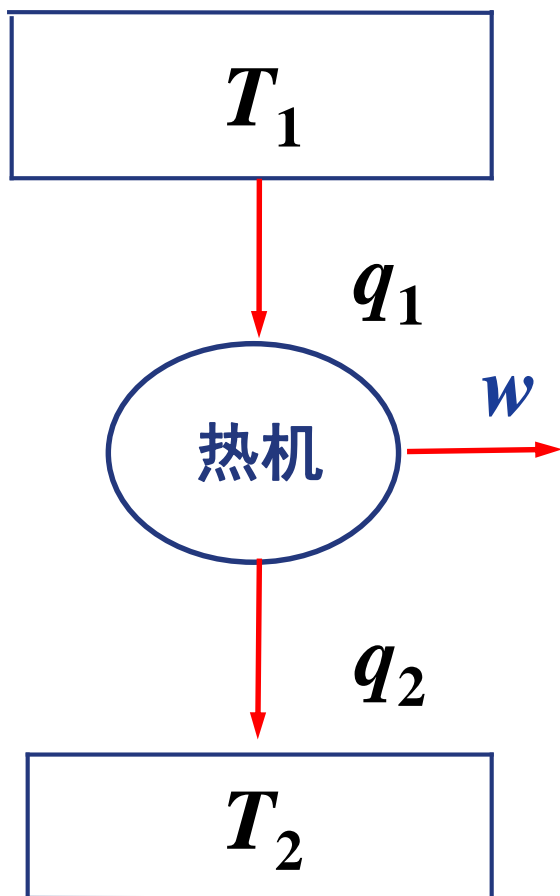


工程热力学

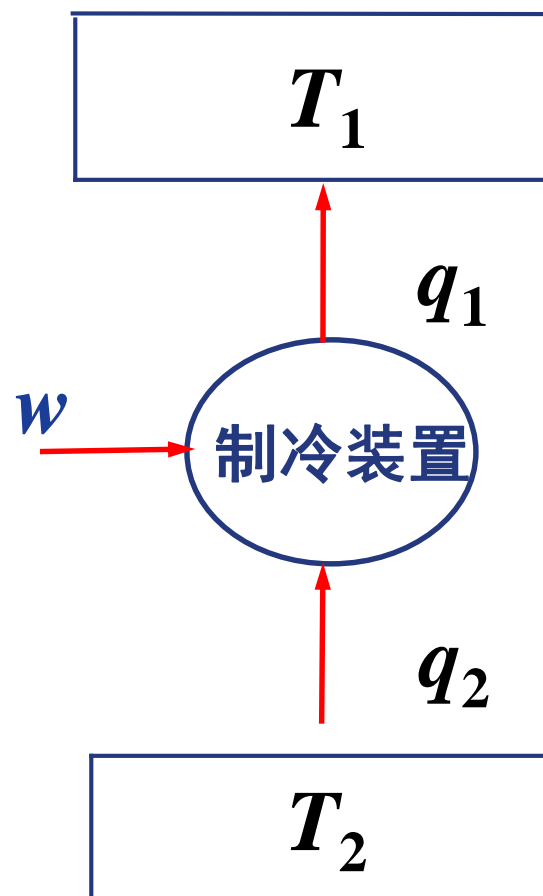
武俊梅



正循环



逆循环



第十一章 制冷循环

11-1 概述



11-2 气体压缩制冷循环



11-3 蒸气压缩制冷循环



11-1 概述

一、制冷循环和热泵循环

都是逆循环。但目的不同:

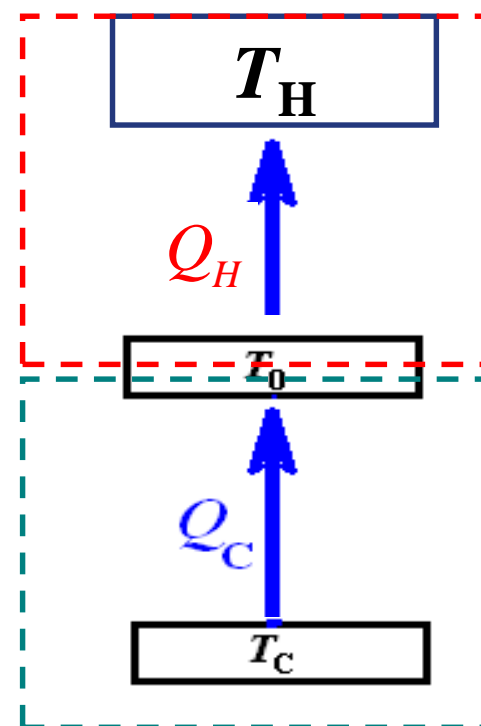
热泵循环: 不断地向高温热源提供热量, 以维持其高温。

制冷循环: 不断地从低温热源取走热量, 以维持其低温。

热泵
循环

环境

制冷
循环



二、经济性指标

制冷系数

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w_{net}}$$

供热系数

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{w_{net}}$$

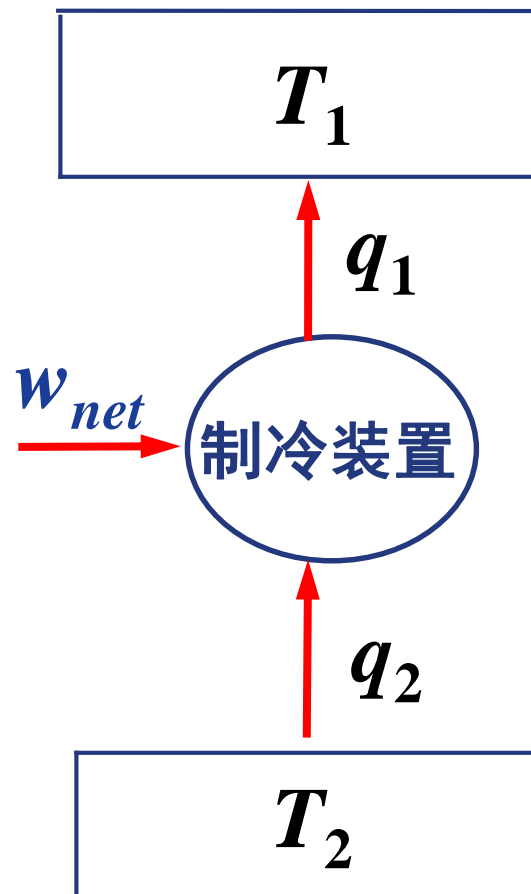
工作性能系数 *COP*

Coefficient of performance

$$COP = \frac{\text{得到收益}}{\text{付出代价}}$$

能效比 *EER* (energy efficiency ratio)

$$EER = \frac{\text{制冷量}}{\text{输入总的电功率}}$$



❖ 如何选购冰箱、空调（属于白色家电）？

中国能效标识

1、2、3、4、5共5个等级



BCD-169CM(E)



