

高等学校教材

内燃机原理

(修订本)

西安交通大学 蒋德明 主编

NONGJIGAO DENG
XUEXIAO JIAOCAI

中国农业机械出版社

高等学校教材

内 燃 机 原 理

(修 订 本)

西安交通大学 蒋德明 主编

中国农业机械出版社

本书讲述内燃机工作过程的基本理论。全书共分十二章。分别讲述内燃机的性能指标、实际循环、换气过程、混合气形成和燃烧过程、燃料供给过程、废气涡轮增压理论以及内燃机实际工作过程的数值计算方法。

本书为内燃机专业本科生教材,也可供从事内燃机设计、制造、运用的人员和科研部门的技术人员参考。

内 燃 机 原 理

(修 订 本)

西安交通大学 蒋德明 主编

★

责任编辑:赵爱宁 孙祥根

★

中国农业机械出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张25 · 插页1 · 字数613千字

1981年5月北京第一版

1988年6月北京第二版·1988年6月北京第七次印刷

印数 38,001—42,100 · 定价:4.25元

★

ISBN 7-80032-021-9/TK · 1(课)

二 版 前 言

本书初版问世以来已经整整七年了，根据内燃机学科的发展现状和各校的使用意见，我们本着“加强基础、更新内容、删繁就简、有教材特色”的总要求进行本书的修订工作。

由于内燃机工业至今仍是工业发达国家的一大经济支柱，大量的人力和资金倾注于内燃机的开发研究之中，因此新技术层出不穷，甚至连一些重要的观点也在发展变化之中，本书希望跟上这一发展趋势，在加强基础的同时，注意更新内容。

鉴于学生往往对专业教材的内容不易融会贯通和灵活运用情况，本书首次在各章后面增加思考题和习题，由于我们材料积累不够，所列题目不一定都合适，请各校授课教师选用和补充。

本书的修订工作仍在原主编、西安交通大学内燃机教研室蒋德明教授主持下进行，参加的有周龙保教授、林杰伦和王陈生副教授，毕小平讲师也承担了部分工作。修订稿完成后，由原主审、清华大学内燃机教研室程宏教授进行仔细审阅。编者感谢程宏教授为提高本书质量所作出的辛勤劳动。

本书疏漏谬误之处在所难免，谨请使用本书的同志们批评指正。

编者

1986年10月于西安

主要符号及意义

拉丁字母

AF ——空燃比	p'_0 ——排气背压
C_m ——活塞平均速度	p_k ——增压压力
$^\circ CA$ ——曲轴转角(度)	p ——气缸压力
D ——气缸直径	p_i ——平均指示压力
F_p ——活塞面积	p_e ——平均有效压力
g_i ——指示燃油消耗率	p_m ——平均机械损失压力
g_e ——有效燃油消耗率	S ——活塞行程
g_b ——每循环供油量	T_0 ——环境温度
H_u ——燃料低热值	T_s ——进气系统温度
L_0 ——燃烧 1 kg 燃料理论上所需的空气量 (千摩尔)	T_a ——进气终点温度
M_e ——发动机扭矩	T_c ——压缩终点温度
M_c ——阻力矩	T_z ——最高燃烧温度
M_1 ——新鲜充量(千摩尔)	T_b ——膨胀终点温度
M_2 ——燃烧产物(千摩尔)	T_r ——残余废气温度, 或气缸盖后温度
M_r ——残余废气(千摩尔)	T_T ——废气涡轮前温度
$\dot{M}_b$ ——小时燃油消耗量	T_k ——增压空气温度
m, M ——质量	T ——气缸中气体温度
$\dot{m}, \dot{M}$ ——质量流率	t_n ——调速器的稳定时间
$\dot{m}_a$ ——空气质量流率	U ——内能
N_i ——指示功率	V_k ——气缸工作容积
N_e ——有效功率	V_c ——压缩终点气缸容积
N_m ——机械损失功率	V_h ——燃烧室容积
n_1 ——压缩多变指数	$\dot{V}$ ——容积流率
n_2 ——膨胀多变指数	W ——机械功
n ——发动机转速	
n_p ——喷油泵转速	
n_{Tk} ——增压器转速	
p_0 ——环境压力	
p_s ——进气系统压力	
p_a ——进气终点压力	
p_c ——压缩终点压力	
p_z ——最高燃烧压力	
p_b ——膨胀终点压力	
p_r ——残余废气压力	
p_T ——废气涡轮前压力	

p'_0 ——排气背压
p_k ——增压压力
p ——气缸压力
p_i ——平均指示压力
p_e ——平均有效压力
p_m ——平均机械损失压力
S ——活塞行程
T_0 ——环境温度
T_s ——进气系统温度
T_a ——进气终点温度
T_c ——压缩终点温度
T_z ——最高燃烧温度
T_b ——膨胀终点温度
T_r ——残余废气温度, 或气缸盖后温度
T_T ——废气涡轮前温度
T_k ——增压空气温度
T ——气缸中气体温度
t_n ——调速器的稳定时间
U ——内能
V_k ——气缸工作容积
V_c ——压缩终点气缸容积
V_h ——燃烧室容积
$\dot{V}$ ——容积流率
W ——机械功

