

动 力 工 程

热 力 工 程

【热力工程】生产和利用热能的工程。自然界中许多能源（如燃料的化学能、太阳能、地热、原子能等）都是以热能形式出现的。热能或是直接被利用，如冶金、化工等生产过程中的加热、烘干和供暖等；或是用作动力，如汽车、火车、船舶、飞机等；热力电站则是大量地利用热能转换为电能以提供动力。热力工程是国民经济中的一个重要方面。它包括供热工程、蒸汽动力工程、热力发动机以及与此有关的基础辅助系统。研究减少能量损耗、提高能量利用率以节约能源是热力工程所面临的重要课题。

【物质的热物理性质】物体受热时固有的物理性质。如温度升高、体积膨胀、在物体内热量由一处传到另一处等。对于不同物质的物体，这些性质是不同的，通常用“比热”、“热膨胀系数”、“热传导率”、“热扩散率”这些热物理参数来描述。

【比热】单位数量物质温度升高 1°C 所需要的热量。它是物质的一个重要的热力学性质。由于物量单位有千克、体积和摩尔，采用这些物量单位对应定义的比热分别称为质量比热、容积比热和摩

尔比热。

【比热比】定压比热与定容比热的比值。是热工计算中常用的参数。

【体膨胀系数】定压下体积随温度变化的相对变化率。

【普朗特数】流体的运动粘度与热扩散率的比值。它反映流体动量传递和热量传递能力的相对大小，是传热学中一个很重要的物性参数。

【热力平衡】热力系统在没有外界作用（热、功交换）的情况下宏观性质不随时间变化的状态。热力系的平衡包括热平衡、力平衡、化学平衡和相平衡四个方面，经典热力学通常只考虑前两种平衡。若组成热力系的各部分之间没有热量的传递，热力系就处于热平衡；各部分之间没有相对位移，热力系就处于力平衡。同时具备了热和力的平衡，热力系就处于热力平衡状态。

【热力状态】用热力学基本状态参量，压力 P 、温度 T 、比容 v 描述的工质（体系）在变化过程中某瞬间的容现和理状态。如果工质（体系）各部分状态号量均匀而且不随时间而变，则该热力状态为平衡态。平衡态和由平衡态组成的热力过程是经典热力学研究的主要对象。若状态参量不均匀且随时间而变，该热力状态为非平衡态，也叫非稳态。对于单相均匀的工质（如气体），在通常的情况下，可由任意两个独立的状态参数来确定其热力状态。

【比容】单位质量物质所占的容积。单位为 $\text{米}^3/\text{公斤}$ 。比容的倒数

为密度。

【焓】一个组合状态参数，数值上等于物质内能与物质体积和压力的乘积之和。

【熵】热力学系统的一个重要态函数，其变化指明自发过程进行方向，并给出孤立系统达到平衡的必要条件。可逆过程熵的变化等于系统吸收或放出的热量与系统的热力学温度之比。

【状态方程】热力系中基本状态参数之间的函数关系式。

【热力过程】由于外界作用（功、热交换）使系统状态发生变化的过程。若热力系沿原过程路线反向回复到原状态而不给外界留下任何影响的过程称为可逆过程。否则称为不可逆过程。热力学中都是讨论可逆过程，可以很方便地用状态参数坐标图中的一条曲线来表示。热力学中把许多实际过程近似地概括成五个基本过程，它们是：定容、定压、定温、绝热和多变过程。分析过程的目的在于：（1）确定过程的特点，或求得过程方程；（2）确定初、终参数之间的关系；（3）确定过程中工质与外界的功和热量的变换。

【多变过程】热力系状态变化满足： $Pv^n = \text{定值}$ 的过程。上式即为多变过程的过程方程， n 为变指数，在过程中 n 为某一常数。定容、定压、定温、绝热等过程是多变过程的一些特例。上述过程在状态参数坐标系中的变化曲线示于下图。多变过程比上述过程更普遍，但又有别于实际过程，在实际过程中， n 通常是变化的。

【正向循环】 又称热机循环。将热能转换成机械能的循环。

【卡诺循环】由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程组成的循环。它有下列特点：（1）卡诺循环的热机效率只决定于热源和冷源的温度，温差越大，则效率越高，这给提高热机效率指出了方向；（2）卡诺循环的热效率只能小于 1，但对于同样温度界限内的任何循环而言，卡诺循环效率最高，因此，卡诺循环是实际热力机选择循环时的最高理想。

【奥托循环】由两个定容过程和两个绝热过程组成的汽油发动机理想化的定容加热循环。在循环中压缩比越大，热效率越高。但压缩比的提高受混合气体自燃温度的限制。当压缩比超过一定值时，

混合气体会发生“爆燃”，使发动机不能正常工作。

【狄塞尔循环】由一个定压、一个定容和两个绝热过程组成的柴油发动机理想化的定压加热循环。其热效率随压缩比的增大而提高，随予胀比的增大而降低。柴油机压缩比的增大则受机械效率的限制，因为随着压缩比增大，其机械效率降低。

【斯特林循环】由两个定温过程和两个定容过程组成的活塞式热气发动机（又称斯特林发动机）的理想循环。

【布雷敦循环】由两个等压过程和两个绝热过程组成的燃气轮机定压加热理想循环。

【郎肯循环】由两个绝热过程和两个定压过程组成的简单蒸汽动力装置的理想循环。其中，初温、初压越高，乏汽压力越低，则其热效率越高。

【逆向循环】又称制冷循环或热泵循环。系统消耗机械功，从冷源将热量转移给热源的循环。

【熵增加原理】孤立系的熵可以增大，或保持不变，但不能减少。孤立系内发生可逆的传热，可逆的热转换为功的循环时，其熵不变。如过程不可逆，其熵增加。这一原理近来也用以解释宇宙起源及人类社会活动等的一些问题。

【能量贬值原理】能量中可用能的减少称为能量的贬值。据卡诺定

理,可逆热机的效率最高,而对于不可逆热机,其效率要降低,这就使同档的热量转化的机械能(这里的可用能)减少,即能量贬值。能量贬值总是由于不可逆变化引起的,同时也总伴有孤立系的熵增大。

【工质】工作介质的简称。实现热能与其他形式能量转换中的媒介物。亦称热力学工质。在热能与机械能转换中采用的工质均为气体,如空气、燃气、蒸气等。通过气体膨胀实现这一转换。

【混合气体】由几种单一气体组成的无化学反应的稳定气体。热力工程中常见的混合气体有空气、燃气、烟气等。混合气体中各组成物的含量,有绝对成分和相对成分之分,按所取单位则有质量成分、容积成分和摩尔成分。

【湿空气】含有水蒸汽的空气,是水蒸汽与干空气的混合物。在通常情况下,由于空气中水蒸汽含量很少,有时就按干空气(即按理想气体)来计算。但在干燥过程、空气调节、蒸发冷却等情况下,就必须按混合气体来考虑。干空气和过热蒸汽组成的湿空气称为未饱和空气;干空气与饱和水蒸汽(即其分压力等于当时温度所对应的饱和压力时的水蒸汽)组成的湿空气称为饱和空气。湿空气中水分的含量称为湿度,它有三种表示方法:(1)绝对湿度(单位容积湿空气中所含水蒸汽的质量);(2)相对湿度(单位容积湿空气中水蒸汽的实际含量与同温度下的最大可能含量之比);(3)含湿量(每千克干空气中所含水蒸汽量的克数)。

【露点】将未饱和空气定压冷却到开始结露时的温度。即湿空气中水蒸气分压力所对应的饱和温度。如果露点低于零摄氏度,水蒸

气便会结霜。不同湿度的湿空气有不同的露点，即露点与水蒸气分压有关，但与总压力无关。露点可用露点计或干湿球温度计来测量。

【实际气体】某些不能忽略分子本身所占有的体积及分子间相互作用力的气体。严格说，热机中遇到的各种工质都是实际气体，只是为方便分析、简化计算，把某些气体（如空气、烟气和燃气等）当作理想气体来处理。而对于在高压、低温下的气体或蒸汽等，就不能当作理想气体。实际气体的性质比较复杂，不能用理想气体状态方程来描写，而应用实际气体的状态方程。

【范德瓦尔斯方程】实际气体的状态方程之一。是在理想气体状态方程的基础上考虑分子体积及分子间相互作用力后得到的方程。是一半经验方程，修正因子要经实验确定。

【水蒸汽】由水（或冰）汽化（或升华）变成的气体。是许多换热器、蒸汽发动机等所采用的工质。在未充满水的密闭容器内，水分子逸出液面与水分子返回水中的两种动态过程达到平衡时，水蒸汽含量达到稳定状态，这种状态称为饱和状态。饱和状态下的水和水蒸汽分别称为饱和水与饱和水蒸汽。对于水，当温度超过 647.3K 时，将只有气相存在，相图中这点称为临界点，此时温度称为临界温度。相图中，汽、液、固三相共存的点称为三相点。

【水蒸汽的汽化潜热】一公斤饱和水在一定的压力下完全变为相同温度的饱和水蒸汽所需加入的热量。压力越高，汽化潜热越小，当

压力达到临界压力时，汽化潜热变为零。

【水蒸汽图表】描述水蒸汽热力性质的图和表。图表中规定三相点的饱和水的内能和熵等于零，焓值也接近于零。常用的水蒸汽图有压容（ $P-v$ ）图、温熵（ $T-S$ ）图和焓熵（ $h-S$ ）图。

图中曲线 A_1C 及 CA_2 分别为饱和水线和饱和水蒸汽线。它们把图面分隔为水、湿蒸汽和过热蒸汽三个区。湿蒸汽区即汽、液两相共存的饱和区，在这个区域内水汽化变成饱和蒸汽的过程既是定压过程又是定温过程。压容图可用来表示水蒸汽的状态及其变化过程；温熵图常用来分析水蒸汽的热力过程或热力循环，图中饱和区水汽化过程线下的面积表示汽化潜热 r ；焓熵图在蒸汽动力工程的计算中使用更为方便。水蒸汽热力性质表常用的有饱和水与饱和水蒸汽表和未饱和水与过热水蒸汽表两种。

【气体和蒸汽的绝热流动过程】气体或蒸汽与外界无热交换的流动过程。在热力工程中，管道、喷嘴、扩压管、节流装置（孔板、阀）中的流动在多数情况下可以认为是绝热过程。

【喷嘴与扩压管】利用流体压力降低而增加流速的特殊形状的管段称为喷嘴，利用流体减速来提高压力的特殊管段称为扩压管。喷嘴和扩压管是汽轮机、燃汽轮机、喷气式发动机、火箭发动机乃至各种喷射泵、引射器、抽气器中的主要部件。喷嘴有渐缩形和缩扩形；扩压管有渐扩形和缩扩形。

【气体和蒸汽在喷嘴和扩压管中的流动】由于喷嘴（扩压管）中的流速很快，长度又很短，因而可近似当成绝热流动过程。按照可逆绝热（定熵）流动的特性对喷嘴要求：流速为亚音速时要做成渐缩形喷嘴；流速为超音速时要做成缩扩形喷嘴。对扩压管的要求：流速为超音速时要做成渐缩扩压管；流速为亚音速时要做成渐扩扩压管；流速由超音速连续降到亚音速时要做成缩扩形扩压管。流速等于当地音速的情况，总是发生在最小截面处。

【临界流速】喷嘴中达到当地音速的流速。临界流速总是发生在喷嘴的最小截面（即喉部）处。

【临界压比】临界压力（即流速达到当地音速时气流的压力）与滞止压力（流速等于零时气流的压力）的比值。空气的临界压比值约为 0.528，过热和饱和水蒸汽的临界压比值分别约为 0.546 和 0.577。

【引射器】又称抽气器或喷射泵。利用高压流体（蒸汽、气体、水等）喷射来抽吸或输送低压流体（蒸汽、有害气体、水等）的设备。构造简单，无运动部件，使用方便，很适合抽除含尘、腐蚀性和易燃易爆的气体。缺点是在混合过程中不可逆损失较大，热

能利用率较低。凡有余热蒸汽来源的地方可以被用作喷射制冷、真空抽气或小型锅炉给水等。

【节流过程】使流体压力降低的一种热力过程。流体流过突然缩小随即又突然扩大的流通截面（如孔板、阀门等）而引起压力降低的过程。节流过程在热力工程中有广泛的应用。最常见的应用是使流经管路中的流体压力降低或变更流体的流量。具体的应用有：如利用孔板前后的压力差来测量流量；利用多次节流产生的显著压降来做轴封；利用等焓节流过程在蒸汽压缩致冷循环中，将冷凝器输出的工质高压液体变成为输入蒸发器的低压工质湿蒸汽等。在有的场合，又要避免节流过程的出现，如汽轮机的蒸汽流道中如发生节流，将引起的热能的损失。

【热传导】又称导热。物体各部分无相对位移或不同的物体直接接触时依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象。它是传热的基本方式之一。单纯的导热只能发生在固体中。温差的存在是产生导热的根本条件。某一瞬间空间所有各点的温度分布称为温度场，不随时间变化的温度场称为稳定温度场，反之称为不稳定温度场。稳定温度场引起的导热称为稳定导热，不稳定温度场引起的导热称为瞬态导热。研究导热的目的是为了增强或减弱导热。工程上只限于研究导热现象的宏观规律。导热的速率由傅立叶方程确定，物质的导热性能用导热率或热阻来表征。物体内部的温度分布可通过求解导热微分方程得到。

【傅立叶定律】热流密度（单位时间内通过单位面积所传递的热量，也称热通量）在数值上与温度梯度（表征空间温度场变化强弱的

物理量)成正比。这是热传导的基本定律,是由法国数学家傅立叶在大量导热实验结果基础上于 1822 年提出的。

【热传导率】又称导热系数。表征物体导热能力的特性参数。在数值上它表示单位时间内沿导热方向单位长度上温度降低 1 摄氏度时,单位面积所导过的热量,单位是瓦/米·度。对于不同物质,导热系数不同。对于同一物质,其导热系数也因温度、压力、湿度、密度及物质组成的结构形式不同而异。有些材料,如木材、石墨、云母等的异热系数随导热方向变化而变化,称为各向异性导热体。

【热阻】阻止热量传递的综合参数。在传热计算中,它是一个方便而常用的参数。在热传导中遇到的热阻称为导热热阻,它与材料厚度成正比,与材料导热系数及材料导热面积成正比。在对流换热中,壁面与流体之间的热阻称为对流热阻,数值上与对流换热系数及换热面积成反比。在辐射换热中的热阻称为辐射热阻,其阻值与物体间相互辐射的等效面积及相对辐射角系数成反比。此外,两固体接触面上还存在有接触热阻。

【热扩散率】又称导温系数。反映物体受热或冷却时各部分温度趋向一致的能力,是瞬态导热中的一个重要参数,数值上等于材料的导热系数与材料密度及比热的比。

【对流换热】又称对流传热或对流放热。流体和固体壁面直接接触时所发生的热传递过程。它是热传导和热对流综合作用的结果。因此,对流换热的强弱与流动状态、流体的物理性质以及壁面的形

状、尺寸、位置和表面状况等诸多因素有关，是一个极为复杂的传热过程。若流体的运动是由泵、风机、风扇等设备引起的，这样的传热过程称受迫对流换热。若流体的运动是由于传热本身产生的密度差引起的，这样的传热称自然对流换热（或称自由对流换热）。对流换热还包括有相变的沸腾换热和凝结换热以及汽—液两相对流换热。

【牛顿冷却公式】简称牛顿公式。由牛顿于 1701 年提出，表述为：对流换热热流密度与固壁与流体的温差成正比，其中比例系数为对流换热系数。牛顿公式并没有说明对流系数与各种复杂因素的关系，因而没有给工程计算带来实质性的简化。

【对流换热系数】又称放热系数。1 平方米壁表面积上，当流体与壁面之间温差为 1°C 时，每分钟所传递的热量。它反映对流换热的强弱，但受流体和壁面的许多因素影响。研究对流换热的目的之一，就是寻求各种条件下对流换热系数与各种因素的关系。具体研究方法有实验测定法、数学分析解法和数值分析解法。

【沸腾换热】液体处在剧烈汽化状态的换热过程。由于状态的变化和强烈的扰动，沸腾换热要比单相换热强烈的多。沸腾换热常见于锅炉、蒸馏塔、蒸发器以及诸如火箭喷管、核反应堆芯、浇铸、热管等需要强化传热和冷却的场合。

【凝结换热】蒸汽在低于其饱和温度的固体或液体表面上凝结时的换热过程。有两种凝结形式：膜状凝结（润湿性液体的蒸汽）和珠状凝结（非润湿性液体的蒸汽）。膜状凝结换热时热要通过膜层

传到冷表面。因此，膜层的厚度和流态（层流或紊流）对换热系数影响很大。珠状凝结换热时蒸汽通过珠间面积直接与冷表面接触，因而换热系数很大，但工业设备中常见的水蒸汽或其他蒸汽在金属壁面上的凝结一般都是膜状凝结，因此，在工业设备的设计计算都应按膜状凝结来考虑。

【热管】一种新型高效的传热元件。利用了沸腾和凝结两种相变换热过程，与同直径的良导体（如铜、银等）轴向导热相比，其导热能力要高数百倍。热管一般由内衬吸液芯的密闭金属管和工作介质组成。液态工作介质在热管的加热段通过管壁吸收外界热源的热量并沸腾蒸发为蒸汽，靠蒸汽压差把蒸汽送到放热段，散热后凝成液体，并由吸液芯的毛细作用返回蒸发段，如此循环实现热的交换。除传热能力大外，热管还有下列特点：（1）轴向温降很小，整根热管几乎是等温的；（2）结构简单，无运动部件，工作可靠；（3）选用不同工质可使热管适应很宽的温度范围，因而有着广泛的应用前途。

【辐射换热】不同温度的两个物体之间通过热辐射（电磁波）进行的非接触传热过程。工业中常见的辐射换热有固体之间和固体表面与火焰或蒸汽之间两种情况。任意位置两表面之间的辐射热量与两表面温度的四次方差、黑度及有效辐射面积等有关。辐射换热是各种锅炉等高温设备中的重要换热方式。

【黑体与灰体】研究辐射换热的理想化物体。物体吸收、反射、透射能量与投射到物体上的总能量的比值分别称为物体的吸收率、反射率和透射率。吸收率等于 1 的物体称为黑体，黑体是吸收率

最大的物体，一切实际物体的吸收率均小于 1。灰体也是一种理想化物体，其吸收率等于某个小于 1 的常数，它的吸收率和辐射力与波长是无关的量，这与实际物体不同。黑体与灰体的引入对分析辐射换热规律、建立有关关系方程式有重要意义。

【黑度】又称辐射率。任何实际物体的辐射力 E 与同温度下绝对黑体辐射力 E_0 之比，以 $\epsilon = \frac{E}{E_0}$ 表示。物体的黑度 ϵ 表明该物体接近黑体的程度。在加热炉内表面及电热元件表面，涂以黑度大的涂层，可以强化辐射传热。炉壳表面则应涂以黑度小的涂层，以减少辐射热损失。另外，照相底片上影像的黑白程度也称为黑度。又叫光学密度。

【斯蒂芬—波尔兹曼定律】又称四次方定律。黑体的辐射力同它的绝对温度的四次方成正比。

【辐射角系数】简称角系数。反映某一表面所发射或反射的辐射可能达到另一表面的份额的参数。对于漫射表面（发射和反射无方向性）又是反映两表面几何形状、大小及相对位置等几何特征的无量纲量。在辐射换热计算中，角系数的概念和计算是很重要的。确定角系数的方法有下列五种：（1）直接积分法；（2）周线积分法；（3）代数解法；（4）交叉线法；（5）投影法。常用几何图形的角系数可以在资料中查到。

【换热器】又称热交换器。把热量从较热的流体传给较冷的流体的设备。它不仅是保证动力、化工、轻工、冶金等各种工艺流程和

条件而广泛使用的装备，也是开发利用工业二次能源、实现余热回收以节约能源的重要设备。换热器的种类很多，按工作原理可分为表面式、混合式与蓄热式三种，工程上用得最广的是表面式。按工作任务表面式换热器可分为加热器与冷却器；蒸发器与冷凝器。按传热面结构表面式换热器又可分为管式和板式两大类。管式中又有列管式、套管式，翅片管式等多种型式；板式中也有波纹平板式、螺旋板式、板壳式、板翅式等多种型式。在表面式换热器中，冷热流体的流动方式有顺流（a）、逆流（b）、交叉流（c）以及这三种流动的组合（d、e、f）。

流体在换热器中流动方式

【管壳式换热器】由外壳、管板和管道构成的一种表面式换热器。管壳式换热器结构坚固、易制造，换热表面清洗方便，适应性强，高温高压场合也可以用。是久经考验、目前仍占主要地位的换热设备。

管壳式换热器原理

(a) 蒸汽加热器

(b) 表面式凝汽器

【肋片管式换热器】管子外壁加有肋片的管式换热器。加肋片的目的是增加空气侧的换热面积。这种换热器的结构紧凑，非常适用于换热面两侧流体放热系数相差较大的场合。汽车前面的冷却水箱就是属于这一种。肋片的形状很多，有方形、圆形、皱纹形等，与管子的连接方式也有多种，如嵌片式、焊接、铸造等。不同的结构和连接方式对流动阻力，特别是传热性能有很大影响。

【螺旋板换热器】由两张平行的金属板卷起来，构成两个螺旋形通道，再加上下盖板及连接管而成的板式换热器。这种换热器的螺旋形通道有利于提高放热系数，其中的污垢形成速度也只有管壳式的十分之一，另外，它的结构紧凑，单位体积可容纳的换热面积约为管壳式的三倍。其缺点是不易清洗，检修困难，承压能力低。

螺旋板换热器

【板翅式换热器】由多层基本换热元件组成的板式换热器。这种换热器用作气—气换热器时，传热系数可比管式高十倍，而且结构紧凑，承压也较高。缺点是易堵塞、清洗困难、不易检修。

板翅式换热器结构原理

1. 半隔板；2. 侧条；3. 翅片；4. 流体

热 工 测 量

【热工测量】对压力、温度等热力状态参数的测量，也包括对流量等过程参数的测量。它是对热力生产过程进行自动调节、程序控制、保护的依据，又能为产品检验、事故分析、经济核算和运行改进等技术管理工作提供原始资料。按信息获取方法，可分为偏差式测量法、另差式测量法和微差式测量法。

【压力测量】工程技术上的压力就是物理学中的压强，即流体作用在物体单位面积上的法向力，单位为“帕”（1 帕=1 牛顿/平方米）。物理学中的压强是绝对压力，而通常压力表所指示的压力是以当地大气压力为基准的相对压力，又称表压力。它们之间的关系为： $P_{\text{绝对}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气(当地)}}$ 或 $P_{\text{表}} = P_{\text{绝对}} - P_{\text{大气(当地)}}$ 。因此，表压力有正负之分，负压又叫真空度。压力仪表有多种型式，按照工作原理和输出信号性质，可以分为：机械式和电气式；压力表和压力传感器；远传压力表和压力开关。机械式压力表是利用敏感元件受压后发生变形或变位的大小来显示压力。属于这种类型的压力表有液柱式压力计、弹性压力表、负荷式压力计（如活塞式、液柱平衡活塞式、浮球式和钟罩式等）。这种仪表结构简单、使用方便、价格便宜，得到广泛应用。其中弹性压力表在生产中使用最多。它们通常是就地指示仪表，若要远传显示压力，则需通过位移变换器（例如电感式、力平衡式、电容式、霍尔式、振弦式、应

变式和光纤式等)把位移信号转换成电信号,或者直接使用电气式压力传感器(分别利用压电效应、压阻效应和压磁效应)。

【液柱式压力计】利用液柱对底面产生的静压与被测压力相平衡原理,用液柱高度表示待测压力的大小的仪器。这种压力计结构简单,使用方便,精度高,缺点是量程受液柱高度的限制,玻璃管易损坏,只能当地指示,较难发送信号,故多用在实验室中测量表压力、压差和负压。常用的液柱式压力计有 U 形管压力计和单管压力计。其变型有:斜管压力计,可用于测量微小的压力;补偿式微压计,其读数误差可小于 0.02—0.05 毫米汞柱。液柱式压力计使用的液体通常有汞、四氯化碳、水和酒精。

【弹簧管压力表】利用弹簧管变形引起的位移量与引入管内的待测介质压力之间的对应关系实现压力检测的仪表。由弹簧管(单圈或多圈)、曲柄连杆、齿轮、指针和表壳等部分组成。可测量表压力或真空度。弹簧管压力表结构简单,牢固,准确,稳定,维护量小,价格便宜,因而在工程中应用普遍。单圈弹簧管压力表应用最广,一般分为普通型和精密型,准确度等级有 4、2.5、1.5、1、0.4、0.25、0.16、0.1 等级。多圈弹簧管压力表常做成带记录功能的压力表。此外,还有一些适于特殊情况(如抗震型、耐腐蚀型、热带型——防湿热、防盐雾、防霉菌)的压力表和专用压力表(如禁油的氧气压力表)。

【位移式压力变换器】通过压力引起的位移来实现非电量转移为电量的一种装置。常用的位移式压力变换器有:电感式、电容式、力平衡式、应变式、霍尔式、振弦式和光纤式等。

【电容式压力变换器】利用可变电容电容量的变化把压力信号转换为电信号的装置。可变电容器动极板在压力的作用下产生位移,从而改变电容器的电容,测此电容量的变化即可反映压力的大小。它的优点很多,如结构简单、灵敏度高、动态性能好、稳定性好、可靠性高、测量范围宽等。缺点是分布电容对灵敏度影响大,特性呈非线性。

