



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十二五”规划教材

# 发动机原理

第2版

林学东 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育“十二五”规划教材

# 发动机原理

第2版

林学东 编著

于秀敏 主审



机械工业出版社

本书主要以车用电控发动机为主,在四冲程循环理论的基础上,着重阐述发动机热功转换的基本原理、特点、性能分析方法,汽油机、柴油机混合气形成和燃烧原理,以及有害排放物及其生成机理,并从整车性能匹配与评价角度,讲述改善发动机性能和排放特性的技术措施。全书共八章,内容包括:内燃机的发展史、四冲程内燃机的理论循环与实际循环、换气过程及其提高充气效率的措施、燃料与燃烧、汽油机混合气的形成和燃烧、柴油机混合气的形成和燃烧、发动机特性曲线的分析、发动机与整车性能匹配等。本书的特色在于以电控发动机控制策略为主,以整车性能为目标,强调发动机工作过程的控制方法,取消了传统机械式发动机的化油器、调速器等内容。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业和车辆工程专业及相关专业的本科生、研究生教材,也可作为从事汽车发动机方面研究开发的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

发动机原理/林学东编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2014.12  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-48209-3

I. ①发… II. ①林… 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(2014)第232217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 丁昕祯 责任编辑:蔡开颖 章承林

版式设计:赵颖喆 责任校对:闫玥红

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·399千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48209-3

定价:35.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书基于汽车节能与低排放而发展的汽车发动机电子控制技术，注重车用内燃机能量转换的基本理论，从内燃机性能控制策略角度出发，全面而系统地阐述了车用内燃机工作过程的特点、基本原理以及以节能与低排放为目的的控制措施和性能分析方法。

车用内燃机仍然以四冲程内燃机为主，虽然随着电子技术和控制技术的发展，其结构上得到了不断完善，特别是进入 21 世纪以来，针对日趋严格的汽车排放法规和节能要求，基于现代科学技术，车用内燃机的控制技术有了很大的变化，使得车用内燃机已成为机电一体化的产品。而现代车用内燃机理论是在传统的机械式四冲程内燃机原理的基础上，抛弃过时的内容，追加电子控制技术、控制策略以及基于电控技术的可变控制技术而构成的。因此本书在沿用第 1 版体系的基础上，主要修订的内容有：

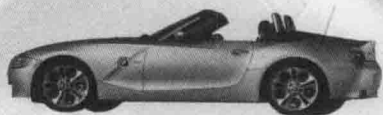
- 1) 在第三章内燃机的换气过程中，将增压及 EGR 对发动机性能影响部分分离出来，加到第七章中发动机的性能部分，并完善内容。
- 2) 在第四章内燃机的燃料与燃烧中，补充了现代内燃机的燃烧理论。
- 3) 在第六章柴油机混合气的形成和燃烧中，补充了高压喷射混合气形成机理及排放控制理论，以及压电式高压共轨喷射系统的特点。
- 4) 在第七章发动机的特性中，补充了电控柴油机性能标定部分的内容。
- 5) 修改了本书第 1 版中文字和图形的不当之处。

本书在修改、图形整理和校对过程中得到了吉林大学内燃机工程系李德刚讲师和吉林大学动力机械及工程专业博士生袁方恩等同学的大力支持和帮助，在此深表谢意。同时，衷心感谢吉林大学汽车工程学院副院长于秀敏教授对本书进行了认真细致的通篇审阅，并提出了宝贵的意见。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业和车辆工程专业以及相关专业的本科生和研究生教材，也可作为从事汽车领域研究工作的科技人员的参考书。

由于本书内容涉及面广，加之作者水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，恳切希望广大读者提出批评指正。E-mail: xdlin@jlu.edu.cn。

作者  
于长春



# 目 录

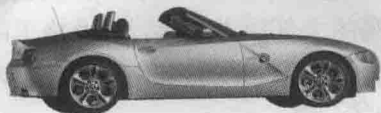
前言	第四节 内燃机的有效性能指标	20
第一章 绪论	一、动力性指标	20
第一节 内燃机的发展	二、经济性指标	22
一、内燃机概念的形成	三、排放指标	23
二、从内燃机草图到蒸汽机	第五节 机械损失	25
三、蒸汽革命——蒸汽汽车时代	一、机械效率	25
四、四冲程理论与内燃机的发明	二、内燃机的机械损失	25
五、内燃机汽车的问世	三、机械损失的测定	26
第二节 内燃机在汽车上的应用	第六节 热平衡	28
一、汽车的基本结构	第三章 内燃机的换气过程	30
二、三种动力的竞争	第一节 四冲程内燃机的换气过程	30
三、内燃汽车发展的几个阶段	一、排气过程	30
第二章 内燃机的循环及性能评价指标	二、进气过程	32
第一节 概述	三、配气定时及气门叠开现象	32
第二节 内燃机的理论循环	四、换气损失	33
一、卡诺循环与内燃机的动力循环	第二节 充气效率及影响因素	34
二、三种理论循环	一、充气效率	34
三、理论循环的评价	二、影响充气效率的因素	35
四、理论循环的比较	第三节 提高充气效率的措施	37
第三节 内燃机的实际循环及其评价指标	一、减小进气系统阻力	37
一、实际循环	二、合理选择配气定时	40
二、评价指标	三、有效利用进气管的动态效应	45
	四、有效利用排气管的波动效应	48
	第四节 增压技术	49
	一、增压器的类型及特点	49
	二、废气涡轮增压器的能量回收	53
	三、增压器的工作原理及其特性	



