

第3章

电控燃油喷射系统

汽油发动机电控系统是一个集各种控制功能于一体,高度集约化的综合控制系统。电控燃油喷射系统是汽油发动机电控系统中的首要组成部分,本章内容将从结构和控制功能两个方面单独对电控燃油喷射系统进行分析,而不是简单地从结构上将电控燃油系统从汽油发动机电控系统中分割开来。

3.1 电控燃油喷射系统概述

汽油机电控喷油技术简称汽油电喷技术,全称是汽油发动机电子控制燃油喷射技术,是借鉴飞机汽油机喷油技术而诞生,并伴随着汽车油耗法规、排放法规和电子技术的进步而逐步发展到当今水平。因电子控制燃油喷射发动机(电控发动机或电喷发动机)具有降低油耗和减少有害物质排放等卓越性能,所以到 20 世纪末完全取代了化油器式发动机。

3.1.1 电控燃油喷射系统的构成

现代汽油发动机的电控系统尽管种类繁多,但作为一个控制系统,它们具有与其他电子控制系统相同的 3 个基本组成部分:传感器、电控单元(electronic control unit, ECU 或 electronic control model, ECM)和执行元件。然而,以汽油发动机作为特定控制对象,以实现某些控制功能为目标的汽油发动机电控系统,在具体组成元件的内涵上有明显的特点,汽油发动机电控系统的构成如图 3-1 所示。

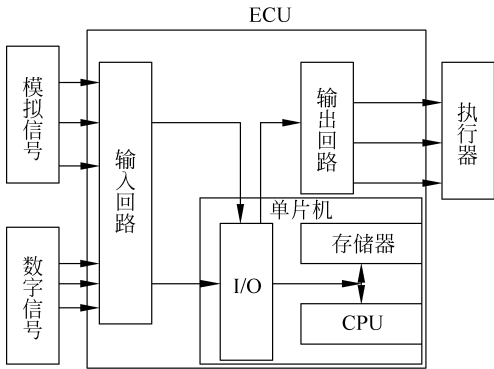


图 3-1 发动机电控系统的构成

3.1.2 电控燃油喷射系统的分类

由于生产的厂商和年代不同,目前正在使用的电控汽油发动机种类繁多,布置形式和结构有较大的差异。为了对电控汽油发动机有一个全面认识,对各种类型的电控汽油发动机按照它的主要结构特征或工作特征,可作如下分类。

1. 按汽油喷入的位置分类

对采用压力喷射方式形成混合气的电控汽油发动机,按汽油喷入的位置分类,可分为缸内直接喷射方式和进气管喷射方式两种类型。进气管喷射系统又可分为单点喷射(SPI、TBI或CFI)和多点喷射(MPI)。多点喷射系统按照进气量的检测方式不同,又可分为压力型(D型)和流量型(L型)燃油喷射系统。

1) 缸内直接喷射系统

缸内直接喷射方式的主要特点是:喷油器安装在气缸盖上,喷油器把汽油直接喷入发动机气缸内,在气缸内与已吸入的空气混合形成可燃混合气,如图3-2所示。

采用缸内直接喷射方式,通过合理组织缸内的气体流动,并与一定的喷油规律相配合,能够实现分层稀薄燃烧(fuel stratified injection, FSI),可以进一步降低汽油发动机有害物的生成量,提高汽油发动机的燃油经济性。缸内直喷技术是柴油机分层燃烧技术衍生而来的汽油喷射新技术,缸内直喷系统均为多点喷射系统,这种喷射系统将喷油器安装在火花塞附近的气缸盖上,并以较高的燃油压力(10MPa左右)将燃油直接喷入气缸燃烧。因为汽油黏度低而喷射压力较高。实验证明,缸内喷射的优越性在于喷油压力高、燃油雾化好,并能实现缸内稀薄混合气(空燃比40:1)的燃烧,因此,能够显著降低油耗,减少排放和提高动力性。缸内直喷技术是汽油机电控喷油技术的发展方向,国内外汽车都已经采用缸内直喷技术,如奔驰E200、E300L,宝马X6系列、7系列,速腾1.4L TSI、1.8L TSI,迈腾,奥迪RS4、R8,丰田雷克萨斯GS300等轿车都已经装备缸内直喷系统。

