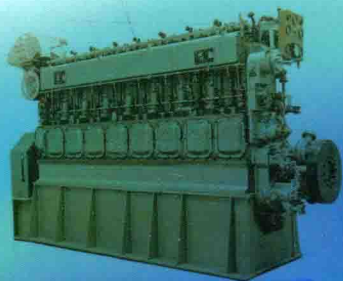




船舶柴油机结构

安士杰 欧阳光耀 编著 ■



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船舶柴油机结构

安士杰 欧阳光耀 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书为国家精品课程教材。

本书系统论述船舶柴油机基本组成、典型结构、部件设计要求以及使用管理要求的基本理论和管理知识。以典型船用柴油机结构为例对船用柴油机燃烧室组件、动力传递组件、换气系统、燃油系统、增压系统、调速系统、润滑系统、冷却系统以及启动系统进行了部件结构分析以及设计基本要求分析。全书内容紧密联系现有船舶柴油机实际结构,力求做到理论与实际相结合,讲述深入浅出,图文并茂,通俗易懂。

本书可作为内燃机专业以及轮机工程专业的本科教材,又可以作为内燃机设计、制造、维修专业技术人员以及轮机管理技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机结构/安士杰,欧阳光耀编著. —北京:国防工业出版社,2015. 10
ISBN 978-7-118-10217-8

I. ①船... II. ①安... ②欧... III. ①船用柴油机—结构 IV. ①U664. 121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 249503 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 335 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

本书是以船舶柴油机特别是高速大功率柴油机为典型,辅以中低速大型船用柴油机,系统论述船舶柴油机基本组成、典型结构、部件设计要求以及使用管理要求的基本理论和管理知识。对船舶柴油机主体机件、燃油系统、增压系统、调速系统以及润滑、冷却系统都有较为详细的阐述。

本书旨在打牢基础、拓宽专长、突出本专业的高新技术,在内容上既着重基本概念和典型结构,又反映了国内外船舶柴油机的当前的发展方向和技术水平,使学生学习之后,对船舶柴油机结构有比较深入的理解。

本书共10章,第1章、第2章由安士杰副教授执笔,第3章、第4章由欧阳光耀教授、杨昆讲师执笔,第5章、第6章由赵建华副教授、汪宏伟讲师执笔,第7章由刘振明讲师执笔,第8章~第10章由张萍副教授、白禄峰讲师执笔,全书由安士杰副教授统稿,由欧阳光耀教授审阅。编写过程中,得到了常汉宝教授、李育学副教授的帮助,在此表示感谢。

限于编者的学识经验,书中内容难于覆盖所有相关技术问题,存在不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 柴油机基本概念	1
1.1.1 柴油机的定义	1
1.1.2 柴油机的基本结构	3
1.1.3 柴油机基本结构参数	4
1.2 柴油机工作原理	5
1.2.1 四冲程柴油机的工作原理	5
1.2.2 二冲程柴油机的工作原理	8
1.2.3 增压柴油机的工作特点	11
1.3 柴油机的主要性能指标	12
1.3.1 动力性	12
1.3.2 经济性	14
1.3.3 可靠性	15
1.3.4 紧凑性	17
1.3.5 环保性	18
1.4 船用柴油机的分类和发展	18
1.4.1 柴油机的分类	18
1.4.2 现代柴油机的结构特点	22
1.4.3 现代柴油机提高经济性的主要途径	23
第 2 章 燃烧室组件	25
2.1 燃烧室组件的工作条件	25
2.1.1 工作条件	25
2.1.2 承受的负荷	27
2.2 气缸	36

2.2.1	气缸的构造	36
2.2.2	气缸套的润滑与冷却	39
2.2.3	气缸套的磨损与穴蚀	39
2.2.4	典型气缸结构	41
2.3	气缸盖	45
2.3.1	气缸盖的结构形式	46
2.3.2	气缸盖的防漏措施	46
2.3.3	气缸盖的材料	46
2.3.4	典型气缸盖结构	47
2.4	活塞组件	50
2.4.1	活塞	51
2.4.2	活塞环	61
2.4.3	活塞销	66
第3章	动力传递组件	69
3.1	连杆	69
3.1.1	单列式柴油机连杆	70
3.1.2	V形柴油机连杆	75
3.1.3	十字头式柴油机连杆	80
3.2	曲轴	85
3.2.1	曲轴的组成及基本构型	86
3.2.2	曲柄的排列及发火次序	90
3.2.3	曲轴实例	91
3.2.4	曲轴减振器	94
3.3	机体	97
3.3.1	机体的主要结构形式	97
3.3.2	贯穿螺栓	98
3.3.3	典型机体结构	100
3.4	主轴承	104
3.4.1	主轴承的结构形式	104
3.4.2	轴瓦与轴瓦合金	109
3.4.3	推力轴承	111
3.5	曲轴箱防爆装置	114

