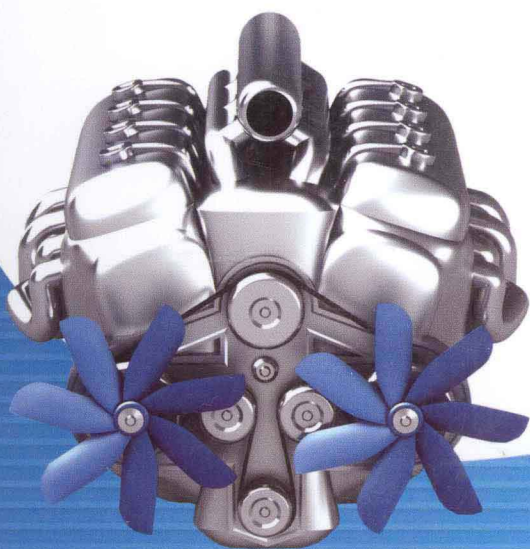
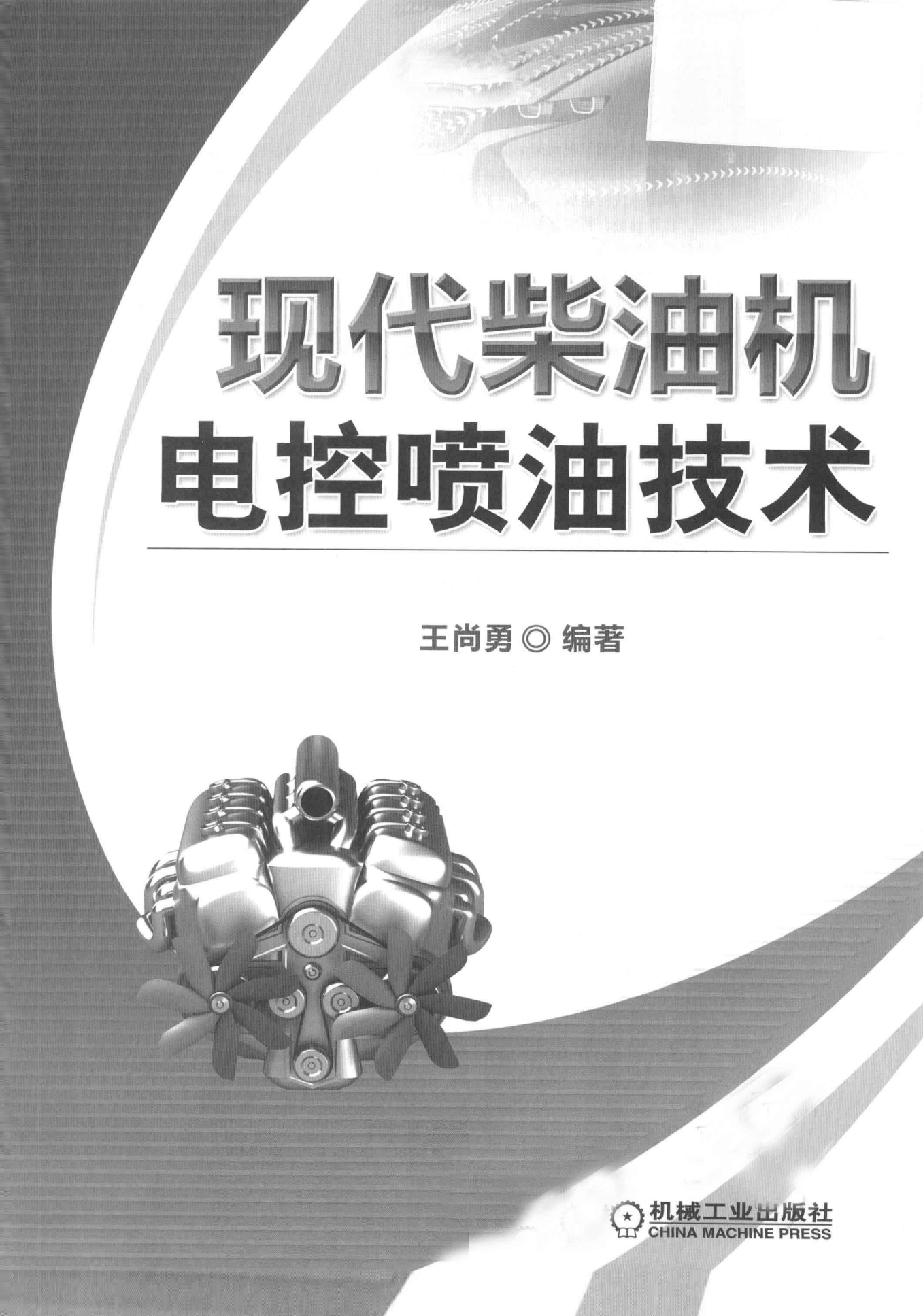


现代柴油机 电控喷油技术

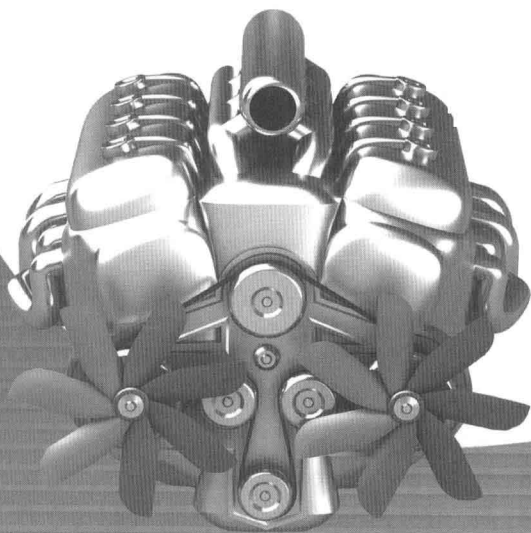
王尚勇 ◎ 编著





现代柴油机 电控喷油技术

王尚勇 ◎ 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书重点介绍了现代柴油机高压共轨喷油技术,兼顾了柴油机电控单体泵、泵喷嘴和位置控制式喷油系统。对于高压共轨喷油技术,详细介绍了各种典型系统的组成,结构,工作原理,特点;各零部件的结构,工作原理,技术参数,特别是对重要部件——调压阀的结构、工作机理、技术参数给予详细的介绍,书中特别详细介绍了高压共轨喷油系统的控制技术,同时介绍控制技术的最新发展。书中不仅介绍了电装、德尔福等几家主流公司的技术,还介绍了一些新型的高压喷射系统或者叫混合喷油系统,具有一定的前瞻性。在书的最后介绍了高压共轨喷油系统的计算分析方法和实验测试技术,这是迄今国内出版的书籍中很少涉及的内容。

