

区域多水源供水系统优化调度

杨 琦, 田一梅, 李 震, 吕祥瑞
(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 以区域多水源协同供水、优化运行为基点,提出了一种用于多水源优化调度建模、求解及方案评价的实用方法,并以北方某工业园区的多水源供水为例进行了模拟计算。在分析工业园区供需水结构的基础上,提出了多水源联合供水优化调度策略,以总缺水损失-协调供水费用-各供水子系统供需水量差额最小为目标,建立了多目标优化调度模型;采用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II),为决策者提供多组解方案;结合逼近理想解的 TOPSIS 法与 FAHP 法进行方案评价选优,为多水源供水系统优化调度提供决策支持。

关键词: 多水源优化调度; 方案评价; NSGA-II; TOPSIS; FAHP

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0068-05

Optimal Scheduling of Regional Multi-source Water Supply System

YANG Qi, TIAN Yi-mei, LI Zhen, LÜ Xiang-rui

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Focused on cooperative water supply and optimal operation in regional multi-source water supply, a practical method for modeling, solving, and scheme evaluation in the optimal scheduling of multi-source water was proposed. The multi-source water supply system in a northern industrial park was used to test the method. Based on the analysis of the water supply structure in the industrial park, a strategy to optimize the schedule of multi-source water supply was presented. A multi-objective scheduling optimization model was developed to minimize the general loss of water shortage, the cost of coordination in water supply, and the differences between water supply and demand in each subsystem. Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) was used to provide solution sets which were used as scenarios by decision makers; the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) were combined to solve the problem of scenario evaluation and optimization to provided decision support.

Key words: optimal scheduling of multi-source water; scheme evaluation; NSGA-II; TOPSIS; FAHP

近年来随着水资源日益紧张,各种水源的开发与协调利用成为供水行业研究的热点问题。虽然水资源优化调度在西方已有较为成功的例子,但各种

实用、有效的优化调度方法的研究仍有较大难度。

随着计算机科学的发展,现阶段关于建模和求解的研究,为解决水资源管理这类组合最优化问题

提供了新思路、新方法^[1]。2002年,McKinney等提出基于GIS系统的水资源模拟系统框架,并尝试用于流域水资源配置^[2];陈晓宏等^[3]以大系统分解协调理论作为技术支持,建立东江流域水资源优化调度的实用模型和方法;2004年,王慧敏等提出在南水北调工程的水资源配置与调度中引入供应链管理思想,以达到水资源配置与调度的目的^[4]。笔者以北方某工业园区供需水现状为基础,探讨区域多水源优化调度建模、求解以及评价的实用方法,旨在为区域多水源优化调度决策提供支持。

1 区域多水源优化调度模型的建立与求解

区域多水源优化调度,是在区域范围内对多种可利用水源进行合理配置,调配生活、生产和生态用水,协调地区、行业等各用水单位的用水关系,实现各类水源的统一优化调度管理。区域多水源优化调度将遵循:兼顾生活、生产、生态用水;优质优用,尽可能减少优质水低用,降低系统运行费用;充分利用再生水及雨洪水,优先配置非常规水源等多水源配置原则,并结合研究区域供需水现状及未来发展规划确定多水源优化调度系统追求的目标。

1.1 多目标选取

① 多水源系统运行费用最小或者协调利用费用最小目标。

$$E_1 = \min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m R_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

或:

$$E_1 = \min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m C_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

式中, R_{ij} 为第 j 类用户从第 i 水源调用单位水量所需的价格费用,元/ m^3 ; x_{ij} 为调度周期内第 j 类用户从第 i 水源调用的水量, m^3 ; C_{ij} 为多水源协调利用的价格费用,元/ m^3 。

② 缺水损失或者生产浪费损失最小目标。在实际调度中,区域缺水量的大小或者缺水程度对社会发展有所影响。

$$E_2 = \min \sum_{j=1}^n GDP_j \cdot |Q_j - \sum_{i=1}^m x_{ij}| \quad (3)$$

式中, GDP_j 为第 j 类用户因缺水而导致的经济损失,元/ m^3 ; Q_j 为第 j 类用户调度周期内需水量, m^3 。

③ 多水源各子系统独立运行供需水量差最小目标。

$$E_3 = \min \sum_{j=1}^n |Q_j - x_{ij}| (i=j) \quad (4)$$

1.2 约束条件的确定

① 水资源量约束,包括水厂可供水量约束、原水输水能力约束(即水源可供水量约束)。

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \Omega_i \quad (5)$$

式中, Ω_i 为第 i 水源调度周期内可供水量或原水输水能力,其中,雨水供水采用雨水可利用量预测值, m^3 。

② 水源独立运行(不包括雨水利用独立系统)供水保证率约束。

$$\begin{cases} \Pi_{\text{自来水}} \geq 80\% \\ \Pi_{\text{再生水}} \geq 70\% \\ \Pi_{\text{优质水}} \geq 70\% \end{cases} \quad (6)$$

