

新能源电池包冷却系统设计及其热性能仿真研究

彭梦龙

宁德时代新能源科技股份有限公司 福建宁德 352100

摘 要: 随着新能源电动汽车的快速发展, 电池包的热管理成为了影响电池性能和安全的重要因素。为了提升电池包的效率和延长使用寿命, 设计合理的冷却系统是至关重要的。本文基于电池包的热性能仿真研究, 提出了一种改进的冷却系统设计方案, 利用数值仿真技术对电池包的温度场进行分析, 探讨了冷却方式的优化方法。通过对比不同冷却方案, 验证了设计的冷却系统能够有效降低电池包的工作温度, 提升电池性能。结果表明, 合理的冷却设计对电池包的热管理有着显著的改善作用。

关键词: 新能源; 电池包; 冷却系统; 热性能; 仿真研究

引言

随着电动汽车市场的快速增长, 电池技术不断革新, 但随之而来的是电池热管理问题的日益突出。电池包的热管理对于电池的安全性、效率及使用寿命至关重要。传统的电池冷却系统存在散热不均、冷却效率低等问题。近年来, 随着计算机技术和仿真技术的发展, 电池热管理系统的设计可以通过数值仿真来进行优化。本文结合当前电池冷却技术的研究现状, 针对电池包的热性能问题, 设计了一种新型的冷却系统, 并通过仿真分析验证其可行性与优势。

1 热管理系统的现状与挑战

1.1 电池包的热管理要求

在电动汽车 (EV) 和储能系统中, 电池包作为核心的能源供应单元, 其热管理性能对整个系统的安全性、效率和使用寿命至关重要。电池在充放电过程中会产生大量的热量, 尤其在高功率输出时, 温度升高更加显著。如果电池包的热量不能及时散发, 温度将会持续上升, 超出电池的安全工作温度范围。这不仅会导致电池热失控, 严重时可能引发起火或爆炸, 威胁使用安全。同时, 过高的温度还会导致电池内部电化学反应效率的降低, 进而引起电池容量衰减加速, 影响其持续使用性能。电池的热管理不当, 还可能导致电池单体间的温度差异过大, 导致电池的不均匀老化, 进一步降低系统整体性能。因此, 设计电池包冷却系统时, 必须确保其具备高效的散热能力, 能够在不同工况下均匀、迅速地将电池包内部产生的热量散发出去, 维持电池在安全、稳定的工作温度范围内, 从而延长电池的使用寿命、提高其效

率并保障系统的安全运行。

1.2 现有冷却系统的类型与局限性

目前, 电池包的冷却系统主要有三种常见类型: 空气冷却、液冷和相变材料冷却, 每种系统都有其特点及局限性。空气冷却系统是一种简单而传统的冷却方式, 利用空气对流散热将电池包产生的热量带走。其主要优点是结构简单、成本低, 且易于实现, 但散热效率较差, 尤其是在高功率输出和大容量电池的应用场景下, 无法有效满足电池包的散热需求。对于大规模电池系统, 空气冷却往往会导致电池温度过高, 从而影响电池性能和使用寿命。液冷系统则通过在电池包内外布置冷却液管道, 利用液体具有较高的热容特性迅速将热量带走。相比空气冷却, 液冷系统具有更高的散热效率, 但其设计复杂、成本较高, 而且需要精确计算液体流动路径、冷却液的选择以及系统的封闭性, 增加了系统的维护和制造难度。相变材料冷却系统利用相变材料在发生相变时吸收热量的特点, 可以提供更为均匀的散热效果, 且具有较大的热储存能力, 理论上可以提高电池包的散热效率。然而, 该技术尚处于研发阶段, 技术尚不成熟, 且成本较高, 仍未得到广泛应用, 限制了其在实际应用中的普及。

2 冷却系统的设计与优化

2.1 冷却系统的基本设计原理

为了克服传统冷却系统的不足, 本文提出了一种结合液冷技术与相变材料的混合冷却系统设计。该设计基于液冷系统的高效散热特性和相变材料的显著热容量优势, 在电池包的结构内合理布局冷却管道和相变材料层, 以实现双重散

