

# 操作线方程

表达从任一塔板下降的液相组成  $x_n$  及由其下一层板上升的蒸气组成  $y_{n+1}$  之间关系的方程。

## 精馏段操作线方程

对控制体作物料衡算有：

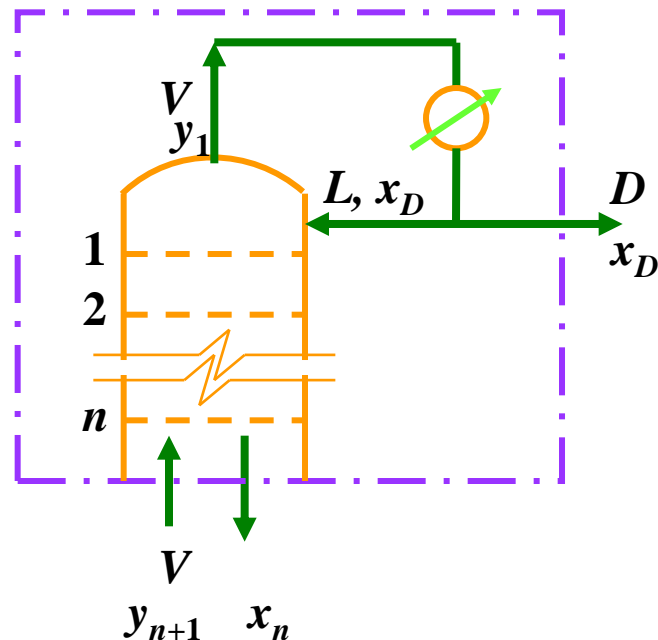
$$V = L + D$$

$$V y_{n+1} = L x_n + D x_D$$

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{D}{V} x_D \xrightarrow[\text{泡点回流: } V=L+D=(R+1)D]{\text{回流比: } R=L/D} y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

