

汽车动力总成现代技术

张亮 李文凯◎编著
韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

汽车工程专业系列丛书

汽车动力总成现代技术

张亮 李文凯 ◎编著
韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车动力总成现代技术 / 张亮, 李文凯编著; 韩维建主编. —北京: 机械工业出版社, 2016.12

(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-55473-8

I. 汽… II. ①张… ②李… ③韩… III. 汽车-动力总成-系统设计 IV. U463.202

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 273821 号

汽车动力总成现代技术

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 单秋婷

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京瑞德印刷有限公司

版 次: 2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 170mm×242mm 1/16

印 张: 8.5

书 号: ISBN 978-7-111-55473-8

定 价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 68995261 88361066

投稿热线: (010) 88379007

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjg@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

丛书总序

作为国家《中国制造 2025》战略部署的主要支点之一，汽车业持续、快速、健康的发展将为实现中国制造业强国目标奠定坚实的基础。面对中国汽车产业大而不强的现状，自主品牌汽车产业的发展壮大时不我待。重庆自主品牌汽车协同创新中心，依托国家“2011 计划”，立足于重庆地区汽车产业的资源和优势，以我国自主品牌汽车发展重大需求为牵引，以体制机制创新为手段，探索我国汽车自主品牌的发展模式。中心面向国内自主品牌汽车产业，重点开展培养高端人才，汇聚优秀团队，研发核心技术，推广产业应用，整合优势资源，搭建交流平台等工作。重庆自主品牌汽车协同创新中心瞄准“节能环保、安全可靠、智能舒适”的国际汽车三大发展趋势，凝练学科发展方向，汇聚创新资源和汽车及相关领域的优势学科群，建立了全面涵盖汽车行业研究领域的创新团队。

为了满足汽车领域人才培养的多学科交叉性、行业化、工程化和国际化需求，重庆自主品牌汽车协同创新中心委托中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士作为本套“汽车工程专业系列丛书”的主编，组织多位具有多年国际知名汽车公司研发工作经验的专家和国内一线汽车领域的专家组成编写团队，立足汽车行业现有先进技术，紧跟国际前沿，把握创新特点，遴选汽车领域最新技术成果及发展方向，编写本套丛书。本套丛书的出版将为中国汽车领域高层次人才培养提供支撑。

书籍是知识传播的介质，也是人才培养及创新意识传承的基础。正如重庆大学建校宣言“人类之文野，国家之理乱，悉以人才为其主要之因”所阐释

的，本套丛书秉承重庆自主品牌汽车协同创新中心人才培养方针，主要面向高校汽车相关学科的本科及研究生教学，同时也可为汽车行业工程人员提供参考。相信本套丛书会对我国汽车领域学科及行业产生积极良好的推动作用。



重庆自主品牌汽车协同创新中心主任

自序

中国的汽车产业发展迅速,已经成为我国国民经济的支柱产业之一。随着家庭平均汽车保有量的迅速增长,汽车给整个社会带来的能源、环境、交通和安全的压力日益加大。尽管汽车在轻量化、电动化、排放控制技术和安全技术方面已经有了长足的进步,尤其是近几年互联网和通信技术在汽车的独立驾驶和智能化方向提供了极大的发展和创新的空间,但诸多的发展给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此,行业的快速变化亟需培养一大批不仅懂专业技术,更熟悉跨界知识的创新型人才。

重庆大学汽车协同创新中心认识到人才培养的迫切需求,组织我们为新成立的汽车学院编写一套教材。参与这套教材编写的所有作者都身在汽车行业的科研和技术开发的第一线,其中大部分作者是近年海归的年轻博士。教材的选题经过专家在传统学科和新兴学科中反复地论证和研讨,遴选了汽车行业面临紧迫挑战性的技术和话题。第一批教材有八本,包括《汽车材料及轻量化趋势》《汽车设计的耐久性分析》《汽车动力总成现代技术》《汽车安全的仿真与优化设计》《汽车尾气排放处理技术》《汽车系统控制及其智能化》《中国汽车二氧化碳减排路径》和《汽车制造系统和质量控制》。

这套教材的一个共同特点就是与国际发展同步、内容新颖。编著者对于比较传统的学科,在编写过程中尽可能地把最新的技术和理念包括进去,比如在编写《汽车材料及轻量化趋势》的过程中,不仅介绍了各种轻量化材料的特点和动向,而且强调了轻量化材料的应用必须系统地考虑材料的性能、部件的加工方法和成本。有些选题针对汽车行业发展的新的技术动向,比如《汽车安全