热效果,兼顾了散热效率和温度稳定性。液冷系统通过冷却液在管道中流动,将电池包内的热量有效地带走,确保温度分布更加均匀,避免出现局部过热区域。冷却管道采用蛇形布局,紧密贴合电池单体的表面,增加了与电池的接触面积,提高了热交换效率。冷却液的流动速度可以根据电池包的温度情况进行调节,当电池温度较高时,提高流速以增强散热效果;当温度较低时,降低流速以减少能量消耗。同时,在液冷系统中还设置了散热器和风扇,将冷却液吸收的热量散发到外部环境中,形成一个完整的散热循环。相变材料则通过吸收并储存热量,在电池温度升高到设定值时发生相变,吸收大量的潜热,延缓温度上升的速度。相变材料被填充在电池单体之间的间隙和电池包的外壳内侧,形成一个温度缓冲层。选择相变温度在 35~40℃之间的相变材料,使其能够在电池温度接近最佳工作温度上限时发挥作用,有效控制温度的进一步上升。这种设计不仅提高了散热效率,而且通过减缓电池温度波动,保证电池在较为稳定的工作温度范围内运行,从而避免因温度过高或波动过大而影响电池的安全性、性能及使用寿命。通过合理选择和布局冷却管道与相变材料,本文提出的混合冷却系统能显著提升电池包的热管理能力,增强电池的可靠性和性能。在正常工况下,液冷系统主要负责散热工作,将相变材料的作用保持在备用状态;当遇到高功率充放电等突发情况,电池产热急剧增加时,相变材料迅速发挥作用,吸收大量热量,配合液冷系统共同控制温度,确保电池包的安全运行。

2.2 冷却系统的优化方法

在冷却系统设计的过程中,除了追求更高的冷却效率外,系统的结构复杂性、制造成本、运行稳定性和维护性也是需要重点考虑的因素。为此,本文对冷却系统进行了多次优化,从多个方面提升系统的综合性能。首先,在液冷部分,优化了冷却管道的布局和流速,确保冷却液能够均匀流经电池包内的每个热源区域,提高冷却液与电池之间的热交换效率。通过计算流体动力学(CFD)仿真,对不同的管道布局方案进行了模拟分析,比较了蛇形、平行、叉形等多种布局的温度分布情况,最终选择了蛇形布局,这种布局能够使冷却液在流动过程中与电池表面充分接触,避免了冷却死角的出现。同时,对管道的直径进行了优化,直径过大可能会增加系统体积和成本,直径过小则会增加流体阻力,经过多次仿真试验,确定了最佳的管道直径,在保证冷却效果的同时

降低了系统的能耗。其次,在相变材料的选择上,综合考虑了材料的相变温度、热导率、相变潜热、循环稳定性、成本等特性,选用了具有适合工作温度范围的复合相变材料。该复合相变材料以石蜡为基体,添加了一定比例的膨胀石墨,膨胀石墨具有较高的热导率,能够有效提高相变材料的整体热传导性能,解决了传统相变材料热导率低的问题。同时,这种复合相变材料经过多次相变循环后,其相变潜热的衰减率较低,保证了系统的长期稳定运行。为了降低生产成本并提高系统的可维护性,优化后的冷却系统采用了模块化设计,将液冷系统和相变材料冷却部分分为不同的模块,每个模块都可以独立进行安装、拆卸和维修。这种设计不仅便于生产和维修,而且有利于根据不同的电池包规格和散热需求进行灵活组合和调整。例如,对于功率较小的电池包,可以减少液冷模块的数量;对于功率较大的电池包,则可以增加相变材料模块的填充量。此外,仿真结果表明,优化后的冷却系统能够在不同工作环境下实现较低的电池温度,特别是在高功率充放电情况下,系统的冷却效果尤为突出,能够有效避免电池包因过热导致的热失控问题,提升电池包的温控能力。在 -10℃到 40℃的环境温度范围内,该冷却系统都能将电池包的工作温度控制在 25~40℃的最佳范围内,温度均匀性也得到了显著提升,电池单体之间的最大温差不超过 3℃。

3 热性能仿真研究与结果分析

3.1 热性能仿真模型的建立

为了验证所设计冷却系统的实际效果,本文采用计算流体动力学(CFD)仿真方法建立了电池包的热性能模型。该仿真模型基于三维建模软件构建,全面涵盖了电池单体、冷却管道、冷却液、相变材料以及电池包外壳等组件,精确模拟了电池包的结构和各组件之间的相对位置关系。在模型中,对电池单体的电化学反应产热过程进行了模拟,根据电池的充放电电流、电压、内阻等参数,计算出电池在不同工况下的产热速率。电池单体的产热模型采用了简化的电化学-热耦合模型,考虑了熵变热、极化热和欧姆热的综合作用,能够较为准确地反映电池的实际产热情况。冷却管道和冷却液的流动与热交换过程是模型的重点部分,模型中考虑了冷却液在管道内的流动状态(层流或湍流)、热导率、比热容、粘度、流速等重要因素,通过求解 Navier-Stokes 方程和能量方程,模拟冷却液的流动和热量传递过程。相变材料

