

文章编号:1005-0523(2016)01-0107-07

基于图论的丽水市多水源供水配置模型研究

李奥典,唐德善,石蓝星,周 政

(淮海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了能更好地为城市供水规划提供指导,以丽水市为例,从图论的角度针对丽水市多水源供水的特点,建立了多水源供水优化配置模型。首先,将研究区域按高程进行分区,依据图论理论构建了供水系统概化模型;其次,以年运行费用最小为目标函数,建立了优化配置模型。计算方法采用遗传算法,对各供水分区进行供水量的配置计算,计算了现状年和两个规划水平年下的配置方案。为了验证模型的合理性,将现状配置方案进行对比,结果表明,本配置方案在运行费用上较现有方案可节省16.72%,该模型有一定的推广与应用价值。

关键词:图论;供水配置;多水源;丽水市

中图分类号:TV212.2

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.01.016

丽水市位于浙江省西南部,多山区,素有“九山半水半份田”之称。辖境内主水系为瓯江水系,其干流穿主城区而过,下游经温州入东海。目前,丽水城区主水源有两个,分列瓯江南北两侧,形成分区供水格局。但是随着城市化发展,南部片区水源面临污染风险,北部片区供水能力不足,且因是山区地形,高程起伏大,虽有南北双水源,但南部水源高程较低,两者无法互为备用;因此,丽水市拟在南部高压供水处新建一处水厂,其水源由南部滩坑水库优质水源提供,以期能形成三水源互为备用格局(如图1所示)。三水源格局形成之后,供水系统布置与优化,供水资源配置等问题亟需进行研究。

随着城市化水平的不断提高,城市的多水源供水资源配置问题越来越受到关注,国内外学者从供水资源的不确定性、气候变化、经济效益、生态环境效益等不同角度对此问题进行过一定的研究^[1-7]。图论理论是数学的一个分支,在交通等多个领域有广泛应用^[8],本文从供水系统的拓扑结构出发,采用图论中的研究方法对三水源供水系统进行配置研究,希望能找出新供水格局下合理的供水系统配置方案。

1 系统分区与概化

将城区供水区块分为12个片区,主要根据地形、高程、面积对供水区块进行分区。根据图1的12个分区概化出12个供水分区节点,如图2圆形节点所示;根据现有供水管网分布以及拟建管网,概化出29条供水管网路线,如图2直线段所示;根据现有供水设施概化出水厂节点,泵站节点以及水源节点,如图2所示。

节点之间的连接方式均在现有的连接方式以及拟建管网连接方式基础上概化出来。1~12号节点为概化的分区供水节点,13~15号节点是水厂节点,16~19号节点是为了符合实际走向而概化的中间拐点,20号节点是泵站节点。所有节点(除S1~S3节点)均以实际经纬度坐标绘制。

收稿日期:2016-08-22

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB417006);长江学者和创新团队发展计划(IRT1233)

作者简介:李奥典(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水资源系统规划研究。

通讯作者:唐德善(1955—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为水资源系统规划与水利经济研究。

