18-1 温度 2021年6月3日11点15分

什么是物理学？

物理学和工程学的主要分支之一是热力学，它是对系统热能（通常称为内能）的研究和应用。热力学的核心概念之一是温度。从孩提时代起，您就一直在发展热能和温度的工作知识。例如，您知道要小心使用热食和热炉，并将易腐烂的食物存放在冷或冷的隔间中。您还知道如何控制家中和车内的温度，以及如何保护自己免受风寒和中暑。热力学如何融入日常工程和科学的例子数不胜数。汽车工程师关心汽车发动机的加热，例如在 NASCAR 比赛期间。食品工程师既关心食品的适当加热（例如用微波炉加热的比萨饼），又关心食品的适当冷却（例如在加工厂快速冷冻的电视晚餐）。地质学家关注厄尔尼诺事件中的热能转移以及北极和南极冰层逐渐变暖。农业工程师关心决定一个国家农业兴旺或消失的天气条件。医学工程师关心患者的体温如何区分良性病毒感染和癌变。我们讨论热力学的起点是温度的概念及其测量方式。

温度

温度是七个 SI 基本量之一。 物理学家在开尔文标度上测量温度，该标度以称为开尔文的单位进行标记。 物体的温度虽然表面上没有上限，但确实有下限； 这个极限低温被视为开尔文温标的零。 室温约为 290 开尔文，或我们所写的 290 K，高于这个绝对零。 图 18-1 显示了很宽的温度范围。 宇宙在 137 亿年前开始时，其温度约为 1039 K。随着宇宙膨胀它冷却，现在已达到约 3 K 的平均温度。我们地球上的温度比这要高一些，因为我们碰巧生活 靠近一颗星星。 没有我们的太阳，我们也将处于 3 K（或者更确切地说，我们无法存在）。

热力学第零定律

许多物体的特性会随着我们改变它们的温度而改变，也许是通过将它们从冰箱移到温暖的烤箱。举几个例子：随着温度的升高，液体的体积增加，金属棒变长一点，电线的电阻增加，受限气体施加的压力也会增加。我们可以使用这些属性中的任何一个作为仪器的基础，帮助我们确定温度的概念。图 18-2 显示了这样的仪器。任何足智多谋的工程师都可以使用上面列出的任何一种特性来设计和建造它。该仪器配有数字读数显示器并具有以下特性： 如果加热（例如，使用本生灯），显示的数字开始增加；如果你把它放进冰箱，显示的数字开始减少。该仪器没有以任何方式校准，数字（目前）没有任何物理意义。该设备是一个温度计，但（目前）还不是温度计。假设如图 18-3a 所示，我们将温度计（我们称之为物体 T）与另一个物体（物体 A）紧密接触。整个系统被限制在一个厚壁绝缘箱内。温度计显示的数字滚动，直到它们最终静止（假设读数为“137.04”）并且不会发生进一步的变化。事实上，我们假设物体 T 和物体 A 的每一个可测量的特性都具有一个稳定的、不变的值。那么我们说这两个物体彼此处于热平衡状态。即使显示的体 T 读数尚未校准，我们仍得出结论，体 T 和 A 必须处于相同（未知）温度。假设我们接下来让物体 T 与物体 B 紧密接触（图 18-3b）并发现两个物体在温度计的相同读数下达到热平衡。那么物体 T 和 B 必须处于相同（仍然未知）的温度。如果我们现在让物体 A 和 B 紧密接触（图 18-3c），它们是否立即彼此热平衡？通过实验，我们发现它们是。

图 18-3 所示的实验事实总结为热力学第零定律：

如果物体 A 和 B 都与第三物体 T 处于热平衡，则 A 和 B 彼此处于热平衡.

用不太正式的语言，第零定律的信息是：“每个物体都有一个叫做温度的属性。当两个物体处于热平衡时，它们的温度相等。反之亦然。”我们现在可以把我们的温度计（第三个物体 T）做成一个温度计，相信它的读数将具有物理意义。我们所要做的就是校准它。我们在实验室中经常使用第零定律。如果我们想知道两个烧杯中的液体是否处于相同的温度，我们用温度计测量每个烧杯的温度。我们不需要让两种液体紧密接触并观察它们是否处于热平衡。被称为合乎逻辑的事后思考的第零定律直到 1930 年代才被发现，早在热力学第一和第二定律被发现和编号之后很久。因为温度的概念是这两条定律的基础，所以将温度确定为有效概念的定律应该具有最低的数字——因此是零。

