问题 (刘华强等, 2017)。

锂离子电池的性能与温度密切相关。当电池处于适宜的温度范围时, 其充放电性能和循环寿命较为稳定; 温度过高会加快电池内部不可逆反应, 温度过低则会抑制电池的能量和功率输出。研究表明, 动力电池较适宜的工作温度范围为 25 ~ 40 °C, 电池组内各单体之间的温差应控制在 5 °C 以内。温度分布不均匀会造成各单体性能不一致, 并影响电池组的容量和循环寿命 (夏国栋等, 2017)。

目前, 常见的电池热管理技术主要包括空气冷却、液体冷却和相变材料冷却。空气冷却系统具有结构简单、质量轻和维护成本低等特点, 但空气的导热性和比热容较低, 冷却能力有限; 液体冷却具有较高的导热性和散热能力, 更适合高倍率充放电条件下的大型电池组; 相变材料冷却则利用材料在相变过程中吸收的潜热调节电池温度, 但其导热性能和结构布置仍存在一定限制 (吴伟雄等, 2019)。

基于上述背景, 本文以动力电池热管理系统为研究对象, 在建立电池热模型的基础上, 通过仿真分析电池在不同工况下的温度变化, 并针对系统中存在的问题提出优化方案, 以提高电池的散热性能和温度均匀性。

一、动力电池热特性分析

锂离子电池发热主要源于充放电过程中发生的电荷移动和化学反应。在充放电过程中，锂离子和电子在电池内部及外部电路中迁移，并产生和积累热量，进而影响电池的性能、寿命和安全性。

根据电池生热理论，电池产生的热量主要包括焦耳热、极化热、反应热和副反应热（艾哈迈德·A·佩萨兰，2002）。焦耳热是电流通过电极、隔膜等材料的欧姆电阻时产生的热量，其大小与电流平方和内阻有关；极化热是电极电势偏离平衡电势时产生的不可逆热量；反应热由锂离子在正负极材料中的嵌入和脱出产生；副反应热主要出现在过充、过放等异常条件下，正常工作通常可以忽略。

电池在不同工作状态下的发热量存在明显差异。随着充放电倍率提高，电池产热量和温升均会增加，电池温度通常在放电过程中持续升高，并在放电末期达到较高值（王涛等，2015）。因此，快速充电和高倍率放电对电池热管理系统提出了更高要求。

温度不仅影响电池的发热过程，还会影响其工作性能。低温条件下，电池内部电化学反应速率降低，导致内阻增大、容量减少和输出功率下降（张升水等，2003）；高温虽然能够增强电化学反应，但也会加快电池老化，降低容量和循环寿命。因此，电池热管理系统不仅需要限制电池的最高温度，还应减小电池组内部的温度差异。

二、热管理系统建模与仿真分析

为了分析动力电池在不同工况下的温度变化，需要建立相应的电池生热和传热模型。目前常用的模型主要包括电化学-热模型和电-热模型。电化学-热模型以电池内部发生的电化学反应为基础，考虑化学反应对电池发热的影响；电-热模型则通过电压、电阻和电容构建等效电路，并将电流通过电池内阻产生的能量损失转化为热量。

本文基于能量守恒原理建立电池热模型，通过含有内部热源项的热传导方程描述电池在发热和散热共同作用下的温度变化。在此基础上，利用数值仿真分析不同工况下电池的最高温度和温度分布，为热管理系统的结构优化提供依据。在具体建模过程中，对系统条件进行了简化。假设电池外表面与冷却介质之间存在对流换热关系，根据不同冷却方式设定相应的换热系数，以反映实际的散热能力。通过上述处理，可以对系统温度分布进行有效监测。

在仿真分析阶段，选取典型高负载的情况作为主要的研究对象，对电池温度变化进行计算。结果表明，在未进行优化的情况下，电池组内部存在明显温度梯度，中心区域温度显著高于边缘区域，随着工作时间延长，温差逐渐增大。这种不均匀分布会对