的仿真与优化设计》主要介绍汽车安全仿真的模型验证和优化，这是汽车产品开发采用电子认证的必经之路；而《汽车系统控制及其智能化》概括了汽车的主要系统及其控制，以及智能化技术在各个系统中的应用，这些都是汽车自动驾驶的基础。

这套教材的另一个突出的特点是实用，比如一般汽车设计要求非磨损件的寿命是 24 万公里。《汽车设计的耐久性分析》着重介绍了汽车行业用于耐久性分析的主要工具和方法，以及这些方法的理论基础。这是进行汽车整车和零部件寿命耐久性正向设计的基础。随着环境保护的法规日益严格，汽车排放控制技术也在不断发展提高。汽车动力技术已经形成化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气排放处理技术》和《中国汽车二氧化碳减排路径》介绍了排放控制技术的进程和法规实施的协调，以及达到法规要求的不同技术路线。汽车质量一直是热门话题，也是一个汽车企业长期生存的关键问题之一。《汽车制造系统和质量控制》介绍了现代汽车制造系统与质量控制的基本概念和实践。

本套丛书不仅对汽车专业的学生大有裨益，也可以作为汽车从业人员和所有对汽车技术感兴趣者的参考读物。由于时间有限，选题的范围还不全面。每本书的内容也会反映出作者的知识和经验的局限性。在此，真诚地希望广大读者提出意见，供我们不断修改和完善。

韩维建

推 荐 序

随着我国汽车工业的快速发展，先进的汽车设计理论和技术在车身开发中越来越受到重视。同时，汽车发展遇到了环保、能源、交通等各个方面的诸多问题，在这种新形势下，从业者掌握和熟练运用核心设计技术显得尤为重要。

汽车的设计与制造是一个非常复杂的系统工程，需要考虑零件、子系统、系统，乃至整车等各个层面，综合运用材料科学、能源科学、信息科学和制造科学的相关知识、理论和方法。本套“汽车工程专业系列丛书”涵盖了汽车制造系统和质量、汽车动力总成、汽车材料及轻量化、车身耐久性、汽车安全仿真与优化、汽车系统控制及其智能化、汽车尾气排放处理与二氧化碳减排等多个方面的内容，涉及汽车轻量化、安全、环保、电子控制等关键技术。

本套丛书的作者既有在汽车相关领域工作多年、经验丰富的专家，也有学成回国、已崭露头角的后起之秀；内容安排上既有适合初学者学习的大量基础理论知识，也融入了编著者在相关领域多年来的研究体会和经验，从中我们能充分体会到现代汽车技术节能、环保和智能化的发展趋势。本套丛书结合大量实例，取材丰富、图文并茂。

本套丛书可作为汽车设计的参考工具，也可作为车辆工程、机械工程、环境工程等专业研究生的专门教材及学习参考书。相信该套书对于汽车行业相关领域的研究生、企业研发人员和科研工作者会产生重要的启发作用，特作序推荐。



上海交通大学

前 言

作为汽车专业研究生的阅读材料,本教材将集中介绍汽车,特别是乘用车动力总成的历史沿革、原理构造、设计方法,以及所依托的先进理论与分析手段。

与国内传统教材相比,本教材在众多前辈工作的基础上,以汽车动力总成的功能描述为出发点,进而解释内燃机的关键性能指标、原理、设计方法,再通过介绍相关基础学科与开发方法,力图建立一幅动力总成的技术全景图。鉴于作者知识所限,本教材以汽油机为主,介绍了内燃机的主要性能参数,继而引出内燃机的工作原理,以及相应的设计理念与方法。此外,本教材亦试图通过能源、经济与环境等社会因素的分析,解释汽车动力总成的历史、现状与未来之路。同时,本教材通过总结理论知识,并结合若干工程应用,简单阐述了理论在工程实践中的应用。

本教材并不打算在具体的工程技术细节方面花费过多笔墨。关于这些内容,相信读者一定可以找到相关书籍,并且在实践当中不断深化认识与应用。之所以如此安排,是希望理工科学生在专注研究工程技术的同时,能够从宏观层次来理解动力总成这一人类历史的重要发明。21 世纪,不但需要工程师,更加需要具备工程、经济、社会等综合视野的人才。本教材的目的在于抛砖引玉,为汽车相关专业研究生、工程师,以及从业人员开拓思路,提供帮助。

人类社会的进步离不开对历史的记录与学习,本教材的编写也离不开前人的工作与铺垫。在此,作者谨向那些为本教材提供参考与素材的专家与同行,致以最诚挚的谢意!

