



燃气涡轮发动机以空气和燃气作为工作介质,它将燃料的化学能转变成热能,再将热能转变成机械功。掌握力学、热力学、气体动力学的基础知识对理解发动机的工作原理是非常有必要的,本章简要介绍上述学科相关基础知识及概念。

1.1 力学基础

1. 物质

自然界的所有物质都是由分子和原子组成的。在任何状态和形状下都具有物质原有特性的最小粒子称为分子。原子是构成物质的基本单元,其简单结构是由原子核和一个或多个电子组成。原子核由一个或多个中子加上一个或多个质子组成。在多数原子中,中子和质子的数目相等。氧原子的原子核由 8 个质子和 8 个中子组成,8 个电子绕原子核转动。

气态、液态和固态是常见的三种物态。物质由一种物态向另一种物态的转变叫相变。

液体中的分子逸出液面向空间扩散的过程叫汽化。逸出液面的分子受到液体表面层分子的吸引力,只有动能足够大的分子,克服表面分子的吸引力才能逸出液面。当液体盛在密封容器中,液体汽化后,分子留在液面上方,有一些会因接触液面再回到液体中去。如果单位时间内离开液面的分子个数等于从蒸汽回到液体中的分子个数,则容器中的蒸汽达到饱和,这时蒸汽的压强定义为饱和蒸汽压。单位体积空气中所含的水蒸气质量称为绝对湿度。空气中所含水蒸气密度和同温度下饱和水蒸气密度的比值称为相对湿度,通常用百分数表示。

在一定的温度与压力下,固体将熔解为液体,液体凝固为固体。固体的熔解温度叫熔点,液体的凝固温度叫凝固点。固体也可以不通过熔解而直接汽化,称为升华。物质由气态变为固态叫结晶。在相变图上,物质的汽化曲线(AD)、熔解曲线(BD)和升华曲线(CD)交于一点,该点叫三相点。三相点的温度和压强是物质的三种状态平衡共存的条件(见图 1-1)。

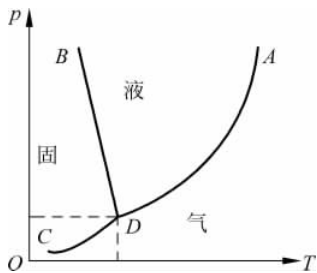


图 1-1 相变曲线

2. 气体的成分

在燃气涡轮发动机中空气和燃气作为工作介质。空气由多种气体成分组成,主要成分为氮气(N_2)、氧气(O_2)和氩气(Ar)等,其所占容积的百分比是:氮气 78.03%,氧气

20.99%, 氩气 0.98%。

燃气是空气与燃料进行燃烧后的气体产物。燃气的成分随燃料化学成分的不同以及燃气与空气的混合比例的不同有很大的差异。燃气涡轮发动机通常使用航空煤油作燃料, 航空煤油的主要成分是碳原子和氢原子, 可用 C_8H_{18} 表示。

3. 运动

直线运动有匀速直线运动和变速直线运动之分。圆周运动是曲线运动的一个特例。物体绕定轴转动时, 物体中每个质点都作圆周运动, 圆周运动是研究物体转动的基础。

牛顿运动定律是研究物体间的相互作用以及由此引起的物体运动状态变化规律的基础。牛顿第一定律又叫惯性定律, 是说任何物体都保持静止的或沿一直线作匀速运动的状态, 直到作用在它上面的力迫使它改变这种状态为止。力是引起运动物体状态改变的原因。

牛顿第二定律是物体受到外力作用时, 它所获得的加速度的大小与外力的大小成正比, 与物体的质量成反比, 加速度的方向与外力的方向相同。牛顿第二定律的数学表达式通常写成

$$F = ma \quad (1-1)$$

式中: F ——力;

m ——质量;

a ——加速度。

在旋转系统中, 牛顿第二定律的数学表达式写成

$$M = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-2)$$

式中: M ——扭矩;

J ——转动惯量;

ω ——角速度;

$d\omega/dt$ ——角加速度。

牛顿第二定律说明力是产生加速度的原因, 扭矩是产生角加速度的原因。对于质量一定的物体, 其受到的作用力越大, 加速度越大; 对于转动惯量一定的物体, 其受到的扭矩越大, 角加速度就越大。