图书在版编目(CIP)数据

现代柴油机电控喷油技术/王尚勇编著. —北京:
机械工业出版社, 2013. 6
ISBN 978-7-111-42167-2

I. ①现… II. ①王… III. ①柴油机—电子控制—喷
油—技术 IV. ①TK421

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 075592 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 刘 焯

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184 × 260mm · 25 印张 · 613 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-42167-2

定价:76.00 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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

为了降低柴油机的能源消耗和减少废气排放污染,满足节能和排放法规的要求,现代柴油机采用电控喷油技术已经成为其应用和发展必不可少的一个环节,是当今柴油机发展的重要方向之一。早在20世纪70年代,许多发达国家就竞相开发柴油机电控喷油技术。到目前为止,已研制并生产出了许多功能各异的柴油机电控喷油系统。而且,大部分已产品化并大量投放市场,取得了显著的经济效益和社会效益。

21世纪将是现代柴油机电控喷油技术发展的鼎盛时期,柴油机传统的机械式燃油喷射系统已经越来越不适应现代柴油机技术的发展。现代柴油机采用电控喷油技术的目标除了改善发动机的动力性和经济性外,更加强调对排放的控制和改善安全性和舒适性。

我国从20世纪80年代起就有许多科研单位和高等院校相继开展了柴油机电控喷油技术的研究和开发。进入21世纪以后,为了实现我国政府对人类可持续发展的承诺,大力发展柴油机电控喷油技术,加快我国柴油机产品的升级换代已成为内燃机工业的当务之急。

在这种客观形势下,在广大柴油机工程技术人员中推广先进的现代柴油机电控喷油技术,在大专院校的内燃机专业教学中,开设现代柴油机电控喷油技术的课程或讲座已显得十分迫切与需要。

但是,在过去,由于诸多原因的影响,国内柴油机电控喷油技术方面的著作不多,而且目前可以见到的一些柴油机喷油技术的著作,其中有关现代柴油机电控喷油技术的内容也不够丰富、详实。本书编写目的是为了适应柴油机电控喷油技术发展的需要,试图弥补现有柴油机喷油技术著作的不足。

现代柴油机电控喷油技术已经从最初的位置控制式电控喷油系统经过后来的时间控制式电控喷油系统(例如电控单体泵、电控泵喷嘴),发展到了现在的时间-压力控制式电控喷油系统,即高压共轨喷油技术。而且,高压共轨喷油技术的应用已经从最初的中、小型柴油机发展到了大功率的柴油机(例如大型工程机械、内燃机车、大型发电机组,甚至大型船舶),已经从各种车用柴油机发展到了各种非道路应用柴油机,高压共轨喷油技术是未来各种柴油机燃油喷射系统的发展方向,这已经是业界的共识。

本书详细讲述了现代柴油机电控喷油系统,重点介绍高压共轨喷油技术,兼顾电控单体泵、泵喷嘴和位置控制式喷油系统。对于高压共轨喷油技术,书中详细介绍了各种典型系统的组成、结构、工作原理、特点和存在的问题;各零部件的结构、工作原理、技术参数,典型零部件的性能对比,存在的问题。特别是对目前已出版的著作中没有给予足够重视的共轨压力控制阀的结构、工作机理、技术参数给予了详细的介绍。书中详细介绍了高压共轨喷油系统的控制技术、电控单元和传感器,同时介绍了最新的技术发展,不局限于博世

(BOSCH)、电装(DENSO)、德尔福(DELPHI)等几家公司的技术。另外,还介绍了一些新型的柴油机电控喷油系统或者叫混合电控喷油系统,使该书有一定的前瞻性。最后,介绍了高压共轨喷油系统的计算分析方法和实验测试技术,这是迄今国内出版的书籍中没有涉及的内容。

本书作者长期从事现代柴油机电控喷油技术的科研和教学工作,特别是曾主持并长期从事高压共轨喷油技术的研制开发工作,也曾为企业和相关工程技术人员做过柴油机电控喷油技术的讲座,为本书的编写积累了比较丰富的经验和专业素材。

本书可供从事柴油机电控喷油技术研究、设计、维修、使用等方面的科技人员、工程技术人员阅读,也可供动力机械及工程专业的本科生或研究生作为教材使用。

现代柴油机电控喷油技术发展很快,由于作者水平有限,加之资料的限制,肯定存在不足甚至错误,敬请专家和读者批评指正,并向本书所引用的参考文献的作者们表示衷心感谢。最后,向在本书的编写过程中给予帮助的各位编辑、同仁、朋友致以诚挚的感谢。

编 者

目 录

前言

第 1 章 柴油机电控喷油技术概论 1

- 1.1 柴油机电控喷油技术出现的必然趋势 1
- 1.2 现代柴油机对燃油喷射系统的主要要求 4
- 1.3 柴油机电控喷油系统概述 6
- 1.4 柴油机电控喷油系统的主要特点 8
- 1.5 柴油机电控喷油系统控制原理和分类 9
 - 1.5.1 柴油机电控喷油系统控制原理 9
 - 1.5.2 柴油机电控喷油系统的分类 10
- 参考文献 12

第 2 章 位置控制式电控喷油系统 13

- 2.1 位置控制式电控直列泵喷油系统 13
 - 2.1.1 日本 ZEXEL 公司的 COPEC 直列式喷油泵 13
 - 2.1.2 德国 BOSCH 公司 EDR 系统 14
 - 2.1.3 具有可变预行程的电控直列泵 16
 - 2.1.4 TICS 可变预行程机构 17
- 2.2 位置控制式电控分配泵 22
 - 2.2.1 分配泵简介 22
 - 2.2.2 位置控制式电控分配泵的定量控制 23
 - 2.2.3 位置控制式电控分配泵的定时控制 24
- 参考文献 26

