

工 程 热 力 学

(涡轮喷气发动机设计与制造专业用)

南 京 航 空 学 院

1974.6.

绪 论

§ 1. 工程热力学的研究对象是什么？

飞机在天空中能快速地飞行，主要靠它的发动机不断地提供前进的动力，也就是推力。

发动机的推力是怎样产生的呢？

我们先从外观笼统地观察一下喷气发动机的工作情况（本教材以后分析对象主要针对涡轮喷气发动机，另有说明除外）。在地面试车时，从发动机和外界的关系来看，只看到气流进入发动机，而以万马奔腾之势从尾喷口喷出来，就是在空中飞行状态下，气流出口速度也大于进口流速，发动机的推力就是靠这个速度差产生出来的。如果没有速度差，进、出口的气流速度一样，那是不会产生推力的。速度差愈大，产生的推力也愈大。关于“速度差产生推力”的物理本质，可用力学定律来解释，气流从进口到出口，速度变化即反映了有动量的变化，动量变化一定是由于发动机对气流施加一种力的作用结果，又根据力学运动第三定律可知，发动机本身也同时受到一个大小相等，方向相反的作用力，这个力就是气体对发动机作用的推力。速度差愈大（表明出口速度大），显然作用力必然也大，相应的推力也大。可见发动机的“作用”，不外乎就是“对气流进行加速”。

发动机又怎么能将进入的慢速气流变快呢？回答这个问题，我们还是从发动机客观实际出发。我们看到发动机工作时要不断地输入燃油（例如煤油），如果切断油路，尾喷口气流速度也马上慢下来，最后停车。可见发动机把气流速度变快是紧紧与供油密切相关。实际上我们可以用能量的观点简单地解释这种现象。气流的出口速度大于进口速度，也就是出口气流的动能大于进口动能，那么所增加的这部分

动能的能量是从那里来的呢？通过以后的学习，将会知道它就是从输入的燃油，在燃烧室中燃烧后，把燃油原来具有的化学能变为热能，然后这分热能加给气体又转变为动能，使气流加速。（当然这只是通俗的理解）。可见这个发动机的“职责”就在于如何把燃料的化学能变为热能，再把这份热能，转变为机械能（动能属于机械能）。这里讲的是喷气发动机，如果扩大到一般热力发动机，（如蒸气机、内燃机）从能量观点来看，可以说也基本上是一样，都不外乎是把燃料的化学能变为热能，再转变为机械能。所不同的是：燃料不同，以及转变成的机械能具体形式不同（例如有些发动机它不需要在出口气流高速流动下产生推力，而是需要直接带动旋转机械的机械功，象活塞式发动机就是如此）。工程热力学，简单地说就是研究在热力发动机中化学能转变热能，热能转变机械能的规律的一门科学。关于化学能与热能的转变问题，将在另外的课程中去讲它，我们这门课主要讨论热能转变机械能问题。本课具体解决两个问题：(1)“转变”的规律；

(2)“转变”中有关的计算。

§ 2. 发动机是怎样把热能转变为机械能的

要了解这个问题，还得先对具体发动机内部大致情况了解一下，看一看进入发动机的空气和燃油经过怎样的变化最后使气流加速的。某型发动机运转时（地面试车），将外界静止空气吸入发动机，气体经进气道（见图1）时速度逐渐增大，压力、温度稍有降低。到达“1”截面气流的轴向速度约为196米/秒，然后气流进入压气机（轴向式），到达压气机出口截面“2”时，压力、温度有显著增加，速度略有减小。出口压力约为进口压力的7.14倍。通常把压气机的出口压力与进口压力之比叫作压气机的增压比，温度增高到约561°K，出口速度约为135米/秒。接着气流进入燃烧室，喷入燃油进行燃烧，

