



“十三五”普通高等教育本科规划教材

船舶与海洋工程电气与信息类规划教材

船舶电气工程导论

许顺隆 主 编

林洪贵 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

船舶与海洋工程电气与信息类规划教材

船舶电气工程导论

主 编 许顺隆

副主编 林洪贵

编 写 俞万能 陈 武

主 审 张春来



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书共5章,内容包括概述、船舶电气设备、船舶电子仪器与设备、船舶自动控制系统、船舶电子电气工程展望。主要介绍船舶电子电气工程专业特点及课程设置和船舶电气工程发展过程与现状,船舶电力系统、船舶电机和船舶电力拖动等的组成、简单原理及其特点以及船舶电气设备的工作环境和规范要求,船舶航海仪器、船舶通信设备和船舶报警装置等电子设备及其构成系统的特点与相关知识,船舶计算机控制与局域网、船舶柴油主机遥控和船舶自动操舵系统的组成特点,未来船舶电子电气工程的发展趋势和展望。

本书适用对象主要为高等院校应用型本科船舶电子电气专业学生及相关专业(如电气工程、轮机工程、电气自动化)学生和企业工程人员等。本书还适用于对现代船舶电子电气技术和设备感兴趣的其他工程人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气工程导论/许顺隆主编. —北京:中国电力出版社, 2015. 12

“十三五”普通高等教育本科规划教材, 船舶与海洋工程电气与信息类规划教材

ISBN 978-7-5123-8853-6

I. ①船… II. ①许… III. ①船用电气设备-电气工程-高等学校-教材 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 017637 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 7.5印张 179千字

定价: 15.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

于马尼拉外交大会通过的经 2010 年全面修订的《1978 年海员培训、发证和值班标准国际公约》(简称 STCW78/10 公约)已于 2012 年生效,是在《STCW78/95 公约》的基础上对船员教育培训提出的新要求。STCW78/10 公约新设了船舶“电子电气员”(Electro-Technical Officer)岗位及其适任标准,这是 IMO 电子航海战略实施计划中的人才保证,是海员教育培训中新的课题。

航海教育既是学历教育,也是技能职业教育。要培养合格的现代化海船管理人才,航海教育不仅要符合我国船员考试、评估、发证的要求,还要符合《海员培训、发证和值班标准国际公约》(International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, STCW 公约)及其修正案的要求。随着船舶大型化、快速化、专业化、现代化的程度越来越高,电气技术、电子技术(包括电力电子、通信电子技术)、控制技术、计算机及其网络技术在船舶主、辅动力机械等各种自动装置中得到越来越多的应用,现有人员的知识和技能已远远不能满足现代船舶电子电气设备管理和维护的要求。

船舶电子电气工程导论就是针对轮机工程船舶电子电气方向的本科生开设的课程,主要介绍《STCW78/10 公约》所要求的船舶电子电气知识,介绍船舶电子电气工程专业特点与概况、课程设置与学习要求以及船舶电子电气工程技术发展方向。内容包括:现代船舶的电气、自动化、通信、导航助航等技术;船舶自动化、大型化的发展,船舶的复杂化和新技术的发展等新需求;通信、导航助航设备介绍;专业的发展方向。经过本课程学习,使学生了解《STCW78/10 公约》有关电气、电子与控制职能所要求的专业知识与技能,为今后课程学习指引方向。

全书共分 5 章。第 1 章概述,内容包括船舶电子电气工程专业特点及课程设置、船舶电气工程发展过程。第 2 章船舶电气设备,内容包括船舶电气设备的工作环境和相关要求、船舶电力系统、船舶电机、船舶电力拖动系统。第 3 章船舶电子仪器与设备,内容包括船舶航海仪器、船舶通信设备等电子设备及其构成系统的特点与相关知识。第 4 章船舶自动控制系统,内容包括船舶自动化概述、船舶计算机控制与局域网、船舶柴油主机遥控系统、船舶自动操舵系统。第 5 章船舶电子电气工程展望,内容包括电力推进船舶及其控制、船舶电力系统的展望和船舶综合发展的展望。

本书由集美大学轮机工程学院(简称轮机学院)许顺隆副教授编写了第 1 章部分、第 2 章、第 3 章及第 5 章部分内容并对全书进行统稿,轮机学院林洪贵副教授编写了第 4 章,轮机学院俞万能教授和陈武教授编写了第 1 章和第 5 章部分内容。编写人员具有船舶电气工程实际工作经验和多年的教学实践,本书为多年实践和教学总结,兼顾新知识、新技术;注重理论联系实际,注重内容的实用性和先进性。

