
一、问题表格法

问题表格法确定夹点的步骤

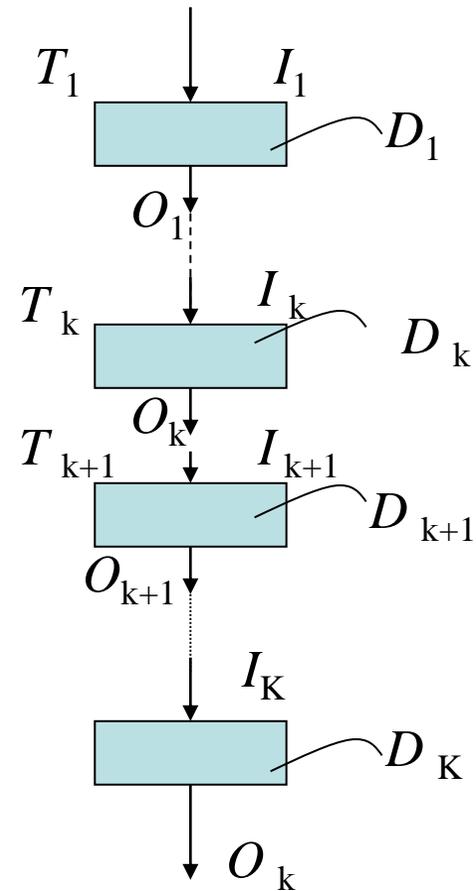
第一步：子网络的分割，问题表格(1)；

第二步：每个子网络的热量衡算；

第三步：问题表格(2)的确立与夹点的确定。

子网络的基本概念

- 热级联：每个单元都是相似的传热过程组成的串级结构。每一级相当于一个子网络。
- 热级联—虚拟结构，同一温位的物流集中于同一级。



子网络热量衡算的基础概念

- O_K : 第k个子网络向外界或其他子网络输出的热量;
- I_K : 外界或其他子网络供给第k个子网络的热量;
- D_K : 第k个子网络本身的赤字 (Deficit), 即该子网络为满足热平衡所需要的外加热量。

热量衡算的基本公式

- $O_k = I_k - D_k$ 输出=输入-赤字
- $D_k = (\sum CP_C - \sum CP_H)(T_k - T_{k+1})$
- $\sum CP_C$: 子网络k中包含的所有冷物流的热容流率之和;
- $\sum CP_H$: 子网络k中包含的所有热物流的热容流率之和。

待完成的表单

子网络 序号	赤字 D_K/kW	热量/kW	
		I_K	O_K
SN ₁			
SN ₂			
SN ₃			
SN ₄			
SN ₅			
SN ₆			

例题一：

一过程系统含有两个热物流和两个冷物流，给定数据列于下表，选定冷热物流间最小传热温差为 $\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试用问题表格法确定该过程的夹点位置。

物流标号	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	150	60	180.0	2.0
H2	90	60	240.0	8.0
C1	20	125	262.5	2.5
C2	25	100	225.0	3.0

第一步：子网络的分割

问题表格(1)

$\Delta T_{\min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

子网络序号	冷物流及其温度			热物流及其温度		
	C_1	C_2	$/^{\circ}\text{C}$	H_1	H_2	$/^{\circ}\text{C}$
SN_1				150		
SN_2		125		145		
SN_3		100		120		
SN_4		70		90		
SN_5		40		60		
SN_6		25				
		20				

等于最小传热温差

第二步：子网络的热量衡算

- 第一个子网络：

$K = 1$ ，（温度间隔为 $150 \sim 145 \text{ } ^\circ\text{C}$ ）

$D_1 = (0 - 2) \times (150 - 145) = -10$ （负赤字表示有剩余热量10kW）

$I_1 = 0$ （无外界输入热量）

$O_1 = I_1 - D_1 = 0 - (-10) = 10$

O_1 为正值，说明子网络1(SN_1)有剩余热量供给子网络2(SN_2)

