

研究论文

间歇用水系统中废水回用与集中再生 处理的调度优化设计方法

李冠华, 王 乐, 刘永忠

(西安交通大学化工系, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对间歇用水系统建立了废水回用与废水集中再生处理协调运行和调度优化的数学规划设计模型。在多周期运行条件下, 以保证循环周期中水系统最优运行为目标, 提出了消除不同操作周期下储罐中水量和浓度波动的多周期反算求解策略, 并确定了多周期操作下优化的用水网络。通过单杂质间歇用水系统实例阐明了所提出方法的有效性, 为具有废水集中再生处理的间歇用水系统从启动到稳定的多周期操作和设计提供依据。

关键词: 间歇用水系统; 废水回用; 集中再生; 多操作周期; 调度

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157(2010)02-0378-06

Optimal design of batch water-using system with wastewater reuse and centralized treatment through scheduling

LI Guanhua, WANG Le, LIU Yongzhong

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

Abstract: A mathematical programming model was proposed to optimize a batch water-using system with wastewater reuse and centralized treatment in coordination. In order to achieve an optimal operation in the repeated cycle under multiple cycles, a back-calculation strategy was proposed to dampen fluctuations of residual water and contaminant concentrations in buffer tanks. Optimal water-using schemes could be obtained for different operating cycles. A case study of a batch water-using system with a single contaminant was used to illustrate the effectiveness of the proposed method. It provided insight into the design and operation of the batch water-using system with centralized treatment running from start-up to steady state during multiple operating cycles.

Key words: batch water-using system; water reuse; centralized treatment; multiple operating cycles; scheduling

引 言

废水的直接回用、设置储罐和废水再生回用等方法为间歇用水系统减少新鲜水需求的重要方法^[1-7]。废水的直接回用受时间和浓度等因素的限

制, 往往需在系统中设置中间储罐来满足时序的要求。对于设置中间储罐也无法有效减少新鲜水用量的间歇用水系统, 则需要进行废水再生, 以进一步增加废水回用的机会, 这对于多杂质间歇用水系统尤其有效^[8]。在用水过程操作时序可调整的情况

2009-10-22 收到初稿, 2009-10-29 收到修改稿。

联系人: 刘永忠。第一作者: 李冠华 (1983-), 男, 硕士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20936004, 20876123)。

Received date: 2009-10-22.

Corresponding author: LIU Yongzhong, yzliu@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20936004, 20876123).

下，还可考虑对用水操作进行调度优化^[9-12]，以提高系统的废水回用率。

间歇用水系统的总体同步优化设计一般包括废水回用/循环的网络设计、废水处理网络的设计和用水操作的调度优化 3 个部分^[13]。虽然总体同步优化方法具有全局着眼和同时处理多个目标权衡的优点，但对于工业规模的用水系统，由于计算工具处理规模的限制，目前仍主要采用分步优化或部分集成的方法^[14-15]。

目前，对于间歇用水系统的优化主要集中在中间储罐的合理设置和废水回用的调度优化等方面，而对于在间歇用水系统中设置再生处理装置的研究报道较少^[16-17]。在间歇用水系统中，为了保证再生处理设备的连续运行，废水回用的调度也将受到限制。特别是在多操作周期下连续操作的再生处理设备与间歇操作的用水单元之间协调运行研究方面，对于用水系统操作特性和优化设计的研究还鲜有报道。

对于具有废水集中再生处理的间歇用水系统，本文提出废水回用与集中再生处理的协调运行和调度优化设计方法。针对多周期运行间歇用水系统，在保证用水系统结构稳定和废水集中再生流率恒定的前提下，以用水系统在循环周期运行最优为目的，本文提出了消除不同操作周期下储罐中水量和浓度波动的多周期反算求解策略。

1 问题的描述

对于具有集中式废水连续再生的间歇用水系统，为了保证多操作周期间歇用水操作和废水连续处理的协调运行以及网络结构的稳定，已知各用水单元的操作时长、杂质负荷、用水单元的最大容量、极限进出口浓度和中间储罐的最大容量，并根据实际设定废水再生后浓度，假设：