③ 应急调度供水设施能力约束,包括满足应急调度水质要求的水处理设施产水规模、区域内各类输配水管道覆盖程度及送水能力等。

$$\Delta x_{ij} \leq \omega_i \quad (7)$$

式中, Δx_{ij} 为多水源系统中 i 子系统向 j 子系统应急调度水量, m^3 ; ω_i 为多水源系统中 i 子系统实施应急调度时的应急供水能力, m^3 。

④ 变量非负约束。

$$\begin{cases} x_{ij} \geq 0 \\ \Delta x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.3 基于NSGA-II的模型求解

模型建立后求解成为关键。目前一些常用算法多是基于加权法求解,且这种方法仅仅能求出一组解,而决策者往往需要多目标模型的求解结果能够提供多种供选方案,并按一定的评价体系优选。为此,采用一种带精英策略的基于快速分类的非支配多目标遗传算法(NSGA-II),该算法一次运行可求得多个无偏好(无权重系数)的最优解^[5]。

2 方案评价

通过模型运算、决策者与系统信息的不断交换,就会得到多个满足约束条件、体现不同决策者意愿的多水源优化调度方案。方案的评价与优选是多水源优化调度系统分析的重要环节。在实际优选过程中,影响最终结果的关键因素主要有3个:评价指标的选取、指标权重的确定以及评价方法的选择。

以多水源协调利用为基点,按照各类用水对协调补水水质要求,结合区域各类水资源、水处理设施的实际情况,选取自来水、再生水等各类水资源供水保证率以及各类水源的协调补水量等多项指标,利

用模糊层次分析法(FAHP)^[6]确定各指标的权重,并采用逼近理想解的综合距离评价方法(TOPSIS)^[7]对多种调度方案进行评价。根据TOPSIS法的基本原理,同时考虑备选方案分别与理想方案和最不理想方案之间的距离,从而从多种调度方案中确定尽可能贴近理想方案、远离最不理想方案的优化方案。

3 应用实例

将上述多水源优化调度数学模型及模型求解与方案评价等方法应用于我国北方某新建工业园区。在该园区水资源综合开发系统布局的基础上,分析园区水资源供需结构与运行工况,合理利用一切可利用的水资源,实现水资源供需系统的优化运行。

3.1 优化模型建立

3.1.1 多水源供需系统构成

该新建工业园区的各类水源及供水设施主要包括:①远距离输送至该区域的原水,经本区域自建净水厂净化后向区域供应优质饮用水;②远距离输送至该区域的自来水,经本区域加压泵站加压供水;③本区域再生水厂供应的再生水;④本区域可以利用的雨水。

区域内用水部门包括:区内生活、生产、建筑与仓储、生态用水及其他。按照其对水质要求可分为自来水用户、再生水用户、优质水用户和雨水用户。

鉴于多水源协调补水的水质要求,结合区域供水系统现状,则多水源调度除正常供水情况下优质饮用水、自来水、再生水及雨水供水外,其应急调度时可选择自建水厂不同处理级别净水作为补水水源,如自建水厂经常规处理的净水用作自来水补水,据此可将区域供水及协调补水水源分为7类,各水源之间在满足水质要求的前提下可协调供水。

3.1.2 模型建立

根据园区供水现状、需水要求,确定园区多水源优化调度策略:①多水源各子系统尽可能供需水量平衡。②如各子系统供需失衡,即部分子系统供小于需,其应急调度可选择两种协调补水方式,其一,现状供水水源的高质低补,如自来水可作为再生水的补充水;其二,自建水厂不同处理级别净水补水。据此建立园区多水源供水系统供需关系矩阵 R ,见式(9)。矩阵 R 以上文中7类水源为行、4类用户为列,矩阵元素 r_{ij} 表示 i 水源与 j 用户的供需关系, $r_{ij}=1$ 表示 i 水源向 j 用户供水, $r_{ij}=0$ 表示不存在供

