

汽 / 车 / 先 / 进 / 技 / 术 / 译 / 丛

汽油机直喷技术

(德) R. 巴斯怀森 著
宋进桂 李栋 于京诺 王健 吴凯 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车先进技术译丛

汽油机直喷技术

(德)R. 巴斯怀森 著

宋进桂 李 栋 于京诺 王 健 吴 凯 等译



机械工业出版社

缸内直喷点燃式发动机越来越受到重视, 它们的潜力仍待得到进一步开发。提高发动机功率和转矩, 同时进一步降低燃油消耗和排放是汽油缸内直喷发动机未来发展的必然趋势。依目前的观点, 推动汽油缸内直喷技术发展的关键技术将是新的燃油喷射方式和燃烧过程。本书分 16 章, 系统地展现了燃油喷射和燃烧过程的最新发展, 对一些发动机新概念进行了解释和评价, 探讨了汽油缸内直喷技术对发动机系统和部件的影响, 阐述了材料和工作液必须满足的要求。书末的展望部分对未来的缸内直喷点燃式发动机是否会取得与柴油机相同的水平进行了讨论。

本书适合于汽车研究与开发工程技术人员阅读, 并可作为车辆工程及载运工具运用工程等学科专业的研究生或本科生教材。

Gasoline Engine with Direct Injection

Richard Van Basshuysen

Original ISBN: 978-3-8348-0670-3

Originally published in the German language by Vieweg + Teubner, 65189 Wiesbaden, Germany.

Vieweg + Teubner is a part of Springer Science + Business Media © Vieweg + Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009.

Authorized Simplified Chinese Edition is published by CMP. All Rights Reserved.

本书中文简体版由德国 Vieweg + Teubner 出版社授权机械工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2011-0493

图书在版编目(CIP)数据

汽油机直喷技术/(德)巴斯怀森著; 宋进桂等译. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12
(汽车先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-36216-6

I. ①汽… II. ①巴…②宋… III. ①汽车—汽油机—燃油喷射系统—研究 IV. ①U464. 136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 216015 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: 徐 巍 责任编辑: 徐 巍 何士娟 版式设计: 霍永明

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21 印张 · 18 插页 · 408 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-36216-6

定价: 99.00 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

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

译者的话

汽油缸内直喷技术早年应用于飞机发动机,近年来,一些国外大的汽车制造商纷纷加大资金投入来开发缸内直喷汽油机,并已有产品成功地应用于车辆上。在日本,三菱公司(Mitsubishi)的汽油缸内直喷 GDI 发动机于 1996 年在日本、1997 年在欧洲投放市场;丰田公司(Toyota)的 D4 分层充气发动机也于 1996 年投放日本市场;日产公司(Nissan)于 1998 年将分层充气缸内直喷 V6 汽油机投放市场。在欧洲,2000 年,PSA 集团将 2.0 HPI(High Pressure Direct Injection)缸内直喷发动机安装到标致 406 和雪铁龙 C5 轿车上;同年,大众汽车(VW)公司 FSI 发动机也投放市场。2002 年,奥迪公司(Audi)的 FSI 缸内直喷发动机以及戴姆勒·克莱斯勒公司(Daimler Chrysler)装有 M271 DE 缸内直喷发动机的 C 级轿车先后投放市场。上述缸内直喷汽油机均采用空气导向型或壁面导向型分层充气模式。2006 年,戴姆勒·克莱斯勒公司将采用喷注导向型分层充气的第二代缸内直喷汽油机投放市场。这种采用压电式喷油器的 M272 DE 35 型 3.5L V6 发动机用于 CLS 350 CGI 型汽车上。另外,2000 年问世的雷诺公司(Renault)的 2.0L 6V IDE 发动机、2003 年问世的宝马(BMW)760 轿车采用的 V12 发动机和欧宝汽车(Opel)的 2.2L DIRECT ECOTEC 缸内直喷发动机采用了均质充气模式。到目前为止,市场上的增压缸内直喷发动机,如大众和奥迪汽车的 Turbo FSI 发动机、2006 年 9 月以后的宝马 3 系列轿车发动机也都采用了均质混合概念。

