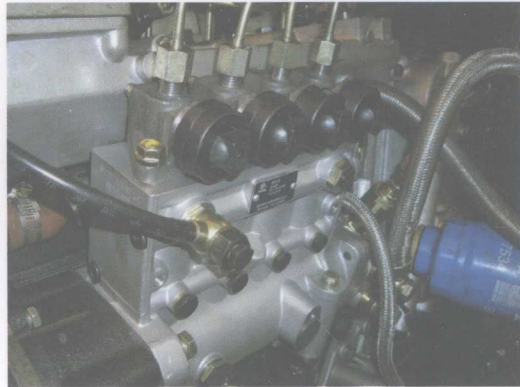
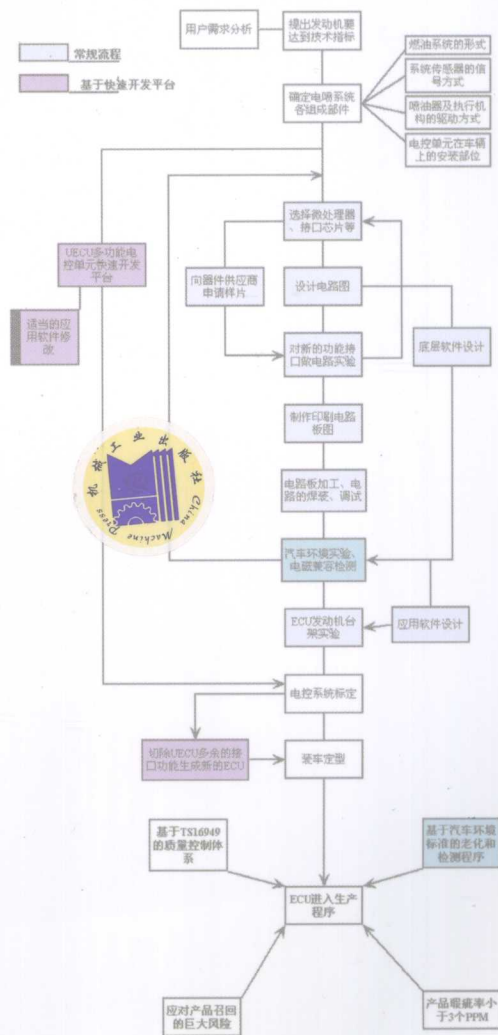
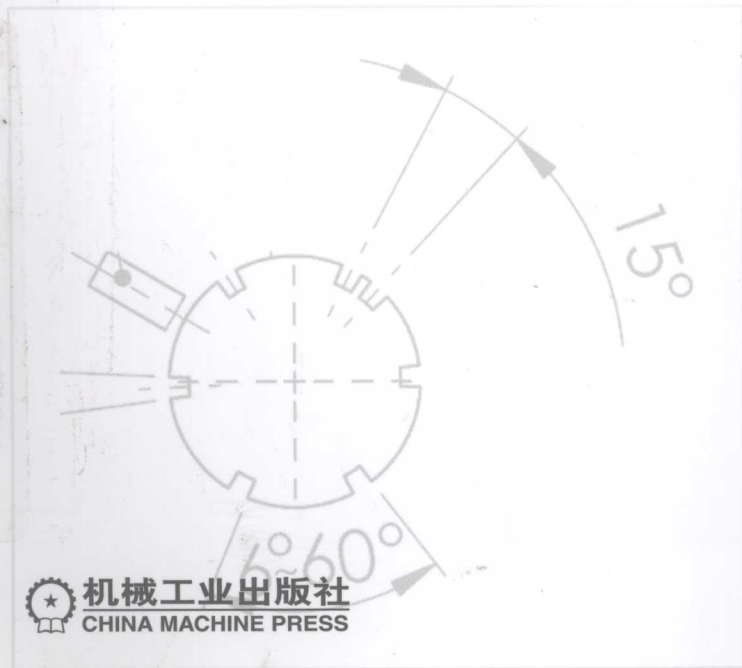




柴油机电控技术 实用教程

李铁军 著

CHAIYOUJI DIANKONG JISHU
SHIYONG JIAOCHENG



柴油机电控技术实用教程

李铁军 著



机械工业出版社

本书包含了两个方面的内容：一是较为系统地、全面地介绍了柴油机电控技术的基本内容；二是针对电控柴油机的实际控制需求，对编制柴油机控制程序的基础条件、工作步骤、实现方法和工程应用等问题进行了细致和深入的讨论，并给出了针对电控高压共轨、电控单体泵和电控分配泵柴油机模型的控制源代码例程。

本书可供从事柴油机工程工作的专业技术人员、高等院校内燃机工程专业的教师、研究生和本科生用于系统学习掌握柴油机电控技术；也可供从事柴油机电控技术工作的其他专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

柴油机电控技术实用教程/李铁军著. —北京：机械工业出版社，2009.4

ISBN 978-7-111-26616-7

I. 柴… II. 李… III. 柴油机—电子控制—教材 IV. TK421

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 040221 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：连景岩 责任编辑：杜凡如

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：鞠 杨 责任印制：乔 宇

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·24 印张·591 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-26616-7

