

系统性强、定位明确。丛书各教材之间联系密切，符合各个学校的课程体系设置，为学生构建了完整、牢固的知识体系。
层次性强。各教材的编写严格按照由浅及深、循序渐进的原则，采用以具体实验项目为单元的项目式编写方法，重点、难点突出，以提高学生的学习效果。
先进性强。本套教材吸收最新的研究成果和企业的实际案例，使学生对当前专业发展方向有明确的了解。
操作性强。教材重点培养学生的实际操作能力，并最大限度地将在理论运用于实践中。本系列教材所选案例均贴合工作实际，以满足广大企业对汽车类专业应用型人才实际操作能力的需求，增强学生在就业过程中的竞争力。

十二五
汽车类

MIANKUANG SHIERWU GAOJING JIAOYU
HECHENG GAISE XIANMU YANJIU CHENGGUO



面向“十二五”
高等教育课程改革项目研究成果

电控发动机 原理与检修

(第2版)

主编 赵振宁 李东兵

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

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

电控发动机原理与检修

(第2版)

主 编 赵振宁 李东兵
副主编 高洪喜 李 刚

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

图书在版编目 (CIP) 数据

电控发动机原理与检修/赵振宁, 李东兵主编. —2 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5640 - 5224 - 9

I. ①电… II. ①赵… ②李… III. ①汽车 - 电子控制 - 发动机 - 理论 - 高等学校 - 教材②汽车 - 电子控制 - 发动机 - 检修 - 高等学校 - 教材 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 211596 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地质印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 18

字 数 / 419 千字

版 次 / 2011 年 12 月第 2 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 2000 册

定 价 / 37.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 吴皓云

前言

QIAN YAN

世界经济一体化，给中国带来了机遇和挑战，特别是中国汽车工业的迅速兴起。目前，中国已成为了汽车大国。世界各国汽车公司都争先恐后地涌入我国，由原来向中国进口汽车，转向与国内合作生产汽车，并带来了大量先进的汽车技术。

电控发动机是汽车的动力总成，是机电一体化的典型产品，在国内有 10 多年技术成熟的历史。

本书第一章对发动机的基础理论作了简要介绍；第二章介绍了电控发动机的传感器，删去了原书一些淘汰的传感器，如体积式空气流量计；第三章讲述了点火系统，略讲了传统和电子点火，重点为电控发动机点火；第四章的燃油供给系统在原书的基础增加了无回油管供油系统；第五章介绍直喷系统；第六章介绍了怠速控制，淘汰了一些怠速控制系统；第七章进气系统控制，全新介绍了国内使用的进气系统控制方法；第八章排放控制系统，更详细讲解了控制排放的方法；第九章发动机冷却控制，简要地介绍了将来要大量采用的电控冷却系统；第十章讲述的是自诊断，增加了厂家培训检测仪的内容；第十一章主要讲的是汽车电路图。本书由赵振宁、李东兵任主编，高洪喜、李刚任副主编。其中第一、第二、第三、第四由李东兵编写，第五、第六、第七、第八和第十章由赵振宁编写，第九章由高洪喜编写，第十一章由华东交通大学李刚编写。

本书的编写难度较大，主要是新电控发动机的资料较少，又因为与所讲的内容对得上的电子图片素材又太少。一般是处于厂家内部修理层面的培训状态。能见到的国外报道，内容却又很不具体，而且涉及知识产权问题，给编写收集资料带来很大困难。

本书较适合于汽车领域培训和进修的工程技术人员、汽车车间工作的技师和工程技术人员，以及高等学校和专业学校的教师、学生和所有汽车技术爱好者使用。

书中提出的观点、方法有的是作者个人的看法。错误和不足在所难免，希望读者给予谅解和宽容，敬请批评和指正。

编 者

目录

MULU

► 绪论 电控发动机管理系统 (ECU) 的发展概述	(1)
----------------------------------	-----

► 第一章 汽油机的燃烧理论	(3)
第一节 汽油的使用性能	(3)
第二节 汽油发动机正常燃烧的条件	(6)
第三节 汽油车排放基本知识	(15)

► 第二章 电控发动机传感器	(21)
第一节 空气流量计	(23)
第二节 进气管压力传感器	(30)
第三节 节气门位置传感器和油门踏板位置传感器	(36)
第四节 温度类传感器	(49)
第五节 爆振传感器和爆振控制	(52)
第六节 催化转换器和氧传感器	(59)
第七节 怠速提升信号	(72)
第八节 转速类信号和位置类信号	(76)

► 第三章 点火系统	(79)
第一节 早期的点火系统	(79)
第二节 点火提前角和闭合角	(84)
第三节 微机控制点火系	(87)
第四节 汽缸不做功的判断	(99)
第五节 火花塞	(102)
第六节 点火系统常见故障	(110)
第七节 点火系统主要故障	(113)

