

教育部普通高等教育精品教材

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



内燃机学

第4版

主 编 刘圣华 周龙保
副主编 韩永强 王 忠



双色印刷
二维码



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

教育部普通高等教育精品教材
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

内 燃 机 学

第 4 版

主 编 刘圣华 周龙保
副主编 韩永强 王 忠
参 编 汪 映 王金华 杜家益
主 审 刘巽俊 蒋德明



[本书资源，扫码观看]



机械工业出版社

本书是教育部普通高等教育精品教材。

本书从内燃机工作性能指标之间的运算关系、理论与实际循环和缸内燃烧过程三个基础理论方向,系统讲述内燃机工作的基本原理,并结合电控燃料供给系统、可变进气系统、增压小型化、高效排气后处理等技术,介绍内燃机实现节能减排的技术路线和潜力等。

本书共分11章,内容主要包括内燃机的工作性能指标、工作循环、燃料、缸内气体流动与混合气的形成及燃烧、排放机理及控制等,更新了柴油机燃烧着火过程及阶段划分内容,简化了燃料供给系统内容,突出介绍了现代内燃机节能减排的原理与技术方法,并包含有一定的内燃机使用和动力学与设计等内容。

本书为高等院校内燃机方向及相关专业本科生教材,也可供从事内燃机研究、设计制造及应用的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机学/刘圣华,周龙保主编.—4版.—北京:机械工业出版社,2017.3

教育部普通高等教育精品教材 “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-56286-3

I. ①内… II. ①刘… ②周… III. ①内燃机-高等学校-教材
IV. ①TK4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第047039号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 章承林 王小东

责任校对:张晓蓉 封面设计:张静

责任印制:李昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017年7月第4版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·434千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56286-3

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com



前言

随着世界范围内高标准燃油经济性和排放法规的实施，内燃机科技有了日新月异的发展，主要体现在内燃机的有效热效率的提升、先进的电子控制和高效排放后处理系统应用等几个方面。在我国由内燃机生产制造大国向研发设计与生产制造并重发展的转型期，有必要对内燃机学的教学内容进行与时俱进的更新，因此在本书的编写过程中，力求反映最新研究成果，使燃烧理论与技术相结合。

本书共 11 章，分为三部分：在基本知识方面，内容包括内燃机发展简史、中国内燃机工业发展简史和内燃机的典型构造与技术；在内燃机原理方面，有内燃机的工作指标、工作循环、燃料、混合气的形成和燃烧及污染物的生成与控制等内容，特别加强了现代内燃机节能减排新技术内容；在应用与设计方面，延续前版教材的特点，内容涵盖内燃机的使用特性与匹配、内燃机动力学与概念设计。本书配有部分动画，扫描二维码即可观看。

本书为“九五”部级重点教材，普通高等教育“十五”“十一五”“十二五”国家级规划教材，以及教育部普通高等教育精品教材，但随着国Ⅳ和国Ⅵ排放标准的制定和实施，需要对内燃机燃烧与排放控制措施等有关内容进行修订，以满足新的教学改革计划的要求。本书由西安交通大学刘圣华和周龙保教授任主编，吉林大学韩永强教授和江苏大学王忠教授任副主编，其中刘圣华和周龙保教授主要完成了第一~三章、第五章、第六章和第八章的编写，西安交通大学汪映副教授编写了第四章和第八章（部分内容），西安交通大学王金华副教授编写了第五章（部分内容），吉林大学韩永强教授编写了第六章（部分内容）、第九~十一章，江苏大学王忠和杜家益教授共同编写了第七章。本书由刘巽俊和蒋德明教授担任主审。在编写过程中，不仅得到了潍柴控股集团有限公司、广西玉柴机器集团有限公司、昆明云内动力股份有限公司、重庆长安汽车股份有限公司等单位的鼎力支持，还得到了许多内燃机同行的帮助，在此谨向对本书的编写和出版做出贡献的所有人表示感谢。

内燃机产品是工艺品般的高技术载体，内燃机学博大精深，本书在承接前三版教材结构和内容的基础上，力求反映当今最新科技成果，但编者并没有全面参与诸如国Ⅳ和国Ⅵ等发动机的研究进程，故疏漏之处在所难免，恳请读者提出使用建议，帮助编者及本书不断进步。

编者

常用符号

A_{Fi} ——示功图面积		TDC——上止点	
B ——燃油消耗量	kg/h	T_{ex}, t_{ex} ——膨胀终点温度	K, °C
BDC——下止点		T_{max}, t_{max} ——最高燃烧温度	K, °C
b_e ——有效燃油消耗率	g/(kW·h)	T_r, t_r ——排气温度	K, °C
b_i ——指示燃油消耗率	g/(kW·h)	T'_r, t'_r ——残余废气温度	K, °C
BSU——滤纸烟度		T_{tq} ——转矩	N·m
c_p ——比定压热容	kJ/(kg·K)	v_m ——活塞平均速度	m/s
c_v ——比定容热容	kJ/(kg·K)	V_s ——工作容积	L
D ——气缸直径	mm	X ——燃烧百分率	
$dQ_n/d\varphi$ ——瞬时刻放热量	kJ/[(°)(CA)]	A/F——空燃比	
K ——传热系数	W/(m ² ·K)	ε_c ——压缩比	
H_u ——燃料低热值	kJ/kg	η_{ei} ——有效热效率	
i ——气缸数		η_{ii} ——指示热效率	
κ ——等熵指数		η_m ——机械效率	
l_0 ——化学计量空燃比		η_s ——扫气效率	
n ——发动机转速	r/min	θ_{ij} ——喷油提前角	(°)(CA)
n_1 ——压缩多变指数		θ_{ig} ——点火提前角	(°)(CA)
n_2 ——膨胀多变指数		λ ——曲柄连杆比, 热导率	
P_e ——有效功率	kW	λ_p ——压力升高比	
P_i ——指示功率	kW	π_c ——增压比	
P_L ——升功率	kW/L	ρ_0 ——初始膨胀比	
P_m ——机械损失功率	kW	τ ——冲程数(四冲程 $\tau=4$, 二冲程 $\tau=2$)	
p ——压力		τ_i ——滞燃期	ms
p_a ——环境压力	kPa	$\phi_a(\lambda)$ ——过量空气系数	
p_b ——增压压力	MPa	ϕ_c ——充量系数	
p_{max} ——最高燃烧压力	MPa	φ_i ——滞燃期	(°)(CA)
p_{me} ——平均有效压力	MPa	ϕ_r ——残余废气系数	
p_{mi} ——平均指示压力	MPa	ϕ_s ——扫气系数	
p_{mm} ——平均机械损失压力	MPa	ϕ_{tq} ——转矩储备系数	
q_m ——质量流量	kg/s	φ ——曲轴转角	(°)(CA)
q_v ——体积流量	m ³ /s	φ_c ——凸轮轴转角	(°)(CaA)
S ——活塞行程	mm	φ_j ——喷油持续角	(°)(CA)
T_a, t_a ——环境温度	K, °C	Ω ——涡流比	