2) 进气管(缸外)喷射系统

进气管喷射又称为缸外喷射,是指喷油器将燃油喷射在节气门或节气门附近进气管内的喷射系统,如图3-3所示。与缸内喷射相比,进气管喷射系统对发动机机体的改动量较小,喷油器不受燃烧高温、高压的直接影响,设计喷油器时受到的制约较少,且喷油器工作条件大大改善。国产桑塔纳、宝来、捷达、奥迪、红旗、广州本田、海南马自达、天津夏利、威乐、威驰、丰田、北京现代等系列都采用了进气管喷射系统。

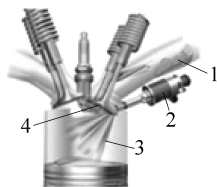


图 3-2 缸内直喷示意图

1—进气管; 2—喷油嘴; 3—高压雾化的汽油; 4—进气门

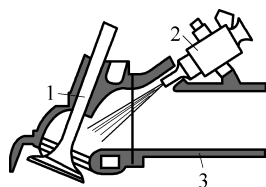


图 3-3 缸外喷射(进气管喷射)示意图

1—进气门; 2—喷油嘴; 3—进气管

(1) 单点燃油喷射系统(single point fuel injection system, SPFI 或 SPI)

单点燃油喷射系统是指在多缸发动机节气门的上方,安装一只或并列安装两只喷油器同时喷油的燃油喷射系统,如图 3-4 所示。

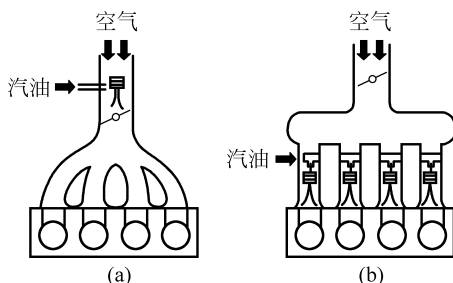


图 3-4 单点喷射与多点喷射

(a) 单点喷射; (b) 多点喷射

在单点燃油喷射系统中,燃油喷射在节气门上方的进气管中与进气气流混合形成可燃混合气,通过进气歧管分配到各个气缸。如图 3-4(a)所示。因为喷油器安装在节流阀体(即节气门体)中央集中喷射燃油,所以又称为集中喷射系统(concentrate injection system, CFI),如美国通用汽车公司的 TBI 系统、福特汽车公司的 CFI 系统以及德国博世(Bosch)公司的 Mono-Motronic 系统等。

(2) 多点燃油喷射系统(multi-point fuel injection system, MPFI 或 MPI)

多点燃油喷射系统是指在发动机每个气缸都安装一只喷油器的燃油喷射系统,如图 3-4(b)所示。缸内喷射系统的喷油器安装在气缸盖上方,缸外喷射系统的喷油器安装在进气门前方。多点燃油喷射和单点燃油喷射系统工作原理都是由电控单元根据空气流量计、曲轴位置传感器、节气门位置传感器、冷却液温度传感器等检测的发动机工况信号计算喷油时间,在发动机每个气缸进气行程开始之前喷油一次,喷油量由每次喷油持续时间的长短来控制,喷射所需要的压力燃油由电动燃油泵提供。由于单点喷射系统的燃油器距离进气门较远,喷入进气管的燃油具有足够的时间与进气气流混合形成均匀的可燃混合气,因此,对燃油雾化质量的要求不高,可采用较低的喷油压力(一般为 100kPa 左右),多点喷射的燃油器距离进气门较近,对燃油雾化的要求较高,因此喷油压力较高(一般为 250~400kPa)。

2. 按喷油控制方式分类

按照控制方式不同,发动机燃油喷射系统可分为机械控制式、机电结合式和电子控制式燃油喷射系统 3 种类型。

1) 机械控制式燃油喷射系统

机械控制燃油喷射系统是一种以机械构件组成的控制系统对汽油喷射过程进行控制的模式。具有代表性的典型系统是博世公司的机械控制方式汽油喷射系统,如早期的(1967—1982 年)奔驰、奥迪轿车采用的 K 型汽油喷射系统(K-Jetronic),即为机械控制式燃油喷射系统。