需关系,则式(9)显示系统共存在10种供需水量关系或供水模式。依据式(1)~(8),建立了含有10个决策变量的多水源系统多目标优化调度数学模型(略)。模型中费用参数、单位水量经济损失系数、各水源供水能力、用户用水量及各水源间应急调度供水设施能力等,根据园区实际运行资料确定。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 模型求解及结果分析

系统中自来水、再生水、优质水及雨水的某月需水量预测分别为 132×10^4 、 80×10^4 、 40×10^4 、 $38 \times 10^4 \text{ m}^3$,而系统可供应量分别为 120×10^4 、 90×10^4 、 $45 \times 10^4 \text{ m}^3$,雨水可利用量预测为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,远距离输送至园区的水源水量为 $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。供需分析显示自来水、雨水供水量尚存在较大缺口,故利用模型进行供水优化调度方案计算。

利用Matlab编程求解模型。模型计算所需其他参数设置如下:种群大小 $N_{\text{ind}}=300$,最大进化代数 $N=5\ 000$,交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.2$,选择fgoalattain作为混合函数。

模型计算结果基本满足需水要求,仅雨水供水量尚缺 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。考虑到园区自来水管网、再生水管网及原水输水管道敷设现状,部分用户对各类水源的可调剂量,园区自建水厂各级净水规模及调度方案的可操作性等各方面因素,将自来水、再生水的需水量修正为 137×10^4 、 $75 \times 10^4 \text{ m}^3$,重新计算,得到105个Pareto解,每个解都代表1个关于多水源调度的决策方案。按照在解空间均匀取值的方法初选其中7个方案,见表1。可以看出,在独立系统满足供水安全的条件下,各方案一般首先满足自给,如各方案中的自来水、再生水及优质饮用水;当自来水、雨水供小于需时,在保证用户水质要求的前提下,根据系统缺水损失最小、协调供水费用最小的原则,以及优先调用再生水原则进行系统各水源间的协调利用,如方案5、6中的再生水、自建水厂原水经预处理出水均优先作为雨水补充水;比较方案1与6可以看出,两方案供需水量基本平衡,但由于方案

6 最大限度地利用了再生水,其供水费用较方案 1 节省了 8.69%。此外,由于优化算法的全局搜索,部分解并非期望解,如方案 7 由于未考虑系统多水源的协调利用,致使供需失衡达 13.79%。

表 1 解方案示例

Tab. 1 Solution examples

Pareto 解	调度方案	总缺水损失/ 万元	协调供水 费用/万元	总供水费用/ 万元	总缺水量/ 10 ⁴ m ³
1	{119.5,0,0,73.6,7.4,40,18.1,1,15.5,14.9}	0	147.76	1 145.44	0
2	{119.9,0,0,74.8,7.5,40,16.8,0.1,8.9,15}	58.21	118.66	1 125.37	6.9
3	{120,0,0,75,0,40,11.9,0,0,15}	260.52	47.60	1 066.05	28.1
4	{120,0,0,75,10,40,17,0,0,15}	103.89	98.04	1 109.03	13.0
5	{120,0,0,75,15,40,17,0,5.8,15}	17.49	131.61	1 133.54	2.2
6	{120,0,0,75,15,40,17,0,7.5,15}	4.35	136.86	1 137.64	0.5
7	{120,0,0,75,0,40,0,0,0,15}	439.44	0	1 012.43	40.0

3.3 方案评价

3.3.1 评价准则

根据园区供水调度方式,建立多水源优化调度方案的决策评价体系,以实现多水源调度为总目标层、各水源独立运行系统和多水源协调利用系统为中间类别层、以多水源优化调度方式为从属于两类别层的评价指标层,见图 1。根据优化调度的原则,FAHP 计算采用 0.1~0.9 数量标度,最终求得各种调度方式相对于系统总目标的重要性权重:

$$w = [0.21, 0.128, 0.28, 0.082, 0.038, 0.038, 0.08, 0.038, 0.058, 0.048]^T \quad (10)$$

由式(10)可知:该园区实施多水源优化调度时,各水源独立运行系统内应优先保证优质饮用水与自来水的供需要求;多水源协调利用系统内,应优先调用再生水,其次,将自建水厂原水经初期处理作为再生水或雨水的补充水源,与区域多水源优化调度原则相符。

