

车辆发动机原理

秦有方 主编

国防工业出版社

车辆发动机原理

秦有方 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书以汽车、拖拉机和坦克等车辆内燃机为对象,柴油机为重点,对内燃机工作过程原理、燃料供给与调节、混合气形成、增压及热力循环电子计算机模拟计算等基本理论作了系统地阐述。对于减少废气污染、噪音及车辆用新型动力的工作原理也作了相应介绍。

本书可供高等院校内燃机专业教学用,也可供有关科技人员参考。

车 辆 发 动 机 原 理

秦 有 方 主 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 17¹/₂ 406千字

1982年6月第一版 1982年6月第一次印刷 印数: 0,001—3,200册

统一书号: 15034·2372 定价: 1.80元

前 言

本书是根据车辆发动机专业教学大纲的要求编写的。

近十年来，各国对内燃机污染物排放及噪音的限制日益严格，石油资源日趋紧张，因而对内燃机性能指标提出了更高的要求，不仅要求高的升功率、低燃油消耗率，而且要求低污染，低噪音。这使得内燃机增压技术、电子计算机辅助设计、废气污染物及噪音控制等方面受到更大的重视，在组织工作过程的方法和观点上也都有很大的变化。我们力图从全书体系上反映这些变化的新技术、新发展。

本书由吴大昌同志主审，由秦有方同志主编。全书共有十四章，第八章由魏镔、秦有方合编，第十、十一章由陈士尧编写，第十二章由吴大昌、程昌圻合编，其余各章系秦有方编写。

本书仍采用我国目前普遍采用的公制单位。为便于阅读国外参考书以及适应向国际单位制（SI）过渡，在书后附有单位换算表。

由于我们水平有限，书中一定有不少缺点甚至错误，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

本书所用的主要符号	1	第六章 内燃机特性	109
绪论	3	第一节 引言	109
第一节 内燃机的应用范围	3	第二节 速度特性	110
第二节 内燃机的分类	4	第三节 内燃机工作的稳定性	115
第三节 车辆用内燃机的特点	5	第四节 负荷特性	116
第四节 内燃机发展简史	6	第五节 万有特性	117
第一章 内燃机的示功图和性能指标	9	第六节 调速特性	118
第一节 引言	9	第七节 螺旋桨特性	118
第二节 示功图	9	第八节 柴油机功率的标定和指标的修正	119
第三节 内燃机性能指标	12	第九节 废气排放特性	121
第二章 燃料和燃烧	21	第十节 发动机噪音	123
第一节 引言	21	第七章 汽油机混合气的形成	128
第二节 石油的组成	21	第一节 引言	128
第三节 燃料的性质及规格	23	第二节 理想的化油器特性	129
第四节 燃料的燃烧	25	第三节 简单化油器及其特性	130
第五节 燃烧产物中的有害成分	34	第四节 化油器的辅助系统	133
第六节 燃料与可燃混合气的热值	37	第五节 多腔化油器	134
第七节 气体比热和内能的计算	38	第六节 汽油喷射	135
第三章 内燃机实际循环	41	第七节 分层进气	136
第一节 引言	41	第八章 柴油机可燃混合气的形成	138
第二节 换气过程	41	第一节 引言	138
第三节 压缩过程	52	第二节 燃料喷雾	138
第四节 燃烧过程	56	第三节 气缸内的空气状况	141
第五节 膨胀过程	78	第四节 开式燃烧室	143
第六节 实际循环的指标	82	第五节 涡流室燃烧室	149
第四章 发动机的有效指标	86	第六节 预燃室燃烧室	150
第一节 引言	86	第七节 各种燃烧室的比较	152
第二节 机械损失的测定方法	86	第九章 发动机增压	155
第三节 影响机械损失的因素	88	第一节 引言	155
第四节 发动机的有效指标	92	第二节 增压系统的常用类型	156
第五节 发动机的升功率	94	第三节 离心式压气机	158
第五章 发动机热平衡及其传热	97	第四节 废气涡轮	164
第一节 引言	97	第五节 废气涡轮增压器结构	167
第二节 内燃机热平衡	97	第六节 废气能量利用	170
第三节 内燃机的传热	101	第七节 涡轮增压发动机指标及工作过程 参数的特点	175
第四节 热负荷	103	第八节 发动机与增压器的匹配原则	179
第五节 影响热负荷的因素	105		

