

2-4 热集成技术基 础及应用

一、概述

过程工业生产中，一些物流需要加热，一些物流需要冷却，我们希望合理匹配物流，充分利用热物流去加热冷物流，尽可能地减少公用工程加热和冷却负荷，以提高系统的热回收能力和投资费用。换热网络的主要作用就是在各种条件允许的情况下，尽可能经济地回收所有过程物流的有效能量，以减少公用工程的耗能量。

换热网络设计和优化方法

◆ 数学规划方法

◆ 夹点技术

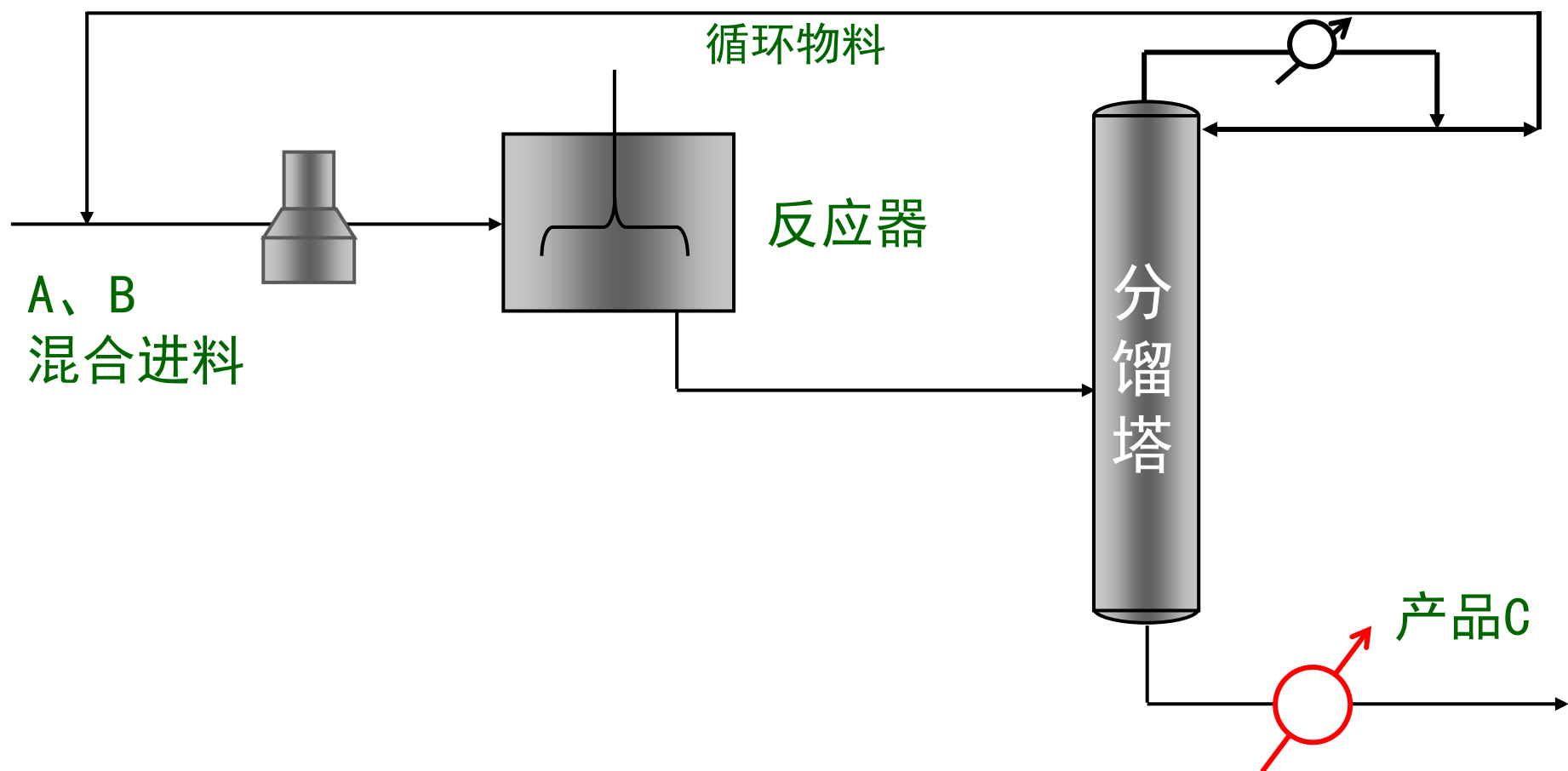
可以用来做什么?
怎么做?

◆

夹点技术的优势

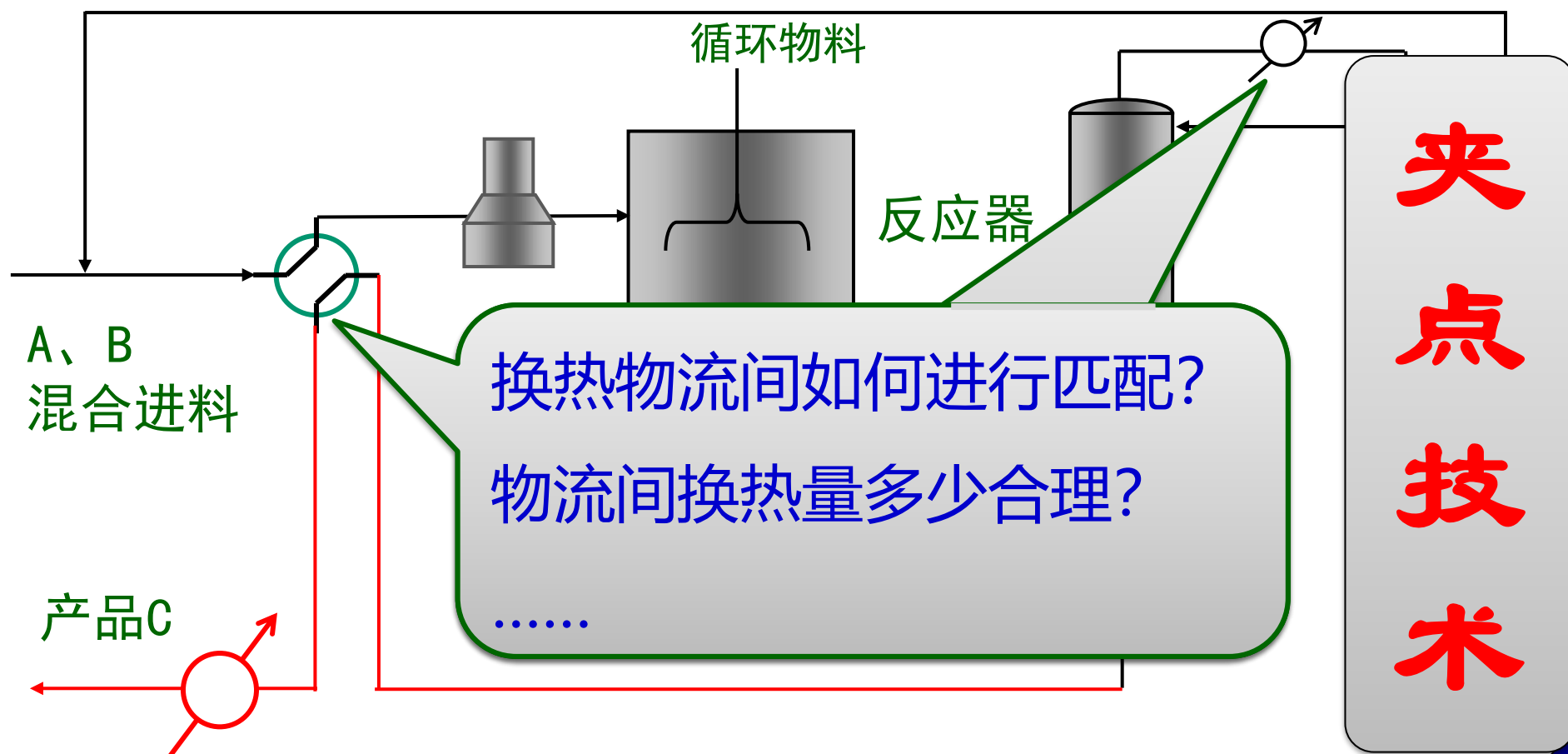
- 是热集成技术发展的基础之一；
- 是过程能量系统综合优先选择的方法；
- 对于复杂大系统的热集成具有直观和实用的优势。

