

[储能系统]

柴电混合动力船舶集装箱式电源系统设计

文/孟顺 孟庆国 蔡诚 曹阳 杭标
中能建储能科技(武汉)有限公司

介绍电池储能技术在混合动力船舶上的应用,详细介绍箱式电源的系统设计,电池管理系统(BMS)设计和本地综合控制系统的设计,介绍箱式电源的布置方案,探讨混合动力船舶的箱式电源能量管理策略。为进一步深入研究电池储能技术在船舶上的应用提供参考。

为应对气候变化带来的一系列全球变暖,冰川融化、海平面上升、雾霾天气等现象,国际海事组织(IMO)及各国制定了日趋严格的碳、硫、氮减排强制性法规相关的环境保护要求。为控制航运排放,第70届航运环境保护会议指出,2025年后建造下水船只的能效设计指标(Energy Efficiency Design Index, EEDI)应比2005年至少提高30%。

世界上的航运企业,造船企业和船舶设计研究所正在积极推动绿色环保新能源技术应用于实船,储能技术在船舶上的应用越来越普遍,储能技术的引入势必会成为提升船舶、海洋平台能效和减少污染性气体排放的重要渠道,并成为船舶应用领域发展的重点方向。其中以集成柴油发电机组和储能系统作为新能源船舶电站的柴电混合动力船舶实例应用较具有代表性和革新性。

目前柴电混合动力系统主要应用于渡船、小型客船及游览观光船,镇扬汽渡60 m车客渡船,浙江海洋大学渔业资源调查船,海监46动力系统改造船都属于小型船舶;弘帆068是内河2 000 t级常规动力干散货船,也实现了柴电混合动力改造。

本文设计的柴电混合动力船舶箱式电源,主要应用于柴电混合动力船。对船用电池储能系统的系统设计和控制策略展开研究,对船舶电动化探索阶

段的工程开展具备一定指导意义。

系统总体构成

混合动力船的柴电混合动力系统基于船舶海洋工程的运行工况要求设计,系统总体构成如图1所示,包括柴油发电机组、直流配电板系统、主备电驱推进系统和锂电池箱式电源系统等4个部分。

整个系统由主推进AFE变频器、侧推变频器、主发逆变器、电池系统直直变换器、箱式电源、直流配电板和EMS系统等部件组成。船舶能量管理系统(EMS)控制系统的能量流动,根据EMS系统获取各个支路的功率等信息,并对各个环节进行投切调度,在柴油机组能量富裕的情况下实现箱式电源充电;柴油机组功率输出不足时,箱式电源放电,箱式电源内的本地控制系统监控箱式电源内电池、消防、可燃气体探测、水浸、温湿度和应急排风等信息,保护电池储能系统正常运行。