第 3 章 时间控制式电控喷油系统 27

- 3.1 概述 27
- 3.2 电控泵喷嘴 27
 - 3.2.1 商用车电控泵喷嘴 28
 - 3.2.2 轿车用电控泵喷嘴 31
- 3.3 电控单体泵 35
 - 3.3.1 单体泵的优点 35
 - 3.3.2 电控单体泵的基本结构及工作原理 35
 - 3.3.3 典型电控单体泵结构和工作原理 36
- 参考文献 38

第 4 章 高压共轨喷油系统的结构与工作原理 39

- 4.1 典型高压共轨喷油系统的结构 39
- 4.2 高压共轨喷油系统的工作原理 39
 - 4.2.1 典型高压共轨喷油系统的结构 39
 - 4.2.2 高压共轨喷油系统中共轨压力的建立 40

4.3 乘用车的高压共轨喷油系统	41	4.4.3 BOSCH 公司的新一代商用车高压 共轨喷油系统	48
4.3.1 燃油低压供油系统	41	4.4.4 BOSCH 公司的大功率柴油机 高压共轨喷油系统	50
4.3.2 高压共轨喷油系统的 喷油压力控制	42	4.5 电控混合燃油喷射系统	52
4.3.3 典型乘用车高压共轨 喷油系统	43	4.5.1 电控单体泵和高压共轨喷油器 组成的混合燃油喷射系统	52
4.4 商用车的高压共轨喷油系统	45	4.5.2 电控单体泵、高压共轨喷油器加共 轨管组成的混合燃油喷射系统	54
4.4.1 低压燃油系统的特点	45	参考文献	58
4.4.2 典型商用车的高压 共轨喷油系统	46		

第 5 章 高压共轨喷油系统的各部件

5.1 高压油泵	59	5.2.5 两位三通高速电磁阀控制的高压 共轨喷油器和两位三通高速 电磁阀控制的高压共轨 喷油器性能对比	102
5.1.1 高压油泵的工作原理	59	5.2.6 采用压电晶体驱动技术的高压 共轨电控喷油系统	104
5.1.2 高压油泵的基本性能参数	60	5.2.7 应用液压放大机构的高压 共轨喷油器	110
5.1.3 高压油泵的工作特点	64	5.3 溢流阀	112
5.1.4 高压油泵的结构分析	64	5.3.1 直动式溢流阀	112
5.1.5 阀配流径向柱塞泵的配流阀	67	5.3.2 电液比例控制溢流阀	115
5.1.6 阀配流径向柱塞泵的柱塞 弹簧的设计	73	5.4 电液比例进油节流阀	118
5.1.7 典型高压油泵的结构分析	74	5.4.1 一般节流阀的特性	118
5.1.8 高压油泵的低压输油泵	81	5.4.2 电液比例进油节流阀特性	120
5.2 高压共轨喷油器	86	5.5 共轨管	124
5.2.1 概述	86	5.6 限流器	125
5.2.2 高压共轨喷油器的基本 工作原理	87	参考文献	126
5.2.3 高压共轨喷油器的主要 技术参数	92		
5.2.4 典型高速电磁阀驱动的高压 共轨喷油器的分析比较	92		

第 6 章 电控喷油系统执行器中的关键技术

6.1 电—机械转换的基础	128	6.2.1 高速电磁开关阀的结构	145
6.1.1 电磁场基础	128	6.2.2 高速电磁开关阀的开关性能	146
6.1.2 电磁铁的吸力特性	132	6.2.3 高速电磁开关阀的特性分析	155
6.1.3 直流直线电动机(动圈式 力电动机)	143	6.2.4 高速电磁开关阀的结构分析	157
6.2 高速电磁开关阀	145	6.3 电液式执行器	157
		6.3.1 电液式执行器的特点	158

6.3.2 电液式执行器的分类	159	6.4.4 压电驱动器种类	166
6.4 压电陶瓷驱动器(或执行器)	161	6.4.5 积层式压电陶瓷驱动器 (执行器)的结构特点	166
6.4.1 压电陶瓷的基本特性	161	6.4.6 积层式压电陶瓷驱动器的特性	168
6.4.2 常用压电材料	162	参考文献	171
6.4.3 压电陶瓷性能参数	163		

第7章 柴油机电控喷油系统的电控单元

7.1 电控单元的输入级	173	7.4.2 开关稳压电源	203
7.1.1 电控单元输入级的作用	173	7.4.3 升压电源	204
7.1.2 电控单元输入级信号类型	173	7.5 通信技术	204
7.1.3 电控单元输入级的特点	173	7.5.1 总线定义	205
7.1.4 电控单元输入级的结构类型	174	7.5.2 总线类型	205
7.1.5 输入通道设计中应考虑的问题	175	7.5.3 现场总线	205
7.1.6 输入通道中的先进技术	178	7.5.4 现场总线的体系结构	206
7.2 电控单元中的微控制器	179	7.5.5 现场总线的优点	207
7.2.1 概述	179	7.5.6 控制器局部网	207
7.2.2 柴油机电控喷油系统中的微控制器	180	7.6 压电陶瓷驱动的高压共轨喷油器的驱动电路	209
7.3 电控单元的输出级	186	7.6.1 压电陶瓷驱动器特性分析	209
7.3.1 模拟量的输出通道	187	7.6.2 压电陶瓷驱动器的驱动电路的基本结构	210
7.3.2 开关量的输出通道	191	7.6.3 压电陶瓷驱动器的驱动方式的选择	213
7.3.3 功率放大器	192	7.6.4 功率开关管的选择	214
7.4 电控单元的电源设计	202	参考文献	214
7.4.1 线性稳压电源	203		

