

第 1 章 汽车动力系统概述

1.1 汽车动力系统的发展历史

汽车在发展过程中其动力系统经历了数次技术革命。蒸汽机是汽车上应用的第一种动力源,1769 年法国人 Nicolas-Joseph Cugnot 制造了世界上第一辆蒸汽驱动的三轮汽车,此后不断有蒸汽汽车出现并投入运输。1876 年,德国工程师 Nikolaus Otto(尼古拉斯·奥托)成功试制出世界上第一台实用的活塞式四冲程煤气内燃机,为内燃机汽车的发明奠定了基础。1885 年,德国人 Gottlieb Daimler 和 Karl Benz 分别制成了四轮内燃机汽车和三轮内燃机汽车,成为汽车发展史上最重要的里程碑之一,此后内燃机汽车开始蓬勃发展。到 20 世纪 90 年代出现了插电式混合动力汽车(PHEV)和混合动力汽车(HEV)。21 世纪初期至今,由于车用动力电池技术的突破,纯电动汽车又开始了蓬勃发展,汽车的动力系统逐渐走上了电动化的潮流。

1.2 汽车动力系统的基本组成

汽车动力系统是汽车上负责能源的存储、转化、传递直到输出的装置总成,其组成如下。

(1) 车载能源存储装置,用于在车辆中存储不同形式的能源,以供车辆行驶或其他设备的运行。一款车型根据其使用能源的种类可以拥有一个或多个储能装置,内燃机汽车的能量来源为液体燃料(如汽油、柴油等),对应的能源存储装置为燃油系统。纯电动汽车的能源存储装置是各类型的电池。对于混合动力汽车和燃料电池汽车而言,前者的能源存储装置为燃油系统和电池,后者为储氢瓶和电池。

(2) 车载能源转化装置,用于将上述能源转化为其他装置需要的能源,包括内燃机、电机、燃料电池、DC(直流)/DC(直流)转换器和 DC(直流)/AC(交流)逆变器等。内燃机可以将燃油中的化学能转化为曲轴运动的机械能,用于驱动车辆。电机既可在车辆驱动时将电能转化为机械能,也可以在车辆制动时将机械能转化为电能进行回收再利用。燃料电池将氢气和氧气的化学能转化为电能。DC/DC 转换器可以将动力电池输出的直流电转化为另外一种电压的直流电,比如从 600 V 高压转换到 12 V(轿车)或者 24 V(商用车)等,为车载低压设备供电。DC/AC 逆变器用于将电池的直流电转化为多数驱动电机(如永磁同步电机、交流感应电机等)使用的交流电。

(3) 车载动力输出装置,用于将其他能源(主要是化学能和电能)转化为可以驱动车辆行驶的机械能并输出。内燃机和电机既是能源转化装置,也是动力输出装置。

(4) 车载动力传动装置,用于将内燃机或电机输出的机械能传递到车轮。以燃油车为例,其动力传输路线为内燃机→离合器→变速器→传动轴→主减速器和差速器→半轴→车轮。纯电动车的动力系统中存在动力电池、逆变器和电机三大部件之间的电能传输,电力线缆是它们之间的动力传输装置;在机械能的传递方面,其动力传动系统根据拓扑结构分为集中式驱动和分布式驱动两类。集中式电驱动系统在燃油车基础上保留了变速器、传动轴、

主减速器和差速器等结构,其中变速器的结构相对简单,仅有 1~2 个挡位。分布式驱动系统根据电机位置不同可以分为轮边电机驱动和轮毂电机驱动,电机输出的动力通过减速器传递给车轮,或直接驱动车轮。

(5) 车载动力热管理系统,用于耗散车辆动力系统运行过程产生的热量,保证内燃机、电池、电机等部件的正常运行,提高车辆性能与可靠性,或者加热低温状态的内燃机和电池、燃料电池,使其迅速上升到正常工作温度。目前内燃机、电机、燃料电池和 DC/DC 转换器大都采用水冷系统散热,少数内燃机采用风冷散热,部分电机为了追求更高的输出功率,也可以采用油冷散热,加热系统包括热泵加热、电阻丝或 PTC(正温度系数)加热。

