

第3章 内燃机主要性能参数的测量

进行内燃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。内燃机试验测量、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:内燃机的转速、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(对于增压内燃机),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) 与内燃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 内燃机转速、扭矩测量和功率计算

在汽车内燃机中,内燃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。内燃机某工况下的有效功率是通过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)可以看出,内燃机的有效输出功率与有效扭矩和转速的乘积成正比。

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。对于内燃机转速的测量,可用的传感器有很多种,目前主要用磁电式传感器、霍尔传感器和光电式传感器。

现以磁电式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、永久磁铁、铁芯和线圈组成。磁电式传感器安装在被测对象上(内燃机使用时通常固定在机体上)。磁铁与信号盘保持有 $0.5 \sim 1.2 \text{ mm}$ 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,因而在线圈中感应出交变的电动势。以 f 表示感应电动势的频率,则 f 与转速间的关系为

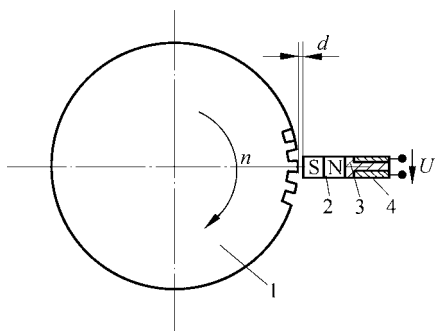


图 3-1 磁电式传感器

1—信号盘; 2—永久磁铁; 3—铁芯; 4—线圈

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

式中: n ——内燃机的转速, 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,因此在内燃机中应用较为广泛。

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。假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之改变,当磁场消失时,霍尔电压变为零。

霍尔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。

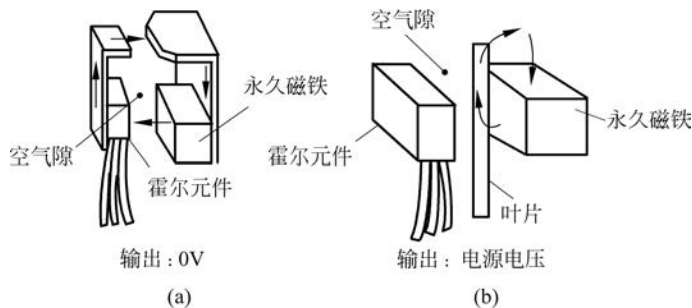


图 3-2 霍尔传感器信号发生器示意图

(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。

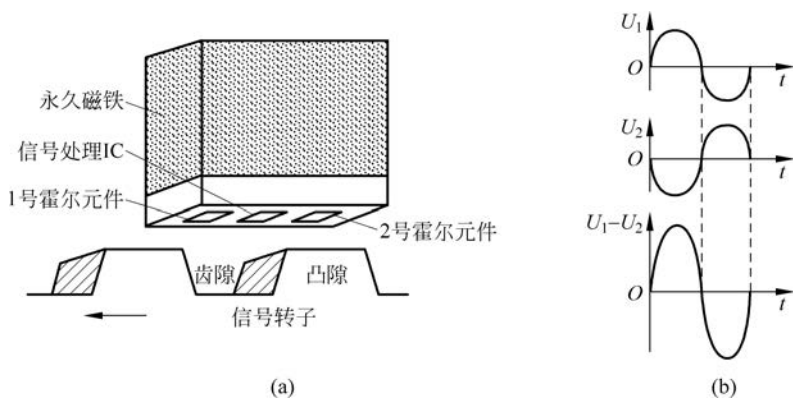


图 3-3 触发轮齿式霍尔(曲轴或凸轮轴位置)传感器

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,在传感器中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 ± 0.5 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(0.2~0.4 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,使信号盘便于安装。

霍尔传感器是 1879 年由 Edwin Hall 利用霍尔效应发明的。20 世纪 80 年代以来,汽车上应用的霍尔传感器与日俱增,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;二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,在内燃机台架上,要想精确地测出内燃机扭矩的大小,通常的办法是给内燃机施加阻力矩(负荷),即通过测功机给内燃机一个“负荷”,利用测功机浮动外壳的测点受力来测量内燃机的扭矩。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。目前测试内燃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。工作时在内燃机扭矩作用下,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:

$$M_e = WL \quad (3-3)$$

式中: M_e ——实测有效扭矩, $N \cdot m$;

