



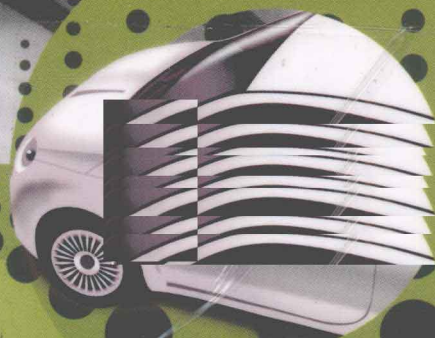
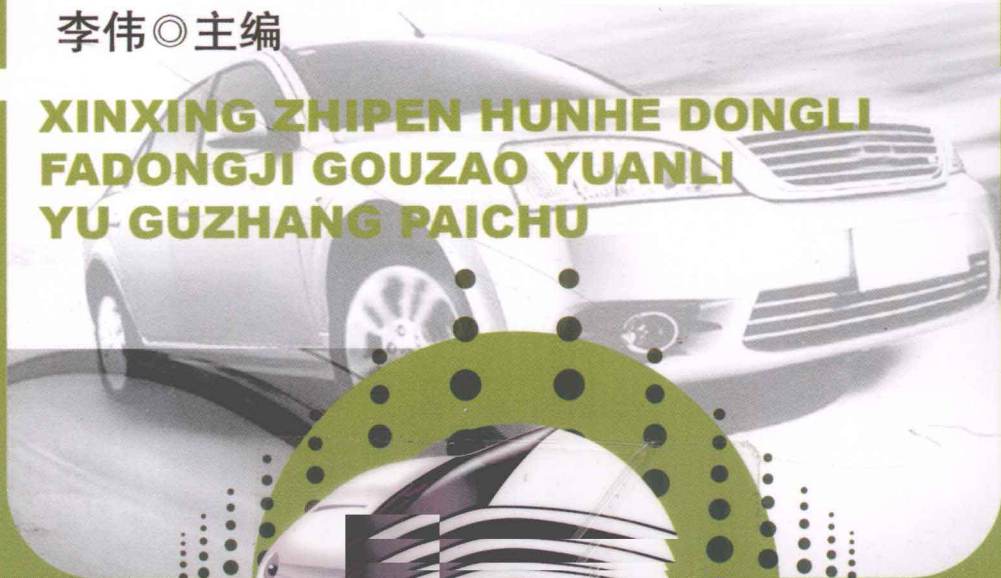
汽车维修技能修炼丛书

QICHE WEIXIU JINENG XIULIAN CONGSHU

新型直喷、混合动力 发动机构造原理 与故障排除

李伟◎主编

XINXING ZHIPEN HUNHE DONGLI
FADONGJI GOUZA0 YUANLI
YU GUZHANG PAICHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车维修技能修炼丛书

新型直喷、混合动力发动机 构造原理与故障排除

李 伟 主编



机械工业出版社

本书根据最新直喷和混合动力发动机结构与维修的特点,在理论与实用并重原则的基础上,详细介绍了现代直喷与混合动力发动机各部件结构、工作原理、检修、故障诊断与排除等知识,重点讲解了大众、宝马、奔驰、三菱、凯迪拉克、丰田、本田、雷克萨斯等车系直喷混合动力发动机的最新技术、缸内直喷发动机的原理与控制、缸内直喷发动机的主要部件,以及其他车型混合动力发动机的结构原理等汽车技术内容,工作原理叙述清晰、明了。本书精选了部分维修实例,便于读者查阅。

本书内容新颖,图文并茂,车型新,实用性强。适合用作汽车维修职业技术基础教材,供汽车维修或相关技术人员使用,也可作为大、中专院校汽车专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

新型直喷、混合动力发动机构造原理与故障排除/
李伟主编. —北京:机械工业出版社, 2011. 7
(汽车维修技能修炼丛书)
ISBN 978-7-111-35203-7

I. ①新… II. ①李… III. ①汽车—发动机—构造
②汽车—发动机—故障修复 IV. ①U472.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 129912 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:连景岩 责任编辑:连景岩 版式设计:霍永明

责任校对:肖琳 封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19 印张·470 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-35203-7

定价:49.80 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着世界能源危机和环保问题日益突出,世界各大汽车公司纷纷致力于开发新能源与新能源汽车,近几年直喷发动机和混合动力车辆已经大批量面世,新能源汽车获得了长足发展,人们对汽车的燃油经济性要求也越来越高。为此,各汽车制造企业纷纷推出了各自的缸内直喷和混合动力发动机,如大众公司的 TSI(均质燃烧)、通用公司的 SIDI(点燃式缸内直喷)、丰田公司的 D-4s、宝马公司的 HPI(高压直喷)、三菱公司的 GDI(汽油缸内直喷)、丰田普锐斯混合动力、本田飞度混合动力等。特别是电子技术、计算机技术在汽车上的应用,使汽车故障诊断从传统的听、看、闻等经验诊断方式,向以集成化、智能化的诊断设备为手段,以信息技术为依托的现代汽车故障诊断技术发展,这些缸内直喷与混合动力发动机各有自身的特点,技术先进,维修难度大,而市场上缺少这方面的资料,严重阻碍了缸内直喷与混合动力发动机的维修。为了适合我国汽车维修业的发展,满足广大汽车维修人员的需要,以推动缸内直喷、混合动力发动机维修技术的普及与维修水平的提高,特编写此书。

本书特点:

1. 以市场主流车型尽可能突出新结构,适合注重技能培养的汽车维修技术人员、高职院校、高级培训学校和鉴定机构等高级工培训。
2. 系统地介绍了直喷、混合动力发动机各部件的构造、可变配气机构拆装及常见故障的诊断与排除方法、专用工量器具使用,使读者较快地掌握维修、调整技术。
3. 大量实物图片与结构原理相配合,使读者对直喷、混合动力发动机的认识和理解更加深化。

