

研究论文

具有中间水道的废水再生循环水网络的优化

冯 霄¹, 沈人杰¹, 余新江²

(¹ 西安交通大学化工系, 陕西 西安 710049, ² 克拉玛依职业技术学院石油化学工程系, 新疆 独山子 833600)

摘要: 考虑废水再生循环的水网络, 可以最大限度地减少系统的新鲜水消耗和废水排放量, 具有中间水道的水网络结构, 可以有效地提高系统的柔性, 本文建立了具有中间水道的废水再生循环水网络的超结构, 提出了网络优化的数学模型。由于该最优网络涉及多参数的优化, 本文采用了分步优化的策略, 根据各参数的相对重要性, 依次对新鲜水消耗量、再生水流率和再生负荷进行优化。计算实例表明, 本文建立的方法是有效的。

关键词: 水网络; 中间水道; 再生循环; 超结构; 数学规划; 优化

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 08-2046-06

Optimization of regeneration recycling water networks with internal water mains

FENG Xiao¹, SHEN Renjie¹, YU Xinjiang²

(¹ Department of Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

² Department of Petrochemical Engineering, Kalamay Vocational & Technical College, Dushanzi 833600, Xinjiang, China)

Abstract: A water network with regeneration recycling can reduce freshwater consumption and wastewater discharge to the maximum extent. Networks with internal water mains are normally more flexible, and more convenient to operate and control. In this paper, a general methodology for the design of optimal regeneration recycling water networks with internal water mains was proposed, based on a newly established superstructure. The optimization was virtually a multi-objective problem. Considering the relative importance of these objectives, sequential optimization was adopted. Freshwater consumption, regenerated water flowrate and contaminant regeneration load, were minimized in sequence, which corresponded to three mathematical models. By solving these models step by step, a regeneration recycling water network could be constructed, which was economically favorable. A case study showed the effectiveness of the method.

Key words: water network; internal water main; regeneration recycling; superstructure; mathematical programming; optimization

引 言

考虑废水再生循环的水网络, 可以最大限度地

减少系统的新鲜水消耗和废水排放量, 因而受到广泛的关注^[1-6]。但是, 对于常规网络结构, 为了取得最大的节水减排效果, 各用水单元之间高度集

2008-02-21 收到初稿, 2008-04-08 收到修改稿。

联系人及第一作者: 冯霄 (1953—), 女, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (20436040)。

Received date: 2008-02-21.

Corresponding author: Prof. FENG Xiao. E-mail: xfeng@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20436040).

成，以致系统柔性变差^[7]。而具有中间水道的水网络，由于所有的用水单元只与水道相连，彼此之间相互不连接，因此，如果生产过程中一些用水单元的水质发生波动，就不会直接影响其他用水单元，而是将扰动传播给与之相连的下游水道。中间水道可以看作是缓冲器，在其中，水在用作其他单元水源之前先混合，因此扰动将被削弱；更为重要的是，通过补加新鲜水，中间水道的水质很容易控制。只要中间水道的水质保持稳定，由一些用水单元所引起的扰动将会被抑制，而不会在整个系统中传播。用水网络中设置中间水道，不仅可以简化设计，同时由于消除了用水单元之间的相互连接，且中间水道中的水质容易调节，因而系统的柔性大大增强，系统中水质的控制以及生产操作易于进行^[7-8]。

对于具有中间水道的水网络的研究，主要集中在废水直接回用网络的优化^[7-11]。而对于考虑废水再生的网络，研究较少，仅有的研究采用了试差的方法确定再生浓度，然后进行网络设计^[12]。这样的方法虽然避免了复杂的数学规划，但通常不能获得系统的最优解。

本文针对具有中间水道的废水再生循环水网络特点，在建立网络超结构的基础上，提出了网络优化的数学模型。

1 具有中间水道的废水再生循环水网络结构和超结构

具有中间水道的再生循环水网络结构如图 1 所示，它是具有一个再生单元的中间水道水网络结构，就是通过在系统中设置两个中间水道，即再生水道和再生后水道。再生水道接收一些用水单元的废水，将一部分供给那些最大进口浓度大于或等于该水道浓度的单元，另一部分送往再生单元进行再生，再生后的水进入再生后水道。所有的用水单元都不直接相连，而只与新鲜水道、再生水道、再生后水道和废水道中的一个或者多个水道相连，从其中取水，并向其中之一排水。

