

# 第 7 章 电控柴油喷射系统

**教学提示：**将传统的机-液喷油系统实现电子控制，成为机-电或机-电-液一体化的喷油系统，并进而实现以控制喷油系统为核心的柴油机综合控制，可以全面优化柴油机性能。电控柴油喷射系统与燃烧室配合更加良好，喷油压力柔性可控、喷油量和喷油时刻控制与调节更加精确并能实现理想的喷射规律。

**教学目标：**要求学生了解柴油机电控喷射系统的发展历史和趋势，掌握分配式喷油泵实施电子控制的基本方法和工作原理，掌握共轨燃油喷射系统的优点、组成和控制原理。

## 7.1 柴油机电控系统发展概述

全球环境的日益恶化，对柴油机的排放和经济性提出了更高的要求。为了适应更加严格的排放和能源法规的要求，改进柴油机燃油喷射系统是关键环节之一。

将传统的机-液喷油系统改造为电子控制，即机-电或机-电-液一体化的喷油系统，并进而实现以控制喷油系统为核心的柴油机整机综合控制与管理，可优化柴油机性能。

就燃油喷射系统而言，柴、汽油机的控制要素和控制要求有很大不同，汽油机主要是低压的进气支管内或节气门口喷射，对喷射定时和喷油规律(喷油率)没有严格要求；柴油机则是高压缸内喷射，而且要求在毫秒级的时间内完成喷油定时、喷油率、喷油压力与喷油量的精确控制。所以，要达到对燃油喷入量、喷油时刻和油束的空间形态三方面的控制达到优于传统机-液喷油系统的目的，其难度要比汽油机电控喷射大得多。例如，重型载货汽车电控泵喷嘴使用的电磁控制阀，与汽油机的电磁喷油器相比，承受压力高了 300~500 倍，启闭速度则要快 10~20 倍。

因此，柴油机电控技术的发展比汽油机滞后。但是，随着微型计算机技术、电子与传感器技术和汽油机电控技术的发展，尤其是高速强力电磁阀的研制成功，使柴油机电控技术的一系列关键问题得到解决，迅速发展起来。

柴油机和汽油机的电控技术从总体上有类似之处，即各种机构的电控系统都由传感器、电控单元 ECU 和执行器所组成。但相对于汽油喷射系统，柴油机的电控系统更加多样化，具体功能及对性能的影响，不同系统则各不相同。

柴油机电控喷油系统根据不同的控制方式，分为脉动式电控喷油系统、脉动+时间控制式喷油系统和共轨式喷油系统三类。脉动式喷油系统，包括如直列喷油泵、分配泵等。这类泵的原有的油量及供油规律控制靠柱塞螺旋槽(分配泵为油量控制套筒)、机械调速器和油泵凸轮，喷油定时靠机械式喷油提前器(分配泵为液压自动提前器)，它们的供油方式都是脉动的。将这类喷油系统电控化，脉动的供油方式没有改变，称为脉动式电控喷油系统。

脉动+时间控制式喷油系统主要指电控泵喷嘴系统和电控单体泵系统，此类系统仍保持传统的柱塞往复运动脉动供油方式，但由电磁溢流阀开、闭时间和时刻来控制油量和定时。

共轨式喷油系统不采用柱塞泵脉动供油原理,而是由公共油道(共轨)或蓄压室向各喷油器提供所需的高压燃油,通过随工况而变化的实时控制共轨上的高速电磁阀调节喷射压力和喷油规律。这类电控系统又分为蓄压式电控燃油喷射系统、液力增压式电控燃油喷射系统和高压共轨式电控燃油喷射系统。

## 7.2 脉动式电控喷油系统

### 7.2.1 电控直列泵

在原直列喷油泵基础上装有齿杆位移传感器、凸轮轴或曲轴的转角位移及转速传感器、线性电磁铁的执行器、电控单元等组成的控制系统,对喷油量进行调节。喷油量的计量按位置控制方式,根据加速踏板位置、转速等输入信息、以柱塞的供油始点和供油终点间的物理长度,即有效行程(位置)来确定,而有效行程又是由供油齿杆的位置决定的。图 7.1 为德国博世公司的电控直列泵。

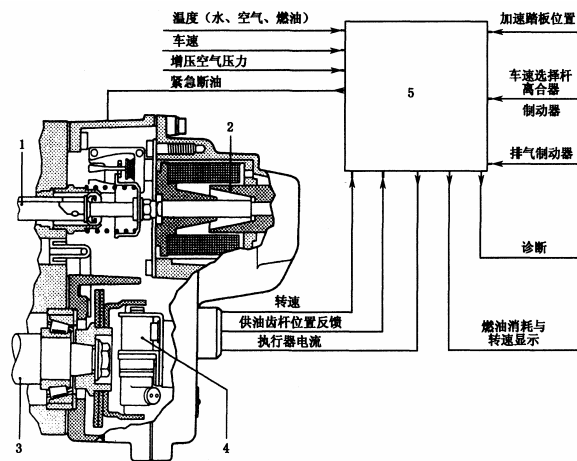


图 7.1 博世公司的电控直列泵

1—供油齿杆 2—比例电磁铁 3—油泵凸轮轴 4—转速传感器 5—电控单元(ECU)

如第 6 章所述,直列喷油泵的机械控制喷射系统通过加速踏板和调速器作用于齿杆,反馈的控制信息是柴油机转速和加速踏板的位置,二者通过机械联系改变供油齿杆位置而控制喷油量,电控后喷射系统则通过传感器检测柴油机的运行状态和环境条件,并由电控单元 ECU 计算出适应柴油机运行状况的控制量,然后由执行器实施。具体说来,加速踏板位置为一可变电电压信号,它反映的是驾驶员愿望,通过标定加速踏板位置电压信号和转速信号与供油齿杆位置的对应关系,同时包括由其他传感器,如各种温度、进气压力、车速、制动、离合器分离等信号对供油齿杆位置进行修正的关系,并以软件的形式存储于 ECU 中,ECU 检测到各种信息后,通过线性电磁铁的执行器改变齿杆位置。例如,当采集到离合器分离信号时,线性电磁铁的执行器将齿杆拉到怠速位置。因此,它比纯机械喷射系统控制精确、灵敏;而且在需要扩大控制功能时,只需改变电控单元的存储软件,便可实现综合控制。

