

中华人民共和国

内河船舶船员适任考试培训教材

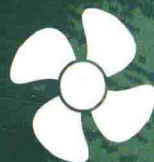
主推进动力装置

中国海事服务中心组织编审

主编 韩雪峰 彭中波 张波



轮机专业



大连海事大学出版社

中华人民共和国内河船舶船员适任考试培训教材

主推进动力装置

中国海事服务中心组织编审

主 编 韩雪峰 彭中波 张 波

大连海事大学出版社

内 容 简 介

本书共六章,介绍了船舶柴油机的基本知识、柴油机的主要系统、柴油机增压装置、轴系和螺旋桨等,对柴油机主要结构、性能、调试、管修要点和常见故障的诊断与处理等进行了重点介绍。本书根据《中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则(2010)》要求编写,内容紧扣《内河船舶船员适任考试大纲(2010)》,适用于申请内河船舶一类适任证书的轮机长、轮机员考前培训。

图书在版编目(CIP)数据

主推进动力装置 / 韩雪峰,彭中波,张波主编. —大连:大连海事大学出版社,2010. 12
(2011.4 重印)

中华人民共和国内河船舶船员适任考试培训教材

ISBN 978-7-5632-2501-9

I. ①主… II. ①韩… ②彭… ③张… III. ①船舶推进—动力装置—技术培训—教材
IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 244406 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

大连华伟印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2010年12月第1版

2011年4月第2次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:14 字数:345千

责任编辑:沈荣欣

封面设计:王艳

ISBN 978-7-5632-2501-9

定价:36.00元

前 言

根据《中华人民共和国内河船舶船员适任考试和发证规则(2010)》和《内河船舶船员适任考试大纲(2010)》，中国海事服务中心组织在内河船舶运输领域有着丰富教学和培训经验的专家、教授、高级讲师在2006年培训教材的基础上重新编写了《内河船舶船员适任考试培训教材》，并组织实践经验丰富的海事管理机构专家和船公司的指导船长、轮机长对教材进行了审定。

在本套教材编写前，中国海事服务中心组织参编专家对内河船舶运输现状进行了广泛的调研和深入的讨论，确保教材内容符合船上实际，反映最新航海应用技术和最新法律、法规、规范与标准，并在表达方式上通俗易懂、易于理解，符合内河船舶船员业务学习和技能培训的需要。

本系列教材分驾驶专业和轮机专业两部分：驾驶专业包括《船舶操纵》、《避碰与信号》、《航道与引航》、《船舶管理》、《船舶驾驶与管理》五种教材；轮机专业包括《主推进动力装置》、《船舶辅机与电气》、《机舱管理》、《轮机基础》、《船舶动力装置》、《轮机管理》六种教材。另外，单独编写和开发了内河船舶船员适任考试模拟练习软件，以光盘的形式出版，驾驶专业和轮机专业各一种。

《主推进动力装置》由重庆交通大学韩雪峰、彭中波、张波主编，由交通运输部长江海事局施先宏、江苏海事职业技术学院王永祥担任主审。第一、四、五章由韩雪峰、彭中波编写；第二章由张波、张德荣编写；第三章由何宏康、刘春江编写；第六章由彭中波编写。

教材在编写过程中得到了交通运输部海事局领导和专家的关心和指导，相关海事部门和船公司对教材编写也提供了热情的帮助和支持，在此一并表示感谢！由于时间仓促，书中难免存在错误和疏漏，欢迎广大读者和专家批评指正。

中国海事服务中心
2010年11月

目 录

第一章 柴油机基本知识	(1)
第一节 柴油机常用技术名词定义	(1)
第二节 四冲程柴油机的工作原理及特点	(2)
第三节 二冲程柴油机的工作原理及特点	(4)
第四节 柴油机定时图	(5)
第五节 国产柴油机型号表示法、船舶柴油机分类	(7)
第六节 内河船舶柴油机的发展趋势	(8)
第二章 柴油机的主要部件	(13)
第一节 机座、机体、主轴承	(13)
第二节 气缸套和气缸盖	(23)
第三节 活塞组件	(32)
第四节 连杆组件	(38)
第五节 曲轴组件	(40)
第六节 柴油机运动部件失中原因	(48)
第三章 柴油机的主要系统	(50)
第一节 船用柴油机换气系统	(50)
第二节 燃烧基本知识与燃油系统	(63)
第三节 柴油机润滑系统	(89)
第四节 柴油机冷却系统	(93)
第五节 柴油机启动装置	(97)
第六节 柴油机调速装置	(110)
第七节 柴油机换向装置	(124)
第四章 柴油机增压装置	(133)
第一节 柴油机增压的目的	(133)
第二节 废气涡轮增压的分类、结构及工作原理	(133)
第三节 定压涡轮增压和脉冲涡轮增压器的特点	(140)
第四节 废气涡轮增压器日常维护管理要点和常见故障排除方法	(140)
第五章 船舶轴系和螺旋桨	(144)
第一节 船舶轴系	(144)
第二节 螺旋桨	(155)
第三节 主机功率的传递及其效率	(158)
第四节 螺旋桨空泡的产生原因及其危害	(159)

第六章 柴油机特性分析.....	(160)
第一节 柴油机曲柄连杆机构的受力分析.....	(160)
第二节 船舶轴系扭转振动的概念及减振措施.....	(163)
第三节 柴油机性能指标.....	(167)
第四节 柴油机特性概念及应用.....	(170)
第五节 柴油机故障诊断.....	(177)
第六节 柴油机的工况测量及分析.....	(181)
习题及答案.....	(186)