一定操作条件下，精馏段内第  $n$  层下降的液相组成  $x_n$  与第  $n+1$  层上升的汽相组成  $y_{n+1}$  之间的关系。

该方程为一直线，其斜率为  $R/(R+1)$ ，截距为  $x_D/(R+1)$



## 提馏段操作线方程

对控制体作物料衡算有：

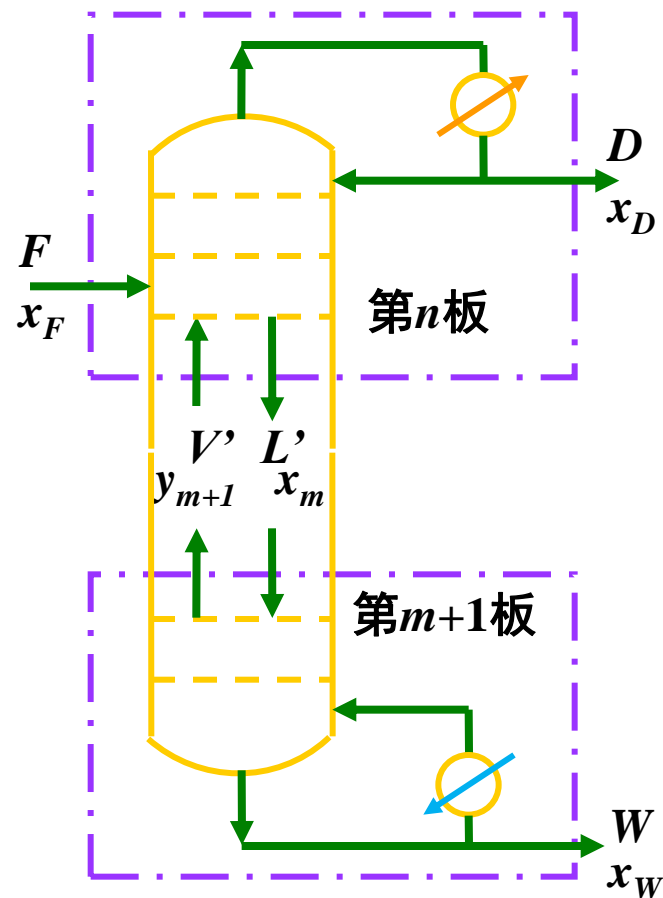
$$L' = V' + W$$

$$L'x_m = V'y_{m+1} + Wx_w$$

$$y_{m+1} = \frac{L'}{V'}x_m - \frac{W}{V'}x_w$$

斜率                  截距

$$y_{m+1} = \frac{L'}{L' - W}x_m - \frac{W}{L' - W}x_w$$



在定态连续操作过程中， $W$ ， $x_w$  为定值，同时由恒摩尔流假设可知， $L'$  和  $V'$  为常数，故提馏段操作线方程亦为直线。

## 操作线方程在 $x$ - $y$ 图上的体现

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y_{m+1} = \frac{L'}{V'} x_m - \frac{Wx_W}{V'}$$

