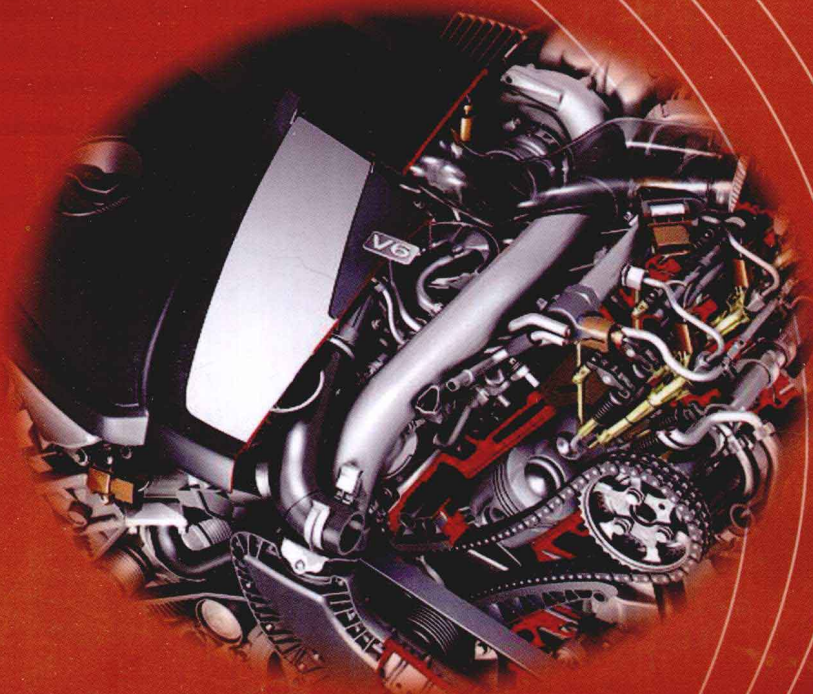


高等学校理工科机械类规划教材

# 内燃机原理教程

INTERNAL COMBUSTION ENGINING FUNDAMENTALS

许锋 主编



大连理工大学出版社  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校理工科机械类规划教材

# 内燃机原理教程

主编 许 锋

编者 许 锋 隆武强 冯立岩

唐 斌 杜宝国

主审 周俊杰

大连理工大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

内燃机原理教程 / 许锋主编. — 大连 : 大连理工大学出版社, 2011. 5

ISBN 978-7-5611-6065-7

I. ①内… II. ①许… III. ①内燃机—理论—教材  
IV. ①TK40

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 029377 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连业发印刷有限公司印制

大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:185mm×260mm

印张:25

字数:586 千字

2011 年 5 月第 1 版

2011 年 5 月第 1 次印刷

---

责任编辑:于建辉 王颖鑫

责任校对:任俊杰 牟雪莹

封面设计:孙 元

---

ISBN 978-7-5611-6065-7

定 价:39.80 元

# 前 言

进入 21 世纪,内燃机在新概念燃烧理论、汽油机的电控直接喷射技术、柴油机的高压共轨电控喷油系统,以及清洁代用燃料应用等方面都有新的突破。内燃机已成为高效率、低污染的动力机械,方兴未艾,正受到汽车、船舶及军事等领域的青睐。随着科学技术的飞速发展,内燃机正面临着节能与环保的双重挑战。与此同时,也对从事内燃机专业的教学、科技人员提出了更高的要求。为了适应新技术发展的需要,与时俱进,编者结合多年的教学经验和科研成果,对内燃机原理讲义进行了全面修订,并正式出版。

“内燃机原理”是内燃机专业的必修课程,具有很深的理论性和较强的实践性。本教程结合专业发展前景,联系工程实际,翔实、系统地阐述了内燃机的工作原理。本教程具有以下特色:结构严谨,条理清晰,内容新颖,语言流畅,图文配合适当,理论联系实际,易于学习掌握。通过对本教程的学习,打好坚实的专业基础,从而提高专业技能,激发创新思维。

