

研究论文

基于线性规划的单杂质间歇过程用水最小化

程华农, 毛文锋, 郑世清

(青岛科技大学计算机与化工研究所, 山东 青岛 266042)

摘要: 对间歇化工过程的单杂质用水网络提出了以新鲜水量最小为目标的优化设计方法。该方法对间歇过程的每个操作假定为一个操作接一个储罐, 对所有操作按出口浓度从小到大排序, 避免了高浓度水回用到低浓度水的操作中, 去掉了用水网络中多余连接, 构造了用水网络超结构。该超结构可以表述为一个线性规划模型。通过 GAMS 求解该模型得出每个操作周期的最小新鲜水量, 并通过证明得出该最小用水量随操作周期增加最终不再变化。该方法可以用作有、无中间储罐间歇过程用水网络综合, 实例计算结果表明该方法是可行的, 与其他方法相比更简单。

关键词: 间歇过程; 用水网络; 优化; 线性规划

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 02-0417-08

Fresh water minimization for batch process with single contamination based on linear programming

CHENG Huanong, Mao Wenfeng, ZHENG Shiqing

(Research Center for Computer and Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: A method based on linear programming was proposed to design water network in batch chemical processes with a single contaminant. The aim was to determine the optimal water use structure for fresh water minimization in each operation cycle. Each operation in batch processes was assumed to connect with a tank. These operations are arranged in the order of outlet concentration from low to high. This method avoided the re-use of high concentration water in the operation with low concentration water. Then a superstructure was developed which entailed all the re-use possibilities. By solving the linear programming model corresponding to the superstructure with general algebraic modeling system (GAMS), the minimal fresh water was identified. Furthermore, it was proved that the final minimal fresh water reached a fixed value with repeating operation cycles. The proposed method could be applied to the optimization of batch water network with or without a storage tank. The results of the case study show that the method is feasible and simpler than other methods.

Key words: batch process; water network; optimization; linear programming

引 言

由于水资源的日趋紧张以及对环境保护的日益

重视, 通过优化生产过程的用水网络来减少新鲜水量和废水排放量引起了人们的广泛兴趣。近 20 年来人们对用水网络的优化进行了深入的研究, 主要

方法有图形法^[1-4]和数学规划法^[5-10]。这些方法主要用于连续过程。而作为化工生产的重要组成部分的间歇过程,由于生产过程操作条件和资源消耗随着时间变化的复杂性,使间歇过程用水网络研究工作相对较少。

在连续过程中,一个操作*i*的出口物流可以作为另一个操作*h*的入口物流的必要条件是:这个操作*i*的出口物流的浓度不大于操作*h*入口物流的最大允许浓度。在间歇过程中,如果满足上述条件,操作*h*进水和操作*i*出水必须是同步的。这种情况很难满足,因此可以采用中间储罐的方法存储上一个操作排出的废水,以便供给下一个操作使用。文献[11-12]在给定罐数目的基础上,对间歇过程的用水网络,分别以新鲜水量、水(新鲜水和废水)费用、水和公用工程费用以及水、公用工程和设备费用最小为目标,采用数学规划的方法进行了优化。该方法没有考虑操作之间水的直接利用,所建立的数学模型是一个含有积分的非线性优化模型,求解较为困难。文献[13]对两种情况下的间歇过程用水进行了研究:第一种情况是保证传质量和单元操作出口浓度为最大出口浓度;第二种情况是保证传质量和单元操作的用水量。对这两种情况分别研究了无、有一个中间储罐的间歇过程用水网络综合。除了第一种情况下无中间储罐间歇过程用水网络综合是混合整数线性规划外,其他的都是非线性规划问题。文献[14-15]对间歇过程废水最小化提出一种图形化方法。文献[16-18]将连续过程的水夹点分析用于间歇过程,采用组分时间间隔表(Time-dependent Composition Interval Table)确定每个时间间隔的水夹点,所研究案例和文献[14]有相同的特点:其单元进水和出水是同时进行的,每个时间间隔中质量交换为连续过程,因此该单元操作不是严格意义的间歇过程^[13]。

对于间歇过程用水网络建模,文献[11-14]只考虑一个操作周期情况,而实际工业生产中的间歇过程往往有多个操作周期,如果浓度满足要求,上个周期结束时剩余的水完全可以为下一周期所用。因此,文献[15-18]还考虑了多个操作周期下的用水网络优化问题。

