

船舶系列丛书

船舶动力装置 原理与设计



CHUANBO DONGLI
ZHUANGZHI
YUANLI YU SHEJI

陆金铭 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船舶系列丛书

船舶动力装置原理与设计

陆金铭 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书着重阐述船舶动力装置的基本组成、工作原理及设计方法。全书共分9章。第1章为绪论;第2、3、4章介绍推进轴系的组成与结构原理及轴系设计与振动校核等;第5、6章分析船、机、桨配合特性及其匹配设计;第7章介绍电力推进及喷水推进的工作原理及设计方法;第8章介绍船舶供电与供热装置;第9章介绍动力管路系统工作原理及其设计。

本书可作为高等院校轮机工程和热能动力工程专业的专业教材,也可作为轮机工程专业的研究生参考教材,并可供船舶行业职工培训及研究设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力装置原理与设计 / 陆金铭编著. —北京:
国防工业出版社, 2014. 7
(船舶系列丛书)

ISBN 978-7-118-09414-5

I. ①船... II. ①陆... III. ①船舶机械—动力装置—
船舶设计 IV. ①U664. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 114820 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19½ 字数 486 千字

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.50 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

本书是应江苏科技大学精品教材建设立项项目而编写的,参考了船舶动力装置相关教材及中国船级社 CCS 的《钢质海船入级规范》,在作者多年积累的教学讲义基础上修改、补充编写而成。对原理部分进行了精简,对应用部分进行了充实,增加了一些新内容,各章附一些思考题及编程计算题。

教育部提出的“卓越工程师教育培养计划”,旨在培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才,为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务。面对我国经济发展转型升级与全面提升国际竞争力的紧迫要求,亟需培养造就一大批创新能力强、适应我国经济社会发展需要的各类工程技术人才。中国正在从造船大国向造船强国发展,船舶动力装置作为船舶最重要的组成之一,迫切需要一大批从事动力装置设计开发、研究制造的优秀人才。

船舶动力装置亦称“轮机”,它是船舶的“心脏”,是保证船舶按任务需求进行航行、作业、停泊及船上各类人员正常工作和生活所必需的机电设备的综合体。它的主要任务是利用燃油化学能、核能、燃料电池等能量,并实现能量的转换、利用和分配。船舶动力装置主要由推进装置、辅助装置、船舶管路系统、船舶甲板机械、机舱的机械设备遥控及自动化 5 个部分组成。船舶动力装置按主机型式分主要有柴油机动力装置、燃气轮机动力装置、蒸汽动力装置、联合动力装置和核动力装置等。近年来,船舶动力装置出现了许多新技术及研究热点,如电力推进及喷水推进技术、燃料电池技术等,本书对此作一些基本介绍,全书内容以柴油机动力装置为主。

船舶动力装置原理与设计是船舶轮机工程专业的核心专业课程。通过该门课程的学习,期望学生能全面地了解船舶动力装置的基本组成、基本类型及特点、总体设计思想和技术发展;掌握推进轴系和传动装置的组成、结构原理及特性,轴系布置原理、计算和主要部件的设计方法;船-机-桨工况配合性能分析、主机选型步骤与方法;动力装置经济性分析;动力装置最优设计方法和计算机辅助设计方法等。

全书共分 9 章。第 1 章为绪论,着重阐述船舶动力装置的基本组成、工作原理等;第 2 章介绍推进轴系的组成与结构原理及轴系设计与轴承布置等;第 3 章介绍推进轴系传动设备的特点及选型要点;第 4 章介绍推进轴系振动计算,包括轴系扭振、纵振及横振等;第 5 章分析船、机、桨配合特性;第 6 章介绍船、机、桨匹配设计;第 7 章介绍电力推进及喷水推进的工作原理及设计方法;第 8 章介绍船舶供电与供热装置;第 9 章介绍动力管路系统工作原理及其设计。袁志飞老师参与了第 1 章及第 2 章的编写,温华兵老师参与了第 4 章的编写,全书由陆金铭老师统稿完成。

船舶动力装置涉及的学科较广,而且随着科学技术的进步还在不断的发展中。由于编者水平有限,本教材的内容组织、分析论述等方面肯定存在错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 船舶动力装置的含义及组成	1
1.2 船舶动力装置的类型及特点	2
1.2.1 柴油机动力装置	2
1.2.2 蒸汽动力装置	5
1.2.3 燃气轮机动力装置	7
1.2.4 联合动力装置	8
1.2.5 核动力装置	11
1.2.6 不依赖空气的动力装置	13
1.3 船舶动力装置的基本特性指标	18
1.3.1 技术指标	18
1.3.2 经济指标	20
1.3.3 性能指标	21
1.4 船舶动力装置的设计要求	22
1.5 船舶动力装置设计的观点、方法与步骤	24
1.5.1 设计观点	24
1.5.2 设计方法与步骤	25
1.6 船舶动力装置计算机辅助设计	26
1.6.1 船舶动力装置设备选型集成系统	26
1.6.2 船舶轴系设计程序系统	27
1.6.3 船舶管路程序集成系统	27
1.6.4 船舶机舱布置设计程序系统	27
1.6.5 船舶动力装置优化设计	28
习题	28
第2章 船舶推进轴系	29
2.1 船舶推进轴系任务与组成	29
2.2 船舶推进轴系的传动形式与特点	32
2.2.1 直接传动	32
2.2.2 齿轮箱减速传动	32
2.3 船舶推进轴系主要部件	33
2.3.1 推力轴与推力轴承	33
2.3.2 中间轴与中间轴承	36