本书得到江苏科技大学、海军工程大学、武汉理工大学、上海海事大学物流工程学院等兄弟院校的大力支持,在此,致以衷心的感谢!本书引用和参考了许多同行的论著、教材等

文献，以及船舶行业规范和培训，在此向所有作者们深表谢意！

由于编者水平和知识所限，书中难免存在欠缺和谬误，殷切希望广大读者、专家给予批评指正。

编 者

2015 年 11 月

第 1 章	概述	1
1.1	船舶电子电气工程专业特点及课程设置	1
1.2	船舶电气工程发展过程	3
	小结	4
	习题	4
第 2 章	船舶电气设备	
2.1	船舶电气设备的工作环境和相关要求	5
2.2	船舶电力系统	9
2.3	船舶电机	17
2.4	船舶电力拖动系统	23
	小结	33
	习题	33
第 3 章	船舶电子仪器与设备	34
3.1	船舶航海仪器	34
3.2	船舶通信设备	51
3.3	船舶报警系统	68
	小结	77
	习题	77
第 4 章	船舶自动控制系统	78
4.1	船舶自动化概述	78
4.2	船舶计算机控制与局域网	80
4.3	船舶柴油主机遥控系统	95
4.4	船舶自动操舵系统	100
	小结	103
	习题	104
第 5 章	船舶电子电气工程展望	105
5.1	电力推进船舶及其控制	105
5.2	船舶电力系统的展望	107
5.3	船舶综合发展的展望	109
	小结	111
	习题	112
	参考文献	113

第 1 章 概 述

《1978 年国际海员培训、发证和值班标准公约》及其 1995 年修正案（简称 STCW78/95 公约），对船舶电机员职务在船舶中不再作为强制配员，我国海事局因此不再对船舶电机员实施评估、考试和发证，电机员一度在一些船舶上消失。但随着船舶配套设备的技术发展，对船舶配备电机员或电工的呼声越来越高，因此在 2007 年 1 月 22 日至 26 日在伦敦召开的国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）培训和值班标准分委会第 38 次会议中，国际自由工会联合会（ICFTU）和国际船舶管理者协会（ISMA）以及德国等提交的提案中提到：随着科学技术快速发展以及计算机和电子设备在船舶营运中日益广泛运用，要求船员具备特殊知识和技能，为在整个航海界实现一致的培训和最低适任标准，有必要制定明确的培训和发证要求，以适应现代船舶技术发展需要。经过分委会的详细讨论，同意在 STCW 公约规则中引入电子船员的定义。按照进程，电子电气船员将作为船舶的强制配员写进经全面修订的 STCW 公约和规则终稿计划，并在 2010 年 6 月召开的马尼拉外交大会上通过。

根据 STCW78/10 修正案规定，主推进装置在 750kW 及以上的船舶都必须配备一名持有适任证书的电子电气员（Electro-Technical Officer）的强制性最低要求。

1.1 船舶电子电气工程专业特点及课程设置

1.1.1 船舶电子电气工程专业的培养目标

为了履行 STCW78/10 修正案，我国许多海运院校开始设置船舶电子电气工程专业或类似的专业，以培养船舶电子电气员。新的电子电气员不同于原来的船舶电机员，电子电气员的业务范围既包括原来的船舶电气部分，同时又包括过去船舶报务员所负责的电台通信设备及驾驶台上通信与导航设备等。

船舶电子电气工程专业的培养目标是：培养具有良好的科学、文化素养和高度的社会责任感，综合素质好，安全与环保意识强，富有创新意识与实践能力和实践能力，适应船舶自动化要求，熟练掌握电气技术、电子技术、控制技术、计算机控制及其网络技术等先进知识，满足国际海事组织 STCW 国际公约中规定的“电气、电子和控制工程”、“维护和修理”及“船舶操作控制和船上人员管理”三项高级海员职能要求，能够胜任现代船舶各项自动化装置的维护和修理任务，在航运及相关领域从事技术、管理、科研、教育等工作的船舶高级电子电气工程技术人员。

船舶电子电气工程是集船舶、电气、电子、计算机、自动控制、机械于一体的综合学科，集中体现船舶电子电气设备和系统的设计、制造、管理、使用、检验和维修等方面的先进理论和技术，属综合性、交叉性、实践性很强的专业。专业的主要特点是：既要掌握船舶电子电气工程相关理论知识，又要掌握船舶电子电气设备的维护和修理技能，因此是理论性和实践性都要求较高的专业。

1.1.2 船舶电子电气工程专业的知识体系

船舶电子电气工程专业的主要的知识领域包括电路与电子、控制理论与应用、计算机应用、电机与拖动、轮机工程、通信工程等，涉及电气、电子、控制、通信导航等方面的概念。根据国家教育工程专业认证要求和本专业培养目标要求，船舶电子电气工程专业的知识体系见表 1-1。