在国内,一汽、奇瑞、吉利、华晨和长安等大型汽车制造企业也在与高等院校联合开发缸内直喷汽油机。可以说,缸内直喷技术是汽油机技术的一次重大变革,是内燃机发展史上的一个重要里程碑。

然而,汽油缸内直喷的实现,特别是分层工作模式的实现,在技术上有较大的难度,燃烧控制和排放控制非常复杂,汽油缸内直喷技术的潜力尚不能得到充分发挥。人们必须对汽油缸内直喷技术做进一步研究。来自德国博世、奥迪、马勒等著名企业和卡尔斯鲁厄工业大学等公司和大学的著名专家和科学家,通过本书为读者展现了燃油喷射和燃烧过程的最新发展,对一些发动机新概念(如缩小尺寸)进行了解释和评价,分析了汽油缸内直喷技术对排放、噪声、点火系统、活塞、气门等的影响,阐述了汽油缸内直喷技术对燃料、润滑剂的要求,并对未来的发展趋势进行了讨论。书中介绍的研究成果对汽油缸内直喷技术的研究与开发很有借鉴价值。本书图文并茂,有彩色插图 100 余幅。

本书适合于从事汽车发动机与整车开发的工程师、零部件与系统开发的工程

师，以及从事内燃机设计、研究与开发的工程技术人员阅读，并可作为车辆工程、动力机械及工程、能源与动力工程以及载运工具运用工程等学科专业的研究生或本科生教材。

参加本书翻译的主要有宋进桂、李栋、于京诺、王健、吴凯、杨占鹏、陈燕、左为民等。另外参与部分翻译工作的有郑浩栋、朱云鹏、李广全、李辉、李玖印、潘宁、谢文增等。由于译者水平有限，难免出现不妥或错误之处，敬请业内专家及读者朋友批评指正。

译者

2011年8月

前 言

实现机动化，才有可能去远方旅行，才有可能探索新大陆，甚至是征服宇宙。长久以来，这一直是人类的梦想。早年，人类利用马匹来克服时间与空间的限制，利用船只征服地球上的海洋和最遥远的国度。后来，人类发明了轮子，运输机动化从此开始。

有关运输机动化的争论一直也没有停止过，毕竟，运输机动化使这个星球上的我们在生活的方方面面都发生了从未有过的变革。后果确实非常严重。重要的生态系统已经失衡，许多地方环境的适应性迄今没有恢复。除了对大自然的不加限制的开发利用，导致地球天然资源的枯竭之外，环境的破坏——如扩大陆地占有以及土地、水和空气的污染——也威胁着地球上的所有生命。

我们工程师应该对这种开发的福与祸负责，更应该对目前的这种状况负责，因而也就有义务恢复已经被破坏的环境平衡。本书的目的就是要为此做出一点贡献。我们怎样才能减少汽车所造成的资源消耗和污染物排放呢？在我们的这个过于嘈杂的世界上，可以采用什么样的降噪措施呢？本书涉及这样一些问题，还涉及有关前景最好的汽油机开发的其他问题和技术要点。书末对替代动力装置进行了比较。

本书专门为产品开发人员、负责汽车制造和配件供应的开发人员以及相关的服务提供商所写。本书是一本用于科学研究、学术研究和教学的重要指南。

本书编者十分感谢参与写作的合作作者们。作为合作作者的代表——Ulrich Spicher 教授和他的助手们承担了本书的主要写作任务。本书所有的作者及其所在的公司和大学均在“作者单位及任务分工”中有说明。他们不仅严格履行约定，以精益求精的职业能力展现了最新的知识，而且对未来发展反复地做出了预测。书中采用近 400 幅插图，并且为了方便读者进一步研读，列出了 427 种最新参考文献。

