



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

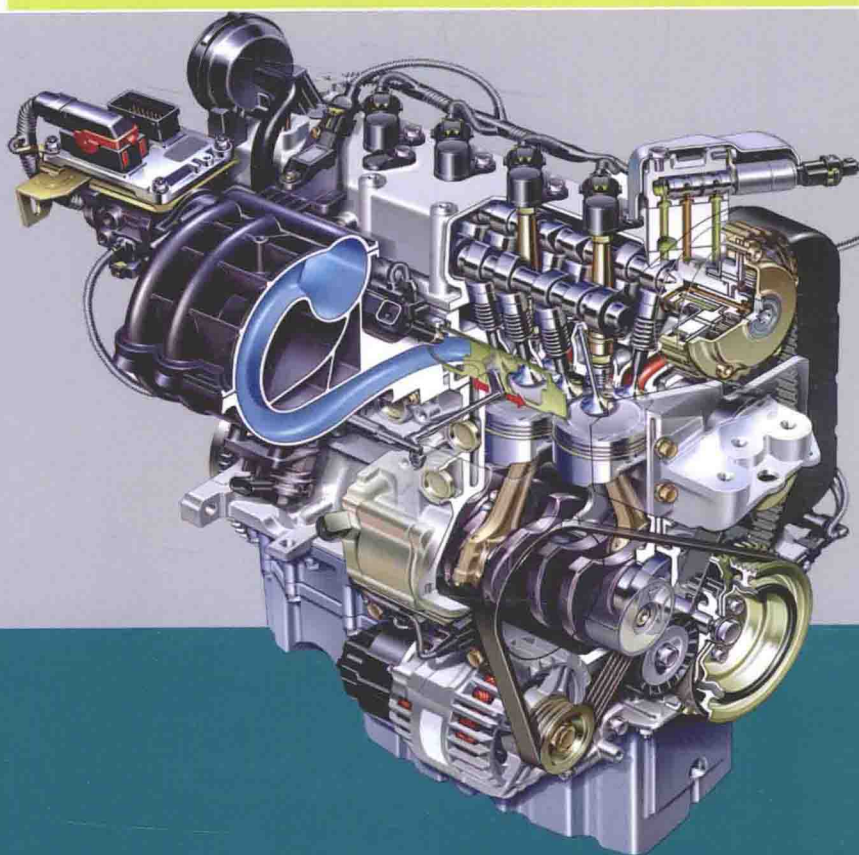
内燃机原理教程

(第二版)

主编 许 锋 隆武强

INTERNAL COMBUSTION
ENGINE FUNDAMENTALS

2nd Edition



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

内燃机原理教程

(第二版)