电池的性能产生不利影响，这也为后续优化提供了事实依据。

三、热管理系统优化设计

针对前文仿真分析中出现的电池温度分布不均及局部温升较高等问题，本文从系统结构设计及传热路径优化两个方面对动力电池热管理系统进行了改进。在优化过程中，既考虑了散热效率的提升，也兼顾了系统复杂度的控制，以保证方案具有应用价值。为更加直观地说明优化前后冷却结构的差异，对动力电池热管理系统流道布局进行展示，如图1所示。

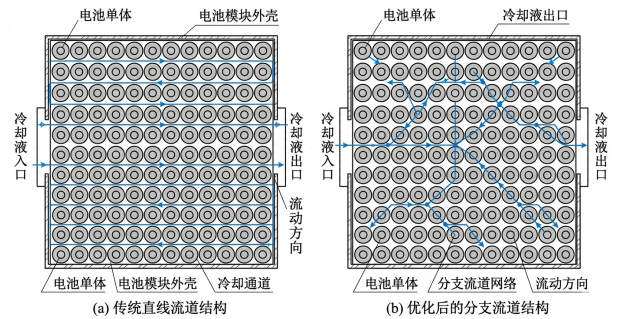


图1 优化前后动力电池冷却通道结构对比图

由图1可以看出，原始结构中冷却通道呈单一线性分布，冷却介质沿固定路径流动，导致靠近入口区域换热充分，而远离入口的区域散热能力明显下降，易形成局部高温区域。相比之下，优化后结构通过引入分支式流道设计，使冷却液能够在进入电池模块后进行多路径分配，从而覆盖更多电池单元区域。该结构有效缩短了冷却介质与各电池单体之间的换热路径，同时改善了流体分布均匀性，为后续温度均匀性的提升奠定了基础。

由此可见，冷却液沿通道流动时，其温度会持续升高，容易导致电池组内部温度分布不均。针对这一问题，可通过优化冷却剂通道结构、设置分流器以及调整管路布置，使冷却液进入电池模块后沿不同通道流动，从而提高各区域的散热能力。同时，通过优化冷却通道的位置和分布方式，可使电池组温度更加均匀，减少局部高温区域的形成。

在流体分配方面，应进一步对冷却液的入口流量和通道结构进行优化。通过调整不同通道的尺寸和布置，使冷却液在各通道中的分配更加均匀，从而提高液冷系统的散热能力。在保证冷却效果的同时，还应合理控制冷却液流量，以兼顾电池组的温度均匀性和冷却系统的泵功率。

在传热路径优化方面，间接液冷系统存在一定热阻，电池产生的热量需要穿过冷却管壁后才能被冷却液带走。因此，可通过增加导热管数量、优化管路结构以及提高冷却液的导热性能，增强电池与冷却液之间的热交换。采用导热性能较好的材料，也可以提高系统的导热和散热能力，进一步改善电池组的温度均匀性。

在完成上述优化设计后，对改进方案进行了仿真实验验证。结果表明，优化后的系统在温度控制及均匀性方面均有所提升。相比原始结构，电池模块的最高温度明显下降，且温度分布更加均

匀,说明所提出的优化措施能够在不增加系统复杂度的前提下提升热管理性能。

四、结果分析与讨论

从仿真结果来看,优化后的动力电池热管理系统在温度控制能力有了明显的改进。以典型高倍率放电工况为例,对比优化前后的温度变化曲线可以发现,原始系统中电池模块中心区域温度上升较快,且在运行一段时间后出现明显的温度峰值,而优化后系统能够有效延缓温升速率,使最高温度始终控制在合理范围内。该结果表明,通过对冷却结构进行调整,可以显著改善系统的散热效率,从而降低电池热积累风险。为进一步分析优化方案对电池温度变化的影响,对优化前后系统在相同工况下的温度变化过程进行对比,如图2所示。

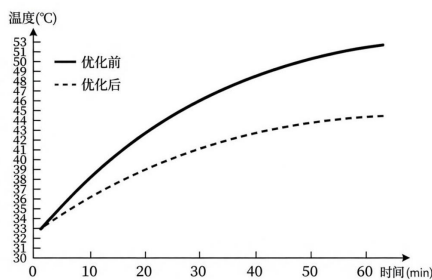


图2 优化前后电池温度变化曲线

如图2所示,在相同运行条件下,优化前电池组温度随时间快速升高,并在运行后期达到较高值;优化后电池组的温升速率减缓,最高温度明显降低。由曲线变化趋势可知,优化后的空气冷却结构能够提高电池组的冷却性能,减少热量在电池组内部积聚。该结果表明,通过优化电池组结构和冷却通道,可以降低电池组的最高温度,改善系统的散热效果(李伟等,2019)。

