

机械工程手册

第 74 篇 内 燃 机

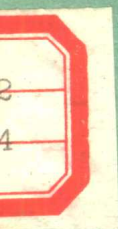
(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机 械 工 业 出 版 社



机械工程手册

第74篇 内 燃 机

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会

机械工业出版社

本篇介绍了各种内燃机的基本原理、结构、特点、增压技术、测试方法、噪声控制与废气净化等内容。扼要介绍了内燃机及其主要零部件的设计与计算公式、数据和资料。对内燃机的发展趋势也作了简要介绍。

机 械 工 程 手 册

第 74 篇 内 燃 机

(试 用 本)

上海内燃机研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $10^{5/8}$ · 字数 298 千字

1979 年 3 月北京第一版·1979 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—60,000 · 定价 0.81 元

*

统一书号: 15033 · 4612

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来，机械工业在毛主席的革命路线指引下，贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验，同时采用国外先进技术，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的，有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员，更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本篇是《机械工程手册》第74篇，由上海内燃机研究所主编，参加编写的有天津大学、天津内燃机研究所、吉林工业大学、北京内燃机总厂、上海柴油机厂、华中工学院、山东工学院、西安交通大学、九江动力机厂、长春汽车研究所、上海交通大学、镇江农机学院、洛阳拖拉机研究所、北京汽车厂、无锡油泵油嘴厂、济南柴油机厂、长沙汽车电器研究所、大连热力机车研究所、天津工程机械研究所、温州船用挂机厂、无锡柴油机厂、龙溪机器厂、上海货车厂、上海工程机械厂、无锡钻探工具厂、兰州电源车辆设计研究所等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组
电机工程手册

目 录

第1章 概 述

- 1 内燃机在国民经济中的地位.....74-1
- 2 内燃机的主要特点及其主要分类.....74-3
 - 2.1 内燃机的主要特点74-3
 - 2.2 内燃机的主要分类74-3
- 3 现代内燃机的发展.....74-4
 - 3.1 发展趋势74-4
 - 3.2 在发展中受到的限制74-5
- 4 内燃机总体设计概述.....74-6
 - 4.1 主要结构型式和尺寸的确定74-6
 - 4.2 总体布置74-6
 - 4.3 内燃机的研制步骤74-6

第2章 基本工作原理

- 1 工作循环.....74-7
 - 1.1 理想循环74-7
 - 1.2 实际循环74-8
 - 1.3 工作过程主要参数74-9
- 2 内燃机主要性能指标74-11
- 3 内燃机主要特性74-11
 - 3.1 负荷特性.....74-11
 - 3.2 速度特性.....74-12
 - 3.3 调速特性.....74-12
 - 3.4 推进特性.....74-13
 - 3.5 万有特性.....74-13
- 4 曲柄连杆机构的运动分析74-13
- 5 曲柄连杆机构的动力分析74-14
 - 5.1 单缸内燃机的惯性力.....74-14
 - 5.2 多缸内燃机的惯性力和惯性力矩.....74-15
 - 5.3 作用在曲柄连杆机构上的力和力矩.....74-16
- 6 内燃机的平衡74-16
 - 6.1 内燃机的平衡分析.....74-16
 - 6.2 内燃机的平衡方法.....74-18
- 7 曲轴轴系的扭转振动74-19
 - 7.1 扭振现象及其危害.....74-19
 - 7.2 扭振计算步骤.....74-19
 - 7.3 扭振许用应力.....74-23

- 7.4 扭振的消减.....74-23

第3章 燃烧与燃烧室

- 1 柴油机的燃烧与燃烧室74-24
 - 1.1 燃烧过程.....74-24
 - 1.2 典型燃烧室.....74-24
- 2 汽油机的燃烧与燃烧室74-27
 - 2.1 燃烧过程.....74-27
 - 2.2 不正常燃烧.....74-27
 - 2.3 汽油机燃烧室的设计要求.....74-27
 - 2.4 典型燃烧室.....74-27

第4章 主要零部件

- 1 活塞与连杆74-29
 - 1.1 活塞.....74-29
 - 1.2 活塞环.....74-30
 - 1.3 活塞销.....74-32
 - 1.4 连杆.....74-33
 - 1.5 连杆螺栓.....74-36
- 2 曲轴与轴承74-37
 - 2.1 曲轴.....74-37
 - 2.2 曲轴主轴承与连杆轴承.....74-41
- 3 气缸套、气缸盖和机体74-44
 - 3.1 气缸套.....74-44
 - 3.2 气缸盖.....74-47
 - 3.3 机体.....74-50
- 4 配气机构74-54
 - 4.1 概述.....74-54
 - 4.2 布置形式.....74-54
 - 4.3 运动学和动力学.....74-54
 - 4.4 凸轮型线设计.....74-55
 - 4.5 配气机构主要零部件结构与设计.....74-56

第5章 供给系统

- 1 进气系统74-58
 - 1.1 汽油机进气管.....74-58
 - 1.2 柴油机进气道.....74-58
 - 1.3 空气滤清器.....74-59

- 2 柴油机燃油供给系统74-61
 - 2.1 喷油泵.....74-61
 - 2.2 喷油器.....74-68
 - 2.3 输油泵.....74-69
 - 2.4 喷油角度提前器.....74-70
 - 2.5 调速器.....74-70
 - 2.6 柴油滤清器.....74-71
- 3 汽油机燃油供给系统74-72
 - 3.1 化油器.....74-72
 - 3.2 汽油泵.....74-76
 - 3.3 汽油滤清器.....74-76

