



西安交通大学

“十一五”国家重点图书
研究生创新教育系列教材

高等车用内燃机原理

蒋德明 陈长佑
杨嘉林 杨中极



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



西安交通大学

“十一五”国家重点图书

研究生创新教育系列教材

高等车用内燃机原理

蒋德明 陈长佑 杨嘉林 杨中极

西安交通大学出版社

· 西 安 ·

内 容 简 介

本书1~9章以提高内燃机性能为中心,重点介绍近期国内外在提高内燃机整体性能方面的技术进步和正在研究的热点问题,比较侧重于实用。主要内容有:内燃机的燃料及其电控供油系统,内燃机气缸内的湍流,汽油机燃烧系统,直喷式柴油机的燃烧系统和排气后处理,内燃机中的传热,车用柴油机的废气涡轮增压以及内燃机的排放测试等。10~24章重点介绍与内燃机燃烧和有害排放物生成机理有关的基础化学和物理问题及其应用,比较侧重于理论方面的深入探讨。

本书主要供动力机械及工程、车辆工程及相关学科的硕士、博士研究生作“高等车用内燃机原理”必修课教材使用,也可供上述两个专业和相关专业的高级研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等车用内燃机原理/蒋德明等编著. —西安:西安交通大学出版社,2007.7
ISBN 978-7-5605-2242-5

I. 高... II. 蒋... III. 汽车-内燃机-研究生-教材
IV. U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083210 号

书 名	高等车用内燃机原理(精装本)
编 著	蒋德明 陈长佑 杨嘉林 杨中极
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 10 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西向阳印务有限公司
字 数	844 千字
开 本	727mm×960mm 1/16
印 张	45.5
版 次	2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5605-2242-5/U·3
定 价	80.00 元(精装本)

版权所有 侵权必究

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

西安交通大学研究生院一直希望编写出版一套以培养研究生创新能力为主的教材,这无疑是一个目标明确但又十分艰巨的任务,要靠长期坚持不懈的努力才能完成的工作。

从内燃机和汽车发展的历史和现状看,大概可以分为三种类型的技术创新:(1)原创性创新(如新型发动机的发明,新燃烧方式的开发等);(2)已有技术集成性的创新(如各种电控喷油系统的商品化);(3)在消化吸收众多先进产品的基础上独立自主、集思广益地开发出具有更高性能的产品。

实现以上三类技术创新的基础是:1. 创新者要具备牢固、明确,又有运用自如的基础知识,特别是有清晰的物理概念,因为原创性的创新总是从最基本的物理概念出发的;2. 有丰富的、持续不断积累的实践经验,因为只有在实践中才能发现问题,才能进行针对性的创新,脱离实践、关起门来冥思苦想是很难创新的;3. 要有丰富的多学科知识,在此基础上产生联想。

基于以上的认识,我们在编写这本教材时,很注意:(1)从内燃机一百多年发展的历史中,特别是近几十年来的飞速发展,广大内燃机科技工作者是如何应对自己面临的挑战的,也就是说历史上的曾有过的创新是怎样实现的;(2)尽可能反映内燃机科技最新的发展动态,把学科的也是正在进行的技术创新的前沿问题阐述清楚,当前内燃机行业面临的重大任务就是节能和减少排放。

由于汽车行业是个高投入、高风险、高利润的高科技行业,世界各工业发达国家为此投入大量的人力、物力,因此新技术、新材料、新工艺、新产品层出不穷,没有一个人可以自称为无所不晓、无所不能的全面的内燃机专家。因此为了写好这本书,我们特地邀请了几位活跃在国内外科研、生产第一线的内燃机专家进行合作,共同撰写,下面对合作者的情况作一简略介绍。

杨嘉林(J. Yang)教授:西安交通大学工学硕士,美国 Wisconsin-Madison 大学工学博士,师从著名的内燃机专家 P. S. Myers 教授,现为美国 Ford 汽车公司研究与前瞻工程研究中心的高级技术专家,西安交通大学兼职教授,专长为火花点火发动机的燃烧和内燃机中的传热研究,他为本书撰写了第一篇的第 4 章和第 6 章。

杨中极高级工程师,西安交通大学工学硕士,长期从事发动机的测试工作,对各类车用发动机排放达标试验积累了丰富的经验。现在中国一汽集团无锡油泵油嘴研究所工作,他为本书撰写了第一篇的第8章。

