

# 工程热力学

## 第二章



## 第二章 热力学第一定律

# First law of thermodynamics

2-1 热力学第一定律的实质

2-2 热力学能和总能

2-3 热力学第一定律基本表达式

2-4 稳定流动能量方程式的应用



## 2-1 热力学第一定律的实质

### 一、第一定律的实质

能量守恒与转换定律在热现象中的应用。

#### 能量守恒与转换定律:

自然界中一切物质都具有能量。能量既不可能被创造,也不可能被消灭,而只能从一种形式转变成另一种形式。在转换的过程中,能的总量保持不变。



## 二、第一定律的表述

热是能的一种，机械能变热能，或热能变机械能的时候，他们之间的比值是一定的。

或：

热可以变为功，功也可以变为热；一定量的热消失时必定产生相应量的功；消耗一定量的功时，必出现与之相应量的热。

**不花费能量就可以产生功的第一类永动机是不可能制造成功的。**



## 2-2 热力学能和总能

### 一、热力学能(internal energy)

$$U \left\{ \begin{array}{l} U_{\text{ch}} - \text{化学能} \\ U_{\text{nu}} - \text{原子核能} \\ U_{\text{th}} \left\{ \begin{array}{l} U_{\text{k}} \left\{ \begin{array}{l} \text{平移动能} \\ \text{转动动能} \\ \text{振动动能} \end{array} \right\} f_1(T) \\ U_{\text{p}} - \text{内位能} \quad f_2(T, v) \end{array} \right\} \end{array} \right\} U = U(T, v)$$

在无化学反应及原子核反应的过程中，化学能和原子核能都不变化，可以不考虑，热力学能的变化只是内位能和内动能的变化。



# 热力学能的说明

- 热力学能是状态量 state property

□  $U$  : 广延参数 [kJ]

□  $u$  : 比参数 [kJ/kg] 一比热力学能

对于循环:  $\oint dU = 0 \quad \oint du = 0$

- 热力学能总以变化量出现, 其零点人为定



## 二、外部储存能（macroscopic forms of energy）

外部储存能包括宏观动能和重力位能，它们的大小要借助在系统外的参考坐标系测得的参数来表示。

**1. 宏观动能**： $E_k$ ，单位为J或kJ

$$E_k = \frac{1}{2} m c_f^2$$

**2. 重力位能**： $E_p$ ，单位为 J 或 kJ

**注意：**  $E_p = mgz$

$c_f$ 和 $z$ 是力学参数，处于同一热力状态的物体，选用不同的坐标系可以有不同的值， $c_f$ 和 $z$ 是独立于热力系统内部的参数。宏观动能和重力位能是有序能（机械能）。



### 三、总（储存）能(total stored energy of system)

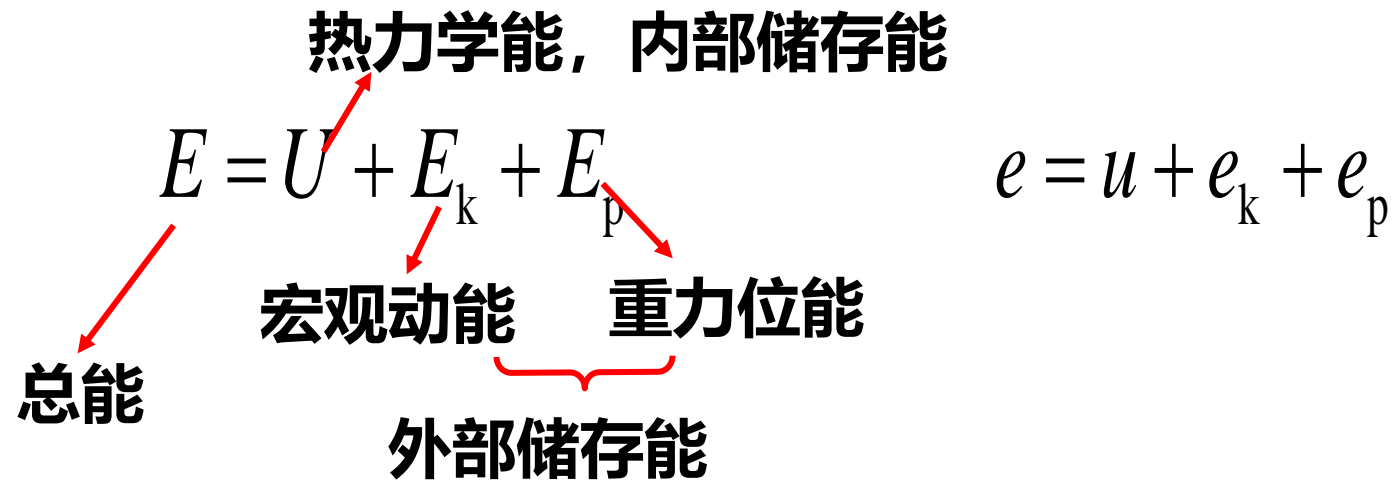
**热力学能，内部储存能**

$$E = U + E_k + E_p$$

**宏观动能      重力位能**

**外部储存能**

**总能**

$$e = u + e_k + e_p$$


比总能e还可写成：

$$e = u + e_k + e_p = u + \frac{1}{2}c_f^2 + gz$$





## 四、功和热量

### (一)、功(work)的定义和可逆过程的功

1. 功的力学定义: 力 $\times$ 在力的方向上的位移
2. 功的热力学定义: **通过边界传递的能量其全部效果可表现为举起重物。**

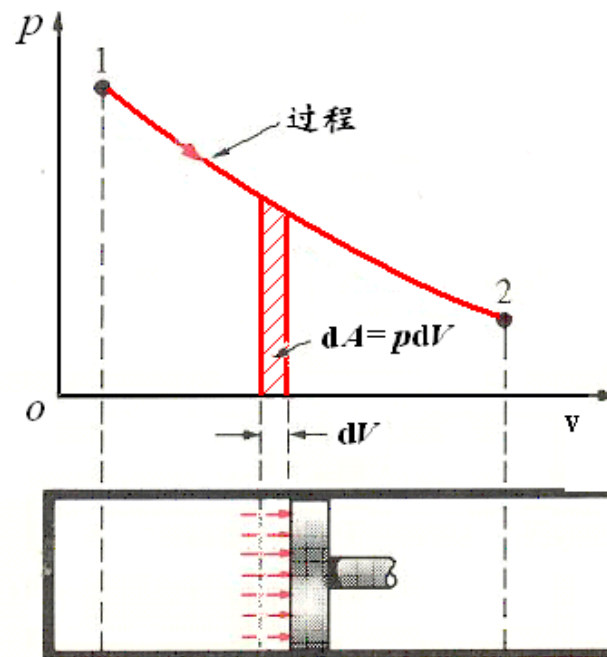
#### 3. 可逆过程功的计算

$$\delta W = Fdx \quad W = \int_1^2 \delta W$$

$$F = pA \quad = \int_1^2 pA dx = \int_1^2 p dV$$

▲ 功是过程量

▲ 功可以用 $p$ - $V$ 图上过程线与 $v$ 轴包围的面积表示





#### 4. 功的符号约定:

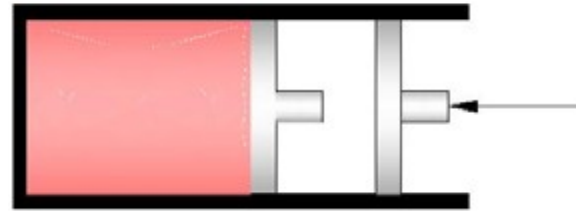
系统对外做功为 “+”

外界对系统做功为 “-”

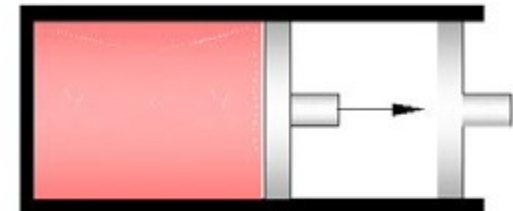
$$dV < 0$$

$$\delta W < 0$$

Compression:



Expansion:



$$dV > 0$$

$$\delta W > 0$$

#### 5. 功和功率的单位:

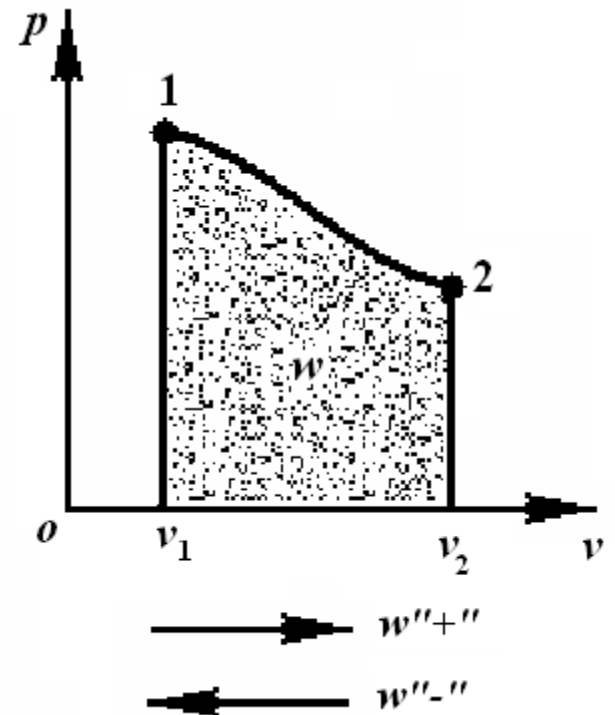
J 或 kJ

J/s  $\rightarrow$  W

kJ/s  $\rightarrow$  kW

单位质量工质所作的功, 用  $w$  表示, 单位: J/kg

附:  $1\text{kWh} = 3600\text{kJ}$

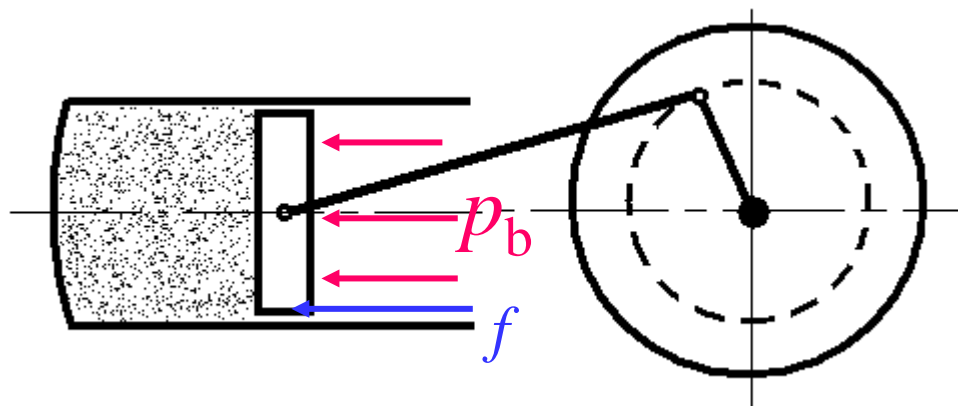




## 6. 讨论

### ● 有用功(useful work)概念

$$W_u = W - W_l - W_p$$

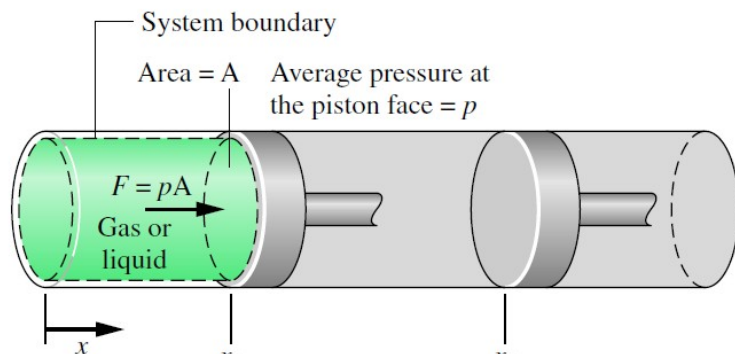


其中:  $W$ —膨胀功(compression/expansion work);