2.3.3	螺旋桨轴	37
2.3.4	尾轴管装置	37
2.4	传动轴的设计	43
2.4.1	传动轴的材料	43
2.4.2	传动轴的设计	44
2.5	船舶推进轴系的布置设计	48
2.5.1	轴线的确定	48
2.5.2	中间轴承位置与间距	49
2.5.3	轴承负荷	51
2.6	船舶推进轴系校中设计	51
2.6.1	轴系模型简化	52
2.6.2	力矩分配法	55
2.6.3	三弯矩方法	64
	习题	68
第3章	推进系统的后传动装置	69
3.1	齿轮传动装置	69
3.1.1	齿轮传动装置的功能及其种类	69
3.1.2	齿轮传动装置选型设计	72
3.2	液力耦合器	76
3.2.1	液力耦合器功能及其种类	76
3.2.2	液力耦合器的工作原理	79
3.2.3	液力耦合器设计	82
3.3	摩擦离合器	85
3.3.1	摩擦离合器的功能及其种类	85
3.3.2	摩擦离合器的设计	87
3.4	自动同步离合器	92
3.4.1	自动同步离合器的工作原理	92
3.4.2	自动同步离合器的特点	93
3.5	弹性联轴器	94
3.5.1	弹性联轴器的功能及其种类	94
3.5.2	非金属弹性元件联轴器	95
3.5.3	金属弹性元件联轴器	97
3.5.4	弹性联轴器的选型设计	100
	习题	101
第4章	船舶推进轴系振动	102
4.1	轴系振动形式及危害	102
4.1.1	轴系振动的形式	102
4.1.2	轴系振动的危害	102

4.2	轴系振动激振力	103
4.2.1	柴油机激振力	104
4.2.2	螺旋桨激振力	111
4.3	轴系的扭振计算	112
4.3.1	轴系扭振计算的当量模型	112
4.3.2	轴系扭振的自由振动计算	116
4.3.3	轴系扭振的强迫振动计算	124
4.3.4	轴系扭转振动的预防措施	130
4.4	轴系纵振计算	132
4.4.1	轴系纵振计算的当量模型	132
4.4.2	轴系纵振的自由振动计算	136
4.4.3	轴系纵振的强迫振动计算	138
4.4.4	轴系纵振的预防措施	146
4.5	轴系回旋振动计算	147
4.5.1	轴系回旋振动的激振力	147
4.5.2	轴系回旋振动计算方法	148
4.5.3	轴系回旋振动的预防措施	162
	习题	163
第5章	船-机-桨的配合性能	168
5.1	基本概念	168
5.1.1	特性、工况、配合点	168
5.1.2	船舶航行阻力特性	169
5.1.3	柴油机的基本特性	169
5.1.4	燃气轮机装置的外特性	171
5.1.5	蒸汽轮机的外特性	173
5.1.6	螺旋桨推进特性	174
5.1.7	航速与转速的转换关系	177
5.1.8	无因次分析法	177
5.2	典型推进装置的稳态特性与配合	178
5.2.1	船、机、桨匹配条件	178
5.2.2	单机单桨直接传动	179
5.2.3	双机单桨推进装置配合特性	181
5.2.4	减速齿轮箱传动	181
5.2.5	一机双桨传动	182
5.2.6	调距桨推进装置的配合及其工作特性	183
5.3	过渡工况	186
5.3.1	过渡过程运动方程	186
5.3.2	起航和加速工况	187

5.3.3	倒航(反转)	188
5.3.4	双桨推进装置的转弯工况	189
	习题	190
第6章	主机与螺旋桨选型设计	191
6.1	概述	191
6.1.1	主推进装置形式	191
6.1.2	螺旋桨类型与数目	193
6.2	功率传递及船舶有效功率估算	197
6.2.1	功率传递	197
6.2.2	船舶有效功率估算方法	199
6.3	机桨匹配设计	201
6.3.1	机桨匹配设计的一般方法	201
6.3.2	等航速下“机配船”的机桨匹配方法	208
6.4	空泡校核	210
6.4.1	柏利尔限界线	210
6.4.2	高恩限界线	212
6.4.3	B系列螺旋桨空泡特性估算图	213
6.5	经济性分析	213
6.5.1	基本概念	213
6.5.2	提高推进效率	215
6.5.3	主机选型的经济性分析	216
6.5.4	推进装置选型的经济分析	218
6.5.5	经济分析实例	220
	习题	222
第7章	电力推进与喷水推进	223
7.1	电力推进	223
7.1.1	概述	223
7.1.2	吊舱推进系统	228
7.1.3	直流电力推进系统	233
7.1.4	交流电力推进系统	235
7.1.5	电力推进系统与螺旋桨特性配合	239
7.2	喷水推进装置	244
7.2.1	概述	244
7.2.2	喷水推进基本理论	247
7.2.3	喷水推进器设计	251
	习题	255
第8章	船舶供电和供热装置	256
8.1	船舶供电装置	256

