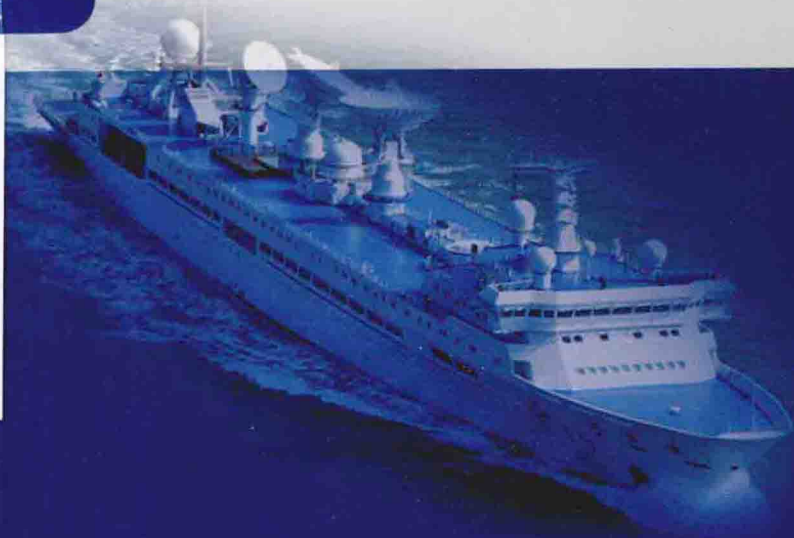


普通高等教育船舶与海洋工程学科“十二五”规划系列教材

船舶动力装置 原理与设计

● 主 编 吕庭豪
● 副主编 李海艳 吕瑜



华中科技大学出版社

<http://www.hzupress.com>

普通高等教育船舶与海洋工程学科“十二五”规划系列教材

船舶动力装置原理与设计

主 编 吕庭豪
副主编 李海艳 吕 瑜

华中科技大学出版社

内 容 提 要

本书介绍船舶动力装置的组成、工作原理及其特点;并以柴油机动力装置为侧重点,就主柴油机的原理和特性,以及推进装置形式等进行了论述;对传动设备与轴系、管路系统、辅助装置及动力装置总体的设计思想、设计理论和设计方法等做了详细的介绍;对本学科一些新的技术和方法也做了简介。

全书共 8 章,涵盖的内容丰富,在素材选取和体系构造上,既考虑满足轮机工程本科专业的教学需要,又考虑了非轮机工程专业选用的方便。本书亦可供从事船舶研究、设计与生产的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶动力装置原理与设计/吕庭豪主编. —武汉:华中科技大学出版社,2014.5
ISBN 978-7-5680-0098-7

I. ①船… II. ①吕… III. ①船舶机械-动力装置-高等学校-教材 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 100123 号

船舶动力装置原理与设计

吕庭豪 主编

策划编辑:万亚军

责任编辑:刘勤

封面设计:刘卉

责任校对:何欢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉市籍缘印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:20.5

字数:531千字

版次:2014年8月第1版第1次印刷

定 价:39.80元



华中科技大学

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

普通高等教育船舶与海洋工程学科“十二五”规划系列教材

序

海洋是孕育生命的“摇篮”，也是养育生命的“牧场”，人类社会发展的历史进程与海洋息息相关。自古以来，人类在利用海洋获得“鱼盐之利”的同时，也获得了“舟楫之便”，仅海上运输一项，就占到了目前国际贸易总运量中的 2/3 以上。而今随着科学技术的发展，海洋油气开发、海洋能源开发、海水综合利用和海洋生物资源开发及保护等拉开了 21 世纪——海洋新世纪的帷幕。传统的船舶工程因海洋开发而焕发青春，越来越明朗地成为 21 世纪一道亮丽的风景线。

船舶与海洋工程学科，是一个有着显著应用背景的学科。大型船舶和海上石油钻井平台，是这个学科工程应用的两个典型标志。它们就如同海上的城市，除了宏大的外观，其上也装备有与陆上相类似的设施，如电站及电网系统、起吊设备、生活起居设施、直升机起降平台等，还装备有独特的设施，如驾控室、动力装置、推进系统、锚泊设备等。因此，该学科与其它相关学科有着密切的联系，如土木工程、动力工程及工程热物理、机械工程、电气工程、控制科学与工程等学科。将现代化的船舶与海洋工程的产品称为集科技大成之作，毫不夸张。

为了满足船舶与海洋工程学科本科生的学习需要，在多年教学、科研工作的基础上，并参考兄弟院校的相关教材及国内外有关资料文献，编写了本系列教材。本系列教材涵盖了船舶与海洋工程专业和轮机工程专业的主要学习课程，包括船舶与海洋工程概论、轮机工程概论、船舶流体力学、船舶设计原理、船舶与海洋工程结构力学、船舶摇摆与操纵、海洋平台设计原理、海洋资源与环境、舰船电力系统及自动装置、船舶动力装置原理与设计、深海机械与电子技术、舰船液压系统等。本系列教材的编写，旨在为船舶与海洋工程学科相关专业的本科生提供系统的学习教材，同时也向从事造船、航运、海洋开发的科技工作者及对船舶与海洋工程知识有兴趣的广大读者提供一套系统介绍船舶与海洋工程知识的参考书。

教材建设是高校教学中的基础性工作，是一项长期的工作，需要不断吸取人才培养模式和教学改革成果，吸取学科和行业的知识、新技术、新成果。本套教材的编写出版只是近年来华中科技大学船舶与海洋工程学院教学改革的初步总结，还需要各位专家、同行提出宝贵意见，以进一步修订、完善，不断提高教材质量。