【电感式压力变换器】利用线圈电感量(自感或互感)的变化把压力信号转换为电信号的一种装置。其特点是结构简单、可靠性较高、分辨率和准确性较好,输出非线性可小于

$\pm 0.1\%$, 灵敏度可达 $0.1\sim 5$ 伏/毫米。但响应频率低,不宜作高速动态测量,非线性也与测量范围有关。常用的型式有:(1)磁阻式电感变换器(改变磁路的磁阻,使电感发生变化);(2)差动变压器式变换器(改变原边的耦合度,使互感发生变化);(3)压磁式变换器(利用压磁材料在压力作用下其导磁率发生变化来改变电感);(4)电涡流式变换器(利用电涡流引起电感的变化)。

【应变式压力变换器】利用应变片将测压弹性元件的应变转换成电阻变化的装置。其特点是简单可靠、灵敏度及准确度高(可达 $\pm 0.1\sim 0.2\%$)。应变片尺寸小、重量轻、测量范围广,动态特性好,环境适应性较强,能进行多点测量。应变片的结构有金属的丝绕式、箔式、薄膜式、扁栅式;编织式和半导体的各种型式。金属电阻应变片常用的是扁平栅结构,这样易与弹性元件粘贴,因而应变的传递及稳定性较好。金属箔式(光刻)和薄膜式(真空镀膜)的“表面/截面”比值大,传热性能好,允许电流密度大,

所以灵敏系数和准确度高，工作温度范围大。半导体应变片的突出优点是体积小、灵敏系数大、可测微小应变，主要缺点是其灵敏系数的温度稳定性差，输出特性的非线性大。

【电气式压力传感器】利用某些物体受力后某种电特性发生变化的现象把压力信号转换为电信号的一种装置。常用的有：压电式压力传感器（利用石英、压电陶瓷、压电晶体等材料的压电效应）、压阻式压力传感器（利用单晶硅、石墨、锰铜合金、铂等材料的压阻效应）和压磁式压力传感器（利用铁磁物质的压磁效应）。电气式压力传感器具有动态性能好、灵敏度高、易于小型化，便于远传信号及安装方便等优点。

【流量测量】测量单位时间内通过流道某一有效截面的介质量（即流量）。根据介质的计量单位可将流量分为质量流量和容积流量。根据流量测量的时间特性，又可分为瞬时流量、累积流量（或称总流量）和平均流量。为了得到某一定义下的流量，必须选择相应的测量方法，例如：容积法（介质通过标准的计量容器逐次排出，测量其排放频率即可显示容积流量），适合测量累积流量或平均流量，典型的有标准容积管、椭圆齿轮流量计及刮板式流量计等；流速法（基于一维流动的连续性方程，容积流量与截面平均速度成正比），可检测瞬时流量，典型的有电磁流量计、超声流量计、节流式流量计、动压测定管、旋涡流量计、涡轮流量计、转子流量计和靶式流量计等；质量法（增加了反映密度的输入信号，有直接和间接两种方法），可以直接检测质量流量，典型的有热式质量流量计，利用哥里奥利力工作的振动式质量流量计等。

【节流式流量计】利用介质流过节流件时所产生的压降与流速的关系来测量流量的装置。有些型式的节流式流量计不需要个别标定，就能保证相当高的准确度，是工业部门用得最多的一种流量计。节流流量计由节流装置、压力信号传输管路和压差测量仪器组成。节流装置由节流件、取压装置和测量管段组成，作为流量传感器把流量信号变换为压差信号。节流件的形式很多，常用的有孔板、喷嘴、文丘里管，其结构和使用条件是标准化的。标准节流装置由于结构简单，不需要单独标定，使用寿命长和适应性广，因而在流量测量仪表中占据主要地位。节流装置与压差计共同组成节流件变压降式流量计。工业上使用的压差计主要有双管式、环天平式、钟罩式、浮子式、膜式和双波纹管式等，80年代使用最多的是弹性式压差计。根据需要，压差计可以配有指示、记录和流量积算机构，也有的附加远传变换器、报警和自动调节装置。压差计的标尺可按压差分度，也可以按流量分度。由于流量与压差之间为平方关系，若要进行流量积分求得累计流量或将流量信号输入调节系统，必须对流量标尺线性化，所以要对压差信号开方。开方器有机械式和电器式两种。

【涡轮流量计】一种速度式流量计。由涡轮流量变换器和流量指示、积算仪两部分组成。流量变换器包括一个转速随流量变化的叶轮和转速检测器两个主要环节。流体冲击叶片使叶轮以与流量成正比的速度转动，同时使叶轮产生轴向推力，因此，设计时要考虑自动平衡此轴向力。为了防止流体因进入叶轮角度不同而引起难以估计的误差，在叶轮前后均设置整流器以保证流体沿轴向通过流量计。转速检测有两种基本方式，即电磁型和调制载波型。电磁检测器通常由外部线圈与叶片相作用，利用阻抗变化发出信号，

也可在叶片中装磁铁，使线圈内感应出电脉冲，调制载波检测方式是利用叶轮转动时叶片对固定的载波频率进行调制而得到信号，这种方式的阻滞力矩较前一种小，对改善低速（小流量）性能有利。流量变换器输出的是频率信号，流量积算仪是用来将电脉冲频率信号按照确定的系数转换成流量信号。涡轮流量计的特点是精度高（一般为 $\pm 0.5\%$ ），量程比大（一般为 $10:1$ ），动态性能好（毫秒级），频率输出线性好（抗干扰，便于积算和控制），耐高压，使用温度范围宽，压力损失小（一般为 2×10^4 帕），适用于测量低粘度、清洁流体的流量。其管径为 4—500 毫米（液体）和 10—100 毫米（气体），测量范围为 0.04—6000 立方米/小时（液体）和 1.5—200 立方米/小时（气体）。

【质量流量计】按测量方法有直接式和间接式两种。直接式质量流量计的测量原理大致分为：（1）与能量的传递、转换有关的测量原理，典型的有量热式质量流量计和差压式质量流量计；（2）与力和加速度有关的测量原理，典型的有哥里奥利力式和角动量式。间接式质量流量计是通过体积流量计和密度计的组合来测量质量流量的，也可以通过测量被测流体的温度和压力，将被测流体的体积流量自动地换算成标准状态下的体积流量，从而可以间接地确定质量流量。当被测流体成分发生变化时，测量温度和压力的办法不能正确计算出密度，因此不能正确推导出质量流量，所以温度、压力的推导式质量流量计的使用场合是有限制的。

【温度测量】温度是最普遍、最重要的热工参数之一。温度测量仪表一般都由检测和显示两部分组成。简单的温度计（如水银温度计）这两部分形成一个整体。常用的检测方法有：利用物质热膨

胀与温度的关系（如双金属温度计、水银温度计和压力表式温度计）；利用金属或半导体电阻随温度的变化（如铂电偶温度计、热敏电阻温度计）；利用热电效应（如热电偶温度计）；利用物体的辐射能与温度的关系（如光学高温计、光电高温计、全辐射和部分辐射温度计、光电比色温度计）等。前三种属接触测量方式，最后一种为非接触测量方式；温度的数值表示法通过建立温度标尺（温标）来实现。历史上提出过多种温标，如早期的经验温标（摄氏温标、华氏温标），理论上的热力学温标和当前世界通用的国际实用温标，中国现用的是“1968年国际实用温标”，它是以13个纯物质的相变点，如氢三相点（ -259.34°C ）、水三相点（ 0.01°C ）和金凝固点（ 1064.43°C ）等，作为定义固定点来复现热力学温度的，单位为开尔文（K）。随着现代科学技术特别是电子技术的发展，已研制出多种新型的温度传感器和温度测量仪表，如晶体管PN结温度传感器，光纤温度传感器，测量温度分布的红外热象仪和激光温度测量仪等。此外，还出现了利用集成电路做成的便携式数字温度计或对温度信号进行存贮和再处理。

【热电偶温度计】由热电偶、显示仪表及其附件（补偿导线、保护套管、冷端恒温器等）组成的温度计。特点是结构简单，使用方便，具有较高的准确度，温度测量范围宽（常用热电偶为 -50°C — $+1600^{\circ}\text{C}$ ，特殊材料热电偶目前可测温度最低到 -180°C ，最高可达 $+2800^{\circ}\text{C}$ ），可远传等。热电偶在温度测量中应用极为广泛，常用的有：铂铑—铂热电偶，镍铬—镍硅（镍铝）热电偶，镍铬—考铜热电偶，铜—镍铜热电偶等。

【热电阻温度计】利用导体或半导体的电阻率与温度有关的特性制

成的温度计。在 -200°C — 600°C 温度范围内多采用电阻温度计，它具有灵敏度高、准确度高、性能稳定、复现性好、可以远传等优点。其缺点是：不能测太高的温度，测温元件体积较大，因而只能反映平均温度，且热惯性较大。半导体热敏电阻体积很小，但非线性严重，复现性较差。目前应用较广的热电阻材料是铂和铜以及某些金属（主要是钴、锰和镍）的氧化物。为了适应低温测量，还研制出铟（4.2—15K）、锰（2—63K）和碳（液氦温区）等热电阻材料。

【光学高温计与光电高温计】基于普朗克定律的单色（即特定波长）辐射高温计。是通过测量物体单色辐射亮度来确定其温度的仪器，得到的是物体的亮度温度而非真实温度，又称亮度温度计。一般用把被测亮度与参考辐射源的亮度进行比较的方法来确定单色亮度，其中靠人眼进行比较的称为光学高温计，而采用光电检测器来作亮度比较的称为光电高温计。光电高温计的优点在于既可使用可见光又可使用红外光，故有利于辐射法测低温，灵敏度也比光学高温计高一个量级，且准确度高，可以连续测量，响应快，能自动测量。

【全辐射高温计和部分辐射高温计】以斯蒂芬—玻耳兹曼定律为基础，用热电堆作探测器，接受被测物体全波段辐射能以用来判定被测物体温度的装置，叫全辐射高温计；用光电、热电元件作探测器接受被测物体某些特定波段辐射能以用来判定被测物体温度的装置叫作部分辐射高温计。它们测得的都是物体的“辐射温度”。这类仪器通常都由光学系统、检测元件和显示仪表三部分组成。严格讲全辐射高温计也是一种部分辐射高温计，只不过它接

收的辐射能波段很宽，但这种高温计将受到中间介质（例如二氧化碳、水蒸汽等）在特定波段上的辐射和吸收特性的影响。部分辐射高温计可以利用检测元件与滤光片的适当配合，选择仪器的工作波段，如以大气透射率较高的波段（常称大气“窗口”）作为工作波段，这样就可以减少阳光、大气等的干扰。红外测温仪便是一种广泛应用的部分辐射温度计。

【光电比色高温计】利用物体在两个不同波长下光谱辐射亮度比来实现温度测量的仪器。它测量物体的单色辐射功率，在结构上与光电高温计类似。不同的地方主要有两点：一是要两个波长下的单色辐射功率信号，另一点是将两个信号进行比值运算后的结果作为输出。其特点是：（1）测得的是物体的“色温”（它比亮度温度计测得的亮度温度和辐射高温计测得的辐射温度都更接近真实温度）；（2）由于是测两个波长下单色辐射功率之比，故对待测表面黑度变化和光路中吸收介质的影响有较强的抗干扰能力；（3）结构复杂，价格昂贵，准确度也还较差。

【P-N 结温度传感器】利用半导体二极管和三极管的 PN 结在恒定电流情况下正向压降与温度呈正比关系的特点做成的测温元件。测温范围为： $-80\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。其特点是：尺寸小，结构简单可靠，热惯性小，输出电信号，可远传，准确度高（0.5—2.5 级），灵敏度也较高（利用三极管测温度，基极电流恒定情况下，有约—2.4 毫伏/摄氏度的灵敏度），但互换性较差。

【石英温度传感器】利用石英振子的消振频率与温度有关这一特性做成的测温元件。测温范围为 $-80\sim 250^{\circ}\text{C}$ （上限受激振回路耗散

功率的限制)。其特点是:数字输出,灵敏度、分辨率和准确度均很高(分别约为1000赫兹/摄氏度,0.0001℃,±0.1℃)。

【热流计】直接测量热流密度的装置。常用的有:金属片型热流计;薄膜型热流计;热电堆型热流计;量热型热流计。金属片型热流计结构简单但精度不高;薄膜型热流计使用温度不能过高;热电堆型热流计灵敏度高,应用最广;量热型热流计反应速度较快;潜热型热流计测量数据不需要修正,且构造简单、价格便宜,但不能连续测量。

蒸气动力工程

【蒸汽动力工程】涉及蒸汽的生产以及一切以蒸汽作为原动力的工程。它包括生产蒸汽装置(锅炉)的研究、设计与生产;也包括以蒸汽作原动力的一切蒸汽动力装置,如蒸汽机、汽轮机等的研究、设计、生产与应用等工程技术。近代,由于核能、太阳能、地热能、海水温差等新能源的开发利用,蒸汽动力工程也扩展到核能蒸汽动力工程;太阳能蒸汽动力工程;地热能蒸汽动力工程等领域。蒸汽动力工程的诞生,曾推动了世界第一次工业革命,首先使纺织业、后使采矿业、交通运输业等相继实现机械化。特别是与电业工程相结合。将世界推进到以电气化、自运化为标志的第二次工业革命的历程。它包括锅炉工程、蒸汽机与汽轮机工程等。

【锅炉】一种生产蒸汽的换热设备。主要由锅和炉两大部分组成。最大效率地利用热能,加大蒸发量是锅炉设计制造所追求的目标,这也就使增大受热面积的种种手段得以广泛应用。目前,锅炉已由简单锅炉(热效率为30%左右)发展到火管锅炉(即将大直径炉室改成若干小直径的火管,使管外水吸热蒸发的锅炉),及水管管炉(即将锅改成若干分布在炉内的小直径水管的锅炉),热效率有了很大提高。目前,电站锅炉已发展到超临界压力(大于22兆帕),单台容量达1300兆瓦的锅炉。相应的燃烧方式也有了许多改变。且随着蒸汽压力的提高,由蒸汽、水密度差驱动的自然循环锅炉发展到了用密度差与循环水泵共同作用的强制循环锅炉和完全由给水泵驱动水汽运动的直流锅炉。

锅炉中由炉膛、锅筒、燃烧器、水冷壁、过热器、省煤器、空气预热器和炉墙构架等主要部件构成的生产蒸汽的核心部分,称为锅炉本体,其中最主要的部件是炉膛和锅筒。

炉膛又称燃烧室,是燃料燃烧的场地。它的主要作用是保证燃料燃尽并使出口烟气温度冷却到对流受热面能安全工作的水平。由于燃烧性质及燃烧方式不同,炉膛的结构也不相同。用炉排作为燃烧床的火床燃烧室是工业锅炉中广泛采用的一种形式,煤在炉排上燃烧,风从炉排下进入炉膛,由炉膛出口处的锅炉管束来承担吸收热并产生蒸汽的任务。这种炉膛由于结构上的限制,一般只适用于小型锅炉。在大中型现代电站锅炉中常采用悬浮燃烧室。燃料(煤粉,油或可燃气体)由燃烧器喷入炉膛形成火炬燃烧,它不需要炉排。近代锅炉中还采用旋风燃烧室,使粒度较细的煤粉随高压风进入旋风炉膛并与切向进入炉膛的二次风混合旋转推进,迅速着火燃烧,这种锅炉结构紧凑,热效率高达90%以上。本世纪五十年代又发展起来一种沸腾床燃烧室,介于火床

燃烧室与悬浮燃烧室之间，借助高压风将一定粒度的煤在沸腾床上吹沸起来进行燃烧，能够燃烧劣质煤并有效脱硫除硝，有利于环保，热强度也较高。

【炉排】又称炉篦。堆置固体燃料并使其有效燃烧的设备。通常用铸铁片构成栅格。炉排片之间有一定的间隙，以便下面的空气通过其上的燃料层。最初采用的是固定炉排，这种炉排结构简单，着火条件好，有“无限制着火”之称。但燃烧不完善，加煤、除渣和拨火等操作劳动强度大。为了使上述操作机械化，采用以下三种办法：（1）固定炉排加抛煤机；（2）振动炉排（燃料在炉排上移动）；（3）链条炉排（燃料层随炉排一起移动）。

【燃烧器】又称喷燃器。锅炉、冶金炉及其他工业炉上将煤粉、油或煤气等燃料喷入炉中燃烧的设备。利用油泵、鼓风机、蒸气或压缩空气将燃料从燃烧器喷入炉中，与空气均匀混合，以达到充分燃烧的目的。分为二次风强烈旋转的旋流式，一、二次风同向的直流式和少量空气流过稳燃器的平流式等几种。

【锅筒】用锅炉钢或合金钢制成的圆筒形容器，是循环式锅炉的主要部件之一。它的作用是：（1）作为循环回路的闭合件。把省煤器、水冷壁和锅炉管束与过热器等连接在一起；（2）提供足够的汽水贮存空间，以适应锅炉工况的变化；（3）净化蒸汽。利用汽水分离器除去蒸汽中含有盐分的锅炉水滴，利用清洗装置清除溶解在蒸汽中的盐分；（4）补充给水；（5）排除污水（含盐高的水）。一般低压锅炉蒸发面大，除水冷壁外须布置较多的锅炉管束，因而需要二个甚至三个以上锅筒。上锅筒通常称为汽包，下锅筒

叫泥鼓。现代中高压锅炉多数为单锅筒，直流锅炉已完全取消了锅筒，从而可以节省贵重金属。

【水冷壁】锅炉中布置在炉膛内壁，用来降低炉壁温度、保护炉墙的辐射受热面。在低于临界压力的各种动力锅炉中，它主要起蒸发受热面作用；在超临界压力直流锅炉中，则用来加热水和过热蒸汽。

【过热器】锅炉的附加受热面。布置在炉内利用高温烟气将锅炉产生的饱和蒸汽（湿蒸汽）加热到规定温度的过热蒸汽（干蒸汽）的一种装置。与汽轮机配套的锅炉一定要布置过热器，生产高温高压的过热蒸汽供汽轮机用，既能提高其热效率，又能预防涡轮叶片被水蚀。过热器由钢管弯成的蛇形管排和集箱组成。按传热方式，可分为对流、辐射和半辐射三种型式。按布置方式分为垂直式和水平式。按蒸气相对于烟气的流向又可布置成顺流、逆流或混流三种形式。

【省煤器】利用锅炉尾部烟气的余热，将锅炉给水在送入锅炉之前进行预热的装置。亦即“给水预热器”。它使燃烧过程的热量得以充分利用，从而达到降低排烟温度，节约燃料的目的。按水的预热程度分为非沸腾式和沸腾式。按材料分为铸铁式和钢管式。铸铁式耐蚀性较好，可用于给水未经除氧的锅炉，但强度不高，工作压力小于 25kgf/cm^2 ，不能承受水冲击，故不能用于沸腾式省煤器。钢管式由并联的蛇形管组成，不受压力限制，可作成沸腾式省煤器。钢管式可以分为光管式和鳍片管式两种。

【空气预热器】装设在省煤器之后的预热空气的装置。其目的是为了降低排烟温度，提高锅炉效率，节约燃料，减少价格较贵的蒸发受热面及改善燃烧和传热效果。其结构有间壁式和再生式两大类。在间壁式空气预热器中，烟气通过间壁把热量连续地传给空气；而在再生式空气预热器中，烟气和空气交替地流过受热面。受热面先从烟气吸取热量随后释放给空气，如此交替进行。

【锅炉汽温调节】为保持处于运行过程中的锅炉出口处蒸汽的温度在允许范围内波动而采取的一种技术措施。一般规定蒸汽的出口温度的波动范围不应超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ — 10°C 。锅炉蒸汽的出口温度是蒸汽质量的重要标志之一。如采用高温高压蒸汽是提高汽轮机热功转换效率的最有力手段。当然锅炉出品汽温要视与之配套的蒸汽动力装置的具体要求而定。若汽温过高，会使锅炉辅助设备过热器和再热器的强度降低，寿命缩短；汽温过低，又会加剧汽轮机末级叶片的水蚀过程；达不到设计要求的温度，则会降低汽轮机的热效率。因此，现代大型锅炉均安装有汽温自动调节装置，进行汽温调节。由于汽温的波动与锅炉的负荷、燃料种类与性质、燃烧过程（烟气流向、给水温度、燃料—空气比）等因素相关。因此直接和间接控制上述因素，就产生了许多汽温调节方法。常用的有减温器（分表面减温器和喷淋式减温器两种）调温法；烟气再循环调温法；摆动燃烧器调温法；烟气挡板调温法；汽—汽热交换器调温法等。

【锅炉的煤粉制备系统】把煤粉颗粒制成在1—500毫米之间的设备。制粉系统包括煤的粉碎、研磨和输送设备。可分为中间仓储式和直吹式两类。中间仓储式制粉系统是把磨成的煤粉先储存在

煤粉仓内，根据负荷要求再由煤粉仓送入炉膛。直吹式制粉系统是把磨成的煤粉从磨煤机直接吹入炉膛。前者一般配用筒式球磨机。后者多配用中速磨煤机或风扇磨煤机。

【磨煤机】把煤块破碎并磨成煤粉的机械。是锅炉煤粉制备系统中的主要设备。型号很多，按转速可分为低速、中速和高速三种类型。球磨机是一种低速磨煤机，圆筒形结构，靠内装的钢球将煤块砸碎并研磨成粉。其特点是对煤种适应性强，可长期安全运行，对杂质不敏感，维修费用低，但笨重，金属消耗量大，占地多，初投资大，适用于满负荷运行。中速磨煤机有辊—盘式、辊—碗式、辊—环式和球—环式四种，工作原理相同，靠两组相对运动的部件将原煤挤压、碾磨成粉。其优点是重量轻，占地小，投资省，电耗低，噪音小，但一般只适用于烟煤和贫煤。风扇磨煤机是目前电站采用最多的一种高速磨煤机。结构类同离心风机，靠高速运动的叶片（冲击板）将煤块击碎并与壳壁（内装护甲）碰撞进一步破碎。这种磨煤机集干燥、破碎、输送为一体，可省一台风机，其中煤粒大多处于悬浮状态，利于通风、干燥，最适合磨制高水分褐煤和较软的烟煤，缺点是冲击板磨损大，寿命短且系统漏风严重。

【锅炉水处理】对锅炉水进行净化、软化、除盐、除气处理，并对锅内水质进行调整使之符合标准的过程。其目的是防止锅炉水汽系统结垢、积盐和腐蚀。各种锅炉根据规定的水质标准来选用水处理方法和系统。水的净化通常采用混凝、澄清和过滤等方法；水的软化是除去水中的钙、镁盐类溶解物，使之变成软水，其方法有化学软化处理、磁场软化处理和离子交换软化处理；在高压以

上锅炉中，由于蒸汽溶盐能力增大，金属腐蚀增强，因而须对给水进行除盐处理，方法有蒸馏法和化学法，蒸馏除盐成本高，化学除盐常采用阴阳离子交换法；水中含氧将引起金属化学腐蚀，除氧的方法有热力除氧、化学除氧和真空除氧三种。对于小型工业锅炉或作为水处理的辅助手段，可采用炉内化学处理，即向炉内加入磷酸三钠等碱性药剂与水中所含的钙、镁盐类作用形成沉渣，再通过锅炉排污除去。

【锅炉通风、锅炉除尘】在锅炉燃烧过程中，必须把燃烧所需的空气不断送入炉膛，同时又需把烟气不断排出锅炉，这一过程称为锅炉通风。锅炉通风有四种方式：自然通风（靠烟囱的抽力）、负压通风（靠装在锅炉出口的引风机）、平衡通风（靠分别装在锅炉进、出口的送、引风机，炉膛出口处维持 20—30 帕的负压，这是大型锅炉最常用的一种通风方式）、正压通风（只装送风机，整个烟道都在正压下工作，适于低氧燃烧）。锅炉的烟尘是主要大气污染源之一，因此需要消烟除尘，解决措施是从两方面着手：一是改进燃烧，二是加装除尘装置，减少排向大气的烟尘量。除尘器按工作原理可分为重力沉降除尘器、惯性分离除尘器、离心除尘器、静电除尘器、过滤式除尘器及超声波除尘器等。

【锅炉自动控制】锅炉运行自动化的一种技术措施。它应是实现锅炉最佳运行工况和安全运行的有力保证。它由自动检测系统、程序控制、自动调节、自动保护及相关的若干执行机构等装置组成。使锅炉自动地按预定的程序和工况运行，实现自动检测和操作。自动控制，即利用电子计算机进行巡检，监视和测量锅炉运行中的各种重要数据如介质的温度、压力、流量、水位、烟气成分及炉

膛火焰、各种辅助设备的状态等，并进行数据处理、工况计算、趋势分析、事故分析和操作指导。程序控制是指锅炉的开、停、运行、事故处理等都将按预定程序通过执行机构有条不紊地进行顺序操作。自动调节是为了锅炉自动地保持在预定工况下安全、经济地运行而对某些重要量如汽温等进行的调节。自动保护分紧急保护和连锁保护两类，是为防止运行管理人员错误操作或调节装置失灵而导致事故发生所采取的措施。如锅炉上的安全阀，在锅炉超压时，自动打开，以防锅炉爆炸。

【工业锅炉】为工矿企业的生产工艺、动力和采暖提供蒸汽或热水的锅炉。大多数为低参数、小容量锅炉，火床燃烧，热效率较低。就其结构而言可分为火管锅炉和水管锅炉两种。火管锅炉具有结构简单、运行水平和给水品质要求较低的特点。水管锅炉受热面布置方便，传热性能好，热效率比火管锅炉高，钢材消耗少。工业锅炉数量大，因此，提高效率，提高机械化、自动化水平以及防止环境污染等是当前的重大研究课题。

