ICS 点击此处添加 ICS 号
点击此处添加中国标准文献分类号

中 华 人 民 共 和 国 国 家 标 准

GB/T XXXXX—2011

工业水系统集成优化导则

Guideline for industrial water system integration

（征求意见稿）

200x-XX-XX 发布　　200x-XX-XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中 国 国 家 标 准 化 管 理 委 员 会　发布

前　　言

本标准依据 GB/T 1.1－2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》起草。

本标准由全国工业节水标准化技术委员会（SAC/TC442）提出并归口。

本标准起草单位:……。

本标准主要起草人:……。

工业水系统集成优化导则

1 范围

本标准规定了工业水系统集成优化的术语和定义、基本原则、程序和方法。

本标准适用于过程工业水系统集成优化的设计及改造。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7119 节水型企业评价导则

GB/T 12452 企业水平衡测试通则

GB/T 19923 城市污水再生利用 工业用水水质

GB/T 21534 工业用水节水 术语

CJ40 工业用水分类及定义

HG/T3923 循环冷却水用再生水水质标准

SL 368 再生水水质标准

3 术语和定义

GB/T 21534和CJ40涉及的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水系统集成优化 water system integrated optimization

从系统工程的角度出发，将整个用水系统作为一个有机的整体进行综合考虑，对废水直接回用、再生回用和再生循环的所有可能的途径进行综合考察，采用过程系统集成的原理和技术合理分配用水，提高水资源的重复利用率，使用水系统的新鲜水消耗和废水排放同时达到最小的方法。

3.2

新鲜水 freshwater

企业内用水单元或系统取自任何水源被该企业第一次利用的水。（编制说明中可以解释来源）

3.3

工业废水 wastewater

生产过程中使用过，在质量上已不符合生产工艺要求，对该过程无进一步利用价值的水。

3.4

废水直接回用 wastewater direct reuse

从某个用水单元出来的废水直接用于其他用水单元而不影响其操作，又称为水的优化分配。

3.5

废水再生回用 wastewater regeneration reuse

从某个用水单元出来的废水经处理后用于其他用水单元。

3.6

废水再生循环 wastewater regeneration recycle

从某个用水单元出来的废水经处理后回到原单元再用。

3.7

用水单元 water-using unit

需要水或产生废水的化学、生物或物理装置。

3.8

水阱 water sink

需要水的用水单元。

3.9

水源 water source

可以供用水单元使用的水流。

3.10

极限浓度 limiting concentration

用水单元进、出口允许的杂质最高浓度。

3.11

极限水流量 limiting flowrate

在给定的极限进出口浓度下，为去除本单元一定质量负荷的杂质所需的水流量。

3.12

水夹点技术 water-pinch technology

是质量交换集成技术在用水操作上的应用，其通过构造浓度组合曲线确定水夹点，并对用水系统进行分析、综合和改造的技术。

3.13

数学规划法 mathematical programming approaches

基于对用水系统所建立的超结构模型，通过模型求解对用水系统进行集成优化的方法。

3.14

浓度组合曲线 Concentration-composite curve

所有用水操作的杂质浓度-累积质量负荷表示的一种图示，用以确定新鲜水目标。

3.15

超结构模型 superstructure model

从所有可能的用水网络的结构或流程开始的非线性规划模型。

4 基本原则

4.1 目的性原则

以工业水系统整体为优化对象，以降低水资源消耗和废水排放、提高用水效率和效益为目标，实现系统总体的用水最优。

4.2 合理性原则

应与企业总体生产发展规划、生产工艺合理配套，采用技术成熟、处理效率高、安全可靠的技术及工艺，确保企业用水安全。

4.3 可行性原则

应易于实施、操作及管理，方案设计所需的各项技术指标应易于获取。

4.4 经济性原则

应与企业实际情况结合，在满足技术目标的基础上充分考虑经济性指标。

5 程序和方法

5.1 工业水系统集成优化分为五个步骤：水系统现状调查、水系统优化对象及其极限数据的确定、最小新鲜水流量的确定、水系统集成优化方案设计与分析、水系统集成优化方案实施及效果评估。具体步骤见图 1。

