

第五章 热力装置和永动机

热力装置的本质

“蒸汽机产生动力，从本质上说，是由于燃烧等化学作用或其它作用，使热平衡受到破坏，蒸汽机则是使这种被破坏的热平衡得到恢复，...根据这个原理，为了产生动力，不仅要产生热，而且要具备冷。没有冷，热也就不能利用了。”

“温度差的存在，使热平衡的恢复得以表现出来，同时就产生了动力。”

“水蒸气只是一种手段，而且不是唯一的手段。一切物质都可用于这个目的，因为一切都可以发生冷热交换，都能收缩或膨胀，在发生体积变化的时候都有克服阻抗而做功的能力，因而能产生动力。”

——萨迪·卡诺：《关于火的动力的思考》

典型热力装置简介

装置示例1：车辆发动机（汽油、柴油内燃机）

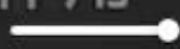


海码课堂三维微视

通常会说车辆受到了向前的牵引力的作用



0:12 / 7:25



高清



装置示例2：发电机组（燃气轮机）



装置示例3：飞机发动机（燃气轮机）



装置示例4：火箭推进器



www.LearnEngineering.org

A **YouTube** PARTNER ...

装置示例5：核动力推进



好看

制冷装置原理与示例



制冷装置原理与示例

5.1 热力设备分析

热力过程和装置的能流

- 闭口系: $\Delta U = Q - W$
- 开口系: 能流+物流

$$\Delta E_{sy} = Q - W + \int_{\tau} (e_1 \delta m_1 - e_2 \delta m_2)$$

$$W = W_{sh} + W_f = W_{sh} + \Delta(pV) \text{ —— 流动功}$$

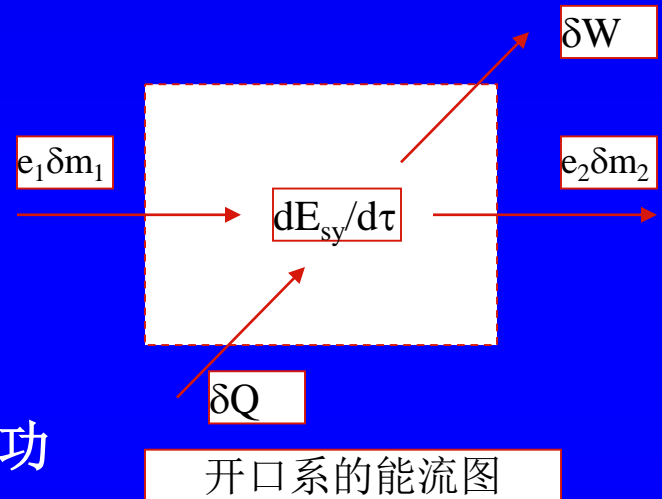
$$\Delta H = Q - W_t$$

其中技术功:

$$W_t = W_{sh} + \frac{1}{2} m \Delta c^2 + mg \Delta z$$

或者写成:

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2} m (c_2^2 - c_1^2) + mg(z_2 - z_1) + W_{sh}$$



焓的定义与含义

$$\text{焓的定义: } H = U + p V$$

H ——焓，单位J

U ——内能

p ——压强

V ——体积

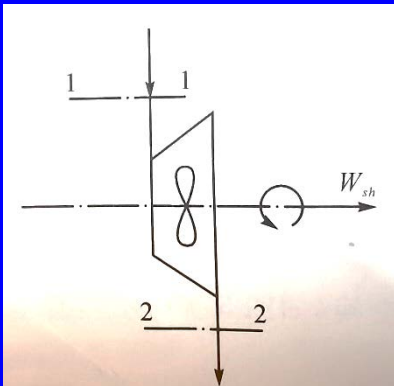
单位质量的焓为**比焓** h ，单位J/Kg

焓：可以简单理解为“含有的”能量。想象一团气体，有内能，还能撑开一定体积的空间。焓=内能+排开这团气体所要做的功或者，焓的大小是这一团气体比同样空间的真空所多出的能量

如果没有焓这个概念，那现有的物理量只能表示能量总量、做功能力、做功功率等，不能准确衡量其循环中工质的能量密度，因此建立比焓这个概念。

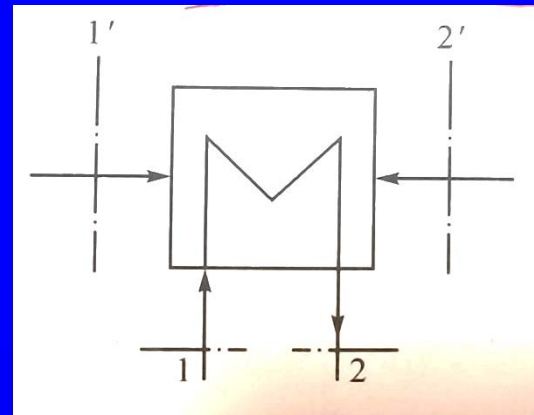
工程设备的热力分析

1) 叶轮式机械：内燃机、蒸汽轮机、燃气轮机、压气机、泵、风机等



若忽略工质进出口的宏观动能差、势能差和散热，
可认为：向外输出的轴功
等于工质进出口的焓差

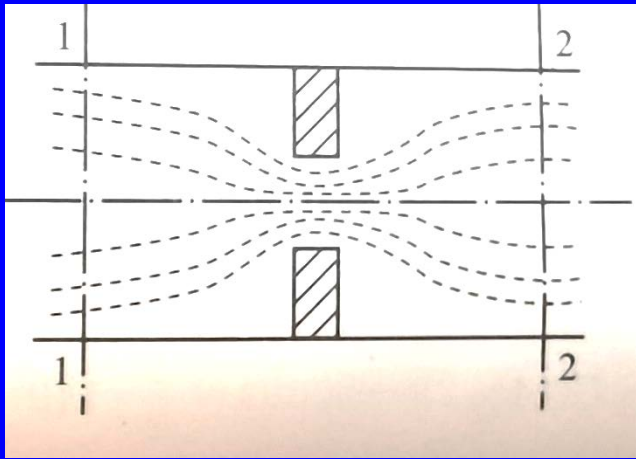
2) 热交换机：锅炉、加热器、蒸发器、冷凝器等



若忽略工质进出口的宏观动能差、势能差，可认为：
工质吸收/排放热量等于
焓的变化

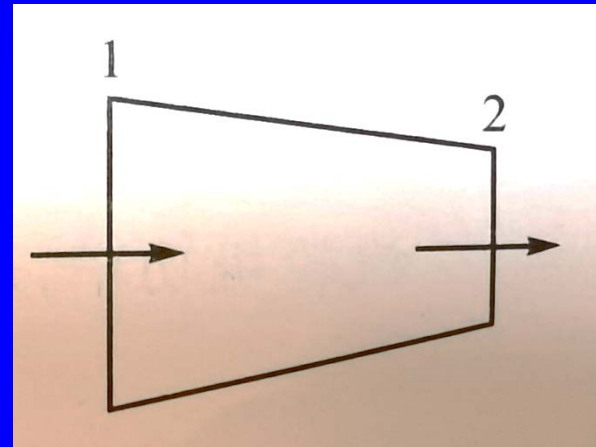
工程设备的热力分析

3) 节流装置：阀门、流量孔板等



若假设绝热，可认为：节流口上下游焓值不变

4) 喷管：各类热机中大量使用，还包括火箭推进器



无轴功、忽略散热与工质在进出口的势能差，则气体动能的增加等于焓的减少

工程设备的热力分析

例题 5-1:汽轮机进口的蒸汽参数压力是 13MPa, 温度是 540℃, 焓为 3443.25kJ/kg, 进口速度为 70m/s。蒸汽在汽轮机中绝热膨胀, 出口压力为 0.005MPa, 蒸汽焓值为 2009kJ/kg, 出口速度为 140m/s, 当蒸汽质量流量为 400t/h 时, 试求:

- (1) 若略去动能变化, 汽轮机的输出功率为多少千瓦?
- (2) 动能变化对输出功率有多大影响?
- (3) 若汽轮机散热 $6.81 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 时, 对输出功率又有多大影响?

