

高等专科教育汽车技术规划教材

汽车发动机 原理与汽车 理论

冯健璋 主 编

机械工业出版社



本书讲述了发动机的工作过程和汽车的基本理论。内容包括发动机的性能指标、换气过程、废气涡轮增压、燃料与燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、发动机特性、发动机排放与噪声、汽车发动机新技术、汽车的动力性与燃油经济性、汽车动力装置参数的确定、汽车的制动性、操纵稳定性、平顺性和通过性等。

本书为汽车、内燃机制造与维修专业高等专科教材，也可供从事汽车、发动机的设计、制造和运用的工程技术人员、技术工人参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车发动机原理与汽车理论/冯健璋主编. —北京: 机械工业出版社, 1999.8

高等专科教育汽车技术规划教材

ISBN 7-111-07121-2

I. 汽… II. 冯… III. ①汽车-发动机-理论-高等学校: 专业学校-教材 ②汽车-理论-高等学校: 专业学校-教材 IV. U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 23402 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 邓海平 版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·16.25 印张·392 千字

0 001—7 000 册

定价: 21.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

序

随着汽车数量的增加与普及率的提高，汽车在国民经济和家庭生活中的作用也越来越大。为使汽车安全而经济地运行，对其正确地使用、保养和维修，就显得十分重要。

但是，伴随汽车数量增加的同时，汽车尾气排放所造成的公害与噪声等问题，已成为人们极为关注的社会问题。为保护人们赖以生存的环境，社会呼吁生产低噪声、低（无）污染的汽车，这是时代的要求。与此同时，对于已经运行的汽车，要科学地、合理地进行保养和维修，以保持汽车的良好运行状态。为提高维修质量，维修部门应充实现代化的维修设备与检测设备，应提高使用这些设备人员的技术水平和实际技能。

全国高等工程专科学校机械类专业协会汽车技术分会组织十几所学校的教师，由专家担任主编，在机械工业出版社教材编辑室的大力支持下，编写了本套汽车技术规划教材。这是机械行业高等专科学校汽车类专业教材建设的突破与创新。本套教材的特点是“实”“特”“变”“新”。“实”是书中的内容实用性强；“特”是专科特色明显；“变”是变过去以载货车为主的体系为以轿车为主的体系；“新”是内容新，目前已经实用化的新结构、新设备、新技术尽量写到教材中，以便与飞速发展的汽车技术相适应。

希望本套教材能够成为广大汽车爱好者、初学者的良师益友，对从业人员的技术技能也有所裨益。为提高维修行业的整体维修质量、工作效率和维修技术水平，做出贡献。

全国高工专机械工程协会汽车技术分会理事长 韩德恩

前 言

随着国民经济支柱产业的汽车和内燃机工业的迅速发展,急需汽车、内燃机制造与维修方面的生产第一线的应用型高级技术人才。作为培养这方面人才的高等工程专科学校的汽车、内燃机制造与维修专业发展迅速,而该专业的教材又十分缺乏。为满足教学的需要,根据1997年8月在威海和10月在郑州召开的全国高工专机械工程类专业协会汽车技术分会教材工作会议制定的《汽车发动机原理与汽车理论》教材编写大纲,由承德石油高等专科学校、沈阳大学、南京机械高等专科学校、哈尔滨工业大学汽车学院等院校的有关教师共同编写了本教材。

作为工业企业第一线的应用型高级技术人才,他们需要宽而不很深的专业知识和很强的专业技术应用能力。因此,教材内容本着必需够用为度、加强针对性和应用性的原则,为紧跟汽车技术不断发展的形势,在教学内容现代化方面做了尝试,增添了诸如电控汽油喷射、柴油机电控和可变技术等方面的内容。为培养利用发动机的基本原理解决工程实际问题的能力,在本教材中安排了7篇文摘供读者借鉴。

本教材的主要内容包括发动机性能指标、工作过程、废气涡轮增压、内燃机特性、内燃机的电子控制、排放和噪声、汽车的动力性、经济性、制动性、操作稳定性、平顺性和通过性以及汽车动力装置参数的确定等。本书按70学时(发动机原理40学时、汽车理论30学时)编写。

本教材由承德石油高等专科学校冯健璋主编,并编写了第二、三、七章,侯树梅编写了第四、六、九章,沈阳大学机械工程学院的孟晓红编写了第一、五、八章,南京机械专科学校的丁家镛编写了第十、十一、十二章,哈尔滨工业大学汽车学院盖玉先编写了第十三、十四、十五章。本教材由房绍平教授级高级工程师主审。

本教材为汽车、内燃机制造与维修专业大专教材,可作为相近专业的参考书,也可供这方面的工程技术人员、技术工人参考。

本教材引用了有关教科书、内燃机专业期刊的许多资料;在本教材编写过程中,承德石油高等专科学校杨占军、郑长松二位同志做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,错误在所难免,欢迎使用本教材的同志指正批评。