1 优化方法

1.1 用水网络超结构

对一个单杂质间歇用水过程,假定现有的设备

单元是在优化的条件下操作的,因此无需改变工艺,且只考虑水回用问题。同时假定产品计划已经建立,没有物料失衡和测量数据随机波动的存在,不同产品任务中的水消耗的描述也通过产品配方给出。溶质在富流和水之间的平衡溶解关系是线性的,不考虑操作温度影响,并且提供了以下数据:(1)单元的用水量;(2)单元操作入口的最大浓度;(3)单元操作出口的最大浓度;(4)操作的进水开始时间和结束时间;(5)操作的排水开始时间和结束时间。

用水网络超结构方法如下:首先对间歇过程的每个操作假定为其后接一个储罐,这样每个操作的排水都可以作为另一个操作的进水。然后对所有操作的用水按出口浓度从小到大进行排序,如果出口浓度相同,则按入口浓度从小到大排序。在确定排序后,按照文献[19]给出的单杂质水网络最优的前提条件,只有排在操作*i*($1 < i < m$)之前操作的排水是操作*i*的水源。设新鲜水来自储罐0,最终的废水排往储罐*m*+1。根据上述条件,构造间歇过程用水网络超结构如图3。该结构中避免了高浓度废水在低浓度用水操作中返混,从而去掉了不必要的用水连接,降低了对应数学模型求解的难度。

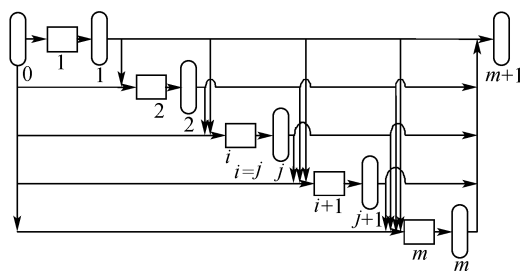


图 1 用水网络超结构

Fig. 1 Water use network superstructure

1.2 数学模型

对第*i*个操作满足 $1 \leq i \leq m$ 。对第*j*个罐满足 $0 \leq j \leq m+1$,其中*m*为操作总单元数, $j=0$ 为新鲜水罐, $j=m+1$ 为废水罐。设第*j*个罐能够提供给第*i*个操作的体积为 $Q(j, i)$, $X(j, i)$ 为第*j*个罐到第*i*个操作水的分配系数。第*j*个罐在某一操作周期*p*结束后剩余水体积为 $Vt_p(j)$, Wf_p 为新鲜水罐在周期*p*需提供的新鲜水量。 $T_{is}(i)$ 、 $T_{if}(i)$ 分别为第*i*个操作进水开始和结束时间。 $T_{os}(i)$ 、 $T_{of}(i)$ 分别为操作*i*排水开始和结束的时间。 $q(i)$ 为操作*i*所需的水量, $C_i(i)$ 、 $C_o(i)$ 分别为进、出操作*i*的物流浓度。设每个操作出口浓

度为该操作的最大出口浓度，这样使得消耗的新鲜水量最小^[19]。

在某一操作周期 p ($p \geq 1$) 中，目标函数为新鲜水罐提供的水量最小

$$\min Wf_p = \sum_{i=1}^m V(0, i) \quad (1)$$

约束方程：

罐 j 实际提供给操作 i 的水量为

$$V(j, i) = Q(j, i)X(j, i) \quad (2)$$

$Q(j, i)$ 为本周期能提供的水量加上个周期剩余的水量。本周期中，罐 j 能提供多少水给操作 i 做水源 ($j < i$)，还取决于与罐 j 相接的操作 h ($h = j$) 和操作 i 之间的相互关系。

当 $T_{os}(h) \leq T_{if}(i)$ 时，即操作 h 的排水开始时间早于或等于操作 i 的进水结束时间，罐 j 中本周期的水能提供给操作 i

$$Q(j, i) = q(j) + Vt_{p-1}(j) \quad (3)$$

当 $T_{os}(h) > T_{if}(i)$ 时，即操作 h 的排水开始时间晚于操作 i 的进水结束时间，罐 j 中本周期的水不能提供给操作 i

$$Q(j, i) = Vt_{p-1}(j) \quad (4)$$

对第 i 个操作，入口浓度必须小于该操作的最大入口浓度

$$\frac{\sum_{j=0}^{i-1} V(j, i)C_o(j)}{\sum_{j=0}^{i-1} V(j, i)} \leq C_i(i) \quad (5)$$

每个操作 i 必须满足传质量

$$\left[\sum_{j=0}^{i-1} V(j, i) \right] C_o(i) - \sum_{j=0}^{i-1} V(j, i) C_o(j) = q(i) [C_o(i) - C_i(i)] \quad (6)$$