表 1-1 船舶电子电气工程专业的知识体系

分 类	知 识 领 域
通识教育类	人文社会科学、自然科学、计算机信息技术、体育、大学英语、大学语文、工程经济学、大学信息技术基础、C 语言程序设计、高等数学、线性代数、概率论与数理统计、复变函数与积分变换、大学物理等
学科基础类	轮机工程、电工理论与新技术、通信与信息系统、电力电子与电力传动、控制理论与控制工程、电路原理、模拟电子技术、数字电子技术、单片机原理及应用、机械基础、自动控制原理、电机学、电力电子技术、计算机网络、PLC 原理及应用等
专业类	船舶电力拖动、船舶电力系统、机舱自动控制、传感器与监测报警、船舶计算机与网络、航行设备与通信系统、船舶电气电子设备维护管理、船舶管理、专业英语船舶动力装置、船舶自动控制技术、船舶电站及其自动化装置、电子导航系统、船舶辅助机械控制系统、船舶电子与电气英语、专业英语听力与会话等
专业公共选修	船舶与海洋污染防治技术、计算机控制技术、组态控制技术、海事法规、船舶检验、船舶贸易与经济、航运概论、DSP 原理及应用、AutoCAD、液压传动与控制等

本专业的实践环节除了各相关课程实验外，还包括专业教育实践训练。专业教育实践训练主要项目有：熟悉与基本安全训练、精通救生艇筏和救助艇训练、高级消防训练、精通急救训练、工程训练、船舶航行教学实习、电气综合训练、海船船员适任考试强化训练、毕业实习与毕业论文。其中，熟悉与基本安全训练、精通救生艇筏和救助艇训练、高级消防训练、精通急救训练等需要通过海事部门组织的专门考核通过并取得相应的证书。电气综合训练项目包括船舶电工工艺和电气测试、船舶电站和轮机模拟器操作、船舶电气设备拆装、船舶电子与电气英语听力与会话强化训练，并参加国家海事局海船船员适任考试与评估。

船舶电子电气工程专业本科人才的培养，必须遵守 IMO 的 STCW 公约和国家海员培训、考试和发证的法规的强制性要求，并充分考虑国内外航运业的实际要求，同时也应注意到航海教育中含有与职业教育相同的成分。建立以学科为导向的教学模式，将专业教育和海员适任性培养相结合。人才培养应注重学生德、智、体全面发展，加强全面素质教育，注重培养学生的综合能力，以培养多功能、复合型的专门人才为主干。因此，教学内容的特点是：重基础，做到整体优化，对学生因材施教，以加强素质教育、培养实践动手能力为重点。

船舶电子电气工程专业教育是工程教育与职业教育的结合，因此，它是属于我国高等教育工科的范畴，具有全国工科专业所必需的基础课程。本专业教育中设置的专业课程需要满足 STCW 公约对船舶电子电气员的最低要求。

1.2 船舶电气工程发展过程

船舶电子电气工程是指船舶的电子电气有关的各种设备或系统及其研究、开发、设计、施工、生产、操作、管理等工作,一般包括电力系统、电力拖动系统、电力推进系统、照明系统、船内通信与信号系统、通信与导航系统六大系统。由于现代电气系统,几乎都由电子元器件或设备控制(包括程序控制、数字控制、数据控制等),因此船舶电子电气工程常简称为船舶电气工程。

船舶电气工程的发展与船舶自动化的发展密不可分,若按自动控制水平不同进行划分,船舶电气工程的发展大致可归纳为5个阶段:①初始阶段或电气化阶段;②单机自动化阶段;③机舱集中监视与遥控阶段;④“无人机舱”操作阶段;⑤“超自动化”船舶阶段。

初始阶段或电气化阶段(20世纪之前):电在船上的应用开始于19世纪30~40年代,但一直到19世纪末,电在船上开始了试验性的应用,并实现了照明的电气化和简单的电力拖动。例如:第一艘电动船的试验于1838年由俄罗斯科学院士雅可比完成,他将制成的电动机装于小艇上并在涅瓦河上试验成功;第一次使用蓄电池向船舶照明灯具供电的试验出现在19世纪40年代;1898年,美国“圣·保罗”号轮船装置了火花式发报机和矿石收音机,并于当年11月成功地抄收了世界上第一个海岸电台发出的电报。同年,俄国“海军上将阿善检克”号轮船在航行中遇上了大风雪,搁浅在芬兰湾荷格兰德岛附近。为了展开营救,俄罗斯发明家亚·斯·波波夫在荷格兰德岛和最靠近的海岸城市特卡之间建立了无线电台,并用无线电报命令“耶尔马可”号破冰船前往执行搜救任务,这是无线电通信在海上搜救的第一次应用。19世纪90年代,各国船舶上开始安装弧光灯和白炽灯,照明和信号灯系统首先实现了电气化。