第九节	改善涡轮增压发动机特性的措施	183	第三节	应用电子计算机计算柴油机	
第十节	超高增压柴油机	186		工作循环	249
第十章	柴油机燃油供给系统	189	第十三章	二冲程发动机	258
第一节	引言	189	第一节	引言	258
第二节	喷油泵和喷油器	190	第二节	换气系统的基本型式	258
第三节	燃油喷射过程	203	第三节	换气过程中各阶段的特点	260
第四节	供油系统对柴油机性能的影响	207	第四节	表征换气过程的参数	261
第五节	近代喷油系统简介	219	第五节	二冲程发动机的优缺点	262
第十一章	发动机的调节	228	第十四章	车辆用新型动力	264
第一节	引言	228	第一节	引言	264
第二节	柴油机使用调速器的必要性	228	第二节	燃气轮机	264
第三节	调速器	230	第三节	旋转活塞发动机	267
第十二章	柴油机工作循环的计算	244	第四节	绝热发动机	269
第一节	引言	244	第五节	斯特林发动机	270
第二节	柴油机工作循环的经验计算	244	附录	单位换算	273

本书所用的主要符号

A ——热功当量	M_1 ——可燃混合物数量
a ——音速	M_2 ——燃烧产物数量
B ——每个气缸每循环供油量	M_e ——发动机扭矩
C_m ——活塞平均速度	N_e ——发动机有效功率
C_v ——气体等容分子比热	N_i ——发动机指示功率
C_p ——气体等压分子比热	N_m ——发动机机械损失功率
C ——压气机叶轮中气体绝对速度	N_k ——压气机功率
D ——气缸直径	N_T ——涡轮功率
d ——柱塞直径	N_l ——升功率
d_v ——气阀阀盘直径	n ——发动机曲轴转速
E ——调速器恢复力；弹性模数	n_{Tk} ——废气涡轮增压器转速
e ——发动机转速变化系数	n_1 ——压缩过程多变指数
F ——散热面积；弹簧预紧力	n_2 ——膨胀过程多变指数
f ——流通截面面积	p_0 ——周围介质压力
g ——重力加速度	p_a ——压缩始点气缸内压力
g_a ——比耗气量	p_e ——压缩终点气缸内压力
g_e ——有效燃油消耗率	p_z ——气缸内最大爆发压力
g_i ——指示燃油消耗率	p_b ——膨胀终点气缸内压力
G_a ——每小时空气消耗量	p_r ——气缸余气压力
G_T ——每小时废气流量	p_T ——涡轮前气体压力
G_f ——每小时燃油消耗量	p_i ——平均指示压力
H ——焓降	p_e ——平均有效压力
H_u ——燃料低热值	p_k ——增压压力
H_m ——可燃混合气热值	p_m ——机械损失平均压力
h ——涡轮实际焓降	Q ——加热量；燃油流量
h_e ——柱塞有效行程	q ——比热量
I ——工质的焓	R ——气体常数；曲柄半径
i ——气缸数目	S ——活塞冲程
k ——适应性系数	T ——温度
K ——供油不均匀度；绝热指数	t ——时间
L_0 ——燃烧 1 公斤燃料理论所需空气量	U ——气体内能
L ——作功量	u ——叶轮圆周速度
m ——空燃比	V ——容积

V_h ——气缸工作容积

W ——做功量

w ——叶轮中气体相对速度

x ——燃料燃烧放热系数（放热百分比）

希腊字母符号

α ——过量空气系数；燃油可压缩性系数

γ ——余气系数；气体重度

δ ——不均匀度；调速率

ε ——压缩比

η ——效率；系数

θ ——角度

λ ——燃烧过程压力升高比

μ ——分子变化系数；压气机功率系数；
泊松系数

ξ ——热量利用系数

π_k ——增压压比

ρ ——密度

τ ——每循环活塞冲程数

φ ——曲轴转角

φ_F ——示功图丰满系数

ω ——角速度

绪 论

第一节 内燃机的应用范围

内燃机是热机的一种。凡是将热能转变为机械能的装置都称为热机。蒸汽机、汽轮机、内燃机、燃气轮机及火箭喷气发动机等都属于热机。原子能发动机也是热机的一种，它是用核燃料的热机。目前世界上工农业和运输业中所用的动力，主要来源于热机。内燃机在品种、数量及发出的总功率数方面又居热机的首位。