2) 机电结合式燃油喷射系统

机电结合式燃油喷射系统也称为 KE-Jetronic 系统,它是 K-Jetronic 系统的改进,由博

世公司于1982年推向市场。KE-Jetronic系统与K-Jetronic系统基本相同,汽油控制系统的控制方式仍采用机械控制,差异在于KE-Jetronic系统增加了一个电控单元、若干个传感器和一个电液式压差调节器。

3) 电子控制式燃油喷射系统

电子控制式燃油喷射系统是指由电控单元(ECU)根据各种传感器信号,经过数学计算和逻辑判断处理后,直接控制执行器(喷油器)喷射燃油的系统,如图3-5所示。

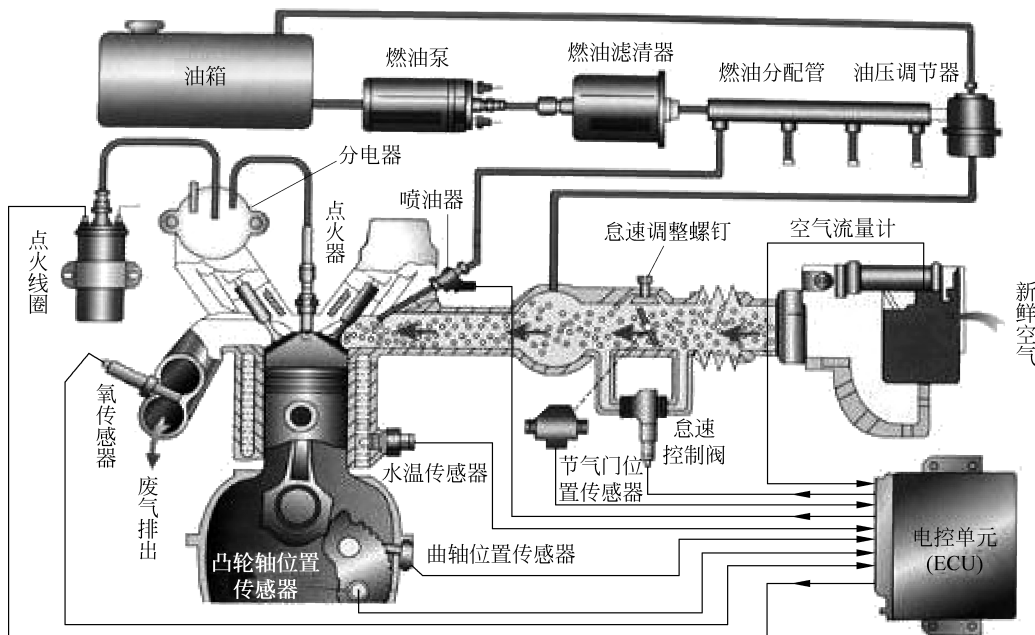


图 3-5 电控燃油喷射系统

电子控制式燃油喷射系统又称为电控喷油系统,其显著特点是发动机供油系统供给一定压力的燃油(一般高于进气歧管压力 300kPa),燃油由喷油器喷入进气门附近或直接喷入气缸内与空气混合,喷油器受电控单元(ECU)控制,ECU 通过控制每次喷油持续时间的长短来控制喷油量。喷油持续时间一般为 2~12ms,喷油持续时间越长,喷油量越大。

3. 按喷油器喷油方式分类

按照喷油器喷油方式,燃油喷射系统分为连续喷射和间歇喷射两种。

1) 连续喷射

连续喷射方式又称为稳定喷射方式。连续喷射方式的特点是:汽油发动机运行期间,喷油器的喷油是连续进行的。这种喷射方式不需要考虑喷油定时和各缸的喷油顺序,因此控制非常简单,但混合气的均匀性、空燃比控制精度及汽油发动机对过渡工况的响应特性都较差。连续喷射方式仅用在博世公司的机械控制式汽油喷射系统(K-Jetronic 系统)和机电结合式燃油喷射系统(KE-Jetronic 系统)中。

