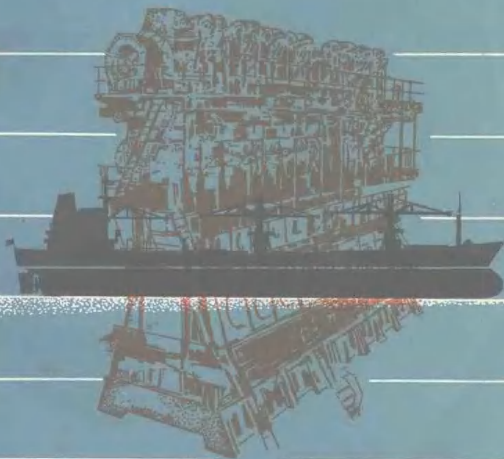


# 船舶柴油机

上册

大连海运学院内燃机教研组 编



人民交通出版社

132204

# 船舶柴油机

上册

大连海运学院内燃机教研组 编



人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是在大连海运学院内燃机教研组所编《船舶柴油机》的基础上,参照近期修订的轮机管理专业本课程教学大纲编写的。

本书主要从我国远洋船舶实际出发,着重介绍大型低速二冲程柴油机和大型中速四冲程柴油机的构造、原理、性能和使用管理。内容力求运用有关基础理论知识,结合几种典型柴油机,重点讨论其使用、操作、调整、故障及其处理,并对燃油处理和燃烧,润滑和冷却,增压器、增压系统和增压器的喘振,调速器的性能和调节以及柴油机与螺旋桨的配合等问题作了较为详细的叙述。此外,还对柴油机和轴系的减振问题作了简单介绍。

本书分上、下两册。上册包括柴油机一般介绍、主要机件、喷射与燃烧、热力过程、经济性和主要测量仪表等;下册包括增压、主要系统、特性、操纵、动力学和机振、主要故障和管理等内容。

本书上册由钱天祉、公维书主编,孟庆明参加编写;金宇清、郑克钊主审,潘延令和本教研组其他同志参加审阅;周正荣、鞠永顺协助制图。

本书主要作为水运院校轮机管理专业教材,也可供远洋和沿海轮机管理人员以及船舶修造人员阅读。

## 船舶柴油机

上 册

大连海运学院内燃机教研组 编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平门)

北京市书刊出版业营业许可证出字第006号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$  印张: 16.25 字数: 390 千

1980年12月第1版

1980年12月第1版 第1次印刷

印数: 0001—15,000册 定价: 1.70元

# 目 录

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>第一章 一般介绍</b>        | <b>1</b>   |
| 第一节 四冲程柴油机工作原理         | 1          |
| 第二节 二冲程柴油机工作原理         | 5          |
| 第三节 柴油机的类型             | 9          |
| 第四节 柴油机在船舶上的应用和发展      | 11         |
| <b>第二章 主要机件</b>        | <b>14</b>  |
| 第一节 活塞、气缸和气缸盖的构造       | 14         |
| 第二节 活塞、气缸和气缸盖的维修和管理    | 42         |
| 第三节 曲柄连杆机构、机座和机架       | 49         |
| 第四节 曲柄连杆机构的维护和管理       | 80         |
| 第五节 换气机构               | 96         |
| 第六节 推力轴承、齿轮减速器、轴系及其管理  | 112        |
| 第七节 典型柴油机介绍            | 129        |
| <b>第三章 燃油的喷射和燃烧</b>    | <b>136</b> |
| 第一节 燃油                 | 136        |
| 第二节 燃油的喷射和混合           | 142        |
| 第三节 燃油的燃烧              | 155        |
| 第四节 喷油设备               | 165        |
| 第五节 喷油设备的维护和管理         | 195        |
| <b>第四章 工作循环和主要性能指标</b> | <b>201</b> |
| 第一节 理想循环概述             | 201        |
| 第二节 实际工作过程             | 203        |
| 第三节 主要性能指标             | 221        |
| 第四节 热平衡                | 227        |
| 第五节 影响柴油机功率和经济性的主要因素   | 229        |
| <b>第五章 热工测量和仪表</b>     | <b>233</b> |
| 第一节 示功器和示功图            | 233        |
| 第二节 DETS系统简介           | 248        |
| 第三节 其它热工仪表             | 250        |

## 第一章 一般介绍

柴油机是内燃机的一种。它和它的内燃机一样，都是使燃料在发动机的气缸中燃烧，从而生成高温、高压的燃气，随后高温高压的燃气进行膨胀，推动活塞作往复运动，完成由燃料的化学能转化为活塞运动的机械能的一种热机。活塞的往复运动通过连杆-曲柄机构转变为曲轴的回转运动，带动工作机械。

上面已经指出，柴油机中燃油的化学能是要经过燃烧才能转变为热能的。因此，为了使燃油获得燃烧所需的空气，柴油机就必须具有进入新鲜空气的过程。在柴油机中，燃油不是靠外界火源点燃的，而是在高温下自己发火燃烧的。所以，进入空气亦只是具备了燃油燃烧的条件之一，除此之外，还必须使空气具有足够高的温度。从大气里吸入柴油机中的低温空气要靠活塞的压缩，才能达到足够高的温度和压力。此时，将燃油喷入其中，就能发火燃烧。由于柴油机中燃油是靠压缩发火的，所以柴油机又称为压燃式内燃机。

燃油燃烧后放出大量热能，使燃气的压力、温度急剧升高。此燃气在气缸中膨胀，推动活塞做功。膨胀终了时，气体失去了做功能力，变成废气，排出气缸。

综上所述，燃油在柴油机中燃烧做功，必须通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程才能实现，进行了这五个过程就完成了个工作循环。接着又进行第二个工作循环。如此不断地周而复始，实现柴油机的持续工作。图1-1所示即为柴油机工作过程示意图。