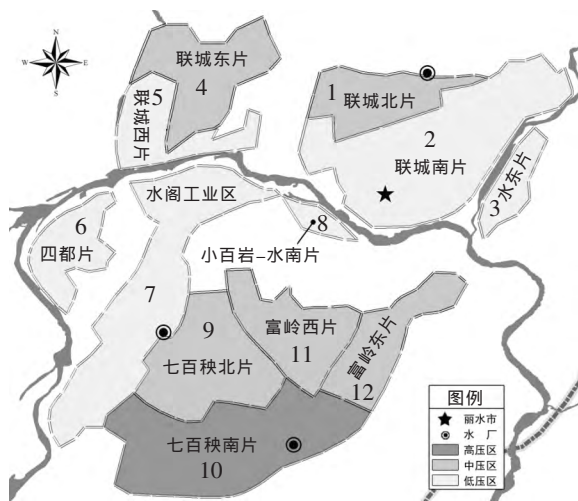


图1 供水系统分区示意图

Fig.1 Partition diagram of water supply system

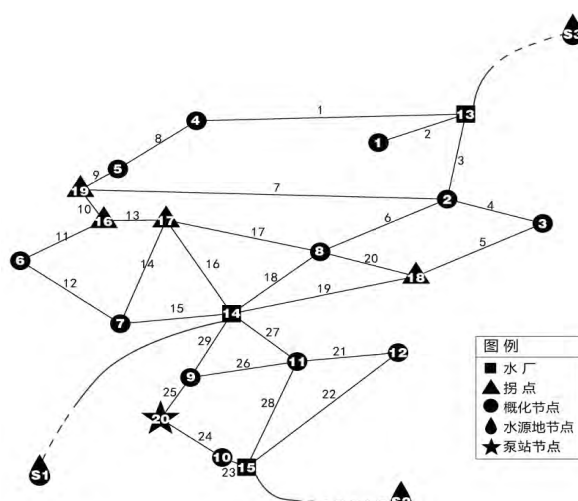


图2 供水配置模型概化图

Fig.2 Generalized graph of water supply allocation model

2 供水配置模型

2.1 供水系统的图论描述

供水管网中水的流向受到压差的控制,在压差一定的情况下,管道内流向也是一定的,因此从图论的角度可以看成是一个有向图。节点集合定义为 V , 管网路线集合定义为 E , 供水管网系统定义为 G , 则该系统可表示为

$$\left. \begin{aligned} V &= [v_1, v_2, \dots, v_n], n=20 \\ E &= [e_1, e_2, \dots, e_m], m=29 \\ G(V, E) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中:管段 $e_k=(v_i, v_j)$ 与节点 v_i 或 v_j 互相关联; v_i 与 v_j 为相邻节点。集合 E 中不同管线施工的成本不同,为了更好地模拟供水系统,将成本函数作为权重,则供水管网系统 G 即为带权有向图(1)则在式基础上可以得到带权有向图供水管网系统 $\bar{G}$

$$\left. \begin{aligned} V &= [v_1, v_2, \dots, v_n], n=20 \\ W &= [w_1, w_2, \dots, w_n], m=29 \\ E &= [w_1 e_1, w_2 e_2, \dots, w_n e_m], m=29 \\ \bar{G}(V, W \cdot E) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为了使整个供水系统的费用最低,在节点集合 V 中 v_i 到 v_j 的供水路线定义为 $i \rightarrow j$ 的带权最短路径。采用 Floyd 算法可以得到水厂节点到各供水节点的供水路径,以 v_i 到 v_j 为例,其计算原理如下:

S1:从任意一条单边路径开始。所有两点之间的距离是边的权,如果两点之间没有边相连,则权为无穷大。

S2:对于集合 V 中每一对顶点相邻节点 v_i 和 v_j , 设 $D_{\min}(i, j)$ 为两者最短路,再遍历集合 V 是否存在一个 v_k 使得 $D_{\min}(i, k) + D_{\min}(k, j) < D_{\min}(i, j)$, 若存在则令 $D_{\min}(i, j) = D_{\min}(i, k) + D_{\min}(k, j)$, 当遍历完集合 V , 则可得到 v_i 到 v_j 的最短路径。

