

船用发动机 润滑油 的应用

CHUANYONG FADONGJI
RUNHUAYOU
DE YINGYONG

杨慧青 曾向明 俞巧珍 编著
谭亲明 金国平 杨智远
詹玉龙 主审

上海浦江教育出版社

船用发动机润滑油的应用

杨慧青 曾向明 俞巧珍 编 著
谭亲明 金国平 杨智远

詹玉龙 主审

上海浦江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

船用发动机润滑油的应用 / 杨慧青等编著. —上海: 上海浦江教育出版社, 2011.12

ISBN 978-7-81121-203-7

I. ①船… II. ①杨… III. ①舰船发动机—发动机润滑油—应用 IV. ①U664.1②TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 227720 号

上海浦江教育出版社出版

地址: 上海市海港大道 1550 号上海海事大学校内 邮编: 201306

电话: 021-38284900 传真: 021-38284916

上海豪杰印刷有限公司印刷 上海浦江教育出版社发行

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm × 203 mm 印张: 5.25 字数: 165 千字

责任编辑: 谢尘 封面设计: 赵宏义

ISBN 978-7-81121-203-7 定价: 30.00 元

前 言

21 世纪,我国航运业和造船业得到迅猛发展。根据《船舶产业调整振兴规划》,到 2011 年我国造船产量达到 5 000 万吨。远洋和近海船舶运输量的剧增,使得船用润滑油对于确保船舶设备可靠运行的重要性日显突出。船舶发动机因其工作条件苛刻,且大多使用高硫劣质燃料油,对其匹配使用的润滑油有着特殊要求。

目前一些专业论著偏重于船舶机械构造或船用润滑油知识介绍,没有将润滑油作为船舶机械系统一个重要的组成部分统一考虑。本书将船舶发动机与润滑油知识结合起来,由船舶发动机构造到润滑系统进行介绍,再通过对船用发动机油应用、船用油检测技术及润滑案例进行描述,形成一条相关技术链。旨在为船舶轮机专业的学生、船舶轮机管理人员、相关机务管理人员以及油品供应人员等提供船用润滑油,尤其是船用发动机油的基本作用、选用原则以及润滑油使用管理方面的知识并提供帮助。

在本书的编写过程中,中国石化润滑油公司相关技术人员提供了大量数据支持,上海海事大学商船学院的许多老师也提供了大量帮助和指导,在此表示诚挚的感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在一些不足和误漏之处,欢迎同行批评指正。

编 者

2011 年 12 月

目 录

第一章 船用发动机的类型和润滑	1
第一节 船用发动机的类型	1
第二节 润滑的基本原理	16
第三节 船舶设备润滑系统	21
第二章 船舶润滑	24
第一节 船舶润滑油的种类	24
第二节 船舶发动机油的选用	37
第三节 船舶润滑	43
第三章 国内外船用润滑油产品	45
第一节 船用气缸油	45
第二节 船用低速机系统油	49
第三节 船用中速机油	52
第四节 船用高速机油	57
第五节 船用其他机械设备润滑油	59
第四章 润滑油的管理	95
第一节 润滑油储存和运输的管理	95
第二节 船用润滑油的使用管理	98
第五章 润滑油检测及故障诊断	115
第一节 润滑油的检测	115
第二节 故障诊断	123

第六章 船用发动机润滑油事故案例	132
案例一 某船使用劣质润滑油导致副机损坏事故	132
案例二 某船润滑油脏污导致主机抱轴事故	135
案例三 某船润滑油变质导致主机停车事故	138
案例四 某船使用假冒润滑油导致主机烧瓦事故	140
案例五 某船主机润滑油乳化事故	142
案例六 某船四冲程主机曲轴及主轴承烧损事故	144
案例七 某船冷库冷凝压缩机组连杆断裂事故	148
案例八 某船空气压缩机润滑油选择不当事故	153
参考文献	157

第一章 船用发动机的类型和润滑

第一节 船用发动机的类型

1807年,美国人富尔顿制成世界上第一艘用明轮推进的蒸汽机船“克莱蒙特”号,并在美国哈德逊河上试航成功。“克莱蒙特”号以6.4 km/h的速度航行91.4 km,开创了人类航海史上的新时代。以动力机械驱动的船舶取代依靠风帆、人力航行的船舶,为人们带来了运输上的便利,但动力机械离不开润滑油,没有良好的润滑油,机械设备的故障率会急剧上升,其工作寿命也会大大缩短。本书结合船舶动力机械的特点,介绍船舶发动机润滑油的使用和管理方面的知识。