主 编 许 锋 隆武强

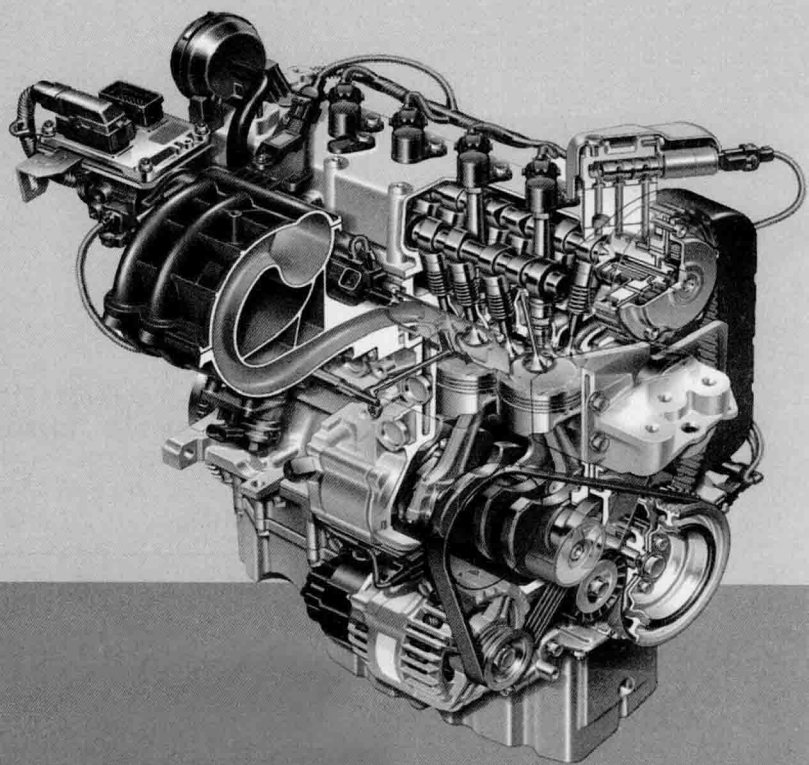
副主编 冯立岩 唐 斌

参 编 杜宝国 田江平

主 审 周俊杰 魏象仪

INTERNAL COMBUSTION
ENGINE FUNDAMENTALS

2nd Edition



大连理工大学出版社
Dalian University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

内燃机原理教程 / 许锋, 隆武强主编. — 2 版. —
大连: 大连理工大学出版社, 2015.9
ISBN 978-7-5685-0046-3

I. ①内… II. ①许… ②隆… III. ①内燃机—理论
—高等学校—教材 IV. ①TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 182716 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>

大连永盛印业有限公司印刷

大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm

印张: 27

字数: 650 千字

2011 年 5 月第 1 版

2015 年 9 月第 2 版

2015 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 于建辉

责任校对: 许 蕾

封面设计: 冀贵收

ISBN 978-7-5685-0046-3

定 价: 50.00 元

第 2 版前言

大连理工大学出版社 2011 年出版的《内燃机原理教程》，作为理工科机械类本科生教材已使用了 5 年，得到了广大内燃机专业本科生、研究生及工程技术人员、研究人员的好评，被大连理工大学评为优秀教材，并入选 2014 年度教育部第二批公布的“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”书目。

随着国内外内燃机技术的迅速发展，本教材内容需要更新和补充。编者认真总结了近几年的教学经验，合理地选取当前国内外内燃机在理论方面的新进展，学术方面的新成就，并结合编者在科研工作中的实际探索，对原教材进行了全面修订。

本次修订在保持原教材的理论系统性强、结合实际新颖性好的基础上，增加了如下内容：内燃机与动力传动装置的匹配，涡轮增压中冷四冲程柴油机工作过程数值计算，汽油机增压等，对其他各章也进行了修订。

本次修订主要由许锋教授完成，隆武强教授、冯立岩副教授、唐斌副教授、杜宝国博士、田江平副教授编写了新增加的内容。周俊杰教授担任主审，魏象仪教授进行了审核，并提出了宝贵建议，在此深表感谢。

本书出版得到了大连理工大学教务处和离退休处的资助。

限于编者的学识和水平，本书疏漏及错误之处在所难免，敬请读者、专家批评指正。

您有任何意见或建议，请通过以下方式与大连理工大学出版社联系：

电话：0411-84708947

邮箱：jcjf@dutp.cn

编 者

2015 年 8 月

第 1 版前言

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、唐斌博士、杜宝国博士参加了编写。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类专业根据国标、部标所做的统一规定。

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

符号	含义	单位
p_d	进气压力	MPa
p_e	有效压力	MPa
p_{ex}	膨胀终点压力	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_{T0}	涡轮后排气背压	kPa
Q	热量	J, kJ
Q_B	燃料燃烧放出的热量	kJ
Q_e	转变为有效功的热量	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	气缸内瞬时温度	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_{tq}	转矩	N · m
T_{tqmax}	最大转矩	N · m
T_{w1}	活塞顶平均温度	K
T_{w2}	气缸盖平均温度	K

符号	含义	单位
u	热力学能 (内能)	J, kJ
$\bar{u}$	气流平均速度	m/s
u'	气流脉动速度	m/s
V_{ce}	气缸余隙容积	L
V_m	活塞平均速度	m/s
V_s	气缸工作容积	L
W_e	有效功	J, kJ
W_i	指示功	J, kJ
X	燃烧百分率	