【电站锅炉】向汽轮发电机组提供蒸汽的锅炉，是火力发电厂三大主机之一。电站锅炉多采用大容量、高参数。目前自然循环锅炉和直流锅炉的单机容量已分别达到 850 兆瓦和 1300 兆瓦。蒸汽参数由高参数（10 兆帕，510℃）、超高参数（14 兆瓦，540°—570℃）进一步发展到亚临界参数（17—18 兆帕，540°—570℃）和超临界参数（高于 22.11 兆帕，540°—570℃）。结构上多采用悬浮燃烧的水管锅炉，其中汽水循环方式有自然循环、强制循环、直流锅炉和复合循环四种型式。自然循环锅炉中靠下降管和上升管管中工质的密度差建立工质循环，超高压以下的锅炉普遍采用自然循环

方式，亚临界压力锅炉也可采用这种循环方式，但锅筒内压力一般限于 20 兆帕以下；强制循环锅炉是在下降管和上升管之间加装循环泵以提高工质循环压头，工质做强制流动，因而蒸发受热面布置灵活，锅筒直径也可以较小，锅炉起停时间短，负荷调节范围大，这种循环方式主要用于亚临界压力的锅炉；直流锅炉中，在给水泵压头作用下给水一次性通过各级受热面，最终全部变成过热蒸汽输出，它无需锅筒，管径也小，因而制造方便，节省金属，起停迅速，调节灵敏，而且是唯一可用于超临界参数的锅炉；复合循环锅炉是在直流锅炉汽水系统中增设循环泵，在高负荷时，循环泵作增压泵，系统按直流锅炉方式运行，低于一定负荷时，系统按低倍率方式运行，其特点是减小了高低负荷下水冷壁中流速的差值，更适于变压运行。

【船用锅炉】供船舶使用的采用低中参数，以燃油为主的锅炉。因受船舶体积限制，船舶锅炉的外形尺寸及其结构要求小而紧凑，炉膛容积热负荷高，水循环高度回路小，重量要小。一般多采用锅筒式自然循环的弯水管锅炉。

【机车锅炉】为蒸汽机供应蒸汽的锅炉，是蒸汽机车的主要组成部分。机车锅炉均采用火管锅炉。要求布置紧凑，即在有火管的锅筒前方装一个包有水夹套的火箱，火箱下部装有炉排和灰箱。通常设有蒸汽过热器（布置在大烟管内）。

【汽轮机】又称蒸汽透平。利用具有一定压力和温度的蒸汽膨胀加速推动叶轮旋转做功的原动机。特点是转速高、功率大、经济性好，是现代大型火力发电厂、原子能发电厂和大型船舶中最主要

的原动机。按蒸汽的膨胀次数可分为单级式和多级式；按汽流方向可分为轴流式和辐流式；按作用原理可分为冲击式和反击式；按处理排汽的方法可分为凝汽式和背压式；按用途可分为中心电站汽轮机、工业汽轮机和船舶汽轮机。单级汽轮机大多由一个速度级构成，它的结构简单、功率小、效率低，一般用于小型发电机、离心泵和通风机等。多级汽轮机由一个速度级和若干压力级构成，它的效率高、输出功率大，还可以级间抽汽，适用于中心电站和热电站。提高蒸汽动力循环热效率的主要途径之一是提高汽轮机的蒸汽初参数和降低排汽压力。因此，现代大型汽轮机多采用多级、轴流、凝汽式。汽轮机由固定部分（汽缸、隔板、喷嘴等）和转动部分（机轴、叶轮式转鼓、叶片等）及调节系统组成。它没有活塞、连杆等往复运动机件，既可提高转速，又可避免滑动摩擦，使机械效率提高；另外，在汽轮机内蒸汽连续单向流动膨胀做功，内部效率较高，转矩也很均匀，适合带动发电机或其他高速转动机械。提高单机功率，改善蒸汽动力循环和提高效率，研制新型汽轮机以适应大、中、小型的、基本负荷与调峰负荷的需要，发展利用核能、地热、太阳能和工业余热以及开发利用其他新能源汽轮机等都是今后重要的发展方向。

【汽轮机的构造】主要由喷嘴、隔板、叶片、转子和轴等部件组成。喷嘴是铸造或铣制而成的弧形流道，第一级以后各级的喷嘴固定在隔板上，其作用是把蒸汽的热能变成动能。隔板是用来隔开相邻两级并安装喷嘴的部件，一般作成两半，分别固定在上、下汽缸上。叶片是把蒸汽的动能转换成机械能的部件，在喷嘴喷出的高速汽流作用下高速旋转做功，它固定在转轴上。转子是轴与固定在轴上的叶轮式轮鼓的总称，作用是将叶片的机械功通过轴输

出。

【汽轮机的工作原理】在汽轮机中，喷嘴和汽缸以及隔离板构成静止部分，简称定子，叶片与叶轮（或轮鼓）构成其转动部分，简称转子。工作时，高温高压蒸汽在喷嘴内膨胀、加速，推动叶片及叶轮的快速旋转，同时也使蒸汽速度降低，从而完成蒸汽动能到转子动能的转换。习惯上把完成这种转换过程的喷嘴与叶片等称为一个工作级。为了提高蒸汽能量利用率及运行安全性，为了得到更大的单机功率，一般采用多级汽轮机。蒸汽进入汽轮机后，依次通过各级，轴输出功率是各级功率的总和，其简要工作原理为，蒸汽进入第一级，膨胀、作功后再由喷嘴进入第二级，进一步膨胀并推动叶片转动，如此类推，直至排出汽轮机外。这样可以大大提高汽轮机的热效率。

【汽轮机控制系统】为保证汽轮机安全经济运行的一整套监控设备。它包括进气调节系统、监测保护系统、自动起停和功率给定系统。调节系统是用来使汽轮机的运行性能满足所拖动的工作机械的要求。例如，在带动发电机时，为保持供电频率恒定，必须进行转速调节，使之在电负荷变化时转速不变。而对供热式汽轮机，要进行压力调节，使之在热负荷变动情况下维持供热压力恒定；在带动风机、水泵等流体机械时，要求机组转速适应负荷而变化，通常采用流量调节（即保证在各种输出压力下流体机械的流量基本不变）或压力调节。监测保护系统用来保证机组的运行安全，超速是各种机组最危险而又随时可能发生的事故，用作超速保护的装置叫危急保安器。此外，监测的项目还有：转子或轴承座的振动，转子的轴向位移，汽缸与转子的热膨胀差，缸壁温

度、汽压、背压、润滑油压、油温以及轴瓦温度等。汽轮机启动过程是机组寿命消耗率最大、事故发生率最高的工况，启动自动化就是为了保证操作正确和机组安全。功率给定控制是针对并网运行各机组的功率的控制。监测保护系统的发展趋势是利用微机进行分析诊断和趋势预测。研制机组起停和运行全盘自动化控制系统将有助于机组的安全运行、提高机组的经济性和利用率，是重要的发展方向。

【凝汽器】又称冷凝器。将蒸汽冷凝成液体的一种换热器。是凝汽式汽轮机的重要部件。其作用除了将汽轮机的乏汽（排汽）凝结成水供锅炉需要外，还能在排汽处建立较高的真空度以增大汽轮机的输出功率和热经济性。按蒸汽凝结方式可分为表面式与混合式两类。为保证回收的凝结水不受污染以满足锅炉给水纯洁度要求，需要采用表面式凝汽器。在工作蒸汽不需回收时，如地热汽轮机中可采用混合式凝汽器。

【蒸汽机】把蒸汽的压力能直接转换成机械功的往复式动力机械。是最早出现的原动机。由于受往复运动的机件惯性的限制，转速较低，所以功率不大，热效率也低，但具有结构简单、制造、维修方便，转速可变幅度大，过载能力强，易于逆转等特点，适合作交通工具的动力。在机车、小型船舶上至今仍在使用。其工作原理可简单描述为高压蒸汽进入汽缸，推动活塞并带动活塞杆与曲柄运动，从而带动相应机械运动。蒸汽机按蒸汽在活塞一侧或两侧工作，分为单作用式或双作用式；按汽缸布置方式，可分为立式和卧式；按蒸汽在一个缸中膨胀或依次在多个缸中膨胀，可分为单胀式和多胀式；按蒸汽在缸中的流向可分为回流式和单流

式；按排汽方式和排汽压力，可分为凝冷式、大气式和背压式。蒸汽机的主要热损失是初凝结和再冷化损失，这是其效率低的主要原因。采用过热蒸汽和复胀机，并适当提高转速，可以有效改善其经济特性。

【蒸汽动力装置】以蒸汽为工质的热功转换设备。是最早使用的动力机械。问世之初是由蒸汽发生器（锅炉）和蒸汽机组成的联合装置。经发展现已成为由锅炉、汽轮机、冷凝器和水泵等组成的成套设备。其单机容量达到 1300 兆瓦，热效率达到 40% 以上。如上海汽轮机厂生产的 N125—135 型机组热效率达 43.2%。蒸汽动力装置的基本循环是在卡诺循环基础上经改进的朗肯循环。研究表明，提高新汽的初压力、初温度是提高基本循环蒸汽动力装置热效率的重要途径。现已普遍向高参数用高温高压蒸汽的方向发展。除此之外，现代蒸汽动装置还采用了给水加热器的抽汽回热循环、再热循环及燃气—蒸汽联合循环等装置。进一步提高了热效率。二十世纪 50 年代以后，由低温核反应堆的开发，核能蒸汽动力装置得到很快的发展。

【提高蒸汽动力循环热效率的途径】由朗肯循环可知：提高蒸汽初温和初压（即提高了吸热过程的平均温度）或降低乏汽温度，是提高热效率的有效措施。但乏汽温度事实上已经降到最低限（接近环境温度）。提高初温受到材料的限制。单独提高初压将导致乏汽温度过高，影响汽轮机末级叶片的安全。解决这个问题并可提高热效率的办法是采用再热循环。更广泛被用来提高热效率的方法是回热循环，即利用汽轮机中作过部分功但压力还不太低的蒸汽（主要是利用其潜热）去加热锅炉给水。吸热过程中预热水的

起点温度提高了,吸热过程的平均温度,因而热效率也就提高了。热电合供循环也是提高热效率的有效方法。大型电厂都采用这种循环既供电、又供热,叫热电厂。其总经济性除热效率外,还应包括供热的效益。此外,还可以采用一些联合循环,如汞—水之类的两汽循环、蒸汽—燃气联合循环等来接近卡诺循环以达到更高的热效率。

【核动力装置】利用原子核反应堆中核燃料裂变反应产生的热能转变成动力的整套设备。它包括核反应堆、动力产生系统以及安全保障和控制系统。核动力装置的重要特点之一是燃料消耗量少,因而特别适用于燃料贮备量受限制的船舶(尤其是潜艇)和宇航方面。用核能发电已受到重视并已有相当的发展。到1983年底,世界上已建立核电站反应堆302座,总机容量达19.9万兆瓦。在核电站中主要采用热中子轻水堆(包括沸水堆和压水堆),在舰艇核动力装置中几乎全都采用压水堆;在航天核动力装置中,较多利用同位素电池,能量转换器将热能直接转变为电能。核燃料有强烈的辐射性。因此,核动力装置的安全保障是个极为重要的问题。一般,从设计到运行,各国都有严格的质量保证和控制标准。

【燃气—蒸汽联合循环装置】燃气轮机与蒸汽动力装置联合工作的一个整体装置。燃气轮机的排气用来加热蒸汽。燃气轮机在高温段工作,蒸汽动力装置在低温段工作,其目的是提高循环工作介质的初温、降低其排出温度从而提高整个循环的热效率。燃气轮机单独工作时,燃气初温可高达 1200°C ,但排气温度也很高,约为 450°C — 550°C ,故效率不超过38%。现代大型蒸汽动力装置中,新蒸汽温度一般不超过 600°C ,虽然排汽温度较低,其热效率最高

也只达 38—39%，而联合循环的热效率已达到 40—46%。联合循环装置的型式有排气余热利用型联合循环装置（燃气轮机的排气被引入余热锅炉，产生蒸汽供应汽轮机，余热锅炉有补燃和不加补燃的两种），煤气化的燃煤联合循环装置（以煤为燃料，经气化后引入燃气轮机的燃烧室燃烧，其余部分与前一型式同）和沸腾燃烧的燃煤联合循环装置（沸腾炉中的高温烟气或空气供燃气轮机作为工质，产生的蒸汽供汽轮机作为工质。沸腾炉有加压的和常压的两种）。

内燃机工程

【内燃机工程】将燃料的热能转换为机械能的动力机械。按工质的加热方式，分为外燃式和内燃式。蒸汽机和汽轮机，燃料是在机器外部的锅炉里燃烧的，属于外燃式。使燃料在机器内部的燃烧室里燃烧的，属于内燃式。内燃动力机械按照结构特点及其运动方式分为：（1）活塞式内燃机，包括往复活塞式、旋转活塞式和自由活塞式内燃机；（2）旋转叶轮式，包括燃气轮机和喷气式发动机；（3）将上述两种组成联合机组的，称复合式发动机。

【内燃机】一般指往复活塞式内燃机。内燃机的发展从蒸汽机诞生后开始，1860 年德国的勒努瓦设计出第一台煤气机，1876 年德国人奥托创制成第一台四冲程循环煤气机，1883 年德国的戴姆勒制成第一台汽油机，推动了汽车的发展。1897 年德国工程师狄塞尔

首创成功压燃式内燃机，主要用柴油作燃料，又称柴油机。内燃机的特点：（1）在所有热机中，有效热效率最高，可达 46%；（2）功率范围宽广，小至航模发动机大至船用 3.5 万多千瓦；（3）单位体积比功率高、比重量较轻，便于移动，适于交通运输各个领域使用；（4）起动快，并能很快达到全负荷运行；（5）对燃料要求比蒸汽动力机械高；（6）排气中有害成分及噪声，造成环境公害。经过 100 多年的发展，现代内燃机的性能已达到较高水平。一般车用汽油机每升功率达到 30—40 千瓦，比重量约 0.7—1.4 公斤/千瓦，燃料经济性在 280—300 克/千瓦小时。大型低速增压柴油机，最低油耗率可达 190—225 克/千瓦小时，其热效率已达到 38—46%。

内燃机种类繁多。（1）按使用燃料分汽油机、柴油机和煤气机；（2）按完成一个工作循环活塞往复的冲程数分四冲程和二冲程内燃机；（3）按燃料着火方式分火花点火式、压燃式和热泡式；（4）按气缸数分单缸、多缸，按气缸排列分直列式、卧式、V 型及星型等；（5）按冷却方式分水冷和风冷；（6）按进气压力分自然进气和增压内燃机；（7）根据用途可分汽车摩托车、拖拉机、工程机械、内燃机车、船用、农用、固定式和发电用内燃机。同一台内燃机、往往包含有各项分类内容，也表示出本身的特征，可以满足不同用途的要求。内燃机今后发展趋势：（1）采用微机控制，改善工作过程，进一步节能、降低油耗、减少排污；（2）改进机构，提高单机功率，工作可靠性和使用寿命；（3）降低振动、减少噪声；（4）广泛采用新技术、新工艺、新材料。

【往复活塞式内燃机】见“内燃机”。

【内燃机总体构造】由一系列机构和系统组成，包括：（1）机体与曲轴连杆机构；（2）配气机构；（3）润滑系统；（4）冷却系统；（5）点火系统；（6）供给系统；（7）起动装置。车用内燃机的气缸体为其机架，气缸体内为圆筒形气缸，活塞在气缸内作上下往复运动，经连杆变为曲轴的旋转运动。气缸体下部有能够安装曲轴的轴承支座和油底壳，在气缸体上部有气缸垫、气缸盖和气缸盖罩，在气缸体外侧面安装进排气管、起动机、水泵、风扇、燃油泵、分电器及化油器（或喷油泵）等零部件。当活塞在上止点时，其上部形成燃烧室，燃料燃烧后生成高温高压的燃气，燃气在气缸内膨胀，推动活塞做功，曲轴将各个气缸内活塞的动力从飞轮端输出，对外做功。

【内燃机曲轴连杆机构】由活塞、连杆、曲轴及飞轮等组成，主要作用是将燃气的膨胀功转化为曲轴向外输出的机械能。

【活塞】承受气缸内燃气爆发压力，并将此力通过活塞销传给连杆，推动曲轴旋转的零件。其顶部还是燃烧室的组成部分。由于燃气高温和高速往复运动，活塞应有足够的强度、良好的导热性和尽可能小的重量。活塞材料一般是铝合金或铸铁，中小型内燃机用铝合金活塞较多。活塞由顶部、环槽部和裙部组成，其顶部与气缸盖上的对应部分组成一定形状的燃烧室；其环槽部具有2—4道环槽，上面安装2—3个气环，用来密封气缸内的高压气体，下面一道环槽安装油环，将气缸壁上的润滑油刮下，通过环槽内的小孔，流回油底壳；其裙部是指从活塞销座孔上部的油环槽下端面起，直到活塞下端面的部分，主要承受侧向力，并对活塞本身的往复直线运动起导向作用。

【活塞环】开口的圆环状零件。在自由状态下其外径略大于气缸内径，装入气缸后利用自身弹力使其侧面紧贴在气缸内壁上。活塞环分为气环和油环两种。气环用来密封气缸，并将活塞顶部的部分热量传递给气缸壁；油环的主要作用是刮去气缸壁上多余的润滑油。

【连杆】将活塞的往复运动变为曲轴的旋转运动，并将活塞承受的力传给曲轴的零件。连杆必须有足够的刚度与强度，大都用优质中碳钢或合金钢模锻而成。其结构由小头、杆身、大头三部分组成。在小头内有耐磨铜套与活塞销配合。杆身多为工字形断面，可减轻重量，提高刚度，在传力时不致弯曲变形。连杆大头与曲轴的曲柄销联结，并作高速旋转运动。为便于安装，连杆大头从中间分开，内部装有连杆瓦片，与曲拐轴颈的配合间隙约 0.05—0.20 毫米，以便于磨损后检修，更换瓦片即可。

【曲轴】把各个气缸连杆传来的力变成旋转扭矩，通过飞轮输给传动装置，并驱动配气机构及其他辅助装置。曲轴在内燃机中受到各种力的共同作用产生交变应力而易造成疲劳破坏，因此用强度、刚度、冲击韧性和耐磨性都较好的优质中碳钢模锻制造。目前已广泛采用高强度球墨铸铁铸造毛坯，可大大降低制造成本。一般曲轴前端装有起动爪及正时齿轮。主轴颈将曲轴固定在缸体轴承中，各曲拐轴颈（又称连杆轴颈）分别与各缸连杆大头联结。在单缸机中，为了平衡惯性力的要求，在曲拐轴颈的曲柄上装有扇形平衡重块。在主轴颈与连杆轴颈之间有润滑油道相通，以便使润滑油从主轴颈流向连杆轴颈。曲轴后端伸出机体外，有一凸缘

法兰，以便安装飞轮。

【飞轮】用来储存内燃机做功冲程的能量，克服其他几个辅助冲程的阻力，使曲轴能够均匀地旋转的零件。飞轮多用灰铸铁制造，当高速发动机轮缘的圆周速度超过 50 米/秒时，则采用强度较高的球铁或铸钢。飞轮外形简单，为一个大圆盘，其边缘做得宽而厚，中间为薄片状，这样可减轻重量而得到较大的转动惯量。飞轮加工后除本身进行静平衡外，与曲轴装在一起还要进行动平衡，因此，在修理安装时，其相对位置不能变动。飞轮与曲轴用螺栓拧紧联成一体后，螺母处用锁紧片进行防松。在发动机中，常利用飞轮的外平面，作为离合器的主动部分，因此飞轮上带有离合器。在小型单缸风冷汽油机中，飞轮上装有叶片，起风扇作用，在飞轮内部安装点火用磁电机，使发动机结构紧凑。

【轴瓦】在连杆大头孔内及缸体主轴承孔内，都装有两个分开式轴瓦，分别称为连杆轴瓦（小瓦）和主轴瓦（大瓦）。在中小型内燃机上，轴瓦一般由厚度 1—3 毫米的薄钢板作基层，在表面浇有 0.1—0.5 毫米减磨合金层，并对表面进行镜面加工，使瓦片对同一种型号内燃机具有互换性，便于检修。瓦片背面均匀地紧贴在轴承孔壁上，使它有很好的承载和散热能力，提高工作可靠性，延长使用寿命。在轴片中部开有小孔，为通油孔。为了防止瓦片在工作时发生转动或轴向移动，在瓦片分开的端面上冲制凸台，称为“定位唇”，安装时分别将其嵌入轴承孔的凹槽中。瓦片内径大于轴颈的尺寸约在 0.05—0.2 毫米，称为油膜间隙。如果间隙过小，瓦片会与轴颈发热“抱住”，长时间使用后，轴颈因磨损而使间隙过大，会产生异响。这时应进行检修或更换瓦片。

【气缸工作容积】活塞一个行程所扫过的气缸容积。等于活塞面积与行程的乘积。活塞行程是指上止点到下止点之间的距离。多缸发动机有多个气缸，各气缸工作容积的总和称为发动机排量。

【燃烧室容积】活塞在上止点时活塞顶上的气缸容积。

【压缩比】气缸总容积与燃烧室容积之比。内燃机压缩比越高，压缩后缸内气体压力与温度越高，燃料燃烧的速度加快，并使燃气膨胀做功也愈充分，使内燃机做功能力加大，经济性提高。因此压缩比是内燃机一个重要的结构参数。但实践证明，汽油机压缩比过大，会发生不正常燃烧——爆燃，因此，现代汽油机的压缩比为 6—10。而柴油机压缩终点的温度必须高于柴油的“可燃温度”（约 600K），才能使喷入燃烧室的柴油着火。因此柴油机使用很高的压缩比，一般为 12—22。

【内燃机配气机构】使进、排气门或进、排气口在规定的时间内打开或关闭，使内燃机在工作循环中不断吸入新鲜充量和排出废气的机构。根据气门及凸轮在发动机上的布置形式，可分为侧置气门式和顶置气门式。侧置气门式结构简单，但它使燃烧室不紧凑，抗爆震性低，限制了汽油机压缩比的提高，同时，由于进、排气道拐弯较多，阻力加大，充气效率降低，使发动机高速性和燃料经济性变差。因此被逐渐淘汰。顶置气门式的进排气门都安装在气缸盖上，使燃烧室结构紧凑，汽油机压缩比可提高，进排气阻力减小，提高充气效率，使内燃机的动力性和经济性都得到提高，排污性能也得到改善。因此在内燃机中得到广泛应用。顶置气门式

又可分为下置凸轮和顶置凸轮两种。下置凸轮轴的顶置气门式配气机构目前应用最广，它由气门组、摇臂、推杆、挺柱和凸轮轴组成。顶置凸轮轴直接放在气缸盖上，使配气机构的惯性力、振动和变形都较小，在高速轿车用的内燃机上正获得推广。顶置凸轮采用链传动，改用齿形皮带传动，可简化结构，减小噪声，降低成本。

【气门组】由气门、气门座（镶在燃烧室内）气门弹簧、气门弹簧座、锁夹等组成。气门用来控制燃烧室和进、排气道之间的开放和关闭。气门头部与燃烧室内的高温燃气直接接触。同时受到气体压力、气门弹簧力以及运动零件的惯性力作用。要求气门能耐热、耐磨和耐腐蚀。一般排气门采用耐热合金钢，进气门采用普通合金钢制作。气门头部做成 30 度或 45 度锥面与气门座的内锥面紧密贴合。为使贴合密封可靠，锥面除磨光外，还要求将气门与气门座一起配合研磨，在密封锥面中部出现 1—2 毫米宽的无光泽接触环带为止，以保证燃烧室内气体的密封。气门座可在机体上直接镗出，内燃机常用耐热合金钢或合金铸铁制成单独的环形气门座圈，压入气门口处，以便磨损检修时更换气门座圈。气门弹簧座及锁夹，用来装拆气门弹簧，并保证弹簧正对气门中心。

【气门导管】引导气门上下移动，保证气门头锥面与气门座紧密贴合，并使气门散热的零件。常用灰铸铁或球墨铸铁制成，为圆柱形管。压入机缸后再将内孔精铰，与气门留有 0.05—0.12 毫米间隙，利用配气机构飞溅出来的机油进行润滑。

【气门弹簧】具有足够大的弹力，给气门压紧力，使气门紧密关闭

的零件。高速内燃机普遍用有两个气门弹簧，能提高工作可靠性，还可防止共振。气门弹簧结构多为圆柱形螺旋弹簧，用高碳锰钢或镍铬锰钢丝，冷绕成形，经机械加工、热处理制成。

【凸轮轴】利用凸轮使各缸气门按规定的工作次序和配气相位定时开关的轴。凸轮轴受到气门间歇性开启的周期性冲击，对凸轮表面要求耐磨，对凸轮轴本身要求有足够的韧性和刚度，因此，一般用优质钢模锻经精密磨削加工而成。20 世纪末，广泛采用合金铸铁或球墨铸铁制造。凸轮轴上配置有各缸排、进气凸轮。一般每隔两缸有一个轴颈支承，各轴颈的直径大于凸轮的最大尺寸，使拆装方便。车用发动机凸轮轴颈与轴承的配合间隙一般为 0.03—0.07 毫米，使用中磨损超过 0.15 毫米时，应修理或更换。在凸轮轴前端用键固定正时齿轮（或链轮）。四冲程发动机曲轴每 2 转，凸轮轴转动 1 转，使各缸进、排气门开、关一次。