2) 间歇喷射

间歇喷射方式也成为脉冲喷射方式。间歇喷射方式的特点是:汽油发动机运行期间,喷油器按照一定的规律以间歇工作的方式,把汽油喷入各缸的进气歧管内,电控汽油发动机

全部采用间歇喷射方式。间歇喷射方式按各缸喷油器的喷射时序控制方式,可分为同时喷射、分组喷射和顺序喷射 3 种方式。

(1) 同时喷射。同时喷射是指在发动机运转期间,由 ECU 的同一个指令控制所有喷油器同时开启或同时关闭的喷油控制,如图 3-6(a)所示。此外采用分组喷射或顺序喷射的燃油喷射系统发生故障时,控制系统处于应急状态运行时,ECU 将自动转换为同时喷射。同时喷射方式的喷油正时与发动机各缸的工作过程没有关系,因此各缸混合气的形成时间长短不一,造成各缸在混合气均匀性上存在较大差异,早期的电控燃油喷射系统都采用这种控制方式。

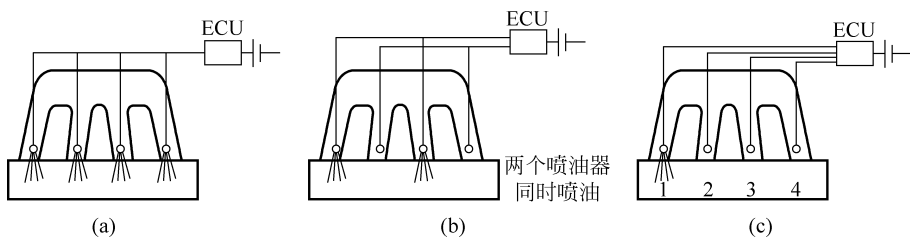


图 3-6 汽油机间歇喷射方式

(a) 同时喷射; (b) 分组喷射; (c) 顺序喷射

(2) 分组喷射。将喷油器分组,由 ECU 分别发出喷油指令控制各组喷油器的喷油,如图 3-6(b)所示。分组喷射的控制电路虽然比同时喷射方式复杂,但各缸混合气的均匀性与空燃比控制精度有了较大提高,部分中低档轿车采用了分组喷射方式。

(3) 顺序喷射。顺序喷射又称为次序喷射或独立喷射,是指在发动机运转期间,喷油器按照进气行程的顺序依次进行燃油喷射。如图 3-6(c)所示。喷油正时由 ECU 根据凸轮轴位置传感器提供的信号判定第一缸活塞位置,在第一缸活塞到达进气行程上止点前一定角度时,ECU 发出喷油脉冲信号控制第一缸喷油器喷射燃油。第一缸喷油器喷油之后,ECU 根据气缸点火顺序,轮流控制其他气缸的喷油器在其活塞到达进气行程上止点前一定角度时喷射燃油,从而实现顺序喷射。

3.2 空气供给系统

空气供给系统的作用是向汽油发动机提供清洁的、与汽油发动机负荷相适应的、经过计量的新鲜空气,使它们在进气管或气缸内与喷油器喷出的汽油形成品质良好的可燃混合气。空气供给系统由空气滤清器、空气计量装置(空气流量传感器)、节气门体和节气门位置传感器、进气总管和进气歧管组成。按照检测进气量的方式不同,空气计量方式又分为 D 型(压力型)和 L 型(空气流量型)。D 是德语压力(druck)的首字母,D 型是早期的燃油喷射系统中没有空气流量计,采用进气歧管绝对压力传感器,通过复杂的算法间接计算进气量的方式;L 是德语空气流量(luftmengen)的首字母,L 型则是采用空气流量计直接计算进气量。本节主要讲述空气流量传感器、进气歧管压力传感器以及节气门位置传感器等的工作原理。

3.2.1 空气流量传感器的结构与工作原理

空气流量传感器(air flow sensor, AFS)又称为空气流量计(air flow meter, AFM),是进气歧管空气流量计的简称,其功用是检测发动机进气量的大小,并将空气流量信息转换成电信号输入电控单元(ECU),以供 ECU 计算确定喷油时间(喷油量)和点火时间。进气量信号是 ECU 计算喷油时间和点火时间的主要依据。

电控燃油喷射系统中目前使用过的空气流量计主要有翼片式空气流量计、卡门涡流式空气流量计、热丝(热线)式空气流量计和热膜式空气流量计 4 种类型。因翼片式空气流量计为机械式空气流量计,目前已经淘汰,本文只介绍卡门涡流式、热丝与热膜式空气流量计。

