

纯电动汽车锂离子电池热管理系统优化设计与仿真研究

谢雄伟

延安职业技术学院 陕西延安 716000

摘要：本研究针对纯电动汽车锂离子电池在充放电过程中产生的热量问题，开展了热管理系统的优化设计与仿真研究。通过分析不同类型热管理系统的优缺点，结合理论分析和仿真建模，优化了散热材料和结构设计，提升了散热效率。研究采用模块化设计理念，将电池组划分为多个独立散热单元，并通过仿真验证了优化方案的实际效果。实验结果表明，优化后的热管理系统在高温工况下能有效降低电池温度，确保其在最佳工作范围内稳定运行，延长电池寿命，提升整车性能。本研究为纯电动汽车锂离子电池热管理系统的设计和改进了提供了理论依据和技术支持。

关键词：纯电动汽车；锂离子电池；热管理系统；优化设计；仿真研究

引言

纯电动汽车（PEV）作为新能源汽车的重要发展方向，近年来在全球范围内得到了广泛关注和應用。其环保、高效的特点使其成为未来交通领域的重要替代方案。锂离子电池作为 PEV 的核心动力源，其性能直接影响整车的续航能力、安全性和可靠性。然而，锂离子电池在充放电过程中会产生大量热量，若不及时管理和散热，将导致电池温度升高，进而影响电池寿命和性能，甚至引发安全隐患。

针对这一问题，锂离子电池热管理系统的研究显得尤为重要。热管理系统通过控制和调节电池温度，确保其在最佳工作范围内运行，从而延长电池寿命，提升整车性能。本研究旨在通过优化设计锂离子电池热管理系统，提升其散热效率，确保电池在各类工况下稳定运行。研究方法主要包括理论分析、仿真建模和实验验证。通过分析不同类型热管理系统的优缺点，结合仿真技术进行方案优化，并通过实验验证优化方案的实际效果。

研究的意义在于为纯电动汽车锂离子电池热管理系统的设计和改进了提供理论依据和技术支持，推动 PEV 技术的进一步发展，提升其在市场中的竞争力。通过本研究，期望能够为相关领域的研究者和工程师提供有价值的参考，促进纯电动汽车产业的健康发展。

1 锂离子电池热管理系统的理论基础

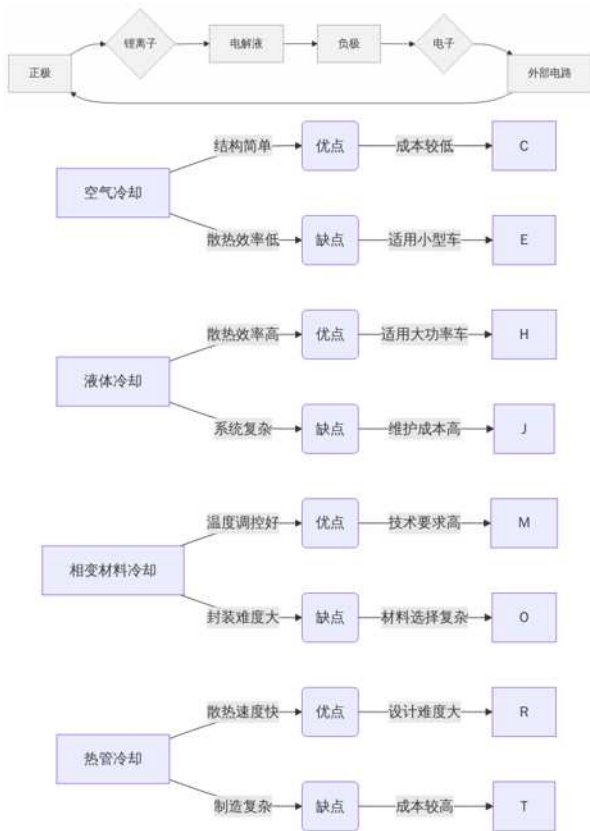
锂离子电池作为纯电动汽车的核心部件，其工作原理及热特性对整车性能至关重要。锂离子电池通过正负极之间的锂离子嵌入和脱嵌过程实现电能的存储与释放。具体而言，

充电时，锂离子从正极脱嵌，经过电解液迁移至负极并嵌入其中；放电时，锂离子则从负极脱嵌，返回正极。这一过程伴随着电化学反应，产生热量。若热量积累过多，将导致电池温度升高，影响电池性能，甚至引发安全隐患。