【配气相位】用来表示内燃机的进、排气门实际开启和关闭时间的曲轴转角。在理论上，进、排气门应当在活塞位于上、下止点时开启或关闭，但实际上，内燃机中进、排气门都实行提前开启和延迟关闭。提前开启的目的是使活塞达到止点位置时其开度最大，以使气缸内顺利地进行进气或排气过程。气门延迟关闭的目的是延长进、排气的时间，以便利用气流的惯性使进气充足、排气彻底。配气相位中，进气门在上止点前早开角为 10° — 30° ，在下止点后晚关角为 40° — 70° ；排气门在下止点前早开角为 40° — 60° ，在上止点后晚关角为 10° — 30° 。

【气门间隙】从调整螺钉顶端至气门杆顶端的间隙。留有此间隙的

目的在于使气门在任何情况下,甚至在气门及其传动机构受热膨胀后都能紧密地关闭。内燃机产品对气门间隙都有规定的数值,过大或过小都将导致工作恶化。在使用中应根据实际情况利用调整螺钉正确地调整气门间隙。

【内燃机润滑系统】将一定数量的清洁润滑油送到各运动件磨擦部位,同时起到润滑、冷却、净化磨擦表面作用的装置。内燃机用各种润滑方式和特点见表。

润滑方式	特 点
掺混润滑	汽油中掺入约 5% 润滑油,经化油器雾化后,借此掺混的油雾润滑各摩擦部位。
压力间歇润滑	润滑油在微型泵控制下定期进入摩擦部位。
压力循环润滑	在机油泵作用下,润滑油以一定压力进入摩擦部位。
飞溅润滑	将润滑油飞溅在摩擦表面。
油雾润滑	靠润滑油雾,使润滑油附着于摩擦部位。

小型曲轴箱扫气二冲程汽油机采用掺混润滑,也可采用压力间歇润滑。大多数内燃机为复合方式润滑系统,采用压力循环润

滑各主要轴承，用飞溅润滑气缸壁、凸轮，用油雾润滑气门摇臂、连杆小头等处，润滑系统主要部件有机油泵、机油滤清器和机油冷却器等。

【内燃机润滑油】润滑运动件接触表面的油料。汽油机用润滑油又称车用机油，柴油机用润滑油又称柴油机油，俗称机油。车用机油分 HQ—15、HQ—10、HQ—6、HQ—6D、HQ—8D 等牌号，其凝固点分别为 -5°C 、

-15°C 、 -20°C 、 -30°C 、 -35°C 。一般夏季用 HQ—10（10 号），冬季用 HQ—6（6 号）油。柴油机油牌号分 HC—14、HC—11、HC—8，凝固点分别为 0°C 、 -15°C 、 -20°C ，一般夏季用 14 号，冬季用 8 号或 11 号。凝固点高的油其粘度也高，选用机油应考虑粘度随温度变化的特性。适于夏季用的机油到冬季就会变得太稠，适于北方用的机油在南方就嫌过稀。因此必须按地点和温度变化，选用和更换机油。

【机油泵】用来使机油压力升高和保证一定的油量，向各摩擦表面强制供油的部件。内燃机广泛采用齿轮式和转子式机油泵。齿轮式油泵结构简单，加工方便，工作可靠，使用寿命长，泵油压力高，得到广泛应用。转子泵转子形体复杂，多用粉末冶金压制。这种泵具有齿轮泵同样的优点，但结构紧凑，体积小，在内燃机上的应用越来越多。

【机油滤清器】用来滤清机油中的金属磨屑及机械杂质的部件。它可以保护摩擦表面，其性能好坏直接影响到内燃机的大修期限和使用寿命。在润滑系统中一般装有粗滤器和细滤器。粗滤器可滤

去机油中直径为 0.05—0.1 毫米较大的杂质，流动阻力较小，串联于机油泵与主油道之间。其结构有金属片缝隙式和线绕式两种。细滤器采用毛毡、棉纱压制滤清片等作滤芯，或用机械离心式，由于流动阻力较大，大都并联在油路中，约有 5—10% 润滑油不断通过细滤后流回油底壳。现代中小型内燃机已广泛使用纸质滤芯滤清器，可滤掉 0.01—0.04 毫米杂质，滤清效果好，流通能力大，结构简单，体积小，重量轻，可串联于油路中使用。其缺点是纸芯易于堵塞、撕裂，工作寿命约 260—400 小时就需更换。滤清器一般安装在发动机外侧，以便于更换滤芯。

【机油散热器】对机油进行强制冷却，以保持机油在适宜的温度范围内工作的部件。一般可分以空气或水为冷却介质两种类型。水冷式机油散热器与冷却系散热器相似，在车用内燃机上，两者放在一起，可用冷风进行有效的冷却。在热负荷不高的内燃机中，不装机油散热器。

【内燃机冷却系统】冷却内燃机的高温零件，使发动机在最适宜的温度范围内工作，以保证发动机工作的可靠性、耐久性和良好的动力性、经济性的装置。冷却方法分为水冷和风冷两种。水冷系统冷却效果较好，冷却均匀，运转噪音小，得到了广泛的应用。冷却水在内燃机中进行循环的方法不同，分为自然循环和强制循环两类。

【自然循环冷却系统】利用水的密度随温度而变化的特性，使冷却水在冷却系统中进行循环的装置。其优点是结构简单，在一定程度上可自动地调节冷却的强度。缺点是冷却不均匀，下部的水温

低，上部的水温高，局部区域由于冷却强度不够而过热。自然循环冷却可分为蒸发式、冷凝器式和热流式三种。蒸发式冷却系统缸体、缸盖的冷却水直接与蒸发水箱相通，内燃机工作时，热水与冷却水进行上升、下降循环。当水箱中的水温升到沸点后，便开始沸腾，在吸收大量的热以后成为蒸汽散入空气，保持了整个冷却系统的温度在水的沸点附近。工作时，冷却水在不断消耗，每千瓦功率，一小时约消耗 0.7—1.4 公斤，因此必须按时加水，在缺水地区会带来很大不便。冷凝器式和热流式都能克服冷却水消耗量大的缺点，但装了风扇，结构复杂得多，而且冷却效果仍不理想，很少使用。

【强制循环冷却系统】由水套、水泵、散热器及风扇等组成的水冷系统。车用内燃机大都采用强制循环冷却系统，在工作时，利用水泵使冷却水在冷却系统内强制流动，冷却水由水泵出口通过分水管进入水套，冷却高温零件后的热水经过节温器进入散热器上部，流过散热器下部时，经风扇冷却，热量散入空间。冷却后的水在水泵作用下再进入发动机内进行不断冷却循环。散热器前装有百叶窗，可调节冷却空气的流量，以便根据季节的不同调节冷却强度。节温器在水温低于 70℃ 时关闭，使冷却水不流经散热器，只在发动机水套内小循环，以便冷起动后水温很快升高，让发动机进入最佳热力状态。

【水泵】用来提高冷却水的压力，使水在冷却系统中强制循环的部件。离心式水泵具有结构简单，制造容易，尺寸小，工作可靠，当水泵因故障停止工作时，冷却水仍可进行自然循环，防止内燃机因局部过热而损坏等优点，因而得到广泛的采用。水泵叶轮上的

叶片常用径向的直叶片，有时为了提高水泵的效率，将叶片制成一定形状的多曲叶片。水泵轴和泵体采用机械式水封，以防止水泵泄漏。当使用中由于磨损而漏水时，应更换水封。

【冷却水散热器】将冷却水所携带的热量散入大气以降低冷却水的温度，起到强制冷却作用的部件。由上水箱、散热芯部和下水箱三部分组成。上水箱顶部为冷却水的加水口。由水箱盖封闭，使冷却系统成为一个封闭系统。在水箱盖中装有空气、蒸汽阀，使冷却系统的压力自动保持在 0.9—1.2 个大气压。提高蒸汽压，可提高冷却水的沸点，不仅与外界大气温差加大，还可提高整个冷却系统的散热能力。

【冷却风扇】安装在散热器后部，提高散热能力的部件。常用的是轴流式风扇，其结构简单，布置方便，低压头时风量大。常用薄钢板冲制成风扇的叶片，断面冲压成弧形，与旋转平面成 30° — 60° 倾角。用工程塑料制作的叶片为翼形断面。叶片数一般为四片或六片。有时将叶片间的夹角做成不相等的，以减小旋转时产生的振动和噪音。风扇叶片装在皮带轮上，经常与水泵装在同一轴上。由曲轴前端皮带轮通过三角皮带驱动。现代车用发动机，在风扇与皮带轮之间装有硅油液力离合器，可调节风扇转速，减少用于驱动风扇的功率损失（约 50%），而且还能减少风扇噪音。

【节温器】调节冷却系统的冷却强度，保证内燃机在最佳热力状态下工作的部件。除调节冷却空气流量的方法外，还可调节流经散热器水流量。节温器一般在发动机出水口有上、下二个阀门，由感温器控制开、关。当水温低于 $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 时，上阀门关闭，下阀门

打开，使发动机出水直接进入水泵，此时称小循环。当水温高于 80°C 时，上阀门打开，下阀门关闭，冷却水流向散热器，冷却后进入水泵。此时称大循环。节温器的感温器用热膨冷缩原理使阀门升降。原用弹性皱纹筒式感温器，内装乙醚，因制造复杂，使用寿命短，现在逐渐为腊式感温器取代，它工作可靠，寿命较长。

【内燃机供给系统】向气缸供给空气和燃料，并形成混合气的装置。由于汽油机和柴油机使用燃料的特性不同，其混合气形成和着火方式都有很大不同，如表所示。因此，两种内燃机的供给系统有很大差别。见“汽油机供给系”及“柴油机供油系”。

燃 料	汽 油	柴 油
挥发性	好	差
点燃性	好	差
自燃性	差	好
混合方法	在气缸外部用化油器形成均质混合气	用高压泵及喷油器将油喷入缸内形成不均质混合气
着火方式	外源点火	压 燃

【空气滤清器】用来清除进气中的灰尘和杂质的部件。将清洁的空气送入气缸内，以减少气缸与活塞及气门组件之间的磨损。对空气滤清器的要求是高的滤清效果，低的流动阻力，能连续长期工作而维护简便。滤清器所用滤清方法有三种：（1）惯性式，利用

杂质的密度比空气的密度大，当空气旋转或拐弯时，离心惯性力的作用使杂质从气流中分离出来；（2）过滤式，使进气流过金属滤网或滤纸等，将杂质阻挡而粘附在滤芯上；（3）油浴式，在滤清器底部有机油盘，使惯性甩出杂质粘滞在油池中，金属滤芯上粘有机油雾，空气流过滤芯时进一步被滤清。采用哪种滤清方式取决于内燃机的用途和环境条件。一般汽车采用油浴式滤清器。20世纪末以来，大多采用纸滤芯滤清器。环境含灰尘较多的拖拉机和工程机械用内燃机，需采用两种或三种滤清方式的组合式滤清器，以提高滤清效果。

【内燃机起动装置】完成内燃机起动过程所需的一系列机件。不同类型内燃机的起动转速要求不同，汽油机约 40—100 转/分，柴油机约 80—220 转/分。根据起动时能量提供的方式，可分为：（1）人力起动，包括手摇、拉绳、脚踏起动，装置简易，起动力矩不大，劳动强度较大，只适用于小型汽油机、摩托车、15KW 以下柴油机及车用机备用起动；（2）电力起动，主要采用直流串激电动机，具有结构紧凑、操作方便、可遥控、起动迅速等优点，在汽车拖拉机等中小功率内燃机中广泛应用；（3）压缩空气起动，起动扭矩大，可靠，但结构复杂，辅助设备多，成本高，笨重，适于船舶、机车等大中功率柴油机用；（4）汽油机起动柴油机，起动用汽油机短期功率为柴油机功率 20%，经传动机构带动柴油机，并可对柴油机进行预热，在较低温度下能可靠起动，但结构复杂、笨重，适于野外工作的拖拉机、工程机械等应用。

【起动电动机】向内燃机供给起动力矩的电动机。常用的起动电动机为串激式直流电动机，操作简便且可以遥控。其特性在低速时

输出的扭矩大，随着转速升高扭矩逐渐减小，很适合内燃机起动的要求。

【起动操纵机构】使起动电动机上的起动齿轮与飞轮上的齿圈进入啮合和接通起动机电源开关的机构。分为直接操纵式和电磁操纵式两种。前者用杠杆等机件连结，结构简单，但不能远距离操作，在汽车上已逐渐淘汰。后者用电磁线圈产生磁力，只要按下开关，即可使起动机工作，因此在汽车上得到广泛应用。

【起动离合机构】位于起动机的电枢轴与小齿轮之间具有单向传递扭矩作用的机构。当内燃机起动后，齿轮虽未脱开啮合，但起动机不能被内燃机带动，不会有超速危险。常用的啮合机构有滚柱式、摩擦片式和弹簧式三种，安装在小齿轮与起动机的电枢轴之间。

【起动辅助装置】包括减压装置、进气加热器、预热塞和电热塞等。减压装置可使压缩比高的柴油机在起动时降低起动扭矩，一般使进气门在起动前保持开启状态，减小压缩阻力，用手转动飞轮使发动机转速很快提高。当转速达到起动要求后，再使进气门正常关闭，柴油机即可起动。多缸机上，各缸减压气门设有联动机构。在大功率柴油机上，采用分级减压机构，使部分气缸先工作，预热发动机，其余缸再转入工作。为了改善中小功率柴油机在低温下起动性能，可在进气管中装进气加热器，在燃烧室装预热塞或电热塞。对发电机及机车用大功率柴油机，采用预热锅炉加热冷却水和润滑油，能达到在 -40°C 环境下起动柴油机。

【内燃机平衡分析】对消除或减弱内燃机工作时力和力矩不平衡性的方法的分析。这些不平衡的力和力矩主要包括往复惯性力、离心惯性力以及多缸机中的惯性力矩，它们周期性地变化并作用在机架上，产生振动，影响机器的可靠性和人员的舒适性，因此必须从结构上采取一些措施，在内部予以消除或减弱，以减小振动，减小主轴承与轴颈的摩擦，减小曲轴的变形。对于单缸内燃机的离心惯性力，只要在曲柄的对侧加置平衡重块即可平衡。对于往复惯性力的平衡方法，以双轴平衡法（又称兰彻斯特平衡机构）的效果较好，它加装一对大小相等、旋转方向相反的平衡块，其转速与曲轴相等而相位差 180° ，使其离心惯性力在气缸轴线方向之和与往复惯性力大小相等、方向相反而平衡。国产 195 型柴油机装有这种平衡机构。多缸机中采用合理的曲柄排列和气缸排列，使一部分主要惯性力和惯性力矩自身得到平衡。加装简单平衡块和采用双轴平衡法，对多缸机的平衡作用与单缸机相同。

【内燃机工作循环】混合燃气在内燃机气缸内作功的全过程。包括混合燃气的进气、压缩、燃烧膨胀作功和排气四个分过程。并由此四个过程构成内燃机的工作循环，它们相互顺序联系而不可分割。完成一个工作循环，活塞沿气缸壁上下的行程数可以不同，由此将内燃机分为二冲程内燃机和四冲程内燃机两大类。

【内燃机示功图】又称 $P-V$ 图。内燃机工作循环中气体压力随气缸容积而变化的曲线图。用于表示工质在内燃机汽缸中的实际工作情况。示功图中，上部顺时针循环封闭的曲线面积，定为正功，下部由逆时针循环封闭的曲线面积，为进、排气过程消耗的功，定为负功，两者面积之差表示内燃机一个工作循环向外界所作的功。

【四冲程内燃机】活塞往复四个行程,完成一个工作循环的内燃机。四冲程内燃机每个工作循环包括进气、压缩、膨胀做功和排气共四个过程,每完成一个工作过程,活塞在气缸中移动一个冲程。

(1) 进气过程:曲轴带动活塞由上止点向下止点移动,此时进气门开启,排气门关闭,活塞上部的气缸容积逐渐增大,缸内压力降低低于大气压力时,外界空气被大气压入气缸。由于进气管道、气门等对气体流动有阻力及活塞的高速运动,进气门关闭时,气缸内压力一般低于大气压力。流入气缸的新气与燃烧室内高温零件接触,并与前一循环气缸内的残余高温废气混合,而使进气终点温度升高;

(2) 压缩过程:当曲轴继续旋转半圈,活塞由下止点向上止点移动,气缸内气体被活塞压缩,其温度和压力随之升高,不仅给燃烧准备了有利条件,同时也为燃烧后燃气的膨胀做功创造了前提;

(3) 膨胀做功过程:压缩终了,进排气门都严密关闭,燃料在气缸中燃烧后,缸内气体的温度和压力迅速增高。高温高压的燃气以很大的力推动活塞向下膨胀做功,使曲轴旋转向外界输出动力。所以膨胀过程是内燃机循环中的做功过程,膨胀结束缸内气体压力和温度很快降低;

(4) 排气过程:仍由曲轴旋转带动活塞由下止点向上止点移动,此时排气门打开,进气门关闭,缸内的废气经排气门排出气缸。活塞到达上止点,排气终了时,“燃烧室容积”内遗留着未被排除干净的废气,称为“残余废气”。排气过程完毕后重复下一个循环的进气,使内燃机连续不断地工作。

【二冲程内燃机】活塞往复运动两个冲程,曲轴旋转一周,完成进气、压缩、做功和排气四个过程即一个循环的内燃机。与四冲程机比较,主要区别是没有单独的进、排气机构,它是在气缸壁上

有三个不同位置的进、排、换气孔。在第一冲程中，活塞自下止点向上移动，已充入气缸内的混合气被压缩。活塞接近上止点时，活塞下方曲轴箱产生真空，混合气从进气孔进入曲轴箱。第二冲程中，活塞上方缸内气体向下膨胀做功，当进气孔被活塞裙部关闭时，活塞下方曲轴箱内混合气被预压缩而压力提高，活塞接近下止点时，排气孔先打开，高压废气经排气孔排出。活塞下方曲轴箱内受预压缩的混合气，经扫气孔流入气缸，并可将缸内废气驱除出去，称为气缸的换气过程。与四冲程机比较，二冲程机具有以下优点：配气机构简单，单位马力机重较小，造价较低；曲轴每转一周就有一次做功，因而运转时比较平稳；当内燃机排量和转速相同时，二冲程机可比四冲程机提高功率 50—80%。二冲程机的缺点是：由于换气时间短促，气缸充气不足，排气不净，以及换气泵须消耗一定功率，因此二冲程机的效率较低；二冲程机工作冲程频繁，因此机械零件受热和受力次数多，容易磨损。二冲程机换气过程进行得好坏，对动力性和经济性的影响很大。二冲程机的换气方式，见“横流换气”、“回流换气”与“直流换气”。

【横流换气】扫气孔与排气孔位于气缸两侧的壁上，是二冲程内燃机最早采用的换气方式。其扫气效果很差，新气容易从排气孔排出，而且缸壁两侧温度不均匀易发生形变，已很少使用。

【回流换气】扫气孔不对着排气孔，使扫气新气的主流在气缸内壁流动时转弯而形成回线，再将废气挤出缸外的换气方式。在大型机中扫气孔、排气孔可沿气缸四周排列好几个。在小型机中，一般排气孔为一个，扫气孔为两个，简称“三孔回流扫气”，广泛用于摩托车等的汽油机上。

【直流换气】扫气空气沿气缸轴线产生旋转运动，形成一个“空气活塞”，将废气扫出气缸的换气方式。其缺点是结构复杂，仍需要配气机构驱动排气门，还要增添扫气泵等。但因其换气质量好，在大型二冲程内燃机上得到广泛采用。

【曲轴箱扫气】在小型二冲程汽油机中，为简化结构而采用密封的曲轴箱来代替扫气泵的扫气方式。因其扫气压力不高，扫气后气缸中前一个循环残余在缸内的废气量高达 25—40%，扫气效率较低。

【内燃机工作循环参数】用来表征内燃机工作循环进行过程中工质的热力状态，包括工质的压力和温度的参数。可通过实际内燃机示功图的测试分析得到，对新设计的内燃机可通过工作过程热力计算来求取，并绘制示功图作为内燃机设计计算的依据。一般内燃机工作循环各工作过程终点工质的状态参数见下表。

工作过程	状态参数	汽油机	柴油机
进气 终点	压力 P_a (兆帕)	0.075—0.090	0.080—0.095
	温度 T_a (°C)	80—130	50—70
压缩 终点	压缩比	6—9	12—22
	压力 P_c (兆帕)	0.70—1.5	3.0—5.0
	温度 T_c (°C)	300—500	500—700
燃烧 终点	压力 P_z (兆帕)	3.0—5.0	5.0—10.00
	温度 T_z (°C)	1900—2500	1500—1900
膨胀 终点	压力 P_b (兆帕)	约 0.4	约 0.3
	温度 T_b (°C)	930—1230	730—930
排气 终点	压力 P_r (兆帕)	0.105—0.12	0.105—0.12
	温度 T_r (°C)	600—900	500—700

【内燃机性能指标】指内燃机的动力性和经济性指标。有两大类：

(1) 以气缸内工质对活塞做功（示功图）为基础的性能指标，有平均指示压力，指示功率，指示热效率，指示燃料消耗率等；
(2) 以内燃机曲轴飞轮端对外界输出有效的性能指标，包括有效功率、平均有效压力、有效热效率、有效燃料消耗率等。两类指标的关系，通过内燃机机械效率给出他们之间的比值。见“机械效率”。

【平均指示压力】单位气缸工作容积每循环所作的指示功。如果工质对活塞做功越多，则平均指示压力越大，因此平均指示压力可用来直接评价各种不同排量内燃机的作功能力。它又可设想为一个恒定不变的压力，作用在活塞顶上，使活塞移动一个冲程所作的功等于每一循环的指示功。

【指示功率】工质在单位工作时间内对活塞所作的有用功。

【指示热效率】燃料燃烧所放出的热量转变为指示功的有效程度，它等于实际循环的指示功与所耗燃料的发热量之比。

【指示燃料消耗率】内燃机每 1 小时内发出每千瓦的指示功率所需要的燃料量。内燃机指示燃料消耗率越低，则指示热效率越高。

【空燃比】内燃机工作时，气缸内燃烧所消耗的空气量与燃料量之比。燃烧 1 公斤燃料，完全燃烧时所需的空气量，称为理论空燃比，汽油的理论空燃比为 14.8，柴油为 14.7。

【燃空比】内燃机所消耗的燃料量与空气量之比。为空燃比的倒数。

燃料完全燃烧时的理论燃空比，汽油为 0.0676，柴油为 0.0699。

【过量空气系数】内燃机燃烧 1 公斤燃料所消耗的实际空气量与理论上完全燃烧所需要的空气量之比，用 α 表示。 α 也表示了燃烧室内混合气的浓度。当 $\alpha=1$ 时，称为理论混合气； $\alpha>1$ 时，称为稀混合气，即燃烧后，废气中剩有空气； $\alpha<1$ 时，称为浓混合气，燃烧中空气不足，燃料燃烧不完全而费油。但在汽油机中，浓混合气可以提高作功能力，因此在全负荷时，常供给浓混合气。

【充气效率】实际进入气缸的新鲜充量与以进气状态充满气缸工作容积的新鲜充量之比值，它反映了内燃机进气过程的完善程度。所谓进气状态，对非增压发动机而言，是指空气滤清器以后进气管内的气体状态；对增压发动机而言，是指增压器或中冷器后进气管内的状态。充气效率与平均有效压力及升功率成正比，是影响内燃机性能极为重要的参数之一。

【最高燃烧压力】每循环作用在活塞单位面积上的最大压力。是考核内燃机机械负荷的一项指标，一般汽油机的最高燃烧压力为 3—5 兆帕，柴油机为 5—10 兆帕。

【泵损失】在四冲程非增压内燃机的示功图上，由排气及进气过程所组成的面积。它在循环中是负功，即由曲轴驱动活塞作功，约占内燃机机械损失功率的 10—20%。

【机械损失功率】内燃机维持本身运转所消耗的功率。它包括：活塞与气缸各轴承副等运动零件消耗的摩擦功；驱动配气机构、水

泵、风扇、机油泵、燃油泵和发电机等附件所消耗的功率。

【有效功率】由内燃机曲轴输出的功率。在数值上等于指示功率与机械损失功率的差值。内燃机的有效功率可以利用各种测功器和转速计来进行测量，然后再进行计算而得出。在内燃机铭牌上标明的有效功率称标定功率，与标定功率相应的转速称为标定转速。

【平均有效压力】一个假想为作用在活塞顶上的恒定不变的压力，使活塞移动一个冲程所作的功等于每循环所作的有效功。平均有效压力是内燃机的一个重要动力性指标，当气缸容积一定时，平均有效压力越大表示有效扭矩越大，发动机的动力性越好。

【升功率】每升气缸工作容积所输出的有效功率。是衡量内燃机动力性的重要指标。升功率高，则发动机紧凑，体积小，功率大。升功率范围：车用汽油机在 22—50 千瓦/升，车用柴油机在 11—25.8 千瓦/升。

【机械效率】内燃机的有效功率与指示功率之比。表示内燃机的机械损失。影响机械效率的因素很多，如转速、负荷、润滑油品质及发动机冷却状况等。

【有效效率】转变为 1 千瓦小时有效功的热量与完成 1 千瓦小时有效功所消耗燃料的热量之比。常用来衡量燃料所含的热量转变为有效功的有效程度。

【有效燃料消耗率】又称有效燃油消耗率、有效油耗率。内燃机在

1 小时内发出每千瓦有效功率所消耗的燃油量。以克/千瓦·小时为单位来表示。有效燃料消耗率是表示不同内燃机在燃料消耗方面的经济性指标，它与内燃机的结构、工作情况、技术保养以及调整工作的质量等有关。

【内燃机热平衡】研究内燃机消耗燃料总热量的分配。一般包括四大项：（1）转化为有效功的热量 q_e ；（2）冷却介质带走热量 q_c ；（3）高温废气带走的热量 q_r ；（4）其他热损失 q_s 。按总热量的百分比表示，热平衡的式子为 $q_e + q_c + q_r + q_s = 100\%$ 。汽油机与柴油机的热平衡见下表：