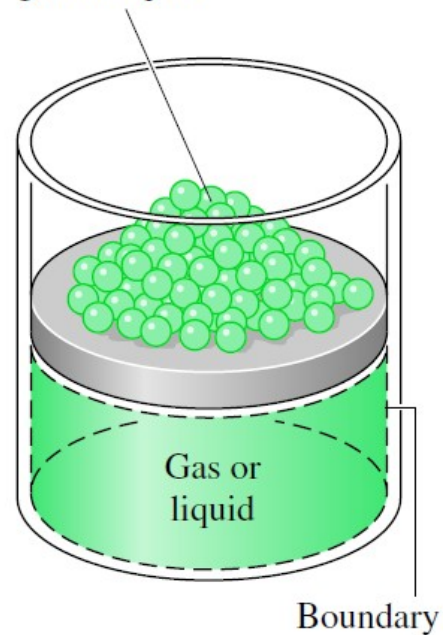
$W_l$ —摩擦耗功;

$W_p$ —排斥大气功。

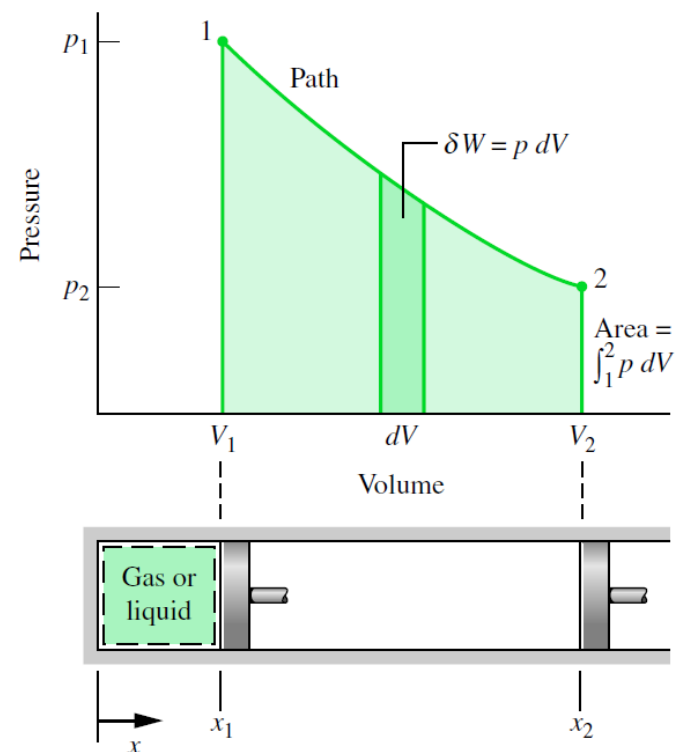
# ● Expansion or compression work: Moving boundary work



Incremental masses removed during an expansion of the gas or liquid



$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$





### Given:

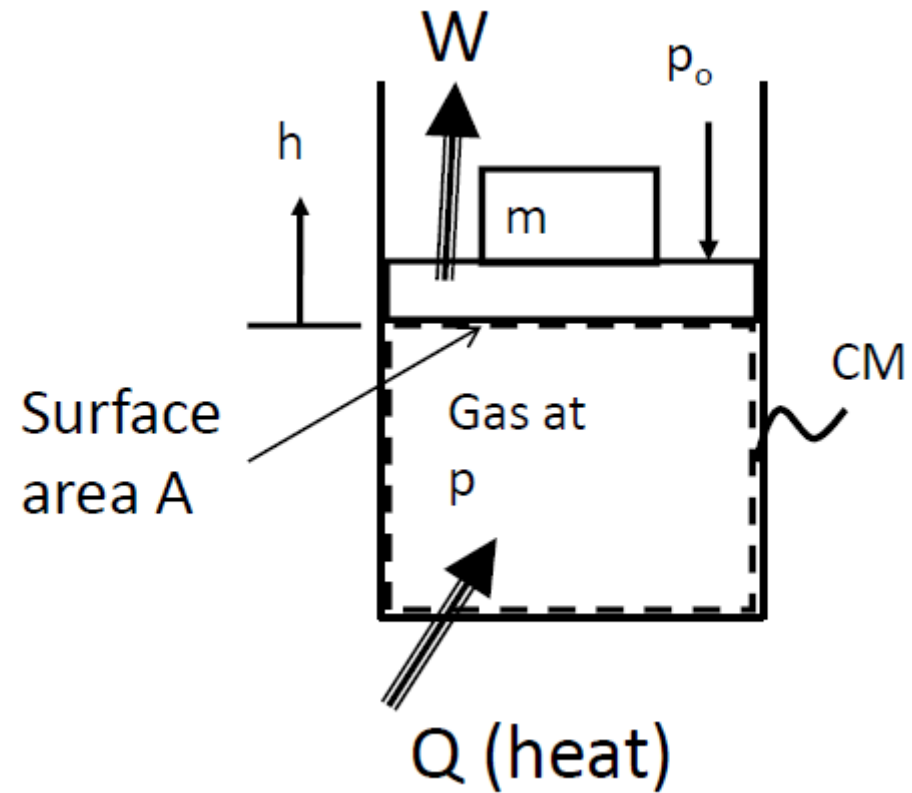
- $m = 100 \text{ kg}$
- $A = 0.01 \text{ m}^2$
- $p_o = 100 \text{ kPa}$
- $V_1 = 0.02 \text{ m}^3$
- $V_2 = 0.04 \text{ m}^3$

### Find:

- boundary work,  $W_b = ?$

### Assumptions:

- Quasi-static process
- Neglect friction





- Solution:

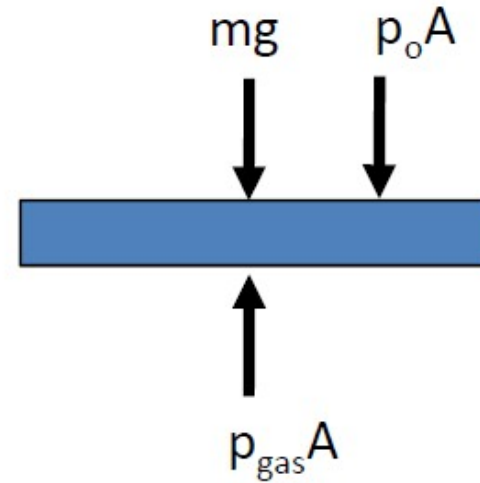
- Force balance on piston

$$p_{gas} A = mg + p_o A$$

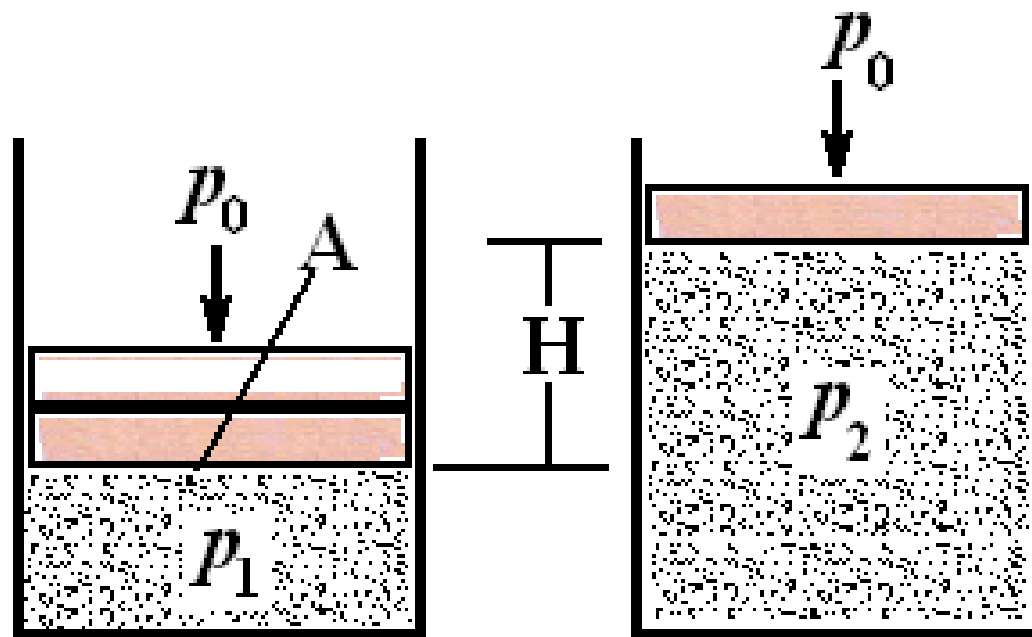
$$p_{gas} = \frac{mg}{A} + p_o$$

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} p_{gas} dV = \int_{V_1}^{V_2} \left( \frac{mg}{A} + p_o \right) dV$$

$$W_b = \frac{mg}{A} \int_{V_1}^{V_2} dV + p_o \int_{V_1}^{V_2} dV = \underbrace{mg(h_2 - h_1)}_{\Delta PE \text{ of mass}} + \underbrace{p_o(V_2 - V_1)}_{\text{- work done on atm.}}$$



- 用外部参数计算不可逆过程的功



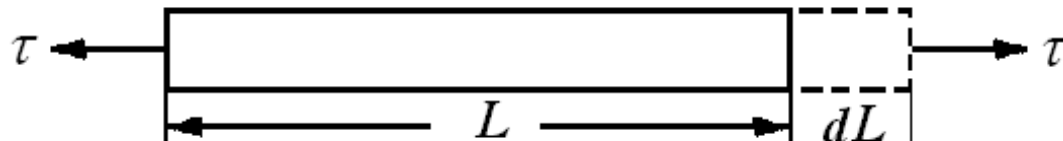
$$W \neq \int_1^2 p dV \quad ?$$

$$W = p_0 A H = p_0 \Delta V$$

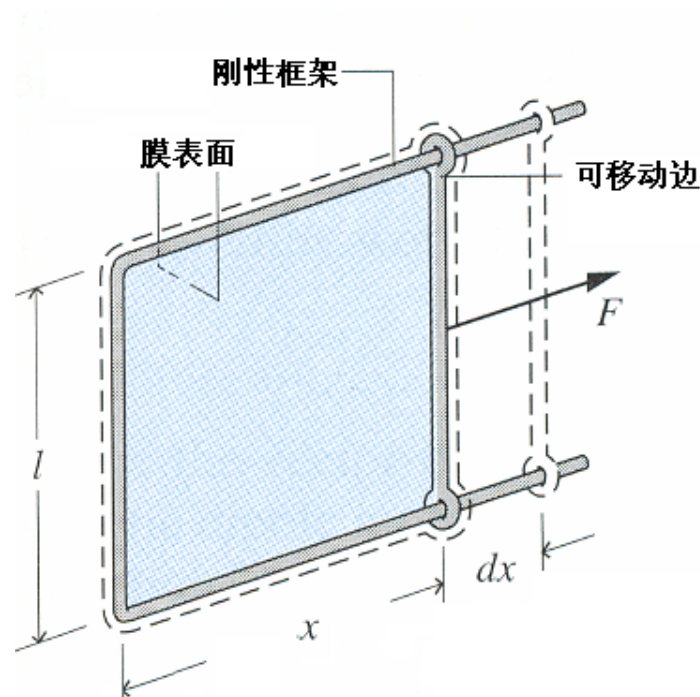


# 广义功(generalized work)简介

弹性力功



表面张力功



电极化功及磁化功等





- Extension of a solid bar:

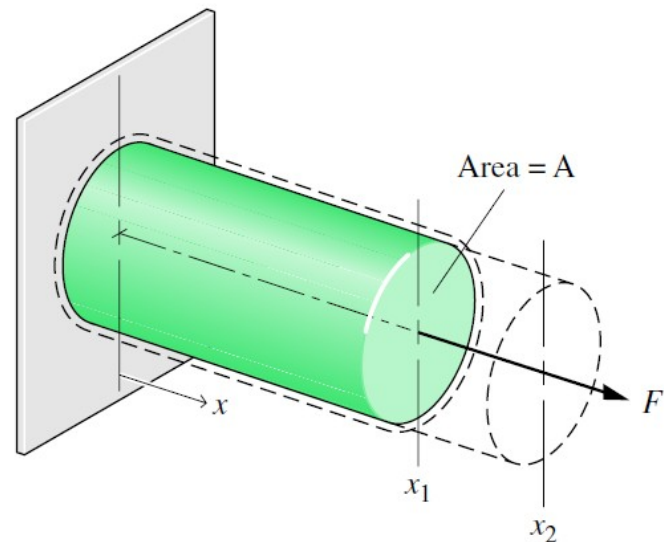
$\sigma$  normal stress acting at the end of the bar.