第6章 润滑、水冷、起动和点火系统

- 1 润滑系统74-78
 - 1.1 功能与设计要求.....74-78
 - 1.2 典型润滑系统.....74-78
 - 1.3 主要参数.....74-79
 - 1.4 润滑油的选用.....74-80
 - 1.5 主要部件.....74-81
- 2 水冷系统74-84
 - 2.1 功能与设计要求.....74-84
 - 2.2 主要参数.....74-84
 - 2.3 水冷系统的类型.....74-85
 - 2.4 主要部件.....74-88
- 3 起动系统74-91
 - 3.1 功能与设计要求.....74-91
 - 3.2 起动系统的类型.....74-91
 - 3.3 起动辅助装置.....74-94
- 4 点火系统74-96
 - 4.1 功能与设计要求.....74-96
 - 4.2 点火系统的类型.....74-96
 - 4.3 主要部件.....74-97
- 2.2 性能特点74-101
- 2.3 结构特点74-102
- 2.4 发展趋势74-102
- 3 汽车用汽油机和柴油机74-102
 - 3.1 使用特点74-102
 - 3.2 性能和结构特点74-102
 - 3.3 发展趋势74-103
- 4 机车用柴油机74-105
 - 4.1 使用特点74-105
 - 4.2 性能特点74-105
 - 4.3 结构特点74-105
 - 4.4 发展趋势74-105
- 5 船用柴油机74-106
 - 5.1 使用特点74-106
 - 5.2 性能特点74-106
 - 5.3 结构特点74-106
 - 5.4 发展趋势74-107
- 6 小型汽油机、摩托车汽油机和船用
挂机74-107
 - 6.1 小型汽油机74-107
 - 6.2 摩托车汽油机的特点74-108
 - 6.3 船用挂机74-108
- 7 发电用内燃机74-110
 - 7.1 使用特点74-110
 - 7.2 性能特点74-110
 - 7.3 结构特点74-111
 - 7.4 发展趋势74-111

第8章 二冲程内燃机

第7章 各种用途内燃机的特点

- 1 农用和拖拉机用柴油机74-99
 - 1.1 使用特点.....74-99
 - 1.2 性能特点74-100
 - 1.3 结构特点74-100
 - 1.4 发展趋势74-101
- 2 工程机械用柴油机.....74-101
 - 2.1 使用特点74-101
- 1 概述74-111
- 2 换气过程74-114
 - 2.1 换气方式的分类74-114
 - 2.2 换气过程的三个时期74-116
 - 2.3 评价换气品质的主要参数74-117
- 3 换气系统74-117
 - 3.1 给气比及扫气压力的选择74-117
 - 3.2 气口参数74-118
 - 3.3 气口及气道74-118
 - 3.4 进、排气波动效应的利用74-119
- 4 二冲程柴油机的废气涡轮增压74-119
- 5 结构设计要点74-120

第9章 风冷内燃机

- 1 概述74-120
 - 1.1 整机特点与使用场合74-120
 - 1.2 散热过程与散热量74-124
- 2 散热片与散热面积74-124
 - 2.1 气缸散热片74-124
 - 2.2 气缸散热面积74-124
- 3 气缸盖和气缸套74-124
 - 3.1 气缸盖74-124
 - 3.2 气缸套74-127
 - 3.3 气缸的连接与安装74-128
- 4 冷却风扇74-129
 - 4.1 风扇概述74-129
 - 4.2 风扇与内燃机的匹配74-129
 - 4.3 风扇的传动和功率74-130
- 5 风冷系统总体布置74-130
 - 5.1 风冷系统总体方案74-130
 - 5.2 导风罩74-132
 - 5.3 风量的调节74-132

第10章 内燃机增压技术

- 1 概述74-133
 - 1.1 增压原理74-133
 - 1.2 增压系统分类74-133
 - 1.3 汽油机、煤气机增压74-135
 - 1.4 现代增压柴油机的技术指标74-135
- 2 涡轮增压器74-135
 - 2.1 分类74-135
 - 2.2 涡轮与压气机的平衡运转74-136
- 3 涡轮增压系统74-137
 - 3.1 定压系统74-137
 - 3.2 脉冲系统74-137
 - 3.3 脉冲转换系统74-138
- 4 涡轮增压器与内燃机的配合74-140
 - 4.1 涡轮增压器与内燃机的配合特性74-140
 - 4.2 涡轮增压器的选配方法74-140
 - 4.3 涡轮增压器与内燃机配合特性的调整74-142
- 5 改善增压内燃机热负荷与机械负荷的措施74-142

- 5.1 控制最高爆发压力增长的措施74-142
- 5.2 控制热负荷增长的措施74-143
- 5.3 采用超压比增压系统74-143
- 5.4 采用两级增压74-143

第11章 其他内燃机

- 1 煤气机74-143
 - 1.1 概述74-143
 - 1.2 煤气机的主要燃料74-143
 - 1.3 煤气机种类74-144
 - 1.4 煤气机的主要参数和结构74-144
- 2 旋转活塞发动机74-145
 - 2.1 三角活塞汽油转子机74-145
- 3 自由活塞发气机74-147
 - 3.1 概述74-147
 - 3.2 自由活塞——燃气轮机组的特点74-147
 - 3.3 自由活塞发气机主要性能和结构参数74-147
 - 3.4 主要运行特点74-148
- 4 内燃打桩机74-148
 - 4.1 工作原理74-148
 - 4.2 主要技术参数74-149
- 5 内燃夯土机74-149
 - 5.1 基本结构74-149
 - 5.2 工作原理74-149
 - 5.3 主要技术参数74-149
- 6 内燃凿岩机74-149
 - 6.1 基本结构74-149
 - 6.2 工作原理74-151
 - 6.3 主要技术参数74-151

第12章 内燃机噪声控制与废气净化

- 1 噪声控制74-151
 - 1.1 概述74-151
 - 1.2 主要噪声源的特点及其降低方法74-152
 - 1.3 低噪声内燃机的设计74-153
- 2 废气净化74-154
 - 2.1 概述74-154
 - 2.2 排污生成原因74-154
 - 2.3 废气净化的措施74-155
 - 2.4 排气测试74-156

第13章 内燃机试验与测量

- 1 概述74-156
- 2 典型试验方法74-157
 - 2.1 试验时的注意要点74-157
 - 2.2 特性曲线的制取74-157
- 3 基本参数的测量方法74-157
 - 3.1 试验台架的要求74-157

- 3.2 有效功率的测定74-158
- 3.3 燃油消耗率的测定74-158
- 3.4 示功图的测录74-159
- 3.5 机械效率的测定74-159
- 3.6 空气消耗量的测定74-160
- 3.7 热平衡试验74-160
- 3.8 过量空气系数的测定74-160
- 3.9 其他参数的测量74-161

