

纯电动挖掘机整车热管理方案设计与研究

吴智禄

广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007

DOI:10.61369/ERA.2026070031

摘 要 : 针对纯电动挖掘机电池、电机、液压系统及驾驶室多热源耦合导致的散热与能耗矛盾, 提出一种集成分层冷却与余热利用的整车热管理方案。通过动力系统、液压系统及驾驶室热负荷特性分析, 确定各回路散热边界条件, 构建高温、中温、低温分层冷却回路与冷媒循环回路协同的系统架构。完成散热器、水泵、压缩机及膨胀阀等关键部件选型匹配, 建立一维仿真模型对典型工况进行能效分析。台架试验与整车道路试验结果表明, 该方案能有效控制各部件工作温度, 显著降低辅助系统功耗, 提升整车续航能力。

关 键 词 : 纯电动挖掘机; 热管理; 冷却回路; 能效分析; 试验验证

Design and Research of Thermal Management Solution for Pure Electric Excavator Vehicles

Wu Zhilu

Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd. Liuzhou, Guangxi 545007

Abstract : To address the conflict between heat dissipation and energy consumption caused by the coupling of multiple heat sources—including the battery, motor, hydraulic system, and cockpit—in pure electric excavators, this study proposes an integrated vehicle-wide thermal management solution that combines hierarchical cooling with waste heat utilization. Through analysis of the thermal load characteristics of the power system, hydraulic system, and cockpit, the cooling boundary conditions for each circuit were determined, leading to the establishment of a system architecture featuring coordinated hierarchical cooling circuits for high-, medium-, and low-temperature zones alongside a refrigerant circulation circuit. Key components such as radiators, water pumps, compressors, and expansion valves were selected and matched accordingly, and a one-dimensional simulation model was developed for energy efficiency analysis under typical operating conditions. Test bench and road test results demonstrate that this solution effectively controls component operating temperatures, significantly reduces auxiliary system power consumption, and enhances the vehicle's range.

Keywords : pure electric excavator; thermal management; cooling circuit; energy efficiency analysis; experimental verification

引言

工程机械向电动化转型的步伐不断加快, 纯电动挖掘机根据零排放、低噪音等优势广受关注。但电池、电机、电控以及液压系统在工作时会产生诸多热量, 如果散热不佳, 可能造成关键部件降额运行或者损坏。驾驶室空调对于冷热的需求又给热管理系统带来了更多复杂性并加大了能耗。传统燃油挖掘机的热管理方案已不可照搬, 迫切须要研发适合纯电动平台的高效整合热管理技术。本项研究站在整车层面, 针对热负荷特点、系统架构、部件适配、仿真分析以及实验验证实施系统探究, 从而为纯电动挖掘机热管理系统的工程化设计提供参照。

一、整车热负荷特性分析

(一) 动力系统产热特性

动力系统属于纯电动挖掘机的关键热源部分, 其包含动力电池、驱动电机以及电控单元。电池在充放电的时候由于内部电阻

会产生焦耳热, 当执行大倍率放电操作时, 温度上升的速度会明显变快, 特别是在铲掘以及重负载的情况下, 热负荷达到最大值。驱动电机在低速大扭矩区间, 铜损起主要作用, 而在高速区间, 铁损和机械损耗增多, 其效率曲线会影响到产热量。在电控单元里, 功率模块的开关损耗和导通损耗随着电流增大而增大,

作者简介: 吴智禄 (1995.05-), 男, 汉族, 广西钦州人, 学历: 大学本科, 职称: 助理工程师, 民研究方向: 电动挖掘机热管理系统设计和开发。

散热的需求量和装载作业的频率呈正相关关系。这三者之间存在较大的热特性差别，所以要分别创建各自的产热模型，从而给冷却回路的设计提供边界条件。

（二）液压系统产热特性

纯电动挖掘机保留了液压推动的工作装置和行走机构，液压泵依靠电机来驱动，系统出现热量的原因在于节流损失、溢流损失以及摩擦损失。处于复合动作状态时，多路阀的节流压降十分明显，液压油的温度上升速度很快。当动臂下降的时候，其势能回收虽然能够减小能耗，但在能量转换过程当中还是会生成额外的热量。液压油温度过高会引发粘度缩减、泄漏增多以及容积效率下滑，这些都会加重发热现象，陷入一种恶性循环之中。所以，精确地计算出不同作业循环期间液压系统的热负荷，对于确定散热器的容量以及预测油液的使用寿命来说非常关键。

