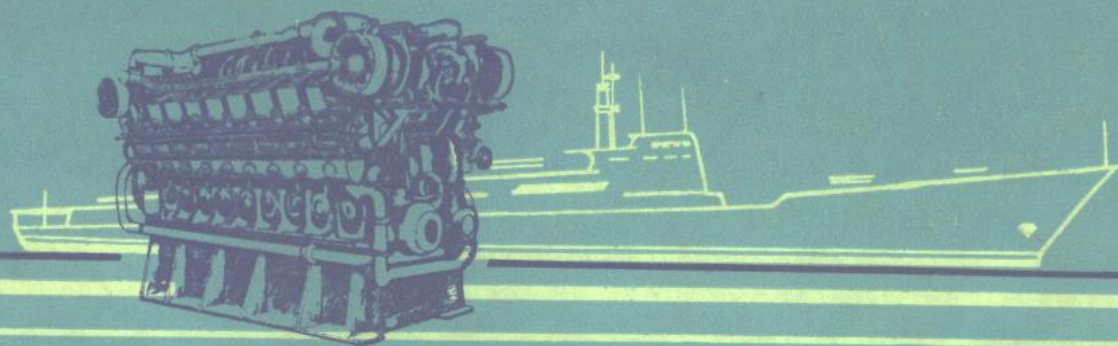


船用柴油机设计手册

(一)

设计总论



国防工业出版社

船用柴油机设计手册

(一)

设计总论

《船用柴油机设计手册》编辑委员会 编

本篇主编：刘 颖

执笔人员：第一章：赵玉莲 第二章：段远才 第三章：刘运安
第四章：王永良、毛学鸣 第五章：施 引、周轶尘

国防工业出版社

内 容 简 介

本分册是《船用柴油机设计手册》的第一篇。本篇共分五章：第一章船用柴油机的发展，介绍船用柴油机的技术发展简史，扼要地说明了当前水平、发展趋势和应用理论研究动向。第二章设计指导思想，论述如何在设计工作中正确贯彻党的方针政策，阐明科研与生产、继承和创新、远和近、先进性和现实性等关系。第三章船用柴油机的标准化、系列化和通用化，书中对“三化”工作的作用、“三化”工作与技术发展的关系、船用柴油机“三化”工作的特点等问题进行了较详细的论述，并对统一、简化机型的原则和附件“三化”工作进行了说明，最后介绍了我国船用柴油机标准化工作的概况。第四章设计程序，提出了设计工作的完整内容，总结出符合科学发展规律的程序。第五章舰船对柴油机的要求和船用柴油机的特性，详细论述各类军民船舶对柴油机的共同要求和特殊要求，介绍船用柴油机各种工作特性的作用，以及如何按舰船用途确定允许工作范围。

《船用柴油机设计手册》共有八篇及附录一章，现按篇分册出版，共九个分册。第一篇设计总论，第二篇总体设计，第三篇船用柴油机工作过程计算，第四篇动力计算，第五篇船用柴油机主要零部件，第六篇系统和附件，第七篇试验与测量，第八篇材料，最后一册为附录。

本书主要供船用柴油机设计研究人员使用，也可供柴油机制造和使用部门工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

E085/29

船用柴油机设计手册

(一)

设计总论

《船用柴油机设计手册》编辑委员会 编

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张 4¹/₂ 95 千字

1979年9月第一版 1979年9月第一次印刷 印数：0,001—8,000册

统一书号：15034·1878 定价：0.52元

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

领 导 成 员

张有萱	夏 桐	沈岳瑞	李渤仲
陈时雄	余运生	孙全柱	李忠仁
刘 仁	熊 琳	刘 颖	胡国栋
于康庄	赖灵淮	谭汉雄	朱国信

《船用柴油机设计手册》编辑工作组

刘 锦	张连方	方 商	商云祥
邱耀先	华裕达	潘荫琪	殷志成
程华峰	徐景福	茅建国	

前 言

柴油机已经有将近一个世纪的发展历史，但迄今技术上仍处于不断改进和发展阶段。柴油机在各种类型军民船舶中应用极为广泛。根据国外不完整的统计资料，1976年新建的2000吨以上民用船舶中，柴油机动力已超过一千万马力，占船舶主机总马力的72%，并且有继续上升的趋势。中小型运输船，工程船及渔轮中柴油机的应用更为普遍。在舰艇中，虽然近年来燃气轮机的发展在一定范围内取代了柴油机，但在中、小型战斗舰艇中，柴油机因其经济性较好以及其它原因，仍被广泛采用。大量军用辅助舰船中，柴油机更是主要动力。因此，大力发展柴油机制造工业和不断提高船用柴油机性能和技术水平是发展我国内河和海洋运输事业，建设强大海军和开发海洋资源的一项重要措施。

我国在解放前几乎没有船用柴油机制造工业。解放后随着国民经济和国防建设的发展，船用柴油机工业也获得迅速的发展。在“独立自主、自力更生”社会主义建设方针的指引下，1958年我国年青的船机科研设计队伍开始自行研制了多种型号舰船用柴油机，其中包括远洋运输船舶所用的低速重型柴油机，以及大功率中、高速柴油机，有多种型号通过了国家鉴定，已进行正式生产，装备了许多舰船，累积了一定的研究、设计新型船用柴油机的经验。

现在我国社会主义革命和社会主义建设进入了一个新的时期，以华国锋同志为首的党中央领导全国各族人民开始了新的长征。为了实现新时期的总任务，全国科学大会制定了科学技术发展的近期和远景规划，号召科学技术要走在国民经济和国防建设的前面。船用柴油机工业及其科学技术也进入了以高速度向现代化进军的阶段。