图1-1 柴油机工作过程示意图

在结构上，柴油机工作循环中的进气、压缩、燃烧、膨胀和排气各过程，是通过活塞、连杆、曲轴、配气机构和喷射系统等部件之间互相配合的动作来实现的。

### 第一节 四冲程柴油机工作原理

图1-2所示为四冲程柴油机的构造简图。活塞3在气缸2中作上下往复运动，它与气缸、气缸盖1共同组成密闭的空间，称为工作空间，柴油机的上述工作循环即在此空间内进行。连杆4和曲轴5把活塞的往复运动变成回转运动。气缸盖、气缸、曲轴等部件由机架6和机座7支承，机座用螺栓固定在船的基座上。

当活塞从上部往下运动时，曲柄从0°开始转动，设在气缸盖上的进气阀a被专设的传动机构顶开，空气被吸入气缸，直至活塞运动到最下部，相当于曲柄从0°转到了180°。此时，进气阀关闭，进气过程结束。在曲柄从180°转到360°时，活塞从下部上行，对气缸里的空气进行压缩。当活塞行至上部时，喷油器c将燃油喷入气缸，燃油开始燃烧，燃气膨胀并推动

活塞下行,使曲柄从 $360^{\circ}$ 转到 $540^{\circ}$ 。活塞到达最下部后,转而又开始上行,排气阀 $b$ 被传动机构打开,开始排气,直到活塞行至气缸上部,排气结束。此时曲轴从 $540^{\circ}$ 转到 $720^{\circ}$ ,完成了一个工作循环。

由上述可见,活塞在往复运动中从上行转向下行,或从下行转向上行时,都有一个转向点,这个转向点分别称为活塞的上死点和下死点。活塞从上死点行至下死点(或相反)所走过的行程叫做冲程。上述柴油机工作循环的五个过程分别在四个冲程(曲轴转两转)内完成的,就叫做四冲程柴油机。

图1-3中的四个简图分别表示五个过程进行的情况和活塞、曲轴等部件的有关动作位置。

**第一冲程——进气冲程。**活塞从上死点下行,进气阀 $a$ 打开。由于气缸容积增大,缸内压力下降到大气压力以下,新气通过进气阀被吸入气缸。进气阀一般在活塞到达上死点前即提早打开。气阀开启的时刻可用曲柄位置来表示,如图中所示,曲柄位于点1时,进气阀开启,直到下死点之后(点2)进气阀关闭。曲柄转角 $\varphi_{1-2}$ (图中阴影线所占的角度)表示进气过程。

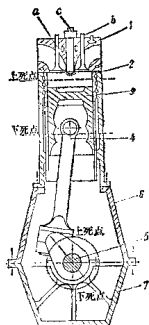


图1-2 四冲程柴油机构造简图

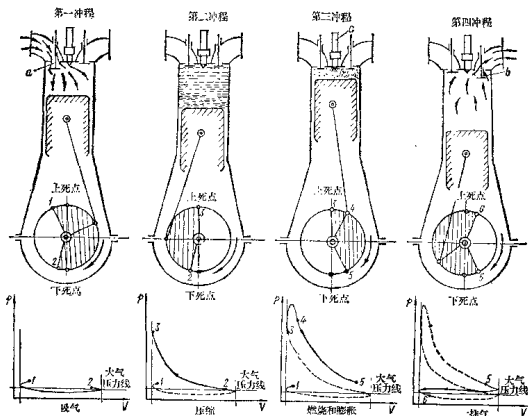


图1-3 四冲程柴油机工作原理

**第二冲程——压缩冲程。**空气的压缩过程是在活塞从下死点向上运动,自进气阀关闭(点2)至活塞到达上死点(点3)的期间内进行的。第一冲程吸入的新气,经过此冲程后,

压力增至30~40千克力/厘米<sup>2</sup> (约3~4兆帕) ①或更高一些, 温度升至600~700°C (燃油的自燃温度为210~270°C)。压缩终了的气体压力和温度用 $p_c$ 和 $t_c$ 表示。燃油在压缩过程的后半期(即点3之前)通过喷油器C射入气缸与其中的空气混合, 并在高温下自行发火。不难看出, 在这一冲程中, 除主要进行压缩过程外, 还包括进气的延迟、燃油和空气的混合以及发火燃烧。图中, 压缩过程用曲柄转角 $\varphi_{2-3}$ 表示。

第三冲程——工作冲程。在此冲程内进行着燃烧和膨胀过程。在冲程之初, 由于燃油强烈燃烧, 气缸内的压力和温度急剧升高, 压力达50~80千克力/厘米<sup>2</sup> (约5~8兆帕), 温度达1400~1800°C。燃烧的最高压力和最高温度用 $p_z$ 和 $t_z$ 表示。活塞越过上死点后, 在燃气压力作用下被推向下行。由于气缸容积增大, 压力开始下降, 在上死点后某一时刻(点4), 燃烧基本结束。气缸中的压力和温度随着燃气的膨胀而逐渐下降, 一直到排气阀b开启时膨胀结束。膨胀终了时, 燃气压力降至2.5~4.5千克力/厘米<sup>2</sup>, 温度降至600~750°C。与进气阀相同, 排气阀总是提早在下死点前(点5)开启, 因此在这一冲程末期, 排气过程已经开始。图中, 燃烧和膨胀过程用曲柄转角 $\varphi_{3-4-5}$ 表示。

第四冲程——排气冲程。在上一冲程末, 排气阀b开启, 气缸内的燃气压力和温度迅速下降。这时活塞尚在下行, 废气靠气缸内外压力差经排气阀排出气缸。当活塞由下死点上行时, 废气被活塞推出气缸, 此时的排气过程是在高于大气压且在压力基本不变的情况下进行的。与进气阀一样, 排气阀也一直延迟到上死点后(点6)才关闭。图中, 排气过程用曲柄转角 $\varphi_{5-6}$ 表示。

进行了上述的四个冲程, 柴油机就完成了一个工作循环。当活塞继续运动时, 另一个新的循环又按同样的顺序重复进行。

可见, 四冲程柴油机每完成一个工作循环, 曲轴要回转两转, 每个工作循环中只有第三冲程(工作冲程)是作功的, 其它三个冲程都是为工作冲程服务的, 都需要外界供给能量。柴油机常做成多缸的, 这样, 进气、压缩、排气冲程的能量可由其它正在工作的气缸供给。如果是单缸柴油机, 那就由飞轮供给, 飞轮把工作冲程的部分能量储存起来而在其余三个冲程进行时给出。

