

电池动力船舶船员专业培训课程指南

目录

1.前言.....	1
2.简介.....	1
3.课程实施.....	2
3.1 课程计划.....	2
3.2 课程纲要和时间表.....	4
3.3 教员指南.....	6
教辅资料.....	14

CHINA MSA

1.前言

根据《交通运输部海事局关于加强电池动力船舶船员培训管理有关事项的通知》（海船员函〔2023〕1615号）的要求，电池动力船舶上的轮机长、轮机员以及对电池动力系统负有操作、维护和保养职责的船员在任职前接受不少于3天的包含电池动力系统维护保养、设备操作和故障分析处理等内容的专业培训。

本指南由交通运输部海事局指导，广东海事局、福建海事局、江苏海事局承办，组织广州航海学院、福建船政交通职业学院、江苏海事职业技术学院、广东交通职业技术学院、中国船舶集团有限公司第711/712/719研究所、中船赛思亿（无锡）电气科技有限公司、中国船级社广州分社、中国船级社福州分社、广州金航游轮股份有限公司、湖北三峡旅游集团等单位共同编写。

2.简介

■目的

本指南目的是指导经营电池动力船舶的航运企业或企业委托的相关机构及其教学人员组织开展电池动力船舶船员专业培训，作为开展相关培训工作的技术性文件，鼓励参照使用。航运企业可结合企业经营、船舶航线和相关法律法规要求，科学制定并实施船员培训课程，充分考虑但不限于本指南内容。

■使用

教员在使用该指南时，应当审视课程计划和细化的教学大纲，考虑学员的入门标准、学员知识和技能的实际水准和之前所接受的相关教育和培训，并应当识别出在培训内容上由于学员实际入门水准的差异可能引起困难的任何部分，并加以强化。此外，教员还应当识别出学员可能还没有获得的任何学术知识、技能或技术训练。

本指南中已经设计了相应的课程安排及课程表，教员可结合实际培训环境及资源配置情况，对课程表进行评估，如有需要可根据实际情况进行相应调整。

■ 实施

为使培训课程顺利进行和取得成效，开展培训的企业或机构应充分做好下列各方面的准备：合格的教员、辅助人员、教室或其他场所、设备、教辅材料、其他参考资料。

3. 课程实施

3.1 课程计划

■ 培训对象

本指南为在以锂离子蓄电池或能量型超级电容器作为部分或全部动力源，动力电池组总容量大于 100kW·h 且设有直流综合电力系统的中国籍国内航行船舶上任职的轮机部高级船员以及对电池动力系统负有操作、维护和保养职责的船员而设置，航运企业岸基管理人员也可参加本课程。

■ 培训证明

完成培训且考核合格，开展培训的企业或机构发放培训证明，并保持完整的船员培训记录，确保可供随时查询。

■ 培训规模

培训开班的规模视教员的数量、培训投入的设备和设施的数量而定，培训开班规模不超过 20 人/班，实操项目的分组和实操教员安排，应能确保每个学员都能得到充分的训练和指导。

■ 教员

从事培训的教员应具备有关教学技能和培训方法知识，具有电池动力船舶常识和应急应变等能力，实操训练每一项目至少一名实操教员负责。船舶建造方、设计方、设备供应商、船级社验船师及有相关经验的航运企业船舶管理人员等具有教学能力的人员以及经培训的航海院校教师可担任教员。

■ 培训设备和设施要求

理论教学使用一个配有投影机或电子屏幕的正规的教室，满足录像或幻灯片等视听材料教学的需求，配备可供 20 名学员进行案例分析、讨论的桌椅和相应的设备，该教室也可用于学员课外练习和作业。

课程的实操训练，使用电池组总容量大于 $100\text{kW}\cdot\text{h}$ 且设有直流综合电力系统的船舶将更有利于培训的开展。也可使用下列实训设备或设施进行培训：

■ 1 间实训室，配备一个演示操作台，空间可放置以下教学设备且容纳 20 名学员（4 组）分组开展实操训练。

■ 1 套电池动力船舶模型，重点展示机舱和电池舱设备布置，且配置机舱设备组成系统布置挂图。

■ 绝缘防护装备（至少含绝缘手套、绝缘衣服、绝缘靴和属具等）10 套

■ 1 套消防设备，包括固定式和手提式七氟丙烷灭火器。

■ 1 套可燃气体探测系统，包括可燃气体探测器、可燃气体报警控制器和火灾声光警报器。

■ 1 套锂电池组，包含锂电池包、锂电池簇、高压盒、电池管理系统（BMS）等。

■ 1 套超级电容器组，由 2 个及以上单体电容器串联。

■ 1 套应急蓄电池，包含免维护蓄电池、少维护蓄电池和开口式普通蓄电池各 1 个，配置电解液比重计 3 支。

■ 1 套直流配电系统或等效模拟设备，含 DC/DC，DC/AC 模块，电力电子开关，能量管理系统（EMS）或功率管理系统（PMS），电抗器，熔断器等，可实现操作训练。

■ 1 套交流配电板或等效模拟设备，可展示配电板内部结构与实现配电板的操作训练。

■ 1 套推进电机，包含直流电动机，异步电动机，同步电动机和永磁电动机

各 1 个。

■ 1 套驱动变频器，与推进电机配套使用，可实现对推进电机的调速操作。

■ 1 套日用逆变器或等效模拟设备，可展示内部结构，且配置原理挂图 1 张。

■ 1 套隔离变压器或等效模拟设备，可展示内部结构，且配置原理挂图 1 张。

■ 1 套遥控系统（PMS）或等效模拟设备，可实现对推进电机的启停、调速控制，以及驾控、集控和机旁控制的操作切换，同时实时监控船舶推进系统各个设备的运行状态、报警信息。

■ 1 套岸电充电系统或等效模拟设备，可模拟高低压充电操作流程。

■ 1 套箱式电源或等效模型，可展示内部结构，且配置原理挂图 1 张。

■ 1 套检测仪器，包括便携式气体探测器、测静电仪、温度检测仪和绝缘检测仪各 4 个。

■ 4 套检修工具，包括万用表、钳形电流表、电烙铁、螺丝刀和热风枪等常用电气检测工具。

■ 1 套图书资料，包括型式认可证书、检测报告、功能说明资料和操作说明资料等。

上述设备标准为推荐标准，航运企业可根据培训实际情况进行适当调整。

3.2 课程纲要和时间表

■ 课程纲要

课程纲要	大概学时
熟悉、掌握和精通	理论教学、示范、展示和实际操作
模块一：电池动力系统操作与管理（4 学时）	
电池船舶控制系统功能及工作原理 1.1 电池管理系统（BMS）功能及工作原理 1.2 能量管理系统（EMS）/功率管理系统（PMS）功能及工作原理 1.3 监测报警系统（AMS）功能及工作特点	2
电池动力系统的启动与管理	1

1.4 电池动力系统启动及注意事项	
1.5 电池运行管理记录	
电池动力系统安全性	1
1.6 电池动力系统潜在安全性问题	
模块二：电池动力系统应急处理、维护与故障排查（实操 2 学时）	
电池动力系统应急处理	0.5
2.1 电池动力系统应急处理	
电池动力系统维护	0.5
2.2 电池动力系统维护流程	
电池动力系统故障排查	1
2.3 电池动力系统常见故障及排查	
模块三：直流配电系统组成与工作原理（6 学时）	
直流配电系统结构、功能及工作原理	
3.1 船舶电力系统的组成、特点及主要参数	2
3.2 船舶直流配电系统的组成与功能	
3.3 单向/双向 DC/DC 变换器功能及原理	
3.4 直流配电系统工作原理	
3.5 直流组网系统的冷却系统	
电力负载系统的组成、功能与工作原理	
3.6 推进逆变器功能及原理	3
3.7 推进控制系统	
3.8 日用逆变器	
充电装置与岸电的功能与要求	
3.9 充电柜设施的整流模块	1
3.10 外部充电装置	
3.11 岸电	
模块四：直流配电系统操作（实操 2 学时）	
直流配电系统操作	
4.1 船/岸电切换操作	1.5
4.2 手动及自动启/停/投切操作	
4.3 电池动力船舶岸电充电操作	
推进系统操作	0.5
4.4 推进系统遥控模式下启动/停机	
模块五：直流配电系统的保护（2 学时）	
选择性保护的基本原理和实现方式	
5.1 快速熔断器、直流隔离开关、直流接触器工作原理及使用范围	1
5.2 选择性保护工作原理	
应急蓄电池的充电和维护	0.25
5.3 应急蓄电池	
电力设备冷却系统组成与作用	0.25
5.4 电力设备冷却系统	
系统应急	0.5
5.5 系统应急操作流程	
模块六：直流配电系统的应急处理与故障排除（实操 6 学时）	

直流配电系统的故障排除 6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除 6.2 电网常见故障排查	4
直流配电系统的应急处理 6.3 突发情况下的应急操作	1
应急蓄电池的维护保养 6.4 应急蓄电池的维护保养	1
模块七：案例分析（2学时）	
7.1 EMS 通讯模块导致船舶失电事故案例 7.2 船舶动力电池失火事故案例 7.3 电池管理系统失电致全船失电事故案例 7.4 锂离子电池热失控造成爆炸事故案例 7.5 船舶单机舵桨变频器故障失控冲滩事故案例 7.6 航行中 DC/DC 单元故障导致全船失电 8 分钟事故案例	2

■课程的时间表

时间/天	第一天	第二天	第三天
第一、二节	模块一 电池动力系统操作 与管理	模块三 直流配电系统组成 与工作原理	模块六 直流配电系统的应急处 理与故障排除（实操）
第三、四节	模块一 电池动力系统操作 与管理	模块三 直流配电系统组成 与工作原理	模块六 直流配电系统的应急处 理与故障排除（实操）
午间休息			
第五、六节	模块二 电池动力系统应急处 理、维护与故障排查（实 操）	模块四 直流配电系统操作 （实操）	模块六 直流配电系统的应急处 理与故障排除（实操）
第七、八节	模块三 直流配电系统组成 与工作原理	模块五 直流配电系统的保护	模块七 案例分析

备注：教员应注意到上述各学习任务的先后次序和时间安排中理论和实际操作时间仅仅是建议性，这些具体培训内容可根据电池动力船舶航运企业运营和船舶实际装备的特点（如箱式电池动力船舶、混合电池动力船舶等），以及学员的实际工作经验、能力、培训的师资和设备等实际情况进行适当的调整。

3.3 教员指南

■介绍

教员指南提供了教学过程中所需的教学素材的指导，课程的教辅资料反映并

参照了《交通运输部海事局关于加强电池动力船舶船员培训管理有关事项的通知》（海船员函〔2023〕1615号）中关于强化专业培训的规定。

依据通知的规定，本教辅资料按七个知识模块编排：

模块一：电池动力系统操作与管理

模块二：电池动力系统应急处理、维护与故障排查

模块三：直流配电系统组成与工作原理

模块四：直流配电系统操作

模块五：直流配电系统的保护

模块六：直流配电系统的应急处理与故障排除

模块七：案例分析

本指南中课程纲要和时间表在课程教辅资料的时间安排提供指导性的意见，教员可根据具体需要进行必要的调整。

应准备必要的投影仪和幻灯片教学讲义和专业培训材料分派给学员使用。通过图片或3D动画使学员结合理论知识，尽快并更容易理解和掌握电池动力船舶的各个系统和部件。

充分和良好的准备是课程成功和达到预期效果所必不可少的。教员应充分备课，以使学员通过本课程的学习，获得电池动力船舶专业知识和职业技能，同时培养学员发现问题、分析问题和解决问题的能力，培养学员整体思维、融会贯通、学会学习的能力。

在整个课程过程中，应始终强调严格遵守规章和规定以及采取一切安全措施的重要性，必要时，应告知学员如何避免事故的发生。

必须仔细研究详细教学大纲并应尽可能参照课程计划和授课说明。课程的设计是建立在对电池动力船舶轮机员岗位工作内容层次和 workflow 分解的基础上，以职业能力培养为重点来进行的。

教学应尽可能地贴近船上的实际工作和使用设备实物，如可能应进行课堂案例分析和实物讲解。教学应遵循“以必须、够用为度”的高职教育理念和人的学习认知规律。教学内容的后续课程从“必须”“够用”两个方面出发，同时兼顾知识的完整性、系统性和学生的可持续发展性，知识讲授应力求化繁为简、化难为易，用通俗易懂的语言来进行阐述。

严格按照学员考勤制度的规定，实行课前和下课前点名管理，把学员的出勤率纳入考核成绩。

■日常安全工作

理论课程和实操训练期间的安全防范措施是课程安排中的主要组成部分，在整个课程期间必须确保学员的安全，尤其是用电安全和防火措施。

管理员应做好日常性的场地设施设备安全检查工作，对发现安全问题及缺陷必须限期改进。教员及其管理员必须严格监督和做好安全保护工作，必要时，教员应做好准备以便他们在需要时能够协助学员。其他安全措施包括实操前场地设施设备的检查和准备工作等。

■指导说明

下列说明是为了进一步突出课程的主要目标，说明包含了培训内容、教辅材料、场地设施设备及教具、培训方式和分组要求。

培训模块	培训内容	教辅资料	场地设施设备及教具	培训方式	分组
模块一：电池动力系统操作与管理（4学时）	电池船舶控制系统功能及工作原理（2学时）				
	1.1 电池管理系统（BMS）功能及工作原理 1.1.1 了解电池管理系统的功能 1.1.2 了解电池管理系统的工作原理	1-1 页	多媒体教室	理论授课	
	1.2 能量管理系统（EMS）/功率管理系统（PMS）功能及工作原理 1.2.1 了解功率/能量管理系统的技术要求 1.2.2 了解功率/能量管理系统的功能及原理	1-2 页	多媒体教室	理论授课	
	1.3 监测报警系统（AMS）功能及工	2-3 页	多媒体教室	理论	

	作特点 1.3.1 了解系统功能描述 1.3.2 了解系统的工作特点			授课	
	电池动力系统的启动与管理（1 学时）				
	1.4 电池动力系统启动及注意事项 1.4.1 熟悉启动前注意事项 1.4.2 掌握系统正常启动步骤	3-4 页	多媒体教室	理论授课	
	1.5 电池运行管理记录	5-6 页	多媒体教室	理论授课	
	电池动力系统安全性（1 学时）				
	1.6 电池动力系统潜在安全性问题 1.6.1 了解电池动力系统潜在安全性问题 1.6.2 熟知电池的主要风险之一热失控 1.6.3 熟知应对方案 1.6.4 了解相关规范要求	6-8 页	多媒体教室	理论授课	
	电池动力系统应急处理（0.5 学时）				
	2.1 电池动力系统应急处理 2.1.1 采用正确的程序进行电池系统内部火灾应急操作流程 2.1.2 采用正确的程序进行电池系统外部火灾应急操作流程 2.1.3 描述电池舱起火现场应急处置具体方案	9-10 页	可燃气体探测系统、消防设备（包括固定式和手提式七氟丙烷灭火器）、实训室	实操训练	10 人一组
	电池动力系统维护（0.5 学时）				
模块二：电池动力系统应急处理、维护与故障排查（实操 2 学时）	2.2 电池动力系统维护流程 2.2.1 熟悉系统日常维护 2.2.2 熟悉电池组周期维护 2.2.3 熟悉电池管理系统的检查要点 2.2.4 掌握电池管理系统的日常维护要点 2.2.5 掌握 PMS 系统日常维护要点 2.2.6 了解船用超级电容系统的日常维护保养 2.2.7 掌握动力电池系统安全检查要点 2.2.8 掌握动力电池系统维护保养	10-15 页	锂电池组、超级电容、实训室	实操训练	10 人一组
	电池动力系统故障排查（1 学时）				
	2.3 电池动力系统常见故障及排查 2.3.1 正确判断故障现象：系统不工作，掌握其排查方法 2.3.2 正确判断故障现象：CAN 通讯故障，掌握其排查方法 2.3.3 正确判断故障现象：485 通讯故障，掌握其排查方法	15-17 页	锂电池组、电池管理系统（BMS）、直流配电系统或等效模拟设备、遥控系统（PMS）或	实操训练	10 人一组

	<p>2.3.4 正确判断故障现象：某 DC/DC 模块无法充放电，并报出 DC/DC 故障，续航力下降，掌握其排查方法</p> <p>2.3.5 正确判断故障现象：单边电池系统无法运行，掌握其排查方法</p> <p>2.3.6 正确判断故障现象：电池系统启动失败，并报故障，掌握其排查方法</p> <p>2.3.7 正确判断故障现象：电池包无法充电，电池包电压过高，掌握其排查方法</p> <p>2.3.8 正确判断故障现象：电池包无法放电，电池包电压过低，掌握其排查方法</p> <p>2.3.9 正确判断故障现象：电池包无法放电，且电池包电压正常，温度过高，掌握其排查方法</p> <p>2.3.10 正确判断故障现象：电池舱发生外部火灾，掌握其排查方法</p>		等效模拟设备、岸电充电系统或等效模拟设备、消防设备、实训室		
	直流配电系统结构、功能及工作原理（2 学时）				
模块三：直流配电系统组成与工作原理（6 学时）	<p>3.1 船舶电力系统的组成、特点及主要参数</p> <p>3.1.1 了解船舶电力系统的组成</p> <p>3.1.2 了解船舶综合电力系统的特征和基本要求</p> <p>3.1.3 了解船舶电力系统的基本参数</p>	18-20 页	多媒体教室	理论授课	
	<p>3.2 船舶直流配电系统的组成与功能</p> <p>3.2.1 了解直流配电系统架构</p> <p>3.2.2 了解主要设备组成及参数</p>	20-23 页	多媒体教室	理论授课	
	<p>3.3 单向/双向 DC/DC 变换器功能及原理</p> <p>3.3.1 了解 DC/DC 变换器的种类</p> <p>3.3.2 了解 DC/DC 变换器工作原理</p> <p>3.3.3 了解双向 DC/DC 转换器的工作原理</p>	23-26 页	多媒体教室	理论授课	
	<p>3.4 直流配电系统工作原理</p> <p>3.4.1 了解集中式直流综合电力系统</p> <p>3.4.2 了解分布式直流综合电力系统</p>	26-27 页	多媒体教室	理论授课	
	<p>3.5 直流组网系统的冷却系统(与 5.4 电力设备冷却系统一并讲解)</p>	27-27 页	多媒体教室	理论授课	
	电力负载系统的组成、功能与工作原理（3 学时）				
	<p>3.6 推进逆变器功能及原理</p> <p>3.6.1 了解逆变器的功能</p> <p>3.6.2 了解逆变器工作原理</p> <p>3.6.3 了解逆变器维护保养要点</p>	27-28 页	多媒体教室	理论授课	
<p>3.7 推进控制系统</p>	28-31 页	多媒体教室	理论		

	3.7.1 熟悉推进控制系统功能 3.7.2 了解功率限制功能 3.7.3 了解推进电机控制			授课	
	3.8 日用逆变器	31-31 页	多媒体教室	理论授课	
	充电装置与岸电的功能与要求 (1 学时)				
	3.9 充电柜设施的整流模块	31-32 页	多媒体教室	理论授课	
	3.10 外部充电装置 3.10.1 了解岸基充电技术 3.10.2 了解充电装置的一般要求 3.10.3 掌握充电装置检查要点	32-33 页	多媒体教室	理论授课	
	3.11 岸电 3.11.1 了解岸电技术原理 3.11.2 了解直流配电系统对岸电或其他外来电源的设计要求	33-34 页	多媒体教室	理论授课	
	直流配电系统操作 (1.5 学时)				
模块四：直流配电系统操作 (实操 2 学时)	4.1 船/岸电切换操作 4.1.1 掌握船/岸电切换注意事项 4.1.2 掌握船/岸电切换操作 (1) 采用正确的程序进行船电转岸电操作 (2) 采用正确的程序进行岸电转船电操作	35-36 页	岸电充电系统或模拟设备、实训室	实操训练	10 人一组
	4.2 手动及自动启/停/投切操作 4.2.1 锂离子电池组手动及自动启/停/投切操作 (1) 采用正确的程序进行锂离子电池组的启动 (2) 描述锂离子电池组的并网条件 (3) 采用正确的程序进行锂离子电池组的停机 4.2.2 掌握柴油发电机组手动及自动启/停/投切操作 (1) 采用正确的程序进行柴油发电机组的启动 (2) 描述柴油发电机组的并车条件 (3) 采用正确的程序进行柴油发电机组的停机 4.2.3 掌握直流配电系统手动及自动启/停/投切操作 4.2.4 掌握交流配电板手动及自动启/停/投切操作	36-39 页	交流配电板或等效模拟设备、直流配电系统或等效模拟设备、模拟发电机组、实训室	实操训练	10 人一组
	4.3 电池动力船舶岸电充电操作 4.3.1 掌握岸电充电一般操作流程 (1) 描述电池动力船舶岸电充电操	39-40 页	岸电充电系统或模拟设备、实训室	实操训练	10 人一组

	作的流程 (2) 采用正确的程序进行电池动力船舶岸电充电操作 4.3.2 掌握船员维护保养和操作要点 (1) 描述充电装置等设备维护保养和操作要点 (2) 采用正确的程序进行充电电缆、充电枪、充电连接器和岸电箱的维护保养				
	推进系统操作 (0.5 学时)				
	4.4 推进系统遥控模式下启动/停机	40-41 页	遥控系统 (PMS) 或等效模拟设备、实训室	实操训练	10 人一组
	选择性保护的基本原理和实现方式 (1 学时)				
	5.1 快速熔断器、直流隔离开关、直流接触器工作原理及使用范围 5.1.1 了解快速熔断器 5.1.2 了解隔离开关 5.1.3 了解直流接触器 5.1.4 了解断路器 5.1.5 了解固态开关	42-47 页	多媒体教室	理论授课	
	5.2 选择性保护工作原理 5.2.1 了解船舶电力系统保护装置保护原则 5.2.2 了解船舶电网保护方式	47-48 页	多媒体教室	理论授课	
模块五：直流配电系统的保护 (2 学时)	应急蓄电池的充电和维护 (0.25 学时)				
	5.3 应急蓄电池 (结合 6.4 应急蓄电池的维护保养一并讲解)	48-48 页	多媒体教室	理论授课	
	电力设备冷却系统组成与作用 (0.25 学时)				
	5.4 电力设备冷却系统 5.4.1 了解冷却系统的组成 5.4.2 了解水冷柜 5.4.3 了解电动机冷却 5.4.4 了解电子元器件及其模块冷却 5.4.5 了解变压器的绝缘与冷却	48-52 页	多媒体教室	理论授课	
	系统应急 (0.5 学时)				
	5.5 系统应急操作流程 (结合 6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除一并讲解)	52-52 页	多媒体教室	理论授课	
模块六：直流配电系统的应急处理与故障排除 (实操 6 学时)	直流配电系统的故障排除 (4 学时)				
	6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除 6.1.1 航行中主开关跳闸应急处理 (1) 了解常见主开关跳闸的原因 (2) 掌握主开关跳闸的应急处理	53-55 页	交流配电板或等效模拟设备、直流配电系统或等效模拟设备、	实操训练	10 人一组

	(3) 掌握防止主开关跳闸的应急措施 6.1.2 故障模式分析及应急措施、方案		实训室		
	6.2 电网常见故障排查 6.2.1 了解整流/逆变模块故障 6.2.2 了解电池组故障 6.2.3 了解线路故障	55-56 页	锂电池组、日用逆压器或等效模拟设备、实训室	实操训练	10 人一组
	直流配电系统的应急处理 (1 学时)				
	6.3 突发情况下的应急操作 6.3.1 掌握推进系统应急操作 (1) 采用正确的程序进行推进系统的应急操作 (2) 能够有效排除推进系统的故障	56-57 页	遥控系统 (PMS) 或等效模拟设备、实训室	实操训练	10 人一组
	应急蓄电池的维护保养 (1 学时)				
	6.4 应急蓄电池的维护保养 6.4.1 了解应急蓄电池的作用 6.4.2 掌握蓄电池的维护保养要求 6.4.3 掌握蓄电池维护保养注意事项	57-58 页	应急蓄电池、实训室	实操训练	10 人一组
模块七: 案例分析 (2 学时)	7.1 EMS 通讯模块导致船舶失电事故案例 7.2 船舶动力电池失火事故案例 7.3 电池管理系统失电致全船失电事故案例 7.4 锂离子电池热失控造成爆炸事故案例 7.5 船舶单机舵桨变频器故障失控冲滩事故案例 7.6 航行中 DC/DC 单元故障导致全船失电 8 分钟事故案例	59-69 页	多媒体教室	理论授课	
电池动力船舶箱式电源系统 (选学, 2 学时)	8.1 箱式电源换电流程简介 8.2 箱式电源的组成、布置要求与主要功能 8.3 箱式电源的吊装与安装 8.4 箱式电源系统的操作与维护 8.5 应急处理方法 8.6 七氟丙烷灭火装置检查维护保养要求	70-80 页	多媒体教室	理论授课	