本书由大连理工大学能源与动力工程学院许锋教授主编,隆武强教授、冯立岩副教授参加编写,唐斌博士、杜宝国博士也参加了编写。全书由周俊杰教授主审。

本书所用的名词、术语、符号等均符合教育部高校动力工程专业根据国标、部标所作的统一规定。

本书引用的图样、数据参考了许多院校、研究院所的文献资料,在此谨致深切的感谢。

本书涉及内容较多,范围较广,限于编者的学识和水平,疏漏及错误之处在所难免,敬请使用本书的专家、读者批评指正。

编 者

2011 年 2 月

# 常用符号表

## 1. 英文字母

符号	含义	单位	符号	含义	单位
$A$	面积	$\text{mm}^2$	$H_u$	燃料低热值	$\text{kJ/kg}$
$A_1$	示功图曲线包围的面积	$\text{mm}^2$	$h$	比焓	$\text{J/kg}$
$A_a$	空气消耗量	$\text{kg/h, kg/s}$	$h_c$	表面传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$A/F$	空燃比		$i$	汽缸数	
$A_p$	柱塞面积	$\text{mm}^2$	$i_n$	喷孔数	
$A_n$	喷孔总流通面积	$\text{mm}^2$	$K$	传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$a$	声速	$\text{m/s}$	$k$	空气绝热指数	
$B$	燃油消耗量	$\text{kg/h}$	$k_r$	燃气绝热指数	
$b_e$	有效燃油消耗率	$\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$k_T$	涡轮前废气绝热指数	
$b_i$	指示燃油消耗率	$\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$L$	雾束贯穿距	$\text{mm}$
$C$	机油消耗量	$\text{kg/h}$	$L_0$	化学计量空燃比	$\text{kmol/kg}$
$c$	速度	$\text{m/s}$	$l_0$	化学计量空燃比	$\text{kg/kg}$
$c_0$	喷嘴环出口流速	$\text{m/s}$	$M_1$	新鲜空气量	$\text{mol, kmol}$
$C_p$	定压比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$Ma$	马赫数	
$C_v$	定容比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$M_r$	残余废气量	$\text{mol, kmol}$
$(\mu C_p)_m$	空气的平均定压摩尔比热容	$\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$m$	质量	$\text{g, kg}$
$(\mu C_v)_m$	空气的平均定容摩尔比热容	$\text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$n$	内燃机转速	$\text{r/min}$
$D$	汽缸直径	$\text{mm}$	$n_1$	平均压缩多变指数	
$d_n$	喷孔直径	$\text{mm}$	$n_2$	平均膨胀多变指数	
$dQ_B/d\varphi$	放热率	$\text{kJ}/(^{\circ}\text{CA})$	$n_{Tb}$	增压器转速	$\text{r/min}$
$dx/d\varphi$	燃烧率	$1/(^{\circ}\text{CA})$	$P_e$	有效功率	$\text{kW}$
$E$	燃油的弹性模量		$P_i$	指示功率	$\text{kW}$
$E_T$	涡轮进口处的可用能	$\text{kJ}$	$P_L$	升功率	$\text{kW}$
$F_i$	示功图面积	$\text{cm}^2$	$P_m$	机械损失功率	$\text{kW}$
$F_{w_3}$	汽缸套瞬时表面积	$\text{cm}^2$	$p$	汽缸内工质瞬时压力	$\text{kPa, MPa}$
$F_c$	喷嘴环出口最小流通面积	$\text{cm}^2$	$p_0$	标准大气压	$\text{kPa}$
$f_e$	排气门瞬时开启面积	$\text{cm}^2$	$p'_0$	排气背压	$\text{kPa}$
$f_s$	进气门瞬时开启面积	$\text{cm}^2$	$p_a$	环境压力	$\text{kPa}$
$G_a$	空气质量流量	$\text{kg/h}$	$p_b$	增压压力	$\text{MPa}$
$g_b$	每循环供油量	$\text{g/cyc}$	$p_{ca}$	压缩始点压力	$\text{MPa}$
$H$	焓	$\text{J, kJ}$	$p_{co}$	压缩终点压力	$\text{MPa}$
			$p_d$	进气压力	$\text{MPa}$
			$p_e$	有效压力	$\text{MPa}$
			$p_{ex}$	膨胀终点压力	$\text{MPa}$

符号	含义	单位
$p_g$	排气背压	MPa
$p_i$	指示压力	MPa
$p_{inj}$	喷油压力	MPa
$p_{jo}$	启喷压力	MPa
$p_{jmax}$	喷油峰值压力	MPa
$p_{max}$	最大燃烧压力	MPa
$p_{me}$	平均有效压力	MPa
$p_{mi}$	平均指示压力	MPa
$p_{mm}$	平均机械损失压力	MPa
$p_r$	排气门后的工质压力	MPa
$p_s$	进气管内压力	MPa
$p_T$	涡轮进口压力	MPa
$p_{ot}$	涡轮后背压	kPa
$Q$	热量	J, kJ
$Q_e$	转变为有效功的热量	kJ
$Q_i$	燃料燃烧放出的热量	kJ
$Q_w$	冷却水带走的热量	kJ
$Q_r$	废气带走的热量	kJ
$q_m$	质量流量	kg/s
$R$	空气气体常数, 曲柄半径	J/(kg · K)
$R_m$	通用气体常数	J/(mol · K)
$R_T$	废气气体常数	J/(kg · K)
$s$	熵	J/K
$S$	活塞行程	mm
$T$	汽缸内瞬时温度	K
$T_0, t_0$	标准大气温度	K, °C
$T_a, t_a$	环境温度	K, °C
$T_b$	增压空气温度	K
$T_{co}$	压缩终点温度	K
$T_d$	进气温度	K
$T_{ex}$	膨胀终点温度	K
$T_{max}, t_{max}$	最高燃烧温度	K, °C
$T_s$	进气管内气体温度	K
$T_T$	涡轮进口温度	K
$T_{iq}$	转矩	N · m
$T_{iqmax}$	最大转矩	N · m
$T_{w1}$	活塞顶平均温度	K
$T_{w2}$	汽缸盖平均温度	K
$u$	热力学能 (内能)	J, kJ
$\bar{u}$	气流平均速度	m/s

符号	含义	单位
$u'$	气流脉动速度	m/s
$V_{ce}$	压缩室容积	L
$v_m$	活塞平均速度	m/s
$V_s$	汽缸工作容积	L
$W_e$	有效功	J, kJ
$W_i$	指示功	J, kJ
$X$	燃料百分数	