5.2 水系统现状调查

5.2.1 确定优化范围

企业应根据需求确定水系统集成优化范围。

5.2.2 调查水源水阱

调查优化范围内的水源水阱，调查表格式参见附录 A，调查内容应包括：

a) 水源、水阱所在车间；
b) 水源、水阱所在工艺单元；
c) 水源流量；
d) 水阱用水流量；
e) 水阱当前用水来源。

注：水源流量是指该用水单元实际可提供的水量，而非该用水单元的总流量；水阱用水流量是指该用水单元除去目

前已经回用的废水流量后仍需要补充的新鲜水流量。

5.2.3 绘制用水网络现状图

5.2.3.1 用水网络现状图是对企业用水网络现状的直观描述，应明确：

a) 新鲜水流量和来源；
b) 各水阱分配到的新鲜水流量；
c) 各水源流量和流向。

5.2.3.2 根据水源水阱调查数据，绘制用水网络现状图，样式参见附录 B。

5.3 水系统优化对象及其极限数据的确定

5.3.1 确定优化对象

企业应根据现场调查数据及专家咨询，确定待优化的用水单元。

5.3.2 确定约束条件

5.3.2.1 约束条件应包括主要杂质种类、浓度、用水单元水流量等指标。

5.3.2.2 确定约束条件时应考虑：

a) 优化对象水质特点及工艺需求；
b) 经济性及可操作性；
c) GB/T 19923、HG/T3923、SL 368 中相关水质标准；
d) 其他可能限制水回用的因素。

注1：采用水夹点法设计水系统集成优化方案只涉及主要杂质和流量 2 类约束条件；采用数学规划法在必须确定主要杂质及流量 2 类约束条件基础上，可以选择经济指标、用水网络复杂程度等其他指标作为约束条件。

注2：在确定主要杂质时，企业可以选取对优化对象影响较大的一种或几种杂质作为约束条件，而在初始网络(见 5.4 节)生成后，将其他杂质作为约束再进行考虑。

注3：约束条件个数不宜过多，以免会增加水系统集成优化方案求解难度。

5.3.2.3 通过测量、可靠的历史数据统计分析或其他方法得到约束条件的数据。

5.3.3 确定极限数据

5.3.3.1 根据约束条件数据确定用水单元的极限水流量以及主要杂质的极限浓度,数据表格参见附录 C。

注：对已知明确禁止引入某种杂质的单元，应将杂质极限进口浓度设为零；对排水含有不可被其他单元再利用的杂质的用水单元，应将极限出口浓度设为极大值。

5.3.3.2 确定极限数据应考虑:

a) GB/T 19923、HG/T3923、SL 368 中相关水质标准；
b) 传质推动力；
c) 最大溶解度；
d) 避免杂质析出；
e) 避免装置结垢及堵塞；
f) 避免固体物料沉降的最小流率。

5.4 最小新鲜水流量的确定

根据废水直接回用、再生回用或再生循环等途径，可采用水夹点法或数学规划法确定用水系统的最小新鲜水流量，方法参见附录D和附录E。单杂质水系统宜采用水夹点法，多杂质或复杂水系统宜采用数学规划法。

5.5 水系统集成优化方案设计与分析

5.5.1 水系统集成优化方案初步设计

企业应根据最小新鲜水流量，设计用水网络，形成水系统集成优化方案，设计用水网络时应遵循：

a) 以能够实现杂质从用水操作到水流的传递过程为基本原则；
b) 以用水单元极限数据为约束。

5.5.2 水系统集成优化方案优化

企业应对优化对象进行除约束条件以外的其他限制水回用的杂质进行分析，确定5.5.1中设计的用水网络是否满足各项水质限制因素，并通过操作经验、工程诀窍对用水网络进行优化。