一、蒸汽机动力装置

早期的轮船都采用蒸汽机作为动力机械。蒸汽机是将蒸汽的能量转换为机械功的往复式动力机械,它的出现引发了18世纪的工业革命。直到20世纪初,蒸汽机仍是世界上最重要的原动机,直至内燃机和汽轮机等出现才逐渐让位。

简单蒸汽机主要由汽缸、底座、活塞、曲柄连杆机构、滑阀配汽机构、调速机构和飞轮等部分组成,汽缸和底座是静止部分,见图1-1。从锅炉来的蒸汽,经主汽阀和节流阀进入滑阀室,受滑阀控制交替地进入汽缸的左侧或右侧,推动活塞运动。蒸汽机按蒸汽在活塞一侧或两侧工作,可分为单作用式和双作用式蒸汽机。

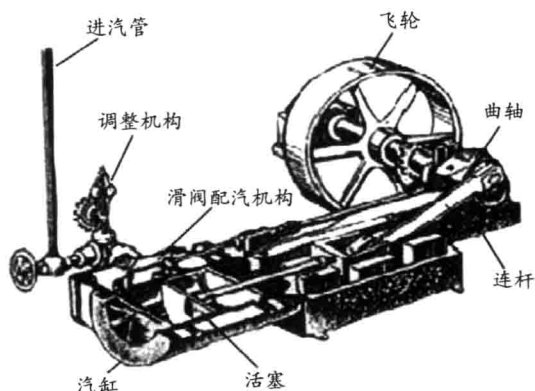


图 1-1 蒸汽机结构

蒸汽机的发展首先体现在功率和效率的提高上,而这又主要取决于各蒸汽参数值的提高。初期蒸汽机的蒸汽压力仅为 0.11~0.13 MPa,19 世纪初才达到 0.35~0.7 MPa,而 20 世纪 20 年代曾到 6~10 MPa。在蒸汽温度方面,19 世纪末还未超过 250℃,而 20 世纪 30 年代曾达到 450~480℃。在转速方面,18 世纪末瓦特蒸汽机的转速仅为 40~50 r/min,20 世纪初转速达到 100~300 r/min,个别蒸汽机曾达到 2 500 r/min。在功率方面,最初单机功率仅几千瓦,而 20 世纪初的一台船用蒸汽机的功率可达 18.4 MW。

在瓦特时代初期,连续运转的蒸汽机,按燃料热值计,其总效率不超过 3%;到 1840 年,最好的凝汽式蒸汽机总效率可达 8%。根据卡诺定律,要想提高蒸汽机的热效率,必须提高蒸汽的温度和压力,但随着各蒸汽参数值和蒸汽机功率的提高,蒸汽已不可能在一个汽缸中继续膨胀,还必须在相连接的汽缸中继续膨胀,于是出现多级膨胀的蒸汽机。蒸汽机因受到润滑油闪点的限制,所用蒸汽的最高温度一般不超过 400℃,机车、船用等移动式蒸汽机的蒸汽温度还略低一些,多数不高于 350℃。考虑到膨胀的可能性和结构的经济性,常用压力在 2.5 MPa 以下。蒸汽参数受到限制,从而也限制蒸汽机功率的进一步提高。到 20 世纪,蒸汽机最高效率为

20%以上,相比同时代的柴油机要低很多(柴油机最高可达 56%),因此蒸汽机动力装置很快被柴油机动力装置取代,至今仍然存在的船用蒸汽发动机基本上都是蒸汽轮机。

二、蒸汽轮机动力装置

利用蒸汽使叶轮转动的机器叫蒸汽轮机,由英国的查尔斯于 1884 年首先制造出来。蒸汽轮机利用从锅炉来的高温高压蒸汽,通过蒸汽喷嘴喷出,冲击汽轮机的叶片,带动机轴一起转动,见图 1-2。蒸汽轮机具有很高的转速和很大的功率,热效率为 25%~30%,主要用在大型火力发电厂和核电站中。