燃烧产生大量热量，使燃气的温度显著增高到约为 1145°K ，压力稍有降低，速度变化不大。燃气在涡轮导向器收敛通道中，剧烈地膨胀加速，温度、压力都显著下降，流过涡轮时，温度、压力还继续降低，同时推动涡轮转子做功。涡轮转子和压气机转子是在同一个轴上工作的，也就是说涡轮发出来的功主要用来带动压气机（极少量的功用于传动附件）。当开动加力时，燃气还要在加力燃烧室中通过喷入燃油继续加热，从而提高温度可达到 1377°K ，最后在收缩喷口中膨胀加速。如不开动加力，则从涡轮出来的燃气在排气装置中直接膨胀加速，产生推力。这时气体的温度和压力均下降。

发动机中气体的流程参数（主要是压力、温度和速度）的变化情况，表示在图 1 上。

热机把热能转变为机械能是借助于一定的工作物质（例如这里的燃气）来达到的。这种工作物质简称为工质。各种热机都有自己的工质。例如常见的汽油机、柴油机它们的工质也都是燃气；蒸汽机的工质是水蒸汽。由于气态物质有流动性，而且它的容积容易进行压缩、膨胀，所以一般热机的工质都是气体（或汽）。

通过上面简单介绍，我们可以看到热能是从燃油燃烧而来，所转变成的机械能则表现在尾喷管出口气流的动能增加。这种热能与机械能的转变，如果孤立地看好象主要是在尾喷管中完成的。它是通过燃气在喷管中进行一系列的状态变化所形成的过程来达到的。但光有喷管而没有其它部件保证，那也是不能连续地获得机械能的。例如压气机和燃烧室就是为工质创造高压、高温的条件；涡轮是用来带动压气机和其它附件转动；进气道保证空气源源不断地流入，并在压气机前获得均匀的速度场，等等。因此，在发动机中完成热能与机械能的转变，应看成是工质从进口到出口通过在各个部件中一系列状态变化过程的

总结果。这样一个长过程在研究时通常把它当作一个循环来考虑。具体地说，这个循环是指工质通过进气道、压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室以及尾喷管等部件在其中所进行的过程，同时还包括排出来的气体，在大气中排出热量，冷却后又回到进口状态的假想过程。这样所构成的一个封闭循环通常叫作热力循环，意思是表明这种循环是完成热能与机械能的转变。