2. 希腊字母

符号	含义	单位
α	空燃比	
β	通流能力系数, 喷雾锥角	
γ	比热容比	
δ	后膨胀比	
δ_b	中冷度	
ε	湍流流动耗散率	
ε_c	几何压缩比	
ε_{ce}	有效压缩比	
η_{bs}	压气机定熵效率	
η_c	中冷器效率	
η_E	废气能量传递效率	
η_e	有效效率	
η_{et}	有效热效率	
η_f	指示效率	
η_{it}	指示热效率	
η_m	机械效率	
η_s	扫气效率	
η_{Tb}	涡轮增压器效率	
η_u	燃烧效率	
η_v	充气效率	
θ_{ea}	排气提前角	
θ_{el}	排气迟后角	
θ_{ia}	进气提前角	
θ_{il}	进气迟后角	
λ	瞬时过量空气系数	
λ_b	增压度	
λ_p	压力升高比	
λ_q	放热系数	
λ_s	曲柄连杆比 (R/L)	

常用符号表

符号	含义	单位
μ	实际分子变化系数, 动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
μ_0	理论分子变化系数	
μ_e	排气的流量系数	
μ_s	进气的流量系数	
ν	运动黏度	cm^2/s
ξ_r	中冷器阻力系数	
ξ_z	燃烧终点的热利用系数	
π_b	增压比	
π_r	涡轮膨胀比	
ρ_0	初膨胀比	
ρ_f	燃油密度	kg/m^3
τ	冲程数	
τ_i	着火滞燃期	
ϕ	燃空当量比,相对湿度	
ϕ_a	过量空气系数	
ϕ_{at}	总过量空气系数	
ϕ_c	充量系数	
ϕ_n	示功图丰满系数	
ϕ_{n+1q}	适应性系数	
ϕ_r	残余废气系数	
ϕ_s	扫气系数	
ϕ_{tq}	扭矩储备系数	
φ	曲轴转角	$^{\circ}\text{CA}$
φ_{ij}	喷油提前角	$^{\circ}\text{CA}$
φ_{fs}	供油提前角	$^{\circ}\text{CA}$

符号	含义	单位
φ_i	滞燃角	$^{\circ}\text{CA}$
φ_{ig}	点火提前角	$^{\circ}\text{CA}$
φ_z	喷油持续角	$^{\circ}\text{CA}$
ψ	节气门开启度	
ψ_d	进气流速函数	
ψ_s	冲程失效系数	
ψ_T	燃气流通函数	
Ω	涡流比	
Ω_T	反动度	
ω_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

