

模块 3



BOSCH 共轨式电控喷油系统

◎ 学习目标



1. 知识目标

- (1) 熟悉高压共轨系统的组成与控制功能；
- (2) 掌握高压共轨系统各组件的结构与工作原理；
- (3) 了解 ECU 控制策略；
- (4) 熟悉高压共轨系统的常见故障诊断与排除法。



2. 能力目标

- (1) 能在实车上认识高压共轨系统的各组件；
- (2) 掌握高压共轨系统各组成部件在实车上的安装位置；
- (3) 熟悉高压共轨系统的检测方法；
- (4) 了解高压共轨系统的常见故障原因和维修方法。



3.1 高压共轨系统概述



3.1.1 高压共轨技术概述

高压共轨技术(common rail direct injection, CRDI)意为高压共轨柴油直喷技术。CRDI技术和SDI(自然吸气直接喷射柴油发动机)技术、TDI(直喷式涡轮增压柴油发动机)技术都是德国 BOSCH 公司研发的柴油发动机技术。BOSCH 高压共轨系统的主要组成部件如图 3-1 所示。

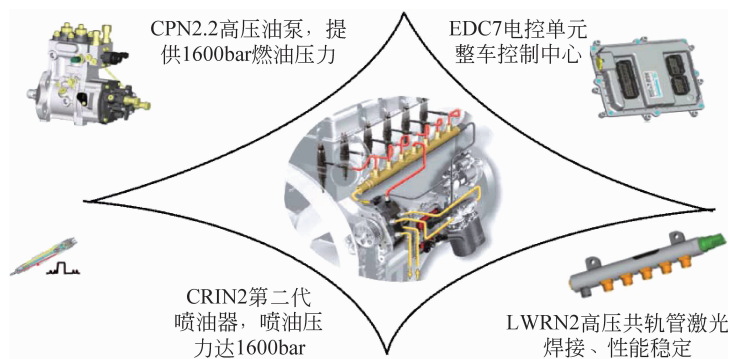


图 3-1 BOSCH 高压共轨系统的主要组成部件(1bar=100MPa)

高压共轨(common rail)电喷技术是在高压油泵、压力传感器和电子控制单元(ECU)组成的闭环系统中,将喷射压力的产生和喷射过程彼此完全分开的一种供油方式。它是由高压油泵将高压燃油输送到公共供油管,对供油管内的油压实现精确控制,使高压油管压力大小与发动机的转速无关,可以大幅度减小柴油机供油压力随发动机转速变化的程度,从而使控制过程更具有柔性,能更准确地实现小油量的精确控制,更好地实现多次喷射。目前共轨系统已发展到第 3 代——压电式共轨系统,压电执行器代替了电磁阀,使喷射控制更加精确,取消了回油管,使结构更加简单。压力调节范围为 200~2000bar,使调节范围更广,最小喷射量可控制在 0.5mm^3 ,减小了烟度和 NO_x 的排放。它比传统增压柴油机燃烧效率提高了 8%、二氧化碳排放率降低 10%、噪声下降 15%。

日本电装公司在 1991 年研究开发出 ECD-U2 第 1 代产品,并于 1995 年匹配 Hino 的 J08C 柴油机、五十铃的 6HK1 柴油机。经过多年的改进与完善,最新产品已用于轿车的 ECD-U2P 系统。国外燃油系统制造商也纷纷投入巨额资金和人力开发共轨系统。BOSCH 公司于 1995 年发明了用于轿车的高压共轨系统,采用径向柱塞转子式供油泵,喷油器电磁阀采用球阀结构。BOSCH 公司首家于 1997 年开始批量生产共轨燃油喷射系统的乘用车。1999 年年底诞生的装配着 3 缸共轨柴油发动机的 Smart 的排量只有 799mL,最大功率为 30kW,在 1800~2800r/min 时输出最大扭矩 $100\text{N}\cdot\text{m}$ 。在奔驰公司推出的 E320 上安装了第 2 代共轨发动机,最大功率为 150kW,在 1000r/min 时输出扭矩 $250\text{N}\cdot\text{m}$,在 1400r/min 时即可得到峰值扭矩的 85%,在 1800~2600r/min 时可实现 $500\text{N}\cdot\text{m}$ 的峰值