定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379349

封面无防伪标均为盗版

自序

我在大学里学的专业课程是柴油机设计制造。20 世纪 80 年代,我在一所部队院校执教,讲授《柴油机原理》和《柴油机结构》课程,并参与指导一些课程实践活动。这些本职工作和与之相关的学习过程使我逐渐成为这方面的专业人员。我不仅对柴油机的结构特征和工作原理有了一定的了解,也知道了限制柴油机性能提高的各种因素。后来由于工作需要,我开始参加与计算机技术有关的教学和科研工作,从中了解了计算机应用技术,并学会了设计计算机软件。结合我掌握的两个领域的技术知识,我开始使用计算机来控制柴油机运行。最后我知道限制柴油机性能提高的各种因素都能够通过这种技术手段克服或改善。我坚信,将来柴油机技术的发展一定会走到我想象中的那一步:每一台柴油机都配有一个计算机芯片构成的控制器,柴油机的所有动作,进气、排气、供油、调速等,都由这个控制器来实现统一控制。我还构思了供油系统、配气系统、冷却系统、调速系统等各部分为满足电控技术要求所必须进行的改进,选择了可供控制试验的微处理器,编制了控制流程。

2002 年,我从部队退役,进入一家大型电子企业的汽车电子工程部,在汽车电子专家张育华博士的指导下从事车用 ECU 的软件设计。张育华博士是国内最早开展内燃机电控技术研发的专家之一。他在 ECU 部件产业化方面做了扎实的工作,具有国内领先水平。在那时,车用内燃机电控技术几乎完全像我预想的那样在几个工业先进国家发展起来了,但这种发展对工业制造技术的高水准要求却超出了我的想象。国内的相关技术发展不尽如人意,整个内燃机电控技术几乎完全控制在国外厂商的手中,国内汽车制造业对此多有非议。这也反映出了国内工业基础与工业先进国家的实际差距。

2005 年,我进入一家柴油机制造企业从事国Ⅲ标准柴油机研发工作。我注意到近年来国内柴油机电控技术正在开始进入生产环节并快速地改变着柴油机产业的传统形象,从这种情况可以预见到这一技术对柴油机产业未来的重要影响。我认为,国内的制造企业如果想跟上柴油机应用电控技术这一潮流,必须掌握其中的核心技术。对于柴油机制造商而言,目前最需要的是获得两方面的技术支持:一是电控燃油系统执行器;二是 ECU 技术。在这两个技术条件的支持下,必须掌握自主的柴油机控制源码,这是实现产品自主化的关键。

在参与内燃机电控技术研发的工作中,曾经有一些研究生和技术人员与我商讨应该如何编写内燃机的控制程序,我们针对一些具体的技术问题进行了深入的讨论和研究。当时我们都没有见过有关这一工作的系统资料。因此,我觉得应有一本专著对柴油机的结构、电控系统以及对编写内燃机控制程序的方法和相关的技术问题做系统的介绍和讨

论,这可以使更多的专业人员加入到这项工作中来,并为柴油机专业的技术人员、大学生和研究生提供入门的参考。

为了促进国内柴油机专业人员系统地学习柴油机电控技术,并帮助部分专业人员掌握开发柴油机控制程序的方法,也为了促进柴油机控制软件的规范化,使国内柴油机控制软件技术日益完善,我对近年来在柴油机电控技术工作中的经验和收获做了整理,形成了本书。由于目前国内还未见同类内容书籍,加之本人的能力和经历有限,本书只是一种初步的尝试,希望能够起到抛砖引玉的作用。

本书共分为十四章。第一章对柴油机电控技术的发展历程、现状和前景做出综述,将柴油机电控技术的轮廓和学习阅读本书的注意事项做了简要介绍;第二章到第四章介绍了柴油机电控系统三大主要构成部件,即传感器、执行器和控制器;第五章到第十章介绍了柴油机控制软件的相关要素和实现方法,是本书最核心的内容;第十一章、第十二章主要讨论了电控柴油机调试与标定技术;第十三章介绍了一台电控高压共轨柴油机的控制源程序;第十四章对电控单体泵和电控分配泵柴油机的控制程序与电控共轨柴油机做了对比介绍。

我非常希望国内自主的柴油机电控技术能够得到充分地发展,希望有更多的国内柴油机生产企业能够掌握柴油机电控技术的核心要素。如果本书能够对这一发展历程起到一点积极的作用,我将非常欣慰!

感谢陈亚平在本书写作过程中,为我在书稿校阅、文本整理、插图绘制和文稿打印及装订等方面做出的工作。

李铁军

2009年3月

目 录

自序

引论	1
----	---

第一章 概论

第一节 柴油机电控技术发展概述	4
一、柴油机电控技术的发展历程	4
二、国内柴油机电控技术的发展和现状	6
三、国内柴油机电控技术发展中的主要问题	8
四、国内柴油机电控技术展望	9

第二节 柴油机电控技术简介

一、电子控制技术	10
二、柴油机电控系统的构成	11
三、技术配套系统	13
第三节 如何学习本书	13

第二章 传感器

第一节 温度和压力传感器	16
一、冷却液温度传感器	16
二、进气温度和压力传感器	18
三、燃油温度传感器	20
四、润滑油温度传感器	20
五、排气温度传感器	20
六、环境气温传感器	20
七、润滑油压力传感器	21
八、燃烧压力传感器	21

第二节 位移传感器

一、分配泵滑套位置传感器	21
二、废气再循环阀开度传感器	21
三、喷油器针阀升程传感器	21

第三节 空气流量传感器

一、热线式空气流量传感器	22
二、热膜式空气流量传感器	23

第四节 角度传感器

一、曲轴角位移传感器	23
------------	----

二、凸轮轴角位移传感器	24
-------------	----

三、加速踏板角位移传感器	25
--------------	----

第五节 开关量发生器

一、扳动式开关	26
二、外部开关量发生器	26

第三章 执行器

第一节 电控高压共轨燃油系统

一、工作原理	29
二、国外电控高压共轨燃油系统的发展情况	32
三、国内电控高压共轨燃油系统的发展	32
四、电控高压共轨系统应用前景展望	32
五、电控高压共轨系统的性能试验	33

