



工业和信息化部“十二五”规划教材

车辆发动机原理

孙柏刚 杜 巍 编著 ●

FUNDAMENTALS OF
VEHICLE ENGINES

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

车辆发动机原理

孙柏刚 杜 巍 编著 ●

FUNDAMENTALS OF
VEHICLE ENGINES

内 容 简 介

本书讲述车辆(摩托车、汽车、拖拉机及装甲车辆等)用往复式内燃机及燃气轮机的工作原理,全书共15章。本书继承了秦有方、陈士尧、王文波等编著的《车辆内燃机原理》的主要内容,结合作者多年从事发动机研究及教学的体会,对原书的内容进行了充实及修订,特别对近年来发展的新技术领域,如VVT技术、排放污染物的后处理、高压燃油喷射系统、发动机管理与控制、内燃机性能仿真等做了较多的补充,以适应内燃机现代科学技术发展的需要。

本书可作为大学本科车辆工程及内燃机专业的基础教材,也可供有关专业工程技术人员参考及自学。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

车辆发动机原理/孙柏刚,杜巍编著. —北京:北京理工大学出版社,2015.11
ISBN 978-7-5682-0849-9

I. ①车… II. ①孙… ②杜… III. ①车辆-发动机-理论-高等学校-教材
IV. ①U464

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第149579号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/18.25

字 数/421千字

版 次/2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷

定 价/38.00元

责任编辑/封雪

文案编辑/杜春英

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

近二十年是中国汽车工业高速发展的时期，车辆发动机的种类、数量及技术水平发生了较大变化，新技术不断涌现，给车辆发动机原理的教学提出了新的要求，与技术发展相适应的高等教育的改革也应与时俱进。本书在秦有方、陈士尧、王文波等编著的《车辆内燃机原理》（1997版）的基础上，结合作者多年从事发动机研究及教学的体会，进行了重新编写，以适合于车辆工程及内燃机方向本科生专业课的教学选用。

在本书的编写过程中，罗庆贺、吴东伟、姚海春、汤弘扬、徐丹、刘志超、谢诚、范英杰等研究生协助收集、整理资料并参与部分编写工作，在此，对他们的辛勤劳动表示衷心感谢！编写过程中参阅并引用了国内相关文献，对这些文献的作者表示最真挚的谢意！

全书共分15章，其中第1、2、4、5、6、8、9、10、11、15章由孙柏刚编写，第3、7、12、13、14章由杜巍编写，由孙柏刚统校全书。本书由北京理工大学李向荣教授和北京工业大学张红光教授主审，并提出了许多宝贵的意见，在此向他们表示谢意。鉴于作者水平有限，书中难免有错误之处，谨请读者批评指正。

编 者

2014年12月，于北京理工大学

目 录

CONTENTS

第 1 章	绪论	001
1.1	车辆发动机发展简史	001
1.2	发动机的应用范围	005
1.3	发动机的分类	005
1.4	坦克发动机的特点	007
1.5	典型车用发动机结构简介	009
第 2 章	内燃机的示功图和性能指标	014
2.1	概述	014
2.2	示功图	014
2.3	指示性能指标	017
2.4	内燃机中的摩擦损失	020
2.5	内燃机的有效指标	025
2.6	提高内燃机性能的途径	029
第 3 章	燃料和热化学基础	033
3.1	概述	033
3.2	石油的组成及燃料性质	033
3.3	内燃机的代用燃料	039
3.4	燃烧热化学基础	044
第 4 章	内燃机工作循环	052
4.1	概述	052
4.2	理想循环分析	054
4.3	实际循环的损失	059
4.4	内燃机的热平衡	060
第 5 章	内燃机的换气过程	065
5.1	概述	065
5.2	评价参数	067

5.3	充量系数	068
5.4	影响充气量的因素	070
5.5	二冲程发动机换气	077
5.6	进排气管道内的气体波动效应	081
第6章	汽油机混合气的形成	085
6.1	概述	085
6.2	化油器的原理	086
6.3	电控汽油喷射系统	088
6.4	发动机电子控制系统	098
第7章	柴油机混合气的形成及燃烧室	102
7.1	概述	102
7.2	气缸内的空气运动	103
7.3	燃油喷雾特性	109
7.4	压燃式内燃机的燃烧室	113
第8章	火花点火内燃机的燃烧过程	120
8.1	燃烧阶段划分	120
8.2	点火定时	122
8.3	火焰传播	123
8.4	燃烧稳定性	125
8.5	非正常燃烧	127
8.6	火花点火内燃机的燃烧室	129
8.7	新概念燃烧	131
第9章	压燃式内燃机的燃烧过程	136
9.1	概述	136
9.2	燃烧阶段的划分	138
9.3	影响着火延迟期的因素	140
9.4	放热规律分析	142
第10章	柴油机燃油喷射	150
10.1	概述	150
10.2	典型高压供油系统	154
10.3	燃油喷射过程	163
10.4	供油系统参数及其对发动机性能的影响	168
10.5	异常喷射	179
第11章	内燃机排气污染物生成与控制	184
11.1	概述	184
11.2	内燃机主要污染物的生成机理	186
11.3	排放法规与测试循环	190
11.4	污染物测试分析方法	193
11.5	主要技术对策	199