在这一新的阶段中，船用柴油机科研和设计工作应认真总结建国以来正、反两方面的经验，并在“独立自主、自力更生”的基础上，有分析、有选择地学习国外的先进技术。在统一领导、全面规划的前提下，研究发展更多的、符合我国国情的各种类型舰船用柴油机及其附属设备，尽快地把我国舰船用柴油机的技术提高到世界先进水平，为实现国民经济和国防建设现代化作出应有的贡献。《船用柴油机设计手册》就是为了适应这一新形势的要求，总结我国多年来的研究设计经验，及本着“洋为中用”的原则适当地选用了一些国外可靠的设计方法和资料编写的，为我国从事船用柴油机的广大科研、设计、教学、生产和使用人员提供必要的船用柴油机研究、设计的技术知识和资料。

本手册的读者对象是具备一定基础理论知识和实际经验的本专业从业人员，其中有些篇章也可供与船用柴油机有关的其它专业人员参考，以及作为大专院校有关专业学生的辅助学习资料。

本书共分八篇。第一篇是设计总论，其内容是介绍船用柴油机发展简史和当前发展趋势，阐明有关设计指导思想和设计程序中的有关问题，其中特别强调船用柴油机的三化问题；介绍各种类型舰船对柴油机设计的技术要求。第二篇是总体设计，介绍船用柴油机在总体设计阶段所要考虑的各种技术问题，提供各种设计方案比较用的资料和计算方法。第

三、四两篇是有关工作过程和动力学方面的计算方法。第五篇是船用柴油机主要零部件设计、计算和专用试验方法的介绍。第六篇是船用柴油机各种系统及其有关附件的设计。第七篇是船用柴油机在研制过程中各种试验研究方法的详细介绍。第八篇是有关船用柴油机使用材料和油料的介绍。最后附录一章是国内外有代表性的各种类型船用柴油机参数总表、剖面图、有关标准资料、国际单位与公制单位的换算以及电算程序。每篇暂以分册形式出版，以便读者选用。全手册出齐后，再发行一部分合订本。

我们准备在第一版出版以后，通过科学研究和广泛的学术交流，逐步形成我国自己的、比较完善的船用柴油机研究设计方法，积累丰富的设计资料和数据，在以后的版本中修订和补充，使有助于尽快的提高我国船用柴油机技术，赶超国外先进水平。

由于本手册系第一次编写，内容不完善的地方一定很多，希望读者在使用中发现需要补充和修订的地方随时取得联系，以便在今后再版时加以修订和充实。

本手册的编写是在国内有关船用柴油机科研、设计的领导机关、院校、科研设计单位和生产单位的大力协同下进行的，共有 100 余人参加了各篇、章、节的编写，为了对编写的内容负责，篇、章的主要编写人员都有署名。编辑委员会借此出版机会，特向各有关单位领导的大力支持和有关同志的热情帮助表示深切的感谢。

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

目 录

第一篇 设计总论

第一章 船用柴油机的发展	1-1
第一节 船用柴油机技术发展简史	1-1
(一) 无气喷油的出现	1-1
(二) 废气涡轮增压技术的成功	1-2
(三) 燃用重油	1-2
(四) 焊接结构和箱式机架的采用	1-2
(五) 增压技术的进一步发展	1-3
第二节 船用柴油机的当前水平和发展趋势	1-4
(一) 船用柴油机的当前水平	1-4
(二) 船用柴油机技术发展趋势	1-7
(三) 船用柴油机应用理论研究动向	1-11
参考资料	1-11
第二章 设计的指导思想	1-13
第一节 正确贯彻党的方针政策	1-13
(一) 独立自主、自力更生方针和技术引进政策的关系	1-13
(二) 注意经济效果, 把技术和经济结合起来	1-14
(三) 设计工作中的群众观点问题	1-15
(四) 坚持实践第一的观点	1-15
(五) 坚持标准化、系列化和通用化原则	1-15
第二节 全面考虑设计技术问题	1-16
(一) 科研、设计和生产的关系	1-16
(二) 继承和创新	1-17
(三) 远近结合问题	1-17
(四) 先进性和可靠性	1-18
(五) 设计的工艺构思	1-19
参考资料	1-19
第三章 船用柴油机的标准化、系列化和通用化	1-20
第一节 意义和作用	1-20
第二节 “三化”工作与技术发展的关系	1-20
第三节 船用柴油机系列化工作的特点及统一、简化机型的原则	1-21
(一) 系列的形成和特点	1-21
(二) 统一和简化机型的原则	1-22
第四节 船用柴油机零、部件及附件的“三化”和专业化生产	1-23
第五节 柴油机标准化情况简介	1-24
第六节 柴油机标准的编制	1-25
(一) 编制标准的基本原则	1-25
(二) 编写方法和步骤	1-25
第四章 设计程序	1-23