以上结构的电控直列泵还不能实现对喷油始点和喷油规律的电子控制。也就是说, 还需要装备机械式喷油提前器。要实现该功能, 可以采用可变预行程结构。其原理是将通过喷油定时杆将原本固定的柱塞套筒用旋转电磁铁使套筒能在小范围内上下移动, 从而就能选择喷油时刻。图 7.2 为日本 Zexel 公司的可变预行程直列泵。它是在博世公司的电控直列泵的基础上开发的。

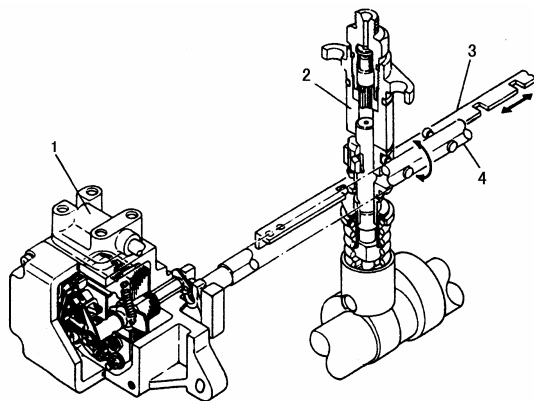


图 7.2 Zexel 公司的可变预行程直列泵

1—预行程执行器 2—柱塞副 3—齿杆 4—喷油定时杆

可变预行程还能选择喷油泵凸轮工作段的型线位置, 如图 7.3 所示。在 A 区, 喷油提前大但油泵供油率低(低压喷油), 在 B 区, 供油率上升。 $\text{NO}_x$  和微粒的排放就可通过喷射期和喷油压力来调整。当柴油机在低负荷时, 可选择凸轮型线的低速段, 使喷油提前, 减少微粒排放, 并利用这时的低供油率减小预混燃烧, 从而也可降低  $\text{NO}_x$ 。在高负荷时则选择高速段凸轮型线, 既可减少  $\text{NO}_x$  又可减少微粒排放。此外, 还可利用转速与负荷的关系选择同时降低  $\text{NO}_x$  和微粒的凸轮型线工作段。

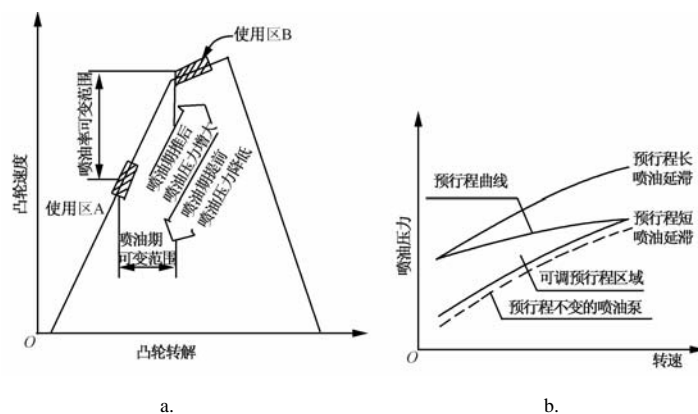


图 7.3 可变预行程直列泵控制特性

上述电控喷油泵改动最小, 是最早的柴油机电控产品。但由于供油齿杆及联动装置、柱塞套等都是惯性大的零部件, 所以过程控制慢, 精度不够高, 喷射压力难以进一步提高, 虽然可变预行程对喷油规律有一定的调节作用, 但调节柔性低, 结构复杂。

### 7.2.2 电控分配泵

用电控装置取代机械调速器和提前器,对 VE 分配泵供油量调节套筒的位置以及液压提前器进行低频连续调节,以实现油量和定时的控制,图 7.4 是日本电装公司生产用 VE 分配泵的电控喷油系统。

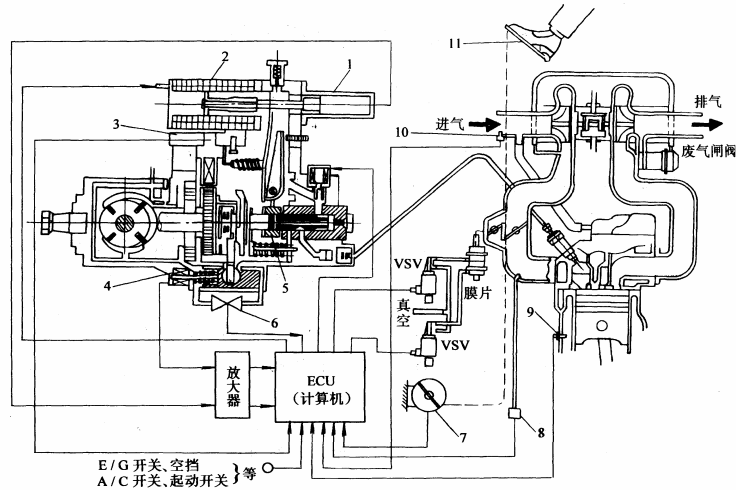


图 7.4 日本电装公司用 VE 分配泵的电控喷油系统

- 1—供油量调节套筒位置传感器 2—供油量控制电磁阀 3—转速传感器 4—定时器位置传感器  
5—供油量调节套筒 6—定时器控制阀 7—加速踏板位置传感器 8—进气压力传感器  
9—冷却液温度传感器 10—进气温度传感器 11—加速踏板

供油量的控制方法:与电控直列泵类似,电控单元 ECU 根据加速踏板位置传感器和柴油机转速传感器的输入信号,首先算出基本供油量;然后根据来自冷却液温度、进气温度和进气压力等传感器信号以及启动信号,对基本供油量进行修正;再按供油量调节套筒位置传感器信号进行反馈修正之后,确定最佳供油量(调节套筒位置)。

电控单元把计算和修正的结果作为控制信号传到供油量控制电磁阀(图 7.5),产生磁力,吸引可动铁心。控制信号的电流越大,磁场就越强,可动铁心向左的移动量越大,通过杠杆将供油量调节套筒向右推移的就越多,供油量也就越大。

