



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107194040 B

(45) 授权公告日 2020.12.18

(21) 申请号 201710288461.7

G06F 113/08 (2020.01)

(22) 申请日 2017.04.27

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 105592518 A, 2016.05.18

申请公布号 CN 107194040 A

CN 106231609 A, 2016.12.14

(43) 申请公布日 2017.09.22

CN 103020642 A, 2013.04.03

(73) 专利权人 西交利物浦大学

CN 102625324 A, 2012.08.01

地址 215123 江苏省苏州市工业园区独墅湖高等教育区仁爱路111号

US 2009228516 A1, 2009.09.10

(72) 发明人 岳勇 朱晓辉 张一新 王威

魏冠雄. 分布式水质监测预警网络监测点布局优化方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技I辑》.2015, (第12期), B027-636.

(74) 专利代理机构 苏州创元专利商标事务有限公司 32103

刘伟. 基于改进粒子群算法的污水处理氧化沟工艺优化控制研究与实现.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技I辑》.2016, (第6期), B027-543.

代理人 范晴 丁浩秋

审查员 张雪锋

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 111/06 (2020.01)

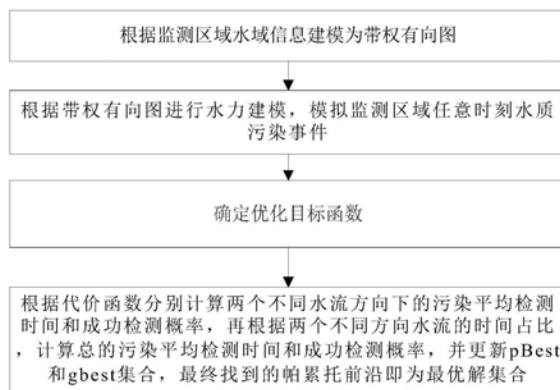
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,包括:将水域交叉点、关键点位置信息及水流流向组成有向图顶点集合,计算相邻顶点间距离,建模为带权有向图;根据带权有向图进行水力建模,模拟监测区域任意时刻水质污染事件,建立各监测水域段的水力参数;确定优化目标函数;根据多目标粒子群算法进行多目标优化,不断调整粒子移动速度和位置来寻求最优解根据代价函数分别计算两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率,再根据两个不同水流方向水流的时间占比,计算总的污染平均检测时间和成功检测概率,寻找帕累托前沿为最优解集合。可以实现对双向水流情况下水质监测系统的优化部署,可以根据不同的目标进行优化。



1. 一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,其特征在于,包括以下步骤:

S01: 获取监测区域中所有水域交叉点以及关键点位置信息,将水域交叉点、关键点位置信息及水流流向组成有向图顶点集合,计算相邻顶点间距离,建模为带权有向图;

S02: 根据带权有向图进行水力建模,将顶点作为相邻水域的连接点,代表候选监测点,边作为相邻连接点间的水域段,边的长度即为水域段长度;模拟监测区域任意时刻水质污染事件,建立各监测水域段的水力参数,获得所有监测点在不同时刻、不同地点发生污染事件时成功检测到污染事件的最短时间和污染物浓度;

S03: 设所有候选监测点集合 $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ ,  $M$ 为所有候选监测点数量,  $x_i$ 表示第 $i$ 个候选监测点;拟设立的监测点集合 $X_T = [x_1, x_2, \dots, x_T]$ ,  $T$ 为拟部署的监测点数量,  $\mathbf{X}_T \subset \mathbf{X}$ 且 $T < M$ ; 设某时刻只有一个污染事件,该事件可发生在任一候选监测点位置,则污染事件集合为 $E = [E_1, E_2, \dots, E_M]$ ;  $d_m^t(X_T)$ 表示在优化部署方案为 $X_T$ 时,第 $m$ 个污染事件中第 $t$ 个监测点检测到污染所需时间,则该污染事件中各监测点所需污染检测时间为 $d(X_T) = \{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\}$ , 污染事件所需最短检测时间为:

$$t_m(X_T) = \begin{cases} \min\{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\} \\ -1 \text{ (若该污染事件未被检测到)} \end{cases} \quad (1)$$

设 $r_m(X_T)$ 为第 $m$ 个污染事件是否被成功检测标志,则其值为:

$$r_m(X_T) = \begin{cases} 1, & \text{若 } t_m(X_T) \neq -1 \\ 0, & \text{若 } t_m(X_T) = -1 \end{cases} \quad (2)$$

