



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

高等车用内燃机原理

(上册)

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



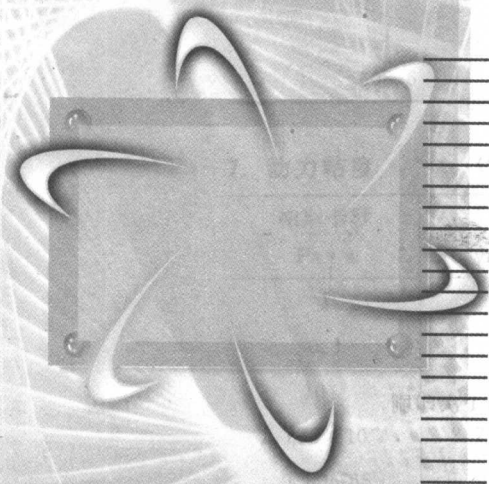
西安交通大学

研究生创新教育系列教材

高等车用内燃机原理

(上册)

蒋德明 陈长佑 杨嘉林 杨中极



西安交通大学出版社

西安·西安·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。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. 上册/蒋德明等编. —西安:
西安交通大学出版社,2006.4
研究生用书
ISBN 7-5605-2176-2

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 033065 号

书 名	高等车用内燃机原理(上册)
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 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668357 82667874(发行部) (029)82668315 82669096(总编办)
印 刷	陕西江源印刷科技有限公司
字 数	400 千字
开 本	727mm×960mm 1/16
印 张	21.75
版 次	2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0 001~2 000
书 号	ISBN 7-5605-2176-2/TK·94
定 价	29.60 元

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技术进步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。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

2005年9月24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, $g/(kW \cdot h)$
b_i	指示燃油消耗率, $g/(kW \cdot h)$
c_p	比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$
c_v	比定容热容, $kJ/(kg \cdot K)$
CA	曲轴转角, $^{\circ}CA$
D	气缸直径, mm
$\frac{dx}{d\varphi}$	燃烧率, $1/^{\circ}CA$
$\frac{dQ}{d\varphi}$	放热率, $kJ/^{\circ}CA$
F/A	燃空比
f	频率, Hz
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, MJ/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_t	Kolmogrov 时间标尺, ms
L_l	积分长度标尺(湍流大标尺), mm
L_t	积分时间标尺, ms
L_k	Kolmogrov 长度标尺, mm
M_e	转矩, $N \cdot m$
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_e	喷油持续角, °CA
Φ	当量(燃空)比, $\Phi = 1 / \phi_a$
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, $g/(kW \cdot h)$
BSHC	有效未燃 HC 比排放, $g/(kW \cdot h)$
BSNO _x	有效 NO _x 比排放, $g/(kW \cdot h)$
BSPM	有效 PM 比排放, $g/(kW \cdot h)$
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
ELC	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, $g/(kW \cdot h)$
LEV	低排放车辆
PMEP	平均泵气损失压力, kPa, MPa
ULEV	超低排放车辆
VGT	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 (8)
- 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 (19)
- 2.2 我国新车用燃油标准与欧美标准的比较 (23)
- 2.3 替代燃料 (28)
- 2.4 火花点火发动机的电控喷油系统 (35)
- 2.5 直接喷射式柴油机的高压共轨式电控燃油喷射系统 (40)
- 参考文献 (49)

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 (51)
- 3.2 湍流特性参数的定义 (53)
- 3.3 湍流特性参数间的关系 (62)
- 3.4 内燃机气缸内湍流特性参数的计算方法 (64)
- 3.5 湍流特性参数对湍流燃烧的影响 (69)
- 参考文献 (73)

第4章 汽油机燃烧系统

4.1 概述	(74)
4.2 化油器式汽油机和点燃燃烧的普遍现象	(75)
4.3 电喷汽油机	(84)
4.4 缸内直喷汽油机	(88)
4.5 均质压燃汽油机	(105)
参考文献	(129)

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	(132)
5.2 直喷式柴油机的新概念燃烧模型	(135)
5.3 影响直喷式柴油机常规燃烧系统排放的主要因素	(141)
5.4 放热率计算	(151)
5.5 直喷式柴油机新燃烧方式的探索	(157)
5.6 排气后处理	(171)
5.7 柴油机排气后处理装置的集成化	(186)
参考文献	(188)