W ——作用在载荷单元上的力, N ;

L ——力臂长度, m 。

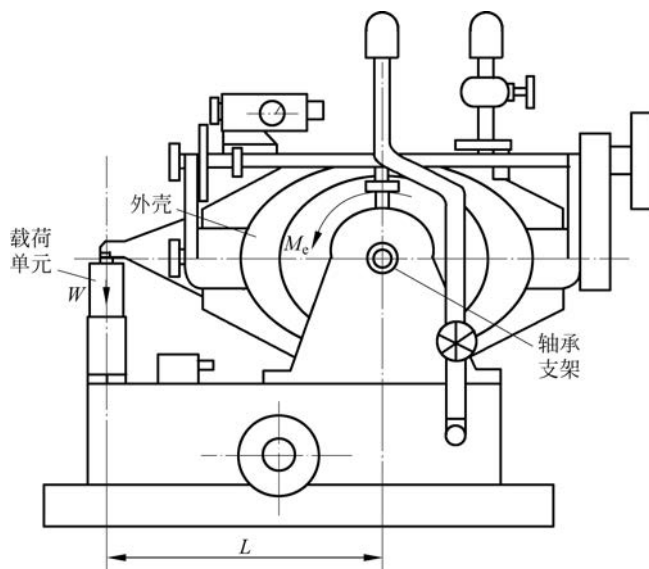


图 3-4 测扭矩机构(测功机后视图)

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式的扭矩测量目标。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械连接,不会受到磨损,故精度高,因此常用于内燃机测试试验中,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。