测量温度

在这里，我们首先在开尔文标度上定义和测量温度。 然后我们校准一个温度计，使它成为一个温度计。

水的三重点

为了设置温标，我们挑选了一些可重现的热现象，并相当随意地为其环境指定了某个开尔文温度； 也就是说，我们选择一个标准定点，并给它一个标准定点温度。 例如，我们可以选择水的冰点或沸点，但出于技术原因，我们选择水的三相点。 液态水、固态冰和水蒸气（气态水）可以在热平衡中仅在一组压力和温度值下共存。 图 18-4 显示了一个三相点池，其中这种所谓的水三相点可以在实验室中实现。 根据国际协议，水的三相点被指定为 273.16 K 作为校准温度计的标准定点温度； 那是，

其中下标3表示“三点”。 该协议还将开尔文的大小设置为水的三相点温度与绝对零之间差异的 1/273.16。 请注意，我们在报告开尔文温度时不使用度数标记。 它是 300 K（不是 300°K），读作“300 开尔文”（不是“300 开尔文”）。 通常的 SI 前缀适用。 因此，0.0035 K 是 3.5 mK。 开尔文温度和温差在命名法上没有区别，所以我们可以写成“硫的沸点是 717.8 K”和“这个水浴的温度升高了 8.5 K”。

恒量气体温度计

校准所有其他温度计的标准温度计基于固定体积的气体压力。 图 18-5 显示了这样一个定容气体温度计； 它由一个充气灯泡组成，通过管子连接到水银压力计。 通过升高和降低储液器 R，U 形管左臂中的汞含量始终可以达到刻度的零，以保持气体体积恒定（气体体积的变化会影响温度测量）。 与灯泡热接触的任何物体（例如图 18-5 中灯泡周围的液体）的温度定义为

其中 p 是气体施加的压力，C 是常数。 根据公式 14-10，压力 p 为

其中 p0 是大气压，𝜌 是压力计中汞的密度，h 是测量管两臂中汞含量之间的差值。\*（在公式 18-3 中使用减号是因为 压力 p 的测量值高于压力 p0 的水平。）如果我们接下来将灯泡放入三点电池中（图 18-4），则现在测量的温度为

其中 p3 是现在的气体压力。 消除方程 18-2 和 18-4 之间的 C 得到的温度为

这个温度计还是有问题的。 如果我们用它来测量水的沸点，我们会发现灯泡中的不同气体给出的结果略有不同。 然而，随着我们使用越来越少的气体来填充灯泡，无论我们使用什么气体，读数都会很好地收敛到单一温度。 图 18-6 显示了三种气体的这种收敛。 因此，用气体温度计测量温度的方法是

该配方指示我们按如下方式测量未知温度 T：用任意数量的任何气体（例如氮气）填充温度计灯泡并测量 p3（使用三点电池）和 p，该温度下的气体压力 被测量。 （保持气体体积相同。）计算比率 p/p3。 然后用灯泡中的少量气体重复两次测量，并再次计算该比率。 继续这种方式，使用越来越少的气体，直到您可以推断出灯泡中几乎没有气体时会发现的比率 p/p3。 通过将该外推比率代入公式 18-6 来计算温度 T。 （该温度称为理想气体温度。）

18-2 摄氏度和华氏度 2021年6月3日11点33分

到目前为止，我们只讨论了用于基础科学工作的开尔文标度。 在世界上几乎所有国家/地区，摄氏温标（以前称为摄氏温标）是流行和商业用途以及许多科学用途的首选标度。 摄氏温度以度为单位，摄氏温度与开尔文大小相同。 但是，摄氏刻度的零移到比绝对零更方便的值。 如果 TC 代表摄氏温度，T 代表开尔文温度，则

在以摄氏度表示温度时，通常使用度数符号。 因此，我们将摄氏读数写为 20.00°C，而将开尔文读数写为 293.15 K。 在美国使用的华氏温标采用比摄氏温标更小的度数和不同的零度温度。 您可以通过检查上面标有两个刻度的普通室温计来轻松验证这两种差异。 摄氏度和华氏度之间的关系是

其中 TF 是华氏温度。 通过记住一些对应的点，例如水的冰点和沸点（表 18-1），可以轻松地在这两个标度之间进行转换。 图 18-7 比较了开尔文、摄氏和华氏标度。

我们使用字母 C 和 F 来区分两个尺度上的测量值和度数。 因此，

表示摄氏刻度上的 0° 与华氏刻度上的 32° 测量的温度相同，而

表示 5 摄氏度的温差（注意度数符号出现在 C 之后）相当于 9 华氏度的温差.