备注: 如在箱式电源电池动力船舶任职, 可将电池动力船舶箱式电源系统模块作为选学内容。

附件: 教辅资料

附件

教辅资料
(第一版)

前言

本教辅资料在编写过程得到广州航海学院、福建船政交通职业学院、江苏海事职业技术学院、广东交通职业技术学院、中国船舶集团有限公司第 711/712/719 研究所、中船赛思亿（无锡）电气科技有限公司、中国船级社广州分社、中国船级社福州分社、广州金航游轮股份有限公司、湖北三峡旅游集团等单位的大力支持，借鉴和吸收了国内电池动力船舶主流设计商、厂商和航运企业的相关技术资料。由于本教辅资料完成之时，电池动力船舶技术还在不断更新迭代，相关船舶技术检验规则、规范和行业标准也在不断修订和完善，难免有疏漏的地方，敬请使用单位斧正。

鉴于目前运营的电池动力船舶种类不一，船舶动力类型多样，本教辅资料内容仅供参考，未尽之处，各单位也可根据自身营运船舶种类、动力类型、经营航线等实际情况更新补充。

目录

模块一：电池动力系统操作与管理.....	1
电池船舶控制系统功能及工作原理.....	1
1.1 电池管理系统（BMS）功能及工作原理.....	1
1.2 能量管理系统（EMS）/功率管理系统（PMS）功能及工作原理.....	1
1.3 监测报警系统（AMS）功能及工作特点.....	2
电池动力系统的启动与管理.....	3
1.4 电池动力系统启动及注意事项.....	3
1.5 电池运行管理记录.....	5
电池动力系统安全性.....	6
1.6 电池动力系统潜在安全性问题.....	6
模块二：电池动力系统应急处理、维护与故障排查.....	9
电池动力系统应急处理.....	9
2.1 电池动力系统应急处理.....	9
电池动力系统维护.....	10
2.2 电池动力系统维护流程.....	10
电池动力系统故障排查.....	15
2.3 电池动力系统常见故障及排查.....	15
模块三：直流配电系统组成与工作原理.....	18
直流配电系统结构、功能及工作原理.....	18
3.1 船舶电力系统的组成、特点及主要参数.....	18
3.2 船舶直流配电系统的组成与功能.....	20
3.3 单向/双向 DC/DC 变换器功能及原理.....	23
3.4 直流配电系统工作原理.....	26
3.5 直流组网系统的冷却系统.....	27
电力负载系统的组成、功能与工作原理.....	27

3.6 推进逆变器功能及原理.....	27
3.7 推进控制系统.....	28
3.8 日用逆变器.....	31
充电装置与岸电的功能与要求.....	31
3.9 充电柜设施的整流模块.....	31
3.10 外部充电装置.....	32
3.11 岸电.....	33
模块四：直流配电系统操作.....	35
直流配电系统操作.....	35
4.1 船/岸电切换操作.....	35
4.2 手动及自动启/停/投切操作.....	36
4.3 电池动力船舶岸电充电操作.....	39
推进系统操作.....	40
4.4 推进系统遥控模式下启动/停机.....	40
模块五：直流配电系统的保护.....	42
选择性保护的基本原理和实现方式.....	42
5.1 快速熔断器、直流隔离开关、直流接触器工作原理及使用范围.....	42
5.2 选择性保护工作原理.....	47
应急蓄电池的充电和维护.....	48
5.3 应急蓄电池.....	48
电力设备冷却系统组成与作用.....	48
5.4 电力设备冷却系统.....	48
系统应急.....	52
5.5 系统应急操作流程.....	52
模块六：直流配电系统的应急处理与故障排除.....	53
直流配电系统的故障排除.....	53
6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除.....	53
6.2 电网常见故障排查.....	55
直流配电系统的应急处理.....	56

6.3 突发情况下的应急操作.....	56
应急蓄电池的维护保养.....	57
6.4 应急蓄电池的维护保养.....	57
模块七：案例分析.....	59
7.1 EMS 通讯模块导致船舶失电事故案例.....	59
7.2 船舶动力电池失火事故案例.....	61
7.3 电池管理系统失电致全船失电事故案例.....	64
7.4 锂离子电池热失控造成爆炸事故案例.....	65
7.5 船舶单机舵桨变频器故障失控冲滩事故案例.....	66
7.6 航行中 DC/DC 单元故障导致全船失电 8 分钟事故案例.....	68
选学内容：电池动力船舶箱式电源系统.....	70
8.1 箱式电源换电流程简介.....	70
8.2 箱式电源的组成、布置要求与主要功能.....	70
8.3 箱式电源的吊装与安装.....	75
8.4 箱式电源系统的操作与维护.....	75
8.5 应急处理方法.....	79
8.6 七氟丙烷灭火装置检查维护保养要求.....	79

模块一：电池动力系统操作与管理

电池船舶控制系统功能及工作原理

1.1 电池管理系统（BMS）功能及工作原理

1.1.1 电池管理系统的功能

电池管理系统主要负责电池系统的主要参数测量(温度、电压、荷电状态等)、状态监控及安全运行，防止电池出现过充、过放、过流、过温等问题，在充放电过程中实时跟踪监测电池的健康状况数据，为蓄电池提供通信、安全、蓄电池单体均衡及管理控制，并提供与应用设备通信接口的系统。

其中，电池单体均衡管理按照能量的转移形式可分为主动均衡模式和被动均衡模式。主动均衡模式是通过能量转移的方式将能量高的单体电池一部分能量转移到能量低的单体电池上，从而实现各单体电池能量均衡的方法。若忽略转移过程的能量损耗，主动均衡模式不存在电池能量损失，且发热量少，是目前动力电池管理主要采用均衡方式。被动均衡模式是指将串联电池组中能量较高的单体电池通过连接电阻负载，消耗部分能量从而达到各单体电池均衡的方法。被动均衡模式通过损失电池的电量实现均衡，目前使用较少。

1.1.2 电池管理系统的工作原理

电池管理系统（BMS）一般应由主电源和应急电源两路电源供电，两路电源应能自动转换。

BMS 需根据蓄电池层级配备电池控制单元和电池监测电路。单个蓄电池包均可配备电池监控单元（CSC），每个支路配置从高压盒用于单支路监控控制，每个子系统配备主高压盒用于整个子系统监控控制。BMS 可根据能量管理系统（EMS）要求，通过通讯将信息反馈给 EMS。

1.2 能量管理系统（EMS）/功率管理系统（PMS）功能及工作原理

1.2.1 功率/能量管理系统的技术要求

能量管理应能采集并显示电池系统和船舶配电系统的重要参数，应包括但不限于以下内容：

- (1) 各组电池系统的充放电状态；
- (2) 各组电池系统的荷电状态（SOC）；
- (3) 各组电池系统充放电的功率；

- (4) 各组电池系统的总电压、总电流；
- (5) 蓄电池组、推进系统、日用负载电源变换器等分路断路器和汇流排母联（隔离）开关的状态；
- (6) 配电板汇流排电压；
- (7) 电池系统、配电系统和推进系统的所有故障信息，如另设有监测报警系统（AMS），则只需显示严重故障信息；
- (8) 电池系统能实时提供其剩余电量尚能维持船舶航行的时间或里程。

能量管理系统应能控制和调配本船全部电站及储能系统，在船舶航行、作业、停泊等工况下为船舶用电设备提供足够的电能，保证船舶安全航行和正常操作。

1.2.2 功率/能量管理系统的功能及原理

主要功能为：直流母线预充；监控锂离子电池组、推进电机、日用电源、岸电电源等设备的主断路器状态，监控直流配电板、交流配电板中主要断路器状态；与锂离子电池组 BMS 通讯，完成锂离子电池组状态的实时监控和保护；电池斩波模块充放电模式选择；锂离子电池组的启动和停止、锂离子电池组之间的功率分配；日用电站的启动和停止；日用电站的主断路器的自动合闸和分闸控制；非重要负载优先脱扣；与 AMS 通讯。

1.3 监测报警系统（AMS）功能及工作特点

1.3.1 系统功能描述

(1) 集控室主控单元功能

- 1) 仅使用轨迹球（鼠标）就能进行一切操作；
- 2) 越限报警功能；
- 3) 列表显示功能；
- 4) 报警历史存档内容及显示功能；
- 5) 走势图表显示功能；
- 6) 打印相关功能；
- 7) 将数据内容存档在硬盘中；
- 8) 任何时候可以查看上述存盘的内容；
- 9) 自动及人工退出报警功能；
- 10) 通讯故障报警功能。

(2) 输入/输出单元功能

1) 输入输出单元是一个智能模块。负责和主机联系，成为系统的一个对外的接口；

2) 输入的信号有控制台上的应答按钮和状态选择开关等（自用）。

(3) AMS 输入电源规格要求电源：AC220V/50Hz，DC24V（波纹系数 $\leq\pm 5\%$ ，电压波动 $\leq\pm 20\%$ ，不同型号略有不同）。

1) AMS 应能实现对电池动力系统的监测报警，应布置在船舶通常有人值班的处所；

2) AMS 应能与 BMS 进行通信，能接收并处理 BMS 采集汇总的电池系统信息；

3) AMS 应能显示电池系统、配电系统和推进系统的所有故障信息，并在发生故障时发出视觉和听觉报警。

1.3.2 系统的工作特点

AMS 系统可以满足全船报警监测项目明细表，系统采集备用发电机组、液位遥测、舱底水系统等报警信号、在驾驶室、集控室可看到系统中各种参数，报警时可看到具体报警点。同时接收舵机延伸监测报警信号、火灾探测报警信号、电池舱消防系统报警信号等，通过在集控室、驾驶室进行重复监测报警，监测报警硬点、软点总输入数量 600 点（通讯 500 个，硬点 100 个），通讯回路不少于 6 路。

AMS 系统还可以满足报警监测设备系统、机舱监测报警系统的需求，报警输出数量不少于 2 个（AO 输出按需配置隔离模块，触点容量满足 220V 控制回路使用）。

电池动力系统的启动与管理

1.4 电池动力系统启动及注意事项

1.4.1 启动前注意事项

(1) 确保动力系统 24V 专用充放电板上主电源及相关设备开关均已合闸；

(2) 到左右舷机舱直流配电板操作屏前查看报警信息，确认所有报警并复位，查看充放电控制柜（DC/DC 柜）、逆变电源屏、水冷柜屏上无报警、故障灯点亮，并确保水冷柜打到遥控位；

(3) 到左右舷电池舱查看电池域管理盒无报警故障，并确保控制位打到遥控位；

(4) 确认左右舷水冷柜内水泵，左右舷外水泵，左右舷机舱风机，左右舷电池舱风机，左右舷推进舱风机，中央空调等负载已停止，且船舶不在充电过程中。

1.4.2 系统正常启动步骤

(1) 在充放电板间合上直流配电板、锂离子电池组、交流配电板 24V 开关，确保 24V 供电正常。

(2) 回集控室，待直流配电板触摸屏正常开机及各柜门指示灯亮起后，点击触摸屏上复位按钮，随后触摸屏观察锂离子电池组将处于待机状态（电池柜就绪指示灯亮起）。

(3) 直流配电板控制柜选择开关打到自动，然后点击触摸屏锂离子电池页面的“一键放电”按钮，此时电池会正常启动并网，等直流母线电压建立后，日用柜将处于就绪状态（日用柜就绪指示灯亮起）。

(4) 若交流配电板模式（以下称 T1、T2）为“遥控模式”，则等电池放电成功后会自动启动 T1 或 T2，电源会输出至变压器原边，若变压器模式处于“自动模式”，原边电压正常后，等待几秒后日用变压器开关会自动合闸。若变压器是处于“手动模式”，则需手动按下变压器合闸按钮，并为全船供电。

若交流配电板模式为“手动模式”，则需人工按下启动 T1 或 T2，电源会输出至变压器原边。若日用变压器模式处于“自动模式”时，原边电压正常后，等待几秒后日用变压器开关会自动合闸。若变压器是“手动模式”，则需手动按下变压器合闸按钮，并为全船供电（日用电源输出断路器与岸电断路器互锁，启动日用电源前请确保岸电断路器断开）。

(5) 日用供电正常后，请尽快打开直流配电板的江水冷却泵、电池舱风机或发电机机舱风机、推进电机淡水及江水冷却泵等，确保各个冷却设备正常运行。

(6) 分别将驾控台、机旁箱推进模式打到遥控，驾驶台手柄零位，启动 M1 电机、M2 电机，这时可正常航行。

(7) 当需要用发电机作为航行动力时，启动发电机前，应确保至少有一组电池正在放电运行，然后在发电柜柜门上启动 G1 或 G2，观察触摸屏直至发电机组成功并网承担负载。

1.5 电池运行管理记录

作为船舶轮机长或者轮机员需要熟悉电池运行管理记录，主要包括主要设备认知、电池系统等，如表 1-5-1。

表1-5-1 电池管理记录学习表

考核项目		考核内容（要求及说明）	是否掌握
主要设备认知	电池高压盒	1.熟悉锂离子电池各监测仪器功能；2.电池各连接端口的日常检查及维护。	
	电池域管理盒	1.熟悉电池域管理盒操作。	
	24V 充放电板	1.熟练 24V 充放电板的正确操作方法；2.各功能柜 24V 电源开关的启闭状态是否处于正常状态；3.熟悉 24V 充放电板应急操作。	
	直流配电柜	1.掌握直流配电柜各电工开关按钮和控制屏的功能；2.各控制设备的位置；3.日常使用的转换步骤和使用方法及注意事项。	
	水冷柜	1.熟悉水冷柜原理作用；2.水冷柜的启闭操作；3.熟悉水冷柜日常水路保养工作和故障处理流程。	
	交流配电柜	1.熟悉交流配电柜各设备控制的仪表和功能；2.电源控制设备的启闭状态。	
	推进控制箱	掌握推进控制箱的操作。	
	舵桨控制箱	掌握舵桨控制箱的操作。	
	监控报警系统	1.了解掌握监控报警各仪器的报警状态；2.监控状态中出现的各种报警故障和排除方法。	
	逆变器	1.熟悉逆变器的操作步骤和转换方法；2.运行转换的注意事项。	
锂离子电池启动操作流程	启动前	在充放电板间合上直流配电板、锂离子电池、交流配电板 24V 开关，检查充放电板电压，确保 24V 供电正常	
	启动操作	锂离子电池触摸显示屏各参数达到启动放电状态	
	启动后	启动电池后，其他设备功能柜处于就绪状态	

	舱室通风和冷却	检查电池舱室通风和冷却设备处于打开正常状态，各冷却设备参数处于正常状态。	
电池及启动系统运行		<p>(1) 检查电池舱内通风是否良好，干燥清洁，电池舱温度应当控制在 20~45℃ 范围内。</p> <p>(2) 检查电池模块外通风正常，无干扰热源。</p> <p>(3) 检查模块间连接线/接插件应连接牢固且表皮绝缘层无破损。</p> <p>(4) 检查模块与货架的固定螺丝紧固无松动。</p> <p>(5) 检查模块不存在裂缝、变形、极柱松动、膨胀等异常情况。</p> <p>(6) 检查模块泄压阀正常，周围无异物。</p> <p>(7) 检查电池温度应与当前环境温度相符，静态时电池温差 < 8℃。</p> <p>(8) 电池单体之间应具有有一致性，静态压差（单体荷电状态（SOC）≤ 10%），静态荷电状态（SOC）差值 < 20%。</p> <p>(9) 检查锂离子电池电量是否足够，电池启动系统及运行状态正常，电池管理系统（BMS）相关运行信息存储记录正常。</p> <p>(10) 检查直流配电板水冷系统，工作温度 < 25℃，工作压力 1.5~2.5bar（如压力低则补充蒸馏水）。</p> <p>(11) 检查电池系统的接地和绝缘阻抗。</p> <p>(12) 检查动力电池组的工作状况，如温度、交流电压和频率等。</p> <p>(13) 清洁保养时仅需使用干燥的软布定期清理顶部灰尘，勿用水、腐蚀性化学物质等清洁。</p>	

电池动力系统安全性

1.6 电池动力系统潜在安全性问题

1.6.1 电池动力系统潜在安全性问题

- (1) 可能产生的泄漏（有毒、易燃、腐蚀等）；
- (2) 可能产生的气体（有毒、易燃、腐蚀等）；
- (3) 爆炸危险性，包括电池在通风和热失控时释放气体的说明；
- (4) 电池内部及外部短路；

- (5) 电池组热失控故障;
- (6) 电池组单体温度故障;
- (7) 动力电池单体电压过压、欠压;
- (8) 电池组总电压异常;
- (9) 电池组电压不平衡;
- (10) 动力电池串联回路电流过流;
- (11) 电池组电源故障;
- (12) 电池组绝缘故障;
- (13) 电池组过充过放保护;
- (14) 电池组荷电状态 (SOC) 偏差异常;
- (15) 充电故障;
- (16) 电池组通讯失败故障;
- (17) 电池断路器不正常动作。

1.6.2 电池的主要风险之一热失控

(1) 电池热失控阶段分级

电池热失控分为四个阶段：第一个阶段为高温引发阶段。电池温度 $60^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ ，该阶段电池安全且可逆，若降低温度至正常条件，则电池仍可安全使用。

第二个阶段为电池内部热失控阶段。一般情况下，电池温度 $90\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，负极表面 SEI 膜开始分解；温度达到 $120\sim 130^{\circ}\text{C}$ ，SEI 膜破坏，负极与溶剂、粘结剂反应，隔膜融化关闭；温度升高至 150°C 之上后，内部电解质开始分解。

第三个阶段电池鼓包阶段。电池温度达到 200°C 之上，正极材料分解； $250\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，嵌锂态负极开始与电解液反应。

第四个阶段电池失效阶段。电解液与正极反应产生的氧气剧烈反应，电池进一步热失控，直到反应物全部燃尽；电芯温度最高到约 450°C ，泄压阀打开，温度迅速下降。

(2) 电池热失控的内部因素

电池热失控的内部因素可能为机械滥用，电池包遭遇撞击变形导致内部电池短路；电滥用，电池过充过放；热滥用，环境温度高且电池充放电时内部累计大量热量。

外部因素主要是其他设备高温或火灾，高温蔓延至锂离子电池。

1.6.3 应对方案

为了船舶的安全使用，相关人员必须经过专业培训合格才能上岗，无关人员禁止打开电池箱。

(1) 观察每次电池组上电之后、下电之前，锂离子电池组显示屏或者直流配电板显示屏里 BMS 所有的单体电芯电压（单体电芯电压范围一般在 3~3.5V 之间）。

(2) 电池工作后观察电池舱风机/空调的启动情况（根据实际情况删减）：

1) 电池舱风机/空调与电池有联动，根据充电/放电的模式，风机/空调同步启动；

2) 时刻通过 BMS 观察电芯最高温度，当电芯温度达到 35°C 启动风机，设定值是初步的，可以根据实际调整；

(3) 当船舶处于运营状态时，电池系统每个月至少要充满一次电；

(4) 当船舶处于停运状态时，电池系统每三个月至少要满充一次电，进行一次深度充放电循环，即满充-满放-满充；

(5) 冬天船舶要充电时，充电之前先上高压，观察电芯的温度，如果最低低于 0°C，则先运行一段时间，直到电芯温度超过 0°C 再充电；

(6) 每年让厂家深度维护一次，但报废期前的一年应视情况加大检查频次。每次电池检查，建议与船舶电气设备维护保养同时进行以便增加电池的寿命（实际根据各个厂家维护手册进行维护）。

1.6.4 相关规范要求

详见包括但不限于以下内容：

(1) 交通运输部海事局发布的《纯电池动力船舶技术法规实施指南》以及其他相关技术性文件。

(2) 中国船级社发布的《船舶应用电池动力规范（2023）》及其 2024 修改通报、《船舶直流综合电力系统检验指南（2023）》以及其他相关技术性文件。

模块二：电池动力系统应急处理、维护与故障排查

电池动力系统应急处理

2.1 电池动力系统应急处理

2.1.1 电池系统内部火灾应急操作流程概述

(1) 快速按下集控室急停或者驾驶室急停或者电池舱内本地急停，将电池系统与船舶电网进行隔离。

(2) 将直流配电板内连接电池系统的隔离开关打开，保证电池系统与船舶电网隔离。

(3) 如电池舱内没有发生大规模烟雾或者火灾，可以进入电池舱，通过高压箱断开 MSD 维修开关，保证电池系统与船舶电网隔离。

(4) 若单电池包发生热失控产生烟雾或者火灾，可以采用电池舱内配置的七氟丙烷手持灭火器对准电池包进行灌入灭火。

(5) 根据电池舱火灾情况，启动配置电池舱灭火系统进行灭火。

2.1.2 电池系统外部火灾应急操作流程概述

(1) 快速按下集控室急停或者驾驶室急停或者电池舱内本地急停，将电池系统与船舶电网进行隔离。

(2) 将直流配电板内连接电池系统的隔离开关打开，保证电池系统与船舶电网隔离。

(3) 根据电池舱火灾情况，启动配置电池舱灭火系统进行灭火。

2.1.3 电池舱起火现场应急处置

具体方案如图 2.1.1 所示：

船舶现场应急处置方案（消防火灾）

项目	具体工作流程
应急处置流程图	
应急口诀	报告报警-消防灭火-引导乘客-安抚疏散-乘客救助
应急处置措施	<p>1.报告报警。船舶设备故障导致起火，船长应立即向海事、港务、水警等以及公司指挥部报告，并指挥各岗位人员做好应急处置。</p> <p>2.排险控险（排查故障-航行警告-组织灭火-乘客安抚提醒及穿着救生衣-紧急疏散）</p> <p>(1) 当设备故障导致设备（电池舱）起火后，驾驶台立即通知轮机长启动消防泵；船长驾驶船舶时不宜频繁加减速。</p> <p>(2) 在航时，立即显示失控号灯和号型，并播报航行警告以及一切有效手段向周边船舶广而告之，同时船长应当第一时间向公司及海事、港务等部门报告本船失火情况。</p> <p>(3) 服务人员使用广播或人工对乘客做好解释和安抚，引导好穿着好救生衣并维护船上秩序防止因恐慌发生次生灾害。</p> <p>(4) 船长立即指令普通船员做好相关的灭火工作。</p> <p>(5) 靠泊码头后有序疏散乘客。</p> <p>3.警戒和疏散。在事故发生区域附近设置警戒区域，严格控制非救援船舶和人员进入。并及时通过过驳或就近靠码头疏散船上人员，并疏散附近无关人员，维持现场秩序，确保救援工作能顺利开展。</p> <p>4.医疗救护。有人员受伤时，服务人员应立即统计受伤人数，在等待救护车到来前对受伤乘客进行简单的、必要的医疗救护，并对受伤乘客按照受伤严重程度进行区分，进行分类救助。</p>
岗位/应急人员配备情况	设置 4 个岗位，包括船长、轮机、水手以及服务人员。
应急物资设置情况	船舶设置有 24V 应急照明、1 套应急广播、2 台甚高频、3 台大声公、7 台对讲机，3 把手电筒，探照灯 2 个，锚机 2 套，1 个便民药箱。

图 2.1.1 电池舱起火现场应急处置流程图

电池动力系统维护

2.2 电池动力系统维护流程

2.2.1 系统日常维护

- (1) 电池箱外部有无碰撞变形，若有，需打开电池箱检查内部情况。
- (2) 电池箱固定螺栓是否松动，电池箱是否有异味，是否有不明漏液情况。
- (3) 高压箱和域管理盒内部线束是否存在松动、老化、破损等情况。
- (4) 检查电池组的电压，确保电池电压正常。
- (5) 定期检查系统的工作状态，确保及时发现故障。
- (6) 电池应远离火源以及一切易引起火花的电器设备，以免引起爆炸。
- (7) 切勿将电池组短接，电池短接会引起燃烧。

(8) 避免对电池过度放电，放电保护后应立即（最迟不能超过 24h）进行完全充电。

(9) 系统不需要经常清洁保养，仅需定期清理顶部积灰，请使用干燥的软布进行除灰，勿用水、腐蚀性化学物质、清洗剂或强洗涤剂清洁。

2.2.2 电池组周期维护

动力电池组维护保养周期为 3 个月，手段为目测及诊断仪检测，维护流程及内容包括：

(1) 动力系统外观检查：

- 1) 目测检查整个电池包外观，确保电池无磕碰、破损。
- 2) 目测电池包外是否通风，电池模块周围需确保一定的通风散热环境，无干扰热源。
- 3) 目测检查电池模块泄压阀，泄压阀周围是否有异物。
- 4) 检查冷却系统的泵、风扇、散热器和散热孔是否堵塞、漏水或损坏。

