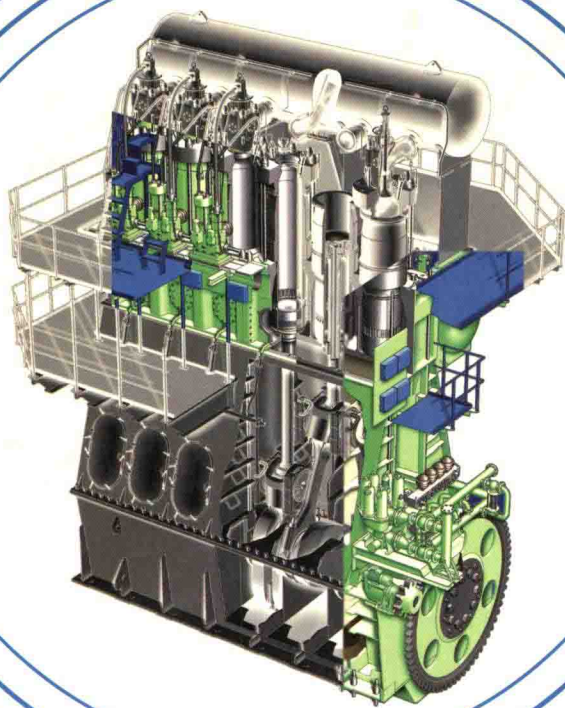


高等学校教材

船舶柴油机

黄少竹 主编



大连海事大学出版社

高等学校教材

船舶柴油机

黄少竹 主编

大连海事大学出版社

© 黄少竹 2006

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机 / 黄少竹主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2005.12
ISBN 7-5632-1905-6

I. 船… II. 黄… III. 船用柴油机—教材 IV. U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 125842 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

大连大印印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2006 年 2 月第 1 版

2006 年 2 月第 1 次印刷

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:25.5

字数:632 千字

印数:1~2000 册

责任编辑:黎 为

封面设计:王 艳

定价:38.00 元

前 言

本教材是根据全国高校航海类专业教学指导委员会制定的“轮机管理专业四年制本科指导性教学计划”的要求和审定的“船舶柴油机教材大纲”,同时参考了1998年2月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”的考试要求,并结合我校多年的科研教学经验编写的。

本教材从我国远洋船舶实际出发,以低、中速船舶柴油机为典型,系统地阐述了船舶柴油机的构造、工作原理、性能,以及使用管理的基本概念。通过学习培养学生对船舶柴油机使用、操作、调整、维护保养、故障分析及处理的能力。

本书内容力求贯彻理论联系实际、循序渐进和少而精的原则,覆盖海事局“海船船员适任考试与评估大纲”的考试内容,并能反映出国内外船舶柴油机技术最新的动向和水平。

本书主要作为轮机管理专业的教材,也可供轮机管理人员及从事船机修造的工程技术人员参考。

本书由黄少竹教授主编。第三、七章由黄少竹教授编写;第一、四章由张天野副教授编写;第二章由黄加亮副教授编写;第五、八、十章由陈景锋副教授编写;第六、九章由陈丹副教授编写。

由于编者水平所限,书中不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2005年9月12日

目 录

第一章 柴油机的工作循环和主要性能指标.....	(1)
第一节 船舶柴油机的历史与现状.....	(1)
第二节 柴油机的基本工作原理.....	(3)
第三节 船舶柴油机的分类	(11)
第四节 柴油机的工作循环	(14)
第五节 柴油机的主要性能指标	(28)
第六节 柴油机的热平衡	(35)
第二章 柴油机的结构和主要部件	(38)
第一节 柴油机的结构	(38)
第二节 燃烧室部件	(43)
第三节 曲柄连杆机构	(71)
第四节 柴油机的主要固定件	(96)
第三章 换气机构和增压系统.....	(101)
第一节 换气机构.....	(101)
第二节 废气涡轮增压系统和涡轮增压器.....	(110)
第三节 现代船舶柴油机增压系统运行的基本规律.....	(130)
第四节 增压系统的故障与维护管理.....	(136)
第四章 燃油喷射与燃烧.....	(141)
第一节 燃油与燃油添加剂.....	(141)
第二节 燃油的喷射.....	(154)
第三节 喷油泵及喷油器.....	(160)
第四节 混合气的形成和燃烧.....	(169)
第五节 故障与维护管理.....	(180)
第六节 提高柴油机功率和经济性的措施.....	(187)
第七节 柴油机排气污染与净化.....	(188)
第八节 船用电控燃油喷射系统及智能柴油机.....	(192)
第五章 燃油系统、润滑系统和冷却系统	(200)
第一节 燃油系统.....	(200)
第二节 低质燃油的使用和降速航行.....	(206)
第三节 离心式分油机.....	(210)
第四节 润滑和润滑油的性质.....	(224)
第五节 润滑系统.....	(231)
第六节 气缸润滑.....	(244)
第七节 冷却系统.....	(254)

第六章 柴油机的调速和操纵	(261)
第一节 柴油机的调速	(261)
第二节 调速器	(265)
第三节 调速器的故障与管理	(284)
第四节 起动装置	(286)
第五节 换向装置	(293)
第六节 柴油机的操纵系统	(298)
第七章 柴油机的特性及使用范围	(308)
第一节 概述	(308)
第二节 柴油机的特性	(309)
第三节 柴油机的允许使用范围	(316)
第八章 示功图测录与分析	(326)
第一节 示功图的测录	(326)
第二节 示功图的分析	(333)
第三节 柴油机主要运行参数的测量	(338)
第九章 柴油机的振动与平衡	(341)
第一节 柴油机动力学	(341)
第二节 柴油机平衡	(349)
第三节 轴系扭转振动和减振	(362)
第四节 轴系纵向振动和减振	(375)
第十章 柴油机的运行管理与应急处理	(382)
第一节 备车和机动操纵	(382)
第二节 运转中的管理与完车	(384)
第三节 封缸运行	(388)
第四节 停增压器运转	(391)
第五节 拉缸	(391)
第六节 敲缸	(393)
第七节 扫气箱着火	(394)
第八节 曲轴箱爆炸	(395)
第九节 烟囱冒火	(396)
第十节 连杆螺栓断裂	(398)
第十一节 紧急刹车	(399)

