

PART 4B

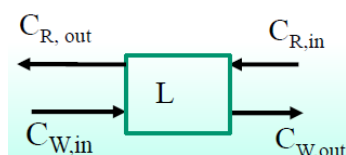
Water Pinch Method

水夹点方法

传质模型的提出

我们关注整个水系统中的“用水”部分

在用水子系统中，工艺物流与水流在一个单元里发生传质：



假设工艺物流流量 F_R ，用水量 F_W 。

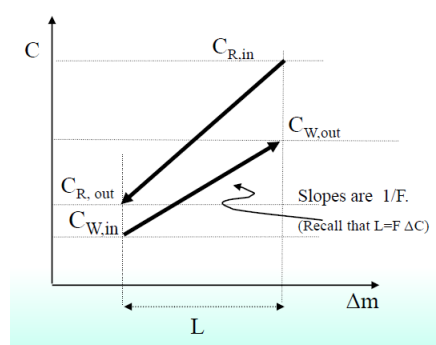
传递的物质浓度较低因此含量与 F 相比可直接忽略。

这个传质过程与换热类似，只不过先前的热量（焓）变成了质量，温度变成了浓度。

过程也遵守质量传递和质量守恒定律

$$L = F_R (C_{R, in} - C_{R, out}) = F_W (C_{W, out} - C_{W, in})$$

因此，效仿 T - H 图，我们用浓度 C - 质量 m 图表示这一过程

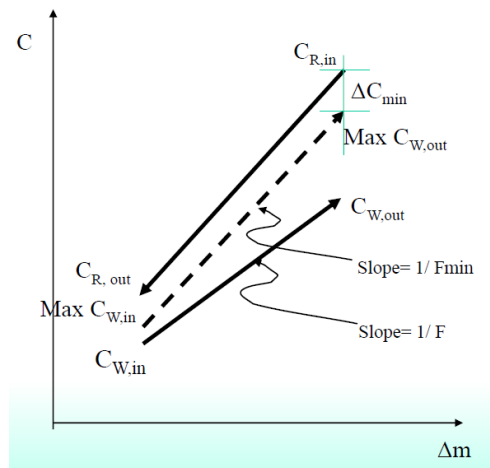


Concentration Flow Diagrams

斜率的倒数为流股的流量

极限水曲线

传热存在温差限制，那么传质自然也有浓度差限制

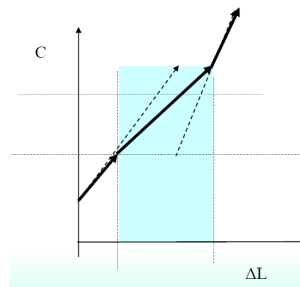


所以在这样一个传质过程中，水的进出口浓度都会存在一个**上限值**。这些上限值不仅仅由最小浓度差决定，还需考虑很多因素。

因此，题目一般会直接提供各过程的水浓度上限值。我们用这些上限值和传质量得到的是**水的极限曲线**。

M.B.教授的 PPT 中没有说清楚，例题中给出的 C_{IN} 和 C_{OUT} 是用水的进出口浓度上限，不是工艺物流的数据，所以 C_{OUT} 会高于 C_{IN} ，极限曲线的箭头是朝↗的

一个工艺中自然不可能只有一股工艺物流需要传质，因此我们还要引入**水的极限曲线的组合曲线**：



现在我们思考横坐标的含义。就如同 T-H 图中的横坐标表示的是焓的相对值一样，横坐标表示的是物流中溶质质量的**相对值**。我们也只关心过程中溶质质量的变化量。为了便于后续的操作，我们规定，**极限水曲线的起点横坐标为 0**，这使得它的起点位于纵坐标轴上。

最小用水量

在寻找最小用水量时，我们假设供水只有一股，这股水的重复利用满足了所有物流的传质需求。

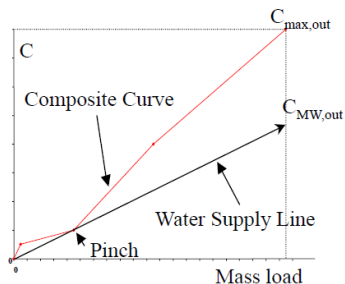
这样，在 C-m 图上，表示供水的就是一条笔直的线段（供水线，Water Supply Line）

