

普通高等教育规划教材



船舶柴油机

朱建元 主 编
胡以怀 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育规划教材

Chuanbo Chaiyouji

船舶柴油机

朱建元 主编

胡以怀 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地论述船舶柴油机的结构、工作原理、运行特性、维护管理、柴油机和轴系的振动与减振,以及船舶推进装置的基本理论和管理知识。结合新型柴油机介绍其使用、调整、故障分析及其处理。对燃油的处理与喷射、燃烧与排放、换气与增压、润滑与冷却、调速器及其调整、起动换向与操纵、柴油机特性、示功图测录与分析、船舶推进轴系、柴油机和轴系的振动与减振、柴油机运行管理及应急处理等进行了较为详细的阐述。

本书为轮机管理专业本科教材,也可供轮机管理人员职务适任证书培训及船机修造工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶柴油机 / 朱建元主编. —北京: 人民交通出版社,
2008. 9

ISBN 978 - 7 - 114 - 07322 - 9

I. 船… II. 朱… III. 船用柴油机 IV. U664. 121

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123784 号

普通高等教育规划教材

书 名: 船舶柴油机

著 作 者: 朱建元

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.copress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 23.25

字 数: 585 千

版 次: 2008 年 9 月第 1 版

印 次: 2008 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07322 - 9

印 数: 0001 ~ 2000 册

定 价: 46.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书是根据全国高等学校航海类专业指导委员会制定的“轮机管理专业四年制本科生指导性教学计划”和“船舶柴油机教材大纲”,以及 STCW 78 / 95 公约 和 中华人民共和国海事局 2006 年制定的“中华人民共和国海船船员适任考试大纲”的要求,结合编者多年来科研和教学经验编写的。

本书以近代船用大型低速二冲程柴油机和中速四冲程柴油机为主要典型,系统地论述船舶柴油机的结构、工作原理、运行特性、维护管理、柴油机和轴系的振动与减振,以及船舶推进装置的基本理论和管理知识。结合新型柴油机介绍其使用、调整、故障分析及其处理。对燃油的处理与喷射、燃烧与排放、换气与增压、润滑与冷却、调速器及其调整、起动换向与操纵、柴油机特性、示功图测录与分析、船舶推进轴系、柴油机和轴系的振动与减振、柴油机运行管理及应急处理等进行了较为详细的阐述,使学生具备对现代船舶柴油机维护管理、故障分析、调整和改进的知识与技能。

本书内容力求理论联系实际、阐述循序渐进,兼顾本科生教学和船员适任考试培训的要求,力图反映国内外相关领域当前的发展动向和技术水平。

本书主要作为轮机管理专业本科教材,也可供轮机管理人员职务适任证书培训及船机修造工程技术人员使用。

本书由上海海事大学朱建元教授任主编,周美荣副教授任副主编;由胡以怀教授任主审。全书共十一章,其中,第二、五~十一章由朱建元编写;第一、三、四章由周美荣编写。

本书得到上海市教育委员会科技基金资助,项目编号 06FZ039。

由于教材内容广泛,编者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2008 年 6 月

目 录

第一章 柴油机的基本知识	1
第一节 柴油机的工作原理	1
第二节 柴油机的热力循环	7
第三节 柴油机的主要性能指标	11
第四节 柴油机的分类和发展	18
第二章 柴油机的结构与主要部件	24
第一节 燃烧室部件的工作条件及负荷	24
第二节 活塞、气缸及气缸盖的构造	32
第三节 曲柄连杆机构	51
第四节 机架、机座与贯穿螺栓	70
第三章 燃油的喷射与燃烧	76
第一节 燃油	76
第二节 燃油的喷射	82
第三节 可燃混合气的形成	95
第四节 燃油的燃烧	100
第五节 柴油机的排放与净化	107
第六节 喷油设备	110
第七节 喷油设备的检查与调整	127
第四章 柴油机的换气与增压	134
第一节 换气过程	134
第二节 换气机构	140
第三节 废气涡轮增压	149
第四节 废气涡轮增压器	159
第五节 增压器的喘振和消除	165
第六节 增压系统故障及维护管理	170
第五章 燃油系统、润滑系统及冷却系统	173
第一节 燃油系统	173
第二节 低质燃油的使用和降速运行	177
第三节 离心分油机	179
第四节 润滑与润滑油	189
第五节 润滑系统	196
第六节 气缸的润滑	206
第七节 冷却系统	212

第六章 柴油机的特性及工作范围	220
第一节 概述	220
第二节 速度特性	221
第三节 推进特性	226
第四节 负荷特性	229
第五节 调速特性	230
第六节 柴油机的限制特性及工作范围	231
第七节 柴油机与螺旋桨的配合	233
第七章 示功图测录与分析	239
第一节 示功图测录仪器	240
第二节 示功图的种类和测取	243
第三节 示功图的分析与计算	245
第八章 柴油机的起动、换向、调速与操纵	253
第一节 起动装置	253
第二节 换向装置	260
第三节 柴油机的调速和机械调速器	265
第四节 液压调速器	270
第五节 电子调速器	283
第六节 调速器的维护管理	286
第七节 操纵系统	288
第九章 船舶推进装置	293
第一节 船舶推进装置概述	293
第二节 传动轴系的组成和检查	296
第三节 传动轴系的结构	302
第四节 齿轮减速箱和联轴节	309
第五节 螺旋桨装置	314
第六节 传动轴系的管理	319
第十章 柴油机及轴系的振动与减振	321
第一节 曲柄连杆机构的运动及作用力	321
第二节 柴油机的振动和平衡	326
第三节 轴系的扭转振动特性和减振	332
第四节 轴系的纵向振动特性和减振	342
第十一章 柴油机的运行管理及应急处理	348
第一节 备车与机动操纵	348
第二节 运行中的管理和完车	350
第三节 紧急停车和倒车	354
第四节 柴油机应急运行时的管理	355
第五节 柴油机运行的主要故障与处理	358

