



国防特色教材·动力机械及工程热物理



北京市高等教育精品教材立项项目

内燃机燃烧科学与技术

NEIRANJI RANSHAO KEXUE YU JISHU

——○ 李向荣 魏 镨 孙柏刚 编著 ○——
杜 巍 周 磊

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理



北京市高等教育精品教材立项项目

内燃机燃烧科学与技术

李向荣 魏 榕 孙柏刚 杜 巍 周 磊 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书以车用内燃机的燃烧理论与技术为主要内容。全书共 15 章,前 7 章为基础部分,后 8 章为内燃机专业部分。基础部分主要包括:绪论,湍流与混合,化学动力学,着火过程,预混燃烧的火焰传播,非均质混合物的扩散燃烧,内燃机燃烧测试分析技术。这些内容虽为基础,但也注意到与专业的联系。专业部分主要包括:内燃机缸内气体运动,内燃机燃油雾化、蒸发和混合,火花点火发动机燃烧与控制,压燃式发动机燃烧与控制,内燃机排气污染物生成与控制,内燃机模拟燃烧,内燃机代用燃料,特种车辆高功率密度柴油机燃烧系统。

本书可供本专业研究生和教学、科研人员使用,也可供本科生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机燃烧科学与技术 / 李向荣等编著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0623 - 0

I. ①内… II. ①李… III. ①内燃机—燃烧理论
IV. ①TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217162 号

版权所有,侵权必究。

内 燃 机 燃 烧 科 学 与 技 术

李向荣 魏 镨 孙柏刚 杜 巍 周 磊 编著

责任编辑 李 青 李冠咏 李徐心

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:34 字数:762 千字

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0623 - 0 定价:75.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

国内外战车、舰艇用高功率密度柴油机发展很快,由于它们的应用条件苛刻,给性能和功率密度等多方面带来特殊要求,而反映它们特点的燃烧与燃烧系统的教材较少。从知识层面看,当前内燃机科技发展水平与本科生的知识间差距很大,本书可减少和填补这一“中空地带”。作为研究生教材,篇幅不能过长,对发展逾百年的内燃机既要系统、科学地反映,还要深入浅出、易懂,而且包括近半的燃烧基础知识,无疑难度是很大的。

改革开放以来,我国各项事业尤其是交通运输用车辆、船舶等及内燃机工业发展速度惊人。加入 WTO 后,我国已成为竞争十分激烈的国际大市场,充满了机遇与挑战。在这样的发展态势下,凸显出我国自主知识产权的匮乏。在内燃机领域,性能的核心技术是燃烧和燃烧系统,更迫切要求“开拓创新”。在这样的大背景下,要求研究生应具有创新思维、坚实的基础知识和实干能力,以适应国家经济转型和广泛的社会需求。

温室效应造成严重自然灾害频仍、石油资源消耗和环境污染不断加剧,是地球人共同面对的三大问题。 CO_2 减排、节能和环保已成为我国政府的重要国策。我国内燃机行业必须努力做出应有的贡献。

原教材《内燃机燃烧学》讲义,是 1983 年完成的,部分内容已显陈旧和不足,远不能满足当前发展的需求。因此,在原教材基础上增删、重写,多人合作完成本书。

实践是创新之本。本书以燃烧基础和内燃机燃烧的试验研究和相关技术成果为主线进行阐述。随着内燃机的发展,理论也相应发展,并起着指导作用。本书力图从理论与实践的结合上阐明内燃机燃烧和技术的规律,并力求突出理念和研究思路。

创新离不开继承。温故知新,本书对基础知识作了系统介绍;从知新和发展的角度,对新的知识、理论和成果也有较充分的推介,还不乏作者和同事们多年的积累和研究成果。

本书系由北京理工大学车用内燃机专业的部分教师编写,李向荣完成第 4 章、6 章、7 章、10 章,并负责组织编写、全书统编和出版事宜;魏镭完成第 1 章、

2 章、3 章、15 章,并参与了其他部分章节的编写;孙柏刚完成第 9 章、11 章、12 章;杜巍完成第 5 章、8 章;周磊完成第 13 章、14 章。

希望读者用批判的态度,吸收和总结前人的试验和理论成果,力争发展自己的新理念、新方法、新技术和新理论,创造出更多的有自主知识产权的内燃机新成果。内燃机的发展远未到终点,百年的发展史尤其是近三十年的迅速发展就是明证,未来还有许多难关等待着有志者去攻克,光辉的顶峰正等着我们共同去奋力攀登!

