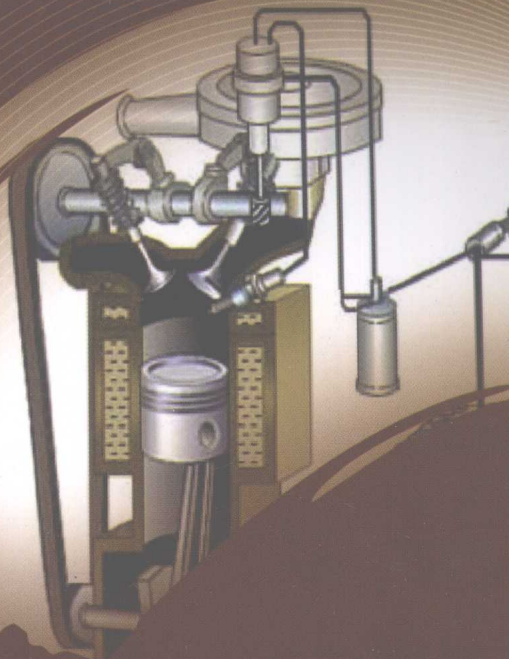


■ ■ 高职高专应用型规划教材



内燃机 构造与原理

◎ 主 编 仇桂玲 朱彦熙
◎ 副主编 许崇霞 吴延霞 王宝昌
◎ 主 审 韩加蓬

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

 <http://www.phei.com.cn>

高职高专应用型规划教材

内燃机构造与原理

主编 仇桂玲 朱彦熙

副主编 许崇霞 吴延霞 王宝昌

主审 韩加蓬



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容包括：内燃机的工作原理和总体构造、曲柄连杆机构、配气机构、汽油机燃油供给系、柴油机燃油供给系、发动机润滑系、冷却系、起动装置、汽油机点火系统、内燃机增压、内燃机特性、内燃机的噪声控制和排气净化。

全书结构完整，结合典型工程机械设备讲解内燃机基本构造和工作原理，并有选择地融入国内外最新技术介绍。本书各章均配有重、难点提示和思考题，便于自学。此外，书后还附有内燃机拆装实训的基本方法和步骤，供实训教学参考。

本书适合作为高等职业院校港口机械、物流机械、起重运输机械、汽车等专业教材，也可用于各类职业资格、在职培训，或相关技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

内燃机构造与原理/仇桂玲，朱彦熙主编. —北京：电子工业出版社，2008.8
高职高专应用型规划教材
ISBN 978-7-121-07013-6

I. 内… II. ①仇… ②朱… III. ①内燃机—构造—高等学校；技术学校—教材 ②内燃机—理论—高等学校；技术学校—教材 IV. TK40

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 096206 号

责任编辑：陈 虹

印 刷：北京市顺义兴华印刷厂

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：20 字数：512 千字

印 次：2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言



中国加入 WTO 以后, 国民经济快速发展, 对外经济贸易日益增进。港口机械、物流机械、汽车、起重机械等行业也随之进入了一个全新的发展时期, 各种新技术、新工艺、新设备不断涌现。社会、企业对高职高专人才的数量要求更多, 素质要求更高。2008 年的政府工作报告提出要大力培养“高素质技能型”人才的培养目标。为适应新的职业教育的发展形势, 满足社会、企业对高职高专人才培养要求, 在跟全国同类院校交流和学习的基础上, 结合全国港口机械、物流机械、汽车、起重机械等诸多相关行业调研的实际情况, 我们编写了此书。

本书内容深入浅出, 以大量港口机械、物流机械、汽车、起重机械等行业使用的汽油机和柴油机为例, 系统阐述了行业内常用内燃机的结构和工作原理。全书主要有以下特点:

- 拓宽了使用范围。本教材既保证了基本理论、基本内容、基本操作方法的教
- 学, 又反映了新技术、新经验、新趋势的时代特色。主要面向高等职业院校, 也可以用于相关专业的职业资格培训和各类在职培训, 亦可供相关技术人员参考。
- 本教材结构完整、难易适中、通俗易懂。在内容的选择上, 照顾了广度、控制了深度, 力图针对专业、服务专业, 并对适用专业相关的内容予以足够的重视。同时附有每章的重点、难点和思考题, 便于学生自学。
- 本教材的编写注重理论联系实际, 在编写的过程中借鉴了大量相关行业技术人员的实际操作经验, 结合典型工程机械设备系统地介绍了其基本构造和工作原理, 同时, 有选择地介绍了一些国内外的新技术、新设备, 以便拓宽学生的视野, 为学生进一步深造奠定基础。
- 本书附有内燃机拆装实训的基本方法和步骤, 可供实训参考。

全书由青岛港湾职业技术学院仇桂玲、朱彦熙担任主编, 仇桂玲统稿, 山东理工大学韩加蓬教授主审。具体分工如下: 仇桂玲负责第 1、3、11 章的编写; 朱彦熙负责第 2、4、10 章的编写; 许崇霞负责第 5、7 章的编写; 吴延霞负责第 6、8 章的编写, 王宝昌负责第 9、12 章的编写。另外, 吴广河、李永刚、李少辉、董丽也参与了本书的编写。

