

新能源工程机械的动力系统设计及节能效果研究

刘旭鹏, 王嘉瑞, 王 坤

(烟台港股份有限公司联通国际件杂货码头分公司, 山东 烟台 264000)

摘要 新能源工程机械的动力系统和传统机型存在明显差异, 其构造选择、部件匹配的方面需考虑到新能源工程动力系统特殊性确定。本文主要从新能源工程机械实际情况出发, 分析纯电动、混合动力、增程式三种主流方案结构特点, 明确工程机械中电机选型、电池布置、能量回收回路以及控制策略的设计要点。同时, 本文选择某典型工况下一台 3 t 级电动装载机进行实测, 记录设备运行时能耗参数, 并且将其和同规格柴油机型对比, 进而统计目前不同作业阶段新能源工程机械的能量回收量。测试结果表明, 在合理配置的基础上, 电驱动系统在多种工况条件下能耗均低于柴油机, 特别是在频繁启停、带坡场景下能源节约方面更具优势。

关键词 新能源工程机械; 动力系统; 能量回收; 能耗对比

中图分类号: TM61; TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.037

0 引言

随着我国“双碳”目标不断落实到位, 工程机械电动化转型速度日益加快。新能源工程机械在矿山、港口、市政等封闭或低排放领域中得到逐步应用, 其动力系统不再依赖内燃机, 而是采用电机、电池、电控等新型部件。所以, 新能源工程机械系统架构与控制逻辑发生巨大改变。目前新能源工程机械市场中出现多种技术路线, 主要为纯电驱动、油电混合、增程发电等。不同类型的新能源工程机械使用在不同作业强度与续航需求的场景下, 为提高新能源工程机械的产品竞争力, 需深入分析这类型工程机械的特点, 选择适宜的动力系统集成设计方式, 并且测量其节能效果以便获取最佳设计方案。

1 新能源工程机械动力系统构型

1.1 纯电动系统

纯电动工程机械的动力来源为车载电池组, 其通过电机、控制器将电能传输给驱动电机, 并且带动液压泵或行走机构持续运转。该类型工程机械取消发动机、油箱、排气管等传统内燃机组件, 并且运行时不产生任何尾气排放, 尤其在封闭或环保要求的区域下应用价值高。而纯电动工程机械一般在固定场地内充电, 可根据实际需求选择慢速交流电充电或快速直流电充电方式。然而纯电动的新能源工程机械受到电池

容量限制, 其一般应用在工作节奏稳定、作业时间规律、有可靠补能条件场合下, 一般在港口内部转运、市政短途等场景中应用。

1.2 混合动力系统

新能源工程机械中混合动力系统同时拥有柴油发动机和动力电池组, 这两种能源都能给机械设备提供足够驱动力, 以保持正常运行。在柴油发动机与动力电池组采用并联式结构设计, 发动机直接驱动工作装置或行走系统, 也可以带动发电机给电池充电。而电池则用于补充瞬时高功率需求, 如机械启动、加速、重载挖掘时, 也可以在制动或下放工况下回收部分能量达到节能效果。该设备中布置离合器、分动箱等机械连接部件, 并且配置专用控制单元协调油电输出。混合动力工程机械保留燃油加注的便利性, 且不需要外部充电设施, 尤其在连续作业时间长、强度高、作业地点偏僻的水利、矿山等工矿条件下应用价值高^[1]。

1.3 增程式与插电式结构差异

新能源工程机械中增程式是重要类型, 其行驶与作业完全由电机完成。而在电池电量不足时, 由柴油发动机完成发电, 且发动机不参与机械传动。该类型设备发动机保持稳定转速运行, 能够满足电池充电或直接向电机供电需求, 进而能够延长新能源工程机械的运行时间。插电式混合动力与增程式有明显差异,

作者简介: 刘旭鹏 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术。

其主要利用外接电源给电池充电,也允许发动机直接驱动设备运行,从而形成油电并联输出方式。上述两种类型在能量传递路径上有明显差别,增程式为燃料先转变为电能再驱动,插电式则允许燃料和电能分别或共同驱动。因此,增程式系统各部分保持独立,其控制逻辑清晰;插电式由于存在机械连接,在动力响应复杂工况下有一定的不同。

2 动力系统设计要点

2.1 电机选型与扭矩—转速特性匹配

新能源工程机械动力系统设计,电机选型需综合分析机械的整机最大牵引力、最高行驶速度、作业循环的功率需求等因素。新能源工程机械中永磁同步电机特点是功率密度高、效率区间宽,需要在设计环节绘制整机负载谱,能够提取典型工况下扭矩与转速组合以实现电机特性曲线精准匹配。而电机峰值扭矩满足新能源工程机械在启动、爬坡、重载挖掘作业需求,额定功率需要覆盖持续作业的功率区间。电机的转速范围应考虑到新能源工程机械高速行驶以及低速大扭矩输出需求,一般利用两档变速箱扩展调速区间。而新能源工程机械的冷却系统根据连续工作温升设计,其选择液冷方式维持绕组温度低于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,该设备电机控制器IGBT模块电流等级峰值为电流1.2倍冗余配置,能够保证设备在运行时具备较高过载能力。如果新能源工程机械电机安装靠近驱动桥或液压泵,能够减少传动损失,并保证电机防水、防尘等级超过IP67^[2]。