图1-3下方的 $p-V$ 图表示出一个工作循环内气缸中气体压力随活塞位移(即气缸容积变化)而变化的情况。

纵坐标表示气缸内的气体压力 $p$ , 横坐标相当于活塞行程的气缸容积 $V$ 。在过程进行时, 气缸内气体的压力和容积是同时变化的。 $p-V$ 图可用于研究柴油机工作过程进行的情况, 并且可用于计算柴油机完成一个工作循环所作的功, 我们就把这种 $p-V$ 图称为示功图。

在 $p-V$ 图中, 线1-2表示进气过程中气缸内的压力随容积变化的情况。活塞在上死点时, 气缸内的压力高于大气压力, 这时新气不能吸入。随着活塞下行, 气缸容积增大, 压力随之下降至大气压力以下, 新气才开始进入。此后, 进气过程一直延续到进气阀关闭时为止, 此时活塞已从下死点上行了一小段距离。在进气过程的大部分时间里, 气缸内的压力低于大气压力。

$p-V$ 图中线2-3表示压缩过程进行时压力随气缸容积减小而增高的情形, 线3-4-5表示燃烧和膨胀过程中压力随气缸容积而变化的情形, 线5-6则表示排气过程进行时的情况。

① 本书同时采用工程单位制和国际单位制。在工程单位制中, 压力(压强)单位为千克力/厘米<sup>2</sup>或公厘力/厘米<sup>2</sup>, 代号为 $\text{kgf/cm}^2$ ; 在国际单位制中, 压力(压强)单位为帕, 即 $\text{N/m}^2$ 或 $\text{N/m}^2$ 。二者换算关系为1千克力/厘米<sup>2</sup>=9.80665×10<sup>4</sup>帕。为使叙述简便起见, 本书取1千克力/厘米<sup>2</sup>=10<sup>4</sup>帕。

上述工作循环各过程线的综合,就构成了四冲程柴油机的示功图(图1-3右下角)。

从大气吸入的新气经压缩后容积减小,压力升高。为了表明空气被活塞压缩的程度,采用了压缩比 $\epsilon$ 这个参数。所谓压缩比(理论压缩比),就是活塞在下死点时气缸容积与活塞在上死点时气缸容积的比值,它的计算式为

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

式中,  $V_c$ ——压缩空间容积,即活塞在上死点时的气缸容积,也称燃烧室容积;

$V_a$ ——气缸总容积,即活塞在下死点时的气缸容积。 $V_a = V_c + V_r$ ;

$V_r$ ——气缸工作容积,即活塞从上死点至下死点的气缸容积。

压缩比是柴油机的一个重要性能参数。压缩比大,说明空气被压缩得厉害,压缩后的压力和温度就高,因而它对燃油的燃烧和柴油机所受的机械负荷都有影响。此外,压缩比大,燃气有足够的膨胀作功的余地,可以提高柴油机的热效率。压缩比的大小随柴油机的机型而异,一般柴油机的压缩比为11~20。

四冲程柴油机的进气阀和排气阀的启闭都不是在上、下死点,而是在上、下死点的前后某一时刻,它们的开启时间都大于180°曲柄转角。这种进、排气阀在上、下死点前后启闭的时刻叫做气阀定时。用曲柄转角表示气阀定时的圆图叫做气阀定时圆图,如图1-4表示。

在图1-4中,进气阀在上死点前点1开启,在下死点后点2关闭。排气阀在下死点前点5开启,在上死点后点6关闭。角 $\varphi_1$ 为进气阀提前开启角,  $\varphi_2$ 为进气阀延后关闭角,  $\varphi_{1-2}$ 为进气过程。  $\varphi_3$ 为排气阀提前开启角,  $\varphi_4$ 为排气阀延后关闭角,  $\varphi_{5-6}$ 为排气过程。

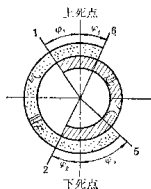


图1-4 定时圆图

为什么进排气阀的启闭不在上、下死点,而在上、下死点前后呢?我们知道,一定数量燃油的燃烧是以相应数量的空气为前提的。在一定气缸工作容积的条件下,吸入的空气量越多,越有利于燃油的燃烧。如果进气阀启闭时刻适宜,就能增多空气的吸入量。至于排气阀的启闭时刻,则是由于新气能否吸入更多是以废气能否排出干净为先决条件的。废气能否排出干净,当然与排气阀启闭的时刻密切相关。因此,正确的气阀定时乃是影响四冲程柴油机作功的重要因素。

由上述气阀定时中不难看出,进气阀和排气阀在上死点前后的一段时间里同时开启,对应于这段时间的曲柄转角称为气阀重叠角。进、排气阀在上死点前后同时开启是否会发生废气倒灌入进气管呢?应该说,适宜的气阀重叠角不仅不会使废气倒灌入进气管,而且还有助于废气的清除和新气的充入。因为在排气终了时,由于废气的流动惯性,废气按原方向继续排出气缸,加上此时进气阀开度较小,因此废气不会向进气管倒灌。同时,当废气由于惯性

表1-1

| 名 称   | 非 增 压      |            | 增 压        |            |
|-------|------------|------------|------------|------------|
|       | 开 启        | 气 闭        | 开 启        | 关 闭        |
| 进 气 阀 | 上死点前15~30° | 下死点后10~30° | 上死点前40~80° | 下死点后20~40° |
| 排 气 阀 | 下死点前35~45° | 上死点后10~20° | 下死点前40~55° | 上死点后40~50° |
| 重 叠 角 | 25~50°     |            | 80~130°    |            |