（三）驾驶舱热负荷计算

驾驶舱热负荷会直接左右操作人员的舒适度以及空调系统的能耗情况。热负荷源于太阳辐射、围护结构传导、新风换热以及舱内人员和电子设备散发的热量。在夏季高温时期，由于大面积的玻璃窗户，太阳辐射所占的热量比例较高，而且顶部和侧壁被太阳照射之后，导热现象非常明显。纯电动挖掘机没有发动机余热可用，到了冬天只能依靠电加热或者热泵系统来实现供暖，其能耗压力很大。按照典型气象参数以及舱体结构参数建立稳态和瞬态热负荷的计算模型，就可以得出空调所需的制冷量和制热量，给热管理系统整体的能量分配提供依据。

二、热管理系统架构设计

（一）冷却回路拓扑结构

冷却回路拓扑会决定热守护系统的整体架构及其节能潜力。对于多热源存在温度等级差别的情况，采取分层冷却策略，即高温回路负责液压油冷却，中温回路用于电机及电控冷却，低温回路专门给电池冷却。这些回路通过散热器和风扇部件集中设置，并共用进风通道来缩减安装空间。回路之间设有换热器达成热量传递，冬天可以把电机余热导入电池保温回路，从而减小加热时的能量损耗。拓扑设计要综合考虑管路压降、流量分配的均匀性以及维修便捷性，利用并联支路协调各支路的流阻。在控制策略上，引入变频调速技术，依据实时热负荷动态调节水泵与风扇转速，实现部分负荷下的高效运行。同时，系统预留与座舱空调的热泵耦合接口，通过四通阀切换实现废热回收与跨系统能量梯级利用，显著提升整车能效水平。

（二）冷媒循环回路设计

冷媒循环回路具备驾驶舱制冷以及电池辅助冷却的功能，利用电动压缩机来带动蒸汽压缩制冷循环。冷凝器和冷却回路散热器共享同一个风扇，蒸发器按照需求被分成驾驶舱风冷蒸发器和电池冷却用板式换热器这两条路径，通过电磁阀的切换来达成单冷、双冷以及热泵制热这三种模式。在此回路当中设置了电子膨胀阀，用以精准地调控制冷剂的流量，从而顺应工况下负荷的改变情况。储液器和气液分离器可保障系统稳定地运行，而回热

器则能优化循环的效率。其总体的设计是以满足极端高温环境中的制冷需求作为核心目标。

（三）集成热管理控制策略

集成控制策略要协调冷却回路和冷媒回路的运行，把最小化总能耗当作目标。控制器会随时采集各个部件的温度、环境温度以及工况信息，按照规则和改良算法来决定水泵转速、风扇转速、压缩机转速以及模式切换。如果电池温度低于临界值，那么首先利用电机余热来提升温度，防止启动电加热。当作业强度较小时，减慢水泵和风扇的转速，缩减寄生功耗。制订分级温控目标，把核心部件的温度限值当作硬性约束，把舒适性需求当作柔性约束，做到能耗与性能的动态兼顾。

三、关键部件选型与匹配

（一）散热器与风扇选型

散热器的选型按照各个回路的最大散热量以及允许温升来执行。高温回路的液压油散热器采用板翅式结构，其材料选用耐腐蚀铝合金，翅片间距综合考虑换热效率和抗堵塞能力。中温与低温回路散热器依照功率器件额定工况下的热损耗来确定面积，并保留一定的余地。风扇的选型把最高环境温度下的总散热量当作参照，利用无刷直流风扇做到无级调速，按照风阻曲线来适配静压和风量。当很多散热器串联布置的时候，要计算风阻叠加的影响，保证风扇的工作点在高效区间。

（二）水泵与压缩机匹配

电动水泵给冷却液循环供应动力，其选型要符合各回路的流量和扬程要求。按照管路阻力特性曲线来确定水泵的工作点，选取效率较高的离心式电子水泵，其供电电压同整车平台相同。水泵采用并联布置时，要注意流量分配要均衡，防止远端支路出现流量不够的情况。电动压缩机应按照驾驶舱最大热负荷以及电池辅助冷却需求的总冷量来进行匹配。排量的选取要确保在怠速工况下也能满足基本的制冷需求，转速范围需包含全工况调节，并且噪音指标要达到驾驶舱舒适性的要求。

（三）膨胀阀与管路设计

电子膨胀阀属于制冷剂流量调节的核心元件，它依靠步进电机来精准调控开度，其响应速度要符合工况突变时过热度控制的需求。在选型的时候，要契合压缩机排量范围以及蒸发器容量，防止出现调节振荡现象。管路设计按照减小流阻、规避振动的准则，制冷剂管路用铝合金材料制成，弯曲半径超过管径的三倍，接头部分采用压板密封方式。冷却液管路选择三元乙丙橡胶软管，其耐温等级应当与回路温度相适应，在布置时避开急弯和干涉情况。对于高差比较大的地方要设置排气阀。

