

## 萃取过程的计算

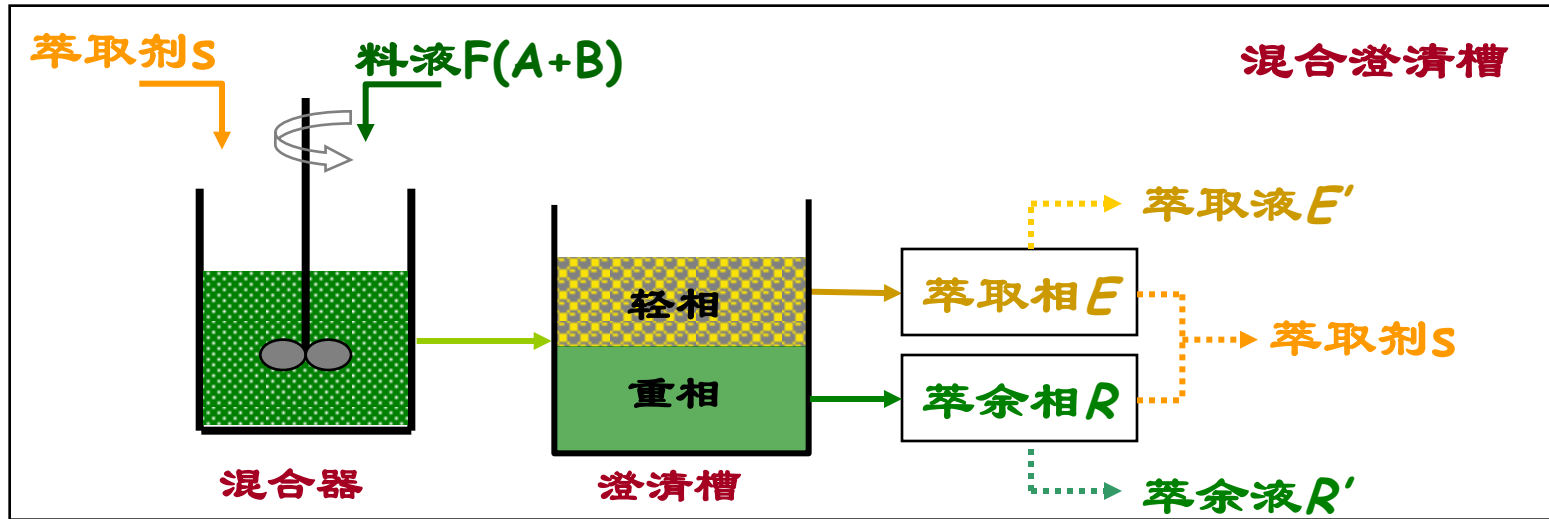
**理论级：**离开萃取器的萃取相与萃余相互成平衡。

**对分级式萃取过程，可先求出所需理论级数，然后由级效率确定所需的实际级数。**

**级效率：**实际萃取级的分离能力与理论级的差异。

# 单级萃取计算

单级萃取可间歇或连续操作。



**计算任务：**

给定  $F$ 、 $x_F$ 、 $y_{S0}$ 、 $x_R$  (或  $x'_R$ )，根据相平衡数据和物料衡算求出  $E'$ 、 $y'_E$ 、 $R'$ 、 $S$

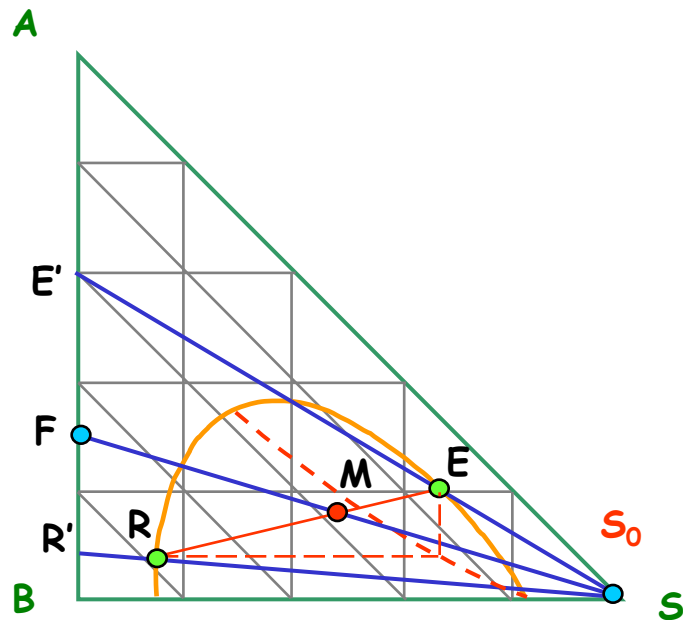
计算方法有解析法和图解法。

## 单级萃取：萃取剂与稀释剂部分互溶

### 图解法

➤ 根据平衡数据作出溶解度曲线及辅助线。

➤ 已知  $x_F$ ，在 AB 边上定出 F 点，由萃取剂组成确定  $S_0$  点。联结  $FS_0$ ，代表原料液与萃取剂的混合液 M 点必在  $FS_0$  线上。



➤ 由  $x_R$  (或  $x_{R'}$ ) 定出 R 点 (若知  $R'$  点，连  $SR'$  线与溶解度曲线的交点即为 R 点)。再由 R 点利用辅助曲线求出 E 点，则 RE 与  $FS_0$  线的交点即为混合液的组成点 M。

➤ 根据杠杆法则

$$\frac{S_0}{F} = \frac{\overline{FM}}{\overline{S_0M}}$$

溶剂比

$$F + S_0 = R + E = M$$

$$E = M \frac{\overline{MR}}{\overline{ER}}$$

$$F = R' + E'$$

$$E' = E \frac{\overline{ES}}{\overline{SE'}}$$

$R'$

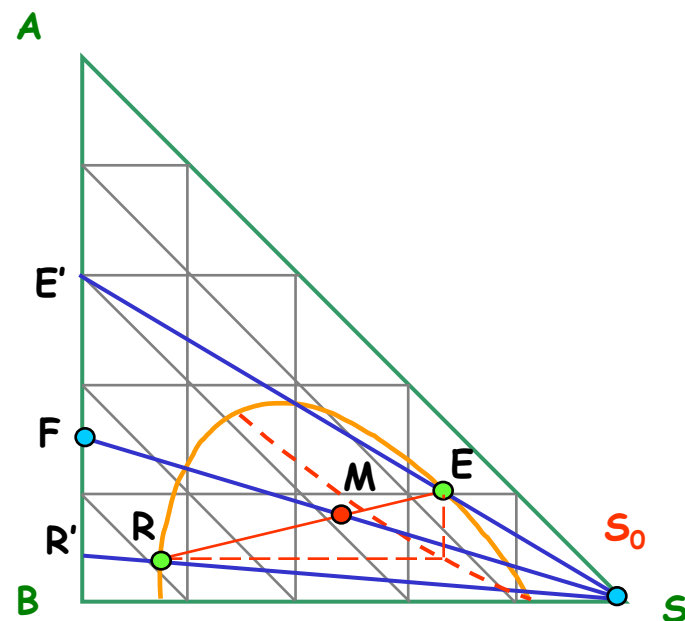
## 单级萃取 (S 与 B 部分互溶)