第一章 柴油机基本知识

柴油机自 1897 年问世以来,已经历了一个多世纪的发展,各种性能都有很大的提高。目前,在内河民用船舶动力中,都普遍采用柴油机作为推进用主机与发电原动机。

柴油机是一种以柴油作为燃料的热力发动机(简称热机),它是内燃机的一种。其燃料的燃烧和热能的放出以及热能转变为机械能都在发动机的内部进行。柴油机具有热效率高、功率范围广、机械损失小、机动性能好等优点。

柴油机是靠压缩而发火的,因此称之为压燃式内燃机。柴油机从大气中将空气吸入气缸,依靠活塞上行压缩,使之达到足够高的温度和压力;再将燃油以雾状喷入气缸,在高温高压的空气中自燃。燃油燃烧后放出大量的热能,使燃气的压力、温度急剧升高,在气缸内进行膨胀,推动活塞并通过曲柄连杆机构对外做功,燃气膨胀做功后变成废气,排出气缸。其过程涉及两次能量转换:化学能转化为热能;热能转化为机械能。

由此可见,柴油机一个完整的工作循环是由进气、压缩、喷油燃烧、膨胀做功和排气五个热力过程组成的。

第一节 柴油机常用技术名词定义

柴油机常用技术名词如图 1-1 所示。

(一)气缸直径 D

气缸套的名义内径。

(二)曲柄半径 R

曲柄的曲柄销轴线与主轴颈轴线之间的距离。

(三)上止点 TDC

活塞在气缸中运动的最上端位置,即活塞离曲轴中心线最远的位置。

(四)下止点 BDC

活塞在气缸中运动的最下端位置,即活塞离曲轴中心最近的位置。

(五)冲程 s

上、下止点之间的距离。活塞运动一个冲程,相应于曲柄回转 180° ,所以冲程等于曲柄半径的两倍,即 $s=2R$ 。

(六)压缩容积 V_c

活塞位于上止点时,活塞顶与气缸盖底面之间的气缸空间,又称燃烧室容积。

(七)气缸工作容积 V_h

活塞从上止点到下止点所扫过的气缸空间,又称活塞排量或冲程容积。

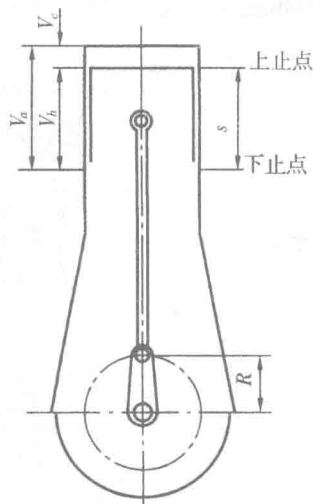


图 1-1 柴油机常用技术名词

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 s$$

(八) 气缸总容积 V_a

活塞在下止点时, 活塞顶以上的所有气缸空间, 它是压缩容积与气缸工作容积之和。

$$V_a = V_c + V_h$$

(九) 压缩比 ϵ

气缸总容积与压缩容积的比值, 也称几何压缩比。

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_h}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c}$$

压缩比实际上是空气被压缩前最大体积与被压缩后最小体积之比, 它表明了气缸内空气被活塞压缩的程度。压缩比是影响柴油机气缸中压缩终了新鲜空气温度与压力大小的最主要因素, 压缩比越大, 压缩终点时气缸内空气的压力和温度就越高, 燃油就越容易燃烧; 反之, 压缩比越小, 压缩终点的压力和温度就越低, 燃油就不易燃烧, 柴油机启动就困难。压缩比 ϵ 对柴油机的燃油燃烧、效率、启动性能和机械负荷等影响很大。柴油机压缩比下限应能保证冷车启动可靠与低负荷运转稳定。

第二节 四冲程柴油机的工作原理及特点

用四个冲程(即曲轴回转两周)完成一个工作循环的柴油机称为四冲程柴油机。四个冲程分别是: 进气冲程、压缩冲程、燃烧膨胀冲程和排气冲程。

图 1-2 的四个简图分别表示柴油机工作循环四个冲程进行的情况及活塞、连杆、曲柄位置的相应变化情况, 对应的 $p-V$ 图表示气缸内气体压力随气缸容积的变化情况。