第 12 章	内燃机增压	206
12.1	概述	206
12.2	废气能量利用	210
12.3	车用涡轮增压器	216
12.4	涡轮增压器与发动机匹配	224
12.5	柴油机增压改造及性能改进	235
12.6	汽油机增压特点	240
第 13 章	内燃机特性	242
13.1	概述	242
13.2	速度特性	243
13.3	内燃机工作稳定性	249
13.4	负荷特性	250
13.5	万有特性	251
13.6	螺旋桨特性	252
13.7	调速特性	253
13.8	内燃机功率标定和指标修正	254
第 14 章	内燃机工作过程计算基础	256
14.1	概述	256
14.2	发动机几何模型	256
14.3	缸内热力过程的计算方程	259
14.4	热力过程计算模型	261
14.5	一维气体动力学概论	266
第 15 章	其他类型车用动力	268
15.1	汪克尔转子发动机	268
15.2	混合动力	271
15.3	燃料电池	273
15.4	燃气轮机	276
参考文献		281

第1章

绪论

1.1 车辆发动机发展简史

1.1.1 早期发展简史

任何其他形式的能转变为机械能的装置，统称为发动机。热机是将热能转变为机械能的装置，其中又有内燃机和外燃机之分。目前，世界上工农业和运输业中所用的动力主要来源于热机，而内燃机在品种、数量及发出的总功率数方面又居热机的首位。

17世纪中期，人们就曾设想把某种工质在气缸内燃烧来获得机械能，但直到1860年才出现第一台实用的发动机，这就是法国人雷诺（Lenoir）研制成功的煤气机。它没有压缩过程，当活塞行至进气冲程中点时，用电点火，发动机的热效率不超过4.5%，气缸内最大压力只有4个标准大气压，功率为3~5马力（1马力=0.735千瓦）。这种发动机当时在英国、法国使用很广。

1862年，法国人罗沙（Beau De Rochas）对发动机热力过程进行了理论分析，提出了改善热效率的四项原则（气缸的冷却面积尽量小，膨胀前气缸内压力尽可能高，膨胀时活塞的速度尽可能快，膨胀范围尽可能大）以及实现这些原则的措施。这是认识上的一次飞跃，也是第一次提出等容燃烧的四冲程循环原理。

1876年，德国人奥托（Nicolaus August Otto）按罗沙的理论研制出第一台四冲程煤气机，功率为4马力，压缩比为2.5左右，效率为10%~12%，这些指标都高于当时的其他热机。奥托机的出现是在理论指导下的实践结果，是发动机发展史上的第一次重大技术突破。

在奥托四冲程发动机出现后，英国人克勒克（Dugald Clerk）开始研究二冲程发动机。二冲程发动机的曲轴每一转有一个做功冲程，克服了四冲程发动机每两转有一个做功冲程的缺点。在1881年的法国巴黎展览会上展出了这种二冲程发动机。

内燃机发展初期都以煤气为燃料，这是由于19世纪中期欧洲各大城市已使用煤气照明，而当时照明煤气是比较广泛且容易得到的能源。随着石油工业的发展，出现了比煤气热值高得多的汽油及柴油等产品，这为后来液体燃料发动机的出现创造了条件。

1883年，德国人戴姆勒（Gottlieb Daimler）研制成带表面蒸发型化油器的电火花点火的立式汽油机。当时其他发动机的转速较低，很少超过200 r/min，而他制造的汽油机转速竟高达1 000 r/min。与此同时，德国人苯茨（Karl Benz）也开始研制高速汽油机。

汽油机的出现为发动机在交通运输车辆上的应用提供了条件，因为其功率大、质量轻、

体积小、热效率高，特别适应交通运输业的要求。1886年，戴姆勒和苯茨分别成功地把他们制造的高速汽油机装在车辆上运行，现在公认这一年为汽车诞生年。

1885年，英国人卜雷斯特曼（Pfiestnum）成功研制出使用重质石油燃料的煤油机。

1890年，英国人斯图加特（Stuart）研制成功不用电点火装置的烧球式煤油机。

1893年，德国人迪塞尔（Rudolf Diesel）发表了压燃式发动机工作原理的理论，他最初提出的理论有下列缺点：

- （1）压缩过程终点的气体压力要求很高，达 25 MPa，温度达 800 °C；
- （2）燃烧过程保持等温条件，使每循环做功太少；
- （3）缸壁不冷却，零件表面温度过高，润滑条件得不到保证；
- （4）以煤粉为燃料，燃烧后产生固体的灰分，使机件磨损太快。

