

HSE 和设计等技术

过程水系统集成技术及其进展

冯 霄 沈人杰 曹殿良

(西安交通大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:水系统集成技术是将整个企业的用水系统作为一个有机的整体来对待的一种技术,可以有效地节省新鲜水用量,并同时减少污水的排放。介绍了近年来在过程水系统集成方面的研究进展。对于常规水网络结构,主要包括两方面的研究:水夹点技术与数学规划法,指出了两种技术的优势与缺陷及有待进一步研究的问题。还介绍了一种新的水网络——基于中水道的水网络——的研究与进展。

关键词:节水;集成;水夹点;中水道

中图分类号: TQ021.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2004)S2-0099-04

Water system integration technology and its research progress

FENG Xiao, SHEN Ren-jie, CAO Dian-liang

(School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Water system integration is such a technology which is used to treat the water-use system in a plant as a whole. It can effectively reduce the amount of freshwater consumption as well as wastewater produced. The latest research progress in the water system integration research is introduced. Two main approaches involved in conventional water network design are water pinch technology approach, and mathematical programming. The advantages and limitations of the both methods are showed, and the further work needed to do is pointed out. The research of a new water network based on internal water main is also introduced.

Key words: water saving; integration; water pinch; water main

近年来,由于水资源的日趋紧缺以及社会对环境保护的日益重视,过程工业的新鲜水用量及废水排放量最小化成为过程系统设计与优化的研究焦点之一。节约新鲜水用量及减少污水排放的技术有多种,其中,水系统集成技术能取得极其显著的节水效果,成为当前研究的热点。水系统集成,就是把企业的整个用水系统作为一个有机的整体来对待,除了新鲜水以外,将每个用水单元排放的废水均作为可能的水源,考虑如何分配各用水单元的水量和水质,以使系统水的重复利用率达到最大,同时污水的排放量达到最小。

从 20 世纪 80 年代开始,水的优化分配问题就已被提出^[1],当时主要是采用数学规划加超结构法,且针对简单的单组分污染物,在整个 80 年代只有寥寥无几的研究论文发表。1994 年,英国曼彻斯特理工大学(University of Manchester Institute of Science and

Technology, UMIST)的 Smith 教授领导进行了水系统集成研究,并发表了著名的论文“废水最小化”(Wastewater minimization)^[2]。在这篇论文中,提出了许多重要的概念,例如极限水曲线、极限水复合曲线、水夹点等。Smith 用类似于过程热集成中构造冷热复合曲线的方法,构造极限水复合曲线,此时,水中的污染物浓度为纵坐标,要去除的污染物质量为横坐标,则供水曲线斜率的倒数就代表了供水量,其工作给出了整个水系统的洞察,指出哪里是制约用水的瓶颈,最小新鲜水用量及最小污水产生量的目标值,及如何考虑系统中污水的再生利用(指将污水处理至某一浓度下再回用于生产中)。

Smith 的工作奠定了水系统集成的基础,形成一种比较完整的水系统集成方法和技术,之后在该领域的研究逐步形成高潮,大量的研究与应用相继问世^[3-14]。

为了求解多组分污染物系统,数学规划法显示了其优势。图示法和数学规划法成为水系统集成的两大类方法。下面对这 2 种方法先简单加以介绍,然后指出这 2 种技术各自的优势与缺陷,及有待进一步研究的问题,最后再介绍一种新的水网络结构。

1 基于图示法的水夹点技术^[2]

一般来说,从一个用水单元出来的废水如果在污染物浓度、腐蚀性等方面满足另一个单元的进口要求,就可为其所用,从而达到节约新鲜水的目的,这是节水工作的主要着眼点。考虑一个用水单元,在该单元中,物料通过与水接触达到净化的目的。这个过程可以用图 1 所示的负荷-浓度图来表示。浓度最高的为物料线,较低的为供水线。供水线斜率越大,流率越小。只要能够满足最小传质推动力、最大溶解度、设备腐蚀等的要求,位于物料线下方的供水线就可满足要求。但是,为了确定别的单元来的废水能被本单元再利用的可能性,需要指定本单元最大进口浓度。同时,为了确定所需水的最小流率,需要指定本单元最大出口浓度。这样就得到了该单元用水的极限曲线(图 1 中物料线下的实线)。