箱式电源系统设计

1. 系统概述

整个箱式电源由集装箱(含A-60耐火结构)、电池架和设备固定、电池系统(含电池管理系统和高压箱)、通风系统(含应急排气系统)、温湿控

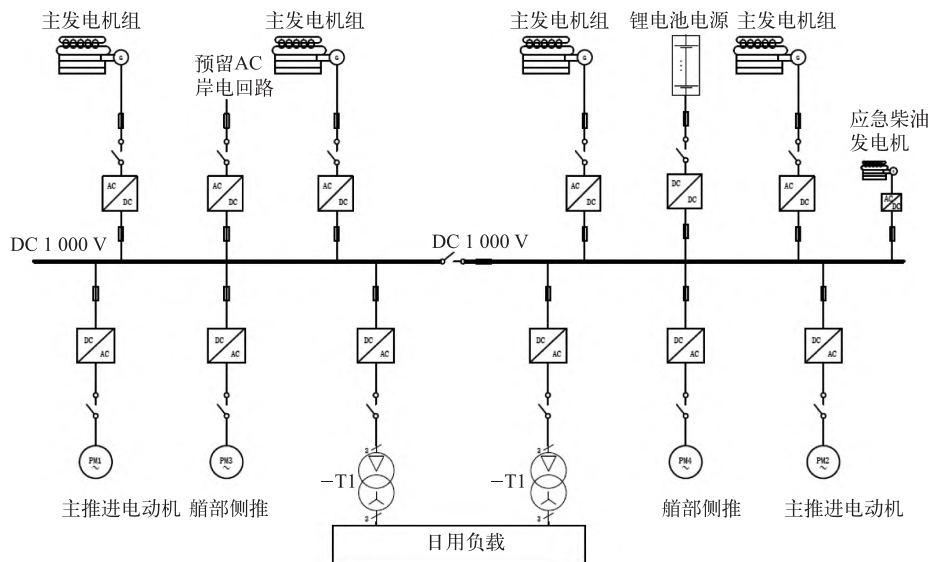


图1 柴电混合动力系统单线图

制系统、火灾探测系统、可燃气体探测系统、固定式灭火系统、照明系统、视频监视系统、综合报警显控系统和换电接口等组成。电池系统由单体电池组成电池包，多个电池包串联形成电池簇，电池舱内配置多个电池簇，并在汇流配电柜中并联。通过岸电充电装置与电网连接，双向控制放电和充电，并通过BMS实时监控电池状态、安全管理及保护电池系统。

目前船舶储能系统设计和配置主要根据中国船级社（CCS）的《船舶应用电池动力规范2023》、《集装箱检验规范》、《船用锂离子电池产品检验指南》和《钢质海船入级规范》等规范指南进行设计，陆用标准主要依据GB/T 11918.1《工业用插头插座和耦合器 第1部分：通用要求》等。

2. 容量及组成

混合动力船舶的储能容量，取决于船舶的实际航速航行工况。《船舶应用电池动力规范2023》中规定单个集装箱内蓄电池总存储电量不得大于2 000 kW·h。随着电芯能量密度的不断提升，中大型电动船舶的应用逐渐增多。因此单个集装箱的电量配置尽量接近2 000 kW·h。

动力电池包采用磷酸铁锂电池，PACK箱采用标准化设计，若干个电池包形成一簇电池，通过高压箱配电，汇集到汇流配电柜中。电池簇在设计时，考虑动力冗余。当箱式电源出现某一簇故障不能放电时，其余电池簇仍可输出动力。待故障排除并充

满后重新加入电池系统，和其余电池簇一起放电。

电池管理系统需符合中国船级社的要求。采用三级架构，一级BMS为包内采集单元，二级BMS为簇级主控单元，三级BMS为堆级总控单元。整个BMS具有数据采集、通信、报警和保护、控制，状态估算、参数设置，数据存储、计算、统计和显示等功能，电池管理系统还具有均衡和绝缘电阻检测功能。BMS主要功能列表见表1。

表1 BMS主要功能列

分类	功能	说明
数据采集	电池单体电压	实时监控单体电压值
	电池簇总电压	实时监控电池簇总电压值
	电池簇总电流	监控电池簇充放电电流
	温度	监控电池组温度
通信	与对内，对外设备进行通信交互	监控系统、功率变换系统、其他管理层级电池管理系统等设备进行信息交互的功能
监测参数、显示、报警、保护功能	状态监测，故障诊断及处理	根据故障定义判断故障等级及采取相应措施
状态估算	SOC，SOE估算	实时估算荷电状态（SOC）和能量状态（SOE）
均衡	电池均衡	主动均衡方式和被动均衡方式中的一种或两种
绝缘电阻测量精度	电池簇绝缘电阻检测	误差符合相关标准要求

箱式电源配置消防报警系统，用于电池单元内部的可燃气体探测、火灾探测、火灾报警、消防以及电池系统故障时的紧急切断。

消防报警系统具备足够数量的探测器以探知单元内部各处事故。电池单元内部设置七氟丙烷灭火系统作为主要消防措施。灭火产物可由安全防护系统控制进行自动施放，也可利用释放按钮实现远程遥控施放，并且具有就地应急手动施放功能。七氟丙烷的容量根据电池舱内剩余空间计算得出。

安全防护系统具备火灾报警和消防联控功能，根据不同探测器的组合动作形成控制逻辑，实现事故驱气自动启动、单元内部风机自动切断和灭火剂自动施放功能，并发出声光报警。

3. 箱式电源布置

箱式电源内蓄电池箱（柜）/蓄电池包距箱壁及箱顶的间距应不少于150 mm，且距箱壁及箱顶加强结构净距离均不应小于100 mm，以利于减少在吊装过程中的碰撞风险。集装箱电池舱采用A60防火保温分隔方案，侧壁、顶部采用防火陶瓷棉，电池舱底部敷防火敷料；集装箱其他舱室侧壁、顶部保温材料采用岩棉。保温材料的厚度根据热力学计算确定。电池舱舱门应为A60级别防火门。箱式电源的布置如图2所示。

