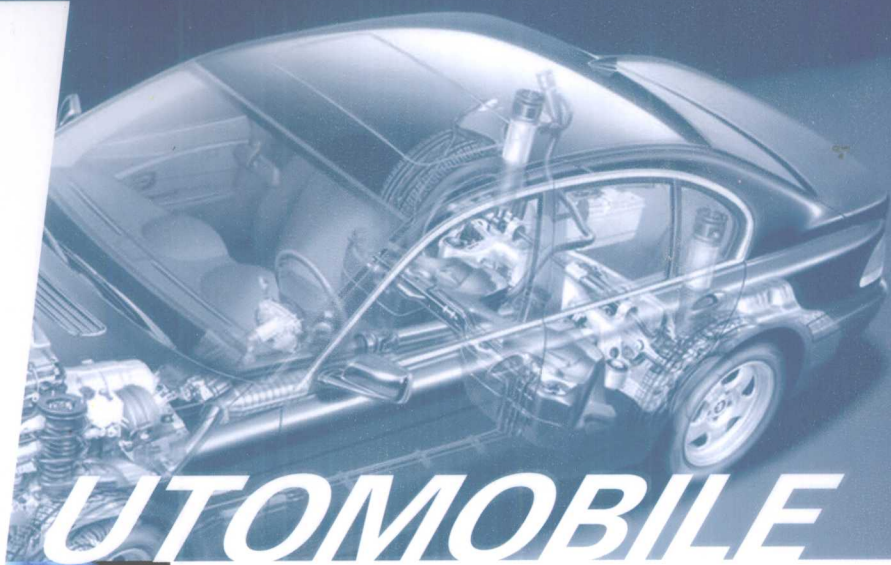


A



UTOMOBILE

== 汽车专项维修新技术丛书 ==

凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社



主编 / 鲁植雄

QICHE ZHUANXIANG WEIXIU XINJISHU CONGSHU

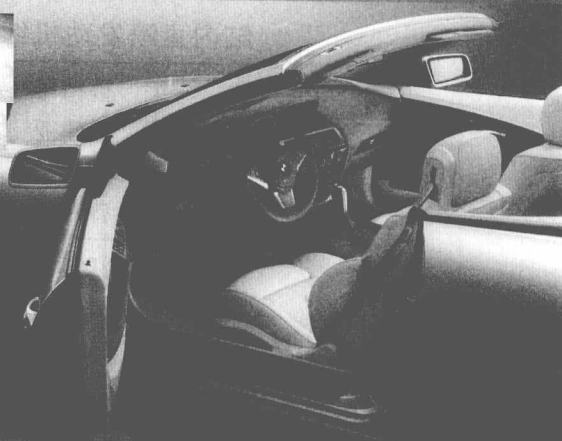
缸内直喷发动机 结构原理与维修



UTOMOBILE

二汽车专项维修新技术丛书二

凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社



主
QICH

缸内直喷发动机 结构原理与维修

图书在版编目(CIP)数据

缸内直喷发动机结构原理与维修 / 鲁植雄主编. —南京:
江苏科学技术出版社, 2009. 11

ISBN 978 - 7 - 5345 - 6731 - 5

I. 缸… II. 鲁… III. 汽车—汽油机—车辆修理 IV.
U472.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 073696 号

缸内直喷发动机结构原理与维修

主 编 鲁植雄
责任编辑 谷建亚
责任校对 郝慧华
责任监制 曹叶平

出版发行 江苏科学技术出版社(南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009)
网 址 <http://www.pspress.cn>
集团地址 凤凰出版传媒集团(南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009)
集团网址 凤凰出版传媒网 <http://www.ppm.cn>
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
照 排 南京展望文化发展有限公司
印 刷 南通印刷总厂有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 15.25
字 数 380 000
版 次 2009 年 11 月第 1 版
印 次 2009 年 11 月第 1 次印刷

标准书号 ISBN 978 - 7 - 5345 - 6731 - 5
定 价 30.00 元

图书如有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换。

前 言

随着石油资源越来越紧缺,人们对汽车的燃油经济性要求越来越高,为此,一种新型的汽油机燃烧方式应运而生,即发动机稀薄燃烧技术,而实现稀薄燃烧的理想方式是缸内直喷分层喷注,即汽油缸内直喷(GDI)。直喷式发动机是在汽缸内喷注汽油,将喷油器安装在燃烧室内,将汽油直接喷注在汽缸燃烧室内,空气则通过进气门进入燃烧室与汽油混合成混合气被点燃做功,这种形式与直喷式柴油机相似,因此,缸内喷注式汽油发动机是将柴油机的形式移植到汽油机上的一种重大创举。