该优化部署方案 $X_T$ 在所有污染事件中所需最少平均检测时间为:

$$\bar{t}(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M t_m(X_T), \quad \text{其中 } t_m(X_T) \neq -1 \quad (3)$$

该优化部署方案 $X_T$ 成功检测到污染事件概率为:

$$r(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_m(X_T) \quad (4)$$

平均检测时间最少、检测成功率最高的公式为:

$$F_1 = \text{Minimize}\{\bar{t}(X_T)\} \\ F_2 = \text{Maximize}\{r(X_T)\} \quad (5);$$

S04: 根据多目标粒子群算法进行多目标优化,通过不断调整粒子移动速度和位置来寻求最优解,粒子移动速度和位置变化公式如下:

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (pbest(i, t) - p_i(t)) + c_2 r_2 (gbest(t) - p_i(t)) \quad (6)$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) + V_i(t+1) \quad (7)$$

其中,  $\omega$ 为惯性系数,  $C_1$ 为粒子自身历史最优值权重系数,  $C_2$ 为全局最优值权重系数,  $r_1, r_2$ 为 $[0, 1]$ 区间随机数;  $pbest(i, t)$ 为第 $i$ 个粒子在 $t$ 时刻的最优值,  $gbest(t)$ 为所有粒子在 $t$ 时刻的最优值,  $p_i(t)$ 为第 $i$ 个粒子在 $t$ 时刻的当前值;

根据代价函数分别计算两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率,再根据两个不同水流方向水流的时间占比,计算总的污染平均检测时间和成功检测概率,将污染平均检测时间和成功检测概率组成一个向量作为代价函数返回值更新pBest和gbest集合,最终找到的帕累托前沿即为最优解集合。

2. 根据权利要求1所述的基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,其特征在于,所述关键点位置至少包括区域交界水质控制点、饮用水源地控制点、潜在点面污染源。

3. 根据权利要求1所述的基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,其特征在于,所述步骤S01中还包括细化带权有向图,在距离较长的顶点间插入额外顶点,并重新计算这些新的顶点间距离并更新带权有向图。

4. 根据权利要求1所述的基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,其特征在于,所述代价函数的处理包括以下步骤:

根据当前粒子信息分解粒子中蕴含的监测节点位置信息;

根据监测节点位置信息分别计算两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率。

## 基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种水下传感器网络的部署方法,具体地涉及一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法。

### 背景技术

[0002] 近20年来,受中国经济粗放式增长和人口增加等多种因素影响,水环境恶化趋势加剧、水污染事件频发,对经济发展和社会稳定构成严重威胁。松花江硝基苯泄露、太湖蓝藻、镇江货轮苯酚泄露等事件引起国内外广泛关注。对与人类生活密切相关的水环境进行监测可掌握水体污染物分布状况,探明各种污染物质,追溯污染物来源、途径、迁移转化和消长规律,预测水体污染变化趋势,为水环境质量评价和采取科学防治措施提供基础数据和决策依据。因此,水环境监测是水环境治理中不可缺少的一个重要环节。

[0003] 随着信息技术发展,由监控中心和若干监测子站组成的水环境自动监测系统可对监测区域进行24小时实时监测,得到广泛应用,先后在太湖流域、滇池流域、巢湖、洱海、松花江等重点区域建成了水环境监控和预警系统。这些系统在实时监测水环境变化、及时发现污染事件和污染治理评价等方面发挥了重要作用,但也暴露出建设和运维成本高(建设一个水环境自动监测站点需数百万元,每个站点每年的运维费用也需约10万元)、监测站点位置固定、监测区域有限等不足。因此,国内外开展了水环境监测网络优化部署研究,以降低系统建设成本并提高监测能力。研究人员引入多目标优化算法,把污染检测时间最少和检测可靠性最高作为两大优化目标,结合嵌套分区算法、记忆补偿函数、受约束的离散优化算法、遗传算法等多目标优化方法对水环境监测网络进行优化。多目标优化算法综合考虑多个优化目标,取得了较好的优化结果。但这些算法都以单向水流和河流为研究对象,因此无法很好地适用于具有双向水流情况下的水质监测系统的优化部署。