第8章 柴油机电控喷油系统的控制模型与控制策略

8.1 位置控制式电控喷油系统的控制模型与控制策略	216	8.2.3 喷油脉宽和喷油定时的计算	241
8.1.1 电液直列式喷油泵油量控制系统模型分析	216	8.3 高压共轨喷油系统的共轨压力控制技术	244
8.1.2 电磁式油量控制系统控制模型	237	8.3.1 概述	244
8.2 时间控制式电控喷油系统的控制算法	238	8.3.2 基于电液比例进油节流阀的高压共轨轨压控制技术与控制策略	247
8.2.1 喷射过程的时序	239	8.4 喷油量控制与调节	259
8.2.2 高速电磁开关阀关闭时间的测量与预测	241	8.4.1 概述	259
		8.4.2 基于转矩协调的喷射油量计算	260
		8.5 喷油速率控制与调节	263
		8.5.1 概述	263

8.5.2 喷油率形状控制技术	264	8.6.2 基于柴油机各气缸排气温度的 高压共轨喷油器的喷射特性 一致性控制方法	277
8.6 多缸柴油机各缸喷油器喷油 量一致性的控制	276	参考文献	279
8.6.1 概述	276		

第9章 高压共轨喷油系统的仿真分析技术

9.1 概述	281	数学模型	304
9.1.1 高压共轨喷油系统的仿真 分析技术的作用	281	9.3.4 数值计算方法	306
9.1.2 高压共轨喷油系统的仿真 分析技术的实施步骤	282	9.4 高压共轨喷油系统液压元件 流场仿真和液动力	306
9.1.3 高压共轨喷油系统的仿真 建模及模型的解算方法	283	9.4.1 概述	306
9.2 应用动态仿真软件进行高压共轨 喷油系统的动态仿真分析	284	9.4.2 高压共轨喷油系统液压 元件流场仿真	308
9.2.1 AMESim 介绍	284	9.4.3 高压共轨喷油系统中液压元件的 滑阀和锥阀液动力	310
9.2.2 AMESim 在高压共轨喷油 系统中的应用	285	9.4.4 非全周开口圆柱滑阀 稳态液动力	313
9.2.3 其他可以在高压共轨喷油系统中 应用的动态仿真软件	292	9.4.5 应用流场仿真技术研究高压共轨 喷油器中的空穴(气穴)问题 ...	317
9.3 一个精确模拟具有多次喷射 能力的高压共轨喷油系统的 动态仿真数学模型	295	9.5 高压共轨喷油系统中柴油的 物理性质	322
9.3.1 热流体动力学模型	296	9.5.1 概述	322
9.3.2 机械模型	301	9.5.2 喷射压力不大于 180MPa 条件下 的典型燃油物理特性	322
9.3.3 高速电磁阀电磁铁的		参考文献	329

第10章 高压共轨喷油系统试验检测技术

10.1 有关高压共轨喷油系统试验 技术的一些概念	330	10.2.2 试验方法	334
10.1.1 柴油机喷油系统的 试验技术	330	10.3 高压油泵的试验	337
10.1.2 柴油机喷油系统试验设备	330	10.3.1 概述	337
10.1.3 柴油机喷油系统试验设计	330	10.3.2 高压油泵的试验方法	338
10.1.4 柴油机喷油系统 试验的分类	331	10.4 机械式溢流阀的试验	340
10.1.5 试验标准	332	10.5 电液比例控制高压 溢流阀的测试	341
10.2 高压共轨喷油器试验技术	332	10.5.1 静态性能测试	341
10.2.1 概述	332	10.5.2 静态性能测试方法	341
		10.5.3 动态性能测试	342
		10.5.4 动态性能测试方法	343

10.6 电液比例节流阀的性能		10.6.3 电液比例节流阀的性能	
特性试验	345	试验油路及方法	346
10.6.1 静态性能	345	参考文献	350
10.6.2 动态特性	345		

第 11 章 柴油机电控系统 中的传感器

351

11.1 加速踏板位置传感器	351	11.4 位移传感器	369
11.1.1 电位器式加速踏板位置		11.4.1 差动变压器式线性	
传感器	351	位移传感器	369
11.1.2 非接触(霍尔式)加速		11.4.2 差动自感式(变磁	
踏板位置传感器	353	阻式)位移传感器	372
11.2 转速、曲轴转角和气缸识别的		11.4.3 电涡流位移传感器	375
传感器	356	11.5 空气质量流量计	379
11.2.1 电磁式曲轴位置传感器	356	11.5.1 热线式空气流量计	379
11.2.2 霍尔效应转速传感器	358	11.5.2 热膜式空气流量计	381
11.2.3 差动式霍尔效应转速		11.6 温度传感器	381
传感器	359	11.6.1 金属热电阻温度传感器	381
11.3 压力传感器	359	11.6.2 热敏电阻温度传感器	384
11.3.1 压阻式压力传感器	360	参考文献	388
11.3.2 压电式压力传感器	364		

第 1 章

柴油机电控喷油技术概论

1.1 柴油机电控喷油技术出现的必然趋势

我国是一个人口众多、资源相对不足的国家，走中国特色的可持续发展道路，才符合中国的国情。为此，必须对内燃机技术的发展给予足够的重视。

首先，内燃机是能源消耗的大户。据国际汽车工程师协会(FISITI)1996年公布的资料，公路运输是当今世界上最主要的运输方式。世界客运总量的80%和世界货运总量的42%由公路承担，所以在世界能源消耗中，公路运输占石油消耗的42%，约占人类能源总消耗的16%。由于内燃机的油耗在世界能源消耗中占有举足轻重的地位，所以降低内燃机的油耗一直是全人类共同关注的问题。我国内燃机燃油消耗率与国际先进产品相比要高10%~20%。进入21世纪以来，中国汽车产量迅速上升，至2009年底，我国汽车保有量已经超过7600万辆，与2008年相比较，增长了1150多万辆，增长超过了15%。据有关部门预计，到2020年，中国汽车保有量将超过2亿辆，汽车在我国能源消耗中的地位也将更为重要。而我国是一个能源紧缺的国家，2011年，我国石油进口依存度达54%，内燃机石油消耗约占全国总消耗量的三分之二，是名副其实的用油大户。因此，不断地降低发动机的油耗，节约能源将是一项长期的任务。