华中科技大学船舶与海洋工程学科规划教材编写组

2014 年 8 月

前 言

本书是根据华中科技大学轮机工程专业本科四年培养计划中的“船舶动力装置原理与设计”课程教学大纲的要求和编者多年来积累的教学经验而编写的。

“船舶动力装置原理与设计”是一门综合性、专业性、实践性和应用性都很强的课程,它涉及的知识面相当广泛。在本书的编写过程中,考虑到本课程的特点,在介绍船舶动力装置基本理论和原理的基础上,拓宽了实用内容;着重考虑轮机工程专业本科生的使用,同时兼顾非轮机工程专业本科生的选用要求。因此,在结构体系编排上采用了由浅入深、由泛用到专用的方式,力求让更多的读者受益。本书内容取材遵循与时俱进的理念,在沿袭必需的传统内容的同时,尽量展示船舶动力装置新的研究成果与设计方法,使读者了解现代船舶动力装置的发展趋势。全书内容涵盖内河船舶和海洋船舶动力装置的特点,并以最常用的柴油机动力装置为主线进行论述,引导读者把握本书内容的重点所在。本书内容体系力求完整,亦尽量避免与其他课程内容的重复。

全书共分8章。第1章叙述船舶动力装置的基本概念、形成与发展,常用船舶动力装置的组成原理及特点,介绍了推进装置的配置形式。第2章叙述船用主柴油机的基本原理和特性,介绍了主机选型论证方法。第3章叙述轴系的任务和组成,轴系零部件的选型与设计方法。第4章介绍了传动设备的结构原理与特点,以及选型要求。第5章以柴油机动力装置为例,叙述船舶管路系统的工作原理与设计问题。第6章叙述船、机、桨工况与配合的基本理论,并就典型推进装置形式的工况与配合特性进行了分析和讨论。第7章叙述船舶辅助供能装置,介绍了船舶供电装置和供热装置的作用、组成、设备选型和设计计算方法。第8章叙述船舶动力装置总体设计的思想与观点,总体设计的内容与方法,评价和改善动力装置设计质量等问题,并结合实例介绍了船舶机舱规划与布置的相关内容。

全书语言流畅,图文并茂,通俗易懂。众多的插图不仅起到直观解疑的作用,也使读者不致有内容抽象、枯燥的感觉,便于读者阅读和自学。

本书由吕庭豪任主编,李海艳、吕瑜任副主编。本书资料的收集、内容的筛选、文字的编排和插图的绘制等工作由编者共同完成。

本书是在华中科技大学船舶与海洋工程学院的领导大力支持下编写的,并承蒙多位同行的帮助,谨在此一并表示深切的谢意。

尽管在成书过程中,编者对内容、体系等做了认真的考虑和权衡,但限于学识与水平,加上现代船舶动力装置的不断发展与创新,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2014年7月

于华中科技大学

目 录

第 1 章 船舶动力装置引论	(1)
1.1 动力装置概述	(1)
1.2 蒸汽轮机动力装置	(4)
1.3 燃气轮机动力装置	(9)
1.4 柴油机动力装置.....	(14)
1.5 联合动力装置.....	(15)
1.6 核动力装置.....	(18)
1.7 船舶推进装置的基本形式.....	(21)
第 2 章 主柴油机原理与选型	(27)
2.1 柴油机的构造与类型.....	(27)
2.2 柴油机的工作原理.....	(31)
2.3 柴油机的工作参数.....	(36)
2.4 柴油机的特性.....	(40)
2.5 柴油机推进装置的选型分析.....	(48)
2.6 柴油机推进装置功率传动过程.....	(55)
第 3 章 船舶轴系设计	(59)
3.1 概述.....	(59)
3.2 轴系布置设计.....	(62)
3.3 传动轴结构与设计.....	(68)
3.4 尾轴管装置的结构与选型设计.....	(82)
3.5 轴系部件的结构与选型.....	(96)
3.6 轴系负荷与合理校中计算	(112)
第 4 章 后传动设备原理与选型设计	(128)
4.1 概述	(128)
4.2 船用弹性联轴器	(129)
4.3 船用摩擦离合器	(133)
4.4 船用液力耦合器	(141)
4.5 船用齿轮传动设备	(145)
4.6 可调螺距螺旋桨装置	(154)
第 5 章 船舶管路系统	(161)
5.1 概述	(161)
5.2 燃油管系	(161)
5.3 润滑油管系	(172)
5.4 冷却水管系	(180)
5.5 压缩空气管系	(189)

5.6	排气管系	(196)
5.7	舱底水管系	(200)
5.8	压载水管系	(206)
5.9	消防管系	(213)
5.10	供水管系	(222)
5.11	机舱通风管系	(228)
5.12	管系材料的选用与计算	(233)
第 6 章	船机桨工况配合特性分析	(242)
6.1	船、机、桨工况配合概述	(242)
6.2	单列式推进系统工况配合特性	(248)
6.3	非单列式推进系统工况配合特性	(256)
6.4	过渡工况配合特性	(262)
第 7 章	船舶辅助供能装置	(266)
7.1	船舶供电装置	(266)
7.2	船舶供热装置	(270)
第 8 章	船舶动力装置总体设计	(276)
8.1	概述	(276)
8.2	总体设计质量的评价	(283)
8.3	提高总体设计质量的途径	(288)
8.4	机舱规划	(296)
8.5	机舱布置与实例	(299)
参考文献	(319)

第1章 船舶动力装置引论

1.1 动力装置概述

1.1.1 船舶动力装置的含义与组成

船舶动力装置是指船舶上所需能量的产生、传递及消耗的全部机械、设备及系统的有机组合体。它用来保证船舶正常航行、作业、停泊以及船员、旅客正常工作和生活,是船舶的一个重要组成部分。船舶,根据其大小、用途、航区的不同,动力装置中机械、设备及系统的规模、数量和复杂程度是不相同的,但其组成基本相同。它可分为以下几个方面的内容。

