

电池动力船舶的应用与发展

熊倩怡

重庆交通大学 重庆 400074

摘要：文章重点聚焦电池动力船舶，特别是搭载磷酸铁锂电池的船舶，详述了此类船舶的产业发展现状、核心技术优势以及广泛的实际应用案例，强调其在助力航运业实现碳减排目标、推动绿色能源转型方面的积极作用与巨大潜力。

关键词：节能减排；电池动力船舶；磷酸铁锂

引言：根据国际能源署（IEA）2020年的统计数据，交通运输是全球电力和工业之后的第三大碳排放领域，占全球碳排放的约21%。在交通运输领域内，航运业的碳排放量位居汽车行业之后，占比约11%；截止到2023年，航运业碳排放总量已经超过10亿吨，占全球总排放的2-3%。

为减缓CO₂排放对环境的污染，国际海事组织（IMO）设定了严苛的减排目标：要求至2030年，相较于2008年基准值，航运业需降低40%的碳排放强度，并在2050年前实现温室气体年度总排放量至少下降50%。为积极响应号召，可以从优化改良船舶动力装置、升级船舶尾气处理技术两大核心层面减少船舶温室气体排放问题；本文的核心聚焦于通过对船舶动力装置改良升级，以及积极采用高效节能的绿色动力装置，深度剖析其在船舶领域的应用实践与发展趋势。

1 锂电池综合性分析

相较于传统的船舶动力系统，电力推进具有零排

放、技术附加值高、易于集成化和标准化、运营成本低、安全可靠高等特点，生态优势和综合效益明显^[1]。船舶电力推进装置一般采用电动机械带动螺旋桨，以推动船舶运动^[2]。电池动力船是电力推进船舶中最有发展潜力的一种，它们通常设计成可以快速更换电池的模式，就像电动汽车换电一样，这样可以提高运营的灵活性和方便性，减少等待时间，并确保有足够的电量进行长距离航行。

在众多储能元件中，锂电池应用于船舶电力推进系统中的前景被看好，原因是锂电池寿命长、循环性能好、体积小、无污染，而且有很高的能量密度，可维持较长时间的放电或者充电状态，有着良好的稳态性能^[3]。

动力电池主要分为磷酸铁锂电池、三元锂电池、钴酸锂电池、锰酸锂电池、钛酸锂电池等，我们将对比分析上述提到的几种电池类型，并参考图1和表1进行详细说明。

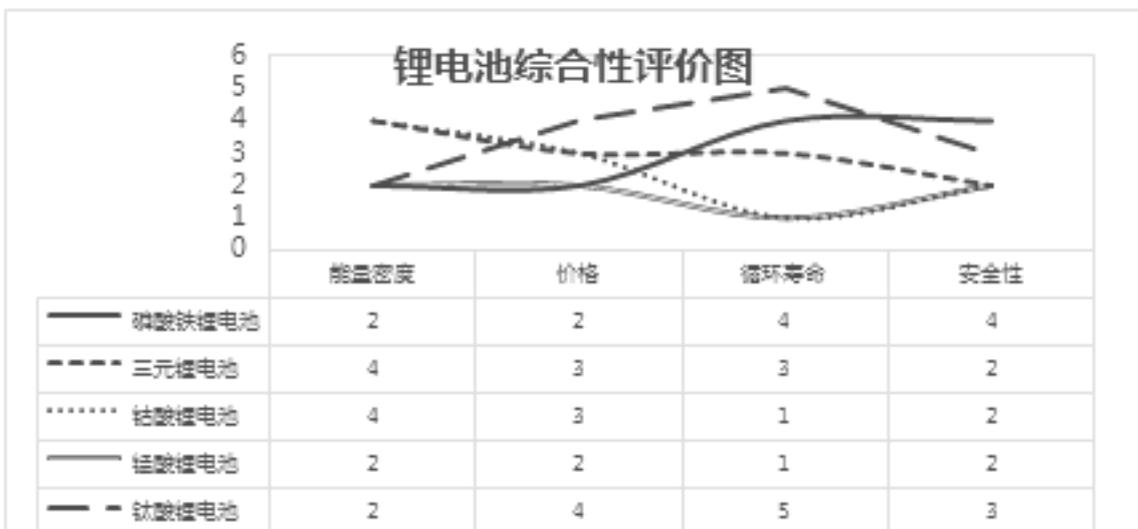


图1 锂电池综合性评价图

表1 锂电池参数数据表

	磷酸铁锂电池	三元锂电池	钴酸锂电池	锰酸锂电池	钛酸锂电池
能量密度(Wh/kg)	140	200	170	130	110
充放电循环次数	3000-4000	1500-2000	500	500	20000