典型石化、化工过程构成



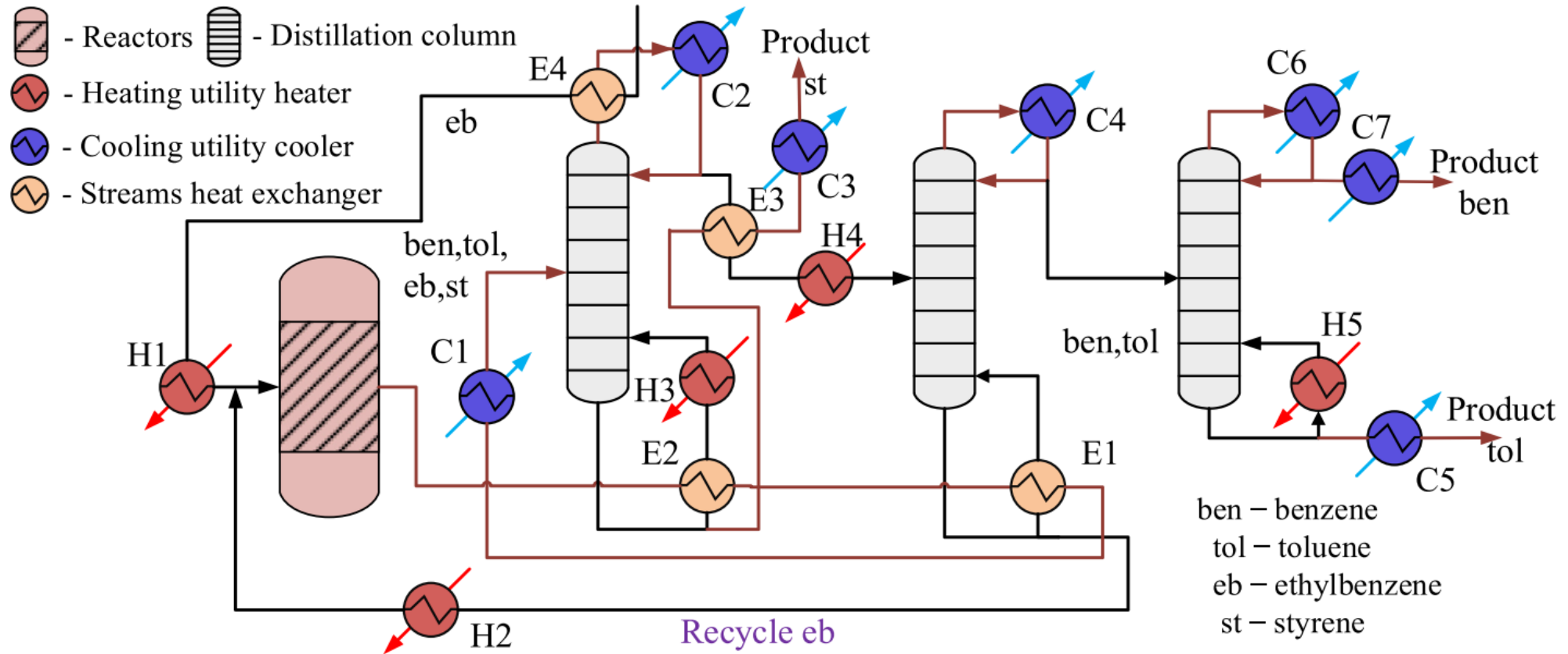
原料 → 加热 → 反应 → 分离 → 冷却 → 产品

典型化工过程构成

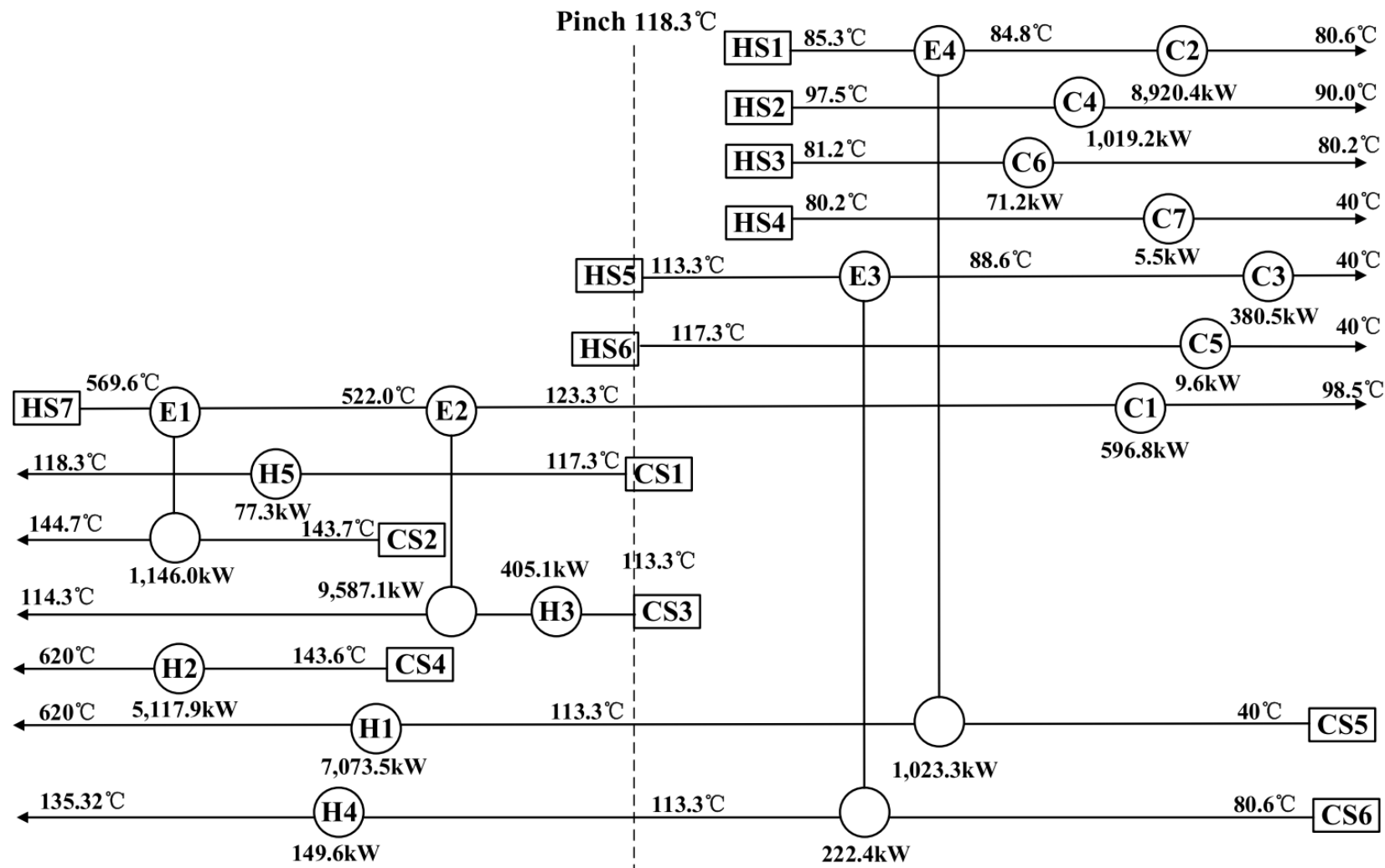


原料 → 换热 → 加热 → 反应 → 分离 → 换热 → 冷却 → 产品

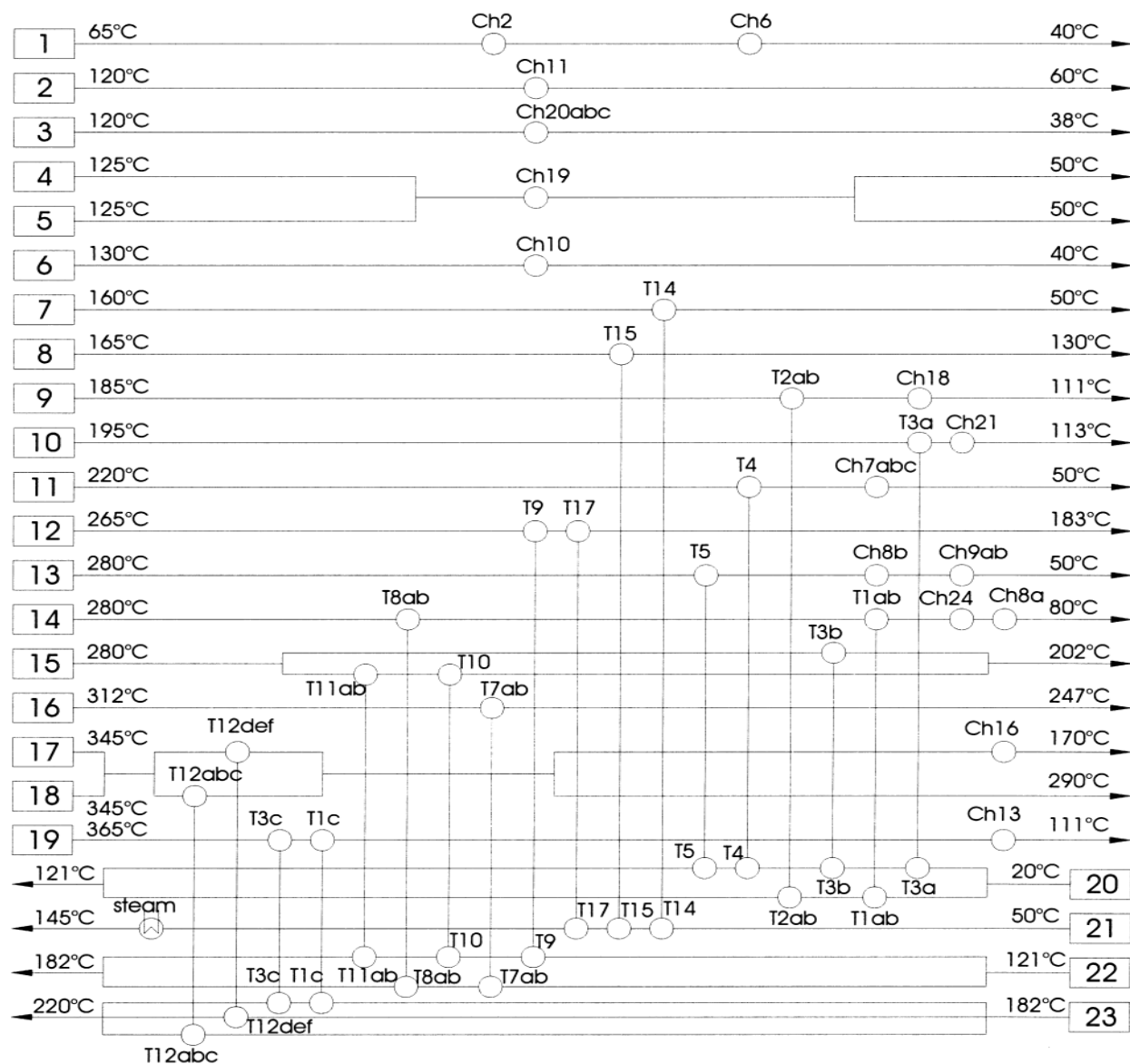
原油蒸馏过程



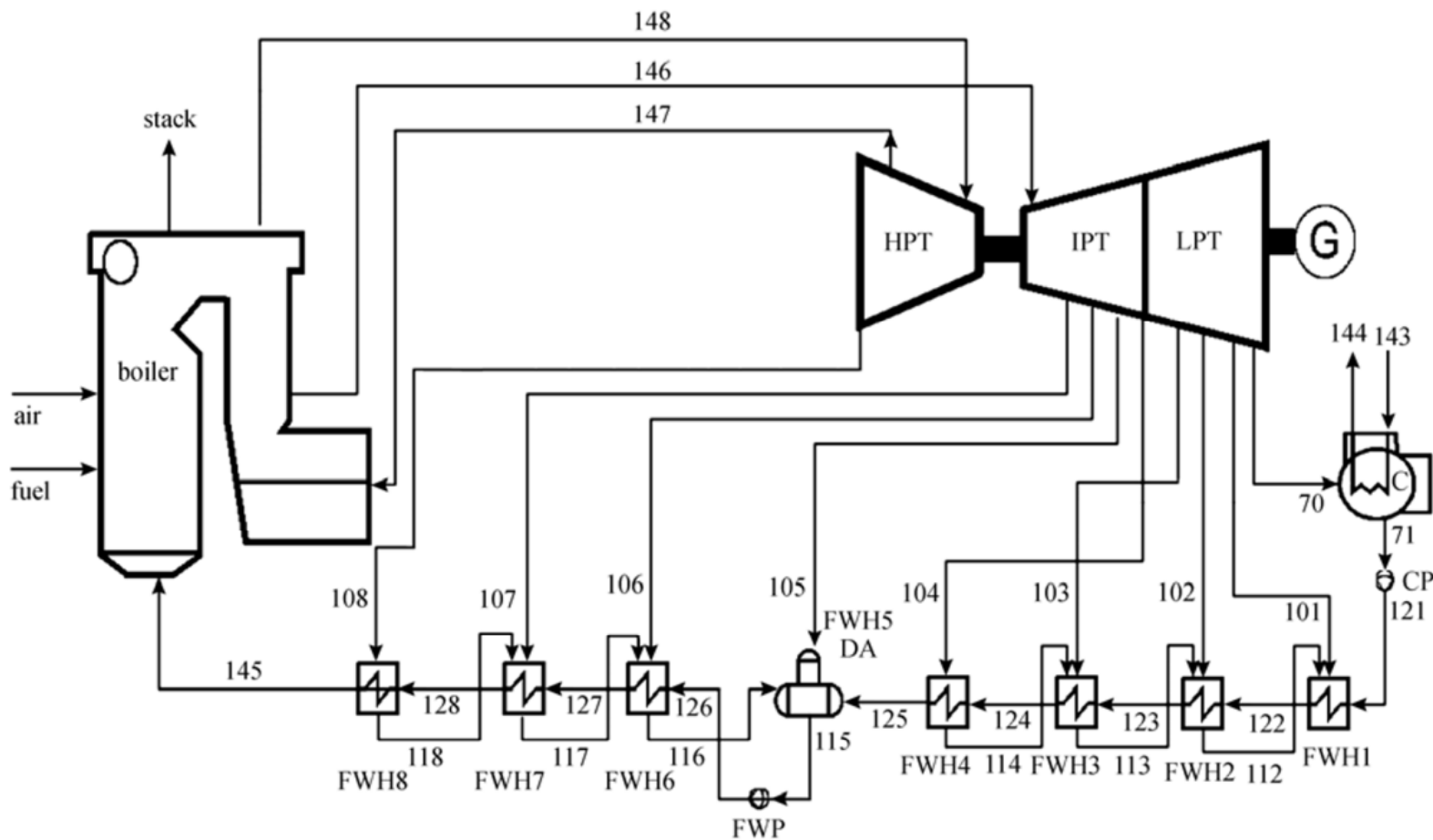
原油蒸馏过程换热网络



原油蒸馏换热网络

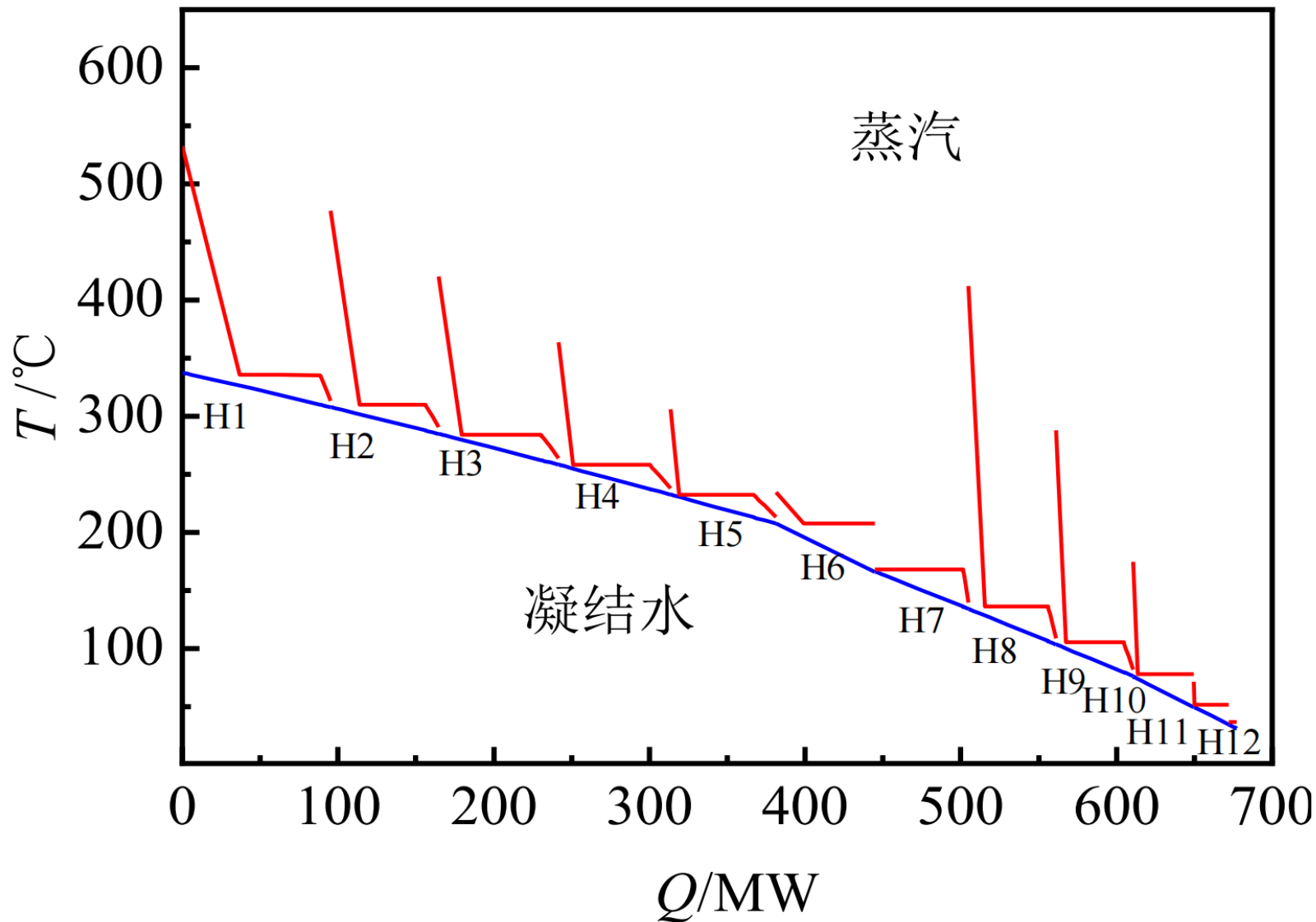


热力循环过程

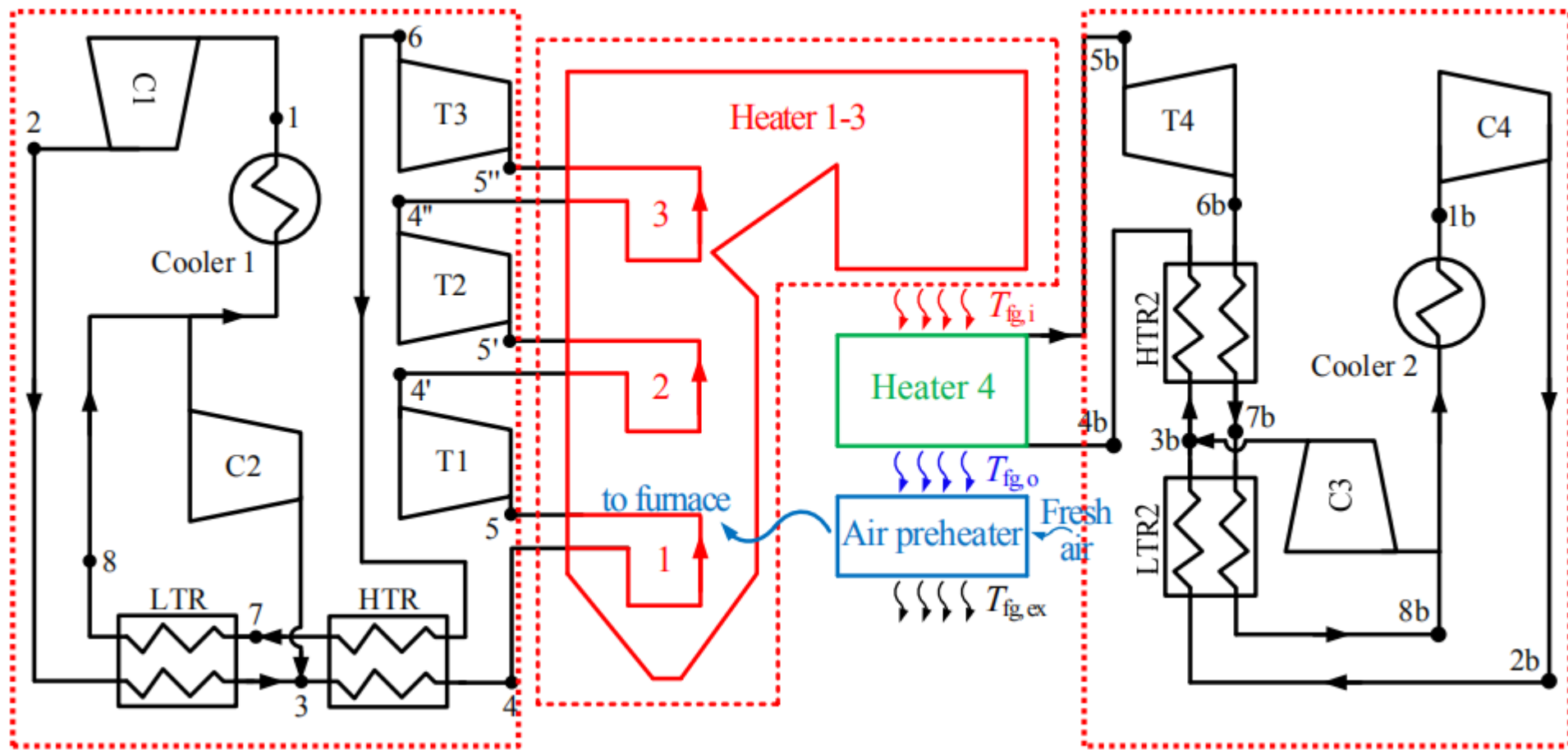


蒸汽动力循环

热力循环过程集成

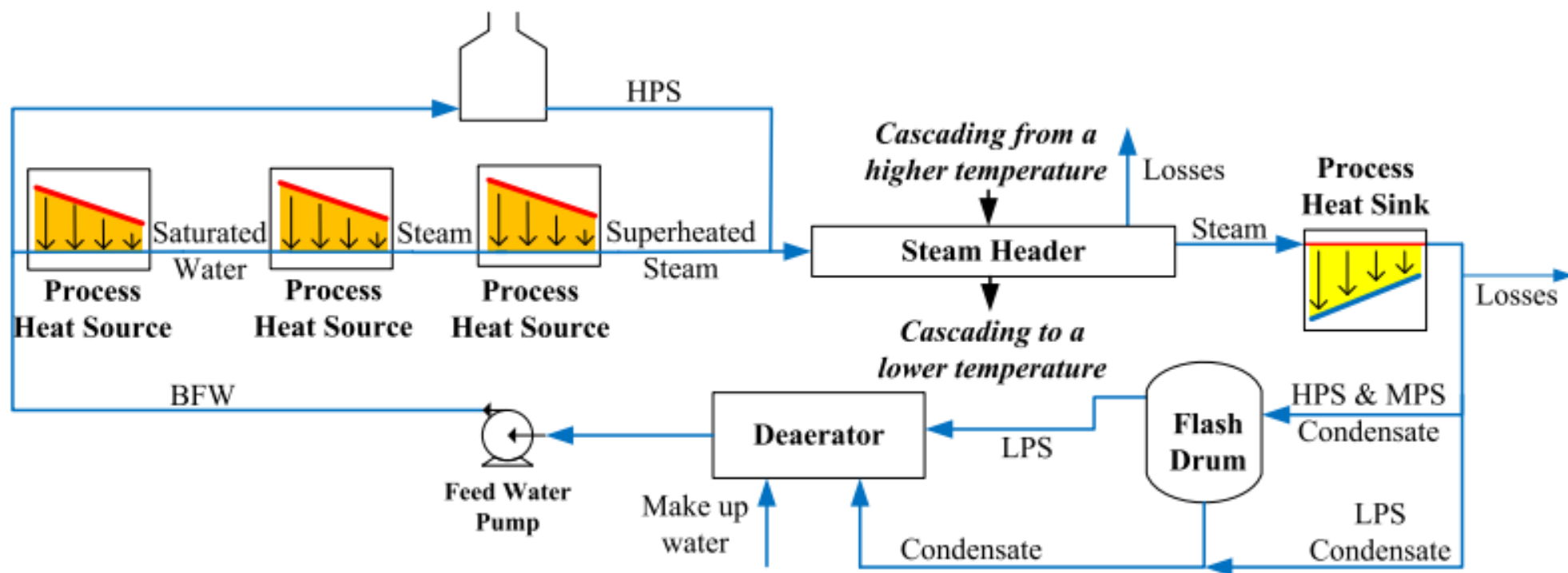


热力循环过程



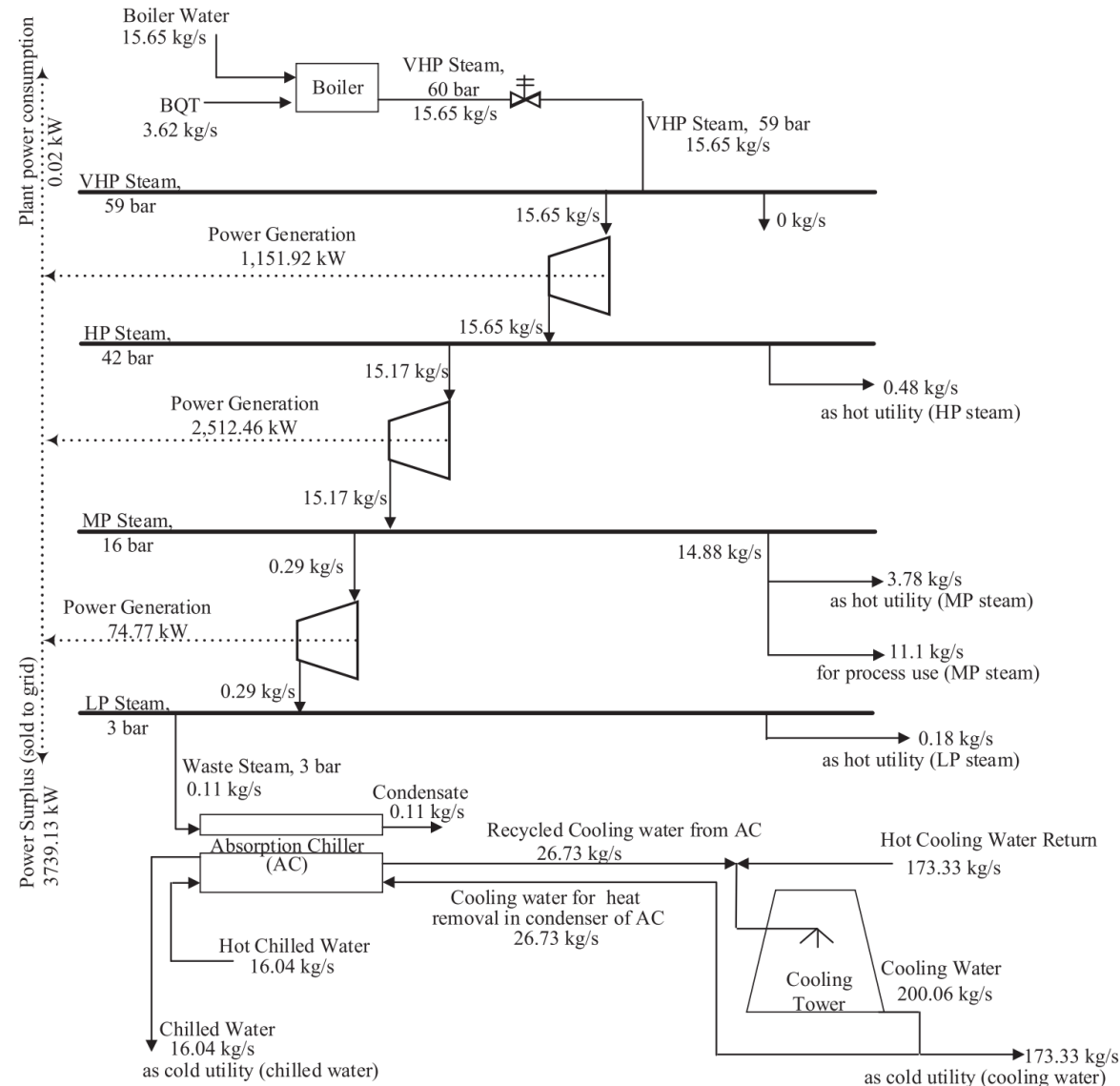
CO₂发电循环

热力循环过程

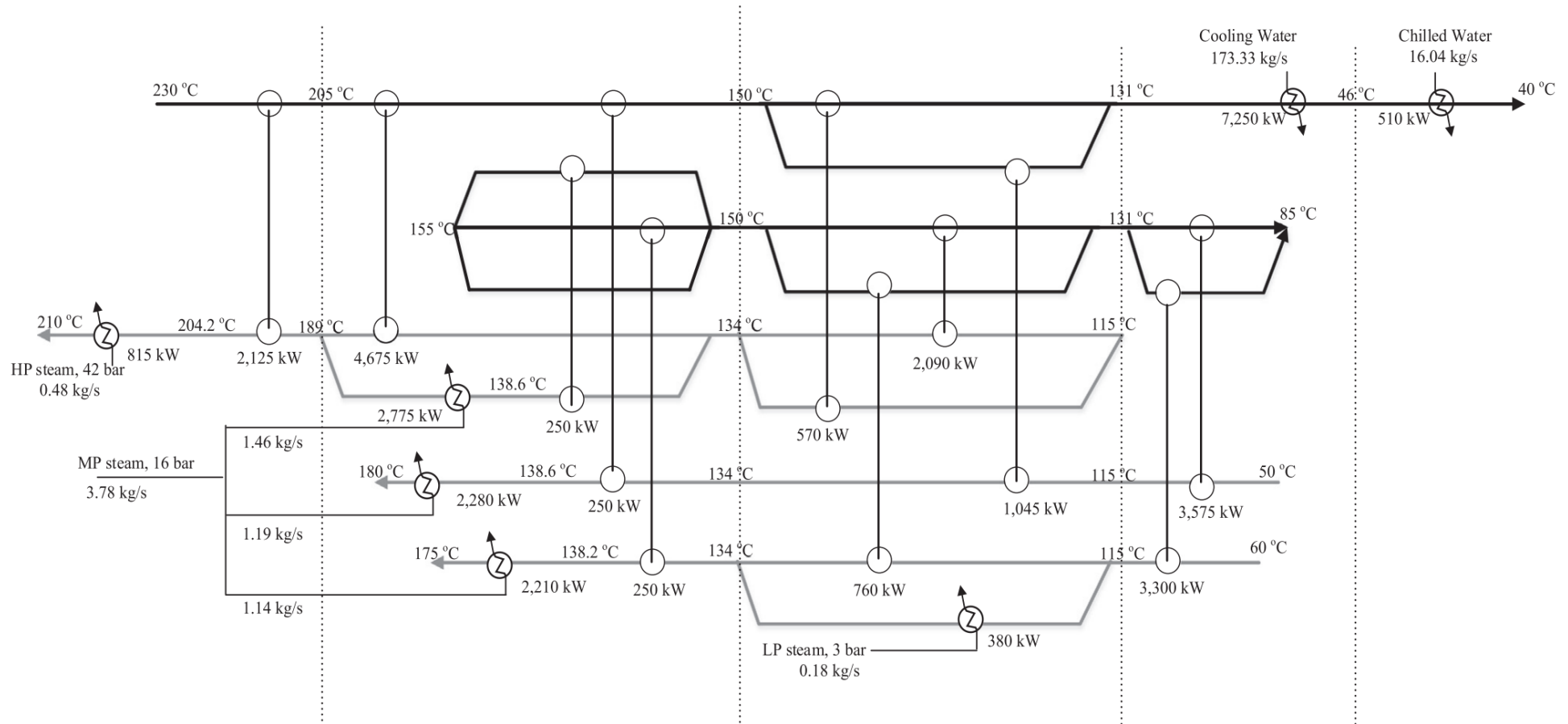


蒸汽动力循环循环

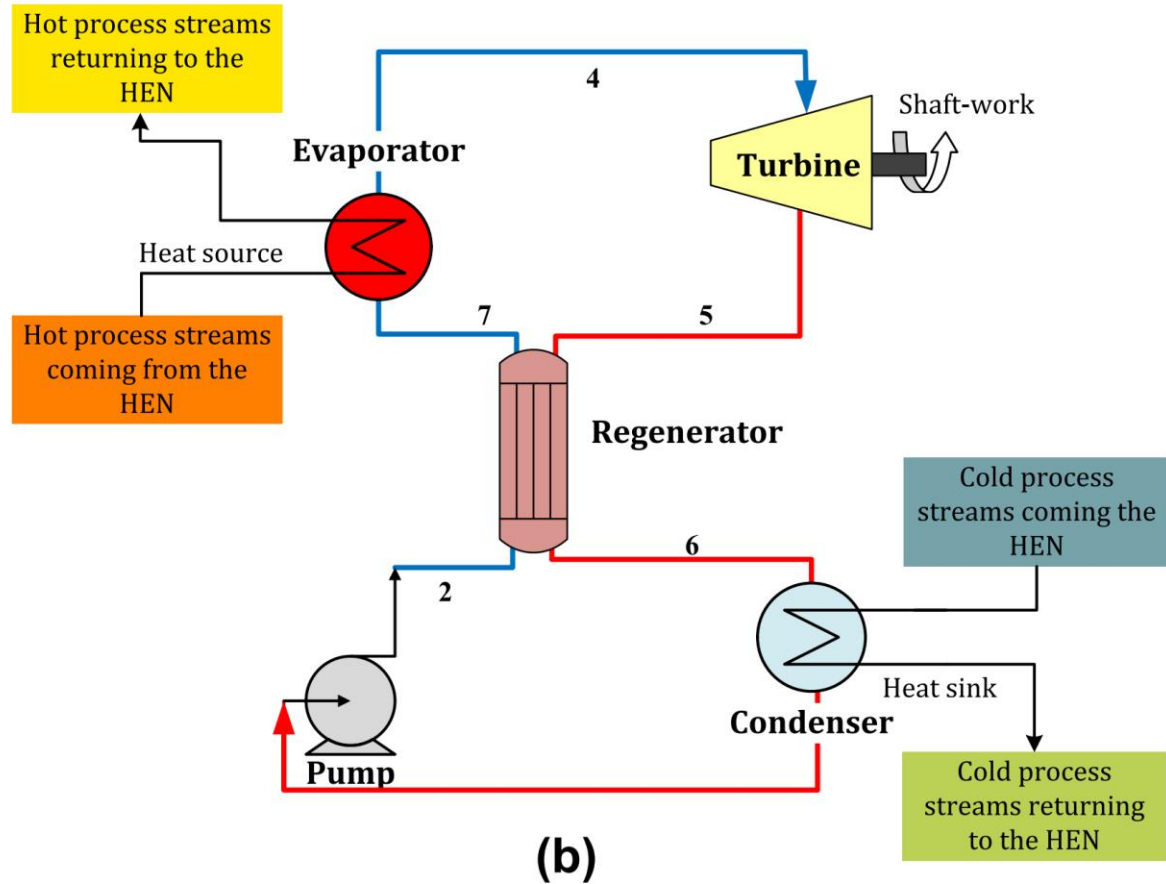
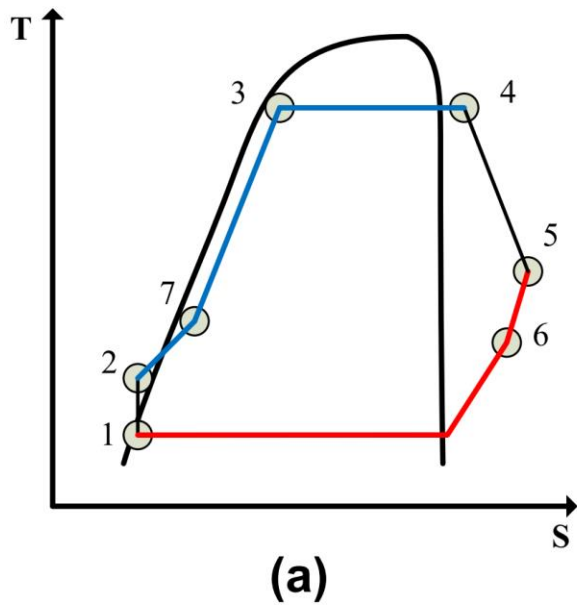
热力循环过程



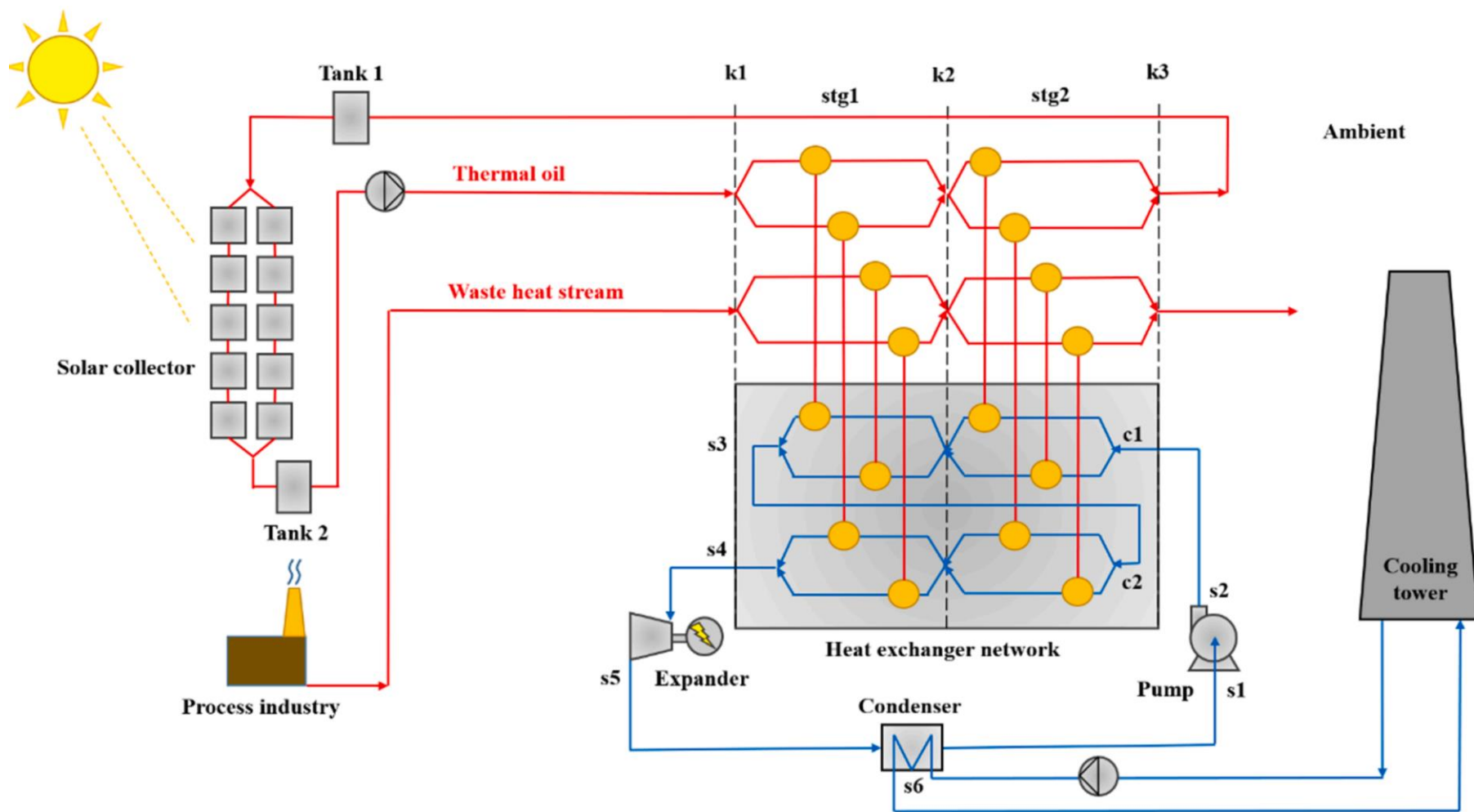
热力循环过程换热网络



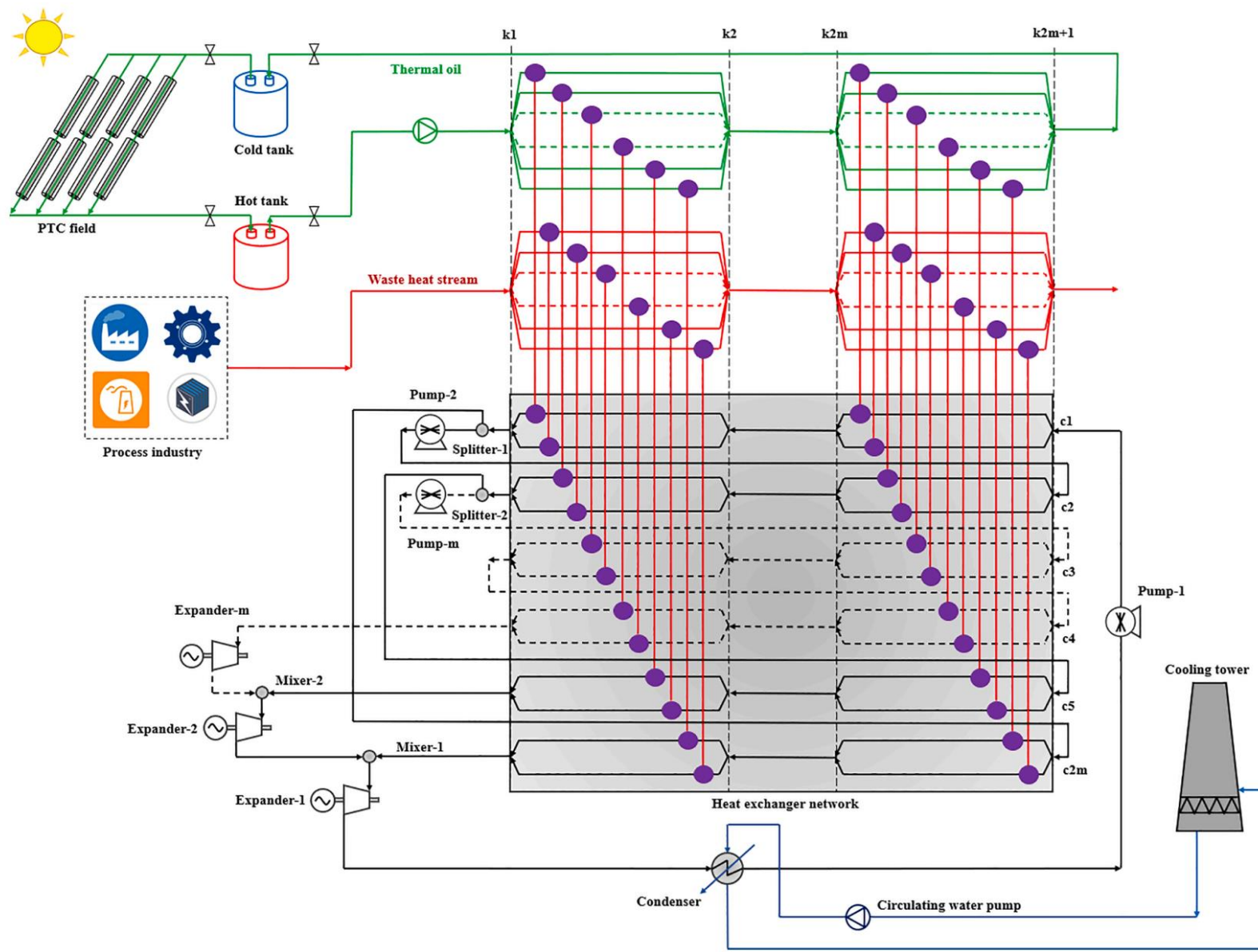
热力循环与过程集成



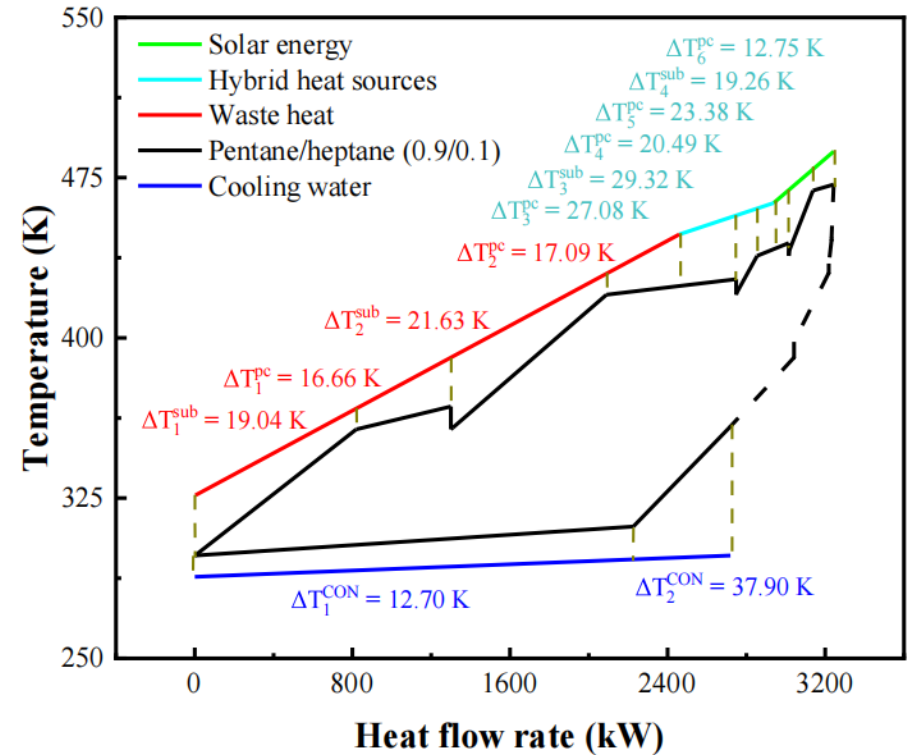
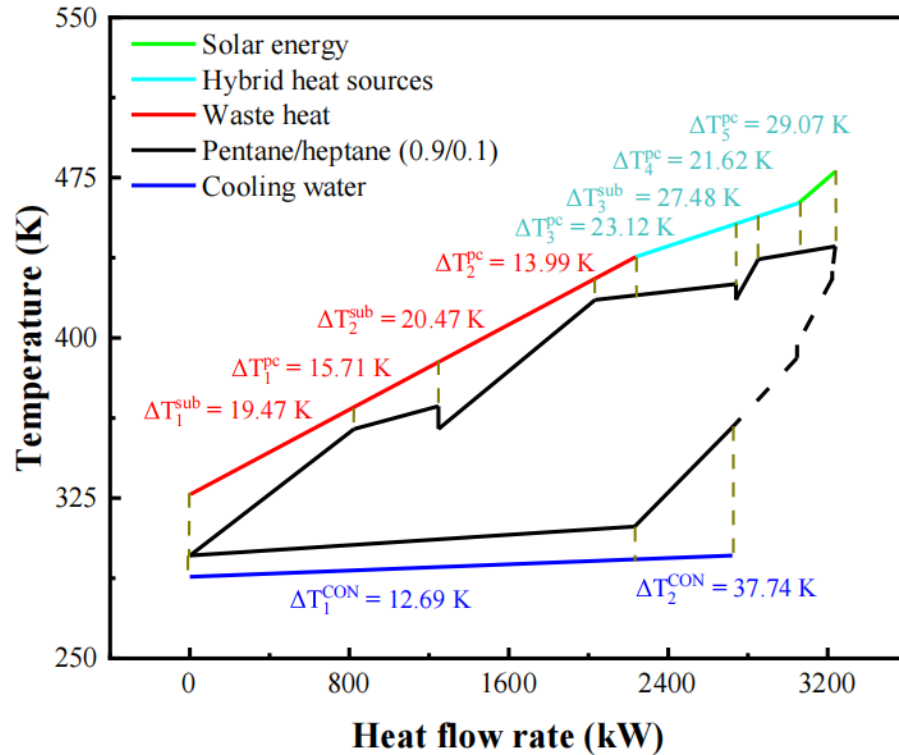
热力循环与过程集成