第一篇的其余六章为蒋德明教授所撰写。

陈长佑(C. Chen)教授:西安交通大学工学硕士,英国 Bath 大学工学博士,师从著名的内燃机专家 F. J. Wallace 教授,现为英国 Ricardo 研究所高级技术专家,西安交通大学兼职教授,专长为内燃机燃烧和排放物生成的模拟,他撰写了本书的第二篇和第三篇。

本书1~9章以提高内燃机整机性能为中心,重点介绍近期国内外在提高内燃机性能方面的技术进步和正在研究的热点问题,内容比较侧重于实用。10~24章原稿用英文写作,然后由汪映博士(第二篇第10~15章)王锡斌副教授(第三篇第18~20章)苗海燕副教授(第三篇第21~24章)蒋德明教授(第二篇第16、17章和第三篇第25章)翻译成中文,重点介绍与内燃机燃烧和有害排放物生成机理有关的基础化学、物理问题及其应用,比较侧重于理论方面的深入探讨。此外,本书除列出常用的符号和英文缩写表外,由于第一篇第6章所用符号较多,并且其中大部分符号仅在该章使用,因此在该章之后又单独建立专用符号表,以利读者阅读。

本书主要作为动力机械及工程和车辆工程专业的研究生作教材使用,也可供以上两个专业和有关专业的高级技术人员作参考。由于本书的专业课性质,教师在使用时不必受教材约束,可以根据自己的专长和经验加以补充和发挥。同学们在阅读本书时,也只需掌握要领,个别的内容可以在今后的论文阶段和工作时再深入钻研,融会贯通。

本书内容涉及面广,错误(包括对第二篇和第三篇英文稿翻译的错误)和遗漏在所难免,谨请读者不吝赐教。

在本书出版之际,作者还要感谢西安交通大学研究生院对出版研究生创新教材的资助,感谢西安交通大学出版社邹林副编审出色的编辑工作。

作者们谨以本书的出版庆贺母校交通大学建校110周年和迁校50周年。

蒋德明

2007年4月8日

于西安交大汽车工程系

常用符号和英文缩写表

1. 英文字母

A/F	空燃比
b_e	有效燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
b_i	指示燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
c_p	比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
CA	曲轴转角, $^\circ\text{CA}$
D	气缸直径, mm
$\frac{dx}{d\varphi}$	燃烧率, $1/^\circ\text{CA}$
$\frac{dQ}{d\varphi}$	放热率, $\text{kJ}/^\circ\text{CA}$
F/A	燃空比
f	频率, Hz
h_c	表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$H(h)$	焓或比焓, J, kJ 或 $\text{J}/\text{kg}, \text{kJ}/\text{kg}$
$H_u(\text{LHV})$	燃料低热值, $\text{kJ}/\text{kg}, \text{MJ}/\text{kg}$
i	气缸数
k	空气等熵指数; 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 湍流动能, kJ/m^3
K_τ	Kolmogrov(柯尔莫哥洛夫)时间标尺, ms
L_l	积分长度标尺(湍流大标尺), mm
L_τ	积分时间标尺, ms
L_k	Kolmogrov 长度标尺, mm
M_e	转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
m	质量, kg
$\dot{m}$	流量, kg/s
n	发动机转速, r/min

n_{TK}	增压器转速, r/min
P_e	有效功率, kW
P_i	指示功率, kW
p	压力, Pa, kPa, (bar), MPa
$p_a(p_A)$	环境压力, kPa, (bar), MPa
p_K	增压器出口压力, kPa, (bar), MPa
p_{inj}	喷油压力, MPa
p_{max}	最高燃烧压力, MPa
p_{me}	平均有效压力, kPa, (bar), MPa
p_{mi}	平均指示压力, kPa, (bar), MPa
p_s	进气管内压力, kPa, MPa
p_T	涡轮进口压力, kPa, MPa
Q	热量, J, kJ
$\dot{Q}$	热流量, W, kW
$\dot{q}$	表面热流量, MW/m ² , kW/m ² , W/m ²
R	气体常数, kJ/(kg · K)
S	熵, J/K, kJ/K; 冲程, mm
s	比熵, J/(kg · K); kJ/(kg · K)
st	冲程
t	时间, s, min, h
T	温度, K; 周期, ms
$T_a(t_a)$	环境温度 K, (°C)
$T_K(t_K)$	压气机出口温度, K, (°C)
$T_{max}(t_{max})$	最高燃烧温度, K, (°C)
$T_r(t_r)$	气缸出口温度, K, (°C)
$T_s(t_s)$	进气管内温度, K, (°C)
$T_T(t_T)$	涡轮进口温度, K, (°C)
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
$\bar{u}(\text{RMS})$	湍流强度, m/s
u'	气流脉动速度, m/s
v_m	活塞平均速度, m/s
V_h	气缸工作容积, L, mm ³

