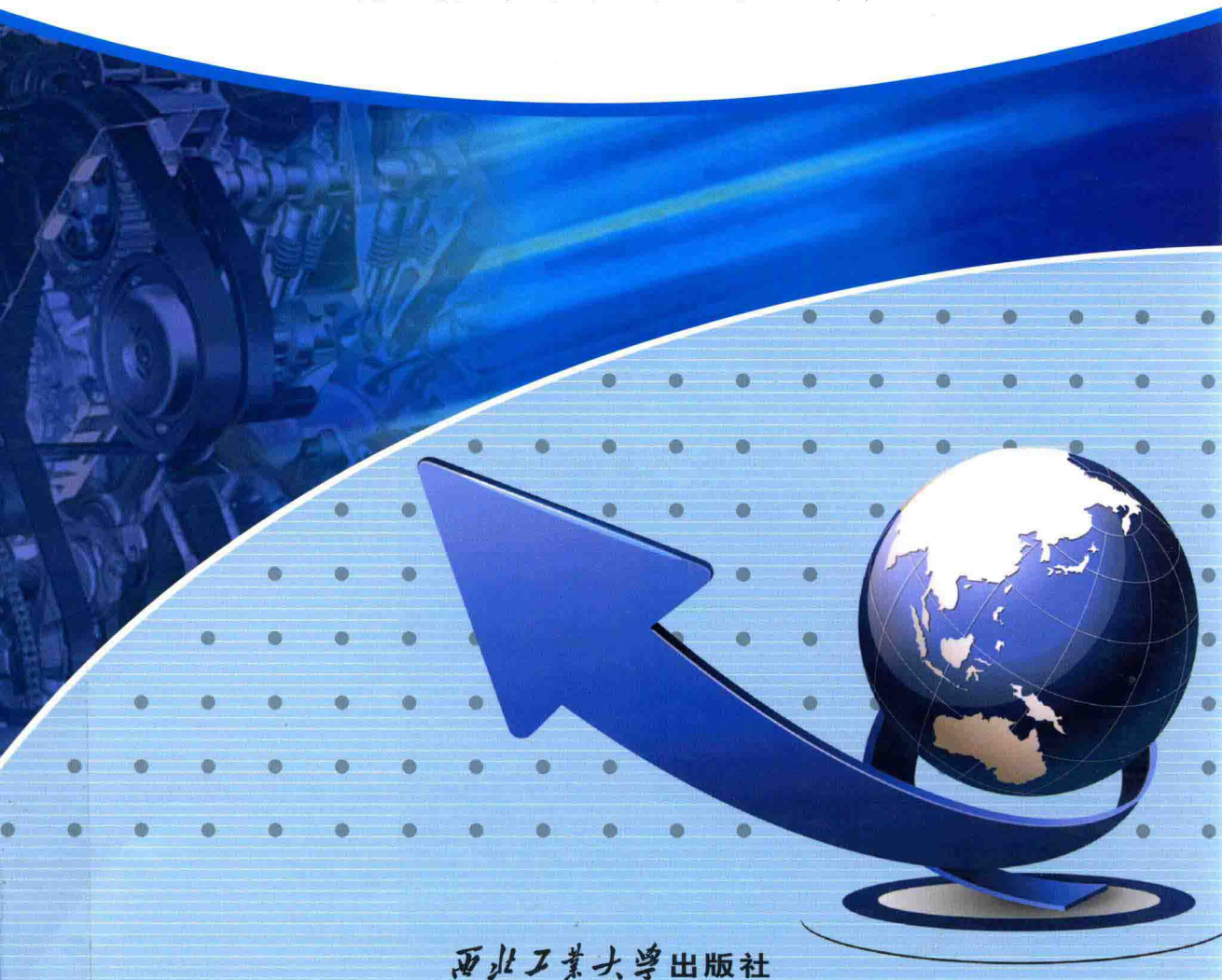


高等学校“十三五”规划教材

柴油机构造与原理

主 编 姚 良

副主编 崔智高 徐 斌 王新军



西北工业大学出版社

三五”规划教材

CHAIYOUJI GOUZAO YU YUANLI

柴油机构造与原理

主 编 姚 良

副主编 崔智高 徐 斌 王新军

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书为高等学校“十三五”规划教材,通过理论与实践相结合,全面系统地介绍了康明斯柴油机的工作原理和基本构造,并结合典型机型介绍了柴油机的使用操作、维护保养、检查调整和常见故障。其主要内容包括柴油机工作原理、柴油机主体机件、配气机构、燃油供给系统、润滑系统、冷却系统、柴油机增压技术、启动电器系统及仪表、内燃机特性、柴油机的使用与调整和柴油机故障分析等。

本书可作为高等院校柴油机构造与原理课程的教材,也可供从事柴油机操作、维修和管理的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

柴油机构造与原理/姚良主编. —西安:西北工业大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-5612-5785-2

I. ①柴… II. ①姚… III. ①柴油机—构造—教材
②柴油机—理论—教材 IV. ①TK42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 327378 号

策划编辑: 杨 军

责任编辑: 王 尧

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072

电 话: (029)88493844 88491757

网 址: www.nwpup.com

印刷者: 陕西天意印务有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 413 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

前 言

本书以康明斯柴油机为例,重点介绍柴油机的基本工作原理,以及 N 系列和 K 系列等康明斯主导机型柴油机的组成和构造,并对柴油机的操作、维护保养、检查调整以及常见故障分析做了详尽讲解。

本书共分为 11 章,内容包括柴油机工作原理、柴油机主体机件、配气机构、燃油供给系统、润滑系统、冷却系统、柴油机增压技术、启动电器系统及仪表、内燃机特性、柴油机的使用与调整和柴油机故障分析等。

本书融入了笔者长期从事内燃机教学、科研、学术研究和装备维修的部分成果和经验,这种来源于实践的知识,对学生加深本书内容的理解和提高动手能力都有很好的指导和借鉴意义。为便于学员学习和理解,本书在内容编排中强调共性、注重个性,遵循功用→结构→原理→工作条件和材料→失效形式与检修为主线,在充分体现了本书的系统性和完整性的同时,也增强了本书的可读性和适用性。