扭矩。0~100km/h的加速时间只有7.7s,最高车速为243km/h。综合油耗是6.9L/100km,80L的油箱使续航能力达到了1000km,而配有汽油机的E320的综合油耗是9.9L/100km。德尔福与西门子分别在1998年和2000年推出轿车Multec-DCR1400共轨系统,采用径向柱塞转子式供油泵。德尔福公司的喷油器电磁阀设计在喷油器内,使得喷油器体积更小巧;西门子喷油器采用压电执行器,响应时间更短。

柴油共轨系统已开发了3代。

第1代共轨高压泵总是保持在最高压力,大大浪费了燃油,燃油温度很高。第1代共轨系统为商用车设计的,最高喷射压力为140MPa,乘用车喷射压力为135MPa。

第2代共轨系统可根据发动机需求而改变输出压力,并具有预喷射和后喷射功能。带有控制油量的油泵,喷射压力能达到220MPa。即使在压力较低的情况下,该系统也可以根据实际状况提供适量的喷油压力。不仅有助于降低燃油消耗,而且可以降低燃油温度,从而省去燃油冷却装置。预喷射降低了发动机噪声:在主喷射之前百万分之一秒内,少量的燃油被喷进了汽缸压燃,预热燃烧室。预热后的汽缸使主喷射后的压燃更加容易,缸内的压力和温度不再是突然地增加,有利于降低燃烧噪声。在膨胀过程中进行后喷射,产生二次燃烧,将缸内温度增加200~250℃,降低了排气中的碳氢化合物。BOSCH公司的第2代共轨系统产品在沃尔沃的S60/V70D5HE1和宝马的230d等乘用车上试用。

第3代共轨系统带有压电直列式喷油器。2003年,第3代共轨系统面世,压电式共轨系统的压电执行器代替了电磁阀,于是得到了更加精确的喷射控制。省去了回油管,在结构上更简单。压力在20~200MPa弹性调节。最小喷射量可控制在0.5mm³,最高喷射压力达到180MPa。采用压电直列式喷油器的系统使得带预喷和后喷的喷油率曲线范围更符合各种工况要求。

共轨高压喷射具有很多优点:改善了进气和燃油的混合及燃烧过程,降低了柴油机的排放;高压泵的驱动扭矩小,机械噪声小;适用性强,不需要对柴油机的结构进行重大改进即可替代传统喷油系统;多点喷射能降低噪声、减少白烟、减少烟雾,引导喷射可使点火延迟期间喷射的燃料减少,回避急剧的燃烧压上升,降低噪声。压力宽范围的调节和喷油量的精确控制,减小了烟度和NO_x的排放。不同喷射控制系统的压力与发动机转速关系如图3-2所示。

目前,共轨燃油喷射系统应用十分普遍。BOSCH公司共轨系统在欧洲乘用车和轻型车柴油发动机上已得到普通应用,目前国内主要引进德国BOSCH、美国德尔福和日本电装的电控柴油机技术。BOSCH公司已生产出2500万套共轨系统,并在江苏无锡投资建设了技术中心和工厂,实现了本地化生产。长城汽车与BOSCH公司开发出了高压共轨柴油发动机,此外奥迪、奔驰、华泰等品牌也推出了采用共轨系统的汽车。部分大学、研究所和企业也通过合作或自主研发,取得了各具特色的研究成果,有数十项专利公布。因此,我国在电控直喷式柴油机方面已积累了一定的经验,但总体来说与国外还存在差距,主要体现在制造工艺和批量生产的质量控制。此外,国内共轨系统相关配套体系不健全,部分零部件还依靠进口,如单片机芯片、共轨压力传感器等。