目录

前言		参考文献	74
常用符号		思考与练习题	74
第一章 概论	1	第五章 内燃机混合气的形成和燃烧	75
第一节 内燃机发展简史	1	第一节 内燃机缸内的气体流动	75
第二节 中国内燃机工业发展简史	4	第二节 汽油机混合气的形成	79
第三节 内燃机的典型构造与技术	7	第三节 点燃式内燃机的燃烧	84
参考文献	15	第四节 压燃式内燃机的燃烧	99
思考与练习题	15	参考文献	105
第二章 内燃机的性能指标	16	思考与练习题	106
第一节 示功图与指示性能指标	16	第六章 内燃机污染物的生成与控制	108
第二节 有效性能指标	19	第一节 概述	108
第三节 机械效率与机械损失	20	第二节 污染物的生成机理和影响因素	109
第四节 内燃机的升功率推算以及提高动力 性与经济性的途径	23	第三节 内燃机的排放控制	118
参考文献	26	第四节 内燃机的排气后处理	126
思考与练习题	27	第五节 排放法规简介	134
第三章 内燃机的工作循环	28	第六节 OBD 简介	137
第一节 内燃机的理论循环	28	参考文献	137
第二节 内燃机的实际循环	32	思考与练习题	138
第三节 四冲程内燃机的换气过程	34	第七章 内燃机的燃料供给与调节	139
第四节 提高内燃机的循环效率	38	第一节 概述	139
第五节 内燃机的增压	41	第二节 柴油机燃油系统	140
参考文献	53	第三节 燃油系统参数对柴油机性能的影响	150
思考与练习题	54	第四节 柴油机燃油电控系统及控制 策略	156
第四章 内燃机的燃料	55	第五节 电控汽油喷射系统	160
第一节 石油基燃料及标准	55	第六节 气体燃料供给系统	168
第二节 汽油的性能指标	57	参考文献	170
第三节 柴油的性能指标	60	思考与练习题	171
第四节 内燃机的替代燃料	63	第八章 内燃机的节能减排	172
第五节 燃料燃烧化学	68	第一节 内燃机的热平衡	172
第六节 燃料的全生命周期评价	72		



第二节 汽油机的节能技术	175	第一节 曲柄连杆机构运动学	213
第三节 柴油机的节能技术	182	第二节 曲柄连杆机构受力分析	214
第四节 提高内燃机效率的循环	188	第三节 内燃机质量平衡	219
第五节 内燃机的新型燃烧方式	189	第四节 曲轴轴系的扭转振动	226
参考文献	192	参考文献	233
思考与练习题	193	思考与练习题	233
第九章 内燃机的使用特性与匹配	194	第十一章 内燃机的概念设计	234
第一节 内燃机的工况	194	第一节 内燃机的设计要求	234
第二节 内燃机的负荷特性	195	第二节 内燃机类型的选择	236
第三节 内燃机的速度特性	198	第三节 内燃机基本参数的选择	239
第四节 内燃机的万有特性	202	第四节 内燃机开发的程序与方法	243
第五节 内燃机的功率标定及大气校正	205	第五节 内燃机主要零件设计要点	246
第六节 内燃机与工作机械的匹配	207	第六节 配气机构设计要点	266
参考文献	211	第七节 润滑系、冷却系与起动系	275
思考与练习题	211	参考文献	277
第十章 内燃机动力学	213	思考与练习题	278



第一章

概 论

第一节 内燃机发展简史

内燃机是一种燃料在机器内部燃烧释放能量对外做出机械功的热机。本书只介绍点燃式发动机（汽油机，也能燃用其他高辛烷值燃料）和压燃式发动机（柴油机，也能燃用其他高十六烷值燃料）。燃气轮机也是内燃机的一种，但它的工作原理与汽油机和柴油机的完全不同，因而不在于本书讨论范围之内。内燃机的热效率高、结构简单、比质量小、比体积小、价格便宜、耐久可靠、运行成本低，且能够符合相关的排放法规，因而广泛应用于交通运输（陆地、内河、海上和航空）、农业机械、工程机械和发电等领域。

