

第3章

发动机主要性能参数的测量

进行发动机试验研究及性能检测所需的参数中,有些参数可以直接测量,有些参数则需利用直接测得的参数或已有数据经过计算求出。发动机试验测量、计算后所需的参数项目主要分为以下几种类型。

(1) 与常规动力性、经济性能直接有关的项目: 发动机的转速、扭矩、功率、燃油消耗率、点火提前角、供油提前角、空气消耗量,进气压力和温度,排气压力与温度、中冷前后温度和压力(对于增压发动机),排气背压,润滑油的压力和温度,冷却水温度,燃油温度、密度等。

(2) 与发动机尾气排放有关的项目: 一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、柴油机的微粒(PM)和烟度等。

(3) 与试验环境有关的项目: 大气压力、温度和湿度等。

(4) 其他项目: 根据一些特殊要求进行测试的项目,如柴油发动机高压喷油泵泵端和嘴端压力、充气效率、过量空气系数、汽缸内的最高爆发压力、平均有效压力、压力升高率、噪声、振动等。

对以上所述参数涉及的基本测试项目需要相应的仪器和设备,采用不同的方法进行。下面将分类进行介绍。

3.1 发动机转速、扭矩测量和功率计算

在汽车发动机中,发动机在整个运转范围内的功率、工作转速和此时的输出扭矩均是重要的性能参数。发动机某工况下的有效功率是测定有效扭矩和转速值后计算而得。计算公式如下:

$$P_e = \frac{2\pi M_e n}{60 \times 1000} = \frac{M_e n}{9550} \quad (3-1)$$

式中: P_e ——有效功率, kW;

M_e ——实测有效扭矩, N·m;

n ——实测转速, r/min。

从式(3-1)中可以看出,发动机的有效输出功率正比于有效扭矩与转速的乘积。

3.1.1 转速测量

转速是单位时间内曲轴的平均旋转次数,通常以每分钟的转数(r/min)作为计量单位。对于发动机转速的测量,可用的传感器有很多种,目前主要用磁电式传感器、光电式传感器和霍尔传感器。

现以磁电式转速传感器和霍尔传感器为例简要说明其测量方法。

1. 磁电式传感器

磁电式传感器是通过磁电作用把被测参数转换为感应电动势的一种器件。它是利用带齿的含铁导磁材料在磁场中切割磁力线所产生的感应电动势来计算转速的。其结构原理简图如图3-1所示,由被测转轴上安装的带齿的含铁导磁材料制成的信号盘1、永久磁铁2、铁芯3和线圈4组成。磁电式转速传感器安装在试验台架支架上(发动机使用时通常固定在机体上)。磁铁与信号盘保持有0.5~1.2mm的间隙 d 。当信号盘旋转时,齿的凹凸引起磁阻的变化,使磁通量发生周期变化,因而在线圈4中感应出交变的电动势。我们以 f 表示感应电动势的频率,则频率 f (Hz)与转速间的关系为

$$n = \frac{60f}{z} \quad (3-2)$$

式中: n ——发动机的转速,r/min;

z ——信号盘齿数;

f ——感应电动势频率,Hz。

利用磁电式传感器也可以进行转角的度量。将转盘中的某些齿做出特殊齿形或间隔,也可以作为某一具体角(位置)的标志。

磁电式转速传感器的突出优点是不需要外加电源、结构简单、工作安全可靠、转速精度高、输出阻抗小、测速范围较广等,因此在发动机中应用较为广泛。

2. 霍尔传感器

霍尔(Hall)传感器是基于霍尔效应的一种传感器。设在一个矩形半导体薄片上有一电流通过,此时如有一磁场也作用于该半导体材料上,则在垂直于电流方向的半导体两端会产生一个很小的电压,这种效应就称为霍尔效应。如改变磁场的强度,霍尔电压的大小亦随

