

船舶

CHUANBO DIANLI
TUIJIN JISHU

电力推进技术

▶ 乔鸣忠 于飞 张晓锋 编著



船舶电力推进技术

乔鸣忠 于 飞 张晓锋 编著



机械工业出版社

本书重点分析了船舶交流电力推进系统的相关技术及特种电力推进技术,同时也兼顾了直流电力推进系统。全书共分12章,第1章简单介绍了船舶电力推进的基本概念、构成、特点、分类、应用及发展状况。第2章介绍了船舶电力推进中的螺旋桨基本理论、工作特性及螺旋桨对推进电动机的机械特性要求。第3章介绍了船舶电力推进系统中所采用的各种推进电动机,包括直流推进电动机、多相异步推进电动机、多相同步推进电动机和多相永磁推进电动机。第4章介绍了船舶直流电力推进系统,包括直流推进系统的主电路连接方式、简单的G-M系统、带蓄电池组的G-M系统、恒功率系统、恒电流系统以及带整流输出的交流发电机一直流电动机推进系统。第5章介绍了交流电力推进系统中所采用的大功率电力电子器件及其构成的交-交变频器、多电平变频器、H桥型变频器和电流源型变频器。第6章介绍了交流推进变频器所采用的PWM技术,包括正弦PWM、空间矢量PWM、特定谐波消除PWM及电流滞环PWM。第7章介绍了交流电力推进系统所采用的调速控制技术,包括标量控制技术、矢量控制技术、直接转矩控制技术以及特种推进电动机的控制技术,并举例分析了交流电力推进系统的构成及技术特点。第8章介绍了船舶侧推装置的组成、原理、典型控制系统及其应用。第9章介绍了吊舱式电力推进系统的组成、结构、原理及特点。第10章介绍了超导电力推进系统的组成、原理与特点,并分析超导推进电机及超导电力推进系统方案设计。第11章介绍了船舶磁流体电力推进系统的构成、原理、性能特点及发展应用。第12章介绍了船舶电力推进的监测技术与控制技术以及电力推进监测与控制系统的的设计,并进行了实例分析。

本书适合作为船舶类院校本科生或研究生教材,也可作为船舶设计研究所及船厂相关的技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力推进技术/乔鸣忠,于飞,张晓锋编著. —北京:机械工业出版社,2013.1
ISBN 978-7-111-40356-2

I. ①船… II. ①乔…②于…③张… III. ①船舶推进—电力装置—动力装置
IV. ①U664.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第266538号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:罗莉

版式设计:闫玥红 责任校对:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.75印张·385千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40356-2

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

船舶电力推进技术是指采用电动机直接带动螺旋桨推动船舶行进的技术，可广泛用于各种民用船舶和军用舰船。与传统的机械推进方式相比，电力推进系统具有噪声低、调速性能好、效率高、可靠性好、重量体积小、布置灵活等优点。

船舶电力推进技术的应用历史悠久，1838年第一艘电动试验船诞生，直到第一次世界大战开始，电力推进系统都采用蓄电池作动力源，直流电动机作推进电动机。二战结束后，电力推进系统在潜艇、大型邮轮、破冰船、拖轮、渡轮、消磁船、拖网船等船上开始得到了广泛的应用。1985年后采用交流电力推进系统的民船大量涌现，过去一直只局限于专用船只的电力推进系统，目前已扩展到几乎所有的民船领域。1986年美国提出“海上革命”计划，把综合全电力推进作为新一代舰艇的推进方式，英、法、德等发达国家也竞相斥巨资研制采用电力推进系统的新一代主战舰艇，并取得了重大进展，采用综合全电力推进已成为舰艇动力发展的必然趋势。

舰船电力推进技术在我国也有较长的发展历史，如我国自行设计的采用直流电力推进的常规潜艇性能优良，早已驰骋于世界各大洋。但是，我国电力推进技术在交流方面起步较晚，民船中所采用的交流电力推进大都引进国外大公司的成套设备。我国自主研发的交流电力推进技术从“十五”开始，历经“十一五”至今已取得了飞跃发展。本书作者有幸经历了国内交流电力推进技术从无到有、从小到大的发展过程，并借本书对船舶电力推进当前的技术组成和发展状况进行一次全面的归纳和系统的总结。

本书重点分析了船舶交流电力推进系统的相关技术及特种电力推进技术，同时也兼顾了直流电力推进系统。全书共分12章，第1章简单介绍了船舶电力推进的基本概念、构成、特点、分类、应用及发展状况。第2章介绍了船舶电力推进中的螺旋桨基本理论、工作特性及螺旋桨对推进电动机的机械特性的要求。第3章介绍了船舶电力推进系统中所采用的各种推进电动机，包括直流推进电动机、多相异步推进电动机、多相同步推进电动机和多相永磁推进电动机。第4章介绍了船舶直流电力推进系统，包括直流推进系统的主电路连接方式、简单的G-M系统、带蓄电池组的G-M系统、恒功率系统、恒电流系统以及带整流输出的交流发电机—直流电动机推进系统。第5章介绍了交流电力推进系统中所采用的大功率电力电子器件及其构成的交-交变频器、多电平变频器、H桥型变频器和电流源型变频器。第6章介绍了交流推进变频器所采用的脉宽调制(简称PWM)技术，包括正弦PWM、空间矢量PWM、特定谐波消除PWM及电流滞环PWM技术。第7章介绍了交流电力推进系统所采用的调速控制技术，包括标量控制技术、矢量控制技术、直接转矩控制技术以及特种推进电动机的控制技术，并举例分析了交流电力推进系统的构成及技术特点。第8章介绍了船舶侧推装置的组成、原理、典型控制系统及其应用。第9章介绍了吊舱式电力推进系统的组成、结构、原理及特点。第10章介绍了超导电力推进系统的组成、原理与特点，并分析超导推进电动机及超导电力