感谢博世公司 (Robert Bosch GmbH)，没有它的专业支持和提供资料，本书的写作不可能完成。

最后，我还要感谢 Vieweg 出版社，特别是编辑团队，在最短的时间内做出了出色的工作，使得该书能以极高的质量问世。

我期待着本书受到读者的欢迎。

Richard van Basshuysen 博士
(德国工程师学会成员)

作者兼责任编辑简介



Richard van Basshuysen 博士, VDA(德国汽车工程师协会)成员, 1932 年生于莱茵河畔的 Bingen。他在完成了汽车技师学徒的学习之后, 从 1953 ~ 1955 年, 在位于 Wolfenbüttel 的 Fachhochschule Braunschweig(一所应用学科的大学)学习, 取得机械工程师资格。1982 年获得大学工程学位。从 1955 ~ 1965 年, 他在 Bochum 的 Aral AG 公司任研究助理。

1965 年, 他加盟 NSU 公司, 并担任负责发动机与变速器开发(其中包括转子发动机的开发)的试验部经理。在此期间, 他与其他人共同负责 Prinz 4、NSU 1000、NSU 1200、RO 80 和 K70 型汽车的开发工作, 并被任命为负责汽车试验的副经理。1969 年, NSU 公司被现在的奥迪公司接管。因此他成了舒适级汽车的开发经理和发动机/变速器开发经理。与此同时, 作为行政人员的代表, 他成为奥迪公司监察委员会的成员。他最重要的研究成果是最早的排放可控涡轮增压直喷乘用车柴油机。这项研究是他顶着巨大的压力(甚至是来自 VW 内部的压力)完成的。由于该机要求油耗比其前辈(预燃室式发动机)降低 20%, 并产生更高的功率和转矩, 从而确立了该发动机在全世界的地位。在欧洲, 该发动机的市场份额在 1989 年约为 12%, 到 2007 年提高到 50%。

在他风风火火的职业生涯之后, Richard van Basshuysen 博士于 1992 年创办了一家工程咨询公司。该公司目前仍在运行中。目前, 他担任几份国际知名学术杂志, 如《汽车技术杂志》(ATZ)和《发动机技术杂志》(MTZ)的主编, 并担任若干国际上汽车制造商和工程服务提供商的顾问和若干科技图书(其中许多已经翻译成英文出版)的作者和编辑。2006 年后, 他还与 Fred Schaefer 教授一起担任互联网门户网站 www.motorlexikon.de 的主编兼合作作者。此外, 他还是各种各样的顾问团、咨询委员会, 如德国工程师协会(VDI)、澳大利亚汽车工程学会(ÖVK)的成员。他的学术著作(独立或合著)有 60 余部。自 1991 年以来, 他写的社论发表在 ATZ 和 MTZ 上。2001 年, Richard van Basshuysen 因为开发新型直喷柴油机而获得 Ernst Blicke Priz 2000 奖的高额奖金, 并因其“在直喷乘用车柴油机的开发中的杰出表现及在担任 ATZ/MTZ 主编和 VDI 汽车与交通系统技术学会顾问委员会成员期间的杰出贡献”, 而被授予 VDI 的“BENZ-DAIMLER-MAY-BACH”荣誉勋章。2004 年, 因 Richard van Basshuysen 一生的卓越贡献, Magdeburg 大学授予他名誉博士。