全书由北京理工大学机械与车辆学院秦有方教授和西安交通大学能源与动力工程学院刘圣华教授进行了仔细的审阅,提出了许多非常宝贵的意见和建议,使作者受益匪浅,在此表示感谢,并向本书所引用的参考文献的作者们表示衷心的感谢。同时感谢国防科技工业局人事教育司和北京市教育委员会高等教育处对本书的出版所给予的支持,感谢北京航空航天大学出版社对本书所做的细致的编审工作。

由于能力和水平的限制,谬误和不当之处,敬请批评指正。

作 者

2010 年 8 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 我国运输车辆及其动力进入快速发展期	1
1.1.1 汽车业发展迅速	1
1.1.2 特种重型车用柴油机的发展	2
1.2 节能、减排与环保	2
1.2.1 交通运输业必须节能与减排	2
1.2.2 内燃机必须减少排气污染	3
1.3 内燃机中燃烧的重要性	4
1.3.1 概 述	4
1.3.2 燃烧是内燃机的核心	5
1.4 内燃机燃烧科学的发展中相关学科和技术的支撑	6
1.4.1 多层次学科的支撑	6
1.4.2 内燃机燃烧与燃烧系统结构设计的统一性	7
1.4.3 内燃机燃烧研究用测试仪器和设备的广泛性	7
1.4.4 计算机硬件和软件技术的应用	7
参考文献	8
第 2 章 湍流与混合	9
2.1 湍流基本知识	9
2.1.1 概 述	9
2.1.2 湍流运动基本方程	12
2.1.3 湍流零方程模型	13
2.1.4 概率密度函数和流速统计矩	15
2.1.5 相 关	16
2.1.6 湍动尺度	18
2.1.7 旋涡级串(vortex cascade)	21
2.1.8 湍动能谱	22
2.1.9 间歇性(intermittency)	26
2.1.10 拟序结构	26

2.2	扩散理论简述	27
2.2.1	分子扩散基本定律	28
2.2.2	湍流扩散	31
2.2.3	湍流扩散的比拟	32
2.2.4	分子(或层流)扩散与湍流扩散的比较	32
2.2.5	斯蒂芬(Stefan)流	34
2.3	湍动射流简介	36
2.3.1	湍动射流特性	36
2.3.2	正交横流中的等密度圆形湍动射流	39
2.3.3	冲击射流	40
2.4	拟序结构与混合	41
2.4.1	概 述	41
2.4.2	轴对称圆形湍动射流的拟序结构与混合	41
2.4.3	燃烧中的拟序结构与混合	42
2.5	章后语	44
	参考文献	45
第3章	化学动力学	47
3.1	概 述	47
3.2	反应速率及速率方程	47
3.2.1	反应速率	47
3.2.2	速率方程与反应级数	48
3.3	简单级数反应	49
3.3.1	一级反应	49
3.3.2	二级反应	50
3.3.3	n 级反应($n > 2$)	51
3.4	复合反应	51
3.4.1	可逆反应	51
3.4.2	平行反应	52
3.4.3	连串反应	53
3.4.4	复合反应的近似处理	54
3.5	温度对反应速率的影响	55
3.6	活化碰撞理论	57
3.6.1	总碰撞次数	58

