

## 发展史

### 1 - 一般原理

在机械发展史中，存在两大机械家族，用于带动液体或产生旋转运动：

- 活塞式机械，
- 被命名为“涡轮机”的一类机械。

活塞式机械的运转原理是基于活塞的上下往复运动而产生的容积的变化。它可以用于压缩工质或释放被压缩的工质，特别是对于汽流体。

这种活塞式机械装备有转换装置，可将往复式的运动转换为旋转式的运动，或者正好相反。

这种装置，往往结构复杂，一般为连杆系统，但也可以是凸轮、旋转斜盘等等。

在这些机械中，活塞总是在气缸内摩擦。

为了保持气缸内的压力，它们必须装备密封环。

在大多数的情况下，包括压缩机和内燃机，为了保证润滑油的质量，从而确保各部件间的油质摩擦保持在最低程度，必须对压缩机的活塞—密封环—气缸进行冷却。

涡轮类机械的运转原理是基于在定子内安装的带有叶片的转子的旋转。因此它们不需要运动模式转换装置。

涡轮机不能在高压下工作，因为它们不具备可使得叶片间的容积改变的装置。在定义上，涡轮机是不可变容的。

但是，它们拥有一个优点：叶片在定子中没有摩擦。

在栏目 T “技术”中解释了如何将活塞式机械和涡轮机的优点相结合，在极端不利的最大压力比下，设计一台机械，以满足：

- 无需运动模式转换装置；
- 确定工作容积的各组件在运转时没有摩擦；
- 可以产生不同的容积和压力；
- 其密封性由可控负荷损耗获得。

## 发展史

### 2 - 热机热力学

#### 2.1 - 热机热力学

##### 2.11 - 热力学理论基础

热力学是建立于以下理论之上的：

- 能量既不能凭空产生，也不能凭空消失；
- 各种形式的能量是可以相互转化的：燃烧可产生热能，热能可转化为机械功；
- 由于各部件在运转时存在摩擦，热能绝不会完全转化为机械功。
- 所有自然过程和技术过程的能量转化都是不可逆的，且总是向最可能的方向发生，热能只能自由地由较热的物体传向较冷的物体。
- 反之，较冷物体向较热物体的传导只能在提供能量的情况下产生。

##### 2.12 - 转化的类型

根据转化发生的条件，热力学转化的类型按下文所述确定。这是：

- 压力恒定时被称为等压转化过程；
- 体积恒定时称为等容转化过程；
- 温度恒定时被称为等温转化过程；
- 没有热量交换时称为绝热转化过程；
- 没有热量的交换且没有摩擦时称为等熵转化过程；
- 发生状态的改变时称为多变转化过程。

当我们研究理想气体的理论循环时，我们可以使用这类转化的定律，因为我们可以使用由盖·吕萨克（1779-1850）发现的公式： $PV = RT$ 。它说明常数： $PV = R(267 + t)$ ，它接近于 $PV = R(273,15 + t)$ 。

盖·吕萨克定律和波-马定律相结合，并以热力学系统中理想气体的简单模型假设为基础，使得我们在此后数年确立了“理想气体”状态方程，即 $PV = nRT$ 或 $PV = NkT$ 。

##### 2.13 - 工作原理

燃料中所包含的化学能，通过氧化燃烧转化为了热能，这种热能借助被称为热机的机械转化为机械功。

## 发展史

### 2.14 - 热机分级

当燃烧在发动机内部进行时，我们称其为内燃。此时存在两种可能，在这两种情况下，循环都是开放式的：

- 或者其做功过程是周期性的，它必须在每个周期进行换气并吸入一定体积点燃的燃气，往复活塞式发动机即为这种情况；
- 或者其做功的过程是连续的，并不断地换气，如同在燃气轮机中的情况一样。

