

§ 6—5 循环过程 卡诺循环

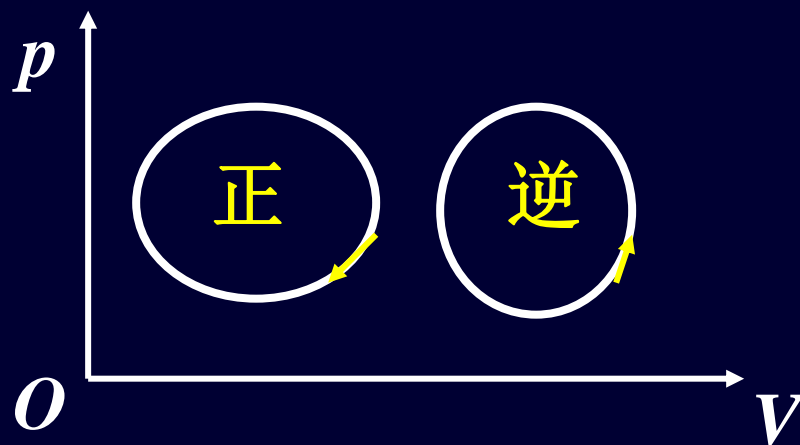
(热力学第一定律的应用, 引入第二定律的桥梁)