### 解析法

$$F + S_0 = R + E = M$$

$$Fx_F + S_0y_{s0} = Rx_R + Ey_E = Mx_M$$

$y_E$ 、 $x_M$ 、 $x_R$ 、 $x'_R$ 、 $y'_E$  可由相平衡关系求出。



$$S_0 = \frac{F(x_F - x_M)}{x_M - y_{S_0}}$$

$$E = \frac{M(x_M - x_R)}{y_E - x_R}$$

$$R = \frac{M(y_E - x_M)}{y_E - x_R}$$

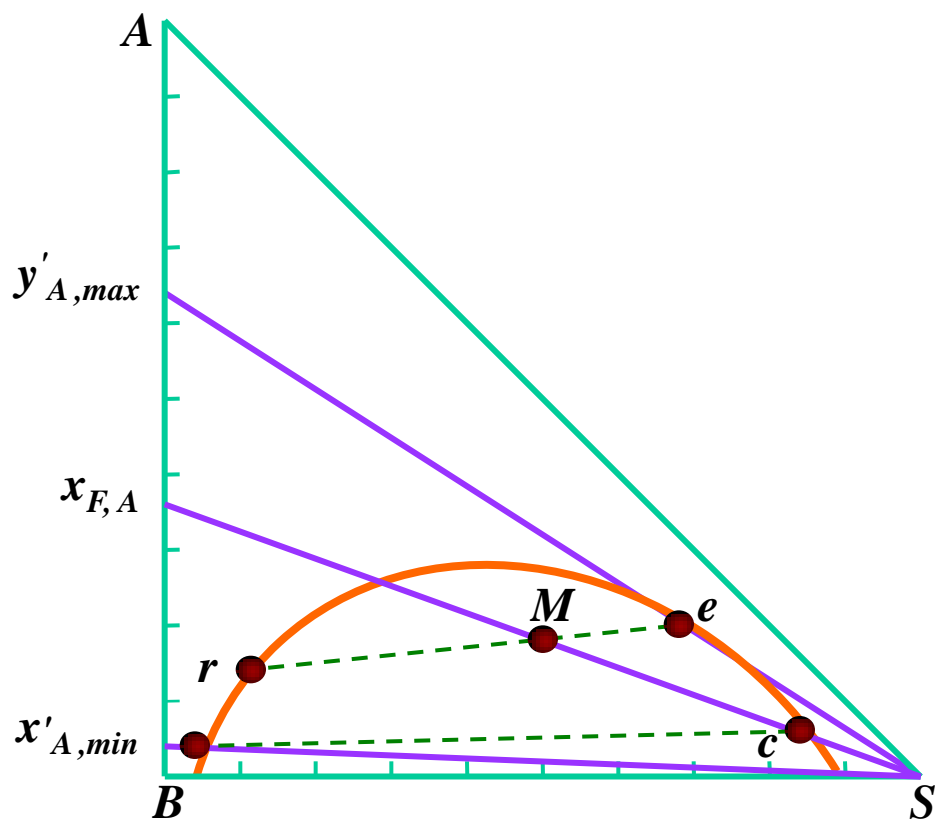
$$F = R' + E'$$

$$Fx_F = R'x'_R + E'y'_E$$

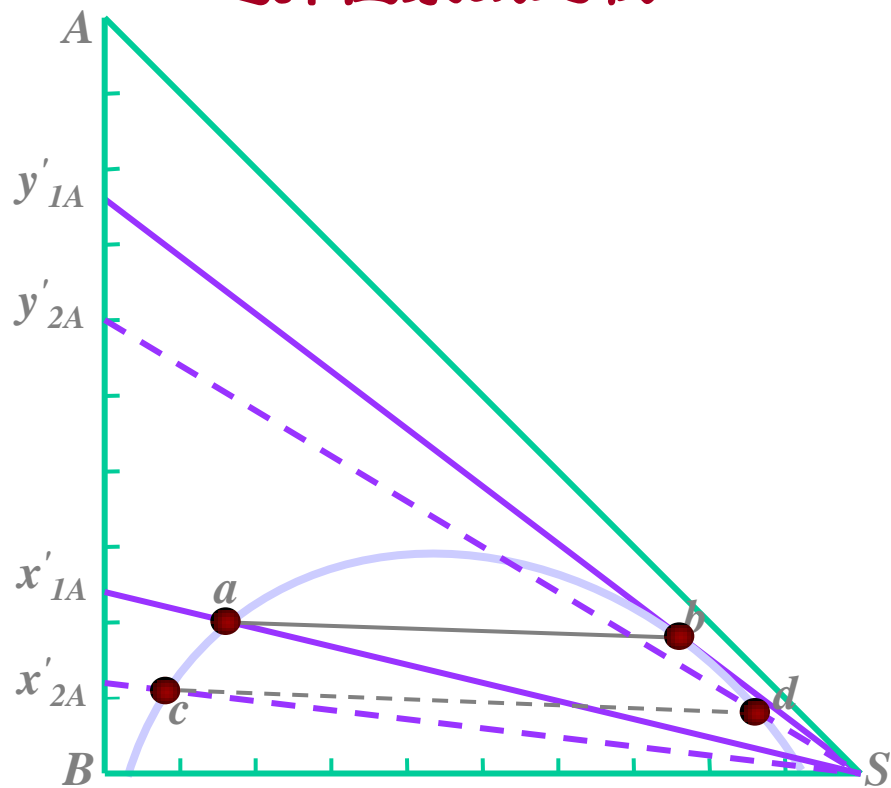
$$E' = \frac{F(x_F - x'_R)}{y'_E - x'_R}$$