(1) 略去动能的影响时的做功量:

$$\begin{aligned} W'_{sh} &= W'_t = (h_1 - h_2)m \\ &= (3443.25 - 2009) \times 400 \times 10^3 \\ &= 57.37 \times 10^7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

汽轮机功率:

$$P' = \frac{W'_{sh}}{3600} = 159.3 \text{ kW}$$

(2) $Q=0$, 做功量:

$$\begin{aligned} W_{sh} &= (H_1 - H_2) - \frac{m}{2}(c_2^2 - c_1^2) \\ &= \left[(3443.25 - 2009) - \frac{1}{2}(140^2 - 70^2) \times 10^{-3} \right] \times 400 \times 10^3 \\ &= [1434.25 - 7.35] \times 400 \times 10^3 \\ &= 57 \times 10^7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{汽轮机功率: } P = \frac{W_{sh}}{3600} = 158.54 \text{ kW}$$

$$\Delta P = \frac{|P - P'|}{P} = \frac{|158.54 - 159.36|}{158.54} = 0.515\%$$

工程设备的热力分析

例题 5-1: 汽轮机进口的蒸汽参数压力是 13MPa, 温度是 540℃, 焓为 3443.25kJ/kg, 进口速度为 70m/s。蒸汽在汽轮机中绝热膨胀, 出口压力为 0.005MPa, 蒸汽焓值为 2009kJ/kg, 出口速度为 140m/s, 当蒸汽质量流量为 400t/h 时, 试求:

- (1) 若略去动能变化, 汽轮机的输出功率为多少千瓦?
- (2) 动能变化对输出功率有多大影响?
- (3) 若汽轮机散热 $6.81 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 时, 对输出功率又有多大影响?

3600

$$\Delta P = \frac{|P - P'|}{P} = \frac{|158.54 - 159.36|}{158.54} = 0.515\%$$

边
式

(3) 当存在散热时, 做功量:

$$Q = (H_2 - H_1) + \frac{m}{2}(c_2^2 - c_1^2) + W_{sh}$$

动能

$$\begin{aligned} W''_{sh} &= \left[(3443.25 - 2009) - \frac{1}{2}(140^2 - 70^2) \times 10^{-3} \right] \times 400 \times 10^3 - 6.81 \times 10^5 \\ &= 57.00 \times 10^7 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\text{汽轮机功率: } P'' = \frac{W''_{sh}}{3600} = 158.36 \text{ kW}$$

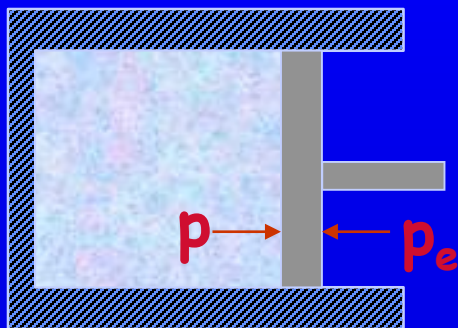
$$\Delta P = \frac{|P - P''|}{P} = 0.114\%$$

通过计算可知, 虽然汽轮机工作中动能差、散热的绝对值较大, 但相对汽轮机输出而言可以小到忽略不计的地步, 对输出的功率影响很小。

5.2 热力过程分析

过程与循环

- **过程**：系统从一个状态向另一个状态变化所经历的全部状态的总和，即系统的状态随时间发生变化。热能和机械能的相互转化需要通过工质的状态变化才能实现。
- **平衡**——宏观的静止状态
- **过程**——变化，即平衡的破坏



$$\Delta P = 0?$$
$$\Delta P \neq 0?$$

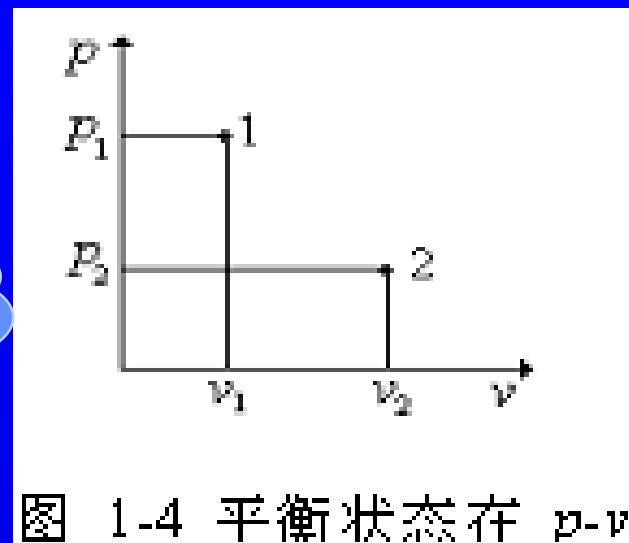


图 1-4 平衡状态在 p - v

准平衡过程

- 如果实际过程变化的时间(如1秒)远大于弛豫时间(约 10^{-3} 秒)，可以认为这个过程进行“无限缓慢”，任意一个中间状态都无限接近于平衡态，即过程中的每一状态都是平衡态。
- **准平衡过程**：系统所经历的一系列状态都无限接近于平衡态。
- 准平衡过程可在状态坐标图上用连续曲线表示。