(2) 电池组状态检查：

- 1) 目测电池模块间连接线/接插件检查，箱体间连接线及接插件应连接牢固且表皮绝缘层无破损。
- 2) 目测检查每一个电池包紧固状态，电池模块与货架的固定螺栓，固定模块的螺栓应紧固无松动脱落。
- 3) 目测电池模块可靠性，模块不存在裂缝、变形、极柱松动、鼓胀等异常情况。
- 4) 目测检查每一个电池包的正负极电连接，确保动力插头卡扣插入插座。

(3) 电池组数据检查：

利用故障诊断仪进行数据流检查，读取相应数据流，检查动力电池的温度及一致性等。进行电池温度监测，确保静态时电池温度应与当前环境温度相符。

- 1) 查看动力电池系统温差数据，要求静态电池温差 $<8^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 查看电池一致性，电压差异过大可能导致某些电池过早失效或过热。要求静态压差（单体）荷电状态（SOC） $\leq 10\%$ 。
- 3) 查看荷电状态（SOC）偏差，要求静态荷电状态（SOC）差值 $<20\%$ 。
- 4) 进行充放电试验，确保充放电电压和电流在规定范围内（具体数值参照维修手册）。

2.2.3 电池管理系统的检查要点

BMS 主要是监控电池的状态，能够提高电池的利用率，防止电池出现过充电和过放电，延长电池的使用寿命。因此需要定期进行 BMS 软件版本更新，以便获得最新的电池保护功能。检查 BMS 的故障报警和日志，如有异常需及时诊断和处理。

(1) 检查外部电源给管理系统供电是否正常，是否能达到管理系统要求的最低工作电压。

(2) 检查外部电源限流设置，是否导致给管理系统的供电功率不足，若是，及时调整外部电源，使其满足管理系统的用电要求。

(3) 检查管理系统的线束是否完整无损，及时整理杂乱线束。

(4) 检查管理系统中给整个系统供电的 DC/DC 电压输出是否正常；如有异常可更换坏的 DC/DC 模块。

2.2.4 电池管理系统的日常维护要点

(1) 检查电池系统传感器是否工作正常，包括电流、电压、电池温度等监控状况是否工作正常。

(2) 检查数据存储单元数据记录是否完好，是否方便进行检查和故障排除。

(3) 检查电池荷电、能量状态是否正常，如发现数据异常，应及时开展故障排查。

(4) 检查电池组安全控制及预警系统是否工作正常，并应定期开展测试。

(5) 检查充电完成后能否及时切断回路。

2.2.5 功率管理系统 (PMS) 日常维护要点

(1) 检查系统各传感器是否工作正常，包括电池系统和船舶配电系统的监测、报警和保护功能是否工作正常。

(2) 查看 PMS 现有警报及历史警报数据记录，综合研判系统的工作状态是否良好。

(3) 船员可以在 PMS 触摸屏上进行控制动力电池启动和停车、逆变器切换等测试，查看 PMS 功能是否正常。

2.2.6 船用超级电容系统的日常维护保养

(1) 检查超级电容储存、安装位置是否远离火源、热源以及一切易引起火花的电器设备。检修时，操作人员需佩戴必备劳动保护用品，包括绝缘鞋、绝缘手套等。

(2) 日常检查，可以通过人机界面或 BMS 屏（电池管理系统）检查超级电容系统的电压、电流、温度等状态；检查电容系统上下电是否正常，BMS 屏（电池管理系统）电容状态显示是否正常。

(3) 任何时段若发现模块或单体出现短路、冒烟、泄漏等现象，必须立即停止操作，采取断开回路、切断电源等对应安全措施。

(4) 灭火时要用七氟丙烷或二氧化碳灭火器，不能使用干粉灭火器，严禁使用泡沫及水灭火。

2.2.7 动力电池系统安全检查要点

(1) 检查动力系统越控、应急停车功能是否正常

结合船舶实际要求开展现场测试，核实越控系统、应急停车系统是否正常。

(2) 动力配电系统切换

检查动力配电系统的切换是否正常，包括直流配电板、交流配电板、整流器模块、DC/DC 模块、日用逆变器、推进逆变器、汇流排母联开关，供电开关、变压器等设备的状况和切换功能，尤其应关注互为备用的两台设备间切换的有效性，若有必要，现场结合船员实操进行测试。

(3) 动力系统熔断器标识

检查动力系统熔断器是否标识并在船上存有备件，如电池动力系统中使用了熔断器，应提供适当的标识，并在船上存有备件，以及安装替换熔断器的说明。

(4) 动力系统保护装置

动力系统中隔离开关或断路器、开关检查动力系统中隔离开关或断路器、开关等设备状态是否良好，动力电池系统的主电路应通过隔离开关或不带脱扣机构的断路器，开关连接至配电系统母排以便于维护检修时起隔离作用。

(5) 动力电池系统短路和过流保护的专用设备

检查电池系统短路和过流保护的专用设备是否连接到配电系统母排，电池系统应通过具有短路和过流保护的专用设备连接到配电系统母排。

(6) 动力电池系统紧急关断装置

检查标称电量超过 $50\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电池系统应设置独立的紧急关断装置用于断开电池系统的连接，其视觉和听觉信号状况是否良好，并满足下列要求：

1) 紧急关断装置应设在驾驶室和动力电池舱外易于到达之处，动作时应同时发出视觉和听觉信号；

2) 紧急关断功能应由硬件电路执行，并与控制、显示和报警系统相互独立。

(7) 动力电池系统报警信号

检查电池系统最小电量时报警信号是否能发出视觉和听觉报警信号，作为船舶推进用和/或主电源的电池系统的总电量在达到船舶正常操作所需要的最小电量时是否发出视觉和听觉报警信号，该报警信号的报警装置应与其他报警装置独立。检查电池管理系统是否在就地及远程（船舶经常有人值班处所）设置分项视觉和听觉报警。

(8) 检查绝缘电阻

检查电池子系统能否连续在线监测绝缘电阻，电池子系统应能连续在线监测绝缘电阻，避免多个绝缘电阻监测同时工作，造成干扰。

(9) 检查动力电池的布置是否满足技术法规要求

1) 检查动力电池舱（室）的布置，是否与起居处所相互远离，若确需相邻布置时，二者的共用限界面应尽可能减至最小，并采用满足所要求的隔热结构；

2) 检查动力电池舱内的动力电池箱（柜）或动力电池包，与舱壁及上方甲板之间是否留有足够的空间以利于动力电池通风散热。对于船长大于等于 20m 的船舶，距舱壁的间距是否小于 150mm ，距上方甲板的间距是否小于 500mm ；对于船长小于 20m 的船舶，距舱壁和上方甲板的间距均是否小于 150mm ；动力电池箱（柜）、动力电池包是否牢固固定，并尽可能远离外舷侧，避免碰撞的影响。动力电池箱（柜）、动力电池包至船体外板的水平距离是否小于 500mm ，对于船长小于 20m 的船舶，该距离可降为 300mm ；

3) 对于船长大于 15m 的船舶，当推进用动力电池在舱内布置时，检查是否设置于两个专用舱内，每个专用舱室内动力电池总存储能量是否大于 $2000\text{kW}\cdot\text{h}$ ；

4) 检查动力电池舱（室）和/或动力电池箱（柜）内是否设有独立的温度监测装置及听觉和视觉报警是否正常工作；

5) 检查动力电池箱(柜)是否设置独立的可燃气体探测装置。当探测到动力电池箱(柜)内可燃气体浓度大于其爆炸下限(体积分数)的20%时,是否能在驾驶室发出报警,同时启动应急排气系统。

此外需要注意,①日常检查需要及时清理电池外壳及高压盒内的积灰,确保电池组的通风良好,以防止热量累积导致过热,禁止直接用水冲洗,清理时可以采用干燥的布进行擦拭;②动力电池包使用过程中保持电量在25%以上;长时间(2个月或以上)搁置不使用时每个月对电池系统进行维护充电(低温条件下不要进行充电),始终保持电池电量在30%左右。

2.2.8 动力电池系统维护保养

场地要求:不可远离充电场所,保证完成后及时补电。

人员要求:需要专业人员或经过厂家培训后合格人员进行系统保养。

保养操作流程:

(1) 均衡维护保养

- 1) 控制电池电量至25%~40%之间静置停船。
- 2) 关闭整船电源后重新上电,关闭全船所有用电设备。
- 3) 维持此状态12~15小时后断电,维护完成后进行一次满充电。

(2) 健康状态(SOH)测试

对电池组进行一次满充和满放,使用充放电电量对SOH值进行校准。

(3) 控制、报警和保护功能测试

在厂家指导下或者邀请厂家专业人员,对表4中的控制、报警和保护功能进行测试。

电池动力系统故障排查

2.3 电池动力系统常见故障及排查

2.3.1 故障现象:系统不工作

解决方法:

(1) 若故障原因为供电异常

1) 检查外部电源给簇管理盒系统供电是否正常,是否能满足簇管理盒系统要求的最低工作电压,看外部电源是否有限流设置,导致给管理系统的供电功率不足,可以调整外部电源,使其满足簇管理盒系统的用电要求。

2) 检查域管理给簇高压盒供电是否正常。

3) 检查簇高压盒给电池箱供电是否正常。

(2) 若故障原因线束短路或断路

1) 检查簇管理盒系统的线束是否有短路或断路，对线束进行修改使其工作正常。

2) 检查簇高压盒和簇电池箱是否有连接线短路或断路。

(3) 若故障原因为 AC/DC 无电压输出

查看域管理盒系统中给整个系统供电的 AC/DC 是否有电压输出，AC/DC 的输入电压是否正常，如有异常可更换输入电压，或更换坏的 AC/DC 模块。

2.3.2 故障现象：CAN 通讯故障

解决方法：

(1) 若故障原因为高压盒主控模块未工作，检查域管理盒输出 24V 是否正常。

(2) 若故障原因为 CAN 信号断线，检查 CAN 信号传输线是否退针或插头未插；监听 CAN 端口数据，是否能够收到 BMS 或者主控模块数据包。

2.3.3 故障现象：485 通讯故障

解决方法：一般故障原因为 485 信号断线，检查 485 信号线插头是否脱落。

2.3.4 故障现象：某 DC/DC 模块无法充放电，并报出 DC/DC 故障，续航力下降

解决方法：分离该故障回路，不要合闸或启动。保持正常航行，靠岸后通知厂家，上报故障代码，并进行维修。

2.3.5 故障现象：单边电池系统无法运行

解决方法：电动船一般分别设有多组电池构成直流主网，单边电池系统故障，一般不影响船上其他功能，会导致续航里程下降。

(1) 首先降低船速、保持航向稳定，检查熔断器是否存在熔断的情况，若无熔断器或开关故障，在船舶稳定后重新启动该侧电池系统，若仍无法启动，断开该侧电池系统。

(2) 保持低速航行，至码头维修。

2.3.6 故障现象：电池系统启动失败，并报故障

解决方法：可能原因 DC24V 铅酸电池电量不足，检查 DC24V 铅酸电池，在进行船岸电切换时，应确保 DC24V 铅酸电池的电压在 25.5V 以上（检查方法：在负载挂在 24V 充放电板上时，分断 AC220V 开关，检查蓄电池侧电压）。若发现电压不足，应停止船岸电切换，并给 DC24V 铅酸蓄电池进行充电，保证其铅酸电池电压在 25.5V 以上，然后再进行船岸电切换。

2.3.7 故障现象：电池包无法充电，电池包电压过高

解决方法：可能原因单体电压过高，检测板过充保护，则需电池包放电至上限电压以下，单体电压低于 3.65V 解除过充保护。

2.3.8 故障现象：电池包无法放电，电池包电压过低

解决方法：可能原因单体电压过低，检测板过放保护，则需电池包充电至上限电压以下，单体电压高于 2.8V 解除过放保护。

2.3.9 故障现象：电池包无法放电，且电池包电压正常，温度过高

解决方法：可能原因电池包温度 $\geq 65^{\circ}\text{C}$ ，检测板过温保护，则需等待温度恢复后过温保护解除。

2.3.10 故障现象：电池舱发生外部火灾

解决方法：

- (1) 轮机员确认电池舱失火或电池热失控，在电池舱门口拍下紧停；
- (2) 确认电池舱内无人员；
- (3) 关闭舱门、通风系统，启动七氟丙烷灭火器；
- (4) 若扑灭明火，则观察电池舱温度，直至温度降至室温；
- (5) 保持单桨航行，至码头维修。

模块三：直流配电系统组成与工作原理

直流配电系统结构、功能及工作原理

3.1 船舶电力系统的组成、特点及主要参数

3.1.1 船舶电力系统的组成

船舶综合电力系统是指采用电力系统集成技术来实现电能的产生、输送、变换、分配以及利用，以满足船舶推进、甲板机械、舱室机械、照明等负荷需要的系统。它将船舶发电与推进用电、船载设备用电集成在一个统一的系统内，从而实现发电、配电与电力推进用电及其他设备用电的统一调度和集中控制。电力系统根据功能可以划分为发电模块、配电模块、电力变换模块、推进模块、储能模块、电能控制模块以及日用负载模块等。

3.1.2 船舶综合电力系统的特征和基本要求

(1) 船舶电力系统的特点

由于船舶是活动于水面上的独立体，其所处环境和使命任务特殊，因此，船舶电力与陆地电力系统相比，在电站容量、连接方式、电压等级、变送电装置等都有很大差别特点主要表现在如下几个方面：

1) 电站容量和类别

为保证供电的可靠性和经济性，陆上电力系统一般由若干个不同类型的电厂联合供电，电力系统的容量一般都很大，如三峡水电站总装机容量为 2240 万 kW，单机容量为 70 万 kW，且各电厂联网运行。陆地电源可以认为是无限大电源系统。由于船舶电站只需满足一条船上负载的需要，因此其单机容量和系统容量与陆地相比小得多，只能视为有限电源系统。目前，采用机械推进的船舶电站容量在 10000kW 以内，采用电力推进的船舶电站容量相对较大，可以达到机械推进船舶电站容量的数十倍。为了使管理维护方便，船舶上发电机组的形式、容量大多采用相同的类型，常采用柴油发电机组、蒸汽轮机发电机组和燃气轮机发电机组等几种。

由于船舶电站容量小，单机容量与某些大的船用负载可相比拟，当大功率电动机启动会对电网造成较大的冲击，因而对船舶电力系统的稳定性提出了较高的要求。例如要求船舶发电机励磁调节器动作时间要快，有强励能力，有较大承受过载能力等。

由于船舶是海上独立活动单元，为在各种工况下，如航行、作业、停泊、应急等情况都能连续、可靠、经济、合理地进行供电，船上常配置多种电站。船舶电站的种类有主电站、停泊电站、应急电站、特殊或专用电站等。

2) 发配电装置和电力网

陆上电力系统容量大，发电机功率也大，发电机的出口电压可达数千伏甚至几万伏，因此主配板的电压一般在一万伏以上，发电机开关为高压开关。因此装置的保护及自动装置种类繁多、结构复杂。陆上电力系统供电范围广，送电距离有时长达数千公里，为了减少电损失、功率损失，必须采用高压输电，这样就需配备各种电压等级的配电装置（断路器、感器、变压器、避雷器）和输电线路，以满足送变电的要求。目前陆上最高输电网络电压已达 500kV，因此输电大多采用架空线路。

船舶上从维护管理可靠、安全、经济、优质及系统容量较小等考虑，主要采用中、低电压等级的发配电电气设备及各种类型的电缆供电给负载，因此维修、保养要比陆上容易得多；另外由于船舶容积的限制，电气设备比较集中，发电设备和用电设备之间距离较短，电网长度不大，并都采用电缆，所以发电机和电力网的保护比起陆地上要简单多，一般只设置保护发电机外部故障的短路及过载保护，电力网保护通常和发电机保护采用一套装置。

但是，正因为船舶电力系统的电压等级低、电缆线短，使发电机、电线路、自动开关和配电板上的额定电流、事故电流都相对很大，造成这些设备常处在其热效应和电动力效应的边界状态，因而降低了安全裕度。

3) 电气设备工作条件恶劣

船舶长期处于各种水体中，船体及船用设备直接暴露在复杂的自然环境下，需要长期经受如高热、高湿、低温、盐雾、霉菌、油雾、日光辐射等各种恶劣环境条件的考验，使导电金属受到腐蚀，并使绝缘材料性能降低；在风浪较大的水域中行驶时还需承受横、纵向的摆以及高、低频的振动和冲击，影响电气设备动作的可靠性和正确性；随着用电设备的增加，特别是电力电子设备比例的增大，船舶的电磁环境也日益恶劣。

为了提高船舶电气设备在恶劣的环境条件下工作的可靠性，确保其在运行期间内的工作能力，不论是电工器件的选型、电气设备的设计和安装、电力系统的构建，还是电气设备的使用、电力系统的控制，以及各电气设备和子系统的维护

保养，都应严格按照船用标准和规范进行。对影响船舶航行安全和船员生命安全的重要电气设备，还应采用多路供电、应急供电的方式，保证其供电连续性，提高船舶在航行中的生存能力。

(2) 船舶电力系统的基本要求

船舶电力系统能在各种工况下完成其担负的任务，是对船舶电力系统的基本要求，即系统能以规范规定的品质向全船电力负荷连续供电。这包括：

1) 确保为保持船舶处于正常工作状态并满足船员正常生活条件所需的所有电气设施的供电，而不求助于应急电源。

2) 确保在各种紧急状态下，向保证船舶安全所需要的重要电气设备供电。

3) 确保船员及船舶设备的安全，免受电气事故的危害。

为此，对系统相关设备应采用可靠而先进的技术；要求有最佳费用效益；贯彻统一和互换原则；选用船用设备要求体积小、重量轻、结构简单、耐用、使用维护方便等；另外，对船舶电力系统的供电生命力、工作寿命、可靠性、可维修性和安全性，以及适应环境条件的能力都提出了更严格的要求。

3.1.3 船舶电力系统的基本参数

船舶电力系统的基本参数是指电制（电流种类）、电压、频率、线制。

3.2 船舶直流配电系统的组成与功能

3.2.1 直流配电系统架构

直流配电系统如图 3.2.1 所示，主要由电池组、直流配电板、推进电机、日用变压器、交流配电板、岸电箱及控制系统等组成。

通过直流配电柜内的推进逆变器为推进电机提供电能，同时通过日用逆变器和日用变压器为日用负载提供电能。船舶靠岸后，通过岸电直流电源为电池组进行充电。配备控制系统，可以实现全船能量综合管理、推进控制和监测报警功能，提高船舶的自动化水平。系统结合能量综合管理控制可以提高能量综合利用效率，提高系统的可靠性和冗余度。通过短路电流计算和协调性保护策略，选择合适的熔断器可以实现母线、供电和用电设备短路时的协调性保护，增加系统的安全性和可靠性。

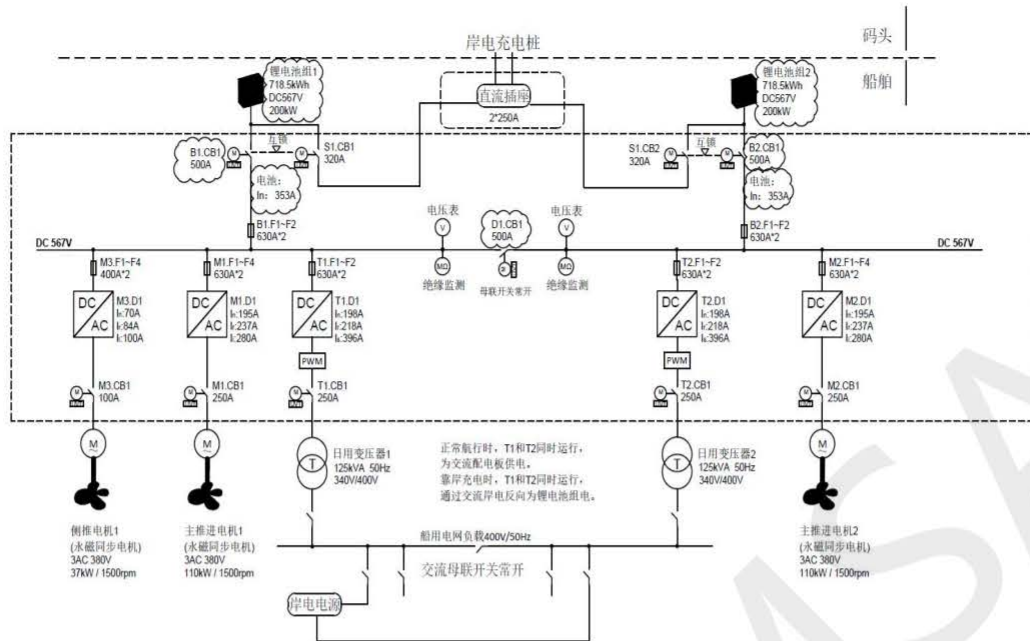


图 3.2.1 直流配电系统架构

3.2.2 主要设备组成及参数

(1) 直流配电板组成

整个直流母排系统配置锂离子电池组，经过直流配电板系统在直流母线进行并网，驱动推进电机。同时直流配电板系统提供日用电源，为船舶日用负载提供高品质的日用交流电源。

直流配电板包括各个设备控制的功率模块、推进控制器、直流母排及直流开关、熔断器等器件。实现完成对于锂离子电池组的控制和状态监测、推进电动机的控制和状态监测、日用电源输出的控制及监控以及故障和报警记录。

(2) 电气保护

直流配电板电气保护主要分设备侧保护和直流侧保护。设备侧的保护主要是依靠各支路功率模块实现，直流配电板直流母排与电动机、日用配电板等设备之间均有功率模块，直流配电板主电路采用 IGBT 全桥结构，直流配电板均可以通过功率模块内部的霍尔传感器采集三相交流侧电流，信号传给模块内部的采样电路板，采样电路板将采集到的电流通讯传给 PLC，PLC 设置有延时过流保护值和瞬时过流保护值（短路保护），当任意支路的功率模块电流触发延时过流保护阈值时，触发延时过流预警，延迟后该支路的功率模块会停止运行，同时将主断路器断开，并发出声光报警，在控制柜的触摸屏上显示该功率模块延时过流报警

信息；当触发瞬时过流保护阈值时，比如发生短路故障，功率模块会立刻停机，同时将主断路器断开，并发出声光报警，在驾控台的触摸屏上显示该功率模块瞬时过流报警信息，无论是延时过流保护还是瞬时过流保护过程中，均不会导致功率模块损坏，也不会对其他支路的功率模块造成影响。

直流侧保护主要依靠各支路功率模块直流侧熔断器实现，直流配电板每台功率模块与直流母排均采用快速熔断器连接。正常运行时，所有功率模块通过公共直流母线进行功率分配，当某一功率模块的直流端发生短路时，故障回路的熔断器会因为 I^2t 的累积而熔断，将故障回路切除出总回路中，非故障回路的熔断器在故障切除时的 I^2t 均未达到其额定弧前 I^2t ，未受到损伤，在故障回路切除后会保持正常运行。不论故障点在哪里，直流侧短路故障均不会导致电动机、锂离子电池组、日用配电板等设备发生任何故障。

此外，直流配电板连接永磁电动机、日用电源、锂离子电池组的主电路与各设备之间均设置有隔离开关或者断路器，可防止设备能量回馈而产生高压危及检修人员的安全。

（3）接地原理

直流配电板系统在工作时需要地对地泄放谐波电流，因此机柜底座需要与船体基座进行低阻抗连接，一般推荐的连接方式为周围间断式边角焊焊接，如果操作不方便时，也可以采用螺栓固定，以保证柜体与船体可靠连接。在直流配电板各个柜体内设有 PE 强电接地排和 IE 弱电接地排，这两种接地排用于不同的电气接地，PE 强电接地排一般设在主电缆附近，主要用于强电接地，如变频电缆的地线芯接地、变频电缆屏蔽层铜丝编织接地等；IE 弱电接地排一般设在用户接线端子排附近，主要用于信号接地，如信号电缆的泄漏线芯接地、信号线屏蔽层铜丝编织接地等。

