



船舶电力系统 建模与控制

施伟锋 许晓彦◎著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

船舶电力系统 建模与控制

施伟锋 许晓彦 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍船舶电力系统结构的基础上,论述了船舶电力系统建模的机理方法、非线性方法与神经网络方法,构建了船舶电力系统的数字仿真系统。作为船舶电力系统建模与控制的应用,介绍了一种船舶自动化电站模拟器的开发方法与实现案例。本书深入浅出、内容丰富、材料翔实,有比较多的船舶电力系统建模、分析与控制、船舶电能质量参数检测与改善的案例,反映了船舶电力系统研究的一些新成果。

本书可供在电力系统、船舶电力系统、轮机工程、系统建模与控制等领域从事研究的广大科技工作者参考,也可作为相关专业师生的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力系统建模与控制 / 施伟锋, 许晓彦著. —北京: 电子工业出版社, 2012.1
ISBN 978-7-121-15043-2

I. ①船… II. ①施… ②许… III. ①船舶—电力系统—系统建模②船舶—电力系统: 控制系统 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 231721 号

策划编辑: 康 霞

责任编辑: 谭丽莎 文字编辑: 王凌燕

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 17 字数: 435.2 千字

印 次: 2012 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着我国航运与造船事业的飞速发展，一个航运与造船大国如何发展为航运与造船强国成为关心远洋运输与船舶领域发展的广大高校师生与科技工作者思考的热点问题。要实现这个转变，需要有知识创新，需要有相关理论与技术的有力支撑，需要培养一批具有良好船舶电力系统理论与专业技术的人才，需要他们为之进行努力与奋斗。目前，海洋船舶的吨位越来越大，尤其是电力推进船舶已开始实质性应用，船舶电力系统的内容因涉及船舶主动力系统，成为海洋船舶最重要的系统之一。船舶电力系统建模与控制是电力系统及其相关理论与技术的一部分，对于远洋运输船舶这样的海上独立与按需移动的交通工具，船舶电力系统分布在一个移动与狭小的空间内，电气设备密度高；船舶电力系统与陆用无穷大电网相比，系统的容量小，但作为单个移动体，船舶电力系统的容量是已知系统中最大的；船舶电力系统的特性与陆用无穷大电网有明显不同，很多方面不能用无穷大系统进行描述，有其固有的运行特点。船舶电力系统的建模、特性分析与控制是深入研究船舶电力系统的基础，非常值得研究。由于船舶工业环境恶劣，使得船舶电力系统的电能质量问题越来越成为许多研究者关心的问题。

本书从船舶电力系统的基本概念与工作原理出发，介绍了船舶电力系统的结构、机理建模、非线性建模与神经网络建模方法；分析了船舶电力系统的特性，深入分析了船舶电力系统的混沌与随机分形特性。在船舶电力系统控制方面，以船用柴油发电机组控制为重点，首先介绍了常用的控制方法，对柴油发电机形成的船舶电力系统的电压与频率的控制原理进行了论述；然后重点论述了船用发电机组的人工神经网络控制方法。电能质量方面，重点论述了船舶电力系统电能质量参数的测量方法与测量系统，论述了船舶电力系统电能质量的改善方法，针对船级社对船舶电力系统电能质量测量与控制的相关规范进行了介绍。

为提高远洋运输船舶电气/轮机工程人员的技术素质，世界海事组织要求运用船舶自动化电站模拟器进行船舶电气/轮机工程人员的技术培训。运用模拟器进行船舶自动化电站专业知识与技术培训具有教学效率高和成本低的优点。因此，船舶自动化电站系统仿真装置（模拟器）研究成为国际国内相关行业研究的一个热点。作为船舶电力系统建模与控制的目的之一，最后论述了开发实现船舶自动化电站系统仿真装置的一种方法。

本书的第1~6章，以及第10章由施伟锋教授撰写，第7~9章由许晓彦教授撰写。博士后燕存良、博士生周左晗、硕士生丁立刚、杨建敏和梁璟旻老师参与了本书的部分编写工作。

本书获得上海市教育委员会科研创新（重点）项目（12ZZ155）、上海海事大学研究生教材建设项目、上海市教育委员会重点学科“港航电力传动与控制工程（J50602）”的资助，在此一并表示感谢。

限于作者的水平，书中难免有不当之处，欢迎各位专家批评指正。

作 者
2011年12月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 船舶电力系统的形成与发展	(1)
1.2 船舶电力系统建模与控制概述	(3)
第 2 章 船舶电力系统结构	(8)
2.1 船舶电力系统基本结构与运行工况	(8)
2.2 典型船舶电力系统	(12)
2.2.1 柴油机动力装置船舶电力系统	(13)
2.2.2 轴带发电机船舶电力系统	(14)
2.2.3 电力推进船舶电力系统	(15)
2.2.4 船舶应急电力系统	(18)
2.3 船舶电力系统的船级社规范要求	(19)
第 3 章 船舶电力系统机理建模与分析	(23)
3.1 船舶电力系统广义模型构建	(23)
3.2 船舶电力系统机理建模与仿真	(24)
3.2.1 船舶电力系统建模	(24)
3.2.2 船舶电力系统数字仿真平台的建立	(36)
3.2.3 船舶电力系统仿真结果与分析	(38)
3.3 船舶电力系统非线性建模与混沌现象分析	(43)
3.3.1 混沌现象与分析方法	(44)
3.3.2 船舶电力系统非线性建模与随机分形	(55)
3.3.3 船舶电力系统三维自治系统模型与混沌	(64)
第 4 章 船舶柴油发电机神经网络建模	(74)
4.1 神经网络建模方法	(74)
4.1.1 神经网络知识模型辨识原理简述	(75)
4.1.2 RBF 神经网络与 Hopfield 神经网络结构与特性	(76)
4.1.3 神经网络建模结构	(81)
4.2 一种局部递归混沌神经网络	(82)
4.2.1 神经网络的非线性动力学特性与混沌神经网络	(82)
4.2.2 局部递归混沌神经网络的神经元动力学特性分析	(83)
4.2.3 局部递归混沌神经网络构建与学习	(88)
4.3 基于 RBF 神经网络的船舶发电机建模	(92)
4.4 基于混沌神经网络的船舶发电机建模	(96)
4.5 船舶电力系统动态响应特性的 Hopfield 神经网络识别	(103)
4.5.1 离散联想记忆原理简述	(103)
4.5.2 船舶电力系统动态响应特性的识别	(104)

