



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

(下册)

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



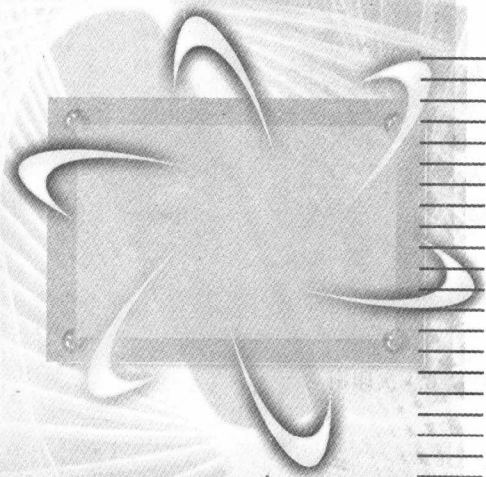
西安交通大学

“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

(下册)

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

本书分上、下两册。上册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先进技术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。下册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. 下册/蒋德明等编. —西安:
西安交通大学出版社, 2006. 10
研究生用书
ISBN 7-5605-2325-0

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(2006)第 117516 号

书 名	高等车用内燃机原理(下册)
著 者	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 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	国营五二三厂
字 数	436 千字
开 本	727mm×960mm 1/16
印 张	23.625
版 次	2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-2325-0/TK·99
定 价	35.00 元

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中,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。

本书将分上、下两册出版。上册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先进技术和正在研究的热点问题,内容比较侧重于实用。下册原稿用英文写作,然后由汪映博士(第二篇 10 至 15 章)王锡斌副教授(第三篇 18 至 20 章)苗海燕副教授(第三篇 21 至 24 章)蒋德明教授(第二篇 16、17 章和第三篇 25 章)翻译成中文。下册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研究生的教材使用,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。

本书内容涉及面较广,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

2005 年 7 月 24 日

于西安交大汽车工程系

目 录

(下 册)

总序

前言

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.....	(3)
10.2 状态方程.....	(3)
10.3 热状态方程.....	(4)
10.4 理想气体混合气.....	(5)
10.5 蒸发潜热.....	(6)
10.6 化学计量比.....	(7)
10.7 绝对焓和生成焓.....	(7)
10.8 燃烧焓与热值.....	(8)
10.9 绝热火焰温度.....	(9)

第 11 章 化学平衡

11.1 综述	(12)
11.2 反应坐标	(12)
11.3 多步反应的化学计量学	(13)
11.4 第二定律的考虑	(14)
11.5 吉布斯自由能	(14)
11.6 化学平衡常数	(15)
11.7 化学平衡的一般解法	(18)
11.8 燃烧的平衡产物	(20)

第 12 章 化学动力学

12.1 综述	(23)
12.2 阿列纽斯方程	(23)
12.3 全局与基元反应	(24)
12.4 双分子反应	(26)
12.5 其它基元反应	(26)
12.6 多步反应机理的反应速率	(27)
12.7 紧凑符号	(28)
12.8 反应速率系数和平衡常数之间的关系	(30)
12.9 单分子反应机理	(31)
12.10 化学时间尺度	(32)

第 13 章 火焰的物理化学过程

13.1 火焰过程	(37)
13.2 火焰反应	(37)
13.3 链反应	(39)
13.4 火焰传播	(40)
13.5 试验火焰结构	(42)
13.6 火焰中的输运和流动	(43)
13.7 火焰分区	(49)

第 14 章 燃料和燃烧化学反应

14.1 概述	(51)
14.2 氢	(53)
14.3 一氧化碳(微量氢)	(55)
14.4 碳氢化合物	(56)
14.5 甲烷	(59)
14.6 乙烷	(66)
14.7 脂肪族碳氢化合物	(67)
14.8 苯和其它芳香烃化合物	(75)
14.9 醇类和含氧燃料	(79)

第 15 章 燃烧的简化化学动力学模型

15.1 概述	(84)
---------------	------

15.2	反应流分析	(84)
15.3	敏感性分析	(85)
15.4	反应机理的自动生成和简化	(87)
15.5	一步反应机理	(89)
15.6	稳态近似	(89)
15.7	偏平衡法	(92)
15.8	根据经验所得的全局反应机理	(93)
15.9	利用敏感性分析对反应机理自动简化	(94)
15.10	广义反应机理: 简要形式的燃烧机理	(94)
15.11	局部线性化及本征值分析	(98)
15.12	详细反应机理所得数据库的代数表达式: 重构模型	(100)
15.13	集中化学组分法	(101)
 第 16 章 氮氧化合物的生成和分解		
16.1	概述	(103)
16.2	热 NO	(103)
16.3	瞬发 NO	(104)
16.4	燃料 NO	(105)
16.5	由中间产物 N_2O 生成的 NO	(105)
16.6	二氧化氮排放	(106)
16.7	氧化二氮排放	(106)
16.8	NO_x 控制方法的化学	(107)
 第 17 章 碳烟生成		
17.1	成烟过程	(113)
17.2	试验系统和碳烟生成	(115)
17.3	燃料的碳烟生成倾向	(116)
17.4	成烟火焰的结构	(117)
17.5	碳烟生成的化学机理	(120)
17.6	碳烟氧化的化学机理	(123)
17.7	碳烟模型	(124)
 第二篇参考文献		 (135)