缸内直喷发动机的空燃比达到 40:1,具有节省燃油、减少废气排放、提升动力性能、减少发动机震动、喷油精度的提高、发动机更耐用等优点,目前各汽车制造企业纷纷推出了各自的缸内直喷发动机,如大众公司的 FSI(燃油分层喷射)、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)、保时捷的 DFI(直接燃油喷射)等。这些缸内直喷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发动机的维修,因此,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,以推动缸内直喷发动机的维修技术的普及与水平的提高,特编写此书。

本书不涉及高深的专业知识,文字简练,通俗易懂。通过阅读本书,您就能理解缸内直喷发动机的结构原理、故障诊断和维修方法。本书适合汽车维修人员及技术人员参考使用,也可作为大中专汽车相关专业学生的学习参考书。

本书由南京农业大学鲁植雄博士主编,参加本书文字及图片资料整理工作的还有刘奕贯、袁越阳、陈明江、赵兰英、王文伟、周克林、王庆、田丰年、类雪、徐煌、逢小凤、殷新东、陆遥忠、袁俊等同志。

本书编绘过程中,得到了许多汽车制造企业和维修企业的大力支持和协助,并参考了许多名家的著作,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中有谬误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 9 月

目 录

第一章 发动机稀薄燃烧技术	1
一、基本术语	1
二、可燃混合气	1
三、稀薄燃烧的特点和类型	4
四、进气道喷射分层稀薄燃烧技术	6
五、缸内直接喷射技术	8
六、均质混合气压燃技术	9
七、稀薄燃烧空燃比的控制	12
八、稀薄燃烧技术的发展	14
第二章 缸内直喷发动机的原理与控制	15
一、分层燃烧与缸内直喷	15
二、GDI 发动机的发展	16
三、GDI 发动机的优缺点	20
四、GDI 发动机与 PFI 发动机的对比	22
五、GDI 发动机的工作原理	24
六、GDI 发动机的综合控制	26
七、GDI 发动机的关键技术	30
八、GDI 发动机的电子控制系统	39
九、几种典型 GDI 发动机简介	47
十、GDI 发动机的主要排放污染物	51
十一、GDI 发动机的发展趋势	52
第三章 缸内直喷发动机的主要部件	55
一、GDI 发动机的燃油系统	55
二、GDI 发动机的排气系统	64
三、GDI 发动机的火花塞	74
四、GDI 发动机的废气涡轮增压器	84
五、GDI 发动机的双涡轮增压系统	89
六、GDI 发动机的 EGR 技术	91
七、GDI 发动机的进气歧管翻板阀	94
八、GDI 发动机的可变配气相位	95

九、GDI 发动机的可变进气歧管	102
十、GDI 发动机的机体改进	106
第四章 大众汽车缸内直喷发动机的结构原理与检修	109
一、2.0FSI 缸内直喷发动机	110
二、2.0T FSI 缸内直喷发动机	124
三、3.2FSI 缸内直喷发动机	131
四、1.8T FSI 缸内直喷发动机	149
五、1.4TSI 缸内直喷发动机	163
六、1.8TSI 缸内直喷发动机	178
第五章 丰田汽车缸内直喷发动机的结构原理与检修	183
一、D—4 型缸内直喷发动机	183
二、D—4S 型缸内直喷发动机	190
三、雷克萨斯 LS460 轿车 1UR 缸内直喷发动机	197
四、雷克萨斯 2GR—FSE 进气道喷射与缸内直喷组合发动机	202
第六章 奔驰汽车缸内直喷发动机的结构原理与检修	208
一、概述	208
二、结构特点	210
三、喷油控制策略	214
四、发动机的特性曲线	216
第七章 其他车型缸内直喷发动机的结构原理与检修	218
一、2008 款凯迪拉克 CTS 轿车缸内直喷发动机	218
二、三菱汽车缸内直喷发动机	222
第八章 典型案例分析	228
案例一 宝马缸内直喷发动机启动困难	228
案例二 2006 款奥迪 2.0T FSI 发动机自愈的缺缸故障	230
案例三 奥迪 A6L2.0 FSI 启动困难	231
案例四 大众奥迪 200 轿车大修后无法启动	233
案例五 大众迈腾轿车无法启动	233
案例六 大众迈腾轿车启动困难,高速抖动厉害,加速无力	234
案例七 2008 款奥迪 A6L 发动机无法启动	235
案例八 奥迪车发动机启动困难	237
案例九 某帕杰罗 GDI 发动机不能着车	238