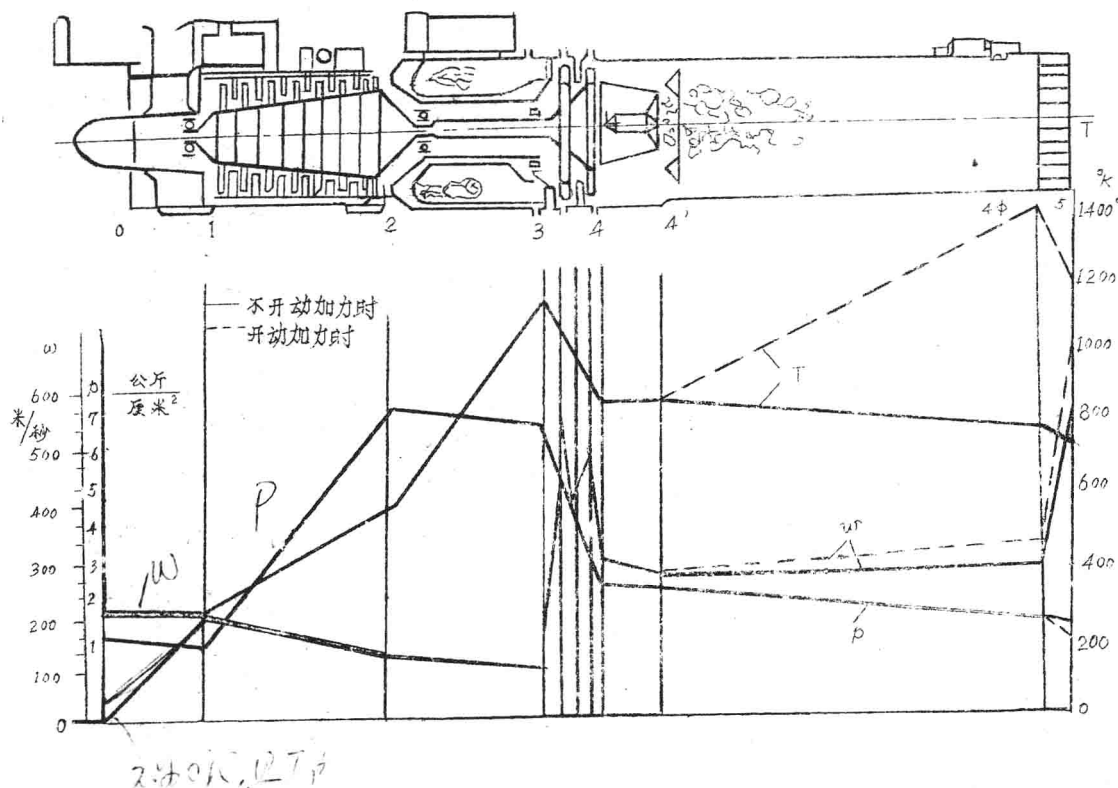


图 1 气流热力参数沿发动机各部分的变化

§ 3. 热能与机械能的转换是两种运动形式的转换

热能与机械究竟是怎么回事？它们相互转换又是个什么问题？

我们知道在燃烧室中，燃油燃烧后放出热能而使工质具有较多的

热能。从尾喷口排出的燃气，则具有较大的动能，即机械能。可见热能与机械能存在于工质之中。这里我们简要地介绍一些有关物质结构及分子运动方面的常识，作为对这两种能量的初步了解。

按照分子运动论认为，一切物质都由无数极小的粒子所组成，我们叫它为分子。分子是一个物质的最小单位，仍保有这种物质的一切性质。如果再分下去，就要把物质分解为原子以及其它更小的微粒了。一个分子是很小的东西，一个立方厘米（只有手电筒灯泡那么大）的空气，在普通的温度和大气压下，大约有 2.7×10^{26} 个分子。每个分子的直径大约为 2×10^{-8} （厘米），这大约相当于一根头发丝的三十五万分之一。这里的数据和我们日常所见到、感觉到的数量相差太远了，不是大得太大，就是小得太小，几乎难于捉摸。为了便于我们想象起见，可以打个比方，那就是如果把 1 厘米³ 的气体分子全部拿来一个挨一个地排成直线，那就可以形成一条长达六百万公里的链子，大约等于从地球到月球距离的十五倍。这些分子在那个相当于电灯泡大小的体积里并不是把灯泡全塞结实的，它是松松地散在里面的。是杂乱地分布，彼此之间有着相当大的空隙，粗略地估计分子间距离大约是分子本身大小的十倍左右，分子和分子之间存在着相互吸引力和排斥力，但由于气体分子的分布是如此稀疏，所以分子的相互作用力显得很微小，另外，这些分子也不是固定地停在那里不动的，而是无规则地、不停地运动着，忽而左、忽而右，忽而上，忽而下，忽而前后，往那个方向飞的都有。很象夏天傍晚我们看到的大群大群的蚊子在空中杂乱无章地飞舞一样。分子的速度是很快，摄氏零度的时候，空气分子运动速度是 1770 公里/小时，它比喷气机还要快。当然并没有那么大空地地方让它直跑，在飞跑过程中分子和分子不断互相撞击，撞完以后改变了方向，仍旧继续向前飞跑，平均速度没有减少。同时

也有无数的分子撞击容器的壁，撞击容器壁也和彼此互相碰撞一样，撞完之后，改变一个方向再飞，平均速度是不减少的。单原子组成分子的气体，它的分子运动只能是整个分子飞跑，也就是移动这一种运动方式。而由两个原子组成的分子，除了整个分子飞跑外，两个原子同时还可以回转，象两个人挽起手来转圈子跳舞似的。此外两个原子中的每个原子还可以来回振荡。构成分子的原子数越多，可能的运动花样也越多。凡是可能有的运动花样，实际上也总是存在的，分子除了表现为上述各种运动组成的分子无规则运动外，在分子的内部也产生一种分子内部运动，这是与辐射热有关的分子内部运动，（这里不详介绍）这两种运动互相影响互相转化，交织在一起。以上就是气体的“微观世界”概况。

