

灵敏度与柔性分析在水网络研究中的应用

王洪卫 都 健 宋丽丽 樊希山 姚平经

(大连理工大学化工系统工程研究所, 辽宁 大连 116012)

摘要:通过计算现有水网络的柔性指数来判断水网络是否满足柔性要求,当柔性指数 < 1 时,需要对水网络的设计向量参数进行调整,利用灵敏度分析法确定最佳调节设计向量的选择原则,找出最佳调节设计向量,使所需增加的新鲜水量最小,并示一例加以说明。

关键词:水网络;灵敏度;柔性分析

中图分类号:TQ021.8

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0154-03

Application of sensitivity and flexibility analysis in water network

WANG Hong-wei, DU Jian, SONG Li-li, FAN Xi-shan, YAO Ping-jing

(Institute of Process Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: It can be known that whether the water network is met with flexibility by calculating the flexibility index of current water network. The design parameters need to be improved when the flexibility index < 1 . The principle of selecting prime modulation design vectors was presented according to sensitivity analysis theory. The prime modulation design vectors can be founded, and an example was illustrated.

Key words: water network; sensitivity; flexibility analysis

水网络是过程系统的一个子系统,在实际运行过程中,水网络中的一些参数常常受过程系统中其他因素的影响而偏离标准值,例如用水单元去除杂质受过程系统生产量的变化及生产过程的波动偏离其标准值而发生波动,当其变化范围超过水网络所能承受的范围时,水网络就不能正常运行,必然影响到过程系统的正常运行,因此需要对此水网络的设计向量参数进行改进。

通过计算现有水网络的柔性指数(F)可以得出此水网络是否满足柔性要求。当柔性指数 $F < 1$ 时,需要对水网络的设计向量参数进行调整,但是如何才能进行有效的调整,即选择最佳的设计向量,使所需增加的新鲜水量最小是十分重要的。

1 灵敏度函数

1.1 系统的参数灵敏度

系统的参数灵敏度是系统的参数变化对系统动态性能的影响,也即参数变化对诸如系统的时间向量、状态向量、传递函数,或其他表征系统动态性能的影响。

1.2 灵敏度函数表达式

为了分析与计算系统灵敏度,用相对灵敏度函数计算灵敏度。

如果系统变量 y 与参数 a 的关系为 $y = y(a)$, 则相对灵敏度的函数为:

$$S_a^y = \frac{d(\ln y)}{d(\ln a)} = \frac{dy/y}{da/a} \Big|_{\alpha_0} \quad (1)$$

相对灵敏度便于进行参数变异效应的比较,十分实用。通过比较灵敏度的大小,可以得到参数变化对系统向量影响程度的大小。

2 柔性指数的数学模型

2.1 水网络超结构

水网络中每个用水单元通过进入的新鲜水流股和从其他用水单元回用的流股来满足工艺要求,任意 2 个用水单元之间都可能存在水的回用,其超结构见图 1。

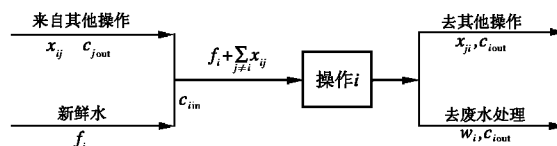


图 1 水网络超结构示意图

图 1 中, f_i 为 i 单元新鲜水量; c_{iout} 为 i 用水单元出水杂质浓度; x_{ij} 为 j 用水单元水回用到 i 用水单元的水量; x_{ji} 为 i 用水单元水回用到 j 用水单元的水量; w_i 为 i 用水单元去废水处理量。

2.2 水网络柔性指数的数学模型

根据以上超结构模型,各用水单元质量平衡,总质量平衡及用水单元出口浓度限制,水网络柔性指数的数学模型如下:

$$F = \max \delta_k, \quad k = 1, 2, \dots, 2^i \quad (2)$$

s. t.