根据图表数据,并结合能量密度、寿命、安全性和成本等因素,钴酸锂电池和锰酸锂电池的循环寿命可能在高负荷下不足,对长期稳定运行的船舶来说会增加成本。在极端条件下,如过充或短路时,这两种电池容量下降快,热稳定性差,尤其在高温下性能降低明显。钴酸锂电池容易过热甚至发生安全事故,锰酸锂电池虽更稳定但仍需保护措施以避免风险。因此,这两种电池不适合用于船舶动力。

钛酸锂电池的能量密度低于三元锂和磷酸铁锂电池,导致相同续航需要更大更重的电池,不适合空间和载重受限的船舶。此外,它的生产成本较高,不利于大规模应用在船舶上。尽管循环寿命长,但因成本和应用范围限制,它并未成为船舶动力的优选。

综合文献查阅和数据分析,三元锂电池和磷酸铁锂电池最适合作为船舶的电池动力源。这两种电池循环寿命长,可以提供足够续航完成航行任务,尤其适合长途和特殊任务的船舶,能够有效缓解“续航焦虑”。

将三元锂电池和磷酸铁锂电池相比较,磷酸铁锂电池呈现出更大的优势:

1.1 晶体结构

磷酸铁锂(LiFePO₄,简称LFP)是一种橄榄石型正交晶系结构的材料,具有良好的电化学稳定性和热稳定性,其分解温度高达约550°C,这种热稳定性源于其稳定的化学键(如P-O、Fe-O键)和紧密堆积的晶体结构,使电池在高温环境下仍能保持结构完整,降低热失控风险。

其基本构成单元是FeO₆八面体和PO₄四面体,以特定方式排列,形成稳定的晶体结构,氧原子被束缚在PO₄四面体中,即使在极端条件下也不会轻易释放氧气,降低了热失控风险;锂离子(Li⁺)嵌入于FeO₆八面体间的空位中。在充放电过程中,锂离子可以在晶体结构的二维通道(010面)中进行可逆的脱嵌移动,驱动电池的能量转换,这种有序的离子通道结构有利于锂离子的快速迁移,提高电池的充放电效率。

LFP中的铁(Fe)元素以+3价Fe³⁺状态存在,具有稳定的d电子构型,不易发生Jahn-Teller效应,有助于保持晶体结构的稳定性。此外,PO₄四面体的存在提供了良好的电荷补偿机制,使得整个晶体具有良好的电荷平衡,有利于提高电池的循环稳定性和安全性。

LFP在面临意外过热、短路等风险时,LFP电池更不易发生热失控,降低了火灾隐患,电池在高温环境下也能保持良好的结构完整性,确保电力供应的连续可靠,且PO₄四面体提供的电荷补偿机制确保了整个晶体的电荷平衡,减少了副反应的发生,进一步提升了电池在反复充放电过程中的稳定性和耐用性,这对于需要长期服役、频繁充放电的船舶电力系统尤为重要。

1.2 低成本

磷酸铁锂电池在各类型电池中展现出最为经济的价格优势,其价格区间低于其他锂电池,这种显著的成本优势意味着在选择船舶动力源时,有利于实现船舶动力系统的成本效益最大化。因此,磷酸铁锂电池作为船舶动力源不仅具备技术可行性和性能可靠性,更在经济层面为船舶制造业提供了极具竞争力的解决方案,有助于推动船舶绿色能源转型的同时确保整体项目投资的经济效益。

