

海上平台起重机混合动力系统及其控制策略设计

李尧¹, 祝成祥^{2,3}

1. 山东科技职业学院, 山东 潍坊 261053; 2. 潍柴新能源动力科技有限公司, 山东 潍坊 261061;

3. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决海上平台起重机高能耗、高排放的问题,提高能源利用效率,综合考虑动力电池成本较高和柴油机在安全可靠方面不可替代的典型优势,提出一种海上平台起重机用混合动力方案,通过监测电池荷电状态(state of charge, SOC)与起重机动力负载,设计协同控制策略,并进行起重机典型作业工况下的仿真验证。结果表明:柴油机-锂电池混合动力系统驱动的起重机燃油消耗和 CO₂ 排放均明显下降;经过 8 h 典型作业循环,传统柴油机与混合动力驱动的起重机燃油消耗分别为 141.0、120.2 kg, CO₂ 排放分别为 435.7、371.3 kg,燃油消耗和 CO₂ 排放均降低 14.8%。

关键词:海上平台起重机;混合动力;能量管理;节能减排

中图分类号: TH21

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)06-0028-06

引用格式: 李尧, 祝成祥. 海上平台起重机混合动力系统及其控制策略设计[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(6):28-33.

LI Yao, ZHU Chengxiang. Design of hybrid power system and its control strategy for a offshore platform crane[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(6):28-33.

0 引言

海上平台起重机适用于海洋环境中物料、设备、人员的吊装和转运作业,是海洋工程领域不可或缺的设备。相比陆上起重机,海上平台起重机的载荷覆盖范围更大、低能效工况更多、吊装工况受到的晃动等外界冲击更复杂^[1-2]。柴油机是起重机的核心动力源和动力分配中心,一方面将燃油的化学能转化为设备所需的机械能,另一方面将机械能合理分配到起重机各执行部件,完成起重、回转、行走等动作^[3]。

虽然以传统柴油机为动力的起重机在能源独立性、应急可靠性、抗极端冲击等方面具有不可替代的典型优势^[4],但起重机的典型工况对应柴油机的低能效工作区,不同平台或同一平台不同建设阶段柴油机运行工况略有差异。海上平台起重机典型载荷谱如图 1 所示,图中蓝色圆形为海上平台起重机常用工况点占比,圆心对应柴油机转速、转矩,直径代表在此转速、转矩运行的工作时间占比。由图 1 可知:海上平台起重机运行在低速低负荷区的工作时间占比超过 85%。由于柴油机长期工作在低速低负荷工况,能效低、污染物排放高等问题突

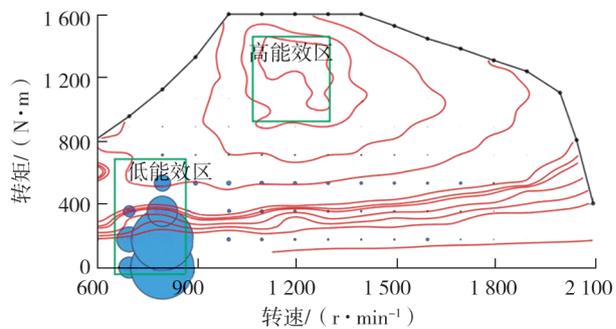


图 1 海上平台起重机典型载荷谱

收稿日期:2025-07-07

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2024QH602)

第一作者简介:李尧(1984—),男,山东曲阜人,工学硕士,副教授,主要研究方向为柴油机及动力模块性能开发与匹配、柴油机及整车相关零部件设计,E-mail:liyao8415@163.com。

出,已无法满足国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)对船舶及海上平台碳排放强度指标(carbon intensity indicator, CII)等碳排放要求,亟需清洁能源解决方案。

混合动力系统在陆上交通及工程机械领域已实现规模化应用,船舶领域亦有成熟案例。混合动力在海上平台起重机领域的研究仍处于早期阶段,主要存在两类技术路线:1)将动力传动系统全面电动化,取消柴油发电机组,完全依赖平台电网供电,并采用势能回收系统,可将货物势能的 85%~95%转化为电能存储再利用,但其对电网的依赖性较强,台风工况下平台电网故障率高达 23%^[5],并且电力驱动的起重机额定起重质量存在限制,通常起重质量超过 300 t 时就应对电网进行扩容,改造成本增加约 40%;2)使用柴油机和电池并联架构的混合动力系统,通过液压阀组选择驱动源,在该架构下柴油机与电池无法同时输出动力,柴油机也无法向电池反向充电,削弱系统的节能潜力^[6]。