第 5 章 船舶电力系统稳定与控制	(107)
5.1 船舶电力系统稳定与控制概念.....	(107)
5.1.1 电力系统稳定概念与分类.....	(108)
5.1.2 船舶电力系统发电机组控制方式.....	(111)
5.2 船舶电力系统电压与无功功率控制.....	(117)
5.2.1 船舶发电机励磁控制系统结构与分类.....	(117)
5.2.2 船舶发电机励磁控制基本原理.....	(121)
5.2.3 无功功率与电压控制的其他控制方法.....	(125)
5.3 船舶电力系统频率与有功功率控制.....	(128)
5.3.1 船舶发电机组转速控制系统结构与分类.....	(128)
5.3.2 船舶发电机组转速 Smith 预估数字 PID 控制.....	(132)
5.3.3 船舶发电机自动调频调载控制.....	(134)
第 6 章 船舶发电机组神经网络控制	(137)
6.1 神经网络控制方法.....	(137)
6.2 CMAC 神经网络的特性.....	(139)
6.3 CMAC 神经网络控制.....	(142)
6.4 船舶发电机组控制系统结构.....	(144)
6.5 船舶柴油发电机组转速 CMAC 神经网络控制.....	(145)
6.5.1 发电机组转速控制系统设计.....	(145)
6.5.2 发电机组转速控制算例.....	(146)
6.6 船舶发电机励磁 CMAC 神经网络控制.....	(152)
6.6.1 发电机励磁控制系统设计.....	(152)
6.6.2 发电机励磁控制算例.....	(153)
6.7 船舶柴油发电机组转速与励磁双回路 CMAC 神经网络并行控制.....	(158)
6.8 船舶发电机神经网络容错控制.....	(161)
第 7 章 船舶电力系统电能质量特性及其分析	(164)
7.1 船舶电力系统电能质量特性分析.....	(165)
7.1.1 船舶电力系统电能质量参数特性.....	(165)
7.1.2 供电质量与用电质量.....	(165)
7.1.3 船舶电力系统电能质量评估.....	(170)
7.2 船舶电力系统电能质量指标.....	(170)
7.2.1 通用电网的电能质量指标.....	(170)
7.2.2 船舶电力系统电能质量指标.....	(175)
7.3 带变流器子系统的船舶电网谐波分析.....	(180)
第 8 章 船舶电力系统电能质量参数测量	(183)
8.1 电力系统电能质量参数测量方法.....	(184)
8.1.1 模拟量系统.....	(184)
8.1.2 数字量系统.....	(186)
8.2 电力系统电能质量参数测量系统.....	(192)

8.2.1	常规电力系统中电能质量参数测量系统	(192)
8.2.2	船舶电力系统电能质量参数测量系统	(192)
第 9 章	船舶电力系统电能质量控制方法与规范	(211)
9.1	控制船舶电力系统电能质量的意義	(211)
9.1.1	电能质量与船舶运行的安全性	(211)
9.1.2	电能质量参数与船舶运行的经济性	(212)
9.2	船舶电力系统电能质量改善方法	(216)
9.2.1	电力系统电能质量改善的通用方法	(216)
9.2.2	船舶电力系统电能质量改善方法	(223)
9.2.3	船舶电力系统电能质量控制的展望	(229)
9.3	船级社对船舶电力系统电能质量测量与控制的规范	(230)
9.3.1	船舶电力系统电能质量参数测量装置	(230)
9.3.2	船舶电力系统电能质量参数测量与控制的规范	(237)
第 10 章	船舶自动化电站仿真装置开发	(239)
10.1	系统仿真的基本概念	(239)
10.2	船舶自动化电站模拟器模型组成	(240)
10.3	船舶自动化电站模拟器系统硬件支持平台	(241)
10.4	船舶自动化电站模拟器系统软件开发	(244)
参考文献		(254)

第 1 章 概 述

现代海洋船舶上都装备有供给电能的独立系统——船舶电力系统。从船舶电力系统的形成与发展过程来看，“电”在船上得到应用已有一百多年的历史。从早期的船舶电力系统用于单一照明供电，到驱动辅助机械的电力拖动，再到现代用于船舶电力推进，船舶电力系统及其自动控制得到了快速的发展。随着船舶向大型化、自动化方向发展，船舶电力系统容量不断增大，在船舶中的重要性越来越高。对于电力推进船舶，电力系统更是成为了船舶推进的主动力系统，出现了“全电船”，船舶电力系统的概念有了很大的扩展^[1]。尤其对于军用舰船，全电船更是发展的重要方向。