第6章 内燃机中的传热

6.1 概述	(191)
6.2 传热基本理论的简单回顾	(192)
6.3 经验或半经验的内燃机传热模型	(193)
6.4 缸内流场能量方程的解析解和数值解	(195)
6.5 缸内湍流边界层能量方程的近似解析解	(196)
6.6 气缸内的辐射传热	(208)
符号说明	(215)
参考文献	(217)

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	(222)
7.2 可变几何参数增压器	(225)
7.3 应用 VGT 增压器和放气阀增压器时柴油机性能的比较	(229)
7.4 VGT 的喷嘴叶片位置和 EGR 阀开度的优化组合	(234)
7.5 车用涡轮增压柴油机控制系统的热力学模型	(241)
参考文献	(247)

第 8 章 内燃机的排放测试

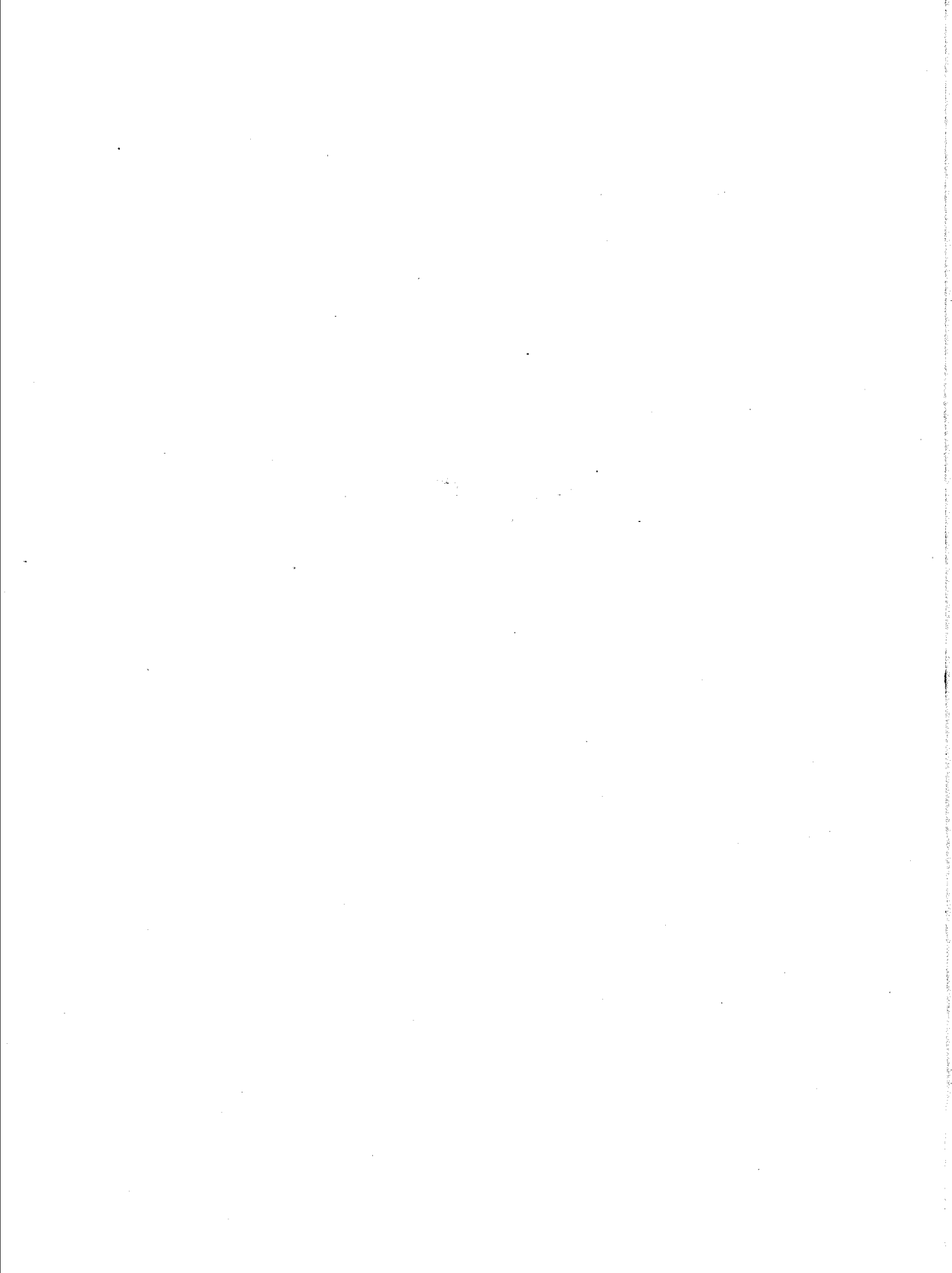
- 8.1 排放法规 (249)
- 8.2 排放试验室的配置 (264)
- 8.3 主要测试设备 (269)
- 8.4 排放测试设备的使用 (287)
- 8.5 排放测试研究的其它方法和新动向 (304)
- 参考文献 (314)