[0004] 例如中国专利文献CN 106231609一种基于重点目标区域的水下传感器网络优化部署方法,包括水域监测模型的建立和水下传感器网络的优化部署两个基本步骤。步骤一,利用主成份分析方法,建立重点水域监测模型;步骤二,利用加权因子调整的粒子群算法实现对整个网络的优化部署。通过建立重点水域的监测模型,进而实现对整个网络的优化部署。该方法只能适用于单向水流和河流,并且没有进行多目标优化,优化效果不理想。

### 发明内容

[0005] 针对目前多目标优化算法只针对单向河流的缺陷和不足,本发明的目的是提出了一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法。适用于双向的水流,可以实现对双向水流情况下水质监测系统的优化部署,可以根据不同的目标进行优化。

[0006] 本发明的技术方案是:

[0007] 一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,包括以下步骤:

[0008] S01:获取监测区域中所有水域交叉点以及关键点位置信息,将水域交叉点、关键点位置信息及水流流向组成有向图顶点集合,计算相邻顶点间距离,建模为带权有向图;

[0009] S02:根据带权有向图进行水力建模,将顶点作为相邻水域的连接点,代表候选监测点,边作为相邻连接点间的水域段,边的长度即为水域段长度;模拟监测区域任意时刻水质污染事件,建立各监测水域段的水力参数,获得所有监测点在不同时刻、不同地点发生污染事件时成功检测到污染事件的最短时间和污染物浓度;

[0010] S03:设所有候选监测点集合 $X=[x_1, x_2, \dots, x_M]$ , $M$ 为所有候选监测点数量, $x_i$ 表示第 $i$ 个候选监测点;拟设立的监测点集合 $X_T=[x_1, x_2, \dots, x_T]$ , $T$ 为拟部署的监测点数量, $X_T \subset X$ 且 $T < M$ ;设某时刻只有一个污染事件,该事件可发生在任一候选监测点位置,则污染事件集合为 $E=[E_1, E_2, \dots, E_M]$ ;  $d_m^t(X_T)$ 表示在优化部署方案为 $X_T$ 时,第 $m$ 个污染事件中第 $t$ 个监测点检测到污染所需时间,则该污染事件中各监测点所需污染检测时间为 $d(X_T) = \{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\}$ ,污染事件所需最短检测时间为:

$$[0011] \quad t_m(X_T) = \begin{cases} \min\{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\} \\ -1 \text{ (若该污染事件未被检测到)} \end{cases} \quad (1)$$

[0012] 设 $r_m(X_T)$ 为第 $m$ 个污染事件是否被成功检测标志,则其值为:

$$[0013] \quad r_m(X_T) = \begin{cases} 1, & \text{若 } t_m(X_T) \neq -1 \\ 0, & \text{若 } t_m(X_T) = -1 \end{cases} \quad (2)$$

[0014] 该优化部署方案 $X_T$ 在所有污染事件中所需最少平均检测时间为:

$$[0015] \quad \bar{t}(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M t_m(X_T) \quad \text{其中 } t_m(X_T) \neq -1 \quad (3)$$

[0016] 该优化部署方案 $X_T$ 成功检测到污染事件概率为:

$$[0017] \quad r(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_m(X_T) \quad (4)$$

[0018] 平均检测时间最少、检测成功率最高的公式为:

$$[0019] \quad F_1 = \text{Minimize}\{\bar{t}(X_T)\}$$

$$[0020] \quad F_2 = \text{Maximize}\{r(X_T)\} \quad (5);$$

[0021] S04:根据多目标粒子群算法进行多目标优化,通过不断调整粒子移动速度和位置来寻求最优解,粒子移动速度和位置变化公式如下:

$$[0022] \quad V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (pbest(i, t) - p_i(t))$$

$$[0023] \quad + c_2 r_2 (gbest(t) - p_i(t)) \quad (6)$$

$$[0024] \quad p_i(t+1) = p_i(t) + V_i(t+1) \quad (7)$$

[0025] 其中, $\omega$ 为惯性系数, $C_1$ 为粒子自身历史最优值权重系数, $C_2$ 为全局最优值权重系数, $r_1$ 、 $r_2$ 为 $[0, 1]$ 区间随机数; $pbest(i, t)$ 为第 $i$ 个粒子在 $t$ 时刻的最优值, $gbest(t)$ 为所有粒子在 $t$ 时刻的最优值, $p_i(t)$ 为第 $i$ 个粒子在 $t$ 时刻的当前值;