第二节 电控单体泵燃油系统

一、基本原理	35
二、电控单体泵测试试验	36
三、国内电控单体泵燃油系统近年来的发展	37
四、单体泵系统的基本配置	38

第三节 电控分配泵燃油系统

一、基本原理和产品代表	38
二、电控分配泵系统的测试试验	40
三、电控分配泵系统的操作和控制	41

第四节 柴油机上的其他主要电控执行设备

一、废气再循环阀	42
二、可调涡轮增压器	42
三、其他执行器	43

第五节 柴油机电控系统执行器的关键技术

技术	44
----	----

第四章 控制器

第一节 电控单元 (ECU)

一、概述	45
------	----

二、ECU 的逻辑结构	47	第二节 实时中断服务模块	89
三、ECU 对高速电磁阀的驱动	50	一、实时中断服务模块 RTI 的主要功能	89
四、ECU 的电特性和环境特性	50	二、时钟模块	89
第二节 ECU 的核心部件——单片机		三、定时执行模块	92
简介	51	第三节 中断服务体系	93
一、单片机的由来与发展	52	一、曲轴信号中断	94
二、单片机内部的典型逻辑结构	53	二、凸轮轴信号中断	95
三、ECU 内单片机应用的基本技术要素	56	三、供油输出驱动的中断控制	95
四、单片机与 ECU	57	第四节 任务调度机制	97
第三节 开放式 ECU 技术理念和通用电控单元开发平台 (UECU)	59	一、任务调度方式	97
一、开放式 ECU 技术理念	59	二、任务调度机制的算法表达	98
二、通用电控单元开发平台 (UECU)	60	三、任务调度机制的发展	99
三、目前市场上几款较成熟的 UECU 比较	63	第五节 柴油机的控制策略	99
第四节 电控单元的软件体系	64	一、控制策略的含义	99
一、ECU 的软件体系	64	二、控制策略的实施方法	102
二、ECU 的基础软件	65	三、电控柴油机常用控制策略	104
三、ECU 的诊断软件	66	四、控制策略的细化和拓展	110
四、ECU 的控制软件	66	第六节 脉谱的处理方法和查找功能	111
五、ECU 的调试与标定软件系统	67	一、脉谱的形式	111
第五节 国内几款较成熟的电控单元简介	68	二、脉谱的数据描述	113
一、国内 ECU 产业的发展	68	三、常用脉谱及其定义、标定和调试	114
二、成都威特研发的 ECU 产品	68	四、脉谱的查找方式	116
三、镇江恒驰科技有限公司的 ECU 产品	69	五、常用脉谱数据的存储设计	117
四、其他国内企业的 ECU 部件研发	71	六、脉谱的查找函数	119
第五章 柴油机控制软件综述	72	第六章 信号的输入	124
第一节 ECU 软件框架和控制软件	73	第一节 曲轴和凸轮轴信号	124
一、ECU 软件的框架构成	73	一、曲轴转角信号	124
二、ECU 软件的运行机理说明	74	二、凸轮轴转角信号	125
三、控制软件的主要变量及相关因素	75	三、其他 IC 类输入	126
四、控制软件所需要的基础软件资源	82	第二节 模拟信号输入和处理	126
五、控制软件的功能函数	85	第三节 开关类信号输入和处理	128
六、控制软件的程序结构	88	第四节 执行输入动作的时机设置	129
七、上电和关电	88	一、定时设置	129
		二、定位设置	130
		三、混合设置方式	132
		第七章 输入信号的处理	133
		第一节 曲轴和凸轮轴角位移信号处理	133
		一、曲轴与凸轮轴转角脉冲信号的	

时序	133	第三节 供油提前角的确定和供油时机控制	164
二、凸轮轴转角脉冲信号的输入处理	133	一、电控高压共轨和单体泵系统的供油提前角计算	165
三、曲轴脉冲信号的输入处理	134	二、供油提前角的计算时机和供油的执行	167
第二节 模拟量输入后的处理	135	三、电控分配泵系统的供油提前角控制	168
一、输入的模拟量	135	四、高压共轨系统多次喷射	170
二、模拟量输入的软件滤波函数	136	五、利用凸轮轴信号实现供油提前角计算	173
三、模拟量的进一步处理	137	第四节 角加速度的计算和运用	176
第三节 开关量输入的处理	139	一、角加速度在运动控制中的意义	177
一、对机械电开关输入的消颤	139	二、角加速度的离散化计算	178
二、开关量的输入函数	140	三、角加速度的应用实例	178
第八章 输出控制和驱动函数	141	第五节 PID 控制在电控柴油机中的应用	181
第一节 电控油泵和喷油器驱动函数	141	一、PID 控制的原理	181
一、驱动电控单体泵系统的高速电磁阀	142	二、PID 参数的整定	182
二、驱动电控共轨系统喷油器	143	三、PID 控制在电控柴油机中的主要应用	183
三、驱动电控分配泵的油量控制滑套	145	第六节 共轨系统轨压的控制	184
第二节 脉宽驱动函数	145	一、目标轨压脉谱	184
一、脉宽驱动的概念	145	二、目标轨压的 PID 控制	184
二、脉宽驱动的实现	146	三、轨压 PID 控制函数和任务	185
三、脉宽驱动的实例——控制 EGR 阀	147	第七节 用 PID 方法控制电控分配泵滑套位置	187
第三节 开关控制	150	一、实现滑套位置 PID 控制过程的要素	187
一、开关驱动的概念	150	二、滑套位置 PID 控制函数和任务	188
二、开关驱动的实现	150	第十章 柴油机控制策略的实现	191
三、开关驱动的实例	151	第一节 总体策略框架的实现	191
四、信号灯的的控制	152	一、控制策略的工况划分	192
第九章 基本控制处理功能	154	二、主体控制流程	193
第一节 转速的计算	154	三、CMPT 任务函数的实现	194
一、瞬态转速及离散化处理	154	四、控制策略的调用时机	194
二、平均转速	155	第二节 停止工况	196
三、依托曲轴信号的转速计算	156	一、进入停止工况	196
四、依托凸轮轴信号的转速计算	157	二、由停止工况转出	197
第二节 每次供油量的实现	158	三、停止工况的处理函数	197
一、共轨系统每次供油量	159		
二、电控单体泵系统每次供油量	160		
三、电控分配泵系统每次供油量	160		
四、燃油温度补偿	161		
五、每次供油量不均衡现象的校正	163		
六、电源电压因素的处理	164		
七、停缸运行控制	164		

