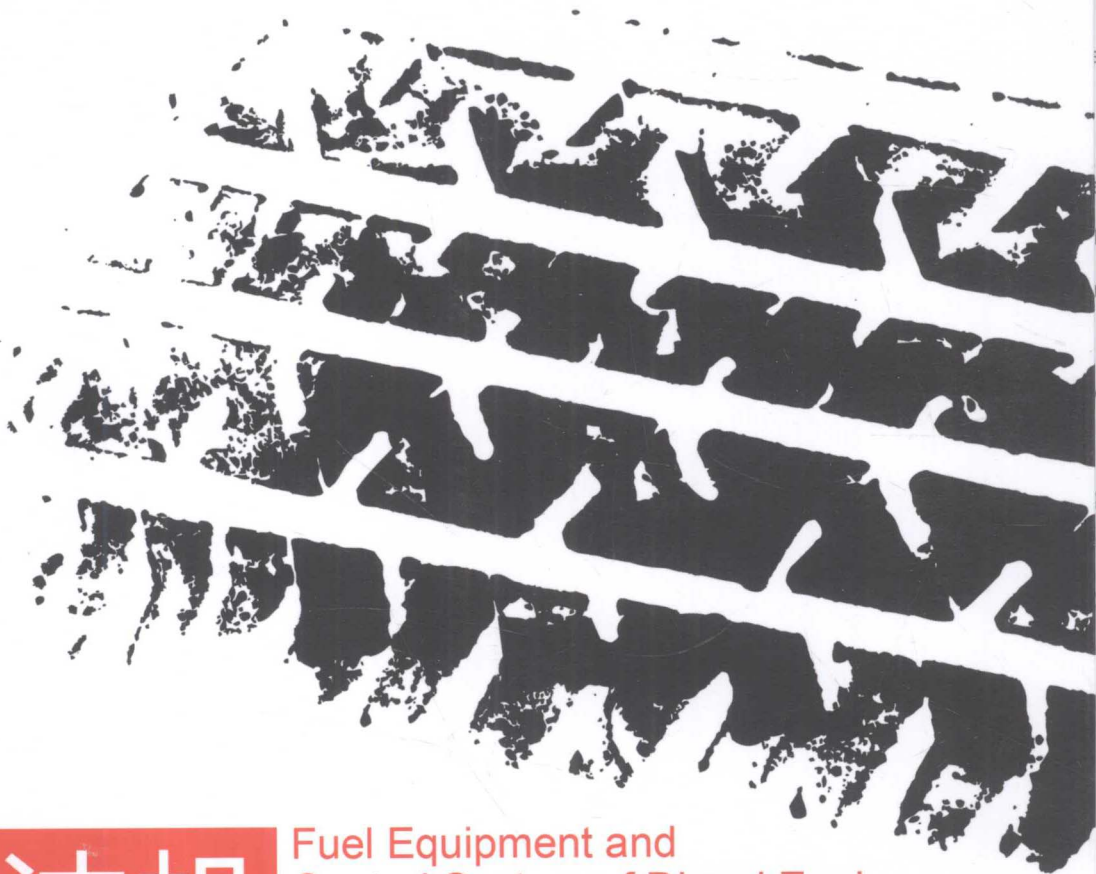




中国汽车工程学会

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



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（DEDP0501，0503）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 燃油和管壁的非定常换热的计算	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	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
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。