第一章 柴油机的工作循环和主要性能指标

第一节 船舶柴油机的历史与现状

柴油机自 1897 年由 Rudolf Diesel 发明以来,已经得到了巨大的发展。下面就有关柴油机发展的历史作一简要介绍。

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,英国资本主义生产力的发展促进了 1776 年瓦特蒸汽机的发明,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,这种热机由于热效率低,以及过于笨重而又不适应社会生产力发展对新型动力机械需求的增加。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。之后,1880 年一些工程师,如英国的 D. Clerk 和 J. Robson,以及德国人 Karl Benz 等成功地开发了二冲程内燃机。

1892 年德国工程师 R. Diesel 申请了压缩发火内燃机专利,并于 1897 年在 MAN 公司制成第一台实际使用的柴油机(压燃式、空气喷射、定压燃烧)。因可采用较大的压缩比,其效率比煤气机有显著提高。1904 年柴油机首次用于船舶推进装置(294 kW, 260 r/min)。从此在船舶领域里开始了与蒸汽推进装置的竞争局面。在此后 40 多年中,柴油机在自身逐步完善中有了很大发展,如 1927 年在柴油机上正式使用了由 R. Bosch 发明的喷油泵(回油孔式)一喷油器喷射系统,代替了原需用 7 MPa 压缩空气喷油的空气喷射系统,实现了混合燃烧。1905 年,瑞士人 Alfred Buechi 提出了涡轮增压的设想,1926 年 MAN 公司制造了第一台船用废气涡轮增压柴油机,当时由于增压器制造水平的限制,此项技术未能迅速推广。但总的来看在与蒸汽推进装置竞争中无突破性进展,在船舶使用中蒸汽推进装置仍占据领先地位。

从第二次世界大战到 20 世纪 50 年代中后期,由于社会生产力的迅速发展对船舶推进装置提出了新的要求。柴油机在此期间完成了大缸径、焊接结构、废气涡轮增压,以及使用劣质燃油等四项重大技术成果,并逐步发展了船用低速柴油机系列。此期间在国外大致有八种船用低速柴油机型号(由八大船用柴油机制造厂生产)。在这些技术成就中,废气涡轮增压技术在船用二冲程柴油机上的成功使用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,其技术特征是废气涡轮增压技术的普及。至此,在与蒸汽动力装置的竞争中柴油机逐渐取得了领先地位。

从 20 世纪 60 年代到 70 年代船用低速柴油机进入了黄金时代,它在船舶动力装置中取得了明显的压倒优势。各船用柴油机厂之间开始进行调整、合并、淘汰。柴油机技术趋于完善。此期间的船用低速柴油机的性能参数大致范围为:缸径 $D = 600 \sim 1\,050$ mm,行程 $S = 1\,000 \sim 1\,800$ mm,单缸有效功率达 3 000 kW(单机组达 36 000 kW),油耗率约为 0.21 kg/kW·h(有效热效率 $\eta_e = 40\%$)。此期间内,船用低速柴油机发展的特点按顺序大致为增大机组功率、提高可靠性和提高经济性。20 世纪 70 年代的两次能源危机诱发了世界范围内的能源危机。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%。由此,改变了人们长期以来的传统观念,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。20 世纪 70 年代末到 80 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 年~3 年),各类柴油机采用多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 0.155~0.160 kg/kW·h,有效热效率可高达 55%。国外把这一时期船用柴油机的发展称为第二次飞跃。其主要技术特征是节能技术的普及。随着柴油机节能技术的发展,柴油机的可靠性也有了长足的发展。各种先进技术的运用大大提高了船用柴油机的可靠性。当前,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。现代船用柴油机发展中的第三个特点是控制与操纵自动化,即对船用柴油机及其附属设备进行自动控制及自动监视。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,20 世纪 70 年代电子技术开始在柴油机上使用。20 世纪 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。2000 年,Wärtsilä 瑞士公司成功地推出了全电子控制的智能型柴油机并开始装船使用。目前,低速机的冲程可达 3 150 mm(RTA84),单缸功率可达 5 000 kW,单机功率可达 80 080 kW(14RTA96)。

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,至今已经历了四代机型。它的最大优点是重量轻、尺寸小,可选用最佳的螺旋桨转速。在工作可靠性、使用寿命、经济性以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 2 000 总吨以上船舶中使用中速机做主机者占 25% 左右。

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滚装船和集装箱船的主机。船舶发电柴油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。

经过近几十年尤其是近十多年的发展,现代船用柴油机已经发展到一个较高的技术水平。今后,随着生产力的发展将会对船用柴油机提出更高的要求,船舶柴油机也将继续发展改进。当前柴油机的发展可以概括为:以节能为中心充分兼顾到排放与可靠性的要求,全面提高柴油机性能。根据此发展目标,今后的研究趋势大致为:提高经济性的研究,包括燃烧、增压、低摩擦、低磨损等的研究;降低柴油机排放的研究,排放是现代柴油机面临的严重挑战,随着对船舶柴油机排放的限制使得经济性的提高更加困难,这也是船舶柴油机发展中的新课题;提高可靠性与耐久性的研究;电子控制技术的研究;代用燃料的研究等。

目前柴油机技术发展中存在如下几个热点:

1. 船用柴油机采用共轨喷油技术

在汽车发动机上采用共轨喷油系统是很普遍的。而 MTU 柴油机公司首先将这种技术用在船用柴油机上。该公司将共轨喷油系统最先用于 4000 系列柴油机,后来又用于新推出的

8000 系列柴油机。采用共轨喷油系统和相应的柴油机控制装置后,柴油机即能适应多种工况。由于柴油机的各种喷油参数是可以单独控制的,因此可使燃油消耗量显著降低,废气排放量有所减少。与采用普通喷油系统的柴油机相比,采用共轨喷油系统的柴油机可以在慢速低负荷运行时降低噪声。