3.6.2 有效碰撞分数 q	59
3.6.3 反应速率及速率常数	59
3.6.4 讨 论	60
3.7 活化络合物理论	61
3.7.1 原理概述	61
3.7.2 速率常数计算分析	62
3.8 压力对反应速率的影响	63
3.9 链反应	64
3.9.1 直链反应	65
3.9.2 支链反应	65
3.9.3 链反应动力学	66
3.9.4 爆炸反应	69
参考文献	69
附 录	70
附录参考文献	73
第 4 章 着火过程	74
4.1 着火的分类	74
4.2 热着火过程	75
4.2.1 热着火理论	75
4.2.2 着火延迟期(孕育时间)的解析	79
4.2.3 绝热容器内可燃混合物的自燃过程	80
4.2.4 着火界限	81
4.3 烃的着火特点	82
4.3.1 氢氧的着火界限	82
4.3.2 烃类的着火界限	84
4.3.3 烃类的三阶段和单阶段着火过程	85
4.4 均质混合气自燃的发展	87
4.5 液体燃料喷雾的着火	90
4.5.1 物理延迟和化学延迟	90
4.5.2 燃料雾注着火的图像	91
4.5.3 着火延迟的分析	92
4.6 强迫着火	94
4.6.1 热面点火	94

4.6.2 电火花点火	101
参考文献	106
第5章 预混燃烧的火焰传播	108
5.1 概 述	108
5.2 预混层流燃烧的火焰传播	108
5.2.1 层流燃烧速度的测量方法	108
5.2.2 层流燃烧的火焰传播原理	113
5.2.3 层流燃烧速度的影响因素	116
5.2.4 层流火焰传播极限	119
5.3 预混湍流燃烧的火焰传播	120
5.3.1 湍流燃烧的试验研究	121
5.3.2 表面模型的计算与发展	123
5.3.3 微扩散的容积燃烧模型	130
5.3.4 涡旋破碎模型	131
5.3.5 统计模型	133
5.3.6 湍流火焰传播速度的影响因素	134
5.4 封闭容器内的火焰传播	135
5.5 爆 震	137
5.5.1 冲波和爆震波	137
5.5.2 爆震波结构及产生过程	141
5.5.3 汽油机条件下爆震的特点	143
参考文献	144
第6章 非均质混合物的扩散燃烧	146
6.1 引 言	146
6.2 气体燃料扩散燃烧	146
6.2.1 层流扩散火焰和湍流扩散火焰	146
6.2.2 扩散火焰高度	148
6.2.3 同轴射流湍流扩散燃烧	150
6.2.4 简单化学反应系统	151
6.2.5 湍流扩散燃烧的模化	152
6.2.6 湍流与燃烧的相互作用	154
6.3 油滴的燃烧	155

6.3.1	单油滴的蒸发和燃烧	156
6.3.2	对流对油滴蒸发和燃烧的影响	166
6.3.3	油滴运动的阻力	168
6.4	油滴群的燃烧	169
6.4.1	油滴间的相互影响	169
6.4.2	油滴群的燃烧形式	170
6.4.3	油滴群中的火焰传播	171
6.4.4	气流相对速度对油滴群燃烧的影响	172
6.5	喷雾燃烧	173
6.6	扩散燃烧中碳烟的生成机理	176
	参考文献	179
第 7 章	内燃机燃烧测试分析技术	181
7.1	测试装置	181
7.2	流速测量	189
7.3	密度、组分浓度及温度测量	197
7.4	缸内压力测量及分析	206
7.5	喷油雾化特性测试	207
7.6	流动、燃烧可视化	212
	参考文献	216
第 8 章	内燃机缸内气体运动	217
8.1	进气涡流	217
8.1.1	进气涡流的形成	217
8.1.2	进气涡流的测量	219
8.2	挤 流	220
8.3	进气滚流	223
8.3.1	进气滚流的形成和发展	223
8.3.2	进气滚流的测量	224
8.4	缸内湍流运动	225
8.4.1	进气流动	225
8.4.2	流动的基本特征	226
8.4.3	定义和分析	228
8.4.4	均速和脉动速度	233

