

高等学校交流讲义

工程热力学

夏彦儒编

只限学校内部使用



中国工业出版社

前 言

本书原系热能动力装置与工业热能两专业的讲义。内容基本上符合前高等教育部1954年批准的教学大纲。初稿完成后，于1956年曾将油印本寄国内各兄弟学校征求意见，并于1957年10月乘兄弟学校教师来南京工学院听民主德国专家Elsner讲学之便，组织了两次讨论，获得了很多宝贵意见。

大跃进以来，我国科学事业出现了新的面貌，对教材质量的要求也不断提高。1959年在华中工学院召开了全国热能动力装置专业的教材编写协作会议，会上讨论并修订了“工程热力学”的教学大纲，确定了教材编写工作的分工，而“工程热力学”是由我院负责主编的教材中的一种。为了进一步提高教材质量，我们决定推荐夏彦儒同志的著作，并由教研组组织力量加以审订和补充。重写了第一章全部，对于第一定律、比热、混合气体、第三定律、气体过程、气体压缩等部分的叙述方式，进行了适当的修改。流动工质及化学热力学两章则增加了内容。新补充了热力学的新发展一章及关于自由活塞、联合循环等部分。又于各章后面增添了例题，书后增加了附图附表。参加审订工作的有夏彦儒、陈军健、厉麓鸣等同志，个别部分曾经教研组集体讨论。

本书取材广泛，说理清楚；某些章节，作者根据自己的教学经验，在系统上和次序上作了大胆变革的尝试。我们认为这样做对于贯彻党的“百花齐放，百家争鸣”的方针，开展学术问题的争论，是有益的。我们热忱地希望兄弟学校对本书提出宝贵的意见和批评，以便今后不断提高本书质量。

南京工学院热工学教研组

1961年4月

目 录

前言	3
緒論	9
第一章 一些基本概念	12
1-1 工程热力学	12
1-2 热力系	12
1-3 状态, 状态参数	13
1-4 平衡态	13
1-5 温度	13
1-6 压力(压强)	14
1-7 容积, 比容	16
1-8 内能	17
1-9 熵	17
1-10 纯物质的状态方程	19
1-11 参数的数学特性	20
1-12 功	21
1-13 传热量	22
1-14 热力过程, 可逆性	23
例题	25
第二章 热力学第一定律	28
2-1 能量守恒及转换定律	28
2-2 热功当量	28
2-3 热力学第一定律	29
2-4 焓	31
2-5 比热	32
2-6 能量守恒及转换定律应用于流动 热力系	36
2-7 稳定流动	37
2-8 稳定流动公式之应用	38
例题	39
第三章 理想气体及其混合物	41
3-1 理想气体各定律	41
3-2 理想气体的分子运动论	42
3-3 理想气体的内能与焓	43
3-4 理想气体的比热	45
3-5 量子论对比热的解释	46
3-6 理想气体混合物	47
3-7 折合容积	47
3-8 分压力	48
3-9 混合气体的成分	48
3-10 容积成分、莫尔成分和分压力之 间的关系	49
3-11 容积成分与重量成分的关系	49
3-12 混合气体的折合气体常数及折合 分子量	50
3-13 混合气体的重度	51
3-14 混合气体的内能与焓	51
3-15 混合气体的比热	51
例题	52
第四章 热力学第二定律	54
4-1 自然过程的方向性	54
4-2 平衡态的或然率	55
4-3 平衡热力系的熵	56
4-4 经典热力学第二定律的简史	58
4-5 闭合循环	58
4-6 卡诺循环	59
4-7 卡诺定理	60
4-8 热力学第二定律	61
4-9 卡诺定理的证明	61
4-10 热力学温标	62
4-11 一个新的状态参数, $\int \frac{dQ}{T}$	63
4-12 不可逆循环的效率和 $\int \frac{dQ}{T}$	66
4-13 熵增原理	68
4-14 熵增原理举例	68
4-15 温熵图, 焓熵图	72
4-16 关于熵的总结	73
4-17 热力学第二定律的重要性与 限制	74
例题	75
第五章 气体的主要过程	77
5-1 定容过程	78
5-2 定压过程	79
5-3 定温过程	80
5-4 定熵过程	81