5.5.3 水系统集成优化方案经济性分析

企业应明确需要改进以适应水质的工艺及设施，计算改造成本、水回用效益、投资回收期等经济指标，分析水系统集成优化方案的经济性。

5.6 水系统集成优化方案实施及效果评估

5.6.1 根据水系统集成优化方案，进行工程设计及建设。

5.6.2 企业应从经济、管理、用水评价指标等方面综合评价水系统集成优化实施效果。

5.6.3 企业应依据 GB/T 7119 计算本企业内各种用水评价指标，包括单位产品取水量、重复利用率、废水回用率、冷却水循环率、冷凝水回用率、达标排放率等。

5.6.4 企业应根据水系统集成优化结果，总结经验，持续挖掘企业内节水潜力。

a) 完善相关管理制度，加强管理；
b) 分析测算相关节水改造项目的节水效益及成本；
c) 与同类企业的水平进行比对或对标自检，持续挖掘企业内节水潜力。

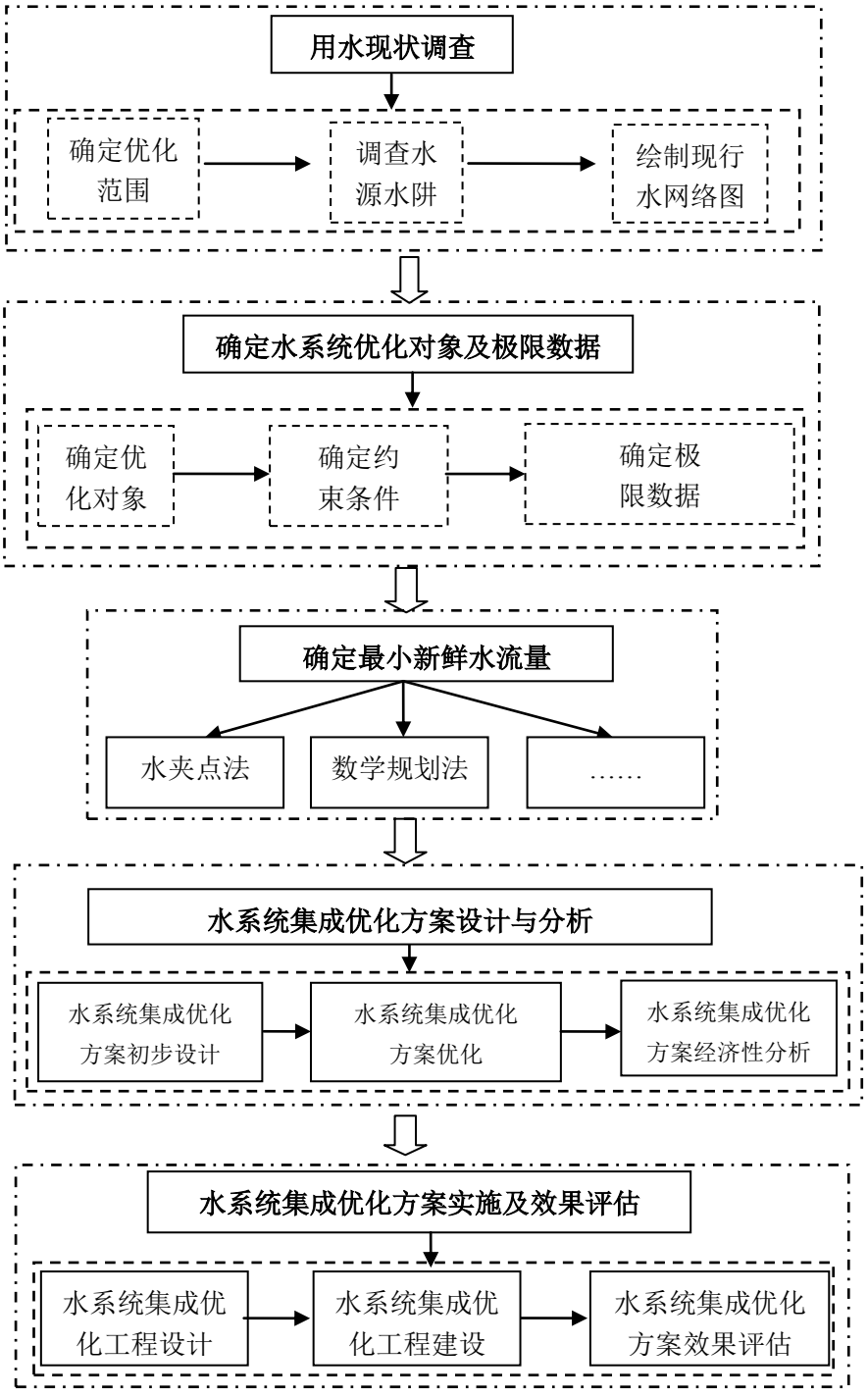


图1　工业水系统集成优化程序框图

附 录 A
（资料性附录）
水源水阱调查表

图A.1 水源调查表

编号	所在车间	用水工序	流量/(t/d)

图A.2 水阱调查表

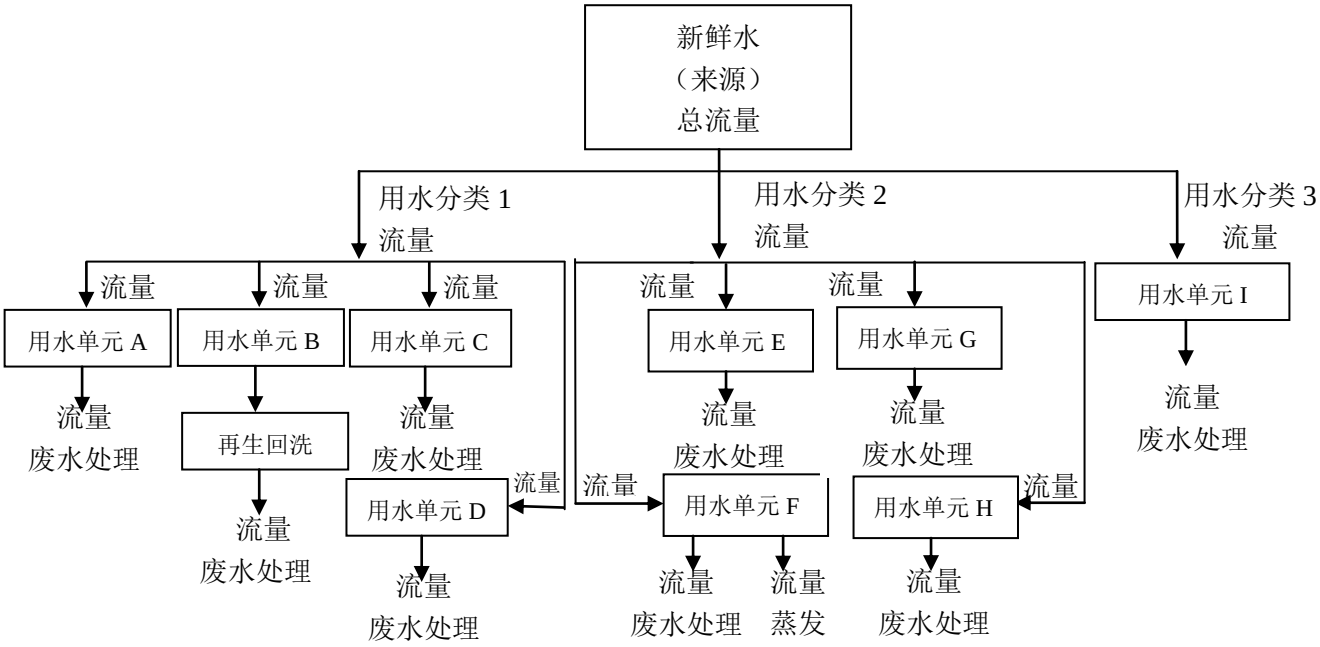
编号	所在车间	用水工序	流量/(t/d)	目前用水

注：可根据企业情况适当增加调查项目

附　录　B
（资料性附录）
用水网络现状图

用水网络现状图是对企业用水网络现状的直观描述，其建立在对企业水源、水阱的充分调查基础上。在用水网络现状图中，需要明确新鲜水水源、总流量、各用水单元新鲜水分配情况以及出水流向。