1. 卡门涡流式空气流量传感器

卡门涡流式空气流量传感器又称为卡门漩涡式空气流量计,其依据为卡门涡流理论,是利用超声波或者反光镜检测涡流频率来检测空气流量的一种传感器。如果在流速均匀的空气通道中安放一个涡流发生器,那么当空气流过涡流发生器时,就会在它的背面两侧有规律地交替产生一个个漩涡,叫作卡门漩涡。如图 3-7 所示,在一定的流速范围内,卡门漩涡的发生频率 f (即单位时间内交替产生的漩涡个数)与空气的流速 v 、涡流发生器的直径 d 有如下对应关系:

$$f = S_t \frac{v}{d} \quad \text{或} \quad v = d \frac{f}{S_t}$$

式中, S_t 为斯特罗巴尔数,其数值的大小与涡流发生器的几何形状有关,当涡流发生器的几何形状确定时,在流速为 $1 \sim 75 \text{ m/s}$ 范围内,斯特罗巴尔数基本上保持不变(S_t 约为 0.2)。由于流量计的通道截面积已定,因此只要测出涡流发生的频率,ECU 就能由以上对应关系,计算出空气的流速和体积流量,进而根据温度和压力算出进入发动机气缸的空气质量。

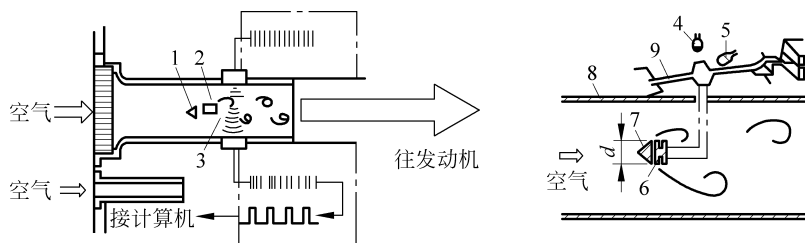


图 3-7 反光镜检测卡门涡流式空气流量计

1—涡流发生器；2—稳定板；3—卡门漩涡；4—LED；5—光敏晶体管；
6—导压孔；7—涡流发生器；8—进气歧管；9—板弹簧

电控汽油发动机中的卡门涡流式空气流量计根据涡流频率检测方法不同,有反光镜检测方式和超声波检测方式两种类型。

1) 反光镜检测方式

反光镜检测方式卡门涡流空气流量计的基本结构如图 3-8 所示,主要由涡流发生器、发光二极管(LED)、光敏三极管、反光镜、集成控制电路等组成。在传感器气流入口处一般设

置蜂窝状整流网栅(见图 3-7),其作用是使吸入的空气在涡流发生器上游形成比较稳定的气流,从而保证涡流发生器产生与流速成正比的涡流。反光镜采用反光能力较强的金属箔片制成,并用细薄的张紧带张紧在导压腔的外表面上,镜面上部设有一只发光二极管(LED)和一只光敏三极管,发光二极管发出的光由反光镜发射到光敏三极管上。涡流频率的检测任务由发光二极管、反光镜、光敏三极管完成,传感器内部的信号处理电路将频率信号转换成数字信号,再输入 ECU 进行运算处理,涡流式流量传感器检测的是进气气流的体积流量,为了避免环境温度变化给流量监测带来误差,一般采用进气温度信号进行修正。