第二步：子网络的热量衡算

- 第二个子网络：

$K = 2$ ，（温度间隔为145~120°C）

$$D_2 = (2.5 - 2) \times (145 - 120) = 12.5$$

（正赤字表示有热量赤字12.5kW）

$I_2 = O_1 = 10$ （子网络SN₁有剩余热量供给SN₂）

$$O_2 = I_2 - D_2 = 10 - 12.5 = -2.5$$

O_2 为负值，说明子网络SN₂有剩余的负热量供给子网络SN₃（即需要子网络3向子网络2供给热量，但这是不可能的）

第二步：子网络的热量衡算

- 第三个子网络：

$K = 3$, (温度间隔为 $120 \sim 90^\circ\text{C}$)

$$D_3 = (2.5 + 3 - 2) \times (120 - 90) = 105$$

$$I_3 = O_2 = -2.5$$

$$O_3 = I_3 - D_3 = -2.5 - 105 = -107.5$$

- 第四个子网络：

$K = 4$, (温度间隔为 $90 \sim 60^\circ\text{C}$)

$$D_4 = (2.5 + 3 - 2 - 8) \times (90 - 60) = -135$$

$$I_4 = O_3 = -107.5$$

$$O_4 = I_4 - D_4 = -107.5 - (-135) = 27.5$$

第二步：子网络的热量衡算

- 第五个子网络：

$K = 5$ ，（温度间隔为 $40 \sim 25^\circ\text{C}$ ）
只有冷物流

$$D_5 = (2.5 + 3) \times (40 - 25) = 82.5$$

$$I_5 = O_4 = 27.5$$

$$O_5 = I_5 - D_5 = 27.5 - 82.5 = -55$$

- 第六个子网络：

$K = 6$ ，（温度间隔为 $25 \sim 20^\circ\text{C}$ ）

$$D_6 = 2.5 \times (25 - 20) = 12.5$$

$$I_6 = O_5 = -55$$

$$O_6 = I_6 - D_6 = -55 - 12.5 = -67.5$$

第三步：问题表格(2)的确立与夹点的确定

子网络 序号	赤字 D_K/kW	热量/ kW	
		I_K	O_K
SN ₁	-10	0	10.0
SN ₂	12.5	10.0	-2.5
SN ₃	105.0	-2.5	-107.5
SN ₄	-135.0	-107.5	27.5
SN ₅	82.5	27.5	-55.0
SN ₆	12.5	-55.0	-67.5