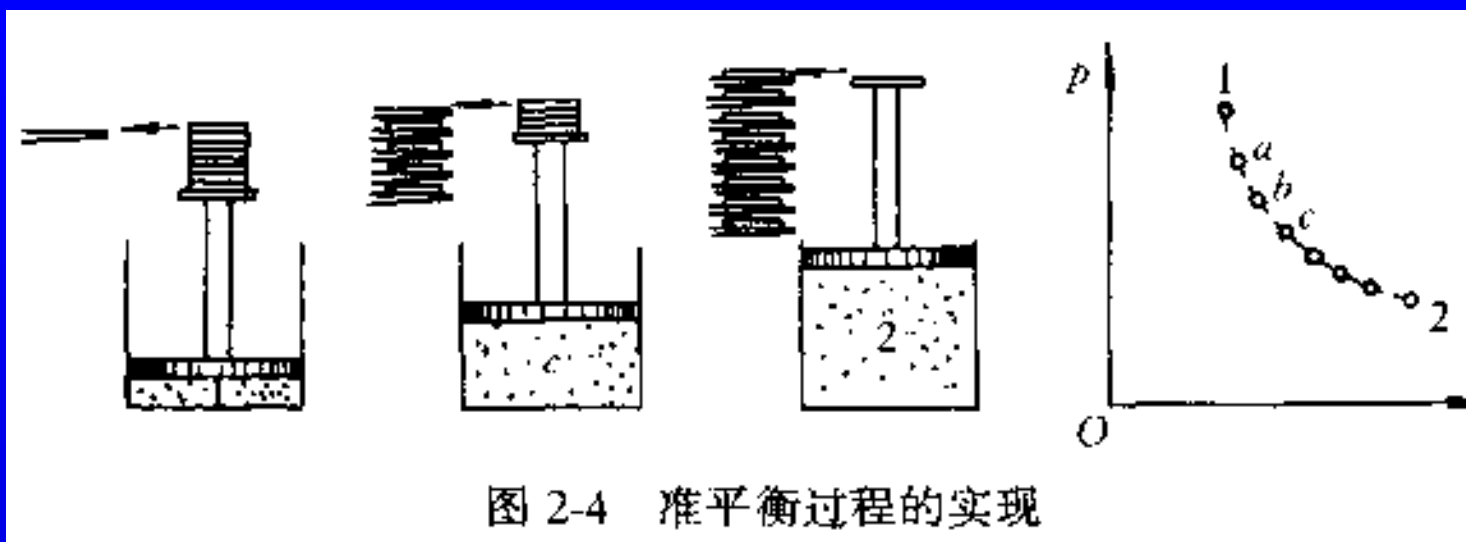


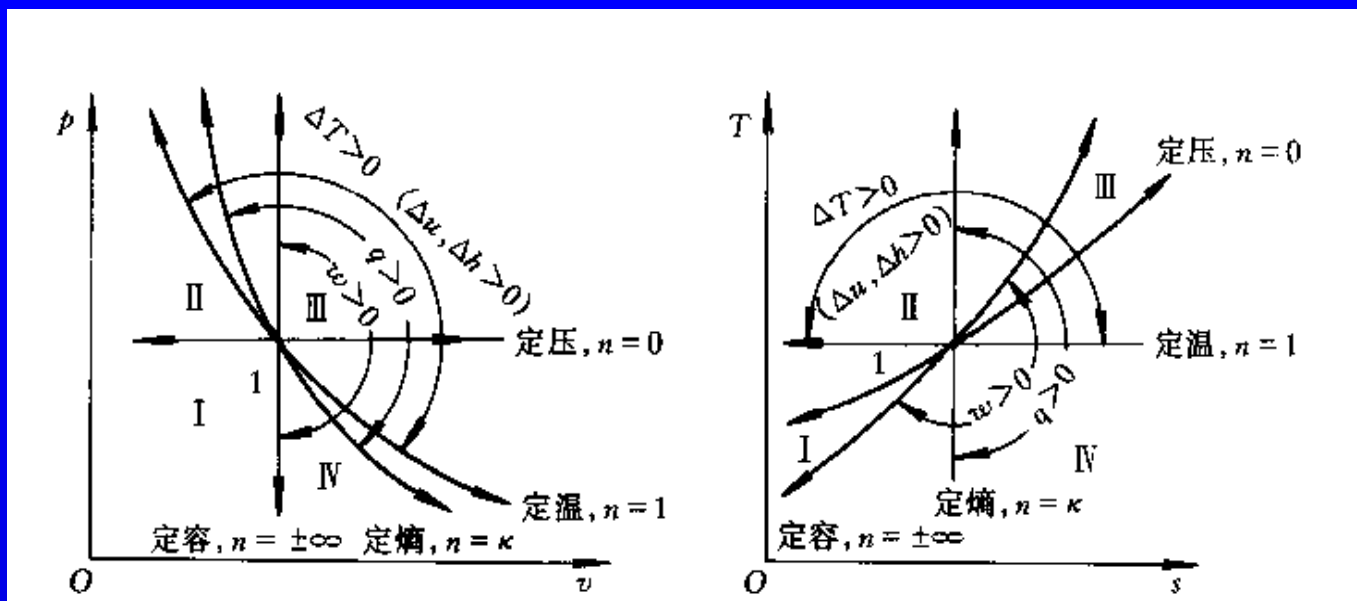
图 2-4 准平衡过程的实现

基本热力过程

- 定压过程: $n=0$, $p=\text{常数}$;
- 定温过程: $n=1$, $pv=\text{常数}$;
- 定熵过程: $n=\kappa$, $pv^\kappa=\text{常数}$;
- 定容过程: $n=\pm\infty$, $v=\text{常数}$ 。

多变过程: $pv^n = \text{常数}$

n 称为多变指数,
在 $0 \sim \pm\infty$ 之间变化。



(a) p-v图

(b) T-s图

例题

例题 5-2:柴油机的气缸吸入 25 升温度为 50°C 的空气,经过绝热压缩,空气的温度要求升高到远超过燃料的点火温度,以便喷入柴油时能随喷随烧。如果要求柴油喷入时气缸内的温度达到 720°C ,问空气体积必须被压缩到多大时才能满足要求? 压缩比是多少?

解:已知 $T_1 = 273 + 50 = 323\text{K}$, $T_2 = 273 + 720 = 993\text{K}$, $V_1 = 25\text{L} = 0.025\text{m}^3$,取空气的绝热指数 $n = \kappa = 1.4$,利用理想气体状态方程,定熵过程中有 $p_1 v_1^{\kappa} = p_2 v_2^{\kappa}$,则 $T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1}$

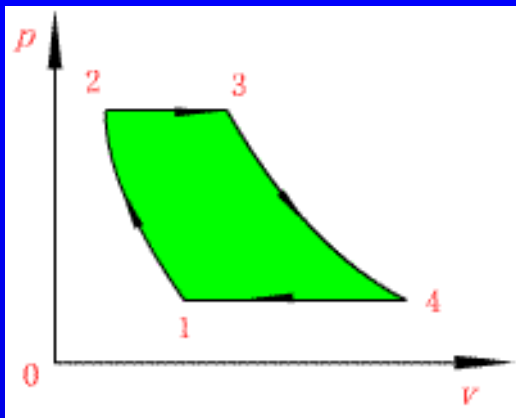
$$V_2 = V_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 0.025 \times \left(\frac{323}{993} \right)^{\frac{1}{0.4}} = 1.52 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

压缩比

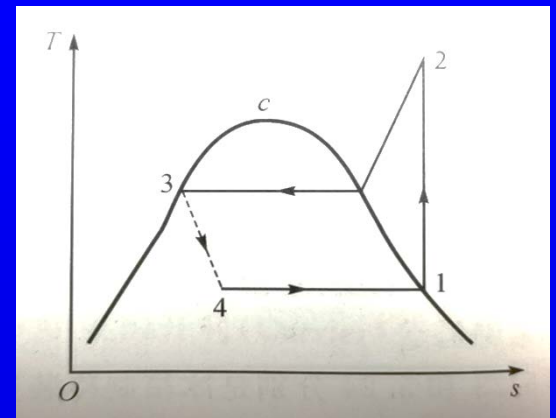
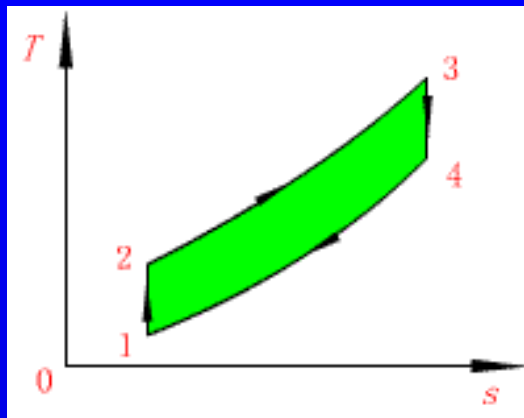
$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{0.025}{1.52 \times 10^{-3}} = 16.5$$

循环

- **循环**：系统从某一初态出发经历一系列过程后又回到初态，形成一个封闭的热力循环过程。
- 一个循环在状态坐标图上可以用封闭的一组曲线表示，其中每一段连续曲线表示一种过程。
- **做功循环**：动力循环——顺向循环——顺时针循环
- **耗功循环**：制冷循环——逆向循环——逆时针循环



顺向循环



逆向循环

循环的经济性指标

实验表明：热力系经历一循环过程回到初态时，系统在整个循环中从外界吸入(或放出)的热量等于其对外完成的(或得到的)功量。

$$\oint (\delta Q - \delta W) = 0$$

循环的经济性指标：热效率 $\eta_t = w_{\text{net}} / q_1$

或 制冷系数 $\varepsilon = q_2 / w_{\text{net}}$

或 供暖系数 $\varepsilon' = q_1 / w_{\text{net}}$

q1: 从高温热源获取能量

q2: 从低温热源获取能量

卡诺循环



- 定理一：不可能制造出在两个温度不同的热源间工作的热机，而使其效率超过在同样热源间工作的可逆热机。
- 定理二：在两个热源间工作的一切可逆热机具有相同的效率。

卡诺循环

—简单而理想的可逆热机循环

- 1—2 为 T_1 下的定温吸热过程;
- 2—3 为绝热膨胀过程;
- 3—4 为 T_2 下的定温放热过程;
- 4—1 为绝热压缩过程

$$W = Q_1 - Q_2$$
$$\eta_c = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