经过实践，迪塞尔克服了上述缺点，在 1898 年研制出带冷却水套的、基本上按等压过程燃烧的、以煤油为燃料的压燃式发动机。压燃式发动机的热效率比电火花点火式发动机的热效率高得多。压燃式迪塞尔机的研制成功是发动机发展史上的第二次重大技术突破。

初期的压燃式发动机是利用压缩空气（约 60 个标准大气压）将燃油喷入气缸，发动机还要附带空气压缩机，使整个动力装置非常笨重，难以用在车辆上。为了解决这个问题，许多人曾试图不用压缩空气，而以其他方法使燃油雾化。

1899 年开始研制机械式喷油装置，但是限于当时机械制造工艺水平较低，制造不出满足要求的、精密的喷油装置。直至 1914—1915 年制造工艺水平提高之后，才出现了结构简单、外形尺寸小、精密的机械式喷油装置。1925 年，在德国建成了专业化的生产喷油泵的工厂（Bosch），此后便停止使用带压气机的喷油装置，并使压燃式发动机（柴油机）应用于车辆上成为可能。

1926 年，瑞士人波希（Alfred J Buchi）提出了利用发动机排出的废气能量来驱动压气机的废气涡轮增压理论，但受当时技术水平的限制，发展缓慢。在第二次世界大战中，少数航空发动机采用废气涡轮增压，以补偿在高空时的功率下降。1950 年之后，随着燃气轮机技术的发展，废气涡轮增压技术开始广泛应用于柴油机中，从而使柴油机的技术性能指标有了大幅度提高。如今，增压柴油机被广泛应用于各种军用战斗车辆上，其最新技术体现在坦克发动机上。据统计，在第二次世界大战期间，约有 35% 的坦克采用汽油机，21 世纪 50 年代后期，各国坦克已全部采用柴油机为动力。

1.1.2 20 世纪初—40 年代

我国内燃机产业起步较晚。1900 年，上海求新机器制造厂生产了我国第一台 5 马力煤气机。20 世纪 20 年代，广州、山东、上海、常州等地开始生产柴油机。20 世纪 30 年代，上海新中厂制成第一台柴油汽车。20 世纪 40 年代，我国生产出了最大功率为 300 马力的柴油机，但技术图纸及主要零部件多是国外进口。1924 年，上海新祥和机械厂制成 11.76 kW、17.05 kW 等 5 种不同规格的压缩着火四冲程低速柴油机。上海新中厂分别于 1929 年和 1939 年制成了我国第一台功率为 26.47 kW 的双缸柴油机和功率为 47.79 kW 的 4 缸、1 800 r/min 的车用柴油机。

至 1916 年，汽车往复活塞式发动机历经近 30 年的发展，技术日趋成熟。在此期间，作战需要一种能够突破由机枪、铁丝网和壕沟构成防御体系的特种车辆，于是以汽油机为动力

并带有装甲防护的车辆——坦克,出现在1916年第一次世界大战的战场上。

第一次世界大战期间,坦克选用了汽车用直列4缸或6缸水冷汽油机,功率为26~110 kW。例如,1916年英国生产的第一批I型坦克安装了直列6缸水冷汽油机,功率为77 kW;法国坦克采用的是直列4缸水冷汽油机。在第一次世界大战结束后10年左右的时间里,坦克装甲车辆迅速发展,一些国家研制、装备了多种坦克,从而使得多种型号的发动机在坦克上竞相得到应用,功率为66~298 kW,主要是汽油机,少数采用了柴油机。

随着对坦克性能要求的提高,选用当时生产的发动机,无论从功率、结构形式和车内布置等方面都不能适应坦克的需要。因此,在20世纪20年代后期,一些国家开始研制专用的坦克发动机,英国于1928年研制了坦克汽油机和66 kW的坦克柴油机,德国于20世纪30年代初期研制了V型12缸水冷坦克汽油机。

1.1.3 20世纪50—80年代

新中国成立后,我国的发动机产业得到了大力发展。1952年,我国发动机总功率产出为近3万kW。1956年,长春建立第一汽车制造厂,年产3万辆装载质量为4t的解放汽车,其发动机采用功率为66 kW的CA10型6缸汽油机;同年南京汽车厂开始生产功率为37 kW的4缸汽油机。到1957年,全国发动机总功率产出达50万kW,发动机工业已初具规模。

1959年,上海柴油机厂试制成功了供汽车、工程机械、船舶、农业机械、发电机等采用的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柴油机系列。同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,并引进了当时具有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型拖拉机和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。