第二，内燃机是环境污染的罪魁祸首之一。内燃机对环境的污染问题已不容忽视。现在我们生活的这个地球环境状况日益恶化，特别是城市的污染问题更为严重，在城市里我们已很难看到蓝色的天空。而内燃机废气污染占我国绝大多数城市非供暖季大气污染的50%以上，是城市最主要的大气污染源。因此许多国家都对车辆排放制定了严格的限制标准。

为此，我国于1999年1月开始在北京实施相当于欧Ⅰ的轻型车国Ⅰ排放标准，从2001年在全国范围内开始实施国Ⅰ标准，2005年开始实施国Ⅱ标准(等同于欧Ⅱ)，2007年开始实施国Ⅲ标准(等同于欧Ⅲ)，2010年开始实施国Ⅳ标准(等同欧Ⅳ)。

面对日益严重的能源危机和环境污染，国际内燃机界不停地在寻找实现清洁、高效内燃机的途径。在技术发展中，人们对柴油机技术有了更新、更深入的认识。

首先，自20世纪90年代以来，由于排放控制技术的发展，柴油机在车用动力中占据着越来越重要地位。在中、重型汽车动力中柴油机保持着其独占的地位；在轻型车动力领域内，柴油机的应用不断扩大；在轿车领域，低油耗、低污染的柴油机轿车在欧洲得到迅速发展。目前，欧美国家的100%的重型车、90%的轻型车采用柴油机，欧洲柴油机轿车已占轿

车年产量的 50%，法国、西班牙等国家更高达 70% 以上。人们逐渐认识到柴油机是当今保持汽车大批量、低成本生产中解决环保与节能双重压力的最有效、最经济的手段之一。

其次，伴随着柴油机技术的不断发展，气体燃料发动机（天然气发动机、液化石油气发动机）、混合动力汽车、电动汽车以及与之配套的各种动力电池的开发已取得重大突破。然而，业内人士仍普遍认为，由于受到关键技术水平、生产成本、使用条件等方面的制约，上述新型动力汽车要普及总量 10 亿辆（2010 年全球汽车保有量）和年产大约 7000 万辆车的规模，绝不是一二年内能够实现的。

我国内燃机，特别是车用柴油机工业在过去几十年里得到飞速发展，但仍存在很多问题。我们的柴油机产品，很多可靠性差，能耗大，排放污染严重，动力性、紧凑性、振动和噪声等指标也较差。此外，我国的柴油机技术水平大多很落后。现在，国外在柴油机方面已普遍采用电控技术，直喷式高压喷射技术以及增压，特别是增压中冷、废气再循环技术、排气后处理等先进技术。电控共轨喷射技术也已进入实用阶段，并且正在迅速地推广应用。而在国内，由于缺乏技术投入，车用柴油机的技术水平相对比较落后，对国外现在采用的或正在研究的新技术的掌握和应用还有相当的差距。

科学技术是解决可持续发展难题的必要手段。为使我国的内燃机工业实现可持续发展，我们就必须在新技术方面加大人、财、物的投入，并取得重大突破。在这中间，柴油机采用电控技术，特别是电控共轨喷油技术已势在必行。

采用电控喷油技术是当前柴油机技术发展的重要方向之一。早在 20 世纪 70 年代，世界上许多技术发达国家就已竞相开发柴油机电子控制喷油技术，到目前为止，已研制并生产出了许多功能各异的柴油机电子控制喷油系统，其中大部分已产品化并投放市场，取得了显著的经济效益，与此同时也有力地推动了柴油机电控喷油技术的进一步发展，控制功能更全、工作更可靠的新产品层出不穷。

柴油机电控喷油技术的出现与发展是一个必然趋势，究其原因，主要有以下两个方向：

其一，由于能源危机和严重的环境污染，对柴油机的燃油经济性和排放指标提出了十分苛刻的要求。很久以来，为了降低柴油机的油耗和减少排放，除了对柴油机本身的各个系统进行了研究和改进之外，先后还出现了各种各样的机械式控制机构。诚然，这些控制机构如机械式调速器、喷油提前装置等实现了对影响发动机经济性和排放的主要参数的控制，曾取得了不容忽视的成果。但由于它们不可能实现更为复杂的调控，并存在一些先天缺陷，其控制结果是不能令人满意的。有结果证明：喷油始点改变 1° 曲轴转角。燃油消耗率会增加 2%，HC 排放量增加 16%， NO_x 排放量增加 6%。显然，依靠机械式喷油提前装置实现高精度的喷油提前角控制是十分困难的，甚至是不可能的。

其二，控制精度低是机械式控制系统不再能满足更高控制要求的主要问题，而无论是柴油机的循环供油量（齿杆位移量的控制）还是喷油提前角（喷油始点的控制）实际上均受很多因素的制约，其每一瞬时的最佳值均不同，要想实现发动机的最优运行，必须要实现多参量的实时检测与控制，显然，这又是机械式控制无能为力的。因此，当人们对柴油机的经济性和排放提出更高的要求时，传统的机械式控制系统就必须被别的更好的系统所取代。

图 1-1 为欧洲的内燃机车柴油机排放标准，图 1-2 是美国非道路大型柴油机 NO_x 和颗粒排放标准，从这些排放标准可以看出，即便是非道路用的柴油机和内燃机车用的柴油机对氮氧化物（ NO_x ）和微粒（PM）的限制也很严格。