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

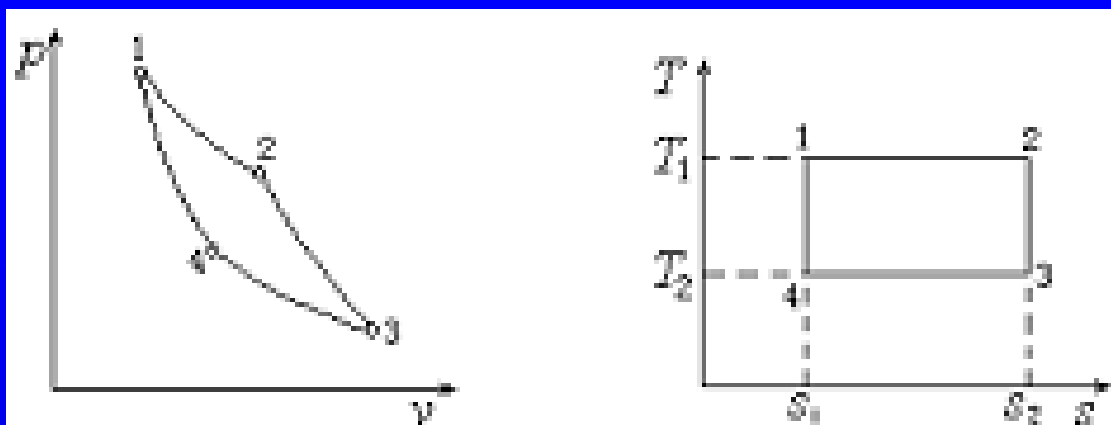


图 4-3 卡诺循环示意图

卡诺逆循环(理想制冷循环)

- 1—4 为绝热膨胀过程
- 4—3 为 T_2 下的定温吸热过程;
- 3—2 为绝热压缩过程;
- 2—1 为 T_1 下的定温放热过程;

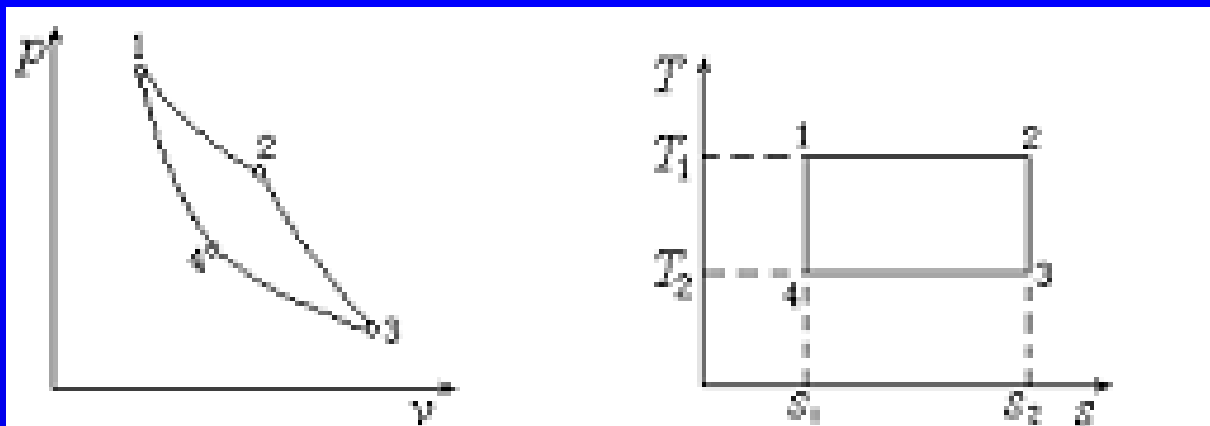


图 4-3 卡诺循环示意图

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$\varepsilon_c = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