第一章 柴油机的基本知识

第一节 柴油机的工作原理

在各种动力机械中,柴油机由于热效率最高,功率范围宽广,起动迅速,维修方便,运行安全,使用寿命长,因而得到广泛应用,在国民经济和国防建设中处于重要地位。特别在船舶方面,柴油机作为主机和辅机更是占统治地位。柴油机是目前世界上船舶使用最为普遍的动力装置,在一般大中型民用船舶中,有 90% 以上使用柴油机作为主推进装置,只有在一些军用船、特种船舶和个别货船(比如一些液化汽船和运煤船等)使用燃气轮机、蒸汽机等。

一、柴油机的基本概念

1. 热机

热机是把热能转换成机械能的动力机械,它的基本工作原理是:燃料在一个特设的装置中燃烧,将化学能转变为热能以加热工质,然后将这种具有热能的工质导入发动机,把工质的热能转变为机械能。显然,在热机的工作过程中进行着两次的能量转换,即将燃料的化学能转变为热能,再将热能转变为机械能。根据燃料燃烧场所的不同,热机又可分为外燃机和内燃机两大类。柴油机、汽油机、蒸汽轮机及蒸汽机是热机中较典型的机型。

2. 外燃机与内燃机

在外燃机(如蒸汽机)中,燃料的燃烧发生在机器外部特设的锅炉中,燃料燃烧时化学能转变为燃烧产物的热能,并将此热能通过锅炉壁传给水,使水变成蒸汽,再将蒸汽引入蒸汽机内,膨胀作功,使水蒸气的热能转变为机械能推动机械运动。在蒸汽机中推动机械做功的工质为水蒸气,在燃气和水的热传递过程中存在着较大能量损失,因此外燃机的热效率相对较低。往复式蒸汽机和蒸汽轮机属于外燃机。

在内燃机中燃料的燃烧是在机器内部进行的,燃烧产生的化学能转变为燃烧产物的热能,燃烧产物膨胀直接推动机械运动作功,燃烧产物(燃气)就是作功的工质。显然在内燃机中两次能量的转换过程均发生在机器内部。由于采用内部燃烧,从能量转换角度看,内燃机能量损失小,具有较高的热效率,另外,由于内燃机不需要庞大的外围锅炉设备,在尺寸和重量等方面比外燃机具有优越性,因而在与外燃机的竞争中处于有利地位。内燃机按运转方式和使用燃料的不同可分为柴油机、汽油机、煤气机和燃气轮机等。

3. 柴油机

柴油机和汽油机均属于往复式内燃机,它们都具有内燃机的基本优点,但又具有各自的工作特点。因而它们在工作原理、经济性以及使用范围上均有差异,表 1-1 即为柴油机与汽油机的比较。

由此可以看出,柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。柴油机与其他热机相比,除热效率高外,还具有如下优点:

(1) 功率范围广。单机功率可从 1kW 到 68 000kW 不等, 因此其应用领域十分广泛。

柴油机与汽油机的比较

表 1-1

	柴 油 机	汽 油 机
燃料(燃烧工质)	柴油或劣质燃油	汽油
点火方式	压缩自行燃烧	电火花塞点燃
混合气形成方式	气缸内混合	气缸外混合
压缩比	12 ~ 22	6 ~ 10
有效热效率	0.30 ~ 0.55	0.15 ~ 0.40

(2) 机动性好。正常启动只需 3 ~ 5s 的时间, 并能很快达到全负荷, 有宽广的转速负荷调节范围, 并能直接反转, 操作简便, 能适应船舶航行的各种要求。

(3) 尺寸小、重量轻。柴油机属内燃机, 不需要锅炉等大型的外围附属设备, 适合于在交通运输等动力装置中应用, 特别对于船舶, 有利于机舱的布置。

柴油机同时也存在如下的缺点:

(1) 存在机身振动、轴系扭转振动和噪声。

(2) 某些部件的工作条件恶劣, 如在高温、高压并有冲击性负荷的条件下工作。

4. 柴油机的基本结构参数(图 1-1)

(1) 上止点(T. D. C)。活塞在气缸中运行的最高位置, 也就是活塞离曲轴中心线最远的位置。

(2) 下止点(B. D. C)。活塞在气缸中运行的最低位置, 也就是活塞离曲轴中心线最近的位置。

(3) 曲柄半径 R 。曲轴的曲柄销中心线与主轴颈中心线的距离。

(4) 活塞行程 S 。指活塞从上止点运行到下止点间的直线距离, 简称行程。它等于曲轴曲柄半径 R 的两倍。活塞运行一个行程时曲轴转动 180° 。

(5) 气缸直径 D 。气缸的内径, 简称缸径。

(6) 行程缸径比 S/D 。活塞行程 S 与气缸直径 D 的比值。

(7) 余隙高度 h_c 。活塞在上止点时活塞的最高顶面与气缸盖底平面之间的垂直距离。

(8) 压缩容积 V_c 。活塞在气缸内位于上止点时, 在活塞顶上方的全部空间容积, 也称为燃烧室容积。

(9) 气缸工作容积 V_s 。活塞在气缸中从上止点运行到下止点时所扫过的容积。显然:

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

(10) 气缸总容积 V_a 。活塞在气缸内位于下止点时, 活塞顶以上的气缸全部容积。显然:

$$V_a = V_s + V_c \quad (1-2)$$

(11) 压缩比 ε 。气缸总容积 V_a 与压缩容积 V_c 之比值, 亦称几何压缩比。即:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (1-3)$$

目前, 柴油机的压缩比一般 ε 为 12 ~ 22, 中、高速柴油机的 ε 高于低速机的。

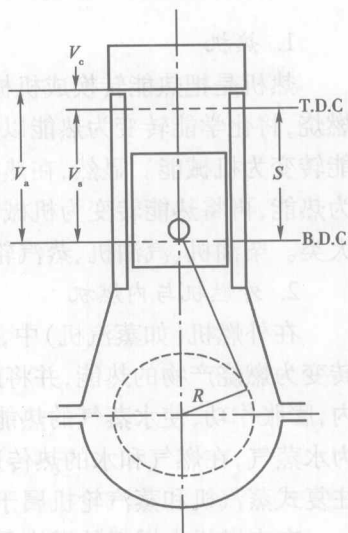


图 1-1 柴油机基本结构参数

二、四冲程柴油机的工作原理

根据柴油机的工作特点,燃油在柴油机气缸中燃烧作功必须通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程。包括上述五个过程的全部热力循环过程称为柴油机工作过程,包括上述五个过程的周而复始的循环叫工作循环。对往复式柴油机可用 $p-V$ 示功图清楚地描绘其工作循环中各过程的进行情况。现将每一工作循环按活塞行程分为四个阶段(图 1-2)。

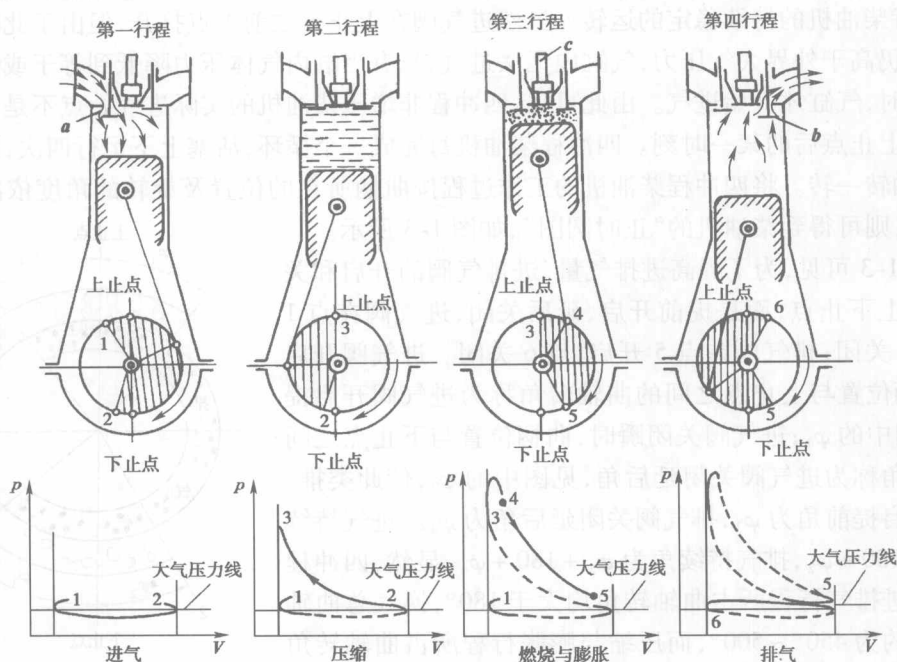


图 1-2 四冲程柴油机工作原理图

1. 进气行程

活塞从上止点下行,进气阀 a 已打开。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),进气阀开启的延续角度 φ_{1-2} (图中阴影线部分) 约为 $220^\circ \sim 250^\circ$ 。

2. 压缩行程

活塞从下止点向上运动,自进气阀 a 关闭(曲柄到达点 2)开始压缩,一直到活塞到达上止点(曲柄到达点 3)为止。第一行程吸入的新鲜空气经压缩后,压力增高到 $3 \sim 6\text{MPa}$,温度升至 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ (燃油的自燃温度为 $210 \sim 270^\circ\text{C}$)。将压缩终点时的压力和温度分别用符号 p_c 和 t_c 表示。在压缩过程的后期由喷油器 c 喷入气缸的燃油与高温空气混合、加热,并自行发火燃烧。曲轴转角 φ_{2-3} 表示压缩过程,约为 $140^\circ \sim 160^\circ$ 。