在低速机方面,Sulzer 公司和 MAN-B&W 公司走在了前列,Sulzer 公司开发的 RT-flex 系列已经装船使用,首台采用电控等压喷射系统的 RT-flex 58T-B 型柴油机装在一条由现代尾浦造船公司建造的 4.7 万载重吨散货船上,其采用的共轨喷油系统可用于无凸轮轴柴油机。MAN-B&W 柴油机公司研制的无凸轮轴、完全采用电子控制的 7S50ME-C 型柴油机,也已正式投放市场。该型机由阿尔法工厂制造,首台机安装在挪威船东订造的 3.75 万载重吨级化学品船上。MAN-B&W 7S50ME-C 型柴油机(输出功率 1.041 5 万 kW、转速 120 r/min)采用定时控制燃油喷射和排气阀排气,可有效地降低燃油消耗率。此外,该型机还具有氧化氮数值和排烟浓度低等优点。

2. 柴油机进入智能化时代

MAN-B&W 柴油机公司研制的智能系统可将普通十字头式低速柴油机改造成完全由计算机控制的柴油机。MAN-B&W 柴油机公司对智能系统的研制是从 1991 年开始的,研制该系统的目的就是要提高柴油机的可靠性、灵活性。2000 年 11 月,该公司研制的智能系统已经装在挪威的一艘 3.75 万载重吨化学品运输船的主机上。船舶上的柴油主机如果装上电子智能控制系统就可以全面提高柴油机的性能,使柴油机的各种功能得到充分发挥。电子智能控制系统一般包括柴油机的起动、调速、扭矩限制、运行状况监测、数据和诊断信息传递等。

3. 减少 NO_x 排放,保护生态环境

在提高柴油机性能的同时,人们并没有忘记保护生态环境。市场上现已出现了结构简单的降低 NO_x 排放装置。法国热机协会推出了利用蒸发湿空气系统来减少 NO_x 排放装置。为了使增压空气达到接近饱和的状态,蒸发湿空气系统将蒸发增压空气中的大量水分。通过试验台试验和实船试验证明,蒸发湿空气系统可以使柴油机的 NO_x 排放量减少 70%。从经济角度看,该系统有效利用海水,通过添加廉价的添加剂即可避免水中钙的沉积。该系统已与主机配套运行 6 000 h 未出现问题。专家对装有蒸发湿空气系统的柴油机运行 3 300 h 后进行了检测,检测结果表明,这台柴油机的缸套、活塞和活塞环的工作状况良好,活塞上积炭很少。该机在运行一年后经再次检测发现,装有蒸发湿空气系统后增压器涡轮不易被腐蚀。当然作为减少排放的有效措施,SCR、EGR 等技术也在发展之中。

第二节 柴油机的基本工作原理

柴油机是以柴油作为燃料的压燃式内燃机。工作时,空气在气缸内被压缩而产生高温,使喷入的柴油自行着火燃烧,产生高温、高压的燃气,燃气膨胀推动活塞做功,将热能转变为机械功。柴油机的工作循环由进气、压缩、喷油着火燃烧、膨胀做功和排气等过程组成。这些过程可以由四冲程柴油机来实现,也可由二冲程柴油机来实现。

一、四冲程柴油机(非增压)的工作原理

图 1-2-1 所示是四冲程柴油机的基本结构图。工作时活塞作往复直线运动,曲轴作旋转运动。活塞改变运动方向瞬时的位置称止点(死点),止点处的活塞瞬时运动速度为零。离曲

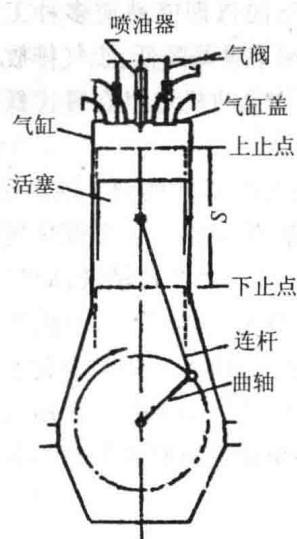


图 1-2-1 四冲程柴油机的基本结构

轴中心最远时的止点称上止点(T.D.C.),最近时的止点称下止点(B.D.C.)。

曲柄销中心与主轴颈中心之间的距离称曲柄半径 R 。连杆大、小端中心间的距离称连杆长度 L 。

上、下止点间的距离称活塞行程(冲程) S 。活塞行程等于曲柄半径的2倍,即 $S = 2R$ 。活塞在上、下止点间移动所扫过的容积称气缸工作容积 V_s 。

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S \quad (1-2-1)$$

式中, D 为气缸直径(缸径)。

活塞位于上止点时活塞顶与气缸盖之间的气缸容积,称燃烧室容积(压缩室容积、余隙容积) V_c 。

气缸总容积 V_a 与燃烧室容积之比称压缩比(ϵ)。

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (1-2-2)$$

显然压缩比是一个几何概念,它与柴油机的转速无关。

用四个行程(曲轴回转两转)完成一个工作循环的柴油机称四冲程柴油机。

图 1-2-2 是四冲程柴油机的工作原理简图。图的上部表示四个行程中活塞、连杆、曲轴及气阀的相对位置。图的下部表示相对应的气缸内气体压力随气缸容积的变化情况,称 $p-V$ 示功图。

1. 进气行程

活塞从上止点下行,进气阀打开。由于活塞下行的抽吸作用,新鲜空气充入气缸。为了能充入更多的空气,进气阀一般在上止点前提前开启(曲柄位于点 1),在下止点后延迟关闭(曲柄位于点 2),气阀开启的延续角(图中阴影线部分)为 $220^\circ \sim 250^\circ$ 。

2. 压缩行程

活塞从下止点上行,进、排气阀均关闭。上行的活塞对缸内的空气进行压缩,使其温度和压力均不断升高(曲线 2—3)。压缩终点的压力 p_c 为 $3 \sim 6$ MPa; 温度 t_c 为 $500 \sim 700^\circ\text{C}$, 燃油自燃温度远低于此值。自燃温度随压缩压力而变,轻柴油自燃温度如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1 轻柴油自燃温度随压缩压力的变化

