(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2022 年 1 月 20 日 (20.01.2022)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2022/012093 A1

(51) 国际专利分类号:
G06Q 10/04 (2012.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/085198

(22) 国际申请日: 2021 年 4 月 2 日 (02.04.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010668751.6 2020年7月13日 (13.07.2020) CN

(71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

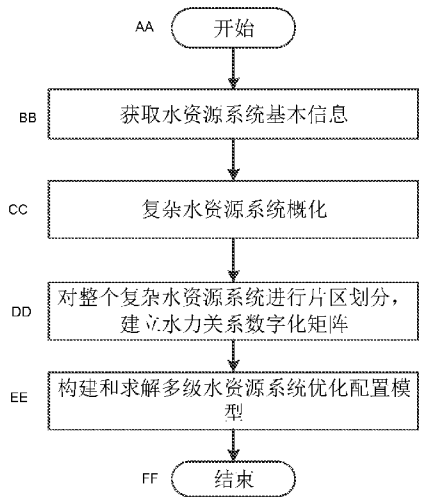
(72) 发明人: 郭玉雪(GUO, Yuxue); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 许月萍(XU, Yueping); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 程伟平(CHENG, Weiping); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 于欣廷(YU, Xinting); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 尤延锋(YOU, Yanfeng); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路147号黄鸿年科技综合楼215室万尾甜, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,

(54) **Title:** COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEM OPTIMAL CONFIGURATION METHOD BASED ON "PARTITIONING-RATING" THEORY

(54) **发明名称:** 一种基于"分区-分级"理论的复杂水资源系统优化配置方法



AA START
BB ACQUIRE BASIC INFORMATION OF A WATER RESOURCE SYSTEM
CC GENERALIZE A COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEM
DD PARTITION THE WHOLE COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEM, AND ESTABLISH HYDRAULIC RELATIONSHIP DIGITAL MATRICES
EE CONSTRUCT AND SOLVE A MULTI-STAGE WATER RESOURCE SYSTEM OPTIMAL CONFIGURATION MODEL
FF END

图 1

(57) **Abstract:** A complex water resource system optimal configuration method based on a "partitioning-rating" theory. The method comprises the following steps: firstly, acquiring basic information data of a water resource system, and secondly generalizing a complex water resource system; then partitioning the whole water resource system according to a water supply relationship between a reservoir, a pump station, a riverway, a water conveying pipeline and a water plant, and establishing hydraulic relationship digital matrices of different partitions; and finally, constructing and solving a multi-stage water resource system optimal configuration model according to the type of water supply source, and determining a rational optimal configuration scheme set. By means of the method, a complex water resource system can be simplified, and a new approach is provided for the efficient utilization of water resources.

WO 2022/012093 A1

[见续页]

GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种基于"分区-分级"理论的复杂水资源系统优化配置方法，步骤如下：首先获取水资源系统基本信息数据，其次对复杂水资源系统进行概化；然后按照水库、泵站、河道、输水管道与水厂之间的供给水关系对整个水资源系统进行分区，并建立不同分区水力关系数字化矩阵；最后按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，确定合理的优化配置方案集合。本方法可实现复杂水资源系统的简单化，为水资源高效利用提供新的途径。

一种基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法

技术领域

本发明属于水资源配置领域，具体涉及一种基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法。

背景技术

为了解决水资源分布时空不均问题导致的水资源短缺问题，开展水资源优化配置研究能够提高水资源利用率，具有明显的社会和经济效益。然而随着社会经济的快速发展，水资源优化配置需要考虑的因素日益增多，尤其是针对复杂水资源系统，在优化配置模型的构建和求解过程中，容易出现维数灾难问题，因此有必要对系统进行分区处理，实现系统的有效降维，以提高计算效率。同时，以往的水资源优化配置模型通常以全区域的总供水保证率最大为社会效益目标，难以保证各分区用水户效益的公平性。另外，在优化配置模型的求解方面，Mirjalili 等人（2014）提出的灰狼优化算法（GWO）已被证明在对函数求解精度和稳定性上要明显优于粒子群算法（PSO）、差分算法（DE）和遗传算法（GA）等优化算法，但也存在着收敛速度慢、全局搜索能力弱、容易陷入局部最优的缺陷。

发明内容

本发明的目的在于提供一种复杂水资源系统优化配置方法，该方法基于“分区-分级”理论进行水资源优化配置模型构建，同时对灰狼算法进行改进，并应用于模型求解，确定最优配水方案集合。该方法能够简化多维优化求解过程，避免陷入局部优化提高计算效率，且保证各用水户的公平性及提高供水保证率。

为实现上述目的，本发明的技术方案是：

一种基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，包括以下步骤：

步骤 1，获取水资源系统基本信息数据，包括水库水位-库容关系曲线，水库、泵站、河道、输水管道、水厂的基本特征参数、地理位置信息等；

步骤 2，将复杂水资源系统概化为不同单元，包括节点和有向线段；

步骤 3，对整个复杂水资源系统进行片区划分，分别建立不同分区水力关系数字化矩阵；

步骤 4，按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，确定合理的水资源优化配置方案集合。

上述技术方案中，进一步地，所述步骤 2 中将系统中的水库、泵站、河道、水厂分别概化为节点，输水管道概化为有向线段。

进一步地，所述步骤 3 中分区原则是以水厂为分区中心，按照水库、泵站、河道、输水管道与水厂之间的水力关系进行片区划分。

更进一步地，所述步骤 3 中将不同分区之间的交汇处概化为虚拟节点。

进一步地，所述步骤 3 中水力关系均以 0，-1 和 1 数字化表示，其中 0 表示无水力关系，-1 表示出流，1 表示入流。

进一步地，所述步骤 4 中的供水水源包括本地水和外调水，其中本地水包括水库和河道水。

进一步地，所述步骤 4 按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，包括以下步骤：

步骤 4-1，仅考虑本地水，建立第一级水资源单目标优化配置模型。以分区水资源系统为对象，分别构建各分区以水厂供水保证率最大为目标函数，以水量平衡、本地水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力等为约束的水资源单目标优化配置模型，其中，目标函数：

$$Max \quad f(x)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}x_{ij}/\sum_{j=1}^{J}Q_j *100\% \tag{1}$$

式中，Q_j 为 j 水厂的需水量（m^3），x_{ij} 为第 i 水库向第 j 水厂的供水量（m^3）。

步骤 4-2，采用改进的单目标灰狼算法进行上述模型求解，确定各个水厂的缺水量 $WQ_i\ (i=1,2,\ldots,M)$，M 为整个水资源系统内的水厂个数；