曲线 .....	55	二、正常燃烧过程 .....	99
第五节 废气再循环系统 .....	59	三、不正常燃烧 .....	105
一、概述 .....	59	四、使用因素对燃烧过程的	
二、废气再循环系统的分类 .....	60	影响 .....	107
第四章 内燃机的燃料与燃烧 .....	65	第三节 汽油机燃料喷射量的	
第一节 内燃机燃料及其提炼 .....	65	控制 .....	108
一、石油中烃的分类及性质 .....	65	一、电控汽油喷射系统 .....	109
二、燃料的提炼方法及对燃料性能		二、质量流量式电控汽油喷射系统	
的影响 .....	67	的喷射量控制 .....	111
三、代用燃料及其特性 .....	67	三、速度-密度式电控汽油喷射系统	
第二节 传统燃料的现状及使用		的喷射量控制 .....	120
特性 .....	70	第四节 汽油机燃烧组织方式及	
一、柴油 .....	70	燃烧室 .....	124
二、汽油 .....	73	一、对燃烧室的基本要求 .....	124
三、汽油、柴油性能的差异对发动机		二、燃烧室内的气流特性 .....	125
性能的影响 .....	76	三、典型燃烧室 .....	126
第三节 燃烧热化学 .....	77	四、汽油机分层给气和稀薄燃烧	
一、1kg 燃料完全燃烧所需的理论		系统 .....	128
空气量 .....	77	第五节 汽油机的有害排放物及其	
二、过量空气系数 .....	78	控制 .....	135
三、 $\phi_a > 1$ 时完全燃烧的产物及		一、汽油机的有害排放物及其产生	
数量 .....	78	机理 .....	135
四、燃料热值与混合气热值 .....	79	二、影响汽油机排放特性的因素 .....	139
第四节 燃烧的基本知识 .....	80	三、汽油机排放控制技术 .....	141
一、自燃着火理论 .....	80	四、汽油机的增压及米勒循环 .....	142
二、内燃机的燃烧方式 .....	85	第六章 柴油机混合气的形成和	
第五节 内燃机燃料及燃烧方式的		燃烧 .....	144
发展趋势 .....	90	第一节 柴油机热功转换的特点 .....	144
第五章 汽油机混合气的形成和燃烧 .....	92	第二节 柴油机的燃烧过程 .....	145
第一节 汽油机混合气的形成及热功		一、燃烧阶段的划分 .....	145
转换特点 .....	92	二、燃烧放热规律 .....	147
一、外部混合气的形成特点 .....	92	三、柴油机有害排放物的生成	
二、缸内直喷式混合气的形成		机理 .....	148
特点 .....	95	四、柴油机排放控制策略 .....	154
三、空燃比与发动机性能的关系 .....	96	五、柴油机的燃烧噪声 .....	155
第二节 汽油机的燃烧过程 .....	98	六、冷起动特性 .....	155
一、点火过程 .....	98	第三节 燃油喷射和雾化 .....	156
		一、对燃料喷射系统的要求 .....	156



二、燃油喷射雾化特性·····	157	第五节 增压器与发动机性能	
三、喷射系统·····	159	匹配·····	225
第四节 柴油机混合气的形成与		一、增压比的选择·····	226
燃烧室·····	179	二、增压中冷·····	226
一、柴油机混合气的形成方式·····	180	三、涡轮增压器与发动机的匹配	
二、高速直喷燃烧室结构及其混合气		原理·····	227
的形成特点·····	182	第六节 EGR 对发动机性能的	
三、燃烧室内气流特性及其评价		影响·····	233
方法·····	184	第八章 发动机与汽车动力传动系统	
第五节 燃烧过程的影响因素·····	186	的匹配·····	236
一、喷雾特性与燃烧室内气流特性		第一节 汽车动力传动装置及主要	
的匹配·····	186	参数的确定·····	236
二、影响燃烧过程的运转因素·····	192	一、动力传动装置及其作用·····	236
第六节 柴油机的排放控制技术·····	194	二、动力传动系统主要性能参数	
一、机内措施·····	195	的选择·····	241
二、后处理技术·····	198	第二节 汽车行驶基本原理及	
第七章 发动机的特性·····	203	特性·····	243
第一节 概述·····	203	一、牵引力·····	243
一、发动机的工况·····	203	二、汽车的行驶特性·····	245
二、发动机的试验台架·····	204	第三节 发动机与动力传动装置的	
三、发动机的试验方法·····	210	匹配·····	247
四、发动机特性的分析方法·····	211	一、发动机性能与汽车性能之间的	
第二节 发动机的负荷特性·····	213	关系·····	247
一、汽油机的负荷特性·····	213	二、汽车万有特性及评价·····	248
二、柴油机的负荷特性·····	214	三、整车性能匹配方法·····	249
三、汽油机和柴油机负荷特性的		第四节 整车性能的改进途径·····	252
区别·····	215	一、发动机性能的改进·····	253
第三节 发动机的速度特性·····	216	二、合理选择底盘参数·····	254
一、汽油机的速度特性·····	216	三、变速比的最佳控制·····	254
二、柴油机的速度特性·····	218	四、行车速度的控制·····	255
三、汽油机和柴油机速度特性的		参考文献·····	256
比较·····	221		
第四节 发动机的万有特性·····	222		



# 第一章 绪论

19 世纪末、20 世纪初的最大发明之一是汽车。而汽车概念的形成及汽车文明的发展可以说是从蒸汽革命开始的。作为汽车心脏的发动机，从蒸汽机年代开始其发展历程就遵从“适者生存”的法则，在如何小型化、轻量化、高功率化、高效率化的要求下，从蒸汽汽车发展到内燃汽车，这种来自社会及用户的要求有力地推动了汽车技术的发展。随着社会的发展，在进一步提高热效率，改善动力性和经济性，降低有害排放物，以满足不同社会不断严格的排放法规中，内燃机得到不断的完善，已发展成集现代技术于一体的高科技机电一体化现代化动力机械装置，同时，也使内燃机的理论得到了进一步深入的发展。

任何一项科学技术的发展都有其发展背景和历程。汽车技术也一样，能源利用及其动力机械的发明与发展，有力地促进了汽车技术的发展。而汽车工业的发展又与人类社会文明与科学技术的发展历史紧密相关。科学技术的发展不仅为推动人类社会的文明发挥了重要的作用，而且成为把汽车融入于社会的重要手段。