绘制用水网络现状图时，企业可以根据GB/T 12452对企业用水进行分类，也可根据企业操作需要选择其它分类方式。



图B.1　用水网络现状图简图

附 录 C
（资料性附录）
用水单元极限数据

表C.1 企业用水单元极限数据

编号	所在车间	用水单元	杂质组分	极限浓度		极限水流量	
				进口（mg/L）	出口（mg/L）	入口（t/d）	出口（t/d）

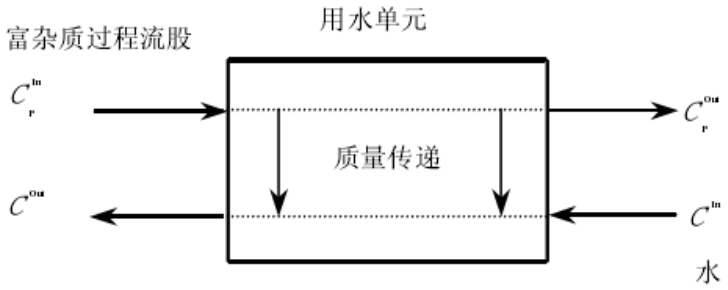
附 录 D
（资料性附录）
水夹点法

水夹点法是质量交换的集成，涉及将杂质从用水操作单元传递到水流中。具体地说，就是通过负荷-浓度图或者流量-浓度图找到夹点位置，确定系统的最小新鲜水流量，然后再构造满足要求的基本用水网络并调优，实现减小最小新鲜水流量。

水夹点法优点在于其形象、直观、物理意义明确，除了能够确定最小新鲜水流量目标并建立相应用水网络外，还为创造进一步新鲜水节约和废水量最小化提供了指导。但由于二维图形的限制，使其在解决多杂质水系统集成问题上存在困难，并且无法解决与水质、水量无关的目标或约束。

D.1.1 水夹点分析

典型的用水单元如图D.1所示。在该单元中，物料与水直接接触，物料中的杂质在传质推动力的作用下进入水中，产生一定浓度的废水。



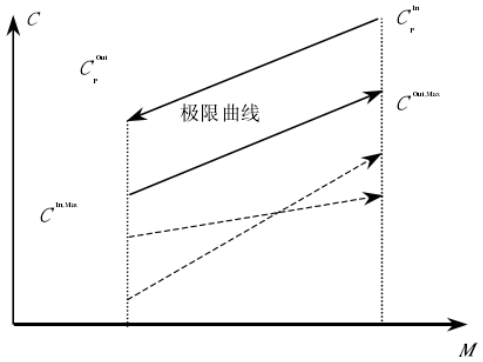
图D.1 用水单元流程示意图

物料传递过程的质量平衡关系可由式(1)描述：

$$C^{Out} = \frac{M}{F} + C^{In} \qquad (1)$$

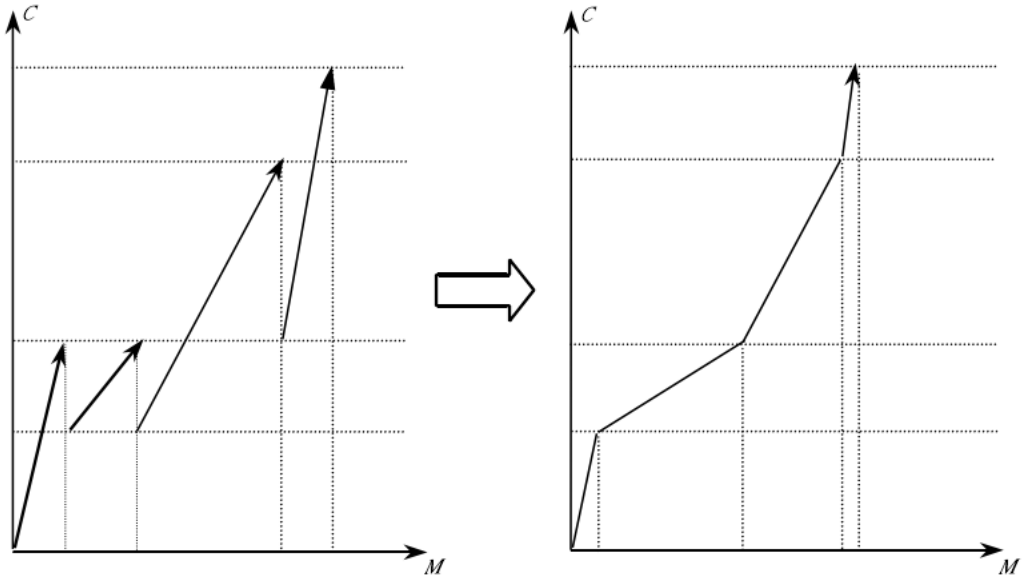
式中，F为水的流率，t/h；M为杂质负荷，g/h；C_{In}为水的进口杂质浓度，mg/L；C_{Out}为水的出口杂质浓度，mg/L。