(6) 车载动力控制系统,用于采集上述不同动力装置的各种传感器信号并通过网络协调控制动力系统各零部件的状态。控制系统一般由多个控制器和通信网络[CAN(控制局域网)总线、实时以太网总线、FlexRay 等]以及传感器、执行器和线束组成。

1.2.1 内燃机动力系统

根据内燃机和驱动轮位置的不同,常见的燃油车可以分为前置发动机前轮驱动(FF)、前置发动机后轮驱动(FR)、后置发动机后轮驱动(RR)和四轮驱动(4WD)。

典型的内燃机前置后驱动力系统如图 1-1 所示。内燃机将燃油中的化学能转化为机械能,经过离合器、变速器、传动轴、主减速器和差速器、半轴,最终传递到车轮,驱动车辆行驶,详见第 2 章内燃机动力系统。

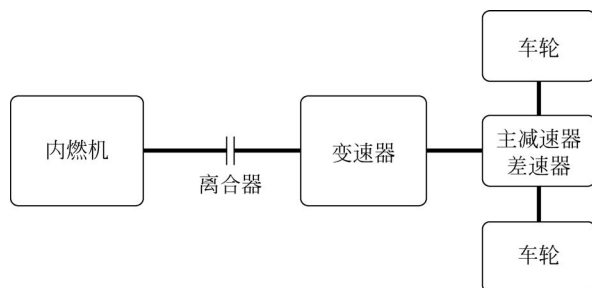


图 1-1 内燃机动力系统

1.2.2 混合动力系统

根据内燃机与驱动电机之间能量流与动力传递的关系,混合动力系统可以分为串联式混合动力系统、并联式混合动力系统、混联式混合动力系统。以串联式混合动力系统(图 1-2)

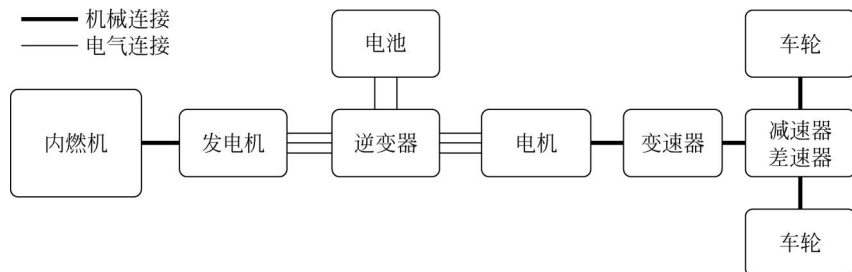


图 1-2 串联式混合动力系统

为例,内燃机带动发电机发电,产生的电能用于供给驱动电机以及给动力电池充电。由于内燃机仅用于发电,其运行工况与车辆行驶工况解耦,因此可以控制内燃机工作在高效率区域。详细的混合动力系统介绍见第6章。

1.2.3 纯电动动力系统

图1-3所示为集中式纯电动动力系统的拓扑结构,电池输出的直流电经过逆变器转化为驱动电机运行的交流电。电机通过转子旋转输出机械功,经过变速器、减速器和差速器、传动轴等部件,传递到车轮上。详细的纯电驱动构型,可见本教材的第7章。

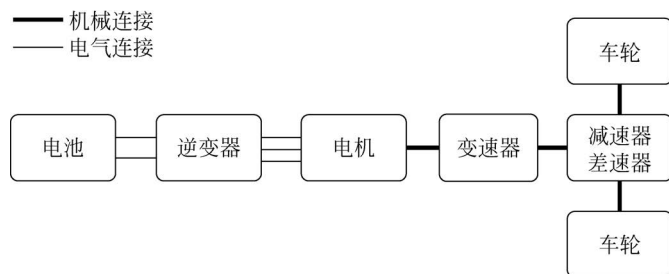


图 1-3 纯电动动力系统

1.3 汽车动力系统的性能评价指标

1.3.1 动力性评价指标

汽车动力系统的动力性由动力输出部件本身的特性及整车的动力性来衡量,通常使用以下指标评价:

(1) 内燃机或电机的外特性或万有特性。内燃机的转矩转速外特性是指内燃机全负荷时转矩随着转速变化的特性;电机的外特性是指电机的最大转矩随转速变化的特性。万有特性图通常以转速为横坐标,转矩为纵坐标,描述不同转速和转矩下的排放、油耗、效率、功率等关系,通常制成等高线图的形式,也被称为 MAP 图。

(2) 汽车原地起步加速时间和超车加速时间。原地起步加速时间是指车辆从停放开始起动,将加速踏板快速踩到底加速到某一指定车速,从开始踩下加速踏板至车辆达到指定车速的时间。通常轿车采用 0~100 km/h 加速时间评价,货车采用 0~60 km/h 加速时间评价。超车加速时间是指车辆从某一非零车速开始,将加速踏板踩到底直到加速到另一更高车速,从踩下加速踏板至车辆达到指定车速的时间。内燃机轿车 0~100 km/h 加速时间一般在十几秒,电动汽车的相应加速时间在 3~4 s 即可完成。

(3) 最大输出转矩和最大爬坡度。内燃机的最大输出转矩是指内燃机全负荷时测得的最大转矩。电机的最大输出转矩是指电机工作在恒转矩区时能达到的最大转矩。最大爬坡度是指汽车在良好路面上,满载状态下所能通过的极限坡道,采用坡道垂直高度与水平距离的百分比表示。

(4) 最高转速和最高车速。内燃机和电机的最高转速是指其被设计能够工作的最高转速。对于最高车速,由于内燃机和电机的特性不同,我国使用不同标准来评价非电动汽车和电动汽

车。内燃机汽车的最高车速是指汽车能够保持的最高稳定车速。电动汽车最高车速由 1 km 最高车速和 30 min 最高车速来衡量。1 km 最高车速是指电动汽车能够往返各持续行驶 1 km 以上距离的最高平均车速。30 min 最高车速是指能够持续行驶 30 min 以上的最高平均车速。

1.3.2 经济性评价指标

一定工况下汽车行驶百千米的燃油消耗量是经济性评价的关键指标。影响因素包括动力系统各部件的工作效率与测试时所选定的循环工况。新能源汽车与燃油车动力系统的差异主要体现在动力系统工作效率上。燃油车效率主要由内燃机-变速器-传动系统的工作效率决定；电动汽车动力系统的工作效率，主要由电池充放电效率、电机和控制器工作效率、减速和传动装置的效率等因素共同决定；混合动力汽车动力系统的工作效率还与能量流的分配与管理方式有关。图 1-4 所示为卡车柴油发动机的万有特性，其中绘有等功率线与等燃料消耗率曲线，与图 1-5 所示车用电机的转矩-转速-效率特性 MAP 图对比，可以发现电机转矩、转速可正可负，能够四象限运行，而且低速转矩高，功率输出范围宽，经固定齿比减速器减速后即可驱动车辆，而发动机一般不能反转（转速不能为负），常需与多级变速器联合使用才能满足车辆驱动需求。

