

图中中间部分的另一曲线对应右坐标的刻度，表明了膜元件的另一个有趣的现象，膜的水力渗透系数或简称 A 值，为盐浓度的可逆函数，在高盐度时 A 值降低，在低盐度时 A 值增加。在该 12 支膜元件的实例里，前后 A 值相比整整下降了 15%，如要正确地设计系统产水流量，必须将这一点考虑进去。

5-11.2 设计方程与参数

某一具体的 RO/NF 系统性能包括给定进水压力条件下的系统产水量和脱盐率。简单地说，RO/NF 系统的产水量 Q 与有效膜面积 S 和净渗透推动力 $\Delta P - \Delta \pi$ 成正比，比例常数称为膜的水力渗透系数 A 值，水力渗透方程式如下：

$$Q = (A)(S)(\Delta P - \Delta \pi) \quad (6)$$

盐分通过扩散作用透过膜正面，盐通量 N_A 与膜正反两侧盐分的浓度差成正比，比例常数称为盐扩散系数 B 值。

$$N_A = B(C_{fc} - C_p) \quad (7)$$

其中 C_{fc} = 进水和浓水间平均浓度

C_p = 产水浓度

基本上有如下两种方法计算某一具体设计的性能：

【元件逐渐逼近法】

这是一种最精确的计算方法，但采用人工手算相当麻烦，却适合采用电脑运算，第一支元件的所有操作条件包括进水压力，都必须预先假设。然后可以计算出该元件浓水的流量及压力，离开第一支元件的浓水就是第二支元件的进水。在计算完所有元件的结果之后，可能会发现原假设的进水压力过高或过低，因而必须假设一个新的第一支元件的进水压力，再次进行试差法计算。

采用杜邦™ FilmTec™ 反渗透系统分析软件，就可迅速获得上述试差法的精确结果，该软件可用于对系统的改进或优化设计。该软件的详细计算过程及方法在此不作具体叙述，但计算的方程式和参数列于表 5-7 中。

为了确定方程式 (6) 中的 A, ΔP 和 $\Delta \pi$ 值，产水量方程式 (6) 展开成方程式 (8)，经过转换方程式 (7)，产水浓度可由方程 (17) 导出，设计计算方程式列于表 5-9，所有符号的定义列于表 5-11。

【系统整体逼近法】

该方法较为容易，如果已知进水水质、温度、产水流量与元件数量，即可计算出进水压力与产水水质的平均值；如果已知进水压力而元件数目未知，则经过几次反复的计算即可推算出所需元件的数量，该法与元件逐渐逼近法计算结果的差距可在 5% 以内，设计计算方程式列于表 5-10，所有符号的定义列于表 5-11。

表 5-9 方程式中的下标 i 表示系统水流方向 n 支元件相串联中的第 i^{th} 元件，为了计算出精确的系统性能，必须采用方程式 8，根据一组进水条件对每一支元件进行逐渐地计算，计算结果取决于每一支膜元件上的质量平衡，每支元件参数关系式如下：方程式 12 计算浓水浓度，方程式 17 计算产水浓度，方程式 25c 计算进水和浓水间平均流体阻力 P_{fc} ，方程式 14 计算温度校正系数 TCF，方程式 15 计算浓差极化系数 pf_i 和方程式 26 计算产水水力渗透系数 $A_i(\pi_i)$ 。这些结果通常涉及进水和产水侧的运行压力和渗透压的平均值。对于单元件低回收率系统，仅仅利用进出口间条件的算术平均值，就可以得到很高精确度的计算结果，即使在这种情况下，如果不能知道出口条件时，仍需采用试差逐步逼近算法。

表 5-9 RO 系统性能设计计算方程：单支元件的性能

计算项目	方程式	方程编号
产水流量	$Q_i = A_i \bar{\pi}_i S_E (\text{TCF})(\text{FF}) \left(P_{fi} - \frac{\Delta P_{fci}}{2} - P_{pi} - \bar{\pi} + \pi_{pi} \right)$	8
进水和浓水间平均渗透压	$\bar{\pi}_i = \pi_{fi} \left(\frac{C_{fci}}{C_{fi}} \right) (pf_i)$	9
产水侧平均渗透压	$\bar{\pi}_{pi} = \pi_{fi} (1 - R_i)$	10
比值：i 元件进水和浓水间浓度算术平均值与进水浓度之比	$\frac{C_{fci}}{C_{fi}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{ci}}{C_{fi}} \right)$	11
比值：i 元件浓水与进水浓度之比	$\frac{C_{ci}}{C_{fi}} = \frac{1 - Y_i (1 - R_i)}{(1 - Y_i)}$	12
进水渗透压	$\pi_f = 1.12(273 + T) \sum m_j$	13
FT30 膜温度校正系数	$\text{TCF} = \text{EXP} \left[2640 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$ $\text{TCF} = \text{EXP} \left[3020 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \leq 25^\circ\text{C}$	14a,b
FilmTec™ 8 英寸元件浓差极化系数	$pf_i = \text{EXP} [0.7Y_i]$	15
系统回收率	$Y = 1 - [(1 - Y_1)(1 - Y_2) \dots (1 - Y_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$	16
产水浓度	$C_{pj} = B(C_{fcj})(pf_i)(\text{TCF}) \frac{S_E}{Q_i}$	17