► 第四章	燃油供给系统	(116)
第一节	汽油喷射系统简介	(116)
第二节	喷油正时控制	(119)
第三节	缸内混合气形成系统	(121)
第四节	缸外喷射燃油供给系统	(122)
第五节	供油系统的其他元件	(128)
第六节	喷油量控制	(134)
第七节	喷油器波形分析	(137)
第八节	典型燃油压力故障	(140)
► 第五章	直喷发动机和直喷稀燃发动机	(144)
第一节	直喷稀燃发动机理论	(145)
第二节	国内投入批量生产的直喷发动机	(148)
第三节	投入批量生产的直喷稀燃发动机	(152)
► 第六章	怠速控制	(155)
第一节	旁通气道式怠速控制系统	(160)
第二节	电加热双金属片式辅助空气阀	(161)
第三节	电磁阀式怠速控制执行机构	(162)
第四节	旋转滑阀式怠速控制执行机构	(163)
第五节	步进电机式怠速控制执行机构	(166)
第六节	节气门直动式怠速控制系统	(172)
第七节	怠速控制系统故障	(177)
► 第七章	进气系统控制	(182)
第一节	可变配气相位技术	(182)
第二节	可变进气管长度技术	(194)
第三节	丰田发动机的谐振增压	(200)
第四节	大众涡轮增压系统控制	(202)
第五节	无节气门的进气门升程无级调节系统	(209)
► 第八章	排放控制系统	(212)
第一节	排放控制系统简介	(212)
第二节	二次空气喷射系统	(214)
第三节	油箱蒸发物排放控制系统	(217)
第四节	废气再循环控制系统	(220)

第五节 曲轴箱强制通风系统	(223)
► 第九章 电控发动机对冷却系的控制	(226)
► 第十章 电控发动机的自诊断	(235)
第一节 汽车 OBD II	(235)
第二节 汽车电脑检测仪	(238)
第三节 电控发动机的诊断方法	(241)
第四节 数据流分析	(244)
第五节 串行数据扫描工具	(246)
► 第十一章 汽车电路图	(260)
第一节 大众捷达 AHP (1997 年五阀) 发动机电路图	(260)
第二节 大众捷达 ATK (两阀) 发动机电路图	(265)
第三节 2005 年大众最新捷达发动机电路图	(267)
第四节 2.0L 奥迪 FSI 直喷发动机电路图	(270)
第五节 二汽尼桑阳光发动机电路图	(276)
► 附录 本书涉及的量与单位	(278)

绪论 电控发动机管理系统 (ECU) 的发展概述

20 世纪 80 年代,不少汽车发动机管理系统(电脑或 ECU)只控制喷油,而不控制点火和排放,这样的发动机管理系统可以称为电喷发动机管理系统。这样的发动机已淘汰,想见到都不容易。

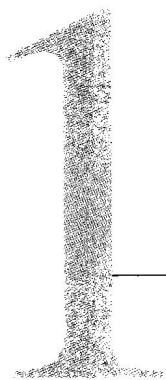
20 世纪 90 年代初,汽车发动机管理系统除控制喷油,还可以控制点火及部分排放(如 EGR 控制),甚至有的汽车对进气系统进行了如可变进气管长度或可变进气正时控制(VVT-i 技术)及进气门升程控制(VTEC-i 技术),这时电喷发动机管理系统就升级为电控发动机管理系统。这样的发动机管理系统有一套非常简单的自诊断系统,诊断出故障后存储故障码,然后再人工调出故障码(需要修理人员手中必须有一本故障码表),并对照故障码表查出故障(这就是早期电控发动机书中介绍的人工调用故障码功能)。早期汽车的自诊断功能较差,且自诊断系统一般不提供数据在线功能。这样的发动机已落后或进入民办中职或高职学校的实验室作为教学使用,由于购入成本较低,可以不计使用期损耗,一般较易接受,使用效果很好,使用产生的社会效益也很高。市面的电控发动机理论书籍大多停留在这个阶段。

20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,汽车发动机管理系统在控制喷油、点火与 90 年代初功能方面相比,汽车发动机管理系统功能没有太多区别,但其他方面却发生了很大变化。这个时期的发动机管理系统的突出功能表现在两个方面:一是在提高发动机效率和排放控制更细化、更精确方面出现了许多新技术;二是自诊断系统的功能非常强大,且提供了数据在线功能。

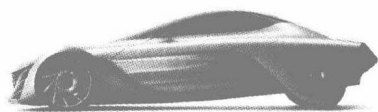
新技术方面如排放控制增加了二次空气喷射技术、带 EGR 率反馈的 EEGR 技术、油箱检漏技术、精确的活性炭罐清洁阀控制技术;进气系统如汽油机废气涡轮增压技术、进排气正时都可变的配气正时控制技术(双 VVT-i 技术)等;冷却系统增加了冷却风扇转速和节温器开度的控制,以保证发动机工作在正常工作温度,而不会高温;发动机管理系统则增加了对充电系统的控制。