热力学: 紧密围绕热机的研究和应用——工作物质
重复进行某些过程, 不断吸热做功

一. 循环过程

1. 定义: 系统经历一系列变化后又回到初始状态的整个过程叫循环过程。

准静态循环过程: 相图中的闭合曲线



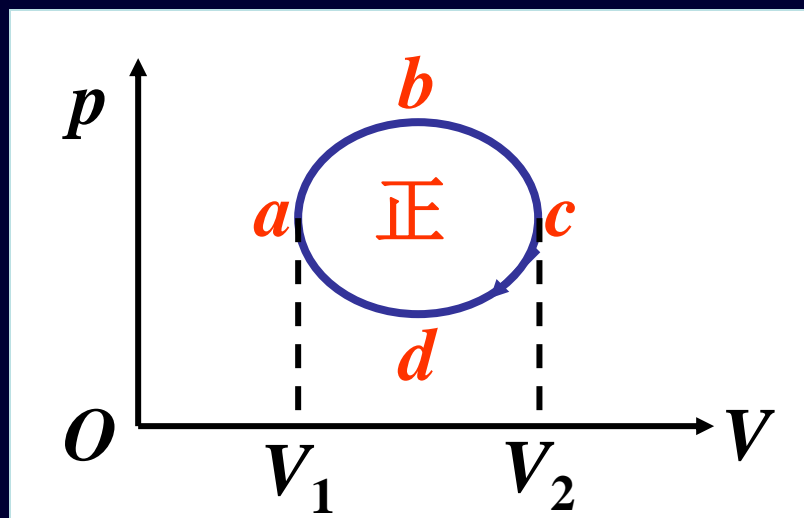
顺时针: 正循环

逆时针: 逆循环

2. 共同特征

$\Delta E = 0$ 热力学第一定律: $Q_{\text{净}} = A_{\text{净}}$

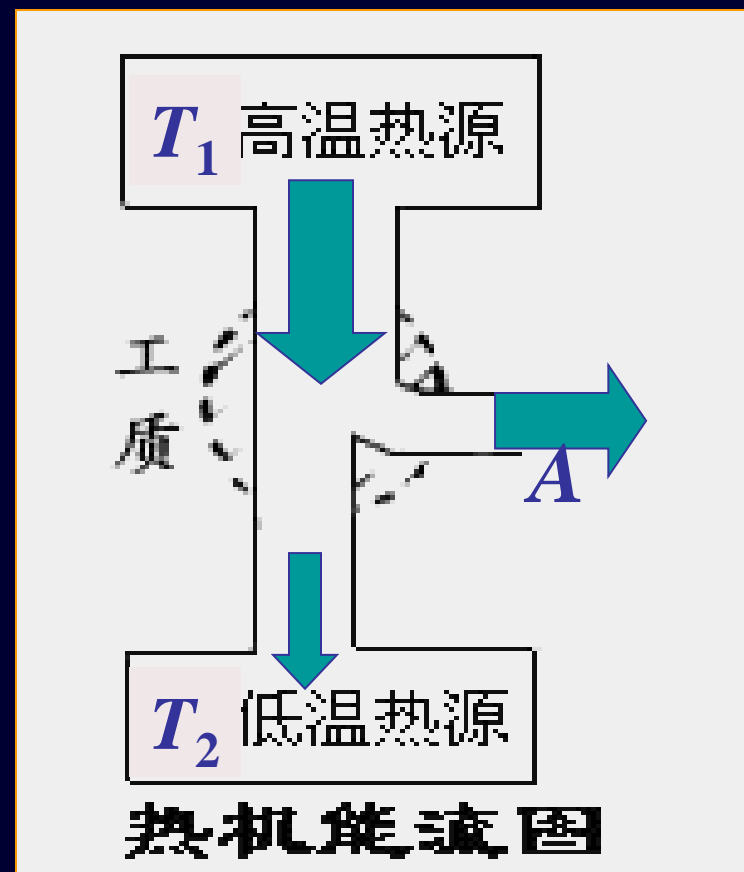
3. 正循环及其效率



特征: $Q_{\text{净}} = A_{\text{净}} > 0$

热机的循环:

从外界吸热→对外做功

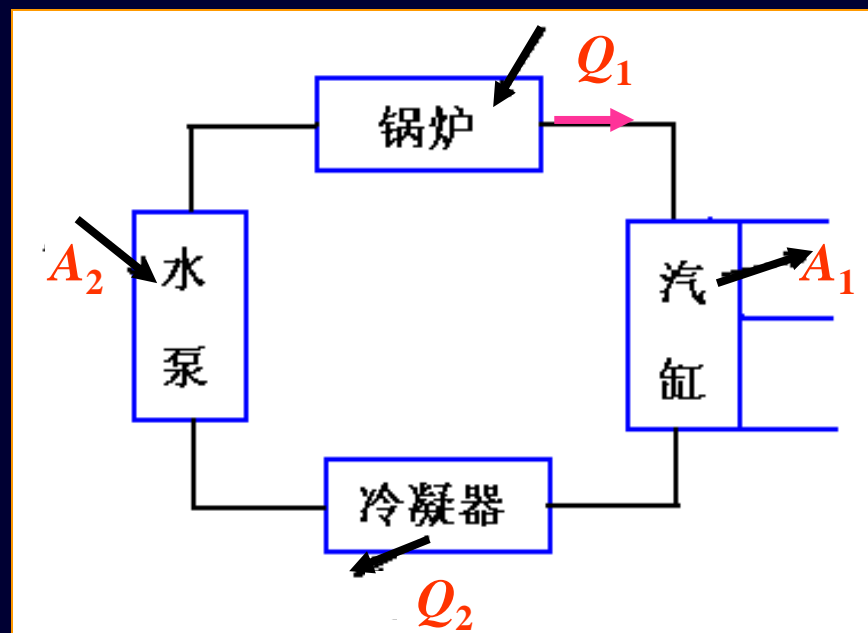
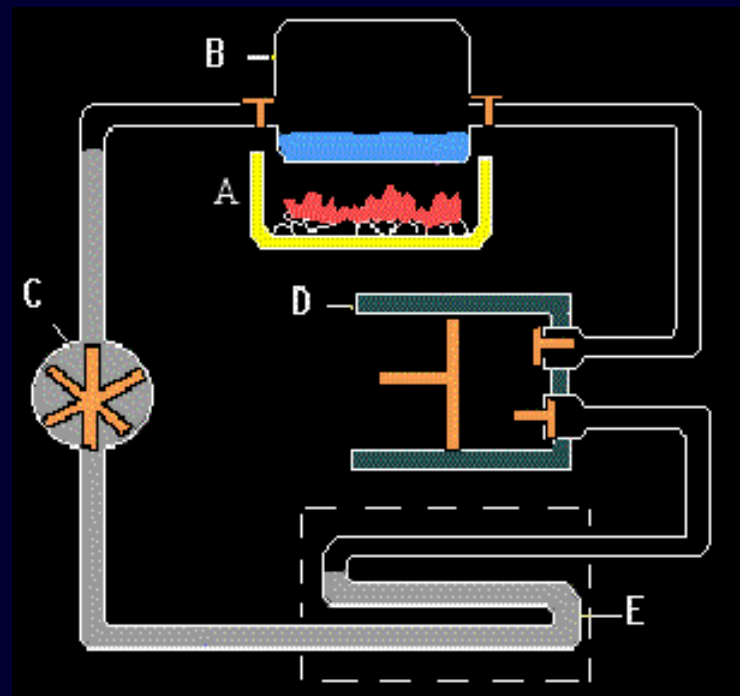