单机自动化阶段(20世纪初~20世纪50年代):个别自动化设备在远洋运输船舶上已有应用。例如,驾驶方面有自动舵、自动航迹绘算器等,机舱方面有锅炉自动燃烧装置、给水自动调节以及各种热工参数的自动调节等。船舶舾装方面有自动火警信号和自动灭火设备等。但此阶段的设备还未构成一个完整的集中控制系统。

机舱集中监视与遥控阶段(1960~1964年):在1959年,日本设计了万吨远洋货轮“金华山丸”,该轮设有带隔音和空调设备的机舱集中控制室,只需一个人在控制室内值班,就可以对整个机舱的设备进行集中监视和遥控,同时在驾驶室也可以直接对主机进行遥控。“金华山丸”于1961年建造完毕开始航行。

“无人机舱”操作阶段(1965~1968年):此阶段船舶出现了12、24h,甚至36h机舱无人值班操作的船舶。其特点是:除了在独立的机舱集中控制室内对主机、辅机等设备进行集中监视和遥控外,还能够在驾驶台对主机进行自动遥控。同时,机舱内还装设完善的火警探测装置以及呼叫系统等。作为“无人机舱”操作船,基本条件主要有:①推进装置的驾驶台自动遥控;②电站自动化;③锅炉全自动控制;④机舱重要设备的参数自动调节;⑤重要辅机故障自动切换;⑥机舱设备故障自动检测并延伸报警;⑦机舱火警自动检测并延伸报警。

“超自动化”船舶阶段(1969年以后):在1969年以后,世界上许多国家相继制造出装

有电子计算机的自动化程度更高的船舶,即“超自动化”船舶。此阶段的船舶突破了机舱自动化的范畴,把全船作为一个统一的整体,电子计算机在驾驶、机舱和舾装等各方面全面应用,实现了综合控制和全盘自动化。应该说明的是,随着时间的推移和技术的进步,“超自动化”船舶的功能不断扩大,性能不断完善,自动化程度不断提高。

总之,船舶电气工程的发展经历了由单纯的电气照明到全部设备电气化、电子化,电力拖动由直流到交流,控制方式由单机自动控制到综合自动控制,控制手段由手动控制到逻辑控制、模拟量控制、程序控制、数字控制的过程。如今的船舶自动化已发展为集机舱自动化、航行自动化、机械自动化、装载自动化等于一体的多功能综合系统。



小 结

船舶电子电气工程是集船舶、电气、电子、计算机、自动控制、机械于一体的综合学科,集中体现船舶电子电气设备和系统的设计、制造、管理、使用、检验和维修等方面的先进理论和技术,属综合性、交叉性、实践性很强的专业。

船舶电子电气工程专业的特点是:既要掌握船舶电子电气工程相关理论知识,又要掌握船舶电子电气设备的维护和修理技能,因此是理论性和实践性都要求较高的专业。

船舶电子电气工程的主要课程包括通识教育课程、专业基础课程、专业课程和专业公共选修课程四部分。

船舶电气工程的发展经历了由单纯的电气照明到全部设备电气化、电子化,电力拖动由直流到交流,控制方式由单机自动控制到综合自动控制,控制手段由手动控制到逻辑控制、模拟量控制、程序控制、数字控制的过程。如今的船舶自动化已发展为集机舱自动化、航行自动化、机械自动化、装载自动化等于一体的多功能综合系统。



习 题

1. 船舶电子电气工程专业的特点是什么?
2. 船舶电子电气工程专业的专业基础课和专业课各有哪些?
3. 试述船舶电气工程的发展经历。

第2章 船舶电气设备

船舶电气设备 (Marine Electrical Equipment) 主要指船舶的发配电设备和各生产机械的电动机及其控制设备,是与能量转换、传输等有关的所谓的“强电”设备,而与信号传输或控制有关的“弱电”设备则常称为船舶电子设备或船舶相关仪器。

2.1 船舶电气设备的工作环境和相关要求

2.1.1 工作环境

船舶长年在海上营运,与陆上的电气设备比较,船舶电气设备的工作环境非常恶劣,归纳起来主要包括以下几个方面:

(1) 振动和冲击。船舶航行时,主推进装置会产生振动,纵向海浪常常将船尾高高抬起然后再重重抛下,海浪会对船舶造成很大的冲击。因此,船舶电气设备的工作环境存在较大的振动和冲击。

(2) 倾斜和摇摆。海浪会使船舶前后左右摆动;船舶航行时要消耗各种油料和淡水,如果没有及时采取措施,船舶将出现倾斜。而且船舶运载的货物若绑扎不够牢固或者其他原因造成绑扎失效,若再遭遇风浪将会出现货物移动,甚至可能使船舶倾斜。

(3) 环境温度变化快。船舶运送货物时,从一个地方到另一个地方,所处的纬度变化可能较大,经常是几天就经历一轮春夏秋冬,刚刚还是赤道洋面的酷暑,没过几天转瞬又要经历极地的严寒。因此,船舶电气设备的工作环境不仅是高温和严寒,而且环境温度变化剧烈。