$x(x_b)$ 已燃燃料分数

2. 希腊字母

γ	比热容比
ε	压缩比;湍流动能耗散率, kJ/s
δ	边界层厚度, mm
η_{adK}	压气机等熵效率
η_{adT}	涡轮机等熵效率
η_e	有效热效率
η_i	指示热效率
η_m	机械效率
η_{TK}	涡轮增压器总效率
θ_{inj}	喷油提前角, °CA
θ_{ig}	点火提前角, °CA
λ	曲柄连杆比; Taylor 长度标尺(湍流微标尺), mm
λ_τ	Taylor 时间标尺, ms
μ	流量系数; 动力粘度, Pa · s
ν	运动粘度, $\nu = \mu / \rho$, m ² /s
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	充量系数
ϕ_r	残余废气系数
ϕ_s	扫气系数
φ	曲轴转角, °CA
φ_i	滞燃角, °CA
φ_z	喷油持续角, °CA
Φ	当量(燃空)比, $\Phi = 1/\varphi_a$
ω	角速度, rad/s
Ω	涡流比

3. 英文缩写

ATDC	上止点后, °CA
BTDC	上止点前, °CA
BMEP	平均有效压力, MPa
BSFC	有效燃油消耗率, g/(kW · h)
BSCO	有效 CO 比排放, g/(kW · h)
BSHC	有效未燃 HC 比排放, g/(kW · h)
BSNO _x	有效 NO _x 比排放, g/(kW · h)
BSPM	有效 PM 比排放, g/(kW · h)
BSU(FSN)	波许(Bosch)烟度单位(滤纸烟度单位)
COV	燃烧循环变动系数
CR	共轨燃油喷射系统
DPF(DPT)	柴油机微粒捕捉器
ECE	欧洲经济委员会
ELR	欧洲负荷响应循环
ESC	欧洲稳态循环
ETC	欧洲瞬态循环
EGR	废气再循环
IMEP	平均指示压力, MPa
ISFC	指示燃油消耗率, g/(kW · h)
LEV	低排放车辆
PMEP	平均泵气损失压力, kPa, MPa
ULEV	超低排放车辆
VGTT	可变几何参数涡轮增压器
WG	废气放气阀
ZEV	零排放车辆

目 录

前言

常用符号和英文缩写表

第一篇 性能改进

第 1 章 绪论

- 1.1 中国汽车工业的飞速发展 (3)
- 1.2 中国汽车工业发展中存在的问题 (5)
- 1.3 2020 年轿车动力装置预测 (9)
- 参考文献 (18)

第 2 章 内燃机的燃料及其电控供油系统

- 2.1 燃料的组成、物理-化学性质对燃烧和排放的影响 (20)
- 2.2 我国新车用燃油标准与欧美标准的比较 (25)
- 2.3 替代燃料 (29)
- 2.4 火花点火发动机的电控喷油系统 (36)
- 2.5 直接喷射式柴油机的高压共轨式电控燃油喷射系统 (41)
- 参考文献 (51)

第 3 章 内燃机气缸内的湍流

- 3.1 内燃机气缸内湍流的生成过程概述 (53)
- 3.2 湍流特性参数的定义 (55)
- 3.3 湍流特性参数间的关系 (64)
- 3.4 内燃机气缸内湍流特性参数的计算方法 (67)
- 3.5 湍流特性参数对湍流燃烧的影响 (71)
- 参考文献 (75)