18-3 热膨胀 2021年6月3日11点47分

您通常可以通过将其放在热水流下来松开紧密的金属罐盖。当热水给它们的原子增加能量时，盖子的金属和罐子的玻璃都会膨胀。 （随着能量的增加，原子可以比平常移动得更远一点，抵抗将每个固体固定在一起的弹簧状原子间力。）然而，因为金属中的原子比玻璃中的原子移动得更远，盖子比罐子膨胀得更多，因此被松开。在许多常见情况下，必须预料到材料随温度升高的这种热膨胀。例如，当一座桥梁受到较大的季节性温度变化时，桥梁的各个部分会被扩展槽隔开，以便在炎热的天气下这些部分有扩展的空间而不会导致桥梁屈曲。填充牙洞时，填充材料必须具有与周围牙齿相同的热膨胀特性；否则，先吃冷冰淇淋再喝热咖啡会很痛苦。在建造协和式飞机（图 18-9）时，设计必须考虑到机身在超音速飞行过程中的热膨胀，因为经过的空气会产生摩擦加热。一些材料的热膨胀特性可以被普遍使用。温度计和恒温器可能基于双金属条组件之间的膨胀差异（图 18-10）。此外，熟悉的玻璃液体温度计基于这样一个事实，即水银和酒精等液体的膨胀程度与其玻璃容器不同（更大）。

线性膨胀

如果长度为 L 的金属棒的温度升高了 ΔT，则发现它的长度增加了一个量

其中 𝛼 是一个常数，称为线性膨胀系数。 系数 𝛼 的单位是“每度”或“每开尔文”，取决于材料。 尽管 𝛼 随温度而有所不同，但对于大多数实际用途而言，它可以被视为特定材料的常数。 表 18-2 显示了一些线性膨胀系数。 请注意，这里的单位 C° 可以用单位 K 代替。固体的热膨胀类似于照片放大，除了它是在三个维度上。 图 18-11b 显示了钢尺的（夸张的）热膨胀。 公式 18-9 适用于尺子的每一个线性尺寸，包括它的边缘、厚度、对角线以及在它上面蚀刻的圆和在它上面切出的圆孔的直径。 如果从那个孔切下的圆盘最初与孔紧密贴合，如果它经历与标尺相同的温度升高，它将继续紧密贴合。

卷扩展

如果固体的所有维度都随温度膨胀，则该固体的体积也必须膨胀。 对于液体，体积膨胀是唯一有意义的膨胀参数。 如果体积为 V 的固体或液体的温度增加了 ∆T，则发现体积增加为

其中 𝛽 是固体或液体的体积膨胀系数。 固体的体积膨胀系数和线膨胀系数的关系为

最常见的液体水与其他液体的行为不同。正如我们预期的那样，高于 4°C 左右，水会随着温度升高而膨胀。然而，在 0 到 4°C 之间，水会随着温度的升高而收缩。因此，在大约 4°C 时，水的密度最大。在所有其他温度下，水的密度小于此最大值。水的这种行为是湖泊自上而下而不是自下而上结冰的原因。当表面上的水从 10°C 冷却到冰点时，它变得比较低的水密度更大（“更重”）并沉入底部。然而，在 4°C 以下，进一步冷却会使表面上的水比较低的水密度更小（“更轻”），因此它会留在表面直到结冰。因此，当较低的水仍然是液体时，表面冻结。如果湖泊自下而上结冰，那么形成的冰在夏季往往不会完全融化，因为它会被上面的水隔离。几年后，地球温带的许多开放水域将终年结冰——水生生物将不复存在。