[0026] 根据代价函数分别计算两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率,再根据两个不同水流方向水流的时间占比,计算总的污染平均检测时间和成功检测概率,并更新 $pBest$ 和 $gbest$ 集合,最终找到的帕累托前沿即为最优解集合。

[0027] 优选的,所述关键点位置至少包括区域交界水质控制点、饮用水源地控制点、潜在点面污染源。

[0028] 优选的,所述步骤S01中还包括细化带权有向图,在距离较长的顶点间插入额外顶点,并重新计算这些新的顶点间距离并更新带权有向图。

[0029] 优选的,所述代价函数的处理包括以下步骤:

[0030] 根据当前粒子信息分解粒子中蕴含的监测节点位置信息;

[0031] 根据监测节点位置信息分别计算两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率;

[0032] 根据两个不同水流方向水流的时间占比,计算两个不同水流方向的污染平均检测时间和成功检测概率;将污染平均检测时间和成功检测概率组成一个向量作为返回值更新pBest和gbest集合。

[0033] 与现有技术相比,本发明的优点是:

[0034] 本发明适用于双向的水流,可以实现对双向水流情况下水质监测系统的优化部署,可以根据不同的目标进行优化,使得检测时间最少和检测可靠性最高。

## 附图说明

[0035] 下面结合附图及实施例对本发明作进一步描述:

[0036] 图1为本发明基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法的流程图;

[0037] 图2a为水域水流一流向的带权有向图;

[0038] 图2b为水域水流另一流向的带权有向图;

[0039] 图3为双向水流优化部署帕累托前沿。

## 具体实施方式

[0040] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明了,下面结合具体实施方式并参照附图,对本发明进一步详细说明。应该理解,这些描述只是示例性的,而并非要限制本发明的范围。此外,在以下说明中,省略了对公知结构和技术的描述,以避免不必要地混淆本发明的概念。

[0041] 如图1所示,一种基于双向水流的水质监测网络多目标优化部署方法,包括以下步骤:

[0042] 1、把水质监测河道计算机建模为有向图

[0043] 通过GIS地理信息系统获取监测区域中所有河流交叉点、区域交界水质控制点、饮用水源地控制点、潜在点面污染源等需重点关注的位置信息,把这些点的信息和河水流向组成有向图顶点集合;利用地图距离测量工具分别测量相邻顶点间距离,把监测区域河流信息建模为带权有向图,如图2a、2b所示。

[0044] 2、细化带权有向图

[0045] 根据实际精度要求,在距离较长的顶点间插入额外顶点,并重新计算这些新的顶点间距离并更新带权有向图。

[0046] 3、模拟污染事件

[0047] 把带权有向图顶点和边导入水力建模软件Storm Water Management Model

(SWMM), 顶点作为相邻河道的连接点, 代表候选监测点, 边作为相邻连接点间的河道, 边的长度即为河道长度。模拟监测区域水质污染事件。把各监测河段海拔、宽度、深度及河水流速等水力参数输入SWMM软件, 在软件中模拟任意时刻水质污染事件, 获得所有监测点在不同时刻、不同地点发生污染事件时成功检测到污染事件的最短时间和污染物浓度。

[0048] 4、确定优化目标函数

[0049] 设所有候选监测点集合 $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ ,  $M$ 为所有候选监测点数量,  $x_i$ 表示第 $i$ 个候选监测点; 拟设立的监测点集合 $X_T = [x_1, x_2, \dots, x_T]$ ,  $T$ 为拟部署的监测点数量,  $X_T \subset X$ 且 $T < M$ ; 设某时刻只有一个污染事件, 该事件可发生在任一候选监测点位置, 则污染事件集合为 $E = [E_1, E_2, \dots, E_M]$ ;  $d_m^t(X_T)$ 表示在优化部署方案为 $X_T$ 时, 第 $m$ 个污染事件中第 $t$ 个监测点检测到污染所需时间, 则该污染事件中各监测点所需污染检测时间为 $d(X_T) = \{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\}$ , 污染事件所需最短检测时间为:

$$[0050] \quad t_m(X_T) = \begin{cases} \min\{d_m^1(X_T), d_m^2(X_T), \dots, d_m^T(X_T)\} \\ -1 \text{ (若该污染事件未被检测到)} \end{cases} \quad (1)$$