**精馏操作线:**

$a$ 点:  $y = x = x_D$

斜率:  $R/(R+1)$

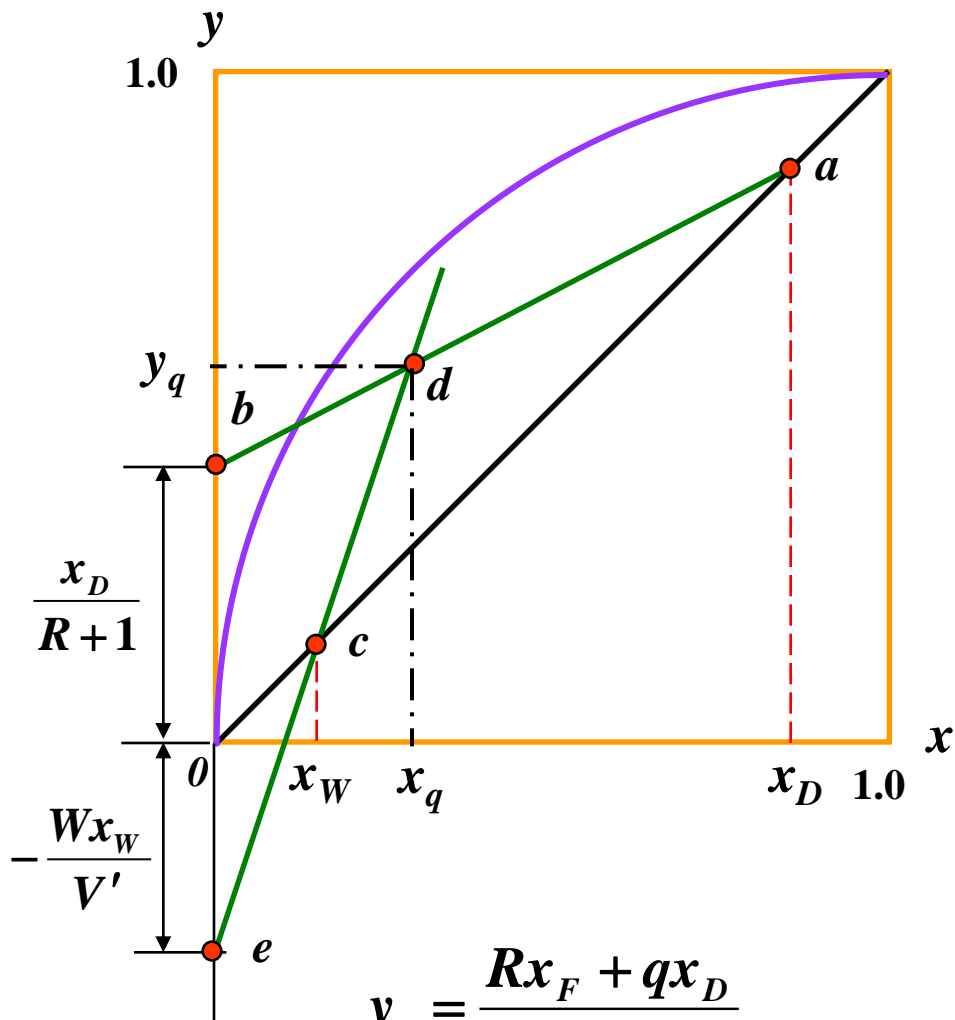
截距:  $x_D/(R+1)$

**提馏操作线:**

$c$ 点:  $y = x = x_W$

斜率:  $L'/V'$

截距:  $-Wx_W/V'$



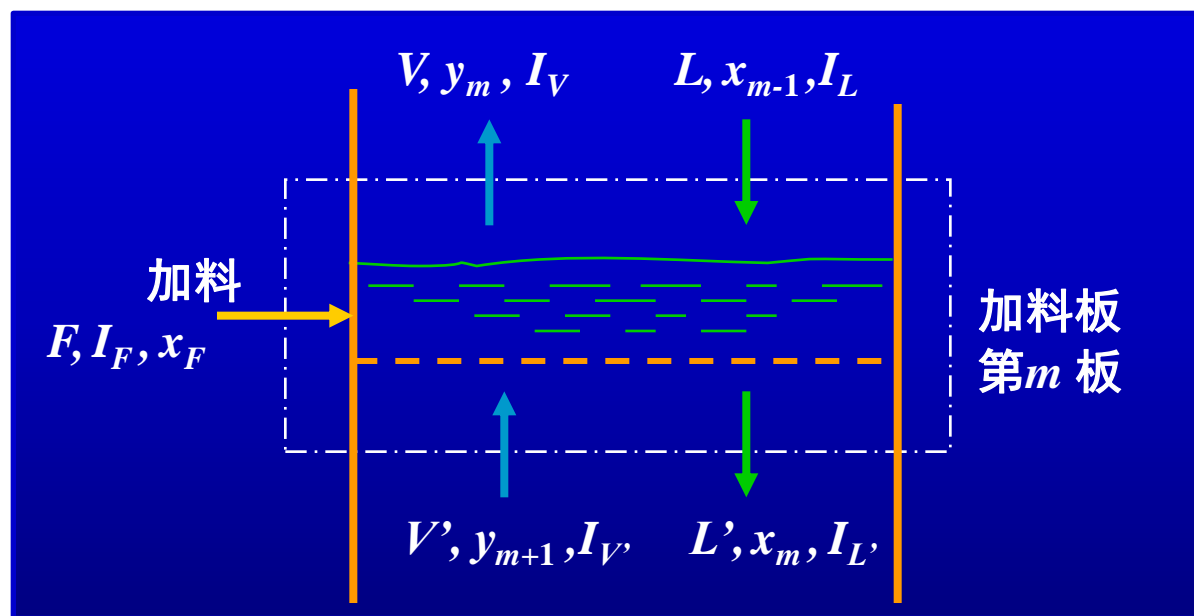
**交点  $d$  坐标:**

$$y_q = \frac{Rx_F + qx_D}{R+q}$$

$$x_q = \frac{(R+1)x_F + (q-1)x_D}{R+q}$$

## 进料热状态对塔内摩尔流率的影响及 $q$ 线方程

因有物料自塔外引入，流经加料板的汽液两相摩尔流率将随加料的热状态而变化。变量增多使得该板计算所需相关方程数增加，其基本计算式：**三个衡算式和一个相平衡关系式**