1.1 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 / 7

1.2.1 内燃机的理论循环

与假设条件 / 7

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 内燃机的指示参数 / 30

1.4.2 内燃机的有效性能指标 / 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

习 题 / 48

参考文献 / 49

第 2 章 内燃机的换气过程 / 50

2.1 四冲程内燃机的换气过程 / 50

2.1.1 换气阶段的划分与换气损失 / 50

2.1.2 充量系数与提高充量系数的 措施 / 56

2.1.3 进、排气系统的动态效应 / 65

2.2 二冲程内燃机的换气过程 / 67

2.2.1 二冲程内燃机换气形式的 分类与时面值的确定 / 67

2.2.2 二冲程内燃机换气过程的

阶段划分及其换气特点 / 73

2.2.3 换气质量的评价指标

及扫气效率的影响因素 / 76

习 题 / 78

参考文献 / 79

第 3 章 内燃机的燃料供给与调节 / 80

3.1 内燃机的燃料及其性质 / 80

3.1.1 石油制品燃料及其对内燃机的 适用性 / 80

3.1.2 柴油的标准和理化性质 / 82

3.1.3 汽油的标准和理化性质 / 85

3.1.4 内燃机的代用燃料及其性质 / 87

3.2 柴油机的燃油喷射与调节 / 90

3.2.1 对喷油系统的要求和分类 / 90

3.2.2 柱塞泵-管-喷油嘴系统工作 原理及结构参数确定 / 94

3.2.3 泵-管-嘴系统喷油过程分析 与异常喷射消除方法 / 108

3.2.4 喷油特性和喷油规律 / 112

3.2.5 燃油的雾化和喷雾特性 / 119

3.2.6 调速器 / 123

3.2.7 柴油机电控喷油系统 / 131

3.3 汽油机的燃油供给与控制 / 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 / 156

3.4 内燃机的代用燃料供给装置 / 164

3.4.1 压缩天然气供给系统 / 164

3.4.2 液化石油气供给系统 / 166

3.4.3 醇类燃料在发动机中的 燃用方式 / 167

3.4.4 乳化燃料及其使用技术 / 168

习 题 / 171

参考文献 / 171

第4章 内燃机混合气的形成与燃烧 / 172

4.1 内燃机气缸内的气流运动 / 172

4.1.1 气缸内气流运动的作用
及形式 / 172

4.1.2 各种气流运动的主要特征
和评定参数 / 172

4.1.3 缸内气流运动对混合气形成
和燃烧过程的影响 / 179

4.2 汽油机混合气的形成与燃烧 / 179

4.2.1 汽油机混合气形成的
方式与特点 / 179

4.2.2 汽油机的燃烧过程
与影响因素 / 181

4.2.3 汽油机的点火过程
与火焰传播 / 185

4.2.4 汽油机的不正常燃烧
与不规则燃烧 / 190

4.2.5 汽油机的燃烧室与新型
燃烧方式 / 194

4.3 柴油机混合气的形成与燃烧 / 204

4.3.1 柴油机混合气形成的
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 柴油机的燃烧放热规律
及影响因素 / 212

