

项目 1 基本概念



项目知识点

本项目知识点包括：热力系及其类型；状态和状态参数；平衡态；状态方程和状态参数坐标图；过程和循环；功和热量。



项目要求

理解和掌握工程热力学基本概念：热力系、平衡态、准静态（准平衡）过程、状态参数、状态量、过程量、功量、热量、 $p-v$ 图和 $T-s$ 图、循环。

(1) 明确一般热力系的定义，准确解释闭口系、开口系、绝热系和孤立系等热力系的特点及相互间的联系与区别。

(2) 准确解释平衡态、均匀态、稳定态的特点及区别。

(3) 准确掌握工程热力学八个状态参数的定义、物理意义。

(4) 准确解释准平衡过程，具有在状态参数坐标图中表示准平衡过程的能力。

(5) 准确解释状态量和过程量的特性及相互区别。

(6) 具有根据力平衡原理计算容器中压力的能力。



学习笔记



项目知识结构框图

本项目知识结构框图如图 1-1 所示。

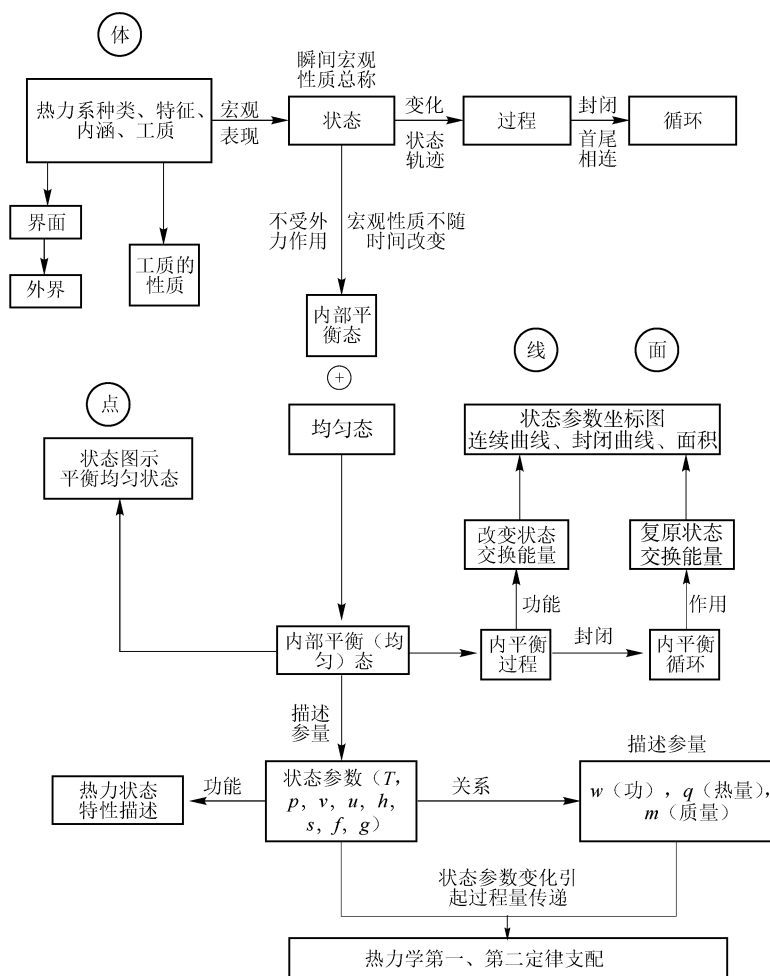


图 1-1 知识结构框图 1

任务 1.1 项目重要知识点

1. 热力系

- 热力学系统（系统、热力系或体系）：人为地划定一个或多个任意几何面所围成空间的物质，作为热力学的研究对象。
- 外界：系统之外的一切物质的统称。
- 边界：系统与外界的边界面。真实的或想象的，固定的或移动的界面都可作边界面，系统与外界通过边界进行能量及物质的传递。
- 闭口系：与外界没有物质交换的系统，又叫作控制质量系统。
- 开口系：与外界有物质交换的系统，又称为控制容积系统。