编者
1998.11

本书常用符号表

拉丁字母

A/F —— 空燃比

a —— 加速度

B —— 小时耗油量

b_e —— 有效燃油消耗率

b_i —— 指示燃油消耗率

Δb —— 喷油泵循环供油量

c —— 声速、比热容、土壤黏度系数、阻力系数

C_D —— 空气阻力系数

C_m —— 活塞平均速度

c_p —— 定压比热容

c_v —— 定容比热容

CA —— 曲轴转角

D —— 气缸直径、动力因数

E —— 调速器起作用时作用在推力盘上的推力

A —— 活塞面积

F_t —— 汽车驱动力

F_i —— 坡度阻力

F_j —— 加速阻力

F_w —— 空气阻力

F_{xb} —— 地面制动力

F_z —— 地面法向反作用力

F_μ —— 制动器制动力

F_ϕ —— 附着力

f —— 频率、滚动阻力系数

H —— 焓

h —— 比焓

h_μ —— 燃料低热值

i —— 气缸数

i_k —— 变速箱传动比

i_0 —— 主减速器传动比

K —— 绝热指数、适应性系数、稳定性因数、液力变矩器变矩比、悬架刚度

κ —— 侧偏刚度

κ_r —— 外倾刚度

L —— 轴距

L_0 —— 理论空气量

Ma —— 马赫数

m —— 质量

\dot{m} —— 质量流量

M_1 —— 新鲜充气量

M_2 —— 燃烧产物量

M_r —— 残余废气量

M_z —— 回正力矩

m_1 —— 非悬挂质量

\dot{m}_k —— 空气质量流量

m_2 —— 悬挂质量

n —— 发动机转速

N_c, N_r —— 土壤承载能力系数

n_1 —— 压缩多变系数

n_2 —— 膨胀多变系数

n_b —— 发动机标定转速

n_k —— 增压器压气机转速

n_T —— 增压器涡轮转速

p —— 压力

p_a —— 进气终了压力

p_b —— 膨胀终了压力

p_k —— 增压压力

p_{me} —— 平均有效压力

p_{mi} —— 平均指示压力

p_0 —— 环境压力

p_r —— 残余废气压力

p_T —— 涡轮前废气压力

p_w —— 饱和蒸汽压力

p_z —— 最高燃烧压力

P_L —— 升功率

Q —— 热量

q —— 单位质量热量

Q_{mix} —— 混合气热值

Q_s —— 汽车百公里油耗

R —— 气体常数、调速器推力盘运动时所受的摩擦

力、汽车转向半径

r —— 车轮半径
 S —— 活塞行程、嫡
 s —— 比嫡、滑动率
 T —— 热力学温度
 T_a —— 进气终了温度
 T_b —— 膨胀终了温度
 T_c —— 压缩终点温度
 T_k —— 增压空气温度
 t_n —— 调速器稳定时间
 T_0 —— 环境温度
 T_r —— 残余废气温度
 T_T —— 涡轮前废气温度
 T_{tq} —— 有效转矩
 T_z —— 最高燃烧温度
 T_μ —— 制动器摩擦力矩
 u —— 汽车速度
 u_{ch} —— 特征车速
 V —— 容积
 v —— 流速、质量体积、质心侧向速度
 V_c —— 压缩容积
 V_s —— 气缸工作容积
 V_k —— 燃烧室容积
 W —— 单位质量功
希腊字母
 α —— 过量空气系数、转角
 γ —— 残余废气系数、刚度比

δ —— 后期膨胀比、旋转质量换算系数
 δ_2 —— 稳定调速率
 ϵ —— 压缩比、调速器灵敏度、悬挂质量分配系数
 η_{ad-k} —— 压缩机绝热效率
 η_{ad-T} —— 废气涡轮绝热效率
 η_e —— 有效热效率
 η_i —— 指示热效率
 η_m —— 机械效率
 η_T —— 废气涡轮有效效率
 η_{TK} —— 增压器效率
 η_v —— 充气效率
 θ —— 点火或供油提前角
 λ —— 压升比、频率比
 μ —— 转矩储备系数、质量比
 μ_n —— 转速储备系数
 μ_0 —— 分子变更系数
 ρ —— 密度、预胀比
 τ —— 行程数、土壤切应力
 τ_i —— 着火延迟角
 φ —— 曲轴转角、附着系数
 φ_b —— 制动力系数
 φ_i —— 着火延迟角、侧向力系数
 φ_0 —— 同步附着系数
 φ_s —— 滑动附着系数
 β —— 制动器制动力分配系数
 ω_0 —— 无阻尼圆频率
 ξ —— 阻尼比

目 录

序

前言

本书常用符号表

第一篇 汽车发动机原理

第一章 发动机的性能指标	1
第一节 发动机的理论循环	1
第二节 四行程发动机的实际循环	5
第三节 发动机的指示指标、有效指标和强化指标	8
第四节 发动机的其它指标	9
第五节 发动机的热平衡	10
第六节 发动机技术的现状与发展	11
思考题	12
第二章 发动机的换气过程	14
第一节 四行程发动机的换气过程	14
第二节 四行程发动机的充气效率	17
第三节 提高发动机充气效率的措施	19
第四节 工程应用实例(文摘)	23
思考题	28
第三章 发动机废气涡轮增压	29
第一节 概述	29
第二节 废气涡轮增压器的基本结构及原理	30
第三节 废气能量的利用	36
第四节 涡轮增压器与柴油机的匹配	38
第五节 工程应用实例(文摘)	42
思考题	45
第四章 燃料与燃烧热化学	46
第一节 发动机的燃料及使用特性	46
第二节 燃烧热化学	49
思考题	52
第五章 柴油机混合气的形成与燃烧	53
第一节 燃料喷射与雾化	53
第二节 柴油机的燃烧过程	60