推进系统方案设计。第 11 章介绍了船舶磁流体电力推进系统的构成、原理、性能特点及发展应用。第 12 章介绍了船舶电力推进系统的监测技术与控制技术以及电力推进监测与控制系统的的设计,并进行了实例分析。

本书的第 1~4 章由乔鸣忠编写,第 5~7 章由于飞编写,第 8~12 章由张晓锋编写,全书由乔鸣忠统稿。本书的部分内容来自课题组培养的博士研究生论文,他们是叶志浩博士、杜承东博士、宋庆国博士、魏永清博士、张成胜博士,在本书的写作过程中徐建霖讲师、梁京辉博士、蔡巍博士、朱鹏博士、夏益辉博士、李耕硕士、黄刘玮硕士、周玉文女士参与了本书部分内容的文字编排和绘图等工作,在此向他们表示感谢。

特别感谢李麟教授,他对全书内容进行了仔细审阅,提出了许多宝贵意见,并为本书提供了许多重要资料,对本书水平的进一步提升发挥了重要作用。

本书受到了国家自然科学基金项目(51277177)和海军工程大学研究生院教材建设基金的支持,在此向他们表示感谢。

由于作者水平有限,同时船舶电力推进技术的发展还在不断深入,许多技术问题本书没有涉及,本书内容中还有许多不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述 1

- 1.1 船舶电力推进系统概述 1
 - 1.1.1 电力推进系统的构成 1
 - 1.1.2 电力推进系统的分类 1
 - 1.1.3 电力推进的特点 3
- 1.2 船舶电力推进的应用 4
- 1.3 船舶电力推进发展趋势 6
 - 1.3.1 电力推进发展概况 6
 - 1.3.2 电力推进现状及发展趋势 8

第 2 章 船舶电力推进系统的机桨

特性 15

- 2.1 螺旋桨的基础知识 15
 - 2.1.1 螺旋桨的外形和名称 15
 - 2.1.2 螺旋面及螺旋线 16
 - 2.1.3 螺旋桨的几何特性 17
- 2.2 螺旋桨的推力和阻转矩 20
- 2.3 螺旋桨的工作特性 21
- 2.4 舰船的阻力 22
- 2.5 螺旋桨与船体的相互作用 22
 - 2.5.1 船体对螺旋桨的影响 22
 - 2.5.2 螺旋桨对船体的影响 23
- 2.6 螺旋桨特性 23
 - 2.6.1 自由航行特性 23
 - 2.6.2 系缆(抛锚)特性 24
 - 2.6.3 螺旋桨反转特性 25
- 2.7 螺旋桨对推进电动机机械特性的要求 27

第 3 章 船舶推进电动机 30

- 3.1 船舶推进电动机概述 30
 - 3.1.1 推进电动机的特点 30
 - 3.1.2 船舶推进电动机的要求 31
- 3.2 船舶直流推进电动机 33
 - 3.2.1 直流电动机的基本原理 33
 - 3.2.2 直流他励电动机数学模型 35
 - 3.2.3 直流电动机的运行特性 39
 - 3.2.4 船舶直流推进电动机特点 40

- 3.3 交流推进电动机 42
 - 3.3.1 多相异步电动机数学模型 43
 - 3.3.2 多相同步电动机数学模型 47
 - 3.3.3 交流电动机的运行特性 50
 - 3.3.4 船舶交流推进电动机特点 53
- 3.4 船舶永磁推进电动机 56
 - 3.4.1 基本原理、分类 56
 - 3.4.2 多相永磁电动机通用数学模型 57
 - 3.4.3 多相正弦波永磁同步电动机数学模型 59
 - 3.4.4 船舶永磁推进电动机特点 61

第 4 章 船舶直流电力推进 64

- 4.1 主电路连接方式 64
 - 4.1.1 主电动机并联接法与主电动机串联接法的比较 64
 - 4.1.2 一般串联接法与交互串联接法的比较 65
 - 4.1.3 主电动机采用单电枢或双电枢的比较 65
 - 4.1.4 主电路连接法举例 66
- 4.2 简单的 G—M 系统 67
 - 4.2.1 工作原理和机械特性 67
 - 4.2.2 G—M 系统的工作状态 69
 - 4.2.3 G—M 系统的优点 70
 - 4.2.4 G—M 系统的缺点 70
- 4.3 带蓄电池组的 G—M 系统 71
 - 4.3.1 调速方式及工作特性 71
 - 4.3.2 系统的优缺点 73
- 4.4 恒功率系统 73
 - 4.4.1 理想恒功率特性和发电机电动机特性的自动调节方法 73
 - 4.4.2 三绕组发电机系统 76
- 4.5 恒电流系统 77
 - 4.5.1 基本原理 77
 - 4.5.2 恒电流系统的静特性 79
 - 4.5.3 恒电流系统的应用范围 79
- 4.6 带整流输出的交流发电机—直流电动机