BCD-190CM(E)



KFR-35GW

1.5匹

¥ 2800

定频

能效等级 3级
电辅加热 支持

适用面积(平方米) 约16-24m²

制冷量(W) 3500

制冷功率(W) 1075

制热量(W) 3850

制热功率(W) 1120

电辅加热功率(W) 1000

内机噪音(dB(A)) (静音档-高档) 24.5-37

外机噪音(dB(A)) ≤51

定频机能效比 3.25

循环风量(m³/h) 630



1匹=735W, 耗电量

¥ 3600

变频

能效等级 3级
电辅加热 支持

适用面积(平方米) 约16-24m²

制冷量(W) 3500(450-3800)

制冷功率(W) 1110(160-1450)

制热量(W) 4500(800-5100)

制热功率(W) 1500(190 -1755)

电辅加热功率(W) 1000

内机噪音(dB(A)) (静音档-高档) 19-38

外机噪音(dB(A)) ≤51

变频机能效比 APF 3.53 SEER 3.99

循环风量(m³/h) 630

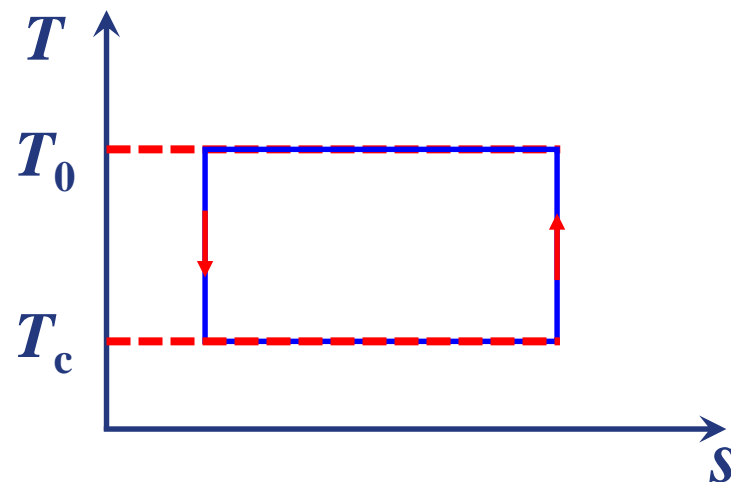
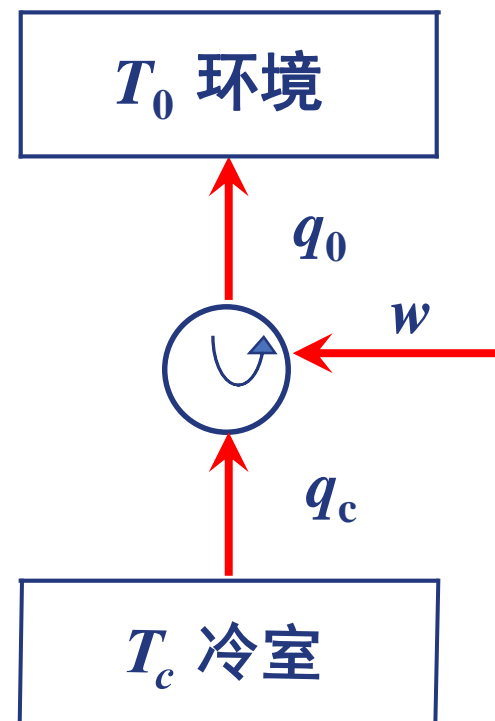
最理想制冷循环——逆卡诺循环

$$\varepsilon_C = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c} = \frac{T_c}{T_0 - T_c}$$

T_0 不变, $T_c \downarrow$ $\varepsilon_C \downarrow$

T_c 不变, $T_0 \uparrow$ $\varepsilon_C \downarrow$

制冷系数 < 1 , > 1 , or $= 1$;
环境温度越高或制冷温度越低,
制冷系数越小。



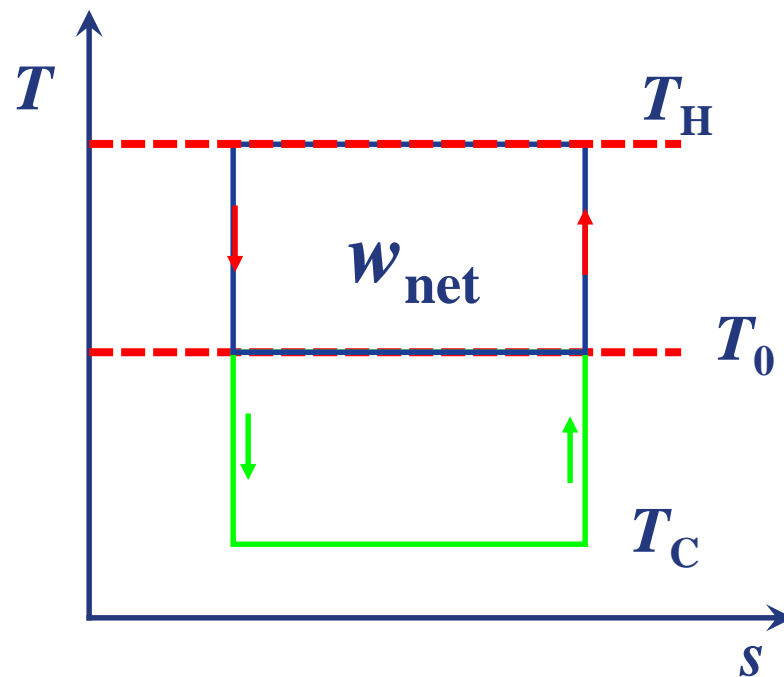
卡诺逆循环-热泵循环

$$\varepsilon'_C = \frac{q_H}{w_{\text{net}}} = \frac{q_H}{q_H - q_0} = \frac{T_H}{T_H - T_0} = \frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_H}}$$