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

5.3 动力装置

内燃机循环（汽油机）——奥托循环

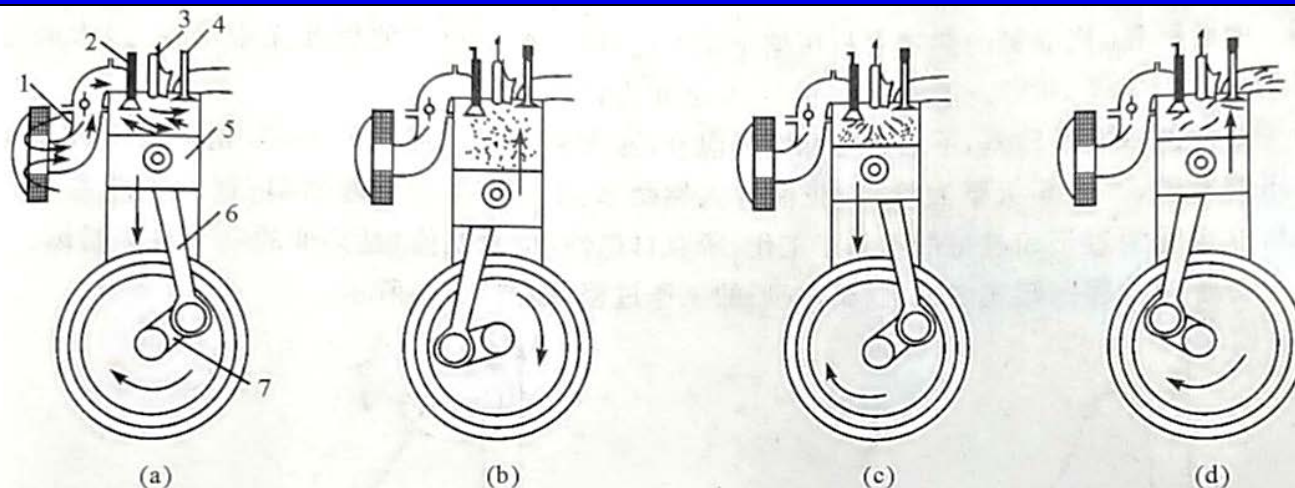


图 5.9 单缸四冲程汽油机工作原理图

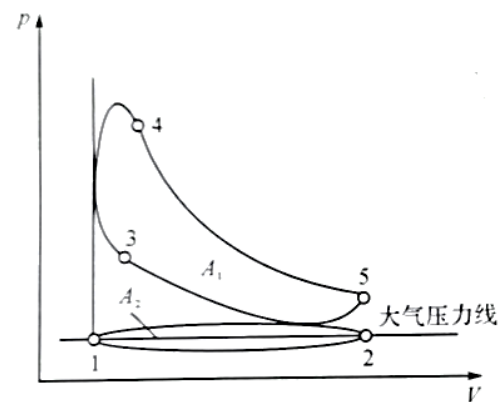
1—化油器；2—进气阀；3—火花塞；4—排气阀；5—活塞；6—连杆；7—曲轴

第一冲程：进气冲程——1—2 等压进气(空气)过程(图 5.10)；

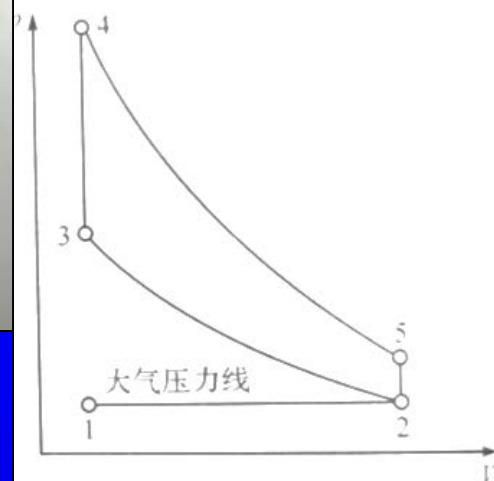
第二冲程：压缩冲程——2—3 绝热压缩过程(图 5.10)；

第三冲程：做功冲程——3—4 定容燃烧(加热)过程及 4—5 绝热膨胀过程(图 5.10)；

第四冲程：排气冲程——5—2 定容放热过程(图 5.10)。



(a) 实际示功图



(b) 理论示功图

2-3定熵压缩

→ **3-4定容加热**

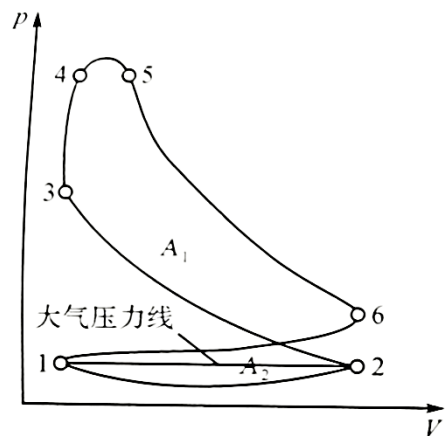
→ **4-5定熵膨胀**

→ **5-2定容放热**

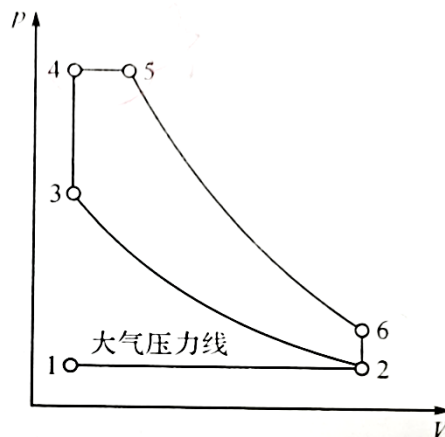
$$\eta_i = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

设备安全的前提下压缩比越大效率越高

柴油机循环——萨巴德循环



(a) 实际示功图



(b) 理论示功图

图 5.11 四冲程压燃式内燃机的示功图

第一冲程：进气冲程——1—2 等压进气(空气)过程(图 5.11)；

第二冲程：压缩冲程——2—3 绝热压缩过程(图 5.11)；

第三冲程：做功冲程——3—4 定容燃烧过程、4—5 定压燃烧过程和 5—6 绝热膨胀过程

第四冲程：排气冲程——6—2 定容放热过程(图 5.11)。

- 2-3 定熵循环
- 3-4 定容加热
- 4-5 定压加热
- 5-6 定熵膨胀
- 6-2 定容放热

与点燃式类似,可以得到混合加热循环热效率

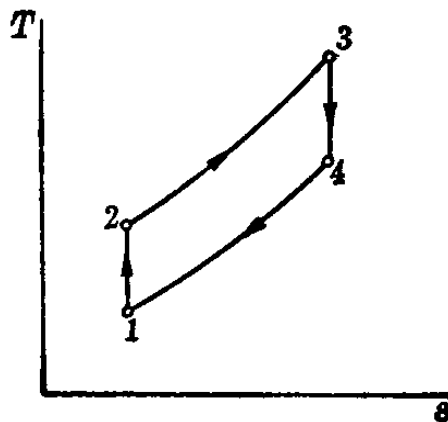
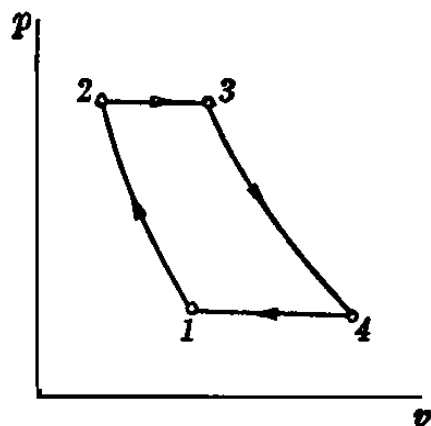
$$\eta_i = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{\kappa} - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)} \quad (5-21)$$

其中 $\lambda = \frac{p_4}{p_3}$ 为“定容升压比”,是第三冲程中定容燃烧过程中压力的提升幅度; $\rho = \frac{v_5}{v_4}$ 为

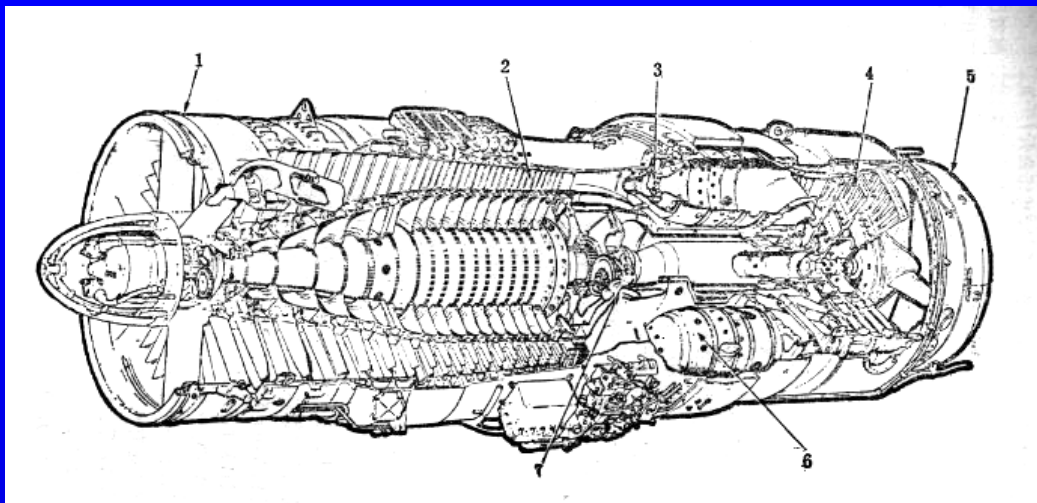
“定压预胀比”,是第三冲程中定压燃烧过程中容积增大的幅度; $\epsilon = \frac{v_2}{v_3}$ 为“压缩比”,是内燃机

在第二冲程中绝热压缩过程中的压缩比。

燃气轮机系统——布雷顿循环



- ⑩ 1-2 可逆绝热压缩 (压气机)
- ⑩ 2-3 可逆定压加热 (燃烧室)
- ⑩ 3-4 可逆绝热膨胀 (燃气轮机)
- ⑩ 4-1 可逆定压放热 (排气)



$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{1}{\beta^{(\kappa-1)/\kappa}}$$

火力发电厂——朗肯循环

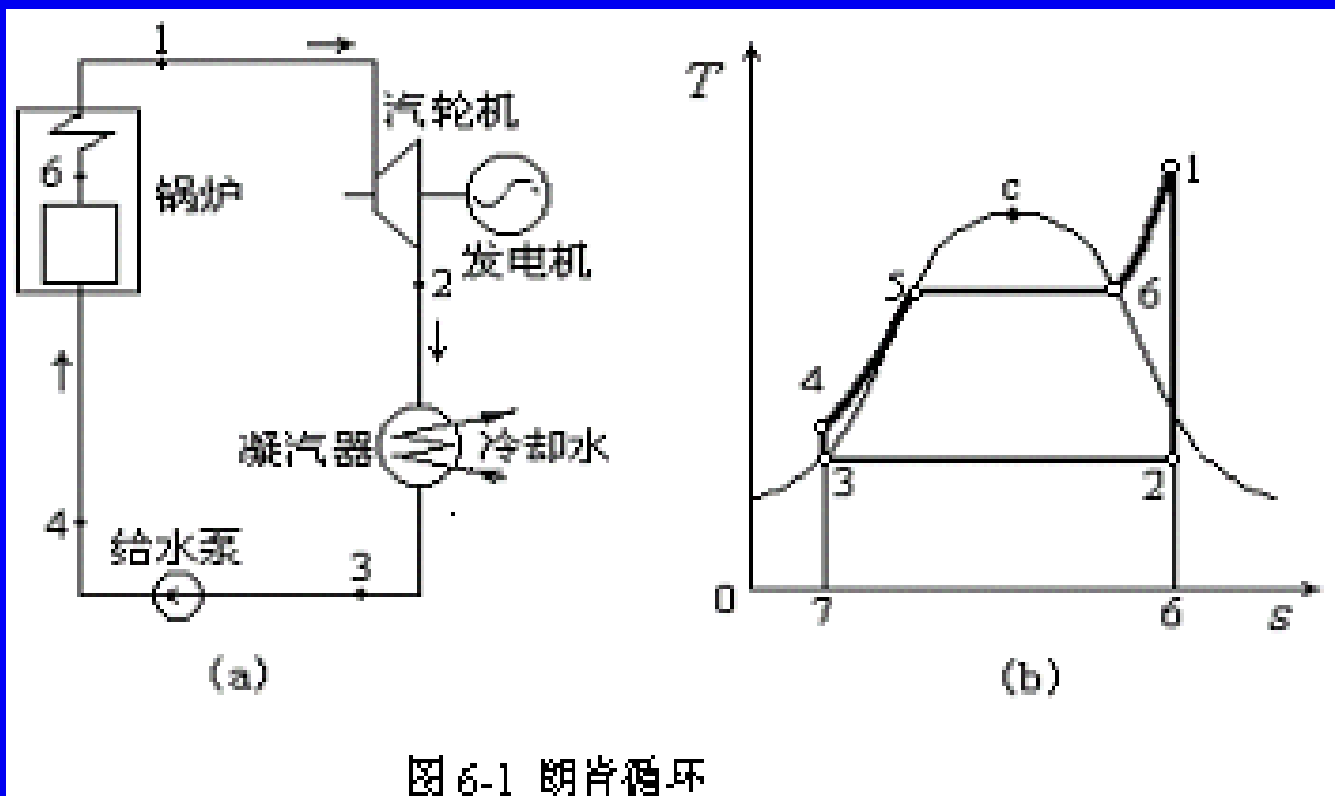
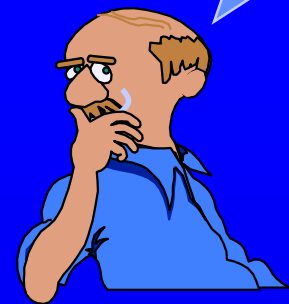