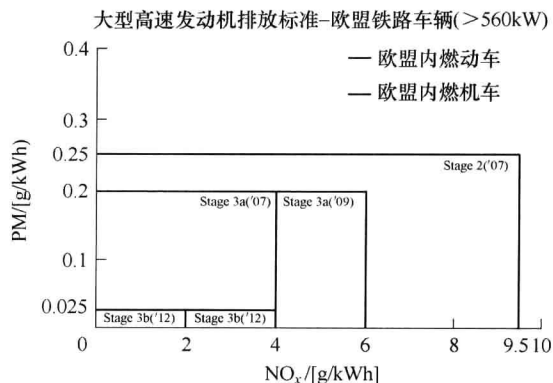


图 1-1 欧盟(EU)内燃动车和内燃机车排放限值标准图

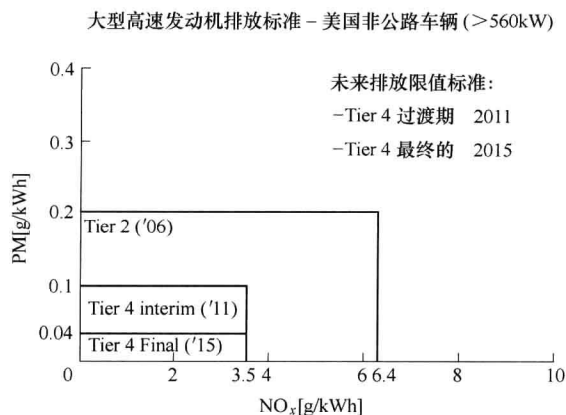


图 1-2 美国环保局建筑业和工业排放限值标准图

要降低柴油机 NO_x 排放,就要减小柴油机气缸内的最高压力和最高温度,不使气缸内的 N_2 和 O_2 在高温高压下变成 NO_x ,这就要求喷油定时滞后。喷油定时滞后会引起烟度(颗粒)排放上升,经济性和动力性下降。为解决矛盾,除提高喷射压力和速率,缩短喷射持续时间外,主要是通过电子控制方式寻求最优化的喷油定时。为降低燃烧噪声和 NO_x 排放,柴油机要求喷射系统有一个小的预喷射量,产生在主喷射之前,而且预喷射量、预喷射与主喷射之间的间隔都能根据不同运行工况有所变化,这些显然只有通过柴油机电子控制的某些系统(如共轨系统)才能实现。为降低排放,还要对喷油器的瞬时喷油速率进行控制,希望实现喷射初期喷油速率低,以降低 NO_x 和噪声,喷射结束时又要能快速断油,以降低颗粒和 HC,并且也要随着不同工况进行适当调整,这也只有采用电控技术才能实现。

图 1-3 是美国 Caterpillar(卡特匹勒)公司柴油机喷油速率控制对排放指标影响的试验结果。柴油机采用电控喷油技术后,由于其控制精度高,控制自由度大,控制功能齐全,因此能实现整个运行范围内参数优化,不仅能改善排放,改善经济性,还可有效地改善低速性能,改善低温时起动和怠速性能,以及改善操作性能,从而也改善了汽车的舒适性。柴油机电控喷油技术的发展明显地提高了使用性能和降低了排放。

以单片微型计算机为代表的微控制器的出现大大促进了柴油机控制系统的更新换代,使

柴油机电控喷油技术的出现与发展成为可能。

自 20 世纪 70 年代以来,微电子技术有了长足的发展,随着大规模集成电路的出现,微电子产品的成本大幅度下降,在功能强化、功耗降低的情况下,可靠性逐步提高,且性能日臻完善,从而使得在柴油机这一特殊设备中采用微型计算机控制技术成为可能。特别是当单片机以崭新的面貌出现以后,采用单片机的柴油机数字控制系统异军突起,发展十分迅速。可以说电子模拟控制已比传统的机械控制大大前进了一步,但由于各种内在原因,这种控制仍不能满足更高的要求,而数字控制系统的情形就截然不同了。与模拟控制相比,数字控制系统具有许多优点,如它的线路简单,所需硬件少,功耗低,抗干扰能力强,可靠性高(集成电路的失效率已达到 $10^{-9}/h$),控制精度高,能实现多功能控制,适应性强,且调试方便等。因此,以单片机为中心配备适当的硬件和软件,足以形成一个功能十分齐全体积很小的监测、控制、诊断和支撑系统,来完成柴油机所需要的高精度的实时控制。以单片微型计算机为代表的微控制器系统的两大显著特点是:控制精度高和处理信息的能力强,而这两点正是机械式控制系统所不及的,也正是微控制器系统能够取代柴油机机械控制系统的主要原因所在。

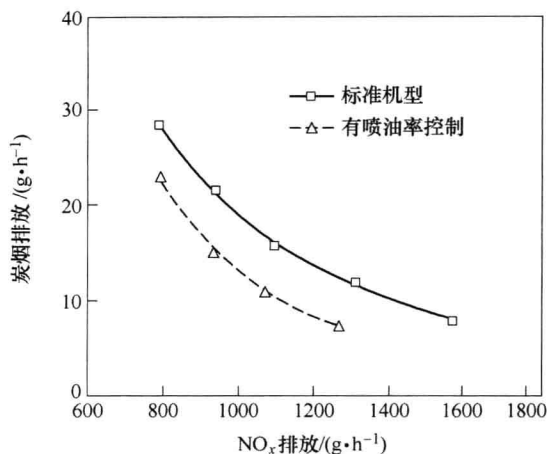


图 1-3 额定工况时喷油速率控制效果

1.2 现代柴油机对燃油喷射系统的主要要求

从上节的分析可知,柴油机电控喷油技术是满足日益严格的排放法规,改善燃油消耗,实现节能减排最关键的技术之一。目前,对柴油机燃油喷射系统提出了更高、更严格的要求,如要求喷射系统具有非常高的控制柔性(自由度),具有多次喷射能力,能够控制喷油速率形状,最高喷射压力能够达到 200MPa 以上。为此,未来柴油机对燃油系统的主要要求(图 1-4 ~ 图 1-6)可归纳如下。