8.1.1	船舶电站形式及其选择	256
8.1.2	电站容量及配置	257
8.1.3	发电机组选型与布置	259
8.2	船舶供热装置	260
8.2.1	供热任务及供热锅炉形式	260
8.2.2	蒸汽耗量与锅炉容量估算	261
8.2.3	供热系统的布置	263
8.3	柴油机余热利用系统	265
8.3.1	柴油机排气余热利用系统	265
8.3.2	冷却余热利用系统	271
习题	277
第9章	动力管路系统	278
9.1	燃油管系	278
9.2	滑油管系	281
9.3	冷却管系	284
9.4	压缩空气管系	289
9.5	排气管系	292
9.6	管系设计	295
习题	303
参考文献	304

第 1 章 绪 论

1.1 船舶动力装置的含义及组成

船舶动力装置亦称“轮机”，是保证船舶按任务需求进行航行、作业、停泊及船上各类人员正常工作和生活所必需的机电设备的综合体。它的主要任务是产生各种能量，并实现能量的转换、利用和分配，因而有船舶“心脏”之称。

船舶动力装置主要由推进装置、辅助装置、船舶管路系统、船舶甲板机械、机舱的机械设备遥控及自动化 5 个部分组成。

一、推进装置

推进装置是指发出一定功率、经传动设备和轴系带动螺旋桨，推动船舶并保证以一定航速前进的一整套设备。它是船舶动力装置中最重要的组成部分，包括：

(1) 主机。其作用是把燃料燃烧所产生的热能转化为机械能，用以推动船舶前进。船舶根据不同要求可设置一台或者数台主机，也可设置不同类型的主机。目前可供选用的主机有柴油机、汽轮机、燃气轮机等。

(2) 传动设备。其功能是断开或接通主机传递给传动轴（推力轴、中间轴、艮轴）和推进器的功率，同时还可以使后者达到减速、反向和减振等目的。其设备包括离合器、减速齿轮箱、弹性联轴器和电力推进机械等。

(3) 船舶轴系。用来将主机的功率传递给推进器。它包括传动轴、联轴器、轴承、轴系转速发送器、轴系防腐蚀电位仪及轴系密封装置等。

(4) 推进器。是能量转换设备，它是将主机发出的能量转换成船舶推力的设备，如螺旋桨、明轮和喷水推进器等。螺旋桨有定螺距桨和变螺距桨及调距桨等。

(5) 制动设备。对于特种船舶，为了改善前进和倒车性能，动力装置轴系上设置制动设备。制动设备的功能是把主推进轴系旋转运动速度锁住并使其停止旋转，有静态制动装置和动态制动装置 2 种。制动设备的形式有气动、液动、电动及手动 4 种。

图 1-1 为船舶柴油机推进装置的示意图，图中示出柴油主机、减速齿轮箱（传动设备）、

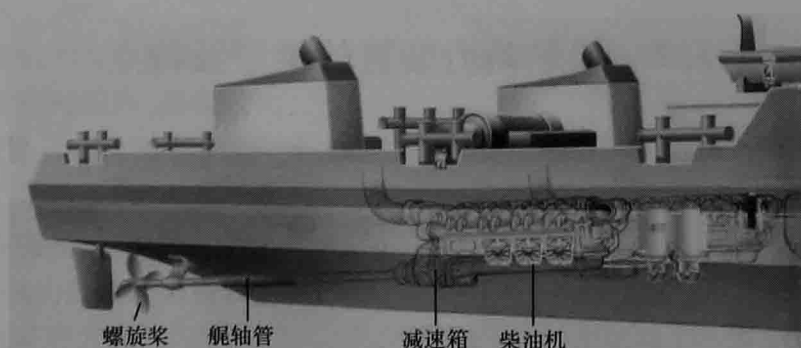


图 1-1 船舶柴油机推进装置

轴系及螺旋桨的连接情况。中高速柴油机转速较高,减速齿轮箱将转速降低后,通过轴系驱动螺旋桨。螺旋桨在水中旋转产生推力或拉力,使船舶前进或后退。驾驶员从驾驶室通过车钟与机舱中的值班轮机员取得联系或直接遥控主机,改变轴系转速和转动方向,或调节调距桨的螺距,从而控制船舶航行的快、慢和进、退。

二、辅助装置

除供给推进船舶的能量之外,用以产生船上需要的其他各种能量的设备,称为辅助装置。它包括:

(1) 船舶电站。其作用是供给辅助机械及全船所需要的电能,由发电机组、配电板及其他电气设备组成。发电机组主要有柴油发电机组、汽轮发电机组、轴带发电机组和余热发电机组等。

(2) 辅助锅炉装置。民用船舶一般用它产生低压蒸汽,以满足加热、取暖及其他生活需要。它由辅助锅炉及为其服务的燃油、给水、鼓风、送汽设备及管路、阀件等组成。

三、船舶管路系统

船舶管路系统用来连接各种机械设备,并传递有关工质,它包括:

(1) 动力管路。主要用来为主机和辅机服务的管路,有燃油、滑油、冷却水、压缩空气、排气及废气利用等管路。

(2) 船舶系统。为保证船舶的生命力及船员和旅客的正常生活所需的系统,有舱底、压载、消防、生活供水、施救、冷藏、空调、污水处理、通风及取暖等。

四、船舶甲板机械

船舶甲板设备是保证船舶航向、停泊及装卸货物所需要的机械设备。包括:

(1) 锚泊机械设备,包括锚机、绞盘等。

(2) 操舵机械设备,包括舵机及操纵机械、执行机构等。

(3) 起重机械设备,如起货机、吊艇机及吊杆等设备。

五、机舱的机械设备遥控及自动化

机舱的机械设备遥控及自动化,包括对主、辅机和有关机械设备等的远距离控制、调节、检测和报警系统等。

在上述船舶动力装置的5个组成部分中,推进装置是最重要的部分,它影响到整个船舶动力装置的性能。其工作好坏,又直接涉及到船舶的正常航行和安全,故在进行设计选型和建造过程中要特别注意。推进装置在船上之所以能发挥重要的作用,必须依赖于动力装置其他各个组成部分的配合,故对其他部分也不能忽视,这样才能保证整个船舶动力装置正常工作。

1.2 船舶动力装置的类型及特点

船舶动力装置按主机形式分主要有柴油机动力装置、燃气轮机动力装置、蒸汽动力装置、联合动力装置和核动力装置等。

1.2.1 柴油机动力装置

一、柴油机的特点

柴油机分为高速、中速和低速3种,高速柴油机主要用于军船和快艇上,中速柴油机

主要用于军船和民用滚装船、中小型运输船上,而低速柴油机则绝大部分用于民用运输船上。

柴油机动力装置具有热效率高、功率转速范围大、较高的功率体积比和功率重量比、在整个工作范围内燃油消耗率低、低转速稳定、空气消耗量少、排气温度低、良好的启动性能和较高的机动性等特点,大多数船舶采用柴油机或柴油机联合动力装置。

1954年6月我国试制成功6187C型柴油机,用作50t运输船的主机。1958年为建造3000t沿海货船的需要,沪东造船厂建造了我国第一台6ESDZ 43/82 1470kW、200r/min 直流扫气增压低速柴油机,装于“和平60号”船上。与此同时,还研制出了6EDZ 43/67 筒形活塞1470kW、250r/min 低速柴油机,首制2台装于“昆仑”号长江高级客船上。1960年由于建造万吨货船的需要开展了7ESDZ75/160A 6470kW 直流扫气低速柴油机的研制工作,于1965年6月通过鉴定验收,并安装于我国第一艘自行设计建造的“东风”轮船上。该动力装置采用了当时国际上刚出现的柴—蒸联合装置,装有强制循环废气锅炉、蒸汽轮机发电机组,航行时可不用柴油发电机组,由蒸汽轮机发电机组供电,使航行时的油耗率大为降低。20世纪70年代末,先后引进了Sulzer、SEMT—Pielstick、B&W、MAN—B&W、大发、MWM等中低速柴油机,还引进了大量为柴油机配套的辅机设备,如柴油发电机组、泵、辅锅炉、空压机、空调设备、控制用的仪器仪表等。

柴油机具有优良的性能,在现代船舶中,不论商船、渔船、工程船及军用舰艇上都得到了极为广泛的应用。目前以柴油机作为主机的船舶占98%以上,柴油机船总功率占造船总功率的90%以上。可见柴油主机占绝对的统治地位。

柴油机具有如下优点:

(1) 经济性高。耗油率比蒸汽、燃气动力装置低得多。高速柴油机耗油率为 $0.16 \sim 0.18 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,中速柴油机为 $0.125 \sim 0.170 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,低速机为 $0.126 \sim 0.140 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。一般汽轮机装置耗油率为 $0.18 \sim 0.35 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,燃气轮机装置耗油率则更大,为 $0.24 \sim 0.40 \text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。这一优点使柴油机船的续航力大大提高,即一定续航力下所需的燃油储备量较少,从而使营运排水量相应增加。

(2) 重量轻。柴油机动力装置中除主机和传动机组外,不需要主锅炉、燃烧器及工质输送管道等,所以,辅助设备和机械相应较少,布置简单,因此单位重量指标较小。

(3) 机动性好。操作简单、启动方便,正倒车迅速。一般正常启动到全负荷只需 $10 \sim 30 \text{min}$,紧急时仅需 $3 \sim 10 \text{min}$ 。虽然启动比燃气轮机装置差一些,但它不需要像燃气轮机装置那样一套复杂的启动和倒车设备。柴油机装置停车只需 $2 \sim 5 \text{min}$,主机本身停机只要几秒钟即可。

柴油机存在如下缺点:

(1) 由于柴油机的尺寸和重量按功率比例增长快,因此单机组功率受到限制。

(2) 柴油机工作时噪声、振动较大。

(3) 中、高速柴油机的运动部件磨损较严重,高速强载柴油机的整机寿命仅 $1000 \sim 2000 \text{h}$ 。

(4) 柴油机在低转速时稳定性差,因此不能有较小的最低稳定转速,影响船舶的低速航行性能。另外,柴油机的过载能力也较差,在超负荷10%时,一般仅能运行1h。

二、柴油机的发展方向

目前,柴油机正往下列几个方向发展。

1. 大型化

由于增压技术的进步和工作过程的改善,单缸和单机功率不断提高。功率的提高主要是通过不断提高平均有效压力 p_e 来实现的,四冲程柴油机的 p_e 已达2.6MPa,二冲程柴油机的 p_e 可达1.575MPa。

14缸RT-flexX96C船用柴油机,持续输出最大功率80080kW,转速102r/min。长27.3m,高13.5m,2300t,适合于新一代大型集装箱船。该机型采用了完善的RT-flex共轨技术,提高了刚性,降低了结构应力,具有良好的可靠性、安全性和耐久性,维护更加方便。

MAN B&W低速柴油机,功率最大可达100000kW。德国Hapad-Lloyd公司建造的7200箱集装箱船选用了12缸K98MC柴油机,功率68610kW(93360hp)、重2157t;供12000箱集装箱船使用的14缸K98MC发动机,功率为73500kW(100000hp)。Wartsila的NSD将RTA机器的T型机B系列的平均有效压力从1.82MPa提高到1.9MPa,功率增加了9%。中速柴油机正在向中型商船的传统领地挑战,并在旅游船、渡船、滚装船上继续保持其传统领地。1996年,Wartsila公司开发的W64系列中速柴油机,缸径640mm、冲程900mm、单缸额定功率2010kW、转速333r/min,可以选择5~9缸直列式。V型机的冲程缩短为770mm,单机缸数增加到16~20缸,转速增加到428r/min,单缸功率为1940kW。这样,如采用2台12缸V型机,双机并车功率可达46560kW,完全可取代1台大功率低速机,并可以明显减少机舱空间。

2. 高效率

进入21世纪后油价上升,降低油耗和节能引起广泛重视。目前低速机的油耗最低已达160g/(kW·h),进一步降低将是很困难的。采用柴-蒸联合装置可以提高效率,特别是中速机,由于排气温度比低速机略高,更有利于采用废气涡轮发电装置。

3. 高可靠性和对船舶有较强的适应性

Sulzer TRA 84机采取了发动机曲轴中心线至船体内底板的高度保持与其有竞争的制造厂的相同缸径的发动机一致的措施,以便于在现有的船舶设计中替换。考虑到上排气道及机舱后部横向空间的布置,涡轮增压器和扫气冷却器可以安装在发动机不同的纵向位置上。为了简化机舱管系的布置,将十字头润滑油泵安装在发动机上,并当发动机需要附加平衡装置时,作为附件,可提供电动二级平衡装置。

MANB & W公司推出的绿色环保G型主机G-ME,冲程更长,转速更低,油耗更低,效率更高,行程/缸径比增加到4.65,汽缸平均有效压力达21.0bar。6G60ME-C9.2相对于6S60ME-C8.2机型效率提高2.1%,与之匹配的螺旋桨效率提高4.2%。6G50ME-B9.2相对于6S50ME-B9.2机型效率提高0.2%,与之匹配的螺旋桨效率提高4.3%。

4. 低排放

柴油机在燃油燃烧过程中,不但产生二氧化碳(CO₂),还产生诸如氧化氮(NO_x)、碳氢化合物(HC)、氧化硫(SO_x)、一氧化碳(CO)和灰尘颗粒等有害物质,它们对周围环境造成不同程度的污染。首先提出这一问题的是美国、挪威和瑞典等国,国际海事组织(IMO)已对柴油机的NO_x排放作出了规定,2000年1月以后建造的新船或改装船,其柴油机的排放物NO_x和SO_x将分别减少30%和50%(和1991年比)。对NO_x的限制值主要取决于柴油机的转速,其中包括了柴油机的经济性因素。对SO_x的限制主要取决于燃油的含硫量,要求限制在4.5%以下。图1-2为柴油机NO_x排放限制标准,表1-1为NO_x排放限制条件执行日期,表1-2为硫排放限制标准。