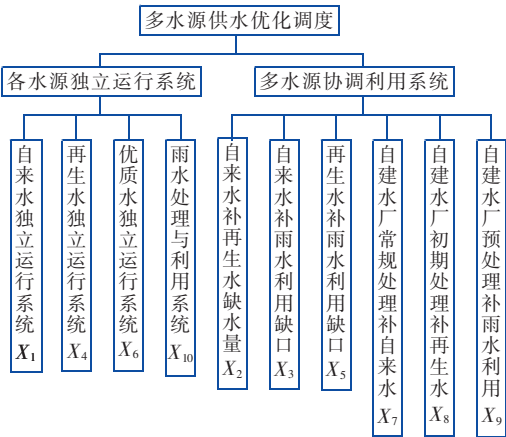


Fig. 1 Evaluation structure of multi-source water optimal scheduling

3.3.2 方案选优

根据 TOPSIS 评价方法,建立园区多水源优化调度拟定方案决策矩阵,见表 2。

表 2 园区多水源优化调度拟定方案决策矩阵

Tab. 2 Decision matrix of planning scheme for optimal scheduling of multi-source water in industrial park

项 目	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
自来水系统供水保证率/%	87.2	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5
自来水补再生水缺水量/10 ⁴ m ³	0.4	0	0	0	0	0	0
自来水补雨水缺水量/10 ⁴ m ³	0.2	0	0	0	0	0	0
再生水系统供水保证率/%	98.1	99.7	100	100	100	100	100
再生水补雨水缺水量/10 ⁴ m ³	7.4	7.5	0	10	15	15	0
优质水系统供水保证率/%	100	100	100	100	100	100	100
自建水厂补自来水量/10 ⁴ m ³	18.1	16.8	11.9	17	17	17	0
自建水厂补再生水量/10 ⁴ m ³	1	0.1	0	0	0	0	0
自建水厂补雨水量/10 ⁴ m ³	15.5	8.9	0	0	5.8	7.5	0
雨水利用率/%	99.3	100	100	100	100	100	100

根据各水源独立运行系统应首先满足本系统用水的原则,选取各水源供水保证率为指标,而雨水系

选取雨水利用率为指标;在多水源协调利用系统中,选取协调利用的水量为指标。

将表2中各缺水量进行标准化处理后,结合FAHP法求得的各供水方式权重系数,按照构造加权矩阵计算方法,得到加权标准化决策数据矩阵,并根据矩阵的行对应方案、列对应评价指标,计算各方案与正理想解、负理想解的距离(欧氏距离)及各方案与理想方案的贴近度 Z_i ,结果依次为0.51、0.64、0.41、0.61、0.78、0.81和0.37,不难看出方案6为最优方案。

4 结论

① 结合区域多水源供水的优化调度需要,提出了集多目标模型建立、求解与决策于一体的实用方法。在求解过程中,采用NSGA-II算法对多目标模型进行求解,能有效避免以往基于加权法求解模型而产生的权重不能反映决策者意愿的问题,且其求解结果能够为决策者提供多种选择方案。

② 方案的评价与优选是区域多水源供水系统优化调度的重要环节,从指标的选取、权重的确定以及评价方法的选择3个方面分别进行了论述,采用FAHP法确定目标权重,引进TOPSIS法进行方案评价与选优,实现了从决策角度解决多水源供水系统优化调度的问题。

参考文献:

- [1] Meier R, Barkdoll B D. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms[J]. J Water Resour Plan Manage, 2000, 126(4): 245-250.
- [2] McKinney D C, Cai X M. Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method[J]. Environ Model Software, 2002, 17(5): 413-425.
- [3] 陈晓宏, 陈永勤, 赖国友. 东江流域水资源优化配置研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 366-372.
Chen Xiaohong, Chen Yongqin, Lai Guoyou. Optimal allocation of water resources in Dongjiang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 366-

372(in Chinese).

- [4] 王慧敏, 朱九龙, 胡震云, 等. 基于供应链管理的南水北调水资源配置与调度[J]. 海河水利, 2004(3): 5-8.
Wang Huimin, Zhu Jiulong, Hu Zhenyun, et al. Water resources allocation and dispatch of South-to-North Water Transfer based on SCM[J]. Haihe Water Resources, 2004(3): 5-8(in Chinese).
- [5] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80-88.
Zhang Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(2): 80-88(in Chinese).
- [7] 郭廷忠, 薛旭方, 李蕊. TOPSIS法在开封市化肥河水环境质量评价中的应用[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 59-62.
Guo Tingzhong, Xue Xufang, Li Rui. Application of TOPSIS in environmental quality assessment of Huafei River in Kaifeng[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2008, 31(2): 59-62(in Chinese).



作者简介: 杨琦(1989-), 女, 四川成都人, 硕士, 工程师, 研究方向为市政给排水。

E-mail: 273969459@qq.com

收稿日期: 2018-12-12