2.2 目标函数

目标函数为年总费用最低(费用函数单位为万元)如下式所示

$$\left. \begin{aligned} F_n(X) &= \min \{ F_1(X) + F_2(X) + [F_3(X) + F_4(X) + F_5(X)] \times (A/F, 5\%, 30) \} + F_{n+1}(X) \\ X_n &= \max \left(X_{n-1}, \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{ij} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \right) \\ F_0(X) &= 0, X_0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中: n 表示计算阶段,这里将 $n=1$ 定义为现状年, i 代表拟分析水厂数量,此处有3个水厂,即 $i=3$; j 表示需水分区数量, $j=12$;自变量 X 矩阵是一个 12×3 的矩阵, x_{ij} 包括每个水厂往每个分区的供水; $F(X)$ 是年总费用,包括:水厂的年运行费(制水费用和提水费用)和基建费用(输水管网建设费用、取水管网建设费用和泵站建设费用)两部分。基建费用以30年为折旧期按等额计算法平摊到每年,其中 A 表示年均支付金额, F 表示本息和,年利率取5%,再和年运行费叠加得到目标函数值; $F_1(X)$ 是制水费用函数,S1水厂取20万元 $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{年})^{-1}$,S2、S3水厂取15万元 $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{年})^{-1}$; $F_2(X)$ 是提水费用函数

$$F_2 = \eta_1 \times \eta_2 \times J \times H \times Q \quad (4)$$

其中: η_1 为泵站提水效率,取1.05; η_2 为单位换算系数; J 为电价,取工业电价0.67元·度 $^{-1}$; H 为自来水厂提水水头(单位:m); Q 为自来水厂提水流量(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

$F_3(X)$ 是输水管网建设费用,根据实际费用拟合得到

$$F_3 = a Q^b = 219.17 \times W \times Q^{0.572766} \quad (5)$$

式中: Q 为管道流量 $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$; W 为施工难度矩阵,见式(2),其中 w_i 取值范围依当地情况,设定为 $[0.72, 1]$ 。

$F_4(X)$ 泵站建设费用,取200万元 $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,即新建一个提水量 $1(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 的泵站约投资200万元。

$F_5(X)$ 取水管网建设费用,据实际费用拟合得到

$$F_5 = \begin{cases} 156.17 \times Q^{0.572766} & (\text{S1 水厂}) \\ 109.17 \times Q^{0.572766} & (\text{S2、S3 水厂}) \end{cases} \quad (6)$$

2.3 约束条件

模型中分为3类约束条件:

1) 管道压力约束:供水水源受到供水压力和高程限制,水管流向由低压力节点流向高压节点,对于集合 W ,有

$$K = \begin{bmatrix} k_{w1,w1} & \cdots & k_{w1,w_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{w_m,w1} & \cdots & k_{w_m,w_m} \end{bmatrix}, \text{ if } P(w_i > w_j), \text{ then } k_{w_i,w_j} = 1, k_{w_i,w_j} = \infty \\ \text{ else } k_{w_i,w_j} = \infty, k_{w_i,w_j} = 1 \quad (7)$$

2) 水源供水能力约束,用 D 矩阵表示,对于自变量集合 X 有

$$\left. \begin{aligned} D &= [d_1 \cdots d_i], i=3 \\ 0 &\leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq d_j, m=12, 1 \leq j \leq 3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3) 用水户需水约束,用 $\bar{D}$ 矩阵表示,对于自变量集合 X 有

$$\left. \begin{aligned} \bar{D} &= [\bar{d}_1 \cdots \bar{d}_i], i=12 \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &\geq \bar{d}_j, m=3, 1 \leq i \leq 12 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.4 参数输入

根据概化模型,输入参数主要是概化节点编号和道路节点编号,通过输入各编号节点的信息,求解、优化供水模型。输入的参数文件包括:

1) 文件1:供水系统文件。包括节点集合 V 的经纬度、高程、海拔等基本情况和管网路线集合 E 的节点间的连接关系等基本信息。

2) 文件2:节点高程属性文件。节点高程文件中节点高程属性结合丽水城区的地形特点划分为常压供水片区(1等),中压供水片区(2等),高压供水片区(3等),如图1所示。

3) 文件 3:水管漏失率文件。根据拟合出供水漏失率的函数关系,得到水厂节点到各需水节点的漏失率。

4) 文件 4:道路节点施工难度文件。根据实际情况以及现状工况率定,这里取值范围根据式可知,在 0.72~1 之间取值。图 3 为供水资源配置模型配置计算流程图。