推进系统	80	6.3 特定谐波消除 PWM (SHEPWM) 控制 技术	131
4.6.1 交流发电机的设计特点	80	6.4 滞环 PWM 控制技术	133
4.6.2 十二相发电机整流桥连接方式及 整流特性	82	第 7 章 船舶交流电力推进系统调速 控制技术	135
4.6.3 采用交一直系统的优点	83	7.1 电力推进系统标量控制技术	135
4.7 船舶直流电力推进控制案例	84	7.1.1 开环恒压频比 (V/F) 标量 控制	135
第 5 章 船舶交流电力推进系统及其 变频器	86	7.1.2 带转差率调节的速度控制	137
5.1 交流电力推进系统概述	86	7.2 电力推进系统矢量控制技术	138
5.2 推进变频器用大功率电力电子器件	88	7.2.1 矢量控制与直流电动机控制的 相似性	138
5.2.1 电力二极管	88	7.2.2 等效电路和相量图	139
5.2.2 晶闸管	90	7.2.3 矢量控制原理	140
5.2.3 门极关断晶闸管 (GTO)	93	7.2.4 直接矢量控制	141
5.2.4 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	94	7.2.5 磁链矢量的估计	142
5.2.5 集成门极换流晶闸管 (IGCT)	95	7.2.6 间接或前馈矢量控制	145
5.2.6 电子注入增强栅晶体管 (IEGT)	96	7.3 电力推进系统直接转矩控制	147
5.3 交-直-交变频器分类	98	7.3.1 基于定子和转子磁链的转矩 表达式	147
5.4 H 桥型逆变器	100	7.3.2 直接转矩控制的基本原理	148
5.4.1 单相半桥电压型逆变电路	100	7.4 交流电力推进系统示例	151
5.4.2 单相 H 桥逆变器	100	7.4.1 某液化天然气运输船电力推进 系统	151
5.4.3 多相 H 桥逆变器	101	7.4.2 某 350t 自航起重船电力推进 系统	153
5.5 两电平逆变器	103	第 8 章 船舶侧推装置	156
5.5.1 三相两电平逆变电路	103	8.1 船舶侧推装置简介	156
5.5.2 多相两电平逆变电路	105	8.1.1 船舶侧推装置的工作原理	156
5.6 多电平逆变器	106	8.1.2 船舶侧推装置的作用和要求	157
5.7 交-交变频器	111	8.2 船舶侧推装置控制系统的组成和 原理	157
5.7.1 单相交-交变频电路	111	8.2.1 定距桨侧推装置	158
5.7.2 三相交-交变频电路	116	8.2.2 调距桨侧推装置	159
第 6 章 船舶交流电力推进系统 PWM 控制技术	119	8.3 船舶侧推装置的典型控制系统	163
6.1 正弦 PWM (SPWM) 控制技术	119	8.4 船舶侧推装置的选用要点及其应用	165
6.1.1 基本原理	119	8.4.1 船舶侧推装置的选用要点	165
6.1.2 过调制操作	121	8.4.2 船舶侧推装置的应用	165
6.1.3 载波与调制波频率的关系	121	8.5 船舶侧推装置设计举例	168
6.1.4 死区效应及补偿	122	第 9 章 船舶吊舱式电力推进	171
6.2 空间矢量 PWM (SVPWM) 控制 技术	123	9.1 船舶吊舱式电力推进的基本原理	171
6.2.1 静止空间矢量	124	9.1.1 吊舱式推进器简介	171
6.2.2 矢量作用时间计算	125		
6.2.3 V_{ref} 位置与作用时间之间的 关系	127		
6.2.4 开关顺序设计	127		

9.1.2 吊舱电力推进系统	177	11.3.4 海水通电电极	212
9.1.3 吊舱电力推进中的几项关键技术	177	11.3.5 推进用电力系统	212
9.2 船舶吊舱式电力推进的性能和特点	180	11.3.6 超导磁流体推进船设计概要	212
9.3 吊舱式对转螺旋桨 (CRP) 系统的结构原理和特点	183	11.4 发展应用	213
9.4 机桨一体化推进器 (IMP) 的结构原理和特点	185	11.4.1 发展历程及前景	213
第 10 章 船舶超导电力推进	187	11.4.2 潜在应用示例	217
10.1 船舶超导电力推进装置的发展	187	第 12 章 船舶电力推进的监测与控制	221
10.2 相关的超导电性概念简述	189	12.1 船舶电力推进监控概述	221
10.2.1 超导材料的几个主要性质	190	12.1.1 船舶电力推进监测与控制技术现状	221
10.2.2 超导材料简介	192	12.1.2 船舶电力推进监测与控制技术的发展	222
10.2.3 超导技术应用	193	12.2 船舶电力推进监测与控制系统通信技术	223
10.3 超导电力推进系统	194	12.3 船舶电力推进监测与控制系统设计要求	225
10.3.1 超导电力推进的特点	194	12.3.1 环境要求	225
10.3.2 适用范围及主要组成设备	196	12.3.2 安装要求	225
10.3.3 推进方式与特征	197	12.3.3 绝缘耐压要求	226
10.3.4 低温冷却方案	197	12.3.4 工作电源要求	226
10.4 超导推进电动机	198	12.3.5 主要功能性能要求	226
10.4.1 低温超导直流单极电动机	198	12.3.6 监控系统网络的要求	227
10.4.2 高温超导交流同步电动机	199	12.3.7 监控系统用传感器的要求	227
10.5 船舶超导电力推进系统方案设计示例	201	12.3.8 控制软件基本要求	227
10.5.1 液化天然气破冰船超导直流电力推进系统方案	202	12.4 船舶电力推进监测与控制系统设计	228
10.5.2 直流超导电力推进试验船	202	12.4.1 方案的初步制订	228
10.5.3 小水线面双体船、水翼艇等的超导交流电力推进系统方案	203	12.4.2 监测与控制网络设计	228
第 11 章 船舶磁流体电力推进	204	12.4.3 监测与控制系统设计	228
11.1 磁流体推进简介	204	12.4.4 监测与控制系统软件设计	231
11.1.1 磁流体推进基本概念	204	12.4.5 人机界面设计	232
11.1.2 磁流体推进原理	205	12.5 船舶电力推进监测与控制系统方案实例	233
11.1.3 船舶总体构成	207	12.5.1 某船电力推进监控系统设计	233
11.2 磁流体推进的性能和特点	208	12.5.2 采用 CAN 总线的多相推进电动机控制系统	238
11.3 超导磁流体关键技术与总体概念	209	参考文献	239
11.3.1 推进器总体设计	209		
11.3.2 超导磁体系统	210		
11.3.3 低温制冷系统	211		

