



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



辽宁省首批“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

船舶柴油机

(第二版)

李 斌 主编



大连海事大学出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



辽宁省首批“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

船舶柴油机

(第二版)

李斌 主编

大连海事大学出版社

©李斌 2014

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机 / 李斌主编. — 2 版. — 大连: 大连海事大学出版社, 2014. 9

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 辽宁省首批“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

ISBN 978-7-5632-3077-8

I. ①船… II. ①李… III. ①船用柴油机—高等学校—教材 IV. ①U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 214665 号

大连海事大学出版社出版

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

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

大连美跃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 2014 年 9 月第 2 版 2014 年 9 月第 5 次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:28

字数:694 千 印数:10001 ~ 12000 册

出版人:徐华东

责任编辑:沈荣欣 责任校对:刘长影

封面设计:王 艳 版式设计:解瑶瑶

ISBN 978-7-5632-3077-8 定价:55.00 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,还涉及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。共分十五章,分别是船舶柴油机总论,柴油机的工作原理和性能指标,柴油机的结构和主要部件,燃油喷射与燃烧,柴油机的有害排放及控制,柴油机的换气与增压,柴油机系统,柴油机及推进轴系的振动,柴油机特性及选型,柴油机的调速装置,船用柴油机电子控制技术,柴油机的起动、换向和操纵系统,气体燃料发动机,示功图的测录与分析,柴油机运转管理与应急处理。

本教材反映了船舶柴油机发展的最新成果,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参考。

第二版前言

本教材第一版是航海类专业精品系列教材,辽宁省精品教材,也是“十一五”普通高等教育本科国家级规划教材。本教材自2008年4月由大连海事大学出版社出版后,一直被全国航海类院校轮机工程专业广泛使用,印数共计10000册。

本教材再次被教育部列入“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材和辽宁省首批“十二五”普通高等教育本科省级规划教材。本次修订就是按照教育部对普通高等教育国家级规划教材的最新要求进行的。本教材在编写过程中,教材编写人员参考了大量船舶柴油机的最新资料,听取了我国航运界各大远洋公司、海运公司的有关专家对原教材的意见,收集了大量有关船舶柴油机使用及管理方面的经验和案例,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,融合了原教材的经典内容,并对原教材中过时的内容进行了更新和修订。本次修订的主要内容如下:

1. 根据2010年《1978年海员培训、发证和值班标准国际公约马尼拉修正案》和2012年《中华人民共和国海船船员适任考试和发证规则》的新要求,对教材的相关内容进行了修订;
2. 根据国际海事组织2008年和2011年对《73/78国际防止船舶造成污染公约》附则VI的两次重要修正中的针对船舶柴油机有害排放和船舶温室气体(GHG_s)排放所提出的新要求,对教材的相关内容进行了修订;
3. 由于近十年来全电子控制的智能型柴油机的普及和推广,因此对柴油机电子控制技术相关内容进行了修订;
4. 根据近年来双燃料发动机在远洋和近海船舶中开始使用的情况,新增了第十三章气体燃料发动机;
5. 针对近年来船舶柴油机技术发展的成果和运行管理经验,对相关内容进行了修订。

本次编写修订工作由大连海事大学轮机工程学院李斌、段树林、张跃文、武占华、邢辉、仇大志、魏一、宋玉超、冯伟、姜兴家、崔文彬、段绪旭共同完成。本书由李斌主编,孙培廷主审。全书共十五章。第一、二、三、五、十三章由李斌编写修订;第四、六章由段树林编写修订;第七章由邢辉、冯伟编写修订;第八章由武占华、宋玉超编写修订;第九章由李斌、姜兴家编写修订;第十章由李斌、崔文彬编写修订;第十一章由李斌、魏一、段绪旭编写修订;第十二章由李斌、张跃文编写修订;第十四章由邢辉、仇大志编写修订;第十五章由仇大志编写修订。全书由李斌统稿。

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,对提高本书的质量做出了很大贡献。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全体同事的大力支持,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