第4章 汽油机燃烧系统

4.1 概述	(77)
4.2 化油器式汽油机和点燃燃烧的普遍现象	(78)
4.3 电喷汽油机	(87)
4.4 缸内直喷汽油机	(91)
4.5 均质压燃汽油机	(109)
参考文献	(134)

第5章 直接喷射式柴油机的燃烧和排气后处理

5.1 推动直接喷射式柴油机燃烧研究的动力	(137)
5.2 直喷式柴油机的新概念燃烧模型	(140)
5.3 影响直喷式柴油机常规燃烧系统排放的主要因素	(146)
5.4 放热率计算	(157)
5.5 直喷式柴油机新燃烧方式的探索	(163)
5.6 排气后处理	(177)
5.7 柴油机排气后处理装置的集成化	(192)
参考文献	(195)

第6章 内燃机中的传热

6.1 概述	(197)
6.2 传热基本理论的简单回顾	(198)
6.3 经验或半经验的内燃机传热模型	(199)
6.4 缸内流场能量方程的解析解和数值解	(201)
6.5 缸内湍流边界层能量方程的近似解析解	(202)
6.6 气缸内的辐射传热	(215)
符号说明	(222)
参考文献	(224)

第7章 车用柴油机的废气涡轮增压

7.1 车用柴油机对涡轮增压系统的特殊要求	(228)
7.2 可变几何参数增压器	(231)
7.3 应用 VGT 增压器和放气阀增压器时柴油机性能的比较	(235)
7.4 VGT 的喷嘴叶片位置和 EGR 阀开度的优化组合	(240)

7.5 车用涡轮增压柴油机控制系统的热力学模型	(247)
参考文献	(254)
第8章 内燃机的排放测试	
8.1 排放法规	(255)
8.2 排放试验室的配置	(270)
8.3 主要测试设备	(275)
8.4 排放测试设备的使用	(295)
8.5 排放测试研究的其它方法和新动向	(311)
参考文献	(322)
第9章 燃料电池及混合动力系统	
9.1 概述	(324)
9.2 燃料电池	(325)
9.3 混合动力系统	(334)
参考文献	(340)
 第二篇 燃烧和排放物生成的化学基础	
 第10章 热化学	
10.1 热力学性质	(343)
10.2 状态方程	(343)
10.3 热状态方程	(344)
10.4 理想气体混合气	(345)
10.5 蒸发潜热	(346)
10.6 化学计量比	(347)
10.7 绝对焓和生成焓	(347)
10.8 燃烧焓与热值	(348)
10.9 绝热火焰温度	(349)
 第11章 化学平衡	
11.1 综述	(352)
11.2 反应坐标	(352)
11.3 多步反应的化学计量学	(353)
11.4 第二定律的考虑	(354)

11.5	吉布斯自由能·····	(354)
11.6	化学平衡常数·····	(355)
11.7	化学平衡的一般解法·····	(358)
11.8	燃烧的平衡产物·····	(360)
 第 12 章 化学动力学		
12.1	综述·····	(363)
12.2	阿列纽斯方程·····	(363)
12.3	全局与基元反应·····	(364)
12.4	双分子反应·····	(366)
12.5	其它基元反应·····	(366)
12.6	多步反应机理的反应速率·····	(367)
12.7	紧凑符号·····	(368)
12.8	反应速率系数和平衡常数之间的关系·····	(370)
12.9	单分子反应机理·····	(371)
12.10	化学时间尺度·····	(372)
 第 13 章 火焰的物理化学过程		
13.1	火焰过程·····	(377)
13.2	火焰反应·····	(377)
13.3	链反应·····	(379)
13.4	火焰传播·····	(380)
13.5	试验火焰结构·····	(382)
13.6	火焰中的输运和流动·····	(383)
13.7	火焰分区·····	(389)
 第 14 章 燃料和燃烧化学反应		
14.1	概述·····	(391)
14.2	氢·····	(393)
14.3	一氧化碳(微量氢)·····	(395)
14.4	碳氢化合物·····	(396)
14.5	甲烷·····	(399)
14.6	乙烷·····	(406)
14.7	脂肪族碳氢化合物·····	(407)