150年来，内燃机的研究与发展凝聚了众多科学技术人员的聪明智慧，历史上具有重要影响的产品发明与制造大致如下：

一、大气压力式内燃机

1860年，定居在法国巴黎的比利时人莱诺依尔（J. J. E. Lenoir，1822—1900）发明了大气压力式内燃机。该内燃机的工作过程是煤气和空气在活塞的半个行程吸入气缸，然后被火花点燃，后半程为膨胀行程，燃烧的煤气推动活塞下行膨胀做功，活塞上行时开始排气行程。这种发动机在燃烧前没有工质压缩，膨胀比也较小，其热效率低于5%，最大功率只有4.5kW左右。1860—1865年共生产了约5000台。大气压力式内燃机及工作循环如图1-1所示。

奥托（Nicolaus A. Otto，1832—1891）和浪琴（Eugen Langen，1833—1895）受莱诺依尔煤气机的启发，发明了一种更为成功的大气压力式内燃机，并在1867年巴黎博览会上展出。它利用燃烧所产生的缸内压力升高，在膨胀行程时加速一个自由活塞和齿条机构，它们的动量将使气缸内产生真空，然后大气压力推动活塞内行。齿条通过滚轮离合器与输出轴相啮合，输出功率。这种发动机热效率可达11%，共生产了近5000台。奥托-浪琴的发动机如图1-2所示。

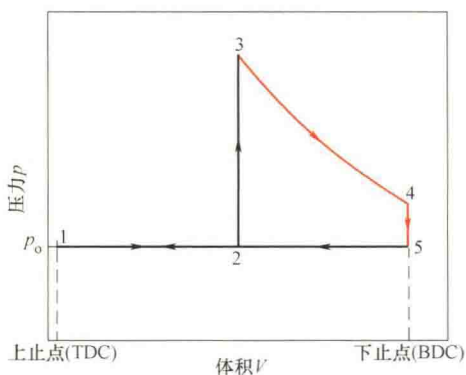
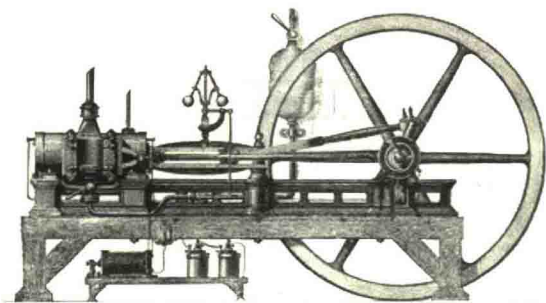


图 1-1 大气压力式内燃机及工作循环

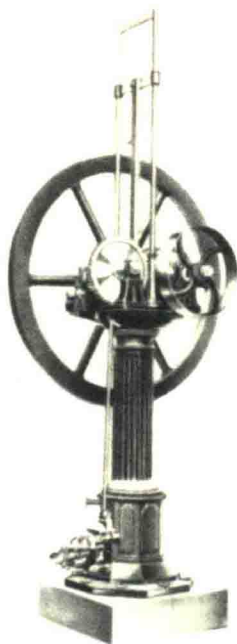


图 1-2 奥托-浪琴的发动机

大气压力式煤气机虽然比蒸汽机具有更大的优越性，但仍不能满足交通运输业所要求的高速、轻便等性能要求。

二、四冲程内燃机

1876年，奥托完成了一种四冲程循环的内燃机的发明制造。该机器拥有进气、着火前的压缩、燃烧膨胀与排气交替进行的四个活塞行程，克服了以前的大气压力式内燃机热效率低、质量大的缺点，使发动机的热效率提高到了14%，而质量则减小了近70%，从而能够有效地投入工业应用。至1890年，生产约50万台机器销往欧洲和美国。奥托的四冲程内燃机及工作循环如图1-3所示。

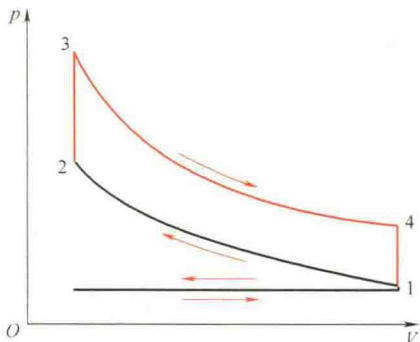
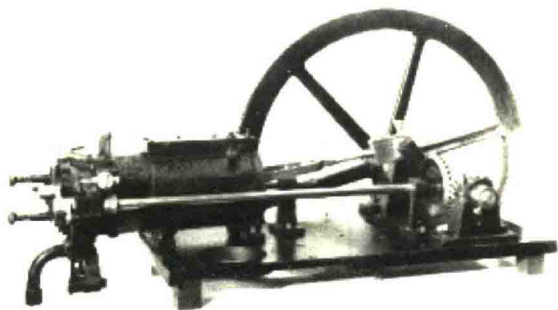


图 1-3 奥托的四冲程内燃机及工作循环



奥托 (Nicolaus A. Otto)

1832 年出生于德国霍兹豪森镇，卒于 1891 年科隆。1860 年以后，陆续完成了多种内燃机制造技术的发明，1876 年完成了具有划时代意义的四冲程点燃式内燃机的发明创造。

三、二冲程内燃机

1878 年，英国人克拉克 (Dugald Clerk, 1854—1913) 完成了一款通过顶置进气门轴流扫气的二冲程内燃机的发明 (混合气由顶部气门进入气缸，与现在的轴流扫气方案正好相反)。

1897 年，德国人奔驰 (Karl Benz, 1844—1929) 独立完成了与之类似的曲轴箱预压缩进气二冲程内燃机的发明。

四、压燃式内燃机

1892 年德国工程师狄塞尔提出了一种新型内燃机的专利，即在压缩终了将液体燃料喷入缸内，利用压缩终了气体的高温将燃料点燃，它可以采用大的压缩比和膨胀比，没有爆燃，热效率比当时其他的内燃机高一倍。这一发明在 5 年之后终于变成一个实际的机器，即柴油机。狄塞尔的柴油机及工作循环如图 1-4 所示。

