

基于某款新能源汽车直冷和液冷电池热管理系统能耗仿真对比研究

Simulation-based Comparative Study on Energy Consumption of Direct and Liquid Cooling Battery Thermal Management Systems for a New Energy Vehicle

韩飞¹, 李强, 万方方, 陈柄林, 芦俊洁, 吴健
(宁波吉利罗佑发动机零部件有限公司 宁波 315336)

摘要: 本文基于某款新能源直冷电池热管理系统进行了能耗仿真研究。首先, 对该系统的组成进行了详细介绍, 并分析了其热管理过程中的能耗特点。接着, 建立了直冷和液冷电池热管理系统的能耗仿真模型, 考虑了电池充放电过程中的热损耗、温度变化以及热管理系统的能耗等因素。然后, 通过仿真实验, 对不同系统在不同工况下的能耗进行了计算和分析对比。结果显示, 对比直冷电池热管理系统, 该新能源液冷电池热管理系统在高温环境下能耗更高, 且随着负载的增加而增加。最后, 针对系统能耗问题, 提出了一些优化措施, 包括改进热管理系统的设计、优化电池的工作温度范围等。通过这些优化措施, 能够有效降低系统的能耗, 提高其能源利用效率。本研究对于新能源直冷电池热管理系统的能耗分析和优化具有一定的参考价值, 对于推动新能源技术的发展和应用具有一定的意义。

关键词: 锂离子电池建模; 电池冷媒直冷、液冷; GT-SUITE; 数值模拟

Abstract: This paper presents a simulation study on the energy consumption of a new energy direct cooling battery thermal management system. Firstly, the composition of the system is introduced in detail, and the energy consumption characteristics during the thermal management process are analyzed. Then, energy consumption simulation models for direct cooling and liquid cooling battery thermal management systems are established, considering factors such as thermal losses, temperature variations, and energy consumption of the thermal management system during battery charging and discharging processes. Subsequently, through simulation experiments, the energy consumption of different systems under different operating conditions is calculated and analyzed. The results show that compared to the direct cooling battery thermal management system, the new energy liquid cooling battery thermal management system has higher energy consumption in high-temperature environments, and the energy consumption increases with increasing load. Finally, to

address the energy consumption issue, some optimization measures are proposed, including improving the design of the thermal management system and optimizing the operating temperature range of the battery. These optimization measures can effectively reduce the system's energy consumption and improve its energy utilization efficiency. This study provides valuable insights for the analysis and optimization of energy consumption in new energy direct cooling battery thermal management systems, and it is of significance for promoting the development and application of new energy technologies.

Keywords: lithium-ion battery modeling; battery refrigerant direct cooling, liquid cooling; GT-SUITE; numerical simulation.

引言

随着新能源汽车的快速发展,电池热管理系统的效率和能耗成为了研究的焦点。电芯本体的温度控制对其性能和寿命有着十分至关重要的影响,因此设计有效的热管理系统显得必不可少。目前,直冷和液冷是电池热管理系统中常用的两种方法^[1]。直冷系统通过空调侧制冷剂直接冷却电池,而液冷系统则通过空调侧 chiller 对冷却液进行冷却,再利用水泵形成可循环流体来带走热量。然而,这两种系统在能耗和效率方面存在差异,需要进一步的研究和比较。

本文旨在基于某款新能源直冷和液冷电池热管理系统进行能耗仿真研究,以深入了解系统在不同工况下的能耗特性,并通过优化措施降低系统的能耗,提高能源利用效率。首先,对直冷和液冷电池热管理系统的组成和工作原理进行详细介绍,包括热传导路径、散热方式和温度控制策略等。其次,分析了系统在充放电过程中产生的热损耗和温度变化对能耗的影响。最后,建立了直冷和液冷电池热管理系统的能耗仿真模型,充分考虑了电池在充放电过程中的热损耗和热管理系统的能耗等一系列因素。通过仿真和实验结合的方式,对不同系统在不同工况下的能耗进行计算和分析,以验证模型的准确性和可靠性,我们发现直冷系统相较于液冷系统具有更低的能耗。最后,针对系统能耗问题,提出了一些优化措施,包括改进热管理系统的设计、优化电池的工作温度范围等^[2]。