压缩压力 p_c (MPa)	自燃温度 t ($^\circ\text{C}$)
0.1	270 ~ 290
2.8	204
4.2	195

在上止点(压缩终点)附近,燃油经喷油器以雾化的状态喷入燃烧室,并在高温高压空气的作用下,开始自行发火燃烧。

3. 膨胀行程

在此行程的初期,燃烧仍在猛烈地进行,使缸内的压力和温度都急剧升高,其最大值分别可达 6 MPa 左右和 $1500 \sim 2000^\circ\text{C}$ 。在高温高压燃气的作用下,活塞向下运动作功,在上止点后某一时刻(图中点 4),燃烧基本结束,但高温高压燃气继续膨胀作功推动活塞下行。当活塞到达下止点前某一时刻(图中点 5),排气阀开启,排气过程开始。此时,气缸内的压力 p_b 为

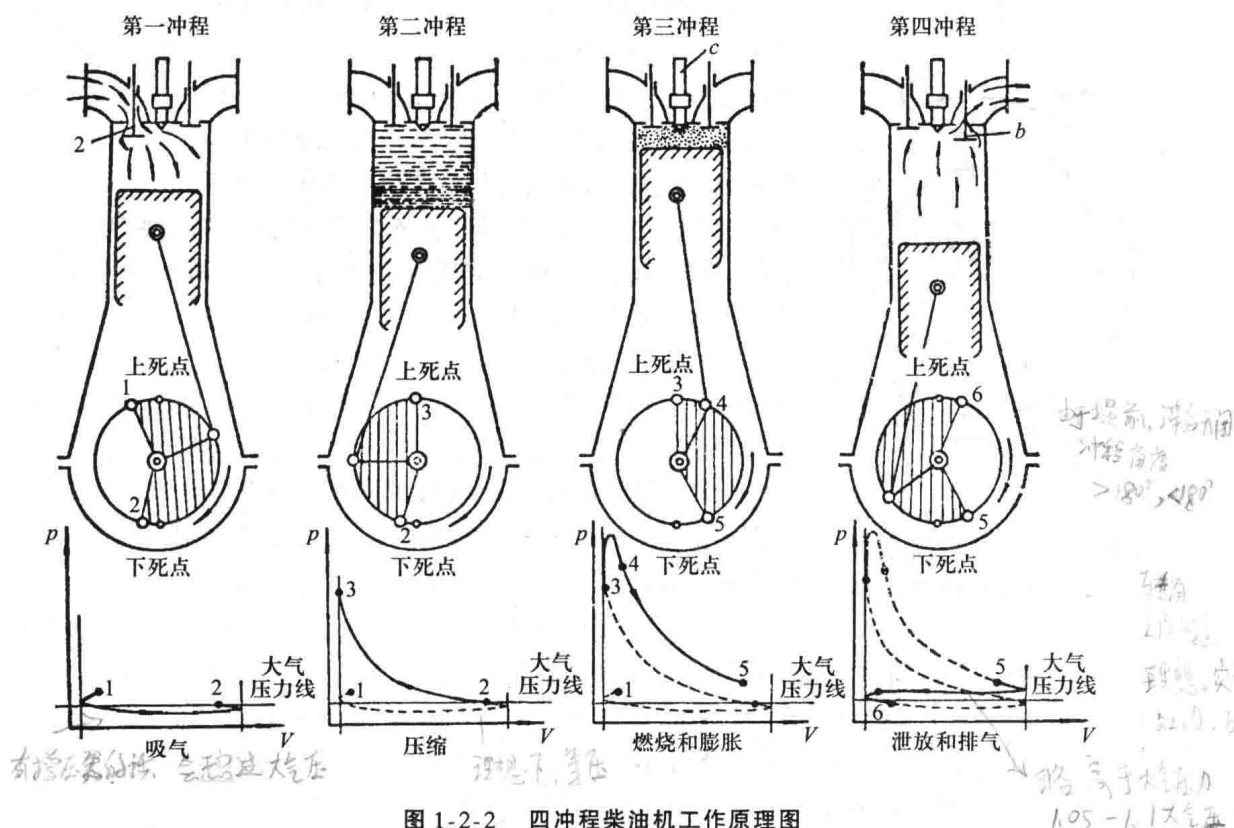


图 1-2-2 四冲程柴油机工作原理图

0.3 ~ 0.6 MPa, 温度 t_b 为 600 ~ 700 °C。活塞则继续下行到下止点。

4. 排气行程

活塞由下止点向上运动, 排气阀继续开启着, 上行的活塞将气缸内的废气强行推挤出去。为了实现充分排气和减少排气过程中所消耗的功, 排气阀不但在下止点前提前开启, 而且要在排气行程结束的上止点后关闭(图中点 6)。排气阀开启(曲线 5—6)的延续角度为 $230^\circ \sim 260^\circ \text{A}$ 。

综上所述, 在四冲程柴油机中, 要经历进气、压缩、膨胀、排气等四个行程才完成一个工作循环, 与此相应的是曲轴回转两转, 即 720° 曲轴转角。而且, 在四个行程中, 只有膨胀行程才做功, 其余三个行程都要消耗功。因此, 在单缸柴油机中, 必须有一个足够大的飞轮来供给这三个行程所需的能量; 而在多缸柴油机中, 则借助于其他气缸膨胀做功过程来供给。

此外, 柴油机由停车状态进入工作状态, 必须借助外源能量的驱动使其起动运转, 直至喷入气缸的燃油自发火燃烧, 柴油机才能自行运转。

四冲程柴油机的进、排气阀的启闭都不正好在上、下止点, 而是在上、下止点前后某一时刻。它们的开启持续角均大于 180°CA 。进、排气阀在上、下止点前后启闭的时刻称为气阀正时(定时), 通常气阀正时用距相应止点的曲轴转角(CA)表示。用曲轴转角表示气阀正时的圆图称气阀正时(定时)圆图, 如图 1-2-3 所示。