2.2 电池容量与快充能力设计

新能源工程机械动力系统设计时考虑到电池总容量,其按照机械单班次作业所需电量分析,并且具备一定的安全余量。根据新能源工程机械设计要求,统计典型工况下整机平均功率乘以作业时间得出基础用电量,再增加20%余量以应对低温条件下容量衰减以及长期使用循环老化。而工程机械中电池包由多个模组串并联方式,其系统电压平台一般为 $600\sim 800\text{ V}$,能够减少机械运行时电流传输的能量损耗。而新能源工程机械的电芯使用磷酸铁锂材料制作,其满足安全性与使用寿命要求。新能源工程机械的电池热管理采用液冷方式,需要将液冷板安装在电池模组间,保证电池包内部温度在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。同时,新能源工程机械电池快充接口支持 120 kW 以上直流充电功率,30 min内可将电量充至80%。

2.3 制动/下放工况能量回收回路设计

新能源工程机械在车辆制动或工作装置下放过程中,其设备驱动电机切换为发电机模式,能够将设备

动能或重物势能转变为电能回馈到动力电池中。该能量回收系统能够实现节能效益提升,其设计时回路包含电机控制器内双向逆变模块、直流母线支撑电容以及电池侧DC/DC变换器。而在能量回收回路设计时,考虑到控制逻辑以及硬件承受力。在机械设备下放重物时,其液压系统利用电比例阀调节节流压力,确保设备的部分势能不被溢流阀消耗,而是驱动电机旋转发电;此时形成的交流电经过逆变器整流为直流后送入电池内。在新能源工程机械行车制动时,电机制动力和机械摩擦制动力按照规定比例协同作用保证减速度平稳,能够防止给新能源工程机械造成过大冲击。在机械设备运行时回收电流受到严格限制,其回收电流禁止超过电池允许的最大充电电流,一般设定为1C倍率^[3]。能量回收回路设计还需兼顾不同工况的动态适配性,增设工况识别传感器与智能控制单元,实时监测设备负载、运行速度及电池SOC(State of Charge)状态。当电池接近满电状态时,自动切换回收策略,通过弱化能量回收强度或切换至电阻耗能模式,避免电池过充损坏。同时,回路需配置过压、过流保护模块,在回收电压突变或电流异常时快速切断回路,保障电机控制器、电池等核心部件安全^[4]。

2.4 多源能量管理控制策略

新能源工程机械动力系统若采用混合动力或增程式设计,其能量管理系统的作用是协调发动机、电池以及电机之间的功率分配。新能源工程机械能量管理控制策略分为规则性、优化性两种,如下:规则型策略保证能量管理控制有明确的边界,如电池荷电状态低于30%时启动发动机、高于80%时则停止发动机;同时,规定不同工况下功率分配比例,以使系统按照预设逻辑工作。优化型策略则能减少新能源工程机械燃油消耗或等效能耗,其采用动态规则或等效燃油消耗最小计算方法在线计算当前情况下最优功率分配方案。新能源工程机械运行中整车控制器获取油门开度、车速、液压系统、负载、压力等信号,将其作为能量管理控制策略制定依据^[5]。此外,新能源工程机械为保护电池达到良好状态,一般将设备充放电深度设定为20%~80%区间。

3 节能效果测试与对比分析

3.1 测试工况设定

新能源工程机械动力系统在节能测试环节,其测试工况如下:城市道路循环、挖掘—装载循环、坡道运输循环。城市道路循环需要模拟市政清扫车的运行状态,主要掌握设备起步、匀速行驶、制动、怠速等

工况,测试总时长为 30 min^[6]。挖掘—装载循环需参照 ISO 9248 标准制定,主要测定新能源工程机械空载行驶、挖掘、回转、卸料、返回的 5 个连续动作,并且测试完整循环 10 次。坡道运输循环则在坡道 5% 条件下测试,包含上坡满载运行、下坡空载滑行以及平路转向等。上述测试工作在同一试验场地下完成,测试时环境温度 20 ~ 25 °C。测试前设备充分预热,达到正常工作状态。而在测试环节每种工况独立进行三次完整测试,取三次测试结果的平均值作为该工况最终数据。本次测试选择一台额定载重 3 t 的纯电动轮式装载机进行,对照机型为同吨位传统柴油动力装载机,确保两者在整机质量、工作装置、液压系统等参数保持一致^[7]。