一般所说的内燃机都是指往复式活塞式内燃机，在这种发动机中，燃料在气缸内直接燃烧，推动活塞做往复运动。如煤气机、汽油机和柴油机等。

活塞式内燃机的应用范围非常广泛。地面上各种运输用车辆（汽车、拖拉机、内燃机车等）、发电站、农业机械、林业机械、矿山、石油、建筑及工程机械等方面大量使用内燃机为原动机。水上运输可作内河及海上船舶的主机和辅机。在航空方面，一些小型民用飞机还在用内燃机为动力。

内燃机在国防中的地位十分重要，使用范围也非常广泛。如部队运输、火炮牵引，各种战斗车辆（坦克、装甲车、步兵战车、自行火炮、导弹发射车、雷达车等）、发电、工程机械与施工，各种水面舰艇及水下潜艇等方面都大量使用内燃机。

因此，内燃机工业和技术的发展是实现我国四个现代化的重要方面之一。

内燃机获得如此广泛应用是由于它具有下列优点：

（1）热效率高。热效率高，能节省燃料，经济性好，尤其柴油机是热效率最高的热机，最高有效热效率已达46%。

（2）外型尺寸小、重量轻、便于移动。内燃机单位马力的重量在0.3~30公斤/马力范围，随用途而定。

（3）功率范围广，适应性好。单机功率可从零点几马力到几万马力（48000马力）。这是其他热机做不到的。

（4）起动迅速。正常起动只要几秒钟，并很快达到全功率。

（5）水的消耗量少，特别是风冷发动机根本不需要水，这对缺水地区是个重要优点。

（6）维护简单，操作方便。

内燃机也有缺点，即：

（1）燃料限制。在内燃机中只能直接用液体或气体燃料。如采用固体燃料时，需要有笨重的煤气发生器，将固体燃料转变为气体燃料，这使整个动力装置的重量和尺寸增加，起动准备时间加长。而且热效率也降低了。

（2）噪音大，容易使管理人员疲劳，也是城市中噪音污染源。

（3）废气中有害成分造成排放污染。

（4）低速时很难发出大扭矩，因而以内燃机为动力的车辆，必须装有变速机构。

第二节 内燃机的分类

内燃机有许多种类型, 根据主要的特点可大致作如下分类:

(一) 按实现循环的方式划分

- (1) 四冲程内燃机, 由活塞移动四个冲程或曲轴二转完成一个循环;
- (2) 二冲程内燃机, 由活塞移动二个冲程或曲轴一转完成一个循环。

(二) 按使用的燃料种类划分

(1) 液体燃料内燃机, 其中有用轻质燃料的, 一般称为汽油机, 有用重质燃料的, 一般称为柴油机;

- (2) 多种燃料内燃机, 可用轻质到重质的液体燃料;
- (3) 气体燃料内燃机, 一般称为煤气机;
- (4) 液-气混合燃料内燃机, 基本燃料是气体的, 少量的液体燃料作为点燃用。

(三) 按点火方式划分

- (1) 外部点火内燃机, 利用电火花点燃工作混合气 (汽油机、煤气机);
- (2) 压燃点火内燃机, 利用压缩终点空气的高温使燃油自燃 (柴油机);
- (3) 烧球式内燃机, 利用燃烧室壁面的高温使燃料着火。

(四) 按形成混合气的方式划分

(1) 外部形成混合气的内燃机, 可燃混合气在气缸外部形成, 如使用化油器的汽油机;

(2) 内部形成混合气的内燃机, 在高压下将燃油喷入气缸, 形成雾状和空气混合燃烧 (如柴油机、烧球机及向气缸内直接喷射汽油的发动机等)。

(五) 按压缩比划分

- (1) 低压缩比内燃机, 主要指汽油机;
- (2) 高压缩比内燃机, 主要指柴油机。

(六) 按循环的加热方式划分

- (1) 等容加热循环内燃机, 一般汽油机和煤气机属于这类;
- (2) 等压加热循环内燃机, 旧式的压缩空气喷油式柴油机属于此类机型, 现在已经不用了;

(3) 混合加热循环内燃机 (兼有等容加热和等压加热), 现代柴油机属于此类。

(七) 按调节负荷的方法划分

- (1) 量调节式内燃机, 依靠每循环工质数量的多少调节负荷, 如汽油机;
- (2) 质调节式内燃机, 依靠参加工作的混合气浓度改变负荷, 如柴油机。

(八) 按进气方式划分

(1) 非增压式内燃机, 也称自然吸气式内燃机, 它依靠活塞使工作气体吸入气缸, 一般的发动机都属此类;