图 6-1 朗肯循环

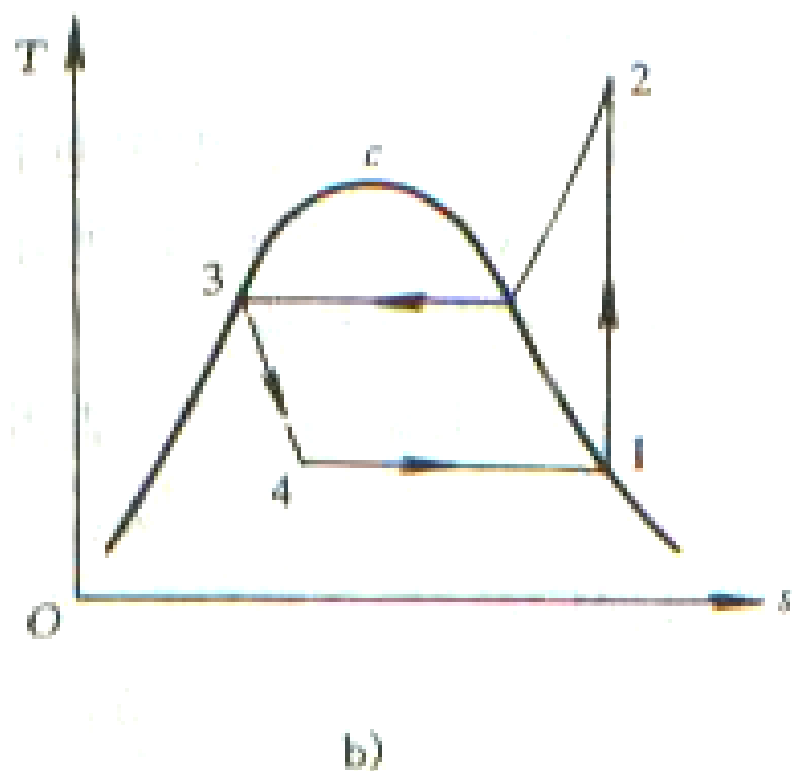
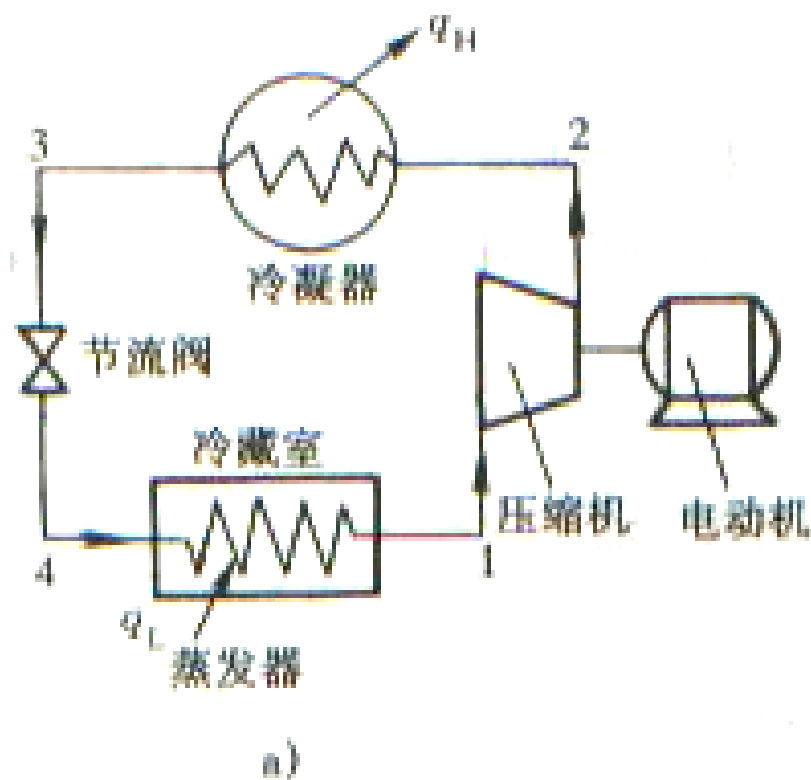
我又要电又要热如何？



- 1-2: 可逆绝热膨胀（汽轮机） 2-3: 可逆定压放热（凝汽器）
- 3-4: 可逆绝热压缩（泵） 4-1: 可逆定压吸热（锅炉）

5.4 制冷装置与热泵

压缩蒸汽制冷循环



1-2可逆绝热压缩（压缩机）→2-3可逆定压放热（冷凝器）
→3-4: 节流过程（节流阀）→4-1: 可逆定压吸热（蒸发器）

压缩蒸汽制冷循环



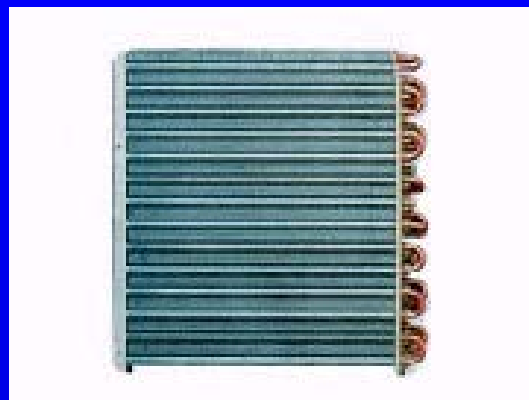
压缩机



冷凝器



膨胀阀



蒸发器

吸收式制冷循环

$\text{LiBr-H}_2\text{O}$ (吸收剂—制冷剂)