综上所述,本研究基于一款新能源汽车模型,对直冷和液冷电池热管理系统的能耗进行了比较分析。结果表明,直冷电池热管理系统具有较低的能耗和更好的电池温度控制效果,有助于提高电池的性能和寿命,在高效冷却、节省空间、及提高可靠性和安全性等方面的更具优势,对未来电池热管理系统的设计和策略优化提供一些参考价值。

1. 二阶 R C 等效电路模型的建立

本文采用的是 60.2Ah 的三元锂电池。电池模型包含有: RC 回路等效电路模型、电池冷却回路、空调侧制冷回路,其中 RC 回路等效电路模型原理如图 1 所示^[3]。

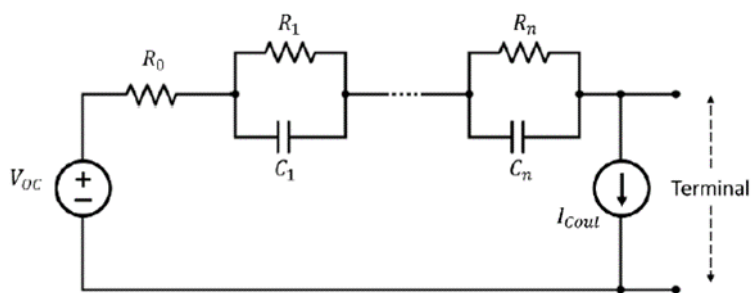


图1 RC回路等效电路模型

该电芯在不同温度和 SOC 下的欧姆内阻（ R_0 ）分别如下图 2 所示：

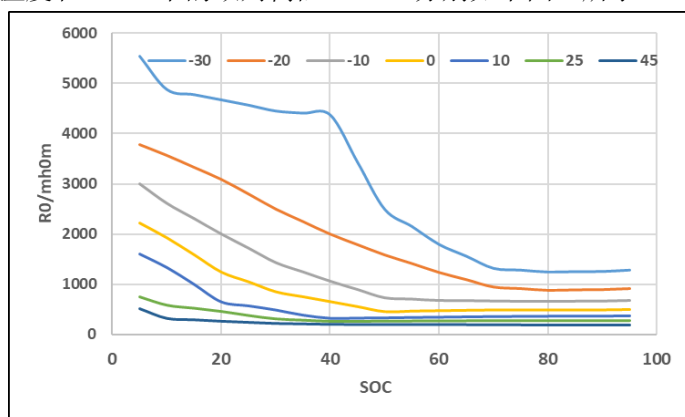


图2 电芯在不同温度和 SOC 下放电欧姆内阻分布

直冷和液冷电池包在高温 GLTC 开关空调时电池的总输出功率分别如图 3，4 所示：

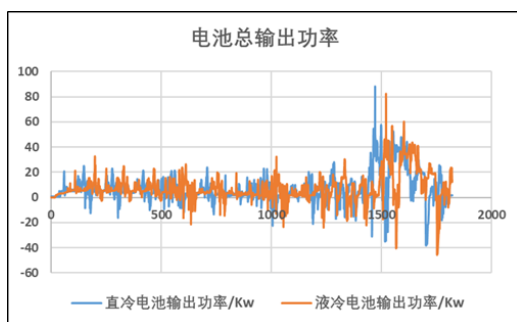


图3 高温 GLTC 开空调时电池总输出功率

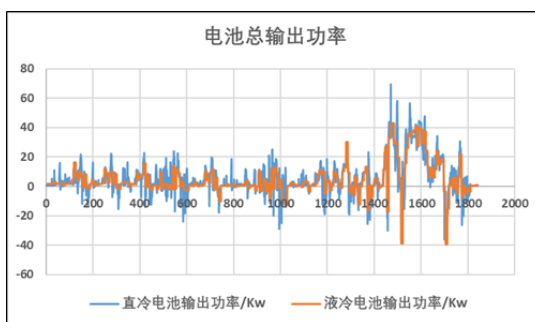


图4 高温 GLTC 关空调时电池总输出功率

2. 电池包直冷及液冷仿真模型建立

该款新能源车型液冷和直冷热管理原理图如图 5 所示；

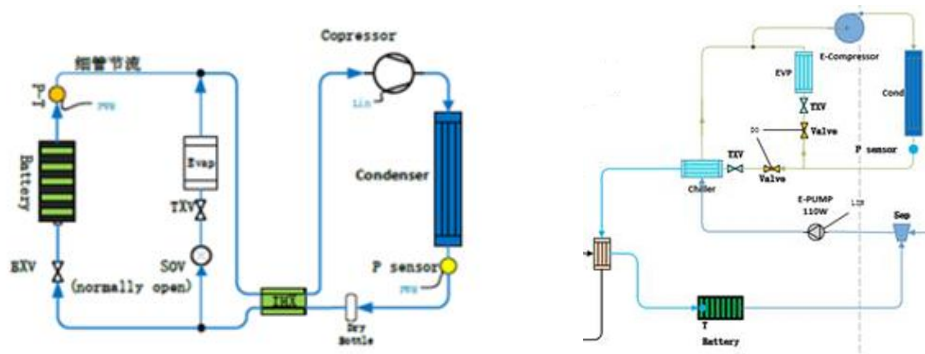


图 5 某款新能源汽车直冷和液冷电池回路热管理原理对比图

由于电池包的热管理与 HVAC 系统控制策略紧密相关,故将电池包热管理回路与 HVAC 系统集成仿真分析,本文中采用的制冷剂为 R134a^[4]。搭建了如图 6, 7 所示的直冷和液冷电池包热管理系统模型;

