



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版



柴油机

Fuel Equipment and
Control System of Diesel Engines

供油装置及控制系统

[俄] 格列霍夫 (Л. В. Грехов) 著
[俄] 伊万申克 (Н. А. Иващенко)
[俄] 马尔科夫 (В. А. Марков)

孙柏刚 赵建辉 柴国英 译
王尚勇 审校

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



孙柏刚，男，1969年2月出生，博士，副教授，博士生导师，北京理工大学热能与动力工程系主任。1994年硕士毕业于北京理工大学，同年留校工作，1998—1999年在鲍曼莫斯科国立技术大学做访问学者，跟随伊万申克院士从事内燃机性能与结构联合仿真分析工作。现主要从事火花点火发动机研究开发及高压燃油喷射系统设计技术研究开发，目前承担科技部国际合作专项项目1项及多项其他科研项目，近年来发表论著50余篇。



赵建辉，男，1981年12月出生，黑龙江哈尔滨市人，博士，副教授，2009年硕士毕业于北京理工大学，同年进入鲍曼莫斯科国立技术大学攻读副博士学位。跟随格列霍夫教授攻读学位期间，主要从事高压燃油系统设计技术及仿真分析软件研究开发。2013年获得副博士学位回国工作于哈尔滨工程大学，现主要从事船用柴油机供油及控制系统设计与开发工作，近年来发表论著20余篇。



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

柴油机

Fuel Equipment and
Control System of Diesel Engines
供油装置及控制系统

[俄] 格列霍夫 (Л. В. Грехов)

[俄] 伊万申克 (Н. А. Иващенко) 著

[俄] 马尔科夫 (В. А. Марков)

孙柏刚 赵建辉 柴国英 译

王尚勇 审校

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

内 容 简 介

本教科书全面分析了现代柴油机的技术指标及对供油过程参数的需求, 详尽展现了供油系统的新结构与工作原理, 分析了各自的优缺点, 详尽讲述了俄罗斯国内外柴油机供油与控制系统的设计方法, 指出柴油机经济性、排放指标与供油系统结构设计及特性的相关性, 本书还提出了供油与电控系统的研究方法与现代设计方法。本书的另外一个目标是补充更新与电控供油系统相关的教学与科研文献。本书是依据作者多年在鲍曼莫斯科国立技术大学讲授供油装置、控制系统等多门课程的基础上撰写而成的。

本书可作为高等学校本科生、硕士生、博士生的教学用书, 适于内燃机、汽车与汽车经济、环境保护等相关专业使用, 也可供运输与农业机械柴油机等相关企业、研究机构工程技术人员参考使用。

本书可能会对国内外柴油机及供油装置新技术感兴趣的读者有益, 也会对柴油机的操作人员有益。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

柴油机供油装置及控制系统/ (俄罗斯) 格列霍夫, (俄罗斯) 伊万申克, (俄罗斯) 马尔科夫著; 孙柏刚, 赵建辉, 柴国英译. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 5640 - 9102 - 6

I. ①柴… II. ①格…②伊… ③马… ④孙… ⑤赵… ⑥柴… III. ①柴油机 - 燃油系统
②柴油机 - 控制系统 IV. ①TK423

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 079266 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2014 - 4871 号

Copyright© Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков.

All Rights Reserved.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
82562903 (教材售后服务热线)
68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 27.75

字 数 / 644 千字

版 次 / 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 89.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

随着国民经济的迅速发展，中国快速步入了汽车生产和消费大国行列，各大城市的汽车保有量增加较快，带来了比较严重的环境污染与大量的石油资源消耗，高效柴油机的推广应用是实现汽车行业节能减排战略的重要组成部分。柴油机的热效率比汽油机高30%~40%，使用柴油机可显著降低燃油消耗和二氧化碳排放，欧洲汽车柴油机的使用比例已超过50%。供油装置及控制系统则是柴油机的“心脏”，但长期以来柴油机的“心脏病”问题还在制约着我国柴油机行业的发展，目前国内主要供油系统厂商还没有能力完成高压大流量燃油喷射系统的自主设计，我国柴油机行业仍然处于不利的国际竞争地位。

鲍曼莫斯科国立技术大学长期从事柴油机及高压燃油喷射系统的研究，在整机系统设计、流体动力学、油气两相流、燃烧匹配及有害污染物排放研究等方面形成了系统的设计理论和方法，特别是近年来，不断总结基础燃油喷射系统基础理论成果和工程实践经验，编写了燃油喷射系统及发动机性能优化设计软件，得到了国际同行的认可与应用。《柴油机供油装置及控制系统》是依据作者多年在鲍曼莫斯科国立技术大学讲授供油装置、控制系统等多门课程的基础上撰写而成的。该书全面分析了现代柴油机的技术指标及对供油过程参数的需求，详尽展现了供油系统的新结构与工作原理，分析了各自的优缺点，详尽讲述了柴油机供油与控制系统的设计方法，指出柴油机经济性、排放指标与供油系统结构设计及特性的相关性，该书还提出了供油与电控系统的研究方法与现代设计方法，这些方面的内容也是国内柴油机及供油系统相关从业人员迫切需要了解和掌握的重要理论基础。

本书三位译者目睹国内燃油系统设计技术方面的差距，本身又都是发动机行业的从业者，深感责任之重大。赵建辉2009年赴俄攻读学位以来，一直与国内保持着非常紧密的联系，本书俄文原著第一作者格列霍夫教授也恰好就是赵建辉的导师。2012年，北京理工大学邀请格列霍夫教授来校讲学，同期也举办了第一届高压燃油系统与节能减排研讨会，格列霍夫教授第一次向国人展示了他三

十多年的研究成果。这些成果也深深吸引了我们，遂与格列霍夫教授沟通翻译出版其著作的事项，2013年8月获得该俄文原著三位作者的正式授权，使得我们有机会将该研究成果推荐给国内同行。

北京理工大学孙柏刚教授与中国北方发动机研究所柴国英研究员、哈尔滨工程大学赵建辉副教授联合承担了本书的翻译工作。其中：孙柏刚翻译了第一章，第二、六章部分章节；赵建辉翻译了第三、四、七章及第六章部分章节；柴国英翻译了第五章，第二章部分章节。翻译出版过程中得到了科技部国际合作项目（2013DFR70170）、国防科工局供油研究项目（DEDPO501，0503）的支持！由于译者的专业领域偏差，加之时间仓促，使得有些专业术语的翻译可能不够贴切，不当之处，请读者予以指正，烦请反馈修改意见与建议。如是，我们将不胜感激！

北京理工大学出版社在本译著的出版过程中给予了大力支持，特别是在全书的图片加工、公式编辑方面给各位译者节省了大量的时间，使三位译者更专注于翻译文字的斟酌。在此对出版社方面的工作表示深深的谢意！

运输工具及农业机械运用的有效性在很大程度上取决于其所使用的内燃机的特性。近年来，柴油机在运输领域得到了极大的推广，绝大多数的载重卡车、公共汽车及农机装备使用了柴油机。在轻型车上柴油机的应用也不断扩展，按照 Bosch 公司数据，西欧装备柴油机的轻型车市场份额在 2000 年就已达到 32.5%，2005 年达到 44%~48%（目前这一数字已接近 55%~60%，译者注）。

发动机制造业的现代发展趋势是显著改善燃油经济性和排放性指标，相比其他动力装置，使用高压压缩比、较大过量空气系数的柴油机更符合这一发展趋势。但如果没有供油过程参数及供油特性的优化，不能依据发动机运行工况及使用条件合理调整这些参数，柴油机的这种原理上的优势也无法实现。因此，无论是单独装备供油装置，还是与供油控制系统整体装备，都必须允许有针对性地调整所需要的供油特性及供油参数，才能满足柴油机运行工况对燃油流动、混合与燃烧过程的要求。

这样一来，电控燃油喷射系统就成为发动机的基本系统之一。电控燃油喷射系统的结构特征及其性能参数决定了柴油机的重要工作指标，如最大功率与扭矩、燃油经济性、污染物排放、动态特性与启动特性等，还有燃烧过程及发动机零件热负荷。因此，在研制和完善电控燃油喷射系统的过程中，必然产生结构形式选择及基本性能参数与特性的计算问题；况且车用柴油机具有宽广的工作转速与负荷范围，这种燃油系统性能的计算不但需要考虑柴油机的稳态工况，同样也需要兼顾柴油机的过渡工况（非稳态工况）。在本书中不但关注柴油机供油系统的基本型式，也涉及供油系统的结构型式变种，还引入了电控供油系统计算方法和基本特性优化算法，揭示了发动机经济性、生态环境指标与供油系统特性的相关性。应用本书的基本方法，可以有目的地完成未来供油装置构建、结构设计选型、供油装置参数优化及在发动机中应用有效性的评估工作。

在 1996—1998 年期间，主要的汽车制造企业已先后掌握了新一代柴油机技术，这些柴油机基本上都装备了喷射压力达到

135 ~ 200 MPa的供油系统。这就允许更全面地优化发动机所有特征工况的工作过程，达到降低有害污染物排放、噪声、燃油消耗率的目的，也能够改善发动机的启动特性及运输工具的动态性能指标。本书所涉及的材料较好地反映了柴油机供油与控制系统的当代技术水平。

本书专门研究运输及汽车拖拉机柴油机的供油装置及控制系统的设计与改进问题。新一代柴油机供油与电控系统相关的科技文献的相对不足，越发显示出本书的必要性。莫斯科国立技术大学在20世纪50、70和80年代相继出版了系列教科书，这些书中所阐述的理论和方法得到了有效的应用和验证，有些还获得过国家奖励，这些方法也是本书的重要基础。其中较新的教科书《内燃机：往复式活塞式发动机系统》也是由鲍曼莫斯科国立技术大学的专家编写的，出版于1985年，而在本教科书撰写中特别关注供油与电控系统的最新结构和已有计算方法的不足。

除阐述典型的供油装置及控制系统的结构和设计外，在本书中引入了最新的供油系统，应用作者的计算方法进行了各种供油装置的比较分析。也对提高燃油经济性、降低柴油机有害排放物的相关研究方法和工具进行了研究，其目的是进一步完善柴油机的供油装置及控制系统。

本书是依据作者多年在鲍曼莫斯科国立技术大学讲授供油装置、控制系统等多门课程的基础上撰写而成的，也引入了作者多年来为俄罗斯柴油机及供油装置生产企业及科研机构所做的科研、设计、试制方面的宝贵资料。

本书第一章部分章节和第二至四章由格列霍夫教授撰写，第一章部分章节、序言及结论由伊万申克教授撰写，第一章部分章节和第五至七章由马尔科夫教授撰写。作者对库烈绍夫副教授准备1.4节表示诚挚的谢意，同时也感谢卡拉特涅夫副博士在本书第一版材料制作方面的宝贵建议。作者对R. Bosch公司莫斯科代表处提供本书的原始材料表示感谢！也对本书完成中付出艰苦细致劳动的阿绍金、米金腾科及出版社等其他合作者表示深深的谢意！

第一章 柴油机供油装置及控制系统设计的一般问题	1
1.1 发动机制造业的当前任务	1
1.1.1 燃油经济性	2
1.1.2 排气污染物	3
1.1.3 发动机动态性能	9
1.1.4 柴油机燃料	10
1.2 对供油系统的要求及其分类	12
1.3 供油装置的发展方向 and 前景	14
1.3.1 工作过程和供油过程的优化	14
1.3.2 提高喷射压力	15
1.3.3 供油装置的电子控制	17
1.3.4 喷油规律的控制	17
1.3.5 喷油提前角的控制	19
1.3.6 共轨系统的研发	19
1.3.7 代用燃料供油系统	20
1.3.8 实际使用条件下供油装置功能的保证	20
1.3.9 喷射稳定性和最小循环供油量的保证	20
1.3.10 燃油喷射的快速完成	20
1.3.11 柴油机供油装置的发展前景	21
1.4 柴油机工作过程与供油系统的优化设计	23
1.4.1 工作过程建模与优化的计算软件	23
1.4.2 工作过程的优化实例	25
第二章 直接作用式供油装置	28
2.1 柴油机燃油系统综述	28
2.1.1 滤清器	29
2.1.2 输油泵	31
2.2 单体和整体式喷油泵	34
2.2.1 柱塞泵	34
2.2.2 单体泵	48
2.3 分配式高压油泵	56
2.3.1 Bosch 公司 VE 型喷油泵	57
2.3.2 Bosch 公司 VP-44 型转子泵	61
2.3.3 EPIC 系统	65
2.3.4 Stanadyne 公司的 PCF 和 DS 型转子泵	70
2.3.5 分配式喷油泵总的特点	72
2.4 柴油机喷油器	72
2.4.1 喷油器分类	74



2.4.2	喷油嘴	81
2.4.3	喷油器制造材料和工艺说明	88
2.5	泵喷嘴	90
2.5.1	不同厂家的泵喷嘴	90
2.5.2	电控泵喷嘴	92
2.5.3	快速响应控制阀	97
2.5.4	关于泵喷嘴的一些想法	97
2.6	供油装置的设计准备与试验	98
2.6.1	喷油泵基本参数的确定	99
2.6.2	喷油器基本参数的确定	101
2.6.3	高压油管尺寸的确定	103
2.6.4	几何喷油提前角的设置	103
2.6.5	喷油泵的测试	105
2.6.6	喷油器的测试	107
第三章	蓄压式供油系统	110
3.1	共轨式供油系统的组成和装置	110
3.2	共轨式供油系统的高压油泵	115
3.2.1	共轨式供油系统的高压油泵的设计	117
3.2.2	高压油泵的设计要求	124
3.3	共轨式供油系统的电控喷油器	126
3.3.1	电液式喷油器的结构	126
3.3.2	电液式喷油器的工作分析,改进的途径和设计	132
3.4	共轨式供油系统中供油的控制	141
3.4.1	喷油规律	143
3.4.2	对控制系统的要求	147
3.5	可选择的其他电控供油系统	148
3.5.1	带有压力放大器的蓄压式供油装置	148
3.5.2	带有压电驱动的系统	152
3.5.3	带有电动马达的供油装置	152
3.5.4	液力冲击式供油装置	153
3.5.5	无发动机燃油试验台	154
第四章	供油过程的计算——作为供油装置设计的工具	156
4.1	供油过程的物理现象	156
4.1.1	燃油的压缩性	156
4.1.2	燃油压缩性对供油的影响	157
4.1.3	供油装置零件的易变形性	159
4.1.4	高压油泵传动的弹性	159
4.1.5	燃油的密度	159
4.1.6	高压油管中的声速和压力波动现象	160