第三节 起动工况	198	二、独立数据修订	232
一、进入起动工况	198	三、数据的图形显示	235
二、由起动工况转出	198	四、脉谱的显示与标定	236
三、起动工况的控制策略	199	五、诊断功能	239
四、起动工况的控制脉谱	200	第三节 国内几种调试与标定软件系统的 典型实例	240
五、起动工况的处理函数	202	一、EMCS 1.08 系统功能和操作简介	240
第四节 怠速工况	205	二、HT-Link 系统功能和操作简介	244
一、进入怠速工况	206	三、其他系统简介	247
二、由怠速工况转出	206	四、调试与标定软件系统的发展与 完善	249
三、怠速工况的控制策略	207	第四节 ECU 模拟调试环境	251
四、怠速工况的控制脉谱	207	一、对模拟调试环境的要求	252
五、怠速工况的处理函数	208	二、实现模拟调试环境的方法	252
第五节 常规工况	213	三、两种电控柴油机信号模拟系统	256
一、进入常规工况	214	四、使用柴油机信号模拟系统检验 ECU 功能	256
二、由常规工况转出	214	第五节 电控燃油系统的泵台试验	257
三、常规工况的控制策略	214	一、电控燃油系统主要的性能指标	258
四、常规工况的控制脉谱	215	二、电控燃油系统泵台试验的实现	260
五、常规工况的处理函数	216	三、泵台试验的实际步骤	262
第六节 限速工况	219	第六节 调试与标定的准备	264
一、进入限速工况	220	一、对电控柴油机测试台架的要求	264
二、由限速工况转出	220	二、电控柴油机系统安装	264
三、限速工况的控制策略	220	三、上位机的配置及软件系统安装	265
四、限速工况的控制脉谱	221	四、起动试验前的检查	265
五、限速工况的处理函数	221	第十二章 柴油机台架标定的一般 步骤	266
第七节 超速工况	222	第一节 标定工作前的数据准备	266
第八节 控制工况的扩展	222	一、供油特性脉谱	266
一、急加速工况	223	二、各传感器的特性数据	266
二、急减速工况	223	三、其他数据和独立参数脉谱	267
三、车速限制工况	224	第二节 起动前的标定工作	267
四、按档位区分的工况	225	一、冷却液温度传感器脉谱的标定	268
第十一章 电控柴油机的调试与标定	226	二、进气压力和温度传感器的标定	268
第一节 外界与 ECU 的通信	226	三、轨压传感器脉谱的标定	269
一、ECU 的数据通信	226	四、燃油温度传感器脉谱标定	269
二、CAN 总线通信技术	228	五、加速踏板脉谱标定	269
三、实时通信功能 CommunFun	229	六、其他传感器脉谱的标定	270
四、调试与标定软件系统的概念	230		
五、上位机指令伺服系统 HiLeSer	230		
第二节 调试与标定软件系统	230		
一、独立数据显示	231		

七、轨压的确定	270	二、控制程序流程图	297
第三节 起动工况标定	271	三、对执行器的驱动函数	298
一、确定数据的原始值	271	四、变量的设置	299
二、做好怠速工况初始设置	272	五、脉谱的设置	299
三、执行起动操作	272	六、通信功能的设置	299
四、起动过程的细致调节	273	七、任务编号的设置	300
第四节 怠速工况标定	274	第三节 控制层源程序	300
一、确定数据的初始值	274	一、基础软件资源模块	300
二、怠速工况的初步标定	276	二、全局变量定义模块	302
三、怠速工况的细致标定	276	三、脉谱数据定义模块	306
四、怠速工况与常规工况间过渡问题	277	四、通信宏定义头模块	306
第五节 常规工况标定	278	五、控制层用户函数声明模块	311
一、确定数据的初始值	279	六、控制功能模块	312
二、外特性标定	280	七、控制程序的编译、连接和写入	333
三、可用工作区标定	281	第四节 利用模拟运行设备做调试	334
四、最大转矩限定	282	一、模拟运行设备的选择和连接	335
第六节 限速和超速工况标定	282	二、用示波器检验相位	335
一、转速波动对限速标定的影响	282	三、调整供油控制驱动波形	336
二、限速节点的设置和相关标定原则	282	四、传感器输入的模拟调试	336
三、限速性能标定过程	284	五、各工况的模拟调试	337
四、超速性能测试	284	第五节 在柴油机试验台上的调试	339
第七节 对环境要素的调控	285	一、轨压控制的实现	339
第八节 标定工作完成后的数据处理	285	二、试验台的配置和柴油机的安装	340
第九节 电控柴油机车辆标定初步	286	三、停止工况	340
一、电控柴油机车辆标定概述	286	四、起动工况	340
二、油门油量标定	287	五、怠速工况	341
三、其他的车辆标定问题	288	六、常规工况和限速工况	341
第十三章 电控共轨柴油机控制程序	291	第六节 外围设备的控制功能	342
第一节 基本控制模型和资源需求	291	一、EGR 控制	343
一、EDBM_CRD 的基本模型	291	二、低温冷起动系统控制	345
二、EDBM_ECU 应具有的基础软件功能	291	三、冷却风扇控制	351
三、软件的模块结构	293	四、空调控制	352
四、关于程序符号设置的规定	294	五、其他额外载荷控制	355
五、基本参数	294	第十四章 电控单体泵和电控分配泵柴油机控制程序	356
第二节 控制程序的要点	295	第一节 电控单体泵柴油机控制程序	356
一、控制程序功能综述	295	一、基本控制模型和控制资源的差异	356
		二、控制策略的差异	356