步骤 4-3，同时考虑本地水和外调水，建立第二级水资源多目标优化配置模型。以整个水资源系统为对象，构建以系统供水保证率最大、运营总成本最小为目标函数，以外调水分配到各个水厂不小于各水厂缺水量 WQ_i、水量平衡、本地水源可供水量、外调水水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力等为约束的水资源多目标优化配置模型，其中，目标函数为：

供水保证率最大 $$Max \quad f_1(x)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}x_{ij}\Big/\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}Q_j \times 100\% \tag{2}$$

运营总成本最小 $$Min \quad f_2(x)=M_e+M_i-M_b \tag{3}$$

式中，$k=1,2,..,K$ 为分区个数，M_i 为本地水使用费用（¥），M_e 为外调水使用费用（¥），M_b 为收益（¥）。其中，本地供水费用包括泵站运行电费、政府水资源费用、非自有水库水资源购置费；外调水包括政府水资源费、以及泵站运行电费。

步骤 4-4，按照各分区计算，采用改进的多目标灰狼算法求解多目标优化配置模型，获得 Pareto 方案集合，确定不同方案下各个水库的配水量和外调水量。

进一步地，所述步骤 4-2 采用改进的单目标灰狼算法求解各个分区单目标优化模型，包括以下步骤：

步骤 4-2-1，初始化算法参数和种群。种群规模大小为 *Popsize*，最大迭代次数 *Maxgen*，决策变量个数 *Dimension*，决策变量取值范围[*Lb*, *Ub*]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 $X=\left[X_1,X_2,\ldots,X_i,\ldots,X_{Popsize}\right]$；

步骤 4-2-2，计算种群中每个个体的适应度，其中水厂供水保证率越大，返回的适应度越大；按照适应度大小进行排序，选择并保存适应度最大的三个个体：X_α、X_β、X_δ，其中 X_α 为全局最优的灰狼；

步骤 4-2-3，采用 X_α、X_β、X_δ 对种群中的所有灰狼个体进行更新，更新方式为：

$$\begin{aligned}
D_\alpha &= \left|C\cdot X_\alpha(t)-X_i(t)\right| \\
D_\beta &= \left|C\cdot X_\beta(t)-X_i(t)\right| \\
D_\delta &= \left|C\cdot X_\delta(t)-X_i(t)\right| \\
X_1 &= X_\alpha(t)-A\cdot D_\alpha \\
X_2 &= X_\beta(t)-A\cdot D_\beta \\
X_3 &= X_\delta(t)-A\cdot D_\delta \\
X_i(t+1) &= \left(X_1+X_2+X_3\right)/3
\end{aligned} \tag{4}$$

其中，t 为迭代次数，$A=2a\times r_1-a$，$C=2\times r_2$；A、C 和 a 均为收敛因子，r_1、r_2 为随机变量，r_1、$r_2\in(0,1)$，D_α、D_β、D_δ 表示个体 X_α、X_β、X_δ 与个体 X_i 之间的距离。

步骤 4-2-4，判断迭代次数是否已达到 *MAXGEN*，若是，则终止运行并输出水厂的缺水量；若否，返回步骤 4-2-2 继续进化；

步骤 4-2-5，确定系统内所有水厂的缺水量。

进一步地，所述步骤 4-2-3 中收敛因子 a 采用基于抛物线的非线性收敛方式收敛，方程为：

$$a=2-2\left(t/MAXGEN\right)^2 \tag{5}$$

其中，t 为当前迭代次数，$MAXGEN$ 为最大迭代次数。

进一步地，所述步骤 4-4 采用改进的多目标灰狼算法求解系统多目标优化配置模型，包括以下步骤：

步骤 4-4-1，初始化算法参数和种群。种群规模大小为N_p，外部归档集个数为N_e，最大迭代次数为N_{gen}，决策变量个数为N_d，决策变量取值范围为[Lb, Ub]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 X；

步骤 4-4-2，计算种群中每个个体的适应度值，按照适应度值计算所有个体的非支配排序等级$[P_j^t]_{rank}(j=1,2,...,N)$和拥挤距离$d_j^t(j=1,2,...,N)$，按照以下规则选取$N_e$个个体作为初始的外部归档集 NEA：选取非支配排序等级为 $rank$=1 的个体，若等级为 1 的个体数量大于N_e，则选择拥挤距离较大的前N_e个体；若不足，则依此选择排序等级为 $rank$=$rank$+1 中拥挤距离较大的个体，直至外部归档集 NEA 包含个体数为N_e，以保证种群的多样性；

步骤 4-4-3，在外部归档集 NEA 中按照以下规则选择$X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$三个个体作为优先等级：若非支配排序的等级均为非占优等级或第一等级，分别选取拥挤距离最大的前三个个体作为$X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$；若非支配排序的等级个数等于 2，分别在 $rank$=1 的等级中选取拥挤距离最大的前两个个体作为$X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$，在 $rank$=2 的等级中选取拥挤距离最大的个体作为$X_\delta^{'}$；若非支配排序的等级个数大于 2，分别在 $rank$=1、2、3 等级选取拥挤距离最大的三个个体作为$X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$，其中$X_\alpha^{'}$为全局最优的灰狼；

步骤 4-4-4，按照$X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$采用式（4）-（5）对种群中的所有灰狼个体进行更新；

步骤 4-4-5，计算种群中每个个体的适应度值，将更新后的新种群与外部归档集 NEA 进行合并，按照步骤 4-4-2 所述的选取规则更新外部归档集 NEA；

步骤 4-4-6，判断迭代次数是否已达到$MAXGEN$，若是，则终止运行并输出外部归档集 NEA 中的 Pareto 非劣解集合；若否，返回步骤 4-4-3 继续进化；

步骤 4-4-7，整理输出不同非劣解对应的水库供水量、河道翻水量和外调水量。

本发明与现有技术相比，具有以下有益效果：

（1）以水厂为中心，按照供水关系对水资源系统进行分区处理，能够简化复杂水资源系统的高维优化求解过程；

（2）按照供水水源类型构建和求解多级水资源优化配置模型，可在提高供水保证率的前提下，实现经济效益最大化和水资源利用最大化；

（3）建立水力关系数字化矩阵，能够直观展示复杂水资源系统单元之间的水力联系，简化模型构建与求解过程；

（4）以各分区供水保证率最大化为目标函数计算缺水量，能够保障各用水户的供水公平性；

（5）采用基于抛物线的非线性收敛方式，可使收敛因子 a 初期衰减程度降低，确保更好地寻找全局最优解；后期衰减程度提高，更加精确地寻找局部最优解，能够有效地平衡灰狼算法全局搜索和局部搜索能力，提高模型求解效率；