(2) 增压式内燃机, 为增大发动机的功率, 使进入气缸的工作气体预先经过压气机, 压缩后供入气缸, 一般高功率的强化发动机属于此类。

(九) 按用途划分

- (1) 固定式内燃机;
- (2) 船用内燃机;
- (3) 机车用内燃机;
- (4) 汽车拖拉机内燃机;
- (5) 坦克用内燃机;
- (6) 航空用内燃机。

(十) 按冷却方式划分

- (1) 水冷式内燃机;
- (2) 风冷式内燃机。

(十一) 按气缸数目和排列形式划分

- (1) 单缸和多缸内燃机;
- (2) 多缸内燃机还可分为: 直列式、卧式、V型、X型、H型、星型及对置活塞式等几种。

一般在车辆上主要用直列式和V型的发动机。

第三节 车辆用内燃机的特点

对汽车、拖拉机等车辆用内燃机的基本要求是:

- (1) 热效率高, 即燃油消耗率低 (每单位时间每马力消耗的燃料量), 经济性好;
- (2) 动力装置的尺寸小, 重量轻, 这就要求每单位气缸工作容积能发出更多的功率;
- (3) 废气污染及冒烟要低, 工作噪音低;
- (4) 冷起动可靠;
- (5) 结构简单, 操作方便, 维修保养费用低;
- (6) 零件结构可靠, 工作寿命长。

军用战斗车辆发动机和汽车拖拉机发动机有很多相同之处, 但是技术要求更为严格, 其中以坦克发动机最具代表性。

众所周知, 坦克是现代化战争中用于地面的一种有效的进攻和防御的武器, 它有三大技术性能: 强大的火力, 坚固的防护和灵活的机动能力。机动能力在很大程度上取决于发动机性能。

坦克发动机的工作条件比汽车拖拉机严酷得多。除了首先要求结构可靠性之外, 在其他性能方面还要求:

(1) 功率大。为提高坦克的行驶速度和加速性, 以改善机动性, 现代坦克的吨功率要求 20~30 马力/吨 (有的试验型坦克已达 50 马力/吨)。这就要求一辆主战坦克的功率为 800~1500 马力范围。当然, 这一功率范围在工业上并不为奇, 但要同时满足下面要求是不容易的。

(2) 尺寸小, 重量轻。由于坦克内部给予动力室的空间有限, 发动机的外形尺寸不能太大。现代坦克发动机的体积功率大于 800~1000 马力/米³。在发动机的长、宽、高三个

尺寸中, 高度低更为重要。发动机高度会影响坦克的高度, 坦克外形越低越好, 便于隐蔽, 不易为炮火击中。

(3) 燃油消耗率低。当坦克携带的燃油量一定时, 发动机的燃油消耗率低, 意味着增大坦克的行驶里程, 减轻油料输送负担, 提高坦克的作战能力。

(4) 使用多种燃料。

(5) 低速时大扭矩。

(6) 低温起动性能好。

(7) 加速性好。

第四节 内燃机发展简史

研究和分析技术发展的历史, 可以了解前人的经验和教训, 掌握技术发展的主流、趋势和远景。

十八世纪六十年代开始了以蒸气机的广泛使用为主要标志的工业革命, 这是人类历史上在使用铁器之后的第一次技术革命。到了十九世纪六十年代, 又发明了一种比蒸汽机更为轻便和效率更高的动力机——内燃机。

十七世纪中叶, 人们就曾设想把某种工质在气缸内燃烧而获得机械能。但直到1860年才出现第一台实用的内燃机, 这就是法国人雷诺 (Lenoir) 研制成功的煤气机。它没有压缩过程, 当活塞行至进气冲程中点时, 用电点火, 发动机的热效率不超过4.5%, 气缸内最大压力只有4个大气压, 功率为3~5马力。这种发动机当时在英国、法国使用很广。

1862年法国人罗沙 (BEAU DE ROCHAS) 对内燃机热力过程进行了理论分析之后, 提出了改善热效率的四项原则 (气缸的冷却面积尽量小; 膨胀前气缸内压力尽可能高; 膨胀时活塞的速率尽可能快; 膨胀范围尽可能大) 以及实现这些原则的措施。这是认识上的一次飞跃, 也是第一次提出了等容燃烧的四冲程循环原理。