4.1.7 高压油路中的不连续性	161
4.1.8 黏性效应	163
4.1.9 供油过程的非等温性	166
4.2 单相燃油的可压缩性	166
4.3 供油过程中燃油的两相状态	169
4.3.1 两相混合物的简单模型	171
4.4 达朗贝尔(D'Alembert)方法计算油管内的燃油流动	173
4.4.1 概述	173
4.4.2 计算方法的实质	173
4.4.3 流动摩擦的考虑	174
4.4.4 油管的分段性	174
4.4.5 气相形成的计算	175
4.4.6 关于“压力波动轨迹”的概念	176
4.5 有限差分解决油管内流动的任务	177
4.5.1 特征线法	178
4.5.2 粒子轨迹法	178
4.5.3 任意非连续离散的方法	179
4.6 非定常条件下的油管阻力	187
4.6.1 非定常边界层的结构	188
4.6.2 关于流动特性和层流向紊流转变条件的问题	189
4.6.3 流动摩擦的特点	190
4.6.4 高压油管中的阻力准则关系式	191
4.6.5 摩擦理论模型	192
4.7 边界条件下的流量方程和平衡方程	193
4.7.1 平衡方程的传统描述	193
4.7.2 质量平衡方程	194
4.7.3 液体流动的流量方程	194
4.8 零件运动、面积与泄漏的边界条件方程	197
4.8.1 在边界平衡方程中有效横截面积的计算	197
4.8.2 边界条件平衡方程内的泄漏计算	198
4.8.3 边界条件内的运动方程	200
4.9 油泵单元凸轮传动的计算	201
4.9.1 摆动式挺柱的运动学	201
4.9.2 圆弧凸轮	202
4.9.3 可变曲率的凸轮	204
4.9.4 偏置的凸轮机构	205
4.10 高压油泵传动的动力学	206
4.10.1 作为弹性系统的传动数学模型	206
4.10.2 传动动力学的分析	209



4.11	供油过程中的非等温性	213
4.11.1	非等温性的描述方程	214
4.11.2	燃油和管壁的非正常换热的计算	215
4.11.3	油腔中的热效应	216
4.11.4	非等温性对供油的影响	217
4.12	计算稳定性和收敛性的组织求解	218
4.12.1	边界条件方程的积分稳定性问题	218
4.12.2	组织计算和计算的收敛性	221
4.13	供油装置的优化	222
4.13.1	影响因素的数值实验	222
4.13.2	最优化	223
4.13.3	寻找最优解的技巧	224
第五章	柴油机控制系统设计的总任务	227
5.1	柴油机的工况、燃油经济性和排放	227
5.2	研制经济型和生态型柴油机控制系统的可行性	235
5.3	柴油机供油过程控制的任务	251
5.3.1	循环供油量	251
5.3.2	喷油提前角	259
5.3.3	供油规律	266
5.3.4	最高喷射压力	272
5.4	非传统燃油供给过程控制的必要性	276
5.5	控制系统结构原理和分类	291
第六章	柴油机供油控制系统	300
6.1	柴油机供油控制系统的分类	300
6.2	分开式供油系装置的控制系统的	302
6.2.1	多柱塞直列式高压油泵	302
6.2.2	分配泵	311
6.2.3	单体泵	314
6.3	非分开式供油装置的控制系统的	320
6.4	共轨供油系统的控制系统的	325
6.5	非传统燃料供油装置的控制系统的	328
6.6	从组织控制供油过程角度评价不同类型的供油系统的	345
第七章	柴油机自动调节与控制系统的数学模型及其研究方法	353
7.1	面向柴油机的调节和控制	353
7.2	面向调节和控制的柴油机数学模型	354
7.2.1	曲轴转速自动调节系统	354
7.2.2	废气涡轮增压柴油机的自动控制系统	358

7.3 柴油机调速器的数学模型	364
7.4 调节和控制系统元件连接的基本类型	374
7.5 自动调节和控制系统的数学模型	375
7.6 自动调节和控制系统及其元件的动态特性	377
7.7 典型动态环节及其特性	386
7.7.1 比例环节	387
7.7.2 积分环节	389
7.7.3 微分环节	395
7.8 自动调节和控制系统的稳定性	398
7.9 调节过程的性能指标	407
7.10 非线性自动调节系统	411
7.10.1 系统线性部分微分方程和传递函数的组成	413
7.10.2 非线性元件和系统的谐波线性化方程的组成	414
7.10.3 自动振荡参数的确定	415
7.10.4 自动振荡稳定性的评价	418
结束语	422
参考文献	423

柴油机供油装置及控制系统设计的一般问题

1.1 发动机制造业的当前任务

柴油机很早就成为动力装置总功率在 200~80 000 kW 范围内的基本动力形式。全球汽车总数中柴油机的市场份额不断增长,如图 1.1 所示。在最近 5 年(从 1996 年至 2001 年),涡流室式柴油机更多地被开式燃烧室柴油机所取代。造成这种变化的原因,除了世界各国都采用更严格排放法规的因素外,也与新一代供油装置、自动控制系统、自动调节系统的应用密切相关。

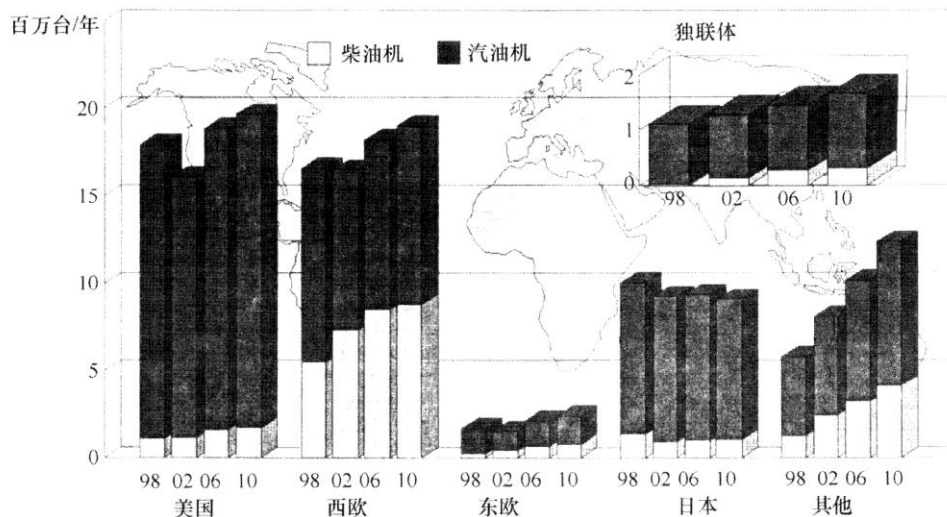


图 1.1 世界主要区域汽油车、柴油车 1998—2010 年的生产量

在当前条件下,对柴油机的工作指标提出了越来越严格的要求,而且要求这些指标作为一个整体来考虑。在这些指标当中,燃油经济性、排放污染物指标被认为是最重要的。随着世界石油储量的不断消耗、石油产品价格的不断上涨以及大气中 CO₂ 的增加,必然要求提



高发动机的燃油经济性。柴油机燃油经济性的主要评价指标是有效燃油消耗率，包括外特性、标定功率、标定转矩三种工况的最低燃油消耗率。国外最好的高速柴油机的最低燃油消耗率可以达到 $b_e = 190 \sim 192 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，俄罗斯国内柴油机可达到 $b_e = 210 \sim 230 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，如图 1.2 所示。

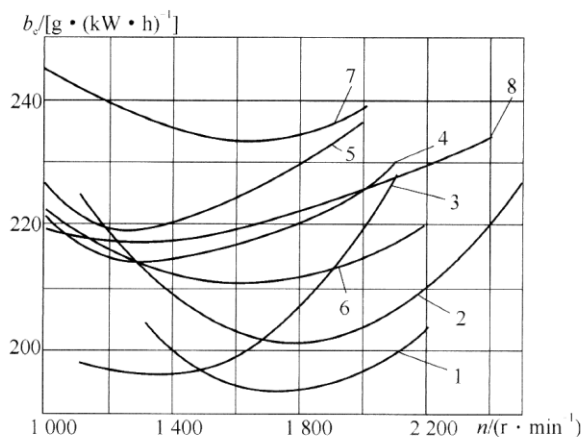


图 1.2 几种国内外柴油机外特性有效燃油消耗率曲线

1—6076H (John Deere, USA); 2—6BTA (Cummins, USA); 3—N14-460 (Cummins, USA);
4—TL11 (Leyland, UK); 5—КамАЗ 7406; 6—СМД-31; 7—Д-120; 8—Д-245

1.1.1 燃油经济性

车用柴油机工作在较宽的工况范围，在低转速、部分负荷工况时柴油机的燃油经济性指标一般都很差，如图 1.3 所示。因此，在柴油机外特性下获得最佳燃油经济性，还不能保证在实际使用条件下获得最低的燃料消耗。

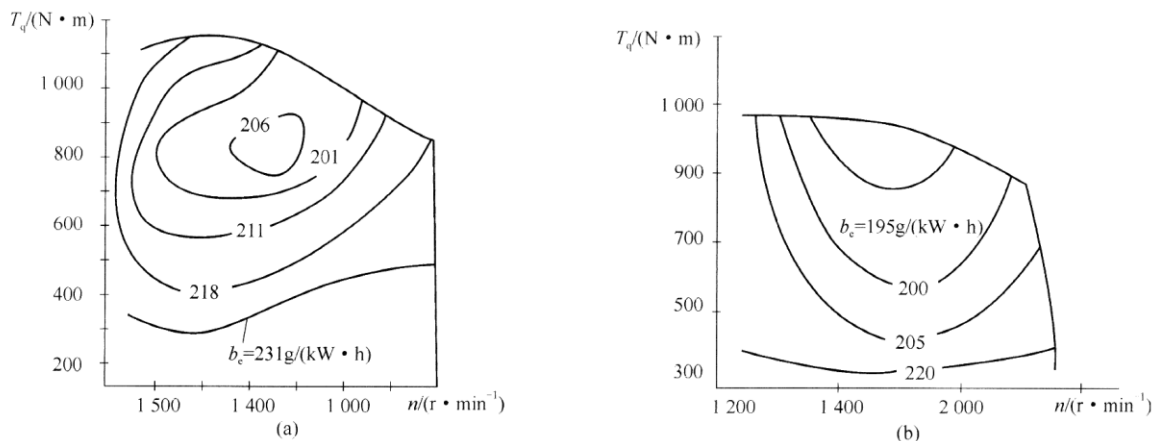


图 1.3 车用柴油机万有特性

(a) КамАЗ-7406; (b) 6076H (John Deere, USA)

T_q —发动机转矩; b_e —有效燃油消耗率

既然用标定功率、最大转矩下的有效燃油消耗率来评价柴油机的燃油经济性是不全面的，就必须采用一个加权平均的燃油消耗评价方法，如式 (1.1) 所示。

$$b_{e\text{cp}} = \sum_{i=1}^k (G_{Ti} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^k (P_{ei} \cdot K_i) \quad (1.1)$$

式中, G_{Ti} 是第 i 工况下的小时耗油量; P_{ei} 是该工况下的发动机功率; K_i 是反映每一工况下发动机运行时间的系数; k 是工况数。这样一来, 为了全面改善柴油机的燃油经济性, 就不能只关注标定工况下降低燃油消耗, 还必须考虑车用柴油机的其他实际使用工况。

1.1.2 排气污染物

发动机另外一个重要工作指标就是排气污染物的毒性。当前降低有害排放物还有另外两个重要意义, 一是扩展柴油机的使用范围, 二是增加使用柴油机为动力装置的汽车、公共汽车等其他机械的总数量。内燃机排气污染在大气污染中占有较大的比重, 在大城市中机动车排放的有害物质是主要污染源之一。机动车排放占总排放量的比例在美国可达 60.6%, 英国 33.5%, 法国 32%, 俄罗斯 43%, 在莫斯科部分地区高达 85%。因此, 除改善柴油机燃油经济性指标外, 降低排气污染物毒性也是非常严峻的问题。

柴油机的尾气排放是多种组分的混合物, 既包括完全燃烧产物二氧化碳 (CO_2) 和水 (H_2O), 也包括不完全燃烧产物, 如一氧化碳 (CO)、燃料碳氢 (HC)、醛 (RCHO)、碳烟 (C), 还有未参与燃烧的氧气 (O_2)、氮气 (N_2), 排气中也含有氮氧化物 (NO_x)、燃料中含硫导致的硫的氧化物 (主要为 SO_2)。除了上述这些气态污染物外, 柴油机排气中还有固体颗粒物, 其主要成分是碳烟。柴油机燃烧会产生大约 250 种组分产物, 其中的一部分是无毒的, 柴油机排放中的有毒部分大约占柴油机排气总量的 0.1%~1%。这些有害排放中, 占总重量 80%~95% 的有害排放物是如下五种组分: NO_x 、 CO 、 HC 、 RCHO 和 SO_2 , 如表 1.1 所示。而排放法规限制的主要污染物是氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、碳氢 (HC) 和碳烟 (C) 或颗粒物 (PM)。

表 1.1 某些俄罗斯国产柴油机排气的主要成分组成

排气中的组分	浓度范围	柴油机全负荷工况的排气有害成分	
		浓度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	单位排放量/ $[\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$
氮气 N_2	74%~78%	—	—
氧气 O_2	2%~18%	—	—
水蒸气 H_2O	0.5%~9.0%	15~100	—
二氧化碳 CO_2	1%~12%	40~240	—
氮氧化物 NO_x	0.004%~0.5%	1~8	10~30
其中:			
一氧化氮 NO	0.004%~0.5%	1.0~4.5	6~18
二氧化氮 NO_2	0.0001%~0.013%	0.1~0.8	0.5~2.0
一氧化碳 CO	0.005%~0.4%	0.25~2.5	1.5~12.0
碳氢化合物 HC	0.009%~0.3%	0.25~2.0	1.5~8.0
碳烟	0.01~1.1 g/m^3	0.05~0.5	0.25~2.0
二氧化硫 SO_2	0.0018%~0.02%	0.1~0.5	0.4~2.5
三氧化硫 SO_3	$(0.4~6) \times 10^{-4}\%$	—	—
醛 RCHO	0.0001%~0.002%	1.0~10	—

