

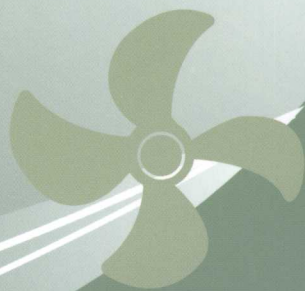


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航海类专业精品系列教材

船舶柴油机

李 斌 主 编



大连海事大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
航海类专业精品系列教材

船舶柴油机

李 斌 主 编

大连海事大学出版社

© 李斌 2008

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机 / 李斌主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2008. 4
(航海类专业精品系列教材)
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5632-2164-6

I. 船… II. 李… III. 船用柴油机—高等学校—教材 IV. U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053998 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连天正华延彩色印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 25

字数: 616 千 印数: 1 ~ 3000 册

责任编辑: 姚文兵 沈荣欣 版式设计: 沈荣欣

封面设计: 王 艳 责任校对: 曲玉华

ISBN 978-7-5632-2164-6 定价: 40.00 元

内容简介

本教材以培养轮机工程专业的高层次人才为目标,其主要研究对象是船用大型中低速柴油机。大型柴油机不仅在结构与系统方面与中小型柴油机不同,还涉及到柴油机与船舶各个系统的关系。

本教材的内容包括船舶柴油机的工作原理、结构特点、工作系统、运行管理、测试分析以及维护保养等各个方面。共分十四章,内容包括柴油机的工作原理和性能指标、柴油机的结构和主要部件、燃油喷射和燃烧、柴油机的有害排放及控制、柴油机的换气与增压、柴油机的系统、柴油机及推进轴系的振动、柴油机特性、柴油机的起动换向和操纵系统、柴油机电子控制技术、示功图的测录与分析、柴油机的运转管理与应急处理等。

本教材反映了船舶柴油机的最新成果,具有较强的实用性和较高的学术价值。教材内容丰富,文字简明,深入浅出,篇幅适中。

本教材主要作为轮机专业本科教材,也可供轮机管理人员及相关专业工程技术人员的参考。

前 言

海上运输是交通运输的重要组成部分,在促进外贸运输发展和推动对外贸易增长等方面以其他运输方式不可比拟的优势发挥出越来越重要的作用。

大连海事大学作为我国唯一的国家重点航海类专业院校,多年来为我国乃至国际海上运输业培养了大量的航海类专业高级人才,对促进航运业的发展起到了重要作用。近年来,随着科学技术的进步和交通运输业的发展,学校针对航海类专业的鲜明特色,在人才培养方案、教学内容及课程体系改革等方面进行了一系列的研究和实践。在此基础上,我校组织编写出一套与新的培养方案、教学内容及课程体系相适应的航海类专业精品系列教材,旨在加强航海类专业建设,提高航海类人才培养的质量和水平,进一步推动高等航海教育的发展。

为了保证航海类专业精品系列教材顺利出版,学校在人力、物力和财力等方面予以充分保证。组织校内航海类专业的资深专家、骨干教师和管理干部做了大量工作,从筹备、调研、编写、评审直至正式出版,历时三载有余。2005年5月,学校先后组织召开了两次航海类专业教学改革研讨会,来自交通部海事局、辽宁海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、中国船级社等单位的专家为教材编写的筹备工作提出了中肯的意见和建议。2006年初,教材编写工作正式启动,确定重新编写航海类专业教材22种,其中航海技术专业教材13种、轮机工程专业教材9种。教材编写大纲先后征求了中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司及大连海事大学等单位10多位专家的意见。学校组织教材主要编写人员分赴北京、天津、青岛、上海、广州、武汉及厦门等多家航运企事业单位进行调研,收集了大量的最新技术资料,同时听取了有关领导和专家的意见。2007年我校先后召开了五次评审会,来自交通部海事局、驻英大使馆海事处、中国海事服务中心考试中心、辽宁海事局、山东海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、大连港引航站、上海海事大学、海军大连舰艇学院、大连水产学院、集美大学、青岛远洋船员学院及大连海事大学等单位的多位专家对22种教材的初稿就内容、文字及体例等方面逐一评审,反复推敲,几易其稿,逐步完善,反复审核,最终正式出版。该套教材中共有16种教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这套航海类专业精品系列教材以履行修订后的STCW公约为前提,结合海上运输业发展的国际性和信息性等特点,以更新教学内容为重点,对原有教材做了大量的增删与修改,注重理论基础及内容阐述的逻辑性和准确性,力求反映国内外航海科技领域的新成就与新知识,适应21世纪海上运输业对航海类人才的知识、能力和素质结构的要求,兼顾各教材内容之间的衔接与整合,避免重复与遗漏。我衷心的希望,通过全体编写人员的不懈努力,这套精品系列教材,能够进一步加强我校航海类专业的建设,为国内兄弟院校航海类专业的发展提供有益的借鉴,为我国高等航海教育发展尽微薄之力。