第 j 个罐到第 i 个单元的分配系数应该 ≤ 1

$$X(j, i) \leq 1 \quad (7)$$

当 $1 \leq j \leq m$ 时，中间储罐 j 中剩余水的体积为

$$Vt_p(j) = \sum_{k=0}^{j-1} V(k, h) - \sum_{i=j+1}^m V(j, i) + Vt_{p-1}(j) \quad (8)$$

其中， h 为与罐 j 相接的操作 ($h = j$)， $\sum_{k=0}^{j-1} V(k, h)$ 为超结构中排在操作 h 之前的罐 k ($1 \leq k \leq j - 1$) 给操作 h 提供的水，也是罐 j 在周期 p 中接受的水量， $\sum_{i=j+1}^m V(j, i)$ 为罐 j 提供给超结构中排在操作 h 之后的操作 i ($j + 1 \leq i \leq m$) 的水量， $Vt_{p-1}(j)$ 为罐 j 在上个周期 $p - 1$ 剩余的水。

当没有中间储罐时，只有操作 h 的排水时间介于操作 i 的进水和排水时间之间，操作 h 才能提供给操作 i 水。因此式 (2) 和式 (3) 变成：

$$\begin{aligned} \text{当 } T_{is}(i) \leq T_{os}(h) \leq T_{if}(i) \text{ 时} \\ Q(j, i) = q(j) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } T_{is}(i) > T_{os}(h) \text{ 或 } T_{os}(h) > T_{if}(i) \text{ 时} \\ Q(j, i) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式 (1) ~ 式 (10) 组成的方程属于线性规划问题，可以得到确定解，和文献 [11-13] 提出的方法相比较为简单，本文采用 GAMS^[20] 软件计算。

1.3 最小新鲜水量的确定

从式 (1) ~ 式 (10) 可以看出，由于 $X(j, i)$ 的值在每个周期中可能是变化的，所以该方法中最小新鲜水量也可能是不断变化的。对此本文给出如下证明：间歇过程最小新鲜水量随着操作周期的增加最终为一个确定值。

如果没有时间限制，即排在 i 前面的操作都能提供给 i 水，那么间歇过程用水网络的最小新鲜水量应该等于流率为间歇过程单元用水量下的连续过程最小新鲜水量 W_f^c 。因此间歇过程的最小新鲜水量值应该大于等于 W_f^c 。如果第 1 个操作周期，即 $p = 1$ 时， $Vt_p(0) = W_f^c$ ，则以后周期的最小新鲜水量都不会小于周期 1 的新鲜水量，因此，采用和周期 1 相同的网络结构可以保证新鲜水量最小。

如果有时间限制，即排在某一操作 i 前面的一些操作 H 不能提供给 i 水，那么周期 1 新鲜水量可能 $Vt_p(0) > W_f^c$ 。因为第 m 个操作的排水不能回用，下面只考虑 $1 \leq j \leq m$ 。有两种情况：第一种是所有的中间储罐都没有水， $Vt_p(j) = 0$ ；第二种是至少有一个储罐有水， $Vt_p(j) > 0$ 。第一种情况下由于周期 1 中所有的中间储罐都没有水，所以周期 2 等同于周期 1，依次类推，以后周期最小新鲜水量都不会发生改变，因此采用和周期 1 相同的网络结构即可。

第二种情况证明如下。

设没有时间限制时，最终用水网络如图 2 所示，其中 i 是其中一个操作， P 是提供 i 用水的所有操作，排在 i 的前面， R 是接受 i 排水的所有操作，排在 i 后面。 $Vt_p^c(P^c)$ 、 $Vt_p^c(i)$ 、 $Vt_p^c(R^c)$ 分别为 P^c 、 i 、 R^c 储罐剩余的水量。当有时间限制时， H 是同周期内由于时间限制不能提供给 i 水的所有操作，其他单元符号意义同图 2。 H 和 P 之