## 2. 希腊字母

符号	含义	单位
$\alpha$	空燃比	
$\beta$	通流能力系数	
$\gamma$	比热容比	
$\delta$	后膨胀比	
$\delta_b$	中冷度	
$\epsilon$	湍流能动耗散率	
$\epsilon_c$	几何压缩比	
$\epsilon_{ce}$	有效压缩比	
$\eta_{bs}$	压气机定熵效率	
$\eta_c$	中冷器效率	
$\eta_{ce}$	废气能量传递效率	
$\eta_e$	有效效率	
$\eta_{et}$	有效热效率	
$\eta_i$	指示效率	
$\eta_{it}$	指示热效率	
$\eta_m$	机械效率	
$\eta_s$	扫气效率	
$\eta_{Tb}$	涡轮增压器效率	
$\eta_v$	充气效率	
$\theta_{ee}$	排气提前角	
$\theta_{ei}$	排气迟后角	
$\theta_{ia}$	进气提前角	
$\theta_{ii}$	进气迟后角	
$\lambda$	瞬时过量空气系数	
$\lambda_b$	增压度	
$\lambda_p$	压力升高比	
$\lambda_q$	放热系数	
$\lambda_s$	曲柄连杆比	
$\mu$	实际分子变化系数	
$\mu_0$	理论分子变化系数	
$\mu_e$	排气的流量系数	



符号	含义	单位
$\mu_s$	进气的流量系数	
$\xi_r$	中冷器阻力系数	
$\xi_e$	燃烧终点的热利用系数	
$\pi_b$	增压比	
$\pi_r$	涡轮膨胀比	
$\rho$	初膨胀比	
$\rho_i$	燃油密度	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	冲程数	
$\tau_i$	着火滞燃期	
$\Phi$	化学当量比	
$\phi$	相对湿度	
$\phi_a$	过量空气系数	
$\phi_{a1}$	总过量空气系数	
$\phi_c$	充量系数	
$\phi_n$	示功图丰满系数	
$\phi_n \cdot u$	适应性系数	
$\phi_r$	残余废气系数	
$\phi_s$	扫气系数	
$\phi_{1q}$	扭矩储备系数	
$\varphi$	曲轴转角	°CA
$\varphi_{f1}$	喷油提前角	°CA
$\varphi_{f2}$	供油提前角	°CA
$\varphi_i$	滞燃角	°CA
$\varphi_{ig}$	点火提前角	°CA
$\varphi_z$	喷油持续角	°CA
$\psi_d$	进气流速函数	
$\psi_s$	冲程失效系数	
$\psi_T$	燃气流速函数	
$\Omega$	涡流比	
$\Omega_T$	反动度	
$\omega_p$	柱塞运动速度	

### 3. 脚标

符号	含义
a	空气
b	已燃
c	压缩, 燃烧
ch	化学
cr	临界
e	有效值, 排气
f	燃料, 火焰
g	燃气
i	指示值, 始点
ig	点火
j	喷射
m	平均
T	涡轮
u	未燃

# 目 录

## 第 1 章 内燃机的工作过程与性能指标

- 1.1 内燃机技术概述 / 1
  - 1.1.1 内燃机概述 / 1
  - 1.1.2 内燃机技术发展状况 / 5
- 1.2 内燃机的理论循环 / 8
  - 1.2.1 内燃机的理论循环与假设条件 / 8
  - 1.2.2 内燃机的三种理论循环 / 8
- 1.3 内燃机的实际循环 / 13
  - 1.3.1 内燃机的实际循环与各项损失 / 13
  - 1.3.2 四冲程内燃机实际循环的工作过程 / 15
- 1.4 内燃机的性能指标与热平衡 / 29
  - 1.4.1 指示参数 / 30
  - 1.4.2 有效性能指标 / 32
  - 1.4.3 内燃机实际循环的近似热计算 / 38
  - 1.4.4 内燃机的热平衡 / 43
  - 1.4.5 提高内燃机动力性和经济性的技术措施 / 47

## 第 2 章 内燃机的换气过程

- 2.1 四冲程内燃机的换气过程 / 51
  - 2.1.1 换气阶段的划分与换气损失 / 51
  - 2.1.2 充量系数与提高充量系数的措施 / 57
  - 2.1.3 进、排气系统的动态效应 / 66
- 2.2 二冲程内燃机的换气过程 / 68
  - 2.2.1 二冲程内燃机换气形式的分类与时面值的确定 / 68
  - 2.2.2 二冲程内燃机换气过程的阶段划分及其换气特点 / 74

- 2.2.3 换气质量的评价指标及对扫气效率影响因素 / 77

## 第 3 章 内燃机燃料供给与调节

- 3.1 内燃机的燃料及其性质 / 81
  - 3.1.1 石油制品燃料及其对内燃机的适用性 / 81
  - 3.1.2 柴油的标准和理化性质 / 83
  - 3.1.3 汽油的标准和理化性质 / 86
  - 3.1.4 内燃机的代用燃料及其性质 / 88
- 3.2 柴油机燃油喷射与调节 / 91
  - 3.2.1 对喷油系统的要求和分类 / 91
  - 3.2.2 柱塞泵-管-嘴喷油系统工作原理及结构参数确定 / 95
  - 3.2.3 泵-管-嘴系统喷油过程分析与异常喷射消除方法 / 109
  - 3.2.4 喷油特性和喷油规律 / 113
  - 3.2.5 燃油的雾化和喷雾特性 / 119
  - 3.2.6 调速器 / 125
  - 3.2.7 柴油机电控喷油系统 / 132
- 3.3 汽油机燃油供给与控制 / 149
  - 3.3.1 汽油机的燃油供给方式及对混合气浓度的基本要求 / 149
  - 3.3.2 化油器式汽油机供油系统 / 151
  - 3.3.3 电控汽油喷射系统 / 157
- 3.4 内燃机的代用燃料供给装置 / 165
  - 3.4.1 压缩天然气(CNG)供给系统 / 165
  - 3.4.2 液化石油气(LPG)供给系统 / 166
  - 3.4.3 醇类(甲醇和乙醇)燃料在发动机中的燃用方式 / 167