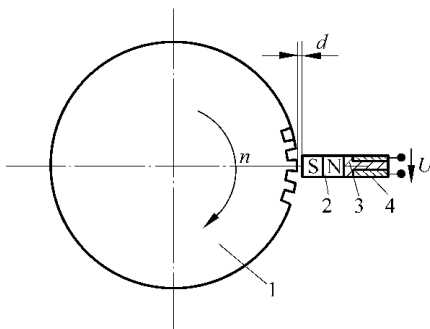


图 3-1 磁电式转速传感器
1—信号盘; 2—永久磁铁; 3—铁芯; 4—线圈

之改变,当磁场消失时,霍尔电压变为零。

霍尔转速传感器主要由霍尔元件或霍尔电路、永久磁铁和触发轮等组成,触发轮一般为叶片或轮齿形式,通常装在曲轴上或者凸轮轴上。图 3-2 所示为触发叶片式霍尔传感器信号发生器的示意图。当叶片进入永久磁铁与霍尔元件之间的空气隙时,由于霍尔元件的磁场被触发叶片所旁路(或称隔磁),霍尔元件不产生霍尔电压;当触发叶片离开空气隙后,永久磁铁的磁通便穿过霍尔元件而产生霍尔电压。利用霍尔电压方波信号的频率,可算出转速值来。

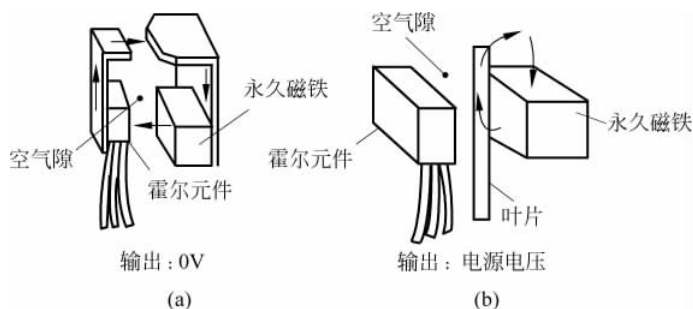


图 3-2 霍尔传感器信号发生器示意图

(a) 有霍尔电压(叶片离开空气隙); (b) 无霍尔电压(叶片在空气隙中)

对于触发轮是轮齿形式的霍尔传感器,则传感器探头上通常安装有两个霍尔元件,其结构示意图如图 3-3(a)所示。

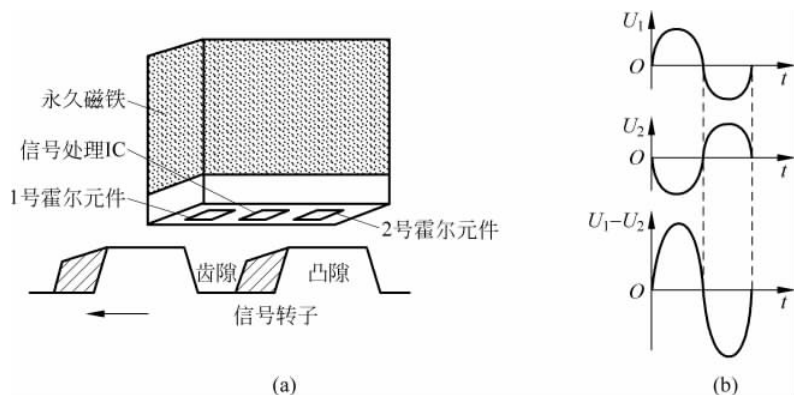


图 3-3 触发轮齿式霍尔(曲轴或凸轮轴位置)传感器

此种结构传感器的工作原理与触发叶片式霍尔转速传感器的工作原理相同。结构上有所不同,主要区别在于永久磁铁与霍尔元件安装在一侧,即霍尔芯片位于磁铁和齿轮之间。当轮齿式信号轮旋转时,使探头与信号轮之间的空气间隙发生变化,从而导致磁路中的磁场强度发生变化。根据霍尔效应,在传感器的霍尔元件中就会产生交变电压,其输出电压是两个霍尔电压(两个霍尔元件)的叠加,如图 3-3(b)所示。因输出电压增加,所以信号轮