为了更好地理解现代内燃机的特点及其技术的发展背景，重温其发展历史，具有重要的意义。

## 第一节 内燃机的发展

### 一、内燃机概念的形成

早在 1673 年，荷兰物理学家赫更斯在凡尔赛宫用水过程中，对借助机械力来代替笨重的体力劳动的问题，创造性地构想出了“内燃机草图”。凡尔赛宫是经历 1667 ~ 1688 年由法国路易十四开始建设，到路易十五完成的王宫。其中包括宫殿、花园与放射形大道三部分，宫殿南北纵长 425m。宫前大花园面积 6.7km<sup>2</sup>，纵轴长 3km。从大殿前直到正门开凿有一条长为 1.61km 的运河，用于款待来自各国的贵客“边畅饮开胃酒，边谈论国事”。当时庭院里树木的浇水、喷水池的用水以及运河之水等，都是从塞纳河提取的。当时赫更斯负责凡尔赛宫庭院的管理。为了解决凡尔赛宫一天 3000m<sup>3</sup>的用水量要求，赫更斯费尽脑汁想设计出一种能替代繁重人力劳动的“动力机械”，到 1673 年终于构想出第一幅内燃机草图。





自该草图问世后，经过12年到1685年，设计制造出14台直径为12m的水车来完成凡尔赛宫的用水任务。

这一重大发明其实也离不开当时16世纪末和17世纪初所进行的三大实验，即英国包尔塔的蒸汽压力实验，托里拆利（流体力学奠基人）和巴斯噶的大气压力实验，以及格里凯的真空作用实验。这三大实验使人们开始认识到蒸汽、大气和真空的相互作用。而这些重大实验成果和发明为早期蒸汽动力技术的产生奠定了牢固的科学基础。

## 二、从内燃机草图到蒸汽机

从赫更斯的内燃机草图的构想到蒸汽机的发明经历了三次技术革新。第一次技术革新是由法国著名的物理学家、工程师巴本（Denis Papin, 1647—1712）发明的，他最先应用了蒸汽动力技术。当时他与赫更斯同住在一个城市——巴黎。在医学院读书期间，他对赫更斯的构想很感兴趣并进行了深入的研究，并从1674年开始致力于蒸汽泵的实验设计，试图把火药发动机改进设计成蒸汽机。巴本从当时欧洲炼铁厂广泛使用的活塞式风箱中受到启发，想将风箱变为汽缸，而风箱中的活塞则变为汽缸中工作的活塞。基于这种想法，他开始试制模型进行实验研究，即先向汽缸底部注入少量的水，然后把汽缸放到火上加热。实验结果表明，当汽缸内的水沸腾后所产生的蒸汽推动活塞慢慢上升；然后当把火从汽缸下抽掉将汽缸内的蒸汽慢慢冷凝时，由于蒸汽的冷凝，汽缸内产生真空，在大气压力的作用下，活塞又慢慢下降。通过这一项实验，巴本总结出两大重要结论：

- 1) 利用蒸汽压力、大气压力、真空的相互作用，完全可以推动汽缸内的活塞及其活塞杆件作往复直线运动。
- 2) 这种运动所产生的机械动力可以带动其他机械作简单运动。

由此巴本发明了带有活塞的蒸汽泵。之后，考虑到蒸汽压力大可能会造成汽缸爆炸，故于1680年又发明了安全阀。这样，第一台可以把热能转变为机械能的实验型蒸汽泵，于1680年在英国首次试验成功。

第二次技术革新是继巴本之后，由英国的机械工程师赛维利（T. Savery, 1650-1715）在近代蒸汽动力技术发展中所做出的重大贡献。赛维利设计的蒸汽泵主要由汽缸与锅炉组成，其原理源于包尔塔的蒸汽压力实验。与巴本的蒸汽泵不同，在汽缸中未采用活塞，只是在其中接有吸水管、排水管和进汽管。当蒸汽从锅炉经过进汽管进入汽缸后被冷却时所产生的真空度，把矿井中的水经吸水管吸进汽缸内，之后再再将蒸汽注入汽缸，这部分进入汽缸的高压蒸汽就把吸入汽缸的水从排水管排出去。后来，赛维利在他的蒸汽泵中也采用了安全阀。于1695年赛维利制造出了几台这种无活塞的汽压式蒸汽泵。

第三次技术革新是托马斯·纽可门（Thomas Newcomen）发明的蒸汽机。纽可门对赛维利所设计的蒸汽泵进行了研究，并认为该蒸汽泵存在两大致命的缺点。其一是热效率太低，对此纽可门在设计上作了重要革新，即不让冷却水直接进入汽缸，而是把冷却水通过一个小水龙头向汽缸内进行喷入。其二是赛维利所设计的蒸汽泵基本上只是一种水泵，而不是动力机械。针对这一缺点，他在该蒸汽泵的基础上引入了巴本的活塞装置，这样在蒸汽压力、大气压力和真空度的相互作用下，活塞在汽缸内可作往复式机械运动。而这种机械运动一旦传递出去可以对外做功，蒸汽泵也就变成蒸汽机了。

由于进行了上述三次研究和技术革新，一台近代蒸汽机的完整蓝图基本上设计出来了，



并于1712年纽可门蒸汽机问世。

从巴本的蒸汽泵到纽可门的蒸汽机，早期蒸汽动力技术的发展已向人类社会预告即将兴起的第一次工业革命的信息——蒸汽时代的即将到来。而纽可门蒸汽机的诞生，使英国的煤矿工业从地下水的困惑中解脱出来，煤矿产量迅速增加，迎来了英国的（工业）产业革命，有力地推动了当时英国的经济发展。