热管理系统在纯电动汽车中扮演着关键角色，其主要功能是控制和调节电池温度，确保其在最佳工作范围内运行。高效的热管理系统不仅能延长电池寿命，还能提升电池充放电效率和整车续航能力。尤其在高温或低温环境下，热管理系统的性能直接关系到电池的安全性和可靠性。

热管理系统主要分为空气冷却、液体冷却、相变材料冷却和热管冷却等类型。空气冷却系统结构简单，成本较低，但散热效率有限，适用于小型电动车。液体冷却系统通过循环流动的冷却液带走热量，散热效率高，适用于大功率电动车，但系统复杂，维护成本较高。相变材料冷却利用材料的相变吸热特性，具有较好的温度调控能力，但相变材料的选取和封装技术要求较高。热管冷却利用热管的高效导热特性，散热速度快，但系统设计和制造难度较大。

为更直观地展示锂离子电池的工作原理及不同类型热管理系统的结构，本文引用了图 1 和图 2。图 1 展示了锂离子电池的正负极、电解液及锂离子迁移过程，揭示了其基本工作原理。图 1 则对比了空气冷却、液体冷却、相变材料冷却和热管冷却四种热管理系统的结构特点，帮助读者理解各系统的优缺点。



通过上述分析，可以看出不同类型的热管理系统各有优劣，选择合适的系统需综合考虑车辆类型、使用环境和成本等因素。

2 热管理系统优化设计

优化设计的目的在于提升锂离子电池热管理系统的效能，确保电池在最佳温度范围内稳定运行，延长其使用寿命，并提高整车的安全性和续航能力。优化设计应遵循以下原则：首先，系统设计需满足高效散热的需求，确保热量及时排出；其次，设计应注重经济性和可行性，避免过度复杂化；最后，系统应具备良好的可靠性和适应性，能够在不同环境条件下稳定工作。

热管理系统设计的关键参数包括散热材料的热导率、散热结构的几何尺寸、冷却介质的流量和温度等。这些参数对系统的散热性能有显著影响。例如，散热材料的热导率越高，热量传递效率越高；散热结构的几何尺寸直接影响散热面积和流体流动特性；冷却介质的流量和温度则决定了热量带走的能力。为更清晰地展示这些参数的影响，本文引用了表 1。

参数	影响描述
散热材料热导率	热导率越高，热量传递效率越高，散热性能越好
散热结构几何尺寸	几何尺寸影响散热面积和流体流动特性，合理设计可提升散热效果
冷却介质流量	流量越大，热量带走能力越强，但需平衡泵耗和系统压力
冷却介质温度	介质温度越低，散热效果越好，但需防止电池温度过低影响性能

具体优化设计方案包括散热材料选择和散热结构设计两个方面。在散热材料选择上，优先考虑高热导率的材料，如铝合金、铜合金等。这些材料不仅导热性能优异，还具备良好的机械强度和耐腐蚀性。此外，新型纳米材料的应用也值得探索，因其具有更高的热导率和更轻的质量。

在散热结构设计上，采用模块化设计理念，将电池组划分为多个独立散热单元，每个单元配备独立的散热通道。这种设计有助于提高散热均匀性，防止局部过热。同时，优化散热鳍片的结构和布局，增加散热面积，提升对流散热效果。对于液体冷却系统，设计合理的流道布局，确保冷却液均匀流经每个电池单元，最大化散热效率。

综上所述，通过合理选择散热材料和优化散热结构，结合仿真技术的验证，可有效提升锂离子电池热管理系统的性能，满足纯电动汽车高效、安全运行的需求。

3 仿真模型的建立与验证

在纯电动汽车锂离子电池热管理系统的优化设计与仿真研究中，仿真模型的建立是关键环节。仿真模型的建立方法基于热力学和流体力学的基本原理，结合电池热特性的数学模型。首先，通过能量守恒方程和傅里叶热传导定律，建立电池单元的热传导模型。其数学表达式为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c}$$

其中， T 为温度， t 为时间， α 为热扩散率， ∇^2 为拉普拉斯算子， q 为单位体积热生成率， ρ 为密度， c 为比热容。

其次，考虑冷却介质的流动特性，采用纳维-斯托克斯方程描述流体动力学行为：

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

其中， $\mathbf{u}$ 为流体速度， p 为压力， μ 为动力粘度， $\mathbf{f}$ 为体积力。

模型参数的设置需确保其合理性和准确性。散热材料的热导率、密度和比热容等参数根据实际材料特性选取，如

铝合金的热导率取值为。冷却介质的流量和温度则根据实际工况设定,流量范围为至,温度设定为至。这些参数的设置基于实验数据和工程经验,确保模型能够真实反映实际系统的热管理性能。

