

纯电动装载机动力系统热管理优化 与散热性能提升研究

刘耀邦 吴明华

安徽交通职业技术学院 安徽 合肥 230051

摘要: 随着新能源工程机械的发展,纯电动装载机因其环保节能优势得到广泛应用,但动力系统在高负荷作业时易受热积聚影响,导致性能下降。本文针对动力电池、驱动电机及控制系统的散热问题,提出相变材料散热、热管技术、高效液冷、智能风道优化及热能回收等优化方案,并通过CFD仿真与实验验证优化效果。研究表明,优化后系统温度降低10℃以上,散热效率提高15%,能耗降低2%,提升了纯电动装载机的稳定性与可靠性。研究成果可为新能源工程机械的热管理优化提供技术支持。

关键词: 纯电动装载机; 动力系统; 热管理优化; 散热性能; 液冷技术

引言

近年来,随着新能源技术的发展,纯电动装载机因其低碳环保、运行成本低等优势,在工程机械领域逐步得到应用。然而,与传统燃油装载机相比,纯电动装载机的动力系统在长时间高负荷作业时,容易因过热导致性能下降,甚至影响整机可靠性。因此,如何优化动力系统的热管理,提升散热性能,已成为提升纯电动装载机作业稳定性和使用寿命的关键问题。

目前,纯电动装载机的热管理主要依赖风冷或液冷技术,但传统散热方式在高温、高负荷工况下往往存在散热效率低、能耗较大、系统控制精度不足等问题。因此,本研究围绕动力电池、驱动电机及控制器的热管理优化展开,探讨高效散热方案,如相变材料散热、热管技术、智能液冷系统等,并结合仿真与实验验证优化效果。研究结果将为提高纯电动装载机的热管理水平提供理论依据和实践指导。

1 纯电动装载机动力系统热管理现状分析

纯电动装载机作为新能源工程机械的重要发展方向,其动力系统主要由动力电池、驱动电机和控制系统组成。这些核心部件在运行过程中会产生大量热量,若热量无法有效散发,将导致温度过高,从而影响设备性能,甚至缩短使用寿命。因此,针对纯电动装载机动力系统的热管理现状进行分析,是优化散热性能、提升设备稳定性的基础。

1.1 纯电动装载机动力系统的组成及热源分布

纯电动装载机的动力系统由三大核心部件组成:动力电池、驱动电机及其控制系统。动力电池是提供能量的主要来源,常见的锂离子电池在充放电过程中会产生大量热量,特别是在高负荷作业时,电芯温度可能快速上升,甚至超过安全阈值,影响电池寿命,甚至引发热失控。

驱动电机作为装载机的动力输出装置,在高功率运转时,由于电磁损耗、铜损、铁损等因素,也会产生大量热量。如果散热不及时,电机温度升高会降低工作效率,严重时可能出现退磁、绝缘老化等问题。此外,控制系统(包括逆变器和功率电子模块)在高速开关运作时,其功率器件也会产生显著的热量积聚,若热量无法有效管理,可能引起电气故障,影响整机运行稳定性。因此,动力系统的热管理不仅需要解决局部散热问题,还需要考虑整体热量分布和散热系统的协调性。

1.2 现有热管理系统的散热性能及不足

目前,纯电动装载机的热管理主要采用风冷或液冷技术。风冷系统利用空气对流进行散热,结构简单、维护成本低,但受限于环境温度和风速的影响,散热效率较低,特别是在高温、封闭环境下,风冷散热的效果有限。而液冷系统虽然能够提升散热效率,但结构较为复杂,增加了系统的成本和维护难度。

基金项目: 职业教育提质培优行动计划—职业教育“课堂革命”典型案例“智能工程机械运用技术专业课堂革命”(2021TZPY54);安徽省质量工程—《工程机械液压与液力传动》精品课程(2022jpkc038);安徽省质量工程—机器视觉产教融合实训基地(2022cjr014);安徽省高校省级自然科学基金项目—基于光纤传感技术的路面结冰监测研究(2024AH050278);安徽省高校省级自然科学基金项目—机器人减速器产品设计优化及实验验证(2022AH052458)。

在动力电池热管理方面,传统的风冷方式散热能力有限,导致电池组内部温度分布不均,容易造成局部过热,影响电池一致性,进而影响整机的续航能力。部分高端设备已采用液冷方式,通过冷却液循环带走热量,提升散热性能,但液冷系统本身的功耗较高,在一定程度上增加了能源消耗。