这种气体的内部现象（通常称为微观现象）怎样和我们所观察到的气体整体表现（通常称为宏观现象）对得起头来呢？现在就从这里谈起。我们都有这样的体会，就是皮球可以压缩（或膨胀）的，这是因为皮球里的气体具有压缩（或膨胀）性。气体为什么会有这种性能呢？这就是由于气体内部分子之间有很大的空隙，气体受压缩就是分子间的距离缩短，分子总的活动空间变小，也就是气体的宏观容积变小。可见气体的容积与分子之间距离有关。当我们用手心去捂住一个装有压缩空气的瓶口时，我们会感到手心表面受到气体的压力。这个压力又是怎样形成的呢？这是由于气体分子在瓶内作无规则运动，不仅分子互撞，同时也撞击器壁，撞击手心的表面，我们所感到的压力就是大量分子撞击手心表面的结果。另外，我们有时感到有些气体“冷”一些，有些气体“热”一些，这又是怎么回事呢？这两种感觉的差别的实质从微观来看，主要表现在气体内部分子运动的速度快慢不同。你感觉到“热”，这是你的表皮上的神经末梢受到了外界刺激

的一种反应和味觉对于糖盐的感觉是相仿的。正在急剧运动的分子（速度快的）撞击你的神经末梢，这种撞击就使你有“热”的感觉，另一种气体分子速度稍慢一些，你就会感觉到“冷”一些。物体的冷热程度通常用“温度”这个术语来表达的，“热”一些表示温度高一些，“冷”一些表示温度低一些，可见，气体的温度与分子运动速度有关。关于气体的宏观量与其微观量之间关系式有如下两个（仅作介绍，不作推导）；

$$(1) \quad P = \frac{2}{3} n_0 \left(\frac{m \bar{\omega}^2}{2} \right) \quad (1)$$

式中 P — 气体压力强度， n_0 — 单位体积中分子数目； m — 分子质量， $\bar{\omega}^2$ — 分子速度平方的平均值，显然，

$$\left(\frac{m \bar{\omega}^2}{2} \right) \quad \text{是一个分子移动的平均动能。}$$

式(1)给出了气体宏观量压强与其内部分子运动的微观量分子移动平均动能之间的连系。

$$(2) \quad \left(\frac{m \bar{\omega}^2}{2} \right) = \frac{3}{2} K T \quad (2)$$

式中 K — 叫做玻尔兹曼常数，它的数值等于 1.38×10^{-16} ^{尔格} / 度， T — 气体的绝对温度。式(2)给出了气体的宏观量温度与其内部分子运动的微观量分子移动平均动能之间的联系。

这种大量分子作无规则的运动和分子内部运动称为分子热运动，所谓“热能”转变为“机械能”就是分子的热运动与机械运动这两种运动形式的“转变”。

§ 4. 工程热力学的研究方法

对热能与机械能转换问题进行分析时，首先要使所研究的对象范围加以划定，这样才有可能弄清所研究对象与其相联系的外在物之间各种能量交换的关系，也才有可能掌握对象参与变化时各物理量所遵循的规律，以便分析计算。否则将是混淆不清的。

我们所划定的那一部分作为热力学分析的对象就叫做热力系统。

或简称系统。系统以外的任何东西都叫做外界。系统和外界的分界面叫做系统的边界。通过边界，系统和外界之间可以有能量的交换和质量的交换，但习惯上所取的系统常常是把一定量的工质划为系统，这时系统和外界只有能量的交换而无质量的交换。对于有质量交换的系统，叫做开口系统。另外，在划定系统时，对于流动着的工质还要考虑“参考坐标”问题。因为气流的速度和动能都是与分析时所选定的“参考坐标”密切有关的。通常有下列两种选定“参考坐标”的方法。

(1) 把“坐标”固定在管壁上或叫“定坐标”。这就是说工质相对于这个“坐标”如果有相对运动的话，那么它的速度和动能就是根据这个坐标来确定的。如果我们在进气道内取出两截面相距为 dx 之间的工质微元体划为系统（见图2），这个系统对坐标（即管壁）来说是有速度的，因而它也具有动能。这个系统和外界之间可能有热量的交换；这块作为系统的工质，在管道内流动，通过边界（例如在管道轴的方向上）外界对它必然有力的作用，同时相对于定坐标又有位移，因而也就有功的交换。