本书图文并茂、行文规范、内容充实、简洁易懂,在突出柴油机构造与原理内容的基础上力求反映本专业的技术发展和工程应用,有助于读者学习、理解和掌握。

本书由姚良、崔智高、徐斌和王新军合作编写,姚良担任主编。本书第 1~4 章由姚良编写;第 5,6 章由徐斌编写;第 8~11 章由崔智高编写;第 7 章由王新军编写。

本书编写过程中曾参阅了相关国家标准、专业规范、设计手册和相关文献资料,谨向有关作者表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限,书中错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 8 月

目 录

第 1 章 柴油机工作原理	1
1.1 概述	1
1.2 柴油机的工作原理	4
1.3 多缸柴油机工作特点	6
1.4 柴油机主要性能指标与型号编排规定	11
第 2 章 柴油机主体机件	21
2.1 曲柄连杆机构运动和简要受力分析	21
2.2 机体、汽缸盖与汽缸套	23
2.3 活塞连杆组	32
2.4 曲轴飞轮组	41
第 3 章 配气机构	50
3.1 配气机构的工作过程	50
3.2 气门组件	52
3.3 气门控制机构	55
3.4 齿轮传动机构和进排气系统	59
第 4 章 燃油供给系统	67
4.1 柴油	67
4.2 燃油供给系统的功用与组成	69
4.3 柱塞式燃油系统的组成与原理	71
4.4 PT 燃油系统的组成与原理	92
第 5 章 润滑系统	107
5.1 机油	107
5.2 润滑方式及润滑油路	113
5.3 润滑系统主要部件	118
5.4 润滑系统保养	129
第 6 章 冷却系统	132
6.1 冷却系统的功用与冷却方式	132
6.2 冷却系统主要部件	136

6.3 冷却系统使用与保养	147
第7章 柴油机增压技术	152
7.1 概述	152
7.2 涡轮增压器的构造及工作原理	156
7.3 涡轮增压器的使用与维护	164
7.4 涡轮增压器常见故障	165
第8章 启动电器系统及仪表	168
8.1 启动条件与启动方式	168
8.2 电动机启动	169
8.3 压缩空气启动装置简介	176
8.4 柴油机辅助启动装置介绍	177
8.5 蓄电池	179
8.6 充电发电机	186
8.7 交流发电机调节器	191
8.8 柴油机电路分析	195
8.9 柴油机常用仪表介绍	201
第9章 内燃机的特性	205
9.1 内燃机的工况	205
9.2 内燃机的负荷特性	206
9.3 内燃机的速度特性	208
第10章 柴油机的使用与调整	210
10.1 柴油机的使用	210
10.2 柴油机的维护保养	213
10.3 柴油机的调整	220
10.4 柴油机维修基本常识	233
第11章 柴油机故障分析	240
11.1 概述	240
11.2 柴油机常见故障分析	244
附录 I 柴油机规格及技术数据(附表 1~附表 4)	258
附录 II 常用单位及其换算(附表 5~附表 6)	262
参考文献	265

第 1 章 柴油机工作原理

1.1 概 述

1.1.1 内燃机发展简史

在人类生活和生产中,内燃机应用最为广泛。内燃机是一种热力发动机,它将燃料在汽缸内通过燃烧使热能转变为机械功输出。1892 年,德国工程师鲁道夫·狄塞尔(Rudolf Diesel 1858—1913 年)提出了一种内燃机的新设想,即在压缩终了将液体燃油喷入汽缸内,利用压缩终了气体的高温将燃油点燃,由于可以采用较高的压缩比和膨胀比,又没有爆燃,使得热效率提高了近 1 倍。5 年之后设想变为现实,德国工程师成功研制出世界首台汽缸直径为 250 mm、转速为 172 r/min 的压燃式发动机——柴油机,其功率为 14.7 kW,热效率达到了 26.2%。这就是现代柴油机的起源,距今已有 100 多年的历史。

1922 年德国博世(BOSCH)公司成功研制出柱塞式燃油喷射装置,1927 年形成产品,使得柱塞式燃油系统和机械调速系统在柴油机设计和生产领域得到推广并沿用至今。第二次世界大战后,涡轮增压技术开始在内燃机特别是在柴油机上得到广泛应用,它使得发动机的功率成倍提高,并由此产生了非常可观的社会和经济效益。

1954 年,美国康明斯发动机公司(Cummins Engine Company)设计了独特的 PT 燃油系统,大大提高了发动机的动力性和经济性。

随着科学技术的迅猛发展和新技术、新材料、新工艺的不断应用,内燃机的设计水平、制造技术、相关指标和使用性能也在日臻完善。以柴油机为例,由于它具有热效率高(热效率居热机首位)、功率范围广(数 kW~数万 kW)、结构紧凑、机动性强以及适应性好等优点,加之使用维修方便,广泛应用于国民经济各行各业及军事领域,如交通运输、农业机械、工程机械和发电机组等。

100 多年来,内燃机的工作原理没有本质改变,但其性能却在不断改善和提高,从追求低油耗到降低排放、降低噪音和减轻振动,20 世纪 80 年代以来,更注重向可靠性、安全性和操作的舒适性发展,并在发动机的强化技术、电子喷射和电子调速,以及代用燃料使用等方面取得了突破性进展。

众所周知,柴油机是一种结构复杂的动力机械,不同型号的柴油机,尽管构造有所差异,但基本组成相同。它主要由以下机构和系统组成。

(1)主体机件。由机体、汽缸盖和汽缸套等固定机件和曲柄连杆机构共同组成。他们构成了柴油机的骨架,用来提供零部件的安装位置,完成汽缸内的燃烧并将机械能通过曲轴输出,驱动负载工作。

(2)配气机构。由气门组件、气门控制机构和进排气系统共同组成。其功用是按照发动机的工作顺序实现进气和排气。

(3)燃油供给系统。由油箱、输油泵、柴油滤清器、喷油泵(康明斯柴油机为 PT 燃油泵)、喷油器(康明斯柴油机为 PT 喷油器)及调速器等组成。其功用是将一定量的清洁柴油,按照发动机负荷大小和一定的工作顺序,在一定的时间内以高压和良好的雾状喷入汽缸内燃烧。

(4)润滑系统。由油底壳、机油泵、机油滤清器、机油冷却器,以及阀门、润滑油道、指示和报警装置等组成。其功用是将清洁的机油以一定的压力连续地输送至发动机各运动零件的摩擦表面,减小运动零件的摩擦损失和磨损,确保润滑良好和柴油机工作可靠。