2014年6月

第一版前言

“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。我校组织编写的《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情况,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,编者对《船舶柴油机》教材进行了修订,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,收集了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,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,对提高本书的质量做出了很大贡献。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 船舶柴油机的现状及技术水平	(8)
第四节 船舶柴油机的发展趋势	(10)
思考题	(16)
第二章 柴油机的工作原理和性能指标	(17)
第一节 柴油机的类型和基本结构参数	(17)
第二节 柴油机的工作原理	(19)
第三节 柴油机的性能指标和工作参数	(28)
思考题	(34)
第三章 柴油机的结构和主要部件	(36)
第一节 柴油机的总体结构	(36)
第二节 燃烧室部件	(41)
第三节 曲柄连杆机构	(67)
第四节 柴油机的主要固定件	(82)
思考题	(94)
第四章 燃油喷射与燃烧	(96)
第一节 燃油	(96)
第二节 燃油的喷射和雾化	(106)
第三节 喷油设备	(111)
第四节 可燃混合气的形成	(130)
第五节 燃油的燃烧	(135)
思考题	(140)
第五章 柴油机的有害排放及控制	(142)
第一节 柴油机有害排放物的种类和产生的原因	(142)
第二节 各种有害排放物造成的主要危害	(145)
第三节 控制有害排放的措施	(146)
第四节 船舶 CO ₂ 排放的控制方法	(159)
思考题	(165)
第六章 柴油机的换气与增压	(167)
第一节 柴油机的换气过程及换气质量评定参数	(167)
第二节 换气机构	(172)
第三节 废气涡轮增压	(180)

第四节	废气涡轮增压器与增压系统	(186)
第五节	增压系统的维护和管理	(201)
思考题		(205)
第七章	柴油机系统	(206)
第一节	燃油系统	(206)
第二节	分油机	(211)
第三节	润滑系统	(223)
第四节	冷却系统	(239)
思考题		(245)
第八章	柴油机及推进轴系的振动	(247)
第一节	机械振动的基础知识	(247)
第二节	曲柄连杆机构的运动及受力	(251)
第三节	柴油机不平衡激振力/力矩的分析与平衡	(258)
第四节	船舶推进轴系扭转振动	(268)
第五节	船舶推进轴系纵向振动	(274)
思考题		(278)
第九章	柴油机特性及选型	(279)
第一节	概述	(279)
第二节	柴油机特性	(280)
第三节	柴油机的选型和使用范围	(289)
思考题		(294)
第十章	柴油机的调速装置	(296)
第一节	柴油机的调速	(296)
第二节	调速器的结构和工作原理	(300)
第三节	调速器的调节和管理	(309)
思考题		(314)
第十一章	船用柴油机电子控制技术	(316)
第一节	电子控制式柴油机的基本概念	(316)
第二节	Wärtsilä 公司的 RT-flex 柴油机	(319)
第三节	MAN 公司的 ME 系列电控柴油机	(330)
第四节	电子调速器	(337)
第五节	电子注油器	(344)
思考题		(353)
第十二章	柴油机的起动、换向和操纵系统	(354)
第一节	起动装置	(354)
第二节	换向装置	(364)
第三节	柴油机的操纵系统	(368)
思考题		(373)

第十三章	气体燃料发动机	(374)
第一节	柴油机的代用燃料和天然气	(374)
第二节	气体燃料和双燃料发动机的工作原理	(377)
第三节	气体燃料供给系统	(386)
思考题		(390)
第十四章	示功图的测录与分析	(391)
第一节	示功图的测录	(391)
第二节	示功图的分析 and 计算	(400)
思考题		(408)
第十五章	柴油机运转管理与应急处理	(409)
第一节	备车与机动操纵	(409)
第二节	运转中的管理与完车	(412)
第三节	柴油机停车期间的日常检查	(417)
第四节	封缸运行	(418)
第五节	停增压器运转	(420)
第六节	拉缸	(421)
第七节	敲缸	(424)
第八节	扫气箱着火	(425)
第九节	曲轴箱爆炸	(427)
第十节	烟囱冒火	(430)
第十一节	连杆螺栓断裂	(431)
第十二节	紧急刹车	(433)
思考题		(435)
参考文献		(436)

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型。

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,从能量转换观点,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,因此其热效率较高;而回转式发动机是连续工作的,可以达到很高的工作转速,使其功率密度(单位质量或体积所发出的功率)较高,但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,但又都具有各自的工作特点。汽油机使用挥发性的汽油做燃料,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。其发火为电点火式(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,因而限制了汽油机经济性大幅度提高的可能,而且也不允许作为船用发动机使用(汽油的火灾危险