T_H 不变, $T_0 \downarrow \varepsilon'_C \downarrow$

T_0 不变, $T_H \uparrow \varepsilon'_C \downarrow$

供热系数恒大于1;
环境温度越低或供热温度
越高, 供热系数越小。



制冷循环种类

压缩式制冷

气体压缩制冷（空气）✓

蒸气压缩制冷（制冷剂）✓

吸收式制冷

吸附式制冷

蒸汽喷射制冷

半导体制冷

热声制冷，磁制冷

11-2 气体压缩制冷循环

一、气体压缩制冷循环——逆布雷顿循环

飞机空调系统、列车空调、环境
 试验室、石油化工、食物保鲜及
 快速冷冻等领域。

工质：理想气体

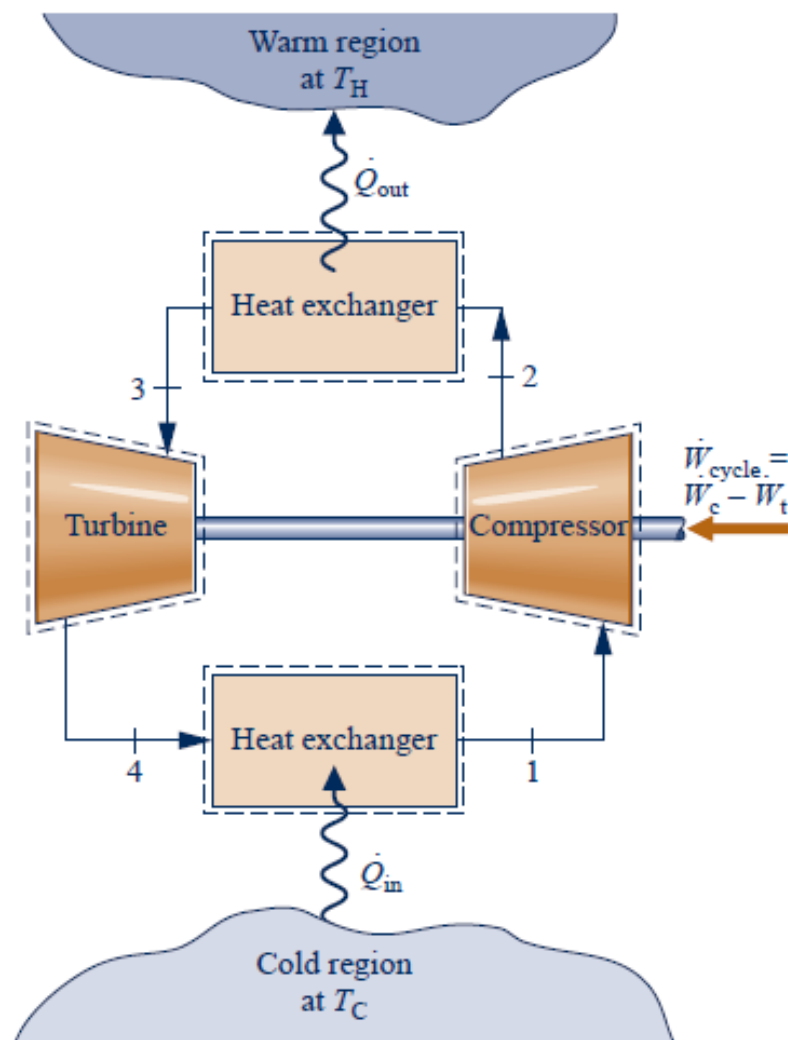
四个主要部件：

压 气 机：绝热压缩

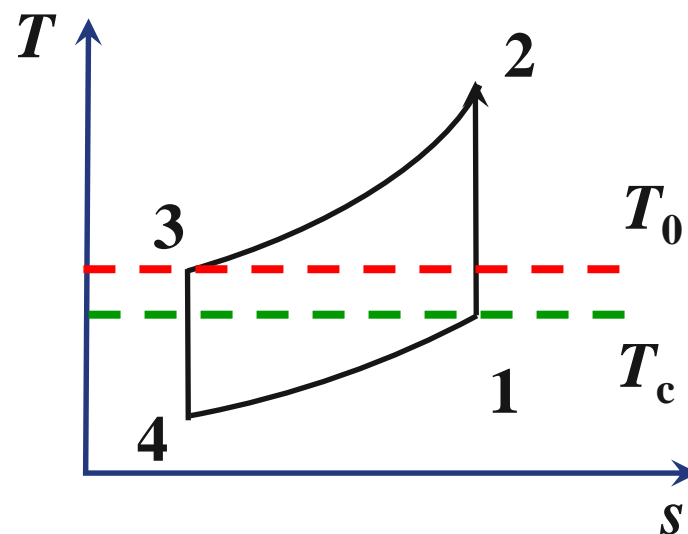
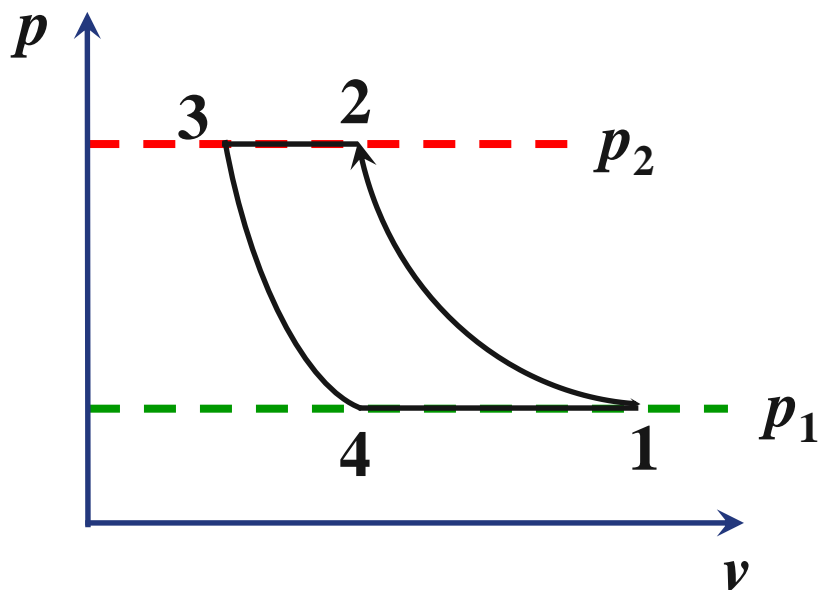
冷 却 器：放热过程