排出时，在燃烧室内形成低压，造成抽吸气体的有利条件，遂将新气吸入气缸。新气充入后又更好地将废气扫出，实现了所谓燃烧室扫气。

合适的气阀定时和气阀重叠角随机型而异，一般都是通过实验方法才能得出。柴油机电阀定时和气阀重叠角的范围列于表1-1。

## 第二节 二冲程柴油机工作原理

二冲程柴油机是将柴油机一个工作循环的五个过程缩减在两个冲程内完成。它与四冲程柴油机的主要差别是换气的方式不同。在四冲程柴油机中，正如上节所述，新气靠活塞的抽吸作用造成外界与气缸内的压力差自然地吸入，但由于压力差小，流速慢，空气只能随活塞下行而不断充入气缸。同样，废气也要靠活塞上行时的推挤作用而排出气缸。因此，进、排气各占了一个冲程。在二冲程柴油机中，气缸下部开设扫、排气口，或设气口-气阀机构，并专门设置一个扫气泵，先将空气吸入泵内压缩，使压力提高到高于大气压力，再从扫气口打入气缸中驱扫废气，使废气从排气口排出。这样，提高了气体的流动速度，而且进、排气同时进行。因此，就能使换气过程缩减到只占整个冲程的很小一部分。

图1-5所示为一种采用特设的活塞式扫气泵的二冲程柴油机的工作原理。扫气泵附设在柴油机的一侧，它的活塞由柴油机的曲柄连杆机构带动。空气从泵的吸入阀 $b$ 被吸入气缸，经过压缩后由排出阀 $c$ 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。在膨胀冲程中，活塞下行，先将排气口 $f$ 打开（相当于曲柄在点1的位置），气缸内的大量废气从排气口泄入排气管 $g$ 。当气缸内的压力降至接近扫气压力时（一般扫气压力为 $1.1 \sim 1.4$ 千克/厘米<sup>2</sup>或约 $110 \sim 140$ 千帕），活塞下行把扫气口 $e$ （相当于曲柄在点2的位置）打开，扫气箱 $d$ 中的空气经进气口 $e$ 进入气缸。从此时起，进气和排气同时进行，一直到活塞行至下死点又转而向上运动，把进气口关闭为止（相当于曲柄在点3的位置）。接着，活塞继续上行，最后把排气口关闭（相当于曲柄在点4的位置）。至此，进排气过程全部结束，而开始了压缩、燃烧和膨胀过程。这些过程的进行情况与四冲程柴油机基本相同。其中1-2-3-4（见图曲柄位置）即为扫气过程。点1为排气口开启时刻，点2为扫气口开启时刻，点3为扫气口关闭时刻，点4为排气口关闭时刻。图1-5中的右面是它的示功图，示功图尾部1-2-3-4为扫气过程。

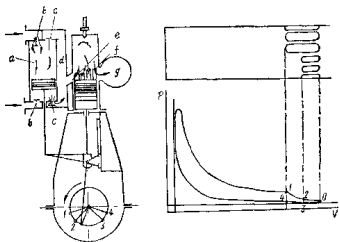


图1-5 二冲程柴油机工作原理

显然，二冲程柴油机的进气和排气过程是在前一循环膨胀冲程末和后一循环压缩冲程初的一段时间内完成的，它比四冲程柴油机的进排气过程短得多。

比较四冲程和二冲程柴油机的工作循环，可以看出，在二冲程柴油机中，由于用扫气泵代替柴油机活塞来完成进、排气过程，因此使每一工作循环减少了两个辅助冲程，而能在每

两个冲程内得到一个作功冲程，这样就大大提高了柴油机的作功能力。按理，在柴油机其它条件相同的情况下，二冲程柴油机的功率应为四冲程柴油机的两倍。但由于二冲程柴油机的压缩和膨胀冲程被进、排气过程占去了一部分，加上带动扫气泵又要消耗柴油机一部分功率，因此实际上二冲程柴油机的功率仅为四冲程柴油机的1.6~1.7倍。此外，二冲程柴油机由于每两个相邻的作功冲程之间的间隔较短，因此它的回转要比四冲程柴油机均匀。

二冲程柴油机的主要缺点，是废气的清除和新气的充入不如四冲程柴油机完善。此外，进入气缸的新气在排气口开启着的时候要同废气一起泄出一部分，这就增加了新气的消耗量。

向气缸内多喷油显然能在机器尺度和重量不变的情况下提高柴油机的功率。但是，喷油量的增加必然需要空气量相应增多，否则，喷入气缸的过量燃油会由于空气量不足而燃烧不完全，致使热量不能完全释放出来。所以，提高柴油机功率的关键在于增加空气量。

既然二冲程柴油机可借助扫气泵来提高进气压力而实现扫气，那也就可以用它产生更高的空气压力来增加气缸的进气量。我们把用增加进气压力来提高功率的方法称为柴油机增压。但是，扫气泵是由柴油机带动的，因此，进气压力的提高会使柴油机消耗于扫气泵的功增多，在进气压力超过一定值时，消耗于扫气泵的功将大大增加，这时柴油机所提高的功率几乎全部消耗在带动扫气泵本身上。显然，这是得不偿失的。

实践中发现，柴油机排出的废气温度还很高，燃油燃烧所放出的热量约有三分之一随同废气排走。如果把废气中的能量利用起来，使之带动扫气泵工作，既能增加柴油机的功率，又可提高柴油机的经济性。为此，将柴油机排出的废气送入一涡轮机中，使涡轮机高速回转来带动一离心式压气机，由它把压力较高的空气送入气缸，以实现增压。我们称这种增压方式为废气涡轮增压。废气涡轮和同轴安装的压气机合称废气涡轮增压器。可以认为，废气涡轮增压的实现是柴油机在提高功率途程中的一次飞跃。

图1-6所示为一种具有废气涡轮增压的二冲程柴油机工作原理简图。它的特点如下。

新气通过气缸下部的进气口 $a$ 进入气缸，而废气则通过气缸盖上的排气阀 $b$ 排出气缸。在进、排气管道上分别安装了离心式压气机 $c$ 和废气涡轮 $d$ 。离心式压气机与废气涡轮同轴，由废气涡轮带动，两者组合成废气涡轮增压器。当柴油机工作时，排出气缸的废气通过废气涡轮，使废气涡轮从废气中获得能量而带着压气机一起转动。新鲜空气则从大气通过吸入口 $f$ 吸入压气机，经压缩后压力和温度升高，然后由管 $g$ 经冷却器 $h$ 冷却后导入进气管 $b$ 和扫气箱 $i$ ，准备进入气缸。