实例：蒸汽机的循环

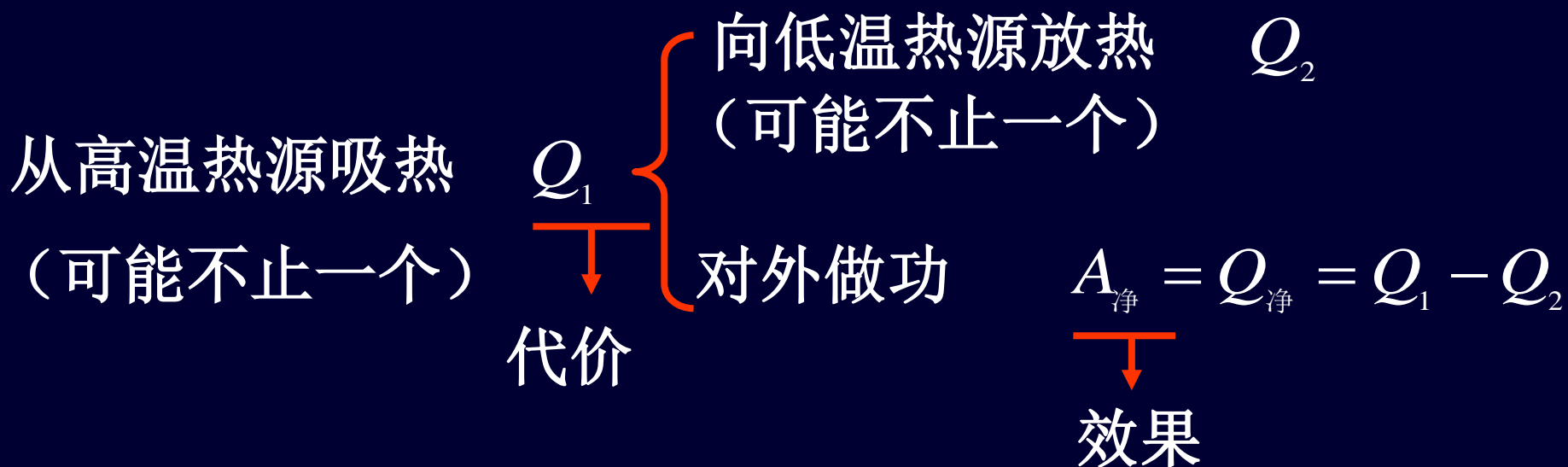
$$A_{\text{净}} = A_1 - A_2 = A$$

$$Q_{\text{净}} = Q_1 - Q_2 = A$$

$$\begin{aligned}\text{效率: } \eta &= \frac{A_{\text{净}}}{Q_{\text{吸}}} \\ &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \\ &= 1 - \frac{Q_2}{Q_1}\end{aligned}$$



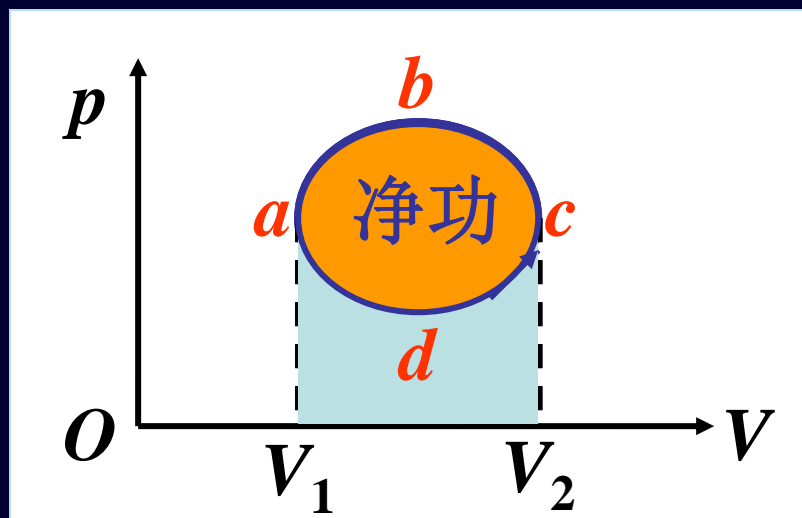
热机的能量转换:



热机效率:

$$\eta = \frac{A_{\text{净}}}{Q_{\text{吸}}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