$$R' = \frac{F(y'_E - x_F)}{y'_E - x'_R}$$

### 单级萃取的分离极限



### 选择性系数比较



## 溶剂用量的范围

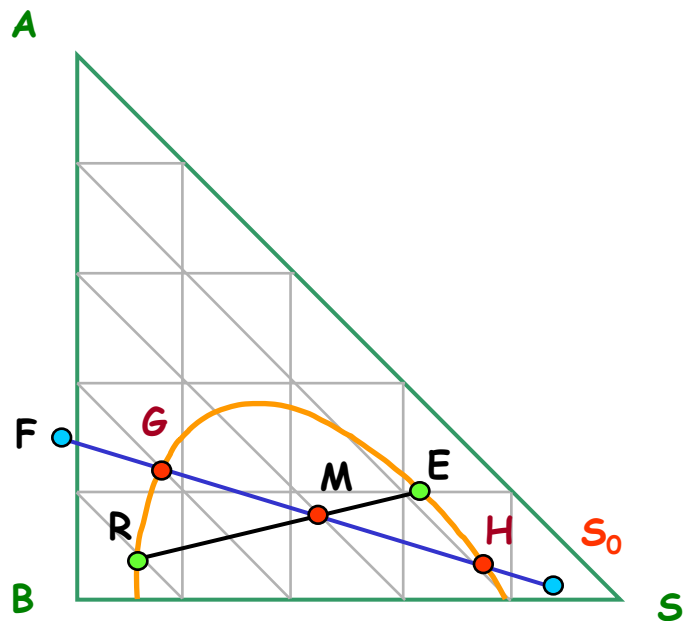
对单级萃取，原料量  $F$  及组成一定：

**G点：最小溶剂用量， $S_{\min}$**

$$S_{\min} = F \frac{\overline{FG}}{\overline{GS}_0}$$

**H点：最大溶剂用量， $S_{\max}$**

$$S_{\max} = F \frac{\overline{HF}}{\overline{HS}_0}$$



在极限情况下，混合液只有一个相，起不到分离作用。

萃取操作  $S$  应满足下列条件

$$S_{\min} < S_0 < S_{\max}$$

**例10-1：**以水为溶剂萃取丙酮—醋酸乙酯中的丙酮，三元物系在 $30^{\circ}\text{C}$ 下的相平衡数据如表10-1所示。试求：

- ① 在直角三角形相图中，作出溶解度曲线和六条联结线；
  - ② 各对相平衡数据相应的分配系数和选择性系数；
  - ③ 当酯相中丙酮为30%时的相平衡数据；
  - ④ 当原料液中丙酮含量为30%，水与原料液的质量相等，每kg原料液进行单级萃取后的结果。
-

## 直角相图图解法

若萃取剂和原溶剂可近似为互不相溶物系，计算可简化。

假设萃取剂中无组分A，即 $y_S = 0$ ，则物料衡算：

$$BX_F = SY + BX$$

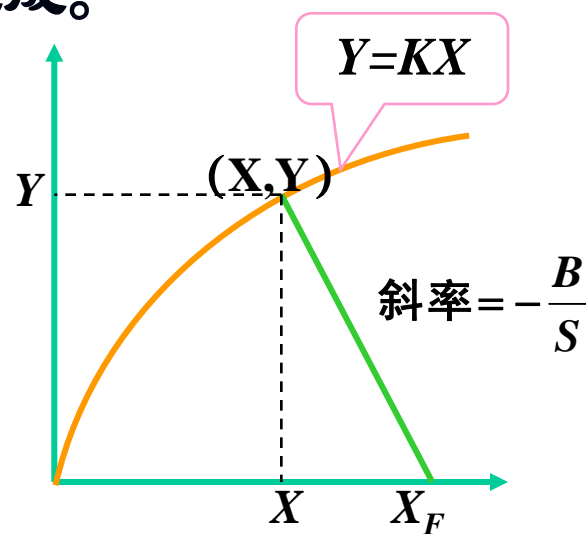
$X$  (kgA/kgB),  $Y$  (kgA/kgS),  $X_F$  (kgA/kgB) 分别为组分A在萃余相、萃取相和原料液中的比质量组成。

操作线方程为：

$$Y = -\frac{B}{S}(X - X_F)$$

组分A在两液相的分配平衡关系 $Y = KX$

由于 $K$ 随 $X$ 变化，其直角相图为一曲线。



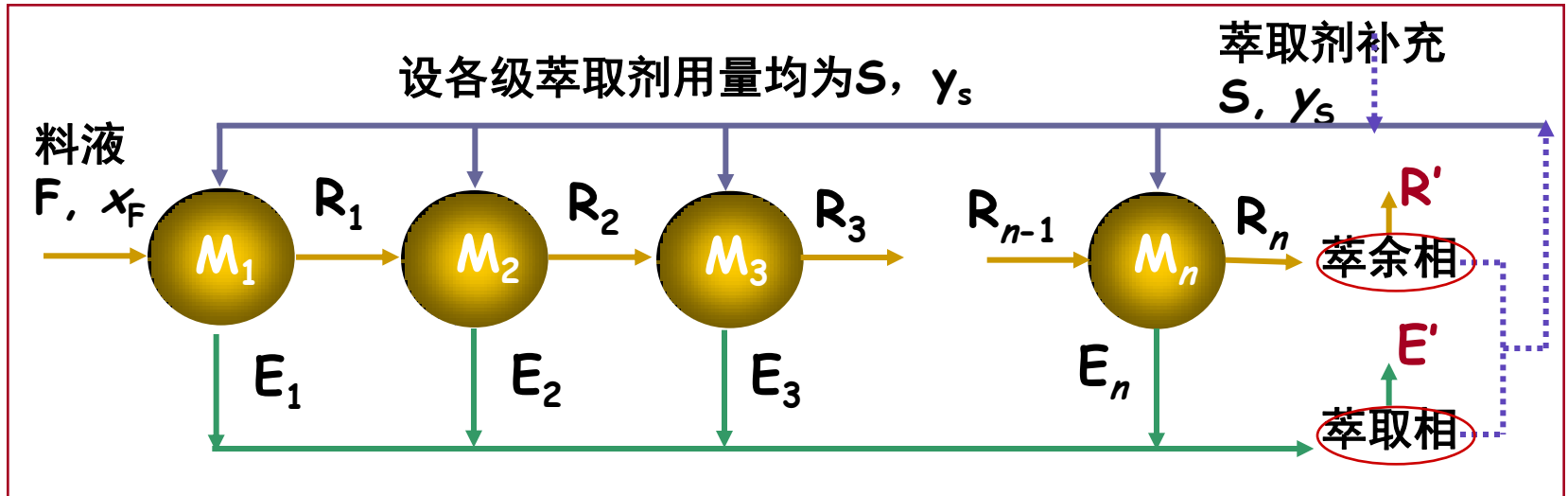
通过点 $(X_F, 0)$ ，作斜率为 $-B/S$ 的直线，交相平衡曲线于点 $(X, Y)$ ，得单级萃取的两相组成。