1.1 船舶电力系统的形成与发展

1. 船舶电力系统的形成

20 世纪 40 年代，海洋万吨级船舶平均电站容量只有 60kW。我国在 20 世纪 50 年代以前，船舶电力系统绝大多数为直流电制，主要用于满足船舶照明供电。自 1953 年起，我国开始大规模的经济建设。在 20 世纪 50 年代，只能按照苏联提供的一些样机和图纸进行仿造。20 世纪 60 年代初，国内制造的远洋船舶上采用混合电制，发电机为交流，经变流机组变为直流电后给甲板机械等电力拖动负载供电。

20 世纪 60 年代，我国自行设计研制了新一代的船舶和舰艇，主要有万吨级远洋货轮、导弹驱逐舰与潜艇等。从仿制逐步走向自行设计、试制和独立建造。自行设计、试制完成了交流 200kW、400kW、1200kW 柴油发电机组和汽轮发电机组等船舶电力系统主要设备^[2]。

20 世纪 70 年代，我国继续发展船舶交流电气设备，完成了船舶起货机用恒力矩变极变速异步电动机及其控制装置、轴带发电机系统成套装置、DZ910 系列船用塑壳式自动开关等船舶电气设备的试制与生产。在我国自行设计制造的沿海及远洋船舶上普遍采用了交流电制，实现了船舶电力系统的交流化^[2]。

20 世纪 80 年代开始，我国实行改革开放的经济政策，积极开展了从国外引进船用电气设备制造的先进技术工作，并加以消化吸收；积极开展国际交流和学术交流活动；按国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）标准修订了我国船舶电气设备标准，以适应船舶向大型化、自动化方向发展的需要。近年来，我国的船舶制造技术发展迅猛，已经能够完成电力推进船舶的制造，电力系统容量在 10~30MW，电力推进船舶制造能力与国际水平比较接近。然而，用于船舶制造的一些关键设备，包括船舶电力系统设备的设计、制造与自动控制的关键技术等被国外大企业垄断，国内关键技术掌握得比较少，因此



急需进行船舶电力系统自动化的相关专业知识的自主创新与人才培养。

从船舶电力系统发展的历史观察,船舶电力系统从直流电系统发展到交流电系统,系统的容量从千瓦级发展到兆瓦级。目前,万吨级远洋船舶电力系统容量在 2000kW 以上,大型集装箱远洋船舶电力系统容量在 10MW 以上,电力推进船舶电力系统容量在 20MW 以上,甚至达到 100MW;船舶电力系统无论从系统结构、设备和控制都发生了巨大的变化。最初的船舶电力系统主要用于船舶的照明,是一个照明系统;以后逐渐扩展到对电动机等负荷供电,支持电力拖动系统工作;目前,在一些电力推进船舶上,电力系统中安装了大功率主推进电动机用于船舶推进,电力系统已发展成为主要的船舶动力系统。随着船舶日趋大型化、自动化与电力推进技术的应用,船舶电力系统的容量日益增大,电力系统控制日趋复杂,船舶电力系统自动化程度不断提高。系统经历了单台发电机自动化、机舱局部自动化和全船自动化阶段,由单台微机对船舶电力系统的控制发展到多微机网络自动化控制系统,并朝着“高可靠性智能化”方向发展。

船舶电力系统与陆上的电力系统有着许多不同。船舶海上移动的工业环境决定了电气设备运行条件要比陆上恶劣,所以对船舶电力系统的安全与控制要求也比陆上系统高。船舶电力系统的工作环境可归纳成下列几个主要特点。

(1) 远洋船舶航行区域广,气温变化大、湿度高,空气中常常有盐雾、油雾、霉菌等腐蚀物,甚至还混杂有易爆气体。此外,还因受风浪的作用而产生倾斜和摇摆。

(2) 主柴油机及船舶推进系统运行时会产生振动;舰艇战斗过程中,更会受到各种强烈的机械冲击。

(3) 船舶舱室容积小、空间狭窄,周围的船体、管路都是导体。

(4) 船舶电气设备之间存在较大的电磁干扰。

船舶的工作环境因素会导致船舶电力系统的故障率增大,故障发生对于船舶安全的威胁是非常大的,这对电力系统的控制提出了高要求。

根据船舶环境条件,对船舶电力系统的运行提出下列要求^[3]。

(1) 工作可靠,主要是指电气设备在运行过程中不发生结构、功能上的故障,最大限度地保证不间断供电。

(2) 生命力强,主要是指船舷因故发生破舱进水或失火时,电力系统仍能保持不间断供电的能力。

(3) 应具有防盐雾、防油雾、防霉菌、防水、防燃、防爆等性能和耐冲击、振动、摇摆的能力,能经受长期与周期性的横摇与纵倾。

(4) 要求能在 $-25\sim 45^{\circ}\text{C}$ 的环境空气温度和空气相对湿度为 95%的条件下正常工作。

(5) 保证工作人员的人身安全,防止发生触电事故。

(6) 电气设备的外壳结构要便于装拆和维修。

(7) 要有一定的防无线电干扰和磁干扰的措施。

(8) 尽可能提高系统工作效率,减少燃料消耗和确保船舶应有的续航能力。

不同类型的船舶对上述各点要求是不尽相同的,应根据船舶具体情况而有侧重,对某些特殊用途的船舶更有特殊的要求。



2. 船舶电力系统的发展

近来,随着电力推进船舶的应用,船舶电力系统容量与结构发生了突破性变化。由于计算机、微处理器和通信网络技术的迅猛发展,对相互独立的多个系统可以进行高度集成。船舶电力系统、推进系统及其他们的控制系统的设计发生了巨大的变化,取得了很大的进展。另外,对冗余推进船舶及具有动力定位功能的船舶需求不断上升,要求更多船舶配备物理上独立的冗余系统。如今,船上各个不同系统之间的相互联系已变得日趋复杂,从而使船舶的设计、工程和建造更具综合性。