教材在编写和出版过程中,得到了方方面面领导、专家和同仁的大力支持和热心帮助(具体名单附后)。我谨代表大连海事大学及教材编写全体成员对以上单位和个人致以最诚挚的谢意。各位专家和同仁渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的学术风范以及细致入微

的工作作风为教材的顺利出版作出了卓越的贡献,在很大程度上可以说,这套教材的成功出版,是全体编写人员,各港航企事业单位的领导、专家和同仁共同努力的成果。

航海类专业精品系列教材的编写是一项繁重而复杂的工作,鉴于时间和人力等方面的因素,这套教材在某些方面还不是十分完善,缺点和不妥之处在所难免,希望同行专家不吝指正。同时,希望以此为契机,吸引更多航海技术领域的专家、学者参与到这项工作中来,为我国航海教育献计献策,为我国乃至国际海上运输事业培养出大量高素质的航海类专业人才。

大连海事大学校长



2008 年 3 月

对教材出版给予大力支持和帮助的单位及个人如下:(以姓氏笔画为序)

于晓利	教授	大连水产学院
于智民	高级船长、高工	中远散货运输有限公司
马文华	高工	大连远洋运输公司
方伟江	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
王 阳	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
王 健	高工、高级引航员	大连港引航站
王国荣	高级轮机长	中远散货运输有限公司
王征祥	船长	中远集装箱运输有限公司
王新全	高工、总轮机长	中国远洋运输(集团)总公司
车 毅	船长	大连远洋运输公司
叶依群	高级船长	中远散货运输有限公司
田喜林	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
石爱国	教授	海军大连舰艇学院
任辰西	高级船长	中远散货运输有限公司
刘 屹	高工	大连远洋运输公司
刘世长	船长	日照海事局
孙 广	高工	辽宁海事局
安 彬	高级船长	大连远洋运输公司
邢 钺	高工	中远散货运输有限公司
吴 恒	教授、博导	大连海事大学
吴万千	副教授	青岛远洋船员学院
张仁平	教授	驻英大使馆海事处
张文浩	高工	中远散货运输有限公司
张均东	教授、博导	大连海事大学
张秋荣	教授	上海海事大学
李 录	高级轮机长	广州远洋船员管理公司

李志华	副教授	大连海事大学
李忠华	高工	珠海海事局
李恩洪	船长、高工	交通部海事局
李新江	副教授	大连海事大学
杜荣铭	教授	大连海事大学
杨君浩	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
沈毅	工程师	辽宁海事局
邱文昌	教授	上海海事大学
邱铁卫	高级轮机长	大连远洋运输公司
邵哲平	教授、船长	集美大学
邹文生	高级轮机长	大连远洋运输公司
陈志强	高级轮机长	中远集装箱运输有限公司
陈建锋	高工、高级船长	中远散货运输有限公司
周邱克	高工、高级船长	中海客轮有限公司
房世珍	大副	青岛远洋对外劳务合作有限公司
易金华	指导船长、高级船长	中海国际船舶管理有限公司广州分公司
林长川	教授	集美大学
金松	教授级高工	中国船级社大连分社
金义松	船长、高工	中海国际船舶管理有限公司
姚杰	教授	大连水产学院
姜勇	教授级高工	山东海事局
洪碧光	教授、船长	大连海事大学
赵经文	高工、轮机长	大连远洋运输公司
赵晓玲	副教授	青岛远洋船员学院
赵爱屯	高级船长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
夏国忠	教授	大连海事大学
徐波	高工	中远集装箱运输有限公司
敖金山	高级船长	枫叶海运有限公司
殷传安	高级轮机长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
郭子瑞	教授	辽宁海事局
郭文生	高级船长	广州远洋船员管理公司
顾剑文	高工	大连国际船员培训中心
崔保东	船长	青岛远洋对外劳务合作有限公司
黄党和	轮机长	中国海事服务中心
蔡振雄	教授	集美大学
魏茂苏	轮机长	青岛远洋对外劳务合作有限公司