间的用水情况 and 无时间限制下相同, 图 3 中未标出。

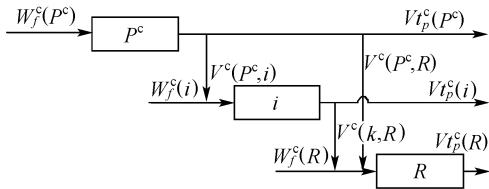


图 2 无时间限制下水网络

Fig. 2 Water network without time constraint

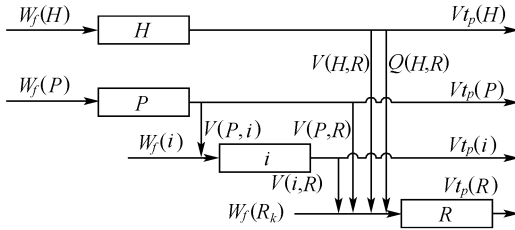


图 3 有时间限制下水网络

Fig. 3 Water network with time constraint

本文第一步证明在有时间限制下, H 的排水可以再给 R 一部分水量 $Q(h, k)$, 保证 R 的新鲜水量和 R 的传质量不变。第二步证明由于 H 没有提供给 i 水, 相对于没有时间限制情况, 单元 i 需额外补充新鲜水, 即 $W_f(i) > W_f^c(i)$ 。第三步证明 H 剩余的水量 $V_{t_p}(H) > V_{t_p}^c(H)$, 则 H 下个周期可以用量为 $V_{t_p}(H) - V_{t_p}^c(H)$ 作为 i 的水源, 减少 i 的新鲜水量。随着周期的增加, i 的新鲜水量 $W_f(i)$ 等于 $W_f^c(i)$, 此后新鲜水量不再变化。

第一步:

图 2 和图 3 中 R 传质量不变

$$V_{t_p}^c(R)C_o(R) - [V^c(i, R)C_o(i) + V^c(P^c, R)C_o(P^c)] = V_{t_p}(R)C_o(R) - [V(i, R)C_o(i) + V(P, R)C_o(P) + V(H, R)C_o(H) + Q(H, R)C_o(H)] \quad (11)$$

因为

$$V_{t_p}^c(R) = V^c(i, R) + V^c(P^c, R) + W_f^c(R) \quad (12)$$

$$V_{t_p}(R) = V(i, R) + V(P, R) + W_f(R) + V(H, R) + Q(H, R) \quad (13)$$

$$W_f^c(R) = W_f(R) \quad (14)$$

$$V^c(P^c, R) = V(P, R) + V(H, R) \quad (15)$$

$$V^c(P^c, R)C_o(P^c) = V(P, R)C_o(P) + V(H, R)C_o(H) \quad (16)$$

由式 (12) ~ 式 (16), 式 (11) 化简可得

$$Q(H, i) = \frac{[V^c(i, R) - V(i, R)][C_o(R) - C_o(i)]}{C_o(R) - C_o(H)} \quad (17)$$

当 $V(i, R) > V^c(i, R)$ 时, H 不需要再给 R 一部分水量, 即 $Q(H, i) = 0$, 就可以保证 R 传质量和新鲜水量不变。

第二步:

由于单元 i 在图 2 和图 3 中的传质量不变, 可得

$$[V^c(P^c, i) + W_f^c(i)]C_o(i) - V^c(P^c, i)C_o(P^c) = [V(P, i) + W_f(i)]C_o(i) - V(P, i)C_o(P) \quad (18)$$

根据

$$V^c(P, i) - V(P, i) = V^c(H, i) \quad (19)$$

$$V^c(P^c, i)C_o(P^c) - V(P, i)C_o(P) = V^c(H, i)C_o(i) \quad (20)$$

式 (18) 可推出

$$W_f(i) - W_f^c(i) = V^c(H, i) \left[1 - \frac{C_o(H)}{C_o(i)} \right] \quad (21)$$

因为 $C_o(H) < C_o(i)$, 所以 $W_f(i) > W_f^c(i)$ 。

第三步:

因为

$$W_f(i) + V(P, i) = V(i, R) + V_{t_p}(i) \quad (22)$$

$$W_f^c(i) + V^c(P^c, i) = V^c(i, R) + V_{t_p}^c(i) \quad (23)$$

$$V_{t_p}^c(i) = V_{t_p}(i) \quad (24)$$

由式 (19)、式 (22) ~ 式 (24) 可得

$$V(i, R) - V^c(i, R) + V^c(H, i) = W_f(H) - W_f^c(H) \quad (25)$$

因为 $W_f(i) > W_f^c(i)$, 所以

$$V(i, R) - V^c(i, R) + V^c(H, i) > 0 \quad (26)$$

分别对有、无时间限制下, 进出 H 水量衡算

$$W_f(H) = V(H, R) + Q(H, R) + V_{t_p}(H) \quad (27)$$

$$W_f^c(H) = V^c(H, R) + V^c(H, i) + V_{t_p}^c(H) \quad (28)$$

因为

$$W_f(H) = W_f^c(H) \quad (29)$$

$$V(H, i) = V^c(H, i) \quad (30)$$

所以

$$V_{t_p}(H) - V_{t_p}^c(H) = V^c(H, i) - Q(H, R) \quad (31)$$

将式 (17) 代入式 (31) 得

$$V_{t_p}(H) - V_{t_p}^c(H) = \frac{V^c(H, i)[C_o(R) - C_o(H)] - [V^c(i, R) - V(i, R)][C_o(R) - C_o(i)]}{C_o(R) - C_o(H)} \quad (32)$$