第三节 可燃混合气的形成与燃烧室	62
第四节 影响燃烧过程的运转因素分析	69
第五节 工程应用实例(文摘)	71
思考题	73
第六章 汽油机混合气的形成与燃烧	74
第一节 化油器的工作原理	74
第二节 汽油机的燃烧过程	80
第三节 汽油机的燃烧室	85
第四节 工程应用实例(文摘)	88
思考题	91
第七章 发动机的特性	93
第一节 发动机工况、性能指标与工作过程参数的关系	93
第二节 发动机的负荷特性	94
第三节 发动机的速度特性	97
第四节 发动机的调速特性	101
第五节 发动机的万有特性	104
思考题	106
第八章 发动机的排放与噪声	107
第一节 排放物及危害	107
第二节 排放物的机内、机外处理	111
第三节 柴油机的噪声	113
第四节 工程应用实例(文摘)	117
思考题	119
第九章 汽车发动机新技术	120
第一节 汽油机的新型燃烧室	120
第二节 电控汽油喷射系统	123
第三节 电控电子点火系统	135
第四节 柴油机的电子控制	138
第五节 可变配气机构与可变进气管	141
第六节 工程应用实例(文摘)	144
思考题	147

第二篇 汽车理论

第十章 汽车的动力性	148
------------	-----

第一节	汽车的动力性指标	148	思考题	198	
第二节	汽车的驱动力	149	第十三章	汽车的制动性	199
第三节	汽车的行驶阻力	152	第一节	制动性的评价指标	199
第四节	汽车的动力方程	159	第二节	制动时车轮的受力分析	200
第五节	汽车行驶的驱动——附着条件	163	第三节	汽车的制动效能及其恒定性	203
第六节	汽车的驱动力——行驶阻力平衡图 与动力特性图	167	第四节	制动时汽车的方向稳定性	208
第七节	汽车的功率平衡	170	第五节	前后制动器制动力的比例关系	211
第八节	装有液力变矩器的动力特性	172	第六节	自动防抱死系统	217
第九节	影响汽车动力性的主要因素	176	思考题	218	
第十节	汽车动力性试验	180	第十四章	汽车的操纵稳定性	220
思考题		184	第一节	概述	220
第十一章	汽车的燃油经济性	185	第二节	轮胎侧偏特性	223
第一节	汽车燃油经济性的评价指标	185	第三节	线性二自由度汽车模型对前轮角 输入的响应特性	227
第二节	汽车在各工况下的燃油消耗	186	第四节	汽车操纵稳定性与悬架、转向系 的关系	232
第三节	影响汽车燃油经济性的因素	189	第五节	汽车操纵稳定性的道路试验	236
思考题		192	思考题	239	
第十二章	汽车动力装置参数的 确定	193	第十五章	汽车的平顺性及通过性	241
第一节	发动机功率的选择	193	第一节	汽车的平顺性	241
第二节	传动比的选择	193	第二节	汽车的通过性	245
第三节	利用燃油经济性——加速时间曲线 确定动力装置参数	196	思考题	250	
			参考文献	251	

第一篇 汽车发动机原理

发动机（本书中的发动机都是指汽车发动机）是汽车的动力来源，其质量的优劣，直接影响着汽车的性能、可靠程度和寿命。汽油机是汽车发动机的传统机型，由于其工作柔和、噪声低、运转平稳、升功率高、比质量轻，所以在轿车和轻型车上占优势。由于新技术的采用，在燃油经济性方面亦有较大的改善。车用柴油机是载货车的主要动力，其最大优点是经济性好，它的运行耗油率比汽油机低 30%~40%，所以，近年来的趋势是发展柴油汽车，甚至在轿车领域柴油机的渗透量也在逐年增加。

内燃机的循环热效率高。现代高性能车用柴油机的循环热效率高达 40% 以上，车用汽油机的循环热效率也可达到 33% 左右。功率覆盖面大，转速范围宽，应用广泛是车用发动机的主要优点，而发动机排气对大气的污染，能源消耗日趋增高，又是内燃机工作者首先要解决的问题。

80 年代以来，发动机电子控制技术已有很大发展，其目标是保持发动机运行参数最佳值，以求得发动机动力、经济、排放等性能指标的最佳化，并监视运行工况。

为了使汽车发动机最佳化运行，制造厂要设计、制造出高质量的产品，汽车的使用者还必须正确使用、经常维护。因此，从事发动机设计、制造、运用、维护、修理的技术人员要掌握发动机的基本理论，并能创造性地运用它。

汽车发动机理论是以提高发动机性能作为主要研究目标，深入到工作过程的各个阶段，分析影响性能指标的因素，研究提高性能指标的具体措施及努力方向。

汽车发动机原理的主要内容包括发动机的性能指标、特性、工作过程、增压技术、燃料与燃烧、排放、噪声及其防治、发动机电子控制等。

第一章 发动机的性能指标

发动机的性能指标所包括内容很广泛，主要有动力性能指标、经济性能指标及运转性能指标。

衡量一台发动机的质量主要是对以上性能指标进行评定，但在评定时不仅要考虑性能指标，还要把可靠性、耐久性、结构工艺、生产实际条件以及使用特点等多方面予以综合评定，并把各种性能有机地结合起来。