第一节	船用柴油机研制的一般程序	1-28
第二节	设计任务的来源和确定	1-29
第三节	产品研制的规划阶段	1-30
	(一) 任务的必要性和可行性论证	1-30
	(二) 方案设计	1-31
	(三) 编制设计技术任务书	1-31
	(四) 研制规划和预算	1-32
第四节	先期研究和技术设计	1-32
	(一) 先期研究	1-32
	(二) 技术设计	1-33
	(三) 设计的审查	1-33
第五节	样机的试制、试验和鉴定	1-33
	(一) 试制样机的施工图设计及施工联系	1-34
	(二) 样机的试验和鉴定	1-35
第六节	新产品的的设计定型和生产定型	1-35
第七节	老产品改进程序	1-37
第八节	设计程序与缩短新产品研制周期的关系	1-38
	(一) 必须避免设计和研制过程中多余环节	1-38
	(二) 尽可能采用平行顺序作业	1-38
	(三) 坚持必要的“循序渐进”	1-38
	(四) 重视预研工作和基本研究工作	1-39
	参考资料	1-39
第五章	船舶对柴油机的要求及船用柴油机的特性	1-40
第一节	船舶对柴油机的要求	1-40
	(一) 船用柴油机的一般要求	1-40
	(二) 民用船舶对柴油机的要求	1-43
	(三) 各种军用舰艇对柴油机的要求	1-46
	(四) 舰船用发电机对柴油机的特殊要求	1-52
第二节	柴油机的特性	1-52
	(一) 柴油机的外特性	1-53
	(二) 柴油机的限制特性与允许工作范围	1-54
	(三) 柴油机的负荷特性	1-57
	(四) 柴油机的万有特性	1-58
	(五) 调速特性	1-58
	(六) 理论螺旋桨特性	1-58
第三节	船用柴油机与所带负荷的特性配合	1-59
	(一) 主柴油机与螺旋桨特性配合	1-59
	(二) 柴油机与发电机的配合	1-64
	参考资料	1-64

第一篇 设计总论

第一章 船用柴油机的发展

第一节 船用柴油机技术发展简史

促使人类科学技术发展的根本原因是社会生产力发展的需要。“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”●柴油机的发明产生于十九世纪末欧洲自由资本主义向垄断资本主义和帝国主义过渡时期。当时，引起产业革命的蒸汽机经历了两百多年的改进，已处于发展后期，社会生产力更进一步的发展需要有比往复蒸汽机效能更高的原动机。因此，内燃机、汽轮机就应运而生。柴油机是内燃机的一种。早在1892年德国人狄赛尔(R. Diesel)发明了柴油机工作原理，由于受到资本主义社会制度和当时科学技术水平的限制，并没有试制成功样机，而是在六年后的1898年德国曼恩(MAN)公司，根据该发明制成了第一台四冲程柴油机。这种热机与当时的其他热机相比，最突出的优点是经济性好，其热效率是当时蒸汽机的两倍。这一点直到现在，仍是柴油机赖以生存的主要原因之一。

除此之外，柴油机与蒸汽机相比，还具有起动容易、操纵简便、机动性好、维修管理人员少、能采用安全廉价又便于储存和搬运的燃料及功率范围、重量、体积对船舶设计具有很大的适应性等优点，因此，很快就被用作舰船动力。到本世纪五十年代，几乎在新造船舶中完全排挤了往复蒸汽机。第二次世界大战期间及战后柴油机在舰船上应用更为广泛。仅在最近十余年来，由于燃气轮机的发展，大型水面舰艇，除核动力外，又出现了以燃气轮机为主要动力的趋向，但目前中小型水面舰艇、常规潜艇、民用船舶，柴油机仍是主要动力。

八十多年来，柴油机经历了几次重大的技术革新，其中主要有：

(一) 无气喷油的出现

早期的柴油机，是用高压的空气把燃油喷入气缸中，这样就必须备用一个多级空气压缩机来配合工作，因而增加了机械损失，热效率仅30%（现代柴油机的热效率可达42%⁽¹⁾）。1922年发明了高压燃油泵，这样不需要高压空气的帮助，高压燃油直接可喷入气缸中，减少了驱动空气压缩机的功率，使发动机的机械效率提高至90%左右，相应地也降低了单机马力重量。

● 摘自周恩来总理在第三届全国人民代表大会第一次会议上的“政府工作报告”。

(二) 废气涡轮增压技术的成功

最初发明的柴油机是自然进气的。而功率的增加要求增加单位时间的进气量。早在1896年狄赛尔本人就设计了一种机械增压装置，它利用活塞下端吸入空气，而后通过一个中间容器，将空气送入四冲程循环柴油机的燃烧室中，借以增大进气量。这是早期机械增压方式的尝试。此后陆续出现了扫气泵、鼓风机等各种机械增压方式。但是，这种增压方式仍然消耗柴油机的部分有效输出功率，使燃油消耗率增加，机械效率降低。由于柴油机的排气温度高达400~700℃，所带走的能量占全部燃料所发出热量的40%以上，为了回收这部分废弃的能量，提高效率，就开始研究废气涡轮增压技术。在1911~1914年，瑞士人波希(Bosch)首先完成了废气涡轮增压的试验，并于1925年成功地安装在德国曼恩(MAN)公司的四冲程柴油机上，结果使同一台柴油机功率提高了50%以上，而重量只增加了3~20%。二次大战后，废气涡轮增压技术在四冲程柴油机上的应用更加广泛。1951年丹麦B&W公司最早在二冲程机上采用废气涡轮增压。当时因取消了机械式扫气泵，使二冲程柴油机的机械效率提高了10%，同一台柴油机的功率增大35%，耗油率下降了10克/马力·时。后来随着柴油机增压比的不断提高，为了降低发动机零部件的热应力和进一步提高充气量，在增压系统中又采用了空气中间冷却器，使增压技术又向前发展一步。这样，从增压技术发明，特别是采用废气涡轮增压技术以来，找到了一种成倍地提高柴油机功率的有效途径。