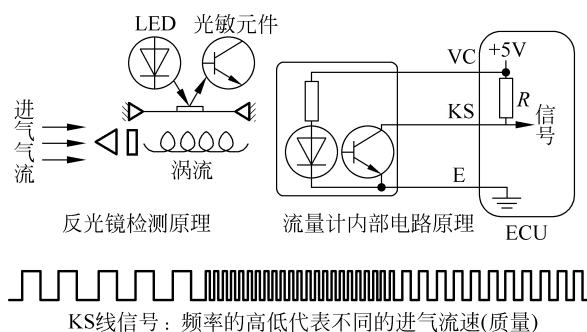


图 3-8 反光镜检测方式工作原理

2) 超声波检测方式

超声波检测方式见图 3-7,该流量计由布置在主通道中央产生卡门漩涡的锥状涡流发生器和涡流稳定板,检测涡流发生频率的超声波发生器、超声波接收器,集成电路,以及对进气压力和温度进行检测的进气压力传感器和进气温度传感器等部件组成。当空气流过涡流发生器时,将在涡流发生器两侧交替产生卡门漩涡,由于卡门漩涡的存在,涡流发生器背后流场的压力和速度场会发生与涡流变化规律相对应的交替变化。反光镜式卡门涡流空气流量计利用压力的交替变化来检测涡流的发生频率,超声波检测方式卡门涡流空气流量计则是利用流场中交替产生的漩涡对超声波的加速和阻滞效用,来检测漩涡的发生频率。

卡门涡流式空气流量计的主要优点是响应速度快,它的输出信号几乎与空气流速变化同步,因此得到的空气流量几乎没有滞后;输出信号为线性数字脉冲信号,信号的处理简单;进气阻力小,结构紧凑,长期使用流量特性基本不会发生变化。但也存在制造成本较高,测出的是空气的体积流量,还需要 ECU 通过运算换算成质量流量,并需测量进气温度和进气压力的缺点。目前主要采用的车型为丰田雷克萨斯 LS400 及部分三菱轿车,仅用于日系车型。

2. 热丝(热线)式与热膜式空气流量传感器

热丝与热膜式空气流量传感器借鉴的是日常生活中使用的电吹风机的工作原理。当空气流过一个温度比它高的发热物体时,空气从发热物体吸收的热量与流过该发热体的空气质量具有一定的对应关系,利用这一原理制成的空气流量计称为热丝(热线)式或热膜式空气流量计,这类空气流量计检测到的是空气的质量流量。

热丝式空气流量传感器的结构如图 3-9 所示,该空气流量计主要由防护网 1、取样管 2、铂热线 3、温度补偿电阻 4 和控制线路板 5 等组成。取样管布置在空气通道中央,由两个塑料护套和一个热线支撑环组成。在热线支撑环内,布置一根直径为 $70\mu\text{m}$ 、电阻为 R_H 且随温度变化的铂丝热线 3 作为发热体。热线支撑环前段布置一个电阻为 R_K 且阻值随温度变

化的铂薄膜电阻 4(也称为冷线),起温度补偿作用。热丝式空气流量计的输入电压信号从精密电阻 R_A 的两端引出, R_A 布置在热线支撑环后端的塑料护套内。 R_H 、 R_K 、 R_A 和位于控制电路板上的 R_B 构成一个惠斯通电桥, R_B 除了作为惠斯通电桥的一个桥臂外,同时兼有对空气流量计的输出特性进行最后调整的功能。

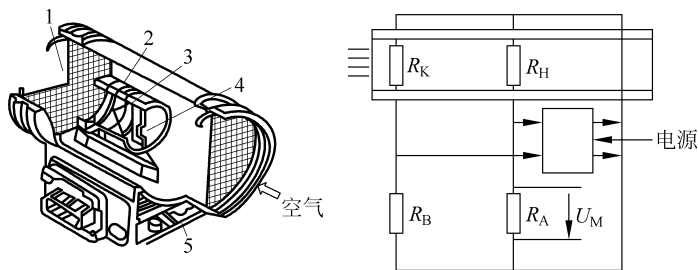


图 3-9 热丝式空气流量传感器的结构及电路原理
1—防护网; 2—取样管; 3—铂热线; 4—温度补偿电阻; 5—控制线路板

热丝式空气流量计的基本工作原理为:当温度较低的空气流过布置在空气通道中温度较高的热线时,热线与空气发生热量交换,热线变冷电阻变小。作为热线式惠斯通电桥的一个桥臂,该桥臂电阻的变化使原来平衡的电桥产生了不平衡,为了使电桥恢复平衡,必须增大流过热线的电流,对热线加热,使它的电阻值恢复到使电桥平衡的数值。由此可见,流过热线的空气质量越多,空气带走的热量也越多,为保持电桥平衡,维持热线温度所需的电流也越大,反之则越小。由于流过热线的电流与精密电阻 R_A 两端的电压成正比,因此 ECU 根据 R_A 两端的输出电压,就能用相应的算法,算出空气的质量流量。

