



研究生教材

高等内燃机 原理

蒋德明



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

责任编辑：李志丹

李晓蕙

封面设计：伍 胜

ISBN 7-5605-1584-3



9 787560 515847 >



ISBN 7-5605-1584-3/TK·82 定价：30.00 元



研究生教材

高等内燃机 原理



B1274128

西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西 安 ·

内 容 简 介

本书在总结国内、外最新研究成果的基础上,深入讲述与内燃机工作过程有关的专门知识。本书共分 12 章,分别讲述:中国内燃机工业的发展;2020 年轿车动力装置和燃料;进排气管内的一维不定常流动;气缸内的湍流;火花点火发动机的电控燃油喷射系统和燃烧;压缩点火发动机的电控燃油喷射系统和燃烧;排气的后处理技术;内燃机中的传热;废气涡轮增压技术;工作过程的数值模拟及优化;燃料电池与混合动力以及内燃机研究的新进展。

本书主要供动力机械及工程、车辆工程及相关学科、专业硕士研究生“高等内燃机原理”必修课教材之用,也可供上述学科、专业的高年级本科生、博士生和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等内燃机原理/蒋德明编著. —西安:西安交通大学出版社,2002.11
ISBN 7-5605-1584-3

I. 高… II. 蒋… III. 内燃机-理论-研究生-教材 IV. TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 072580 号

*

西安交通大学出版社出版发行
(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)
陕西省轻工印刷厂印装
各地新华书店经销

*

开本:850 mm×1 168 mm 1/32 印张:11.25 字数:281 千字
2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷
印数:0 001~1 000 定价:30.00 元

发行科电话:(029)2668357,2667874

前言

1.《高等内燃机原理》是动力机械及工程、车辆工程和相关学科、专业硕士研究生的必修课教材。由于本科生的专业口径不断扩大,专业课教学时数不断减少,学生在校期间接受的内燃机原理知识,仅限于《内燃机学》(机械工业出版社,1999年)的内容,因此在研究生时要加深与加宽。《高等内燃机原理》是在《内燃机学》的基础上编写的,并力求做到在内容上不和它重复。

2.《高等内燃机原理》是一本教材,它的主要任务是把基本理论、基本知识、基本方法表达准确,叙述清楚,而不追求对某一特定专题的过分深入探讨以及对实验资料和工程数据的大量堆积。研究生在论文阶段将在导师指导下,阅读有关专题文献,因此本书大部分内容对专题研究而言只起到引导“入门”的作用。

3.教材内容应“与时俱进”,不断更新,世纪之交的内燃机技术已取得突破性进展,因此在写作本书时要尽量反映新观点,纳入新内容,但由于作者本人的知识和实践经验的限制,不一定反映得十分全面和正确。作者期望我国年青的内燃机学者通过本书的学习能迅速接近国际研究的前沿。

4.燃烧过程的研究是内燃机研究的核心,本书在这方面的内容显然偏少,使用本书的教师可以在拙著《内燃机燃烧与排放学》(西安交通大学出版社,2001年)中选择部分内容作为补充。

5.上海交通大学内燃机研究所卓斌教授为本书第11章的写作提供资料,本书第7章是在博士生李维、苏林、廖世勇的“专题综述”作业的基础上写成的,本书第8章的初稿是由刘明安博士完成的,在此一并向以上同志致谢。此外,作者还要感谢西安交通大学出版社编辑李志丹副教授等同志对本书出版的大力支持和帮助,感谢西安交通大学研究生院给予研究生教材出版基金资助。

6.作者衷心欢迎使用本书的教师、学生和其它读者对本书不

足之处提出批评和改进意见。

蒋 德 明

2002 年 10 月于西安交通大学
汽车工程系

主要符号表

1. 英文字母

a 声速, m/s; 热扩散率, m^2/s

A 无因次声速

a_A 气流从压力 p 等熵膨胀到参考压力 p_R 时的声速, m/s

bdc, tdc 下止点, 上止点

B 燃油消耗量, kg/h

b_e 有效燃油消耗率, g/(kW·h)

b_i 指示燃油消耗率, g/(kW·h)