因为供水最开始的浓度一般为 0（新鲜水，Fresh Water），溶质质量自然也为 0，因此，供水线的**起点为原点**，终点与组合曲线的终点位于**同一横坐标**，这使得传质质量相等。

而它的斜率是供水流量的倒数，因此，斜率可以任意变化，且斜率越大，供水量越少。

但很显然，**供水线不可以在组合曲线上方**。

于是，当供水量达到最小时，供水线与组合曲线出现除原点外的交点，**水夹点**（Water Pinch）出现了：



类似地，从这张图中我们能得到一个重要结论：

水夹点上方不应使用新鲜水，水夹点下方不应排放废水

此外，我们也能发现 $C_{MW,out}$ 与 $C_{max,out}$ 的差距比较大

问题表法

同样图象法直观但不准确，我们使用一个稍微数学一点的方法。

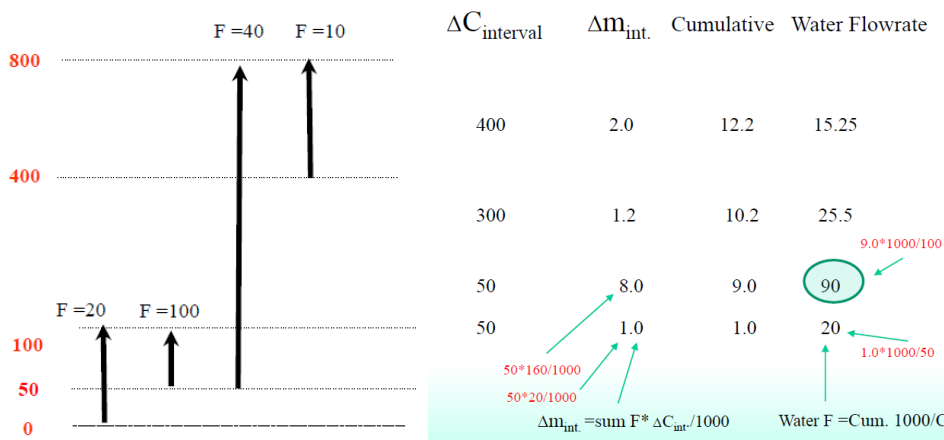
问题表法的原理与 PART 2 中的问题表法类似：

- ① 可以确定的是，用水夹点只会出现在组合曲线的折点上产生
- ② 如果这些点中的某一点在供水线上，则供水线的斜率就是该点的纵坐标除以横坐标
- ③ 这样可以得到多个斜率，斜率最小的那个点就是水夹点，因为只要斜率比它大，供水线就会高于夹点了。

假设现在有工艺流股需要传质，给出了各过程的用水浓度上限：

Process number	Mass load of contaminant (kg/h)	C_{IN} (ppm)	C_{OUT} (ppm)	Water flowrate (t/h)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

就像 PART 2 里面学的一样，我们将浓度分区间，算出每个区间的传质量



但不同的是，我们需要从低浓度开始算至高浓度：

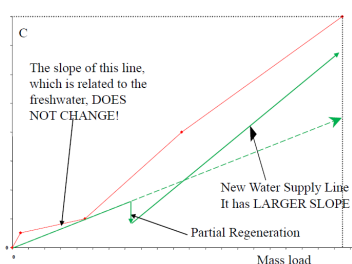
第一区间浓度范围为 0 50，存在一条流股，流量 F 为 20，那么传质量为 $20 * (50 - 0) = 1000$ ，此时水中累积的质量为 1000，用 1000 除以该区间最大浓度 50，得到的 20 为当前最小用水量，就是纵坐标为

50 的折点的斜率倒数。

第二区间浓度范围为 50 100，存在三条流股，总流量 F 为 160，传质量 8000，此时累计质量 $8000 + 1000 = 9000$ （这就是第二个折点的横坐标），9000 除以该区间最大浓度 100（第二个折点的纵坐标），得到的 90 为当前最小用水量（第二个折点的斜率倒数）