本书文字简练,通俗易懂,适合于高职高专学员、汽车维修人员、汽车行业工程技术人员,也可供相关专业的师生使用参考阅读。

本书由李伟主编,参加编写的还有李微、于洪燕、李校航、李校研、李春山。

由于经验不足,书中的错误和不完善之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

概述..... 1

第一章 缸内直喷发动机原理与

燃烧技术控制..... 4

第一节 直喷发动机稀薄燃烧特 点和类型..... 4

第二节 缸内直喷发动机的原理 11

第三节 缸内直喷发动机控制技术 ... 21

第四节 直喷式发动机的排气后 处理 37

第二章 缸内直喷发动机的主要部件 ... 45

第一节 燃油系统的组成 45

第二节 高压燃油泵 48

第三节 大众直喷发动机喷油器 及传感器 54

第四节 电子控制单元及系统概貌 ... 58

第五节 直喷发动机可变进气翻板、 涡轮增压器、电子节气门 ... 66

第六节 宽带氧传感器 74

第七节 大众新型电子节气门结构、 EGR 废气再循环阀 77

第三章 缸内直喷发动机机械部件 83

第一节 机械部分 83

第二节 润滑系统 91

第三节 直喷发动机冷却系统..... 102

第四章 可变配气机构..... 112

第一节 本田发动机 VTEC 结构 原理..... 112

第二节 本田 i-VTEC 结构、原理 与控制系统..... 117

第三节 本田 VTEC/VTC 系统检修 ... 122

第四节 本田可变气缸 VCM 结构 原理与检修..... 127

第五节 VVT-i 结构原理与维修 135

第六节 丰田 VVTL-i 工作原理 137

第七节 丰田 VVT-i 发动机配气 机构拆装..... 140

第八节 宝马可变气门控制结构 VCC 与工作原理 149

第九节 大众可变配气正时结构 原理..... 153

第十节 雷克萨斯 LS460 双 VVT-i 系统..... 157

第十一节 现代 i30 轿车 CVVT 正时校对..... 159

第五章 混合动力发动机结构原理..... 161

第一节 雷克萨斯 RX450h 混合动 力发动机的结构原理..... 161

第二节 丰田普锐斯混合动力发动 机的结构原理..... 165

第三节 本田混合动力结构原理..... 192

第四节 天然气发动机..... 199

第六章 其他直喷发动机结构原理..... 201

第一节 奔驰缸内直喷发动机结构 原理..... 201

第二节 宝马轿车 HPI 高精度直 喷发动机..... 205

第三节 宝马 HPI 高精度喷射 N63 发动机..... 209

第四节 宝马双涡轮增压系统..... 211

第五节 丰田 D-4S 缸内直喷发动 机结构原理..... 219

第六节 凯迪拉克 CTS 缸内直喷 发动机..... 224

第七节 三菱 GDI 缸内直喷发动机 结构原理..... 227

第七章 故障案例..... 234

第一节 迈腾 1.8TSI 发动机怠



速抖动故障·····	234	动力冷却系统故障·····	267
第二节 迈腾 EPC 灯亮换挡冲击 ···	235	第十六节 宝马 X5 加速不良 ·····	268
第三节 迈腾 1.8TSI 发动机偶尔 熄火·····	238	第十七节 奥迪 Q7 发动机控制单 元的供电不良引起异 响故障·····	269
第四节 大众 CC 无法起动 ·····	240	第十八节 迈腾 1.8TSI 发动机偶 尔无法起动, 正常行 驶时加速无力·····	272
第五节 宝马发动机功率下降故 障排除·····	241	第十九节 迈腾 DSG 1.8TSI 发动 机偶尔无法起动·····	274
第六节 宝马 740Li 怠速不稳 ·····	242	第二十节 迈腾 1.8TSI 多功能转 向盘信息菜单无法进 行设置调整·····	277
第七节 丰田普锐斯混合动力轿车 无法正常起动·····	244	第二十一节 迈腾 1.8TSI 发动机 机油警报灯闪亮·····	281
第八节 迈腾驱动 CAN 总线故障 诊断方法·····	246	第二十二节 油气混合轿车耗气量 高故障排除·····	282
第九节 大众直喷发动机无法起动 ···	252	第二十三节 迈腾发动机控制系统 出现故障码“00833 (偶发)” ·····	284
第十节 分析方法——发动机怠速 抖动的判定·····	255	第八章 新款大众高尔夫 A6 1.4TSI 发动机电路图·····	287
第十一节 奥迪 A6L 2.0 轿车无法 起动·····	261		
第十二节 燃油泵早期损坏导致 发动机偶尔熄火·····	261		
第十三节 燃油压力调节阀 N276 机械故障·····	263		
第十四节 迈腾发动机故障灯报警 ···	265		
第十五节 雷克萨斯 RX450h 混合			

概 述

车辆的维修如同给病人看病一样，准确问诊、把脉、开药至关重要。下面阐述汽车的维修注意事项、诊断要领。

一、电控发动机维修注意事项

1) 在接通点火开关的情况下，不可随意断开任何一个带有电磁线圈装置的电路，例如喷油器、怠速控制阀、点火装置、空调离合器，以及连接这些部件的蓄电池连接线等。因为任何线圈在断电的瞬间，由于自感作用，都将在线路上产生瞬时的高电压(有时可能超过7000V)，使电控单元及传感器严重受损。

2) 不可用快速充电起动机进行辅助起动，以防止快速充电起动机的脉冲高电压损坏电子元件。在没有连接和拧紧蓄电池连接线接头时，绝不要起动发动机；不可在发动机运转时拆下蓄电池连接线。

3) 当转动发动机检查气缸压缩压力时，要拔掉汽油喷射控制系统的电源继电器或熔断器，以防止喷入的燃油影响检测结果。拆开任何油路部分时，首先应降低燃油系统的压力。

4) 对电控单元及与其连接的传感器、执行器进行检修时，操作人员须预先消除身上的静电，因为有时人体的静电可能产生上千伏的高压，造成电控单元和其他部件中集成电路和电子器件严重损坏。操作人员可预先使自己接地(接触车身)，或接触自来水管等有良好接地效果的物体，以消除身体上所带的静电。此外，不要轻易拆下电控单元盒盖。天线的连接线应远离电控单元连线，其距离应不小于20cm。