因为

$$[C_o(R) - C_o(H)] > [C_o(R) - C_o(i)] \quad (33)$$

所以由式 (32)、式 (33) 可得

$$V_{t_p}(H) - V_{t_p}^c(H) > \frac{[V^c(H, i) - V^c(i, R) + V(i, R)] [C_o(R) - C_o(i)]}{C_o(R) - C_o(H)} \quad (34)$$

由式 (26) 得到

$$V_{t_p}(H) - V_{t_p}^c(H) > 0 \quad (35)$$

由式 (35) 可得在保证其他新鲜水量不变的情况下, H 剩余的水量比没有时间限制的水量多, 多出的水量可以用作 i 的水源, 从而减少 i 的新鲜水量, 直至 i 的新鲜水量等于没有时间限制下的值。

2 实例研究

2.1 实例 1

实例 1 取自文献 [13], 为了方便, 将文献相应的符号换成本文中的符号, 用水数据如表 1 所示, 后面的案例同实例 1 一样处理。

表 1 实例 1 的数据
Table 1 Data of case 1

Operation (i)	$q(i)$ /kg	$C_i(i)$ /kg · kg ⁻¹	$C_o(i)$ /kg · kg ⁻¹	$T_i(i)$ /h	$T_o(i)$ /h	$M(i)$ /kg
A	1000	0	0.1	0	3	100
B	280	0.25	0.51	0	4	72.8
C	400	0.1	0.1	4	5.5	0
D	280	0.25	0.51	2	6	72.8
E	400	0.1	0.1	6	7.5	0

实例 1 中操作的进水和排水时间分别为两个时间点, 因此式 (3) 和式 (4) 分别变成

当 $T_{os}(h) \leq T_{if}(i)$ 时

$$V_p(j, i) = q(j) + V_{t_{p-1}}(j) \quad (36)$$

当 $T_{os}(h) > T_{if}(i)$ 时

$$V_p(j, i) = V_{t_{p-1}}(j) \quad (37)$$

其中操作 C 和操作 E 执行清洗任务, 不进行传质, 只要求流量不低于 300 kg。因此在方程中另外加入:

当 $C_o(i) = C_i(i)$ 时

$$\sum_{k=0}^{i-1} V(k, i) \geq 300 \quad (38)$$

经过计算得到无中间储罐的新鲜水量为 1767.84 kg, 网络结构如图 4 所示, 和文献 [13] 相同。有中间储罐下周期 1 的所需新鲜水量为

1285.5 kg, 用水网络结构如图 5 所示。因为周期 1 中罐 B、C、D 和 E 中的水都不回用, 所以可以省去, 只剩下操作 A 后的储罐, 简化后的水网络如图 6 所示。第 2 个周期计算水网络结构如图 7 所示, 新鲜水量为 1000 kg, 它等于没有时间限制下的最小新鲜水量, 因此此后周期的新鲜水量不再变化, 相应的网络结构不变。由于罐 B、D 和 E 中的水不回用, 所以罐 B、D 和 E 可以省去。操作 A 的出口浓度等于 E 的入口浓度, 且罐 A 提供完操作 B、C 和 D 水外, 还剩 $1000 - 177.5 - 300 - 177.5 = 345$ kg 水量, 操作 E 的进水可以全部由罐 A 提供, 因此罐 C 可以省去。经过化简得到图 8 所示的周期 2 水网络结构。文献 [13] 没有考虑多个操作周期的情况, 即不考虑上个周期水的回用, 它和本文周期 1 的计算的水量和网络结构一样。文献 [15] 考虑了多个操作周期的情况, 它和本文周期 2 计算的结果一样。