热量（%）	汽油机	柴油机
有效功 q_e	25—30	30—42
冷却介质带走 q_c	25—40	15—35
废气带走 q_r	30—40	25—45
其他热损失 q_s	5—10	2—10

【内燃机特性曲线】用实验的方法在一定条件下测量内燃机的动力性与经济参数，如有效功率、平均有效压力、有效扭矩、燃料消耗率等，随工况如负荷、速度等的变化规律，将其用曲线表示出来。对内燃机特性的研究与测试，不仅给内燃机性能的评价提供了依据，还给配套机械为选配内燃机提供了重要参考。内燃机特性主要指：负荷特性、速度特性、调速特性、螺旋桨特性、万有特性等。

【负荷特性】内燃机化油器调整到最佳性能，点火提前角保持在最佳位置，转速保持一定时每小时有效燃料消耗率随负荷而变化的关系。它反映了汽油机在各种负荷情况下工作时的经济性。由于转速一定，内燃机的有效功率、有效扭矩与平均有效压力是互成比例的，因此，负荷的变化也可以用有效扭矩或平均有效压力来表示。对转速不变的固定式内燃机，最常用负荷特性作评价依据。对于汽车发动机，由于工作转速经常变化，需要测定各种转速下的负荷特性，才能综合评定其经济性。

【速度特性】内燃机节气门开度一定，点火提前角维持在最佳数值及化油器已调整适当的情况下，扭矩、功率、燃料消耗率等性能指标随转速而变化的关系。在节气门全开的情况下取得的速度特性称为内燃机的外特性，此时内燃机的功率最大，代表该机所能达到的最高性能。在节气门部分打开的情况下取得的速度特性称为部分特性。不同的内燃机，其速度特性上各点的数值不同，但其曲线的变化规律都相似。

【螺旋桨特性】船用内燃机的速度特性。其功率随转速的变化按螺旋桨特性 $N_e = A n^3$ 变化。用来评定船用内燃机的性能及确定船舶的经济航速。式中 A 为常数，决定于螺旋桨的结构。

【调速特性】当柴油机的控制拉杆固定在某一位置（即某一给定转速）时，调速器能随负荷的变化自动控制喷油泵的供油量，使柴油机的功率在零到最大值之间变化，此时扭矩与转速的变化关系。可见，柴油机的调速特性是由调速器的静力特性所规定的，它可

以通过实验测定。

【万有特性】内燃机各主要性能参数相互关系的综合特性，常以转速为横坐标；平均有效压力为纵坐标而画出等功率、等比油耗、等排温曲线。对全面评价内燃机性能有重要意义。

【内燃机扭矩储备系数】用来说明内燃机克服短期过载的能力，在数值上等于最大扭矩与标定工况扭矩之差与标定工况扭矩的比值，可由外特性曲线求取。

【内燃机增压】预先给将进入气缸与可燃气体混和的空气加压，使之被压缩而提高空气密度的一种技术措施。在气缸容积不增加的条件下，提高空气密度无异于提高了燃气混合气的含氧量，同时也增加了燃气量。这样，既可使燃烧更充分又使燃油量增多，从而可大幅度提高内燃机的功率。若对压缩空气在进入气缸前进行“中冷”，还能降低排气中的有害成分，有利于环境保护。内燃机增压技术，从 20 世纪 50 年代之后，便在大中功率的柴油机上广泛应用，并取得很大的经济效益，高增压柴油机比常压柴油机功率提高二倍以上。汽油机增压技术则因某些原因只在高原大气压力减小的情况下，为恢复汽油机原来的功率时使用。内燃机增压按手段的不同，可分为机械增压、惯性增压、废气涡轮增压及气波增压等。按压力的大小又可分为低增压（压力小于 0.15 兆帕）；中增压（压力在 0.15—0.25 兆帕之间）；高增压（压力在 0.25—0.40 兆帕之间）；超高增压（压力大于 0.4 兆帕）。

【机械增压】直接耗用内燃机的机械能而使压气机工作，从而将即

将进入气缸的空气进行压缩的一种技术。一般由内燃机曲轴通过传动机构带动一台离心式压缩机或容积式（罗次泵）压缩机来实现空气增压。由于机械增压的方法直接消耗内燃机功率，使其经济性下降，故这种增压法用的较少，只为低增压内燃机采用。

【惯性增压】利用进、排气管内运动气体的惯性效应和波动效应，提高充气效率，达到增压效果的一种简便方法。如曲轴箱扫气二冲程汽油机，改变排气管长度，应用排气动力效应，可使最大功率提高 20—30%。对四冲程多缸机，改变进气管总管与支管长度，应用进气管动力效应，也可提高功率，但不太适应变工况内燃机，只在少数汽、柴油机上应用。

【气波增压】利用曲轴驱动气波增压器来实现增压。气波增压器由空气定子、燃气定子和转子组成，空气定子与内燃机进气管连通，燃气定子与排气管连通，使两种气体工质直接接触而不混合，并通过压力波来传递能量，因此它是一种能量转换器。转子消耗内燃机功率约 1—1.5%。气波增压器提供的压力在整个转速范围内变化不大，能量转换过程也不受转子惯性的影响，使内燃机具有良好的速度和负荷响应特性，尤其低速扭矩特性、加速性好，能满足车用发动机增压的要求，增压压力可达到 0.25 兆帕。但气波增压器运转时，进排、气噪音大，结构不如涡轮增压器紧凑，体积和重量大，故目前应用较少。

【废气涡轮增压】利用内燃机的废气能量推动涡轮旋转，涡轮再带动与它同轴的压气机，使空气进行压缩后，提高密度供入气缸，达到增压目的。增压技术在 1923 年开始应用于柴油机，目前已得到

普遍应用。根据废气能量的利用方式可分：(1) 定压增压系统，其特点是各缸排气都进入一根粗大的排气总管，使进入涡轮的燃气压力基本稳定，可提高涡轮效率，但排气能量中的脉冲能量不能利用，使内燃机的加速性和低负荷性能变差，只适于高增压，工况变化不大的内燃机采用；(2) 脉冲增压系统，其特点是排气支管、总管做得细而短，将排气时间互不重合的几个气缸（4 缸机为二个缸，6 缸机为三个缸）的排气管连入一根总管，以保持尽可能大的脉动压力，有利改善变工况性能，但涡轮在脉动气流状态下工作效率较低。为克服两种系统的缺点，已研制出脉冲转换器，把两种系统的优点结合起来，并能满足气缸数不是 3 倍数的柴油机增压使用。根据所用涡轮的不同，可分为：(1) 径流式涡轮增压器，适用于流量较小的中小功率柴油机；(2) 轴流式涡轮增压器，适用于流量较大的大型柴油机。现代涡轮增压器是大批量生产的系列化产品，可满足不同功率、不同类型内燃机增压的要求。废气涡轮增压内燃机，实质上是往复活塞式内燃机与旋转式叶片机相结合的一种复合式发动机。

【复合增压】内燃机增压的一种措施。它是将机械增压与涡轮增压两者联合使用的一种内燃机增压方式。同时安装有上述两种增压器。常见于二冲程柴油机使用，以改善起动和低速低负荷工作状态。

【内燃机噪声】内燃机工作时所发出的超过环境保护规定允许分贝值的各种声响。降低内燃机运行时发出的各种声音，是减小内燃机噪声的重要手段。内燃机的噪声来源有三种，即机械噪声、燃烧噪声和气体动力噪声。机械噪声产生的原因一般是由转动机件

偏心产生振动或由于传动机之间配合间隙失当(过大)、啮合不严密而产生撞击所致。配气机构是内燃机的主要机械噪声源,应通过精密加工、改进凸轮设计等措施予以克服。燃烧噪声产生原因是气缸内燃气混合气燃烧时产生的压力波引起高频振动所致,经缸套传至外界。实践证明以水冷代替风冷,用汽油机代替柴油机,可降低内燃机燃烧噪声的水平。气体动力噪声产生的原因是气体扰动及气体与机件互作用所致,内燃机主要气体动力噪声源是进排气系统。其他如冷却风扇、压气机、二冲程内燃机的换气过程也产生气体动力噪声。用局部隔声或加装隔音罩,排气系统加消声器等措施可进一步降低噪声水平。

【内燃机排气净化】 内燃机排气中包含许多成分,其中一氧化碳、碳氢化合物及氮氧化物、颗粒(黑烟及油雾等)等是有害成分,造成对大气的污染,为污染物质,其总和在柴油机排气中不到1%,在汽油机中最大可达5%左右。内燃机排气净化主要研究如何降低以上有害物的排放量。排气净化方法可归纳为三方面:(1)前处理,对燃料和空气进入发动机气缸前进行处理;(2)机内净化,按排气净化的原则来设计及改进发动机的供给系、燃烧系及点火系;(3)后处理,在废气排入大气前,在排气系统中应用净化装置,以减少排入大气中的有害成分。

【汽油机排污防治措施】 从当前净化技术来说,还没有一种方法能将排气中的有害成分都加以防治,为此,必须多种防治措施综合应用。总的原则,要根据现行排放限制标准与车辆排放水平综合考虑,合理选用多项最经济有效的净化措施,使达到排气限制标准。表中给出汽油机的排污防治措施。

【柴油机排污防治措施】要因地制宜，根据排气限制标准及性能要求，采用多种防治措施综合使用，目前研究的防治措施及效果见下表。

【曲轴箱强制通风】气缸内一部分燃气不可避免地会经过活塞环的间隙漏入曲轴箱中，结果使曲轴箱内压力增高，机油变质，油气排入大气造成污染（曲轴箱排出碳氢占碳氢总排出量的 25%）。目前大多采用封闭式曲轴箱强制通风装置。从空气滤清器引出新鲜空气进入曲轴箱内与气缸窜气混合后，从挺柱推杆侧面进入气缸盖罩，由计量阀（PCV 阀）控制吸入进气管在气缸内烧掉。PCV 阀是一个单向阀，能根据进气管负压大小自动调节流量，万一进气管回火时，能关闭通道，以免火焰传到曲轴箱中去。

【催化反应器】一种装有催化剂的机外排气净化装置。像消音器那样串装在排气管中，使排气中的有害成分：一氧化碳、碳氢化合物和氮氧化物，进行化学反应后，转化为无害的二氧化碳、水汽和氮气，再排入大气。催化器内装的催化剂，是一种金属氧化物，含有贵金属铂、钯等，20 世纪 70 年代以来发展稀土金属氧化剂也取得成功。催化剂可分三种：（1）氧化催化剂，能使一氧化碳和碳氢起氧化反应；（2）能对氮氧化物起净化作用的称还原型催化剂；（3）20 世纪末已研制成能对三种成分同时起净化作用的三元催化剂，但它要求供给燃烧室混合气的浓度在理论完燃比附近，因此需在排气管中按装氧传感器，对化油器实行闭环控制，自动调整混合比。催化剂的形状分颗粒状、陶瓷蜂窝状和金属带状等。催化反应器的结构，根据气流方向可分为上流式、下流式和轴流式

三种。一般催化剂容易铅中毒而失效，因此，装上催化反应器的汽油机要求使用无铅汽油。

汽油机排污防治措施

分类	排污防治措施		防治效果				备 注
			CO	HC	NO _x	微粒	
前处理	汽油无铅化 代用燃料：甲醇			↓	↓	↓	气门磨损 ↑
低污染发动机设计（机内净化）	燃烧系	降低面容比 S/V 降低压缩比 缩小激冷区 加强空气涡流	↓	↓↓↓	↓		
	点火系	延迟点火提前角 加强点火能量（高能点火）		↓↓	↓		功率 ↓ 油耗 ↑
	供给系	自动恒温进气 提高化油器精度 改进配合相位	↓↓	↓↓	↓		
	汽油喷射 稀薄燃烧（层状给气） 废气再循环（EGR）		↓↓	↓	↓↓		功率 ↑ 油耗 ↓ 结构复杂 油耗 ↓ 结构复杂
后处理	二次空气喷射，热反应器 再次燃烧法 催化反应器		↓↓↓	↓↓↓	↓		消耗燃料
	曲轴箱封闭系统（PVC 阀） 防止汽油蒸发措施			↓↓			简单易行

柴油机排污防治措施

分类	排污防污措施		净化效果				备 注
			CO	HC	NO _x	微粒	
前处理	燃料中添加钡盐消烟剂 燃料添水或乳化 进气管喷水 喷压：无中冷 有中冷		↓	↓	↓ ↓ ↑ ↓	↓ ↓	引起二次公害
机 内 净 化	废气再循环				↓	↑	大负荷时 CO ↑
	燃烧室	采用分隔式燃烧室 直喷式加大燃烧室径深比	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓	相对直喷式油耗 ↑
	供给系	延迟喷油定时 提高喷油速率 加大喷嘴喷孔 减小多孔喷嘴压力室容积 预喷射	大负 ↑ ↓	小负 ↑ ↓	↓ ↓ ↓ ↓	↑ ↓ ↑	功率↓油耗↑ 油泵负荷↑ 控制复杂
	进气系	加强进气潜心流 改变气门重叠 增加充量使 FA ↓	↑ ↓	↑ ↓	↓ ↓		
后处理	除尘滤清净化 蜂窝陶瓷过滤器 催化反应器		↓	↓		↓ ↓	体积太大

【废气再循环】简称 EGR 法。将排气管中废气的一部分返流至进气管后再吸入气缸。它是控制内燃机氮氧化物排放的主要措施。废气再循环不仅减少排气总量，并使进气稀释，减少了进入气缸混合气的能量，降低了燃烧的最高温度，降低了氧的相对浓度，从而有效地抑止了燃烧过程中氮氧化物的生成量。一般废气再循环随负荷增加，最大值控制在 20% 左右，可使氮氧化物下降 60—

70%，而油耗率上升只有3%左右。在内燃机怠速、暖机、全负荷工况时，为保证燃烧稳定，及全开油门时的动力性，控制系统应使EGR不起作用。

【非扩散红外分析仪】简称为NDIR。用来检测内燃机排气中一氧化碳及碳氢浓度的一种仪器。测定一氧化碳浓度范围为0—10%，二氧化碳为0—16%，碳氢为0—5000ppm（1ppm=百万分之一浓度，即10000ppm=1%）。用来分析碳氢时，对碳氢中的稀烃和芳香族感度很低，所以，应用氢火焰离子型分析仪分析碳氢。

【氢火焰离子型分析仪】简称FID。用来测量排气中碳氢浓度的仪器。其工用原理为：利用有机碳氢化合物在氢火焰（2000℃）的高温燃烧时，生成自由离子产生微电流信号，其电流大小和碳素数，试样流量和浓度成正比。经电流放大器后加以测量和记录，可测出从几个到50000ppm浓度的碳氢。它比NDIR测量碳氢的精度高，线性关系好。因此在国际上排放标准中，规定用FID测量碳氢。由于碳氢中各组分的沸点不同，高沸点的碳氢在取样过程中会产生凝缩。在直接取样测量时，应加热取样管路，汽油机为150℃左右，柴油机应在200℃以上。

【化学发光分析仪】简称CLD。专测氧化氮的仪器。排气中的氧化氮几乎全是一氧化氮和二氧化氮，通过转换器将二氧化氮分解成一氧化氮，并由臭氧发生器产生臭氧，使两者反应，放出激态分子，能发射出光量子，其强度与一氧化氮量成正比，利用光电倍增管将光能转变为电信号输出，可推算一氧化氮浓度。其优点为感应度高，可达0.1ppm。在1万ppm范围内输出呈线性关系，适

于连续检测。

【滤纸式烟度计】包括采样器和检测器两部分。采样器为一个弹簧泵。前端有探头插入排气管中央取气。吸气泵每次吸气量为 330 毫升，时间小于 2 秒。排气通过滤纸，碳烟就在滤纸上留下试样。检测器利用反射原理，测定滤纸的污染程度，由指示表上的 10 分刻度读出，白色为 0，黑色为 10。滤纸式烟度计结构简单，调整方便，测定值可靠性高，价格便宜，而且滤纸试样直观性好，便于保存。缺点是只宜稳态工况测定。

【透光式烟度计】利用透光衰减来测定排气烟度的烟度计。内部有测试管和校正管。将测定的排气引入测试管，在管子两端有光源和光电池，可测出光线的衰减量。校正管内通入干净空气。当光源和光电池转向校正管，作零点校正。烟度记录器指示值：无烟为 0，全黑为 100。由于排烟是连续不断通过测试管的，所以不论稳态、非稳态和过渡工况的烟度都能测定。但由于光学系统的污染及排烟中的水滴和油滴，也可能作为烟度显示出来，容易产生误差，因此必须注意清洗。

【风冷内燃机】采用风冷系统以空气作为冷却介质的内燃机。其风冷系统主要由风扇、导风罩、导流板和带散热片的缸体、缸头等组成。导风罩、导流板可将风扇吹出的冷风均匀地分配给各个气缸，冷风流经散热片时，可有效地将气缸内缸盖的热量带走，使各气缸均匀冷却。风冷式内燃机比水冷式内燃机结构简单、维修容易，对地区、气候适应性较好。这是因为风冷却系统比水冷却系统结构简单重量轻，无漏水、冰冻、结垢等故障之故。但与水

冷式内燃机比，也存在不如水冷却均匀、热负荷大，工作可靠性降低等缺点。

【煤气机】以发生炉煤气、城市煤气、天然气、沼气等可燃性气体为燃料的内燃机。其工作原理与气油机相似。气体燃料与空气在混合室混合后进入气缸，当活塞进行到压缩过程结束时，混合气体温度仍低于其自燃温度。此时，可用电火花点燃，也可以喷入少量柴油引燃混合气，开始燃烧过程。根据点燃方式的不同可分为火花式煤气机和柴油煤气机两种。

【旋转活塞式内燃机】简称转子内燃机，是一种二十世纪六十年代初发展起来的新型结构的内燃机。其气缸体的内壁有“8”字型气缸壁面，两侧面同气缸盖和中间隔板封闭，缸体和缸盖均为固定件。气缸内装有弧边三角形柱体的转子，转子一端固定有与转子同心的内齿圈。外齿轮固定在缸盖上。内燃机主轴的主轴颈支承在与外齿轮同心的主轴承上，偏心轴颈穿在与内齿圈同心的转子轴承孔内。在内燃机运转中，转子上的内齿圈围绕固定外齿轮啮合旋转作行星运动，即转子不仅绕固定外齿轮的中心（主轴中心）公转，同时又绕其自身中心自转，转子自转 1 圈，可使主轴旋转 3 圈。工作原理与往复活塞式内燃机一样，旋转活塞三个顶点在旋转时，永远与壁面型线接触，将气缸分成三个工作腔，当转子自转 1 圈，每个腔的容积由最小到最大，再由最大到最小变化 4 次，可对应完成进气、压缩、膨胀做功、排气 4 个工作过程，也即完成一个工作循环。当转子自转一圈，三个腔同时完成一个做功过程，相当于一个腔工作容积的二冲程内燃机。根据需要，可以制成单缸、双缸或四缸机，各缸中间用隔板分开，两端用缸盖

密封，各缸功率通过一根主轴输出，主轴上每一缸设一个偏心轴颈与固定齿轮。转子内燃机的优点：（1）没有往复运动零件，运转平稳，振动小；（2）不需气门等配气机构，结构简单，重量轻；（3）适于高速运转，体积小，功率大。但与技术成熟的往复式内燃机比较还存在一些问题：（1）转子三角尖端处与缸体接触处以及两端面与缸盖平面的密封比较困难；（2）经济性较差，排污较高；（3）起动困难，低速动力性差。因此，只用于个别赛车与小客车上。

【自由活塞式内燃机】1920 年左右开始研究，50 年代才有正式产品。按其用途可分为自由活塞发气机和自由活塞压气机。作发气机使用时，常与燃气涡轮组成复合式发动机，由自由活塞发气机、燃气涡轮、燃气集气罐、进气门、活塞、气缸、喷油嘴、扫气箱、压气机缸、压气机活塞等组成。自由活塞发气机的工作原理和对置活塞二冲程柴油机相似，但只产生高温燃气供给燃气涡轮作功。其结构特征为无曲柄连杆机构，两个活塞运动时内外止点位置都可以改变，由同步机构保持左右两个活塞的对称运动，故称“自由活塞”。自由活塞压气机的燃气仅用来驱动压气机活塞，使进气增压，由压气机缸向外输出压缩空气，将发动机与压气机自身驱动。由于结构复杂，单位马力的重量较大，主要用于泵站、船舶和中小电站等固定作业区域。

【汽油机】用汽油作燃料的外源点火式内燃机。1883 年德国人戴姆勒创制成功第一台汽油机，至本世纪 30 年代汽油机已得到很大发展，现代汽车、摩托车、船用挂机、小型农用动力及小型飞机仍以汽油机作主要动力。由于汽车保有量大，使汽油机总功率在热

机中占首位。汽油机结构以往复活塞式为主，和柴油机相比，其供油系统和燃烧着火系统有很大区别外，还具有以下特点：(1) 燃烧速度快，允许转速可达 10000 转/分以上；(2) 升功率大大高于柴油机，同样功率时，比柴油机轻巧，特别适于作汽车动力使用；(3) 由于压缩比不高，因此热效率比柴油机低 15—25%，80 年代正致力于研究高压压缩比汽油机，以提高经济性。汽油机分类：(1) 按供油方式分为化油器式和汽油喷射式，80 年代发展的电脑控制汽油喷射将逐渐替代化油器式；(2) 按点火系可分机械点火和晶体管点火两类，后者高速性好；(3) 按混合和燃烧方式分为均匀混合和层状给气，层状给气可实现稀薄燃烧，有利降低排污，提高经济性；(4) 按燃烧室形状分为 L 型、浴盆型、楔型和蓬型、半球型等，其中蓬型及半球型许用压缩比可达 10 左右，在车用汽油机中得到广泛应用。汽油机的发展方向为改善混合气分配，组织新的燃烧过程，不断提高经济性，降低排污。

【汽油机燃料】即汽油。由多种碳氢化合物组成，其基本成分是 85% 的碳和 15% 的氢。它由石油提炼而成，是比重小而易于挥发的液体。汽油的主要性能中蒸发性及抗爆性最为重要。由于汽油是在化油器内的高速气流中喷散雾化，然后蒸发而形成可燃混合气的，因此汽油蒸发性的好坏对汽油机的性能影响很大，蒸发性好，在较低的温度和流速下也能形成可燃混合气，发动机比较容易起动。抗爆性指汽油在内燃机中燃烧时避免发生爆燃的能力。汽油机的爆燃是可燃混合气在汽油机内不正常的燃烧现象，与很多因素有关，但在一定的发动机结构和使用工况下，主要决定于汽油的抗爆性。抗爆性好，就可以承受较高的压缩比，从而改善发动机的经济性。汽油的抗爆性与其化学组成有关，中国采用马达

法测定，并用辛烷值作指标。提高汽油抗爆性最常用的方法是给汽油添加抗爆剂。

【辛烷值】表示车用汽油抗爆性的指标。其大小与汽油组分的化学结构有关。将汽油试样与由异辛烷（辛烷值规定为 100）和正庚烷（辛烷值规定为零）配成的混合液体在标准的发动机中进行比较，其抗爆性与油样相当的液中异辛烷的百分含量，即为该油样的辛烷值。辛烷值越大，汽油抗爆性越好，质量亦越高。在汽油中加入少量的抗爆剂（四乙铅或四乙铅同溴乙烷等混合成的乙基液），可显著提高其辛烷值。

【燃烧室形状】取决于缸径、冲程、火花塞和气门的位置及数目、活塞顶部形状等各种因素的综合作用，与汽油机的燃烧有着密切的关系。主要分为四种：（1）L 型燃烧室，与侧置气门配合，结构简单，但燃烧室尺寸不紧凑，面容比大，散热损失大，许用压缩比较低，因此热效率较低，同时气道曲折，充气效率较低，只用在小型汽油机上；（2）楔型燃烧室，采用顶置气门，进气阻力较小，充气效率较高，且尺寸紧凑，面容比小，散热损失小，许用压缩比较高，具有较好的动力性能和经济性能，是 60 年代以来轿车发动机采用最多的燃烧室；（3）浴盆型燃烧室，与楔型燃烧室接近，气门垂直于缸盖顶部，工艺性较好，但高速性不及楔型燃烧室；（4）半球型燃烧室，面容比最小，火花塞布置在中央位置，使火焰传播距离缩短，爆燃倾向减小，因此许用压缩比最高，而且散热损失减小，有利提高经济性，在火花塞两侧可以布置较大的气门直径，气道流畅，充气效率提高，因此动力性最好，新型车用汽油机倾向于采用这种燃烧室，其缺点为气门传动机构复杂，

加工工艺性差，而且燃烧速度过快，燃烧噪音大。

【L 型燃烧室】与侧置气门配合的燃烧室。主要优点为结构简单。但燃烧室尺寸不紧凑，面容比大，散热损失大、许用压缩比较低，因此热效率较低，同时，气道曲折，气流流动阻力较大，充气效率较低，使用这种燃烧室的汽油机，经济性和动力性指标都较差，在车用发动机上已被淘汰，只在小型汽油机上还有使用。

【楔形燃烧室】呈楔形的燃烧室。采用顶置气门，与侧置气门燃烧室相比，具有以下共同优点：（1）进气阻力减小，使充气效率上升，允许转速提高，具有较好的动力性能；（2）燃烧室尺寸紧凑，火焰传播距离缩短，可使许用压缩比提高，经济性较好；（3）燃烧室的面容比减小，热损失与 HC 排放降低。楔形燃烧室特点为气门倾斜 $6—30^{\circ}$ ，进气阻力较小，火花塞在楔形顶端进排气门之间，压缩比可提高到 $9—10$ ，是 20 世纪 60 年代以来，轿车发动机采用最多的燃烧室。