编者的话

“船舶柴油机”是轮机工程专业的主干专业课。我校曾多次组织编写和修订船舶柴油机教材,仅“文革”后就有1981年版,1990年版,1997年版和2002年版等几个版本的《船舶柴油机》教材,分别由人民交通出版社和大连海事大学出版社出版,形成针对轮机工程专业独特的教学体系。由于我校出版的《船舶柴油机》教材具有定位准、内容新、特色鲜明的特点,在全国各高校的轮机工程(或轮机管理)专业本专科的教学中得到广泛采用,其中2002年版《船舶柴油机》教材被评为辽宁省精品教材。

近十年来,船舶柴油机的发展很快,特别是在2000年以来,由于全电子控制的智能型柴油机的推出,引起了船舶柴油机革命性的发展,在船舶柴油机的发展史上具有划时代的意义。从培养高素质的轮机专业人才的角度出发,船舶柴油机教材必须反映船舶柴油机的现状及最新发展,保证我们的学生能够站在船舶柴油机发展的前沿。因此,在交通部科教司的支持下,根据高等学校交通运输学科专业教学指导委员会航海技术分委员会的建议,对《船舶柴油机》教材进行修订,并作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和航海类精品系列教材出版。

本版《船舶柴油机》教材是根据大连海事大学2006年轮机工程专业《船舶柴油机》教学大纲的要求,同时参考中华人民共和国海事局下发的《海船船员适任考试和评估大纲》中对主推进动力装置的考试要求以及我校多年来船舶柴油机课程的教学经验编写而成的。它以培养轮机工程专业高层次人才为目标,符合STCW公约的相关要求,适应高等院校航海类(轮机工程)专业学生教育和高级船员培训的需求。

本教材在策划和编写过程中,通过走出去,请进来的方法进行了广泛的调研,听取了我国航运界各大远洋公司、海运公司的专家对原教材及新教材编写大纲的意见,也收集大量的有关船舶柴油机使用及管理方面的经验和案例,得到了广泛的认同,也走出了一条教改的新路子。

教材编写人员参考了大量船舶柴油机的最新资料,以当前典型的船用大型低速二冲程柴油机及中速四冲程柴油机为主要参考机型,对原教材中过时的内容进行了修订,同时增加了柴油机的有害排放及控制和柴油机的电子控制技术两章内容,不仅反映了当前船舶柴油机发展的成果和运行管理经验,也很好地融合了原教材的经典内容。

本书由大连海事大学轮机工程学院李斌副教授担任主编,孙培廷教授主审。全书共十四章。第一、二、五、八、十、十一章由李斌编写,第三、十二、十三、十四章由李春野编写;第四、六章由段树林编写;第七、九章由张跃文编写。全书由李斌统稿。

在本书的编写过程中,得到了中远集团中远散货运输有限公司,大连远洋运输公司,青岛远洋运输公司,上海远洋运输公司,广州远洋运输公司,中海集团客运公司、油运公司、集装箱运输公司,中国液化天然气运输有限公司,中波公司大力支持,有关专家对本教材及编写大纲提出了许多中肯的意见和建议,并提供了大量电子版和文字版的资料。世界上最主要的船舶柴油机制造公司Wärtsilä公司、MAN公司提供了大量有关船舶柴油机技术的最新资料。在本书初稿完成后,中国海事服务中心、中国海员发展集团、大连远洋运输公司、集美大学、青岛远洋船员学院和大连海事大学的有关专家对本教材进行了全面的评审,提出了许多修改意见;主

审孙培廷教授一直十分关心本教材的编写工作,在本教材的策划、编写和审定的各个阶段都提出了许多意见和建议,对提高本书的质量作出了很大贡献。本教材也得到了大连海事大学领导、大连海事大学教务处和轮机工程学院领导及主机教研室的大力支持。在此向上述单位和所有关心、帮助本教材编写和出版的专家和老师表示衷心的感谢。

