

纯电池动力船舶电力系统安全管理技术研究

周成

中国远洋海运集团，上海，200127；

摘要：纯电池动力船舶作为新型动力系统船舶，其电力系统的安全管理对于保障船舶稳定运行和航行安全至关重要。本文基于对磷酸铁锂电池为推进动力电源和主电源的纯电池动力船舶（船长≥20m），深入探讨了纯电池动力船舶电力系统的安全管理技术。通过分析电池类型、电力系统布置、安装、使用、监控及日常维护等方面，为船舶管理者和电力系统操作人员提供一套系统化的安全管理方法，以确保纯电池动力船舶的安全运行。

关键词：纯电池动力船舶；电力系统；安全管理；磷酸铁锂电池

DOI：10.69979/3060-8767.25.02.033

引言

纯电池动力船舶采用锂离子电池作为推进动力电源，具有环保、低噪音等优点，正逐渐成为中小型内河及近海船舶的主流趋势。但电力系统的安全管理面临诸多挑战。为建立完善的安全管理体系，提升纯电池动力船舶的安全管理能力，本文依据重点航运单位关于纯电池动力船舶安全管理的操作指南，重点研究纯电池动力船舶电力系统的安全管理技术，以期为船舶的安全运行提供理论支撑和实践指导。

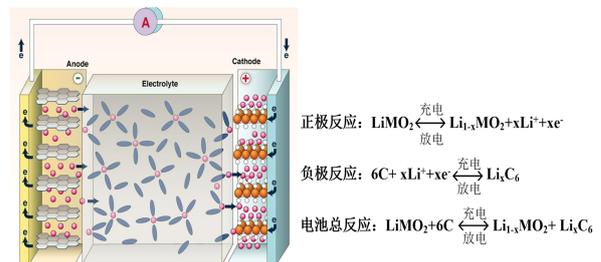
1 纯电池动力船舶电力系统概述

纯电池动力船舶的电力系统主要包括动力电池组、电力推进系统、能量管理系统以及辅助电源系统等。动力电池组作为船舶的动力来源，其性能直接影响到船舶的续航能力和安全性。电力推进系统则负责将电能转化为机械能，驱动船舶航行。能量管理系统则负责监控和调节整个电力系统的运行状态，确保其高效、稳定地工作。辅助电源系统则为船舶上的照明、通信等设备提供电力支持。具有高电压、大容量，复杂的能量转换过程和对环境因素的敏感性等显著特点。

纯电池动力船舶使用的电池主要为锂离子电池，其中磷酸铁锂电池因其安全性高、循环寿命长等优点，被业界广泛采用。

1.1 锂离子电池的工作原理

锂离子电池的充放电过程是锂离子在电池正负极中的脱出和嵌入实现的，锂离子电池反应是一种理想的可逆反应。



锂离子电池基本原理示意图

充电时，从 LiMO_x 晶格中脱出 Li^+ ，通过电解液和隔膜变成 Li ，插入到石墨负极中；放电过程则相反，负极中的 Li 失去电子变成 Li^+ ，同样通过电解液和隔膜，嵌入到 LiMO_x 晶格中。

1.2 锂离子电池的基本特性

特性指标	具体特性
能量转换	化学能 \leftrightarrow 电能
内部反应	氧化还原化学反应
使用损耗	化学介质活性的降低负极材料钝化使得容量衰减充放电能量转换损耗正极材料
内部阻抗	充电时内阻下降，放电时内阻上升
单体标称电压	3.0-3.7V
温度影响	有明显的活性极化温度关系,工作范围：-25℃ +45℃
理想充放电时间	一次充满电 5-6 小时
功率密度	50-380 W/kg
能量密度	20-250 Wh/kg
充放电效率	>95%
循环寿命	平均约为 3000-5000 次,大功率充放电对寿命影响较大
荷电保持能力	存在低自放电
环境危害	即使采用无害化学材料，仍然具有潜在污染
工程使用	单体的大规模串并联

1.3 锂离子电池的燃烧特性

因锂电池结构特性，高温下 SE 膜、电解液材料会发生分解，电解液的分解物还会与正、负极发生化学反

应,致使电芯隔膜融化短路,过程大量放热。累积增强导致电芯防爆膜破裂,电解液喷出燃烧起火。

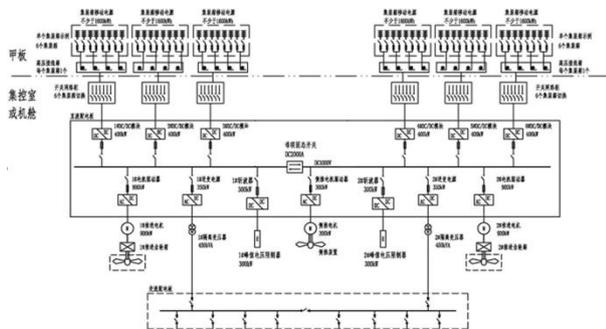
磷酸铁锂电池在安全阀破裂后会释放出大量的可燃气体,其燃烧过程与荷电状态(SOC)关系密切(如下图),电池SOC的降低会明显减弱电池燃烧的剧烈程度,但燃烧持续时间将随着SOC的降低而增加。通过对比标准热释放速率发现,100%SOC的电池燃烧速率高于汽油,存在较大的火灾风险。