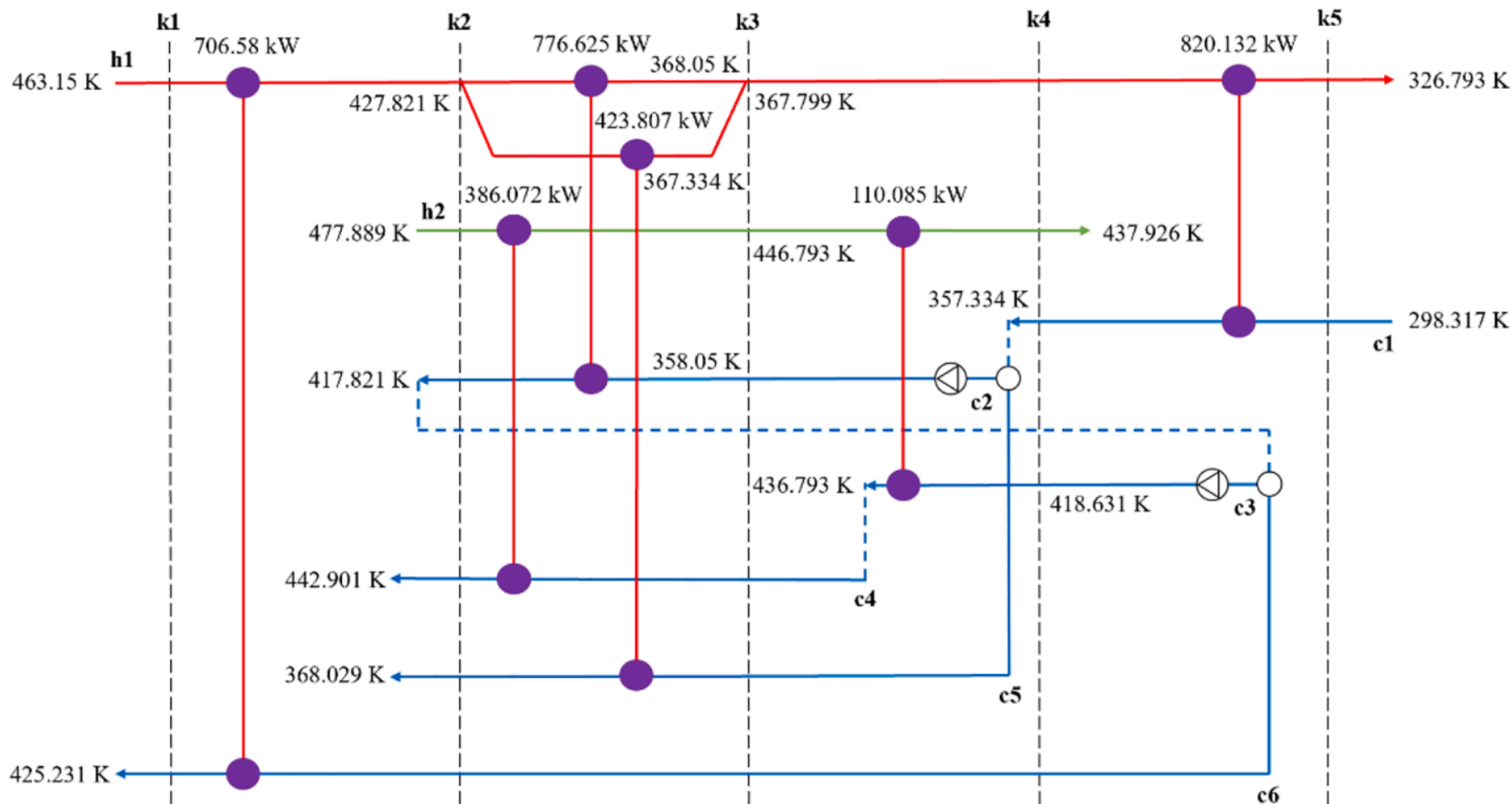
热力循环与过程集成换热网络



热力循环与过程集成换热网络

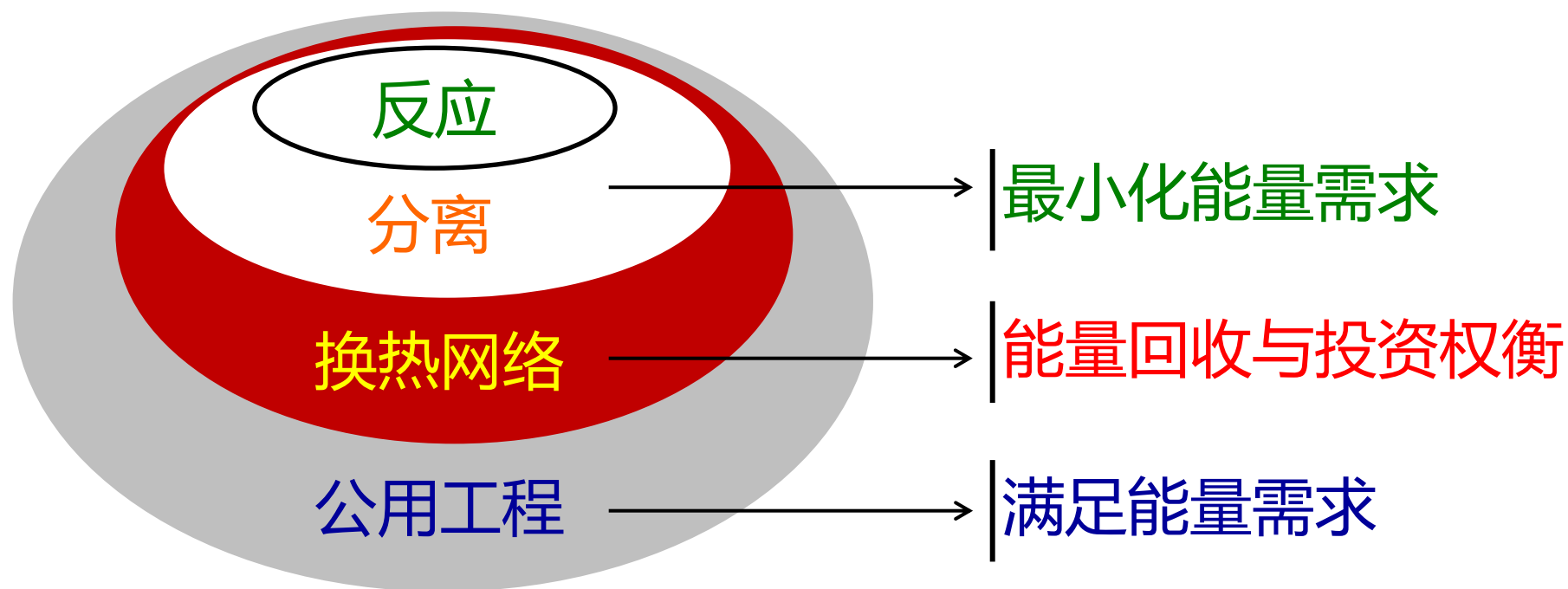


热力循环与过程集成换热网络



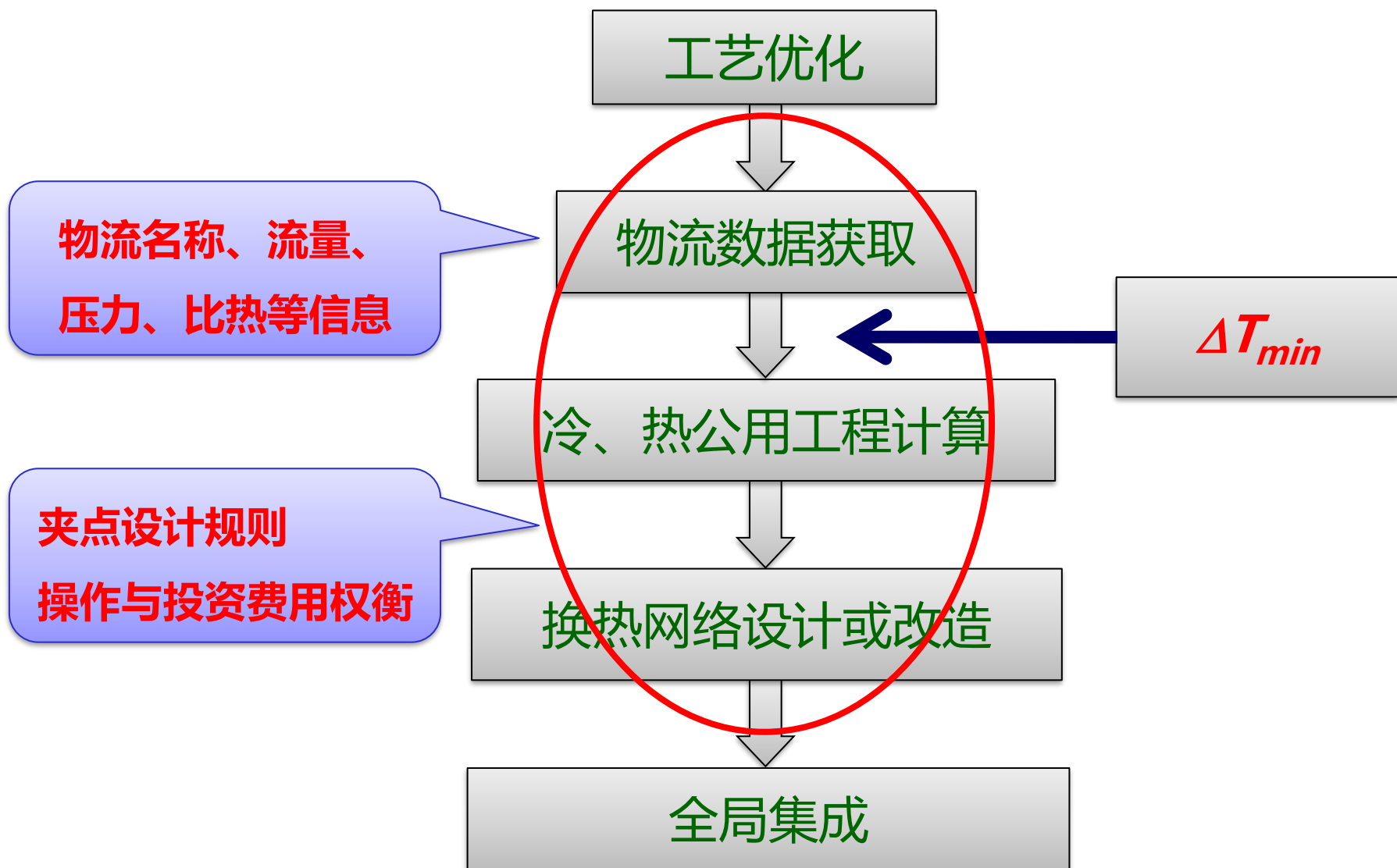
(b) HORCT

过程系统综合的洋葱模型



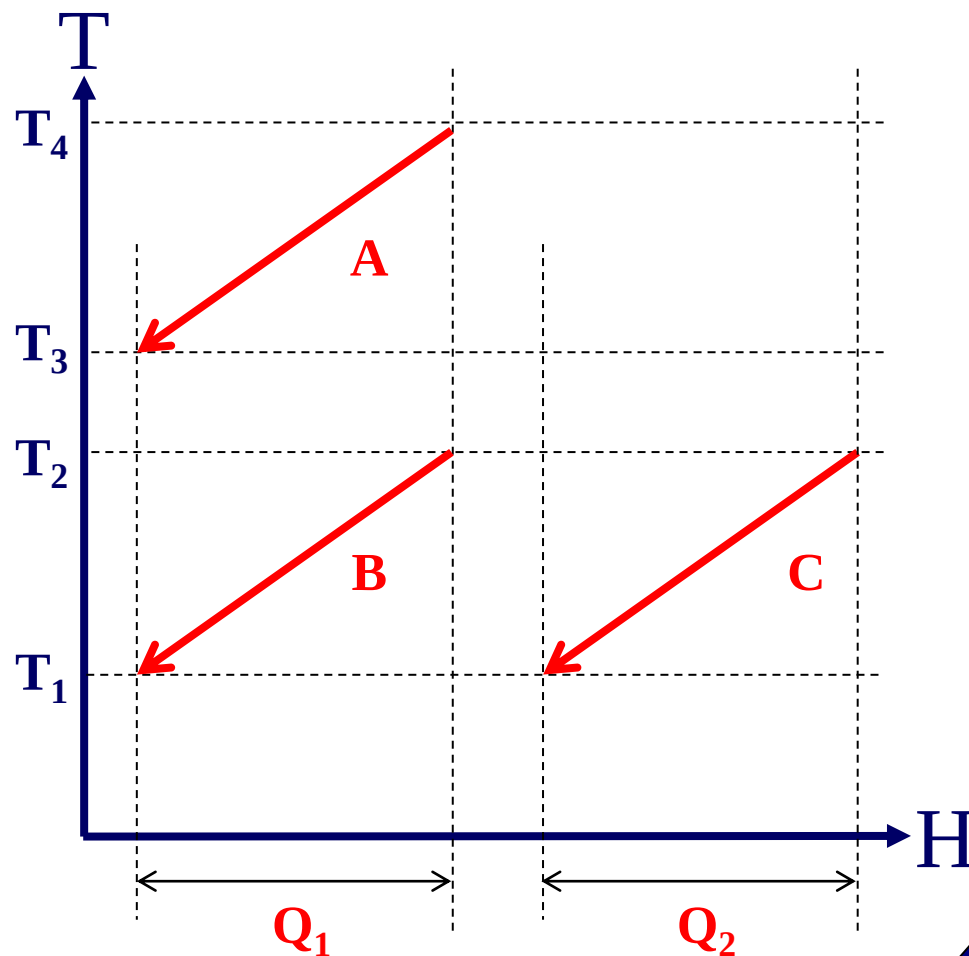
- 对换热网络进行夹点分析前，必须确认工艺过程已经优化。
- 从工艺过程涉及的冷、热物流获取用于换热网络分析和优化的基础数据。

夹点分析主要步骤



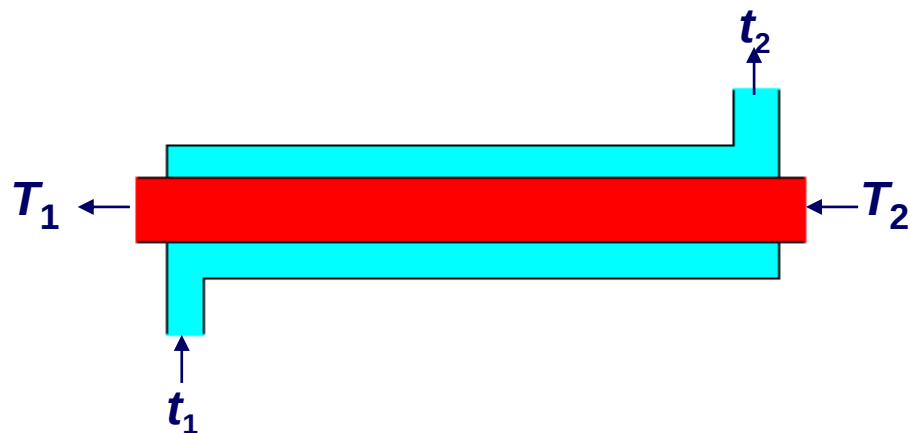
思考三个问题：

- (1)：什么是热力学第一定律；
- (2)：什么是热力学第二定律；
- (3)：图中三条相同长度的平行线段有何区别？



二、热交换过程

传热过程

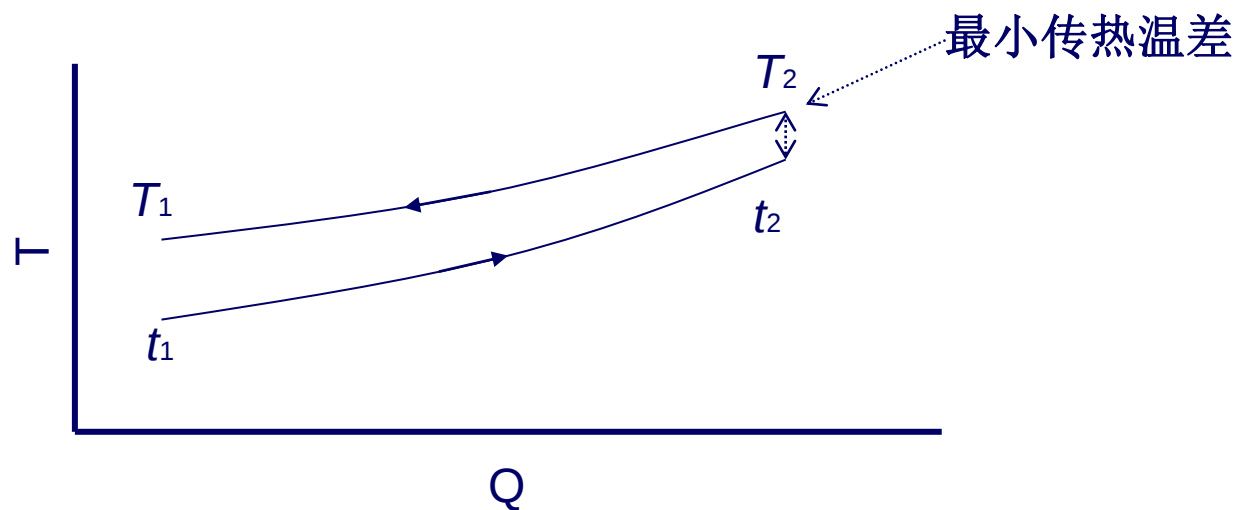


T_1 — 热流出口

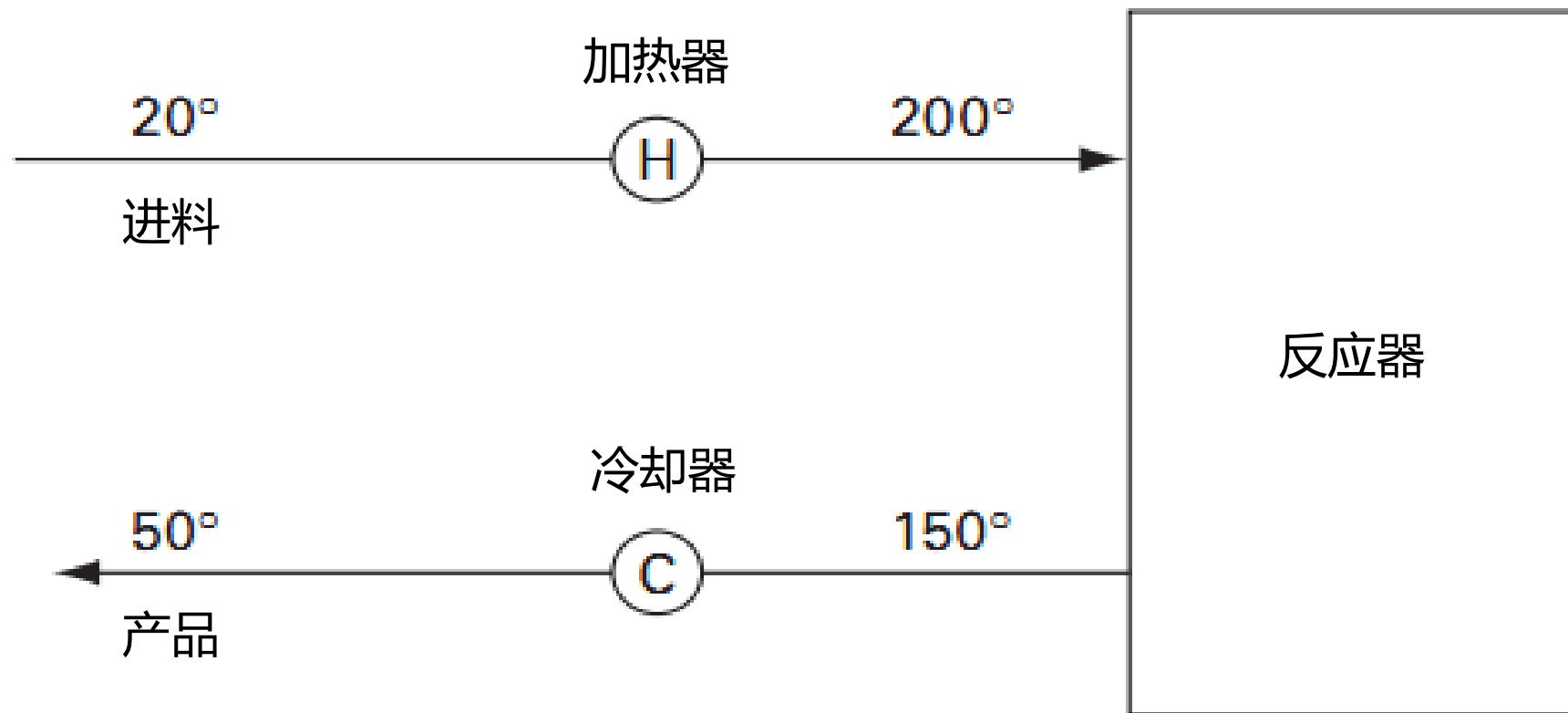
T_2 — 热流进口

t_1 — 冷流进口

t_2 — 冷流出口



热交换的基本概念



热交换的基本概念

物 流：任何需要加热或冷却的，但在过程中不改变其组成的流体。

冷物流：需要从低温加热到较高的工作温度的供料。

热物流：需要从高温冷却到较低温度的产品。

热交换的基本概念

	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot^\circ\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$)	初始温 度 $T_s(^{\circ}\text{C})$	目标温 度 $T_t(^{\circ}\text{C})$	热负荷 $H(10^4\text{kcal/h})$
冷物 流	100	0.05	5	20	200	900
热物 流	100	0.09	9	150	50	900

为了完成加热和冷却，我们需要在冷物流那里加一个加热器，在热物流那里加一个水冷器，很明显，我们需要提供 $900 \times 10^4\text{kcal/h}$ 热流和 $900 \times 10^4\text{kcal/h}$ 的冷流才能完成这一过程。

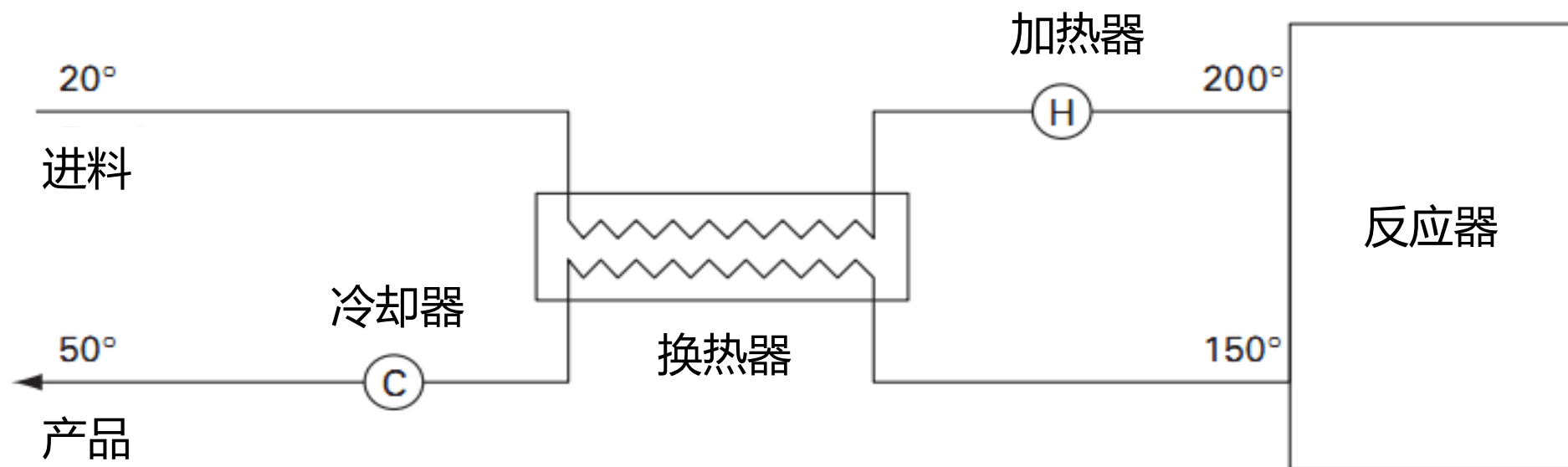
热交换的基本概念

我们能否减少能量消耗呢？

加热器

当然可以，如果我们用换热器能够回收热物流中的一些热量使其用来加热冷物流，我们就能够消耗较少的水和热量来满足这一过程。

热交换的基本概念



理想的，我们想要回收热物流中所有 $900 \times 10^4 \text{kcal/h}$ 用来加热冷物流，是否可能？

换热网络设计或优化问题

- 目标方程

根据限定条件使冷、热公用工程耗量最小

$$\text{Minimize } (Q_H + Q_C)$$

- 限定条件

- 各股物流的目标温度

$$T_2^i = a_i, \quad T_1^i = b_i$$

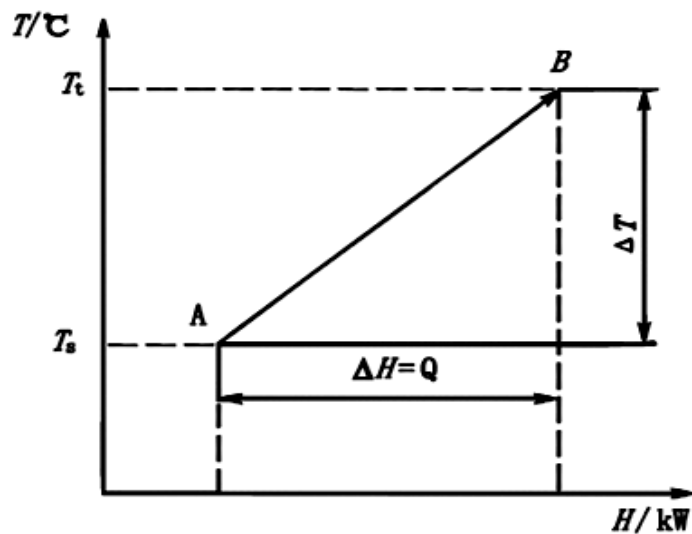
$$t_1^i = c_i, \quad t_2^i = d_i$$

- 热交换器的最小传热温差

$$\Delta T_{min} = k$$

三、温焓图 (T-H Diagram) 及组合曲线 (Composite Curve)