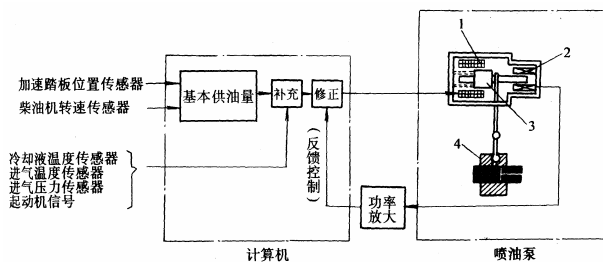


图 7.5 供油量的控制

- 1—供油量控制电磁阀 2—供油量调节套筒传感器 3—可动铁心 4—供油量调节套筒

供油定时的控制方法：电控单元首先根据柴油机转速和加速踏板位置等传感器的输入信号，初步确定一个供油时刻，然后再根据进气压力、冷却液温度等传感器的信号和启动机信号进行修正(图 7.6)。喷油泵喷油提前器的活塞位置传感器 1 的铁芯直接与喷油提前器的活塞相连。喷油提前器活塞位置信号反馈给电控单元，以实行反馈控制。电控单元根据最后确定的供油时刻，向供油定时控制阀 3 的线圈 6 通电，可动铁心 7 被电磁铁吸引，压缩弹簧 8 向右移动，打开喷油提前器由高压腔 4 通往低压腔 5 的油路，使喷油提前器活塞两侧的压差减小，活塞 2 向右移动，供油时刻推迟，即供油提前角减小。

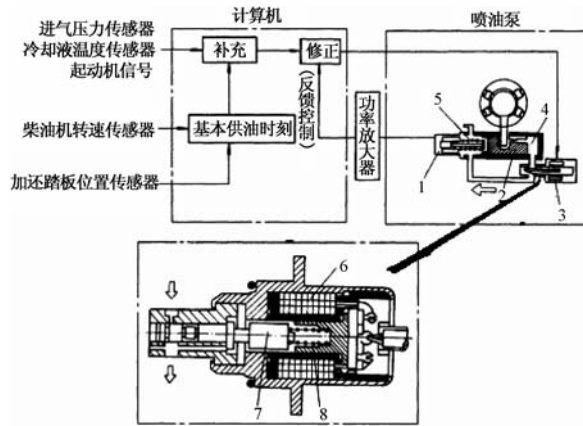


图 7.6 供油定时的控制

1—喷油提前器活塞位置传感器 2—喷油提前器活塞 3—供油定时控制阀 4—高压腔  
5—低压腔 6—供油定时控制阀线圈 7—可动铁心 8—弹簧

供油定时控制阀是电磁阀。通过改变流过电磁线圈的脉冲电流的占空比，改变由喷油提前器的高压腔到低压腔的流通截面积，以调整喷油提前器活塞两侧的压力差，使活塞产生不同的位移，以控制供油时刻。

电控分配泵相对于其原来纯机械式调节方式，控制油量和供油时刻精确、灵敏，不存在产生失调的可能性；在需要扩大控制功能时，只需改变电控单元的存储软件，便可实现综合控制。通过改换输入装置的程序和数据，可以改变控制特性，一种喷射系统可用于多种柴油机，也可在一种柴油机上实现不同的控制模式，优化柴油机的运转特性。

电控分配泵与电控直列泵相比，虽然在控制和调节方法上类似，由于前者被控元件更轻量化，故精度和灵敏度要高，因此在轿车、轻型客车、轻型卡车上得到广泛应用。

脉动式电控喷油系统只是对传统喷油系统的初步电控化改造。由于未变更原有喷油装置，脉动供油以达到喷射的特性保持不变，一般不能对喷油率和喷油压力进行调控。此外，由于不是对油量和定时进行直接控制，存在中间环节，控制响应速度不能满足现代柴油机的要求，同时也做不到各缸的独立控制。

### 7.3 脉动时间控制式喷油系统

由第 6 章可知，合理的燃烧放热规律是柴油机具备良好动力性、经济性及降低排放与噪声的关键，而燃烧放热规律又是由喷油规律决定的。燃烧放热规律包括三要素，即燃烧

放热始点、放热持续期和放热率曲线形状。一般说来,传统的机械式喷油系统及上述的脉动式电控喷油系统通过调节供油提前角控制燃烧放热始点,通过油量调节、改变喷油持续角、改善雾化、加强缸内空气流动、喷油系统与燃烧室的合理匹配等措施控制放热持续期和放热率曲线形状,但由于喷油率(喷入汽缸的油量与时间的关系)不可控,放热持续期和放热率曲线形状的控制既达不到较高的精度,也不能兼顾柴油机全工况范围。

时间控制式喷油系统实现了对喷油率的柔性控制,对于改善柴油机的性能具有十分重要的意义。

时间控制式柱塞泵脉动喷油系统仍保持传统的柱塞往复运动脉动供油方式,利用安装在高压油路中的高速、强力电磁溢流阀来直接控制喷油始点和喷油量,柱塞副只起加压、供油作用,没有油量调节功能。为此取消了专用于调节油量和定时的机构,如调速器、提前器、供油调节杆、柱塞斜槽乃至出油阀组件等。

图 7.7 德国博世公司电控泵喷嘴系统在柴油机上的安装图,图 7.8 为电控泵喷嘴工作原理图。

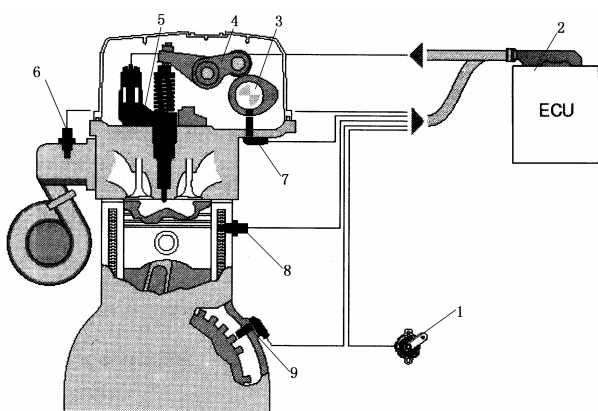


图 7.7 电控泵喷嘴在柴油机上的安装图

1—加速踏板传感器 2—电控单元 3—驱动凸轮轴 4—摇臂  
5—泵喷嘴喷油器 6—增压压力传感器 7—转速传感器  
8—冷却液温度传感器 9—曲轴位置传感器