[0051] 设 $r_m(X_T)$ 为第 $m$ 个污染事件是否被成功检测标志, 则其值为:

$$[0052] \quad r_m(X_T) = \begin{cases} 1, & \text{若 } t_m(X_T) \neq -1 \\ 0, & \text{若 } t_m(X_T) = -1 \end{cases} \quad (2)$$

[0053] 该优化部署方案 $X_T$ 在所有污染事件中所需最少平均检测时间为:

$$[0054] \quad \bar{t}(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M t_m(X_T) \quad \text{其中 } t_m(X_T) \neq -1 \quad (3)$$

[0055] 该优化部署方案 $X_T$ 成功检测到污染事件概率为:

$$[0056] \quad r(X_T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_m(X_T) \quad (4)$$

[0057] 平均检测时间最少、检测成功率最高的公式为:

$$[0058] \quad F_1 = \text{Minimize}\{\bar{t}(X_T)\}$$

$$[0059] \quad F_2 = \text{Maximize}\{r(X_T)\} \quad (5)$$

[0060] 5、多目标粒子群算法

[0061] 多目标粒子群算法是近年来使用最流行的演进算法, 算法通过引入帕累托前沿来处理多目标优化问题。算法通过引入辅助存储空间来引导粒子移动并通过特定的变异操作来增强粒子的空间探索能力。算法通过不断调整粒子移动速度和位置来寻求最优解。其粒子移动速度和位置变化如公式6和7所示:

$$[0062] \quad V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1 (pbest(i, t) - p_i(t))$$

$$[0063] \quad + c_2 r_2 (gbest(t) - p_i(t)) \quad (6)$$

$$[0064] \quad p_i(t+1) = p_i(t) + V_i(t+1) \quad (7)$$

[0065] 其中,  $\omega$ 为惯性系数,  $C_1$ 为粒子自身历史最优值权重系数,  $C_2$ 为全局最优值权重系数,  $r_1, r_2$ 为 $[0, 1]$ 区间随机数;  $pbest(i, t)$ 为第 $i$ 个粒子在 $t$ 时刻的最优值,  $gbest(t)$ 为所有

粒子在t时刻的最优值,  $p_i(t)$  为第i个粒子在t时刻的当前值。

[0066] 6、定义新的代价函数BidirectionalCost()

[0067] 代价函数主要包括以下几个步骤: (1) 把当前粒子信息分解粒子中蕴含的监测节点位置信息; (2) 根据监测节点位置信息分别计算表2和表3所示的两个不同水流方向下的污染平均检测时间和成功检测概率; (3) 根据两个不同水流方向水流的时间占比, 计算两个不同水流方向的污染平均检测时间和成功检测概率; (4) 把污染平均检测时间和成功检测概率组成一个向量, 作为代价函数返回值, 返回给上层函数。

[0068] 对公式6和7进行循环迭代, 并利用代价函数BidirectionalCost() 计算得到不同监测点选址方案下的平均检测时间和成功检测概率并更新pBest和gbest集合, 最终找到的帕累托前沿即为最优解集合。

[0069] 具体实例如下:

[0070] (1) 把河道建模为有向图。两个河道具有完全相同的河道宽度、水深、海拔、河道长度等参数, 但具有相反的水流方向, 其参数取值如表1所示。

河段	宽度 (英尺)	河道 斜率	曼宁 系数	长度 (英尺)	流量 (升/秒)
[0071] A	10	0.0001	0.02	2000	10
B	10	0.0001	0.02	2000	10
C	10	0.0001	0.02	2000	10
D	10	0.0001	0.02	2000	10
E	10	0.0001	0.02	1000	10
F	10	0.0001	0.02	2000	10
G	10	0.0001	0.02	3000	20
[0072] H	10	0.0001	0.02	4000	20
I	10	0.0001	0.02	2000	30
J	10	0.0001	0.02	3000	30
K	10	0.0001	0.02	5000	60

[0073] (2) 细化带权有向图。标注出各河段实际长度, 并根据河流水力参数获得如上表所示数据。

[0074] (3) 通过SWMM软件模拟污染事件, 污染物浓度为10mg/L, 污染物检测最小阈值为0.01mg/L, 获得不同水流方向下的各监测点污染检测时间, 如表2和表3所示。

