



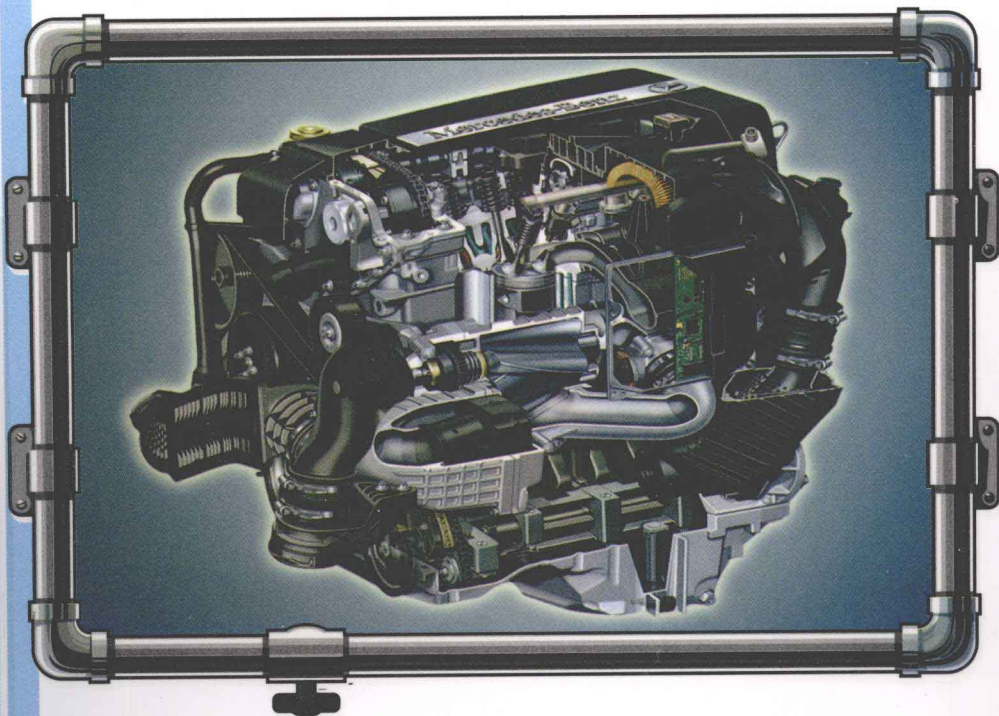
21世纪全国高等院校汽车类**创新型**应用人才培养规划教材

汽车发动机原理

(第2版)

韩同群 主 编

- ✓ 增加汽车发动机发展简史内容
- ✓ 增补电子控制技术的前沿知识
- ✓ 理出知识主线使形散而神不散



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书讲述汽车常用动力——点燃式和压燃式内燃机的基本理论, 兼顾新型车用动力技术, 包括燃料电池和混合动力驱动技术等。全书分为 4 篇, 共 12 章。绪论介绍了汽车发动机的发展简史和发展前景。第一篇讲述了与热力发动机密切相关的热工基础知识, 主要包括工程热力学和传热学的基础理论与应用。第二篇在热力学基本定律基础上论述广泛应用的车用发动机——往复式内燃机的能量转换以及循环充量的原理和规律, 即动力输出与能量利用问题。第三篇讨论内燃机的燃烧与排放问题, 包括内燃机的燃烧过程、规律与有害排放物及噪声控制。第四篇讨论了内燃机应用于汽车动力时具有重要影响的运行特性与性能调控问题。

作者根据多年来对车辆工程、交通运输、汽车运用等非内燃机专业讲授汽车发动机原理的经验, 编写了本书内容, 坚持了实用性原则, 并对汽车发动机前沿技术等内容做了较大补充修改。

本书一般作为汽车类专业本科生教材使用, 也可供从事汽车及发动机科技工作人员参考, 同时也较适于初学发动机原理的读者自学之用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理/韩同群主编. —2 版. —北京: 北京大学出版社, 2012. 8

(21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21012-3

I. ①汽… II. ①韩… III. ①汽车—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(2012)第 170660 号

书 名: 汽车发动机原理(第 2 版)

著作责任者: 韩同群 主编

策 划 编 辑: 童君鑫 宋亚玲

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-21012-3/TH·0304

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 510 千字

2007 年 8 月第 1 版

2012 年 8 月第 2 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 42.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

第 2 版前言

随着汽车工业的发展及社会对汽车类人才需求的增加,设置车辆工程、交通运输、汽车运用等专业的院校越来越多。传统上,上述专业在学习发动机原理之前,应开设工程热力学、传热学等课程,但这两门课内容多、课时长。由于教学改革的需要,上述课程被压缩了学时,也有的取消了这两门课。但是,学习发动机原理,没有热工方面的知识作基础是不够的,也会给以后的工作带来不便。

《汽车发动机原理》(第 2 版)是在第 1 版的基础上修订的。与第 1 版相比,第 2 版增加了绪论“汽车发动机发展简史”,对“热力工程基础”部分做了较大修改,将第 1 章热力学第一定律,第 2 章热力学第二定律,第 3 章燃烧学基础,第 4 章传热过程,分别修改为第 1 章热机与热功转换的基本规律,第 2 章发动机的理论循环,第 3 章发动机的燃料与燃烧,第 4 章发动机的传热。

有关往复式内燃机的工作原理方面,在教学实践中,学生反映知识与内容“太散”,抓不住主线。本书理出的知识主线是:“热功转换的基本规律——动力的输出与能量利用——燃烧与排放——发动机性能的测试、调控与应用”。全书分篇、章编写,使知识结构脉络清晰、层次分明,达到“形散而神不散”的效果。