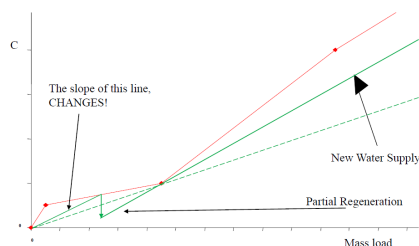
以此类推，最后得到的一系列最小用水量中的**最大值**（此时斜率最小）就是最终的最小用水量。

部分再生 Partial Regeneration



对浓度在夹点以上的水作再生处理使其浓度降低，会发现在后续的传质中用水量会变小（图上是斜率变大），也就是说实际上只用再生一部分水，看似节约了。

但是对于该浓度以下部分的传质，用水量不变，所以如此再生并不能减少用水量。



但如果在夹点以下作再生，可以看出，两段供水线的斜率都增大了，这意味着用水量得到了有效减少。

进一步分析

最后需要说明的是，水夹点法并没有那么多用处，它只能处理只传一种溶质的用水系统，并且只能用于得到最小用水量，不能用于设计用水网络。

PART 5

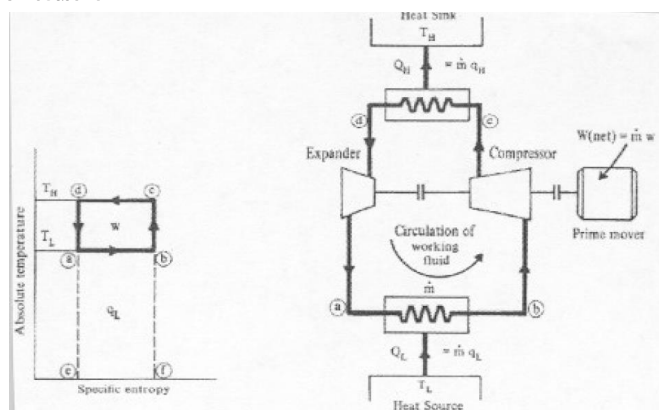
Refrigeration Cycles

制冷循环

逆卡诺循环（Carnot Cycle in Refrigeration Mode）

在大学物理 I 和化工热力学中，我们都学习了制冷循环。

最简单的循环就是逆卡诺循环：



a → b 在 T_L 下等温可逆膨胀，熵增加

吸热 $Q_L = T_L \Delta S$

b → c 绝热（等熵）压缩，温度由 T_L 升至 T_H

吸收功

c → d 在 T_H 下等温可逆压缩，熵减少

放热 $Q_H = -T_H \Delta S$

d → a 绝热（等熵）膨胀，温度由 T_H 降至 T_L

做功

于是，工质在低温段吸收热量之后，由压缩机提升至高位热能，再将热量在高温段放出，重新回到低温段，如此循环，实现制冷。

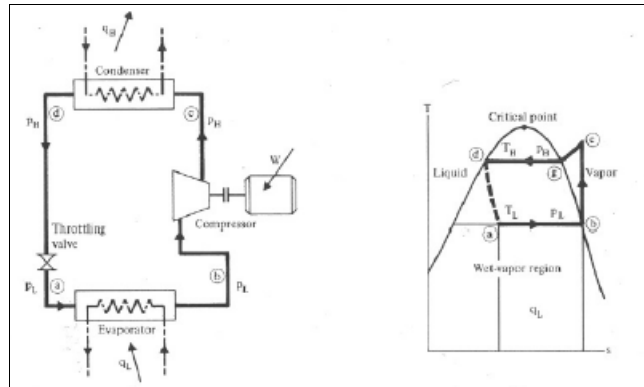
由热力学定律，该过程需要的净功 $W = -(Q_L + Q_H) = \Delta S(T_H - T_L)$ ，也就是 T-S 图中矩形的面积

我们定义系数 COP 衡量一个循环的效率

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{\Delta S(T_H - T_L)}{T_L \Delta S} = \frac{T_H - T_L}{T_L}$$