第 1 章 概 述

船舶电力推进是由电动机带动螺旋桨或其他推进器来推动船舶运动，而不是由原动机直接带动推进器。与一般船舶机械拖动不同，电力推进电动机的功率很大，一般从几百千瓦到几十兆瓦。由于推进电动机的功率几乎与发电机组总容量相当，因而电力推进系统的设计不仅包括推进电动机部分，还要将发电机方面的影响考虑在内。

本章主要介绍船舶电力推进系统的构成、分类、特点、应用及发展概况。

1.1 船舶电力推进系统概述

1.1.1 电力推进系统的构成

船舶电力推进系统一般由螺旋桨、电动机、发电机、原动机以及控制设备组成。其构成如图 1-1 所示。

其中，原动机 Y 的机械能经发电机 G 变为电能，传输给推进电动机 M，由电动机将电能变为机械能，传递给螺旋桨 J，推动船舶运动。由于螺旋桨所需功率较大，推进电动机不能由一般的日用电网供电，必须

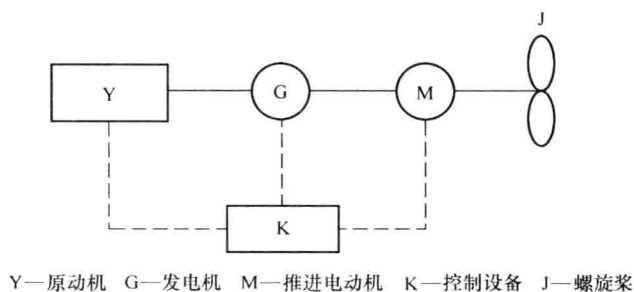


图 1-1 电力推进系统构成简图

设置单独发电机（组）或更大功率的电源，因此电力推进船可设立两个独立的电站，也可设立一个综合性电站。

电力推进用的原动机可以采用柴油机、汽轮机或燃气轮机。目前一般采用高速或中高速柴油机，大功率时采用汽轮机或燃气轮机。

发电机可以采用直流他励发电机、交流同步发电机或交流整流发电机等。

电动机可以采用直流他励电动机、交流同步电动机、异步电动机或永磁电动机等。

船舶推进器一般采用定距螺旋桨，因为其效率高、尺寸较小。

1.1.2 电力推进系统的分类

电力推进装置利用旋转电动机从原动机向螺旋桨传递功率。由原动机驱动的发电机直接或通过固态整流器或变频器供电给推进电动机，推进电动机直接或通过减速齿轮装置与螺旋桨联轴。由于使用了固态变换器，发电机所发出的供推进电动机使用的电能不必是同一类型，可以是交流电也可以是直流电。因此，船舶电力推进系统可以根据所用的原动机类型、主电路电流种类以及装置的功能进行分类。

1. 按原动机类型分类

(1) 柴油机电力推进

柴油机是目前船舶电力推进中最广泛采用的原动机，特别是中小型船舶，采用柴油机较汽轮机更为经济。为了减轻重量和减小体积，电力推进一般采用高中速柴油发电机组。

(2) 蒸汽轮机电力推进

一般适用于大功率电力推进以及本身需要大量蒸汽消耗的船舶。汽轮机可以使用低级廉价的燃料，降低船舶运营的成本，汽轮机的缺点是需要蒸汽锅炉，使动力装置体积大，其重量亦大。

(3) 燃气轮机电力推进

燃气轮机功率大、体积小、重量轻、结构简单、起动快，是电力推进可考虑的原动机。

(4) 原子能反应堆装置电力推进

把原子能反应堆中产生的热能，通过热交换器加热蒸汽或惰性气体，然后通过汽轮机发电。作为船舶电力推进，它可以不需要燃料储备而航行很长时间，因而特别适于破冰船、潜艇、远洋船等大中型船舶。

(5) 燃料电池电力推进

燃料电池是直接或间接地使用燃料氧化自由能的化学电池，它与通常的电池不同，只要连续供应燃料就能连续产生电能。此外，它工作可靠、无噪声，并可根据需要，任意串、并联。这些优点，使燃料电池在电力推进的应用中具有广阔的发展前景。

2. 按电流种类分类

按主回路电流种类可分成直流、交流、交直流和直交流系统电力推进。

(1) 直流电力推进

按系统调节原理可分为恒压电力推进、简单 G—M 电力推进、恒功率电力推进以及恒电流电力推进等。

(2) 交流电力推进

推进电机采用交流电动机，包括异步电动机、同步电动机、永磁电动机，其调速方式主要采用交交变频调速、交直交变频调速等。目前，绝大多数船只均采用此类推进方式。

(3) 交直流电力推进

交直流系统采用电力电子技术将交流电源和直流电动机结合成一个系统。

(4) 直交流电力推进

直交流系统采用电力电子技术把直流电源和交流电动机结合成一个系统。

3. 按推进功能分类

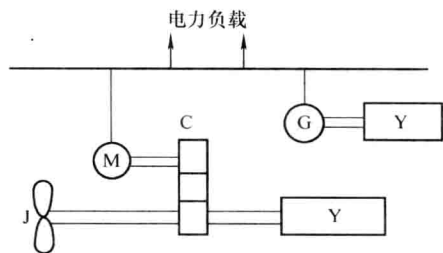
(1) 独立电力推进

螺旋桨专由推进电动机带动，主发电机除供电给推进电动机外，有时尚可把一部分电能供给船舶电网。

(2) 联合电力推进

联合电力推进，这种推进方式如图 1-2 所示，它可以有四种工况：

1) 螺旋桨由推进电动机带动（此



Y—原动机 G—发电机 M—推进电动机 J—螺旋桨 C—齿轮箱

图 1-2 联合电力推进

时主机与螺旋桨脱开), 作低速航行;