温位

q_k 为负值的时候传热过程无法完成，需要外界供入热量。

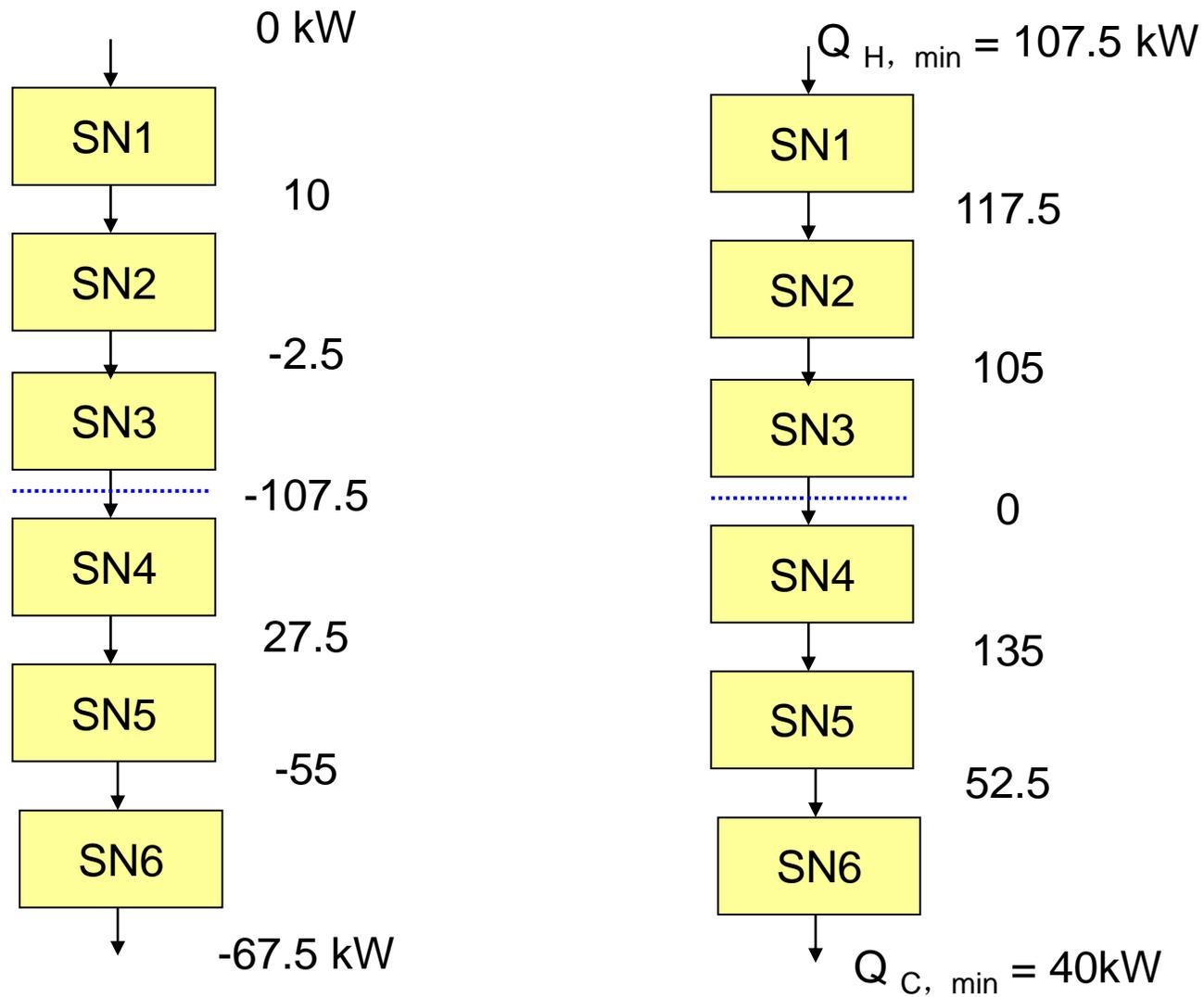
O_K 负值最大者，所需从外部供入的最大热量。

若外部供入的热量为107.5 kW，则过程 O_K 值不存在负值。

第三步：问题表格(2)的确立

子网络 序号	赤字 D_K/kW	无外界输入热量/kW		外界输入最小热量/kW	
		I_K	O_K	I_K	O_K
SN ₁	-10	0	10.0	107.5	117.5
SN ₂	12.5	10.0	-2.5	117.5	105.5
SN ₃	105.0	-2.5	-107.5	105.5	0
SN ₄	-135.0	-107.5	27.5	0	135.0
SN ₅	82.5	27.5	-55.0	135.0	52.5
SN ₆	12.5	-55.0	-67.5	52.5	40

有无外界输入热量时的子网络传热示意图



第三步：夹点与公用工程冷、热负荷的确定

- 考察发现，外界输入最小热量时， SN_4 输入的热量为0，其他子网络的输入、输出热量皆无负值，此时 SN_3 与 SN_4 之间的热流量为0，即为夹点，该处的传热温差为 ΔT_{\min} 。
- 夹点处热物流温度为 90°C ，冷物流的温度为 70°C 。
- 最小公用工程的加热负荷 $Q_{H, \min} = 107.5 \text{ kW}$
- 最小公用工程的冷却负荷 $Q_{C, \min} = 40.0 \text{ kW}$

例题二：

将例题一中最小传热温差 ΔT_{\min} 改为 15°C ，
考察最小传热温差的改变对计算结果的影响。

例题二的问题表格(1):

问题表格(1)

$$\Delta T_{\min} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$$

子网络序号	冷物流及其温度			热物流及其温度		
	C_1	C_2	$/^{\circ}\text{C}$	H_1	H_2	$/^{\circ}\text{C}$
SN_1			150			
SN_2		125	140			
SN_3		100	115			
SN_4		75	90			
SN_5		45	60			
SN_6		25				
		20				

等于最小传热温差

例题二的问题表格(2):