表 5-10 RO 系统性能设计方程：系统平均性能

计算项目	方程式	方程编号
总产水量	$Q = N_E S_E \bar{A} \bar{\pi} (\text{TCF})(\text{FF}) P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} P_p - \pi_f \left[\frac{C_{fc}}{C_f} p_f - (1 - \bar{R}) \right]$	18
比值：进水和浓水间系统平均浓度值与进水浓度之比	$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{-\bar{R} \ln(1 - Y / Y_L)}{Y - (1 - Y_L) \ln(1 - Y / Y_L)} + (1 - \bar{R})$	19
极限系统回收率	$Y_L = 1 - \frac{\pi_f (\bar{p} f) (\bar{R})}{P_f - \Delta P_{fc} - P_p}$	20
进水和浓水间系统对数平均浓度值与进水浓度近似比值	$\left. \frac{C_{fc}}{C_f} \right _{Y_L, \bar{R}=1} = -\frac{\ln(1 - Y)}{Y}$	21
平均元件回收率	$Y_i = 1 - (1 - Y)^{1/n}$	22
平均极化系数	$\bar{p} f = \text{EXP}[0.7 Y_i]$	23
进水和浓水间系统平均渗透压值	$\bar{\pi} = \pi_i \left(\frac{C_{fc}}{C_f} \right) \bar{p} f$	24
8 英寸两段系统，进水和浓水间系统压降平均值	$\Delta P_{fc} = 0.04 \bar{q}_{fc}^2$ $\Delta P_{fc} = \left[\frac{0.1(Q / 1440)}{Y N_{V2}} \right] \left[\frac{1}{N_{VR}} + 1 - Y \right]$	25a,b,c
单支 8 英寸元件或单段系统进水和浓水间压降	$\Delta P_{fc} = 0.01 n \bar{q}_{fc}^{1.7}$	
进水和浓水间平均渗透压函数的膜水力渗透系数	$\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125; \bar{\pi} \leq 25$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.125 - 0.01 \left(\frac{\bar{\pi} - 25}{35} \right); 25 \leq \bar{\pi} \leq 200$ $\bar{A}(\bar{\pi}) = 0.070 - 0.0001(\bar{\pi} - 200); 200 \leq \bar{\pi} \leq 400$	26a,b,c
产水浓度	$C_p = B C_{fc} \bar{p} f (\text{TCF}) \left(\frac{N_E S_E}{Q} \right)$	27

表 5-11 符号定义

Q_i	元件 i 产水量(gpd)	\sum_j	所有离子总和
$A_i \pi_i$	25°C 时元件 i 水力渗透系数，它是进水和浓水间平均渗透压的函数(gfd/psi)	Y	系统回收率
S_E	元件膜面积(ft ²)	$\prod_{i=1}^n$	n 项串联乘积
TCF	膜产水温度校正系数	n	串联元件数量
FF	膜流量因子	Q	系统产水量(gpd)
P_{fi}	元件 i 进水压力(psi)	N_E	系统中元件数量
ΔP_{fci}	元件 i 进水和浓水间平均压降(psi)	\bar{Q}_i	元件平均产水量(gpd) = Q/N_E
P_{pi}	元件 i 产水侧压力(psi)	$\bar{A}\pi$	25°C 时水力渗透系数，它是进水和浓水间平均渗透压的函数(gfd/psi)
$\bar{\pi}_i$	进水和浓水间平均渗透压(psi)	\bar{C}_{fc}	进水和浓水间系统平均浓度(ppm)
π_{fi}	元件 i 进水渗透压(psi)	\bar{R}	系统平均脱盐率
π_{pi}	元件 i 产水侧渗透压 (psi)	$\bar{\pi}$	系统进水和浓水间平均渗透压(psi)
pf_i	元件 i 浓差极化系数	$\Delta \bar{P}_{fc}$	进水和浓水间系统平均压差(psi)
R_i	元件 i 脱盐率 = $\frac{\text{进水浓度} - \text{产水浓度}}{\text{进水浓度}}$	Y_L	(最大) 极限系统回收率
C_{fci}	元件 i 进水和浓水间平均浓度 (ppm)	\bar{Y}_i	平均元件回收率
C_{fi}	元件 i 进水浓度 (ppm)	\bar{pf}	平均浓差极化系数
C_{ci}	元件 i 浓水浓度(ppm)	\bar{q}_{fc}	进水和浓水间算术平均流量(gpm) (=1/2(进水流量 + 浓水流量))
Y_i	元件 i 回收率 = $\frac{\text{产水流量}}{\text{进水流量}}$	N_V	系统中 6 芯压力容器数量($\approx N_E/6$)
π_f	待处理进水渗透压(psi)	N_{V1}	两段系统中第一段的压力容器数量($\approx 2/3 N_V$)
T	进水温度(°C)	N_{V2}	两段系统中第二段的压力容器数量($\approx N_V/3$)
m_j	第 j^{th} 种离子摩尔浓度	N_{VR}	段间压力容器排列比 (= N_{V1}/N_{V2})