1876年德国人奥托 (NICOLAUS AUGUST OTTO) 按罗沙的理论制出第一台四冲程煤气机, 功率为4马力, 压缩比为2.5左右, 效率为10~12%, 这些指标都高于当时的其他热机。奥托机的出现是在理论指导下的实践结果, 是内燃机发展史上的第一次重大技术突破。

在奥托四冲程内燃机出现后, 英国人克勒克 (DUGALD CLERK) 开始研究二冲程内燃机。二冲程发动机的曲轴每一转有一个作功冲程, 它克服了四冲程发动机每两转有一个作功冲程的缺点。在1881年的法国巴黎展览会上展出了这种二冲程内燃机。

内燃机发展初期都以煤气为燃料, 这是由于十九世纪中叶, 欧洲各大城市已使用煤气照明, 而当时照明煤气是比较广泛且容易得到的能源。随着石油工业的发展, 出现了比煤气热值要高出许多的汽油及柴油等产品, 这为后来液体燃料发动机的出现创造了能源条件。

1883年德国人 G. 戴姆勒 (Gottlieb Daimler) 研制成功了带表面蒸发型化油器的电火花点火的立式汽油机。当时内燃机的转速较低, 很少超过200转/分, 而他制造的汽油机竟高达1000转/分。与此同时, 德国人 K. 奔驰 (Karl Benz) 也开始研制高速汽油机。

汽油机的出现为内燃机在交通运输车辆上的应用提供了条件。因为它的功率大、重量轻、体积小、热效率高，特别适应交通运输业的要求。1886年戴姆勒和奔驰分别成功地把他们制造的高速汽油机装在车辆上运行，现在公认这一年为汽车诞生年。1887年他们又把汽油机装在轮船上试验成功。

1885年英国人卜雷斯特曼 (Priestman) 研制成功使用重质石油燃料的煤油机。

1890年英国的阿·斯托尔特 (Akroyd Stuart) 研制成功不用电点火装置的烧球式煤油机。

1893年德国人鲁·笛塞尔 (Rudolf Diesel) 发表了压燃式内燃机的工作原理。由于他最初提出的理论有下列缺点，所以未能实现：

- (1) 压缩过程终点的气体压力过高，达 250 公斤/厘米^2 ，温度达 800°C ；
- (2) 燃烧过程保持等温条件，使每循环做功太少；
- (3) 缸壁不冷却，零件表面温度过高，润滑条件得不到保证；
- (4) 以煤粉为燃料，燃烧后产生固体的灰分，使机件磨损太快。

经过实践，笛塞尔克服了上述缺点，在1898年研制出带冷却水套的、基本上按等压过程燃烧的、以煤油为燃料的压燃式内燃机。压燃式内燃机的热效率比电火花点火式内燃机的热效率大大提高。压燃式笛塞尔机的研制成功是内燃机发展史上的第二次重大技术突破。

初期的压燃式内燃机是用压缩空气（约60个大气压）将燃油喷入气缸，发动机还要附带空气压缩机，使整个动力装置非常笨重，难以用在车辆上。为了解决这个问题，许多人曾试图不用压缩空气，而以其他方法使燃油雾化。

于1899年开始研制机械式喷油装置，但是限于当时机械制造工艺水平较低，作不出满足要求的、精密的喷油装置。直至1914~1915年制造工艺水平提高之后，才出现了结构简单、外形尺寸小的精密的机械式喷油装置。1925年在德国建成了专业化的生产喷油泵的工厂 (Bosch)，此后便停止使用带压气机的喷油装置，并使压燃式内燃机（柴油机）用于车辆上成为可能。

1926年瑞士人波希 (ALFRED J. BUCHI) 提出了利用发动机排出的废气能量来驱动压气机，使发动机增压的废气涡轮增压理论，但因受当时技术水平的限制，发展缓慢。在第二次世界大战中，少数航空发动机上有采用废气涡轮增压的，以补偿在高空时的功率下降。1950年之后，随着燃气轮机技术的发展，废气涡轮增压技术也逐渐在柴油机上广泛使用，从此柴油机的技术性能指标有了大幅度提高。

内燃机被广泛应用于各种军用战斗车辆上，其最新技术水平往往体现在坦克发动机上。

坦克是在第一次世界大战以后迅速发展的一种武器。在坦克发展的初期阶段，都借用汽车或航空用的汽油机为动力。本世纪三十年代中期有少数国家开始研制专用的坦克发动机。战争实践表明，只有专门设计的坦克发动机才能符合坦克的战术技术要求。