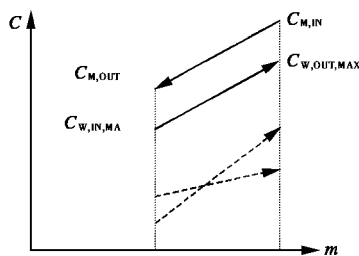


图 1 用水单元的浓度-负荷曲线

为了达到节水的全局最优化,必须从整体上来考虑整个系统的用水情况,所以需要将所有用水单元的情况用复合曲线来分析。构造极限水复合曲线的方法与构造换热网络中冷热流体复合曲线的方法相同。对于一个系统而言,极限复合曲线给出了整个系统对水质和水量的要求,可以据此确定最小新鲜水用量,并进一步设计用水网络。

位于复合曲线下方的供水线均可满足供水要求。假定供水线入口浓度为零,为了使所用新鲜水量达到最小,应该尽可能增大其出口浓度,即增大供水线的斜率。由图 2 可见,当供水线的斜率增大到在某点与复合曲线开始重合时,出口浓度达到最大,新鲜水用量达到最小。重合的位置就是所谓的“水夹点”,此时供水线的斜率就代表了新鲜水的最小用量。然后根据复合曲线与供水线,就可设计新鲜水

量最小、水的重复利用率最大的水系统网络。

此外,若想进一步降低新鲜水用量,还可考虑水的再生再利用,限于篇幅这里不作介绍。

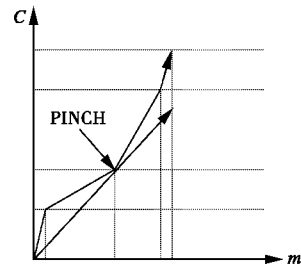


图 2 夹点图

2 基于超结构的数学规划法^[7]

基于超结构的数学规划法的基本思想是:每一个用水单元都可以使用新鲜水和从其他单元来的水,从每一个用水单元出来的水又都可以进入其他用水单元作为水源,由此建立超结构,然后用数学规划解这个超结构,得到新鲜水去各单元的流率与各单元之间的水流率,从而得到用水网络,其优点是可以通过计算机辅助设计,迅速而可靠。

2.1 超结构

如图 3 所示,按如下步骤建立超结构:

①在新鲜水源后标示一组分裂的箭头 S 以表示去往各个用水单元的新鲜水;

②在每一个用水单元前标示一组交汇的箭头 M 以表示从新鲜水源与其他用水单元来的水;

③在每一个用水单元后标示一组分裂的箭头 S 以表示从该单元去往其他用水单元及废水管的水;

④在废水管前标示一组交汇的箭头 M 以表示从各用水单元来的水。

步骤②中的箭头应与①,③中的相应箭头相连,④中的箭头应与③中的相应箭头相连,建立好的超结构见图 3。

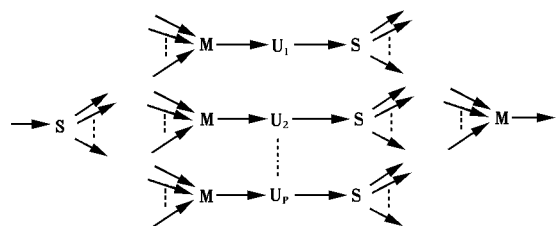


图 3 超结构

2.2 数学规划

根据所建立的超结构,可以列出如下的非线性模型:

$$\text{目标函数: } \min \sum_i F_i^W \quad (1)$$

$$\text{等式约束: } F_{\text{IN},i} = F_{\text{OUT},i} + L_i \quad i = 1, \dots, P \quad (2)$$

$$F_{\text{IN},i} C_{\text{IN},i,k} + M_{i,k} = F_{\text{OUT},i} C_{\text{OUT},i,k} + L_i C_{L,i,k} \quad k = 1, \dots, S \quad (3)$$

$$F_{\text{IN},i} = F_i^W + \sum_{j \neq i} F_{j \rightarrow i} \quad j = 1, \dots, P \quad j \neq i \quad (4)$$

$$F_{\text{IN},i} C_{\text{IN},i,k} = \sum_{j \neq i} F_{j \rightarrow i} C_{\text{OUT},j,k} \quad (5)$$