5-5 絕热过程	83	9-1 平衡的类别	141
5-6 多变过程	84	9-2 平衡的条件	141
5-7 理想气体各过程的 $p-v$ 和 $T-S$ 图	85	9-3 化学純物质(单元系)的 平衡条件	142
5-8 气体过程計算公式总表	87	9-4 单元系的复相平衡	143
5-9 最大有效功	87	9-5 克拉貝龙-克勞修司方程	144
例題	90		
第六章 气体之压缩与膨胀	92	第十章 真实单元物质的性质	145
6-1 基本概念	92	10-1 复习关于真实气体的討論	145
6-2 理想往复式压气机所耗費的功	94	10-2 純物质的 $p-v-T$ 图	146
6-3 有余隙的往复式压气机	96	10-3 凡得瓦尔氏物态方程	147
6-4 多級压缩	93	10-4 其他的物态方程	150
6-5 往复式气动机	100	10-5 对比状态定律	151
6-6 离心式和軸流式压气机	101	例題	153
6-7 冲射器	102	第十一章 蒸汽	156
例題	102	11-1 一些定义	156
第七章 气体动力循环	104	11-2 汽化过程的 $p-v$ 图	157
7-1 往复式內燃机的一般工作原理	105	11-3 湿蒸汽的参数	157
7-2 定容加热循环(奥图循环)	106	11-4 干飽和蒸汽和飽和液体的平衡 比热	158
7-3 定压加热循环(逃塞尔循环)	108	11-5 汽化过程的 $T-S$ 图, 汽化潜 热	160
7-4 混合加热循环	110	11-6 內能、焓和熵的起标点	161
7-5 循环之比較	111	11-7 液体热, 蒸汽的总热	161
7-6 平均加热温度, 平均排热温度	113	11-8 蒸汽的 $p-v$ 图和 $T-S$ 图上各种 綫羣	162
7-7 定压加热的燃气輪循环	115	11-9 焓熵($i-s$)图	166
7-8 定容加热的燃气輪循环	119	11-10 蒸汽性质表	167
7-9 封閉式燃气輪	120	11-11 水与水蒸汽	168
7-10 噴气式发动机循环	121	11-12 蒸汽过程	169
7-11 自由活塞发动机的工作原理	123	11-13 蒸汽的压缩	172
7-12 自由活塞发动机的热力学分析	124	例題	173
例題	125	第十二章 气体与蒸汽的流动	177
第八章 关于单相热力系的一些 普遍方程式	132	12-1 概說	177
8-1 两个新参数——自由能, 自由焓	132	12-2 流动气体的基本方程式	177
8-2 特性函数	133	12-3 声速	178
8-3 各参数的偏微商之間的关系	135	12-4 气体流經噴管时的变化情况	179
8-4 比热的普遍式	136	12-5 理想气体可逆地流經噴管时的 数学分析	180
8-5 內能的普遍式	137	12-6 非理想气体可逆地流經噴管时的 数学分析	180
8-6 焓的普遍式	137	12-7 管内流动的热力学分析	181
8-7 熵的普遍式	138	12-8 噴管的計算	184
8-8 化学势	138		
例題	139		
第九章 热力系的平衡	141		

12-9 滞止温度	186	15-5 湿空气的焓	239
12-10 绝热节流	187	15-6 湿泡温度	239
12-11 节流效应, 转回温度	189	15-7 $J-d$ 图	240
12-12 合流	193	15-8 湿空气变化过程的图解	242
12-13 充气混合	195	例题	242
12-14 不稳定流动——绝热放气		第十六章 化学热力学基础	247
作功	195	16-1 热效应, 反应热	248
例题	197	16-2 赫斯定律	249
第十三章 蒸汽循环	202	16-3 反应热与温度的关系	251
13-1 朗肯循环	202	16-4 化学平衡	252
13-2 朗肯循环的热效率	204	16-5 理想气体混合物的化学平衡	
13-3 蒸汽参数对朗肯循环效率的		常数	254
影响	206	16-6 平衡常数与温度的关系	255
13-4 再热循环	207	16-7 离解度	256
13-5 蒸汽动力机的内效率和内部		16-8 能斯特定理	258
相对效率	209	16-9 多相反应, 真实气体反应	261
13-6 回热循环的理论	210	16-10 复杂化学反应的平衡常数	262
13-7 实用的回热循环	211	例题	262
13-8 回热循环的热效率	211	第十七章 热力学之应用于溶液	264
13-9 回热温度的研究	213	17-1 溶液	264
13-10 水蒸汽的缺点	214	17-2 溶解热	265
13-11 理想工质	215	17-3 相律(无化学反应)	266
13-12 两汽循环	216	17-4 康诺瓦乐夫法则	267
13-13 热电站的循环	218	17-5 平衡溶液的其他参数	267
13-14 蒸汽-燃气联合装置	218	17-6 稀溶液	268
例题	220	17-7 稀溶液的 $p-z$ 图	269
第十四章 制冷, 制热	224	第十八章 热力学方面几个比较新的	
14-1 一般性的讨论	224	发展方向	270
14-2 空气制冷循环	225	18-1 引言	270
14-3 蒸汽压缩制冷循环	227	18-2 “焓”	270
14-4 蒸汽压缩循环中所用的制冷剂	228	18-3 热力设备的焓平衡	272
14-5 蒸汽冲射制冷循环	229	18-4 个别设备或整套装置的	
14-6 蒸汽吸收制冷循环	230	完善程度	272
14-7 变热系数	231	18-5 热工装置中的主要损失	273
14-8 机械变热器	231	18-6 参数焓的简史和目前发展情况	274
14-9 轮流产生冷热	233	18-7 焓产率	275
例题	233	18-8 “流”与“势”之间的特性关系	277
第十五章 湿空气	235	18-9 不可逆过程的相互干扰	277
15-1 概说	235	18-10 应用不可逆过程热力学的一个	
15-2 绝对湿度和含湿量	236	简单例子	278
15-3 相对湿度	237	18-11 不可逆过程热力学的发展简	
15-4 湿空气的重度和气体常数	237	史和目前发展情况	279