(三) 燃用重油

二次大战后，船用柴油机的广泛应用，柴油需要量急剧增加，引起了人们对船用柴油机燃用重油的重视。一般重油的价格比柴油约低35%，因而可以大大地降低运行成本，提高船用柴油机的经济性。对于船用柴油机来说，能否燃用重油也是在航运经济方面与蒸汽轮机竞争的关键之一。在1948年前后，经过试验证明，在柴油机上燃用重油是完全可能的。但当时由于受到技术水平的限制，有些技术问题未能得到完全解决，以致燃用重油没有普遍地推广。例如，由于燃用重油引起滑油污损；重油中由于过高的硫成分产生氧化物对气缸的腐蚀；重油中的钒、钠等成分燃烧后形成的钒盐、钠盐在500~600℃高温下形成液态，对排气阀的严重腐蚀等方面，均未能很好地克服。后来随着科学技术的发展，上述问题逐渐获得了解决，因而目前几乎全部低速机都可以燃用粘度较高的重油，并有约60%的中速机可燃用粘度为雷氏1250秒以上的重油^[1]。

(四) 焊接结构和箱式机架的采用

随着焊接技术的发展，试验证明船用柴油机的机身和机架完全可以用焊接结构代替铸造。于是在三十年代末期就出现了焊接结构的柴油机，并于1948年在大型二冲程十字头型低速机上也开始采用。在当时起了提高柴油机的结构强度、减轻柴油机重量的作用，特别是对军用机型，焊接机身有较好的抗冲击能力。近年来，大多数的低速机制造公司把过去传统的A字型机架改为箱式机架，用以增加结构刚度。随着铸造技术的进步，铸造机身的重量得以减轻，上述箱式结构亦可铸造，且具有成本较低的优点，因此，铸造结构在

民用机型上目前应用很广。

(五) 增压技术的进一步发展

1. 高性能增压器的发展 增压器性能的好坏对柴油机性能影响很大。通常二冲程机的增压器消耗的功占柴油机总功率的40%左右，四冲程占37%左右。为了提高平均有效压力，首先要提高压气机的压比。七十年代前柴油机的增压比一般为2~2.5左右。以后瑞士BBC公司、日本三菱公司等又进行压比更高的增压器的研究，1972年就出现增压比为3~3.5的大型增压器，1975年又研制成功了增压比为3.5~4的增压器。此外，还由于不断改善压气机的工作条件，保证压气机稳定运转，使增压器总效率也有显著提高，目前较先进的增压器总效率在60%以上。这样使一级增压柴油机的功率有可能比非增压柴油机功率提高200%以上。

2. “二级涡轮增压”的发展 通常为了获得高的平均有效压力(p_e)，必须有高的增压比。当 $p_e=25$ 公斤/厘米²时，增压比要在4以上，而目前通常一级增压的最高压比仅能达到3.5~4，为进一步提高 p_e ，就出现了“两级涡轮增压”方式。

所谓“两级涡轮增压”方式，就是两组增压器，一组是高压增压器带中冷，一组是低压增压器带中冷，串联地安装在柴油机上，而柴油机排出的废气仍经过涡轮再排到大气中，空气在两台增压器的压气机里进行两次压缩和两次中冷。其明显的优点是能充分利用废气能量，可获得较高的压比。由于增大了气缸的进气量，不但能大幅度地提高单机功率，而且由于过量空气系数增大，降低了燃烧室周围，特别是进排气阀的热负荷；与同型机相比，也可在同样功率和工作条件下减少缸数、缩短机身长度。

在二冲程低速机上，最早采用两级涡轮增压方式是日本三菱重工业公司。该公司于1963年就在神户发动机厂的6UET 45/80 D型柴油机上开始进行试验，1975年6月制成两级增压的8UEC 52/105E型柴油机，并结束了装船试验工作^[7]。目前，日本神户发动机厂、赤板铁工所都正在生产两级涡轮增压的柴油机。瑞士“苏尔寿”(Sulzer)公司于1970年前后，曾公布了两级涡轮增压的试验情况，并对两级涡轮增压的几种组合方式进行了试验比较^[2]；瑞典哥塔维根公司(Götaverken)，最近详细地报道了进行两级涡轮增压的试验结果^[2]，并决定与丹麦B&W公司签订共同发展两级增压的合同；与此同时，西德曼恩(MAN)公司也发表在KSZ-B型柴油机上进行两级涡轮增压的试验情况^[2]。

在四冲程机上采用两级涡轮增压，最早是日本富士柴油机制造公司，于1971年在W6M25H型柴油机上试验成功^[2]。该机于1974年5月已装在渔船上。法国热机研究协会(SEMT)和日本石川岛播磨重工业公司，先后在PC 2-5型柴油机上采用两级涡轮增压，并采用BTC型低压比两级增压方式，使单缸功率和平均有效压力大幅度提高，由一级增压的650马力、 $p_e=19.5$ 公斤/厘米²，提高到842马力、 $p_e=25.5$ 公斤/厘米²，在试验室中单缸功率已达到1000马力、 $p_e=31.2$ 公斤/厘米²。

3. “补燃增压”系统的发展 补燃增压系统是法国人七十年代在研究坦克发动机时发明的。该增压系统是使用压比为5的高压比增压器，并在压气机排气口和涡轮进气口之间，安装一个旁路集气管和辅助燃烧室，在柴油机启动之前，为了提供足够的进气压力，先用电动机起动增压器，然后在辅助燃烧室进行电火花点燃，产生燃气，增压器就像一个

小的燃气轮机一样开始运转，直到柴油机功率达到全负荷的 15~20% 以后，柴油机就可以不需要辅助燃烧室的协助而自行运转。这种增压系统能充分地发挥废气涡轮增压器的效率，因而使平均有效压力能大幅度地提高，其功率可比一级增压柴油机高一倍。另一个优点是能解决低压比启动和低工况运转的困难。