在图 1-2-3 中, 进气阀在上止点前点 1 开启, 在下止点后点 2 关闭。其与相应止点的夹角 φ_1 、 φ_2 分别称为进气提前角、进气滞后角。排气阀在下止点前点 5 开启, 在上止点后点 6 关闭, 其与相应止点的夹角 φ_3 、 φ_4 分别称为排气提前角、排气滞后角。

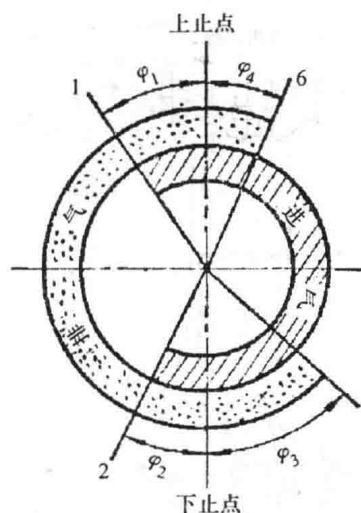


图 1-2-3 四冲程柴油机
气阀正时圆图

(1) 排气阀提前开: 气阀开启和关闭均有个过程, 气阀开启初期其通道截面很小, 流动阻力很大。如果排气阀太接近下止点时才开启, 提前开启的角度太小, 废气排出不畅, 会造成活塞上行推出废气消耗的功增大, 残余废气量增加。但排气阀提前开启角也不能太大, 否则会使气体膨胀功损失过多。

(2) 排气阀滞后关: 排气阀滞后关, 一方面使活塞到达上止点时, 排气道仍有足够通道截面, 有利于废气的排出; 另一方面, 由于利用了排气流的惯性, 可使废气排得更干净。

(3) 进气阀提前开: 进气阀提前开, 除了使进气冲程开始时 5 有较大的通道截面, 以减少进气阻力、增加进气量, 还可形成进排气阀叠开, 对燃烧室进行扫气, 减少剩余废气量, 增加进气量。

(4) 进气阀滞后关: 进气阀延迟在下止点后关闭, 一方面使活塞在下止点附近时进气阀仍有足够开度; 另一方面还可充分利用进气流的惯性而吸入更多空气。

总之, 气阀提前开启与延后关闭是为了将废气排除干净并增加空气的吸入量, 以利于燃油的燃烧, 另外排气提前还可减少排气耗功。因此, 各机型(对应常用转速)有一最佳正时。按此正时工作, 柴油机充入新气最多, 性能最好。机型不同, 正时也不同。正时圆图在柴油机使用说明书中均有给出, 不允许任意改变, 经常要以它为依据检查调整气阀正时。燃油喷射也有正时要求, 也可画在这个图上。

由图 1-2-3 还可看出, 在上止点前后进气阀与排气阀同时开启着, 同一气缸的进、排气阀同时开启的曲轴转角称为气阀重叠角。在气阀叠开期间, 进气管、气缸、排气管连通, 这样有助于废气的排出和新气的流入。此时利用废气流动惯性的抽吸作用, 除可避免废气倒冲入进气管外, 尚可将新鲜空气吸进气缸, 并利用此压力差用新气将燃烧室内的废气扫出气缸, 实现所谓燃烧室扫气。此时不但可提高换气质量, 还可利用进气冷却燃烧室零件的高温表面。因而, 四冲程柴油机均有一定的气阀重叠角, 而且增压柴油机的气阀重叠角均大于非增压机, 如表 1-2-2 所示。

表 1-2-2 四冲程柴油机气阀重叠角

名称	非增压		增压	
	开启	关闭	开启	关闭
进气阀	上止点前 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$	下止点后 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$	上止点前 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$	下止点后 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$
排气阀	下止点前 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$	上止点后 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$	下止点前 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$	上止点后 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$
重叠角	$25^{\circ} \sim 50^{\circ}$		$80^{\circ} \sim 130^{\circ}$	

二、二冲程柴油机的基本工作原理

用两个行程(曲轴回转一转)完成一个工作循环的柴油机称为二冲程柴油机。

二冲程柴油机与四冲程柴油机不同, 其气缸上设有气口, 图 1-2-4 中气缸右侧为排气口, 左侧为进气口。排气口比进气口高, 进、排气口的开关均由活塞控制。此外, 二冲程柴油机设有扫气泵, 扫气泵预先将空气压缩并送入扫气箱中, 扫气箱中的空气压力(扫气压力)要比大气