目 录

译者的话

前言

作者兼责任编辑简介

第 1 章 引言	1
第 2 章 汽油缸内直喷发展史	3
参考文献	22
第 3 章 混合气形成与燃烧过程	25
3.1 混合气形成的基础理论	27
3.1.1 燃料准备	28
3.1.2 缸内流动特性	31
3.2 均质混合缸内直喷	35
3.3 分层混合缸内直喷	42
3.3.1 壁面导向型燃烧过程	45
3.3.2 空气导向型燃烧过程	48
3.3.3 喷注导向型燃烧过程	49
3.4 点火与燃烧	58
3.5 均质压燃汽油缸内直喷技术	68
3.5.1 热力学基础	68
3.5.2 汽油自燃概念与控制策略	71
3.5.3 缸内直喷的干预选择	74
3.5.4 降低油耗和污染物排放的潜力	75
3.5.5 声学特性	76
3.6 组合式柴油机/汽油机燃烧过程	82
参考文献	83
第 4 章 喷射系统概论	89
4.1 低压空气辅助缸内直喷	90
4.2 高压共轨缸内直喷	92
4.2.1 高压燃油泵	94
4.2.2 油轨	98
4.2.3 高压喷油器与喷嘴	98

4.2.4 喷油策略	107
参考文献	109
第5章 功率与转矩	111
参考文献	117
第6章 增压技术	119
6.1 机械增压	121
6.2 废气涡轮增压	126
6.3 汽油机废气涡轮增压器与缸内直喷的最佳配合	130
6.4 用电动增压器实现高压增压	133
6.5 复合增压	134
参考文献	137
第7章 燃油消耗	139
参考文献	150
第8章 缩小尺寸与压低转速	151
8.1 缩小尺寸	151
8.2 压低转速	153
参考文献	154
第9章 废气排放与污染物控制	155
9.1 发动机工作中污染物的形成	155
9.2 法律规定	158
9.3 降低污染物的措施	166
参考文献	175
第10章 噪声排放	177
10.1 法规要求	177
10.2 燃烧噪声	179
10.2.1 均质 GDI 与分层 GDI 之间的比较	179
10.2.2 涡流和滚流对燃烧激振的影响	180
10.2.3 废气再循环率对燃烧噪声的影响	181
10.2.4 工作模式转变的影响	182
10.2.5 分层工作模式中怠速工况的优化	182
10.2.6 GDI 缩小尺寸概念的声学问题	183
10.2.7 燃油质量对噪声的影响	184
10.3 机械噪声	185
10.3.1 爆燃控制系统的优化	186
10.3.2 高压燃油分配系统的影响	187

参考文献	188
第 11 章 汽油缸内直喷对发动机其他系统的影响	191
11.1 点火系统	191
11.1.1 火花点火系统	191
11.1.2 激光点火	199
11.1.3 微波点火	203
11.2 活塞	204
11.2.1 材料	205
11.2.2 制造工艺	207
11.2.3 设计与零件强度	208
11.3 气门、气门座圈和气门导管	211
11.3.1 气门和气门座圈	211
11.3.2 缸内直喷汽油机的进气门积炭问题	213
11.3.3 气门导管	214
11.3.4 轻量化气门	214
11.4 现代汽油机的进气系统	215
11.4.1 进气系统热力学	215
11.4.2 自然吸气式发动机的进气歧管	217
11.4.3 增压发动机的进气歧管	219
11.4.4 缸内直喷增压汽油机的进气歧管	220
11.5 曲轴箱通风	221
11.6 空气循环阀	225
11.6.1 技术描述	225
11.6.2 设计原理与边界条件	226
11.6.3 热力学潜力	227
11.7 炭罐清污	232
11.8 车内辅助加热系统	235
11.8.1 引言	235
11.8.2 辅助加热系统	235
11.8.3 PTC 电辅助加热器(空气侧)	236
11.8.4 冷却液电加热器	238
11.8.5 燃油辅助加热器	239
11.8.6 黏液加热器	240
11.8.7 废气辅助加热器	241
11.8.8 小结和未来预测	242