2) 螺旋桨由主机(原动机)直接带动(此时推进电动机与螺旋桨脱开);

3) 螺旋桨由主机(原动机)与推进电动机共同带动, 作高速航行;

4) 在航行时推进电动机由主轴带动, 作发电运行, 把电能回馈给电网(相当于轴带发电机)。

(3) 特种电力推进

特种电力推进有侧推电力推进、全回转吊舱电力推进、超导电力推进、磁流体电力推进和泵喷电力推进等。

(4) 综合电力推进

采用电力系统集成技术来实现船舶电能的产生、输送、变换、分配以及利用, 以满足船舶推进、日用负载、大功率脉冲负载等的需要。它将船舶发电与推进用电、船载设备用电集成为一个统一的系统内, 从而实现发电、配电与电力推进用电及其他设备用电统一调度和集中控制。

1.1.3 电力推进的特点

与直接或带齿轮推进相比, 电力推进的主要优点有:

(1) 布置安装灵活。大型船舶的原动机几乎是毫无例外的安装在船尾的下部空间, 同时需要一根较长的传动轴系连接螺旋桨。而电力推进的电动机通常和螺旋桨靠得很近, 省去了传动轴系, 相应地节省了空间。发电设备可以根据全船的配置合理安排, 不受推进电动机和螺旋桨的限制, 可以在机舱整个空间内立体布置, 既方便灵活, 又充分利用了机舱舱容。如果从消防和安全性方面考虑, 还可以把发电机分成几组布置在不同的舱室中。

(2) 易于获得理想的拖动特性, 提高舰船的技术经济性能。

1) 低速特性。柴油机的调速比一般为1:3, 因此采用直接推进时, 不容易获得低速度(额定转速为250~300r/min时, 稳定低速不可能低于90~120r/min)。而电动机的调速比可达1:10甚至一比几十, 故采用电力推进时螺旋桨可以获得很低转速(4r/min以下), 有利于船舶实现机动航行, 比如稳定低速接近目标、靠离码头等。

2) 动车停车等的快速性。电动机的起动、停止与反转均比柴油机迅速, 因此螺旋桨动车停车及倒车速度很快, 有利于提高船舶的机动性。

3) 恒功率特性。船舶在航行过程中, 由于风浪等因素的影响, 阻力经常发生变化。采用电力推进装置可以在阻力经常变化的条件下, 始终维持动力设备(柴油机、发电机或电动机)处于恒功率运行, 使动力设备的效率保持在较高的水平上, 以利于充分发挥动力设备的效能(即充分利用设备的装置功率)。

4) 恒电流特性。电力推进装置的主回路电流可以采用一定的调节措施使其保持一定的数值不变, 这就有可能在主回路内串接若干个电动机, 这些电动机可以独立调节而彼此不受影响, 这一特性对某些工程船特别适合。这些船具有容量相近而不同时使用的若干个负载, 将它们的拖动电动机电枢串接在一条主回路内, 由公共的发电机组供电, 可以使发电机组的装置容量大大减小。采用恒电流系统时还具有电动机过渡过程较快、工作可靠、操纵灵活、系统无过载危害等特点。

5) 堵转特性。当螺旋桨被绳缆、冰块等卡住时, 由于采用电力推进, 系统具有“堵转

特性”，在短时期内不必断开电动机，待到卡住的原因消除以后，螺旋桨很快恢复正常运转，消除了系统经常“断开—接通”的弊端。

(3) 可以采用中高速不反转原动机，降低了设备重量、体积。螺旋桨的转速不能太高，通常是在 300r/min 以下，否则其效率将降低，因此在直接推进时，原动机若为柴油机时，它的转速就不可能做得较高，只能采用所谓重型低速柴油机。其特点是功率大、速度低，因而重量大、尺寸大。如果采用电力推进装置，则可用轻小的中高速柴油发电机组，柴油机也不必采用可反转的，这样便可大大降低原动机的重量和体积。

中高速柴油机重量轻、尺寸小，便于舱室布置。不反转柴油机结构简单、运行可靠、寿命长。在其他条件相同时，不反转柴油机比可反转柴油机的寿命要长得多。据已有资料显示，柴油机每反转一次的磨损与它工作 16h 的磨损相当。由于原动机不必反转，因此电力推进装置也为燃气轮机的广泛应用创造了良好的条件。

(4) 操纵灵活、机动性能好。采用电力推进易于实现由驾驶室直接进行舰船的操纵，使舰船的操纵十分机动灵活。对于直接推进，一般是由驾驶室通过车钟向机舱传递主机操作指令，由主机操作人员按指令操纵柴油机，然后通过车钟向驾驶室回令。这样不但来车速度慢而且很容易产生误操作。若采用电力推进，驾驶人员只需在驾驶室操纵驱动推进电动机的调速装置即可实现对舰船的操纵，大大减少了误操作的可能性。

电力推进装置的操纵过渡过程比直接推进的大大缩短（来车快），因此它应付紧急状态的能力较强，极大地增加了航行安全性。

(5) 可靠性高。可使用多台发电机组和电动机，从而确保较大的可靠性，丧失一台装置不致引起电力的全部丧失。同时，进行多台小容量装置的维修比进行单台大容量装置的维修更高效、更容易。

(6) 振动小。摒弃了传动轴系和调速齿轮箱，较少的螺旋桨振动传递到原动机上。

(7) 适用性强。除提供推进电力外，还可利用发电机组给其他日用负载供电。

(8) 燃料经济性。由于可以完全关闭一些发电装置，且另一些发电装置在接近满载和高效率下运行，因此在减小了功率时，燃料的经济性是极好的。通过使用固态变换器控制电动机转速，发电机在其最佳转速下运行，使原动机获得最高效率。