第 9 章 燃料电池及混合动力系统

- 9.1 概述 (317)
- 9.2 燃料电池 (318)
- 9.3 混合动力系统 (327)
- 参考文献 (332)

附录:常用单位换算简表

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

1953 年中国第一汽车制造厂在长春市奠基,三年后即 1956 年 7 月 13 日,12 辆国产“解放”牌汽车驶下总装线,开创了我国汽车工业的新纪元。但在以后的很长一段时期里,由于指导思想和产业政策上的偏差,使我国汽车工业发展的步伐十分缓慢。1989 年,我国发布了《产业政策要点》将汽车(特别是轿车)项目列为国家重点支持项目。其后,中国的“三大”(上海、一汽、二汽),“三小”(天津、北京、广州)轿车生产基地格局形成,使轿车生产超过其它车型。1994 年,《汽车工业产业政策》出台,汽车产业被列为国家支柱产业,4 年之后,我国汽车产量超过 160 万辆,跨入世界 10 大汽车生产国行列。

近年来,我们汽车行业出现产、销两旺的“井喷”式发展,2003 年共生产各种汽车 444.4 万辆,同比增长 35.2%,共销售(不含进口车销售)439.1 万辆,同比增长 34.2%。我国一举成为世界第四大汽车生产国和第三大汽车消费国,2004 年上半年产量排在前 10 位的轿车企业是:上海大众,一汽大众,上海通用,广州本田,天汽一汽夏利,北京现代,长安汽车,神龙汽车,奇瑞汽车,一汽丰田(人民网 2004.7.22)。2003 年十大企业的产量占全国产量的 78.8%,销量占 80.5%,其中上汽、一汽、长安和东风汽车 2003 年的产销量均超过 40 万辆。随着我国国内市场的不断扩大和成熟,世界著名汽车跨国公司,汽车零部件厂商,著名研究机构几乎全部入驻中国,来华建厂和建所,外资也以更大规模进入中国,我国一些大型汽车集团也以同样的速度,融入国际跨国汽车集团。

在表 1.1 上列出 2003 年分车型汽车产销量统计表^[1],从表 1.1 看出 2003 年以轿车的产销量最高,分别高达 83.3%和 75.3%,其次是轻型客车,分别增长 32.5%和 29.9%,再次是轻型载货车,分别增长 24.7%和 25.9%,而中型载货车和中型客车,产销同比下降最多。

在表 1.2 上示出我国汽车产销量达到不同百万辆级所用的年限^[1],由表可知,我国汽车产量每增加 100 万辆,所用的年限越来越短,从 300 万辆级到 400 万辆级,只用了一年时间,这显然与我国 20 年多来改革开放所取得的全面经济繁荣分不开的。据初步估计,我国约有几千万户家庭已具备购买轿车的经济实

力,2003年私人购买轿车已超过轿车总销量的70%,北京私人购车的比例已达90%。

表 1.1 2003 年分车型汽车产销量 辆

车型	生产量	同比增长 /%	销售量	同比增长 /%
总计	4 443 686	35.2	4 390 806	34.2
1. 载货汽车	1 229 601	10.0	1 211 411	10.4
① 柴油载货车	991 412	11.3	980 405	11.7
汽油载货车	238 189	5.7	231 006	5.2
② 重型载货车	261 768	3.6	255 755	4.3
中型载货车	136 172	-17.1	136 378	-17.2
轻型载货车	689 060	24.7	682 078	25.9
微型载货车	142 601	-3.7	137 200	-6.2
2. 客车	1 195 210	11.9	1 207 794	15.2
① 柴油客车	157 187	0.3	157 893	1.7
汽油客车	1 038 023	13.9	1 049 901	17.5
② 重型客车	19 613	13.4	19 003	14.0
中型客车	53 666	-13.1	53 117	-14.0
轻型客车	443 421	32.5	440 240	29.9
微型客车	678 510	3.8	695 434	10.1
3. 轿车	2 018 875	83.3	1 971 601	75.3