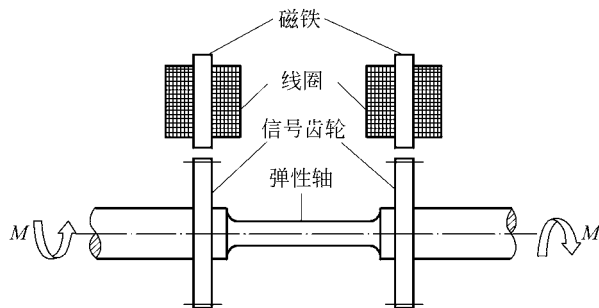


图 3-5 磁电式扭矩传感器工作原理图

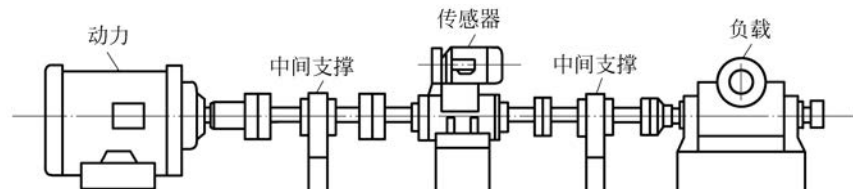


图 3-6 扭矩传感器一般安装示意图

(2) 应变式传感器

应变式非接触扭矩传感器的结构原理如图 3-7 所示,该图显示的是法兰式传感器(相应的也有轴式)结构原理示意图,主要由定子和转子组成。

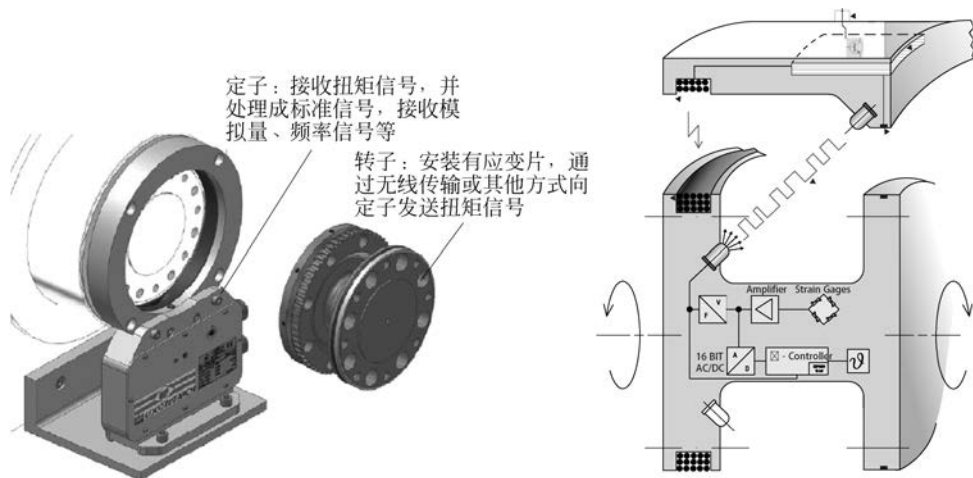


图 3-7 应变式非接触扭矩传感器结构原理示意图

在转子即被测弹性轴上用应变胶粘贴专用的测扭应变片,并组成惠斯通桥,通过装在定子上的信号传输单元向该惠斯通桥提供有源激励(恒定电源),此时,当弹性轴发生扭转变形时,惠斯通桥应变片阻值随之发生变化,即可获得该弹性轴受扭后成比例变化的电压信号,如图 3-8 所示。通过内置放大电路将该电压信号放大后,经过相应的信号处理和转换变成

与扭应变成比例的模拟信号——电压量或频率量,用无线信号传输方式(或其他方式)将信号传给装在定子上的扭矩信号测量仪器。安装示意图如图 3-9 所示。

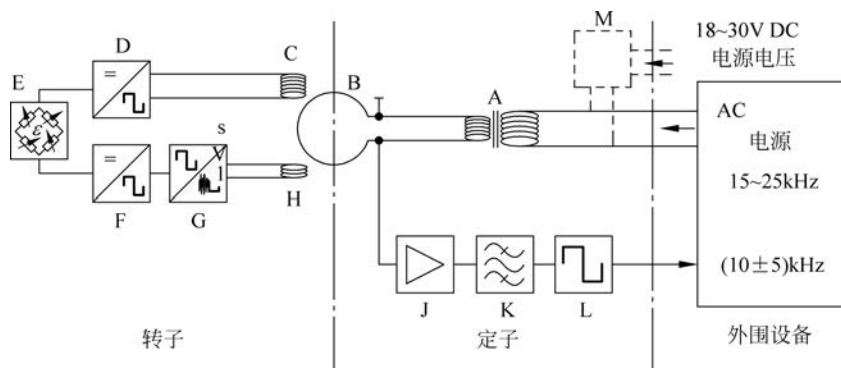


图 3-8 应变式扭矩传感器信号传输示意图

法兰式非接触式扭矩传感器的测量原理与轴式非接触式扭矩传感器相似,不同的是:法兰式扭矩传感器没有轴承支撑。由于没有轴承,因而没有易磨损件,使之可长期使用,且工作速度大为提高。

2. 扭矩测量误差

在内燃机台架试验中,如扭矩采用平衡力法测量,其测量误差除了非电量电测装置带来的误差外,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出现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)。

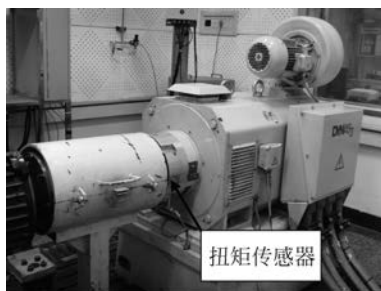


图 3-9 法兰式扭矩传感器安装示意图

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

内燃机的大多数性能都与点火提前角(点燃式内燃机)和喷油提前角(压燃式内燃机)有

紧密的关系。电控汽油机或点燃式内燃机要标定提前角的 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, 电控内燃机具有专用的曲轴位置传感器(crankshaft position sensor, CPS)。实际上内燃机 CPS 除了可提供相对于活塞上止点位置的曲轴转角信号, 还可测量内燃机转速, 以及各种信号的相位和转角数值, 因此, CPS 又称为内燃机转速与曲轴转角传感器。其功用是采集曲轴转动角度和内燃机转速信号, 并输入到电子控制单元(electronic control unit, ECU), 以便确定点火时刻和喷油时刻。对于四冲程内燃机, 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内燃机的一个工作循环, 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, 并输入到内燃机 ECU, 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内燃机起动时识别出第一次点火时刻。

图 3-10 所示为某 4 缸内燃机 CPS 和凸轮轴位置传感器(判缸传感器)安装位置示意图。

实际安装中, CPS 一般安装在内燃机缸体或变速箱壳体上(与信号盘对应), 凸轮轴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 冲程内燃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), 其中, 57 个为小齿缺, 1 个为大齿缺。图 3-10 所示的位置正好对应内燃机第 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 1 缸的压缩上止点了, 如图 3-11 所示。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与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。