常用符号表

C_m ——活塞平均速度 m/s	S ——活塞行程 mm
D ——气缸直径 mm	$T_0(t_0)$ ——大气温度 K, (°C)
G_T ——燃油消耗量 kg/h	$T_a(t_a)$ ——进气终点温度 K, (°C)
g_c ——换算因数, $9.81\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2)$	$T_b(t_b)$ ——膨胀终点温度 K, (°C)
g_e ——燃油消耗率(比油耗) g/(PS·h)	$T_c(t_c)$ ——压缩终点温度 K, (°C)
g_N ——比重量 kgf/PS	$T_K(t_K)$ ——增压空气温度 K, (°C)
H_u ——燃料的低热值 kcal/kg	$T_r(t_r)$ ——排气温度 K, (°C)
i ——气缸数	$T_T(t_T)$ ——涡轮前排气管内温度 K, (°C)
K ——空气绝热指数	V_h ——气缸工作容积 l, cm^3
K_T ——燃气绝热指数	α ——过量空气系数
l ——连杆长度(连杆大、小头中心距) mm	γ_r ——残余废气系数
L_0 ——燃烧1kg燃料理论上所需空气量 kg/kg	δ_1 ——瞬时调速率
M ——倾覆力矩 kgf·m	δ_2 ——稳定调速率
M_e ——内燃机输出扭矩 kgf·m	e ——压缩比
N ——功率 PS	η_e ——有效热效率
N_e ——有效功率 PS	η_i ——指示热效率
N_{eb} ——标定功率 PS	η_m ——机械效率
N_i ——指示功率 PS	η_s ——扫气效率
N_m ——摩擦功率 PS	η_v ——充量系数
n ——发动机转速 r/min	θ ——喷油提前角或点火提前角 °, deg
n_1 ——压缩多变指数	λ ——压力升高率
n_2 ——膨胀多变指数	ξ_s ——显燃期的热量利用系数
n_b ——标定转速 r/min	π_K ——增压比
n_{TK} ——增压器转速 r/min	τ ——冲程数(四冲程: $\tau=4$, 二冲程: $\tau=2$)
p_0 ——大气压力 kgf/cm ²	$\varphi(\alpha)$ ——曲轴转角 °CA
p_a ——进气终点压力 kgf/cm ²	φ_s ——扫气系数
p_b ——膨胀终点压力 kgf/cm ²	
p_c ——压缩终点压力 kgf/cm ²	
p_e ——平均有效压力 kgf/cm ²	
p_K ——增压压力 kgf/cm ²	
p_r ——涡轮前排气管内压力 kgf/cm ²	
p_z ——最高爆发压力 kgf/cm ²	
P ——作用力 kgf	
P_N ——活塞侧推力 kgf	
P_j ——往复惯性力 kgf	
P_r ——离心力 kgf	

使用单位制的补充说明

根据国务院1977年颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》，我国计量单位制，将逐步采用比较科学的国际单位制(SI)，故本篇采用质量作为基本单位(kg)，而力的单位，国际单位制用牛顿(N)，即 $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ，考虑到国内实际情况，仍沿用重力单位制中力的单位，即公斤力(kgf)。由于同时采用两种单位制，在具体计算中将引入牛顿与公斤力的换算因数 g_c ， $g_c\approx 9.81\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2)=9.81\text{N}/\text{kgf}$ 。

第1章 概 述

1 内燃机在国民经济中的地位

内燃机是将燃料（液体或气体）引入气缸内燃烧，再通过燃气膨胀、推动活塞、曲柄-连杆机构，从而输出机械功的热力发动机。

内燃机自十九世纪后期出现以来，获得了广泛的应用，至今已成为现代动力机械的重要组成部分。

在农业上，农田作业机械、排灌机械、农副业

加工机械、中小渔船、农船和林牧机械等都大量使用内燃机作动力。

在交通运输方面，载重汽车、轿车、内河船舶、内燃机车及部分远洋客货轮和油轮一般都以内燃机为动力。图 74·1-1 和图 74·1-2 所示分别为轿车和轻型载重汽车用内燃机。