据统计，在第二次世界大战期间，坦克约有65%采用汽油机，只有35%采用柴油机。五十年代后期，各国主要坦克已全部采用柴油机为动力。

战斗车辆采用柴油机的主要优点是：

(1) 柴油机热效率高, 燃油消耗率低, 同时, 柴油比重较汽油大, 在坦克燃料箱容积相同时, 可比汽油机有较大的行驶里程 (约增30~50%), 提高了行军作战能力, 并减少后勤支援任务。

(2) 柴油比汽油的着火危险性小, 在战斗中, 起火可能性小, 而且便于运输。

(3) 没有电点火系统, 减少了易出故障的电气设备。

(4) 容易改成多种燃料发动机。

(5) 和汽油机功率相同时, 具有较高的动力牵引性能, 提高了车辆平均行驶速度及加速性。

近二十年来, 高速柴油机成功地采用了废气涡轮增压和中冷技术, 其单位体积功率有了大幅度的提高, 使其重量及外形尺寸大大缩小。因而在轻型坦克、侦察车辆等轻型轮式和履带式装甲战斗车辆中也普遍以柴油机为动力。

解放前我国处于半封建半殖民地的社会状况, 经济文化落后, 工业基础薄弱, 不可能大量生产象内燃机这样技术要求较高的结构复杂的机器。

1909年上海求新机器制造厂生产了我国第一台五马力煤气机。二十年代在广州、山东、上海、常州等地开始生产柴油机。三十年代上海新中厂制成第一台柴油汽车。四十年代生产了最大功率为300马力的柴油机, 但技术图纸及主要零、部件多是国外进口。解放前, 我国柴油机累计生产约20万马力。

解放后我国人民在中国共产党的领导下, 经过艰苦奋斗已经建立起独立的内燃机制造业。我国已经建设起一系列现代化的生产各种类型内燃机的工厂, 随着生产的发展还建立起许多研究单位, 并在许多高等院校设立了有关专业。三十多年来我国内燃机的技术发展水平经历了仿制、改进和自行设计的三个阶段。就中、小功率柴油机而言, 1950年生产3种机型, 全部是仿制的。1957年生产16种机型, 只有一种是自行设计的。1973年生产53种机型, 自行设计的竟有40种, 占总机型的75.6%。

我们的进步是很大的, 但和国外的先进技术水平相比, 还有不小的差距。我们相信, 在党中央的正确领导下, 经过努力奋斗, 差距会逐渐缩小的。我们要研制出更多更好的内燃机, 为振兴中华, 为祖国实现社会主义社会的四个现代化作出贡献。

第一章 内燃机的示功图和性能指标

第一节 引言

内燃机工作时，气缸内的工质进行着极其复杂的热力学、化学、气体动力学及传热学等方面的过程，通过周而复始的连续不断的工作循环将燃料的热化学能转变为机械功。

和理论热力循环不同，实际循环是开式的，气缸内工质每循环更换一次，它是由进气、压缩、燃烧、膨胀及排气等五个过程组成。在各过程中，气缸内的压力随时在变化。

气缸内压力随工作容积或曲轴转角变化的坐标图称为示功图 (Indicator diagram)。

发动机示功图有两种基本形式：以气缸工作容积为独立变量的称为 $p-V$ 示功图 ($p-V$ Indicator diagram)；以曲轴转角为独立变量的称为 $p-\varphi$ 示功图 ($p-\varphi$ Indicator diagram)。示功图是借助于专门的仪器从气缸内部测得的。示功图是我们了解气缸内部工作过程，探索各种因素对工作过程影响的重要资料。示功图的形状和发动机的工作状况、工作过程的特点及燃烧室结构型式有关，并直接影响发动机的性能指标。