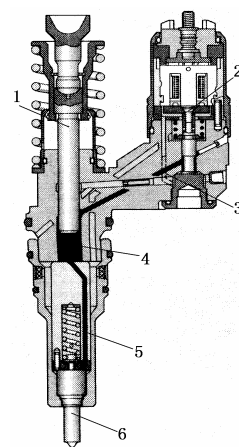


图 7.8 电控泵喷嘴工作原理图

1—柱塞 2—电磁溢流阀 3—旁通油路  
4—柱塞腔 5—高压油路 6—喷油器

电控泵喷嘴工作原理图是:柱塞在凸轮轴和摇臂的驱动下给燃油加压,旁通油路在电磁溢流阀关闭时,柱塞腔内压力升高。压力升高到一定值时,喷油器打开,燃油喷入;旁通油路在电磁溢流阀打开时,柱塞腔泄压,喷油器处于关闭状态。因此,电磁溢流阀打开的时刻决定喷油提前角,打开的时间决定喷油量,同时可以得到所需要的喷油率,如三角形、预喷形等,如图 7.9 所示。

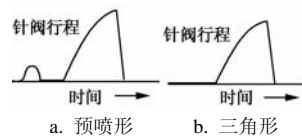


图 7.9 电控泵喷嘴的喷油率

图 7.10 是德国博世公司电控单体泵系统在柴油机上的安装图;图 7.11 为其工作原理图。可以看出,电控单体泵的工作原理与电控泵喷嘴类似,事实上,二者也具有同样的控制效果,这里不再赘述。

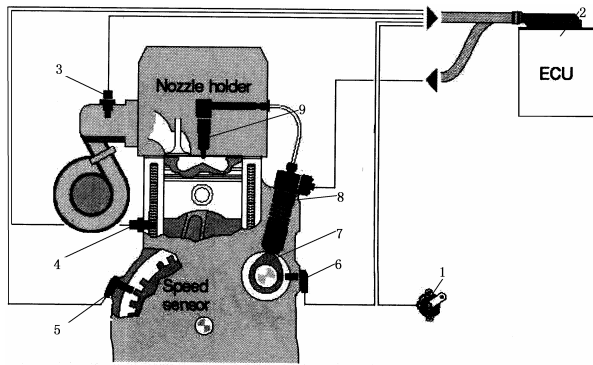


图 7.10 电控单体泵在柴油机上的安装图

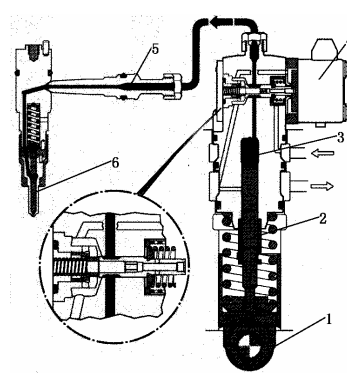


图 7.11 电控单体泵工作原理图

- 1—加速踏板传感器 2—电控单元 3—增压压力传感器 4—冷却液温度传感器 5—曲轴转速传感器 6—凸轮轴转速传感器 7—驱动凸轮轴 8—单体泵 9—喷油器

电控泵喷嘴与电控单体泵系统，是目前已使用的两种时间控制式柱塞泵脉冲燃油喷射系统。它们均为“时间-压力”计量方式，其中供油压力仍是由凸轮的运转规律决定的，虽然可以达到 160-180MPa 的喷射压力，但不可控，因此控制喷油量的大小要首先考虑供油压力变化规律，然后由电磁溢流阀开启脉冲大小来调节。喷油率虽然可控，但受凸轮的运转规律限制。另外，由于驱动系统复杂，强度要求高，所以，目前只在重载柴油机上应用。

## 7.4 共轨喷油系统

### 7.4.1 共轨喷油系统工作原理

共轨系统不再应用柱塞脉动供油原理，而是先将柴油以高压(喷油压)状态蓄集在被称为共轨(Common rail)的容器中，然后利用电磁三通阀将共轨中的压力油引到喷油器中完成喷射任务。利用安装在高压油路中的高速、强力电磁溢流阀来直接控制喷油始点和喷油量，通过实时变更电磁阀升程和改变高压油路中的油压来实现喷油率和喷油压力的控制。

共轨中蓄积的与喷油压力相同的柴油，此油直接进入喷嘴(针阀腔)开启针阀进行喷射，这就是高压共轨系统。比较成熟的有德国博世公司的 CR 系统、日本电装公司的 ECD-U2 系统等。

概括起来高压共轨系统的主要优点有：

(1) 共轨系统中的喷油压力柔性可调，对不同工况可确定所需的最佳喷射压力，从而优化了柴油机综合性能。

(2) 可独立地柔性控制喷油正时，配合高的喷射压力(120~200MPa)，可同时控制 NO<sub>x</sub> 和微粒(PM)在较小的数值内，以满足排放要求。

(3) 柔性控制喷油速率变化，实现理想喷油规律，容易实现预喷射和多次喷射，既可降低柴油机噪音和 NO<sub>x</sub> 排放，又能保证优良的动力性和经济性。

(4) 由电磁阀控制喷油, 其控制精度较高, 高压油路中不会出现气泡和残压为零的现象, 因此在柴油机运转范围内, 循环喷油量变动小, 各缸供油不均匀可得到改善, 从而减轻柴油机的振动和降低排放。

(5) 能分缸调控并且响应快。

(6) 具有极好的燃油密封性, 高压燃油泄漏量小, 降低了驱动燃油泵的功率损失。

(7) 有很好的可安装性。对柴油机不要求附加驱动轴, 可以像通常的直列式油泵一样安装, 只需略加修改喷油器支架, 就可安装电控喷油器。

高压共轨系统与常规的喷油泵-高压油管-喷油嘴系统相比, 后者的喷油压力一般随转速的升高而升高, 有的系统还与负荷有关, 这种特性对低速和部分负荷下的燃油经济性和烟度不利, 而共轨系统可以做到喷油压力不随转速变化而变化的特性, 并可保持到柴油机的低转速达 500r/min, 同时, 最小循环供油量可达每循环  $1\text{mm}^3$ , 其值远小于重型卡车用柴油机为保持最低稳定转速所需的每循环  $12\text{mm}^3$ 。