为验证模型的准确性,采用实验数据进行对比分析。通过搭建实验平台,测量不同工况下电池的温度分布,并与仿真结果进行对比。验证方法包括计算温度分布的均方根误差(RMSE)和相对误差,具体公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{sim},i} - T_{\text{exp},i})^2}$$
$$\text{相对误差} = \frac{\sum_{i=1}^N |T_{\text{sim},i} - T_{\text{exp},i}|}{\sum_{i=1}^N T_{\text{exp},i}} \times 100\%$$

其中, $T_{\text{sim},i}$ 为仿真温度, $T_{\text{exp},i}$ 为实验温度, N 为测量点数。

验证结果显示,仿真模型在不同工况下的温度分布与实验数据吻合良好,RMSE 值在以内,相对误差小于,表明模型具有较高的精度和可靠性。

综上所述,通过建立基于热力学和流体力学原理的仿真模型,合理设置模型参数,并通过实验数据进行验证,可以确保仿真模型的准确性和可靠性,为纯电动汽车锂离子电池热管理系统的优化设计提供有力支持。

4 仿真结果分析与讨论

在纯电动汽车锂离子电池热管理系统的优化设计与仿真研究中,仿真结果的展示及其分析是评估优化方案效果的重要环节。本研究对比了三种不同的优化方案,分别为方案 A(基础冷却系统)、方案 B(增加散热鳍片)和方案 C(优化冷却流道设计)。仿真结果显示,方案 A 在高温工况下电池最高温度达到 45℃,而方案 B 和方案 C 分别降至 40℃ 和 38℃。这表明增加散热鳍片和优化冷却流道设计均能有效降低电池温度,提高热管理系统的性能。

进一步分析发现,方案 B 在电池中部区域的温度分布较为均匀,但边缘区域仍存在局部高温现象。相比之下,方案 C 不仅在整体温度分布上更为均匀,且边缘区域的温度也得到了有效控制。这主要归因于优化后的冷却流道设计,使得冷却介质能够更均匀地流经电池表面,提升了散热效率。

在实际应用中,方案 C 的优化效果显著,具有较高的实用价值。然而,其局限性在于对冷却系统的结构设计要求

较高,增加了制造成本和复杂性。此外,仿真模型未考虑极端工况下的热管理性能,实际应用中需进一步验证其在复杂环境下的可靠性。

通过对比分析不同优化方案的仿真结果,本研究为纯电动汽车锂离子电池热管理系统的设计提供了重要参考。尽管方案 C 在实际应用中存在一定局限性,但其显著的降温效果和均匀的温度分布仍使其成为较为理想的优化方案。未来研究可在此基础上,进一步探索成本更低、结构更简单的优化设计,以提升系统的综合性能。

5 结论与展望

本研究通过理论分析、仿真建模和实验验证,对纯电动汽车锂离子电池热管理系统进行了优化设计,取得了显著成果。创新点主要体现在以下几个方面:首先,采用模块化设计理念,将电池组划分为多个独立散热单元,提升了散热均匀性;其次,优化了散热材料和结构,显著提高了散热效率;再次,结合仿真技术进行方案验证,确保了设计的可行性和有效性。

展望未来,研究方向可进一步拓展至以下几个方面:一是探索新型散热材料和技术的应用,如纳米材料和相变材料,以提升散热效率;二是优化系统结构设计,降低制造成本,提高经济性;三是考虑多因素耦合影响,建立更全面的仿真模型,提升模型的预测精度。应用前景方面,随着纯电动汽车市场的快速发展,高效、可靠的热管理系统将具有广阔的应用前景,对提升整车性能和安全性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 石方鉴,栗广生,余冬,等.新能源汽车电池包冷却性能影响因素分析[J].装备制造技术,2025,(04):31-36.
- [2] 崔广磊,李超.纯电动汽车电池组测试与验证平台的研制[J].汽车知识,2024,24(09):13-15+72.
- [3] 陈庆柠.纯电动汽车电池管理系统维护策略与性能评估[J].时代汽车,2024,(11):106-108.
- [4] 刘頔,张国华,马仕昌,等.纯电动汽车用锂离子电池的低温性能[J].电池,2023,53(03):267-270.
- [5] 刘吉仁.纯电动汽车锂离子电池性能分析及维护保养[J].南方农机,2022,53(08):144-146.

作者简介:谢雄伟(1997—),男,汉,陕西延安,延安职业技术学院,本科,助教,汽车检测与维修。