【浴盆形燃烧室】其特点与楔形燃烧室接近，气门垂直于缸盖顶部，工艺性较好。中国产东风 6100Q 及北京 492Q 型车用汽油机、都采用这种燃烧室，由于气道的进气阻力比楔形加大，因此，高速性不及楔形燃烧室。

【半球形燃烧室】燃烧室的面容比最小，火花塞布置在中央位置，使火焰传播距离缩短，爆燃倾向减小，因此许用压缩比最高，加上散热损失减小，有利提高经济性，在火花塞两侧可以布置较大的气门直径，气道流畅，充气效率提高，因此动力性最好。新型

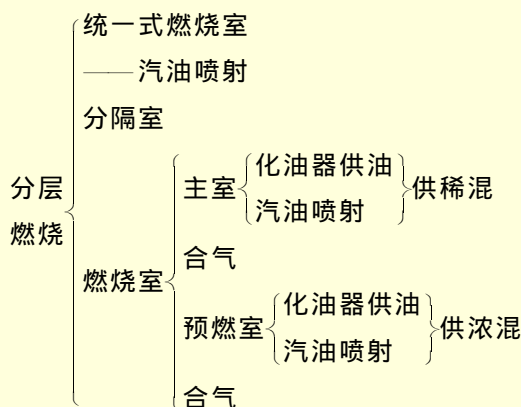
车用汽油机倾向采用这种燃烧室。其缺点为气门向两边倾斜，使气门传动机构复杂，加工工艺性差，而且燃烧速度过快，燃烧噪音比楔形燃烧室大。

【汽油机正常燃烧】燃烧室中的均质混合气，由电火花点燃后形成火焰中心，以球面向外传播火焰，直至传至整个燃烧室，将混合气烧完，称为正常燃烧。研究表明，浓混合气 $\alpha=0.8—0.9$ 时，形成火焰中心时间最快，火焰传播速率最高，达到 30—70 米/秒，使汽油机功率增大，但由于空气不足，燃料不能完全燃烧，使油耗率升高。当燃烧稀混合气 $\alpha=1.03—1.10$ 时，燃料才能充分燃烧，而使汽油机达到最经济油耗率。

【汽油机爆震燃烧】属于汽油机的一种不正常燃烧。当汽油机燃烧室中火焰向前传播时，远离火花塞处的终燃部分混合气，受到已燃部分混合气的压缩和热辐射作用，而产生自燃，形成爆震燃烧。爆震燃烧时，自燃可形成多个火焰核心，它比正常燃烧快几十倍的速率向外传播火焰，使缸内压力来不及平衡，产生压力冲击波，在燃烧室壁面反射，造成振动，产生高频噪声，发出金属敲击声，俗称“敲缸”。它使汽油机过热，冷却水温升高，功率下降，油耗升高。持久剧烈的爆燃，会加剧气缸的磨损，导致活塞、气门和火花塞等机件损坏。因此，爆燃是限制汽油机功率提高和经济性改善的主要障碍。避免燃爆的措施：（1）使用高辛烷值汽油，使混合气不易自燃；（2）降低终燃处的混合气温度，加强燃烧室挤气面的冷却；（3）设计紧凑的燃烧室，缩短火花塞至终燃处的距离，提高燃烧室内的气流运动，提高正常火焰传播速度，使终燃部分混合气来不及产生自燃；（4）使用中可提高转速，延迟点火

时间来避免爆燃。

【汽油机分层燃烧】又称分层进气或稀薄燃烧。使汽油机内混合气浓度分层，在火花塞周围局部区域供给较浓的混合气，而在燃烧室的大部分区域具有较稀的混合气，使混合气浓度从火花塞开始，逐渐由浓到稀，实现分层燃烧。它不仅可提高经济性还可以改善排放，而引起各国重视。分层燃烧与供油方式和燃烧室结构有关，其分类见下栏图。



【汽油机供给系】供给汽油机工作时所需要的可燃混合气的系统。可分化油器供油和汽油喷射两大类。大多数汽油机，主要采用化油器供油，在航空发动机、赛车和高级轿车上采用汽油喷射供油，并向一般车用发动机推广中。

【化油器供油】利用化油器使燃料与空气混合，形成可燃混合气进入发动机燃烧室的供油方式。化油器供油时，发动机驱动汽油泵，使汽油从油箱经滤清器流经化油器，在化油器中，空气与汽油按一定比例形成新鲜混合气，经进气管分配到各个气缸。混合气燃烧作功后变成废气，由各缸经排气管、消音器排到大气中去。

【化油器】又称汽化器。汽油机供给系中影响汽油机经济性和动力性的关键部件。其功能是根据汽油机的不同工况，供给一定数量和一定浓度的混合气，使发动机良好燃烧。简单化油器主要由带有浮子机构和量孔的浮子室、喷管、带有喉管的空气管及节气门组成。当空气吸入气缸流经喉管时，由于截面收缩，流速增高，压力降低，使喉管处产生真空，同时，浮子室的燃油在大气压作用下，经主量孔从喷口喷出，恰好被喉管处的高速气流带走，汽油挥发雾化并与空气混合，其过程一直延续到气缸内压缩过程终了，使汽油机燃烧前得到均匀混合气。主量孔用来控制进入化油器的燃料量，也即控制混合气的浓度。化油气的节气门（俗称油门）用来调节供入气缸的混合气量，以满足汽油机不同工况、不同负荷时燃烧的需要。

【车用化油器构造】又称化油器工作系统。由主油系、怠速油系、省油系统、加速系统、起动系统、浮子室和针阀浮子系统、喉管系统等组成。主油系是化油器的主要供油系统，它供给发动机在大部分工况下的燃油。使用时，需经校正，常用空气补偿校正方案，在主量孔与喷孔之间加入空气量孔和泡沫管，形成泡沫燃油通过泡沫孔从喷口喷出燃烧。怠速泵负责发动机在怠速工况（运转而不做功）下的燃油供应。由怠速空气量孔、怠速油量孔、怠速出油口、调节螺钉、过渡喷口等组成。利用节气门后活塞吸气形成的高真空设置怠速出油口将燃油吸出。为了调节油气混合比，特设调节螺钉，以使发动机按实际怠速运转条件稳定运转。过渡喷品设在怠速出油口上方，利用节气门在此处的真空度补充供油。一般在主油系开始出油之前，整个怠速油系仍继续供油，但将随

节气门开大而减少。省油系统又称功率加浓系统。分机械式省油器和真空式省油器等类型。机械省油器由推杆、省油器阀门、主量孔功率量孔和联动摇臂等组成；真空省油器则由气道、省油器活塞、弹簧、推杆、省油器阀门、主量孔、功率量孔等组成。它在发动机以外特性工作时为了发出最大功率，使混合气由经济混合比转变成功率混合比，并使燃料浓度增加。加速系统是为避免节气门突然开大可能出现的加速缓慢或进气管回火，甚至停车的故障而设置的装置。常用的加速系统为柱塞式加速泵，在节气门突然开大时，将一部分燃油直接喷入喉管。起动系统是为使发动机冷起动时提高燃油的雾化与汽化程度，增加燃油浓度而特设的装置。一般为阻风门，起动时关闭，使整个化油器腔内形成很高的真空度，迫使燃油大量流出。发动机起动后，将阻风门逐渐打开，使油气混合比恢复正常。浮子室和针阀浮子系统是保持油气混合比稳定和浮子室油面高度稳定而采用的控制装置。常用的有针阀浮子机构。喉管系统则一般在保证发动机最大充气量的前提下，选取最小的喉管尺寸，以获得较高的气流速度。现代汽车化油器还采用二重或三重喉管系统。

【多腔化油器】包括双腔、四腔化油器。主要用于车用汽油机。多腔化油器按节气门动作顺序分为并动和分动两种。分动式应用较多，在大部分中小负荷工况下，用主腔供给混合气，在高速大负荷时，联动机构将副腔节气门打开，使发动机发出最大功率。

【汽油泵】将燃油从油箱中吸出，以足够的压力和流量向化油器供油的装置。按驱动方式分两种：（1）机械式，装在发动机缸体外侧，由配气凸轮轴上的偏心轮驱动，利用膜片产生吸油、压油作

用，在汽油泵下端装有手动臂，当汽油机不工作时，可用来泵油。

(2) 电动式，按控制方法分触点式和晶体管式两种，它们不受驱动机械安装的限制，可将汽油泵安装在通风散热良好的地方，减少了油路发生“汽阻”的可能，在输油管路中，汽油因高温汽化而产生气泡，称为“汽阻”，它使供油困难甚至断油而停机。因此，要求汽油泵的供油能力要比汽油机实际耗油量大 5—6 倍，以提高克服汽阻的能力。

【汽油滤清器】除去汽油中的水分和机械杂质，以免供油系部件发生故障和气缸磨损的器械。小型汽油机采用重力供油，滤清器由沉淀杯和细孔滤网组成，不易将较小杂质除尽。车用汽油机由汽油泵供油，一般采用多孔陶瓷滤芯与沉淀杯，滤清效果很好。

【汽油喷射】用喷射汽油使汽油与空气形成混合气的方法。与化油器相比，汽油喷射具有很多优点：(1) 由于没有化油器喉管，进气阻力降低，充气效率提高，可提高功率 10% 左右；(2) 能按照发动机工况要求，根据进气量控制喷油量，精确地供给发动机最佳浓度的混合气；(3) 使各缸供油均匀，可以适当提高汽油机的许用压缩比，容易实现分层燃烧，因此，汽油喷射还可提高经济性 5—10%，排放性能得到很大改善。其缺点为结构复杂，成本较高，维修难度大。30 年代开始，首先在航空发动机上采用，40 年代后用于赛车，70 年代已向轿车上发展。汽油喷射型式可分：(1) 单点喷射，将汽油喷向进气管，或利用原化油器壳体，靠进气管向各缸分配，用于排量 2 升以下 4 缸机较多；(2) 多点喷射，向各缸进气门前喷射，使各缸供油均匀，不受进气管影响，在大排量发动机应用较多。由于微型计算机的发展，汽油喷射的控制

大多采用微机控制。

【汽油机点火系】组成汽车的重要装置。用于点燃各气缸中被压缩的可燃混合气体，使其依次完成各自的工作循环，不断将热能转换为机械能，达到驱动汽车行驶目的一种装置。汽油机点火泵一般采用电火花点火方式。它通过一整套电气设备和机件，在相互配合下，将低压电变为高压电，按发动机点火顺序轮流击穿各气缸内的电极间隙产生电火花，点燃被压缩的可燃混合气。完成此项工作的一整套电气设备和机件总称为汽油机点火系。按点火装置储能元件的不同，分为电感储能和电容储能两类；按结构特点可分为机械触点式、晶体管式和电子自动式等。历史上使用最广的是一种传统点火系，又称蓄电池点火系。它由电源（蓄电池或硅整流发电机）、点火开关、点火线圈、附加电阻、分电器、电容器和火花塞等零部件组成。为了适应现代高速发动机的点火需求，提高汽油发动机的技术经济指标，传统点火系必将被晶体管式点火装置取代，进而向电子自动式点火装置发展。

【点火提前角】点火提前的时间所对应的曲轴至压缩上止点前的转角。点火提前是指混合气的点火在活塞到达上止点之前进行，其目的在于使汽油机燃烧过程在压缩上止点附近完毕，以使燃烧放出的热能在膨胀作功过程能得到充分利用。汽油机在一定转速、一定油门开度下，有一个最合适的点火提前角，可使汽油机燃烧达到最佳状态，发出最大功率，达到最好的经济性，这个最合适的提前角，称为最佳点火提前角。实验表明，当转速升高，负荷减小，最佳点火提前角应当加大，这由点火系分电器中的离心自动提前装置和真空提前装置自动调节。一般汽油机在油门全开标定

工况时，最佳点火提前角约在 30—45 度范围内。

【点火正时】将汽油机的点火提前角调到最佳角度。最佳点火提前角的大小主要与汽油机的工作转速、负荷和燃料抗爆性有关。当汽油机转速升高时应增大点火提前角，可通过点火系的离心式点火提前自动调节装置自动调节；当汽油机负荷增大时，应减小点火提前角，可通过点火系的真空式点火提前调节装置自动调节；此外，当汽油机更换燃料品种时，也应适当调整点火提前角。

【蓄电池点火系】由蓄电池作为电源的点火系统。由蓄电池、电流表、点火线圈、分电器和火花塞等组成，由蓄电池供给电流，经点火线圈、继电器触点的作用，将 12 伏直流电压转变为 15—20 千伏的高压电，使火花塞的电极间产生电火花，点燃混合气。蓄电池点火系供给点火的能量和电压的大小，直接影响着汽油机的性能，而点火系能否给出足以击穿火花塞间隙的次级电压，是和很多因素有关的，如火花塞积炭、电容、触点间隙等。

【点火线圈】点火系的主要元件。相当一个升压变压器。铁芯用硅钢片叠成，外面绕有次级线圈，用 0.06—0.10 毫米漆包线绕 1.1—2.3 万匝，用来产生高压。再外层绕有初级线圈，用 0.5—0.8 毫米漆包线绕 220—330 匝。外壳内填满绝缘油或沥青，防止潮气侵入。上部胶木盖中心为高压线插孔，四周有 3 个接线柱：“电源开关”、“开关”和低压接线柱。分别与点火开关、起动机开关和断电器联结。在前二个接线柱之间串有附加电阻，可提高高速情况下的初级电流，改善点火性能。起动时，附加电阻被起动开关短路，使起动时初级电流加大，提高了点火

能量，有利于起动。点火线圈为一个通用元件，选用时，应符合蓄电池电压为 6V 或 12V。应注意点火线圈的接铁极性应与电池一致，使火花塞中心电极为高压负极，可改善点火性能。新的点火线圈为闭磁路点火线圈，减小了漏磁通损失，可使线圈的能量转换由 60% 提高到 74%，提高了火花塞的点火能量，正得到推广。

【分电器】由低压断电器和高压配电器、电容器和点火提前装置等组成。分电器轴由曲轴驱动。四冲程机曲轴转 2 圈，分电器轴转 1 圈。4 缸机断电器凸轮为四方形，6 缸机断电器凸轮为六方形，以保证每循环各缸轮流点火一次。断电器由固定触点和凸轮控制的活动触点组成。两触点用铂铱合金（又称白金）制成。凸轮角转过一次使触点接通、断开一次。接通时，初级线圈贮存能量。断开瞬间，点火线圈次级线圈互感产生高电压，经配电器送至气缸火花塞跳火一次。在分电器下壳中装有离心式点火提前机构。当发动机转速上升，可自动使点火提前角加大，在分电器壳边，装有真空点火提前器，与化油器节气门下方连通。当节气门关小时（负荷减小），真空度提高，可使点火提前角加大，使汽油机自动调整在最佳点火提前角。与断电器的白金并联装有电容器（容量 $0.15—0.25\mu\text{f}$ ，耐压 400V），以承受初级线圈的自感电势，减小触点电弧，加速初级电流断开，延长触点寿命。

【火花塞】又叫火星塞。汽油机点火系的重要部件。由接触头、瓷绝缘管、中心电极、侧电极和壳体等构件组成。中心电极与侧电极间构成火花间隙，大小在 0.6—1.0mm，安装时火花塞拧装在汽油发动机气缸盖上的火花塞螺孔内，火花间隙则伸入燃烧室。工作时，从分电器由高压线将高电压按气缸的点火顺序依次配送到

各缸火花塞，火花间隙被击穿产生放电火花，点燃缸内被压缩的混合燃气。通常按热值不同，将火花塞分为热型、中型、冷型三类。热型火花塞的瓷绝缘管裙部较长、传热途径较远、传热较慢；冷型则绝缘裙部较短、传热较快。发动机功率较大，压缩比大，转速高的情况应选冷型火花塞；反之选热型火花塞。在使用中，如发现火花塞常积炭，说明过冷了，应换用热型火花塞；若发动机熄火后仍能工作一段时间并有敲击声，则为过热，应改用冷型火花塞。火花塞按结构特点还可分为：标准型（普通型）、短座型、半导体型、测温型、电阻型、防干扰型、多极型、屏蔽型、防水型、细电极型等。

【磁电机点火系】采用磁电机供电的点火系。磁电机不需要外来电源，它的转子与汽油机曲轴通过齿轮传动一起回转，依靠本身铁芯上的初级线圈内由电磁感应得到的低压电流，再在铁芯上的次级线圈内感应产生高压电流，此时分电器的分火头正好与某一侧点接触，因而使火花塞发火，点燃该气缸内的混合气。磁电机点火系的主要特点是结构紧凑，免除了比较笨重的蓄电池，减少了维护保养工作，但在多缸低速情况下点火性能较差，主要用于单缸二冲程小汽油机上。

【晶体管点火系】利用晶体管的开关功能代替机械式触点的点火系统。其优点为可增大初级电流，减小电感，加大点火能量，克服了原机械触点带来的弊病，使点火系最高电压在高速或低速时不下降。火花塞积炭情况下，也能可靠点火。在提高内燃机的动力性、降低油耗和减少排污方面显示出很大优越性，因此得到迅速推广。晶体管点火系可分为几个类型：（1）按储能方式分电感储能式和电容储能式；（2）按有无触点分有触点 and 无触点；（3）无触点按触发信号方式分：电磁感应式、光电式和霍尔式，以电感

储能式、电磁感应式无触点晶体管点火系应用较多。

【电容储能式点火系】属于晶体管点火系。先用直流升压器将直流低压电升到 400 伏左右，并向储能电容充电，利用无触点触发信号，使可控硅导通，储能电容经可控硅向初级线圈放电瞬间在次级线圈中互感高压电势，使火花塞间隙处跳火。电容放电式可克服蓄电池点火系次级电压受转速、次级电容和火花塞积炭等影响的缺点，可点燃稀混合气，适应高转速及提高点火可靠性，但结构复杂，成本较高。

【小型汽油机】功率在 22 千瓦以下，缸径小于 80 毫米的汽油机。由于体积小，重量轻，结构简单，成本低廉，使用方便，广泛用作工业、农、林、牧和小型发电、水泵、装卸运输机等动力，一般为通用机型，达到一机多用。为了燃用低辛烷值汽油，压缩比在 6 左右，其性能范围列表如下。结构特点力求简单，如：（1）以风冷为主，风扇叶片与飞轮结合成离心式冷却风扇；（2）二冲程以曲轴箱扫气单缸立式为主，四冲程有单、双和四缸的，多缸时为改善平衡可用对置气缸；（3）二冲程多用半球形燃烧室、四冲程用 L 型燃烧室侧置气门；（4）润滑系二冲程用掺混或点滴润滑，四冲程单缸采用飞溅润滑，主轴承采用滚动轴承；（5）化油器比较简单，无加浓、省油器和加速泵，二冲程常用柱塞式化油器；（6）起动装置单缸以拉绳起动为主，两缸和四缸采用手摇增速起动；（7）点火系单缸用飞轮磁电机，多缸用单体磁电机；（8）为减轻重量广泛使用铝合金压铸件或锻件。其发展趋势为采用尼龙塑料、节约金属、减轻重量、降低成本；采用晶体管点火装置，提高可靠性和寿命。

冲 程 数	二冲程	四冲程
功率 (千瓦)	0.60—3.5	1—22
缸径 (毫米)	30—56	55—80
转速 (转/分)	3000—8000	2000—3600
排量 (毫升)	26—120	120—1250
压缩比	5.4—7.3	5.7—7.0
升功率(千瓦/升)	15—40	10—20
比重量(公斤力/千瓦)	2.7—6.1	4.0—10.0

【摩托车汽油机】使用特点一般与汽车用汽油机相同，其动力按排量分为 50、100、125、175、250、350、500、750、1000 毫升等级别。其结构与小型汽油机接近，具有以下特点：(1) 为提高升功率，一般摩托用发动机转速可达 8000 转/分，赛车用可达 17000 转/分以上；(2) 冷却大都采用风冷，利用车速迎面风冷却，不需装冷却风扇；(3) 燃烧室多采用半球形，可减少热损失，适于高速和提高压缩比；(4) 为提高升功率，小排量大都采用二冲程机，为提高换气效率采用旋转阀或簧片阀式进气机构；(5) 考虑节能与排放要求，有些厂家摩托车开始采用四冲程汽油机。

【汽车用汽油机】与柴油机相比，由于汽油机具有噪声振动小、转速、升功率高、扭矩储备系数大、比重量轻、起动方便、造价低等优点，目前绝大部分小客车、轻型载重车都以汽油机作为动力。近年来为节约能源，在小客车、轻型载货上开始采用柴油机，并有逐渐增多趋势。根据汽车使用特点，工况变化很大，在上坡或高速公路上行驶，处于高负荷和外特性条件下行驶，经常使用工

况以中低速部分负荷为主。车用汽油机的性能范围见附表。其特点为：(1) 大多数采用水冷四冲程，多缸发动机、排量小于 2.5 升，常用直列 4 缸，在 2.5—5 升之间采用直列 6 缸或 V 型 6 缸，大于 5 升多为 V 型 8 缸，个别有 V 型 12 缸；(2) 车用汽油机力求高速、强化、提高升功率和降低比重量，结构上特点如采用短冲程 ($S/D < 1$)，齿形皮带传动的顶置凸轮轴，每缸 3 或 4 个气门，配置 3 个甚至 2 个活塞环的轻型短活塞，以及采用废气涡轮增压技术；(3) 要求怠速转速低而稳定，万有特性上最低油耗率曲线应在中小负荷常用转速区域。车用汽油机的发展趋势为：减小排污和噪

车 型	小 客 车	轻、中型 载重车
缸 径 (毫米)	74—100	74—117
转 速 (转/分)	3600—7500	2800—5500
功 率 (千瓦)	37—280	37—170
排 量 (升)	1.2—8.2	1.2—9.9
压 缩 比	7.3—10	6.5—9
升功率(千瓦/升)	29—66	18—26
升扭矩(牛·米/千)	65—80	59—70
比重量(公斤力/千瓦)	1.3—2.0	1.8—2.7
扭矩储备系数	1.20—1.40	1.20—1.40
大修里程(公里)	15—20 万	20—50 万

声;发展新型高压压缩比燃烧系统和汽油喷射,进一步提高经济性;减少每缸工作容积(0.4—0.6 升左右)以得到最佳的升功率和比重量指标。

【船用挂机】又称舷外机。为汽油机与螺旋桨联成整体的快艇用动力装置。其使用特点与船用内燃机相同,但螺旋桨吃水浅,易露出水面使汽油机负荷和转速变化大,应有防止超速和安全停车装置。经常在河水、海水中,工作条件恶劣,零件应有良好防水耐蚀性能,多选用不锈钢、铝合金或经特殊表面处理。整机由动力头和下体两部分组成;发动机及其附件密封在消音罩壳内形成动力头,传动轴、圆锥齿轮、螺旋桨,排气管和冷却水泵等组成下体,船用挂机汽油机性能和结构特点与小型和摩托车汽油机类同,但更要求体积小、重量轻、结构紧凑。多采用二冲程高强度、功率在 3.5 千瓦以下为单缸风冷,2.5—30 千瓦为双缸或 V 型 4、6 缸,以河水或海水直接冷却。升功率在 25—40 千瓦/升,比重量在 2—7 公斤力/千瓦,气缸排量在 40—20000 毫升、压缩比 6—7,可燃用一般汽油。对安全可靠要求高,应保证 500 小时无故障,以免出海停机造成海难事件。

【柴油机】又称狄塞尔内燃机或压燃式内燃机。一种以柴油、重油、燃料油等作为燃料的内燃机。其工作原理是进入气缸内的空气,被活塞压缩到燃料能自行燃烧着火的温度后,用射油泵及喷油器将燃料喷成雾状射入其中,与灼热的空气相遇,即自行着火燃烧。燃烧所产生的高温、高压燃气,在气缸内膨胀推动活塞作功。用作各种拖拉机、载重汽车、内燃机车、船舶、小型发机械和农田排灌机械的发动机。

【柴油机燃料】可分轻柴油和重柴油两种,分别用于高速和大型低速柴油机。轻柴油沸点范围在 160°C — 365°C ,为多种烃类组成的混合物,含有少量的硫、氢、氧的有机化合物,每公斤燃料低热值约 42200 千焦。柴油必须具有很好的燃烧性、低温流动性和安定性。燃烧性以十六烷值、馏程和粘度来衡量,其初馏点在 180°C ,10% 馏出温度为 200°C 左右,以保证低温容易起动。粘度影响喷雾质量,轻柴油粘度以 2.5—8.0 厘迤为合格。低温流动性以柴油的凝点表示,国产柴油用凝点温度($^{\circ}\text{C}$)值作为牌号,轻柴油分 0、-10、-20、-35 号。重柴油分 10、20、30 号。柴油只能在高于凝点 1— 3°C 条件下工作,因此要根据地区、气温来选用柴油。安定性包括热安定性与储存安定性,与柴油闪点及胶质有关。储存柴油容器必须清洁,防止杂质和水分混入油中,油桶不宜露天存放,严禁曝晒与烟火,防止火灾。

【十六烷值】测定柴油自燃性能和爆性的指标。测定方法是将柴油试样与由正十六烷(十六烷值规定为 100)和 α —甲基萘(十六烷值规定为零)配成的混合液,在标准柴油机中进行比较,其自燃性与油样相当的混合液中的正十六烷的百分含量,即为该油样的十六烷值。其值越大,柴油的自燃性和抗爆性就越好,质量就越高。

