

# 节水减排的过程系统工程方法

杨友麒<sup>1</sup>, 庄芹仙<sup>2</sup>

(1. 中国化工信息中心, 北京 100029; 2. 北京圣金桥信息技术公司, 北京 100083)

**摘要:** 论述了节水减排的重要意义及我国当前存在的问题, 指出进行炼油化工企业节水减排的途径是: 水平衡测试—水网络系统集成优化—污水深度处理回用。其中水网络系统集成优化的过程系统工程方法有两大类: 水夹点分析法和数学规划方法。介绍了 2 种方法的基本概念及应用效果。

**关键词:** 节水; 污水减排; 水网络; 过程系统工程; 水夹点技术

中图分类号: TQ-9; TQ021.8

文献标识码: C

文章编号: 0253-4320(2008)01-0008-04

## Process system engineering methods for water conservation

YANG You-qi<sup>1</sup>, ZHUANG Qin-xian<sup>2</sup>

(1. China National Chemical Information Center, Beijing 100029, China;

2. Beijing Sunbridge SoffTech Ltm., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Water conservation and wastewater reduction are crucial for many enterprises of process industries, and it is particularly true in China. The serious problems in water saving are described and the progresses in water network are introduced in this paper. In order to optimize the water network, the process systems engineering methodologies including water pinch technology and mathematical programming method must be used. The concepts and application of above two approaches are also described.

**Key words:** water conservation; waste water reduction; water network; process system engineering methods; water pinch

## 1 节水减排刻不容缓<sup>[1]</sup>

我国是一个水资源短缺的国家。按 2004 年人口计算, 我国人均水资源拥有量只有 2 185 m<sup>3</sup>, 不足世界人均水平的 1/4, 是世界上 13 个主要缺水国家之一。而且我国资源分布不均匀, 从东南向西北递减, 长江以北广大地区人口占全国 46%, 但水资源只占全国的 19%。这就造成全国 400 多个城市供水不足, 其中严重缺水的城市有 110 座。据预测, 到 21 世纪中叶, 我国人口达到 16 亿峰值时, 人均水资源拥有量将减少到 1 750 m<sup>3</sup>, 届时全国的大部分地区将面临水资源更加紧张、严重缺水的局面。

除资源性缺水之外, 结构性和水质性缺水又进一步加剧了问题的严重性。从世界范围看, 由于工业发展迅速, 排放的污水已使可供人类使用水量 1/3 的淡水资源受到污染, 约 20% 的人口缺乏安全饮用水。我国也不例外, 全国 700 余条大、中河流近 1/2 受到污染, 78% 的城市河道不宜作饮用水源, 50% 的城市地下水已受到污染。

在这种形势下, 中央在“十一五”规划中的 8 个

约束性指标中就规定了一个“万元工业增加值取水量下降 30%”的硬指标, 并已作为各级政府和国营企业领导干部的业绩考核指标。

虽然水已经成为我国宝贵的战略资源, 但是人们的认识还远远跟不上, 浪费现象十分严重, 用水效率总体水平较低。我国工业用水占总量的 22%, 用水效率与国际先进水平相差悬殊, 2005 年我国每万元工业增加值取水量为 357 m<sup>3</sup>, 约为日本的 18 倍, 美国的 22 倍; 工业用水重复利用率约 53%, 远低于发达国家 75% 的水平。此外, 工业污水排放量大, 污染严重, 排放的污水量占全国污水排放总量的 49% 左右, 绝大多数有毒有害物质随工业污水排入水体, 致使许多城镇的饮用水源受到了不同程度的污染, 部分水源被迫弃用, 加剧了水资源的短缺。

当前我国化工、石化企业一方面供水不足问题日趋严重, 除长江沿岸地区供水状况较好外, 其他地区企业均存在不同程度的供水不足现象, 特别是西北地区和沿海地区, 正面临严重供水不足; 另一方面, 我国化工、石化行业水资源利用率低, 节水减排有很大潜力。例如, 我国化工行业每吨化学品的

收稿日期: 2007-12-18

作者简介: 杨友麒(1935-), 男, 大学, 教授级高工, 中国系统工程学会过程系统工程专业委员会副主任, 从事化学工程、过程系统工程、计算机应用等方面的研究, yang@pku.edu.cn。