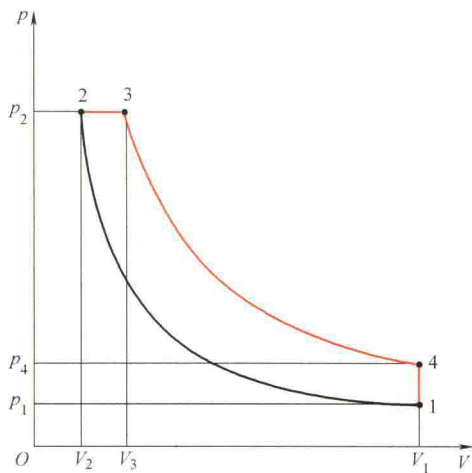
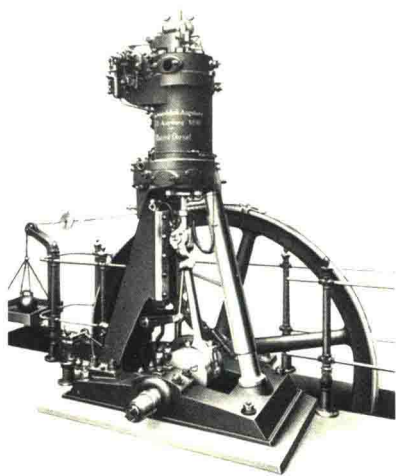


图 1-4 狄塞尔的柴油机及工作循环



狄塞尔 (Rudolf Christian Karl Diesel)

1858 年出生于巴黎，卒于 1913 年。1893 年获得压燃式内燃机专利，并于 1896 年试制成功，1897 年完善为液体燃料喷射定压加热循环模式的水冷机型，是世界上第一台柴油机的发明者。



五、转子发动机

1957年,汪克尔(F. Wankel)通过多年的努力,在成功地解决了密封与缸体震纹之后,实现了他的三角活塞转子发动机的发明。它的零件数少、体积小、转速高、质量小、功率大。除燃用汽油燃料外,转子发动机现在也可以燃用重质燃料,如柴油等,在赛车、无人机和小型发电机组等领域获得了较好的应用。汪克尔的发动机主要部件与工作原理如图1-5所示。

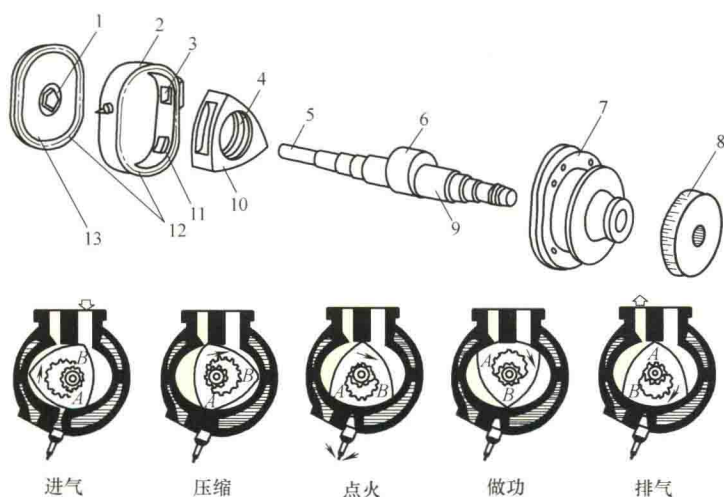


图 1-5 汪克尔发动机主要部件与工作原理

1—固定定时齿轮 2—缸体 3—排气道 4—定时内齿轮 5—驱动端 6—偏心轮
7、13—端盖 8—飞轮 9—偏心轴 10—转子 11—进气道 12—冷却水通道

内燃机已经历了一个半世纪的发展,在内燃机燃烧理论的指引下,通过材料、机械加工、燃料和电子控制等技术的进步,其耐久可靠性、动力经济性以及比体积或比质量功率等技术指标的强化程度不断提高,满足了绝大部分固定和移动用途的要求,因而取得了巨大的成功和广泛的应用,并带动了包括石油炼制、钢铁、汽车等上下游产业的发展,是名副其实的国民经济支柱产业。特别是近30年来,随着排放法规的实施,极大地推动了内燃机科学与技术的进步。在可预见的将来,内燃机依然是汽车等移动机械的主要动力源,但越来越严苛的排放法规和经济法规(CO₂排放法规)的实施,特别是电动汽车的发展,对内燃机工作者提出了新的挑战。

第二节 中国内燃机工业发展简史

从1908年广州的均和安机器厂仿制成第一台煤气机开始,中国内燃机工业至今已经走过了百年。内燃机工业在中国的发展历史可以概括地分为内燃机工业初创期、内燃机工业体系的建设期和内燃机工业飞速发展期三个阶段。

一、内燃机工业初创期(1908—1949)

1901年冬,上海出现由外国人带入的汽车,外国生产的内燃机作为商品也开始进入我



国口岸。据统计,仅上海一地,先后有 20 多个洋行(外国人办的商行)在我国推销英、德、美、法等国生产的 30 多种型号的内燃机。由于内燃机在性能上比蒸汽机优越,有市场需求,继 1908 年广州的均和安机器厂的 5.88kW 单缸卧式煤气机及 1915 年广州的协同和机器厂制成的第一台 29.4kW 烧球式柴油机之后,1924 年上海新祥和机器厂制成了 11.76kW 和 17.05kW 等 5 种不同规格的压缩着火四冲程低速柴油机。上海新中工程公司于 1929 年制成我国第一台功率为 26.47kW 双缸柴油机,1937 年仿制出 35 马力(1 马力 = 735.499W)的帕金斯(Perkins)高速柴油机,1939 年仿制出 1800r/min、65 马力的 MAN 高速车用柴油机,并参照生产出 1500r/min、45 马力的煤气机。这表明中国已由制造结构比较简单的单缸卧式低速柴油机,发展到技术要求较高的多缸柴油机和车用高速柴油机。