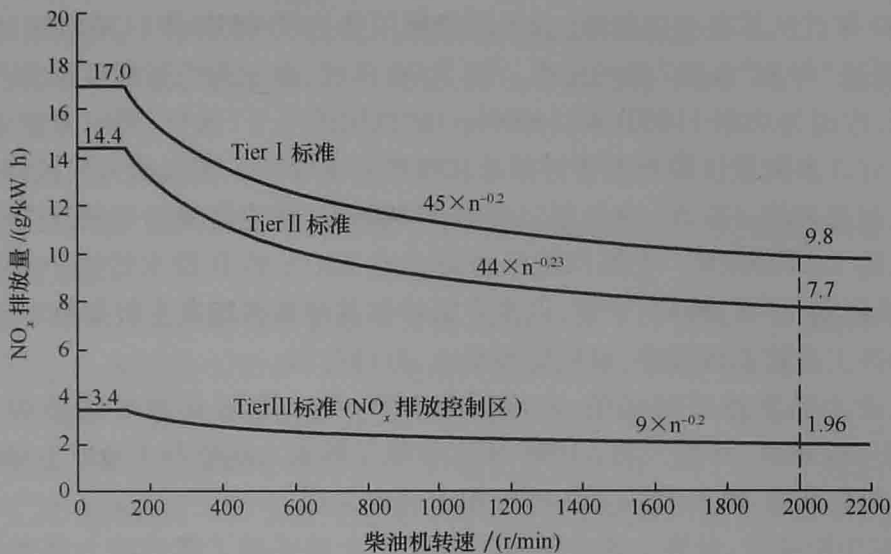


图 1-2 柴油机 NO_x 排放限制

表 1-1 NO_x 排放限制条件执行日期

船舶建造日期(以龙骨安放时间为准)	室外	室内
2000 年 1 月 1 日以前	不限制	不限制
2000 年 1 月至 2010 年 12 月 31 日	Tier I	Tier I
2000 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日	Tier II	Tier II
2016 年 1 月 1 日以后	Tier II	Tier III

表 1-2 SO_x 排放限制

限制日期	全球限制	SO _x 排放控制区	限制日期	全球限制	SO _x 排放控制区
2010 年 1 月	4.5%	1.5%	2015 年 1 月	3.5%	0.1%
2012 年 1 月	3.5%	1.0%	2020 年 1 月	0.5%	0.1%

为了改善柴油机的排放,近年来,各柴油机制造商采取了各种具体有效的措施,诸如为降低最高燃烧温度,可延迟燃油喷射,使发火点和燃烧后移。但这将使燃油消耗率增加。采用此法后每减少 10% NO_x,燃油消耗将会上升 2%。再如燃烧乳化油,用燃油和水混合喷射,向柴油机燃烧室喷水可以降低最高燃烧温度,水雾与燃气的混合越好,效果也越好。采用机内处理方法降低氧化氮的生成量,不但效果不十分明显,并且每一种方法均将不同程度地影响柴油机的经济性,使燃油消耗量增加。采用“选择催化还原除氧化氮系统”(SCR 法)对废气进行机后处理,既可以避免对柴油机本身结构的改变,不影响柴油机的经济性,又可以将废气中的 NO_x 去除(可达 95%)。另外,采用代用燃料以降低 NO_x、HC 和 CO 的排放逐渐受到各国柴油机研究机构的重视。采用天然气、液化石油气、甲烷等可使有害气体排放显著减少。原因是燃烧温度较低,气体燃料易于完全燃烧,但需利用电控装置对空燃比作全过程监测和调节。

1.2.2 蒸汽动力装置

1958 年由沪东造船厂建造的“民主 14 号”乙型沿海客货船采用了 1100kW 的四缸三胀式蒸汽往复机。1958 年 6 月由沪东造船厂制成 1765kW 的五缸单流式蒸汽机用于“和平 25 号”和“和平 28 号”沿海货船上。往复蒸汽机由于整个动力装置效率低、平衡性能差、重量尺寸大等原因当时在国外已基本淘汰。

20 世纪 60 年代从苏联引进图纸,由大连造船厂建造了 9555kW(13000hp) 汽轮机用作万吨远洋货船“跃进”号和“红旗”号的主机。到了 70 年代,由上海汽轮机厂根据“跃进”号引进的汽轮机图纸,改进为功率 11800kW(16000hp) 的汽轮机用于“远望”号航天测量船上,当时主要是考虑船上有许多测量仪器和设备对振动和噪声要求较高。该船动力装置的主要参数为蒸汽压力 5MPa,过热蒸汽 470℃,主机额定功率 11800kW,减速器输出端转速为 118r/min,5 台汽轮发电机组 5×1200kW。主副汽轮机组由 2 台 32t/h 的 D 型水管锅炉并行供汽。机舱采用集控,主机启动、停车、换向、变速,以及主锅炉和其他辅机均在主机集控室监视,并通过微处理机对全部热工参数监视报警、彩色屏幕显示、自动打印。

用汽轮机动力装置推进的船舶,在国际上 1970 年~1976 年每年建造约 120 艘,1977 年—1980 年每年仅建造 20 艘左右,1986 年以后除了核动力舰船和大型航空母舰、LNG 船外已很少采用。但在我国 80 年代以后大型舰船上仍有采用。

在 20 世纪中期前后,世界上各主要海军国家都大量采用了蒸汽动力装置作为大型舰船的主动力,蒸汽动力装置的水平为主锅炉容量 65~120t/h,每台主汽轮机的功率为 27500kW(35000 hp)、36800kW(50000 hp) 和 51500kW(70000hp),采用蒸汽的参数为 4.4~6.3MPa、450℃~490℃,美国航空母舰则采用 8.27MPa、510℃,油耗在全航速时为 381~558 g/(kW·h)。目前我国有单轴推进功率 11756kW(16000hp)~26500kW(36000hp) 的多型蒸汽动力装置。