由于教材内容广泛,编者学识水平有限,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 3 月

目 录

第一章 船舶柴油机总论	(1)
第一节 柴油机及其在船舶动力装置中的地位	(1)
第二节 船舶柴油机的发展	(3)
第三节 船舶柴油机当前的技术水平	(6)
第四节 船舶柴油机的发展趋势	(9)
思考题	(14)
第二章 柴油机的工作原理和性能指标	(15)
第一节 柴油机的类型和基本结构参数	(15)
第二节 柴油机的工作原理	(17)
第三节 柴油机的性能指标和工作参数	(26)
思考题	(31)
第三章 柴油机的结构和主要部件	(33)
第一节 柴油机的总体结构	(33)
第二节 燃烧室部件	(37)
第三节 曲柄连杆机构	(60)
第四节 柴油机的主要固定件	(72)
思考题	(83)
第四章 燃油喷射和燃烧	(85)
第一节 燃油	(85)
第二节 燃油的喷射和雾化	(94)
第三节 喷油设备	(101)
第四节 可燃混合气的形成	(119)
第五节 燃油的燃烧	(123)
思考题	(130)
第五章 船舶柴油机的有害排放及控制	(132)
第一节 船舶柴油机的排放与危害	(132)
第二节 控制船舶柴油机排放的有关法规	(135)
第三节 柴油机有害排放的控制措施	(138)
思考题	(143)
第六章 柴油机的换气与增压	(144)
第一节 柴油机的换气过程及换气质量评定参数	(144)
第二节 换气机构	(149)
第三节 废气涡轮增压	(156)
第四节 废气涡轮增压器与增压系统	(163)

第五节 增压系统的维护和管理	(178)
思考题	(181)
第七章 柴油机系统	(182)
第一节 燃油系统	(182)
第二节 分油机	(188)
第三节 曲轴箱润滑系统	(204)
第四节 气缸润滑系统	(213)
第五节 冷却系统	(219)
思考题	(226)
第八章 柴油机及推进轴系的振动	(228)
第一节 柴油机及推进轴系振动的基础知识	(228)
第二节 柴油机的振动与平衡	(233)
第三节 轴系扭转振动及减振措施	(239)
第四节 轴系的纵向振动及减振措施	(250)
思考题	(255)
第九章 柴油机特性及选型	(257)
第一节 概述	(257)
第二节 柴油机特性	(258)
第三节 柴油机的选型和使用范围	(267)
思考题	(272)
第十章 柴油机的调速装置	(273)
第一节 柴油机的调速	(273)
第二节 调速器的结构和工作原理	(277)
第三节 调速器的调节和管理	(285)
思考题	(291)
第十一章 船用柴油机电子控制技术	(292)
第一节 电子控制式柴油机的基本概念	(292)
第二节 典型的船用电子控制式柴油机	(295)
第三节 电子调速器	(303)
第四节 电子注油器	(312)
思考题	(314)
第十二章 柴油机的起动、换向和操纵系统	(315)
第一节 起动装置	(315)
第二节 换向装置	(325)
第三节 柴油机的操纵系统	(329)
思考题	(341)
第十三章 示功图的测录与分析	(342)
第一节 示功图的测录	(342)
第二节 示功图的分析与计算	(351)

思考题	(360)
第十四章 柴油机的运转管理与应急处理	(361)
第一节 备车与机动操纵	(361)
第二节 运行中的管理与完车	(364)
第三节 柴油机停车期间的日常检查	(367)
第四节 封缸运行	(368)
第五节 停增压器运转	(370)
第六节 拉缸	(371)
第七节 敲缸	(373)
第八节 扫气箱着火	(374)
第九节 曲轴箱爆炸	(376)
第十节 烟囱冒火	(377)
第十一节 连杆螺栓断裂	(379)
第十二节 紧急刹车	(380)
思考题	(381)
参考文献	(383)

第一章 船舶柴油机总论

第一节 柴油机及其在船舶动力装置中的地位

一、柴油机与动力机械

机械设备通常可分为动力机械和工作机械两大类。动力机械是将其他形式的能量(如热能、电能、风能等)转化为机械能,而工作机械则是利用机械能来完成所需的工作。把热能转换成机械能的动力机械称之为热机。热机是最重要的动力机械,蒸汽机、蒸汽轮机以及柴油机、汽油机等都是热机中较典型的机械。

热机在工作过程中需要完成两次能量转化过程。第一次能量转化过程是将燃料的化学能通过燃烧转化为热能,第二次能量转化过程是将热能通过工质膨胀转化为机械能。如果两次能量转化过程是在同一机械设备的内部完成的,则称之为内燃机,汽油机、柴油机以及燃气轮机都属于内燃机。由于在内燃机中,两次能量转换均发生在气缸内部,此类机械能量损失小,具有较高的热效率。另外,在尺寸和重量等方面也具有明显优势(例如,燃气轮机在热机中的单位重量功率最大)。如果两次能量转化过程分别在两个不同的机械设备内部完成,则称之为外燃机。在该类机械中,化学能转变成热能的过程(燃烧)发生在锅炉中,热能转变成机械能发生在气缸内部。此种机械由于热能需经某中间工质(水蒸气)传递,必然存在热损失,所以它的热效率不高,整个动力装置也十分笨重。内燃机在与外燃机的竞争中已经取得明显的领先地位。