柴油机排气中的有害成分不取决于柴油机的类型、尺寸及结构的特殊性。

氮氧化物 (NO_x) 在总的有害排放中质量占比 30%~80%，当量毒性占比 60%~95%。柴油机排放的氮氧化物 (NO_x) 中 95%~98% 为一氧化氮 (NO)、2%~5% 为二氧化氮 (NO_2)， NO_2 的毒性要比 NO 高 6 倍， NO 是不稳定的，标准条件下 NO 氧化成 NO_2 需要 0.5~1 h，甚至到 100 h（这主要取决于其在空气中的浓度）。氮氧化物的成因在于燃烧室高温使得空气中的氮气发生氧化，最剧烈的氮氧化物生成是在燃烧的第一阶段，直至达到缸内最高燃烧温度的时刻，一般在曲轴转角 $360^\circ\sim 380^\circ$ 之间 (360° 为燃烧上死点)。

一氧化碳 (CO ，也称为煤气) 在大气条件下只有很少的数量，而在内燃机排气中，它的浓度可能会非常高，在汽油机中这一数值会达到 12%。柴油机中 CO 与汽油机不同，排气中的 CO 浓度较低，一般不超过 0.4%~0.5%。与 CO_2 相比， CO 更不稳定，它在大气中的存在时间为 2~42 个月。 CO 是燃料中的碳与空气中的氧发生化学反应的中间产物。在柴油机燃烧室中 CO 的主要成因是可燃区内燃料分配的不均匀，燃烧室局部存在较低过量空气系数的空间，可以观察到燃料的不完全燃烧。另外一个 CO 的形成原因是燃烧室高温区域导致的 CO_2 的分解反应， CO_2 会分解为 CO 和 O_2 。

柴油机排气中轻质的气态碳氢 (HC) 主要是烷烃和烯烃，烷烃主要是甲烷 (CH_4)、乙烷 (C_2H_6)、丙烷 (C_3H_8)、丁烷 (C_4H_{10})，烯烃主要是乙烯 (C_2H_4)、丙烯 (C_3H_6)、丁烯 (C_4H_8)。在汽油机排气中，甲烷占未燃碳氢总量的 14%~58%，在柴油机中只有 2%~6%，其他形式的碳氢排放就更少。柴油机碳氢排放可能的形成条件有三：一是火焰前锋及火焰中心部分温度下降，二是在燃烧室壁面上存在燃料油膜，三是由于燃油系统中存在二次喷射。柴油机 HC 产生的主要原因之一是燃烧室的壁面激冷效应，在燃料燃烧的过程中，火焰会向壁面方向发展，由于壁面导热，使得燃烧中形成的烃基在冷壁面上复合而产生 HC 。柴油机燃烧室的近壁激冷层厚度为 0.005~0.3 mm，该层中残留有燃料碳氢颗粒。柴油机 HC 产生的另外一个原因是燃烧室中存在低过量空气系数区域，存在未参与燃烧的燃料碳氢。

固体颗粒物也是柴油机排气中主要有毒成分之一。这些颗粒物质是采用专门的过滤器捕捉到的，其中包括可溶性成分及非可溶性成分，可溶性成分含有未燃烧的燃料颗粒和机油，非可溶成分主要有碳烟、硫酸盐（燃料中含硫）、金属的氧化物（燃料和机油中的添加剂）。固体颗粒物的多少很大程度上依赖于发动机的机油烧蚀消耗。碳烟是柴油机颗粒排放的主要成分，占据颗粒物排放的 95%~98%。

碳烟颗粒具有多孔形状，一般尺寸范围 0.1~100 μm ，大多数在 0.2~1.0 μm 。由于柴油机排气中碳烟的存在会导致透光度的损失，因而呈现出黑色的烟雾。排气的透光密度取决于碳烟颗粒的数量和尺寸，当排气中碳烟含量超过 0.1 g/m^3 时即为可见烟度。

碳烟的形成机理中存在一系列连续性的过程：燃料的受热分解、火焰中活性碳氢颗粒的生成、碳核的增长、碳核的凝聚和氧化。因此，排气中的碳烟是由碳烟的形成和氧化两个过程决定的，碳烟形成首先与过量空气系数有关，也与混合气形成、燃料特性、燃烧温度和燃烧时间有关。柴油机过渡工况时碳烟会增加（与增压发动机中废气涡轮系统空气供应的惯性相关），也会在低速大负荷工况增加，主要是该工况下的较低的增压压力、较差的燃油喷雾质量所致。

碳烟的毒性不在于其含有碳元素，而在于凝聚在碳粒上的多环芳香烃，在柴油机排气中

可以发现 20 多种不同的多环芳香烃, 苯核是它们的主要支撑结构, 苯核由连成环状的 6 个碳原子构成, 带有三个单键、三个双键, 一些芳香族化合物除了具有苯核结构外, 还带有一个或几个侧链。柴油机排气中的碳氢分子通常有 2、3、4 个环状结构, 包含 12~20 个碳原子, 其中最危险的是苯蒽芘 ($C_{20}H_{12}$), 是一种强烈的致癌物。这些碳氢化合物中的任何一种都是燃料在转化过程中带来的: 在燃烧室中由于热分解, 重组分燃料蒸发不足而凝聚在碳烟颗粒上。

发动机中的其他有害成分还有醛 (RCHO) 及二氧化硫 (SO_2), 醛的生成主要是因为燃烧室中的焰前反应, 特别是低温燃料氧化过程。此类反应具有特殊性且醛在后续燃烧过程中会被完全燃烧, 因此最大浓度醛的生成一般在发动机的启动工况及小负荷工况。醛类排放中最显著的是甲醛 (HCHO) 和丙烯醛 (CH_2CHCHO)。柴油机燃烧室中二氧化硫的产生主要是因为燃料中含有硫 (S) 和硫的化合物 (硫化氢 H_2S , 硫醇 RSH 及其他硫化物), 在高温及氧气充足条件下, 硫被氧化生成 SO_2 和 SO_3 。

以上所关注的柴油机有害排放物成分均反映出其对人类健康的严重影响, 对农作物及动物也有不良的影响, 因而应对柴油机排气加以限制。

世界各国采用的排放法规中, 对有害排放物 (NO_x 、CO、HC、PM) 均设置了许可的单位质量排放限值。在俄罗斯, 除了较早生效的法规 OCT 37.001.234-81, OCT 37.001.054-86 外, 也采用了欧洲车用柴油机排放法规, 这些法规限制的各种污染物限值如表 1.2、表 1.3 所示, 也包括柴油机排气烟度限值 (法规 ECC OOH R24-03), 如表 1.4 所示。

表 1.2 总质量 3.5 吨以下汽车排放法规限值

法规文件	生效年代		排放物限值/($g \cdot km^{-1}$)				
	欧洲	俄罗斯	CO	HC + NO_x	NO_x	HC	PM
OCT 37.001.054-86	—	1990	13.33	4.94	—	—	—
ЕЭК ООН R83-02 (欧 I)	1993	1999	2.72	0.97	—	—	0.14
ЕЭК ООН R83-03 (欧 II)	1996	2005	1.0	0.7	—	—	0.08
ЕЭК ООН R83 (欧 III)	2000	2006	0.64	0.56	0.5	—	0.05
欧 IV	2005	2008—2010	0.50	0.30	0.25	0.1	0.025

表 1.3 总质量 3.5 吨以上载重汽车柴油机排放法规限值

法规文件	生效年代		排放物限值/($g \cdot km^{-1}$)			
	欧洲	俄罗斯	CO	HC	NO_x	PM
OCT 37.001.234-81	—	1982	9.5	3.4	18.35	—
ЕЭК ООН R49	1989	1995	14.0	3.5	18.0	—
ЕЭК ООН R49-01	1991	1996	11.2	2.4	14.4	—
ЕЭК ООН R49-02A (欧 I)	1993	1998	4.5	1.1	8.0	0.36
ЕЭК ООН R49-02B (欧 II)	1995	2005	4.0	1.1	7.0	0.15
欧 III	1999	2006	2.0	0.6	4.5	0.10
欧 IV	2003—2005	2008—2010	1.5	0.5	3.5	0.08
欧 V	2006—2009	2010—	1.0	0.5	2.0	0.05

表 1.4 柴油机排气烟度限值

法规文件	生效年代	柴油机烟度限值	
		外特性烟度 K_{x_w}	自由加速烟度 K_{x_f}
ГОСТ 17.2.2.01 - 84	1985	$K_{x_w} \leq 60\% \sim 34\%$ (取决于排气流量)	非增压柴油机 $K_{x_f} \leq K_{x_w}, \%$
ЕЭК ООХ R24 - 02	1986	$K_{x_w} \leq 60\% \sim 34\%$ 或 $K_{x_w} \leq 2.26 \sim 1.065 \text{ m}^{-1}$ (取决于排气流量)	增压柴油机 $K_{x_f} \leq 1.1 K_{x_w}, \%$ $K_{x_f} \leq K_{x_w} + 0.5, \text{ m}^{-1}$

每个国家都采用不同的发动机有害排放物和烟度的检测方法。与普通的发动机试验不同，排放检测时设定了标准的柴油机运行工况，使用了专门的检测仪器和检测方法学。在评价发动机有害排放物时使用两种不同的研究方法：发动机定参数定工况试验、指定变化参数下的过渡工况试验。

轻型汽油发动机及车用柴油机按行驶循环完成过渡工况试验，在欧洲和俄罗斯都采用欧洲行驶循环 ECE R 15/05，该循环分成两个部分：首先是城市行驶循环，ECE，如图 1.4 所示，包括 4 个连续的行驶循环，其次是郊区行驶循环，EUDC。首先完成发动机的冷启动及 40 s 的冷态预热，整车试验在轻型转鼓试验台上完成，测试各种污染物排放浓度，再确定各污染物的质量排放，计算污染物的单位行驶里程的质量排放 (g/km)，用此值与表 1.2 排放法规允许的限值做比较。

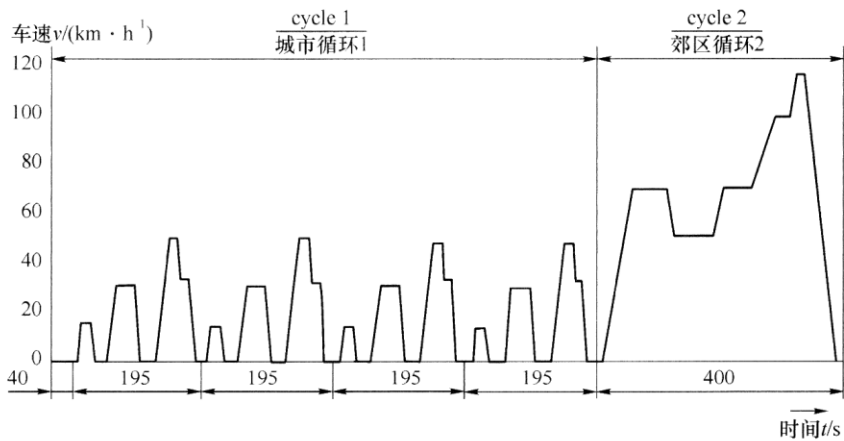


图 1.4 欧洲行驶循环 ECE R15/05

载重车用柴油机也需要按设定的工况完成试验，美国和欧洲都采用的 13 工况法如图 1.5 (a) 所示。此试验循环中包括 13 个预先设定的工况，其中 3 个工况是最低转速的冷态运转，5 个标定转速加载工况 (10%、25%、50%、75%、100% 负荷)，5 个 0.6 倍标定转速的加载工况 (10%、25%、50%、75%、100% 负荷)，0.6 倍标定转速基本对应发动机最大转矩转速。每一个工况都要持续 10 分钟，测量排气污染物浓度的平均值，并测量相应的发动机有效功率。

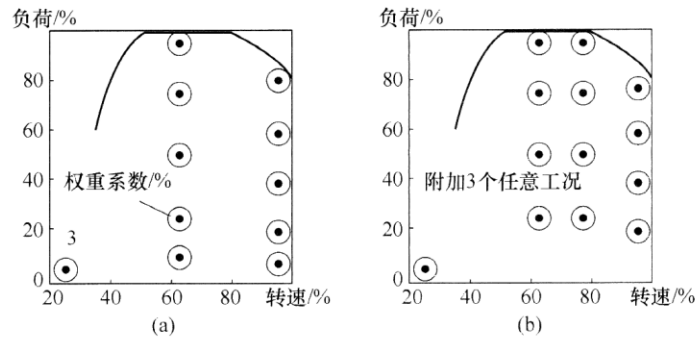


图 1.5 13 工况循环 ECE R49 (a); 16 工况循环 ESC (b)

从 2003 年开始，原 13 工况法 ECE R49 更新到欧洲稳态循环 (European Steady State Cycle, ESC)，ESC 所述的 13 个运行工况，如图 1.5(b)，添加了三个柴油机工作的任意工况，需要在轻型转鼓试验台上完成，这就可以消除专门针对 13 工况所做的蓄意改进，避免其他运行工况排放指标恶化。

在完成欧 III 法规型式认证时，制造商可选择欧洲稳态试验循环 (ESC) 或欧洲瞬态循环 (ETC)。从欧 IV 开始，发动机需要通过上述两种试验，ETC 可模拟车用发动机在城市、郊区及干线公路的实际运行条件，允许在发动机台架上测试各种过渡工况。

为了综合评价 13 工况法的排放污染物，需要针对每一工况测试每种污染物的小时质量排放量，再按每种污染物分别在全部测试循环内加权，需要考虑每一工况实际运行时间下的加权系数，总排放量再除以加权的发动机有效功率，可按下述公式计算每种污染物的单位质量排放量：

$$\begin{cases} e_{\text{NO}_x} = \sum_{i=1}^{13} (E_{\text{NO}_x} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (P_{ei} \cdot K_i) \\ \vdots \\ e_{\text{CO}} = \sum_{i=1}^{13} (E_{\text{CO}} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (P_{ei} \cdot K_i) \\ \vdots \\ e_{\text{HC}} = \sum_{i=1}^{13} (E_{\text{HC}} \cdot K_i) / \sum_{i=1}^{13} (P_{ei} \cdot K_i) \end{cases}$$

得到的每种污染物的单位质量排放数值可与表 1.3 所示的排放法规限值做比较。车用柴油机排气烟度在外特性试验时测量，主要是标定功率工况和最大转矩工况，也需要测量无负荷自由加速烟度，参见表 1.4。对于拖拉机和康拜因联合收割机用柴油机，从标定转速到最大扭矩转速 (0.6 倍标定转速)、从 80% 负荷到全负荷构成的四边形区域中，其烟度偏差不允许超过 40%。值得指出，在欧 I、欧 II、欧 III 中没有烟度指标，而是使用了颗粒物排放指标。不同国家在烟度测量中使用不同的方法和仪器，与光密度相关的主要评价指标是：不透光度、消光系数、波许烟度和浓度，表 1.5 给出了各种测量方法所测数值的相对关系。