这个过程也可以用图D.2所示的浓度-负荷图来表示。横坐标M代表污染物负荷，纵坐标C代表污染物浓度。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。为了确定从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允许进口浓度($C^{In,Max}$)，称为极限进口浓度；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($C^{Out,Max}$)，称为极限出口浓度。这样就得到了该单元用水的极限曲线(图D.2中物料线下的实线)。可以看出，位于极限曲线下方的供水线均可满足要求。



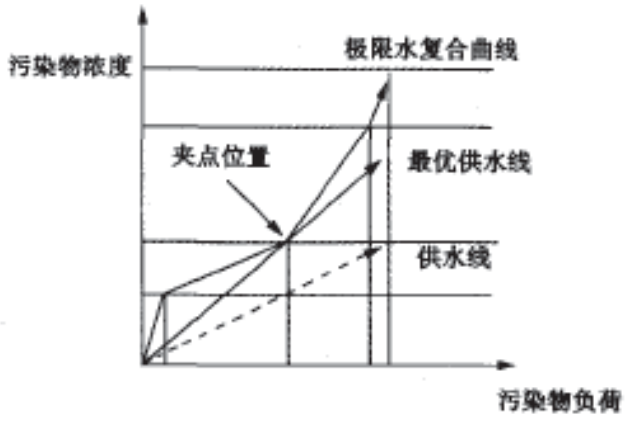
图D.2　负荷-浓度图

从整体上来考虑整个系统的用水情况以达到用水网络的全局最优化，需要将所有用水单元的极限曲线复合起来进行分析。图D.3给出了如何将4个用水单元的极限曲线复合为极限复合曲线的方法。



图D.3　构造极限复合曲线

位于极限复合曲线下方的供水线均可满足系统的用水要求。假定新鲜水供水线入口浓度为0，要使新鲜水用量达到最小，应该尽可能增大其出口浓度，即增大供水线的斜率。当供水线的斜率增大到在某点与极限复合曲线相碰时，传质推动力达到最小，出口浓度达到最大，新鲜水用量达到最小。这个相碰点就是所谓的“水夹点”，如图D.4所示。水夹点对于用水网络的设计具有重要的指导意义。**水夹点上方用水单元的极限进口浓度高于夹点浓度，不应使用新鲜水；水夹点下方用水单元的极限出口浓度低于夹点浓度，不应排放废水。**



图D.4　水夹点及最小供水线

D.1.2　水夹点设计

利用水夹点技术确定了系统的最小新鲜水目标值，可以进一步在此基础上设计达到该目标值的水网络。设计的方法主要有两种：最大传质推动力法与最小匹配数法。最大传质推动力法充分利用极限复合曲线与供水线之间的浓度差，在最终的设计中使传质推动力达到最大。而最小匹配数法则通过旁流和混合使各单元与水的匹配数达到最少。按照上述方法得到的水网络中存在回路时，需要进一步打破回路以简化网络。

以上关于夹点技术法的描述都是针对直接回用的情况，若想进一步减少新鲜水用量，还可以采用再生回用或再生循环，分析的步骤也可以在夹点图上进行。

附 录 E
（资料性附录）
数学规划法

E.1.1 新鲜水用量最小化模型

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.