自诊断系统的功能升级,如:点火系统的失火识别;喷油系统的多种断油控制;进气正时控制相位出错识别;排气控制系统的 EGR 系统故障监测、活性炭罐清洁阀故障监测等。自诊断系统除了故障码功能外,又配备了数据的在线读取功能。数据在线功能和故障码功能的联合使用,可使故障的范围进一步明确,大大节省了修理时间。例如,空气流量计有故障或点火线圈开裂都会造成排气冒黑烟,通过空气流量计数据流来分析,可以排除或确认为空气流量计故障。数据在线功能在没有故障码时仍可以推出一些难于发现的故障,为诊断提供依据。例如,空气流量计的漏气监测功能可以通过空气流量计数据实现。这样的发动机正是流行产品,由于购入成本较高,使用损耗一般不易接受,一般学校的实验室很少使用。

2005年，德国首先在国内的奥迪车上配备了直喷系统，日本丰田也不示弱，在推出混合动力普锐斯和凌志之后，丰田的直喷轿车也相继打入中国市场。这样缸外喷射的电控发动机管理系统升级为缸内喷射的电控发动机管理系统，由于软件的控制功能较多及同一功能的控制数据较多，而且这种发动机要求响应要快，所以要求系统信号采集、处理、运算等方面速度更快，存储器的容量更大，这就使电控发动机管理系统变得极为复杂。



第一章



汽油机的燃烧理论

第一节 汽油的使用性能

汽油有车用汽油、工业汽油和直馏汽油等。我们讨论的是车用汽油的使用性能。通过炼制和调制能够控制汽油的性能，以保证发动机和汽车的驾驶性能。影响燃料性能的主要因素有挥发性、含硫量、添加剂和辛烷值等。

1. 汽油的挥发性

汽油机要求汽油能在极短时间（0.001~0.01 s）内气化并与空气充分混合，使每一汽油分子都被空气中的氧包围以便可以充分燃烧。所以汽油的挥发性对汽油机的工作影响很大。

知识点滴：挥发性用来衡量燃料气化（形成蒸气）难易程度。当燃料不易挥发时，称这种燃料是低挥发性的。

低挥发性的燃油可能导致下列情况发生：

- ① 发动机冷启动困难；
- ② 在环境温度较低时汽车的操纵性能和燃油的经济性能下降；
- ③ 火花塞和燃烧室的积炭增加。

知识点滴：在化油器发动机或者节气门体喷射发动机中，低的燃油挥发性可导致燃油分配不均匀，进而导致汽缸间的燃烧不均衡，在进气管中气化燃油比液体燃油传播得更远和更快。

在环境温度较高时，挥发性过强的燃油在油管 and 油泵内可以形成蒸气泡沫，这种蒸气泡沫可以导致气阻或者导致发动机性能的下降，可能引起的问题有：

- ① 较多的蒸发排放物；
- ② 发动机过热时汽车的操纵性能变差；
- ③ 燃油经济性变差；
- ④ 热浸后启动困难。

知识点滴：气阻是燃油在油管或者油箱内沸腾的结果。由于蒸气的可压缩性，产生气阻时，油泵不能将燃油输送到化油器或者喷油器中去，导致发动机失火。对油管进行充分冷却后，发动机能够重新工作。

燃油喷射发动机采用电控喷油泵，系统中燃油压力较高。高压下燃油的沸点提高，气阻发生的可能性减小。

如果在夏天使用冬季汽油，可能发生下列问题：

- ① 怠速工作粗暴；
- ② 游车；
- ③ 气阻；
- ④ 加速缓慢；
- ⑤ 发动机喘振；
- ⑥ 蒸发系统受损；
- ⑦ 发动机热浸时液体溢流。

2. 含硫量

由于硫是原油的组分之一，汽油中总会包含一些硫，汽油中含硫量过高会腐蚀发动机和排放控制系统。正因为如此，在油品炼制过程中应该尽可能地除掉硫。

当汽油在燃烧室中燃烧时，燃烧的产物之一是水。燃烧的高温使得水以蒸汽的状态离开燃烧室，水蒸气经过排放控制系统时可能冷凝成为液体状态。当发动机停机并冷却后，除排放控制系统以外，燃烧室中和曲轴箱中的由于燃烧窜入的水蒸气也可能冷凝。当汽油中的硫燃烧时，它与氧结合生成二氧化硫。当二氧化硫与水结合时会形成硫酸，硫酸具有极强的腐蚀性，硫酸的腐蚀会造成排气门腐蚀和排放控制系统的损坏。当二氧化硫流经催化转化器和排气系统时，会产生难闻的臭鸡蛋味道。为了降低腐蚀性，应严格限制汽油中的硫含量。在美国，现行的法律规定硫的质量百分数必须低于 0.01%。在许多欧洲和亚洲国家，这个标准更严格。