单级干式制冷循环（One-Stage Dry Refrigeration Cycle）

接下来我们看一个实际一点的循环



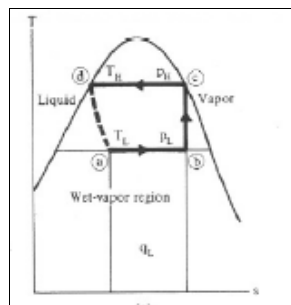
- a → b 湿蒸汽定压蒸发
- b → c 低压蒸汽压缩为高压蒸汽
- c → d 高压蒸汽冷却为高压液体
- d → a 高压液体节流膨胀为湿蒸汽

该循环将 a→b 放在了气相区而非两相区，所以被称为干式循环。

这在热力学上并不是最优，但对于实际应用，湿式循环会使机械产生很多问题，因此干式循环

Mechanically Better

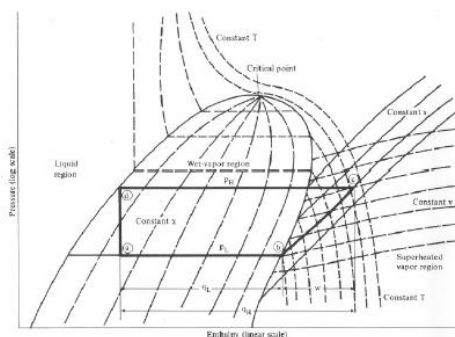
湿式循环如下图



和卡诺循环相比，干循环和湿循环都在 d → a 阶段用节流阀代替了膨胀机，也是因为

Mechanically Better

p - H 图



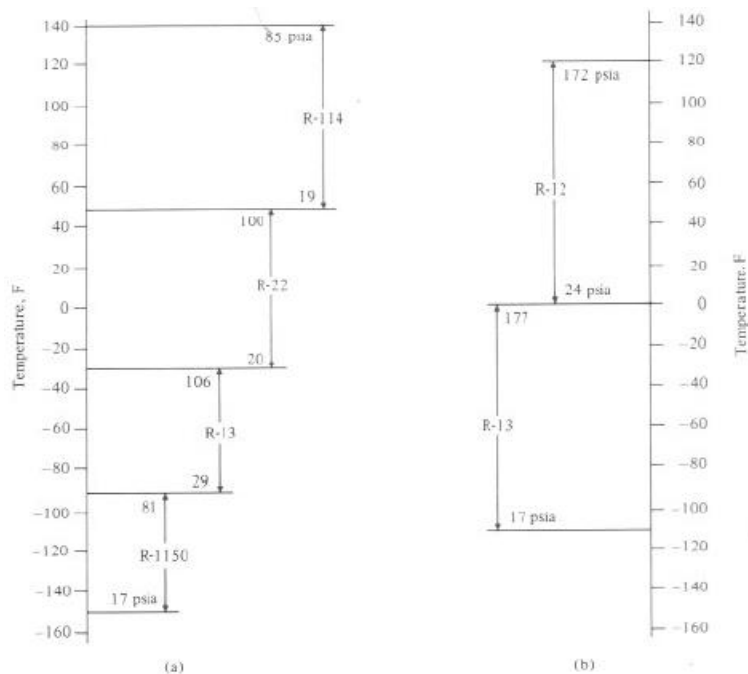
单级压缩干式制冷循环在压力-焓图上的表示

制冷流体选择

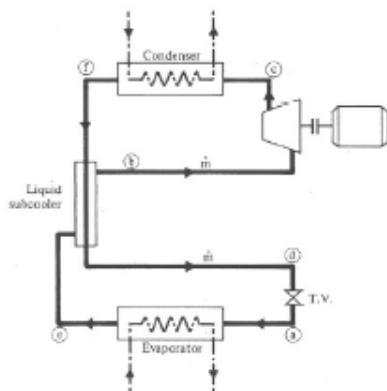
一般来讲，为了达到高效率， p_L 应尽可能低，但是不能低于大气压。因此，选择的制冷剂需要有一