表 1.5 柴油机排气烟度的相对关系

不透光度 /%	消光系数 /m ⁻¹	波许烟度 /bosch	浓度 / (g · m ⁻³)
10	0.25	1.10	0.033
12	0.30	1.30	0.042
14	0.35	1.48	0.052
16	0.41	1.67	0.062
18	0.46	1.84	0.071
20	0.52	2.02	0.081
22	0.58	2.18	0.091
24	0.64	2.34	0.101
26	0.70	2.50	0.111
28	0.76	2.64	0.122
30	0.83	2.77	0.133
32	0.90	2.89	0.144
34	0.97	3.02	0.156
36	1.04	3.14	0.168
38	1.11	3.26	0.181
40	1.19	3.37	0.193
42	1.27	3.47	0.206
44	1.35	3.59	0.220
46	1.43	3.70	0.234
48	1.52	3.80	0.248
50	1.61	3.91	0.264
52	1.71	4.01	0.281
54	1.81	4.12	0.299
56	1.91	4.22	0.317
58	2.02	4.32	0.335
60	2.13	4.42	0.355
62	2.25	4.52	0.375
64	2.38	4.62	0.395
66	2.51	4.72	0.416
68	2.65	4.81	0.439
70	2.80	4.91	0.462
72	2.96	5.01	0.489
74	3.13	5.12	0.514
76	3.32	5.23	0.544
78	3.52	5.34	0.575
80	3.74	5.45	0.609
82	3.99	5.57	0.648
84	4.26	5.72	0.691
86	4.57	5.87	0.737
88	4.93	6.04	0.786
90	5.35	6.22	0.844

俄罗斯国产车用柴油机的特性分析表明,大多数的发动机都没有达到欧洲机动车排放污染物法规要求,例如, КамА3 7406 (8ЧН12/12) 排放特性如图 1.6 所示。相应的 NO_x 排放为 $16.8 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, CO 排放为 $8.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, HC 排放为 $3.7 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 这些指标是在保证最佳燃油经济性下得到的,每一种污染物都没有达到欧 II 的限值要求。降低排气污染物的各种技术措施的采用会使得该发动机达到相应的排放限值,如提高燃油喷射压力、发动机特性优化、喷油提前角优化等。

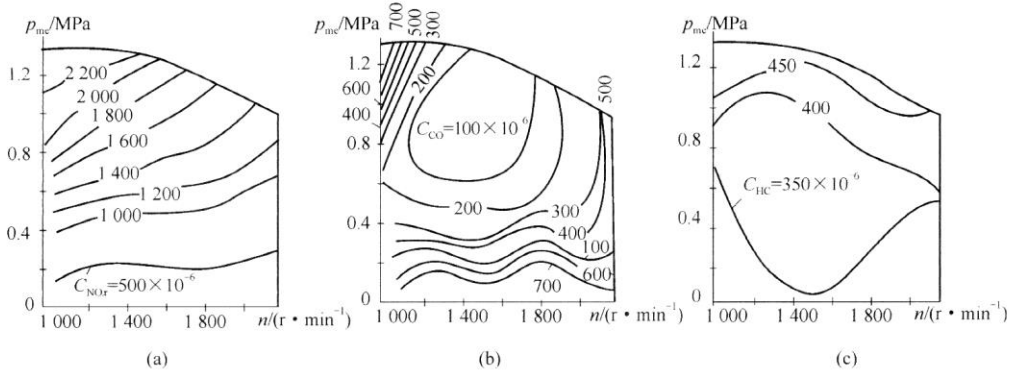


图 1.6 КамА3 (卡马斯) 柴油机排气中 NO_x 、 CO 、 HC 的浓度特性

俄罗斯国产拖拉机发动机同样也不具有较好的排放指标,弗拉基米尔柴油机厂生产的 Д-120 (2ЧН 10.5/12.0) 柴油机的排放特性如图 1.7 所示,该发动机采用涡轮增压及调节机构,匹配到最佳燃油经济性时,其单位质量污染物排放数值为: NO_x 排放为 $17.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, CO 排放为 $10.2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, HC 排放为 $0.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 同样也没有达到欧洲标准的要求。

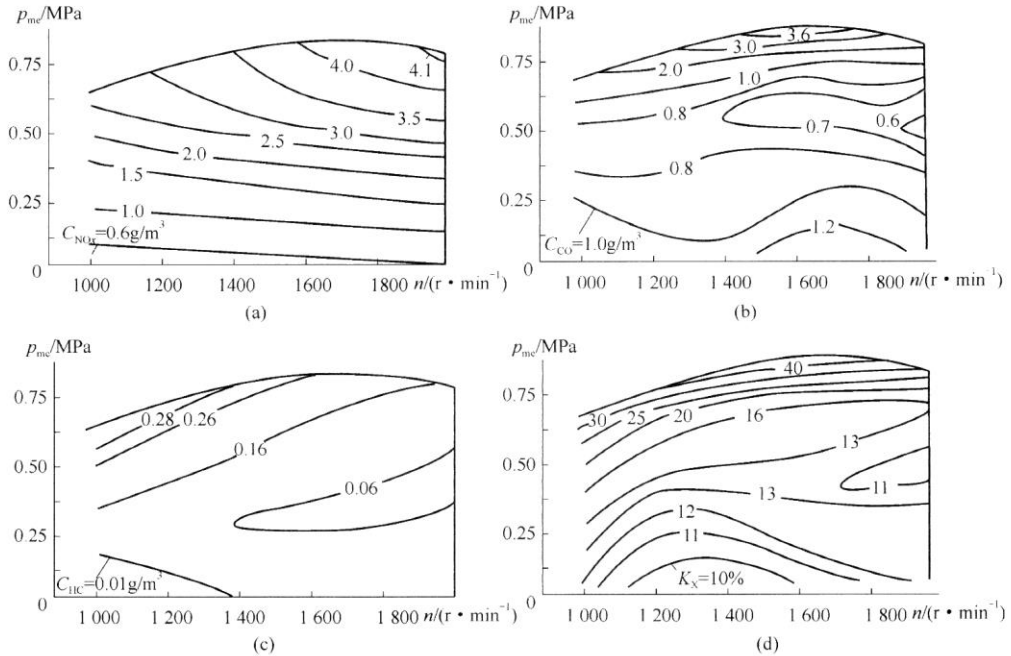


图 1.7 Д-120 柴油机排气中 NO_x 、 CO 、 HC 、烟度的变化特性

1.1.3 发动机动态性能

对于车用和拖拉机用柴油机的比较重要的要求是保证发动机的动态性能,在城市运行的

车用柴油机面临剧烈变化的实际使用条件, 柴油机良好的动力性能可以缩短各种过渡过程的时间, 如加速、减速、加载与减载等, 进而提高运输工具的机动性能。运输工具的动态性能通常用它的加速性来评价, 最经常采用的加速指标是百公里加速时间, 梅赛德斯-奔驰公司 220CDI、270CDI、400CDI 三款车的百公里加速时间分别是 10.7 s、11.4 s、8.1 s, 福特蒙迪欧 (Mondeo) DL 2.0 TDI 和大众帕萨特 1.9 TDI 的百公里加速时间分别为 10.6 s 和 10.2 s。为了缩短百公里加速时间, 必须改善发动机的动态性能。

过渡过程时间和过渡过程中参数 (如转速) 的激增是柴油机动态性能的最有意义的评价指标^[66,139]。过渡过程时间是发动机曲轴转速工况间变化的时间间隔, 确定方法是出现转速扰动的时刻到下一个稳定转速出现的时刻, 转速偏离期间应带来尽可能小的不稳定工作区间。过渡过程转速的激增一般用调速率来表达, 调速率定义为调节转速的最大偏移量除以目标转速的设定值, 用百分数表示。

在俄罗斯国家标准、技术文件等规范文件中, 按照汽车、拖拉机、工业柴油机一般的技术要求, 动态性能的技术指标一般不明文标出, 但在柴油机转速自动调节的俄罗斯国家标准 (ГОСТ 10511-83 及后续修订文件) 中是有这一要求的。过渡过程时间和调速率受发动机自动调节系统的控制精度限制, 柴油机动态性能指标的分级参见表 1.6, 柴油发电机组对动态品质有着最严格的要求, 要求达到表 1.6 中的第一级的控制精度, 因为这些发动机经常处在加载、减载负荷变化条件下工作, 在负荷全部减掉情况下 (从全负荷到怠速), 许可的最长调节时间不超过 2 s, 调速率不允许超过 5%。车用柴油机的调节系统按国家标准规定处在第四级精度级别, 相应的过渡过程时间不超过 10 s, 调速率不超过 15%。在怠速情况下, 允许的转速激增不允许超过怠速转速的 18%。对于车用柴油机来说, 最有特征的动态过程是加速和减速工况, 这些对柴油机的特殊要求也在俄罗斯国家标准中有相应的规定, 柴油机动态特性的这些限值对于自动调节系统、自动控制系统的开发具有非常重要的意义。

表 1.6 柴油机动态品质指标

指标	控制精度分级			
	1	2	3	4
调速率/%	5.0	7.5	10.0	15.0
过渡时间/s	2	3	5	10

1.1.4 柴油机燃料

柴油机使用不同燃料工作时的适应性是发动机制造业的基本任务之一, 也就是保证柴油机具有多种燃料工作能力。车辆及汽车拖拉机不仅要求能在标准柴油下工作, 也能在其他燃料下正常工作。当前应用于内燃机的所有燃料类型按其原材料来源可以分成两个大组: 石油基燃料和非石油基燃料 (也称为代用燃料), 代用燃料又可分为液态燃料和气态燃料。

相对稳定的石油产品加工总量与机动车用油需求的不断增加是当前燃料能源行业面临的特殊矛盾, 这一矛盾将导致未来柴油燃料的供给不足, 随着汽车运输业柴油机化的不断深入, 柴油燃料的供给不足会不断加剧, 这也导致在柴油机中燃用轻质、包含重组分燃料的必要性, 虽然通常这些重组分燃料在柴油生产中不被使用。

石油基燃料是柴油发动机的主要工作燃料, 考虑到车用柴油机工作转速和强化程度较

高,以及复杂的使用条件,通常会限定一个可供使用的燃料清单,相应地对轮式和履带车辆使用的多种燃料发动机也要提出通用的技术条件,例如ГОСТ* 19794-74及后续修订文件。这就使得发动机既能工作在标准柴油燃料下,也可以在煤油下工作;或是车用汽油,同样也可以工作在这些燃料的混合燃料下,在运输工具中采用这种动力装置就可以显著降低燃料的供应要求,增加其续航能力;这也允许更完全地利用原油中所包含的各种馏分,汽油机和柴油机可以使用原油中54%的馏分,而如果使用多种燃料发动机,就允许利用原油中71%的馏分。这也就能够保证发动机在缺少这种,或那种燃料的情况下不间断地机动工作,这对运输用的发动机来说是特别重要的,在汽车技术中使用多种燃料发动机可以使运输工具的储备行程增加25%~30%。

扩展内燃机燃料资源的另外一条途径是在柴油机中使用代用燃料。代用燃料的应用是以石油储备的减少为前提条件的。已探明的全球石油可开采资源大约为1450亿吨,现阶段每年开采大约30亿吨,在保持现有开采水平条件下石油资源够用50年。伴随着石油资源的不断减少,石油价格的上涨也是显而易见的。因此,从内燃机用油经济学的角度看,用代用燃料逐步替代石油产品的亏空是有前景的。

从气态原材料、煤炭和页岩气中提取燃料被认为是最有前景的代用燃料,同样也包括植物燃料。俄罗斯能源市场的特殊性促进了代用燃料的大面积推广,主要由于俄罗斯市场的天然气、煤炭与石油相比巨大的价格差,而传统内燃机燃料基本与世界价格一致。

当前,液化石油气占据车用代用燃料第一的位置,液化石油气的主要成分是丙烷和丁烷,来源于石油加工过程的伴生气体,液化的丙烷和丁烷目前已成为与汽车汽油相竞争的燃料,全球装备该种燃料的汽车接近2000万辆。在俄罗斯,液化石油气也是最普遍的代用燃料,而这种趋势还在不断扩展,1995年至2010年期间,车用液化气需求会达到470万~580万吨。需要指出的是,与传统汽车用汽油相比,液化石油气在俄罗斯具有较低的生产价格。

天然气是另外一种有前景的车用代用燃料。已探明的天然气的储量为136万亿 m^3 ,平均年开采大约2万亿 m^3 ,可以满足全球70年应用。俄罗斯拥有全球45%的天然气资源,俄罗斯天然气工业正在持续发展。1993年,俄罗斯占世界天然气开采量的27%;1995年,俄罗斯开采的天然气总量是5850亿 m^3 ;2010年这一数字增长到7400亿~8600亿 m^3 。

气体凝析液是内燃机燃料现实的储备,它是多种碳氢化合物的混合物,是在开采天然气或伴生石油气时冷凝得到的。这种气体凝析液的价格非常低廉,它的组成成分又非常接近内燃机燃料。因此,它被广泛地用于石油和天然气的开采地,用于内燃机发电装置,既可以单独应用,也可以将其掺混到柴油中。

煤炭是近期就能够应用于内燃机燃料生产的最有可能的原料,世界矿物能源的80%~85%存在于煤炭中,可以确信的世界煤炭资源的储备为16亿吨,其中的4亿吨是可开采的,按现在的煤炭开采水平足够开采200~250年,最有前景的就是用煤合成内燃机燃料。

天然树脂(沥青和重油)也可以作为内燃机燃料生产的原料,以固态或半固态存在于可燃页岩气和油砂中,这种树脂中的轻馏分可用于生产内燃机燃料,与标准柴油的性质非常接近。

醇类和醚类燃料具有在柴油机中实际应用的前景,如甲醇、乙醇、二甲醚,它们可以用任何一种含有碳氢元素的原材料来合成,比如煤炭、页岩气,泥煤或木材。很多国家都已经掌握了工业生产甲醇的方法,生产甲醇的原料来源也是非常广阔的,价格也不高,因此甲醇