- (1) 用水系统具有有限个用水操作，且每个运行周期内各用水操作的操作次数一定；
- (2) 用水操作的进水和出水均瞬时完成；
- (3) 废水再生过程连续运行，且流率恒定。

针对具有废水回用和废水连续再生的间歇用水系统，本文建立数学规划的调度优化模型，可解决以下问题：

- (1) 用水系统的最小新鲜水用量、恒定的再生水流率和废水的排放量；
- (2) 多操作周期下废水的再生处理流率；

- (3) 中间储罐中残余水量的变化；
- (4) 多操作周期下间歇用水网络的结构。

2 超结构模型

具有集中式废水连续再生的间歇用水系统的超结构模型如图 1 所示。

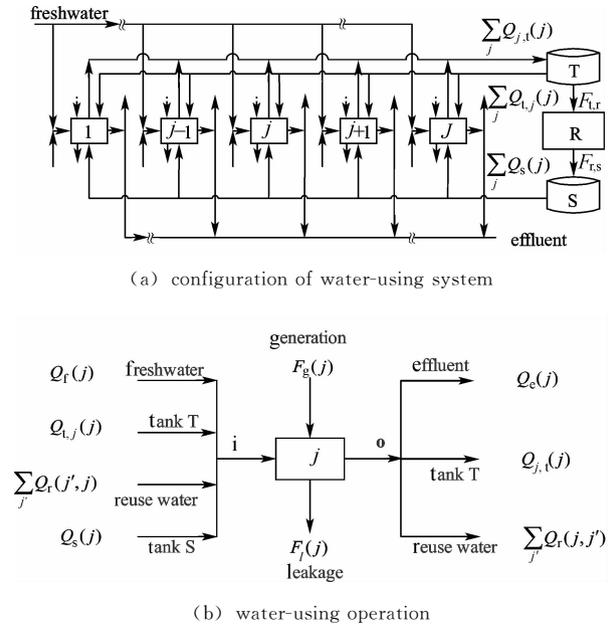


图 1 集中式废水连续再生间歇用水系统的超结构
Fig. 1 Superstructure of batch water-using system with continuous and centralized treatment unit

该系统可分为间歇的用水过程、连续的废水再生过程和与再生过程连接的中间储罐 3 部分。用水单元可以在周期内任意时刻开始，其进水可以是新鲜水、其他过程的排水、再生处理前后的水；其排水可以直接排放、排至其他过程或排至再生处理前的缓冲储罐 T。用水操作中可能产生水或泄漏水；储罐 T 可接收各用水过程的排水，并为用水过程提供回用水，或给再生处理过程提供废水；废水再生后排向储罐 S，以供各用水过程使用再生水。

与用水操作时序已知的用水系统不同，间歇用水系统的调度优化模型中各用水操作的操作时序为待优化量。

3 数学模型及其求解策略

基于图 1 的超结构，数学模型可分为两部分：第一部分在时间上属于静态过程，针对各个用水单元、储罐和再生单元的等式和不等式约束；第二部分属于动态过程，当用水操作的操作时长一定时，

通过调度优化用水操作的起始操作时间，提高系统的废水回用率，以达到获得用水系统最小新鲜水量的目标。

数学模型的主要约束包括：(1) 废水的直接回用必须满足时间与浓度限制，即用水操作的进水时间与排水单元的出水时间一致，且回用水满足进水浓度的要求；(2) 所有用水操作必须满足进出水浓度和极限进水量的限制；(3) 一旦废水开始再生将连续稳定运行，且保持恒定的再生流率。

3.1 用水操作、储罐和再生单元的约束条件

(1) 用水操作

进出口节点的水量平衡

$$Q_i(j) + \sum_n [Q_{t,j}(j)y_{t,j}(j,n)] + \sum_n [Q_{s,j}(j)y_{s,j}(j,n)] + \sum_n \sum_{j'} [Q_r(j',j)y_r(j',j,n)] = Q_i(j) \quad (1)$$

$$Q_c(j) + \sum_n [Q_{t,i}(j)y_{t,i}(j,n)] + \sum_n \sum_{j'} [Q_r(j,j')y_r(j,j',n)] = Q_c(j) \quad (2)$$

