

高等学校试用教材

内燃机 构造与原理

西安冶金建筑学院 陆耀祖 田维铎 主编



中国建筑工业出版社

本书以工程机械和汽车用高速内燃机为重点,对内燃机的原理、结构、性能以及基本试验项目都作了较为系统的阐述和分析。主要内容包括内燃机工作原理、热力循环、性能指标、曲柄连杆机构、换气过程及配气机构、可燃混合气形成与燃烧、燃料供给系、润滑系、冷却系、起动装置、电气设备、内燃机特性、废气涡轮增压、废气污染及噪声控制等。

本书为建筑系统院校工程机械专业试用教材,也可作为汽车、拖拉机或从事内燃机工作的科技人员和技术工人参考。

高等学校试用教材
内 燃 机 构 造 与 原 理
西 安 冶 金 建 筑 学 院
陆 耀 祖 田 维 铎 主 编

*
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*
开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 21 字数: 508 千字
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷
印数: 1—5,100册 定价: 2.80 元
统一书号: 15040·5111

前 言

本书是根据1983年6月沈阳会议制定的全国建筑系统院校工程机械专业内燃机课教学大纲编写的。原统编教材《柴油机构造与修理》于1979年出版后采用的院校和单位很多，曾起到了应有的作用。近年来由于工程机械专业对内燃机课的要求有了明显的提高，根据新制定的教学大纲，本书全面地增加了汽油机构造和内燃机原理两方面的内容，原教材的修理部分内容另设新课，不再编入。因此，重新编写了这本教材，并以“内燃机构造与原理”的书名出版。

本书将内燃机构造与原理合并成一册编写，对教材作了一些改革，重点加强内燃机的基础理论和基本构造，使理论与结构相结合，并适当增加了近年来工程机械内燃机的部分新结构。在教材内容方面则以工程机械和汽车用高速柴油机为主，并述及汽油机。每一部分均以理论为先导，然后再深入分析相应的结构，故在学习本课程之前，学生应进行内燃机构造实习。为加强试验教学环节，我们将教学大纲所要求的基本试验内容分散在有关章节作简要的阐述。

本书全部采用法定计量单位制。名词术语与GB1883—80一致。

本书为建筑系统院校工程机械专业教材，也可作为汽车、拖拉机、矿山机械等专业的教学用书，从事内燃机工作的科技人员和技术工人也可参考。

本书由西安冶金建筑学院陆耀祖、田维铎主编。参加编写的教师有：西安冶金建筑学院陆耀祖（绪论、第二、五、六、七、十六章）、焦凤珠（第一、三、四、十章）；北京建筑工程学院傅宏久（第八、九、十三章）；重庆建筑工程学院邓朝毅（第十一、十二、十四、十五章）。

本书由同济大学陈树德主审。西安交通大学内燃机教研室张滋伟教授对全书进行了审阅，并提出很多宝贵意见，在此致以深切的谢意。

由于水平所限和经验不足，书中的错误和不妥之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

编者

1985年9月

常用符号

- a ——音速, m/s
 c_m ——活塞平均速度, m/s
 c_p ——定压比热, J/kg·K
 c_v ——定容比热, J/kg·K
 D ——气缸直径, mm
 G_a ——空气消耗量, kg/h
 G_f ——燃油消耗量, kg/h
 g_e ——燃油消耗率, g/kW·h
 g_i ——指示燃油消耗率, g/kW·h
 H_u ——低热值(燃料), kg/kg
 i ——气缸数
 k ——空气绝热指数
 L ——连杆长度, mm
 M_e ——扭矩, N·m
 m ——质量, kg或kgmol
 N_e ——有效功率, kW
 N_{ob} ——标定功率, kW
 N_i ——指示功率, kW
 N_l ——升功率, kW/L
 N_m ——机械损失功率, kW
 n ——转速, r/min
 n_b ——标定转速, r/min
 n_c ——压缩多变指数
 n_e ——膨胀多变指数
 P ——作用力, N; 压力, kPa
 P_a ——压缩始点压力, kPa
 P_b ——膨胀终点压力, kPa
 P_c ——压缩终点压力, kPa
 P_e ——平均有效压力, kPa
 P_i ——平均指示压力, kPa
 P_f ——往复惯性力, N
 P_k ——增压压力, kPa
 P_m ——平均机械损失压力, kPa
 P_N ——侧压力(活塞), N
 P_0 ——大气压力, kPa
 P_r ——离心力, N
 排气压力或高压油管剩余压力, kPa
 P_i ——理想循环平均压力, kPa
 P_c ——最高爆发压力, kPa
 Q ——热量, J; 蓄电池容量, A·h
 q ——单位质量热量, J/kg
 q_f ——循环供油量, g/cyc或mL/cyc
 R ——气体常数, J/kg·K; 曲轴半径, mm
 S ——熵, J/k; 活塞行程, mm
 $T_a(t_a)$ ——压缩始点温度, K(°C)
 $T_b(t_b)$ ——膨胀终点温度, K(°C)
 $T_c(t_c)$ ——压缩终点温度, K(°C)
 $T_k(t_k)$ ——增压空气温度, K(°C)
 $T_0(t_0)$ ——进气温度(大气温度), K(°C)
 $T_r(t_r)$ ——排气温度, K(°C)
 V_a ——气缸最大容积, L或cm³
 V_c ——气缸最小容积(压缩容积), L或cm³
 V_H ——总排量, L或cm³
 V_n ——气缸工作容积, L或cm³
 V_k ——燃烧室容积, L或cm³
 W ——功, J
 W_i ——指示功, J
 α ——过量空气系数
 γ_r ——残余废气系数
 δ ——后期膨胀比
 δ_1 ——瞬时调速率
 δ_2 ——稳定调速率
 ϵ ——压缩比
 ϵ_e ——有效压缩比
 η_k ——压缩机绝热效率
 η_e ——有效热效率