附录	281	VII	气体的平均比热(计算公式)	285	
I	气体常数表	281	IX	气体的绝热及多变过程计算参考表	286
II	气体的真实定压莫尔比热 μC_p 大卡/莫尔度	281	X	由饱和温度算起的过热水蒸汽的平均比热 C_{pm} , 大卡/公斤·度	288
III	气体的真实定容莫尔比热 μC_v 大卡/莫尔度	282	XI	饱和水蒸汽表	290
IV	气体的平均定容容积比热 C'_{vm} 大卡/标准米 ³ 度	282	XII	水及过热蒸汽表(插页)	
V	气体的平均定压容积比热 C'_{pm} 大卡/标准米 ³ 度	283	XIII	饱和水银蒸汽表	293
VI	气体的平均定压重量比热 C_{pm} 大卡/公斤度	284	XIV	饱和氨(NH ₃)蒸汽表	294
VII	气体的平均定容重量比热 C_{vm} 大卡/公斤度	285	XV	二氧化碳(CO ₂)饱和蒸汽表	295
			XVI	过热氨蒸汽表	296
			XVII	氟氯烷12饱和蒸汽表	297
			XVIII	水蒸汽的 <i>i-s</i> 图	
			XIX	氨蒸汽的 <i>T-S</i> 图	
			XX	<i>J-d</i> 图	



緒 論

热力学研究各种能量——主要是热能——的性质及相互轉換規律的普遍理論。工程热力学主要是研究热与功之間的相互轉換問題。

一切的“能”都是可以相互轉換的。大自然中所儲藏的“能”，多半不是可以直接利用来为人类服务的，而必須加以轉換。热力发电厂就是能量轉換的一个最好例子。图 0-1 是一个热力发电厂的简单示意图。燃料与空气进入炉膛，发生氧化(燃燒)而将化学能变为热能；热能使鍋炉内的水变为水蒸汽，水蒸汽在过热器中进一步提高温度后进入汽轮机；在汽轮机中，蒸汽的热能轉变为动能而使汽轮机的轉子轉动。这个轉动的机械能通过发电机而轉变为电能。作功后的蒸汽在冷凝器中放热而凝結成水。一小部分电能使給水泵发生运动而将冷凝水送回鍋炉。循环水泵也利用电能驅动而将冷却水送入冷凝器中吸热后排出。

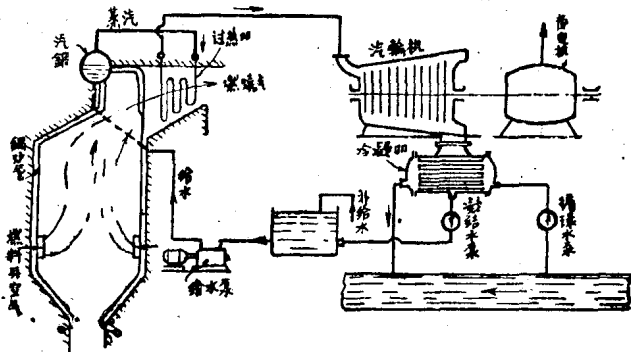


图 0-1

另一个例子是高炉煤气的利用(图0-2)。热空气进入高炉，与炉內的燃料起化学作用而发生一种含有大量 CO 的高炉煤气。煤气經过除尘、洗淨和分水后，一部分送到蒸汽鍋炉的炉膛中燃燒(如上例所說)，一部分进入空气預热器中燃燒以預热空气，另一部分經再度淨制后分别进入主煤气机(发电)和副煤气机(鼓风)。冷空气在空气預热器中被燃燒着的煤气把它的温度提高后进入高炉。

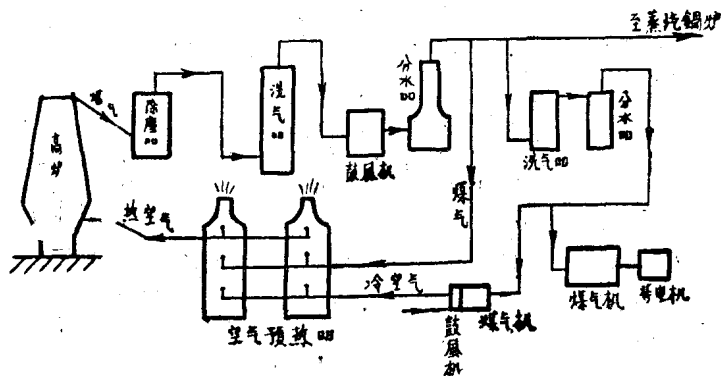


图 0-2

人类为了生活和生产，能够由大自然取得的天然能，主要有以下几种：

(1) 水力——利用水的动能，可以使机械发生运动，也可将水的位能轉变为动能来驅动机械。水力发电虽然在基本建設(筑坝)方面費用較大，但是在运行期間的耗費极小。因此，凡是地形利于建立水力发电站的地方，人們都尽量地利用。世界各国的水力发电量，一年比一年增加起来了。水力发电的主要缺点在于必須考虑地理条件和生产有季节性。