（4）预充电功能

直流配电板中内置预充电路，预充电源为各个锂离子电池组，当直流母排冷启动或者重启时，各电池在启动时首先通过直流配电板内置的预充电路对直流母排进行预充电，当直流母线电压满足要求时，方可启动主电路，以避免直接上电由于直流母排直流电容的冲击导致功率模块损坏的情况，增加系统稳定性。

（5）绝缘监测

直流配电板直流母排分为左右舷两段，每段直流母排上均有一台绝缘监测表，直流配电板正常运行时，两段母线之间的母联开关是断开的，两台绝缘表同时工作，各自监测对应半舷母排的绝缘电阻，当母联开关闭合时，两台绝缘表只有一台工作，监测整舷母排的绝缘电阻，无论哪种工况，当直流母排绝缘电阻低于设定的报警值时，主控制器会收到报警反馈信号，并有声光报警，同时控制柜的触摸屏上也会显示出直流母排绝缘低警告的信息。

(6) 紧急停机

直流配电板每一路连接各设备的功率模块主电路均设置有紧急断开装置，在相应的直流配电板柜门上有急停按钮，当需要紧急停机时，可以按下急停按钮，该急停按钮通过硬线直接会将主断路器脱扣，同时急停按钮的一组触点也会反馈给主控制器，主控制器也会立刻停止功率模块输出。

对于锂离子电池组，在电池系统高压箱、电池舱室外、驾控台上也均设置有急停按钮，每一路急停按钮均通过独立的硬线连接至电池系统高压控制箱内，当按下任意站点的急停按钮后，均可以控制电池系统高压控制箱内的总正、总负接触器断开，实现紧急停机。对于推进电机，PCS 控制器还接收来自遥控系统的推进电机急停信号，无论哪一路急停触发，都会直接触发相应的推进电机急停，功率模块会立刻停机，主断路器欠压脱扣。上述各个急停支路均通过硬线直接控制断路器或者接触器，与控制、监测及报警系统相互独立。

3.3 单向/双向 DC/DC 变换器功能及原理

对于仅有直流电源的船舶，比如：AUV、太阳能电池和燃料电池等船舶，如果采用直流调速，就需要 DC/DC 变换器又称为直流斩波器（DC Chopper），将固定直流电源变换为可调的直流电源。

3.3.1 DC/DC 变换器的种类

(1) 升压型和降压型

降压转换器是单向 DC/DC 转换器是把蓄电池高压直流降压为发电机的直流电压（低压）。升压转换器对动力电池电压进行升压：采用 DC/DC 转换器将蓄电池高压升为更高的直流电压来驱动电机，可提高系统的工作效率。升压型主要用在高压电池数目少，高压数值低，为了提高电机效率，采用了升压型。降压型主要用在高压电池和铅酸蓄电池之间。

(2) 非绝缘型和绝缘型

非绝缘型是电路两侧通过电子元件相连通；绝缘型是电路两侧采用变压器隔离，采用磁能交换。绝缘型 DC/DC 转换器的换能部件是变压器，变压器由一次侧（输入侧、动力蓄电池侧）和二次侧（输出侧、铅酸蓄电池侧）两种线圈构成，线圈匝数比与电压比成比例。利用变压器改变电压时，变压器需通过交流电压。动力蓄电池是直流电压，DC/DC 转换器通过控制芯片控制功率半导体导通、截止，将动力蓄电池的直流电压转换成交流电压。利用变压器转换交流电压，再利用功率半导体将交流电压转换成 14V 的直流电压。利用功率半导体转换交流和直流时，负载电容器是为了抑制电压波形的噪声，平滑化输出电压。

非绝缘型和绝缘型这两种 DC/DC 转换器的工作效率都很高，一般为 85%~95%，并且适于商用。非绝缘型结构简单、成本低，而绝缘型则能将主电源的高等级电压与辅助蓄电池的低等级电压隔离开来，更加安全可靠。

(3) 单向 DC/DC 和双向 DC/DC

单向 DC/DC 只能向一个方向实现电压转换，双向 DC/DC 能互相实现电压转换。单向 DC/DC 多用于将燃料电池的电压升为与其并联的蓄电池电压。双向 DC/DC 多用于将动力蓄电池的电压升压为电机工作电压，或反之。也可以将动力电池的电压降为 12V 铅酸蓄电池的电压，或反之。

3.3.2 DC/DC 变换器工作原理

DC/DC 转换器一般由控制芯片、电感线圈、二极管、三极管、电容器构成。基本 BUCK 型 DC/DC 结构简单、转换效率高，是首选的 DC/DC 转换电路拓扑结构之一。电路的原理图如图 3.3.1 所示， U_{in} 输入电压， U_o 是 BUCK 电路的输出电压， C_{in} 是输入电容， S 是主功率开关管， D 是主功率二极管， L 是储能电感。

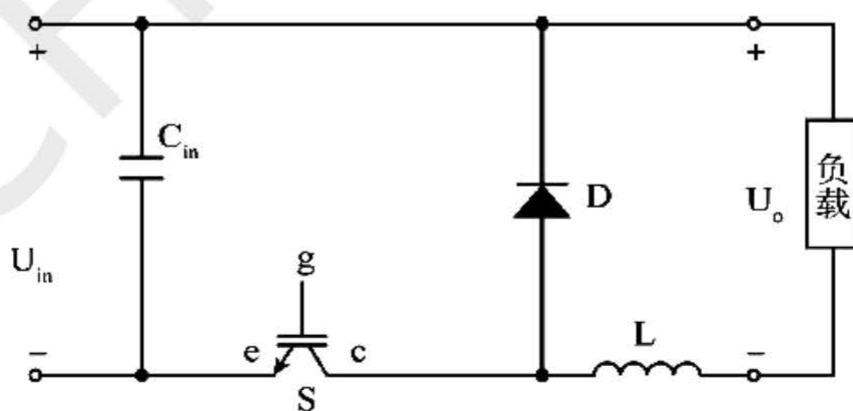


图 3.3.1 基本 BUCK 型 DC/DC 电路拓扑

基本 BUCK 电路的工作过程如下：当开关管 S 导通时，电流经负载、电感 L 流过 S 并线性增加，电能以磁能形式存储在电感线圈 L 中，同时给负载供电，电容 C、负载、L、S 构成回路，此时由于二极管 D 的阳极接负，D 处于截止状态，当 S 由导通转为截止时存储在电感 L 中的能量释放出来，通过 D 续流，维持向负载供电，L、D 和负载构成回路，若周期性地控制开关管 S 的导通与关闭，即可实现能量由 U_{in} 向 U_o 的降压传递电路的输出电压 $U_o = \delta U_{in}$ ， δ 为开关管 S 的导通占空比，为达到上述降压传递，开关管 S 与二极管 D 必须轮流导通与关断，二者之间频繁地进行换流。

3.3.3 双向 DC/DC 转换器的工作原理

在以蓄电池和超级电容器组成的混合电源上，一般蓄电池以稳态充/放电的形式工作，而超级电容器在电动车辆启动时，能够以大电流的放电形式工作，在接受外电源或制动反馈的电能时又能以大电流的充电形式工作。蓄电池和超级电容器的电流为双向流动，因此，在蓄电池和超级电容器与电力总线之间装置升降压双向 DC/DC 电流转换器，双向控制和调配所输入和输出的电流。升降压双向 DC/DC 电流转换器电路如图 3.3.2 所示。

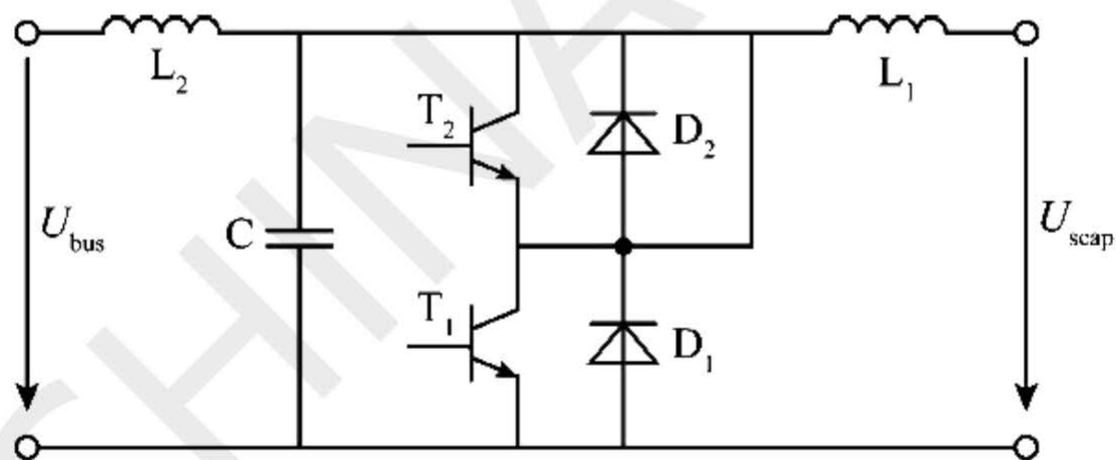


图 3.3.2 双向 DC/DC 转换器电路

在升降压双向 DC/DC 转换器的输入端用 2 个导通开关和 2 个整流二极管，分别组成 2 个大功率的直流电转换器（IGBT），在输入端装有电感器 L_2 和电容器 C，在输出端装有电感器 L_1 。双向 DC/DC 转换器处于充电工况时，导通开关 T_1 切断，导通开关 T_2 导通，充电机或制动反馈的电流经由动力总线向蓄电池或超级电容器中充电。在通过电感 L_1 时，部分电流暂时存留在电感 L_1 中，当导通开关 T_2 断开后，电感 L_1 中存留的电流通过整流二极管 D_2 转存在电容器 C 中。

双向 DC/DC 转换器在对超级电容器充电时处于降压 (Buck) 状态。在超级电容器电路上装置电感 L_1 还可以减小进入超级电容器线路的电流脉冲。

双向 DC/DC 转换器处于放电工况时，导通开关 T_1 导通，导通开关 T_2 切断。蓄电池或超级电容器放电，电容器 C 中储存的电荷也同时放电，电流方向是由超级电容器向动力总线方向流动，DC/DC 转换器对外放电处于升压 (Boost) 状态。在总线电路上装置电感 L_2 可以减小进入总线的电流脉冲。

3.4 直流配电系统工作原理

3.4.1 集中式直流综合电力系统

发电装置、储能装置、负载直接或经变流器接入直流母排。直流母排由两个及以上的母排分段组成，各母排分段通过母联保护装置连接，正常工况下母联保护装置合闸，集中式直流配电，如图 3.4.1 所示。

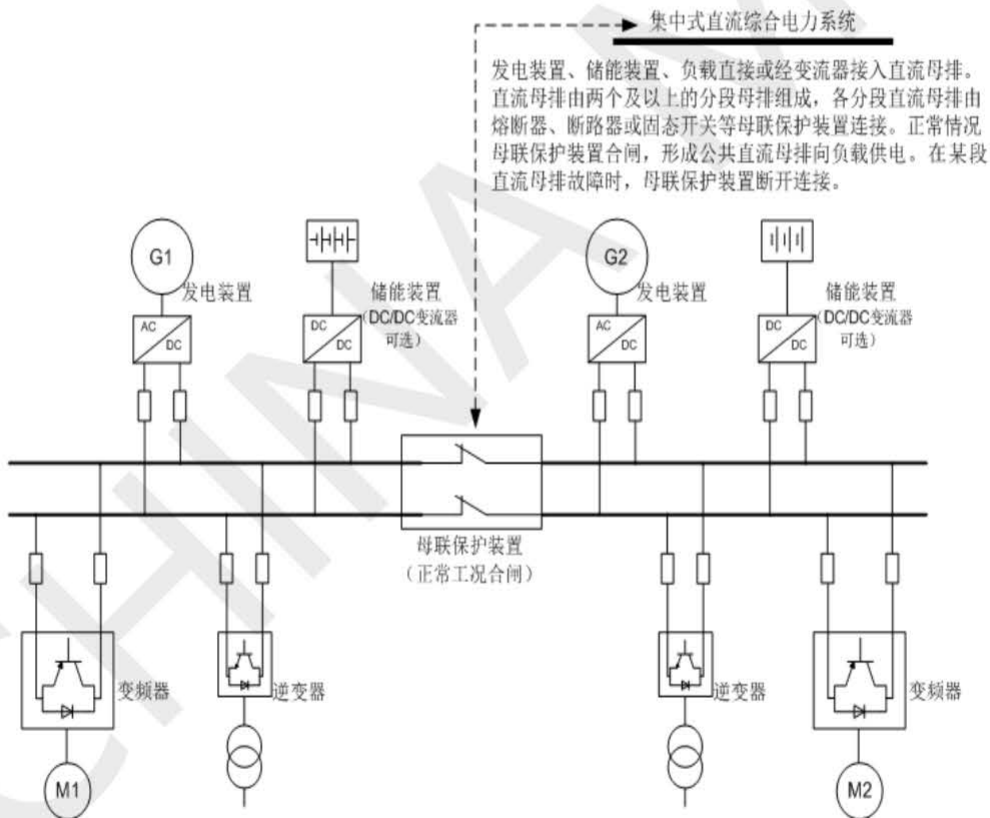


图 3.4.1 集中式直流综合电力系统示意图

3.4.2 分布式直流综合电力系统

发电装置、储能装置、负载直接或经变流器接入多段直流母排。各段直流母排通过母联接触器或隔离开关连接，正常工况下母联接触器或隔离开关分闸，各段直流母排相互独立、分布式运行。如图 3.4.2 所示。

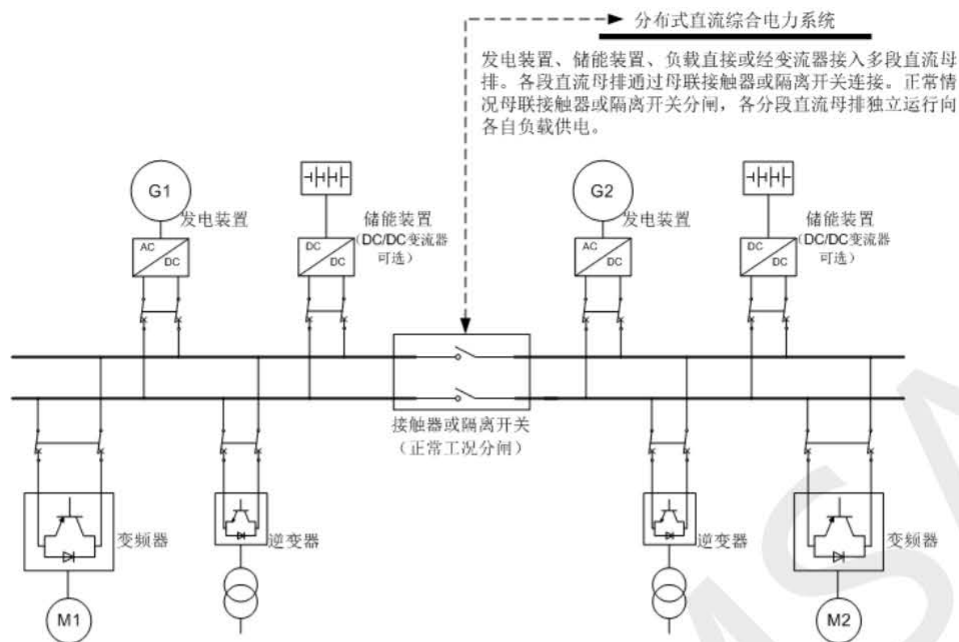


图 3.4.2 分布式直流综合电力系统示意图

3.5 直流组网系统的冷却系统

略。（与 5.4 电力设备冷却系统一并讲解）

电力负载系统的组成、功能与工作原理

3.6 推进逆变器功能及原理

3.6.1 逆变器的功能

在电池动力船舶系统中，锂离子电池组通过斩波器将电池组的直流电压转换为稳定的直流母线电压，通过直流母线下垂的控制方式实现锂离子电池组之间的功率分配。推进电机通过推进逆变器从直流母线取电，转换为交流电源驱动运行。船舶日用电源采用双冗余的方式通过日用逆变器从直流母线取电，转换为交流电源，并配置正弦滤波器和变压器等，以保证日用逆变电源的波形质量满足使用要求。

3.6.2 逆变器工作原理

逆变器的主要功能是将直流电源（蓄电池等）的直流电转换为交流电，逆变器的作用的工作原理基于三个主要的步骤：整流、滤波和逆变。

(1) 整流

逆变器的输入是直流电源，首先需要将交流电源转换为直流电。这个过程叫作整流。整流电路通常采用桥式整流电路，它由四个二极管组成。当输入交流电通过整流电路时，只有一个二极管导通，将正半周的交流电转换为直流电。

(2) 滤波

在整流之后，输出的直流电仍然存在一些脉动。为了使输出电压更加平稳，需要进行滤波。滤波电路通常使用电容器，它可以存储电荷并平滑输出电压。

(3) 逆变

在滤波之后，直流电被送入逆变器的逆变部分。逆变器使用一种称为 PWM（脉宽调制）的技术，通过控制开关管的导通时间来调整输出的交流电压和频率。逆变器的输出可以是纯正弦波、修正正弦波或方波，具体取决于应用需求。

3.6.3 逆变器维护保养要点

- (1) 检查逆变器散热孔附近是否有异常味道，箱体温度是否正常；
- (2) 检查逆变器过电流、高温警报是否正常；
- (3) 检查逆变器双绞线屏蔽是否正常，接头处是否松动；
- (4) 检查逆变器冷却系统（如有）工作状况是否良好，水冷系统控制温度通常不超过 45°C。

3.7 推进控制系统

3.7.1 推进控制系统（PCS）功能

直流组网变频控制配电系统通过 PCS 来管理整个船舶的推进系统，PCS 负责接收遥控系统的操作指令，增加指令分配及控制保护等功能后，通过变频器驱动主推进电机。子控制器分别连接如下设备：

(1) 锂离子电池子控制器

主要连接锂离子电池的电池管理系统（BMS），获得锂离子电池的关键参数信息，包括荷电状态（SOC）、（健康状态）SOH、温度、最大允许充放电电流等。

(2) 主推进子控制器

主要连接主推进遥控系统、主推进电机的接线盒和机旁控制箱，获得主推进电机的控制指令，并反馈主推进电机的绕组和轴承温度等信息。

(3) 发电机组控制器

主要连接柴油发电机组机旁控制箱，获得柴油发电机组的关键参数信息，如转速，电压，电流等。

(4) 日用电源控制器

主要连接日用配电板，获得日用电源的模式设定和启动停止等指令。

(5) 岸电子控制器

主要连接岸电电源控制箱，获得岸电电源的启动停止等指令，为锂离子电池提供充电电源。

3.7.2 功率限制功能

在以下情况下，推进控制系统将执行对推进设备的功率限制：

(1) 推进功率超出现有船舶发电功率限制

由于 PCS 和 PMS 都集成在直流母线变频控制配电系统的控制系统中，所以可以很便捷地检测发电的总功率和消耗的总功率，当推进功率超出现有发电能力，将暂时限制推进设备的功率输出，直到 PMS 调整现有发电机和锂离子电池的运行状态，增加现有发电功率能力后再释放其推进功率限制。

(2) 推进设备报警功率限制

当推进设备（推进变频器模块、推进电机、推进器）给出过热报警信号时，此时将限制推进功率，从而保护推进设备。

(3) 直流母线电压过低功率限制

当直流母线电压明显低于控制参考变量时，证明瞬时条件下发电机组功率无法提供推进功率（可能是发电机组故障等原因），此时推进控制器将迅速限制推进功率，从而保护全船电网。

3.7.3 推进电机控制

推进控制系统主推进子控制器接收推进遥控系统手柄（随动控制）或者按钮（非随动控制）给出的转速信号，驱动推进电机变频器，并将推进电机状态反馈至推进遥控系统，完成对推进电机的控制。主要具备如下功能：

(1) 主推进电机参考转速的确定

推进控制系统接收来自推进遥控系统操作摇杆（4~20mA 信号）或者操作面板按钮信号（开关量信号）作为输入，转化成参考转速。

(2) 主推电机启动

当主推进子控制器获得主推遥控系统的启动指令后，首先进行初始化判断，条件包括：

- 1) 转速参考指令是否处于零位；
- 2) 相关冷却泵是否工作正常；
- 3) 主推进电动机的锁轴装置是否已经解锁；

- 4) 主推进电动机的绕组温度和轴承温度是否正常；
- 5) 主推进电动机的轴承碳刷是否报警；
- 6) 艏轴的推力轴承和中间轴承的温度传感器是否报警（待定）；
- 7) 变频器是否有其他故障或者报警；冷源水压力开关是否正常。

（3）主推进电机的停止

主推进的停止分为速度降至零和停止变频器 2 个步骤，并且故障停车也是遵循这个流程。

（4）主推电机急停

主推进电动机急停的目的是当出现紧急情况或者控制信号失控时，主推进控制系统以最快的速度切断电机与变频器之间的断路器，停止动力供应。推进控制系统推进子控制器接收来自控制站点的急停指令，各控制站点之间的急停线路相互独立，触发主推电机的急停。

（5）主推电机限功率运行

为保证电站系统安全运行，推进控制系统对主推进系统提供了两种限功率模式，分别为功率限制模式 1 和功率限制模式 2。功率阈值可根据实际需求由设备厂商进行微调。

1) 功率限制模式 1 即主推进电动机最大的输出功率被限制在当前手柄对应的位置，即无论遥控系统给出的转速参考多大，主推进电动机最大只能提供当前的输出转矩。但是如果遥控系统给出的转速参考下降，转速仍然可以跟随下降。

2) 功率限制模式 1 的触发条件是推进控制系统实时监测到系统负荷率高于 80%时，此时会进入功率限制 1 模式，且此工况不可越控。只有当负荷率低于 80%即增加锂离子电池组(电池组供电时)或者发电机组自动增机(发电机组供电时)，或者主推电机转速下降，功率限制 1 模式可自动解除。

3) 功率限制模式 2 即主推进电动机最大的输出功率被限制在当前输出转矩的 50%，即无论控制面板给出的转速参考多大，主推进电动机最大只能提供当前的输出转矩的 50%。

4) 功率限制模式 2 的触发条件是推进控制系统实时监测系统负荷，当系统负荷率高于 90%或者直流母线电压过低时触发并锁存功率限制模式 2，锁存限制信号，只有当系统负荷率低于 60%或 30 秒后自动解除。

（6）主推电机故障降速、故障停车及越控

1) 对于主推进系统，如果触发了故障降速或者故障停车的条件，推进控制系统控制器会发出“故障降速预报警”或“故障停车预报警”信号给主推遥控控制面板，此时主推遥控面板上的“故障降速越控”或“故障停车越控”带灯按钮的指示灯会闪烁，此时主推电机并没有真正的降速或者停车，如果在 5 秒之内按下“故障降速越控”或者“故障停车越控”按钮，则进行故障降速或故障停车。

2) “故障降速越控”或“故障停车越控”均属于事前越控，一旦发生了真正的故障降速或者故障停车后，越控将不产生效果。

3) 故障降速的触发条件：主推进电动机绕组温度高，主推进电动机轴承温度高，主推进电机变频器模块温度高（不可越控）。

4) 故障停车触发条件：主推进电动机绕组温度超高，主推进电动机轴承温度超高，主推进电机控制器模块温度高，水冷系统故障，主推进变频器故障（不可越控），主推进电机超速（不可越控）。

3.8 日用逆变器

交流日用逆变器的技术要求：

(1) 逆变器之间，以及逆变器与交流发电机组之间切换供电时，应保证切换过程平稳、无冲击，且切换过程中日用交流负载不断电。

(2) 交流日用配电系统若仅由逆变器供电，在正常工况下，逆变器应采用恒压恒频控制策略；在发生交流系统短路故障时，逆变器应能立即响应从恒压恒频控制切换至恒流恒频控制，向交流日用配电系统提供指定幅值和恒定频率的短路电流，且持续时间不低于 0.5 秒，用于交流日用配电系统保护电器识别和分断短路故障。

(3) 交流日用配电系统若由逆变器与交流同步发电机组并联供电，可由交流同步发电机组调节交流母排电压，逆变器根据功率/能量管理系统调节电流；必要时，无论交流同步发电机组是否投入，逆变器均应能够向交流日用配电系统提供稳定的电压和频率。

充电装置与岸电的功能与要求

3.9 充电柜设施的整流模块

可控整流器（Rectifier），又称 AC/DC 变换器，是一种将交流电变为可调直流电的变换器。可控整流器的电路拓扑以桥式整流电路为主，一般采用三相整流

电路，其换流模式有相控整流和斩控整流两种。

(1) 相控整流器 (SCR)