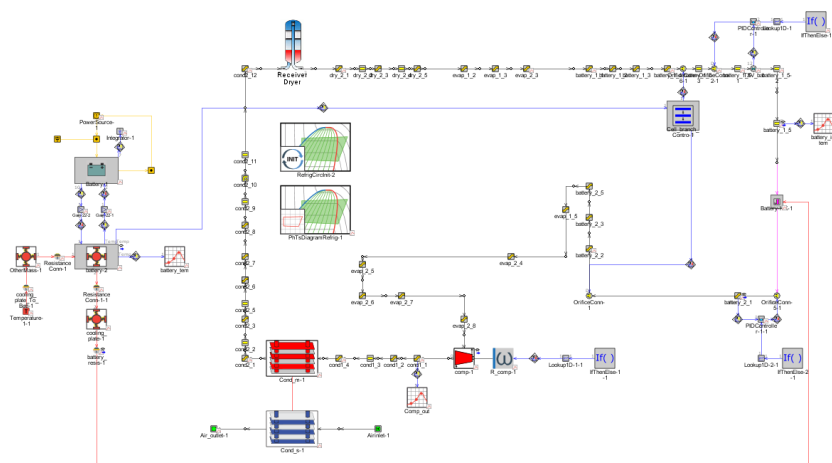


图 6 某款新能源汽车直冷电池回路热管理模型

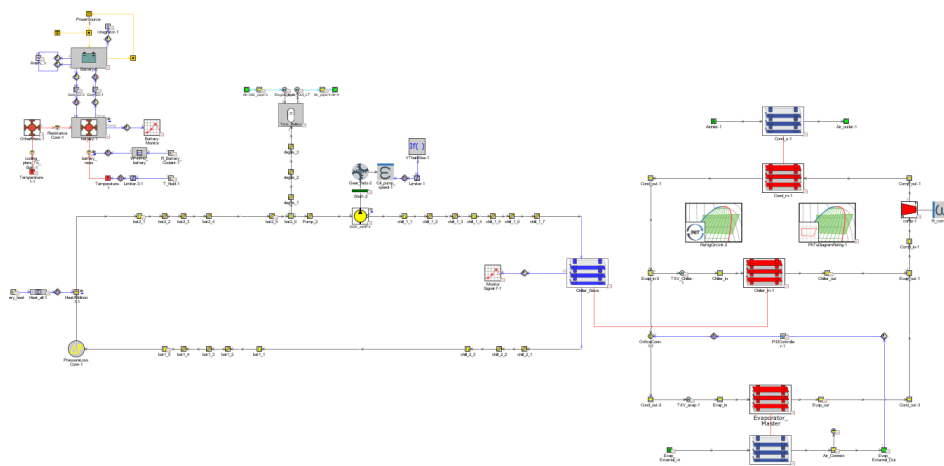


图 7 某款新能源汽车液冷电池回路热管理模型

3. 直冷及液冷电池包热管理系统仿真结果及分析

模型中采用了给定边界的电池包等效电路模型, 电池的输出功率来自于试验实际测试结果。试验中环境温度 40°C , 电池本身 SOC 充电窗口为 0.9, 压缩机转速随乘员舱温度和电芯温度进行策略可调^[5]。图 8,9 为高温 GLTC 循环下电芯仿真和试验的温降速率对比曲线。由图 8, 9 可以看出, 在系统仿真等效电路热管理建模方式下, 可以反映出直冷和液冷的电芯温降曲线和压缩机系统能耗;