与直接或带齿轮推进相比，电力推进的主要缺点有：

(1) 在最高速度时的总效率通常较低。

(2) 采用电气设备可能引来一些需要防范的附加危害，如电气设备中可能的火灾，故障引起的扰乱（闪络、短路和接地）、电击造成的人身伤害等。

(3) 电力推进装置需要受过较好训练且具有较高技能的操作人员。

(4) 需要种类繁多的备件。

1.2 船舶电力推进的应用

电力推进多数应用在具有下列特点的船舶上：

(1) 需要高度机动性能的船舶；

(2) 需要有特殊工作性质的船舶；

(3) 具有大容量辅助机械的船舶；

(4) 军用舰船。

在上述一些船舶上采用电力推进尤其具有突出的优点，国内外均有应用实例：

1. 渡轮

电力推进易于集中控制，可在驾驶室直接操纵船舶。采用电力推进后，除了船尾部装设推进器外，尚可方便地在船首及左右舷装设侧向推进器，使渡轮在港口要道和狭窄航道中能快速、灵活和安全地航行，也使靠离码头的操作快速、准确、可靠。“烟大”轮是国内首次采用全电力推进系统的载火车、汽车和旅客的客滚船，该船由上海船舶研究设计院设计，天津新港船厂建造，长 182.6m，宽 24.8m，满载排水量 16299t，服务航速 18kn[⊖]，抗风能力 8 级，推进器采用了 ABB 公司 2 × 4088kW 紧凑型 Azipod 推进装置，已在 2006 年建成使用。

2. 挖泥船

耙吸式挖泥船在采用电力推进时，挖泥机械（大功率泥泵）不必由专用的原动机带动，动力装置的功率可以给耙吸工作和推进工作随意分配使用。即在耙吸挖泥时，船舶低速航行，主发电机除把一小部分电能供给推进装置外，大部分能量供给泥泵。不进行耙吸操作时，船舶可利用全部电能高速航行，提高了电能的利用率。这样可以减少原动机组数量，提高动力装置的经济性，还可简化机舱值班和维护工作，提高船舶生产率，降低挖泥成本。如链斗式挖泥船，在需要自航时，也常利用挖泥机械的电力作为推进动力。

3. 破冰船

电力推进在低速时能发出大推力，可出色地完成破冰任务。它的堵转特性使机组不会超载，并在螺旋桨被冰块卡住时也不会发生事故。电力推进装置的快速机动性能和恒功率自动调节性能，也改善了破冰船的工作效率。

4. 起重船

在自航式起重船上，可利用起重机械的电力作为推进动力。如我国自行设计、制造的 50t 起重船，装有两台 55kW 柴油发电机组，起重作业时，供电给起重机械。在航行时，供电给两台 55kW 的推进电动机，航速约为 3kn。

5. 渔轮

可以根据各工况的不同要求，方便地把电能适当分配至推进、捕捞和冷藏机械，以节省一些专供辅机（如拖网机、冷藏机）的发电机组，如拖网渔船，在寻找鱼群时，只需在经济航行工况下运行，推进装置耗用一部分电能，在拖网捕鱼时，除将部分电能供低速推进外，其余可供给拖网机械与其他设备，在捕捞完毕返回基地时，可把全部电能供给推进装置，全速返航。

6. 拖轮

电力推进装置具有宽广的调速范围，故可保证从自由航行状态到拖带状态都发出全功率，获得拖航工作的最佳效率。此外，在拖带过重时，还可实现堵转，避免事故的发生。由于电力推进可以方便地在驾驶室控制，保证了操作的正确性和拖曳的安全性。对港口拖轮，就更为适宜。

⊖ 1 节 (kn) = 1 海里/时 = (1852/3600) m/s。

7. 调查船、测量船

这些船上的甲板机械、附属设备和科研仪器，往往需要大量电能，它们可以与电力推进装置一起从主发电机组中获得电能。电力推进具有较高的机动性、低速航行特性等，这些对于航行状态多变、航区复杂的调查船和测量船都是必不可少的。

8. 消防船

消防船在急驶火场时，必须把主发电机的全部功率用于推进，在到达火场后，只需把少量的电能供给低速推进，在火场周围缓行，而把大部分电能供给消防泵。电力推进不仅可以减少消防船上原动机数量，而且可以在驾驶室集中控制，获得良好的机动性和操纵性，使消防船处于最佳灭火位置，出色完成消防任务。

9. 救捞船

同消防船相似，在急驶救生地点后，救生打捞设备（如空压机、绞车等）可从主发电机组获得大量电能。

10. 领航船

采用电力推进，可精确地控制低速推进，使船的位置保持不变，在恶劣的气候条件下移动时，电力推进还可增加其安全性。由于领航船的工作包括了一段相当长的低速航行，采用电力推进后，可以只开一部分机组，减少了燃料消耗，提高了经济性；在一定的燃料储备下，减少了返航添加燃料的次数，增加了运营时间。

11. 布缆船

在敷设电缆时，需要稳定正确的航向和较大调节范围的低速推进。采用了电力推进，就可以达到上述要求，同时还可降低推进速度，将剩余的电力用于布缆作业。

12. 航标工作船

在敷设和维修航标时，需要低速电力推进，使船舶逐渐靠近和保持在航标敷设的位置进行作业。我国沿海航标船大都采用电力推进。

13. 水下作业船只

由于在水下无法采用柴油机需要氧气的原动机，因此，水下作业船只通常都采用蓄电池供电的电力推进方式，如潜艇、潜水器等。

14. 大型邮轮

直接由变频器控制的电动机推进驱动装置，使邮轮布置方便、紧凑；增加了客轮房间，减少噪声，使乘客生活更舒适。如美国的“幻想号”，日本的“Crystal Harmony号”等。