在军用动力方面,20世纪50年代,苏联、德国先后在重型坦克T-10、豹I上安装功率为552 kW、610 kW的机械增压柴油机。美国则在AY17W汽油机的基础上研制了AY1790-8汽油喷射式发动机,并装于M46、M48坦克上,功率为646 kW,转速为2 800 r/min;英国在“奇伏坦”坦克上安装了515 kW的二冲程柴油机。苏联于1955年开始设计二冲程坦克柴油机。

1959年,美国“大陆”公司在AV-1790基础上研制成功了涡轮增压、风冷坦克用的柴油机AV1790-2,功率为552 kW,并于20世纪60年代初装备于M60坦克上。20世纪70年代,涡轮增压技术、中冷技术的发展使坦克发动机的功率密度大幅度增加,同时改善了发动机扭矩特性,并使其结构更加紧凑、可靠,油耗进一步降低。20世纪70年代末80年代初,德国豹II坦克的MB873Ka-500发动机,功率为1 103 kW,转速为2 600 r/min;英国挑战者坦克配备的CV12TCA发动机,功率为883 kW,转速为2 300 r/min。

20世纪80年代后期,我国发动机步入一个高速发展时期,引进和开发了许多新品种,其中主要的代表有:上海通用汽车公司配备在别克轿车上的1.0 L的L34汽油机,上海大众汽车配备在帕萨特上的8LBBG(V型6缸)和8LAWL481Q增压汽油机,中国第一汽车集团的6102、488和EA113轿车用汽油机,东风汽车公司的TU3轿车用汽油机以及东风康明斯发动机有限公司的康明斯B系列柴油机,南京汽车集团有限公司生产的配备在依维柯上的Sofim140.01柴油机,北京吉普汽车有限公司的D498Q汽油机,一汽集团的大连柴油机厂、

无锡柴油机厂的 CA498A、CA4110A、CA6110A、CA6113 型柴油机, 玉林柴油机厂、湖南动力机厂、柳州机械总厂的 6105Q 型柴油机, 朝阳柴油机厂的 100、102 等系列柴油机, 第一拖拉机厂的 R100 系列柴油机, 上海柴油机厂的 D6114、3300B 系列柴油机, 江铃汽车股份有限公司、庆铃发动机公司的 4JA1、4JB1 型柴油机, 潍柴柴油机厂和杭州汽车发动机厂的 WD615 系列柴油机, 重庆康明斯发动机有限公司的 N、K、L 系列柴油机, 陕西柴油机厂的 12PC-5V 型柴油机。此外, 还有许多类型的汽油机、摩托车发动机以及小型号柴油机, 此处不一一列举。

1.1.4 20 世纪 90 年代—现在

截至 2013 年, 我国发动机的产量超过 8 000 万台, 发动机工业总产值突破 4 100 亿元, 发动机总功率突破 18 亿 kW, 进出口总额突破 211 亿美元。虽然我国发动机的生产数量位居全球第一位, 但是在性能、质量和可靠性以及自主研发能力方面与国外相比还有很大的差距, 需要发动机行业的从业人员努力和警醒。

对于军用车辆, 超高增压旁通补燃发动机 UDV8X1500, 功率为 1 103 kW, 装于法国“勒克莱尔”主战坦克上, 该机的平均有效压力达 3.22 MPa, 升功率为 66.97 kW/L, 体积功率为 606.29 kW/m³。德国的 MT883Ka-500 发动机, 通过扩大缸径、行程, 发展成了 MT883Ka-501 发动机, 功率达到 1 200 kW。在该机的基础上, 采用顺序增压并提高转速到 3 300 r/min, 增压比达 4.8, 研制出了 MT883Ka-512 发动机, 功率为 1 660 kW。采用两级增压、中冷和顺序增压研制出的 MT883Ka-523 发动机, 功率达到 1 920 kW。系列机型的平均有效压力达 2.21~2.81 MPa, 升功率达 60~70 kW/L。德国 MTU 系列坦克发动机代表了世界的先进水平, 表 1-1 给出了部分国外典型军用发动机的相关技术参数。

表 1-1 国外典型军用发动机的相关技术参数

发动机型号	MT883Ka-500	MT883Ka-501	C12V150ZAL	B-46	XAV28-1450	UDV8X1500
压缩比	14.0	17.0	13.0	13.0	15.0	8.0~9.1
缸径/行程	144/140	144/140	150/160	150/180	150/130	142/130
总排量/L	27.40	27.40	33.93	38.88	27.56	16.47
标定功率/ [kW·(r·min) ⁻¹]	1 103/2 700	1 210/3 000	883/2 200	574/2 000	1 081/2 600	1 103/4 580
单位排量功率/ (kW·L ⁻¹)	40.26	44.16	26.00	14.76	39.22	66.97
活塞平均速度/ (m·s ⁻¹)	12.60	14.00	11.70	12.00	11.27	10.83
平均有效 压力/MPa	1.79	1.75	1.42	0.89	1.81	3.22
扭矩储备系数	1.17	—	1.12	1.10	1.19	1.18
燃油消耗率/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	220	212	226	245	195	231
燃油供给系统	单体泵	共轨	直列泵	—	—	—