另外，已知萃取相和萃余相组成，计算萃取剂的用量。



## 多级错流萃取(S与B部分互溶)

单级萃取分离程度有限，可采用多级萃取进一步降低萃余相中溶质的浓度。**多级错流的计算只是单级的多次重复。**



第一级： $F + S \rightarrow M_1, M_1 \rightarrow E_1 + R_1$  (平衡相)

第二级： $R_1 + S \rightarrow M_2, M_2 \rightarrow E_2 + R_2$  (平衡相)

第三级： $R_2 + S \rightarrow M_3, M_3 \rightarrow E_3 + R_3$  (平衡相)

依次计算，直到萃余相中溶质的浓度等于或小于所要求的浓度为止，**标绘的联结线数目即为理论级数。**

## 多级错流萃取

### 图解求理论级数

$$F / M_1 = \overline{SM}_1 / \overline{FS}$$

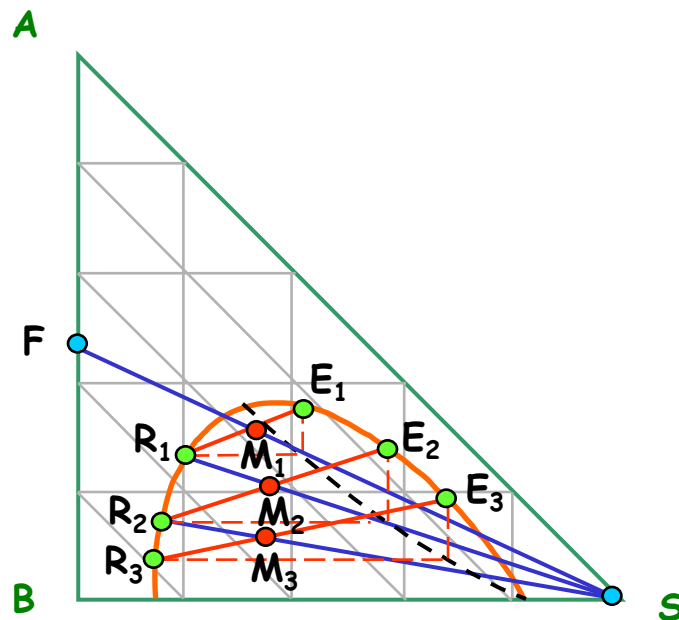
⇒  $M_1$ (FS 上)

$$R_1 / M_2 = \overline{SM}_2 / \overline{R_1S}$$

⇒  $M_2$ ( $R_1S$  上)

$$R_2 / M_3 = \overline{SM}_3 / \overline{R_2S}$$

⇒  $M_3$ ( $R_2S$  上)



多级错流操作最终可得组分A含量很低的萃余相，但溶剂用量较多。

## 例10-2：单级萃取与两级错流萃取的比较

对例10-1中的物系，将萃取剂分为两等分，每次0.75kg水/kg原料液，进行两级错流萃取，求所得到的萃取液和萃余液组成。

联接FS，FS上的点 $M_1$ 由下式决定，即： $\underline{M_1E}/\underline{M_1S} = S_1/F = 0.75$

或  $\underline{M_1E}/\underline{FS} = S_1/(F+S_1) = 0.75/1.75 = 0.429$

通过点 $M_1$ 作联结线 $R_1E_1$ ；

联结 $R_1S$ ，在 $R_1S$ 上定出点 $M_2$ ，

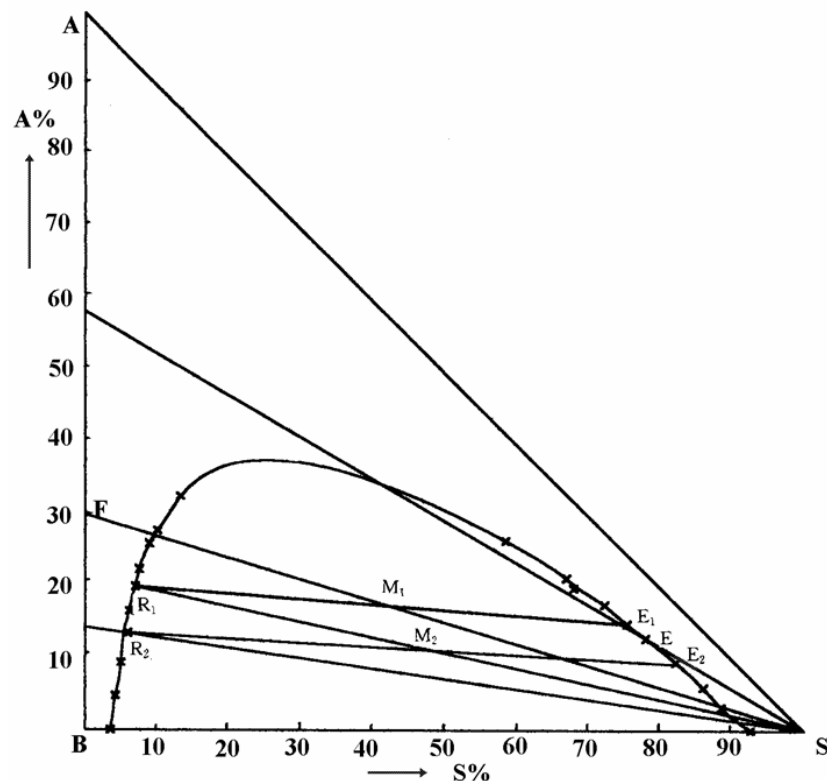
使： $\underline{R_1M_2}/\underline{R_1S} = 0.429$

通过点 $M_2$ 作联结线 $R_2E_2$ 。

联接 $SR_2$ 并延长，交BA于 $R'$ 上，  
由点 $R'$ 定出萃余液浓度 $x'=13\%$ ；

由 $E_1$ 、 $E_2$ 两点混合形成 $E$ 点，  
连SE并延长交BA边于 $E'$ 点，  
由点 $E'$ 定出萃取液浓度 $y'=58\%$ 。

