

化工过程模拟及软件应用

杨鑫
化学化工学院
重庆理工大学
第一实验楼A203
cheyangxin@cqut.edu.cn

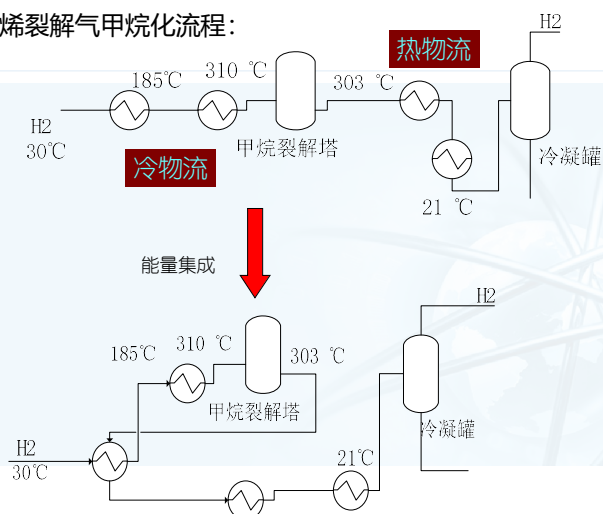
换热网络综合

- 换热网络简介
- 换热网络综合方法
- 夹点技术法
- 夹点法设计能量最优的换热网络

换热网络 Heat exchanger networks, HEN

- 换热是化工生产不可缺少的单元操作过程。
- 为了使物流温度满足工艺要求，而且也是为了回收过程热，减少公用工程消耗。
- 对于一个含有换热物流的工艺流程，将其中的换热物流提取出来，组成了换热网络系统。

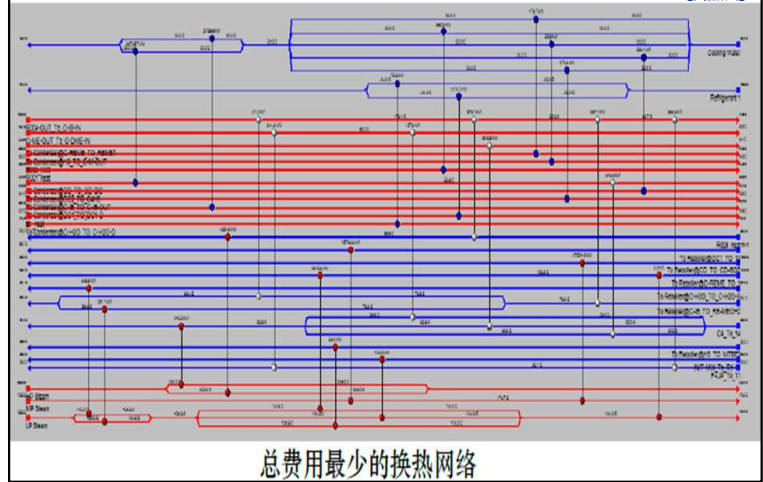
乙烯裂解气甲烷化流程：



换热网络综合

- 设计一个由热交换器、辅助加热器和辅助冷却器组成的换热器网络，将物流匹配在一起，充分利用热物流去加热冷物流，提高系统的热回收，使系统中需要加热或冷却的物流都达到预定的出口温度
- 尽可能地减少辅助加热与辅助冷却负荷，并令系统的投资费用和运行费用最小，同时使装置成本、公用工程（外部加热和冷却介质）消耗成本最少。
- 如何确定物流间匹配换热的结构以及相应的换热负荷分配的问题。

换热网络



换热网络综合方法

- 温焓图——最小公用消耗 (Hohmann)
 - 在温焓图上进行过程物流的热复合，找到了换热网络的能量最优解，即最小公用消耗；
 - 提出了换热网络最少换热单元数的计算公式。
 - 意义在于从理论上导出了换热网络的两个理想状态，从而为换热网络设计指明了方向
- 温度区间法——(Linnhoff 和 Flower)
 - 合成能量最优的换热网络：从热力学的角度出发，划分温度区间和进行热平衡计算，这样可通过简单的代数运算就能找到能量最优解（即最小公用工程消耗），这就是著名的温度区间法（简称TI法）
 - 对能量最优解进行调优。
- 夹点 (Pinch Point, 狭点, 窄点) 法——Linnhoff
- 人工智能法

夹点技术法

热物流 H; 冷物流 C

热容流率: $F \cdot C_p$ (物流流量*热容)

H: $T_{\text{初始}}$ 冷却 $T_{\text{目标}}$

C: $T_{\text{初始}}$ 加热 $T_{\text{目标}}$

- 热力学第一定律: $Q = F C_p (T_{\text{初}} - T_{\text{终}})$ (放热为+, 吸热为-)

物流号	类型	FCp	T初	T终	热量Q
1	冷	3.0	60	180	-360
2	热	2.0	180	40	280
3	冷	2.6	30	105	-195
4	热	4.0	150	40	440
					165

理论基础

- 如果没有温度推动力的限制，就必须由公用工程系统提供165kW的热量
- 第一定律计算算法没有考虑一个事实，即：只有热物流温度超过冷物流温度时，才能把热量由热物流传到冷物流。
- 任何换热网络既要满足第一定律，还要满足第二定律
- 热力学第二定律：热不可能自发地、不付代价地从低温物体传到高温物体。