* ГОСТ, 俄罗斯国家标准的缩写(类似于中国的GB)。

是具有推广前景的。

植物来源的燃料与前面所讲的其他燃料是不同的，它是可再生的，这些燃料也具有很好的排放指标，是可以完全生物降解的，所有这些因素都促进了其在柴油机上的应用，预计到2010年，俄罗斯生物燃料的需求将会达到480万吨油当量，或占内燃机用油的2%~3%。

应用代用燃料不只是为了解决石油燃料的替代问题，在某些情况下，也希望改善柴油机的经济性指标和排放指标。在柴油机中使用非传统燃料必然会产生供油过程、混合气形成过程、着火过程和燃烧过程变差的相关问题。特别是在使用轻馏分燃料时，造成小时燃料消耗下降与相应的功率下降，与柴油相比，下降达25%~35%。导致柴油机功率下降的主要原因是质量循环供油量的减少，因为轻馏分燃料的密度和黏性更小，且具有较大的可压缩性^[51,74]，在使用植物油时正好相反，产生由于高密度和黏性带来的问题。

多种燃料发动机在使用轻馏分燃料时带来着火延迟期增加，导致更粗暴的燃烧，增加了最高燃烧压力。另外的问题是某些代用燃料或许还需要使用外源点火或使用柴油引燃。正如上面所说的，在使用轻馏分燃料时可能会导致的功率下降、粗暴燃烧等超过其许可值的范围，为了保证所要求的功率指标和可接受的燃烧动态过程，必须要根据所使用的燃料的物理化学性质校正供油过程，如循环供油量、喷油提前角的调整。在某些情况下，为了非传统燃料的正常着火，必须向柴油机燃烧室内喷入少量的引燃柴油，引燃量也需要随发动机转速和负荷而变化。

以上论述表明：柴油机经济性、排放性能的改善，动态性能的改善及发动机使用非传统燃料的能力都与发动机工作过程的优化密不可分，完善工作过程的最有效的方法之一就是改善供油系统参数及这些参数的控制。

1.2 对供油系统的要求及其分类

供油系统的基本功能如下：

- 1) 燃料的存储；
- 2) 燃料准备（清除水分、机械杂质，加温或冷却）；
- 3) 按工况和发火顺序进行燃料分配，保证各缸供油量一致；
- 4) 在确定的工作循环区间按指定的规律喷射燃油；
- 5) 在燃烧室内按混合气形成方式不同进行燃料喷射。

对上述功能进行适当的论述和补充，就会提出对供油系统的具体要求，以便考量它们是如何保障柴油机经济性、排放、工作过程及使用条件的各种要求^[42]。下面将详细论述对燃油系统的基本要求（括号中的部分是一些注释或举例）：

- 1) 较低的价格和重量，较好的工艺性（在汽车柴油机的成本构成中，供油装置占25%~40%）；
- 2) 工作寿命期间供油指标的稳定性（喷油器的调整和维修应当大于1 000 h，高压油泵的调整和维修应大于3 000 h）；
- 3) 服务、维修与调整的方便性（例如，在拆卸喷油器时需要摘取缸盖、配气凸轮轴就属于不够方便的结构）；
- 4) 发动机生命周期内的无故障运行时间（高速柴油机供油装置的寿命是4 000~10 000 h，低速柴油机为10 000~26 000 h）；
- 5) 保证指定的喷射压力和喷射特性，并且能随着发动机工况的变化进行控制；
- 6) 循环供油量、喷油提前角可以随着发动机的转速、负荷、增压压力、环境参数、发

动机热状态等参数的变化进行控制（喷油提前角的控制精度为 $\pm 0.5^\circ$ ，如图 5.36 所示。启动循环供油量的保证：启动需要的喷油量一般是标定循环喷油量的 1.2~2 倍）；

7) 不产生二次喷射和燃油泄漏；

8) 最低的各缸间的供油不均匀性（标定工况下，不均匀性低于 3%~4%，循环间的供油不一致性小于 1%，或者是每一气缸可单独进行供油量的控制）；

9) 更低的噪声水平（距离 1 米处的噪声低于 80 dB），以期降低发动机的噪声水平；

10) 小负荷工况时，稳定的最小循环供油量的保证（最小循环喷油量大约为标定工况喷油量的 1/50~1/10）；

11) 为排除管路中的空气，使用“排气”系统的可能性。

针对地面运输车用柴油机供油装置的补充要求是：

1) 供油装置速度特性的形状（油量调节器，供油装置的优化，电子调节）；

2) 保证发动机过渡工况的动态特性；油泵自身的动态加速过程（控制残余压力，不随工况变化的残余压力的建立）；

3) 防止燃料泄漏的、必要的耐震性和密封性，防止灰尘、水分和空气混入燃油；

4) 在较宽空气温度范围内的工作能力。

这些要求可酌情扩展到所有类型的供油装置中，也可以作为对单独零部件的要求。

供油装置的分类：

供油装置分类通常可按其结构差异、供油方式和燃料喷射方式进行。发动机对供油系统有各种各样的需求，也就造成供油装置结构的多样性，如图 1.8 所示。到 21 世纪初，直接作用式供油系统是最基本的供油系统型式，其喷射过程主要靠柱塞运动实现，而关于不同类型供油装置的发展趋势详见 1.3 节。

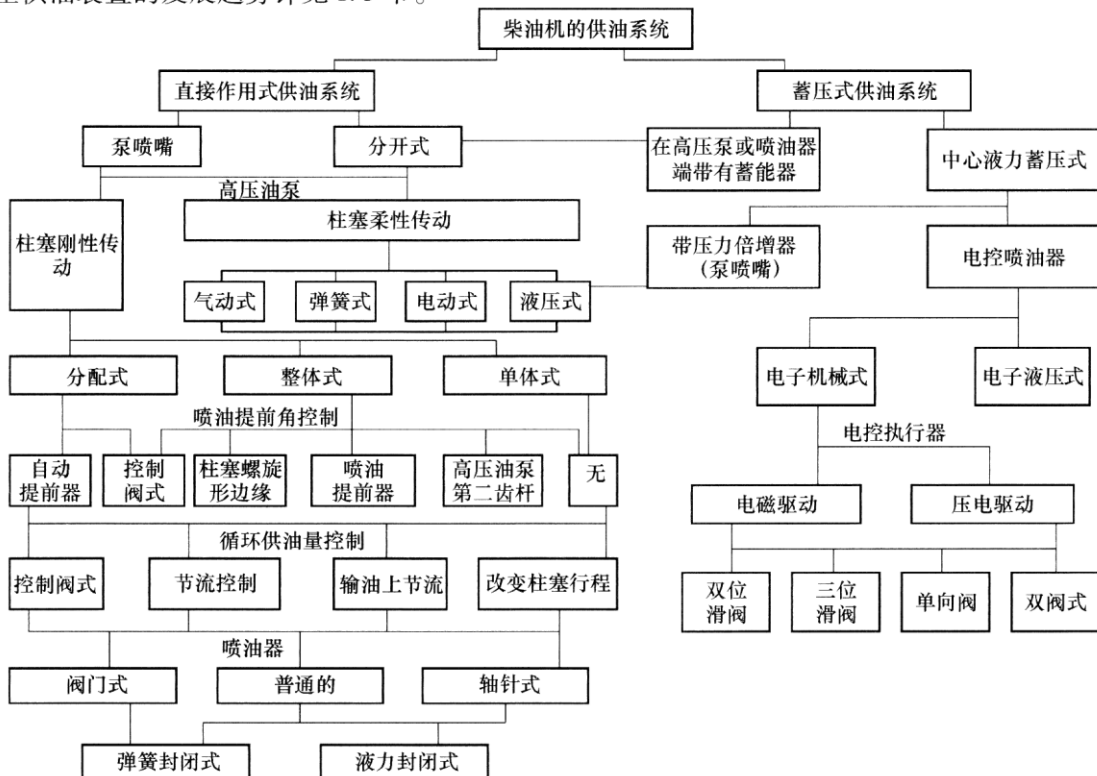


图 1.8 柴油机供油系统的分类

1.3 供油装置的发展方向 and 前景

哪一种供油装置将占据未来？任何一种预测都有失偏颇。为了使得预测更充分一些，我们试图考虑上面所列举的对供油装置的所有要求，认为完善供油装置的准则是：

- 1) 发动机的经济性指标；
- 2) 功率和工作噪声；
- 3) 有害排气污染物的限值；
- 4) 运输工具的动力性；
- 5) 启动可靠性；
- 6) 适应性系数；
- 7) 不超过燃烧压力、热负荷、涡轮前温度等限制条件。

解决柴油机排放性能问题总是与供油装置的完善联系在一起，按 Bosch 的数据资料，在汽车柴油机满足欧Ⅱ、欧Ⅲ排放法规的十大技术措施中，有六个与供油装置密切相关。与此相联系，我们就可以找到现代柴油机供油装置进一步改善的技术方向，而且这些技术方向并不是非此即彼的，也不是相互独立的。因而，这些技术的划分也只能是相对的。

1.3.1 工作过程和供油过程的优化

图 1.9 是梅赛德斯-奔驰卡车柴油机组混合气形成的发展历程，只有中心垂直安装喷油器（图 1.10）可以保证油束特性及流量系数的均匀性，已成为一种典型的技术解决方案。尽管其在布局与使用中不是很方便，如每缸三气门或四气门时使用一根配气凸轮轴的情况（图 1.11 (a)），在使用 2 气门时，从混合气形成、维修服务方便性来看不得不倾斜放置喷油器（图 1.11 (b)）。

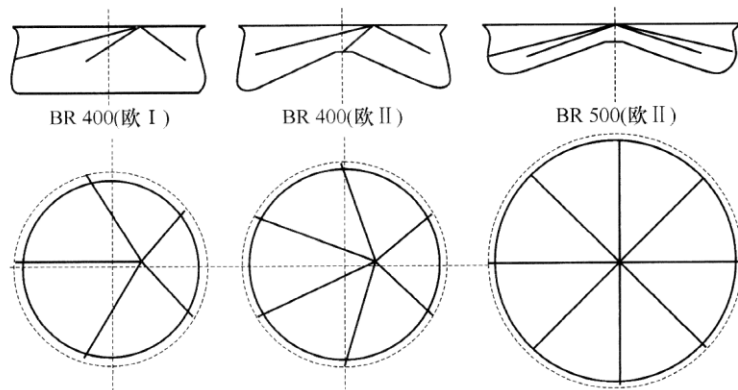


图 1.9 混合气形成过程组织方式的演变

工作过程精细研究的必要性在任何时候也不会受到怀疑，但这种可能性总是受到工作过程复杂性、缺少精确的数学模型、不能接受的实机优化工作量这些因素的限制。工作过程与供油装置比较现实的研究只能是利用有限度的试验数据，这种情况已持续了很多年。时至今日，虽然还不能构建出从零开始的柴油机设计程序，但解决这些任务的一些数学模型和计算软件已经出现，使用软件的一些相关信息可以在 <http://energy.power.bmstu.ru/e02/p01rus> 网站上找到。

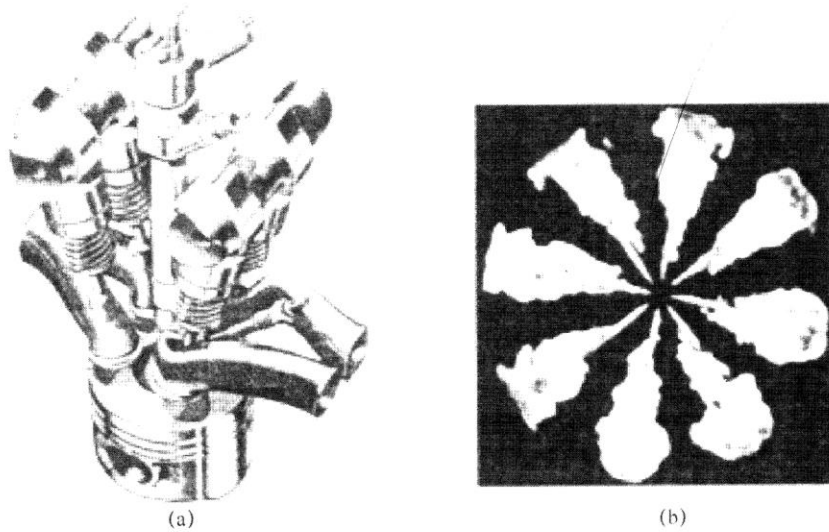
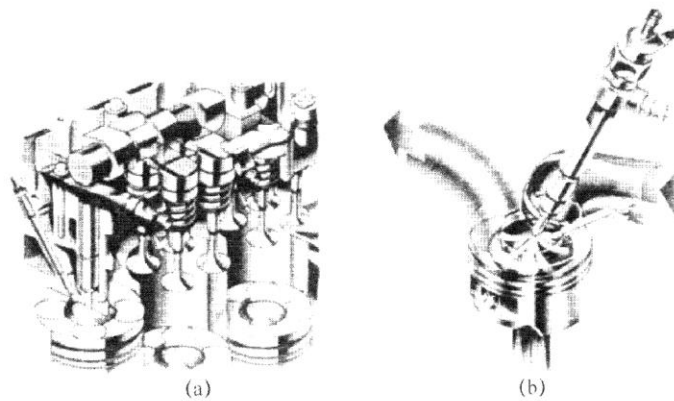


图 1.10 中心垂直放置喷油器 (a); 燃烧图像 (b)

图 1.11 Opel Ecotec 四气门柴油机垂直放置喷油器 (a);
JTD Alfa Romeo 两气门柴油机倾斜放置喷油器 (b)

1.3.2 提高喷射压力

按照燃油经济性、颗粒物与氮氧化物排放来优化工作过程时,设计者可以给出一系列的典型解决方案。比如,针对高速柴油机来说,通常会采用开式燃烧室、压缩比提高到 19 ~ 21、中冷技术、垂直放置喷油器、使用 6 ~ 8 个孔、最小孔径 0.1 mm 及最小的喷油提前角等。而实际上,在充分优化工作过程时,最佳的性能指标总是在提高喷射压力下得到的,也往往会超过前几代柴油机的这些典型值。从 20 世纪 30 年代至 80 年代的半个世纪时间内,高速柴油机的最高喷射压力只有很缓慢的增长,从 25 到 50 MPa,而在最近的十年间,最高燃油喷射压力有跨越式的增加,从 80 到 200 MPa。这个因素不只取决于混合气形成过程,也是因为高喷射压力给解决柴油机工作中的一些矛盾性任务提供了一种可能。一方面需要降低氮氧化物排放、燃烧速率、机械负荷,另一方面也需要降低燃料消耗、颗粒物排放及 CO、CH₄。关于这一点很容易从图 1.12 中看出。