3. 燃油添加剂

很多年来，炼油工业一直将对人体有害的铅的化合物，如四乙基铅加入到汽油中以提高汽油的辛烷值。从 20 世纪 70 年代中期以来，汽车设计要求采用无铅汽油。这是由于汽车上安装了一些防止环境污染的特殊装置，如催化转化器和氧传感器，为了使这些设备能够正常工作，含铅汽油不能再作为汽车燃料，汽油车上必须使用无铅汽油。

汽油添加剂具有不同的特性和各种不同的用途，汽油添加剂价格昂贵，因此只能加入有限的量。在汽油调配过程中需要加入的添加剂如下。

(1) 清净剂。其用于保证燃油系统沉积物的清净性，控制添加剂燃烧的沉积物。如聚醚胺被加入到添加剂中帮助溶解沉积物，以保证喷油器的干净。但是此类添加剂趋向于在进气管处产生沉积物。

(2) 防冻剂。在汽油中针对特定季节加入异丙醇以防止油管在寒冷的季节结冰。

(3) 金属活性抑制剂和防锈剂。这些添加剂用于阻止燃油和燃油系统中的金属之间进行化学反应而形成腐蚀性物质。

知识点滴：添加清净剂最初是为了清洁喷油嘴并使其保持干净。喷油嘴发生阻塞的原因是在高温和短程驾驶条件下，会使汽油中的烯烃（一种有机化合物）累积并形成沉淀，附着在喷嘴边上。添加清净剂的作用就在于使沉淀物分解并保持喷油器干净，但是它们自身也会在发动机进气门背部上和火花塞上形成沉淀。正因为如此，添加的汽油喷油嘴的净化物质可能也会危害发动机的运行，但此事不可避免。

节气门体喷射的供油系统很少使喷油嘴出现阻塞现象，这是因为喷油嘴的位置距发动机热源足够远，从而沉淀无法形成。

4. 汽油的抗爆性

汽油在发动机中正常燃烧时,火焰的传播速率为 $30 \sim 70 \text{ m/s}$ 。但当混合气已燃烧 $2/3 \sim 3/4$ 时,未燃烧的混合气中产生了高度密集的过氧化物,它的分解使混合气中出现了许多燃烧中心,燃烧速率猛增,产生强大的压力脉冲,火焰的传播速率可达 $800 \sim 1\,000 \text{ m/s}$,甚至高达 $3\,000 \text{ m/s}$,从而汽缸内就产生了清脆的金属敲击声。这种燃烧就是爆燃(deflagration)。爆燃会使发动机过热,活塞、气阀、轴承等冲击变形损坏。

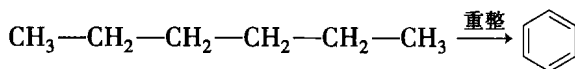
知识点滴:爆燃是发动机发出的一种金属敲击声,通常是在发动机加速过程中产生的,是由于汽缸内不正常或者不可控的燃烧造成的。

爆燃的程度与燃料的组成有关。已经知道,异辛烷(2, 2, 4-三甲基戊烷)的抗爆性(antiknock character)极高,则将其“辛烷值”(Octane number)定为100;正庚烷的抗爆性极低,则将其“辛烷值”定为0。将二者按一定比例配成混合液,便可得到辛烷值(即异辛烷的体积百分数)为 $0 \sim 100$ 的“燃料”,这就是燃料辛烷值的标准。辛烷值是汽油抗爆性的定量指标,我国汽油机用汽油的牌号就是根据辛烷值确定的。例如,某汽油的辛烷值是93(即93#汽油),表明这种汽油在标准的单缸内燃机中燃烧时,其爆燃噪声强度与7份正庚烷和93份异辛烷的混合物在相同条件下的爆燃噪声强度相同。

汽油的抗爆性与组成汽油的烃类有关。正构烷烃随碳原子数的增多,其抗爆性和辛烷值均降低;异构烷烃随支链的增多,其抗爆性升高。环烷烃抗爆性居中,而芳香烃及其衍生物抗爆性较高。

为了提高汽油的抗爆性,常向汽油中添加抗爆添加剂。其中四乙基铅是最有效的添加剂。四乙基铅的作用是破坏生成的过氧化物,使爆燃不能发生。然而,含铅化合物的汽车尾气是大气铅污染的主要来源。从环保出发,我国早已淘汰含铅汽油而大力发展无铅汽油。