第一章 发动机稀薄燃烧技术

缸内直喷发动机的关键技术是对稀薄燃烧技术的理解,何谓稀薄燃烧?稀薄燃烧的混合气是怎样形成的?如何进行控制?这是本章的主要内容。

一、基本术语

DFI——直接燃油喷射(Direct Fuel Injection)

FSI——燃油分层喷射(Fuel Stratified Injection)

GDI——汽油缸内直喷(Gasoline Direct Injection)

HCCI——均质混合气压燃(Homogeneous Charge Compression Ignition)

HPI——高压直喷(High Pressure Injection)

PFI——进气道喷射(Port Fuel Injection)

SIDI——点燃式缸内直喷(Spark Ignition Direct Injection)

CGI——分层汽油喷射(Stratified-Charged Gasoline Injection)

SI——点燃(Spark Ignition)

SC——机械增压(Super Charger)

TFSI——涡轮增压燃油分层喷射(Turbo Fuel Stratified Injection)

TSI——涡轮-机械增压(或双涡轮增压)(Turbocharger-Super Charge Injection)

T——涡轮增压(Turbo)

VDE——可变排量技术(Variable Displacement Engine)

VTEC——可变相位和升程技术(Variable Valve Timing and Valve lift Electronic Control System)

VVT——可变气门定时(Variable Valve Timing)

二、可燃混合气

1. 可燃混合气的表示

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 1 kg 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

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

$\lambda = 1$ 的可燃混合气称为理论混合气; $\lambda < 1$ 的称为浓混合气; $\lambda > 1$ 的称为稀混合气。

(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 1 kg 汽油完全燃烧所需空气质量,即化学计量空气质量约为 14.8 kg。显然, $\alpha = 14.8$ 的可燃混合气为理论混合气; $\alpha < 14.8$ 的为浓混合气; $\alpha > 14.8$ 的为稀混合气。空燃比 $\alpha = 14.8$ 称为理论空燃比或化学计量空燃比。过量空气系数 λ 与空燃比 α 在数值上的对应关系如表 1-1 所示。

表 1-1 λ 与 α 数值对应关系

$\lambda(\phi_a)$	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,当燃用 $\lambda = 1.05 \sim 1.15$ 的可燃混合气时,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。

试验还证明,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。

2. 混合气的形成方式

迄今为止,汽油机的发展历经三代(图 1-1)。传统化油器式和进气道喷射式汽油机都是

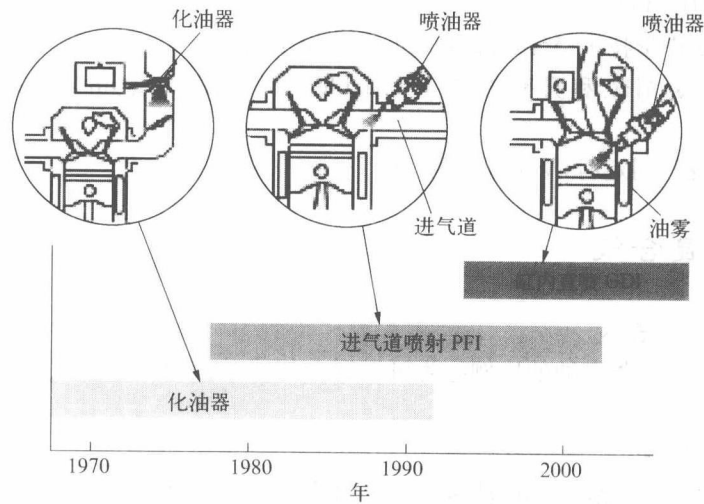


图 1-1 汽油机发展的三个阶段

在汽缸外形成混合气,然后进入汽缸内燃烧,而 GDI 发动机则将汽油直接喷入到汽缸内,利用缸内气流运动、燃油喷射雾化、燃烧室表面引导形成混合气后进行燃烧。表 1-2 比较了这三代汽油机的工作方式及优缺点。