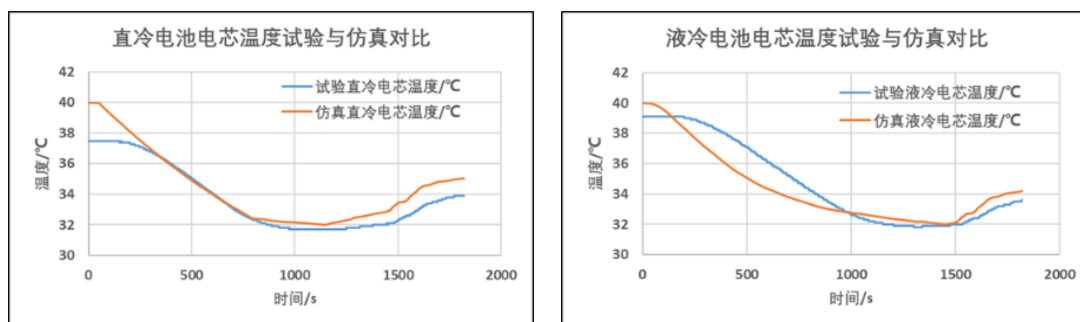


图 8 直冷和液冷热管理系统电芯仿真与试验温降对比曲线

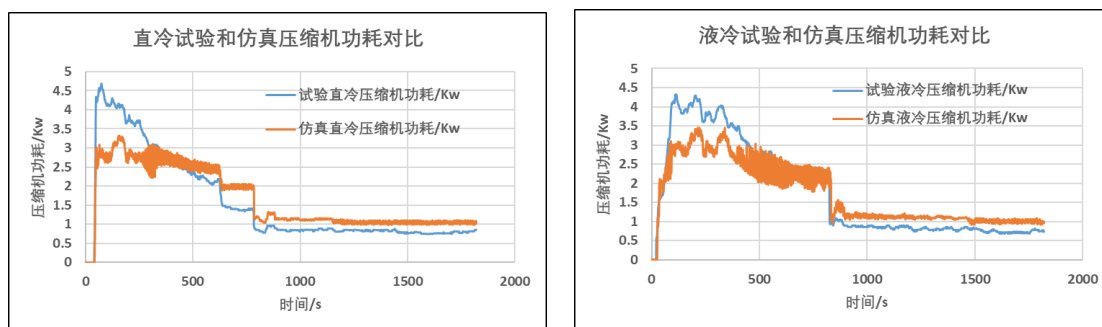


图 9 直冷和液冷热管理系统压缩机仿真与试验系统能耗对比曲线

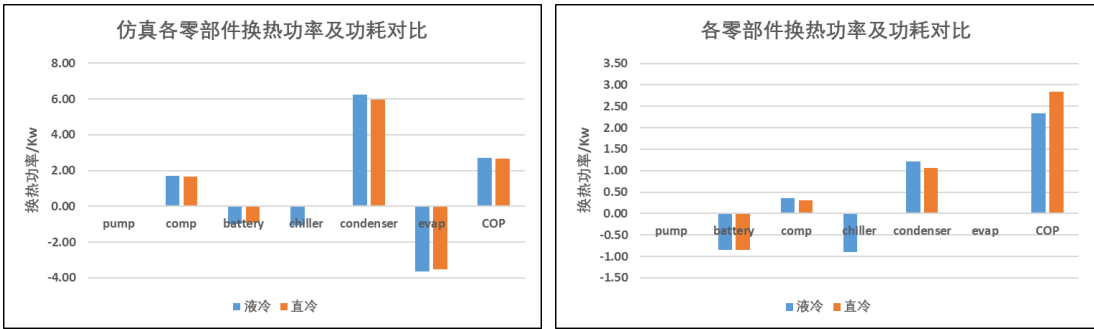


图 10 直冷和液冷热管理系统各零部件换热功率及 COP 对比曲线

通过仿真结果可以得到，该新能源车型在高温 GLTC 开空调工况下，直冷热管理系统电芯温降速率约为 $0.42^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，液冷热管理系统电芯温降速率约为 $0.33^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，液冷电池热管理系统能耗较直冷系统高 $0.14\text{kW}/\text{h}$ ，二种电池热管理系统方式的 COP 整体接近；在高温 GLTC 关空调的工况下，直冷热管理系统电芯温降速率约为 $0.65^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；液冷热管理系统电芯温降约为 $0.55^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，液冷系统能耗较直冷系统高 $0.15\text{kW}/\text{h}$ 左右，直冷电池热管理系统 COP 明显高于液冷，开空调时折合油耗收益约 $0.135\text{L}/\text{百公里}$ ，关空调时折合油耗收益约 $0.158\text{L}/\text{百公里}$ ；

4. 不同直冷电池包热管理策略的影响

直冷电池包和乘员舱的协同控制是一个控制难点^[6]。本文采用一种较简单的控制策略，目的在于模拟不同电芯温度控制策略和出口压力对电芯温升和系统能耗的影响。

通过 PID 调节电池包前电子膨胀阀的开度、开关、进出口压力等，考察电池包在不同控制策略下对系统能耗结果的影响。

计算边界条件为：环境温度 38°C ，冷凝器进风风速为 $5\text{m}/\text{s}$ ，进风温度 42°C ，电池进行 1C 恒功率放电^[7]。即压缩机通过监测电芯本体温度，PID 控制开关；再通过 PID 控制电芯出口温度 3°C 、进出口压力等一系列参数。当电芯本体温度高于电芯温度临界值时电子膨胀阀开启，压缩机转速升至 4000rpm ；低于电芯温度临界值时电子膨胀阀关闭，压缩机关闭。