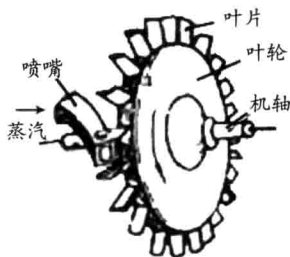


图 1-2 蒸汽轮机原理

蒸汽轮机主要由一个中央很厚的钢盘和钢盘外沿弧形叶片组成,当蒸汽喷射到叶片上时,轮机就转动起来,而且蒸汽速度越快,轮机转动得也越快。当气体从高压空间流向低压空间时,压强差越大,流动的速度越快。因此,在蒸汽轮机里由水管式锅炉过热管送来的过热蒸汽从喷嘴喷出时,体积急剧膨胀,同时压强降低、速度增快,这样的蒸汽具有很大的动能,即蒸汽的内能在喷嘴中转变为蒸汽的动能。当蒸汽喷射到叶片上时,它的动能又转变为机轴旋转的机械能。

与蒸汽机相比,在同样功率下,蒸汽轮机重量轻、体积小,不需要用曲柄和飞轮等机械装置将往复运动转变为回转运动,因此蒸

汽轮机运转时转动均匀,几乎没有振动,其转速可达 3 000 r/min。它的缺点是只能沿一个方向转动,一般不能开倒车,且必须与高压锅炉配套使用,故蒸汽轮机的使用受到一定限制,只能用在发电厂或巨型舰艇上。

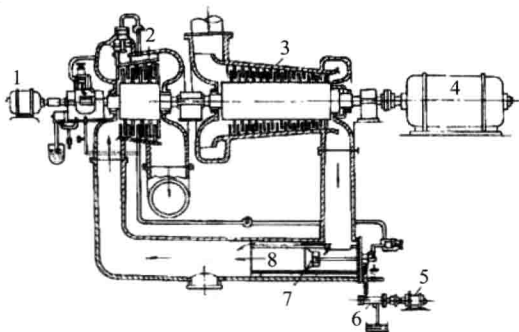
蒸汽轮机的热效率比蒸汽机高,可达 30%左右,而且回转运动比往复运动的平稳性好,也比较容易进行高效润滑,因而可靠性也较高。但因经济原因,在普通船舶上使用蒸汽轮机推进装置仍然受到限制(相比柴油机,其燃油消耗率太高)。除仍在营运的燃重油和燃煤蒸汽船外,液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船是目前唯一专门使用蒸汽轮机推进的船型。这是因为在 LNG 船上, LNG 以 -163°C 的温度装在隔热舱中运输,尽管高效隔热,但仍不可避免每天有 0.1%~2.5%的 LNG 蒸发,蒸发的 LNG 可作为双燃料主锅炉的燃料用以生产主涡轮机用的蒸汽,为船舶提供所需的推进功率。

三、燃气轮机动力装置

燃气轮机是一种旋转叶轮式热力发动机,以连续流动的气体为工质带动叶轮高速旋转,从而将燃料的能量转变为有用功的内燃式动力机械。中国在 12 世纪的南宋高宗年间就对走马灯有所记载,它实质上是涡轮机(透平)的雏形;15 世纪末,意大利人列奥纳多·达芬奇设计出烟气转动装置,其原理与走马灯相同;至 17 世纪中叶,透平原理在欧洲得到较多应用。

现代燃气轮机由压气机(压缩机)、燃烧室和燃气涡轮等组成,见图 1-3。当燃气轮机工作时,压气机从大气中连续地吸入空气并将其压缩;压缩后的空气进入燃烧室,与喷入的燃料混合后燃烧成为高温燃气,随即流入燃气涡轮中膨胀做功,推动涡轮叶轮带着压气机叶轮一起旋转;加热后的高温燃气做功能力显著提高,因而燃气涡轮在带动压气机的同时,尚有余功作为燃气轮机的输出功率。

燃气轮机由静止启动时,需用启动电动机驱动旋转,待加速到能独立运行后,启动电动机才脱开。



1—启动电动机;2—燃气轮机;3—轴流式压气机;4—发电机;
5—带动燃油泵的电动机;6—燃油泵;7—射油器;8—燃烧室

图 1-3 燃气轮机结构及工作原理

燃气初温和压气机的压缩比是影响燃气轮机效率的 2 个主要因素,提高燃气初温并相应提高压缩比,可使燃气轮机效率显著提高。20 世纪 70 年代末,压缩比最高达到 31;工业和船用燃气轮机的燃气初温最高达 $1\ 200^{\circ}\text{C}$ 左右,航空燃气轮机的燃气初温超过 $1\ 350^{\circ}\text{C}$ 。