牛顿第三定律说明两个物体之间的作用力和反作用力在同一直线上, 大小相等而方向相反。作用力和反作用力分别作用在两个物体上。

4. 常见力

在日常生活和工程技术中经常遇到的力有重力、弹力、摩擦力等。重力是因地球吸引而使物体受到的力。物体的质量指物体中包含物质的多少, 用 m 表示。在重力作用下, 任何物体产生的加速度都是重力加速度 g , 重力的方向和重力加速度的方向相同。如重力用 W 表示, 则

$$W = mg \quad (1-3)$$

发生形变的物体, 由于要恢复原状, 对与它接触的物体会产生力的作用, 这种力叫弹力。弹力是产生在直接接触的物体之间并以物体的形变为先决条件的。弹簧被拉伸或压缩时, 它对与之相连的物体有弹力作用, 这种弹力总是力图使弹簧恢复原状。在弹性限度内, 弹力

大小和形变成正比,遵循胡克定律:

$$F = kx \quad (1-4)$$

式中: F ——弹力;

k ——弹性系数;

x ——位移。

两个相互接触的物体作相对运动时,或有相对运动的趋势时,在接触面之间产生一对阻止相对运动的力叫摩擦力。相互接触的两个物体在外力作用下,虽有相对运动的趋势,但不产生相对运动,这时的摩擦力叫静摩擦力。外力超过最大静摩擦力,物体间产生了相对运动,这时也有摩擦力,叫滑动摩擦力。摩擦力大小与正压力成正比,并取决于摩擦系数。

物体运动过程中还受到惯性力、阻尼力的作用。

振动是物体运动的一种形式,凡是物体在平衡位置附近作往复运动,均称为振动。振动分两种基本形式,即自由振动和受迫振动。振动物体离开平衡位置的最大距离叫振幅,它的大小说明物体振动的强弱程度。物体完成一次全振动所经历的时间叫周期。单位时间内物体完成全振动的次数叫频率。物体作自由振动时的频率叫自由振动频率或固有频率。自由振动频率的高低完全由物体本身的性质决定,与外力大小无关。

1.2 热力学基础

1. 热力学概念

在热力学中将研究对象的物质及其所在的空间称为系统。系统之外能以某种方式与系统发生相互作用的局部区域内的物质称为外界。系统可能呈现各种不同的状态,平衡态是系统与外界不发生相互作用的条件下,其宏观性质不随时间变化的状态。系统从一个平衡态向另一个平衡态变化时所经历的全部状态的总和称为热力过程。封闭的热力过程称为热力循环,简称循环,此时系统从一个平衡态经过一系列的状态又回到原来的状态。实施热力循环的目的是实现系统与外界连续不断地进行热能与功的转换。

2. 基本状态参数

可以直接测量的状态参数称为基本状态参数,例如温度 T 、压力 p 、比容 v 等。

(1) 比容

单位质量气体所占有的体积称为比容,以 v 表示。如以 V 表示气体的容积, m 表示气体的质量,则

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

比容的倒数即单位容积气体的质量称为气体的密度,以 ρ 表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-6)$$

(2) 压力

气体的压力是气体分子对物体表面作用力的结果。在物理学上一个大气压是指在海平面标准状态下的大气压力,其值等于 760mmHg 或等于 101 325Pa。

(3) 温度

温度和压力一样是气体的一个宏观的量,温度的数值与气体分子平均直线运动动能成正比。度量温度的单位有:摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)、华氏温度($^{\circ}\text{F}$)和绝对温度(K)。摄氏温度将一个标准大气压下纯水的冰点定为零度,并将纯水的冰点和沸点之间等分为 100 格。华氏温度将一个标准大气压下纯水的冰点定为 32 度,并将纯水的冰点和沸点之间等分为 180 格。绝对温度是将气体分子停止不规则热运动时,即分子运动速度为零时的温度作为零度,温度间隔也是将一个标准大气压下纯水的冰点和沸点之间等分为 100 格。科学研究表明,绝对温度的零度相当于 -273°C (见图 1-2)。这三种温度单位的换算关系可表示为