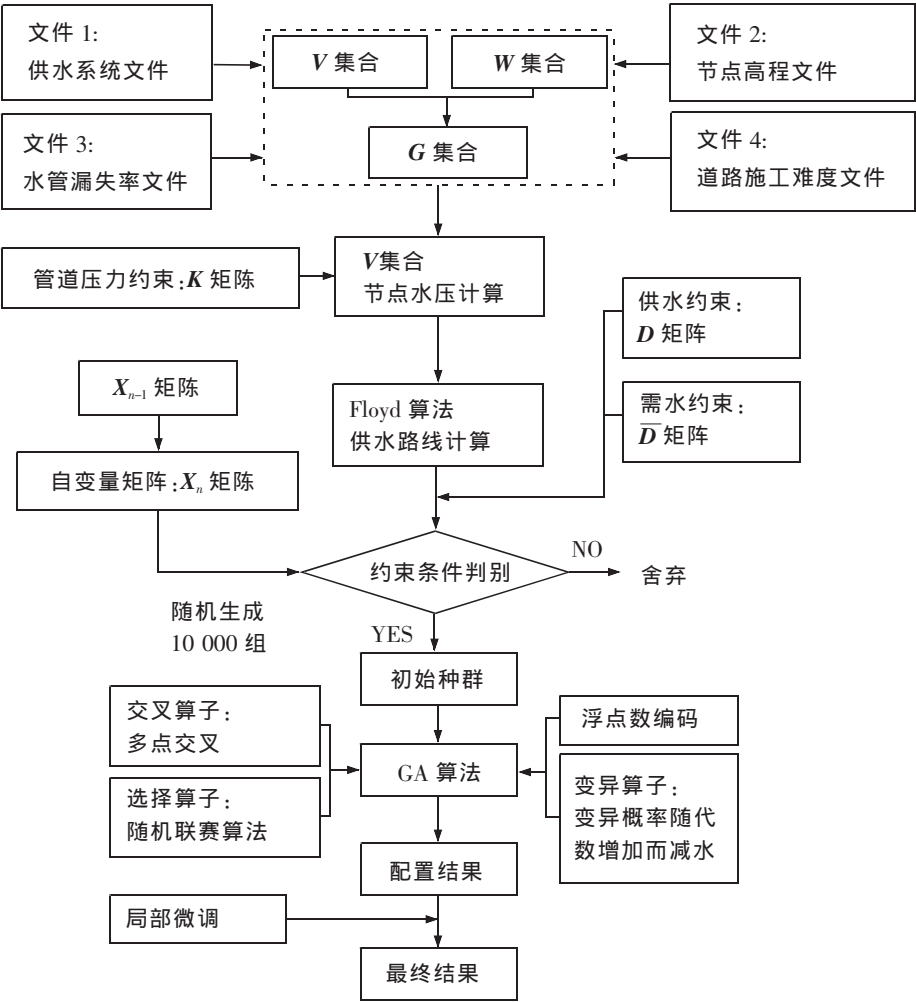


图 3 供水资源配置模型计算流程图

Fig.3 Calculation flow chart of water resources allocation model

3 实例计算

目标函数非线性且自变量数量多,这里考虑采用遗传算法进行求解,采用 Gatbs 工具箱在 MATLAB 软件中进行编程计算。考虑约束条件较多,首先生成大量随机初始解,后进行约束条件判断,筛选出可行解,以此得到初始种群。经此处理后,再在此基础上再利用遗传算法进行计算,进行约 200 代的交叉、遗传和变异后,目标函数值基本稳定,从而可以得到配置结果。

3.1 基本情况

3.1.1 需水节点需水量

根据式(3)说明, $n=1$ 时为现状年,根据丽水市区的经济发展指标和城市化等因素,采用组合灰色模型的方法^[9]预测了 2 个计算时段下的需水量($n=2, n=3$),如表 1 所示。

表 1 各计算规划年下各需水节点需水量
Tab.1 Water requirement to be calculated for each node in every planning level year $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