三、控制程序的制作	356
四、控制程序的调试与排错	359

第二节 电控分配泵柴油机控制程序	四
概述	359
一、基本控制模型和控制资源的差异	359
二、控制策略的差异	360
三、控制程序的调试与排错	361

附录 关于 EDBM_ECU 基础功能的说明	362
第一节 EDBM_ECU 硬件功能的说明	363

一、EDBM_ECU 模型资源	363
二、电源问题	364
三、其他扩展通道	364
第二节 EDBM_ECU 基础软件功能的说明	364
一、供控制层使用的函数资源	364
二、通信功能	368
三、调试与标定软件	369
参考文献	371

引 论

近年来,柴油机电控技术已经在一些工业先进国家得到了较充分的发展。国内自主发展起来的柴油机电控技术也有了长足的进步,已处在蓄势待发的阶段。造成这种技术发展态势主要有以下原因:

1. 对柴油机控制性能的追求

随着柴油机制造技术的不断提高,对于柴油机工作性能的研究不断深入,影响柴油机工作性能的诸多因素已经逐渐被人们了解。这些因素中有的与零部件的结构特征有关,如:进气道的形状、气阀的流通截面积、燃烧室的形状、喷油角度与燃烧室形状的配合等;有的与零部件的制造材料有关,如:选用特殊材料制作的活塞环,能够成倍地增加使用寿命;也有与零部件的制造工艺有关,如:在曲轴主轴颈圆角位置采用滚压加工,可以增加曲轴的疲劳寿命等。

在柴油机结构性能日趋完善的条件下,人们发现:柴油机的控制性能逐渐成为影响柴油机性能进一步提高的关键因素。例如:传统的机械式高压燃油系统配合机械式或机械液力式调速器,无法满足对于供油时机的选择需求。对于柴油机燃烧性能的一般性研究结果告诉我们:当柴油被以雾状喷入柴油机气缸后,其完成燃烧准备的过程与多种条件相关。当这些条件一定时,完成柴油的汽化需要一段确定的时间。柴油机转速上升时,在这段时间内曲轴转过的角度会增大。因此,为了获得理想的燃烧起点,这时应增大供油提前角以保证燃烧准备的需要。但喷入气缸的燃油所需的雾化时间还与每次喷入气缸的燃油量有关。从需求上说,较大的每次喷油量需要较长的燃烧准备时间。过去使用的多种机械式的“供油提前角调整器”仅从供油时机调整,几乎都不能完全满足控制的需求,有的还会大大地增加设备成本。

随着柴油机使用范围的不断扩展,针对特殊使用环境的柴油机控制需求也越来越多。如何在高原条件下实现正常工作?如何在高寒条件下实现顺利的起动?类似问题的研究结论往往会提出针对性的控制需求。这些控制需求如果都用专门的控制机构来实现,则柴油机附属的独立控制机构会越来越多,成本也会大大增加。另一方面,当驾驶员操纵车辆正常行驶时,柴油机的载荷不仅是单纯的行驶阻力,还有其他载荷。例如:当车辆上较大功率设备(如用于制动的空气压缩机等)开始运行时,会造成载荷的突变,这种突变决不是驾驶人员能够通过应急操作动作来应对的,因为其发生的时机是随机的。如果没有有效的方法对这种载荷的突变做出应对,自动对每次供油量做出补偿性调整,则会造成柴油机转速的波动,影响驾驶的平稳性。

对于柴油机性能的高要求涉及了对各缸供油量的精确控制。由于制造与使用情况的不一致,会造成在同一加速踏板位置下不同气缸供油量不一致,这种不一致会造成柴油机转速波动的异常,影响其工作性能。对于传统的机械燃油系统,一般是对于系统在额定工况下的每次供油量做标定,使各缸供油量在这一点的每次供油量达到一致。但对于其他的工况点,只能通过工艺水准的一致性来保证,常常不能完全保证这种一致的供油量。在经过一段使用时间后,由于磨损和其他原因也会造成各气缸每次供油量产生差异。为了保证柴油机在长期工

作中各缸的动力均匀性,需要一种可以按不同气缸、不同工况点、个别地调控各缸每次供油量的设备能力。

另外,还有其他的一些对柴油机控制性能的日益细化的要求。要满足这些要求对于传统的机械、液压和电气控制设备显得无能为力。由于这种情况的增多,人们希望获得更为灵活、简便、智能化的控制能力。电子控制系统的出现,为满足这种希望提供了可能。

2. 智能电子控制设备的发展

20 世纪 70 年代,世界上出现了第一枚微处理器芯片。这种设备引发了 20 世纪的一场工业革命,造成了计算机技术在几乎所有社会生产与生活领域的普及应用。经过近四十年的发展,微处理器的制造技术达到了超大规模集成电路的阶段,在一片 5mm^2 的半导体基板上,可以集成几百万至几千万个晶体管,从而实现复杂的逻辑处理功能。