5) 检测电控系统的元件时，应使用高阻抗的数字式仪表(内阻大于10k Ω)，不能使用指针式的仪表；禁止使用通常汽车维修中所用的试灯进行测试，最好选择一只电子式安全测试灯测试。

6) 电控发动机发生故障时，首先应对发动机本身进行检查，分析原因，然后再考虑电控系统的问题。因为电控发动机的大量故障与常规发动机相同，电控系统中多数故障源于配线的断路、短路、连接插头松动等明显的问题。所以首先应从这些简易的地方着手排除，然后再按照故障检测、诊断的规定方法和流程诊断排除故障。

7) 在车身上使用电弧焊时，应断开电控单元电源。

8) 在拆卸电控汽油喷射系统各电线插头时，首先应关掉点火开关，然后拆下蓄电池的负极接地线，断开蓄电池。如果只检查电控系统，则关掉点火开关即可，不必断开蓄电池，否则存储于电控单元内的所有故障码有可能会全部消失，给发动机的故障排除带来困难。因此，如有必要，应在断开蓄电池之前读取故障码。

9) 对装有安全气囊的汽车，应在断开蓄电池20s或更长时间之后，才可对安全气囊进行维修，否则安全气囊可能会充气膨胀。如不按正确顺序操作，安全气囊也有可能意外张开，造成事故。因此，没有正确、全面的维修资料时，不可维修安全气囊。

10) 如果断开蓄电池后，发动机的工作状况不如蓄电池断开以前好，这时不可轻易更

换零部件。这可能是因为蓄电池断开后，电控单元中的学习修正记忆被消除了。可先起动发动机运转一段时间，此时电控单元便会自动控制建立学习修正记忆，使发动机的不良工作状态自动消失。

二、电控发动机故障诊断要领

电控发动机故障诊断的基本要领可以分为以下四项：

1. 先简后繁、先易后难

由于汽车电控装置经常在高温、振动、灰尘、潮湿等环境下工作，因此一些驾驶性能故障可能就是由于其恶劣的工作环境造成的，比如线束折断、插接器松动或锈蚀、真空管龟裂或脱落等，因此，能以简单方法检查的可能故障部位应优先予以检查。比如直观检查，用眼看，观察线路或插接器是否有断裂、松脱，进气管路有无破损等；耳听，借助螺钉旋具、听诊器等听发动机有无异响，怠速和急加速是否粗暴，有无漏气声，喷油器有无规律的“喀哒”声等；手摸，摸一摸相关电气总成、继电器、可疑的线路插接器连接是否有松动，电子部件表面的温度有无不正常的高温以判断该处是否接触不良，喷油器、电磁阀是否有规律地振动来判断其工作正常与否等。通过采用简便的直观检查方法，可将一些较为明显的故障迅速地查找出来。直观检查未找出故障，需借助于仪器仪表或其他专用工具来进行检查时，也应对较容易检查的内容先予检查。能就车检查的项目应优先进行检查。

2. 先思后行、先熟后生

在对汽车电控故障诊断维修时，应针对故障现象首先进行故障分析，明确引起故障的可能原因，确定优先检查的方向和部位，避免对与故障无关的部位做无谓的检查，也可防止有关的应检项目漏检而多走弯路，即为“先思后行”。“先熟后生”说的是由于车辆设计制造以及使用环境等方面的因素，一些车型的某些故障，常常以某个部件或总成故障比较常见，这时便可根据平时积累下来的经验，对这些部件或总成优先给予检查；另外，在汽车电控系统中，有些故障形成的原因很复杂，牵涉的应检项目和部位也很烦琐，因此，先挑一些自己熟悉的部件、部位或系统优先给予检查，往往也能达到事半功倍的效果。

3. 先上下、先外后里

当前汽车电子装置越来越多，使发动机舱排得满满的，由于空间有限，布局紧凑，层层相叠，有时为了检查一个部件就要拆除周围一大堆零件，这样做既费工又费时，因此，掌握好先上下、先外后里的原则也是十分有益的。能随手检查的项目先做；能在发动机舱做的检查不去底盘做，能在外部做的项目不去里面做。

4. 先备后用、代码(故障码)优先

电子控制系统的一些部件性能好坏，电气线路正常与否，常以其电压或电阻等参数来判断。如果没有这些数据资料，系统的故障检测判断将会很困难，往往只能采取新件替换的方法，这些方法有时会造成维修费用猛增且费工费时。“先备后用”是指在检修该型车辆时，应准备好维修车型的有关检修数据资料。除了从维修手册、专业书刊上收集整理这些检修数据资料外，另一个有效的途径是对无故障车辆电控系统的有关参数进行测量并记录下来，作为日后检修同类型车辆的检测比较参数。如果平时注意做好这项工作，会给系统的故障检查带来方便。当电子控制系统出现某种故障时，故障自诊断系统就会立刻监测到故障并通过警告灯向驾驶人报警，与此同时故障自诊断系统将以故障码的方式储存该故障的信息。但是对



于有些故障，故障自诊断系统只储存该故障码，并不报警。因此，在对发动机进行系统检查前，应先读取故障码，并检查和排除故障码所指的故障部位。待故障码所指的故障消除后，如果发动机故障现象还未消除，或者开始就未存储故障码，则再对发动机可能的故障部位进行检查。

三、电控发动机故障诊断步骤

1. 问诊、外观检查

打开发动机舱盖，目视检查机件有无缺失，管路有无脱落，电线插接器有无松脱，是否存在漏油、漏水、漏气、漏电现象，发动机怠速运转是否平稳。观察排气管口是否排气平稳，是否有烟色不正常现象。