1. 推进装置

推进装置是指在给定的条件下,保证船舶以一定航速航行所需能量和推进力的设备,它是船舶动力装置中最主要的组成部分,主要包括以下内容。

(1) 主发动机 简称主机,是供给船舶以一定航速航行所需能量的动力机,现代船用主机有蒸汽轮机、燃气轮机和柴油机等。此外,电力推进装置中采用电动机作为主机。

(2) 主锅炉 它是为蒸汽轮机提供蒸汽的设备,包括为它服务的辅助设备和管系等。

(3) 传动设备 它是将主机发出的能量通过传动轴传递给推进器的设备。它同时还可起到离合、减速、变向和减振等作用。它包括减速器、离合器和联轴器等,以及电力推进装置中的专用设备。

(4) 船舶轴系 其作用是将主机发出的能量传递给推进器,同时将推进器发出的推力传递给船体。它包括传动轴、轴承和密封件等。

(5) 推进器 它是将主机发出的能量转换成船舶推力的设备。主要有螺旋桨推进器、明轮推进器、直翼推进器和喷水推进器等。

2. 辅助装置

除供给船舶以一定航速航行所需能量之外,用于产生船上需要的其他各种形式能量的设备称为辅助装置。它有如下几类。

(1) 船舶电站 它的作用是供给全船所需要的电能(电力推进装置所需电能除外)。它由发电机组、配电柜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,轴带发电机组等形式。

(2) 辅助锅炉装置 它的作用是产生低压蒸汽,供给全船加热、取暖及其他生活所需的热能。它主要由辅助锅炉或余热锅炉以及为它们服务的管系和设备等组成。

3. 船舶管路系统

它是泛指为专门用途而输送流体(液体或蒸汽气体)的成套设备,用于保证船舶动力装置可靠工作以及船舶航行安全。按其用途分为两大类。

(1) 动力管系 主要用来为主机和辅机服务的管系。计有以下几种:燃油管系、润滑油管系、冷却水管系、压缩空气管系、排气管系等。

(2) 船舶管系 为保证船舶的航行安全及船员和旅客的正常生活所需要的系统。计有以下几种:舱底水管系、压载水管系、消防管系、蒸汽管系、生活水管系、通风管系等。

此外,现代特种运输船舶设置了许多专用管系,如 LNG 运输船舶中的 LNG 管系、石油运输船舶中的货油管系、化学品运输船舶中的液货加热保温管系等均属于船舶专用管系。

4. 船舶甲板机械

它是指为保证船舶航行、停泊及装卸货物所需要的机械设备。它主要有以下几类。

(1) 锚泊机械设备 它包括锚机、绞盘等。

(2) 操舵机械设备 它包括舵机及操纵机械、执行机构等。

(3) 起吊机械设备 它包括起货机、吊艇机及吊杆等设备。

5. 机舱遥控及自动化设备

它是指实现动力装置远距离操纵与集中控制调节、检测和报警的设备。它的控制对象包括主机、辅机和有关机械设备等。

综上所述,船舶动力装置是一个十分复杂的能量综合体。由燃料的化学能转换来的有三种能量形式:推进动力、电能和热能。因此,构成了非常复杂的机械、设备及系统的组合体。其中,推进装置是最重要的部分。推进装置产生的推进动力是衡量船舶活动能力的根本依据,推进装置的技术性能可以代表动力装置的性能,其工作的好坏,又直接影响到船舶的正常航行与安全,故在设计选型和建造中都应特别注意。

由上可知,船舶动力装置研究的内容是极为丰富的,但本书主要讨论柴油机动力装置,并着重研究推进装置的相关问题。

1.1.2 船舶动力装置的形成与发展

历史上(200 多年前)用蒸汽机、锅炉、明轮推进器等机器设备代替风帆作动力来推进船舶的一套机械设备与系统,俗称“轮机”。轮机工程一词源于英文 marine engineering,即海上(动力)工程之意。

现代人们把船舶上实现能量转化和分配的全部机械、设备和系统的有机组合体统称为“船舶动力装置”。所谓船舶动力装置,是指保证船舶正常航行、作业、停泊以及船员、旅客正常工作和生活所必需的机械设备及系统的综合体。

1807 年,蒸汽机被应用到一艘名为“克莱尔蒙特”(Clermont)号用明轮推进的木质船上,于是开创了用机器设备代替风帆作动力推进船舶的历史。

1896 年,世界上第一艘汽轮机船“透平尼亚”(Turbinia)号试航。

1903 年,第一艘内燃机船“万达尔”(Bahgal)号问世。

1951 年,作为主要动力的燃气轮机船开始建造。

1952 年,自由活塞蒸汽机——燃气轮机联合装置开始在“雪利欧斯”(Sirius)级扫雷艇上使用。

1954 年,“诺提拉斯”(Nantilus)号核动力潜艇下水。

目前,螺旋桨取代明轮作为主要推进器已广泛应用于各类船舶上。

现代“轮机”的内容已极其丰富;其机械设备的规模、功能、复杂性和自动化程度等方面都是过去无法相比的。它除了提供推进船舶的动力外,同时还产生各种形式的能量,如机械能、电能及热能等,以供给船舶在航行和停泊时船舶辅机和其他生活上的需要。

本学科涵盖的内容如下:

- (1) 动力装置;
- (2) 热能动力机械;
- (3) 振动与噪声;
- (4) 自动化与智能工程;
- (5) 辅机与系统;
- (6) 环境工程;
- (7) 电力系统与设备;
- (8) 轮机检验、管理和驾驶;
- (9) 海洋开发技术等。

其中,动力装置是船舶“活力”的源泉,它是近代船舶必不可少的重要组成部分,并素有船舶“心脏”之称;因此在很多情况下,“动力装置”和“轮机”的含义是相同的,只是使用习惯和场所不同,可能有不完全相同的解释和理解;轮机自动化程度是衡量现代船舶设计与制造水平的重要标志,它是船舶的“灵魂”;海洋开发技术是轮机工程面临的新挑战和新机遇,是21世纪高新技术的“精髓”。