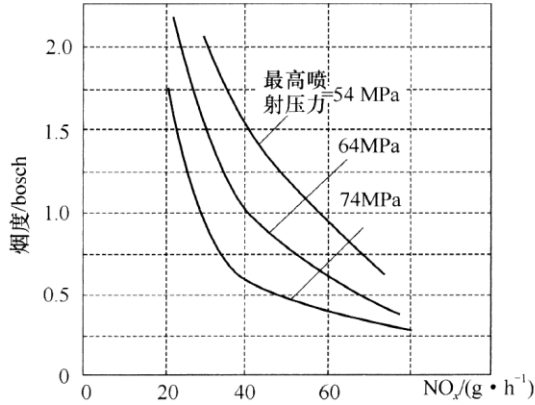


图 1.12 不同喷油提前角和喷射压力下有害排放物
梅赛德斯 OM611; $n = 2\,000\text{ r/min}$; $p_{me} = 0.4\text{ MPa}$

在图 1.12 中可以明显看出，随着喷油提前角的变化，和工作过程的大多数参数一样，排放指标也呈现出单方向的改善。在这个矛盾关系下也看出近年来提高燃油喷射压力的必要性，这也是排放法规的基本要求，如图 1.13 所示。不仅仅需要提高燃油喷射压力，也要按内燃机工况来优化调整喷射压力，如图 1.14 所示。

16

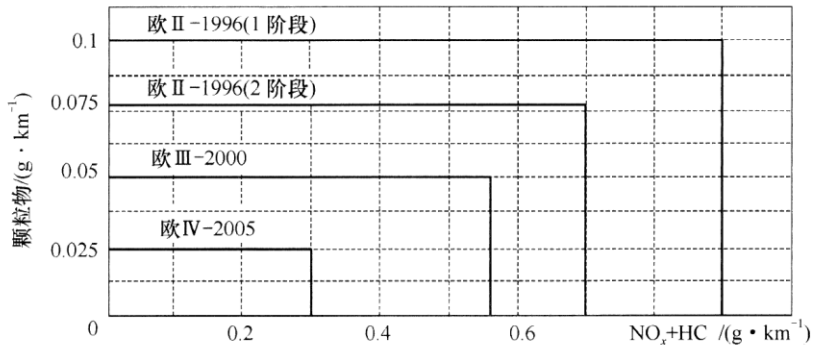


图 1.13 欧洲测试循环轻型柴油车排放法规

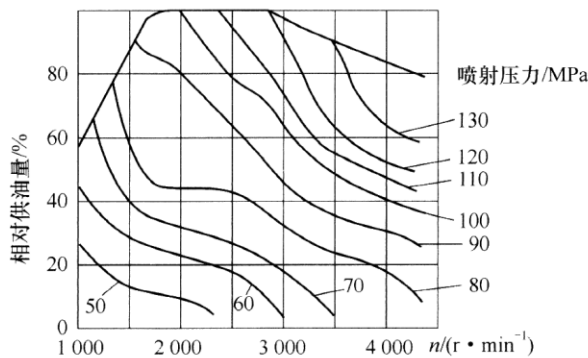


图 1.14 梅赛德斯 OM611 柴油机喷射压力随转速和相对供油量的优化曲线

喷射压力随转速和负荷而变化常被看做是传统供油装置的缺点。事实上,喷射压力的变化特征比喷射压力为定值更接近于优化值,保证喷射压力随转速、循环供油量和其他工况参数的最佳匹配关系是发动机性能优化的主要任务之一。一方面,创建满足要求的供油装置及控制系统是值得的;另一方面,某些内燃机的生产商甚至还不知道喷射压力的这种变化关系。这也不足为怪,毕竟保证这种变化关系的技术手段在不久前刚刚出现。从这个观点来说,供油装置的形式就不一定必须是共轨系统(Common Rail),在柴油机研制时,在已批量生产的供油装置基础上构建所需要的供油装置或许是最方便的。

1.3.3 供油装置的电子控制

带有电子控制的供油系统相比于传统供油装置具有如下优点:

- 1) 随发动机转速变化的循环供油量的柔性调节,保证需要的外特性;
- 2) 依据发动机工况和其他工作参数,优化调整供油提前角;
- 3) 启动工况的自动控制及加浓控制,强制怠速运转下断油,过渡工况调节;
- 4) 最小的各缸供油不均匀性,或者,根据每一缸结构、制造和技术状态特点采用最优的供油不一致性和喷油提前角;
- 5) 部分工况时,断缸或切断工作气缸的循环;
- 6) 控制单元对电路的自诊断和自动补偿,这些功能可纳入发动机或整车的控制。

除了这些基本的功能外,专业级的电控系统还有一些更独特的优点。评价不同供油装置的前景时,就看上述所列举的诸多功能的满足程度。

不使用柔性的电子控制系统很难满足有害污染物排放法规严格的要求。比如,在高负荷时,供油提前角调整的优先权是降低氮氧化物排放,而在小负荷时,需要降低燃油消耗率和烟度,提前角会加大。可以采用增压中冷来解决降低燃油消耗、颗粒物排放与降低噪声、氮氧排放之间的矛盾,但增压中冷也同样需要按柴油机工况变化来柔性调整,如增压压力、再循环废气的调节等。供油控制系统也是柴油机整机或整车的控制系统的重要组成部分,其功能也得以显著扩展:预热塞控制、配气相位控制、空调控制及自动防抱死控制等。控制系统组成的合理性与其需要控制的参数、燃油装置的类型相关联。

电子控制系统的推广不仅受制于基础零部件的缺失(高速电磁阀、压电驱动器、高压油泵),还有少部分发动机制造商对此准备不足。事实上,带有大量参数的优化控制程序的建立是一项非常艰巨、花费昂贵的工作,需要建立高精度数学模型,进行内燃机与供油装置工作过程的联合优化是解决这个问题的有效途径。

1.3.4 喷油规律的控制

在高速柴油机中,供油装置会在着火滞燃期内完成75%~80%的燃油喷射,使得循环动力学特性显著提高,进而导致曲柄连杆机构的过载、噪声与振动的增加以及更高的氮氧化物排放^[115]。解决问题最简单的,也是最有效的一种方法是高压小喷孔下的供油持续期的适当延长,这种方法是20世纪80年代末期由拉兹列采夫教授所建立,他使用了多区燃烧模型优化方法,如图1.15所示。

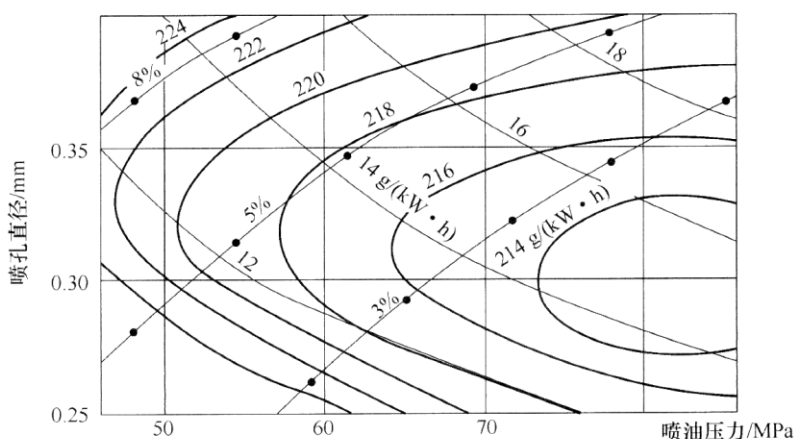


图 1.15 柴油机工作过程优化

在这个过程中，在中等燃烧压力、最小的供油提前角条件下只形成有限的氮氧化物，获得了较好的燃油经济性和较小的排气烟度，因为高压小喷孔产生了极细的喷雾颗粒。这种混合燃烧概念在 1996—1998 年间被某些国外汽车柴油机厂家采用。从供油装置设计角度看，已经不能像以前一样，降低燃油消耗率和烟度正成为更艰巨的任务，必须缩短喷油持续期。显然，降低喷孔直径也因为燃油喷雾几何形态的不利变化而受到限制，过小的喷孔还带来喷孔堵塞与喷嘴结焦的风险。此外，超小喷孔的混合气形成机理还不够十分清晰。已经发现：高喷射压力（200 MPa）、小喷孔直径（0.06 mm）下的破碎的喷雾，明显降低了着火延迟期^[52]。

小喷孔导致的这种动态特性因素可以通过喷射规律的分阶段前锋来降低。这种方法很早就知道，但实现起来并不十分有效，一直也没有大范围应用。在传统的供油装置中，高压油管的波动过程，可能会导致相反的过程，使喷油规律前锋面的陡度增加，双弹簧喷油器则是一种可以被采用的结构形式。喷油规律前锋面的控制直到今天仍为研究内容，而不是作为该控制实现的可靠方法。为了达到欧 II、欧 III 排放法规中 NO_x 的排放限值，工质的放热过程应该更接近迪塞尔循环，而不是混合循环。这样，保证可控喷油规律前锋面方法的研究是非常有研究价值的，即使对于直接作用式供油系统来说，这种方法也是众所周知的技术难题。

两次喷射是缩短供给主喷燃油着火延迟期的根本手段，第一阶段只喷射最基本的燃油量，两次喷射是可以实现、又十分必要的技术手段，解决了大规模应用问题^[195]。两次喷射对降低 NO_x 和噪声的有效性，如图 1.16 所示，推动人们去进行两次喷射实现手段的研究。少量引燃（预喷）柴油的供给是特别困难的，而引燃柴油供油参数（供油量、持续期、相对于主供油的提前角等）的不完全优化也降低了两次喷射的有效性，或者会导致负面的结果，而供油装置这种复杂的控制规律可能只有在高压共轨系统中才能实现。

从影响柴油机指标的观点看，喷油持续期和喷油规律形状是关联的，这里给出的一些建议，也仅有一定的适用性，如图 1.17 所示，放热规律的形状对 NO_x 排放有明显的影 响，解决这个任务的最好的方法是使用精确的数学模型来完成方案的优化^[76]。

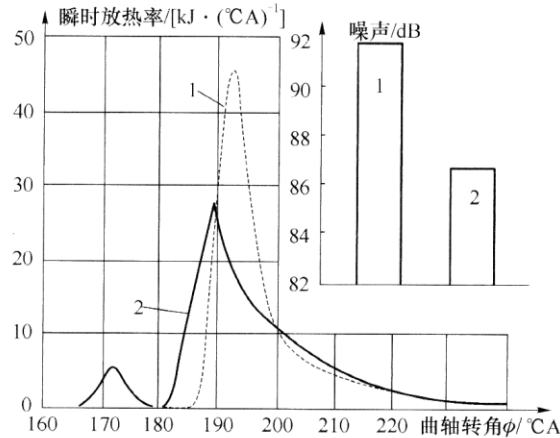


图 1.16 Mercedes OM611 柴油机放热速率和噪声
1—单次喷射；2—两次喷射

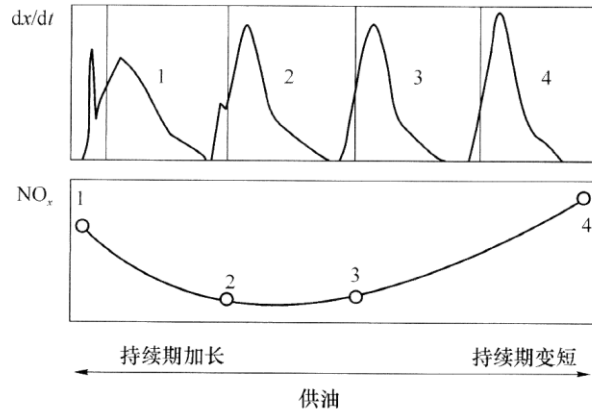


图 1.17 MAN B&M Diesel 柴油机放热规律和 NO_x 排放随体积供给强度的变化关系

1.3.5 喷油提前角的控制

为了优化发动机的工作过程，进行喷油提前角的控制是非常有必要的，喷油提前角取决于至少 5~8 个内燃机工况参数。带有机调调速器的分配泵可以通过 1~3 个参数来实现喷油提前角的调整，现今俄罗斯国内生产的很多柴油机都没有供油提前角调整装置。在这种情形下，最重要的控制特性就是随转速变化的特性，也就是在转速增加时，供油提前角减小，这种供油系统曾在卡车柴油机 MM3-245、使用 Steyr 柴油机的 ΓA3 车上出现过。带电子控制的供油装置中，供油提前角的调整是最简单的^[34]，仅在传统的供油装置中实现供油提前角的自动调节方法会引起人的兴趣。

1.3.6 共轨系统的研发

共轨系统研究被看做是独立的方向，或被认为是带电子控制的供油装置的未来发展方向。相比于直接作用式的供油装置（图 1.8），共轨系统允许最佳地调整喷油压力和喷油规律，完成多次喷射。共轨系统的研制大约开始于 30 年前，但只是到 1997 年才获得工业应用。2001 年前，共轨系统配套的发动机就有几十款，各种变型产品就更难数清，这种供油装

置的应用范围从轻型车用发动机到舰船十字头形二冲程发动机。带有液压放大器（带液力驱动柱塞的泵喷嘴）的供油装置也被归入此类，但由于其存在一系列问题而导致其前景充满争议。

遗憾的是，20世纪50年代，带有机电控制的蓄压式供油系统的生产经验对共轨系统的建立没有什么帮助，在共轨系统方面也还有相当多的问题^[34]：

- 1) 高技术含量、低成本、更好工艺性的电液式喷油器的开发完善；
- 2) 喷油器电磁阀及驱动的研制；使用液力平衡方式，经济的燃油消耗，好的工艺性及操纵稳定性；
- 3) 创造结构简单的、低成本的、可靠的高压油泵，供油压力需达到200 MPa；
- 4) 寻找控制喷油规律的有效方法；
- 5) 开发高效低成本、多功能的发动机电子控制系统和控制软件。

1.3.7 代用燃料供油系统

开发发动机代用燃料主要受生态学和燃料结构要求的驱使，同样还有其经济上的合理性。毋庸置疑，代用燃料的使用会进一步扩大。我们知道，地壳中煤炭的储量是石油和天然气总和的15倍，每一种新燃料都对供油装置提出了特殊要求。当发动机从一种燃料过渡到另外一种燃料时，重要的问题是保证供油系统的可控性与通用性，主要包括：低压管路的简单改造，降低精密偶件的磨损，防止燃料泄漏，保证供油装置零件耐久性及高压油泵内供油过程的实现等。实际上，对所有的代用燃料来说，都要求其物理性质的确切信息。