$\text{H}_2\text{O-NH}_3$

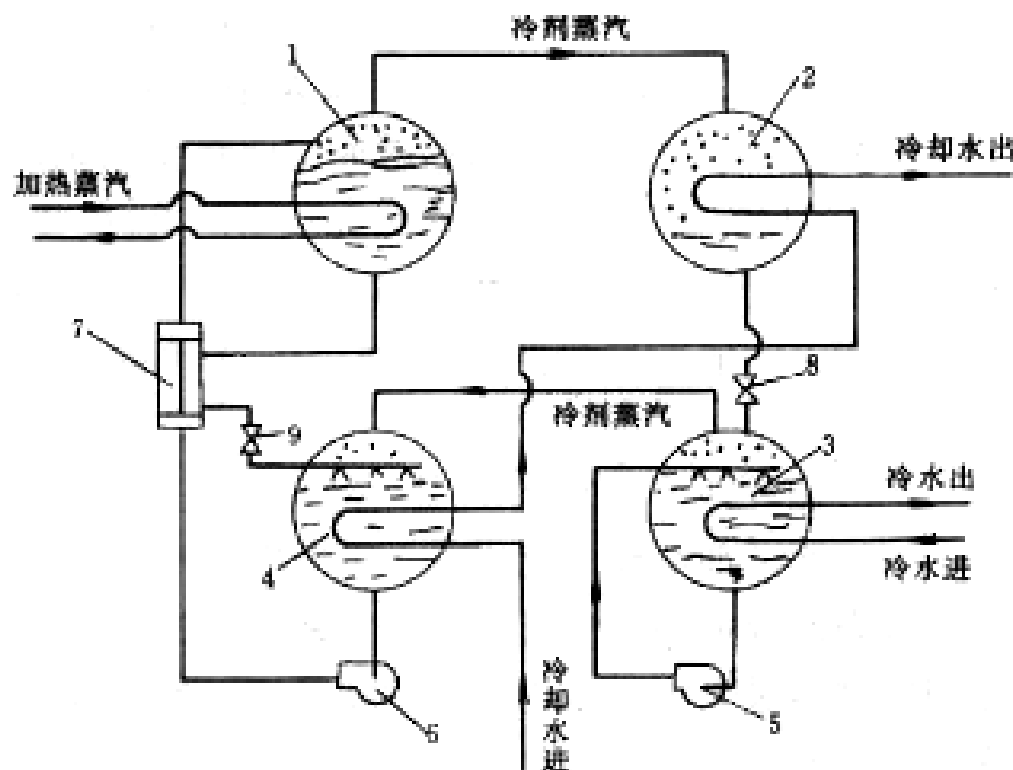


图 2-1 吸收式制冷机基本组成及工作原理

1—发生器；2—冷凝器；3—蒸发器；4—吸收器；5—冷剂泵；

6—溶液泵；7—热交换器；8—节流阀；9—减压阀

热泵

通过消耗一部分

功把热量由低温

处转移到高温处，

热泵循环本身是

制冷循环。

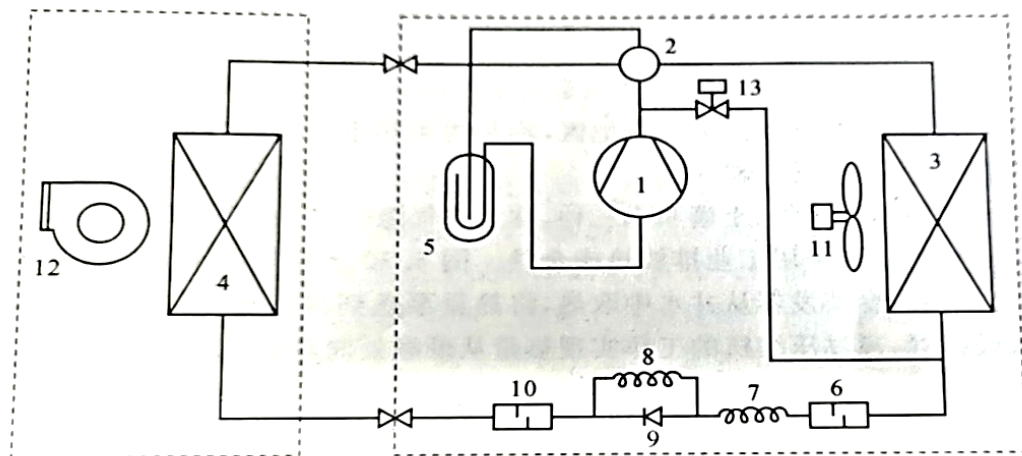


图 5.28 家用分体热泵空调器原理图

1—压缩机；2—四通换向阀；3—室外换热器；4—室内换热器；5—液体分离器；6—过滤器；
7—主毛细管；8—副毛细管；9—单向阀；10—过滤器；11—室外机风机；
12—室内机风机；13—融霜电磁阀

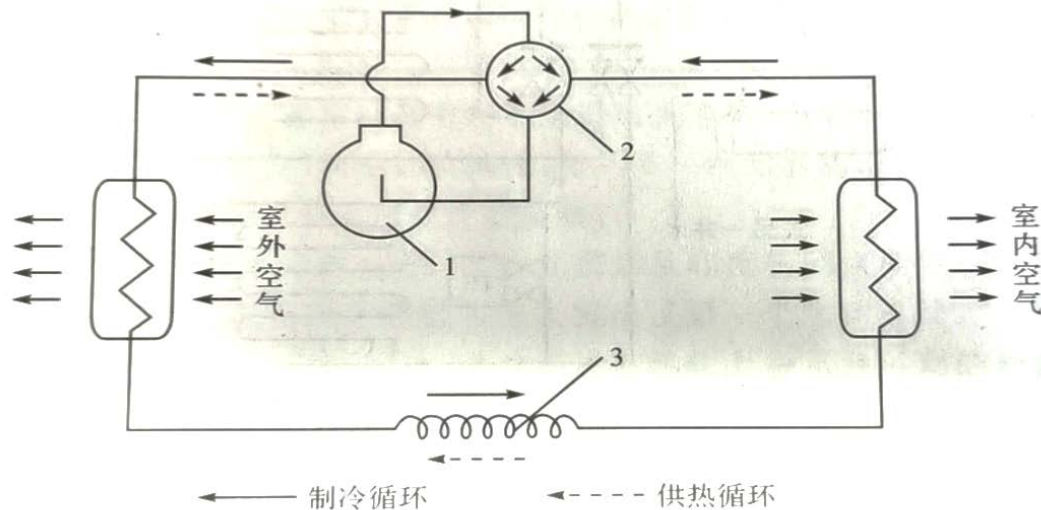


图 5.29 热泵型冷暖空调系统简图

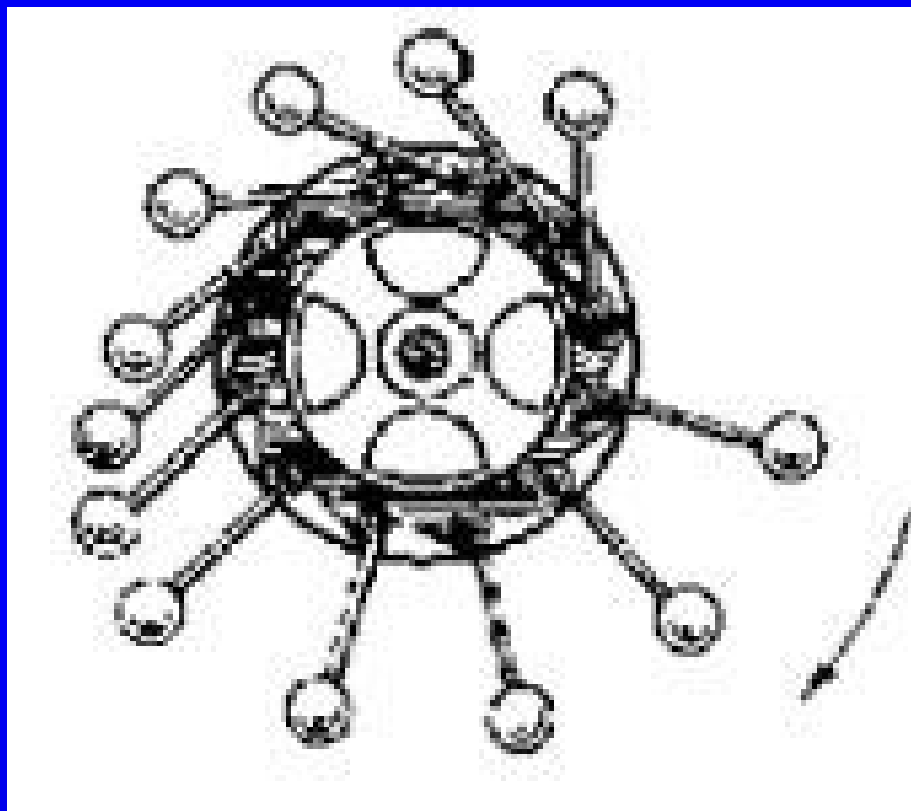
1—压气机；2—四通换向阀；3—毛细管节流装置

热泵简介

- <https://haokan.baidu.com/v?vid=12967644533594029847&pd=bjh&fr=bjhauthor&type=video>