- **绝热系**：与外界没有热量交换的系统。
- **绝功系**：与外界没有功（膨胀功或技术功）交换的系统。
- **稳定流动系统**：如果开口系内工质的质量与参数均不随时间变化，则称为稳定流动系统，否则为不稳定流动开口系统。
- **简单可压缩系统**：与外界之间只交换热量及一种准静态功的系统。工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。
- **孤立系**：与外界之间既无物质交换又无能量交换的系统。绝对的孤立系是不存在的，但是可以认为任何非孤立系+相关的外界=孤立系。

2. 状态和状态参数

➤ **状态参数**：用以描述系统内工质所处状态的一些宏观物理量。工质状态参数的变化量只取决于给定的初态与终态，而与变化过程中的状态或路径无关。

状态参数的积分特性：当系统由初态 1 变化到终态 2 时，状态参数 z 的变化量与初态和终态相关，而与路径 a, b 无关，即

$$\Delta z = \int_{1,a}^2 dz = \int_{1,b}^2 dz = z_2 - z_1 \quad (1-1)$$

当系统经历一系列状态变化而又回复到初态时，其状态参数的变化为零，即它的循环积分为零：

$$\oint dz = 0 \quad (1-2)$$

状态参数的微分特性：状态参数的微分是全微分。设状态参数 z 是另外两个变量 x 和 y 的函数，则

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy \quad (1-3)$$

在数学上的充要条件为

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \quad (1-4)$$

如果某物理量 z 具有上述数学特征，则该物理量一定是状态参数。

- **强度量**：与系统内所含物质的数量无关的物理量，如压力、温度、密度等。
- **广延量**：与系统内所含物质的数量有关的物理量，如体积、内能、焓等。
- **比参数**：单位物理量的广延量。比参数具有强度参数的性质，如比体积、比内能、比焓等。比参数用相应的小写字母表示，而且为了书写方便，把除比体积以外的其他比参数的“比”字省略。

➤ **基本状态参数**：压力、比体积和温度是三个可以测量而且又常用的状态参数。其他的状态参数可根据这些基本状态参数之间的关系（详见项目 5）间接地导出。

(1) **压力（又称压强）**：气体单位面积上所作用力的法向分量。

- **绝对压力 p** ：工质真实的压力。
- **表压力 p_g** ：绝对压力高于环境压力（ p_b ）时，压力表指示的数值。
- **真空度 p_v** ：绝对压力低于环境压力（ p_b ）时，真空表指示的数值。

三者的关系：

$$p_g = p - p_b \quad (1-5)$$

$$p_v = p_b - p \quad (1-6)$$

(2) 温度：描述处于同一热平衡状态各系统的宏观特性的状态参数。

➤ 热力学第零定律：与第三个系统处于热平衡的两个系统，彼此也处于热平衡。

热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系： $\{t\}_{\text{℃}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15$ 。

(3) 比体积 v ：单位质量工质所占的体积，单位是 m^3/kg 。

➤ 密度：单位体积内所包含的工质质量，是比体积的倒数。

3. 平衡态

➤ 平衡态：指在不受外界影响（重力场除外）的条件下，状态参数不随时间变化的状态。平衡态下系统的状态可用确定的状态参数来描述。

实现平衡的充要条件：①热平衡，系统内无温差；②力学平衡，系统内无压力差。

对于有相变及化学反应的情况，将存在化学势差。当这种势差消失时，达到相应的相平衡或化学平衡。

➤ 状态公理：

假设系统内部有 K 种可变化的物质，系统与外界有 L 种交换，则系统可变化的总的自由度 I 为

$$I = K + L + 1$$

简单可压缩系统的独立状态参数只有 2 个。

4. 状态方程和状态参数坐标图

➤ 状态方程：基本状态参数 p 、 v 、 T 之间的关系

$$v = f(p, T) \text{ 或 } f(p, v, T) = 0$$

状态方程的具体形式取决于工质的性质。理想气体的状态方程 $pv = R_g T$ 最为简便，其他工质的状态方程将在项目 4 中介绍。

➤ 状态参数坐标图

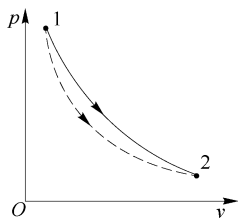


图 1-2 准静态与非准静态过程

简单可压缩系统的独立状态参数只有 2 个，可以表示在平面坐标图上。常用的坐标图有 p - v 图，如图 1-2 所示，纵坐标轴表示状态参数 p ，横坐标轴表示状态参数 v 。