随着国内经济的高速发展,环境污染已成为一个严重的社会问题,所以国家对汽车排

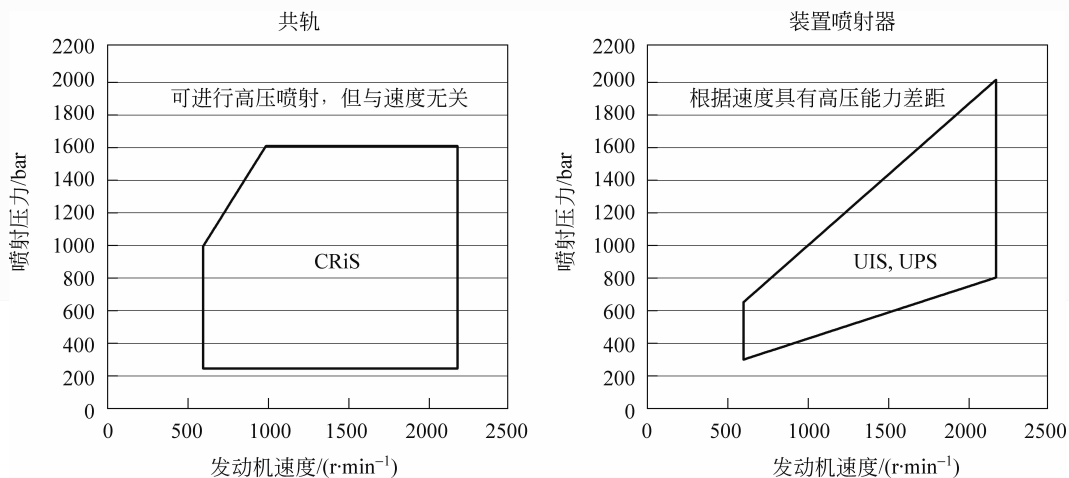


图 3-2 不同喷射控制系统的压力与发动机转速关系 (1bar=100MPa)

放的标准也日趋严格。2007年7月1日,全国实施国Ⅲ排放标准。至2013年7月1日,北京、上海、广州、深圳、南京、乌鲁木齐、兰州等19个城市已率先执行国Ⅳ标准。2013年,北京率先执行相当于欧Ⅴ标准的京Ⅴ排放标准。2014年4月30日起,上海市规定在上海市销售、首次注册登记的新购置机动车,或从外地转入上海市注册登记的机动车,都要实施国Ⅴ排放标准。国家不断提高排放标准,严格控制汽车的排放污染物,极大地推动了发动机技术的发展。汽油发动机由于技术相对成熟且有后处理,因此可以满足目前排放标准。柴油发动机由于目前大部分还是机械式燃油系统,且柴油机直喷技术发展历程较短,因而为满足排放标准要求必须重新设计发动机。我国目前大部分采用引进技术来满足现阶段排放标准(国Ⅲ)。随着排放标准的提高,柴油机必须采用电控喷射系统。目前,国内柴油电控系统主要有共轨、单体泵等。和国外先进技术相比,虽然还不具备对等的实力,但发展势头良好。如无锡一汽油泵油嘴研究所研发的共轨系统已在无锡公交车上使用,同时国内从事电控柴油机研发的企业数量较多,因而国内在电控柴油发动机市场今后一定会有所作为。当然,国内在电控柴油机系统方面还面临很多挑战,如制造工艺不成熟,批量规模较小;燃油品质难以保证;柴油机后处理技术水平不高等。但这些会随时间推移,不久将逐步得到解决。



3.1.2 柴油发动机电控技术的特点

1. 柴油发动机电控技术与汽油发动机电控技术的比较

柴油发动机电控技术与汽油发动机电控技术有许多相似之处。整个系统都是由传感器、电控单元和执行器3部分组成。除个别传感器外,其他传感器的种类、结构、工作原理和信号基本相同。由于柴油发动机和汽油发动机使用燃料的不同,所以燃油系统和工作特点存在很大的差异,采用的电控技术特点也有差异。

