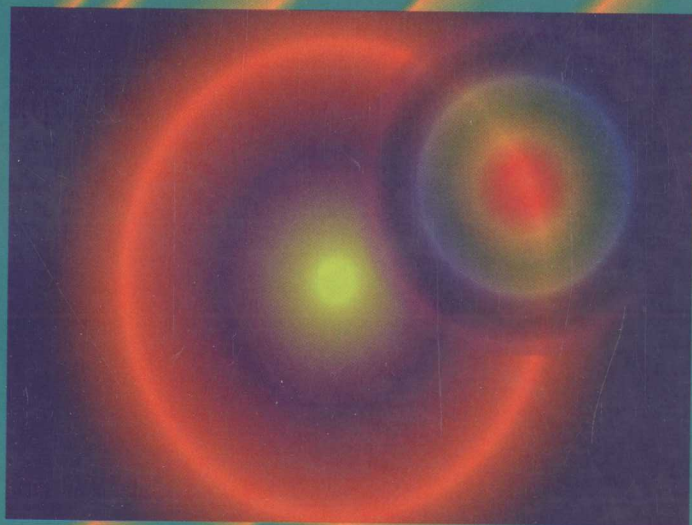


大连海事大学
出版基金赞助
学术丛书

电力推进 自动控制

樊印海 编著



大连海事大学出版社

大连海事大学出版基金赞助学术丛书

电力推进自动控制

樊印海 编著

大连海事大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力推进自动控制/樊印海编著.-大连:大连海事大学出版社,1997

ISBN 7-5632-1021-0

I.电… I.樊… III.推进-自动控制 IV.U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 18834 号

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 4684394)

大连海事大学印刷厂印刷 大连海事大学出版社发行

1998年2月第1版

1998年2月第1次印刷

开本:850×1168 1/32 印张:6.75

字数:169千 印数:001~500册

责任编辑:王铭霞

封面设计:王艳

责任校对:贾玫

版式设计:王瑞国

定价:10.80元

内 容 提 要

船舶电力推进是用电动机带动螺旋桨旋转,推动船舶运动。电力推进系统包括发电机、船舶电站、控制系统、变压器和推进电机等环节。本书对电力推进作了详细的介绍,包括系统组成、工作原理、自动控制系统及原理、设计计算方法、系统参数优化。同时还介绍了最新电力推进系统,包括超导电力推进、太阳能电力推进、燃料电池电力推进等。

本书是在作为电力传动及其自动化专业研究生教材的基础上进行撰写的,内容较为全面、详尽,是我国第一本电力推进方面的书籍。

本书适宜从事电力推进方面研究工作的工程技术人员、船舶电气工程师阅读,也可供大专院校相关专业的教师和学生作为教科书或参考书之用。

前 言

随着海运事业的发展,海运和河运货运量的增加,每年都有各种用途的新型船舶出现。在新建造的船舶中有一些是电力推进船舶。

在大多数船舶上,从动力机械到螺旋桨或者其它推进器;其能量传递方式是机械传递方式。这是因为这种传递方式的船舶动力装置更节省能源,并具有体积小、重量轻的特点。

但是,电气传动装置也有其一系列的特点。它可以满足由于船舶结构、运行特点和技术性能所提出的许多条件和要求,而机械传动方式则不能满足这些条件。所以,对某些类型的船舶来说必须采用电力推进装置。

近年来由于微型计算机和半导体电力电子元件及技术的高速发展,使得变频调速技术在降低谐波、提高效率等方面有了很大的进展,使它在电力推进中得到了广泛的应用。所以,在许多新建造的电力推进船舶上都装备了计算机控制的变频调速交流电力推进装置。

目前,由于研制和采用了新型电源、超导电力推进装置及磁流体推进器,使电力推进得到了广泛的应用。电力推进装置主要装备在破冰船、油船、运输船、拖船、救生打捞船舶、滚装船、轮渡、自航行钻井平台、考察船和深潜器上。

我国电力推进船舶的建造和使用始于50年代。目前我国约有50条电力推进船舶,尤其是近年来建造和购买了许多这类船舶。其中主要是滚装船、救生打捞船、拖船、自航行钻井平台、考察船及其它舰船等。在这些船舶的电力推进装置中,有发电机—推进电机系统的电力推进系统、可控整流直流电力推进系统、变频调速交流电力推进系统、无人机舱计算机控制变频调速电力推进系统等等。