1949 年,全国内燃机总的生产能力为 7000kW 左右,从 1908 年到 1949 年累计生产内燃机不足 14 万 kW,内燃机生产厂家主要分布在广州、上海、无锡、常州、福州、昆明、太原、长沙和天津等地。

二、内燃机工业体系的建设期(1950—1979)

1. 内燃机工业体系初建期(1950—1957)

1949 年新中国成立后,在经济建设恢复的 3 年(1950—1952)期间,我国的内燃机工业迅速得到了恢复。上海柴油机厂试制成功 110 系列柴油机,天津动力机厂研制成功 4146 柴油机,上海与天津建立油泵油嘴生产点。至 1952 年,我国内燃机产量就达到了 3 万 kW。

在第一个五年计划(1953—1957)期间,通过自主开发、仿制和接受援建等,我国建成了内燃机工业第一批骨干企业,如现在的知名企业上海柴油机厂、无锡柴油机厂、济南柴油机厂、潍坊柴油机厂、河南柴油机厂、陕西柴油机厂、常州柴油机厂、宁波动力机厂等,并着手按专业化生产方式组织内燃机配附件生产,形成完整系列的小功率单缸到多缸大功率柴油机及多种型号的汽油机的开发与生产能力。最值得纪念的当属 1956 年在长春建成年产 3 万辆装载质量为 4t 的解放牌汽车的第一汽车制造厂,同时生产功率为 66kW 的 CA10 型六缸汽油机。同年,南京汽车厂开始生产功率为 37kW 的 NJ-50 型四缸汽油机,等等。到 1957 年,全国知名的内燃机骨干企业已有 34 家之多,内燃机产量已经达到 50 万 kW,我国内燃机工业已初具规模。这一时期引进机型虽然不多,但引进的是成套技术和装备,对我国内燃机工业的大量生产起到了示范作用,为后续发展奠定了基础。

2. 内燃机工业体系建设期(1958—1979)

1958 年,上海柴油机厂试制成功了可与汽车、工程机械、船舶、农业机械、发电机等多种用途配套的 135 系列柴油机,它是我国由仿制到自行设计、由小批量转为大批量生产的第一个中小功率系列柴油机。

在拖拉机与农用柴油机方面,1959 年建成了洛阳第一拖拉机厂,生产东方红 54 型履带式拖拉机与 4125 型柴油机。该厂从苏联引进了柴油机先进生产技术与由专用机床组成的流水生产线,引进了具有当时国际先进水平的油泵油嘴生产技术与检测设备。天津拖拉机厂引进并生产东方红 40 拖拉机和 4105 型柴油机。北京内燃机总厂引进与铁牛 55 型拖拉机配套的 4115 型柴油机。在当时的农业机械部的领导组织下,有关工厂还先后研制开发了多种型号(165、175、195 系列)的小型单缸农用柴油机,推动了我国农业机械化进程。

在大功率柴油机方面,我国自行设计了 12V180 型机车用柴油机、6250Z 型增压柴油机



(用于发电与船舶)以及6300系列柴油机(用于船用、发电、排灌)等。

在排气涡轮增压器与增压柴油机方面,1958年新中动力机厂研制成功我国第一台轴流式T250X型排气涡轮增压器及882kW的8L350Z型柴油机,之后有关单位先后研制成功10号径流式增压器(配6135型柴油机)和12号径流式增压器(配6160型柴油机)。

20世纪60年代中期,全国已建成内燃机主机生产厂家近百家,零部件企业超过200家,成立了上海内燃机研究所、山西车用发动机研究所、天津内燃机研究所和上海船用柴油机研究所及长春汽车研究所、洛阳拖拉机研究所、大连热力机车研究所(大连内燃机车研究所)、中国农业机械化科学研究院等科研单位,天津大学、上海交通大学、西安交通大学、吉林大学(吉林工业大学)等30多所高等院校设立了内燃机专业,形成产学研相结合的科技攻关联合队伍,初步完成了系统全面的内燃机工业建设。

“文革”时期,为了到1980年基本上实现农业机械化,片面强调内燃机工业主要为农业机械化服务,内燃机企业盲目发展,低水平重复建设,内燃机企业从60余家猛增到270多家,内燃机产量也从1280万kW增长到1840万kW。内燃机工业在产品结构、技术、工艺和管理等低水平趋同。期间,虽然有二汽10万台的车用汽油机的建成投产,船舶、铁道、军工等部门研制并投产了多种新的内燃机型,在内燃机的生产数量和品种发展上仍有较大的进步,但总的来说只是生产规模的扩大,技术进步不显著,拉大了与国外先进技术水平的差距。

三、内燃机工业飞速发展期(1980—现在)

1979年10月党的十一届三中全会以后,我国实行改革开放的政策,国民经济进入快速发展通道,中国汽车和内燃机工业也迎来全面发展的新时代。内燃机工业进行了一系列调整整顿工作,通过引入市场机制,推行全面质量管理,引进国外先进技术和对企业进行技术改造等,我国内燃机的技术水平有了明显提高。这一时期引进与技术合作开发的新产品种类繁多,主要有:摩托车汽油机和小型通用汽油机;微型汽车和桑塔纳、捷达、富康、通用、本田等轿车汽油发动机;依维柯索菲玛、日本五十铃、康明斯和斯太尔等系列柴油机。船机方面一般采用引进许可证协议的方式生产,如日本大发、MAN、法国热机协会的PA与PC系列柴油机等。此外,还有许多工厂完成了老机型的技术升级改造,并积极开发新机型。整机生产的大发展带动了诸如活塞、增压器、燃油系统及汽车电子和尾气净化器等一大批零部件行业和企业的陆续崛起。