5. 过程与循环

➤ 准静态过程：使系统状态改变的不平衡势差无限小，以致该系统在任意时刻均无限接近于某个平衡态的过程。准静态过程在 p - v 图上可以用实线表示，如图 1-2 所示，而非准静态过程要用虚线表示。大多数实际工程的过程都可以看作是准静态过程。

建立准静态过程概念的意义：既可以进行热功转换，又可以用确定的状态参数描述过程。

➤ 耗散效应：通过摩擦、电阻、磁阻等使功变热的效应。耗散效应并不影响准静态过程的实现。

➤ 可逆过程：系统经历一个过程后，如令过程逆行而能使系统与外界同时恢复到初始状态而不留下任何痕迹的过程。无耗散的准静态过程就是可逆过程。

- **热力循环 (循环)**: 工质从初始状态经历某些过程之后又回复到初始状态的过程。
- **可逆循环**: 全部由可逆过程组成的循环。在 $p-v$ 图或 $T-s$ 图上, 用闭合实线表示。
- **不可逆循环**: 含有不可逆过程的循环, 在 $p-v$ 图或 $T-s$ 图上, 不可逆过程用虚线表示。

➤ **正循环 (动力循环、热机循环)**: 工质吸热, 对外做出功量, 如图 1-3 所示。

➤ **逆循环 (制冷循环、热泵循环)**: 消耗功量, 工质放热, 如图 1-4 所示。

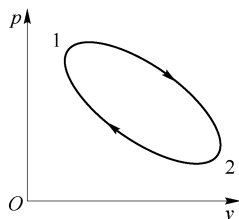


图 1-3 正循环吸热, 对外做功

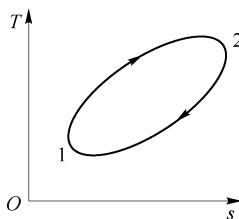


图 1-4 逆循环耗功, 向外放热

6. 功和热量

➤ **功**: 系统与外界交换能量的一种方式, 其唯一效果可归结为外界举起了一个重物。

➤ **准静态过程的容积变化功 (准静态功)**:

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-7)$$

如图 1-5 所示, 在 $p-V$ 图中 W 是过程曲线与横坐标轴围成的面积, 因此 $p-V$ 图或 $p-v$ 图又称为示功图。

若过程不同, 则容积变化功不相同, 所以功是过程量。

气体膨胀, 功量为正, 气体对外做功。

气体被压缩, 功量为负, 外界对气体做功。

式 (1-7) 同样适用于可逆过程, 但不能用于非准静态过程。

单位质量气体准静态或可逆过程中的比容积变化功为

$$\delta w = \frac{1}{m} p dV = p dv \quad (1-8)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-9)$$

➤ **热量**: 系统与外界之间依靠温差传递的能量。这是与功不同的另一种能量传递方式。

规定: 系统吸热时热量取正值, 放热时取负值。

➤ **熵**: 系统在微元可逆过程中与外界交换的热量 δQ_{rev} 除以传热时系统的热力学温度 T 所得的商, 即为系统熵的微小增量:

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} \quad (1-10)$$

可逆过程传热量的计算式为

$$Q_{\text{rev}} = \int T dS \quad (1-11)$$

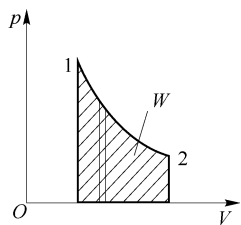


图 1-5 $p-V$ 图 (示功图)

➤ 比熵:

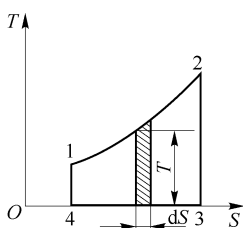


图 1-6 T - S 图 (示热图)

$$ds = \frac{\delta q_{\text{rev}}}{T} \quad (1-12)$$

熵是广延参数, 具有可加性, 均匀系统 m (单位为 kg) 工质的熵 $S = m \cdot s$ 。

熵的单位为 J/K , 比熵的单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

T - S 图: 由于 $\delta Q_{\text{rev}} = TdS$, 如图 1-6 所示, $1 \rightarrow 2$ 可逆过程中系统与外界交换的热量 Q_{rev} 可以用过程线下的面积代表。 T - S 图或 T - s 图又称示热图。

任务 1.2 思考题提示与简答

1. 有人说绝对压力、表压力和真空度都是状态参数, 对吗? 为什么?

【提示】 从三者的定义及状态确定后这三个压力数值是否唯一来分析。

2. 如果容器中气体的压力保持不变, 那么压力表的读数一定也保持不变吗?

【提示】 从压力表的读数取决于容器中气体的绝对压力和压力表所处环境的大气压力两个因素都对压力表的读数有影响来分析。

3. 平衡态与稳定态有何区别和联系?

【提示】 平衡强调的是在没有外界作用时系统宏观性质对时间的不变性。对于稳定系统, 虽然系统宏观性质具有对时间的不变性, 但是系统是有外界作用的。

4. 平衡态与均匀态有何区别和联系?

【提示】 从平衡 (状态) 和均匀的定义出发来分析二者的区别。二者的联系是有条件的, 即: 对于处于平衡态下的单相气体 (气体或液体), 如果忽略重力的影响, 又没有其他外场 (电、磁场等) 作用, 那么内部各处的各种性质都是均匀一致的, 这时它是平衡的, 也是均匀的。

5. 状态量与过程量有何区别和联系?

【答】 状态量是热力状态的单值函数, 其数学特性是点函数, 状态量的微分是全微分, 这个全微分的循环积分恒为零。而过程量不是热力状态的单值函数, 即使在初、终态完全相同的情况下, 过程量的大小与其中间经历的具体路径有关, 过程量的微分不是全微分, 因此它的循环积分不是零而是一个确定的数值。

6. 热力系的选取有何限制?

【答】 略

7. 有人说状态方程就是状态参数之间的关系, 对吗?

【答】 略

8. 举例说明促使系统状态变化的原因是什么。

【答】 略

任务 1.3 习题详解

1-1 人体温度是 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，问这个温度相当于华氏温度、兰氏温度和热力学温度各为多少？

【答案】 $98.6\text{ }^{\circ}\text{F}$ 、 $558.29\text{ }^{\circ}\text{R}$ 、 310.15 K 。

注：通过此题可练习温度单位的换算。

1-2 气象报告说：某高压中心气压是 102.5 kPa ，它相当于多少毫米汞柱？它比标准大气压高出多少？（计算结果以 kPa 为单位）

【解】 根据题意有

$$p = 102.5\text{ kPa} = 102\,500\text{ Pa} = 102\,500\text{ Pa} \times 7.500\,62 \times 10^{-3} = 768.81\text{ mmHg}$$

$\Delta p = p - p_{\text{标准}} = 768.81 - 760 = 8.81(\text{mmHg})$ ，即 $\Delta p = 8.81\text{ mmHg} / 7.500\,62 = 1.175\text{ kPa}$
或

$$\Delta p = p - p_{\text{标准}} = 102.5\text{ kPa} - 101.325\text{ kPa} = 1.175\text{ kPa}$$

注：通过此题可练习压力单位的换算。

1-3 用 U 形管测量容器中气体的压力，在汞柱上加一段水柱（见图 1-7）。已测得水柱高 850 mm ，汞柱高 520 mm 。当地大气压力 p_b 为 755 mmHg ，问容器中气体的绝对压力为多少？（计算结果以 MPa 为单位）

【解】 水柱高、汞柱高及大气压力之和即为容器中气体的绝对压力，但各种压力单位要经过换算。

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{Hg}} + p_b \\ &= 850 \times 9.806\,65 + (520 + 755) \times 133.322\,4 \\ &= 178\,322(\text{Pa}) (0.178\,322\text{ MPa}) \end{aligned}$$