本章主要阐述发动机的动力性、经济性及运转性能指标，并通过对它们的分析，从中找出影响因素及提高性能的一般规律。

第一节 发动机的理论循环

一、三种基本循环

发动机的理论循环是把它的实际工作过程加以简化，以便作定量分析。其最简单的理论

循环为空气标准循环，其简化条件如下：

- 1) 假设工质为理想气体，其比热容为定值。
- 2) 假设工质的压缩和膨胀是绝热等熵过程。
- 3) 假设工质是在闭口系统中作封闭循环。
- 4) 假设工质燃烧为定压或定容加热，放热为定容放热。
- 5) 假设循环过程为可逆循环。

发动机有三种基本理论循环，即定容加热循环、定压加热循环和混合加热循环。发动机的理论循环常用示功率图来说明，如图 1-1 所示。

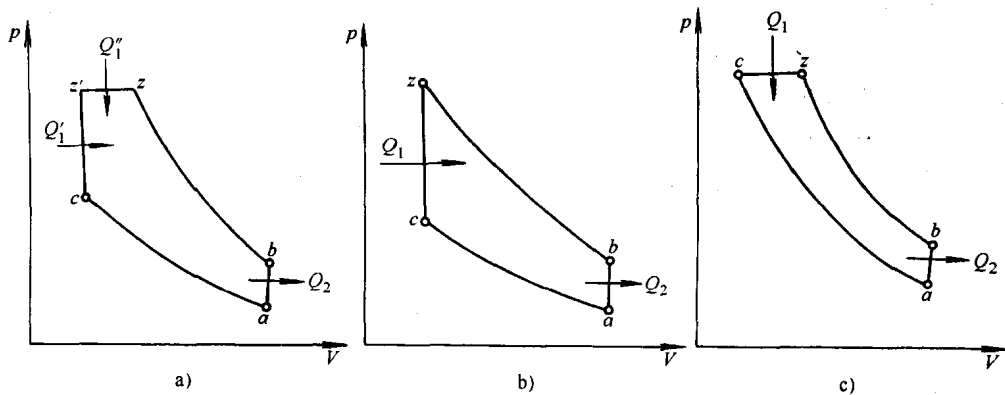


图 1-1 发动机理论循环

a) 混合加热循环 b) 定容加热循环 c) 定压加热循环

理论循环是用循环热效率和循环平均压力来衡量和评定的。

二、循环热效率和循环平均压力

1. 循环热效率 η_t

η_t 是工质所做循环功 W (J) 与循环加热量 Q_1 (J) 之比，用以评定循环的经济性

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

式中 Q_2 —— 循环中放热量 (J)。

根据工程热力学公式，混合加热循环热效率为

$$\eta_{tm} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \frac{\lambda \rho^K - 1}{(\lambda - 1) + K\lambda(\rho - 1)} \quad (1-1)$$

式中 ϵ —— 发动机的压缩比， $\epsilon = V_a/V_c = (V_s + V_c)/V_c = 1 + V_s/V_c$ ，其中， V_a 为气缸总容积， V_c 为气缸压缩容积， V_s 为气缸工作容积；

ρ —— 预膨胀比， $\rho = V_z/V_z' = \epsilon/\delta$ ；

λ —— 压力升高比， $\lambda = p_z/p_c$ ；

K —— 绝热指数。

定容加热循环 ($\rho=1$) 热效率为

$$\eta_{tv} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \quad (1-2)$$

定压加热循环 ($\lambda=1$) 热效率为

$$\eta_{tp} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \frac{\rho^K - 1}{K(\rho - 1)} \quad (1-3)$$

由以上公式可见影响循环热效率的因素如下所述。

(1) 压缩比 ϵ 随着压缩比 ϵ 的提高，三种循环的 η_t 都提高。当 ϵ 较低时，随着 ϵ 的提高， η_t 增长很快；但当 ϵ 较大时，若再增加 ϵ 则效果不明显，如图 1-2 所示。

(2) 绝热指数 K 绝热指数 K 对 η_t 的影响如图 1-3 所示。随 K 值增大， η_t 将提高。 K 值取决于工质的性质，双原子气体 $K=1.4$ ，多原子气体 $K=1.33$ 。