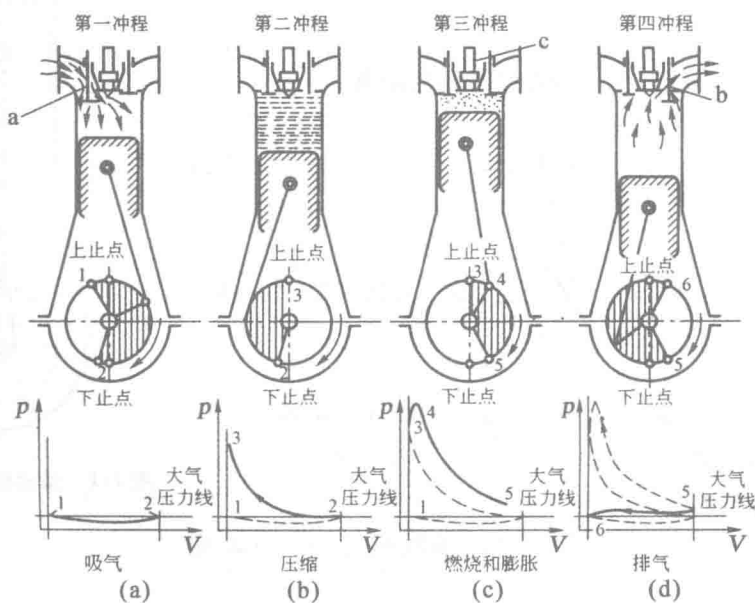


图 1-2 四冲程柴油机的工作原理

第一冲程:进气冲程

这一冲程的任务是让气缸内充满新鲜空气。进气冲程开始时,活塞从上止点向下运动,这时进气阀 a 已经打开,排气阀 b 关闭。随着活塞下行,气缸容积增大,缸内压力下降,低于外界大气压力,利用气缸内外的气压差作用,新鲜空气经进气阀进入气缸。由于受流阻等影响,在进气过程的大部分时间里,气缸内压力低于大气压力,到下止点时,缸内气压为 $0.08 \sim 0.095$ MPa,温度为 $30 \sim 70$ °C。这时,排气阀和喷油器均关闭着。

为了使柴油机做功更完善,必须在进气过程中尽可能多地吸入新鲜空气。为此,整个进气过程是超过 180° 曲柄转角的,即曲柄位于点 1 时进气阀开始打开,曲柄位于下止点后的点 2 时进气阀才完全关闭。进气阀开启始点至上止点的曲柄转角叫进气提前角。进气阀提前开启的目的是为了新鲜空气进入气缸时,进气阀已有足够的开度,可减小进气的阻力。下止点到进气阀关闭位置的曲柄转角叫做进气延迟角。进气阀延迟关闭的目的是为了利用进气的流动惯性,尽可能多地向气缸内充入新鲜空气。整个进气过程所占的总角度 φ_{1-2} (图 1-2(a) 中阴影线所示的角度为 $220^\circ \sim 250^\circ$ 曲柄转角。进气热力过程变化见图(a)中 1-2 曲线。

第二冲程:压缩冲程

此冲程的任务是提高缸内新鲜空气的压力及温度,为喷入气缸的燃油自行着火燃烧及燃气膨胀做功创造条件。活塞从下止点向上运动,自进气阀 a 关闭(曲柄到达点 2)时开始压缩,一直到活塞到达上止点(曲柄到达点 3)为止。活塞上行,气缸容积减小,缸内气体压力和温度随之升高,到达压缩终点时,压力增高到 $3 \sim 4.5$ MPa,温度升至 $600 \sim 700$ °C(柴油的自燃温度为 270 °C 左右),通常压缩终了的气体压力和温度分别用 p_c 和 T_c 表示。压缩过程总角度为 $140^\circ \sim 160^\circ$ 曲柄转角。压缩热力过程变化见图(b)中 2-3 曲线。

四冲程柴油机当进气阀完全关闭瞬时的气缸容积与压缩容积之比值称为有效压缩比。

第三冲程:燃烧和膨胀冲程

本冲程将完成两次能量转换,是柴油机对外做功的冲程。在活塞到达上止点前,燃油经喷油器 c 以雾状喷入气缸内的高温高压空气中,并与其混合,在上止点附近自燃,在上止点后的某一时刻(曲柄位于点 4)燃烧基本结束。由于燃油的强烈燃烧,使气缸内气体温度迅速上升到 $1400 \sim 1800$ °C 或更高,压力增加至 $5 \sim 8$ MPa,甚至 13 MPa 以上。燃烧产生的最高压力称最高爆发压力,用 p_{\max} 表示,最高温度用 T_{\max} 表示。高温高压燃气(即工质)推动活塞下行膨胀做功。到下止点前点 5 排气阀 b 开启时膨胀过程结束。膨胀终了时气缸内气体压力 p_b 为 $0.25 \sim 0.45$ MPa,温度 t_b 为 $600 \sim 700$ °C。燃烧膨胀过程所占的总角度 φ_{3-4-5} 为 $130^\circ \sim 160^\circ$ 曲柄转角,其热力过程变化如图(c)中 3-4-5 曲线。

第四冲程:排气冲程

此冲程的任务是尽可能充分地将做功后的废气排出气缸。排气阀也是提前开启,延迟关闭。排气阀 b 开启时,活塞尚在下行,废气靠气缸内外压力差进行自由排气。当活塞从下止点上行时,废气被活塞推挤出气缸,此时排气过程是在略高于大气压力($1.05 \sim 1.1$ 倍大气压),且在压力基本不变的情况下进行的。排气阀一直延迟到活塞到达上止点之后(曲柄位于点 6)才关闭,这样可利用气流的惯性作用,继续排出一些废气。从排气阀开启到下止点的曲柄转角称排气提前角。上止点到排气阀关闭时的曲柄转角称排气延迟角。排气冲程所占的总角度 φ_{5-6} 为 $210^\circ \sim 240^\circ$ 曲柄转角,其热力过程变化如图(d)5-6 曲线。