第二节 船用柴油机的当前水平和发展趋势

(一) 船用柴油机的当前水平

大功率船用柴油机习惯上是按其转速分成高速、中速、低速三类(表 1-1-2-1)。在目前生产的机型中，大缸径中速机均为四冲程、筒形活塞式；小缸径的中速机，欧洲多用四冲程，而美国则二、四冲程兼有；高速柴油机，二、四冲程均有，但大功率者以四冲程为多。

表 1-1-2-1 船用柴油机分类

项 目 \ 类 别	船用高速机	船用中速机	船用低速机
缸径(毫米)	130~230	230~650	400~1060
转速(转/分)	1000~2200	300~1000	83~300
用 途	军用舰艇、中、小型船舶舰船辅机、电站	中、大型船舶、军用舰船、军辅船、电站	中、大型内河船舶、远洋船舶

1. 船用高速机 至今已有四十余年的发展历史。二次大战前的船用高速机，一般都是自然充气的，只有少数采用机械增压。二次大战后，废气涡轮增压技术逐渐在高速机上得到普遍采用，单机功率随之迅速增加。五十年代西欧各国研制的机型，如西德苯茨(Benz)公司的 MB 820 系列、MAN 公司的 MAN 18/21 系列和法国 SACM 公司的 V 16 BSHR 型等，单机功率在 1000~3000 马力，平均有效压力 p_e 在 10~13.5 公斤/厘米² 之间。六十年代初，西德玛巴哈(Maybach)公司，制造了 MD 系列柴油机，使单机功率达到 3700~4500 马力，平均有效压力达到 19.8 公斤/厘米²，强化系数 ($p_e \cdot C_m$) 为 236 公斤·米/厘米²·秒。至七十年代，西德 MTU 公司 MD 538 TB 92 型的平均有效压力达 22 公斤/厘米²，强化系数高至 251 公斤·米/厘米²·秒；MTU 956 型的单机最大功率 6000 马力，并计划 1980 年达 8000 马力，大修期在 6000 小时以上，耗油率在 155~160 克/马力·时，单位马力重量在 2.51 公斤/马力左右。目前正在试验的机型中，有的平均有效压力达 25~35 公斤/厘米²^[1]，功率可达 10000 马力。二冲程高速机的单机功率也有大幅度的提高，目前单机功率已达 5100 马力以上，试验机型达 6000 马力以上，平均有效压力在 9~12 公斤/厘米²，试验机型达 11~18 公斤/厘米²。表 1-1-2-2 列出国外较先进的船用高速机。

2. 船用中速柴油机 由于解决了燃用重油问题，提高了经济性，并能燃用天然气，成为双燃料柴油机，使中速柴油机成为军民通用、水陆通用的机种。近十余年来，发展特别迅速。四冲程船用中速机单位活塞面积功率二十余年来几乎提高了四倍。1955 年单机功率最大仅 5600 马力，1977 年已达到 27000~30000 马力，正在研制中的产品最大单机功率可达 36000~40000 马力。四冲程单缸功率目前最大为 1800 马力，不久可达 2000 马力；二冲程机如英国海马(Sea Horse)型，单缸功率已达 2500 马力，但自 1971 年制成第一台

表1-1-2-2 国外舰船用高速柴油机

国别	机 型	型 式	缸 数	缸 径 (毫 米)	行 程 (毫 米)	最大功率 (马力)	最大转速 (转/分)	平均有效压力 (公斤/厘米 ²)	活塞平均速度 (米/秒)	耗油量 (克/马力·小时)	增压压力 (公斤/厘米 ²)	机重 (公斤)	单位马力重量 (公斤/马力)	大修期 (小时)	增 压 方 式
西 德	MT40H672	工字型预燃室	40	185	250	7000 (10000)	1700	13.8 (19.7)	14.16	170	2.4	12200	1.74	1000	涡轮增压, 中冷
	MA16 V956 TB91	60° V型预燃室	16	230	230	4500	1570	18.65	12.08	155	2.4	11360	2.52	6000	涡轮增压, 中冷
	MD20V 538 TB91	60° V型预燃室	20	185	200	4500	1900	19.8	12.7	165	1.85	8720	2.12	2000~4000	涡轮增压, 中冷
	MD16V 538 TB90	60° V型预燃室	16	185	200	3600	1900	19.8	12.7	165	1.85	6000	1.72	3000以上	涡轮增压, 中冷
	MB8 V-331 TC	90° V型	8	165	155	800	2340	11.6	12.1	164		1700	2.05		涡轮增压, 中冷
法 国	16 PA4-186	90° V型	16	185	210	2400	1500	16	10.5	168		7300	3.04		两级增压, 中冷 两级增压, 中冷 高增压, 中冷, 低压缩比
	18 PA6-280	90° V型	18	280	290	6300 (7200)	1050 (1000)	16.8 (20.0)	10.15 (8.7)	158 (159.5)		26200	4.15 (3.55)		
	12 PA4-200 VG-DS	90° V	12	200	210	3600	1600	25.5	11.2	160~168	2.4				
	AGOV16-240 ESHR	50° V型	16	240	220	6000	1500	22.6	11.0	153	3.8	15800	2.64		
	AGO20V-240 BTC	50° V型	20	240	220	10000	1350	35	9.8	170	6~7				
意 大 利	X-1832	X型	32	180	205	4000	1640	13.3	11	146		5160	1.29	4000	涡轮增压, 中冷
	X-560	X型	32	180	205	4500	1640			156		5400	1.2	4000	涡轮增压, 中冷
苏 联	M504	星型	56	160	170	5000 (6000)	2000 (2200)	11.09 (13)	12.48	165 (180)	2.4	7200	1.44	2500	涡轮增压, 中冷
	M503改进	星型	42	160	170	3800 (4500)	2000 (2200)	11.09	12.48	165	2.4	6200	1.63	2500	涡轮增压, 中冷
	M401 B	V型	12	180	200	1100	1600			165		1900	1.73	2500	
英 国	T18-37K	△型二冲程	18	130	184 × 2	3140	2100	7.62	12.9	171		4890	1.55	2500	涡轮增压
	T18-50K	△型二冲程	18	130	184 × 2	4140	2100	10.0	12.88	170		5850	1.41		
英 国	16YJC	60° V型	16	197	216	2000	1500	11.8	10.8	176	1.85	6080	3.04		增压中冷
	18RP-200	60° V型	18	197	216	3770	1600	17.9	11.3	165	2.5	10200	2.69		增压中冷
日 本	24WZ	60° W型二冲程	24	150	200	3500 (3300)	1650 (1750)	11.3 (10)	11 (11.7)	180		7900	2.27 (2.38)		二冲程增压中冷