温度区间

温度区间的划分步骤：

- 设置冷、热物流间允许的最小温度差 ΔT_{\min} ；
- 将热物流的起始温度与目标温度减去 ΔT_{\min} ；
- 与冷物流的起始、目标温度按大到小排序，分别用 T_1 、 T_2 、...生成、 T_{n+1} ，从而生成 n 个温度区间。
- 落入各温度区间的物流都考虑温度推动力，每个区间内的热物流都能把热量传给冷物流。

$$Q = [\sum (FC_p)_{H,i} - (FC_p)_{C,i}] \Delta T_i$$

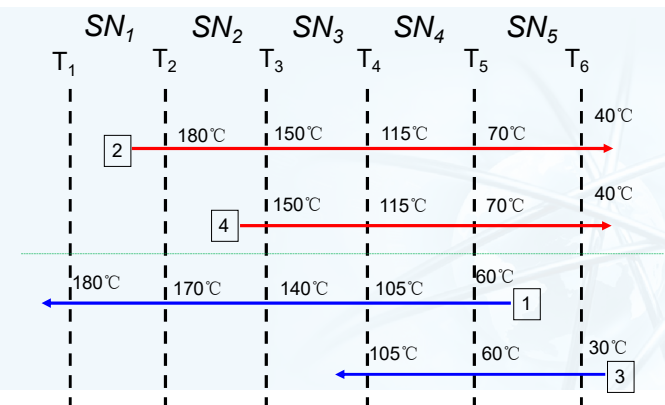
- 温度区间具有的特性：
 - 高温区内的任一股热物流能把热量传给低温区的冷流股
 - 热量不能从低温区流向高温区

温度区间

- 例：根据上表给出的四个冷、热物流数据，若允许温差 ΔT_{\min} 为10℃，试划分其温度区间。
- 解：将各物流的起始和目标温度一起排序，将温度汇成有方向的垂直线，标绘时，在同一垂直位置的冷热物流要相差 ΔT_{\min} $T_1 = 180^\circ\text{C}$, $T_2 = 170^\circ\text{C}$, $T_3 = 140^\circ\text{C}$
 $T_4 = 105^\circ\text{C}$, $T_5 = 60^\circ\text{C}$, $T_6 = 30^\circ\text{C}$

物流号	类型	FCp	T初	T终	热量Q
1	冷	3.0	60	180	-360
2	热	2.0	180	40	280
3	冷	2.6	30	105	-195
4	热	4.0	150	40	440
					165

温度区间



最小公用工程消耗



问题表

1. 确定温区端点温度 T_1, T_2, \dots, T_{n+1} , 将原问题划分为 n 个温度区间。
2. 对每个温区进行流股焓平衡, 以确定热量净需求量

$$D_i = I_i - Q_i = (T_i - T_{i+1})(\sum FCp_C - \sum FCp_H)$$

- D_i - 区间的净热需求量
- I_i - 输入到第 i 个温区的热量, 这个量或表示从第 $i-1$ 个温区传递的热量, 或表示从外部的加热器获得的热量;
- Q_i - 从第 i 个温区输出的热量。这个量或表示传递给第 $i+1$ 个子温区的热量, 或表示传递给外部冷却器的热量。

最小公用工程消耗



3. 设第一个温区从外界输入的热量 I_1 为零, 则该温区的热量输出 Q_1 为: $Q_1 = I_1 - D_1 = -D_1$

4. 在根据温度区间之间热量传递特性, 并假定各温度区间与外界不发生热量交换, 则有:

$$I_{i+1} = Q_i \quad Q_{i+1} = I_{i+1} - D_{i+1} = Q_i - D_{i+1}$$

利用上述关系计算得到的结果列入问题表。

- 若 Q 为正值, 则表示热量从第 i 个温区向第 $i+1$ 个温区, 这种温度区间之间的热量传递是可行的。
- 若 Q 为负值, 则表示热量从第 $i+1$ 个温区向第 i 个温区传递, 这种传递是不可行的。
- 为了保证 Q 均为正值, 可取步骤3中计算得到的所有 Q 中负数绝对最大值作为第一个温区的输入热量, 重新计算。
- 如果上一步计算得到的 Q 均为正值, 则这步计算是不必要的

最小公用工程消耗



- [例] 利用上述中的数据, 计算该系统所需的最小公用工程消耗。
- 解: 按问题计算表计算步骤, 得到的问题表如下:

温 区	流股与温度				$T_i - T_{i+1}$	$\sum C_{pC} - \sum C_{pH}$	D_i	I_i	Q_i	最大允许 热流量			
	热流股		冷流股							输入	输出		
	(2)	(4)	T/℃	180								(1)	(3)
1			180	170	10	3.0	30	0	-30	60	30		
2	↓		150	140	30	1.0	30	-30	-60	30	0		
3	↓	↓	115	105	35	-3.0	-105	-60	45	0	105		
4			70	60	45	-0.4	-18	45	63	105	123		
5	↓	↓	40	30	30	-3.4	-102	63	165	123	225		
FCp		2.0	4.0		3.0	2.6							

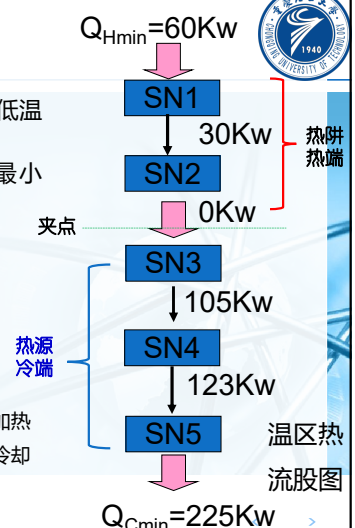
夹点



- 在温度区间中, 从高温区间向低温区间流动的热量为零
- 夹点处冷、热物流间传热温差最小 ΔT_{min}
- 夹点处过程系统的热流量为0
- 夹点上方为热阱, 又称热端
- 夹点下方为热源, 又称冷端