η_i ——指示热效率
 η_m ——机械效率
 η_t ——理想循环热效率
 η_v ——充量系数
 Θ_e ——排气提前角, °CA
 Θ_i ——进气滞后角, °CA
 Θ'_i ——排气滞后角, °CA
 Θ_j ——进气提前角, °CA
 Θ_m ——点火提前角, °CA
 Θ_s ——喷油提前角, °CA
 λ_p ——压力升高比
 μ_m ——扭矩储备系数(扭矩适应性系数)

μ_n ——转速储备系数(转速适应性系数)
 π_k ——增压比
 ρ ——密度, kg/m³;
初期膨胀比
 τ ——冲程数
 τ_i ——滞燃期, S或°CA
 φ ——曲轴转角, °CA
 φ_e ——排气持续角, °CA
 φ_i ——进气持续角, °CA
 φ_m ——进排气重叠角, °CA
 ψ ——行程损失系数;
转速波动率

目 录

绪论	1
第一章 内燃机的基本工作原理与总体构造	6
第一节 内燃机的基本名词术语	6
第二节 四冲程内燃机工作原理及示功图	7
第三节 二冲程内燃机工作原理	10
第四节 内燃机的总体构造	11
第二章 内燃机热力循环	15
第一节 内燃机的理论循环	15
第二节 内燃机的实际循环	23
第三节 内燃机热平衡	25
第三章 内燃机的性能指标	27
第一节 指示指标	27
第二节 有效指标	29
第三节 机械损失	33
第四章 曲柄连杆机构	36
第一节 曲柄连杆机构的运动规律	36
第二节 曲柄连杆机构的受力分析	38
第三节 内燃机运转平稳性和惯性力的平衡	42
第四节 活塞连杆组	49
第五节 曲轴飞轮组	58
第六节 气缸体——曲轴箱组	61
第五章 内燃机换气过程与配气机构	66
第一节 四冲程内燃机的换气过程	66
第二节 四冲程内燃机充量系数的影响因素	71
第三节 提高充量系数的措施	75
第四节 配气机构的组成及其布置形式	78
第五节 配气机构的主要零件	80
第六节 进、排气系统	87
第七节 二冲程内燃机的换气过程	90
第六章 柴油机可燃混合气形成与燃烧	95
第一节 柴油	95
第二节 柴油机可燃混合气的形成	97
第三节 柴油的喷射雾化	98
第四节 柴油机的燃烧过程	105

第五节	柴油机燃烧室	109
第七章	柴油机燃料供给系	120
第一节	柴油机燃料供给系的组成	120
第二节	喷油器	121
第三节	喷油泵	123
第四节	调速器	133
第五节	柴油机燃油供给系的附属设备	146
第六节	燃料供给系的调整与试验	150
第七节	P-T燃料供给系	156
第八章	汽油机可燃混合气形成与燃烧	166
第一节	汽油	166
第二节	汽油机可燃混合气的形成	168
第三节	汽油机的燃烧过程	169
第四节	汽油机燃烧室	175
第九章	汽油机燃料供给系	178
第一节	汽油机燃料供给系的组成	178
第二节	简单化油器	182
第三节	理想化油器	183
第四节	汽油机各种工况对混合气浓度的要求	185
第五节	化油器的各种供油装置	186
第六节	化油器的构造	191
第十章	润滑系	198
第一节	润滑系的功用及润滑方式	198
第二节	润滑油	199
第三节	润滑油路	200
第四节	润滑系主要部件的构造	202
第五节	曲轴箱通风	207
第十一章	冷却系	209
第一节	冷却系的功用和冷却方式	209
第二节	水冷系	209
第三节	风冷系	217
第十二章	起动装置	219
第一节	内燃机的起动条件和起动方式	219
第二节	电动机起动装置	221
第三节	汽油机起动装置	225
第四节	柴油机的起动辅助装置	228
第十三章	电气设备	232
第一节	电源设备	232
第二节	汽油机点火系统	245
第三节	仪表	257
第十四章	内燃机特性和试验	260
第一节	内燃机的工况	260