齿与信号发生器之间的间隙 $((1.0 \pm 0.5)\text{mm})$,或更大,关于间隙大小的进一步信息可参考相关传感器说明书)比普通霍尔传感器间隙 $(0.2 \sim 0.4\text{mm})$ 大。这一结构的优点是不需要在触发轮的另一侧安装永久磁铁,这样信号盘便于安装。

霍尔传感器是1879年由Edwin Hall利用Hall效应发明的。20世纪80年代以来,汽车上应用的霍尔式传感器与日俱增,主要原因在于霍尔传感器有两个突出优点:一为输出的电压信号近似于方波信号;另一为输出电压与被测物体的转速无关,且具有低速特性好、信号处理简单等特点。但此种传感器需要外加电源。

关于霍尔转速传感器的进一步信息可参考文献[1~4]及相关文献。

3.1.2 扭矩测量

1. 扭矩测量原理及装置

第2章已介绍过,在发动机台架上,要想精确地测出发动机扭矩的大小,通常的办法是给发动机施加阻力矩(负荷),即通过测功机给发动机一个“负荷”,利用测功机浮动外壳的测点受力来测量发动机的扭矩。为此,测功机本身应具有吸收能量或传送动力的功能,并具有测量扭矩的装置。

根据扭矩测量原理的不同,测量扭矩的装置分为传递法和平衡力法两种类型。传递法主要应用轴式或法兰式扭矩传感器在动力的传递过程中测出扭矩值。平衡力法则如前面所述,利用作用在测功机上的作用扭矩与反作用扭矩大小相等、方向相反的原理来测量扭矩。目前测试发动机稳态运转时的扭矩普遍应用的是利用平衡力法测扭矩的测功机,也叫摇摆式测功机。但传递式扭矩测量装置的应用也日益增多,因为此种装置精度较高,瞬态性能好,常用在动态测试试验台上。

1) 平衡力法

平衡力法的测量原理及结构简图如图3-4所示,将测功机的外壳通过轴承支撑在支架上,外壳能自由地回转,在外壳上装有力臂,连接载荷单元。工作时在发动机扭矩作用下,载荷单元承受的作用力 W 乘以力臂长度 L 就是扭矩值。扭矩的表达式如下:

$$M_e = W \cdot L \quad (3-3)$$

式中: M_e ——实测有效扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

W ——作用在载荷单元上的力, N ;

L ——力臂长度, m 。

2) 传递法

转轴受到扭矩作用时会产生变形,传递法就是根据扭矩传动轴的扭曲进行测量的方法(通过测量轴变形,利用应力与应变的关系来测量扭矩)。根据扭矩信号的传输方式,扭矩传感器可分为接触式扭矩传感器和非接触式扭矩传感器。非接触式扭矩传感器是在接触式测量的基础上发展起来的。它综合利用了已有的扭矩测量技术和方法,通过技术改进和升级实现非接触的扭矩测量目标。由于非接触式扭矩传感器在其内部的输入和输出之间没有机

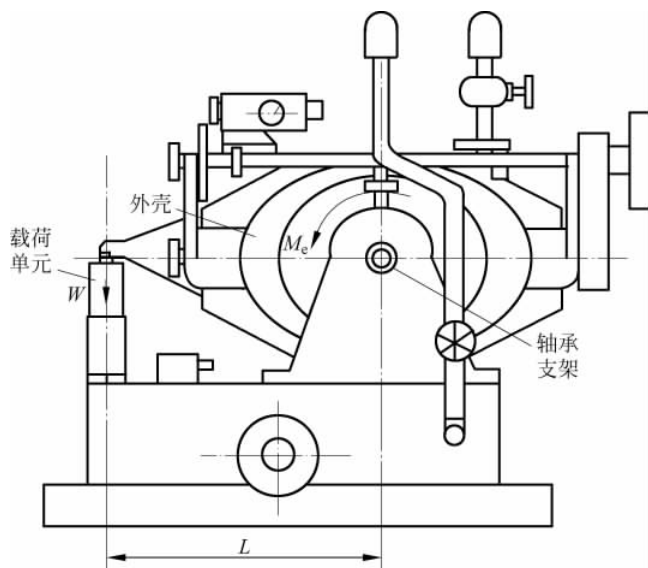


图 3-4 测扭矩机构(测功机后视图)