1-4 用斜管压力计测量锅炉烟道中烟气的真空度（见图 1-8）。已知：管子的倾角 $\alpha = 30^{\circ}$ ，压力计使用密度为 800 kg/m^3 的煤油；斜管中液柱长度 $l = 200\text{ mm}$ 。当时大气压力 $p_b = 745\text{ mmHg}$ 。问烟气的真空度为多少毫米水柱？烟气的绝对压力为多少毫米汞柱？

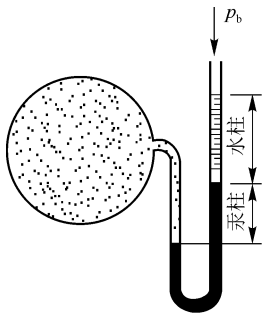


图 1-7 习题 1-3 图

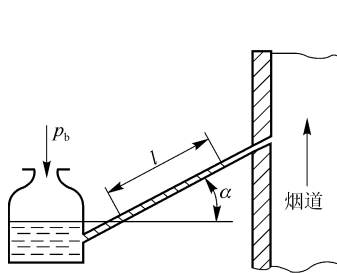


图 1-8 习题 1-4 图

【解】(1) $p_v = \rho g l \sin 30^\circ = 800 \text{ kg/m}^3 \times 9.80665 \text{ m/s}^2 \times 0.2 \text{ m} \times 0.5 = 784.5 \text{ Pa} = 80 \text{ mmHg}$

(2) 根据式 (1-6) 有

$$p = p_b - p_v = 745 - (784.5/101325) \times 760 = 739.12 (\text{mmHg})$$

注：通过此题目练习真空度、绝对压力、表压力之间的关系及压力单位之间的换算。

1-5 某冷凝器上的真空表读数为 750 mmHg，而大气压力计的读数为 761 mmHg，试问冷凝器的绝对压力为多少？(计算结果以 Pa 为单位)

【解】根据式 (1-6) 有

$$\begin{aligned} p &= p_b - p_v = 761 \text{ mmHg} - 750 \text{ mmHg} = 11 \text{ mmHg} \\ &= 11 \text{ mmHg} \times \frac{101325 \text{ Pa}}{760 \text{ mmHg}} = 1466.55 \text{ Pa} \end{aligned}$$

1-6 有一容器内装有隔板，将容器分为 A、B 两部分 (见图 1-9)。容器两部分中装有不同压力的气体，并在不同部位安装三个压力表。已测得 1、2 两个压力表的表压依次为 $1.10 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 $1.75 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。当时大气压为 $0.97 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。试求 A、B 两部分中气体的绝对压力和表 3 的读数。(计算结果以 MPa 为单位)

【解】根据式 (1-5) 有

$$p_A = p_b + p_{g1} = (0.97 + 1.10) \text{ bar} \times 0.1 \text{ MPa/bar} = 0.207 \text{ MPa}$$

由于 $p_A = p_{g2} + p_B$

$$\text{故 } p_B = p_A - p_{g2} = 0.207 \text{ MPa} - 1.75 \text{ bar} \times 0.1 \text{ MPa/bar} = 0.032 \text{ MPa}$$

由于 $p_B = p_b + p_{g3}$

$$\text{故 } p_{g3} = p_B - p_b = 0.032 \text{ MPa} - 0.97 \text{ bar} \times 0.1 \text{ MPa/bar} = -0.065 \text{ MPa}$$

1-7 某实验设备中空气流过管道，利用压差计测量孔板两边的压差 (见图 1-10)。如果使用的是汞压差计，测得液柱高为 300 mmHg，汞密度为 13.60 g/cm^3 。试确定孔板两边压差为多少。(计算结果以 MPa 为单位)