- 公用工程的设计原则

- 夹点处不该有热流量
- 热阱 (热端) 只能引入热公用工程加热
- 热源 (冷端) 只能引入冷公用工程冷却



温焓图

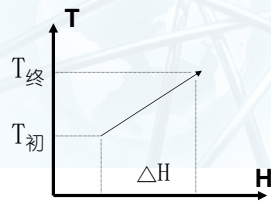
温焓图(T-H图): Temperature – Enthalpy Graph

该图的横轴为焓, H , 纵轴为温度, T 。

物流的焓:

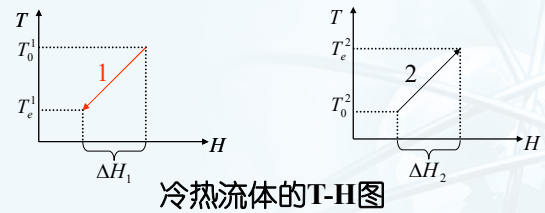
$$Q = \int_{T_{\text{初}}}^{T_{\text{终}}} FC_p \cdot dT = FC_p (T_{\text{终}} - T_{\text{初}}) = \Delta H$$

$$\frac{dT}{dQ} = \frac{T_{\text{终}} - T_{\text{初}}}{\Delta H} = \frac{1}{FC_p}$$

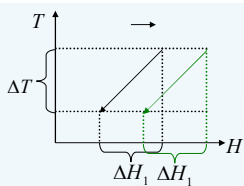


温-焓图

- 流股1需要被冷却, 流股2需要被加热
- 两流股在各自操作的温度区间内热容不随温度变化



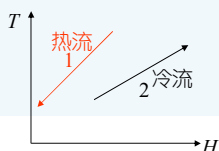
T-H图的水平平移



性质

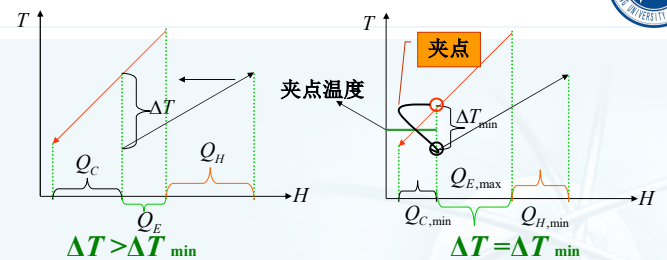
流股T-H直线的平移不改变流股的初始、中止温度与交换焓的值

两股工艺物流的换热设计



原则

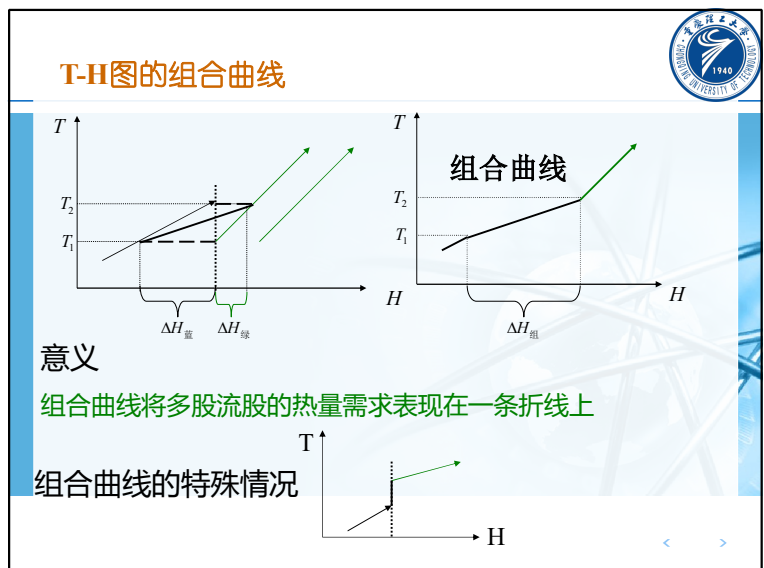
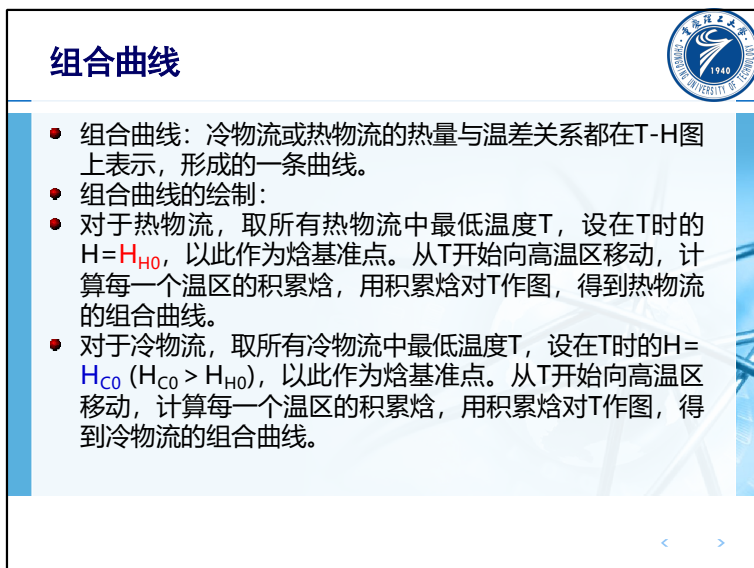
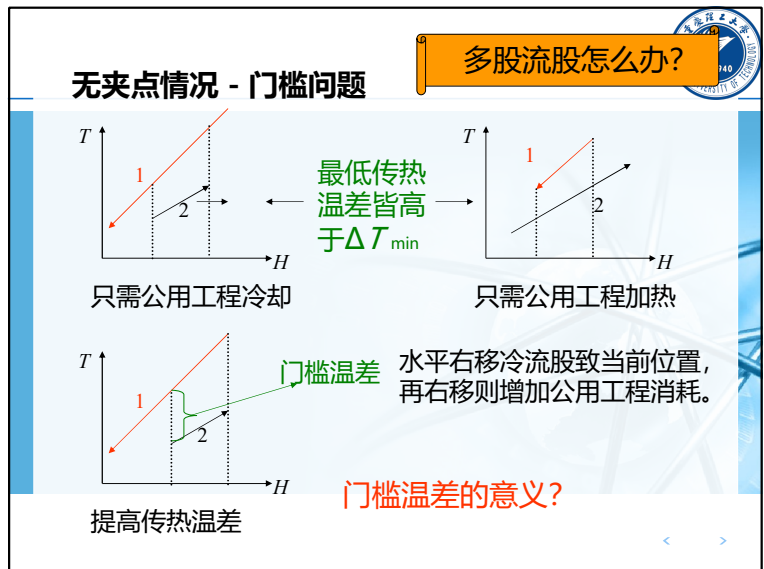
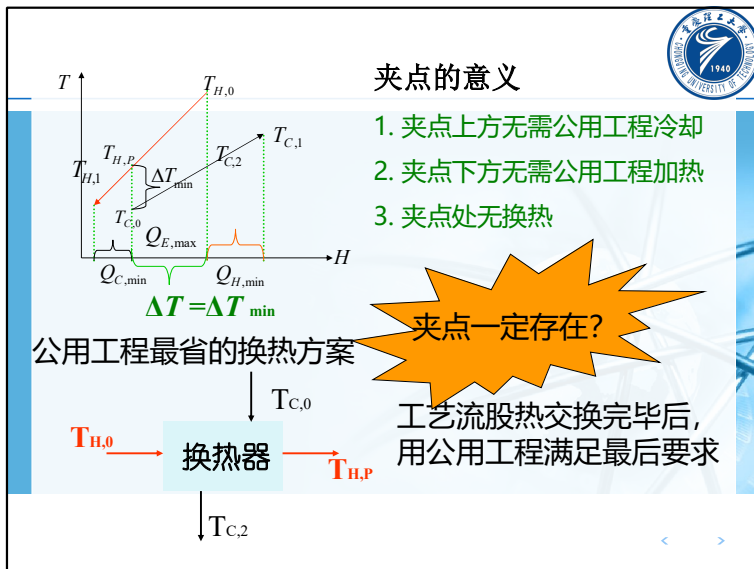
1. 共用工程消耗最少
2. 传热温差必须始终高于最低值 ΔT_{\min}