在图 1 中，4 根垂线从左到右分别代表新鲜水道、再生后水道、再生水道和废水道，其浓度分别标在各条线的上方，水量负荷分别标在各条线的下方。在图中用标有编号的方框代表每个用水单元，用箭头表示各用水单元的进、出口水流股的流向。

具有中间水道的再生循环水网络结构，可以建立一个包含所有可能结构的超结构来描述该网络。

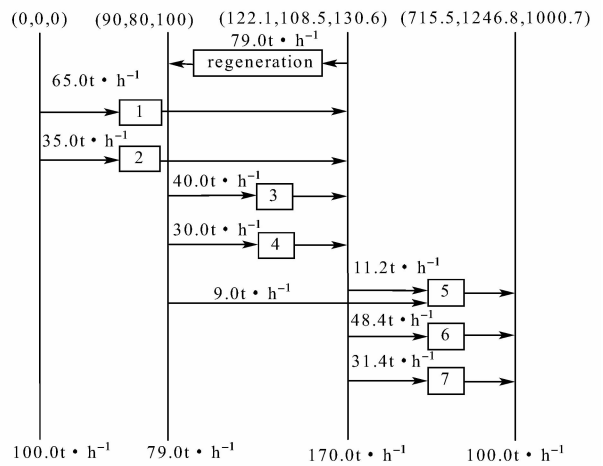


图 1 具有中间水道的再生循环水网络结构

Fig. 1 Network structure of regeneration recycling water system with internal water mains

该超结构可以用图 2 来描述。

图中：

- (1) 新鲜水道 F 后标示一组分裂的箭头以表示去往各个用水单元的新鲜水；
- (2) 在每一个用水单元 P 前标示一组交汇的箭头 M 以表示从新鲜水道及再生水道、再生后水道来的水；
- (3) 在每一个用水单元 P 后标示一个箭头以表示从该单元去再生水道、再生后水道及废水道的水；
- (4) 在再生水道 WM_{BR} 和再生后水道 WM_{AR} 之间标示一个箭头表示从再生水道经再生单元 Re 去往再生后水道的水；
- (5) 在每一个中间水道前标示一组交汇的箭头 M 以表示从各用水单元和上一级中间水道来的水；
- (6) 在每一个中间水道后标示一组分裂的箭头 S 以表示去往各个用水单元和下一级中间水道的水；
- (7) 在废水道 W 前标示一组交汇的箭头 M 以表示从各用水单元及最后一级中水道来的水。

具体就每个用水单元 j 而言，它可以接受新鲜水道 F_j^W 、再生水道 $F_{BR,j}^{MP}$ 和再生后水道 $F_{AR,j}^{MP}$ 对它的供水，从它出来的水流股也可以流向再生水道 $F_{j,BR}^{PM}$ 、再生后水道 $F_{j,AR}^{PM}$ 和废水道 F_j^D ，在该单元中也可能会有水的损失 F_j^L 。不过需要指出的是，对于每一个用水单元而言，它不能同时接收再生水道（或再生后水道）的水并同时向该水道排水。可用图 3 表示每个用水单元 j 相应的进口和出口水流股情况。

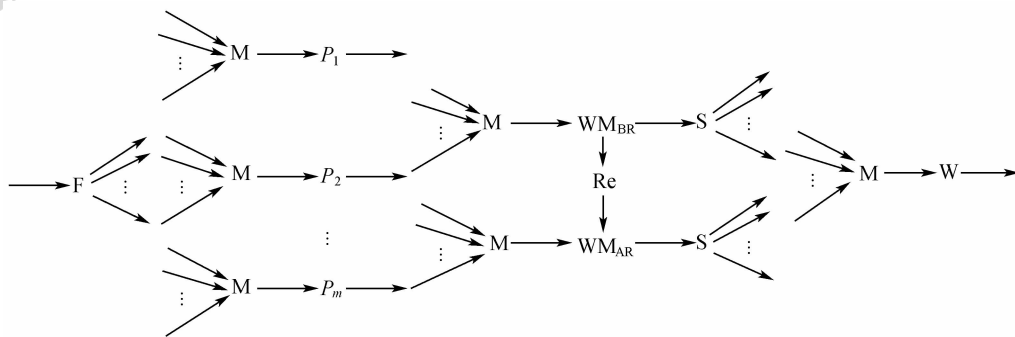


图 2 具有中间水道的再生循环水网络的超结构

Fig. 2 Superstructure of regeneration recycling water networks with internal water mains