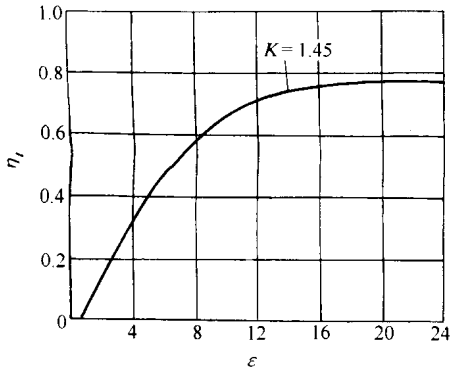


图 1-2 定容加热循环效率 η_t 与压缩比 ϵ 的关系

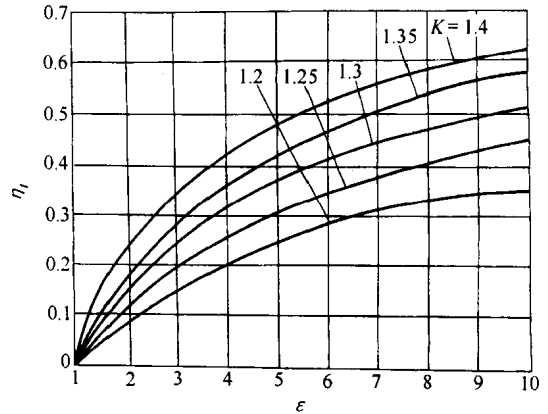


图 1-3 η_t 与 K 、 ϵ 的关系

(3) 压力升高比 λ 在定容加热循环中，随着循环加热量 Q_1 的增加， λ 值成正比加大。若 ϵ 保持不变，则工质的膨胀比也不会变化，这样，循环放热量 Q_2 亦相应增加，而 Q_2/Q_1 不变， η_t 亦不变。

在混合加热循环中，当循环总加热量 Q_1 和 ϵ 不变时， λ 增大，则 ρ 减小。图 1-4 中 $z-b$ 变到 $z'-b'$ ，相应的 Q_2 减少， η_t 提高。

但是 λ 、 ϵ 增加会造成最高温度 T_z 和最高压力 p_z 的急剧上升，因而受到材料耐热性和强度的限制。

(4) 预膨胀比 ρ 在等压加热循环中，若 ϵ 保持不变，随着加热量 Q_1 增加 ρ 值加大。由式 (1-3) 可知， η_t 下降。

在混合加热循环中，当循环总加热量 Q_1 和 ϵ 保持不变， ρ 值增大，意味着等压加热部分增大 (图 1-4)，同样 η_t 下降。

2. 循环平均压力 p_t

p_t (kPa) 是单位气缸工作容积所做的循环功，用以评定发动机的循环做功能力

$$p_t = \frac{W}{V_s}$$

式中 W ——循环所作的功 (J)；

V_s ——气缸工作容积 (L)。

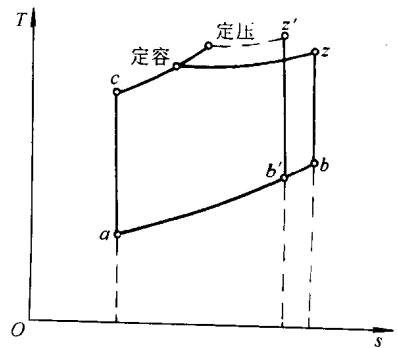


图 1-4 λ 、 ρ 对 η_t 、 p_t 的影响

根据工程热力学公式，混合加热循环的平均压力为

$$p_{tm} = \frac{\epsilon^K}{\epsilon - 1} \frac{p_a}{K - 1} [(\lambda - 1) + K\lambda(\rho - 1)] \eta_t$$

式中 p_a ——进气终了压力 (kPa)。

对定容加热循环 ($\rho = 1$)，其循环平均压力

$$p_{tV} = \frac{\epsilon^K}{\epsilon - 1} \frac{p_a}{K - 1} (\lambda - 1) \eta_t$$

对定压加热循环 ($\lambda = 1$)，其循环平均压力

$$p_{tP} = \frac{\epsilon^K}{\epsilon - 1} \frac{p_a}{K - 1} K(\rho - 1) \eta_t$$

可见， p_t 是随压缩始点压力、压缩比、压力升高比、预膨胀比、绝热指数和热效率的增加而增加。

三、三种基本循环的比较

各种活塞式发动机的工作原理是不同的，因此对不同形式的发动机必须采用相应的工作循环，相应得到最大的热效率。

对于汽油机， ϵ 的最大值由于其所用燃料的确定而相应确定。因此按 ϵ 一定来比较其各种理想循环的热效率，如图 1-5 所示。

由图可知，定容加热循环 2-3 的平均加热温度 T_{m1V} 最高，而定压加热循环 T_{m1P} 最低，混合加热循环 T_{m1m} 则介于两者之间，即

$$T_{m1V} > T_{m1m} > T_{m1P}$$

按工程热力学中等效卡诺循环热效率公式有

$$\eta_{tV} > \eta_{tm} > \eta_{tP}$$

即在压缩比 ϵ 相同时，定容加热循环的热效率最高，因此对汽油机来说应按定容加热循环工作。

对于柴油机，在工作条件一定时，其压缩比也基本上是确定的，但其压缩比一般较高，其压缩终了压力也较高，为避免其工作粗暴、噪声及振动，必须控制其最高压力，因此应按一定的最高压力为条件来比较三种基本循环，如图 1-6 所示。