张 亮

目 录

丛书总序

自序

推荐序

前言

第一章 动力总成综述 1

第一节 动力总成的定义与构成 2

第二节 动力总成的发展简史 3

第三节 动力总成的功能、要求与未来趋势 10

第二章 内燃机原理与设计 13

第一节 内燃机性能指标与参数 13

一、指示性能指标 14

二、有效性能指标 16

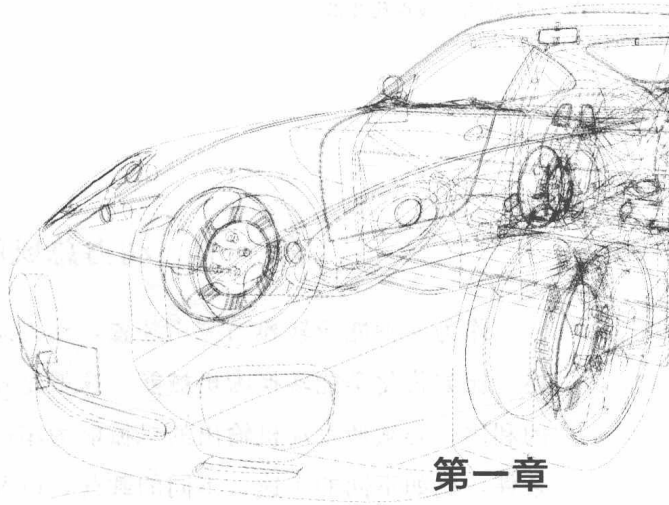
三、强化程度指标 19

四、经济性指标 21

五、排放性能指标 21

第二节 内燃机性能指标强化与改善	26
第三节 内燃机原理简介	28
一、内燃机理论循环	28
二、内燃机实际循环	32
第四节 内燃机热平衡与能量管理	37
第五节 内燃机曲柄连杆机构运动学与受力分析	43
一、曲柄连杆机构运动学	43
二、曲柄连杆机构的受力分析	51
 第三章 内燃机现代研究与方法	56
第一节 内燃机燃烧概述	57
一、汽油机燃烧过程分析	58
二、不正常燃烧现象	60
三、燃烧速度	62
四、先进汽油机燃烧技术	62
第二节 材料与制造概述	63
一、铝合金	64
二、镁合金	65
三、钛合金	65
四、汽缸盖材料研究	66
第三节 CAE 方法与应用	69
一、CAE 与内燃机	70
二、内燃机工程 CAE 分析的常见种类	71
三、内燃机工程 CAE 分析的具体应用	73
 第四章 动力总成的未来之路	83
第一节 动力总成与能源和环境	83

第二节 新能源动力总成路线探讨与生命周期评价	88
一、汽车动力总成技术中“新能源”的概念和发展	88
二、生命周期评价的方法学	92
三、替代燃料和新能源动力总成的生命周期评价： 以温室气体排放为例	94
第三节 新型动力总成：从实验室到真实世界	111
第四节 愿景与展望	114
参考文献	118



第一章

动力总成综述

按照传统理解，汽车动力总成，是一种将蕴藏于汽柴油的化学能转变为动能，进而驱动汽车运动的一种能源转换与利用装置。通俗地讲，就是汽油机与柴油机这两种发动机，及其相应的变速箱系统。在实际的汽车产品中，由发动机输出的动力，就是通过变速箱以及后续传动系统转化为驱动力的。

21 世纪，科学技术日新月异，以往只能存在于人们脑海中或是图纸之上的设想与设计，都逐渐地在现实中生根发芽，比如混合动力、燃料电池、纯电动汽车等，都已经出现并且量产。这些人类社会的文明成果，必须依靠技术进步，同时又离不开商业推动。虽然这些新技术、新方向，目前在数量上所占的比例很低，但在不同程度上改变了人们对动力总成的认识。人们逐渐认识到，动力来源并不仅限于内燃机。鉴于作者本身经验以及篇幅限制，本教材将以汽油机为主，重点介绍乘用车动力总成。关于新能源技术，本教材在后续若干章节亦会探讨。



第一节 动力总成的定义与构成

作为一种能源转换与应用装置，动力总成至少具备两项功能：一是能源转换，比如将化学能转换为机械能，这就是发动机的一种典型应用；二是机械能的利用，必须使发动机输出的机械能为车所用，这就必须考虑车辆的各种工作条件，比如不同的车速、不同的载荷，以及不同的驾驶习惯，这就引入了传动系统的概念。