高压共轨系统是一个电子控制的精确的压力-时间油量控制系统, 共轨中压力波动很小, 它没有常规电控喷油系统中存在的一些问题, 如没有由压力波而产生的难控区、失控区, 也没有调速器能力不足等问题, 可实现柴油机所需的理想油量控制特性。

图 7.12 为博世公司的共轨燃油喷射系统的基本组成图。主要由电控单元(ECU)14、高压油泵(high-pressure pump)2、共轨管(common rail)6、电控喷油器(electronic injector)8 以及其他传感器(sensors)12 与其他执行器(executors)13 等组成。

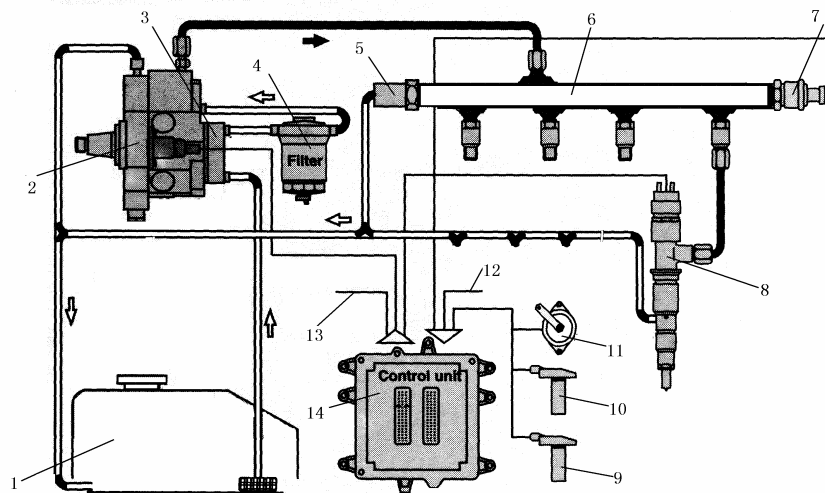


图 7.12 博世公司的 CR 共轨燃油喷射系统

- 1—油箱 2—高压油泵 3—齿轮泵 4—燃油滤清器 5—调压控制阀 6—共轨管  
7—油轨压力传感器 8—电控喷油器 9—曲轴位置传感器 10—转速传感器  
11—油门踏板 12—其他传感器 13—其他执行器 14—电控单元(ECU)

低压的齿轮泵 3 将燃油输入高压油泵 2, 高压油泵 2 将燃油加压送入共轨管 6, 共轨管 6 中的压力由电控单元 14 根据油轨压力传感器 7 测量的油轨压力以及电控单元预设的压力 MAP 图进行调节, 高压油轨内的燃油经过高压油管, 根据机器的运行状态, 由电控单元从预设的 MAP 图中确定合适的喷油定时、喷油持续期和喷油率, 然后电液控制电控喷油



器 8 将燃油喷入汽缸。高压油泵只起向燃油轨供油的作用,其工作频率与柴油机转速没有固定的约束关系,可任意选择,只需保持共轨腔的油压即可。将油箱来的低压油泵入,经调压控制阀 5 调节到喷油所需的压力。

ECD-U2 系统的总体布置如图 7.13 所示。包括高压供油泵、共轨管、喷油管、电控单元 ECU 以及多种传感器。

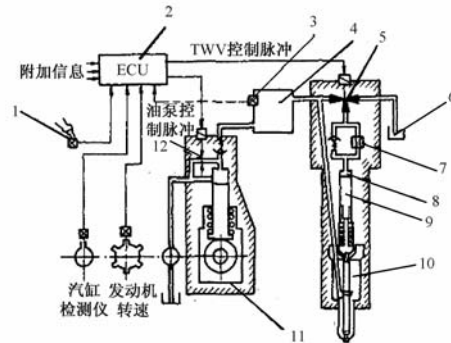


图 7.13 日本电装公司的 ECD-U2 共轨燃油喷射系统

1—油门踏板 2—电控单元 3—燃油压力传感器 4—共轨管 5—三通阀(TWV) 6—燃油箱  
7—节流孔 8—控制室 9—液压活塞 10—喷嘴 11—高压供油泵 12—油泵控制阀

高压供油泵是一个 2 缸直列泵,该泵的凸轮是一个三叶凸轮,近似三角形,凸轮轴旋转一次,每缸供油三次,装在它上面的油泵控制阀(PCV)接受来自 ECU 的指令控制旁通油量,达到控制共轨管内的油压的目的。共轨管中的油压由燃油压力传感器送到 ECU 中,并经预先储存在 ECU 中的油压 MAP 图(喷油压力与转速、负荷关系图)的比较和修正,进行喷油压力的反馈控制。共轨油压同样作为喷油器的背压(控制室内压力)使用,喷油量与喷油定时的控制依靠三通阀(TWV)不断变动控制室内的背压来实现,即依靠 ECU 指令,变化作用在 TWV 上的电脉冲宽度来实现循环喷油量的变化,依靠改变脉冲的定时来实现喷油定时的变化,依靠喷油器设计措施和脉冲作用方式的变化来实现喷油率的变化。ECD-U2 可实现三角形、靴形和引导喷射三类喷油率形状。

## 7.4.2 共轨喷油系统构成

### 1. 高压油泵(high-pressure pump)

高压油泵的供油量的设计准则是必须满足在任何工况下的柴油机的喷油量与控制油量之和的需求以及启动和加速时的油量变化的需求。由于共轨系统中喷油压力的产生与燃油喷射过程无关,且喷油正时也不由高压油泵的凸轮来保证,因此高压油泵的压油凸轮可以按照峰值转矩最低、接触应力小和耐磨的设计原则来设计凸轮。