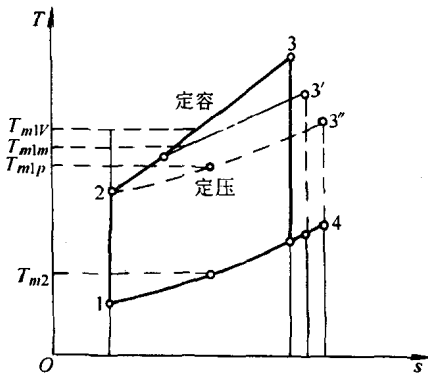


图 1-5 ϵ 相同各种理想循环的热效率比较

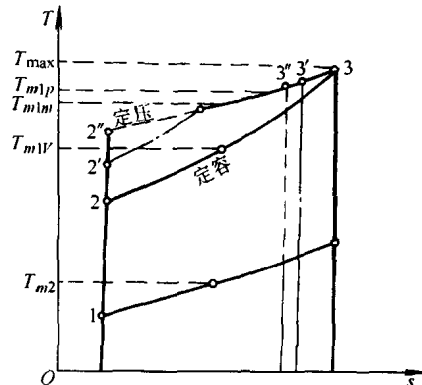


图 1-6 最高压力相同三种理想循环热效率的比较

由图可知

$$T_{m1p} > T_{m1m} > T_{m1v}$$

按等效卡诺循环热效率公式有

$$\eta_{tp} > \eta_{tm} > \eta_{tv}$$

即在最高压力一定的条件下，定压加热循环的热效率最高，因而高增压柴油机及车用高速柴油机应按定压加热循环工作。

第二节 四行程发动机的实际循环

四行程发动机实际循环由进气、压缩、作功和排气四个行程所组成，如图 1-7 所示。

一、进气行程

为使发动机连续运转，必须不断吸入新鲜工质，即是进气行程。进气过程中，进气门开启，排气门关闭，活塞从上止点向下止点移动，在气缸内形成真空，新鲜工质才被吸入气缸。由于进气系统的阻力，进气终了时气缸内压力小于大气压力，约为 0.075~0.09MPa。因为流进气缸内的工质受到气缸壁、活塞顶等高温机件及上循环残余废气余热的加热，所以进气终了温度也升高到 370~400K。在图 1-7 中进气行程用曲线 ra 表示。

二、压缩行程

为使吸入气缸内工质能迅速燃烧，以产生较大压力，使发动机做功，必须在做功行程之前将工质压缩，即压缩行程。在这个行程中，进、排气门均关闭，活塞由下止点向上止点移动。在图 1-7 中压缩行程用曲线 ac 表示，工质受压缩的程度用压缩比 ϵ 表示。压缩行程是一个复杂的多变过程，其间有热交换和漏气损失。

三、燃烧过程

这个过程，活塞位于上止点前后，进、排气门均关闭。燃烧过程的作用是将燃料的化学能转化为热能，使工质的温度和压力升高。燃烧越靠近上止点，放出热量越多，热效率越高。

汽油机的燃烧过程接近定容加热循环，原因是汽油机的可燃混合气是在火花塞点火之前已基本形成，火花塞在上止点前点火，火焰迅速传播到整个燃烧室，工质的温度、压力迅速上升。

柴油机的燃烧过程接近混合加热循环，喷油嘴在上止点前喷油，燃油微粒迅速与空气混合，并借助于空气的热量而自燃。开始时，燃烧速度很快，工质温度、压力剧增，接近定容加热；后来，一面喷油，一面燃烧，燃烧速度逐渐缓慢，又因活塞下移，气缸容积加大，压力升高不大，而温度继续上升，燃烧接近定压加热。

无论汽油机还是柴油机，燃烧都不是瞬时完成的。

四、作功行程

在这个行程中，进、排气门仍旧关闭。当活塞接近上止点时，工质燃烧放出大量的热能。高温高压的燃气推动活塞从上止点向下止点运动，通过连杆使曲轴旋转并输出机械能，除了用以维持发动机本身继续运转外，其余的用于对外作功，在图 1-7 上用曲线 zb 表示。作功行程比压缩过程更复杂，除有热交换和漏气损失外还有补燃。因此，作功行程也是一个多变过程。