透平膨胀机：绝热膨胀

冷室换热器：吸热过程



简化处理：①理想气体；②定比热；③可逆；



1-2 可逆绝热压缩

3-4 可逆绝热膨胀

2-3 等压冷却

4-1 等压吸热

循环增压比

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

T_0 : 取决于环境的温度;

T_c : 取决于冷室的温度。

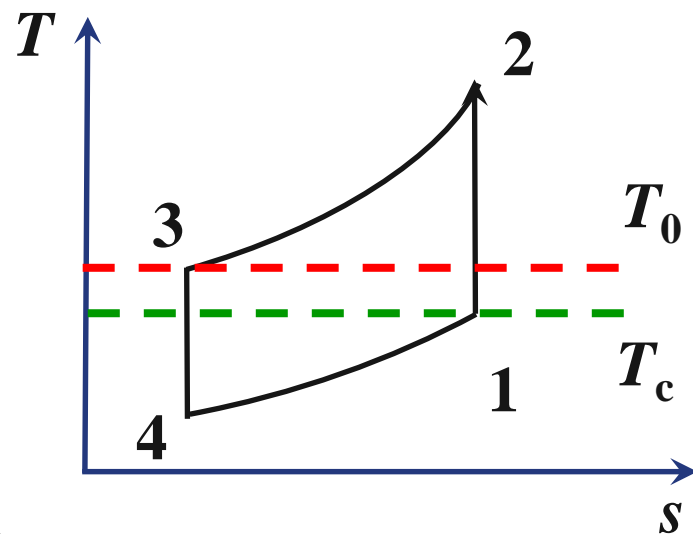
二、循环分析

放热量: $q_0 = h_2 - h_3$

吸热量 (单位制冷量) : $q_c = h_1 - h_4$

净功量:

$$\begin{aligned} W_{net} &= W_C - W_T = q_0 - q_c \\ &= h_2 - h_1 - (h_3 - h_4) = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) \end{aligned}$$



制冷系数:

定值比热

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

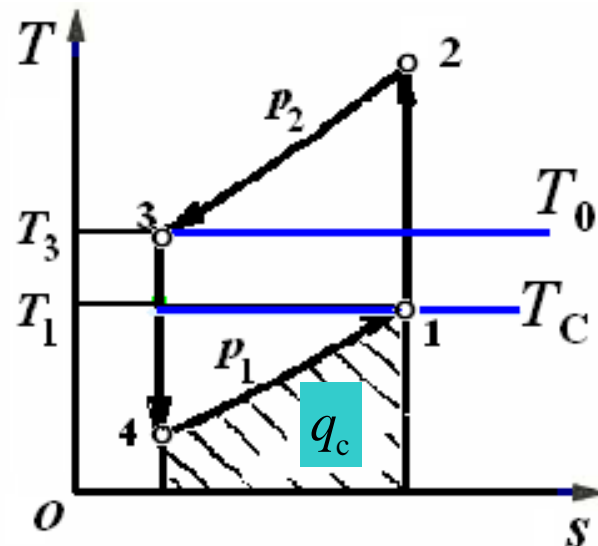
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{q_c}{W_{net}} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 \leftarrow T_3) - (T_1 - T_4)} \\ &= \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \end{aligned}$$

$T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$
 $T_3 = T_4 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$

讨论：

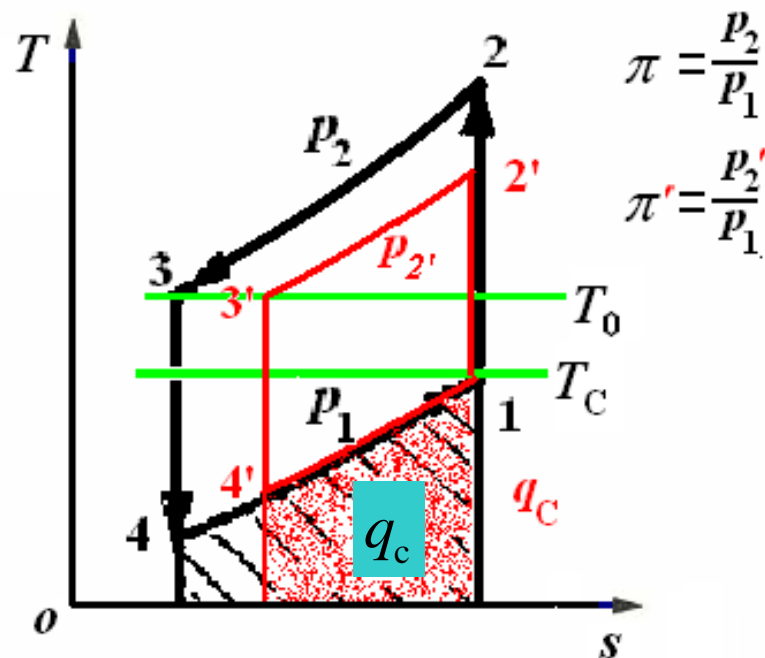
1) 相同温度的 T_0 和 T_C 之间

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1} < \frac{T_C}{T_0 - T_C} = \varepsilon_c$$