第三篇 燃烧的物理基础

第 18 章 控制方程

18.1 粘性张量	(141)
18.2 化学组分与热量的分子输运	(141)
18.3 动量守恒方程	(142)
18.4 质量守恒方程和组分守恒方程	(142)
18.5 扩散速度和 Fick 定律	(143)
18.6 全局质量守恒方程和修正速度	(143)
18.7 能量守恒方程	(145)

第 19 章 层流预混燃烧火焰

19.1 物理描述	(148)
19.2 Mallard-Le Chatelier 理论	(149)
19.3 Zeldovich, Frank-Kamenetskii 和 Semenov 理论	(152)
19.4 数值分析	(157)
19.5 火焰速度	(163)
19.6 拉伸火焰动力学	(166)
19.7 热爆炸, 点火和熄灭	(179)

第 20 章 层流扩散火焰

20.1 物理描述	(195)
20.2 扩散火焰的理论分析工具	(197)
20.3 不可逆无限快化学反应的火焰结构	(205)
20.4 不可逆快速化学反应火焰的解析解	(209)
20.5 扩散火焰理论向其它火焰结构的推广	(215)
20.6 实际层流扩散火焰	(219)

第 21 章 湍流燃烧导论

21.1 火焰和湍流的相互作用	(227)
21.2 湍流的基本描述	(228)
21.3 湍流对燃烧的影响	(231)
21.4 湍流燃烧的计算方法	(233)

21.5	湍流燃烧的 RANS 模拟	(240)
第 22 章 湍流预混火焰		
22.1	概述	(249)
22.2	湍流燃烧的反应速率	(254)
22.3	湍流火焰速度的现象学模型	(255)
22.4	无限薄火焰前锋的极限	(257)
22.5	预混湍流燃烧的类型	(262)
22.6	湍流预混火焰的 RANS 方法	(267)
22.7	等位面公式	(279)
22.8	湍流火焰时间的建模	(284)
22.9	Kolmogorov-Petrovski-Piskunov 分析	(286)
第 23 章 湍流非预混火焰		
23.1	概述	(289)
23.2	物理描述	(292)
23.3	湍流非预混燃烧的分类	(296)
23.4	湍流非预混火焰的 RANS	(299)
第 24 章 液体燃料的蒸发		
24.1	概述	(317)
24.2	Fick 扩散定律	(318)
24.3	Stefan 问题	(319)
24.4	液滴在静态介质中的蒸发	(321)
24.5	液滴的存在时间	(325)
24.6	对流环境中的液滴蒸发	(327)
24.7	液滴动量守恒	(329)
第 25 章 内燃机的燃烧		
25.1	概述	(331)
25.2	均质充量汽油机的燃烧特性	(331)
25.3	汽油机的预混稀燃	(334)
25.4	直接喷射式汽油机的燃烧	(337)
25.5	CVCC 汽油机的燃烧	(340)

25.6	柴油机中的燃烧特性·····	(340)
25.7	柴油机中的化学动力学分析·····	(342)
25.8	柴油机中的燃料/空气的混合和着火 ·····	(346)
25.9	柴油机中的 NO_x 和碳烟的生成 ·····	(348)
25.10	燃烧控制技术 ·····	(353)
25.11	发动机的燃烧控制 ·····	(357)
 第三篇参考文献·····		(364)

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

物质的广延性质的数值与物质的量(质量或摩尔数)有关,广延性质通常用大写字母表示;例如: $V(\text{m}^3)$ 代表体积, $E(\text{J})$ 代表热力学能, $H(\text{J})(=E+pV)$ 代表焓等等。反之,用每单位质量(每摩尔)表示强度性质的值,物质的强度量与物质的量无关。通常用小写字母表示基于质量的强度性质质量,例如: $v(\text{m}^3/\text{kg})$ 代表比容积, $e(\text{J}/\text{kg})$ 表示比热力学能, $h(\text{J}/\text{kg})(=e+p v)$ 代表比焓,等等。用大写字母表示强度性质的规定的一个重要例外是温度 T 。本书中用带上划线的小写字母表示以摩尔为基础的强度性质质量,例如 $\bar{e}$ 和 $\bar{h}$ (J/kmol)。每单位质量(或摩尔)的强度性质质量乘以质量(或摩尔数)就可得到广延性质的值。例如:

$$\begin{aligned} V &= m v \quad \text{或} \quad (N \bar{v}) \\ E &= m e \quad \text{或} \quad (N \bar{e}) \\ H &= m h \quad \text{或} \quad (N \bar{h}) \end{aligned} \quad (10.1)$$