希腊字母

α ——过量空气系数
α_Σ ——总过量空气系数
γ ——残余废气系数
δ ——后膨胀比; 调速器的不均匀度
δ_1 ——瞬时调速率
δ_2 ——稳定调速率
ϵ ——压缩比; 调速器的不灵敏度
η_i ——指示效率
η_m ——机械效率
η_e ——有效效率
η_{ad-T} ——废气涡轮绝热效率
η_T ——废气涡轮有效效率

η_k ——压气机绝热效率	τ_i ——着火延迟(s)
η_{TK} ——增压器效率	τ ——冲程数
η_v ——充气效率	φ ——曲轴转角; 转速不稳定度或供油持续角
η_s ——扫气效率	φ_s ——扫气系数
θ ——供油提前角, 点火提前角	φ_0 ——相应大气条件的过量扫气空气系数
θ_s ——喷油提前角	φ_K ——相应增压条件的过量扫气空气系数
λ ——压力升高比	φ_i ——着火延迟($^\circ$); 示功图丰满系数
μ_s ——空气流量系数	φ_z ——喷油持续角
ξ ——热量利用系数	ψ ——转速波动率
ρ ——初膨胀比	ω ——回转角速度
ρ_s ——燃油密度	

目 录

第一章 内燃机的性能指标及其提高途径	1
§ 1-1 内燃机示功图的两种基本形式—— $p-V$ 图和 $p-\varphi$ 图	1
§ 1-2 内燃机的指示性能指标	2
§ 1-3 内燃机的有效性能指标	5
§ 1-4 机械损失和机械效率	9
§ 1-5 提高内燃机动力性能和经济性能 的途径	13
思考题与习题	16
第二章 内燃机的实际循环	18
§ 2-1 内燃机理论循环概述	18
§ 2-2 燃烧化学	19
§ 2-3 内燃机的实际循环	24
§ 2-4 内燃机中的传热损失	27
§ 2-5 时间损失	32
§ 2-6 示功图的分析	34
§ 2-7 内燃机的热平衡	39
主要参考文献	42
思考题与习题	42
第三章 内燃机的换气过程	43
§ 3-1 四冲程内燃机的换气过程	44
§ 3-2 四冲程内燃机的换气损失和泵 损失	47
§ 3-3 四冲程内燃机充气效率的实验 测定	51
§ 3-4 四冲程内燃机充气效率分析式	53
§ 3-5 提高充气效率的措施	54
§ 3-6 二冲程内燃机的换气过程	59
§ 3-7 进、排气管内动力效应的应用	68
主要参考文献	72
思考题与习题	73
第四章 燃烧的基本理论	74
§ 4-1 化学反应动力学基础及其应用	74
§ 4-2 着火理论	84
§ 4-3 火焰传播	93
§ 4-4 扩散燃烧	97
§ 4-5 燃烧过程中有害排放物的生成	98

主要参考文献	105
思考题	105
第五章 火花点火发动机中的燃烧和 燃烧室	106
§ 5-1 火花点火发动机中的正常燃烧	106
§ 5-2 爆震燃烧	110
§ 5-3 表面点火	118
§ 5-4 多缸汽油机进气充量 的均匀分配	120
§ 5-5 汽油机的排气净化	124
§ 5-6 循环之间的燃烧变动	127
§ 5-7 汽油机的燃烧室	128
§ 5-8 分层燃烧系统	139
§ 5-9 汽油机应用代用燃料时的燃烧	145
主要参考文献	146
思考题	147
第六章 火花点火式内燃机的燃料供给 装置	149
§ 6-1 理想化油器的特性	150
§ 6-2 主燃油系及其校正	152
§ 6-3 化油器辅助设备及其对发动机性 能的影响	157
§ 6-4 化油器和发动机的匹配方法	167
§ 6-5 排气净化对化油器设计的要求	170
§ 6-6 汽油喷射系统概述	173
主要参考文献	178
思考题	178
第七章 柴油机混合气形成和燃烧	180
§ 7-1 柴油机的混合气形成	180
§ 7-2 柴油机的燃烧	184
§ 7-3 放热规律 (或燃烧规律)	192
§ 7-4 柴油机的排气净化	195
§ 7-5 柴油机的冷启动性能	201
主要参考文献	203
思考题与习题	203
第八章 压燃式发动机的燃料喷射 装置	204
§ 8-1 燃料喷射过程	204