一般来讲，发动机在整车的位置可以分为前置、中置和后置三种；而车辆驱动方式则可以分为前轮驱动、后轮驱动与四轮驱动等。这样就会产生不同的组合。从目前的市场来看，以前置前驱、前置四驱为主，一些高端车型也会采用其他组合形式。较为典型的是前置前驱，如图 1-1 所示。其中，发动机横置，其动力经过变速箱，再通过左右半轴传递到车轮，进而驱动车辆运动。这种前置前驱系统，可以称为最基本的布置方式。而更复杂的布置方式，比如前置四驱，如图 1-2 所示，是在变速箱后面添加一个分动器，把变速箱输出的动力分为两路：一路到前驱动半轴；另一路通过中间传动轴到后驱动半轴。四驱方案的好处在于通过能力更强，满足了某些市场需求。当然，随着技术进步，传统的机械四驱方案也会逐渐走向电动化，比如机械前驱外加电子后驱等方式。

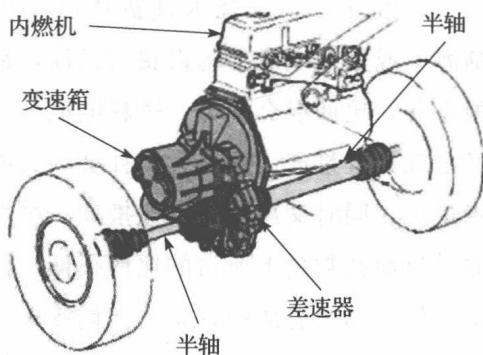


图 1-1 前置前驱

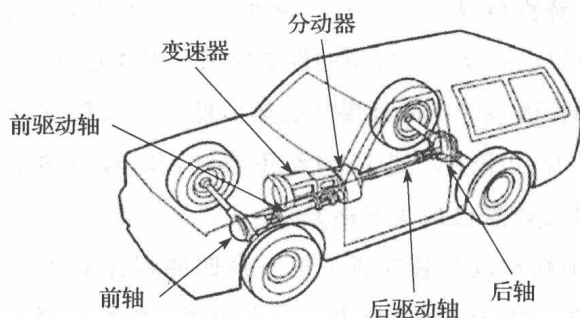


图 1-2 前置四驱

所以，动力总成主要由发动机与变速箱组成，其功能在于将燃油的化学能转化为机械能，再通过合理地转换与分配，进而驱动车辆，满足不同使用场景的需求。为简化问题，本教材在接下来的章节中，将重点讨论汽油机。

第二节 动力总成的发展简史

动力总成的历史，可以分为内燃机与变速箱两个部分。

最早出现的内燃机是以煤气为燃料的煤气机。1860年，法国人雷诺瓦尔制成了第一台单缸、二冲程、无压缩和电点火的煤气机，输出功率为740~1470W，转速约为100r/min，热效率为4%。法国工程师德罗沙认识到，要想尽可能提高内燃机的热效率，就必须使单位气缸容积的冷却面积尽量减小，膨胀时活塞的速率尽量快，膨胀的冲程尽量长。在此基础上，他在1862年提出了著名的燃烧循环四冲程：进气、压缩、燃烧和膨胀、排气。1877年，德国人奥托制成了第一台单缸四冲程往复式活塞式煤气机，功率约为2210W，转速约为180r/min。在这台发动机上，奥托增加了飞轮，使运转平稳，把进气道加长，又改进了汽缸盖，使混合气充分形成。这是一台非常成功的发动机，其热效率相当于当时蒸汽机的两倍。奥托把三个关键的技术思想：内燃、压缩燃气、四冲程融为一体，使这种内燃机具有效率高、体积小、质量轻和功率大等一系列优点。在1878年巴黎万国博览会上，它被誉为“瓦特以来动力机方面最大的成就”。等容燃烧四冲程循环由奥托实现，也被称为奥托循环。

煤气机虽然比蒸汽机具有很大的优越性，但在社会化大生产情况下，不能满足交通运输业所要求的高速、轻便的性能要求。因为它以煤气为燃料，需要庞大的煤气发生炉和管道系统，而且煤气的热值低 ($1.75 \times 10^7 \sim 2.09 \times 10^7 \text{ J/m}^3$)，故煤气机转速慢、比功率小。到 19 世纪下半叶，随着石油工业的兴起，用石油产品取代煤气作为燃料已成为必然趋势。