$$t/^{\circ}\text{C} = (t/^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9} \quad (1-7)$$

$$T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1-8)$$

温度有静温和总温之分。如果气体或液体是静止的,能量由温度代表,静温等于总温。然而如果气体或液体在运动,仅部分能量是热能的形式,其余的能量表现为动能。热能和动能之和即总能量由总温代表。总温也叫滞止温度,它是在气体或液体与外界没有能量交换的条件下,速度滞止到零时气体或液体的温度,用 T^* 表示。总温 T^* 和静温 T 的关系可用下式表示:

$$T^* = T + \frac{c^2}{2c_p} \quad (1-9)$$

式中: c ——速度;

c_p ——比定压热容。

3. 理想气体的状态方程

只有当气体压力不太大和温度不太低的时候,才可以近似地把气体看做理想气体,这时可以忽略气体分子本身的体积和分子间的引力。

对于质量为 1kg 的气体,理想气体状态参数之间的一般关系式即理想气体状态方程为

$$pV = RT \quad (1-10)$$

式中 R 称为气体常数,表示 pV 与 T 之间的比例系数。 R 的数值只决定于气体的种类而不随气体的状态变化。气体常数的法定计量单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。空气的气体常数为 $287.06\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

其他气体的气体常数可用下式计算:

$$R = \frac{8314}{M} \quad (1-11)$$

式中: M ——气体的摩尔质量,法定计量单位为 kg/mol 。

对于质量为 m 的完全气体:

$$pV = mRT \quad (1-12)$$

4. 热力过程

热力系统从一个平衡态向另一个平衡态变化时所经历的全部状态的总和称为热力过程。封闭的热力过程称为热力循环,简称循环。热力系统进行的几个基本热力过程有:定容过程,定压过程,定温过程,绝热过程,多变过程等。

定容过程是气体比容保持不变的过程;定压过程是气体压力保持不变的过程;定温过程是气体温度保持不变的过程;绝热过程是气体与外界没有热量交换的过程;多变过程是

指遵守过程方程 $pV^n = \text{常数}$ 的过程。式中 n 为多变指数,是在 $-\infty \sim +\infty$ 之间的任何一个实数。对于复杂的实际过程,可将它分为几段不同多变指数的多变过程来描述,每一段的多变指数 n 保持不变。

$n=0$ 时,多变过程的过程方程变为 $p = \text{常数}$,为定压过程;

$n=1$ 时,多变过程的过程方程变为 $pV = \text{常数}$,为定温过程;

$n=k$ 时,多变过程的过程方程变为 $pV^k = \text{常数}$,为绝热过程, k 为绝热指数,在常温下空气的 k 为 1.4;

$n=\pm\infty$ 时,多变过程的过程方程变为 $V = \text{常数}$,为定容过程。

5. 功和热

功是系统所受的力和沿着力的方向所移动的距离的乘积。

在热力学中不能说在某种状态下系统具有多少功,只能说系统与外界交换了多少功,并规定,系统对外界做功,则功为正;外界对系统做功,则功为负。功的法定计量单位为焦耳(J)。在单位时间内所做的功称为功率。功率的法定单位为瓦特(W), $1\text{W} = \text{J/s}$ 。

系统在过程中通过边界与外界之间依靠温差所传递的能量称为热量,不能说在某状态下系统具有多少热量,而只能说系统与外界在过程中交换多少热量。热量的法定计量单位为焦耳。

6. 热力学定律

热力学第一定律确定各种能量形式可以互相转变,热可以转变为功,功也可以转变成热。工质受热做功的过程中,工质从外界吸收的热量,一部分转变为工质膨胀时对外做的功,一部分转变为工质内能。能量形式可以转变、传递,但是能量不会消失。确切地说,在某一个孤立体系内,全部的能量是一定的。