参考文献	242
第 12 章 油电混合动力驱动系统中的汽油缸内直喷	247
12.1 引言	247
12.2 乘用车混合动力装置	247
参考文献	254
第 13 章 燃料与润滑剂	257
13.1 汽油燃料	257
13.1.1 引言	257
13.1.2 一般原则	257
13.1.3 汽油燃料成分与汽油燃料混合物	259
13.1.4 对汽油燃料的要求所具有的实际意义	260
13.1.5 燃油对废气排放的影响	265
13.1.6 汽油的生物成分: 生物乙醇和乙基叔丁基醚 (ETBE)	266
13.2 汽油机润滑剂	267
13.2.1 润滑剂类型	267
13.2.2 发动机油的功能	268
13.2.3 对发动机油的要求	268
13.2.4 发动机油的成分	268
13.2.5 粘度	269
13.2.6 基础油	270
13.2.7 添加剂	271
13.2.8 发动机油的使用性能	273
13.2.9 乘用车制造商的燃油和润滑剂规范	276
13.2.10 未来展望	278
参考文献	278
第 14 章 发动机概念	279
14.1 批量概念	279
14.1.1 历史	279
14.1.2 分层充气概念: 壁面导向型和空气导向型燃烧过程	281
14.1.3 均质混合概念	286
14.1.4 增压概念	288
14.1.5 分层充气概念: 喷注导向型燃烧过程	293
14.2 汽车运动概念及其对系列开发的促进	296
14.2.1 引言	296
14.2.2 汽车运动中的汽油缸内直喷	297

14. 2. 3	用于勒芒 24 小时耐力赛的 V8 缸内直喷双涡轮增压发动机	297
14. 2. 4	在缸内直喷和涡轮增压的 2.0L 批量生产发动机上的应用	299
14. 2. 5	赛车缸内直喷发动机与批量生产的缸内直喷发动机的比较	300
14. 2. 6	小结与未来展望	301
14. 3	二冲程缸内直喷汽油机	302
14. 3. 1	引言	302
14. 3. 2	历史	302
14. 3. 3	批量概念	306
14. 3. 4	应用与未来展望	309
	参考文献	314
第 15 章	美国、欧洲和日本的汽油缸内直喷技术	317
15. 1	引言	317
15. 2	美国、欧洲和日本市场	317
15. 3	美国、欧洲和日本缸内直喷技术的未来展望	319
第 16 章	未来展望	321
	参考文献	324

第 1 章 引 言

由于油耗、输出转矩和输出功率的原因，仅仅用了 15 年的时间，直喷式柴油机已经或多或少地取代了间接喷射式柴油机。汽油机也将要发生如此变化。虽然过去的近一个世纪以来，为了改善发动机的输出功率，工程师们一直在为研究汽油缸内直喷而努力工作，但是只有在最近十年左右，三菱公司在欧洲推出了缸内直喷汽油机之后，一些技术才得到实际应用，从而使汽油缸内直喷这种新概念获得巨大成功。然而，与缸内直喷柴油机相比，缸内直喷汽油机尚待解决的难题要复杂得多，因此，缸内直喷汽油机打入市场仍有很长的路要走。不过，在输出功率和转矩方面所能取得的效益以及在降低燃油消耗和污染物排放方面所存在的巨大潜力，使得对汽油缸内直喷的研究成为内燃机研发人员的必修课程。

从更进一步的考察可知，目前正在进行的旨在获取不同结果的开发研究有三种情况：

- 1) 均质混合汽油缸内直喷。
- 2) 分层混合汽油缸内直喷。
- 3) 均质混合和可控自燃、充量压缩点火的汽油缸内直喷。

开发实现不同程度的均质混合汽油缸内直喷比较容易。由于现有的废气处理概念可以得以保留，不需要专用燃料，这样，这种技术就能适用于全世界。该技术的焦点是如何对输出功率、转矩和动态特性进行优化。受最初应用于赛车而获取巨大成功的影响，这种概念特别适合于运动型轿车和其他大功率轿车。