[0075] 表2. 向下水流污染检测时间

污染 位置	污染检测时间											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
[0076] 1	1	11	Inf	30	Inf	42	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	72
2	Inf	1	Inf	17	Inf	29	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	58
3	Inf	11	1	30	Inf	42	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	72
4	Inf	Inf	Inf	1	Inf	11	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	39
5	Inf	Inf	Inf	11	1	23	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	53
6	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	27
7	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	17	1	Inf	Inf	Inf	Inf	46
8	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	29	11	1	Inf	Inf	Inf	59
9	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	41	23	Inf	1	Inf	Inf	71
10	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	48	29	Inf	6	1	Inf	78
11	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	55	36	Inf	11	Inf	1	85
12	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1

[0077] \*Inf表示该污染在某个监测点上无法被检测到



[0078] 表3. 向上水流污染检测时间

污染位置	污染检测时间											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	11	1	11	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
3	Inf	Inf	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
4	29	16	29	1	11	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
5	Inf	Inf	Inf	Inf	1	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
6	41	28	41	11	23	1	16	28	40	47	53	Inf
7	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	11	22	29	35	Inf
8	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	Inf	Inf	Inf	Inf
9	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	6	11	Inf
10	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	Inf	Inf
11	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	1	Inf
12	70	57	70	39	52	27	45	58	69	76	83	1

[0080] \*Inf表示该污染在某个监测点上无法被检测到

[0081] (4) 利用多目标粒子群算法求解在部署三个监测节点情况下的优化部署方案。获得的帕累托前沿如图3所示,获得的优化部署监测点如表4所示。

[0082] 表4. 双向水流帕累托前沿优化部署方案

监测点	检测时间(分钟)	检测成功率
3,10,12	22.69	66.7%
1,10,12	22.69	66.7%
3,6,10	12.79	58.3%
3,6,8	9.5	50.0%
5,6,8	5.6	41.67%
5,6,7	3.5	33.33%
4,5,7	1	25%
3,7,9	1	25%
3,5,9	1	25%
5,7,9	1	25%
2,5,9	1	25%
4,5,8	1	25%
4,5,9	1	25%

[0084] (5) 从表4可以看出,最终优化方案为在3,10,12三个点位上部署监测节点,可以获得较高的检测率和较低检测时间。

[0085] 应当理解的是,本发明的上述具体实施方式仅仅用于示例性说明或解释本发明的原理,而不构成对本发明的限制。因此,在不偏离本发明的精神和范围的情况下所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。此外,本发明所附权利要求旨在涵盖落入所附权利要求范围和边界、或者这种范围和边界的等同形式内的全部变化和修改例。