18-4 吸热 2021年6月3日11点53分

温度和热量

如果你从冰箱里拿出一罐可乐，把它放在厨房的桌子上，它的温度会上升——一开始很快，然后更慢——直到可乐的温度等于房间的温度（然后两者处于热平衡）。同样，留在桌上的一杯热咖啡的温度会下降，直到它也达到室温。在概括这种情况时，我们将可乐或咖啡描述为一个系统（温度为 TS），将厨房的相关部分描述为该系统的环境（温度为 TE）。我们的观察是，如果 TS 不等于 TE，那么 TS 会改变（TE 也可以改变一些），直到两个温度相等，从而达到热平衡。这种温度变化是由于系统与系统环境之间的能量转移导致系统热能发生变化。 （回想一下，热能是一种内能，由与物体内的原子、分子和其他微观物体的随机运动相关的动能和势能组成。）传递的能量称为热，用 Q 符号表示。当能量从环境转移到系统的热能时为正（我们说热量被系统吸收）。当能量从系统的热能转移到其环境时，热量是负的（我们说系统释放或损失了热量）。这种能量转移如图 18-12 所示。在图 18-12a 的情况下，其中 TS > TE，能量从系统转移到环境，因此 Q 为负。在图 18-12b 中，其中 TS = TE，没有这种传递，Q 为零，既不释放也不吸收热量。在图 18-12c 中，其中 TS < TE，传输是从环境到系统；所以Q是正的。

然后我们被引导到热的这个定义：

热量是由于系统与其环境之间存在温差而在系统与其环境之间传递的能量.

语。回想一下，能量也可以通过作用在系统上的力作为功 W 在系统与其环境之间传递。与温度、压力和体积不同，热量和功不是系统的固有属性。它们仅在描述能量传入或传出系统时才有意义。类似地，“600 美元转账”一词在描述与账户之间的转账时有意义，而不是账户中的内容，因为账户持有资金，而不是转账。单位。在科学家们意识到热量是传递能量之前，热量是根据其提高水温的能力来衡量的。因此，卡路里 (cal) 被定义为将 1 g 水的温度从 14.5°C 升高到 15.5°C 的热量。在英制系统中，相应的热量单位是英制热量单位 (Btu)，定义为将 1 磅水的温度从 63°F 升高到 64°F 的热量。 1948 年，科学界决定，由于热量（如功）是传递能量，因此热量的 SI 单位应该是我们用于能量的单位，即焦耳。卡路里现在被定义为 4.1868 J（精确），没有参考水的加热。 （营养中使用的“卡​​路里”，有时也称为卡路里（Cal），实际上是千卡。）各个热量单位之间的关系是

固体和液体对热量的吸收

热容量

物体的热容C是物体吸收或散失的热量Q与物体由此产生的温度变化ΔT之间的比例常数； 那是，

其中 Ti 和 Tf 是物体的初始温度和最终温度。 热容量 C 的单位是每度能量或每开尔文能量。 例如，用于面包加热器的大理石板的热容量 C 可能是 179 cal/C°，我们也可以写为 179 cal/K 或 749 J/K。 在这种情况下，“容量”一词确实具有误导性，因为它暗示了与桶装水的容量的类比。 这个类比是错误的，你不应该认为物体“含有”热量或吸收热量的能力有限。 只要保持必要的温差，热传递就可以不受限制地进行。 当然，物体可能会在此过程中熔化或蒸发。

比热

由相同材料制成的两个物体（例如大理石）的热容与其质量成正比。 因此，定义“每单位质量的热容”或比热 c 是方便的，它不是指物体，而是指制造物体的材料的单位质量。 公式 18-13 则变为

通过实验我们会发现，尽管特定大理石板的热容量可能为 179 cal/C°（或 749 J/K），但大理石本身（在该板或任何其他大理石物体中）的比热为 0.21 cal /g·C°（或 880 J/kg·K）。

从最初定义卡路里和英制热量单位的方式来看，水的比热是

表 18-3 显示了一些物质在室温下的比热。 请注意，水的价值相对较高。 任何物质的比热实际上在某种程度上取决于温度，但表 18-3 中的值在接近室温的温度范围内相当适用。

摩尔比热

在许多情况下，指定物质含量最方便的单位是摩尔 (mol)，其中

任何物质。 因此1mol铝意味着6.02×10 23 个原子（原子是基本单元），1mol氧化铝意味着6.02×10 23 个分子（分子是化合物的基本单元）。 当数量以摩尔表示时，比热也必须涉及摩尔（而不是质量单位）； 它们被称为摩尔比热。 表 18-3 显示了室温下某些元素固体（每个由单个元素组成）的值。

重要的一点

在确定和使用任何物质的比热时，我们需要知道能量作为热量传递的条件。 对于固体和液体，我们通常假设样品在转移过程中处于恒定压力（通常是大气压）下。 也可以想象在吸收热量的同时将样品保持在恒定体积。 这意味着通过施加外部压力可以防止样品的热膨胀。 对于固体和液体，这在实验上很难安排，但效果是可以计算的，结果表明，任何固体或液体在恒压恒体积下的比热差异通常不超过几个百分点。 正如您将看到的，气体在恒压条件和恒容条件下的比热值大不相同。