表 1-2 三代汽油机工作方式及优缺点对比

	GDI	PFI	化油器
喷油方式	缸内直喷	进气道喷射	无
混合气形成	均质或者分层稀薄混合气	均质混合气	均质混合气
空燃比范围	12~50,甚至更高	化学计量比 14.7	12~17
充气效率	较高(中小负荷时取消节气门量、调节负荷方式可以显著降低进气节流损失,燃油汽化冷却进气)	一般(节气门)	较低(节气门和喉管)
压缩比	10~14	7~10	6~8
控制精度和响应速度	控制精度高,响应速度快	稳态工况好,过渡工况和冷启动较差	机械系统控制精度和响应速度最慢
优化潜力	可以全方位优化	进气管及燃烧的局部优化	优化潜力较小

在排放方面,GDI 发动机可解决冷启动时目前 PFI 汽油机 HC 排放高的问题。PFI 发动机是在进气门关闭时把汽油(粒径为 $100\sim 300\ \mu\text{m}$)喷向进气门背部和气门口附近壁面上,依靠暖机后进气门和进气道的壁面温度、进气门打开时灼热废气的倒流和冲击促进汽油蒸发,然后与空气形成均匀混合气。然而在发动机冷启动时,由于加速汽油蒸发的高温条件不具备,油气混合情况差,液体油滴会在进气道、进气门背部沉积,形成表面油膜和油坑,此时为保证缸内形成燃烧所需的混合气浓度,不得不提供过量的燃油,这就造成了很高的 HC 排放;GDI 发动机则是将汽油直接喷入缸内,依靠喷雾和缸内空气运动进行破碎和雾化,对温度的依赖较弱,因而无需过量供油,降低了冷启动时的 HC 排放。

GDI 发动机具有良好的加速响应性和优异的瞬态驱动特性。由于汽油直接喷入缸内,发动机基本上在第 2 个工作循环就能正常运转起来,而 PFI 发动机则至少需要 10 个循环以上才能着火。GDI 发动机可以显著改善中小负荷时的泵气损失。PFI 发动机依靠节气门开度大小调节负荷的方式引起较大的泵气损失;而 GDI 发动机则可以利用喷入缸内的燃油数量调节负荷大小,避免了节气门小开度时造成的节流损失,提高发动机部分负荷时的有效热效率。GDI 发动机较高的压缩比可以进一步提高有效热效率,改善燃油经济性。它将汽油直接喷入汽缸,油滴的蒸发主要依靠从空气中吸热,而非从壁面吸热,这样可降低缸内混合气温度,抑制爆震倾向,通过合理地组织缸内气流运动,实现分层燃烧,可使压缩比提高至 12~14,同时充气效率也有一定的上升。

三、稀薄燃烧的特点和类型

1. 稀薄燃烧的定义

所谓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,所以将空燃比大于 17 的燃烧视为稀薄燃烧。

2. 稀薄燃烧的目的

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,采取了许多有效的措施,其中的汽油机稀薄燃烧技术,就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,汽油机的有害排放物 CO、HC……将大大地减少。

3. 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 20° ,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,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)调节来对空燃比进行闭环反馈控制。

目前,日本丰田、三菱、本田,美国福特,德国奔驰等许多国外汽车公司和研究机构都开发了比较成熟的 GDI 机型和产品。这些 GDI 机型,除了福特、Fiat、Lsuzu 等生产的少数机型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。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,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汽缸,在点火时刻形成预混燃烧的均质混合气。也有如丰田、三菱的某些 GDI 机型采用两段喷射技术,即把燃油分 2 次喷射。

4. 稀薄燃烧的优点

稀薄燃烧系统能使有效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,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。GDI 超稀薄空燃比的利用和工作方式的改变有不少优点,如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,由于其冷却启动迅速快捷,很少需要冷启动加浓,因而可以大幅度降低冷启动时未燃碳氢(UBHC)的排放。

5. 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) NO_x 排放量增加

NO_x 虽然采用了较稀的空燃比,因汽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,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。