3.4.4 乳化燃料及其使用技术 / 169

#### 第4章 内燃机混合气的形成与燃烧

4.1 内燃机汽缸内的气流运动 / 173

4.1.1 汽缸内气流运动的作用及形式 / 173

4.1.2 各种气流运动的主要特征和评定参数 / 173

4.1.3 缸内气流运动对混合气形成和燃烧的影响 / 180

4.2 汽油机混合气形成与燃烧 / 180

4.2.1 汽油机混合气形成的方式与特点 / 180

4.2.2 汽油机燃烧过程与影响因素 / 182

4.2.3 汽油机点火过程与火焰传播 / 186

4.2.4 汽油机的不正常燃烧与不规则燃烧 / 191

4.2.5 汽油机燃烧室与新型燃烧方式 / 194

4.3 柴油机混合气形成与燃烧 / 204

4.3.1 柴油机混合气形成方式与特点 / 204

4.3.2 柴油机的燃烧过程与影响因素 / 207

4.3.3 柴油机燃烧放热规律及影响因素 / 213

4.3.4 柴油机不正常燃烧——粗暴现象 / 220

4.3.5 柴油机的燃烧室 / 221

4.3.6 柴油机新概念燃烧系统 / 230

#### 第5章 内燃机工况与运行特性

5.1 内燃机运行工况与运转参数分析 / 243

5.1.1 运行工况 / 243

5.1.2 内燃机有效性能指标与工作过程参数之间的函数关系 / 244

5.1.3 “量调节”与“质调节” / 245

5.2 内燃机运行特性 / 245

5.2.1 内燃机负荷特性 / 245

5.2.2 内燃机速度特性 / 248

5.2.3 柴油机调速特性 / 252

5.2.4 内燃机万有特性 / 253

5.2.5 柴油机螺旋桨推进特性 / 255

5.3 内燃机的功率标定及大气修正 / 257

5.3.1 功率标定 / 257

5.3.2 内燃机功率、耗油率的大气修正 / 257

#### 第6章 内燃机的排放与控制

6.1 内燃机排气污染物的成分及危害 / 261

6.1.1 内燃机排气污染物的成分 / 261

6.1.2 内燃机排气污染物的危害 / 263

6.1.3 内燃机排气污染物计量单位 / 265

6.2 内燃机排气污染物的生成机理和影响因素 / 266

6.2.1 汽油机排气污染物的生成机理和影响因素 / 266

6.2.2 柴油机排气污染物的生成机理和影响因素 / 276

6.3 内燃机排气污染物的控制技术与净化措施 / 290

6.3.1 汽油机排气污染物控制技术 / 290

6.3.2 柴油机排气污染物控制技术 / 300

6.4 内燃机排放标准 / 316

6.4.1 内燃机排放实验规范 / 316

6.4.2 内燃机排放标准 / 321

#### 第7章 内燃机的排气涡轮增压

7.1 内燃机增压技术与增压方式 / 327

7.1.1 增压对内燃机性能的影响 / 327

7.1.2 内燃机增压的分类 / 328

- 7.2 排气涡轮增压器工作原理及特性 / 329
  - 7.2.1 排气涡轮增压柴油机的结构特点 / 329
  - 7.2.2 涡轮增压器的构造及主要参数范围 / 330
  - 7.2.3 离心式压气机工作原理与特性曲线 / 333
  - 7.2.4 径流式涡轮机工作原理与特性曲线 / 340
  - 7.2.5 轴流式涡轮机工作原理与特性曲线 / 347
  - 7.2.6 增压空气的中间冷却 / 350
- 7.3 排气的可利用能量及涡轮增压系统形式 / 352
  - 7.3.1 排气可用能量及排气能量传递效率 / 352
  - 7.3.2 排气涡轮增压系统形式 / 354
- 7.4 涡轮增压器主要参数的确定及与柴油机的配合运行 / 360
  - 7.4.1 涡轮增压器主要参数的确定 / 360
  - 7.4.2 涡轮增压器与柴油机的配合运行特性 / 367
- 7.5 柴油机的高增压系统及改善低工况性能 / 373
  - 7.5.1 柴油机高增压系统 / 373
  - 7.5.2 改善增压柴油机低工况性能的措施 / 378

# 第 1 章 内燃机的工作过程与性能指标

进入 21 世纪,内燃机技术与现代电子、计算机模拟及控制、激光测试等新技术、新材料、新工艺的发展相结合,使得内燃机成为高效率、低污染的最佳动力机械,广泛应用于交通、工农业、电站、军事等领域,具有强大的潜力和发展前景。同时,内燃机工作原理已成为完善、系统的专门学科。

## 1.1 内燃机技术概述

### 1.1.1 内燃机概述

#### 1. 内燃机的概念

内燃机(ICE)是燃料直接在机器内部燃烧后将能量释放做功的动力机械,主要分为往复式内燃机和回转式燃气轮机。一般所说的内燃机就是指往复式内燃机,它是燃料在汽缸内直接燃烧产生压力,推动活塞作往复运动,通过曲轴-连杆机构转变为旋转运动,对外输出动力的发动机,如汽油机和柴油机。