1.3 SOC精确估算

LFP电池的OCV-SOC曲线相对平直,这有利于准确估算电池的剩余电量(SOC)。在电池管理系统(BMS)中,通过监测电池的OCV,结合温度校正和历史数据学习,可以实现对电池SOC的高精度估计,不仅实现了船舶电池剩余电量的高精度估算,还为电池状态监控和电池组均衡管理提供了坚实的数据基础,有效保障了船舶电力系统的可靠运行和能源效率,并有助于船员和自动化系统做出合理的航行规划、能源分配决策,以及预测潜在的电池故障,保障航行安全。

1.4 安全性

LFP的电化学窗口宽,工作电压平台(约3.4 V vs. Li/Li⁺)处于相对安全的范围内,降低了与电解液发生副反应的可能性。其单电子转移反应机理简单且可逆性好,不易生成导致内部短路的枝晶锂,进一步提升了电池的安全性。

LFP电池在过充、过放、短路、针刺、挤压等滥用条件下表现出较高的安全性能。即使在极端滥用测试中,如强制内部短路,LFP电池也倾向于温和升温而非剧烈热失控,且释放热量相对较少,降低了引发火灾的风险。

磷酸铁锂由于其优异的热稳定性、电化学稳定性、无氧释放特性、结构稳定性和较高的滥用容忍度,具有

出众的安全性能。结合系统级的安全设计，磷酸铁锂电池在电动船舶、电动汽车、储能系统、航空航天等领域广泛应用，被认为是目前市场上最安全的锂离子电池之一。

1.5 绿色环保

磷酸铁锂不含重金属，由常见且环保的铁、磷、锂组成，降低了环境污染风险。这些元素储量丰富且易回收，有利于资源循环利用，减少对稀有矿产的依赖；此外，磷酸铁锂电池无记忆效应，用户可随意充放电，避免因不当操作导致性能衰减和提前报废，减少废弃物；且在异常条件下的安全性优于部分锂离子电池，减少环境事故；从生命周期看，磷酸铁锂电池对环境影响小，尤其在储能应用中环保性能出色，能源消耗、温室气体排放及资源消耗等指标均较低。

2 电池动力船舶的应用

磷酸铁锂电池在船舶行业的应用前景是积极的，得益于其安全性、技术进步、经济性、市场潜力和环保趋势。随着技术的不断进步和市场的逐渐成熟，预计未来几年船舶电动化将进入快速发展期，中国已经成功建造并投入运营了多艘搭载磷酸铁锂电池的船舶。例如：

(1) “闽江之星”福建省首艘电动高端内河游船，采用宁德时代大容量磷酸铁锂电芯。

(2) “深海01”中国自主设计建造的首艘海上危险品应急指挥船，在广州下水，同样搭载宁德时代的磷酸铁锂电池。

(3) “君旅号”国内首艘大型纯电动商旅客船，采用亿纬锂能配套的磷酸铁锂电池。

(4) “珠江公主”实现零排放的纯电帆船；在广州开工建造，使用亿纬锂能提供的磷酸铁锂电池，容量达1.5MWh。

(5) “蓝海豚23”全程零碳排放、减振降噪，该项目电芯为磷酸铁锂，电池容量达2.5MWh。

(6) “中山大学号”是国内最大的海洋综合科考实习船，也使用了宁德时代的磷酸铁锂电池。

3 结语

在全球环保政策趋严和可持续发展需求的双重推动下，电池技术的不断进步，尤其是锂电池能量密度的显著提高，磷酸铁锂电池在船舶领域的应用前景被广泛看好，预计磷酸铁锂电池将在不久的将来，在促进全球航运业绿色低碳发展方面扮演关键角色，不仅提升了船舶的续航力和性能，还加速了清洁能源技术在航运业的广泛应用，成为引领航运业迈向绿色、可持续未来的决定性要素，是航运业实现可持续发展的重要途径。

参考文献

[1]李静磊,孟宁,周峰.船舶电力推进技术的发展探究[J].电气技术与经济,2018,(02):18-20.

[2]王娜娜,汪晓菲,王硕.船用燃料电池电力推进系统特性与展望[J].机电设备,2022,39(02):39-43.DOI:10.16443/j.cnki.31-1420.2022.02.009.

[3]侯锦福,张桦育.电力推进船舶的锂电池应用[J].机电设备,2021,38(03):38-45.DOI:10.16443/j.cnki.31-1420.2021.03.008.