2) T_0 和 T_C 不变

$\pi \downarrow$, $q_c \downarrow$, $\varepsilon \uparrow$ 。

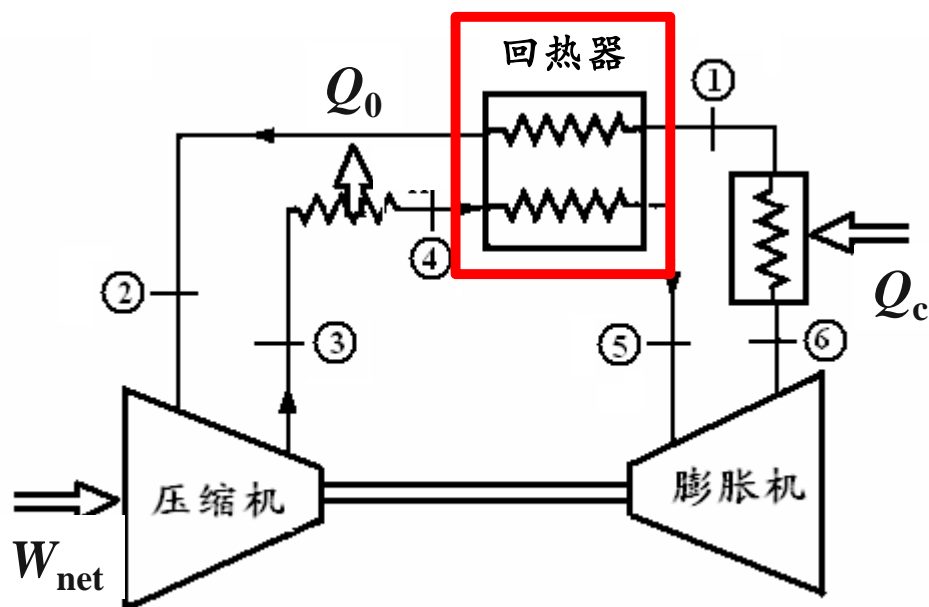


三、气体压缩制冷循环特点

- **优点：** 选用空气时，工质无毒，无味，不怕泄漏。
非常适合飞机空调。
- **缺点：**
 1. 无法实现定温吸、放热过程， $\varepsilon \ll \varepsilon_C$
 2. $q_c = c_p(T_1 - T_4)$ ，空气 c_p 很小， $(T_1 - T_4)$ 不能太大，单位制冷量 q_c 很小。
若 $(T_1 - T_4) \uparrow$ ， $\pi \uparrow$ ， $\varepsilon \downarrow$ 。
 3. 采用活塞式压气机时，流量小，制冷量 $Q_c = m q_c$ 小。

四、提高气态压缩制冷循环制冷量的方法

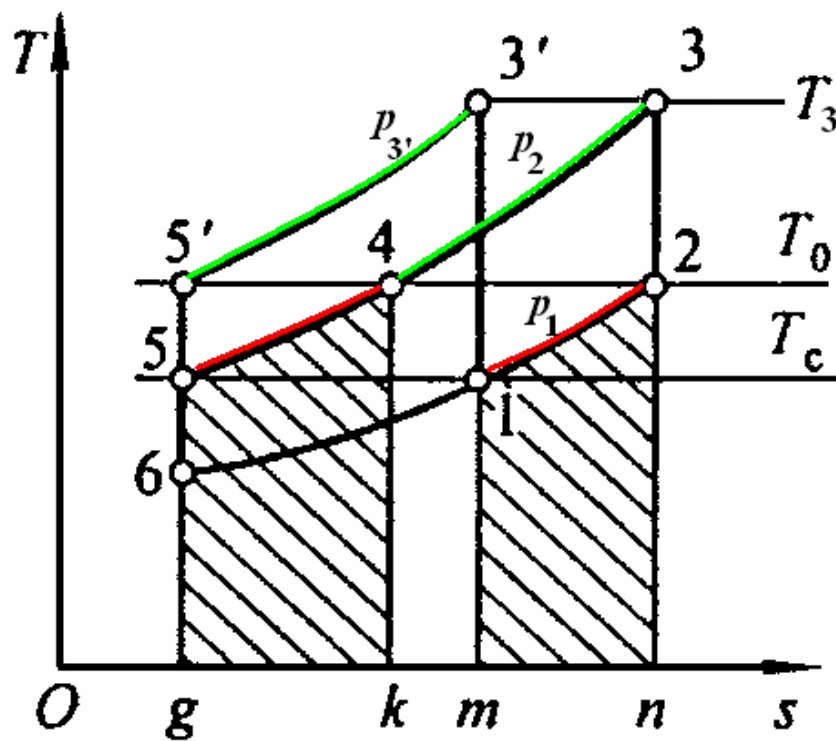
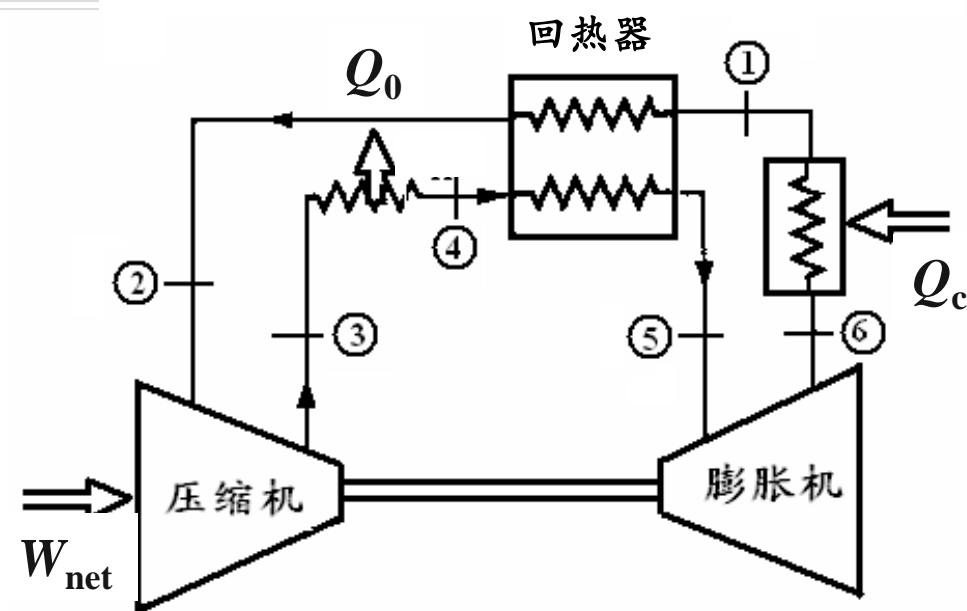
回热：用冷室出来的低温气体与冷却器出来的高温气体进行内部热交换。