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

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

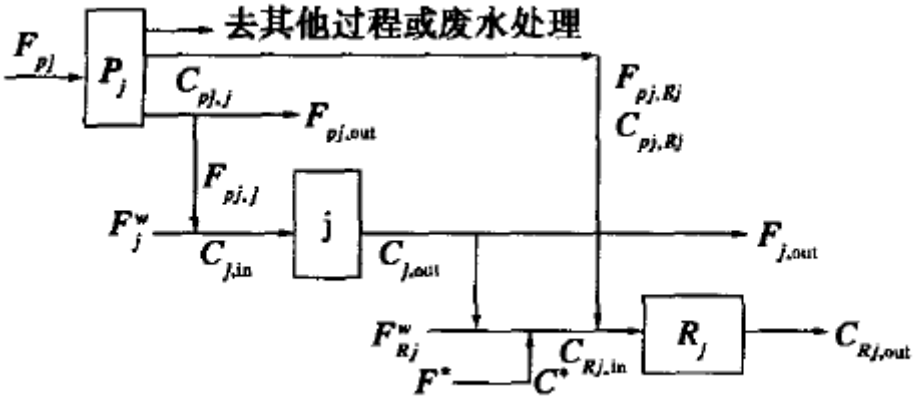
$$\sum_i F_{i,j}(C_{i,\text{out}} - C_{j,\text{in}}) - F_j^w C_{j,\text{in}} = 0 \quad \forall j \in \bar{H}, i \in P_j$$

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

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

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

其中，C_{out} 为i过程出口浓度；C_{out}^{lin}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。这种流程与上下游关系可参照图E.5所示。



图E.1 超结构水网络：一个过程的上游供水量及下游接受器网络关系

E.1.2 优化配置的必要条件

水优化配置的解的必要条件有二：

条件1：出口浓度达到最大：如果水配置达到最优化解，则所有使用新鲜水的用水单元，其出口浓度一定达到其可能的最大值。

总新鲜水用量相同，但出口浓度低于最大值的退化解也有可能存在。但因其通过某些过程的流量必然大一些，所以这些解并不可取。

条件2：浓度单调性：如果一个水配置问题达到最优解，则对每一个过程j而言，其出口浓度一定不小于所有来自其有关上游供水器的废水联合到一起的总浓度。换句话说，以下式子成立：

$$C_{j,\,out} \geqslant C_{pj,\,j}$$

E.1.3 新鲜水用量最小化的LP模型

如果使用出口浓度最大的优化必要条件，则可以把上述非线性规划问题简化成线性规划LP问题。

$$\left.\begin{array}{l} \Sigma F_{i,j}\,(C^{lim}_{i,out} - C_{j,in}) - F^{w}_{j} C_{j,in} = 0 \\ C_{j,in} \leqslant C^{lim}_{j,in} \end{array}\right\} \Longrightarrow$$

$$\Sigma F_{i,j}\,(C^{lim}_{i,out} - C^{lim}_{j,out}) - F^{w}_{j} C_{j,in}^{lim} \leqslant 0 \qquad \forall j \in H,\ j \in P_j^{-}$$

于是NLP问题转变成LP问题。

$$\min \Sigma F_j^{w}$$

s.t.

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

$$F_h^{w} - \frac{L_h}{C^{lim}_{h,out}} = 0 \qquad \forall h \in H^{-}$$

$$\Sigma F_{i,j}\,(C^{lim}_{i,out} - C^{lim}_{j,in}) - F_j^{w} C^{lim}_{j,in} \leqslant 0 \qquad \forall j \in H,\ i \in P_j^{-}$$

I

$$\Sigma F_{i,j}\,(C^{lim}_{i,out} - C^{lim}_{j,out}) - F_j^{w} C^{lim}_{out} + L_j = 0 \qquad \forall j \in H,\ i \in P_j^{-}$$

I