一台内燃机的工作状况和工作性能的优劣，要用一定的指标来表示和评价。所以学习本课时要首先掌握各性能指标的定义、概念及其相互关联。

学习内燃机原理经常从分析示功图入手，以性能指标为对象，结合工作循环的各个阶段，分析各种因素的影响，以便从中找出规律，为改善性能指明方向和提出措施。

表示发动机作功能力的指标称为动力性指标。表示获得一定的机械功所消耗多少燃料的指标，称为经济性指标。

第二节 示功图

高速内燃机测试获得的示功图都是 $p-\varphi$ 示功图 (图1-1)。理论上讲，进气过程由上死点开始至下死点止，实际上在上死点以前进气阀就开启了 (图 1-1 点 1)，在下死点后才关闭 (点 2)，这样可使进气时间延长，向气缸内多进气。实际的压缩过程是在下死点后，进气阀关闭时开始。当压缩过程接近终点时，在上死点前 θ° 向气缸内喷射燃油 (点 3)，再经过一段时间，当着火前的物理-化学准备过程完成之后，在点 4 开始燃烧，气缸内压力急速上升。燃烧过程是在膨胀线上结束的，具

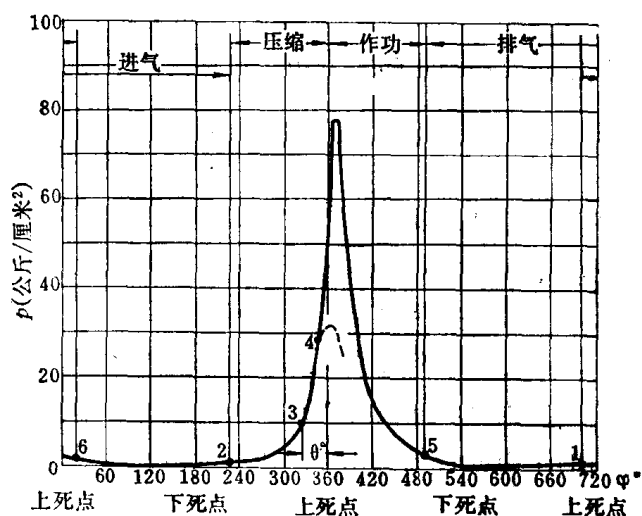


图1-1 四冲程柴油机的 $p-\varphi$ 示功图

体时间视发动机的负荷和转速而定。上死点以后开始膨胀过程，也称作功冲程。排气过程在下死点前开始（点5），直至上死点后（点6）才结束。

利用曲柄连杆机构的活塞位移和曲轴转角的关系，可以容易地将 $p-\varphi$ 图转换成 $p-V$ 示功图。相反，从 $p-V$ 图也可转换成 $p-\varphi$ 图。

图1-2表示四冲程汽油机的 $p-V$ 示功图。

活塞在气缸内的最上位置称为上死点 (Topdead center 简写 TDC)，在最下位置称为下死点 (Bottom dead center 简写 BDC)。

活塞在上死点时的气缸容积称为气缸的压缩室容积 V_c (Compression volume)。

活塞由上死点移至下死点所空出的气缸容积称为气缸工作容积 V_h (Working volume 或 Stroke volume)。活塞在上下死点间移动的距离称为冲程 S (Stroke)。

气缸工作容积 V_h ：

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

式中 D ——气缸直径，

S ——活塞冲程。

气缸工作容积 V_h 常以升为单位。

活塞在下死点时的气缸内容积称为气缸的总容积 V_a (Overall volume)。 V_a 和 V_c 、 V_h 有如下关系：

$$V_a = V_c + V_h$$

气缸总容积与压缩室容积之比称为压缩比 (Compression ratio)：

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

四冲程非增压发动机的工作循环以 $p-V$ 示功图来说明：

进气冲程 (Suction stroke)——活塞由上死点向下死点移动，由于活塞顶上的气缸容积增大，气缸内产生真空度，新鲜气体经进气阀吸入气缸。在示功图上进气冲程由 $r6a$ 线表示，压力低于外界大气压力 p_0 ，进气阀实际上在上死点前某一角度已经开启（点1）。

压缩冲程 (Compression stroke)——活塞由下死点向上死点反向运动时，气阀关闭，气缸内的工作混合气受压缩。压缩线由 $a23c$ 表示。压缩始点压力 p_a 低于大气压力 p_0 ，当活塞离开下死点一定距离后，压力才能与大气压力平衡。所以，为了使进气量增加，进气阀在下死点后的某一时刻关闭（点2）。进气阀晚关，还可以利用进气管中气体惯性作

