

高等内燃机学

魏春源 张卫正 葛蕴珊 编 著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书系统阐述了内燃机及相关学科的基础知识、物理概念、技术特征及内在规律，反映了国内外内燃机产品开发中的一些技术重点与难点，总结了我国在内燃机生产、开发、研制中的经验与技术。全书共分十四章，它们之间既有联系，又有相对的独立性。

本书供高等院校热力工程和动力机械专业研究生使用，也可供汽车、内燃机等行业工程技术人员和有关院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等内燃机学/魏春源，张卫正，葛蕴珊编著. —北京：北京理工大学出版社. 2001. 9
ISBN 7-81045-840-X

I. 高… II. ①魏…②张…③葛… III. 内燃机-理论 IV. TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 049846 号

责任印制：刘京凤 责任校对：郑兴玉

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区中关村南大街 5 号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 620 千字

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

印数：1—4000 册 定价：30.00 元

※图书印装有误，可随时与我社退换※

前 言

发电机将机械能变为电能。

电动机又将电能变为机械能。

液力马达将液体的压力能变为机械能。

太阳能电池将太阳能变为电能。

原子能动力装置将原子能变为热能再推动汽轮机变为机械能。

蒸汽机是将燃料的化学能变为热能，再变为机械能。总之，所有动力装置或原动机都是将一种形式的能变为另一种形式的能。从广义的概念出发，它们都是换能器。

内燃机也是一种换能器。其基本原理是将燃料中的化学能变为热能，再由热能变为机械功。化学能变为热能是通过燃料在气缸中（这是内燃机有别于其它热机，如蒸汽机的显著区别）燃烧而获得。燃烧所需的氧气来自吸入气缸中的空气。为使热能变为机械功，必须通过介质使其在气缸中的压力增高，推动活塞膨胀而作功。内燃机所用的介质是空气和燃料（常用的如汽油、柴油及可燃气体等）混合气与在一定条件下燃烧后的空气和燃烧气体。为了使内燃机能连续作功，上述过程必须反复运行，且所有的介质必须更换。

一种换能器的优劣，首先要看它从一种形式的能转换到另一种形式的能的转换效率、能量载体的可携带性和换能器的方便程度。内燃机自 1876 年在德国问世以来，经历了一个多世纪的不断发展与完善、高新技术的不断注入使其在性能、经济性、可靠性、使用方便性、外形、质量等方面发生了显著的变化，但是它的基本原理没有改变。内燃机的发展是与车辆、船舶、飞机、发电机组等的需要，特别是汽车的发展息息相关。人们（社会）对汽车的需求推动了汽车等行业的发展，从而也促进了内燃机的发展，内燃机的大发展又推动了汽车等行业的大发展。纵观内燃机的发展史，内燃机之所以长盛不衰，具有活力的内在因素是其自身的技术进步。高等内燃机学旨在简要阐述内燃机的一些技术重点与难点，包括内燃机的性能、工作过程、结构强度、热损伤、可靠性、摩擦磨损、故障诊断、动力传动系统、环境保护、使用工况等各个方面，涉及到多学科和跨学科领域。其中大部分内容是我们在长期的研究生教学和科学研究工作中累积而成的。我们希望通过本书的出版能有助于读者深入了解内燃机及其相关领域的技术进步与发展。

本书在内容上着重从基本概念、技术特征、内在规律及相互联系等方面进行叙述与分析，力求做到深、浅结合，有深度又有广度，使本专业人员有所收获，其他专业的人也能对该领域的知识有所了解。