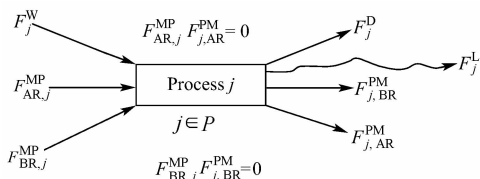


图 3 用水单元 j 进出口流股示意图

Fig. 3 Nomenclature for process units

2 数学优化模型的建立

采用再生单元对部分废水进行再生以后，整个用水网络的新鲜水用量和废水排放量将会明显降低。再生单元作为该网络中非常重要的一部分，其再生水量的大小以及对废水的再生程度（即再生前、后的浓度的选择）将会对整个用水网络的新鲜水量产生较大的影响。如果再生水量增大，系统耗费的新鲜水用量相应变小，但再生设备的投资以及再生的费用也会随之上升。同样，再生水道的浓度确定也是十分重要的，因为它同样关系着再生费用的高低和新鲜水用量。如果再生浓度过高，则再生成本增加而新鲜水用量不再降低；如果过低，则新鲜水用量将增加。而对于再生后的杂质浓度，如果太高，则无法将它再次利用，使再生失去意义，降低水的利用效率；反之，要是太低，则再生的难度加大，相应的再生费用上升很快。因此需要根据实际的网络系统、再生技术以及费用等因素来综合考虑，进行优化。在本文中，再生后的浓度是依据具体的实际研究对象给定，而杂质再生浓度和所需要再生进行再生的水量则是通过求解优化模型获得。

各杂质再生之后的浓度可以根据具体的情况进行选定，比如在所有用水单元中，除了进口浓度限

制为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的必需用新鲜水之外，其他所有的单元中的各个杂质允许进口浓度的最小值就可设置成再生后的浓度。

根据水网络的超结构以及每个用水单元的进出口水流股情况，利用质量衡算就可以列出如下整个系统的约束条件（ $j=1, \dots, P$ 为用水单元集合； $s=1, \dots, C$ 为杂质集合）。

- (1) 对每个单元 j 进行进、出口水量衡算

$$F_j^W + F_{BR,j}^{MP} + F_{AR,j}^{MP} = F_j^D + F_{j,AR}^{PM} + F_{j,BR}^{PM} + F_j^L, j \in P \quad (1)$$

- (2) 对每个单元 j 入口前的混合节点进行杂质质量衡算

$$F_{BR,j}^{MP} C_{BR,s}^{WM} + F_{AR,j}^{MP} C_{AR,s}^{WM} = (F_j^W + F_{BR,j}^{MP} + F_{AR,j}^{MP}) C_{j,s}^{In}, j \in P, s \in C \quad (2)$$

- (3) 对每个用水单元 j 的进、出口杂质进行衡算

$$F_{BR,j}^{MP} C_{BR,s}^{WM} + F_{AR,j}^{MP} C_{AR,s}^{WM} + M_{j,s} = (F_j^W + F_{BR,j}^{MP} + F_{AR,j}^{MP}) C_{j,s}^{Out}, j \in P, s \in C \quad (3)$$

- (4) 每个单元 j 的每种杂质的入口浓度限制

$$C_{j,s}^{In} \leq C_{j,s}^{In,Max}, j \in P, s \in C \quad (4)$$

- (5) 每个单元 j 的每种杂质 s 的出口浓度限制

$$C_{j,s}^{Out} \leq C_{j,s}^{Out,Max}, j \in P, s \in C \quad (5)$$

- (6) 再生水道的水量衡算

$$\sum_{j \in P} F_{j,BR}^{PM} + F_{AR,BR}^{IM} = \sum_{j \in P} F_{BR,j}^{MP} + F_{BR,D}^{IM} + F^R + F_{BR}^L \quad (6)$$

- (7) 再生水道进、出口的杂质衡算

$$\sum_{j \in P} (F_{j,BR}^{PM} C_{j,s}^{Out}) + F_{PR,BR}^{IM} C_{AR,s}^{WM} = (\sum_{i \in P} F_{BR,i}^{MP} + F_{BR,D}^{IM} + F^R + F_{BR}^L) C_{BR,s}^{WM}, s \in C \quad (7)$$