15. 现代化的军用舰船

现代化的军用舰船一方面需要较强的机动性，另一方面也会配备电磁炮、激光、微波等高能武器和电磁弹射等高能量的装备。采用电力推进后，用电动机驱动船舶推进器，控制灵活、调速方便，船在低速航行时，可将大量的能量用于高能武器和高能量装备。如英国建造的45型驱逐舰，美国研制的DDX驱逐舰都采用电力推进。

1.3 船舶电力推进发展趋势

1.3.1 电力推进发展概况

船舶电力推进并非新名词，这一术语出现于1838年，迄今已有160余年的历史。船舶

电力推进随船舶航运事业和电气、电力电子技术的不断进步而发展。在 20 世纪初期, 交流和直流电力推进系统就已在船舶中应用。回顾电力推进的发展, 大致有以下几个阶段:

1. 试验时期

19 世纪末期, 在德国和俄国最先开始以蓄电池为能源的电力推进应用试验, 此后第一代电力推进于 1920 年投入使用, 结果在小客船横渡大西洋上效果明显。这个时期大约从电动船诞生一直延续到 20 世纪初, 此期间的电力推进大多采用蓄电池作动力, 用直流电动机作推进电动机, 功率在 75kW 以下。

2. 广泛应用时期

20 世纪 20 ~ 30 年代, 尽管大功率蒸汽轮机作为舰船原动机的技术已经成熟, 但由于机械加工水平和能力的不足, 从民用货轮、客轮、油轮到航空母舰等大功率舰船, 多采用电力推进。电力推进出现过广泛应用的流行期, 除潜艇、破冰船等特殊工程专用舰船外, 仅美国就有 226 艘护卫舰与 488 艘民船采用电力推进。美国建造的“新墨西哥”号电力推进战列舰, 采用汽轮机发电, 异步电动机推进的总轴功率已达到 4000 ~ 22000kW。

3. 充分应用电力推进特长时期

20 世纪 40 年代后期, 由于机械加工技术的进步, 特别是齿轮传动装置加工能力的提高, 蒸汽轮机和柴油机朝大型化发展, 批量生产能力也得到了提高, 而当时的电力推进却由于技术条件的限制, 其装置大而笨重、效率低、成本高, 严重限制了其广泛应用。因此大部分水面舰船均采用蒸汽轮机、柴油机和燃气轮机及各种联合动力装置推进。

20 世纪 50 年代, 电力推进主要是可调速的“发电机 - 电动机”直流系统, 调速是利用电机励磁回路的可变电阻来实现。

20 世纪 60 年代, 半导体技术可以保证由晶闸管系统来控制励磁, 推动了电力推进系统的发展。20 世纪 60 年代中期, 出现了带变桨距的交流电力推进。

20 世纪 70 年代, 电力推进的特征是借助大电流的半导体元器件, 将用于船舶总电网工作的三相交流发电机电流传递给电力推进装置, 但是, 船舶直流推进电动机有换向器和电刷, 在使用中存在许多缺点, 如大负载和反转时出现火花、换向器磨损、电刷烧毁、产生电磁干扰以及维护困难等。由于在当时条件下变频技术还是新鲜事物, 所以可获得的交流推进装置不能提供必要的容量, 交流换向器电动机具有与直流变速系统相同的缺点。

4. 蓬勃发展时期

20 世纪 80 年代以后, 通过改变供给电动机的电流频率和电压来调节推进电动机转速的交流推进系统取代了直流推进系统, 借助于逆变器和变频器来实现的各种推进方案得到广泛应用。采用更紧凑和更轻便的交流推进电动机——同步电动机和异步电动机可以使系统获得更高频率, 大大简化设备的维护。采用现代交流变换器技术的以下两个系统已获得广泛应用:

(1) 带直接变频器和安静型同步推进电动机的系统, 适合 1 ~ 40MW 功率使用;

(2) 带有中间直流环节的变频器和异步推进电动机的系统, 电动机转速范围为 800 ~ 1500r/min, 并具有与推进轴连接的减速传动装置, 这种类型的推进装置适合于 7 ~ 8MW 功率使用。

20 世纪后期, 功率电子器件制造技术不断提高, 控制技术不断完善, 大大地推动了商用船舶电力推进技术的应用水平, 更大地提升了电力推进系统的有效功率等级, 电力推进在

民船应用领域出现了前所未有的发展盛世，电力商船的应用范围日益扩大。

另外，船舶在推进结构上从燃气轮机、柴油机或核动力等单机配制到多种原动机混合配制；功率等级上从百千瓦级到数十兆瓦级不等；推进模式上更加多样化，如用途广泛的吊舱式推进。由于采用了脉宽调制和循环变频等控制技术，电力推进中推进电动机的控制更加可靠，船上各种设备的用电品质得到保证。上述一系列变化使电力推进成为船舶推进技术的发展趋势。

1.3.2 电力推进现状及发展趋势

1. 电力推进现状

进入 20 世纪末期，世界各国都热衷于研究船舶电力推进技术，新造的船舶 80% 以上都采用了电力推进，而且比例越来越高。另外，造船强国也纷纷提出了电力推进技术的研究计划，如美国提出了船舶综合电力系统（IPS——Integrated Power System）的研究计划，英国提出了船舶综合全电力推进系统（IFEP——Integrated Full Electric Propulsion）研究计划等。