6. 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

化油器式和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:

- 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,造成低负荷时的燃油经济性较差。

- 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,因而不能采用高压缩比,使热效率较低。

- 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的缺点,目前,分层进气(分层燃烧)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,均质混合气难以点燃且燃烧速度减慢,会造成燃烧不稳定,使油耗和 HC 排放上升。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,故称为分层进气(分层燃烧)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,分层燃烧缸内直喷机空燃比的稀限已提高到 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,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 也显著降低。为使发动机在燃用稀混合气时工作稳定可靠,必须同时做到:控制燃烧过程,使之实现快速燃烧;改善供给系混合气制备与分配;改进或强化点火系。分层进气燃烧室可分为统一式和分隔(预燃室)式两大类。美国的德士古 TCCS 和福特 PROCO 以及日本三菱 MCP 属于统一式;日本的本田 CCVC 和丰田 TGP 以及德国的波舍尔 SKS 和大众 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)、均质混合气压力燃(HCCI)。

四、进气道喷射分层稀薄燃烧技术

1. 进气道喷射分层给气燃烧方式

普通汽油机工作时保证可靠点火所对应的空燃比为 10~20,与此相比,稀薄燃烧汽油机的空燃比要大得多。为了保证可靠点火,点燃式稀薄燃烧汽油机在点火瞬间火花塞周围必须形成易于点燃的空燃比为 12.0~13.5 的混合气。这就要求混合气在汽缸内非均质分布。而要实现混合气的非均质分布,必须使混合气在汽缸内分层。混合气分层主要依靠气流的运动结合适时的喷油实现。进气道喷射稀薄燃烧系统根据进气流在汽缸内的流动形式不同,可分为涡流分层和滚流分层 2 种。

(1) 涡流分层稀薄燃烧系统

涡流分层稀薄燃烧方式一般是通过对进气系统的合理配置,使缸内产生强烈的涡流运动。如图 1-2 所示,该涡流的轴线与汽缸中心线大体一致,形成沿汽缸轴线的涡流运动。在进气冲程初期,随着活塞向下运动,缸内形成较强的涡流。通过控制喷油时刻使喷油器在进气后期喷油,进入汽缸的燃油大部分就保持在汽缸的上部,汽缸内的强涡流起到维持混合气分层的作用,汽缸内将形成上浓下稀的分层效果,火花塞周围有较浓的混合气。这样形成的涡流在压缩后期虽然随着活塞的上行逐渐衰减,但涡流的分层效果仍可大体一直保持到压缩上止点,有利

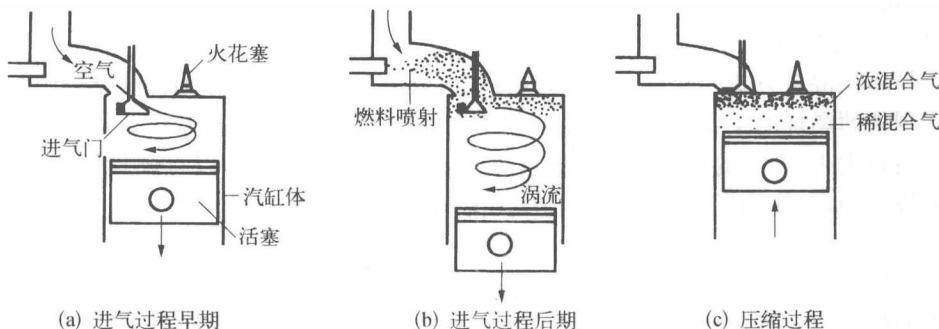


图 1-2 涡流分层给气

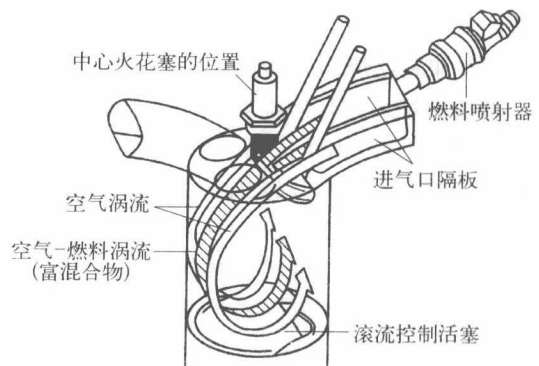


图 1-3 滚流(轴向)分层给气

(1) 采用高压压缩比燃烧室

① 火球高压压缩比燃烧室。这种燃烧室的压缩比为 16, 空燃比可达 26。燃烧室主要位于汽缸盖上凹入的排气门下方, 结构紧凑, 能形成较强的挤气紊流, 其耗油量比分隔式柴油机还好。但是, 采用这种燃烧室必须使用高辛烷值的汽油, 且对缸内积炭比较敏感。