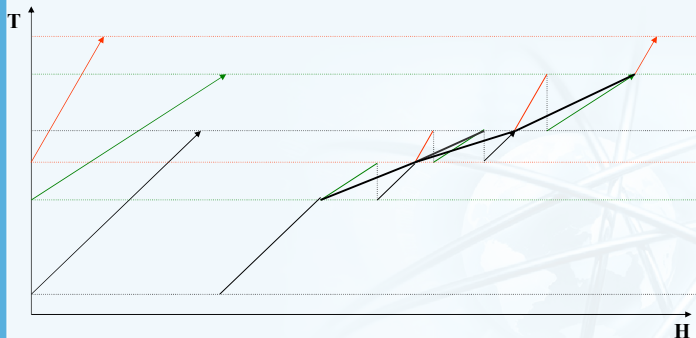
当最终传热温差高于 ΔT_{\min} 时, 热能未被充分回收

两物流曲线水平靠近可降低最终传热温差, 提高热能回收率

当最终传热温差等于 ΔT_{\min} 时, 热能被充分回收



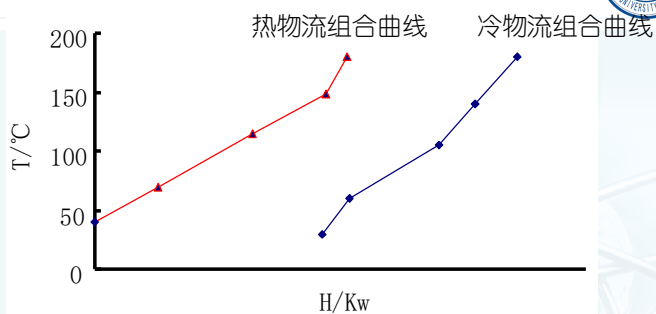
多股流股的组合曲线构造



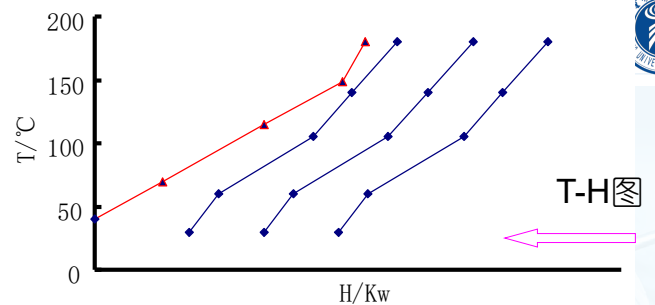
通常将过程系统的全部工艺热流组合成一条折线，全部工艺冷流组合成另外一条折线，随后进行夹点分析。

[例] 根据上述的数据，用T-H图表示冷、热物流的组合曲线。

T/°C	积累焓 H
热物流	
40	$H_0=0$
70	$H_1=(2+4)(70-40)=180$
115	$H_2=(2+4)(115-70)=270$
150	$H_3=(2+4)(150-115)=210$
180	$H_4=2(180-150)=60$
冷物流	
30	$H_0=1000$
60	$H_1=2.6(60-30)=78$
105	$H_2=(3+2.6)(105-60)=252$
140	$H_3=3(140-105)=105$
180	$H_4=3(180-140)=120$