14.8	苯和其它芳香烃化合物	(415)
14.9	醇类和含氧燃料	(419)
第 15 章 燃烧的简化化学动力学模型		
15.1	概述	(424)
15.2	反应流分析	(424)
15.3	敏感性分析	(425)
15.4	反应机理的自动生成和简化	(427)
15.5	一步反应机理	(429)
15.6	稳态近似	(429)
15.7	偏平衡法	(432)
15.8	根据经验所得的全局反应机理	(433)
15.9	利用敏感性分析对反应机理自动简化	(434)
15.10	广义反应机理:简要形式的燃烧机理	(434)
15.11	局部线性化及本征值分析	(438)
15.12	详细反应机理所得数据库的代数表达式:重构模型	(440)
15.13	集中化学组分法	(441)
第 16 章 氮氧化合物的生成和分解		
16.1	概述	(443)
16.2	热 NO	(443)
16.3	瞬发 NO	(444)
16.4	燃料 NO	(445)
16.5	由中间产物 N_2O 生成的 NO	(445)
16.6	二氧化氮排放	(446)
16.7	氧化二氮排放	(446)
16.8	NO_x 控制方法的化学	(447)
第 17 章 碳烟生成		
17.1	成烟过程	(453)
17.2	试验系统和碳烟生成	(455)
17.3	燃料的碳烟生成倾向	(456)
17.4	成烟火焰的结构	(457)
17.5	碳烟生成的化学机理	(460)

17.6 碳烟氧化的化学机理·····	(463)
17.7 碳烟模型·····	(464)
第二篇参考文献·····	(475)

第三篇 燃烧的物理基础

第 18 章 控制方程

18.1 粘性张量·····	(481)
18.2 化学组分与热量的分子输运·····	(481)
18.3 动量守恒方程·····	(482)
18.4 质量守恒方程和组分守恒方程·····	(482)
18.5 扩散速度和 Fick 定律 ·····	(483)
18.6 全局质量守恒方程和修正速度·····	(483)
18.7 能量守恒方程·····	(485)

第 19 章 层流预混燃烧火焰

19.1 物理描述·····	(488)
19.2 Mallard-Le Chatelier 理论 ·····	(489)
19.3 Zeldovich, Frank-Kamenetskii 和 Semenov 理论 ·····	(492)
19.4 数值分析·····	(497)
19.5 火焰速度·····	(503)
19.6 拉伸火焰动力学·····	(506)
19.7 热爆炸, 点火和熄灭 ·····	(519)

第 20 章 层流扩散火焰

20.1 物理描述·····	(535)
20.2 扩散火焰的理论分析工具·····	(537)
20.3 不可逆无限快化学反应的火焰结构·····	(545)
20.4 不可逆快速化学反应火焰的解析解·····	(549)
20.5 扩散火焰理论向其它火焰结构的推广·····	(555)
20.6 实际层流扩散火焰·····	(559)

第 21 章 湍流燃烧导论

- 21.1 火焰和湍流的相互作用..... (567)
- 21.2 湍流的基本描述..... (568)
- 21.3 湍流对燃烧的影响..... (571)
- 21.4 湍流燃烧的计算方法..... (573)
- 21.5 湍流燃烧的 RANS 模拟 (580)

第 22 章 湍流预混火焰

- 22.1 概述..... (589)
- 22.2 湍流燃烧的反应速率..... (594)
- 22.3 湍流火焰速度的现象学模型..... (595)
- 22.4 无限薄火焰前锋的极限..... (597)
- 22.5 预混湍流燃烧的类型..... (602)
- 22.6 湍流预混火焰的 RANS 方法 (607)
- 22.7 等位面公式..... (619)
- 22.8 湍流火焰时间的建模..... (624)
- 22.9 Kolmogorov-Petrovski-Piskunov 分析 (626)

第 23 章 湍流非预混火焰

- 23.1 概述..... (629)
- 23.2 物理描述..... (632)
- 23.3 湍流非预混燃烧的分类..... (636)
- 23.4 湍流非预混火焰的 RANS (639)

第 24 章 液体燃料的蒸发

- 24.1 概述..... (657)
- 24.2 Fick 扩散定律 (658)
- 24.3 Stefan 问题..... (659)
- 24.4 液滴在静态介质中的蒸发..... (661)
- 24.5 液滴的存在时间..... (665)
- 24.6 对流环境中的液滴蒸发..... (667)
- 24.7 液滴动量守恒..... (669)