我国在 20 世纪设计和建造的电力推进船舶主要采用传统的直流推进技术，到了 20 世纪末期，我国也开始研究以综合电力系统为背景、具有现代技术的交流电力推进船舶，国内建造的第一艘交流电力推进船舶是上海爱德华造船有限公司为瑞典 DONSOTANK 公司制造的“帕劳斯佩拉”号化学品船，于 2000 年投入运营；2002 年 12 月广船国际为中远广州公司建造的半潜船“泰安口”号正式交付使用。该船采用了先进的吊舱型式的交流电力推进系统，目前它的姊妹船“康盛口”号也已经投入运行。上述船舶均由国外公司设计，仅在国内厂家建造。国内自行设计的第一条具有现代技术的交流电力推进船是由上海船舶研究设计院设计，江南重工建造的科学考察船，于 2005 年在南海投入使用，上海船舶研究设计院还为铁道部设计了两艘交流电力推进的客滚船“烟大”渡轮，该船由天津新港船厂建造，船长 182.6m，宽 24.8m，满载排水量 16299t，服务航速 18kn，抗风浪能力为 8 级。

船舶综合电力系统主要包括发电、配电、电能变换、电力推进、监测与控制等内容。其构成如图 1-3 所示。

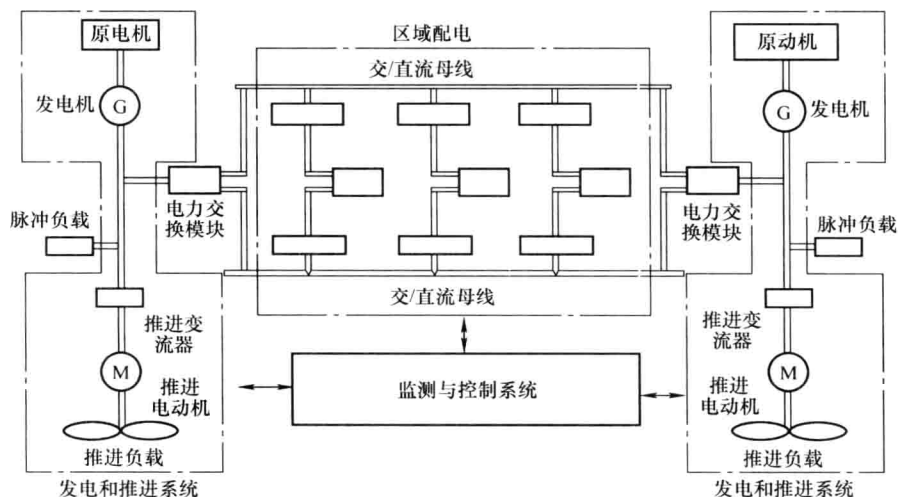


图 1-3 综合电力系统构成简图

电力推进系统主要由推进电动机、推进变频器、推进负载、监测与控制系统等组成。这些装置的应用现状及发展趋势如下:

(1) 推进电动机

按电动机类型,推进电动机分为直流推进电动机、交流推进电动机、永磁推进电动机和超导推进电动机。在水面船舶电力推进中是交流推进电动机和永磁推进电动机并存的局面。在水下作业船只(含潜艇)电力推进中直流推进电动机目前占主导地位。

1) 直流推进电动机

因其具有良好的转速、过载、起动和运行性能,直流推进电动机在水下作业船只(含潜艇)电力推进系统中至今仍占统治地位。为适应形势发展的需要,在采用新技术、新结构、新工艺和新材料的背景下,直流推进电动机的设计不断完善,其推进性能不断提高。

2) 交流推进电动机

在变频调速技术成熟以前,由于交流电动机调速性能的限制,交流推进电动机主要用于对机动性要求不高的船舶,或者作为某些船舶的一种辅助推进。例如,作为辅助推进的主动舵电动机和用于驱动变桨距推进器的交流推进电动机。

随着电力电子技术、数字控制技术、现代控制理论特别是矢量控制技术和直接转矩控制技术的发展,交流推进电动机的调速性能已可与直流推进电动机相媲美。在国外的商用特种水面船舶中交流推进电动机的应用已十分广泛,国内电力推进船舶中交流推进电动机的应用也正在起步。

作为动力型的交流电动机,原则上都可以作为交流推进电动机用。但是,实际应用中主要有以下几种类型:绕线转子异步电动机、笼型异步电动机、先进感应电动机和同步电动机等。

3) 永磁推进电动机

伴随着永磁材料和交流调速的发展,永磁推进电动机以其明显的优势展示在世界海洋上。永磁推进电动机在德国212潜艇、俄罗斯“阿莫尔”号潜艇上的成功应用以及美国、英国、法国等各国在实用化研究上的累累硕果,有力地证明了它是近中期首选的动力装置,是船舶直流推进电动机的更新换代产品。永磁推进电动机按气隙磁通方向可以分为径向磁通永磁电动机、轴向磁通永磁电动机和横向磁通永磁电动机。按电枢绕组反电势波形,可分为正弦波永磁电动机和方波(梯形波)永磁电动机。

永磁电动机采用永磁材料励磁,没有励磁绕组和励磁损耗。与一般励磁电动机相比,永磁电动机具有效率高、体积小等优点,特别适用于船舶推进电动机。

在船舶推进电动机上使用的永磁材料主要为钕铁硼和钕钴两种稀土永磁材料。钕铁硼具有较高的磁能积、价格便宜,但温度系数偏大、居里温度低。钕钴具有较高居里温度、温度系数小,但价格贵、磁能积低。

4) 超导推进电动机

随着高温超导材料的发展,超导推进电动机逐渐引起世界各国的青睐,成为中远期可提供高效、大功率动力的推进电动机。超导推进电动机有超导单极电动机、超导同步电动机、超导异极电动机(即超导换向器式直流电机)、特种超导电动机等。其中超导单极电动机和超导同步电动机已具有一定的研究基础,较为成熟。

直流超导电力推进系统采用的是超导单极电动机,到目前为止,世界上已经研制成功