第二节	柴油机特性	261
第三节	汽油机特性	269
第四节	内燃机的功率标定及大气修正	273
第五节	内燃机性能特性试验	275
第十五章	柴油机废气涡轮增压	285
第一节	柴油机增压的基本概念	285
第二节	废气涡轮增压器	287
第三节	废气涡轮增压系统的选择	300
第四节	增压柴油机的性能与结构	303
第五节	涡轮增压器与柴油机的匹配	305
第十六章	内燃机噪声控制与废气净化	311
第一节	内燃机噪声控制	311
第二节	内燃机废气净化	316
附录一	内燃机产品名称和型号编制规则(摘自GB725—82)	323
附录二	往复式内燃机-内燃机方位(摘自GB3270—82)	325
附录三	内燃机的旋转方向和气缸编号(摘自GB726—65)	326

绪 论

一、内燃机发展简史

早在1700年，英国人纽卡姆就制成了直立气缸密封式活塞、缸内喷水冷却的蒸汽机。1763年英国人瓦特改良了纽卡姆蒸汽机，使蒸汽机进入了实用阶段，这一重大发明在当时促成了欧洲的工业革命。但是，由于蒸汽机存在着热效率低、结构笨重、移动不方便及操作麻烦等缺点，因而逐渐不能适应生产发展的需要。

1877年德国工业家奥托(Otto)创制了按等容燃烧、用电火花点火的四冲程煤气机。由于煤气机必须使用气体燃料，而气体燃料的来源比较困难，这就阻碍了煤气机的进一步发展。

1885年德国人戈特利布·戴姆勒(Gottfried Daimler)仿照四冲程煤气机制成第一台汽油机，并于1887年使第一台用汽油机驱动的汽车问世。由于汽油机具有轻小价廉、运转平稳及启动、使用简便等优点，便迅速在运输车辆上得到了广泛应用。

为了研制使用廉价燃料的发动机，1892年德国工程师鲁道夫·狄塞尔(Rudolf Diesel)首先提出了柴油机的工作原理。他在发明专利中写道：“在气缸中的纯空气将被活塞如此强烈地压缩，致使它所产生的温度远超过所使用的燃料的自然温度，而燃料的输入气缸是在活塞通过上止点之后陆续进行的……”。一般说来，现代的柴油机基本上是按照这一原理工作的。最初，狄塞尔曾试用煤粉做燃料，力图实现等温燃烧过程，即具有最高热效率的卡诺循环来获得尽可能好的经济性，但是试验失败了。后来他继续对发动机进行研究，改用煤油作燃料，采用了较高的压缩比和压缩点火方式，并将等温燃烧过程改为等压燃烧过程，终于在1897年研制出了世界上第一台柴油机(当时为煤油机)。

早期柴油机的燃料是靠压缩空气将其喷入气缸的。1922年德国的罗伯特·波许(Robert Bosch)公司研制出燃料机械喷射装置。此后，这种机械喷油装置就完全代替了燃料的空气喷射，这就给柴油机在交通运输中的广泛应用提供了可能性，从此，柴油机开始了迅速的发展。

最初的柴油机均系四冲程。1905年瑞士制成第一台船用二冲程柴油机。美国通用汽车公司于1936年首先在中小功率柴油机上采用了二冲程形式。二冲程柴油机与四冲程柴油机相比，具有较高的单位容积功率和较均匀的扭矩，并且结构简单、使用维修方便；但是它的燃油及润滑油消耗量较高，冷却较困难和耐用性较差。目前二冲程和四冲程柴油机同样都得到广泛的应用。

柴油机增压的设想早在1896年鲁道夫·狄塞尔发明柴油机时就提出来了，当时他指出：“在单缸机上安装增压泵和进气室，这样改变了进气室中的空气压力，就能改变输出功率”。1911~1914年瑞士工程师阿尔弗雷德·比希(Alfred Büchi)首先提出柴油机废气涡轮增压的理论，并进行了试验。1925年他又以“脉冲增压”获得瑞士专利。1926

年废气涡轮增压机开始用于四冲程柴油机，1942年以后在低速、船用二冲程柴油机上陆续采用。增压技术可以有效地提高柴油机的平均有效压力，从而大幅度地提高柴油机的有效功率。与此同时，柴油机的经济性和废气污染也可得到明显地改善。目前，大型低速二冲程柴油机已全部采用涡轮增压，中速和高速大功率柴油机绝大多数采用涡轮增压，载重汽车和工程机械柴油机则越来越多地采用了涡轮增压技术。

内燃机自发明以来，一直把提高动力性，改善经济性以及提高可靠性和耐久性作为努力的目标，不断地进行研究改进。但是，自1961年美国开始规定轿车的排气标准之后，特别是1970年由于美国加利福尼亚州决定对载重卡车用柴油机排放的一氧化碳、碳氢化合物和氮氧化物从1973年和1975年起分两个阶段进行限制以来，加上1973年10月阿拉伯石油输出国大幅度地提高石油价格，这些严峻的问题给全世界的内燃机研究者和制造公司提出了新的要求，使内燃机传统的研究目标发生了根本性的变化。除了继续提高其动力性、可靠性、耐久性外，主要的研究目标将是净化废气、降低噪音、降低燃油消耗率和采用多种燃料。