(5)冷却系统。由离心式水泵、散热器(或热交换器)、风扇、节温器、水滤器,以及机体和汽缸盖中的冷却水套及水管、指示和报警装置等组成。其功用是及时散热,确保发动机在最适宜的温度范围内可靠工作。

(6)涡轮增压系统。其功用是通过提高柴油机的进气压力,使更多的空气进入汽缸,在保证燃油完全燃烧的同时增加循环喷油量,显著地提高发动机的动力性和经济性。通常,安装有增压系统的柴油机称为增压柴油机;反之,称为非增压柴油机。

(7)启动装置和电源设备。前者是借助外力,迫使柴油机由静止状态转入运转状态;后者通常为两种,一种是向启动电机提供足够的电能;另一种是向蓄电池提供充电电流和向其他用电装置提供直流电源。如图 1-1 所示为 12V135 型柴油机构造图。

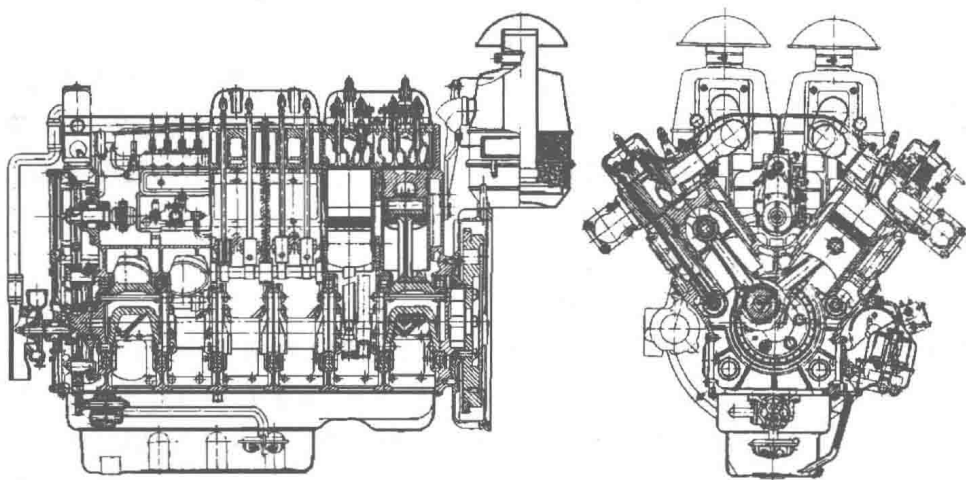


图 1-1 12V135 柴油机构造图

1.1.2 基本名词术语

如图 1-2 所示的单缸柴油机工作简图中,圆筒形汽缸套 11 中装有活塞 12,活塞通过活塞销 4、连杆 3 与曲轴 2 相连。曲轴支承在主轴上,其末端固定有飞轮,机体 13 的上部由汽缸盖密封,汽缸盖上装有进气门 6、排气门 5 及喷油器 8,由配气机构凸轮轴控制气门的开启与关闭,并通过喷油器向燃烧室喷入雾状柴油。柴油机工作时,活塞在汽缸中做往复运动,曲轴绕其轴线做旋转运动。基本名词术语主要包括以下几项。

(1)止点(死点)。活塞在汽缸中做往复运动的两个极限位置称为止点。活塞离曲轴旋转中心的最远位置,即活塞顶能达到的最高位置称为上止点;活塞离曲轴旋转中心的最近位置,即活塞顶能达到的最低位置称为下止点。

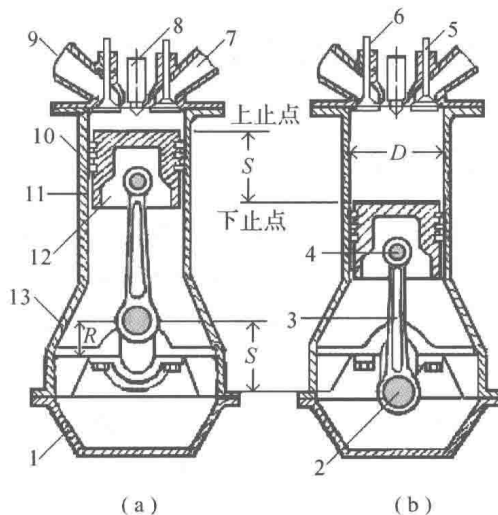


图 1-2 单缸四冲程柴油机简图

(a) 活塞在上止点; (b) 活塞在下止点

1—油底壳; 2—曲轴; 3—连杆; 4—活塞销; 5—排气门; 6—进气门; 7—排气管;
8—喷油器; 9—进气管; 10—活塞环; 11—汽缸套; 12—活塞; 13—机体

(2) 活塞行程。活塞从上止点移动到下止点, 或从下止点移动到上止点所走过的距离, 即上、下止点间的距离称为活塞行程(又称冲程), 用字母 S 表示。活塞每移动一个行程, 曲轴旋转半周转过 180° 。若用字母 R 表示曲轴(曲柄)半径, 则对汽缸中心线垂直通过曲轴中心线的柴油机来说, 活塞行程 S 等于曲柄半径 R 的 2 倍。

(3) 燃烧室和燃烧室容积。活塞在汽缸内做往复运动时, 汽缸内的圆柱形空间也在不断发生变化。当活塞在上止点位置时, 活塞顶与汽缸盖之间的空间称为燃烧室, 其容积称为燃烧室容积, 用字母 V_c 表示, 单位为 L(升)。

(4) 汽缸工作容积。活塞从上止点移动到下止点, 或从下止点移动到上止点所扫过的空间容积称为汽缸工作容积, 用字母 V_h 表示, 单位为 L(升)。多缸柴油机的总工作容积为所有汽缸工作容积之和, 通常称为柴油机的排量, 它等于单个汽缸工作容积 V_h 与汽缸数的乘积。排量越大的发动机, 输出功率也越大。