①用水操作单元 i 杂质质量衡算

$$c_{iout} \left[\sum_{j \neq i} x_{ij} + f_i \right] = \sum_{j \neq i} x_{ij} c_{jout} + \Delta m_i * 1000 \quad (3)$$

②用水操作单元 i 杂质出口浓度限制

$$c_{iout} \leq c_{iout}^{max} \quad (4)$$

③用水操作单元 i 水质量衡算

$$f_i + \sum_{j \neq i} x_{ij} - w_i - \sum_{j \neq i} x_{ji} = 0 \quad (5)$$

④过程约束

$$\Delta m_i^N - \delta_k \Delta m_i^- \leq \Delta m_i \leq \Delta m_i^N + \delta_k \Delta m_i^+ \quad (6)$$

$$f_i, w_i \geq 0 \quad x_{ij} \geq 0$$

此模型就是要定量地求出水网络所能承受的确定参数 Δm_i 的最大变化范围。

3 设计向量选择原则与步骤

3.1 选择原则

水网络中的各用水单元新鲜水量及各用水单元间回用水量称为设计变量;受过程系统中其他因素影响而发生波动的向量为不确定向量;需要控制的向量如用水单元出水杂质浓度称为控制向量。最主要的问题是如何寻找到所需调整的最佳设计变量,在此,利用灵敏度^[1]分析的方法,总结出如下最佳调节设计变量的选择原则:

(1)控制向量对设计变量反应灵敏,即控制向量对设计向量的灵敏度要尽可能的大,这意味着设计变量的较小变化可以导致控制向量较大的变化。

(2)不确定向量的变化会引起控制向量的变化,这就需要通过调整所选择的设计向量来调节控制向

量的变化,使控制向量不超过其控制范围。

(3)原水网络水量分配是最佳的,当操作条件即不确定向量变化时,需要对现有水网络的一些设计向量进行改进,而且在改进过程中对它作最小的改变就使水网络适应不确定向量变化范围,那么改变一定是最小的,因此这种改进就是最优的。

(4)目标函数

$$OBJ = \sum_{i=0}^n [f_i * y_i] \rightarrow \min$$

约束条件:

①用水操作单元 i 杂质质量衡算

$$c_{iout} = \left[\sum_{j \neq i} x_{ij} - f_i \right] = \sum_{j \neq i} x_{ij} c_{jout} + \Delta m_i \quad (7)$$

②用水操作单元 i 杂质出口浓度限制

$$c_{iout} \leq c_{iout}^{max} \quad (8)$$

③用水操作单元 i 水质量衡算

$$f_i + \sum_{j \neq i} x_{ij} - w_i - \sum_{j \neq i} x_{ji} = 0 \quad (9)$$

3.2 具体步骤

(1)首先确定控制向量、不确定向量和设计向量;

(2)计算控制向量对不确定向量的影响,即灵敏度分析,由灵敏度是否等于零可以确定不确定向量可以引起哪些控制向量发生变化;

(3)计算由第(2)步确定的控制向量对设计向量的灵敏度,根据灵敏度的大小确定最佳调整设计向量;

(4)按控制向量对设计向量的灵敏度大小顺序依次调整设计向量(根据约束方程),直至达到柔性要求。

4 示例

下面通过例子来说明,假定某一用水网络结构如图2所示。

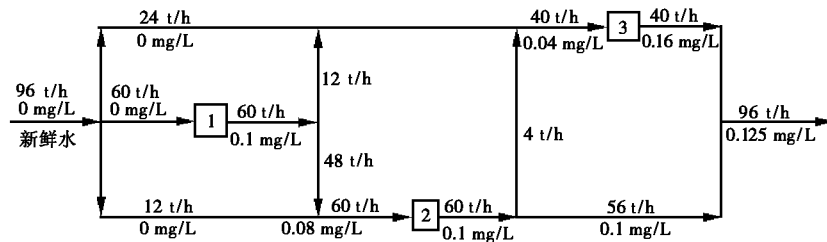


图2 水网络结构

该水网络共有3个用水单元,各单元间排放废水可以回用,无再生情况,各单元约束条件见表1,不确定参数为1、2单元去除杂质质量,它们之间是相

互独立的。

计算此水网络的柔性指数^[2] $F = 0.476$,不满足柔性要求,需要对此水网络进行改进,调整设计向

量,使之满足柔性要求。根据以上步骤,设计向量调整如下:

(1) 不确定向量为 Δm_1 、 Δm_2 ; 控制向量为 $c_{1,out}$ 、 $c_{2,out}$ 、 $c_{3,out}$; 设计向量为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 $x_{i,j}$ ($i \neq j$; $i, j = 1, 2, 3$)。