附图说明

图 1 是本发明的方法流程图；

图 2 是本发明中步骤 4-2 的具体流程图；

图 3 是本发明中步骤 4-2-3 中的参数 a 非线性收敛图；

图 4 是本发明中步骤 4-4 的具体流程图；

图 5 是实施案例中 D_2 分区系统概化图；

具体实施方式

下面结合具体实施例，进一步阐明本发明，应理解这些实施例仅用于说明本发明而不用于限制本发明的范围，在阅读了本发明之后，本领域技术人员对本发明的各种等价形式的修改均落于本申请所附权利要求所限定的范围。

如图 1 所示，一种基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，具体包括以下步骤：

步骤 1，获取水资源系统基本信息数据，包括水库水位-库容关系曲线，水库、泵站、河道、输水管道、水厂的基本特征参数、地理位置信息等；

步骤 2，将复杂水资源系统概化为不同单元，包括节点和有向线段；

步骤 3，对整个复杂水资源系统进行片区划分，分别建立不同分区水力关系数字化矩阵；

步骤 4，按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，确定合理的水资源优化配置方案集合。

所述步骤 2 中将系统中的水库、泵站、河道、水厂分别概化为节点，输水管道概化为有向线段。

步骤 3 中分区原则是以水厂为分区中心，按照水库、泵站、河道、输水管道与水厂之间的供给水关系进行片区划分。

步骤 3 中将不同分区之间的交汇处概化为虚拟节点。

步骤 3 中水力关系矩阵均以 0，-1 和 1 数字化表示，其中 0 表示无水力关系，-1 表示出流，1 表示入流。

所述步骤 4 中的供水水源包括本地水和外调水，其中本地水包括水库和河道水。

步骤 4-1，仅考虑本地水，建立第一级水资源单目标优化配置模型。以分区水资源系统为对象，分别构建各分区以水厂供水保证率最大为目标函数，以水量平衡、本地水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力等为约束的水资源单目标优化配置模型，其中，目标函数：

$$Max \quad f(x)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}x_{ij}/\sum_{j=1}^{J}Q_j *100\% \tag{1}$$

式中，Q_j 为 j 水厂的需水量（m^3），x_{ij} 为第 i 水库向第 j 水厂的供水量（m^3）。

步骤 4-2，采用改进的单目标灰狼算法进行上述模型求解，确定各个水厂的缺水量 $WQ_i\ (i=1,2,\ldots,M)$，M 为整个水资源系统内的水厂个数；

步骤 4-3，同时考虑本地水和外调水，建立第二级水资源多目标优化配置模型。以整个水资源系统为对象，构建以系统供水保证率最大、运营总成本最小为目标函数，以外调水分配到各个水厂不小于各水厂缺水量 WQ_i、水量平衡、本地水源可供水量、外调水水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力等为约束的水资源多目标优化配置模型，其中，目标函数为：

供水保证率最大 $$Max \quad f_1(x)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}x_{ij}\Big/\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}Q_j \times 100\% \tag{2}$$

运营总成本最小 $$Min \quad f_2(x)=M_e+M_i-M_b \tag{3}$$

式中，$k=1,2,..,K$ 为分区个数，M_i 为本地水使用费用（¥），M_e 为外调水使用费用（¥），M_b 为收益（¥）。其中，本地供水费用包括泵站运行电费、政府水资源费用、非自有水库水资源购置费；外调水包括政府水资源费、以及泵站运行电费。

步骤 4-4，按照各分区计算，采用改进的多目标灰狼算法求解多目标优化配置模型，获得 Pareto 方案集合，确定不同方案下各个水库的配水量和外调水量。

步骤 4-2 的采用改进的单目标灰狼算法求解各个分区单目标优化模型，其流程图如图 2 所示，具体步骤如下：

步骤 4-2-1，初始化算法参数和种群。种群规模大小为 *Popsize*，最大迭代

次数 *Maxgen*，决策变量个数 *Dimension*，决策变量取值范围[*Lb*, *Ub*]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 $X=\left[X_1,X_2,\ldots,X_i,\ldots,X_{Popsize}\right]$；

步骤 4-2-2，计算种群中每个个体的适应度，其中水厂供水保证率越大，返回的适应度越大；按照适应度大小进行排序，选择并保存适应度最大的三个个体：X_α、X_β、X_δ，其中 X_α 为全局最优的灰狼；

步骤 4-2-3，更新收敛因子 A、C 和 a，按照 X_α、X_β、X_δ 对种群中的所有灰狼个体进行更新，更新方式为：

$$\begin{aligned}
D_\alpha &= \left|C\cdot X_\alpha(t)-X_i(t)\right| \\
D_\beta &= \left|C\cdot X_\beta(t)-X_i(t)\right| \\
D_\delta &= \left|C\cdot X_\delta(t)-X_i(t)\right| \\
X_1 &= X_\alpha(t)-A\cdot D_\alpha \\
X_2 &= X_\beta(t)-A\cdot D_\beta \\
X_3 &= X_\delta(t)-A\cdot D_\delta \\
X_i(t+1) &= \left(X_1+X_2+X_3\right)/3
\end{aligned} \tag{4}$$

其中，t 为迭代次数，$A=2a\times r_1-a$，$C=2\times r_2$；A、C 和 a 均为收敛因子，r_1、r_2 为随机变量，r_1、$r_2\in(0,1)$，D_α、D_β、D_δ 表示个体 X_α、X_β、X_δ 与个体 X_i 之间的距离。

步骤 4-2-4，判断迭代次数是否已达到 *MAXGEN*，若是，则终止运行并输出水厂的缺水量；若否，返回步骤 4-2-2 继续进化；

步骤 4-2-5，确定系统内所有水厂的缺水量。

如图 3 所示，所述的收敛因子 a 采用基于抛物线的非线性收敛方式，方程为：

$$a=2-2\left(t/MAXGEN\right)^2 \tag{5}$$

其中，t 为当前迭代次数，*MAXGEN* 为最大迭代次数。

步骤 4-4，采用改进的多目标灰狼算法求解整个系统的多目标优化配置模型，获得 Pareto 方案集合，确定不同方案下各个水库的配水量和外调水量，其流程图如图 4 所示，具体步骤如下：