转化热

当固体或液体以热量的形式吸收能量时，样品的温度不一定升高。相反，样本可能会从一个阶段或状态变为另一个阶段或状态。物质可以以三种常见状态存在： 在固态中，样品的分子通过相互吸引力锁定在一个相当刚性的结构中。在液态下，分子具有更多的能量并且移动得更多。它们可能会形成短暂的簇，但样本没有刚性结构，可以流入或沉降到容器中。在气体或蒸汽状态下，分子具有更多的能量，彼此独立，并且可以填满容器的全部体积。融化。熔化固体意味着将其从固态变为液态。这个过程需要能量，因为固体分子必须从它们的刚性结构中解放出来。融化冰块形成液态水是一个常见的例子。将液体冻结成固体是熔化的逆过程，需要从液体中去除能量，这样分子才能沉淀成刚性结构。

汽化。 使液体汽化是指将其从液态变为气（气）态。 这个过程，就像熔化一样，需要能量，因为分子必须从它们的簇中解脱出来。 将液态水煮沸以将其转化为水蒸气（或蒸汽——单个水分子的气体）是一个常见的例子。 将气体冷凝成液体是汽化的逆过程； 它需要从气体中去除能量，这样分子才能聚集在一起，而不是彼此飞走。 当样品完全发生相变时，每单位质量必须以热量形式传递的能量称为相变热 L。因此，当质量为 m 的样品完全发生相变时，传递的总能量为

当相变是从液体到气体（然后样品必须吸热）或从气体到液体（然后样品必须放热）时，相变热称为汽化热 LV。 对于处于正常沸点或冷凝温度的水，

当相变由固态变为液态（此时样品必须吸热）或由液态变为固态（此时样品必须放热）时，相变热称为熔化热LF。 对于处于正常冰点或融化温度的水，

表 18-4 显示了某些物质的转化热.

18-5 热力学第一定律 2021年6月3日13点59分

仔细观察热量和工作

在这里，我们详细了解能量如何在系统与其环境之间以热量和功的形式传递。让我们将气体限制在带有可移动活塞的气缸中，如图 18-13 所示。由于密闭气体的压力作用在活塞上的向上力等于加载到活塞顶部的铅弹的重量。圆柱体的壁由绝缘材料制成，不允许以热量形式传递任何能量。圆柱体的底部位于一个热能储存器上，一个热储存器（可能是一个热板），您可以通过转动旋钮来控制其温度 T。系统（气体）从初始状态 i 开始，由压力 pi、体积 Vi 和温度 Ti 描述。您想将系统更改为最终状态 f，由压力 pf、体积 Vf 和温度 Tf 描述。将系统从初始状态变为最终状态的过程称为热力学过程。在这样的过程中，能量可以从储热器（正热量）转移到系统中，反之亦然（负热量）。此外，系统可以做功以升高加载的活塞（正功）或降低它（负功）。我们假设所有这些变化都缓慢发生，结果系统始终处于（近似）热平衡（每个部分始终处于热平衡）。

假设您从图 18-13 的活塞上移除了一些铅弹，让气体推动活塞，剩余的铅弹通过不同的位移 d→s 向上推力 →F 。 由于位移很小，我们可以假设→F 在位移过程中是恒定的。 然后 →F 的大小等于 pA，其中 p 是气体的压力，A 是活塞的表面积。 气体在置换过程中所做的微分功 dW 为

其中 dV 是活塞运动引起的气体体积的微分变化。 当您移除足够多的弹丸以允许气体将其体积从 Vi 变为 Vf 时，气体所做的总功为

在体积变化过程中，压力和温度也可能发生变化。 为了直接评估公式 18-25，我们需要知道系统从状态 i 变为状态 f 的实际过程中压力如何随体积变化。

一径。 实际上有很多方法可以将气体从状态 i 带到状态 f。 图 18-14a 显示了一种方法，它是气体压力与其体积的关系图，称为 p-V 图。 在图 18-14a 中，曲线表明压力随着体积的增加而降低。 公式 18-25 中的积分（以及气体所做的功 W）由点 i 和 f 之间曲线下方的阴影区域表示。 不管我们如何沿着曲线移动气体，这项工作都是正的，因为气体通过推动活塞向上来增加其体积。