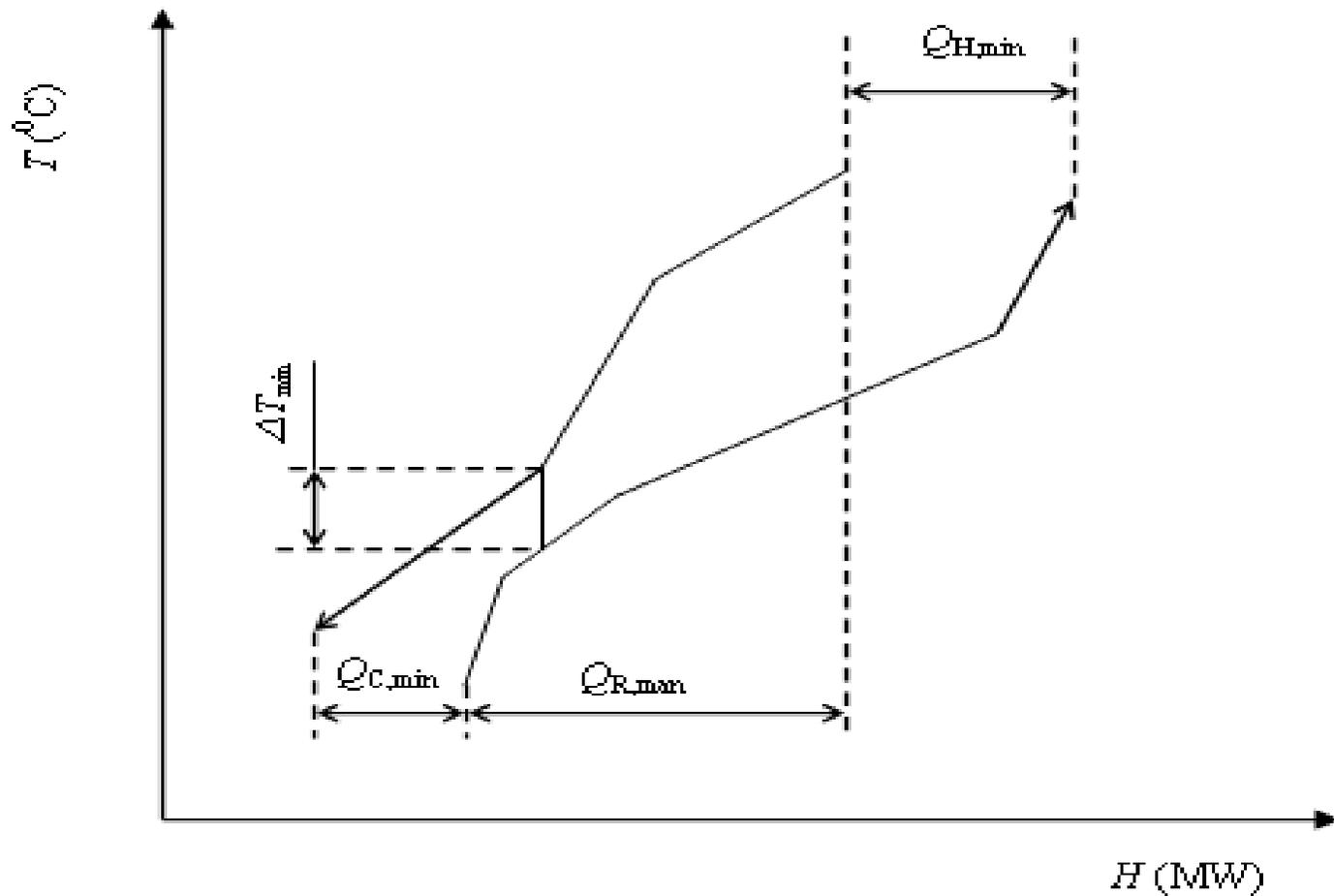
子网络 序号	赤字 D_K/kW	无外界输入热量 /kW		外界输入最小热量 /kW	
		I_K	O_K	I_K	O_K
SN ₁	-20	0	20.0	80.0	100.0
SN ₂	120.5	20.0	7.5	100.0	87.5
SN ₃	87.5	7.5	-80.0	87.5	0
SN ₄	-135.0	-80.0	55.0	0	135.0
SN ₅	110.0	55.0	-55.0	135.0	25.0
SN ₆	12.5	-55.0	-67.5	25.0	12.5

选用不同最小传热温差时计算结果比较

$\Delta T_{\min} / ^\circ\text{C}$	$Q_{H, \min} / \text{kW}$	$Q_{C, \min} / \text{kW}$	夹点位置/ $^\circ\text{C}$	
			热物流	冷物流
20	107.5	40	90	70
15	80	12.5	90	75

ΔT_{\min} 越小，热回收量越多，所需的加热和冷却公用工程量越少，但相应的换热面积加大，投资费用增加，故需要确定最优的 ΔT_{\min} 。

二、最小传热温差



夹点可定义为冷热组合曲线上传热温差最小的地方（等于 ΔT_{min} ）

最优的 ΔT_{min} 确定方法：

- 1)、根据经验确定，需要考虑公用工程和换热器设备的价格、换热介质、传热系数、操作弹性等因素的影响。
- 2)、在不同 ΔT_{min} 下综合出不同的换热网络，选取总费用较低的网络对应的 ΔT_{min} 。
- 3)、运用数学规划法进行操作费用和投资费用的同时优化。