为了研究、设计、制造电力推进系统，以及更好地对电力推进装置进行维护和保养，促进我国海运事业的发展，编著者根据在前苏联攻读博士学位期间发表的一系列论文以及有关资料，编辑出版本书，作为对我国海运事业的一点贡献。

在本书的编辑和出版过程中，得到了刘宗德教授、陆祥润教授的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有不妥之处，请读者批评指正。

编著者

1995年12月

目 录

第一章 概论.....	(1)
1.1 电力推进船舶	(1)
1.2 电力推进装置的特点及其要求	(1)
1.2.1 电力推进装置的分类和应用范围	(1)
1.2.2 电力推进装置的特点	(4)
1.2.3 对电力推进装置的要求	(6)
1.3 电力推进船舶概况	(6)
第二章 船舶动力装置.....	(8)
2.1 船舶动力装置的用途和分类	(8)
2.2 船舶推进器特性.....	(10)
2.2.1 船舶运动水阻力.....	(10)
2.2.2 船舶推进器作用原理和类型.....	(10)
2.2.3 螺旋桨特性.....	(11)
2.2.4 船舶摇荡时螺旋桨阻力矩的变化.....	(17)
2.3 热动力发动机特性.....	(17)
2.3.1 柴油机特性.....	(17)
2.3.2 燃气轮机特性.....	(21)
2.3.3 蒸汽轮机特性.....	(22)
2.3.4 原子能动力装置.....	(23)
第三章 电力推进装置及其原理	(24)

3.1	电力推进装置及其特性	(24)
3.1.1	电力推进原理	(24)
3.1.2	发电机和推进电动机的联接	(27)
3.1.3	不同联接方式下电力推进装置的工作状态	(37)
3.1.4	发电机、推进电机、整流器、变频器和激磁器	(42)
3.1.5	系统保护和监测	(60)
3.2	单一电站电力推进装置	(70)
3.2.1	单一电站的基本特点	(70)
3.2.2	单一电站直流电力推进装置	(71)
3.2.3	单一电站交流电力推进装置	(79)
第四章	电力推进装置的稳态特性	(85)
4.1	电力推进装置的稳态特性及其选型	(85)
4.1.1	机械特性	(85)
4.1.2	电力推进装置的选型	(87)
4.2	直流电力推进装置的稳态特性	(88)
4.2.1	获得所需机械特性的原理	(88)
4.2.2	带不可控整流器的同步发电机外特性	(90)
4.2.3	恒流电力推进装置的稳态特性	(94)
4.3	交流电力推进装置的稳态特性	(95)
4.3.1	发电机的并联运行	(95)
4.3.2	电力推进装置的参数变化	(100)
第五章	电力推进装置的过渡过程	(105)
5.1	直流电力推进装置的过渡过程	(105)
5.1.1	推进电机的启动和反转过渡过程	(105)
5.1.2	可控整流电力推进装置的启动和反转过渡过程	(112)
5.2	直流电力推进系统数学模型	(114)
5.3	交流电力推进装置的过渡过程	(118)

5.3.1 推进电机的启动过程	(118)
5.3.2 推进电机的反转过程	(122)
5.4 同步发电机—同步推进电机系统的数学模型	(126)
第六章 电力推进自动控制	(132)
6.1 控制方法	(132)
6.1.1 自动控制的目的	(132)
6.1.2 优化控制的品质指标	(132)
6.1.3 控制装置(调节器)的选择	(134)
6.2 系统的综合	(141)
6.2.1 电力推进系统方程线性化	(141)
6.2.2 系统方框图	(145)
6.2.3 不可控整流直流电力推进系统的综合	(157)
6.2.4 单一电站可控整流电力推进系统的综合	(162)
6.2.5 扰动作用下电力推进自动控制系统的综合	(174)
6.3 交流电力推进装置的自动调节系统	(181)
第七章 新型电力推进装置	(187)
7.1 燃料电池(Fuel cell)电力推进装置	(187)
7.2 温差电力推进装置	(190)
7.3 新型大功率船用动力装置的设计	(192)
7.4 超导电力推进装置	(193)
7.4.1 超导电力推进装置的特点	(193)
7.4.2 直流超导电机电力推进装置	(194)
7.4.3 交流超导电机电力推进装置	(197)
7.4.4 交一直流超导电力推进装置	(198)
7.5 超导磁流体推进	(199)
参考文献	(201)