另一个路径。从状态 i 到状态 f 的另一种方法如图 18-14b 所示。改变分两步进行——第一次从状态 i 到状态 a，第二次从状态 a 到状态 f。此过程的步骤 ia 是在恒定压力下进行的，这意味着您不会干扰图 18-13 中活塞顶部的铅弹。您可以通过缓慢转动温度控制旋钮使音量增加（从 Vi 到 Vf），将气体温度升高到某个更高的值 Ta。 （升高温度会增加气体作用在活塞上的力，使活塞向上移动。）在此步骤中，膨胀的气体做正功（以提升加载的活塞），系统从储热器吸收热量（以响应您在调高温度时产生的任意小的温差）。这种热量是正的，因为它被添加到系统中。图 18-14b 的步骤 f 是在恒定体积下进行的，因此您必须楔住活塞，防止其移动。然后当您使用控制旋钮降低温度时，您会发现压力从 pa 下降到其最终值 pf。在此步骤中，系统将热量散失到储热器中。对于整个过程 iaf，功 W 为正且仅在步骤 ia 期间执行，由曲线下方的阴影区域表示。在 ia 和 af 步骤中，能量以热量的形式传递，净能量传递 Q。

颠倒的步骤。 图 18-14c 显示了一个过程，其中前两个步骤以相反的顺序执行。 这种情况下的功 W 小于图 18-14b 中的功 W，吸收的净热量也是如此。 图 18-14d 建议您可以根据需要使气体完成的工作尽可能小（通过遵循 icdf 之类的路径）或尽可能大（通过遵循 ighf 之类的路径）。 总结：一个系统可以通过无数个过程从一个给定的初始状态到一个给定的最终状态。 可能涉及也可能不涉及热量，一般来说，功 W 和热量 Q 对于不同的过程会有不同的值。 我们说热量和功是与路径相关的量。

消极工作。 图 18-14e 显示了一个例子，其中系统做负功，因为一些外力压缩系统，减少它的体积。 所做功的绝对值仍然等于曲线下方的面积，但由于气体被压缩，气体所做的功为负。

循环。 图 18-14f 显示了一个热力学循环，其中系统从某个初始状态 i 进入另一个状态 f，然后又回到 i。 系统在循环期间所做的净功是膨胀期间所做的正功和压缩期间所做的负功之和。 在图 18-14f 中，净功为正，因为膨胀曲线下的面积（i 到 f ）大于压缩曲线下的面积（f 到 i）。

热力学第一定律

您刚刚看到，当系统从给定的初始状态变为给定的最终状态时，功 W 和热量 Q 都取决于过程的性质。 然而，通过实验，我们发现了一件令人惊讶的事情。 数量 Q ‒ W 对于所有过程都是相同的。 它仅取决于初始状态和最终状态，完全不取决于系统如何从一个状态变为另一个状态。 Q 和 W 的所有其他组合，包括单独的 Q、单独的 W、Q + W 和 Q ‒ 2W，都是路径相关的； 只有数量 Q ‒ W 不是。 数量 Q ‒ W 必须代表系统某些内在属性的变化。 我们称这个性质为内能 Eint 并写成

公式 18-26 是热力学第一定律。 如果热力学系统只经历微分变化，我们可以将第一定律写为\*

如果能量以热量 Q 的形式添加，系统的内能 Eint 趋于增加，如果能量作为系统所做的功 W 损失，则趋于减少。

在第 8 章中，我们讨论了能量守恒原理，因为它适用于孤立系统——即没有能量进入或离开系统的系统。热力学第一定律是将该原理扩展到非孤立系统。在这种情况下，能量可能以功 W 或热量 Q 的形式传入或传出系统。 在上述热力学第一定律的陈述中，我们假设系统的动能或势能没有变化系统整体；也就是说，∆K = ∆U = 0。规则。在本章之前，术语工作和符号 W 始终表示在系统上完成的工作。然而，从公式 18-24 开始，并继续接下来的两章关于热力学的内容，我们将重点关注系统所做的工作，例如图 18-13 中的气体。在系统上所做的功总是系统所做功的负数，因此如果我们根据对系统所做的功 Won 重写公式 18-26，我们有 ∆Eint = Q + Won。这告诉我们以下信息：如果系统吸收热量或对系统做正功，则系统的内能趋于增加。相反，如果系统失去热量或对系统做负功，则内能趋于减少.

热力学第一定律的一些特例

以下是表 18-5 中总结的四种热力学过程.