全面电动化或增加相对独立的电池驱动模块都能大幅减少柴油机工作时间,避免或大幅降低柴油机驱动带来的高能耗、高噪声、高污染风险^[7-8]。但这两种技术均未充分考虑部分孤岛平台、电网未覆盖区域或者电网相对脆弱平台的适用性,且不同驱动模块之间缺乏协同互动,无法做到能源效率的最大化、系统控制的集成化与智能化^[9-10]。本文中在保留传统柴油机-液压传动基本架构的基础上,匹配混合驱动系统,设计电池荷电状态(state of charge, SOC)与整机载荷动态监测和控制策略,实现电池驱动模块工作时间最大化和柴油机驱动模块工作状态最优化,为海上作业平台动力系统绿色升级提供技术支持。

1 混合动力系统方案

1.1 整体架构

混合动力系统方案整体设计遵循以下原则:1)保留柴油机动力及液压传动系统,满足电网脆弱或者电网尚未覆盖平台等的应急保障需求;2)增加新能源驱动模块,通过新能源模块的协同作业,优化柴油机驱动系统运行区间,实现节能减排、减振降噪的目的;3)暂不进行吊装作业过程中的能量回收,以降低系统复杂度和建造成本;4)预留插电接口,用于平台电网支持的场景,以进一步扩大系统适配范围^[11-14]。

在电量充足情况下优先采用电池驱动,电量较低时柴油机自动发电储能,并根据功率需求灵活组合电池驱动和柴油机驱动作业,系统动力耦合逻辑如图 2 所示,图中: K_L 为柴油机负荷率,即当前输出功率与额定输出功率的比, Q_{SOC} 为电池的荷电状态,即电池剩余可用电量与其完全充电状态总容量的比。为实现上述动力耦合逻辑,搭建系统架构如图 3 所示,图中:VCU 为整车控制器(vehicle control unit),CAN 为控制器局域网络(controller area network),HCU 为混合动力控制器(hybrid control unit),BMS 为电池管理系统(battery management system),CCU 为离合器控制单元(clutch controller unit),PDU 为高压配电箱(power distribution unit),ECU 为电子控制单元(electronic control unit),MCU 为电机控制单元。

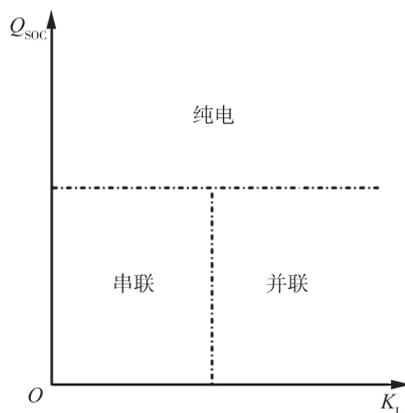


图 2 动力耦合逻辑图

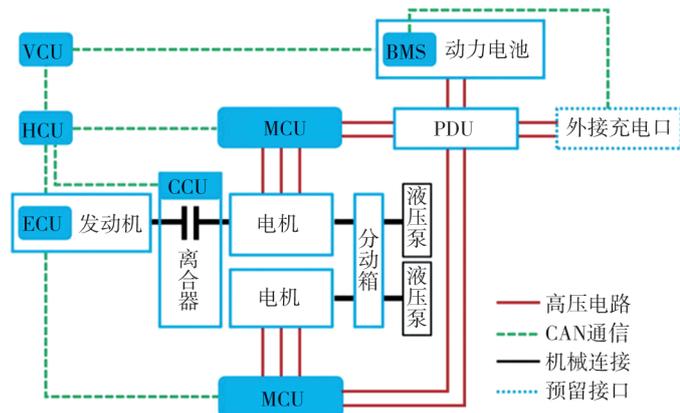


图 3 系统架构图

系统采用串并联混动架构,在原有柴油机和液压传动链的离合器和分动箱之间布置一个电机,并在分动箱上额外增加一个独立电机,形成起重机用串并联新能源混动架构,实现高效灵活的油电协同作业。系统详细构成功能为:VCU负责协调和控制整车的动力系统、能量管理、安全监测等核心功能,通过CAN总线协调HCU和BMS的工作;HCU负责管理系统中动力执行部件,通过CAN通信协同发动机ECU、MCU、CCU;BMS通过PDU为电机输送电量,或接收外接充电口的电量输入。