1.3.8 实际使用条件下供油装置功能的保证

如果在柴油机上达不到供油试验台上获得的供油参数要求，除了低压管路、燃料品质外，还存在一些非定常的工作条件：背压、燃油加热的影响以及不良的高压油泵的传动。解决这些问题就能更好地设计供油装置，也能保证供油装置具有更高的技术水平。

1.3.9 喷射稳定性和最小循环供油量的保证

直接作用式供油装置中，提高喷射稳定性的有效方法之一是消除燃油中的气相、增加高压油路中的初始压力，找到解决这些问题的简单又有效的方法是有现实需求的，即便是在共轨式供油装置中也正在进行这种方法的搜寻，如提高电液喷油器的响应、改进工艺、喷射过程的程序识别。最小循环供油量主要是针对两次喷射（或多次喷射）、气体燃料发动机引燃、降低怠速转速等问题。

1.3.10 燃油喷射的快速完成

必须消除较大燃油颗粒的形成，防止废气进入喷油嘴，也就可以降低燃油消耗、HC排放和烟度，防止喷油嘴积碳。或许，能够保证上述目标的手段有：喷油器小型化、供油优化、基于循环时间的针阀控制等。即便是在共轨系统中也还存在上述问题，最基本的任务是要消除二次喷射，特别是随着供油压力的不断提高，解决这个问题就更具有现实意义，也被迫使供油装置更复杂，比如，在高压油泵中要附加一些控制阀。

综上所述，前述所列举的这些方向不一定是当前供油装置的全部方向，但很多都与1.2节所述的供油装置的廉价、结构简单、可靠性要求有关。解决所有这些问题不仅需要研究新结构、完善操纵过程，还应在供油装置研发的早期阶段引入计算机辅助设计，采用数值离散化优化供油参数，数学模型使用的有效性取决于模型及模型应用的可信性。

1.3.11 柴油机供油装置的发展前景

如果说到一些具体的设计解决方案，有些措施还远不是显而易见的。在回答未来供油装置的类型这个首要问题时，可以回想，Bosch 公司在 20 世纪 90 年代曾投放几种形式的供油系统，当时没有哪一种系统会被认为没有前景：泵喷嘴、单体泵、直列泵、单柱塞的转子分配泵、共轨系统，如图 1.18 所示。每一种供油系统都有自己的优点和缺点，有些技术特征是没有争议的，所有的最新供油系统都要求是电子控制的、喷射压力都应达到 135 ~ 200 MPa。

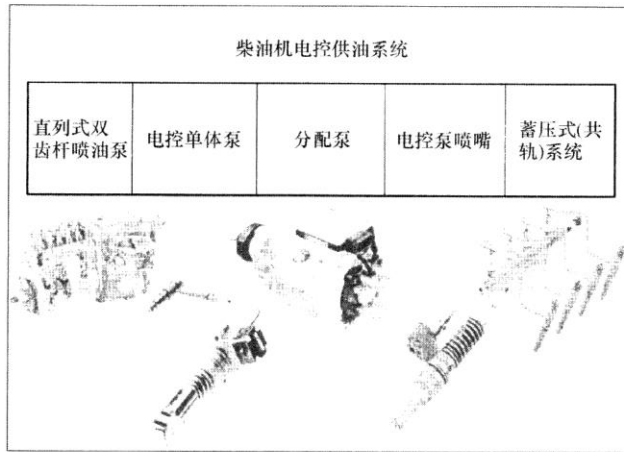


图 1.18 Bosch 公司供油装置产品的类型

这些现代电子控制供油系统都有自己更适合自己的应用领域，如图 1.19 所示。此外，在专用发动机和固定式发动机中使用机械调速器的单体泵和直列高压油泵（整体式）更受欢迎。无论是发动机制造商，还是用户都对供油系统技术发展的预测感兴趣，已有供油系统型式中哪一种会在未来更受欢迎？从图 1.20 可看出，随着喷油压力的提高及时间的推进，各代供油系统是如何被替代的。

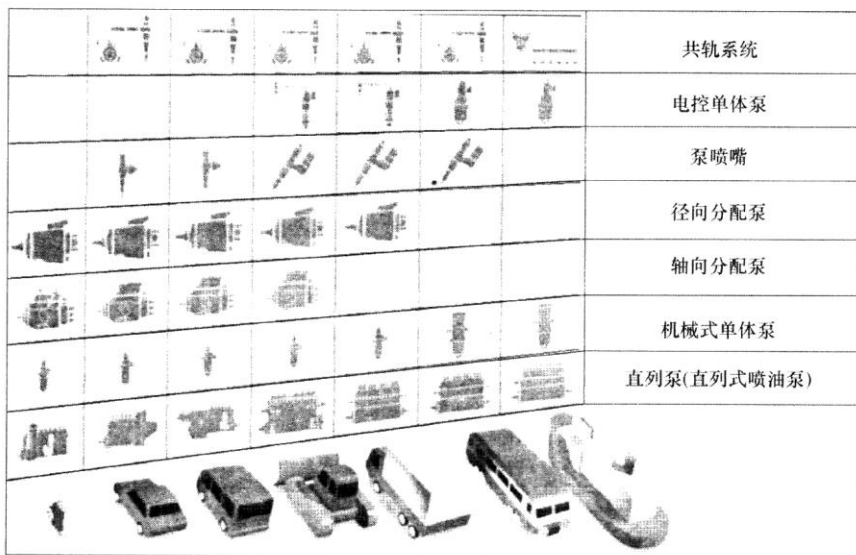


图 1.19 Bosch 公司各种供油装置的应用范围

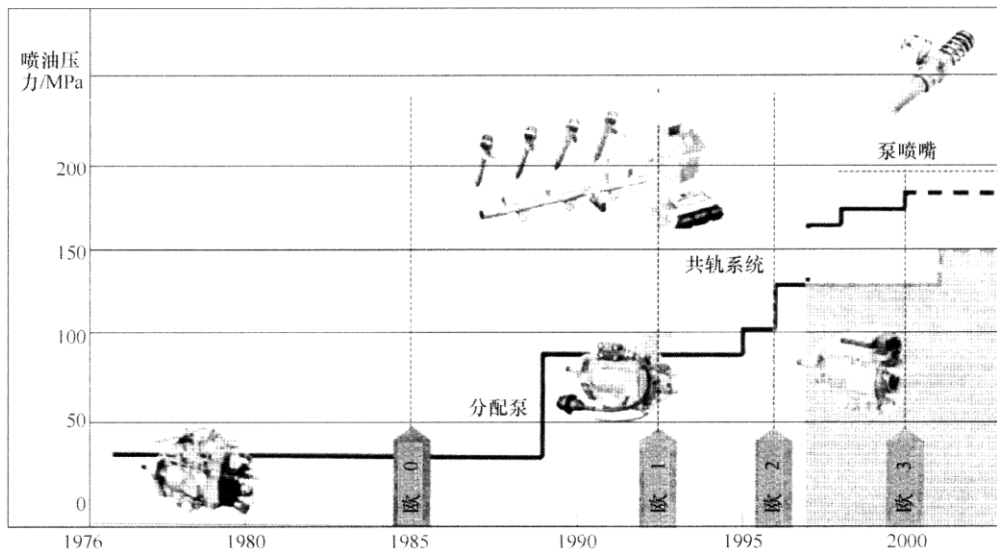


图 1.20 喷射压力提高及 Bosch 公司供油装置演变过程

22

很显然，较低压力的供油系统是没有前景的。第一代共轨系统的喷射压力达到 135 MPa，在面临欧 IV 法规时，不如泵喷嘴好，但现在共轨系统克服一些技术障碍后，其喷射压力已提高到 160 MPa，正在准备研制 180 MPa 的供油系统。在这个关系下，就不奇怪主要燃油系统供应商把共轨系统作为主导方向，共轨系统允许灵活改变喷射特性、改变供油提前角、按缸供油、改变喷油压力，如图 1.21 所示。顺便也指出，共轨系统已经在各种用途柴油机中推广使用，如图 1.22 所示。

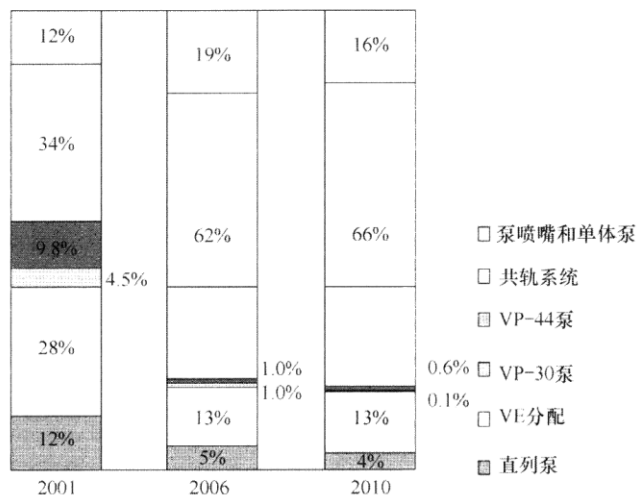


图 1.21 Bosch 公司供油装置结构型式的预测

可是，在满足现代柴油机供油与控制要求时，供油装置可以保留其适度的复杂性和有限的成本增加。因为在汽车柴油机的成本构成中供油系统占 18% ~ 40%，也有人认为这个数字达到 52%。由于这个原因，Bosch 公司决定放弃最新开发的 VP-44 高压油泵的生产，而 Lucas EPIC 系统同样也未进入批量生产。降低生产成本、快速完善产品的根本途径是提高产品的产量，这方面最经典的例子就是 Bosch 公司，其每年轻型车供油系统的产量超过 500 万台套，重型载重车供油系统年产量超过 200 万台套。

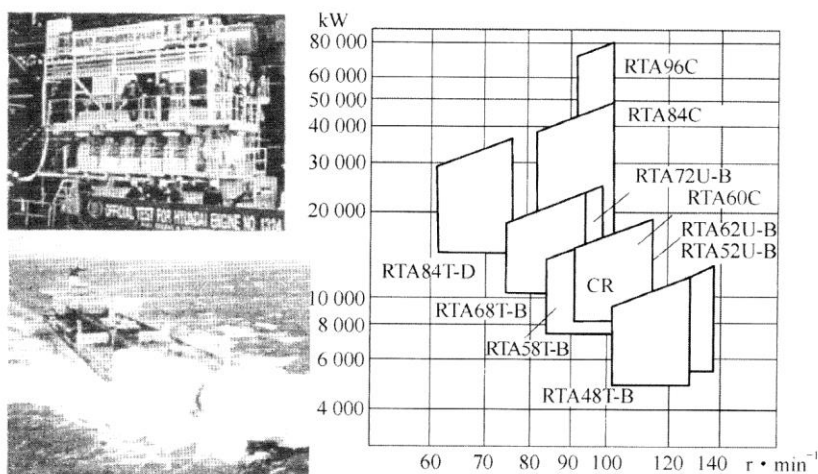


图 1.22 共轨系统在大型舰船 RTA58T 柴油机上的首次应用

1.4 柴油机工作过程与供油系统的优化设计

23

工作过程和供油装置的计算机优化可以显著缩短研制周期，降低柴油机开发中劳动量耗费大的工序的成本，消减所占用的人员数量，多方案分析优化也可取得最好的开发结果。这方面最关键的问题就是数学模型的可信性，搜寻优化解决方案的有效组织，同样也应包括软件的易用性和专业领域应用的可能性。

把工作过程优化作为建立供油装置技术要求的指标。一般情况下，在解决供油装置设计问题时都要进行工作过程的计算分析，常用的方法是依据参照发动机、已有燃油系统的开发经验来确定供油装置的技术指标。这些类比的信息及研究结果总是来自于有限的试验数据，极少情况下会依赖于极高专业技能、经验丰富的专家，虽然也能快速获得较好的结果。遗憾的是，到目前为止也还在采用另外一种方法：依据柴油机试验来进行大量供油装置设计方案的选择。这在任何情况下，严格地说，都不能称之为科学的方法，因为其设计过程总是与富有知识和经验的某些人相联系，不能够在合理的时间段内教会新的专业开发人员。

工作过程的计算机优化允许获得对供油装置的指标要求，只有工作过程与供油装置的协同优化才能在整体上达到柴油机的最优指标要求。符合供油装置需要的主要工作过程优化参数是：喷嘴的孔数和孔径、喷射压力与喷油规律、供油的工况特性（速度特性、负荷特性和其他特性），这些参数中有些是供油装置自身的参数，如孔数和孔径，有些参数则是发动机工作指标要求的，如喷射压力、喷油规律。

以下关于工作过程建模和计算实例的相关内容是由鲍曼莫斯科国立技术大学库烈绍夫教授完成的。

1.4.1 工作过程建模与优化的计算软件

许多先进科学中心集中主要力量发展计算流体力学（CFD）技术，以期解决气体流动三维建模、缸内燃料喷射及发动机进排气系统相关问题，所计算的发动机的单元数量达到 30 万 ~ 60 万，在每一个单元中求解系统守恒方程，计算过程中对蒸发、燃烧及有害污染物

形成进行建模。最常使用的软件包括：KIVA (Los Alamos)、FIRE (AVL)、VECTIS (Ricardo)、Star-CD (Computational Dynamics Ltd.)。为了能计算碳烟、NO_x 和 CO，虽然各软件都投入了较大的力量，但这些任务的彻底解决还为时尚早。计算结果的可信性通常还不满足实际需要。现今 CFD 软件存在的缺点是计算工作量大而必须使用超级计算机，一个方案的计算时间需要几十甚至几百小时，一个计算方案的数据准备时间，即便是专业能力很强也还需要几天时间，内燃机诸多过程的工程优化需要考虑成百上千个设计方案，虽然这些软件可以很成功地用于其他研究目的，例如发动机的进、排气系统的详细研究，但解决工程优化基本不具备可能性。