从目前船舶电力系统发展的趋势看,中压电力系统成为大型海洋船舶电力系统发展的方向。目前新建的大型船舶,如集装箱船、客滚船、油轮、LNG 船、豪华游轮、半潜船等,由于电力系统容量非常大,大多都采用中压电力系统;而海洋平台及海洋工程船,由于运用电力推进动力定位系统,几乎无一例外地采用了中压电力系统。国内外此类新型船舶的设计、施工及营运等实践证明,中压电力系统应用于现代船舶取得了很好的效果,体现了未来船舶电力系统发展的方向,将成为未来大型海洋船舶电力系统主干电网的主流形式。

军用舰船与电力推进船舶电力系统的发展方向是综合电力系统(Integrated Power System, IPS)^[4]。综合电力系统技术开始于20世纪90年代中期,将船舶电力系统的领域拓展到了船舶动力系统等各个方面,成为船舶系统中最重要系统,产生了“全电船”。电力系统控制内容涉及电能的产生、分配、管理调度、功率变换、舰载设备用电及其电力推进系统的各个方面。采用舰船IPS技术是未来使用舰载高能武器系统的必由之路;采用IPS技术能简化舰船动力系统结构,降低舰船噪声能级,提高舰船的生命力和综合作战能力;舰船IPS技术有利于舰船总体设计的优化。

随着电力系统及其自动化技术的发展,结合军用舰船与海洋运输类船舶,船舶电力推进将是重要的发展方向之一。在船舶电力系统发展方向上,国际权威观点认为,船舶电力系统在21世纪的发展将经过“中压交流电系统→中压高频(200~400Hz)交流电系统→中压直流电系统”的发展轨迹^[5],尤其在军用船舶上,“综合中压直流电系统”将是发展的重要方向之一^[6]。

1.2 船舶电力系统建模与控制概述

船舶电力系统建模与控制研究是以实际船舶电力系统为对象,运用系统建模原理与系统仿真技术、电力系统分析、电力系统稳定与控制理论等,根据船舶电力系统的结构与工作原理对系统的基本电力系统单元、电网等建立数学模型,最终建立船舶电力系统模型,并以此根据船舶航行情况对船舶电力系统的运行工况、各种现象进行分析与研究,对船舶电力系统的各种控制方法进行研究。其中,船舶柴油发电机组控制、系统电能质量控制是船舶电力系统控制的重要内容。船舶电力系统建模与控制研究成果主要用于实际船舶电力系统的设计、评估与控制方法研究,用于船舶电力系统数字仿真系统与船舶自动化电站模拟器的建立。

海洋船舶向着超大型方向发展,海洋船舶电力系统的发电机单机容量不断增大;各种电力设备的运用,使得船舶电力系统变得越来越复杂,对电力控制与管理系统的要求也越来越



高, 船舶电力系统控制的长期稳定性与控制质量的重要性日益凸显^[7]。由于电能不能大量储存, 船舶电力系统运行时电能的生产、传输、消耗要求保持动态平衡, 系统的各个组成部分通过电气联系而成为一个整体, 系统中某一个电气设备发生故障会瞬间波及全部电网, 从而可能对系统的安全运行带来负面影响, 严重时系统将失去稳定而崩溃, 由此将直接威胁船舶的安全和船舶人员的生命。为保证船舶电力系统的安全稳定运行, 为提高船舶发电机组的供电质量, 需要对船舶电力系统及其控制的各个方面进行研究, 主要内容包括船舶电力系统的动态过程特性; 建立船舶电力系统模型与仿真系统; 对系统的运行进行故障模式影响分析与安全评估; 分析船舶电力系统不稳定因素与故障机理; 进行船舶发电机组控制方法研究; 进行船舶电力系统谐波检测、电能质量分析与控制研究等。

出于船舶航行安全的考虑, 出于船舶电力系统的复杂性和安全的重要性, 船舶电力系统的设计方案在实施之前需要进行一系列动态/静态品质、系统安全性和系统优化指标的评估; 船舶电力系统建造与实际运行时需要进行系统参数设定与调试; 希望能进行电力系统故障仿真, 以降低系统设计、建造与调试的成本。船舶电力系统仿真平台的运用可以缩短船舶电力系统建造与应用的时间, 提高系统建造效率, 是一项非常有意义的工作。精确的电力系统模型对系统设计方案的评估起到关键性的作用, 反之船舶电力系统模型的不准确而得出脱离实际的分析结果, 会给船舶电力系统的设计与运行带来巨大的损失。因此, 根据船舶电力系统的特点, 对船舶电力系统进行建模、分析和控制研究具有重要的理论价值和实际的应用意义。