械连接,不会受到磨损,故精度高,因此常用于发动机试验测试中,尤其是动态试验。非接触式扭矩传感器按检测方法可分为应变式、磁弹性式、磁电式和光电式传感器。关于扭矩传感器的进一步信息可参考相关书籍、文献[5~6]及相关传感器说明书。

下面简要介绍磁电式和应变式传感器。

(1) 磁电式传感器

利用磁、电感应的非接触式扭矩传感器结构原理如图 3-5 所示,在一根弹性轴的两端安装有两个信号齿轮,在两齿轮的上方各装有一组信号线圈,在线圈内均装有磁铁,与信号齿轮组成磁电信号发生器。在弹性轴受扭时,将产生扭转变形,使两组交流电信号之间的相位发生变化。在弹性变化范围内,相位差变化的绝对值与扭矩的大小成正比。安装示意图如图 3-6 所示。

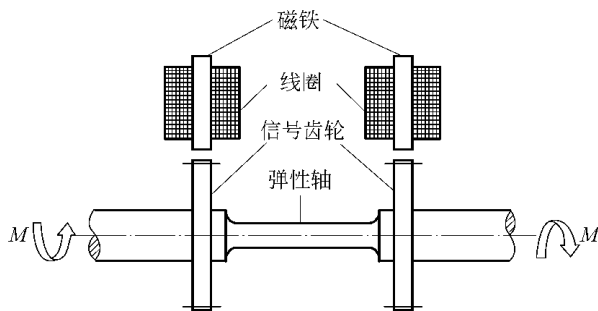


图 3-5 磁电式测扭传感器工作原理图

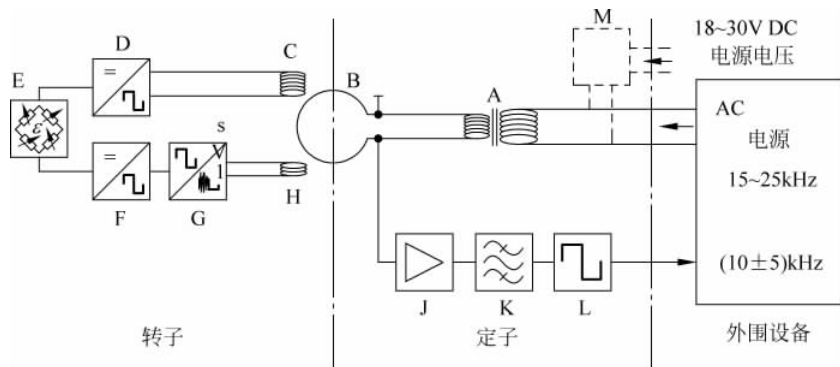


图 3-8 应变式扭矩传感器信号传输示意图

的误差外,主要是测功机的误差。各种测功机的一个共同的主要误差来源,就是浮动定子两端轴承摩擦带来的误差。由于定子只在很小角度内摆动,长期和过载使用会造成局部的压痕而带来较大摩擦阻力。因此,除关心轴承的润滑状况外,还应定期进行检查和标定。

电力测功机多用鼓风机进行冷却,形成鼓风损失,且随转速增加而大幅上升。这是一种系统误差,可事先预估进行修正。

电力和电涡流测功机电线的刚性和水管、润滑油路的刚性会产生摆动阻力,带来误差,因此宜采用柔性管线,并尽可能从中心引入。水力测功机水位的波动,也是误差的来源之一。

由于测功机误差随使用时间和装配情况而变化,所以长期使用和维修安装后应重新进行校正标定。标定的方法参见 2.1.1 节“测功机的校正”,应该注意的是机械摩擦阻力有方向性,单纯的加载测量会形成无法估计的系统误差。所以标定过程中应记录顺序加载和顺序减载时的两组数据,取其平均值作为标定结果(或参照相关标准)。