(5) 汽缸总容积。活塞位于下止点时, 活塞顶上部的汽缸容积称为汽缸总容积, 它等于燃烧室容积与汽缸工作容积之和, 用字母 V_a 表示, 单位为 L(升)。

(6) 压缩比。压缩比定义为汽缸总容积 V_a 与燃烧室容积 V_c 之比, 表示在压缩过程中, 气体在汽缸内被压缩的程度。压缩比越大, 气体受压缩的程度也越大, 压缩终点气体的压力和温度也越高, 有利于燃料的燃烧和燃气膨胀做功。压缩比是一个重要的结构参数, 柴油机的压缩比高于汽油机, 一般为 $12 \sim 22$ 。

(7) 活塞平均速度。当曲轴匀速转动时, 活塞在汽缸内的往复直线运动并非匀速, 当活塞趋向于上、下止点时, 速度越来越低, 到上、下止点时为零; 当活塞背离上、下止点时, 速度越来越快, 在中间的某一位置时速度达到最大。根据曲轴的转速 $n(\text{r/min})$ 和活塞行程 $S(\text{mm})$, 可以求出活塞每秒种平均移动的距离, 即活塞平均速度。活塞平均速度用 C_m 表示, $C_m = (n \times S / 30) \times 10^{-3} (\text{m/s})$ 。

1.2 柴油机的工作原理

1.2.1 四冲程柴油机工作原理

如图 1-3 所示,四冲程柴油机工作时,曲轴旋转两圈做功一次。活塞上、下各运动两次完成一个工作循环,它包括进气冲程、压缩冲程、做功冲程和排气冲程。在柴油机的一个工作循环里,发动机的进、排气门各开、关一次,喷油器完成一次喷油过程。

1. 进气冲程(a)

其作用是将新鲜空气引入汽缸,为后续的良好压缩准备条件。此时,活塞在曲轴的带动下从上止点向下止点运动,进气门开启、排气门关闭。随着活塞下移,活塞顶上部的汽缸容积不断增大,外界空气经开启的进气门充入汽缸。当活塞移动到下止点时,进气门关闭。

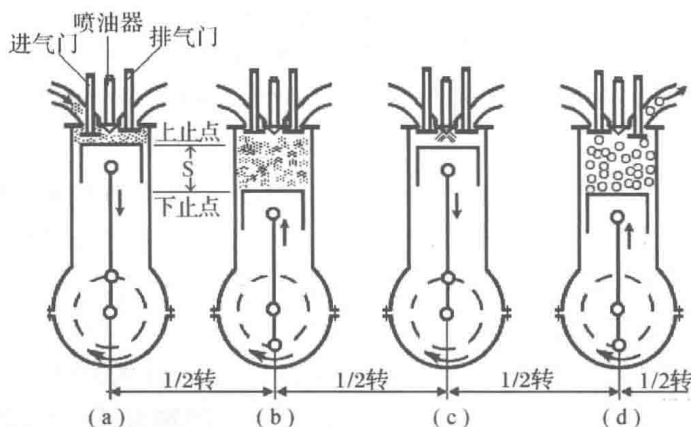


图 1-3 柴油机工作过程示意图

(a) 进气冲程; (b) 压缩冲程; (c) 做功冲程; (d) 排气冲程

由于进气过程中空气经过空气滤清器、进气管道和气门时存在流动阻力,加之受到气门等高温零件的加热,因此,进入汽缸的空气压力略低于大气压力,而温度高于环境温度。进气终了,非增压柴油机汽缸内的空气压力一般接近大气压力,进气温度约为 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$;增压柴油机约为 $0.13\sim 0.20\text{ MPa}$,如果采用空气中间冷却,进气温度约为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

进气量和进气温度是影响柴油机性能的主要因素,目前柴油机大都采用了涡轮增压器和空气中间冷却器,提高进气压力的同时降低进气温度,以使更多的空气充入汽缸。

2. 压缩冲程(b)

其功用一是为汽缸内混合气形成及良好燃烧准备条件;二是使燃气得到尽可能大的膨胀机会,保证热能更有效地转化为机械能。此时,曲轴通过连杆推动活塞由下止点向上止点运动,进、排气门均关闭,汽缸内的空气被压缩。

在压缩冲程,由于活塞上行使汽缸容积逐渐减小,气体被强烈压缩,压力和温度随之升高。压缩终了,对非增压柴油机,汽缸内的压力约为 $3\sim 5\text{ MPa}$,温度约为 $500\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$;对增压柴油机,压缩末了的压力和温度会更高。

为了使压缩冲程后期可燃混合气能够迅速自燃,柴油机采用较高的压缩比,保证压缩终了

汽缸内气体温度比柴油的自燃温度(约 $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)高出 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压缩比是由发动机结构决定的,不同机型其值有所不同。当柴油机汽缸严重磨损、进气阻力增大或汽缸漏气严重时,都会使压缩终了的温度和压力降低,导致喷入汽缸的柴油不易着火,柴油因空气量不足而燃烧不充分,发动机功率下降、排气冒黑烟、油耗增加等。实用中,常以实测的汽缸压缩压力来判断柴油机的技术状况。

为了充分利用柴油燃烧所产生的热量,要求燃烧过程能够在活塞移动到上止点略后位置迅速完成,使燃烧后的气体充分膨胀做功。但是,由于喷入汽缸的柴油必须要经过一定的物理、化学的着火准备阶段才能实现燃烧,因此,实际的柴油机循环是在压缩冲程结束前,在压缩冲程上止点前某个曲轴转角(一般为 $10\sim 35(^{\circ}\text{CA})$)通过喷油器开始将柴油提前喷入汽缸。

3. 做功冲程(c)

其功用是实现热能与机械能的转换,对外输出动力。做功冲程也称燃烧膨胀冲程,是柴油机的主要工作冲程。此时,活塞在燃烧气体的推动下从上止点向下止点运动,进、排气门仍关闭。

由于喷入汽缸内的柴油在高温空气中很快混合、燃烧而产生大量热能,使汽缸内的气体压力和温度急剧升高,燃烧的最高压力可达到 12.69 MPa ,最高温度可达 $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。高温、高压燃气膨胀并推动活塞下行,通过连杆带动曲轴旋转,对外输出动力。随着活塞下移,汽缸容积逐渐增大,气体压力逐渐减小。膨胀终了,非增压柴油机汽缸内的压力约为 $0.3\sim 0.4\text{ MPa}$,温度约为 $600\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$;增压柴油机汽缸内压力约为 $0.5\sim 0.8\text{ MPa}$,温度约为 $650\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4. 排气冲程(d)