3.2 能耗数据采集方法

本次测试中柴油机模型能耗使用高精度燃油流量计测量,其输出单位为 L/h。新能源模型能耗由电池管理系统实时记录充放电电量,其单位为 kW·h。本次测试中整机高压直流回路安装高精度功率分析仪,其采样频率达到 10 kHz,能够及时获取设备运行中电压、电流、瞬时功率数据,并形成时间序列曲线。而测试中设备的空调、照明等辅助系统能耗利用独立电能表计量,并将其能源消耗计入总能耗数据中^[8]。在本次测试前动力电池制造商按照标准流程充电,起始荷电状态为 95%。在测试结束后及时进行补电,使电池恢复到相同荷电状态;工程机械的电量消耗以补充电量扣除充电效率损失后计算得出,并且充电效率根据实际测量参数值修正。同时,本项目测量中采集 GPS 车速、油门踏板开度、液压系统工作压力等辅助信号,并且采样频率超过 100 Hz,能够精准识别设备作业时能耗变化情况。上述测量设备由第三方计量机构校准,并且保证系统整体测量不准确度小于 1.5%。

4 新能源工程机械动力系统电耗分析

4.1 与同吨位柴油机型在相同工况下的能耗对比

在城市道路循环中,纯电装载机的平均能耗为 28 kW·h/h,折合等效油耗 6.2 L/100 km;同吨位柴油机型实测油耗为 9.8 L/100 km,等效能耗降低 37%。挖掘—装载循环中,电驱动整机完成 10 次标准循环总耗电 42 kW·h,柴油机型消耗燃油 12.5 L,按燃料低位热值折算,电能等效节约 29%。在坡道运输循环中,因下坡滑行与制动能量回收,纯电机型平均能耗为 21 kW·h/h,柴油机型油耗为 11.3 L/100 km,等效节能达 45%。综合三种工况加权计算,新能源机型平均等效能耗降低 34%。电机在宽转速范围内效率保持在 85% 以上,内燃机在部分负荷工况效率低于 30%。电驱动系统取消液力

变矩器、传动轴等机械传动环节,减少功率传递损失。柴油机型存在怠速燃油消耗,电驱动在停机状态下无能量输入。

4.2 能量回收贡献率与系统综合效率计算

坡道运输循环中,下坡滑行与制动阶段共回收电能 9.6 kW·h,占该工况总消耗电量 21.0 kW·h 的 45.7%。挖掘—装载循环中,动臂下放势能回收与回转制动再生共回收 4.1 kW·h,占总耗电 42.0 kW·h 的 9.8%。城市道路循环因频繁启停,制动能量回收总量为 7.3 kW·h,占总耗电 28.0 kW·h 的 26.1%。能量回收贡献率定义为回收电量与总耗电量的比值。系统综合效率为整机输出有用功与总能量输入之比。有用功通过液压系统压力与流量积分、行走阻力与位移乘积计算得出。纯电系统在挖掘工况综合效率为 58%,坡道工况达 67%;柴油机系统对应工况综合效率为 32% 至 38%。电池充放电循环效率为 92%,电机及逆变器整体效率为 96%,电能传输链路损耗可控。

5 结束语

新能源工程机械动力系统设计从电机、电池、能量回收与控制策略进行,并结合设计方案和运行工况制定合理的节能方案。本次测量结果显示,典型工况下确定适宜设计方案,使电驱动系统实现 30% 以上等效能耗降低。此外,还从电池能量密度、快充速度、低温性能方面优化能量管理系统,从而实现新能源工程机械节能效果的提高,为现代工程机械领域的发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 李金凤,张学敏,宋正河,等.基于 TRIZ 理论的分式混合动力拖拉机动力系统设计及验证[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(01):366-381.
- [2] 丁旭,孙科,段小维.某动力装置领先试飞液压负载系统设计[J].科技创新与应用,2019(01):88-89.
- [3] 沈登武.工程机械产品设计中的节能与环保分析[J].南方农机,2019,50(22):139.
- [4] 闫利明,李让,王富宏.工程机械液压系统动力匹配与其控制技术探讨[J].科技风,2020(05):169.
- [5] 朱姗.节能减排在机械设计中的应用[J].科技资讯,2022,20(02):60-62.
- [6] 宋泓炎,彭一雯,张玉飞,等.一种汽车后桥辅助动力系统设计及有限元分析[J].农机使用与维修,2022(04):26-28.
- [7] 董丽娟,朱哲煜.基于混合动力液压挖掘机系统优化设计的研究[J].内燃机与配件,2021(01):55-56.
- [8] 张丽艳,臧国航.新能源农业机械的研发及对可持续农业的影响[J].中国农机装备,2025(04):127-129.