$$F = \sigma A$$

$$\delta W = -\sigma A dx.$$

$$W = -\int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx$$

$$W = -\sigma A(x_2 - x_1)$$





- Surface Tension Work:

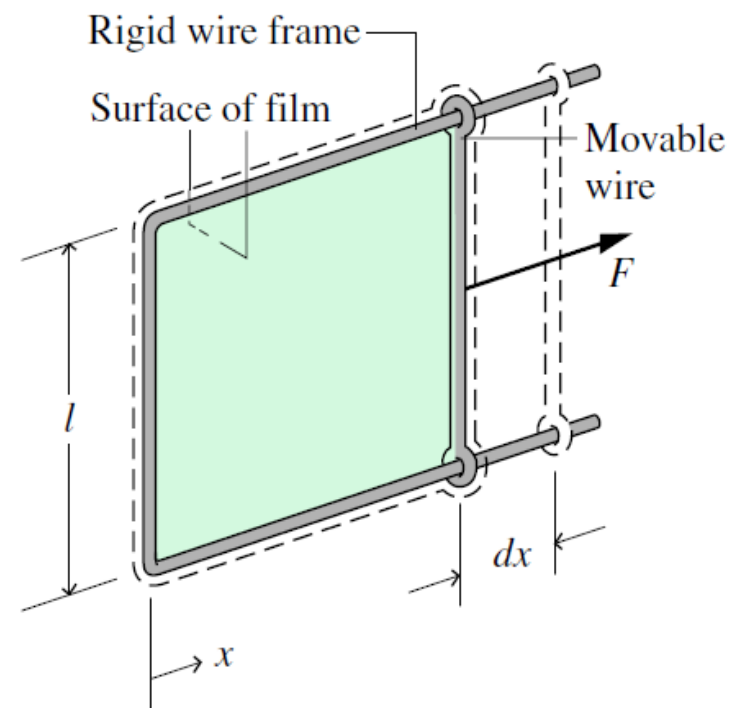
$\tau$ , surface tension *acting at the movable wire*

$$F = 2l\tau$$

$$\delta W = -2l\tau dx$$

$$dA = 2l dx$$

$$W = - \int_{A_1}^{A_2} \tau dA$$





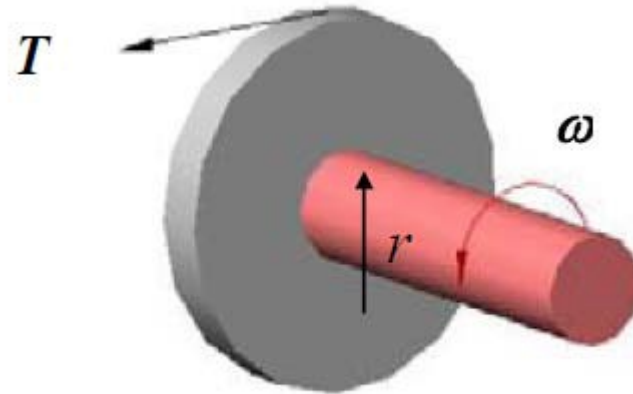
- Shaft Work:

$$T = Fr$$

$$\delta W = \frac{T}{r} ds$$

$$\delta W = \frac{T}{r} r d\theta$$

$$W = \int_1^2 T d\theta$$



$$\dot{W} = \frac{\delta W}{\delta t} = T \frac{d\theta}{dt} = T\omega$$



- Spring Work:

$$F = kx$$

$$W = -\int_{x_1}^{x_2} kx dx$$

$$W = -\frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$$

Compression:

$$< 0$$

$$< 0$$

$$> 0$$

Expansion:

$$> 0$$

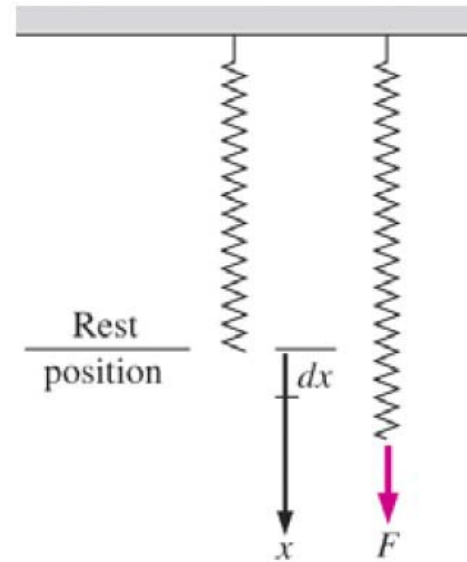
$$> 0$$

$$> 0$$

$$F = k_s (x_o - x)$$

$$ds = d(x_o - x)$$

$$\delta W_{Spring} = k_s (x_o - x) d(x_o - x)$$



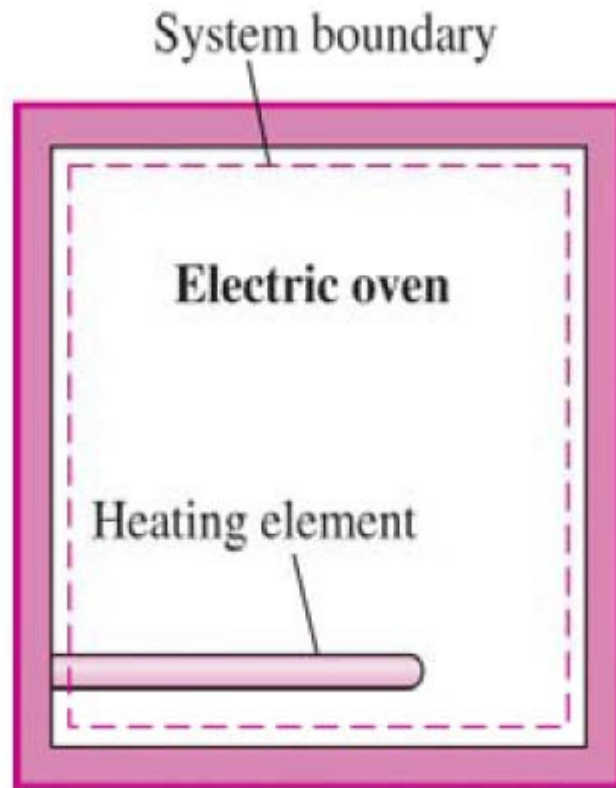


- Electrical work:

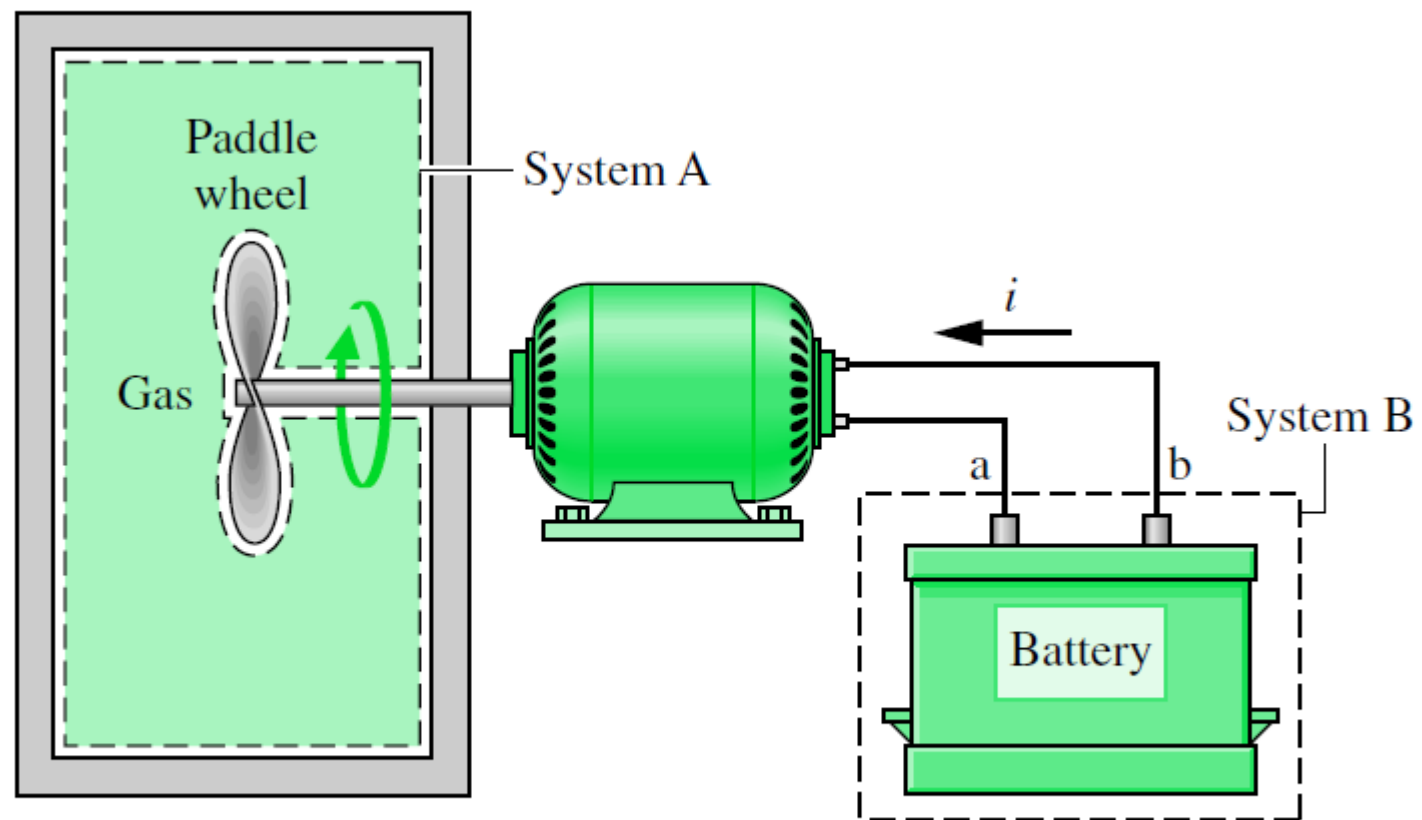
$$\dot{W}_{elec} = V_e I$$

$V_e$  : electric potential difference [V]

$I$  : electric current [A]



# Examples





## (二)、热量 (heat)

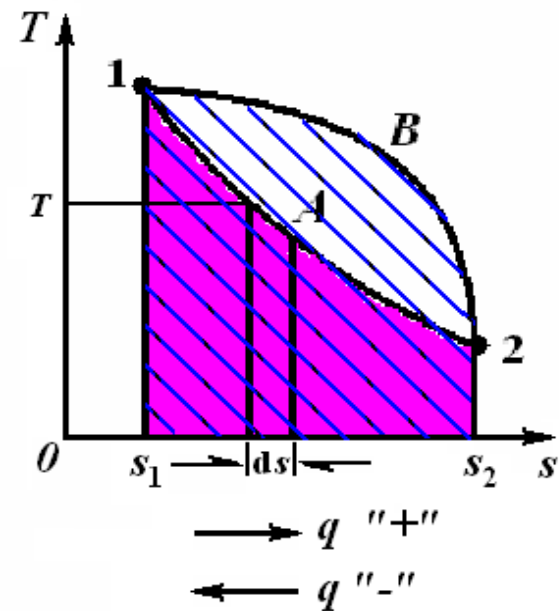
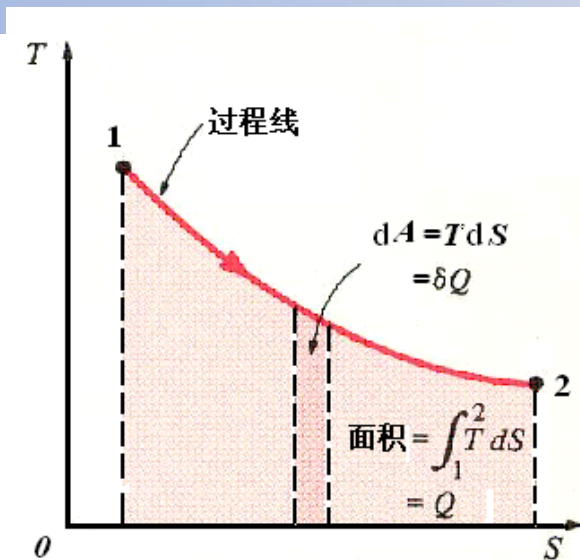
1. 定义：仅仅由于温差而通过边界传递的能量。
2. 符号约定：系统吸热 “+”；  
放热 “-”
3. 单位： J (kJ)
4. 计算式及状态参数图