其功用是排除汽缸内的废气,为下一个工作循环的进气冲程做好准备。此时,活塞由下止点向上止点运动,进气门关闭,排气门打开。

排气冲程开始时活塞位于下止点,汽缸内充满着燃气膨胀做功后的废气,废气依靠本身的动能并在活塞上行的推动下,经开启的排气门排至外界。

排气冲程终了,非增压柴油机汽缸内的压力约为 0.11 MPa ,排气温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;增压柴油机为 0.12 MPa 和 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。由于汽缸存在一定的压缩容积,排气冲程不可能将汽缸内的废气排净,仍会存留少量残余废气。当活塞到达上止点时,排气门关闭,排气冲程结束。

至此,柴油机经历了曲轴旋转两周、活塞上下往复运动的4个冲程,完成了由进气、压缩、做功、排气4个冲程所组成的一个工作循环。排气冲程结束后,曲轴依靠飞轮转动的惯性作用使进气冲程重新开始,如此周而复始地工作循环,保持柴油机连续运转。需要指出的是,柴油机由静止→启动→自行着火燃烧,是由柴油机的启动装置借助外力(如人力、电力或压缩空气的压力)实现的,通过飞轮拖动曲轴旋转,直至汽缸内着火燃烧,启动过程结束,柴油机转入上述的正常工作循环。

需要指出的是,二冲程发动机与四冲程发动机同样具有进气、压缩、做功和排气过程,所不同的是这些过程只用两个活塞行程就完成了。也就是说,二冲程发动机的曲轴旋转一周即完成一个工作循环,它与四冲程发动机差别最大的是进排气过程(即换气过程),该过程的工作顺序是:在做功行程末期,活塞下行,首先打开排气口开始排气,而后扫气口开启,在扫气泵的作用下(对新鲜充量进行压缩),具有一定压力的新鲜充量由扫气口流入汽缸,并强迫废气由排气口流出,进行充量更换,然后,活塞到达下止点后又上行,依次将扫气口和排气口关闭,进排气

过程结束,换气过程的持续时间一般为 $120 \sim 150(^{\circ}\text{CA})$,而四冲程发动机一般为 $400 \sim 500(^{\circ}\text{CA})$ 。由此可见,相同转速下,二冲程发动机比四冲程发动机做功频率高 1 倍,升功率也可以提高 1 倍,但由于二冲程发动机,在组织热力过程和结构设计上的特殊问题,在相同工作容积和转速下,发动机的平均有效压力往往达不到四冲程的水平,升功率也只能提高 $50\% \sim 70\%$ 。二冲程发动机目前主要应用在一些大型低速船舶柴油机和小型风冷汽油机(2.0 kW 以下)等领域。

1.2.2 柴油机工作过程的示功图表示

上述工作过程也可用图 1-4 所示示功图表示。图中的纵坐标代表汽缸压力 P ,横坐标代表活塞在不同位置时的汽缸容积 V (或曲柄转角 α),因此,示功图通常又称为 $P-V$ 图。运用示功图,能够清楚、直观地表示一个工作循环内汽缸压力 P 与活塞在不同位置时的汽缸容积 V 之间的变化关系。

图中, $r-a$ 曲线表示进气冲程。随着汽缸容积逐渐增大,对非增压柴油机,进气压力略低于大气压力 P_0 ;对增压柴油机,略高于 P_0 。

$a-c'-c$ 曲线表示压缩冲程。随着汽缸容积逐渐减小,由于进、排气门关闭,活塞上移压缩气体,压力升高较快。图中 c' 点表示供油时刻, c' 点至上止点的曲轴转角称为供油提前角。

$c-z-z'-b$ 曲线表示做功冲程。燃气推动活塞下移,在上止点附近,随着柴油与空气混合燃烧,汽缸内压力急剧升高,如 $c-z$ 曲线所示,近似为等容燃烧过程。由于柴油喷射并与空气混合及燃烧需要延续一个时期,尽管活塞越过上止点并开始向下运动,汽缸容积增大,但汽缸中压力并不立即下降,而是出现了一段 $z-z'$ 近似的等压燃烧曲线。此后活塞被推动下移,汽缸容积逐渐增大,汽缸内压力下降。

$b-r$ 曲线表示排气冲程。随着汽缸容积逐渐减小,压力变化比较平缓。由于排气系统存在流动阻力,排气压力略高于大气压力。

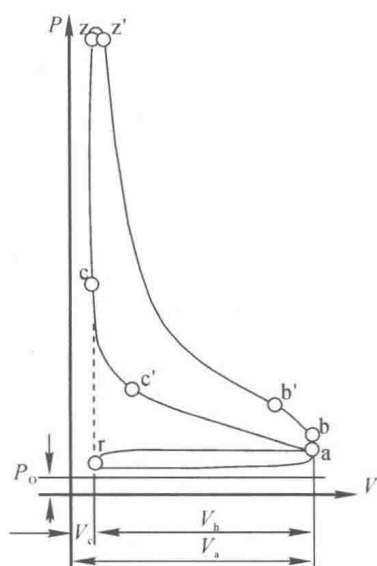


图 1-4 增压柴油机示功图

1.3 多缸柴油机工作特点

前述柴油机的工作原理,是以单缸机为例进行分析的。

在单缸机中,柴油机每个工作循环中只有燃烧膨胀冲程对外做功,而进气、压缩和排气三个冲程非但不做功,还要消耗一部分功用来完成压缩气体和克服进、排气阻力,实现进气和排气,由此造成单缸机做功冲程时转速升高,其余三个冲程转速降低,同时,功率的增大也受到汽缸直径的限制。

为了提高发动机功率和改善柴油机运转的平稳性,可增加汽缸数目和在曲轴一端安装飞轮。采用多缸机既可增大发动机的功率,多缸交替工作也使发动机运转更为平稳;飞轮是一个具有较大转动惯量的圆盘状零件,发动机工作时,在做功冲程,燃气压力通过活塞、连杆推动曲

轴转动,飞轮跟着旋转而将一部分动能“贮存”起来。当发动机转动到其他三个冲程时,飞轮便将“贮存”的能量释放,惯性作用使曲轴仍然保持接近原有转速,从而改善了柴油机运转的平稳性。