可通过重整或加入高辛烷值组分的方法来获取高辛烷值燃料。所谓重整(reforming),就是把馏分中烃类分子的结构进行重新排列,使辛烷值高的组分如芳烃、带支链异构体等含量增加,且保证所含碳原子数仍在汽油组分范围内,因而辛烷值大大提高。例如,把下面的长直链重整为芳香烃。



其他高辛烷值的化合物如甲醇、甲基叔丁基醚等加入后也可显著提高抗爆性,而无须加入四乙基铅。为了便于与含铅汽油区分,无铅汽油不添加着色染料(我国早已禁止加油站供应含铅汽油)。

知识点滴:低标号汽油会导致化油器发动机爆振,且只能转动分电器改变初始点火角来适应。对于电喷发动机,爆振传感器把信号传给电脑后,电脑推迟点火提前角。若无检测仪则可用正时枪看点火角推迟,点火角稳定且较小,说明是油的故障,点火角乱动不稳定可能是油的故障,也可能是进气歧管压力波动太大造成,这与传统分电器的点火角乱动故障排除方法相同。若有检测仪可直接通过故障码或数据流看到点火角推迟。

低标号汽油导致电喷发动机推迟点火角。修理时,反过来用,看到点火角推迟就要怀疑汽油可能有质量问题,修理上要把握,理论书上的很多描述都要倒过来才能用到实践中去。

5. 汽油的化学安定性和物理稳定性

汽油中若含大量不饱和烃,在储存、运输、加注及其他作业中,会因空气中氧、较高温

度及光的作用而氧化生成胶质。胶质在汽油中溶解度小,会黏附在容器壁上,给汽油机的工作带来害处,降低汽油的化学安定性(chemical stability)。

胶质物或者抗氧化剂:许多调和汽油中含有芳族胺和苯酚来防止胶质物和沥青质的生成,在储存期间,由于某些汽油物质和氧结合可能形成有害的胶质物沉积,加入抗氧化剂能增加汽油的稳定性。

提高化学安定性的方法,一是通过炼制工艺,使易氧化的活泼烃类、非烃类组分尽量减少;二是向汽油中添加抗氧化添加剂,如酚类(2,6-二叔丁基-4-甲酚)、胺基酚类及胺类等物质。

汽油在储藏、运输、加注和其他作业时,保持不被蒸发损失的性能叫物理安定性(physical stability)。汽油的物理安定性主要由汽油中的低温馏分决定。

知识点滴:不饱和烃氧化生成胶质,胶质在汽油中溶解度小,会黏附在汽油供给系统表面,所以发动机的汽油供给系统无论是化油器还是电喷系统,到一定时间必须清洗。

6. 汽油中腐蚀性物质的影响

汽油中水溶性酸和碱(H_2SO_4 、 NaOH 、磺酸及酸性硫酸酯)等对所有的金属都有强烈的腐蚀性;环烷酸对有色金属,特别是铅和镁有强的腐蚀性。氧化生成的有机酸,特别是有水存在时,对黑色金属也有腐蚀性。

汽油中的含硫化合物,特别是 SO_2 和噻吩,不仅有腐蚀性,还会使汽油产生恶臭,促使汽油产生胶质。硫化物燃烧后生成的 SO_2 、 SO_3 与水反应生成 H_2SO_3 、 H_2SO_4 ,能直接与金属作用,使汽缸和活塞受到强烈腐蚀。

7. 汽油中机械杂质和水分的影响

新出厂的汽油完全没有机械杂质和水分。由于运输、倒装、用小容器向汽油箱加注,到达使用者手中时,常将机械杂质(锈、灰尘、各种氧化物)及水分落入其中。机械杂质会加速化油器量孔的磨损,堵塞化油器量孔,堵塞电喷系统的喷油嘴和汽油滤清器等;机械杂质若进入燃烧室会使燃烧室沉积物增多,加速汽缸、活塞和活塞环的磨损。水分在冬季结冰,冰粒堆积在汽油滤清器中会堵塞油路,严重时终止供油。水分还会引起加速腐蚀,加速汽油氧化生胶,破坏汽油中的添加剂等不良作用。所以汽油规格中规定不允许有机机械杂质和水分存在。

知识点滴:化油器量孔变大是杂质的磨损;杂质、冰粒、胶质可以堵塞化油器量孔,堵塞电喷系统的喷油嘴和汽油滤清器。

第二节 汽油发动机正常燃烧的条件

汽油发动机正常燃烧的条件如下:

- (1) 正确的空燃比;
- (2) 正确的点火正时和点火能量;
- (3) 正确的缸压;
- (4) 正确的配气正时。

一、汽油发动机正常燃烧对空燃比的要求

混合气的成分不同，对发动机动力性和经济性、排放污染有较大影响。而混合气的成分通常用“空燃比”或“过量空气系数 λ ”表示。

(一) 空燃比和过量空气系数 λ

空燃比和过量空气系数 λ (Lambda) 两个术语都是表示混合气浓稀程度的术语，在表示混合气浓稀程度时根据具体使用场合选用不同的表达方式，更为方便。

内燃机的设计都是通过燃烧有机燃料来产生动力，汽油可以认为是有机碳氢燃料，由于是多种碳氢有机物的混合物，所以无化学分子式。燃烧过程将空气中的氧气 (O_2) 和燃料中的氢 (H) 和碳 (C) 相结合，在汽油机中，火花塞点火开始燃烧过程。燃烧过程将持续 0.001 ~ 0.01 s。

理论上充分燃烧过程发生的基本化学反应为：氢 (H) + 碳 (C) + 氧气 (O_2) + 火花 = 热量 + 水 (H_2O) + 二氧化碳 (CO_2)。

如果燃烧过程完全，所有的碳氢化合物 (HC) 与所有可用的氧 (O_2) 完全结合，恰好完成燃烧的空气和燃料的比例被称为理论空燃比，汽油的理论空燃比以质量比 (重量比) 表示为 14.7:1 (空气比汽油)，或用体积比表示为 1 升燃油完全燃烧大约需要 9 500 升空气。不同的燃料有不同的理论空燃比和热量 (见表 1-1)。

表 1-1 不同燃料的理论空燃比和热量

燃料	热量 (Btu/gal)	理论空燃比
汽油	$\approx 130\,000$	14.7:1
乙醇	$\approx 76\,000$	9.0:1
甲醇	大约 60 000	6.4:1

注：1 Btu = 1 055 J, 1 gal = 3.785 cm³

按理论上空气和汽油充分燃烧过程发生的基本化学方程确定空气和汽油的混合比，即空气质量与汽油质量比，称为“空燃比”，通常用 A/F 表示，即 Air/Fuel 的质量之比。

汽油完全燃烧并生成 CO_2 和 H_2O 时的空燃比称为“理论空燃比”，约为 14.7。在实际的发动机燃烧过程中，燃烧 1 千克汽油所消耗的空气不一定就是理论所需求的空气量，它与发动机的结构与使用工况密切相关，所供实际空气量可能大于或小于理论空气量。所以也可以用实际空气量与理论空气量 14.7 的比值称为“过量空气系数 λ ”，可用公式表示为：

过量空气系数 $\lambda = \text{实际空气质量} / 14.7$

若 $\lambda > 1$ 表示所供的空气量大于理论空气量，这种混合气叫稀混合气。若 $\lambda < 1$ ，表示空气量不足以燃料完全燃烧，这种混合气叫浓混合气。过量空气系数 $\lambda = 1$ 和空燃比 14.7 是相同的混合气浓度。

例 1 在汽缸内燃烧 1 kg 汽油所消耗的空气为 12.23 kg。这种缸内燃烧是不完全燃烧。

解 过量空气系数 $\lambda = 12.23 / 14.7 = 0.9 < 1$ ，则混合气过浓。

知识点滴：实际上由于诸多因素的影响，燃烧过程发生的基本化学反应为：氢 (H) +

碳 (C) + 氧气 (O_2) + 氮气 (N_2) + 其他化学物质 + 火花 = 热量 + 水 (H_2O) + 一氧化碳 (CO) + 二氧化碳 (CO_2) + 碳氢化合物 (HC) + 氮氧化物 (NO_x) + 其他化学物质。

(二) 不考虑排放达标的情况下空燃比对发动机动力性和经济性的影响

过量空气系数 λ 表示实际的空燃比与理论空燃比 (14.7:1) 差异程度。图 1-1 所示为空燃比与输出功率和油耗率的关系。

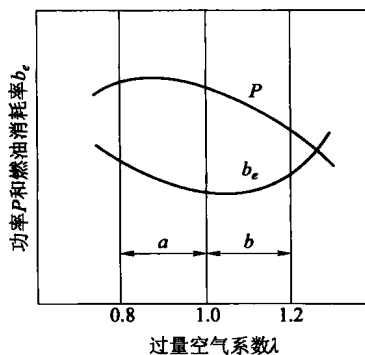


图 1-1 过量空气系数 λ 对功率 P 和燃油消耗率 b_e 的影响

a—浓混合气（缺少空气）；
b—稀混合气（空气过量）

从图 1-1 中可知：

$\lambda < 1$ 为空气不足，形成浓的混合气。在 λ 为 0.85 ~ 0.95 时发动机发出最大的输出功率。

$\lambda > 1$ 为在此范围内具有过量空气或称为稀燃混合气。该过量空气系数标志减少燃油消耗和发动机功率降低。 λ 能达到的最大值即所谓的“稀燃极限”，它很大程度上依赖于发动机设计和所采用的混合气形成系统。在混合气稀燃极限时，混合气不再能点着，发生燃烧失火，则会明显地增加运转的不均匀性。