燃烧室和涡轮不仅工作温度高,还要承受在燃气轮机启动和停机时因温度剧烈变化引起的热冲击,工作条件恶劣,故它们是决定燃气轮机寿命的关键部件。为确保有足够的寿命,这两大部件中工作条件最恶劣的零件如火焰筒和叶片等,须用镍基和钴基合金等耐高温材料制造,同时还须用空气冷却来降低零件温度。

除主要部件外,一台燃气轮机还必须有完善的调节保安系统,需要配备良好的附属系统和设备,包括启动装置、燃料系统、润滑系统、空气滤清器、进气和排气消声器等。

燃气轮机分重型和轻型 2 类。重型的零件较为厚重,大修周期长,寿命可达 10 万 h 以上;轻型的结构紧凑、质量轻,所用材料

一般较好,其中以航空发动机的结构最紧凑、质量最轻,但寿命较短。

与活塞式内燃机和蒸汽动力装置相比,燃气轮机的主要优点是小而轻。重型燃气轮机的单位功率质量一般为 $2\sim 5\text{ kg/kW}$,而航空发动机一般低于 0.2 kg/kW 。燃气轮机所占面积小,用于车、船等运输机械时,既节省空间,又可装备功率更大的燃气轮机以提高车、船速度。燃气轮机的主要缺点是效率不够高,只能达到 30% 左右,且在部分负荷下效率下降较快,空载时燃料消耗量高。因此,目前燃气轮机仅用于军舰和高速民用船舶,普通商船很少使用。

四、柴油机动力装置

柴油机是以柴油为燃料通过压缩点火燃烧的内燃机,由于其热效率能达到 50% 以上,经济性比较好,目前绝大多数的商船都选用柴油机作为船舶的推进装置。在柴油机中要完成 2 次能量转换,首先使柴油在有充足空气的条件下进入柴油机燃烧,而柴油是在高温高压下发火燃烧的,所以柴油机中的空气要达到足够高的温度,可通过压缩空气实现,因此柴油机也称为压燃式内燃机。

柴油燃烧后释放出大量热量,使燃气的温度和压力剧增,因此具有很强的膨胀做功能力,通常把这种有做功能力的高温燃气物质称为工质。工质在柴油机中膨胀,通过推动活塞做功,最终膨胀结束失去做功能力,成为废气。为让新鲜空气能再次进入柴油机中使其恢复做功能力,就要将废气排出。

柴油机要使柴油在其中燃烧做功,并能连续不断地工作,需要有进气、压缩、燃烧、膨胀和排气等 5 个过程,这 5 个过程即为柴油机的 1 个基本工作循环。5 个工作过程既可以在 4 个活塞冲程(1 个冲程为活塞上行或下行 1 次)中完成,又可以在 2 个冲程中完成,因此,柴油机可分为四冲程柴油机和二冲程柴油机。

(一) 四冲程柴油机

1. 基本结构

四冲程柴油机的基本结构见图 1-4。气缸盖上装有进气阀、排气阀和喷油器等,气缸中的活塞通过连杆与曲轴相连。

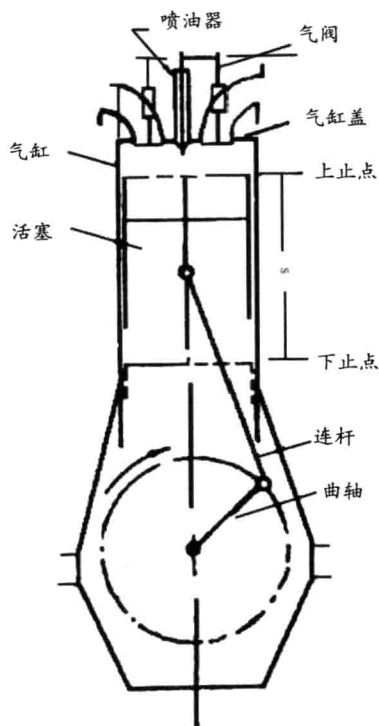


图 1-4 四冲程柴油机的基本结构

2. 工作原理

当柴油机工作时,活塞在气缸中做往复运动,通过曲柄连杆机构将这个运动转变成曲轴的回转运动。活塞运动时到达的气缸最上位置称为上止点,而到达的气缸最下位置称为下止点。活塞从上止点运动到下止点或从下止点运动到上止点称为 1 个冲程,冲