分层混合汽油缸内直喷的开发主要是为了降低燃油消耗和 CO_2 排放。除了三菱公司的壁面导向概念之外，在欧洲，还将空气导向型燃烧过程引入到发动机批量生产中。然而，尤其在高负荷和高转速范围，这些燃烧过程所期望的燃料消耗方面的优点并没有实现。因此，就这些概念而言，理所当然地存在某些疑问。例如，由于在超理论空燃比范围内进行排气处理，成本会增加，而且需要无硫燃料，所以，在世界范围实现这些概念会存在成本过高和过于复杂的问题。考虑到这些方面，现在研究者的注意力又转向了喷注导向型燃烧过程。尽管喷注导向型燃烧过程对混合气形成过程提出了更高的要求，但是可以期望燃油消耗的降低最高可达 20%。这个降低幅度与柴油机转变成缸内直喷所实现的油耗降低幅度相同，而实际上只能使直喷柴油机的实测燃油消耗降低 10%~15%。

在研究领域，对于均质混合和充量压缩点火的可控自燃缸内直喷燃烧过程已经进行了长期研究。这些燃烧过程也被称为 HCCI (Homogeneous Charge Compres-

sion Ignition,均质压燃)和CAI(Controlled Auto-Ignition,可控自燃),正在被开发为用于汽油机和柴油机的新型燃烧过程。由于这些概念在降低排放和提高燃烧效率方面潜力巨大,所以人们对此给予厚望,另外还为这些燃烧过程而专门开发了燃料。因此,一个长久以来的梦想将会变成现实:一种将汽油机和柴油机两种发动机的优点加以组合的最优的新型燃烧过程,将会在现有的燃烧过程基础上实现。

第2章 汽油缸内直喷发展史

从技术演变的角度看，蒸汽机是内燃机的前辈。在蒸汽机中，燃烧气体的热能通过热交换器传给工质。蒸汽机是一种外部燃烧的热机。而在内燃机中，燃料的化学能在发动机内转变成机械功。在内燃机的开发过程中，真正的难题(除了工作气体点火之外)就是混合气的形成，即燃料与空气的计量、准备与混合。

1860年，Jean Joseph Etienne 所设计的照明煤气发动机可以被看做是内燃机最早的成功发明。该发动机没有混合气压缩但却装备有电火花点火系统。1867年，Nikolaus August Otto(尼古拉斯·奥古斯特·奥托)获得了最早的以他的名字命名的常压煤气发动机的专利。以这种发动机为基础，奥托又于1867年在道依茨(Deutz)公司发明了一种四冲程发动机。该机的特征(四冲程、空气/煤气混合气的预压缩)已经由 Beau de Rochas 在1862年做过介绍。1886年，由 Carl Benz(卡尔·本茨)和 Gottlieb Daimler(戈特利布·戴姆勒)以及由 Wilhelm Maybach(威廉·迈巴赫)研制的最早的四冲程汽油机汽车诞生，所以这种四冲程发动机成为重要的发展里程碑。在本茨和戴姆勒所设计的这种最早的汽车发动机上，混合气的形成发生在单独开发的浮子式化油器内。借助于一个球阀，通过一个保持一定能级的气柱实现进气。在两种化油器概念中，通过供热使燃油蒸发得到加强。

1893年，迈巴赫喷雾化油器的发明为解决汽油机混合气的形成迈出了重要的一步。这一被认为是数十年来的重大突破的混合气形成概念，即将一根燃油喷管插入横断面积缩小的进气管中。横断面积缩小会使空气流速加快，从而将燃油吸入，并使从喷管口流出的燃油雾化。该化油器也借助于一个球阀，将喷管内的油位保持恒定。

汽油喷射的发展历史几乎与化油器的发展历史一样长。早在1877年，Nikolaus August Otto 就获得了将燃油直接喷入燃烧室的专利^[1]。

1884年，Hallesche Maschinenfabric 首次生产了燃油喷射固定式发动机^[2]。图2-1给出了由 Johannes Spiel 所设计的这种发动机的一个气缸和燃油喷射系统的断面图。燃油从汽油箱1经过吸气阀2进入喷油泵的泵腔。利用一根与凸轮轴5相连的气门提升杠杆，使喷油泵的柱塞3与进气门4一起被操纵。在油泵柱塞3进入压缩行程期间，前面吸入的汽油推开压力阀7进入进气道。喷油泵的压力阀的作用就像外张型喷嘴一样，压力阀与密封锥面之间能够形成密封。当燃油推开压力阀喷出时，就形成一个锥形油束。利用一个手动调节螺栓来改变喷油泵柱塞行程，就能调节喷油量。在这台发动机上有意识地产生充气分层是特别值得关