3. 燃烧和膨胀行程

活塞在上止点附近,由于燃油猛烈燃烧,使气缸内的压力和温度急剧升高,压力约达 $5 \sim 8\text{MPa}$,甚至 13MPa 以上,温度约为 $1400 \sim 1800^\circ\text{C}$ 或更高些。将燃烧产生的最高压力称最高爆发压力,简称爆压,用 p_z 表示。高温高压的燃气(即工质)膨胀推动活塞下行而作功。由于气缸容积逐渐增大使压力下降,在上止点后的某一时刻(曲柄位于点 4)燃烧基本结束,此时温度接近最高点。膨胀一直到排气阀 b 开启时结束。与进气阀相同,排气阀 b 总是在活塞到达下

止点前开启(曲柄位于点5),曲轴转角 φ_{3-4-5} 表示燃烧和膨胀过程。

4. 排气行程

在上一行程末,排气阀 b 开启时,活塞尚在下行,废气靠气缸内外压力差经排气阀排出。当活塞越过下止点开始上行时,活塞将废气推出,排气阀一直延迟到活塞越过上止点后(曲柄位于点6)才关闭。排气过程用曲轴转角 φ_{5-6} 表示,约为 $230^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 。

在上止点之前,排气阀还没有关闭,进气阀再次打开,又重复第一行程,开始第二个工作循环,以维持柴油机的持续稳定的运转。虽然进气阀在上止点之前1点打开,但由于此时缸内的气体压力仍高于外界大气压力,气缸内无法进气,只有当缸内气体压力降低到等于或低于外界大气压力时,气缸才开始进气。由此可见,四冲程非增压柴油机的实际进气始点不是在上止点前而是在上止点后的某一时刻。四冲程柴油机每完成一个循环,活塞上下运行四次,曲轴转两转,凸轮轴转一转。将四冲程柴油机的工作过程按曲柄所在的位置及旋转的角度依次画在一个圆图上,则可得到柴油机的“正时圆图”,如图1-3所示。

由图1-3可见,为了提高进排气量,进排气阀的开启和关闭均不在上下止点,而是提前开启、延后关闭,进气阀在点1开启、点2关闭;排气阀在点5开启、点6关闭。进气阀开启瞬时,曲柄位置与上止点之间的曲轴转角称为进气阀开启提前角,见图中的 φ_1 ;进气阀关闭瞬时,曲柄位置与下止点之间的曲轴转角称为进气阀关闭延后角,见图中的 φ_2 ;依此类推,排气阀开启提前角为 φ_3 ,排气阀关闭延后角为 φ_4 。进气持续角为 $\varphi_1 + 180 + \varphi_2$,排气持续角为 $\varphi_3 + 180 + \varphi_4$,显然,四冲程柴油机的进排气行程所占曲轴转角均大于 180° ,换气总曲轴转角角度约为 $450^{\circ} \sim 500^{\circ}$,而压缩与膨胀行程所占曲轴转角均小于 180° 。凸轮作用角为相应各过程持续角的 $1/2$ 。

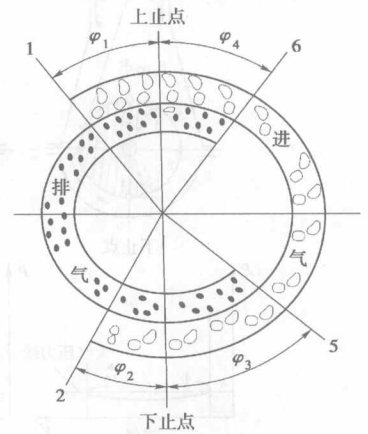


图1-3 气阀正时圆图

由图1-3还可看到,在上止点前后的一段曲轴转角内,进、排气阀有一个同时打开的角度,称为进、排气重叠角(气阀重叠角)。它等于进气提前角+排气滞后角,即 $\varphi_1 + \varphi_4$,由于此时气缸与进、排气管相通,当排气按惯性流动将近停止时,因新鲜空气冲入气缸,继续将废气清扫出气缸,有利于将气缸内的废气彻底清除,故常称之为“燃烧室扫气”。此时,由于进入气缸的新群空气温度较低,当它扫过时可以降低柴油机燃烧室部件的热负荷。当然这时不可避免地会有部分新鲜空气从排气阀流失而降低空气利用率。增压柴油机因气缸热负荷大,因而常采用加大气阀重叠角的办法,以改善柴油机的工作条件、延长柴油机承受高温部件的工作寿命。

气阀正时不仅取决于柴油机类型、转速、进排气阀凸轮的形状,在实际运转中还由于磨损、间隙以及震动等原因而发生改变,轮机管理人员必须定期进行测量和调整。柴油机气阀正时和气阀重叠角的范围列于表1-2。

四冲程柴油机气阀重叠角度

表1-2

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 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$	上止点后 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$
重叠角	$25^{\circ} \sim 50^{\circ}$		$80^{\circ} \sim 130^{\circ}$	

三、二冲程柴油机的工作原理

二冲程柴油机把进气、压缩、燃烧、膨胀、排气过程紧缩在活塞的两个活塞行程内完成,使曲轴旋转一周就完成一个工作循环。

二冲程柴油机与四冲程柴油机不同,其气缸上设有气口,图 1-4 中气缸右侧为排气口,左侧为进气口。排气口比进气口略高,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)要比大气压力高。