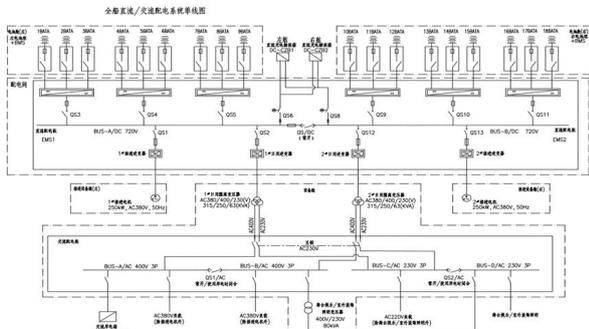
磷酸铁锂电池不同荷电状态(SOC)下的燃烧试验过程图

1.4 电池动力系统组成

纯电池动力系统主要由推进电机、动力电池以及推进器组成。



箱式锂电池动力系统示意图



舱式锂电池动力系统示意图

纯电池船舶常规采用直流综合电力推进系统,如上所示,电池组经直流变换器输至直流母排,直流电能逆

变为交流电,驱动推进电机带动螺旋桨,直流电能经日用逆变模块供日用负荷使用。

1.5 船舶管理系统组成

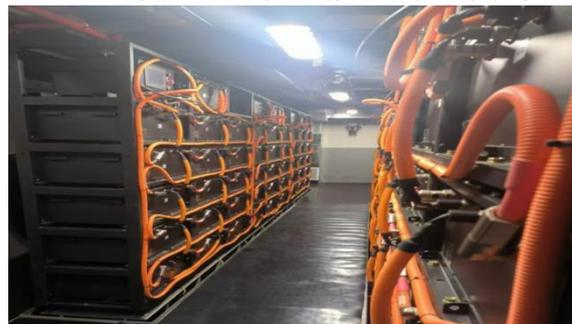
纯电池船舶管理系统主要有两个系统组成:电池管理系统(Battery Management System, BMS)、能量管理系统(Energy Management System, EMS)或电池管理系统(Battery Management System, BMS)、功率管理系统(Power Management System, PMS)。

BMS负责参数测量、状态监控及安全运行,EMS负责充放电控制、在网电池组数量及功率平衡等综合管理,PMS负责调速和功率限制等,整个系统通过BMS、EMS和PMS之间的相互协作,保证船舶航行的安全。

2 纯电池动力船舶电力系统安全管理研究

2.1 充电式电池舱布置与安装

- (1) 核查单个蓄电池舱蓄电池总存储电量,不得大于2000kWh。
- (2) 核查蓄电池舱门,不得开向起居处所。
- (3) 检查蓄电池舱内蓄电池通风散热空间,不得放置任何杂物。
- (4) 检查蓄电池舱内的蓄电池包,确保安装牢固,且远离船体外板,可有效避免碰撞。
- (5) 蓄电池舱内用于安装、调试、检修、更换等维护空间及通道内不得放置任何杂物。
- (6) 定期测试蓄电池舱的机械通风或其他温度调节装置(如空调),确保其功能正常。
- (7) 检查蓄电池舱内的蒸汽、液体等压力管路,确保无渗漏,禁止在蓄电池舱内使用法兰接头。
- (8) 禁止在蓄电池舱内安装与电池系统无关的电气设备。
- (9) 核查蓄电池舱内在蓄电池热失控状态下工作的电气设备(如火灾探测器、可燃气体探测器及报警器等),应为防爆型,非防爆电气设备必须能够切断电源。