对于不同用途的内燃机, 其内燃机凸轮轴信

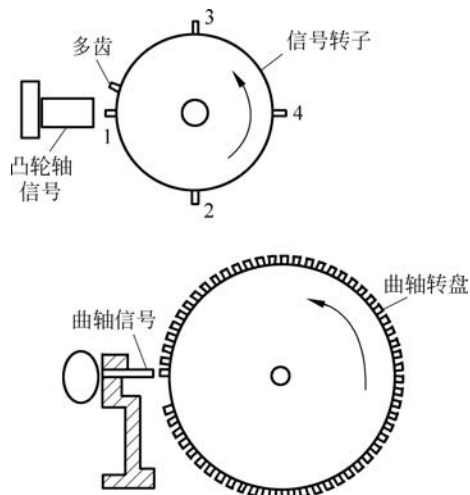


图 3-10 曲轴位置传感器和凸轮轴位置传感器安装示意图

(图为第 1 缸压缩上止点时的位置)

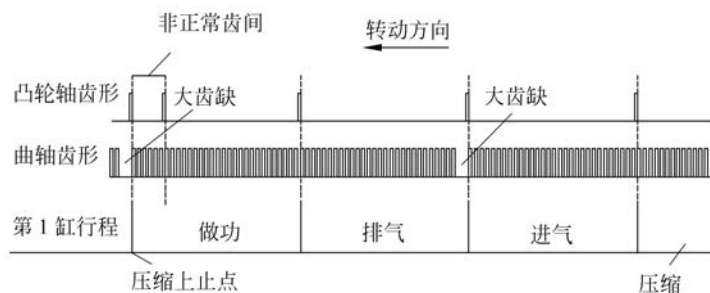


图 3-11 汽缸识别信号

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,详细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内燃机判缸功能,如采用离子流火花塞或通过内燃机缸内压力的变化来进行判缸,详细信息读者可参阅文献[7]等相关内燃机资料。

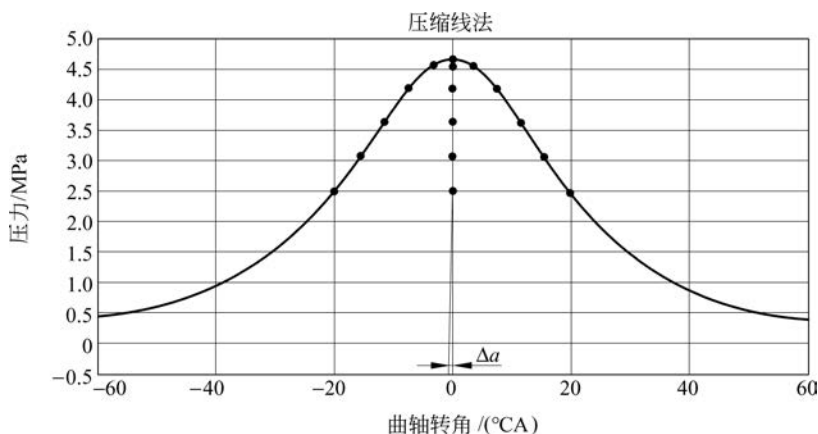
2. 上止点真实位置确定

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)内燃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,此方法有一定的准确性。但当内燃机冷却散热强烈时,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。因内燃机工作中的真正压缩上止点是活塞上行消除间隙后的最高位置,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_l 一般调整到 $0.15 \sim 0.2\text{mm}$ 。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,并可作为内燃机动态上止点信号,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位置的精度,其次取决于记录的点火或喷油点信号是否准确,此外还取决于曲轴齿盘的分度精度。电控内燃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量方法和误差,可参阅相关专业资料。