性大)。汽油机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。各种不同类型的发动机的工作特点如表 1-1 所示。

表 1-1 不同类型的发动机的工作特点

		蒸汽机	蒸汽轮机	燃气轮机	汽油机	柴油机
能量转化设备	化学能—热能	锅炉	锅炉	燃气轮机	汽油机	柴油机
	热能—机械能	蒸汽机	蒸汽轮机			
工作介质		水蒸气	水蒸气	燃气	燃气	燃气
运动形式		往复	回转	回转	往复	往复
发火方式		—	—	—	火花塞点火	压缩发火

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。这是通过压缩过程实现的。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。燃油燃烧后放出的大量热能,使燃气的温度和压力急剧升高,推动活塞膨胀做功,产生动力。膨胀终了时,气体失去做功能力,成为废气排出气缸。

总之,燃油在柴油机气缸中燃烧做功,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的不同,所采用的动力装置的类型也不同。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热机中是最高的,有效热效率可达 50% 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。目前使用的柴油机的最低单机功率约为 0.6 kW,最高功率已超过 87 000 kW,并具有生产约 100 000 kW 柴油机的能力,适用的领域广,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做功,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,柴油机动力装置就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235 000;1924年,柴油机船已发展到约2 000艘,总吨位达2 000 000;1940年,柴油机船进一步发到约8 000艘,总吨位达18 000 000。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了柴油机时代。

目前,船舶柴油机在民用船舶动力装置中占绝对的统治地位,不仅占领了普通船舶动力装置领域,也占领了VLCC、大型散货船和集装箱船等在传统上认为属于蒸汽动力装置的领域。近年来开发的双燃料柴油机在LNG船的动力装置中也取代了蒸汽动力装置的地位,船舶柴油机基本上成为船舶主机的代名词。近二十年来,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)低速机约占80%,四冲程中速机占20%;若以装机台数计算,二冲程低速机所占比例接近60%,四冲程中速机约占40%。

柴油机在船舶上的另一个主要应用场合是作为发电机的原动机,也就是作为船舶副柴油机,也称之为船舶副机。从船舶实际使用来看,除了少数蒸汽动力船舶,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据绝对的主导地位。

对于船用主机来讲,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。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)等优点适于作大型运输船舶如油船、散货船和集装箱船的主机;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渡船及游船的主机。船舶发电机组由于所需功率不大,转速较高,其原动机均采用结构简单、紧凑的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

一、国外船舶柴油机的发展情况

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,并由此开始了第一次工业革命,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的问题越来越突出,已不能适应社会生产力的发展要求,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,热效率可高达 14%,在当时曾得到普遍使用。在 1880 年英国的 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。1893 年德国工程师 Rudolf Diesel 申请了压缩发火内燃机专利,并于 1897 年在 MAN 公司成功研制出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史上的又一个里程碑,为现代工业的发展奠定了基础。

柴油机由于其热效率高的固有优势,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作用。

1. 船舶柴油机发展的第一阶段

船舶柴油机发展的第一阶段是从 20 世纪初至 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 总吨,它使用了两台“Sulzer”公司生产的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,转速 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 总吨,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,转速 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 6 500 总吨,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,转速 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 总吨,它装备了四台 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,转速 127 r/min,该轮的下水和投入营运,打破了当时有关柴油机动力装置不能用于大型船舶推进的偏见。这一阶段,在船舶领域,蒸汽机与柴油机并存,并在相互竞争中发展。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,柴油机在自身逐步完善中有了很大发展,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,使得柴油机大结构上非常笨重;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:1910 年前后,英国 Vickers 公司的 McKechnie 将机械式高压燃料喷射技术引入大型柴油机;1915 年,McKechnie 开发和试验了可运行的直接喷射式柴油机;1927 年 R. Bosch 生产出性能可靠的高压喷油泵,并在柴油机上正式使用,这是柴油机技术发展的一个突破性进步。喷油设备的改进使柴油机有了突飞猛进的发展,并广泛用于车辆、船舶等运输机械中,这一基本原理一直沿用至今。