现代轮机工程所研究的内容大致归纳为如下几点:

- (1) 舰船新型动力系统的研制;
- (2) 舰船新能源的开发与利用;
- (3) 船舶动力系统的优化组合与节能新技术;
- (4) 船舶机械与系统的自动化和智能化;
- (5) 船舶和海洋工程的环保技术;
- (6) 海洋资源开发技术等。

由此可见,轮机工程已为广大的科学技术人员施展才华提供了一片碧水蓝天。

1.1.3 船舶动力装置的分类

船舶动力装置按照其不同特征可分成如表1-1-1所示的各种类型。

表 1-1-1 船舶动力装置的类型

分类方法	按使用工质分	按主机型式分	按使用燃料分
类型	蒸汽动力装置	蒸汽轮机动力装置	常规动力装置
	燃气动力装置	燃气轮机动力装置	核动力装置
	蒸汽-燃气联合动力装置	柴油机动力装置	—
	—	联合动力装置	—

主发动机是动力装置中最重要的机械设备,因此,本章将分别介绍几种船用热力发动机及其动力装置的基本原理与特点。

1.2 蒸汽轮机动力装置

1.2.1 基本组成和简单热力循环

1. 组成与原理

船舶蒸汽轮机动力装置是以锅炉产生的蒸汽为工质,以蒸汽轮机作为主机,其输出功率通过减速器,传递到螺旋桨以推进船舶的动力装置。图 1-2-1 所示的是蒸汽轮机动力装置的基本组成。

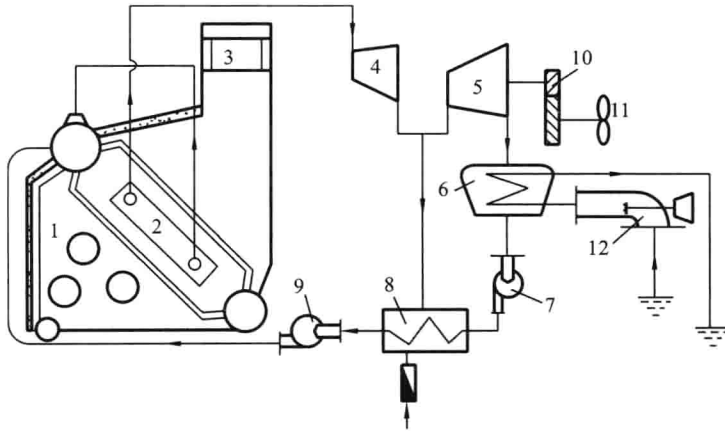


图 1-2-1 船舶蒸汽轮机动力装置的基本组成

- 1—主锅炉;2—蒸汽过热器;3—空气预热器;4—高压蒸汽轮机;5—低压蒸汽轮机;6—主冷凝器;
- 7—凝水泵;8—给水预热器;9—给水泵;10—减速齿轮;11—螺旋桨;12—循环水泵

蒸汽轮机动力装置由主锅炉、蒸汽轮机、冷凝器、轴系、管系及其他有关机械设备等组成。在这种装置中,燃料的燃烧是在发动机的外部,即在锅炉中进行的。

如图 1-2-1 所示,蒸汽轮机动力装置的基本工作原理是:燃料在主锅炉 1 中的炉膛内与通过空气预热器 3 进入锅炉中的空气一起燃烧;燃料燃烧放出的热量被水管中的水吸收,并汽化成饱和蒸汽;饱和蒸汽经过蒸汽过热器 2 再吸热成为过热蒸汽;过热蒸汽进入高压蒸汽轮机 4 和低压蒸汽轮机 5 膨胀做功,使蒸汽轮机叶轮旋转,再通过减速齿轮 10 带动螺旋桨 11 工作。做过功的乏汽在主冷凝器 6 中将热量传给冷却水,同时本身凝结成水,然后由凝水泵 7 抽出,并经给水预热器 8 预热再由给水泵 9 打入锅炉 1 的水鼓中。从而形成一个工作循环。冷凝器的

冷却水用循环水泵 12 由舷外泵入,吸热后又排至舷外。

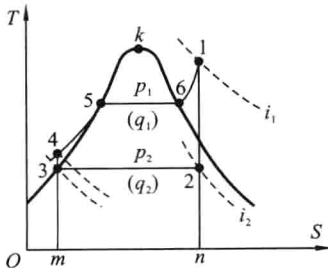


图 1-2-2 简单的蒸汽动力装置的理想循环

2. 简单热力循环过程

蒸汽轮机动力装置的简单热力循环过程可用图 1-2-2 所示的 T-S 来描述:图中:4—5 线表示水在汽锅中,在压力 p_1 下被加热到沸腾温度的过程;5—6 线表示在汽锅中,在压力 p_1 下的汽化过程;6—1 线表示在压力 p_1 下,在蒸汽过热器中的过热过程;1—2

线表示蒸汽在蒸汽轮机中的绝热膨胀过程,这个过程要输出功;2—3线表示在压力 p_2 下,乏汽在冷凝器中的凝结过程;3—4线表示冷凝水在水泵中的绝热压缩过程,这个过程要消耗功。这种简单的蒸汽动力装置的理想循环称为朗肯循环。