步骤 4-4-1，初始化算法参数和种群。种群规模大小为 N_p，外部归档集个数为 N_e，最大迭代次数为 N_{gen}，决策变量个数为 N_d，决策变量取值范围为[*Lb*, *Ub*]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 X；

步骤 4-4-2，计算种群中每个个体的适应度值，按照适应度值计算所有个体的非支配排序等级 $[P_j^t]_{rank}(j=1,2,\ldots,N)$ 和拥挤距离 $d_j^t(j=1,2,\ldots,N)$，按照以下规则选取 N_e 个个体作为初始的外部归档集 *NEA*：选取非支配排序等级为 *rank*=1 的

个体，若等级为 1 的个体数量大于N_e，则选择拥挤距离较大的前N_e个体；若不足，则依此选择排序等级为 *rank*=*rank*+1 中拥挤距离较大的个体，直至外部归档集 *NEA* 包含个体数为N_e，以保证种群的多样性；

步骤 4-4-3，在外部归档集 *NEA* 中按照以下规则选择X'_α、X'_β、X'_δ三个个体作为优先等级：若非支配排序的等级均为非占优等级或第一等级，分别选取拥挤距离最大的前三个个体作为X'_α、X'_β、X'_δ、X_δ；若非支配排序的等级个数等于 2，分别在 *rank*=1 的等级中选取拥挤距离最大的前两个个体作为X'_α、X'_β，在 *rank*=2 的等级中选取拥挤距离最大的个体作为X'_δ；若非支配排序的等级个数大于 2，分别在 *rank*=1、2、3 等级选取拥挤距离最大的三个个体作为X'_α、X'_β、X'_δ，其中X'_α为全局最优的灰狼；

步骤 4-4-4，按照X'_α、X'_β、X'_δ采用式（4）-（5）对种群中的所有灰狼个体进行更新；

步骤 4-4-5，计算种群中每个个体的适应度值，将更新后的新种群与外部归档集 *NEA* 进行合并，按照步骤 4-4-2 所述的选取规则更新外部归档集 *NEA*；

步骤 4-4-6，判断迭代次数是否已达到*MAXGEN*，若是，则终止运行并输出外部归档集 *NEA* 中的 Pareto 非劣解集合；若否，返回步骤 4-4-3 继续进化；

步骤 4-4-7，整理输出不同非劣解对应的水库供水量、河道翻水量和外调水量。

现以某城市复杂水资源系统优化配置为例，说明发明方法的有效性与合理性。该研究地区涉及 27 个水库、22 个泵站以及 4 个供水水厂：A、B、C 和 D 水厂。按照泵站、水库与水厂的供给水关系可将此区域划分为 3 个片区，D_1、D_2和D_3，其中 A 和 B 水厂位于D_1分区，C 水厂位于D_2分区，D 水厂位于D_3分区。对系统进行概化，如图 5 所示为D_2分区系统概化图；分析各片区的水力关系，建立数字化矩阵，如表 1 为D_2分区的水力关系数字化矩阵的部分信息。选取计算时段为 2016 年 6 月 1 日，按照供水水源类型构建和求解研究区多级水资源系统优化配置模型，表 2 为以 6 月 1 日为例，在多目标解集中选择的多组水库配水方案，可知，在多种方案下四个水厂于 6 月 1 日供水保证率均满足 100%。其中所在D_1分区的R_1水库存储外调水，并负责对 A、B、C 三个水厂进行供水。

表 1 D_2分区的水力关系数字化矩阵的部分信息

节点	管段									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j

1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
11	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1

表 2 6 月 1 日多组水库供水水量方案

分区	水库	水厂	供水水量（m^3）				
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
D_1		C	5393.04	5392.92	5393.00	5393.02	5392.99
	R_1	A	8373.10	8373.26	8373.67	8373.68	8372.10
		B	5578.44	5578.71	5580.53	5578.94	5578.44
	R_2	B	101.73	102.61	103.27	102.29	105.34
	R_3	A	50.26	51.06	50.09	50.89	51.12
	R_4	A	431.60	430.90	443.54	429.29	431.06
	R_5	A	1260.27	1260.24	1260.23	1260.39	1260.37
	R_6	A	6862.11	6860.80	6862.00	6861.88	6860.83
	R_7	B	300.92	300.68	301.08	301.46	301.13
	R_8	B	230.78	232.65	235.76	231.42	231.19
	R_9	B	543.43	541.25	543.86	545.75	543.36
	R_{10}	B	884.61	883.33	883.29	881.18	882.15
D_2	R_1	C	1267.06	1267.00	1266.78	1266.51	1267.94
	R_2	C	33807.46	33807.44	33807.68	33808.04	33808.12
	R_3	C	170.86	171.53	170.03	172.95	172.67
	R_4	C	109.91	110.17	110.38	120.81	150.33
	R_5	水库 R_8	10113.50	10116.34	10113.83	10114.34	10113.75

	R_6	水库 R_8	483.97	482.68	483.15	482.99	483.63
	R_7	水库 R_8	5068.30	5068.45	5068.76	5069.15	5068.38
	R_8	C	30042.96	30043.82	30043.84	30043.01	30043.30
D_3	R_1	B	5762.48	5762.59	5761.38	5761.43	5762.32
		D	308.00	301.14	302.86	302.86	305.81
	R_2	D	951.79	951.77	950.98	949.42	951.04
		D	6595.54	6594.59	6595.57	6595.58	6594.45
	R_3	D	23434.99	23435.64	23433.50	23436.18	23379.47
	R_4	R_5	1586.51	1585.48	1586.38	1585.95	1586.38
		D	1284.06	1280.93	1280.50	1280.21	1286.96
	R_5	D	18197.74	18197.70	18197.73	18197.73	18197.74
	R_6	D	6149.17	6149.16	6149.16	6149.15	6148.85
	R_7	D	2449.09	2449.02	2449.05	2449.07	2448.30
外调水（m^3）			34144.86	35056.72	35768.75	37052.57	38872.32
总计（m^3）			187540.43	188427.85	189156.33	190431.82	192256.23
供水保证率（%）			100%	100%	100%	100%	100%
供水成本（元）			54511.63	55161.18	55680.59	56604.64	57938.49