温焓图(T-H Diagram)



一无相变化的冷物流在 T - H 图上的标绘

$$Q = W \cdot c_p (T_t - T_s) = \Delta H$$

$$\text{斜率} = \frac{\Delta T}{\Delta H} = \frac{T_t - T_s}{\Delta H} = \frac{1}{W \cdot c_p}$$

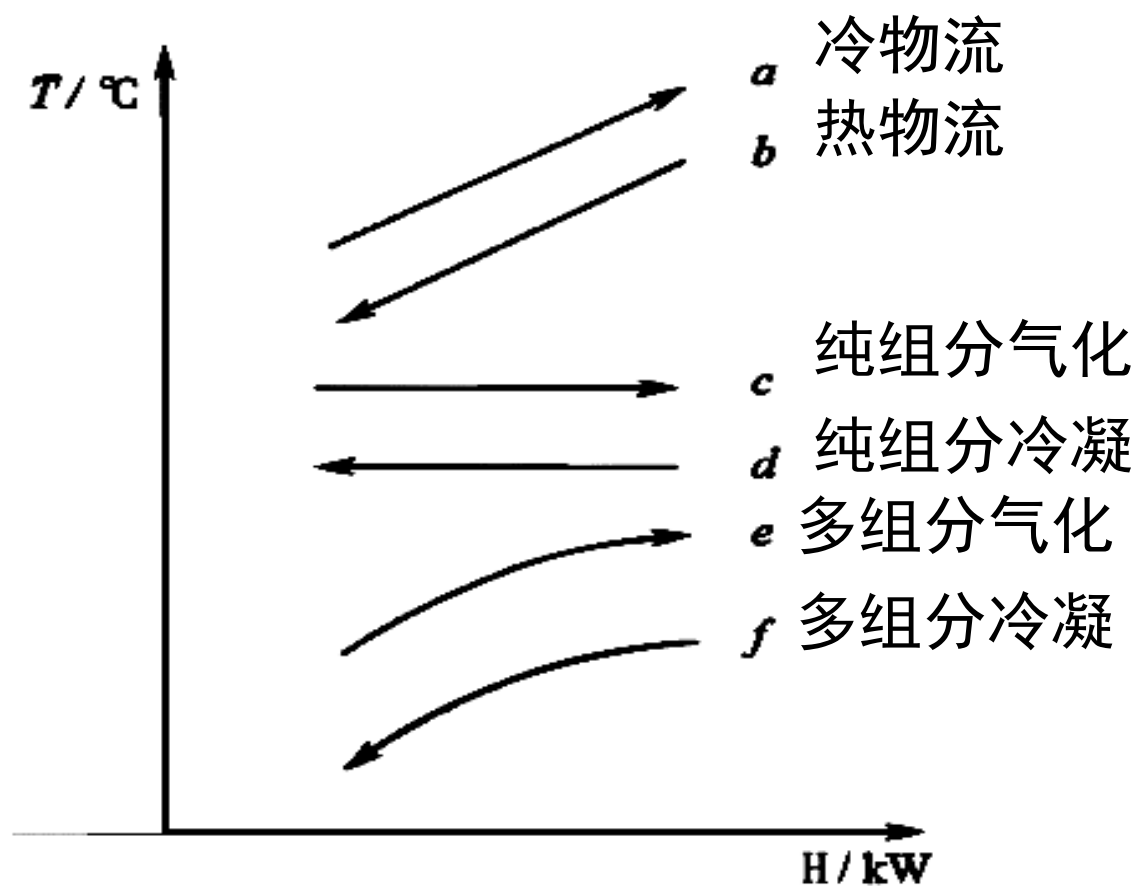
$W \cdot c_p$ - 热容流率

温-焓图（T-H 图）性质

该股T-H图的斜率为热容流率的倒数，热容流率越大，斜率越小，在同样的热负荷下该股的温度变化越小。

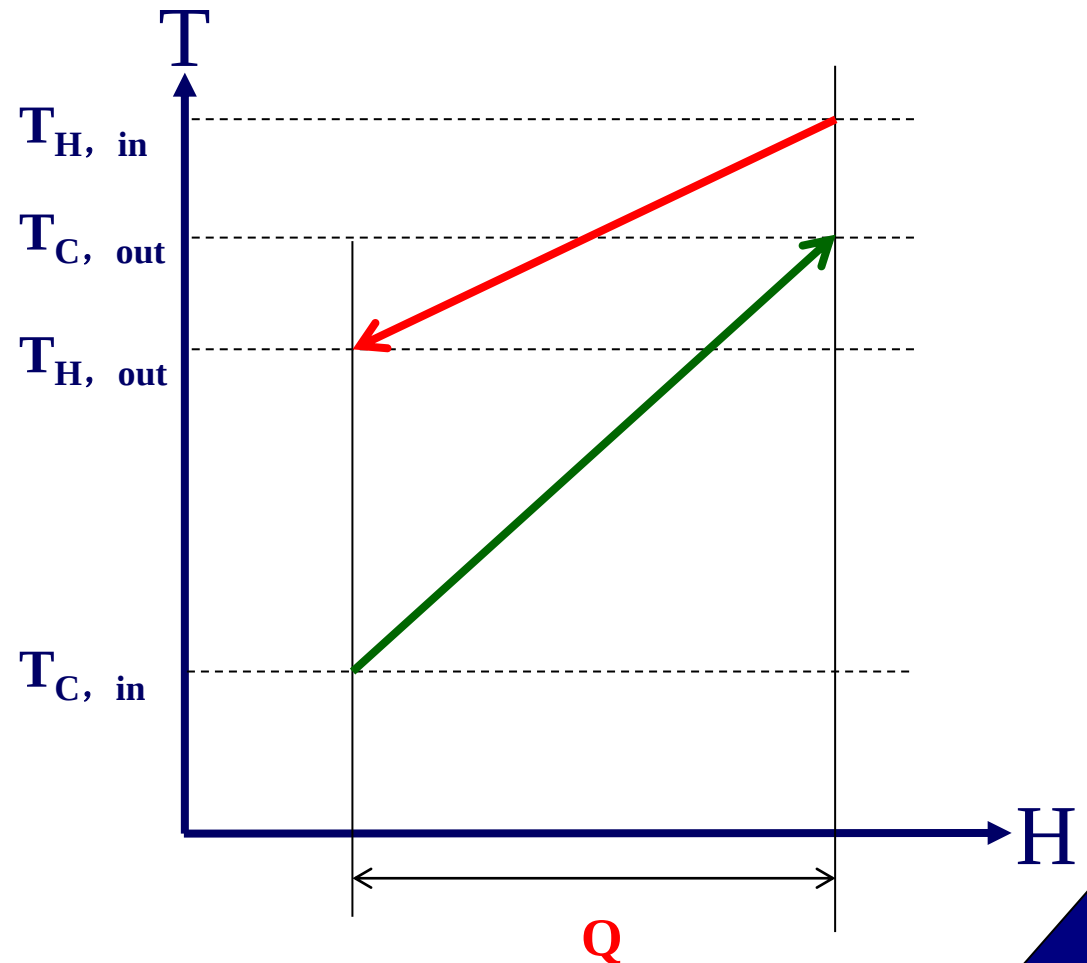
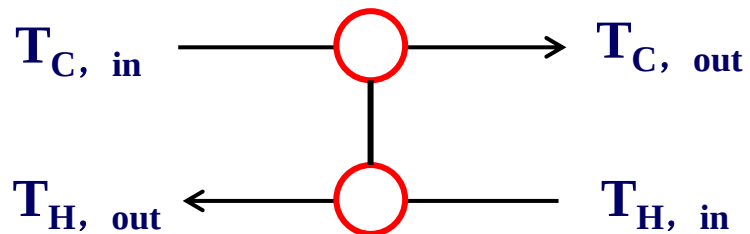
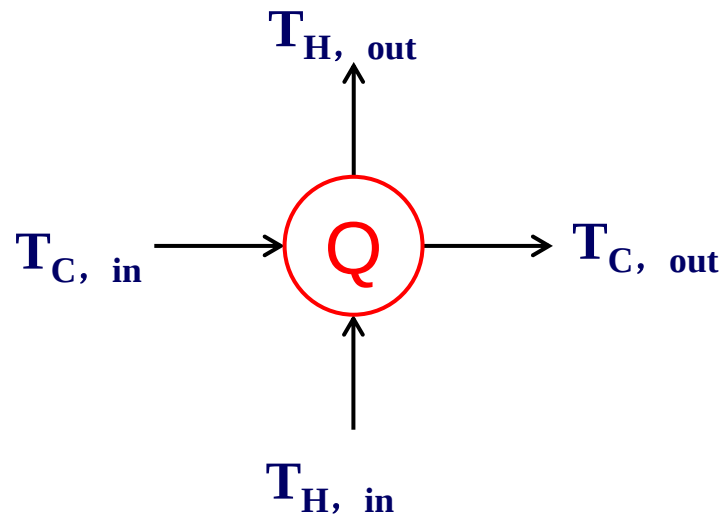
当该股在温度变化范围内比热容 C_p 变化显著时，该股的T-H图是非线性的，在这种情况下可将温升范围分为若干个比较小的温度区间，在各个温度区间分别画出T-H图。

不同物流在 T-H 图上的标绘

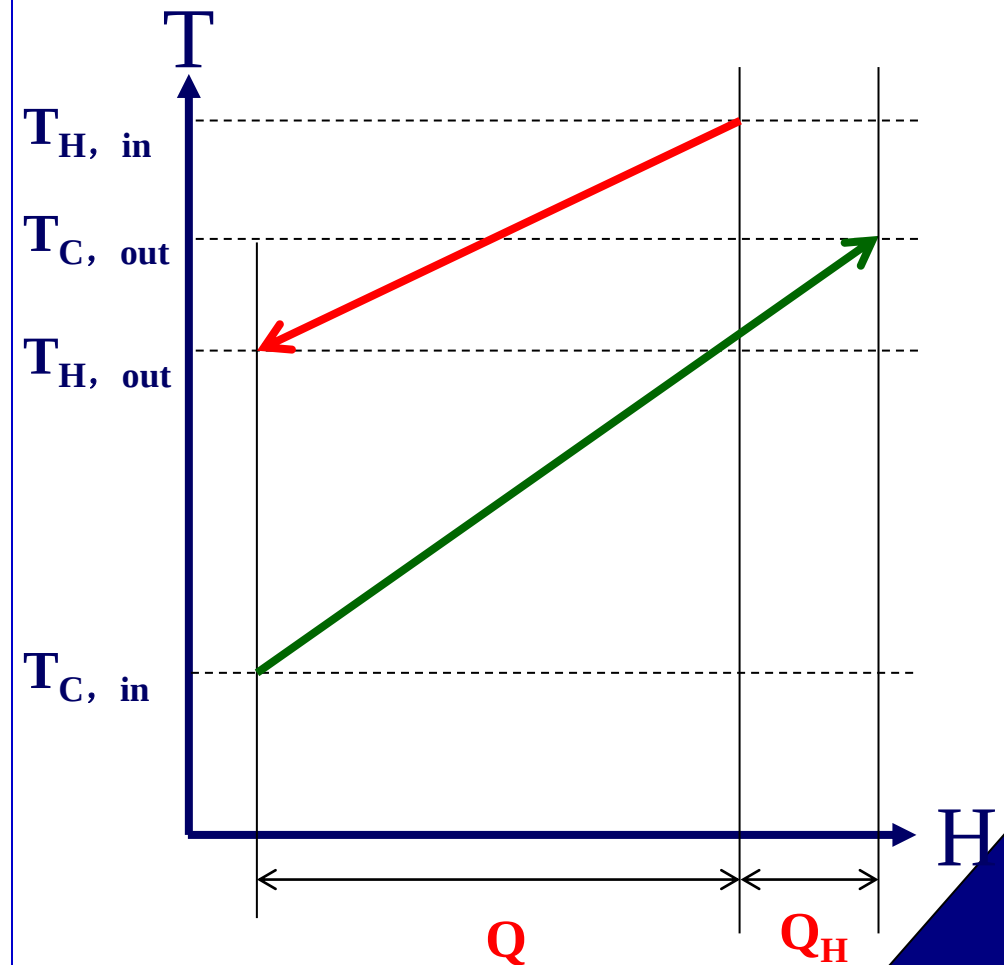
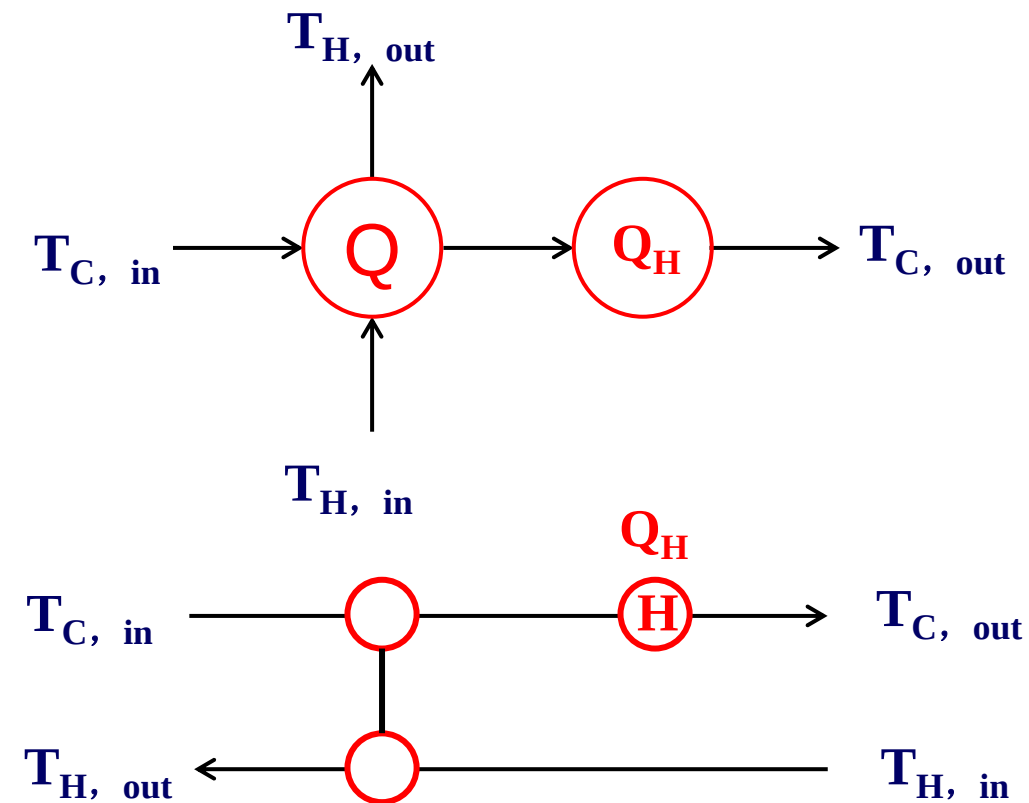


几种有同类型物流在 $T-H$ 图上的标绘

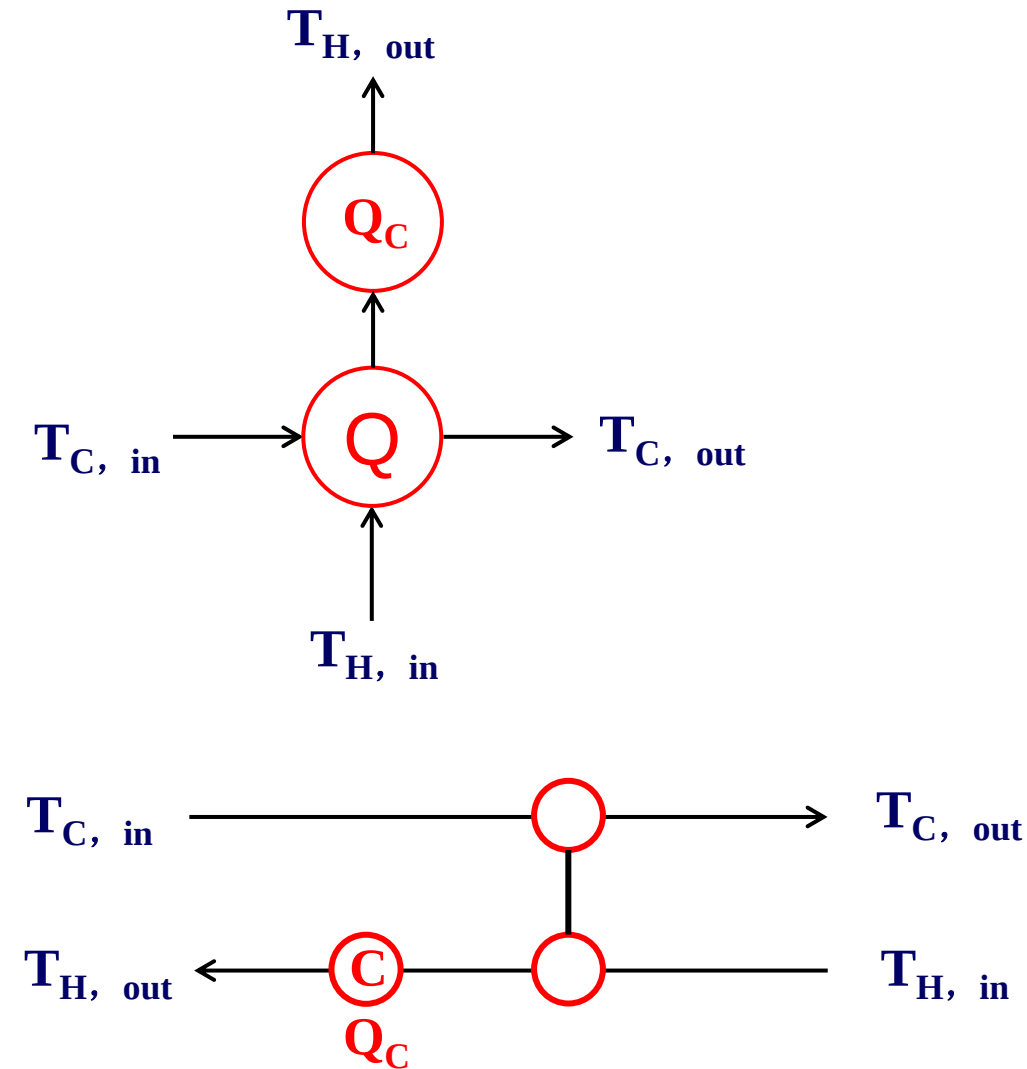
温焓图(T-H Diagram)



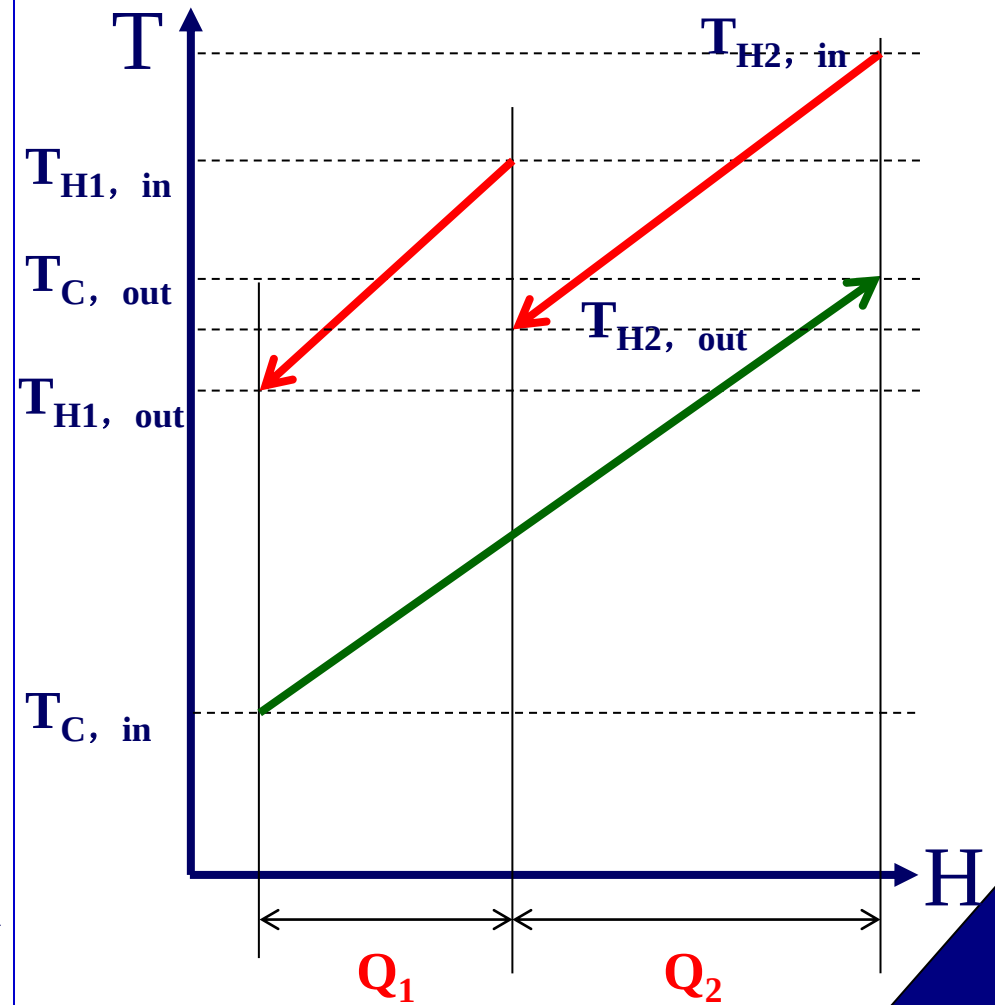
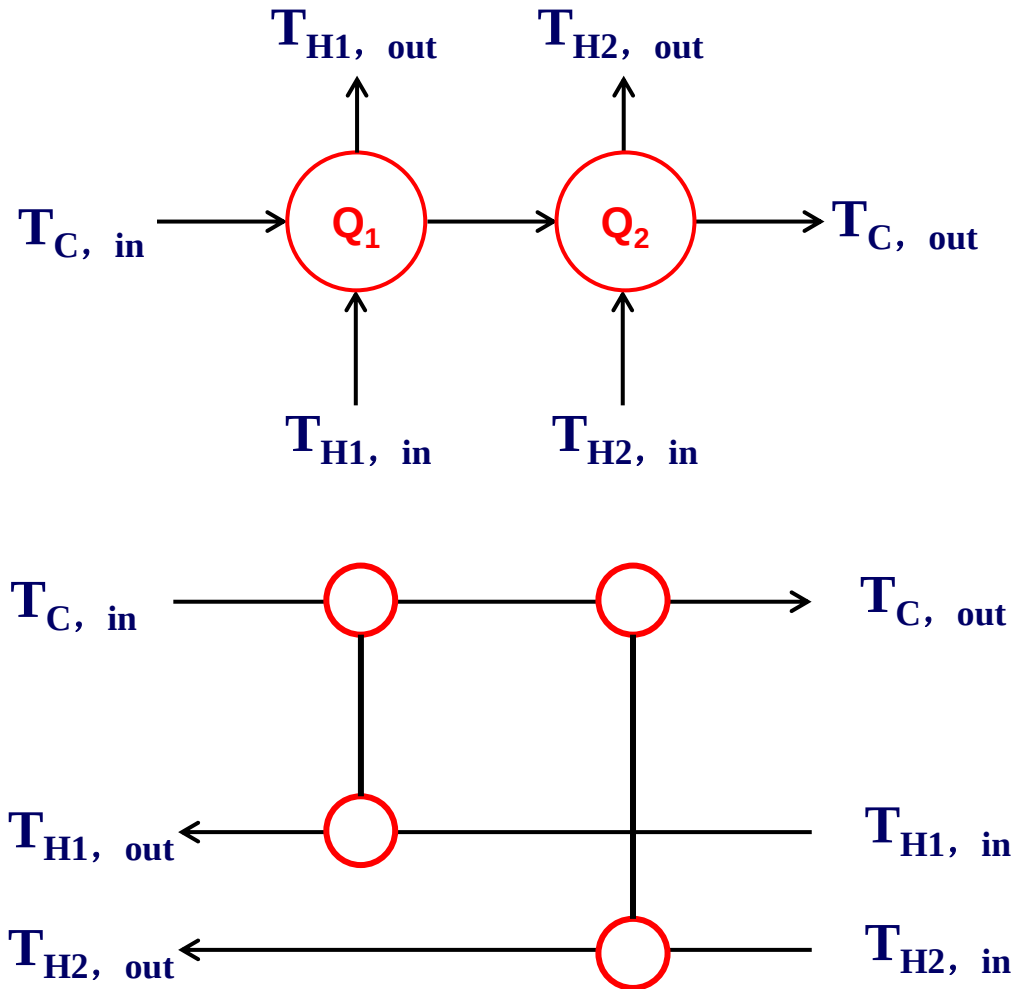
温焓图(T-H Diagram)