进气管喷射的汽油发动机在缺少空气 5% ~ 10% ($\lambda = 0.95 \sim 0.85$) 的情况下能得到最大的功率输出。在过量空气为 10% ~ 20% ($\lambda = 1.1 \sim 1.2$) 的情况下达到最低的燃油消耗。

知识点滴： λ 能达到的最大值即所谓的“稀燃极限”，它很大程度上依赖于发动机设计和所采用的混合气形成系统。在混合气稀燃极限时混合气不能点燃，或点燃后仍发生燃烧的不连续，会明显地增加运转的不稳定性。

若采用极高压喷射与空气对冲则可以很好地充分混合，点燃后不发生燃烧的不连续，发动机运转得也较稳定。点燃混合气则需在火花塞附近创造低于“稀燃极限”的混合气。

(三) 在考虑排放达标的情况下对空燃比的要求

汽油发动机的燃油消耗率基本上取决于空燃比。为了保证真正的完全燃烧必须保证有过量空气，从而达到尽可能低的燃油消耗。这受到混合气的着火能力和燃烧时间的限制。

空燃比也对排气后处理系统的效率（在理论空燃比工况下达到最大效率）具有决定性的影响。三效催化转化器代表着这一先进技术，该催化转化器能减少 98% 以上的有害排放成分。为了三效催化转化器的运行，发动机在正常的温度工况下必须准确地保持过量空气系数为 1。为此必须准确地确定吸入的空气量和准确地计量供给的燃油质量。

为减少有害物质排放，现有的采用燃烧室外形成混合气的系统，只要发动机运行工况允许，均采用理论空燃比工作。某些运行工况需要对空燃比进行专门校正。如当发动机在冷态时，水温在 80℃ 以下，混合气应较浓；节气门的突然开大，混合气要加浓；节气门的突然关小，混合气要变稀或断油；大负荷时应加浓。

为满足以上要求，混合气形成系统必须具备混合精确和混合均匀两个功能。电脑控制的进气管喷射发动机能精确地喷射燃油量，可按不同工况的空燃比喷油，可达到混合气形成的精确的一个条件。空气和燃油要充分均匀分布在燃烧室内是充分燃烧的另一个条件，这就必须达到高度燃油雾化；否则，大的油滴将沉淀在进气管或燃烧室壁上，这些大的油滴不能完

全燃烧,导致碳氢化合物排放增加。电脑控制的燃油喷射系统提高了喷油压力,汽油和空气的对冲大大增强,可达到高度燃油雾化。

燃油喷射系统的功能在于供给尽可能适合发动机相应工况空燃比的混合气。喷射系统,特别是电子系统能较好地将混合气成分保持在规定的很窄的范围内。这有利于燃油消耗、驾驶性能和功率输出。如今汽车工业大多数采用燃烧室外形成混合气的系统。

(1) 直接喷射不稀燃的发动机。近几年来汽油机发展日新月异,以前在技术、材料和生产成本上的问题被一一解决,像柴油机一样在汽缸内部形成混合气系统(燃油直接喷入燃烧室内的极高压喷射系统)也称缸内直接喷射或直接喷射,很好地将汽油进一步雾化充分混合,从而降低燃油消耗,这种系统的重要性越来越突显。

(2) 直接喷射和分层进气的稀燃发动机。缸内直接喷射很好地将汽油进一步雾化充分混合,由于能充分混合,稀燃极限的中断燃烧情况消失,从而降低了燃油消耗。直接喷射具有不同的燃烧条件,使得稀燃极限极大提高。因此这些发动机可在部分负荷工况时以极高的过量空气系数(λ 高达 4.0)条件下运行。

知识点滴:化油器发动机中负荷使用空燃比为 17 的混合气,比缸外喷射油的电喷发动机省油。但 NO_x 排放不合格。反之,若能解决 NO_x 排放问题,且使用一定程度的稀混合气,则汽油燃烧更充分,热机效率提高。这就是稀燃发动机。

可见,汽车空燃比的大小的设计总在发动机动力性和经济性与排放性之间取舍。

(四) 七大工况代替九大工况

汽油发动机采用七大工况而不是化油器发动机采用的九大工况。

1. 化油器发动机的九大工况

九大工况即五个稳定工况加上四个不稳定工况。(稳定工况大致可分为水温 80°C 以上怠速、小负荷、中等负荷、大负荷和全负荷五种情况。不稳定工况可分为启动,水温不到 80°C 的高怠速、怠加速和急减速四种情况。)在稳定工况运转时,发动机已经完成预热,运转过程中没有转速和负荷的突然变化。混合气成分的要求根据实际运行的转速与负荷而定。