进行了上述四个冲程,柴油机就完成了一个工作循环,如此循环往复使柴油机得以连续

运转。

第三节 二冲程柴油机的工作原理及特点

一、二冲程柴油机的工作过程

通过活塞的两个冲程完成一个工作循环的柴油机称为二冲程柴油机。二冲程柴油机完成一个工作循环只需曲轴转一周,即 360° 。

二冲程柴油机与四冲程柴油机基本结构相同,主要差异在配气机构方面。二冲程柴油机没有进气阀,用气缸套下部开设的扫气口来代替。有的连排气阀也没有,也是在气缸套下部开设排气口代替或设扫气口与排气阀机构,并专门设置一个扫气泵及贮存压力空气的扫气箱,利用活塞对气口的控制完成配气,从而简化了柴油机结构。

图 1-3 是二冲程柴油机工作原理图。扫气泵 b 附设在柴油机的一侧,它的转子由柴油机带动。空气从泵的吸入口 a 吸入,经压缩后排出,储存在具有较大容积的扫气箱 d 中,并在其中保持一定的压力。其工作原理如下:

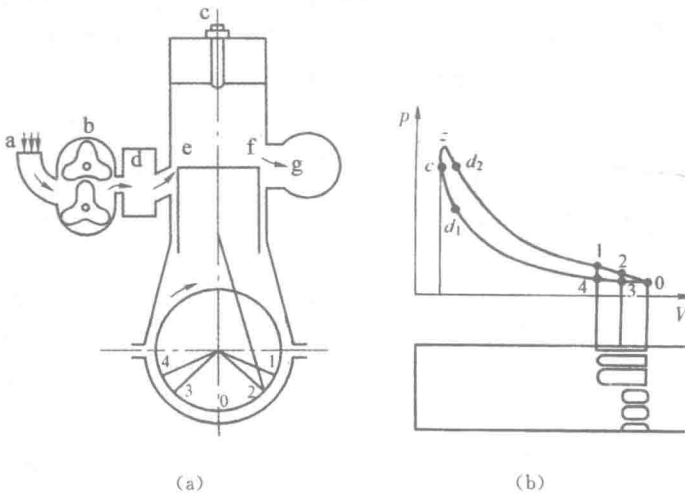


图 1-3 二冲程柴油机工作原理示意图

第一冲程:燃烧膨胀及排气冲程:

燃油在燃烧室内着火燃烧,生成高温高压燃气。活塞在燃气的推动下,由上止点向下运动,对外做功。当曲柄在点 1 位置时,下行活塞打开排气口 f,此时燃气膨胀做功结束,气缸内大量废气靠自身高压从排气口 f 排入到排气管 g 进行自由排气。当气缸内压力降至接近扫气压力时(一般扫气箱 d 中的扫气压力为 $0.105 \sim 0.140$ MPa),下行活塞把扫气口 e 打开(此时曲柄在点 2 的位置),扫气空气进入气缸,同时把气缸内的废气经排气口 f 驱赶出气缸。当活塞运行到下止点,本冲程结束,但扫气过程却一直持续到下一个冲程排气口关闭(此时曲柄在点 4 位置)为止。

第二冲程:扫气及压缩冲程:

活塞由下止点向上运动,活塞在遮住扫气口 e 之前,扫气空气继续从扫气口进入气缸,将

气缸中的残存废气从排气口 f 扫出气缸。活塞继续上行,逐渐遮住扫气口,当扫气口完全关闭后(此时曲柄在点 3 位置),扫气空气停止充入,但排气口还开着,排气还在进行,这阶段称为“过后排气阶段”。排气口关闭时(此时曲柄在点 4 位置),气缸中的空气就开始被压缩。当压缩至上止点前 d_1 点时,喷油器将燃油喷入气缸,与高温高压的空气相混合,随即在上止点附近自行发火燃烧,本冲程结束,并与前一冲程形成一个完整的工作循环。

二冲程柴油机当气口被活塞完全关闭瞬时的气缸容积与压缩容积之比值,称为有效压缩比。

二、二冲程柴油机与四冲程柴油机优缺点比较

二冲程柴油机与四冲程柴油机相比,二冲程柴油机具有一些明显优点,当然也存在本身固有的缺点。

(一)优点

(1)提高了柴油机的做功能力。完成一个工作循环,四冲程柴油机要占用四个冲程,而二冲程柴油机只占用两个冲程,对于两台气缸尺寸及转速相同的柴油机,二冲程柴油机的功率似乎应比四冲程柴油机大一倍。但是实际上,由于二冲程柴油机在气缸套上开有气口而使工作容积有所减少,机械传动的扫气泵也要消耗一定的功率等原因,因此,功率只能增大 $60\% \sim 80\%$ 。显然,若两者功率相同,则二冲程柴油机的尺寸较小,质量较轻。

(2)简化了柴油机结构。省去了进气阀及其传动装置,对有些二冲程柴油机,还省去了排气阀及其传动装置,所以,其维护保养工作就简单方便得多。

(3)改善了柴油机的动力性。因为二冲程柴油机是在两个冲程内完成一个工作循环,比四冲程柴油机的转矩要均匀,所以运转较平稳。

(二)缺点

(1)换气质量较差,热效率较低。二冲程柴油机不像四冲程柴油机那样有独立的进、排气过程,而换气过程是在膨胀过程之末和压缩过程之初进行,使得换气时间很短;扫气过程中新鲜空气与废气掺混严重;新鲜空气还随废气一起泄出一部分,增加了空气消耗量,所以换气质量差,燃油燃烧不完善,热能利用不充分,热效率比四冲程柴油机低。