节点 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	共计
$n=1$	0.724	3.427	0.472	1.014	0.867	0.828	2.258	0.485	1.647	2.730	1.049	1.192	16.691
$n=2$	1.127	5.371	0.736	1.582	1.362	1.300	3.539	0.767	2.584	4.275	1.644	1.863	26.150
$n=3$	1.637	7.797	1.068	2.296	1.978	1.887	5.137	1.114	3.751	6.205	2.387	2.705	37.960

3.1.2 供水节点供水量

现状年 S2 水源尚未参与供水,阶段 2 和阶段 3 中 S2 水源参与供水,考虑到各水源的供水能力以及水源扩容的进展,供水节点各节点的供水量能力如表 2 所示。

表 2 各计算规划年下各供水节点供水能力
Tab. 2 Water supply capability to be calculated for each node in every planning level year $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

水 厂	S1	S2	S3
$n=1$	10	—	10
$n=2$	20	10	10
$n=3$	20	25	10

3.2 现状年结果($n=1$)

在进行规划年配置计算前,为了验证该模型的可靠性和合理性,首先计算了现状条件下该模型的配置方案,并与现状供水系统的配置情况进行对比分析,如表 3 所示。

表 3 现状配置方案与优化配置方案结果对比表
Tab.3 Comparison of the results of the current allocation scheme and the optimal allocation model $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

节点编号	现状需水	优化结果			现状配置		
		S1	S3	总 计	S1	S3	总 计
1	0.724	0.000	0.724	0.724	0.000	0.724	0.724
2	3.427	0.000	3.427	3.427	0.000	3.427	3.427
3	0.472	0.000	0.472	0.472	0.000	0.472	0.472
4	1.014	0.000	1.014	1.014	0.000	1.014	1.014
5	0.867	0.000	0.867	0.867	0.867	0.000	0.867
6	0.828	0.828	0.000	0.828	0.828	0.000	0.828
7	2.258	1.358	0.900	2.258	0.358	1.900	2.258
8	0.485	0.000	0.485	0.485	0.000	0.485	0.485
9	1.647	1.647	0.000	1.647	1.647	0.000	1.647
10	2.730	2.730	0.000	2.730	2.730	0.000	2.730
11	1.049	1.049	0.000	1.049	1.049	0.000	1.049
12	1.192	1.192	0.000	1.192	1.192	0.000	1.192
总计	16.691	8.874	7.817	16.691	8.668	8.023	16.691
折算年费用		7057.2 万元/年			8197.1 万元/年		

注:1.现状情况下 S2 水厂尚未参与供水,故配置中仅列出 S1 和 S3 水源的供水;2.此供水量为净供水量,实际供水量需加上沿途水的漏失。

1) 从配置方案上来看:两者的配置差别仅出现在节点 5 和节点 7 上,虽然原方案中 S1 水源供给 5 号片区距离较近,但是需横跨瓯江,成本较高,因此成本反而较优化配置方案中的舍近求远后的方案要高。总体来看,基于本文模型计算下的优化配置方案和现状下的配置方案基本一致,说明该优化配置模型的计算结果是合理的。

2) 从配置结果上看:优化结果下目标函数计算结果为 7 057.2 万元/年;现状配置结果下结果为 8 197.1 万元/年,和现状配置结果相比,折算年运行费用少了 16.72%,经济效益明显。

3.3 规划年结果($n=2,n=3$)

同理,根据本文的配置模型,计算了 $n=2$ 以及 $n=3$ 时的配置方案,如表 4 所示。

表 4 $n=2,n=3$ 下供水配置方案计算表
Tab.4 Calculation table of the water supply allocation scheme under $n=2&n=3$