程的长度就是上止点与下止点之间的距离,一般用 S 表示。曲轴每转 1 圈,活塞完成 2 个冲程。四冲程柴油机是指柴油机的 1 个基本工作循环由 4 个冲程完成,即曲轴转 2 圈。如果曲柄半径用 R 表示,则 $S=2R$ 。

当活塞位于上止点时,活塞顶部与气缸盖之间的容积称为燃烧室容积 V_c ;当活塞位于下止点时,活塞顶部以上的全部气缸容积称为气缸总容积 V_a ;活塞在上、下止点之间移动所扫过的气缸容积称为气缸工作容积 V_s 。

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 S$$

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}$$

式中: D 为气缸直径; ε 为压缩比,即气缸总容积与燃烧室容积之比。压缩比是柴油机的重要参数之一,大型低速柴油机的压缩比一般为 11~13。

柴油机基本工作循环的 5 个过程在 4 个冲程中的进行情况见图 1-5。

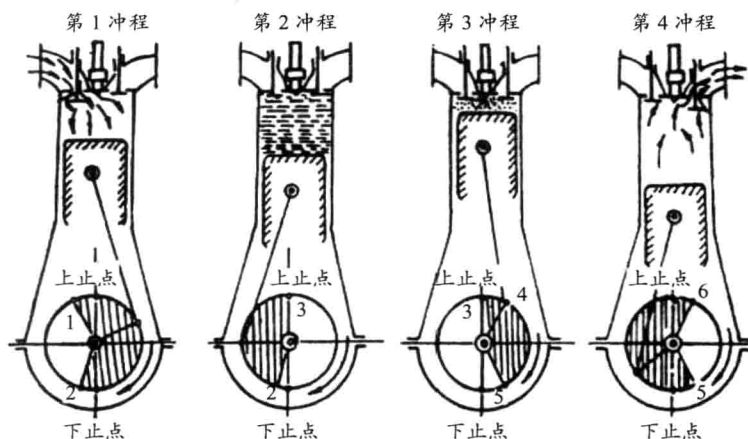


图 1-5 四冲程柴油机的工作原理

(1)第1冲程——进气冲程。活塞从上止点下行,进气阀打开,由于气缸容积逐渐增大,缸内压力降低,新鲜空气通过进气阀被吸入气缸。进气阀一般在活塞到达上止点之前已经提前打开,其开启时刻用曲柄位置表示。进气阀开启后,直到活塞运行到下止点后才关闭。

(2)第2冲程——压缩冲程。空气的压缩过程从活塞由下止点向上运动后进气阀关闭到活塞到达上止点为止。进气冲程吸入的新鲜空气经过压缩后,压力升到3~6 MPa,温度达到600~700℃。燃油的自燃发火温度一般为210~270℃,燃油在压缩后期(活塞到达上止点前)通过喷油器喷入气缸,与空气混合并在高温下自燃发火燃烧。这个冲程包括进气的延时、空气压缩、燃油的喷入、燃油空气混合以及发火燃烧过程等。

(3)第3冲程——膨胀冲程。这个冲程是燃烧的主要阶段。燃油在燃烧时,气缸内的压力和温度急剧升高,压力达到5~8 MPa,温度达到1400~1800℃,甚至更高。在燃气压力的作用下活塞被推向下行,由于气缸容积不断增大,压力开始降低,在上止点后的某一时刻,燃烧基本结束。气缸中的压力和温度随着燃气的膨胀继续下降,直到排气阀开启,膨胀结束。这时燃气压力降至2.5~4.5 MPa,温度降至600~700℃。在这个冲程中,排气阀在活塞运行到下止点前就已经打开,即膨胀冲程在下止点前就已经结束。

(4)第4冲程——排气冲程。在膨胀冲程末期,排气阀开启,废气通过排气阀排出,气缸内的压力和温度迅速下降。这时活塞仍在下行,废气靠气缸内外的压差排出气缸。活塞由下止点上行后,废气靠活塞推出气缸,这时的排气过程是在高于大气压力并且压力基本保持不变的情况下进行的。排气阀一直到活塞到达上止点后才关闭。