(4) 潮湿、盐雾、油雾和霉菌的环境条件。船舶长年在海上营运,海面上的湿度较大,空气中的盐分较高、舱室中还常常有油雾,这不仅会加速船舶电气设备的绝缘的老化,而且由于舱室通风相对不良,很容易产生霉菌,从而对设备的绝缘构成严重威胁。

(5) 船舶电网电压和频率的变化大。船舶电网是独立的电网,在网运行的发电机容量较小。和陆上电力系统比较,船舶上用电负载与发电机容量之比大很多。起动或停止某一设备时,电网的电压和频率变化较大,因此,船舶电气设备要在电网电压和频率变化大的环境下工作。

在上述五种恶劣工作环境中,振动和冲击、倾斜和摇摆影响的主要是船舶电气设备的结构部件,环境温度、潮湿、盐雾、油雾和霉菌影响的是电气设备的绝缘环节,船舶电网电压和频率的波动影响的是设备工作的性能。应该说明的是,电气设备最薄弱但却最重要的环节是绝缘环节。结构部件可在安装或工艺方面采取适当的措施减少影响,工作性能可通过改进控制得到保障,但绝缘环节却是在设备设计与制造时必须解决的问题。因此,一般情况下船舶电气设备不能用陆上产品替代,如果一时没有专门的船用电气产品,而要采用陆用产品代替,则必须经过“三防”(防湿热、防盐雾、防霉菌)处理,并需征得有关船级社(或称验船协会、验船机构)认可。

2.1.2 相关要求

由于船舶工作环境的特殊性，船舶建造完成后，必须经过相关检验，满足船级社的各种规定才能投入营运。在我国，对船舶电气设备检验的依据主要是中国船级社《钢质海船入级与建造规范》（以下简称《海船规范》）的规定。《海船规范》的有关规定主要包括环境温度、倾斜摇摆、振动、电压和频率的波动、电气防爆和外壳防护等级等方面。

1. 对温度方面的要求

环境温度是影响电气设备绝缘性能的主要因素之一，在电气工程领域，根据耐热性能的不同，绝缘材料一般分为七个等级，见表 2-1。

表 2-1 绝缘材料的耐热等级

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	C
极限温度（℃）	90	105	120	130	155	180	>180
额定温升（℃）	45	60	75	85	110	135	>135
材料举例	未浸漆的棉纱、丝、纸及其组合物	Y 级材料经绝缘漆处理	高强绝缘漆、环氧树脂、有机薄膜	云母、石棉、玻璃丝用有机胶合或浸渍	B 级材料用合成胶黏合或浸渍	B 级材料用硅有机树脂黏合或浸渍	B 级材料用优良硅有机树脂黏合或浸渍，以及云母、玻璃、石英等

表 2-1 中的额定温升是指允许的最高工作温度（即表中的极限温度）与标准环境温度之差，即：额定温升=最高工作温度-标准环境温度。我国规定，标准环境温度陆上为 40℃，船上为 45℃。应该说明的是，其中极限温度或最高工作温度是指电气设备任何一点的温度都不能超过的温度，而不是指设备的平均温度。

《海船规范》对船舶电气设备在温度方面的要求主要是绝缘等级、规定环境空气温度和初级冷却水温度。我国《海船规范》规定，船舶电气设备采用的绝缘材料应为 B 级或以上绝缘等级，规定环境空气温度和初级冷却水温度要求见表 2-2。

表 2-2 环境温度要求

介 质	安装位置	温 度（℃）	
		无限航区	除热带海区以外的有限航区
空气	封闭处所内	0~45	0~45
	温度超过+45℃（或+40℃）和低于 0℃的所有处所内	按这些处所的温度	按这些处所的温度
	开敞甲板	-25~45	-25~45
冷却水		32	25

注 适用于电子设备的环境空气温度的上限值为 55℃。

2. 对振动、倾斜和摇摆方面的要求

对船舶电气设备耐受振动的要求见表 2-3，耐受倾斜和摇摆的要求见表 2-4。

表 2-3 振 动 要 求

安装位置	频率范围 (Hz)	峰 值
一般场所	2.0~13.2	位移±1mm
	13.2~100.0	加速度±7m/s ²
往复机上和舵机舱内	2.0~25.0	位移±1.6mm
	25.0~100.0	加速度±40m/s ²

表 2-4 倾斜和摇摆要求

设 备 和 组 件	倾斜角			
	横 向		纵 向	
	横倾	横摇	纵倾	纵摇
应急电气设备、开关设备、电器和电子设备	22.5°	22.5°	10°	10°
上述设备以外的设备和组件	15°	22.5°	5°	7.5°