1. 模型概念

研究船舶电力系统的目的是为了掌握系统各个组成部分的特性及其之间的关系, 是为了预演系统在一种新的控制策略下的执行情况。然而, 要对船舶电力系统进行各种实际试验存在一些问题, 如试验成本很高, 或者由于会影响船舶的航行而不能进行, 或者船舶正在设计之中实际系统还未制造完成, 或者会导致船舶现有工作系统的破坏和发生事故等, 这些情况使船舶电力系统不能进行多次实际试验, 需要按实际系统建立系统模型(物理模型或数学模型)来进行研究, 然后利用模型实验研究的结果来推断实际系统的工作情况, 然后进行适当的实际试验。“模型”是系统的一种表示, 是系统的内在联系及它与外界的关系的一种描述, 是为了研究系统的特性而开发的。这种使用模型来研究系统的方法叫做系统模拟或系统仿真, 简称“仿真”。之所以可以用模型来模仿实际系统, 是因为模型与系统的特性方面存在相似性与同形性^[8]。

2. 模型的分类

模型的分类方法很多, 可以根据模型的代表方式将模型分成物理模型和数学模型。

(1) 物理模型: 实际系统在结构上缩小后的相似体。因此其外观、结构特性与实际系统极为相似, 描述的逼真感较强。例如, 用功率较小的发电机、电动机与各种负载组成一个与实际船舶电力系统成比例的实验船舶电力系统, 类似于建筑师做缩小比例的房屋模型作为自己的设计方案。物理模型在其他诸如土木建筑、水利工程、飞机等制造方面有着广泛的应用。

(2) 数学模型: 用数学方程(通常是一些代数方程和微分方程的组合等)来描述实际系统的结构和性能的模式。若模型中不含时间因素, 则称为静态模型; 若模型与时间有关, 则



称为动态模型。

一个真实系统的内在联系及和外界的关系的实际情况是很复杂的,用模型完全准确地描述系统很困难,一般是在保证一定精度情况下的近似描述。建立在物理属性相似基础上的物理模型,描述真实系统的真实感虽然较强,但是对于复杂的系统,建立物理模型所需费用高,而且要修改参数或改变结构都很困难。因此,将系统的内在联系和它与外界的关系抽象为数学模型,运用数学模型描述其特性并用计算机计算来仿真系统的动态过程,是目前使用最广泛的系统描述方法。

3. 建模

建模是一项有悠久历史的人类活动。建立在科学工程方法基础上的人与外部世界的相互作用,看起来已有了“形式化”模型或者说抽象的表示方法,这就仿佛是一把关键的钥匙。科学研究中的绝大部分工作是形式化过程和建立模型的过程所组成的^[8]。

通过观察和实验,科学家们试图建立抽象的表示方法和定律,这些方法、定律是对现实世界中有关的已经证明了的假设的形式化。这种形式化模型仅在它抓住了实际系统中的基本性质时才有运用价值。它使得人们有可能进行推理、分析和设计。

船舶电力系统的模型化,通常指的是用数学模型刻画与描述船舶电力系统的特性。由于船舶电力系统的特点,系统数学模型主要由两部分组成:描述船舶电力系统电气设备的单元模型和描述船舶电力系统单元间连接关系的系统结构模型。

4. 常用建模方法

船舶电力系统的数学模型是研究系统特性的重要基础。常用数学模型建立方法有机理建模、辨识建模或两者相结合。对于不同的系统或不同用途,可以根据各自的特点采用不同的建模方法。

机理建模方法是根据船舶电力系统工作原理、物理过程的机理,在某种假定条件下,按照电路原理、电机学原理、电力系统稳定与控制理论等相关的理论,建立船舶电力系统物理过程的数学方程,结合其边界条件与初始条件,再采用适当的数学处理方法,来得到能够正确反映船舶电力系统静态特性与动态特性的数学模型。其模型形式有代数方程、微分方程、差分方程、偏微分方程等;船舶电力系统由于电、磁、机械的强耦合,模型具有较强的非线性特性。

辨识建模方法就是采用系统辨识技术,根据船舶电力系统实际运行或试验过程中所取得的输入/输出数据,利用各种辨识算法来建立船舶电力系统的动静态数学模型。近年来,系统辨识技术得到了飞速的发展。系统辨识建模的主要研究内容有:系统模型结构辨识、系统模型参数辨识、系统模型验证等。建立一个精确的模型需要船舶电力系统足够多的、准确的数据,而且这些数据应覆盖船舶电力系统所有主要的运行工况。目前,对于线性系统的辨识已经有比较成熟的理论,其主要方法有:最小二乘法、辅助变量法、极大似然法等。而非线性系统的辨识还没有构成完整的理论体系,有待于进一步的研究。由于船舶电力系统的非线性特性,精确的辨识需要用非线性系统的辨识方法进行。

船舶电力系统建模、分析与控制研究有一些基本任务,要建立与实际船舶电力系统尽可能接近的模型,完成的各种电气设备模型可以根据实际设备进行参数设定,根据实际船舶电



力系统结构与数据构成各种类型的船舶电力系统仿真模型。船舶电力仿真系统能模拟船舶航行时的电力系统的各种运行工况；能对船舶发电机组的控制方式进行精确的仿真，控制器的控制方式可以重新设计，具有开放性；仿真运行时能观察到电网上任意一点的电气参数的瞬时值，能对电力系统的瞬态和稳态进行仿真与分析；仿真测量得到的参数值的精度与实际船舶电力系统测量得到的参数值的精度十分接近；满足系统设计方案论证、船舶发电机组控制评估、系统参数整定和故障仿真等分析研究的需要。在船舶电力系统控制方面，由于系统的动态和静态特性主要由船舶柴油发电机组的控制特性决定，因此，船舶柴油发电机组的控制成为系统控制的关键。然而，目前船舶发电机组控制系统常用的仍然是经典的 PID 控制，需要研究先进的控制方法以提高船舶电力系统控制的质量，有关智能控制方法在船舶发电机组控制中的运用与研究有很好的发展前景。