### 三、蒸汽革命——蒸汽汽车时代

纽可门蒸汽机的问世，激发了当时许多科学家们的创造性思维。当时伦敦格拉斯哥大学的鲁滨逊教授，提出把当时四轮马车改成蒸汽汽车的设想，并委托当时负责修理格拉斯哥大学实验教学仪器的技师瓦特，让他做蒸汽机模型进行试验研究，但未能成功。之后鲁滨逊教授未能继续研究下去。但这件事引起了受当时英国工业革命影响的瓦特对蒸汽机的浓厚兴趣。1764年瓦特受命负责格拉斯哥大学教学用纽可门蒸汽机的修理工作。在修理过程中通过故障分析，瓦特发现纽可门蒸汽机存在的燃料消耗量大、效率低，同时只能作往返直线运动的两大缺点。因此，这种蒸汽机除了只能用于矿井抽水之外，就没有其他用途了。而它浪费的蒸汽可达八成以上。为了解决这一问题，瓦特首次提出了将工质（蒸汽）采用与汽缸分离的冷凝器中冷却的设想。他认为，既然蒸汽具有弹性，那么只要把汽缸和另一个容器相连接，让蒸汽接入其中，就不需直接冷却汽缸而浪费许多热量了。根据这一设想，瓦特设计了一个与汽缸分离的冷凝器，并在汽缸外面加绝热套，使汽缸保持高温工作状态。同时在冷凝器与汽缸之间用一个调节阀相连接，使两者既能连通又能分开。这样，既能把做功后的蒸汽引入汽缸外的冷凝器进行冷凝，又能使汽缸内产生真空，避免了汽缸在一冷一热过程中的热量损失。基于这一发明，在1766~1769年期间，瓦特受到化工技师罗巴克在经费上的赞助制造出第一台蒸汽机样机。同年，瓦特因发明冷凝器而获得他在改革纽可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，但与纽可门蒸汽机相比，除了热效率有显著提高以外，其他没有变化，即还无法作为真正的动力机械对外连续做功。当时瓦特参加了著名的科学社团“圆月学社”，该学社会员大多数都是本地的一些科学家、工程师、学者及科学爱好者。在圆月学社里与化学家普列斯特利等人的交往中，瓦特对当时人们所关注的气体化学与热化学有了更多的了解，扩大了知识面，使瓦特进一步增长了科学见识，活跃了科学思想。自1769年试制出带有分离冷凝器的蒸汽机后，热效率已不是主要问题了，活塞只能作往返直线运动才是它致命的缺点。1781年，瓦特在参加圆月学社活动过程中，受到天王星和由此引出的行星绕日圆周运动，以及钟表齿轮的圆周运动的启发，设想如果把活塞往复直线运动改变成旋转运动的话，就可以把动力连续传递给任何工作机械。于是，同年研制出一套被称为“太阳和行星”的齿轮联动装置，由此成功地把活塞的直线运动转变成齿轮的旋转运动。为了使轮轴圆周运动更加均匀，瓦特在轮轴上安装了一个大飞轮。

对动力传动机构的这一重大革新，使瓦特蒸汽机才真正成为动力机械。1781年底，瓦特以发明齿轮式机械联动装置获得了第二项专利。

在蒸汽机上加行星齿轮联动装置和飞轮以后，完成了将活塞的往复直线运动转变为轴的旋转运动过程，但消耗不少能量，蒸汽机效率不高，输出动力不大。为了进一步提高蒸汽机的效率，瓦特在发明齿轮联动装置以后，对汽缸本身进行了研究。经研究发现，虽然把纽可



门蒸汽机的内部冷凝变成了外部冷凝，使蒸汽机的热效率有了显著的提高，但在蒸汽机中蒸汽推动活塞做功的冲程与纽可门蒸汽机相同。蒸汽对活塞只是单向做功，即从一端进入、另一端排出。瓦特设想，如果蒸汽能够从两端同时进入和排出的话，蒸汽即能推动活塞向上运动又能推动活塞向下运动，这样效率可提高一倍。根据这一设想，瓦特于1782年试制出一种带有双向进排气装置的新汽缸，把原来的单向汽缸装置改装成双向汽缸（图1-1），并首次把引入汽缸的蒸汽由低压变为高压，由此瓦特获得了第三项专利。这是瓦特在改革纽可门蒸汽机过程中的第三次技术飞跃。通过这三次技术革新，纽可门蒸汽机完全演变成瓦特蒸汽机，如图1-1所示。

1784年，瓦特以带有飞轮、齿轮联动装置和双向进排气装置的高压蒸汽机综合装置取得了他在革新纽可门蒸汽机过程中的第四项专利。1788年，瓦特发明了离心调速器和节气阀；1790年，他又发明了汽缸示功器。至此，瓦特完成了他发明蒸汽机的全部过程。

在前人的科学研究成果的基础上，瓦特在蒸汽机上的这些重大的技术改进，使得蒸汽机作为动力机械，在工厂和交通运输等方面得到了广泛应用，由此，蒸汽动力的巨大潜力被逐渐发掘出来，并有力地推动了社会和现代科学的向前发展，迎来了著名的蒸汽革命。

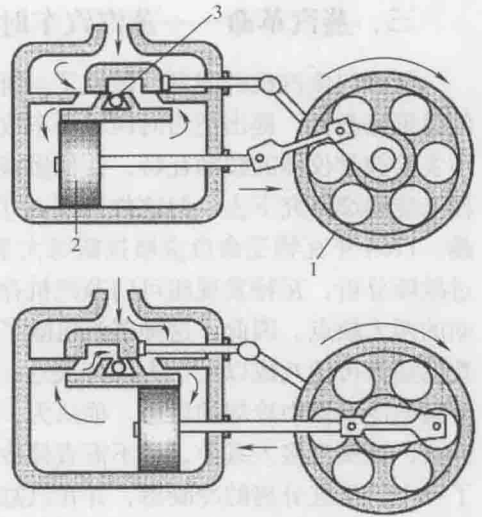


图1-1 瓦特蒸汽机

1—飞轮 2—活塞 3—双向进、排气装置

#### 四、四冲程理论与内燃机的发明

瓦特蒸汽机虽然提高了当时的劳动生产率，促进了手工业向大工业的迅速过渡，直接推动了18世纪伟大的工业革命，但仍然存在着体积庞大、效率低等缺点，这些缺点受到当时广大科学家们的关注。要克服蒸汽机这些致命的缺点，必须要解决锅炉与汽缸分离的问题。因此，如何将锅炉与汽缸合二为一，成为当时研究的热点。许多科学家在这方面作了不懈的探索，如：利用燃烧烟气冷却后产生的真空来抽水，利用火药在汽缸内爆炸所产生的压力来驱动活塞，用氢气和空气混合后燃烧时所产生的压力来推动活塞做功等。1794年英国罗伯特·斯特利特（Robert Street）率先进行了通过燃料的燃烧获得动力的研究。之后，1799年法国的列奔（Lebon）、1820年英国的W. 谢希尔（W. Cecil）等人也进行了这方面的研究，但直到1823年左右才制造出实用性的发动机。当时的这种发动机是通过冷却因燃烧而产生的高温气体时所产生的低压来获得动力的。直接利用燃烧压力来获得动力的发动机是由英国的W. L. 莱特（Wright）率先开始研究的。此时的发动机与现在的内燃机在结构上已经很相近。1838年英国的维利厄巴纳特（William Barnett）提出了在点火之前压缩混合气有利于提高效率的观点，由此开始研究压缩式发动机，但未能实用化。同时研究了用火点燃的点火装置。1842年美国的A. 杰克（Drake）、1855年英国的A. W. 牛顿（Newton）制造出热管点火式发动机。到此为止，发动机仍然处于试验研究阶段。虽然在研究工作上得到了很大的成功，但还没有达到实用化的水平。1860年法国的雷诺（Lenoir）首先发明了将煤气和空气