BSU 滤纸烟度单位

c 速度, m/s

c_0 涡轮喷嘴前气体等熵膨胀至环境压力时的理论速度, m/s

c_p 比定压热容, kJ/(kg·K)

c_v 比定容热容, kJ/(kg·K)

c_w 阻力系数

CA 曲轴转角, °CA

CYC 循环

CYL 气缸

D 气缸直径, mm

$\frac{dx}{d\varphi}$ 燃烧率, 1/°CA

$\frac{dQ}{d\varphi}$ 放热率, kJ/°CA

E 能量, J, kJ

EGR 废气再循环

f 频率, Hz

$F(f)$ 面积, mm^2 , cm^2 , m^2

F/A 燃空比

h_c 表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 $H(h)$ 焓或比焓, J, kJ 或 J/kg, kJ/kg
 $H_u(LHV)$ 燃料低热值, kJ/kg
 i 气缸数
 k 空气等熵指数; 热导率, $W/(m \cdot K)$; 湍流动能, kJ/m^3
 k' 燃气等熵指数
 K_τ Kolmogorov 时间标尺, ms
 l 长度, mm, cm, m
 l_0 化学计量空燃比, kg/kg
 L_0 化学计量空燃比, kmol/kg
 L 积分长度标尺(湍流大标尺), mm
 L_τ 积分时间标尺, ms
 L_K Kolmogorov 长度标尺, mm
LEV 低排放车辆
 m 质量, kg
 m_{cyc} 循环供油量, g/cyc
 M_r 相对分子质量
 Nu Nusselt 数 $Nu = h_c l / k$
 n 发动机转速, r/min
 n_{Tb} 增压器转速, r/min
 P_e 有效功率, kW
 P_i 指示功率, kW
 P_m 机械损失功率, kW
 p 压力, Pa, kPa, MPa
 $p_a(p_A)$ 环境压力, kPa, MPa
 p_b 增压器出口压力, MPa, kPa
 p_c 压缩终点压力, MPa

p_d 进气终点气缸压力, kPa, MPa
 p_g 排气背压, kPa, MPa
 p_{ex} 膨胀终点压力, MPa
 p_{inj} 喷油压力, MPa
 p_{max} 最高燃烧压力, MPa
 $p_{me}(\text{BMEP})$ 平均有效压力, MPa
 $p_{mi}(\text{IMEP})$ 平均指示压力, MPa
 p_{mm} 平均机械损失压力, kPa, MPa
 Pr Prandtl 数 $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$
 p_s 进气管内压力, kPa, MPa
 p_T 涡轮进口压力, kPa, MPa
PZEV 部分零排放车辆
 $q_m(\dot{m})$ 质量流量, kg/s
 $q_v(\dot{v})$ 容积流量, m^3/s
 Q 热量, J, kJ
 $\dot{Q}$ 热流量, W
 $\dot{q}$ 表面热流量, MW/m^2 , kW/m^2 , W/m^2
 R 气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 Re Reynold 数 $Re = \frac{\rho u l}{\mu}$
 S 熵, J/K, kJ/K, 冲程, mm
 s 比熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
st 冲程
SULEV 超超低排放车辆
 t 时间, s, min, h
 T 温度, K; 周期, ms
 T_a, t_a 环境温度, K, $^{\circ}\text{C}$

T_b, t_b 压气机出口温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 $T_{\max}, t_{\max}$ 最高燃烧温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 T_r, t_r 气缸出口温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 T'_r, t'_r 残余废气温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 T_s, t_s 进气管内温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 T_T, t_T 涡轮进口温度, K, $^{\circ}\text{C}$
 T_{tg} 转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 u, U 比热力学能 kJ/kg ; 热力学能, kJ ; 流速, m/s ; 圆周速度, m/s
 $\bar{u}$ 气流平均速度, m/s
 $\tilde{u}$ (RMS) 湍流强度, m/s
 u' 气流脉动速度, m/s
 $ULEV$ 超低排放车辆
 v_m 活塞平均速度, m/s
 V_s 气缸工作容积, L
 W 机械功, kJ
 $x(x_b)$ 已燃燃料分数
 y_b 已燃体积分数
 ZEV 零排放车辆