在等容加热条件下,气体不对外做功,外界加入 1kg 静止气体的热量全部转变为气体的内能。它与气体温度的关系可表示为

$$dq = c_v dT \quad (1-13)$$

式中: c_v 为比定容热容,此式表明气体内能的增量等于气体温度增量与比定容热容的乘积。

为计算方便起见,把气体的内能和功合在一起,称为气体的焓。只有在等压条件下,对外做功为零,焓的增量在数值上正好等于外界加入气体的热量。等压加热时,外界加入气体的热量与气体温度的关系可表示为

$$dq = c_p dt \quad (1-14)$$

式中: c_p 为比定压热容。 c_p/c_v 称为比热容比,用 k 表示,也叫绝热指数。在常温下空气的 k 为 1.4,不同成分气体的绝热指数随气体温度变化。

热力学第二定律确定,在热动力机中,工质从热源所得到的热量,不可能全部变为功,而只能将其中一部分热量变为功,其余的热量必须通过工质传递给某一个冷源。转变的功与工质得到的热量之比称为热效率。热源与冷源之间运行的理想循环即卡诺循环的效率是这两个热源和冷源之间的任何热机可能达到热效率的极限。

热力学第二定律有各种说法,常见的有:

开尔文说法:“不可能制造出从单一热源吸热并使之全部转变为功的循环发动机”;

克劳修斯说法:“不可能由低温物体向高温物体传送热量而不引起其他变化”。

1.3 气体动力学基础

1. 气体动力学

气体动力学是研究气体在流动过程中气体与气体、气体与固体之间相互作用所遵循的规律以及参数变化的规律的学科。

气体的密度随着压力或温度的变化而变化的性质称为气体压缩性,压缩性是气体的重要属性。黏性是实际气体的一个物理属性,它表示出气体对于切向力的一种反抗能力,这种反抗力只在运动气体流层间发生相对运动时才表现出来。

当气流流过平板时,在板上气流速度为零,离板面越远流速越大,直到离开板面一段距离的地方,气流速度才与未扰动的气流速度没什么显著的差别。平板附近气流速度出现这样的分布正是气体黏性的表现。黏性使直接接触板面的一层气体完全贴在静止的板面上,和板面没有相对运动。通常将靠近物体表面附近速度梯度很大的一薄层气体称为附面层(见图 1-2)。流体的流动分为层流和紊流两种状态。定义雷诺数

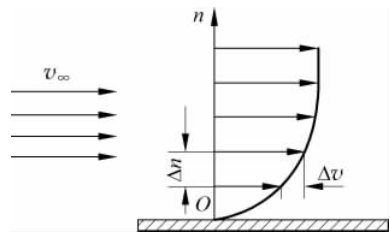


图 1-2 附面层内的速度分布

$$Re = \frac{\rho c D}{\mu} \quad (1-15)$$

式中: Re ——雷诺数;

ρ ——流体的密度;

c ——平均速度;

D ——特征尺寸;

μ ——流体的动力黏度。

雷诺数较小时,流体作层流流动;雷诺数较大时,流体作紊流流动。由层流变为紊流或由紊流变为层流时的雷诺数称为临界雷诺数。光滑管内流动的临界雷诺数为 2300。

2. 连续方程

气体在流动过程中遵守质量守恒定律、牛顿运动定律、能量守恒和转换定律。

将质量守恒定律应用于运动流体所得到的数学关系式称为连续方程。一维定常流的连续方程为

$$\rho_1 A_1 c_1 = \rho_2 A_2 c_2 = \text{常数} \quad (1-16)$$

式中: ρ ——密度;

A ——面积;

c ——速度。

3. 动量方程

动量是质量和速度的乘积。动量方程是将牛顿第二定律应用于运动流体所得到的数学关系式。对于一个确定的体系可表述为,在某一瞬间体系的动量对时间的变化率等于该瞬

间作用在该体系上所有外力的合力,表示为

$$\sum F = \dot{m}_2 c_2 - \dot{m}_1 c_1 \quad (1-17)$$

式中: \dot{m} ——流体的质量流量。

式(1-17)说明,在定常流中,作用在控制体内流体上全部外力的合力等于单位时间流出和流入该控制体的流体在该方向的动量之差。

4. 伯努利方程

伯努利方程是能量守恒与转换定律应用于运动流体所得到的数学关系式。对于不可压缩的理想气体,伯努利方程可表示为(忽略位能)

$$p + \frac{\rho c^2}{2} = \text{常数} \quad (1-18)$$

式中: p ——静压;