(2)热负荷较高。在转速相同时,气缸内每单位时间的燃烧次数,二冲程机是四冲程机的两倍,因此,与气缸内高温燃气相接触部件热负荷比较高。

二冲程柴油机的上述缺点,随转速的增加,会变得更加严重,所以,小型高速柴油机采用四冲程;大型低速柴油机采用二冲程;中型中速机,四冲程、二冲程均有采用,但以四冲程机为主。

目前,内河民用船舶动力中,普遍采用四冲程柴油机作为主机和发电原动机。

第四节 柴油机定时图

一、柴油机定时

柴油机各热力过程的开始和结束时刻,都可用该时刻曲柄位置相对于上、下止点的角度来表示。把用曲柄转角表示的进气阀(口)、排气阀(口)、喷油泵、喷油器、启动阀开始开启和完全关闭的时刻总称为柴油机的定时(正时)。合适的定时是确保柴油机安全性、可靠性、动力性、经济性的基础。

以上、下止点为基准,气阀(口)启、闭时刻称为配气定时,喷油器启、闭时刻称为喷油定时,喷油泵启、闭时刻称为供油定时,启动阀启、闭时刻称为启动定时。

需要说明的是,由于燃油的可压缩性、高压油管的弹性、压力波传递需要时间等因素的影响,喷油泵开始供油的时刻,比喷油器开始供油时刻要早。对于一台既定的柴油机,其喷油定时是不能用常规方法准确测量和标注的,喷油定时主要通过供油定时来保证。因此,柴油机生产厂家提供的柴油机说明书中标注的“喷油定时”往往指的是“供油定时”。

二、柴油机定时图

把柴油机各定时集中反映在一个圆形图中,这个图称为柴油机定时图。

图 1-4 为 6350C 型柴油机定时图,曲柄转向(自飞轮端看)为顺时针。如图,在进气上止点前后共 36° 曲轴转角,进、排气阀同时开启着,这段重叠的曲柄转角称为进、排气重叠角。在这一角度范围内,进气阀开度尚小,废气因流动惯性排出气缸,不会向进气管内倒灌,且在惯性排气时,燃烧室内形成低压,可将新鲜空气吸入气缸并更好地将废气扫出,实现燃烧室扫气并降低气缸热负荷。

增压柴油机的进、排气重叠角比同型非增压机要大。

由此可以看出,定时图可以直观、明了、全面地表示柴油机各热力过程开始和结束的时刻及相互关系,因此,柴油机说明书中均以定时图来表示该机的定时,用以指导管理人员操作、管理、拆检和调试柴油机。一般绘制柴油机定时图的方法和要求如下(以四冲程机为例):

- (1) 已知某柴油机进气阀、排气阀、启动阀、喷油器(或喷油泵)开始打开及完全关闭的时刻相对于上、下止点的曲柄转角,并列表;
- (2) 以曲轴中心为圆点作十字交线(点画线),在垂直线上、下位置分别标明上止点、下止点,并用箭头标示正车转向;
- (3) 用量角器分别量出各定时的角度,并过圆点作相应直线,标明定时名称;
- (4) 按进气、压缩、膨胀、排气、启动的顺序,以正车转向由内向外分别作圆弧,连接各热力过程的始、终点,再标明定时角度;
- (5) 标明图例。

图 1-4 为 6350C 柴油机定时图。可以看出,该机的进气、压缩、膨胀、排气、启动过程分别占 224° 、 156° 、 130° 、 246° 、 124° 曲柄转角,进、排气重叠角为 36° 曲柄转角。

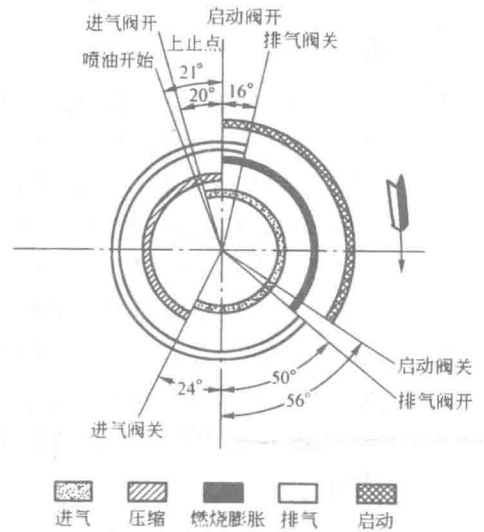


图 1-4 6350C 型柴油机定时图

第五节 国产柴油机型号表示法、船舶柴油机分类

一、国产柴油机型号表示法

国产柴油机型号通常是由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成,包含了气缸数目、气缸直径,活塞行程,技术特性等信息。

如 6250ZC 柴油机:

缸数符号	冲程、气缸排列符号	缸径符号	机器特性符号	变型设计符号
6		135	ZCa	
气缸数	无:四冲程直列式	气缸直径(mm)	Z: 增压 D: 可倒转 C: 船用右机 Ca 为左机 F: 风冷	1: 第一种变型设计 2: 第二种变型设计 3: 第三种变型设计

所以,6250ZC 柴油机为 6 缸,四冲程,250 mm 缸径,增压,船用右机。又如 8E350ZDC 为 8 缸,二冲程,350 mm 缸径,增压,可倒转,船用右机。

二、船舶柴油机分类

船舶柴油机分类方法较多,现将主要分类方法叙述如下:

(1)按工作循环特点分:有四冲程柴油机和二冲程柴油机。

(2)按柴油机进气方式分:有增压柴油机和非增压柴油机。

压比 $\pi_k < 1.7$ 的增压柴油机称为低增压柴油机。

压比 $\pi_k = 1.7 \sim 2.5$ 的增压柴油机称为中增压柴油机。

压比 $\pi_k > 2.5$ 的增压柴油机称为高增压柴油机。

(3)按柴油机转速和活塞平均速度分:

柴油机的速度可以用曲轴转速 n 或活塞平均速度 C_m ($C_m = s \cdot n / 30$ m/s, s 为冲程)来表示。现有船舶柴油机的转速范围是:

低速机 $n \leq 300$ r/min, $C_m = 6.0 \sim 7.2$ m/s;

中速机 $300 < n \leq 1000$ r/min, $C_m = 7.0 \sim 9.4$ m/s;

高速机 $n > 1000$ r/min, $C_m = 9.0 \sim 14.2$ m/s。

(4)按结构特点分:有筒形活塞式柴油机和十字头式柴油机。

图 1-5(a)所示为筒形活塞式柴油机的构造简图。活塞通过活塞销直接与连杆连接,活塞的导向作用由活塞本身下部的筒形裙部来承担,在运动时,活塞与气缸壁之间产生侧推力 F_N 。图 1-5(b)为十字头式柴油机。活塞 1 通过活塞杆 2 和十字头 3 与连杆 6 相连接,导向作用主要由十字头来承担。当柴油机工作时,十字头上的滑块 4 在导板 5 上滑动,侧推力 F_N 产生在滑块与导板之间。

(5)按气缸排列分:有直列型(单列式)柴油机,如图 1-6(a)所示;V 形柴油机,如图 1-6(b)所示。

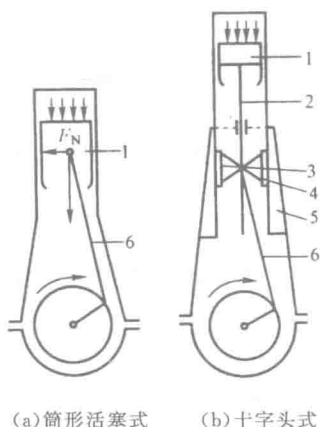


图 1-5 筒形与十字头式柴油机的构造简图

1—活塞;2—活塞杆;3—十字头;4—滑块;5—导板;6—连杆

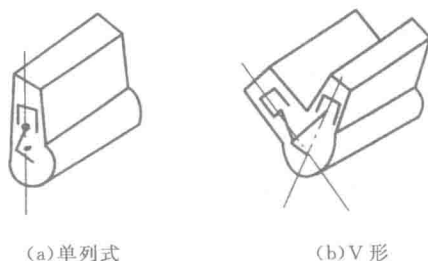


图 1-6 单列和 V 形排列柴油机

船用柴油机往往要求有较大的单机功率,若采用单缸形式,必须将气缸直径做得很大,这在结构上难以实现,因此出现了多缸柴油机。多缸柴油机按气缸排列形式分为直列型与 V 形柴油机。V 形柴油机的气缸中心线夹角通常为 90° 、 60° 和 45° 。V 形柴油机主要用于中速机和高速机。

(6)按柴油机能否倒转分:有可倒转式和不可倒转式。

曲轴直接可倒转的柴油机为可倒转柴油机,它可以直接带动螺旋桨。

曲轴不能倒转的柴油机称为不可倒转柴油机。作为主机使用时,它需带有倒顺车离合器、倒顺车齿轮箱或可变螺距螺旋桨装置。

(7)按动力装置的布置分:左机和右机。

内河船舶主推进动力装置通常布置成双机双轴双桨形式,布置在机舱右舷的柴油机称为右机,布置在机舱左舷的柴油机称为左机。

第六节 内河船舶柴油机的发展趋势

近年来,现代船舶柴油机技术和管理发展迅速,柴油机各项技术趋于完善。各船用柴油机生产厂家经过激烈竞争、淘汰和重组,尤其是国外专利和技术的引进,使得各机型得到不断的调整、改造和升级。各类柴油机均采用各种节能措施降低油耗,努力提高柴油机的有效热效率,以提高整个动力装置的热效率;在柴油机结构、材料上及加工工艺上不断改进,努力提高柴油机的工作可靠性;利用先进的电子技术对柴油机进行监测与控制,特别是近年来电子计算机的运用,更将柴油机的管理技术提高至一个崭新的水平上。这些方面的发展主要表现在如下方面。

一、四冲程柴油机得到普遍应用

由于内河航道的特殊性,在船舶主机中,普遍采用四冲程柴油机。由于四冲程中速柴油机有着重量轻、尺寸小,通过合适的减速装置可选用最佳螺旋桨转速,经济性好、工作可靠性高,