在过程4—5、5—6和6—1中,热量是在一定的压力 p_1 下加入的,等压下加入的热量可以由过程的始点和终点的焓差来表示。加入的热量 q_1 为

$$q_1 = i_1 - i_4$$

在 T - S 图上,此热量可用加热线下的面积 $m-4-5-6-1-n-m$ 表示。

过程2—3是循环的等压放热过程,所放出的热量 q_2 为

$$q_2 = i_2 - i_3$$

在 T - S 图上,此热量可用面积 $m-3-2-n-m$ 来表示。

蒸汽轮机中的膨胀功 W_T (绝热膨胀等熵过程)为

$$W_T = i_1 - i_2$$

循环中水泵所消耗的功 W_p (绝热压缩等熵过程)为

$$W_p = i_4 - i_3$$

循环的有效功 W_0 (相当于1—2—3—4—5—6—1的面积)为

$$W_0 = W_T - W_p = (i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)$$

循环的有效热量 q_0 为

$$q_0 = q_1 - q_2 = (i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)$$

所以循环热效率 η_t 为

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(i_1 - i_4) - (i_2 - i_3)}{i_1 - i_4} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{i_1 - i_4}$$

由于在较低的初始蒸汽参数的动力装置(3 MPa以下)中,水泵消耗的功 $i_4 - i_3$ 比 $i_1 - i_4$ 小得多,可以略去不计,故循环热效率的近似式为

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4}$$

从图1-2-2可看出,在相同的背压 p_2 下,如果提高蒸汽的初始温度 t_1 和压力 p_1 ,都能提高循环热效率,这是因为增加了平均进汽温度。但是蒸汽的初始参数的提高,受到材料耐热性,设备的强度及设备的可靠性各方面的限制,不能无限制地提高。特别是船舶由于工作条件的限制,蒸汽的参数一般低于陆用。在相同的蒸汽初始压力 p_1 和初始温度 t_1 下,降低背压 p_2 也能使热能效率提高。因为背压降低了,所以放出的热量减少。但背压不能无限制地降低,它受到冷却水温度和冷凝器尺寸的限制。因此冷凝温度(饱和温度)不能低于或甚至等于冷却水的温度。

上面所介绍的简单理想循环中,由于冷凝器中被冷却水带走了冷凝蒸汽的汽化潜热,热量损失很大,占加入到循环中热量的60%~70%,所以循环热效率较低。在船舶蒸汽轮机动力装置中可以说是没有完全按照这种循环工作的,而是在这种循环的基础上适当地加以改进以提高热效率。如图1-2-1所示,在图中增加了给水预热器,它是利用已在主机做过部分功的蒸汽的汽化潜热来预热给水的,这可使进入冷凝器的蒸汽量减少,而被冷却水带走的热量也就减少了,所以循环热效率得到了提高。这种利用主机的抽汽或辅机的乏汽来加热给水的循环称为再生循环。现代的民用船舶,为了提高动力装置的经济性,给水预热级数达到4~5级。

1.2.2 蒸汽轮机结构与工作原理

蒸汽轮机是一种旋转式发动机,蒸汽在蒸汽轮机中的工作过程是连续的,且具有两次能量转换:先是蒸汽的热能转变为汽流的动能,然后是动能转变为转动叶轮的机械能。根据蒸汽轮机的结构和能量转换的方式,蒸汽轮机可分为冲动式蒸汽轮机和反动式蒸汽轮机两种形式。

1. 冲动式蒸汽轮机

图 1-2-3 所示为单级冲动式蒸汽轮机结构与工作原理简图。

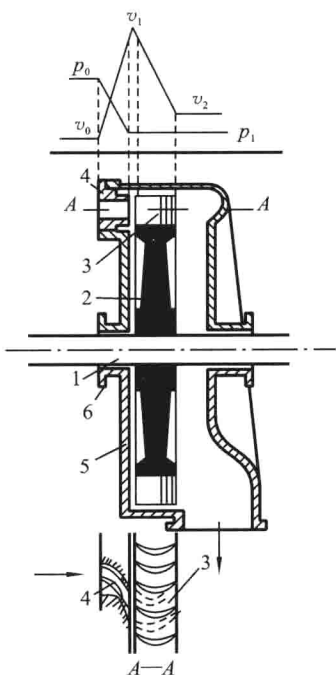


图 1-2-3 单级冲动式蒸汽轮机结构与工作原理简图

1—转轴;2—叶轮;3—叶片;
4—喷管;5—机壳;6—轴承

如图 1-2-3 所示,轴 1 的两端支承在轴承 6 上,可以自由旋转。轴的中央装配一叶轮 2,叶轮的圆周上装设许多弯曲的叶片 3,每两叶片之间就形成了如图 1-2-3 所示的弯曲的流动槽道。叶轮 2 与转轴 1 组合成一体称为转子。喷管 4 安装在机壳 5 上固定不动,此机壳亦称为汽缸。

蒸汽首先在喷管中膨胀,在膨胀过程中蒸汽的压力降低而流速大大提高,如图 1-2-3 所示,压力由 p_0 下降至 p_1 ,速度由 v_0 增加至 v_1 。高速气流随即进入工作叶片 3 所形成的弯曲形槽道,按照它的形状使蒸汽流拐弯时,就产生了离心力作用在叶片上,从而推动叶轮旋转,从轴上输出机械功。

蒸汽在喷管中,由于横截面大小是逐渐变化的,因此产生了不同程度的膨胀,即压力降低而速度增加。在工作叶片槽道中横截面大小不变,蒸汽流过时并不发生膨胀,同时压力也没有什么变化,而蒸汽以较低的速度 v_2 流出。高速气流通过工作叶片弯曲的槽道产生离心力作用于蒸汽轮机叶轮而做功。这种仅仅利用喷嘴喷出高速蒸汽流的动能通过离心力作用推动叶轮而做功的蒸汽轮机,就称为冲动式蒸汽轮机。