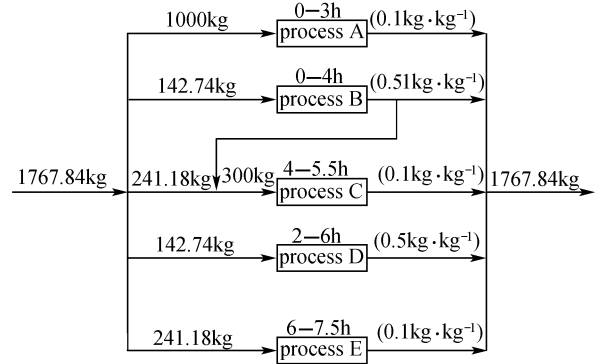


图 4 无储罐的水网络

Fig. 4 Water network without storage tank

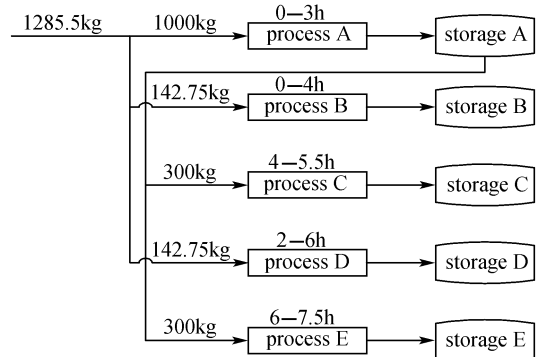


图 5 周期 1 初始水网络

Fig. 5 Initial water network of period 1

2.2 实例 2

实例 2 取自文献 [14], 如表 2 所示。无中间储罐的新鲜水量为 121.25 t, 网络结构如图 9 所

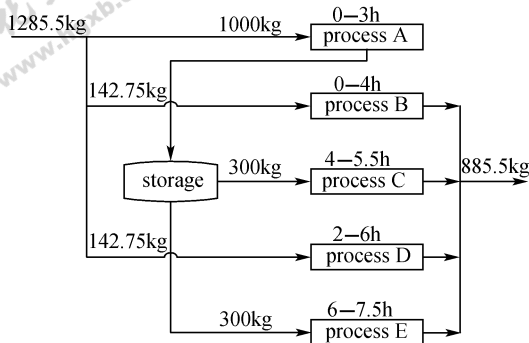


图 6 周期 1 简化后的水网络

Fig. 6 Simplified water network of period 1

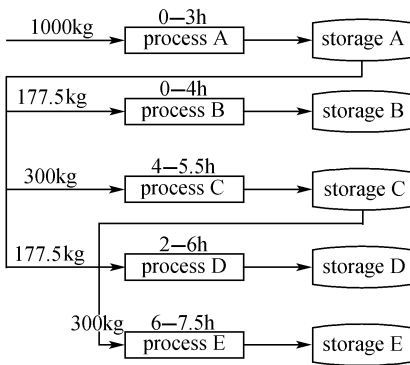


图 7 周期 2 初始水网络

Fig. 7 Initial water network of period 2

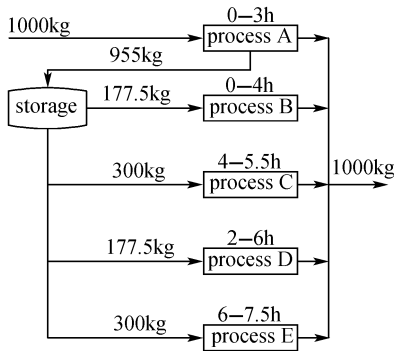


图 8 周期 2 简化后的水网络

Fig. 8 Simplified water network of period 2

示。有中间储罐时，计算得到周期 1 的最小新鲜水量为 102.5 kg，它等于没有时间限制时的最小新鲜水量，则以后周期的新鲜水量不再变化，相应的网络结构同周期 1。最初网络结构经过实例 1 类似的化简后，最终网络结构如图 10 所示。本文计算的有中间储罐下新鲜水量和文献 [14, 18] 相同，网络结构和文献 [18] 相同，与文献 [14] 不同：文献 [14] 操作 2 直接给了操作共 2.5 t 水，该结果和表 2 中操作 1 和操作 2 时间关系矛盾。

表 2 实例 2 的数据

Table 2 Data of case 2

Operation (i)	$q(i)$ /t	$C_i(i)$ /kg · t ⁻¹	$C_o(i)$ /kg · t ⁻¹	$T_{is}(i)$ /h	$T_{if}(i)$ /h	$T_{os}(i)$ /h	$T_{of}(i)$ /h	$M(j)$ /kg
1	100	0.1	0.4	0.5	1.5	0.5	1.5	30
2	40	0	0.2	0	0.5	0	0.5	8
3	25	0.1	0.2	0.5	1.0	0.5	1.0	2.5