8.4.5	滚流的湍流特性	236
8.4.6	挤流的湍流特性	236
8.4.7	概率密度函数与相关	237
8.4.8	缸内湍流尺度	239
8.4.9	能谱分析	243
8.4.10	缸内湍流的非平衡性及其扩散系数	244
8.5	缸内气体流动模拟简述	244
8.5.1	概 述	244
8.5.2	CFD 软件在内燃机缸内流动中的应用	245
8.6	章后语	245
	参考文献	246
第 9 章	内燃机燃油雾化、蒸发与混合	250
9.1	液体射流破碎与雾化机理	250
9.1.1	射流破碎现象	250
9.1.2	液体射流雾化机理	251
9.2	喷雾特性	253
9.2.1	喷雾的粒径特性	253
9.2.2	自由射流喷雾的空间分布特性	256
9.2.3	喷雾的蒸发过程	263
9.3	燃油射流撞壁和壁射流	265
9.3.1	概 述	265
9.3.2	单油滴撞壁形态	266
9.3.3	无蒸发柴油射流撞壁后的结构与形状	266
9.3.4	气体射流撞壁与壁射流	267
9.3.5	壁射流半径和高度的发展	268
9.3.6	有蒸发柴油射流的撞壁和壁射流	270
9.3.7	进气涡流的影响	271
9.3.8	汽油喷雾撞壁特性	271
9.4	可燃混合气的形成	272
9.4.1	自由射流混合	273
9.4.2	燃油射流撞壁和壁射流混合	280
9.4.3	壁面蒸发和热混合原理	284
9.5	喷雾模型与数值模拟	285

9.5.1 模型分类与模型发展历程	286
9.5.2 喷雾破碎模型	286
9.5.3 液滴蒸发模型	290
参考文献	291
第 10 章 火花点火发动机燃烧与控制	295
10.1 概 述	295
10.2 火花点火汽油机的正常燃烧	296
10.2.1 燃烧过程的直接观察和火焰结构	296
10.2.2 燃烧过程分期和特性参数	299
10.2.3 火焰传播和压力上升	302
10.2.4 燃烧气体中的温度梯度和气体的移动	303
10.2.5 影响火焰传播的各种因素	304
10.2.6 各缸燃烧差异	309
10.2.7 燃烧过程的热量利用	309
10.3 各循环间燃烧的变动	311
10.3.1 各循环燃烧的变动及其特性值的表示方法	311
10.3.2 燃烧循环变动带来的问题	314
10.3.3 影响燃烧变动的主要因素	314
10.3.4 部分燃烧和失火	318
10.3.5 减少燃烧变动的措施	319
10.4 火花点火发动机内的爆燃	319
10.4.1 汽油机爆燃的特性、危害和诊断	319
10.4.2 爆燃的理论	324
10.4.3 辛烷值与压缩比	327
10.4.4 防止爆燃的方法	327
10.5 表面着火及其他自动着火现象	330
10.5.1 异常燃烧的说明	330
10.5.2 表面着火机理	332
10.5.3 表面着火的各种影响因素	334
10.5.4 燃料的表面着火性	335
10.5.5 表面着火的防止措施	336
10.5.6 其他自动着火现象	336
10.6 稀混合气燃烧的发动机	338

10.6.1	燃烧稀混合气存在的问题	338
10.6.2	提高压缩比的影响	339
10.6.3	改善点火系统	341
10.6.4	典型均质稀混合气燃烧发动机	342
10.7	层状充量发动机的燃烧	343
10.7.1	概 述	343
10.7.2	层状充量的燃烧原理	344
10.7.3	层状充量燃烧系统的分类	345
10.7.4	几种典型层状充量燃烧发动机	347
10.7.5	缸内直喷发动机的发展趋向	354
10.8	结束语	355
	参考文献	356
第 11 章	压燃式发动机燃烧与控制	358
11.1	概 述	358
11.2	直喷燃烧系统燃烧过程	359
11.2.1	燃烧阶段划分	359
11.2.2	燃烧过程可视化分析	360
11.2.3	燃烧过程研究的新进展	361
11.2.4	柴油机燃烧中湍流结构的一些试验和分析	364
11.3	着火延迟期	367
11.3.1	概 述	367
11.3.2	着火延迟期的影响因素	367
11.3.3	着火延迟期计算	372
11.3.4	着火延迟期对燃烧过程及柴油机性能的影响	374
11.4	燃烧的影响因素和控制的综合考虑	376
11.4.1	柴油机燃烧性能改进方向	376
11.4.2	喷油参数的影响和匹配	378
11.4.3	进气涡流对油/气时空分布的影响	390
11.4.4	燃烧室几何参数的匹配	392
11.4.5	EGR 的影响	396
11.5	新概念燃烧系统	397
11.5.1	MK 燃烧方式	398
11.5.2	UNIBUS	399