二、内燃机的优缺点

与其它热机相比，内燃机的优点是：

1.热效率高。即运转经济性好，燃油消耗率低，特别是在部分负荷运行时更为显著。目前汽油机的有效热效率为30~35%，而柴油机的有效热效率已达46%，是所有热机中热效率最高的一种。

2.功率范围宽广。现代汽油机最小功率0.59kW，而柴油机的最大功率已达35328kW，故适用范围大。

3.结构紧凑、比重量（内燃机重量与标定功率的比值）较小、便于移动。

车用和工程机械用柴油机的比重量可达3.4~4.7kg/kW，而车用汽油机和军用高速柴油机的比重量有的可达1.36kg/kW，这对于车辆、工程机械和军用坦克、战舰等移动式动力装置特别有利。

4.起动迅速、操作简便，并能在起动后很快达到全负荷运行。

缺点是：

1.对燃料要求比较高。高速内燃机一般均使用汽油或轻柴油，并且对燃料的清洁程度要求严格。在气缸内部难以使用劣质燃料或固体燃料。

2.排气污染和噪音引起公害。由于内燃机应用在国民经济的各个领域，其产量和保有量极大，对环境的污染越来越严重。

3.结构较复杂、零部件加工精度要求高。

三、内燃机在国民经济中的应用

内燃机自十九世纪后期出现以来，经过一百多年来的不断研究和改进，已发展到相当完善的程度，在动力机械中占有极其重要的地位，它广泛地应用在国民经济和军事装备的各个领域中。

（一）航空

在第二次世界大战结束以前，飞机上一直使用往复式内燃机。目前，只有私人飞机、

教练飞机、直升飞机和其它轻型飞机还使用往复式内燃机。至于民航飞机，几乎都改用涡轮螺旋桨或涡轮喷气式发动机，而军用飞机则已全部改用涡轮喷气式发动机。

（二）农业

随着农业机械化的迅速发展，拖拉机及农田作业机械、排灌机械、农副产品加工机械、中小渔船、农船和林牧机械都大量使用内燃机作动力。

（三）车辆与机车

对于轿车和载重汽车，内燃机几乎是唯一的动力，尽管近些年来燃气轮机已取得了相当的进展，但把它作为车辆动力，目前还处于试验阶段。

蒸汽机是铁路机车的传统动力，但现在绝大多数蒸汽机车已被电力机车或内燃机车所取代。由于电力机车所需的电力网，其建设费用昂贵，故一般线路主要使用内燃机车。

（四）矿山、建筑及工程机械

在矿山机械、建筑和工程机械中，大都用内燃机作动力，自行式工程机械则均采用内燃机作动力。

采用内燃机为动力的工程机械主要有：

1. 起重机械，如汽车起重机、轮胎起重机、履带起重机；
2. 挖掘机械，如单斗挖掘机、多斗挖掘机、多斗挖沟机、隧道挖掘机；
3. 铲土运输机械，如铲运机、平地机、推土机、装载机、翻斗车等；
4. 压实机械，如压路机；
5. 路面机械，如道路翻松机、水泥（沥青）混凝土摊铺机、沥青喷洒机、混凝土振实机（如光面机、切缝机）；
6. 桩工机械，如柴油打桩机；
7. 混凝土机械，如混凝土搅拌输送车、汽车式混凝土输送泵等。

（五）船舶

内河船舶全部采用内燃机作动力。远洋客货轮和油轮则采用汽轮机或柴油机作动力。第二次世界大战后，由于船用柴油机废气涡轮增压技术的不断进步以及成功地解决了燃烧重油的问题，使船用柴油机的经济性大大得到改善。近些年来，在远洋客货轮和油轮上，柴油机动力已占有明显的优势。

（六）固定电站

对功率超过100MW的大型固定电站来说，汽轮机占领先地位。原子能电站也是利用汽轮机来发电的。但是，对中小型固定式或移动式电站来说，柴油发电机组是十分经济的，并愈来愈占有重要的地位。

（七）军事装置

坦克、装甲车、重武器牵引车以及各种水面舰艇和潜水艇等，内燃机都是最主要的动力。

四、内燃机的分类

把燃料燃烧时所放出的热能转换成机械能的机器称为热机。

热机可分为外燃机和内燃机两大类。燃料燃烧的气体将所含的热能通过其它介质转变

为机械能者，称为外燃机，如蒸汽机和汽轮机等；燃料在气缸内部进行燃烧，所产生的气体（即工质）直接将所含的热能转变为机械能者，称为内燃机，如汽油机、柴油机、煤气机和燃汽轮机等。其中以汽油机和柴油机应用最为广泛，通常所说的内燃机多是指这两种发动机。