② 卡多 HRCC 燃烧室。这种燃烧室在使用辛烷值为 99 的汽油时, 其压缩比为 13, 经济空燃比为 21.5。这种燃烧室结构紧凑, 火焰传播距离较短, 挤气面积大, 紊流强, 火花塞位于凹坑内。

(2) 采用四气门

高性能轿车的汽油机大多采用四气门结构, 在其上再进一步发展稀薄燃烧。四气门发动机的两个进气道分别通向两个进气门, 一个是平滑的直进气道, 其上装有控制进气的控制阀, 另一个是产生涡流的涡流进气道, 采用切向进气方式。也可以采用在进气道中设置突起或隔板等方式产生涡流, 两进气道之间有通道相连。在控制阀后面装有一只双孔喷油器, 两股油束深深贯穿入两进气道内。在发动机部分负荷工况下, 控制阀关闭直进气道, 进气只通过涡流进气道进入, 高速涡流使喷入的燃料雾化和混合。在发动机高速工况时, 控制阀打开直进气道, 两个进气道同时进气, 可改善高速运转时混合气的形成与燃烧。

(3) 采用可变配气相位机构

采用可变配气相位机构, 可根据发动机转速和负荷的变化调整气门的开闭时刻, 以满足稀薄混合气在不同工况和不同转速下的进、排气效应, 从而保证汽油机在各种工况下都能稳定地工作。

(4) 加装燃烧压力传感器

加装燃烧压力传感器, 精确检测燃烧压力的变动, 然后调节各缸的供油量, 使空燃比接近燃烧界限。另外, 由于提高了压缩比, 汽油机易产生爆震, 加装燃烧压力传感器后, 可使燃烧室内的燃烧状态及时地反馈到 ECM, 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。

(5) 采用稀薄混合气传感器

普通电控汽油机氧传感器的突变空燃比为 14.7。稀薄燃烧系统在排气管中安装了稀薄混合气传感器, 用以取代氧传感器来检测稀薄燃烧界限, 使发动机尽可能地接近稀薄燃烧极限运行。

五、缸内直接喷射技术

GDI 是 Gasoline Direct Injection 的缩写, 意即汽油直接喷射, 其结构见图 1-4。

近年来, 国外各大汽车厂商都在积极研究开发缸内直喷分层稀薄燃烧技术。德国大众公司于 2000 年向市场投放了 FSI 型缸内直喷汽油机, 2001 年标致雪铁龙公司开发了 HPI 缸内直喷系统, 丰田公司则推出了 D-4 型直喷式火花点火发动机等。采用缸内直喷分层稀薄燃烧技术的汽油机, 在中小负荷时, 在压缩行程的后期开始喷油, 通过与燃烧系统的合理配合, 在火花塞附近形成较浓的可燃混合气, 在远离火花塞的区域, 形成稀薄分层混合气。在发动机大负荷及全负荷时, 在早期进气行程中将燃油喷入汽缸, 使燃油有足够的时间与空气混合, 形成完全均质的混合气进行燃烧。另外, 也有采用分段喷射技术

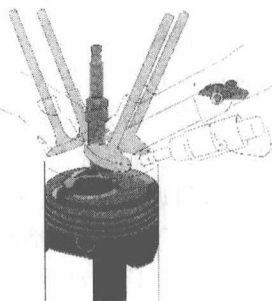


图 1-4 GDI 结构图

分层混合气,即在进气早期开始喷油,使燃油在汽缸中均匀分布,在进气后期再次喷油,最终在火花塞附近形成较浓的可燃混合气,将一个循环的喷油量分作两次喷入汽缸,可以很好地实现混合气的分层。