内燃机工作原理是内燃机学的重要组成部分,内容包括工作过程与性能指标、充量更换、燃料供给与调节、混合气形成与燃烧、运行特性与匹配、涡轮增压技术、排放与噪声控制等。

#### 2. 内燃机的特点

德国人 N·A·奥托(N. A. Otto)于 1876 年成功制造出世界上第一台汽油机。R·狄塞尔(R. Diesel)于 1897 年制造了第一台柴油机。内燃机经历了一个多世纪的辉煌发展,其优点是:

##### (1) 动力性大

###### ① 功率范围大

单缸汽油机最小功率  $P_e/\text{缸} = 1 \text{ kW/cyl}$ , 单机柴油机最大功率  $P_e = 92\,000 \text{ kW}$ (MAN-B&W 18VK98MC 船用柴油机)。

###### ② 转速范围大

高速赛车用汽油机最快转速  $n = 9\,000 \text{ r/min}$ (波尔舍 V8-3000 汽油机),低速船用柴油机最慢转速  $n = 70 \text{ r/min}$ (苏尔寿 RTA68 型柴油机)。

###### ③ 输出转矩大

沃尔沃(Volvo)D12D-500 重型车用柴油机最大输出转矩  $T_{i_{q_{max}}}/n = 2\,400 \text{ N} \cdot \text{m}/1\,300 \text{ r/min}$ 。

##### (2) 经济性好

###### ① 热效率 $\eta_e$ 高

现代高性能四冲程车用柴油机有效热效率  $\eta_{ei}$  已达 45% 以上,二冲程船用柴油机  $\eta_{ei}$  达 50%,车用汽油机  $\eta_{ei}$  也已达 35%,未来柴油机  $\eta_{ei}$  可达 52% ~ 55%。

### ② 经济性能好

燃油消耗率低,柴油机为 160 ~ 220 g/(kW·h),汽油机为 260 ~ 300 g/(kW·h)。机油消耗率  $b_{oi} < 1$  g/(kW·h),且  $\frac{b_{oi}}{b_e} < 3\%$ 。

### ③ 多种代用燃料适用性强

可以燃用压缩天然气(CNG)、液化石油气(LPG)、甲醇、乙醇、生物质燃料及二甲醚(DME)等清洁燃料。船用低速柴油机可燃用重油。

### (3) 运转性能良好

① 启动迅速,操纵可靠,适应性强;

② 使用寿命长,大修期长,车用机为  $5 \times 10^5$  km,船用低速机为 5 年;

③ 维修保养简便。

内燃机的缺点:

① 对燃料质量要求较高;

② 结构较复杂,零件加工精度要求高;

③ 有害气体排放量大,噪声的环境污染较严重。

## 3. 内燃机的分类

### (1) 按所用燃料及着火方式分类

① 点燃式内燃机(SIE),压缩汽缸内的可燃混合气,并用电火花点火燃烧的内燃机,以汽油机为代表。

② 压燃式内燃机(CIE),压缩汽缸内的空气,产生高温高压引起燃料自燃的内燃机,以柴油机为代表。

### (2) 按完成一个工作循环的冲程数( $\tau$ )分类

① 四冲程内燃机,冲程数  $\tau = 4$ ;

② 二冲程内燃机,冲程数  $\tau = 2$ 。

### (3) 按汽缸冷却方式分类

① 水冷式内燃机,用水冷却汽缸和汽缸盖等零件;

② 风冷式内燃机,用空气冷却汽缸和汽缸盖等零件。

### (4) 按进气状态分类

① 非增压(自然吸气)四冲程内燃机,仅带扫气泵的二冲程内燃机;

② 涡轮增压式(带中间冷却器)内燃机。

### (5) 按发动机转速( $n$ )及活塞平均速度( $v_m$ )分类

① 高速机  $n > 1000$  r/min,  $v_m = \frac{\pi s}{30} > 9$  m/s

② 中速机  $300$  r/min  $< n \leq 1000$  r/min,  $6$  m/s  $< v_m \leq 9$  m/s

③ 低速机  $n \leq 300$  r/min,  $v_m \leq 6$  m/s

### (6) 按汽缸排列分类

① 直列 L 式 1、2、4、6、8、10 缸;

② V 形 45°、60°、90° 夹角, 8、12、16、20 缸。

(7) 按用途分类<sup>[1]</sup>

① 汽车(Q), ② 铁路机车(J), ③ 船用主机(C), ④ 工程机械(G), ⑤ 发电机组(D), ⑥ 拖拉机(T), ⑦ 摩托车(M), ⑧ 农用运输车(Y) 等。

#### 4. 内燃机的术语

(1) 工作循环

从新鲜空气充入汽缸起, 到燃烧产物排出汽缸止, 燃料在汽缸内燃烧放热, 推动活塞做功, 热能转变为机械能所必须经过的进气、压缩、燃烧、膨胀和排气这五个连续过程, 且周而复始的循环, 称为一个工作循环。为使这个循环持续进行, 一个循环都包括两个阶段: 闭式阶段(压缩过程、燃烧过程和膨胀过程), 开式阶段(从排气门开到进气门关)。