本书在编写过程中借鉴和参考了国内外同行业的大量资料, 在此致以诚挚的谢意! 由于时间仓促、编者水平有限, 书中难免出现错误与不足, 敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月



目 录

绪论	1
第 1 章 内燃机的工作原理和总体构造	8
1.1 内燃机的基本结构、术语及类型	8
1.1.1 基本结构	8
1.1.2 基本术语	11
1.1.3 内燃机的分类	12
1.2 四冲程内燃机的工作原理	15
1.2.1 四冲程汽油机的工作原理	15
1.2.2 四冲程柴油机的工作原理	16
1.3 二冲程内燃机的工作原理	17
1.3.1 二冲程汽油机的工作原理	17
1.3.2 二冲程柴油机的工作原理	18
1.3.3 汽油机与柴油机、四冲程与二冲程内燃机的比较	19
1.4 发动机的性能指标	20
1.5 内燃机的编号规则	21
思考题	23
第 2 章 曲柄连杆机构	24
2.1 概述	24
2.2 曲柄连杆机构的受力	24
2.3 机体组	26
2.3.1 机体组的功用及组成	26
2.3.2 机体	27
2.3.3 曲轴箱	30
2.3.4 汽缸盖	30
2.3.5 汽缸垫	32
2.3.6 发动机的支承	33
2.4 活塞连杆组	33
2.4.1 活塞	34
2.4.2 活塞环	39
2.4.3 活塞销	43
2.4.4 连杆	44
2.4.5 连杆轴瓦	45
2.5 曲轴飞轮组	46
2.5.1 曲轴	46
2.5.2 飞轮	53
2.5.3 曲轴扭转减振器	54
思考题	55

第3章 配气机构	56
3.1 概述	56
3.2 气门式配气机构的布置形式	56
3.3 配气相位和气门间隙	60
3.3.1 配气相位	60
3.3.2 气门间隙	62
3.4 配气机构的主要零部件	63
3.4.1 气门组	63
3.4.2 气门传动组	67
3.4.3 可变式配气机构	73
思考题	75
第4章 汽油机燃油供给系	76
4.1 汽油机燃油供给系的组成和燃料	76
4.1.1 汽油机燃油供给系的功用	76
4.1.2 汽油机燃油供给系的组成	76
4.1.3 汽油	77
4.2 可燃混合气体和汽油机性能关系	80
4.2.1 空燃比	80
4.2.2 可燃混合气成分	81
4.2.3 可燃混合气成分对发动机性能的影响	81
4.2.4 汽油机各种工况对可燃混合气成分的要求	82
4.3 化油器式燃油系统的组成	84
4.3.1 简单化油器的构造	84
4.3.2 简单化油器的特性	85
4.3.3 理想化油器特性与简单化油器特性比较	85
4.3.4 化油器各工作系统	86
4.4 化油器的构造	90
4.4.1 化油器类型	91
4.4.2 化油器的附加装置	93
4.5 汽油供给装置	95
4.6 空气滤清器及进、排气装置	98
4.6.1 空气滤清器	99
4.6.2 进气管与排气管	99
4.6.3 排气消音器	101
4.6.4 催化转化器	101
4.7 汽油直接喷射	103
4.7.1 概述	103
4.7.2 燃油喷射系统的种类	104
4.7.3 电控汽油喷射系统的基本类型	105
4.7.4 电控汽油喷射系统主要组件的构造和工作原理	109
4.7.5 传感器	111

4.7.6	碳罐	112
4.7.7	电喷发动机和化油器发动机的区别	112
	思考题	114
第 5 章	柴油机燃油供给系	115
5.1	柴油及其使用性能	115
5.2	柴油机混合气形成和燃烧室	116
5.2.1	可燃混合气的形成与燃烧	116
5.2.2	燃烧室	117
5.3	柴油机的燃烧过程	119
5.3.1	着火的条件和特点	119
5.3.2	燃烧过程	120
5.3.3	对燃烧过程的要求	122
5.3.4	影响燃烧过程的运转因素	123
5.4	喷油器	125
5.4.1	孔式喷油器	126
5.4.2	轴针式喷油器	127
5.4.3	燃油的喷雾	129
5.5	喷油泵	130
5.5.1	柱塞式喷油泵的工作原理	130
5.5.2	柱塞式喷油泵的构造	132
5.5.3	柱塞式喷油泵实例	138
5.5.4	转子分配式喷油泵简介	139
5.6	调速器	141
5.6.1	调速器的功用	141
5.6.2	调速器的种类	141
5.6.3	机械式调速器的工作原理	142
5.6.4	机械式调速器实例	144
5.6.5	附加装置	151
5.7	P-T 燃油系统	153
5.7.1	P-T 燃油系统的组成	153
5.7.2	PT 燃油泵	154
5.7.3	PT 喷油器	158
5.7.4	P-T 燃油系统的特点	159
5.8	电控柴油喷射系统	160
5.8.1	电控 VE 泵喷射系统	161
5.8.2	电控共轨喷油系统	164
5.9	柴油机供给系辅助装置	165
5.9.1	燃油箱	165
5.9.2	燃油滤清装置	165
5.9.3	输油泵	168
5.9.4	油水分离器	168