**单级萃取** $x'=18.5\%$ ； $y'=58.5\%$ 。

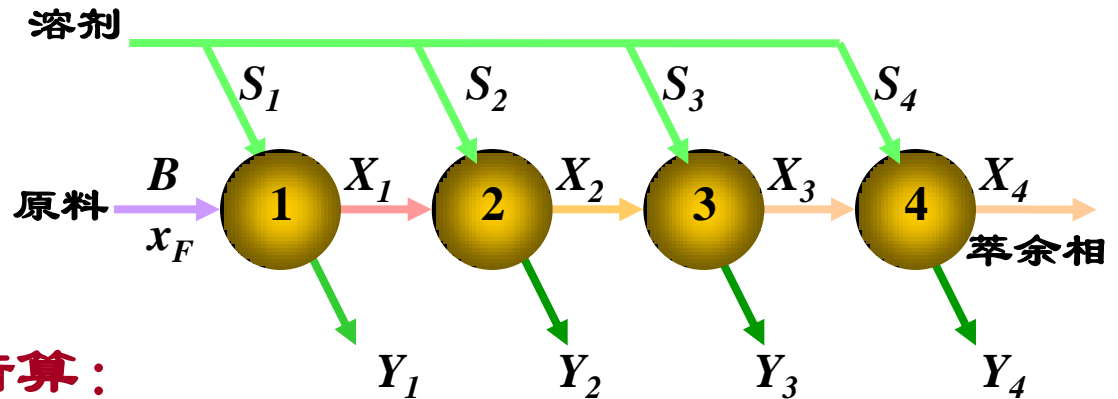


## 多级错流萃取：萃取剂与稀释剂完全不互溶体系

由平衡数据绘出  $X \sim Y$  平衡曲线，由每一级物料衡算得出操作线，直到第  $n$  级萃余相中的浓度  $X_R$  满足要求为止。

平衡关系：

$$Y = f(X)$$

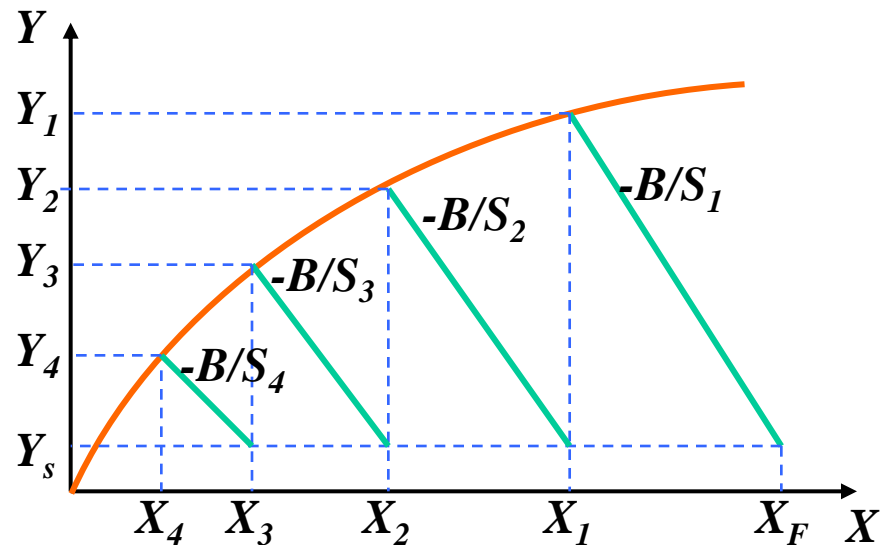


任一级系统的物料衡算：

$$S_i(Y_i - Y_s) = B(X_{i-1} - X_i)$$

$$Y_i = -\frac{B}{S_i} X_i + \frac{B}{S_i} X_{i-1} + Y_s$$

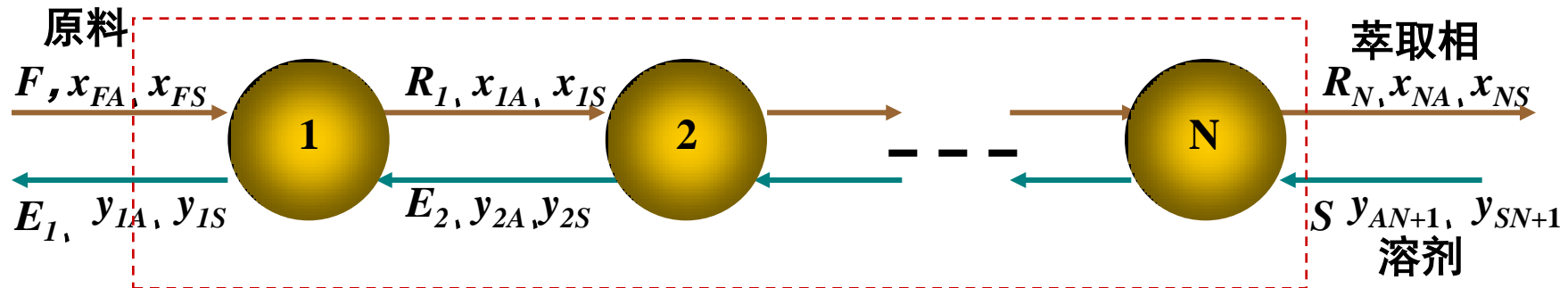
——操作线方程



## 多级逆流萃取 (S 与 B 部分互溶)

逆流操作可在溶剂用量较小的情况下获得较大的分离程度

### 物料衡算



### 整体

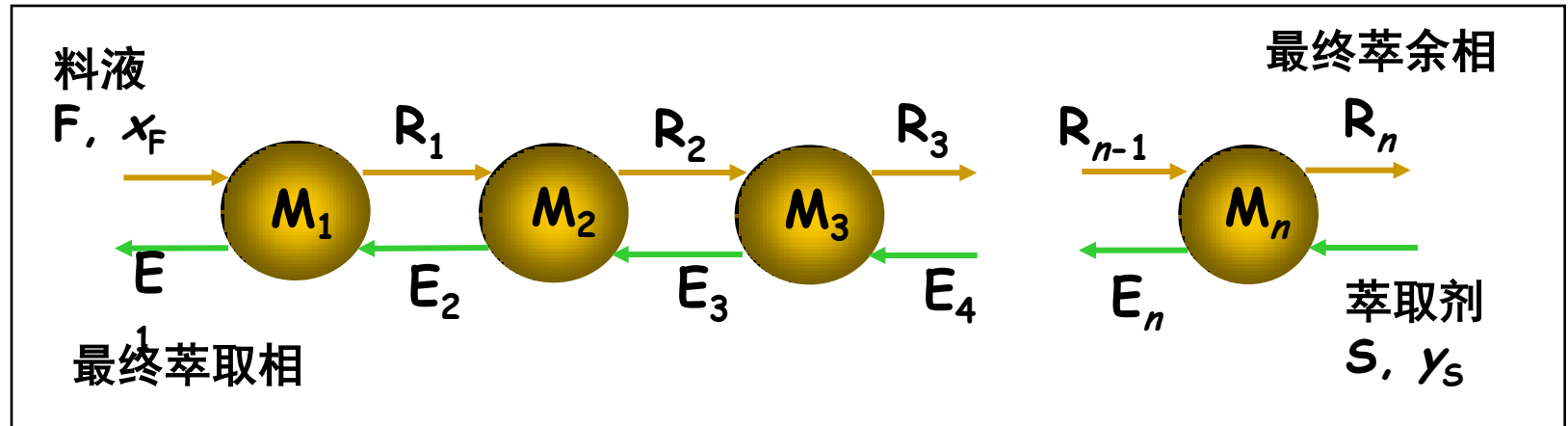
$$\begin{aligned}
 F + S &= R_N + E_1 \\
 Fx_{FA} + Sy_{AN+1} &= R_N x_{NA} + E_1 y_{1A} \\
 Fx_{FS} + Sy_{SN+1} &= R_N x_{NS} + E_1 y_{1S}
 \end{aligned}
 + \begin{aligned}
 x_{NS} &= \varphi(x_{NA}) \\
 y_{1S} &= \phi(y_{1A})
 \end{aligned}
 \longrightarrow E_1, y_{1A}, y_{1S}, R_N, x_{NS}$$

### 第一级

$$\begin{aligned}
 F + E_2 &= R_1 + E_1 \\
 Fx_{FA} + E_2 y_{2A} &= R_1 x_{1A} + E_1 y_{1A} \\
 Fx_{FS} + E_2 y_{2S} &= R_1 x_{1S} + E_1 y_{1S}