气缸内工作循环的各主要过程——压缩、燃烧和膨胀的进行情况与非增压柴油机一样，只是由于采取了增压，使各过程的压力和温度有所增高。至于扫气过程，则与前而介绍过的二冲程柴油机相似。当活塞下行还没有打开进气口 $a$ 之前，排气阀 $b$ 首先被气门机构打开（相当于曲柄在点1位置）。废气大量泄出气缸，并经排气阀和排气管 $i$ 进入废气涡轮 $d$ 中。当活塞继续下行使气缸内的压力降低到接近于增压压力时，活塞将进气口 $a$ 打开（相当于曲柄在点2位置），等待在进气口外边的增压空气即进入气缸，并把废气扫出。当活塞运动到

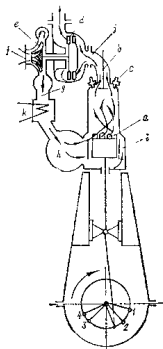


图1-6 废气涡轮增压二冲程柴油机工作原理

下死点并转向上行,进气口 $a$ 被关闭(相当于曲柄在点3位置),接着排气阀关闭(相当于曲柄在点4位置),于是扫气过程结束,压缩过程开始。

二冲程柴油机的换气不同于四冲程柴油机。通过长期的生产实践,已发展了数种合理的换气型式,分别以不同的方式控制气体在换气过程中在气缸内的流动路线,并获得了满意的换气效果。根据气体在气缸内流动的不同方向,这些换气型式可以分为直流式和弯流式两类。弯流式又包括回流和横流两种。

直流换气有气口式和气口-气阀式两种,日前以后者使用较多。气口-气阀式直流换气是在气缸盖上装有排气阀机构,在气缸套的下部周围均布着一圈扫气口,如图1-7所示。在活塞下行打开扫气口前,通过排气阀传动机构先把排气阀打开,气缸中的废气经排气阀排出,使气缸内的压力降低到可以进行扫气的数值。随后,扫气口开启,新鲜空气从扫气口周围的扫气箱中经扫气口进入气缸下部进行扫气,并强迫废气由下而上经排气阀排出气缸。这样,气体在气缸中的流动方向是自下而上的直线流动。扫气口在气缸的水平平面内一般做成具有一定的倾斜角,以便空气回旋地进入气缸,驱扫废气,减少新气与废气混杂。这种具有排气阀机构的换气型式又称直流阀式换气。它的主要优点是排气干净,换气质量好,气缸套下部受热均匀不易变形,而且还可以通过调整排气阀的定时使排气阀及时关闭,避免扫气口关闭后的排气损失,相反可以实现排气阀关闭后的少量充气(叫过后充气)。但是,这种换气型式也有一定缺点,主要是排气阀机构比较复杂,管理检修麻烦,因而在一定程度上限制了它的使用范围。

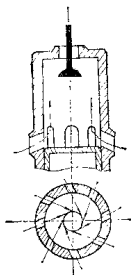


图1-7 直流换气

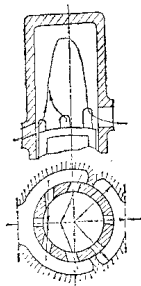


图1-8 横流换气

我国的9ESDZ43/82B型和国外的B8.W型柴油机等都是采用这种换气型式。

横流换气与直流换气不同,气缸盖上没有排气阀机构,进气和排气都是经过气缸下部的扫气口和排气口进行的。扫气口和排气口分别布置在气缸周围的两侧,排气口高于扫气口,如图1-8所示。当活塞下行时,首先打开排气口,使大量废气以高速冲出气缸,气缸内的压力迅速降低。当气缸内的压力降低到接近扫气压力时,活塞下行将扫气口打开,开始进行扫气。扫气口沿垂直和水平方向均有倾斜角,借以控制气体的流动方向,达到减少新气与废气掺混、避免死角(新气流不到的部位)和提高换气质量等目的。气体在气缸内的流动路线是这样的:新鲜空气从气缸一侧沿倾斜的扫气口进入气缸并向上流动把废气推向上行,然后在气缸上部转向下行,经气缸另一侧的排气口排出。这样,气体在气缸中是横向流动,因此称

横流换气。当活塞经下死点转向上行时，首先关闭扫气口，进气结束，但排气口仍然开启着，所以将有部分新鲜空气从排气口排出。这种换气形式因没有排气阀机构，具有结构简单、管理方便的优点。但是，与直流换气相比，横流换气也存在着一定的缺点。由于气体在气缸内的流动路线长而且需要转向，因此一般说来，换气质量较差。气缸下部两侧受热不同，因而容易变形。由于气口的这种布置，必然要损失部分新气。此外由于进、排气口分别布置在气缸两侧，当采用废气涡轮增压时，则不得不把位于排气口一侧的涡轮增压器排出的增压空气用长管绕过机器送到气缸另一侧的扫气口，从而增加了设备，加大了气体输送过程中的阻力损失，给柴油机的增压带来更多的困难。正是由于这些问题，横流换气型式近期有了新的发展，其最大特点是把扫气口从排气口的对侧分别移到排气口的下方和两侧（见图1-9），分布在排气口下方和两侧三分之二的圆周上，这样就能够把扫气箱和排气管置于气缸的同侧，解决了增压时在进、排气系统布置上所遇到的困难。同时，为了避免过后排气损失，排气口又加装了排气回转阀机构，借助该阀的回转运动，可以控制排气口的启闭时刻，实现过后充气。此外，它还可以防止当活塞在上死点时新鲜空气经开启着的进、排气口逃逸到排气管中去（因为该柴油机采用短活塞，活塞在上死点时，进、排气口是同时开启的）。

这种换气型式既具有横流换气的基本优点，又解决了前者的缺陷，因而目前很受使用者欢迎。苏尔寿 RD 型柴油机采用这种换气型式。排气回转阀机构虽然有以上优点，但它毕竟使设备复杂，增加了维护费用，而且在高增压的情况下，回转阀片的工作条件更加恶劣，因而目前又取消了回转阀机构。将排气回转阀取消后，采用长活塞，它在上死点时可封闭气口，以防止新气损失。苏尔寿 RND 型柴油机即采用这种结构。