后面,根据每一不同情况我们会选用以质量为基础的强度性质质量或者选用以摩尔为基础的强度性质质量。

10.2 状态方程

状态方程提供一种物质的压力 p , 温度 T 和容积 V (或比容积 v) 之间的关系。对于理想气体,建模时可忽略分子间相互作用力和分子体积的气体,如下为理想气体的状态方程式:

$$pV = N R_u T \quad (10.2a)$$

$$pV = m R T \quad (10.2b)$$

$$p v = R T \quad (10.2c)$$

$$p = \rho R T \quad (10.2d)$$

式中比气体常数 R 等于通用气体常数($=8315 \text{ J}/\text{kmol} \cdot \text{K}$)除以气体的摩尔质量 W , 即

$$R = R_u/W \quad (10.3)$$

式(10.2d)中密度 ρ 为比容的倒数($\rho=1/v=m/V$)。在整个第二篇和第三篇中,我们假设所有的气体成分和混合气体均为理想气体。这种假设是合理的,因为伴随燃烧的高温通常会导致足够低密度,理想气体是合理的近似。我们通常使用国际标准单位。

10.3 热状态方程

表示热力学能(或焓)与温度和比容积(或压力)的关系式称为热状态方程:

$$e = e(T, v) \quad (10.4a)$$

$$h = h(T, p) \quad (10.4b)$$

式中单位为焦耳。

通过对式(10.4a)和(10.4b)进行微分运算可得到对 e 或 h 微分变化的一般表达式:

$$de = \left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_T dv \quad (10.5a)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp \quad (10.5b)$$

在上面的表达式中,热力学能和焓对温度的偏导数分别为定容和定压比热:

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_v \quad (10.6a)$$

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \quad (10.6b)$$

对于理想气体, $\left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_T$ 和 $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T$ 为 0。据此,我们对式(10.5)进行积分,代替式(10.6),得到如下理想气体热状态方程:

$$e(T) - e_{\text{ref}} = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_v dT \quad (10.7a)$$

$$h(T) - h_{\text{ref}} = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (10.7b)$$

在节 10.4 中,我们将定义一个合适的参考状态用来计算不同种类化合物的不同键能。

10.4 理想气体混合气

用来描述混合气成分的两个重要和有用的概念为组分的摩尔分数和质量分数。考虑一种包含 N_1 摩尔的组分 1 和 N_2 摩尔的组分 2 的多组分的混合气等等。组分 i 的摩尔分数 X_i 的定义为组分 i 的摩尔数与系统总摩尔数的比：

$$X_i = \frac{N_i}{\sum_j N_j} = \frac{N_i}{N_{\text{tot}}} \quad (10.8)$$

类似地, 组分 i 的质量分数 Y_i 为组分 i 的质量与混合气总质量的比:

$$Y_i = \frac{m_i}{\sum_j m_j} = \frac{m_i}{m_{\text{tot}}} \quad (10.9)$$

注意, 根据定义所有组分的摩尔(质量)分数之和为 1, 即

$$\sum_i X_i = 1 \quad (10.10a)$$

$$\sum_i Y_i = 1 \quad (10.10b)$$

使用各个组分的摩尔质量和混合气的摩尔质量, 摩尔分数和质量分数之间可以相互转换, 式如

$$Y_i = X_i \frac{W_i}{W_{\text{mix}}} \quad (10.11a)$$

$$X_i = Y_i \frac{W_{\text{mix}}}{W_i} \quad (10.11b)$$

当组分的摩尔或质量分数已知时, 混合物的摩尔质量 W_{mix} 很容易用下式计算:

$$W_{\text{mix}} = \sum_i X_i W_i \quad (10.12a)$$

$$W_{\text{mix}} = \frac{1}{\sum_i (Y_i / W_i)} \quad (10.12b)$$

组分的摩尔分数也可用来确定相应组分的分压力。第 i 种组分的分压力的定义为: 假设把第 i 种组分从混合气中孤立开来并使它处在与混合物同样的温度和容积下时的压力。对于理想气体, 混合气的压力是组分分压力之和:

$$p = \sum_i p_i \quad (10.13)$$

分压力与混合气组分和总压力的关系为

$$p_i = X_i p \quad (10.14)$$

对于理想气体混合气, 许多的混合气比质量(摩尔)特性可通过组分质量(摩尔)