(2) 风力——流动着的空气(风)具有或大或小的动能,而这个动能是无穷无尽的。在农业上广泛地利用风車来代替人力。风力的缺点是:它的速度和方向都变换无常,并且很难用来发生大量的动力,因为这需要很大的风車。

(3) 太阳能——太阳通过辐射而傳到地球上的能量也是无穷无尽的。約从九十年前开始,世界上就有了小型的日光发电厂。此外还可以利用太阳能来制造低温(制冷),调节空气等。

(4) 燃料的化学能——燃料在燃燒中将化学能轉变为热能。这个热能又可轉变为各种其它的能。

热能动力与水能动力是目前动力方面的主要来源。与水能动力比較起来,热能动力受地理的限制較小,不受季节和气候的影响,所需的建設时间和費用小得多,建立輸电綫路的費用也較小。由于这些特点,当必須在短时期内迅速增加动力而經濟条件和劳动力有限的时候,就必須在发展水能动力的同时更多地建立热力发电厂。

(5) 原子能——近年来人們发现在原子核內蘊藏着巨大的能量,比化学能大到好多万倍。帝国主义者利用原子能来制造杀人的武器,并用来对全世界进行战争威胁。社会主义国家則利用原子能来服务于和平建設。苏联所首創的原子能发电厂于1954年6月27日开始正式发电,为原子能的和平利用开展了无限的前途。

我們的祖先在发现“能”的轉換和利用方面有极光荣的历史。钻木取火的技能早到无从查考。商周两朝有很精巧的鑄工,而冶鑄工作中不可能沒有鼓风机(将机械能轉变为压能)。鼓风机的发明至少在三千年以前。在紀元37年(后汉时代)发明了用水力来驅动风箱,这是有据可考的。用火来发生机械旋轉运动的走馬灯和燃汽輪机的基本原理有相似的地方,这是中国在1150年左右(南宋时代),或更早发明的,比欧洲对于同原理的应用(1550年的火力旋轉烤肉机)要早四百多年。1678至1679年在北京試驗用蒸汽輪推动車船,比欧洲的火車早150年,比輪船也早一百多年。但是由于历代王朝的封建統治,在长时期中限制了生产力的发展,視技术科学为雕虫小技,因此我們祖先的創造发明很少用来促进生产力的发展或改善人民的生活;也沒有由这些經驗发展出一套完整的有系統的理论来使技术向前迈进。在解放前,由于我国长期处于半殖民地半封建的状态,工业不能发展,科学反而远远落在欧西各国之后了。

欧洲在十五世紀后半,生产的发展引起了“文艺复兴”,接着推翻了封建貴族的統治,打倒了羅馬教皇的独裁;把自然科学从宗教下面解放出来。到十八世紀又发生了“工业革命”,手工业变为机械工业;家庭工业变为工厂工业。由于工业生产的逐渐集中,对于在生产地点供給大量机械原动力的需要愈来愈大,这就导致俄国的波尔宗諾夫(1766年)和英国的瓦特(約二十年后)先后发明了蒸汽机而将热变为功的原理运用到生产上去。

虽然俄国偉大的科学家罗蒙諾索夫早在1744年和1760年就拒絕了当时盛行的“热质論”,奠定了物质分子运动論的基础,发现了能量守恒定律,但是他的著作沒有流傳到其他国家。蒸汽机成功地地为工业服务了多年之后,再加上其他許多科学部門(如化学、生物学、磁电学等)中所观察到的許多事实,才使科学家們注意到“能”的形态問題。时机一經成熟,就有許多人(迈耶、湯孙、焦耳、亥姆霍次、科尔丁、朗肯等等)差不多同时(十九世紀后半)发现了热力学第一定律。

热力学第一定律不过是能量守恒和转换定律运用于牵涉到热的生产和吸收那些现象中。这个定律说：一个物体的能量之增加 ΔU ，一定等于它所净收入的热量 Q 减去它对外所作的功 ΔL ，用数学公式来表示，就是

$$\Delta U = Q - \Delta L.$$

蒸汽机在运用初期中的效率很低，就是说要耗费大量的热才能获得少量的功。这又对科学家们提供了一个课题，而结果是得出一个热力学第二定律。卡诺(1824)是首先提出热机(变热为功的机器)的效率是有限制的，而不可能超过他所假想的理想热机的效率。最后由克劳修斯(1848)和开尔文(1852)相互独立地提出不同形式的热力学第二定律。这个定律的基本精神是指出自然变化的方向性。经过一系列的推导，最后得出一个结论：在自然变化中有这样一个量“熵”(S)，它的值只能增加不能减少，即

$$dS \geq 0.$$

关于这两个定律和“熵”的物理意义，将在正文中详细讨论。

从这两个定律出发，人们导出了许多关于热现象的规律，形成了一个有系统的完整的科学部门。这门科学反过来又大大地推动了热动力工程的发展，因而推动了整个生产的发展。热力学的发展过程是生产与科学相互推动的一个很明显的例子，是理论由实践而来，又在实践中得到检验和丰富的典型例子。