(1) 对混合气浓度的控制方式不同。汽油发动机控制的是进入缸内混合气的量,柴油发动机控制的是喷入缸内的燃油量。汽油发动机一般要求混合气浓度在过量空气系数



尽量接近 1 的状态下工作,所以汽油发动机普遍采用带氧传感器的闭环电控燃油喷射系统,氧传感器检测废气中残余氧的含量以确定混合气浓度,并通过调节喷油量来保持过量空气系数尽量接近 1 的状态。柴油发动机对混合气浓度一般没有相对固定的要求,所以对混合气浓度控制并不严格,柴油发动机的电控喷射系统是通过控制喷油时间来调节输出油量的大小,且柴油发动机喷油控制是由发动机的转速和加速踏板位置等来决定的。柴油发动机电控技术有两个明显的特点:一是柴油喷射电控执行器复杂,二是柴油电控喷射系统的多样化。

(2) 对喷油压力的要求不同。由于柴油与汽油的性质不同,为保证混合气形成质量,柴油发动机与汽油发动机对喷油压力的要求相差很大。汽油发动机多点喷射系统的喷射压力一般为 $0.25\sim 0.35\text{MPa}$,单点喷射系统的喷油压力一般为 $0.07\sim 0.10\text{MPa}$;而柴油机的喷油压力高达 $100\sim 200\text{MPa}$ 。如何建立更高的喷油压力是柴油机技术发展的重点和难点。

(3) 对燃烧过程的控制途径不同。汽油发动机主要通过点火正时和点火能量来控制燃烧过程;而柴油发动机则是通过控制喷油正时、喷油持续时间和喷油速率来控制燃烧过程。

(4) 柴油喷射的电控执行更复杂。柴油发动机燃油喷射具有高压、高频和脉动等特点。其喷射压力可高达 200MPa 或更高,是汽油发动机喷射压力的 100 倍以上。同时柴油发动机需要对喷油量、喷油正时和喷油压力等多个参数进行综合控制,而且柴油发动机对喷油正时的要求更高。这就导致电控柴油发动机燃油喷射执行器比汽油发动机要复杂得多,其控制软件也较汽油发动机来得复杂。

(5) 电控柴油发动机燃油喷射系统形式多样。传统柴油发动机具有直列泵、分配泵、泵喷嘴、单体泵等结构完全不同的系统,实施电控技术的执行机构随之而变,形成了柴油喷射系统的多样化。虽然柴油发动机高压共轨技术获得越来越广泛的运用,但燃油泵和喷油器还是保持了多样性。

柴油发动机共轨式电控燃油喷射技术是一种全新的技术,因为它集成了计算机控制技术、现代传感检测技术以及先进的喷油结构于一身。它不仅能达到较高的喷射压力、实现喷射压力和喷油量的精确控制,而且能实现预喷射和后喷,从而优化喷油特性形状,降低柴油机噪声和大大减少废气的排放量。

2. 柴油发动机电控技术与传统柴油机的燃油喷射的比较

传统的柴油喷射系统是采用机械方式进行喷油量和喷油时间调节和控制的。由于机械运动的滞后性,调节缓慢,精度差,喷油速率、喷油压力和喷油时间无法精确控制,导致柴油发动机动力性和经济性不能充分发挥,排气污染超标。研究表明,一般机械式喷油系统对喷油正时的控制精度为 2°CA (曲轴转角)左右。而喷油始点每改变 1°CA ,燃油消耗率会增加 2% ,HC 排放量增加 16% , NO_x 排放量增加 6% 。

与传统的机械方式比较,电控柴油喷射系统具有如下特点:

- (1) 对喷油正时的控制精度高(高于 0.5°CA),反应速度快;
- (2) 对喷油量的控制精确、灵活、快速,喷油量可随意调节,可实现多次喷射,包括预喷射、主喷射和后喷射,实现理想的喷油规律;
- (3) 喷油压力高(高压共轨电控喷油系统工作压力高达 200MPa 或更高),不受发动



机转速影响,燃油雾化质量提高,改善了燃烧过程;

- (4) 结构简单,可靠性好,适用性强,长期工作稳定性好;
- (5) 对燃油清洁度要求高,对维护保养技术的要求高。



3.1.3 我国柴油共轨技术的标准

发动机是汽车的“心脏”,电控喷射系统又是发动机的中枢。电控共轨喷油系统是目
前世界领先的燃油喷射系统,也是柴油发动机满足国Ⅳ甚至更高排放标准的理想方案之
一。当电控柴油喷射技术已经在全球普及时,我国电控共轨系统研发明显落后,只有少数
机构和企业可小批量生产。在这样的条件下,我国出台相关国家标准具有特殊意义。由
无锡一汽油泵油嘴研究所起草的我国“柴油机电控共轨喷油系统总成标准”于 2011 年
3 月 1 日正式实施。该标准属于推荐性标准,包括 4 个方面:喷油系统总成技术条件、喷
油系统共轨管总成技术条件、喷油系统喷油器总成技术条件以及喷油系统高压供油泵总
成技术条件。采用国际化标准的程度为“无”,这意味着在电控共轨领域,我国制定了完全
自主的国家标准。

外国一些行业组织把电控共轨喷油系统标准作为保密性标准,因此其他国家的企
业很难看到。我国实施的电控共轨国标,属于公开性和推荐性标准,标准的实施将为我国柴
油发动机电控共轨喷油系统的研发和生产提供共同的技术语言。根据全国燃料喷射系
统标准化技术委员会公布的修订标准计划,电控共轨喷油器试验台试验方法、组合式电
控单体泵总成试验方法、柴油发动机燃油喷射装置清洁度评定、柴油发动机喷油泵试
验喷油器标定等共 19 个项目的标准制定,将形成一个更完善的柴油发动机电控共
轨喷油系统标准体系。

柴油发动机电控喷射技术是中国内燃机行业的短板。德国 BOSCH 和西门子、日
本电装、美国德尔福等公司的电控共轨系统早已大批应用,而我国自主的电控共
轨系统仍处在研发和小批量试用阶段,与国际水平差距很大。此前,我国电控共
轨系统的相关标准严重缺失,既没有相应的国家标准或行业标准,也没有相应的
国际标准。这不但使电控共轨系统的研发、生产、销售和市场应用没有可依
据的技术法规,而且燃料喷射系统行业也很难规范有序地发展。

电控共轨系统国家标准的实施,标志着我国电控共轨技术研发有了自己的技术
规范。为未来我国电控共轨技术研发铺平了道路,也为今后制定相应的国际标
准奠定了基础。标准的实施标志着我国汽车领域难度最大、水平最高的核
心技术标准话语权掌握在我们自己手里。



3.2 高压共轨系统的组成

高压共轨系统由共轨式喷油系统和控制系统两部分组成,高压共轨系统主要元
件在实车上的位置如图 3-3 所示,共轨式喷油系统组成部件如图 3-4 所示。BOSCH
高压共轨系统的部件有不同的类型,安装在不同发动机上的位置也有所不同。