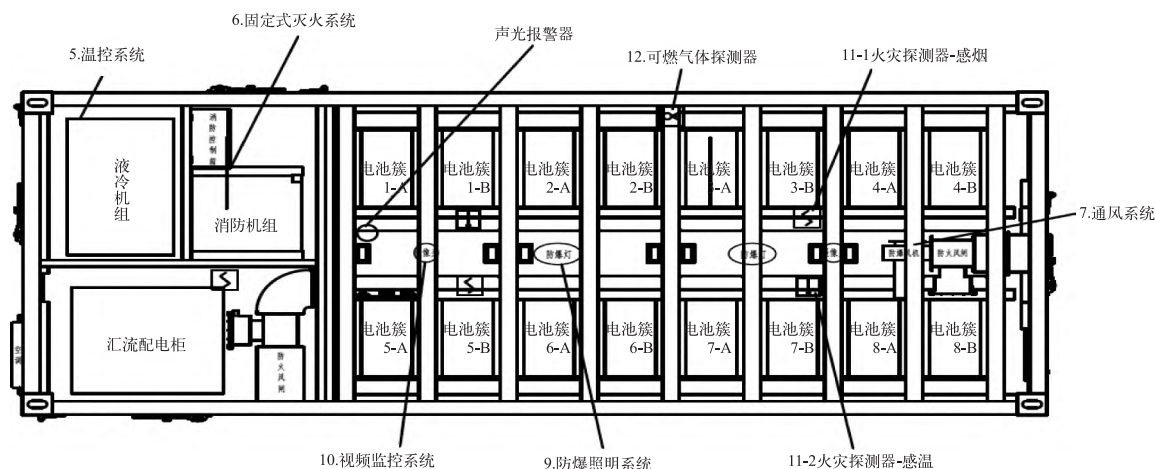


图2 箱式电源系统布置图

本地综合控制系统

1. 本地综合控制系统原理

箱式电源的本地综合控制系统为汇流配电柜，主要由直流汇流母排、断路器、功率模块、UPS、I/O模块、电池管理系统（三级总控模块）、无线传输模块、综合控制系统和辅助部件等组成，汇流柜能提供直流支持多个电池簇并联接入，支持多路I/O接口输入，监控箱式电源消防、火灾探测器、空调、排风、门禁和水浸等信号状态。

综合控制系统能识别充放电状态，并进行充、放电控制，安全可靠的进行能量管理。能安全的控制电池子系统的投入/断开，能抑制各个子系统之间的环流。能与上级船舶PMS/EMS/AMS通信，并进行联动控制。具备独立温度监控和保护回路，在温度超过限值时，控制消防和排风系统，将箱式电源控制到安全状态。综合控制系统能收集箱式电源的状态参数和所有报警信号，并按照规范要求进行显