【柴油机燃烧系】柴油机进气系统、供油系统和燃烧室结构三者之间的综合匹配。柴油机的动力性、经济性、起动性和寿命等指标,都与燃烧系统匹配及燃烧过程进行的完善程度有关。燃烧过程与燃料的性能、缸内气体流动、燃料喷注等混合气形成过程有直接关系。至今,燃烧系统的改进,在很大程度上依赖于经验和大量的试

验研究工作。

【柴油机混合气形成】一般有两种混合气形成方式:(1)空间雾化混合,主要靠燃料喷雾与燃烧室形状配合,并利用燃烧中的空气运动,在燃烧室中使燃料与空气形成混合气,一般柴油机以空间雾化混合为主;(2)油膜蒸发混合,将大部分燃料喷到球形燃烧室壁面上形成油膜,油膜受室壁高温加热汽化、蒸发,此时,空气在燃烧室内以很强的涡流旋转,与蒸发的燃料形成混合气。在球形燃烧室中以油膜蒸发混合为主。燃烧室内的空气运动,在进气过程产生进气涡流,在压缩过程产生挤流,挤流只对混合气形成和燃烧起辅助作用。产生进气涡流的方法,可用导气屏进气门、切向气道或螺旋气道。

【导气屏进气门】在进气门上带有突唇的气门。它强制空气从导气屏对面流出,使气流受气缸壁面的约束,产生绕气缸中心线的旋转运动。在实际柴油机中,由于导气屏增加进气阻力,还需要增加防止气门旋转的定位装置,不仅使气门机构复杂,还使气门磨损不均匀,因而很少采用。

【切向气道】由气道的形状引导气流,以单边切线方向进入气缸,造成旋转气流的通道。切向气道流动阻力大,尤其要求涡流高时,阻力增加很快,充气效率降低。但切向气道结构简单,适用于对进气涡流要求不高的燃烧系统。

【螺旋气道】将气门上方的气道空腔做成螺壳形状,使气流在气道出口形成高速旋转的通道。螺旋气道的优点是流动阻力增加不大,

进气涡流强度很大,适用于要求强涡流的燃烧系统。中国国产缸径 90、105、135 系列柴油机都采用螺旋气道。其缺点为铸造工艺要求高,气道型芯的变形、定位及出口位置和气门的同心度等都需严格控制。

【柴油机燃烧室】柴油机燃烧系统的主要组成部分之一。形成燃气混合气并点火燃烧的地方,根据有无涡流室、预燃室将其分为直接喷射式燃烧室和分隔式燃烧室两大类。直喷式燃烧室又分为开式和半开式两种,主要是燃气混合气形成特点各异;分隔式燃烧室又分为涡流室式燃烧室和预燃室式燃烧室两种。

【直接喷射式燃烧室】根据气流运动、喷油方式和燃烧室形状,一般可分开式(浅盆形)和半分开式(深盆形)两类。开式燃烧室形状为浅盆形,主要靠多孔(6—12 孔)喷嘴以 20—40 兆帕高压喷射将燃料布满整个燃烧室,一般不组织空气运动,进气阻力小,这种燃烧室形状简单,相对散热损失小,最大优点为经济性好,容易起动,是典型的空间雾化混合,在大型(缸径大于 200 毫米)中、低速柴油机中广泛采用。半分开式燃烧室在活塞顶上具有口径缩小的深坑,其形状很多,使用最多的为 ω 形,与浅盆形相比,它需组织较强的进气涡流,对供油喷雾要求降低,一般采用 3—4 孔喷嘴,利用高速涡流帮助形成混合气,使空气利用率大大提高,并且保持经济性及起动容易的优点,目前在小型高速车用柴油机上的应用日益增多。

【涡流室式燃烧室】属于分隔式燃烧室。由缸盖部分涡流室和活塞顶上的主燃室组成,两室由切向通道相通。一般涡流室占总燃烧室容积的 50—80%,呈球形或倒钟形,利用压缩过程进入的空气产

生强烈的涡流运动,使喷入涡流室内的燃料很快混合着火,着火后燃气与混合气因热膨胀冲入主燃室形成二次混合燃烧。这种燃烧室的优点是,不需组织进气涡流,充气效率高,空气利用充分,动力性及高速性都较好,而且主燃室中压力升高率较小,工作平稳,排气有害成分也比直喷式低,因此在小型高速车用柴油机上首先得到应用。其缺点是因燃烧室散热表面积大,气体流动节流损失较大,燃料经济性较差,一般比直喷式油耗高 10—15%,冷起动困难,常需装预热塞。

【预燃室式燃烧室】属于分隔式燃烧室。它由设在气缸盖上的预燃室和设在活塞顶上的主燃室组合而成。与涡流室式燃烧室相比,预燃室占燃烧室总容积的 25—40%,与主燃室通道截面积也较小,预燃室以长柱形为主,压缩过程并不产生有规律的涡流。燃料在预燃室内着火后,高速喷向主燃室,形成强烈的燃烧涡流,因此预燃室相当一个燃气喷嘴。预燃室燃烧系统对燃料种类不敏感,能适应多种燃料性。工作平稳,燃烧噪声小,对供油系统要求低,喷油压力为 8—13 兆帕。其主要缺点为预燃室通道小,流动损失大,散热面大,燃料经济性很差,比直喷式高 15% 以上,而且冷起动困难。致使预燃室应用日益减少,主要在缸径小于 100 毫米、转速大于 3500 转/分的小型高速机及个别中型机上应用。

【球形油膜燃烧室】属于半分开燃烧室,1956 年由德国茅勒尔所发明,燃烧室在活塞顶上为圆球形,又称 M 燃烧系统。其混合气形成与传统的空间混合有很大不同,采用油膜蒸发混合,将燃料喷向球形壁面,形成一层油膜,由于壁面温度在 200°—350℃,使燃料很快蒸发,而强烈的涡流使油气很快与空气形成混合气。M 燃烧系,

由于在着火延迟期形成的混合气量少,后期又能很快混合,使柴油机的燃烧过程声轻烟少,并能使用从柴油到汽油的轻质燃料而平稳运转,在柴油机发展中具有创新意义。缺点为低温起动困难,小负荷时壁温低,油膜蒸发困难,易冒蓝烟,HC 排放增加。由于受球表面积和油膜厚度限制,M 燃烧系主要应用在缸径 75—130 毫米范围的小型高速柴油机上。通过实践表明,这种燃烧系列制造加工工艺要求高,大量生产时,不易保证产品性能,目前正式产品中很少采用。

【柴油机供油系】对柴油机的性能有重大影响,其功能为:(1)向各缸均匀地计量供油;(2)保持合适的喷油定时;(3)燃油雾化、分布和贯穿要与燃烧室形状配合;(4)喷油规律与燃烧过程配合良好,断油迅速,避免二次喷射或后滴。供油系统通常由柴油箱、输油泵、滤清器、喷油泵、高压油管、喷油器等组成。与喷油泵连接装有调速器,使柴油机在某一转速范围内稳定运转。在车用柴油机上还安装喷油提前角自动调节器,随发动机转速升高而加大提前角。根据柴油工作压力的高低,供油系统又可分为低压和高压两部分。低压系统负责将柴油从柴油箱吸出,经过滤清器等部件后送到喷油泵;高压系统则把燃料由喷油泵,经高压油管送到喷油器并喷入气缸。

【柱塞式喷油泵】定时定量向喷油器输送高压燃油的装置。柱塞与柱塞套是组成喷油泵的基本部件,依靠油泵凸轮及柱塞弹簧的作用,柱塞在柱塞套内可以做上下往复运动,形成了喷油泵吸油与泵油的功能。为了调节喷入气缸的油量,在柱塞的头部铣有直槽及螺旋斜槽。供油量的调节是靠转动柱塞、改变柱塞的有效行程来实现的。多缸机可将多个分泵组成一个总泵,结构简单,工作可靠,维修

方便,在现代柴油机上广泛应用。

【分配式喷油泵】依次向汽缸喷油的装置。20 世纪 50 年代研制成功,在小型高速 4 缸机上得到应用。其高压泵部分为对置双柱塞,由内凸轮圈旋转 90° ,使柱塞进油、压油一次,高压油由分配转子的出油孔正好与某缸的出油孔相通,被送至该缸喷油器。内凸轮旋转一周,由同一对柱塞供高压油 4 次至 4 个气缸。分配泵由一对柱塞供油,其优点为零件数量少,体积小,重量轻,成本低。缺点为分配转子与分配套筒稍有杂质易被咬死,对燃油滤清要求很高,最大供油压力比柱塞式油泵小。因此,仅在小型高速多缸(一般 4 缸)机上采用。中国产 485、495 柴油机即采用这种喷油泵。

【柴油机供油提前角】见“柴油机喷油提前角”。

【柴油机喷油提前角】喷油器开始向气缸内喷油的时刻所对应的曲轴转角。喷油泵出油阀打开向外供油的时刻称为供油提前角。由于高压油管内的压力波动,使喷油提前角小于供油提前角,其差值称为喷油延迟角。一般柴油机,观察出油阀开始供油时,测量此时对应的曲轴转角,即可测出供油提前角,为静态测量。喷油提前角需用电子仪器,测量喷油器针阀开始升起的时刻及对应的曲轴转角,属于动态测量。喷油提前角的调整,实际上通过调整喷油泵的供油提前角即可实现。调整喷油泵供油提前角的方法就是改变发动机曲轴与喷油泵凸轮轴的相对角位置,为此,一般柴油机常将两者的联轴节的结构设计成可调式的。安装喷油泵时,先转动曲轴,使第 1 缸活塞位于压缩上止点,再使喷油泵凸轮轴与壳体的相应标记对准,然后将联轴节用螺钉拧紧。

【喷油规律】喷油器在喷油过程中,每秒(或每度油泵凸轮转角)喷出的燃油量随时间(或油泵凸轮转角)的变化关系。从喷油规律可得知喷油提前角、喷油延迟角和喷油持续角,了解喷油特性。这对研究、改进燃油系统与燃烧系统的匹配有很大用处。喷油规律可用测量计算或直接测量法求出。

【喷油泵速度特性】当喷油泵供油齿条或拉杆位置不变时,每循环供油量随转速而变化的特性。理论上,供油齿条不变,每循环油量不应随转速而变化。实际测量,每循环供油量随转速升高而增加。这是由于柱塞在套筒中高速运动造成进、回油孔的节流作用而引起的。柴油机的扭矩与每循环供油量成正比,这使柴油机油门全开时,外特性的扭矩曲线形状,随转速增高而向上升,不能满足使用要求。实用中常用出油阀及调速器弹簧两种校正方法,改进油泵速度特性,使循环油量随转速升高而有所下降,从而提高柴油机的适应性系数。

【柴油机喷油器】具有两个作用:(1)控制喷油压力、使燃油雾化成较细的油粒;(2)使喷注的形状与柴油机燃烧室相配合,促使混合气的形成与燃烧。现代柴油机主要采用闭式喷油器,使燃料达到规定的压力(大于 10 兆帕)才将针阀打开,开始喷射燃料。当油泵供油停止时,针阀在弹簧力作用下关闭喷油器而不发生滴漏现象。与不同形状燃烧室配合,喷油嘴伸入燃烧室的嘴头部分,可分为轴针式和孔式喷油器两大类。喷油器上部为调压螺钉,通过调压弹簧及顶杆紧压针阀,使之关闭,只有当油压升高到大于调压弹簧的预紧力时,针阀才升起而开始喷油。在喷油器试验仪上调整调压螺钉也

即调整弹簧预紧力,即可调整喷油开始时的喷油压力。

【轴针式喷油器】常用于涡流室和预燃室柴油机上,喷孔直径较大,约 1—3 毫米,针阀头部有柱形或倒锥形轴针伸出喷孔,使喷注成圆柱或圆锥形喷油时轴针在孔内往复移动,可清除孔中的积炭,从而避免喷孔堵塞,提高了工作的可靠性。

【孔式喷油器】主要用于直喷式燃烧室。针阀头部不伸出阀体,只对针阀座密封,控制嘴端喷孔的开、闭。喷孔的数目与直径及喷射方向与燃烧室形状配合,一般喷孔数 1—8 个,直径 0.25—0.5 毫米。单孔喷嘴用于球形燃烧室, ω 形燃烧室常用 4 孔喷嘴。

【高压油管】连接喷油泵与喷油器的管路。由于承受高压油的脉动负荷及振动,一般用厚壁无缝钢管制成,外径为内径 3 倍以上。高压油管长度与容积对喷油规律有较大影响,为使各缸喷油规律一致,各缸喷油器至喷油泵的高压油管长度应一致,使用及修理时不得随意变动。

【泵喷嘴】柴油机的一个部件。省去连接喷油泵与喷油器的高压油管,而将两者组成一体,使燃油雾化喷入汽缸与空气混合燃烧的装置。它可以消除用高压油管引起压力波动对供油系统的不良影响,使柴油机更加稳定。但因结构与传动复杂,尚未广泛推广使用。

【内燃机调速器】使内燃机随着外界负荷的变化自动调节供油量,保持转速在一定范围内稳定,并防止超速飞车怠速熄火现象。因内燃机的结构和供油调节方法不同,一般柴油机都需装调速器,汽油

机除小型发电及作起动机使用外,都不需要装调速器。调速器按工作原理分为:机械离心式、液力式、气力式和电子式,其中机械式调速器结构简单、工作可靠,广泛用于中小功率柴油机上。按调速器功能可分:单制式、两制式和全制式。

【单制式调速器】调速器弹簧的预紧力固定不变,调速器只在发动机转速超过某一个规定的转速时起作用。调速器飞球的离心力随转速变化,在规定转速附近,离心力大于或小于预紧力时,使油泵齿条移动也即改变油量。当外界负荷降到零时,转速突然升高,离心力加大使齿条向供油量减小方向移动,直至发动机转速下降到稳定在空转转速为止。单制式调速器常用于转速固定的发电用柴油机。当用来限制最高转速时,称极限调速器,作为防止飞车的保险装置。

【两制式调速器】只在发动机怠速和标定转速两种工况下起调速作用,在其他中间转速,调速器不起作用,可由人工操纵直接控制油门。这种调速器主要用于汽车柴油机上,可改善加速性不受调速器影响。

【全制式调速器】使柴油机在允许的全部转速范围内有级或无级地控制和调节转速,它的适用范围很广,主要用于转速、负荷变化广的拖拉机、工程机械、重型汽车等。

【农业用柴油机】使用特点:按 12 小时功率工作,作业转速变化小,负荷重,经常短期超载,工作条件恶劣,使用季节性强,地点分散,维修条件也差。柴油机的可靠性和寿命为主要指标,燃油最低消耗

率应在标定功率附近,并能燃用农用柴油。对性能指标要求:功率范围 2—90 千瓦,转速在 1500—3000 转/分,比重量为 7.5—20 公斤力/千瓦,并有良好的低温冷起动性能。结构特点:水冷四冲程为主,农用柴油机应使结构简单、容易制造;使用维修方便,直列单、双缸占农用机 50% 以上;一般小型手扶拖拉机常用卧式单缸,手摇减压起动、蒸发式凝汽冷却;田间拖拉机以直列 4 缸机为主,发动机机体作为车架的组成部分,应刚性好而坚固结实。20 世纪末,采用涡流室燃烧室式为主,并向直喷式发展,其发展趋势:提高整机可靠性,寿命及“三化”程度,能与车用及工程机械用柴油机进行系列化设计,做到一机多用。

【工程机械用柴油机】一般推土机和装载机等配专用柴油机,其他则多由车用柴油机变形配用。其结构特点:(1)缸体有足够强度和刚度,采用三点或弹性支承,以承受冲击力;(2)曲轴轴向止推要加强,前后端应加强密封,防止倾斜作业时渗漏机油;(3)润滑系和冷却系容量比车用机加大,油底壳在 30—35° 倾斜时,吸油盘不露出油面;(4)采用高效的二级或三级空气滤清器,并有自动排尘装置。柴油机性能以水冷四冲程直列 2、4、6 缸为主,或 V 型 8—16 缸。功率范围 15—600 千瓦,并向大功率和增压发展,可达 880 千瓦。转速在 1500—2600 转/分,比重量为 4—8 公斤力/千瓦。要求扭矩储备系数大于 25%,转速储备系数大于 1.6。

【汽车用柴油机】由于燃料经济性好,工作可靠寿命长,在载重车上已得到广泛应用。近年来,随着柴油机技术提高及重视节能,轻型载重车和小客车也推广采用柴油机动力。其主要性能参数见右(表一),其他结构和性能特点,见“汽车用汽油机”。

【机车用柴油机】使用条件较好,满负荷运行时间不多,维修保养条件及技术水平较高。结构特点:(1)受空间限制,宽度应小于 1.75 米,高度小于 2.8 米;(2)整机重量在 4 轴机车应小于 11—15 吨,在 6 轴机车应小于 16.5—22 吨;(3)具有大功率强化机的典型特征,一般为水冷四冲程,V 型 8—18 缸,带增压中冷及油冷活塞;(4)采用全速调速器,工作转速分为 16 个档位,由司机遥控并采用自动报警和防超速、增压器防喘振等保护装置。性能参数:整机功率 1450—4600 千瓦,缸径 180—260 毫米,转速 1000—1500 转/分,比重量 3.7—7.7 公斤力/千瓦,增压后平均有效压力达 1.3—2.0 兆帕。

【船用柴油机】使用特点:(1)大部分时间在标定工况下运转,负荷变化急剧;(2)需在纵向倾斜 15—25°,横向倾斜 15—35°的情况下运转;(3)直接带动螺旋桨的主机应反复地停车和反向起动,并能燃用重油。结构特点为:(1)设置重油预热和净化装置,采用碱性润滑油及提高冷却水温,防止硫酸形成;(2)低速大功率机采用十字头式活塞—连杆机构,在气缸下部设置横隔板,防止重油的燃烧产物漏入曲轴箱污染润滑油;(3)具有转向机构,使曲轴能直接反转,并采用压缩空气起动。主要性能参数见下(表二)。发展趋势:(1)提高单机功率,适应提高船舶吨位和航速;(2)发展高增压 V 型中速大功率机。

【燃气轮机】将气体压缩、加热后使之连续膨胀,变热能为机械能的回转式动力机械。由压气机、燃烧室、透平(又称涡轮)、控制装置及必要的热交换器和辅机等组成。广泛用于石油工业,发电工业,军用舰艇和坦克,大型轮船、内燃机车、各种飞机及大型货运汽车上。

【燃气轮机循环】在燃气轮机中进行的空气压缩、燃气混合气燃烧、气体加热膨胀和冷却等过程组成的热力循环过程。由工质是否直接排入大气将燃气轮机的循环分为开式循环与闭式循环两类。其中开式循环又分为简单循环、回热循环和复杂循环三种。实际循环的性能受到诸多因素的影响,比如涡轮效率、压气机效率、流动阻力、变化热容等因素的影响。

【简单循环】依次实现绝热压缩、等压(或近似等压)加热、绝热膨胀及等压(或近似等压)放热诸过程的循环。在实际发动机中,简单循环的诸过程都是不可逆的。

【回热循环】简单循环的燃气轮机排气温度较高,达 430℃ 以上,造成热量损失。回热是废热利用的一种有效措施。采用回热循环的燃气轮机比简单循环多了一只称为回热器的热交换器。热交换器

表一 汽车用柴油机主要性能参数

参 数	轻、中型载重车	中、重型载重车	重型载重车
缸径 (毫米)	85—100	110—135	>140
气缸排列及数目	L4—6,V8	L6,V8,V10	V12 V16
功率(千瓦)	45—100	88—260	>260
转速 (转/分)	2800—4500	2200—3000	1800—2200
压缩比	16—22		
比重量(公斤力/千瓦)	3—6.1		
扭矩储备系数(%)	5—20		
转速储备系数	1.5—2.0		
大修里程(公里)	2万—6万		

表二 船用柴油机主要性能参数

参 数	低速机	中速机	高速机
冲程数	二	二,四	二,四
气缸排列及数目	6—12	4—18	6—16
缸径 (毫米)	420—1060	250—650	85—195
转速 (转/分)	102—250	350—900	1000—2200
单机功率 (千瓦)	1840—3550	147—20000	11—4110
燃油消耗率 (克/千瓦小时)	190—225	198—245	206—285
比重量 (公斤力/千瓦)	34—54	10.2—34	6.8—15

换热面的一侧是从涡轮排出的高温废气,另一侧是压气机出口的温度较低的空气。在回热器中,一部分废气热量回收到空气中,提高了空气进入燃烧室的温度,可节省燃料,提高循环效率。但回热循环增加机组重量和尺寸,应用不太普遍,仅在车用时,特别重视循环热效率的提高,才采用回热循环。

【复杂循环】中冷循环和再热循环同时使用的循环。在回热循环基础上,增加中冷器和第二个压缩机成为中冷循环,在第一涡轮后,增加第二个燃烧室及第二个涡轮成为再热循环,可降低空气消耗量 25—30%,提高比功(每千克工质输出功率)。中冷和再热同时采用称为复杂循环,可大大提高比功和热效率,但机组结构和操纵太复杂,因而实用很少。

【闭式循环】与开式循环的主要区别在于工质不直接排入大气,而在封闭回路中循环使用。闭式循环工质可用空气或氮气等气体,涡轮排出工质可经冷却器冷却后重新吸入压气机,压缩后用加热器(气体锅炉)加热至加热温度。闭式循环主要缺点为冷却器和加热器尺寸大,成本高,加热温度较低,温比不高,故实用不多。其

优点为工质纯净，无污染，还能适用多种燃料，当使用核能反应堆作加热器热源，组成核动力燃气轮循环装置，效率可高于汽轮机的核动力装置。

【燃气轮机总体构造】除压气机、燃烧室和涡轮等主机设备外，还有辅助设备，包括起动机、传动装置，各种油泵、水泵、管道阀门和附件等，组成燃油、润滑油、动力油以及冷却空气和冷却水等系统。为确保安全经济地运行，还应配置调节、操纵、安全系统。

【压气机】燃气涡轮中常用轴流式和离心式压气机。也有采用轴流—离心混合式。对压气机的要求：（1）热效率高；（2）单级压比高；（3）稳定工况区宽广；（4）比流量（单位面积流通能力）大。压气机由涡轮直接驱动，当运行工况偏离设计工况时，气流从叶片上强烈分离，引起压气机的“喘振”现象，使燃气轮机无法运行。因此压气机与涡轮的匹配，要求压气机的流量、压比、功率和转速在各种工况下都能与涡轮相匹配，涡轮运行线与压气机喘振线应有 12—15% 余量。在燃气轮机保安系统中应有防喘振装置和可调导叶等，使机组回到稳定工况区工作。轴流式压气机用于大、中功率燃气轮机组，单级压比小，便于多级串联。

【燃气轮机燃烧室】将压气机来的高压空气与喷嘴喷入的燃料混合，经过等压燃烧产生高温燃气，供涡轮作功的燃烧室。对其要求：（1）点火可靠、燃烧稳定；（2）燃烧完全、额定负荷时，燃烧效率应在 0.96—0.98；（3）压力损失小，压损系数 $\epsilon_B \leq 3—5\%$ ，排气温度均匀；（4）排气干净，无黑烟、含 NO_x 少；（5）耐热强

度高、使用寿命长。燃烧室由外壳、内壳及火焰管组成，火焰管进气端为扩压器，使气流降速，以免将火焰吹熄，在火焰部头部装有稳定火焰的旋流器，旋流器中心装有喷油嘴，起动时用点火器将混合气点燃。燃烧室用钢板和耐高温合金板材制作，可分单管、分管、环形和环管等 4 种。喷嘴按使用燃料不同分为液体燃料和气体燃料喷嘴。

【单管燃烧室】又称圆筒形燃烧室。采用圆筒形的外壳和火焰管的燃烧室。在每台燃气轮机中装置 1—2 个，可直立或横卧于燃气轮机上方。主要优点为结构简单、便于维修、使用寿命长可达 1 万小时。缺点为空间利用率差，比容积热强度低，不适用于要求结构紧凑的机组，广泛应用于小功率及部分中等功率燃气轮机。

【分管形燃烧室】通常为 6—12 个分开的小燃烧室，围绕燃气轮机均匀布置。每一个燃烧室都有单独的外壳，火焰管及喷油嘴，但点火器仅安装在个别燃烧室（通常为 2 个），然后依靠燃烧室之间的联焰管点燃其他燃烧室。分管形燃烧室尺寸小，易组织燃烧，调试、拆卸方便。但整个燃烧室构造复杂，空间利用率不高，重量大，火焰管冷却表面增大，火焰管间传焰性能差，燃烧室与直流布置的压气机和涡轮机流路不适应，故应用不多。

【环形燃烧室】由燃烧室内、外壳体所形成的环形空间内安装一个环形火焰管，火焰头部沿环周均匀布置 12—20 个旋流器和喷油嘴组成的燃烧室。其燃烧过程在火焰管的环形空间内进行，使燃烧室尺寸紧凑，需要冷却保护的火焰管面积较少，燃烧温升大，比容积热强度较高。主要缺点为油气匹配及组织燃烧的难度较大，检

修拆卸比较困难,调试时耗气量大。但由于环形燃烧室优点突出,广泛应用于航空燃气轮机、工业燃气轮机中,有扩大应用的趋势。

【环管形燃烧室】壳体与环形燃烧室相同,沿环形周向均匀布置8—12个管形火焰管,各火焰管之间也有联焰管相通供点火传焰。这种燃烧室吸收了分管形和环形燃烧室的优点,其火焰管尺寸较小,匹配混合气组织燃烧及调试方便,尺寸比较紧凑。主要缺点为进口段流动比较复杂,扩压口设计较困难、而且也有传焰问题。在航空燃气轮机上常采用顺流式,在工业燃气轮机中为缩短长度,常采用逆流式环管形燃烧室。