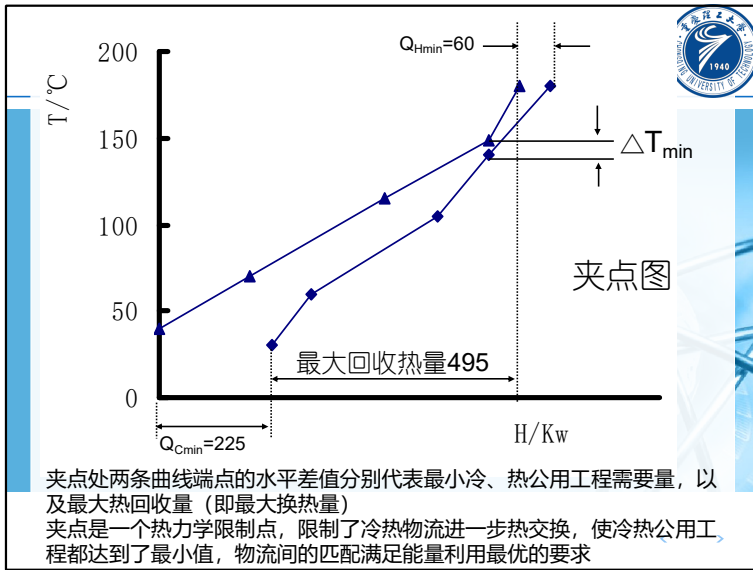


T-H图



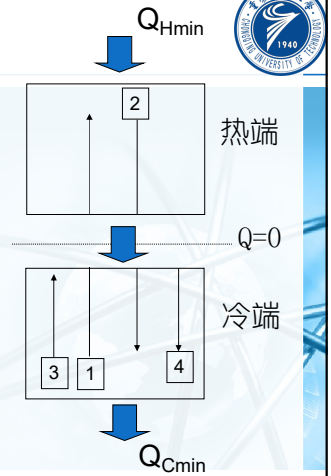
T-H图

- 由于T-H图上的H值为相对值，因此曲线可以沿H轴平移而不会改变交换热量。
- 将冷物流组合曲线沿H轴向左平移，当两条曲线的垂直最小距离等于最小允许传热温差 ΔT_{min} 时，就达到了实际可行的极限位置。
- 这个极限位置就是夹点



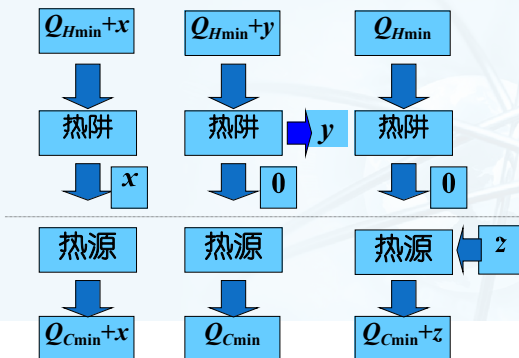
夹点的特性

- 夹点的能量特性
 - 夹点限制了能量的进一步回收，它表明了换热网络消耗的公用工程用量已达到最小状态。
 - 求解能量最优的过程就是寻找夹点的过程
- 夹点的位置特性
 - 夹点把整个问题分解成了夹点上热端与夹点下冷端两个独立的子系统。
 - 在夹点之上，换热网络仅需要热公用工程，因而是一个热阱。在夹点之下，换热网络只需要冷公用工程，因而是一个热源。
 - 夹点以上热物流与夹点下冷物流的匹配（热量穿过程夹点），将导致公用工程用量的增加。



换热网络的分解

- 设有x单位热量从夹点流过
- 根据焓平衡，必将使夹点之上热公用工程用量增加x单位，同时也使夹点之下的冷公用工程用量增加x单位。



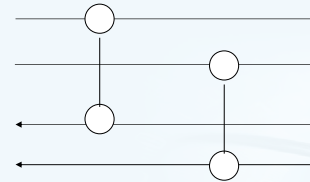
换热网络设计原则

- 避免夹点之上热物流与夹点之下冷物流间的匹配
- 夹点之上禁用冷却器
- 夹点之下禁用加热器

换热网络优化

- 目标：在公用工程用量最少的前提下寻求设备投资最少（即换热单元数最少）
 - 公用工程消耗最少
 - 换热单元数最少
- 这个目标很难同时满足，当公用工程消耗最少时，不能保证换热单元数最小。为了减少换热单元数，往往要牺牲一些能量消耗。
- 在设计换热网络时，存在能量与换热设备数的折衷问题。
- 在实际进行网络设计时，一般是先找出最小公用工程消耗，即先设计能量最优的换热网络，然后再采取一定的方法，减少换热单元数，从能量和设备数上对换热网络进行调优。

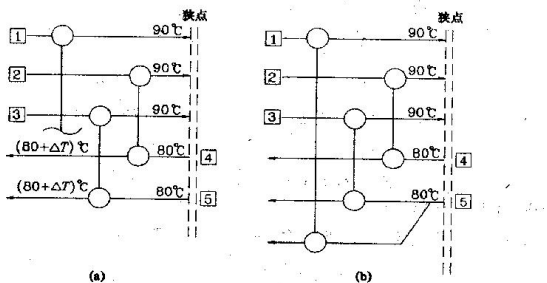
匹配的可行性原则



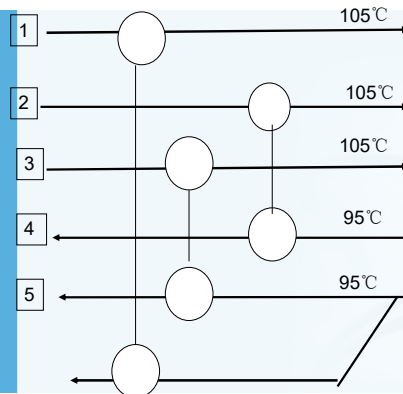
- 夹点处温差最小，限制最严，一旦离开夹点，选择余地就加大了。
- 由于夹点处的特性，导致夹点处的匹配不能随意进行
- 为了保证设计出的换热网络能量最优，可以把原问题分解成两个部分分别进行设计