回热与非回热循环的比较

比较原则： T_0 、 T_c 、压气机出口温度相等。

非回热循环：1-3'-5'-6-1 \longrightarrow 回热循环：2-3-4-5-6-1-2



回热循环

非回热循环

放热量:

$$q_{0R} = c_p(T_3 - T_4)$$

相等

$$q_0 = c_p(T_{3'} - T_{5'})$$

单位制冷量:

$$q_{cR} = c_p(T_1 - T_6)$$

不变

$$q_c = c_p(T_1 - T_6)$$

所以:

$$\varepsilon_{\text{回热}} = \varepsilon_{\text{非回热}}$$

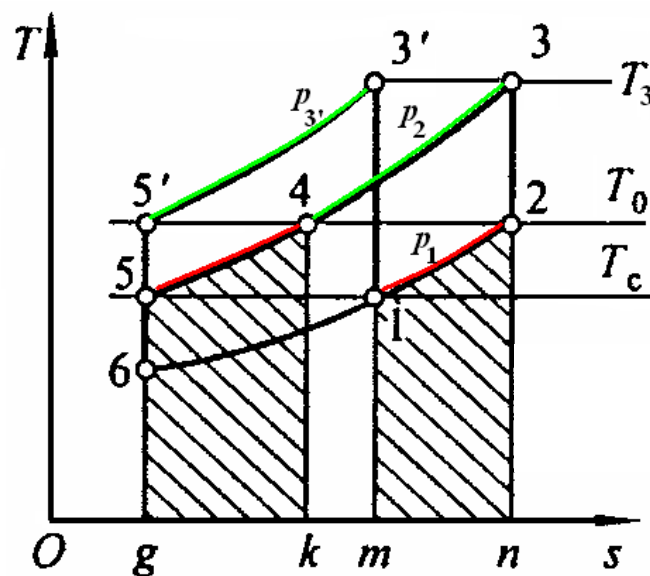
但:

$$\pi_R = \frac{p_3}{p_2} < \pi = \frac{p_{3'}}{p_1}$$

回热的好处:

1) 小增压比为使用大流量叶轮式压气机创造了条件, 以增大制冷量。小增压比也可以减小压缩过程不可逆损失。

2) 可以获得很低的制冷温度 T_c , 用于液化和低温工程中。



气体压缩制冷循环的缺点：

1) 不能实现定温吸热、放热，因此偏离逆卡诺循环较远，制冷系数低；

2) $q_c = c_p(T_1 - T_4)$ ，空气 c_p 很小， $(T_1 - T_4)$ 不能太大，

单位制冷量 q_c 很小。虽然采用回热结合使用叶轮式压气机可以提高总的制冷能力，但不能大大提高。在需要大制冷量场合，需要选用蒸汽压缩制冷装置，其中用到的工质称为制冷剂，需要按实际气体处理。

可以实现：

- 蒸气在两相区易实现定温过程；
- 汽化潜热大，可以获得大的制冷量。

水能用否用于制冷？

水在0℃以下凝固不能流动。

一般需用低沸点工质，如氟利昂、氨

沸点: $T_s(p = 1atm)$

水 100℃

R22 -40.8℃

R134a -26.1℃

氨 -33.5℃

11-3 蒸汽压缩制冷循环

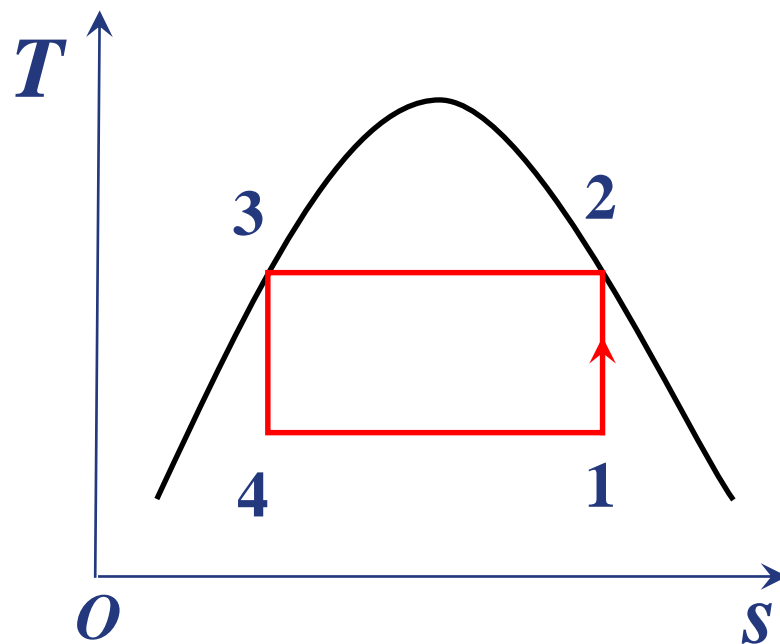
完全在两相区进行：

理论上可以实现逆卡诺循环，
是最理想的。

但是：

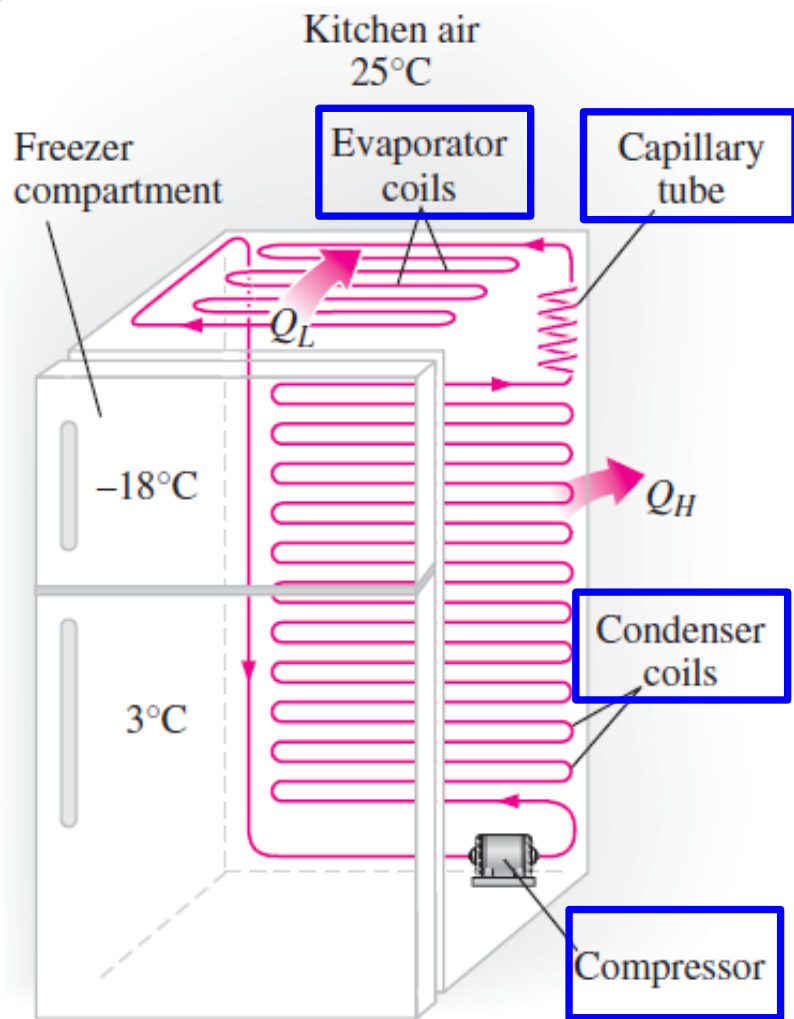
1. 压气机压缩湿蒸汽，不安全、效率低；
2. 膨胀机中液体不易膨胀，得不偿失。