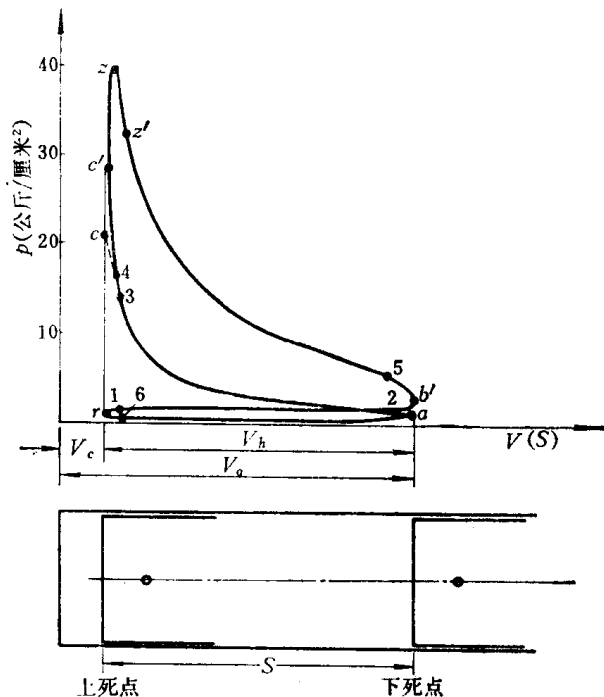


图1-2 四冲程汽油机 $p-V$ 示功图

用增加进气量。因此,实际的进气过程延续时期大于进气冲程。

当活塞继续向上死点移动时,气缸内工作混合气受压缩,温度和压力随着压缩而上升。

燃油的燃烧需要一定的时间,为了提高热量利用率,燃烧过程应在上死点前开始,在上死点后结束。所以,当活塞行至上死点前的一定角度时(点3)将混合气提前点火。经过短时间的物理-化学准备后,在点4出现火焰,开始燃烧,压力线偏离压缩线。由于短时间内释放出大量的热,气缸内温度、压力迅速升高。

膨胀冲程(Expansion stroke)——活塞由上死点移向下死点,在高温高压气体作用下,活塞作有用功,膨胀开始时,燃烧继续进行。这一冲程在示功图上由 $c'z'5b'$ 表示。

排气冲程(Exhaust stroke)——活塞由下死点向上死点移动,气缸内气体经过打开的排气阀,被推出气缸。

排气阀往往在活塞到达下死点前便提前开启(点5),这可使排气压力降低,减少将废气推出气缸时所消耗的功,并且,当废气压力 p_r 降低后,还能减少压缩室容积的废气量,使新鲜充量所占比例增加。由于排气冲程终点的压力 p_r 仍然高于大气压力,以及利用排气管内气流惯性的抽吸作用,更多地排走废气,排气阀也是在上死点后某时刻迟后关闭(点6)。

四冲程废气涡轮增压发动机的 $p-V$ 示功图(图1-3)和非增压的基本相似。不同方面只有两点:

(1) 工质参数高。增压时,进入气缸的新鲜气体是由压气机供给的压缩气体,其压力 p_k 和温度 T_k 都高于外界大气的压力 p_0 和温度 T_0 。由于循环开始时的工质参数高于非增压的,所以整个循环的气体参数值都高。另一方面,由于每循环进气量增加,可使参加燃烧的燃料量相应增加,而这又相当于给每循环的热量增加,使气体的温度、压力都随之上升。

(2) 进气压力线高于排气压力线。废气涡轮增压发动机在大部分工况,进气压力 p_k , 都高于排气压力 p_r 。

二冲程发动机的 $p-V$ 示功图(图1-4)与四冲程发动机相比,只有换气过程(进气和排气)有所不同。

二冲程发动机没有单独的进、排气冲程,只有压缩和作功两个冲程,曲轴一转完成一个工作循环。新鲜充量是经过扫气泵预先压缩后进入气缸的,并由这些高压气体把废气驱除。排气和进气过程,是在作功冲程终点和压缩冲程始点附近的部分冲程内几乎同时完成的。其他过程(压缩、燃烧和膨胀过程)与四冲程发动机相同。

由图1-4可见,在作功冲程活塞接近下死点时,排气口开启(点1),气缸内的膨胀气体向外流出,压力下降;再过一段时间,进气口(扫气口)开启(点2),经过压气机(或称扫气泵)压缩的高压气体,从扫气口进入气缸,并驱除废气。活塞从下死点向上死点移动时,进气口先关,气缸内气体继续经排气口外流,直至排气口关闭,压缩过程才真正开始(点3)。所以二冲程发动机的实际工作容积 V'_h 和几何工作容积 V_h 不同,两者之差称为损失容积 V_l , 即