内燃机按其主要运动机构的不同，分为往复活塞式内燃机和旋转活塞式内燃机两大类。其中往复活塞式内燃机在数量上占统治地位。所谓旋转活塞式内燃机是本世纪50年代才出现的新型发动机，它没有往复活塞式内燃机的往复运动机构和气门机构，结构简单，体积小，重量轻，转速高，单位气缸容积的有效功率大，振动小，运转平稳，而且制造成本低。世界上一些工业发达国家经过长期的研究试制工作，已小批量投入生产，主要适用于高速场合，如小客车、竞赛汽车、赛艇、飞机等方面。我国也对这种发动机进行了大量的研制工作，并取得了一定的成果。由于旋转活塞式内燃机还存在着不少问题，所以目前尚未普遍应用。

常用的往复活塞式内燃机分类方法如下：

1. 按燃料分类，有：

柴油机；汽油机；煤气（包括各种气体燃料）机等。

2. 按一个工作循环的行程数分类，有：

四冲程内燃机；二冲程内燃机。

3. 按燃料着火方式分类，有：

压燃式内燃机；点燃式内燃机。

4. 按冷却方式分类，有：

水冷式内燃机；风冷式内燃机。

5. 按进气方式分类，有：

自然吸气式内燃机；增压式内燃机。

6. 按气缸数目分类，有：

单缸内燃机；多缸内燃机。

7. 按气缸排列分类，有：

直列式内燃机；V型内燃机；卧式内燃机；对置气缸内燃机等（图0-1）。

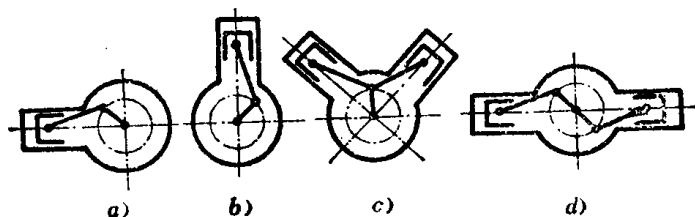


图 0-1 气缸排列形式

8. 按转速或活塞平均速度分类，有：

高速内燃机（标定转速高于1000r/min或活塞平均速度高于9m/s）；中速内燃机（标定转速600~1000r/min或活塞平均速度6~9m/s）；低速内燃机（标定转速低于600r/min或活塞平均速度低于6m/s）。

9. 按用途分类，有：

农用、汽车用、工程机械用、拖拉机用、铁路机车用、船用及发电用等内燃机。

五、工程机械用内燃机的特点

工程机械的技术性能在很大程度上由其发动机的结构、性能和技术水平所决定。工程机械内燃机主要有以下几个方面的特点：

1. 工程机械的施工场地往往是凹凸不平的，使内燃机工作时受到很大的冲击和振动，因此机体要有较大的刚度和强度，附件应可靠地连结。为了减小底盘变形对内燃机的影响，常在内燃机与底盘之间采用三点支承或弹性支承的连接方式。

2. 工程机械经常要在倾斜地面上工作，内燃机应能保证在前后、左右倾斜 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的情况下可靠地运转，因此对润滑、冷却和燃油供给等系统的设计要有相应的措施。

3. 施工场地的空气含尘量很大（可达 $1.5 \sim 2.0 \text{g/m}^3$ ），内燃机不但要配备效率高、容量大的空气滤清器，还应配备高效率的燃油和机油滤清器，以保证内燃机有较长的使用寿命。

4. 工程机械使用的地区极广，环境气温的变化幅度较大，所以对燃油、机油、冷却系统和起动方法应作特殊的考虑。

5. 工程机械在隧道或矿井工作时，内燃机应有严格的废气净化和降低噪音的措施；在水中工作时，要采用防水的密封结构。

6. 工程机械经常在急速变工况下工作，特别是负荷的变化率很大。为使工程机械在任何转速下均能稳定运转，内燃机需要使用性能良好的全程式调速器。

7. 工程机械内燃机全负荷作业时间所占的比例较大。此外在工作时还经常承受突加负荷，而且在某些情况下还需在超负荷下工作。因此扭矩储备要大，工作转速范围要宽，其扭矩储备系数一般不应小于15%，转速适应性系数不应小于1.4。

8. 一定用途的工程机械内燃机在结构布置上有其特殊的要求。如推土机及装载机希望内燃机在飞轮前有侧向动力输出装置（输出50~70%功率），以便提升及转向等机构的取力；液压传动的单斗挖掘机则希望内燃机前端（自由端）也能输出功率（有时输出100%功率），以带动液压泵；液力传动的工程机械其液力变矩器用油的冷却要由内燃机冷却系统来完成。

由以上特点可知，工程机械内燃机是在十分苛刻的使用条件下工作的，在设计和改造时必须对内燃机整体性能以及零部件的附属设备进行充分地考虑，采用相应措施研制专用的工程机械内燃机系列，或者由车用内燃机变型使用，以满足各种工程机械的要求。

由于工程建设规模不断扩大，而建设周期要求缩短，目前工程机械内燃机正在向大型化、高速化和增压化发展。与此同时，还要求不断提高可靠性、延长使命寿命、降低燃油消耗。此外，降低工程机械内燃机的噪音和废气污染也必须予以足够的重视。