用水操作的水量平衡

$$Q_i(j) + F_g(j)d(j) = Q_o(j) + F_l(j)d(j) \quad (3)$$

用水操作进出口的杂质平衡

$$Q_i(j)C_i(j) + M(j) = Q_o(j)C_o(j) + F_l(j)d(j)C(j) \quad (4)$$

$$C_i(n) = \frac{\{Q_i(n-1) - F_{t,R}[t(n) - t(n-1)]\}_{Y_R(n-1)}C_i(n-1) + \sum_j [Q_{t,i}(j)y_{t,i}(j,n)C_o(j)]}{Q_i(n) + \sum_j [Q_{t,j}(j)y_{t,j}(j,n)]} \quad (12)$$

$$C_i(n) |_{t(n)=0} = 0 \quad (13)$$

(3) 废水再生处理单元 R

再生处理单元操作开始后，稳定运行且保持进出水速率恒定，即

$$F_{t,R} = F_{R,s} \quad (14)$$

废水再生后的浓度满足

$$\min\{C_i^{\max}(j)\} < C_s < \max\{C_o^{\max}(j)\} \quad (15)$$

(4) 废水再生处理后置储罐 S

储罐 S 的水量也与再生单元工作与否直接相关。因此，储罐 S 的水量平衡为

$$Q_s(n) = Q_s(n-1) + F_{R,s}[t(n) - t(n-1)]_{Y_R(n-1)} - \sum_j [Q_{s,j}(j)y_{s,j}(j,n)] \quad (16)$$

储罐 S 的极限进水量约束

$$Q_s(n) \leq Q_s^{\max} \quad (17)$$

3.2 用水操作的调度

用水操作的时间约束

$$t_o(j) = t_i(j) + d(j), 0 \leq t_i(j), t_o(j), t(n), t_R \leq H \quad (18)$$

用水操作的进出水杂质浓度

$$C_i(j) = \frac{1}{Q_i(j)} \{ \sum_n [Q_{t,j}(j)C_i(n)y_{t,j}(j,n)] + \sum_n [Q_{s,j}(j)C_{s,y_{s,j}}(j,n)] + \sum_n \sum_{j'} [Q_r(j',j)C_o(j')y_r(j',j,n)] \} \quad (5)$$

$$C_o(j) = \frac{Q_i(j)C_i(j) + M(j)}{Q_o(j) + F_l(j)d(j)} \quad (6)$$

用水操作进出水的杂质浓度约束

$$C_{i(o)}(j) \leq C_{i(o)}^{\max}(j) \quad (7)$$

用水操作的极限进水量约束

$$Q_i(j) \leq Q^{\max}(j) \quad (8)$$

用水单元无产生和漏逸的水时， $F_g(j) = F_l(j) = 0$ 。

(2) 废水再生处理前置储罐 T

储罐 T 的水量与再生单元工作与否直接相关。

因此，储罐 T 的水量平衡为

$$Q_t(n) = Q_t(n-1) + \sum_j [Q_{t,i}(j)y_{t,i}(j,n)] - \sum_j [Q_{t,j}(j)y_{t,j}(j,n)] - F_{t,R}[t(n) - t(n-1)]_{Y_R(n-1)} \quad (9)$$

$$Q_t(n) |_{t(n)=0} = 0 \quad (10)$$

储罐 T 的极限进水量约束

$$Q_t(n) \leq Q_t^{\max} \quad (11)$$

储罐 T 的杂质浓度

该约束保证了用水操作进出水时间、衡算节点时间和再生单元操作时间均在周期限定时间之内。

废水直接回用的时间约束

$$t_o(j) - H[1 - y_r(j,j',n)] \leq t_i(j') \leq t_o(j) + H[1 - y_r(j,j',n)] \quad (19)$$

该约束保证了用水操作之间相互排水在时间上的一致性。

储罐 T 进出水的时间约束

$$t_{i(o)}(j) - H[1 - y_{t,i}(j,n)] \leq t(n) \leq t_{i(o)}(j) + H[1 - y_{t,i}(j,n)] \quad (20)$$