第一章 概 论

1.1 电力推进船舶

电力推进船舶，主要指船舶的主推进系统是由电动机所带动的。但是，在许多大型穿梭油船和救助船舶上也使用电力推进侧推进器，因此这里所说的电力推进船舶，泛指使用电动机带动推进器的船舶。

船舶电力推进，通常是由原动机带动发电机发电，然后直接或经变流器给推进电动机供电，由推进电机带动推进器旋转，使船舶运动。原动机有柴油机、蒸汽轮机、燃气轮机和原子能动力装置。现在，新型电源有燃料电池(Fuel cell)、热电偶及太阳能供电的新型能源。

目前，随着超导体材料及其应用技术的发展，超导电力推进和超导磁流体推进也已有了初步的应用，它是电力推进未来发展的一个方向。

1.2 电力推进装置的特点及其要求

1.2.1 电力推进装置的分类和应用范围

图 1.1 所示为电力推进装置总体图。图中 1 为推进电机；2 为汇流排；3 为激磁系统；4 为发电机；5 为热力发动机；6 为控制系统。

不同类型电力推进装置的区别在于原动机、电源种类及其用途不同。

按照热力发动机的种类可把电力推进装置分为柴机电力推进装置、蒸汽轮机电力推进装置、燃气轮机电力推进装置。热动力机的选择要根据功率、设备价钱、船舶用途、经济性能和一系列其它的因素来进行。

柴油机—电力推进装置使用中、小排水量的船舶上，其目的是利用柴油机比蒸汽轮机的效率高这一特点。从整体经济性和减小机舱体积出发应该使用高速柴油机。

为了提高螺旋桨的功率，需要几个柴油机发电机组，而柴油发电机组太多又会失去其优越性。柴油机—电力推进装置的电力系统可以是直流的，也可以是交流的。

蒸汽轮机电力推进装置使用在如下情况：当所需的功率太大而使用太多的柴油机不适合时，或者根据船舶的用途需要采用蒸汽轮机。蒸汽轮机电力推进装置通常采用交流供电，也有直流的，如“列宁”号破冰船。在交流—直流式蒸汽轮机电力推进装置中，采用半导体整流器件，也有采用恒压、恒频和恒功率的交流电力推进装置。

作为大功率燃气轮机装置的方案之一，可以利用推进电机使电气传动控制简单。有如下几种系统组成方式：发电机—直流电动机或交流电动机、带整流器的推进电机等。

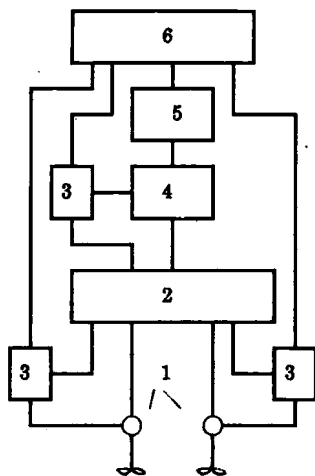


图 1.1 电力推进装置总体图

按电流种类来划分电力推进装置，或者按推进电机分为交流和直流电力推进装置。

直流电力推进装置又可分为：使用同步发电机，不可控整流的直流推进电动机系统及直流发电机、直流推进电动机系统。

交流电力推进装置也可分为下列两类：一类是使用同步发电机和异步推进电动机，热力发动机转速是可控的；另一类是推进电动机用变频器进行控制。

上述电力推进装置，同样可以只有一个船舶交流电站，由这个电站给交流推进电机供电，或者通过整流装置给直流电机供电，同时给其它的船舶电气设备供电。直流电力推进装置使用在破冰船、冰区运输船、拖船、拖网渔船、自航行挖泥船等船舶上。这些船舶都要求有良好的机动性，而且工作条件恶劣。