4.3.4 柴油机的不正常燃烧 / 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 / 229

习 题 / 240

参考文献 / 240

第5章 内燃机运行特性与动力装置匹配 / 241

5.1 内燃机的运行工况与运转
参数分析 / 241

5.1.1 内燃机的运行工况 / 241

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 / 242

5.1.3 “量调节”与“质调节” / 243

5.2 内燃机的运行特性 / 243

5.2.1 内燃机的负荷特性 / 243

5.2.2 内燃机的速度特性 / 246

5.2.3 柴油机的调速特性 / 250

5.2.4 内燃机的万有特性 / 252

5.2.5 柴油机螺旋桨的推进特性 / 254

5.3 内燃机的功率标定

及大气修正 / 256

5.3.1 内燃机的功率标定 / 256

5.3.2 内燃机功率、油耗率的
大气修正 / 256

5.4 内燃机与动力传动装置的匹配 / 258

5.4.1 内燃机与汽车动力传动装置的
匹配 / 259

5.4.2 内燃机与船舶推进装置的
匹配 / 263

5.4.3 内燃机与发电机组的匹配 / 265

习 题 / 266

参考文献 / 266

第6章 内燃机的排放与控制 / 267

6.1 内燃机排气污染物的成分
及危害 / 267

6.1.1 内燃机排气污染物的成分 / 267

6.1.2 内燃机排气污染物的危害 / 269

6.1.3 内燃机排气污染物的
计量单位 / 271

6.2 内燃机排气污染物的生成机理
和影响因素 / 272

6.2.1 汽油机排气污染物的生成机理
和影响因素 / 272

6.2.2 柴油机排气污染物的生成机理
和影响因素 / 282

6.3 内燃机排气污染物的控制技术
与净化措施 / 296

6.3.1 汽油机排气污染物的
控制技术 / 296

6.3.2 柴油机排气污染物的 控制技术 / 308	7.3 排气的可利用能量及涡轮增压 系统形式 / 359
6.4 内燃机排放标准 / 322	7.3.1 排气可用能量及排气能量 传递效率 / 359
6.4.1 内燃机排放实验规范 / 322	7.3.2 排气涡轮增压系统形式 / 361
6.4.2 内燃机排放标准 / 328	7.4 涡轮增压器主要参数的确定及与 柴油机的配合运行 / 367
习 题 / 332	7.4.1 涡轮增压器主要参数的确定 / 367
参考文献 / 332	7.4.2 涡轮增压器与柴油机的 配合运行特性 / 374
第 7 章 内燃机的排气涡轮增压与匹配 / 334	7.4.3 排气涡轮增压中冷四冲程 柴油机工作过程数值计算 / 380
7.1 内燃机增压技术与增压方式 / 334	7.5 柴油机的高增压系统及改善 低工况性能 / 396
7.1.1 增压对内燃机性能的影响 / 334	7.5.1 柴油机的高增压系统 / 396
7.1.2 内燃机增压的分类 / 335	7.5.2 改善增压柴油机低工况 性能的措施 / 401
7.2 排气涡轮增压器的工作原理 及特性 / 336	7.6 汽油机增压 / 408
7.2.1 排气涡轮增压柴油机的 结构特点 / 336	7.6.1 汽油机增压的特点 / 408
7.2.2 涡轮增压器的构造 及主要参数范围 / 337	7.6.2 汽油机增压的主要 技术措施 / 409
7.2.3 离心式压气机的工作原理 与特性曲线 / 340	7.6.3 汽油机增压性能实例 / 413
7.2.4 径流式涡轮机的工作原理 与特性曲线 / 347	习 题 / 417
7.2.5 轴流式涡轮机的工作原理 与特性曲线 / 354	参考文献 / 418
7.2.6 增压空气的中间冷却 / 357	

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控制、计算机模拟及激光测试等新技术、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,广泛应用于车辆、机车、船舶、拖拉机、工程机械和国防设备上,在国民经济建设中有着重要作用,并具有强大的潜力空间和发展前景。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(internal combustion engine, 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。主要分为往复式活塞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活塞式内燃机,它是燃料在气缸内直接燃烧产生压力,推动活塞做往复运动,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

德国人奥托(N. A. Otto) 于 1876 年成功制造出世界上第一台汽油机。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

汽油机单缸最小功率 $P_e/\text{缸} = 1 \text{ kW/cyl}$, 柴油机单机最大功率 $P_e = 92\,000 \text{ kW}$ (MAN-B&W18VK98MC 船用柴油机)。

② 转速范围广

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

(2) 经济性好

① 有效热效率 η_{et} 高

现代高性能四冲程车用柴油机 η_{et} 已达 45% 以上, 二冲程船用柴油机 η_{et} 达 50%, 车用汽油机 η_{et} 也已达 35%, 未来柴油机 η_{et} 可达 52% ~ 55%。

② 燃油消耗率低

经济性能好,柴油机燃油消耗率为 $160 \sim 220 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,汽油机燃油消耗率为 $260 \sim 300 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。机油消耗率 $b_{oi} < 1 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,且 $\frac{b_{oi}}{b_e} < 3\%$ 。

③可燃用多种代用燃料

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,车用高速机大修期为行程 $5 \times 10^5 \text{ km}$,船用低速机大修期为 5 年;

③维修保养简便。

3. 内燃机的分类

(1)按所用燃料及点火方式分类

①点燃式内燃机(spark ignition engine, SIE),压缩气缸内的可燃混合气,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(compression ignition engine, CIE),压缩气缸内的空气,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(τ)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)按气缸冷却方式分类

①水冷式内燃机,用水冷却气缸和气缸盖等零件;

②风冷式内燃机,用空气冷却气缸和气缸盖等零件。

(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)或活塞平均速度(V_m)分类

①高速机 $n > 1\,000 \text{ r/min}$, $V_m = \frac{nS}{30} > 9 \text{ m/s}$;

②中速机 $300 \text{ r/min} < n \leq 1\,000 \text{ r/min}$, $6 \text{ m/s} < V_m \leq 9 \text{ m/s}$;

③低速机 $n \leq 300 \text{ r/min}$, $V_m \leq 6 \text{ m/s}$ 。

(6)按气缸排列分类

①直列 L 式 1、2、4、6、8、10 缸;

②V 形 45° 、 60° 、 90° 夹角,8、12、16、20 缸。

(7)按用途分类^[1]

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

从新鲜空气充入气缸起,到燃烧产物排出气缸止,燃料在气缸内燃烧放热,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。一个循环包括两个阶段: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)。