2. 读码—清码—运行—再读码

连接诊断仪，查询故障码，永久性和偶发性故障码都要记录，然后清除故障码。起动发动机，使冷却液温度达到 80℃ 以上，发动机转速升至高速运转几秒钟，达到故障再现的条件后，再查询并记录故障码。

3. 分析故障码

通过维修手册查阅故障码的产生原因、影响及排除方法，偶发性故障码不能忽视，然后再进行判断。如果未存储故障码，就要考虑控制单元不做监视的元件是否有故障，应采用其他检查方法判断其是否存在故障。

4. 阅读数据块

数据块可以提供发动机运转状态的实时数据，是否能正确分析数据块代表着诊断水平的高低。冷却液温度等会首先达到数据块的条件，对于数据中超出规定值的数据，应参照维修手册分析其原因。

5. 测量

根据故障现象、故障码内容、数据块数值确定测量项目，可以使用万用表、二极管测试灯、尾气分析仪、燃油压力表、真空表、气缸压力表、示波表、模拟信号发生器、喷油器检测清洗仪、点火正时灯等仪器进行测量，选择仪器的原则是能迅速地检查出故障原因。必须读懂各检测仪器的说明书并正确使用。

6. 故障排除

根据前几步的检测结果，得出故障诊断结论，可采用更换元件、调整或剥开线束查找故障点、清洁接地点、清洗节气门和进气道等方法进行故障排除。

7. 诊断仪检测、试车检验

使用诊断仪检测，检查是否有故障码记忆，对于加速闯车、行驶熄火等故障必须进行路试。阅读数据块的数值是否恢复正常，待验证故障完全排除后可竣工交车。

第一章 缸内直喷发动机原理与燃烧技术控制

第一节 直喷发动机稀薄燃烧特点和类型

随着能源供给的日益紧张，人们对车用发动机的燃油经济性更加重视，并且采取了许多有效的措施。汽油机稀薄燃烧技术是改进汽油机燃油经济性的重要手段，它可以使燃料的燃烧更加完全，同时辅以相应的排放控制措施，也可使汽油机的有害排放物 CO、HC 等大大地减少。

一、基本术语

可燃混合气中空气与燃油的比例称为可燃混合气成分或可燃混合气浓度，通常用过量空气系数和空燃比表示。

(1) 过量空气系数 发动机工作过程中，燃烧 1kg 燃油实际供给的空气量与理论空气量之比，称为过量空气系数，用 λ 或 φ_a 表示，即

$$\lambda = \frac{\text{燃烧 1kg 燃油实际供给的空气质量}}{\text{完全燃烧 1kg 化学计量空气质量}}$$

$\lambda = 1$ 称为理论混合气； $\lambda < 1$ 称为浓混合气； $\lambda > 1$ 称为稀混合气。

(2) 空燃比 可燃混合气中空气质量与燃油质量之比称为空燃比，记作 α 。即

$$\alpha = \frac{\text{空气质量}}{\text{燃油质量}}$$

按照化学反应方程式的当量关系，可求出 1kg 汽油完全燃烧所需空气质量，即化学计量空气质量约为 14.7kg。 $\alpha = 14.7$ 为理论混合气； $\alpha < 14.7$ 为浓混合气； $\alpha > 14.7$ 为稀混合气。空燃比 $\alpha = 14.7$ 称为理论空燃比或化学计量空燃比。过量空气系数与空燃比 α 在数值上的对应关系见表 1-1。

表 1-1 λ 与 α 数值对应关系

$\lambda(\varphi_a)$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
α	8.9	10.4	11.8	13.3	14.8	16.3	17.8	19.2	20.7

试验证明，当 $\lambda = 1.05 \sim 1.15$ 时，混合气燃烧完全，燃油消耗率低，故称这种混合气为经济混合气，其混合比为经济混合比。当 $\lambda = 0.85 \sim 0.95$ 时，混合气燃烧速度最快，热损失最低，这时发动机的有效功率最大，故称此种混合气为功率混合气，其混合比为功率混合比。

试验证明，混合气过浓或过稀都不能着火燃烧。在一般情况下，混合气浓到 $\lambda = 0.4 \sim 0.5$ 或混合气稀到 $\lambda = 1.3 \sim 1.4$ 时火焰便不能传播。通常称前者为火焰传播上限，称后者为火焰传播下限。



如上所述,可燃混合气成分直接影响发动机的性能及发动机能否正常运转,而且使用同一种成分的混合气不可能同时获得最大功率和最低燃油消耗率。

二、稀薄燃烧的定义

稀薄燃烧是指空燃比 α 大于理论空燃比 14.7 时的燃烧。但在实际使用中,为保证各缸不失火,混合气不能太稀,其空燃比的稀限为 17,所以在实际使用中,将空燃比大于 17 的燃烧视为稀薄燃烧。

三、稀薄燃烧的实现

传统的汽油机在空燃比达到 15 甚至更高以后,就可能出现点火困难或不点火现象,反而使发动机各项性能指标降低、排放水平恶化。为了实现稀薄燃烧,必须使燃烧室内形成分层气流,使火花塞周围形成较浓的混合气,在远离火花塞处则形成较稀的混合气。为了达到上述要求,对汽油机主要进行了如下改动:

1) 进气道由传统形状改为螺旋式,在进气口处设置蝶形涡流阀,使气流形成较强的涡流,流动更为合理,有利于火花塞点火及火焰的迅速传播。

2) 采用无级调节气门定时系统 VVT-i,可改变进气门定时角以满足不同工况、不同转速下的进、排气效应,从而保证汽油机在各种工况下都能稳定地工作。

3) 加装燃烧压力传感器。汽油机的压缩比在提高到 10 以上时,为了防止汽油机出现爆燃现象,在燃烧室内加装了燃烧压力传感器,使燃烧室内的燃烧状态及时反馈到 ECM(电子控制器),ECM 根据预先设定的数据对喷油及点火进行调整,使汽油机各项性能指标均保持在最佳状态。