本书还力求通过内燃机技术发展的一个侧面说明科学技术发展和进步的内在动力和外部条件，以在更高层次上加强对学生思维能力的培养和产品开发能力、应用能力的提高。

《高等内燃机学》在编写过程中精选了大量插图，给出了丰富的数据和实例，力求做到无形和有形、学术与技术、定性与定量的结合。

本书涵盖的信息量大，各章间既相互联系，又有独立性，可按教学任务的要求有所侧重，有所取舍。

清华大学程宏教授、北方交通大学贾萍穗教授各自主审了本书全部内容并提出了宝贵的

建议和修改意见，作者表示衷心感谢。

在本书编写过程中得到了有关专家、学者的多方帮助与支持，在此也向他们表示诚挚谢意。

由于本书涉及的知识面广，跨度大，且涉及到一些其它学科和领域，而我们的水平有限，不当之处恳请读者批证指正。

作 者

2000 年 12 月于北京

目 录

第一章 内燃机的过去、现在与未来·····	(1)
第一节 内燃机的孕育·····	(1)
第二节 内燃机及汽车的诞生·····	(2)
第三节 车用内燃机的发展·····	(3)
第四节 车用内燃机的未来·····	(6)
参考文献·····	(9)
第二章 内燃机的热力循环分析·····	(10)
第一节 汽油机和柴油机的基本热力循环分析·····	(10)
第二节 内燃机的其它热力循环分析·····	(23)
参考文献·····	(29)
第三章 工作过程仿真计算·····	(30)
第一节 气缸中真实工作过程的仿真计算·····	(30)
第二节 气体在进排气管系中流动过程仿真计算模型简介·····	(46)
参考文献·····	(53)
第四章 废气排放与净化措施·····	(54)
第一节 排放的由来、途径与成分·····	(54)
第二节 排放物的危害·····	(56)
第三节 影响有害物排放的各种因素·····	(57)
第四节 排气净化的主要技术途径·····	(60)
第五节 限制汽车排放的法规·····	(72)
第六节 车用燃油的发展及效果·····	(79)
参考文献·····	(85)
第五章 摩擦与磨损·····	(87)
第一节 摩擦的基本概念、摩擦定律和影响因素·····	(87)
第二节 内燃机中的摩擦损失·····	(90)
第三节 磨损·····	(108)
第四节 内燃机中主要零件磨损·····	(112)
参考文献·····	(120)
第六章 内燃机热损伤·····	(121)
第一节 热损伤及研究范围·····	(121)
第二节 高温蠕变与松弛·····	(122)
第三节 低循环疲劳寿命研究·····	(130)

第四节	高温低循环疲劳与热疲劳强度·····	(143)
第五节	疲劳、蠕变交互作用及寿命·····	(150)
参考文献	·····	(152)
第七章	内燃机故障诊断·····	(154)
第一节	故障诊断及内容·····	(154)
第二节	特征分析·····	(157)
第三节	状态识别·····	(165)
第四节	专家系统诊断原理·····	(173)
参考文献	·····	(177)
第八章	内燃机可靠性·····	(179)
第一节	可靠性的基本概念·····	(179)
第二节	零件强度的可靠性·····	(186)
第三节	系统可靠性·····	(195)
第四节	内燃机可靠性试验·····	(208)
参考文献	·····	(215)
第九章	增压与匹配·····	(216)
第一节	增压与增压器的基本知识·····	(216)
第二节	废气涡轮增压器·····	(222)
第三节	增压器与内燃机的匹配·····	(230)
第四节	改善增压内燃机加速性和部分负荷性能的主要措施·····	(258)
参考文献	·····	(261)
第十章	内燃机电子控制技术·····	(262)
第一节	内燃机电子控制技术的发展与现状·····	(262)
第二节	汽油机电子控制系统·····	(263)
第三节	柴油机电子控制系统·····	(281)
第四节	柴油机发电机组转速电子控制(电子调速器)·····	(290)
参考文献	·····	(301)
第十一章	内燃机噪声及控制·····	(302)
第一节	噪声的危害及其物理度量·····	(302)
第二节	内燃机的噪声源·····	(305)
第三节	燃烧噪声及控制·····	(305)
第四节	机械噪声及控制·····	(312)
第五节	内燃机表面辐射噪声·····	(314)
第六节	气体动力噪声·····	(317)
第七节	消声器·····	(320)
参考文献	·····	(324)
第十二章	内燃机振动控制·····	(326)

第一节	内燃机振动分类与评价·····	(326)
第二节	内燃机隔振理论基础·····	(329)
第三节	橡胶隔振器·····	(332)
第四节	液压悬置·····	(342)
第五节	内燃机轴系振动控制·····	(346)
参考文献	·····	(352)
第十三章	汽车动力传动系统及匹配·····	(353)
第一节	动力传动系统结构类型·····	(353)
第二节	汽车的动力性·····	(355)
第三节	汽车的燃油经济性·····	(363)
第四节	内燃机使用特性对汽车动力性、经济性的影响·····	(365)
第五节	汽车动力装置参数的确定·····	(368)
第六节	汽车动力性和燃油经济性的评价·····	(372)
第七节	汽车动力传动系统的最优匹配·····	(375)
参考文献	·····	(377)
第十四章	内燃机的使用工况与结构可变的柔性内燃机·····	(378)
第一节	内燃机的使用工况·····	(378)
第二节	结构可变的柔性内燃机·····	(385)
参考文献	·····	(398)

第一章 内燃机的过去、 现在与未来

第一节 内燃机的孕育

1673—1680年荷兰物理学家柯·惠更斯(Christian Huygens)首先提出了真空活塞式火药燃烧的高温燃气在气缸中冷却后形成真空而带动活塞做功,在人类历史上第1次把燃气与活塞联系起来,实现了“内燃”。1690年惠更斯的朋友和助手,一位法国医生德·巴本(Deni Papin)在火药机试验不断失败后,采用了相当于真空原理的用水蒸气作工质的活塞式发动机,成为近代蒸汽机的直接祖先。蒸汽机用煤作燃料,采用外燃的方法。由于蒸汽机这一技术的科学性、合理性并符合当时的生产条件,在社会上得到了广泛的研究与改进,终于在1705—1711年英国人纽卡姆(New Comen)制成了矿井用的直立气缸密封式活塞、缸内喷水冷却的真空式蒸汽机,热效率不到1%。

1776年英国人瓦特(Watt)改良了纽卡姆蒸汽机,发明了水汽分离冷凝器,大大完善了蒸汽机,热效率达3%,对蒸汽机的近代化作出了贡献,开始了蒸汽机时代,在世界范围内掀起了第一次工业革命。

1814—1829年英国人史蒂芬森(Stevenson)制成了蒸汽机车。蒸汽机的发展、推广、应用经历了约70年。从19世纪中叶开始到20世纪20~30年代的又一个70年为蒸汽机广泛应用的全盛时期。