动力机械的运动机构基本上有两种运动形式,一种为往复式,一种为回转式。在往复式发动机中,工质的膨胀做功是通过活塞的往复运动实现的;而回转式发动机则是利用高速流动的工质在工作叶轮内部膨胀,推动叶轮转动而工作的。往复式发动机是间歇工作的,其工质的最高温度较高;而回转式发动机是连续工作的,由于受材料热强度的限制,其工质的最高温度不能太高,这就限制了其热效率的进一步提高。

柴油机和汽油机同属往复式内燃机,但又都具有各自不同的工作特点。汽油机使用挥发性好的汽油做燃料,采用外部混合法(汽油与空气在气缸外部进气管中进行混合)形成可燃混合气。其燃烧为电点火式(电火花塞点火)。这种工作特点使汽油机不能采用高压压缩比,因而限制了汽油机的经济性不能大幅度提高,而且也不允许作为船用发动机使用(汽油的火灾危险性大)。但它广泛应用于运输车辆。柴油机使用挥发性较差的柴油或劣质燃料油做燃料,采用内部混合法(燃油与空气的混合发生在气缸内部)形成可燃混合气;缸内燃烧采用压缩式发火(靠缸内空气压缩形成的高温自行发火)。这种工作特点使柴油机在热机领域内具有最高的热效率,在船用发动机中,柴油机已经取得了绝对统治地位。

柴油机是以柴油或劣质燃料油为燃料、压缩发火的往复式内燃机。为了使燃料获得燃烧所需的空气,柴油机就必须具有进气过程。在柴油机中,燃油不是靠外界火源点燃的,而是在高温条件下自行发火燃烧的,所以进入气缸的空气还必须达到足够高的温度,这要通过压缩过

程实现。在压缩终点,将雾化的燃油喷入高温高压的空气中,就能发火燃烧。燃油燃烧后放出大量热能,使燃气的温度和压力急剧升高,推动活塞膨胀作功,产生动力。膨胀终了时,气体失去作功能力,成为废气排出气缸。

总之,燃油在柴油机气缸中燃烧作功,必须通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程才能实现,这五个过程称为柴油机的基本工作过程,进行了这五个过程就完成了一个工作循环,接着又重复进行下一个工作循环。

二、柴油机动力装置的主要特点

各类船舶因其用途和吨位不同,所采用的动力装置形式也不同。一般根据其所采用的发动机类型、动力传递方式和推进器的种类加以区分。按发动机的类型可分为柴油机动力装置、汽轮机动力装置、燃气轮机动力装置、联合动力装置和核动力装置等。

通常,柴油机动力装置具有以下突出优点:

(1)经济性好。目前,柴油机动力装置的热效率在各种装置中是最高的,有效热效率一般可达40%以上,大型低速柴油机可高达55%,并可使用价廉的重油,燃油费用低。

(2)功率范围宽广。柴油机的单机功率从0.6 kW到97 300 kW,适用范围广,基本可满足各种不同类型船舶的要求。

(3)尺寸小,重量轻。由于柴油机的工质直接在气缸中燃烧作功,不需要锅炉、冷凝器等大型设备和部件,减少了机舱设备所占的容积,减轻了重量,有利于船舶机舱布置。

(4)机动性好。柴油机起动方便,加速性能好。有较宽的转速和负荷调节范围,可直接反转,能适应船舶航行的各种工况要求。

(5)可靠性高,寿命长,维修方便。

同时,柴油机也具有以下缺点:

(1)存在机身振动、轴系扭转振动和噪声。

(2)某些部件的工作条件恶劣,承受高温、高压并具有冲击性负荷。

三、柴油机在船舶动力装置中的地位

一般认为,1912年投入营运的Selandia轮是世界上第一艘远洋柴油机船。从此以后,柴油机动力装置在同蒸汽动力装置的竞争中不断发展壮大。1914年,只有不足300艘柴油机船,其总吨位约为235 000GT;十年以后,柴油机船已发展到约2 000艘,总吨位达2 000 000GT,1940年柴油机船进一步发到约8 000艘,总吨位达18 000 000GT。1939年,柴油机船在世界船队总吨位中所占的比例也从1920年的不足4%上升到约60%。20世纪40年代以后,可以说船舶动力装置开始进入到了柴油机时代。