当燃烧在发动机外部进行时，我们称其为外燃。在这种情况下，做功过程可能是连续的，其循环是闭合的，因为驱动工质可保持化学性质不变，仅发生状态的转化，且无需进行替换。

在燃烧室外进行空气—燃气混合气体的调节，有利于实现均质化。我们称其为外部调节或混合均质。

当混合在燃烧室内进行时，其操作条件较差。此为异质。我们称其为内部调节或混合异质。

如果燃气由电火花点燃，我们称其为受控引燃，但是如果因达到了自燃温度而使混合气体自发点燃，我们称其为自动点火。

### 2.15 - 热力学循环

热能向机械功的转化，只可能在驱动工质发生状态改变时发生。

这些状态的改变通常通过包含两个下述状态变量的曲线图来表示：

- 温度的升高或降低；
- 压力的升高或降低；
- 体积的增大或缩小。

一般情况下，图表上的坐标反应的是：

- 在 $p$ - $V$ 图上的压力—体积比；
- 在 $T$ - $S$ 图上的温度—熵的比值；
- 在 $H$ - $S$ 图上的焓—熵比值。

对热力学的研究促使数位学者提出了工作循环的概念。时至今日我们仍在这些概念：

- 阿方斯·比奥·德·罗克斯发明的压缩机及提出的四冲程循环理论。这一循环也是如今四冲程汽油发动机的参考循环。
- 在1867年，尼古拉斯·奥库斯特·奥托（N.A.Otto）根据这一循环理论发明了一种发动机，但是在一次诉讼后他放弃了他的工作，因为他不是此专利的持有人。

## 发展史

- 詹姆斯·焦耳 (J. Joule) 在18\*\*年 (1818-1889) 提出的恒压循环理论。它是以后燃气轮机类发动机的参考循环。
- 萨巴特 (Sabathé), 其名字不详, 他最先主张将比阿方斯·奥·德·罗克斯和鲁道夫·狄 (R. Diesel) 提出的循环理论结合起来。这后来成为了柴油机的参考循环理论, 许多人还其错误地称为“狄赛尔发动机”。

### 2.16 - 对燃料的强制性要求

用于热机的燃料被分为三类, 各类都有各自的强制性要求:

- 用于均质调节和受控引燃的热机的燃料类;
- 用于异质调节和自动点火的热机的燃料类;
- 用于连续燃烧的燃气轮机类发动机的燃料类;

在那些供均质调节用的燃料类中, 包括含铅汽油、无铅汽油、液化石油气等。

这类的燃料必须是比较容易挥发的, 以有利于空气—燃料混合气的均质调节。但是它还需对其挥发性提出更高的要求, 即:

- 决定燃料的气化率的沸腾曲线需随温度的变化而变化;
- 蒸气压力;
- 气液比, 可用来确定燃料气化产生气泡的趋势;
- 密度, 可用来确定燃料的某些类型或成分;
- 不得超过铅含量的标准;
- 辛烷值决定了汽油的抗爆震能力。

用于异质调节的燃料, 其被称为: 柴油。

它是沸点在180和360摄氏度之间的不同碳氢化合物的混合物。

对柴油的主要要求有:

- 密度;
- 沸腾曲线;
- 运动粘度;
- 引火点;
- 十六烷值。

这些要求也已被标准化!

## 发展史

对于用于燃气轮机的燃料，其强制性要求有：

- 粘度；
- 各类杂质的含量，尤其是硫、钠、钒和铅含量。

外燃机对燃料的强制性要求较少。实际上，发动机的工质和燃气往往不是相同的。只要燃料能快速地充分燃烧，且不留下残留物就足够了。

### 2.17 - 燃烧

燃烧按以下两种不同的方式进行：

- 在往复式活塞式热机中作周期性燃烧，并随后每次换气；
- 在燃气热机中连续燃烧。

周期性的燃烧会带来很多问题。实际上，它必须发生在极短的一瞬间。在四冲程的热机中，其转速为6000转每秒，则其周期为： $1/(6000/2/60) = 1/50 = 0.02$  秒。