4. 逆循环及致冷系数

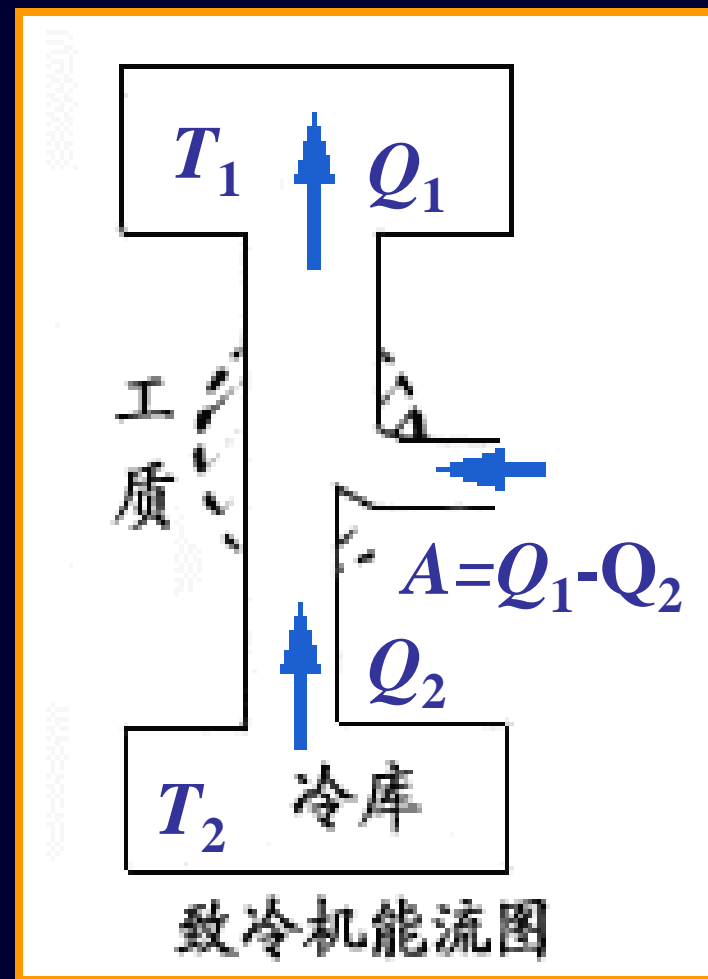


特点: $Q_{\text{净}} = A_{\text{净}} < 0$

致冷机的循环:

外界对系统做功——

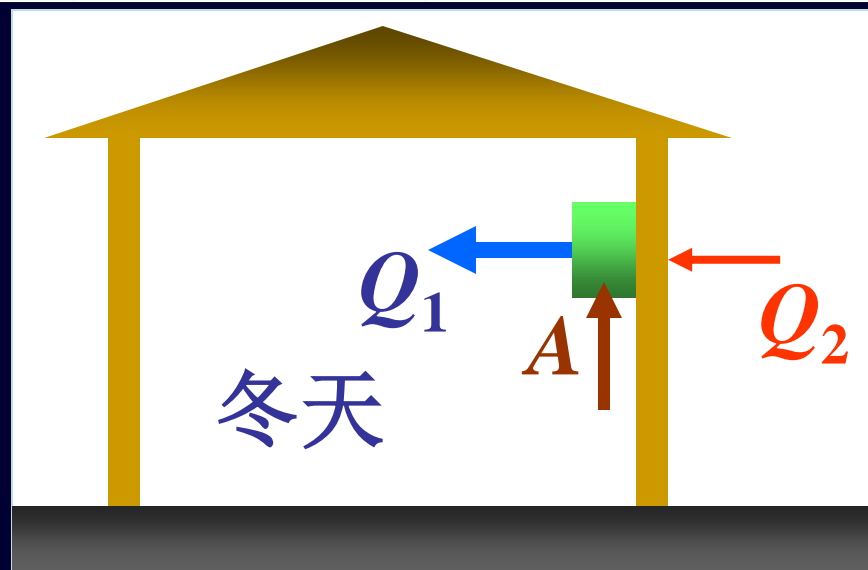
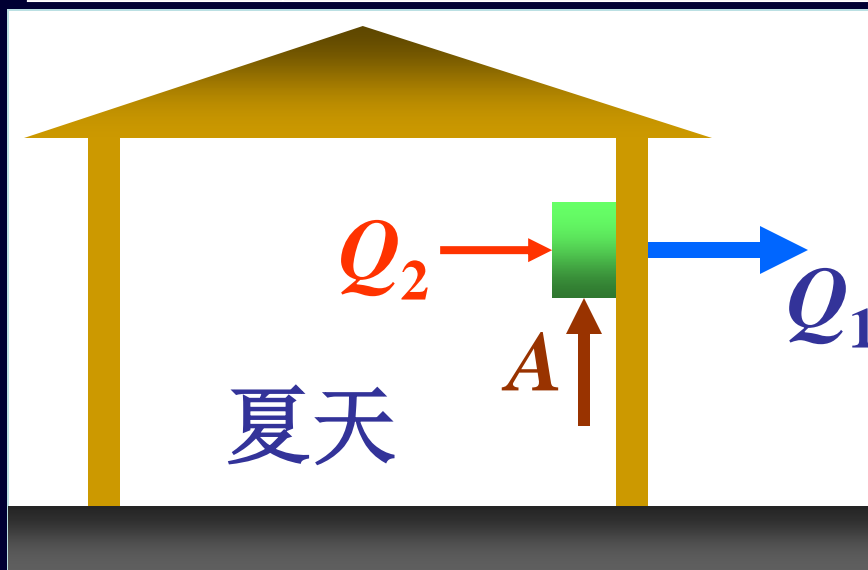
系统向外界放热