- (8) 再生后水道的水量衡算

$$\sum_{j \in P} F_{j,AR}^{PM} + F^R = \sum_{j \in P} F_{AR,j}^{MP} + F_{AR,D}^{IM} + F_{AR,BR}^{IM} + F_{AR}^L \quad (8)$$

(9) 再生后水道的杂质衡算

$$\sum_{j \in P} (F_{j,AR}^{PM} C_{j,s}^{Out}) + F^R C_{Out,s}^R =$$

$$(\sum_{j \in P} F_{AR,j}^{MP} + F_{AR,BR}^{IM} + F_{AR,D}^{IM} + F_{AR}^L) C_{AR,s}^{WM}, s \in C \quad (9)$$

(10) 由于再生单元的水来自于再生水道，故其再生负荷为

$$M_s^R = F^R (C_{BR,s}^{WM} - C_{Out,s}^R), s \in C \quad (10)$$

(11) 对每个用水单元而言，如果它从某水道取水以后，它就不能同时向该水道排水

$$F_{AR,j}^{MP} F_{j,AR}^{PM} = 0 \quad (11)$$

$$F_{BR,j}^{MP} F_{j,BR}^{PM} = 0 \quad (12)$$

(12) 由于再生水道要设置在再生后水道和废水水道之间，所以它们三者的浓度要满足

$$C_{BR,s}^{WM} > C_{AR,s}^{WM}, j \in P, s \in C \quad (13)$$

$$C_s^D > C_{BR,s}^{WM}, j \in P, s \in C \quad (14)$$

由于优化目标是新鲜水用量最小、再生水流量最小、再生负荷最小，所以问题成为了一个多目标的优化问题，求解的过程中将它转化为多个单目标问题逐步优化求解。由于新鲜水用量（亦即废水排放量）直接影响系统的运行费用和环境性能，取为第一个目标。第二个目标为再生水流量，因为研究表明再生水流量是影响再生费用的主要参数^[6,13-15]。再生负荷取为最后一个目标。

第一步：优化总新鲜水用量

目标：

$$\min \sum_{j \in P} F_j^W \quad (15)$$

约束条件为式 (1) ~ 式 (14)

求解此数学规划以后，便可以得到系统的最小新鲜水用量最优解，并将该解写为 F_{min}^W 。

第二步：优化再生水流量

目标：

$$\min F^R \quad (16)$$

约束条件为式 (1) ~ 式 (14) 与

$$\sum_{j \in P} F_j^W \leq F_{min}^W (1 + \delta_1) \quad (17)$$

式中 δ_1 为一个人设定的大于等于零的数，用以控制新鲜水流量的最大允许值 $F_{min}^W (1 + \delta_1)$ 。当 $\delta_1 = 0$ 时，有 $\sum_{i=1}^P F_i^W \leq F_{min}^W$ ，此时新鲜水流量的最大允许值就是前一步求得的最小值。求解此数学规划，可以得到在新鲜水用量不超过最大允许值的情况下的最小再生水流量，并将该值写为 F_{min}^R 。

第三步：优化再生负荷

目标：

$$\min \sum_{s \in C} M_s^R \quad (18)$$

约束条件为式 (1) ~ 式 (14) 及式 (17)，与

$$F^R \leq F_{min}^R (1 + \delta_2) \quad (19)$$

式中 δ_2 是一个人为设定的 ≥ 0 的数，用以控制再生水流量的最大允许值 $F_{min}^R (1 + \delta_2)$ 。当 $\delta_2 = 0$ 时，有 $F^R \leq F_{min}^R$ ，此时再生水流量的最大允许值就是前一步求得的最小值。求解此数学规划，可以得到在再生水流量不超过最大允许值的情况下的最小再生负荷和相应的用水网络，包括每个水道中的各种杂质浓度、新鲜水到各用水单元、各用水单元到各水道、各水道到各用水单元的水量分配情况以及再生单元的入口再生浓度和再生水量。

如果考虑不同杂质的不等价性，可以采用文献 [2] 中所提出的加权法，对每一种杂质赋予一个加权因子，再将加权后的当量杂质负荷最小化。

本文的求解都是采用商业软件 Lingo 完成的。

3 实例

3.1 单杂质系统

首先以具有 5 个用水单元的单杂质系统为例，该系统的极限数据如表 1 所示。

表 1 单杂质系统极限数据

Table 1 Limiting water data of single-contaminant system

Process	$C_{j,s}^{In,Max}$ /mg · L ⁻¹	$C_{j,s}^{Out,Max}$ /mg · L ⁻¹	$M_{j,s}$ /g · h ⁻¹
1	25	80	2.00
2	25	90	2.88
3	25	200	4.00
4	50	100	3.00
5	50	800	30.00