就在蒸汽机大出风头的时候,人们没有放弃对其它动力装置的追求。但直到社会的需求和蒸汽机固有的缺点突出出来时,内燃机才得到了发展的动力。

早在1794年,英国人罗伯特·斯却里塔(Robert Street)提出燃用松节油或柏油的内燃机原理,首次提出燃料与空气混合的原理。1799年法国化学家莱蓬(Lebon)建议采用照明煤气作燃料并用电火花点火。1820年英国人塞歇尔(W. Cecil)用氢煤气作燃料,使内燃机以60r/min的转速转动起来。1833年英国人莱特(W. L. Weight)提出“爆发”发动机,摆脱了真空发动机的影响,直接利用燃烧压力推动活塞做功。1857年意大利恩·巴尔桑奇(Engenio Bersanti)和卡特依西(Matteucci)试验了齿条齿轮式(不采用曲柄连杆机构)将活塞与轴连接起来的自由活塞发动机,第1次实现爆发做功。经过70多年的摸索、改进,在1860年法国人兰诺(Lenoir)终于研制成功第1台实用的二冲程、无压缩、电火花点火的煤气机。它的外形和结构与蒸汽机相似。采用齿条与齿轮结构,齿条与活塞相连,齿轮与输出轴相连。活塞与气缸的密封采用了自涨式弹力环。热效率达4%,但燃烧混合气不进行压缩。当时认为对燃烧混合气进行预压缩要消耗额外的功,而不知道预压缩可提高热效率。由于兰诺发动机的使用,激励人们进一步从理论上研究内燃机。人们终于发现,对燃烧混合气进行预先压缩可以提高热效率。1862年法国铁路工程师包·德·罗沙(Beau de Rochas)在对内燃机热力过程进行理论分析后对内燃机热效率提出4项要求:①单位气缸容积的冷却面积应尽可能

小；②膨胀开始前缸内压力应尽可能高；③膨胀时活塞的速度应尽可能快；④膨胀应尽可能充分。为此他提出4项措施：①要在活塞的向外行程内吸入新鲜混合气；②在接着的向内行程内进行压缩；③在上止点前附近点火，在下一个向外行程内膨胀；④在下一个向内行程内排气。第1次提出了近代发动机等容燃烧的四冲程循环原理。这是认识上的飞跃，但这一理论当时只发表在法国一家地方刊物上，很久以后才被人发现。

20世纪30年代、40年代，蒸汽机由于热效率低，锅炉预热时间长，设备投资大，移动不便，安全性差，锅炉常发生爆炸事故而被新型动力装置替代，逐渐退出了历史舞台。这种新型动力装置就是内燃机。它能很好地满足车辆动力装置的要求，具有很高的能量转换效率（热效率可达30%~50%，而普通蒸汽机的有效热效率不超过5%~8%，带冷凝器的可产生过热蒸汽的蒸汽机有效热效率也不超过18%），体积小、质量轻、易于起动。

内燃机就是在蒸汽机的基础上发展起来的，开始时仿照蒸汽机结构，在气缸内（而不是在气缸外）燃烧煤气，诞生了按四冲程循环方式工作的内燃机。

第二节 内燃机及汽车的诞生

1876年 Nikolaus August Otto(1831—1891)的四冲程煤气机完成了历史性的台架试验，诞生了世界上第1台煤气机。在德国博物馆的题词中写道，“它结束了先驱者（蒸汽机）的时代，奠定了世界发动机（内燃机）新技术”。

该煤气机为单缸、四冲程、卧式、按等容燃烧，压缩比为2.5，功率为2.94 kW，热效率为12%~14%，运转平稳，体积小，很快得到推广应用。1880年功率达11~14.7 kW(15~20PS)，1893年则达到147 kW(200PS)。1886年热效率达到15.5%，1894年热效率高达20%。

1886年夏，Benz和Daimler按Otto(1832—1891)的四冲程原理，造出了第1台Benz车用汽油机（单缸，0.78 L，0.65 kW/(400 r/min)）和Daimler车用汽油机（单缸，0.46 L，0.81 kW/(650 r/min)）。

内燃机的发展给汽车的发展以新的推动力。

1886年Cottlieb Daimler和Karl Benz成为世界第一辆汽车的发明者，这种在马路上出现的没有马的马车当时被认为是魔鬼般的机器。1936年汽油机被命名为Ottomotor。

1892年2月27日Rudolf Diesel(1858—1913)提出了用煤粉作燃料、压缩点火的发动机工作循环专利，1893年2月23日得到德国专利(专利号DRP67207)。

1893年成功地制造了第1台没有冷却的试验机。冲程 $S=400\text{ mm}$ ，缸径 $D=150\text{ mm}$ ，煤油从压力管通过开式喷嘴直接喷入燃烧室（先前由于煤粉在缸内堵塞活塞，所以改用液体燃料）。像医生在示波器上观察心电图一样，发动机制造者用示功图判断自己制造的发动机的工作情况。