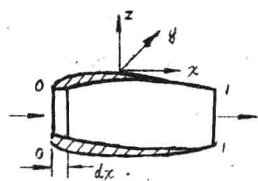


图 0—2

系 统

(2) 把“坐标”固定在所流动的工质上，或叫“动坐标”。例如在上述情况中，如果把坐标固定在流动着的微元系统上，则坐标与系统一道运动着，因而系统对坐标来说，没有相对运动（或者说处于相对静止下），这时对系统进行热力分析时，就不存在速度和动能问题，但是通过边界仍然要考虑热量交换问题，因为热交换是与坐标选择无关的。另外在功的交换形式上，也有所不同（这一点后面还要详细分析，这里不多谈了）

目 录

绪 论

§ 1 工程热力学的研究对象是什么?	1
§ 2 发动机是怎样把热能转变为机械能的?	2
§ 3 热能与机械能的转换是两种运动形式的转换	4
§ 4 工程热力学的研究方法	7

第一章 工质的状态

§ 1 状态参数	1—1
§ 2 理想气体及其状态方程	1—10
§ 3 理想气体的混合气	1—16

第二章 热力过程

§ 2—1 热力过程	2—1
§ 2—2 定压过程	2—4
§ 2—3 定容过程、定温过程	2—7
§ 2—4 绝热过程	2—9
§ 2—5 发动机的循环	

第三章 热力学第一定律及能量方程

§ 3—1 热力学第一定律本质	3—1
§ 3—2 气体定常流动的能量方程	3—3
§ 3—3 相对静止情况的能量关系式	3—25
§ 3—4 机械能形式能量方程	3—28
§ 3—5 热力学第一定律的应用	3—31

第四章 熵及定熵过程

§ 4—1 熵是个状态参数	4—1
§ 4—2 理想气体熵的计算	4—4
§ 4—3 温熵图及焓熵图	4—7
§ 4—4 定熵过程分析	4—12

第五章 多变过程及叶轮机的热力过程

问题的提出	5 — 1
多变过程	5 — 2 $\sqrt{c}$
压气机和涡轮中的热力过程	5 — 8
热力学图解	5 — 12 $\sqrt{s}$

第六章 热力学第二定律及发动机热力循环

涡轮喷气发动机理想循环	6 — 2
热力学第二定律	6 — 12
涡轮喷气发动机实际循环	6 — 23
活塞式发动机理想循环简介*	6 — 31 $\sqrt{c}$
符号说明	

第一章 工质的状态

发动机把热能转变为机械能是依靠工质在各部件中发生一系列的状态变化来实现的。那么工质的状态是怎样确定的呢？这一章主要来解决这个问题。

§ 1—1 状态参数

考察一下工质在发动机中发生状态的改变，我们是怎样感觉出来的呢？最直观的反映主要表现在气体通过不同的截面时，从仪表上显示出来的温度、压力等读数有所变化。可见，对于气体处于一个什么状态，主要是借助于气体的某些物理性质（如温度、压力等）来加以识别的。正如我们区别地理上的状态用经纬度，区别一个物体的几何状态用长、宽、高一样，我们区别热能转变为机械能的工质的热力状态则用温度、压力等这一类物理量。这种用来表徵工质的状态的物理量就叫做热力状态参数或简称为状态参数（也有人叫做热力参数）。因而“状态”这个概念反映到我们感觉中的就是一组状态参数的综合。

什么样的物理量可以作为状态参数呢？我们准备放在后面去讨论，这里先来介绍三个可以通过直接观测得到的状态参数，即压力、温度及比重（比容和密度）。通常称这三个参数为基本参数。

1—1—1 压力

在发动机内腔的壁面上，承受着空气（或燃气）对壁面的作用。单位面积上所受到垂直于这个面上的作用力的大小，物理学上叫“压力强度”或压强，工程上简称“压力”。压力的实质是大量分子撞击器壁的总结果。