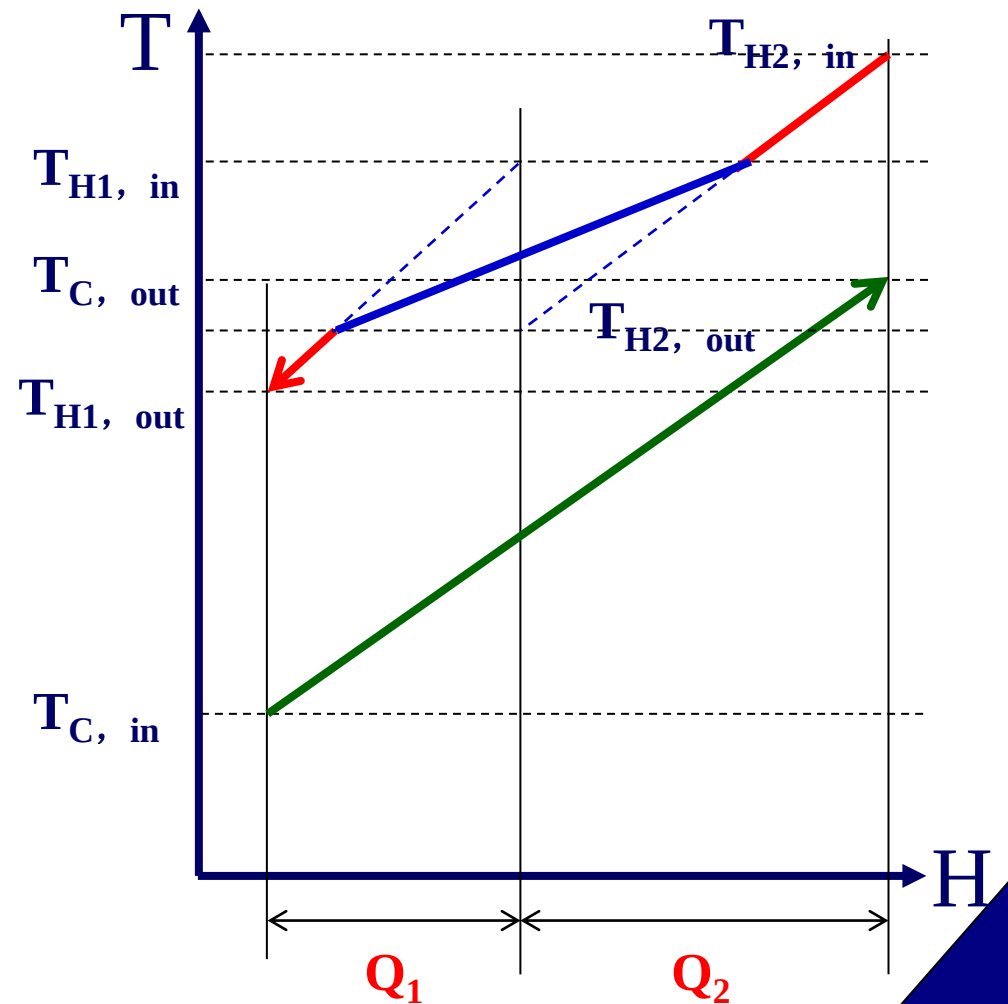
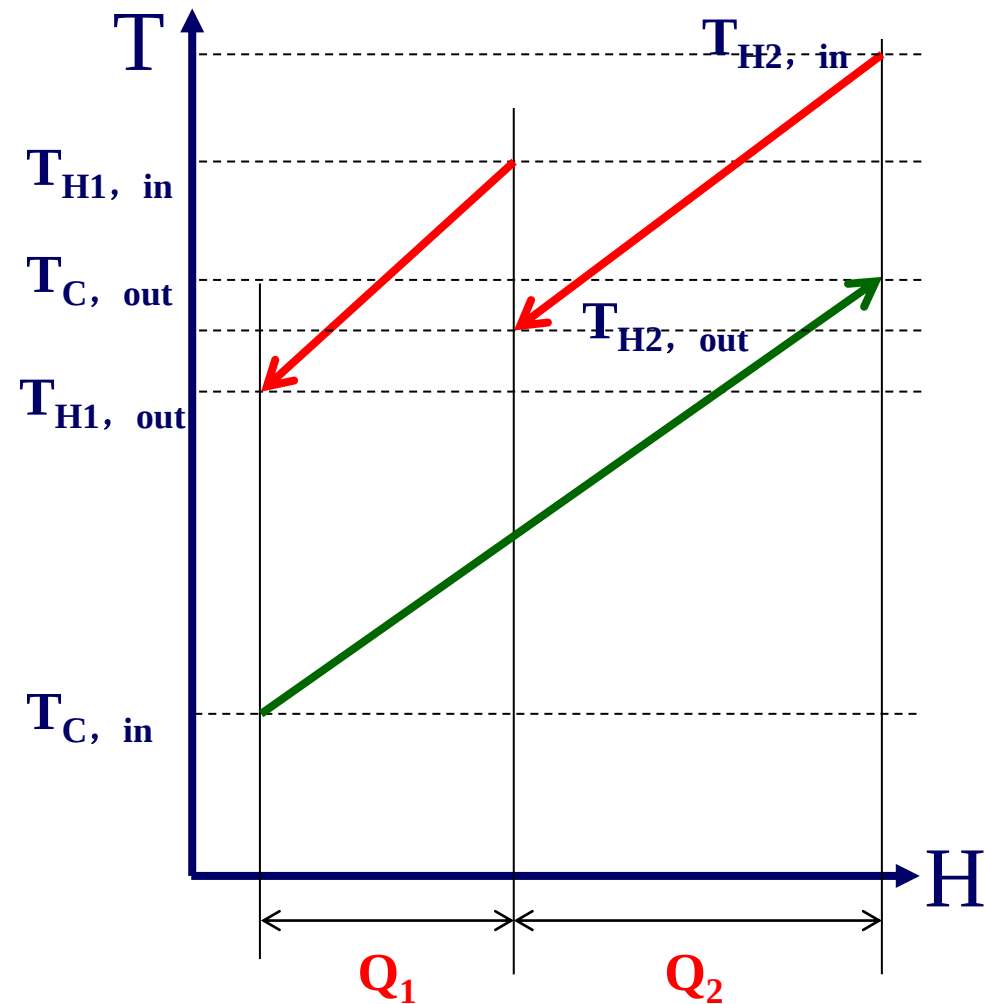
温焓图(T-H Diagram)



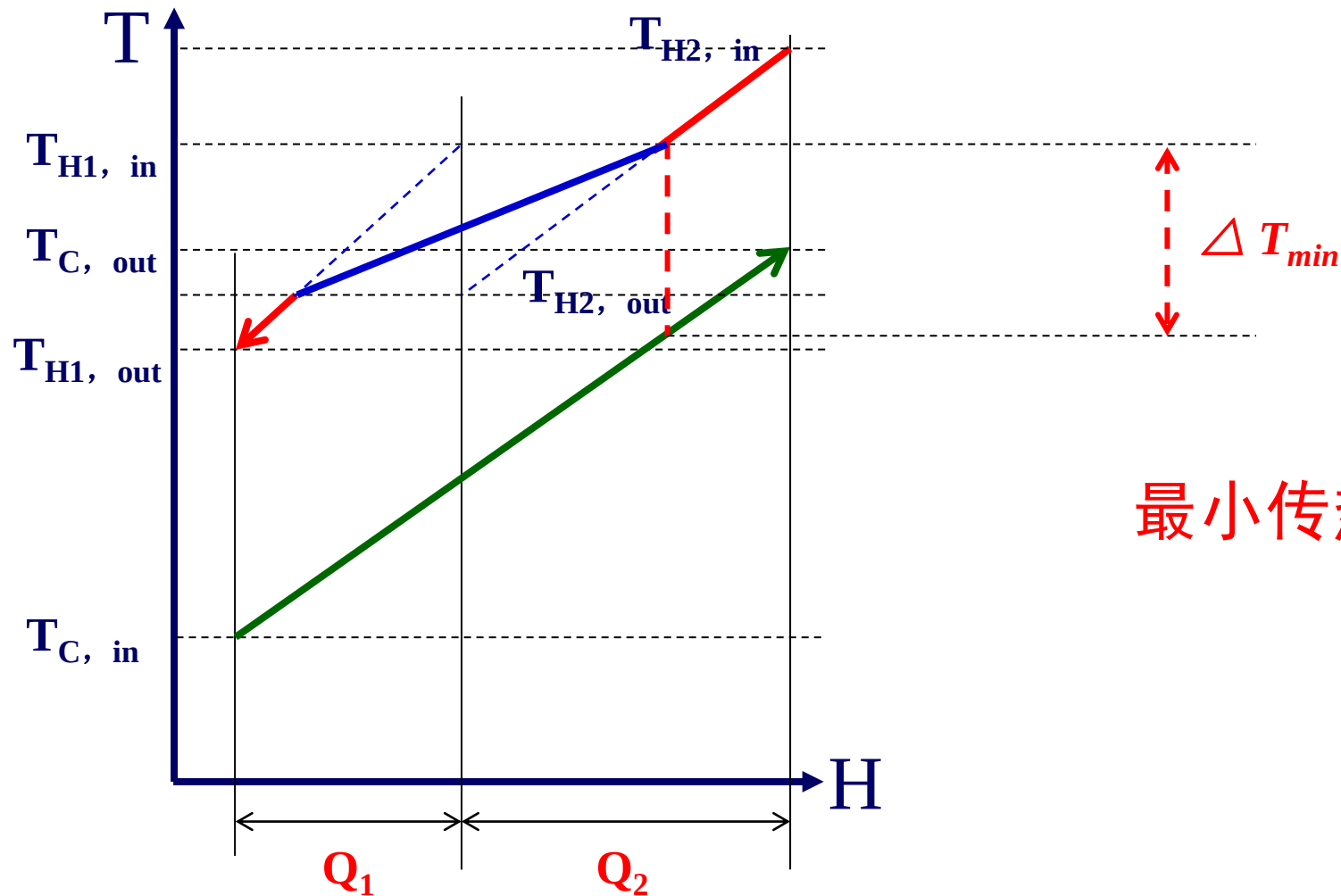
温焓图(T-H Diagram)



温焓图(T-H Diagram)

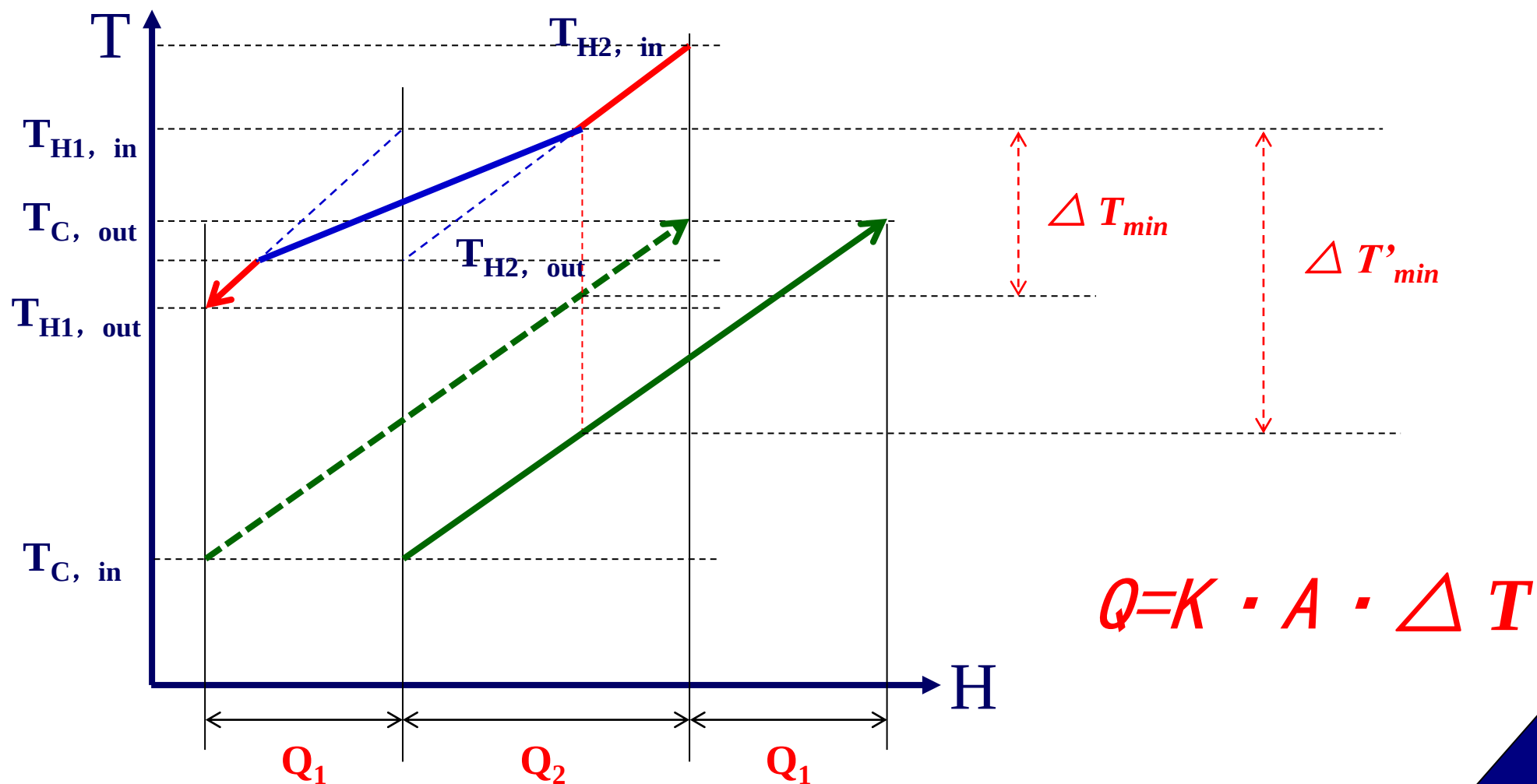


温焓图(T-H Diagram)

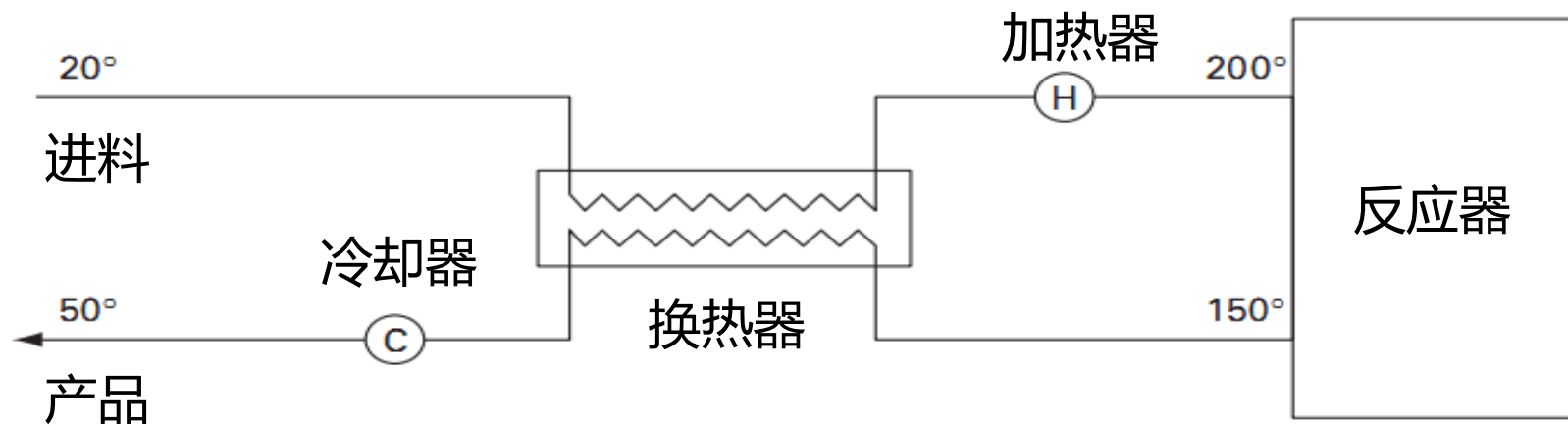


最小传热温差

投资与操作费用的权衡



练习题目1:

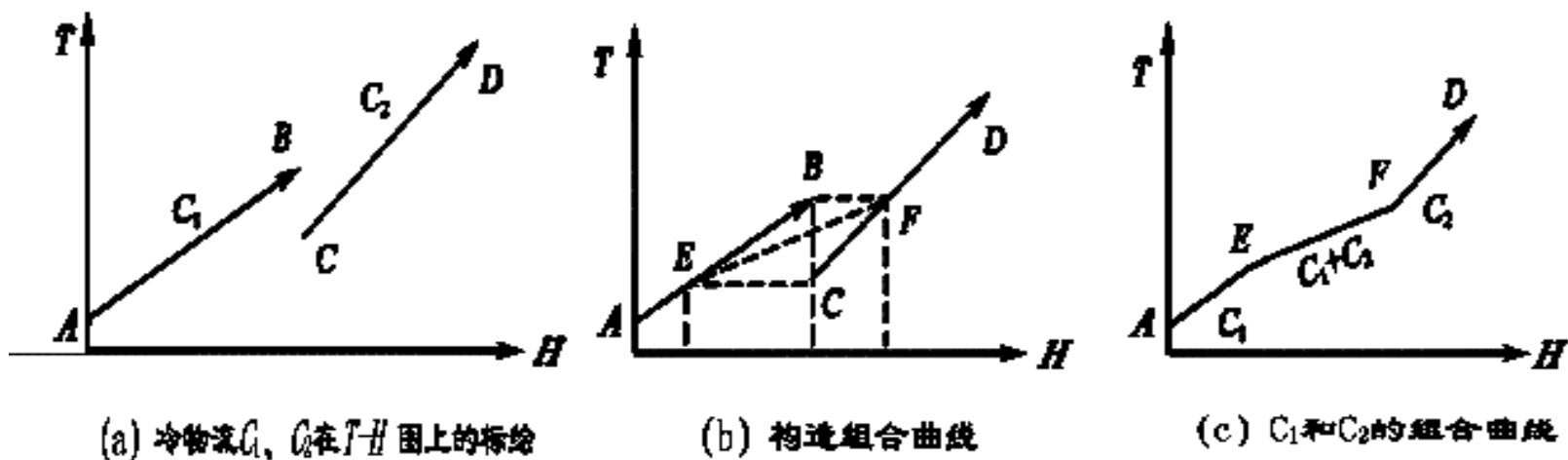


	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot^\circ\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$)	初始温度 $T_s(^\circ\text{C})$	目标温度 $T_t(^\circ\text{C})$	热负荷 H(10^4kcal/h)
冷物流	100	0.05	5	20	200	900
热物流	100	0.09	9	150	50	900

如果给定最小传热温差是 10°C ，请在温焓图中表示该换热网络，我们可以最多回收多少热量？需要热、冷公用工程各是多少？

组合曲线(Composite curve)

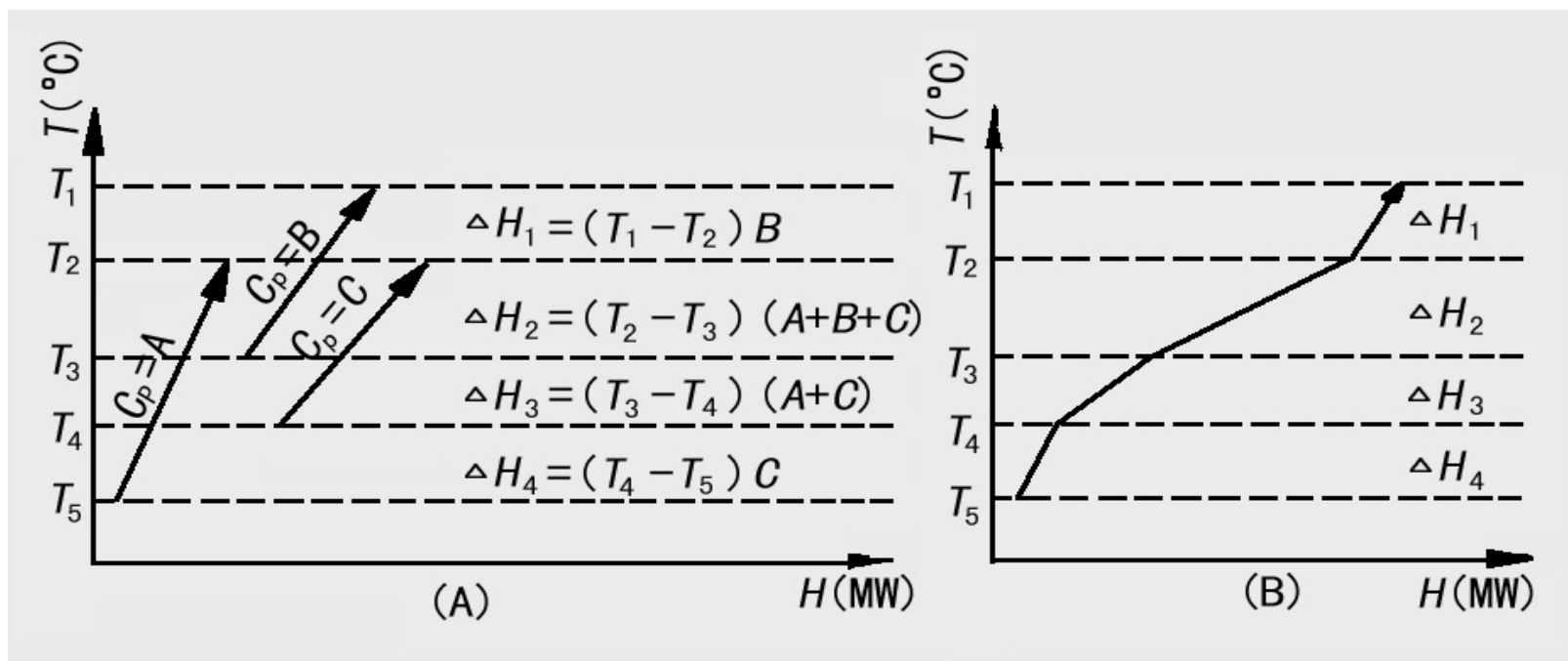
将系统的物流组合起来，以便于进行过程的冷、热物流的合理匹配。



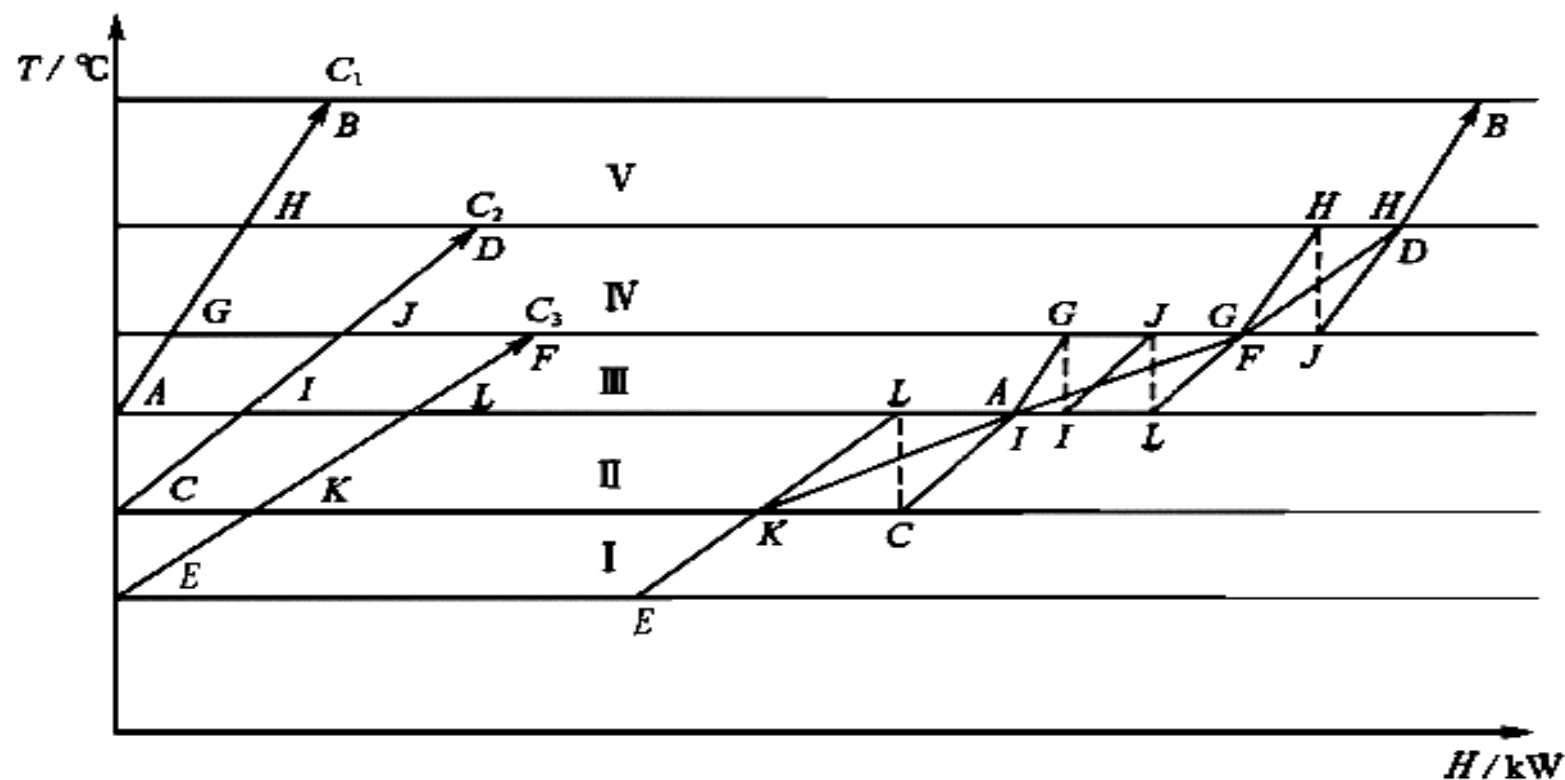
组合曲线的构造过程

从T-H 图到组合曲线

- $T_1 \sim T_2$ 之间只有一个冷流股吸热 $(T_1 - T_2)B = \Delta H_1$ ，所以这一段斜率不变。 $T_2 \sim T_3$ 之间有三个冷流股吸热 $(T_2 - T_3)(A+B+C) = \Delta H_2$ ，组成组合曲线时要把原来三个冷流股在H轴上的投影叠加起来，构成组合曲线的第二段。按此方法，可形成每个温度区间的组合曲线(B)。
- T-H图和组合曲线的概念同样适用于热流股。



示例：三个冷物流，构造组合曲线



练习题目：

	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot^\circ\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$)	初始温度 $T_s(^\circ\text{C})$	目标温度 $T_t(^\circ\text{C})$	热负荷 H(10^4kcal/h)
冷物流	100	0.1	10	40	90	500
冷物流	300	0.05	15	80	120	600

	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot^\circ\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$)	初始温度 $T_s(^\circ\text{C})$	目标温度 $T_t(^\circ\text{C})$	热负荷 H(10^4kcal/h)
热物流	200	0.06	12	270	120	1800
热物流	300	0.05	15	260	160	1500
热物流	100	0.2	20	180	80	2000

流股组合曲线

热负荷只与焓 H 的相对值 ΔH 有关，也就是说， T 轴是有连续性的，而 H 轴则只有相对性， T - H 图可以沿 H 轴平行移动而效果不变。根据这一特点就可以把多个 T - H 图合并为一条组合曲线。

四、基础物流数据

夹点分析主要步骤



4.1 展开夹点分析的物流数据表单

物流 编号	物流 名称	物 流 类 型	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot$ $^{\circ}\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot$ $^{\circ}\text{C}$)	初始温 度 $T_s(^{\circ}\text{C})$	目标温 度 $T_t(^{\circ}\text{C})$	热负荷 H(10^4kcal/ h)
----------	----------	------------------	--------------	--	--	-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

1

2

3

$$\text{热容流率CP} = \text{比热}C_p \times \text{流量F}$$

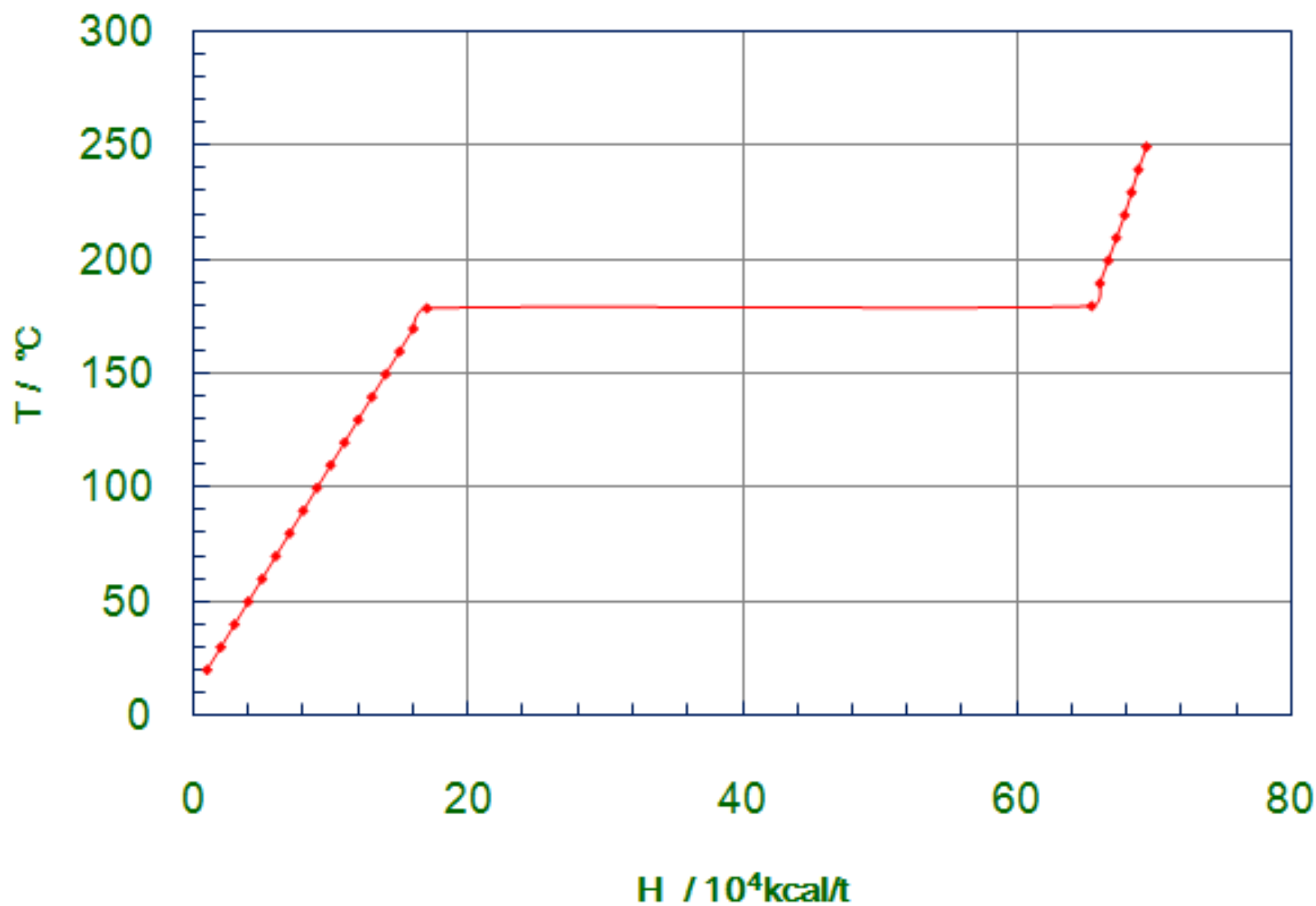
$$\text{热负荷H} = \text{热容流率CP} \times (\text{目标温度}T_t - \text{初始温度}T_s)$$