第一章 内燃机的基本工作原理与总体构造

第一节 内燃机的基本名词术语

图1-1为单缸往复式活塞式内燃机结构简图。它主要由排气门1、进气门2、气缸盖3、气缸4、活塞5、活塞销6、连杆7和曲轴8等组成。

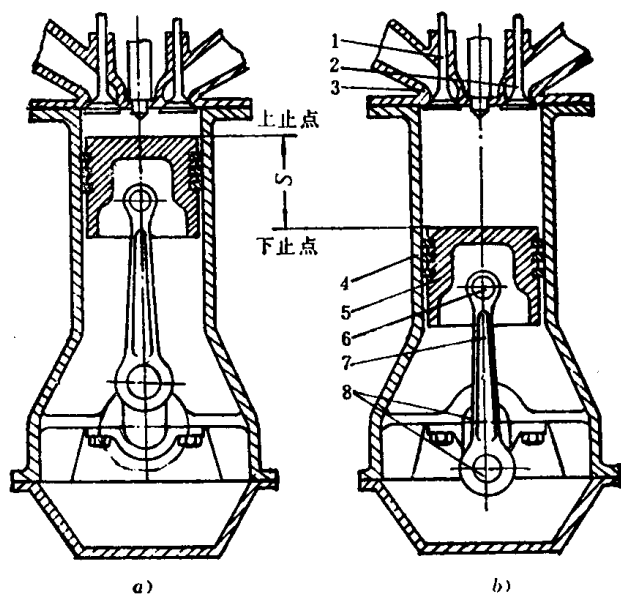


图 1-1 往复式活塞式内燃机结构简图

a) 活塞在上止点; b) 活塞在下止点

1—排气门; 2—进气门; 3—气缸盖; 4—气缸; 5—活塞; 6—活塞销; 7—连杆; 8—曲轴

从图中可以看出活塞在气缸中上下各移动一个行程，曲轴旋转一周。活塞顶端离曲轴旋转中心最远处，称为上止点。活塞顶端离曲轴中心最近处，称为下止点。上、下止点间的距离 S 称为活塞行程。连杆轴颈中心到曲轴轴颈中心的距离 R 为曲柄半径。对于气缸中心线通过曲轴中心线的内燃机，其活塞行程为曲柄半径的两倍，即 $S = 2R$ 。

活塞处于上止点位置时，活塞顶部的气缸容积称为燃烧室容积或余隙容积，用 V_c 表示。活塞处于下止点位置时，活塞顶以上的气缸容积称为气缸的总容积，用 V_a 表示。活塞由上止点移动到下止点所扫过的容积，称为气缸的工作容积，用 V_h 表示。因此，气缸总容积等于工作容积与燃烧室容积之和，即

$$V_a = V_h + V_c \quad (1-1)$$

多缸机各气缸工作容积的总积称为内燃机排量，用 V_L 表示。若气缸数为 i ，气缸直径为 D ，活塞行程为 S ，以升为单位的内燃机排量可由下式计算：

$$V_L = \frac{\pi D^2}{4 \times 10^3} S i \quad \text{L} \quad (1-2)$$

气缸总容积和燃烧室容积之比，称为压缩比，用 ϵ 表示。

$$\epsilon = \frac{V_0}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (1-3)$$

压缩比表示气缸中气体被压缩的程度。

对于往复式活塞式内燃机，曲轴每转两圈，活塞往复运动四次完成进气、压缩、做功、排气一个工作循环的为四冲程内燃机；如果曲轴每转一圈，活塞往复运动两次完成一个工作循环的称为二冲程内燃机。

第二节 四冲程内燃机工作原理及示功图

一、单缸四冲程柴油机的工作原理

1. 进气过程（图1-2a） 活塞从上止点向下止点移动，这时在配气机构作用下进气门打开，排气门关闭。由于活塞下移，气缸容积增大，气缸内产生真空吸力，新鲜空气经滤清器、进气管不断吸入气缸。

2. 压缩过程（图1-2b） 活塞由下止点向上止点移动，这时进、排气门均关闭。气缸内容积不断减小，气体被压缩，其温度和压力都不断提高，为喷入气缸内的柴油蒸发、混合和燃烧创造条件。

3. 膨胀做功过程（图1-2c） 在压缩过程接近终了时，喷油器将柴油以细小的油雾喷入气缸，在高温、高压和高速气流作用下很快蒸发与空气混合，形成可燃混合气。并在高温下自行着火燃烧，放出大量热量，使气缸中气体温度和压力急剧上升。高压气体膨胀便推动活塞从上止点向下止点移动，从而推动曲轴旋转。这样，燃料的热能转变成曲柄连杆机构的机械运动而对外做功。随着活塞下移，气缸内的温度和压力也逐渐下降。