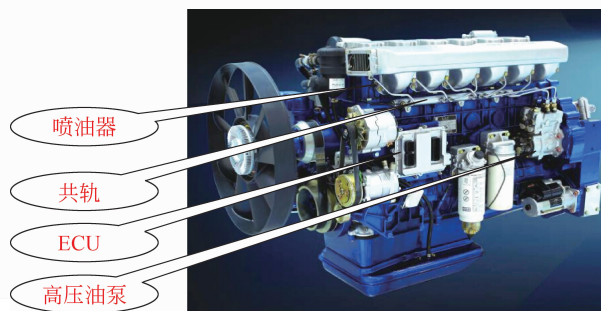


图 3-3 主要元件在实车上的位置

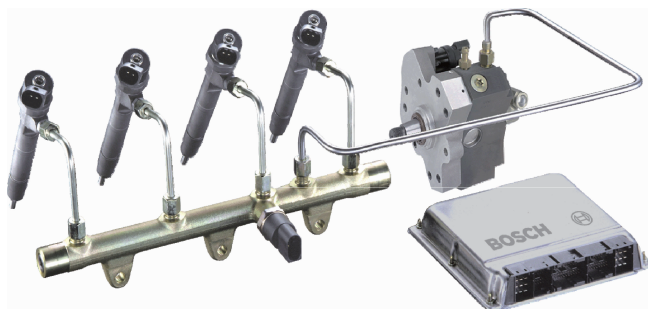


图 3-4 共轨式喷油系统组成部件



3.2.1 共轨式喷油系统

共轨式喷油系统组成如图 3-5 所示。

共轨式喷油系统主要由高压泵、高压共轨、喷油管和喷油器等组成。实车上的共轨式喷油系统如图 3-6 所示,共轨上有 6 根高压油管连接发动机上的 6 个喷油器。由图 3-5 可见,燃油箱 1 中的燃油经输油泵滤网 2→电动输油泵 3→低压油管 5→燃油滤清器 4→高压泵 6(高压泵出来的燃油压力达 160~200MPa)→高压油管 7→共轨 8→高压油管 7→喷油器 9→在 ECU 11 的控制下喷入汽缸,多余燃油→喷油器 9→回油管 10→油箱。

共轨式喷油系统将喷射压力的产生和喷射过程彼此完全分开,通过对共轨管内的油压实现精确控制,使高压油管压力大小与发动机的转速基本无关。这一柴油发动机技术的创新最大限度地降低了柴油发动机的振动和噪声,同时将油耗进一步降低,使排放更加清洁。但是,共轨技术的喷油压力低于泵喷嘴系统,一般只能达到 160MPa 左右。由于喷油压力调节宽泛,采用共轨技术的柴油车能更好地适应各种工况,起步也不会困难。

电控高压共轨喷油系统与传统的凸轮驱动的机械调节式喷油系统相比,其特点主要表现在以下 5 个方面。

(1) 广泛的应用领域。用于小型乘用车和轻型载重车,每缸功率可达 30kW;用于重型载重车、内燃机车和船舶,每缸功率可达 200kW 左右;

(2) 喷油压力可达 135MPa,甚至更高;