经过上述4个冲程,柴油机完成1个工作循环。当活塞继续运动时,又开始新的循环。四冲程柴油机的每个工作循环都要通过曲轴转2圈来完成,其中,只有第3冲程做功,在该冲程中,完成

燃油从化学能转变为热能,又从热能转变为机械能的2次能量转换;其他3个冲程都为这个工作冲程服务,且都需要供给能量以保证活塞的正常运行。所以,柴油机一般要做成多缸,这样进气、压缩和排气冲程的能量可由其他正在工作的气缸供给。但如果是单缸的柴油机,就要通过飞轮在工作冲程时储存部分能量来供给其他3个冲程。

3. 气阀正时

四冲程柴油机的进气阀和排气阀的启闭都不在上、下止点的时刻,而在上、下止点的前后某个时刻,由它们开启时间得到的角度都大于 180° 曲柄转角。这种进排气阀在上、下止点前后的启闭时刻叫做气阀正时,用曲柄转角表示气阀正时的圆图称为气阀正时圆图。如图1-6所示,进气阀在上止点前1点打开,在下止点后2点关闭;排气阀在下止点前3点开启,在上止点后4点关闭。 φ_1 为进气阀提前开启角, φ_2 为进气阀延后关闭角,它们对应的是进气过程; φ_3 为排气阀提前开启角, φ_4 为排气阀延后关闭角,它们对应的是排气过程。

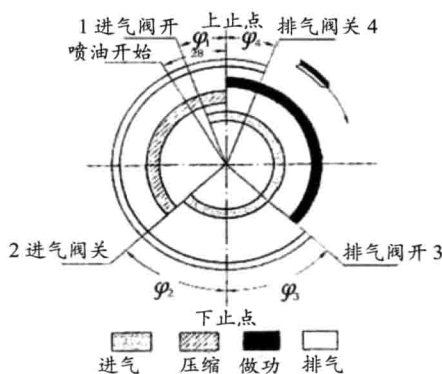


图 1-6 气阀正时圆图

进气阀的提前开启,可以减少气阀和空气惯性对进气时刻的影响,使进气在上止点附近就开始进行,且进气充分;延后关闭,则能利用气流惯性吸入更多空气。排气阀的提前开启,可以减小排气阻力,使活塞上行排气时减少排气功耗;而延迟关闭,同样是利

用排气的惯性更好地将气排干净。进气阀和排气阀在上止点前后的一段时间内同时开启，这个同时开启的曲柄转角称为气阀重叠角，即图 1-6 中的 $\varphi_1 + \varphi_4$ 。选择合适的气阀重叠角，不会使排气倒灌，反而有助于排出废气和充入空气。

(二) 二冲程柴油机

1. 工作原理

二冲程柴油机需要将柴油机的 5 个过程在 2 个冲程内完成。这 5 个过程中，燃烧和膨胀做功的冲程必不可少，压缩以满足燃油自行发火燃烧的过程也非有不可，而进气和排气是燃烧和做功的辅助过程，只要能在很短的时间内完成，就可在 2 个冲程内完成 1 个工作循环。

四冲程柴油机的进气是由于活塞下行，气缸内压力降低，空气被吸入气缸而完成的。没有这个冲程的二冲程柴油机，需要提高空气压力才能使空气进入气缸，因此，二冲程柴油机在进气系统设置扫气泵或鼓风机满足提高进气压力的要求；排气也需要由进气清扫才能彻底排除。进气和排气这 2 个过程只能在活塞位于下止点附近时完成，二冲程柴油机的工作原理见图 1-7。

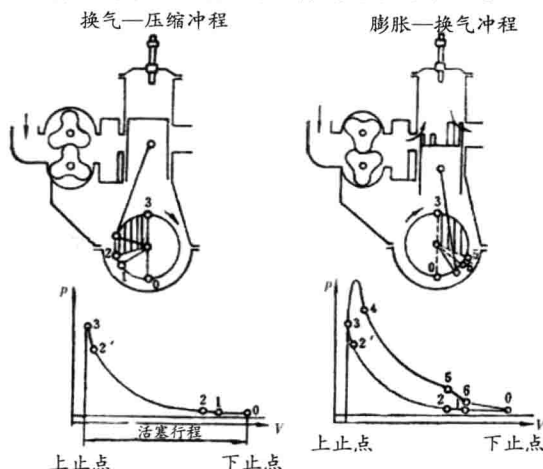


图 1-7 二冲程柴油机的工作原理