再生处理单元开始操作的时间约束

$$t_R - H[1 - y_R(n)] \leq t(n) \leq t_R + H y_R(n) \quad (21)$$

储罐 S 出水的时间约束

$$t_R - H[1 - y_{s,j}(j,n)] \leq t_i(j) \leq t_R + H y_{s,j}(j,n) \quad (22)$$

3.3 优化目标

由于图 1 所示的超结构模型中包含了仅设置中间储罐而无废水再生的间歇用水系统，因此，在优化目标中可将最小新鲜水量和废水再生处理量作

为 2 个目标分步进行优化。如果计算得到的最小再生水流率为零，则表明该用水系统可通过废水回用进行优化而无需废水再生。最终对新鲜水量和废水再生流率联合评估，可获得经济性评价最优的系统^[8]。

本文的优化目标为在周期 P 内新鲜水、废水排放和再生水的费用之和最小，即

$$\min(\sum_j Q_i^p(j) D^W + F^{R,P} H D^R + \sum_j Q_e^p(j) D^D) \quad (23)$$

新鲜水、再生水和排放污水的单位价格可表示为^[18]

$$\begin{aligned} D^W &= 1.4 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1} \\ D^R &= \alpha (F^R H)^{-\beta} \left(\frac{C^{R,\max}}{C^R} \right)^\gamma \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1} \\ D^D &= 2.2 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1} \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $\alpha=30$, $\beta=0.86$, $\gamma=1.75$ 。

通过增加约束条件，该数学规划模型也可拓展到多杂质间歇用水系统，具体方法可见文献^[8]。

3.4 数学模型的求解策略

由于本文针对间歇用水系统的多周期操作进行优化，在用水网络的初始周期和循环周期中，为了消除储罐 T 和储罐 S 的水量和杂质浓度的波动，本文采用多周期反算的求解策略，即首先对第 1 周期的用水系统进行优化计算，所得到的优化结果作为循环周期的初始运行数据，再计算循环周期的用水系统，同时获得保证模型目标值条件下的最佳初始运行条件，然后再将循环周期优化计算的结果作为第 1 周期的附加约束条件，重新反算第 1 周期的用水网络，最终获得多周期下优化的间歇用水系统结构。

4 实例研究

表 1 给出了包含 7 个用水操作的单杂质用水系统。用水数据包括用水操作的极限进出口浓度、杂质负荷和用水操作时长。将上述数据带入本文的 MINLP 模型中，选取再生后杂质浓度为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，采用 GAMS 2.5/BARON 的 MINLP 求解器进行求解。为了保证储罐容量在合理范围内，预设储罐容量近似等于各用水操作全部使用新鲜水的水量。计算中设置储罐 T 和储罐 S 的最大容量为 2000 t。

模型的求解过程分为初始周期和循环周期。在初始周期中，为避免问题复杂化，不考虑操作

表 1 7 个用水操作单杂质用水系统的水数据

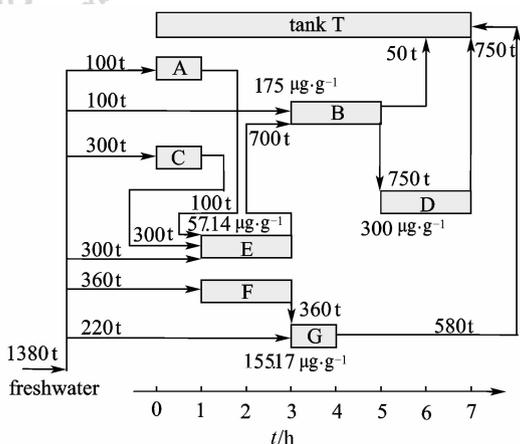
Table 1 Water-using data of single contaminant system with seven water-using operations

Operation	$C_i^{\max}(j)$ / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$C_o^{\max}(j)$ / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Mass load/kg	Duration /h
A	0	100	10	1
B	200	300	100	2
C	100	100	30	1
D	300	500	150	2
E	100	200	100	2
F	150	250	90	2
G	250	300	84	1