( $T$ - $S$ 图上) 表示

$$Q = \int_1^2 T dS \quad (\text{可逆过程})$$

$$\delta Q = T dS$$

热量是过程量





## 熵的初步了解:

过程量	可逆过程公式	过程推动力	过程标志
$W$	$\delta W = p dV$	$p$	$dV$
$Q$	$\delta Q = T dS$	$T$	$dS$

熵的定义式:

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

$P, T$ 为强度量,  $V$ 广延量

熵 $S$ 为广延量, 单位: J/K

比熵 $s$ , 单位: J/(kg·K)





### (三)、热量与功的异同：

1. 均为通过边界传递的能量；
2. 均为过程量；
3. 功传递由压力差推动，体积变化是作功标志；  
热量传递由温差推动，熵变化是传热的标志；
4. 功是物系间通过宏观运动发生相互作用传递的能量；  
热是物系间通过紊乱的微粒运动发生相互作用而传递的能量。  
  
功 → 热是无条件的；  
热 → 功是有条件、限度的。



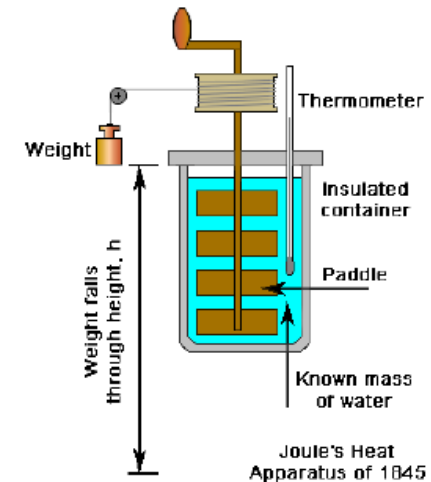
## 2-3 热力学第一定律基本表达式

● Experimental observations by Robert Mayer and James P. Joule (19. century):

“Energy can be neither created nor destroyed during a process, it can only change forms.” □ **Conservation of energy**

● The First Law is a statement:

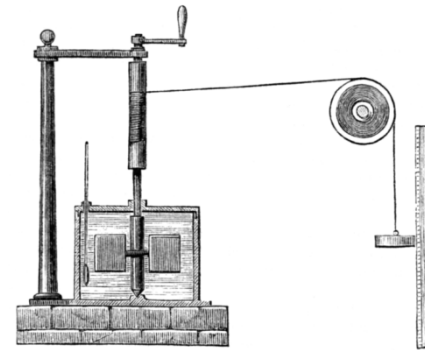
- » based on experiments and observations
- » cannot be drawn from any other known
- » physical principle
- » recognized as a fundamental principle





---

Born	24 December 1818(1818-12-24) Salford, Lancashire, England
Died	11 October 1889(1889-10-11) (aged 70) Sale, Cheshire, England
Citizenship	British
Fields	Physics
Known for	First Law of Thermodynamics
Influences	John Dalton (1766 -1844) John Davies



Joule's Heat Apparatus, 1845





## 2-3 热力学第一定律基本表达式

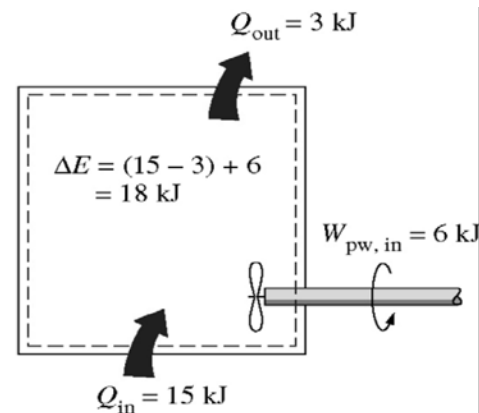
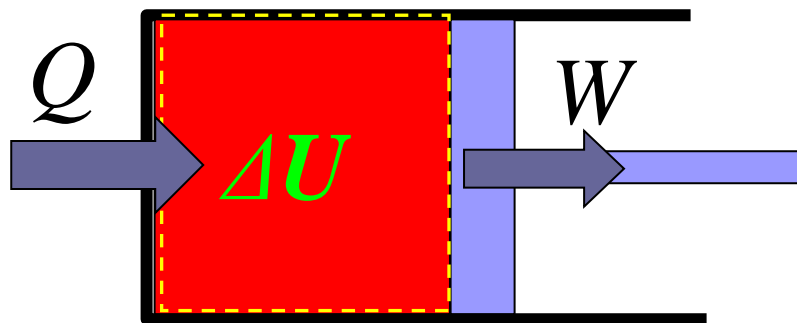
对任何系统，各项能量之间的平衡关系可表示为：

**加入系统的能量总和 - 热力系统输出的能量总和 = 热力系  
总储存能的增量**

用热力学第一定律分析热力学问题的步骤：

1. 确定所研究的系统，建立坐标系；
2. 分析过程中系统本身的能量变化及与外界交换的能量；
3. 列出平衡方程；(包括能量的、质量的)
4. 求解。

# 一、闭口系统的热力学第一定律表达式



取封闭气缸中的工质为研究对象，忽略系统动能和位能的变化，则：

$$\Delta E_k = 0 \quad \Delta E_p = 0 \quad \text{则: } \Delta E = \Delta U$$

根据能量平衡方程：

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1 \quad Q = \Delta U + W$$

对于微元过程：  $\delta Q = dU + \delta W$

热力学第一定律解析式



## 注意:

1. 表达式中 $Q$ 、 $W$ 、 $\Delta U$ 都是代数值, 规定: 系统吸热 $Q$ 为正值, 系统对外做功 $W$ 为正, 反之则为负。系统的热力学能增大时,  $\Delta U$ 为正, 反之则为负。

2. 对于单位质量工质:  $\delta q = du + \delta w$       $q = \Delta u + w$

3. 对于可逆过程:  $\delta Q = dU + p dV$       $Q = \Delta U + \int_1^2 p dV$

4. 对于单位质量工质可逆过程:  $\delta q = du + p dv$       $q = \Delta u + \int_1^2 p dv$

5. 动能位能变化不能忽略时:  $\Delta E_k \neq 0$       $\Delta E_p \neq 0$

$$Q = \Delta E + W \quad q = \Delta e + w$$



6. 对于循环过程:  $\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta W$

$$\because \oint dU = 0 \quad \therefore \oint \delta Q = \oint \delta W \quad \oint \delta q = \oint \delta w$$

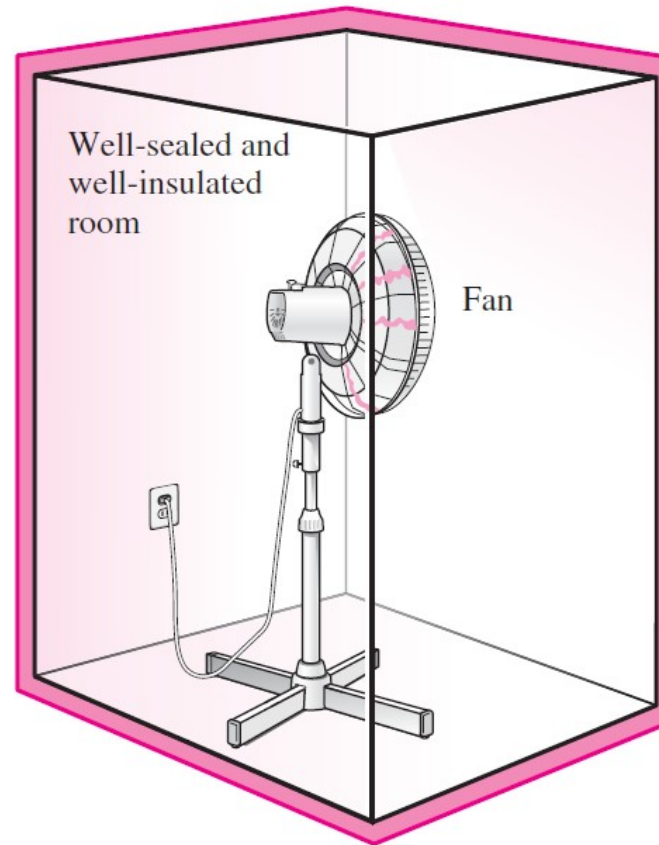
7. 热力学第一定律解析式的适用条件:

$$Q = \Delta U + W \quad q = \Delta u + w$$

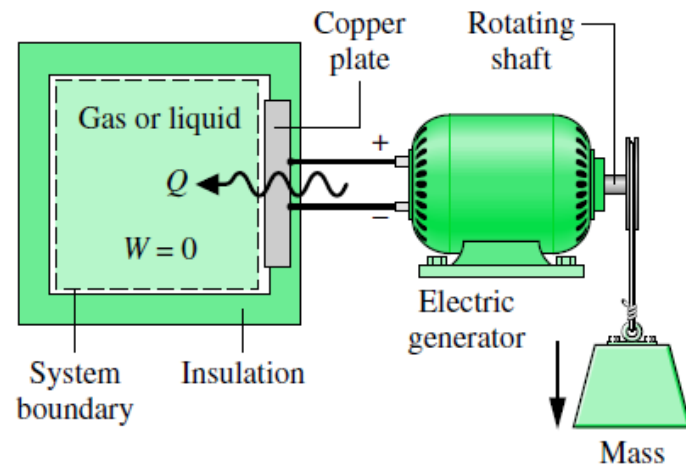
①闭口系统; ②任何工质; ③任何过程



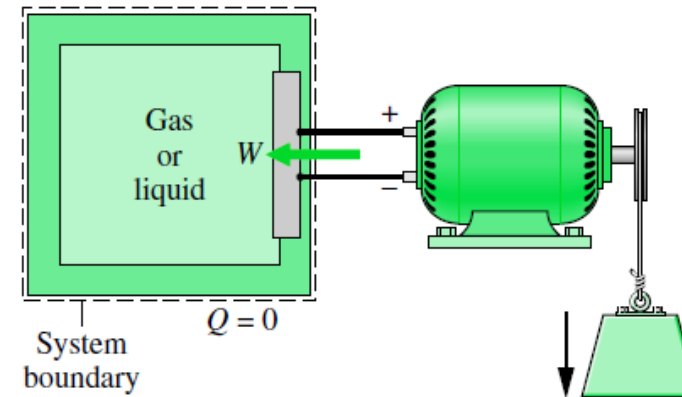
- A fan running in a well-sealed and well-insulated room will raise the temperature of air in the room



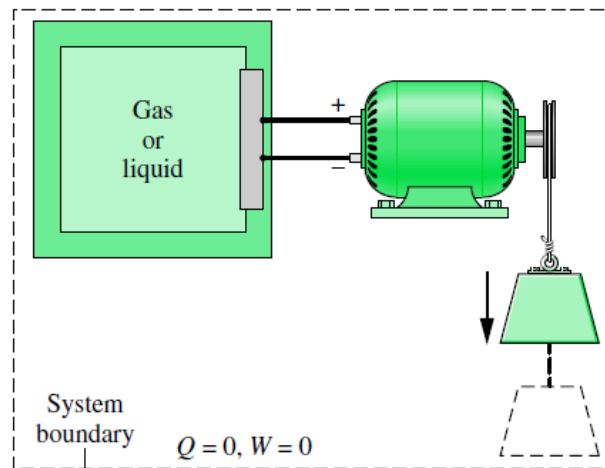




(a)



(b)



(c)

the quantities symbolized by  $W$  and  $Q$  in the foregoing equations account for transfers of energy and not transfers of work and heat, respectively.