需要改进。



11-3 蒸汽压缩制冷循环

一、工作流程及主要设备



四大件:

压缩机、冷凝器

蒸发器、节流阀（毛细管）

过程简化:

压缩机: 定熵压缩过程

冷凝器: 定压放热过程

节流阀: 绝热节流过程

蒸发器: 定压吸热过程



二、蒸汽压缩制冷循环 123451 特点 相当于逆朗肯循环。

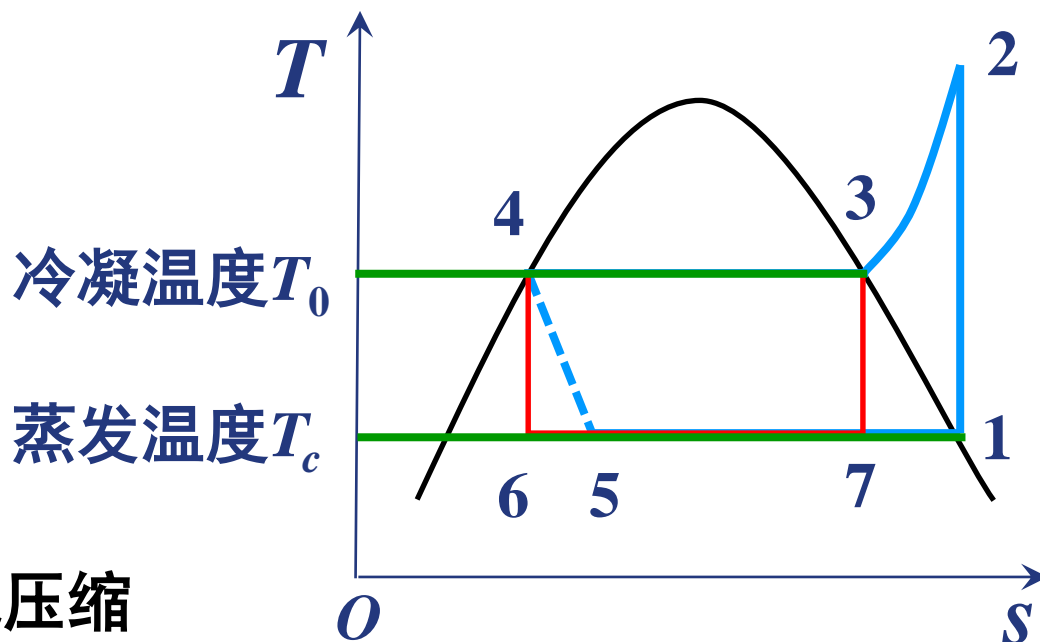
与逆卡诺循环3467比较

$$\varepsilon < \varepsilon_c$$

压缩过程：

逆卡诺 7-3 发生湿蒸汽压缩
“液击”现象。

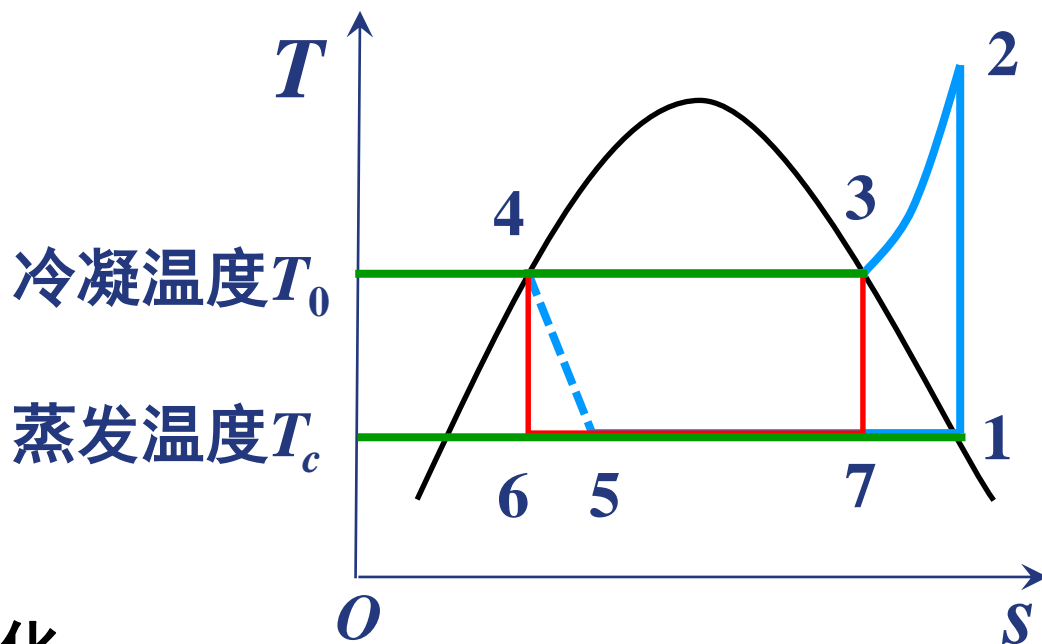
实际 1-2 蒸汽压缩——干压缩，既安全，
又增加了单位质量工质的制冷量7-1。