1.2 工作模式及切换逻辑

基于上述耦合逻辑和系统架构,设定不同的工作模式及切换逻辑,如表1所示。

表1 系统工作模式及切换逻辑

模式	驱动方式	触发条件	设备状态	优先级 ^①
1	锂电池驱动	$K_L \leq 30\%$ 且 $Q_{soc} \geq 30\%$	柴油机停机,锂电池供电	1
2	柴油机驱动	$30\% < K_L \leq 80\%$	柴油机直接驱动液压泵	2
3	柴油机-锂电池联合驱动	$K_L > 80\%$ 且 $Q_{soc} \geq 20\%$	柴油机驱动,锂电池补足缺口	3
4	柴油机驱动-锂电池充电	$K_L \leq 20\%$ 且 $Q_{soc} < 80\%$	柴油机驱动且柴油机为锂电池充电	4
5	应急锂电池驱动	柴油机故障且 $Q_{soc} \geq 10\%$	锂电池独立驱动电机运行	5
6	应急柴油机驱动	电驱模块故障	恢复传统的柴油机驱动	6

注:为避免在同一状态临界值处频繁跳转切换, K_L 、 Q_{soc} 等参数可设置5%~10%的迟滞区。

①优先级的数字越小优先级越高。

由表1可知:1)模式1为锂电池直接驱动起重机,此时电池电量充足, $Q_{soc} \geq 30\%$,系统动力负载较低, $K_L < 30\%$,系统优先采用动力电池存储的电能驱动设备,柴油机熄火停机,该模式的优先级为1;2)模式2为柴油机直接驱动起重机,此时系统动力负载率约为30%~80%,基本处于柴油机高效工作区,系统优先采用柴油机驱动,锂电池模块不工作,该模式的优先级为2;3)模式3为柴油机-锂电池联合驱动起重机,此工况系统动力负载率高于80%,且电池 $Q_{soc} \geq 20\%$,系统协调柴油机与电机共同驱动设备工作,降低柴油机负荷率使其工作在相对高效区间,剩余动力由动力电池驱动电机补足,该模式的优先级为3;4)模式4为柴油机驱动同时发电为电池充电,此工况系统动力负载率低于20%,且电池 $Q_{soc} < 80\%$,系统控制柴油机驱动设备工作,同时驱动发电机发电并存储至动力电池,该模式的优先级为4;模式4与模式1的切换条件存在交集,在条件交集区间优先进入模式1工作;5)模式5为应急锂电池驱动,当柴油机发生故障且 $Q_{soc} > 10\%$,临时以动力电池驱动设备完成基本的安全或救急动作;此模式不同于模式1,应急状态下首先考虑人员和设备整体安全, Q_{soc} 下限设定为10%,该模式的优先级为5;6)模式6为应急柴油机驱动,当锂电池模块发生故障,系统就恢复传统的柴油机驱动状态,该模式的优先级为6。

1.3 关键设备参数匹配

以额定起重质量为50t的起重机为例,柴油机的选型可以直接参考现有柴油机驱动的起重机;锂电池的选型需从能量需求、功率需求、寿命约束等方面核算。锂电池能量需求

$$W = W_s \alpha / (\eta d \beta), \quad (1)$$

式中: W_s 为单循环电池净耗能, $\text{kW} \cdot \text{h}$; α 为安全因数,一般取1.2~1.5; η 为变流器效率,取0.97; d 为可用 Q_{soc} 窗口,即推荐电池正常工作的 Q_{soc} 上下限的差,本文中 $d=0.5$; β 为允许放电深度,是电池放电量与电池额定容量的比,本文中 $\beta=0.5$ 。