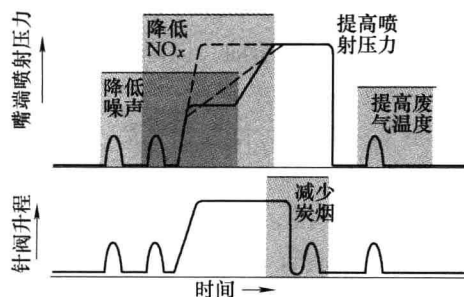


图 1-4 对喷油系统的要求

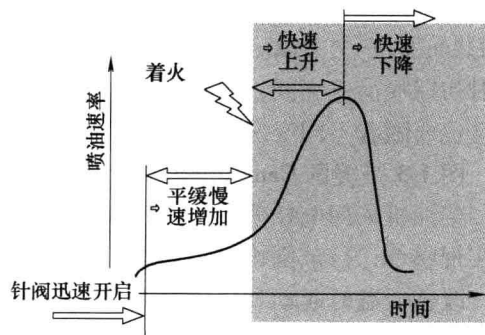


图 1-5 轿车柴油机的理想的喷油速率要求

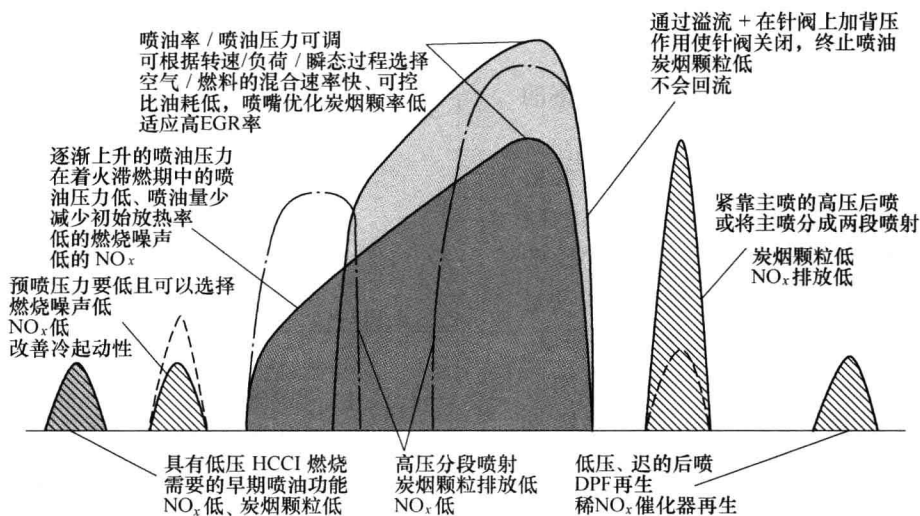


图 1-6 柴油机的理想喷油速率要求

- ① 喷油压力不断提高，且与转速、负荷无关、控制灵活。
- ② 能够精确计量和控制喷油量，特别是最小稳定喷油量要小且可控。
- ③ 良好的喷雾特性：贯穿度、喷雾锥角、喷雾粒径及其分布要适当，雾束要与燃烧室形状和燃烧室中的空气运动相匹配。
- ④ 正确、灵活可变的喷油定时，合适的喷油持续时间。
- ⑤ 合适的扭矩特性，转速适应范围要宽广。
- ⑥ 瞬态响应性能要好，以适应动态排放和性能要求。
- ⑦ 噪声要低（包括机械噪声和燃烧噪声）。
- ⑧ 高的喷油速率和合适的喷油率形态：通过控制喷油率形状以控制燃烧速率形状、压力升高率，降低燃烧噪声和颗粒排放，改善 NVH。在高速区域要求供油速率高，充分利用喷射能量来促进扩散燃烧；控制开始时的喷油速率以控制 NO_x，通过快速断油以控制 PM 和 HC。

为此，要求在喷油开始时可以控制针阀开启，使得在着火滞燃期内有低的喷油率和平缓上升的喷油率形态，而且这也有利于保证喷油过程和喷油率形状的一致性；而在着火以后要求针阀开启速度很快，使喷油率快速提升；在喷油结束时针阀的关闭速度也要很快，即能够实现“先缓后急”的喷油率形态，使碳烟排放和油耗最低。

⑨ 无不规则喷射，但可以根据需要控制喷油次数：能够实现预喷、分段喷射或多次喷射，如早的预喷、迟的预喷、主喷、早的后喷、迟的后喷（根据后处理策略需要），并为 NO_x 催化转化器提供排气中足够的 HC 和有利的排气温度。

⑩ 喷射压力可根据发动机的转速和负荷任意选择，根据不同的喷油阶段调节喷射压力以获得最佳的扭矩特性和最低的排放。希望在喷油过程中喷射压力呈逐渐上升的压力特性，但针阀关闭时的喷射压力要小，以减少小升程时喷射特性差的喷油量。在全负荷额定转速工况要求有足够的最大喷射压力以满足额定功率和排放的要求。而在某些工况采用比较矩形的喷油波形，提高部分负荷时的平均有效喷射压力，以适应高 EGR 率的要求。

⑪ 成本要低，在发动机上的安装、布置要方便。安全性、可靠性、寿命和维修性能等要好。

图 1-7 为柴油机对放热率和喷油率的要求。

影响喷油系统和发动机性能的参数有很多。而对发动机性能影响敏感的喷油系统主要参数包括：喷油系统的预喷射（预喷射次数、时间间隔、油量和变动量等）、针阀开启压力和压力的上升梯度、最大喷油压力、喷孔直径、针阀关闭时的压力差、后喷（早的后喷、迟的后喷和后喷压力）、针阀开启和关闭速度等。

由此可见，常见的喷油系统，如电子调速器控制的直列式喷油泵、定时套控制喷油正时的电控直列泵（TICS）、电控分配泵、电控单体泵（EUP）、集成电控单体泵（FEUPI）、电控泵喷嘴（EU I）、液压驱动的电控泵喷嘴（EUI）、高压泵喷嘴（HPI）等都将很难满足今后柴油机发展的需要。

所以，满足未来要求的燃油喷射系统主要有电控高压共轨系统（CR）、智能型喷油系统（如德尔福公司的智能型喷油器 Smart E3 injector）等。除此以外，高压喷射以后，燃料的温度会急剧升高，所以，高压喷射系统燃料的冷却和温度控制也是未来控制系统的关键。

1.3 柴油机电控喷油系统概述

尽管目前已发展出许多功能各异的柴油机电控喷油系统，如针对直列泵的电子调速器，电控分配泵，电控单体泵等，但其基本组成大体上是相同的，如图 1-8 所示，它们均与被控对象（柴油机）构成一闭环反馈控制系统。一般可将柴油机电控喷油系统分为四个部分，即：被控对象（柴油机）、传感器、以单片机为核心的控制器和执行器，后三部分组成柴油机电控喷油系统。