船舶电力系统建模、分析与控制研究存在一些问题。在系统建模方面，船舶电力系统中的主要设备“船用发电机”的数学模型具有复杂性和非线性特性，理论上基于机理的发电机模型，由于计算比较复杂，因此计算速度比较慢，会影响仿真的实时性；若建模时进行了一些不合理的简化，会使得实际同步发电机的非线性特性没有充分地表现出来，限制了模型在船舶自动化电站实时模拟器中的应用。在模型应用中，模型的精确性与实时性是比较突出的问题，船舶电力系统是多个柴油发电机组与供电装置组成的复杂系统，对于复杂系统的建模要考虑非线性因素与建模方法的自适应因素。建模与仿真是否全面系统地反映船舶电力系统运行的实际情况是需要很好地研究的，船舶电力系统的一些固有的非线性与混沌特性也值得研究。

目前，智能化建模方法的运用正不断地被研究者重视和认同，基于人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 的知识模型被研究者重视，ANN 建模能很好地对实际电力系统的非线性进行描述，其并行计算的方法可以解决模型运算速度慢的问题，适合于模型的实时运算与仿真。在船舶电力系统 ANN 建模上，构建一个泛化能力强的 ANN 用于系统建模，是研究者追求的目标。另外，对于我国目前的经济实力与教学科研水平，船舶电力仿真系统的成本因素是一个比较现实的决定系统能否推广与应用的因素，这也是研究者需要考虑的问题。由于船舶电力系统固有的非线性与混沌特性，如何判定系统是否存在混沌现象，如何进行系统混沌特性的描述，成为需要解决的问题。

船舶电力系统建模是控制的基础工作，建模的目的是为了研究船舶电力系统在各种工况下的特性，为建立船舶自动化电站模拟器等仿真系统提供依据。另外，建模的目的是为了更好地实施船舶电力系统的控制方法，使船舶电力系统稳定可靠地发挥作用。

5. 船舶电力系统控制

船舶电力系统的功能是将能量从一种自然存在的形式转换为电的形式，并将它输送到各用电设备。观察电力发生传输与消耗过程，电能很少以电的形式直接消耗，而是将其转换为其他形式，如热、光和机械能。电能运用的优点是效率高。一个正确设计和运行的船舶电力系统应满足下列要求。

(1) 系统必须能够适应不断变化的负荷有功功率和无功功率需求。与其他形式的能量不同，电能不能方便地以足够数量储存。因而，必须保持适当的有功和无功旋转储备，并始终给予适当的控制。

(2) 系统应以最低成本供电并具有最小的生态影响。



(3) 考虑到频率的不变性、电压的不变性、可靠性水平, 系统供电质量必须满足一定的船舶工业标准。

因此, 船舶电力系统的控制对于船舶的安全航行具有非常重要的意义。

船舶电力系统的控制内容丰富, 主要控制包括发电机组转速控制、发电机励磁控制、电力系统电能质量控制、电力系统重构、电力系统自修复、功率分配控制、电力推进电机控制等内容。从船舶电力系统自动控制角度来看, 目前实际船舶上发电机组的控制方法以传统的 PID 控制方法为主, 研究的热点有智能控制、鲁棒控制、最优控制、非线性控制等方法。从技术的发展方向来看, 智能控制及其与各种控制方法相结合的方法将是船舶电力系统控制发展的方向。

本书论述的船舶电力系统控制的核心问题包括发电机组控制、电能质量控制等。发电机组控制包括发电机组转速控制与同步发电机励磁控制两方面, 在这两方面的控制中目前船舶上运用的控制方法是经典 PID 控制^[9]。由于船舶电力系统是多柴油发电机组的复杂系统, 存在同一发电机组系统中两控制回路的适应与协调问题, 以及不同发电机组并网运行时机组之间控制的适应与协调问题。由于这些因素, 仅仅运用 PID 控制很难将船舶电力系统的运行质量提高到一个新的水平。

船舶电力系统要切实保证船舶航行的用电需要, 必须达到安全、可靠、优质和经济的标准。例如, 在电能的发生、输送、分配和使用中, 不发生事故; 满足电能的连续供给要求; 满足电能使用的电压和频率等参数的质量指标的要求; 电力系统的运行费用要低, 并尽可能地节约电能; 确保船舶电力系统安全、可靠、优质和经济地运行。可以说这些是船舶电力系统控制的基本任务。