与 CFD 技术同时存在并发展的另外一种方法是：采用基于热力学或现象学的零维和一维模型。已获得比较广泛应用的该类软件主要有：BOOST (AVL)、WAVE (Ricardo)、GT-Power (Gamma Technologies)。俄罗斯国内开发的，获得商业化应用的软件有：Импульс 与 Волна (ЦНИДИ)、ДИЗЕЛЬ (МГТУ им Н. Э. Баумана)。三种国外软件之间的竞争导致其不断完善软件开发，如进、排气系统的详细研究、增压器部件选择等。完成这样的工作分析只要有 Pentium 级别的处理器就足够了。为了计算燃烧，这些软件都采用了苏联科学家伊万·伊万诺维奇·韦伯 (И. И. Вибе) 在 1962 年提出的韦伯 (Вибе) 燃烧方程，或者更晚一些类似方法。所有这些国外的软件都允许用户建立自己的燃烧过程计算子模型，而燃烧和混合气形成过程建模又恰恰是这些软件开发的最基本问题。在比较理想的情况下，喷油规律、喷雾破碎、从喷孔到缸壁的平均距离、充量的湍流这些因素都应被考虑在内。Импульс (ЦНИДИ) 软件的新版本和 ДИЗЕЛЬ (МГТУ им Н. Э. Баумана) 软件的早期版本使用了 Разлейцев Н. Э. 教授 1980 年提出的燃烧计算方法，该方法也是当时最先进的计算方法。

美国的 GT-Power 软件使用了补充的 Вибе 模型，采用了 Hiroyasu 教授的燃烧模型，可以研究自由喷雾的发展。燃烧室形状优化设计的问题与燃料喷雾的方向密切相关，活塞顶部燃烧室形状与涡流也是相关的，必须考虑燃料喷雾与壁面的相互作用。现在能够考虑这种相互作用的软件只有 ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т (МГТУ им. Н. Э. Баумана)。ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т 软件以 90 年代初 Н. Э. Разлейцев 教授开发的模型为基础，经过 А. С. Кулешов 的进一步完善，允许计算有涡流的燃烧室内燃油射流的运动，发展了燃油射流和壁面的碰撞计算模型，可以考虑气缸壁面和涡流的相互作用。该方法与试验结果有较好的一致性，不再要求专门的调试，可以完成不同参数对工作过程影响的分析：燃烧室形状、燃料喷雾的方向、涡流强度、喷油器的孔径和孔数、喷油规律。燃烧模型还添加了氮氧化物和碳烟的计算模型。ДИЗЕЛЬ-2/4т 有完善的用户接口，经过不同尺寸、不同用途的高速发动机的验证。

由于使用新的燃烧计算方法，ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т 可以解决一些其他软件无法完成的任务，如供油装置的设计和选型。在 ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т 中包含混合过程可视化程序，可以反映出燃料喷雾发展的动态结果及近壁流动结果。利用这个软件可以进行燃烧室形状参数的设计优化，在考虑进气涡流强度条件下选择燃油射流的方向，通过对燃料喷雾动态发展影像的分析，可以完成混合过程的计算优化，计算落入燃烧室不同区域的燃料量，达到其最有利的分布。

ПК ДИЗЕЛЬ-2/4т 的内核具有很高的计算速度，可以嵌入到一些非线性过程计算中，扩大了其应用范围，提高工作有效性、降低数值试验的计算时间。该软件也支持用户通过 Internet 远程操作，关于这个软件的详细描述请查看 МГТУ 的网站：<http://energy.power.bmstu.ru/e02/p01rus>。

1.4.2 工作过程的优化实例

本节所展示的工作过程优化实例是使用 ПК ДИЗЕЛЬ - 2/4r 得到的，目的是完成供油装置的选型和设计。图 1.23 展示出缸内过程可信模型在计算复杂燃烧室形状、切向涡流、湍流、非对称放置喷油器的能力。（拖拉机用 СМД 柴油机的工作过程计算，发动机转速 $n = 1800 \text{ r/min}$ ，平均有效压力 $p_{me} = 0.77 \text{ MPa}$ 。循环供油量 $= 0.08 \text{ g}$ ，上死点涡流比 3.15）。

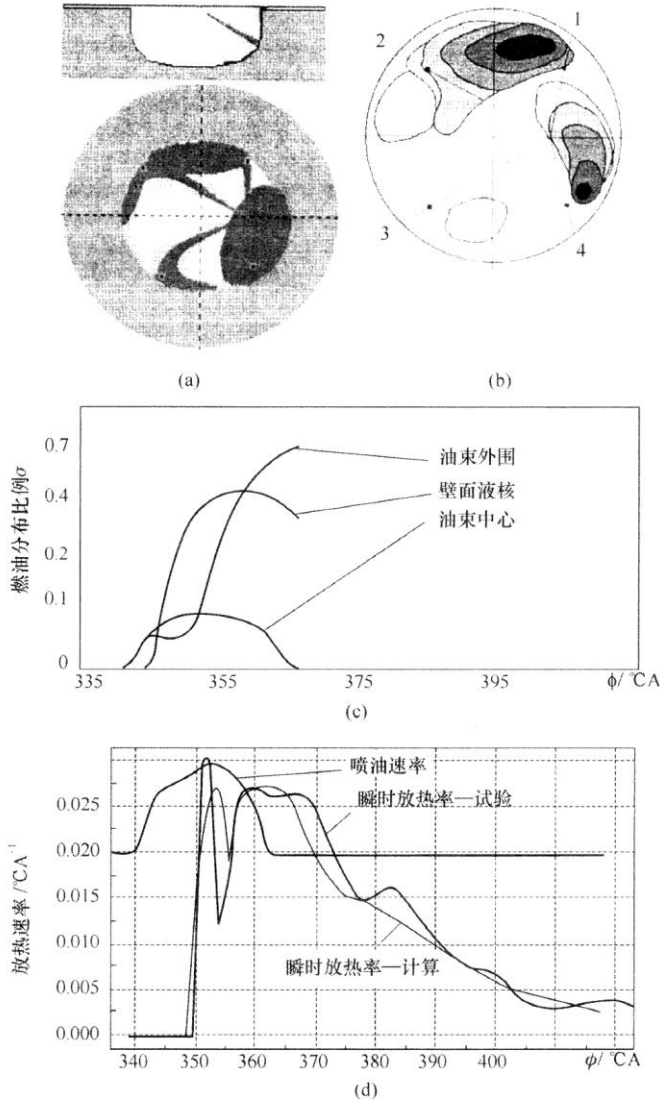


图 1.23 СМД 柴油机试验与计算结果

(a) 计算结果；(b) 高速摄影图像；(c) 计算得到的油束 I 的分布情况；(d) 放热速率和喷射速率

用燃烧室近壁射流高速摄影试验与燃料喷雾动态计算结果相比较，并且用发动机示功图计算放热规律与本软件计算放热规律曲线相比较，模型完全相符，能够准确计算出切向涡流对喷雾发展过程的影响以及由涡流带来的近壁流动。

降低喷孔直径并提高喷射压力的趋势是显而易见的，表 1.7 展示了一台柴油机工作过程

优化的参数实例。在试图改善 D-120 柴油机的指标时, 如果只考虑喷孔直径和喷射压力, 会导致出现负面的结果 (见表第一列和第二列), 尽管增加了喷射压力, 燃油破碎加强, 但产生了不利的燃油分布: 23.5% 的燃油被分布到近壁区域, 此处的蒸发速度很低 (喷孔为 0.3 mm 时, 该区域只有 1.7% 的燃料); 稀薄区域中燃料比例下降 5%, 此处蒸发条件最好; 非贯穿部分近壁射流燃料比例是 17.5%, 此处亦有不错的蒸发条件 (喷孔直径为 0.3 mm 时, 该值为 37%)。也就是说, 如此长的喷雾油束没有足够的发展空间, 导致互相掺混, 燃烧过程被拖延导致燃油消耗率和烟度增加, NO_x 的下降是因为低品质燃烧所致, 不能认为是开发成果。

表 1.7 D-120 柴油机工作过程优化研究结果

技术方案	A (原机)	B	C	D
燃烧室	原机燃烧室	定型燃烧室	定型燃烧室	优化燃烧室
喷油嘴	$3 \times 0.3 \times 120^\circ$	$3 \times 0.22 \times 120^\circ$	$3 \times 0.22 \times 120^\circ$	$3 \times 0.22 \times 150^\circ$
压缩比	16	16	19.5	19.5
最佳喷油提前角/ $^\circ\text{CA}$	16	16	11.5	11.5
涡流比	3.1	3.1	3.1	2.98
喷射压力/MPa	52	66.5	66.5	66.5
索特平均直径/ μm	30	19	19	19
有效燃油消耗率/ $(\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	239	247	242	236
$\text{NO}_x / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	3.4	2.7	1.8	1.92
烟度/hartridge	17.2	25.6	24.2	17.9

这个例子很好地说明只进行局部优化难以获得成功, 因为影响柴油机工作工程的参数很多, 这些参数间又互相影响, 单独改变其中的一个参数甚至是有风险的。由于这种复杂性是固有的, 因此供油参数的改变也要求柴油机自身参数的匹配优化。在图 1.24 中给出了改变喷油器参数时的有效燃油消耗率、气缸最高燃烧压力、烟度和 NO_x 的综合结果, 两个变化的发动机试验参数是: 压缩比和供油提前角。压缩比大于 19.5 条件下, 燃烧过程应会改善。当活塞顶隙变薄 0.5 mm, 供油提前角小于 11.5° , 增加燃油消耗和碳烟, 在较大提前角时增加燃烧温度和 NO_x 排放。这样就会出现供油装置与柴油机参数的新优化组合, 以确保方案 C 比方案 B 有改善 (表 1.7)。

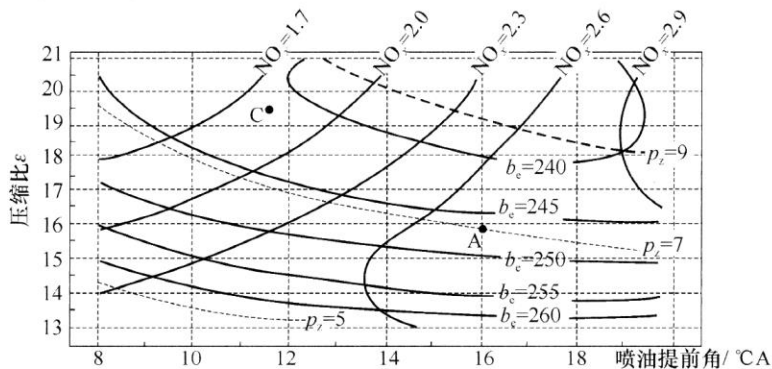


图 1.24 压缩比、喷油提前角对比油耗、 NO_x 的影响

为了降低燃油消耗和碳烟排放，需要改变燃烧室形状和油束方向，保证油束有更大的自由发展空间，以便增加尾段的燃烧速率；再进一步依据油束落点优化燃烧室形状，需要考虑由于燃烧室形状及顶隙变化带来的涡流的变化，经验燃烧室结果如表 1.7 的 B 列。

在试验燃烧室中喷射燃料的分布更合理，主要原因如下：

- 1) 油束外围和近壁流外围，蒸发条件最好，分布 69% 的燃料，原型是 60%；
- 2) 近壁流核心处，蒸发条件稍差，分布 27.9% 的燃料，原型为 37%；
- 3) 滞燃期中蒸发的燃料更少，有更小的着火滞燃期，以至于没有放热规律中的第一个尖峰，如图 1.25 (b) 所示，可以避免局部高温生成 NO_x ；
- 4) 较小的油滴索特平均直径为快速蒸发创造了条件；
- 5) 近壁流燃料受活塞的挤压作用没有落入到缸盖表面。

完整的优化方案给出了比初始方案更好的改进结果，依据这些结果可以构建出对供油装置的指标和重要参数的要求，这种方法学与相应的计算软件由鲍曼莫斯科国立技术大学 (МГТУ им. Н. Э. Баумана) 开发成功，已用于工厂产品开发、科学研究和教学工作。

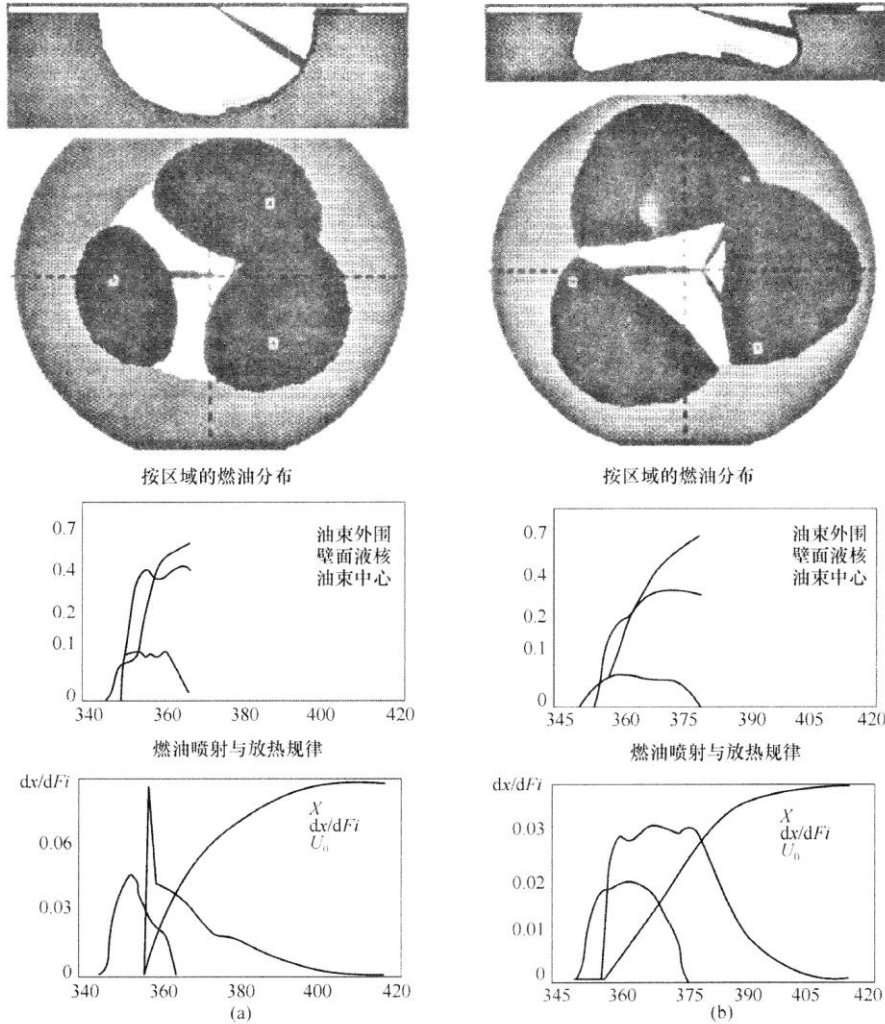


图 1.25 非增压柴油机工作过程组织方案的计算结果
(a) 优化前; (b) 优化后