近十几年来,船舶柴油机在民用船舶动力装置中更是占绝对的统治地位,不仅占领了VLCC、大型散装船和集装箱船等在传统上认为属于蒸汽动力装置的领域,而且还向蒸汽动力装置统治的最后一个堡垒——LNG船的动力装置发起了冲击。近年来世界造船统计见表1-1。

表 1-1 近年世界 2 000 DWT 以上船舶造船统计

年份	1990	1992	1994	1996	1998	2001	2002	2003
造船数	817	763	778	986	1080	948	960	1033
柴油机船	817	763	770	974	1078	941	946	1017
百分比	100%	100%	98.97%	98.78%	99.81%	99.26%	98.54%	98.45%

从表 1-1 可见,近十几年来,船舶柴油机动力装置在民用船舶动力装置中所占的比例都

超过了 98.5%,在某些年份甚至高达 100%。在全部民用船舶柴油主机中,以功率计算,二冲程(大功率)低速机几乎占 80%,若以台数计算,所占比例接近 60%。可见低速柴油机是当今民用船舶的主要推进装置,见表 1-2。

表 1-2 2000~2003 年 2 000 DWT 以上船舶柴油机装船情况统计

年份	2000		2001		2002		2003	
	装机数 (台)	装机功率 (kW)	装机数 (台)	装机功率 (kW)	装机数 (台)	装机功率 (kW)	装机数 (台)	装机功率 (kW)
低速机	625	9 034 065	699	10 754 906	655	10 896 237	715	11 113 899
百分比	55.65%	77.69%	60.52%	79.64%	55.04%	81.10%	60.75%	82.40%
中速机	498	2 594 719	456	2 749 161	535	2 538 605	462	2 373 208
百分比	44.35%	22.31%	39.48%	20.36%	44.96%	18.90%	39.25%	17.60%
总计	1 123	11 628 784	1 155	13 504 068	1 190	13 434 842	1 177	13 487 107

柴油机在船舶上的另一个主要的应用场合是作为发电机的原动机,也就是作为船舶辅柴油机。从船舶实际使用来看,无论是远洋、近海还是内河船舶,绝大多数都是以柴油机作为发电原动机。可以说,柴油机作为发电原动机也占了绝对的主导地位。

一般对船用主机来讲,经济性、可靠性和使用寿命是第一位的,重量和尺寸是第二位的。据此,低速二冲程柴油机因其效率高、功率大、工作可靠、寿命长、可燃用劣质油以及转速低(通常为 100 r/min 左右,最低可达 56 r/min)等优点适于作船舶主机使用。大功率四冲程中速柴油机因其尺寸与重量小较适于作为滚装船和集装箱船舶主机。船舶发电柴油机(俗称副机)因其发电机要求功率不大,转速较高以及结构简单,因而均采用中、高速四冲程筒形活塞式柴油机。

第二节 船舶柴油机的发展

任何一门科学技术的发展,总是与社会生产力的需要和当时科学的发展水平相适应的。18 世纪初,英国资本主义的发展促进了蒸汽机的发明,并由此开始了产业革命,推动了生产力的发展。随着生产力的发展,蒸汽机热效率低以及过于笨重问题越来越突出,已不能适应社会生产力发展的要求,因而产生了对新型动力机械的需求。

1876 年,德国人奥托(N. A. Otto)第一次提出了四冲程循环(即进气、压缩、膨胀、排气)原理,并发明了电点火的四冲程煤气机。该煤气机运转平稳,热效率可达 14%,在当时曾得到普遍使用。1880 年,一些工程师(如英国的 D. Clerk 和 J. Robson,以及德国人 K. Benz 等)成功地开发了二冲程内燃机。

德国工程师 Rudolf Diesel 于 1893 年申请了压缩发火内燃机专利,并于 1897 年在 MAN 公司研制成功第一台使用液体燃料的内燃机(压燃式、空气喷射、定压燃烧),其效率比煤气机提高了近一倍。内燃机的问世,是继蒸汽机之后发动机发展的又一个里程碑,为现代工业的发展奠定了基础。