样机后, 至 1976 年尚未见在船上实用。四冲程机平均有效压力已达 $p_e = 21 \sim 26$ 公斤/厘米², 在探索性的试验机上已达 $39 \sim 42$ 公斤/厘米² [6]; 二冲程 p_e 为 $10 \sim 15.6$ 公斤/厘米²。强化系数在单级增压的机型中, 一般为 $146 \sim 160$ 公斤·米/厘米²·秒, 正在研制中的为 180 公斤·米/厘米²·秒。在两级增压的机型中, 日本石川岛播磨重工的 PC 2-5 BTC 型机已达 203 公斤·米/厘米²·秒, 富士 W6M26 型机已达 204 公斤·米/厘米²·秒, 单位马力重量为 $8.5 \sim 9.5$ 公斤/马力, 包括减速齿轮箱在内, 也仅 16 公斤/马力, 燃油耗量与低速机不相上下, 通常在 $146 \sim 157$ 克/马力·时, 其寿命均在 20000 小时以上。表 1-1-2-3 为国外较先进的典型中速柴油机。

3. 船用低速柴油机 自五十年代船用低速十字头式二冲程柴油机解决烧重油技术后, 经济性、机动性皆优于蒸汽轮机, 因而在民用船舶上得到迅速应用, 成为民用中大型船舶的主要动力之一。随着五十年代至七十年代初期, 船舶向大型化、高速化发展, 船用低速

表1-1-2-3 国外较先进的船用中速机

国别	厂家	机型	冲程	缸径×行程 (毫米)	平均有效压力 (公斤/厘米 ²)	转速 (转/分)	单缸功率 (马力)	18缸功率 (马力)
西德	Deutz	BVM540	4	370×400	19.2	630	550	9900
西德	MAN	L-N40/45	4	400×450	19.5	600	748	13464
日本	三菱	L-V42M	4	420×450	20.4	530	750	13500
法国	SEMT	PC2-5BTC	4	400×460	26	520	842	15154
瑞士	Sulzer	Z40/48	4	400×480	18.64	600	750	13500
西德	MAN	L-V52/55A	4	520×550	18.1	450	1055	18990
法国	SEMT	PC4	4	570×620	21.3	400	1500	27000
日本	三井	V60M	4	600×640	20.2	370	1500	27000
西德-瑞士	MAN-Sulzer	65/65	4	650×650	18.76	400	1800	21600 ^①

① 65/65 1977年只有V-12缸一种机型。

机单机功率不断增加，由五十年代初期的单缸功率 1500 马力，发展到六十年代末期的 4000 马力，12 缸单机功率达 48000 马力，缸径增大至 1060 毫米。七十年代初期，资本主义世界的“能源危机”及苏伊士运河的重新开放以及资本主义世界的经济萧条，大型船舶停止发展；同时，这种超大缸径的低速机，由于转速不能低于 100 转/分，船舶推进效率较低，故低速机已停止向增大单机功率进一步发展。由于与船用中速柴油机竞争，目前国外有减小缸径、加大行程、降低转速的发展动向。低速船用柴油机目前一级增压的强化系数在 80 公斤·米/厘米²·秒；日本三菱 UEC 采用两级增压方式，使强化系数达到 100 公斤·米/厘米²·秒；正在试验的两级增压的强化系数已达到了 120 公斤·米/厘米²·秒。平均有效压力为 11~12.5 公斤/厘米²，正在研制的机型有达 15 公斤/厘米²者。燃油消耗率一般在 145~150 克/马力·时之间。目前所有低速机都能燃用重油。单位马力重量一般为 30~40 公斤/马力。表 1-1-2-4 为国外较先进的船用低速柴油机。

表1-1-2-4 国外较先进低速柴油机

国别	公司	机型	缸径/行程 (毫米)	转速 (转/分)	平均有效压力 (公斤/厘米 ²)	单缸功率 (马力)	12缸功率 (马力)	强化系数 ($P_e \cdot C_m$)
瑞士	Sulzer	RND105	1050/1800	108	12.30	4000	48000	79.3
丹麦	B&W	K90GF	900/1800	114	11.80	3410	40900	80.77
西德	MAN	KSZ90/160A	900/1600	122	12.06	3330	39960	78.2
西德	MAN	KSZ90/160B	900/1600	122	13.21	3672	44060	83.8
西德	MAN	KSZ52/105B	520/1050	83	13.2	1200	26000	85
日本	三菱	UEC85/180E	850/1800	120	13.95	3800	45600	100.4
日本	三菱	UEC60/125E	600/1250	158	15.31	1900	22000	100.8
		UEC65/135E	650/1350	150	15.40	2300	27000	104.0