然而，这个周期还包括进气、压缩、做功和排气过程，而燃烧仅在做功过程中发生，它仅能持续： $0.02/4 = 0.005$ 秒。

在两冲程热机中，上述周期应除以3。

对于均质调节和受控引燃的发动机，引燃阶段在时间上实际是稳定的，它仅取决于混合气体的组成，而释放的热量是取决于燃烧室的结构和引燃点的位置的。

燃烧的速度，取决于火焰的扩散速度、涡旋强度和混合气中未引燃部分的温度变化。

引燃阶段的持续时间是固定的，它发生在膨胀做功阶段前，为了使燃料能在转化为机械功而膨胀做功时将其包含的化学能最大限度的释放，我们必须在其引燃前准备一个装置，以用于调节引燃时刻。

在异质调节的热机中，自动引燃在压缩即将结束时发生。此时燃料被注入到强力压缩的空气中并加热到700至900摄氏度之间。

燃烧将按两步进行，这也表明它确实是一种按照萨巴特循环进行的燃烧：

- 第一阶段是燃料注入时，引燃开始阶段：它产生了等容热量，按照阿方斯·比奥·德·罗克斯提出的循环进行；
- 另一阶段在燃烧开始后，燃料注入期间：它产生了等压热量，按照鲁道夫·狄塞尔提出的循环进行。

## 发展史

在燃气轮机类或外燃式发动机内持续进行的燃烧必须是稳定且有规律的。这是我们对此类发动机的主要要求。

### 2.18 - 热力学效率

热机的热力学效率取决于其散失热量的数量，即消耗的热量。它等于：

$$\eta = (\theta' - \theta'') / \theta''$$

其中  $\eta$  代表效率，  
 $\theta'$  带来的热量  
 $\theta''$  散失的热量。

## 2.2 - 热机的机械结构

### 2.21 - 往复式四冲程和二冲程汽油热机

往复式四冲程汽油发动机是一种对空气—燃料进行均质调节并采用受控引燃的发动机。

燃料主要是汽油，但也可以使用替代产品，如液化石油气。

燃料的调节，或在化油器内，或间接地在进气管内，或是直接在气缸内等燃料被周期性喷入的装置中进行。

燃料混合物在气缸内进行周期性的压缩，直至其压力在15至25巴范围内变化为止。

压缩后的温度在400至600摄氏度之间变化，此温度仍小于其自然温度，这样，燃料混合物必须被引燃以使燃料完成化学能的释放。

由火花引燃的燃气的燃烧，其速度是十分迅速的。燃料的压力值将增长到接近于其压缩后压力值的七倍，但是平均有效压力将与压缩结束时的压力值大致相等。

这些数值，因为同时受到许多变数的影响，而不能精确计算。这也是汽油发动机的制造在很大程度上取决于经验的原因之一。

在四冲程发动机中，换气是借助阀门装置完成的，而在两冲程的发动机中，是通过接近下止点的孔来实现的。

产生的有效做功通过连杆机构在曲柄末端转化为发动机的扭矩。连杆机构比较复杂，它需要发动机转速减至800至1200转/分之间，以保持发动机转动。这就需要大量的消耗燃料，特别是在循环不畅通的时候。

## 发展史

现在，我们可以观察到：

- 机械组件在峰值压力作用下的最大疲劳度和相同机械组件的平均疲劳度之间的比值等于最大压力值和平均实际压力值之间的比值；
- 在考虑到留出一定的安全余量的情况下，这些组件的尺寸由峰值压力值确定，而不是由平均有效压力值确定，这就要求组件留有足够大的尺寸余量。

汽油发动机的优点：

- 数十年的丰富经验，设计可控；
- 发动机机构经济；
- 活塞/气缸的结构有利于承受高压。

汽油发动机的缺点：

- 必须使用高端燃料；
- 压力值的最大值和最小值之比偏低；
- 效率偏低：燃料中包含的化学能仅有30%转化为了机械功；
- 有害物质的排放量相对较高：一氧化氮（NO），碳氢化合物（HC），一氧化碳（CO）；
- 噪声较大；
- 需要变速箱。

