

水夹点分析与数学规划法相结合的废水处理网络优化设计

李 英^{1,2}, 周集体^{*1}, 姚平经³

(1. 大连理工大学 环境与生命学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连交通大学 环境与化学工程学院, 辽宁 大连 116028;

3. 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘要: 提出了水夹点分析和数学规划法相结合的废水处理网络最优设计法. 基于对过程用水的理解, 通过水夹点分析得出废水处理网络设计的基本规则. 在此基础上建立了废水混合、合并、处理和排放各种可能匹配方案的废水处理网络超结构及其 NLP 模型. 既避免了用水夹点综合设计废水处理网络存在回路, 又在一定程度上防止了超结构规模过大、NLP 维数太高、求解困难. 采用通用代数建模系统(GAMS)得到废水处理网络最优设计方案. 文献中的应用实例表明, 所提方法可充分发挥水夹点分析处理结构的简洁实用性和超结构 NLP 寻求最佳方案的优点.

关键词: 废水处理网络; 水夹点分析; 数学规划法

中图分类号: TQ021.8 **文献标志码:** A

0 引言

过程工业中的废水大多采用集中式处理, 即来自不同过程的废水全部收集在同一废水池中, 然后依次经过物理、化学以及生物处理后排放. Eckenfelder 等^[1]认识到分布式废水处理可能比集中式处理有更大的优势. McLaughlin 等^[2]证实大多数废物处理操作的基建费与流经废水的流量成正比且处理的操作费用随给定质量负荷污染物浓度的降低而增加. 如果两个废水流股含有的污染物浓度不同, 采用分布式废水处理比集中式废水处理在基建费和操作费上都要节省, 但如果两个废水流股含有的污染物浓度相同, 则采用集中式处理更合理. 所以废水处理系统设计的首要问题是产生一个通用的方法决定何时将流股分开何时正确合并, 且在实际应用中各种过程所产生的废水一般含有多种不同类型污染物且浓度并不相同, 因此分布式废水处理应用有更广阔的空间.

在此研究领域, Wang 等^[3]、Kuo 等^[4]用夹点法设计分布式废水处理网络, 这一方法在处理小规模单杂质问题时比较有效; 对大规模多杂质问题处理过程过于烦琐, 但它的一个突出优点是其

对过程了解比较充分. Galan 等^[5]通过超结构模型建立废水处理网络的数学模型, 并提供了一个多次求解线性规划/非线性规划的设计型算法. 随后, 对废水处理网络设计的改进主要集中在以下三方面: 一种是设计方法的改进, 如李保红等^[6,7]基于 1 个原则和 3 个规则进行废水处理网络的设计和调优; 一种是优化方法的改进, 如刘永健等^[8]基于粒子群优化算法的分散式废水处理网络的综合; 一种是设计方法和优化方法的同时改进, 如 Rogelio 等^[9]采用超结构分解和数值优化相结合的方法设计分布式废水处理网络. 本文在水夹点分析与数学规划法相结合设计用水网络^[10]的基础上, 将这一方法应用于废水处理网络优化设计.

1 问题描述

合成分布式废水处理网络的问题表述如下: 给定一系列已知流量的过程液体流股, 包含已知浓度的特定污染物; 给定一系列处理单元用来移去每种污染物. 这一问题的目的是在总费用最小条件下确定这些单元存在哪些连接, 它们相应的流量以及它们使每种污染物达到排放规定的组成.

2 水夹点分析

废水处理过程的夹点分析就是在浓度 - 质量负荷图上表示处理过程的行为. 首先, 废水流股从其浓度 $c_{i,j}$ 减到环境允许排放浓度 $c_{e,j}$, 同时移去杂质质量负荷 $\Delta m_{i,j}$. 针对每种杂质将所有废水流股在同一浓度 - 质量负荷图上表示出来, 如图 1(a) 所示. 在不同的浓度区间对质量负荷加和形