1883 年，戴姆勒和迈巴赫制成了第一台四冲程往复式汽油机，安装了迈巴赫设计的化油器，用白炽灯管解决了点火问题。以前内燃机的转速都不超过 200r/min，而戴姆勒的汽油机转速一跃为 800~1000r/min。它的特点是功率大、质量小、体积小、转速大和效率高，特别适用于交通工具。与此同时，本茨研制成功了现在仍在使用的点火装置和水冷式冷却器。

到 19 世纪末，四冲程往复活塞式内燃机进入了实用阶段，很快显示出巨大的生命力。内燃机在广泛应用中不断地得到改善和革新，迄今已达到一个较高的技术水平。

在这 100 多年的发展历史当中，有两个重要的具有划时代意义的发展阶段：一是 20 世纪 50 年代增压技术在发动机上的广泛应用；二是 20 世纪 70 年代开始的电子与计算机技术在发动机研制中的应用，这两个发展趋势至今都方兴未艾。我们可以按照提高汽油机的功率、热效率、比功率和降低油耗等主要性能指标的过程，来回顾一下汽油机在 20 世纪的发展历程，大致分为四个阶段。

第一阶段是 20 世纪的最初 20 年，为适应交通运输的要求，以提高功率和比功率为主。采取的主要技术措施是提高转速，增加缸数和改进相应的辅助装置。这个时期内，转速从 20 世纪的 500~800r/min 提高到 1000~1500r/min，比功率从 3.68W/kg 提高到 441.3~735.5W/kg，这对提高负载能力具有重大的意义。

第二阶段是 20 世纪的 20 年代，主要解决汽油机的爆震燃烧问题。当汽油机的压缩比达到 4 时，汽油机就发生爆震。美国通用汽车公司研究室的米格雷和鲍义德通过在汽油中加入少量的四乙基铝，干扰氧和汽油分子化合的正常过程，解决了爆震的问题，使压缩比从 4 提高到了 8，大大提高了汽油机的功率和热效率。当时另一严重影响汽油机功率和热效率的因素是燃烧室的形状和结

构,英国的里卡多及其合作者通过对多种燃烧室及燃烧原理的研究,改进了燃烧室,使汽油机的功率提高了20%。

第三阶段是从20世纪20年代后期到40年代早期,主要是在汽油机上装备增压器。废气涡轮增压可使气压增至1.4~1.6个大气压,为提高汽油机的功率和热效率开辟了一个新的途径。其真正的广泛应用,则是在20世纪50年代后期才普及的。

第四阶段从20世纪50年代至今,可以这么讲,汽油机技术在原理重大变革之前已经发展近极致,结构越来越紧凑,转速越来越高,缸内喷射、多气门技术、进气滚流、稀薄分层燃烧、废气再循环、三元催化等排放处理技术,点火正时、汽油喷射及空燃比随工况精确控制等全面电子发动机管理等。这些技术在近年来成功研制并量产的缸内直喷汽油机(GDI)上得到了充分的体现。有兴趣的读者可以自行研究。

变速箱作为动力总成不可获取的部分,最初的想法就是寻求如何将活塞的往复运动转换为旋转运动。尼古拉斯·约瑟夫·屈尼奥于1769年将棘齿式的运动转换装置与蒸汽机结合,制造了一台三轮蒸汽机车,如图1-3所示。从此,变速箱的历史就与所有发动机的发展紧密地结合在一起了。1784年,詹姆斯·瓦特获得了常啮合机构与齿轮的专利,并制造了采用牙嵌离合器接合的2挡变速箱。自此,可变速度的传动装置诞生了。

手动变速箱(manual transmission, MT)出现的最早,又称机械式变速箱,必须用手拨动变速杆才能改变变速器内的齿轮啮合位置,改变传动比,从而达到变速的目的。目前,主流的乘用车手动变速箱一般采用4个前进挡或者6个前进挡,外加1个倒挡。

自动变速箱(automatic transmissions, AT),则是在MT的基础上发展而来。最初由斯特蒂文特兄弟于1904年开发,具有两个前进挡。但是很遗憾,由于当时的冶金技术不过关,这款自动变速箱经常会毫无征兆地出现故障。1908年,可以说是自动变速箱发展史的一个里程碑,亨利·福特在T型车上采用了两挡变速箱,并且装备了采用行星齿轮的倒挡,尽管仍然需要驾驶人员通过踏板来选取挡位,但从某种程度上讲,这款变速箱降低了对驾驶技巧的要求。1934年,GM开发了一款半自动变速箱(semi-automatic transmission),