绝热过程。 绝热过程是这样一种过程，它发生得如此之快，或者发生在一个绝热良好的系统中，以至于在系统与其环境之间没有发生热量那样的能量传递。 在第一定律（公式 18-26）中设置 Q = 0 产生

这告诉我们，如果系统做了功（即，如果 W 为正），系统的内能会减少工作量。 相反，如果对系统做功（即，如果 W 为负），则系统的内能增加该量。 图 18-15 显示了一个理想化的绝热过程。 由于绝缘，热量不能进入或离开系统。 因此，能量在系统与其环境之间传递的唯一方式是做功。 如果我们从活塞中取出弹丸并让气体膨胀，则系统（气体）所做的功为正，气体的内能减少。 相反，如果我们增加弹丸并压缩气体，则系统所做的功为负，气体的内能增加。

定容过程。 如果系统（例如气体）的体积保持不变，则该系统无法做任何工作。 将 W = 0 置于第一定律（公式 18-26）中可得出

因此，如果系统吸收热量（即，如果 Q 为正），则系统的内能会增加。 反之，如果在此过程中失去热量（即如果 Q 为负），则系统的内能必定减少。

循环过程。 在某些过程中，经过一定的热和功交换后，系统会恢复到其初始状态。 在这种情况下，系统的内在属性——包括其内能——不可能改变。 将 ∆Eint = 0 置于第一定律（公式 18-26）中可得出

因此，在此过程中所做的净功必须恰好等于作为热量传递的净能量； 系统内能的储存保持不变。 循环过程在 p-V 图上形成一个闭环，如图 18-14f 所示。 我们将在第 20 章详细讨论这些过程。

免费扩展。 这些是绝热过程，其中系统与其环境之间不发生热传递，并且系统上或系统不做功。 因此，Q = W = 0，第一定律要求

图 18-16 显示了如何进行这种扩展。 内部处于热平衡状态的气体最初被封闭的旋塞限制在绝缘双室的一半； 另一半被疏散。 旋塞阀打开，气体自由膨胀以充满腔室的两半。 由于绝缘，没有热量传入或传出气体。 气体不做任何功，因为它冲入真空，因此不承受任何压力。 自由扩展与我们考虑过的所有其他过程不同，因为它不能缓慢且可控地进行。 结果，在突然膨胀期间的任何给定时刻，气体不处于热平衡并且其压力不均匀。 因此，虽然我们可以在 p-V 图上绘制初始和最终状态，但我们无法绘制扩展本身。

18-6 传热机理 2021年6月3日14点28分

我们已经讨论了系统与其环境之间作为热量的能量传递，但我们还没有描述这种传递是如何发生的。 存在三种传输机制：传导、对流和辐射。 接下来让我们依次检查这些机制。

传导

如果您将金属扑克的末端放在火中足够长的时间，它的手柄会变热。 能量通过沿扑克长度的（热）传导从火传递到手柄。 扑克火端金属的原子和电子的振动幅度由于其环境的高温而变得比较大。 在相邻原子之间的碰撞期间，这些增加的振动幅度以及由此产生的相关能量沿着电击棒从一个原子传递到另一个原子。 以此方式，温度升高的区域自身沿着扑克延伸至手柄。 考虑一个面面积为 A 和厚度为 L 的板，其面通过一个热蓄水池和一个冷蓄水池保持在温度 TH 和 TC，如图 18-18 所示。 设 Q 是在时间 t 内作为热量通过板坯从热面传递到冷面的能量。 实验表明，传导率 Pcond（单位时间内传递的能量）为

其中 k，称为热导率，是一个常数，取决于制造平板的材料。 易于通过传导传递能量的材料是良好的热导体并具有高 k 值。 表 18-6 给出了一些常见金属、气体和建筑材料的热导率。

热阻传导（R 值）

如果您对房屋的隔热或野餐时的可乐罐保持低温感兴趣，那么您更关心的是不良的导热体而不是良好的导热体。 为此，热阻R的概念被引入工程实践中。 厚度为 L 的板坯的 R 值定义为

板坯材料的导热系数越低，板坯的 R 值越高； 所以具有高 R 值的东西是不良的热导体，因此是良好的热绝缘体。 请注意，R 是归因于指定厚度的板的属性，而不是材料。 R 的常用单位（至少在美国几乎从未说明过）是每英制热量单位的平方英尺 - 华氏度 - 小时 (ft 2· F°· h/Btu)。 （现在你知道为什么很少提到单位了。）