热丝式空气流量计具有响应速度快、测量精度高、进气阻力小、不会磨损、可直接测量进气空气的质量流量等优点。但它也存在价格较高,热线表面易受空气中尘埃的玷污而影响精度,当空气流速分布不均匀时也会产生误差,发动机回火时容易造成断线等缺点。因此,电控系统一般设有热线自洁电路,在发动机熄火后,自动将热线加热至 1000°C ,持续 1s ,把玷污热线的尘埃烧掉;在有些电控系统中,也有采用将热线与冷线的温差提高至 200°C ,以减轻热线玷污的控制策略。

热膜式空气流量计与热丝(热线)式空气流量计工作原理相同,但结构上有一些差异。热膜式空气流量计的发热体用固定在薄的树脂基片上的铂膜代替铂丝,或者用厚膜工艺将热线、冷线、精密电阻镀在一块陶瓷基片上,从而简化结构,降低制造成本。采用热膜式空气流量计的国产轿车有上海大众桑塔纳 2000 时代超人、帕萨特和“一汽”的红旗、捷达王等。

汽车用空气流量传感器的性能比较见表 3-1。

表 3-1 空气流量传感器性能比较

性能 \ 类型	翼片式	涡流式	热丝与热膜式	歧管压力式
输出方式	模拟输出: 信号电压 U_s 与进气容积 Q_A 成反比,即 $Q_A \propto I/U_s$	数字输出: 信号频率 f 与进气容积 Q_A 成正比,即 $Q_A \propto f$	模拟输出: 信号电压 U_s 与进气质量 Q_M 的 4 次方根成正比,即 $U_s \propto \sqrt[4]{Q_M}$	模拟输出: 信号电压 U_s 与进气歧管压力 p 成正比,即 $U_s \propto p$

续表

性能 \ 类型	翼片式	涡流式	热丝与热膜式	歧管压力式
测量误差	约 3%	约 3%	约 3%	约 3%
相应特性	差	优	优	良
通道阻力	大	小	很小	很小
怠速稳定性	好	好	好	好
有无移动部件	有	无	无	无
进气温度修正	需要	需要	不需要	需要
大气压力修正	需要	需要	不需要	需要
系统控制精度	中等	高	高	低
成本	中等	高	中等	低
综合评价	良	优	优	良

3.2.2 进气歧管压力传感器的结构与工作原理

进气歧管压力传感器属于压力传感器的一种,是一种检测进气歧管绝对压力(或真空度)的压力传感器。在汽车行驶过程中,需要实施检测发动机的进气压力、大气压力、燃油压力、润滑油压力、制动油液压力以及变速传动油液压力等,这些压力传感器一般采用压阻式传感器,工作原理基本相同,主要功能是将气体或液体的压力信号转变为电信号,并输入 ECU 进行处理,从而保证汽车正常行驶。

各种汽车用压阻效应式歧管压力传感器结构类似,外形和结构如图 3-10 所示。半导体压敏电阻式绝对压力传感器是利用半导体压阻效应制成的一种测压传感器。这类传感器主要由真空室、滤清器、集成电路 IC 以及硅片和接线端组成。真空室为传感器所要测定的绝对压力提供一个基准压力(0 气压),硅片为其压力转换组件,也是半导体压敏电阻,压力转换组件由一块约 3mm 见方,厚 160 μm ,其中央部分用光刻腐蚀方法形成一个直径约 2mm,厚约 50 μm 硅薄膜的硅膜片和在圆形薄膜表面用微加工和台面扩散技术形成的 4 个压敏电阻在硅薄膜连接成惠斯通电桥组成(见图 3-11)。测压通道通过软管与进气歧管相连,把进气歧管内的进气压力引到硅薄膜上。在气体压力的作用下,硅薄膜发生拱曲变形,同时引起扩散在其上的 4 个压敏电阻阻值发生相应的变化。由于惠斯通电桥桥臂阻值发生变化,破坏了电桥的平衡,在惠斯通电桥的输出端会输出电桥电压,该电压的高低与进气歧管绝对压力一一对应。