§ 8-2 喷油泵的参数选择及其对柴油机性能的影响.....	209	§ 11-1 概述	308
§ 8-3 喷油器的参数选择及其对柴油机性能的影响.....	219	§ 11-2 废气涡轮增压系统的两种基本型式	317
§ 8-4 高压油管	224	§ 11-3 脉冲系统中影响废气能量利用的主要因素	323
§ 8-5 不正常喷射现象和消除措施.....	225	§ 11-4 脉冲变换增压系统	330
§ 8-6 喷油过程的数值计算方法.....	235	§ 11-5 定压系统中涡轮增压器主要参数的决定	334
§ 8-7 电控式高压喷射系统.....	240	§ 11-6 决定脉冲系统中涡轮机设计参数的方法	339
主要参考文献	241	§ 11-7 废气涡轮增压柴油机的特点	344
思考题与习题	242	§ 11-8 废气涡轮增压器和四冲程柴油机的特性配合	355
第九章 柴油机的燃烧室	243	§ 11-9 脉冲系统中废气涡轮增压器平衡运行点的图解法	359
§ 9-1 直接喷射式燃烧室内的空气运动.....	243	§ 11-10 车用柴油机的废气涡轮增压.....	364
§ 9-2 浅盆形燃烧室.....	251	§ 11-11 汽油机的废气涡轮增压.....	366
§ 9-3 深坑形燃烧室.....	256	主要参考文献	369
§ 9-4 球形油膜燃烧室.....	262	习题	370
§ 9-5 涡流室燃烧室.....	266	第十二章 内燃机实际工作过程的数值计算	372
§ 9-6 预燃室燃烧室.....	271	§ 12-1 柴油机实际工作过程的数值计算	372
§ 9-7 燃烧室的比较和选型.....	274	§ 12-2 汽油机实际工作过程的数值计算	385
主要参考文献	276	主要参考文献	389
思考题与习题	276	思考题与习题	389
第十章 内燃机特性和调速器	278	附录: 常用单位换算表	390
§ 10-1 内燃机特性	279		
§ 10-2 内燃机功率标定和大气修正	289		
§ 10-3 调速器工作原理及其应用	293		
§ 10-4 调速系统的动力过程	298		
§ 10-5 液压调速器	300		
主要参考文献	306		
思考题与习题	306		
第十一章 内燃机增压	308		

第一章 内燃机的性能指标及其提高途径

《内燃机原理》这门课程以提高内燃机性能作为主要研究目标，深入到工作过程的各个阶段，分析影响内燃机性能指标的各种因素，研究提高性能指标的具体措施及努力方向。

内燃机的性能指标很多，主要有动力性能指标（指功率、扭矩、转速）、经济性能指标（主要指燃料与润滑油消耗率）、运转性能指标（主要指冷起动性能、噪声和排气品质）和耐久可靠性指标（主要指大修或更换零件之间的最长运行时间与无故障长期工作能力）。

本章主要研究表征动力性能指标和经济性能指标的各种参数及其相互关系。运转性能指标和耐久可靠性指标对内燃机来说有其不可忽视的重要性，它们将在本书的其他各章及《内燃机设计》等课程中分析讨论。

§ 1-1 内燃机示功图的两种基本形式 —— $p-V$ 图和 $p-\varphi$ 图

燃料燃烧产生的热量是通过气缸内所进行的工作循环转化为机械能的，即气缸中的工质的燃烧压力作用在活塞顶上，通过曲轴连杆机构，在克服了内燃机内部的各种损耗后，表现为对外做功。因此，要研究内燃机的动力性能和经济性能，应首先对内燃机一个工作循环中热功转换的质和量两方面加以分析。

内燃机气缸内部实际进行的工作循环是非常复杂的，为获得正确反映气缸内部实际情况的试验数据，通常利用不同型式的示功器或数据采集系统（data acquisition system）来