3.5.1	曲柄箱防爆装置	114
3.5.2	典型柴油机防爆装置结构	115
第4章	配气机构	118
4.1	气阀机构	119
4.1.1	气阀	119
4.1.2	气阀导管和气阀座	122
4.1.3	气阀弹簧	123
4.1.4	气阀旋转器	124
4.2	凸轮轴	125
4.2.1	凸轮的外形及其在轴上的排列	126
4.2.2	凸轮轴的结构和材料	126
4.2.3	凸轮轴实例	128
4.3	传动装置	130
4.3.1	凸轮轴对气阀机构的传动	130
4.3.2	曲轴对凸轮轴的传动	135
第5章	柴油机燃油供给系统	138
5.1	柴油机燃烧过程及燃烧室	138
5.1.1	柴油机燃烧过程特点及阶段	138
5.1.2	柴油机燃烧室	140
5.2	低压燃油输送系统及附件	145
5.2.1	燃油输送泵	147
5.2.2	燃油滤清器	150
5.2.3	燃油手动泵	154
5.3	高压燃油喷射系统	155
5.3.1	高压油泵	156
5.3.2	喷油器	170
5.3.3	泵—喷油器	175
5.3.4	自动调喷器	180
5.4	电控燃油喷射系统	182
5.4.1	概述	182
5.4.2	共轨系统工作原理	183

第 6 章 柴油机增压装置	187
6.1 增压系统分类.....	188
6.1.1 机械增压系统	188
6.1.2 废气涡轮增压系统	189
6.1.3 复合式增压系统	189
6.2 机械增压系统.....	191
6.2.1 采用离心式压气机的增压系统	191
6.2.2 采用转子式压气机的增压系统	195
6.3 涡轮增压器.....	198
6.3.1 轴流式涡轮机结构、工作原理及特性.....	198
6.3.2 径流式涡轮机结构、工作原理及特性.....	203
6.3.3 典型涡轮增压器结构	204
第 7 章 调速器	211
7.1 概述.....	211
7.1.1 调速器的作用	211
7.1.2 调速器分类	211
7.2 调速器结构及工作原理.....	212
7.2.1 机械调速器	212
7.2.2 液压调速器	213
7.2.3 电子调速器	223
7.3 调速器性能.....	227
7.3.1 调速器的性能指标	227
7.3.2 调速器的稳定性	230
7.4 超速安全装置.....	233
7.4.1 利用断油法的超速安全装置	233
7.4.2 利用断气法的超速安全装置	235
第 8 章 润滑系统	237
8.1 润滑系统的作用和方法.....	237
8.1.1 摩擦的危害	237
8.1.2 润滑的作用	237

8.1.3	润滑的方式	238
8.2	润滑系统的组成及分类	238
8.2.1	润滑系统组成	238
8.2.2	润滑系统分类	239
8.2.3	典型柴油机润滑系统	239
8.3	润滑系统的主要部件	249
8.3.1	滑油泵	249
8.3.2	滑油滤清器	252
8.3.3	滑油冷却器	254
8.3.4	自动信号和保护装置	255
第9章	冷却系统	259
9.1	概述	259
9.1.1	冷却系统的意义	259
9.1.2	船用柴油机冷却系统形式	260
9.2	典型柴油机冷却系统	260
9.2.1	MTU396 柴油机冷却系统	260
9.2.2	MTU956 柴油机冷却系统	263
9.2.3	TBD620 柴油机冷却系统	266
9.2.4	PA6-280 柴油机冷却系统	267
9.3	冷却系统的主要部件	270
9.3.1	水泵	270
9.3.2	调温器	271
9.3.3	海水/淡水冷却器	273
9.3.4	冷却水膨胀水箱及通气阀	274
第10章	启动系统	276
10.1	电启动	277
10.1.1	电启动系统基本原理	277
10.1.2	典型电启动装置	278
10.2	空气启动	280
10.2.1	启动阀	281
10.2.2	空气分配器	282

10.2.3	典型柴油机空气启动系统·····	284
10.3	保证可靠启动的措施·····	285
10.3.1	冷却水加热·····	286
10.3.2	滑油加热·····	286
10.3.3	进气加热·····	287
10.3.4	添加易燃燃料·····	287
10.3.5	减压启动·····	289
参考文献	·····	290

第1章 概述

在各种动力机械中,柴油机热效率高、功率范围宽广、启动迅速、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。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和船舶电站原动机,只有在一些军用船、特种船舶和个别货船(如一些液化汽船和运煤船等)使用燃气轮机、蒸汽轮机等其他类型的动力装置。