汽、柴油机电子控制技术,涉及混合气形成、点火、可变技术、排放控制等内容也做了简要修改,增补了部分前沿知识。

本书由湖北汽车工业学院韩同群教授担任主编,姚胜华副教授担任副主编,参加编写的有姚胜华(第 1、2、3、4 章),甘肃农业大学黄晓鹏(第 5、6、7 章),鲁东大学苑金梁(第 8、9 章),湖北理工学院袁焕(第 10 章),韩同群(第 11、12 章)。本书建议学时在 60~80 学时(包括实验)。

本书的面向对象,除车辆工程、交通运输、汽车运用等专业的本科生外,专科生、3+2 等层次的汽车类专业学生也可选用,因此,本书可以适应不同层次、不同学时的需要,如不讲“燃烧学基础”和“传热过程”,本书学时可精简到 40~50 学时。

由于编者水平有限,疏漏之处在所难免,欢迎使用本书的广大师生批评指正。

编者

2012 年 6 月

目 录

绪论 汽车发动机发展简史	1	第3章 发动机燃料与燃烧	46
第一篇 热力工程基础	11	3.1 发动机的传统燃料	46
第1章 热机与热功转换的基本规律	13	3.1.1 烃的分类、构成和性质 ...	46
1.1 热能在热机中转换为机械功的过程	13	3.1.2 汽油和柴油的使用特性 ...	49
1.2 热功转换的工质及其参数	14	3.1.3 燃料特性引起的发动机工作模式上的差异	55
1.2.1 工质及状态参数	14	3.2 发动机代用燃料	56
1.2.2 状态参数的坐标图	16	3.2.1 气体燃料	56
1.2.3 功和热量	16	3.2.2 液体燃料	58
1.2.4 热力学第一定律	18	3.3 燃烧热化学	61
1.3 理想气体的热力过程	21	3.3.1 1kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量	61
1.3.1 理想气体的热力性质	21	3.3.2 过量空气系数 $\phi_a > 1$ 时完全燃烧产物的数量	62
1.3.2 理想气体的热力过程及参数计算	24	3.3.3 燃料热值与混合气热值 ...	62
1.3.3 理想气体热力过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图	30	3.4 燃烧的基础知识	63
1.4 热功转换的效率	34	3.4.1 着火与燃烧	63
1.4.1 热机循环	34	3.4.2 烃的氧化反应	63
1.4.2 热力学第二定律	36	3.4.3 自燃与点燃	65
思考题与习题	37	3.4.4 发动机的燃烧模式	66
第2章 发动机的理论循环	39	3.5 燃料电池	70
2.1 四行程发动机理论循环的计算 ...	39	3.5.1 燃料电池结构	70
2.1.1 对发动机实际工作过程的简化	39	3.5.2 燃料电池的工作原理	71
2.1.2 理论循环的热效率和平均指示压力的计算	41	思考题与习题	73
2.2 理论循环热效率和平均指示压力的影响因素	42	第4章 发动机的传热	75
2.3 理论循环热效率比较	44	4.1 热量传递过程概述	75
思考题与习题	44	4.1.1 热传递的概念	75
		4.1.2 热传递的3种基本方式 ...	76
		4.2 导热过程	76
		4.2.1 导热现象分析	76
		4.2.2 导热机理	78
		4.2.3 导热问题分析过程	78



4.2.4 一维稳态导热问题	78	5.4.4 发动机的热平衡	128
4.3 对流换热	84	5.5 提高发动机性能指标的途径	130
4.3.1 对流换热的计算	84	5.5.1 发动机能量的合理利用 ...	130
4.3.2 对流换热系数 α 的各种 关联式及应用举例	87	5.5.2 决定动力输出的“量”与 “质”的两大因素	134
4.4 辐射换热	90	5.5.3 影响发动机动力性、 经济性的因素	137
4.4.1 辐射换热的基本知识	90	思考题与习题	138
4.4.2 两物体间的辐射换热量的 计算	94	第6章 换气过程与循环充量	139
4.4.3 气体辐射	97	6.1 四冲程发动机的换气过程	139
4.4.4 火焰辐射	99	6.1.1 换气过程	139
4.5 发动机换热分析	100	6.1.2 换气损失	142
4.5.1 发动机中导热问题的 求解方法	100	6.2 四冲程发动机的充量系数	143
4.5.2 燃气与壁面间的辐射 换热	101	6.2.1 充量系数解析式	143
4.5.3 燃气与壁面间的瞬时综合 换热系数	102	6.2.2 影响充量系数 ϕ_c 的 因素	144
思考题与习题	103	6.2.3 提高发动机充量系数 措施	146
第二篇 动力输出与能量利用	107	6.3 二冲程发动机的换气过程	151
第5章 发动机实际循环与评价 指标	109	6.3.1 换气过程	151
5.1 四冲程发动机的实际循环	109	6.3.2 二冲程发动机换气过程的 特点	152
5.1.1 发动机的实际循环	109	6.3.3 二冲程发动机的扫气 方案	152
5.1.2 发动机实际循环与理论 循环的比较	113	6.3.4 换气效果的评价	154
5.2 发动机的指示指标	116	6.3.5 影响扫气效率的因素	154
5.2.1 发动机的示功图	116	思考题与习题	155
5.2.2 发动机的指示性能 指标	117	第7章 发动机废气涡轮增压	156
5.3 发动机的有效指标	120	7.1 发动机增压的基本方法与原理 ...	156
5.3.1 动力性指标	120	7.1.1 增压的概念	156
5.3.2 经济性指标	122	7.1.2 增压发动机的特点	157
5.3.3 强化指标	122	7.1.3 增压的衡量指标	158
5.4 机械损失与机械效率	123	7.1.4 增压的结构形式及分类 ...	158
5.4.1 机械效率	123	7.2 废气涡轮增压器的基本结构和 工作原理	161
5.4.2 机械损失的测定	124	7.2.1 径流式废气涡轮的工作 原理	161
5.4.3 影响机械效率的主要 因素	127	7.2.2 离心式压气机的工作 原理与特性	163