$10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$

节点编号	$n=2$				$n=3$			
	S1	S2	S3	总 计	S1	S2	S3	总 计
1	0.000	0.000	1.127	1.127	0.000	0.000	1.637	1.637
2	1.722	0.000	3.649	5.371	5.121	0.019	2.657	7.797
3	0.000	0.000	0.736	0.736	0.029	0.612	0.428	1.068
4	0.000	0.000	1.582	1.582	0.000	0.000	2.296	2.296
5	0.000	0.000	1.362	1.362	0.325	0.000	1.653	1.978
6	1.047	0.000	0.253	1.300	1.887	0.000	0.000	1.887
7	3.539	0.000	0.000	3.539	5.137	0.000	0.000	5.137
8	0.767	0.000	0.000	0.767	0.474	0.640	0.000	1.114
9	2.584	0.000	0.000	2.584	3.358	0.393	0.000	3.751
10	1.793	2.482	0.000	4.275	0.305	5.900	0.000	6.205
11	1.644	0.000	0.000	1.644	0.000	2.387	0.000	2.387
12	0.596	1.267	0.000	1.863	0.969	1.736	0.000	2.705
总 计	13.692	3.750	8.709	26.150	17.604	11.687	8.669	37.960
折算年费用	11 012.29 万元/年				17 600.96 万元/年			

注:此供水量为净供水量,实际供水量需加上沿途水的漏失。

4 结论

本文建立的基于图论方法的供水配置模型,是在原有供水系统的基础上进行进一步简化,进而得到各分区的供水量,具有输入参数少,构建方便的优点。计算结果与实际配置方案相比较,配置结果合理、可靠且更为经济。基于此模型,可以解决多水源情况下城市供水配置方案的问题,在此基础上还可以进一步的解决供水设施建设与调度等问题,可以为城市供水规划等提供技术支撑,具有一定的推广和实际应用价值。

参考文献:

[1] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报,2014,45(7):844-849.
[2] 刘三省,尹建光,李薇,等. 基于区间机会约束规划的滨州新区水资源优化配置[J]. 水电能源科学,2014,32(7):28-32.

- [3] 曹平,郭召海,王燕,等. 管网模型在多水源供水优化调度中的应用研究[J]. 中国给水排水,2013,29(19):49–53.
- [4] 赵璧奎. 城市原水系统水质水量联合调度优化方法及应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [5] 高波,郭菊娥,薛欣喜. 沿海城市多水源多用户供水优化配置研究[J]. 中国海洋大学学报:社会科学版,2013(2):19–24.
- [6] PINGALE S M,JAT M K,KHARE D. Integrated urban water management modelling under climate change scenarios[J]. Resources, Conservation and Recycling,2014,83:176–189.
- [7] XIE Y L,HUANG G H,LI W,et al. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management in Nansihu Lake Basin, China[J]. Journal of Environmental Management,2013,127:188–205.
- [8] 郭垂江,雷定猷. 铁路车站取送车作业图论模型及算法分析[J]. 华东交通大学学报,2014,31(1):102–107.
- [9] 王有娟,冯卫兵,李奥典. 基于灰色组合模型的浙江省需水量预测[J]. 水电能源科学,2015,33(3):22–26.

Evaluation on Multi-source Water Supply Allocation Model of Lishui City Based on Graph Theory

Li Aodian, Tang Deshan, Shi Lanxing, Zhou Zheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to provide better guidance for urban water supply planning, this study takes Lishui City as an example and establishes the optimal allocation model of multi-source water supply for Lishui from the perspective of graph theory. Firstly, it partitions study areas according to elevation and builds up the generalized model of the water system based on graph theory. Secondly, taking the minimum annual operation cost as objective function, it establishes the optimal allocation model. By way of genetic algorithm, it then conducts configurable calculation of water supply for each water partition and puts forward the configuration scheme of the current year and two planning level years. By comparing the current configuration scheme with the optimal scheme, it verifies the reasonableness. Results show that the optimal one can save 16.72% in operating costs compared with the existing scheme with more popularization and application values.

Key words: graph theory; water supply resources allocation; multi-source water supply; Lishui City

(责任编辑 姜红贵)