在早期采用晶闸管构成相控型整流器 (Silicon Controlled Rectifier, SCR)，通过 SCR 输出电压的调节，来控制直流电动机转速。

(2) 斩控整流器 (PWM 整流器)

为解决 SCR 网侧 PF 和 THD 问题，近年来开发了一种 PWM (Pulse Width Modulation) 整流器，其主电路拓扑与 SCR 电路相同，只是用全控型电力电子开关器件代替晶闸管，比如：IGBT 或 IGCT 等复合型器件，采用 PWM 调制的方法来控制输出电压，并同时改善功率因数和抑制电流谐波。与晶闸管整流器和直流斩波器相比，PWM 整流器的优点在于：

- 1) 通过正弦脉宽控制，保持网侧功率因数为 1；
- 2) 输入电流为按正弦脉动的近似正弦波，使电流谐波含量有明显减少；
- 3) 对于电动机一类有源负载，可以将负载储能在减速或停车时返回电网，起到节能作用。

由于 PWM 整流器能实现电能的双向传递，因而又称为主动整流器，还可应用于交流传动系统，将交流电动机制动产生的电能逆变回电网。

3.10 外部充电装置

3.10.1 岸基充电技术

当船舶返港需要对电池充电时，为完成对电池充电控制，控制系统配置岸电控制子控制器，岸电子控制器完成对岸电连接以及与斩波柜子控制器共同完成电池充电的控制。当锂离子电池组的控制模式在半自动状态时，系统会自动检测岸电是否存在，当岸电不存在时，电池组会自动转入放电模式。

3.10.2 充电装置的一般要求

- (1) 电池系统应配有足够容量的充电装置。充电装置应有抑制无线电干扰的措施；
- (2) 充电装置应设有过流保护，包括短路保护；
- (3) 充电装置上或临近位置、船舶经常有人值班处所至少应设有能指示充放电电流、电压、温度等参数的仪表；
- (4) 电池系统的充电装置应与 BMS 设有接口，并在 BMS 限定的条件下运行；

(5) 充电装置应设置温度监控装置，该装置应能根据温度变化传送相应信号给充电控制系统，用于实现充电枪端的温度监测和过高温保护功能；

(6) 电池系统若通过直流母排充电，应设有适当的措施，避免直流母排系统的故障对动力电池造成损伤。

3.10.3 充电装置检查要点

(1) 检查电池系统是否配有足够容量的充电装置，充电装置是否有抑制无线电干扰的措施；检查充电装置是否设有过流保护，包括短路保护；检查充电装置上或临近位置、船舶经常有人值班处所是否设有能指示充放电电流、电压、温度等参数的仪表。

(2) 检查电池系统的充电装置是否与电池管理系统（BMS）设有接口，并在 BMS 限定的条件下运行。BMS 是否具有对电池的充、放电及其充放电设备进行控制，过充过放时，应能断开充放电装置；BMS 是否在就地及远程（船舶经常有人值班的区域）设置在执行过充过放保护、充电故障时发出视觉和听觉报警，并能将报警信息在远程显示。

(3) 若充电岸电经由充电连接装置（如充电枪、充电连接器等）与船上充电设备（包括岸电箱）连接，检查是否满足下列要求：

1) 充电连接装置应设有机械连锁，防止带电插拔及充电过程中充电电缆脱落。

2) 在正常和故障条件下，充电连接装置应设有防电击的安全措施。

3) 充电连接装置的设计应考虑便于操作，与岸电装置连接时无需使用专用工具，且不会触及任何带电部件。

4) 检查充电装置是否设置温度监控装置，该装置应能根据温度变化传送相应信号给充电控制系统，用于实现充电枪端的温度监测和过高温保护功能。

5) 电池系统若通过直流母排充电，检查是否设有适当的措施，避免直流母排系统的故障对动力电池造成损伤。

3.11 岸电

3.11.1 岸电技术原理

船舶接用岸电技术，是指船舶靠港期间，停止使用船舶上的发电机，而改用陆地电源供电。港口提供岸电的功率应能保证满足船舶停泊后所必需的全部电力设施用电需求，包括生产设备（如舱口盖驱动装置、压载水泵等）以及生活设施、

安全设备和其他设备。港口（提供岸电）和靠港船舶（接受岸电）各自都专门带有一套岸电系统。

3.11.2 直流配电系统对岸电或其他外来电源的设计要求

（1）岸电或其他外来电源供电电制和电压与直流配电系统的直流母排相匹配时，可经断路器等保护电器直接接入直流母排，否则需配置匹配的变流器。

（2）不与电源装置并联（含短时并联转移负荷）的岸电或其他外来电源（直接或经变流器）接入直流母排应设置必要的连锁，以避免不当连接时对直流配电系统运行造成严重影响。

模块四：直流配电系统操作

直流配电系统操作

4.1 船/岸电切换操作

4.1.1 船/岸电切换注意事项

- (1) 接岸电时，应确保岸电与船电的电流种类一致；
- (2) 接岸电时，岸电的额定频率、额定电压应与船电相一致；
- (3) 当岸电为三相四线制时，需将岸电的中性线接在岸电箱上接船体的接线柱上，只有船体与岸电中性线相连后，才可接通岸电；
- (4) 合上岸电箱上开关，只有当岸电相序与船电相序一致时才可到主配电板前进行转接岸电操作；
- (5) 供岸电时主配电板上的各控制开关均应转到手动位置；
- (6) 船舶接岸电时严禁船舶发电机合闸供电，只有在岸电切除后发电机才可合闸供电，两者不可能同时合闸。

4.1.2 船/岸电切换操作

(1) 船电转岸电操作

1) 船舶靠岸时，将岸上电力电缆接在岸电箱的岸电接线柱上，合上岸电配电开关，岸电电源指示灯亮（一般由岸上人员配合）。

2) 在船电供电情况下合上岸电箱上开关，由岸电箱上相序测定器指示岸电与船电间相序，当两个指示灯的亮暗关系与岸电箱上标志相一致时，说明岸电相序与船电相序一致；否则即相序不一致。若为负序继电器，则当相序不一致时，岸电箱的开关合上即跳闸。

3) 在主配电板前，当岸电指示器已表明岸电已通电时，分断发电机主开关，电网失电后立即合上岸电开关，此时船舶电网已换接成岸电供电。

(2) 岸电转船电操作

1) 启动 1#或 2#日用逆变器，AC380V 自动模式——交流配电板检测到对应支路上的日用逆变器运行供电后，自动合闸，向母排供电；

2) 手动模式——人工按下启动交流配电站，电源会输出至变压器原边。若日用变压器模式处于“自动模式”时，原边电压正常后，等待几秒，日用变压器

开关会自动合闸。若变压器是“手动模式”，则需手动按下变压器合闸按钮，并为全船供电。

3) 主要设备上电，遥控、电池、舵桨的工作电源和 24V 电源上电。

4) 重要负载设备启动，码头备航阶段，机舱风机、空调、广告屏等重要大功率设备送电。

5) 确认主要控制设备工作正常。

4.2 手动及自动启/停/投切操作

4.2.1 锂离子电池组手动及自动启/停/投切操作

锂离子电池组的控制模式具备“手动模式”和“半自动模式”两种控制模式。

若选择“手动模式”，船舶操作人员在斩波柜门上的两位开关拨至“本地”，触控屏上会自动显示该锂离子电池组处于“手动模式”，然后操作人员可手动对锂离子电池组进行“充电”或“放电”的操作，“手动模式”需要专业的操作人员来进行。

若选择“半自动模式”，对于锂离子电池的操作会转到系统触摸屏上，对锂离子电池的充电之前需要保证岸电系统已经接入，然后点击“充电”按钮，系统开始通过岸电为锂离子电池组进行充电。充电完毕后，系统会自动进入“热备”状态，即既不充电也不放电，但是如果判断到岸电断开后，可以立即进入放电状态对母线进行支撑，也可在触控屏上点击“停机”按钮来结束运行。

(1) 锂离子电池组的启动

锂离子电池组的启动，无论是“手动模式”还是“半自动模式”，锂离子电池组的启动都遵循如下的逻辑过程。

1) 初始化判断，要求锂离子电池组没有故障，具备待机信号，且锂离子电池组和斩波模块均没有故障；

2) 综合主断路器（锂离子电池组和斩波模块之间的断路器）；

3) 给斩波模块启动指令，即锂离子电池组开始进行接入组网，此时斩波模块的电流限制值为 0，即虽然完成组网，但是该锂离子电池组并不向直流母线提供任何能量也不从直流母线吸收能量；

4) 通过系统给定“充电”或者“放电”模式，逐渐将电流限制值提升到最大充放电电流限制值，由在网的斩波模块之间设置的并联参数自动平滑实现在网锂离子电池组的功率分配，整个并网过程完成。

(2) 锂离子电池组的并网条件

锂离子电池组在并网之前，控制系统中的能量管理系统（EMS）会检测直流电压是否高于预设值，若直流电压不符合条件，则锂离子电池组会先预充后并网，长期无法并网会返回初始状态。

(3) 锂离子电池组的停机

相对于锂离子电池组的启动，锂离子电池组的停机过程描述如下：

1) 逐渐将斩波模块的电流限制值降低到 0，即逐渐限制该锂离子电池组的电流输出，将负载转移到别的锂离子电池组上；

2) 斩波模块停止工作，即锂离子电池组开始进行直流解列；

3) 断开主断路器，停机过程完成。

4.2.2 柴油发电机组手动及自动启/停/投切操作

发电机组的控制模式具备“自动模式”“半自动模式”和“手动模式”三种控制模式。

在“手动模式”下，需要柴油机机旁控制箱设定为“遥控”，发电机柜的柜门上“手动/半自动”的选择开关选择为“手动”。触摸屏上会自动显示该发电机组处于“手动模式”。操作人员通过发电柜的柜门上的“启动”和“停机”按钮进行柴油机组的操作。

当按下“启动”按钮后，该发电柜的子控制器对柴油机发出遥控启动指令，当子控制器判断柴油机的转速达到接近额定转速之后，给功率模块启动指令，功率模块开始发送脉冲，并且对直流母线电压实施控制，并网之后，本发电机组会自动和其他在网的发电机组按照设定的直流电压下垂曲线进行功率分配。当按下“停机”按钮后，发电柜的子控制器给功率模块下达停机指令，并且给柴油机遥控停机指令，关停柴油机组。

在“半自动模式”下，需要柴油机机旁控制箱设定为“遥控”，发电机柜的柜门上“手动/半自动”的选择开关选择为“半自动”。触摸屏上会默认该发电机组为“半自动模式”，操作人员可以通过触摸屏实现“半自动模式”和“自动模式”之间的切换。操作人员通过触摸屏的虚拟按钮进行柴油机组的操作。

(1) 柴油发电机组的启动

无论是“手动模式”“半自动模式”还是“自动模式”，柴油发电机组的启动都遵循如下的逻辑过程。

1) 初始化判断, 要求柴油机没有故障, 具备备车信号, 且发电机和功率模块没有故障;

2) 启动柴油机, 即给柴油机机旁控制遥控启动指令, 当柴油机的电子调速器使柴油机达到设定转速后, 柴油发电机组的启动过程结束;

3) 启动柴油机过程中利用发电机组的励磁绕组对直流母线进行预充;

4) 闭合发电柜输入断路器;

5) 如果满足并车要求, 给功率模块启动指令, 即柴油发电机组开始进行直流并车, 此时功率模块的电流限制值为 0, 即虽然完成并车, 但是该柴油发电机组并不向直流母线提供任何能量;

6) 逐渐将电流限制值提升到最大值, 由在网的功率模块之间设置的并联参数自动平滑实现在网发电机组的功率分配, 实现了负载从别的机组向该机组的转移, 整个并车过程完成。

(2) 柴油发电机组的并车条件

1) 柴油发电机组在并车之前, 功率管理系统 (PMS) 会检测是否满足下列条件, 如果不满足, 则不会并车, 长期无法并车会返回初始状态。

2) 待并车的柴油发电机组的转速在设定的转速区间。若转速处于该区间之外, 则无法实现并车。

3) 直流母线电压处于设定的电压区间, 若直流电压处于该区间之外, 则无法实现并车。

(3) 柴油发电机组的停机

1) 逐渐将功率模块的电流限制值降低到 0, 即逐渐限制该柴油发电机组的电流输出, 将负载转移到别的柴油发电机组上;

2) 功率模块停止工作, 即柴油发电机组开始进行直流解列;

3) 断开输入断路器;

4) 如果柴油机需要怠速冷却, 则首先给定柴油机机旁控制箱命令使柴油机组进入怠速状态, 冷却结束后, 停机。如果不需要怠速冷却过程, 则直接给柴油机机旁控制箱“遥控停机”指令, 柴油机将会自动停车, 停机过程完成。

4.2.3 直流配电系统手动及自动启/停/投切操作

(1) 检查直流配电系统电源是否正常供电, 对应的配电开关分别在交流配电板 (380V、220V) 和充放电板处 (24V)。

(2) 启动直流配电板冷却水泵（随设备自动启动）和推进设备冷却水泵。

(3) 观察各电池组状态正常且处于“就绪”状态，也无报警信号。

(4) 设定选择电池组控制方式“自动”“手动”。

(5) 复位确认直流配电系统故障信号，设备将处于“就绪”状态。

(6) 推进逆变器：可在推进遥控系统就地控制箱和驾驶室进行控制。当就地控制箱上选择开关旋至“机旁”，则为机旁控制，当选择开关旋至“驾控”则为驾驶室控制。

(7) 日用逆变器：当电池正常放电后，且满足起动条件时，日用电源柜就绪状态灯亮。

4.2.4 交流配电板手动及自动启/停/投切操作

(1) 若交流配电板模式（以下称 T1、T2）为“遥控模式”，则等电池放电成功后会启动 T1 或 T2，电源会输出至变压器原边，若变压器模式处于“自动模式”，原边电压正常后，等待几秒，日用变压器开关会自动合闸。若变压器是处于“手动模式”，则需手动按下变压器合闸按钮，并为全船供电。

(2) 若交流配电板模式为“手动模式”，则需人工按下启动 T1 或 T2，电源会输出至变压器原边。若日用变压器模式处于“自动模式”时，原边电压正常后，等待几秒，日用变压器开关会自动合闸。若变压器是“手动模式”，则需手动按下变压器合闸按钮，并为全船供电。

(3) 确认交流母联开关合闸及 220V 取电支路合闸。

4.3 电池动力船舶岸电充电操作

4.3.1 岸电充电一般操作流程

(1) 驶入码头停靠区域：船舶驶入指定的停靠区域，并确保码头电缆和船舶的电缆可以连接到岸电桩。

(2) 连接岸电电缆：将船舶的电缆连接到岸电桩上的插座，确保连接牢固并没有松动。

(3) 启动充电：在连接好电缆后，打开岸电桩的电源开关，开始对船舶进行充电。电缆上的指示灯可能会显示充电状态。

(4) 监控充电过程：船舶的船员或工作人员应随时监控充电过程，确保电力传输的稳定性和安全性。应密切关注充电状态，确保船舶的电池能够正常充电。

(5) 完成充电：根据充电需求，确定充电时间。一般情况下，充电完成后，应先关闭岸电桩上的电源开关，然后再拔下电缆。

(6) 断开连接：在确认充电已完成且电缆已经断开供电后，可以离开码头停靠区域，继续船舶的运行。

4.3.2 船员维护保养和操作要点

(1) 每次使用后应检查电缆的外观是否有破损，并将脏污处用酒精或专用清洗剂擦拭干净，一旦发生破损应及时予以更新；收放电缆一定要经指定通道上下船，并保证电缆留有足够长度，防止电缆在过船档等部位发生船体、码头、缆绳、扶梯等挤压、磨破损坏，确保电缆完好。

(2) 应定期测量插头的插针之间的相与相的绝缘、相与地的绝缘，绝缘电阻需不小于 $50M\Omega$ 。如有异常，需排除问题重新检测合格后才能使用。插头和插座每次使用完成冷却后盖好且锁紧保护盖，以防止凝露和进水。

(3) 检查控制箱箱门是否关牢靠、锁紧，防止进水。每次使用前先检查各种指示灯是否正常，如果有异常，需排除后才能使用。

(4) 检查充电装置上设置的指示充放电电流、电压、温度等参数的仪表是否正常，可以通过开关设备或仪表测量等方式检查仪表的工作状态；检查并测试电池管理系统中设置的充过放保护、充电故障时是否会发出视觉和听觉报警。

(5) 检查充电连接装置（如充电枪、充电连接器等）与船上充电设备（包括岸电箱）连接状态，确保充电连接装置的机械连锁功能正常，防止带电插拔及充电过程中充电电缆接口接触不紧密甚至脱落；注意观察充电电缆松紧程度，及时调整船舶系泊状态；充电作业期间，操作人员应规范穿戴绝缘手套、绝缘靴等个人防护装备。作业人员在接岸电前必须先确认船和岸上的岸电箱合闸开关处在断开状态，并用测电器测试接线桩，在无电状况下方可进行接电操作。

(6) 充电作业期间船员应保持值守，面对突发雷电、大风、暴雨、水位异常变化等极端情况时，应及时停止充电作业并断开线路连接，防止因雷击、进水、船位异常变化等在充电期间产生次生灾害，待危险因素解除后重新开始充电作业。

推进系统操作

4.4 推进系统遥控模式下启动/停机

(1) 遥控模式下（舵桨本地控制箱、推进控制箱、驾控台控制面板均在遥控模式）启动，在遥控模式下分别启动推进系统、舵系统

1) 此时电池系统、逆变电源应已处于正常运行状态，推进系统及舵系统供电正常，推进系统及舵系统处于“就绪”状态，无报警及故障。

2) 在驾驶室舵、桨操控面板上，分别启动推进系统及舵系统，推进系统转为运行状态，舵系统转为运行状态，可进行遥控手柄的操作。

(2) 遥控模式下（舵桨本地控制箱、推进控制箱、驾控台控制面板均在遥控模式）停机

1) 此时电池系统、逆变电源应已处于正常运行状态，推进系统及舵系统供电正常，推进系统及舵系统处于运行状态，无报警及故障。

2) 在驾驶室舵遥控操控面板上，停止推进系统及舵系统，推进系统转为停机状态，舵系统转为停机状态。

模块五：直流配电系统的保护

选择性保护的基本原理和实现方式

5.1 快速熔断器、直流隔离开关、直流接触器工作原理及使用范围

5.1.1 快速熔断器

(1) 快速熔断器的工作原理

快速熔断器基于熔丝原理工作。内部通常包含一个金属导体丝和陶瓷等支撑体，当电流过载时，丝状导体会受到尖锐的加热并瞬间熔断，从而迅速切断电路，以保护电气或电子设备不被损坏。快速熔断器外形如图 5.1.1 所示。



图 5.1.1 快速熔断器

(2) 快速熔断器的选择

- 1) 快速熔断器的额定电压不应低于系统的最高工作电压。
- 2) 快速熔断器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。
- 3) 校验快速熔断器的开断电流，应满足安装位置所应分断的最大预期短路电流的要求。
- 4) 快速熔断器弧前 I^2t 值应符合：分别在最大/最小运行方式各典型故障下计算系统短路电流及其总 I^2t 值，故障回路熔断器熔断时，每一非故障回路短路电流总 I^2t 值应小于其快速熔断器弧前 I^2t 值的一半。
- 5) 快速熔断器总 I^2t 值应符合：分别在最大/最小运行方式下各典型故障下计算系统短路电流及其总 I^2t 值，故障回路熔断器熔断时，回路时间电流特性曲线在本回路隔离开关电流耐受曲线范围内。

6) 快速熔断器应为螺栓式熔断器，当采用其他型式的熔断器时，应提供资料证明这种安装方式增加的接触电阻不会影响系统的选择性。

5.1.2 隔离开关

(1) 隔离开关的工作原理

隔离开关是输电系统中的一种重要设备，它的作用是在输电线路故障或检修时，对线路进行隔离，以保证电力系统的安全运行。隔离开关主要由机构、触头、支架、动静触头、弹簧、齿轮等部分组成。其工作原理是靠机构完成线路接通和隔离，通过触头与接线柱接触完成电流的传输，同时支架和动触头构成弹簧式断路机构，使开关具有可靠的隔离功能。直流隔离开关外形如图 5.1.2 所示。



图 5.1.2 直流隔离开关

(2) 隔离开关的选择

- 1) 隔离开关额定电压不应低于系统的最高工作电压。
- 2) 隔离开关的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。
- 3) 校验隔离开关动稳定和热稳定所用的短路电流，应满足安装位置最大预期短路电流的要求。
- 4) 回路短路电流持续时间内，短路电流的时间电流特性曲线在隔离开关电流耐受曲线范围内，即短路电流作用下隔离开关不粘接、不起火、不爆炸。

5.1.3 直流接触器

(1) 直流接触器的工作原理

直流接触器的工作原理与普通继电器相似，主要依靠线圈产生的磁场来控制机械触点的闭合和断开。当接触器的线圈通电时，线圈内产生的磁场使静铁芯产生电磁吸力，吸引动铁芯。这种运动直接带动接触器的触点动作，实现电路的闭合或断开。通常这种情况下常闭触点会断开，而常开触点会闭合，两者是联动的。

当线圈断电时，电磁吸力消失，衔铁在释放弹簧的作用下释放，使触点复原，常开触点断开，常闭触点闭合。

直流接触器通常用于控制直流电路，其线圈可以是单线圈或双线圈。单线圈的启动功率较大，而维持功率较小；双线圈的启动功率较小，但维持功率较大。在启动过程中，电流只通过启动绕组，而当接触器完全吸合后，启动绕组与工作绕组串联运行，以降低功耗。直流接触器外形如图 5.1.3 所示。



图 5.1.3 直流接触器

(2) 直流接触器的选择

- 1) 直流接触器的额定电压不应低于系统的最高工作电压。
- 2) 直流接触器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。
- 3) 直流接触器的断流能力不应小于最大可能的过负荷电流。
- 4) 校验直流接触器动稳定和热稳定所用的短路电流，应满足安装位置最大预期短路电流的要求。
- 5) 回路短路电流持续时间内，时间电流特性曲线在直流接触器电流耐受曲线范围内，即短路电流作用下直流接触器不粘接、不起火、不爆炸。

5.1.4 断路器

(1) 断路器的工作原理

断路器是由外壳、脱扣器、触头系统、操作机构、灭弧系统组构而成的。当发生短路时，大电流一般处在 10 到 12 倍所产生的磁场，断路器会克服反力弹簧，从而让脱扣器拉动操作机构让开关迅速跳闸。而当电量过载、电流变大时，发热

量加剧，双金属片会变形到一定的程度，从而推动机构动作，当电流越大时，动作的时间也就越短。

而电子型的断路器，会运用互感器来采集各相电流大小，与设定值比较，当电流异常的时候，微处理器会发出信号让电子脱扣器来带动操作机构动作。

低压类型的断路器，还被称作自动空气开关，其主触点是靠手动操作或电动合闸的，能够分断和接通负载电路，也能够控制不频繁起动的电动机。功能相当于过电流继电器、闸刀开关、失压继电器、漏电保护器、热继电器等电器部分的全部功能总和，是低压配电网中一种重要的保护电器。断路器外形如图 5.1.4 所示。



图 5.1.4 断路器

(2) 断路器的选择

- 1) 断路器的额定电压不应低于系统的最高工作电压。
- 2) 断路器的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。
- 3) 在校核断路器的开断能力时，宜取断路器实际开断时间的短路电流作为校验条件。
- 4) 断路器的额定短路接通电流，不应小于短路电流最大冲击值。
- 5) 在上、下级保护装置均为断路器的配电系统中，应对上级和下级断路器的短路电流整定值和（或）短延时整定值进行协调设计，以保证在同一故障电流作用下，上级和下级断路器具有保护选择性。如断路器仅依靠短路电流瞬时值进行整定，则上级断路器的短路电流整定值应大于下一级断路器可能流过的最大短路电流；如断路器还设有短延时脱扣器，则下级断路器的全分断时间应小于上级断路器的可返回时间。

6) 在选择性保护要求的时间内，断路器应具有能承载安装处的短路电流而不分断的能力。

5.1.5 固态开关

(1) 固态开关的工作原理

固态开关的工作原理是通过控制半导体元件的导通状态来控制电流的流动。由于没有机械部件，因此固态开关具有较长的使用寿命和较高可靠性，可以在很短的时间内打开或关闭电流，并且能够高效地控制大功率。此外，固态开关还具有快速响应和低损耗等优点，因此被广泛应用于不间断电源（UPS）中，可以在主电源出现异常时，快速切换至备用电源，保证负载供电的连续性和可靠性。