思考题	169
第 6 章 发动机润滑系	170
6.1 润滑系的功用及润滑方式	170
6.1.1 功用	170
6.1.2 润滑方式	171
6.2 润滑油	171
6.2.1 机油的使用特性及机油添加剂	171
6.2.2 机油的分类	173
6.2.3 机油的选用	173
6.3 润滑系的组成和润滑油路	174
6.3.1 组成及各机件的作用	174
6.3.2 发动机润滑部位及油路	175
6.4 润滑系的主要机件	177
6.4.1 机油泵	177
6.4.2 机油滤清器	178
6.4.3 机油散热器和冷却器	183
6.4.4 阀门	184
6.4.5 油尺和机油压力表	185
6.5 曲轴箱通风	185
6.5.1 自然通风	186
6.5.2 强制通风	186
思考题	187
第 7 章 冷却系	188
7.1 冷却系的功用及冷却方式	188
7.1.1 功用	188
7.1.2 冷却方式	189
7.2 水冷系统	189
7.3 水冷系统的主要机件	191
7.3.1 散热器	191
7.3.2 风扇	193
7.3.3 水泵	194
7.4 冷却系统的调节和冷却液	196
7.4.1 改变通过散热器的空气流量	196
7.4.2 改变通过散热器的冷却水流量	199
7.4.3 冷却液和防冻液	201
7.5 风冷系统	201
思考题	203
第 8 章 起动装置	204
8.1 起动条件和起动方式	204
8.1.1 起动条件	204

8.1.2	8.1.2 启动方式	205
8.2	8.2 起动机	205
8.2.1	8.2.1 组成	205
8.2.2	8.2.2 直流电动机	205
8.2.3	8.2.3 操纵机构	207
8.2.4	8.2.4 离合机构	208
8.2.5	8.2.5 减速起动机	211
8.3	8.3 柴油机的启动辅助装置	212
8.3.1	8.3.1 电热塞	212
8.3.2	8.3.2 进气预热器	213
8.3.3	8.3.3 减压装置	213
8.3.4	8.3.4 启动液喷射装置	213
	思考题	214
第 9 章	汽油机点火系统	215
9.1	9.1 概述	215
9.1.1	9.1.1 点火系统的功用	215
9.1.2	9.1.2 点火系统的类型	215
9.1.3	9.1.3 点火系统的基本要求	216
9.1.4	9.1.4 点火系统的特点	216
9.2	9.2 传统点火系统组成与工作原理	217
9.2.1	9.2.1 组成	217
9.2.2	9.2.2 工作原理	218
9.2.3	9.2.3 点火时刻	218
9.3	9.3 传统点火系统主要元件及其构成	219
9.3.1	9.3.1 分电器	219
9.3.2	9.3.2 点火线圈	225
9.3.3	9.3.3 火花塞	226
9.4	9.4 电子点火系统	226
9.4.1	9.4.1 有触点电子点火系统	227
9.4.2	9.4.2 无触点电子点火系统	228
9.5	9.5 微机控制点火系统	233
9.5.1	9.5.1 有分电器微机控制点火系统	234
9.5.2	9.5.2 无分电器微机控制点火系统	234
9.6	9.6 车辆电源	241
9.6.1	9.6.1 蓄电池	241
9.6.2	9.6.2 发电机	242
9.6.3	9.6.3 发电机的电压调节器	245
	思考题	248
第 10 章	内燃机增压	249
10.1	10.1 基本概念	249
10.1.1	10.1.1 增压的作用及增压方式	249

10.1.2 增压发动机的结构特点	251
10.2 废气涡轮增压	252
10.3 柴油机废气能量的利用	254
10.4 增压内燃机的性能	256
10.4.1 内燃机增压后性能的改善	256
10.4.2 内燃机结构参数的变动	257
10.5 汽油机增压技术	259
10.5.1 涡轮增压系统	260
10.5.2 机械增压系统	261
思考题	263
第 11 章 内燃机特性	264
11.1 概述	264
11.2 内燃机的工况	265
11.3 负荷特性	266
11.3.1 柴油机的负荷特性	266
11.3.2 汽油机的负荷特性	267
11.4 速度特性	268
11.4.1 柴油机的速度特性	269
11.4.2 汽油机的速度特性	270
11.4.3 转矩特性	271
11.5 调速特性	273
11.6 万有特性	275
11.7 内燃机的功率标定及大气修正	276
11.7.1 功率标定	276
11.7.2 大气修正	277
思考题	278
第 12 章 内燃机的噪声控制和排气净化	280
12.1 内燃机噪声控制	280
12.2 内燃机排气净化	282
12.2.1 排气中的有害成分及其危害	282
12.2.2 排气净化的措施	283
12.3 内燃机排放的测量及法规	288
12.3.1 内燃机排放污染物的测量	289
12.3.2 排放法规	292
思考题	297
附录 A 发动机及零部件拆装实训	299
附录 B 内燃机常用词汇中英文对照表	309
参考文献	310