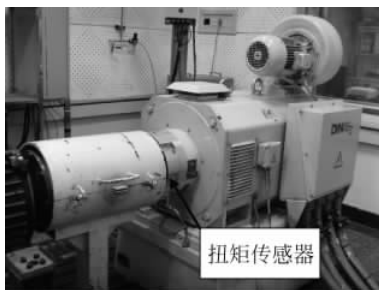


图 3-9 法兰式扭矩传感器安装示意图

3.2 活塞压缩上止点与点火提前角和喷油提前角的测定

1. 曲轴位置及汽缸识别传感器

发动机的大多数性能都与点火提前角(点燃式发动机)和喷油提前角(压燃式发动机)有紧密的关系。电控汽油机或点燃式发动机要标定提前角的 MAP 图;研发试验中要进行大量随提前角而变化的性能参数试验,如最大功率空燃比和最经济空燃比的确定等。因此必须准确确定提前角数值。提前角准确测量的前提则是正确决定点火定时和喷油定时的基准

点,即必须准确测定曲轴在压缩上止点时的位置。因为压缩上止点确定后,它与点火时刻(点燃机)或喷油时刻(压燃机)角度的差值就是所需测定的提前角。为此,电控发动机具有专用的曲轴位置传感器(crankshaft position sensor,CPS)。实际上发动机曲轴位置传感器除了可提供相对于活塞上止点位置的曲轴转角信号外,还可测量发动机转速,以及各种信号的相位和转角数值,因此,曲轴位置传感器又称为发动机转速与曲轴转角传感器。其功用是采集曲轴转动角度和发动机转速信号,并输入电子控制单元(electronic control unit,ECU),以便确定点火时刻和喷油时刻。对于四冲程发动机,由于每循环曲轴旋转两周,各缸都存在两个上止点(压缩行程和进气行程),因此还需要识别是哪一缸,哪一个上止点,即需要一个用于识别汽缸的传感器信号轮。信号轮通常安装在凸轮轴末端,传感器安装在缸盖、缸盖罩或齿轮盖上,又称凸轮轴位置传感器。因为凸轮轴转一圈正好是发动机的一个工作循环,只要它的位置信号与某缸压缩上止点相对应,则该信号出现的时刻,必然对应于该缸的压缩上止点。因此,凸轮轴位置传感器的功用是采集配气凸轮轴的位置信号,并输入到发动机电控单元,以便 ECU 识别顺序排列的第一缸,再确定该缸的压缩上止点,从而进行顺序喷油控制、点火时刻控制和爆燃控制。此外,凸轮轴位置信号还用于发动机起动时识别出第一次点火时刻。

图 3-10 所示为某 4 缸发动机曲轴位置传感器和凸轮轴传感器(判缸传感器)安装位置示意图。

实际安装中,曲轴位置传感器一般安装在发动机缸体或变速箱壳体上(与信号盘对应),凸轮位置传感器一般安装在凸轮轴罩盖或气门室盖上。各传感器分别正对安装在曲轴上的齿盘信号轮和凸轮轴上的信号轮。

4 冲程发动机凸轮轴信号轮转一圈(360° 凸轮轴转角和 720° 曲轴转角)为一个周期。一个周期内,有 4 个均匀分布的正常齿,每缸对应一个,并有一个多齿,在第一缸正常齿与第三缸正常齿之间的 $1/5$ 处,作为判缸标志。

曲轴信号转子为齿盘式,在其圆周上均匀间隔地制作有 58 个凸齿(或其他凸齿数,如 36),57 个小齿缺和 1 个大齿缺。图 3-10 所示的位置正好对应发动机第 1 缸压缩上止点。每个凸齿和每个小齿缺各占的曲轴转角均为 3° ,大齿缺所占的曲轴转角为 15° 。于是,在测试信号中的 15° 宽脉冲信号处,必定是 1 缸或 4 缸(按 1—3—4—2 着火顺序)的上止点处。若同时又出现凸轮轴信号转子多齿数的非正常齿间信号时,就可以判别为被测第一缸的压缩上止点了,如图 3-11 所示。