个正常的沸点与循环的最低温度兼容（通常比人们想要冷却的系统低 10 ）。 p_H 则和在高温段带走热量 q_H 的冷却介质兼容。如果是冷却水， T_H 应该高于冷却水温度 10°C。

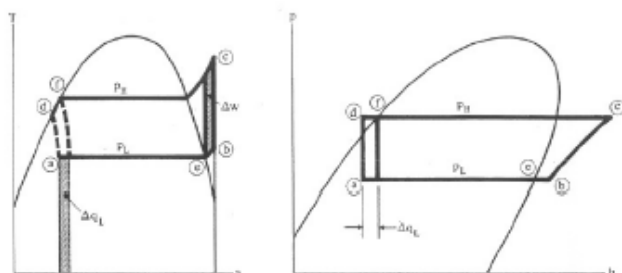
我们通过下面这张图选择制冷流体，每个制冷流体都有其上限与下限，比如 R-22，它的范围是约 -30°F 至 50°F。只有我们选择的 $T_L - T_H$ 区间应该被包含在这个范围内，才能选用 R-22。如果 $T_L - T_H$ 区间太大，需要用到多种流体，就要设置多个循环了。



变式：部分冷却



上面这个制冷循环中，发生了流股间换热，这意味着节流阀前的流体温度降低了，压缩机前的流体温度升高了。T-S 图和 p-h 图上可以直观地表示出变化：

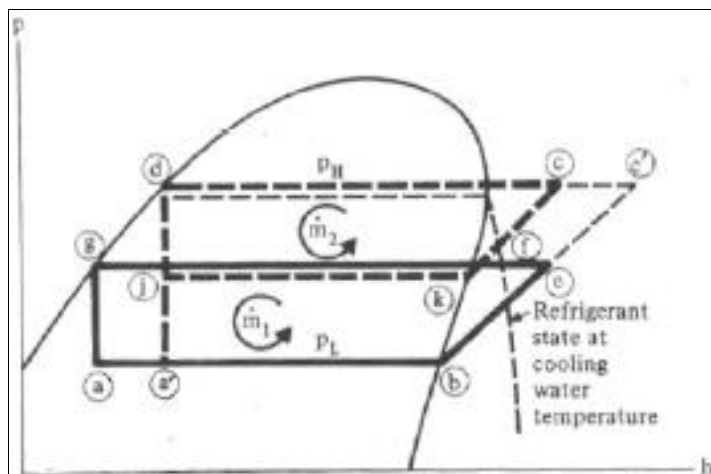
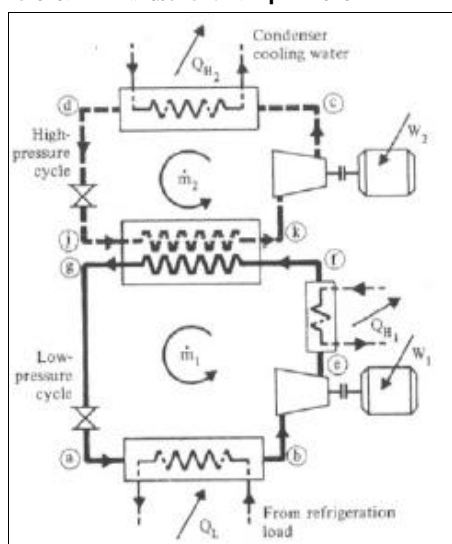


可以看出，因为压缩机前流体温度升高，b 点沿着等压线抬升，使其相比原循环多出了一部分面积，这部分面积就是需要额外做的功；由于节流阀前的流体温度降低，a 点左移，下方多出的面积就是额外移走的热量。

多级制冷循环

对于温度跨度较大的制冷，单级压缩对压缩机的要求太高了。因此采用多级循环。

下面是二级循环以及 p-H 图



通过循环 1 的高温放热与循环 2 低温吸热，将两个循环连接起来。注意循环 1 的高温温度低于循环 2 的低温温度，因此右边两个框是有重叠的。从右图也能够看出，循环 1 的高温放热量高于循环 2 低温吸热量，因此循环 1 要额外放热。