7.3 废气涡轮增压的类型与废气能量的利用	167
7.3.1 废气涡轮增压的类型	167
7.3.2 废气能量的利用	167
7.3.3 定压增压系统与脉冲增压系统的比较和选择	170
7.4 废气涡轮增压对发动机性能的影响	171
7.4.1 废气涡轮增压对发动机动力性和经济性的影响	171
7.4.2 改善废气涡轮增压发动机转矩特性的途径	173
7.4.3 废气涡轮增压对发动机其他性能的影响	174
7.5 汽油机增压	175
7.5.1 汽油机增压的特点	176
7.5.2 汽油机涡轮增压的主要技术措施	176
7.5.3 汽油机废气涡轮增压器的布置	177
思考题与习题	179

第三篇 燃烧与排放

第8章 汽油机混合气的形成和燃烧

8.1 汽油机燃烧过程	183
8.1.1 正常燃烧过程	183
8.1.2 不规则燃烧	185
8.1.3 不正常燃烧	186
8.1.4 运转因素对燃烧的影响	188
8.2 汽油机混合气制备原理	190
8.2.1 汽油机理想混合气特性	190
8.2.2 化油器式供油系统混合气的形成原理	193
8.2.3 电控燃油喷射式供油系统混合气的形成	195
8.3 汽油机的燃烧室	199
8.3.1 汽油机对燃烧室的要求	199

8.3.2 传统汽油机燃烧室	201
8.3.3 汽油机稀薄燃烧系统	202
思考题与习题	209

第9章 柴油机混合气的形成和燃烧

9.1 柴油机燃烧与放热	210
9.1.1 柴油机燃烧过程	210
9.1.2 柴油机燃烧放热规律	213
9.2 柴油机混合气的形成原理	216
9.2.1 燃油的喷射与雾化	216
9.2.2 燃烧室与混合气形成	222
9.2.3 柴油机的预混合燃烧	231
9.3 燃烧过程的优化	233
9.3.1 燃烧优化过程的基本原则	233
9.3.2 燃油喷射过程的优化	235
9.3.3 燃烧室的对比及选型	239
思考题与习题	240

第10章 发动机的排放与噪声控制

10.1 发动机排放物的种类及危害	242
10.1.1 概述	242
10.1.2 发动机排放污染物的危害	243
10.1.3 发动机排放污染物的生成机理	244
10.2 影响汽油机有害排放物生成的主要因素及控制措施	249
10.2.1 影响因素	249
10.2.2 机内净化技术	251
10.2.3 机外净化技术	255
10.3 影响柴油机有害排放物生成的主要因素及控制措施	258
10.3.1 柴油机有害排放物生成特点	258
10.3.2 影响因素	258
10.3.3 机内净化技术	259
10.3.4 机外净化技术	263
10.4 发动机排放法规与测试	265



10.4.1 排放法规	265	11.3.4 混合动力驱动技术	309
10.4.2 排放物测定	265	思考题与习题	313
10.5 发动机噪声来源与控制	272	第12章 发动机性能与参数调控	
10.5.1 发动机噪声的来源	273	技术	314
10.5.2 噪声控制措施	275	12.1 发动机调控技术的发展	314
思考题与习题	276	12.1.1 传统的机、液调控	
第四篇 运行特性与性能调控	279	装置	315
第11章 发动机运行特性与匹配		12.1.2 电子控制系统在	
技术	281	发动机中的应用	315
11.1 发动机的特性	281	12.1.3 发动机(汽车)管理	
11.1.1 工况、工况平面与功率		中心	317
标定	281	12.2 汽油机计算机管理系统	318
11.1.2 发动机运行特性及其分析		12.2.1 控制功能	318
方法	283	12.2.2 燃油喷射的控制	320
11.2 发动机性能测试	284	12.2.3 综合控制策略	325
11.2.1 台架试验设备	284	12.3 电控技术在柴油机上的	
11.2.2 功率和油耗的测量	285	应用	329
11.2.3 试验方法及数据处理 ...	289	12.3.1 电控燃油喷射系统的	
11.3 发动机运行特性与汽车匹配 ...	292	种类	329
11.3.1 发动机的速度特性与汽车		12.3.2 控制功能和控制	
动力性匹配	292	策略	335
11.3.2 车用柴油机的调速		思考题与习题	336
特性	298	附录 符号说明	337
11.3.3 发动机的负荷特性、		参考文献	339
万有特性与汽车			
经济性匹配	303		

绪论

汽车发动机发展简史

1. 蒸汽机的发明与改进和作为汽车动力的使用

汽车是人类 20 世纪最伟大的发明之一，而汽车的概念及其发展是从蒸汽机的发明开始的。汽车动力从蒸汽机开始，其发展历程遵从了“适者生存”的法则，在车用动力小型化、轻量化、高功率化、高效率化的要求下，经历了从蒸汽机汽车发展到内燃机汽车，辅以电动汽车，推动了汽车动力不断发展。

首先是蒸汽机的发明与改进。16 世纪末至 17 世纪初，物理学上进行了关于蒸汽、大气和真空的相互作用 3 个实验，即英国包尔塔的蒸汽压力实验、托里拆利（流体力学奠基人之一）和帕斯卡的大气压力实验以及那末格里凯的真空作用实验，为蒸汽动力技术的产生奠定了实验科学基础。

法国著名物理学家、工程师巴本(Denis Papin, 1647—1712)，从炼铁厂使用的活塞式风箱中受到启发，将风箱变为气缸，风箱中的活塞变为气缸中的活塞。先向气缸底部注入少量的水，再把气缸放到火上加热。当气缸内的水沸腾后，蒸汽推动活塞上升；然后把火从气缸下抽掉，让气缸内的蒸汽冷凝，气缸内产生真空，在大气压推动下，活塞下降。通过这一实验，巴本总结出两个重要结论。