图 1-1 所示为一个工作循环示意图。

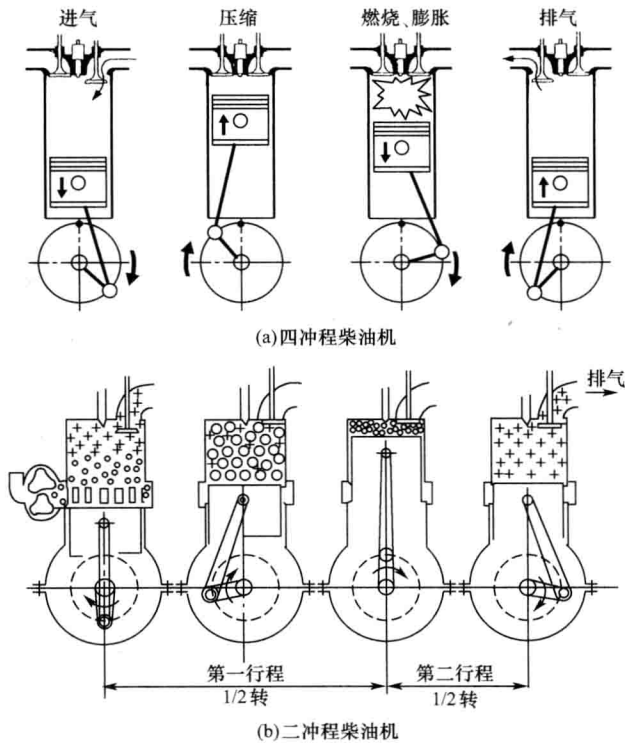


图 1-1 一个工作循环示意图

- ①四冲程内燃机 是活塞在气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°CA ,且 $S = 2R$, R 为曲柄半径;

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

⑤气缸工作容积(活塞排量) $V_s(\text{L})$ 是活塞上、下止点之间的容积,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气缸余隙容积(压缩室容积) V_c 是活塞在上止点时的容积,即气缸最小容积;

⑦气缸最大容积 V_a 是活塞在下止点时的容积,即气缸总容积:

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

⑧压缩比(compression ratio, CR) 表征气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。

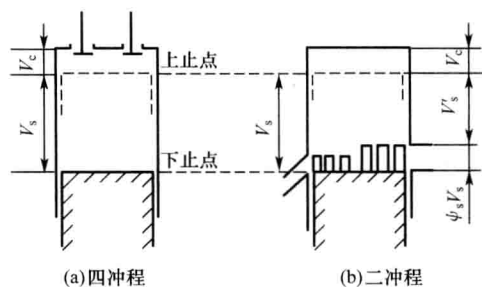


图 1-3 压缩过程气缸容积的变化

a. 几何压缩比 ϵ_c [图 1-3(a)]

压缩比(几何压缩比)是气缸最大容积 V_a 与余隙容积 V_c 的比值,即

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

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 ϵ_{ce}

有效压缩比是进、排气门(口)开始全部关闭瞬时的气缸容积与余隙容积的比值。

在二冲程内燃机中,考虑到冲程损失的有效压缩比^[2] [图 1-3(b)] 为

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

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

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

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: $\epsilon_{ce} = 12 \sim 15.5$ 。