博世公司采用由柴油机驱动的二缸径向柱塞泵来产生高达 135MPa 的压力(图 7.14)。

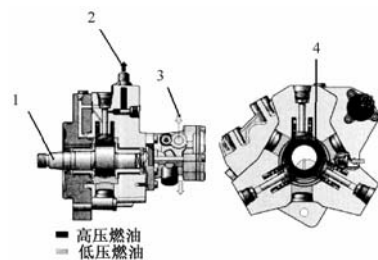


图 7.14 三缸径向柱塞型高压油泵

1—凸轮轴 2—出油口(到共轨管)  
3—机油进口口 4—压油凸轮

该高压油泵在每个压油单元中采用了多个压油凸轮，使其峰值转矩降低为传统高压油泵的  $1/9$ ，负荷也比较均匀，降低了运行噪声。该系统中高压共轨腔中的压力的控制是通过共轨腔中燃油的放泄来实现的。为了减小功率损耗，在喷油量较小的情况下，将关闭三缸径向柱塞泵中的一个压油单元使供油量减少。

ECD-U2 系统通过控制直列泵上面的油泵控制阀的旁通油量，如图 7.15 所示，即控制低压燃油有效进油量的方法，达到控制共轨管内的油压。其工作原理如图 7.16 所示，即：

- (1) 柱塞下行，控制阀开启，低压燃油经控制阀流入柱塞腔。
- (2) 柱塞上行，但控制阀中尚未通电，处于开启状态，低压燃油经控制阀流回低压腔。
- (3) 在达到供油量定时，控制阀通电，使之关闭，回流油路被切断，柱塞腔中的燃油被压缩，燃油经出油阀进入高压油轨。利用控制阀关闭时间的不同，控制进入高压油轨的油量的多少，从而达到控制高压油轨压力的目的。

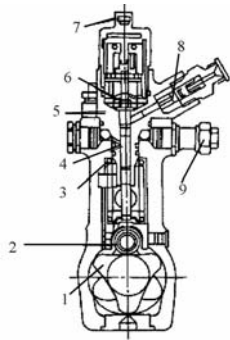


图 7.15 三作用凸轮直列高压油泵

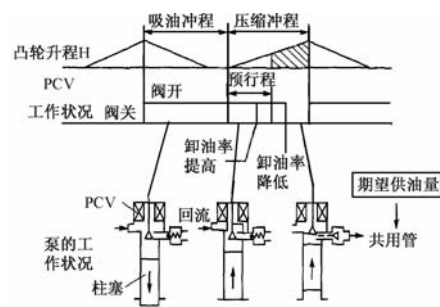


图 7.16 三作用凸轮直列高压油泵工作原理

- 1—三次工作凸轮 2—挺柱体 3—柱塞弹簧 4—柱塞 5—柱塞套  
6—外开型电磁阀 7—接头 8—出油阀 9—溢流阀

(4) 凸轮经过最大升程后，柱塞进入下降行程，柱塞腔内的压力降低，出油阀关闭，停止供油，这时控制阀停止供电，处于开启状态，低压燃油进入柱塞腔进入下一个循环。

高压供油泵采用小柱塞直径、长冲程和低凸轮轴转速的设计，以减少燃油泄漏、运动阻力以及驱动力矩高峰值。由于采用 2 缸直列泵就相当于 6 缸常规直列泵的功能，从而显著减小了供油泵的尺寸。另外，高压油泵不产生额外的功率消耗，只需要确定控制脉冲的宽度和控制脉冲与高压油泵凸轮的相位关系即可。

## 2. 共轨管(common rail)

共轨管将供油泵提供的高压燃油分配到各喷油器中，起蓄压器的作用，博世公司的 CR 系统的共轨管如图 7.17 所示。

共轨管容积具有削减高压油泵的供油压力波动和每个喷油器由喷油过程引起的压力振荡的作用，使高压油轨中的压力波动控制在  $5\text{Mpa}$  以下。但其容积又不能太大，以保证共轨有足够的压力响应速度以快速适应柴油机工况的变化。

高压共轨管上还安装了压力传感器和压力限制器。压力传感器向 ECU 提供高压油轨的压力信号；压力限制阀通过将高压油轨中的压力进行放泄，以保证不同工况下具有所要求的油轨压力。因此，高压共轨管的容积和形状应与确定的柴油机匹配。

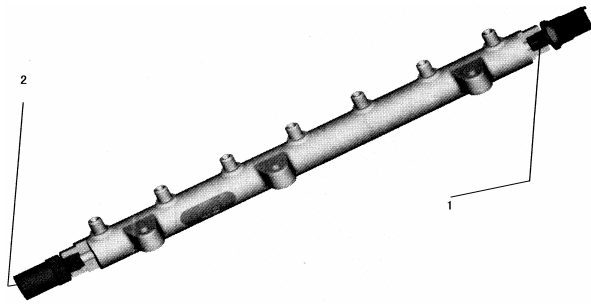


图 7.17 博世公司 CR 系统的共轨管

1—共轨压力传感器 2—共轨压力控制阀

### 3. 电控喷油器(Electronic injector)

电控喷油器是共轨式燃油系统中最关键和最复杂的部件，它的作用是根据 ECU 发出的控制信号，通过控制电磁阀的开启和关闭，将高压油轨中的燃油以最佳的喷油定时、喷油量和喷油率喷入柴油机的燃烧室。

博世公司的 CR 系统和 ECD-U2 的电控喷油器的结构基本相似，都是由于传统喷油器相似的喷油嘴、液压控制活塞、控制量孔、控制电磁阀等组成。下面仅以 ECD-U2 的电控喷油器为例加以说明。其结构原理如图 7.18 所示。

#### 1) 三通阀(TWV)的工作原理与喷油量控制

ECD-U2 每个喷油器总成的上方均有一个电控 TWV 阀，参看图 7.18。三通阀包括内阀和外阀，外阀和电磁线圈的衔铁做成一体，由线圈的通电来指令外阀的运动，阀体则用来支承外阀。三个元件精密地配合在一起，分别形成密封内阀座 A 和外阀座 B，随着外阀的运动，A、B 阀座交替关闭，三个油道(共轨管、回油管和液压活塞上腔)两两交替接通，三通阀仅起压力开关阀的作用，本身并不控制喷油量。

当线圈没有通电时：外阀在弹簧力作用下落座，内阀在油道①的油压作用下上升(图 7.18)，此时密封内锥座 A 开启，油道①、②相通，高压油从①进入液压活塞上腔②中。