回流换气与横流换气一样，气缸盖上也没有排气阀机构，进气和排气也都是经过气缸下

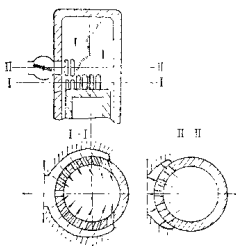


图1-9 新型横流换气

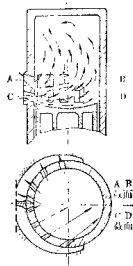


图1-10 回流换气

部的扫气口和排气口进行的。排气口和扫气口位于气缸的同一侧，排气口也设在扫气口的上方，如图1-10所示。气口沿垂直和水平方向均有倾斜角，以控制气体的流动方向。当进行换气时，新鲜空气从向下倾斜的扫气口进入气缸，流经活塞顶部，驱扫废气上行，在气缸顶部转向下行，最后由倾斜的排气口排出。显然，气体的流动呈回线状，因此称为回流换气。气口的这种布置使它无法避免部分新气损失。为了解决这个矛盾，也曾对排气口外加装过排气回转阀装置。但近年来，由于成功地利用了排气管中的压力波动现象，使某一气缸的排气压

力波峰恰好在另一气缸扫气结束时到达,阻止了新气的外泄,避免了新气损失,从而使排气回转阀机构成为不必要,简化了装置。这种换气形式主要使用在曼恩(MAN)型二冲程柴油机上。

后两种换气形式,因气体均需在水缸内转向流动,因而都属于弯流式。它们的最大优点是结构简单,管理方便。它们的共同缺点,一般地讲,是换气质量稍差于直流换气。不过,由于对弯流换气进行了不断的改进,上述各种换气型式都能保证令人满意的换气质量。在这种情况下,结构简单、管理方便就成为人们关心的主要问题,因而弯流换气的优越性就变得更加明显。

### 第三节 柴油机的类型

柴油机在国民经济的许多部门应用极广,用途不同,对柴油机的要求也各不相同,因此柴油机的型式繁多。但是,不论何种柴油机,它们的基本工作原理都是一样的,只是在不同的方面(工作循环或构造等)各有其特点而已。前面已经介绍了一些类型的柴油机,例如四冲程和二冲程柴油机;非增压和增压式柴油机。在二冲程柴油机中,按照扫气形式又分为弯流扫气式和直流扫气式柴油机等。下面再介绍一些最常见的船舶柴油机类型。

#### 一、低速和中、高速柴油机

柴油机的速度可以用活塞平均速度和曲轴转速作为指标。如果柴油机的转速为 $n$ 转/分,活塞的冲程为 $S$ 米,则活塞平均速度 $C_m$ 为

$$C_m = \frac{Sn}{30} \text{ 米/秒}$$

现有船舶柴油机的活塞平均速度 $C_m$ 的范围为:高速机9.0~14.2米/秒;中速机7.0~9.4米/秒;低速机6.0~7.2米/秒。曲轴转速 $n$ 的范围为:高速机1000~2200转/分;中速机300~1000转/分;低速机300转/分以下。近年来,为了改善螺旋桨推进效率以提高整个柴油机装置的效率,低速柴油机的转速进一步降低。

在船舶上,低速柴油机主要用作海船主机;中速柴油机用作河船和部分海船的主机,但近年来中速柴油机作为海船主机的数量迅速增加;高速柴油机则大部分用作河船和木帆船的主机。至于带发电机的柴油机,其转速通常在300~1500转/分之间,属于中、高速的范围。

低速柴油机通常与螺旋桨直接相连,无需减速。  
中、高速柴油机则经过减速器与螺旋桨相连。

#### 二、筒状活塞式和十字头式柴油机

图1-11所示为筒状活塞式(又称无十字头式)和十字头式柴油机的简单构造。在筒状活塞式柴油机中,活塞1直接与连杆2相连接,活塞的导向作用由活塞本身下部的筒状部分来承担,在运动时,活塞与气缸壁之间产生侧压力 $N$ 。在十字头式柴油机中,活塞1通过活塞杆2和十字头3与连杆4相连接,活塞的导向作用主要

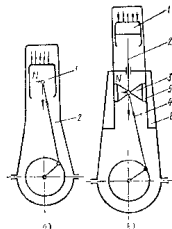


图1-11 筒状活塞式和十字头式柴油机构造简图

由十字头来承担。当柴油机工作时，十字头上的滑块 5 在导板 6 上滑动，侧压力  $N$  产生在滑块与导板之间。

这两种柴油机各有其优缺点。十字头式柴油机由于活塞不需起导向作用，活塞与气缸之间允许有较大的间隙；同时，由于两者之间没有侧压力  $N$  的作用，因此它们之间的磨损较小，不易擦伤和卡死。此外，采用这种构造时，由于活塞杆只在垂直方向作直线运动，因此有可能在气缸下部加设一隔板，这样就把气缸和曲柄箱空间隔离开来，以免气缸中的脏油、烟灰和燃气等漏入曲柄箱而使曲柄箱里的滑油污损（这对于燃用重油的柴油机非常重要）。同时，这一隔板还可能在活塞下方形成密闭空间，作为一个辅助的扫气泵。以上所述都是十字头式柴油机比筒状活塞式柴油机优越的地方。然而，由于采用十字头式结构，柴油机的高度和重量就要增大，构造也较复杂，这又是十字头式柴油机比不上筒状活塞式柴油机的地方。

### 三、直列型和 V 型柴油机

船舶上使用的柴油机，一般都是多气缸的。这样可以增大柴油机的单机功率，也是为了满足船舶机动性的要求。

多气缸的柴油机，通常都是直列、纵向排列的。但是，在气缸数比较多时，例如 12 缸以上，纵向排列会使柴油机过长，曲轴重量过分增加，刚性差，而且在制造和安装上也有困难，因此也常有布置成 V 型和其他型式的机器。图 1-12 所示即为 V 型布置的柴油机构造简图。V 型机的气缸夹角通常为  $90^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $45^\circ$ 。它的特点是它的一系列零件甚至连杆，均与直列型柴油机通用，因此同时生产直列型和 V 型柴油机是方便的。V 型机的气缸数达 18 缸，在某些情况下可达 20~24 缸。这种布置能获得小的比重量和比较高的单机功率，因此在中、高速柴油机中用得较多。