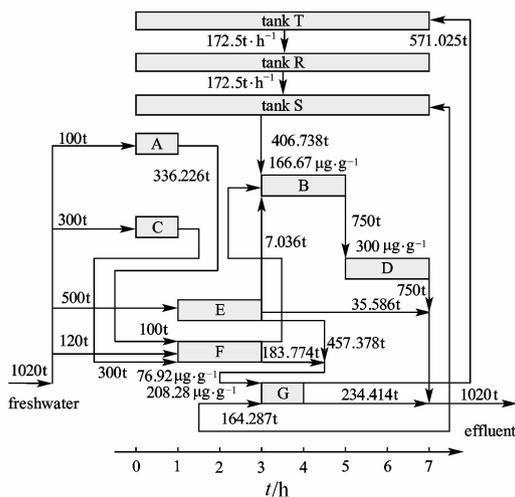
周期长度对目标值的影响；在循环周期，考虑周期长度对目标值的影响。计算表明不同周期长度对用水网络结构和经济性指标值影响较大。本文计算了操作周期取 5~11 h 时的目标值，当循环操作周期的时长为 $H=9$ h 时，用水网络获得经济性目标值为 $1310.84 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1}$ ，为最佳值。因此，本文以循环周期时长为 9 h 来确定最终网络结构。计算采用 Intel Xeon CPU 2.00GHz 计算机，第 1 周期取操作周期长度 $H=7$ h，共有 221 个未知边界，在第 370 个节点处得到最优值，系统共需要新鲜水 1380 t，再生单元不工作，经济性目标值为 $1932 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1}$ ；第 2 周期的操作周期时长 $H=7$ h，共有 165 个未知边界，在第 649 个节点处得到最优值，系统需要新鲜水 1020 t，废水的再生流率为 $172.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，经济性目标值为 $4103.89 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1}$ ；在第 3 操作周期，用水系统达到稳定，操作时长 $H=9$ h，共有 104 个未知边界，在第 416 个节点处得到最优值，系统需要新鲜水 205.678 t，再生流率为 $208.983 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ ，目标值为 $1310.84 \text{ mu} \cdot \text{t}^{-1}$ 。图 2 给出不同操作周期下的用水系统结构，图中仅标出用水操作的实际进口浓度，用水操作的实际出口浓度均达到出口极限浓度。

5 结 论

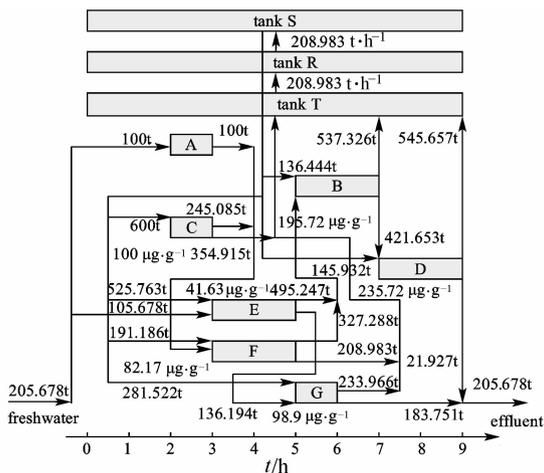
针对具有集中式废水连续再生的间歇用水系统，以新鲜水、废水排放和废水再生的费用之和最小为目标，本文建立了废水回用与集中再生处理的调度优化数学规划模型。在保证多操作周期下用水系统结构稳定和集中再生处理流率恒定的前提下，为了消除中间储罐的水量和杂质浓度在不同周期中的波动，本文提出了多周期反算的求解策略，以保证循环周期的用水最优为目的，通过反算确定非循



(a) the first cycle



(b) the second cycle



(c) repeated cycle

图 2 优化后的用水系统结构

Fig. 2 Configurations of water-using system after optimization

环周期的用水系统结构，最终获得多周期操作条件下优化的用水系统结构。研究表明：以经济性为目标，本文的优化设计模型和方法可有效地解决涉及废水回用和废水集中处理的调度优化问题，为间歇用水操作与连续再生处理的协调优化设计提供理论和计算的基础。