基于传统柴油机驱动系统和柴油机-电池混合动力系统的6种工作模式,混动系统中的柴油机、锂电池、双向变流器等关键设备参数如表2所示。

表2 关键设备参数

设备	选型依据	参数
柴油机	能够独立覆盖全部工况需求	型号为WP12G380E310,额定功率为280 kW,额定转速为2 100 r/min,排量为11.596 L
锂电池组	低功率独自驱动,配合柴油机工作在高能效区	磷酸铁锂电芯,电池电量为80 kW·h
双向变流器	能量双向流动控制,兼容负载波动范围	功率为200 kW,效率不低于97%,过载能力为150%

2 分析验证

2.1 工况设定

参考不同海上平台起重机工况,定义一个周期为8 h的典型作业循环进行仿真分析。以满载质量为50 t的起重机为例,各工况下的参数如表3所示。

2.2 结果对比

典型作业循环工况下的油耗和CO₂排放的计算式为^[15-16]:

$$m_F = \sum P_i g_i t_i, \quad (2)$$

$$m(\text{CO}_2) = \lambda m_F, \quad (3)$$

式中: m_F 为循环耗油量,g; i 为典型工作循环中不同的工况,对应表3中工况序号, $i=1,2,3,4$; P_i 为循环工况需求功率,kW; g_i 为循环工况对应的燃油消耗率,g/(kW·h),根据发动机万有曲线取值; t_i 为表3中循环工况对应的时间,h; $m(\text{CO}_2)$ 为8 h循环工况排放的CO₂的质量,g; λ 为碳排放因子,根据文献[17], λ 取3.09。

传统柴油机驱动方案下,柴油机的输出功率和累计时间按表3执行;柴油机-锂电池串并联混合动力方案下各工况参数如表4所示。

表4 柴油机-锂电池串并联混合动力方案下各工况参数

工况序号	模式	柴油机输出功率/kW	锂电池输出功率/kW	时间/h	频次
1	4	55 ^①		2	60
2	1	0	60	2	60
3	2	200	0	3	50
4	3	150	130	1	10

①柴油机输出功率包括设备待机需求功率15 kW和向锂电池充电用功率40 kW。

设置初始 Q_{soc} 为50%,循环工况时间为8 h,期间各工况根据控制逻辑自定切换,分别进入待机、空载移动、半载提升、满载提升等工况。

按照式(2)(3)计算两种方案下的油耗和CO₂排放,传统方案和混合动力方案下起重机的单循环油耗分别为141.0、120.2 kg,CO₂排放分别为435.7、371.3 kg,油耗和CO₂排放均降低14.8%。

经测算,传统柴油机驱动的海上平台起重机每年消耗柴油约3 000 kg,若在原有柴油机驱动方案基础上完成串并联混动方案改造,系统成本增加约15万元,按照混合动力方案节油率为14.8%,从节油角度计算,投资成本的回收时间约需40 a,投资回报周期偏长。然而,为满足日益严格的营运碳强度指标,

对海上平台起重机进行升级改造已势在必行。本文中的混合动力方案对原柴油机-液压传动系统改动较少,系统改造成功率高于90%,可实现碳排放降低与现有设备有效利用的平衡,可行性较高。