使用寿命长及对劣质燃油的适应性好等突出优点,在近年新建的船舶中,得到广泛应用。

二、提高最高爆发压力 p_{\max} 及提高 p_{\max} 和平均有效压力 p_e 的比值

适当提高 p_{\max} 可以降低燃油消耗率、提高柴油机的热效率。各生产厂家均把提高 p_{\max} 作为降低油耗的一种重要措施,现在各种机型的 p_{\max} 值均有较大提高。但是过高的 p_{\max} 会使受力部件应力增加、螺栓预紧力加大,使结构尺寸相应增大;机器的振动和噪声也随之增加,还容易破坏油膜使磨损加剧,这些不利影响随着科技进步、柴油机结构设计的改进、材料性能及加工工艺的提高均已有所改善。目前先进的非增压柴油机 p_{\max} 为 8 MPa,增压低速机 p_{\max} 在 15 MPa 左右,增压中、高速机 p_{\max} 已达 18 MPa。当 p_{\max} 一定时,降低 p_e ,则 p_{\max}/p_e 增高。降功率使用是一种常见的节能措施。

三、提高行程缸径比 s/D ,降低柴油机转速

提高 s/D 能改善柴油机的换气效果,配合适当的燃烧室形状对良好的燃烧十分有利,并能充分利用燃烧的膨胀功。特别在燃用劣质燃油时,由于燃烧时间的延长,采用较大的 s/D 能使燃烧过程更完善,使燃油消耗率下降。现在各种机型均有提高 s/D 的倾向,目前高速机的 s/D 为 1.01 ~ 1.35,中速机为 1.15 ~ 1.4,低速机由于采用了长冲程和超长冲程的结构形式,其 s/D 值高达 2.55 ~ 3.82。

有些直接传动螺旋桨的中速柴油机,也通过在输出轴系中间加装减速齿轮箱,使输出轴转速由 500 r/min 降至 200 r/min 左右,利用较高的螺旋桨推进效率,使动力装置获得较高的经济性。

长行程低速化会使柴油机尺寸加大,质量增加、造价提高。但通过各种措施,特别是通过强化程度的提高,使燃油耗量降低得到的收益完全可以抵消质量和造价提高带来的不利因素。

四、增大压缩比 ϵ

增大压缩比 ϵ 有利于燃烧,能提高柴油机的经济性。特别是在燃用低品质燃油及在部分负荷使用条件下,能使压缩冲程终点获得较高的气体温度。原先在增压柴油机中,一直惯用降低压缩比 ϵ 来限制 p_{\max} ,以保证部件不受过大的机械负荷,但由此却降低了经济性,这显然已不符合现代柴油机尽可能提高经济性的发展需求。随着柴油机结构进一步完善,材料性能的提高和零部件加工技术的改进,特别是随着增压度的提高,气缸内空气密度加大,更有利于燃油的喷射雾化,能改善燃烧过程,使燃烧更完全及时,因而在同等的 p_{\max} 条件下,增压度高的柴油机运转反而显得平稳和谐;同时较大的空气密度还能强化扫气、加强对气缸壁的冷却,有利于热负荷的改善。

现代新型柴油机,特别是增压度较高的柴油机不仅不降低压缩比,反而采取措施加大压缩比。这样做由理论循环研究可知能提高经济性,实际使用结果也证实了这一点,这也是近年来柴油机在结构上采取的节能措施之一。

五、增压技术和增压系统的改进与发展

增压是提高柴油机功率、改善经济性和节约能源的一项有效措施,同时还能降低柴油机的噪声及废气中的有害物质,近代柴油机的增压技术在不断地改进和提高。

(一) 向高压比、高效率及宽广运行范围发展

四冲程柴油机 p_c 高达 2.5 MPa, 要求压比为 4 (增压压力为 0.32~0.36 MPa) 才能满足正常运转要求。前些年, 有些机型曾采用两级涡轮和两级压气机串联组成的两级增压方式来大幅度提高其压比 (如第一级压比为 2.5, 第二级压比为 2, 两级总压比即为 5), 使柴油机的工作范围、加速性能及排气污染等方面均有改善, 但由于尺寸、质量加大, 成本增加, 管道布置及维护管理困难等不利因素的影响, 使两级增压发展较慢。

目前单级高压比涡轮增压器研制发展很快, 现在涡轮、喷嘴、涡轮叶片及压气机的空气流道, 导风轮和扩压器叶片等均经过应力分析、计算机设计比较和优化, 采取各种措施, 千方百计提高工作性能: 如有些机型的涡轮采用优质镍合金材料制作轮盘, 涡轮叶片根部采用新的形状, 并在叶片间用特殊设计的机械减振套圈取得良好的减振效果; 有些压气机采用后弯式主叶片和导风轮叶片整体式的叶轮, 并用轻巧的铝合金代替昂贵的钛合金; 采用最新设计的推力轴承和复合式弹性轴承, 使它们具有极佳的减振特性; 所有零件经过特殊的精密加工, 并采用专用的合成机油进行润滑。使最新型的增压器在高压比 3.7~4.5 和高废气温度 610~650°C 下具有良好的效率和可靠性。

1970 年代初增压器压比为 2~2.5, 1980 年代已提高为 3.5~4。目前世界上较先进的中型涡轮增压器, 如瑞士 BBC 公司的 RRI 系列最高压比为 3~3.5, 综合效率也达 62%~65%。连小型涡轮增压器也通过提高轮速来提高其压比, 如石川岛播磨公司的 RHB3 型径流式废气涡轮增压器, 质量只有 2.4 kg, 涡轮最高燃气温度允许达到 950°C, 其最高转速可达 270 000 r/min, 最高压比达 2.7。