在矿山机械、石油钻探、油田气矿开发机械、建筑和施工机械等工程机械中，也大都以内燃机为动力。图 74·1-3 所示为工程机械用柴油机。

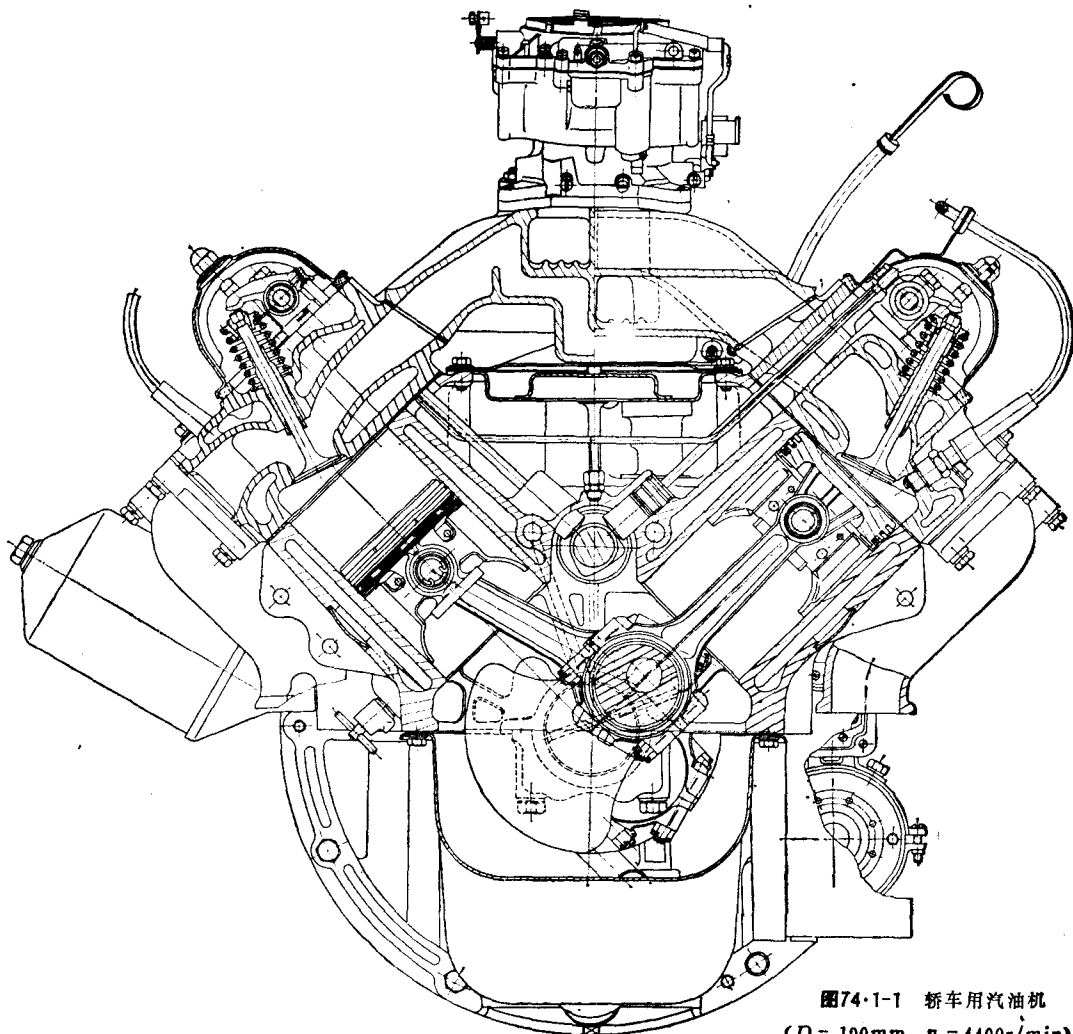


图74·1-1 轿车用汽油机
($D = 100\text{mm}$ $n = 4400\text{r/min}$)

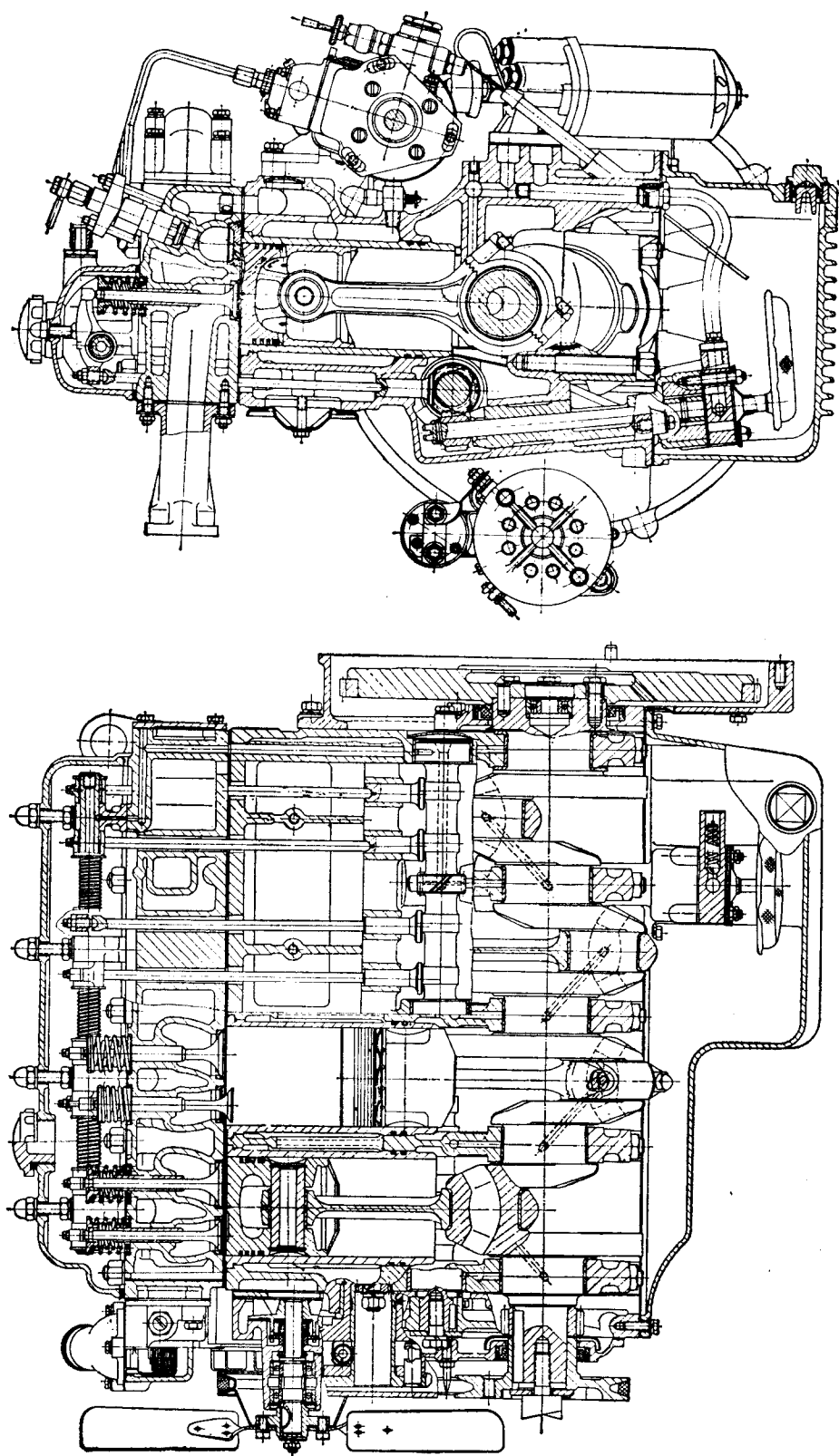


图74-1-2 轻型载重汽车用柴油机 ($D = 85\text{mm}$ $n = 3000\text{r/min}$)