由热力学的两个定律，人们知道利用高温工质可以得到较高的效率，也知道热能的经济不只是决定于热能的量，与热能的品质也大有关系。因此近年来各国都在研究如何提高工质温度而不损伤热机上的金属零件；研究合理的方法来分析能量变化的每一个过程，以便找出主要的损失。人们也已经开始利用这两个定律来找出自然现象相互联系的辩证规律。这些发展情况都将在正文中作简单的介绍。

任何工业都需要动力，这是很明显的。我国1957年的发电量就比过去(1941)的最高产量增加了两倍。1959年的发电量是1941年发电量的七倍，1949年发电量的十倍。今后推行农业电气化，更需要大量的电力。列宁曾经说过：“共产主义就是苏维埃政权加上全国电气化”，可见动力工程在国民经济发展中是一个很重要的因素。上面已经指出：热力发电在今天占着电力来源的绝大部分。由此可见，从事热力发电的人们，在社会主义建设中所负的责任是颇为艰巨的。

另一方面，许多工业中都有各式各样的热工设备，例如干燥、制冷、变热、精馏、工业炉、煤气发生炉等等。这些工业所耗用的燃料很多。在热力发电厂中讲求如何节约燃料，因此经济性相当高(虽然不是没有改进的余地)，而一般工业中多半没有足够地重视这个问题，没有充分地利用热能，因此有浪费现象。消灭这种浪费，就是从事工业热能工作者的重要任务。

总起来说，热能资源的经济利用是我国国民经济中一个重要环节。凡是技术人员都应当对“能”的转换规律有一个基本认识。从事热工的人员尤其应当透彻地了解工程热力学。假如不是这样，就不可能正确地设计出新的热工设备，也不能很好地运行、检修和改进现有设备。

热力学的研究有两个途径——一是“现象”或“经典”热力学，一是统计热力学。所谓“经典热力学”是完全由现象出发的，换言之，是以某些可以测量的宏观量(如温度、压强、重量、容积等)为基础的，而并不深入到物体内部的结构和这些宏观量的本质。因

此，虽然由两个定律出发而得出的許多引論都具有高度的可靠性和普遍适用性，但是經典热力学不能解釋許多由試驗得来的事实。对某些概念(例如熵)，經典热力学也不能給出它們的物理意义。在某些特殊情况下，經典热力学甚至会引到不完全正确的結論上去。分子运动論和統計热力学的出发点是：物质是由大量的分子、原子所組成的这一个假定(現在已經証明是事实了)。分子运动論根据分子(原子)的某些模型来研究分子的质量、平均速度、尺寸、形状等，进一步与宏觀的物理量如温度、压强、导热能力、粘性等联系起来。統計热力学的一个支派用統計方法来研究一个系統內微粒的地位和速率之分布，进一步来解釋各种热現象；另一个支派从不足的已知条件出发，根据大量的系統集体平均来对指定的系統預言它的动态。

經典热力学比較簡單；統計热力学較为繁复。正如罗蒙諾索夫所說：“由观察 建立理論，通过理論来比較观察，是寻求真理的最好方法”。联合两种方法，最能得到良好的結果。本书主要的采用現象方式，而在必要时利用关于物体內部結構和統計的簡易理論来解釋物质的性质，闡明各定律的本质。

第一章 一些基本概念

1-1 工程热力学

恩格斯曾經指出“运动是物质的存在形式，物质的固有属性”^①——沒有不运动的物质，也沒有无物质的运动；又指出运动永远不会丧失其轉变为其他各种运动形式的 能力，能量是物质运动的量度，故能量永远是能够轉化的。

自从罗蒙諾索夫推翻旧的“热质”說而指出“热也是一种运动形式——物体微粒的运动”，迈耶、焦耳等从經驗和实验証明功与热之相互轉化后，热是能量之一种已經无人怀疑了。

研究牵涉到热能的能量轉換規律的科学叫作“热力学”，热力学的基础就是两个热力学定律——**第一定律与第二定律**——和一个**热力学第三定理**。

研究各种物理現象和物理过程中能量轉換規律的普遍理論基础的科学叫做物理热力学。

将热力学的几个基本定律利用于化学过程和物理化学过程来研究这些过程中的热效应、化学平衡等等的科学叫作化学热力学。

工程热力学研究热与功之相互轉換，它的主要課題之一是热机的理論；但为了研究热机，也运用物理热力学和化学热力学中的某些結論。

开始研究工程热力学以前，必須明确地了解其中常用的一些術語和概念。

1-2 热力系

我們正在注意着的，被某些边界包围着的物体或一些物体，叫作一个热力系。所謂边界可能是实际的，也可能是假想的；可能是固定的，也可能是可漲縮的或运动着的。

① “自然辯証法”三联书店1950年版，第63頁。

比方說，空氣在氣缸中，假如我們研究的目標是缸內的空氣，則缸中的空氣就是我們的热力系，而氣缸和活塞就形成热力系的包圍面。假如我們研究的目標是氣缸和缸內的空氣，那麼氣缸和空氣就是我們的热力系，而我們假想一個包圍面來將热力系與外界分開。