如图 1-1 所示为一个工作循环示意图。

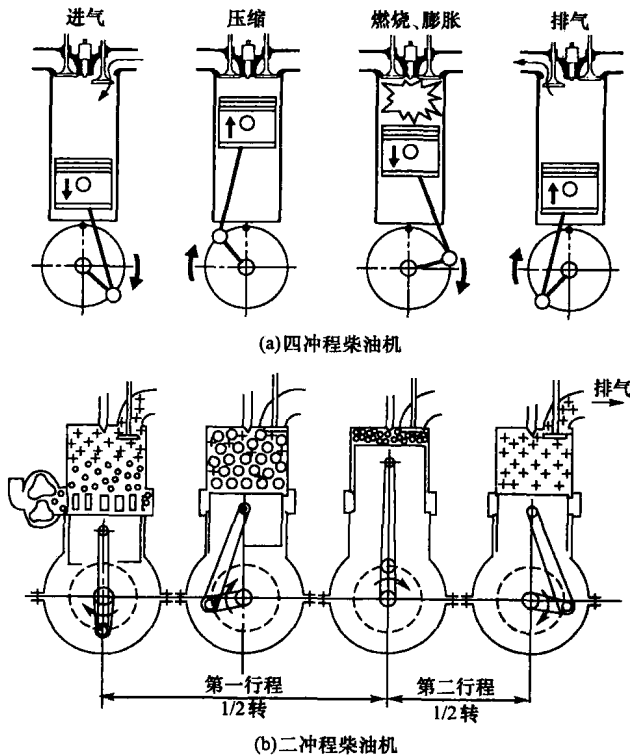


图 1-1 一个工作循环示意图

① 四冲程内燃机 是活塞在汽缸里上下依次往复移动四个行程, 即曲轴旋转两周(720°CA), 完成一个工作循环的内燃机;

② 二冲程内燃机 是活塞经过两个行程, 即曲轴旋转一周(360°CA), 完成一个工作循环的内燃机。

(2) 结构参数(图 1-2)

① 上止点(TDC) 是活塞位于最上边的最高位置, 即活塞顶面离曲轴中心线最远时的止点;

② 下止点(BDC) 是活塞位于最下边的最低位置, 即活塞顶面离曲轴中心线最近时的

止点；

③ 活塞行程  $s(\text{mm})$  是活塞运行的上、下两个止点间的距离，曲轴旋转  $180^\circ\text{CA}$ ，且  $s = 2R$ ， $R$  为曲柄半径；

④ 汽缸直径  $D(\text{mm})$  是发动机汽缸内孔的直径， $s/D$  为行程与缸径的比；

⑤ 汽缸工作容积(活塞排量) $V_s(\text{L})$  是活塞上、下止点之间的汽缸容积，即一个行程所扫过的容积：

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot s \times 10^{-6} \quad (1-1)$$

内燃机排量  $iV_s(\text{L})$ ， $i$  为发动机的缸数。

⑥ 压缩室容积  $V_c$  是活塞在上止点时的汽缸容积，即汽缸最小容积；

⑦ 汽缸最大容积  $V_s$  是活塞在下止点时的汽缸容积，即汽缸总容积：

$$V_s = V_c + V_s \quad (1-2)$$

⑧ 压缩比(CR) 表征汽缸内空气容积被压缩的倍数，它是对发动机性能有重要影响的结构参数。

a. 几何压缩比  $\epsilon_c$  [图 1-3(a)]

在四冲程内燃机中， $\epsilon_c$  是汽缸最大容积  $V_s$  与压缩室容积  $V_c$  的比值，即

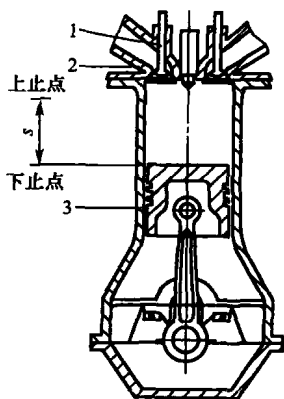
$$\epsilon_c = \frac{V_s}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (1-3)$$

对四冲程汽油机： $\epsilon_c = 7 \sim 10$ ；

对四冲程柴油机： $\epsilon_c = 16 \sim 22$ ；

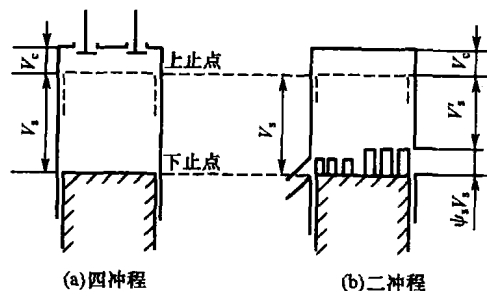
对四冲程增压柴油机： $\epsilon_c = 15 \sim 16$ 。

b. 有效压缩比  $\epsilon_{cc}^{[2]}$  [图 1-3(b)]



1—排气门；2—汽缸盖；3—活塞

图 1-2 内燃机简图



(a)四冲程

(b)二冲程

图 1-3 压缩过程汽缸容积的变化

在二冲程内燃机中，考虑到冲程损失的有效压缩比：

$$\epsilon_{cc} = \frac{V_c + (1 - \psi_s)V_s}{V_c} = 1 + (1 - \psi_s) \frac{V_s}{V_c} \quad (1-4)$$