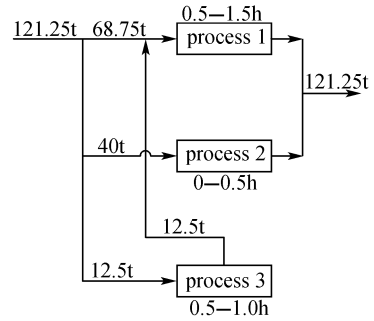


图 9 无中间储罐的水网络

Fig. 9 Water network without storage tank

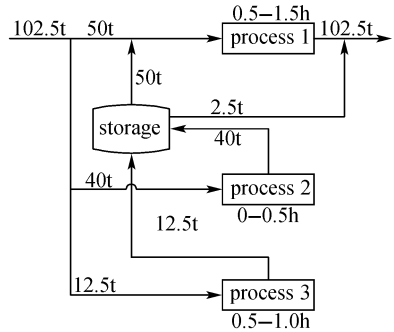


图 10 有中间储罐的水网络

Fig. 10 Water network with storage tank

2.3 实例 3

实例 3 来自文献 [18]，用水数据如表 3 所示，各操作不但要保证传质量，而且要保证用水量。计算得出无中间储罐的新鲜水量为 202.5 t，网络结构如图 11 所示，为了满足各操作水量的要求，在保证传质量的情况下，操作出口物流在返回入口一定水量。如操作 2 出口返回 125 t 水，以满足入口水量 250 t 的要求。本文新鲜水量比文献 [18] 的 211.25 t 要小，原因是在保证入口浓度的情况下，本文结果中操作 2 多给了 10 t 水给操作 3，从而节省了新鲜水量。有中间储罐的新鲜水量为 185 t，它等于无时间限制时的新鲜水量，因此，此后周期的新鲜水量和网络结构不变。由于操作 1 和操作 2 的出口浓度相同，罐 1 和罐 2 可以合成一个罐。操作 3 和 4 的排水不回用，所以化简后的网络结构如图 12 所示。有中间储罐的新鲜水量计算结果和文

表 3 实例 3 数据
Table 3 Data of case 3

Operation(<i>i</i>)	Water/t	$C_i(i)/\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	$C_o(i)/\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	$T_{is}(i)/\text{h}$	$T_{if}(i)/\text{h}$	$T_{os}(i)/\text{h}$	$T_{of}(i)/\text{h}$	$M(j)/\text{kg}$
1	20	0	0.1	0	1.0	0	1.0	2
2	250	0.05	0.1	1.0	3.5	1.0	3.5	12.5
3	80	0.05	0.8	3.0	5.0	3.0	5.0	60
4	20	0.4	0.8	1.0	3.0	1.0	3.0	8

献 [18] 相同，水网络中都只有一个储罐，结构稍有差别。

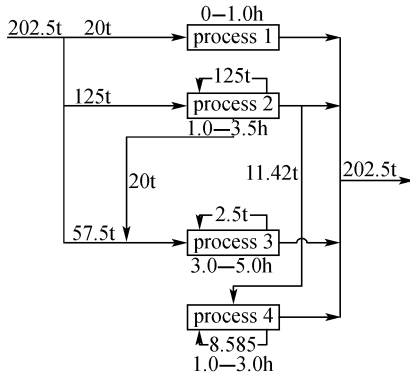


图 11 无储罐水网络

Fig. 11 Water network without storage tank

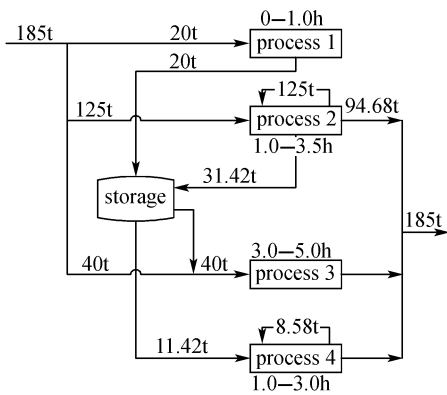


图 12 有储罐水网络

Fig. 12 Water network with storage tank

3 结 论

本文对间歇过程的用水网络进行了优化，提出线性规划的单杂质间歇过程最少新鲜水量的优化设计方法。该方法首先对各个用水操作单元进行排序，得出每个单元可利用的水量，从而简化了超结构，该结构最后归结为一个线性规划，与其他方法相比，模型简单，求解速度快。而且证明该新鲜水量随周期的增加为一个确定的值。通过对每个周期罐使用情况进行分析，得到最终的用水网络结构。

符 号 说 明

$C_i(i)$, $C_o(i)$ —— 分别为操作 i 入口、出口浓度, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