热力系以外的一切物體總稱為外界。热力系與外界之間可能有質量和能量的傳遞。能量傳遞有兩個方式：傳熱和作功。

不與外界傳熱的热力系，叫作絕熱的热力系，或簡稱為絕熱系。

沒有任何能量進出的热力系，叫作絕能系。

不與外界發生任何相互作用——不傳質，不傳熱，不對外界作功——的热力系，叫作孤立热力系。

如热力系各部分的成分都相同，各部分的状态都相同，就叫作一個單相热力系。

1-3 状态，状态参数

所謂热力系的状态就是它的情況或位置。用以描述热力系状态的那些宏觀量，叫作热力状态参数(簡稱参数)。質量、體積、溫度等都是参数的例子。知道了足夠的参数就可確定热力系的状态；知道了热力系的状态就确定了它的一切参数。参数只確定于热力系現在的状态而與達到這一状态的变化过程無關。反過來說，任何物理量，只要它的变化可以用始終兩数值來確定而與热力系的变化过程無關的，都可作為参数。

1-4 平衡态

如一個物體的态不隨時間而自發地变化，我們就說這個物體是在平衡态中。所謂不隨時間而变的态是指所有能觀察到的性質。假如物體的态隨時間而变化，它就不是在平衡态中，或簡單地說這個物體是不平衡的。

平衡包括热平衡與力平衡。假如物體內還有化學反應，則更應包括化學平衡。

在热力学中，平衡态這個概念非常重要，下文將常常提到這個問題。

顯然，平衡热力系的各参数都不會隨時間而自發地改变；就是說，對時間而言，它們都是常数。

以下列舉幾個常用的参数。

1-5 溫度

設有兩個物體(或一個物體的两部分)。設我們用手摸着甲物體(或甲部分)時感覺到溫暖，摸着乙物體(或乙部分)時感覺到涼。使這兩個物體互相接觸(或假如物體的甲乙两部分之間沒有絕熱隔膜)，而外界對這兩個物體(或這個物體的两部分)不起任何作用，則兩個物體的情況(或物體两部分的情況)一定會起变化——原來較暖的逐漸變涼，原來較涼的逐漸變暖；換言之，兩個物體之間沒有平衡(或物體的两部分之間沒有平衡)。經過長時間之後，我們會感到兩個物體(或整個物體的甲、乙两部分)變到一樣的溫暖程度，而它們的溫暖程度也不再變了(假如外界對它或它們不發生任何影响)。這個時候，我們說兩個物體(或物體的两部分)有相互的热平衡，習慣上說它們的溫度相等。沒有達到热平衡以前，人們說較溫物體(或部分)的溫度高些，較涼物體(或部分)的溫度低些。能量由高溫物體(或部分)以傳熱方式傳遞到低溫物體(或部分)。一般地說，一個絕能的热力

系有热平衡时，内部各部分的温度都相同；无热平衡时，能量由高温部分传到低温部分。这就是温度的原始概念或定义。

但这个定义只是定性的，而没有表示出温度的数值。为了表示温度的数值，必须采用某种温度计。

人们又发现物体冷热程度是和物体的一些其他性质(或参数)联系着的；例如一个物体较热时要长些或大些，较冷时短些或小些。利用这个特性，就可借物体的长短或大小来衡量温度。水银温度计就是根据这个原则。既然有热平衡的两物体必有相同的温度，则水银温度计依次与已达到热平衡的两物体分别接触时，水银柱的高度必相等。如温度不相同，则在热物体与温度计接触时使水银柱变得高些，在冷物体与温度计接触时水银柱变得低些。这个高低的差别就衡量温度的差别。

为便利比较起见，人们在温度计与在标准大气压下正在熔化的冰相接触，对应着水银柱的最高点在玻璃管上作一个刻痕；再将温度计与在标准大气压下的沸水接触，对应着此时水银柱的最高点又作一刻痕。我们可以任意地把水的冰点温度叫作零度，水的沸点温度叫作100度，再将两个刻痕之间的距离分成一百个等分，每一个刻痕依次叫作一度，二度，三度……，这就形成了一个摄氏温标(或百度温标)。

我们也可以利用气体的膨胀，气体压力的变化或金属电阻的增减来衡量温度。

人们用符号 t 来代表摄氏温标上的读数，用 $^{\circ}\text{C}$ 符号来表示“按摄氏温标”，例如

$$t = 38^{\circ}\text{C}$$

表示按摄氏温标来衡量时，物体温度比水的冰点高38度。

其他物质大半也都在高温下膨胀，低温下收缩，而可用作温度计的工质。但在采用不同工质的温度计上，除了 0°C 及 100°C 两个温度以外其他读数不会完全互相符合。因此温度的衡量并不明确。假如用不易凝结的气体为工质——例如氢、氧、氮等——可稍稍补救上述缺点。采用这些气体为温度计的工质时，在一定的温度范围之内这些温度计的读数差不多(但并不绝对地)完全互相符合。