压力稍高。

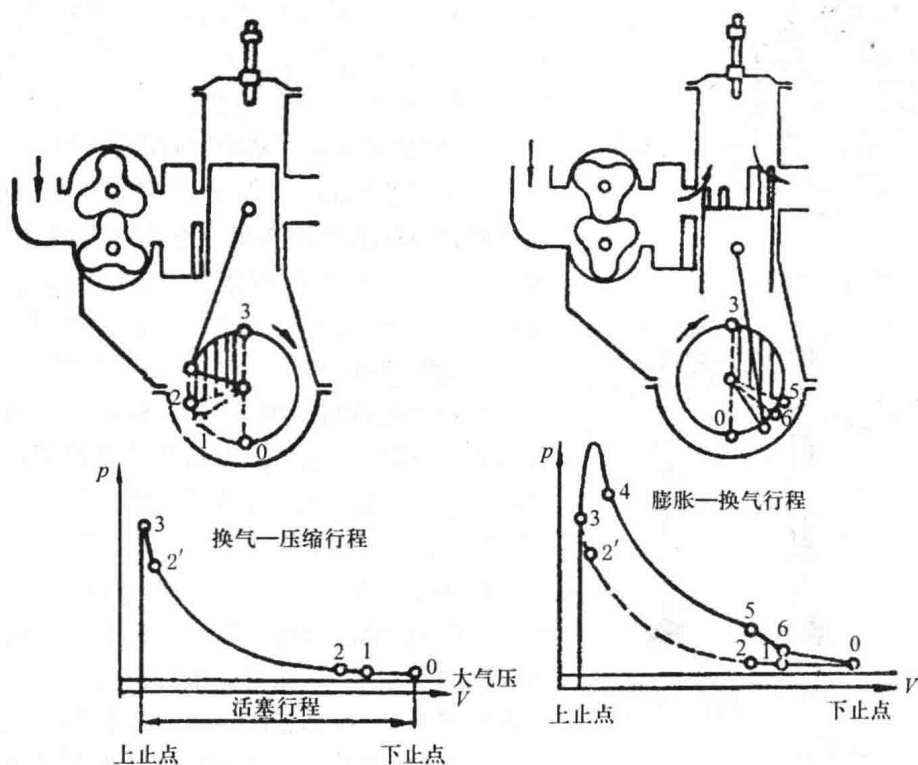


图 1-2-4 二冲程柴油机工作原理图

1. 换气—压缩行程

活塞由下止点向上运动。在活塞遮住进气口(扫气口)之前,新鲜空气通过进气口不断充入气缸并将气缸内的废气经排气口驱除出去。当活塞上行到将进气口全部遮蔽时(点1),新鲜空气停止进入气缸。当排气口被活塞遮蔽后(点2),气缸内的空气就被上行的活塞压缩,压力和温度亦随之升高。在活塞到达上止点前的某一时刻(点2'),柴油经喷油器喷入气缸,并与高温高压空气混合后着火燃烧。

在这一行程中,进行了换气(曲线0—1—2)、压缩(曲线2—3)和喷油着火燃烧诸过程。

2. 膨胀—换气行程

活塞由上止点向下运动。在此行程的初期,燃烧仍在猛烈地进行,到点4才基本结束。高温高压的燃气膨胀推动活塞下行做功。当活塞下行将排气口打开时(点5),由于此时缸内燃气的压力和温度仍较高,分别为 $0.25 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 和 $600 \sim 800^\circ\text{C}$,因而气缸内燃气借助于气缸内外的压差经排气口高速排出,缸内的压力也随之下降。当缸内压力下降到接近扫气压力时,下行的活塞将进气口打开(点6),新鲜空气便通过进气口充入气缸,并对气缸内进行扫气,将气缸内的废气经排气口驱除出去。这个过程一直要延续到下一个循环活塞再次上行将进气口关闭时为止,称为扫气过程。

在这一行程中,进行了燃烧与膨胀(曲线3—4—5)、排气(曲线5—6)和部分扫气(曲线6—0)过程。

由此可见,与四冲程柴油机相比,二冲程柴油机是将进气和排气过程合并到压缩与膨胀行程中进行,从而省略两个行程。因此,二冲程柴油机在曲轴回转一转中就可以完成一个工作循

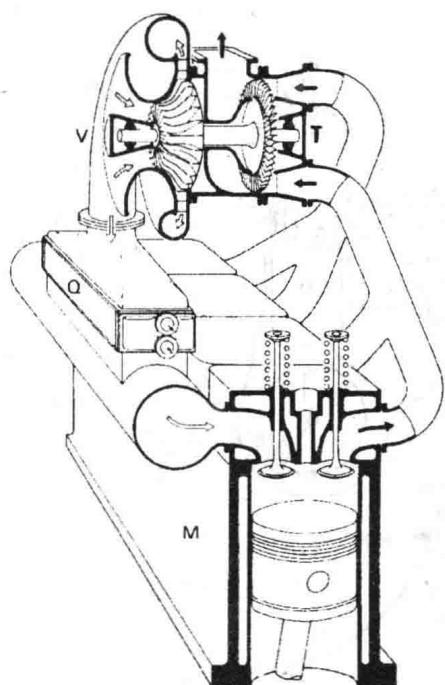


图 1-2-5 废气涡轮增压四冲程柴油机工作简图

环。在气缸直径、活塞行程与转速相同的条件下，二冲程柴油机的功率似乎应为四冲程柴油机的 2 倍，但实际上，由于二冲程柴油机的气口使其有效行程减少等原因，其功率为四冲程柴油机的 1.6 ~ 1.8 倍。

三、增压柴油机的基本工作原理

提高柴油机的进气压力，可使进气的密度增加，从而达到在同样的气缸容积中充进更多的空气量，以便喷入燃烧更多的燃油，作出更多的功来。这种用提高进气压力来提高柴油机功率的方法称为“增压”。

预先对新鲜空气进行压缩的压气机，有直接由柴油机的曲轴通过齿轮等机械驱动的方式，这种增压方式称为机械增压；也有用柴油机气缸排出的废气的能量在涡轮机中膨胀做功，由涡轮机来驱动压气机的方式，称为废气涡轮增压。

图 1-2-5 是废气涡轮增压四冲程柴油机的工作简图。废气涡轮增压器由废气涡轮机和与其同轴的离心式压气机等组成。柴油机气缸排出的废气经排气管进入涡轮机，在其中膨胀做功推动涡轮机转动，并带动压气机工作。被压缩后的新鲜空气经进气管送往柴油机的各个气缸。图中 M 为柴油机，Q 为中冷器，T 为涡轮机，V 为压气机。

二冲程废气涡轮增压柴油机的工作原理和四冲程的基本相同，所不同的是在二冲程柴油机中，增压空气是供入扫气箱中，然后经扫气口进入气缸；由于废气涡轮和压气机需能量平衡的原因，老式二冲程柴油机的废气涡轮增压系统中往往设有辅助压气机。

目前，船舶柴油机已全部采用了废气涡轮增压。

四、二冲程柴油机的换气形式

在二冲程柴油机中，不同的换气形式对换气质量以至对柴油机性能都有重要影响。曾经有多种换气形式。根据气流在气缸中的流动路线，二冲程柴油机的换气形式可分为弯流与直流两大类。每一大类中又有不同的换气形式，即：

弯流	横流(参见图 1-2-4)	{ 排气口有阀控制 简单半回流
	回流(MAN 低速机)	
	半回流(Sulzer 老式低速机)	
直流	排气阀—扫气口式(B&W、三菱及 Sulzer RTA)	
	排气口—扫气口式	