(1) 利用蒸汽压力、大气压力、真空的相互作用，可以推动活塞及其活塞杆做往复直线运动。

(2) 运动产生的机械动力可以带动其他机械运动。

由此发明了带有活塞的蒸汽泵，之后考虑到蒸汽压力过大可能会引起气缸爆炸，发明了安全阀。

继巴本之后，英国机械工程师赛维利(T. Savery, 1650—1715)根据包尔塔的蒸汽压力原理，气缸内不采用活塞，只接有吸水管、排水管和进气管。当锅炉里的蒸汽经过进气管进入气缸后被冷却，造成的真空把矿井中的水经吸水管吸出，再将蒸汽注入气缸，所产生的压力就把水从排水管排出，本质上形成一个蒸汽泵。

托马斯·纽卡门(Thomas Newcomen)在赛维利蒸汽泵的基础上引入巴本的活塞装置，先使蒸汽进入气缸推动活塞，再通过水龙头向气缸内喷溅冷水进行冷却，使活塞返回。这样，在蒸汽压力、大气压力和真空的相互作用下，活塞可做往复运动，经过反复试制，1712 年纽卡门蒸汽机问世。

蒸汽机的问世，激发了许多科学家的创造性思维。1764 年，瓦特研究了纽卡门蒸汽机的两大缺点，即燃料消耗量大，效率低，只能做往复直线运动，除了用于矿井抽水之



外,再也没有其他用途,而蒸汽浪费达八成以上。为此,瓦特提出了采用与气缸分离的冷凝器设计方案,并在气缸外面加绝热套,使气缸保持高温状态。同时,在冷凝器与气缸之间用一个调节阀相连接,使二者既能连通又能分开。这样,既能把做功后的蒸汽引入气缸外的冷凝器进行冷却,使气缸内产生真空,又避免了气缸在冷、热过程中的热量损失。1769年,瓦特因发明冷凝器而获得他在革新纽卡门蒸汽机过程中的第一项专利。

带有冷凝器的蒸汽机虽然试制成功,但与纽卡门蒸汽机相比,除了热效率有显著提高外,由于只有直线运动还是无法作为真正的动力机械。瓦特受到行星绕太阳做圆周运动以及钟表齿轮的圆周运动的启发,设计出把活塞往复直线运动转换成旋转运动的齿轮联动装置,并且为了使轮轴的旋转运动更均匀,在轮轴上安装了飞轮。这一革新使瓦特蒸汽机成为能驱动诸多设备的动力机械。1781年,瓦特以发明齿轮式机械联动装置获得了第二项专利。

为了进一步提高蒸汽机效率,瓦特在发明了齿轮联动装置后,于1782年试制出带有双向进、排汽装置的新型气缸,即蒸汽能推动活塞往返运动,这样效率提高了一倍,并将引入气缸的蒸汽由低压变为高压,由此获得第三项专利。

通过以上三次技术改进,纽卡门蒸汽机演变成瓦特蒸汽机。1784年,瓦特以带有飞轮、齿轮联动装置和双向进排汽装置的高压蒸汽机的综合装置取得了他在革新纽卡门蒸汽机过程中的第四项专利。1788年,瓦特又发明了离心调速器和节气阀;1790年,又发明了气缸示功器,能显示气缸中压力变化过程。至此,瓦特完成了他发明和改进蒸汽机的全部过程。

瓦特蒸汽机热效率约为3%,对蒸汽机的近代化做出了重要贡献,以后,蒸汽机的发展、推广、应用经历了约70年。1814—1829年英国科学家史蒂芬森(Stevenson)制成了蒸汽机车,如图0.1所示。

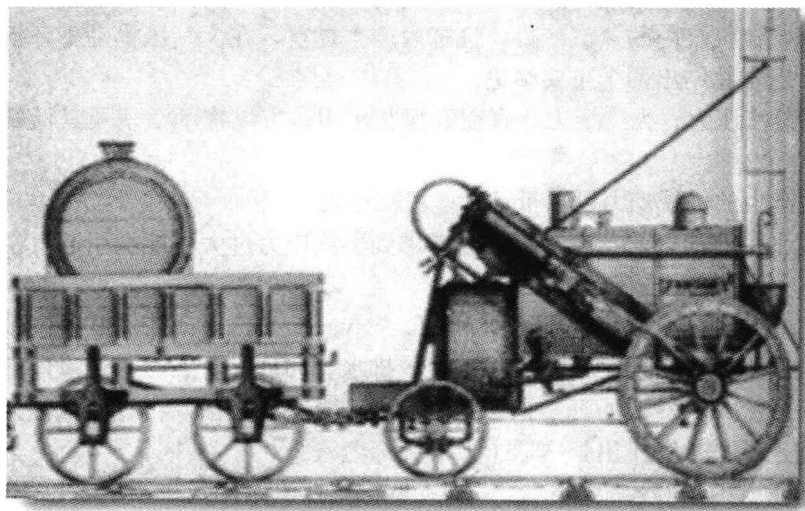


图 0.1 英国人史蒂芬森制成的蒸汽机车

从19世纪中叶开始到20世纪二三十年代为蒸汽机广泛应用的全盛时期。1769年法国陆军工程师古诺制造出第一辆蒸汽机驱动的汽车(图0.2),1771年,古诺改进了蒸汽汽车,时速可达9.5千米,牵引4~5吨的货物。不久,英国出现了第一辆载人蒸汽汽车