介绍： 空调机的循环 — 致冷机与热泵原理的结合

压缩机做功，吸热传向高温热源

季节	作用	低温热源	高温热源	效果
夏天	冷泵 (A)	房间 (Q_2)	大气 (Q_1)	室内降温 (对房间致冷)
冬天	热泵 (A)	大气 (Q_2)	房间 (Q_1)	室内升温 (对大气致冷)



二、卡诺循环



卡诺：Sadi Carnot 1796—1832

法国青年工程师，具有科学家素质。

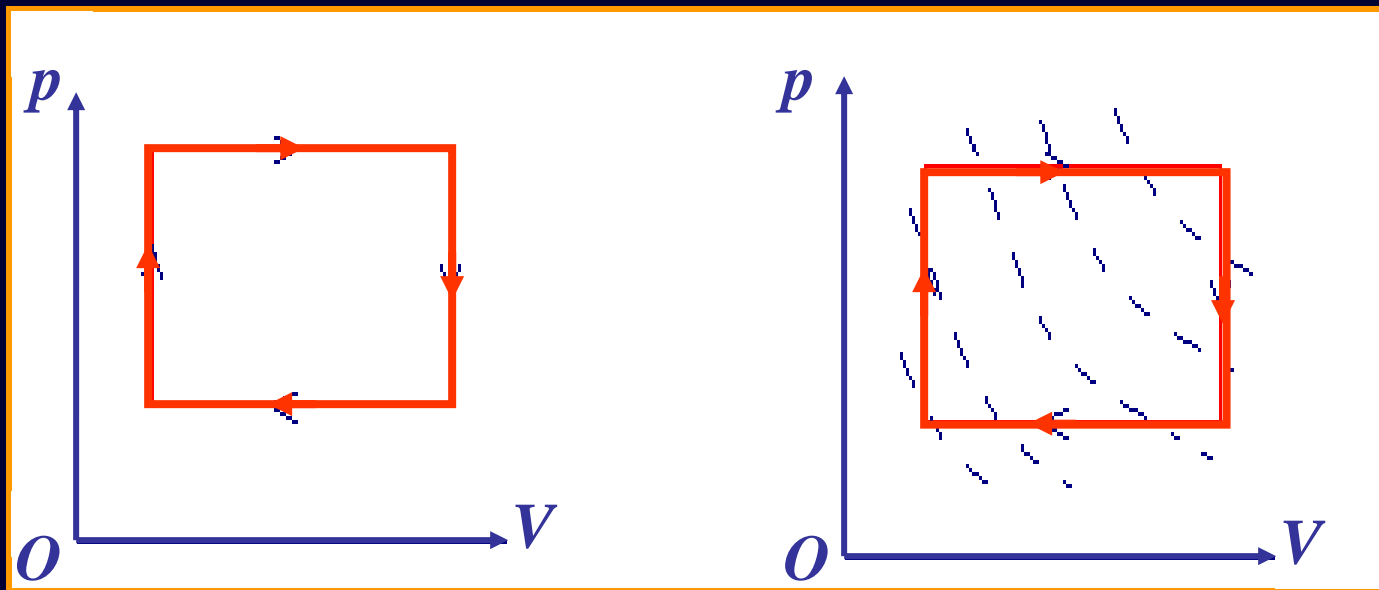
着眼点高，热力学创始人之一。

“为了最完整地研究由热得到动力的道理，必须不依赖于任何特定机构和任何特殊的工作物质，必须使所进行的讨论不仅适合于蒸汽机，而且可以应用于一切可以想象的热机，不管它们用的什么物质，也不管它们如何动作”