4) 采用大口径喷油器,通过提高燃油系统压力,使燃油能在设定时刻准确无误地充分喷入燃烧室内。

5) 氧传感器的重新研究开发。为了保证燃烧的稳定性,稀薄燃烧系统对进气涡流的组织、喷油定时和各工况下的空燃比控制都提出了严格的要求。目前,安装有三元催化转化器的车用汽油机一般采用氧传感器进行闭环反馈控制,即将发动机的空燃比控制在当量空燃比附近,以保证三元催化转化器的正常工作。而稀薄燃烧要求对各工况下的目标空燃比进行调节,其目标空燃比并不仅仅在当量空燃比附近,因而必须采用测量范围较宽的新型氧传感器,通过 PID(比例—积分—微分)调节对空燃比进行闭环反馈控制。

目前,丰田、三菱、本田、福特、奔驰等许多国外汽车公司和研究机构都开发出了比较成熟的 GDI 机型和产品。这些 GDI 机型,除了少数仍采用单一的均质预混燃烧模式外,大都根据汽油机的不同工况而采用了不同的混合燃烧模式。它们广泛使用的是内开式螺旋喷油器,中小负荷区域通过压缩行程后期喷油和燃烧系统的合理配合,可形成分层稀薄快燃的混合气;而在大负荷和全负荷工况下,通过在进气行程中较早地把燃油喷入气缸,在点火时刻则会形成预混燃烧的均质混合气。如丰田、三菱的某些 GDI 机型采用两段喷射技术,即把燃油分两次喷射到燃烧室内。

四、稀薄燃烧的优点

稀薄燃烧系统能使有限的燃油发挥出最大的效率,使汽油机燃烧室内的燃烧更加完全。

该系统不但大大地降低了汽油机的燃油消耗率，也大大地改善了汽油机的尾气排放水平。GDI 超稀薄空燃比的利用和工作方式的改变有不少优点：取消节流降低了泵气损失；燃油蒸发引起了缸内温度的降低，提高了汽油机可工作的压缩比；燃油在进气行程中对进气的冷却，提高了充气效率等。这些优点可以使发动机的燃油经济性提高 25% 左右，动力输出也比进气道喷射的汽油机增加了将近 10%。GDI 发动机除了温室气体 CO_2 排放较少外，由于其冷却起动迅速快捷，很少需要冷起动加浓，因而可以大幅度降低冷起动时未燃碳氢 (UBH) 的排放。

五、稀薄燃烧的缺点

1) 成本高。由于稀薄燃烧系统的结构较为复杂，对喷油系统的要求也相当严格，使喷油系统的结构也较为复杂，由此使制造成本明显增加。

2) 排放量增加。虽然采用了较稀的空燃比，使 NO_x 因气缸内的反应温度较低而降低，但由于分层混合气由浓到稀将不可避免地出现过量空气系数为 1 附近的偏浓区域，会导致这些地方的 NO_x 生成增加。另外，较高的压缩比和较快的反应放热率也会引起 NO_x 的升高。一般来说，GDI 发动机在稀空燃比工作条件下造成的富氧气氛使得传统的三元催化转化器的转化效率降低，同时排气温度较低也不利于它的起燃，进而限制了它在缸内直喷汽油机上的应用。稀薄燃烧催化剂的开发将直接影响到 GDI 发动机 NO_x 排放问题的解决。

六、稀薄燃烧的分类

1. 按混合气状态分

按混合气状态分，可将稀薄燃烧分为均质和非均质两种。

(1) 均质预混合方式 大部分进气道喷射汽油机一般只能在空燃比小于 25 的范围内工作，且采用均质预混合方式。此种方式的空燃比限制在以化学当量比为中心的狭窄区域内，即空燃比小于 25 的范围内工作，其本身存在燃油经济性较差和自身排放高的缺点。

1) 为保证所要求的空燃比，只能用进气管节流的方式对混合气充量进行调节。由于节流会引起较大的泵气损失，因此会造成低负荷时的燃油经济性较差。

2) 由于缸内充满均质的易着火和燃烧的混合气，容易产生爆燃，因而不能采用高压压缩比，使得热效率较低。

3) 浓混合气的比热容较低，也使热效率较低。在化学计量比附近燃烧， NO_x 排放较高。

(2) 非均质分层进气 由于均质预混合方式存在很多缺点，目前，分层燃烧(分层进气)发动机作为稀薄燃烧中的非均质燃烧是实现稀薄燃烧的主要方式。随着空燃比的增加，由于混合气过稀，火花塞周围微小点火体内的燃料量太少，产生的热量不足以聚集形成火焰，使得均质混合气难以点燃且燃烧速度减慢，从而造成燃烧不稳定，使油耗和 HC 排放上升。而传统发动机供给各缸的混合气成分不均匀，在汽油机中只要形成火焰，在火焰的传播过程中，即使是相当稀的混合气，也能正常燃烧。为了提高稀薄燃烧界限，可采用分层充气燃烧，以保证在空燃比大于 20 的条件下在火花塞周围形成易于着火的较浓的可燃混合气(空燃比在 12 ~ 13.5)，而在周边区域和燃烧室的大部分区域是较稀混合气或空气。在浓稀之间，有从浓到稀的各种空燃比混合气，以利于火焰的传播。因此，燃烧室中混合气浓度有组织地分成各种层次，故称为分层燃烧(分层进气)发动机。分层燃烧的汽油机可稳定在空



燃比为 20~25 的范围内工作, 分层燃烧缸内直喷发动机空燃比的稀限可提高到 40 以上。在小负荷工况下, 不需要关小节气门来限制进气量, 基本上避免了发动机换气过程中的泵气损失。在高空燃比情况下, 由于混合气物性的改变, 等熵指数(绝热指数)增加, 传热损失减少, 发动机的热效率可进一步提高。由于汽车发动机经常在小负荷工况下工作, 可使其平均油耗降低 15%~20% 左右, NO_x 排放也会显著降低。为使发动机在燃用稀混合气时工作稳定可靠, 必须同时控制燃烧过程, 使之实现快速燃烧; 改善供给系统混合气制备与分配; 改进或强化点火系统。分层进气燃烧室可分为统一式和分隔(预燃室)式两大类。美国德士古公司的 TCCS 和福特公司的 PROCO 以及日本三菱公司的 MCP 属于统一式; 日本本田公司的 CCVC 和丰田公司的 TGP 以及德国波舍尔公司的 SKS 和大众公司的 PCI 则属于预燃室式。