使用交流电力推进装置的船舶，一般是排水量大的运输船和客船、要求有特殊性能、船舶的速度和方向经常改变的船。对这类船舶来说，动力装置的经济性能具有重要的意义。

带有变频装置或多级变速电动机的交流电力推进装置，应用在航行条件恶劣、又要有良好机动性的船上。

按照电力推进装置的用途分类，可以分为主要的、辅助的和补给的三大类。主要的或称之为独立的电力推进装置中，蒸汽轮机—发电机组或柴油机—发电机组仅给推进电机供电。当然也不排除把部分电能供给船舶的其它用电设备。

辅助电力推进的含义是指在有自航能力的工程船舶上使用，如浮吊、挖泥船、自航行拖曳装置和维修船舶等等。在这些船舶上，电力系统只是给主要的工作机械供电。当航行时，给推进电机供电。

混合式电力推进装置有两个推进系统：机械传动方式和电力传动方式。机械式传动是指通过传动轴、减速器或者液压离合器把推进轴与热力发动机轴联系起来。在电力传动方式中，用辅助发

电机或船舶共用电站对推进电机供电。在主推进器和辅推进器一起工作时，电力传动用来增加推进轴的功率，或者用来获得低速。这时的电力推进不可能保证主推进器工作，综合电力推进用在拖网渔船上。

带有直流或交流电磁离合器的船舶动力装置有其特殊的用途，这种离合器用来柔和地把电动机轴和螺旋桨轴连接起来，离合器可以降低螺旋桨的转速或改变其转向。

1.2.2 电力推进装置的特点

在设计船舶时需要比较不同动力装置的指标和性能、能量传递的方式、重量和体积、一次性投资、运行消耗、设备在船舶上的分布、可靠性、寿命等等。这样可以得到不同方案的一个总的经济指标。

按照不同的指标(重量、体积、总体布置、可靠性等)来衡量电力推进装置，它都比其它的船舶动力装置优越，而对某些类型的船舶(破冰船、拖船、集装箱运输船、驳船等)来说，使用电力推进要比其它的动力装置有许多无可比拟的优点。但是，对于运输船舶来说，电力推进装置并不是都适用。因为电力推进装置比其它动力装置的效率低、一次性投资大、营运消耗大。

电力推进与其它船舶动力装置相比的优点如下：

1) 允许使用高速不可反转的热力发动机，从而降低了船舶动力装置的重量；

2) 当要限制每个热动力发电机组的功率时，可以方便地把发电机联接，从而获得较大功率的船舶动力装置；

3) 允许选用船舶推进器的最佳转速和直径，在热力发动机和推进轴之间没有直接联接时，可以缩短联接轴的长度；

4) 由于在故障状态下可以把发电机和推进电动机断开，保障船舶的航行，从而具有高可靠性并延长使用寿命；

5) 具有控制简单，机动性好的特点；

6)在中低速航行时和船舶经常停止开航时,有较高的经济性能;

7)可以获得所需要的推进电机机械特性,以满足不同航行条件要求;

8)可以从主发电机给船舶电网和大型船舶用电设备供电;

9)可以消除推进螺旋桨对热力发动机的振动和冲击;

10)由于使用同步电动机,可以减小震动;

11)在柴油机—电力推进装置中,可以采用分机组修理的方法,以缩短船舶修理的停航时间。

现代电力推进装置也存在如下缺点:

首先,由于发电机和推进电机中能量的损失,使电力推进的效率降低。从热力发动机到螺旋桨的传递效率比直接联接时的效率约低4%~8%。其中不包括使用大功率的交流推进电机和超导电机的电力推进装置。

其次,采用电力推进装置时要增加维护人员,但高度自动化却减少了人员。

合理的设计可以从本质上减少上述缺点,在许多情况下,可以说电力推进比其它的船舶动力装置更有竞争能力,具有无可争议的优点。

在各类船舶上采用电力推进装置的优点如表1所示。

表 1

序号	船舶类型	采用电力推进装置的优点
1	破冰船	堵转性能好,操纵性能好,低速大马力,正倒车容易
2	考察船	机动性能好,低速航行,噪音小,振动小
3	测量船	操纵性能好,低速航行
4	轮渡	操纵性能好,易实现遥控,便于配置螺旋桨
5	滚装船	便于舱室布置,节约舱容,缩短排气管道
6	豪华客船	噪音小,振动小,节约舱容