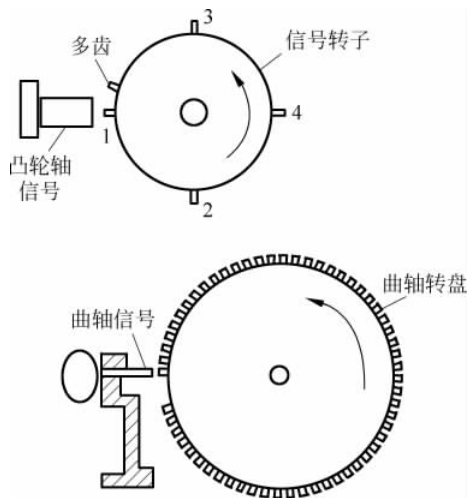


图 3-10 曲轴位置传感器和凸轮轴位置传感器安装示意图
(图为第 1 缸压缩上止点时的位置)

因为通常传感器安装时已确定第1缸压缩上止点处大齿缺同凸轮轴非正常齿相对应。将两个轴的齿形展开图进行对比,即可判断何时为1缸的压缩上止点。

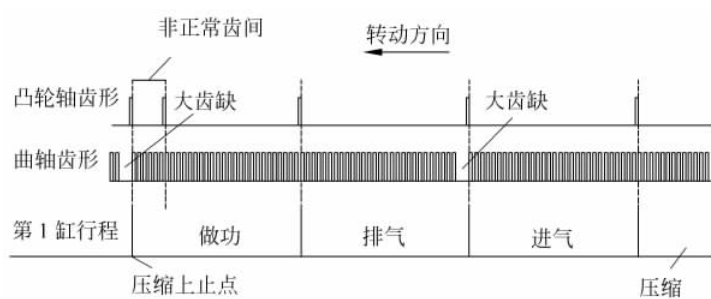


图 3-11 汽缸识别信号

对于不同用途的发动机,其发动机凸轮轴信号轮几何形状及齿数会有所不同,如有“1个齿”“3个齿”“ $Z+1$ 齿”等凸轮轴信号轮。另外,曲轴和凸轮轴传感器及其信号轮的安装条件非常重要,否则会出现信号失真或丢失,进一步信息读者可参考相关传感器说明书。

为解决信号失真等问题,目前也有采用其他方法替代凸轮轴和曲轴位置传感器实现发动机判缸功能,如采用离子流火花塞或通过发动机缸内压力的变化来进行判缸,进一步信息读者可参阅文献[7]等相关发动机资料。

2. 上止点真实位置确定

利用图 3-10 所示的曲轴齿盘宽脉冲信号或其他方法显示上止点相位时,其准确度首先取决于曲轴上止点真实位置的判定。一般来说常用的判定方法有以下几种。

1) 汽缸压缩线法(倒拖法或灭缸法)

利用汽缸压力传感器记录不着火(倒拖或灭缸)发动机的压缩及膨胀压力线,如图 3-12 所示。在曲线的上部(注意是在上部,不是在中部或下部)作若干条平行于横坐标的直线,各直线中点连线的延长线与横坐标的交点即为上止点相位。

一般来说,此时上止点附近的压缩与膨胀曲线是对称的,此法有一定的准确性。但当发动机冷却散热强烈时,压缩与膨胀线对应点的温度不等,压力有差别,就会出现一定的误差,即按上述方法获得的上止点线可能与大气压力线不垂直,有一倾斜角,见图 3-12 中的 $\Delta\alpha$ (此角也称热力损失角)。文献[8]介绍了热力损失角的测量方法,读者可参考。

