

(1) 移動中的物體帶有動能。

(2) 物體上施/受力可表為一僅與空間座標相關的函數。空間全微分，則可視為系統中儲存有位能。

(iii) 動能及位能可以互換 (iv) 在僅有保守力作功的情形下，動能與位能的和，即總機械能，為守恆量（不隨時間改變）。

(vii) 具有彈性的介質可以波的形式傳遞能量。

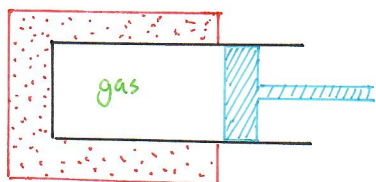
巨觀下，是否有動能與位能以外的能量形式存在？

（假想其它能量可依一定的條件部分或全部轉換成機械能？或是機械能可依一定的條件轉換為其它形式的能量？）

後見之明，能量守恆為物理定律具有時間平移對稱性的

自然推論結果。^{觀察1} 假設物理定律具有時間平移對稱性，則即便有非保守力作功（如摩擦力），則即便總機械能不守恆，總能量亦須守恆。能量須以機械能以外的形式存在。觀察摩擦力做功總是使物體發熱。此具觀之其它能量形式該與溫度（尚未定義）相關。

^{觀察2} 在氣缸中混合氫氣與氧氣，使其發生化學反應（燃燒），則氣體溫度與壓力上升，可推動活塞，對氣缸以外的物體做功。以高溫物體包裹氣缸亦可達到同樣的效果。做功過程，外界物體獲得機械能（如動能）。以能量守恆的觀點，高溫之氣體即便靜止，其中亦儲存有某種形式的能量，並且此種形式的能量亦可轉換為動能或位能。



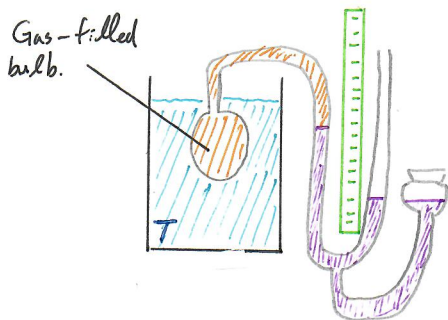
由觀察1與2可推論，機械能可轉換為某種與溫度有關之能量形式，而此種能量形式亦可（部分）轉換為功（eg. 變為機械能）

不可100%轉換，於熱力學第二定律提及

General Physics (I)

Thermodynamics I.

物質或物體的某些特性與它內部具有的能量（微觀上可為動能或位能）（稱 thermal energy 或 internal energy）有關，如壓力、體積、或電阻。（即使物體為靜止，其內部亦可能存有 internal energy）可利用溫度（temperature）對 internal energy 做計量，惟必須先知道如何定義溫度的測量方式（起於經驗法則）、溫標，及校正方式。



e.g. 經驗上 (i) 兩溫度不同的東西放在一起，它們會趨向相同的溫度，及 (ii) 氣體在不同的溫度具有不同的壓力。

因氣體熱含量小（稍後解釋），可利用氣體球接觸待測物以達到與待測物相同的溫度而不太使待測物溫度發生變化。

可利用氣體的壓力來定義溫度。

1. 溫度之 SI 制定義具有底限，定義此底限之值為 0 Kelvin。溫度處於此底限之物質或物體不具有 thermal energy。

2. 理想氣體 (ideal gas) 在密度不變時，其溫度與壓力成正比。（氣體在低壓情形之行為趨近於理想氣體。故可方便地用理想氣體的壓力做為溫度的測度。）

3. 物質在具有特定溫度時發生相變化（如固體 → 液體）。水在具有特定溫度與壓力時固、液、汽三相共存，稱為三相點 (triple-point)。技術上，常以三相溫度 (triple-point temperature) 定義溫標。

稱如此測量的溫度為 ideal gas temperature

$$T = (273.16 \text{ K}) \left(\lim_{P \rightarrow 0} \frac{P}{P_3} \right)$$

在 SI 制選取的三相點溫度

低壓極限

絕對溫標定義

$$T_3 = 273.16 \text{ Kelvin}$$

Celsius 溫度為 Kelvin 溫度的值減 273.15。

gas bulb 在三相點的壓力

The Zeroth Law of Thermodynamics (熱力學第 0 定律)

若物體 A 與物體 B（廣義地）在互相接觸時無淨熱能傳遞（即 A 與 B 達到熱平衡），物體 A 與 C 亦達到熱平衡，則物體 B 與 C 相接觸時亦不會有淨的熱能傳遞，即 B 與 C 亦在熱平衡狀態。此時 A, B, C 三者溫度相等。

General Physics (I) Thermodynamics I

若兩物溫度不相同，則熱能由溫度高者傳到溫度低者。稱此過程中傳遞的能量為 *heat*，通常以符號 Q 表示。 Q 的單位為能量。

$$1 \text{ calorie (cal)} = 3.968 \cdot 10^{-3} \text{ British thermal unit (Btu)} = 4.1868 \text{ Joule (J)}$$

Heat Capacity C (公制單位: J/K)

物體量傳入或傳出 *heat* 時溫度發生變化。heat capacity 為 Q 與溫度變化量 ΔT 之間的正比例係數

$$Q = C \Delta T = C (T_f - T_i)$$

末溫度 初溫度

Specific heat c (公制單位: J/kg·K)

單位質量物質的 heat capacity.

$$Q = c m \Delta T$$

應用於化學時亦可能用 molar specific heat (公制單位: J/mol·K)