(图 0.3)，之后蒸汽机汽车进入全盛时期。图 0.4 为英国早期营运中的蒸汽机公共汽车。

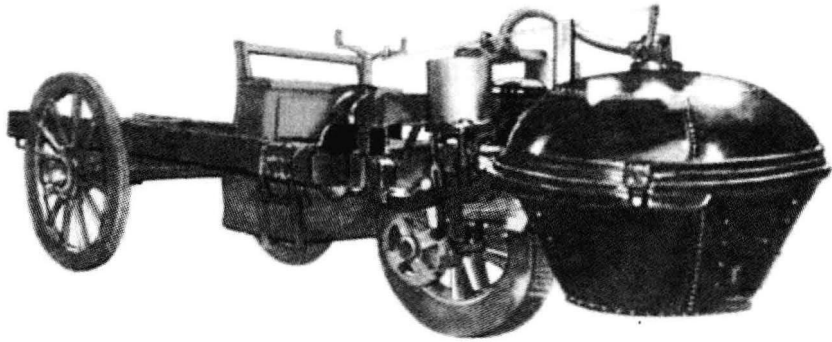


图 0.2 法国人古诺制成第一辆蒸汽机驱动的汽车

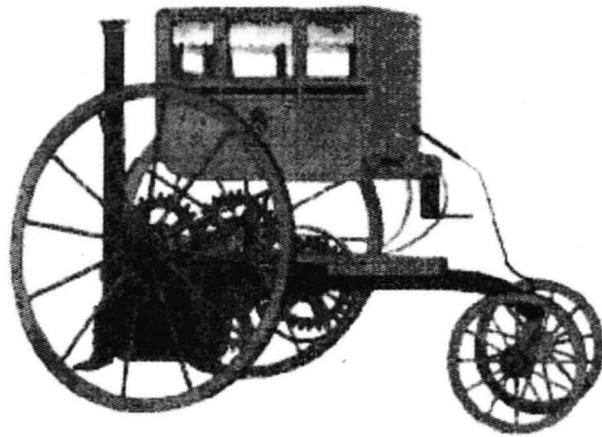


图 0.3 第一辆载人蒸汽汽车



图 0.4 英国早期营运中的蒸汽机公共汽车



2. 四行程理论与内燃机的发明

1) 四行程理论及其实现

瓦特蒸汽机要使用锅炉, 体积庞大、效率低。要克服蒸汽机的这一缺点, 必须解决锅炉与气缸分离的问题。其基本方案是使燃烧在气缸中进行, 许多科学家在此方面做了探索, 如利用燃烧烟气冷却后产生的真空来抽水; 利用火药在气缸内爆炸所产生的压力来驱动活塞; 用氢气和空气的混合燃料燃烧时所产生的压力来推动活塞等。

1673—1680 年荷兰物理学家柯·惠更斯(Christian Huygens)首先提出了用火药燃烧的高温燃气在气缸中冷却后形成真空来带动活塞做功, 第一次把燃气与活塞联系起来, 实现了“内燃”。1794 年, 英国科学家罗伯特·斯特林(Robert Street)提出燃用松节油或柏油的“内燃”机原理, 提出燃料与空气混合推动活塞做功。1799 年法国化学家莱蓬(Lebon)建议采用煤气作燃料并用电火花点火。1820 年英国人塞歇尔提出(W. Cecil)用氢作燃料。

经过 70 多年的探索、改进, 1860 年法国人兰诺(Lenoir)研制成功第一台实用的二行程、无压缩、电火花点火的煤气机。其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%, 但混合气不进行压缩。其原因是当时认为对混合气燃烧前进行预压缩要消耗额外的功, 且不能证明预压缩可提高热效率。

随着热力学和传热学理论的发展, 1862 年法国铁路工程师包·德·罗沙(Beau de Rochas)分析了内燃机的做功过程, 认为要提高热效率须满足 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。

因此, 这是第一次提出了近代内燃机等容燃烧的四行程循环原理。所以, 内燃机在蒸

汽机结构的基础上发展, 它在气缸内而不是在气缸外燃烧燃料, 从而诞生了按四行程循环方式工作的内燃机。

1876 年, 德国的奥托(Nikolaus August Otto)的四行程煤气机完成了历史性的台架试验, 诞生了世界上第一台煤气机(图 0.5)。该煤气机为单缸、四行程、卧式、按等容燃烧, 压缩比为 2.5, 功率为 2.94kW, 热效率为 12%~14%, 运转平稳, 体积小, 很快得到推广应用。

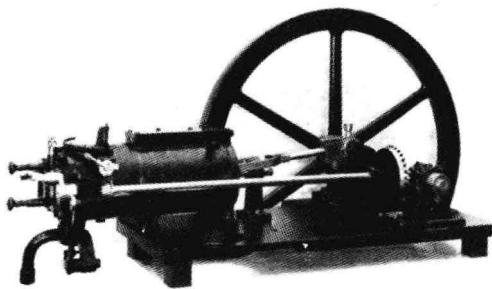


图 0.5 第一台煤气机

点燃式内燃机的发明是在将曲柄连杆机构从蒸汽机(外燃机)移植到内燃机的实践中实现的,因此煤气机和汽油机开发初期的首要问题是如何在气缸内快速形成混合气并可靠点火。最初,一些气体燃料满足这一要求。1900年,原油中的轻馏成分(汽油)成为商品,出现了将汽油气化并与空气混合的化油器,汽油逐渐占据了主导地位。

柴油机的发明过程却与汽油机不同,由于蒸汽机的发展和汽油机的发明,热力学理论更进一步完善。德国工程师鲁道夫·狄塞尔(Rudolf Diesel),针对当时蒸汽机与汽油机热效率低、着火困难等问题,从热力学角度分析,认为从根本上提高循环热效率的途径是实现卡诺循环,而卡诺循环的核心是实现等温吸热和放热。

1878年,狄塞尔研究从实用角度实现等温过程,进而实现卡诺循环。当时改善蒸汽机热效率的主要途径就是利用过热蒸汽,通过研究确认,为了合理利用过热蒸汽的热量必须具备高压,而在高压下过热蒸汽几乎全部成为气态。一种新的思想产生了,即将蒸汽替换成高温高压的空气,在其中逐渐导入已微粒化的燃料,使之燃烧加热空气,并充分膨胀做功。他从热力学角度进行了全面理论分析和验证,并把其研究结果写成《合理的热力发动机理论和构造》一书,提出了用煤粉作燃料、压缩点火的内燃机循环,最终于1893年获得了关于内燃机工作方式及其实现的第一个专利。