## 2.22 - 往复式四冲程柴油热机

往复式柴油发动机是一种进行空气-燃料混合物异质调节的发动机。

调节过程将在气缸、在调节舱、在气缸盖进行，但是在气缸中排气。里卡多舱就是一个例子。

柴油发动机的操作过程与汽油发动机的操作过程几乎一致，除了：

- 空气被压缩到30至55巴之间；
- 压缩温度在700至900摄氏度之间，并已超过柴油的自燃临界温度；
- 柴油的喷射在至上止点前发生；
- 峰值压力偶尔可以达到200巴，但是其数值往往在150巴附近，某些试验用发动机其压力值可以上升至超过240巴；
- 平均有效压力不超过柴油发动机压缩结束时压力值的30%，在装备有增压空气冷却装置的柴油发动机中，其压力值不超过压缩结束时得到的压力值。

喷射式柴油发动机的安全余量必须比汽油发动机中的要大得多，因为柴油发动机必须要考虑到自燃失败的情况，引燃的失败将增大下次循环时的峰值压力。

## 发展史

因此，考虑到在柴油发动机中经常出现的压缩过程中的较高压力，以及因自发引燃而产生的较强峰值压力，必须要求一个相对重型的发动机机组。

因为即使在满负荷时，异质调节的发动机必须在有大量空气的条件下工作，柴油发动机的单位容积功率较小。

柴油发动机的优点：

- 长期可控的设计；
- 发动机结构商用性；
- 活塞/气缸的结构有利于承受高压。

柴油发动机的缺点：

- 制造成本高；
- 压力的最大值和最小值之比低或很低；
- 单位体积功率低，柴油发动机的气缸容积一般为相同功率的气油发动机的1.5倍；
- 效率偏低：燃料中包含的化学能仅有30%转化为了机械功；
- 排放欠佳：存在烟灰和未燃尽物；
- 噪声太大；
- 需要强力的变速箱。

## 2.23 - 燃气轮机

燃气轮机是一种空气—燃料混合气异质调节，并持续燃烧的发动机。

这是一种使用多种碳氢化合物的发动机，可使用液体、气体燃料或乳化燃料。

调节工作在分割式燃烧室内进行，其中喷嘴将燃料精细地喷入助燃空气中以使得混合燃气的燃烧率尽可能高。

压缩过程和做功过程借助于在其各自舱内无摩擦旋转的叶片来实现。

现有的结构使得转速十分高，在系统内的某些地方，气体的流速可以达到甚至偶尔超过声音的吸入的空气首先被压缩至4至6巴，经过一个可能存在的换热器并升温，然后在燃烧室与燃料混合，以生成温度升高、体积增大的混合燃气。燃气将释放其一部分的能量用于做功，在必要时，另一部分存在于换热器中，剩余能量将散失在大气中。

由于其做功压力不太高，功率仅取决于叶片的转速，而叶片的转速逻辑上来说是取决于涡轮机尺寸的。因此，用于汽车业的燃气轮机将在转速范围在8000至70000转/分间运转

## 发展史

燃气轮机的优点：

- 可使用多种碳氢化合物；
- 运行稳定；
- 压力值的最大值和最小值之比较令人满意；
- 无需其他设备，排放值合乎要求。

燃气轮机的缺点：

- 效率偏低：燃料中包含的化学能仅有30%转化为了机械功；
- 做功压力低；
- 转速往往过快；
- 制造成本高；
- 燃料消耗大；
- 不适应小功率的情况；
- 因燃气速度而产生噪音；
- 需要价格昂贵的减速机。