绪 论

0.1 引言

内燃机以其热效率高、结构紧凑、机动性强、运行维护简便的优点著称于世。一百多年以来，内燃机的巨大生命力经久不衰。目前世界上内燃机的拥有量大大超过了任何其他的热力发动机，在国民经济中占有相当重要的地位。现代内燃机更是成为了当今用量最大、用途最广、无一能与之匹敌的最重要的热能机械。

内燃机同样也存在着不少的缺点，主要是：①对燃料的要求高，不能直接燃用劣质燃料和固体燃料；②由于间歇换气以及制造的困难，单机功率的提高受到限制，现代内燃机的最大功率一般小于四万千瓦，而蒸汽机的单机功率可以高达数十万千瓦；③内燃机不能反转；④内燃机的噪声和废气中有害成分对环境的污染尤其突出。可以说一百多年来的内燃机的发展史就是人类不断革新，不断挑战克服这些缺点的历史。

同其他科学一样，内燃机发展至今的每一个进步都是人类生产实践经验的概括和总结。内燃机的发明始于对活塞式蒸汽机的研究和改进。德国人奥托和狄塞尔，在总结了前人无数实践经验的基础上，对内燃机的工作循环提出了较为完善的“奥托循环”和“狄塞尔循环”理论，使得无数人的实践和创造活动得到了一个科学的总结，并有了质的飞跃。他们将前人粗浅的、纯经验的、零乱无序的经验，加以继承、发展、总结和提高，找出了规律性，为现代汽油机和柴油机热力循环奠定了热力学基础，为内燃机的发展做出了伟大的贡献。

0.2 往复式内燃机

往复式内燃机的种类很多，主要的分类方式有：①按所用的燃料的不同，分为汽油机、柴油机、煤油机、煤气机（包括各种气体燃料内燃机）等；②按每个工作循环的行程数不同，分为四冲程和二冲程；③按着火方式不同，分为点燃式和压燃式；④按冷却方式不同，分为水冷式和风冷式；⑤按汽缸排列形式不同，分为直列式、V形、对置式、星形等；⑥按汽缸数不同，分为单缸内燃机和多缸内燃机等；⑦按内燃机的用途不同，分为汽车用、农用、机车用、船用以及固定用等。

1. 煤气机

最早出现的内燃机是以煤气为燃料的煤气机。1860年，法国发明家莱诺制成了第一台实用内燃机（单缸、二冲程、无压缩和电点火的煤气机，输出功率为0.74~1.47kW，转速为100r/min，热效率为4%）。法国工程师德罗沙认识到，要想尽可能提高内燃机的热效率，就必须使单位汽缸容积的冷却面积尽量减小，膨胀时活塞的速率尽量快，膨胀的范围（冲程）尽量长。在此基础上，他在1862年提出了著名的“等容燃烧四冲程循环”：进气、压缩、燃烧和膨胀、排气。

1876年，德国人奥托制成了第一台四冲程往复式内燃机（单缸、卧式、以煤气为燃

料、功率大约为 2.21kW、转速为 180r/min)。在这部发动机上,奥托增加了飞轮,使运转平稳,把进气道加长,又改进了汽缸盖,使混合气充分形成。这是一部非常成功的发动机,其热效率相当于当时蒸汽机的两倍。奥托把三个关键的技术思想:内燃、压缩燃气、四冲程融为一体,使这种内燃机具有效率高、体积小、质量轻和功率大等一系列优点。在 1878 年巴黎万国博览会上,被誉为“瓦特以来动力机方面最大的成就”。又因为等容燃烧四冲程循环由奥托实现,因此被称为奥托循环。

煤气机虽然比蒸汽机具有很大的优越性,但在社会化大生产情况下,仍不能满足交通运输业所要求的高速、轻便等性能。因为它以煤气为燃料,需要庞大的煤气发生炉和管道系统,并且煤气的热值低(约 $1.75 \times 10^7 \sim 2.09 \times 10^7 \text{J/m}^3$),因此煤气机转速慢、比功率小。到 19 世纪下半叶,随着石油工业的兴起,用石油产品取代煤气作燃料已成为必然趋势。

2. 汽油机

1883 年,戴姆勒和迈巴赫制成了第一台四冲程往复式汽油机,此发动机上安装了迈巴赫设计的化油器,还用白炽灯管解决了点火问题。以前内燃机的转速都不超过 200r/min,而戴姆勒的汽油机转速一跃为 800~1000r/min。它的特点是功率大、质量轻、体积小、转速快和效率高,特别适用于交通工具。与此同时,本茨研制成功了现在仍在使用的点火装置和水冷式冷却器。