2. 按燃烧供给方式分

按燃烧供给方式分不同, 汽油稀薄燃烧可分为三种类型, 即进气道喷射分层稀薄燃烧 PFI、缸内直喷稀薄燃烧 GDI、均质混合气压燃 HCCI。

七、稀薄燃烧空燃比的特性

稀薄燃烧技术的宗旨是使发动机在最佳稀薄空燃比下稳定工作, 以改善燃油消耗率和排放性能。由图 1-1 所示的空燃比特性曲线可知: 在理论空燃比下, 采用三元催化转化技术, 可以使 NO_x 排放达标, 但不能满足燃油经济性的要求; 提高空燃比, NO_x 排放量会增加, 并在 $\alpha=16$ 时达到最大; 而后继续增加空燃比, NO_x 排放量下降, 而发动机输出转矩的变动量增加, 发动机不能稳定工作。同时满足油耗最佳、 NO_x 排放量最低、转矩小时空燃比范围很窄。因此, 空燃比的精确控制是稀薄燃烧技术成功的关键。

1. 稀薄燃烧空燃比的控制策略

1) 空燃比反馈控制原理。在排气系统中安装空燃比传感器, 利用其测出排气中的 O_2 浓度, 实现空燃比的闭环控制。其工作原理如图 1-2 所示, 排气侧有氧化铝和镁制成的气体扩散层, 管型加热器可将端部加热至 $700 \sim 800^\circ\text{C}$, 传感器通过将氧离子沿图示实线方向泵入, 可检测到排气中氧气的浓度, 由此进行空燃比的反馈控制。

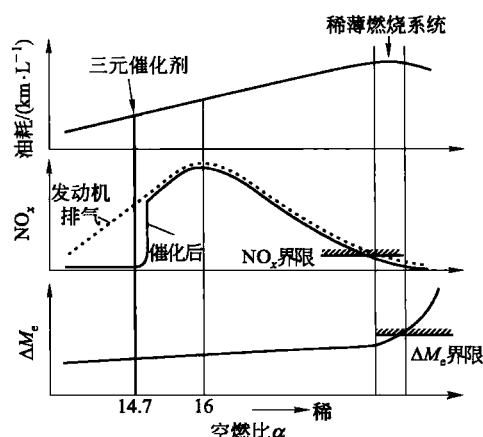


图 1-1 空燃比 α 特性

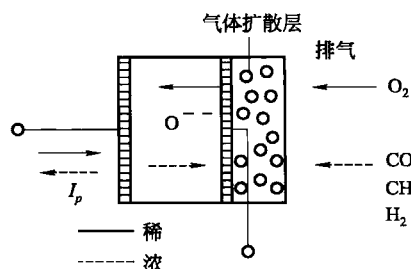


图 1-2 空燃比传感器工作原理图

2) 控制过程。空燃比传感器输出的信号为模拟量, 需进行 A/D 转换, 转换后输入电子控制单元 ECU。ECU 根据传感器测得排气中的 O_2 浓度, 查询存储在 ROM 中的由发动机工况确定的目标空燃比的脉谱图, 计算该工况下排气中的目标 O_2 含量。然后比较目标值与实测值, 求出偏差量并修正, ECU 根据修正的 O_2 浓度确定燃油的最终喷射量, 如图 1-3 所示。

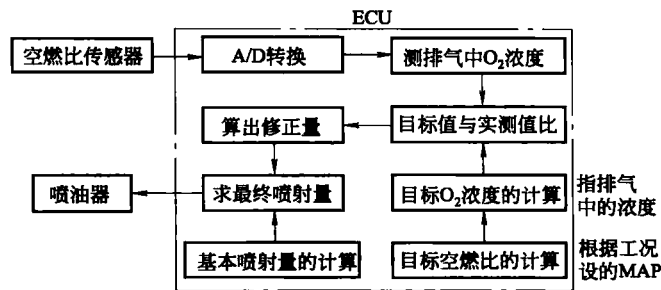


图 1-3 空燃比反馈控制流程

2. 燃烧压力反馈控制

通过气缸压力传感器直接检测气缸内的燃烧压力, 进而计算出发动机每一循环输出转矩的变动量 ΔM_e , 以此进行空燃比的反馈控制, 使实际转矩的变动量控制在允许的范围之内, 如图 1-4 所示。该控制方式是直接测量发动机输出转矩的变动量, 故可以控制空燃比 α , 使实际转矩变动量更接近于所允许的界限值。因此, 可将空燃比控制在稀薄燃烧范围的上限, 使油耗率降得更低, NO_x 的排放量更少。

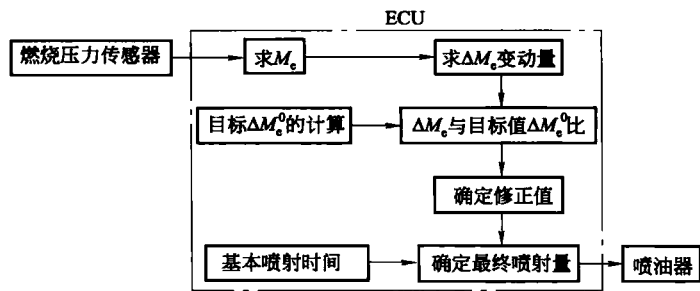


图 1-4 燃烧压力空燃比控制流程

3. 物理模拟的空燃比控制

改进的稀薄燃烧汽油机空燃比的控制方案。该方案增加了一个进气模拟参数在线辨识模块, 并对反馈综合控制参数进行实时在线修改, 构成自校正调节器环节, 以提高前馈控制的反应速度和精度; 增加了电控节气门环节, 以满足发动机在稀薄燃烧时进行浓稀转换控制的特殊要求, 其模拟参数可通过离线辨识事先输入控制器中; 用线性氧传感器, 使反馈环节在发动机整个空燃比工作范围内都能起到良好的调节作用, 如图 1-5 所示。