耗水量为国际水平的2~4倍,生产1t乙烯的耗水量相当于日本或美国的2~3倍;2005年合成氨吨氨耗水全行业平均高达58 m<sup>3</sup>/t,比国际先进水平高5倍。这是因我国中小氮肥厂产量占一半以上,虽然近2年大力推广“两水闭路循环”、“两水零排放”等技术,但水耗指标仍然居高。在污水排放量方面,每加工1t原油的排污水量是国际水平的4~5倍。

面对以上这些挑战,我们应当怎样应对?应当采取什么策略?信息时代为我们提供了什么技术方案来解决问题?这些都应该是业内人士思考与关心的问题。

## 2 从管理节水走向系统节水<sup>[2]</sup>

为了使节水减排工作逐步走向深入,对许多企业来说,应该由一般管理节水深入到系统工程节水。因为一个化工炼油企业的典型供水—用水—废水处理系统是一个庞大的水网络系统,仅凭借管理经验,“头痛医头,脚痛医脚”来提出节水减排措施已经难以有显著效果。必须将水网络系统当成一个系统工程进行全面分析,才能找出最优解决方案。

具体来说,老厂节水减排技术改造,可以采用“三步策略”。第1步:全面做好基础计量工作,做好全厂水平衡测试,在摸清底细的基础上,提高操作管理水平,将最容易挖掘的节水潜力“浮财”挖到手,实现投资少、见效快、收益高的节水减排;第2步:深入进行水网络的系统工程分析,大大提高水的回用率;第3步:污水再生回用。为此,需要采用一套过程系统工程的方法,对水网络系统进行分析 and 优化。

## 3 水网络的过程系统集成优化方法

### 3.1 过程系统集成方法的发展

水系统优化集成的理论自20世纪80年代就开始发展,1989年El-Halwagi和Manousiouthakis发表“Mass exchanger network”的论文,首次提出用累计交换质量—组分浓度坐标表示富集流股和贫流股之间质量交换<sup>[3]</sup>。

1994年英国Wang和Smith发表了著名的“废水最小化”(Wastewater Minimization)论文,提出了直接计算最小新鲜水用量的目标值方法,并用这种方法找到最佳回用水方案,为这种基于概念的图解方法奠定了基础<sup>[4]</sup>。

20世纪90年代后期这方面研究进入高潮,除了发表了许多论文外,还出版了2本专著:一本是美国El-Halwagi著《通过过程集成来防止污染:系统设

计的工具》(Pollution Prevention Through Process Integration: Systematic Design Tools<sup>[5]</sup>);另一本是James G. Mann及Y. A. Liu(刘裔安)《工业用水节约及废水减量》(Industrial water reuse and wastewater minimization, Mc Graw-Hill 1999)。后者在国内已由中国石化出版社于2001年12月翻译出版<sup>[6]</sup>。20世纪90年代这方面的进展Bagajewicz给予了出色的综述<sup>[7]</sup>。

与此同时,在工业上的实际应用也蓬勃展开,并取得显著效益。由于该技术在过程工业中的迫切需求及巨大的潜在效益,国外的软件公司都在力争将这些成果转化为便于利用的应用软件工具。2000年美国的Aspen Tech公司首先推出了Aspen Water商品化应用软件;英国的Linnhoff March公司也有自己的水夹点应用软件Water Target,但该公司是以咨询服务为主要业务。

水网络系统的过程集成方法可分为两大类:

水夹点分析法(20世纪90年代,用于单组分杂质水网络)和数学规划方法(20世纪90年代后期~21世纪,用于多组分杂质水网络)。

近来也有将以上2种方法组合应用,用水夹点分析法来获得一个明确的概念流程方案作为数学规划法的初始模型,然后在此基础上进一步用优化算法来达到最优解。

### 3.2 过程集成方法的基本概念

#### 3.2.1 水夹点分析法的概念

(1)水源和水阱的概念。“水源”泛指可作为水回用的用水操作。即包括外界来的新鲜水,也包括各用水单元排出的可能再次利用的“二次水”,甚至包括目前将送往污水处理的“污水”等所有可资利用的各种水;“水阱”泛指潜在可以利用回用水代替新鲜水以及直接利用新鲜水的用水操作。所以,一个用水操作可以同时既是“水阱”,也是“水源”。