1. 弯流扫气

扫、排气口布置于气缸下端，扫气空气由下而上，然后由上而下地清扫废气。横流扫气的船舶主机已淘汰多年，目前尚可见半回流和回流两种。

1) 半回流(新横流)扫气

这种扫气形式是 Sulzer 公司大型柴油机的传统形式。进气口布置在排气口同侧，如图

1-2-6所示。其气缸盖结构较简单,不用设排气阀。扫气口在纵向(与气缸轴向成角度)和横向(与气缸径向成角度)两个方向均有倾斜角,使扫气空气进入气缸后有向上的运动。活塞顶的形状也有引导扫气空气向上的作用。这样可控制气流方向,防止进气直接流向排气口,减少新、废气掺混,提高换气效率;避免死角,减少残留废气,提高换气质量。某些早期的半回流扫气机型(RD型柴油机),在排气管中装有回转控制阀,可在活塞上行活塞裙开启排气口前关闭排气管,防止新鲜空气经排气口流失。(RND型柴油机不再用回转控制阀,改用长裙活塞,当活塞上行至上止点时,活塞裙仍能挡住排气口。)Sulzer公司大型柴油机发展至RTA型才放弃半回流扫气形式,改用直流扫气形式。

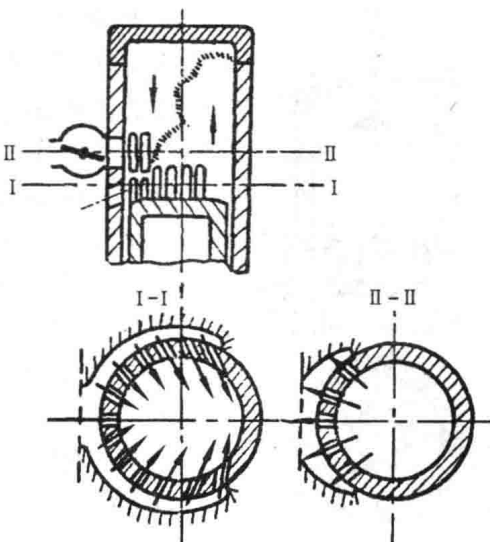


图 1-2-6 半回流扫气示意图

2) 回流扫气

这种扫气形式是MAN公司大型柴油机的传统形式。进、排气口在气缸下部同一侧。扫气口向下倾斜,进气流先向下沿活塞顶面向对侧的缸壁流动并沿缸壁向上流动,到气缸盖再转向下流动,把废气从排气口中清扫出气缸。气流在缸内作“回线”流动,如图1-2-7所示。这种扫气形式有利于凹顶活塞的扫气,其代价是扫气流动路线更长,转弯更多,流动阻力更大。由此在相同条件下,要求有更高的扫气压力。在船用大型柴油机中,MAN K5Z型柴油机即为回流扫气形式。现存已不多了。

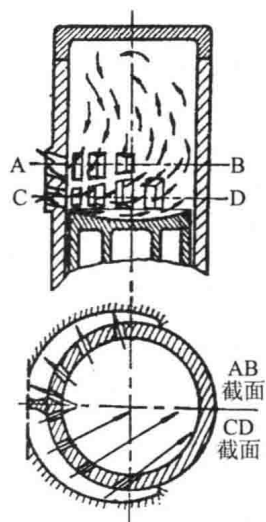


图 1-2-7 回流扫气示意图

2. 排气阀-扫气口式直流扫气

这种扫气形式是B&W、三菱公司大型柴油机的传统形式。气缸下部均布一圈进气口,在气缸盖上有排气阀(1个或多个)。空气从气缸下部扫气口进入气缸,沿气缸中心线上行,驱赶废气从气缸盖上的排气阀排出,气流在缸内的流动方向是自下而上的直线流动,如图1-2-8所示。进气口在纵向和横向两个方向均有倾斜角,使扫气空气进入气缸后向上并绕气缸轴线旋转。这一旋转的气流形成“界面”,使空气与废气不易掺混,扫气效率较高。同时排气阀的启闭由排气凸轮控制,不受活塞运动的限制,所以直流扫气排气阀启闭定时可不下止点为对称而各自设计在最佳点如图1-2-9所示。这样可使柴油机性能更优。现代船用低速柴油机(MAN/B&W MC、Sulzer RTA以及三菱 UEC-LS)均为排气阀-扫气口式直流扫气柴油机。可见二冲程柴油机的正时圆图有排气正时对称与非对称两种类型。

3. 直流与弯流扫气的比较

1) 换气质量

弯流扫气:气流在缸内流动路线长,约为直流的2倍,且需要转向,流动阻力大,要求扫气压力高。新气与废气掺混较严重,存在死角与气流短路现象,因而换气效率较低,新气消耗量

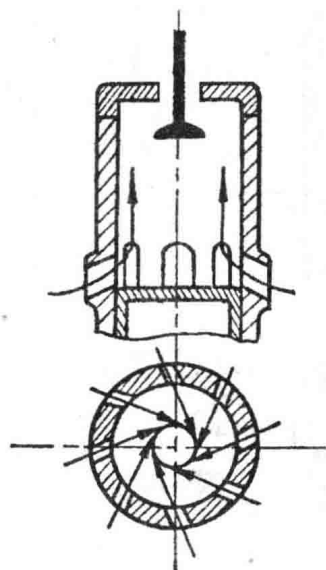


图 1-2-8 排气阀-扫气口式
直流扫气形式示意图

较大,换气需要消耗较多的能量,导致柴油机燃油消耗率较高;残留废气较多,换气质量较直流差,燃烧较差,也导致柴油机燃油消耗率较高。

直流扫气:新气与废气掺混少,新气损失少,扫气彻底,新气充入量多,换气效率高,质量好。

2)对“长冲程化”的适应性

所谓“低转速—长冲程化”,就是由于 1973 年至 80 年代初,能源危机爆发,石油价格飞涨,海运成本中的燃油费用猛增,船主越来越重视降低燃油消耗率,导致柴油机公司在激烈的竞争中,花费巨大的财力、人力,想尽办法降低燃油消耗率而出现的。低速机均直带螺旋桨,输出功率一定时,转速越低,则采用直径越大的螺旋桨,推进效率就越高。也就是说,在不降低发动机功率的情况下,降低转速就意味着提高推进效率。柴油机转速每降低 1%,推进效率 η_p 可提高 0.25%~0.30%。B&W 公司首先(1977 年)发展“低转速—长冲程化”,即降低柴油机设计转速,同时加长冲程,活塞平均速度保持不变。这样不仅提高了 η_p ,而且柴油机自身的效率也提高了,节油的收效非常显著,受到海运界热烈欢迎,销售量越来越大,超过了 Sulzer,至今仍处于领先地位。仅 3 年时间,“低转速—长冲程化”扩大到所有低速机(后来中速机也采用了),各公司低速机转速越来越低,有的机型达 55~60 r/min;冲程缸径比 S/D 越来越大,直流扫气:2.0→2.5→3.0→3.25→3.46→3.82→4.2;弯流扫气则从 1.8→2.1,就发展不下去了。