狄塞尔通过研究热机存在的机械损失,认识到卡诺循环的热效率仅仅是理论上的,它只取决于温度,而对实际内燃机而言并非最高温度而是最高压力起决定性作用。因此,为了获取更高的升功率和机械效率,他放弃自己在理论研究过程中所提出的等温过程,同时于1895年发表了关于《具有在压力变化过程中可变燃料导入期的内燃机》一文,并获得有关柴油机发明过程中的第二个专利。其基本思想如下。

(1) 通过气缸内活塞的压缩将纯空气压缩加热至超过燃料的自燃温度。

(2) 将微粒化的燃料导入缸内高温高压的空气中燃烧,由此推动活塞做功。

后来,微粒化的燃料从煤粉发展到原油中的重馏成分——柴油。由此,狄塞尔创立了压缩自燃发动机的工作模式,其本质就是燃料自行着火。1897年,研制成功具有实用价值的柴油机,当时指示热效率就达到38.6%,后经改进其热效率高达46%,成为热效率最高的热机。

2) 内燃机在汽车上的应用

1886年,德国的卡尔·本茨(Karl Benz)和戈特里布·戴姆勒(Cottlieb Daimler)按奥托的四行程原理,造出了第一台本茨车用汽油机(单缸,0.78L,0.65kW,400r/min)和戴姆勒车用汽油机(单缸,0.6L,0.81kW,650r/min)。将这种体积小、重量轻、又具有足够动力的机器安在车上驱动其前进,产生了内燃机动力汽车。

1886年戈特里布·戴姆勒(Cottlieb Daimler)和卡尔·本茨(Karl Benz)成为世界第一辆汽车的发明者。图0.6为卡尔·本茨的三轮汽车,图0.7为戈特利布·戴姆勒的四轮汽车。

到1936年,柴油机作为汽车的动力才应用于汽车上,并由戴姆勒—奔驰汽车公司安装在梅赛德斯·奔驰牌260D型轿车上,成为第一台柴油汽车。

内燃机的问世改变了庞大的蒸汽机牵引小车的局面,从笨重而破坏公路、移动迟缓而影响交通的汽车,变成小型轻量而快速灵活的汽车。因此,汽车动力逐渐被内燃机所替代。1927年,蒸汽汽车的生产彻底停止了。

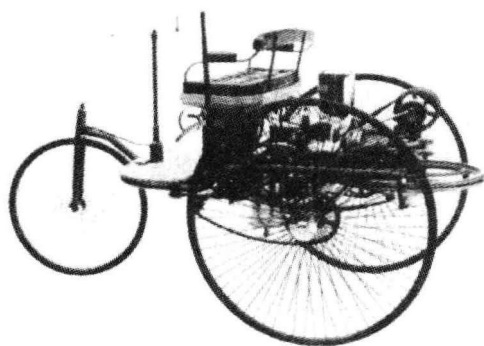


图 0.6 卡尔·本茨的三轮汽车

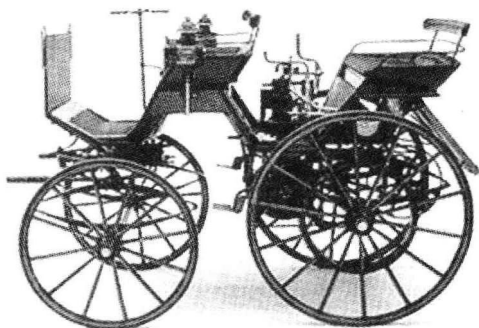


图 0.7 戈特利布·戴姆勒的四轮汽车

3. 车用内燃机的发展历程

1) 车用内燃机的主要标志性技术

以汽油机为代表的点燃式内燃机和以柴油机为代表的压燃式内燃机发明以后,其结构和系统在不断完善,但其基本的结构方案——往复活塞和曲柄连杆机构始终未变,学者们也提出了各种回转式内燃机方案,一直到1956年才由德国人汪克尔(F. Wankel)试验成功了转子发动机。经过多年努力和发展,解决了密封和缸体开裂等技术问题,其才得到一定范围的应用,但往复活塞式内燃机仍然占主体。

内燃机广泛应用于汽车、机车、船舶、工程机械甚至航空等领域,是用途最广的动力机械,并且作为汽车动力,在材料与制造技术、电子控制与智能技术、节能与环保技术、燃料与燃烧技术等方面不断发展进步,各种新技术互相交叉、互相渗透,性能指标不断优化和提升。

内燃机发明之前,有些技术已经奠定了基础。例如,1796年意大利科学家沃尔兹发明了蓄电池;1838年英国人亨纳特发明了点火装置;1858年法国工程师洛纳因发明了用陶瓷绝缘材料制成的电点火火花塞;1859年法国普朗特又发明了铅酸蓄电池等。

燃料在内燃机的发展过程中起了极其重要的作用,最早是用煤气的点燃式内燃机,1900年之后应用汽油,从而出现了各种将汽油汽化并与空气混合的化油器。随着汽油需求量增长,威廉·伯尔顿(William Burton)发明了将重油在压力下加热裂解成易挥发的汽油的技术,大大提高了汽油的产量。但这种汽油沸点较高,从而使起动困难,需要较高转速。1912年起动电动机问世,较好地解决了这一问题。

第一次世界大战以后,1921年通用汽车公司托马斯·米杰里发现了四乙基铅在汽油中的抗爆作用,1923年美国开始将其用来作为汽油的添加剂。尤金·荷德莱(Eugene Houdry)又发明了对原油的催化裂化法,既提高了汽油的产量,同时使汽油获得更好的抗爆性,从而使内燃机的压缩比不断增加,提高了其动力性与经济性。