2000年以来,我国国民经济的壮大和人民生活水平的提高,带动了汽车工业的快速发展,汽车产销量由2000年的200万辆左右发展到2015年的2450多万辆。2010年以来,我国内燃机年产量连续保持在7300万台以上的规模,总功率达15亿kW左右。我国已成为全球内燃机生产和使用大国,内燃机的设计开发水平也有了很大提高,满足了汽车、摩托车、工程机械、发电以及船用配套在规模和技术水平上不断提高的需求,内燃机工业发展取得了举世公认的成就。与此同时,内燃机工业积极实施走出国门的战略,完成了一系列战略合作与兼并,中国内燃机工业已融入世界内燃机工业体系。目前,我国已成为内燃机生产制造大国,汽车与内燃机产品国际市场的激烈竞争,将持续有力地推动我国内燃机工业的技术进步,逐步使我国成为内燃机创新创造强国。

随着我国汽车保有量的增加,为控制汽车排气对环境的污染,相继发布和实施了不同阶



段的汽车排放标准。对轻型汽油车,我国从2000年起实施国I汽车排放标准,经过十余年的发展,2011年全国范围内实施国IV排放标准。2013年北京市还率先实施了相当于欧V的京V地方标准,正力争2017年实施第六阶段机动车排放标准。对于中重型车(柴油机),2000年起实施国I排放标准,2007年和2015年分别实施国III和国IV排放标准。不同阶段排放标准的实施,有力推动了我国内燃机工业和技术的发展。

为减少汽车与内燃机对日益短缺的石油基燃料的依赖,我国正在实施能源多元化战略,国家鼓励发展新能源汽车研发与应用。

第三节 内燃机的典型构造与技术

内燃机燃用经济而又高能的石油基燃料,以其低价、高效、高动力性、坚固耐用和排放符合法规等优点,在道路和非道路及其他众多领域获得了大量的应用。

内燃机种类及分类方法有很多,均可按着火方式分为点燃式和压燃式两类,按常见用途又可分为小型汽油机(主要有通用小型汽油机和摩托车汽油机)、车用发动机、非道路车辆用发动机、船用和固定用途发动机4类。不同用途的内燃机工作过程和原理虽然是相同的,但在结构和燃烧与排放控制等方面具有不同的特点,以下仅就车用汽油机和柴油机做一简单介绍。

一、车用汽油机

车用汽油机是人们最为熟知的一类,广泛用于轿车、轻型车和微型车,气缸数为3~12缸不等,它们的平衡性好,输出转矩较为均匀,满足汽车驾驶性的要求。1.2L排量以下为3缸,1.2~2.5L排量的发动机以直列四缸机居多,六缸机的排量通常为2.5~4.5L,一般采用V形布置方案。V8和W12缸机也是常用的发动机机型,它们结构紧凑,排量更大,可以获得非常高的转矩和功率。

追求卓越、满足社会节能减排和人们消费的需求,带动了车用汽油机技术的不断进步,诸如可变气门正时(VVT)、汽油缸内直喷(GDI)、小型轻量化(Downsizing)、增压(Super/Turbocharging)及可变增压(VGT)等技术,大大提高了发动机和整车的燃油经济性,减少了有害气体和CO₂温室气体的排放。

各大汽车公司,尤其是乘用车公司,均有自己的发动机厂家,便于整车传动系统的调校,在此不可能一一列举全部的发动机及其特征等,下面仅以长安汽车股份有限公司的进气道喷射、缸内直喷和混合动力汽油机为例,做一些简单介绍。

1. 进气道喷射汽油机

进气道喷射汽油机,由于喷油压力低对燃油供给系统要求不高,能够实现燃油供给量的较精确控制以及各缸之间的均匀分配,满足现阶段对排放控制的要求。成本低的优势使其仍然成为当前阶段乘用车的主要动力配置方案。

图1-6所示为长安汽车股份有限公司生产的H16DVVT发动机外观及剖视图,其基本性能参数见表1-1,为直列、4缸、四冲程、电控多点进气道顺序喷射、水冷汽油机。发动机采用双顶置凸轮轴(DOHC)驱动16气门、液压挺柱和滚子摇臂减摩配气机构,配双可变气门正时(DVVT)和高滚流燃烧系统。H16DVVT的电控系统为德尔福公司的Delphi-MT62

或博世公司的 Bosch-MT1788。排放控制方面,采用前氧 λ 闭环,单级催化紧耦合布置,加快三效催化器起燃,有效转化尾气排放物,配备车载故障诊断系统(OBD II),能满足国V排放标准。

表 1-1 H16DVVT 发动机的基本性能参数

机型	缸径×行程	排量	压缩比	最大功率/转速	升功率	最大扭矩/转速	最低燃油消耗率
	mm×mm	mL		kW/(r/min)	kW/L	N·m/(r/min)	g/(kW·h)
H16DVVT	78×83.6	1598	10.8	92/6000	58	160/4000~5000	238

该机型搭载于长安逸动、悦翔V7、CS35等多款乘用车,有MT、AT及DCT三种不同传动配置,几种车型百公里油耗为6.2~7.2L不等,具有低油耗和优异的NVH性能,目前已累计投放市场近100万台。