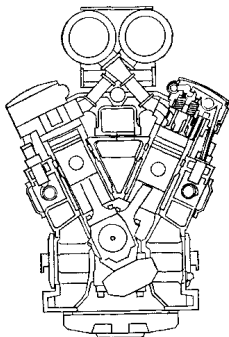


图 1-12 V 型布置柴油机构造简图

### 四、船舶柴油机的型号

每一种柴油机，制造厂都给予一个特定的代号，称为柴油机的型号。型号通常是由若干

表 1-2

| 机 型                                         | 符 号 意 义                                                                                     |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 ESDZ 43/82 B<br>(国产)                      | 9—气缸数；E—二冲程；S—十字头；D—可倾转；Z—增压；43—缸径（厘米），82—冲程（厘米）；B—机壳发展顺序                                   |
| SULZER<br>10 RND 90 M                       | 10—气缸数；R—焊接结构；二冲程、十字头式；N—新型；D—直接驱动螺旋桨，带有推力轴承的船用柴油机；90—气缸直径（厘米）；M—RND 型柴油机的改进型               |
| B&W<br>12 K 98 GF<br>6 L 90 GF              | 12.6—气缸数；K—二冲程、单作用、十字头、直列式；L—二冲程、单作用、十字头、直列式、长活塞冲程；98, 90—气缸直径（厘米）；G—增压度发展顺序；F—用途：直接传动式船用主机 |
| MAN<br>K 10 SZ 105/180 A<br>K 12 Z 93/170 E | K—十字头；10, 12—气缸数；S—维护简单；Z—二冲程；105, 93—气缸直径（厘米），180, 170—活塞冲程（厘米）；A, E—设计改良发展顺序              |

字母和数字组成，它们表示了发动机的某些技术特性，以及气缸直径和活塞冲程等。不过，各国柴油机制造厂所用的技术特性代号有所不同，而且型号代表的内容也不一致。现列举若干大型低速机的型号加以说明，见表1-2。

#### 第四节 柴油机在船舶上的应用和发展

任何一门科学技术的发展，总是与社会生产的需要和当时科学技术的发展水平相联系的，内燃机也不例外。在实际的柴油机出现之前，由于各种工业的发展，对动力来源的需求增加了，建造内燃机的想法已经很多，也作了不少尝试。1878年在巴黎世界博览会上，以奥托(Otto)的名义展出了用电火花点火的四冲程煤气机，其热效率高达12~14%，这就使得内燃机比起蒸汽机来，占有压倒优势，以后就被采用于工业中，并得到迅速推广。1897年狄塞尔(Rudolf Diesel)在前人发明创造的基础上，经过多年的研制，制造成功使用液体燃料的压燃式内燃机，大大提高了内燃机的效率，迅速得到了推广。

柴油机自本世纪初开始用于商船至今七十多年来，由于其热效率高、耗油量低、尺寸小、比重量轻、起动性能好、工作可靠以及能适应广泛的功率和转速范围等优点，因此获得了巨大的发展。目前，它在大、中、小型船舶上和海军舰艇上已被广泛采用。本世纪前半期船舶动力发展的特点是，汽轮机和柴油机逐步代替效率低而又笨重的往复式蒸汽机，从而进入了柴油机与汽轮机相竞争的时期。第二次世界大战以后，由于二冲程柴油机增压技术和燃用重油成功，又大大地提高了柴油机的竞争能力，使船用大型低速柴油机取得了迅速的发展，而汽轮机船的发展受到了很大挫折。目前汽轮机除在大型舰艇上采用之外，只是在大型和超大型船舶上还占有一定的地位。

在以往的海运船舶上，作为主机和辅机用的柴油机之间有一个明显的区别，即主机绝大多数采用低速二冲程十字头式柴油机，而发电机的辅机都采用中、高速四冲程筒状活塞式柴油机；至于废气涡轮增压，则在主、辅机中均已广泛采用。近年来，以大型中速四冲程筒状活塞式柴油机作为主机的也日渐增多。主要原因有以下几点：

1. 海船主机的要求功率大，寿命长，经济可靠，重量和尺度也应尽可能轻小。在这些要求中，主机的寿命和经济可靠是第一位的，重量和尺度等则是第二位的。虽然低速二冲程十字头式柴油机的重量和尺度大，但寿命长且经济可靠则是其突出的优点，因而被广泛地用作海船主机。然而，从六十年代起，大功率中速船用柴油机由于解决了燃用重油问题，燃油消耗率已降低到140~157克/马力小时(52.9~59.3微克/焦耳)<sup>①</sup>，与低速机不相上下，运转可靠性和使用寿命大大改善，克服了原有的弱点，而其重量仅为低速柴油机的30~40%，尺度比低速机小得多。因此，从六十年代后期开始，国外新建船舶越来越多地采用中速柴油机作主机，改变了那种几乎只采用低速柴油机的状况。

2. 船舶辅机的单机功率不大，与发电机相连要求有较高的转速，因此均采用中、高速柴油机。为了满足轻小的要求，中、高速柴油机都无例外地采用筒状活塞式构造。这种中、高速筒状活塞式柴油机的寿命和工作可靠性较低速十字头式柴油机为差，为此，在船上都设有备用辅机，以便保证船舶的安全航行。

3. 中速柴油机(作主机用的大型中速柴油机和船用辅机)多半采用四冲程而很少采用二

<sup>①</sup> 在国际单位制中，燃油消耗率单位采用千克/焦耳，在工程单位制中，燃油消耗率单位采用克/马力小时。1克/马力小时=0.378微克/焦耳。

冲程，其原因主要是：二冲程柴油机的换气质量不如四冲程机（因为换气时间短），特别是在转速较高时，二冲程机的换气质量更难保证，因此二冲程柴油机的经济性较四冲程柴油机为低。