1) 总物流数可行性原则

- 某些过程流通过夹点时，为了达到夹点温度，必须利用匹配进行换热



夹点

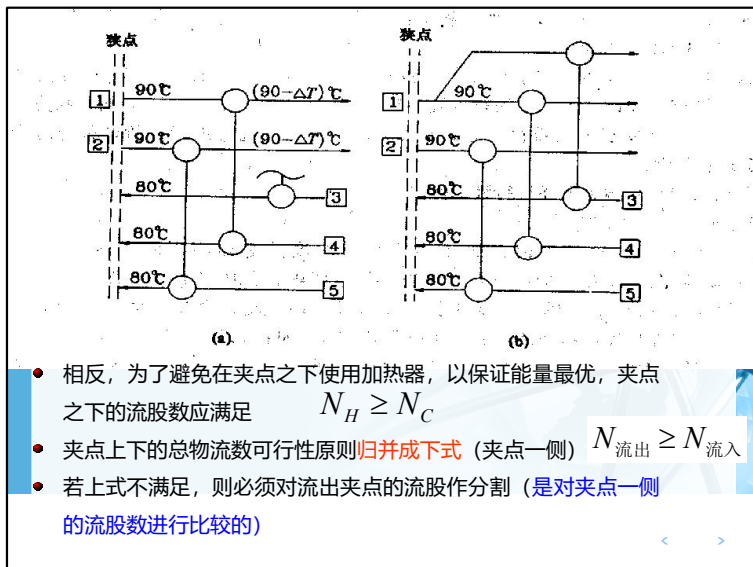


- 因为夹点之上使用外部冷却器会使总公用工程消耗增大，从而达不到能量最优的目的。
- 利用流股分割可以避免夹点之上使用冷却器。
- 为了保证能量最优，夹点之上的物流数应满足

$$N_H \leq N_C$$

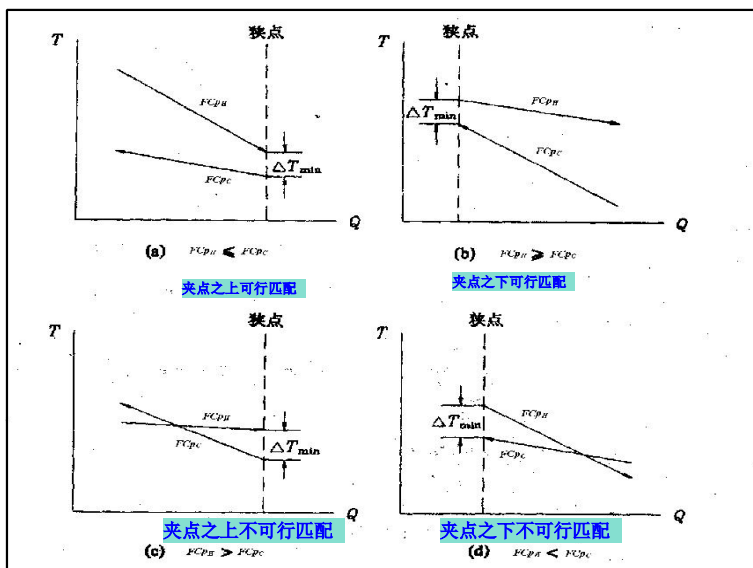
$$N_H: \text{热股数或分支数}$$

$$N_C: \text{冷股数或分支数}$$
- 流股的分割可以保证上式成立



2) FCp可行性原则

- 夹点处的传热推动力达到最小允许传热温差 ΔT_{\min} , 在离开夹点处应有 $\Delta T \geq \Delta T_{\min}$
 - 为了保证传热推力 ΔT 不小于 ΔT_{\min} 每个夹点匹配流股的热容流率 FCp 必须满足下列不等式
 - 夹点之上: $FCp_H \leq FCp_C$
 - 夹点之下: $FCp_H \geq FCp_C$
- FCp_H 为热流股或分支的热容流率; FCp_C 为冷流股或分支的热容流率
- FCp可行性原则也可归并 (夹点一侧) $FCp_{\text{流出}} \geq FCp_{\text{流入}}$
 - 如果流股间的各种匹配组合均不能满足上式, 则需利用流股分割来改变流股的FCp值
 - 上式仅适用于夹点匹配。非夹点匹配时温差较大, 对匹配的限制不象夹点处那样苛刻

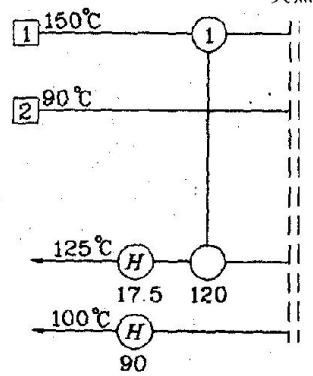


流股的分割—FCp表

- 利用夹点设计方法对表中的物流进行匹配
- 最小允许传热温差 ΔT_{\min} 为 20°C
- 利用问题表法计算得到: 最小加热量为 107.5 kW , 最小冷却量为 40 kW , 夹点位置在 $90-70^\circ\text{C}$

流股及 类型	热容流率 CP $\text{kW}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{初}}$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{终}}$ $^\circ\text{C}$
1 热	2	150	60
2 热	8	90	60
3 冷	2.5	20	125
4 冷	3.0	25	100