式中  $\psi_s$ ——冲程失效系数， $\psi_s = 1 - \frac{V'_s}{V_s}$ ；

$V'_s$ ——进、排气口开始全部关闭瞬间的汽缸容积， $V'_s = (1 - \psi_s)V_s$ 。

对直流扫气： $\phi_s = 0.08 \sim 0.16$ ；对回流扫气： $\phi_s = 0.16 \sim 0.25$ 。

对二冲程柴油机： $\epsilon_{cc} = 12 \sim 15.5$ 。

(3) 示功图

汽缸内压力  $p$  随工作容积  $V$  或曲轴转角  $\varphi$  变化的坐标图，称为示功图。示功图有两种基本形式：

①  $p-V$  示功图

纵坐标为汽缸压力，横坐标以汽缸工作容积  $V$  为独立变量，图 1-4(a) 为四冲程柴油机和四冲程汽油机的  $p-V$  图，图 1-4(b) 为二冲程柴油机的  $p-V$  图。

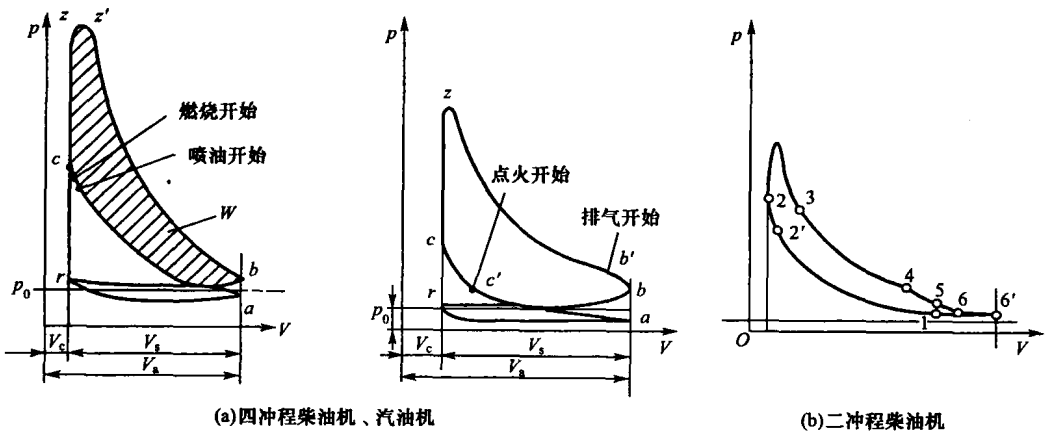


图 1-4 内燃机  $p-V$  图

②  $p-\varphi$  示功图<sup>[3]</sup>

纵坐标为汽缸压力，横坐标以曲轴转角  $\varphi$  为独立变量。它是借助汽缸压力传感器，通过数据采集系统测得的展开示功图，如图 1-5 所示。

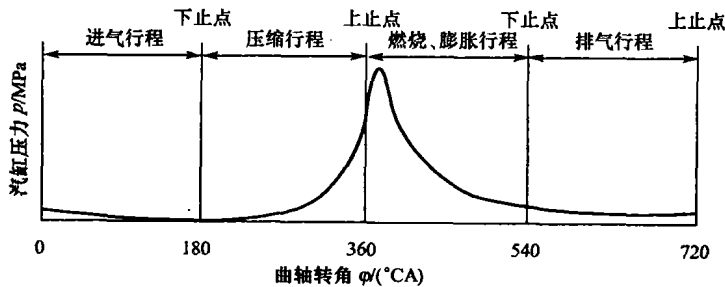


图 1-5 四冲程柴油机  $p-\varphi$  图

由示功图可以观察到内燃机工作循环各个行程的压力变化。示功图是研究内燃机工作过程的一个重要依据。 $p-V$  示功图所包围的面积就是做的功 ( $W$ )，其形状与发动机工作过程的特点、燃烧方式有关，并直接影响内燃机的性能。由示功图可以计算出放热规律图。

1.1.2 内燃机技术发展状况

1. 内燃机技术与时俱进

内燃机作为现代动力机械，在迎接节能和环保的双重挑战中充满发展活力，为人类社会



的继续进步作出了巨大贡献。20 世纪 80 年代后期以来,内燃机技术在以下四个方面具有飞跃式的突破。

### (1) 燃油供给技术

汽油机闭式多点顺序电喷技术普遍利用,电控汽油缸内直接喷射技术(GDI)正在开发应用;

柴油机电控燃油高压多次喷射及电控高压共轨系统(CRS)开始应用。

### (2) 燃烧方式

汽油机准均质分层稀混合燃烧与汽油直喷组合技术正在开发研究;柴油机均质充量压燃(HCCI)新概念燃烧成为研究热点,与可变涡轮截面(VNT)的增压系统优化匹配,以及采用电控排气再循环(EGR)实现高效低排放。

### (3) 燃料使用

改质燃料(RFG 和 RFD)品质不断提高。成功使用甲醇、乙醇汽油,生物质柴油,二甲基醚(DME)等清洁代用燃料。重油加水具有节能降排的效果。

### (4) 后处理装置

汽油机三效催化装置获得成功的使用,柴油机采用 DOC+DPF+SCR 组合式后处理装置取得良好的效果。

## 2. 内燃机性能参数不断提高

### (1) 评价参数

① 动力性:标定功率  $P_e$  (kW)、升功率  $P_L$  (kW/L)、平均有效压力  $p_{me}$  (MPa)、最大转矩  $T_{iqmax}$ 。