### 2.24 - 润滑

常用的热机中，润滑是最复杂的。实际上，往复式热机在多处需要润滑，特别是对润滑操作而言最复杂的结构，如活塞—活塞环—气缸或气缸套：

- 一方面，为保证燃烧尽可能彻底进行，它必须发生在温度高于2000K的情况；
- 另一方面，在气缸中用于引导活塞的润滑油的正常工作温度必须不超过125摄氏度，以避免形成凝胶。

在这个方面，燃气轮机更方便，其叶片不会与舱体接触。

### 2.25 - 冷却

考虑到润滑油在烧焦后便失去了润滑作用，鉴于往复式发动机的结构，为了保证润滑油的润滑性能，对于与燃烧生热部位接触的那部分润滑油必须进行强冷处理。

这种强冷处理会将燃料中30%以上的热能强制排放出去：我们在一边导入热量，而在另一边排出热量。

### 2.25 - 燃气的排放

在往复式发动机中，燃料中超过30%的热能因排放而散失：

## 发展史

- 以热量的形式，因为膨胀容积等于压缩容积，而在燃烧时，压缩容积与新增热量成正比，因而上述的膨胀容积是不会超过压缩体积的；
- 以碳氢化合物部分未燃烧或完全未燃烧的形式，因为对进行状态完全转化的燃烧所给予的时间太短，实际上，0.002至0.01秒是完全不够的，而空气—燃料的比值不是总有利于进行氧化燃烧。

在燃气轮机中，通入燃气的的时间太短，不足以通过膨胀和冷却来限制由排放产生的损耗。除部分热量通过换热器进入压缩空气的情况外，燃料中70至80%的热能都以热量的形式散失了。

## 2.3 - 总结和结论

### 2.31 - 总结

为进行总结，我们建立了一下对比表格：

对比项目	往复式汽油发动机	往复式柴油发动机	燃气轮机
膨胀容积/ 做功容积的比值	等于1	等于1	大于1
热量交换	不可能	不可能	可行
燃料的选择	标准	标准	自由
燃烧过程的模式	周期性	周期性	持续
耐压性	高	高	低
压力最大值/ 平均有效压力的比值	低	低	高
转化为机械功的热能	视情况, 30至35%	视情况, 30至35%	视情况, 20至30 %
冷却系统的损耗	视情况, 30至35%	视情况, 30至35%	无
排放系统的损耗	视情况, 30至35%	视情况, 30至35%	视情况, 70至80 %
燃气的排放	有害	有害	可接受
噪声等级	高	高	高
做功容积内的摩擦	有	有	无
做功容积内的润滑	有危险	有危险	无用
冷却	必须	必须	无用
变速箱	必须	必须	
转速减速器			必须

## 发展史

### 2.32 - 结论

为组建一台热机，需遵守我们在前面的章节中曾经提及的各项理论：

- 外燃机对燃料的强制性要求较少。实际上，热机的工质和燃气往往不是相同的。只要燃料能快速地充分燃烧，且不留下残留物就足够了。
- 在燃气轮机式或外燃式热机内持续进行的燃烧必须是稳定且有规律的。这是我们对此类热机的主要要求。
- 汽油发动机的优点：活塞/气缸的结构有利于承受高压。
- 柴油发动机的优点：活塞/气缸的结构有利于承受高压。
- 燃气轮机的优点：可以使用多种碳氢混合物燃料，运转稳定，压力的最大值/平均有效值的比值较高，无需其它设备，排放值符合要求。

如同我们在前面提到的，在我们的技术细则中应包括以下各点：

- 一台外燃发动机；
- 可使用多种碳氢化合物；
- 结构有利于承受高压；
- 结构有利于承受高温；
- 运行稳定且安静；
- 压力最大值/平均有效压力的比值较高；
- 无需其它设备，排放值符合要求，没有排放系统；
- 做功容积内无润滑；
- 做功容积内无需冷却；
- 无需变速箱；
- 无需运动模式转换装置。

栏目“技术”和“应用”中证明这一技术细则可以得到满足。