4.2 水

物流 编号	物流 名称	物流 类型	流量F (t/h)	比热C _p (10 ⁴ kcal/t· °C)	热容流率CP (10 ⁴ kcal/h· °C)	初始温 度 T _s (°C)	目标温 度 T _t (°C)	热负荷 H(10 ⁴ kcal/ h)
C1	除盐水	冷	100	0.1	10	30	60	300
LPS	1.0MPa蒸汽	热	100	48	4800	170	180	4800
								4200

水汽化或水蒸气冷凝均在一定的温度下， 如果将初始温度
和目标温度定为同一温度， 则计算得到的热负荷可能为零！

4.2 1.0MPa水蒸汽温焓图



4.3 氢气

常温常压下氢气比热: $0.336 \times 10^4 \text{kcal/t} \cdot ^\circ\text{C}$

4.4 石油馏分焓值获取方法

◆ 流程模拟

◆ 算法

◆ 查图法

石油馏分——液态焓值

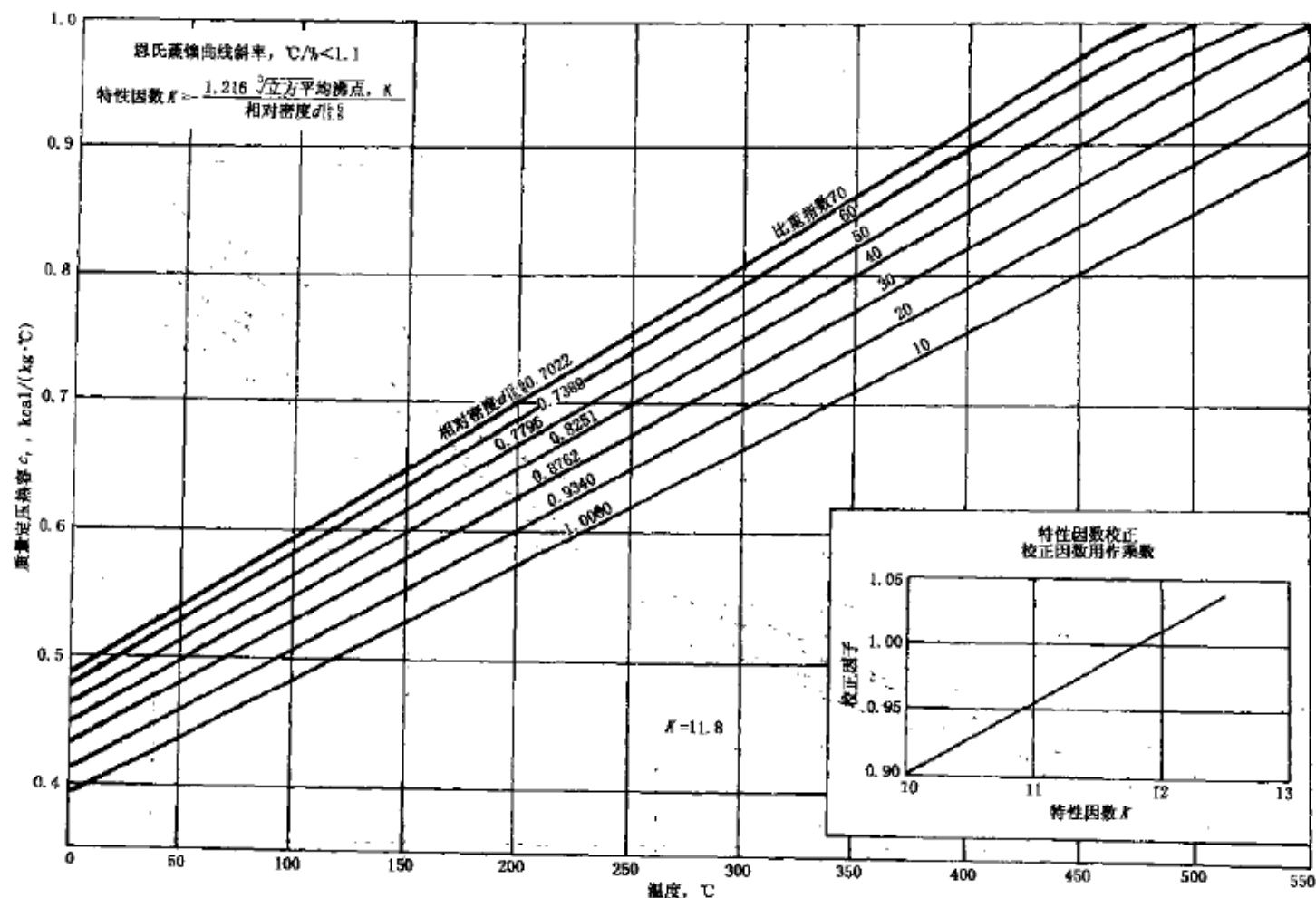
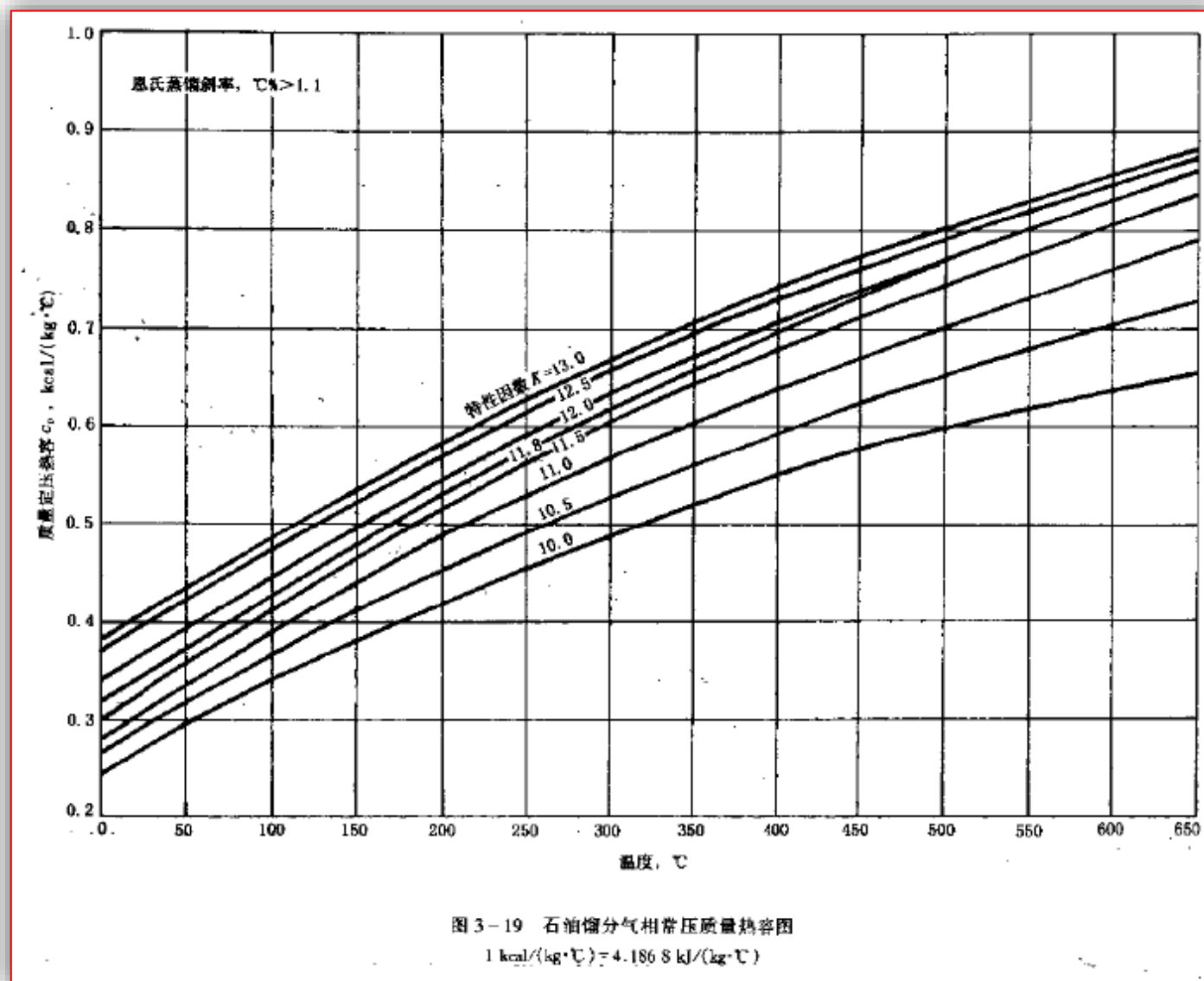


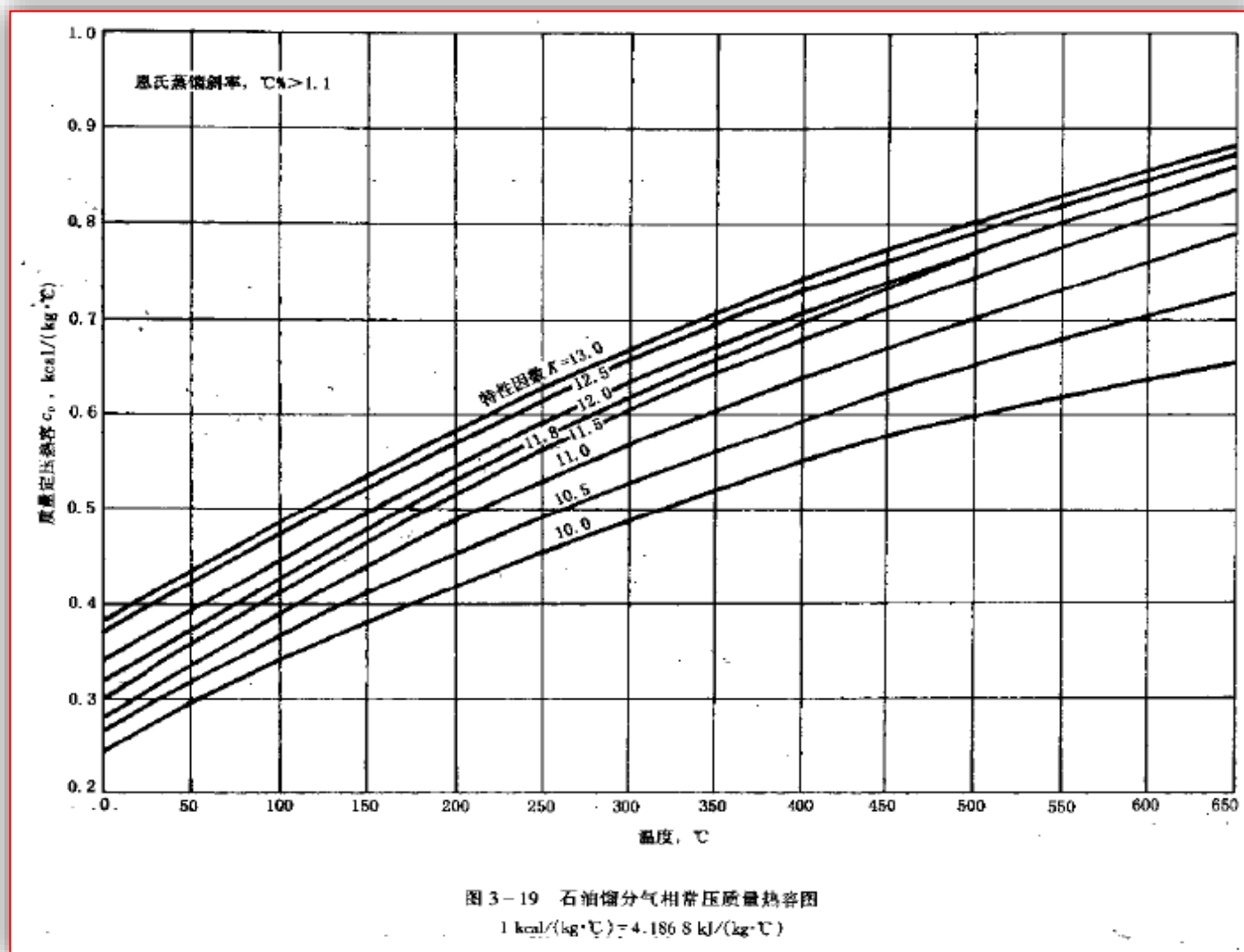
图 3-18 石油馏分液相质量热容图

1 kcal/(kg·°C) = 4.1868 kJ/(kg·°C)

石油馏分——气态焓值



石油馏分——气态焓值



石油馏分——汽化潜热

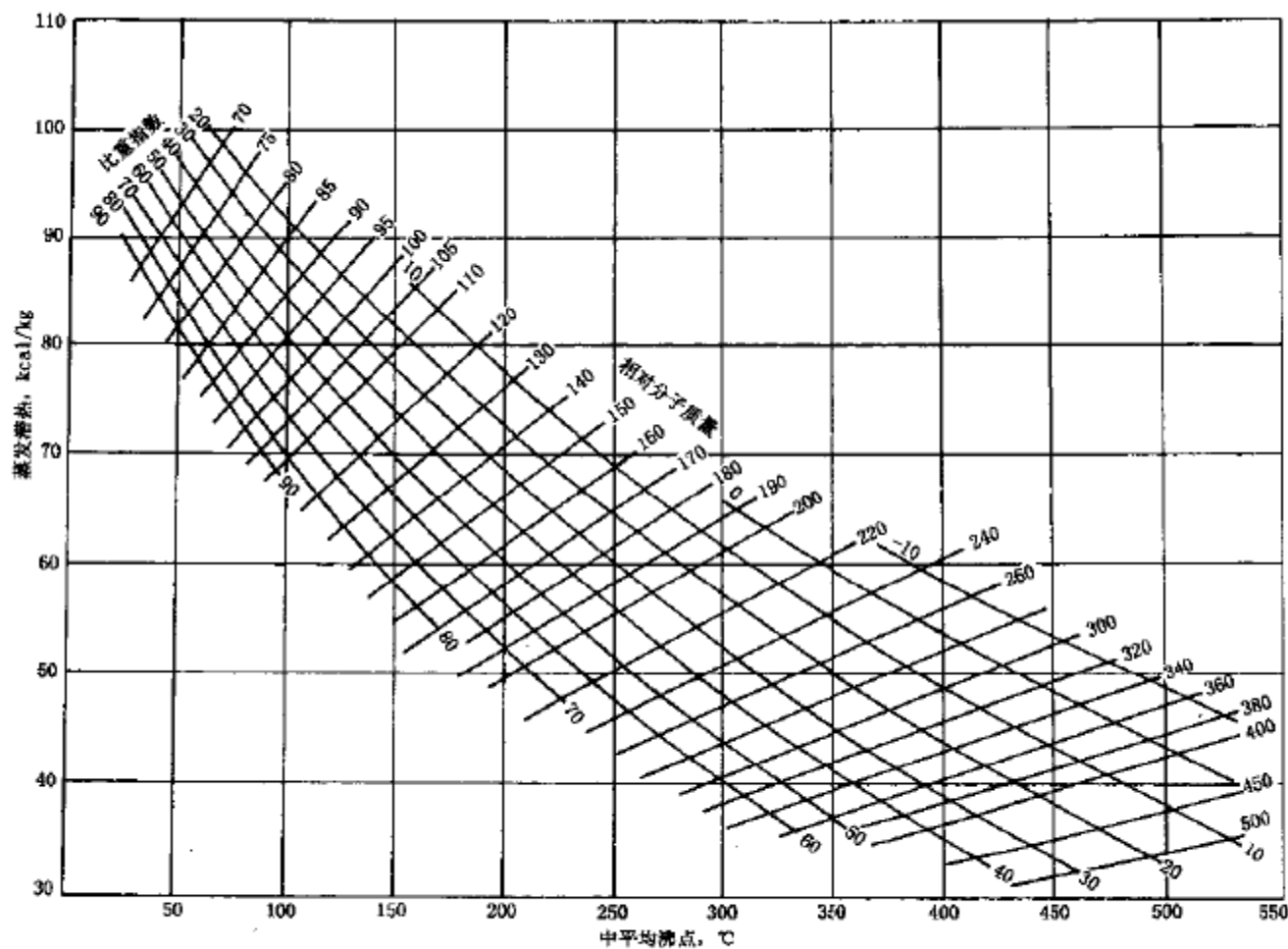


图 3-22 石油馏分常压汽化热图

1 kcal/(kg·°C) = 4.1868 kJ/(kg·°C)

石油馏分——汽化潜热

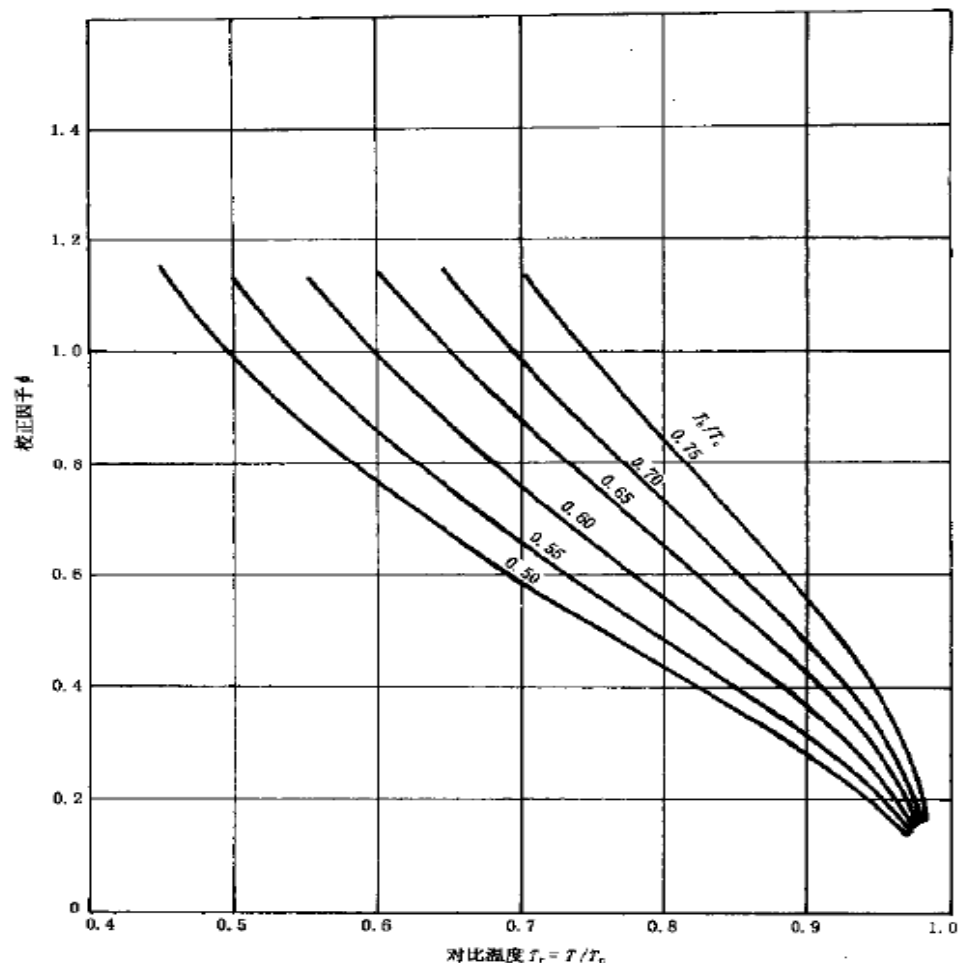
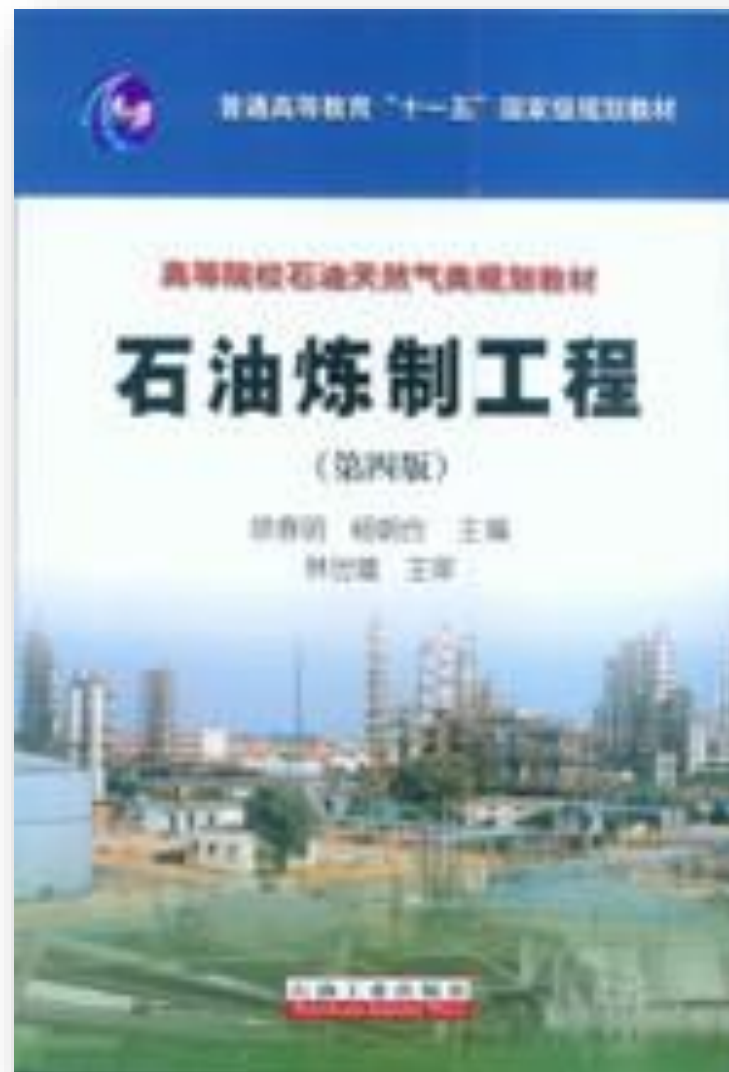
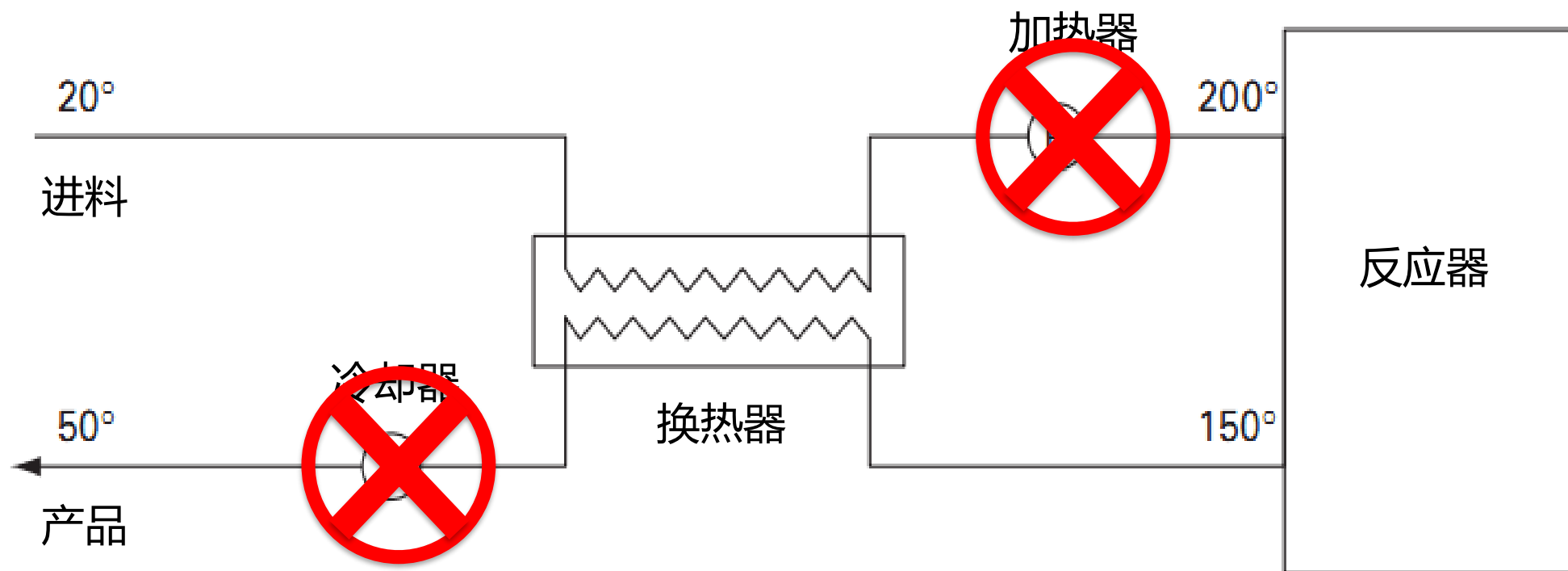


图 3-23 石油馏分汽化潜热校正图



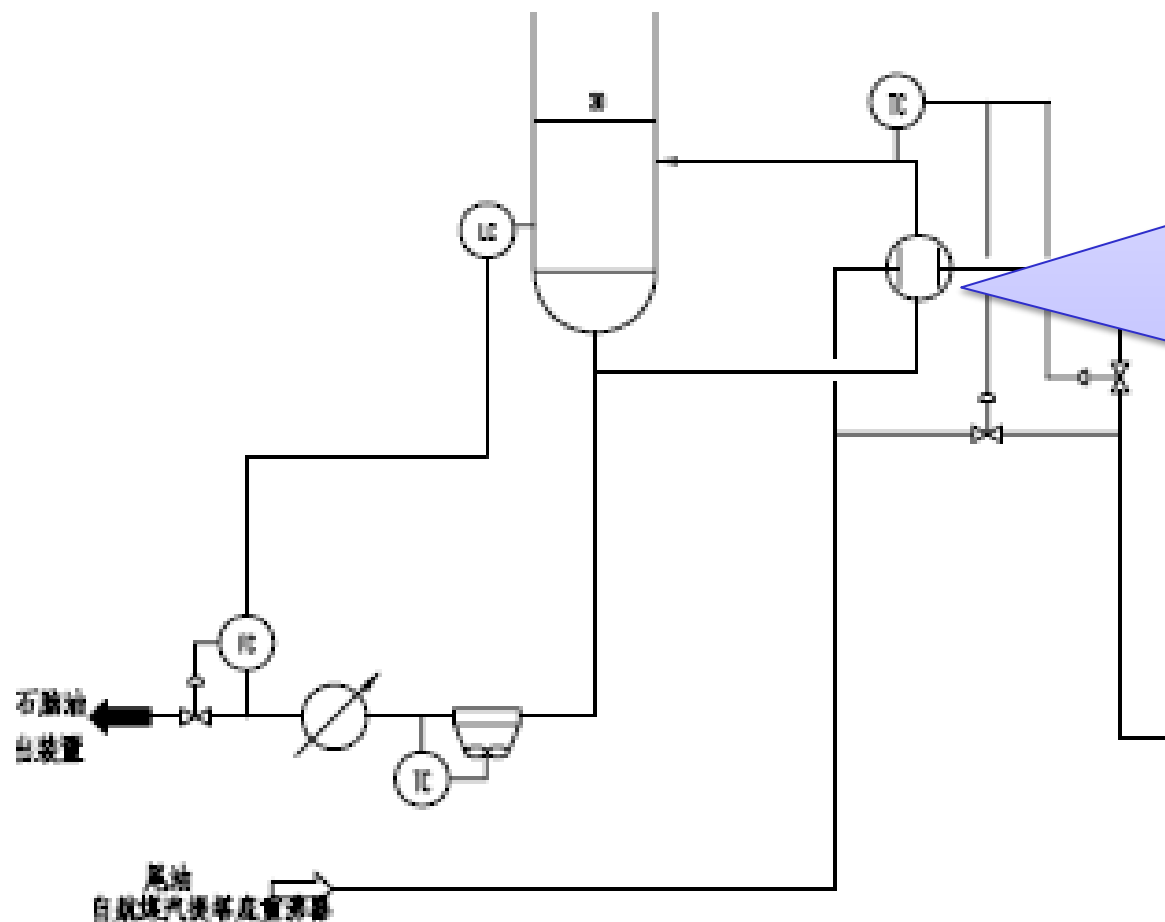
4.5 公用工程物流



4.5 公用工程物流与工艺物流

- (1) 涉及使用循环冷却水、风冷以及制冷介质的公用工程物流在夹点分析时不能统计到工艺物流数据中；
- (2) 涉及蒸汽加热器或加热炉消耗的蒸汽和瓦斯不能统计到工艺热物流中。

4.5 公用工程物流与工艺物流



再沸器热源尾油是否需要统计到热物流中?