② 经济性:燃油消耗率  $b_e$  [g/(kW·h)]。

③ 机械载荷:最大燃烧压力  $p_{max}$  (MPa)、强载系数  $p_{me} \cdot v_m$  (MPa·m/s)。

④ 排放性:欧洲标准欧 V、欧 VI 及美国环保局 Tier2-Bin5 排放要求。

### (2) 轿车用汽油机技术现状

汽油机由于升功率大,可控稀混合燃烧、噪声振动小等特点,广泛用作轿车和轻型车辆的动力。汽油机技术近 30 年发展跃上了两个台阶,由 1980 年前的二气门化油器式,发展为 1990 年以后的四气门电控多点喷射,进入 21 世纪发展为四气门缸内直接喷射分层稀燃,使汽油轿车达到了超低排放的标准。

国内外轿车用汽油机性能指标范围见表 1-1。

表 1-1 国内外轿车用汽油机性能指标范围比较

比较项目	$iV_e/L$	$D/mm$	$P_e/kW$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$P_L/(kW \cdot L^{-1})$	排放达标
国外轿车汽油机	1.8 ~ 5.0	80 ~ 97	103 ~ 272	5 000 ~ 6 300	50 ~ 90	欧 IV
国内轿车汽油机	1.34 ~ 3.0	78.5 ~ 88	63 ~ 142	5 200 ~ 6 000	41 ~ 69	欧 III

### (3) 中小功率高速柴油机国内外发展现状<sup>[4]</sup>

中小功率柴油机由于采用四气门、电控高压喷射及共轨喷油系统、可变喷嘴截面涡轮增压及 EGR 技术,具有低速时转矩大、燃油消耗率低和排放低的特点,被广泛用在重型车辆和工程机械上。

国内外中小功率高速柴油机性能指标范围比较见表 1-2。

表 1-2 国内外中小功率高速柴油机性能指标范围比较

项目		$iV_s/L$	$D/mm$	$P_e/kW$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$p_{me}/MPa$	$b_e/[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$
国外	轿车及轻型	2 ~ 5	78 ~ 100	50 ~ 131	3 900 ~ 4 200	1.17 ~ 1.94	190 ~ 206
	中型卡车	6 ~ 14	102 ~ 150	142 ~ 360	2 100 ~ 2 800		
	重型卡车	15 ~ 32		370 ~ 1 030	1 800 ~ 2 300		
国内	轿车及轻型	3.17 ~ 6	86 ~ 98	35.3 ~ 125	2 000 ~ 3 300	0.81 ~ 1.81	196 ~ 224
	中型卡车	8 ~ 39	102 ~ 150	112 ~ 537	1 500 ~ 2 650		
	重型卡车						

(4) 大功率高速柴油机的发展现状

大功率高速柴油机多采用 V 形汽缸布置, 普遍采用高增压技术, 具有单机功率较大、重量较轻、强载度高的特点, 主要用于舰艇、高速轻型船舶、机车和采油机械等。

国内外大功率高速柴油机性能指标范围比较见表 1-3。

表 1-3 国内外大功率高速柴油机性能指标范围比较

比较项目	$D/mm$	$P_e/kW$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$p_{me}/MPa$	$b_e/[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$
国外大功率高速柴油机	160 ~ 265	2 500 ~ 9 100	1 150 ~ 2 200	1.3 ~ 2.7	180 ~ 220
国内大功率高速柴油机	159 ~ 240	600 ~ 3 680	1 100 ~ 2 100	1.0 ~ 2.3	195 ~ 224

(5) 大功率中速柴油机的发展现状

近年来大型舰船要求提高航速, 单机功率扩大。近期开发的都是四冲程废气涡轮脉冲转换增压系统(MPC) 高增压柴油机, 采用进排气旁通及高压共轨的喷油系统, 中速机燃用乳化重油等技术。

国内外大功率中速柴油机性能指标范围比较见表 1-4。

表 1-4 国内外大功率中速柴油机性能指标范围比较

比较项目	$D/mm$	$P_e/kW$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$p_{me}/MPa$	$p_{max}/MPa$	$b_e/[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$
国外大功率中速柴油机	280 ~ 640	1 200 ~ 34 920	1 050 ~ 327	2.35 ~ 3.0	16 ~ 20	171 ~ 195
国内大功率中速柴油机	200 ~ 400	600 ~ 8 821	1 000 ~ 480	1.09 ~ 2.30	10 ~ 19	185 ~ 244

(6) 大功率低速柴油机的发展现状<sup>[5]</sup>

特点是二冲程单气门直流扫气、长行程、高压比废气涡轮增压系统, 主要用于船舶主机。国外已形成三大系列, 德国 MAN-B&W MC/ME 系列、芬兰 Wärtsilä SulzerRTA 系列和日本三菱的 UEC 系列。

国内外大功率低速柴油机性能指标范围比较见表 1-5。

表 1-5 国内外大功率低速柴油机性能指标范围比较

比较项目	$D/mm$	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$P_e/kW$	$p_{me}/MPa$	$p_{max}/MPa$	$b_e/[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$
国外大功率低速柴油机	260 ~ 1 080	95 ~ 250	1 600 ~ 92 000	1.82 ~ 1.95	14 ~ 15.5	165 ~ 179
国内大功率低速柴油机	340 ~ 840	90 ~ 205	2 200 ~ 23 100	1.45 ~ 1.85	13 ~ 15	166 ~ 213