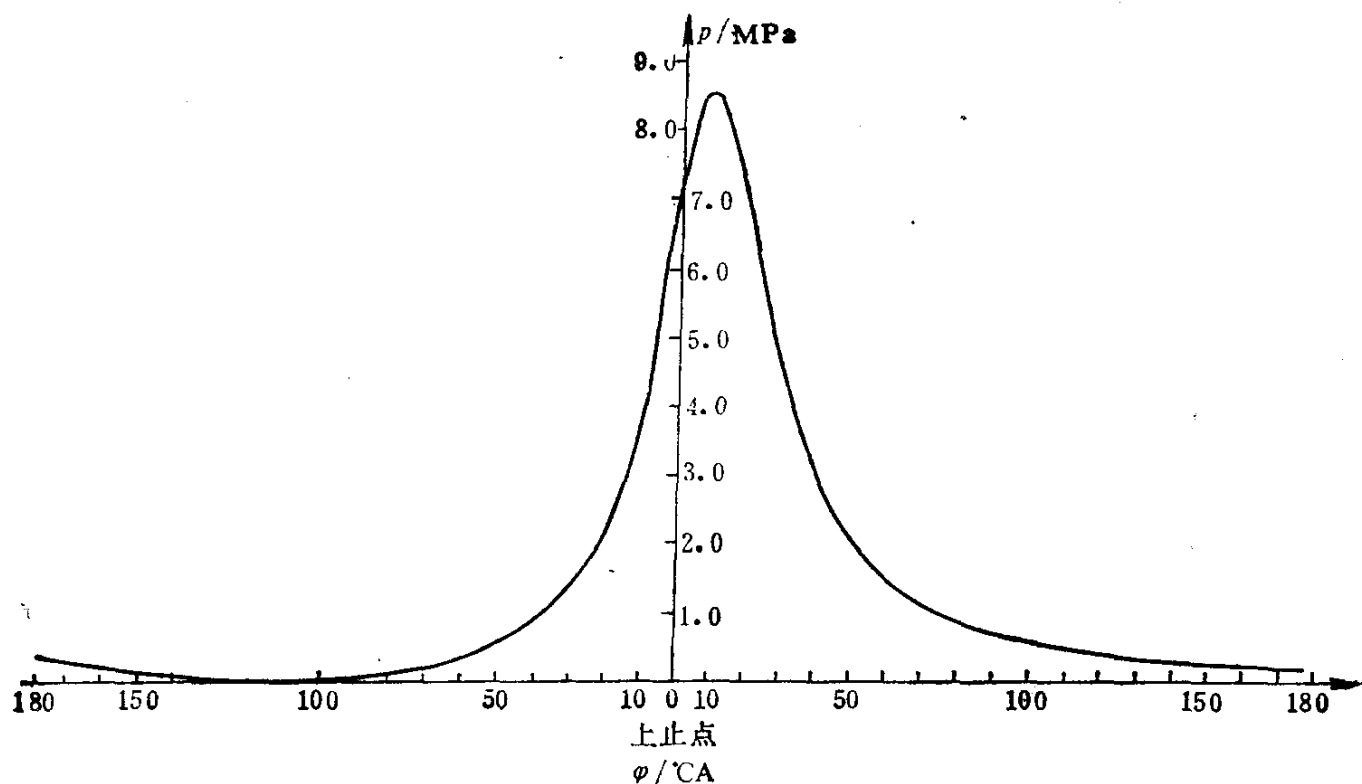


图1-1 120B型四冲程单缸试验机的 $p-\varphi$ 图

$p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ $t_0 = 20^\circ\text{C}$ $N_e = 17.21 \text{ kW}$ $p_e = 0.65 \text{ MPa}$ $n = 2010 \text{ r/min}$

观察或记录相对于不同活塞位置或曲轴转角时气缸内工质压力的变化,所得的结果即为 $p-V$ 示功图或 $p-\varphi$ 示功图。 $p-V$ 图或 $p-\varphi$ 图二者可以互相转换。图 1-1 即为用气电示功器测得的 120 B 型四冲程单缸试验机的 $p-\varphi$ 图,图 1-2 是由图 1-1 的 $p-\varphi$ 图转化而成的 $p-V$ 图。

由进排气过程组成的发动机换气过程,由于此时气缸压力低,需用放大的压力标尺记录出 $p-\varphi$ 或 $p-V$ 低压示功图(见第三章)。

从示功图可以观察到内燃机工作循环的不同阶段:压缩、燃烧、膨胀以及进气、排气(未绘出)过程中的压力变化,通过数据处理,运用热力学知识,将它们与所积累的实验数据进行分析比较,可以对整个工作过程或工作过程的不同阶段进展的完善程度作出正确的判断。因此,示功图是研究内燃机工作过程的重要实验数据。

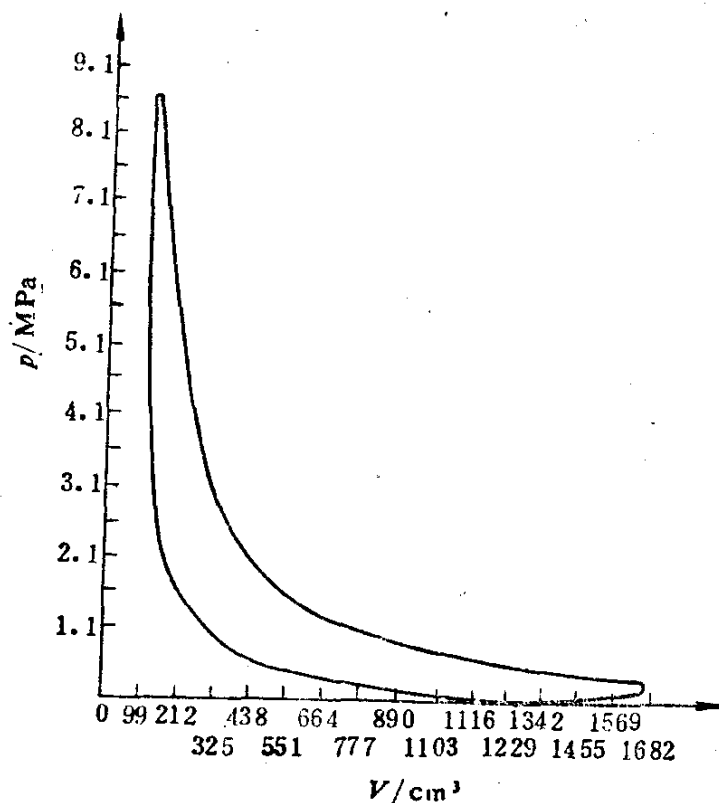


图1-2 120 B型四冲程单缸试验机的 $p-V$ 图

§ 1-2 内燃机的指示性能指标

内燃机的指示性能指标是指以工质对活塞做功为基础的指标。

一、指示功和平均指示压力

所谓指示功是指气缸内完成一个工作循环所得到的有用功 W_i 。指示功的大小可以由 $p-V$ 图中闭合曲线所占有的面积求得,图 1-3 中示出了四冲程非增压和增压发动机以及二冲程发动机的示功图。

图 1-3 a 中四冲程非增压发动机的指示功面积 F_i 是由相当于压缩、燃烧膨胀行程中所得到的有用功面积 F_1 和相当于进气、排气行程中消耗的功的面积(即泵损失)相减而成。即 $F_i = F_1 - F_2$ 。在四冲程增压发动机中(图 1-3 b),由于进气压力高于排气压力,在换气