11.5.3 HCCI	400
11.5.4 ACE 的燃烧概念	402
参考文献	404
第 12 章 内燃机排气污染物生成与控制	408
12.1 概 述	408
12.2 排放法规	409
12.2.1 排放因子与总量控制	410
12.2.2 排放法规演变历程	411
12.3 排放物的生成机理分析	413
12.3.1 一氧化碳的产生机理	413
12.3.2 碳氢化合物的产生机理	413
12.3.3 氮氧化物的产生机理	415
12.3.4 颗粒物的产生机理	417
12.3.5 新进展	417
12.4 影响因素与技术对策	420
12.4.1 影响因素分析	420
12.4.2 技术对策	420
12.4.3 燃 料	423
12.4.4 冷启动和怠速排放	425
12.5 后处理技术	426
12.5.1 三元催化器	426
12.5.2 颗粒捕集器	427
12.5.3 选择催化还原	428
12.5.4 NO _x 吸附器	428
12.5.5 氧化催化器	429
参考文献	429
第 13 章 内燃机燃烧模拟	430
13.1 概 述	430
13.2 汽油机燃烧的零维和准维模型	432
13.2.1 零维模型	432
13.2.2 准维模型	433
13.3 柴油机燃烧的零维和准维模型	439

13.3.1	零维模型	439
13.3.2	准维模型	442
13.4	多维模型	450
13.4.1	控制方程组	450
13.4.2	湍流燃烧模型	453
13.5	大涡模拟(LES)及其应用	455
13.6	数值求解方法	457
13.7	保证仿真精度的科学方法体系——Verification & Validation 准则简介	459
13.7.1	内燃机燃烧模拟中的误差和不确定性	459
13.7.2	Verification & Validation(校核与验证)准则简介	460
13.8	模拟计算实例	463
13.8.1	柴油机喷雾燃烧模拟基本参数设置	463
13.8.2	WAVE 模型的检验	464
13.8.3	WAVE 喷雾模型的验证(Validation)	466
13.8.4	EBU 燃烧模型的检验和验证	468
13.9	小结	470
	参考文献	470
第 14 章	内燃机代用燃料	475
14.1	概述	475
14.2	含碳液体代用燃料	476
14.2.1	醇类燃料	476
14.2.2	二甲醚(Dimethyl Ether)	478
14.2.3	煤制油	480
14.2.4	生物柴油(biodiesel)	480
14.3	含碳气体代用燃料	481
14.3.1	液化石油气 LPG(Liquefied Petroleum Gas)	481
14.3.2	天然气 NG(Natural Gas)	481
14.4	氢燃料	482
14.4.1	氢燃料的基本物理特性	482
14.4.2	氢燃料内燃机的缸内压力变化曲线	483
	参考文献	485

第 15 章 特种车辆高功率密度柴油机燃烧系统	486
15.1 坦克用动力的发展	486
15.2 坦克柴油机燃烧系统发展趋势	489
15.3 高功率密度柴油机燃烧系统研制的一般考虑	495
15.3.1 概 述	495
15.3.2 基础参数的确定	498
15.3.3 进气与增压	499
15.3.4 供油与高压喷射	501
15.3.5 机械负荷和热负荷的限制	503
15.3.6 燃烧系统的设计思路	505
15.4 无涡流型燃烧系统	505
15.4.1 概 述	505
15.4.2 混合与燃烧机理	508
15.4.3 无涡流燃烧系统设计中的一些考虑	510
15.5 低涡流型燃烧系统	512
15.5.1 概 述	512
15.5.2 低涡流进气道	513
15.5.3 混合与燃烧机理	514
15.5.4 低涡流燃烧系统设计问题	515
15.6 卷流型燃烧系统	516
15.6.1 双卷流燃烧系统 DSCS(Double Swirl Combustion System)	516
15.6.2 综 述	520
15.7 可调进气涡流研究	520
15.7.1 一种典型的可调进气涡流系统	521
15.7.2 旋流器可调进气涡流系统	522
15.7.3 双蝶阀可调进气涡流系统	523
15.8 章后语	523
参考文献	524