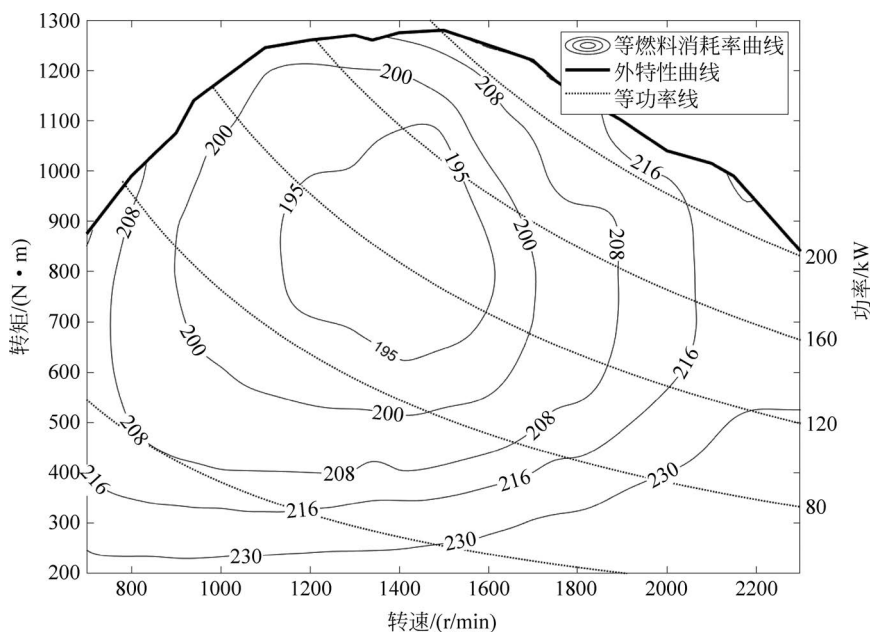
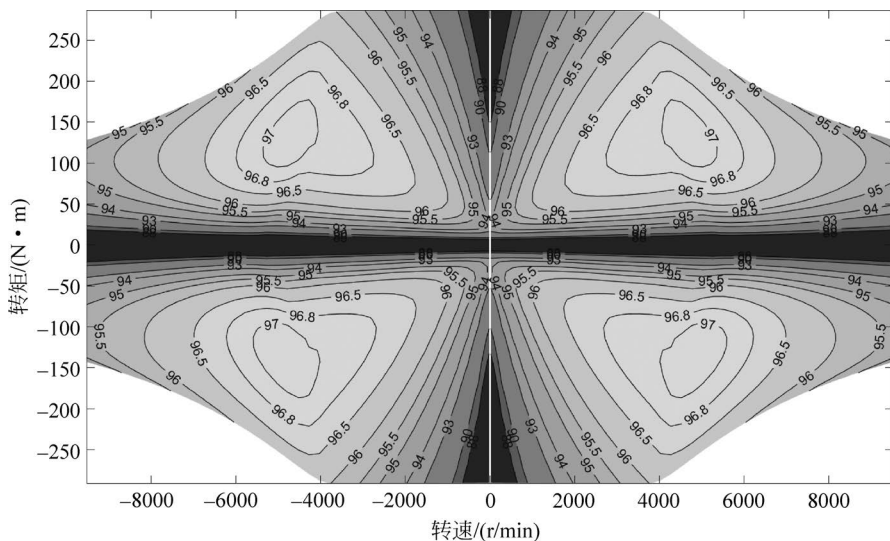


图 1-4 内燃机的万有特性

循环工况决定了经济性指标评定时算得的油耗、能耗指标的可信度。工业和信息化部组织制定的《乘用车燃料消耗量限值》(GB 19578—2021)提出在 2025 年前,传统能源乘用车、插电式混合动力乘用车的试验循环工况将由 NEDC(new European driving cycle,新欧洲驾驶循环)切换为 WLTC(world light vehicle test cycle,世界轻型车辆测试循环),工况的改变将影响车辆综合燃料消耗量。同时,《重型商用车燃料消耗量测量方法》(GB/T 27840—2021)、《轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》(GB/T 19753—2021)、《载货汽车运行燃料消耗量》(GB/T 4352—2022)、《载客汽车运行燃料消耗量》(GB/T 4353—



彩图 1-5

图 1-5 驱动电机的四象限效率 MAP 图

2002)等国家标准的颁布与实施进一步规范了不同车型经济性指标的测量方法,兼顾了油耗、氢耗、电耗等指标的横向比较差异性。

1.3.3 排放性能评价指标

内燃机排放的主要污染物主要是一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物等。后处理是减少污染物排放的主要方式,具体包括净化技术、捕集技术、转化技术等。2019年以后,《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 18352.6—2016)、《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 17691—2018)两部国家标准强制实施,直接对标欧美标准要求汽油车的一氧化碳排放量降低 50%,总碳氢化合物和非甲烷总烃排放限值下降 50%,氮氧化物排放限值降低 42%。