1893年8月10日，在倒拖的试验机上，在不合适的相位下喷入汽油，很容易就着火了，但发出爆炸声。在示功图上的压力超过8 MPa，但自燃的工作原理被证实了。

随后，又将第1台试验机改为第2台试验机，用水冷却，用压缩空气将燃油喷入气缸，以达到对燃烧有利的燃烧碎裂。1894年2月17日进行倒拖试验，试验机能自燃点火，并空转。1895年6月26日经过很多试验后，发动机进行制动试验。

使用煤油和压缩空气；
指示效率 $\eta=30.8\%$ ；
有效效率 $\eta=16.6\%$ ；
比油耗 $b=519.5\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})[382\text{ g}/(\text{PS}\cdot\text{h})]$ 。

低的机械效率（ $\eta_m=54\%$ ）要求改进设计。为此加装了一个单级空气泵，而成为第 3 台试验机，这是至今仍陈列在德国博物馆内的试验机。

1897 年 2 月 17 日试验取得了突破。慕尼黑高等工业学校教授 Schroter 主持，通过了交付试验。1897 年 6 月 16 日试验结果在 Kassel 的德国工程师学会（VDI）上公布。这是当时世界上第 1 台热效率达 26% 的热机。

1898 年柴油机成为商品，但在 1914 年以前发展缓慢。在第一次世界大战中，由于战争的需要柴油机才开始大量生产，而开始广泛应用则是在 1950 年以后。此时，柴油机的心脏——喷油泵已日趋完善和成熟。

第三节 车用内燃机的发展

一、特性指标不断攀升

从 1876 年第 1 台煤气机(Otto 机)，1886 年第 1 台车用汽油机和 1897 年第 1 台柴油机诞生的 100 多年来，车用内燃机从发明、发展到走向辉煌。

为表明车用汽油机的发展状况，Helmut Hütten 从挑选出的具有时代特征的 40 台小轿车用汽油机(不带增压)的主要外形尺寸和特征值(缸数,系列,配气机构型式, V_H , S/D , P (kW), n , v_m , p_e (MPa))的变化予以佐证(见参考文献[1])。

1886 年, 1936 年, 1986 年汽油机的升功率 P_e/V_H (kW/L)，转速 n (r/min)、活塞平均速度 v_m (m/s)、冲程缸径比 S/D 、压缩比 ϵ 和平均有效压力 p_e (MPa)等项指标见表 1-1。

表 1-1 不同年代汽油机性能指标

年 份	$(P_e/V_H) / (\text{kW}\cdot\text{L}^{-1})$	$n/ (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_m/ (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S/D	ϵ	p_e/MPa
1886	2	400	2.5	1.7	2.5	0.3
1936	18	3500	11	1.3	6	0.72
1986	45	5500	14	0.9	9.5	1.05

小轿车用增压汽油机的升功率 1976 年为 53 kW/L ，至今已达 70~90 kW/L 。

小轿车用柴油机的升功率 1936 年为 14 kW/L ，至今已提高到 25~50 kW/L 。

小轿车用汽油机的比功率质量目前已达 1.5~2 kg/kW 。赛车 Porsche “917” 1973 年达到 0.35 kg/kW ，目前进一步减小到 0.2 kg/kW ，达到与飞机用活塞式发动机的同一数量级。而在 1897 年，四冲程汽油机比功率质量为 680 kg/kW 。

现代四冲程汽油机的体积功率为 $200 \sim 250 \text{ kW/m}^3$ 。自由吸气柴油机的体积功率为 150 kW/m^3 。赛车用内燃机以及最好的汪克尔 (Wankel) 内燃机, 其体积功率几乎高出上述指标的 1 倍。

图 1-1 是高速柴油机从 1940 年到 1990 年间强化指标 $v_m p_e$ 的变化趋势 (v_m 为活塞平均速度, p_e 为平均有效压力), 50 年间反映综合性能的强化指标增长了 4 倍多。

从 1897 年到 1992 年的近一百年间, 高速柴油机的热效率 η 提高了 2 倍, 最大爆发压力 $p_{z \max}$ 增加了 5 倍, 功率密度 (活塞面积功率) P_A 的增加超过 10 倍, 见图 1-2。

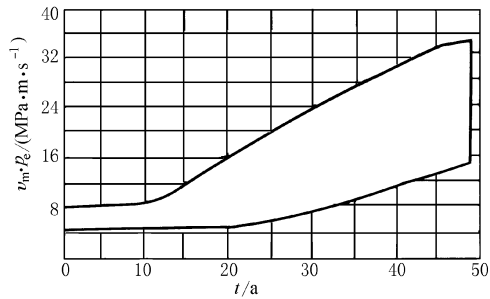


图 1-1 50 年间高速柴油机强化指标 $v_m p_e$ 的变化趋势

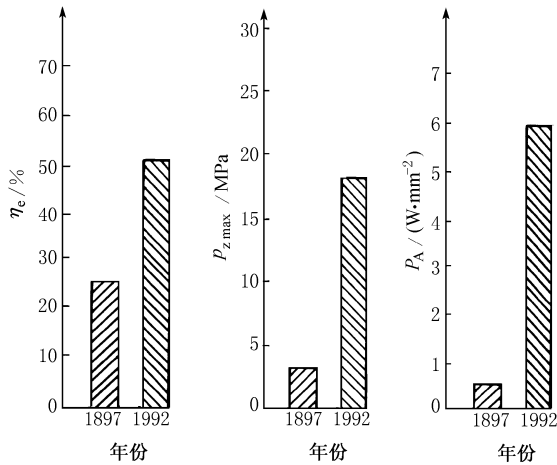


图 1-2 近 100 年高速柴油机有效热效率、最大爆发压力和功率密度的增长

二、20 世纪 60 年代内燃机技术上的重要标志

20 世纪 60 年代是内燃机技术加速发展时期, 其技术特征是:

- 三层轴瓦。
- 过共晶 Si-AL 活塞, 并使用恒范钢片 (invarplatten) 和开槽, 使活塞与缸套间隙减小。过共晶硅铝合金的含硅量为 $11\% \sim 13\% (w)$ 。它是在 Al 的软基体上分布高硬度的初晶硅, 具有典型的耐磨金相组织。其特点是质量轻, 强度、刚度适中, 热稳定性好, 线膨胀系数小, 高温下抗疲劳性能好。热力学温度 T 在 $453 \sim 473 \text{ K}$, 循环基数为 5×10^7 时其疲劳强度为 $60 \sim 70 \text{ MPa}$ 。
- 活塞环镀层。
- 轴颈的感应淬硬或氮化。
- 凸轮冷激处理。

- 使用在屈服极限范围内工作的螺钉。

- 可靠的气缸密封垫。它要保证承受很大的预压力，补偿气缸盖与气缸体结合面不平度和粗糙度所需的延性，重复使用时的弹性和抗燃气、机油、冷却液的腐蚀性。密封宽度为 4~6 mm，常温下最小密封压力为 30~40 MPa，到热力学温度 T 为 572 K 的高温时将达到 120 MPa。在机油和冷却液常温范围内的密封压力为 8 MPa，在 T 为 423 K 时密封压力约为 40 MPa。

- 高转速气门间隙补偿液力元件(液力挺柱)。
- 单腔化油器→分腔化油器→电控化油器。
- 汽油喷射(1967 年 VW1600 汽油机)。
- 晶体管点火。
- 轴向与径向式分配式喷油泵。

三、20 世纪 70 年代内燃机技术的重要标志

20 世纪 70 年代，环保与石油危机给车用内燃机的发展带来了巨大的影响。

在环保方面，1959 年 12 月 4 日美国加州公布了一项法律，要求到 1970 年，大气质量要达到 1940 年的标准（但由于技术上的原因，该法规的实施被一再推迟），随后又颁布了一些环保法规。

人们已注意到了工业化及汽车化带来的严重的环境污染，开始有了环保意识。主要表现在：减少废气、降低噪声、合理利用资料。在汽车内燃机上表现为：

- 1964 年开始使用闭式曲轴箱通风。
- 1966 年公布了工况法排放法规，限制汽车有害气体的排放。
- 1972 年 VW（大众汽车公司）展出了三效催化转换器。
- 1973 年起使用热转换器（氧化转换器）。
- 1975 年起使用三效催化转换器。
- 1976 年起使用三效催化转换器与氧(λ)传感器(可除去排气中 75%~95% 的 CO、NO_x 和 HC 的有害气体)。需要时，再加废气再循环(EGR)，空气二次喷射技术。从而解决了在低油耗下的废气净化问题。

- 在能源方面，1973 年的石油危机（能源危机）使人们认识到资源的有限性与合理利用自然资源的必要性，这是汽车工业发展的一个契机。此后，人们纷纷寻找代用能源并寻求降低内燃机传统燃料消耗的各种途径。

四、20 世纪 80 年代、90 年代初内燃机技术上的重要标志

总的目标是取得人-机-环境的统一，使汽车——人类的骄子能更快、更舒适、更经济、更清洁、更安全。

内燃机技术上的主要措施及趋向：

- 增压旁通技术，解决动态性能差的问题。
- 采用多气门。四气门比二气门能提高功率与转矩 15%，油耗与辛烷值可降低 5%，因为高速时气门时面值要下降 10%~40%。如最新的 16 气门、1.8 L Audi（奥迪）4 缸汽油机，进气面积增加了 130%，排气面积增加了 150%，功率增加 125%，有害气体还可减少

(因气门相位和重叠角可减小)。现又推出每缸 5 气门的 4 缸汽油机。

- 采用满足日益苛刻的环保要求的各项技术措施。
- 采用电子管理内燃机(即电控技术),发达国家长期使用的化油器式汽油机被电控汽油机替代;现代化汽车所用的电子管理系统的价格占汽车造价的 10%,在 2000 年这一比例增加到 20%。
- 可变压缩比。
- 可变气门面积与正时控制。
- 高强度、低密度材料的使用。如铝与加强纤维、陶瓷材料、塑料、碳素纤维等,使内燃机不断轻量化。
- 进一步降低柴油机微粒排放。
- 其它发动机的开发与改善。如电动汽车。通用汽车公司的冲击牌电动汽车的最高车速为 170 km/h,起步至 100 km/h 仅需 8 s,储备行程为 200 km,蓄电池的使用寿命为 3.2×10^4 km。1992 年生产的车型,研制了寿命为 7×10^4 km 的轻便硫钠蓄电池,现在通用公司已开始批量生产这种电动汽车。日本东京电力公司和明电舍公司共同研制的 IZA 电动汽车,其储备行程为 548 km,最高车速为 176 km/h。此外,还有电喷二冲程内燃机、太阳能汽车、氢气发动机汽车等。但在可预见的将来,车用四冲程内燃机仍将保持垄断地位。

