

基于 0-1 整数规划模型的水坝选址问题

陈传军¹, 于宪荣¹, 王延安², 孙玉波¹

(1. 烟台大学数学与信息科学学院, 山东 烟台 264005; 2. 烟台大学计算机与控制工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 针对赞比西河卡里巴大坝存在的问题, 提出了一种应用于大坝选址的新方法, 用于求解出大坝的具体位置和数量. 该方法运用了 0-1 整数规划, 以低成本、高安全系数为目标, 建立多目标 0-1 整数规划模型, 并运用 lingo 软件求解出在赞比西河流域建立水坝的具体位置与数量. 所建立的新多坝系统不仅可以满足赞比西河流域基本的水利用情况, 而且还可应对一些突发的自然灾害. 此法不仅克服了其他选址方法中数量单一、位置不明确等缺点, 且具有原理简单、计算量小等优点. 另外, 还可将此模型用于其他选址问题上.

关键词: 水坝选址; 0-1 整数规划; 赞比西河; Lingo 软件

中图分类号: O221.4

文献标志码: A

赞比西河(Zambezi)是非洲的第四大河流, 全长 2 660 km. 卡里巴大坝(Kariba Dam)是赞比西河上最大的大坝, 卡里巴大坝的建设给河流两岸带来了巨大的经济效益和社会效益. 但是经过调查显示, 当前的卡里巴大坝出现了很多问题, 如图 1 所示. 闸口放出的水流猛而急, 不断冲刷原有大坝的地基, 使其变得十分不稳固. 本文拟建立一个新多坝系统, 即建立 10 到 20 个小水坝代替原有的卡里巴大坝, 对小水坝的选址问题进行研究.

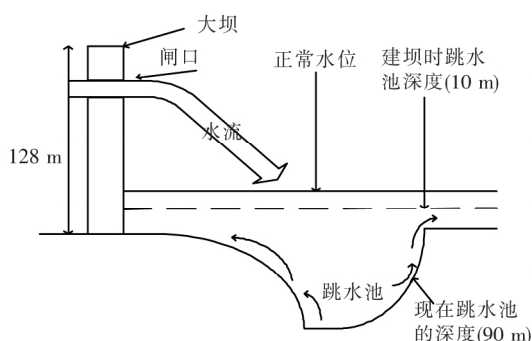


图 1 水坝横截面

Fig. 1 Sketch map of the dam's cross section

选址问题是指为特殊的功能或活动寻找合适的位置^[1], 它一直是地理学、运筹学、计算机科学等学科所关注的热点问题. 选址问题本质上属于运筹学优化问题, 如何合理配置不同的空间资源是具有一定难度的, 合理的选址方案和决策会带来巨大的经济效益和社会效益^[2]. 对于选址问题现在已经形成了多种求解方法. 早期主要是运用单纯形法、松弛算法和分支定界法得出问题的最优解, 然而随着数据量的不断增加, 优化问题的系统结构愈加复杂, 传统优化方法表现出较大的局限性^[3]. 后来, 模拟退火算法^[4]、贪婪算法等启发式算法由于需要进行方案组合的个数较少, 算法简单, 速度快, 也常被应用于求解复杂大规模的选址问题. 近年来, 各种智能计算方法也被引入选址问题中, 如遗传算法、粒子群优化算法等.

针对赞比西河流域复杂的地形特征, 本文运用 0-1 整数规划方法, 以成本最低、水坝安全系数(岩石坚硬程度、溢洪道、地形等因素)最高为目标函数, 建立多目标 0-1 整数规划模型. 相对于其他选址求解方法, 该方法可以准确地确立各个水坝的具

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11771375, 11571297).

作者简介: 陈传军(1978-), 男, 山东滕州人, 副教授, 博士, 研究方向: 微分方程数值解法.

体位置以及建坝数量,具有原理简单、计算量小且结果精确等优点^[5-6].

1 0-1 整数规划模型

0-1 规划是一种特殊形式的整数规划^[7]. 这种规划的决策变量 x_i 只能取值 0 或 1, 故称 x_i 为 0-1 变量或者是二进制变量, 因为一个非负整数都可以用二进制记数法用若干个 0-1 变量表示. 它的一般形式如下:

$$\begin{aligned} \max(\min) z &= c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n, \quad (1) \\ \text{s. t. } \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq (=, \geq) b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq (=, \geq) b_2, \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leq (=, \geq) b_m, \\ x_1, x_2, \cdots, x_n = 0, 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

0-1 变量可以数量化地描述诸如开与关、取与弃、有与无等现象所反映的离散变量间的逻辑关系、顺序关系以及互斥的约束条件, 因此 0-1 规划非常适合描述和解决如线路设计、工厂选址、背包问题等人们所关心的多种问题. 因此它是运筹学中一个重要的模型. 针对不同的实际问题有不同的求解模型, 我们最熟悉的就穷举法, 其他的有隐枚举法(如分支定界法)^[8]、匈牙利法^[9]等.