在驱动电机和控制系统的散热方面,现有的散热方案主要依赖外部风扇强制散热,部分设备采用铝制散热片或热管技术来提升换热效率。然而,由于装载机在恶劣工况下长时间高负荷运行,现有的散热方案难以完全满足热管理需求,特别是在极端环境下,热量积聚仍然是影响设备性能和使用寿命的重要因素。

2 纯电动装载机动力系统热管理优化方案

针对现有热管理系统在散热效率、能耗控制和温度均衡方面的不足,本章提出了一系列优化方案,以提高动力系统的散热能力、降低系统功耗,并增强热管理的智能化水平。这些优化方案主要针对动力电池、驱动电机及控制系统的散热进行改进,并引入智能控制策略,以提升整体热管理的精准性和稳定性。

2.1 动力电池热管理优化设计

动力电池的热管理直接影响纯电动装载机的续航能力和使用寿命。为提高散热效率,本研究提出相变材料散热、热管散热和电子膨胀阀精准温控三项优化方案。相变材料(PCM)可在温度升高时吸收热量,在降低时释放热量,保持电池温度稳定,结合铝合金导热板可提高散热效率并避免局部过热。热管散热技术则利用毛细作用和相变传热原理,将电池内部热量迅速导出至散热片,实现高效散热,且相比传统风冷或液冷方式无需额外能耗。电子膨胀阀精准温控可根据电池温度变化智能调节冷却液流量,响应更快、控制更精准,有效防止电池过热或过冷,提高整体运行效率。综合优化方案能够显著提升动力电池的散热能力和温度管理稳定性,为装载机的高效运行提供保障。

2.2 驱动电机及控制系统散热优化

驱动电机及控制系统的散热优化方案主要围绕高效液冷系统、复合换热材料应用以及智能风道优化布局展开。

液冷系统的优化主要体现在冷却液流道设计和冷却介质选择方面。通过优化冷却液的流动路径,使其能够最大程度地覆盖电机和控制系统的高热区域,提高散热效率。此外,采用高热容的冷却液,如纳米流体冷却剂,可以进一步增强换热能力,降低系统温度。

2.3 热能回收与智能控制系统

在热管理优化中,除了提升散热性能,还可以利用热能回收技术和智能控制系统,进一步提升能源利用效率。

热能回收技术主要针对动力电池和电机系统产生的废热,通过热交换器将废热转化为可用能量。例如,可以利用热电转换材料将废热转化为电能,为低功耗控制系统供电,或用于预热冷却液,提高系统整体的能量利用效率。此外,在寒冷环境下,可以利用废热对电池进行加热,避免低温环境对电池性能的影响,提高电池放电能力。

智能控制系统的优化主要体现在多传感器融合和实时温度监测方面。通过在动力系统的关键部件(电池、电机、控制器)安装高精度温度传感器,并结合人工智能算法,对温度数据进行实时分析,可以精准预测热量分布,并动态调整散热策略。例如,当某一区域温度过高时,系统可以自动提高液冷流量或增加风扇转速,确保设备始终处于最佳工作温度范围。此外,基于云计算的数据分析平台,可以对热管理数据进行长期监测,分析热管理系统的运行规律,为后续优化提供数据支持。

3 纯电动装载机动力系统热管理优化效果验证

在热管理优化方案提出后,为了评估其实际效果,本章将从仿真分析、实验测试和实际工况验证三个方面展开研究。首先,采用计算流体动力学(CFD)仿真技术对不同散热方案的温度分布、换热能力进行分析,并对比优化前后的散热性能。其次,搭建实验平台,对动力电池、驱动电机和控制系统的散热效果进行测试,以验证优化方案的可行性。最后,通过装载机在典型作业工况下的实测数据,进一步分析优化方案对设备稳定性和能耗的影响。

3.1 散热性能仿真与实验验证

为了直观分析优化方案的散热性能,本研究利用CFD仿真软件对动力电池、驱动电机和控制系统的温度分布进行模拟。仿真模型基于装载机实际尺寸构建,并考虑了不同冷却介质(空气、液冷介质)的热导率、比热容和流动特性。