固态开关的主要元件是半导体，通常是硅晶体或锗晶体等。当半导体元件中没有电流通过时，它们处于高电阻状态，几乎没有任何电流能够通过。但是，当电流通过半导体元件时，它们会进入低电阻状态，允许电流快速通过。这样，通过控制半导体元件的导通状态，就可以控制电流的流动状态。

固态开关的优点包括快速响应、高可靠性、长使用寿命和低损耗等。它们可以在极短的时间内切换电流，而且没有机械部件，因此不会出现机械故障或磨损。此外，固态开关可以频繁地开关，从而控制大功率负载的启动和停止。固态开关外形如图 5.1.5 所示。



图 5.1.5 固态开关

(2) 固态开关的选择

- 1) 固态开关的额定电压不应低于系统的最高工作电压。
- 2) 固态开关的额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。
- 3) 固态开关应能承受任何一对端子之间的最高峰值电压，必要时应装设过

电压吸收装置。

4) 固态开关的控制电路应具备连锁和延时功能，以防止双向电力电子开关引起的正负极之间短路。

5) 固态开关应能承受正常工作期间可能出现的过电流。

6) 固态开关应能可靠分断短路电流，且分断时的 di/dt （电流变化率）不超过产品技术文件的限值。

5.2 选择性保护工作原理

5.2.1 船舶电力系统保护装置保护原则

船舶电力系统保护装置，主要是由熔断器、断路器、过载继电器和失电压继电器等组成。这些保护装置的整定值，通常是按时间原则、电流原则或两者综合的原则来进行整定。

(1) 时间原则

通过各级保护装置动作时间整定值的不同来实现选择性保护。动作时间应保证从用电设备至电源方向逐级递增。按时间原则整定的选择性保护系统，其保护性能较可靠，原则上可应用于任何电力系统。

(2) 电流原则

以各级保护装置动作电流的不同来实现选择性保护。动作电流应保证从用电设备至电源方向逐级递增。按电流原则得到的选择性保护的优点是短路时动作迅速，其动作的时间仅取决于保护装置的固有动作时间，通常约为 0.1 秒，其缺点是开关的断流容量受到限制，并易受外界相关因素的干扰，级间协调较困难。由于二者各有利弊，有时难以得到满意效果，实际运用时一般都将两种方法协同使用，相互弥补不足。

5.2.2 船舶电网保护方式

船舶电网的保护按其保护功能通常可分为全定额保护方式和后备保护方式。

(1) 全定额保护方式

电网内所有保护装置所具有的额定短路容量均大于其安装点的估算短路电流。根据选定保护装置特性，可组成选择切断保护方式和非选择切断保护方式。

(2) 后备保护方式

系统中设置的保护装置，对于其安装点的最大估算短路电流实施保护动作。如果短路电流不够，在该保护装置的电源侧设置对最大估算短路电流具有足够容

量的保护装置，以便安全地切断故障回路的保护方式。

应急蓄电池的充电和维护

5.3 应急蓄电池

略。（结合 6.4 应急蓄电池的维护保养一并讲解）

电力设备冷却系统组成与作用

5.4 电力设备冷却系统

5.4.1 冷却系统的组成

无论是电动机、变频器还是直流母排，均需要根据船舶运行环境温度条件，设计和配备冷却系统。冷却系统可以采用空冷或水冷方式，也可采用混合冷却方式。

对于大功率设备一般采用水冷方式，水冷系统由水冷柜和冷却管路组成，水冷柜主要为整个冷却系统提供循环动力、热交换和水路状态监控，冷却管路布置在各变频器柜下方，通过软管与柜内的功率模块等水冷设备连接，整个冷却系统的循环原理如图 5.4.1 所示。在水冷管路上还设置有冷却水温度、压力及流量传感器，还有冷源水压力、温度传感器，信号均反馈至水冷柜中的子控制器，通讯传给主控制器，控制器设置有冷却水温度高、压力高、压力低、流量低以及冷源水温度高、压力低等报警功能，当达到某一报警阈值时，控制柜的触摸屏上会显示相关报警信息，柜门上也会有声光报警，提示操作人员进行检查。

为防止水冷管路泄漏的液体以及因环境变化在管路外壁产生的冷凝水掉落在柜内其他电气设备上，变频器柜内每根水管外部均套了一层波纹管，其端部靠近器件紧固，这样可以保证水管上的漏液和冷凝水全部滴落到波纹管内，并沿着波纹管内壁流至柜体底板上。

为了可以及时检测到柜内是否发生泄漏，在变频器柜体底板最低处（底板设计时有一定的倾斜角度）安装有漏液检测装置，当柜体底板上产生积液时，就会触发漏液检测装置动作，并将输出信号传送至控制柜内的主控制器，发出泄漏报警。

当水冷柜子控制器判断水冷系统故障，如水流量超低、两台水泵故障或者管路泄漏，子控制器会停止水冷系统运行，同时通过通讯系统向主控制器上报故障信息，主控制器会自动停止直流配电系统。

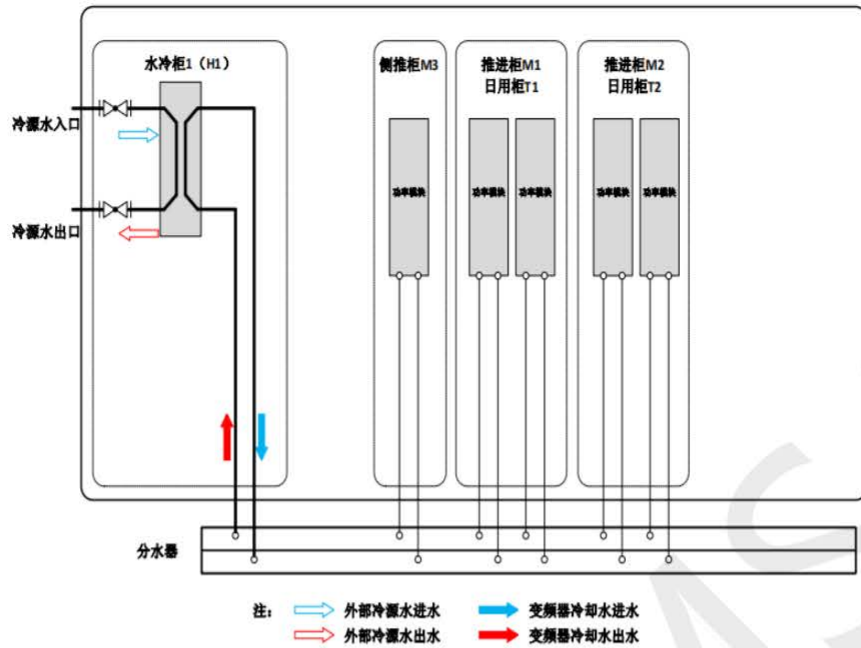


图 5.4.1 冷却系统组成

5.4.2 水冷柜

水冷柜内部的循环原理如图 5.4.2 所示。

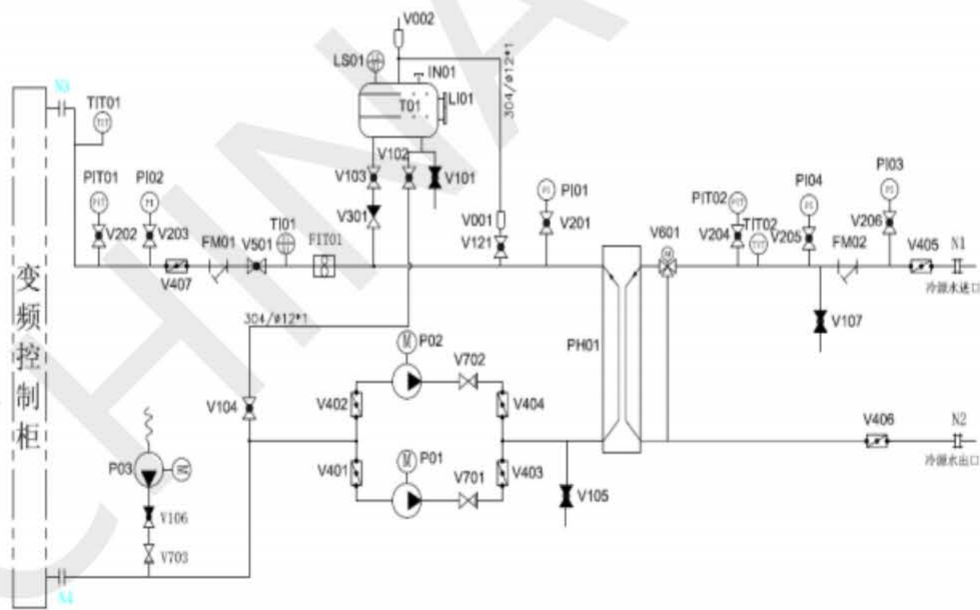


图 5.4.2 水冷柜循环原理图

水冷柜主要有控制箱（内含子控制器）、板换、循环水泵、三通阀、补水泵、压力/温度/流量等传感器、各种阀及连接软管等器件组成，主要完成如下功能。

- (1) 保证冷却系统内部冷却水的循环，对变频器进行冷却。
- (2) 水冷柜控制模式选择，可以选择手动控制模式，也可以选择自动控制。

手动控制模式下，循环水泵的启停控制在水冷柜柜门上通过按钮完成；自动模式下，循环水泵的启停控制主控制器根据系统运行情况来自动启动。

(3) 通过电动三通阀的控制，调节内部冷却水的水温，在自动模式下可以将冷却水的温度维持在设定的水温。

(4) 实现外部冷源水和内部冷却水的热交换。

(5) 可以通过补水泵对系统进行补水。

(6) 对水冷系统的流量、压力、温度等数据进行采集。

(7) 水冷柜报警及故障数据采集。

(8) 水冷柜具有独立的显示屏，可以显示水冷系统的运行状态、水路参数及报警信息。

5.4.3 电动机冷却

电动机运行时要产生损耗，这些损耗都要转变为热能，致使电动机各部分的温度升高，称为温升。船用推进电动机的基本特点是大容量、低转速、高转矩。随着船舶排水量的增大、航速的提高，所需推进动力加大，推进电动机的容量也提升。电动机损耗总是随着容量的提升而增加的，如果这时冷却量不变，实际的电动机温度将升高，有可能损坏绝缘乃至烧毁电机。

(1) 通风冷却方式

船用推进电动机一般是利用空气进行通风冷却，随着单机容量的增加，防潮、防水、降噪等要求的提高，电动机的散热面积和风路安排受到诸多限制，使通风冷却较为困难。所以，需要用不同的冷却方式和通风系统保证电动机温升不超过允许值。船用推进电动机的通风冷却方式有很多种，根据空气循环的能量来源，可分为：

1) 自通风冷却方式。在推进电动机的转轴上装有风扇，依靠电动机转子自身的旋转作用，将冷却空气吸入电动机中或从电动机中排出热空气。这种冷却方式一般用于中小型船舶推进电动机，如辅侧推进电动机、经航推进电动机等。

2) 强迫通风冷却方式。借助外加的单独电动通风机，迫使冷却空气吹入推进电动机中，经过电动机各散热面，吸收电动机的损耗热，冷却发热部位。这种冷却方式适用于功率较大、发热量较大的船舶主推进电动机。

(2) 其他方式冷却

船舶推进电动机的通风冷却方式还有水冷却、蒸发冷却和热管式蒸发冷却

等，如水冷却就是以水为冷却介质的冷却系统，其效果比空气冷却系统好，而且没有空气噪声，越来越受到人们的关注。这种系统电动机定子水冷却较好实现，转子因为旋转存在密封问题，结构较为复杂。

5.4.4 电子元器件及其模块冷却

对于大功率电力电子元器件及其模块或组件，尤其是安装在狭小空间时，需要高效可靠的散热，液体冷却是理想的解决方案。液体冷却可采用水、去离子水、乙二醇等溶液作为传热介质，采用铜、铝等材料制作冷却器，其技术关键是密封性、耐腐蚀性、高散热性和可靠性等。

网格压装水冷板，采用网格堆栈和真空钎焊技术，保证了冷板表面极好的均热性、基底的液压降和高的散热性，图 5.4.3 为一种专用于晶闸管的冷却器和定制的水冷板，由高精度的数控机床加工的水流通道和真空钎焊封装技术，保证了高散热性和流通性。埋入金属基板表面的热管保证了功率器件和冷板表面间最低的热阻。热管可以弯曲成各种复杂形状，使其表面直接埋于功率元器件与基板的接触面下。

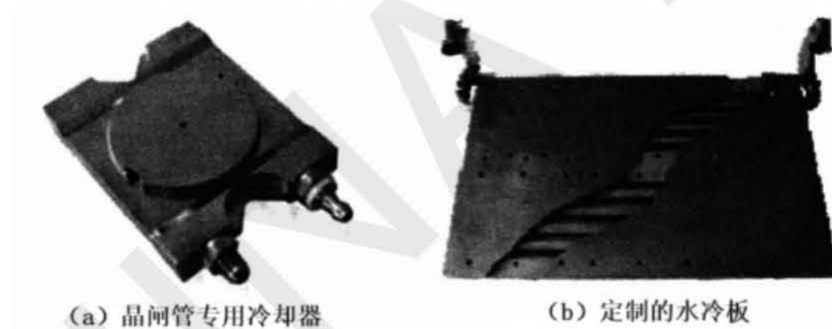


图 5.4.3 几种水冷的散热器

5.4.5 变压器的绝缘与冷却

与普通变压器相似，通常可根据需求设计成空气绝缘干式变压器、油浸式变压器和树脂绝缘变压器。

(1) 干式变压器

采用空气作为绝缘和冷却的媒介。由于空气的绝缘性较差，作为冷却介质效果也低于液体，因此干式变压器体积大、成本高。但是，其安全性要高于其他形式的变压器，因而广泛应用于室内和船上。

(2) 油浸式变压器

采用电气等级的矿物油作为绝缘和冷却媒介。这种变压器虽然在户外电网及

电力传输中广泛应用，但在船上很少使用，其原因是一旦发生油溅出事故，易引起火灾。如果采用不可燃的油，则可用于需要防爆的场合。

(3) 树脂绝缘变压器

采用树脂或压缩气体如六氟化硫（SF₆）或氮气作为绝缘和冷却介质。由于这类压缩气体比空气具有较好的绝缘性和冷却效果，可以减小变压器的体积，适用于船舱空间小的场合。变压器的绝缘等级根据其铁芯和绕组的冷却方式划分，船用变压器大都采用空气式变压器，应选择绝缘材料的耐热等级能满足允许温升180℃的要求。

系统应急

5.5 系统应急操作流程

略。（结合 6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除一并讲解）

模块六：直流配电系统的应急处理与故障排除

直流配电系统的故障排除

6.1 航行中主开关跳闸应急处理及各种跳闸的故障排除

6.1.1 航行中主开关跳闸应急处理

(1) 主开关跳闸的原因

1) 短路造成的主开关跳闸

短路指电路中的两根导线之间因为接触发生异常而导致电流短路。在船舶电气系统中，短路的原因有以下几种。

- ① 电缆受损。
- ② 设备零线断裂。
- ③ 设备接口插头松动。

2) 过载造成的主开关跳闸

过载指电路中电流高于额定电流，超出线路承载能力。在船舶电气系统中，过载的原因有以下几种。

- ① 船舶负载增加。
- ② 发电机不输出电能。
- ③ 变频器输出大电流。

3) 接触不良造成的主开关跳闸

接触不良指断路器、电源开关、保险丝座等设备接口处出现失效，其原因有以下几个方面。

- ① 设备受潮导致接口部分氧化。
- ② 设备使用时间长，接口部分需重新紧固。
- ③ 设备使用过程中，因热胀冷缩造成接触不良。

(2) 主开关跳闸的应急处理

船舶在正常航行中，因主开关跳闸而全船失电时应采取以下应急措施。

- 1) 立即通知驾驶台，通知轮机长下机舱。
- 2) 同时启动备用电源，合上电闸并以最短时间恢复供电。
- 3) 若另一备用电源自动启动，则应立即合闸供电。
- 4) 恢复保证正常航行必需的各主要设备供电。

5) 待恢复正常供电后,再启动各设备,保持正常航行。

(3) 防止主开关跳闸的应急措施

1) 做好配电板、控制箱等的维护保养工作。

2) 做好各电机及其拖动设备的维护保养工作,及时修理与更换有关部件。

3) 做好电池组和发电机组的维护保养工作。

4) 在狭窄水道、进出港等机动航行时应做到:尽力避免配电板操作,尽量避免同时使用几台大功率设备。

6.1.2 故障模式分析及应急措施、方案

(1) “遥控”模式下故障操作流程

在遥控模式下,船员不需要做任何操作,当日用电源发生故障之后,10秒之内备用日用电源会自动启动。例如当正在运行的日用电源柜 T1 出现故障时,程序执行流程如下。

1) 日用电源柜 T1 停止供电并且断开 T1 变频器输出开关。

2) 同时交流配电板自动断开“1号主开关”供电开关。

3) 同时日用电源柜 T2 自动启动,并且自动闭合 T2 变频器输出开关。

4) 交流配电板自动闭合“2号主开关”供电开关,交流配电板恢复供电。

(2) “本地”模式下故障操作流程

以左舷为例,在本地模式下,当正在运行的日用电源柜 T1 出现故障时,日用电源柜 T1 停止供电并且断开变频器 T1 输出开关,操作员恢复右舷日用配电操作流程如下。

1) 在交流配电板上通过“日用电源柜 T2 启动”按钮来启动右舷日用电源柜 T2,日用电源柜 T2 启动完成后,2号主开关自动合闸。

2) 若日用变压器模式处于“自动模式”时,原边电压正常后,等待几秒后日用变压器开关会自动合闸。若变压器是“手动模式”,则需手动按下变压器合闸按钮,并为全船供电。

3) 如果日用电源柜 T2 开关无法闭合,说明交流配电板有故障点还继续存在,需尽快排查将交流配电板故障负载断路器断开,甚至断开一切跟航行无关的设备,然后按下右舷日用柜的“复位”按钮,然后重复第 2) 步骤,使交流配电板恢复供电。

(3) 恢复供电后的带负载启动说明

负载设备与交流配电板之间有满足工作容量的 400V/220V 隔离变压器，交流配电板恢复供电的时候，不会对电网造成冲击而导致合闸失败。

6.2 电网常见故障排查

6.2.1 整流/逆变模块故障

(1) 故障状况：1 号日用逆变电源故障

此时推进动力正常，失电侧舵转向电源失效。

故障现象：交流配电板 AC380V 和 AC220V 失电。

应急操作：驾驶员首先应降低航速保持航向稳定，系统会自动启动 2 号日用电源并恢复供电。

(2) 故障状况：单个日用变压器故障

故障现象：单支路 AC220V 失电。

应急操作：分断该支路日用变压器开关，合闸 2 号变压器开关。

(3) 故障状况：某 DC/DC 模块故障，续航力下降

故障现象：某 DC/DC 模块无法充放电，并报出 DC/DC 故障，续航力下降。

应急操作：分离该故障回路，不要合闸或启动。保持正常航行，靠岸后通知厂家，上报故障代码，并进行维修。

6.2.2 电池组故障

(1) 故障状况：某电池簇故障，续航力下降

故障现象：某电池簇无法充放电，并报出故障及开关分闸。

应急操作：分离该故障回路，不要合闸或启动。保持正常航行，靠岸后通知厂家，上报故障代码，并进行维修。

(2) 故障状况：某电池包故障，续航力下降

故障现象：某电池包故障，该电池簇切除无法充放电，并报出故障及开关分闸。

应急操作：分离该故障回路，不要合闸或启动。保持正常航行，靠岸后通知厂家，上报故障代码，并进行维修。

(3) 故障状况：单边电池系统故障

本船左右舷分别设有多个电池构成直流主网，单边电池系统故障，本船所有功能正常。

故障现象：单边电池系统无法运行

应急操作：首先降低船速、保持航向稳定，检查熔断器是否存在熔断的情况。若无熔断器或开关故障，在船舶稳定后重新启动该侧电池系统，若仍无法启动，断开该侧电池系统，保持低速航行，至码头维修。

(4) 故障状况：DC24V 铅酸电池电量不足

故障现象：电池系统启动失败，并故障。

应急操作：检查 DC24V 铅酸电池，在进行船岸电切换时，应确保 DC24V 铅酸电池的电压在 25.5V 以上（检查方法：在负载挂在 24V 充放电板上时，分断 AC220V 开关，检查蓄电池侧电压）；若发现电压不足，应停止船岸电切换，并给 DC24V 铅酸电池进行充电，保证其铅酸电池电压在 25.5V 以上，然后再进行船岸电切换。

(5) 故障状况：电池舱发生外部火灾

故障现象：电池舱发生外部火灾。

应急操作：轮机员确认电池舱失火或电池热失控，在电池舱门口拍下紧停；确认电池舱内无人员；关闭舱门、通风系统，启动七氟丙烷灭火器；若扑灭明火，则观察电池舱温度，直至温度降至室温；保持单桨航行，至码头维修。

6.2.3 线路故障

(1) 故障状况：后端某设备短路导致故障

故障现象：部分设备脱扣。

应急操作：分离故障回路，并不要合闸或启动。不会对船舶电网造成失电影响，船舶进行正常操作，待到码头检查故障设备。

(2) 如何快速判断电气线路故障

此项要求驾驶员、轮机员要熟悉船舶供电原理和应急流程，并按分区供电模式进行判断。

应急操作：首先降速、保持船舶航向稳定；查看综合报警情况，明确设备报警情况；确定配电系统供电情况，是否有故障，如交流电故障；按对应的流程处置。

直流配电系统的应急处理

6.3 突发情况下的应急操作

6.3.1 推进系统应急操作

当操作手柄失效时，24V 应急电源供电。

(1) 当操控手柄推进无响应时，可将遥控面板上旋钮打到“应急”模式，此时遥控触摸屏上“应急”指示灯亮，可使用“应急加速”“应急减速”“正车”“倒车”进行控制。

(2) 当操控手柄转舵无响应时，可按下“应急操舵”按钮，此时“应急操舵”指示灯亮，可进行“应急左转”“应急右转”进行转舵控制。

(3) 当出现紧急情况，可按下“紧停”按钮，并进行如下操作：

1) 检查确认直流配电系统和交流日用配电系统电气设备处于良好的工作状态。

2) 检查连续监视系统绝缘电阻装置，在系统绝缘电阻异常低时应能发出报警（如适用）。

3) 对遥控、报警监测和安全系统进行总体检查。如检查推进装置越控功能是否正常。当船舶航行在辖水道、船舶交汇等紧急状态下，推进系统出现温度高/超高等情况需要自动降负荷/停机报警后，系统会提示越控请求，越控指示发出警报。此时当前控制位按下越控按钮可进行越控操作，越控指示灯常亮时，系统不会自动降负荷/停机。

应急蓄电池的维护保养

6.4 应急蓄电池的维护保养

6.4.1 应急蓄电池的作用

应急蓄电池的主要用途有以下几点。

- (1) 船舶电网断电时短时提供必要的应急照明。
- (2) 向船舶各类自动化装置、报警装置提供工作电源或作其备用电源。
- (3) 向发电机励磁绕组提供充磁直流电源。
- (4) 向电话交换机等船内通信设备提供工作电源。
- (5) 向船外通信导航设备提供工作电源。
- (6) 用作应急柴油发电机、救生艇机等的启动电源。

6.4.2 蓄电池的维护保养要求

- (1) 对酸性蓄电池的保养要求

1) 每 7~10 天左右检查一次电压、电解液高度及比重，并做好记录（液面高于隔板约 10~20mm），如低于规定值应及时补充蒸馏水，补水后电解液比重将会下降，应进行充电，然后清洁表面。

2) 不经常使用的蓄电池，每月至少检查一次，并进行充电。

3) 蓄电池表面，每 3 个月进行一次彻底清洁，清洁时先用干净布擦除接头处的氧化物然后再涂上牛油或凡士林，防止氧化。

(2) 对碱性蓄电池的保养

1) 每 15 天检查一次电压，电解液比重及高度，并做好记录，如低于规定值应及时补充蒸馏水，进行充电，然后清洁表面。

2) 每 2 个月检查一次蓄电池螺丝塞和透气橡皮套管，保持旋塞拧紧，如弹性失效应换新。

3) 每 6 个月要彻底清洁一次蓄电池的外表面，如有锈蚀，应用煤油擦光，再涂上一层无酸凡士林。

6.4.3 蓄电池维护保养注意事项

(1) 注意保持蓄电池表面清洁，不要有油渍污垢在上面，绝不允许在上面放置金属工具、物品，以防止短路损坏蓄电池。

(2) 保持极柱、夹头和铁质提手等处的清洁，如出现电腐蚀或氧化物等应及时擦拭干净，以保证导电的可靠性。平时应将这些零件表面涂上凡士林，防止锈蚀。

(3) 平时注意盖好注液孔上的盖，以防止船舶航行时电解液溢出，或海水进入蓄电池里。必须保持通气孔畅通。

(4) 蓄电池放电终了，应及时按要求进行充电。

(5) 蓄电池室内严禁烟火。

(6) 保持蓄电池室通风良好。

(7) 碱性蓄电池充电时，不要取下气塞，以防进入大量碳酸气，而使电解液失效。一般每年或使用过 50~100 次充电循环，应更换一次电解液。要注意保持排气胶管畅通，定期打开气塞排气，防止气体聚集太多而造成蓄电池膨胀。