到 19 世纪末,主要的集中活塞式内燃机大体上进入了实用阶段,并且很快显示出巨大的生命力。内燃机在广泛应用中不断地得到改善和革新,迄今已达到一个较高的技术水平。在这样一个漫长的发展历史中,有两个重要的发展阶段是具有划时代意义的:一是 20 世纪 50 年代兴起的增压技术在发动机上的广泛应用;再就是 20 世纪 70 年代开始的电子技术及计算机在发动机研制中的应用,这两个发展趋势至今都方兴未艾。

近年来,在汽车和飞机工业的推动下汽油机取得了长足的发展。按提高汽油机的功率、热效率、比功率和降低油耗等主要性能指标的过程,可以把汽油机的发展分为四个阶段。

(1) 第一阶段是 20 世纪最初 20 年,为适应交通运输的要求,以提高功率和比功率为主。采取的主要技术措施是提高转速、增加缸数和改进相应辅助装置。这个时期内,转速从 19 世纪的 500~800r/min 提高到 1000~1500r/min,比功率从 3.68W/kg 提高到 441.3~735.5W/kg,对提高飞机的飞行性能和汽车的负载能力具有重大的意义。

(2) 第二阶段是 20 世纪 20 年代,主要解决汽油机的爆震燃烧问题。当时汽油机的压缩比达到 4 时,汽油机就发生爆震。美国通用汽车公司研究室的米格雷和鲍义德通过在汽油中加入少量的四乙基铝,干扰氧和汽油分子化合的正常过程,解决了爆震的问题,使压缩比从 4 提高到了 8,大大提高了汽油机的功率和热效率。当时另一严重影响汽油机功率和热效率的因素是燃烧室的形状和结构,英国的里卡多及其合作者通过对多种燃烧室及燃烧原理的研究,改进了燃烧室,使汽油机的功率提高了 20%。

(3) 第三阶段是从 20 世纪 20 年代后期到 20 世纪 40 年代早期,主要是在汽油机上装备增压器。废气涡轮增压可使气压增至 1.4~1.6 大气压,这一应用为提高汽油机的功率和热效率开辟了新的途径。但是其真正的广泛应用,是在 20 世纪 50 年代后期。

(4) 第四阶段从 20 世纪 50 年代至今,汽油机技术在原理重大变革之前发展已近极致。它的结构越来越紧凑,转速越来越高。其技术现状为:缸内喷射;多气门技术;进气滚流,稀薄分层燃烧;电子控制点火正时、汽油喷射及空燃比随工况精确控制等全面电子发动机管

理；废气再循环及三元催化等排气净化技术等。集中体现在近年来研制成功并投产的缸内直喷分层充气稀燃汽油机（GDI）。

但是随着 20 世纪 70 年代开始的电子技术在发动机上的应用，为内燃机技术的改进提供了条件，使内燃机基本上满足了目前世界各国有关排放、节能、可靠性和舒适性等方面的要求。内燃机电子控制现已包括电控燃油喷射、电控点火、怠速控制、排放控制、进气控制、增压控制、警告提示、自我诊断、失效保护等诸多方面。

同样内燃机电子控制技术的发展也大致可分为四个阶段。

(1) 内燃机零部件或局部系统的单独控制，如电子油泵、电子点火装置等。

(2) 内燃机单一系统或几个相关系统的独立控制，如燃油供给系统控制、最佳空燃比控制等。

(3) 整台内燃机的统一智能化控制，如内燃机电子控制系统。

(4) 装置与内燃机动力的集中电子控制，如汽车、船舶、发电机组的集中电子控制系统。

电子控制系统一般由传感器、执行器和控制器三部分组成。由此构成各种不同功能、不同用途的控制系统。其主要目标是保持发动机各运行参数的最佳值，以求得发动机功率、燃油消耗和排放性能的最佳平衡，并监视运行工况。如 Caterpillar 公司的 3406PEPC 系统是在 3406 柴油机上采用可变程序的发动机控制系统，具有电子调速功能，采用电子控制空燃比，可将喷油提前角始终保持在最佳值。美国 Stanaclyne 公司将其生产的 DB 型分配泵改为电子控制喷油泵，称为 PFP 系统，采用步进电机作为执行元件来控制喷油量和喷油定时。

3. 柴油机

柴油机几乎是与汽油机同时发展起来的，它们具有许多相同点。所以柴油机的发展也与汽油机有许多相似之处，可以说在整个内燃机的发展史上，它们是相互推动的。

德国狄塞尔博士于 1892 年获得压缩点火压缩机的技术专利，1897 年制成了第一台压缩点火的“狄塞尔内燃机”，即柴油机。柴油机的高压缩比带来众多的优点。

(1) 不但可以省去化油器和点火装置，提高了热效率，而且可以使用比汽油便宜得多的柴油做燃料。

(2) 柴油机由于其压缩比大，最大功率点的单位功率的油耗低。在现代优秀的发动机中，柴油机的油耗约为汽油机的 70%。特别像汽车，通常在部分负荷工况下行驶，其油耗约为汽油机的 60%。柴油机是目前热效率最高的内燃机。