在温室气体排放方面,全生命周期的碳排放也是车辆排放性能指标的另一个评价维度。《中国汽车低碳行动计划研究报告》(2021 年发布)指出,汽油、柴油、常规混合动力、插电式混合动力、纯电动五种乘用车的生命周期碳排放范围在 146.5~331.3 gCO_2/km 。其中柴油车碳足迹最高,纯电动车碳足迹最低。相较于汽油车,插电式混合动力车和纯电动车的降幅分别为 12.7%、39.4%,主要由燃料周期碳排放降低造成,插电式混合动力车和纯电动车燃料周期碳排放相较于汽油车,减排幅度分别为 28.8%与 57.2%。随着车型级别的增加(车型变大),燃料周期占比呈现逐渐减小的趋势;对于相同级别车辆,SUV(运动型多功能汽车)的碳足迹普遍高于轿车。

1.3.4 环境适应性评价指标

环境适应性指的是车辆在寿命的预期内,在各类环境条件的作用下,实现预定功能以及性能并不受到破坏的能力。汽车动力系统的环境适应性主要包括内燃机、驱动电机、动力电池及其控制系统在内的环境适应性。

1. 内燃机和驱动电机的低温冷起动性能

内燃机低温冷起动性能：在一定温度、大气压力的环境中按要求静置后，通过汽车的起动时间、起步行驶等性能来表征汽车机动运行能力。我国专门制定的国家标准《汽车起动性能试验方法》(GB/T 12535—2021)明确了内燃机汽车的起动性能要求，其主要性能指标有：环境温度、拖动时间、起动次数、起动时间等。

北京市发布了团体标准《纯电动汽车低温冷起动性能要求及试验方法》(T/BJQC 201903—2020)，在规定试验环境温度下，满足规定状态的纯电动汽车，按规定要求进行试验，从驱动系统电源切断状态，到表示驱动系统就绪的“READY”或“OK”状态，用时不超过10 s；进入“READY”或“OK”状态后，车辆应能以不低于5 km/h的车速行驶。

2. 动力电池低温充放电性能

动力电池低温充放电性能也有相应的国家标准和团体标准，包括《电动汽车用动力电池电性能要求及试验方法》(GB/T 31486—2024)和《纯电动汽车低温充电性能要求及试验方法》(T/BJQC 201902—2020)，定义了若干充电性能指标，包括充电时间增加率、放电性能指标等。其中充电时间增加率的具体要求为：按照规定的试验方法进行试验后，应满足在 -10°C 温度下，交流充电时间及直流充电时间增加率 $\leq 20\%$ ，在 -20°C 温度下，交流充电时间及直流充电时间增加率 $\leq 40\%$ ；应满足在 -30°C 温度下，直流充电时间增加率 $\leq 90\%$ 。放电性能指标即放电容量占初始容量的百分比，具体要求为在 $(-20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 下的1C放电容量不低于初始容量的70%。

3. 电动汽车的高温工作性能

内燃机和电动汽车也都需要考虑其高温工作性能，对于内燃机，输出功率为发动机在高温下工作性能的主要评价指标。对于电机和电池，我国制定了《电动汽车用驱动电机系统》(GB/T 18488—2024)和《电动汽车用动力电池电性能要求及试验方法》(GB/T 31486—2024)；其中输出功率与电机高温工作温度限值为电机在高温下工作性能的主要评价指标。对于动力电池，放电容量占初始容量的百分比为电池在高温下工作性能的主要评价指标。在 $(55 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 下的1C放电容量不低于初始容量的90%。

4. 高原/高海拔性能

《汽车起动性能试验方法》(GB/T 12535—2021)中规定了内燃机汽车高原起动性能标准，发动机起动时间、起动次数和输出功率是发动机在高原/高海拔下的主要性能指标。对于电机和电池，高海拔对其工作性能影响较小。