船舶电力系统的应用与研究的历史超过百年, 但全面系统地进行船舶电力系统的建模、分析和控制研究是近几十年的事。目前, 船舶电力系统控制中, 发电机组控制方法以经典控制为主, 深入研究有很大空间。国际上, 电力推进船舶学术交流方面, IEEE Electric Ship Technologies Symposium (IEEE Power and Energy Society 等主办) 是专业进行有关船舶电力系统研讨的国际学术会议, 对船舶电力系统涉及的各方面热点问题进行深入的研讨、交流学术成果、探究船舶电力系统的发展方向。除此之外, 在相关的电力系统国际期刊或学术会议上也发表了许多有关船舶电力系统研究的学术文章, 船舶电力系统的建模与控制受到研究者的重视。总体上, 美国 Mississippi State University (High Voltage Laboratory)、Florida State University (The Center for Advanced Power Systems)、University of Texas at Austin (The Center for Electro-mechanics) 等大学开展了对船舶电力系统的深入研究^[10]。20 世纪 70 年代以来, 挪威的 N. R. Control、英国的 TRANSS、德国的 SIEMENS、日本的 MITSUBISHI 等公司开始研制和生产船舶电站模拟器, 进行了船舶电力系统的建模、分析与控制方面的研究工作。国内, 清华大学、上海交通大学、海军工程大学、哈尔滨工程大学、武汉理工大学、大连海事大学、中国船舶重工集团所属研究所等的大学与研究单位对船舶电力系统的研究非常重视与深入。

目前, 国内外有关船舶电力系统研究的热点问题有: 船舶综合电力系统, 开放型结构的系统和组成, 系统分析、综合、建模与仿真, 船舶电力推进^[11], 电能转换、分配与储存, 电能质量及其突加/突减负荷的影响, 船舶电力系统保护、重构与生存能力, 船舶电力系统测试、评估与发证, 全电船标准^[12], 等等。

第2章 船舶电力系统结构

远洋运输船舶与海上作业的工程船舶种类繁多，常见的有集装箱船、滚装船、散货船、液化天然气船、油轮、游轮、渡轮、动力定位钻探船、浮吊船、布缆船、管道敷设船、破冰船与科学考察船等。各种类型的船舶对于电力系统的要求与功能有所不同，形成的船舶电力系统的结构与设备配置有很大的区别，各有独自的特点。对船舶电力系统的结构与要求进行分析是研究船舶电力系统的基础。

2.1 船舶电力系统基本结构与运行工况

1. 船舶电力系统基本组成与结构

船舶海上航行的独立特性决定了船舶电力系统是一个孤立电力系统。船舶电力系统结构与运行工况具有典型的特点。海洋船舶电力系统一般包括4个组成部分，基本内容如下：

(1) 发电单元是电源。它是将机械能、化学能、核能等转换成电能的装置。船舶上常用的电源装置有柴油发电机组、汽轮发电机组和蓄电池。

(2) 配电单元是自动化电站配电装置。它的作用是对电源进行保护、监视、分配、转换与控制。船舶配电装置可以分为主配电屏、应急配电屏、动力配电屏、照明配电屏和蓄电池充放电屏等。根据不同的船舶需要还配置一些特殊的配电屏。

(3) 输电单元是电网。它是全船输电电缆及其结构组成的总称。其作用是将电能传送给全船所有的用电设备。船舶电网通常由动力电网、照明电网、应急电网、低压电网与弱电电网等构成。

船舶电力系统的电网根据用途不同具有不同的结构。主电网由发电机电源经主配电屏进行供电，它包括动力电网和正常照明电网。应急电网用于当船舶电源因故障不能供电时，应急电源将通过应急配电屏向船上必须工作的部分用电设备供电。弱电电网应急时向全船直流应急照明、通信设备、各种助航设备及信号报警系统供电。通常情况下，船舶电力系统建模与控制研究以船舶主电网与应急电网为控制对象。

(4) 用电单元是电气负载。船舶电气负载可分成几种类型，一般海洋运输类船舶不安装大功率电力推进电动机，电力负荷主要是各种船舶甲板/机舱的机械或泵的电力拖动电动机、制冷空调与冷冻集装箱、船舶电气照明、船舶通信和航行电子设备、通风等用电设备。对于电力推进船舶，除上述负荷之外，主要供电对象是作为船舶主动力的大功率推进电动机及其系统的电力负荷，电力推进负荷的容量将占到电力系统总容量的绝大部分^[13]。

船舶电力系统是以多台柴油发电机组为核心，在主控制配电屏、应急控制配电屏和负载



屏的控制下，对船舶的各种用电设备进行自动供电的系统。如图 2-1 所示是某远洋大型集装箱船舶（69285 载重吨位，5250TEU）电力系统结构的单线图。在发电机容量计算中，每个 40 尺冷藏集装箱按 11kW 计算，每个 20 尺集装箱按 7.5kW 计算，计算冷藏集装箱的负荷时乘以 0.6 的需用系数^[13]。分析系统结构，该电力系统是交流三相 AC 440V/60Hz 电力系统，是一个低压系统，有 4 台 2850kVA（2280kW）/3657A 柴油发电机组，1 台 325kVA（260kW）/4177A 应急柴油发电机组，电力负荷配置有侧推器 2200kW。电网结构由 4 个部分组成，分别是 440V 主电网、440V 应急电网、220V 主照明电网和 220V 应急照明电网。船舶电力系统实用表明，这样的船用发电机容量（2850kVA/440V/60Hz）基本上达到了 440V 电压电力系统的极限，当船舶电力系统的容量继续增加时，需要采用中压电力系统。