吸入气缸后进行混合，并在气缸内燃烧的无压缩过程的实用性煤气机。这种煤气机有气缸、活塞、连杆、飞轮等，是内燃机的初级产品。当时由于无压缩过程，所以热效率很低，只达到4.5%左右。但当时在英国和法国很盛行。此时，社会上开始承认早在1838年纬利蒯巴讷特提出的如果在点火之前压缩混合气则有利于提高热效率的观点，并于1861年在法国的密理蒯（Million）、德国的高斯塔夫·斯库密德等人发表相关的学术论文中强调了压缩过程的效果。1862年法国的彼奥德罗萨斯（M. Alph. Beau de Rochas）立志要“站在瓦特的肩膀上”，彻底改正蒸汽机的缺点。当时所研究制作的内燃机的效率还不如蒸汽机。德罗萨斯对其原因进行了深入的研究与分析，并找到了问题的症结：即这种无压缩内燃机在设计方案上存在着根本性的缺陷，就是缺少提高效率的有效途径。德罗萨斯开始构想提高内燃机热效率的方案。经研究分析他认为，高效率的内燃机，必须具备两个必要的条件：第一是，点火前要高压力；第二是，燃料燃烧后必须迅速膨胀，达到最大膨胀比。如何满足这两个条件？对此德罗萨斯提出了提高内燃机热效率的具体设想，把活塞的运动分成四个冲程：活塞下移，进燃气；活塞上移，压缩燃气，形成高压；点火使气体迅速燃烧膨胀，推动活塞下移做功；活塞上移，排出废气，即由进气、压缩、膨胀做功、排气四个冲程构成一个工作循环的理论。而这一理论成为现在四冲程内燃机最基本的理论。对当时引入压缩冲程是一个很大的创举，为内燃机以后的发展奠定了坚实的理论基础。他仿佛看到了通向“瓦特肩膀”的阶梯，离“瓦特的肩膀”只有一步之遥了。但令人惋惜的是，作为理论家的德罗萨斯，没有实际制作，最终未能迈出最关键的一步。

而当时德国商人奥托从蒸汽机的广泛应用中，看到内燃机的发展前途，从而一直关注内燃机的研制情况。他没有学过机械知识，边学边干。他从工厂烟囱冒出的烟一边和空气混合，一边向天空排出的现象受到启发，想如果把烟换成燃料，在烟囱出口处（混合气浓区）点火，那么燃烧会逐渐传播到稀薄区，能提高燃烧效率。他为了在发动机气缸里实现烟囱冒烟现象，就利用透明的气缸和手动活塞以及侧置式进排气系统制作试验模型，并把香烟的烟从进气阀放入气缸，反复观察进入气缸后的运动规律，终于研究出空气与煤气的添加方法。同时，奥托受到雷诺煤气机的启发，认为如果用液体燃料的话，其用途将大大地提高，为此设计了雾化器。后来在报纸上看到德罗萨斯提出的内燃机四冲程理论报道后，使他看到了内燃机的希望。奥托对德罗萨斯的设计方案反复研究，领会其思想，认定“这是一个天才的设想”，于是，他全心投入内燃机的研制工作之中。1862年2月，奥托制造出一台四冲程样机，但在实用化过程中遇到了点火装置方面的困难，就把它搁置一旁。但是他又发明了“常压引擎”，一种新的二冲程煤气发动机，并于1863年获得专利权。为了使自己的内燃机走向市场，奥托与他人合作，建立“奥托公司”。在1867年的巴黎世界博览会上，他发明的压缩式内燃机获得了金奖。从此销路畅通，公司利润暴长。1872年奥托公司聘请才华非凡、管理经验丰富的工程师戈特利叶博·戴姆勒等帮助生产发动机。于1876年，根据德罗萨斯提出的四冲程理论创建由四个冲程构成一个工作循环的奥托循环，首次实现了四冲程发动机，并成立德国气体发动机制造公司。当时，最初的发动机的压缩比为2.5左右，热效率仅为10%~12%。同年，奥托又改进点火系统，5月研制出第一台四冲程内燃机，第二年获得专利权。这种煤气内燃机基本上克服了蒸汽机的缺点。它“出于蒸汽机而胜于蒸汽机”。奥托终于跨出德罗萨斯无法跨出的最后一步。此后，英国科学家对奥托的四冲程内燃机进行了改进，在一台内燃机上多加一个气缸，构成多（双）缸机，从而使发动机输出的转矩更加均匀。



## 五、内燃机汽车的问世

虽然奥托发明了奥托循环，实现了四冲程理论，在内燃机发展史上做出了重要的贡献，为内燃机汽车的发展奠定了坚实的基础，但是作为商人的他在成功之后未能把成果进一步推向汽车领域，以取得更辉煌的成就。