四、系统建模与仿真

（一）一维系统仿真模型

通过一维流体动力学软件创建整车热管理系统的仿真模型，该模型覆盖冷却液循环回路、制冷剂循环回路以及空气侧流动通

路，按照选定部件的参数绘制其特性曲线。热源模型输入实际测量或者计算得到的热负荷谱，控制器模型植入控制策略逻辑。管路模型考虑沿程阻力和局部阻力，散热器模型利用效能-传热单元数法来计算换热量。此模型能够模拟稳态工况下的温度分布情况，也能模拟瞬态工况下的升温过程，从而给系统性能预测及改良提供一个平台。

（二）典型工况仿真分析

选取挖掘作业循环、重载爬坡以及高温怠速这三种典型工况来做仿真。挖掘工况的时候，液压系统的热负荷会脉动得很剧烈，所以要控制好油温的波动范围。爬坡工况下，驱动电机一直在输出大功率，中温回路里水温能否稳定下来很关键。高温怠速的时候，电池和驾驶舱一起都有冷却的需求，这时候压缩机和冷凝风扇所占的功耗比例就比较高。仿真的结果给出了各个部件温度变化的曲线图，通过这些曲线来分析换热过程中的瓶颈部分、流量分配是否合理，从而检查控制策略在模式切换时的时机选择以及调节精度是否符合设计初衷。

（三）系统能效对比

把整合热管理方案同独立散热方案做能效对比。独立方案里各个回路各自设置散热器和风扇，并没有热量回收的功能。整合方案通过余热利用和联合调速，在相同的工况之下，压缩机和风扇的总功耗就会减小，到了冬季制热时期，节能的效果会越发突出。对比系统的能效比指标，分析不同环境温度和工作强度下能耗形成方面的差别，量化整合设计所带来的续航里程加强程度，从而确定方案在减小辅助系统电耗方面所具有的技术优势。

五、试验验证与优化

（一）台架试验方案

创建热守护系统台架来模仿实车热源和边界条件。各个回路利用电加热器去模拟电池、电机以及液压油所散发的热量，而且把温度传感器设置在关键检测点上。环境模拟风洞负责控制进风的温度和湿度，驾驶舱负荷要通过空调焓差室来测定。试验工况

包含额定工况、峰值工况以及循环工况，要采集有关温度、流量、压力以及功耗的数据。台架试验可以去除整车带来的干扰因素，从而用来验证仿真模型的精准度以及部件单体的性能，还会给控制策略标定提供数据支持。

（二）整车道路试验

在实车环境下做道路验证试验时，要选典型试验场地来模仿实际作业环境。安装车载数据采集系统，用来记录各个部件的温度、环境温度以及系统的功耗。试验项目覆盖连续挖掘作业、转场行驶还有高温静置冷却，目的在于考察热控制系统在真实负载和环境条件下的性能状况。留意电池温差的一致性、液压油温的稳定性以及驾驶舱降温的速度等指标，并检查管路是否存在振动、噪音以及连接处是否密封良好等问题。台架试验往往很难重现这些可靠性方面的不足。

（三）控制策略优化

按照试验数据来更新改进控制策略，调整温度阈值设置以及控制器参数，改良压缩机和风扇的启停逻辑，缩减不必要的频繁调节。运用前馈控制环节，遵照作业工况预测热负荷变化趋势，并预先调整冷却能力。标定余热利用模式的切换条件，协调好节能和部件保护的需求。经过再次试验验证之后，比较改进前后温度的稳定性以及系统的能耗，最终构建出适合量产的控制方案参数集。

六、结语

本研究创建起纯电动挖掘机整车热管理系统的完整技术路径，包含热负荷分析、架构设计、部件适配以及仿真验证等环节。该热管理方案融合分层冷却和余热利用技术，既能保障关键部件的温度稳定，又能减小辅助系统的能耗，从而改善整车的续航能力和作业效率。所给出的设计方法及验证流程可供类似电动工程机械热管理系统开发时作参考。未来可深入探究热泵低温制热性能的改良办法并应用智能预测控制算法，不断加强系统的综合能效。

参考文献

- [1] 李怀义, 刘吉超, 杨海, 等. 电动挖掘机双电机回转控制系统研究 [J]. 工程机械, 2025, 56(05): 36-39+8-9.
- [2] 孟顺, 孟庆国, 曹阳, 等. 电动挖掘机动力电池系统设计与仿真 [J]. 工程机械, 2024, 55(11): 16-21+236+8.
- [3] 李乾坤, 孙维东. 高原隧道专用型电动挖掘机研发及应用 [J]. 工程机械与维修, 2023, (02): 24-26.
- [4] 宋俊. 纯电动微型挖掘机热管理系统研究 [D]. 浙江大学, 2021.
- [5] 卢宇奇. 基于液冷的电动挖掘机动力电池组散热研究 [D]. 西南交通大学, 2019.