模块七：案例分析

7.1 EMS 通讯模块导致船舶失电事故案例

7.1.1 事故简况

2023年4月8日20时54分许，某纯电池动力游览船在观光游览航程中，触碰XX桥南侧下拱肋，造成3名乘客受伤，船舶主甲板船首偏左位置护舷材凹陷及护栏受损，XX桥南侧下拱肋有轻微擦痕。事故如图7.1.1所示。



图 7.1.1 船舶触碰 XX 桥南侧下拱肋图

7.1.2 事故原因分析

(1) 直接原因

1) 该船 EMS 通讯模块功能异常导致 1# 日用逆变器停机，船舶交流配电板失电，左右两台全回转舵桨转舵变频电机失去电力供应，舵桨转向控制失效，船舶操纵能力严重受限。

2) 该船在电力系统安全隐患未消除的情况下，以“带病”的“一用一备”供电模式继续执行观光游览任务，冒险开航，在 1# 日用逆变器停机后，“带病”的 2# 日用逆变器不能及时投入使用。

3) 应急处置不当，船长指挥应急抛锚不当，未能有效控制船舶，未及时提醒并组织乘客做好安全防护。

(2) 间接原因

1) 涉事企业缺乏严格的内控机制

船舶远程管理存在安全风险；电子显示屏存在冲击交流电网的安全隐患；船舶隔离变压器不符合现行内河船舶建造规范要求；船舶日用逆变器的自动切换功

能未得到实船验证；操舵装置动力设备缺应急电源，安全可靠性和有待提高；涉事企业关键岗位人员对电池动力船舶及其关键设备的检修能力不足；制定的保养检查周期不满足要求；电池动力船舶系统理论培训不足。

2) 相关船舶检验技术标准不够完善

电池动力船舶针对推进装置、转舵装置、逆变器、交流配电板等关键性设备的内容较少，有关要求不够具体。

7.1.3 事故警示

在船舶航行中，为防止船舶失电造成事故，最有效的方法是平时做好对电力系统的维护保养以及相关船员的操作性训练，如：

(1) 开航前检查必不可缺

日常航行采用船级社认可的“一用一备”供电模式，关键设备要处于良好状态，不“带病”工作，确保船舶适航性。

(2) 做好船舶日常维护保养至关重要

做好动力电池、电池管理系统、配电系统、用电设备等日常维护保养和功能测试工作，按照规定时间开展绝缘测试，并做好相关记录，确保状况良好。

(3) 加强船员业务培训

制定培训计划，严格按照计划组织全体船员尤其是轮机部船员，开展机电设备使用、维护和日常管理方面的相关业务培训，提高船员的操作能力和管理水平。

(4) 加强船舶失电应急演练

严格按照船舶年度演习和训练计划，组织全体船员开展船舶失电应急演练，提升船员应急反应能力，确保在船舶失电应急情况下，能立即启动应急处置程序，按照《应变部署表》迅速开展应急行动，采取正确有效的应急处置措施。

(5) 企业建立完善的安全管理体系并确保有效实施

航运企业应将机电设备的操作、维护、日常管理以及涉电作业等纳入安全管理体系或安全管理制度进行管理，完善相关安全操作规程，监督指导船员严格按照规程操作。

(6) 企业加强船舶维护保养制度的检查指导

航运企业应按照相关公约、法规、规范规定，结合船舶机电设备的实际情况，制定维护保养计划，督促船舶按维护保养周期执行，及时检查维护保养，准确记录。持续跟踪检查船舶机电设备维护保养落实情况，掌握其工作状况，必要时给

予指导或岸基支持，确保船舶的机电设备正常运行。

7.2 船舶动力电池失火事故案例

7.2.1 事故简况

2021年3月，挪威一艘混合动力船舶突发火灾。事发之后，船员迅速被疏散，该船被拖航至安全水域。尽管情况已稳定，但火灾可能导致船上电池暴露在高温下，在封闭的舱室中产生爆炸性及易燃气体。因此，有关部门当时禁止任何人登船甚至接近船舶，并在该船周围设立了300米的安全区。

7.2.2 事故经过

2021年3月10日，该混合动力船舶停泊在挪威XX港充电，第二天该船按照计划开航。据了解，船员已经为航行途中将遇到的恶劣天气提前做好了准备，并在出发前对电池与机舱进行了检查。

船舶在沿着XX河航行时使用电力推进。离开XX河时，启用了柴油机，以便给电池充电。约1500时，船长提高航速开始充电。由于海面风浪加大，船长在1525时左右再次降低航速。

约1527时，所有12个电池组断开，驾驶室的EMS4板块警报响起。船长和轮机员认为这是误触所造成。

船长从驾驶室开始排查故障，排查结果显示所有系统工作正常。此外，他认为误触所导致的问题并不严重，因为他们在之前的航行中已经经历过几次类似问题。在排查完大约两分钟后，船长让轮机员接替驾驶，他决定去BMS板块所在的左舷机舱进行进一步的故障排查工作。

当EMS系统也发出警告“BMS serious”时，船长降低航速。BMS系统记录到电池组6中的模块过热。在驾驶室的显示反馈为严重故障，但警报并未提供进一步细节，需要进行进一步检查。

大约1533时，船上火警警报响起。驾驶台火警板块显示右舷机舱和右舷电池室失火。与此同时，船长在控制面板上检查发动机状态，并通过安装在机舱内的摄像机监控机舱，柴油机的压力和温度读数显示正常。

当轮机员去机舱检查的途中，电力突然中断，大约1分钟后又恢复正常。驾驶台上的EMS板块未显示电池消耗的迹象。

在去往机舱途经主甲板时，轮机员发现虽然BMS板块上触发了许多警报，但230V板块显示一切正常，同时注意到应急发电机启动指示灯亮起。

由于燃料供应被切断，位于右舷的应急发电机最终失灵，航行失去了控制，屏幕和控制面板黑屏。1539 时，应急电源启动，只有最重要的电气部件在工作。船长试图将船舶驶向就近港口，利用左舷发动机和波浪方向来维持方向稳定。

1541 时，船长通过 VHF channel 6 发出了求救信号。之后船员迅速被疏散，该船也被拖航至附近的港口水域。

7.2.3 事故原因分析

(1) 船上的火灾很可能是由于海水进入通风系统并与电池系统的高压部件接触，从而导致短路、电弧和火灾。调查还表明，低 IP 等级的电气设备外壳使得海水和空气能够进入电池模块。

(2) 灭火剂的延迟释放意味着它几乎没有起到任何抑制作用，不能阻止火势的发展，但在短时间内具有冷却作用。调查表明，缺乏明确的灭火策略来限制锂电池起火时的损害范围。

(3) 调查还发现了几个与使用锂电池相关的风险在设计中没有得到充分识别或解决。

7.2.4 事故警示

锂离子电池作为纯电池动力船舶的动力唯一来源，其系统安全关系到船舶本质安全。锂离子电池本身存在诸如电池自身安全性风险、电池系统缺陷及保护系统不到位风险、锂离子电池使用环境温升风险、能量集聚风险、碰撞风险、电池管理系统故障或与船舶管理系统协调风险、管理与维护不当风险等，这些风险会直接或间接导致锂电池发生热失控。锂离子电池热失控链式反应如图 7.2.1 所示，锂离子电池燃烧过程如图 7.2.2 所示。

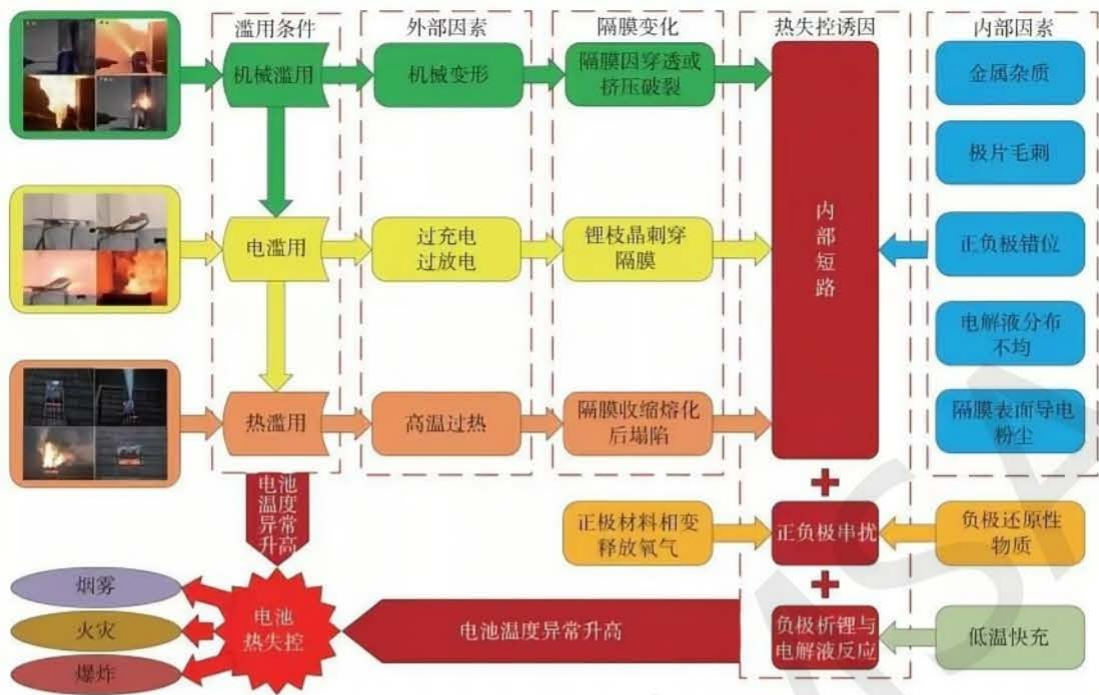


图 7.2.1 锂离子电池热失控链式反应图

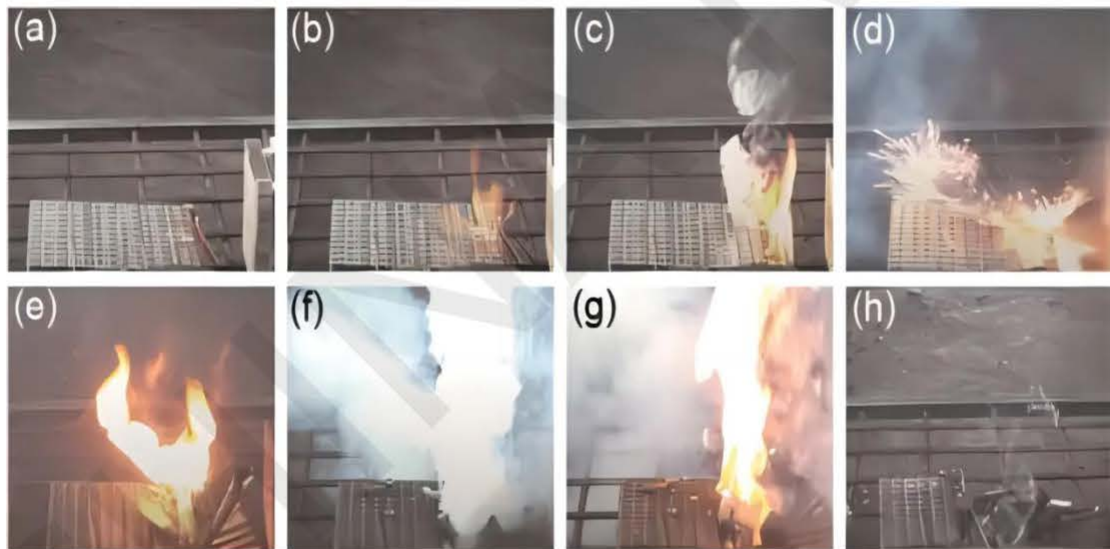


图 7.2.2 锂离子电池燃烧过程示意图

船舶动力电池失火预防主要从几个方面考虑：

- (1) 在电池层面，需要严格按照相关规范要求开展型式认定和产品认可，应使用有船级社认可证书的锂离子电池和电池系统；
- (2) 在系统层面，BMS 需满足相关规范的规定，对于电池系统的设计（包括电池包、箱柜等）需严格按照规范执行；
- (3) 在船舶布置层面，应充分考虑船舶用途、舱室结构以及锂离子电池的布置和防护要求；

(4) 在航运企业管理层面，应完善安全管理体系并确保有效实施，如加强船员业务培训、制定应急预案、建立监督检查机制、制定安全营运管理制度及相关指导手册等；

(5) 在船舶管理层面，要严格按照企业管理体系文件要求进行各项操作，加强应急培训和演练，定期做好电池系统设备维护检查，发现安全隐患及时整改消除。

7.3 电池管理系统失电致全船失电事故案例

7.3.1 事故简况

2024年2月3日某游船在航行过程中，左右舷电池管理系统（BMS）失电，全船电池因电池管理系统（BMS）失电而自动保护停机，全船失电且应急供电未生效。故障发生约30秒后应急供电生效，左右舷电池管理系统（BMS）恢复供电，船员再次启动船电，在交流400V供电后再次触发左右舷电池管理系统（BMS）失电，全船电池因电池管理系统（BMS）失电而自动保护停机，全船失电且应急供电未生效故障。船舶丧失航行能力。

7.3.2 事故原因分析

经事后检查，该船应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器故障，且内部二极管已击穿，整流器内部有大量金属粉尘。因整流器与应急充放电板的蓄电池输出端直流连接，故障的整流器使得应急充放电板的蓄电池无法正常投入供电。另该船左右舷电池管理系统（BMS）仅使用应急充放电板供应的 DC24V 电源一路电源，应急充放电板不能正常供应 DC24V 电源后，左右舷电池管理系统（BMS）失电，全船电池保护停机，全船失电。全船失电后应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器前端 AC380V 也失电，30 秒后应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器保护停机，应急充放电板蓄电池可正常供电使用，左右舷电池管理系统（BMS）恢复使用。但重新启动船电后，应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器前端 AC380V 再次供电，导致应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器重启，船舶进入故障循环。

7.3.3 事故教训

(1) 该船电池管理系统（BMS）控制电取电设计不合理，未做到两路电源冗余，一般应供应一路 AC220V 主电源和一路 DC24V 备用电源，且两路电源互不影响，自动切换。

(2) 应急充放电板设计不合理，应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器与应

急蓄电池输出端应加装二极管隔离，保证整流器故障时不影响应急蓄电池的正常投入。

(3) 应急充放电板 AC380V 转 24V 整流器内部发现大量金属粉尘，推断金属粉尘是整流器故障的主要原因。说明船员的设备维护保养上存在纰漏，未做到设备干净整洁的检查工作。应加强平时维护保养工作，保证供电设备的干净整洁。

7.4 锂离子电池热失控造成爆炸事故案例

7.4.1 事故简况

2019 年 10 月 10 日，挪威渡船公司 Norled 旗下“MFYtteroyningen”号客船的蓄电池室发生小型火灾事故，之后该船以自身动力返回港口，乘客和船员安全撤离。然而在当天晚间，该船蓄电池室发生了严重的气体爆炸，造成重大破坏。

7.4.2 事故原因

火灾事故导致船上电池暴露在高温下，在封闭的房间和舱壁中产生爆炸性及易燃气体，从而导致锂离子电池产生热失控，一旦某个电池单元进入热失控状态，它会产生足够的热量，使得相邻的电池单元也进入热失控状态。

在产热的同时产生有机蒸汽、烷烃类、 O_2 、 H_2 和 CO 等易燃易爆气体，导致电池内部气压增高，超过安全阀压力时，电池安全阀打开，气体通过泄压口向电池外部喷射，发生初爆。

当电池放热温度较高时（研究表明热失控电池内部温度可达 $1000^{\circ}C$ ），喷射气体容易被点燃，经常出现射流火现象。电池内部温度持续升高，化学反应加剧，在短时间内电池内部温度和压力激增，向外喷射火星，伴随着较大的冲击力，发生燃爆。

当狭小空间存在多个电池时，单个电池的热失控放热后，温度上升引起其他电池热失控，喷射易燃易爆气体如多米诺骨牌一样叠加能量，从而产生爆炸。随着每个电池单元轮流破裂并释放其内含物，进而产生一种反复燃烧的火焰，造成严重的后果。

7.4.3 事故警示

(1) 在电池层面，需要严格按照指南要求开展型式认和产品认可，应使用有 CCS 认可证书的锂离子电池和电池系统；

(2) 在系统层面，BMS 需满足指南的规定，对于电池系统的设计（包括电池包、箱柜等）需严格按照指南执行；

(3) 在船舶布置层面，应充分考虑不同用途、不同舱室及甲板锂离子电池布置和防护措施；

(4) 在船舶管理层面，需完善监督管理制度，如加强船员培训、设置应急预案、建立监督检查机制、制定营运管理规范及指导手册等。

7.5 船舶单机舵桨变频器故障失控冲滩事故案例

7.5.1 事故简况

2023 年 5 月 27 日上午 10 时许，某纯电池动力游览船在观光游览航程中，驾驶员采用三机联动模式操控航行，2#（中）推进主机转舵变频器突遇故障失效并在驾驶室控制面板发出报警，具体故障为“制动斩波器接线故障”，如图 7.5.1 所示。此时，左右两台舵桨并未发生报警，驾驶员未将三机联动操控模式调整为单机操控模式，因舵效不正常，驾驶员判断舵桨控制失效采取了冲滩应急措施，冲滩后船体首尖舱水线以上首部外板有局部轻微破损和变形，首升高甲板舷墙部分结构轻微变形。

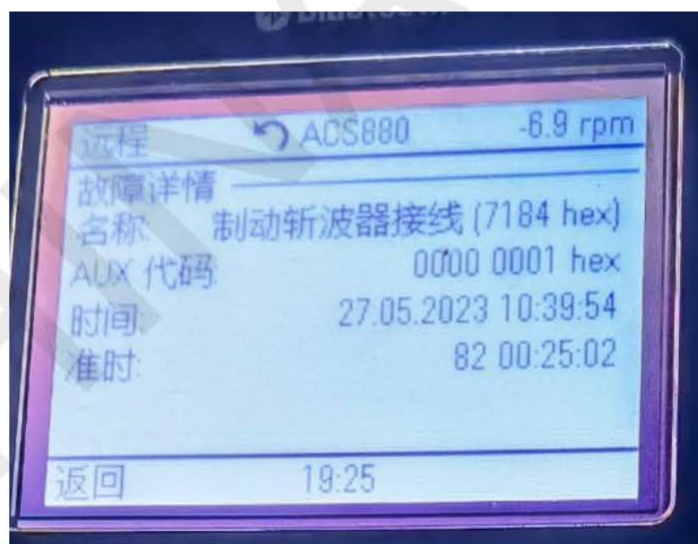


图 7.5.1 驾驶室控制面板报警

7.5.2 事故原因分析

(1) 直接原因

1) 该船 2#舵桨装置的回转机构变频器自带软件稳定性导致的故障，具体为内部制动斩波器故障，转舵电机制动过程中直流电压过高，泄压到制动电阻时，需要制动电阻消耗多余能量，此时若制动斩波器无法启动，会导致变频器报警停

机，造成 2#舵桨无法正常工作。

2) 应急处置不当，在 2#（中）推进主机转舵变频器突遇故障失效，左右两台舵桨并未发生报警时驾驶员应急处置不当，未及时三机联动操控模式调整为单机操控模式，并且主观判断舵桨控制均失效采取了冲滩应急措施，造成船舶破损和变形。

（2）间接原因

1) 涉事企业缺乏严格的内控机制

涉事企业关键岗位人员对电池动力船舶及其关键设备的操作不熟练，在关键设备发生故障时的应急处置演练不够，未能做到快速并正确处置关键设备故障。也反映了相关企业和船舶对船员的电池动力船的知识技能培训还不够。

2) 关键设备的检验和试验标准不够完善

电池动力船舶针对推进装置、转舵装置、逆变器、交流配电板等关键性设备的检验和试验相关标准还需要进一步加强。

7.5.3 事故警示

在船舶航行中，为防止船舶设备故障导致险情，要做好新能源设备的维护保养以及相关船员的业务培训，如：

（1）做好船舶日常维护保养

做好动力电池、电池管理系统、配电系统、用电设备等日常维护保养和功能测试工作，按照规定时间开展测试和试验，确保设备工况良好。

（2）加强船员业务以及应急处置培训

加强对新能源船舶船员的培训，特别是对新能源设备使用及应急处置的培训，制定培训计划，严格按照计划组织关键岗位船员开展电动船关键设备操作、维护和日常管理方面的相关业务培训，并且开展船舶紧急情况下应急处置演练，提升船员应急反应能力，采取正确有效的措施应对可能产生的故障。

（3）企业建立完善的安全管理体系并确保有效实施

将新能源船舶（电池动力船舶）按照《国内安全管理规则》（NSM）建立安全管理体系并纳入审核范畴。航运企业建立安全管理体系，完善相关安全操作规程，监督指导船员严格按照规程操作。

（4）加强新能源船舶的检验力度，重点加强对新能源船舶关键设备的试验和检验。

7.6 航行中 DC/DC 单元故障导致全船失电 8 分钟事故案例

7.6.1 事故经过

某船航行过程中，发现正在使用的电池组中 2 号和 4 号 DC/DC（直流电源控制模块）单元出现间断性故障，未及时向海事管理机构报告。为方便船员对该模块进行检修查明原因，船员将 EMS（能量管理系统）转至半自动模式，电池箱控制位置转至就地模式，启动合闸，满足船舶航行要求。但是，出现绝缘低报警导致 2 号和 4 号 DC/DC 单元仍然处于故障报警状态，无法使用。在使用 4 组电池供电的情况下继续航行。

船舶抵达扬州港附近掉头计划靠码头前，因流速较快、采用大舵角、主推电机转速 120 转左右且侧推重载运行，负荷突然加大，在提供电源的 1 号、3 号、5 号、6 号 4 块 DC/DC 单元模块出现过流报警跳闸。此时 EMS 控制模式为半自动，所以失电后备用发电机不会自动切换至机组模式并启动供电，致使全船失电。船舶电池动力系统故障失去动力，发生船舶失控险情，经过全力抢修约 7 分钟后动力恢复，船舶得到控制。险情未造成人员伤亡和水域污染。靠泊码头后，检查热失控报警输出线路，发现与 2 号和 4 号 DC/DC 单元电池箱通讯线插头针脚有短路烧坏痕迹。重新启动连接该电池箱，模拟对应插脚接线短路，故障重现。失控原因为该电池箱通讯线插头短路烧坏引起热失控误动作。

7.6.2 事故原因

（1）直接原因

船舶顶流调头，主推、侧推都大功率使用，导致直流汇流排瞬时负荷过大，在提供电源的 1 号、3 号、5 号、6 号 4 块 DC/DC 单元模块出现过流报警跳闸。

（2）间接原因

2 号和 4 号电池箱通讯线插头针脚短路引起热失控误动作导致 2 号和 4 号 DC/DC 单元停用，并且为了对该模块进行检修查明原因，船员将 EMS 转至半自动模式，电池箱控制位置转至就地模式。

7.6.3 事故警示

（1）做好船舶日常维护保养

做好动力电池、电池管理系统、配电系统、用电设备等日常维护保养和功能测试工作，按照规定时间开展测试和试验，确保设备工况良好。

（2）加强船员业务以及应急处置培训

加强对新能源船舶船员的培训，特别是对新能源设备使用及应急处置的培训，开展船舶紧急情况下应急处置演练，提升船员应急反应能力，采取正确有效的措施应对可能产生的故障。本案例中，电池供电功率受限情况下应避免主推、侧推同时大功率使用，必须要使用时要做好预案，发生失电时采取紧急措施快速恢复供电。

（3）企业建立完善的安全管理体系并确保有效实施

将新能源船舶（电池动力船舶）按照《国内安全管理规则》（NSM）建立安全管理体系并纳入审核范畴。航运企业建立安全管理体系，完善相关安全操作规程，监督指导船员严格按照规程操作。