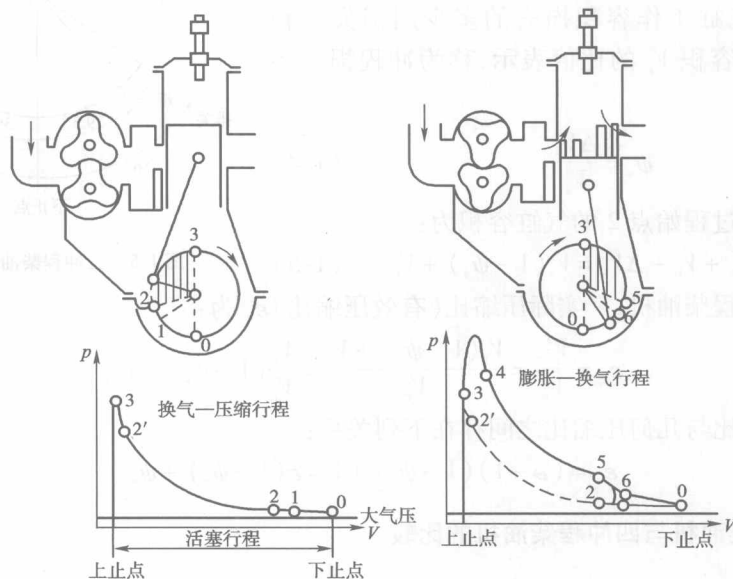


图 1-4 二冲程柴油机工作原理

1. 换气—压缩行程

活塞由下止点向上运动。在活塞遮住进气口之前,新鲜空气通过进气口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闭时(点 1),新鲜空气就停入气缸。当排气口被活塞遮闭后(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,燃烧仍在继续猛烈地进行,到点 4 才基本结束。高温高压的燃气膨胀推动活塞下行作功。当活塞下行将排气口打开时(点 5),由于此时缸内的燃气的压力和温度仍较高,分别约为 $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 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。新鲜空气便通过进气口充入气缸,清扫废气,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。

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)

通常情况下,二冲程柴油机的燃烧和膨胀行程约占 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 曲轴转角;换气过程约占 $130^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 曲轴转角;压缩行程约占 120° 曲轴转角。

则实际压缩过程始点 2 的气缸容积为:

图 1-5 二冲程柴油机正时圆图

$$\varepsilon_e = \frac{V'_a}{V_c} = \frac{V_s(1 - \psi_s) + V_c}{V_c} = \frac{V_s}{V_c}(1 - \psi_s) + 1 \quad (1-6)$$
$$\varepsilon_e = (\varepsilon - 1)(1 - \psi_s) + 1 = \varepsilon(1 - \psi_s) + \psi_s \quad (1-7)$$

从四冲程柴油机和二冲程柴油机的基本工作原理出发,可以得到以下结论:

(2) 二冲程机曲轴转一转就有一个工作冲程,因而在相同工作条件下它的回转要比四冲程机均匀,飞轮尺寸小,输出功率较四冲程机大;但由于作功频繁,燃烧室部件的热负荷比四冲程的高,并给高增压带来困难。

(4) 对于两台气缸尺寸及转速相同的非增压柴油机,理论上二冲程的作功能力为四冲程的 2 倍,但由于二冲程机存在冲程损失容积,使有效膨胀行程缩短,再加上换气质量差及扫气泵消耗曲轴的有效功,使得二冲程机的功率仅约为四冲程的 1.6~1.7 倍。

五、二冲程增压柴油机的工作原理

预先对新鲜空气进行压缩的压气机,可以由柴油机的曲轴通过齿轮等机械驱动,这种增压

方式称机械增压;也可由柴油机气缸排出的废气的能量在涡轮机中膨胀作功,由涡轮机来驱动,称废气涡轮增压。采用机械增压方法后,在保持柴油机原结构尺寸的情况下,虽然功率得到提高,但由于增压器要消耗曲轴的有效输出功,使柴油机的经济性的提高受到了限制,效率较低,故目前已不采用;而废气涡轮增压既能提高柴油机平均有效压力 p_e 和功率 P_e (单位重量功率提高,单位功率重量降低),同时又可降低油耗率,提高柴油机的经济性,所以说它是一种最好的柴油机增压方式。

按照增压压力 p_k (绝对压力)的高低增压可分为低、中高、超高四级。低增压 $p_k \leq 0.15\text{MPa}$,中增压 $p_k = (0.15 \sim 0.25)\text{MPa}$,高增压 $p_k = (0.25 \sim 0.35)\text{MPa}$ 。超高增压 $p_k > 0.35\text{MPa}$ 。当非增压柴油机的有效功率为 P_e ,而同一柴油机的增压机有效功率为 P_{ek} 时,增压机功率的提高幅度可用增压度 k 表示。 k 为功率的增额 ($P_{ek} - P_e$) 与原有效功率 P_e 之比,即 $k = (P_{ek} - P_e)/P_e$ 。一般 $k = 50\% \sim 300\%$,可见,提高增压度,可显著提高柴油机的有效功率,但随着增压度的不断提高,柴油机的机械负荷和热负荷也都将增大,目前,它已成为限制废气涡轮增压柴油机提高增压度的主要因素。

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图。它的特点如下:

新鲜空气经入口 f 进入离心式压气机 e ,经压气机压缩后压力和温度升高,然后由连接管 g 经冷却器冷却后进入进气管 h 和扫气箱 i ,当活塞打开气缸下部的扫气口 a 时被压缩的新鲜空气进入气缸。而废气则通过气缸盖上的排气阀 b 排出气缸,经入口 j 进入废气涡轮机 d ,废气涡轮从废气中获得能量而带动压气机高速回转。新鲜空气在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。至于换气过程,则与非增压的二冲程柴油机相似。由于排气阀置于气缸盖中央,通常在排气阀两侧斜装两个喷油器,如图中 c 所示。四冲程增压柴油机的工作原理和二冲程基本相同,只是四冲程柴油机没有扫气箱,增压空气直接通过进气阀进入气缸。

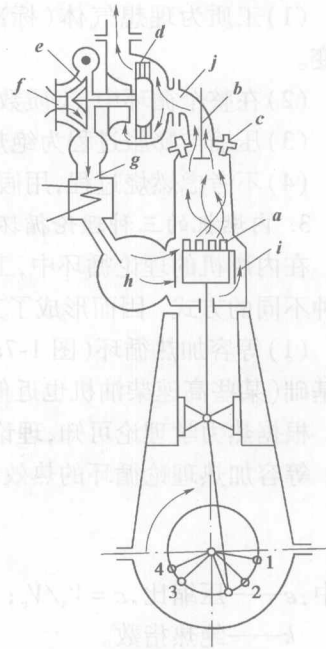


图 1-6 废气涡轮增压二冲程柴油机
a-扫气口;b-排气阀;c-喷油器;d-废气涡轮机;e-离心式压气机;f-入口;g-管;h-进气管;i-扫气箱;j-入口

第二节 柴油机的热力循环

一、内燃机的理论循环

内燃机实际循环在进行中所产生的一系列物理化学变化过程是非常复杂的。若直接对实际循环作全面研究,那必然容易被种种变化万千的现象所困惑,以致茫然失措,无从着手。这时,则需要借助于理论循环,而这些理论循环是人们根据内燃机实际工作过程所表现的特征,予以科学抽象,经过适当的假定和简化而建立起来的。

1. 研究理论循环的目的

(1) 用比较简单的理论公式来说明各基本热力学参数间的关系,以明确提高理论循环热效率和理论循环平均压力的基本途径。

(2) 确定极限的循环热效率,以用来判断实际内燃机的经济性和工作过程进行的完善程度。

(3) 有利于比较各种热力学循环的经济性和动力性。

2. 内燃机的理论循环的简化假定

(1) 工质为理想气体(标准状态的纯空气),在整个循环中工质的物理、化学性质保持不变。

(2) 在整个循环中,工质数量保持不变,不更换,故无进、排气过程及漏气损失。

(3) 压缩与膨胀过程为绝热过程,与外界没有热交换,也不存在摩擦。

(4) 不考虑燃烧过程,用假想的定容放热和定容或定压加热代替实际的换气和燃烧过程。

3. 内燃机的三种理论循环

在内燃机的理论循环中,工质的放热过程一般都是在等容方式下进行的,而吸热过程则有三种不同的方式,因而形成了三种不同的理论循环:

(1) 等容加热循环(图 1-7a)。等容循环也叫奥托循环,是各种汽油机、煤气机的热力学计算基础(某些高速柴油机也近似按此循环工作)。

根据热力学理论可知,理论循环的 $p-V$ 示功图面积既表示一个循环对外作理论功的大小。等容加热理论循环的热效率 η_t 可写成:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (1-8)$$

式中: ε ——压缩比, $\varepsilon = V_a/V_c$;

k ——绝热指数。

可见等容加热循环的热效率只随压缩比 ε 和绝热指数 k 的变化而变化。由于绝热指数 k 在实际循环中变化不大,因此热效率 η_t 主要随压缩比 ε 的增加而增加。压缩比的提高在实际情况下是有一定限制的。

(2) 等压加热循环(图 1-7b)。等压循环也叫狄塞尔循环,早期的空气喷射式柴油机即近似按此循环工作。等压加热理论循环的热效率 η_t 可写成:

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} k (\rho - 1)} \quad (1-9)$$

式中: ρ ——预膨胀比, $\rho = V_z/V_c$ 。

可见等压加热循环的热效率随着压缩比 ε 、绝热指数 k 和预膨胀比 ρ 的变化而变化。 ε 与 k 的影响与等容加热循环中的情况相同。 ρ 对循环热效率的影响,从式(1-9)可以看出,预膨胀比 ρ 增大,将使热效率 η_t 下降,而 ρ 的大小标志着内燃机负荷的大小。因此,按等压加热循环的内燃机,其负荷增加将会使热效率下降。

(3) 混合加热循环(图 1-7c)。现代柴油机基本都是按混合加热循环工作的。混合加热理论循环的热效率 η_t 可写成:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} \quad (1-10)$$