(2)组合曲线。如果在纯度—水流量坐标上表现一个流量为10 m<sup>3</sup>/h、纯度为50 × 10<sup>-6</sup>的水阱(需求),如图1所示。如果有多个水纯度不同的水阱,则可以将它们组合起来,如图1右侧所示,成为1个台阶线。如果有多个水源,形成1个水源组合曲线,如图2所示,在水阱组合曲线的上方,可以看到不同的水源和水阱之间形成相互匹配的关系。我们希望水阱线尽可能向左移动,这样可以使尽多的水阱可以从水源方获得回用水,减少新鲜水的用量。但当水阱组合曲线向右移到和水源组合曲线相碰时,就形成了“水夹点”,说明新鲜水用量达到最小,不可能再向右移动了,也意味着内部水源的利用达到最大值。

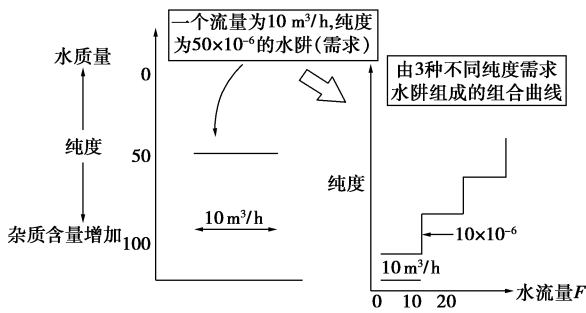


图 1 组合曲线图

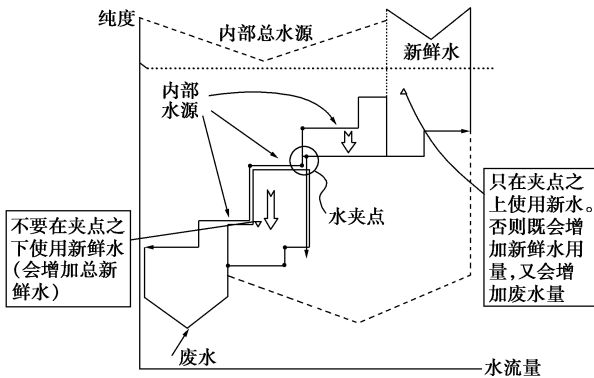


图 2 水夹点原理图

夹点分析方法虽然在 20 世纪 90 年代得到成功应用,但也有其固有的局限性:首先,对于水中含有多种需要控制的杂质时,这种二维图表方法就难以适应了。这时对不同的杂质应对应不同的极限浓度;其次,这种方法对用水系统和废水处理系统的处理方法是不同的,因此它难以应用于最新的分布式水网络系统。这就是为什么到 21 世纪数学规划方法开始流行的原因。

### 3.2 数学规划方法

如果我们构造一个水网络的超结构,如图 3 所示,这是一种包含了各种可能性结构的水网络。为了搜索到最优化的结构,需要建立水网络的数学模型,用数学规划法在计算机上求解:流量为零的流股表示不存在的流股,求出的流量为最佳配置方案。

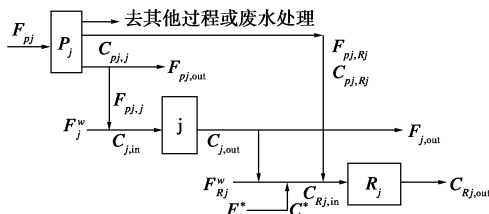


图 3 超结构水网络:一个过程 j 的上游供水量及下游接受器网络关系

考虑单杂质组分,而且每一个用水过程的杂质

负荷均被新鲜水全部移走,已知最大进口及出口浓度约束,则整个新鲜水用量最小的问题可表述为非线性规划:

$$\min \sum_j F_j^w$$

s. t.