在温度分布方面,优化后的电池组也表现出较好的温度均匀性。原结构中,由于各冷却通道的空气流量分配不均,部分电池单体的冷却效果较差,导致电池组内部存在较大温差。优化方案通过调整流道结构和电池间距,使各冷却通道内的空气流量更加均匀,从而减小电池单体之间的温度差异。仿真结果表明,优化后电池组的最大温差降低,温度分布更加均匀(陈凯等,2017)。

进一步分析冷却空气的流动特性可知,气流分布会直接影响电池组的冷却性能。原结构中,部分冷却通道内的空气流速较低,不能及时带走电池产生的热量。通过调整气流通道和空气流

动方向,可以改善电池组内部的气流分布,提高温度均匀性并降低最高温度。往复式气流同样能够减小电池组内的温度差异,改善电池单体之间的温度均匀性(拉吉布·马哈穆德、朴灿宇,2011)。因此,空气冷却系统不仅需要考虑入口空气流量,还应合理设计冷却通道和气流路径。

本文采用简化模型对电池组的温度变化进行分析,但模型尚未充分考虑电池的实际结构、外部参数和边界条件。二维或三维模型能够更全面地描述电池内部的温度分布,但其结构较为复杂,计算量也相对较大。因此,后续研究应结合实验结果对模型进行验证,并根据实际运行条件进一步完善模型参数,以提高温度预测结果的准确性。

本文通过数值仿真对动力电池热管理系统进行了分析。结果表明,优化电池组和冷却通道的结构能够改善空气流动状态,降低电池最高温度,并减小电池单体之间的温差,从而提高电池组的温度均匀性。

五、结论

本文围绕新能源汽车动力电池运行过程中的温升和温度分布问题,对电池热管理系统进行了分析。通过分析锂离子电池的发热机理,建立基于能量守恒的简化热模型,并结合典型工况开展数值仿真,在此基础上对冷却通道结构和气流分配方式进行优化。

研究结果表明,未优化的空气冷却系统容易出现空气流量分配不均的问题,导致部分电池单体温度较高,并增大电池组内部温差。通过优化电池间距、冷却通道结构和空气流动路径,可以改善各冷却通道内的流量分布,提高空气与电池之间的对流换热效果。优化后的系统在降低电池最高温度和减小最大温差方面均有所改善,电池组内部的温度分布更加均匀。

本文采用简化热模型开展仿真分析,未对电池内部复杂的电化学反应以及全部实际边界条件进行详细描述,同时缺少实验结果的进一步验证。后续研究可结合实验测试对模型参数进行修正,并进一步研究空气冷却与液体冷却、相变材料或热管相结合的复合冷却方式,以提高电池热管理系统的冷却能力。

综上所述,通过优化电池组结构、冷却通道和空气流动路径,可以提高空气冷却式电池热管理系统的散热性能,降低电池组最高温度和内部温差,为动力电池热管理系统的结构设计提供参考。

参考文献

- [1] 王万兵. 新能源汽车“隐形引擎”: 电池热管理系统探秘 [J]. 时代汽车, 2025(15): 79-81.
- [2] 邓大成, 吴冬杰, 李阳等. 新能源汽车动力电池热管理系统的故障诊断与维修技术研究 [J]. 汽车维修技师, 2025(12): 36-37.
- [3] 杨家兴, 郭晓冬. 新能源汽车空调与动力电池热管理系统协同优化研究 [J]. 汽车测试报告, 2025(10): 46-48.
- [4] 王静远. 新能源汽车动力电池故障诊断及排除方法研究 [J]. 汽车维修技师, 2025(16): 90-93.
- [5] 刘浩. 新能源汽车电池系统故障诊断与维修技术研究 [J]. 时代汽车, 2025(16): 34-37.