在图 1-5 中,多缸发动机各缸的活塞连杆组全都连接在同一根曲轴上。每个汽缸各自构成一个完整的单缸发动机,并按照前述工作过程独立完成进气、压缩、做功、排气 4 个冲程和工作循环。为了使发动机运转平稳、减轻振动和改善曲轴的受力状况,在同一时刻,每缸所进行的工作过程并不相同,而是根据汽缸数目和结构形式的不同,按一定的工作顺序和间隔一定的曲轴转角交替工作。

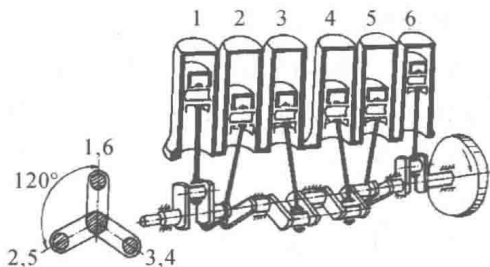


图 1-5 六缸机曲柄连杆机构示意图

1.3.1 多缸柴油机曲柄夹角与柴油机汽缸编号

直列式四冲程柴油机中,曲轴每转动两周(720° 曲轴转角),每个汽缸各自完成一个工作循环。为了保证运转的均匀性,必须使每缸的工作冲程均匀地分布在 720° 曲轴转角内,这可由曲轴上各曲柄(拐)在空间的排列角度来保证。若柴油机有 i 个汽缸,则多缸柴油机曲柄夹角为 $\varphi = 720^\circ / i$ 。因此,4,6,8 缸发动机的曲柄夹角分别为 $180^\circ, 120^\circ, 90^\circ$ 。

对于 V 型发动机来说,由于在每个曲柄上并列地装有两个连杆,并各自伸入左、右列汽缸内,因此,其曲柄夹角为 $\varphi = 720^\circ / (i/2)$ 。例如,具有 12 个汽缸的 V 型发动机 12V135,它的曲柄数与 6 缸发动机相同,故曲柄夹角也是 120° 。

为了方便生产管理和使用维修,多缸柴油机均将汽缸进行编号。国家标准曾对汽缸编号方法做过规定:一是整台柴油机可采用连续的顺序号表示;二是直列式柴油机汽缸编号从自由端开始为第 1 缸,向功率输出端依次编号(如 6135 和康明斯柴油机等);三是 V 型柴油机分左、右两列,左、右列是由功率输出端位置(即面向飞轮)来区分的,该汽缸编号是从右列自由端处为第 1 缸,依次向功率输出端编号,右列排完后,再从左列自由端处接连右列汽缸序号编号,如图 1-6 所示。

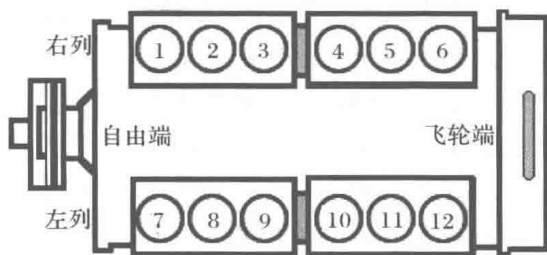


图 1-6 12V135 柴油机汽缸编号

应当指出,也有不少柴油机的汽缸编号方法与国家标准不符。例如,康明斯 K 系列 V 型机组,两列编号为左 1、右 1;左 2、右 2;……;左 6、右 6。因此,对实际的机型,应以使用说明书的规定为准。

1.3.2 多缸柴油机的发火顺序

多缸柴油机的发火顺序(也叫工作顺序),完全由曲轴上的曲柄位置排列所决定,它既要综合考虑柴油机的平衡性和平稳性,又要合理确定各缸的发火顺序。各缸发火顺序的确定原则是:避免相邻两缸接连发火,有效减轻曲轴轴承负荷,改善汽缸散热条件,防止相邻汽缸出现排气干扰和减轻柴油机振动。

多缸柴油机的发火顺序,可由中间用横线连接起来的汽缸编号表示。以 6 缸柴油机为例,由于工作间隔角为 120° ,为此,曲柄的排列常将 1 缸和 6 缸、3 缸和 4 缸,以及 2 缸和 5 缸设计在同一方向,三者间隔 120° ,如图 1-5 所示。此时,6 缸发动机的工作顺序(发火顺序)为 1—5—3—6—2—4。内燃机设计中,6 缸发动机以 1—5—3—6—2—4 的发火顺序应用最为广泛。

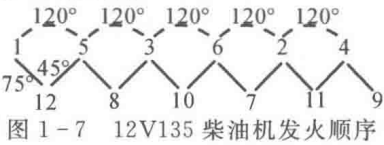
为了便于理解,表 1-1 给出了 6 缸发动机各缸工作循环交替示意图。由于汽缸数目增多,相邻工作缸的冲程出现重叠,故比汽缸数目少的发动机运转更为平稳。而且汽缸数目越多,重叠的角度也越大,柴油机运转也越平稳。

表 1-1 六缸发动机各缸工作循环交替示意图

上、下止点		(上)		(下)		(上)		(下)		(上)				
曲轴转角		0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°	420°	480°	540°	600°	660°	720°
气 缸 号	1	进气												
	5				进气									
	3						进气							
	6							进气						
	2										进气			
	4												进气	

V 型柴油机的发火顺序,采用两列汽缸均匀交错发火。以 12V135 型柴油机为例,左、右两列汽缸中心线的夹角为 75° 曲轴转角,每列汽缸的发火顺序与直列式相同。其中,右列 6 个汽缸的发火顺序为 1—5—3—6—2—4,左列 6 个汽缸为 12—8—10—7—11—9。整机的发火顺序采用左右两列汽缸交替,即 1—12—5—8—3—10—6—7—2—11—4—9。由于从 1 缸发火到 5 缸发火曲轴要转过 120° ,而 V 型夹角为 75° ,因此,1 缸至 12 缸的发火间隔角为 75° ,12 缸至 5 缸的发火间隔角则为 $120^{\circ}-75^{\circ}=45^{\circ}$,依此类推,如图 1-7 所示。

康明斯 KTA2300(又称 K38)柴油机为 12 缸 V 型排列,左、右列发火顺序均为 1—5—3—6—2—4,两列之间相互嵌插,整机发火顺序为:1 右—6 左—5 右—2 左—3 右—4 左—6 右—1 左—2 右—5 左—4 右—3 左。