2 希腊字母

$\alpha(A/F)$ 空燃比
 β, λ 黎曼变量
 γ 比热容比
 $\epsilon_c(\epsilon)$ 压缩比
 ϵ 湍流动能耗散率, kJ/s
 δ 边界层厚度
 η_{adb} 压气机等熵效率

η_{adT}	涡轮机等熵效率
η_E	废气能量传递效率
η_{et}	有效热效率
η_{it}	指示热效率
η_m	机械效率
η_{Tb}	涡轮增压器总效率
θ_{ij}	喷油提前角
θ_{ig}	点火提前角
λ	曲柄连杆比; Taylor 长度标尺(湍流微观标尺), mm。
λ_τ	Taylor 微观时间标尺, ms
μ	流量系数; 动力粘度, Pa·s
ν	运动粘度, m^2/s , $\nu = \mu/\rho$
π_b	增压比
π_T	涡轮膨胀比
ρ	密度, kg/m^3
τ	冲程数
τ_i	滞燃期, ms
ϕ_a	过量空气系数
ϕ_c	充气系数
ϕ_r	残余废气系数
ϕ_s	扫气系数
φ	曲柄转角, °CA
φ_i	滞燃角, °CA
φ_z	喷油持续角, °CA
Φ	当量比, $\Phi = 1/\phi_a$
ω	角速度, rad/s
Ω	涡流比

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 中国内燃机工业的发展

- 1.1 中国汽车和摩托车工业的发展与排气防治 (1)
- 1.2 中国大功率柴油机的发展 (10)
- 参考文献 (12)

第 2 章 2020 年轿车动力装置和燃料

- 2.1 动力装置 (13)
- 2.2 燃料 (17)
- 参考文献 (23)

第 3 章 内燃机进排气管内的一维不定常流动

- 3.1 特征线方法的基本概念 (24)
- 3.2 简单的边界条件 (32)
- 3.3 四冲程内燃机换气过程中气缸内压力变化的计算
..... (44)
- 3.4 应用举例 (46)
- 3.5 适合数值计算需要的等熵气流的特征线算法 (55)
- 3.6 一维不定常非等熵气流的特征线方程式 (62)
- 3.7 一维不定常非等熵气流特征线方程的数值算法
..... (65)
- 3.8 排气门的边界条件 (71)
- 3.9 非增压内燃机排气管内气体流动的数值解法 (80)
- 参考文献 (88)

附录	(89)
----------	------

第4章 内燃机气缸内的湍流

4.1 内燃机气缸内湍流的生成过程概述	(107)
4.2 湍流特性参数的定义	(110)
4.3 湍流特性参数间的关系	(121)
4.4 内燃机气缸内湍流特性参数的计算方法	(125)
参考文献	(130)

第5章 火花点火发动机的电控燃油喷射系统和燃烧

5.1 电控燃油喷射系统概述	(131)
5.2 火花点火发动机燃烧技术的进展	(137)
5.3 放热率计算	(146)
参考文献	(152)

第6章 压缩点火发动机的电控燃油喷射系统和燃烧

6.1 ECD-U2 高压共轨式电控燃油喷射系统	(156)
6.2 直喷式柴油机燃烧技术的进展	(166)
6.3 放热率计算	(178)
6.4 HCCI 燃烧方式	(186)
参考文献	(191)

第7章 内燃机排气的后处理技术

7.1 火花点火发动机的排气后处理技术	(193)
7.2 柴油机的排气后处理技术	(203)
参考文献	(212)

第 8 章 内燃机中的传热

8.1 概述	(214)
8.2 对流传热	(220)
8.3 辐射传热	(229)
8.4 瞬态表面热流量的测量方法	(229)
参考文献	(232)
附录	(234)

第 9 章 内燃机的废气涡轮增压

9.1 涡轮增压系统中的能量转换	(236)
9.2 提高排气能量传递效率的措施	(256)
9.3 涡轮增压器的综合效率和涡轮增压系统的有效性指标··	(265)
9.4 脉冲增压系统的发展	(271)
参考文献	(287)