而曾在奥托气体发动机制造公司担任技术工作，为奥托内燃机研制做出重要贡献的德国人戴姆勒（G. Daimler），认为奥托内燃机虽然重且体积大、转速又低，但只要稍加改进就可以安装在汽车上。但是奥托只热衷于蒸汽机的生产，不同意改进。为此戴姆勒与奥托出现严重意见分歧，于是戴姆勒于1881年与同公司就职的梅巴赫一起辞掉奥托公司的一切职务，办起了当时的第一家汽车工厂，专门研究一种轻便又快速的内燃机。当时实现内燃机的最关键的问题就是如何在气缸内形成可燃混合气，并使之燃烧实现热功转换。为此他们在继承和总结雷诺等前人研究成果的基础上，根据当时已使用的雾化器的原理，于1883年发明了化油器，并研制出世界上第一台轻便又快速的内燃机——汽油机。在该发动机上采用了热管式点火方法，并于1885年将此发动机安装在二轮车上，同年试制三轮车。在此之前发动机的最高转速只有200r/min的水平，而戴姆勒制造的发动机一下子把最高转速提高到1000r/min的高速。1886年戴姆勒将1.1马力（1马力=735.499W）的发动机安装在四轮车上。到1887年汽油机已作为车用和船用发动机而开始使用。

与此同时，另一位德国人卡尔·奔驰（K. Benz），也热衷于制造一种无轨道的、不需马拉的车。经历屡遭失败的艰辛研究工作后，他终于在1879年试验成功一台二冲程发动机。1885年他利用电池和线圈发明了电点火方法，并将此方法应用于二冲程汽油机上，制造出具有实用性的三轮汽车，成立了第一家奔驰汽车制造公司并开始生产汽车。到1900年为止，奔驰汽车制造公司成为世界最大的汽车制造厂。但1900年以后，由于戴姆勒汽车的成功，奔驰汽车公司的经济利益直接受到影响。

在第一次世界大战中德国战败，给德国经济带来了沉重的打击。戴姆勒汽车公司也陷入了经营上的困境，于是，在1926年与奔驰汽车公司合并，成为现在的戴姆勒-奔驰汽车公司。

根据以上内燃机发展的历史，可以认识到，汽油机的发明过程是在将四冲程机构从蒸汽机（外燃机）移植到内燃机的工程实践中发明的，因此汽油机开发初期首要的问题就是如何在气缸内快速地形成混合气和点火的问题，而不是热效率。作为替代蒸汽的燃料，要求其蒸发雾化性好，而汽油这一燃料刚好满足这一要求。所以决定了汽油机的混合气形成和燃烧模式，以及这种燃烧方式固有的排放特性。初期的汽油机热效率也只是当时比较成熟的蒸汽机的水平。而作为内燃机，体积小、转速高、移动性好，以及与当时其他车型相比较续航里程长是其具有的最大特点，所以广泛在汽车上得到应用，后来随着消声器的发明与应用、起动机发明，使得汽油机的技术不断完善，由此改变了汽车的面貌。

作为内燃机另一个典型的代表——柴油机的发明过程却与汽油机不同。柴油机是由德国工程师鲁道夫·狄塞尔（Rudolf Diesel），针对当时发动机热效率低、着火困难等问题，从热力学角度进行全面分析，并从根本上提高循环热效率企图实现卡诺循环的梦想中发明的。早在1878年狄塞尔在慕尼黑工业学校念书时，其恩师林德教授在一次热力学课中解说卡诺循环时讲到：蒸汽机仅仅是将从燃料中获得热量的6%~10%转化为有效功，如果以气体燃料能实现等温燃烧过程的话，就有可能将气体燃料所提供的全部的热能转变为机械功。这一



名言给鲁道夫·狄塞尔留下了很深刻的印象，他在课堂笔记上写道“去研究从实用角度能否具体实现等温过程？”从此就把实现卡诺循环作为自己人生的目标。当时改善蒸汽机热效率的主要途径就是通过过热蒸汽。大学毕业后作为冷冻机技术员的狄塞尔对氨蒸汽比较熟悉。所以，他着眼于利用正常运转条件下凝点远比水蒸气高，而且对气缸冷却作用不敏感的过热氨蒸气替代水蒸气，并在巴黎的林德制冰会社建立实验室，专门进行有关氨过热蒸气和氨溶液的基础研究，并设计研制配备进、排气装置的小型氨气发动机。狄塞尔通过研究确认：为了合理利用过热蒸气所具有的热量必须具备高压，而在高压下过热蒸气几乎成为气态。在这一研究过程中逐渐产生了一种新的思想，即将氨气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，并使之尽可能地膨胀做功。狄塞尔为实现这一想法进行了无数次的实验研究。从蒸汽机的过热蒸汽状态到独特的燃烧过程，狄塞尔从热力学角度细致全面地进行了理论分析和验证，并把所研究的结果写成《合理的热力发动机理论和构造》一书公开发表，并于1893年获得了关于内燃机工作方式及其实现的第一个专利。

这里值得提出的是，从理论到现实发动机的开发研究过程中，狄塞尔通过实际发动机中存在的机械损失，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，对实际发动机而言并非最高温度而是最高压力起决定性作用。因此，在实践中为了获取更高的升功率和机械效率，他果断地于放弃了自己在理论研究过程中所提出的实现等温过程的想法，于1895年获得了关于“具有在压力变化过程中燃料导入时期可变的内燃机”的有关柴油机发明过程的第二个专利。其基本思想是：

- 1) 通过气缸内活塞的压缩过程将纯空气压缩加热至远超过燃料的自燃点。
- 2) 将微粒化的燃料导入到缸内高温高压的空气中燃烧，由此推动活塞做功。
- 3) 对液体燃料，从导入压缩空气开始燃料受高温高压空气的加热作用而在气缸内逐渐汽化。

由此，狄塞尔创造性地创立了压缩自燃式发动机的工作模式。其本质特点就是燃料自行着火，提高压缩压力的目的就是把在上止点喷射的燃料自行燃烧，因而压缩程度成为自行着火的必要条件。而这项专利的特点正是在于利用这样的循环方式求得最高热效率的工作过程。

从1893~1897年，狄塞尔经过多次样机的试制、失败、再改进，并通过试验验证等过程，终于于1897年研制成功具有实用价值的柴油机，该样机的指示热效率当时就达到了38.6%。1898年在慕尼黑展览会上，狄塞尔研制的柴油机引起了汽车制造商们的浓厚兴趣。

柴油机以用廉价的低级燃料而获得高热效率的特点，广泛应用于四冲程和二冲程发动机上。后经过改进，其热效率高达46%，成为热效率最高的热力发动机。但是柴油机作为汽车的动力源而应用于汽车上，是从其发明开始将近40年以后的1936年，由戴姆勒-奔驰汽车公司首先认可，并安装在梅赛德斯-奔驰牌260D型轿车上，成为第一台柴油汽车。