4. 排气过程（图1-2d） 此时排气门打开，进气门关闭。活塞从下止点向上止点移动，废气便依靠压力差和活塞上行的排挤，迅速从排气门排出。

活塞经过上述四个连续工作过程后，便完成了一个工作循环。当活塞再次由上止点向下止点移动时，又开始了下一个工作循环。这样周而复始地继续下去。

在柴油机每一个工作循环中，虽然各阶段的任务不一样，但它们都是互相联系的。例如进气、压缩和排气这三个阶段都是为了做功阶段作准备的。只有废气排除愈干净，进入气缸内的新鲜空气才会愈多；只有将空气进行压缩，才能获得高温、高压，使柴油自然而产生大量热能并转化为机械能。反之，做功过程也为其它三个阶段提供了足够的能量，使曲轴能连续旋转。由此可见，在四冲程柴油机中，只有做功行程对外输出机械功，其余三

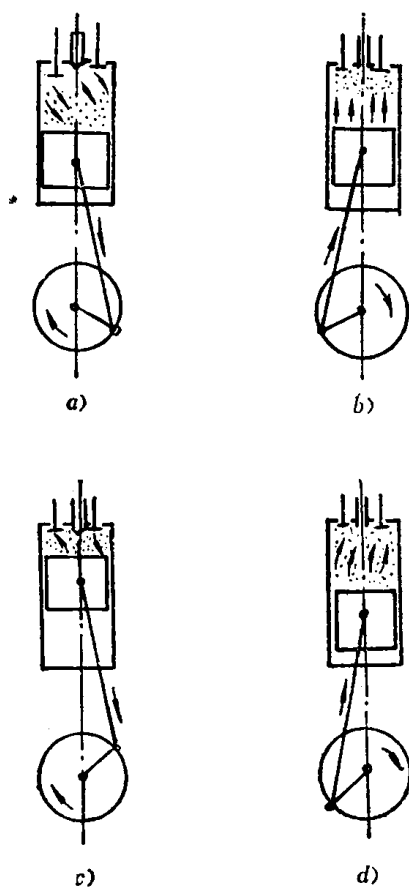


图 1-2 单缸四冲程柴油机的工作过程
a) 进气；b) 压缩；c) 做功；d) 排气

个行程都是消耗机械功的。

二、单缸四冲程汽油机工作原理

单缸四冲程汽油机工作时，同样由进气、压缩、作功、排气四个行程构成一个工作循环，但是，由于汽油机是用汽油作燃料的，因此，汽油机的工作原理与柴油机有所差别，其特点如下：

1. 进气行程时，吸入气缸的气体不是纯空气，而是空气与汽油的混合气，此混合气是在气缸外部的化油器中混合而成。

2. 汽油机中可燃混合气着火燃烧，不是靠压燃，而是靠火花塞强制点火。

3. 汽油机压缩过程中压缩比较小，一般为6~9，而柴油机大约为12~22左右。

4. 汽油机在工作循环进行的过程中，缸内气体的状态参数也不同于柴油机。

三、示功图

内燃机示功图即气缸内气体压力随曲轴转角或气缸容积变化的曲线图，它是用示功器在试验中直接测得的。由示功图可以得到许多重要数据，如气缸内气体的瞬时压力和温度，最高爆发压力，着火时刻，燃烧终点，燃烧规律等，它们是分析内燃机工作过程好坏的原始数据。

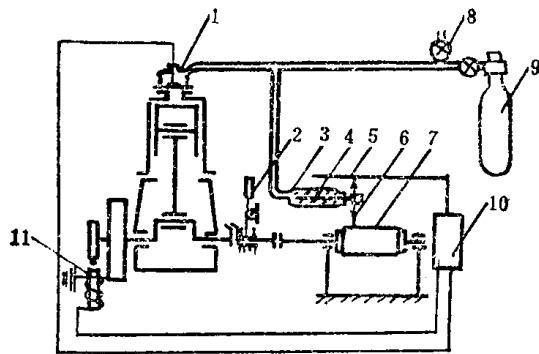


图 1-3 气电示功器工作原理图

1—压力传感器；2—离合器；3—弹簧机构；4—弹簧；5—导杆；6—记录指针；7—记录装置圆筒；8—阀门；9—压缩空气储气瓶；10—闸流管继电器；11—上止点传感器

图1-3为常用的气电示功器工作原理简图。它由压力传感器，电路系统，气路系统及记录装置等四部分组成。

压力传感器装在内燃机气缸盖上，当气缸内压力变化时，通过压力传感器接通或断开电路，将信号传至闸流管继电器10。压力传感器的阀（膜片式或活阀式）

将传感器分为上下两部分，下部空间与内燃机气缸相通；上部空间与压缩空气系统相连，系统中空气压力可由阀8调节。

电路系统主要由闸流管继电器组成。其主要作用是将压力传感器和上止点传感器所产生的信号变为高压脉冲电流，在记录装置的指针6和圆筒7之间产生火花。

气路系统由压缩储气瓶9，管路和阀组成。管路的一端通向压力传感器，另一端通向记录装置的弹簧机构8的气室。

记录装置的圆筒7经离合器2与内燃机曲轴相连，并随曲轴转动。记录纸装在圆筒上。弹簧机构中有一传动杆，杆的一端受弹簧4压力作用，另一端受室中气体压力作用，此气室与压缩空气系统相通。传动杆与记录指针相连，指针两头各与导杆5和圆筒相接触，并可在两者之间滑动。指针的移动是气路中空气压力及弹簧力共同作用的结果，移动距离大小与气室中空气压力成正比。