$$F_j^w + \sum_i F_{i,k} - \sum_k F_{j,k} - F_{j,out} = 0 \quad \forall j \in N, i \in P_j, k \in R_j$$

$$F_h^w - \frac{L_h}{C_{h,out}^{lim}} = 0 \quad \forall h \in H$$

$$\sum_i F_{i,j} (C_{i,out} - C_{j,in}) - F_j^w C_{j,in} = 0 \quad \forall j \in \bar{H}, i \in P_j$$

$$\sum_i F_{i,j} (C_{i,out} - C_{i,out}) - F_j^w C_{j,out} + L_j = 0 \quad \forall j \in \bar{H}, i \in P_j$$

$$C_j \leq C_j^{lim} \quad \forall j \in \bar{H}$$

$$C_i \leq C_i^{lim} \quad \forall i \in P_j$$

其中,  $C_{out}$  为  $i$  过程出口浓度;  $C_{out}^{lim}$  为  $i$  过程出口极限浓度;  $C_{in}$  为  $i$  过程进口浓度;  $C_{in}^{lim}$  为  $i$  过程进口极限浓度;  $F_j^w$  为  $j$  过程新鲜水用量;  $F_{i,j}$  为  $i$  过程流向  $j$  过程的废水流量;  $H$  为直接用新鲜水的“头过程”数集;  $L_{k,i}$  为  $i$  过程中  $k$  污染物含量的移出负荷;  $P_j$  为  $j$  过程相关的上游供水器数集;  $R_j$  为  $j$  过程相关的下游受水器数集。这种流程  $j$  与上下游关系可参照图 3 所示。

下面通过一个案例来展示用数学规划法来优化水网络系统的结构<sup>[7]</sup>。表 1 表示一个由 10 个用水过程构成的用水网络,其超结构中的联接数目可达 72 个。如果用单调性必要条件将不满足的联接删除,则可行性联接由 72 个下降为 40 个。

表 1 10 个用水过程的极限数据

过程号	杂质负荷/ kg·h <sup>-1</sup>	C <sub>in</sub> <sup>max</sup> / 10 <sup>-6</sup>	C <sub>out</sub> <sup>max</sup> / 10 <sup>-6</sup>	无回用最小新鲜水流量/ t·h <sup>-1</sup>
1	2.0	25	80	25.0
2	2.88	25	90	32.0
3	4.0	25	200	20.0
4	3.0	50	100	30.0
5	30.0	50	800	37.5
6	5.0	400	800	6.25
7	2.0	400	600	3.3333
8	1.0	0	100	10.0
9	20.0	50	300	66.6667
10	6.5	150	300	21.6667
总最小流率/t·h <sup>-1</sup>				252.4167

把这个问题简化成线性规划模型解算后,得到答案如表 2 所示。可以看到:最小总新鲜水耗量由 252.4 t/h 下降到 165.9 t/h,新鲜水节省了 34% 以上。这里已做了一些删除不实际联接的简化,例如:

9~7过程联接流量只有1.295 t/h,这意味着如果取经济流速为2.0 m/s,则管径只有内径15 mm,这种联接实际意义不大,应该删除。

表2 10个用水过程的优化配置解

过程号数	$F_{i,j}/t \cdot h^{-1}$	有回用最小新鲜水流量/ $t \cdot h^{-1}$	废水流量/ $t \cdot h^{-1}$
1	0.0	25.0	0.0
2	0.0	32.0	0.0
3	$F_{1,3} = 7.14286$	15.7143	0.0
4	$F_{1,4} = 17.8571$	26.4286	0.0
5	$F_{4,5} = 20.0$	20.0	40.0
6	$F_{7,6} = 4.16667, F_{10,6} = 8.33333$	0	12.5
7	$F_{3,7} = 4.02857, F_{10,6} = 1.29524$	0	1.15714
8	0.0	0	0.0
9	$F_{2,9} = 32.0, F_{4,9} = 11.20$	36.80	78.7048
10	$F_{3,10} = 18.8286, F_{4,10} = 13.0857$ $F_{8,10} = 10.0$	0	33.57
总新鲜水最小流量/ $t \cdot h^{-1}$		165.9424	

得到的最优水网络系统结构如图4所示。经过删除后的联接由40个下降为36个,其中:过程—过程联接12个;水流—过程或过程—废水处理24个。

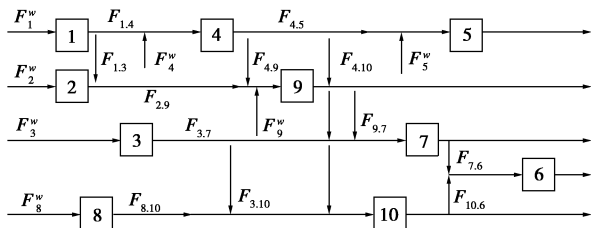


图4 10过程网络优化问题的解(LP模型)