在坦克、装甲车、摩托车、各种轻型舰艇和重武器牵引车等方面，内燃机几乎是唯一的动力。

在中小型电站方面，内燃机也愈来愈占有重要地位。

鉴于内燃机用途如此广泛，因此在实现我国农业、工业、国防和科学技术现代化的过程中，大力发展内燃机工业具有重要意义。

2 内燃机的主要特点及其主要分类

2.1 内燃机的主要特点

(1) 有效热效率高于其他动力机械（如蒸汽机、蒸汽轮机和燃气轮机等）。特别是增压柴油机的有效热效率已达到46%。

(2) 功率范围宽广（0.8~48000 PS），能适应多方面用途。

(3) 体积功率高，比重量较小，便于移动。

(4) 起动性好，并能很快达到全负荷运转。

(5) 对燃料的要求比蒸汽轮机和燃气轮机高。

(6) 废气中含有害成分、臭味和碳烟，是公害之一。

(7) 结构较复杂，零部件加工精度要求较高。

2.2 内燃机的主要分类

(1) 按所用燃料分 有柴油机、汽油机、煤气（包括各种气体燃料）机等。

(2) 按一个工作循环的冲程数分 有四冲程和二冲程内燃机。

(3) 按气缸冷却方式分 有水冷和风冷内燃机。

(4) 按燃料在气缸内的着火性质分 有压燃式和点燃式内燃机。

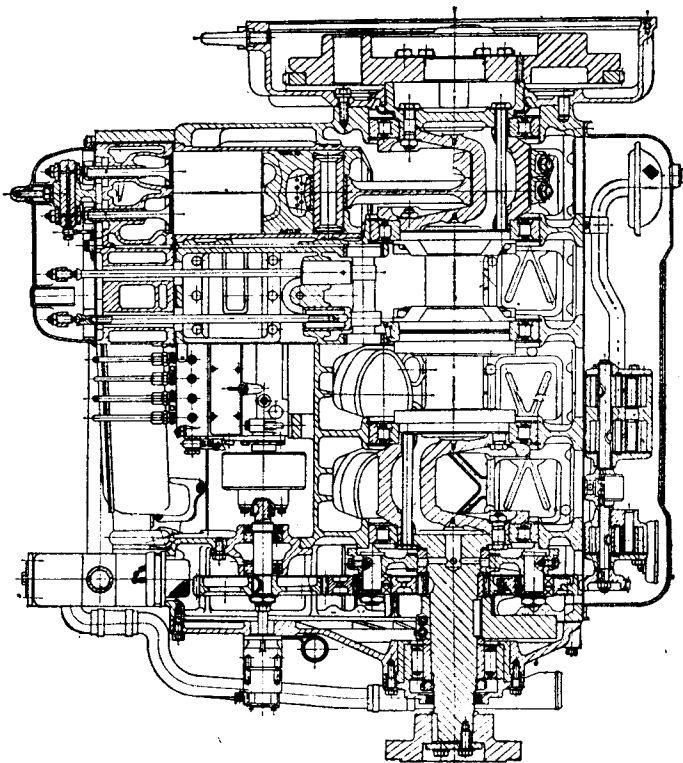
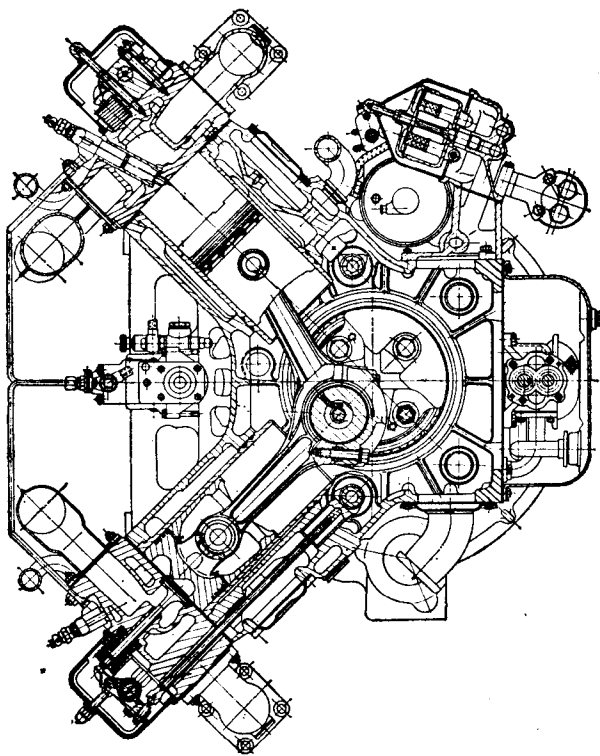


图74-1-3 工程机械用柴油机 ($D=135\text{mm}$ $n=2200\text{r/min}$)

(5) 按气缸排列分 有直列式、卧式、V型、星型、X型、W字型等内燃机。

(6) 按转速和活塞平均速度分 有高速、中速、低速内燃机。

(7) 按气缸数分 有单缸、多缸内燃机。

(8) 按用途分 有农用、汽车用、工程机械用、拖拉机用、内燃机车用、船用、固定用和发电用等内燃机。

(9) 按是否增压分 有增压和非增压内燃机。

3 现代内燃机的发展

3.1 发展趋势

(1) 提高内燃机的单机功率。提高单机功率的主要途径有：增加气缸工作容积（增大缸径和增加缸数）、提高转速、提高平均有效压力（采用增压、改善燃烧、减少机械损失）等。表74-1-1至表74-1-3示出了现代内燃机产品达到的先进技术指标。

表74-1-1 内燃机产品大型化达到的先进指标

机型①及用途	气缸直径 mm	缸 数 i	单缸功率 PS	单机功率 PS
大型低速、船用二冲程柴油机	930~1060	10~12	2500~4000	2500~48000
大型中速、船用、发电用柴油机	550~650	16~18	1500~1700	18000~27000
大型中速、船用、发电用二冲程柴油机	580	7	2500	17500
大型高速、舰船用柴油机	160~280	18~56	100~400	6000~9000
大型高速、舰船用二冲程柴油机	130~150	18~48	120~150	3500~6000
高速、机车用柴油机	240~280	12~18	250~350	4000~6500
高速、坦克用柴油机	150~165	10~12	80~130	800~1500
高速、坦克用风冷柴油机	135~140	12	50~125	760~1500
高速、农业拖拉机用柴油机	120~145	6~8	30~40	180~300
车用汽油机	105~117	8~12	25~30	220~360
高速、自卸汽车用柴油机	140~160	10~16	65~80	800~1000

① 未注明的均为水冷、四冲程。

表74-1-2 内燃机产品高速化达到的先进指标

机 型 及 用 途	转 速 n r/min	活塞平均速度 C_m m/s	高速性指标 $D \cdot n$ m·r/min
轿车用汽油机	4000~6000	12~16	400~480
载重车用汽油机	3200~4500	11~13	300~430
小客车用柴油机	4000~5000	11~13.5	350~405
轻型载重车(2~3tf)用柴油机	3200~4500	11~13.5	330~405
中型载重车(4~8tf)用柴油机	2800~3600	11~13.3	320~400
重型载重车(8tf以上)用柴油机	2200~2800	11~12	300~400
坦克用柴油机	2200~2800	12~13.5	300~430
坦克用风冷柴油机	2200~2800	11~12	270~380
舰船用柴油机	2000~2200	12~13	300~360
农业拖拉机用柴油机	2400~2700	9~9.5	200~250
机车用柴油机	1500~1600	10.5~11.5	250~350