注 1. 装运液化气体和化学品的船舶，其应急电源还要求应在船舶进水以致最终横倾 30°的极限状态下能保持供电。
2. 表中数据应能满足可能同时出现的纵倾、横倾。

表 2-3 规定的数值是要求船舶电气必须承受而不致损坏的振动指标，如果实际安装场所振动指标超过表 2-3 规定值，则应采取相应的措施进行减振。

由表 2-4 可知，不管是摇摆还是倾斜，船舶电气设备所应承受的纵向的值都比横向值小，这是因为船舶的长宽比 (L/B) 相对较大的缘故，货轮一般可达 6 : 1，客轮也可达到 5 : 1。因此，纵向的倾斜和摇摆幅度就比横向小。也正是因为如此，船上具有旋转运动的设备或机组，一般其轴都与船舶的船艏线平行，以减小轴承对倾斜和摇摆的负担。

3. 对电压、频率波动方面的要求

船舶电气设备对电压和频率波动方面的要求见表 2-5。

表 2-5 船舶电气设备对电压和频率波动的要求

设 备		参 数	稳态 (%)	瞬 态	
				(%)	恢复时间 (s)
一般设备		电压波动	+6~-10	±20	1.5
		频率波动	±5	±10	5
由蓄电池供电设备	充电期间接于蓄电池的设备	电压波动	+30~-25	—	—
	充电期间不接于蓄电池的设备	电压波动	+20~-25	—	—

一般设备包括发电机、电动机电气控制设备和电子仪器与设备。由于船舶电网容量相对较小，当大容量用电设备停止工作的瞬间，电网的电压和频率都会升高，电压和频率的波动值为正值；当大容量用电设备投入运行的瞬间，电网的电压和频率都会降低，电压和频率的波动值为负值。这就要求在网运行的所有设备满足表 2-5 中规定的要求。

表 2-5 规定的数值不仅是对用电设备的要求，也是对发电设备的要求。当电网电压和频率发生波动时，要求发电装置的调压设备和调速设备应迅速做出调整。不仅要使电压和频率

的最大偏差值不超过表中规定的瞬态波动的范围，而且应该迅速恢复到正常波动所允许的稳态值内，同时还应满足恢复时间所规定的快速要求。

4. IP 防护等级及其要求

船舶电气设备的工作环境不仅湿度大，还常常需要抵御海水、雨水的侵袭，而且存在有盐雾和油雾的威胁。为了防潮、防盐雾和油雾，船舶电气设备通常应根据其安装场所的情况不同，采取不同的防护形式，船舶电气设备防护形式由其外壳防护等级体现。

早期我国电气设备外壳防护等级的划分比较简单，也不够具体，将防护等级分为：开启式、防护式、防滴式、防水式和水密式等几种，现在一般采用国际标准 IP 防护等级表示。IP 防护等级就是绝缘防护等级，主要是对船舶电气设备的绝缘防护，防止其受潮和受盐雾、油雾的威胁。国际标准 IP 代号由国际电工委员会（IEC）颁布，即 IEC29 号出版物《外壳防护等级分类》，代号由 IP 字母加两位数字表示为：IP××。第一位数字规定了设备外壳对固体物的防护等级，分七个等级，其定义见表 2-6；第二位数字则规定了设备外壳对液体物的防护等级，分九个等级，其定义见表 2-7。

表 2-6 IP 防护等级第一位数字含义

第一位 数字	防 护 等 级	
	简 述	定 义
0	无防护	没有专门防护
1	防大于 50mm 的固体	人体大面积部分如手（对有意识接触无防护），直径超过 50mm 的固体
2	防大于 12mm 的固体	手指或类似物，长度不超过 80mm，直径超过 12mm 的固体
3	防大于 2.5mm 的固体	直径或厚度超过 2.5mm 的工具、线材等，直径超过 2.5mm 的固体
4	防大于 1.0mm 的固体	直径超过 1mm 的线或片状物，直径超过 1.0mm 的固体
5	防尘	并不防止全部灰尘进入，但进入量不妨碍设备正常运转
6	尘密	无灰尘进入

表 2-7 IP 防护等级第二位数字含义

第二位 数字	防 护 等 级	
	简 述	定 义
0	无防护	没有专门防护
1	防滴	垂直滴水应无有害影响
2	15°防滴	与设备垂直线成 15°角时，滴水应无有害影响
3	防淋水	与设备垂直线成 60°角范围内，淋水应无有害影响
4	防溅	任何方向溅水应无有害影响
5	防冲水	任何方向冲水应无有害影响
6	防猛烈海浪	猛烈海浪或强烈冲水时，进入机壳水量应无有害影响
7	防浸水	沉浸在规定压力的水中经规定的时间后，进入水量应无有害影响
8	防潜水	能长期潜水，完全密封，进入量不产生有害影响