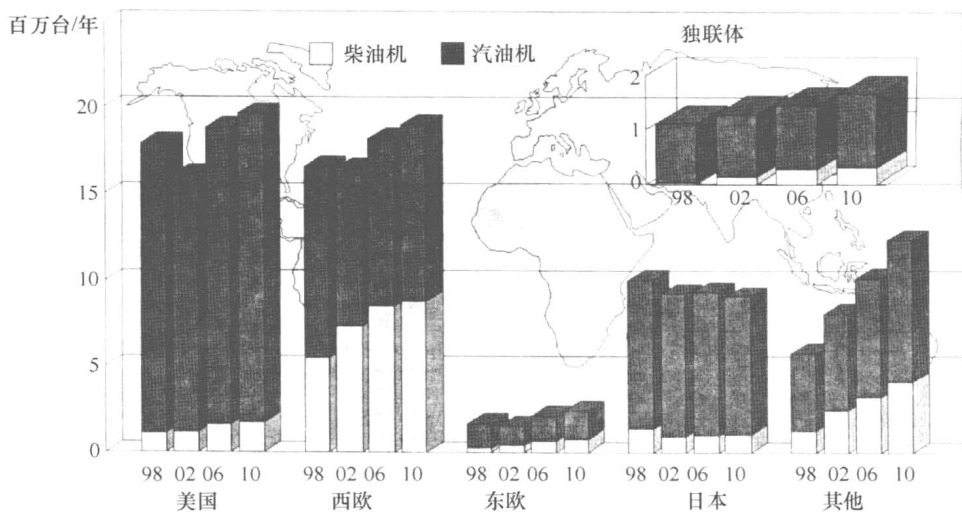


图 1.1 世界主要区域汽油车、柴油车 1998—2010 年的生产量

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 CO_2 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。

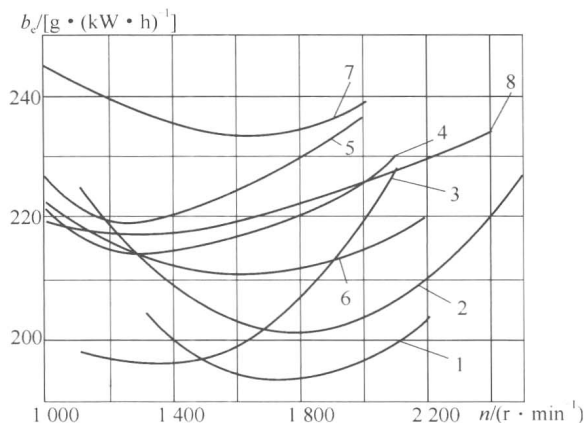


图 1.2 几种国内外柴油机外特性有效燃油消耗率曲线

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。

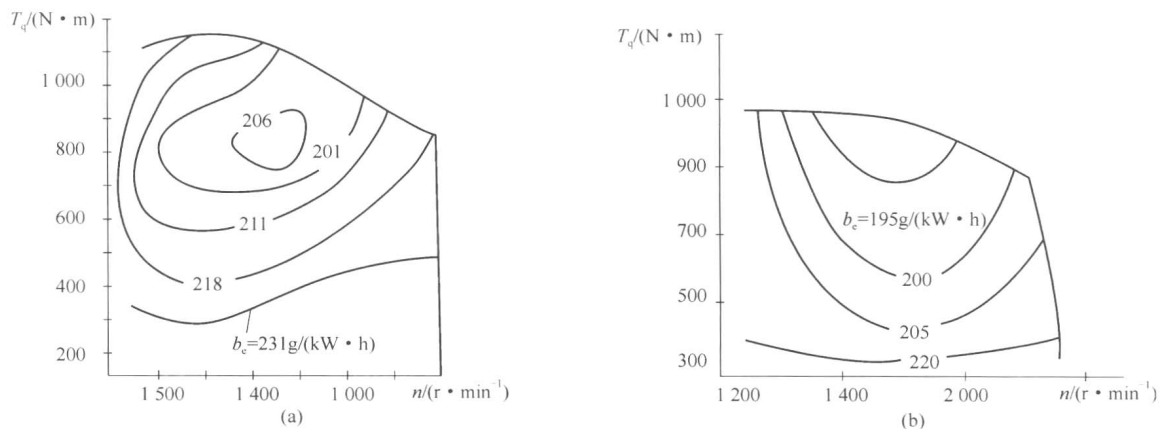


图 1.3 车用柴油机万有特性

(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	0.000 1%~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	0.001 8%~0.02%	0.1~0.5	0.4~2.5
三氧化硫 SO_3	$(0.4~6) \times 10^{-4}\%$	—	—
醛 RCHO	0.000 1%~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 。

4

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