权 利 要 求 书

1、一种基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1，获取水资源系统基本信息数据，包括水库水位-库容关系曲线，水库、泵站、河道、输水管道、水厂的基本特征参数、地理位置信息；

步骤 2，将水资源系统概化为不同单元，包括节点和有向线段；

步骤 3，对整个水资源系统进行片区划分，分别建立不同分区水力关系数字化矩阵；

步骤 4，按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，确定合理的水资源优化配置方案集合；

所述步骤 4 中的供水水源包括本地水和外调水，其中本地水包括水库和河道水；所述步骤 4 按照供水水源类型构建和求解多级水资源系统优化配置模型，包括以下步骤：

步骤 4-1，仅考虑本地水，建立第一级水资源单目标优化配置模型：以分区水资源系统为对象，分别构建各分区以水厂供水保证率最大为目标函数，以水量平衡、本地水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力为约束的水资源单目标优化配置模型；

步骤 4-2，采用改进的单目标灰狼算法求解步骤 4-1 建立的各个分区单目标优化配置模型，确定各个水厂的缺水量WQ_i，其中，$i=1,2,\ldots,M$，M为整个水资源系统内的水厂个数；

步骤 4-3，同时考虑本地水和外调水，建立第二级水资源多目标优化配置模型：以整个水资源系统为对象，构建以系统供水保证率最大、运营总成本最小为目标函数，以外调水分配到各个水厂不小于各水厂缺水量WQ_i、水量平衡、本地水水源可供水量、外调水水源可供水量、泵站过流能力、管道输水能力为约束的水资源多目标优化配置模型；

步骤 4-4，采用改进的多目标灰狼算法求解步骤 4-3 建立的系统多目标优化配置模型，获得 Pareto 方案集合，确定不同方案下各个水库的配水量和外调水量。

2、如权利要求 1 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 2 中将系统中的水库、泵站、河道、水厂分别概化为节点，输水管道概化为有向线段。

3、如权利要求 1 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 3 中分区原则是以水厂为分区中心，按照水库、泵站、河道、输水管道与水厂之间的水力关系进行片区划分。

4、如权利要求 3 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 3 中将不同分区之间的交汇处概化为虚拟节点。

5、如权利要求 3 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 3 中水力关系均以 0，-1 和 1 数字化表示，其中 0 表示无水力关系，-1 表示出流，1 表示入流。

6、如权利要求 1 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 4-2 采用改进的单目标灰狼算法求解各个分区单目标优化模型，包括以下步骤：

步骤 4-2-1，初始化算法参数和种群，其中，种群规模大小为 *Popsize*，最大迭代次数为 *Maxgen*，决策变量个数为 *Dimension*，决策变量取值范围为[*Lb*, *Ub*]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 $X=\left[X_1,X_2,\ldots,X_i,\ldots,X_{Popsize}\right]$；

步骤 4-2-2，计算种群中每个个体的适应度，其中水厂供水保证率越大，返回的适应度越大；按照适应度大小进行排序，选择并保存适应度最大的三个个体：X_α、X_β、X_δ，其中 X_α 为全局最优的灰狼；

步骤 4-2-3，采用 X_α、X_β、X_δ 对种群中的所有灰狼个体进行更新，更新方程为：

$$\begin{aligned} D_\alpha &= \left|C\cdot X_\alpha(t)-X_i(t)\right| \\ D_\beta &= \left|C\cdot X_\beta(t)-X_i(t)\right| \\ D_\delta &= \left|C\cdot X_\delta(t)-X_i(t)\right| \\ X_1 &= X_\alpha(t)-A\cdot D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta(t)-A\cdot D_\beta \\ X_3 &= X_\delta(t)-A\cdot D_\delta \\ X_i(t+1) &= (X_1+X_2+X_3)/3 \end{aligned} \qquad (1)$$

其中，t 为迭代次数，$A=2a\times r_1-a$，$C=2\times r_2$；A、C 和 a 均为收敛因子，r_1、r_2 为随机变量，r_1、$r_2\in(0,1)$，D_α、D_β、D_δ 表示个体 X_α、X_β、X_δ 与个体 X_i 之间的距离；

步骤 4-2-4，判断迭代次数是否已达到 *MAXGEN*，若是，则终止运行并输出水厂的缺水量；若否，返回步骤 4-2-2；

步骤 4-2-5，确定系统内所有水厂的缺水量。

7、如权利要求 6 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配

置方法，其特征在于，所述步骤 4-2-3 中，收敛因子 a 采用基于抛物线的非线性收敛方式收敛，方程为：

$$a = 2 - 2\left(t/MAXGEN\right)^2 \qquad (2)$$

。

8、如权利要求 7 所述的基于“分区-分级”理论的复杂水资源系统优化配置方法，其特征在于，所述步骤 4-4 采用改进的多目标灰狼算法求解系统多目标优化配置模型，包括以下步骤：

步骤 4-4-1，初始化算法参数和种群，其中，种群规模大小为 N_p，外部归档集个数为 N_e，最大迭代次数为 N_{gen}，决策变量个数为 N_d，决策变量取值范围为[*Lb*, *Ub*]，按照决策变量的取值范围初始化灰狼种群 *X*；

步骤 4-4-2，计算种群中每个个体的适应度值，按照适应度值计算所有个体的非支配排序等级 $[P_j^t]_{rank}$ 和拥挤距离 d_j^t，其中，$j = 1,2,...,N_p$，$[P_j^t]_{rank}$ 为迭代 *t* 次后第 *j* 个体的非支配排序等级，d_j^t 为迭代 *t* 次后第 *j* 个体的拥挤距离，按照以下规则选取 N_e 个个体作为初始的外部归档集 *NEA*：选取非支配排序等级为 *rank*=1 的个体，若等级为 1 的个体数量大于 N_e，则选择拥挤距离较大的前 N_e 个体；若不足，则依次选择排序等级为 *rank*=*rank*+1 中拥挤距离较大的个体，直至外部归档集 *NEA* 包含个体数为 N_e，以保证种群的多样性；

步骤 4-4-3，在外部归档集 *NEA* 中按照以下规则选择 $X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$ 三个个体作为优先等级：若非支配排序的等级均为非占优等级或第一等级，分别选取拥挤距离最大的前三个个体作为 $X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$；若非支配排序的等级个数等于 2，分别在 *rank*=1 的等级中选取拥挤距离最大的前两个个体作为 $X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$，在 *rank*=2 的等级中选取拥挤距离最大的个体作为 $X_\delta^{'}$；若非支配排序的等级个数大于 2，分别在 *rank*=1、2、3 等级选取拥挤距离最大的三个个体作为 $X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$，其中 $X_\alpha^{'}$ 为全局最优的灰狼；