成废水组合曲线, 如图 1(b) 所示. 这里

$$\Delta m_{i,j} = f_i(c_{i,j} - c_{e,j}) \tag{1}$$

$$\Delta m_{t,j} = \sum_i \Delta m_{i,j} = \sum_i f_i(c_{i,j} - c_{e,j}) \tag{2}$$

处理过程的行为用移出率 R 表示, 则处理过程的进出口浓度关系如下:

$$R = \frac{c_{in} - c_{out}}{c_{in}} = \frac{\Delta m_{t,j}}{\Delta m_{t,j} + m_0} \tag{3}$$

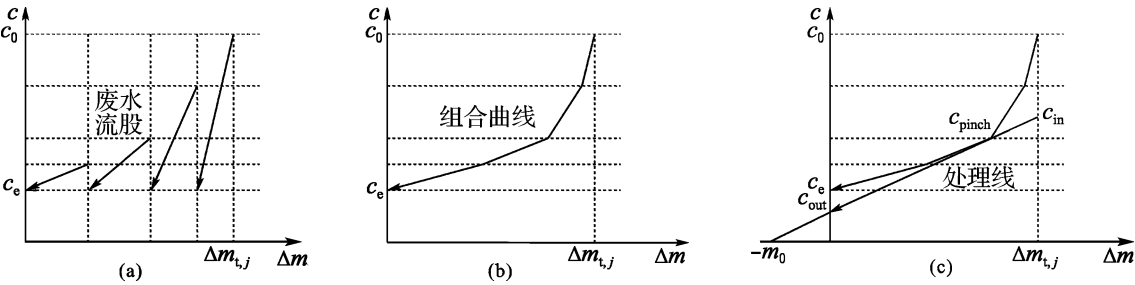


图 1 废水处理网络的水夹点分析图

Fig. 1 The diagram of water pinch analysis for wastewater treatment system

在浓度-质量负荷图上, 当处理线围绕图 1(c) 的 $(-m_0, 0)$ 点旋转, 移出率并不改变. 所以以 $(-m_0, 0)$ 为顶点, 与废水组合曲线相切的处理线使得处理费用(目标函数)最小, 如图 1(c) 所示, 切点为夹点. 为了使所设计的废水处理网络达到上图的目标, 必须满足如下两个标准: 被处理的废水流量必须等于处理线流量; 被处理的废水流股平均进口浓度 $c_{m,in}$ 必须等于处理过程的目标进口浓度 c_{in} . 夹点将废水流股分为 3 类:

- 第 1 类 废水流股的浓度大于夹点浓度;
- 第 2 类 废水流股的浓度等于夹点浓度;
- 第 3 类 废水流股的浓度小于夹点浓度.

且满足如下 3 条设计规则才可以达到处理流量目标:

- 规则 1 第 1 类的废水流股必须全部经过处理单元;
- 规则 2 第 2 类的废水流股部分经过处理单元;
- 规则 3 第 3 类的废水流股不经过处理单元.

3 融入水夹点分析规则的废水处理网络建模

如同用水网络设计, 废水处理网络设计首先也是要建立包含各种可能方案的超结构, 如图 2 所示. 其中 M 为混合器, S 为分离器, TP 为处理单元. 将处理单元的基建费用表示成流量的函数,

则混合整数非线性规划转变成非线性规划, 超结构建模如下.

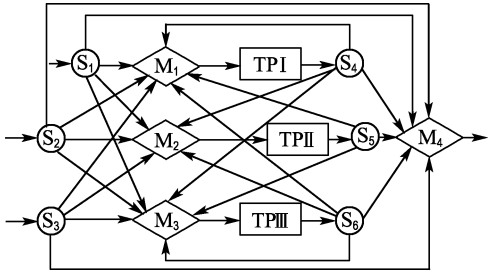


图 2 废水处理网络超结构

Fig. 2 The superstructure of wastewater treatment networks

目标函数:

$$\min \sum_t (\lambda \times A_t f_t^\beta + B_t f_t)$$

约束方程:

处理单元杂质质量平衡

$$(1 - R_{t,j}) \sum_{l \neq t} X_{t,l} c_{l,j,out} = (\sum_{l \neq t} X_{t,l}) c_{t,j,out}; \tag{4}$$

$t \in T, l \in \{W, T\}$

其中 W 为废水流股集合, T 为处理单元集合.