续表 1

7	穿梭油船	操纵性能好, 节约舱容, 总体布置灵活
8	救生船	操纵性能好
9	消防船	操纵性能好
10	拖网渔船	经济性能好, 操纵性能好, 采用单一电站
11	打捞船	采用单一电站, 减少设备, 节约投资
12	渔业加工船	采用单一电站, 减少设备, 节约投资
13	石油钻井平台	采用单一电站, 减少设备, 节约投资, 总体布置灵活
14	挖泥船	采用单一电站, 减少设备, 节约投资, 总体布置灵活

1.2.3 对电力推进装置的要求

海船是在不同的地理纬度航行的, 有时一个航次要由北半球到南半球, 其所在位置长期远离基地, 还可能遇到各种天气条件的影晌。由于这些因素的约束, 对电气设备的要求更高了。即要求电气设备应该更可靠地工作在湿度大(存在油水蒸气)、高温($40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$)、摇荡、振动甚至冲击振动。例如, 破冰船强行通过厚冰区。因此, 电气设备应能防潮、耐高温、抗振动和冲击。

电力推进装置应像所有船舶电气设备一样具有可靠性高、能连续运行、操作简单和安全等等特点。电力推进装置可以在一个热力发动机、一个发电机、一个推进电机或一个控制系统出现故障时不会引起船舶的停航。

电力推进装置应满足我国船级社《钢质海船建造规范》的要求和标准。

1.3 电力推进船舶概况

从表 1~3 可以知道, 电力推进主要应用在破冰船、轮渡、豪华客船、渔船及各种工程船舶上。

近几年国外电力推进船舶概况如表 2 所示。

表 2

序号	船舶类型	数量(1966年~1985年)	所占比例(%)
1	破冰船	58	10
2	轮渡客船	63	10.7
3	考察船	56	9.7
4	拖船	32	5.6
5	渔业加工	64	11.6
6	挖泥船	54	9.4
7	布缆船	20	3.4
8	浮吊	47	8.1
9	钻井平台	101	17.4
10	其它船舶	85	14.7
	总和	580	100

我国电力推进船舶概况如表 3 所示。

表 3

序号	船舶类型	推进方式	控制方法
1	测量船	低速	电磁滑差异步机
2	链斗挖泥	附带	电机变频
3	链斗挖泥	附带	可控硅控制 F-D 系统
4	耙吸泥船	侧推	绕线式电机串电阻
5	考察船	主动舵	电机变频
6	布缆船	船侧推	绕线式串频敏电阻
7	航标船	低速	直流 F-D 系统
8	火车轮渡	主推进	直流恒流
9	消磁船	主推进	直流恒流
10	双体船	附带	绕线式电机串电阻
11	打捞船	船侧推	异步电机, 可调距桨
12	滚装船	前后主推	计算机控制变频调速

第二章 船舶动力装置

2.1 船舶动力装置的用途和分类

推动船舶运动的动力装置是由船上的能源系统、把旋转机械能转变为船舶运动动能的水动力推进器及联接能源系统和推进器的传动装置组成。

海船和河船上的动力源是热动力机械—柴油机、蒸汽机或者燃气轮机,用这些机械把燃料的化学能转换为机械能。在原子能动力船上,是把原子能反应堆中的热能转变为机械能,这是借助热动力机械—蒸汽机或蒸汽轮机进行转换的。

能量由热动力机械到船舶推进器的传递,可以用机械方式,液压方式或电气方式进行。用电气方式把能量传递给推进螺旋桨的装置称为电力推进装置。

从推进装置的可靠性和经济性方面考虑,在大多数已经营运的船舶和正在建造的船舶上,使用的是中、低速柴油机 2 (见图 2.1)。柴油机和螺旋桨推进轴之间不是直接联接的,而是通过推力轴承 1 把推力传递到船体。

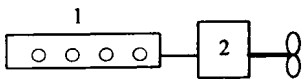


图 2.1 柴油机船舶动力装置

在大功率动力装置的船舶上,甚至在高速游艇上,蒸汽轮机 1 通过齿轮箱 2 使推进轴 3 旋转(见图 2.2),这种系统称之为蒸