控制策略 1	控制策略 2	控制策略 3	控制策略 4	控制策略 5	控制策略 6
--------	--------	--------	--------	--------	--------

- [1] Shen M , Gao Q . Structure design and effect analysis on refrigerant cooling enhancement of battery thermal management system for electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage , 2020(32) : 101940 .
- [2] 曾俊雄 , 熊飞 , 朱林培 , 等 . 液冷和冷媒直冷动力电池包冷却性能数值分析 [J]. 汽车工程学报 , 2020 , 10(06) : 436 - 442 .
- [3] 高帅 , 王俊博 , 朱佳慧等.基于二次节流的电池直冷系统设计与分析 [J].低温与超导 , 2023 , 51 (5) : 56-63.
- [4] LIU Y, ZHANG J. Design a J-type air-based battery thermal management system through surrogate-based optimization[J]. Applied Energy, 2019, 252: 113-119.
- [5] Gesellschaft V . VDI Heat Atlas [M]. Berlin: Springer Verlag , 2010 .
- [6] JIANG W, ZHAO J, RAO Z. Heat transfer performance enhancement of liquid cold plate based on mini V-shaped rib for battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116-122.
- [7] KIM J , OH J , LEE H. Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles [J]. Applied Thermal Engineering ,2019 ,149 :192-212.
- [8] 鲍文迪. 直冷式动力电池热管理性能分析[D].吉林大学,2019.