蒸汽轮机是一种由高温高压蒸汽驱动的涡轮机械。蒸汽轮机动力装置由锅炉、蒸汽轮机、冷凝器、给水泵、给水预热器、减速齿轮箱、轴系及推进器等组成,其基本工作原理如图 1-3 所示。燃料在锅炉 1 的炉膛内燃烧,放出热量加热汽包中的水。水吸热后在锅炉的汽包中汽化为饱和蒸汽,饱和蒸汽在过热器 2 中再次吸热后成为过热蒸汽。过热蒸汽经过主蒸汽管路 3 进入高压蒸汽轮机 4 和低压蒸汽轮机 5,膨胀做功,驱动蒸汽轮机叶轮旋转,再通过齿轮减速装置 6 和轴系带动螺旋桨 7 工作。做过功的乏汽(废汽)在冷凝器 8 中被冷却水冷却,凝结成水,然后由凝水泵 10 抽出送至给水预热器 11,并经给水泵 12 泵入锅炉 1 的汽包中,从而形成一个工作循环。冷凝器 8 中的冷却水由冷却水循环泵 9 由舷外吸入,吸热后又排出舷外。

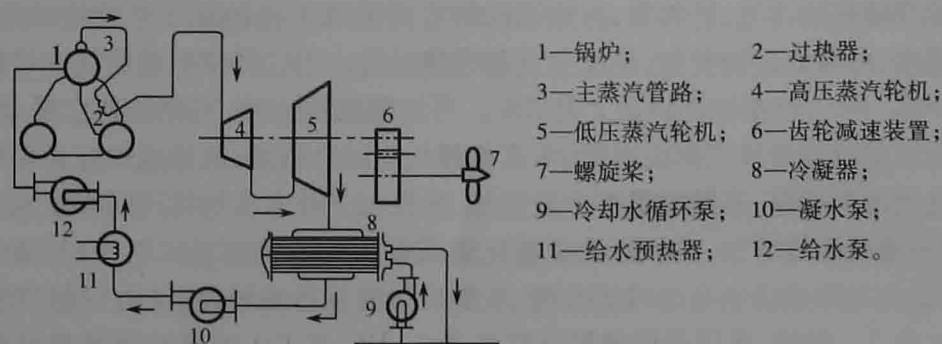


图 1-3 蒸汽轮机动力装置工作原理

蒸汽动力具有如下优点:

(1) 由于汽轮机工作过程的连续性有利于采用高速工质和高转速工作轮,因此单机功率远较活塞式发动机大。现代舰用汽轮机的单机组功率已达 25×10^4 kW 以上,若不受推进器尺寸和制造的影响,陆用电站汽轮机一样可做成 $6 \times 10^5 \sim 10 \times 10^5$ kW 的巨型动力装置。正由于此,主机本身的单位重量尺寸指标优越。

(2) 汽轮机叶轮转速稳定,无周期性扰动力,因此机组振动小、噪声低。

(3) 磨损部件少,工作可靠性高,使用期限可高达 10^5 h 以上。

(4) 使用劣质燃料油,滑油消耗率也很低,仅 $0.1 \sim 0.59\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。柴油机的滑油消耗率为 $3 \sim 10\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

蒸汽动力存在以下缺点:

(1) 重量尺寸大。因为蒸汽动力配置了主锅炉,以及为其服务的辅助机械和设备,占去了船体许多营运排水量。

(2) 燃油消耗大。蒸汽动力装置效率较低,额定工况下经济性仅为柴油机装置的 $1/1.5 \sim 1/2$; 在部分工况下,甚至为 $1/2.5 \sim 1/3$; 在相同燃料储备下续航力降低。

(3) 机动性差。启动前准备时间为 $30 \sim 35\text{min}$; 紧急情况下,缩短暖机过程后也需要 $15 \sim 20\text{min}$; 在舰艇上为保证立即起锚的要求,以暖机状态停泊,从而增加了停泊时的燃料消耗。另外,从一种工况变换到另一种工况的过渡时间也较柴油机动力装置长 $2 \sim 3$ 倍。

1.2.3 燃气轮机动力装置

燃气轮机作为主推进动力广泛应用于大中型舰船。在民船上其压比已高达 30 左右,燃气初温达 1700K 。舰用燃气轮机的燃气初温一般较民用的稍低,约为 1600K ,油耗可达到 $218\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,从美国引进的 LM2500 的油耗为 $231.2\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。在燃气轮机系统中增加一台余热锅炉和蒸汽轮机,燃气轮机排气进入余热锅炉产生蒸汽,然后在汽轮机内做功,提供附加的推进功率。以美国海军为例,这种复合装置的耗油率比简单循环 LM2500 减少约 28%,全功率时,蒸汽轮机的功率为燃气轮机的 35% 左右,在巡航工况时两者之比可达 50%。其缺点是重量尺寸增加,造价高。

我国在 20 世纪 50 年代末即进行了燃气轮机动力装置的研究,在 70 年代将苏联 AI-20M 航空发动机改装成船用 409 型机,最大功率可达 2868kW ,额定工况油耗为 $382\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,装在由大沽船厂建造的 722 气垫登陆艇上。

近年来燃气轮机在渡船上有所发展,如挪威建造的滚装车客渡船采用 4 台三菱 GS12R-PTR 燃气轮机,燃用 LNG,其排出的 NO_x 可以减少 90%, CO_2 可降低 25%。