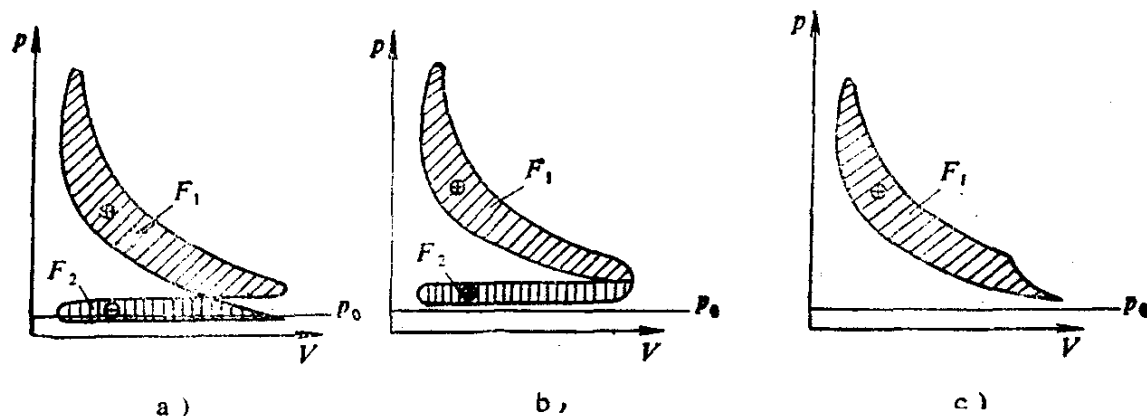


图1-3 发动机的 $p-V$ 图

a) 四冲程非增压发动机 b) 四冲程增压发动机 c) 二冲程发动机

过程中, 工质是对外做功的, 因此, 换气功的面积 F_2 应与面积 F_1 叠加起来, 即 $F_i = F_1 + F_2$ 。在二冲程发动机中 (图 1-3 c), 只有一块示功图面积 F_i , 它表示了指示功的大小。

F_i 可以用求积仪或计算方法求得, 然后用下式计算 W_i 值。

$$W_i = \frac{F_i a b}{100} \quad (\text{N} \cdot \text{m} \text{ 或 } \text{J}) \quad (1-1)$$

式中 F_i ——示功图面积, cm^2 ;

a ——示功图纵坐标比例尺, Pa/cm ;

b ——示功图横坐标比例尺, cm^3/cm 。

指示功 W_i 反映了发动机气缸在一个工作循环中所获得的有用功的数量, 它除了和循环中热功转换的有效程度有关外, 还和气缸容积大小有关。为了能更清楚地对不同工作容积的发动机的工作循环的热功转换有效程度作比较, 引出了平均指示压力 (用 p_i 表示) 的概念。所谓平均指示压力是指单位气缸容积一个循环所作的指示功。

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (\text{Pa}) \quad (1-2)$$

式中 W_i ——发动机一个工作循环的指示功, J ;

V_h ——发动机气缸工作容积, m^3 。

若 V_h 用升 (l) 为单位, W_i 用千焦 (kJ) 为单位时, 则

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (\text{MPa})$$

式 (1-2) 也可写成 $W_i = p_i V_h = p_i \frac{\pi D^2}{4} S$, 其中 D 和 S 分别为气缸直径和活塞冲程, 由此可以引出平均指示压力的第二个概念, 即平均指示压力是一个假想的平均不变的压力, 以这个压力作用在活塞顶上, 使活塞移动一个冲程 S 所作的功即为循环的指示功 W_i 。

平均指示压力是从实际循环的角度来评价发动机气缸工作容积利用率高低的一个参数, p_i 越高, 同样大小的气缸容积可以发出更大的指示功, 气缸工作容积的利用程度越佳, 平均指示压力在国外有些教科书中也有称之为指示平均有效压力的 (IMEP), 平均指示压力是衡量发动机实际循环动力性能的一个很重要的指标。

一般内燃机在标定工况下的 p_i 值在下列范围内:

四冲程非增压柴油机	0.6~0.95MPa
四冲程增压柴油机	0.85~2.6MPa
二冲程柴油机	0.35~1.3MPa
四冲程摩托车用汽油机	0.9~1.43MPa
四冲程小客车用汽油机	0.65~1.25MPa
四冲程载重车用汽油机	0.6~0.85MPa
二冲程小型风冷汽油机	0.4~0.85MPa

二、指示功率

内燃机单位时间内所作的指示功称为指示功率 N_i , 若一台内燃机的气缸数为 i , 每缸的工作容积为 $V_h (\text{m}^3)$, 平均指示压力为 $p_i (\text{N}/\text{m}^2)$, 转速为 $n (\text{r}/\text{s})$, 根据 p_i 的定义, 每循环气体所作的指示功为:

$$W_i = p_i V_h \quad (\text{J})$$

具有 i 个气缸的发动机每秒所作的指示功为:

$$N_i = 2 p_i V_h \frac{n}{\tau} i \quad (\text{W}) \quad (1-3)$$

式中 τ ——冲程数, 对四冲程: $\tau = 4$; 对二冲程: $\tau = 2$ 。

在实际应用时, 一般采用 p_i (MPa), V_h (L), n (r/min), N_i (kW) 代入可得:

$$10^3 N_i = 2 \times 10^6 p_i \frac{i V_h}{10^3} \frac{n}{60 \tau}$$

$$N_i = \frac{p_i V_h n i}{30 \tau} \quad (\text{kW}) \quad (1-4)$$

对四冲程发动机

$$N_i = \frac{p_i V_h n i}{120} \quad (\text{kW})$$

对二冲程发动机

$$N_i = \frac{p_i V_h n i}{60} \quad (\text{kW})$$

三、指示热效率和指示燃油消耗率

指示热效率 η_i 是发动机实际循环指示功与所消耗的燃料热量的比值, 即

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_i} \quad (1-5)$$

式中 Q_i ——得到指示功 W_i 所消耗的热量, (J)。

对于一台发动机, 当测得其指示功率 N_i (kW) 和每小时燃油消耗量 M_i (kg) 时, 根据 η_i 的定义, 可得:

$$\eta_i = \frac{3.6 \times 10^3 N_i}{M_i H_u} \quad (1-6)$$

式中 3.6×10^3 ——1kW·h 的热当量, kJ/(kW·h);

M_i ——每小时发动机的耗油量, kg/h;

H_u ——所用燃料的低热值, kJ/kg。

指示燃油消耗率是指单位指示功的耗油量, 它通常以单位指示千瓦小时的耗油量来表示。

$$g_i = \frac{M_i}{N_i} \times 10^3 \quad [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})] \quad (1-7)$$

因此, 表示实际循环的经济性指标 η_i 和 g_i 之间存在着以下关系:

$$\eta_i = \frac{3.6 \times 10^3}{H_u g_i} \quad (1-8)$$

若以柴油的低热值 $H_u = 41868 \text{ kJ/kg}$ 代入上式

$$\eta_i \approx 86/g_i$$

一般内燃机的 η_i 和 g_i 的统计范围如下:

	η_i	g_i
四冲程柴油机	0.41~0.48	210~175

二冲程柴油机	0.40~0.48	218~177
四冲程汽油机	0.25~0.40	344~218
二冲程汽油机	0.19~0.27	435~305

从统计范围可以看出：柴油机的指示热效率高于汽油机，四冲程发动机的热效率高于二冲程发动机。

§ 1-3 内燃机的有效性能指标

一、机械效率和有效功率

上节所讨论的指示性能指标只能评定工作循环进行的好坏，发动机发出的指示功率需扣除运动件的摩擦功率以及驱动气门机构、风扇、水泵、机油泵、发电机等附件所消耗的功率后才能变为曲轴的有效输出，所有这些消耗的功率的总和称为机械损失功率 N_m ，从而有效功率

$$N_e = N_i - N_m \quad (1-9)$$

有效功率和指示功率之比称为机械效率

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (1-10)$$

内燃机的有效功率可以利用各种型式的测功器和转速计分别测出发动机在某一工况下的曲轴的输出扭矩 M_e 及在同一工况下的发动机转速，按以下公式求得：

$$N_e = M_e \cdot \frac{2\pi n}{60} \times 10^{-3} = \frac{M_e n}{9550} \quad (\text{kW}) \quad (1-11)$$

式中 M_e ——发动机输出扭矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

二、平均有效压力和升功率

平均有效压力是指发动机单位气缸工作容积一个循环能发出的有效功，它是从发动机实际输出功的角度来评定气缸工作容积的利用程度，与平均指示压力相似，它也可看作是一个假想的、平均不变的压力作用在活塞顶上，使活塞移动一个冲程所作的功等于每循环所作的有效功。平均有效压力是衡量发动机动力性能的一个很重要的参数。

按照上述定义可以用如式 (1-4) 所表示的 N_i 和 p_i 之间的关系那样，列出 N_e 和 p_e 的关系式：

$$N_e = \frac{p_e V_h n i}{30 \tau} \quad (\text{kW}) \quad (1-12)$$

$$p_e = \frac{30 \tau N_e}{V_h i n} \quad (\text{MPa}) \quad (1-13)$$

应用式 (1-11) 和 (1-12) 的恒等关系，可得：

$$N_e = \frac{M_e n}{9550} = \frac{p_e V_h n i}{30 \tau} \quad (1-14)$$

求得：

$$M_e = \frac{318.3 p_e V_h i}{\tau} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-15)$$

因此，对于一定气缸总工作容积（即 iV_h ）的发动机，平均有效压力 p_e 值反映了发动机

输出扭矩 M_e 的大小。

$$M_e \propto p_e$$

也就是说, p_e 反映了发动机单位气缸工作容积输出扭矩的大小。

升功率 N_l 的定义是在标定工况下, 发动机每升气缸工作容积所发出的有效功率。它是从功率 (单位时间作功的能力) 方面来衡量发动机气缸工作容积利用程度的一个指标。

$$N_l = \frac{N_e}{i V_h} \quad (\text{kW/l}) \quad (1-16)$$

式中 N_e ——发动机的标定功率, kW/l;

i ——气缸数;