1.1 柴油机基本概念

1.1.1 柴油机的定义

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、燃气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,再将蒸汽引入汽轮机内,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作功的工质为水蒸气,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都属于外燃机。

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。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。内燃机按运转方式的不同可分为往复式内燃机和回转式内燃机,按使用燃料的不同可分为柴油机、汽油机和煤气机等。

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 68000kW 不等,因此其应用领域十分广泛。

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

(3) 尺寸小、重量小。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。

基于上述优点,内燃动力在民用中小型军用船舶中获得广泛应用。

当然,柴油机也有一些缺点,主要有以下几点:

(1) 柴油机的振动与噪声较大,存在机身振动、轴系扭转振动和噪声。

(2) 柴油机气缸内气体压力的变化剧烈,并产生周期性变化的冲击和振动,使受力机件产生较大的机械应力和疲劳裂纹,甚至出现故障和破损。

(3) 燃烧室组件直接受到高温高压燃气的作用,工作条件恶劣,机件受到热应力的作用,使强度下降,直接影响到柴油机的可靠性和寿命。

表 1-1 柴油机与汽油机的比较

项目	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

1.1.2 柴油机的基本结构

柴油机主要由固定部件、运动部件以及辅助系统组成。其主要部件如图1-1所示。

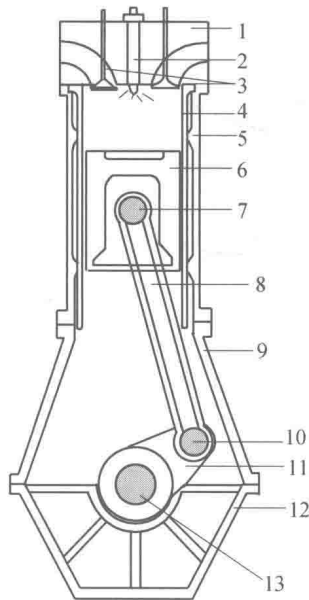


图1-1 柴油机主要部件

1—气缸盖；2—喷油器；3—气阀；4—气缸套；5—机体；6—活塞；7—活塞销；
8—连杆；9—机架；10—曲柄销；11—曲柄；12—机座；13—曲轴。

1. 固定部件

固定部件主要包括机座、机体、气缸盖、气缸套和主轴承等。固定部件构成柴油机主体,用于支承运动部件并由气缸盖、气缸套与活塞组件组成燃烧室。

2. 运动部件

运动部件主要包括活塞组件、连杆组件和曲轴组件等。它们构成曲柄连杆机构,使活塞的往复运动转换为曲轴的回转运动,实现热能向机械能的转换。

3. 辅助系统

柴油机辅助系统有换气系统(由配气机构的气阀组件、气阀传动组件、凸轮轴及其传动机构和进、排气管道等组成)、燃油系统(由低压输送系统的日用油柜、燃油滤清器和输送泵等以及高压喷射系统的喷油泵、高压油管及喷油器等组成)、冷却系统、润滑系统以及启动、换向和调速等系统。

柴油机的基本结构可以使进入气缸的新鲜空气被压缩以提高温度和压力,

并以压缩点火方式使喷射进入气缸的燃料燃烧,所产生的高温、高压工质在气缸中膨胀,推动活塞运动,再通过曲柄连杆机构转变为曲轴的回转运动,从而带动工作机械,最后还可将气缸内的废气排出,再吸入新鲜空气,进行下一个工作循环。

1.1.3 柴油机基本结构参数

柴油机的基本结构参数如图 1-2 所示,主要包括:

(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 。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 2 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。

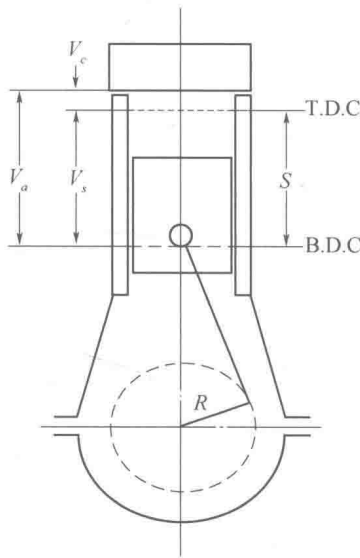


图 1-2 柴油机基本结构参数

(8) 压缩容积 V_{ce} 。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,有

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

(10) 气缸总容积 V_t 。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,有

$$V_t = V_s + V_{ce} \quad (1-2)$$

(11) 压缩比 ε_c 。气缸总容积 V_t 与压缩容积 V_{ce} 之比值,亦称几何压缩比,即

$$\varepsilon_c = \frac{V_t}{V_{ce}} = \frac{V_s + V_{ce}}{V_{ce}} = 1 + \frac{V_s}{V_{ce}} \quad (1-3)$$