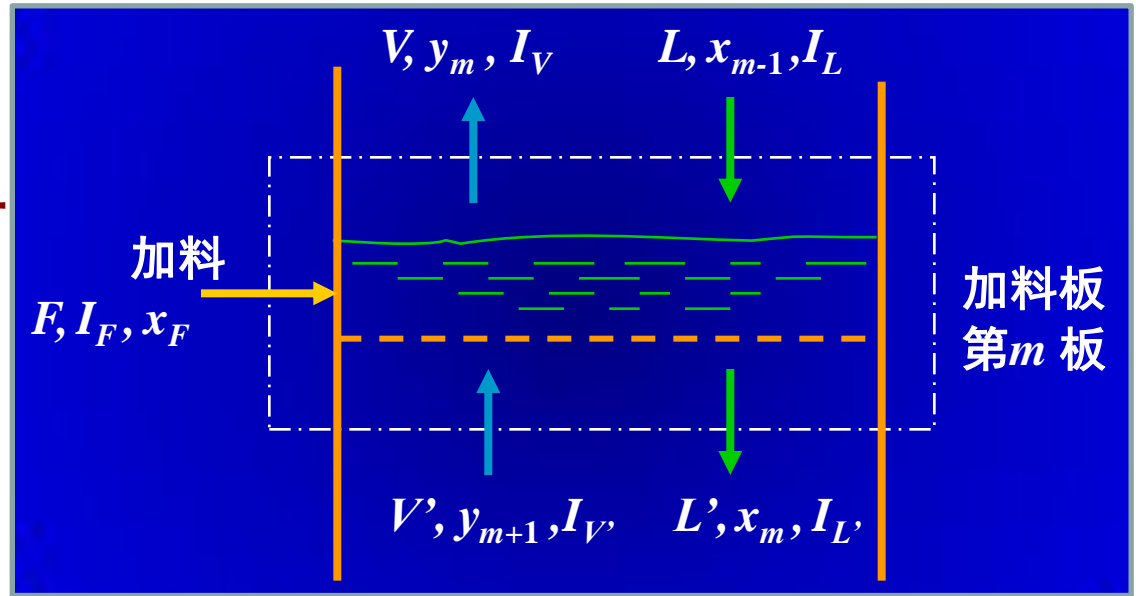


设第  $m$  块板为加料板，进、出该板各股的摩尔流率、组成与热焓可由物料衡算与热量衡算得出

当液汽呈饱和状态，  
且相邻板的温度及组成相差不大时

$$I_V \approx I_{V'}$$

$$I_L \approx I_{L'}$$



总物料衡算

$$F + L + V' = L' + V$$

轻组分物料衡算

$$Fx_F + Lx_{m-1} + V'y_{m+1} = L'x_m + Vy_m$$

热量衡算

$$FI_F + LI_L + V'I_{V'} = L'I_{L'} + VI_V$$

$$\frac{L' - L}{F} = \frac{I_V - I_F}{I_V - I_L}$$

## 进料热状态参数

精馏塔内的汽、液相摩尔流率不仅取决于塔顶的回流比和塔底再沸器的汽化量，而且与加料的热状态直接相关。

加料热状态的影响用**加料热状态参数**表示：

$$\text{定义 } q = \frac{I_V - I_F}{I_V - I_L} = \frac{L' - L}{F} = \frac{1\text{kmol原料变成饱和蒸汽所需热}}{\text{原料的摩尔气化潜热}}$$

—— **加料热状态参数**

其大小与进料的热焓值  $I_F$  直接相关。

$$\text{由定义可得： } L' = L + qF$$

$$V' = V - (1 - q)F$$

## 加料热状态对塔内摩尔流率的影响

实际生产中，进料有五种不同的热状态：

- (1) 温度低于泡点的冷液体， $I_F < I_L$
- (2) 泡点下的饱和液体， $I_F = I_L$
- (3) 温度介于泡点和露点之间的汽液两相混合物， $I_L < I_F < I_V$
- (4) 露点下的饱和蒸汽， $I_F = I_V$
- (5) 温度高于露点的过热蒸汽， $I_F > I_V$