例：一个装有**2kg**工质的闭口系经历了如下过程，过程中系统散热**25kJ**，外界对系统做功**100kJ**，比热力学能减小**15kJ/kg**，并且整个系统被举高 **1000m**，试确定过程中系统动能的变化。

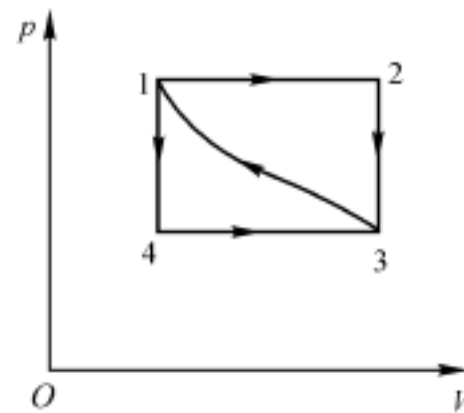


例：一闭口系从状态1沿1-2-3途径到状态3，传递给外界的热量为47.5kJ，而系统对外做功为30kJ，如图所示。

（1）若沿1-4-3途径变化时，系统对外做功为15kJ，试求过程中系统与外界传递的能量。

（2）若系统从状态3沿图示曲线到达状态1，外界对系统做功6kJ，求该过程中系统与外界传递的能量。

（3）若 $U_2=175\text{kJ}$ ， $U_3=87.5\text{kJ}$ ，求过程2-3传递的热量及状态1的热力学能。





## 二、开口系统能量方程

工质流进（出）开口系统时，必将其本身所具有的各种形式的能量，带入（出）开口系统。因此，开口系统除了通过做功与传热的方式传递能量外，还可以借助物质的流动来转移能量。

分析开口系统时，除了能量平衡外，还必须考虑**质量平衡**：

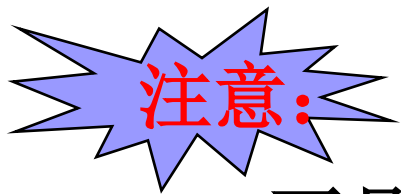
**进入系统的质量 - 离开系统的质量 = 系统质量的变化**

# 1. 推动功 (Flow work)

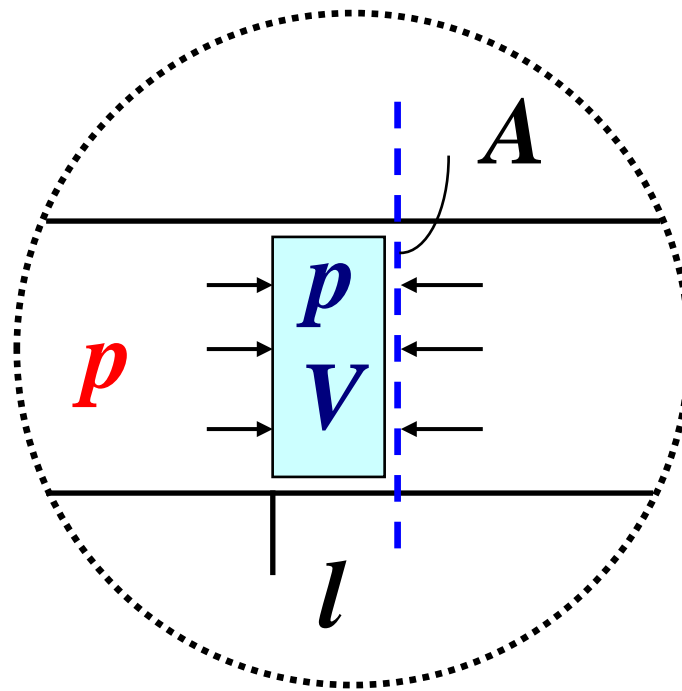
因工质出、入开口系统而传递的功，叫**推动功 (推进功)**

$$W_{\text{推}} = p A l = p V$$

$$w_{\text{推}} = p v$$



不是  $p dv$   
 $v$  没有变化





## 对推动功的说明

- 1、与宏观流动有关，流动停止，推动功不存在；
- 2、作用过程中，工质仅发生位置变化，无状态变化；
- 3、 $w_{\text{推}} = pv$ 与所处状态有关，是状态量；
- 4、并非工质本身的能量（动能、位能）变化引起，而由外界（泵与风机）做出，流动工质所携带的能量。

可理解为：由于工质的进出，外界与系统之间所传递的一种机械功，表现为流动工质进出系统时所携带和所传递的一种能量。

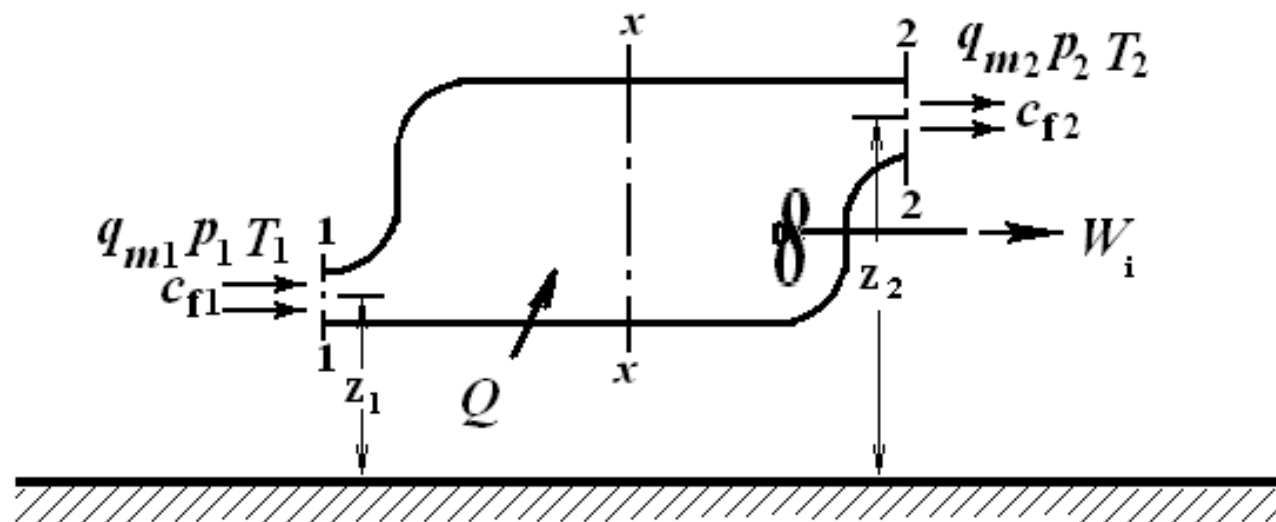


## 2. 稳定流动能量方程(steady-flow energy equation)

稳定流动特征:

- 1) 各截面上参数不随时间变化。
- 2)  $\Delta E_{CV} = 0$ ,  $\Delta S_{CV} = 0$ ,  $\Delta m_{CV} = 0 \cdots$
- 3) 系统与外界交换的能量不随时间变化。

**注意：区分各截面间参数可不同。**





设在 $\tau$ 时间段内有 $m_1$ 千克工质流进系统，同时 $m_2$ 千克的工质流出系统。

$$\Delta m_{\text{CV}} = 0 \quad \therefore q_{m1} = q_{m2} \quad m_1 = m_2 = m$$

在 $\tau$ 时间段内进入系统的能量

$$Q + m \left( u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1 \right) + mp_1 v_1 = Q + m \left( u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1 + p_1 v_1 \right)$$

在 $\tau$ 时间段内离开系统的能量

$$W_i + m \left( u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 \right) + mp_2 v_2 = W_i + m \left( u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 + p_2 v_2 \right)$$





在 $\tau$ 时间段内系统的能量变化为： $\Delta E_{CV} = 0$

根据热力学第一定律可得：

$$\left[ Q + m \left( u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + g z_1 \right) \right] - \left[ W_i + m \left( u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + g z_2 \right) \right] = 0$$

令  $u + p v = h$  ,  $h$  称为比焓, 单位J/kg。



上式可整理成

$$Q = m \left( h_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + g z_2 \right) - m \left( h_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + g z_1 \right) + W_i$$

$$Q = m \Delta h + \frac{1}{2} m \Delta c_f^2 + m g \Delta z + W_i$$

令：  $H = m h = U + p V$  ， 称为焓， 单位J， 上式改成

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2} m \Delta c_f^2 + m g \Delta z + W_i$$

注意m  
的意义

对于单位质量工质，

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_i$$

以上两式称为**开口系统的稳定流动能量方程**。



对于式：

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_i$$

**注意：**  $q$  和  $w_i$  分别是 1kg 工质进入系统后，系统从外界吸入的热量和在系统内部所作的功。除的  $m$  不是系统的质量。

对于微元过程，稳定流动能量方程写成

$$\delta Q = dH + \frac{1}{2} m d c_f^2 + m g d z + \delta W_i$$

$$\delta q = d h + \frac{1}{2} d c_f^2 + g d z + \delta w_i$$



### 3. 焓

**焓**:  $H=U+pV$  , 单位: J或kJ

都是状态参数

**比焓**:  $h=u+pv$  , 单位: J/kg或kJ/kg

**注意:**

- (1) 无论对于流动工质还是不流动工质, **比焓都是状态参数**;
- (2) 对于流动工质, **推动功**等于 $pv$ , **比焓**表示单位质量工质沿流动方向向前传递的总能量中取决于热力状态的部分;
- (3) 对于不流动工质, 不存在**推动功**, **比焓**也不表示能量, 仅是**状态参数**。
- (4) 工程上一般只需要计算工质经历某一过程后焓的变化量, 而不是其绝对值, 所以焓值的零点可人为地规定。



## 4. 技术功 (technical work)

**定义：**在工程热力学中，将工程技术上可以直接利用的动能差、位能差及轴功三项之和称为**技术功**，用 $W_t$ 表示

$$W_t = \frac{1}{2} m \Delta c_f^2 + mg \Delta z + W_i$$

对于单位质量工质，

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_i$$



开口系统的稳定流动能量方程式可改写为

$$Q = \Delta H + W_t$$

$$q = \Delta h + w_t$$

对于微元过程，

$$\delta Q = dH + \delta W_t$$

$$\delta q = dh + \delta w_t$$

对于开口系统的稳定流动过程，系统内各点的状态都不随时间而变化，所以可以将质量为  $m$  的工质作为闭口系统来研究。



可以假定质量为 $m$ 的工质从进口截面处的状态1变化到出口截面处的状态2，从外界吸收了热量 $Q$ ，作了膨胀功 $W$ 。

根据闭口系统的热力学第一定律表达式

$$q = \Delta u + w$$

对比式：

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_i$$

可得

$$w = \underbrace{(p_2 v_2 - p_1 v_1)}_{\text{膨胀功}} + \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + \underbrace{w_i}_{\text{技术功}}$$

推动功之差



上式可改写为

$$w_t = w - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

对可逆过程,

$$\begin{aligned} w_t &= \int_1^2 p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\ &= \int_1^2 p dv - \int_1^2 d(pv) = - \int_1^2 v dp \end{aligned}$$

式中,  $v$  恒为正值, 负号表示技术功的正负与  $dp$  相反。





将上式代入开口系统的稳定流动能量方程式

$$q = \Delta h + w_t \quad (\text{适用于一般过程})$$

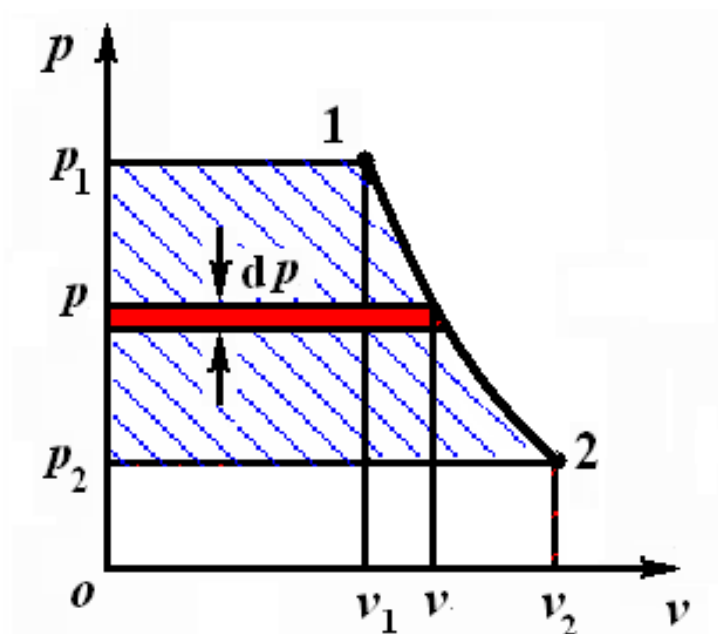
可得  $q = \Delta h - \int_1^2 v dp$  (适用于可逆过程)