(3) 示功图

气缸内压力 p 随工作容积 V 或曲轴转角 φ 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

纵坐标为气缸压力,横坐标以气缸工作容积 V 为独立变量,构成 p - V 图,称为示功图。图

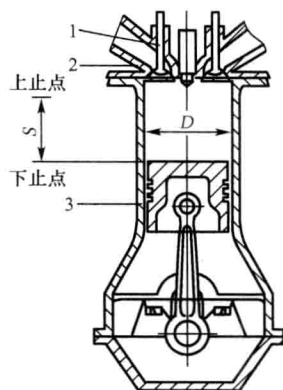


图 1-2 内燃机简图

1—排气门;2—气缸盖;3—活塞

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。

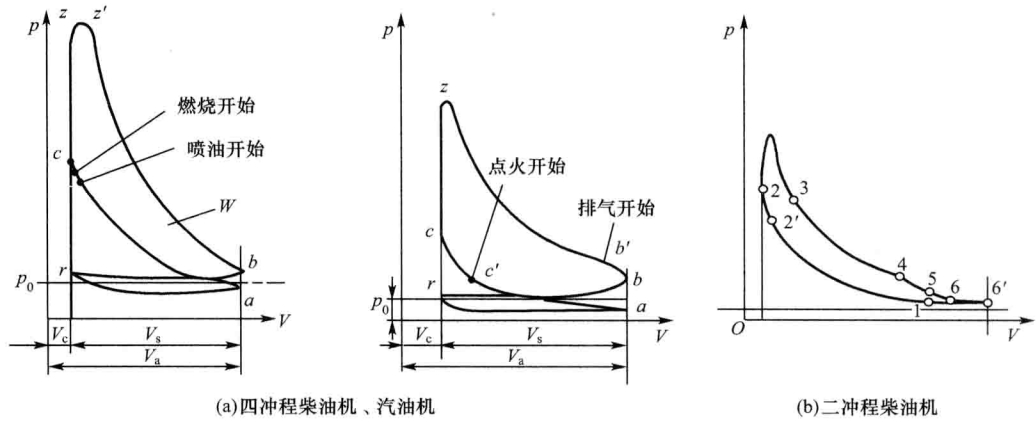


图 1-4 内燃机 $p-V$ 图

② $p-\varphi$ 示功图^[3]

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

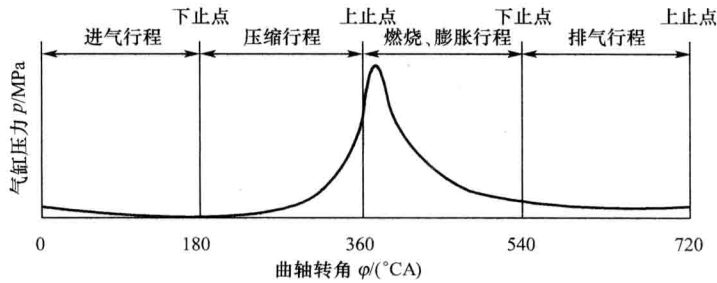


图 1-5 四冲程柴油机 $p-\varphi$ 图

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。由示功图可以画出放热规律图。

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,在面临节能和环保的双重挑战中充满发展活力,为人类社会的进步做出了重大贡献。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,电控汽油机缸内直接喷射技术(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)开始实用。

(2) 燃烧方式

汽油机准均质分层稀混合燃烧与汽油直喷增压技术正在开发研究;柴油机均质充量压燃(HCCI)低温燃烧成为研究热点。车用柴油机采用一级径流式高增压、大负荷放气,采用可变涡轮截面(VNT)的增压技术,以及采用电控冷却排气再循环(EGR)技术,实现高效降低 NO_x 排放。

(3)燃料使用

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

(4)后处理装置

汽油机三效催化装置获得成功使用,柴油机采用DOC(氧化催化转化器)+DPF(颗粒过滤器)+SCR(选择性催化还原)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 $P_e(\text{kW})$ 、升功率 $P_L(\text{kW/L})$ 、平均有效压力 $p_{me}(\text{MPa})$ 、最大转矩 T_{iqmax} 。

②经济性:燃油消耗率 $b_e[\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ 。

③机械载荷:最大燃烧压力 $p_{max}(\text{MPa})$ 、强化系数 $p_{me} \cdot V_m(\text{MPa} \cdot \text{m/s})$ 。

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年以后的顶置双凸轮轴四气门(DOHC₄)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,使汽油机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_s/L	D/mm	P_e/kW	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$P_L/(\text{kW} \cdot \text{L}^{-1})$	排放达标
国外轿车用汽油机	1.8 ~ 6.0	80 ~ 103	103 ~ 300	5 000 ~ 6 400	50 ~ 90	欧 V
国内轿车用汽油机	1.34 ~ 3.0	78.5 ~ 88	63 ~ 142	5 200 ~ 6 000	41 ~ 71	欧 IV

(3)中小功率高速柴油机国内外发展现状^[4]

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	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	p_{me}/MPa	$b_e/[\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$
国外	轿车及轻型卡车	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	轿车及轻型卡车	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						