2) 活塞位置测量法

利用汽缸头上的孔(喷油器孔或火花塞孔,不方便时,可卸下缸盖)安装深度百分尺测量活塞顶的位置。先顺时针转动活塞,测定行程中段到顶点几个位置的尺寸,并记录对应的曲轴相位或飞轮位置。然后逆时针转动上行,记录与上行时同样位置尺寸对应的曲轴相位或飞轮位置。各位置两次测量值中点的平均值就是上止点的位置。此法简易,还可消除活塞连杆接头间隙所造成的误差。因发动机工作中的真正压缩上止点是活塞上行消除间隙后的

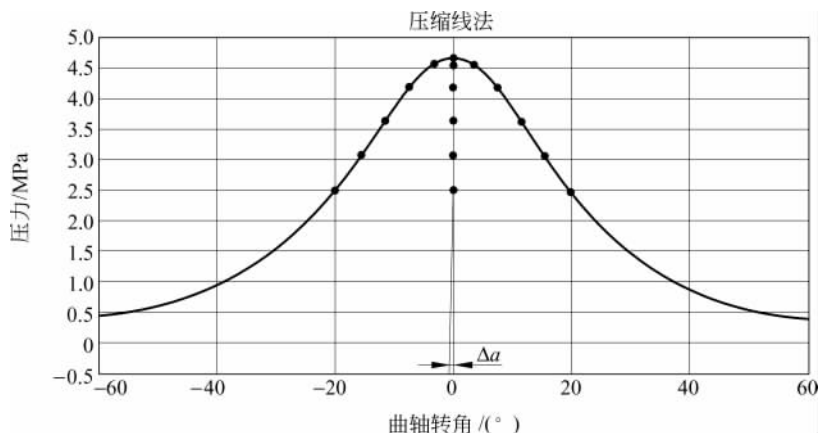


图 3-12 汽缸压缩线法确定上止点位置

最高位置,显然这一方法也有其不足之处。

3. 测定上止点位置的传感器及其误差与校正

近代大多使用磁电传感器来测定已标出的上止点位置。图 3-10 所示齿盘就是利用宽脉冲信号上升沿或下降沿确定上止点的一例。图 3-13 也是常用的一种形式。绕有线圈的永久磁铁固定在机体上,飞轮或皮带轮上对应上止点位置处安装导磁材料制成的凸尖(如图 3-13 所示),它们之间的间隙 Δ_1 一般调整到 0.15~0.2mm。飞轮旋转时在图示位置产生感应电动势脉冲(见图 3-13 中曲线),即可确定上止点位置。

由于传感器安装时不可避免地存在位置误差,可以利用前述上止点位置确定的方法进行校正,当作系统误差处理。要注意测试时的传感器频响问题。此外,曲轴扭转变形也会造成上止点位置的误差,特别是对距离飞轮端较远的汽缸。目前市场上已有专用上止点测定仪(如 AVL 公司生产的上止点测定仪),该测量仪能比较容易地确定上止点的位置,并可作为发动机动态上止点信号,但它的精度同样受安装位置的影响。

文献[9,10]分别介绍了确定上止点的其他方法,读者可参考。

4. 点火提前角与喷油提前角的判定

提前角的测定精度首先取决于上止点信号的位置精度,其次取决于记录的点火或喷油始点信号是否准确。此外还取决于曲轴齿盘的分度精度。电控发动机的这些信号和真实的着火与喷油时刻有一定的延迟,而且随不同工况而变。有关点火提前角与喷油提前角的测

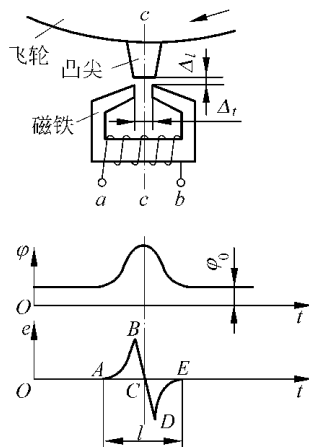


图 3-13 磁电法制取上止点位置