(二) 船用柴油机技术发展趋势

当前船用柴油机在技术上比较明显的主要发展趋势有以下几个方面:

1. 提高单机功率 近二十年来,为了适应船舶大型化和高速化发展的需要,为了六十年代飞跃发展的比功率高的燃气轮机,和长期在大型船舶中占主要地位的蒸汽轮机相竞争,各种类型船用柴油机曾不断向提高单机功率方向发展。在1954年最大单机功率仅12000马力,现可达48000马力。在军用舰船方面,虽然大型水面舰艇有采用燃气轮机趋势,但在中、小型舰艇上柴油机仍是主要的动力装置之一。这些舰艇的航速要求日益提高,也要求柴油机的单机功率不断提高。例如400~600吨的快艇,二次大战时,总功率一般只在10000马力左右,而现在要求在20000~30000马力,单机功率要求达到6000~8000马力左右,而不久前船用高速机最大单机功率仅4500马力。提高单机功率的途径如下:

(1) 提高转速 也就是提高活塞平均速度。由于受到柴油机结构材料的限制,近二十年来提高很少,仅1.2倍左右。目前船用高速机一般不超过13米/秒;船用中速机不超过8~9米/秒;船用低速机不超过6~7米/秒。今后进一步提高的趋势也不明显。

(2) 增加排量 在同样增压度的条件下,增加气缸排量是增加单机功率的有效途径。增加排量通常包括增加缸数和加大缸径或行程。增加缸数的方法,曾在五十到六十年代高速快艇(鱼雷艇、水翼艇、气垫艇)用的轻型高速机上采用过。因为这种艇的机舱容积较小,对柴油机的重量尺寸要求严格,为了增大单机功率,不得限制缸径,增大缸数。当时,缸径在130~160毫米左右的柴油机,缸数增加至18、24、32、42、48、56,出现W、H、▽、X、星型等较复杂的结构型式。但缸数过多,带来结构复杂、维修保养不便、影响柴油机的可靠性。由于气缸的热应力和机械应力得到进一步解决,近年来很少采用这种方法来增加单机功率。加大缸径和行程是目前增加柴油机排量的新动向,也是在同样增压度的条件下,提高单机功率的有效途径。

a. 船用高速柴油机(重型) 一般缸径为180~280毫米,转速1000~1500转/分,缸数最多为20, V型排列,单位马力重量2.0~4公斤/马力,有时称之为中高速机。它是目前机车上应用最广泛的机型,现在被选用在机舱地位和重量限制较宽的大型导弹艇、大型水翼艇、护卫艇、轻型护卫舰和常规电力推进潜艇上。如西德的MTU 956、英国派克斯曼(Paxman)公司的RP 200等型。

近年来,由于水翼艇、气垫艇、半潜艇等特种船型的发展,除吨位大者尚可选用燃气轮机外,中小吨位的这类舰船仍然要求重量轻、尺寸小的高速柴油机作为主机。因此,在结构上怎样解决重量轻、尺寸小与寿命短和维修不便的矛盾是高速柴油机发展的新课题。这方面目前已有新的发展,特别是在超高补燃增压出现后,显示出新的发展前景。

b. 船用中速柴油机 近年来扩大缸径的趋势明显。六十年代单缸功率为500马力的中速机,缸径均在400毫米左右;当单缸功率提高到1000马力时,缸径增大至500毫米;现功率达1500~2000马力,缸径加大至600~650毫米。更进一步增大缸径,目前尚受到热应力的限制。

c. 船用低速柴油机 从五十年代到六十年代中期,国外曾用加大气缸直径的办法来增加单机功率。在此期间,缸径从700毫米增加到1060毫米,甚至开始研制1300毫米

超大缸径柴油机。使其单缸功率达到 5500 马力以上。但 1973 年资本主义国际市场发生能源危机，强调船舶运行的经济性，使大型船舶订货减少，加之这些超大缸径的低速二冲程柴油机，转速在 100 转/分以上，不适合大型螺旋桨最佳转速的要求。现已不在增大缸径上下功夫。相反，由于与中速机竞争，目前低速机缸径有缩小的趋向。丹麦 B&W 公司新的 FGF 系列，缸径在 450~900 毫米之间；苏尔寿 (Sulzer) 公司 RND-M 系列，缸径为 680~900 毫米；MAN 公司的 KSZ-A 和 KSZ-B 型，缸径为 700 毫米左右^[3]。与此同时，目前低速直接推进的二冲程柴油机，有向长行程发展的趋向，以便降低转速适应大型螺旋桨的最优转速 70~80 转/分的要求。如日本把 B&W 系列的 K-GF 型，发展为长行程的 L-GF 型，转速降低了 18%，推进效率提高了 5%；丹麦 B&W 公司在过去的标准机型上，将冲程增加 2%，转速降到 83 转/分，节省燃料 5%。表 1-1-2-5 为发展中的长行程低速机。

表 1-1-2-5 正在发展中的长行程低速机

公 司	机 型	缸径/行程 毫米	缸径和 行程比	转速 转/分	马力/缸	p_e 公斤/厘米 ²	C_m 米/秒	$p_e \cdot C_m$ 强化系数
B & W	L90GF	900/2180	2.42	94	3420	11.80	6.83	80.6
B & W	L94NF	940/2500	2.66	83	5550	17.3	6.9	119
B & W	L80GF	800/1950	2.44	106	2672	11.80	6.76	79.8
B & W	L67GF	670/1700	2.54	119	1870	11.8	6.74	79.5
B & W	L55GF	550/1380	2.51	150	1340	12.50	6.90	86.3
Sulzer	RLA56	560/1150	2.05	155	1190	12.06	5.94	72.5