图 1-2 是化油器发动机节气门开度与空燃比的对应关系,它一般分为五个稳定工况:A 点怠速(节气门开度最小)、AB 小负荷(节气门开度由最小开至 25%)、BC 中负荷(节气门开度 25%~75%)、CD 大负荷(节气门开度 75%~100%)、D 点全负荷 100%。

怠速工况是发动机无负荷的运行。这时,节气门处于关闭状态,因而进气管内的真空度很大。在进气门开启时,汽缸内的压力可能高于进气管压力,于是废气膨胀冲入进气管内,随后又由活塞的下移运动,把这些废气和新混合气又吸入汽缸内,结果汽缸内的混合气中含有较大百分数的废气。为保证这种废气稀释过的混合气能正常燃烧,就必须供给很浓的混合气,如图 1-2 中的 A 点。随着负荷的增加和节气门开度的加大,稀释将逐渐减弱,所以在小负荷工况运行时要求的混合气成分如图 1-2 中的 AB 线段所示,即在小负荷区运行时,供给混合气也应加浓,但加浓程度随负荷加大而变小。

在中等负荷运行时,节气门已经有足够大的开度,废气稀释的影响已经不大,因此要求供给发动机稀的混合气,以获得最佳的汽油经济性,这种工况相当于图 1-2 中的 BC 段,空燃比为 16~17。

在大负荷时,节气门开度已超过 3/4,这时要随着节气门开度的加大,逐渐加浓混合气

以满足功率的要求,如图1-2中的 CD 线段。实际上,在节气门达到全开之前,如果需要获取更大的扭矩,只要把节气门进一步开大就可以实现,因此也就没有必要使用提高空燃比来提高功率,而应当继续使用经济混合气来达到省油的目的。因此在节气门全开之前的部分负荷工况都应当供给经济混合气。只是在全负荷工况时,节气门已经全开,此时为了获取该工况的最大功率必须供给功率混合气,如图1-2中的 D 点。从大负荷过渡到全负荷工况,节气门达全开位置时,混合气加浓也是逐渐变化的。

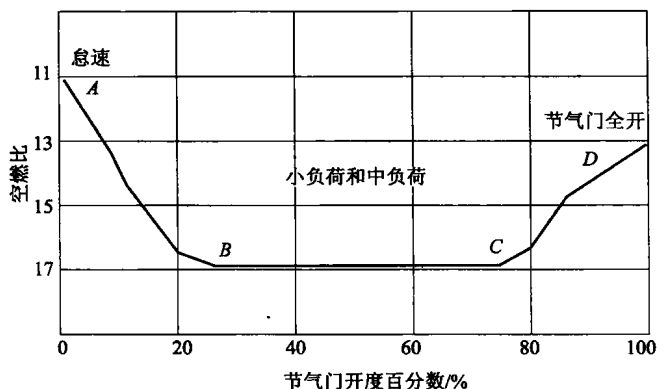


图1-2 化油器式汽油机节气门开度变化时所需的混合气空燃比

知识点滴：化油器发动机省油就是因为汽车大多行驶在空燃比为17、混合气非常稀的 BC 段，但 NO_x 排放超标，图1-2已经不适用于电喷发动机。

2. 电喷发动机的七大工况

七大工况即三个稳定工况加上四个不稳定工况。三个稳定工况可分为水温 80°C 以上怠速、部分负荷和大负荷三种情况；四个不稳定工况可分为启动、水温不到 80°C 的高怠速、急加速和急减速四种情况。

如图1-3所示，对于电喷发动机的空燃比随节气门的变化规律一般为三个稳定工况，即 AB 怠速、 BC 部分负荷（节气门开度由最小至75%）、 CD 大负荷（节气门开度75%~100%）。其大致关系是因为：

(1) B 点和 C 点的节气门开度因车而异；

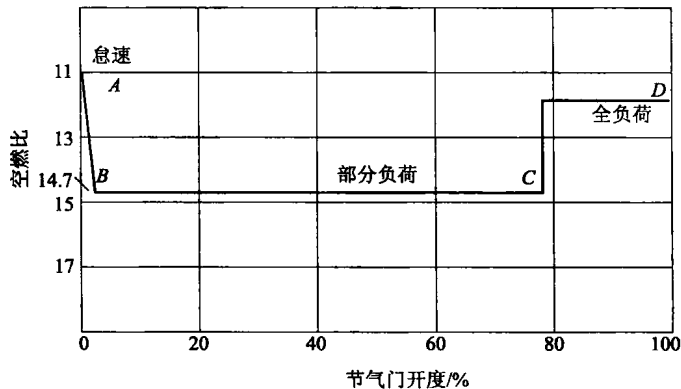


图1-3 电喷汽油机节气门变化时所需的混合气空燃比