 \end{aligned}
 + \begin{aligned}
 y_{m,A} &= f(x_{m,A}) \\
 x_{m,S} &= \varphi(x_{m,A}) \\
 y_{m,S} &= \phi(y_{m,A})
 \end{aligned}
 \longrightarrow R_1, E_2, y_{2A}, y_{2S}, x_{1A}, x_{1S}$$

第二级..... $x_{NA}$  达到要求

## 多级逆流萃取 (S 与 B 部分互溶)



### 物料衡算

$$\begin{aligned}
 i = 1 \quad F + E_2 &= R_1 + E_1 & \text{或} & \quad F - E_1 = R_1 - E_2 \\
 i = 2 \quad F + E_3 &= R_2 + E_1 & \text{或} & \quad F - E_1 = R_2 - E_3 \\
 i = n \quad F + S &= R_n + E_1 & \text{或} & \quad F - E_1 = R_n - S \\
 F - E_1 &= R_1 - E_2 = R_2 - E_3 = \dots = R_{n-1} - E_n = R_n - S = \Delta
 \end{aligned}$$

每一级的  
“净流量”  
↙

离开每级的  $R$  与进入该级的  $E$  流量之差为一常数  $\Delta$ 。  
 $\Delta > 0$  , 流动方向与  $R$  相同,  $\Delta < 0$  , 流动方向与  $E$  相同

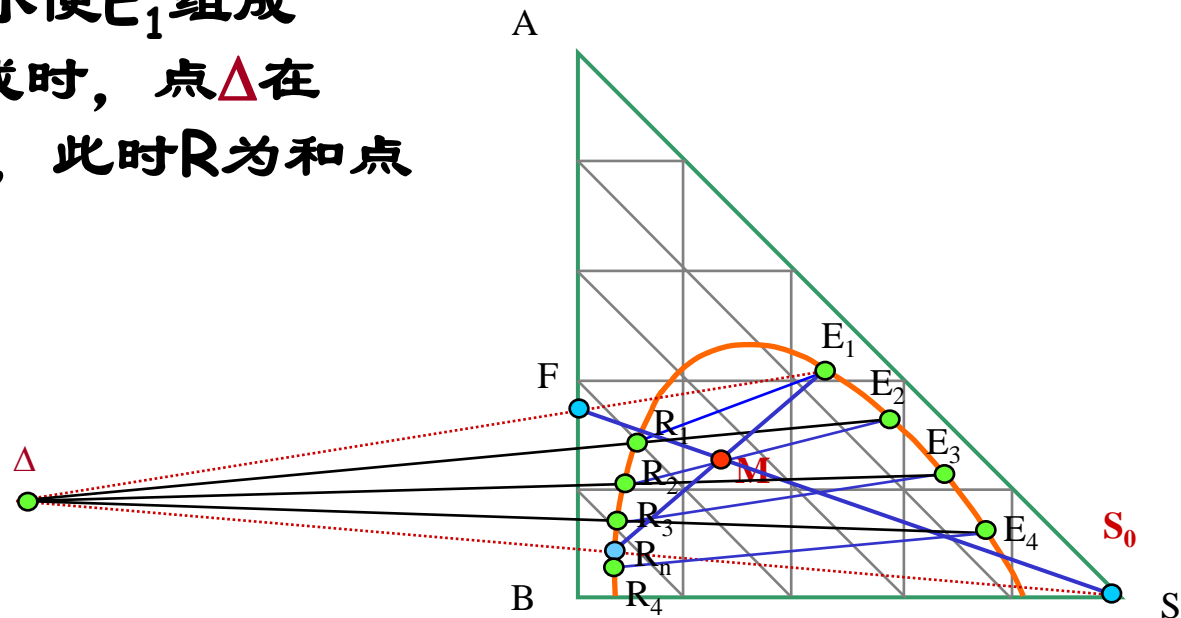
## 多级逆流萃取 (S 与 B 部分互溶)

图解法 ( $\Delta > 0$ )

$F + S = M = E_1 + R_n$  由给定的  $F$ 、 $S$  和  $R_n$  可得出  $E_1$

$F - E_1 = R_1 - E_2 = R_2 - E_3 = R_3 - E_4 \dots = R_{n-1} - E_n = R_n - S = \Delta$