5. 抗冲击、振动、跌落等性能

我国分别制定了内燃机、电机、电池等零部件的可靠性测试标准，包括《汽车发动机可靠性试验方法》(GB/T 19055—2024)、《电动汽车用驱动电机系统可靠性试验方法》(GB/T 29307—2022)和《电动汽车用动力电池安全要求》(GB 38031—2025)等，要求内燃机动力系统在经过车载条件下一定的冲击、振动、跌落等工况后，相关性能参数应处在国标允许范围内，发动机不得向内、向外漏油或漏水，空气不得渗入发动机负压系统，发动机内不得有燃气窜入油道或水道、油水混合等。零部件不得出现严重裂纹或断裂，摩擦表面不得出现严重磨损。电动汽车动力系统在经过车载条件下一定的冲击、振动、跌落等工况后，电机运转时不应出现异常噪声及轴承卡滞现象，绝缘电阻值应满足相关国标规定，额定转速及最高工作转速下的峰值转矩衰减应不大于5%。

1.3.5 汽车动力系统的其他评价指标

1. 车载能源系统的安全性

汽车的安全性是十分重要的一项基本属性,从燃油车到电动车,我国制定了完整的车辆安全性的法规,包括:《汽车燃油箱及其安装的安全性能要求和试验方法》(GB 18296—2019)、《燃料电池电动汽车 安全要求》(GB/T 24549—2020)、《电动汽车安全要求》(GB 18384—2020)、《电动汽车用动力蓄电池安全要求》(GB 38031—2025)等。

燃油安全:汽车燃油箱应具有耐腐蚀性,具有压力补偿装置,在燃油箱盖丢失时,具有防止燃油过量蒸发和溢出的措施,能够防泄漏。满足低温耐撞击性、耐压性、燃油渗透性、耐燃油性、耐火性、耐高温性以及振动耐久性。

氢安全:氢能汽车应有氢气低剩余量提醒装置和氢气泄漏报警装置。整车氢气排放浓度及氢气泄漏浓度应满足要求,储氢气瓶和管路应满足安装位置、热绝缘及防静电要求。氢能汽车所用液氢的氢纯度、仲氢含量等技术指标应满足具体要求。泄压系统及加氢口应满足相关安全要求。

电安全:电动汽车应满足人员触电防护要求,包括高压标记要求、直接接触防护要求、间接接触防护要求以及防水要求。

电池安全性:在国标《电动汽车用动力蓄电池安全要求》(GB 38031—2025)中,汽车动力电池单体应满足在进行相关标准要求的过放电、过充电、外部短路、加热、温度循环、挤压、快充循环后安全试验时,不起火、不爆炸;电池包或系统应满足在进行相关标准要求的振动、机械冲击、模拟碰撞、湿热循环、浸水等试验时无泄漏、外壳破裂、起火或爆炸现象。

2. 电磁兼容性(EMC)

我国制定了国标《道路车辆 电磁兼容性要求和试验方法》(GB 34660—2017),主要包括 EMI(电磁干扰)以及 EMS(电磁耐受性)两部分。

EMI 是电子设备(干扰源)通过电磁波对其他电子设备产生干扰,包括传导干扰以及辐射干扰,其主要指标为车辆和电气/电子部件(ESA)的辐射发射限值。EMS 指电子设备受电磁干扰的敏感程度,其主要评价指标为车辆和电气/电子部件(ESA)对电磁辐射的抗扰强度。

3. 汽车动力系统的可靠性和可维护性

汽车动力系统还有可维护性等要求,包括保养和大修期间等。保养是指定期对汽车进行检查和调整的预防性工作,主要包括更换机油(动力系统润滑油)和机油滤芯以及进行常规的检查。大修是通过拆卸、分解动力系统以及调整、修理或更换必要的零部件等工作来检测故障并进行修复。内燃机汽车动力系统平均故障间隔里程应不少于 5000 km,大修时间应不少于 3 年,大修里程应不少于 6 万 km,全寿命里程应不少于 30 万 km。电动汽车动力系统平均故障间隔里程应不少于 5000 km,大修时间应不少于 8 年,大修里程应不少于 10 万 km,全寿命里程应不少于 30 万 km。

1.4 汽车动力系统的发展趋势

汽车动力系统呈现出多样化的发展趋势,既有高性能低排放内燃机动力,也有混合动力,以及纯电驱动和燃料电池动力,但主流的目标是实现动力系统的低碳化、电动化和智能

化,并助力我国实现“双碳”目标,即 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,2060 年前实现碳中和。