2. 反动式蒸汽轮机

图 1-2-4 所示为单级反动式蒸汽轮机结构与工作原理简图。

如图所示,反动式蒸汽轮机用叶片 3 组成的环形叶栅代替了喷管,固定在静止不动的机壳 5 上,这些叶片称为导向叶片。当蒸汽自进汽管 1 进入进汽室 2,经固定不动的导向叶片 3 时压力下降,由 p_1 降低到 p_1' ;而蒸汽速度大为提高,由 v_0 提高到 v_1 。高速蒸汽流随即流入装在转鼓 6 上的工作叶片 4,并沿叶片间槽道转变方向,其产生的离心力作用于工作叶片上,同时由于工作叶片槽道截面不断变化,因此蒸汽在工作叶片中流过时继续膨胀使压力进一步降低到 p_2 ,由于工作叶轮中气流相对速度增加,由 w_1 增至 w_2 ,产生了反作用力,二者合力的作用而使转鼓得到旋转,把动能转变为机械能。

从图 1-2-4 可以看出,转鼓 6 被支承于两端的轴承 7 上,由于安装在转鼓上的工作叶片前后两端有压力差,因此产生了不平衡的轴向推力(向右)。为了平衡轴向推力而设有平衡活塞 8,其右端受新蒸汽压力作用,左空间 10 有连接管 11 与排汽空间相连,作用的压力很低,因此有向左的压差作用力借以平衡转鼓的轴向推力,使止推轴承 9 的负荷大为减轻。

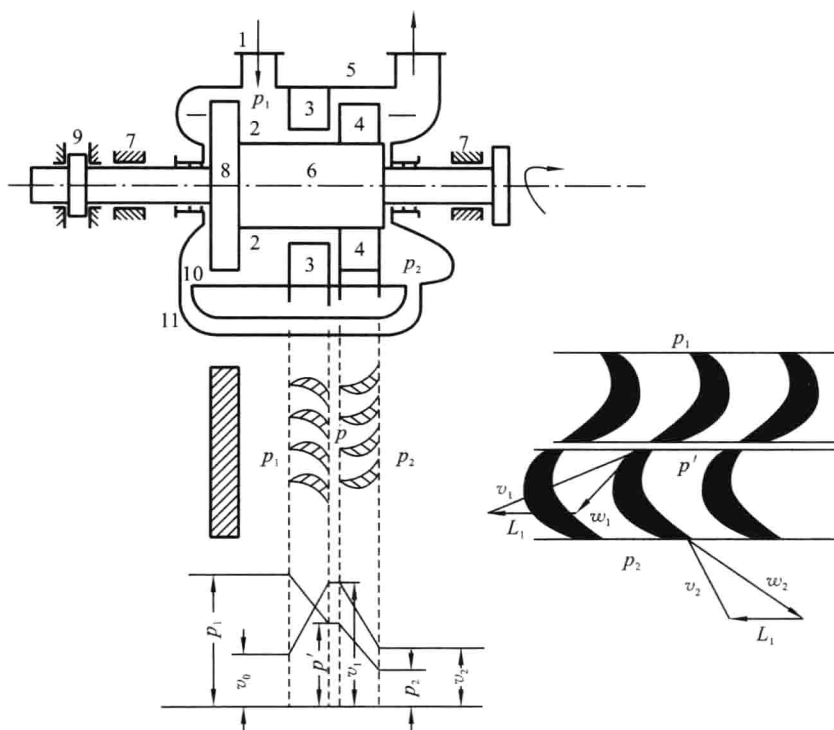


图 1-2-4 单级反动式蒸汽轮机结构与工作原理简图

1—进汽管；2—进汽室；3—导向叶片；4—工作叶片；5—机壳；6—转鼓；7—轴承；
8—平衡活塞；9—止推轴承；10—左空间；11—连接管

以上介绍的一系列工作叶片加上它所属的一系列喷管或导向叶片构成蒸汽轮机的“一级”。只有一列喷管和一系列工作叶片的蒸汽轮机称为单级蒸汽轮机。现代船舶蒸汽轮机动力装置的蒸汽参数较高，受蒸汽轮机结构尺寸和最高转速的限制，单级蒸汽轮机无法充分有效利用具有较高参数的蒸汽的热能。为了提高蒸汽轮机的效率，较大功率的蒸汽轮机采用“多级”式结构。依其工作原理的差异，可分为两种：一种是由一系列喷管和多列(2~3列)工作叶片构成的，蒸汽在一系列喷管中膨胀而速度增加，产生的动能由多列工作叶片逐一吸收，蒸汽的速度也逐一降低，称为速度分级式蒸汽轮机；另一种是由多列喷管和多列工作叶片构成的，蒸汽依次在多列喷管中发生膨胀，压力依次下降而速度增加，蒸汽流经工作叶片时只发生速度的变化，实现由动能到机械能的转变，称为压力分级式蒸汽轮机。

压力分级式蒸汽轮机的效率可以比速度分级式蒸汽轮机的效率高，因此一般大功率蒸汽轮机总是采用压力分级的。冲动式蒸汽轮机级数随蒸汽参数，功率大小及对经济性要求而定，可在较大范围内变动，一般为14~20级。为了减少蒸汽轮机级数，不使其结构过于复杂，多级蒸汽轮机的第一压力级常常采用双速度级的形式，因速度分级能承受较大的焓降。通常蒸汽轮机采用冲动式的，而燃气轮机采用反动式的。

1.2.3 蒸汽轮机的功率调节方法与特性

当船舶的工况发生变化(如航速改变、航行条件变化、载荷变化等)时，需要用调节主蒸汽轮机的功率来适应这种工况的变化。

调节蒸汽轮机的功率最简单的方法是改变安装在蒸汽轮机主汽管上主进汽阀(或称操纵阀)的开启程度。主进汽阀开启程度的增大或减小,蒸汽流经该阀时,因流动阻力的减小或增大,蒸汽受到节流程度的改变而使压力减小或增大,引起绝热焓降的增大或减小,从而改变了蒸汽轮机的功率输出,这种用节流方法改变进入蒸汽轮机前蒸汽状态的调节称为变质调节。这种调节方法因改变了蒸汽的质量,而使效率大大降低,所以一般只有辅蒸汽轮机采用节流调节,因它操作十分方便,机器构造亦简单。