的相变过程则通过焓法进行模拟,考虑了材料在相变过程中的温度变化和潜热释放或吸收,能够准确反映相变材料在不同温度下的状态和热性能变化。电池包外壳的热传导和热辐射特性也被纳入模型中,外壳材料的热导率、emissivity 等参数根据实际选用的材料进行设置,以模拟外壳与外部环境之间的热量交换。整个模型的边界条件设置为:电池包外部环境温度根据不同的仿真工况进行设定,冷却系统的入口冷却液温度和流速也可以根据需要进行调整。通过精确的数值模拟,仿真能够预测不同工况下电池包内的温度分布情况,以及冷却液的流动状态、相变材料的相变情况等。这种仿真分析不仅能揭示电池包的温度变化规律,还能为优化冷却系统提供理论依据。通过对比不同冷却方案的效果,本文评估了每种冷却方式的优缺点,并通过数据反馈进一步优化冷却系统设计,以确保系统能够在实际应用中高效运行。该仿真研究为电池包冷却系统的改进和优化提供了科学依据,并为进一步提升电池包的热管理性能奠定了基础。

3.2 仿真结果与分析

通过仿真分析,本文得出了一些关键结果,表明采用混合冷却系统相比传统的液冷和空气冷却方案,在电池包温度控制方面具有显著优势。首先,混合冷却系统能够显著降低电池包的最大温度,并且温度分布更加均匀,避免了传统冷却系统可能出现的局部过热现象。在相同的高功率充放电工况下,混合冷却系统使电池包的最大温度比传统液冷系统降低了 4~6℃,比空气冷却系统降低了 10~15℃。电池单体之间的最大温差也得到了有效控制,混合冷却系统下的最大温差不超过 3℃,而传统液冷系统的最大温差为 5~7℃,空气冷却系统则达到了 8~12℃。尤其在高功率充放电情况下,混合冷却系统能够更好地抑制电池包内温度的急剧上升,减少因热失控引发的安全隐患。其次,相变材料在系统中的作用也得到了充分体现,它能够有效缓解电池包内部的温度波动,起到了稳定电池温度的作用,避免了温度剧烈变化对电池性能的不利影响。在仿真过程中,当电池包突然进入高功率放电状态时,传统液冷系统需要一定的响应时间才能将温

度控制住,期间电池温度会出现较大幅度的波动;而混合冷却系统中的相变材料能够在短时间内吸收大量热量,使温度波动幅度降低了 50% 以上,为液冷系统的调节争取了时间,保证了电池温度的稳定性。通过对冷却液流动路径和相变材料布局的进一步优化,仿真结果表明,冷却效率可以得到进一步提升,系统的稳定性和可靠性也将得到增强,从而满足电池包在不同工作条件下的热管理需求。例如,将冷却管道的入口和出口位置进行调整后,冷却液的流动更加均匀,电池包内的温度分布也更加合理;将相变材料在电池包高温区域进行重点填充后,该区域的温度控制效果得到了显著改善。此外,对不同环境温度下的仿真结果分析表明,混合冷却系统具有较强的环境适应性。在低温环境下,混合冷却系统可以通过减少冷却液流量和利用相变材料的保温作用,避免电池温度过低;在高温环境下,系统则能充分发挥液冷和相变材料的协同作用,将电池温度控制在安全范围内。这一结果为优化冷却系统的实际应用提供了宝贵的参考,表明混合冷却系统在新能源汽车电池包热管理中具有广阔的应用前景。

4 总结

电池包的热管理问题是电动汽车技术发展的瓶颈之一,本文通过设计与优化冷却系统,并结合热性能仿真分析,提出了一种有效的电池包冷却方案。仿真结果表明,优化后的冷却系统能够有效降低电池温度,提升电池包的稳定性和安全性。未来,随着技术的不断进步,冷却系统的设计将更加精细化,电池包的热管理也将更加高效,为电动汽车的推广应用提供强有力的支持。

参考文献:

- [1] 李鹏. 新能源电池热管理技术研究 [J]. 现代制造工程, 2021(7):118-121.
- [2] 张庆庆. 电池冷却系统的优化设计与仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2022(11):56-59.
- [3] 王并斌. 电动汽车电池热管理系统的应用 [J]. 电池工业, 2023(2):45-48.