注：D—气缸直径m。

表74-1-3 内燃机产品强化程度达到的先进指标

机型①及用途	平均有效压力 p_e kgf/cm ²	升功率 N_l PS/l	比重量 G_N kgf/PS	强化程度指标 $p_e \cdot C_m$ kgf/cm ² ·m/s
车用汽油机(不增压)	8~10	40~60 (80)②	1~2	94~136 (165)②
轻型高速、车用柴油机(不增压)	7.8~8.5	20~26	2.5~3.5	80~100
工程机械、重型汽车用柴油机	9~12	30~37	2.5~3.5	140~180
农业拖拉机用柴油机(不增压)	7.5~8.0	15~20	4~5	50~60
中型高速、风冷柴油机	8~10	15~30	2.5~6	80~113
中型高速、二冲程柴油机	7.8~9.5	30~35	3~4	60~72
坦克用高速柴油机	14~29	30~90	1~2	100~310
舰用高速柴油机	15~20	25~45	1~2	150~250
机车用高速柴油机	15~18.5	24~27	2.5~3.5	140~180
大型中速、船用、发电用柴油机	19~21.3	9~9.5	9~10.5	140~160
大型中速、船用、发电用二冲程柴油机	9~11	9~10.5	9~10.5	50~76
大型低速、船用二冲程柴油机	10~11	2.8~3.1	28~37	65~75

① 未注明者为增压柴油机。

② 括号中数字为少数机型达到。

(2) 提高经济性。提高经济性历来是改进内燃机的重要目标。增压、改善燃烧过程和提高机械效率等都能提高内燃机的经济性。表74·1-4列出了现代内燃机产品燃油消耗率达到的先进水平。

表74·1-4 内燃机产品最低燃油消耗率达到的先进水平

机 型① 及 用 途	最低燃油消耗率② $g_{emin} g/(PS \cdot h)$
车用汽油机(不增压)	205~220
轻型车用高速柴油机(不增压)	175~185
工程机械用、重型车用柴油机	165~180
拖拉机用柴油机(不增压)	170~185
中型高速风冷柴油机	162~185
大型、中速、船用、发电用柴油机	150~155
坦克用高速柴油机	160~180
舰船用高速柴油机	150~170
机车用高速柴油机	150~160
中型高速二冲程柴油机	170~180
大型中速二冲程柴油机	150~160
大型低速二冲程船用柴油机	150~155

① 未注明者为增压柴油机。

② 指产品标定转速负荷特性上的最低燃油消耗率。

(3) 提高可靠性、延长使用寿命。这是改进内燃机的另一重要目标。为此一方面要改进设计,使零部件所受的机械应力和热应力不致过高,另一方面要改进工艺和材料以提高零部件承载机械应力和热应力的能力,以及耐磨、耐蚀能力。同时还要提高使用维护水平。表74·1-5所示为现代内燃机产品第一次大修前达到的寿命范围。

表74·1-5 内燃机第一次大修寿命

机 型 及 用 途	寿 命
客车内燃机	150000~200000km
载重车内燃机	300000~500000km
农用拖拉机用内燃机	6~8kh
工程机械用内燃机	10~25kh
机车用内燃机	20~30kh
大型中速机	20~40kh

(4) 广泛采用新材料、新工艺、新技术。由于内燃机向高速、增压等强化方向发展,同时为了提高可靠性和寿命,近年来采用了一系列新材料、新工艺、新技术。

(5) 改善对环境的污染。主要指降低内燃机

废气中的有害成分、臭味及内燃机噪声等。

(6) 提高内燃机的标准化、系列化和通用化程度。“三化”是重要的技术经济政策。内燃机用途广、机型多,提高“三化”程度有利于组织大批量专业生产、降低成本和节省原材料,并便于组织配件的供应和维修。

(7) 改进测试手段。现代内燃机正日益广泛采用电子计算机自动控制、调节、测量、记录、监视和试验;用放射性同位素测定零件的磨损;用近距离无线电遥测法测定连杆等高速运动零件的动态应力;用半导体技术测量点火系统参数;用激光全息光弹法测定曲轴、连杆、活塞、机体等应力情况;用红外线分析仪、化学发光法、氢火焰离子检定器等测定排气有害成分。

3.2 在发展中受到的限制

(1) 加大缸径受到的限制。近年来大型低速二冲程增压柴油机的最大缸径直径保持在1060mm、整机功率保持在48000PS的水平。主要是这类机型重达1700吨以上,进一步大型化受到制造、安装、运输、维修等困难的限制。所以,大功率(10000~27000PS)中速机近年来有迅速发展,并逐步取代原用大型低速机的某些船用和发电领域。而大功率中速机也稳定在最大缸径650mm左右、最大单机功率27000PS。现代汽油机的最大缸径不超过108~117mm,更大时易发生爆震、燃烧不易控制。

(2) 提高转速受到的限制。目前绝大部分内燃机的活塞平均速度在11~12m/s以下;大于12~13m/s时,将受到惯性力、振动、摩擦功、噪声和零件磨损的限制。转速过高,组织燃烧过程困难、经济性恶化。近年来,一些机型的转速有不再明显升高的趋势。解决高转速问题的途径有适当缩短行程,改进燃烧系统,缩短连杆和活塞长度,减少活塞环数,用顶置凸轮和增加零件刚性、强度等。

(3) 提高平均有效压力受到的限制。增压等强化措施受到零件(包括涡轮叶轮)热应力和机械应力的限制。因此可采用下列措施:冷却活塞、组合活塞、可变压缩比活塞、双金属热调节活塞(线胀系数小)、中冷增压空气、二次喷油、二级增压、二次中冷、降低压缩比、并用高强度合金钢制造受载零件,用强化工艺提高零件疲劳强度,以及采用