$\frac{\rho c^2}{2}$ ——动压。

它说明在不可压流中任一点流体的静压与动压之和保持不变。定义不可压流的静压与动压之和为全压,也可以称为总压,用 p^* 表示。静压是气体或液体静止时的压力;动压是气体或液体运动引起的。在不可压流中,当流动管道横截面积缩小时,流体的流速增大,压力下降;当流动管道横截面积扩大时,流体的流速下降,压力增高。

5. 音速(声速)

音速是物质介质中微弱扰动的传播速度。在气体动力学中音速是一个非常重要的量,因为气流速度与音速之比是判断气体压缩性质的指标。音速与气体状态参数之间有如下关系:

$$a = \sqrt{kRT} \quad (1-19)$$

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-20)$$

式中: k ——绝热指数;

R ——气体常数;

T ——气体静温;

p ——静压;

ρ ——密度。

流场中任一点处的流速 c 与该点处气体的音速(当地音速) a 的比值,叫该点处气流的马赫数,用 Ma 表示,即

$$Ma = \frac{c}{a} \quad (1-21)$$

根据马赫数的大小可以把流动分为亚音速流动($Ma < 1.0$)、音速流动($Ma = 1.0$)和超音速流动($Ma > 1.0$)。

气流速度等于当地音速,即 $Ma = 1$ 时的状态叫做临界状态。临界状态时的参数称为临界参数。临界参数有临界音速、临界速度、临界温度、临界密度和临界面积等。

6. 激波

超音速气流遇到高压区域或遇到障碍物而减速时必定产生激波。激波是一层极薄的流

动区域,在该区域,气体分子间产生强烈的撞击,造成相当大的机械能损失,这部分损失的机械能在激波中转变成热能。气流通过激波后流速和总压下降,静压和静温升高。它是属于有摩擦损失的绝能流动,因而在激波前后总温不变。

超音速气流遇到高压区或钝头物体时所产生的激波,如其波面与气体流动方向相垂直,则这种激波称为正激波。超音速气流遇到高压区或者绕内钝角流动或者遇到楔形物时都会产生斜激波。超音速气流流过钝头物体时,在物体前面产生的激波往往是脱体激波,这种激波就是曲线激波(见图 1-3)。

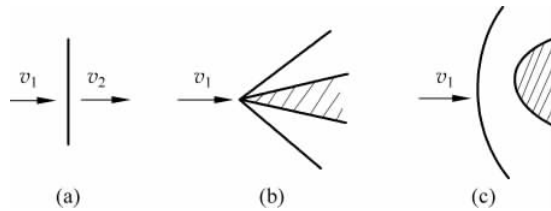


图 1-3 激波

(a) 正激波; (b) 斜激波; (c) 曲线激波



涡轮喷气发动机作为飞机的动力装置,在工作时连续不断地吸入空气,空气在发动机中经过压缩、燃烧和膨胀过程产生高温燃气从尾喷口喷出,流过发动机的气体动量增加,使发动机产生反作用推力。发动机作为一个热机,它将燃料的热能转变为机械能。涡轮喷气发动机同时又作为一个推进器,它利用产生的机械能使发动机获得推力。

2.1 喷气发动机的分类

根据燃料燃烧时所需要的氧化剂来源不同,喷气发动机可分为两大类:一类是火箭发动机,燃料燃烧时所需要的氧化剂是自身携带的;另一类是空气喷气发动机,自身只携带燃料而利用空气中的氧气作为氧化剂。

2.1.1 火箭发动机

火箭发动机本身带有氧化剂,推进剂(燃料和氧化剂)被点燃后在燃烧室中燃烧,化学能转换成热能,生成高温高压的燃气。燃气流经喷管,在其中膨胀加速,热能转换成动能,以极高速度从喷管喷出而产生推进力。由于不需要外界空气来助燃,这种发动机可以在大气层内、外工作。