增压技术也是在这一阶段中发展起来的。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。

2. 船舶柴油机发展的第二阶段

船舶柴油机发展的第二阶段是从 20 世纪 40 年代至 70 年代。第二次世界大战之后,由于全球经济的迅速发展,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,1956 年最大气缸直径为 740~760 mm,1960 年最大气缸直径为 840~900 mm,1965 年最大气缸直径为 930 mm,到 1970 年最大气缸直径达到了 1 060 mm。其相应的单缸功率 1956 年为 900~1 030 kW,1960 年为 1 540~1 700 kW,1965 年为 2 000 kW,1970 年为 3 000 kW,1977 年已达到 3 400 kW。

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,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。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完成了大缸径、焊接结构以及使用劣质燃油等重大技术成果,并逐步形成了多个船用低速柴油机系列。

3. 船舶柴油机发展的第三阶段

船舶柴油机发展的第三阶段是从 20 世纪 70 年代开始至 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,提高柴油机的经济性已成为第一要求。此外,苏伊士运河的通航也使得对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,提高柴油机的经济性和可靠性等。

这一阶段的最主要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。柴油机技术不断趋于完善而柴油机的机型在逐渐减少。船用低速柴油机从以前的八个品牌(由八大船用柴油机制造厂生产)减少到三个。首先是瑞典的 Gotaverken 公司停产了自己的 GV 系列而改为生产丹麦 B&W 公司的 K-GF 系列;英国的 Doxford 公司停产了自己的 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,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。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 $0.155\text{ kg/kWh} \sim 0.160\text{ kg/kWh}$,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。值得一提的是,1975年11月丹麦B&W公司在 $60\,000\text{ t}$ 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。根据散货船、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)和制造工艺的运用大大提高了船用柴油机的可靠性。船用低速柴油机的吊缸周期已从20世纪60年代的 $5\,000 \sim 6\,000\text{ h}$ 提高到 $8\,000 \sim 12\,000\text{ h}$,甚至高达 $20\,000\text{ h}$ 以上。

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 $500 \sim 980\text{ mm}$,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,针对日益兴起的四冲程中速柴油机的竞争,开发了一系列小缸径(260 mm , 350 mm)的低速柴油机。

4. 船舶柴油机发展的第四阶段

船舶柴油机发展的第四阶段是从20世纪初开始,其特征一是电子控制在船舶柴油机上的应用,实现了柴油机控制和管理的电子化、信息化和智能化;二是对柴油机有害排放的控制。

现代船用柴油机控制与操纵自动化,即对船用柴油机及其附属设备进行自动控制及自动监视由来已久。20世纪60年代初曾进行在控制室内对主机集中控制与集中监视;70年代电子技术开始在柴油机上使用;80年代柴油机的电子控制技术已有了很大发展,除可监视柴油机的运行工况外,还可保持柴油机各运行参数的最佳值,以求得柴油机功率、燃油消耗率和其他有关性能的最佳平衡,并由此发展了对柴油机的故障诊断、未来趋势预报等技术,把柴油机的管理技术提高到一个崭新的水平。

电子控制式船舶柴油机最典型的机型是Wärtsilä公司在2000年推出的Sulzer RT-flex全电子控制的智能型柴油机。该柴油机取消了凸轮轴传动齿轮、凸轮轴、燃油喷射泵、气阀控制机构及换向伺服器等设备,而将电子设备及其软件应用于船舶柴油机并成为船舶柴油机的基本组成部分。柴油机的所有主要功能如燃油喷射、排气阀驱动、柴油机的起动和气缸润滑都是全电子控制的。发动机的管理采用DENIS模块和MAPEX监控与维护专家系统,不仅可以对柴油机的工作性能进行优化,而且可以监测柴油机的关键数据,并对这些数据进行智能化分析,以及实现利用专家知识在船评估和通过卫星通信全面支持数据储存和传输。MAN B&W公司也在2003年推出了ME系列电控柴油机,并开始装船使用;同时,日本三菱公司也与Wärtsilä公司合作开发了LSE系列电控柴油机。

随着全球经济的发展,现代工业造成环境污染受到了广泛关注,为限制和控制船舶向大气排放有害物质,国际海事组织(IMO)1997年召开了防止大气污染缔约国外交大会。通过了修订《73/78国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL公约)的1997年议定书。该议定书新增了