V_h ——每气缸工作容积, l。

从式 (1-12) 可得:

$$N_l = \frac{p_e n}{30 \tau} \quad (1-17)$$

式中 p_e ——标定工况下的平均有效压力, MPa;

n ——标定转速, r/min。

可见, 升功率 N_l 是从发动机有效功率的角度对其气缸工作容积的利用率作总的评价, 它与 p_e 和 n 的乘积成正比。 N_l 值越大, 发动机的强化程度越高, 发出一定有效功率的发动机尺寸越小。因此不断提高 p_e 和 n 的水平以获得更强化、更轻巧、紧凑的发动机, 一直是内燃机工作者致力以求的奋斗目标。因而, N_l 是评定一台发动机整机动力性能和强化程度的重要指标之一。

目前内燃机的 p_e 和 N_l 值一般在下列范围内:

	p_e /MPa	N_l /(kW·l ⁻¹)
农用柴油机	0.35~0.8	8.8~14.7
汽车用柴油机	0.65~1	11~25.8
内燃机车用柴油机	1~1.8	11.8~18.4
轻强化高速柴油机	1~2	18.4~29.5
固定船用中速柴油机	0.6~2.1	3.7~7.35
四冲程摩托车用汽油机	0.78~1.2	51.8~88
四冲程小客车用汽油机	0.65~1.2	29.4~51.5
四冲程载重车用汽油机	0.6~0.7	22~25.8
二冲程小型风冷汽油机	0.3~0.65	18.4~73.5

三、由吸入空气量计算平均有效压力

根据每循环吸入的空气量来计算平均有效压力可以导出平均有效压力与一些热力参数之间的关系, 从而明确提高平均有效压力的技术措施。在推导前, 先给出二个重要定义。

1. 充气效率 η_v

每循环吸入气缸的空气量若把它换算成进口状态 (p_i , T_i) 的体积 V_i , 其值一般要比活塞排量 V_h 小, 二者的比值定义为充气效率 η_v , 即

$$\eta_v = \frac{m_i}{m_{h,i}} = \frac{M_i}{M_{h,i}} = \frac{V_i}{V_h}$$

式中 m_1, M_1, V_1 ——分别为实际进入气缸的新鲜空气的质量、千摩尔值、在进气管状态 (p_1, T_1) 下所占有的体积;

m_{sh}, M_{sh}, V_h ——分别为在进气管状态下能充满气缸工作容积的空气质量、千摩尔值及气缸工作容积。

充气效率 η_v 是表征实际换气过程进行完善程度的一个极为重要的参数 (详见第三章)。

2. 过量空气系数 α

燃烧 1 kg 燃料的实际空气量与理论空气量之比称为过量空气系数。

$$\alpha = \frac{m_1}{g_b l_0} \quad (1-18)$$

式中 g_b ——每循环燃料供给量, kg;

l_0 ——1 kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量, 柴油约为 $l_0 = 14.3 \text{ kg}$, 汽油约为 $l_0 = 14.8 \text{ kg}$ 。

对柴油机来说, α 总是大于 1, 以保证喷入气缸的柴油能完全燃烧。在柴油机吸入气缸的空气量一定的情况下, α 小意味着可以向气缸多喷油, 吸入气缸的空气利用率高, 发出的功率大, 所以 α 是反映混合气形成和燃烧完善程度及整机性能的一个指标, 应力求减小 α , 减小 α 在小型高速柴油机中主要受燃烧完善程度的限制, 在大型及增压柴油机中主要受热负荷的限制, 柴油机在全负荷时 α 的一般数值范围为:

低速柴油机	$\alpha = 1.8 \sim 2.0$
高速柴油机	$\alpha = 1.2 \sim 1.5$
增压柴油机	$\alpha = 1.7 \sim 2.2$

对汽油机来说, 在整个运行工况中, 可以遇到 $\alpha > 1$ 和 $\alpha \leq 1$ 的各种情况 (详见第五章), 汽油机在全负荷时 α 的一般数值为:

汽油机	$\alpha = 0.85 \sim 1.1$
-----	--------------------------

除了运用 α 这一参数来表示燃烧时空气量和燃料量之比外, 还可以应用空气燃料比 AF 或燃料空气比 FA 以及相对空燃比 $(AF)_r$, 或相对燃空比 $(FA)_r$ (又名燃料当量比) 来表示, 它们之间的关系为:

$$\text{空燃比} = \frac{\text{空气流量率}}{\text{燃料流量率}}$$

$$\text{燃空比} = \frac{\text{燃料流量率}}{\text{空气流量率}}$$

$$\text{相对空燃比} \quad (AF)_r = \frac{AF}{(AF)_0} = \alpha$$

$$\text{相对燃空比} \quad (FA)_r = \frac{FA}{(FA)_0} = \frac{1}{\alpha}$$

式中 $(AF)_0$ ——燃料完全燃烧时的理论空燃比, 例如对汽油: $(AF)_0 = 14.8:1 = 14.8$;

$(FA)_0$ ——燃料完全燃烧时的理论燃空比, 例如对汽油: $(FA)_0 = 1:14.8 = 0.0676$ 。

实际发动机的 α 可由废气分析法求得, 对于非增压的四冲程内燃机, 也可由耗油量及耗气量按下式求得:

$$\alpha = \frac{\dot{M}_a}{\dot{M}_f l_0}$$

式中 $\dot{M}_a$ ——每小时进入气缸的空气流量, kg/h;