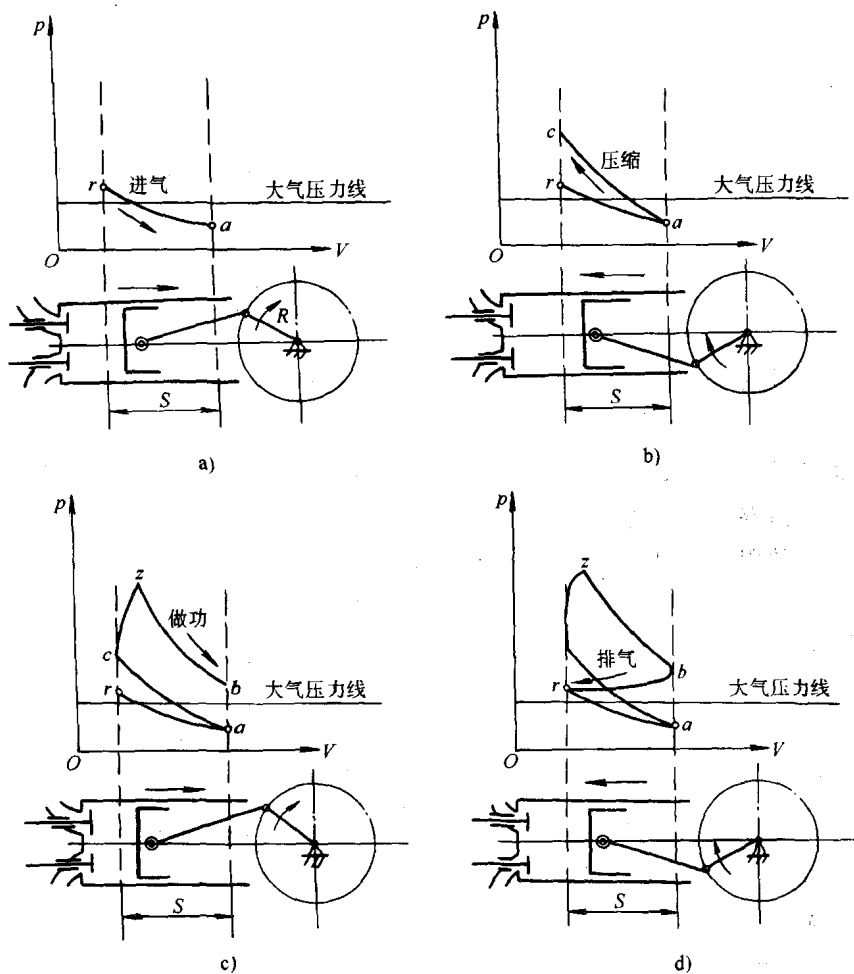


图 1-7 四行程发动机的示功图

a) 进气过程 b) 压缩过程 c) 膨胀过程 (做功过程) d) 排气过程

五、排气行程

当做功行程接近终了时, 开始排气行程, 排气门开启, 靠废气的压力进行自由排气, 活塞到达下止点后再向上止点移动时, 继续将废气强制排到大气中。活塞到达上止点附近时, 排气行程结束, 见图 1-7 中的曲线 bc 。表 1-1 列出了发动机实际循环各过程的有关资料。

表 1-1 发动机实际循环各过程终点的压力和温度

参数 机型	进气终点的 压力 p_a/Pa	进气终点的 温度 T_a/K	压缩终了 的压力 p_c/MPa	压缩终了 的温度 T_c/K	最高爆 发压力 p_z/MPa	最高温度 T_z/K	膨胀终 点压力 p_b/MPa	膨胀终 点温度 T_b/K	排气终 了压力 p_r/Pa	排气终 了温度 T_r/K
汽油机	$(0.8\sim 0.9)p_0$	340~380	0.8~2.0	600~750	3.0~6.5	2200~ 2800	0.3~0.6	1200~ 1500	$(1.05\sim 1.2)p_0$	900~ 1100
柴油机	$(0.85\sim 0.95)p_0$	300~340	3.0~5.0	750~1000	4.5~9.0	1800~ 2200	0.2~0.5	1000~ 1200	$(1.05\sim 1.2)p_0$	700~900
增压柴油机	$(0.9\sim 1.0)p_0$	320~380	5.0~8.0	900~ 1100	9.0~ 13.0				$(0.75\sim 1.0)p_K$	

六、理论循环与实际循环比较

为了解实际循环的热量分配情况，寻找它的损失所在，首先应将实际循环与理论循环进行比较。这里用的理论循环是最简单的空气标准循环，它除了不可避免地向冷源放热外，还有其它损失。研究实际循环与空气标准循环的差异，就可找出热量损失所在。分析差异的原因，可探求提高热量有效利用的途径。图 1-8 给出四行程非增压内燃机示功图与理论循环的比较，其差别由以下几项损失引起。

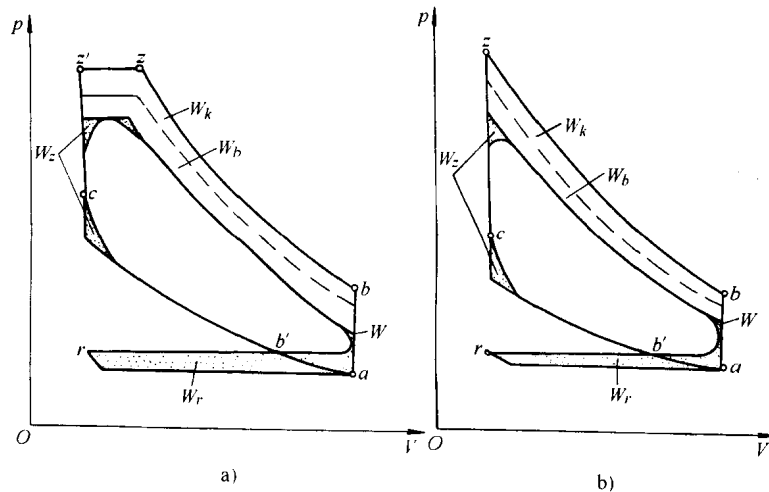


图 1-8 内燃机实际循环与理论循环的比较

a) 柴油机 b) 汽油机

W_k —实际工质影响引起损失 W_r —换气损失 W —提前排气损失

W_z —非瞬时燃烧和补燃损失 W_b —传热、流动损失

(一) 实际工质影响

理论循环中假设工质比热容是定值，而实际气体比热是随温度的增长而上升，且燃烧后生成 CO_2 、 H_2O 等多原子气体，这些气体的比热容又大于空气，使循环的最高温度降低。由于实际循环还存在泄漏，使工质数量减少，这意味着同样的加热量，在实际循环中所引起的压力和温度的升高要比理论循环的低得多，其结果是循环热效率低，循环所做功减少，如图 1-8 中 W_k 所示。

(二) 换气损失

燃烧废气的排出和新鲜空气的吸入是使循环重复进行所必不可少的，由此而消耗的功称为换气损失。由于进排气系统中的流动阻力而产生的损失如图 1-8 中 W_r 所示，换气过程中因排气门在下止点前必要的提前开启而产生的损失如图 1-8 中面积 W 所示。