弯流扫气:不适应长冲程化。气缸加长,弯流扫气流程增加很多,阻力大了很多,扫气压力得提高很多,新、废气掺混更厉害,换气质量、换气效率更差。 S/D 只能达到 2.1。

直流扫气:适宜长冲程化。气缸加长,扫气流程增加不多,阻力增加不多,新、废气掺混进一步减少,换气效率更高,换气质量更好。消耗新气少,燃烧更完全更及时。而且,“低转速—长冲程化”后,如燃烧时间基本不变,则燃烧对应的曲轴转角减小,燃气能更充分膨胀,热效率提高;长冲程化,如压缩比不变,则燃烧室高度增大,有利于燃油的雾化混合燃烧。这些均使柴油机燃油消耗率降低。

3)气缸套变形情况

弯流扫气气缸套下部布置了扫、排气口,温差很大,容易产生变形。直流扫气气缸套下部只有扫气口,不易因受热不均匀而变形。

4)排气启闭定时

直流扫气:排气阀开启定时与关闭定时由排气凸轮控制,可以设计成不以下止点为对称,而各自设计在最佳点,使性能进一步优化。

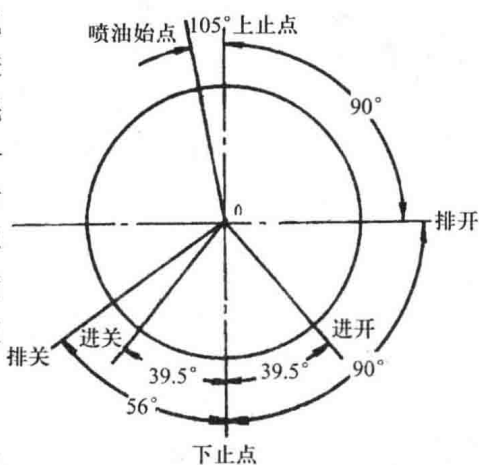


图 1-2-9 ESDZ43/82B 柴油机的正时圆图

弯流扫气:扫、排气口启闭定时由活塞控制,必然以下止点为对称。

由于以上原因,Sulzer 公司的低速机 1981 年底宣布放弃传统的半回流扫气形式,改为采用直流扫气形式,设计了 RTA 型柴油机(1984 年生产第一台),震动了造船、航运界。MAN 公司 1981 年购并 B&W 公司后也放弃发展低速机,所以,弯流扫气在与直流扫气的竞争中已被淘汰。但在工作中我们可能还会用到这类旧机型。

弯流扫气由于没有排气阀,结构简单、可靠,维修简便,因而曾深受航运界欢迎。20 世纪 70 年代 Sulzer 公司的低速机一直处于领先地位,多年销售量均在 50% 以上。

第三节 船舶柴油机的分类

柴油机自 1897 年问世以来,经过一个世纪的发展,其技术已经取得了很大进步并更趋完善,在动力机械中已占据极为重要的地位。在船舶动力机械中也占统治地位。目前,在所有的内河及沿海中、小型船舶中,都采用柴油机作为主机和副机;在远洋民用船舶中,2 000 t 以上的船舶,以柴油机作为主机的船舶占总艘数的 98% 以上,占总功率的 96% 以上。

一、柴油机的优点

柴油机能在动力机械,以及船舶动力装置中占据极为重要的地位,是因为它具有许多优越的条件。与其他热机相比,它具有如下优点:

1. 热效率高。大型低速柴油机的有效效率已达到 50% ~ 55%, 远远高于其他热机;而且柴油机在全工况范围内的热效率都较其他热机高。热效率高,也就是燃料消耗量小;柴油机又能燃用重油,甚至劣质重油;而且柴油机在停车状态时不需要消耗燃料。故燃料费用低,船舶的续航力大。

2. 功率范围大。柴油机的单机功率自 1 kW 至 80 080 kW, 因此其适应的领域宽广。

3. 机动性好。正常起动只需 3~5 s, 并能很快达到全负荷。有宽广的转速和负荷范围,能适应船舶航行的各种要求,而且操作简便。

4. 尺寸小、重量轻。柴油机不需要锅炉等大型附属设备,使柴油机动力装置的尺寸小、重量轻,特别适合于在交通运输等的动力装置中应用。

5. 可直接反转。柴油机可设计成直接反转的换向柴油机,而且倒车性能好,使装置结构简单。

二、柴油机的类型

由于柴油机的应用广泛,因此,为满足各种不同的使用要求,柴油机的类型也就多种多样。根据柴油机的各种不同特点,以及不同的分类方法,船舶柴油机大体上有以下类型。

1. 按工作循环分类。有四冲程柴油机和二冲程柴油机。船舶主机大多数为二冲程,发电副机均为四冲程。

2. 按进气方式分类。有增压柴油机和非增压柴油机。船舶主、副机均为增压。

3. 按曲轴转速分类。有高速、中速和低速柴油机。

高速柴油机 $n > 1\,000\text{ r/min}$, 中速柴油机 $300 < n \leq 1\,000\text{ r/min}$, 低速柴油机 $n \leq 300\text{ r/min}$ 。主机大约 3/4 为低速机(二冲程), 1/4 为大型中速机(基本上是四冲程);副机基本上为中速机,小型船舶副机为高速机。

4. 按柴油机结构特点分类。有筒状活塞式和十字头式柴油机;有单列气缸和多列气缸式