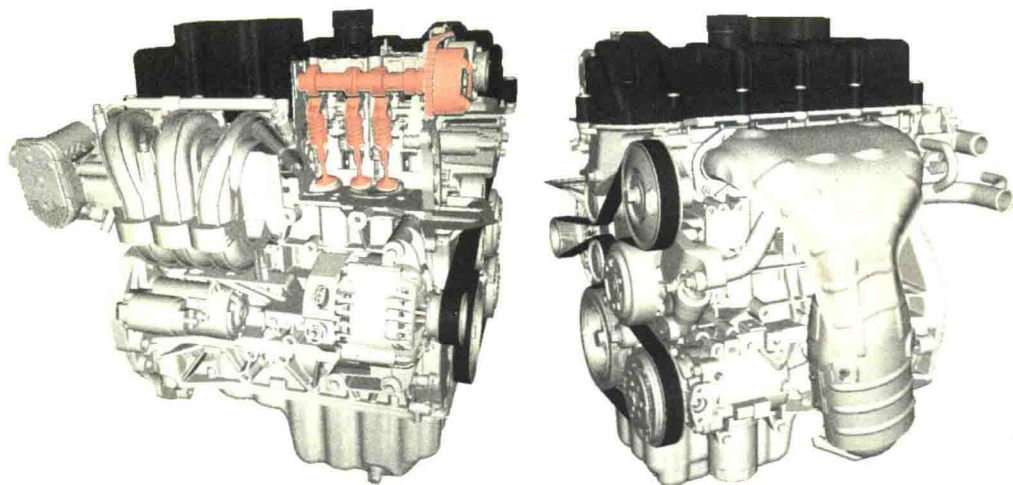


图 1-6 H16DVVT 发动机外观及剖视图

2. 缸内直喷汽油机

缸内直喷汽油机是将汽油经喷油器直接喷入气缸,相比于气道喷射方式,避免了进气道黏附油膜现象,更易实现精准控制喷油。通过匹配废气涡轮增压器,进一步提高发动机的动力性和经济性,降低整车燃油消耗。

图 1-7 所示为长安汽车生产的 H15TGDI 发动机外观及剖视图,其基本性能参数见表 1-2。该发动机为直列 4 缸四冲程水冷汽油机,采用 DOHC 驱动 16 气门,双可变气门正时,滚子摇臂和轻量化小轴颈低摩擦设计技术;电控系统为德尔福公司的 Delphi-MT92,缸内直喷系统采用德尔福高压燃油喷射油轨,喷射压力可达 15MPa,喷油器为 6 孔,喷雾粒径小于 $10\mu\text{m}$,充分保证燃油的雾化均匀和混合,配合高滚流燃烧系统,提高燃烧效率和燃油经济性;增压系统采用博格华纳公司的排气涡轮增压器,实现发动机的小型化,提高升功率;排放控制方面,采用前氧 λ 闭环,两级催化控制:前置催化器快速起燃,减少起动阶段污染物排出,后级催化器满足高排气流量下的废气转化能力需求,有效转化尾气排放物,配备车载故障诊断系统(OBD II),能满足国V排放标准,可升级至欧VI排放标准。

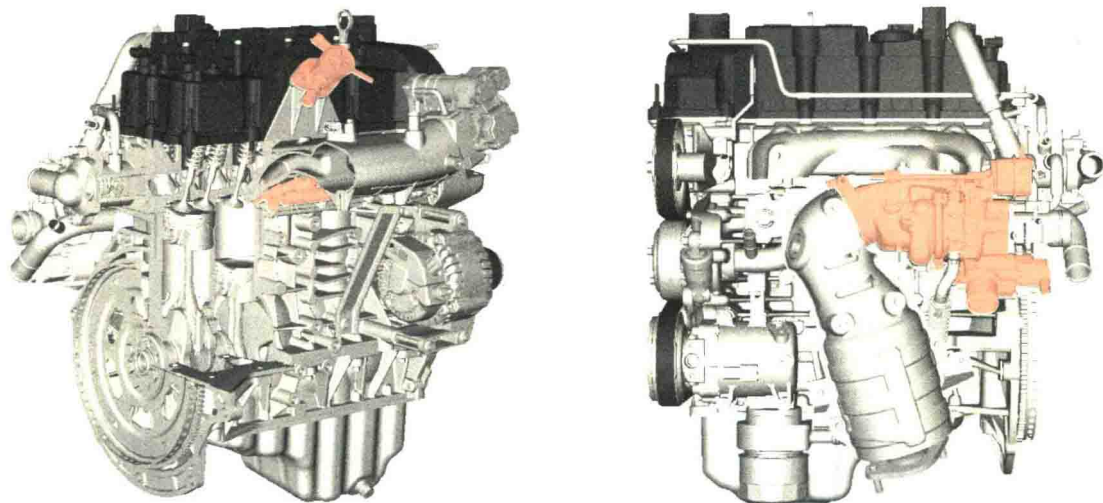


图 1-7 H15TGDI 发动机外观及剖视图

表 1-2 H15TGDI 发动机的基本性能参数

机型	缸径×行程	排量	压缩比	最大功率/转速	升功率	最大扭矩/转速	最低燃油消耗率
	mm×mm	mL		kW/(r/min)	kW/L	N·m/(r/min)	g/(kW·h)
H15TGDI	76×82.6	1499	10	125/5000~5500	83.3	230/1950~4500	241

该机型匹配长安逸动，从起动到 100km/h 实测加速时间为 8.86s，具有优秀的动力性能。虽然该机为抑制爆燃倾向，设计采用了较低的压缩比，并适当加强了冷却、润滑，再加上凸轮轴驱动的高压燃油泵等，相比 H16DVVT 发动机在相同扭矩下的油耗略有升高，但与目前 2.0L 自然吸气发动机相比，在相同动力性的条件下，可使如长安睿骋、CS75 等高级别车型的整车油耗下降 10% 以上。