图 1-5 为 GDI 发动机的系统布置图,图中的控制系统由各种传感器得到所需的实际工况参数,经过控制单元的运算判断后,通过各种驱动机构对喷油器和火花塞等进行实时控制。GDI 发动机的优点是在适当的曲轴转角将汽油直接喷入汽缸中,因此兼有热效率高和升功率大的优点,同时解决了冷启动时 HC 排放量高的问题,发动机的燃油经济性随之改善。采用分层稀薄燃烧技术的 GDI 发动机虽然大幅度地提高了部分负荷下发动机的燃油经济性,但还存在着中、小负荷时 HC 排放较多、 NO_x 排放较高、颗粒排放增加等缺点。

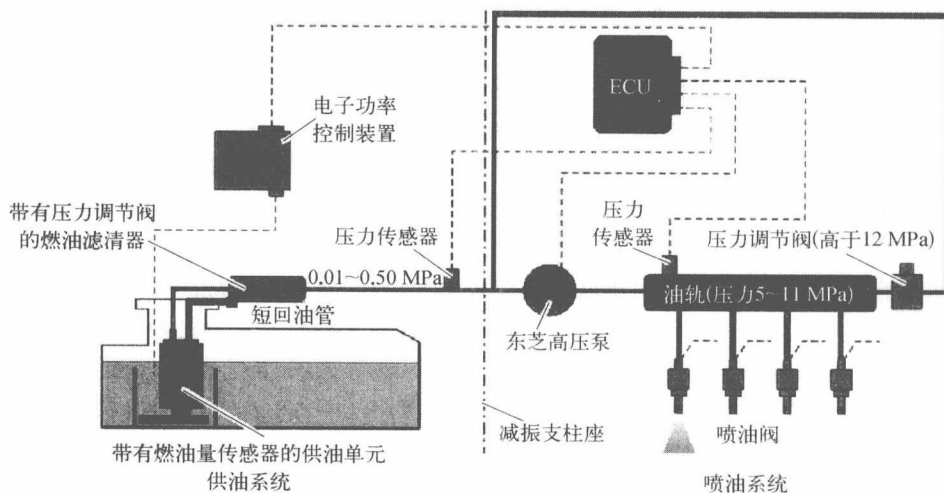


图 1-5 GDI 发动机的系统布置

六、均质混合气压燃技术

1. HCCI 的工作原理

HCCI 的全称是 Homogeneous Charge Compression Ignition, 意即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,都是向汽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,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。而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。在压燃时汽缸内形成多点火核,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. HCCI 的发展

1979 年,日本清洁发动机研究所的 Onishi 等人在二冲程汽油机上发现,在没有火花塞的情况下,发动机一样能够平稳运转,稳定运转的空燃比区域较原机更为宽广,而且具有更好的

稳定性,更低的燃油消耗率和 NO_x 、HC、CO 排放。由光谱分析发现,这种燃烧方式的活性基浓度比传统汽油机高得多,并且存在时间也长于传统汽油机。通过缸内高速纹影图像分析发现,这种燃烧没有明显的火焰前锋面传播,是一种多点同时着火的燃烧方式,他们将这种燃烧方式命名为活性热氛围燃烧,标志着对 HCCI 燃烧的研究正式开始。同年,日本丰田汽车公司的 Noguchi 等人也在二冲程汽油机上实现了 HCCI 燃烧并命名为 TS 燃烧。他们在 $800 \sim 3\,200 \text{ r/min}$ 的转速下和 $11 \sim 22$ 的空燃比范围内成功地实现了非常稳定的 HCCI 燃烧,具有更低的 HC 排放和燃油消耗率。为了更好地理解这种燃烧模式,他们通过分光测试技术成功地测量了燃烧过程中缸内的活性基成分后发现与传统 SI 燃烧不同,HCCI 燃烧中首先出现 CHO 、 HO_2 、 O 等活性基,然后是 HC 、 O_2 和 H ,最后出现 OH 。1983 年,Najt 等人第一次在四冲程汽油机上实现了 HCCI 燃烧。他们通过外部废气再循环和进气加热的方法,在一台单缸四冲程汽油机上实现了不同燃料的 HCCI 燃烧。通过对比不同的压缩比,发现虽然高压压缩比能够在较低的进气温度下实现 HCCI 燃烧,但是燃烧放热率太高。因此压缩比为 7.5 时的燃烧情况好于压缩比为 10 时的燃烧。他们还采用了半经验点火模型和经验放热模型,以实测的汽缸压力曲线为初始条件,考察了发动机运转参数对 HCCI 燃烧模式的影响,提出可以用混合气的化学反应动力学理论解释燃烧过程相对于运转参数变化。他们认为,HCCI 燃烧包括温度低于 950 K 的低温链式反应和温度高于 $1\,000 \text{ K}$ 的高温放热反应。虽然 HCCI 燃烧基本不受发动机转速影响,但是在高转速下,由于低温反应来不及进行,将导致燃烧的失败。Thrning 继续推进了 Najt 等人的试验,在一台四冲程单缸机上靠外部废气再循环和进气加热等手段实现了汽油的 HCCI 燃烧。通过考察不同的压缩比,得出了同 Najt 等人一样的结果,即低压压缩比更适合 HCCI 燃烧。在较低的压缩比下指示燃油消耗率能达到 $180 \sim 220 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,接近于柴油机水平。由于 HCCI 燃烧难于控制,需要进气加热等问题的制约,四冲程 HCCI 发动机一直只停留在基础研究阶段。到了 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初,在环境和能源的双重压力下,HCCI 重新成为人们关注的焦点。在大量开展 HCCI 理论和基础研究的同时,其实用化步伐也明显加快。