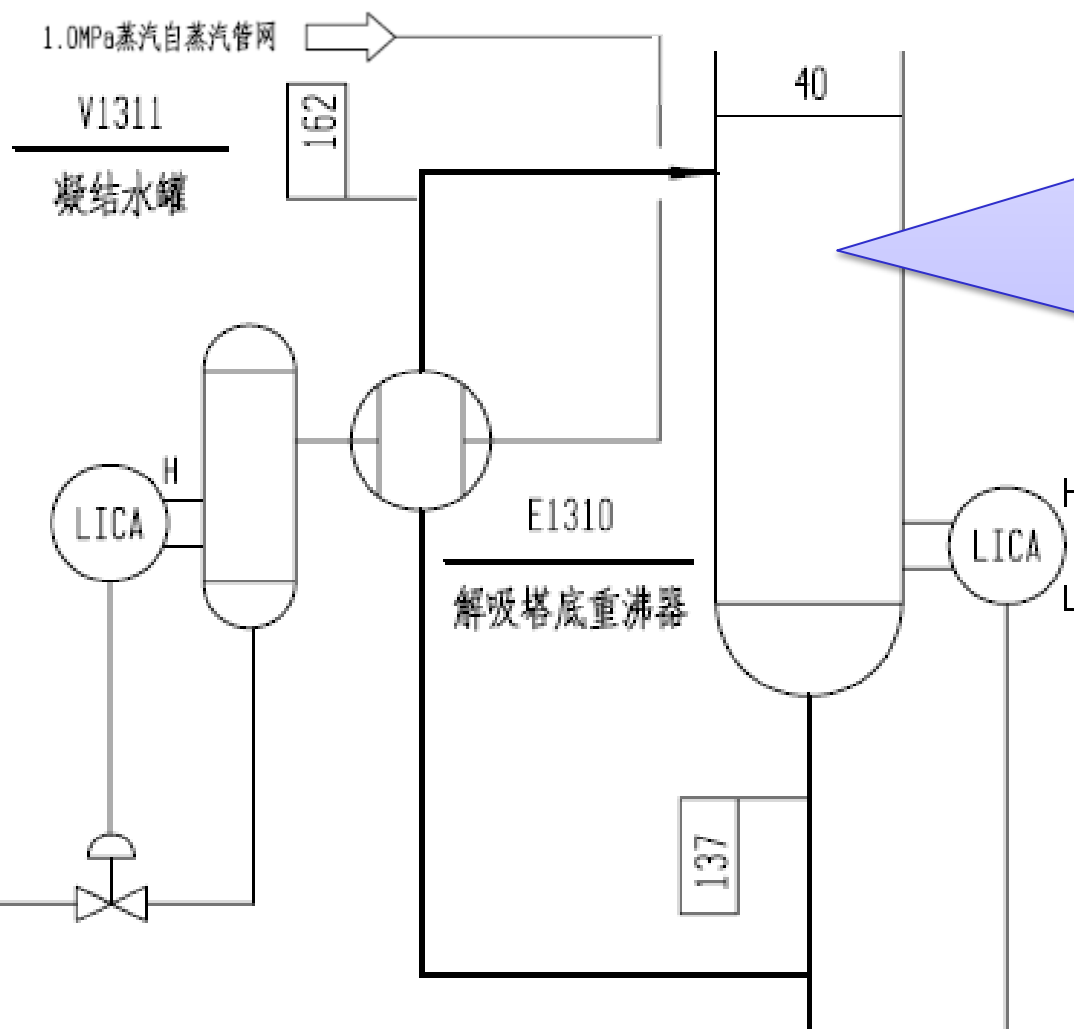
塔底循环再沸物流是否需要统计到冷物流中?

轻石脑油冷却器

轻石脑油空冷器

炉丁烷炉底重沸器

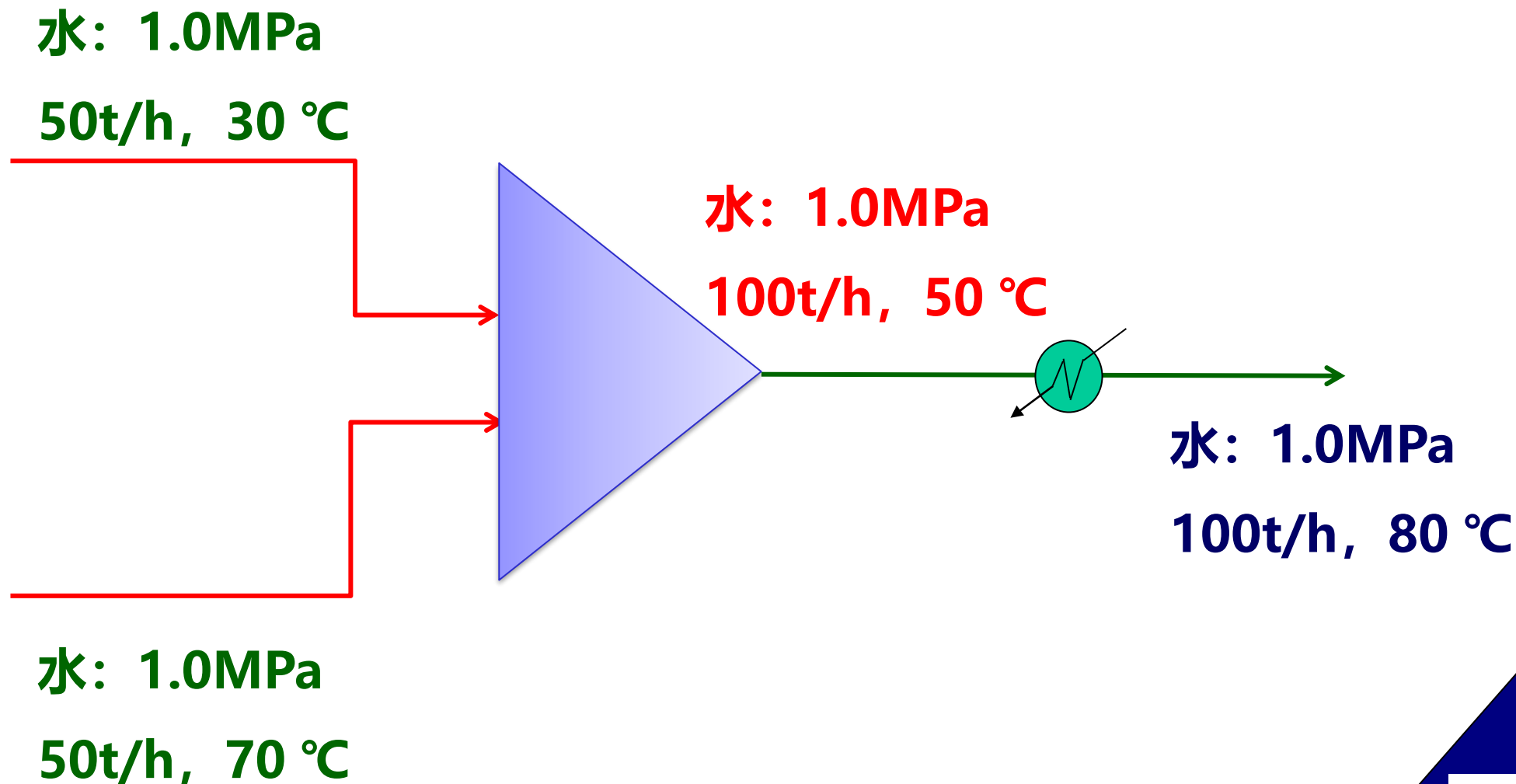
4.5 公用工程物流与工艺物流



**再沸器热源1.0MPa
蒸汽是否需要统计
到热物流中?**

**塔底循环再沸物流
是否需要统计到冷
物流中?**

4.6 真实的获取物流数据——混合过程

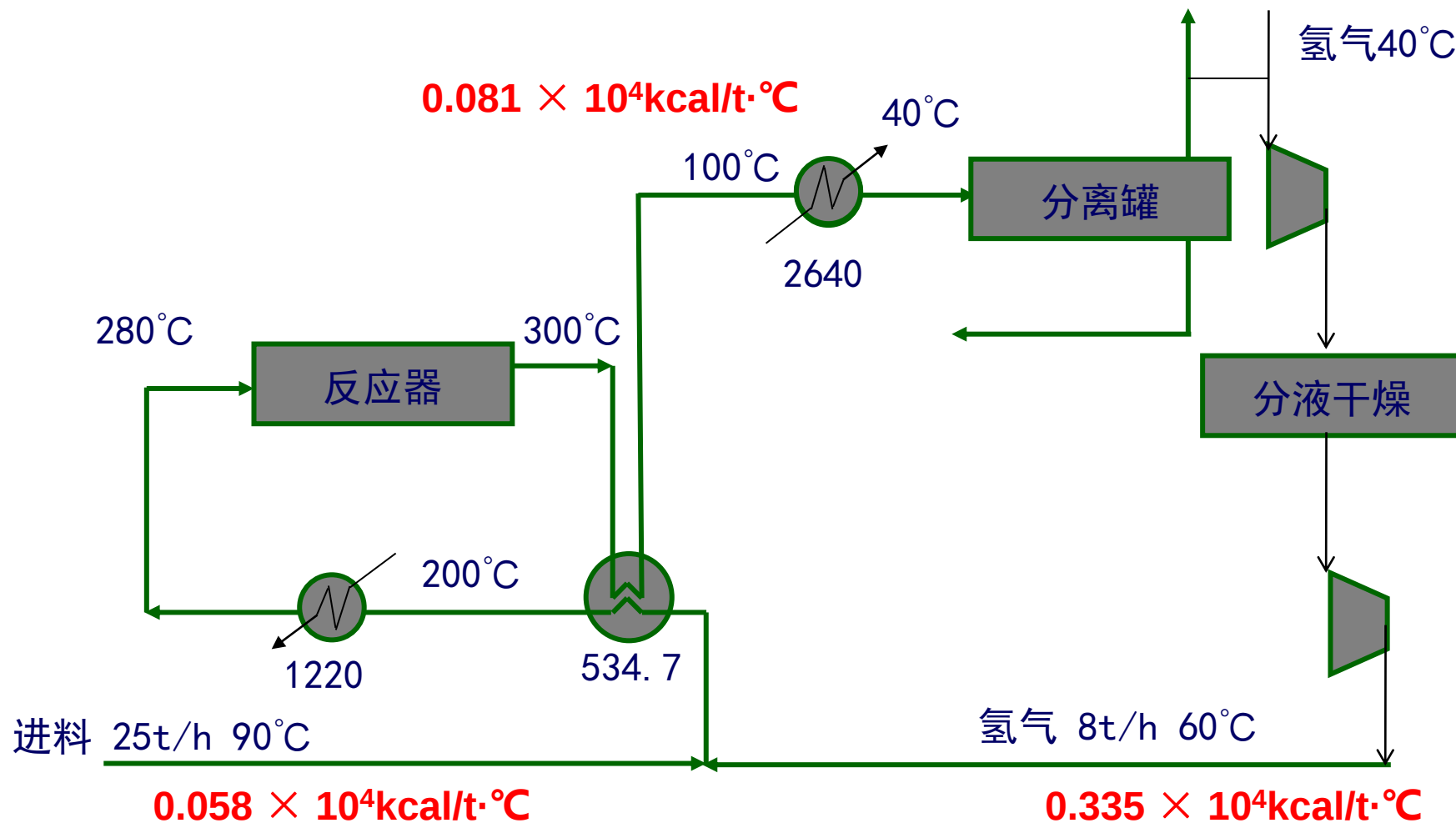


4.6 发生在我们身边的真实故事

- (1) 延迟焦化装置冷、热进料的直接混合再进入换热网络，混合温差高达50 °C ；
- (2) 加氢装置循环氢与热进料的直接混合；
- (3)

在工艺条件允许的条件下积极地合理地减少这种现象！

练习题目2——异构化装置：



练习题目2——异构化装置：

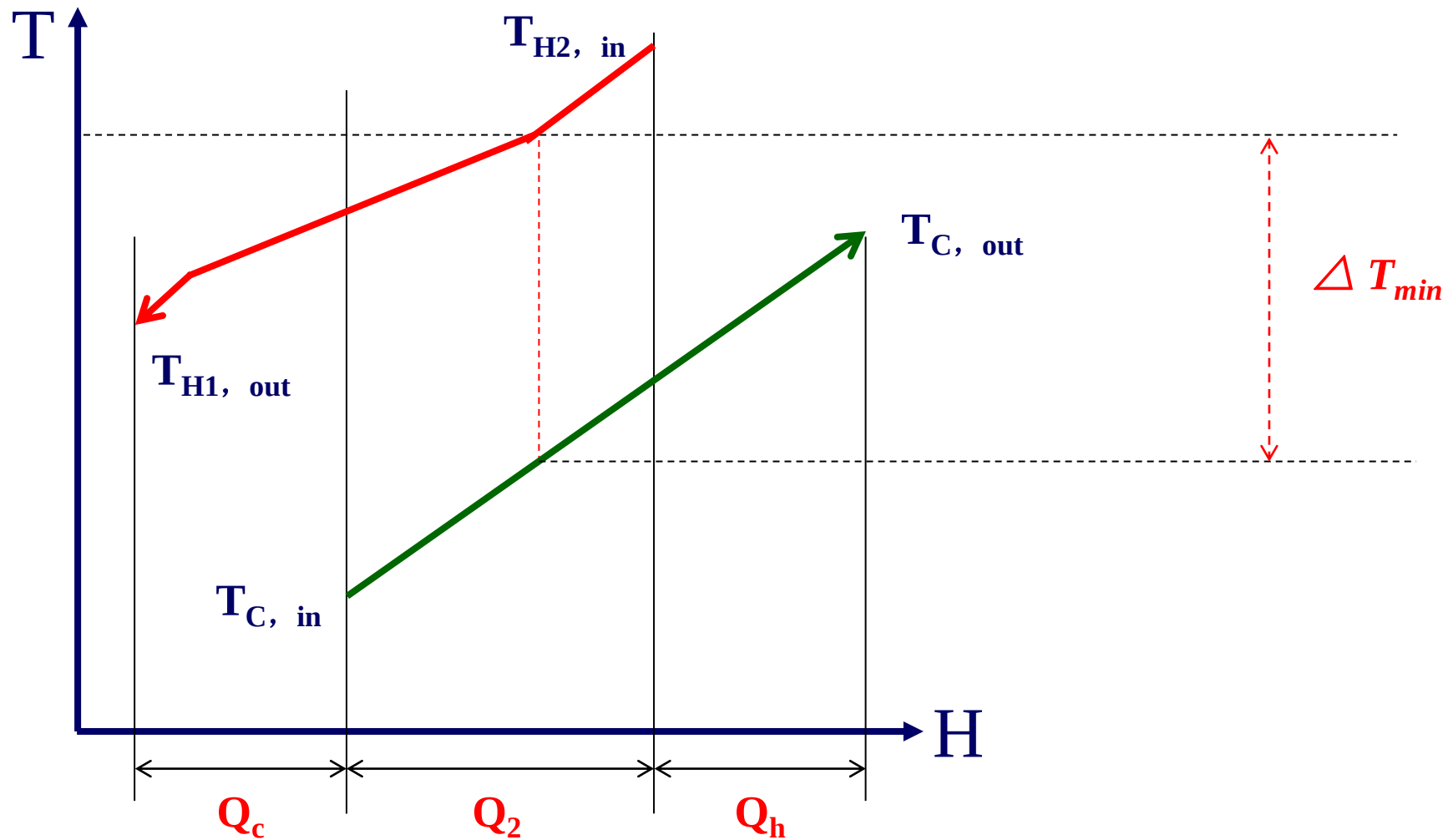
	流量F (t/h)	比热 C_p ($10^4\text{kcal/t}\cdot^\circ\text{C}$)	热容流率CP ($10^4\text{kcal/h}\cdot^\circ\text{C}$)	初始温 度 $T_s(^{\circ}\text{C})$	目标温 度 $T_t(^{\circ}\text{C})$	热负荷 H(10^4kcal/h)
冷物 流	25	0.058	1.45	90	280	275.5
冷物	8	0.335	2.68	60	280	589.6
流试用温焓图表示上述换热网络。						
热物 流	33	0.081	2.67	300	40	694.2

四、夹点技术(Pinch Technology)

夹点 (Pinch)

把冷组合曲线和热组合曲线表示在一个图上，热组合曲线在左上方，冷组合曲线在右下方，然后沿H轴平移冷组合曲线使之靠近热组合曲线。在这个过程中各部位的传热温差 ΔT 逐步变小，直到某一部位的传热温差 $\Delta T = \Delta T_{\min}$ ，最小传热温差的位置称为“夹点”。夹点处热流股的温度称为热夹点温度，夹点处冷流股的温度称为冷夹点温度。

夹点 (Pinch)



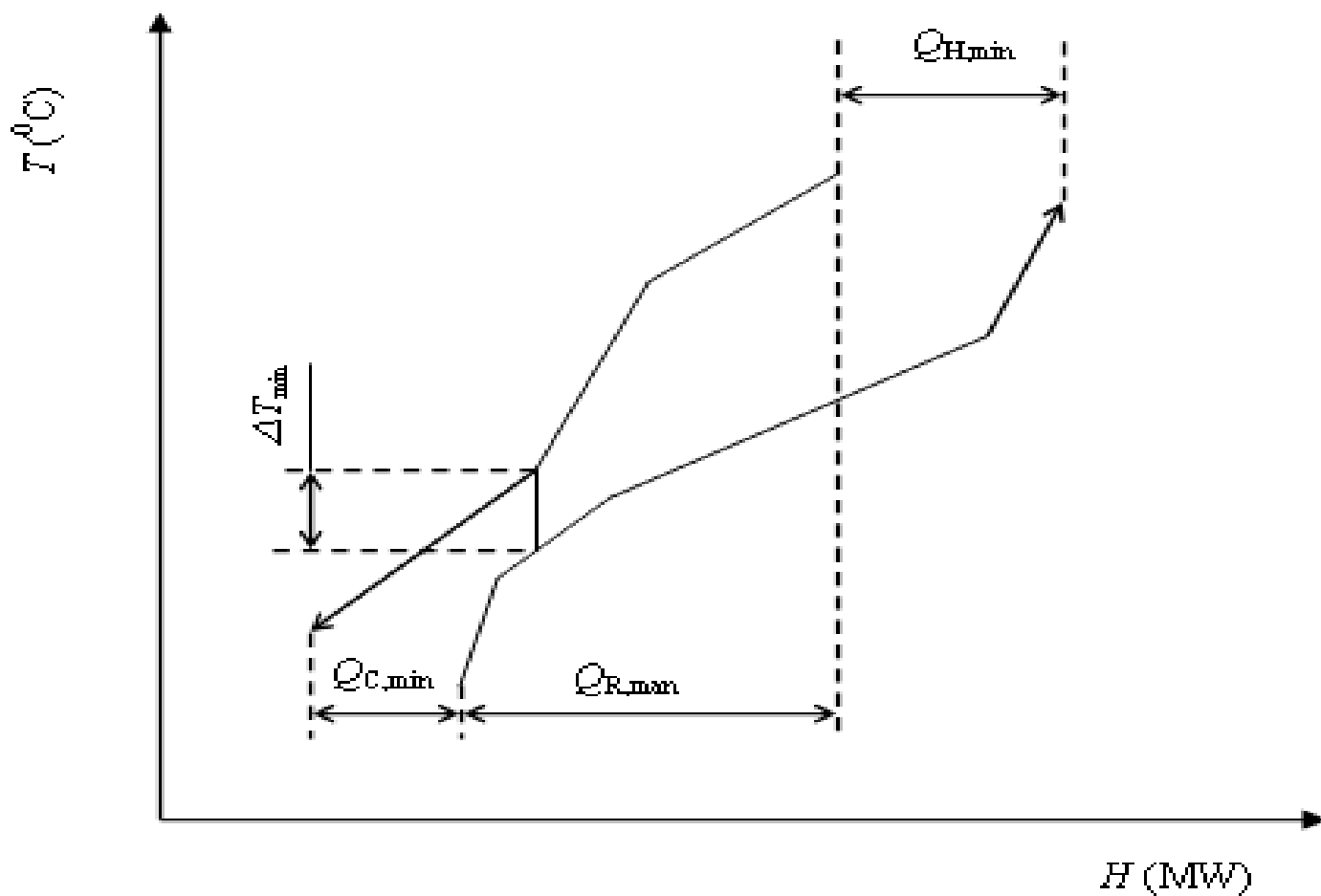
夹点技术的基础理论

夹点技术：以热力学为基础，分析过程系统中能量流沿温度的分布，从而发现系统用能的“瓶颈”（Bottleneck）所在，并给以“解瓶颈”（Debottleneck）。

1978年，Linnhoff 首次提出换热网络的温度夹点问题。

什么是夹点？

- 夹点是一个温度；
- 通常，夹点将温度范围划分为两个区域；
- 热公用工程只能在夹点上方使用，而冷公用工程只能在夹点下方使用。



夹点可定义为冷热组合曲线上传热温差最小的地方（等于 $\Delta T_{\min}$ ）

什么是夹点设计？

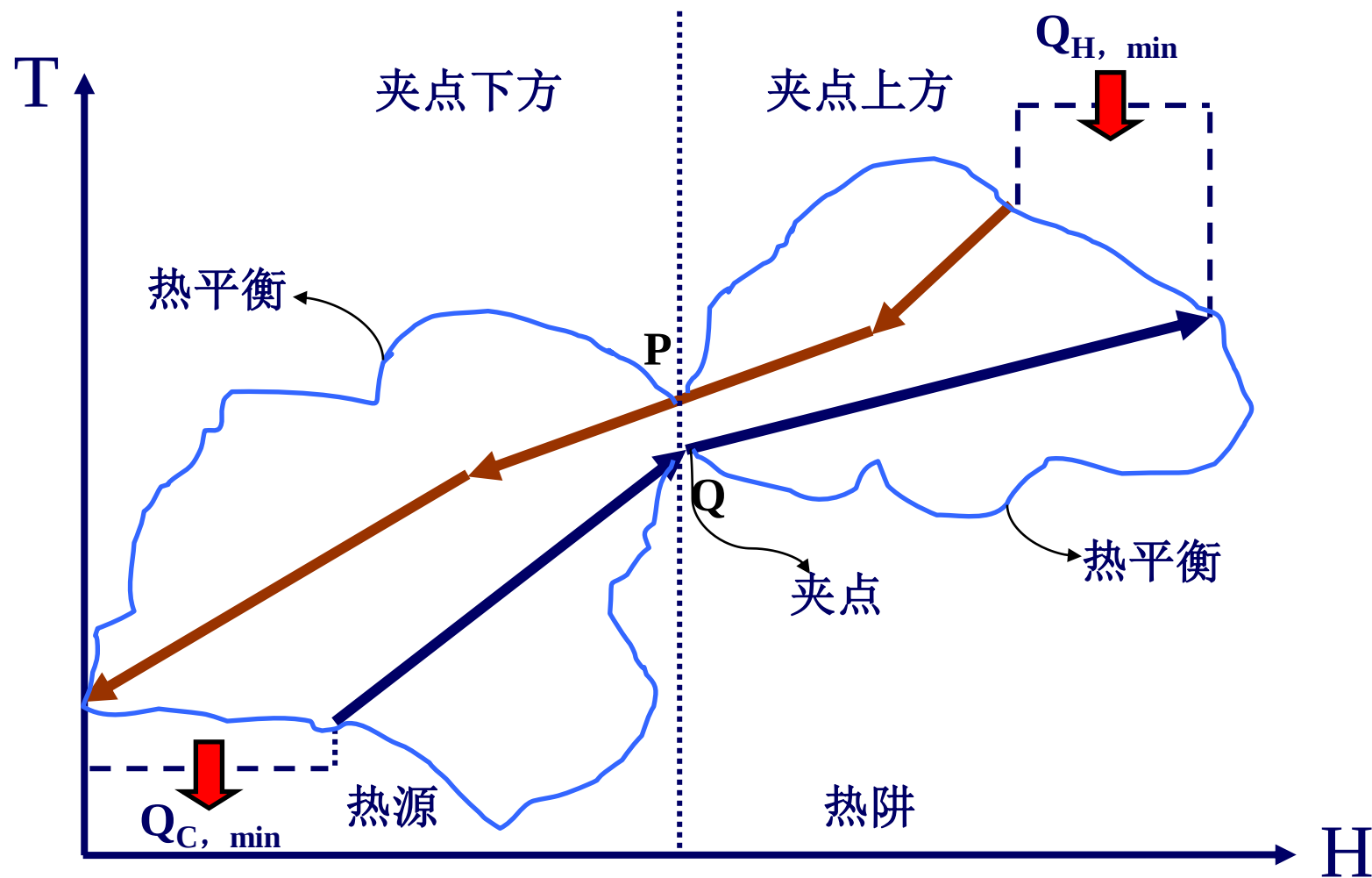
使用夹点方法进行换热网络设计，得到的换热网络没有热量穿越夹点换热，即夹点上方的热物流没有给夹点下方的冷物流换热。

A heat exchanger network obtained using the pinch design method is a network where no heat is transferred from a hot stream whose temperature is above the pinch to a cold stream whose temperature is below the pinch.