H —— 排在 i 前面, 由于时间限制不能提供 i 用水的所有操作

h, i —— 第 h 个、第 i 个操作单元

j, k —— 第 j 个、第 k 个罐

$M(i)$ —— 操作 i 的传质量

m —— 操作单元数

P, R —— 分别为提供、接受 i 用水的所有操作

$q(i)$ —— 第 i 个操作所需的水量

$Q(j, i)$ —— 第 j 个罐能提供第 i 操作的水量

$T_i(i)$, $T_o(i)$ —— 分别为单元 i 的进水、排水时间

$T_{is}(i)$, $T_{if}(i)$ —— 分别为单元 i 的进水开始、结束时间

$T_{os}(i)$, $T_{of}(i)$ —— 分别为单元 i 的排水开始、结束时间

$V(j, i)$ —— 第 j 个罐实际提供给第 i 操作的水量

$V_{t_p}(j)$ —— 第 p 个周期结束后第 j 个罐剩余水量

Wf_p —— 周期 p 需提供的新鲜水量

$X(j, i)$ —— 第 j 个罐和第 i 个操作之间的分配系数

上角标

c —— 无时间限制

下角标

p —— 第 p 个操作周期

References

[1] Wang Y P, Smith R. Wastewater minimization. *Chem. Eng. Sci.*, 1994, **49**: 981-1006

[2] Polly G T, Polly G T. Design better water network. *Chem. Eng. Prog.*, 2000, **96**: 47-52

[3] Feng Xiao, Waren D S. New structure and design methodology for water network. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, **40**: 6140-6146

[4] Castro P, Matos H, Fernandes M C, Nunes C P.

- Improvement for mass-exchange networks design. *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**: 1649-1665
- [5] Yang Y H, Lou H H, Huang Y L. Synthesis of an optimal wastewater reuse networks. *Water Management*, 2000, **20**: 311-319
- [6] Huang C H, Chang C T, Ling H C, Chang C C. A mathematical programming models for water usage and treatment network. *Design. Ind. Eng. Res.*, 1999, **38**: 2666-2679
- [7] Alava-Argae A, Vallianatos A, Kokossis A. A multi-contaminant transshipment model for mass exchange networks and wastewater minimization problems. *Comp. Chem. Eng.*, 1999, **23**: 1439-1453
- [8] Ming-Jeng Tasi, Chueh-Tin Chang. Water usage and treatment network design using genetic algorithm. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, **40**: 4847-4888
- [9] Hu Yangdong (胡仰栋), Xu Dongmei (徐冬梅), Hua Ben (华贲), Han Fangyu (韩方煜). Step by step linear programming method for wastewater minimization. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53**: 66-71
- [10] Savelski, M J, Bagajewicz, M J. Algorithmic procedure to design water utilization systems featuring a single contaminant in process plants. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, **56**: 1897-1911
- [11] Almato M, Sanmarti E, Espuna A, Puigjaner L. Rationalizing the water use in the batch process industry. *Comp. Chem. Engng.*, 1997, **21**: 971-976
- [12] Almato M, Espuna A, Puigjaner L. Optimization of water use in batch process industries. *Comp. Chem. Engng.*, 1999, **23**: 1427-1437
- [13] Majoz T. Wastewater minimisation using central reusable water storage in batch plants. *Comp. Chem. Engng.*, 2005, **29**: 1631-1646
- [14] Wang Y P, Smith R. Time pinch analysis. *Transactions of the IChemE*, 1995, **73A**: 905-914
- [15] Majoz T, Brouckaert C J, Buckley C A. A graphical technique for wastewater minimization in batch processes. *Journal of Environmental Management*, 2005, **78** (4), 317-329
- [16] Foo C Y, Manan, Z A, Yunus R M, Aziz R A. Synthesis of mass exchange network for batch processes (I): Utility targeting. *Chem. Eng. Sci.*, 2004, **59**: 1009-1026
- [17] Foo C Y, Manan Z A, Yunus R M, Aziz R A. Synthesis of mass exchange network for batch processes (II): Minimum units target and batch network design. *Chem. Eng. Sci.*, 2004, **60**: 1349-1062
- [18] Foo D C Y, Manan Z A, Tan Y L. Synthesis of maximum water recovery network for batch process systems. *Journal of Cleaner Production*, 2005, **13**: 1381-1394
- [19] Savelski M J, Bagajewicz M J. On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. *Chem. Eng. Sci.*, 2000, **55**: 5035-5048
- [20] Brooke A, Kendrick D, Meeraus A, Raman R, Rosenthal R E. GAMS User's Guide. Washington; GAMS Development Corporation, 1998