汽油机和柴油机的发明，以及其体积小、质量轻、效率高及续驶里程远的特点，确定了其作为汽车发动机的牢固地位，同时有力地推动了汽车事业的迅速发展。1908年美国的汽车大王亨利·福特（Henry Ford）推出了世界著名的T型福特汽车，并改进了汽车流水线生产方式，揭开了汽车量产的序幕，使汽车走向大众化的道路。

从此，汽车工业的蓬勃发展，彻底改变了世界经济结构和社会结构，汽车文化有力地推动了人类社会文明的快速发展。



## 第二节 内燃机在汽车上的应用

早在 1769 年法国人琼诺 (N. J. Cugnot) 利用当时生产的蒸汽机制作了世界上最初的蒸汽机三轮汽车, 该车全长 7.23m, 车速仅为 3.5km/h。当时排出的黑烟和噪声等公害严重到何等程度不言而喻, 连车速都慢得成为“行驶公害”的程度。但是“无马的汽车”的概念却由此而形成。之后通过高压蒸汽等技术措施改善了蒸汽机的效率, 使蒸汽机的体积尽可能地紧凑化。但是由于笨重的蒸汽汽车对道路的破坏, 以及煤的消耗量的增加等原因, 并未得到当时社会的认可。

1875 年法国人雷恩·谢鲁玻尔发明了炽热曲管式锅炉, 由此大大减小了锅炉的尺寸, 同时消除了锅炉爆炸的危险。他的这一发明不仅使蒸汽汽车得到根本上的改善, 而且也改善了原蒸汽汽车起动困难的问题, 并于 1902 年创造了世界最快的以蒸汽机为动力的赛车。由此, 蒸汽机作为汽车的第一代动力源而得到广泛应用。从 19 世纪末到 20 世纪初, 蒸汽汽车达到了鼎盛时期。之后逐渐被新兴的内燃机所替代, 直到 1927 年才彻底停止了蒸汽汽车的生产。

### 一、汽车的基本结构

内燃机的问世彻底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。但是, 直到 1908 年的 T 型福特汽车问世为止, 车体的基本结构依然是“无马的马车”, 发动机只不过是替代马的位置而牵引汽车而已。

汽车结构的发展, 也经历了其外形和底盘的发展过程。早在 1899 年, 法国的雷诺首先将车身结构改成如同花轿的箱体结构, 第一次制造出封闭式车身。之后, 随着航空技术的应用, 车身采用钢板制作, 并且车身结构向质量分布尽可能均匀化的紧凑型发展。随着内燃机的动力性、经济性的不断提高, 车速也不断升高, 因此车身结构伴随流体力学的发展也向流线型发展。

与此同时, 美国的古德依尔通过对一种热带植物渗汁的研究发现了橡胶, 同时发现橡胶与硫和氧化铅混合加热即硫化, 可以生产出很有实用价值的橡胶产品, 并于 1842 年发明了实心轮胎; 1845 年汤姆森发明充气式轮胎并进行了试验研究, 但由于缺乏市场经验而停止生产。1888 年苏格兰人邓禄普首先发明了自行车用充气式轮胎, 并获得了自行车和三轮车的新式轮胎专利。1894 年法国的米其林 (Michelin) 兄弟俩发明了可拆卸式装有内胎的充气式轮胎, 并在巴黎开设自行车轮胎厂, 于 1895 年将充气式轮胎应用于汽车车轮上。1923 年又试制成低压轮胎, 与高压轮胎相比较, 低压轮胎与地接触面积大, 弹性好, 能有效地减轻冲击振动和提高汽车的行驶稳定性。1948 年米其林橡胶公司发明了子午线轮胎, 其特点是减小车轮的滚动阻力, 节约燃料, 同时耐磨性好, 提高了汽车操纵稳定性, 改善乘坐舒适性, 所以得到广泛应用。

汽车的动力传动装置, 首先是在 T 型福特车上采用的。在该车型上首次采用了前进两档加倒档的脚踏式变速器后, 受到当时广大用户的欢迎。由此传动装置作为发动机动力的补充, 使汽车驾驶及行驶条件更加安全灵活和丰富多样化。

直到 20 世纪前期为止是人类发明汽车并完善其基本结构的过程, 而 20 世纪后期直到现在, 汽车的发展历史是提高性能与人类社会环境要求以及多学科技术协调发展的过程。



可以说,由于有了能源动力革命和轮胎的文化,才有了汽车的文化,才有了现代人类社会文明。

## 二、三种动力的竞争

自蒸汽机发明直到1887年,经过100多年的发展历史,蒸汽汽车的技术已成熟,人们已经充分认识到人类社会活动中汽车的重要性。但是,蒸汽机热效率低,体积庞大而笨重,冒烟严重等致命弱点很难从根本上得到彻底解决。所以,许多科学家着力研究新型动力装置。从19世纪后期到20世纪初作为车用动力源有蒸汽发动机、汽油机和电动机三种,而这三种动力汽车当时竞争非常激烈。其中,蒸汽机首先应用到汽车上,其技术比较成熟。

通过1895年6月在法国举行的著名的巴黎-波尔多-巴黎的第二次汽车拉力赛,人们才开始认识到机动车的重要意义,同时通过参赛的各种车型(如蒸汽汽车、汽油车、电动车及马车)的比较,也开始意识到车身质量越小,优势越大。在这次拉力赛中充气式轮胎也得到了充分的肯定,同时也发现了各种车型所存在的问题。当时,对汽车所关心的问题主要并不是能源与排放,而是燃料的能源密度和一定量燃料所能达到的续驶里程。

通过巴黎的第二次汽车拉力赛,对当时的三种动力车和马车的行驶特性进行对比分析,结果发现:蒸汽汽车每行驶10mile(1mile=1609.344m)需要加一次水;电动车每行驶30mile需要充一次电;而汽油车每行驶150mile才加一次油。马车既无车速也无续驶里程概念,一般任何一种马车,每天至多只能行走15~20mile。由于当时欧洲及美国城市都比较小,任何一种私人车只要其续驶距离能达到15mile以上就可以接受了。但是饲养马是一件很费劲的事情。