在提高压比的同时, 近年来很注重开发高性能废气涡轮增压器, 它能在宽广压比范围内都具有较高的总效率及很容易避开喘振区域, 很多新型增压器都具备这种性能。

(二) 增压系统的改进和发展

随着平均有效压力的提高, 废气中定压能量所占比例增大, 定压增压涡轮效率高、结构简单、系统布置方便等优点更趋突出, 故目前柴油机随着增压度的提高均向定压增压系统方向发展。试验证明在较高增压度条件下, 将脉冲增压改为定压增压, 柴油机的油耗率可降低 11g/(kW·h)~14g/(kW·h)。目前, 高增压柴油机几乎全部采用定压增压。

为了更有效地利用废气能量, 在脉冲增压的排气支管和废气涡轮增压器之间增设“脉冲转换器”和“多脉冲转换器”, 这样既能有效地利用废气的脉冲动能, 又能使涡轮有稳定的进气压力和连续的气流, 使涡轮效率提高。这种方法兼顾了脉冲和定压两种涡轮增压的优点, 使增压效果明显提高, 它尤其适合于气缸数不是 3 的整数倍的柴油机, 因这些柴油机排气管的不合理分组会使废气供应断续进行, 增大涡轮的压气损失, 使涡轮效率明显下降, 同时叶片急剧交变受力会造成疲劳裂纹。近年来, 随着中速柴油机功率的不断提高, 又发展了“单管脉冲转换增压系统”, 它除了兼顾脉冲和定压优点外, 也不受柴油机缸数限制并使排气管的布置更为简化, 其工作性能也进一步得到提高。

(三) 开发“动力涡轮”, 提高动力装置效率

随着废气涡轮增压技术的改进, 柴油机增压度得到提高, 柴油机排气能量除供应给废气涡轮增压器外, 尚有相当的余能。利用一种尺寸小、经济性好的“动力涡轮”接受部分废气能量将其转为涡轮功, 再通过机械方法反馈给发动机输出。目前, 设计运用较好的一套“动力涡轮”装置利用废气中的 15% 能量能产生 4%~5% 的柴油机输出功率。由于该系统投资较大, 在

3 600 kW以上的柴油机上使用才能显示出经济效果。当输出功率小于 50%时,则断开动力涡轮的使用。

(四) 采用高效的增压空气中间冷却器,降低进入气缸的新气温度

因为在空气被增压的同时,温度也上升了,使空气密度提高的幅度减小,影响增压效果。采用中间冷却提高空气密度的作用非常明显。通过计算可知,如果压气机的压比为 2,绝热效率为 75%时,若将压缩后的空气分别冷却至 90 °C、65 °C 和 40 °C,其空气密度将相应增加 8%、16%和 25%,压比越大,中冷后密度增加的效果越显著,进入气缸的空气量增加,能更好地燃烧燃油,明显提高柴油机的功率。

采用高效的中冷器已成为提高增压技术的重要措施,采用合理的散热片材料和形状,通过冷却效果更好的气流和液流流动形式,经过冷却器的各种改型设计,使新型中冷器体积更小,效率更高。“中冷”后由于进气温度的降低使循环平均温度降低,资料表明进气温度每降低 10 °C,循环的平均温度将降低 25 °C,这对降低柴油机的热负荷极为有利。同时因循环温度的降低,也使冷却水带走的热量相对减少,使经济性有所提高。

六、部件结构和使用材料的改进

近年来,柴油机在基本结构不变的前提下,各种机型从不同的角度考虑,一些具体机件构造上有不少改进。随着新机型的出现,各种部件的结构形式和材料的应用还会更趋合理。

燃烧室部件中的气缸盖、气缸套和活塞采用高强度结构并离燃烧室很近处用钻孔冷却,使较高的结构强度和高效冷却相结合,形成“薄壁强背”结构。这种使热负荷和机械负荷都得以降低的结构,目前在大功率中、低速机中被广泛地采用。

缸盖下部圆柱形壁面加长,使得与缸套的结合面下移,使接合处不受火焰的直接冲击,使结合面得到保护。

气缸套通过形状的优化来适应工作压力的提高,设计合理的缸套肩部结构能避免热应力和机械应力过于集中;随着 p_{\max} 不断增大,单一材料制成的铸铁气缸套已达使用极限,有的机型采用双层材料制成的缸套用于低速柴油机,其内层为薄的片状石墨铸铁、具有良好的抗磨性,外层则为厚壁铸钢,增加强度,两层金属之间约有 2 mm 厚的结合层,日本三菱公司在这方面的应用获得了成功。

缸套采用上、下两排注油孔,进行多级润滑并自动控制供油率以适应长冲程活塞的润滑需要。

采用组合式活塞以适应越来越恶劣的工作条件,其活塞顶部用耐热合金钢制成,活塞裙部则用耐磨合金铸铁或铝合金制成,有些机型在两者之间加隔热环,使裙部受热甚微,热变形也相应减少,可以不必制成椭圆形并可适当缩小与缸套之间的间隙,这无疑对工作是有利的。

利用铸钢代替锻钢制造曲轴,可使曲柄尺寸形状不受限制,毛坯加工余量小,精细的铸造工艺可对曲柄臂免去加工,当然曲轴的铸造工艺要求极为严格,这样结构的曲轴已在一些大型机中使用。

七、电子技术在柴油机中的运用

(1) 随着电子技术的迅速发展,特别是近年来电子计算机的普及应用,船舶柴油机中的电子控制技术运用得越来越多。