选学内容：电池动力船舶箱式电源系统

本模块以“绿水 01”和“江远百合”轮为例。

8.1 箱式电源换电流程简介

如图 8.1.1 所示，流程简介：

(1) 利用港口吊装设备对箱式电源进行吊装移动(从换电货船到运货卡车)，完成换电操作流程；

(2) 利用卡车进行对箱式电池从港口到电厂运输操作；

(3) 箱式电池卡车上，直接利用电厂连接充电，无需卸下充电。

特点：换电形式相比充电形式具备换电集装箱形式支持船电分离模式。

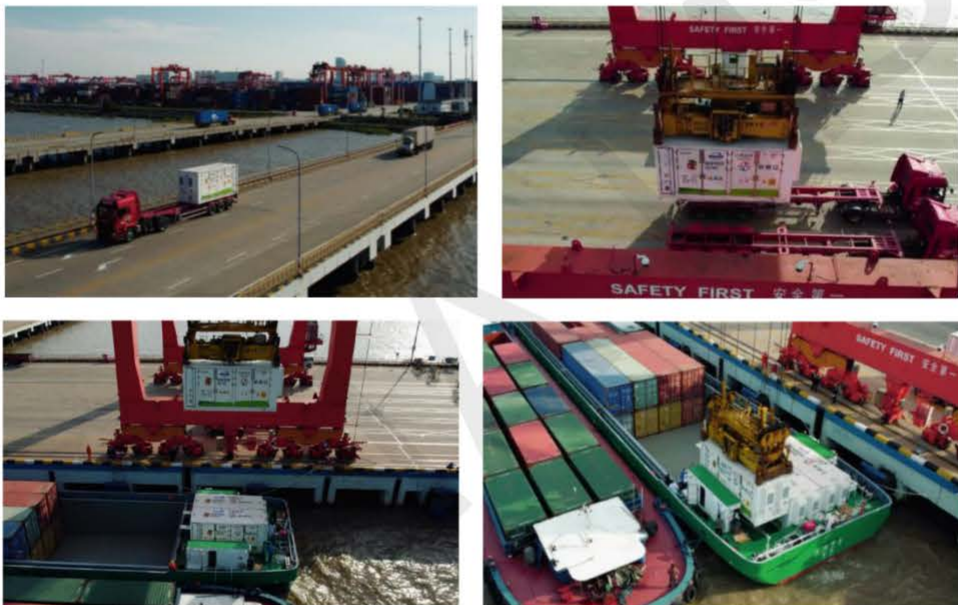


图 8.1.1 “江远百合”号换电实景图

8.2 箱式电源的组成、布置要求与主要功能

8.2.1 组成与结构

箱式电源包含电池系统、插拔件、消防系统、防火设计、空调系统、隔振系统。

(1) 电池系统主要由电池包、高压盒、主控盒等组成。

(2) 插拔件主要由高压插拔件、低压插拔件、水路插拔件组成。

(3) 消防系统主要由火灾探测器、可燃气体探测器、七氟丙烷灭火和水喷淋消防组成。

(4) 防火设计主要是 A60 分舱、顶部底部、空调侧 A60 和两侧 A60 防火门组成。

(5) 空调系统主要由空调和风管组成。

(6) 隔振系统采用钢丝隔振器。

其总体布置如图 8.2.1 所示。

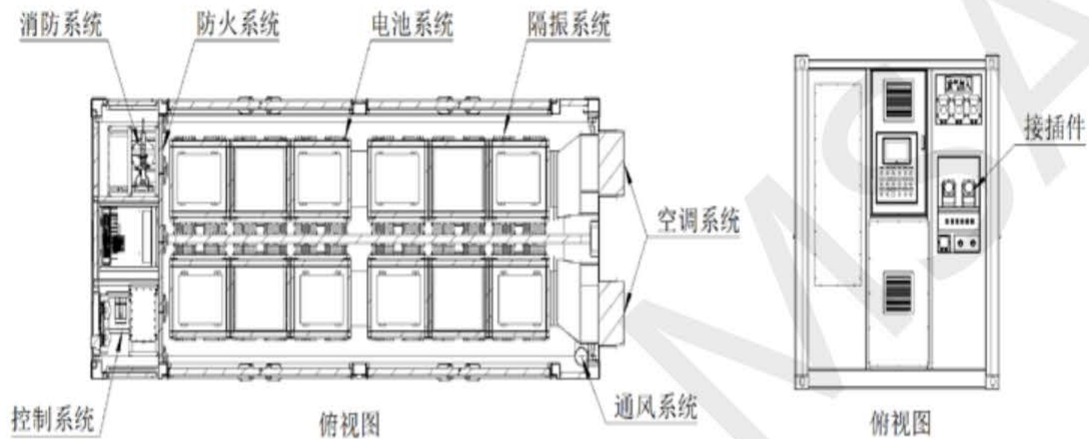


图 8.2.1 箱式电源设备布置图

8.2.2 在船上布置要求

箱式电源内采用电池舱、汇流舱、消防舱、空调舱分开布置的方式。电池舱内上下面对面各布置 4 个，共 8 个蓄电池箱（柜），箱式电源蓄电池箱（柜）底部由八颗螺栓固定，背面配置多个支架支撑，产品所有的电池托架、蓄电池柜都应为碳钢材料，可以承受吊装过程冲击力对电池的影响，箱式电源内电池包与舱壁及上方及侧面甲板之间均留有不低于 150mm 的空间，以利于通风散热。每个蓄电池箱（柜）内安装多个电池包，电池包内蓄电池模块布置简洁，便于更换、检查、测试和清洁，蓄电池柜右侧布置两台空调外机，消防、汇流柜、空调外机分别集成在消防舱、汇流舱、空调舱内，各个功能舱均与电池舱隔离。

8.2.3 电池系统（含 BMS）的组成与功能

电池系统主要包括 8 个蓄电池柜和一个电池管理系统（BMS），为箱式电源主要功能单元，电动船的能源核心，主要作用为电动船提供电力输入，保证电动船能够在正常在水面上行驶。

电池系统中，每个蓄电池柜容量为 $0.2\text{MW} \cdot \text{h}$ ，含 17 个电池包和一个高压箱，电池包内含有两个 1 并 8 串电池模块，高压箱将 17 个电池包能量汇到一起，统一输出到汇流柜。

电池管理系统（BMS）控制器主要由从控、簇控、域控组成，线束主要由高压箱外连线束、高压箱内连线束、簇控线束、加热供电线束、从控线束组成。电池管理系统（BMS）主要用于电池的充放电管理、状态监测与分析、电量管理、保护等，通过系统性地管理，可避免电池过充、过放、过温等情况出现，提高电池性使用寿命。

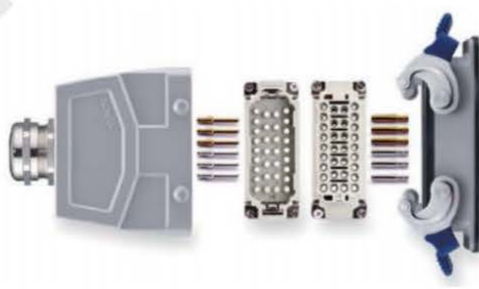
8.2.4 外部接口（插拔件）



图 8.2.2 高压输出接口示意图



8.2.3 交流输入接口示意图



8.2.4 通讯接口示意图

外部接口由高压插拔件、控制电源插拔件、信号插拔件组成。

高压插座用来给电池系统放电与充电。

控制电源插拔件用来通过 220V 交流控制电和 24V 直流控制电。

信号插拔件用来通讯、急停消防报警、消防控制和荷电状态（SOC）低报警。

表 8-2-1 接口系统参数表

高压插拔件参数	
额定直流电压	1000Vdc
芯数	4
每芯额定电流	250A
电缆截面积	≤120mm ²
控制电源插拔件参数	
工作温度	-55℃~+125℃
芯数	4
工作电流	90A
电缆截面积	≤16mm ²
机械寿命	≥5000 次
信号插拔件参数	
工作温度	-55℃~+125℃
芯数	14
工作电流	3A
电缆截面积	≤0.5mm ²
插拔次数	≥5000 次

8.2.5 通风、空调系统的功能设计

空调系统安装于集装箱内，分外机和内机，内机安装于电池舱内侧；外机安装于独立的空调间以便进行冷热交换。空调安装界面具有 A60 防火等级。电池系统运行正常时，由空调系统进行通风，并由电池系统或外部电源对空调进行供电。

箱式电源电池舱内发生火情时，以便及时排出蓄电池热失控情况下产生的可燃气体与可燃气体探测器进行联锁，当探测到可燃气体浓度大于其爆炸下限（体积分数）的 20%时，风闸打开。风闸打开到位后，自动启动应急排风机排出可燃气体。当消防启动喷放灭火剂时，应急排风扇停止工作，风闸失电关闭。

8.2.6 消防系统的功能设计

消防系统主要由感烟探测器、感温探测器、气体探测器、火灾报警控制器、气体灭火控制主机、联动电源箱、紧急启停按钮、声光报警器、警铃、放气指示灯等组成。

消防系统具有自动、电气手动两种控制方式。各保护区均设二路独立探测回路，当第一火灾信号时，发出警报，指示火灾发生的部位，提醒工作人员注意；当第二路探测器亦发出火灾信号后，自动灭火控制器开始进入延时阶段（0~30秒可调），延时过后，向控制对应保护区的启动瓶发出灭火指令，打开电磁阀，然后打开储气瓶，向失火区进行灭火作业，同时报警控制器接收压力讯号器的反馈信号，控制面板喷放指示灯亮；当报警控制器处于手动状态，报警控制器只发出报警信号，不输出动作信号，由值班人员确认火警后，按下报警控制面板上的应急启动按钮或保护区门口处的紧急启停按钮，即可启动系统，喷放灭火剂。

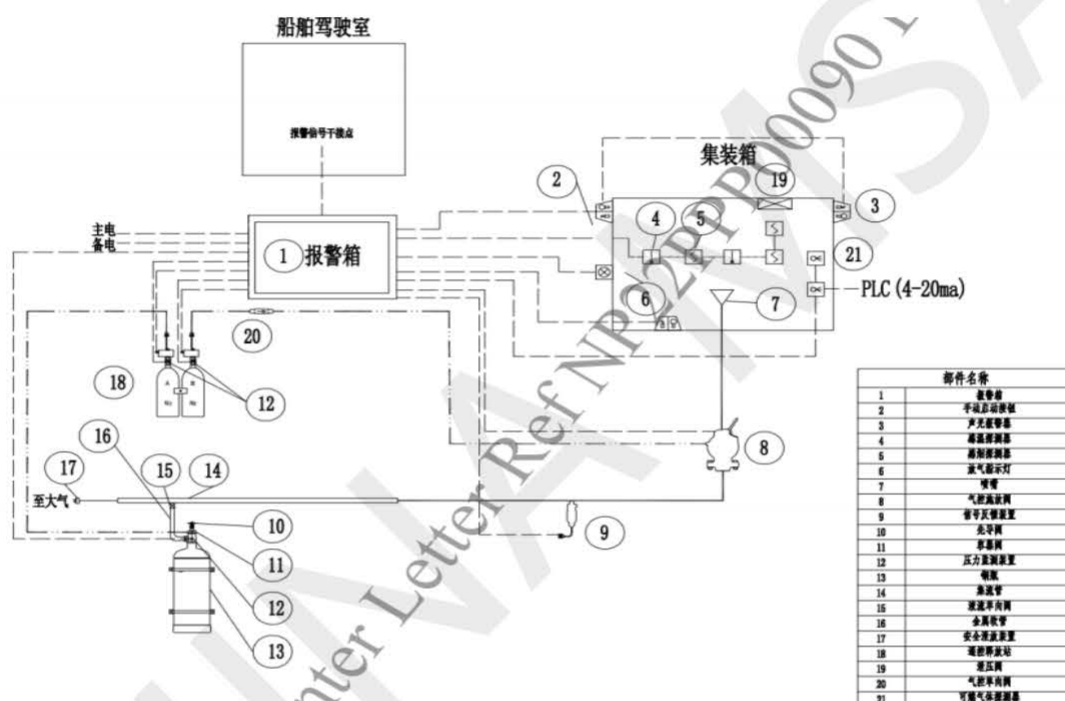


图 8.2.5 船用七氟丙烷灭火系统原理图

8.2.7 紧急切断系统的功能设计

箱式电源配置有紧急切断系统，紧急切断系统可以在箱式电源出现故障时，紧急切断内部电路，仅保留部分安全功能的一种系统。

当紧急切断系统启动时，系统将切断箱式电源高压箱内的高压直流继电器，使蓄电池箱（柜）于外部断开，形成故障隔离，保护正常设备不被故障设备损坏。

当切断辅助电气设备电源后，由于 UPS 的存在，辅助电气中的安全设备仍然运作，保障了系统的安全。

应急照明、视频监控、探测器均为防爆型，空调为非防爆型，当紧急切断系统启动后，普通照明、空调关闭，应急照明、视频监控、温感探测器、烟感探测器、可燃气体探测器均正常运行。

8.3 箱式电源的吊装与安装

8.3.1 吊装方法

箱式电源通过布置 1 台码头吊车，从岸上放置到船上，或从船上放置到岸上，吊车与集装箱连接为标准吊具。吊装示意图 8.3.1。



图 8.3.1 箱式电源的吊装

8.3.2 安装方法

箱式电源吊到甲板上可以通过甲板底锁固定，对箱式电源进行检查，没有问题后，将甲板上的船上插头按照先接 220V 和 24V 控制电源插座，再接信号插座，最后接高压插座的顺序，将插座与插头对应连接。插头连接位置见图 8.3.2。

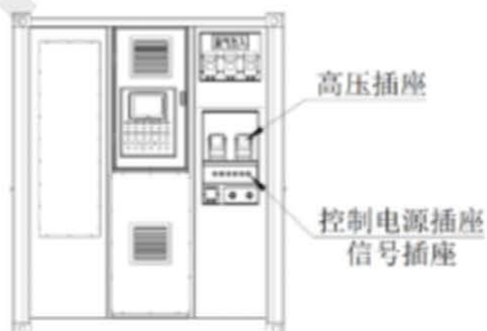


图 8.3.2 插头连接位置图

8.4 箱式电源系统的操作与维护

8.4.1 箱式电源系统的操作面板

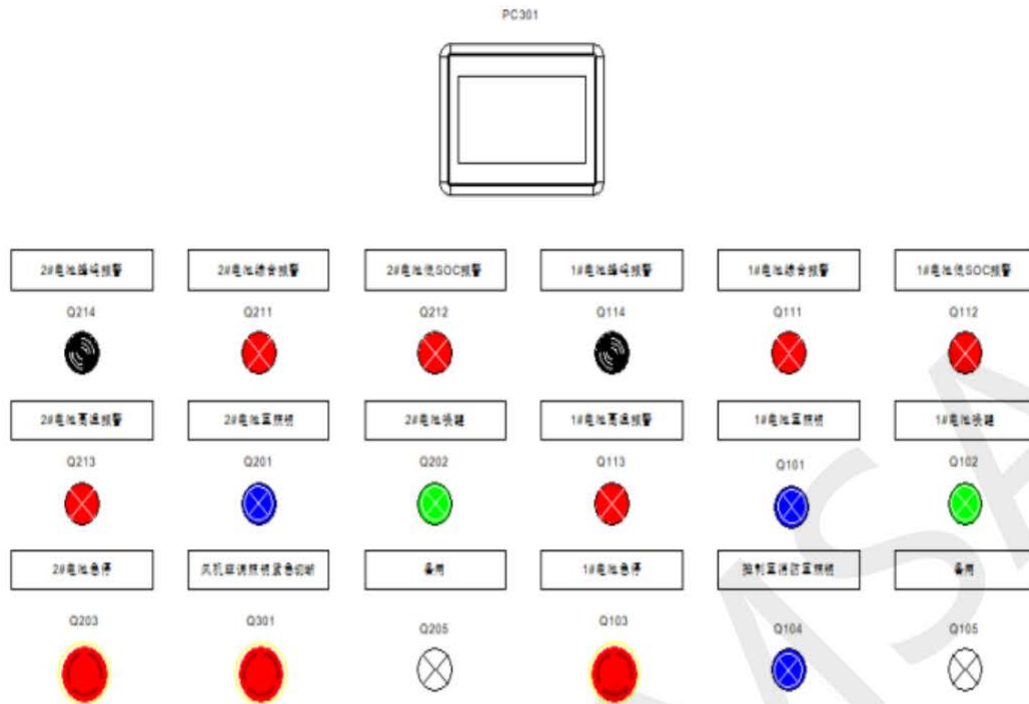


图 8.4.1 面板布局图

表 8-4-1 设备类型表

功能描述	颜色	备注
触摸屏	—	—
1#蜂鸣报警	黑	蜂鸣器
1#综合报警	红	指示灯
1#低 SOC 报警	红	指示灯
1#高温报警	红	指示灯
1#电池室照明	蓝	自锁带灯按钮
1#休眠开关	红	自锁带灯按钮
1#急停	红	自锁按钮
控制室照明	蓝	自锁带灯按钮
2#蜂鸣报警	黑	蜂鸣器
2#综合报警	红	指示灯
2#低 SOC 报警	红	指示灯
2#高温报警	红	指示灯
2#电池室照明	蓝	自锁带灯按钮
2#休眠开关	红	自锁带灯按钮
2#急停	红	自锁按钮
风机空调紧急切断	红	自锁按钮

● 触摸屏：显示电池系统电压、电流、温度、空调状态等信息。

● 1#蜂鸣报警：1#电池子系统故障状态下用声音报警。

● 1#综合报警：1#电池子系统故障状态下用颜色报警。

- 1#低 SOC 报警：1#电池子系统 SOC 低于 20%，报警提示。
- 1#高温报警：1#电池子系统温度 $>65^{\circ}\text{C}$ 时，报警提示。
- 1#电池室照明：控制 1#电池室照明，并反馈照明状态。
- 1#休眠开关：1#电池子系统 BMS 电源供电按钮，在更新程序时使用，非更新程序状态，要处于常闭状态。
- 1#急停：用于紧急情况下，断开 1#电池子系统高压连接。
- 控制室照明：控制控制室照明，并反馈照明状态。
- 2#蜂鸣报警：2#电池子系统故障状态下用声音报警。
- 2#综合报警：2#电池子系统故障状态下用颜色报警。
- 2#低 SOC 报警：2#电池子系统 SOC 低于 20%，报警提示。
- 2#高温报警：2#电池子系统温度 $>65^{\circ}\text{C}$ 时，报警提示。
- 2#电池室照明：控制 2#电池室照明，并反馈照明状态。
- 2#休眠开关：2#电池子系统 BMS 电源供电按钮，在更新程序时使用，非更新程序状态，要处于常闭状态。
- 2#急停：用于紧急情况下，断开 2#电池子系统高压连接。
- 风机空调照明紧急切断：用于紧急情况下，断开风闸、应急排风机、电池舱风机、照明、1#空调、2#空调的电源，电池下高压。

8.4.2 箱式电源系统的使用注意事项

(1) 船舶航行前检查

观察船舶工控机或箱式电源显示器，确认电池系统状态正常，无异常报警信息。当电池系统电量低于 50%时，应及时充电。

(2) 正常运营的使用要求

- 1) 电池舱室环境温度应控制在 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，保障电池在最佳温度范围内使用。
- 2) 每日累计充电电量，尽量不超过额定总电量的 1.5 倍。
- 3) 每三个月至少做一次“电池保养”，防止造成电池损伤，具体操作方法详见前面相关章节。
- 4) 每三日至少做一次自动满充电。

若环境温度 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ，白天补电次数不超过 2 次，每次时间不超过 30 分钟；若单次补电时间超过 30 分钟，仅允许补电 1 次。以避免电池高温影响到正常运营。

(3) 久放不用的使用要求

- 1) 电池存放的最佳荷电状态 (SOC) 区间: 40%~80%。
- 2) 电池系统的存放环境要求通风、干燥、不受阳光直晒、不受雨淋、远离热源。
- 3) 必须每三个月做一次“电池保养”, 防止造成电池损伤。
- 4) 久放首次使用前, 为激活电池系统需至少做一次的“电池保养”, 以恢复电池的性能到最佳状态。

(4) 箱式电源系统的保养

保养操作流程:

- 1) 调整电池电量荷电状态 (SOC) 在 25%~35%区间。
- 2) 电池系统下高压, 复位 BMS 唤醒按钮, 待显示器显示 BMS 通信丢失持续 5 秒后, 按下 BMS 唤醒按钮, 保证电池系统处于高压下电状态。
- 3) 保持 BMS 系统处于低压上电状态 (显示器不显示 BMS 通信丢失), 静置 8~10 小时。
- 4) 静置结束后进行一次满充电。

执行步骤 3) 期间, 不允许电池系统上高压。若因运营时间紧张, 无法满足静置时间要求, 可将步骤 3) 静置时间调整至 3~6 小时, 将保养周期由三个月调整为一个月。

保养完成后, 1 个月内如连续出现两次以上电芯压差/荷电状态 (SOC) 差异过大报警时, 请联系售后部或服务 station 获得帮助

(5) 定期维护要求

为保障发挥电池最佳性能及使用安全, 电池系统需每年至少做一次全面维护, 具体检查项目如下:

- 1) 电池系统的高低电压线束及连接器有无擦伤、破损、松动。
- 2) 电池箱或高压箱是否存在污泥、裂缝、变形、异味、鼓胀。
- 3) 电池箱的气压平衡阀或防爆阀有无损坏。
- 4) 电池箱、从高压盒与电池托架连接应无松动。
- 5) 电池托架, 控制柜与船架连接应牢固可靠。
- 6) 报警灯、急停按钮、工控机等设备可正常使用。

执行检查动作前, 为确保人身安全, 请务必穿戴绝缘鞋、绝缘手套、防静电服及护目镜等防护用品。

如检查发现异常，请联系售后部或服务 station 获得帮助，切勿擅自维修。

8.5 应急处理方法

8.5.1 航行交通事故

(1) 若对电池系统造成碰撞挤压变形，电箱脱落、高低压连接器损坏或脱扣，强制按下急停按钮开关，断开日用 220VAC 和 24VDC 电源，保障电池系统安全，然后按应急预案迅速撤离到安全区域。

(2) 若对电池系统造成碰撞挤压变形，导致舱室进水，强制按下急停按钮开关，断开日用 220VAC 和 24VDC 电源，保障电池系统安全，然后按应急预案迅速撤离到安全区域。

(3) 通知售后部门，在对方给出电池安全判定结果前禁止使用发生事故的船舶。

8.5.2 火灾

当箱式电源出现严重事故或紧急情况时，需立刻启动紧急切断系统，根据消防报警装置判断是否出现火灾等事故，如出现火灾等严重安全事故，需立刻疏散人员，同时启动消防系统，对出现事故的箱式电源进行灭火，灭火过程需全程佩戴防毒面具等防护设备。如大火仍然处于失控状况，则启动电动船上吊机，直接将集装箱抛入临近的江、河、湖里，保证电动船的安全。

前面相关章节已详细介绍了关于电池动力船舶的应急处理，本章不再赘述。对箱式电源的应急处理可参照前面内容。

8.6 七氟丙烷灭火装置检查维护保养要求

(1) 本装置是一种新型的高效灭火装置，自动化程度高，密封性能要求很严格，因此必须建立相应的维护检查和保养，以及保持良好的工作状态。

(2) 在使用检查时，若发现启动钢瓶的充装氮气压力和灭火剂储液瓶充装压力的指示值降低于设计值的 90% 时，应查明原因并予重新充压。

(3) 日常应做好设备的维护保养工作。每季度检查灭火剂重量一次，凡灭火剂净重比充装量减少 5% 以上的，应查明泄漏原因并排除，再予重新充装。

(4) 每年应对本装置各阀件进行维护检查。应启动正常。无异常现象方可继续使用。

(5) 每年检查储液瓶的支撑情况是否良好，管道的吊架，挂钩及压板是否稳固。

(6) 每年对管道，喷嘴用压缩空气（或氮气）进行一次吹除，吹除时可分段进行。

(7) 每五年对连接管进行 8.0MPa 的水压强度和 5.3MPa 的气密性试验，性能合格方可继续使用，如发现老化，应更换后再用。

(8) 每五年对管道系统进行一次强度和气密性试验，试验压力按设计要求。

(9) 每五年对管道阀件及启动瓶组件进行拆洗重装，重新试验。

(10) 本装置灭火启用后，应将下列各部分恢复到原位置，使其工作正常，方可继续使用。