#### 4 过程系统集成方法在石油化工企业的应用

为了最大限度地使一个石油化工企业节水减排,通常实施水平衡测试—水网络系统集成优化—污水深度处理回用三步骤,而其中的水网络系统集成优化(水夹点技术应用)又包括以下几个步骤:

(1)选定参与计算的“水源”与“水阱”,也就是选定有潜力参与匹配集成的所有装置和相关流股。因为我们需要将问题尽量简化,只应寻找可能回用的水源和可能接受回用水的水阱,作为我们研究的对象。

(2)确定系统中所有限制污水回用的杂质。这就要与现场技术人员研究水质的控制指标应当抓住哪几个,例如对于炼油厂是:含油量、氨氮、浊度、COD、氯化物等。

(3)对所有二次水源进行水质分析,填写二次水源水质表。

(4)确定每个水阱进水中各杂质的极限浓度。这是关键的步骤,因为这种技术就贯彻着“极限挑战”的精神,每个水阱所能接受污水污浊的最大限度决定了节水最大可能的量。所以“极限浓度”的确定就是节水潜力确定的关键,必要时可以做一些试验,或查看历史上的最大限度。

(5)计算机上求解模型。

(6)得到初步回用方案。这是计算机自动搜索到的最优解,但这种水网络的匹配方式是否完全恰当,还必须考虑现场的其他多方面因素,所以只是一个初步方案。

(7)对初步方案进行修正。例如,在初步方案的确定过程中存在一个假设:二次水源的水可以代替等量的一次水源的水,即水阱部分或全部采用二次水源的水时用水量不变。在工程实际中某些用水单元进水水质下降可能会导致需水量增加,如洗涤等过程,这样就需要增大一些水阱的进水量。

在“水网络系统集成优化”这一步骤中,除了找寻回用机会外,还要进行冷凝水回收系统及循环冷却水系统的优化(提高浓缩倍数),这就要涉及一些专门技术,需要与专有技术厂商的合作。

近几年来我们将上述方法在一系列石化企业中应用,取得了良好的效果,如表3所示,如果不包括

表3 圣金桥信息技术公司节水减排的项目业绩

项目名称	年代	节水	经济	备注
		量 <sup>①</sup> / 万 $t \cdot a^{-1}$	效益 <sup>②</sup> / 万元 $\cdot a^{-1}$	
大庆石化公司 (化工版块的 8个分厂)	2003	462	5704.0	节水潜力约占总消耗量的14.8%
大港石化公司	2004	28	153.4	新鲜水降低14.0%以上
大庆石化炼油厂	2006	286	2561.8	节水潜力约占总消耗量的33.5%
玉门炼油厂	2007	243	1121.3	节水63%(包括污水深度处理回用)
辽河石化公司	2007	66.88	1298.4	节水30.5%(没有污水回用)
吉林石化公司	2007— 2008	2300 (预计)		正在进行中
兰州石化公司	2007— 2008	1200 (预计)		正在进行中

注:①、②是实施建议的技术措施实施后预计的节水量及经济效益。

烟气制酸工艺和设备较为先进和可靠,大型有色冶炼烟气制酸装置尾气较容易达标排放。为满足更加严格的环保要求,一些新建的冶炼烟气制酸装置开始采用含铈催化剂,以提高二氧化硫转化率;同时,一些采用两转两吸的装置开始增设尾气吸收装置,进一步降低尾气二氧化硫含量,尾气 SO<sub>2</sub> 质量浓度甚至低于 300 mg/m<sup>3</sup>。但一些有色金属冶炼副产的二氧化硫烟气,由于浓度低、气量波动大,不能采用常规制酸工艺,超标排放。