示、报警和控制。本地综合控制系统原理框图如图3所示。

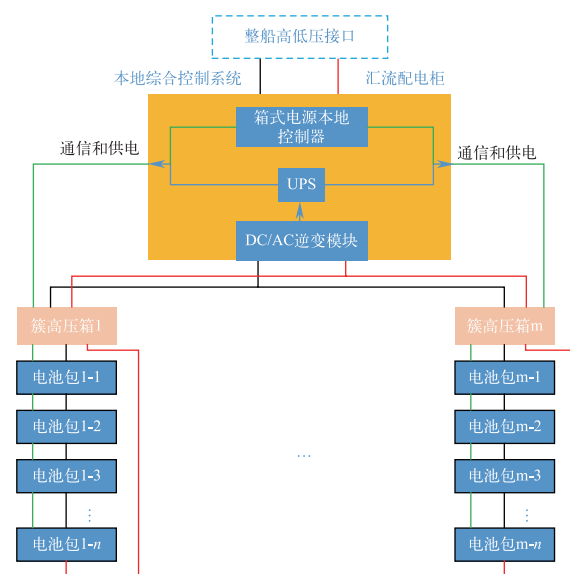


图3 本地综合控制系统原理框图

2. 箱式电源能量管理控制策略

混合动力船舶的箱式电源能量管理策略采用基于逻辑门限的能量管理策略，基于逻辑门限的能量管理策略示意图如图4所示。其中 P_0 为船舶制动功

率， P_0 为电池组最大输出功率， P_0 为柴油发电机组最大输出功率， $P_{\max}$ 为船舶最大负载功率。

具体工作模式如下。

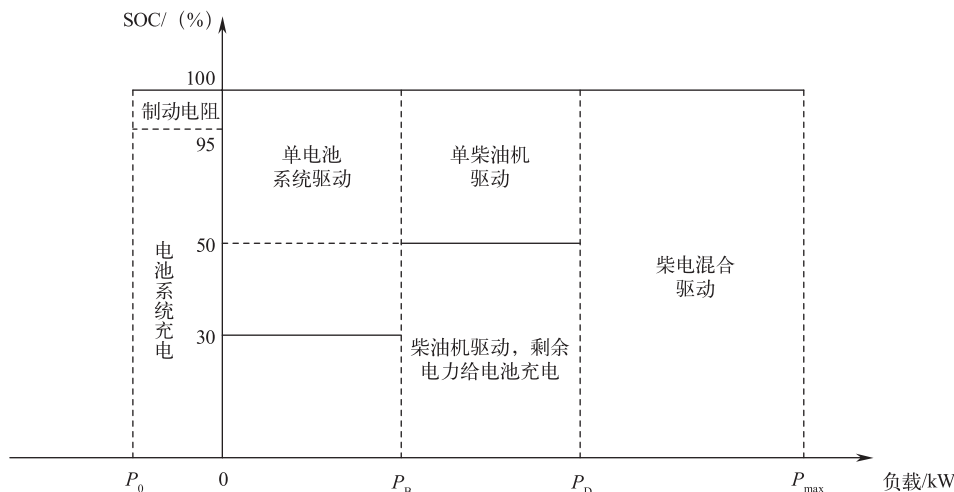


图4 基于逻辑门限的能量管理策略示意图

1) 当柴电混动船舶运行需求功率小于 P_B 时，在箱式电源的SOC大于下限30%时，直流配电板由箱式电源提供电能，柴油发电机组处于怠速或者停机状态；在箱式电源的SOC小于30%时，系统切换至纯柴油发电机推进运行模式，此时柴油发电机投入系统，在满足船舶负荷要求下，补充部分功率给箱式电源，直至箱式电源充至50%，柴油机组才能切除，避免箱式电源频繁充放电切换。

2) 当柴电混动船舶运行需求功率介于箱式电源最大输出功率 P_B 和柴油发电机组最大输出功率 P_D 之间时，在箱式电源SOC大于设定的限值50%时，直流配电板由柴油发电机提供电能，箱式电源在双向DC/DC的控制下不进行功率输出或输入；在箱式电源SOC低于50%时，系统维持单柴油发电机推进运行模式不变，剩余电力给箱式电源充电。

3) 当柴电混动船舶运行需求功率大于 P_D ，小于等于系统最大需求负载功率 $P_{\max}$ 时，此时直流配电板由柴油机组和箱式电源联合提供电能，柴油发电机组全功率输出，箱式电源补充剩余负载需求。

4) 考虑到船舶制动时，会有部分能量需要箱式电源进行回收，若此时箱式电源的SOC高于上限值95%，则利用旁路电阻进行消耗，防止箱式电源发生过充电。

结束语

本文设计的船舶箱式电源系统，完全符合《船用集装箱式移动电源》征求意见稿的要求，应用于柴电混合动力船舶上具有降低排放、降低噪声及高效率等特点。中国船级社发布的《船用集装箱式移动电源》于2024年1月1日起正式生效。此举有力的规范了船用集装箱式电源的设计要求，同时为船舶领域大规模应用储能技术提供了技术导向。未来，随着“电化长江”倡议的实施力度逐渐加强，推动动力电池等新能源技术在长江航运的应用，加快长江航运能源结构清洁低碳转型，船舶箱式电源的应用场景会越来越多。EA

(收稿日期：2024-04-26)

参考文献

- [1] 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 22-35.
- [2] 孙玉伟, 胡克容, 严新平, 等. 新能源船舶混合储能系统关键技术问题综述[J]. 中国造船, 2018, 59(1): 226-236.
- [3] 张丁标, 卢园园, 张育婵. 船舶柴电混合动力系统设计应用[J]. 造船技术, 2022, 50(2): 35-39, 72.