《73/78 国际防止船舶造成污染公约》附则 VI “防止船舶造成空气污染规则”。要求对 2000 年 1 月 1 日或以后建造的船上安装的船用柴油机有害排放进行控制。2008 年 10 月,国际海事组织(IMO)海洋环境保护委员会(MEPC)对 MARPOL 公约附则 VI 重新进行了修订,对于船舶的废气排放提出了更严格的要求。国际海事组织和世界各国对船舶柴油机有害排放的控制内容主要包括氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、微粒物质(PM)和温室气体(CO_2)。

为了满足国际海事组织和世界各国日益严格的排放法规要求并获得相应的证书,必须控制船舶柴油机的排放,这已成为当前船舶柴油机发展的中心任务,使得船舶柴油机在燃料使用、燃烧方式、喷油设备等方面发生了重大变化,并对船舶柴油机的发展产生了重大影响。

在船用低速二冲程柴油机发展的同时,大功率四冲程中速柴油机自 20 世纪 50 年代开始也得到了稳步发展,至今已经历了五代机型。它的最大优点是重量轻、尺寸小,可通过选用减速齿轮箱达到最佳的螺旋桨转速。在工作可靠性、使用寿命、经济性及对劣质燃油的适应性方面均有明显改进,基本上达到与低速机相近的水平。近年建造的总吨位 2 000 以上船舶中,使用中速机作主机的船舶数量达到了 35% ~ 40%,装机功率也达到了装机总功率的 20% 左右。

二、国内船舶柴油机的发展情况

我国是后起的低速机生产大国,船舶低速柴油机的生产基本上可分为三个阶段。第一阶段是在 20 世纪 50 年代至 70 年代末期。由于当时的国际国内环境,船舶柴油机发展立足于自主研发。我国对低速二冲程船舶柴油机研制始于 1958 年,曾经研制并生产了 ESDZ43/82、ES-DZ58/100、ESDZ76/160 等机型,填补了我国大功率低速柴油机的空白,并在国产的沿海和远洋船舶上使用。

20 世纪 70 年代末至 2005 年是我国船舶柴油机发展的第二个阶段。改革开放以来,逐步开始引进 Sulzer、MAN B&W 公司的专利进行生产,船舶柴油机的生产技术和生产能力有了快速增长。这一阶段在引进国外先进技术的同时,没能重视和开发自主品牌的产品,导致国产低速机品牌从此消失,应该说是一个重大的损失。

自 20 世纪 80 年代初到 90 年代中期,国产主机装船率呈上升趋势。1982 年,国产柴油机的装船率仅为 25%,大部分是从日本进口。以后几年,随着国产柴油主机生产能力的提高,国产主机的装船比例迅速上升,由 1983 年的 35% 提高到 1984 年的 51% 和 1985 年的 80%,到 1994 年为止,国产主机比例大体保持 80% 上下。到了 21 世纪初,由于主机生产跟不上造船业的快速发展,国产主机比例持续下降。在 2002 ~ 2004 年,我国造船产量大幅度攀升,尽管国产主机产量也在快速增长,但是国产主机装船率却不断下降,2002 年降至 56%,2003 年进一步跌至 45%,2004 年更低,22 000 kW 以上的船用柴油机几乎都要外购。2005 年我国造船完工量 1 212 万吨,新承接船舶订单 1 699 万吨,手持船舶订单 3 969 万吨,分别占世界市场份额的 17%、23% 和 18%,尤其是我国新承接船舶订单首次超过日本,位居世界第二。这使得我国造机能力不足的问题更加突出了。

2005 年以后是我国船舶柴油机发展的第三个阶段。为了解决我国船用柴油机行业存在的产能较弱的问题,国家从政策、资金等各个方面对造机行业进行了扶植,同时对柴油机曲轴等配套行业也有较大的投入。2005 ~ 2008 年,船用低速柴油机的制造出现了快速增长的势头。2005 年前,规模较大的船用低速柴油机生产企业只有沪东重机、大连船用柴油机厂和宜昌船用柴油机厂三家,目前已发展到 11 家企业,其他几家都是这几年开始投资兴建的。随着曲