到19世纪末西欧一些发达国家早已进入旅游时代,所以动力汽车取代马车已成为必然趋势。蒸汽汽车所存在的固有问题及每10mile都要加水等问题,不太适合于旅游业。而电动汽车一次充电续驶距离有限,而且每次充电费用又昂贵,所以满足不了当时旅游业的要求。1886年汽油车刚刚发明的初期,在热效率、起动性、排放噪声及车速等方面与蒸汽汽车相比并不占优势,反而由于当时无消声器而噪声大,成为其主要问题。但是在续驶里程方面,根据第二次汽车拉力赛的分析结果,汽油车具有其他车种无与伦比的绝对优势。后来由马克西姆发明了消声器,1899年克莱德·科尔曼(Clyde J. Coleman)设计出电动起动装置,并由查尔斯·富兰克林·卡特林于1912年使之进一步完善,使得汽油机的优势逐渐明朗化。进入20世纪以后,石油又被世界公认为机动车辆的主要燃料,由此确立了汽油车的主导地位,使得内燃机汽车得到迅速的发展。

## 三、内燃汽车发展的几个阶段

20世纪初期,随着汽车结构的基本完成,社会上已普遍形成了汽车的概念。特别是从第二次世界大战之后汽车工业复兴至今,汽车的发展过程经历了提高性能、主动安全、被动安全、环境保护、节能等几个阶段。

第二次世界大战后人们对汽车的要求越来越高。对汽车性能方面的要求主要体现在车速要快,操作要方便,价格要更便宜。高速化的要求主要是针对当时盛行的赛车,而驾驶性和价格的要求是来自汽车的大众化。但是汽车的普及,给社会带来了新的问题,即交通拥挤、交通事故、环境污染及石油能源紧张等。

随着社会经济的高度发展,汽车工业也得到了迅速发展。伴随汽车保有量的急剧增加,





交通事故也大幅度增加，成为社会化的问题。甚至，在国外一些国家称汽车为“行驶的凶器”。为汽车洗清这一绰号的就是汽车安全措施。伴随汽车大众化的发展，各汽车公司开始纷纷开发研究汽车的安全技术。而汽车的安全技术主要包括主动安全技术和被动安全技术。所谓主动安全技术就是为了预防事故的发生而采取的一系列措施。如制动系统的开发与完善；判断行驶路面状态和驾驶员疲劳状态的感知、判断及支援系统；减轻操作力和疲劳强度，帮助驾驶员控制操作运行的辅助行驶支援系统；考虑驾驶过程中人的反应时间的人和汽车的协调控制技术。而被动安全技术是当事故不可避免地发生时，用来保护乘客和驾驶员的安全技术措施。如车辆撞击时吸收能量以缓和冲击力的车辆结构上的技术措施，包括保险杠、安全带及气囊等。直到如今，安全技术在主动、被动两方面仍在继续深入地开发研究，且通过采用电子技术和自动控制技术使之更加完善。

从法律形式控制汽车有害尾气排放物的起因是1943年9月在美国洛杉矶发生的光化学烟雾事件。当时，整个洛杉矶市街被一层烟雾遮住，给市民带来催泪、呼吸系统疾病等灾难。美国联邦和加利福尼亚州政府对该烟雾事件进行的调查结果表明，造成这种严重烟雾事件的主要元凶就是汽车尾气排放物中的HC和 $\text{NO}_x$ 。于是，美国于1960年首次制定了防止汽车尾气污染物的法案，并从1965年开始实施。所以从20世纪60年代后半开始到70年代末的十几年间，汽车排气净化技术得到了迅速的发展。其中典型的技术就是转子发动机和稀薄燃烧技术。转子发动机于1967年达到量产化，其特点是燃烧温度低，所以 $\text{NO}_x$ 排放量少。而稀薄燃烧技术是于1972年日本本田技研工业首先发明。在稀混合气下燃烧时，CO和HC生成量少，而且由于空气的冷却作用燃烧温度也低，故 $\text{NO}_x$ 的排放量也低。之后出现了废气再循环（EGR）技术、电控汽油喷射技术、三效催化转换装置等。

除了汽车安全和尾气排放污染问题之外，对汽车发展影响较大的还有石油能源危机。1945年和1972年的两次石油危机，使得世界各汽车制造行业大力开发研制有关节能技术。在整车上，如美国GM（通用）汽车公司采用减小外形尺寸来减轻整车质量；福特汽车公司则通过提高铝等轻合金及塑料等氧化树脂材料的使用率，达到减轻整车质量的目的。在整车布置上，采用发动机前置前轮驱动方式，或发动机后置后轮驱动方式等，通过发动机变速箱直接驱动差速器及半轴，由此提高传动效率，同时减轻传动系统的质量；为了减小发动机室空间，提高发动机单位质量输出功率（比功率），采用V型四缸机、V型六缸机；奔驰、奥迪开发的直列五缸机，日本大发开发的直列三缸机等都是针对节能问题而开发的技术措施。这些技术有效地降低了发动机的比质量（单位输出功率的整车质量），改善了整车燃油经济性。同时对发动机燃烧过程的改善、电控技术的应用、汽车空气阻力特性的改善等方面也进行了深入的研究。这里，在节能和排放控制方面，以及安全等整车性能控制方面，汽车发动机的电子控制技术及其发展起着关键性的作用。电控技术已作为汽车必备的部分，在现代汽车领域占据不可缺少的重要位置。

随着节能与排放法规要求的不断提高，柴油机以其独特的热效率高、油耗低及耐久、可靠功率覆盖面宽等特点，不仅广泛应用于货车上，而且在轿车上也逐步得到广泛应用。而柴油机工作粗暴、振动噪声大、起动性差等缺点，通过电控高压喷射技术及燃烧系统的改进，已得到大幅度的改善。在西欧，柴油机在轿车上的应用比较普及。但目前柴油机的微粒排放（PM）和 $\text{NO}_x$ 排放尚未很好地解决。为此正广泛深入研究电控高压喷射、EGR中冷、增压中冷、后处理技术及HC/CAI燃烧方式等新技术。