式中: λ ——压力升高比, $\lambda = P_z/P_c$ 。

可见混合加热循环的热效率随压缩比 ε 、压力升高比 λ 和绝热指数 k 的增加而提高,随预膨胀比 ρ 的增加而降低。

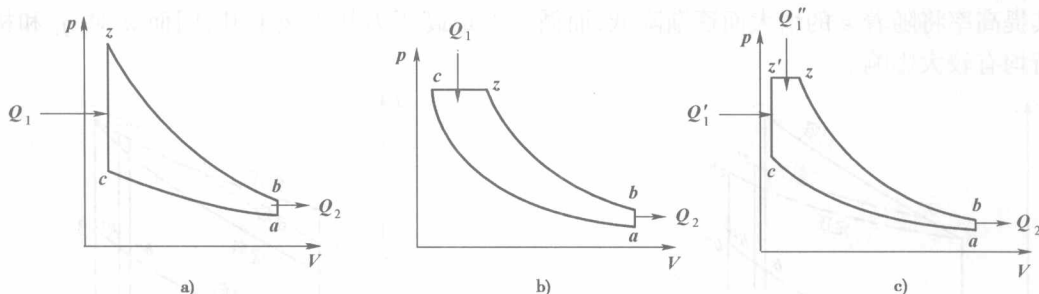


图 1-7 理论循环 $p-V$ 示功图

a) 等容加热循环; b) 等压加热循环; c) 混合加热循环

废气涡轮增压柴油机由于气缸排出的废气不是流入大气,而是流入涡轮继续膨胀做功;而且压缩空气的压气机不是由柴油机曲轴驱动,而是由废气涡轮驱动,其理想循环的 $p-V$ 示功图如图 1-8 所示,废气涡轮增压柴油机的理想循环近似于继续膨胀混合加热循环。

除理论循环热效率外,还有一个重要的参数是平均压力 p_t ,它表征单位气缸工作容积的作功能力。

$$p_t = \frac{W_{th}}{V_s} = \frac{p_a \cdot q_1}{RT_a} \cdot \eta_t \quad (1-11)$$

式中: W_{th} ——一个循环所作理论功;

V_s ——气缸工作容积;

p_a ——压缩始点空气压力;

T_a ——压缩终点空气压力;

q_1 ——单位质量工质吸入热量;

R ——气体常数。

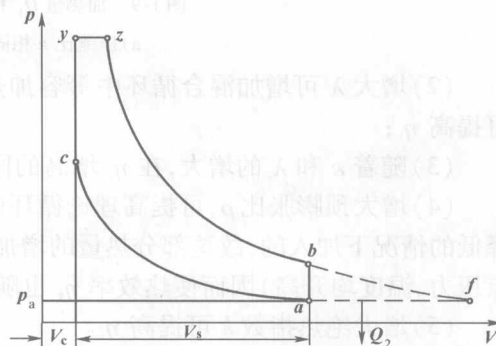


图 1-8 继续膨胀混合加热循环

可见理论循环的平均压力 p_t 随 p_a 、 q_1 、 η_t 的提高和 T_a 的降低而增加。

4. 三种理想循环热效率 η_t 的比较

在加热量 Q_1 相同的情况下,对三种加热循环的 η_t 进行比较:

(1) 如果压缩比 ε 相同,则可以从图 1-9a) 的温熵图来进行比较,该图是压缩比 ε 为 14 时绘制的。在相同的 Q_1 及 ε 下从三种循环的曲线来分析可知,等容加热循环($\rho = 1$)的热效率 η_t 最高;等压加热循环($\lambda = 1$)的热效率最低;而混合加热循环的热效率则位于两者之间的中间区域。

但实际上按等容加热循环工作的汽油机,其压缩比较低,而按混合加热循环或等压加热循环工作的柴油机,其压缩比较高。因此实际上柴油机的热效率比汽油机的要高。

(2) 如果最高爆发压力 p_z 相同,则可以从图 1-9b) 的温熵图来进行比较,在相同的 Q_1 及 p_z 下,等容加热循环的压缩比较低,放热量较大,而等压加热循环的压缩比较高,放热量少。因此这时等压加热循环的热效率最高,等容加热循环的热效率最低,而混合循环的热效率则介于二者之间。

5. 对理论循环热效率 η_t 进行热力学分析的结论

(1) 增加压缩比 ε 可提高工质的最高温度, 增加了发动机的膨胀比, 从而提高热效率 η_t , 但其提高率将随着 ε 的增大而逐渐降低, 而循环的最高压力却迅速上升, 因而 ε 对 η_t 和机械负荷均有较大影响。

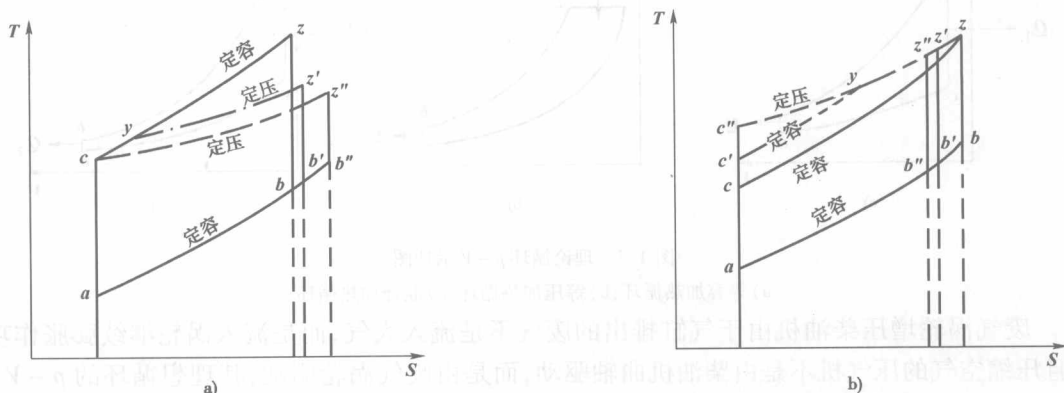


图 1-9 加热量 Q_1 相同时, 三种理想循环 η_{th} 的比较

a) 压缩比 ε 相同; b) 最高爆发压力 p_z 相同

(2) 增大 λ 可增加混合循环中等容加热量, 而减少等容放热量, 提高了热量利用率, 因而可提高 η_t ;