废水流股质量平衡

$$\sum_i X_{t,i} + X_{e,i} = f_i; t \in T, i \in W \tag{5}$$

环境排放标准限制

$$\sum_l X_{e,l} c_{l,j,out} \leq (\sum_i f_i) c_{e,j}; i \in W, l \in \{W, T\} \tag{6}$$

对此非凸非线性规划,往往很难得到全局优化解,将水夹点分析规则融入数学建模中,可加深对过程的理解,减少上述模型中 $X_{i,j}$ 的数量,同时超结构简化如图 3,维数降低,更容易找到全局最优解.如果一个处理过程可以同时处理几种杂质,则超结构中应选取需要处理流量最大的杂质所决定的处理结构.

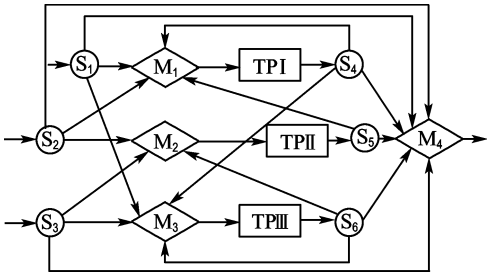


图 3 废水处理网络简化超结构
Fig. 3 The simplified superstructure of wastewater treatment networks

4 实 例

实例取自文献[5],包括 3 个废水流股、3 种杂质及 3 个处理过程,数据见表 1、2. 首先根据夹点分析可得出:

对 H_2S 杂质 TP I 的夹点为 390 mg/L,废水流股 1 部分或全部经过 TP I,废水流股 2 全部经过 TP I,废水流股 3 不经过 TP I;TP II 的夹点为 25 mg/L,废水流股 1 和 2 全部经过 TP II,废水流股 3 部分或全部经过 TP II.

对油杂质 TP II 的夹点为 100 mg/L,废水流股 1 不经过 TP II,废水流股 2 全部经过 TP II,废水流股 3 部分或全部经过 TP II;TP III 的夹点为

100 mg/L,废水流股 1 不经过 TP III,废水流股 2 全部经过 TP III,废水流股 3 部分或全部经过 TP III.

对悬浮物杂质 TP II 的夹点为 350 mg/L,废水流股 1 不经过 TP II,废水流股 2 全部经过 TP II,废水流股 3 部分或全部经过 TP II.

综合得:

废水流股 1 部分或全部经过 TP I,废水流股 2 全部经过 TP I,废水流股 3 不经过 TP I;废水流股 1 和 2 全部经过 TP II,废水流股 3 部分或全部经过 TP II;废水流股 1 不经过 TP III,废水流股 2 全部经过 TP III,废水流股 3 部分或全部经过 TP III.

表 1 废水流股给定数据

Tab. 1 Specified data for wastewater stream

流股号	流量/($t \cdot h^{-1}$)	污染物浓度/($mg \cdot L^{-1}$)		
		H_2S	油	悬浮物
1	13.1	390	10	250
2	32.7	16 780	110	400
3	56.5	25	100	350

表 2 处理操作给定数据

Tab. 2 Specified data for treatment operation

处理单元	移出率/%			基建费用/ 美元	操作费用/ (美元 $\cdot h^{-1}$)
	H_2S	油	悬浮物		
TP I	99.9	0	0	$16\,800f_i^{0.7}$	$1.0f_i$
TP II	90	70	98	$12\,600f_i^{0.7}$	$0.006\,7f_i$
TP III	0	70	50	$4\,800f_i^{0.7}$	0

注:年回收率为 10%;操作时间为 $8\,600\,h \cdot a^{-1}$

采用通用代数建模系统(GAMS),通过建模优化得到如图 4 的废水处理网络结构,与 Kuo 等[4]所得结果基本一致,但设计过程相对简单.