当线圈通电时：外阀在电磁力的吸引下向上运动，关闭密封内锥座 A，此时内阀仍停留在上方，外锥座 B 开启，油道②、③相通，活塞上腔向回油室放油，这时喷油器喷油。线圈通电时间即喷油脉宽，决定喷油量。油道①、②也称为控制量孔，液压活塞上部的空间称为控制室的容积。

控制室的容积的大小决定了针阀开启时的灵敏度，控制室的容积太大，针阀在喷油结束时不能实现快速的断油，使后期的燃油雾化不良；控制室容积太小，不能给针阀提供足够的有效行程，使喷射过程的流动阻力加大，因此对控制室的容积也应根据机型的最大喷油量合理选择。

控制量孔①、②的大小对喷油嘴的开启和关闭速度及喷油过程起着决定性的影响。因

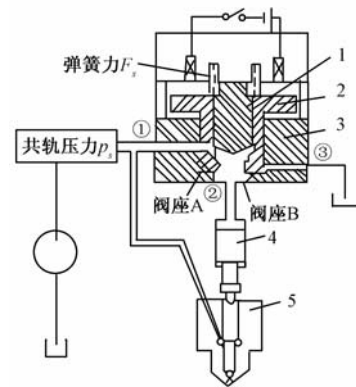


图 7.18 电控喷油器的工作原理图

1—内阀 2—外阀 3—阀体 4—液压活塞 5—喷嘴

此三个关键性结构是进油量孔①、回油量孔②和控制室，它们的结构尺寸对喷油器的喷油性能影响大。回油量孔与进油量孔的流量率之差及控制室的容积决定了喷油嘴针阀的开启速度，而喷油嘴针阀的关闭速度由进油量孔的流量率和控制室的容积决定。进油量孔的设计应使喷油嘴针阀有足够的关闭速度，以减少喷油嘴喷射后期的雾化不良。

此外喷油嘴的最小喷油压力取决于回油量孔和进油量孔的流量率及控制活塞的端面面积。这样在确定了进油量孔、回油量孔和控制室的尺寸后，就确定了喷油嘴针阀完全开启的稳定、最短喷油过程，同时也确定了喷油嘴的稳定最小喷油量。控制室容积的减少可以使针阀的响应速度更快，使燃油温度对喷油量的影响更小。但控制室的容积不可能无限制减少，它应能保证喷油嘴针阀的升程以使针阀完全开启。两个控制量孔决定了控制室中的动态压力，从而决定了针阀的运动规律。

由于高压共轨喷射系统的喷射压力非常高，因此其喷油嘴的喷孔截面积很小，如博世公司的喷油嘴的喷孔直径为  $0.169\text{mm} \times 6$ ，在如此小的喷孔直径和如此高的喷射压力下，燃油流动处于极端不稳定状态，油束的喷雾锥角变大，燃油雾化更好，但贯穿距离变小，因此应改变原柴油机进气的涡流强度、燃烧室结构形状以确保最佳的燃烧过程。

对于喷油器电磁阀，由于共轨系统要求它有足够的开启速度，考虑到预喷射是改善柴油机性能的重要喷射方式，控制电磁阀的响应时间应缩短。博世公司 CR 系统开启响应时间为  $0.35\text{ms}$ ，关闭响应时间为  $0.4\text{ms}$ ，全负荷能耗为  $50\text{W}$ 。

### 2) 喷油定时控制

在 ECD-U2 系统中喷油定时可以自由地独立控制，方法是控制定时脉冲送达 TWV 的时间，在 ECU 中要进行两次运算，即首先在各种传感器信号的基础上算出最终的喷射开始时刻(BTDC 曲轴转角)；然后计算为实现该时刻目标而决定激励脉冲送到 TWV 的时间  $t$ 。基础喷油定时是由发动机转速和负荷(循环喷油量)决定，然后根据进气管压力、水温等进行修正。ECD-U2 系统由发动机转速传感器每隔  $15^\circ$  曲轴转角产生一个脉冲，可在  $30^\circ$  曲轴转角的范围内调节喷油提前角。

### 3) 喷油率的控制

ECD-U2 系统可以实现三角形、引导喷射(即预喷)和靴形三种喷油率。

(1) 三角形喷油率(图 7.19) 实现方法是使喷油器针阀升起速度不要太快，以降低初期喷油量。因此，在动力活塞上方专门设计了一个单向阀和一个节流小孔(参看图 7.18 和图 7.19)。单向阀阻止动力活塞上方燃油通过，燃油只有通过小孔逐步泄出，造成动力活塞上方燃油压力下降速度放慢，针阀缓慢上升。当喷油结束时，三通阀断电，在弹簧力作用下外阀向下运动，座 B 关闭，泄油道关闭，而座 A 打开，亦即打开了燃油进入动力活塞的通道。共轨高压燃油通过单向阀迅即加压到动力活塞上方，活塞下行。由于活塞直径比针阀直径大得多，因此就会产生很大的油压力使针阀迅速关闭，实现快速停止喷射，满足柴油机要求。

(2) 预喷射喷油率 在 ECD-U2 上实现预喷射比较简单，只要在主喷射前给三通阀一个小宽度的电脉冲信号，即可实现。ECD-U2 系统最小预喷油量为每循环  $1\text{mm}^3$ ，预喷射和

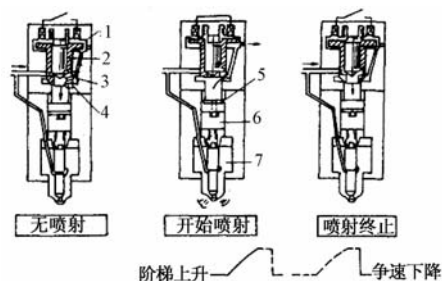


图 7.19 三角形喷油率的实现

1—外阀 2—内阀 3—内座 4—外座  
5—单向孔 6—动力活塞 7—喷嘴

主喷射之间的时间间隔最小为 0.1ms(图 7.20)。

(3) 靴形喷油率 要实现靴形喷油率图形则需要针阀有一个小的预行程停留才能获得。为此喷油器总成结构略有变动,在三通阀与液压活塞之间的节流孔处改为一个靴形阀(孔),如图 7.21 所示。靴形阀和液压活塞间的间隙作为可调的预行程。当三通阀通电时,靴形阀中的高压燃油被释放到泄油道,喷油嘴打开到相当于预行程的高度,针阀在该处停留在一直接维持到靴形阀末端残余压力通过靴形阀节流孔下降一定程度后,针阀才继续升高到最大升程,达到最大喷油速率。依靠预行程量和靴形阀节流孔直径的合理组合,可以得到各种形式靴形喷油率。靴形喷油率由于初期喷油率低,可以获得较低的  $\text{NO}_x$  排放。