在内燃机增压方面,1902年法国的路易斯·雷诺(Louis Renault)提出了增加缸内压力的发明专利,也就是后来被广泛应用的机械增压。1907年美国宾夕法尼亚的一家工厂试制成功了世界上第一台增压内燃机,它采用了曲轴通过传动带驱动离心式压气机的机械增压方案。1915年,瑞士工程师阿尔弗雷德·波希(Alfred Buchi)将这种增压器的机械驱动方式改造成为内燃机的排气涡轮驱动方式。二战后,增压技术开始在柴油机上得到广泛

应用,并逐步扩展到汽油机中。

同时,汽车和内燃机相关技术进入加速发展期。例如,20世纪60年代内燃机技术主要以提高可靠性、耐久性为主,标志性的技术有:滑动轴承使用三层轴瓦;过共晶硅—铝活塞,并使用恒范钢片和开槽;活塞环镀层;轴颈的感应淬硬和氮化;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;高转速气门间隙补偿液力元件(液力挺柱);等等。另外也出现了从单腔化油器到分腔化油器到电控化油器的演变。1967年,汽油喷射系统应用在大众 VW1600 汽油机上,晶体管点火、轴向与径向式分配式喷油泵也得到应用。

20世纪70年代初,由于石油危机导致原油价格成倍上涨,因此引起对内燃机燃油经济性的重视。同时,也注意到了工业化及汽车带来的严重的环境污染。早在20世纪40年代在洛杉矶出现了由汽车排放物形成的空气污染事件后,1952年哈琴·史密特(A. J. Haagen Smit)阐明了光化学烟雾来自日照下的氮氧化合物和碳氢化合物所产生的化学反应的原理,而氮氧化合物、碳氢化合物以及一氧化碳主要来自汽车排气,柴油机又是烟气微粒和氮氧化合物的主要来源。20世纪60年代美国加州首先建立了汽车排放标准,接着在欧洲、日本相应确立了汽车排放标准。20世纪70年代后,要求内燃机减少废气、降低噪声、合理利用燃料,这一时期标志性的技术和措施有:1964年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年德国大众汽车公司开发出了三元催化转换器;1973年起使用热转换器(氧化转换器);1975年起全面使用三元催化转换器;1976年起将无铅汽油、三元催化转换器与氧传感器综合使用;1977年起应用废气再循环(EGR),空气二次喷射技术;等等。

20世纪八九十年代内燃机技术的目标是取得人一机—环境的统一,使汽车更快、更舒适、更经济、更清洁、更安全。内燃机在技术上的主要措施有:采用满足日益苛刻的环保要求的各项技术;全面采用电子管理内燃机(即电控技术);增压旁通技术及解决增压后动态性能差的问题;采用多气门。另外,采用了多种可变技术,如可压缩比、可变气门升程与正时控制。

进入21世纪,汽车内燃机并未因其他车用动力的竞争(如电力)而成为“夕阳工业”,相反,技术进步使得车用四行程内燃机仍保持主体地位。

高强度、低密度材料的使用,如铝与加强纤维、陶瓷材料、塑料、碳纤维等,使内燃机不断轻量化。1998年,巴斯夫公司与丰田的工程师们合作首次开发成功用聚酰胺6制造的进气歧管,从而取代了铸铁、铸铝等金属材料。

燃烧模式和燃烧系统发生重大变革,稀燃技术在汽油机上成功应用。典型的有日本三菱公司缸内直喷式汽油机(GDI)、大众缸内直喷分层燃烧发动机(FSI)、凯迪拉克双模直喷发动机(SIDI)。另外,柴油机的均质混合气压缩燃烧(HCCI)也已点火成功,但离产业化还有一定距离。

燃料更加多样,对于控制排气污染、改善燃油经济性、减少内燃机对日益短缺的石油基燃料的依赖,各国进行了大量内燃机代用燃料的研究工作,并在一定范围内取代汽油和柴油,如用天然气、液化石油气、甲醇、乙醇、合成汽油、合成柴油、生物柴油以及二甲醚等。

各种智能控制技术更加成熟。例如,在进气系统方面,本田的 ECVT、丰田的 VVT-I、现代的 CVVT、通用的 DVVT 等可变气门正时技术都得到了广泛的应用;柴油机电控技



术,包括高压共轨技术、电控泵喷嘴、电控单体泵等;增压及中冷技术向小型柴油机和汽油机扩展;等等。

2) 车用内燃机的发展方向

一般说来,节能和环保,即高经济性和低公害,仍然是 21 世纪车用内燃机发展的主题。在节能方面,德国的四大汽车公司在 1991 年的首脑会议上首先提出“3L 汽车”的概念,即轿车每百公里消耗不到 4L 的油料,且不能牺牲汽车现有的安全性与舒适性。为实现这一目标,十几年来从 3 个方面进行了努力。

(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。

为了达到这一目标,世界各大汽车厂家采取了各种技术措施。

(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。进气系统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,使内燃机的扭矩特性可在宽广的转速范围内有较大的提高,进气管、进气道采用 CAD(计算机辅助设计)、CAM(计算机辅助制造)、CAT(计算机辅助试验)技术。

(3) 采用多气门内燃机,气门正时可随工况变化而自动调节。

(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技术,利用三维流动与燃烧模型的软件对燃烧过程进行仿真计算。

(5) 改进燃油供给系,电控汽油机从将汽油喷在进气道内发展到直接喷在燃烧室内,以实现稀薄燃烧。柴油机则采用更高喷射压力(配低空气涡流)的喷油系统,如共轨式、蓄压式、单体泵等,最高喷射压力从目前的近 100MPa 提高到 120~150MPa,甚至 200MPa。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。喷孔数进一步增加,而喷孔直径进一步减小,并对喷孔的形状也在进行研究,从单一的圆形到其他形状,如长方形或夹气喷孔。此外可改变喷射规律,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 100~120mJ。