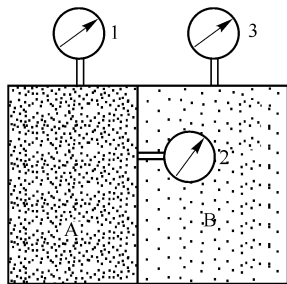


图 1-9 习题 1-6 图

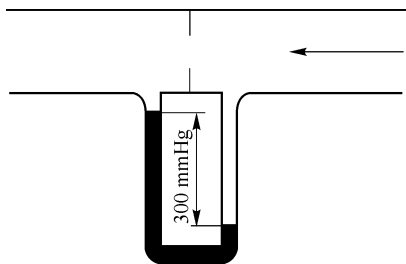


图 1-10 习题 1-7 图

【解】孔板两边的压差为 300 mmHg，换算为 MPa 即可。

$$\Delta p = 300 \text{ mmHg} \times \frac{101325 \text{ Pa}}{760 \text{ mmHg}} = 0.04 \text{ MPa}$$

1-8 从工程单位制热力性质表中查得，水蒸气在 500°C 、 100 at 的比体积和比焓分别为 $v = 0.03347 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h = 806.6 \text{ kcal/kg}$ 。试问，在 SI 制中，这时水蒸气的温度、压力和比焓各为多少？

【解】在国际单位制中，这时水蒸气的压力为

$$p = 100 \text{ at} \times 9.806\,65 \times 10^4 \text{ Pa/at} = 9\,806\,650 \text{ Pa} = 9.806\,65 \text{ MPa}$$

比焓为

$$h = 806.6 \text{ kcal/kg} = 806.6 \text{ kcal/kg} \times 4.186\,8 \text{ J/cal} = 3\,377.07 \text{ kJ/kg}$$

由焓的表达式 $h = u + pv$ 得 $u = h - pv$, 即

$$u = h - pv = 3\,377.07 \text{ kJ/kg} - 9\,806.65 \text{ kPa} \times 0.033\,47 \text{ m}^3/\text{kg} = 3\,048.84 \text{ kJ/kg}$$

注: 通过此题练习工程制与国际制的单位换算。

1-9 容器中的真空度为 $p_v = 600 \text{ mmHg}$, 气压计上汞柱高度 $p_b = 755 \text{ mm}$, 求容器中的绝对压力 (以 MPa 表示)。如果容器中的绝对压力不变, 而气压计上汞柱高度为 770 mm , 求此时真空表上的读数是多少? (以 mmHg 表示)

【解】 容器中气体压力低于当地大气压力, 故绝对压力为

$$p = p_b - p_v = 755 \text{ mmHg} - 600 \text{ mmHg} = 155 \text{ mmHg} = 0.020\,7 \text{ MPa}$$

若容器中绝对压力不变, 而大气压力变为 $p'_b = 770 \text{ mmHg}$, 则此时真空表上的读数为

$$p'_v = p'_b - p = 770 \text{ mmHg} - 155 \text{ mmHg} = 615 \text{ mmHg}$$

任务 1.4 典型例题

D1-1 某容器被一刚性壁分成两部分, 在容器的不同部位安装有压力计, 如图 1-11 所示。设大气压力为 97 kPa 。

(1) 若压力表 B、C 的读数分别为 75 kPa 、 0.11 MPa , 试确定压力表 A 的读数, 以及容器内两部分气体的绝对压力。

(2) 若表 C 为真空表, 读数为 24 kPa , 压力表 B 的读数为 36 kPa , 试问表 A 是什么表? 读数是多少?