(3) 随着 ε 和 λ 的增大, 在 η_t 增高的同时, 将导致循环最高压力 p_z 也急剧上升;

(4) 增大预膨胀比 ρ , 可提高理论循环的平均压力 p_t , 但由于等压加热量是在膨胀比逐渐降低的情况下加入的, 故这部分热量的增加将使等容放热量增大 (即工质膨胀不充分, 膨胀终点压力、温度均升高) 因而使热效率 η_t 也随之降低;

(5) 增大绝热指数 k 可提高 η_t 。

以上各点结论虽然是从研究理论循环中得出, 但仍具有指导意义和实用价值。

二、柴油机的实际循环

在柴油机的实际工作循环中存在着许多理论循环中不曾考虑的损失, 使实际工作循环无论如何也达不到理论循环那样高的工作指标。为了改善实际循环, 减少与理论循环指标的差异应分析比较两种循环的差异所在以及引起各种损失的原因。

1. 工质的影响

理论循环中的工质是理想气体, 而实际循环中的工质是空气和燃烧产物。由于空气和燃烧产物在循环中成分的变化、工质比热的变化及在高温下的分解等因素的影响, 将使燃烧压力和温度降低, 使得在同样加热量下, 实际循环的作功能力和热效率明显下降。但这一因素对实际循环的影响很难在管理中加以改变。

2. 燃烧损失

理论循环中工质的高温高压是由从高温热源吸入热量 Q_1 达到, 而在实际循环中是由燃料的燃烧达到, 由此必然存在着在膨胀中仍进行燃烧的后燃现象以及因供气不足而存在的燃烧不完全现象, 使燃烧膨胀线的位置下移。

3. 气缸壁的传热损失

理论循环中不计工质与气缸壁间的热交换而简化为绝热压缩和绝热膨胀。实际循环中无

论在压缩过程或膨胀过程,缸内工质与缸壁之间均存在着复杂的热交换过程,均为多变过程,压缩或膨胀初期工质吸热,压缩或膨胀后期工质向外散热,而且其总趋势均向缸壁散热,因此压缩终点压力必然低于绝热压缩终点压力,膨胀终点气缸内压力高于绝热膨胀终点压力。

4. 换气损失

理论循环是由热源混合加热和向冷源等容放热,无需进行工质替换。而实际循环必须排出废气并吸入新鲜空气。在排气中由于排气阀提前开启而使膨胀终点温度提高,膨胀功减少,再加上进、排气过程所消耗的功,使得换气损失在柴油机的各项损失中影响较大,而且是不可避免的,它也降低了实际循环的作功能力。

5. 其他损失

如工质漏泄损失、工质的涡动损失,以及因实际燃烧速度与活塞高速运动间的配合不当而偏离理论的等压加热、等容加热过程等,均造成实际循环作功能力下降。

第三节 柴油机的主要性能指标

柴油机的性能指标,包括动力性指标、经济性指标、重量和外形尺寸指标、排气污染指标等。

柴油机的动力性指标包括:平均指示压力 p_i 、指示功率 P_i 、平均有效压力 p_e 和有效功率 P_e ;柴油机的经济性指标包括:指示耗油率 g_i 、指示热效率 η_i 、有效耗油率 g_e 和有效热效率 η_e 。

按照另一分类方式还可将其分为指示指标与有效指标。其中平均指示压力 p_i 、指示功率 P_i 、指示热效率 η_i 、指示耗油率 g_i 为指示指标;平均有效压力 p_e 、有效功率 P_e 、有效耗油率 g_e 和有效热效率 η_e 为有效指标。

指示指标是以气缸内燃气对活塞所作功为基础的指标。它只反映气缸内部工作过程进行的完善程度,而不涉及柴油机本身的一系列机械损失,即燃料燃烧后热能转变为功的有效程度。用各种示功器所测量绘制的 $p-V$ 或 $p-\phi$ 示功图,就是气缸内各工作过程的压力变化情况。指示指标主要是从示功图测量计算而得出的。

有效指标是以柴油机输出轴上所得到的有效功为基础的指标,即考虑到通过曲柄—连杆机构和其他传动机构的功率传递损失后的真正有效的指标。有效指标才是真正标志柴油机的作功能力和经济性的指标。

一、动力性指标

1. 平均指示压力 p_i

1) 定义

平均指示压力是气缸中假定的一个不变的平均压力,它推动活塞在一个行程内所作的功与一个工作循环的指示功 L_i 相等,把这个假定不变的压力称为平均指示压力。如图 1-10 所示。则平均指示压力 p_i 的计算方法如下:

指示功:

$$L_i = p_i F_p S \quad \text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J} \quad (1-12)$$

则平均指示压力:

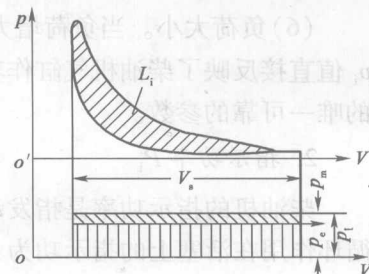


图 1-10 平均指示压力示意图