3. 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,进行的是预混燃烧模式。它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,它还利用废气再循环控制均质稀混合气。

4. 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,保持了原汽油机升功率高的特点;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,压缩比提高到 17.4,空燃比设计值为 $33 \sim 44$ 。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(图 1-6),其燃油消耗率水平甚至超过直喷柴油机水平($180 \sim 200 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$),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。

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 $1\,800 \text{ K}$ 以下,并且由于它以均质稀薄燃烧混合气方式

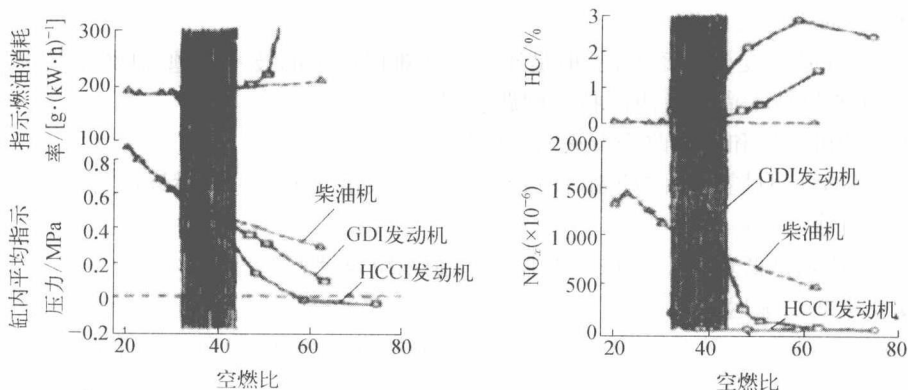


图 1-6 HCCI 发动机、GDI 发动机和柴油机性能对比

工作,有效地抑制了 NO_x 和炭烟的生成,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,则容易出现爆震或失火,发动机的性能变差。

5. 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,但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,这类工作只是定性的与试验取得了一致,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速率,以防爆震的发生,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、爆震、功率等的限制,可操作范围不宽。

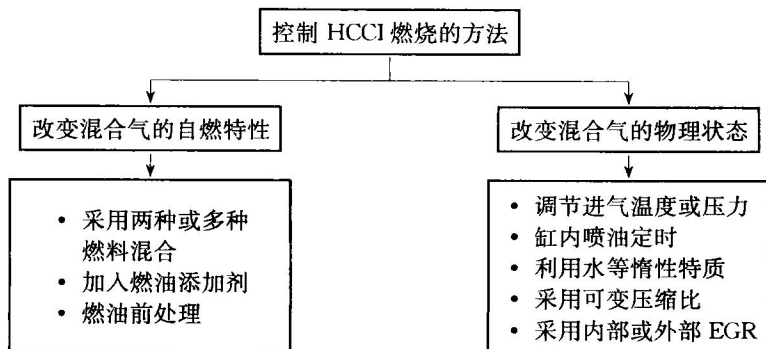


图 1-7 控制燃烧始点的方法