压阻效应式压力传感器的工作特性曲线如图 3-12 所示,横坐标为当前进气歧管的绝对压力,纵坐标为传感器输出电压,随着绝对压力的增大,硅膜片受到的压差增大,膜片变形程度增大,惠斯通电桥的桥臂电阻阻值变化率增大,因此输出电压随之升高,可以看出,输出电压与进气歧管绝对压力几乎成正比。

半导体压敏电阻式绝对压力传感器具有尺寸小、精度高、成本低、响应速度快、重复性和耐震性好;输出信号与进气歧管绝对压力成线性关系;在 $-30\sim 100^{\circ}\text{C}$ 使用范围内,测量精度基本不受温度的影响等突出优点。采用半导体压敏电阻式绝对压力传感器的国产轿车有

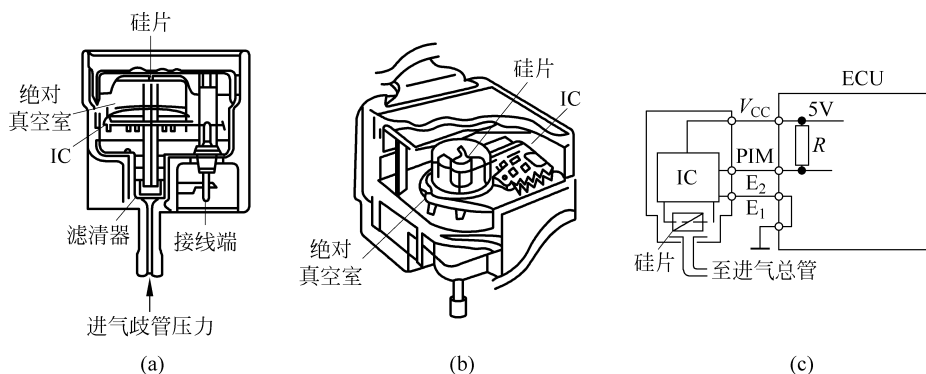


图 3-10 进气歧管压力传感器的结构及连接线
(a) 剖面结构图；(b) 侧剖面结构图；(c) 电路连接图

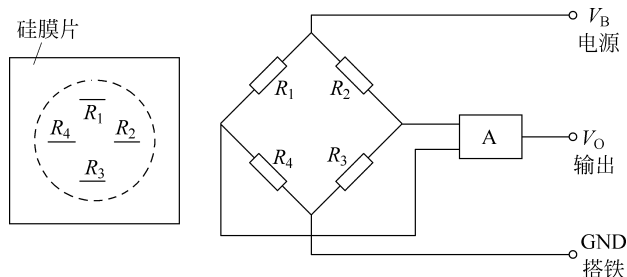


图 3-11 压敏电阻式进气歧管压力传感器的原理

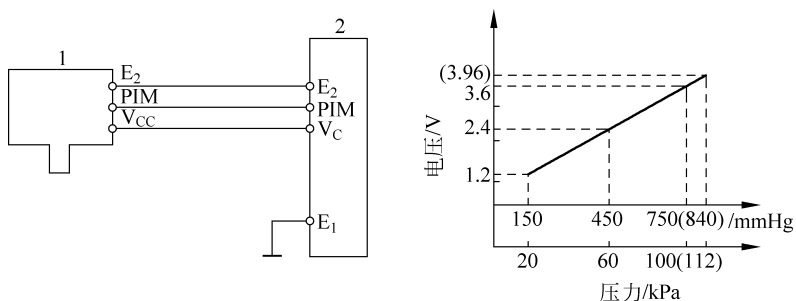


图 3-12 压敏电阻式进气歧管压力传感器的输出特性曲线

上海大众桑塔纳 99 系列、上海通用的赛欧和凯越、一汽大众的奥迪、二汽的富康、广州的本田雅阁等车型。

3.2.3 温度传感器的结构与工作原理

温度是反映发动机热负荷状态的重要参数,为保证控制系统能够精确控制发动机的工作参数,必须随时测定发动机冷却液的温度、进气温度,以便修正控制参数,计算进气的质量和进行排气净化处理。温度传感器的作用是检测发动机冷却液、进气和排气温度等,并将其转变为电信号输送给电控单元 ECU,ECU 根据发动机的温度信号修正喷油时间和点