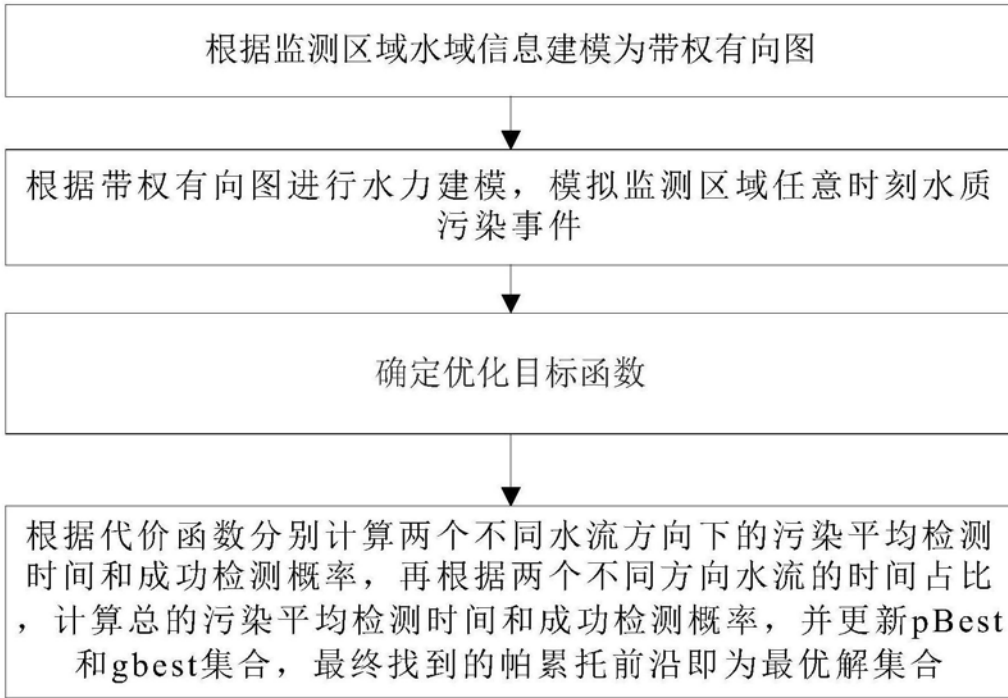


图1

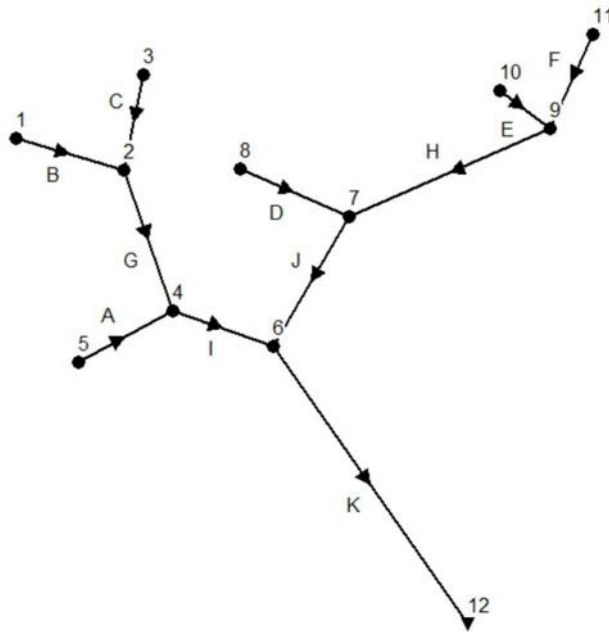


图2a

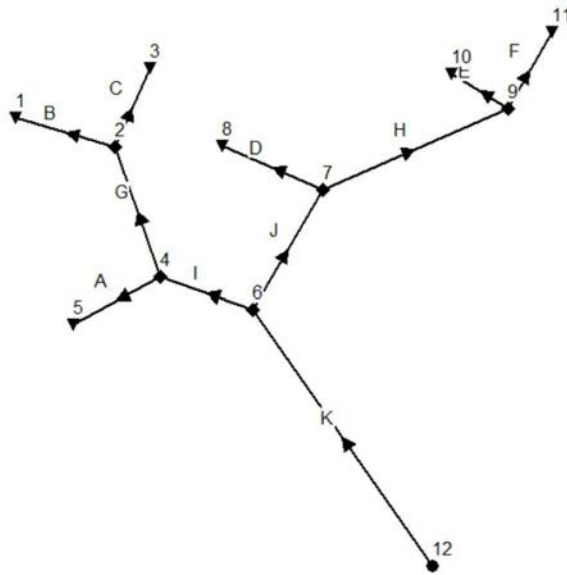


图2b

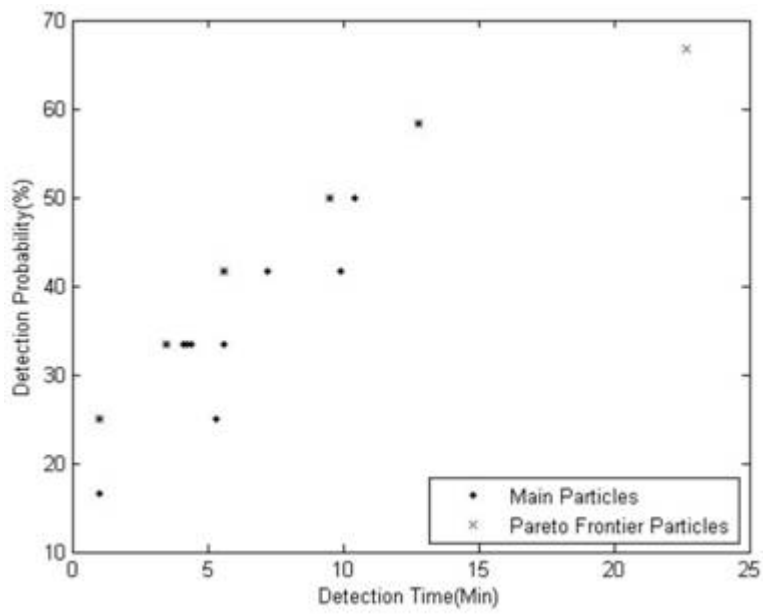


图3