3. 混合动力汽油机

混合动力汽油机通常是根椐混合动力汽车运行特性，在汽油机基础上进行升级开发的，包含了汽油机与电动机混合动力系统。图 1-8 所示为长安汽车股份有限公司生产的混合动力汽油机。该混合动力汽油机由一台 H15 阿特金森循环（Atkinson Cycle）汽油机以及集成的起动电动机和发电机 ISG（Integrated Starter Generator）组成，发动机和电动机的主要技术参数见表 1-3。混合动力装置的发动机是直列 4 缸四冲程、电控多点气道顺序喷射、水冷汽油机，采用了 DOHC 16 气门双可变气门正时排气系统，为突出节能减排的效果，发动机的压缩比由 10.4 提升至 13.0，并通过配气正时调节实现高效的阿特金森循环，提高了循环热效率。组合中空凸轮轴、变排量机油泵、电子节温器和低摩擦活塞环等先进低摩擦技术，提高了发动机的机械效率。配套的 ISG 电动机是高性能永磁风冷电动机，可实现与发动机工况的灵活转换调节（轻度混合）。整机具有结构简单，布置方便灵活的特点。

H15-AC 混合动力汽油机搭载逸动混合动力车型，在低速下采用电动机驱动模式，避免了发动机运行于低负荷、低效率区域，保证了高效的经济性和优秀的加速性能；同时在中高速工况，由于电动机的助力作用，保证了整车优越的动力性能；通过整车的策略控制，当整车动力需求较低时，可调整发动机运行于效率较高的中高负荷区域，保证整车驱动同时进行

电池充电，实现整车综合燃油消耗最优。该车型可实现百公里燃油消耗 5.4L，整车满足国 V 排放标准。

表 1-3 H15-AC 混合动力装置的主要技术参数

机型	缸径×行程	排量	压缩比	最大功率/转速	升功率	最大扭矩/转速	最低燃油消耗率
	mm×mm	mL		kW/(r/min)	kW/L	N·m/(r/min)	g/(kW·h)
H15	78×78.5	1500	13.0	80/6000	53.4	138/4500~5000	235
电动机	额定转矩/转速	额定功率/转速	峰值扭矩/转速	峰值功率/转速	额定转速	最高转速	堵转力矩
	N·m/(r/min)	kW/(r/min)	N·m/(r/min)	kW/(r/min)	r/min	r/min	N·m
ISG	43/(0~3000)	13.5/3000	105/(0~1850)	20.25/3000	3000	6000	105

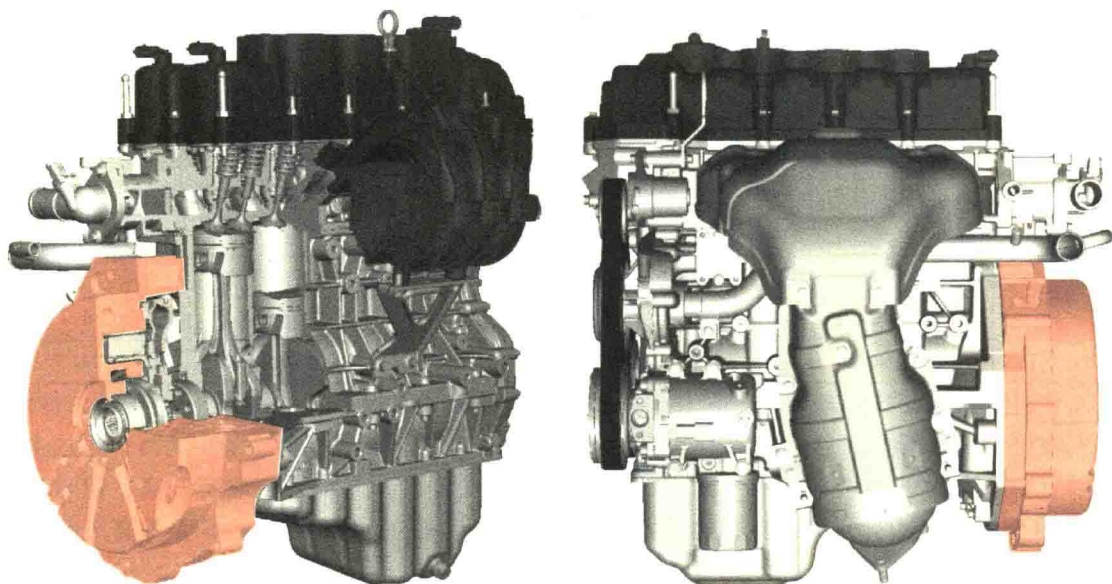


图 1-8 H15-AC 混合动力汽油机

4. 汽油机的结构与技术分析

乘用车用汽油机的压缩比较小，缸内燃烧最高压力较低，所以整机机械负荷低，机体缸盖可以采用铝合金材料，传热性能好，整机重量轻。发动机的机械负荷较小，可以进一步采用轻量化活塞连杆曲轴和低摩擦活塞及环组设计，提高发动机的机械效率。

汽油机采用火焰传播燃烧方式，需要进气滚流，以提高燃烧过程的湍流强度；燃烧室为蓬顶形，火花塞置顶，火焰传播距离短，能够缩短燃烧持续期，对提高发动机的压缩比和降低汽油辛烷值，提高发动机循环的热效率等，提供了结构保证。

汽油机燃烧均质混合气，采用变量调节，在活塞吸气过程，由于活塞前后压差产生吸气负功，影响循环效率和燃油经济性，采用可变进气正时，或进排气双可变正时，不仅能够减少进排气损失，还能够实现压缩比和膨胀比不同的循环方式，进一步提高发动机热效率和降低排放。

发动机转速高，进排气流速快，易出现超临界流动状态，进排气流动阻力大。为提高发