注:资料来源于中国汽车工业协会。

表 1.2 我国汽车产销量达到不同百万辆级所用年限^[1]

汽车产销量/万辆	100	200	300	400
所需年限/年	36*	8	2	1
达到时的年份	1992	2000	2002	2003

* 达到 100 万辆时的始年,是由第一汽车制造厂开始生产汽车的 1956 年算起的。

此外,在汽车技术方面也取得明显进步。在汽车安全方面,乘用车的制动性能、照明和信号装置、轮胎、除霜除雾装置的强制要求已等同采用欧洲 ECE 法规;制动防抱死系统(ABS),已在乘用车上较多采用;安全气囊在中高档乘用车上也有较多应用。在排放方面,我国已普遍实施欧 2 标准,汽油机电喷,高压喷射,柴油机增压,中冷已快速普及,排气催化净化技术等后处理技术正广泛应用。近几年来,国家又大力推动“清洁汽车”计划,压缩天然气(CNG),液化石油气

(LPG),液化天然气(LNG),乙醇汽油,甲醇汽油等均在推广应用;燃料电池车,混合动力车以及纯电动车正在组织攻关,并取得重大进展。更重要的是,由于汽车市场竞争的激烈,计划经济下的“30年产品一贯制”的陈规陋习早已打破。2003年推出的各种汽车新产品(包括改进型在内)达100余种,其中轿车新产品多达60余种,几乎每月都有几个新产品问世。2003年经群众评选出的十大热门车为:华晨宝马3系列;上海别克凯越;一汽大众奥迪A4;广州本田飞度;广州本田雅阁;华晨汽车中华;一汽轿车马自达6;奇瑞东方之子;北京现代索纳塔;奇瑞QQ(人民网,2003.12.15)。汽车工业的发展已成为一部分中国人关心的一件大事。

此外,还要提一下摩托车工业,我国摩托车工业基础雄厚、产量大。自1993年以来,已连续11年产量居世界第一。2003年共生产摩托车1465.8万辆,再创历史新高,出口302.2万辆,同比增长93.6%,出口金额高达10亿美元。

1.2 中国汽车工业发展中存在的问题

在2004年初的人民网《汽车》栏目中,曾对我国汽车工业的现状和今后发展的方向作过较多的讨论,总的意见是在我国汽车工业取得飞速发展的同时,必须清醒地看到存在的问题,主要是:

(1) 自主开发能力差,自主创造的品牌少

我国汽车工业近十年的高速发展,在很大程度上得益于与国际汽车公司的合资与合作。据统计,我国共有66家整车企业与国外汽车公司合资或引进生产许可证,零部件企业与外企合作也为数众多,因此核心技术掌握在别人手中,我方主要提供廉价劳动力。目前,我国除在载货汽车方面还具有较强的研发能力外,对技术含量较高的轿车以及汽车零部件的研发能力均较弱。其主要的原因之一,是我国国内市场庞大,99.1%的产品在国内销售,而国内市场的轿车价格比国际市场平均高出50%~100%,中国汽车工业的利润率达到20%~30%。而国际汽车行业的平均利润率仅为5%。因此我国不少汽车企业的注意力在引进上,引进一个产品,赶快生产投入市场,迅速取得高额利润,而国际汽车企业也乐意把自己即将换代的产品向中国转让。例如德国大众汽车公司,2003年在全球销售汽车约500多万辆,其中在华合资企业销售69万辆,不足其总销售量的七分之一,但大众的利润有7成来自中国(人民网,2004.2.15)。上述的国内外现状压制了中国汽车企业对自主开发新产品的积极性。

(2) “散、乱、小”与“大(小)而全”

目前我国汽车企业数量居世界第一,但绝大多数企业规模都很小。2002年,年产量5万辆以上的企业仅有7家,而年产量为100辆以下的却有27家。