续表

发动机型号	MT883Ka-500	MT883Ka-501	C12V150ZAL	B-46	XAV28-1450	UDV8X1500
单位体积功率/ (kW·m ⁻³)	890	970	732 (本体)	455.56	632.71	606.29
装备年份	1997	2003	1999	1972	1984—1994	1992

1.2 发动机的应用范围

内燃机应用范围非常广泛,如地面上各种运输用车辆(汽车、拖拉机、内燃机车等)、发电站、农业机械、林业机械、矿山、石油、建筑及工程机械等,也可作内河及海上船舶的主机和辅机。在航空方面,一些小型民用飞机还在使用往复活塞式发动机。

发动机在国防中的地位也十分重要,使用范围非常广泛,如部队运输、火炮牵引、各种战斗车辆(坦克、装甲车、步兵战车、自行火炮、导弹发射车、雷达车等)、发电、工程机械与施工、各种水面舰艇及水下潜艇等方面都大量使用发动机。发动机能够获得如此广泛的应用,其原因在于它具有下列优点。

(1) 热效率高。热效率高,节省燃料,经济性好,尤其是柴油机,热效率更高,最高有效热效率已达46%,船舶柴油机的热效率或高达50%以上,可以使车辆具有更长的续驶里程。

(2) 外型尺寸小,质量轻,便于移动。发动机单位功率的质量为0.3~30.0 kg/kW,随用途而定。

(3) 功率范围广,适应性好。单机功率可从小于1马力到几万马力(48 000 马力),这是其他热机做不到的。

(4) 起动迅速。正常起动只需几秒钟,并很快达到全功率。

(5) 水的消耗量少,特别是风冷发动机,根本不需要水,这对缺水地区尤为重要。

(6) 维护简单,操作方便。

发动机也有缺点,主要表现在以下几个方面。

(1) 燃料限制。在发动机中只能直接用液体或气体燃料,当采用固体燃料时,需要利用笨重的煤气发生器将固体燃料转变为气体燃料,这使得整个动力装置的质量和尺寸增加。另外,起动准备时间加长,且热效率降低。