第四节 车用内燃机的未来

一、汽车的发展

内燃机的出现促进了汽车的发展,汽车的大发展又带动了内燃机的飞速发展。回望 100 多年来内燃机发展的轨迹,其重要的技术标志是与汽车的发展、人类的需要息息相关。为了进一步说明内燃机的发展及内燃机的未来,扼要回顾一下汽车的发展。

纵观 100 年来汽车的发展,在各个阶段,人们谋求不同的目标和重点。

初期,汽车只是作为行走的机器,着重于可靠性,不追求豪华、舒适。

中期,约在 20 世纪 20 年代到 40 年代,汽车得到了蓬勃发展。1908 年 10 月 1 日在美国底特律城(Detroit)福特汽车公司开始生产一种“T”型轿车。它第一次用大批量生产的部件在流水线上组装汽车。这种轿车使用简单的四缸内燃机,功率为 14.7 kW,排量为 2.88 L,转速 1 600 r/min。它可用劣质汽油,甚至可用煤油比例很大的混合液。这是一种真正用于汽车的实用型汽车内燃机,其性能适中,工作负荷较低,非常耐用。从 1911—1927 年福特汽车公司共生产出 1500 万辆“T”型轿车,当时的售价为每辆 295 美元。另一个有代表性的汽车是位于德国沃尔夫堡(Wolfberg)的大众汽车厂用流水线生产的“甲壳虫”,其产量超过福特“T”型轿车数百万辆。这种汽车坚固耐用,它的坚固性在战争中得到证实。它适用于在公路网不完善的地区行驶,尤其是拉丁美洲。另外它的售后服务和零配件供应好。现德国大众汽车公司又推出了 21 世纪版本的新型“甲壳虫”。

空前发展和繁荣时期。20 世纪 50 年代到 60、70 年代为汽车的空前发展和繁荣时期。它追求速度、舒适、豪华。发动机的功率和转速增加很多,如 V 型 8 缸汽油机成为美国汽车的标准型汽油机。产品从单一或较少品种到多样性。在汽车的高速、高功率要求下,各大

汽车公司投入了大量的人力、物力、财力对汽车及各总成进行了系统的理论与实际试验研究,进一步解决了汽车的高速行驶性及结构可靠性,同时也给内燃机提出了一些需解决的技术难点,并成为 60 年代内燃机技术上发展的重要特征。

20 世纪 70 年代出现的石油危机使人们认识到自然资源的有限性与合理利用自然资源、促进国民经济可持续发展的迫切性,人们纷纷寻找代用燃料,降低油耗,从而出现了一系列节能措施:如降低车速与功率,减小汽车体积与质量,采用稀薄燃烧、高能点火等等。在这一时期,尽管汽车数量不断增加,但汽车的排放开始受到遏制,资源开始合理利用。

高技术广泛使用时期。在世纪之交的近 2~3 年,我们可以看到高新技术正逐步地、广泛地使用在汽车上,它不但展示了当今汽车的技术状态,而且揭示了未来汽车发展的趋势,也要求并带动内燃机向高经济性、低公害、资源再生利用的方向发展。

二、内燃机的未来

1. 高经济性

轿车正在向低油耗“3 L 汽车”的目标前进。所谓“3 L 汽车”是指轿车每百公里消耗不到 4 L 的油料。这是德国的四大汽车公司在 1991 年的四大公司首脑会议上首先提出的。它分三步进行,即“Drittelmix”。近期目标是 5 L/100 km (目前一般为 8 L/100km),但不能牺牲汽车现有的安全性与舒适性。进一步达到 3 L/100km 的目标。为实现这一目标,10 年来从 3 个方面进行努力:①减轻轿车总质量可节省 30%~35% 的油耗;②减小汽车阻力可节省 35% 的油耗;③提高内燃机热效率可节省 30% 的油耗。根据目前的知识和成熟的技术,装有直喷柴油机(特别是电控共轨喷油系统)的轿车可首先实现这一目标,而汽油机轿车则还要晚些时候才能达到该目标。为了达到这一目标,各汽车厂家采用了各种技术措施:

①采用高效率的内燃机工作循环。如米勒(Miller)循环,高增压、中冷循环,内燃机与涡轮复合循环等。

②改进进气系统,减小进气阻力,采用低涡流的进气道。进气系与内燃机进行良好的动态匹配,充分利用进气的脉动或共振能量,使内燃机的转矩特性可在宽广的转速范围内有较大的提高(可提高 10%),进气管、进气道采用 CAD、CAM、CAT 技术。

③采用多气门内燃机。小轿车内燃机从传统的二气门增加到 3 个、4 个甚至 5 个气门,以弥补高速时气门时面值大幅下降(低 10%~40%)的需要,气门正时也可随工况而自动调节。