1.3.3 柴油机的换气过程

为了简化分析,前面我们都是假设柴油机的进、排气门在活塞到达上、下止点时才开始打开或关闭,但考虑到气门从关闭到完全打开,或从打开到完全关闭都需要经历一定的时间,一方面,初期气门开度小,会增加气体流动的阻力,影响进气和排气;另一方面,柴油机工作循环所经历的时间十分短暂,当转速为 1 500 r/min 时,一个工作循环经历的时间只有 0.08 s,加之热负荷较高,为了保证柴油机多进气和多排气,有利于汽缸换气过程进行,实际的发动机都将气门提前打开和推迟关闭。

柴油机的换气过程包括从排气门开始打开到进气门完全关闭的整个时期,分为自由排气、强制排气和进气三个阶段。

1. 自由排气阶段

柴油机做功冲程临近终了时,汽缸内的气体压力仍然较高,此时若提前开启排气门,汽缸内的废气即可在这个压力作用下以很高的速度自行冲出汽缸。虽然提前排气会减少发动机对外做功,但由于废气排出会使汽缸内的压力大大降低,从而减小了活塞随后上行排气的阻力。由排气门在活塞到达下止点前提前打开开始,至汽缸内压力略高于排气管内压力为止,称为自由排气阶段。自由排气阶段的时间虽然不长,但排气量却高达 60% 左右。排气流量只取决于气体状态和排气门开启面积,与汽缸内的压力无关。

2. 强制排气阶段

自由排气阶段结束至排气过程结束,称为强制排气阶段。活塞上行推动汽缸内的废气从排气门排出,当活塞到达上止点时,汽缸内残余废气压力仍高于大气压力,加之排气时气流具有一定的惯性,为使排气更干净,排气门不在上止点关闭,而是在活塞越过了上止点后延迟关闭。此阶段的排气量,主要取决于排气门的前后压力差。

3. 进气阶段

进气阶段包括了从进气门提起打开至推迟关闭所经历的全部时间。进气门之所以要在进气冲程上止点前提前开启,在越过下止点后延迟关闭,目的是减小进气阻力,充分利用气流惯性以增加新鲜空气的充量。进、排气门提前开启和延迟关闭的角度,不同机型有所差异,最佳数值一般在发动机设计中通过性能试验确定。

从上述分析可知,在进气过程上止点附近,进气门已经开启,排气门尚未关闭,进、排气门有一个同时都开启的时间,称为气门重叠角。将进、排气门的开、闭时刻和开启的持续时间用曲轴转角表示,即为柴油机的配气相位图,如图 1-8 所示。

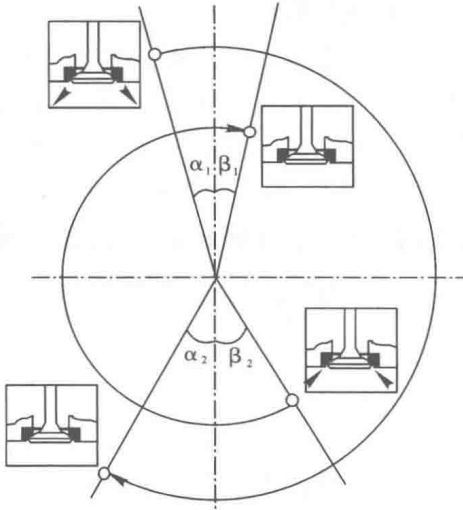


图 1-8 配气相位图

图中, α_1 和 α_2 分别表示进气门提前开启角和延迟关闭角, β_2 和 β_1 分别表示排气门提前开启角和延迟关闭角。因此,发动机进气持续时间为 $(\alpha_1 + 180^\circ + \alpha_2)$, 排气持续时间为 $(\beta_2 + 180^\circ + \beta_1)$, 气门重叠角为 $\alpha_1 + \beta_1$ 。12V135 型、6250 型和康明斯 NTA855、KTA19 机型的配气定时角度见表 1-2。

表 1-2 部分柴油机配气定时角度 单位: (°)

机 型	进气门提前 开启(α_1)	进气门延迟 关闭(α_2)	排气门提前 开启(β_2)	排气门延迟 关闭(β_1)	气门重叠 ($\alpha_1 + \beta_1$)
12V135Z	62±6	48±6	48±6	62±6	124±12
6250Z	55	35	40	65	120
NTA855	26	50	64	26	52
KTA19	22	52	40	14	36

1.3.4 柴油机汽缸工作状态的判别

在柴油机维修保养和技能培训中,一个非常重要的概念就是要判别当某缸处于上止点时其余各缸的工作状态,用来指导配气和供油正时的检查与调整。实用的方法很多,其中,利用示功图法进行判别最为简洁和直观。

如前所述,示功图反映了柴油机一个工作循环内,汽缸压力 P 随曲柄转角 α (或汽缸工作容积 V) 的变化关系。一个工作循环可用四条曲线分别表示进、压、做、排 4 个冲程。若考虑配气定时,用 e 点表示进气门开始打开,至 n 点关闭;用 m 点表示排气门开始打开,至 f 点关闭,如图 1-9(a) 所示。

当活塞在上止点时,曲柄转角 α 为 0° ,在下止点时为 180° 。当直列式六缸柴油机(曲柄夹角为 120° ,发火顺序为 1—5—3—6—2—4)某缸在压缩冲程上止点时,用示功图法判断其余各缸工作状态的方法如下。

首先绘制示功图,并在上、下止点处标示 0° 和 180° 。由于曲柄夹角为 120° ,过 120° 作垂线分别与四条冲程线相交得 4 个交点,过 0° 再作垂线得两个交点,6 个点确定了 6 个缸的不同工作状态。若令第 1 缸活塞处于压缩冲程上止点,则 0° 垂线与压缩冲程线的交点为第 1 缸;与进气冲程线交点则为第 6 缸。再按发火顺序逆示功图曲线将其余交点冠以相应缸号,如图 1-9(b) 所示。最后按配气相位(假设进气门提前开启和延迟关闭的角度分别为 20° 和 48° ;排气门分别为 48° 和 20°)在示功图上标示出 e, n 点和 m, f 点。可见,当第 1 缸在压缩冲程上止点时,第 2~5 缸分别处于排气、进气、做功和压缩过程,第 6 缸处于进、排气上止点。