(2) 噪声大,容易使管理人员疲劳,也是城市中噪声的污染源之一。

(3) 废气中有害成分造成环境污染。

(4) 低速时很难发出大扭矩,因而以发动机为动力的车辆必须装有变速机构。

1.3 发动机的分类

发动机有多种类型,根据其主要特点可大致做如下分类。

1. 按实现循环的方式划分

(1) 四冲程发动机,由活塞移动四个冲程或曲轴转两圈完成一个循环。

(2) 二冲程发动机,由活塞移动两个冲程或曲轴转一圈完成一个循环。

2. 按使用的燃料种类划分

(1) 液体燃料发动机, 其中用轻质燃料的, 一般称为汽油机; 用重质燃料的, 一般称为柴油机。

(2) 多种燃料发动机, 可用轻质和重质的液体燃料。

(3) 气体燃料发动机。

(4) 液-气混合燃料发动机, 基本燃料是气体燃烧, 少量的液体燃料作为点燃用。

3. 按点火方式划分

(1) 外部点火发动机, 利用电火花点燃工作混合气(汽油机、煤气机)。

(2) 压燃点火发动机, 利用压缩终点空气的高温使燃料自燃(柴油机)。

(3) 烧球式发动机, 利用燃烧室壁面的高温使燃料着火。

4. 按形成混合气的方式划分

(1) 外部形成混合气的发动机, 可燃混合气在气缸外部形成, 如使用化油器的汽油机。

(2) 内部形成混合气的发动机, 在高压下将燃油喷入气缸, 形成雾状与空气混合燃烧(如柴油机、烧球机及向气缸内直接喷射汽油的发动机等)。

5. 按压缩比划分

(1) 低压压缩比发动机, 主要指汽油机, 其压缩比为8~11。

(2) 高压压缩比发动机, 主要指柴油机, 其压缩比为12~22。

6. 按循环的加热方式划分

(1) 等容加热循环发动机, 一般汽油机和煤气机属于此类。

(2) 等压加热循环发动机, 旧式的压缩空气喷油式柴油机属于此类机型, 现已淘汰。

(3) 混合加热循环发动机(兼有等容加热和等压加热), 现代柴油机属于此类。

7. 按调节负荷的方法划分

(1) 量调节式发动机, 按照每循环工质数量的多少调节负荷, 如汽油机。

(2) 质调节式发动机, 按照参加工作的混合气浓度改变负荷, 如柴油机。

8. 按进气方式划分

(1) 非增压式发动机, 也称自然吸气式发动机(Natural Aspired, NA), 它依靠活塞使工作气体吸入气缸, 一般的发动机都属此类。

(2) 增压式发动机, 为增大发动机的功率, 使进入气缸的工作气体预先经过压气机压缩后供入气缸, 一般高功率的强化发动机属于此类。

9. 按用途划分

(1) 固定式发动机。

(2) 船用发动机。

(3) 机车用发动机。

(4) 汽车拖拉机发动机。

(5) 坦克用发动机。

(6) 航空用发动机。

10. 按冷却方式划分

(1) 水冷式发动机。

(2) 风冷式发动机。

11. 按气缸数目和排列形式划分

- (1) 单缸和多缸发动机。
- (2) 多缸发动机还可分为：直列式、卧式、V型、X型、H型、星型及对置活塞式等。车辆上主要采用直列式和V型的多缸发动机。

1.4 坦克发动机的特点

坦克是现代化战争中用于地面作战的一种有效的进攻和防御武器，它有三大技术性能：强大的火力、坚固的防护和灵活的机动能力。机动能力在很大程度上取决于发动机的性能。

坦克发动机必须满足军方提出的战术技术要求，主要体现在以下几方面。

- (1) 功率大。为提高坦克行驶速度和加速性能以改善机动性，现代坦克的吨功率要求达到 20~25 kW/t（有的试验坦克已达 50 kW/t），这就要求一辆主战坦克的功率为 600~1 103 kW。当然，这一功率范围在工业上不足为奇，但要同时满足下面要求是不容易的。
- (2) 尺寸小，质量轻。坦克内部给予动力舱的空间有限，发动机的外形尺寸不能过大。现代坦克发动机的体积功率大于 600~1 000 kW/m³，在发动机的长、宽、高三个尺寸中，高度低更为重要，会影响坦克的高度。
- (3) 燃油消耗率低。当坦克携带的燃油量一定时，发动机的燃油消耗率低，这意味着将增大坦克的行驶里程，减轻油料输送负担，提高坦克的作战能力。
- (4) 使用多种燃料。
- (5) 低速时扭矩大。
- (6) 低温起动性能好。
- (7) 加速性好。

从表 1-2 可以看出，随着发动机技术的不断发展，发动机逐渐向更小、更快、更高的方向发展，即发动机的排量越来越小，转速越来越快，平均有效压力越来越高。德国 MTU 公司车用柴油机 MT883Ka-500 的气缸直径为 140 mm，新开发的 890 系列柴油机的气缸直径只有 110 mm，通过缩小气缸直径、减小缸心距，使发动机的体积大幅度缩减，这种趋势也可以从图 1-1 中看出来。

表 1-2 2013 年世界十佳发动机参数

国家	发动机 型号	气缸 排列 及缸数	缸径 (D/mm) × 冲程 (S/mm)	iV_s/L	$(P_e/kW) /$ [$n/ (r \cdot$ $\min^{-1})$]	[$T_{iqmax}/$ (N · m)] / [$n/ (r \cdot$ $\min^{-1})$]	压缩 比	p_{me} /MPa	$P_L/$ (kW · L ⁻¹)	备注
德国	奥迪 3.0 L TFSI 增压 发动机	V 型 6 缸	84.5 × 89	2.995	245/ (5 500 ~ 6 500)	440/ (2 900 ~ 5 300)	10.3	1.51	81.80	缸内直喷、 机械增压
	宝马 2.0 L N20 涡轮增 压发动机	直列 4 缸	84 × 90.1	1.997	178/ (5 000 ~ 6 000)	345/ (1 250 ~ 4 800)	10.0	1.78	89.13	双涡轮单涡 轮、电子节 气门、Double VANOS

续表

国家	发动机 型号	气缸 排列 及缸数	缸径 (D/mm) × 冲程 (S/mm)	iV_s/L	$(P_e/\text{kW}) /$ [$n/(\text{r} \cdot$ $\text{min}^{-1})$]	$[T_{iqmax}/$ ($\text{N} \cdot \text{m}$)] / [$n/(\text{r} \cdot$ $\text{min}^{-1})$]	压缩 比	p_{me} /MPa	$P_L/$ ($\text{kW} \cdot$ L^{-1})	备注
德国	宝马 3.0 L N55 涡轮 增压发动机	直列 6 缸	84 × 89.6	2.979	238/5 800	429/ (1 300 ~ 5 000)	10.2	1.65	79.89	双涡管涡轮、电子节气门、Double VANOS
美国	克莱斯勒 3.6 L Pentastar	V 型 6 缸	—	3.604	210/6 350	347/4 300	10.2	1.10	58.27	双可变气门正时系统
	福特 2.0 L EcoBoost 涡轮 增压发动机	直列 4 缸	87.3 × 83	1.999	187/5500	366/2 500	9.3	2.04	93.55	涡轮增压、缸内直喷
	福特 5.8 L 机械增压发动机	V 型 8 缸	93.4 × 105.7	5.817	485/6 250	813/4 000	9.0	1.60	83.38	机械增压
	通用 LTG 发动机	直列 4 缸	86 × 86	1.998	203/5 500	353/ (1 700 ~ 5 500)	9.5	2.22	101.60	双涡管涡轮增压、缸内直喷、DVVT、活塞喷雾冷却、两级可变排量机油泵等
日本	本田 2.4 L K24 W3	直列 4 缸	87 × 99.1	2.356	192/6 400	247/3 900	11.1	1.53	81.49	缸内直喷、DOHC、i-VTEC (可变气门升程 + 可变气门正时)
	本田 3.5 L V6 J35Y1 自然吸气 汽油机	V 型 6 缸	89 × 93	3.471	207/6 200	342/4 900	10.5	1.15	59.64	i-VTEC 可变气门升程、VCM 可变气缸管理技术
	斯巴鲁 FA20 2.0 L 自然吸气 汽油机	水平对 置 4 缸	86 × 86	1.998	148/7 000	205/6 400	12.5	1.27	74.07	混合喷射，DOHC