八、稀薄燃烧空燃比的控制过程

稀薄燃烧过程空燃比的控制是由 ECU 根据空燃比传感器的检测信号进行空燃比的反馈控制, 以实现稀薄燃烧过程的所控空燃比根据发动机转速及节气门开度等发动机的运转条件进行相应的修正。实际控制过程是 ECU 控制喷油器使实际燃料的喷射量达到事先根据发动

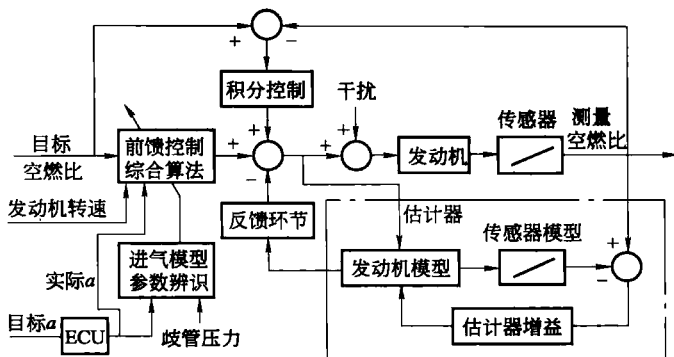


图 1-5 改进的稀薄燃烧汽油机空燃比的控制方案

机运行状态设定的目标喷射量,即在基本喷射量的基础上乘以稀薄燃烧空燃比的学习修正系数,该系数是根据发动机可实施稀薄燃烧空燃比控制的运行条件设定或变更的。发动机可实施稀薄燃烧空燃比控制的运转条件由发动机冷却液温度、转速、进气压力及其变化量,以及节气门开度及其变化量决定。当 ECU 监测到稀薄燃烧空燃比控制条件成立时,从寄存器读取发动机前一次怠速状态下运行时所用学习修正系数,完成稀薄燃烧控制过程;如不满足稀薄燃烧空燃比控制条件,则回到初始检测等待状态,重新监测发动机实施稀薄燃烧空燃比控制的运行条件。

1) 稀薄燃烧空燃比控制技术的实质是控制燃油的喷射量,主要有空燃比反馈控制、燃烧压力控制和带有自校正调节器的基于物理模块的空燃比控制三种方式,有效降低了排放和燃油消耗率。

2) 稀薄燃烧空燃比的控制由 ECU 根据发动机可实施稀薄燃烧空燃比控制的运行条件, 确定稀薄燃烧空燃比的学习修正系数, 确定实际燃油喷射量, 完成稀薄燃烧空燃比控制。

九、HCCI 的压燃技术

1. HCCI 的工作原理

HCCI 的全称是 Homogenous-Charge Compression Ignition，意为均质混合气压缩点燃。早在 20 世纪 30 年代，人们就认识到在汽油机上存在均质混合气压缩自燃的燃烧方式，HCCI 燃烧方式的出现，有效地解决了传统均质稀薄点燃燃烧速度慢的缺点，是有别于传统汽油机的均质点燃预混燃烧、柴油机的非均质压缩扩散燃烧和 GDI 发动机的分层稀薄燃烧的第四种燃烧方式。

HCCI 发动机与传统的汽油发动机一样,都是向气缸里面注入均匀的空气和燃料混合气,但传统的汽油发动机是通过火花塞点火,点燃可燃混合气;而 HCCI 发动机的点火过程同柴油发动机相类似,即通过活塞压缩混合气使之温度升高至一定程度时自行燃烧。提高缸内混合气温度和压力的方式有提高压缩比、采用废气再循环、进气加温和增压等。在压燃时气缸内可形成多点火核,有效维持了着火燃烧的稳定性,并减少了火焰传播距离和燃烧持续期,解决了传统均质稀薄点燃燃烧速度慢的缺点。

2. 汽油 HCCI 与柴油机燃烧方式的区别

汽油 HCCI 与柴油机燃烧方式的不同在于：柴油机在着火时刻燃油还没有完全蒸发混

合, 进行的是扩散燃烧方式, 燃烧速率主要受燃油蒸发以及与空气混合速率的影响; 而进行 HCCI 燃烧的混合气在着火前已经均匀混合, 它进行的是预混燃烧模式。HCCI 既保留传统汽油机比功率高的特点; 又由于节流损失减小, 设计压缩比高, 采用多点同时着火的燃烧方式使得能量释放率较高, 接近于理想的等容燃烧, 热效率较高, 改善了部分负荷下燃油经济性; 另外, 它还能利用废气再循环控制均质稀混合气。

3. HCCI 的主要优点

1) HCCI 的优点在于, 它可以同时保持较高的动力性和燃油经济性。一方面, 它采用均质燃烧混合气, 保持了传统汽油机比功率高的特点; 另一方面, 它取消了节流损失, 设计的压缩比高, 采用多点同时着火的燃烧方式使得能量释放率较高, 接近于理想的等容燃烧, 热效率较高, 保持了柴油机部分负荷下燃油经济性好的特点。如 1996 年丰田汽车公司研究的 HCCI 汽油机, 压缩比可提高到 17.4, 空燃比设计值为 33 ~ 44。研究表明, 它的缸内平均指示压力与 GDI 汽油机和柴油机相当, 如图 1-6 所示。其燃油消耗率水平甚至超过直喷柴油机水平 (180 ~ 200 g/kW · h), 并且随着进气温度的提高, HCCI 的燃烧稀薄燃烧界限可拓宽至空燃比为 80 以上。