- - - 卡诺

1. 研究循环过程的理想模型 —— 卡诺循环

思考： 试设想最简单的循环模型



要无穷多个热源才能得以实现

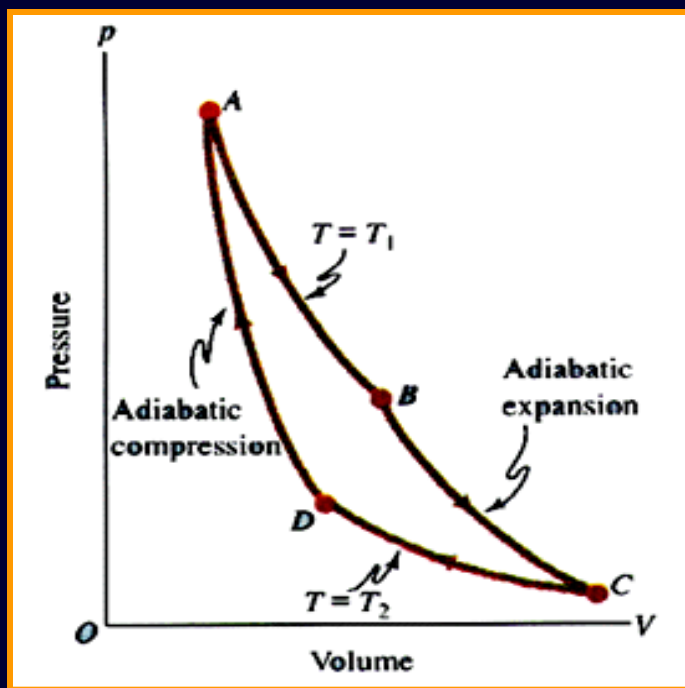
外形简单，实际上复杂

卡诺循环：工作物质只与两个恒温热源交换能量的准静态循环

卡诺正循环或卡诺逆循环特点：

- 1) 与两个恒温热源交换能量（两个等温过程）
- 2) 不与其它热源交换能量（两个绝热过程）

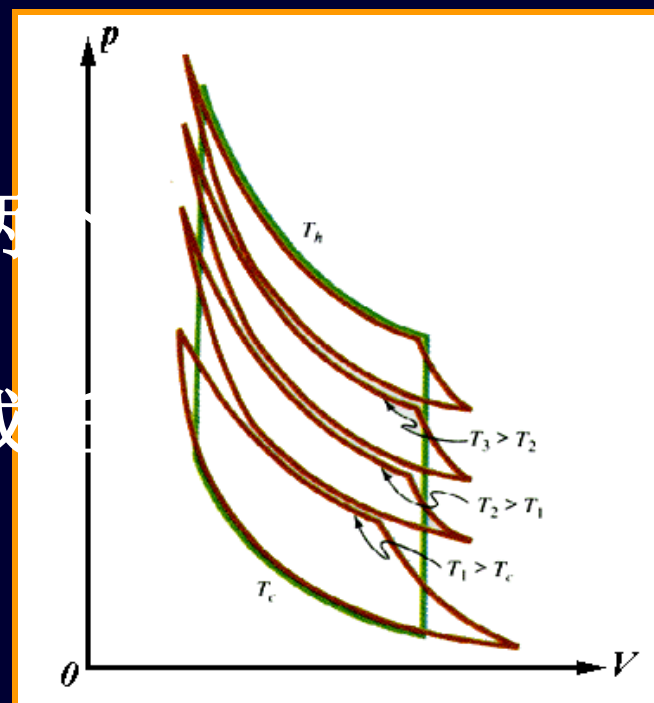
如何在 P - V 图中表示？



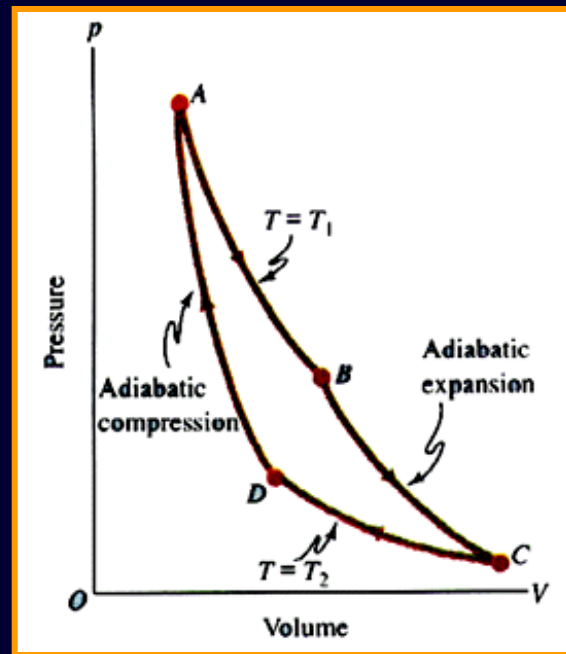