(3) 柴油机因为压缩比高，发动机结实，故经久耐用、寿命长。

同时高压压缩比也带来了以下缺点。

(1) 柴油机的结构笨重。通常柴油的单位功率质量约为汽油机的 1.5~3 倍。柴油机压缩比高，爆发压力也高，在不增压的情况下可达汽油机的 1.5 倍左右。为承受高温、高压，就要求结实的结构。所以柴油机最初只是作为一种固定式发动机使用。

(2) 在同一排量下，柴油机的输出功率约为汽油机的 1/3。因为柴油机把燃料直接喷入汽缸，不能充分利用空气，相应功率输出低。假设汽油机的空气利用率为 100%，那么柴油机仅有 80%~90%。柴油机功率输出小的另一原因是压缩比大，发动机的摩擦损失比汽油机大。这种摩擦损失与转速成正比，不能期望通过增加转速来提高功率。转速最高的汽油机每分钟可运转 10 000 次以上（如赛车发动机），而柴油机的最高转速却只有 5000r/min。

近百年来，柴油机的热效率提高近 80%，比功率提高几十倍，空气利用率达 90%。当今

柴油机的技术水平表现为：优良的燃烧系统、采用四气门技术、超高压喷射、增压和增压中冷、可控废气再循环和氧化催化剂、降低噪声的双弹簧喷油器、全电子发动机管理等，集中体现在以采用电控共轨式燃油喷射系统为特征的新一代柴油机上。目前，日本的 Nippondeno 公司 (ECDU2)，德国 Bosch (ZECCEL) 和美国 Caterpillar 公司 (HELI) 是研究和生产共轨式电控喷油系统的主要公司。

增压技术在柴油机上的应用要比汽油机晚一些。早在 20 世纪 20 年代就有人提出压缩空气提高进气密度的设想，直到 1926 年瑞士人 A.J.伯玉希才第一次设计了一台带废气涡轮增压器的增压发动机。由于当时的技术水平和工艺、材料的限制，还难以制造出性能良好的涡轮增压器，加上二次大战的影响，增压技术未能迅速普及，直到大战结束后，增压技术的研究和应用才受到重视。1950 年增压技术才开始在柴油机上使用并作为产品提供市场。

20 世纪 50 年代，增压度约为 50%，四冲程机的平均有效压力约为 0.7~0.8MPa，无中冷，处于一个技术水平较低的发展阶段。其后的 20 多年间，增压技术得到了迅速发展和广泛应用。

20 世纪 70 年代，增压度达 200% 以上，正式作为商品提供的柴油机的平均有效压力，四冲程机已达 2.0MPa 以上，二冲程机已超过 1.3MPa，普遍采用中冷，使高增压 (>2.0MPa) 四冲程机实用化。单级增压比接近 5，并发展了两级增压和超高增压系统，相对于 20 世纪 50 年代初期刚采用增压技术的发动机技术水平有了惊人的发展。

进入 20 世纪 80 年代，仍保持了这种发展势头。进排气系统的优化设计，提高充气效率，充分利用废气能量，出现谐振进气系统和 MPC 增压系统。可变截面涡轮增压器，使得单级涡轮增压比可达到 5，甚至更高。采用超高增压系统，压力比可达 10 以上，而发动机的压缩比可降至 6 以下，发动机的功率输出可提高 2~3 倍。进一步发展到与动力涡轮复合式二级涡轮增压系统。由此可见，高增压、超高增压的效果是可观的，将发动机的性能提高到了一个崭新的水平。本书后续章节将重点介绍往复式内燃机。

0.3 转动式内燃机

在蒸汽机的发展历史中，从往复式蒸汽机到蒸汽轮机的演化过程对内燃机的发展启发巨大。往复式内燃机运动要通过曲轴连杆机构或凸轮机构、摆盘机构、摇臂机构等，转换为功率输出轴的转动，这样不仅使机构复杂，而且由于转动机构的摩擦损耗，还会降低机械效率。另外由于活塞组的往复运动造成曲柄连杆机构的往复惯性力，这个惯性力与转速的平方成正比。随转速的提高，轴承上的惯性负荷显著增加，并由于惯性力的不平衡而产生强烈的振动。此外，往复式内燃机还有一套复杂的气门控制机构。于是人们设想：既然工具机的运动形式大部分都是轴的转动，能否效法从往复式蒸汽机到蒸汽轮机的路子，使热能直接转化为轴的转动呢？之后，先人们开始了在这一领域的探索。

1. 燃气轮机

1873 年布拉顿 (George Brayton) 制造了一种定压燃烧的发动机。该机能提供使燃气完全膨胀到大气压所发出的功率。20 世纪初法国的阿曼卡 (Bene Armangaud) 等成功地应用布拉顿循环原理制成燃气轮机。但是，因当时条件限制，热效率很低未能得到发展。

到 20 世纪 30 年代，由于空气动力学及耐高温合金材料和冷却系统的进展，为燃气轮机进入实用创造了条件。燃气轮机虽然是内燃机，但它没有像往复式内燃机那样必须在封闭的