(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。

(8) 降低运动机件的摩擦损失。

在环保与降低公害方面,减少排气污染及噪声辐射,节省资源,从而实现低公害的“绿色汽车”或“环保汽车”。其主要技术手段有以下几个。

(1) 降低油耗。所有降低油耗的措施均可降低汽车有害气体的排放和总排放量。

(2) 在采用三元催化转换器及闭环控制的基础上,开发稀薄燃烧的催化技术。

(3) 在燃烧室内安装电热塞,可有效降低内燃机在冷起动或怠速时的 HC、CO 排放量。

(4) 开发在起动和怠速运转时停止排出废气的装置。

(5) 开展 NO 生成和排放计算模型的研究,采用动态废气再循环控制技术。

(6) 柴油机微粒过滤器及再生的试验研究和仿真, 以达到实用化。

(7) 研究和采用含氧燃料。

(8) 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。

以上措施, 有的已经成熟而被采用, 有的正在研究开发。即便如此, 汽车的百公里油耗已从 8~10L/100km 减到约 6.5L/100km, 最先进的可达 4.5L/100km。“3L 汽车”的梦想正在逐步变为现实。

4. 电力驱动在汽车上的应用

1) 电动汽车的研发历史

电动汽车的出现几乎与内燃机汽车同步, 由于物理学的发展, 从而 1831 年英国法拉第发现电磁现象, 1832 年法国皮克斯发明了发电机, 1834 年德国雅可比发明了电动机。1859 年, 法国普朗特发明铅酸蓄电池。有了这些基本条件, 第一辆电动汽车(3 轮)由法国人古斯塔夫·土维(Gustave Trouve)在 1881 年制造出来, 由于当时电池和电机的发展较内燃机成熟, 而且石油的运用还没有普及, 因此电动汽车在早期的汽车中比例较大。例如, 1899 年由比利时工程师卡米乐·热纳茨(Camille Jenatzy)设计的名为“从不满意”的铝制车身电动汽车, 是世界上首辆车速超过 100km/h 的汽车。据统计, 到 1890 年, 在全世界 4200 辆汽车中, 38% 为电动汽车, 40% 为蒸汽汽车, 22% 为内燃机汽车。到了 1911 年, 已经有电动出租汽车在巴黎和伦敦运营, 而到了 1912 年在美国更有至少 3.4 万辆电动汽车运营。

由于石油的大量开采和内燃机的优越性, 因此电动汽车渐渐被人们忽视。直到 20 世纪 70 年代石油危机的爆发, 世界各国开始考虑替代石油的其他能源, 包括风能、太阳能、电能等可再生能源。但是, 由于内燃机技术尤其是节能技术的同步发展、石油危机的解除等因素, 因此电动汽车发展缓慢。

近年来, 随着世界经济发展, 汽车保有量大幅增加。除了已存在的能源问题之外, 环境问题也日趋严重, 而内燃机汽车的排放污染和二氧化碳的温室效应, 给全球的环境带来灾难性影响, 因此开发生产零污染交通工具同是降低碳排放成为追求的目标, 电动汽车的无(低)污染优点, 使其成为当代汽车发展的主要方向之一。

2) 电动汽车的种类

电动汽车主要有纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车 3 种类型。

纯电动汽车是完全由二次电池(如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池或锂离子电池等)提供动力的汽车。混合动力电动汽车是同时以电池和燃油作为动力源的电动汽车(图 0.8)。其采用内燃机和电动机两种动力, 将内燃机与储能器件(电池或超级电容器)通过控制系统相结合, 提供车辆行驶所需要的动力, 因此混合动力电动汽车并未从根本上摆脱交通运输对石油资源的依赖, 是电动汽车发展过程中的一种过渡车型。燃料电池是利用氢气和氧气(或空气)在催化剂的作用下直接经电化学反应产生电能的装置, 具有完全无污染(排放物为水)的优点, 因此, 燃料电池电动汽车是直接燃用燃料而以电驱动的汽车。

发展电动汽车的社会效益和经济效益非常可观。它本身不排放污染大气的有害气体, 即使按所耗电量换算为发电厂的排放, 除硫和微粒外, 其他污染物也显著减少。由于电厂大多建于远离人口密集的区域, 因此对环境危害较小。而且, 由于电厂固定不动, 因此处理各种有害排放物较容易, 也已有了相关成熟技术。

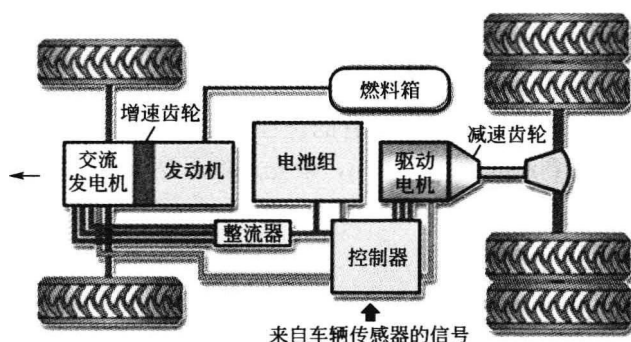


图 0.8 混合动力电动汽车布置图

此外，电力可以从多种一次能源中获得，如煤、核能、水力等，从而可破解石油资源日益枯竭的难题。电动汽车还可以充分利用晚间用电低谷时充电，使发电设备日夜都能充分利用，大大提高经济效益。

但是，电动汽车尚需解决诸多问题，目前还不能得到广泛的应用而完全替代内燃机汽车。这些问题主要包括以下几个。

- (1) 蓄电池的能量密度、使用寿命还有待提高。
- (2) 充电时间需要大幅缩短，即蓄电池要具备快速充电性能。
- (3) 电池以及整车的安全性能不够。
- (4) 配套设施需要跟进建设，包括充电站、未来燃料电池原料的储存与加注设备等。

车用动力的竞争远远没有停止，除蒸汽机已退出历史舞台外，电动汽车和内燃机汽车的竞争可能会持续较长时间。但不论哪一方胜出，或者交替胜出，或者有新型动力胜出，对人类来讲都是一种福音。一部车用动力发展史，就是人类现代文明发展史。