- 对于夹点之上物流匹配情况如图所示
- 对于夹点之下的2条热物流，只有流股2的热容流率大于冷物流，它可以与任意一条冷物流匹配，问题是剩下的物流则无法进行匹配。
- 因此需要对夹点之下的热物流作分割



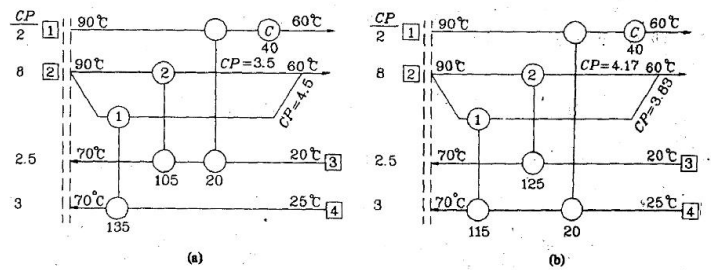
夹点之上的匹配

采用FCp表来分割物流

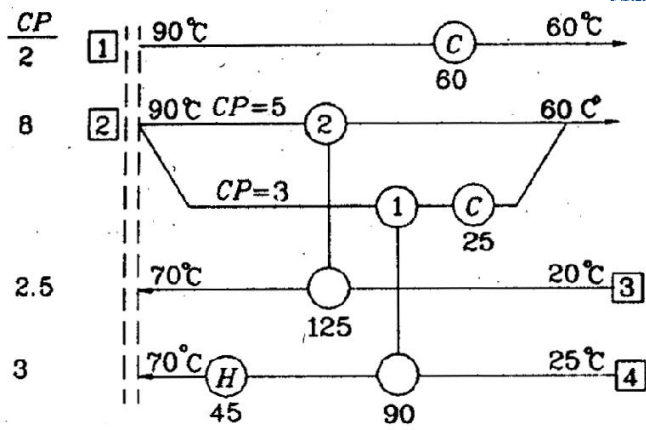
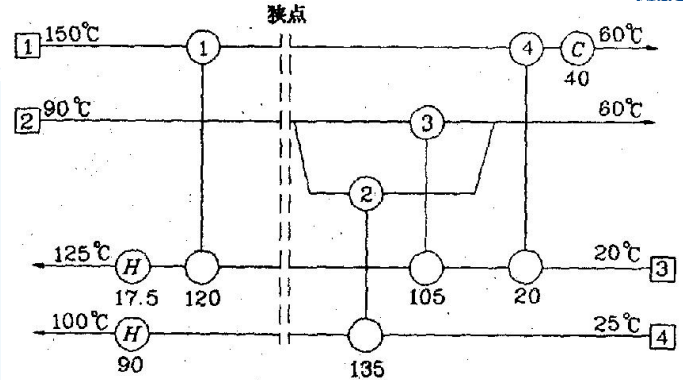
- 把夹点之上或夹点之下的冷、热物流的热容流率按照数值的大小分别排成两列列入FCp表，将可行性判据列于表头。
- 每个FCp值代表一个流股，那些必须参加匹配的FCp值用方框圈起
- 夹点匹配表现为一对冷、热流股FCp值的结合，分割后的流股热容流率写在原流股热容流率旁边。

夹点之下	夹点之下	夹点之下												
$N_H \geq N_C$ $FCp_H \geq FCp_C$	$N_H \geq N_C$ $FCp_H \geq FCp_C$	$N_H \geq N_C$ $FCp_H \geq FCp_C$												
<table><tr><td>8</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>2.5</td></tr></table>	8	3	2	2.5	<table><tr><td>8</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>2.5</td></tr></table>	8	3	2	2.5	<table><tr><td>8</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>2.5</td></tr></table>	8	3	2	2.5
8	3													
2	2.5													
8	3													
2	2.5													
8	3													
2	2.5													
冷端的FCp表	冷端的FCp表	冷端的FCp表												

不可行夹点匹配



冷端的两个可行设计

按 FC_p 表匹配得到的热回收网络

夹点设计法对设计的结果

换热网络的调优

最小换热单元数

- 在利用夹点法设计能量最优的换热网络时，原问题被分解成两个子系统（冷端和热端），这两个子系统是不相关的（它们之间不允许匹配）。

- 所以它的最小换热单元数为两个子网络的最少换热单元数之和

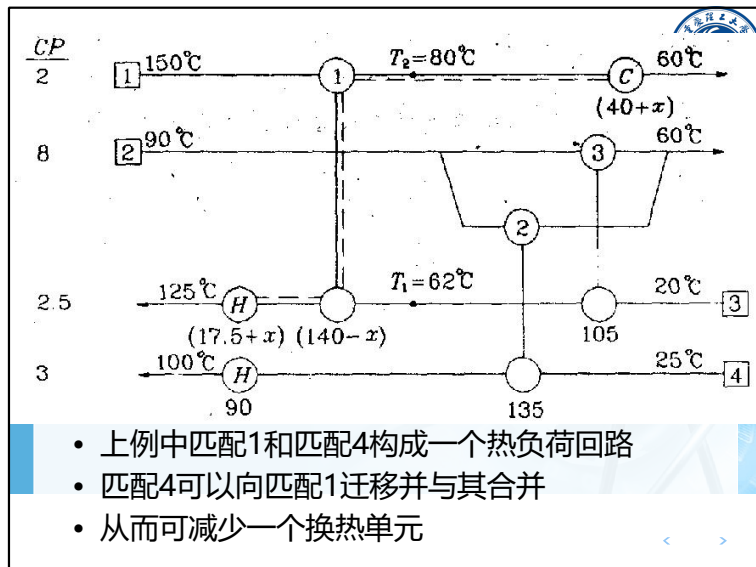
$$U_{E,\min} = (N_H + N_C - 1)_{\text{夹点上}} + (N_H + N_C - 1)_{\text{夹点下}}$$