空间里和限定的时间内燃烧的限制, 所以不会发生像汽油机那样令人担心的爆震, 也很少像柴油机那样受摩擦损失的限制; 且燃料燃烧所产生的气体直接推动叶轮转动, 故它的结构简单(与活塞式内燃机相比, 其部件仅为它的 1/6 左右)、质量轻、体积小、运行费用省, 且易于采用多种燃料, 也较少发生故障。虽然燃气轮机目前尚存在一些缺点: 寿命短、需要高级耐热钢材和成本高及排污(主要是 NO_x) 较严重等, 致使至今燃气轮机的应用仍局限于飞机、船舶、发电厂和机车, 但是由于布拉顿循环的优越性和燃气轮机对燃油的限制少及上述的其他优点, 使得它仍为现在和将来人们致力研究的动力技术之一。如果可突破涡轮入口温度, 大大提高热效率, 且克服其他缺点, 燃气轮机有望取代汽、柴油机。

2. 旋转活塞式发动机

一直以来人们都在致力于建造旋转式发动机, 其目标是避免往复式发动机固有的复杂性。在 1910 年以前, 人们曾提出过 2000 多个旋转发动机的方案。20 世纪初, 又有许多人提出不同的方案, 但大多因结构复杂或无法解决汽缸密封问题而不能实现。直到 1954 年, 德国人汪克尔经长期研究, 突破了汽缸密封这一关键技术, 才使具有长短幅圆外旋轮线缸体的三角旋转活塞发动机首次运转成功。转子每转一圈可以实现进气、压缩、燃烧膨胀和排气过程, 按奥托循环运转。1962 年三角转子发动机作为船用动力, 到 20 世纪 80 年代日本东洋工业公司把它用于汽车引擎。

转子发动机有一系列的优点。

(1) 它取消了曲柄连杆机构、气门机构等, 得以实现高速化。

(2) 质量轻(比往复式内燃机质量下降 1/2~1/3)、结构和操作简单(零件数量比往复式少 40%, 体积减少 50%)。

(3) 在排气污染方面也有所改善, 如 NO_x 产生较少。

同时, 转子发动机也存在着严重的不足之处:

(1) 这种结构的密封性能较差, 至今只能作为压缩比低的汽油机使用。

(2) 由于高速带来了扭矩低, 组织经济的燃烧过程困难。

(3) 寿命短、可靠性低以及加工长短轴旋轮线的专用机床构造复杂等。

0.4 内燃机的发展趋势

内燃机的发明, 至今已有 100 多年的历史。如果把蒸汽机的发明认为是第一次动力革命, 那么内燃机的问世当之无愧是第二次动力革命。因为它不仅是动力史上的一次大飞跃, 而且其应用范围之广、数量之多也是当今任何一种别的动力机械无与伦比的。随着科技的发展, 内燃机在经济性、动力性、可靠性等诸多方面取得了惊人的进步, 为人类做出了巨大贡献。蒸汽机从初创到完成花去了一个世纪的时间, 从完成到极盛又走了一个世纪, 从极盛到衰落大约也是一个世纪。内燃机的发明同样也经历了一个世纪的历程, 如今的内燃机已进入极盛时期, 新时期内燃机的发展呈现如下几个趋势。

1. 内燃机增压技术

从内燃机重要参数(压力、温度、转速)的发展规律来看, 可以发现这三个参数在 1900 年以前随着年代的推移提高得很快。而在 1900 年以后, 尤其是 1950 年以后, 温度、转速提

高变慢，而平均有效压力随着年代的增加仍直线上升。实践证明：提高平均有效压力可以大幅度地提高效率，减轻质量。而提高平均有效压力的技术就是提高增压度。如柴油机增压可大幅度地缩小柴油机进气管尺寸，并使汽缸有足够大的充气效率用于提高柴油机的功率，使之能在一个宽广的转速范围内既提高功率又有大的扭矩。一台增压中冷柴油机可以使功率成倍提高，而造价仅提高 15%~30%，即每马力造价可平均降低 40%。所以增压、高增压、超高增压是当前内燃机重要的发展方向之一。但是这只是问题的一个方面，另一个方面发动机强化和超强化会给零部件带来过大的机械负荷和热负荷，特别是热负荷问题已成为发动机进一步强化的限制；再就是单级高效率、高压比压气机也限制了增压技术的进一步发展，因此，并非增压度越高越好。

2. 内燃机电子控制技术

内燃机电子控制技术产生于 20 世纪 60 年代后期，通过 70 年代的发展，到 80 年代已趋于成熟。随着电子技术的进一步发展，内燃机电子控制技术将会承担更加重要的任务，其控制面会更宽，控制精度会更高，智能化水平也会更高。诸如燃烧室容积和形状变化的控制、压缩比变化控制、工作状态的机械磨损检测控制等较大难度的内燃机控制将成为现实并得到广泛应用。内燃机电子控制是由单独控制向综合、集中控制方向发展，是由控制的低效率及低精度向控制的高效率及高精度发展的。随着人类进入电子时代，21 世纪的内燃机也将步入“内燃机电子时代”，其发展情况将与高速发展的电子技术相适应。内燃机电子控制技术是内燃机适应社会发展需求的主要技术依托，也是内燃机保持 21 世纪辉煌的重要影响因素。