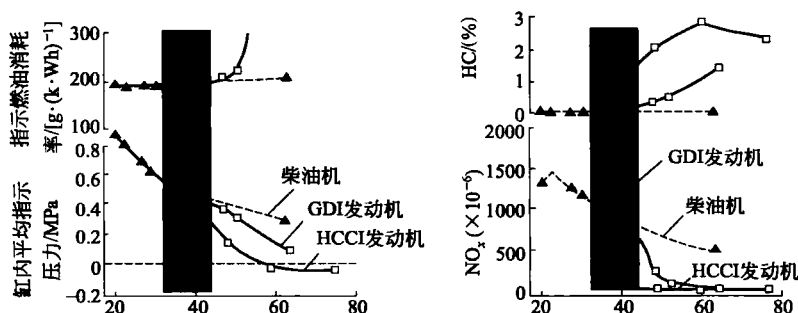


图 1-6 HCCI 发动机、GDI 发动机和柴油发动机性能对比

2) HCCI 燃烧方式可以同时降低 NO_x 和炭烟。它通过设计较稀的混合气空燃比或利用再循环的废气控制把燃烧温度降低在 1800℃ 以下, 并且由于它以均质稀薄燃烧混合气方式工作, 有效地抑制了 NO_x 和炭烟的生成, 因此它几乎做到了无烟燃烧。

3) 由于 HCCI 只与本身的物理化学性质有关, 它的着火和燃烧速率只受燃油氧化反应的化学反应动力学控制, 受缸内流场影响较小, 同时均质预混的混合气组织也比较简单, 因此, 在发动机上实施 HCCI 燃烧模式可以简化发动机燃烧系统和喷油系统的设计。HCCI 发动机设计的难点在于对 HCCI 燃烧速率和着火时刻的控制。由于车用发动机的工况多变, 要想在各工况点都获得较好的燃烧和排放特性, 则必须对 HCCI 燃烧进行控制。如果 HCCI 燃烧控制得较好, 则发动机可在拓宽的大空燃比范围内进行高效稳定的燃烧, 循环波动压力小, 工作柔和; 如果 HCCI 燃烧组织得不好, 则容易出现爆燃或失火, 使发动机的性能变差。

十、控制 HCCI 燃烧的方法

HCCI 燃烧的着火时刻主要受到混合气本身化学反应动力学的影响, 受负荷、转速的影



响较小, 因此不能通过常规的负荷、转速等反馈信号来加以控制, 只能通过试验手段间接测量, 获取经验。着火始点的控制策略如图 1-7 所示, 目前还没有单独的切实可行的方法控制 HCCI 燃烧始点, 需要综合采用两种或多种控制方法。还有学者通过数值模拟方法进行 HCCI 燃烧始点控制的研究, 但由于燃油火焰前的氧化反应机理还未完全清楚, 这类工作只是定性地与试验取得了一致, 还无法实际应用于指导 HCCI 燃烧始点的控制。对于 HCCI 燃烧速率的控制策略, 由于 HCCI 燃烧反应较快, 因此一般采用较大的空燃比或较高的废气再循环率来减缓燃烧率, 以防爆燃的发生, 但同时使得发动机缸内的平均指示压力难以达到较高的水平, 这就使 HCCI 发动机容易受到失火、爆燃、功率等的限制, 可操作范围不宽。

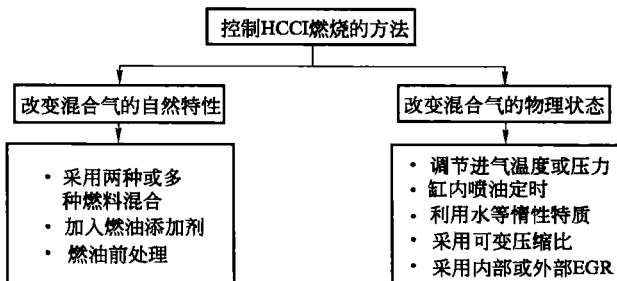


图 1-7 控制燃烧的方法

第二节 缸内直喷发动机的原理

缸内直喷发动机混合气的模式有分层混合气、均质稀混合气、均质混合气三种, 在不同的工况采用不同的模式。下面介绍缸内直喷发动机的特点、不同模式的实现方法及其控制策略。

一、分层燃烧与缸内直喷

分层燃烧技术和缸内直喷技术一直是相关联的。不是说缸内直喷就必须采用分层燃烧, 也不是说分层燃烧必须采用缸内直喷。分层燃烧的真正目的是实现较稀混合气的点燃, 设计缸内直喷的主要目的则是为了实现稀薄燃烧。而发动机的稀薄燃烧技术是为了让混合气燃烧更充分, 达到减低油耗和排放的目的。

分层燃烧实际上就成了这一技术的手段, 要实现分层燃烧, 必须基于缸内直喷, 缸外喷射的发动机是无法实现分层燃烧的。稀薄燃烧的目的是为了省油, 但是省到什么程度才合适, 才能在保障动力系统不受太大影响的前提下, 实现燃烧效率的最优化呢? 我们知道燃油和空气的理论混合比是 14.7:1, 若混合气体的空燃比超过理论混合比, 假设达到了 25:1, 这时油的浓度很低, 会很难点燃, 光靠提高点火能量还是不够的。

设想一下, 如果此时在火花塞附近的燃油浓度较高, 能达到理论空燃比的燃油浓度, 那么此时较浓的混合气体其实是很容易被点燃的。而如果利用这个较浓的混合气去点燃其他的混合气, 显然也是很容易的, 这就是分层燃烧。采用分层燃烧, 就可以实现在很低的燃油浓度下发动机的正常运转。而从上面的分析可以看出, 实现分层燃烧的前提就是气缸内的混合气体不均匀化, 只在靠近火花塞的区域能达到或超过理论空燃比。可能这样说会比较难理解, 那么我们打个比方: 在一个玻璃杯中装满水, 假设杯子是气缸, 水就是被吸入的空气, 如果这时滴入几滴墨水到水里, 我们可以很清楚地看到, 墨水还没来得及被水稀释, 杯口处的水就已经慢慢变色, 但杯底部分还是没有受到影响, 依然清澈。发动机的分层燃烧其实就