用气体的膨胀作温度的衡量仍是任意的，因为我们没有理由用某种气体而不用它种气体。并且各种气体温度计之大致符合也不能满足精密测温的要求。下文第四章中将建立一个不与任何物质的性质发生关系而适用于任何冷热范围的温标。目前我们暂时接受气体温度计所确定的温度。

读者记得，从微观的观点来看，温度是物体微粒的平均动能的函数。

应当注意：温度不是一个可加的参数，假如一公斤物体的温度为 50°C ，则 G 公斤同温物体的温度不等于 $50G^{\circ}\text{C}$ 。

还应注意：假如一个物体有热平衡，则内部各部分的温度必相等(内部热平衡)；整个物体的温度亦必与周围物体的温度相等(对外热平衡)；如用绝对不传能量的材料(绝热刚体)将它包围起来，则只须有了内部热平衡就有了整个的热平衡。没有内部热平衡的物体，无法用一个数值来表示它的温度，因为各部分的温度不同，且随着时间而变化着。

1-6 压力(压强)

流体形状一定迁就它的盛器的形状。液体有一个自由面，在自由面以下，它充满盛器的每一个角落。气体更具有整个充满它的容器的特性。流体和器壁接触的地方，一定

对容器施以推力。每单位面积所受的垂直力叫做**压力(或压强)**；即压力是这个垂直力与面积之比。

假如两个物体或一个物体的两部分的压力不同，外界对它们也不起任何作用(图1-1)，则纵然它们有热平衡，但压力高的必膨胀，压力低的必被压缩；换言之，没有力平衡。假想有一个滑动(无摩擦)的隔板将它们分开，则滑板必被推动，高压物体对低压物体做功，直至两边的压力相等才停止运动，而达到**力平衡**。由此，两个物体有力平衡时它们的压力必相等。无力平衡时，高压物体必膨胀，低压物体必被压缩。这可认为是压力的基本定义。

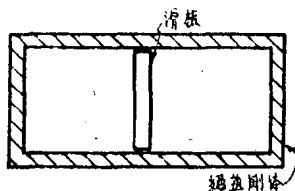


图 1-1

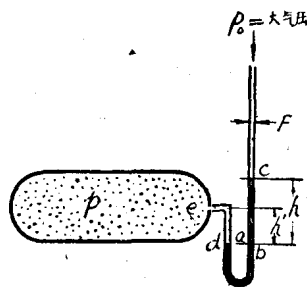


图 1-2

为了表示压力的数值，必须采用压力计，利用力平衡的概念来衡量它。设某器貯流体，其重度为 γ' 公斤/米³(图1-2)；我们的目标是求容器内的压力 P ，在容器上钻一个眼，装上 u —形玻璃管如图，其截面积为 F 米²，管内貯水银(重度为 γ 公斤/米³) abc 。水银柱经过一个时期的动荡之后，必达到力平衡，此时 ab 截面(或任何截面)上下的压力必相等。 a — b 截面上的总力是 C 截面上的空气的重力与 bc 段水银重力之和，即 $p_0 F + \gamma h F$ ，其压力为 $p_0 + \gamma h$ 。根据水静力学，在通连的同液体中，高度相同处的压力相等，故 d 截面上下的压力都等于 $p_0 + \gamma h$ 公斤/米²。如必须求 e 点的压力，还须减去 $\gamma' h'$ 。由此

$$p_e = p_0 + \gamma h - \gamma' h'$$

如容器内貯气体， γ' 与 γ 比较起来很小而可略去，则可认为

$$p = p_0 + \gamma h \text{ 公斤/米}^2,$$

式中 p_0 为当时当地的大气压力。

压力计上的读数 h 衡量器内压力与大气压力之差即 $\gamma h = p - p_0$ ，故 $p - p_0$ 常称为**表压力**或**超压力**(即超过大气压的部分)，用 $p_{\text{计}}$ 来代表它； $p = p_0 + \gamma h$ 常称为**绝对压力**(或**内压力**)。由此，一般地

$$p = \text{大气压} + p_{\text{计}} \quad (1-1)$$

如 u —形玻璃管左面的水银柱比右面的水银柱高，则器内压力必低于大气压，而 h 值应为负数。如用 $P_{\text{空}}$ 代表大气压比器内压力高出的数值，则

$$P_{\text{空}} = \text{大气压} - P, \quad (1-2)$$

称为**真空度**。

在工程热力学的计算中常采用公斤/米²为压力的单位。另一个常用的单位为公斤/厘米²，又称为**工程大气压**，用符号 at 来代表它。如所指的是绝对压力，则在 at 后面加 a 字，如 ata ；如所指的是表压力，则在 at 后面加 u 字(俄文字母)，如 atu 。例如

$$P = 3 \text{ ata}$$

表示绝对压力为 3 公斤/厘米² = 30,000 公斤/米²; 而

$$P = 3 \text{ atu}$$

表示表压力为 3 公斤/厘米²。1 at 表示 $h\gamma = 10,000$ 公斤/米², 故 $h = \frac{10000}{\gamma}$ 。水银的温度为 0°C 时, 它的重度 $\gamma = 13,595$ 公斤/米³, 故当温度为 0°C 时 $h = \frac{10000}{13595} = 0.736$ 米 = 736 毫米就代表 1 公斤/厘米²。水的温度为 4°C 时, 它的重度为 1,000 公斤/米³, 故 1 工程大气压 = 10 米水柱。