5.5 永动机

永动机真的永动吗？



- 早期最著名的一个永动机设计方案是十三世纪时一个叫亨内考的法国人提出来的。





- (左)一个关于永动机的错觉图。尽管水没有动力，但却在无休止流动。
- (右)德国博士奥尔菲留斯**1717**年发明了一种叫自动轮的永动机

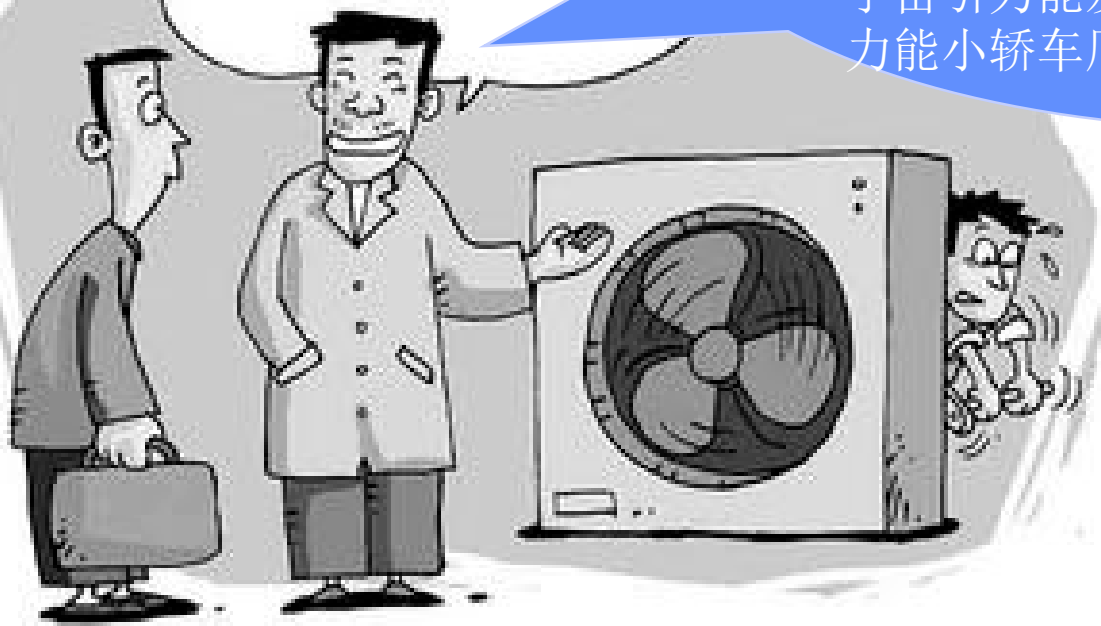
中国古代玩具“饮水鸟” ——“爱因斯坦也吃惊的玩具”。



2004十大科技骗局之六： ——宇宙引力能永动机

我梁星人12月27日要在珠海度假村酒店千禧宫举办“永动机问世全球性新闻发布会”，届时将邀请安南、布什、普京、布莱尔等……海南星人永动机发电厂有限公司将建设装机总容量300万KW的宇宙引力能发电厂及年产10万辆宇宙引力能小轿车厂项目。

我这台机器不用
任何能源就能转！



第二类永动机

- 第二类永动机的模型：电、磁、布朗运动、虹吸、纯机械式、半透膜、溶液扩散作用等。
- 如：在一个引力场中, 建一座极高的水塔, 内装均匀溶液. 在塔顶建一装置使溶质与水分离, 分离出来的水倒入溶液, 而分离出来的溶质 (密度比溶液大) 密封后从塔顶自由落到塔底 (在溶液中下落), 撤除密封, 让溶质重新回到溶液中, 等待扩散完成后开始下一个周期.

热源动力机

- 专利申请号：ZL200610043909.0
- 称根据流体力学中的伯努利定理开发一种能源消耗小、用途广泛和受环境制约小的热源动力机。
- 该动力装置是由原动机、固定格栅、筒状壳体及旋转体组成，高速转动的原动机通过轴带动旋转体转动，旋转体底部的格栅使下部流体旋转起来，底板的上表面压力下降，而下表面压力基本不变，因此上下表面之间产生压力差，使底板获得向上的运动的动力。旋转体的上表面与下表面也产生压力差，使旋转体获得向上的动力。
- 原动机的动力抵消了轴摩擦阻力和流体阻力并保持旋转速度。
- 但这种热源动力是否能大于原动机的动力呢？



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200610043909.0

[43] 公开日 2006 年 10 月 25 日

[11] 公开号 CN 1851262 A

[22] 申请日 2006.4.30

[21] 申请号 200610043909.0

[71] 申请人 庄永涛

地址 250100 山东省济南市历城区二环东路
中段 2668 号

[72] 发明人 庄永涛 宋承凡

权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 1 页

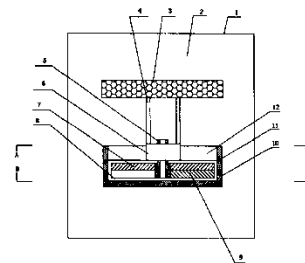
[54] 发明名称

热源动力机

[57] 摘要

本发明的目的是根据流体力学中的伯努利定理开发一种能源消耗小、用途广泛和受环境制约小的热源动力机。其结构是一个动力装置，通过浮体悬浮在流体环境中，该动力装置是由原动机、固定格栅、筒状壳体及与原动机连接在一起的旋转体组成，原动机通过固定格栅与筒状壳体的上端固定在一起，原动机的空心轴下端连接有一底部设置阻尼格栅的旋转体，旋转体底部的阻尼格栅与筒状壳体底部的光滑底板相对作旋转运动。旋转体旋转时，旋转体下部的流体随旋转体一起旋转。这时，旋转体与旋转体下部流体相对运动速度接近为零，根据伯努利定理，旋转流体对旋转体下表面的压强基本不变；旋转体上部流体因受固定格栅的阻尼，旋转速度较小，旋转体上部流体与旋转体产生相对旋转速度，旋转体上部的流体对旋转体的上表面的压强

随相对运动速度加快而减小；旋转体的上表面与下表面产生压力差，此压力差使旋转体获得运动的动力。



无偏二极管

- **2004年7月27日**徐业林等人在美国获得“平行板二极管”的专利(专利号**6.768.177**), 据称获得了俄、英、美、中**4**国的发明专利。
- 不需要外加电能、化学能、太阳能等能量, 只要环境温度高于**-273℃**, 通过特定设计形成不对称(两块金属板中一块是光滑的铬层, 另一块上布满了小坑, 中间夹半导体硅层), 即能从外界环境吸取热量, 将半导体中电子的无序热运动转化成有序的流动, 该器件就能输出电流。坑的直径愈小电流愈大, 如果能将坑的直径缩小到现在的**1%**, 输出的电流就有可能带动家用小型汽车。——《无偏二极管的实验与分析》《导弹与航天运载技术》**2000年NO.3**。
- **2004年12月2日**《光明日报》头版登出“无偏二极管有望开辟新的能源出路”的报道。

- <https://haokan.baidu.com/v?vid=15854934382629650663&pd=bjh&fr=bjhauthor&type=video>
- <https://haokan.baidu.com/v?vid=9703467871448349235&tab=>
- <https://haokan.baidu.com/v?vid=8367136123405711590&pd=bjh&fr=bjhauthor&type=video>

讨论题及作业题

- 对永动机问题你是怎么看的？
- 谈谈现实中你所听到或看到的永动机的例子。
- 习题： 5---1, 6, 8, 10