大多数蒸汽轮机是用喷管调节蒸汽量的,从而也改变蒸汽轮机的功率输出。图 1-2-5 所示为喷管调节简图。图中有四个喷管组,每组包括若干个喷管,第一组直接与主蒸汽管相通,由主进汽阀 1 控制,其他三组由喷管阀 2、3 和 4 来控制。改变完全开启的喷管阀数目,就改变了工作喷管的多少,进汽弧的长短,流通面积的大小,因而改变了流入蒸汽轮机的蒸汽量的多少,从而改变了蒸汽轮机的功率。这种调节方法不改变蒸汽的初始状态,只改变蒸汽量,称为变量调节。而实际应用喷管调节时往往采取既有变量又有变质的混合调节方法。

图 1-2-6 所示为蒸汽轮机的外特性曲线,它表示在变工况情况下蒸汽轮机的转矩 M 、功率 P 与转速 n 之间的关系。图中的实线曲线族表示 $M-n$ 关系,虚线曲线族表示 $P-n$ 关系;由图可见,当耗汽量 G 不变时,随着转矩 M 的减小,而转速 n 升高,功率 P 与转速 n 则呈近似的抛物线变化关系。

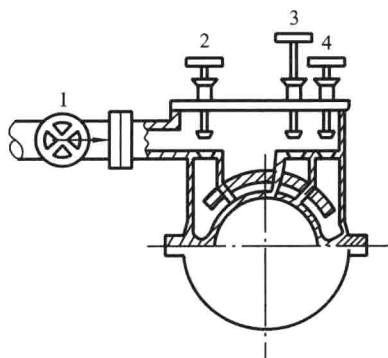


图 1-2-5 喷管调节简图

1—主进汽阀;2,3,4—喷管阀

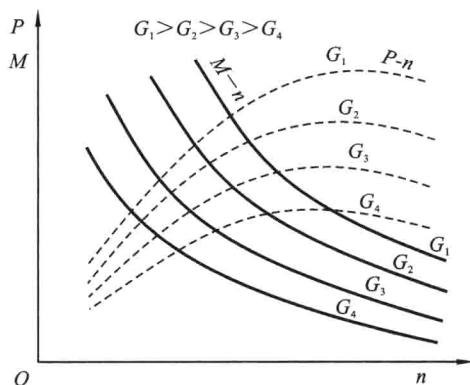


图 1-2-6 蒸汽轮机的外特性曲线图

1.2.4 蒸汽轮机动力装置的特点与应用

蒸汽轮机动力装置具有如下优点。

(1) 由于蒸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,因此单机功率远比活塞式发动机的大。现代船用新型蒸汽轮机的单机功率已达 7.5×10^4 kW 以上,单机功率还可以进一步提高,只是受到推进器吸收功率和尺寸的限制,以及制造上也有困难,而且目前不需要生产更大功率的船用蒸汽轮机。正因如此,蒸汽轮机本身的单位重量尺寸指标比较优越。

(2) 蒸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) 蒸汽轮机摩擦部件少,工作可靠性大,使用期限可高达 10^5 h 以上。

(4) 可使用劣质燃料油,润滑油消耗率也很低,仅 $0.1 \sim 0.5$ g/(kW·h)(柴油机的润滑油消耗率为 $3 \sim 10$ g/(kW·h))。

但蒸汽轮机动力装置的能量转换过程比较复杂,热效率较低,耗油率较高,总的经济性能较差,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,甚至只有 $1/2.5 \sim 1/3$,在相同燃料贮备下续航力降低。蒸汽轮机转速高,并且不能直接反转,所以作为船用时,需要配置具有较大减速比的减速齿轮装置和倒车装置。由于锅炉产生蒸汽需要一定的时间,从锅炉生火到主机启动要经历较长的准备时间,启动前准备时间为 $30 \sim 50$ min,紧急情况下,缩短暖机过程后也需要 $15 \sim 20$ min;在舰艇上为保证立即起锚的要求,就以暖机状态停泊,从而增加了停泊时的燃料消耗;另外,从一个工况变换到另一个工况的过渡时间也较柴油机装置的长 $2 \sim 3$ 倍,所以机动性也较差。其次,蒸汽轮机动力装置设备多,装置复杂,从而使整个装置的重量和尺度较大。

在大功率船舶动力装置中,蒸汽轮机动力装置占有一定的优势。资料统计表明,功率小于 2×10^4 kW 的船舶,多采用柴油机动力装置,而大于 2×10^4 kW 的多采用蒸汽轮机动力装置,如高速客船、集装箱船、大型油船以及 LNG 运输船多采用蒸汽轮机动力装置。

1.3 燃气轮机动力装置

1.3.1 基本组成和工作原理

燃气轮机是最近几十年发展起来的一种新型发动机。在航空型燃气轮机舰用化改装获得成功,它以结构轻巧紧凑,单机功率大,工作可靠,机动性高,改装较方便等优点在水面舰艇动力装置中占有了重要的地位。

1. 主要组成部分

图 1-3-1 所示为燃气轮机动力装置简图。图中驱动压气机的燃气轮机又称为增压涡轮或高压涡轮,动力燃气轮机又称为动力涡轮或低压涡轮。通常把压气机、燃烧室和高压涡轮看做一个整体,称为燃气发生器。

2. 基本工作原理

燃气轮机的基本工作原理与蒸汽轮机的大致相似,只是采用的工质有所不同。蒸汽轮机使用的工质是锅炉中的水加热后产生的蒸汽,蒸汽推动叶轮做功;而燃气轮机则是利用燃料在燃烧室内燃烧所产生的燃气推动叶轮做功。同时燃气轮机是采用反动式的燃气轮机,而蒸汽轮机大多数是冲动式蒸汽轮机。