在物理学上常用物理大气压为单位, 用 AT 来代表它:

$$\begin{aligned} 1 AT &= 1.0332 \text{ at} = 1.0332 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10332 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 760 \text{ 毫米汞柱 (在 } 0^\circ\text{C 下)} & (1-3) \\ &= 10.332 \text{ 米水柱。} & (1-3') \end{aligned}$$

必须注意: “工程大气压”和“物理大气压”都只不过是压力的计量单位, 而与实际大气压无关, 假如当时当地的大气压 $P_0 = 0.95 \text{ ata}$, 某物质的表压力 $P_{\text{计}} = 12 \text{ atu}$, 则该物质的绝对压力

$$P = P_0 + P_{\text{计}} = 0.95 + 12 = 12.95 \text{ ata} = \frac{12.95}{1.0332} = 12.52 \text{ ata}.$$

在今后的计算中, 为了使单位统一, 常将压力的单位化成公斤/米²。

我们还记得, 根据物质动力学, 流体(气体或液体)的压力是分子向器壁冲击的结果。

和温度一样, 压力也不是一个可加的参数。假如一公斤气体的压力是 3 ata, G 公斤同样气体的压力并不等于 $3G \text{ ata}$ 。

假如一个热力系不在任何力场(例如重力场)作用之下, 而有力平衡, 则内部各处的压力必相等(内部力平衡), 内部压力与周围介质的压力亦必相等(对外力平衡)。如热力系有绝能的包围面(绝热刚体), 则有了内部力平衡就有了整个的力平衡。没有内部力平衡的热力系, 无法用一个数值来表示它的压力, 因为各部分的压力不同, 且随时间而变化。

1-7 容积, 比容

一物体(或热力系)所占的空间就叫作它的容积(固体所占的空间, 一般叫作体积)。物体的容积包括物体的组成微粒的体积和微粒运动的空问。在工程热力学中常用米³为容积的单位, 用符号 V 来代表容积。

容积是一个可加的参数, 假如一公斤物质的容积为 5 米³, 则 G 公斤同态的同样物质会占据 $5G$ 米³。

每公斤物质的容积, 叫做这个物质的比容, 用符号 v 来代表它, 即

$$v = \frac{V}{G} \text{ 米}^3/\text{公斤},$$

式中的 G 是物质的总重, 公斤。

物质每单位容积的重量叫做它的重度 γ , 每单位容积的质量叫作它的密度 ρ , 即

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{1}{V} \text{ 公斤/米}^3, \quad (1-4)$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{1}{gV} \text{ 公斤质量/米}^3; \quad (1-5)$$

式中 M 是物质的质量，以公斤计， $g=9.81$ 是重力加速度，米/秒²。

比容不是一个可加的参数。如某物质的比容为 3 米³/公斤，则这个物质 10 公斤的比容并不是十倍于一公斤的比容。

1-8. 内 能

一个热力系因其本身的微粒(分子，原子等)的运动与集态而有的能量，叫作它的内能。整个热力系因宏观运动而有的动能和因处于力场中而有的位能都不包括在内能中。内能包括微粒的动能(包括移动能，转动能，振动能)，微粒的位能，化学能，核子能等等。

在工程热力学中，内能的单位常用大卡(即千卡)，符号 U 。物质单位重量的内能(有时称为比内能)用符号 u 来表示，其单位为大卡/公斤，即

$$u = \frac{U}{G} \text{ 大卡/公斤.}$$

内能既确定于物体的态，它也是一个状态参数。内能和其它状态参数联合起来亦可确定物体的平衡态。

对没有内平衡的热力系而言， $u = \frac{U}{G}$ 只是一个平均值，而并不代表各部分的单位内能。

1-9^① 熵

a) 或然率的概念

要完全了解一个热力系，除非是知道每一个瞬时，每一个微粒的位置和运动(动能或动量)。一般物体所含的微粒都有很庞大的数字，因此确定这样一个热力系的状态所需的参数亦多得不可设想。所有的微粒又都是毫无规律地运动着的。这似乎更增加了困难，但正是这个无规律的运动使我们找出一个规律，——就是微粒按容积和能量分布的或然率。每一种分布方式有它一定的或然率，故或然率(或它的某某函数)就可用作一个参数。这个参数与 V 和 u 联合起来就可确定无内平衡热力系的状态。

或然率是统计物理学中一个极重要的概念。本书中只能作一简单介绍，以帮助了解某些参数的物理意义。

硬币一面印得有字，一面印得有花。将一个硬币抛到空中，落在地上时，有两个可能性：字朝上或花朝上。得到字朝上的机会是 $\frac{1}{2}$ ；换言之，字朝上的或然率是 $P = \frac{1}{2}$ 。假如同时抛两个硬币 A 、 B ，则有下列的四个可能性：

字朝上	字朝下
A	B
AB	
	AB
B	A

① 亦可移在第五章末去讨论。