- 即换热网络不能同时满足能量最优和单元数最少的要求。
- 能量最优可保证操作费用最低，单元数最少可使设备费用最低，因而存在着操作费和设备费之间的权衡。
- 夹点设计法得到的结构处于最小公用工程消耗状态，而勾销推断法基本上可以保证两个子系统中换热单元数最少。
- 当两个子系统组合成原系统时引起了换热单元数的过剩。

能量与设备数的权衡

Linnhoff结论:

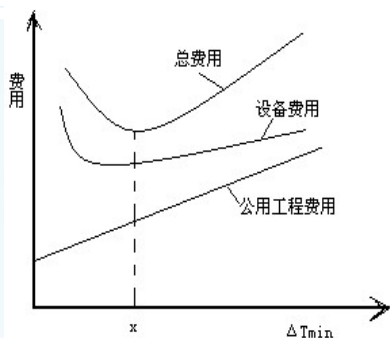
- 换热网络实际换热单元数比最少换热单元数每多出一个单元，都对应着一个独立热负荷回路。
- 换热负荷可以沿热负荷回路进行“加”、“减”，“加”、“减”……地迁移，而不改变该回路的热平衡



- 此时, T_1 与 T_2 间的温差为 18°C , 违反了最小允许传热温差 ($\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$) 的约束。
- 所以这样简单地合并是不可行的, 还必须借助于“能量松弛法”来恢复最小传热温差

ΔT_{\min} 的选取

- 目前一般是直接指定 ΔT_{\min}
- 实际设计中, ΔT_{\min} 的选择与换热网络的操作及设备成本有直接关系
- ΔT_{\min} 是一个待优化的决策变量, 通常经过试差选取。
- 目前还没有直接方法能够精确确定最佳 ΔT_{\min}



最小传热温差对费用的影响

过程系统的总组合曲线

总组合曲线— 在 $T-H$ 图上描述过程系统中的热流量沿温度的分布, 热流量为零处就是夹点。

总组合曲线的绘制

(1) 根据问题表格法计算的结果进行标绘

物流标号	热容流率 / ($\text{kW}/^\circ\text{C}$)	初始温度 T_s / $^\circ\text{C}$	目标温度 T_t / $^\circ\text{C}$	传热温差贡献值
H_1	2.0	150	60	10
H_2	8.0	90	60	5
C_1	2.5	20	125	10
C_2	3.0	25	100	10

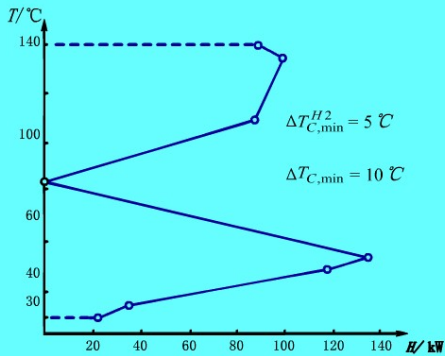
物流的虚拟温度		
物流标号	虚拟初始温度/°C	虚拟目标温度
H_1	$150 - 10 = 140$	$60 - 10 = 50$
H_2	$90 - 5 = 85$	$60 - 5 = 55$
C_1	$20 + 10 = 30$	$125 + 10 = 135$
C_2	$25 + 10 = 35$	$100 + 10 = 110$

子网络序号	冷物流及其温度		热物流及其温度	
k	C_1	C_2	H_1	H_2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

子网络序号	赤字 D_k / kW	热流量 / kW			
		I_k	O_k	I_k	O_k
1	-10	0	10	90	100
2	12.5	10	-2.5	100	87.5
3	87.5	-2.5	-90	87.5	0
4	-135	-90	45	0	135
5	17.5	45	27.5	135	117.5
6	82.5	27.5	-55	117.5	35
7	12.5	-55	-67.5	35	22.5

子网络序号	界面温度 / °C		界面热负荷 / kW	
	(虚拟温度)		上界面	下界面
序号	上界面	下界面	输入	输出
1	140	135	90	100
2	135	110	100	87.5
3	110	85	87.5	0
4	85	55	0	135
5	55	50	135	117.5
6	50	35	117.5	35
7	35	30	35	22.5

按问题表格 (3) 标绘总组合曲线:



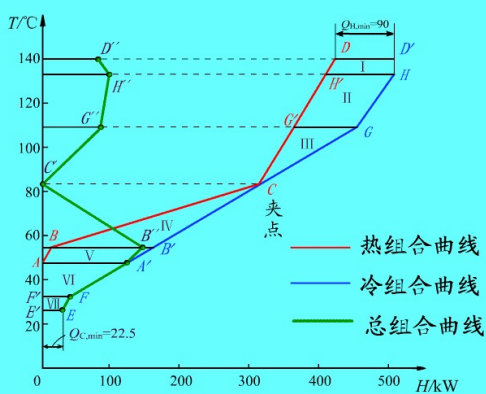
按表5-14标绘的总组合曲线

总组合曲线的意义

描述热流量沿温度的分布;
需要补充热量的温位;
可以回收热量的温位;
夹点上方—热阱, 只需要热公用工程;
夹点下方—热源, 只需要冷公用工程;
过程能量综合的背景。

(2) 构造总组合曲线

总组合曲线的绘制



用作图法绘制总组合曲线

总结

- 学习资料: 换热网络设计教程、网络上很多学习资料
- 重点:
- 掌握换热网络综合的原理
- 自学附件: 换热网络设计教程
- 学会用 Aspen Energy Analyzer 对工艺流程进行换热网络综合
- 为后续的化工设计大赛、化工设计和化工工艺课程设计做准备