不等式约束:

$$0 \leq C_{\text{IN},i,k} \leq C_{\text{IN},i,k}^{\text{Max}} \quad (6)$$

$$0 \leq C_{\text{OUT},i,k} \leq C_{\text{OUT},i,k}^{\text{Max}} \quad (7)$$

式中: F_i^W —第 i 个用水单元的新鲜水用量; $F_{\text{IN},i}$ 、 $F_{\text{OUT},i}$ —第 i 个用水单元的进、出口流率; $C_{\text{IN},i,k}$ 、 $C_{\text{OUT},i,k}$ —第 i 个用水单元第 k 种组分的进、出口浓度; $C_{\text{IN},i,k}^{\text{Max}}$ 、 $C_{\text{OUT},i,k}^{\text{Max}}$ —第 i 个用水单元第 k 种组分的极限进、出口浓度; $M_{i,k}$ —第 i 个用水单元第 k 种组分的负荷; $F_{j \rightarrow i}$ —单元 j 到单元 i 的水流率; L_i —单元 i 内部的水损失,如果单元内部消耗了水,则取正值,如果单元内部生成水,则取负值,这个值一般需要在网络设计之前确定; $C_{L,i,k}$ —第 i 个用水单元损失水中污染物 k 的浓度; P —用水单元的个数; S —组分数。

3 水系统集成研究进展

基于图示法的水夹点技术和基于超结构的数学规划法,均得到了广泛的应用,但也都存在一些较严重的问题,需要进一步研究解决。

基于图示法的水夹点技术的最大优点是它给出了水系统的洞察,由于它能在设计之前给出最小新鲜水用量目标,因此能使设计者了解现行的水系统的缺陷,明了节水的潜力;它能使设计者知道如何设计水网络以及为什么这样设计。它最大的缺点在于由于基于图示法,在解决多组分污染物时显得无力,尽管采用浓度浮动的方法,但使得设计过程变得复杂且不能保证得到最优解。

与此相反,数学规划法的最大优点是能够处理大规模、多污染物的复杂问题,但由于该方法为黑箱模型,设计者不清楚用水网络是如何设计而来。同时由于水网络设计为非线性数学规划,其复杂性使得目前尚不能保证最优解。

此外,目前所设计的水网络,均采用用水单元之间直接的管道连接。这种水网络的优点是节水效果好,但对于用水单元多的大型水网络,却有着水网络过于复杂、不便于运行和控制的缺点,当生产中一个用水单元的水量、水质状况发生变化时,将影响其他

用水单元的运行,若用新鲜水加以调节,又使节水效果下降。

基于以上存在的问题,当前水系统集成研究主要集中在以下几个方面:

(1)探讨水系统集成非线性规划的求解方法。在这方面目前引起关注的主要有美国 Bagajewicz 的工作^[8-10]。他通过引入下列保证用水网络达到最优的条件,将非线性规划转变为线性规划:

①最大出口浓度。所有引入新鲜水的单元在出口处至少有一个组分的浓度达到其极限出口浓度。

②关键组分浓度单调性。对于每一用水单元,其关键组分的极限出口浓度不得低于由该单元供水集合提供的废水混合后的相应组分的浓度。某一单元的关键组分是指该单元全部使用新鲜水时需水量最大的组分。

笔者对 Bagajewicz 的工作进行了验证,发现对于多组分系统,用该方法不能保证得到最优解,还需做进一步的研究。再者,满足最小新鲜水用量的解有无穷多组,而采用线性规划求解时只能求出有限几组。如果考虑设备情况、网络复杂程度、管网尺寸等工程因素,用线性规划所求得解不一定是实际意义上的最优解。

(2)探讨新的水网络结构,这方面目前引起关注的主要有笔者曾提出的基于中水道的水网络结构^[14]。

所谓中水道是指水中杂质浓度介于新鲜水和排放废水之间的水道,它源于一些用水单元具有较低杂质浓度的废水排放,又用于另一些可用较高杂质浓度的水的用水单元。此外如果允许废水循环,中水道中的水也可供给需要较低浓度水的单元。

基于中水道的水网络结构,就是通过在系统中设置一个或多个中水道,所有用水单元都同新鲜水道、中水道、废水道中的一些水道相连,从其中一些取水,向其中之一排水。这样可以简化设计方案,容易进行操作和水质控制。

一般来说,在水系统中设置中水道后,新鲜水用量减少,从而废水排放量也相应减少。中水道设置越多,需消耗的新鲜水量越少,但是增加了网络的复杂性。因此设计时应综合考虑中水道的数量,新鲜水的消耗量以及相应的废水处理能力。