步骤 4-4-4，按照 $X_\alpha^{'}$、$X_\beta^{'}$、$X_\delta^{'}$ 采用式（1）-（2）对种群中的所有灰狼个体进行更新；

步骤 4-4-5，计算种群中每个个体的适应度值，将更新后的新种群与外部归档集 *NEA* 进行合并，按照步骤 4-4-2 所述的选取规则更新外部归档集 *NEA*；

步骤 4-4-6，判断迭代次数是否已达到 *MAXGEN*，若是，则终止运行并输出外部归档集 *NEA* 中的 Pareto 非劣解集合；若否，返回步骤 4-4-3；

步骤 4-4-7，整理输出不同非劣解对应的水库供水量、河道翻水量和外调水量。

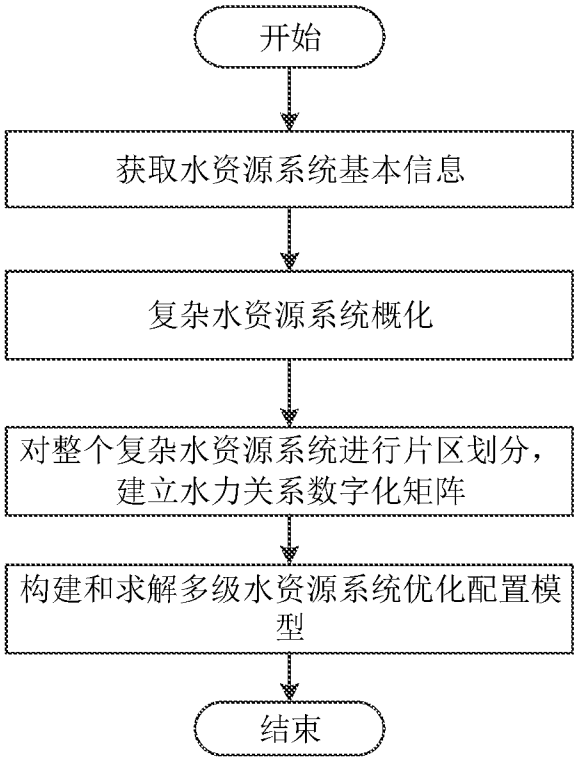

开始
获取水资源系统基本信息
复杂水资源系统概化
对整个复杂水资源系统进行片区划分，建立水力关系数字化矩阵
构建和求解多级水资源系统优化配置模型
结束

图 1

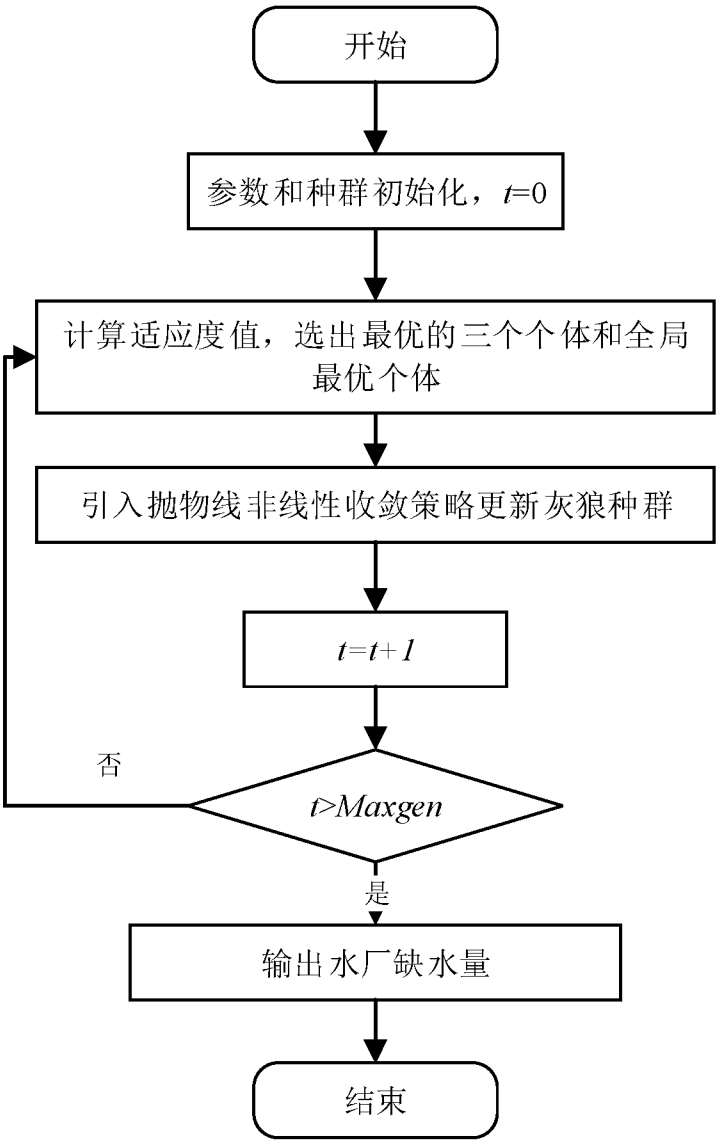

开始
参数和种群初始化，t=0
计算适应度值，选出最优的三个个体和全局最优个体
引入抛物线非线性收敛策略更新灰狼种群
t=t+1
否
t>Maxgen
是
输出水厂缺水量
结束