从发展趋势上看,汽车动力系统呈现如下特征:①高效率,内燃机、电机及其控制器等部件的效率逐渐提高;②高转矩,动力系统的总转矩能力逐渐提高;③高可靠,动力系统的平均首次失效前时间、平均失效间隔工作时间等提高;④高安全,车载能源系统尤其是电池的碰撞安全、热安全等技术水平逐步提高;⑤高集成,动力系统的集成度逐步提高,开始出现了电机、减速器及差速器和电机控制器等多个功能部件集成在一个总成上,其体积功率密度和质量功率密度不断提高;⑥低排放,动力系统的电动化使化石燃料的使用量大幅降低,部分采用混动构型的车型油耗可降至 4 L/100 km 以下;⑦低成本,电驱动技术、电池技术等的发展使动力系统的成本逐步降低;⑧智能化,动力系统的灵活调整转矩和功率分配,精确地适应环境、道路和工况带来的变化,满足不同人员使用动力的习惯。这些目标也将促使当前和未来一段时间汽车动力系统的发展进入黄金时期。

第 2 章 内燃机动力系统

本章将系统地介绍内燃机的发展简史、工作原理、基本构造、性能参数以及内燃机在交通能源技术革新中的发展趋势。

2.1 内燃机发展简史

内燃机是利用燃料在机体内部燃烧产生热能并将热能转变为机械能的一种发动机。19 世纪末往复活塞式内燃机被发明,为汽车工业快速发展点亮了曙光。1876 年尼古拉斯·奥托发明并制造了世界上第一台四冲程点燃式煤气内燃机,如图 2-1 所示。人们发现用石油炼制出的轻质组分(汽油)很适合作为这种火花点火发动机的燃料,但当时发动机的热效率不到 10%。1890 年鲁道夫·狄塞尔受到中国古代压缩空气点火棒的启发,提出了压缩空气加热燃油着火的概念,并于 1897 年制造出了第一台压燃式内燃机(图 2-2),其热效率达到了 26%。狄塞尔早期曾用花生植物油作为压燃燃料,其成本高且燃烧不稳定;后来发现用石油炼制汽油后剩余的重油(柴油)作为燃料,发动机具有更好的燃烧稳定性,且经济性好。20 世纪以来,石油成为内燃机的重要燃料,汽油机和柴油机分别得到了长足发展。

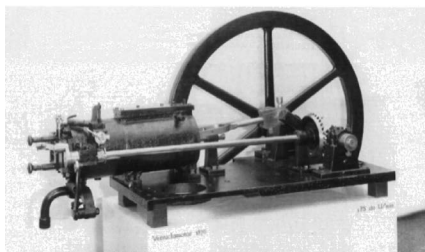


图 2-1 奥托发明的四冲程点燃式煤气内燃机



图 2-2 狄塞尔发明的压燃式发动机

2.1.1 车用汽油机演变

自汽油机发明以来,随着汽车油耗和排放法规的加严,车用汽油机经历了从早期的化油器式,到 20 世纪 80 年代开始的进气道喷射(port fuel injection, PFI)式,再到缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)式的演变。燃油喷射系统的控制目标由早期以动力性和经济性为主,发展到以经济性和排放性为主并兼顾动力性的阶段。从化油器机械控制混合气的浓稀,发展到电子喷射控制进气道和缸内混合气的质量,实现了汽油机动力性、经济性和排放性能的大幅提升。PFI 加三效催化转化器(three-way catalytic converter, TWC)已成为降低汽油机排放的典型主流技术路线,但由于常规 PFI 汽油机的压缩比低,泵气损失大,因此其燃油经济性低。GDI 与 PFI 相比具有诸多优势,如充气效率高、燃油经济性好、瞬时响应快、起动

快、空燃比控制更精确等。近年来,涡轮增压技术在汽油机上得到广泛的应用,在提高升功率(可超过 100 kW/L)的同时,还改善了汽油机的燃油经济性。增压小排量汽油机的结构紧凑,质量减轻,整车燃油经济性也进一步提高。先进的汽油机结构如图 2-3 所示。