④改进燃烧室及燃烧过程。改进燃烧室形状及结构参数,提高压缩比。在燃烧过程的研究手段上,采用可视化模拟实验,利用先进的激光技术和高速摄影。出现了三维流动与燃烧模型对燃烧过程进行仿真计算的各种大型软件。

⑤改进燃油供给系。电控汽油机有从将汽油喷在进气道内发展到直接喷在燃烧室内(像柴油机那样)的倾向。柴油机则采用高喷射压力(配低空气涡流)的喷油系统,如共轨式、蓄压式、单体泵等。其最高喷射压力从目前的近 100 MPa 提高到 120~150 MPa。到 2004 年可望达到 200~250 MPa。在提高喷射压力的同时,燃油的喷油正时和喷油速率也可实现控制与调节。有喷孔数进一步增加、喷孔直径进一步减小(已达 0.11~0.12 mm)的趋势。对喷孔的形状也在进行研究,从单一的圆形到其它形状,如长方形或夹气喷孔。另一方面,可改变喷射规律,如采用先少喷后多喷的型线凸轮,多次间隙喷射等方式。

⑥采用稀薄燃烧，高能点火。空燃比在 20 以上，点火能量在 100~120 mJ 以上。

⑦采用能量再生系统。如串接在内燃机和变速器之间的电动机——发电机和电容器等装置的能量再生系统。当汽车加速时，电流回流到电动机内帮助内燃机对汽车加速；汽车停止时，系统将内燃机关闭；汽车准备行驶时内燃机重新平稳地起动，由于内燃机不处于怠速运转，汽车具有最佳的经济性。

⑧降低运动机件的摩擦损失。

⑨降低内燃机与汽车质量。每降低汽车(包括内燃机)质量 100 kg，汽车百公里油耗可减小 0.6~0.7 L。

图 1-3 是内燃机采取各种降低油耗的措施后可能降低油耗的百分数。

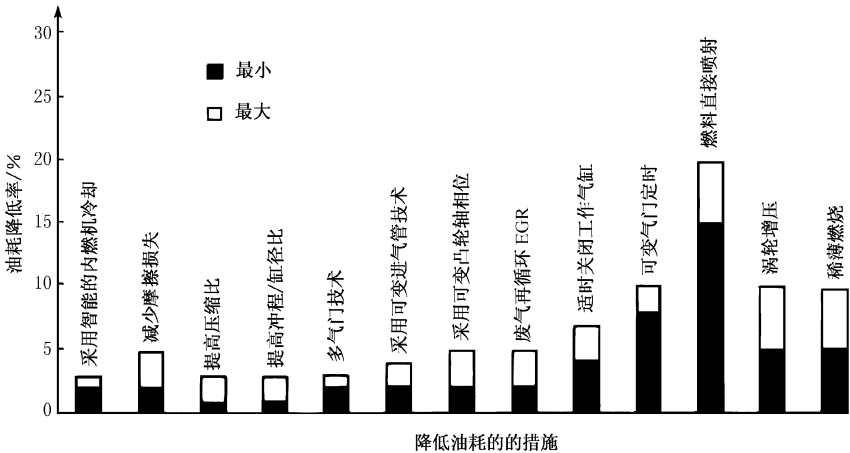


图 1-3 内燃机采取降低油耗措施后可能降低油耗的百分数

由于已经采取和准备采取的有效节能措施，汽车的百公里油耗已从 10~8 L/100 km 减到约 6.5 L/100 km，最先进的可达 4.5 L/100 km。“3 L 汽车”的梦想正在逐步变为现实。

2. 低公害

减少排气污染及噪声辐射，节省资源，实现低公害的“绿色汽车”或“环保汽车”相继出现。有害气体的排放量可比目前降低 70%。其主要技术特征是：

①降低油耗。所有降低油耗的一切措施可降低汽车有害气的排放和总排放量。如美国汽车从 1 亿辆的保有量增加到 2 亿辆，其总油耗几乎不变。

②采用三效催化转换器及闭环控制。开发新的高效、廉价的三效催化转换器、电加热催化转换器和 NO_x 还原三效催化转换器。

③在燃烧室内安装电热塞。它可有效降低内燃机在冷起动或怠速时的 HC、CO 排放量，而在冷起动和怠速时的 HC 和 CO 排放量要占总排放量的 50%。

④开发废气在起动和怠速运转时停止排出的排气装置。

⑤开展 NO 生成和排放计算模型研究，采用动态废气再循环(EGR)控制技术。

⑥柴油机微粒过滤器及再生的试验研究和计算机仿真，以达到实用化。

⑦采用增压、中冷的内燃机技术。

- ⑧研究和采用含氧燃油。
- ⑨对内燃机曲轴转速变化进行监控,以探明内燃机内可能出现的失火。
- 10使用内燃机与电动机的混合动力。电动机采用传统的蓄电池、氢电池、燃料电池等。
- 11使用新型动力及新能源。如太阳能汽车,燃用液化气和天然气等。
- 12采取各种降噪声、隔噪声措施。
- 13资源的回收、再利用。