发动机的试车台仪表板上安置了许多测量不同工作点上气体压力的压力表。这些仪表大部分是属于“弹簧管式”压力表。它是利用表内一种弹簧管在受到腔内外压力差的作用下而产生的弹性变形，牵动指针显示出读数，以表示腔内被测气体的压力与外界环境（如大气）压力之差，因而表面上的读数不是被测气体的真实压力，通常把这个读数叫做表压力（ $P_{\text{表}}$ ），它只表明工质的压力高出于环境压力多少，如果要知道气体的真实压力（ P ——通常称为绝对压力），还要借助

另外一种“气压计”（专门测量大气压力的仪表）取得环境大气压力的读数“ P_H ”；然后按下式计算气体的绝对压力：

$$P = P_{\text{表}} + P_H \quad (1-1)$$

实验室里，在测量不很高的气体压力时，有时采用液体压力表（如水银压力计）比较精确。测量情况见图 1—1 所示。当出现如图 1—1 中(a)情况时，说明被测气体压力大于外界大气压力，这时压力计读数（即两边水银面高度的差值）就是表压力（ $P_{\text{表}}$ ），被测气体的绝对压力还要通过测得环境大气压力（ P_H ）后，按公式（1—1）计算。因为从压力计上清楚地看出，被测气体的绝对压力是与环境大气压力 P_H 加上水银柱压力 $P_{\text{表}}$ 相平衡的。

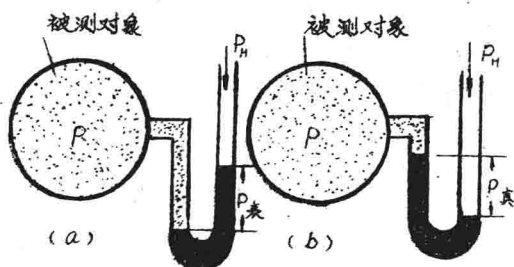


图 1—1 压力测量示意图

顺便提一下，在工程上测量压力时，有时遇到被测气体压力低于环境大气压力时（如图 1—1 中(b)），这时压力计上读数（仍为两水银面高度差）称为“真空度”用“ $P_{\text{真}}$ ”表示，这种压力表称为“真空压力表”。（上述弹簧管式压力表也有测真空度的“真空压力表”）显然，这时被测气体的绝对压力应按下式计算：

$$\therefore P + P_{\text{真}} = P_H$$

$$\therefore P = P_H - P_{\text{真}} \quad (1-2)$$

气体压力的单位，在工程上常用的是〔工程大气压〕我们简称〔大气压〕，它的大小是这样规定的：在每一平方厘米面积上受到1公斤的力。可见1〔工程大气压〕等于1〔公斤/厘米²〕。通常，压力表的刻度用的就是这个单位。在计算中有时还会碰到其它一些单位，如〔公斤/米²〕，〔mmHg〕（读成毫米水银柱），〔物理大气压〕等。它们之间的换算关系如下：

$$1 \text{ (工程大气压)} = 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} = 10^4 \text{ (公斤/米}^2\text{)} \\ = 735.6 \text{ (mmHg)}$$

$$1 \text{ (物理大气压)} = 760 \text{ (mmHg)} = 1.033 \text{ (工程大气压)}$$

有关它们的换算推导过程列于附录中。这里最常用的单位转换是〔工程大气压〕和〔公斤/米²〕，因前者是直接从压力表上取得的数值单位，而后者则是公式计算时常用的单位。

应该指出：只有气体的绝对压力才是气体的状态参数，而表压力和真空度都不是气体的状态参数。这是因为光是表压力和真空度都不能直接反映气体的真实压力大小。我们知道，对应着气体的某一个确定的状态，应该有、也只能有一个压力的数值，而不能有很多压力数值与它相对应。“绝对压力”就符合这个条件，而表压力（或真空度）就不是如此。比方说气体在某一状态时，其绝对压力为3.4〔大气压〕，由于环境大气压力可以出现各种不同的情况，因而尽管被测气体的状态仍保持原样（即真实压力仍为3.4〔大气压〕），但压力表上的指示数值可以出现多种读数，例如环境大气压力是1〔大气压〕的话，则表压力为2.4〔大气压〕，如环境大气压力是1.03〔大气压〕则表压力将变为2.37〔大气压〕。可见，可以有很多个表压力与此状态相对应，（图1-2）显然，表压力不能表示气体在某一状态下的真实压力，只有把它化成绝对压力才是气体的状态参数。对任一确定的状态，只有一个确定的数值与它相对应。这个特性叫做单值性。作为状态参数来说，就必须具备这个单值性条件。