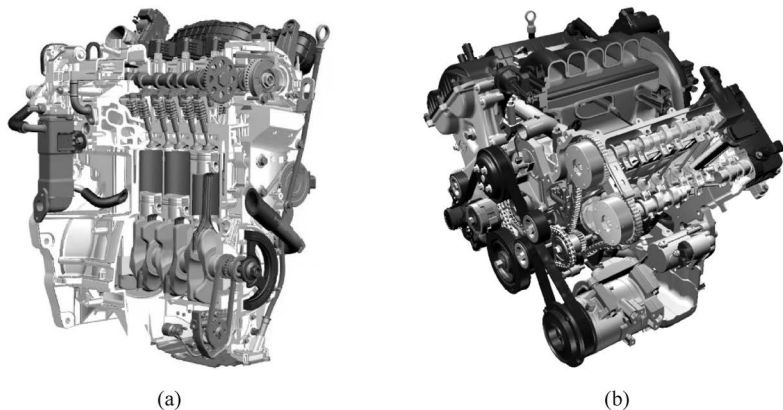
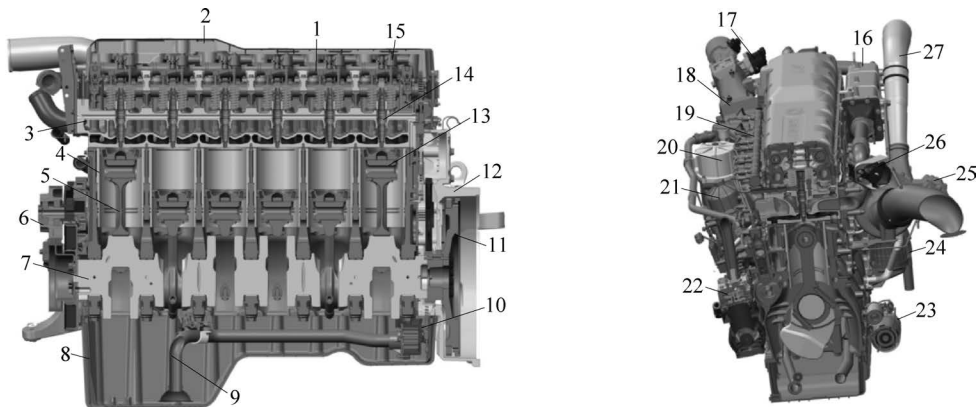


图 2-3 现代先进汽油机结构图

(a) 直列自然吸气; (b) V 型发动机

2.1.2 车用柴油机演变

早期的车用柴油机为自然吸气式,20 世纪 50 年代,以康明斯、沃尔沃和斯堪尼亚等为代表的柴油机制造商开始在卡车上运用废气涡轮增压器技术。现代车用柴油机几乎全部采用增压技术,甚至有产品使用双级涡轮增压,发动机动力性能得到大幅度提升,升功率可以超过 60 kW/L。柴油机的燃油喷射系统也从离心式飞吹调速器加机械式柱塞泵,发展到位置控制式机械柱塞泵系统,进一步发展到时间控制式电控单体泵和泵喷嘴系统,再发展到目前的电控高压共轨系统(图 2-4)。喷射压力也由早期机械泵的约 10 MPa,提升到现代高压共轨



1—摇臂轴; 2—气缸盖罩总成; 3—气缸盖; 4—气缸套; 5—连杆总成; 6—风扇法兰; 7—曲轴; 8—油底壳; 9—机油收集器; 10—机油泵; 11—飞轮; 12—飞轮壳; 13—活塞; 14—喷油器; 15—制动摇臂总成; 16—EGR(废气再循环)冷却器; 17—节气门; 18—进气预热器; 19—高压共轨管; 20—机油粗滤器; 21—燃油细滤器; 22—空气压缩机; 23—起动机; 24—油气分离器; 25—VGT(可变截面涡轮增压器); 26—EGR 阀; 27—压气机出气管。

图 2-4 现代先进柴油机结构图