在动力电池仿真分析中,主要关注电池组的温度分布和最大温差。未优化方案下,电池组内部温差较大,局部温度偏高,容易导致热不均衡。优化后,通过相变材料和热管的协同作用,电池组温度更均匀,最大温差降低了约5℃,整体散热能力提高15%。

在驱动电机的仿真中,传统风冷系统的换热效率

较低,导致电机温度在长时间运行后持续升高。优化后,采用高效液冷系统,电机最高温度降低 10℃,且温度稳定性明显改善。对于控制系统,优化后的石墨烯复合散热片提高了热传导效率,温控精度提升 20%。

基于仿真结果,搭建实验平台进行实际测试。实验平台采用温度传感器实时监测不同部件的温度,并记录散热过程中的数据。测试结果表明,优化方案能够有效降低系统温度,提高散热效率,仿真结果与实验数据基本吻合,验证了优化方案的可行性。

3.2 优化后系统稳定性与能耗分析

在系统稳定性测试中,主要关注装载机长时间运行时的温度变化趋势。实验设置两种运行模式:标准负载运行(50%额定功率)和高负载运行(80%额定功率),分别测试优化前后动力系统的温度变化。

在标准负载运行下,优化前电池组温度在 1 小时内上升 12℃,优化后仅上升 7℃,散热效率提升明显。在高负载运行下,未优化系统的电机温度在 2 小时内达到 90℃,优化后最高温度降低至 80℃,且温度变化更为平稳,避免了过热问题。

在能耗分析方面,优化前,散热系统占据整机总能耗的 8%,优化后降至 6%,其中智能风扇调速和热能回收系统的应用是主要的能耗优化因素。液冷系统的能耗略有增加,但整体上节能效果明显,优化方案在提高散热性能的同时,降低了额外能耗。

3.3 典型工况下的实测数据分析

为了进一步验证优化方案在实际工况下的适用性,选择三种典型作业环境进行测试:高温环境(室外 35℃)、低温环境(室外 -10℃)和高负荷持续作业(连续工作 6h),并对不同工况下的散热效果进行对比分析。

在高温环境下,优化后的动力系统能够有效控制电池组温度,使其维持在 45℃ 以下,相比优化前降低了 6℃,减少了因高温引起的电池衰减风险。驱动电机的温度上升趋势也得到改善,避免了高温导致的效率下降问题。

在低温环境下,优化方案引入的热能回收系统有效提升了电池的低温工作性能,使电池温度稳定在

20℃ 左右,相比优化前提高 8℃,提升了放电能力和续航里程。

在高负荷持续作业下,优化前系统温度在 4h 后开始剧烈上升,电池组温度接近安全阈值,而优化后温度曲线更加平稳,电机和控制系统的温度均低于优化前,保证了整机长时间高效运行。

4 结语

本研究围绕纯电动装载机动力系统的热管理优化,针对动力电池、驱动电机及控制系统的散热问题,提出了相变材料散热、热管技术、高效液冷系统、智能风道优化和热能回收等优化方案。仿真与实验结果表明,优化方案能够有效降低系统温度,提高散热效率,使动力电池温度均衡性提升 15%,电机最高温度降低 10℃,能耗减少 2%。此外,优化方案在不同工况下均展现出良好的稳定性,保障了长时间高负荷作业的可靠性。本研究为纯电动装载机的热管理优化提供了可行的技术方案,为后续提升新能源工程机械的运行效率和寿命奠定了基础。未来可进一步结合 AI 优化控制策略,提高智能化水平,实现更精准的温度管理。

参考文献:

- [1] 杨喻博. 新能源装载机电池热管理及工作性能仿真分析 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [2] 刘增鹏. 电动装载机集成热管理系统设计与仿真分析 [D]. 襄阳: 湖北文理学院, 2024.
- [3] 黄远伟. 电动装载机动力电池水冷板选型和设计 [J]. 建筑机械化, 2022, 43(11):41-43.
- [4] 王帅. 装载机两种冷却系统热特性对比分析及优化研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [5] 李梦轩. 混合动力机车动力电池组散热系统仿真分析及结构优化 [D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [6] 曹有琪, 杜立飞, 卢海, 等. 锂离子动力电池发热特性及散热系统研究进展 [J]. 汽车工艺与材料, 2021(12): 1-6.
- [7] 刘汝杰. 燃料电池动力系统启动过程温度控制策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [8] 罗钧夫. 基于电池热效应分析的混合动力系统控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.