国外船用柴油机当前的水平列于表1-3。

表1-3

| 项 目                           | 机 型   | 低 速 柴 油 机                 | 中 速 柴 油 机                 | 高 速 柴 油 机                |
|-------------------------------|-------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 缸径, 毫米                        |       | 450~1060                  | 230~650                   | 130~280                  |
| 转速, 转/分                       |       | 83~300                    | 300~1000                  | 1000~2200                |
| 最大单缸功率, 千瓦(马力)                |       | 2940<br>(4000)            | 1100~1840<br>(1500~2500)  | 220~308<br>(300~420)     |
| 最大单机功率, 千瓦(马力)                |       | 35300<br>(48000)          | 23800<br>(32400)          | 2200~5150<br>(3000~7000) |
| 平均有效压力,                       | 四 冲 程 | —                         | 1.47~2.55<br>(15~26)      | 1.1~2.16<br>(11.3~22)    |
| 兆帕(千克力/厘米 <sup>2</sup> )      | 二 冲 程 | 1.13~1.31<br>(11.5~13.4)  | 1.07~1.5<br>(10.9~15.6)   | 0.88~1.32<br>(9~13.5)    |
| 活塞平均速度, 米/秒                   |       | 6.04~7.2                  | 7.08~9.4                  | 9.0~14.2                 |
| 燃油消耗率,<br>(克/马力小时)            |       | 52.9~56.7<br>(140~150)    | 52.9~59.3<br>(140~157)    | 57.8~64.3<br>(153~170)   |
| 滑油消耗率,<br>(克/马力小时)            |       | 0.22~8~0.264<br>(0.6~0.7) | 0.329~0.587<br>(0.47~1.6) | 0.567~0.756<br>(1.5~2.0) |
| 单位功率重量,<br>(牛/千瓦<br>(千克力/马力)) |       | 293~533<br>(22~40)        | 86.1~200<br>(6.5~15)      | 18~37.2<br>(1.35~4.3)    |
| 燃油重油情况                        |       | 1500秒以上重油                 | 多数能燃用 250~1500<br>秒重油     | 少数可燃用重油                  |

大功率二冲程低速柴油机由于构造简单、运转可靠、维修方便、操纵容易、能烧重油且油耗低等，所以至今在船用主机中仍占主要地位。1966年以来，各公司为了提高功率相继制造了缸径在1000毫米左右的超大缸径的低速重型柴油机和高增压柴油机。同时，为了简化结构并方便维修、保养和管理而发展了所谓“维护简单”的柴油机。超大缸径低速二冲程柴油机并没有得到预期的发展，装船的机组很少，这是因为与这种巨型柴油机相配的螺旋桨最优转速多为70~80转/分，甚至更低，而柴油机的标定转速却在100转/分以上，致使螺旋桨推进效率由于转速过高而损失10%左右，经济性因而下降。同时这种柴油机的尺寸重量过大，都在2000吨左右，减少了船舶的装货量，而且巨型船舶的需求量也不大，所以进一步增加气缸直径的趋势已经停止。近年来，由于石油涨价，在资本主义世界造成能源危机，因而对降低柴油机的燃料费用更加重视。因此，目前采取了种种措施，如制造长冲程低速柴油机，使转速降低，以提高螺旋桨的推进效率，减少燃料费用；尽量燃用高粘度的渣油，减少燃料费用等。这样做对于合理利用能源也是具有意义的。总之，大型低速柴油机仍在发展之中。

大型中速柴油机在五十年代中期开始发展，至今已经历了三代机型，缸径从400毫米左右增大到650毫米，单缸功率从250马力(184千瓦)●增至将近2000马力(1470千瓦)，平均

● 在工程单位制中，功率单位采用马力；在国际单位制中，功率单位采用瓦。1 马力 = 735.49875 瓦 = 75 千克力·米/秒。



有效压力从9千克力/厘米<sup>2</sup> (0.9兆帕) 提高到26千克力/厘米<sup>2</sup> (2.55兆帕), 活塞平均速度从6.5米/秒提高到9.4米/秒, 单机功率从1500马力 (1100千瓦) 提高到32400马力 (23800千瓦) 以上。由于前述优点, 它们特别适用于宽甲板的集装箱船、滚装船、客轮、登陆舰、海峡渡轮等, 预计今后还将有进一步的发展。

由于各种气动、液动、电子元件的迅速发展, 操纵设备日趋自动化。所谓自动化, 就是对船舶主机、辅机及其辅助设备自动控制和自动监视。为了实现自动化, 必须提高机器的可靠性、耐久性, 还要解决柴油机运转时的自动监控技术。六十年代初期, 曾进行了在控制室内对主机集中操纵和集中监视的尝试, 发展了自动化技术, 并先后在日本、法国、瑞典建造了无人操作机舱的远洋船舶。六十年代中期, 开始在船上安装电子计算机, 用以做各种记录、监视机舱和进行数据计算。现在采用无人机舱的船舶日益增多。为了保证自控系统安全工作, 在驾驶台、机舱集中操纵台上和机器的人工操纵台上装有检查主、辅机工作的必要的指示仪表、指示讯号和报警装置以及柴油机内工况监测装置, 它们能直接将柴油机运转过程中的内部参数变化及时反映出来, 可测量气缸内的燃烧压力、缸套磨损、缸套表面温度、活塞环的工作情况等参数, 以便选择柴油机运转最佳参数, 及时发现和排除故障。其原理是根据被监测的内部参数不同, 选择不同类型的传感器, 把监测的参数反映在仪表上。今后, 随着自动化控制技术的发展, 将有大量的计算机安装在系统中, 以便选择机器运行最佳条件, 实行工况监测、故障自动诊断和自动处理并提高操纵安全性, 最大限度地减少机舱值班人员。

船用大功率柴油机无论低速、中速和高速, 都以提高可靠性和耐久性, 提高经济性包括燃用劣质重油和降低油耗, 减少机型、加强系列化, 提高单缸和单机功率, 降低单位功率的重量, 加强自动监护和遥控装置, 简化维护和检修工作作为发展的共同方向。