图 2

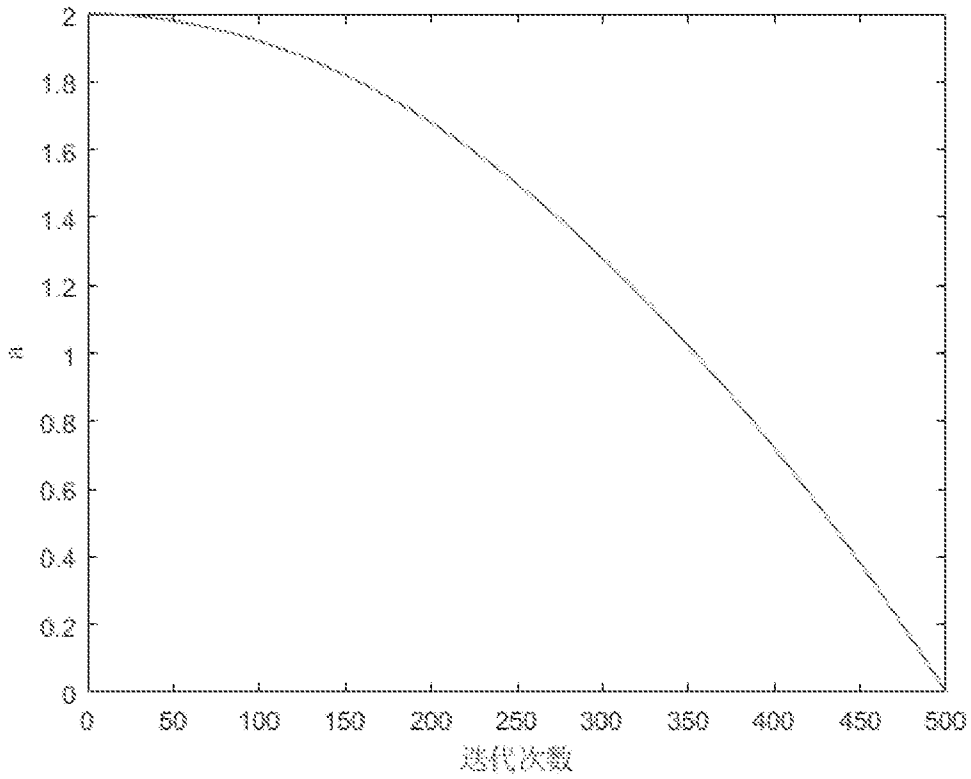

2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
α
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
迭代次数

图 3

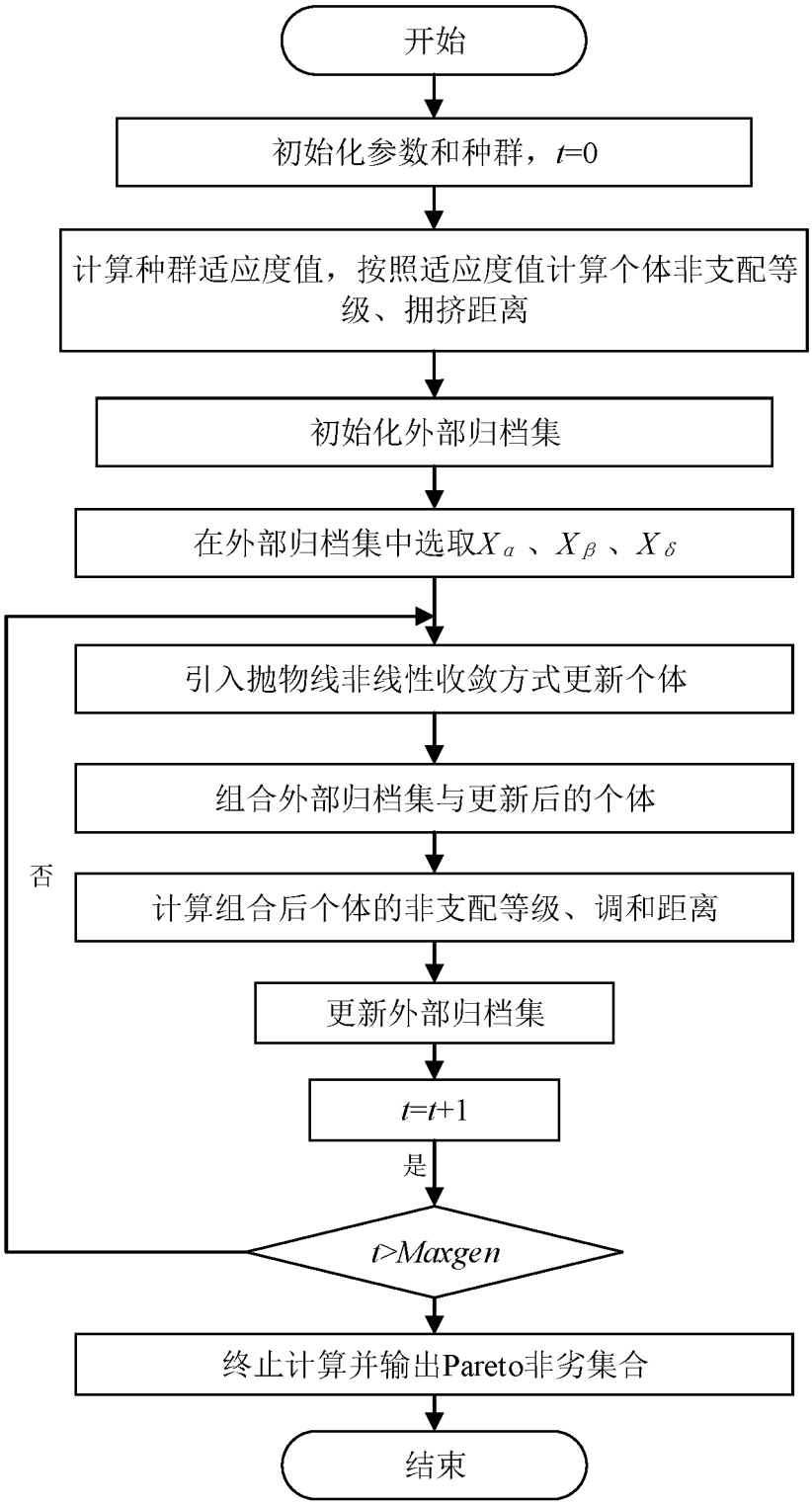

开始
初始化参数和种群，t=0
计算种群适应度值，按照适应度值计算个体非支配等级、拥挤距离
初始化外部归档集
在外部归档集中选取X_α、X_β、X_δ
引入抛物线非线性收敛方式更新个体
组合外部归档集与更新后的个体
计算组合后个体的非支配等级、调和距离
更新外部归档集
t=t+1
是
否
t>Maxgen
终止计算并输出Pareto非劣集合
结束