对于微元可逆过程,

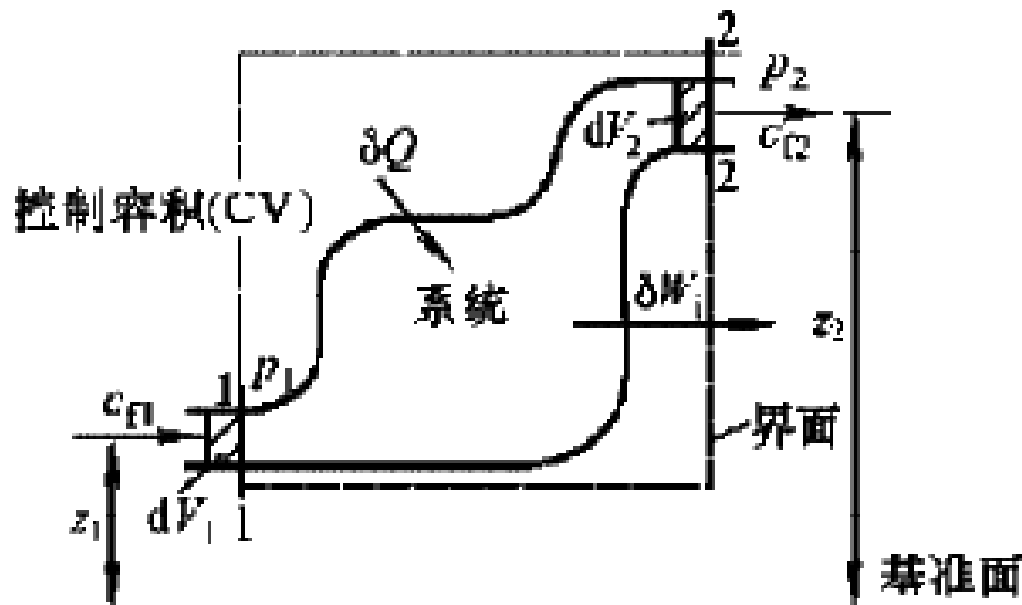
$$\delta q = dh - v dp$$

技术功的图形表示

$$w_t = -\int_1^2 v dp$$



## 5. 开口系统能量方程的一般表达式



设在微元时间段 $d\tau$ 内，进入控制容积的质量为 $\delta m_1$ ，离开的为 $\delta m_2$ ，吸收热量 $\delta Q$ ，对外做功 $\delta W_i$ ，控制容积系统总储存能变化为 $dE_{CV}$ 。



根据能量平衡方程：

$$\delta Q + \delta m_1 \left( u_1 + p_1 v_1 + g z_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 \right) - \delta W_i - \delta m_2 \left( u_2 + p_2 v_2 + g z_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 \right) = dE_{cv}$$

整理后得：

$$\delta Q = dE_{cv} + \delta m_2 \left( h_2 + g z_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 \right) - \delta m_1 \left( h_1 + g z_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 \right) + \delta W_i$$

上式为开口系统能量方程的一般表达式

**注意：**  $dE_{cv}$  包括由于系统内质量变化和系统与外界能量交换变化而引起的变化两部分。



等式两边同除以 $d\tau$ ，令：

$$\frac{\delta Q}{d\tau} = \Phi, \quad \frac{\delta m_1}{d\tau} = q_{m1}, \quad \frac{\delta m_2}{d\tau} = q_{m2}, \quad \frac{\delta W_i}{d\tau} = P_i$$

分别表示单位时间内的热流量、进出口质量流量及内部功量，称为热流率、质流率、内部功率。

开口系统能量方程的一般表达式变为：

$$\Phi = \frac{dE_{cv}}{d\tau} + (h_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2)q_{m2} - (h_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1)q_{m1} + P_i$$

注意：单位为W或J/s



**如果流出、流入控制容积的工质各有若干股，则：**

$$\Phi = \frac{dE_{cv}}{d\tau} + \sum_j \left( h + \frac{1}{2} c_f^2 + gz \right)_{out} q_{m,out} - \sum_i \left( h + \frac{1}{2} c_f^2 + gz \right)_{in} q_{m,in} + P_i$$



例：水泵将50L/s的水从湖面（ $p_1=1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ ,  $t_1=20^\circ\text{C}$ ）打到100m高处，出口处的 $p_2=1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 。水泵进水管径为15cm，出水管径为18cm，水泵功率为60W。设水泵与管路是绝热的，且忽略摩擦阻力，求出口处水温。已知水的比热为 $4.19 \text{kJ}/(\text{kgK})$ 。

解：根据稳定流动时的质量守恒关系

$c_1 A_1 = c_2 A_2$  求出 $c_1, c_2$

质量流率  $q_m = \rho_1 c_1 A_1$

$Q=0$ ，稳定流动能量方程为

$$0 = q_m \left( h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \right) - q_m \left( h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 \right) + P_i$$

$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1)$$



## 2-4 稳定流动能量方程式的应用

### 1. 蒸汽轮机、气轮机

(steam turbine、gas turbine)

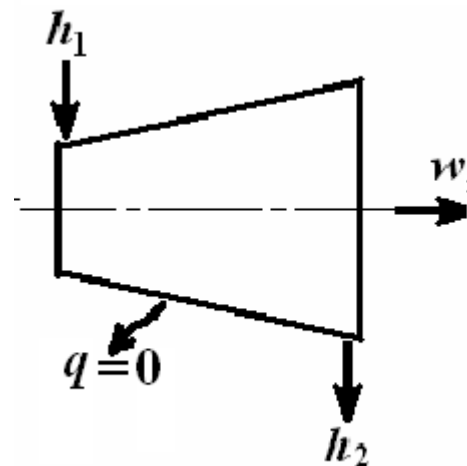
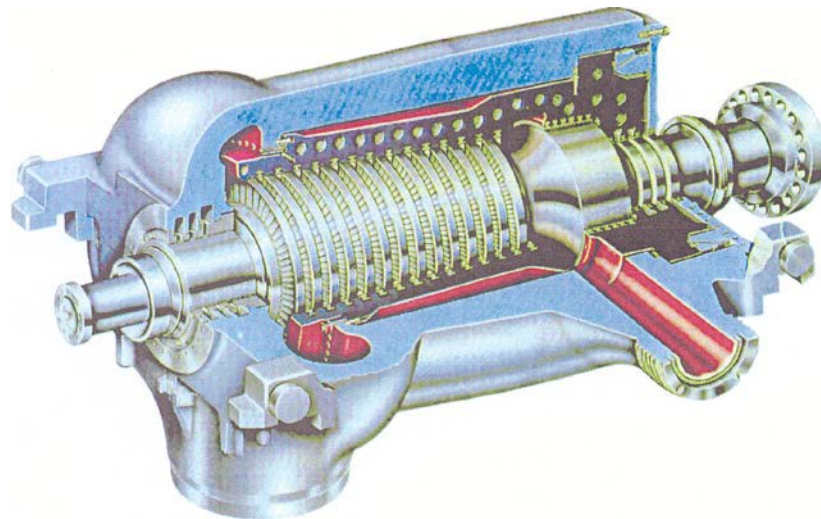
流进系统:  $u_1 + p_1 v_1 = h_1$

流出系统:  $u_2 + p_2 v_2 = h_2 \quad w_i$

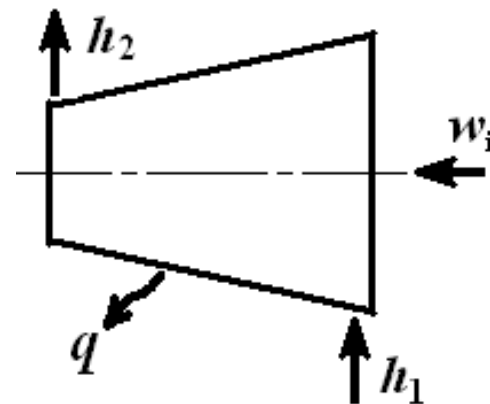
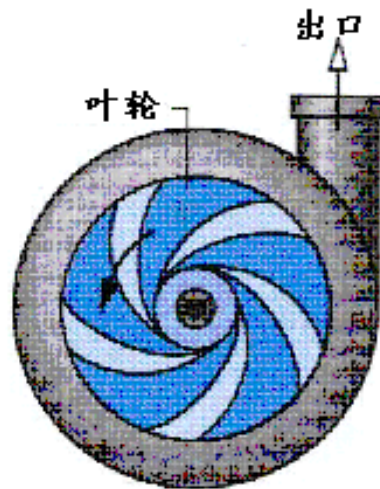
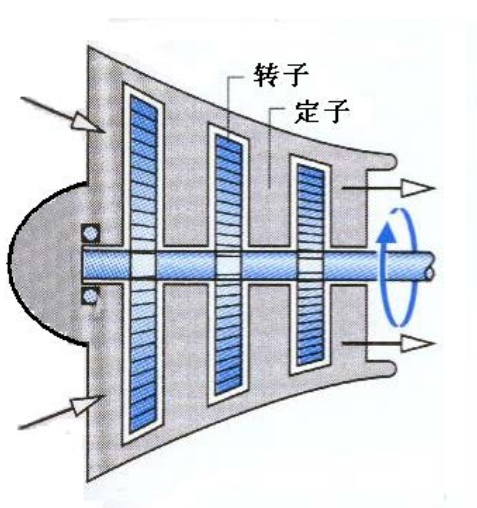
内部储能增量: 0

忽略动能差和位能差, 方程为:

$$h_1 - h_2 = w_i = w_t$$



## 2. 压气机, 水泵类 (compressor, pump)



流入  $h_1, \left( \frac{1}{2} c_{f1}^2 + g z_1 \right), w_i$  流出

$h_2, \left( \frac{c_{f2}^2}{2} + g z_2 \right), q$

内部贮能增量: 0

方程为:  $w_C = -w_t = h_2 - h_1 - q$

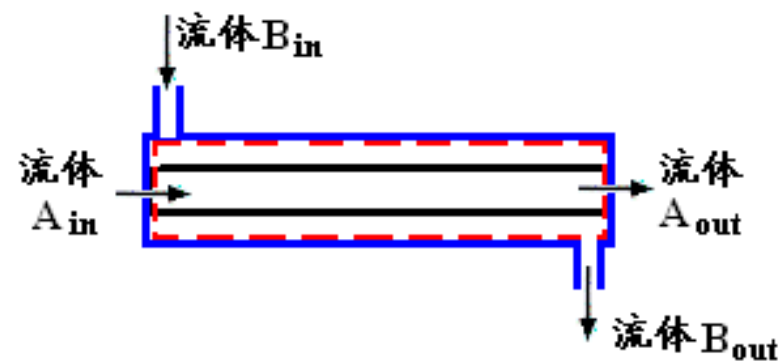
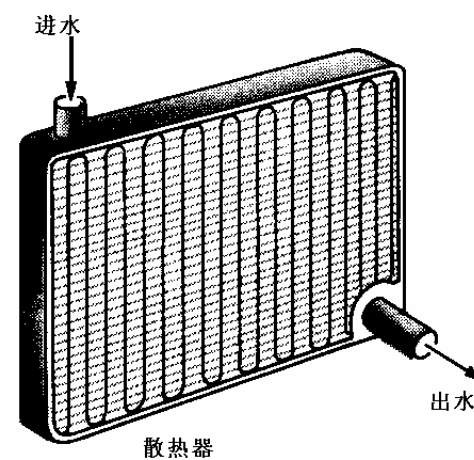
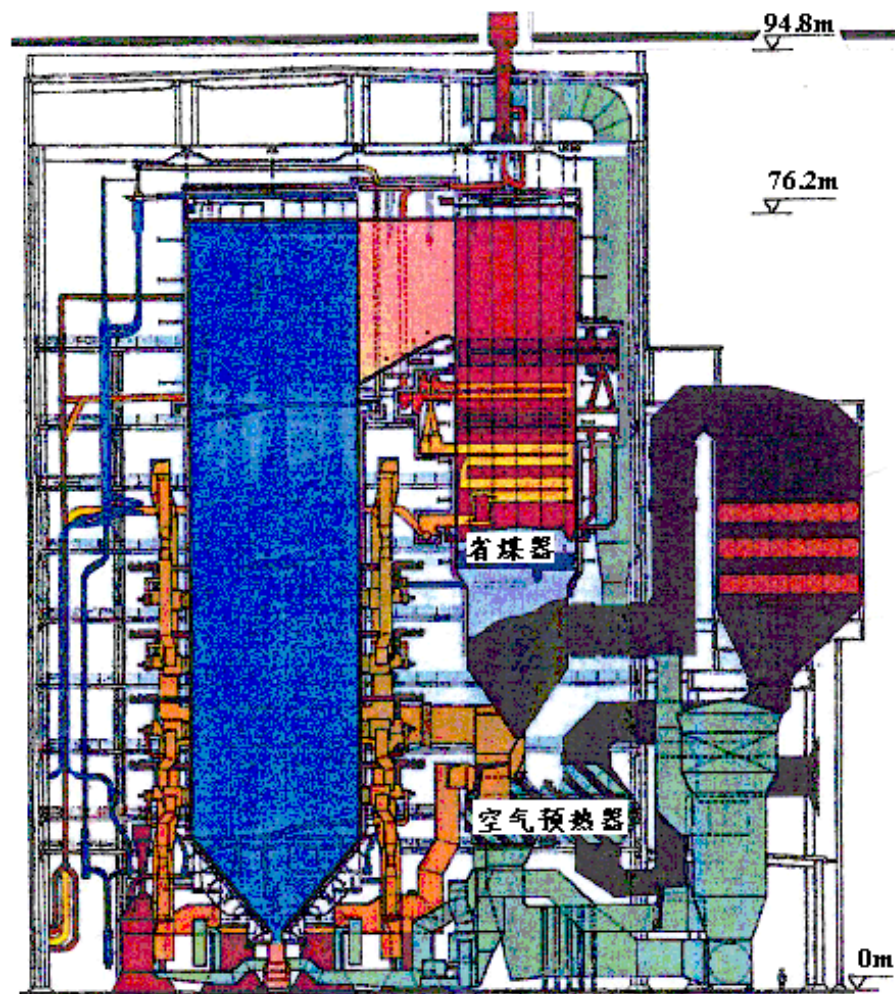
注意  $w_t$  的正负号