$\dot{M}_b$ ——每小时耗油量, kg/h;

l_0 ——理论空气量, kg/kg燃料。

根据式 (1-18) 可得每循环供油量:

$$g_b = \frac{m_b}{a l_0} = \frac{\eta_v m_{b,h}}{a l_0} = \frac{\eta_v V_h \rho_a}{a l_0}$$

式中 ρ_a ——进气管状态下空气密度。

而

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} = \frac{Q_1 \eta_c}{V_h}$$

$$p_c = \frac{Q_1 \eta_c}{V_h}$$

其中

$$Q_1 = g_b H_u = \frac{\eta_v V_h \rho_a H_u}{a l_0}$$

因而

$$p_c = \frac{\eta_v \eta_c \rho_a H_u}{a l_0} \quad (\text{N/m}^2)$$

上式中 H_u, ρ_a 的单位分别为 J/kg, kg/m³, 则 p_c 为 N/m²。实用上, 取 H_u, ρ_a 的单位为 kJ/kg, MPa,

则

$$p_c = \frac{\eta_v \eta_c \rho_a H_u}{1000 a l_0} \quad (\text{MPa}) \quad (1-19)$$

把 $\gamma_c = \frac{p_c}{RT_c}$ 代入, p_c 为进气管压力 (N/m²), T_c 为进气管温度 (K) 空气的气体常数

$R = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 得:

$$p_c = \frac{\eta_v \eta_c H_u p_c}{287000 a l_0 T_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1-20)$$

若计算单位 p_c (MPa), T_c (K), H_u (kJ/kg), l_0 (kg/kg 燃料), 代入:

$$p_c = 3.485 \frac{\eta_v \eta_c H_u p_c}{a l_0 T_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1-21)$$

若 l_0 换用 L_0 (kmol/kg 燃料), 则 $l_0 = m_a L_0$, m_a 为空气的分子量, 代入上式可得

$$p_c = \frac{3.485}{28.9} \frac{\eta_v \eta_c H_u}{a L_0} \frac{p_c}{T_c} = 0.121 \frac{\eta_c}{a} \frac{H_u}{L_0} \eta_v \frac{p_c}{T_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1-22)$$

式 (1-22) 建立了动力性能指标与经济性能指标 η_c 等一系列参数间的关系, 在以后的各章中可以看到, 它是分析发动机性能的一个重要依据。

四、有效热效率和有效燃油消耗率

总的衡量发动机经济性能的重要指标是有效热效率 η_e 和有效燃油消耗率 g_e 。

有效热效率是实际循环的有效功与为得到此有用功所消耗的热量之比值, 即

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_1} = \frac{W_i \eta_m}{Q_1}$$

以式 (1-6) 代入得:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m \quad (1-23)$$

由此可见, 在 η_e 中已经考虑到实际发动机工作时的一切损失了。与前述 η_i 一样, 可得

$$\eta_e = \frac{3.6 \times 10^3 N_e}{M_e H_e} \quad (1-24)$$

当测得发动机有效功率和每小时耗油量 M_e 以后, 可利用此式计算出 η_e 值。

有效燃油消耗率是指单位有效功的耗油量, 通常用每有效千瓦小时所消耗的燃料重量 g_e 来表示。

$$g_e = \frac{M_e}{N_e} \times 10^3 \quad [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})] \quad (1-25)$$

由式 (1-24), g_e 又可表示为:

$$g_e = \frac{3.6 \times 10^3}{\eta_e H_e} \quad [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})] \quad (1-26)$$

可见, 有效燃油消耗率与有效效率成反比, 知道其中一值后, 可求出另一值。

一般内燃机在标定工况下的 g_e 和 η_e 值大致在以下范围:

	$g_e / (\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	η_e
低速柴油机	190~225	0.45~0.38
中速柴油机	195~240	0.43~0.36
高速柴油机	215~285	0.40~0.30
(其中较低的 g_e 值均属废气涡轮增压的四冲程, 二冲程柴油机)		
四冲程汽油机	270~410	0.30~0.20
二冲程汽油机	410~545	0.20~0.15

§ 1-4 机械损失和机械效率

在评定发动机机械损失时, 除了机械损失功率 N_m 和机械效率 η_m 外, 与平均指示压力, 平均有效压力的定义相似, 也可应用单位气缸工作容积的比参数——平均机械损失压力 p_m 。它的定义是: 发动机单位气缸工作容积一个循环所损失的功。它可以用来衡量机械损失的大小, 参照式 (1-13) 可以写出

$$p_m = \frac{30\pi N_m}{V_{hi} n} \quad (\text{MPa}) \quad (1-27)$$

$$N_m = \frac{p_m V_{hi} n}{30\pi} \quad (\text{kW}) \quad (1-28)$$

在致力于提高内燃机性能指标时, 应尽可能减少机械损失, 以提高机械效率, 若不注意这点, 有时在改善气缸内部指示指标的同时, 却不自觉地增加了机械损失, 以致不能获得预期的改进效果。

一、机械损失的组成部分

1. 活塞与活塞环的摩擦损失

这部分损失占整个摩擦损失的主要部分。这是由于它的滑动面大, 相对速度高, 润滑不充分等原因造成的, 这种摩擦与活塞的长度, 活塞间隙以及活塞环的数目和环的张力等结构因素有关, 此外, 在构造相同的情况下, 它随气缸内压力, 活塞速度以及润滑油粘度的升高而增加。