(三) 燃烧损失

1) 实际循环中燃烧非瞬时完成，所以喷油或点火在上止点前，并且燃烧还会延续到膨胀行程，由此形成非瞬时燃烧损失和补燃损失，如图 1-8 中 W_z 所示。

2) 实际循环中会有部分燃料由于缺氧产生不完全燃烧损失。

3) 在高温下部分燃烧产物分解而吸热，即



使循环的最高温度下降，由此产生燃烧损失。

(四) 传热损失

实际循环中，气缸壁（包括气缸套、气缸盖、活塞、活塞环、气门、喷油器等）和工质间自始至终存在着热交换，由此造成损失如图 1-8 中 W_b 所示。

由于上述各项损失的存在，使实际循环热效率低于理论循环。

第三节 发动机的指示指标、有效指标和强化指标

一、发动机的指示指标

指示指标是以工质在气缸内对活塞做功为基础，用指示功、平均指示压力和指示功率评定循环的动力性——即做功能力。用循环热效率及燃油消耗率评定循环经济性。表 1-2 简要说明了发动机指示指标的定义及计算方法。

表 1-2 发动机的指示指标定义及计算方法

指示指标	定义	计算公式	备注
指示功 W_i/kJ	在气缸内完成一个循环所得到的有用功	$W_i = F_i ab$	F_i —— $p-V$ 图曲线闭合所占面积 a —— 示功图纵坐标比例 b —— 示功图横坐标比例
平均指示压力 p_{mi}/MPa	发动机单位气缸工作容积的指示功	$p_{mi} = W_i/V_s$	V_s —— 气缸工作容积 (L)
指示功率 P_i/kW	发动机单位时间内所做的指示功	$P_i = \frac{p_{mi} V_s n i}{30 \tau}$	n —— 发动机转速 (r/min) i —— 发动机气缸数 τ —— 发动机行程数，四行程 $\tau = 4$ ，二行程 $\tau = 2$
指示热效率 η_i	发动机实际循环指示功与所消耗的燃料热量之比值	$\eta_i = \frac{W_i}{Q_1} \left(= \frac{3.6}{b_i h_{\mu}} \times 10^6 \right)$	W_i —— 指示功 Q_1 —— 循环加热量 h_{μ} —— 燃料低热值 (kJ/kg)
指示燃油消耗率 $b_i/\text{g} (\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	单位指示功的耗油量	$b_i = \frac{B}{P_i} \times 10^3$	B —— 每小时耗油量 (kg/h)

二、发动机的有效指标

发动机有效指标是以曲轴对外输出的功率为基础，代表发动机的整机性能。表 1-3 列举有效指标定义及计算方法。

表 1-3 有效指标定义及计算方法

有效指标	定义	计算方法	备注
有效功率 P_e/kW	发动机通过曲轴对外输出的功率	$P_e = P_i - P_m$ $\left(P_e = \frac{T_{iq}n}{9550} = \frac{p_{me}V_s i n}{30\tau} \right)$	P_i —— 指示功率 (kW) P_m —— 机械损失功率 (kW)
机械效率 η_m	有效功率与指示功率之比	$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = 1 - \frac{P_m}{P_i}$	
有效扭矩 $T_{iq}/\text{N}\cdot\text{m}$	发动机通过曲轴输出的扭矩	$T_{iq} = \frac{9550P_e}{n}$	n —— 发动机转速 (r/min)
平均有效压力 p_{me}/MPa	单位气缸工作容积输出的有效功	$p_{me} = \frac{30P_e\tau}{V_s i n}$	τ —— 发动机行程数 V_s —— 发动机工作容积 (L) i —— 发动机气缸数
有效燃料消耗率 $b_e/\text{g} (\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	单位有效功的燃油消耗量	$b_e = \frac{B}{P_e} \times 1000$	B —— 每小时耗油量 (kg/h)
有效热效率 η_e	发动机的有效功 W_e (J) 与所消耗燃料热量 Q_1 之比	$\eta_e = \frac{W_e}{Q_1} \left(= \frac{3.6}{bh_{\mu}} \times 10^6 \right)$	h_{μ} —— 燃料的低热值

三、发动机强化指标

发动机的强化指标用以评定发动机的强化程度。表 1-4 列举了发动机强化指标的定义及计算方法。

表 1-4 发动机的强化指标

强化指标	定义	计算公式	备注
升功率 P_L/kWL^{-1}	发动机每升工作容积所发出的有效功率	$P_L = \frac{P_e}{iV_s}$	用以衡量发动机排量利用的程度
比质量 $M_e/\text{kg} (\text{kW})^{-1}$	发动机的质量与所给出的标定功率之比	$M_e = \frac{m}{P_e}$	表征质量利用程度和结构紧凑性
强化系数	平均有效压力与活塞平均速度的乘积	$p_{me} c_m$	表征发动机的强化程度，是发动机技术进步的一个标志

第四节 发动机的其它指标

发动机其它性能主要指排气品质、噪声、振动等。由于这些性能关系到人类的健康问题，因此必须制定统一标准，并给予严格控制。

一、排气品质

发动机排放对大气的污染已形成公害，为此，各国均采取对策，并制定相应的控制法