从 20 世纪 80 年代开始,一种新型的微芯片元件得到日益普遍的应用,这就是单片计算机。它将中央处理器 (CPU)、时钟发生器、随机读写存储器 (RAM)、只读存储器 (ROM)、可擦除只读存储器 (EPROM)、模/数转换器 (A/D)、输入/输出接口等完全集成在一片半导体基板上。可以说,这样一个芯片就是一台完整意义上的计算机,可以完成独立的处理功能。

以这种单片机为核心的设备逐渐在许多工业自动控制领域中得到日益普遍的应用。目前它几乎无处不在:从手机、电视、影碟机到微波炉、洗衣机、电冰箱和其他许多我们熟悉的设备中,都能找到它们的身影。以这种单片机为核心的独立电子控制设备,称为电控单元 (即 Electronic Control Unit),简称 ECU。

由于电子技术、计算机技术和超大规模集成电路制造技术的发展,以及 ECU 技术的逐渐完善和实用化,使得 ECU 技术在内燃机工程领域得到了日益广泛的应用。目前,ECU 已成为内燃机的主要核心部件,或者说,是内燃机最重要的部件之一。

3. 节约能源和环境保护

近半个世纪以来,能源问题逐渐成为影响国际政治、经济、发展格局的重要因素,整个人类社会面临着地球石油资源日趋枯竭的现实。由于全世界范围内至今尚未有应对石油资源枯竭的可靠手段,因此通过技术改进来节省能源,减少石油资源消耗,尽量地推迟石油资源耗尽那一天的来临,以实现为社会能源需求发展到下一个能源时代做好技术准备,这成为了一种共识。燃油价格的上涨,也从市场角度对燃油的消耗产生了一定制约。追求内燃机的低油耗,成为所有内燃机生产厂商的共同目标。采用电子计算机控制内燃机的技术,能够比以往依赖机械、液压、电气控制系统拥有更精准的控制能力,能够按照最理想的控制策略组织和实现较理想的内燃机燃烧过程。在结构条件保证的前提下,通过对最佳燃烧时机的调控,实现较完美的热功转换过程,使热效率得到明显提高。最突出的是可以实现随着动态的工况对燃烧控制策略做出对应的实时调整,使得在内燃机整个工作区域内都实现较理想的热效率,最终达到更低的单位输出功油耗的效果。

在同一时期内,世界工业发展总量急剧扩充,由包括内燃机排放在内的原因带来的污染造成日益严重的环境破坏。内燃机造成的主要污染来自其工作时排出的一氧化碳 (CO)、碳氢化物 (HC)、氮氧化物 (NO_x) 和固体颗粒 (主要是碳粒) 等。内燃机燃烧工况中的工质状态对于这些污染物的生成有着重要的影响。某些专门的研究指出:通过对燃烧过程组织方式的改变,可以使污染物的生成量得到明显的抑制。由于这些对燃烧过程的组织方式都需

要精准地控制影响燃烧过程的诸因素,因此,最终也只有使用电控的方式,才能实现预定的控制意图。

对于柴油机排放物成分的制约已经通过政府部门的政策而成为一种强制性的规则。近年来对国内影响最大的是国Ⅲ标准,这是由中华人民共和国国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局共同发布的国家标准,主要包括 GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ阶段)》和 GB 17691—2005《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)》。对比其他内燃机,传统的柴油机排放效果是较差的,以上这两项标准的强制实施,使得各柴油机生产企业不得不考虑在自己的产品中引入电控技术,以图对排放效果的改进。其中有的厂商已经推出符合国Ⅲ标准的柴油机产品并装车使用。由于现有的实现柴油机国Ⅲ排放手段中几乎都采用了电控技术,所以甚至有人完全混淆了电控技术和国Ⅲ排放技术这两个概念。实际上电控技术不仅是国Ⅲ技术的基础,而且也是实现未来更高排放标准的技术基础。电控技术不只是对于改进柴油机排放有意义,它对于柴油机的动力性、经济性、操控性、振动和噪声、配套部件的协调、与所驱动设备(车辆等)的一体化融合等传统技术指标的改进和新技术项目的发展,都具有重要和深远的意义。

在柴油机控制中引入电控技术,使得柴油机由传统的纯机械或机械—电气一体化产品发展成为机械—电气—计算机一体化产品,这可以看成是柴油机发展里程上的一次革命性的变革。这次变革使柴油机这种长期以来被认为是噪声较大、排放不佳、难登“大雅之堂”的动力设备,一跃成为满足一些高档动力需求的可选项。在欧洲,近年来使用柴油机作为轿车的动力设备,已经成为一种很常规的选择。在克服了柴油机传统的缺点后,由于柴油机固有的优点,如:动力强、低速转矩较大、油耗低、燃油成本低及安全性好等,使其成为轿车动力的新宠。

了解电控技术并把握其发展和应用的基本要素,已成为每一位柴油机专业人员必须面对的问题。我们目前可以针对柴油机电控技术的发展做出以下预测,其中有些已经接近现实情况:

- 新研发的柴油机都会是电控柴油机,几年后生产的柴油机都会是电控柴油机;
- 柴油机电控技术会成为柴油机核心技术的组成部分;
- 对柴油机电控技术的自主能力会成为柴油机工业自主能力的基本要素;
- 柴油机制造厂能否掌握柴油机电控技术关系到未来对自己产品的话语权;
- 国内柴油机电控技术的自主能力关系到整个国内柴油机产业的未来命运。