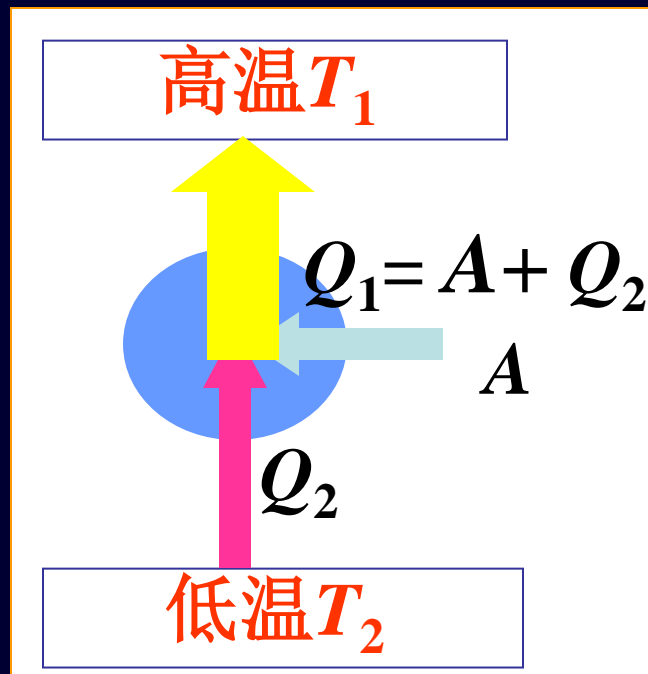
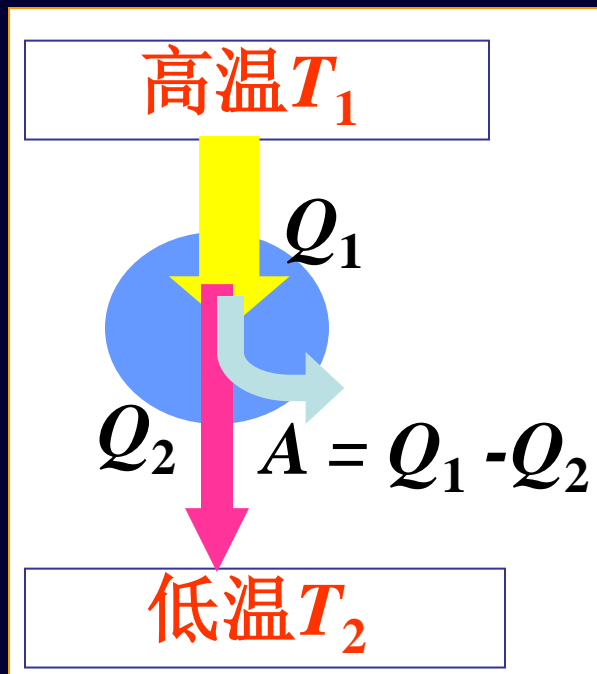
特点：

简单：只需要两
热源

重要：可以组成
任何一种循环



卡诺循环过程:



- 正循环
- $A \rightarrow B$ 等温膨胀 从 T_1 吸热
 - $B \rightarrow C$ 绝热膨胀 对外做功 内能降低
 - $C \rightarrow D$ 等温压缩 向 T_2 放热
 - $D \rightarrow A$ 绝热压缩 外界对气体做功 内能升高

2. 理想气体的卡诺循环

1) 正循环效率

等温过程:

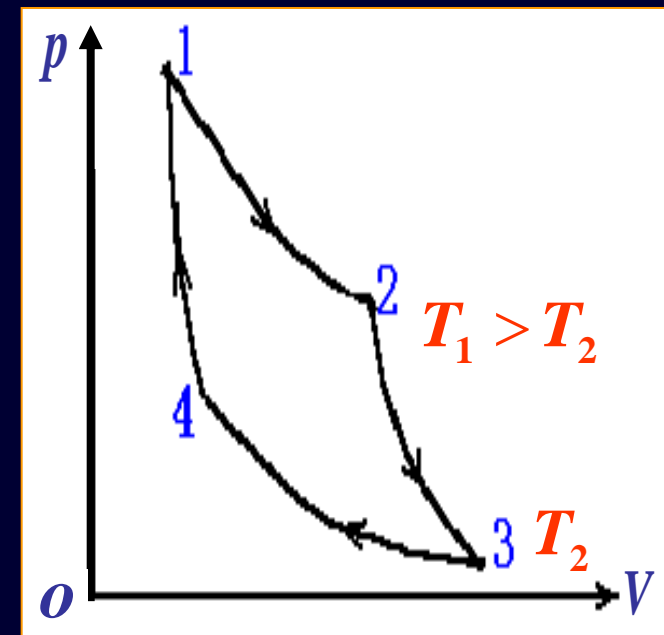
$$1 \rightarrow 2 \quad Q_1 = A_1 = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$3 \rightarrow 4 \quad |Q_2| = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

绝热过程:

$$2 \rightarrow 3 \quad T_1 V_2^{r-1} = T_2 V_3^{r-1}$$

$$4 \rightarrow 1 \quad T_1 V_1^{r-1} = T_2 V_4^{r-1}$$



$$\left. \begin{array}{l} T_1 V_2^{r-1} = T_2 V_3^{r-1} \\ T_1 V_1^{r-1} = T_2 V_4^{r-1} \end{array} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{\frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \left\{ \begin{array}{l} \eta \text{ 仅由 } T_1, T_2 \text{ 决定} \\ T_1 \neq \infty \quad T_2 \neq 0 \quad \eta < 1 \end{array} \right.$$

提高 η 途径，升高 T_1 ，降低 T_2

2) 逆循环致冷系数

等温过程:

$$2 \rightarrow 1 \quad |Q_1| = A_1 = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

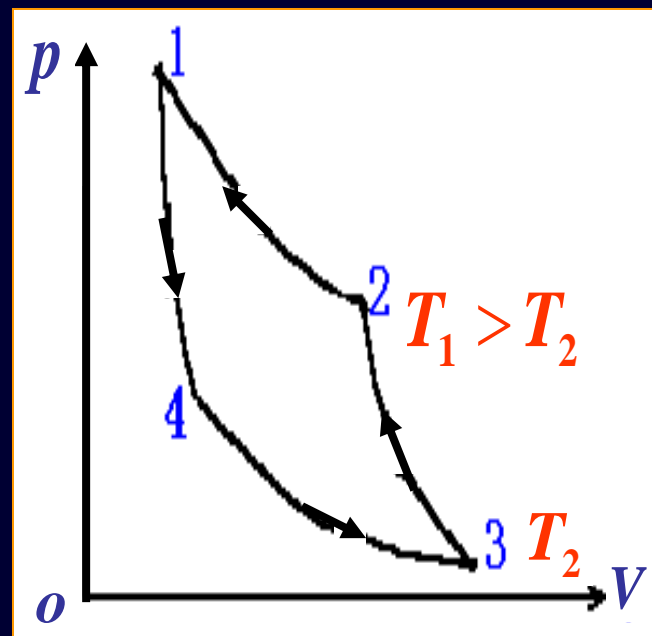
$$4 \rightarrow 3 \quad Q_2 = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

绝热过程:

$$3 \rightarrow 2 \quad T_1 V_2^{r-1} = T_2 V_3^{r-1}$$

$$1 \rightarrow 4 \quad T_1 V_1^{r-1} = T_2 V_4^{r-1}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 V_2^{r-1} = T_2 V_3^{r-1} \\ T_1 V_1^{r-1} = T_2 V_4^{r-1} \end{array} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{\frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}$$

$$w = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$T_2 \downarrow, w \downarrow$: 要从温度越低的低温热源中吸热就要消耗更多的功。

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$w = \frac{Q_2}{A}$$



对一切循环适用

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$w = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



只对卡诺循环适用