【解】 按照压力的关系进行分析, 且 $p_b = 97 \text{ kPa}$ 。

(1) 因压力表 C 的读数: $p_{g,C} = p_I - p_b = 110 \text{ kPa}$,

则绝对压力

$$p_I = p_{g,C} + p_b = 110 + 97 = 207 (\text{kPa})$$

压力表 B 的读数: $p_{g,B} = p_I - p_{II} = 75 \text{ kPa}$

则绝对压力

$$p_{II} = p_I - p_{g,B} = 207 - 75 = 132 (\text{kPa})$$

因为 $p_{II} > p_b$, 所以表 A 一定是压力表, 且

$$p_{g,A} = p_{II} - p_b = 132 - 97 = 35 (\text{kPa})$$

(2) 因真空表 C 的读数: $p_{v,C} = p_b - p_I = 24 \text{ kPa}$

则绝对压力

$$p_I = p_b - p_{v,C} = 97 - 24 = 73 (\text{kPa})$$

压力表 B 的读数: $p_{g,B} = p_I - p_{II} = 36 \text{ kPa}$

则绝对压力

$$p_{II} = p_I - p_{g,B} = 73 - 36 = 37 (\text{kPa})$$

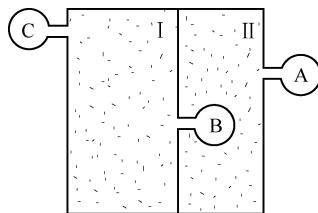


图 1-11 典型例题 D1-1 图

因为 $p_{\text{II}} < p_{\text{b}}$, 所以表 A 一定是真空表, 且

$$p_{\text{v,A}} = p_{\text{b}} - p_{\text{II}} = 97 - 39 = 58 \text{ (kPa)}$$



【讨论】

(1) 从已知处开始, 按顺序找关系。如本题已知 C 的读数, 就应该从左到右进行; 如果已知 A 的读数, 就应该从右到左进行。

(2) 需要注意, 不管用什么压力表, 测得的都是工质的绝对压力和环境压力之间的相对值, 而不是工质的真实压力。

(3) 这个环境压力是指测压计所处的空间压力, 可以是大气压力, 也可以是所在环境空间的压力。

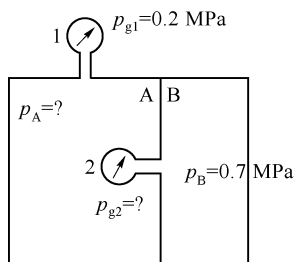


图 1-12 典型例题 D1-2 图

D1-2 如图 1-12 所示, 一容器被分为 A、B 两部分, 且都充满气体, A 部分装两只压力表。已知大气压力 $p_{\text{b}} = 0.1 \text{ MPa}$, $p_{\text{g1}} = 0.2 \text{ MPa}$, $p_{\text{B}} = 0.7 \text{ MPa}$ 。确定 p_{A} 及 p_{g2} 的值。

【解】 因已知表 1 的表压力, 从定义出发有

$$p_{\text{g1}} = p_{\text{A}} - p_{\text{b}} = 0.2 \text{ MPa}$$

$$p_{\text{g2}} = p_{\text{B}} - p_{\text{A}}$$

解得

$$p_{\text{A}} = 0.3 \text{ MPa}$$

$$p_{\text{g2}} = 0.4 \text{ MPa}$$

D1-3 水箱中的水通过空气加压, 用多气体压力计测量压力, 如图 1-13 所示。当 $h_1 = 0.2 \text{ m}$, $h_2 = 0.3 \text{ m}$, $h_3 = 0.46 \text{ m}$ 时, 确定罐内空气的表压力。水、油、汞的密度分别为 1000 kg/m^3 、 850 kg/m^3 、 13600 kg/m^3 。

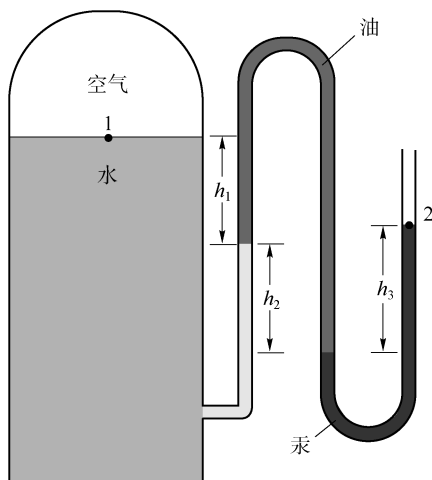


图 1-13 典型例题 D1-3 图

【解】 从 1 点的压力 (空气-水的界面上), 沿着管通过增加 (因为向下) 或减少 (因为向上) ρgh 项, 直到 2 点 (该点的压力为大气压 p_{b}), 可以有如下关系式

$$p_1 + \rho_{\text{水}} gh_1 + \rho_{\text{油}} gh_2 - \rho_{\text{汞}} gh_3 = p_{\text{b}}$$