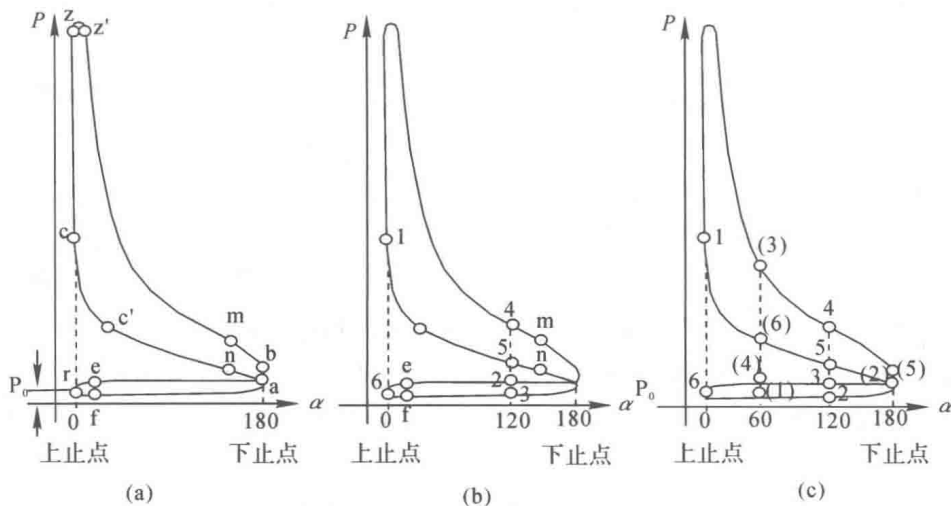


图 1-9 示功图法判断汽缸工作状态

用同样方法可以确定任意一缸在压缩冲程上止点时其余各缸的工作状态,由此可确定气门开关状态并进行气门间隙调整。

图 1-9(c) 为康明斯 KTA38 增压柴油机用示功图法确定的各缸工作状态。柴油机为 1、2 缸 V 型结构(左、右两列汽缸中心线的夹角为 60°),曲柄夹角为 120° 。V 型发动机采用左、右两列汽缸均匀交错发火,发火顺序如图 1-10 所示(每列汽缸的发火顺序仍然为 1—5—3—6—2—4)。对增压柴油机,进气压力略高于排气压力,故进气线($r \rightarrow a$)应在排气线($b \rightarrow r$)的

上方。

作图时,按照前述方法先标示出右列 6 个汽缸 1~6,其发火间隔角度为 120° (见图 1-10)。然后在 1—5 缸中间隔 60° 插入左列的第 6 缸(图 1-9 中用(6)标示),在 5—3 缸中插入(2),依次类推插入(4)(1)(5)和(3)缸。可知,当右列第 1 缸处在压缩冲程上止点时,右列其余各缸的工作状态如前所述。而左列的第 1 缸正在排气、第 2 缸处在进气下止点、第 3 缸正在做功、第 4 缸正在进气、第 5 缸处在排气下止点、第 6 缸正在压缩。如果我们再标示出 m, e, n 和 f 点,即可如实判断出各缸进、排气门的开闭状态。

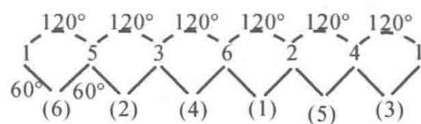


图 1-10 K38 柴油机发火顺序

值得注意的是,一旦确定了某缸的工作位置,依据发火顺序,其余各缸在示功图冲程线上的标示必须要逆示功图曲线的绘制方向,按 $c \rightarrow a \rightarrow r \rightarrow b \rightarrow z$ 的方向标注,同时,还必须考虑到配气定时角度的允许变动范围(一般为 $\pm 6^\circ$)。

事实上,判断汽缸工作状态的方法很多,用正方形、菱形、正(余)弦曲线、转盘,甚至一根直线也能形象直观地标示并得到正确的结果。需要强调的是,判断汽缸工作状态,首先要知道柴油机的发火顺序和曲柄夹角;其次,要知道配气定时,才能确定冲程线上各缸的实际工作状态。以图 1-9(b)为例,当第 1 缸在压缩冲程上止点时,第 4 缸在做功冲程,进、排气门均关闭,但若该缸排气门提前打开的角度 $\geq 60^\circ$,则该缸实际处于排气过程,此时,进气门关闭而排气门打开。

1.4 柴油机主要性能指标与型号编排规定

1.4.1 柴油机的主要性能指标

柴油机的工作性能,大体可分为以下四方面:动力性、经济性、运转性和耐久可靠性。动力性和经济性一般表示一定尺寸和重量的发动机在单位时间内做功的能力,以及发出一定量机械功所消耗燃料的多少,主要与发动机工作过程进行的好坏有关。其中,动力性能指标主要包括功率、扭矩和转速,经济性能指标主要包括燃油消耗率和机油消耗率。

运转性主要用来评价柴油机的冷启动性能、运转中的噪声和排气的品质,主要与设计水平和制造质量有关,与汽缸内燃烧过程密切相关。

耐久可靠性表示在寿命期内,发动机能够有效、可靠工作的能力,主要决定于发动机零部件的结构、材料和制造工艺等因素。该指标主要用于新机型鉴定、货源鉴定和质量检查评估等,常用来检查评价发动机可靠性和性能衰退等,可由平均故障间隔时间(MTBF)和平均首次故障时间组成,也可以理解为大修或更换零件之间的最长工作时间与无故障长期工作能力。对此,苏联规定:柴油机功率 ≤ 500 kW 的机组,其 MTBF 为 1 000 h,旧机组为 700 h。机组平均修复时间,对功率 ≤ 200 kW 的机组不长于 2 h。我国标准规定:军用电站功率在 200 kW 以内的,其 MTBF 对转速为 1 500 r/min 的发动机为 500 h,对转速为 3 000 r/min 的为 250 h。这也是我国首次对柴油发电机组规定可靠性指标,以满足军用电站可靠性的要求。

对柴油机的主要性能进行评价,目的在于对各种类型的发动机进行比较,从中找出影响性能提高的因素并寻求改进措施,使发动机的性能不断完善,指标不断提高,同时也可以帮助我