注的。为了确保空气/燃油混合气直接到达点火器的附近，将进气道通到燃烧室。进气道口朝向气缸盖。这种结构将使大量的残余废气存在于该区域内，使点火困难。就像 Nikolaus August Otto 所研制的发动机一样，要借助于由凸轮轴控制的火焰点火器，才能点燃混合气。

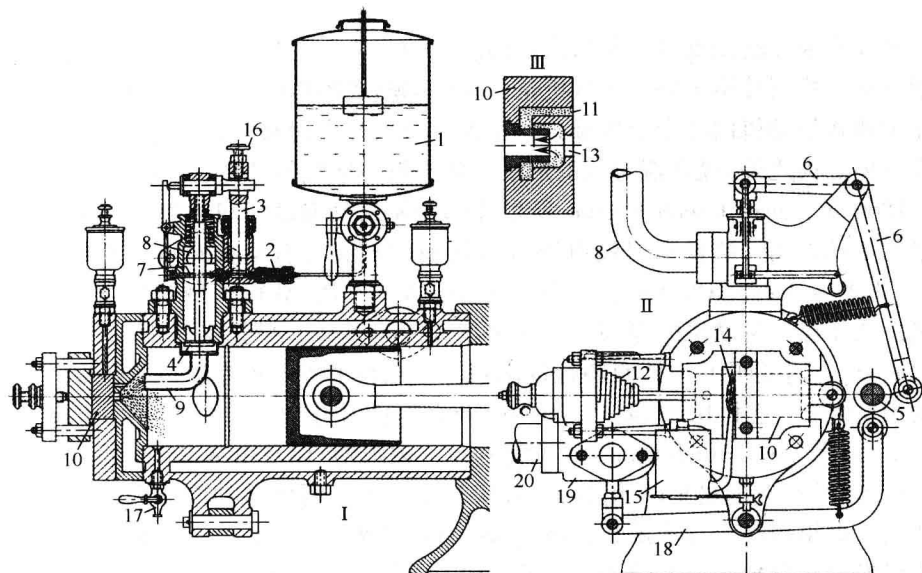


图 2-1 Johannes Spiel 设计的将燃油喷射进气歧管的汽油机^[2]

1—汽油箱 2—吸气阀 3—喷油泵柱塞 4—机械控制的混合气进气门 5—凸轮轴 6—直角形杠杆
7—喷油泵压力阀 8—供气口 9—混合气供给歧管 10—点火滑阀 11—火焰传播空间 12—点火滑阀运动弹簧 13—滑阀中的点火孔 14—点火火焰 15—酒精容器 16—手动调节螺钉(用于启动时增加汽油量) 17—放泄塞 18—排气门控制杆 19—排气门 20—排气管

正如在文献[2]和汽车发动机发展的文章中所陈述的那样，1884年，威廉·迈巴赫还利用“化油器泵”替代“蒸发装置”进行燃油计量和汽化的试验。这种汽油泵送装置以草图的形式保留下来，图上标明的泵油柱塞直径为2mm，行程为7mm，吸油管和压力管均由一个平滑块来控制。

根据文献[3]，进气歧管喷射系统发展的重要事件还包括：1898年或1901年，道依茨公司将进气歧管汽油喷射的固定发动机投入批量生产；1906年，进气歧管喷射系统开始成功用于Grade二冲程航空发动机及Antoinette和Wright四冲程航空发动机；Bosch于1912年，Pallas于1914年，开始进行进气歧管喷射系统的试验。