通过复合板传导

图 18-19 显示了一个复合板，由具有不同厚度 L1 和 L2 以及不同热导率 k1 和 k2 的两种材料组成。 板坯外表面的温度为 TH 和 TC。 板的每个面都有面积A。假设转移是稳态过程，让我们推导出通过板的传导率的表达式； 也就是说，板坯各处的温度和能量传递速率不随时间变化。 在稳态下，通过两种材料的传导率必须相等。 这与说在一定时间内通过一种材料传递的能量必须等于在同一时间内通过另一种材料传递的能量相同。 如果这不是真的，板坯中的温度会发生变化，我们就不会处于稳定状态。 令 TX 为两种材料之间的界面温度，我们现在可以使用公式 18-32 来写

求解公式 18-34 的 TX 产量，经过一些代数运算后，

将此表达式代入 TX 到公式 18-34 的任一等式中，得出

我们可以扩展公式 18-36 以适用于构成平板的任意数量 n 种材料：

分母中的求和符号告诉我们将所有材料的 L/k 值相加。

对流

当您看着蜡烛或火柴的火焰时，您正在观察热能通过对流向上传输。当流体（例如空气或水）与温度高于流体温度的物体接触时，就会发生这种能量传递。与热物体接触的流体部分的温度升高，并且（在大多数情况下）流体膨胀并因此变得密度降低。由于这种膨胀的流体现在比周围较冷的流体轻，浮力导致它上升。一些周围较冷的流体然后流动以取代上升的较热的流体，然后该过程可以继续。对流是许多自然过程的一部分。大气对流在决定全球气候模式和日常天气变化方面发挥着重要作用。滑翔机飞行员和鸟类都在寻找使他们保持在空中的上升热气流（暖空气的对流）。巨大的能量转移通过同样的过程在海洋中发生。最后，能量通过巨大的对流单元从位于太阳核心的核炉输送到太阳表面，其中热气体沿着单元核心上升到表面，而核心周围的较冷气体则下降到表面以下。

辐射

物体与其环境以热能形式交换能量的第三种方法是通过电磁波（可见光是电磁波的一种）。 以这种方式传递的能量通常被称为热辐射，以区别于电磁信号（例如电视广播）和核辐射（原子核发射的能量和粒子）。 （“辐射”一般意味着发射。）当你站在大火前，你通过吸收火焰的热辐射而感到温暖； 也就是说，你的热能随着火的热能减少而增加。 通过辐射进行热传递不需要介质——辐射可以通过真空从太阳传到你。 物体通过电磁辐射发射能量的速率 Prad 取决于物体的表面积 A 和该区域的开尔文温度 T，由下式给出

这里 σ = 5.6704 × 10-8 W/m2·K4 被称为 Stefan-Boltzmann 常数，以 Josef Stefan（他于 1879 年通过实验发现方程 18-38）和 Ludwig Boltzmann（不久后从理论上推导出来）。 符号 ε 表示物体表面的发射率，其值介于 0 和 1 之间，具体取决于表面的成分。 最大发射率为 1.0 的表面被称为黑体辐射体，但这种表面是理想的极限，在自然界中不会出现。 再次注意，公式 18-38 中的温度必须以开尔文为单位，以便绝对零的温度对应于没有辐射。 另请注意，温度高于 0 K 的每个物体（包括您）都会发出热辐射。 （见图 18-20。）

物体通过来自其环境的热辐射吸收能量的速率 Pabs，我们认为它处于均匀温度 Tenv（开尔文），是

公式 18-39 中的发射率 ε 与公式 18-38 中的相同。 理想化的黑体辐射器，ε = 1，将吸收它拦截的所有辐射能量（而不是通过反射或散射将一部分从自身发射出去）。 因为一个物体既发射又吸收热辐射，它的热辐射能量交换的净速率 Pnet 为

如果净能量通过辐射吸收，则 Pnet 为正，如果通过辐射损失净能量，则为负。 无数的医疗案例中都涉及到热辐射，死响尾蛇击中一只伸向它的手。 响尾蛇每只眼睛和鼻孔之间的凹坑（图 18-21）用作热辐射传感器。 比如说，当一只老鼠靠近响尾蛇的头部时，来自老鼠的热辐射会触发这些传感器，引起蛇用尖牙攻击老鼠并注射毒液的反射动作。 即使蛇已经死亡长达 30 分钟，伸出手的热辐射也会引起相同的反射动作，因为蛇的神经系统仍在继续运作。 正如一位蛇专家建议的那样，如果您必须移除最近杀死的响尾蛇，请使用长棍而不是您的手.