燃气轮机的基本工作原理与汽轮机大致相似,只是能量转换采用的载体工质不同。汽轮机中使用的燃料是在锅炉炉膛内燃烧,使锅筒中的水加热产生蒸汽,推动叶轮做功;而燃气轮机则利用燃料在燃烧室内燃烧,所产生的燃气直接推动叶轮做功。

图 1-4 是燃气轮机动力装置的基本工作原理图。一般由 3 部分组成:

1. 压气机

压气机用来压缩进入燃烧室的空气。

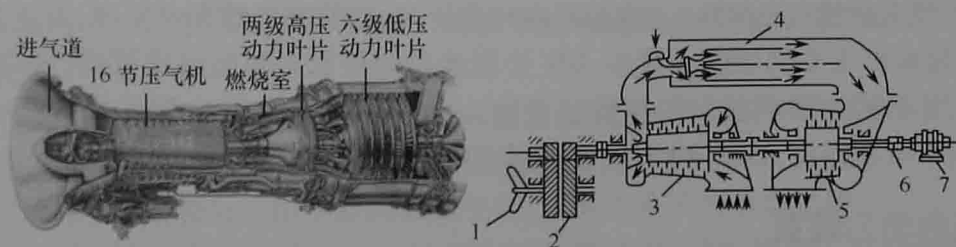


图 1-4 燃气轮机动力装置原理图

1—螺旋桨;2—减速齿轮箱;3—压气机;4—燃烧室;5—燃气轮机;6—联轴器;7—启动电机。

2. 燃烧室

燃料在其中燃烧形成高温高压燃气。

3. 燃气轮机

它将燃气的热能转变为推动轴系和螺旋桨的机械功。

如图 1-4 所示,供燃料燃烧的空气首先进入压气机 3,经压缩后温度升高到 $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$,然后再送到燃烧室 4(燃气发生器)中去;与此同时,燃料通过喷嘴喷入燃烧室,与高温高压的空气混合后点火燃烧,这时温度可高达 2000°C 左右。一般用渗入压缩空气的方法,即二次进风的方法降低燃气温度至 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。燃气进入燃气轮机 5,在叶片流道内膨胀,将其动能转换为机械功,使燃气轮机旋转,驱动压气机 3,随后通过减速齿轮 2 带动螺旋桨 1 工作。装置的启动是利用电动机 7 进行的,电动机通过联轴器 6 与燃气轮机连接。

燃气轮机动力装置能够较好地满足现代舰艇对动力装置提出的高速、高机动性和极低的单位重量的战术、技术要求,故在军用舰艇中较常使用。

燃气轮机动力装置有如下优点:

(1) 单位功率的重量尺寸极小。加速用燃气轮机装置的单位重量可达 $0.65 \sim 1.3\text{kg/kW}$,全工况用燃气轮机装置为 $2 \sim 4\text{kg/kW}$ 。

(2) 单机功率大。有中间冷却、中间加热和回热措施的燃气轮机装置机组功率可达 $6 \times 10^4\text{kW}$ 。

(3) 良好的机动性。从冷态启动至全负荷时间,一般为 $1 \sim 2\text{min}$,有中间冷却、中间加热和回热措施的燃气轮机装置也只需 $3 \sim 5\text{min}$ 。

(4) 低负荷时经济性的恶化程度比汽轮机小。

燃气轮机装置有以下缺点:

(1) 主机没有反转性,必须设置专门的倒车设备。

(2) 必须借助于启动电机或其他启动机械启动。

(3) 由于燃气的高温,叶片材料用的合金钢昂贵,工作可靠性较差、寿命短,如燃气初温在 750°C 以上的燃气轮机,寿命仅 $500 \sim 1000\text{h}$ 。

(4) 由于燃气轮机工作时空气流量很大,一般为 $16 \sim 23\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,柴油机约为 $5\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,汽轮机约为 $0.5\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,因此进、排气管道尺寸较大,舱内布置困难。

(5) 对燃油品质要求高,不能燃烧劣质燃油,且油耗偏高,低转速时性能差,经济性较差,故在民用运输船上很少采用。

舰用燃气轮机正从简单循环(如 LM2500)向带有中间冷却回热的燃气轮机(ICR)发展,如 GT25000 大功率(28670kW)舰船用燃气轮机。未来高速渡船和高速客运双体船将越来越多地采用燃气轮机,如瑞典 Stena 航运公司订造的 Stena Expforer 铝质双体船,采用了 2 台 GE 公司 LM2500 燃气轮机和 2 台功率较小的 GE LM1600 燃气轮机,总功率为 73550kW ,带动喷水推进装置,最大航速可达 43kn 。渡船将向尺度更大、速度更快的方向发展,高速渡船采用燃气轮机亦将是未来主要的动向。日本 IHI 公司推出的超长双体型高速渡船(SSTH),船长为 200m ,拟采用 41000kW 的燃气轮机推进系统。在这些新概念中,一艘船长为 230m 、航速为 40kn 的渡船有可能需要 $250 \sim 300\text{MW}$ 的推进系统。

1.2.4 联合动力装置

舰船要求有较高的全速功率,而全速航行的时间是很少的,只占整个服役期的 $2\% \sim 5\%$,大部分时间用巡航速度航行,巡航速度一般为全速的 $50\% \sim 70\%$,相应所需的功率为总功率