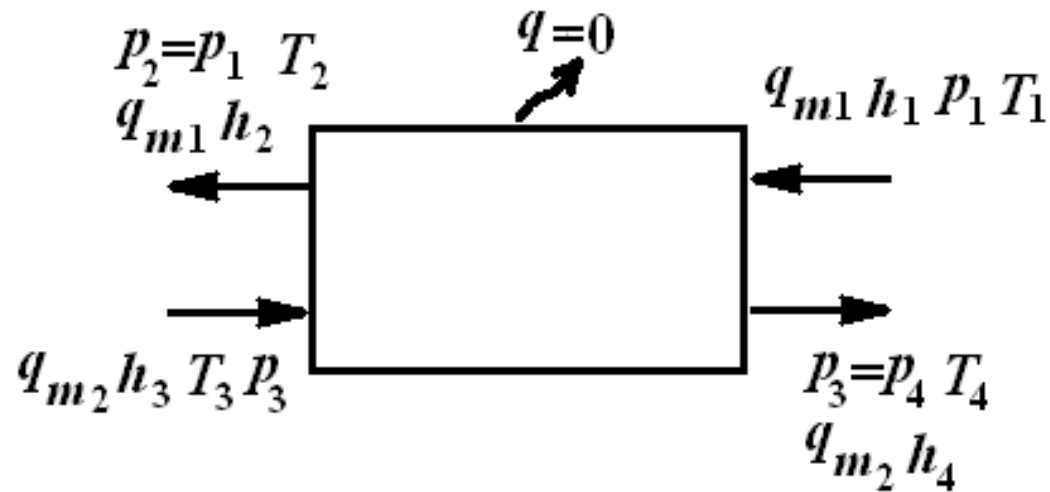




### 3. 换热器（锅炉、加热器等）

(heat exchanger: boiler, heater etc.)





**流入:**  $q_{m_1} \left( h_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + g z_1 \right) + q_{m_2} \left( h_3 + \frac{1}{2} c_{f3}^2 + g z_3 \right)$

**流出:**  $q_{m_1} \left( h_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + g z_2 \right) + q_{m_2} \left( h_4 + \frac{1}{2} c_{f4}^2 + g z_4 \right)$

**与外界无功和热量交换      系统内增加: 0**

**若忽略动能差、位能差, 方程为:**

$$h_4 - h_3 = \frac{q_{m_1}}{q_{m_2}} (h_1 - h_2)$$



## 4. 管内流动

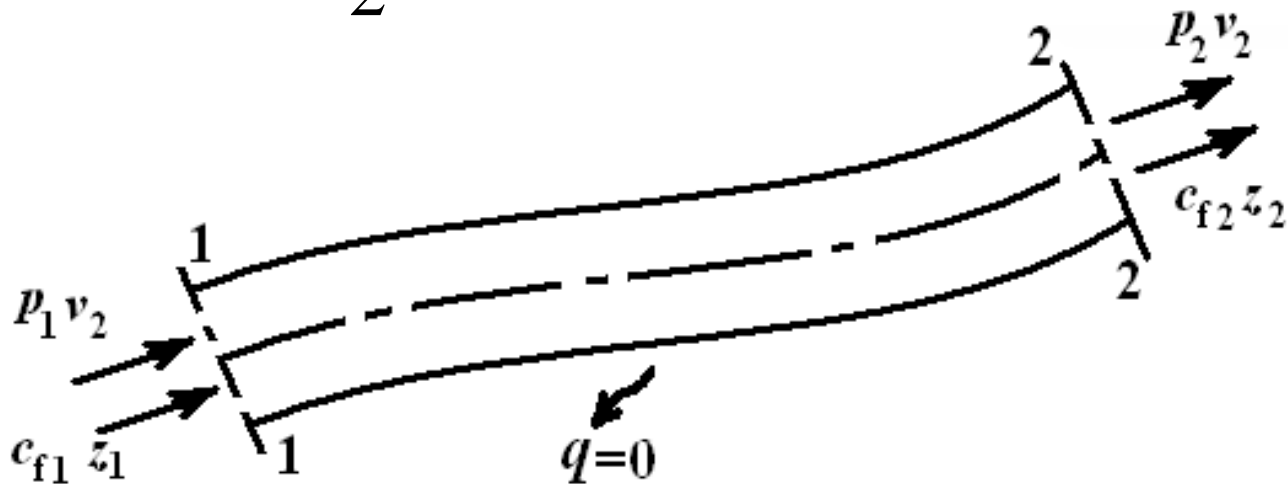
流入:  $u_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1 + p_1v_1$

内部增量: 0

流出:  $u_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2 + p_2v_2$

与外界无热量和功的交换

方程为:  $\Delta h + \frac{1}{2}\Delta c_f^2 + g\Delta z = 0$





例 2-6 某燃气轮机装置,如图 2-7 所示。已知压气机进口处空气的比焐  $h_1 = 290 \text{ kJ/kg}$ 。经压缩后,空气升温使比焐增为  $h_2 = 580 \text{ kJ/kg}$ 。在截面 2 处空气和燃料的混合物以  $\alpha_2 = 20 \text{ m/s}$  的速度进入燃烧室,在定压下燃烧,使工质吸入热量  $q = 670 \text{ kJ/kg}$ 。燃烧后燃气进入喷管绝热膨胀到状态  $3'$ ,  $h_{3'} = 800 \text{ kJ/kg}$ ,流速增加到  $\alpha_{3'}$ ,此燃气进入动叶片,推动转轮回转做功。若燃气在动叶片中的热力状态不变,最后离开燃气轮机的速度  $\alpha_4 = 100 \text{ m/s}$ 。求:

(1) 若空气流量为  $100 \text{ kg/s}$  压气机消耗的功率为多大?

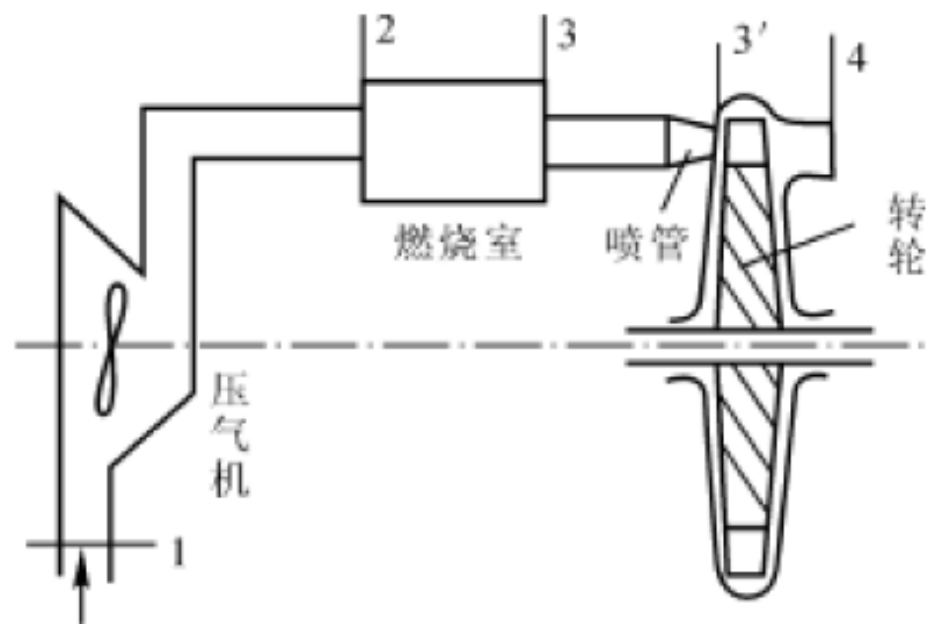
(2) 若燃气的发热值  $q_B = 43\,960 \text{ kJ/kg}$ ,燃料的耗量为多少?

(3) 燃气在喷管出口处的流速  $\alpha_{3'}$  是多少?

(4) 燃气轮机的功率为多大?

(5) 燃气轮机装置的总功率为多少?

解 (1) 压气机消耗的功率:





# 热力循环

要实现**连续**做功，必须构成**循环**

**定义：**

热力系统经过一系列变化回到初态，这一系列变化过程称为**热力循环**。

封闭的热力过程，特性：一切状态参数恢复原值，即

$$\oint dx = 0$$

**分类：**

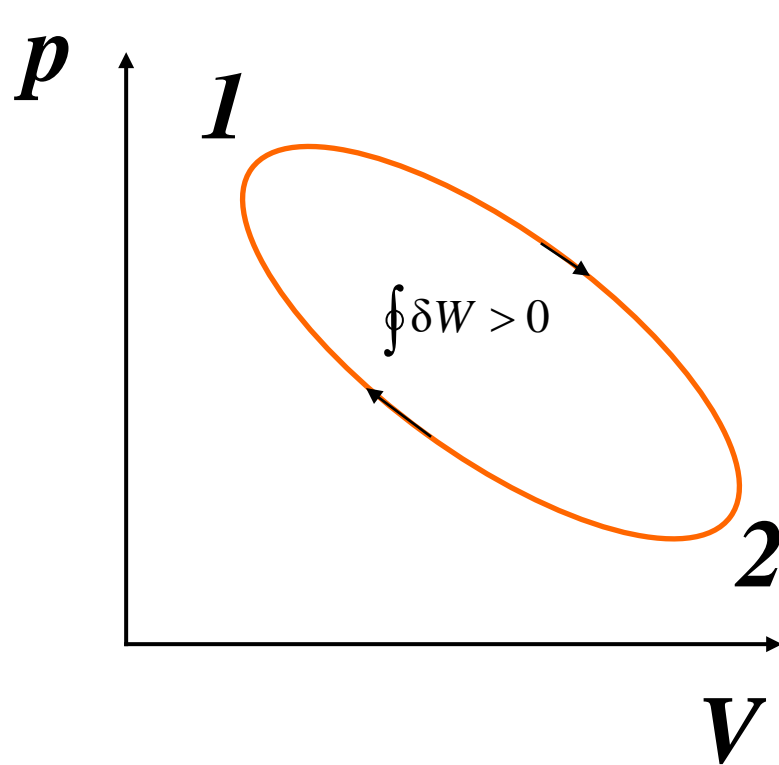
过程 {  
可逆  
不可逆

循环 {  
可逆循环  
不可逆循环

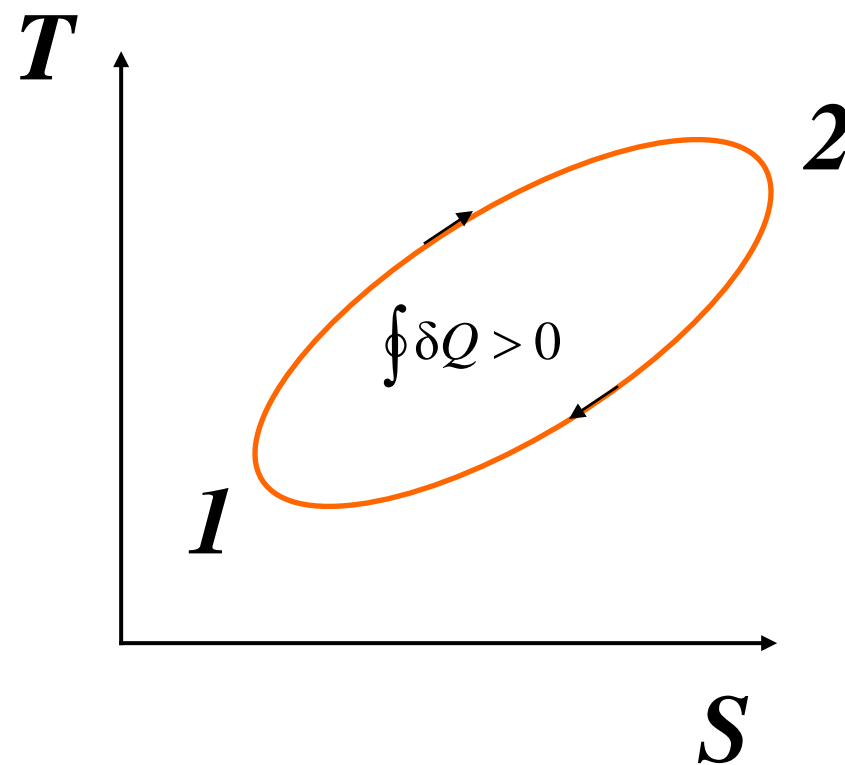


# 正向循环

正向循环：顺时针方向



净效应：对外做功

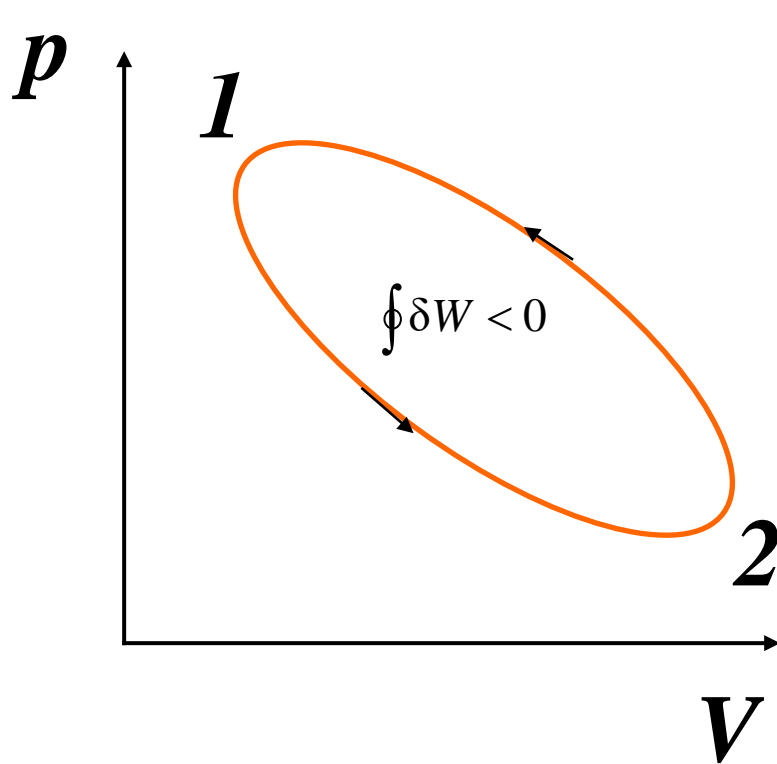


净效应：吸热

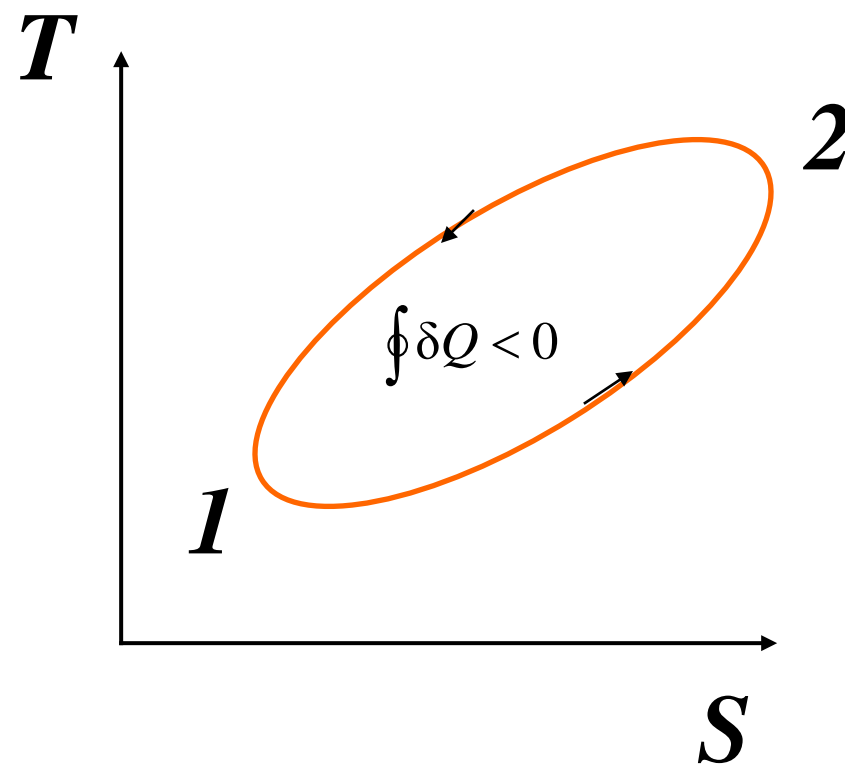


# 逆向循环

逆向循环：逆时针方向



净效应：对内做功



净效应：放热





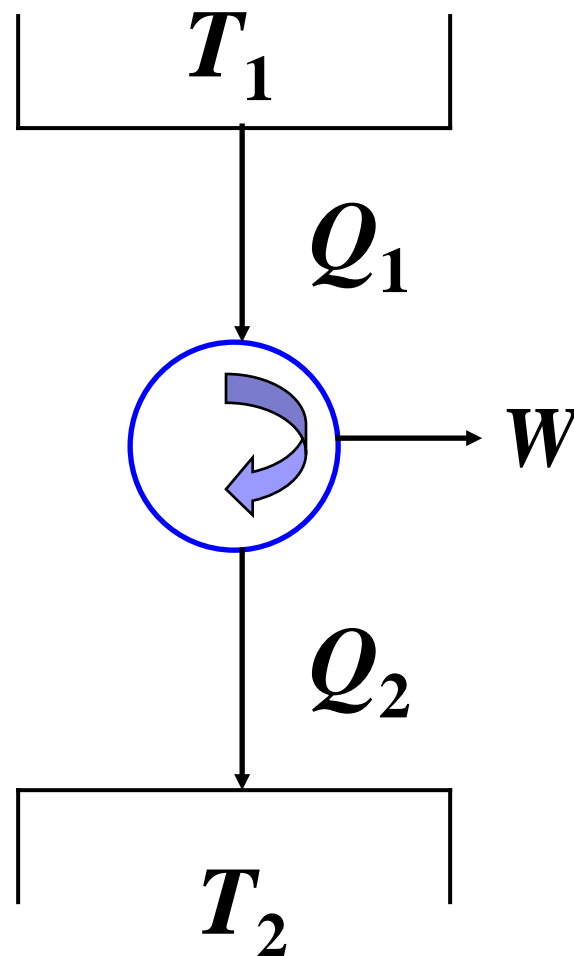
# 热力循环的评价指标

正向循环：净效应（对外做功，吸热）

动力循环：热效率

$$\eta_t = \frac{\text{收益}}{\text{代价}} = \frac{\text{净功}}{\text{吸热}} = \frac{W}{Q_1}$$

数值范围：  $0 < \eta_t < 1$







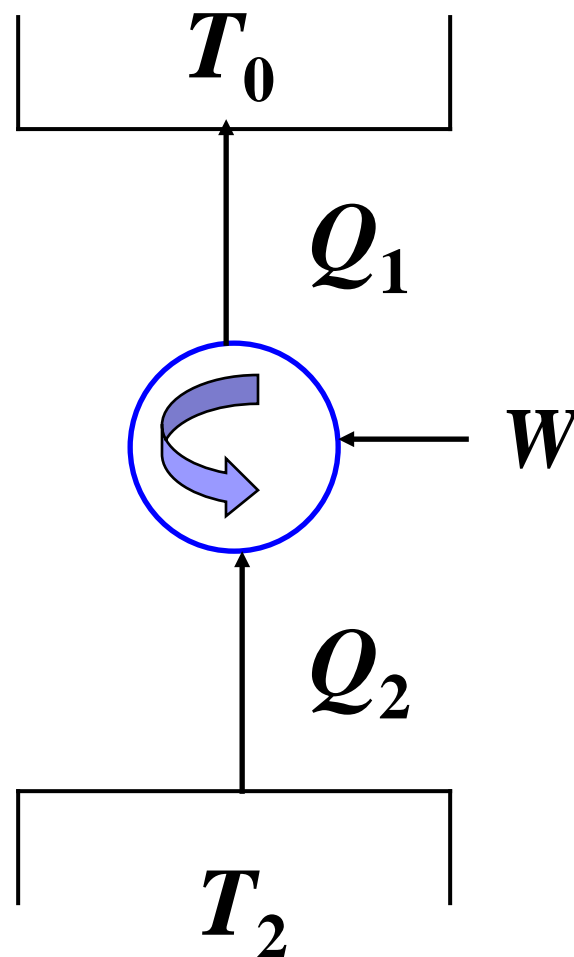
# 热力循环的评价指标

**逆向循环：净效应（对内做功，放热）**

制冷循环：制冷系数

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\text{收益}}{\text{代价}} \\ &= \frac{\text{吸热}}{\text{耗功}} = \frac{Q_2}{W}\end{aligned}$$

数值：>0





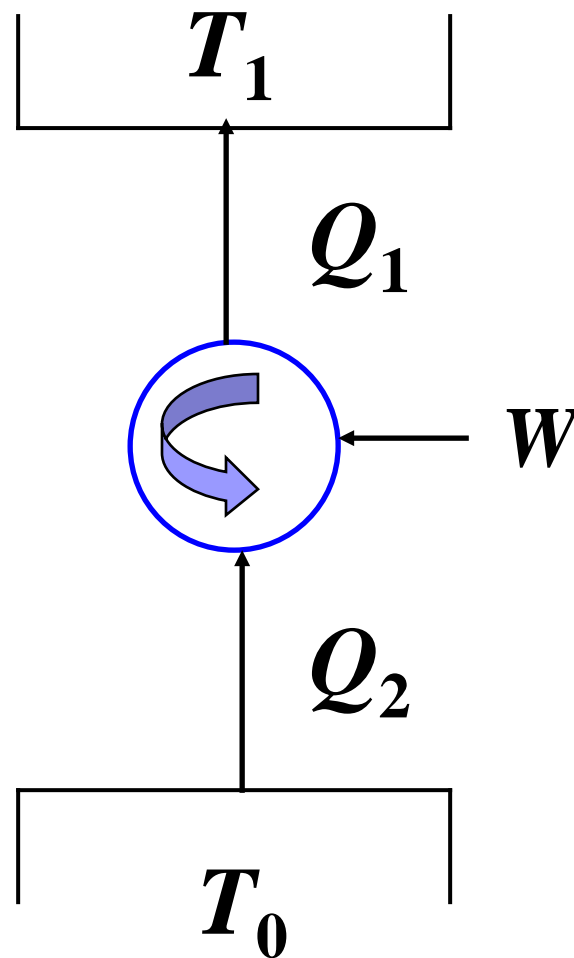
# 热力循环的评价指标

逆向循环：净效应（对内做功，放热）

制热循环：供热系数或热泵系数

$$\begin{aligned}\varepsilon' &= \frac{\text{收益}}{\text{代价}} \\ &= \frac{\text{放热}}{\text{耗功}} = \frac{Q_1}{W}\end{aligned}$$

数值：  $>1$





**谢谢！**