二、蒸气压缩制冷循环 123451 特点 相当于逆朗肯循环。

与逆卡诺循环3467比较

$$\varepsilon < \varepsilon_c$$



节流阀代替了膨胀机

- 1) 省掉膨胀机，设备简化；
- 2) 节流阀开度可调，以调节蒸发温度；

思考题：
空气压缩制冷使用节流阀是否合适？

理想气体，等温节流

三、制冷系数 ε

蒸发器中吸热量（单位制冷量） $q_c = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$

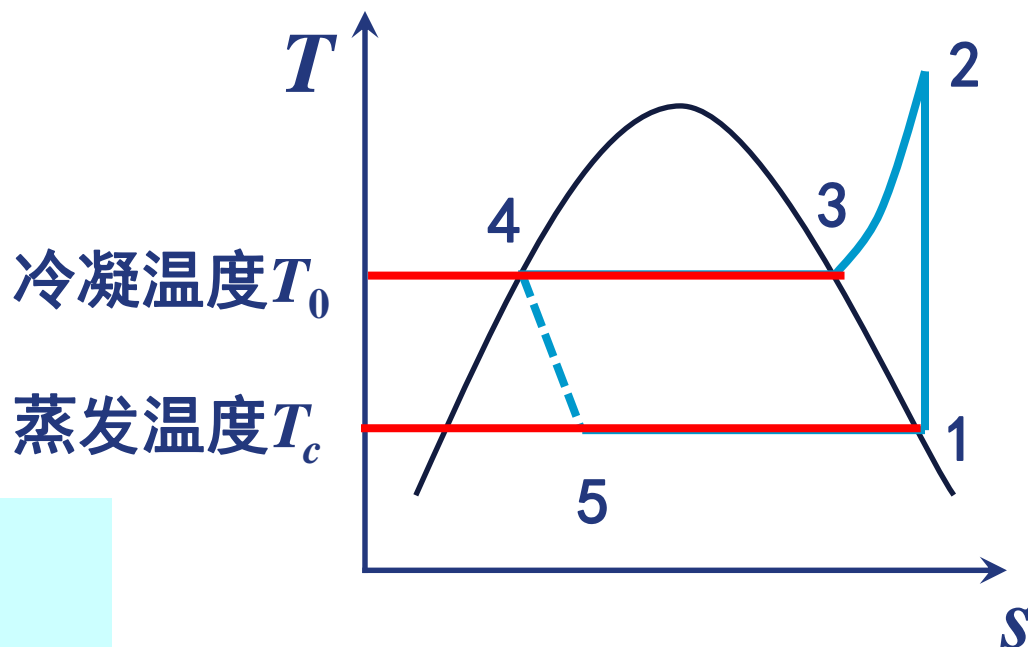
冷凝器中放热量

$$q_0 = h_2 - h_4$$

制冷系数

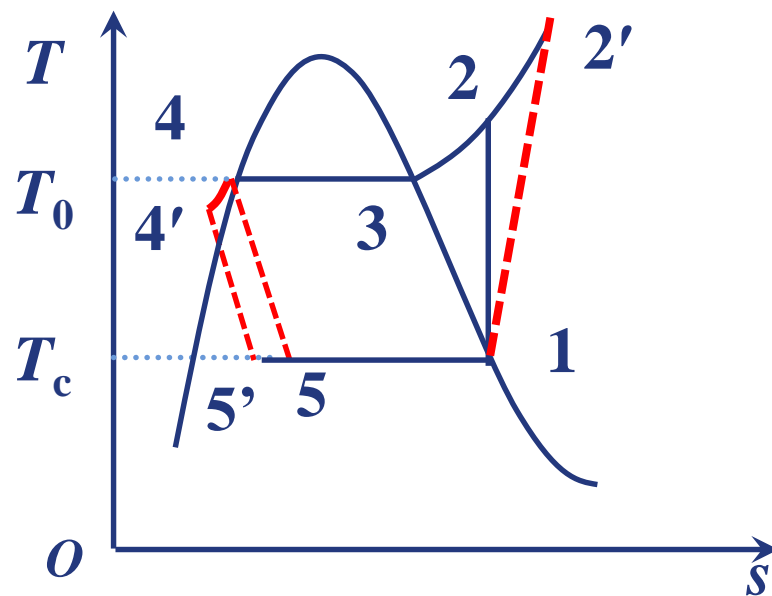
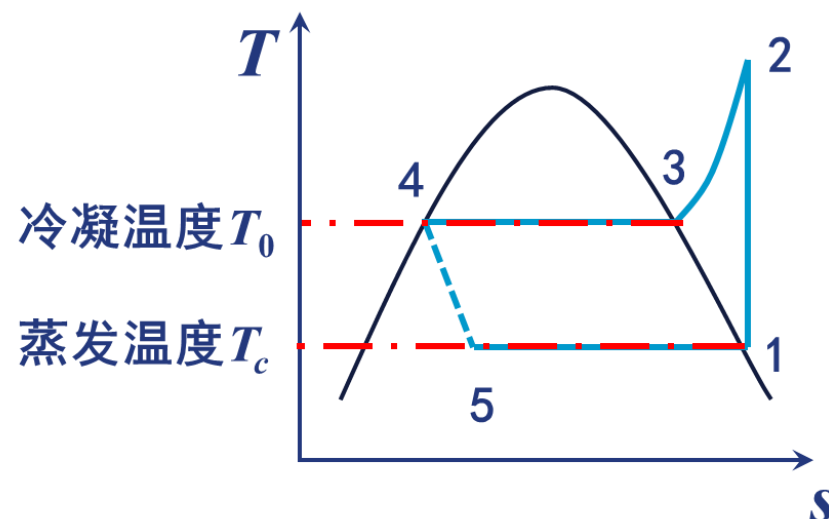
$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{q_c}{q_0 - q_c} \\ &= \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_4)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \end{aligned}$$

✗ $\frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_1}$



四、提高制冷系数的途径

1. 提高蒸发温度
——受限于制冷温度
2. 降低冷凝温度
——受限于环境温度
3. 采用节流前液态制冷剂过冷
——4—4'
制冷量增大，耗功不变。
4. 减小压缩过程不可逆损失



本章要求

1. 在掌握逆卡诺循环的基础上，理解制冷循环、热泵循环；
2. 掌握制冷系数、供热系数的定义；
3. 空气压缩制冷循环的主要部件及热力过程；
4. 蒸气压缩制冷循环的主要部件及热力过程；
5. 提高制冷循环经济性的途径。

作 业:

P316, 思考题 9-5

9-7

9-9

9-10