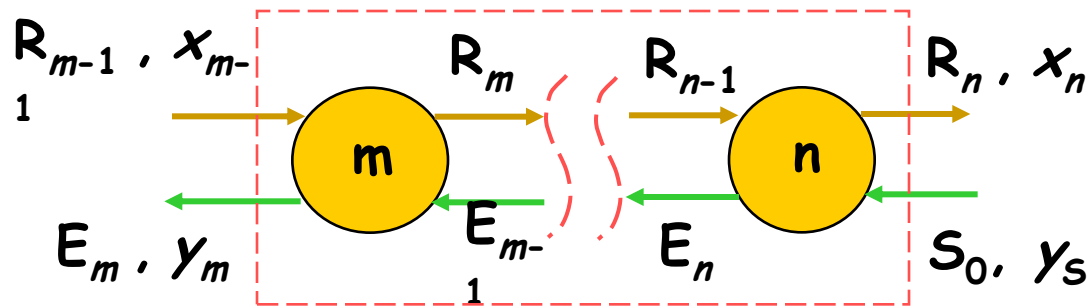
当  $S/F$  较小使  $E_1$  组成  
大于  $F$  组成时, 点  $\Delta$  在  
相图左侧, 此时  $R$  为和点



注意:  $M_1 \neq M_2 \neq M_3 \neq M_4 \neq \dots \neq M$

## 多级逆流萃取(S与B部分互溶)

作图法：直角坐标图解法



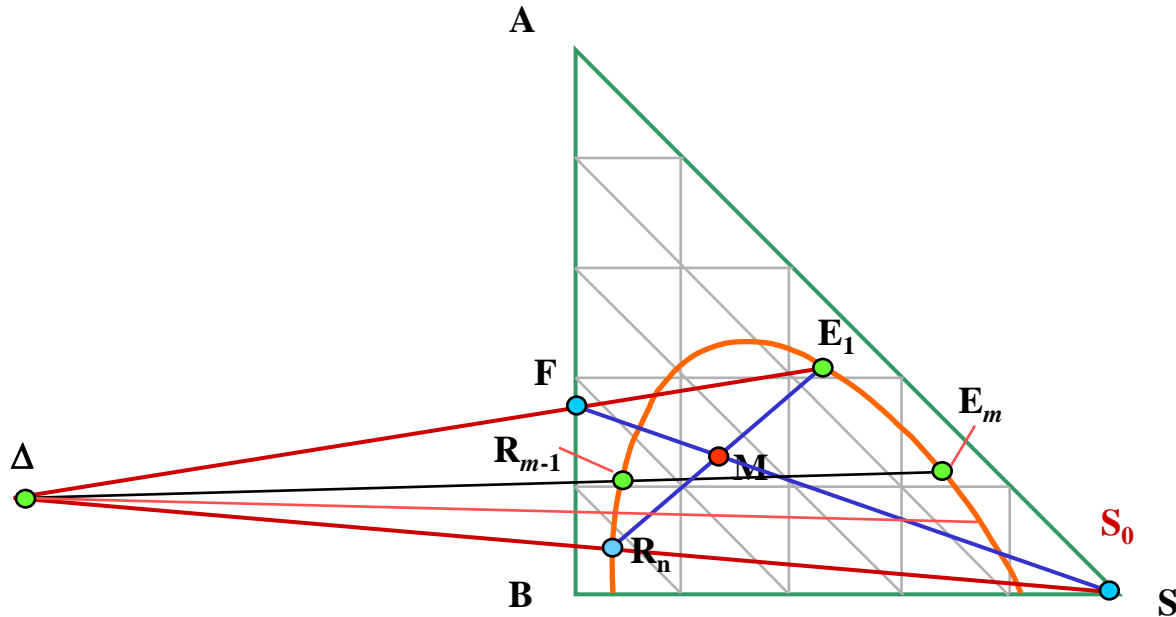
对A组分作物料衡算：

$$S_0 y_S + R_{m-1} x_{m-1} = E_m y_m + R_n x_n$$

$$y_m = \frac{R_{m-1}}{E_m} x_{m-1} + \frac{S_0}{E_m} y_S - \frac{R_n}{E_m} x_n \quad \text{—— 操作线方程}$$

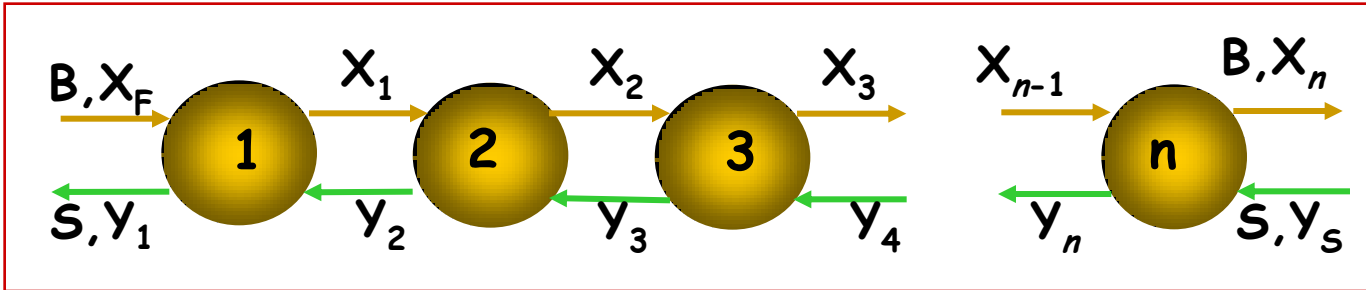


## 操作线上若干点的坐标：通过三角形相图得到



- 确定  $R_n$  及  $E_1$  点，由  $E_1F$  线与  $S_0R_n$  线确定点  $\Delta$ 。
- 在  $\Delta FE_1$  及  $\Delta R_n S_0$  两线间，过  $\Delta$  点作任意操作线与溶解度曲线相交于  $R_{m-1}$  与  $E_m$ ，得操作线上一点  $(x_{m-1}, y_m)$ ，重复上述步骤可得操作线。

## 多级逆流萃取：萃取剂与稀释剂不互溶



### 物料衡算

$$BX_F + SY_{m+1} = BX_m + SY_1$$

$$Y_{m+1} = \frac{B}{S} X_m + \left( Y_1 - \frac{B}{S} X_F \right) \quad \text{—— 操作线方程}$$

$X_F$  — 料液中溶质 A 的浓度, kgA/kgB;