表 1 各用水单元约束条件

操作 i	出口最大质量 浓度 $c_{i,out}^{lim}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最大流量 $f_i^{lim}/$ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	去除杂质质量 $\Delta m_i/$ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
1	0.01	65	(4~5.5~6.5)
2	0.01	65	(0.9~1.1~1.35)
3	0.016	40	4.8

(2) 计算控制向量对不确定向量的灵敏度及灵敏度系数^[1]。由约束条件表达式,根据灵敏度函数表达式计算出控制向量对不确定向量的灵敏度及灵敏度系数,见表 2。

表 2 控制向量对不确定向量的灵敏度系数及灵敏度

	灵敏度系数			灵敏度		
	$c_{1,out}$	$c_{2,out}$	$c_{3,out}$	$c_{1,out}$	$c_{2,out}$	$c_{3,out}$
Δm_1	0.01667	0.01333	0.00633	1	0.8	0.15667
Δm_2	0	0.01667	0.01667	0	0.2	0.01170

(3) 计算控制向量对设计向量的灵敏度及灵敏度系数^[1]。由约束条件表达式,根据灵敏度函数表

达式计算出控制向量对设计向量的灵敏度及灵敏度系数,见表 3。

表 3 控制向量对设计向量的灵敏度系数及灵敏度

	灵敏度系数			灵敏度		
	$c_{1,out}$	$c_{2,out}$	$c_{3,out}$	$c_{1,out}$	$c_{2,out}$	$c_{3,out}$
f_1	-0.00153	-0.00122	-0.00058	-1	-0.8	-0.22170
f_2	0	-0.00153	-0.00015	0	-0.2	-0.01147
f_3	0	0	-0.00392	0	0	-0.6
$x_{2,1}$	0	0	0	0	0	0
$x_{3,1}$	0	0	-0.00163	0	0	-0.12461
$x_{3,2}$	0	0	-0.00163	0	0	-0.04154

(4) 按控制向量对设计向量的灵敏度大小顺序依次调整设计向量。由表 3 可以看出,对于每一个控制向量灵敏度大小分别为:对 $c_{1,out}$ (-1) 调整 f_1 ; 对 $c_{2,out}$ (-0.8、-0.2) 调整设计向量次序为 f_1, f_2 ; 对 $c_{3,out}$ (-0.6、-0.22170) 调节设计向量次序为 f_3, f_1 。

根据水网络数学模型^[3],令 $c_{1,out} = 0.01 \text{ mg/L}$, 调整设计向量 $f_1, f_1 = 65 \text{ t/h}$ 时, $c_{1,out} = 0.01 \text{ mg/L}$, 但 $c_{2,out}$ 、 $c_{3,out}$ 不在控制范围内。令 $c_{2,out} = 0.01 \text{ mg/L}$, 再调整 f_1 , 超出约束条件 ($f_1^{lim} < 65 \text{ t/h}$), 调整 $f_2 = 13.5 \text{ t/h}$, $c_{2,out}, c_{3,out}$ 都在控制范围, 满足约束条件。最后得到的满足柔性的水网络结构如图 3 所示。

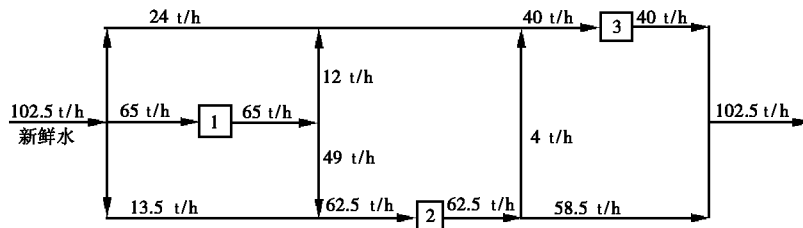


图 3 满足柔性的水网络结构

参考文献

[1] 罗键. 系统灵敏度理论导论[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1990.

[2] Swaney R E, Grossmann I E. [J]. AIChE J, 1985, 31(4): 631 - 641.

[3] 刘裔安. 工业用水节约与废水减量[M]. 北京:中国石化出版社, 2002. ■

青岛大炼油工程可行性研究报告获得国家批准

青岛大炼油工程可行性研究报告日前获得国务院批准,未来几年中国石化将在青岛建成规模为 1 000 万 t/a 的炼油装置。