优质润滑油等。

4 内燃机总体设计概述

内燃机的总体设计要根据用途、材料工艺条件、使用条件以及使用寿命等要求来进行。总体设计包括：确定内燃机型式、基本指标、主要结构尺寸、主要零部件结构、各工作系统型式和主要参数以及总体布置等。基本指标包括标定功率、标定转速、最大扭矩、外形尺寸和净重等。内燃机总体设计是设计中最重要阶段之一，它对新产品能否符合用途需要、可靠性和使用寿命以及该产品的发展前途等，起着决定性作用。

内燃机新产品设计，除只搞指定的机型外，应同时考虑多品种系列化问题。

4.1 主要结构型式和尺寸的确定

在确定基本指标后，就进一步确定内燃机的基本型式（水冷还是风冷，四冲程还是二冲程等），气缸直径和行程，气缸数，气缸排列（直列还是V型等），是否增压等。接着进行方案设计，同时确定内燃机主要零件的结构尺寸。现以中型汽车用柴油机为例阐述如下。

(1) 中型汽车(4~8t)用柴油机一般采用四冲程、水冷、直列、六缸，缸径在95~135mm、转速在2200~3400r/min范围内。增压和非增压型同时考虑。缸径在105mm以下时，采用分开式燃烧室的较多。缸径在105mm以上时，用直接喷射式燃烧室为宜。

(2) 缸径 D 确定后，发动机长度主要决定于缸心距的大小；高度主要决定于行程、连杆长度、活塞压缩高度、气缸盖高度及曲轴箱龙门下沉量等；宽度取决于齿轮传动机构和附件的布置。这类机型的缸心距可取 $(1.15\sim1.30)D$ ，其上限值用于湿式气缸套，下限值用于干式气缸套。行程 S 可取 $(1.0\sim1.15)D$ 。连杆长度取 $(1.6\sim1.8)S$ 。活塞压缩高度取 $(0.60\sim0.70)D$ 。气缸盖高度取 $(0.95\sim1.04)D$ ，其中高转速并采用分开式燃烧室时取上限值，转速较低并用直接喷射式燃烧室时取下限值。曲轴箱龙门下沉量可取 $(0.73\sim1.00)D$ 。

(3) 主轴颈直径取 $(0.75\sim0.84)D$ ，连杆轴颈直径取 $(0.67\sim0.72)D$ ，其中上限值用于球墨铸铁曲轴，下限值用于钢曲轴。进气门直径取 $(0.44\sim$

$0.47)D$ ，排气门直径取 $(0.36\sim0.42)D$ ，其中分开式燃烧室取上限值，直接喷射式燃烧室取下限值。活塞销直径取 $(0.36\sim0.41)D$ 。采用三环活塞，活塞总高度取 $(1.02\sim1.16)D$ 。

4.2 总体布置

总体布置在确保发动机性能和可靠性的基础上还应考虑配套机具对发动机的要求，系列变型要求，工艺性好，使用维修方便以及外形美观等因素。现仍以中型汽车用柴油机为例简述如下：

通常在设计直列六缸机时，凸轮轴与配气机构、充电发电机与起动电机、斜插式机油泵、机油滤清器以及排气管（六缸合一总管）等布置在发动机的一侧；高压油泵、气泵、柴油滤清器和空气滤清器以及进气管等则置于另一侧。如为增压六缸机，则排气管每三缸合一歧管通增压器为宜。

直列六缸机的气缸盖，缸径 $<110\text{mm}$ 时，用整体缸盖为宜；缸径 $>130\text{mm}$ 时，用一缸一盖为宜；其中当缸径在105~130mm之间时，可用一缸一盖或三缸一盖。油底壳一般为带油池的倾斜式冲压件。

V型八缸中型车用柴油机，主要为了获得较好的平衡性，其气缸夹角一般为 90° ，空气滤清器、进气管、高压油泵、柴油滤清器等一般置于V型夹角中间，以充分利用夹角的空间和便于维护，而排气管等分置两侧。

中型车用柴油机的水泵、风扇、水箱等布置在发动机前端，水泵和风扇常为同轴传动。

由于车用发动机置于汽车大梁之间，所以发动机两侧下部附件要少，以免碰大梁并便于拆检。

中型车用柴油机常兼作工程机械和大型拖拉机的动力。所以在前端齿轮系上常设置加力泵，同时曲轴前端要能输出30~50%的发动机功率。

4.3 内燃机的研制步骤

为了确保研制的内燃机能全面达到要求，研制工作应严格按照下列步骤进行：

(1) 对所研制的发动机的用途、配套机具和配件情况等全面的调查研究。对国内外同类机型的性能、结构、附件等特点进行试验分析。同时也应作必要的技术经济分析。

(2) 进行整个系列产品的方案设计（应作几

个方案以便比较)时,对于所选用的参数数据,要认真反复研究比较。设计方案应经多方专业人员共同讨论审定。

(3) 在方案审定基础上,先研制单缸机,以确保所需要的性能指标。同时进行主要零部件、附件的专题试验研究,以确保这些零件、部件、附件达到所需要的性能、可靠性和使用寿命。

(4) 在单缸试验机和零部件、附件初步研制成功的基础上,确定整机设计的最佳方案并进行整个系列的全面设计(最好是联合设计)。

(5) 系列设计审查通过后,进行样机试制与试验(包括使用试验),并作样机鉴定。

(6) 设计制造批量生产所需的生产线和工艺装备。在生产线上小批生产并作小批试制鉴定。

(7) 对整个系列产品图纸正式标定。并在此基础上出版易损零件图册,制定产品技术条件,产品质量检验和分等办法等正式技术文件。

(8) 在发动机投产使用后,继续进行使用调查,及时总结分析,为改进提高产品性能提供依据并为下一代新产品设计作技术储备。

第2章 基本工作原理

1 工作循环

1.1 理想循环

内燃机的工作循环是很复杂的,在分析研究这种循环时,一般先从经过假定和简化的理想循环开始,以确定和比较各种循环的理论热效率、明确提高热效率的途径并判断实际工作循环的完善程度等。所谓理想循环是基于如下假设:(1)工质为理想气体,其比热不随温度变化而为一定值。(2)循环由定量的工质进行,不考虑工质的更换与泄漏。(3)压缩与膨胀均为绝热过程。(4)以热源向工质加热代替燃料在气缸中的燃烧放热,以工质向冷源放热代替废气带走热量。