根据所采用的推进剂不同,火箭发动机又可分为固体火箭发动机和液体火箭发动机两种。

1. 固体火箭发动机

这种发动机采用固体推进剂,例如,黑色火药,聚氨酯、聚丁二烯,复合推进剂等。发动机本体由燃烧室和喷管组成,如图 2-1(a)所示。

固体火箭发动机结构简单,但工作持续时间短,并且推力不易精密控制。它可作为航天器和飞机的助推器,帮助起飞和加速;也可作为战术导弹的主推器,如美国的麻雀导弹、不死鸟导弹、响尾蛇系列导弹等。

2. 液体火箭发动机

这种发动机采用液体推进剂。例如,液氢和液氧,煤油和液氧,偏二甲肼和液氧,偏二甲肼和四氧化二氮等。发动机由燃烧室、喷管、推进剂供应系统等组成,如图 2-1(b)所示。

液体火箭发动机的工作时间较长,可反复起动机,推力易控制。可作为航天器、战略导弹的主推器,如美国的“阿波罗”飞船、“民兵”系列导弹,俄罗斯的 SS-18 导弹等。

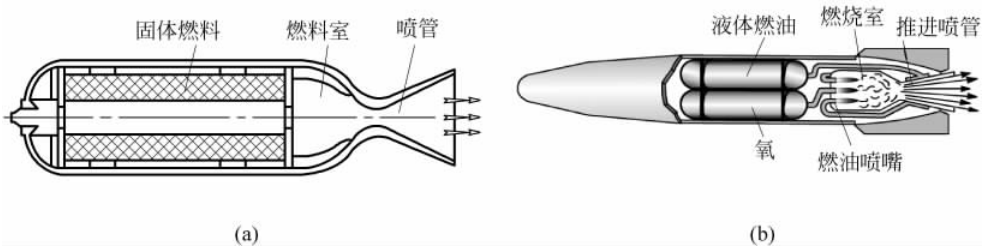


图 2-1 火箭发动机

(a) 固体火箭发动机; (b) 液体火箭发动机

2.1.2 空气喷气发动机

空气喷气发动机燃料燃烧时所需要的氧气从空气中获得,因而只能在大气层中飞行。空气喷气发动机可分为无压气机式和有压气机式两种。

1. 无压气机式空气喷气发动机

这类发动机,空气的压缩是通过降低气流自身速度(即冲压作用)来完成的,没有专门的压气机。它由进气道、燃烧室和喷管组成,没有任何主要的旋转部件,如图 2-2 所示。飞行时,迎面气流在发动机前和进入进气道内速度降低,压力、温度升高,然后在燃烧室内与燃料混合并燃烧,高温、高压燃气在喷管内膨胀加速,最后向外喷出,产生推力。

飞行速度越高,冲压作用越强,推力也就越大,因而它适合作超音速和高超音速飞行。在低速飞行时,冲压作用弱,产生的推力小,经济性很差。飞行速度为零时(如起飞),根本不能产生推力,所以不能单独使用,必须和其他类型的喷气发动机组合起来使用。

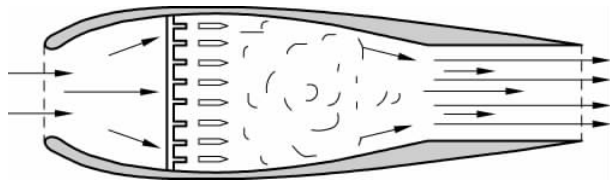


图 2-2 冲压式发动机

2. 有压气机式空气喷气发动机

这类发动机除了通过冲压作用外,主要依靠专门的压气机来完成空气的压缩,因都拥有其核心部件——燃气发生器(压气机,燃烧室,涡轮),统称为燃气涡轮发动机。它又可分为涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮风扇发动机和涡轮轴发动机。

1) 涡轮喷气发动机(简称涡喷)

涡轮喷气发动机由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和喷管组成,如图 2-3 所示。发动机工作时,空气经压气机压缩后,压力提高,随即进入燃烧室与燃料混合并燃烧,燃烧后形成的燃气流入涡轮,涡轮便在高温、高压燃气驱动下旋转起来,从而带动压气机工作,燃气最后在喷管中膨胀加速,高速向外喷出而产生推力。

涡喷发动机迎风面积小,具有较好的速度性能,但亚音速经济性差,适宜作超音速战斗机的动力装置。