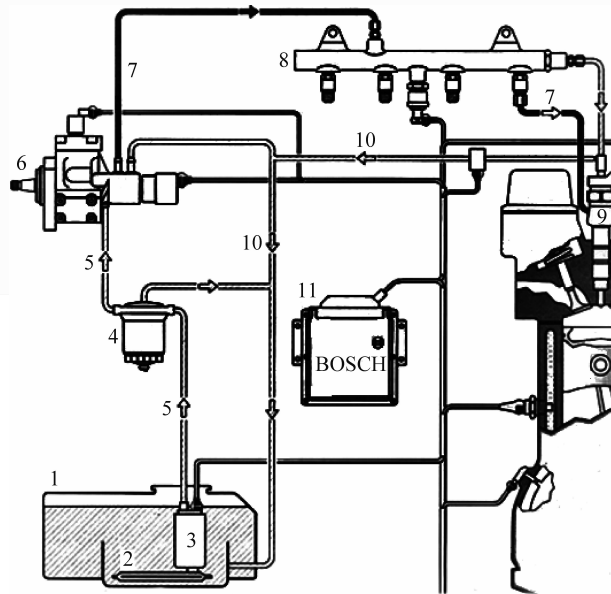


图 3-5 高压共轨系统的组成

1—燃油箱；2—滤网；3—电动输油泵；4—燃油滤清器；5—低压油管；
6—高压泵；7—高压油管；8—共轨；9—喷油器；10—回油管；11—ECU

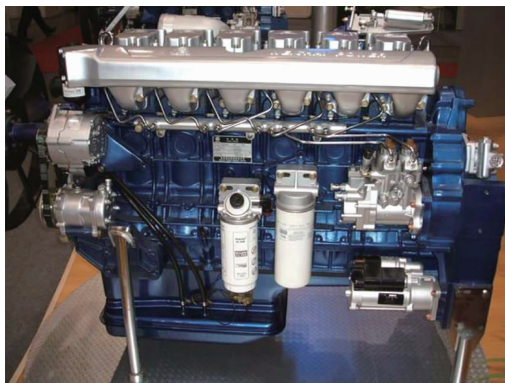


图 3-6 实车上的共轨式喷油系统(潍柴 WP10)

- (3) 喷油开始点可变；
- (4) 可实现预喷射、主喷射和后喷射；
- (5) 喷油压力可随柴油机运转工况而变化。



3.2.2 控制系统

与电控汽油发动机基本相同,控制系统由传感器、ECU(计算机)和执行机构组成。

在共轨式喷油系统中,喷油压力由高压油泵建立,高压燃油存储在“共轨”中,燃油喷油量由控制器 ECU 控制,其任务是对喷油系统进行电子控制,实现对喷油量以及喷油定



时随运行工况的实时控制。采用转速、油门踏板位置、喷油时刻、进气温度、进气压力、燃油温度、冷却水温度等传感器,将实时检测的参数同时输入控制器(ECU),与 ECU 内部储存的设定参数值或参数图谱(MAP 图)进行比较,经过处理计算按照最佳值或计算后的目标值把指令送到执行器。执行器根据 ECU 指令控制喷油量和喷油正时,同时对废气再循环阀、预热塞等执行机构进行控制,使柴油机运行状态达到最佳。

共轨式喷油控制系统的传感器,有的与电控汽油发动机传感器的结构与工作原理完全相同,如曲轴转速传感器、凸轮轴转速传感器、加速踏板传感器、冷却水温传感器,进气温度传感器和空气质量流量计等;有的则是电控柴油发动机特有的,如增压压力传感器、共轨压力传感器等。曲轴转速传感器检测发动机转速,凸轮轴转速传感器检测发火顺序(相位)。加速踏板传感器检测发动机的负荷情况。空气质量流量计检测实时的空气质量流量。采用涡轮增压并带增压压力调节的发动机,其增压压力传感器用以测定增压压力。在低温和发动机处于冷态时,ECU 可根据冷却水温度传感器和进气温度传感器的数值对喷油始点、预喷和其他参数的额定值进行匹配。



3.3 共轨式喷油系统的组成与工作原理



3.3.1 共轨式喷油系统的特点与组成

共轨式燃油系统主要组成部分如图 3-7 所示,可分为低压供油和高压供油两部分。

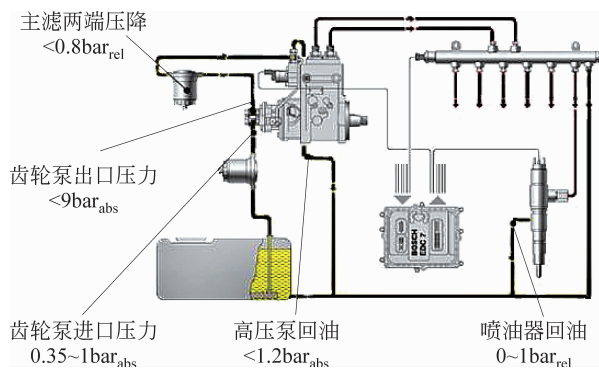


图 3-7 共轨式燃油系统的组成

1. 低压供油部分

共轨喷油系统低压供油部分的重要作用是向高压泵输送足够的清洁燃油,由燃油箱、粗滤器、输油泵(带有滤网)、精滤器及低压管路组成。图 3-7 注明了各段的油压。不同型号的共轨系统会有所差异,但基本燃油系统是一样的。主要组件的功能如下。