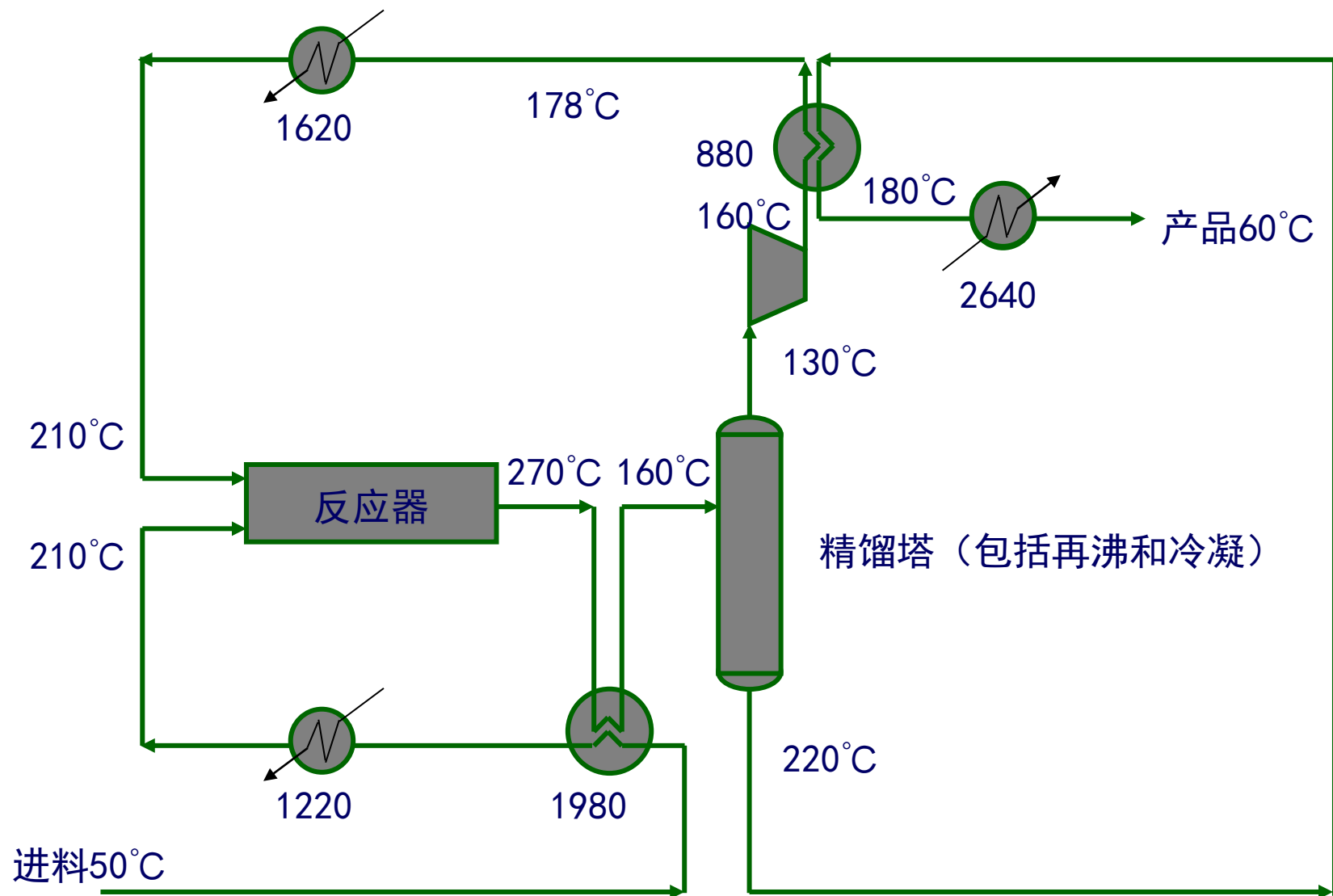
夹点的物理意义

- 对于一个给定的最小传热温差 $\Delta T_{\min}$ ，可以找到一个夹点。
- $T-H$ 图右上角表示至少要由热公用工程提供 $Q_{H,\min}$ 的热量才能将冷流股提高到目标温度，左下角表示至少要由冷公用工程提供 $Q_{C,\min}$ 的冷却量才能将热流股冷却到目标温度，中间重叠部分表示通过换热最大可回收的热量 $Q_{R,\max}$ 。

热阱与热源



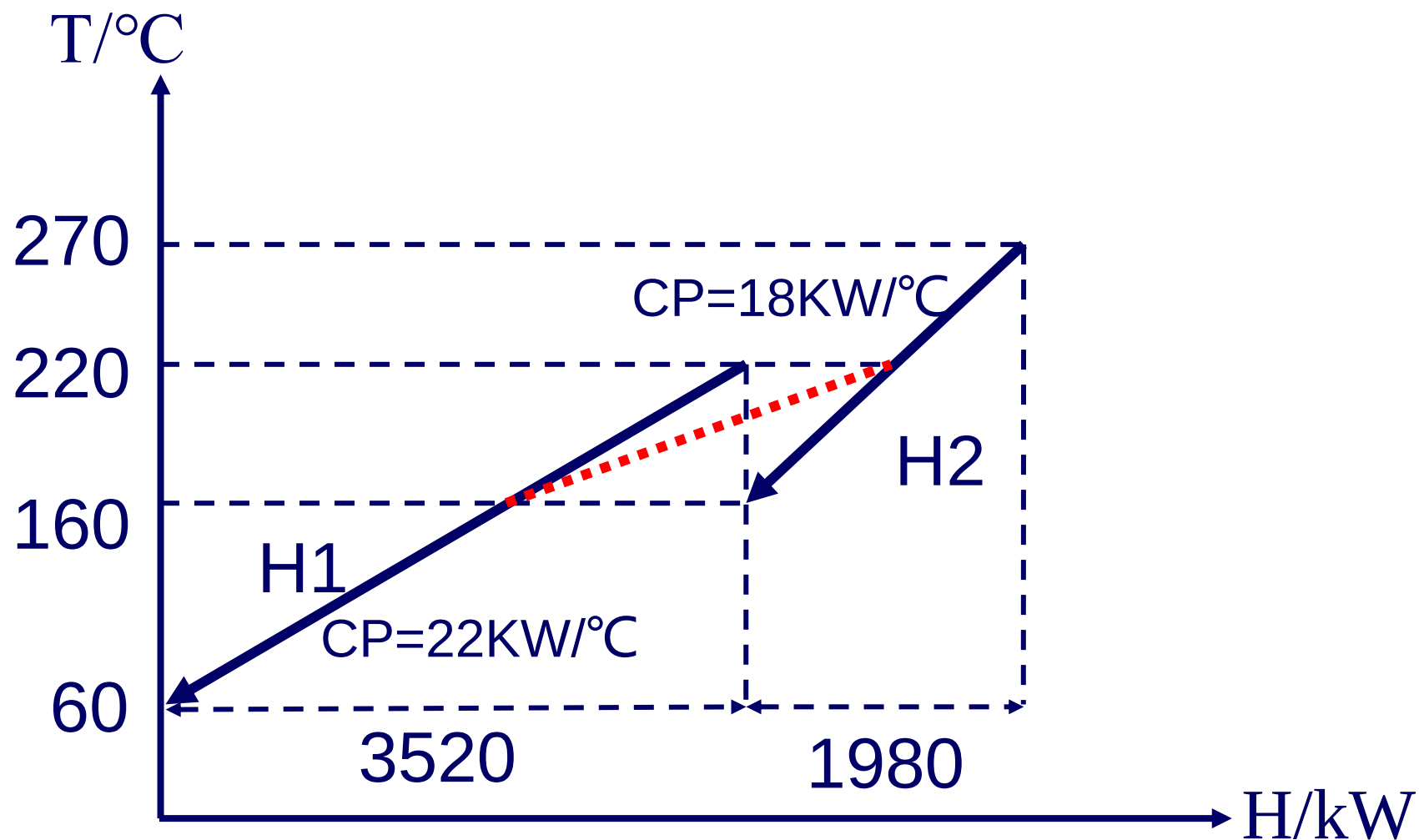
例1：运用组合曲线确定夹点及公用工程负荷



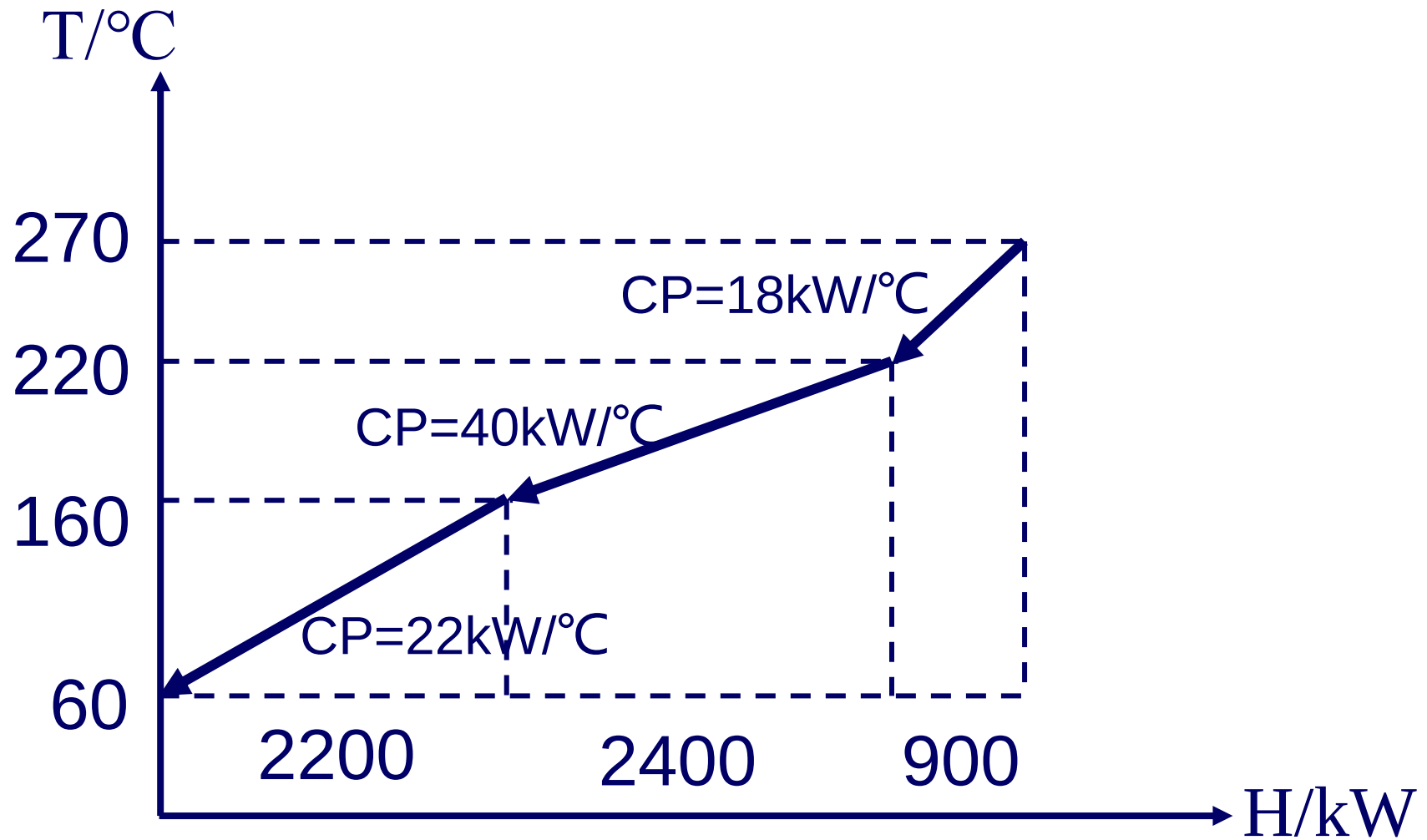
冷热流股数据 ($\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

物流 标号	物流名称	初始温度 °C	终了温度 °C	热负荷 kW	热容流率 kW/ °C
H1	产品	220	60	3520	22
H2	反应流出物	270	160	1980	18
C1	进料	50	210	3200	20
C2	循环流股	160	210	2500	50

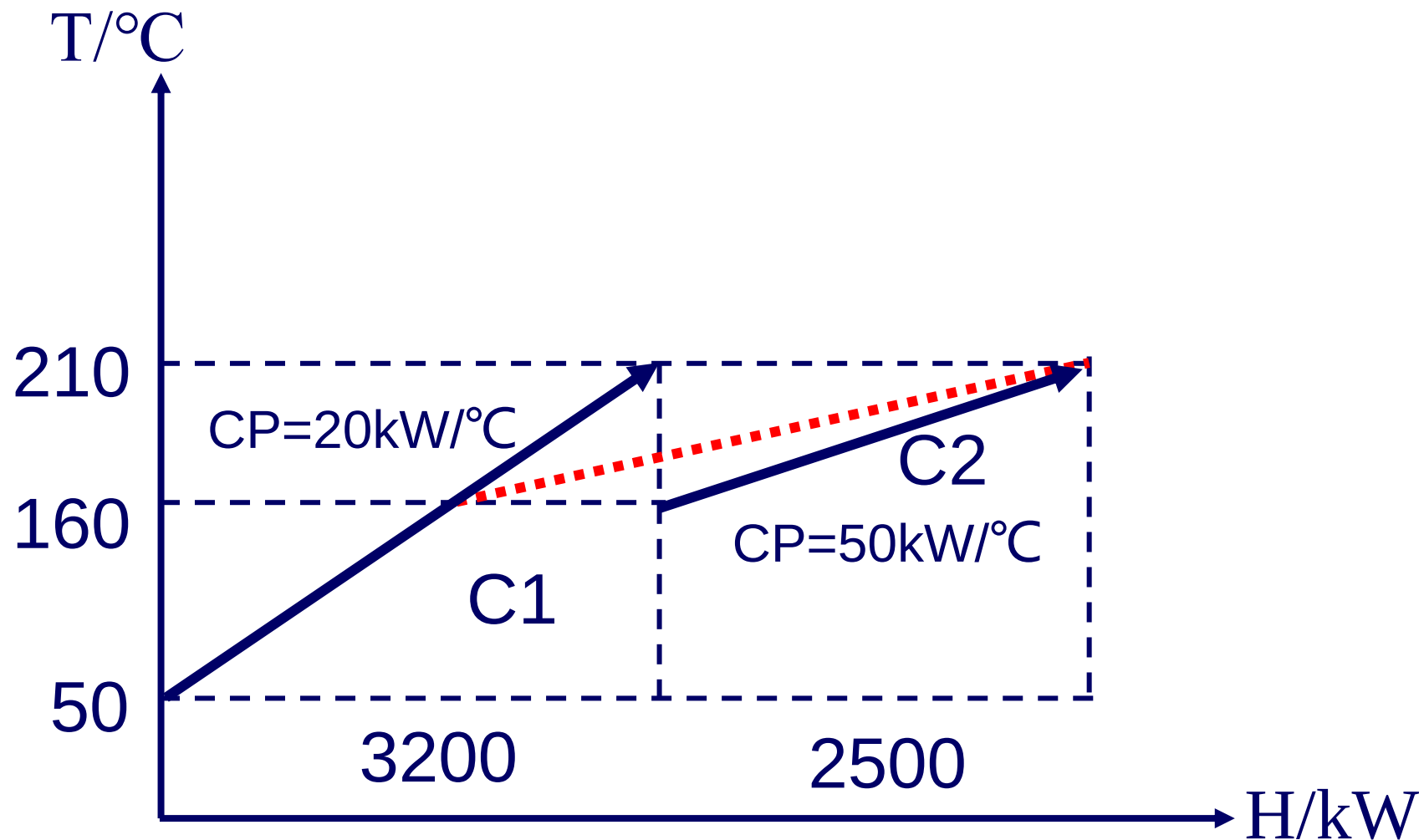
热物流组合曲线



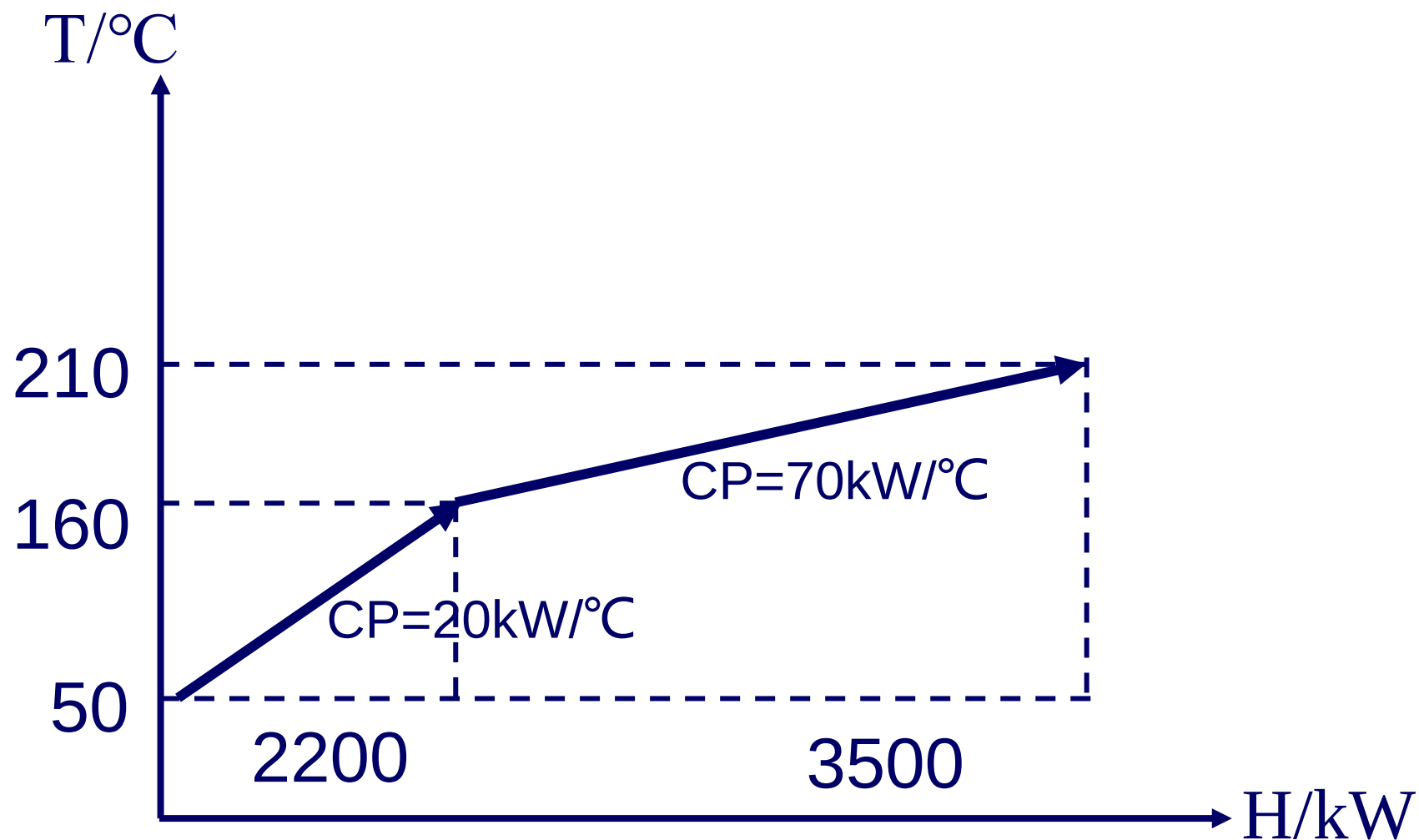
热物流组合曲线



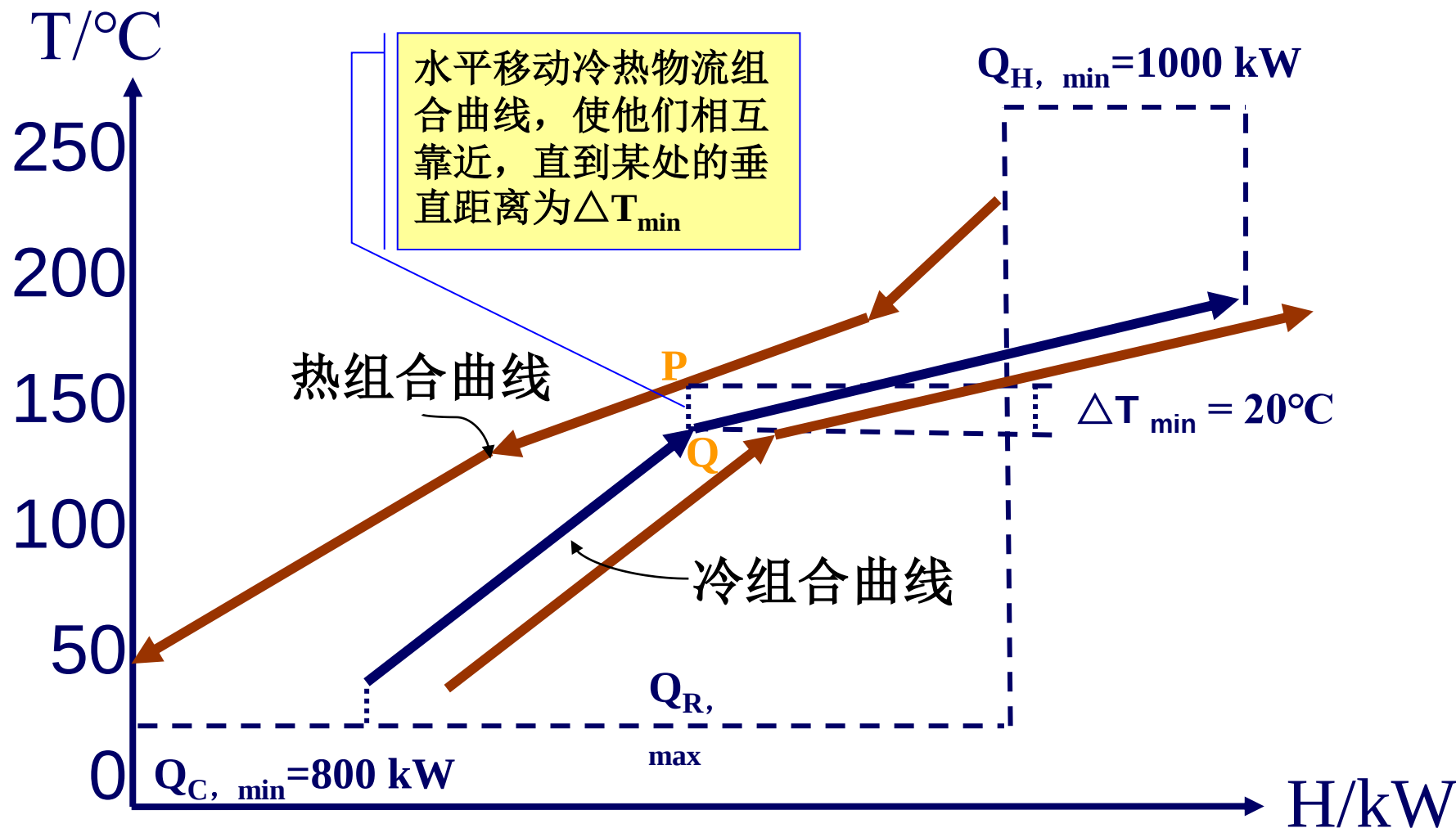
冷物流组合曲线



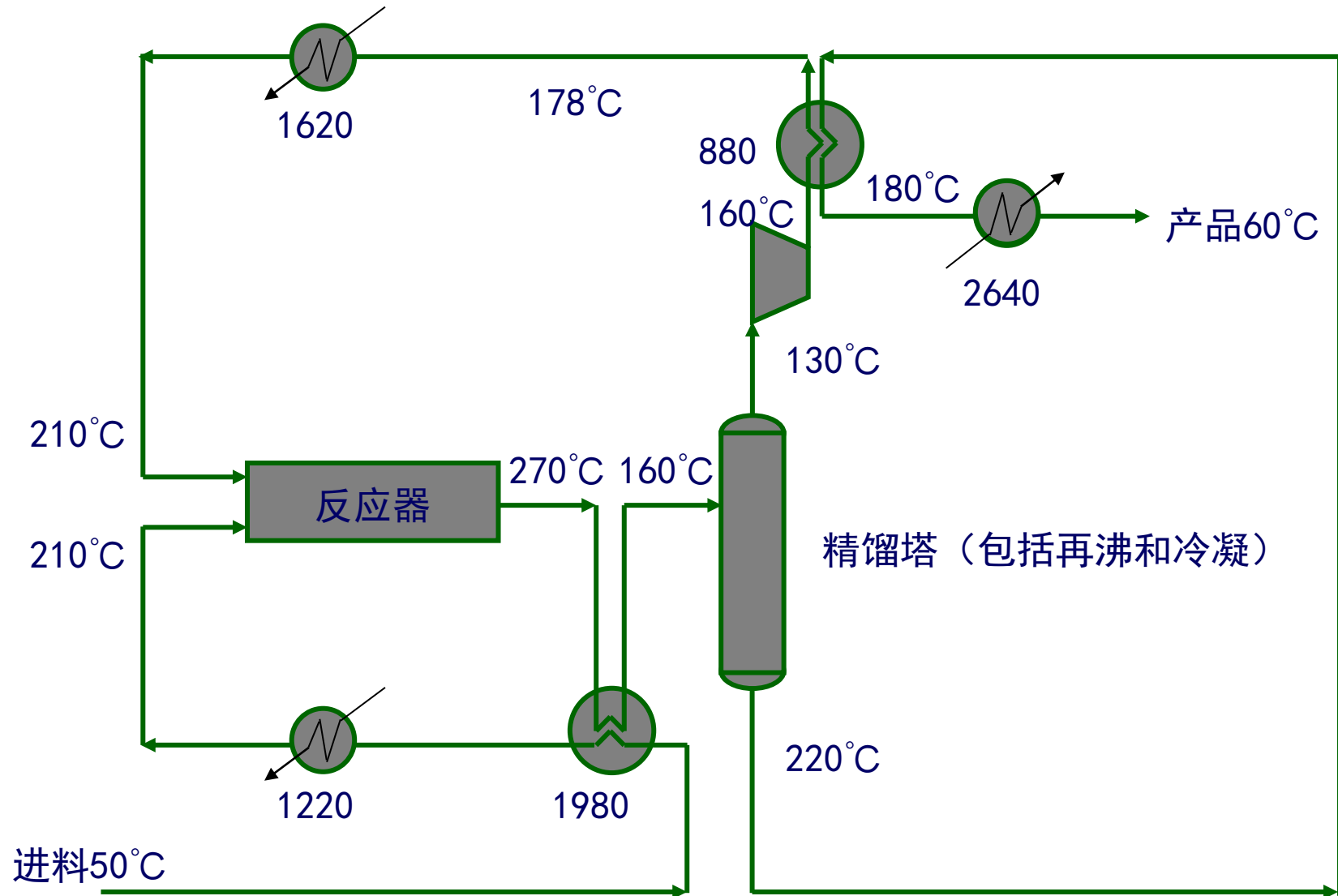
冷物流组合曲线



利用组合曲线确定夹点



联系：运用组合曲线确定夹点及公用工程负荷



冷热流股数据 ($\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

物流 标号	物流名称	初始温度 $^{\circ}\text{C}$	终了温度 $^{\circ}\text{C}$	热负荷 kW	热容流率 kW/ $^{\circ}\text{C}$
H1	产品	220	60	3520	22
H2	反应流出物	270	160	1980	18
C1	进料	50	210	3200	20
C2	循环流股	160	210	2500	50

The end!