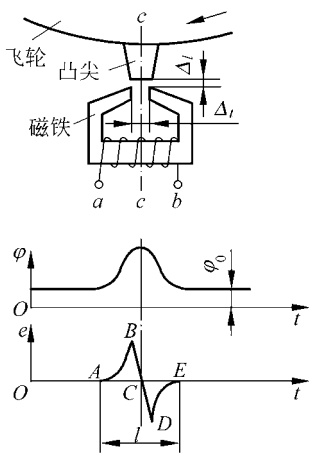


图 3-13 磁电法制取上止点位置

3.3 压力测量与示功图制取

3.3.1 概述

在内燃机试验中,经常要进行压力的测量。如各种介质(气体、燃料、润滑油和冷却水)的压力和大气压。具体来说,各种内燃机试验过程中所需测量的压力主要指:进气管真空度及绝对压力,喷油压力,中冷前后压力,涡轮增压器的压气机进、出口压力,排气背压与排气管压力,机油压力,汽缸压缩压力,工作过程中的缸内压力和曲轴箱压力等。

为了进行专项试验研究,有时还需测定某些零件所承受的压力(如汽缸盖、排气门、缸

套、活塞),因为该参数能直接反映或影响内燃机的性能。内燃机工作过程的示功图是其动力性、经济性和燃烧性能以及机械和热负荷的综合反映,它本身就是缸内压力随时间变化的曲线。因此压力是内燃机试验中非常重要的测量项目(参数)。

由于内燃机工作过程的特点,在大多数情况下,压力是经常变化的(如缸内压力),而且变化的性质和规律各不相同,数值的大小相差悬殊,精度要求高低不等。因此,需根据不同的试验目的及各测量项目的具体要求来选择测量仪器和测量方法。

内燃机试验中测量压力的仪器主要有液柱式压力计和压力传感器等。

1. 液柱式压力计

液柱式压力计是基于液体静压力作用原理,由已知液体高度测得压强。液柱式压力计结构简单、价格低廉、精度较高,一般用于检定或直接测量较小静压力。

常用的液柱式压力计有U形管、单管和斜管3种结构。所用液体有水银、水和乙醇。液柱式压力计在物理学、流体力学等课程试验中已有详细介绍,此处不作过多阐述。

2. 压力传感器

为实现压力测量远传、记录和控制,在压力检测中大量应用各种传感器,将被测压力参数转换成电信号,供远传的电子仪表测量、控制。汽车内燃机中的大多数压力测量均采用压力传感器。

因测量原理不同,压力传感器分为不同类型,如压阻式压力传感器、压电式压力传感器、电容式压力传感器、电阻应变式传感器、电感式传感器和霍尔压力式传感器等。

压阻式压力传感器精度高,频率响应快,工作可靠,容易实现数字化,广泛应用于内燃机进气歧管压力(绝对压力和大气压力)、涡轮增压压力、燃油泄漏蒸气压力的检测。电容式压力传感器主要用于内燃机油油压力检测。压电式压力传感器适合测量动态和准静态的压力变化或者压力波动,因此适合用于高压检测,如内燃机缸内燃烧压力、柴油机的共轨燃油喷射压力等。关于各种传感器的原理及特性读者可参考文献[11-12]及相关说明书。

因价格原因,目前,用于内燃机缸压测量的压力传感器中,压电式压力传感器多用于实验室研究开发,压阻式压力传感器多用于内燃机产品中的缸压监控。

3.3.2 内燃机缸内动态压力测量与示功图制取

内燃机的能量转换是在工作循环的过程中完成的。在一个工作循环的进气、压缩、燃烧、膨胀和排气等过程中,标志工质的状态参数——压力 p 、温度 T 、活塞顶容积 V (反映比容积或密度)都在不断地变化。目前常用一个工作循环的 p - V 示功图(横坐标是 V)或 p - φ 压力图(横坐标是曲轴转角 φ)来反映能量转换的完善程度和每一工作循环做功能力的大小。为提高内燃机性能,研究示功图的规律是非常必要的。示功图与压力图简图见图3-14。压力图以压缩上止点为坐标原点,它是示功图的展开图。

示功图或压力图涉及缸内动态压力和曲轴转角 φ (可换算为活塞顶容积 V)两个参数的测量问题。制取示功图所用的仪器有简单示功仪、机械示功仪、气电示功仪以及现代的应变式示功仪和压电式示功仪。特别是压电式示功仪,由于具有优良的特性而获得广泛的应用。当前微型计算机技术的采用,高速数据采集和实时处理功能的实现,都大大扩展了示功图的功能,提高了测试精度和分析计算效率。

目前,内燃机示功图的制取主要采用压电式示功仪。