根据热源向工质加热过程的不同,理想循环可分为定容加热循环(汽油机、煤气机接近此循环)、定压加热循环以及混合加热循环(柴油机属于此循环)。各种循环的 $p-V$ 图及其理论热效率 η_t 分别示于图74·2-1与表74·2-1。

当加热量与循环最高压力均相同时,定压加热循环的理论热效率最高,混合加热循环次之,定容加热循环最低;当加热量与压缩比均相同时,则定容加热循环的理论热效率最高,混合加热循环居中,定压加热循环最低。现代柴油机的循环最高压力和压缩比均高于汽油机,因而柴油机的热效率比汽油机高。

废气涡轮增压柴油机的废气排出气缸后又进入

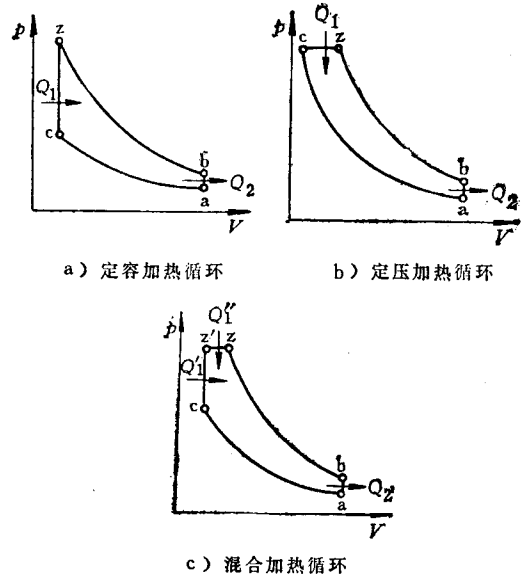


图74·2-1 内燃机的理想循环

表74·2-1 三种理想循环的理论热效率

定容加热循环	定压加热循环	混合加热循环
$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$	$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\epsilon^{k-1} k (\rho - 1)}$	$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\epsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)]}$

注: ϵ —压缩比, $\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$ 。 k —绝热指数。

ρ —前期膨胀比, $\rho = \frac{V_z}{V_c}$ 。 λ —压力升高率, $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ 。

涡轮机中继续膨胀, 能量得到进一步利用。因此, 废气涡轮增压柴油机的理想循环是实行完全膨胀的, 其 $p-V$ 图示于图74·2-2(实线表示定压增压, 虚线表示脉冲增压), η_t 见表74·2-2。这种循环的总压缩比 ε_0 是柴油机压缩比 ε 和增压器压缩比 ε_K 的乘积, 即 $\varepsilon_0 = \varepsilon \varepsilon_K$ 。

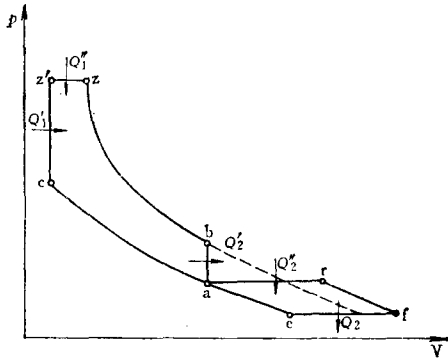


图74·2-2 废气涡轮增压柴油机的理想循环

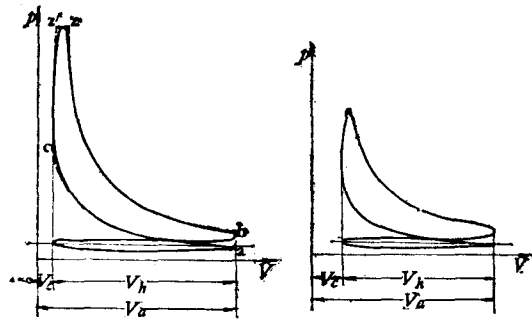
表74·2-2 废气涡轮增压柴油机的理论热效率

定压增压	$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon_0^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{[\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]}$
脉冲增压	$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon_0^{k-1}} \frac{k(\rho \lambda^{\frac{1}{k}} - 1)}{[\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]}$

1·2 实际循环

内燃机实际循环中的工质燃烧前为空气或空气和燃料的混合气, 燃烧后为燃烧产物, 其比热随温度上升而增大, 因此当加热量相同时, 实际循环中工质压力和温度的升高比理想循环要少。实际循环中还存在着其他各种损失, 如传热损失、燃烧损失、时间损失和换气漏气损失等等。这些因素均使实际循环的热效率降低。理想循环的热效率仅是实际循环所趋近而不可达到的极限。

内燃机实际循环的 $p-V$ 图可表明内燃机气缸内工质作功情况, 称示功图, 可用示功器测出 (图74·2-3, 图74·2-4)。



a) 四冲程柴油机 b) 四冲程汽油机

图74·2-3 四冲程内燃机的实际循环

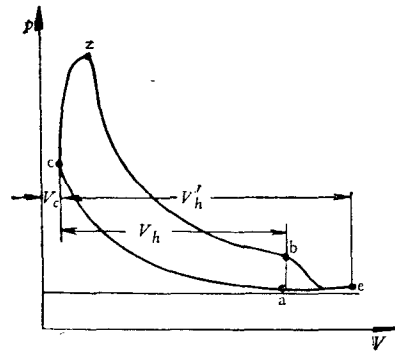


图74·2-4 二冲程柴油机的实际循环

内燃机通过进气、压缩、燃烧——膨胀、排气四个过程完成一次工作循环 (作一次功), 其间四冲程内燃机曲轴旋转二周、二冲程内燃机则旋转一周 (图74·2-5, 图74·2-6)。

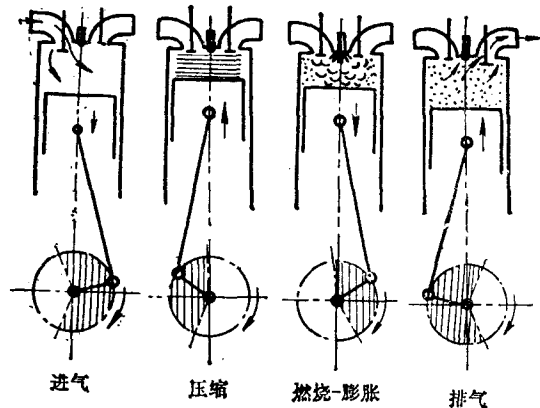


图74·2-5 四冲程内燃机工作循环示意图