各进料热状态的  $q$  值、以及对应的汽、液摩尔流率分别为

- |          |                             |
|----------|-----------------------------|
| (1) 冷液体  | $q > 1, L' > L + F, V < V'$ |
| (2) 饱和液体 | $q = 1, L' = L + F, V = V'$ |
| (3) 汽液混合 | $0 < q < 1, L' > L, V > V'$ |
| (4) 饱和蒸汽 | $q = 0, L' = L, V = F + V'$ |
| (5) 过热蒸汽 | $q < 0, L' < L, V > F + V'$ |

$$q = \frac{I_V - I_F}{I_V - I_L}$$

## $q$ 线方程

两操作线方程的交点轨迹方程。

$$\begin{cases} Vy = Lx + Dx_D \\ V'y = L'x - Wx_W \end{cases}$$

两式相减

$$\rightarrow (V'-V)y = (L'-L)x - (Wx_W + Dx_D)$$

代入相应关系式

$$(q-1)Fy = qFx - Fx_F$$

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$$

——  $q$  线方程或进料方程

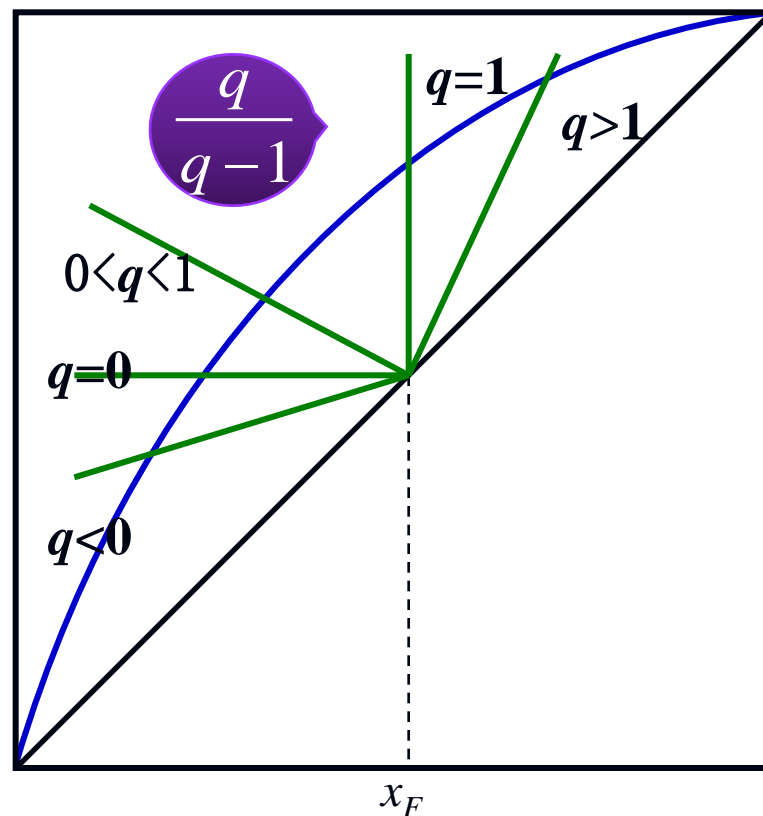
加料热状态一定时， $q$  线方程是一直线方程。

不同加料热状态对应不同的  $q$  值，在  $x$ - $y$  图上，也就对应着不同的  $q$  线。



# 五种进料状况 $q$ 线

进料状态	$q$ 值	$q$ 线
冷液	$q > 1$	$\nearrow$
饱和液体	$q = 1$	$\uparrow$
混合物	$0 < q < 1$	$\nwarrow$
饱和蒸汽	$q = 0$	$\leftarrow$
过热蒸汽	$q < 0$	$\swarrow$



进料焓值(温度)增加,  $q$  值减小, 则  $q$  线沿逆时针方向移动。

# 借助 $q$ 线，操作线方程在 $x$ - $y$ 图上的画法

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1} \quad y_{m+1} = \frac{L'}{V'} x_m - \frac{Wx_W}{V'}$$