柴油机由于其固有的优势,在它问世之后,就被应用于船舶运输业,对 20 世纪船舶运输业的发展起了重要的作用。

船舶柴油机发展的第一阶段是从 20 世纪初至 20 世纪 40 年代。这一阶段是船舶柴油机的初步发展期,尽管从 1903 年开始已经将柴油机用于船舶推进装置,但柴油机动力装置真正

具有里程碑意义的是下列几艘船舶:最早的沿海柴油机船 Romagna 轮,1910 年下水,吨位为 678 t,它使用了两台 Sulzer 气口扫气二冲程柴油机(缸径 310 mm,行程 460 mm),额定功率为 280 kW (250 r/min);世界上第一艘远洋柴油机船 Selandia 轮,1912 年投入营运,吨位为 7 400 t,它装备了两台 B&W 公司生产的 DM8150X 柴油机(缸径 530 mm,行程 730 mm),额定功率为 920 kW (140 r/min);第一艘安装二冲程十字头式柴油机的 Monte Penedo 轮,1912 年投入营运,吨位为 6500 t,它装备了两台 Sulzer 公司生产的 4S47 柴油机(缸径 470 mm,行程 680 mm),额定功率为 625 kW (160 r/min);第一艘由柴油机推进的大型客船 Aoragi 轮,1924 年投入营运,吨位为 17 490 t,它装备了 4 台 Sulzer 公司生产的 6ST70 柴油机(缸径 700 mm,行程 990 mm),总功率为 9 560 kW (127 r/min),该轮的下水和投入营运,打破了当时有关柴油机推进装置不能用于大型船舶的偏见。这一阶段在船舶领域,蒸汽机与柴油机并存,两种发动机相比较而存在,相竞争而发展。但随着柴油机技术的不断发展及其产品性能的不断提高,柴油机逐渐取代了蒸汽机,20 世纪 40 年代以后,新建商船已经很少有蒸汽机船了。

在船舶柴油机发展的第一阶段里,柴油机技术逐步完善,其中最关键的技术是无气喷射技术。Diesel 发明的柴油机是一种空气喷射式发动机,它需要用高压空气将燃油喷入柴油机的燃烧室并将其雾化。这种喷射和雾化方式存在很多问题,一是需要由柴油机带动两级式的压缩机以产生高压空气,使得柴油机在结构上非常笨重;二是喷射空气的压力不够高,仅仅略高于柴油机的压缩压力,因而燃油的喷射和雾化效果不佳,进而影响柴油机的燃烧过程;三是耗能高,带动空气压缩机大约要消耗 15% 的柴油机功率。因此,在柴油机发明不久,就有许多研究人员致力于解决这一问题,1927 年由 R. Bosch 发明的喷油泵在柴油机上正式使用,是柴油机技术的一个突破性进步,使原来带有笨重压缩机的柴油机的重量大大减轻。喷油设备的发展促进了柴油机的发展,并广泛用于车辆、船舶等运输机械上来。这一技术一直沿用至今。

增压技术也是这一阶段中发明的。1905 年瑞士人 Alfred Buechi 提出了废气涡轮增压的专利,但在早期主要采用的是机械增压,目的是为了获得足够的扫气空气,基本上采用往复泵和罗茨泵等形式,第一台废气涡轮增压柴油机由 MAN 公司于 1927 年生产,其安装的增压器由 Brown Boveri 公司(BBC)生产,增压比为 1.3,采用增压技术将该柴油机(缸径 540 mm,行程 600 mm)的功率由 1 250 kW (240 r/min) 提高到 1 765 kW (275 r/min),当时由于增压器制造水平的限制,这台增压器的体积庞大、笨重,此项技术未能迅速推广。

船舶柴油机发展的第二阶段是从 20 世纪 40 年代至 70 年代。第二次世界大战以后,随着社会生产力迅速发展,对船舶运输业的要求不断增长。由于在这一阶段船舶一直向大型化及高速化方向发展,对船舶推进装置提出了新的要求,所需的主机功率日益提高,使得柴油机在船舶动力装置中取得了明显的压倒优势。

这一时期是船用低速柴油机发展的黄金时期,其主要特征是向大缸径大功率方向发展,以提高增压程度和加大气缸排量作为提高单缸功率的主要措施。加大气缸排量的主要手段是加大气缸直径,最大气缸直径 1956 年为 740 ~ 760 mm,1960 年为 840 ~ 900 mm,1965 年为 930 mm,到 1970 年达到了 1 060 mm。其相应的单缸功率 1956 年为 1 200 ~ 1 400 马力,1960 年为 2 100 ~ 2 300 马力,1965 年为 2 750 马力,1970 年为 4 000 马力,1977 年已达到 4 600 马力。