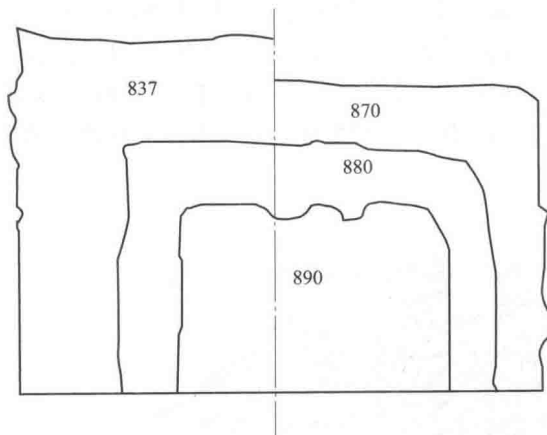


图 1-1 MTU 不同机型的发展示意图

1.5 典型车用发动机结构简介

1.5.1 点燃式发动机

图 1-2 和图 1-3 所示为一汽集团为满足轻型轿车和微型客车需要而开发的 CA4GA 系列汽油机的横、纵剖图。发动机采用 16 气门、可变进气正时、塑料进气管、电子节气门、电控多点燃油喷射系统、静音链传动、耦合式不锈钢排气管、镁铝气缸盖罩盖和链条式罩盖等新技术和新材料，并利用增压技术提高发动机的动力性和经济性，采用缓啮合强制起动电动机实现了怠速停机，降低了交通堵塞地区的燃油消耗和尾气排放。其升功率达到 71 kW/L，扭矩达到 135 N·m/L，满足国 IV 排放标准，燃油消耗率低于国家第 2 阶段燃油消耗标准限值。

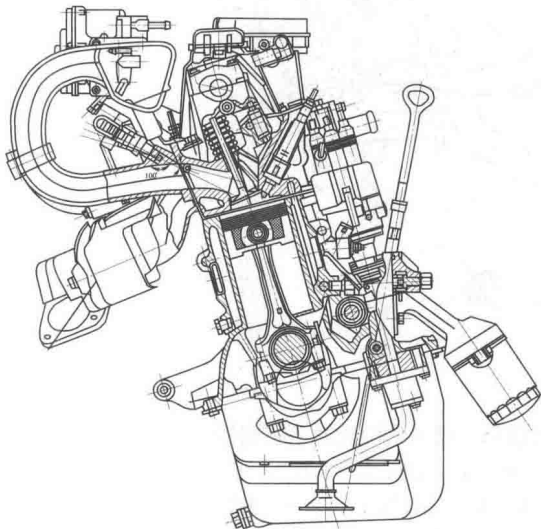


图 1-2 一汽集团生产的 CA4GA 发动机横剖图

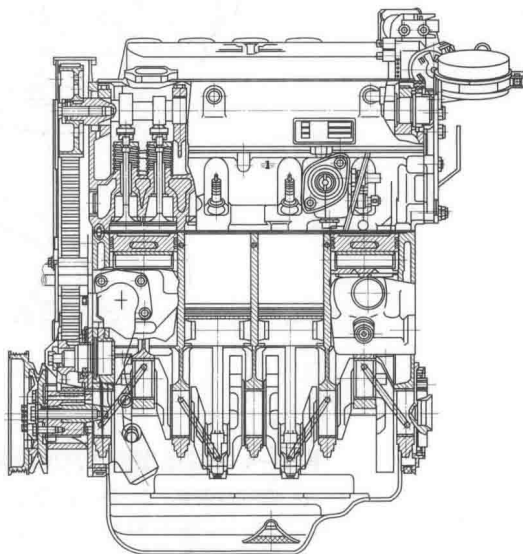


图 1-3 一汽集团生产的 CA4GA 发动机纵剖图

图1-4所示为日本三菱自动车工业株式会社的3G81型多点汽油喷射增压中冷型5气门汽油机的横剖图。5气门包括3个进气门和2个排气门，进排气门采用双顶置凸轮轴(Double Over Head Cam, DOHC)技术，发动机的供油系统采用多点喷射，气缸数为3，其升功率达到85.7 kW/L，扭矩达到135.9 N·m/L，采用涡轮增压系统来提高其动力性及经济性。