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_F}{q-1}$$

**精馏操作线:  $ab$**

$a$ 点:  $y=x=x_D$

截距:  $x_D/(R+1)$

**$q$ 线:  $fd$**

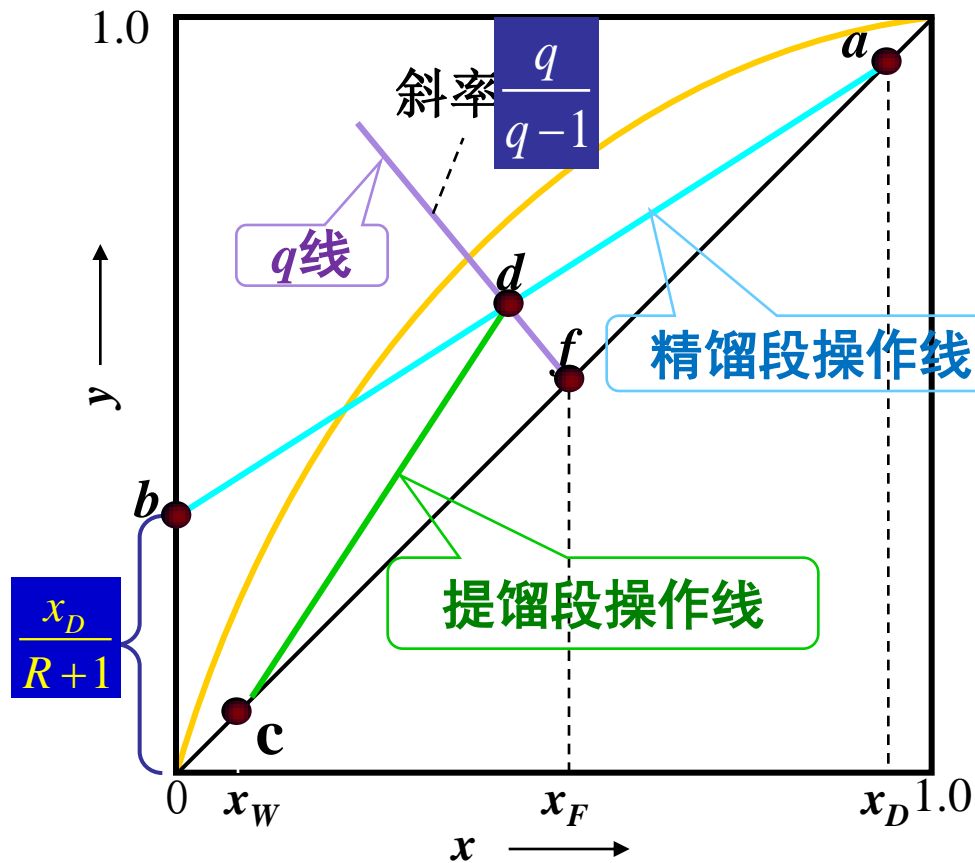
$f$ 点:  $y=x=x_F$

斜率:  $q/(q-1)$

$d$ 点: 操作线交点之轨迹

**提馏操作线:  $cd$**

$c$ 点:  $y=x=x_W$



**【例8-4】** 分离例8-3中的溶液时，若为泡点进料，操作回流比为2.5。  
试分别计算精馏段和提馏段的汽液相流量及操作线方程。

上例的计算结果为：原料液  $F=58.75\text{kmol/h}$   $x_F=0.491$ ；  
馏出液  $D=34.07\text{kmol/h}$   $x_D=0.830$ ；釜液  $W=24.68\text{kmol/h}$   $x_W=0.0235$ 。  
泡点进料：  $q=1$

(1) 精馏段：  $V = (R + 1)D = (2.5 + 1) \times 34.07 = 119.25\text{kmol/h}$

$$L = RD = 2.5 \times 34.07 = 85.18\text{kmol/h}$$

操作线方程

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{1}{R+1} x_D = \frac{2.5}{2.5+1} x_n + \frac{0.830}{2.5+1} = 0.714x_n + 0.237$$

(2) 提馏段：  $L' = L + qF = 85.18 + 1 \times 58.75 = 143.93\text{kmol/h}$

$$V' = V - (1 - q)F$$

$$V = 119.25\text{kmol/h}$$

操作线方程

$$y'_{m+1} = \frac{L'}{L' - W} x_m - \frac{W}{L' - W} x_W = \frac{143.93}{143.93 - 24.68} x_m - \frac{24.68}{143.93 - 24.68} \times 0.0235 = 1.207x_m - 0.207$$