【液体燃料喷嘴】将加压后的燃油,经喷油器喷入燃烧室的火焰管,使燃油雾化成很细的颗粒,蒸发汽化与空气形成混合气后进行燃烧。目前应用最多的为离心式喷嘴。使燃油切向进入嘴头涡流室产生高速旋转运动经喷口喷出。依靠离心力作用将燃油喷散成伞状雾锥,使油滴直径小于0.1—0.15毫米。用改变进油压力的方法调节喷油量,油压调节范围为0.5—6兆帕。单级离心喷嘴结构简单,仅用于小型燃烧室。双级离心喷嘴,油量调节比可达1:10,用于各种类型燃烧室。还有一种空气雾化喷嘴,结构与单级离心喷嘴相似,同时用高速气流冲击油雾锥以改进雾化质量,进油压力低时亦能使雾化良好,进油最大压力7兆帕,雾化空气压力比燃烧室内空气压力高50—80%,雾化空气量占理论燃烧空气量4%,由于雾化作用很强,适于各种燃烧室,燃烧重油或劣质燃料,但需增加雾化空气设备。

【气体燃料喷嘴】将气体燃料送入火焰管与空气混合后燃烧。气体

与液体燃料燃烧室结构大体相同，只需将喷嘴换成气体燃料喷嘴即可。气体燃料喷嘴也有多种型式：（1）管形多孔喷嘴，燃料喷射速度达 150—200 米/秒，由小孔喷出，结构简单、加工方便，适用于燃油燃烧室改装；（2）预混式喷嘴，燃料经旋流器空心叶片上的小孔流出与空气混合后进入燃烧室，由于混合较均匀、所以燃烧较完全；（3）菌形头喷嘴，安装在旋流器中央、燃料经菌形头喷射成伞状气锥，运行范围较广；（4）双燃料喷嘴，中心为油喷嘴，气体燃料经四周小孔喷出，油、气可同时燃烧。

【燃气轮机点火器】燃气轮机起动时，点燃燃烧室内混合气，使之燃烧的装置。常用的点火器有：（1）电阻棒等炽热物点火器、结构简单、工作可靠，但通电时间长，点火反应较慢，一般用于单管燃烧室；（2）电火花点火器，利用高压放电点燃混合气，点火能量小，用于小型燃烧室；（3）火焰点火器，先点燃点火燃料（汽油、煤油等），形成火焰喷入燃烧室，点燃主喷嘴，点火能量大，反应迅速工作可靠，各类燃烧室均可采用。燃用重质燃油的燃烧室，点火时先用轻质燃料，着火后再切换成重油。点火器位置应使点火源位于燃料雾锥充分展开、混合气浓度合适、气流速度较低的地方。

【燃气涡轮】又称燃气透平。把高温高压燃气的能量转变为机械功的旋转式热力机械。分向心式和轴流式两种。向心式仅用于小功率（100 千瓦以下）燃气轮机。轴流式由静子上的一系列喷嘴（又称静叶）和转轮上一列动叶片组成一个涡轮级，单级涡轮功率有限，常用 2—6 级串联组成，与压气机相反，燃气先在喷嘴中降压加速后流入动叶片，产生作用力使转轮旋转输出机械功。在涡轮出口

处装有扩压器，使排气扩压降速，以减少速度损失。一般热效率可达 0.85—0.92。一般燃气涡轮结构简单，但由于在高温下工作，热应力、热膨胀、热腐蚀和冷却等问题要求很高。若静叶片由持环（内缸）固定，再装在机体（气缸）上，则构成双层气缸结构，将动叶片以纵树形叶根装在轮盘上，用拉杆螺栓将多个轮盘联接成组合式转子，叶片高度由前级向后级愈来愈长，这种双层气缸结构和组合式转子得到广泛应用。燃气轮机制作材料，见“涡轮冷却”。

【涡轮冷却】在高的燃气初温下，降低高温部件的温度，达到高效可靠的涡轮运行。目前大多采用压气机抽出的空气作为冷却介质。冷却方法为：（1）对叶片用吹风冷却根部，可使叶片工作部分比燃气温度降低 50—100℃，采用空心叶片内部的综合冷却，可使叶片降低温度 100—200℃。一般静叶用钴基、动叶用镍基高温合金材料制作；（2）转子常用空气冷却轮缘或引入叶根与轮缘区域对流冷却，使轮缘处温度在 550℃ 以下，以便采用便宜的珠光体钢做轮盘；（3）静子的冷却采用双层结构气缸，可在内外缸头夹层中通冷却气流，也可在夹层中敷设绝缘材料，使机壳在 400℃ 左右，能用球墨铸铁等普通材料加工制作。以水或其他液态物质作冷却剂，能达到很好的效果，目前尚处于研究阶段。

【燃气轮机变工况性能】包括两种情况：（1）非设计点运转的稳定工况，如部分负荷或大气环境变化的影响；（2）不稳定的过渡工况，如起动，升速，加减负荷等。在变工况下，燃气轮机的性能应保证：（1）可靠地运行，在各种负荷下，压气机不喘振，涡轮机初温不超温，不超速；（2）经济地运行，即效率不因功率下降

而极度恶化；(3) 机动性好，能迅速起动和加载。变工况性能与下列因素有关：(1) 所驱动机械的特性，如驱动交流发电机为恒速负荷，驱动压气机、泵、船舶车辆等为变速负荷；(2) 燃气轮机的循环方式和型式有：1. 单轴燃气轮机带动电站等恒速负荷时能良好地运行，带动变速负荷时，压气机可能出现喘振，使运行受到限制；2. 分轴燃气轮机，由两个涡轮一个带动压气机，一个带动外界负荷，适用于车辆牵引，由于动力涡轮不与压气机轴联结，突卸负荷时易超速，在低速工况下，压气机也会出现喘振，必须采取防喘振措施；3. 三轴燃气轮机，一个为动力涡轮，另两个带动两个压气机一个低压，一个高压能协调工作，不易喘振，其变工况性能与分轴式相似，但随功率下降，效率下降比分轴式慢；(3) 大气环境的影响，当大气温度升高，压力下降，将使功率下降，效率也相应下降；(4) 起动过程是冷加速过程，燃气轮机由冷态变为热态，形成热冲击，对寿命影响很大，为此压气机加装可调导叶，以减小起动功率和防止升速喘振。

【燃气轮机控制系统】由调节系统、操纵系统、保安系统等组成的，目的在使燃气轮机的工况始终保持在最佳状态的装置。它既能保证燃气轮机运行的安全、又能满足负荷变化、机器经济性能、使用寿命等诸方面的要求。它是燃气轮机实现经济、安全、自动运行的重要装置。广泛应用的有：机械液压控制系统和电子液压控制系统两类。后者因易实现高度自动和实现电子计算机控制，所以成为发展方向，得到迅速的推广应用。

【调节系统】根据燃气轮机用途，调节参数是不同的：(1) 驱动交流发电机和航空使用时，调节机组转速；(2) 作舰船动力时，调

节航速；(3) 作机车牵引动力时，调节功率及车速；(4) 带动增压器及泵时，调节进出口压力或流量。完成这些调节任务，不同形式使用负载（陆、海、空）和不同类型（单轴、双轴、三轴）燃气轮机，其调节装置是不一样的。但基本原理是相同的，即根据燃气轮机本身特性，结合负载特点，当工况变化时，调节输入燃气轮机的工质（如燃油量等），通过燃气轮机各部件本身的特性以及它们之间的气动联系，满足不同负载的要求。

【操纵系统】对过渡过程（如加速、起动等）利用辅助调节器进行控制的装置，以保证燃气轮机能迅速地过渡到能安全可靠地运行。辅助调节器有多种形式：(1) 液压延迟器，以时间程序来控制供油量；(2) 气动式辅助调节器，以压气机出口压力来控制供油量；(3) 加速凸轮程序控制辅助调节器，由凸轮形线通过杠杆传动使油压、压气机压力及涡轮转速各参数关系满足加速过程要求，防止涡轮超温，压气机喘振。随着电子计算机的迅速发展，应用检测仪表，对调节保安系统进行联锁保护和程序控制。对起动过程、燃气轮机应急发电站、天然气输送分配网的集中控制和调度，都可利用计算机进行程序控制，实现自动化。

【保安系统】确保燃气轮机安全运行的保护装置。一般安全保护装置加以限制的参数有：初温超温限制，涡轮超速，润滑油压力过低、过高，熄火、异振报警及压缩机防喘振放气机构等。保安系统可分紧急停机和限值调整保护两大类；(1) 紧急停机保护，当上述参数超过极限时，发出停机指令，自动停车；(2) 限值调整保护，当某项参数达到限值时，不是首先停机，而是采用调整手段（如调节燃油量），使该项参数不致继续恶化，以改善机组运行

条件，当调整保护不能控制时，最后紧急停机起极限保护，迫使机组停止运行。

【燃气轮机起动设备】带动燃气轮机组起动升速，一直到主机达到自持转速的设备。起动设备应能满足下列要求：（1）良好的外特性与足够的功率，一般单轴机组需 5%，多轴机组需 0.5—4% 机组功率；（2）起动方便、迅速、安全、可靠，从起动加速到自转脱扣，对重型机组需 10 多分钟，一般工业单轴机组约 3—10 分钟，航空型机组应小于 60 秒；（3）能多次连续起动，间隔时间较短；（4）起动设备本身重量轻，维护方便。起动设备类型及特点如下：（1）直流电动机起动，起动可靠，升速平稳，外特性好，电源设备笨重，成本高，功率不能很大，适于中小型机组；（2）交流电动机。电源充足，功率可较大，需用变速设备；（3）空气起动，适用于固定式机组，需用高压空气罐和活塞式压气机充气，设备庞大；（4）用内燃机和小型燃气轮机，但都需变速设备。缩短起动时间，除增加起动功率，还采用压气机可调导叶，可减少起动功率和防止升速喘振。

【发电用燃气轮机】利用燃料（油或天然气）燃烧后产生的高温气体能量变为机械能，驱动发电机发电的燃气轮机。单机功率在 5—10 万千瓦，效率可达 30—60%。燃气轮机用于发电不需大量冷却用水、加上其体积小，起动和停机迅速，机动性强，故常被用作移动电源（火车或汽车电站）、起动电源、应急备用电源或承担尖峰负荷等。在缺水而石油、天然气丰富的地区，也可用燃气轮机发电机组承担基本负荷。还可利用其高温排气的余热生产蒸汽，供汽轮机发电机组发电，组成蒸汽—燃气联合循环装置发电，以提

高其总的热效率。一般用作移动电源的燃气轮机，功率约为 10 千瓦左右。

【工业用燃气轮机】主要用于油田、气田、海洋钻探平台，用燃气轮机驱动压气机、增压水泵或发电等。在油、气输送管线上使用燃气轮机还便于集中遥控，并能就地燃用所输送的原油或天然气。在冶金及化工厂的副产品（高炉煤气或可燃气体）可作为燃气轮机燃料，驱动压气机或鼓风机供生产需用、使能源得到合理应用。此时燃气轮机为变转速运行，常用双轴或三轴燃气轮机。

【船用燃气轮机】主要在舰艇上应用。与蒸汽轮机相比，可大大提高舰艇的机动性和灵活性，可节省 60% 机舱面积，用以增强武器装备，而且可以实现全自动化；减少运行维护人员。20 世纪至 70 年代，单机功率已达 3 万千瓦，比油耗降为 330 克/千瓦小时，接近中速柴油机水平。舰艇按螺旋桨特性工作，转速变化范围宽，一般用分轴或三轴燃气轮机。另外也可作为气垫船、水翼船的推进动力和船用辅机。在商船上使用燃气轮机，因经济性原因，仍处于试用阶段。

【车辆用燃气轮机】要求部分负荷时效率高，油耗率低，而且在经常性的变工况下，对变转速适应性要求高，一般采用三轴燃气轮机，动力透平采用可调静叶，以改善扭矩性能，提高加速性能，降低部分负荷时油耗率。燃气轮机结构复杂，优点不能充分发挥。因此，车用燃气轮机尚处于研制完善性能阶段，只在坦克及大型载货汽车上试用。

【机车用燃气轮机】根据机车的特点，空载运行时间很长，要求燃气轮机在低载时燃料经济性好。可安装高效率回热器，采用分轴燃气轮机，提高适应性。燃气轮机占用空间小，使载客空间相对较大，减轻机车重量，车速可高达 300 公里/小时以上，在某些国家应用较多。

【航空用燃气轮机】航空发动机的一种。将燃料燃烧的能量转变为机械能并用以推动飞行器的燃气轮机。也是航空发动机中应用最广的一种，从 60 年代开始，已在航空动力中占统治地位。它在燃气轮机家族中，除具有体积小，重量轻的共性外，其比重量为最小，可低于除 0.2 公斤/千瓦。在飞机上安装燃气轮机，可使迎风面减小而有利高速飞行；由于高空气温低，可提高热效率。根据功能与用途的不同可分为五种类型：（1）涡轮轴发动机为输出轴功率的燃气轮机发动机，燃气由排气装置低速流出，只能提供少量推力，故广泛用于直升机作动力装置；（2）涡轮风扇发动机，在燃气轮机发动机前部或后部安装有一组风扇，使发动机总气流量大大增加，从而提高了发动机的推力，涡轮不输出轴功率，飞机靠喷气推进，气流分内外两个涵道，至尾部混合后从喷管喷出。它在起飞、加速时推力大，巡航耗油率低，广泛用于民航与军用飞机；（3）涡轮喷气发动机，作为燃气发生器，不输出轴功率的燃气轮机发动机，空气从发动机前部进入，经压气机、燃烧室和透平，使燃气在尾部喷管中膨胀加速后喷出，产生反作用力将飞行器推向前进，它尺寸小、重量轻、结构简单、平稳性好；但噪声大、耗油率高、低空性能较差，适用于高速飞行器；（4）涡轮螺旋桨发动机，燃气推动涡轮除带动压气机外，还通过减速器带动空气螺旋桨有轴功率输出的一种燃气轮机发动机，旋转的螺旋桨

提供飞机前进的拉力，燃气从机尾排出也提供少量推力，燃料消耗率低、重量功率比小，适用于 400—800 公里/小时的中速飞行的飞机；（5）涡轮桨扇发动机，结合了涡轮风扇发动机和涡轮喷气发动机特点的燃气轮机发动机，耗油率低、噪音小、推力大、适合用于超、亚音速飞行的中、短程飞机。

【复合式发动机】“引擎”的一种。由活塞式内燃机与燃气轮机组合而成的联合动力机组。为联合形式的热力发动机。按照内燃机、压气机、燃气轮机三者联系方式的不同，可分为燃气复合式发动机、机械复合式发动机、联合联系的复合式发动机、燃气发生器式复合式发动机等几种。由于复合式发动机集中了活塞式内燃机燃烧过程间歇进行，受热件得以冷却，压缩比较高和燃气轮机重量轻、体积小、热效率高等优点，可使联合机的热效率提高到 50% 左右。但因复合式发动机结构复杂，自二十世纪 50 年代以来，仅燃气复合的废气涡轮增压柴油发动机得到广泛应用，而其他种类的复合式发动机只在一些特定场合下得到有限的应用而未获得推广。

【燃气复合式发动机】复合式发动机的一种。也是应用最广的一种，即废气涡轮增压柴油机。内燃机、压气机与燃气轮机三者的联系方式为：内燃机排出的废气驱动燃气涡轮，涡轮轮轴输出的功率全部消耗在压气机的运转上。压气机将空气压缩使其密度升高后，再送入内燃机进气管，从而大幅度提高内燃机功率。

【机械复合式发动机】复合式发动机的一种。因其结构复杂尚未得到推广应用。其特点是燃气轮机通过齿轮传动将全部功率传递给内燃机曲轴。曲轴将部分功率用以驱动压气机工作，用机械增压

方式提高内燃机功率。内燃机废气又推动燃气涡轮，再通过齿轮把所产生的功率传给曲轴。这种复合式发动机的优点，是它能充分地利用废气能量提高其有效效率。原因是曲轴吸收了燃气涡轮除推动压气机消耗外的全部多余的功率。研究表明，对于绝热柴油机，当冷却损失大大减少之后，排气温度可大大提高，因而大幅度地提高了废气能量，使得燃气涡轮有更多的剩余功率被内燃机曲轴吸收。由绝热柴油机—压气机—燃气轮机组成的机械复合发动机，其热效率可达 50%。

【联合联系的复合式发动机】复合式发动机的一种。具有复合增压系统的复合式发动机。其特点是采用了两台或串联、或并联的压气机，一台由内燃机曲轴驱动，为涡轮增压；另一台由燃气涡轮直接驱动，为涡轮增压。两台压缩机同时将空气压缩，提高其密度后向内燃机供气，使之提高其功率。在二种程大型柴油机上得到应用。

【燃气发生器式复合式发动机】复合式发动机的一种。有两种类型：往复活塞式柴油机—压气机—燃气轮机机组；自由活塞式联合机组。前者以往复活塞式柴油机作燃气发生器，供燃气涡轮推动涡轮旋转而对外输出功率。另一方面柴油机曲轴只带动压气机，给柴油机提供增压空气，不对外输出功率。后者由自由活塞发气机与燃气的涡轮组成。其特点是：可用多台自由活塞发气机与一台燃气轮机匹配，机组功率约为发气机单机功率的整倍数；连续运行可靠性高，一台活塞发气机出故障停机不影响整个机组的运行；能适应多种燃料。这种复合式发动机适用于泵站，中、小电站和船舶。

其他动力机械

【水轮机】一种水力原动机。利用水力做功的一种机械。它的核心部分是一个转轮，可在水流的作用下旋转。古代利用简单的水轮机来进行排灌和粮食加工，近代则主要用来发电。它与发电机连接在一起组成一个水力发电机组。利用水流的落差，将水头的势能和动能转变为转轮旋转的机械能，发电机再将旋转的机械能变为电能输出。水轮机与发电机应该配套，并与水头大小匹配。二十世纪 60 年代后，水轮机的发展较快，80 年代就制造出了 700 兆瓦的发电机组，并正在开发研制 1000 兆瓦的机组。世界的水力资源将得到进一步的利用，有利于清洁能源的开发和保护人类的生存环境。按工作原理的不同。水轮机可分为冲击式水轮机和反冲式水轮机两类。前者又分为水斗式（水头大于 100—300 米）和斜冲式（水头在 200 米—300 米之间）两种。后者可分为混流式（小型机组水头在 5—200 米间，大中型机组在 30—700 米间）；轴流式（其中定桨式水头在 3—70 米间，转桨式水头在 3—80 米间）；贯流式（转桨式与定桨式水头均小于 20 米）；斜流式（其中定桨式与转桨式水头均在 40—120 米间）。

【水轮机型号】以反击式水轮机型号示例如下，其中主轴布置型式及引水室特征代号见附表，水轮机型式代号见“水轮机”。

HL 220—LJ—500

└─ 转轮标称直径厘米，
 └─ 主轴布置型式和引水室特征
 └─ 根据比转速规定的转轮型号
 └─ 水轮机型式

【水轮机的基本工作参数】主要包括：（1）工作水头 H （米），水轮机进口断面与出口断面处水流单位机械能之差；（2）流量 Q （米³/秒），单位时间内流过一既定过流断面的水流体积；（3）转速 n （转/分），水轮机每分钟的转数；（4）力矩 M （牛·米），工作机械对主轴产生的阻力矩；（5）效率 η ，水轮机的总效率为容积效率、水力效率、内部机械效率及外部机械效率的乘积。

主轴布置和引水室特征	代 号
立轴	L
卧轴	W
金属涡壳	J
混凝土涡壳	H
灯泡式	P
明槽式	M
罐式	G
竖井式	S
虹吸式	X
轴伸式	Z

【冲击式水轮机】水轮机的一类。由喷嘴、转轮、机壳三大部分组成。从特殊的导水装置引出高压水流通过喷嘴成为具有强大动能的高速自由射流，冲向转轮叶片，把高速射流的动能变为转轮旋转的机械能，并带动发电机发电。在工作过程中水流压力基本不变，主要是动能的改变和转换。冲击式水轮机又分为水斗式水轮机和斜击式水轮机两种。前者使用收缩喷嘴，且转轮装设“V型水斗，水斗中央设水刃，可使射流能量损失减小，提高其机械效率。因此水斗式水轮机应用范围最广。发展更快。后者喷出的射流有一斜角，只用于小型机组。

【混流式水轮机】又叫辐轴流式水轮机或辐向轴流式水轮机。反击式水轮机的一种，是世界上使用最广的一种水轮机。由轴、导轴承、尾水管、轮环、轮叶、支承底环、导叶、顶盖等零部件组成。水流从蜗壳、导水机构沿径向流入转轮，然后逐渐转向平行于轴的方向流出转轮，而进入尾水管，推动转轮旋转作功。其结构比较简单、运行可靠、最高效率超过95%，常在水头30—400米范围内的大中型水电站，也可在水头5—200米的小型水电站，而采用最广的是水头40—300米的大中型水电站。低水头、大容量的混流式水轮机尺寸很大，例如美国研制的700兆瓦单机功率的水轮机，其转轮直径达9.75米，水头仅87米。这种大型混流式水轮机的制造要解决大型零部件加工、运输和刚度问题。而高水头混流式水轮机的制造，则要解决汽蚀、磨损和振动问题。为此，转轮须采用抗蚀性能好的低合金钢或不锈钢制造；导水机构则要采取抗磨和防止间隙性汽蚀等措施。

【轴流式水轮机】反击式水轮机的一种。水流平行于轴的方向流经转轮，使之旋转做功。适用于水头在 30 米以下的水力发电站，是一种低水头用的水轮机。按结构不同又分为定桨式和转桨式两种。定桨式又叫定叶式或螺旋式，叶片固定在轮毂上，叶片角在运行中不能改变，适用水头 3—70 米的小容量机组，或水头、负荷变化不大的多机组电站，一般为中小型电站。转桨式又称转叶式，其叶片可按水头和负荷的变化调整角度，从而提高平均效率，其最高效率已超过 94%，适用水头 3—8 米的大中型水力发电站。例如二十世纪 80 年代安装在中国葛洲坝电站的就是一台单机功率 170 兆瓦、水头为 18.6 米，转速 54.6 转/分，转轮直径 11.3 米的轴流式转桨机水轮机。轴流式水轮机比转速较混流式水轮机大，但汽蚀系数也大。特别是其中转桨式水轮机结构复杂，在转轮体内安装油压接力器使叶片转动角度，这样当转轮直径小于 1.8 米时，便不宜采用。另外在减负运行时，还须采取措施限制抬机现象发生。

【贯流式水轮机】与轴流式水轮机的不同之处在于，主轴水平（或倾斜），转轮前后过流道为直线形或近于直线形，导水机构是圆盘式或圆锥式，且采用了直尾水管。在整个水轮机中水流沿轴向流动。把发电机安装在灯泡状的机室内就叫灯泡式（或半贯流式）机组，其导水机构为圆锥式，尾水管中的水流不转弯，水力损失较小，特别适用于低水头的水电站。

【斜流式水轮机】反击式水轮机的一种。其特点是叶片斜装在轮毂上，随着水头和负荷的变化，可操纵叶片绕轴线相应转动，使其平均效率比混流式水轮机大许多。又可分为定桨式和转桨式两种。

它们适用的水头均为 40—120 米。世界已安装有水头 78.5 米，单机功率为 215 兆瓦的斜流式水轮机。但由于斜流式水轮机结构复杂、转轮体积大，喉管小，造价也高，故一般只在使用混流式或轴流式水轮机不够理想，而且水头和负荷变化不大时才采用它。

【水泵水轮机】一种用于抽水蓄能电站的水轮机。抽水蓄能电站是专门负担电力系统中调峰、调频及事故备用的一种特种水电站。通常它具有高度位置不同的两个水库。水泵水轮机的作用是在电力系统负荷较低时作水泵，把低位水库的水抽到高位水库贮存备用，它充分利用了电网低负荷时的剩余电力；在电网高峰负荷时，将上水库的水放入下水库而作为水轮机发电。水泵水轮机组分为两种类型：一种类型为水轮发电机组和电动水泵组成，用电高峰时，水轮发电机组发电并入电网；用电低谷时，启动电水泵抽水蓄能。另一类型为可逆式水泵水轮机。常见的有混流式、贯流式或斜流式可逆式水泵水轮机，其转轮是两用的，用电高峰时，正转发电；用电低谷时，水轮可逆转，水轮机成为一台抽水水泵。已经安装的混流式可逆式水泵水轮机，发电时水头为 237.5 米，发电功率为 660 兆瓦；作水泵时。扬程可达 247.3 米。这种混流可逆式水泵水轮机在抽水蓄能电站使用最多。

【水轮泵】一种水力机械。也是水泵的一种。以水轮机作为原动机的离心式水泵。一般为水轮机与离心式水泵组成同轴联合机组。是一种中小型的排灌设备。凡水头大于 1 米，流量不小于 $0.1 \text{ 米}^3/\text{秒}$ 的河流、水库和渠沟里均可安装水轮泵。整个机组全部装于水下，无需吸水管，因而结构简单、安装方便、操作容易、维修费用低廉，很适合于边远山区使用。也可用于沿海开发海水的潮汐能。不

输水时，还可带动发电机或其他机具进行发电和加工作业。据统计，至 1980 年中国农村已建成水轮泵站 4 万多座，装机 6 万台。

【风力机械】将风能转换为机械功的动力机械，在工程上用来提水和发电。早在 13 世纪，中国、波斯、埃及就有了风车，利用风车作为动力碾米、磨面、提水灌溉和制盐，风车传入欧洲后，15 世纪已得到广泛应用。由于矿物能源供应的有限性，20 世纪 70 年代“石油危机”后，风能作为可再生的、无污染的自然能源又重新引起人们的重视。近代风力机械由风力机、调向装置与调速器组成。