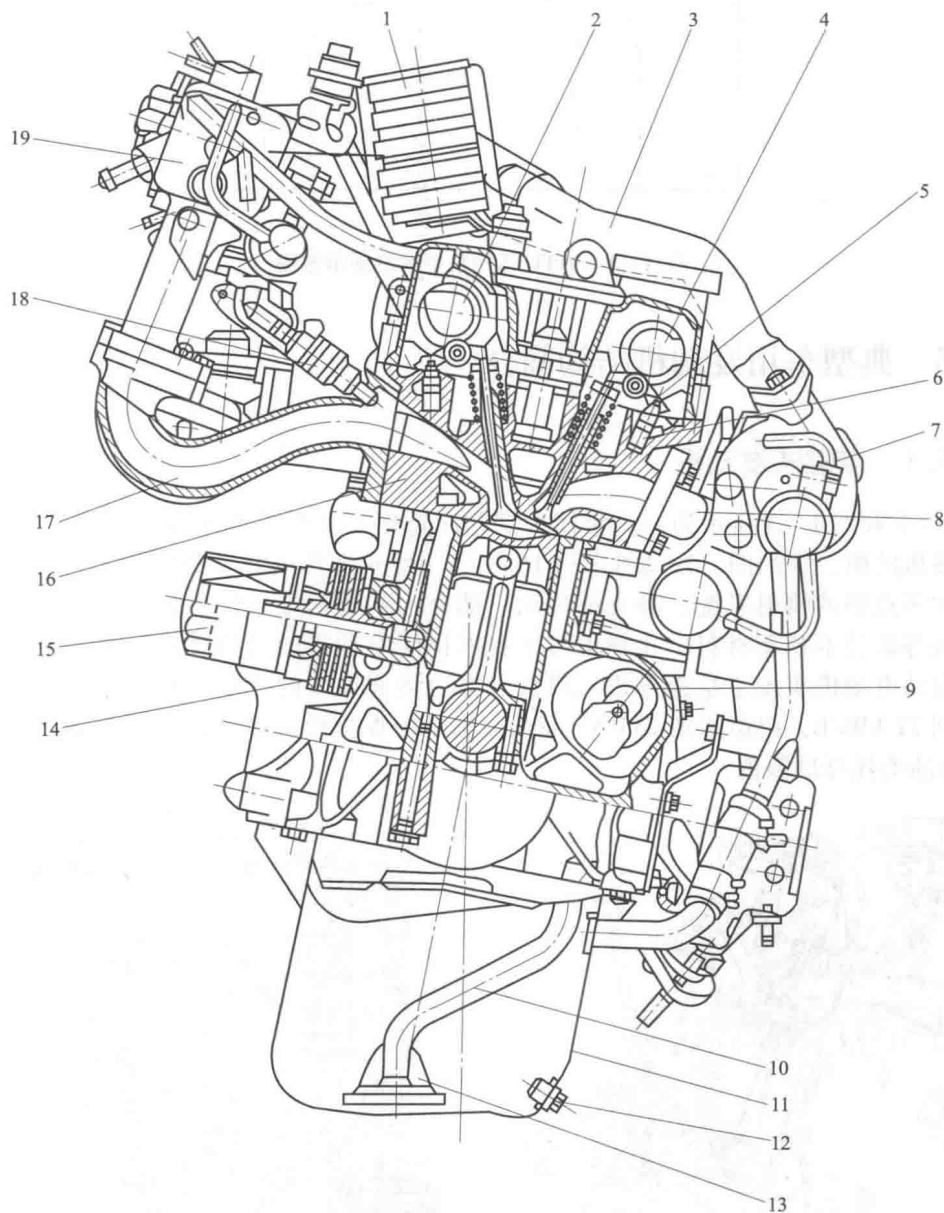


图1-4 3G81型多点汽油喷射增压中冷型5气门汽油机横剖图

- 1—空气滤清器；2—进气凸轮轴；3—增压器出气管；4—排气凸轮轴；
 5—摇臂；6—液压挺柱；7—废气涡轮增压器；8—排气歧管；9—平衡轴；
 10—机油管；11—油底壳；12—放油螺塞；13—机油机滤器；14—机油冷却器；
 15—机油滤清器；16—气缸盖；17—进气歧管；18—汽油喷射器；19—中冷器