在这一阶段,船舶柴油机发展的主要技术特征是废气涡轮增压技术的成熟和普及。随着生产和技术的发展,废气涡轮增压器的设计和制造水平不断提高,使废气涡轮增压器的性能得到改善,重量减轻,体积减小,使它能作为一个附件装在柴油机上。到 20 世纪 40 年代,生产废

气涡轮增压器的技术逐步成熟起来。1946年,瑞士BBC公司开始生产VTR轴流式涡轮增压器系列。废气涡轮增压技术在船用二冲程柴油机上的成功使用,使得船用柴油机的功率大大提高,是船用低速柴油机发展中的重要里程碑。国外称这一时期是船用低速柴油机的第一次飞跃。

船舶柴油机在此期间还取得了大缸径、焊接结构以及使用劣质燃油等重大技术成果,并逐步发展了船用低速柴油机系列。

船舶柴油机发展的第三阶段是从20世纪70年代至90年代末。70年代的两次石油危机诱发了世界范围内的能源危机。1973年石油涨价三倍,石油产品价格大幅度上涨使船舶柴油机的燃油费用支出一跃占总营运成本的40%~50%。降低柴油机的燃油支出费用、提高柴油机经济性已成为第一要求。此外,苏伊士运河的通航也使得对特大型船舶的需求量减少。这一阶段着重于改进增压技术以提高柴油机的单机功率并降低比重量以及提高可靠性和提高经济性问题。

这一阶段的第一个特征是各船用柴油机厂之间开始进行大规模的淘汰、调整和重新组合。从以前的八种船用低速柴油机品牌(由八大船用柴油机制造厂生产)减少到三种。柴油机技术不断趋于完善而柴油机的机型在逐渐减少。首先是瑞典的Gotaverken公司停止生产自己的GV系列而改为生产丹麦B&W公司的K-GF系列;英国的Doxford公司停止生产自己的76J系列而改为生产德国MAN公司的KSZ系列;对整个船舶柴油机行业影响最大的是20世纪80年代初MAN公司和B&W公司的合并以及90年代Wärtsilä公司和Sulzer的合并。船舶柴油机制造公司的合并与重组导致柴油机机型的减少和系列的完备。在世界范围内,目前大型低速柴油机只有MAN B&W的MC系列柴油机和Wärtsilä公司的Sulzer RTA系列柴油机。

这一阶段的第二个特征是节能技术研究和发展的。在20世纪70年代末到90年代,各类节能型柴油机大量出现,机型更新周期大大缩短(甚至仅为2~3年),各类柴油机均采用各种节能措施降低油耗率,努力提高柴油机的有效热效率;同时,由于供给船用柴油机的燃油质量日益低劣,使得船用柴油机在使用劣质燃油的技术上又有了新的发展。目前,现代船用低速柴油机的油耗率已降低到 $0.155 \sim 0.160 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,有效热效率可高达55%。船舶柴油机的节能不仅仅在于提高柴油机本身的热效率,更着重于提高柴油机动力装置的整体效率,也就是提高螺旋桨的推进效率。在这里值得一提的是1975年11月丹麦B&W公司在60 000 t散货船“帕纳马克斯”号上的改进研究,在航速保持16 kn不变的情况下,将螺旋桨直径由6.35 m加大到9 m,通过增加减速装置使螺旋桨转速由原来的140 r/min降低到50 r/min,达到了节约燃油30%以上的效果。这一研究成果引起了造船界的高度重视,降低柴油机转速,提高推进效率成为了当时低速柴油机的发展趋势。这就导致了长行程以及超长行程低速柴油机的研制。根据散装船、油船和集装箱船对推进装置的不同要求,目前已形成了普通行程、长行程和超长行程的完备的船舶柴油机系列。

在柴油机节能技术发展的同时,柴油机的可靠性(在规定的使用期间按规定的负荷运转,不因故障而停车或降功率使用的能力)也有了长足的发展。各种先进技术(如材料、加工、结构等)的运用大大提高了船用柴油机的可靠性。现代船用低速柴油机的吊缸周期已从20世纪60年代的5 000~6 000 h提高到8 000~12 000 h,甚至高达20 000 h。

在此期间船用二冲程低速柴油机的气缸排量没有进一步提高,气缸直径基本保持在600~980 mm,柴油机功率的提高主要依赖于增压技术改进和柴油机强化程度的提高。此外,针