在工业企业中采用具有中水道结构的水网络,其困难之处在于确定中水道数目和各级中水道的杂质浓度。只有正确确定水道的杂质浓度,才能在尽可能少的水道下取得尽可能大的节水效果。

4 结论

(1)水夹点方法直观,物理概念明确,但对多组分复杂系统,难以求解且不能保证最优解。

(2)数学规划法为黑箱模型,不能给出明确的物理概念,但在处理多组分复杂系统时,有其优越性。但目前的非线性规划,也不能保证获得最优解。

(3)通过引入最大出口浓度和关键组分浓度条件,对于单组分杂质系统,可以将非线性规划转变为线性规划,从而可以保证获得新鲜水用量最小的水网络。但目前该方法尚不能解决多组分杂质系统。另外,由于通常满足新鲜水用量最小的水网络有无穷多的解,如何确定工程意义上的最优解也有待进一步研究。

(4)基于中水道的水网络系统,可以简化设计,便于进行操作和水质控制。但如何确定中水道数目,还需进一步研究。

参考文献

- [1] Takama N, Kuriyama T, Shiroko K, *et al.* [J]. *Comp Chem Engng*, 1980, 4: 251 - 258.
- [2] Wang Y P, Smith R. [J]. *Chem Eng Sci*, 1994, 49(7): 981 - 1006.
- [3] Wang Y P, Smith R. [J]. *Tran Inst Chem Eng*, 1995, 73 (Part A): 889 - 904.
- [4] Kuo W C J, Smith R. [J]. *Trans Inst Chem Eng*, 1998, 76(Part A): 287 - 301.
- [5] Olesen S G, Polley S G. [J]. *Trans Inst Chem Eng*, 1997, 75(Part A): 420 - 426.
- [6] Kuo J, Smith R. [J]. *Trans Inst Chem Eng*, 1998, 76(Part A): 287 - 301.
- [7] Huang C H, Chang C T, Ling H C, *et al.* [J]. *Ind Eng Chem Res*, 1999, 38: 2666 - 2679.
- [8] Bagajewicz M J, Rivas M, Savelski M J. A new approach to the design of water utilization systems with multiple contaminants in process plants [A]. In: *AICHE National Meeting* [C]. Dallas, 1999.
- [9] Savelski M, Bagajewicz M. A new algorithmic design procedure for the design of water utilization systems in refineries and process plants [A]. In: *Proceedings of PRESS 99 Meeting* [C]. Budapest, 1999.
- [10] Savelski M, Bagajewicz M. On the use of linear models for the design of water utilization systems in refineries and process plants [A]. In: *Annual AIChE 1999 Meeting* [C]. Dallas, 1999.
- [11] Alva-Argaez A, Vallianatos A, Kokossis A. [J]. *Comput Chem Eng*, 1999, 23: 1439 - 1453.
- [12] Castro P, Matos H, Fernandes M C, *et al.* [J]. *Chem Eng Sci*, 1999, 54: 1649 - 1665.
- [13] Polley G T, Polley H L. [J]. *Chem Eng Prog*, 2000, 96: 47 - 52.
- [14] Feng X, Seider W D. [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2001, 40(26): 6140 - 6146. ■

中国石化加油站在香港正式开业

2004年7月底,中国石油化工股份有限公司位于香港坚尼地道9L和麦当劳道加油站隆重开业,中国石化董事、高级副总裁兼财务总监张家仁先生出席了开业典礼。张家仁先生在致辞中表示:中国石化加油站将为香港的客户提供高质量的燃油产品和优质的零售服务,为繁荣香港社会做出贡献。

中国石化香港加油站按照最新的公司统一形象标识,并采用了节能的灯光设计和环保的油气回收装置,设置了体现人文关怀的残疾人洗手间。加油站标识系统简洁、整齐、细致而和谐,为美丽的东方之珠增添了一道靓丽的风景线,得到了附近的香港居民和其他石油公司的关注和赞赏。

根据香港燃油市场的需求,中国石化加油站提供以下产品:中国石化汽油(SINO POWER)(98#)、中国石化超级汽油(SINO X POWER)和中国石化柴油(SINO DIESEL)(超低含硫)和长城牌系列润滑油产品。香港正在建设中的中国石化加油站还有九龙湾、大埔和东涌加油(气)站等,预计2005年中投入运营。