从表 1 可以看出，该网络各单元进口极限浓度分别为 25 mg · L⁻¹ 和 50 mg · L⁻¹。首先将再生后杂质的浓度设为 50 mg · L⁻¹。第一步以系统的新鲜水用量最小为优化的目标，通过求解数学模型可以得到系统最小的新鲜水用量为 51.8 t · h⁻¹，然后在此基础上以最小的再生水流量为优化目标，求解数学模型便可以得到再生水流量最小值为 151.8 t · h⁻¹。最后在此最小的再生水流量限制下，以最小的再生负荷为优化目标进行求解，便可以得到最小的再生负荷为 7.53 kg · h⁻¹，同时也得到相应的用水网络如图 4 所示。从获得的用水网络中可以看

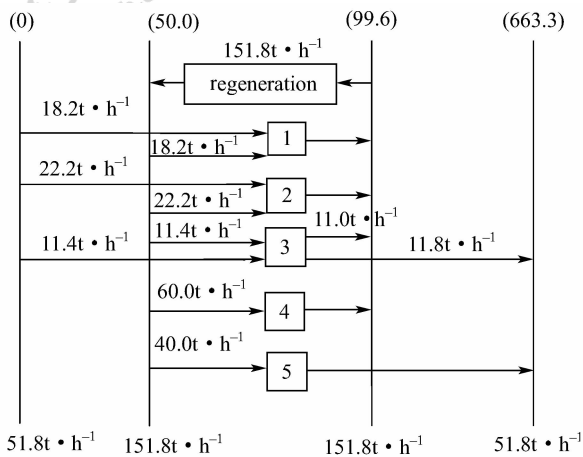


图 4 单杂质系统的用水网络图

Fig. 4 Water network of single-contaminant system

到, 求得的杂质最优再生浓度为: $99.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3.2 多杂质系统

为了更好地说明模型的通用性, 以文献 [12] 中某三杂质七用水单元的用水系统为例, 相应的每个用水单元的极限数据如表 2 所示。在该例中, 由于单元 1 和单元 2 的进口极限浓度均为 0, 故这两个单元都必须用新鲜水, 而其他单元则可从再生水道、再生后水道或者其他单元取水。三种杂质相应的进口极限浓度最小值分别为 90、80、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 2 多杂质系统的极限数据

Table 2 Limiting water data of multi-contaminant system

Process	Contaminants	$C_{j,s}^{\text{In,Max}}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$C_{j,s}^{\text{Out,Max}}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	F_j^{Lim} / $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
1	1	0	80	65
	2	0	70	
	3	0	80	
2	1	0	110	35
	2	0	120	
	3	0	100	
3	1	90	150	40
	2	130	180	
	3	100	210	
4	1	110	210	30
	2	80	150	
	3	150	220	
5	1	260	350	30
	2	200	320	
	3	180	310	
6	1	340	800	64
	2	350	1100	
	3	400	1000	
7	1	950	1500	50
	2	850	2100	
	3	900	1800	

故将此作为系统的再生后浓度。通过模型的求解可以获得系统最小新鲜水用量为 $100 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。然后将目标函数设为再生水用量最小进行优化, 最后在此基础上将系统再生负荷作为优化的最后目标进行求解, 便可得图 1 所示的用水网络。

从图 1 可以看出来, 此时系统新鲜水流量是 $100.0 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 再生水流量为 $79.0 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, 杂质再生浓度分别为 122.1 、 108.5 、 $130.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相应的再生负荷分别为 2.53 、 2.25 、 $2.42 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 总的再生负荷为 $7.20 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与文献 [12] 的结果相比较, 新鲜水消耗相同, 但再生水量要少 $9.6 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4 结 论

本文根据具有中间水道的再生循环水网络结构, 建立了网络的超结构。基于该超结构, 建立了以新鲜水用量最小、再生水流量最小、再生负荷最小为目标的分步优化数学规划模型。依次求解这些模型, 可以获得具有良好经济性和环境性能的带中间水道的再生循环水网络。由于网络结构比较简单, 且采用分步优化策略, 使得问题的求解较为容易。