3. 内燃机材料技术

内燃机使用的传统材料是钢、铸铁和有色金属及其合金。在内燃机发展过程中，人们不断对其经济性、动力性、排放等提出了更高的要求，从而对内燃机材料的要求相应提高。根据内燃机今后的发展目标，对内燃机材料的要求主要集中在绝热性、耐热性、耐磨性、减摩性、耐腐蚀性及热膨胀小、质量轻等方面。要促进内燃机材料的发展，除采用改变材料化学成分与含量来达到零部件所要求的物理、机械性能这一常规方法外，也可采用表面强化工艺来使材料达到所需的要求，但内燃机材料的发展更需要人们去开发适应不同工作状态的新材料。与内燃机传统材料相比，陶瓷材料具有无可比拟的绝热性和耐热性，陶瓷材料和工程塑料（如纤维增强塑料）具有比传统材料优越的减摩性、耐磨性和耐腐蚀性，其比重与铝合金不相上下而又比钢和铸铁轻得多。因此，陶瓷材料（高性能陶瓷）凭借其优良的综合性能，可用在许多内燃机零件上，如喷油点火零件、燃烧室、活塞顶等，若能克服脆性、成本等方面的弱点，在 21 世纪里将会得到广泛应用。工程塑料也可用于许多内燃机零件，如内燃机上的各种罩盖、活塞裙部、正时齿轮、推杆等，随着工艺水平的提高及价格的降低，未来工程塑料在内燃机上的应用将会与日俱增。综合内燃机的各种材料，为扬长避短，在新材料的基础上又开发出了以金属、塑料或陶瓷为基材的各种复合材料，并开始在内燃机上逐渐推广使用。

在 21 世纪的一段时期内，钢、铸铁和有色金属及其合金，仍将是内燃机的主要材料。各种表面强化工艺将更加先进，并得到广泛应用。以金属、塑料、陶瓷为基材的各种复合材料将在 10 年之后进入惊人的高速推广时期，新材料在内燃机上的使用也将同时加速。

4. 内燃机制造技术

内燃机的发展水平取决于其零部件的发展水平,而内燃机零部件的发展水平是由生产制造技术等因素来决定的。也就是说,内燃机零部件的制造技术水平,对主机的性能、寿命及可靠性有决定性的影响。同样制造技术与设备的关系也是密不可分的,每当新一代设备或工艺材料研制成功,都会给制造技术的革新带来突破性的进展。进入 21 世纪后,科学技术的发展会异常迅猛,新设备的研制周期将越来越短,因此新世纪内燃机制造技术必将形成快速发展的局面。

由于铸造技术水平的提高,气冲造型、静压造型、树脂自硬砂造型制芯、消失模铸造,使内燃机铸造的主要零件如机体、缸盖可以制成形状复杂曲面及箱型结构的薄壁铸件。这不仅在很大程度上提高了机体刚度,降低了噪声辐射,而且使内燃机达到轻量化。由于喷涂、重熔、烧结、堆焊、电化学加工、激光加工等局部表面强化技术的进步,使材料性能得到完善发挥;由于设备水平提高,加工制造技术向高精度、高效率、自动化方向发展,带动了内燃机零部件生产向高集中化程度发展。另一方面,柔性制造技术的推广,使内燃机产品更新换代具有更大的灵活性和适应性。多品种小批量生产的柔性制造系统引起了内燃机制造商们的广泛认同,也顺应了生产技术发展及市场形势的变化。电子技术及计算机在设计、制造、试验、检测、工艺过程控制上的应用,推动了行业的技术进步,提高了内燃机的产品质量。新材料的发展也推动了内燃机零部件生产工艺的变革,特别是工程塑料、陶瓷材料及复合材料在内燃机上的运用,有力地促进了内燃机制造技术的发展。随着内燃机电控技术的发展,电控系统三大组成部分(传感器、执行器、控制单元)将成为内燃机零部件行业的重要分支,同时向传统的内燃机制造业提出了新的课题。

由此可以推断,21 世纪内燃机制造技术将向高精度、多元化方面飞速发展。它的发展速度和方向不仅关系到内燃机的质量,还直接对内燃机的未来产生重大影响。就其产品技术进步快慢而言,汽车内燃机发展最快,其次是机车、船舶、发电机组、工程机械、农业机械等。

5. 内燃机代用燃料

由于世界石油危机和发动机尾气对环境的污染日益严重,内燃机技术的研究转向高效节能及开发利用洁净的代用燃料。以汽油机和柴油机为基础进行改造或重新设计,开发以天然气、液化石油气和氢气等为燃料的气体发动机为目前和今后一段时间内内燃机技术的重点之一。其中气体发动机的功率恢复技术和氢气发动机的燃烧控制等是其中的重中之重。