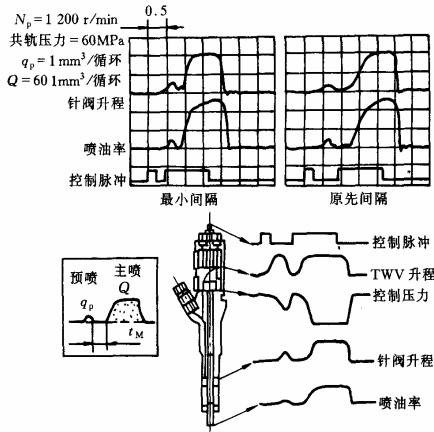


图 7.20 预喷射喷油率的实现

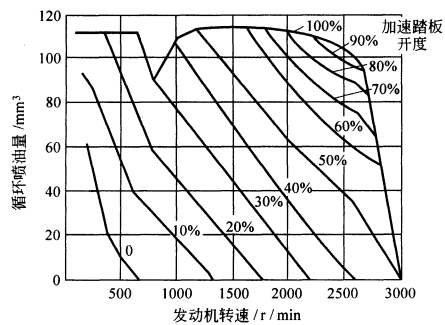


图 7.21 靴形喷油率的实现

#### 7.4.3 柴油机电子管理中心

概括起来,以电控喷射为主的柴油机电子管理中心可以实现下述各项功能:

(1) 目标喷油量控制 可按要求来设计任何模式(全程、两极或其他)的油量调速曲线,以及包括启动加浓、转矩校正在内的“校正外特性”曲线。若有需要,还可利用转速反馈达到调速率为零的等速控制曲线。

图 7.22 所示为高压共轨系统油量控制特性线之一例。此时柴油机加速踏板的位置只是一种控制信号,反映驾驶员的一种意愿。

(2) 目标喷油定时控制 根据排放、油耗、功率和其他性能指标如噪声、冷启动等多方面的综合要求来确定各工况所需的最优化定时值。

(3) 油量及喷油定时的补偿控制 根据环境状态及某些运行状态参数的变化对目标喷油量和定时进行补偿控制。参数包括大气压力、大气温度、冷却水温、柴油油温,等等。此时将试验归纳出的经验公式或数据输入 ECU, 供其发出执行指令时选用。

(4) 冷启动及怠速稳定性控制 冷启动油量和定时都由启动转速、加速踏板位置以及冷却水温、燃油温度共同决定,并按一定程序实现冷启动-暖机-怠速的全过程。

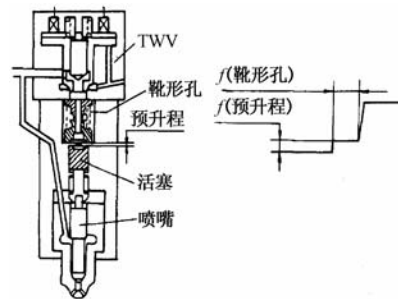


图 7.22 电控系统油量控制特性

(5) 过渡性能与烟度控制 可通过对过渡过程中油量和定时的综合补偿来满足最佳过渡性能和降低烟度的要求。例如, 增压柴油机开始加速时, 通过加大供油提前角可使加速转矩加大, 并减小冒烟量。

(6) 喷油规律与喷油压力的控制 对于共轨喷射系统, 可以通过控制电磁阀升程和调节共轨腔中的压力达到控制喷油率、喷油压力和预喷射油量的目的。喷油压力需要随转速和负荷调整, 图 7.23 所示分别为奔驰 OM611 和大众两轿车柴油机的压力图。

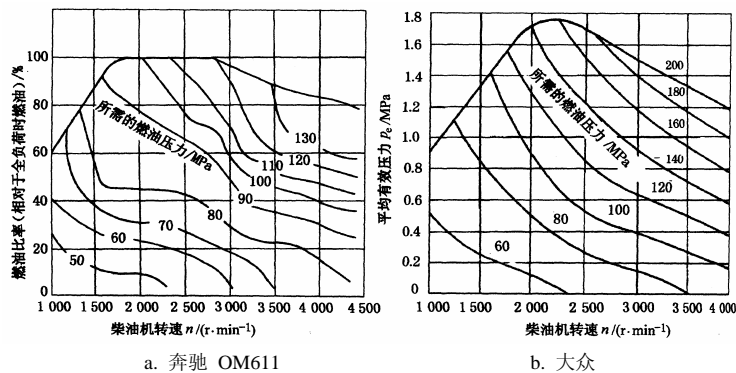


图 7.23 轿车柴油机的喷油压力图

(7) 其他参数及性能的控制 目前, 能实现的控制项目很多, 但并非每个项目都是需要的, 取决于具体的要求。这些项目有: 增压油量与增压时进气量的补偿控制; 废气再循环控制; 增压器涡轮机喷口的可变截面控制; 可变气门定时、可变进气涡流、可变进气管长度的控制; 暖机时对进、排气的节流控制; 部分停缸控制等。此外还有柴油机低油压保护、增压器工作状态保护、传动系统的配套控制以及故障自动诊断功能、故障保险功能, 等等。

## 思考题

1. 对照机械式 VE 分配泵(参看第六章), 说明电控 VE 分配泵的工作原理和优点。
2. 举例说明什么是“时间-压力”计量方式, 电控泵喷嘴与电控单体泵系统的控制还存在哪些不足?
3. 高压共轨系统有哪些优点?
4. 以带三通阀 ECD-U2 系统为例, 说明电控喷油器的工作原理。
5. 电控喷油器能实现哪些喷油率形状? 是如何实现的?