符 号 说 明

- C ——杂质集合
- $C_{j,s}^{\text{In}}$ ——用水单元 j 杂质 s 的进口浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{j,s}^{\text{Out}}$ ——用水单元 j 杂质 s 的出口浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{j,s}^{\text{In,Max}}$ ——用水单元 j 杂质 s 的极限进口浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{j,s}^{\text{Out,Max}}$ ——用水单元 j 杂质 s 的极限出口浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{\text{BR},s}^{\text{WM}}$ ——再生水道中杂质 s 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{\text{AR},s}^{\text{WM}}$ ——再生后水道中杂质 s 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- $C_{\text{Out},s}^{\text{R}}$ ——再生单元杂质 s 的出口浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
- F_j^{D} ——用水单元 j 排至废水道的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- $F_{\text{AR,BR}}^{\text{IM}}$ ——再生后水道供给再生水道的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- $F_{\text{BR,D}}^{\text{IM}}$ ——再生水道直接排至废水道的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- $F_{\text{AR,D}}^{\text{IM}}$ ——再生后水道直接排至废水道的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- F_j^{L} ——用水单元 j 水的损失量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- F_j^{Lim} ——用水单元 j 的极限水流量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- $F_{\text{AR},j}^{\text{MP}}$ ——再生后水道供给用水单元 j 的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- $F_{\text{BR},j}^{\text{MP}}$ ——再生水道供给用水单元 j 的水量, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$

$F_{j,AR}^{PM}$ ——用水单元 j 排至再生后水道的水量, $t \cdot h^{-1}$

$F_{j,BR}^{PM}$ ——用水单元 j 排至再生水道的水量, $t \cdot h^{-1}$

F^R ——再生水量, $t \cdot h^{-1}$

F_j^W ——用水单元 j 的新鲜水用量, $t \cdot h^{-1}$

$M_{j,s}$ ——用水单元 j 中移除杂质的质量负荷, $g \cdot h^{-1}$

M_s^R ——再生单元中移除杂质的质量负荷, $g \cdot h^{-1}$

P ——用水单元集合

References

- [1] Feng X, Bai J, Zheng X. On the use of graphical method to determine the targets of single-contaminant regeneration recycling water systems. *Chemical Engineering Science*, 2007, **62**: 2127-2138
- [2] Feng X, Bai J, Wang H, Zheng X. Grass-roots design of regeneration recycling water networks. *Computers & Chemical Engineering*, 2008, **32**: 1892-1907
- [3] Gunaratnam M, Alva-Argaez A, Kokossis A, Kim J K, Smith R. Automated design of total water systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44**: 588-599
- [4] Huang C H, Chang C T, Ling H C, Chang C C. A mathematical programming model for water usage and treatment network design. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, **38**: 2666-2679
- [5] Mann J G, Liu Y A. *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1999
- [6] Wang Y P, Smith R. Wastewater minimization. *Chemical Engineering Science*, 1994, **49**: 981-1006
- [7] Zheng X, Feng X, Shen R, Seider W D. Design of optimal water-using networks with internal water mains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, **45**: 8413-8420
- [8] Feng X, Seider W D. A new structure and design methodology for water networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, **40**: 6140-6146
- [9] Wang B, Feng X, Zhang Z. A design methodology for multiple-contaminant water networks with single internal water main. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, **27**: 903-911
- [10] Ma H, Feng X, Cao K. A rule-based design methodology for water networks with internal water mains. *Chemical Engineering Research & Design*, 2007, **85**: 431-444
- [11] Wang Dongming (王东明), Yang Fenglin (杨凤林), Zhang Xingwen (张兴文). Design methodology for water networks with internal water mains. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2005, **56** (6): 1051-1056
- [12] Cao D, Feng X, Duan X. Design of water network with internal mains for multi-contaminant wastewater regeneration recycle. *Chemical Engineering Research & Design*, 2004, **82**: 1331-1336
- [13] Wright D G, Woods D R. Evaluation of capital cost data (7): Liquid waste disposal with emphasis on physical treatment. *Canadian J. Chem. Eng.*, 1993, **71**: 575-590
- [14] Wright D G, Woods D R. Evaluation of capital cost data (8): Liquid waste disposal with emphasis on biological treatment. *Canadian J. Chem. Eng.*, 1994, **72**: 342-351
- [15] Wright D G, Woods D R. Evaluation of capital cost data (9): Liquid waste disposal with emphasis on chemical treatment. *Canadian J. Chem. Eng.*, 1995, **73**: 546-561