目前,柴油机的压缩比 ε_c 一般为 12 ~ 22,中、高速柴油机的压缩比高于低速机的压缩比。

1.2 柴油机工作原理

1.2.1 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做功必须通过进气、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称为工作循环。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如图 1-3 所示的四个阶段。

1. 进气冲程

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)为 $220^\circ \sim 250^\circ$ 。

2. 压缩冲程

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 ~ 6MPa,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

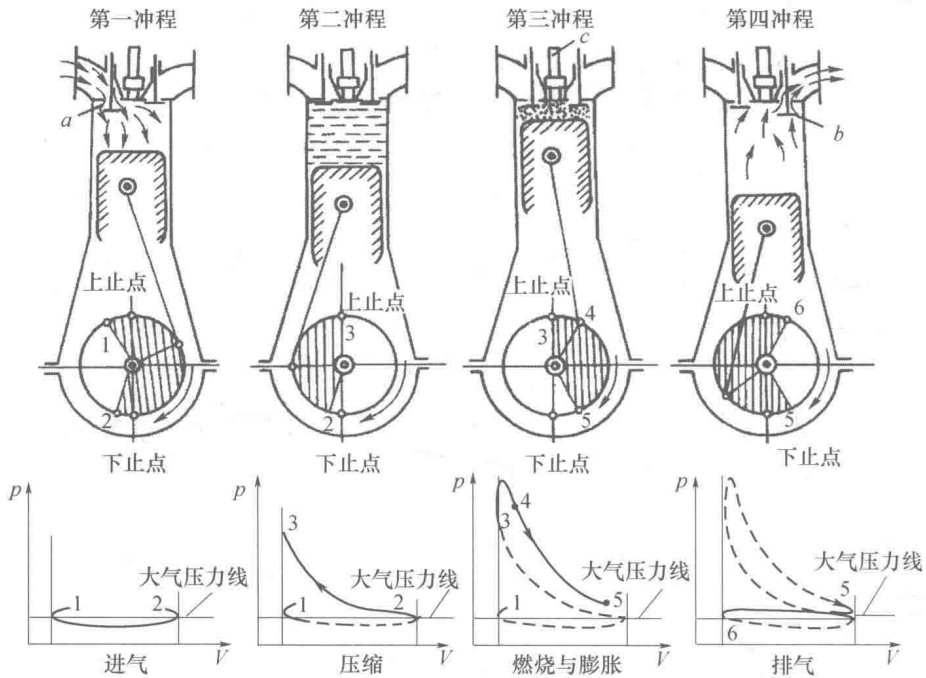


图 1-3 四冲程柴油机工作原理图

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} 表示压缩过程为 $140^\circ \sim 160^\circ$ 。

3. 燃烧和膨胀冲程

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,压力达 $8 \sim 15\text{MPa}$,甚至 20MPa 以上,温度为 $1400 \sim 1800^\circ\text{C}$ 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_2 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提早开启(曲柄位于点 5),曲轴转角 φ_{3-4-5} 表示燃烧和膨胀过程。

4. 排气冲程

在上一冲程末,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。进、排气阀在上、下止点前、后开启或关闭的时刻称为气阀定时(同样喷油器开启的时刻称为喷油定时),气阀定时通常用相应的上、下止点间的曲柄转角来表示,将柴油机的工作过程按曲柄所在位置及旋转角度依次表示定时的圆图称为定时图,如图1-4所示。

由图1-4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 $1/2$ 。

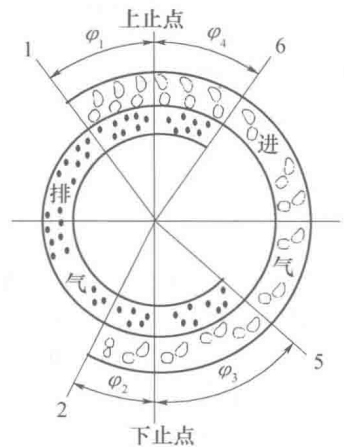


图1-4 气阀定时图

由图1-4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,因新鲜空气充入气缸,继续将废气清扫出气缸,有利于将气缸内的废气彻底清除,故常称为“燃烧室扫气”。此时,由于进入气缸的新鲜空气温度较低,当它扫过时可以降低柴油机燃烧室组件的热负荷。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,以改善柴油机机件的工作条件、延长柴油机承受高温部件的工作寿命。