3 结论

沿用柴油机-液压传动的的基本架构,最大程度保留柴油机驱动的起重机在能源独立性、应急可靠性、抗极端冲击等方面的独特优势,通过对其驱动模块采用柴油机-锂电池混联设计,并结合具体工况场景设计控制逻辑,可充分发挥电驱高效灵活的优势,提高柴油机运行时的平均热效率,实现整体节能减排约14.8%,全生命周期内降成本和减碳效益显著,为老旧海上起重平台的技术改造及新造平台设计提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 刘春强,李经纬,史云龙.海上石油平台起重机应急处置能力的提升[J].石油和化工设备,2024,27(4):144-148.
- [2] 赵小虎.并联式商用混合动力汽车能量管理控制策略研究[J].汽车测试报告,2025(6):145-147.
- [3] 李书凯.海洋平台吊机双动力驱动适应性改造分析与应用[J].化工设计通讯,2023,49(5):21-23.
- [4] 张昊,王辉,何宁.海洋工程大型起重设备及其关键技术研究[J].海洋工程,2009,27(4):130-139.
- [5] 中船保商务管理有限公司.船舶安全风险报告[R/OL]. [2025-01-20]. https://www.chinapandi.com/index.php/cn/?option=com_attachments&task=download&id=590.
- [6] 曾繁琦,袁晓静,王旭平,等.军用混合动力系统能量管理策略研究综述[J].兵器装备工程学报,2021,42(11):15-24.
- [7] 韩乐.车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(10):94-98.
- [8] 刘璐,徐晓玲.车载复合电源功率控制研究[J].电源技术,2017,41(6):923-925.
- [9] 刘振博,林慕义,白宇,等.混合动力装载机复合储能系统6 σ 稳健设计[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(5):187-194.
- [10] 崔宏轩,高岚.基于深度强化学习的柴电混合动力船舶能量管理策略[J].船舶工程,2025,47(8):8-17.
- [11] 何洪文,孟祥飞.混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J].北京理工大学学报,2022,42(8):773-783.
- [12] 王栋森,郭柄麟,陈立强,等.海上钻井平台吊装作业风险智能化分级管理技术研究与应用[J].科技视界,2022(1):18-19.
- [13] 龙哲.基于碳强度指标(CII)下的船舶改造策略分析[J].现代工程项目管理,2025,4(15):235-237.
- [14] 徐圆圆,龚德鸿,黄正光,等.电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析[J].环境科学,2024,45(5):3119-3128.
- [15] 王宁,龚在研,马钧.基于经济与排放效益的混合动力和纯电动公交车发展前景分析[J].中国软科学,2011(12):57-65.
- [16] 全国能源基础与管理标准化技术委员会.综合能耗计算通则:GB/T 2589—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [17] International Maritime Organization. 2022年CII计算的修正系数和航次调整临时导则(CII导则,G5)[Z/OL].中国船级社,译. (2022-12-09) [2024-10-21]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=202212090233054012>.

Design of hybrid power system and its control strategy for a offshore platform crane

LI Yao¹, ZHU Chengxiang^{2,3}

1. Shandong Vocational College of Science and Technology, Weifang 261053, China;
2. Weichai Power New Energy Technology Co., Ltd., Weifang 261061, China;
3. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China

Abstract: In order to solve the problems of high energy consumption and high emissions of offshore platform

cranes and improve energy efficiency, considering the cost of power batteries and the irreplaceable typical advantages of diesel engines in safety and reliability, a hybrid power scheme for offshore platform cranes is proposed, which monitored the state of charge (SOC) of batteries and the dynamic load of the crane, the collaborative control strategy is designed, and the simulation verification under the typical working conditions of the crane is carried out. The results show that the fuel consumption and CO₂ emission of the heavy duty diesel engine driven by the diesel engine-lithium battery hybrid system are significantly reduced. After 8 h typical operation cycle, the fuel consumption of the traditional diesel engine crane and the hybrid crane are 141.0 kg and 120.2 kg, with the CO₂ emissions are 435.7 kg and 371.3 kg, respectively, both the fuel consumption and CO₂ emissions are reduced by 14.8%.

Keywords: offshore platform crane; hybrid power system; energy management; energy conservation and emission reduction

(责任编辑:刘丽君)

(上接第20页)

Health status assessment and prediction method for a diesel engine air system based on time series

WANG Yongkang, WEN Guanhua, WANG Yanyan^{*}, SHEN Zhaojie, MA Conggan,
JI Zhaoqi, LIN Bo, SHAO Luming

School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264200, China

Abstract: To address the challenge of health status assessment for diesel engine air systems, when considering their complex structure, high fault frequency, insufficient full-life-cycle data, and difficulties in accurate fault characterization, and to provide support for predictive maintenance, a time-series-based health status assessment method for diesel engines is proposed. Initial health indicators are constructed according to the health status of the air system per unit time. An autoencoder model is adopted to perform feature weighting optimization on the initial indicators for improved characterization accuracy. Combined with the sliding window method, time-series analysis is applied to smooth historical health status data. Finally, a long short-term memory (LSTM) network is established to predict the health status of the diesel engine air system. The results demonstrate that the designed time-series-based assessment method is effective with high prediction accuracy. The mean squared error (MSE) between the predicted and measured results of health status is 2.11×10^{-5} , the root mean squared error (RMSE) is 0.004 6, and the mean absolute error (MAE) is 0.003 1. This method can provide reliable support for the predictive maintenance of diesel engine air systems.

Keywords: diesel engine; health status assessment; health status prediction; LSTM network

(责任编辑:刘丽君)