2.2 船舶电力系统

由发电、变电、输电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费系统称为电力系统,船舶电力系统主要由发电装置、配电装置、电力网和用电设备组成。发电装置将一次能源转化成电能,经配电装置和电力网将电能供应到各种用电设备进行工作,并转换成动力、热、光等不同形式的能量。根据功能和用途不同船舶电力系统可分为:主电力系统(正常电力系统)、应急电力系统和小应急电力系统。

与陆上电力系统比较,船舶电力系统的特点是:①发电机容量小,电网的电压和频率容易受负载的变化而波动;②输电网络短,短路时故障电流大。针对这些特点,船舶电力系统的发电机电压和频率调节装置要求较高,保护装置的动作要求既快速又可靠;③工作环境恶劣,需要抗冲击振动和倾斜摇摆,防护高温潮湿、油雾、盐雾甚至热带昆虫对绝缘的侵袭。因此,船舶电力系统所用的各元部件在各方面的要求都较高。

2.2.1 船舶电力系统的主要参数

船舶电力系统基本参数是指电流种类、额定电压、额定频率和线制,这些基本参数决定了电气设备的生产和供应,制约着船舶电网工作可靠性和电气设备质量、尺寸、价格等。

1. 电流种类(电制)

电力系统所采用的电流种类称为电制,按电流种类的不同,船舶电力系统可分为直流电力系统和交流电力系统,习惯上称为直流船和交流船。早期的船舶多采用直流电制。交流电制从20世纪30年代开始逐渐在船上应用。目前,除少数小型或特种工程船舶采用直流电制外,油轮、客轮、货轮、旅游船、工程作业船、科考船和军用舰艇等几乎都采用交流电制。

与直流电制相比,交流电制具有以下优点:

(1) 电源装置采用交流同步发电机,配自励恒压装置,动力负荷选用三相交流异步电动机。它们都具有结构简单,工作可靠,维护量少,控制设备简单等优点。

(2) 动力网络与照明网络可通过变压器隔离,因此绝缘电阻容易降低的照明网络基本上不影响动力网络,系统的安全可靠性较高。

(3) 交流电气设备质量轻、尺寸小、价格便宜。

2. 额定电压

额定电压是电力系统的重要参数之一,用电设备的额定电压一般规定与同级电网的额定电压相同;考虑输电线路工作时产生的电压降落,发电机(或电源)的额定电压比同级电网额定电压高5%。

船舶电力系统的电压等级一般应尽可能与岸电相同,目前我国船舶电力系统最常见的电压等级是:交流50Hz、380V/220V。发电机的额定电压为400V;动力用电设备额定电压为380V;照明变压器的一次/二次侧(即原/副边)的额定电压为400/230V;照明用电设备额定电压为220V。

我国船舶电力系统还可采用其他电压等级,电网与用电设备常见的额定电压有110V、220V、380V、3kV、6kV、10kV等,对应的发电机额定电压则为115V、230V、400V、3.15kV、6.3kV、10.5kV等。

额定电压为1kV及以上的船舶电力系统称为船舶高压电力系统。采用高压电力系统可

减小发电设备和用电设备的体积，目前国内的特种工程船以及采用电力推进等用电量很大的船舶，不少已经采用高压电力系统作为其主电力系统。

3. 额定频率

目前，在世界范围内船舶交流电力系统的额定频率有 50Hz 和 60Hz 两种，我国民用船舶普遍采用 50Hz 为额定频率。表 2-8 为世界部分国家船舶和陆用电力系统的额定频率的情况。

表 2-8 世界部分国家船舶和陆用电力系统的额定频率

国 家	船舶电力系统频率	陆地电力系统频率
中国	50Hz	50Hz
美国、加拿大	60Hz	60Hz
英国及欧洲大陆国家	50Hz	50Hz
日本	60Hz	50Hz（东京电力公司及以北的东部地区各公司） 60Hz（中部电力公司及以西地区各公司）
德国	民船 50Hz，军船 60Hz	50Hz

我国《海船规范》对船舶电源的频率规定：交流配电系统的标准频率为 50Hz 或 60Hz。新设计制造的船舶除出口船舶有的采用 60Hz 的频率外，国内船舶电源与陆用电源一律采用 50Hz 作为标准频率。

4. 线制

所谓线制，是指电网输送电能时采用的输电电缆的数量和连接方式。电网的线制不仅关系到电能的正常传输、设备的正常工作，还考虑用电安全，比如漏电保护等。国际电工委员会（IEC）根据线制的不同，将三相交流电力系统分为三类，即 TT 系统、TN 系统、IT 系统。