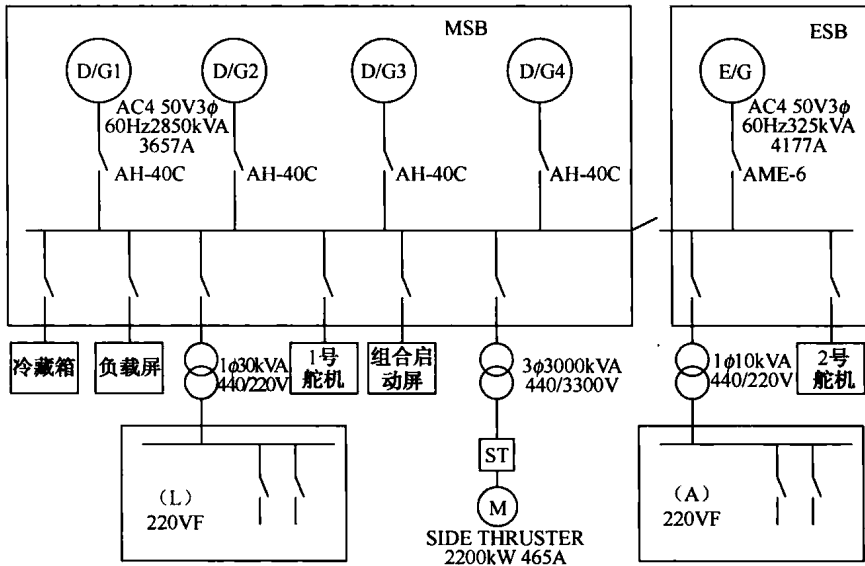


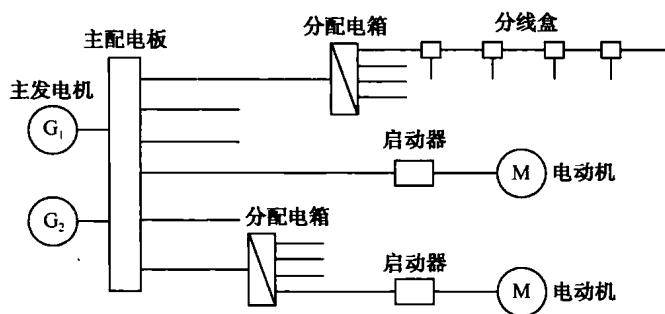
图 2-1 大型集装箱船舶电力系统结构的单线图

从船舶电网结构进行分析，电网的结构形式多样，其中运用比较多的结构形式有枝状配电、环形配电和区域配电布局形式^[14]，如图 2-2 所示。按枝状结线配电的一次网络的每一馈电线都是由总配电屏直接引出，并且各自独立的，它只向一个配电箱或一个用电设备进行供电。而按环状结线配电的一次网络，其主馈电线却是一个环形的闭合回路，经过串接在主馈电线路上的各个分线盒供电给用电设备或配电箱。区域配电系统将用电负载按需要分割为若干个水密区，主馈电线形成多通路环形结构，每一个负载区域都有一个独立的配电控制系统^[15]。

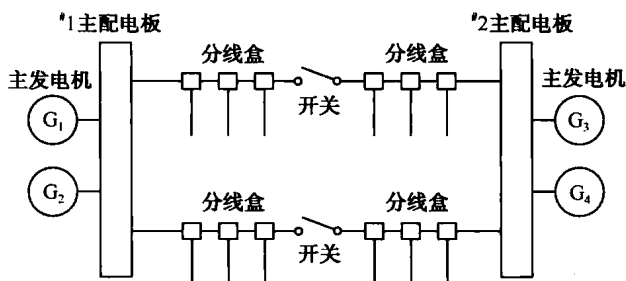
枝状电网具有下列特点：

(1) 由于从总配电屏引出的各条独立馈电线上都装有馈电安全保护开关，因此便于在总配电屏上对全船用电设备实行集中控制。独立馈电，相互之间影响小，提高了供电的可靠性。

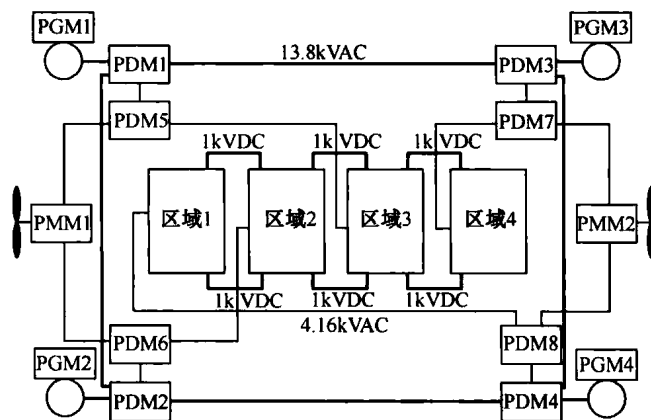
(2) 如果用电设备的数量很多，总配电屏内将会集中大量的馈电电缆，这不但使电缆消耗量大，而且总配电屏的尺寸也需相应地增大。



(a) 船舶枝状电网结构图



(b) 船舶环状电网结构图



(c) 船舶综合电力系统区域配电结构图

PGM—发电单元；PDM—配电单元；PMM—推进电动机单元

图 2-2 船舶电网的接线形式

(3) 这种接线方式的主馈电线一般都不留备用线路，因此任何一条馈电线发生故障时就会造成该线路上用电设备的停电。

环状电网具有下列特点：

(1) 每一个用电设备均可从线路的两个方向获得供电，所以任一路主馈电线因故障断电都不会引起用电设备的停电。

(2) 可以减少主馈电线的数量和总配电屏的尺寸。

(3) 不便于在总配电屏上对各馈电线路实行集中控制，并且往往需要设置两个电站。

区域配电系统具有下列特点：

(1) 用电负荷可以有多种供电方式进行组合供电，当部分发电单元受损，可以有余下发