↓ 每使每 mole 的物質溫度上升或下降 1 K 所需傳入/出的 heat

物體量傳入或傳出 *heat* 不見得會改變溫度，也有可能發生相變化，如石固、液、汽態之間轉變。單位質量物質相變化所需的 *heat* 稱為 *heat of transformation* L (例如 *heat of vaporization* L_v)

$$Q = L m \quad (c \text{ 公制單位: J/kg})$$

名詞: thermodynamic process 系統改變狀態的過程

thermodynamic cycle 系統由初狀態 i 到達某特定狀態 f ，再回到初狀態的過程 (或稱 cyclical process)

The First Law of Thermodynamics (熱力學第一定律) 能量守恆

$$dE_{\text{int}} = dQ - dW$$

系統內能 heat, 習慣上傳入時取正号 功, 習慣上輸出功時取正号

系統內能的增加量等於輸入的熱能減掉輸出的功

$$Q = \int dQ, \quad W = \int dW$$

adiabatic process: $Q = 0$

※ 注意雖然 Q 與 W 與過程有相關性，但 E_{int} 只與狀態有關，與如何達到該狀態之過程無關。

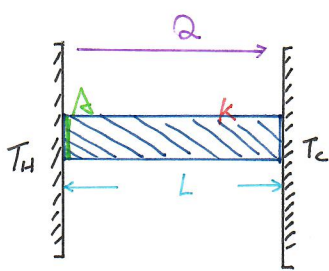
General Physics (I) Thermodynamics I.

heat 為傳遞的熱能. 傳遞熱能有什麼方式?

(1) 傳導 (conduction) (2) 對流 (convection) (3) 輻射 (radiation)

Heat Conduction (熱傳導)

物體要有接觸才可藉由熱傳導傳遞熱能. 其單位時間傳遞的能量與溫度梯度以及接觸面積成正比, 與厚度成反比. 其正比係數為 thermal conductivity (熱傳導係數)



power, 單位時間通過的 heat

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA \frac{(T_H - T_C)}{L} = A \frac{(T_H - T_C)}{L/k}$$

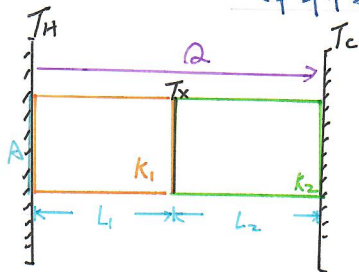
thermal conductivity 溫度梯度: 單位長度的溫差 截面積 A

定義 thermal resistance $R \equiv \frac{L}{k}$

thermal resistance 愈高的物體, 在同樣的溫差下, 其單位時間單位截面積通過的能量愈少.

串聯物體的熱傳導: (假設截面積皆為 A)

能量守恆, 故單位時間通過物體 1 的能量要等於單位時間內通過物體 2 的能量.



$$P_{\text{cond}} = \frac{k_1 A (T_H - T_x)}{L_1} = \frac{k_2 A (T_x - T_C)}{L_2}$$

$$\Rightarrow (L_1 k_2 + L_2 k_1) T_x = L_2 k_1 T_H + L_1 k_2 T_C$$

$$\Rightarrow T_x = \frac{L_1 k_2 T_C + L_2 k_1 T_H}{L_1 k_2 + L_2 k_1}$$

$$\Rightarrow P_{\text{cond}} = \frac{k_1 A}{L_1} \frac{L_1 k_2 T_H + L_2 k_1 T_H - L_1 k_2 T_C - L_2 k_1 T_H}{L_1 k_2 + L_2 k_1}$$

(分子分母同除 $k_1 k_2$) $\Rightarrow P_{\text{cond}} = \frac{A (T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}$

推論三個物體之串聯情形, 只要先把它前二物體視為熱阻為 $L_1/k_1 + L_2/k_2$ 之單一物體, 再看它如何與第三個物體串聯

同理, 若串聯無窮多個物體: $P_{\text{cond}} = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum (L/k)}$

若它們截面積相同

單位時間, 單位面積通過的熱能等於高低溫差除以熱阻和 ($\sum L/k$)

總熱阻愈大, 熱能傳遞的效率愈低

General Physics (I.) Thermodynamics I.

Convection (對流)

流體中若溫度不均勻，則密度不均，使得部分的流體受到較大或小的浮力而上升或下沉。例如大氣中空氣若接觸地表受地面傳導加熱而體積膨脹，則密度降低，因浮力而上升。這些高溫低密度的氣體在上升的過程中，把熱能往高處帶，形成能量傳遞。

Radiation (輻射)

波可傳遞能量，電磁波亦同。物體可藉由吸收或發出 thermal radiation 而輸入或輸出 heat. Thermal radiation 的

功率可以 Stefan-Boltzmann's Law (此節的推導必須具有完整的物理系統力學知識及量子力學中光子能量量子化之概念)

物體經 radiation 輸出的 power

$$P_{\text{rad}} = \sigma \epsilon A T^4$$

emissivity, 無因次，與物體表面性質有關。理想黑體 (ideal black body) $\epsilon = 1$

Stefan-Boltzmann constant $5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

A 與 T 為物體表面積及物體溫度

任意物體若 $T \neq 0$ 皆會發出熱輻射。相對應的，若物體周圍環境溫度為 $T_{\text{env}} > 0$ ，則物體也會吸收自環境發出的熱輻射，其 power 為

$$P_{\text{abs}} = \sigma \epsilon A T_{\text{env}}^4$$

物體在單位時間，由環境中的 radiation 吸收的能量

因吸收/發出 thermal radiation 造成之淨能量變化率為

$$P_{\text{net}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{rad}} = \sigma \epsilon A (T_{\text{env}}^4 - T^4)$$