如图 1-3-1 所示,空气通过进气道进入压气机,经压缩后温度升高到 $100 \sim 200$ °C,压缩空气供向燃烧室以及燃烧室与机匣之间的环形通道。流向燃烧室的那部分空气(称为一次空气)与通过喷嘴喷入燃烧室的燃油混合后经点火即进行燃烧,形成温度高达 2000 °C 左右的燃气。如此高温的燃气,必然对燃烧室进行强烈的辐射热交换和对流热交换。如果燃烧室的内壁不进行冷却,那就极易烧坏;同样,如果高温燃气直接流入涡轮中,涡轮的材料也承受不了,所以需要将高温燃气的温度降低。而通过燃烧室与机匣之间的环形通道的空气(称为二次空气)就起到了冷却燃烧室的内壁和与高温燃气掺混降低燃气温度的双重作用。利用掺混的方法,将温度降低到 $600 \sim 700$ °C 的燃气进入高压涡轮,在叶轮槽道内膨胀,将其动能转化为机械能,使燃气轮机旋转,驱动压气机工作;随后进入低压涡轮继续将热能转换成机械能,驱使动力燃气轮机旋转做功。低压涡轮通过挠性轴与减速装置相连,并带动螺旋桨工作。做过功的废气经排气道排出。

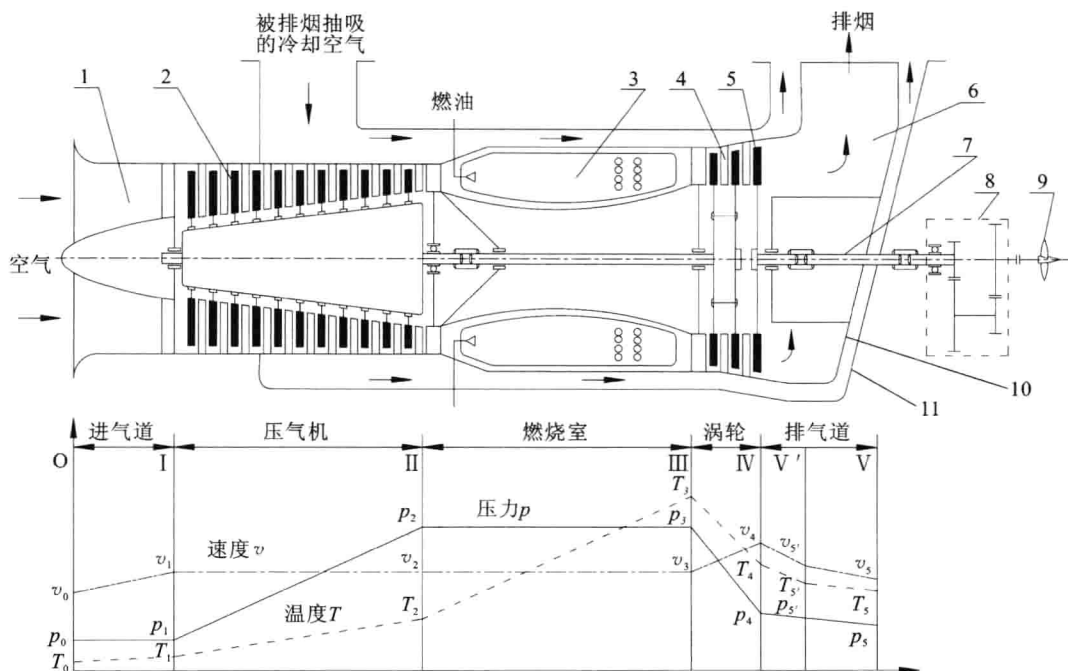


图 1-3-1 燃气轮机动力装置简图

1—进气道；2—轴流式压气机；3—燃烧室；4—驱动压气机的燃气轮机；
5—动力燃气轮机；6—排气道；7—挠性轴；8—减速装置；9—螺旋桨；10—罩壳；11—机匣

图 1-3-1 中还表示出空气—燃气流经燃气轮机时，其流速、压力和温度的变化情况。

1.3.2 简单热力循环过程与特性

燃气轮机装置几乎都采用简单的热力循环形式。

1. 热力循环原理

图 1-3-2 所示为热力循环过程示意图。如图 1-3-2(a) 所示，大气压状态的空气被压气机 1 吸入，空气在压气机中从 p_1 压缩到压力 p_2 ，整个压缩过程如图 1-3-2(b) 中 1—2 线段所示。为了从热力学的观点来研究定压燃烧的燃气轮机装置的循环过程，可以把实际过程理想化。假定在压缩过程中与外界无热交换和气体无流动损失，则可以把压缩过程视为绝热等熵压缩过程，压力和温度同时升高；在空气经过压气机后，进入燃烧室 2，同时向燃烧室喷入燃油，燃油和一次空气混合并在定压下燃烧，形成高温燃气，图 1-3-2(b) 中线段 2—3 可视为等压加热过程；二

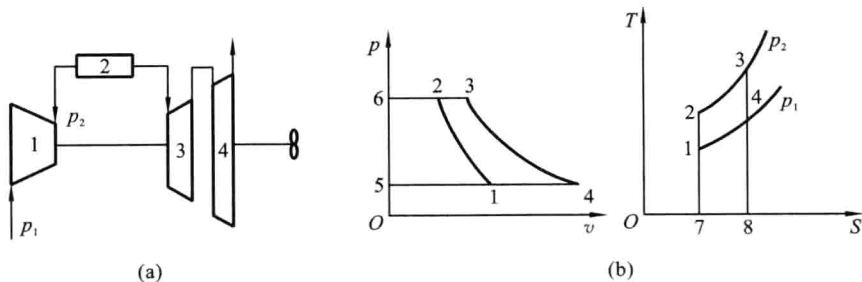


图 1-3-2 燃气轮机装置简单热力循环示意图