图 4

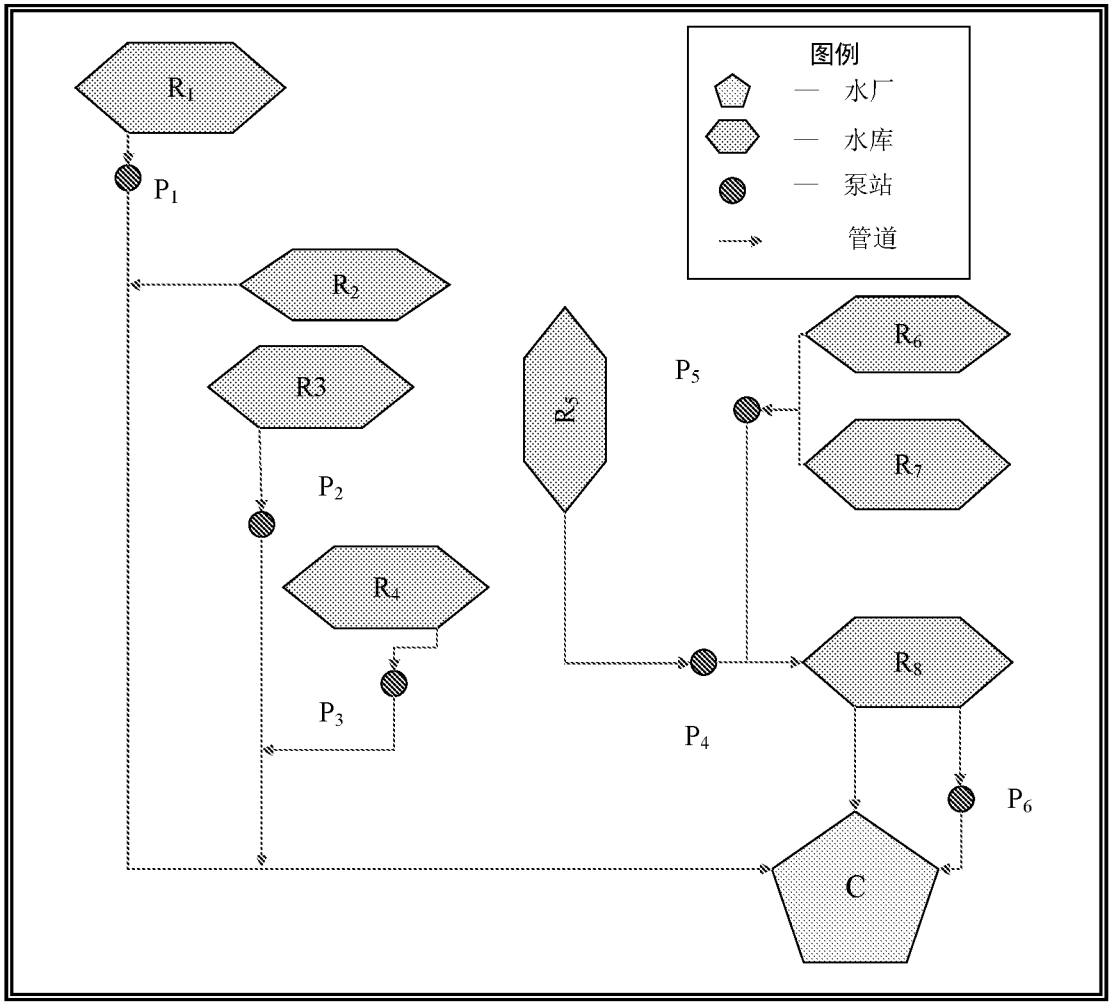


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2021/085198

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06Q 10/04(2012.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE: 水资源, 配置, 优化, 基本信息, 分片, 划片, 分级, 等级, water resource, configure, optimization, basic information, scribing, grading

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111724003 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 29 September 2020 (2020-09-29) claims 1-10, description paragraphs [0003]-[0100]	1-8
A	CN 104700150 A (AEROSPACE SCIENCE AND INDUSTRY SIMULATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 10 June 2015 (2015-06-10) description, paragraphs [0013]-[0038]	1-8
A	CN 108764573 A (CHINA INSTITUTE OF WATER RESOURCES AND HYDROPOWER RESEARCH) 06 November 2018 (2018-11-06) entire document	1-8
A	CN 107491855 A (CHINA INSTITUTE OF WATER RESOURCES AND HYDROPOWER RESEARCH) 19 December 2017 (2017-12-19) entire document	1-8
A	CN 108764557 A (CHINA INSTITUTE OF WATER RESOURCES AND HYDROPOWER RESEARCH) 06 November 2018 (2018-11-06) entire document	1-8
A	CN 110276700 A (BEIJING NORMAL UNIVERSITY) 24 September 2019 (2019-09-24) entire document	1-8

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
10 June 2021	**29 June 2021**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2021/085198

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 7593839 B1 (BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED) 22 September 2009 (2009-09-22) entire document	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2021/085198

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 111724003 A	29 September 2020	None	
CN 104700150 A	10 June 2015	None	
CN 108764573 A	06 November 2018	None	
CN 107491855 A	19 December 2017	None	
CN 108764557 A	06 November 2018	None	
CN 110276700 A	24 September 2019	None	
US 7593839 B1	22 September 2009	None	

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2021/085198

A. 主题的分类

G06Q 10/04(2012.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06Q

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE: 水资源，配置，优化，基本信息，分片，划片，分级，等级，water resource, configure, optimization, basic information, scribing, grading

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 111724003 A (浙江大学) 2020年 9月 29日 (2020-09-29) 权利要求1-10，说明书第[0003]-[0100]段	1-8
A	CN 104700150 A (航天科工仿真技术有限责任公司) 2015年 6月 10日 (2015-06-10) 说明书第[0013]-[0038]段	1-8
A	CN 108764573 A (中国水利水电科学研究院) 2018年 11月 6日 (2018-11-06) 全文	1-8
A	CN 107491855 A (中国水利水电科学研究院) 2017年 12月 19日 (2017-12-19) 全文	1-8
A	CN 108764557 A (中国水利水电科学研究院) 2018年 11月 6日 (2018-11-06) 全文	1-8
A	CN 110276700 A (北京师范大学) 2019年 9月 24日 (2019-09-24) 全文	1-8
A	US 7593839 B1 (BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED) 2009年 9月 22日 (2009-09-22) 全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2021年 6月 10日	2021年 6月 29日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 董显彬 电话号码 86-(10)-53961407

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2021/085198

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 111724003 A	2020年 9月 29日	无	
CN 104700150 A	2015年 6月 10日	无	
CN 108764573 A	2018年 11月 6日	无	
CN 107491855 A	2017年 12月 19日	无	
CN 108764557 A	2018年 11月 6日	无	
CN 110276700 A	2019年 9月 24日	无	
US 7593839 B1	2009年 9月 22日	无	