传感器的主要功能是检测发动机的运行参数或状态，它将非电量的有关参数或状态转化成电信号，然后不失真地将有关信息提供给控制器。目前，在柴油机的信号检测中所用传感器的种类很多，按信号的种类大体上可分为：开关脉冲量和连续模拟量两种，具体应根据所需的监控参数及要求选用。

以单片机为核心的微控制器是柴油机电控喷油系统的大脑，柴油机动力装置能否可靠、经济地运行，在很大程度上取决于微控制器。它是一个典型的数字式控制器，由单片微型计算机、接口电路等硬件和软件组成，信息的采集、处理、传输和时间程序控制是该控制器的主要功能。目前，柴油机电控喷油系统中大都采用单片机，以减小体积、降低成本和提高可靠性。单片机的工作原理和内部结构与通用微型计算机基本相同，但由于它是特殊用途的专

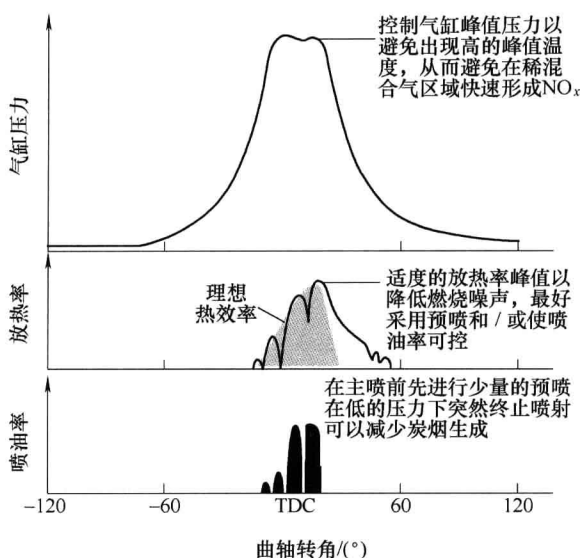


图 1-7 柴油机对喷油率和放热率的理想要求

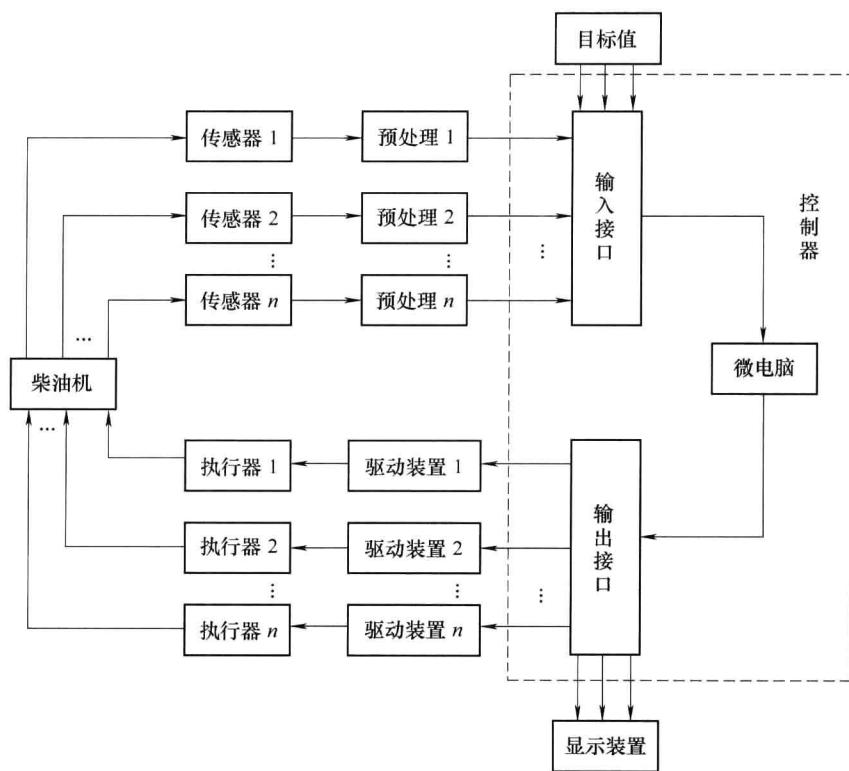


图 1-8 柴油机电控喷油系统的基本组成

用机，对其功能和处理信息能力的要求均较低，因此其系统结构和设备可以大大简化。目前市售的各种单片机功能/价格比却相当高。控制器中的单片机由硬件和软件组成。主要硬件有：中央处理器(CPU)，存储器、输入/输出设备，定时器/计数器等。软件分为两种类型，即系统软件和应用软件。

执行器是柴油机电控喷油系统实现对柴油机进行调控的最终手段，它按照控制器的“意图”动作。执行器由驱动部分、执行电器和机械执行机构三部分组成。微控制器输出的控制决策信号一般很小，不能直接驱动执行电器，需要专门设计驱动电路。目前在柴油机电控喷油系统中的执行器中使用的执行电器分别有：动铁式力电动机，如比例电磁铁、高速开关电磁铁；动圈式力电动机，如直流直线电动机；此外还有压电陶瓷驱动器、直流伺服电动机、步进电动机和力矩电动机等。另外，还采用了电液机构。机械执行机构的形式则依据其控制对象和在发动机上的布置而定。执行器是柴油机电控喷油系统的最后一个环节，也是控制系统对被控对象实施调控的唯一手段，它又直接与发动机有关部件连接。因此，在设计时要充分考虑到其强度、刚度、抗振动能力、抗干扰能力、调节精度和调节稳定性等一系列问题。执行器设计是整个柴油机电控系统的一个重点和难点。

柴油机电控喷油系统工作流程大体如下，传感器检测到的各种信号先送入模/数(A/D)转换器(如果输入信号是模拟量)，然后通过微控制器的接口输入。在微控制器的存储器中，存有所需的发动机调控参数或状态的目标数据。这些目标数据是柴油机的各种不同参数和最优运行结果的综合，一般是通过统计或实测而得到的。当由传感器检测到发动机的某一实际