有关燃油缸内直喷在汽油机上应用的初期试验于1898年开始。这种由Haselwander研究的缸内直喷系统^[4]基于一种开式燃烧室概念，而且这种发动机(图

2-2)以石油为能源。燃油喷射发生在活塞将要到达上止点时,这样蒸发的浓混合气就会到达火花塞。利用一个阶梯形活塞来产生压缩期间所需要的喷射压力。然而,由于缺乏技术上的可行性使这些初始试验最终没有获得成功。

就作者所知,1916年,在Junkers,实用的汽油缸内直喷首次得到实现^[5,6]。然而,在这些发展的起始阶段,Junkers在1914年所进行的开发工作,在变化的航空与发动机工业中只能算作是一些尝试性研究,其目的是开发一种用于飞机推进的既经济又不容易起火的柴油机。作为一种发动机概念,一种具有两根机械连接的曲轴的水平对置式二冲程发动机被选中。后来,根据这种概念开发的航空柴油机在Junkers的Jumo205和207系列飞机上进行了验证。尽管Junkers深信他们在这些发动机的柴油喷射方面所具备的能力,但是在1915

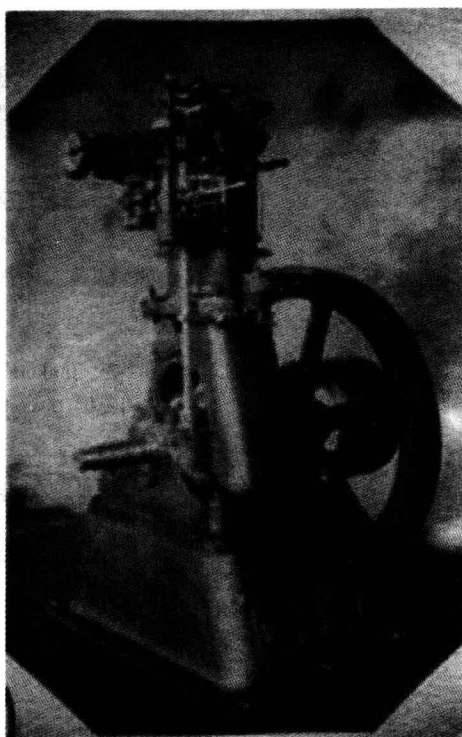


图 2-2 Haselwander 发动机(1898)

年使用这些最早的四冲程试验发动机(型号:MO.3, $V_h = 7.238L$)所进行的试验却很不成功。由于在柴油喷射系统方面所存在的技术问题,以及在飞机发动机上使用汽油和苯的战时供应等因素,所有后来在Junkers进行的飞机发动机试验都要以汽油为燃料,直到1918年第一次世界大战结束。除了相应的单缸发动机之外,一台新设计的6缸发动机(型号:MO.8, $V_h = 14.137L$)成为汽油机试验的基础,1915年开始用这种发动机进行台架试验。试验证明,最初备受宠爱的混合气扫气是不可控制的,曲轴箱回火会对发动机产生致命的破坏。因此,Junkers决定将燃料直接喷入气缸。这项开发工作由Otto Marder负责管理。由于动力传送存在各种各样的问题以及MO.8发动机过大的质量/功率比(比质量),在1916年换用新设计的更大排量的6缸发动机(型号:Fo.2, $V_h = 17.105L$)和相应的单缸试验发动机,继续进行开发工作。图2-3所示为采用水平布置的这种发动机的照片。图2-4所示的该机断面图展示了喷嘴和两个火花塞的位置。沿切向布置的扫气孔和排气孔会导致燃烧气体形成涡流,从而促进了混合气的形成。

除了活塞(已被公认的弱点)外,发动机负荷控制已被公认为关键问题。在不知疲倦的Otto Marder的引导下,通过漫长乏味的设计和试验工作之后,喷油泵