在 IEC 的代号中，第一个字母表示电力系统中性点是否接地，T 为直接接地，I 为对地绝缘。第二个字母则表示漏电保护形式，T 为接地保护，N 为接零保护。此外，TN 系统还可分为 TN-C（三相四线制）、TN-S（三相五线制）、TN-C-S 等系统。TN-C 系统将工作零线兼作接零保护线，用 NPE 表示。TN-S 系统是把工作零线 N 和专用保护线 PE 严格分开的供电系统，用于工作环境非常恶劣且需工作零线的场合。TN-C-S 系统则是部分 TN-C，部分 TN-S 的混合线制系统，环境恶劣、要求较高的部分采用 TN-S，一般环境则采用 TN-C。

早期的以照明为主的船舶电力系统，有采用 TT 系统的，即以船体作为中性线的三相三线制系统；也有采用 TN-C 系统，即中性点接地的三相四线制系统。现代船上，为了安全考虑，都采用 IT 系统，即中性点对地绝缘的三相三线制系统。船舶曾经采用过的电力系统原理示意图如图 2-1 所示。

船上的 TT 系统，即三相三线制中性点直接接地系统，是以船体作为中性线回路的三线系统。其特点是利用船体作为中线形成回路，具有中性点接地的四线系统的优点，而且节省电缆。但三相负载不平衡时中线（船体）将有电流流过，船体各点的电位因电流流过而不同，容易造成触电的危险。因此这种系统只出现在早期以照明为主的船舶电力系统，现在船上一般不用。

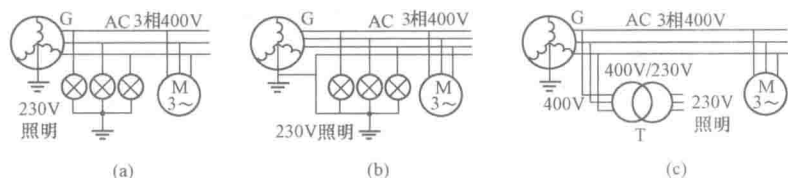


图 2-1 船舶电力系统的线制

(a) TT 系统; (b) TN 系统; (c) IT 系统

船上的 TN-C 系统,即三相四线制中性点接地供电系统,特点是照明与动力系统由同一电源供电,不需要设置照明变压器,发生单相接地故障时,将造成短路,依靠保护元器件可使故障点立即从电网切除,故障点容易查找。但由于照明与动力系统共网,相互之间影响大。尤其是船舶照明系统容易发生单相接地故障,因而容易造成停电,供电的可靠性较低,安全性差,因此目前在船上也非常少见。

船上的 IT 系统,即中性点对地绝缘的三相三线制系统,是目前船舶电力系统的主要线制形式。其特点是照明电源 AC230V 由电网 AC400V 经照明变压器变换获得,照明系统与动力系统通过照明变压器隔离,因而相互间影响小。当系统发生单相接地时,不会出现单相短路而产生短路电流使系统保护跳闸。因此,电力系统即使发生单相接地故障仍然能继续工作,可最大限度保持供电连续性。而且单相接地时,只是使接地相电压变为零,而未接地相的电压升到线电压值 ($\sqrt{3}$ 倍),不影响三相线间电压之间的对称关系,因此系统仍可短时继续供电。但应该尽快找到接地点并排除之,以免使未接地相长期工作在线电压下,造成绝缘损坏。为此,现代船舶电网应设置绝缘监视与报警装置。

2.2.2 船舶主电力系统

船舶主电力系统是船舶正常营运时的电力系统,又称为正常电力系统,由主发电机、主配电板、主电网和正常工作的所有用电设备组成。

1. 发电装置

主电力系统中一般有 2~4 台发电机提供电能,由主配电板进行电力分配,向主电网(即正常电网)供电。远洋船的发电机一般设有 3 台,过狭窄水道时用电量较大,2 台并联运行,1 台备用。正常航行时用电量较少,一般只有 1 台工作,1 台备用,另外 1 台既可进行日常检修保养,也可作为第二备用。客轮从安全角度出发一般设有 4 台发电机,而沿海船舶则可只设 2 台发电机。

早期的蒸汽机船,发电机由蒸汽机驱动(有时用小型汽轮机驱动),但容量较小,主要作为照明电源。在汽轮机船上,发电机由汽轮机驱动,为全船电气设备提供电源,容量从 500~2500kW 不等。目前大部分海船都采用柴油机拖动发电机,构成柴油发电机组。发电机组的发电机一般采用三相交流同步发电机。

船用柴油发电机组早期一般为中速或高速柴油机拖动,随着技术的进步,同时也为了降低运行费用,现在不少柴油发电机组采用低速柴油机(可烧重油)拖动。随着人们节能意识的增强和科学技术的进步,船舶发电装置也在不断发展。目前已经有不少船舶安装有轴带发电装置。轴带发电装置主要由轴带发电机和无功功率发生器组成,船舶正常航行时轴带发电机由推进主机带动,向全船电网供电。为了保证船舶电网对无功功率的需求,轴带发电装置配有无功功率发生器。早期无功发生器多以在网空载运行的同步电动机(又称为同步补偿机