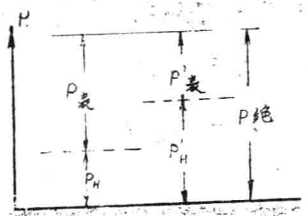


图 1-2

注：压力单位换算关系推导：

(1) 关于 $1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} = 10^4 \text{ (公斤/米}^2\text{)}$

因为 $1 \text{ (米)} = 100 \text{ (厘米)}$

则 $1 \text{ (米}^2\text{)} = (100)^2 \text{ (厘米}^2\text{)}$

即每 $1 \text{ (米}^2\text{)}$ 相当于 $10^4 \text{ (厘米}^2\text{)}$ ，所以

$$\begin{aligned} 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} &= 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \times 10^4 \frac{\text{[厘米}^2\text{]}}{\text{[米}^2\text{]}} \\ &= 10^4 \text{ (公斤/米}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 关于 $1 \text{ (工程大气压)} = 735.6 \text{ (mmHg)}$

根据物理学上计算水银柱的压力方法：

压力大小 = 水银高度 × 水银比重

水银比重是 $13.6 \text{ (克/厘米}^3\text{)}$ ，则 1 (mmHg) 相当的压强为：

$$\begin{aligned} 1 \text{ (mmHg)} &= 0.1 \text{ (厘米)} \times 13.6 \text{ (克/厘米}^3\text{)} \\ &= 1.36 \text{ (克/厘米}^2\text{)} = \frac{1.36}{10^3} = \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \\ &= 13.6 \times 10^{-4} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \\ \text{即每 } 1 \text{ (mmHg)} &\text{相当于 } 13.6 \times 10^{-4} \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \text{ 而} \\ 1 \text{ (工程大气压)} &= 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \\ \text{则 } 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} &\text{又相当于多少 (mmHg) 呢？} \\ 1 \text{ (工程大气压)} &= 1 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)} \\ &= \frac{1}{13.6 \times 10^{-4}} \text{ (mmHg)} \\ &= 735.6 \text{ (mmHg)} \end{aligned}$$

(3) 关于 $1 \text{ (物理大气压)} = 1.033 \text{ (工程大气压)}$

根据物理学规定 $1 \text{ (物理大气压)} = 760 \text{ (mmHg)}$

而 $1 \text{ (工程大气压)} = 735.6 \text{ (mmHg)}$

$$\begin{aligned} \text{所以 } 1 \text{ (物理大气压)} &= \frac{760}{735.6} \text{ (工程大气压)} \\ &= 1.033 \text{ (工程大气压)} \end{aligned}$$

〔例〕水银压力计测压时，为防止有毒的水银蒸汽蒸发，在水银液柱上复盖一层煤油。对某气体测量结果，水银柱高 900 mm ，煤油柱

高 32 mm。设气压计读数为 780 mm Hg，求气压的绝对压力。（煤油比重为 0.80 吨/米³，水银比重为 13.6（吨/米³）。

解：首先建立 U 形管基面压力平衡关系式，并采用单位 mm Hg，

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{油}}$$

将煤油柱换算成相当的水银柱

$$h_{\text{煤油}} \cdot \gamma_{\text{煤油}} = h' \cdot \gamma_{\text{Hg}}$$

$$\text{则 } h' = h_{\text{煤油}} \cdot \frac{\gamma_{\text{煤油}}}{\gamma_{\text{Hg}}}$$

$$= 32 \times \frac{0.8}{13.6} \text{ mm Hg} = 1.88 \text{ mm Hg}$$

$$\therefore P_{\text{绝}} = (900 + 1.88) + 780 = 1681.88 \text{ mm Hg}$$

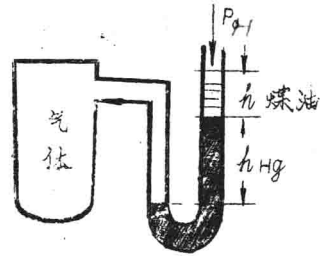
如果有效数字只要三位的话，煤油的压力可以忽略不计。

1-1-2 温度

气体的温度是用温度计来测量的。试车台上也装有多种测温仪表，用它来测量发动机部件有关工作点上的温度。这些温度计主要是热电式的。（关于它的构造、原理和使用问题，将在实验中介绍）