第 10 章 工作过程的数值模拟及优化

10.1 概述	(288)
10.2 直喷式柴油机工作过程的数值模拟	(289)
10.3 火花点火发动机工作过程的数值模拟	(308)
10.4 工作过程模拟的优化 ^{[5]、[6]}	(315)
参考文献	(317)

第 11 章 燃料电池及混合动力系统

11.1 概述	(318)
11.2 燃料电池	(319)
11.3 混合动力系统	(331)
参考文献	(338)

第 12 章 内燃机研究的新进展

12.1 缸内直喷式汽油机(GDI)研究的新进展	(341)
12.2 以采用电控共轨式燃油系统为特征的新一代柴油机的研究进展	(342)
12.3 代用清洁燃料的研究进展	(343)
12.4 HCCI 燃烧技术的研究进展	(344)
12.5 结束语	(345)
参考文献	(345)

第 1 章 中国内燃机工业的发展

1.1 中国汽车和摩托车工业的发展与排气防治

中国是世界上最大的发展中国家,它的陆地面积为 960 万 km^2 ,稍大于美国,为日本的 25.4 倍;人口 12.5 亿,大约是美国的 4.7 倍,日本的 9.5 倍。2000 年人均 GDP(gross domestic product) 为 848 美元,约为美国和日本的 2%。1999 年汽车产量为 183.4 万辆,约占世界总产量的 3.3%,约为美国的 14%,日本的 18.5%。1998 年中国的汽车保有量为 1 319.3 万辆,约占世界保有量的 1.8%。1999 年摩托车产量为 1 126.9 万辆,约占世界总产量的 59.8%。1998 年摩托长车保有量为 2 042.6 万辆,约占世界保有量的 12.5%。中国汽车和摩托车工业以及排气防治的现代化,还有很长的路要走。

1.1.1 中国汽车和摩托车工业的发展

1. 中国汽车工业的发展

中国汽车工业始于 1953 年,但真正取得发展是在 1990 年以后,图 1.1 上示出 1991 年至 1999 年汽车产量的增长情况。目前中国已形成七大汽车企业集团,即一汽、上汽、东风、天汽、北汽、中汽和重汽,1999 年各车型所占比重和七大企业集团产量所占全国的比重如图 1.2 所示。1999 年底全国汽车工业企业职工人数为 180.7 万人,其中工程技术人员 16.9 万人;汽车行业及直接相关

行业的就业人员约 2 672.3 万人,占全国城镇就业人数的 12.7%,即我国城镇就业人数中,平均每 8 人就有 1 人从事与汽车产品有关的工作,因此汽车是我国国民经济的支柱产业之一。

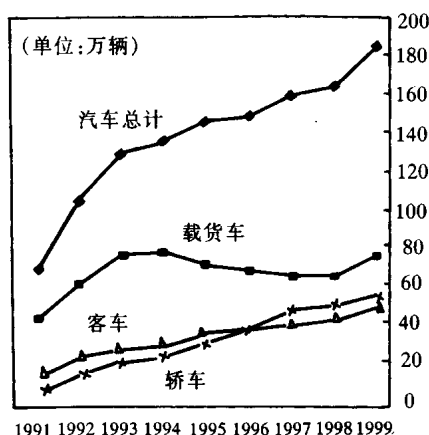


图 1.1 汽车产量增长

中国汽车工业存在的主要问题是:

(1) 中国目前有 118 家汽车生产厂,它们的规模小,效率低,平均效率为日本的 1/2。除七大企业集团外,所有小厂加起来的生产能力还不及日本丰田公司一家多,负债率却达到固定资产的 80%。中国加入 WTO 以后,汽车进口关税将从 80% ~ 100% 降至 25%,中国的汽车工业面临巨大的压力。

(2) 缺乏轿车的自主开发能力和资金,目前中国的轿车大都是按发达国家的生产许可证进行生产的。

(3) 在执行排放标准方面,缺乏按工况法检测的经验以及生产底盘测功器和按工况法连续检测排放物的成套仪器的工厂。

2. 中国摩托车工业的发展

从 90 年代开始中国摩托车产量获得令人惊奇的攀升(图