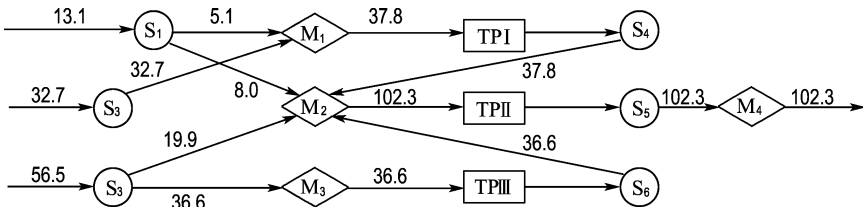


图 4 优化的废水处理网络结构
Fig. 4 Optimal design of wastewater treatment networks

5 结 语

对废水处理网络设计,应用水夹点技术对处理流量和处理费用的计算过于繁琐,而数学规划法形成的超结构模型由于非凸性比较强,获得全

局最优比较困难. 本文利用数学规划法建模全面的优点,并应用夹点分析加深对处理过程的理解,降低了非线性规划的维数,更好地应用了夹点分析确定处理结构的简洁实用性和超结构

NLP 寻求最佳方案的优点,为废水处理网络设计提供了一种切实可行的方法.

参考文献:

- [1] ECKENFELDER W W JR, PATOCZKA J, WATKIN A T. Wastewater treatment [J]. **Chemical Engineering**, 1985, **92**(18):60-74
- [2] MCLAUGHLIN L A, MCLAUGHLIN H J, GROFF K A. Develop an effective wastewater treatment strategy [J]. **Chemical Engineering Progress**, 1992, **88**(9):34-42
- [3] WANG Y P, SMITH R. Design of distributed effluent treatment systems [J]. **Chemical Engineering Science**, 1994, **49**(18):3127-3145
- [4] KUO W C, SMITH R. Effluent treatment systems design [J]. **Chemical Engineering Science**, 1997, **52**(23):4273-4290
- [5] GALAN B, GROSSMANN I E. Optimal design of distributed wastewater treatment networks [J].

Industrial and Engineering Chemistry Research, 1998, **37**(10):4036-4048

- [6] 李保红,费维扬,姚平经. 单杂质废水处理网络设计[J]. 化工学报, 2003, **54**(12):1733-1739
- [7] LI B H, FAN X S, YAO P J. New method for effluent treatment system design [J]. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 2002, **10**(3):273-280
- [8] 刘永健,罗祎青,袁希钢. 基于粒子群优化算法的分散式废水处理网络的综合[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(1):16-20
- [9] ROGELIO H S, JULIAN C F, JU M Z. Superstructure decomposition and parametric optimization approach for the synthesis of distributed wastewater treatment networks [J]. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 2004, **43**(9):2175-2191
- [10] 李 英,姚平经. 水夹点分析与数学规划法相结合的用水网络优化设计[J]. 化工学报, 2004, **55**(2):220-225

Optimal design of wastewater treatment networks by combination of water pinch analysis and mathematical programming

LI Ying^{1,2}, ZHOU Ji-ti^{*1}, YAO Ping-jing³

(1. School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;
3. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: An approach of optimal wastewater treatment networks design by the combination of water pinch analysis and mathematical programming is presented. Water pinch analysis is used to determine the elementary rules for wastewater treatment networks design based on the understanding for wastewater treatment process. Then, a superstructure of wastewater treatment networks and an improved nonlinear programming (NLP) model are built which involves only feasible and better retrofit options considering mixing, treatment and discharge of wastewater. The approach overcomes the defect that water pinch analysis designs the wastewater treatment network with loop and prevents the case that the superstructure is so large that it is difficult to solve it. At last, the general algebraic modeling system (GAMS) is adopted to attain the optimal scheme of wastewater treatment networks. Case study illustrates that the combined method can determine the treatment structure concisely and practically by water pinch analysis and reach the global optimum of wastewater treatment networks by superstructure NLP.

Key words: wastewater treatment networks; water pinch analysis; mathematical programming