由于以上原因,要求目前国内柴油机生产制造企业的决策者更加关注柴油机电控技术的诸多方面要素,关注该技术对柴油机产品的开发、制造、生产、销售和服务带来的影响,以摆脱或避免眼前和未来的被动局面;而柴油机专业技术人员,应该学习掌握柴油机电控技术的相关内容为本职工作提供支持。

本书将为读者提供柴油机电控化的知识基础和应用指导,使读者具备系统的柴油机电控技术知识。专业的柴油机电控技术人员能够通过学习实践掌握柴油机控制程序设计的基本方法,参与柴油机电控技术的具体实际工作。

第一章 概 论

第一节 柴油机电控化技术发展概述

柴油机电控化技术,是一种用计算机来实现对柴油机工作过程优化控制的技术。它使用计算机控制技术替代了传统柴油机中通过机械、液力和电气手段对供油时机、供油量、转速、起动特性、加速特性、限速特性、超速保护等参数和工况的控制,为的是获得更好的控制效果。随着柴油机电控化技术的发展,其应用范围也在不断扩充,柴油机上可用计算机控制的对象越来越多。而由于电控技术的发展,柴油机的内部结构和外围部件也在其反作用的影响下,有了新的发展方向。如:电控进排气门、电控可调增压器喷嘴环、电控废气再循环阀、电控低温冷起动助燃设备等都是柴油机电控化技术应用发展的产物。因此,电控技术不仅能应用于柴油机,同时也促进柴油机技术自身发生了重大变革。

一、柴油机电控化技术的发展历程

做为一种自动化控制设备,柴油机电控系统与其他自动控制系统相似,也是主要由传感器、执行器和控制器三部分组成。其中传感器、控制器的技术与其他领域的电控技术没有原则上的区别,只是在具体需求上有一定的特殊性。但在执行器方面却集中反映了柴油机电控系统的主要特征,其中最主要的执行器是柴油机电控供油系统。因此,对于柴油机电控技术发展的阶段划分,目前主要是按照柴油机电控燃油系统的发展阶段来进行的。

柴油机电控化技术最早的发展主要是集中在对燃油系统的控制。直到现在还有业内人士习惯称柴油机电控系统为柴油机电喷系统。其实,由于这种技术本身的发展,至今其技术内涵远远超出了控制喷油的范围,已经包含了日益增多的控制内容。

1. 位置控制式

从20世纪70年代起,随着微处理器技术的发展,对柴油机电控技术的研究开始起步。最早的电控燃油系统被称为位置控制式。这种系统保留了传统机械系统的喷油泵、高压油管和喷油器,同时也保留了传统高压油泵中调节供油量的齿条、齿圈、柱塞套和柱塞上用于调节每次供油量的斜槽等。但供油量调节齿条不再是通过机械式离心调速系统来调控,而是通过电子控制系统操作电磁执行器或位置控制电动机来调控。这种系统对柴油机本体不需做什么改动,继承性较好,便于对现有柴油机做改造。这种系统的控制自由度与原系统相比没有进步,控制精度提高得也不多。

位置控制式的电控燃油系统在直列泵和分配泵上均有应用。如:日本小松公司1987年开发了KP21型电控直列式油泵;1989年日本电装公司开发了ECD电控直列式油泵;1993年,德国博世公司开发出带控制滑套的直列式油泵Rp43;此外,美国的卡特皮勒公司也曾推出类似的产品PEEC系统。在国内,无锡油泵油嘴研究所也曾实现过此类系统,业内习惯称之为“电调”系统。位置控制式的技术目前在某些柴油机中还有应用,本书中提到的电控分配泵也属于这个范畴。

2. 时间控制式

时间控制式电控喷油系统目前有较多应用。这种方式可大致理解为用高速卸载电磁阀替代了传统的调节供油量的齿条、齿圈、柱塞套和柱塞上用于调节每次供油量的斜槽,但油泵柱塞依然按原来的方式由凸轮轴驱动进行压油工作。高速卸载电磁阀在柱塞腔的上方,当电磁阀放开时,柱塞腔与进油道相通,柱塞上行只会使燃油回到进油道。但如果在柱塞上行期间的某一时段内关闭高速卸载电磁阀,柱塞上方将形成封闭的高压油腔,压力会迅速上升并通过高压油管和喷油器喷入气缸。通过对柱塞上行期间供油时段的选择,可以对供油提前角和供油持续角做出调整,对供油持续角的调整等同于对每次供油量的调整。

从这种电控喷油系统的原理上可以看出,它已经在相当程度上摆脱了机械结构对供油时机的限制,可以利用柱塞上行过程中的任一段实现供油,从而获得理想的供油正时。由于只能利用柱塞上行时段实现供油调整,所以供油还是一定程度上受限于供油泵凸轮结构的,这使得供油压力受转速影响较大。实际使用证明了这种系统对于改善柴油机性能大有帮助,可以借助这种系统实现国Ⅲ标准排放。国外较有代表性的产品是德国博世公司的 EUP 系列电控单体泵,国内有威特公司的 WP-2000 和 WP-1000 等,在实用中获得了很好的性能。使用这种电控泵,最大喷油压力可达 130~160MPa,可以明显地改进燃油雾化效果。

时间控制式电控喷油系统目前已经被国内柴油机生产厂商所接受,有的专业人士认为它将是下一阶段国内最有可能广泛流行的系统。国内自主生产这种燃油系统的时间还不长,但市场需求量很大。由于国产化造成销售价格下降,预计在近几年产量会有较大增加。