(3) 提高平均有效压力 这是近二十年来提高各类船用柴油机单机功率最主要的方法。一般是通过增压，采用高性能增压器、两级增压方式和补燃起高压系统来实现的。船用四冲程高速机由五十年代的 $p_e = 10 \sim 13.5$ 公斤/厘米² 提高到目前的 22 公斤/厘米² 左右，使单机功率提高了一倍以上。四冲程中速机，近 25 年来，单位活塞面积功率提高了四倍以上，其中 75% 是通过提高平均有效压力达到的。二冲程低速机的平均有效压力也是不断在提高，因而使单机功率随之增加，从表 1-1-2-6 各公司船用低速机年度功率的提高，可明显地说明这一趋势。

2. 强化工作过程、提高强化系数、提高单缸功率、减少柴油机的尺寸重量 这一趋势在中、低速机的发展中尤为明显。特别是低速柴油机，如上所述，目前并不强调提高单机功率，而强调提高单缸功率，以便减少同功率柴油机的缸数，缩短机舱长度，提高船的装载能力。表 1-1-2-7 示出了低速船用柴油机强化系数的提高与单位机身长度功率增加的关系。目前主要采用两级增压和超高增压的方式来达到。如日本三菱公司的 UEC 系列的 E 型柴油机，由于采用了两级增压，使强化系数由 80 公斤·米/厘米²·秒左右，提高到 100 公斤·米/厘米²·秒，比同功率的 D 型机提高了 30%，使相应机型的气缸数减少了两个，机身长度缩短了 3~7 米，因此提高了船舶运行的经济性。同样，对船用中速柴油机和高速柴油机，也有用两级增压和超高增压方式提高强化系数和单缸功率的趋势。

3. 提高柴油机的经济性

(1) 降低燃油和滑油的耗量，对提高柴油机经济性和提高舰艇续航力具有重大意义。几十年来柴油机耗油量有明显下降。四冲程高速机的耗油率由 170~180 克/马力·时左右降

表1-1-2-6 各公司船用低速机年度功率的提高

项 目	Sulzer				B & W			
	1945	1955	1965	1976	1945	1955	1965	1976
缸径(毫米)	720	760	760	680	740	740	740	670
行程(毫米)	1250	1550	1550	1250	1600	1600	1600	1400
转速(转/分)	130	119	119	150	115	115	115	145
活塞平均速度 C_m (米/秒)	5.4	6.2	6.2	6.25	6.1	6.1	6.1	6.76
平均有效压力 p_e (公斤/厘米 ²)	4.8	5.4	8.1	12.56	5.2	7.1	8.5	11.78
强化系数($p_e \cdot C_m$)	26.9	33.5	50.2	78.5	31.7	43.3	51.8	79.5
马力/缸	700	1000	1600	1900	920	1250	1500	1870
公斤/马力	—	—	38.1	—	69	40	37	—
机 型	SD72	RSD76	RD76	RND68M	74VTF 160	74VTF 160	74VT2BF 160	K67GF

项 目	MAN				三菱重工			
	1945	1955	1965	1976	1945	1955	1965	1976
缸径(毫米)	700	700	700	700	720	750	750	650
行程(毫米)	1200	1200	1200	1250	1250	1500	1500	1350
转速(转/分)	125	130	135	145	130	122	124	150
活塞平均速度 C_m (米/秒)	5.0	5.2	5.4	6.06	3.4	6.1	6.2	6.75
平均有效压力 p_e (公斤/厘米 ²)	5.2	6.8	8.7	12.25	5.1	7.9	7.9	15.61
强化系数($p_e \cdot C_m$)	26.0	35.4	47.0	74.2	27.6	48.2	49.0	105.4
马力/缸	66.5	90.5	1200	1904	750	1417	1444	2300
公斤/马力	63.4	44.7	37.6	—	66.5	45.9	36.9	—
机 型	KZ70/ 120	KZ70/ 120C	KSZ70/ 120D	KSZ70/ 125A	MS72/125	UEC75/150	UEC75/ 150	UEC65/135E

表1-1-2-7 柴油机强化系数与机长、功率增加关系

机 型	9UEC85/160A	9UEC85/160C	9UEC85/180D	9UEC85/180E
缸径(毫米)	850	850	850	850
行程(毫米)	1600	1600	1800	1800
缸 数	9	9	9	9
平均有效压力(公斤/厘米 ²)	8.19	9.43	11.20	13.95
活塞平均速度(米/秒)	6.40	6.67	7.08	7.20
强化系数($p_e \cdot C_m$)	52.4	62.9	79.3	100.4
功率(马力)	18000	21600	27000	34200
机长(米)	18.44	18.235	18.27	18.27
马力/米	976.1	1184.5	1477.8	1871.9
生产年代	1960~1965	1965~1970	1970~1975	1976

到 155~160 克/马力·时；四冲程中速机由 160 克/马力·时降到 150~155 克/马力·时，较好的 PC4 型柴油机已降到 145 克/马力·时；二冲程低速机由 150 克/马力·时左右降到 140 克/马力·时左右。然而最近由于采用超高增压，单缸功率成倍提高，每循环喷油量成倍增加，使燃烧组织较为困难，又加上为了防止最大爆发压力过高，压缩比降低至 7~8，使热效率下降，导致燃油消耗率有所上升。为此，目前正在进行大量的试验研究工作。此外，降低滑油的消