参 考 文 献

- [1] Helmut Hütten. 100 Jahre Fahrzeugmotoren. MTZ, 1986, 47(4)
- [2] Klaus Mollenhauer(Hrsg). Handbuch Dieselmotoren. Berlin: Springer-Verlag, 1997
- [3] Franz Hauk, Bertold Mayr. Die Entwicklung des personenwagen-Motors in den vergangenen 50 Jahren. MTZ, 1989, 50(7/8)
- [4] Klaus Groth, Onno Syassen. Dieselmotoren der letzten 50 Jahre im Spiegel der MTZ-Höhepunkte und Besonderheiten der Entwicklung. MTZ, 1989, 50(7/8)
- [5] Alfred Urlaub. Verbrennungsmotoren Grundlagen. Verfahrenstheorie. Konstruktion. Berlin: 2. Auflage Springer-Verlag, 1994
- [6] Ferdinand piëch. 3 Litei/100 km im Jahr 2000. ATZ, 1992, 94(1)
- [7] Manfred pütz, Walter kotschek. Die neuen wassergekühlten Deutz-Dieselmotoren BFM 1015-Verbrennungs-und Einspritzsystem. MTZ, 1994, 55(9)
- [8] Eduard Köhler. Verbrennungsmotoren Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. Braunschweig/wiesbaden: Vieweg Verlag, 1998
- [9] Chattopadhyay A. Variable Ventilsteuerung als integrierte Lösung im Verbrennungsmotor. VDI Berichte Nr.1009(1992)
- [10] Atsugi Unisia Corporation, Atsugi/Japan. Atsugi Unisia Corporation, 1989-produktinformation.
- [11] Grohn M, Wolf K. Variable Steuerzeiten der neuen Mercedes Benz Vierventilmotoren. MTZ, 1989, 50(7/8)
- [12] Aoi K, Nomura K, Matsuzaka H. Optimization of Multi-Valve, Four Cycle Engine Design: The Benefit of Five-Valve Technology. SAE Technical paper series 860032
- [13] Lohr F. Die Kraftfahrzeugmotoren der Zukunft. Automobil-Industrie 34(1982)Nr.2
- [14] Hans Peter Lenz. 19 Internationales Wiener Motorensymposium. MTZ, 1998, 59(9)
- [15] Lenz H P. 20 Internationales Wiener Motorensymposium. MTZ, 1999, 60(10)
- [16] Helmut Pucher. VL Grundlagen der Verbrennungskraftmaschinen. SS 2000, FB 11, Technische Universität Berlin.
- [17] Krebs. Reduction of Fuel Consumption. Beijing: Symposium on Technologies for the Future. Volkswagen, 1998
- [18] 魏春源. 当今世界汽车发展的几大趋势. 北京: 汽车专家, 1998(1)

第二章 内燃机的热力循环分析

内燃机问世后以其高的能量转化效率和结构紧凑而迅速占领原先使用蒸汽机的领域。100 年来内燃机（特别是柴油机）的热效率提高近 2 倍。内燃机就是在对其工作过程和热力循环分析的理论基础上出现的。内燃机的发展也是与热力循环的几次重大发展紧密联系在一起的。为此，进一步分析、研究内燃机的基本热力循环有助于深入了解、判断它是如何促进内燃机的发展。我们可以据此审视命题及确定研究方向，抓住学科发展的一些根本性问题开展科学研究。

第一节 汽油机和柴油机的基本热力循环分析

一、空气标准循环(Air Standard Cycles)

满足下述 4 个假设条件的内燃机循环，称为空气标准循环。

- 循环中，工质为定量的空气（视为理想气体），不考虑进、排气过程，无工质交换；
- 燃烧过程用内燃机气缸外的热源加热；
- 循环结束后依靠向外放热，保证气缸内空气的温度、压力回到原始状态；
- 压缩与膨胀过程均为可逆过程。

在上述条件下，分析 4 种热力循环。

设：压缩比 $r_c = \frac{V_1}{V_2}$ ，后膨胀比 $r_e = \frac{V_1}{V_3}$ ，压力升高比 $r_p = \frac{p_1}{p_3}$ ，

压力比 $\alpha = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$ ，对于柴油机 $\alpha=1$ ，

体积比 $\beta = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3'}{T_3}$ ，对于汽油机 $\beta=1$ ，

热容比 $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ 。

1. 卡诺循环(Carnot Cycle)

卡诺循环由等熵压缩①、等温加热②、等熵膨胀③和等温放热④组成（图 2-1）。

卡诺循环效率 $\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$ 。

卡诺循环的峰值压力高，需要高强度的内燃机结构；功率输出

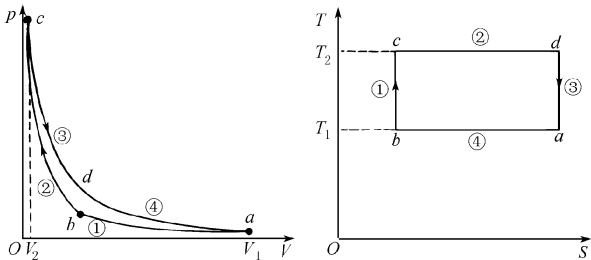


图 2-1 卡诺循环