示功器工作时，先将压缩空气充入示功器气路系统中，则传感器的阀因空气压力作用而被压向下阀座。在压缩过程中，当内燃机气缸内气体压力开始等于或稍高于传感器上部空间空气压力时，阀即离开下阀座而压向上阀座。在这一瞬间，闸流管继电器中感应出高压电，在指针和圆筒之间产生火花，在记录纸上打出一个孔。在膨胀过程中，当内燃机

气缸内气体压力降低到等于空气压力时，阀离开上阀座，同样引起火花，在记录纸上又打出另一个小孔。由于指针移动的距离与气缸内气体压力成正比，因此各孔的位置表明了气缸内压力随曲轴转角变化的规律。对这些孔组成的压力带进行数学处理后，就可以得到数值可靠具有代表性的 $p-\varphi$ 示功图，如图1~4所示。利用内燃机曲柄连杆机构中活塞位移和曲轴转角之间的几何关系，还可转换描绘出另一种气缸内压力随气缸容积变化的 $P-V$ 示功图，如图1-4所示。 $P-V$ 示功图中 $r-a$ 、 $a-c$ 、 $c-b$ 、 $b-r$ 分别为进气、压缩、做功、排气过程的气体压力变化曲线。 P_0 表示大气压力。

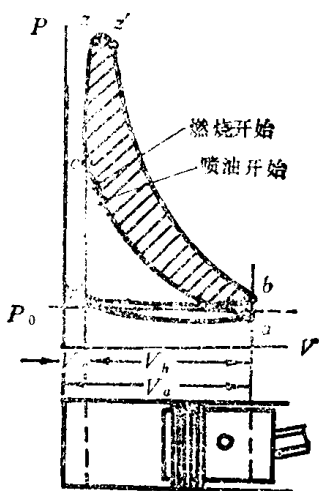


图 1-4 四冲程柴油机示功图

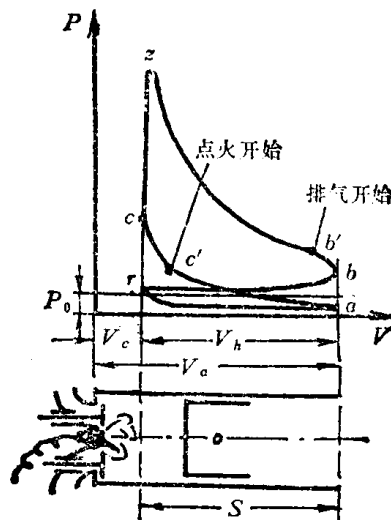


图 1-5 四冲程汽油机示功图

当活塞在排气上止点 r 时，由于排气系统的阻力，上一循环的废气不可能完全排净，因此缸内废气压力略高于大气压力 P_0 ($103\sim 105\text{kPa}$)，温度为 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 。进气行程随着活塞下行，气缸容积增大，压力下降。当气缸内压力低于大气压力 P_0 后，空气被吸入气缸，由于进气系统存在阻力，使进气终了气缸内的气体压力低于大气压力 P_0 ($78\sim 91\text{kPa}$)，温度为 $50\sim 70^\circ\text{C}$ 。

活塞由下止点 a 向上移动，对气缸中气体进行压缩，气体的温度和压力随压缩程度的增加而不断提高。压缩终了时气体压力达 $2940\sim 4420\text{kPa}$ ，温度为 $500\sim 700^\circ\text{C}$ 。

压缩临近终了时，喷油器喷入雾状柴油与空气混合后着火燃烧。缸内气体压力急剧上升到 Z 点，此时压力可达 $5900\sim 8800\text{kPa}$ ，温度升到 $1500\sim 2000^\circ\text{C}$ 。由于喷油和燃烧要持续一段时间，所以，虽然活塞开始下移，但此时还有喷入的燃料继续燃烧放热，气缸内的压力并不明显下降，直到 Z' 点燃烧才基本结束。随着气体膨胀做功而推动活塞继续下移，缸内压力和温度很快下降。

活塞从下止点 b 向上止点 r 移动，废气从排气门排出。由于排气系统有阻力，因此，排气终了时，气缸内废气压力略高于大气压力。当活塞再次向下移动时，又开始了新的工作循环。

示功图中斜线部分面积的大小，就是一个气缸在一个工作循环内气体对活塞所作功的大小。同一柴油机，在不同负荷下工作时，示功图上斜线部分面积的大小不同。小负荷时示功图上的面积小，大负荷时示功图上的面积大。

图1-5为四冲程汽油机示功图。从图中可以看出，与柴油机相比，缸内气体压缩程度