分布式直流综合电力系统示意图

2.4 交流配电系统

1 定期检查测试交流配电系统电源逆变器（至少两台），确保一台逆变器停止工作时，其余逆变器仍能：

(1) 保障船舶航行、安全及冷藏所需的设备供电，保证最低居住条件。

(2) 交流配电系统最大电动机起动时所导致的系统电压降低，不会使任何电机失速或任何其他设备失效。

2 定期检查测试交流配电板主汇流排的独立分段（至少两个），确保电源逆变器和其他双套设备尽可能均匀地连接于这些分段上。

3 检查测试各分段上的所有断路器（如：电源端断路器、分段连接断路器、负载端断路器），确保其动作正常，且满足完全选择性保护要求。

4 正常工况由一台逆变器供电的船舶

(1) 定期检查测试备用逆变器，确保失电后备用逆变器能自动起动，并自动连接至主配电板。

(2) 定期检查测量备用逆变器的容量，确保器容量足以保证重要辅助设备的自动起动或自动顺序起动。

5 正常工况由两台及以上逆变器并联供电的船舶

(1) 定期检查测试其非重要设备自动卸载等保护功能，确保自动卸载功能正常。

(2) 定期检查测试并联逆变器故障保护功能，确

保并联的一台逆变器停止工作后，其余逆变器仍能运行，并保持对操舵和保证船舶安全所必需设备的供电。

3 纯电池动力船舶电力系统的保护与应急响应机制

纯电池动力船舶的电力系统独立于陆地电网，自成一体，需要独立承担供电、配电和用电任务。因此，电力系统的保护与控制对于确保船舶的安全运行至关重要。

(1) 为确保电力系统的安全稳定运行，纯电池动力船舶应采用多种保护与控制策略。例如，设置过电流保护、过电压保护、欠电压保护等电气保护措施；采用先进的控制算法实现对电力系统的实时监测和控制。

(2) 应急响应机制是纯电池动力船舶电力系统安全管理的重要组成部分。包括应急预案的制定、应急设备和器材的配备、应急演练和培训等方面。应急预案应涵盖设备故障、事故处理、人员救援等方案，应急设备和器材应处于良好状态并随时可用。应急响应机制的实践包括建立快速响应机制、启动应急预案、组织人员疏散和救援、切断故障电源等措施。同时，应加强对电池舱等关键区域的监测和防护，防止电池火灾和爆炸等事故的发生。

(3) 操作业务培训：确保相关人员熟悉 BMS 以下功能要求，提高他们的安全意识和应急处置能力。

序号	监测参数	显示	报警	保护	相应保护动作
1	电池系统电压	√			
2	蓄电池单体电压	√	√	√	进行均衡控制、降功率、电池（子）系统停止运行
3	蓄电池串联回路电流	√	√	√	降功率、电池（子）系统停止运行
4	蓄电池单体温度	√	√	√	温度调节和降功率、电池（子）系统停止运行
5	环境温度	√	√	√	温度调节和降功率
6	电气绝缘电阻	√	√	√	电池（子）系统停止运行
7	电池荷电状态（SOC）	√	√	√	降功率、电池（子）系统停止运行
8	电池健康状态（SOH）	√			
9	电池能量流动状态	√			
10	过流保护	√	√	√	降功率、电池（子）系统停止运行
11	过充过放保护	√	√	√	断开充电装置/电池（子）系统停止运行
12	过高温保护（蓄电池单体温度）	√	√	√	温度调节和降功率、电池（子）系统停止运行
13	过高温保护（环境温度）	√	√	√	温度调节和降功率、电池（子）系统停止运行
14	蓄电池包/箱（柜）热管理故障（如有时）	√	√		

15	蓄电池箱(柜)应急排气故障(如有时)	√	√		
16	保护功能故障	√	√	√	电池(子)系统停止运行
17	温度检测故障	√	√	√	电池(子)系统停止运行
18	充电故障	√	√	√	停止充电
19	电池模块间的电压或SOC不平衡	√	√	√	启动均衡控制和降功率、电池(子)系统停止运行
20	电池系统故障停止运行	√	√		
21	电池断路器/继电器不正常动作	√	√		
22	BMS与PMS/EMS/AMS通信失败	√	√	√	降功率、电池(子)系统停止运行
23	BMS电源指示及故障	√	√		

纯电池动力船舶作为绿色航运的重要载体,其电力系统的管理技术与方法对于保障船舶安全运营具有重要意义。本文深入探讨了纯电池动力船舶电力系统的管理技术,通过实施这些管理措施,可以有效提升纯电池动力船舶的安全管理能力,保障船舶的安全运行。展望未来,随着科技的不断进步和环保意识的日益增强,纯电池动力船舶电力系统的管理技术与方法将不断创新和完善。我们有理由相信,在全社会的共同努力下,纯电池动力船舶将迎来更加美好的明天,为人类社会的可持续发展作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 纪厚芝. 基于PLC的多能源船舶能量管理系统研发. Diss. 集美大学, 2015.
- [2] 刘泽樊, and 吕镇洋. "纯电池动力船舶综合电力系统故障分析及保护研究." 珠江水运 23(2024).

作者简介: 周成(1978-),男,汉,山东,工学学士,机务经理,中级工程师,船舶机电一体化,机务管理,电气自动化