(1) 燃油箱。燃油箱必须抗腐蚀,且至少能承受 2 倍的实际工作油压,并在不低于 0.03MPa 压力的情况下仍保持密封。如果油箱出现超压,需经过适当的通道和安全阀自动卸压。即使车辆发生倾斜,或在弯道行驶,甚至发生碰撞时,燃油不会从加油口或压力平衡装置中流出。同时,燃油箱必须远离柴油发动机,如果车辆发生交通事故时,可减小



发生火灾的危险。

(2) 低压油管。低压油管除采用钢管外还可使用阻燃的包有钢丝编织层的柔性管。油管的布置必须能够避免机械损伤,并且在其上滴落的燃油既不能聚积,也不会被引燃。

(3) 输油泵。输油泵是一种带有滤网的电动泵或齿轮泵,它将燃油从燃油箱中吸出,将所需的燃油连续不断地供给高压泵。

(4) 滤清器。燃油滤清器将进入高压泵前的燃油滤清净化,去除燃油中杂质,从而防止高压泵、出油阀和喷油器等精密件过早磨损和损坏。

2. 高压供油部分

电控高压共轨喷油系统的高压供油部分除了产生高压外,还对燃油进行检测、控制和分配。主要由调压阀的高压泵、高压油管、作为高压存储器的共轨(带有共轨压力传感器)、限压阀、流量限制器、喷油器和回油管等组成。主要组件的功能如下。

(1) 高压泵。高压泵将输油泵输送来的燃油加压后供给共轨,其压力可达 135MPa 甚至更高,高压燃油经高压油管进入类似管状的共轨中。

(2) 共轨。在共轨中保持恒定的燃油压力,即使喷油器喷油时由于燃油的弹性而产生蓄压作用,燃油压力仍基本保持不变。燃油压力由共轨压力传感器测定,通过调压阀调节到规定数值。限压阀的任务是将共轨中的燃油压力限制在 150MPa 以内。

(3) 喷油器。当高压燃油在喷油器中被电子控制的电磁阀释放时,喷油嘴开启,将燃油直接喷入柴油机燃烧室。

(4) 高压油管。高压燃油油管必须能够经受喷油系统的最大压力和喷油间歇时的局部高频压力波动。该油管由钢管制成,通常外径为 6mm,内径为 2.4mm。各缸的高压油管长度是完全相同的,共轨与各缸喷油器之间的不同间距是通过各缸高压油管的弯曲程度进行长度补偿的,但油管长度应尽可能短一些。



3.3.2 共轨式喷油系统各部件的结构与工作原理

1. 电动输油泵

低压输油泵分电动式和机械式两种。电动输油泵只用于轿车和轻型商务汽车,不但负责将燃油供给高压泵,还能在 ECU 控制下实现燃油切断。在 BOSCH 生产的 CPI 系统中,常见的电动输油泵如图 3-8(a)所示,输出油压为 0.2~0.25MPa。机械式齿轮燃油泵如图 3-8(b)、图 3-8(c)所示,也是用来为共轨高压油泵提供燃油的。因为它的可靠性比电动输油泵高,所以在汽车上应用更为广泛。它既可以集成在高压油泵中,由高压油泵驱动轴驱动,也可以直接连接到发动机上,由发动机驱动。

2. 燃油滤清器与油水分离器

自 2008 年 7 月 1 日起,全国 3.5t 以上柴油车都要求达到国 III 排放标准。控制柴油车尾气排放主要是通过优化设计燃烧系统、实行电子控制精确喷射、提高柴油喷射高雾化要求以及 EGR 后处理技术等来实现。其中,滤清器的作用很重要,燃烧前过滤技术的提升是确保高效燃烧的前提。