符 号 说 明

- $C(j)$ —— 用水操作 j 中的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
- $d(j)$ —— 用水操作的操作时间, h
- F —— 水流率, $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$
- H —— 用水系统操作周期长度, h
- $Q(j)$ —— 用水操作 j 的水量, t
- $Q(n)$ —— n 时刻储罐中的水量, t
- $Q(j', j)$ —— 用水操作 j' 回用到用水操作 j 的水量, t
- $t(j)$ —— 时刻, h
- $y(j', j)$ —— 用水操作 j' 回用到用水操作 j 的二元变量
- $y_R(n)$ —— n 时刻再生开始的二元变量
- $y_r(j', j, n)$ —— n 时刻操作 j' 用到操作 j 的二元变量

下 角 标

- e —— 排放
- f —— 新鲜水
- g —— 再生
- i —— 进口
- l —— 泄漏
- o —— 出口
- R —— 再生
- r —— 回用
- s —— S 储罐
- t —— T 储罐

References

- [1] Wang Y P, Smith R. Time pinch analysis. *Chemical Engineering Research & Design*, 1995, **73** (A8): 905-914
- [2] Majozhi T. Wastewater minimization using central reusable water storage in batch plants. *Computers & Chemical Engineering*, 2005, **29** (7): 1631-1646
- [3] Almato M, Espuna A, Puigjaner L. Optimization of water use in batch process industries. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, **23** (10): 1427-1437
- [4] Cheng Huanong (程华农), Mao Wenfeng (毛文锋), Zheng Shiqing (郑世清). Fresh water minimization for batch process with single contamination based on linear programming. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (2): 417-424
- [5] Chen C L, Lee J Y, Tang J W, et al. Synthesis of water-

- using network with central reusable storage in batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33** (1): 267-276
- [6] 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** (15): 1381-1394
- [7] Chang C T, Li B H. Optimal design of wastewater equalization systems in batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 2006, **30** (5): 797-806
- [8] Li Guanhua (李冠华), Liu Yongzhong (刘永忠), Zhang Jinzhi (张进治). Optimization of batch water network with multiple contaminants through continuous regeneration/recycle parallel operation. *CIESC Journal (化工学报)*, 2009, **60** (1): 134-141
- [9] Rabie A H, El-Halwagi M M. Synthesis and scheduling of optimal batch water-recycle networks. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, **16** (3): 474-479
- [10] Grau R, Graells M, Corominas J, Espuna A, Puigjaner L. Global strategy for energy and waste analysis in scheduling and planning of multi-product batch chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20** (6): 853-868
- [11] Pochet Y W F. A tighter continuous time formulation for the cyclic scheduling of a mixed plant. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, **32** (11): 2723-2744
- [12] Gouws J F, Majoji T. Impact of multiple storage in wastewater minimization for multi-contaminant batch plants: toward zero effluent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, **47** (2): 369-379
- [13] Cheng K F, Chang C T. Integrated water network designs for batch processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2007, **46** (4): 1241-1253
- [14] Shoaib A M, Aly S M, Awad M E, et al. A hierarchical approach for the synthesis of batch water network. *Computers & Chemical Engineering*, 2008, **32** (3): 530-539
- [15] Oliver P, Rodriguez R, Udaquiola S. Water use optimization in batch process industries (I): Design of the water network. *Journal of Cleaner Production*, 2008, **16** (12): 1275-1286
- [16] Statyukha G, Kvitka O, Dzhygyrey I, et al. A simple sequential approach for designing industrial wastewater treatment networks. *Journal of Cleaner Production*, 2008, **16** (2): 215-224
- [17] Liu Yongzhong, Li Guanhua, Wang Le, et al. Optimal design of an integrated discontinuous water-using network coordinating with a central continuous regeneration unit. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, **48** (24): 10924-10940
- [18] Feng X, Chu K H. Cost optimization of industrial wastewater reuse systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004, **82** (B3): 249-255