温度概念的建立以及它的度量都是以热平衡为基础的。假设将两个冷热程度不同的物体相互接触，则在边界面上要发生热交换，经验表明，经过一定时间以后，两物体之间不再发生热传递，这时我们就说这两个物体处于“热平衡”。并把这两个物体处于热平衡时所具有的这种共同特性用一个物理量来表示，叫做温度。两个处于热平衡的物体的温度是相等的（或具有相同的温度）。温度概念就是这样建立起来的。从微观来看，两物体温度相等，表明两物体内部分子的平均运动动能相等。（参看式（2））所以温度是分子热运动强度的度量。

要确定甲、乙两物体是否温度相等，可以用第三个物体丙分别与它们接触，如果分别都是一接触就达热平衡的话，则可预知如让甲、乙直接接触，也必为热平衡，即温度相等。这个事实告诉我们比较两个物体的温度，不一定让它们直接接触，只要用第三个物体分别与它们接触就行了，这第三个物体就是温度计。“达到热平衡的不同物体具有相同的温度”这个事实，就是我们用各种温度计来测量物体的温度的基本依据。当温度计与被测物体达到热平衡后，温度计的温度就



等于被测物体的温度。

通常使用的温度计都是借助于一定的物质（称为测温质）通过它某种物理性质随温度而变的关系显示出来的。例如水银温度计是利用水银（测温质）的体积（物理性质）随温度而变的关系显示出温度数值的。热电偶温度计是利用两种不同金属材料（测温质）焊在一起的接点随着温度不同而产生不同的热电势（物理性质）而显示温度大小。

前面所讲的测温基本依据，提供了一个测量方法，这个方法只能表示两个物体温度相等，但不能表示物体温度的数值，这常要用一种人为规定的“温度标准尺”（简称“温标”）来确定温度的大小。所谓“温标”就是温度的数值表示法。“温标”一般确定了以下三个内容（所谓温标三要素）：(1)基准点。也就是规定一些情况下的温度作为温标的基准点，并给以一定的数值。例如把冰、水、蒸汽三相共有的三相点温度定为 273.16°K （“ $^{\circ}\text{K}$ ”称为绝对温度）。(2)标准仪器。也就是规定在不同温度范围内使用不同的标准仪器作为制定温标的标准。例如中低温使用的铂电阻温度计，高温的铂—铂铑热电偶和光学高温计等。(3)插补公式。就是规定用上述标准仪器测出数值与标准温度之间的关系。总起来说，温标的含义就是：确定基准点的温度，用规定的标准仪器测量各基准点之间的温度；再将所测得的数值（如电阻温度计的电阻值；热电偶的热电势等）按规定的插补公式计算出温度的标准数值。这样一来就可以确定温度的数值了。我国从1973年1月1日起正式采用“1968年国际实用温标”（简称新温标）以便使我国的温度量值与国际取得一致。

新温标规定，热力学温度是基本温度符号为 T ，单位表示为“ $^{\circ}\text{K}$ ”（读作开尔文温度，或绝对温度）。这种温度单位在热力学中和工程上经常要用到的，它和通常的摄氏温度“ $t^{\circ}\text{C}$ ”之间的关系是：

$$t = T - 273.15 \quad (1-3)$$

由上式看出， 0°C 相当于 273.15°K ， 100°C 相当于 373.15°K ，把摄氏的度数加上 273.15 就变成绝对温度的数值。工程上有时在不要求很精确的计算情况下，用 273 代替 273.15。

【例】：某型发动机压气机出口温度为 288°C ，燃烧室出口温度为