### 1.1.2 酸性废水

以硫铁矿和冶炼烟气为原料进行硫酸生产时,炉气含有大量固态及气态有害杂质,必须采用干法和湿法捕集设备来进行净化处理。湿法净化过程会产生一定量的酸性废水,需要外排。目前,绝大部分硫铁矿和冶炼烟气制酸企业采用了稀酸循环洗涤净化工艺,从而大大减少了新鲜水用量,同时也降低了废水排放量;但依然存在一些中小型硫酸装置采用直排水洗净化工艺,生产 1 t 硫酸产生 10~15 t 酸性废水。酸性废水中除了含有硫酸、亚硫酸、矿尘外,还含有砷、氟、铅、锌、铜、汞、镉等有害杂质,容易造成环境污染,因此必须处理达标后才能排放。在酸性废水处理方面,我国硫酸工作者已做了大量工作,酸性废水可直接送至附近磷肥装置用作配酸;也可采用石灰法、石灰-铁盐法和硫化法等工艺处理酸

性废水,处理后的废水达标外排。

### 1.1.3 废渣

硫铁矿制酸的主要固体废弃物有硫铁矿烧渣和中和渣(主要为石膏),冶炼烟气制酸固体废弃物主要有铜滤饼、铅滤饼、砷滤饼和中和渣等。硫铁矿烧渣颗粒细小且带酸性,在堆存运输过程中易形成粉尘外泄,影响工厂卫生条件和周围环境。目前,硫铁矿制酸生产中完善了矿渣的运输机械,推广使用了增湿输送的干法排渣工艺,主要有刮板输送机—冷却滚筒(增湿)—带式输送机流程和冷却滚筒加冷却滚筒(增湿)—带式输送机流程,减少了粉尘外泄,使得现场环境总体得到较大改观。硫铁矿烧渣主要用作水泥添加剂,部分含硫较高硫铁矿制酸的烧渣用作炼铁原料。冶炼烟气制酸生产中的铜滤饼、铅滤饼、砷滤饼一般经铸渣后送选矿厂回收其中有价金属和砷,大型冶炼烟气制酸企业有价金属和砷回收率较高,基本没有二次污染问题。目前国内仅有少数硫酸企业将中和渣制成建筑材料,大部分企业都采用堆存处理,存在二次污染的问题。

## 1.2 能量消耗及废热回收

### 1.2.1 能量消耗

硫酸生产存在一定的消耗,如电(原料破碎及输送设备如鼓风机、泵消耗)、蒸汽(固体硫磺熔融消耗)和各种辅助燃料等。据中国硫酸工业协会统计,

(上接第 11 页)

污水深度处理回用,节水潜力可以达到 14%~30%。这与英国的 Linnhoff March 公司宣称的结果一致:根据他们做过的 30 多例项目的经验,用这种方法,对炼油厂可有 10%~30% 的节水潜力,对于精细化工厂节水潜力可能高达 60%<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

在水已成为国家战略资源的今天,作为耗水量大的石油和化工行业将节水减排提上紧迫的议事日程责无旁贷。而节水工作进展到现阶段,单纯依靠管理经验已经不能满足需要,必须用过程系统工程的方法,考虑整个企业水网络系统的全面优化。

根据我们的经验,在炼油化工企业采用这种过程系统工程方法制订节水减排的优化方案,至少可以节水 10%~30%,有些企业可能更多。所以,这种先进的方法值得在所有过程工业行业(包括化工、冶金、制药、电力、造纸、饮料、核工业等)中大力提倡

和推广应用。

## 参考文献

- [1] 杨友麒. 节水减排是化工炼油企业的头等大事[J]. 中国化工信息, 2006, 38A: A4-A5.
- [2] 杨友麒. 从管理节水走向系统节水[J]. 现代化工, 2005, 25(12): 6-10.
- [3] El-Halwage M M, Manousiouthakis V. Synthesis of mass: Exchange networks[J]. AIChE Jour, 1989, 35(8): 1233-1244.
- [4] Wang Y, Smith R. Waste Water minimization[J]. Chem Eng Science, 1994, 49(7): 981-1006.
- [5] El-Halwagi. Pollution prevention through process integration: Systematic design tools[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [6] Mann J G, Liu Y A. Industrial water reuse and wastewater minimization [M]. 姚平径, 杨友麒, 等译. 北京: 中国石化出版社, 2001.
- [7] Bagajewicz M. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants[J]. Computers & Chem, Engng, 2000, 24: 2093-2113.
- [8] Spear M. Site Integration Move Beyond Pinch[J]. Process Engineering, 2000(11): 24-25. ■