3. 时间压力控制式

时间压力控制式电控燃油系统。这种系统的特点是有一个各缸共用的高压燃油容腔。这一高压油腔英文原名为 Common Rail,即公共轨道。因此国内习惯称这种系统为高压共轨系统,有人称为 CR。我们将共轨系统的这一高压燃油容腔称为高压油轨或简称油轨。一般高压油轨被安装在气缸盖侧方呈管状与机身长度方向平行。在与各气缸相对的位置,引出高压油管连接对应气缸的喷油器。共轨系统的喷油器受电驱动信号控制。当存在驱动电流时,共轨系统喷油器的高速电磁泄压阀会被打开,引发喷油器针阀两端压力差升高、针阀抬起、燃油喷入气缸。由于这种系统在油轨内压力一定时,每次供油量大体与供油时间成正比,因此也被称作时间压力式控制系统。高压共轨系统具有很突出的特点:

- 1) 燃油喷射压力独立于柴油机转速和负荷。在柴油机低转速下,仍可实现较高的燃油喷射压力。这可以使柴油机低速低负荷时的性能得以改善。
- 2) 对喷油时机和喷油量的控制非常自由。
- 3) 对喷油规律的调节能力很强。喷油控制仅取决于高速电磁阀这一运动件,由于这个运动件质量比较小,因此运动惯性也很小。实际控制时,可以实现在一个工作循环内的多次喷射,有效地改进燃烧效果。
- 4) 能够实现很高的燃油喷射压力。目前已达到 160~200MPa。
- 5) 适应性较强,可以用于多种柴油机机型。

由于共轨系统这些优异的性能,得以实现柴油机燃烧的压升率较好地控制,燃烧噪声也得到了控制,拓宽了柴油机的使用领域。同时,也容易实现对排放的控制。

尽管共轨系统优点突出,但由于对制造水准要求很高,且设备投入资金需求较多,因此目前只有少数国外的技术先进厂商实现了共轨系统的批量制造。其中主要有:德国的博世、

美国的德尔福、日本的电装等。他们的产品已经在货车和轿车柴油机上得到了广泛应用。国内有一汽集团无锡油泵油嘴研究所的共轨系统,已经完成了装车试验,用户日益增多。有些其他国内厂商也已在研制和推出高压共轨燃油系统。

二、国内柴油机电控技术的发展和现状

国内柴油机电控技术在起步方面晚于一些工业先进国家。但是由于近年来需求方面的强力拉动,已经在多个方面取得了一定的进步。

首先是一些高校研究人员取得的成绩。国内的高校研究人员在柴油机电控方面的工作起步并不算晚,只是由于国内配套技术不健全,影响了其成果的产业化进程,但却为国内这一领域的发展起到了带头示范作用。这方面成绩较突出的有:大连理工大学的张育华教授、上海交通大学的卓斌教授、北京理工大学的王尚勇教授等。他们的共同特点是:通过学习国外先进技术和自身的开拓性研究,掌握了柴油机电控系统的基本要素;拿出电控柴油机的示范样机;总结和撰写了一些技术专著,成为国内内燃机电控技术的早期书籍;培养出了国内在内燃机电控方面的新生力量,为国内内燃机电控技术的发展提供了第一批专业人材。这些高校专家对国内柴油机电控技术的主要贡献是完成了柴油机计算机控制系统的设计,为后续的控制系統发展提供了最初的理念;他们还尝试制造出柴油机电控系统的控制器和执行器系统。主要是按照国外产品的理念,通过消化吸收提出自己的设计创意。但由于国内加工制作条件的限制,这方面的一些工作在产业化应用上不是太成功。

在商业化的技术研发领域,一些有条件的科研机构也在柴油机电控领域做出了努力。例如:一汽集团所属的无锡油泵油嘴研究所,是国内最早开始柴油机电控共轨燃油系统研究工作的单位之一。他们为了这一项目做出了巨额的资金投入,在国内率先完成了成套柴油机电控共轨燃油系统,装备这种系统的柴油机已经开始在车辆上使用。

由成飞集团创办的成都威特电喷有限公司,是国内最早使电控单体泵系统达到实用化的公司。威特公司总裁朱元宪博士在国内较早地提出了通过使用电控单体泵系统实现柴油机的国Ⅲ达标策略,并通过自主技术产品实现了这一策略。在此以前,更多人认为应该直接实现共轨式燃油系统,因为这是国际已成熟的主流技术。但根据我国目前的国情,由于现有的柴油机制造资源不可能在短时间内快速更新,因此如何通过继承来实现发展,显得很重要。采用电控单体泵系统实现传统柴油机的电控升级改造,能够最大限度保持原有柴油机技术的继承性,这就使对原柴油机制造生产线的改动需求最小化,同时缩短了技术改造任务的周期,使原有产品经过改造后短时间内就能形成批量的供货能力。

目前,在柴油机电控化改造工作中有一股不可忽视的力量,正在起到日益重要的作用。这就是一些颇具实力的柴油机高压油泵和喷油器制造企业。这些企业共同的特点是具备成熟的大规模精密制造能力,在国内企业中其设备条件、开发投入能力、技术支持能力都较好。更重要的是:实现柴油机的国Ⅲ排放,燃油系统改造是基本的技术条件。因此这些企业既担负历史使命又面临生存压力。另一方面,由于外商的技术保护意识,柴油机电控系统的相关制造技术难以通过技术市场来获得。在此情况下,有些油泵制造企业通过自己组织研发,在电控柴油机燃油系统的开发上取得了令人瞩目的进步。目前在电控共轨系统、电控单体泵系统和电控分配泵系统等方面的研究工作都在推进。

在柴油机电控体系中,控制器(即控制用计算机,常称为 ECU)做为另一个重要的部件,也属于核心技术。在这方面,国内企业有的仿效国外博世、德尔福公司的做法,通过同