经济目标

经济目标有能量费用目标、设备投资目标和总年度费用目标。

$$\text{能量费用目标: } C_e = C_H * Q_H + C_c * Q_c$$

Q_H 为加热工程用量， Q_c 为冷却公用工程用量，

C_H ， C_c 分别为单位加热和冷却工程费用。

经济目标

设备投资目标

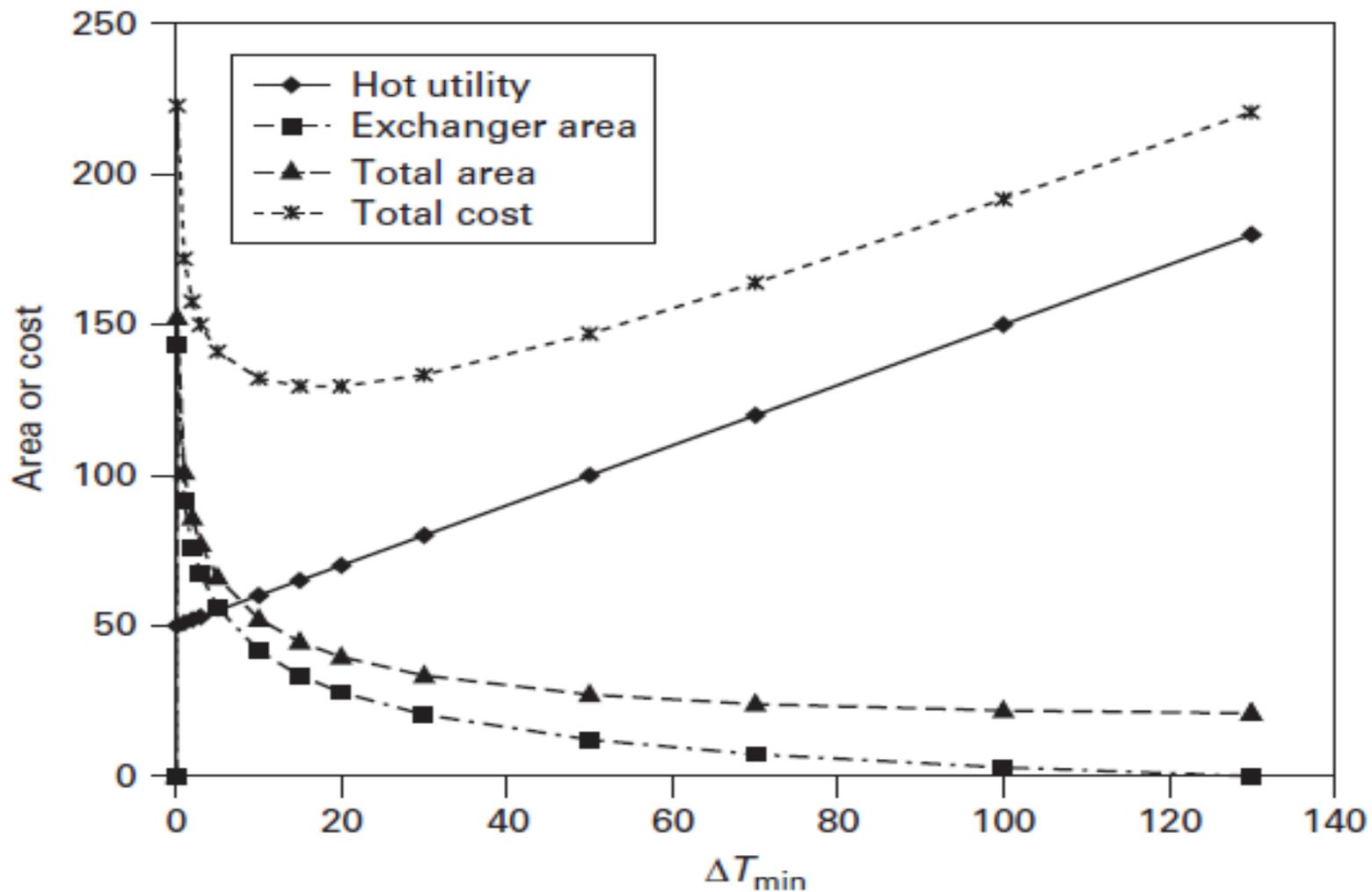
设备投资与传热面积相关，用 C_n 来表示设备投资

$$C_n = A \cdot C_s$$

C_s 表示单位面积的造价

$$\text{年度费用： } CT = C_e B + C_n / R$$

费用与 ΔT_{min} 的关系



ΔT_{min} 的确定方法

- 根据经验，考虑公用工程、换热器设备价格、传热系数、操作弹性等因素。
- 当换热器材质造价较高而能源价格较便宜可以考虑可以采取较高的 ΔT_{min} 。
- 传热系数较大可采取较小的 ΔT_{min} 。
- 企业出于操作弹性的考虑，希望 ΔT_{min} 不小于某个特定的值。

ΔT_{min} 的确定方法