第1章 绪 论

1.1 我国运输车辆及其动力进入快速发展期

1.1.1 汽车业发展迅速

1952年,第一汽车制造厂在长春诞生;1955年,全国生产了61台货车;1958年,一汽和上海的汽车厂各自生产了第一台轿车,全国全年共生产轿车57辆。表1.1.1列出了汽车年生产总量和轿车的年产量,并制成曲线如图1.1.1所示。

表 1.1.1 汽车产量^[1-3]

年份/年	1960	1965	1970	1975	1978	1980	1985	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2001	2003	2004
总量/万辆	2.25	4.05	8.7	13.98	14.90	22.2	44.3	50.92	106.1	135.3	145.6	162.7	206.9	233.4	444.4	507.0
轿车/万辆	0.009 8	0.013 3	0.019 6	0.182	0.26	0.54	0.52	4.24	16.27	25.03	38.15	50.71	60.47	70.3	202.0	231.6

由数字和曲线可清楚地看到,1978年前,汽车年生产总量发展十分缓慢,以后生产进入发展的快车道。从数字看,2004年比1978年的汽车总量增长约34倍;2000—2004年,年产量平均增长率在20%以上。

1978年以来,我国汽车拥有量也有大幅增长,如图1.1.2所示。2005年拥有汽车总量

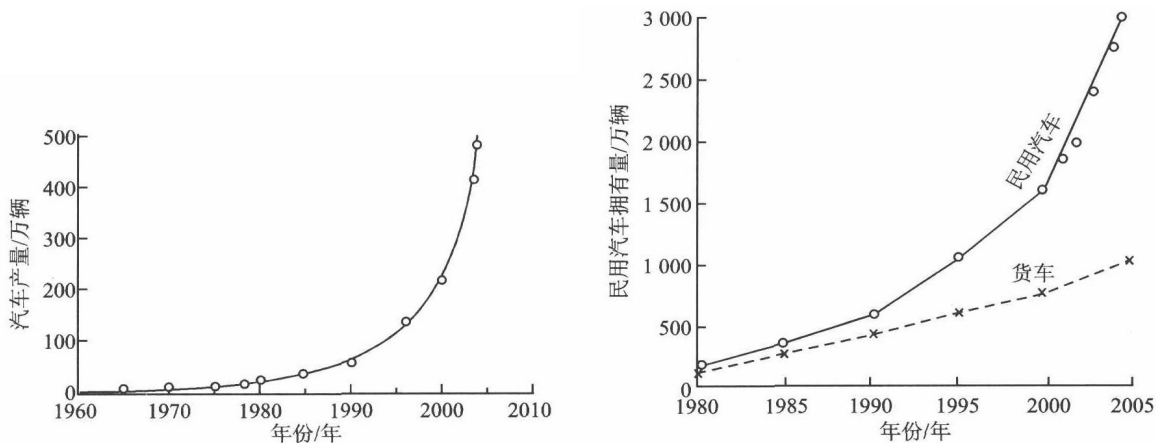


图 1.1.1 我国汽车年产量

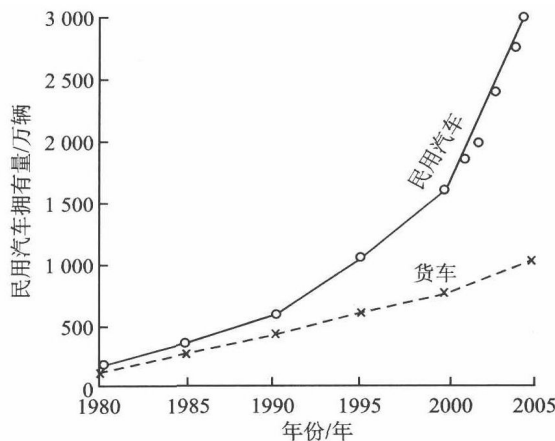


图 1.1.2 中国民用汽车拥有量变化^[3]