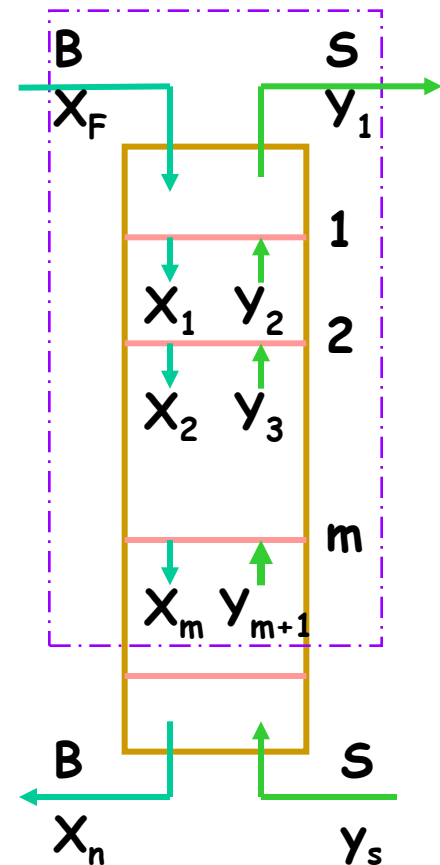
$Y_1$  — 最终萃取相  $E_1$  中溶质 A 的浓度, kgA/kgS;

$X_m$  — 离开  $m$  级萃取相中溶质 A 的浓度, kgA/kgB;

$Y_{m+1}$  — 进入  $m$  级萃取相中溶质 A 的浓度, kgA/kgS;

$B$  — 原料液中纯稀释剂的流量, kg/h;

$S$  — 原始萃取剂组分纯 S 的流量, kg/h。

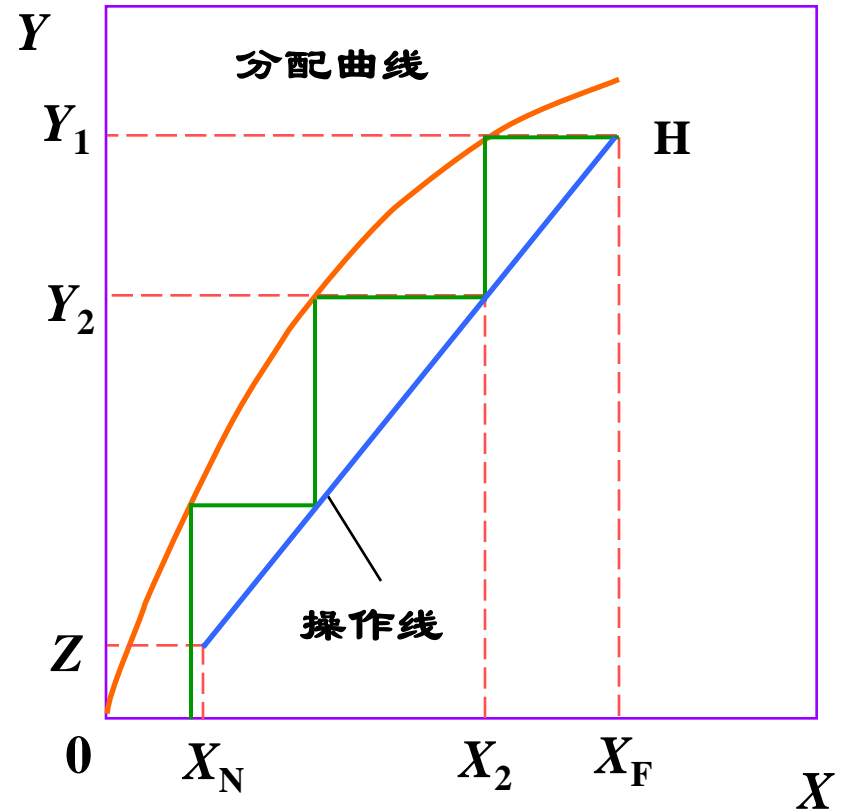


操作线为直线，用直角坐标图解更快捷

## 多级逆流萃取：萃取剂与稀释剂不互溶

### 理论级数

在 $Y-X$ 坐标图上作出分配曲线及操作线，然后在此两线间作梯级便可得到所需的理论级数。



**溶剂比对逆流萃取理论级数的影响：萃取剂与稀释剂不互溶**

**操作线斜率：B/S**

**溶剂比：S/F**

**B/S ↑ 操作线向分配曲线靠近，完成同样分离任务所需的理论级数增加**

**操作线与分配曲线相交，所需理论级数 → ∞**

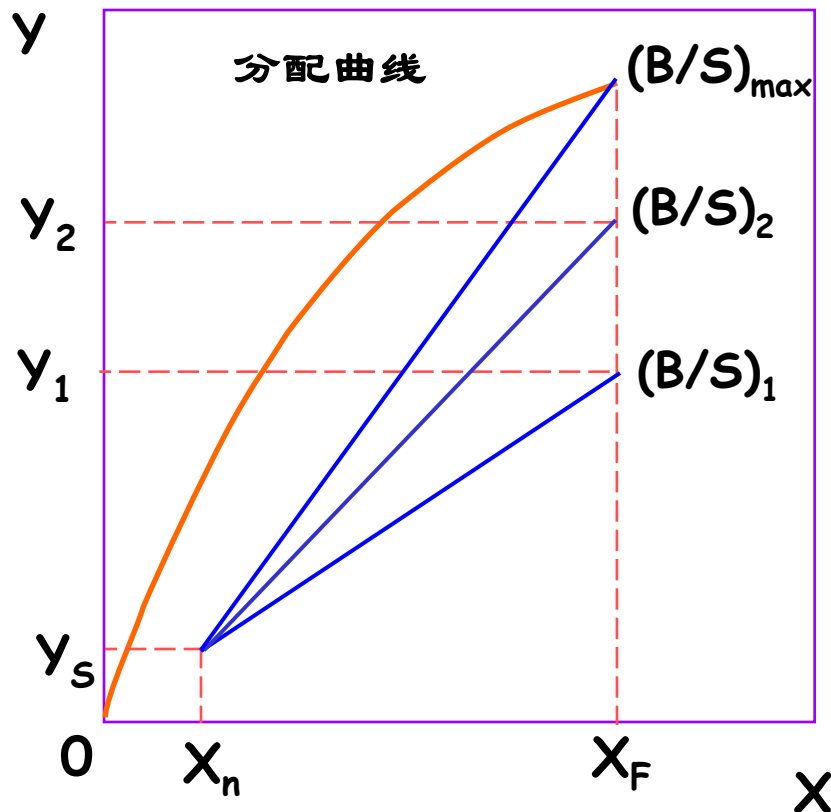
**$(B/S)_{max} \rightarrow (S/F)_{min}$**

**萃取操作的实际溶剂比**

**$(S/F) > (S/F)_{min}$**

**最少萃取剂用量**

$$\frac{B}{S_{min}} = \frac{Y_1^* - Y_S}{X_F - X_n}$$



**实际溶剂用量:  $S = (1.1 \sim 1.5) S_{min}$**