2 基于 0-1 整数规划模型的水坝选址问题

本文首先根据坝址选择的基本条件, 结合赞比西河流域的地理位置信息, 选出 N 个备选坝址; 其次设置 0-1 变量, 以建造水坝的最小花费和最高安全系数作为目标函数, 以大坝的蓄水能力作为约束条件来构建多目标的 0-1 整数规划模型, 从而在 N 个备选坝址中选出合适的建坝地址. 图 2 是这一过程的流程图.

2.1 备选坝址的建立

坝址的选择须满足以下几个基本条件^[10]:

- (1) 大坝的选址最好是口袋型的地形, 腹地广, 出口窄. 腹地广有利于集水, 出口窄有利于建坝;
- (2) 河流的落差大, 水量大;
- (3) 地质情况: 查看这个地方是否处在石灰岩地区、地下溶洞; 是否有断裂带. 最好要选在花岗岩地区或岩石坚硬的地区.
- (4) 出于经济的考虑, 坝的长度应该尽可能小, 并且对于给定的高度, 其应当存储最大体积的水.

(5) 坝址附近应该有适合溢洪道的地点.

根据以上 5 个基本条件, 可从赞比西河流域中选出 N 个点作为备选坝址.

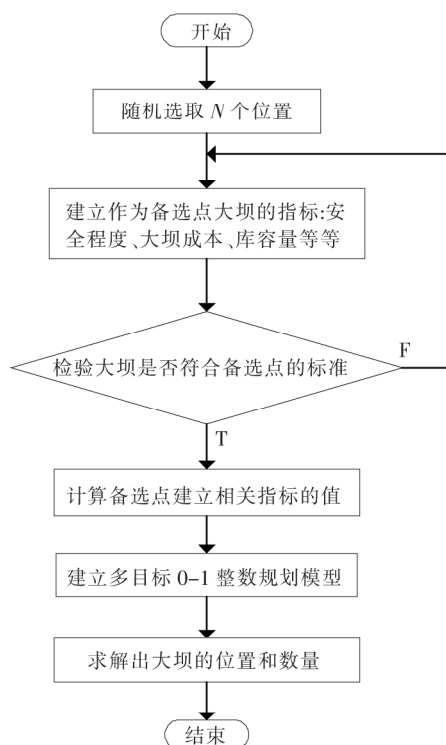


图 2 流程图

Fig. 2 Flow chart

2.2 备选坝址评价指标的建立

本文从 3 个方面建立评价指标. 第一, 建立这些小水坝的成本, 包括管理费用和建造费用两部分. 第二, 小水坝的安全系数: 根据坝址选择的条件, 选择岩石的坚硬程度、是否有适合建立溢洪道的地点和是否具备其它有利地形因素这 3 个条件来综合评估小水坝的安全系数. 第三, 小水坝的蓄水能力: 新建的小水坝的综合蓄水能力不能低于原来的卡里巴大坝的蓄水能力.

2.3 0-1 整数规划模型的建立

模型主要包括变量设置、目标函数、约束条件三部分.

(1) 变量设置. 设 $x_j (j=1, 2, \cdots, N)$ 表示 N 个备选坝址,

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{第 } j \text{ 个备选坝址建坝,} \\ 0, & \text{第 } j \text{ 个备选坝址不建坝,} \end{cases} \quad j=1, 2, \cdots, N. \quad (3)$$

(2) 目标函数. 以最小成本作为第一个目标函数, 总成本为 z ; a_j 表示第 j 个小水坝的建造成本; l

表示建造这一系列小水坝的总管理费用,可得第一个目标函数为

$$\min z = \sum_{j=1}^N a_j x_j + l. \quad (4)$$

以安全系数最高作为第二个目标函数. 由于安全系数受到岩石、溢洪道、地形 3 个因素的影响,但是这 3 个因素的重要程度并不相同,故采用加权法来计算安全系数. u_1 表示第一个因素岩石坚硬程度的权重, u_2 表示第二个因素溢洪道的权重, u_3 表示地形因素的权重. 另外,用等级变量 $A_j (j=1, 2, \dots, N)$ 表示岩石的坚硬程度, 0-1 变量 $B_j (j=1, 2, \dots, N)$ 表示有无合适地点建立溢洪道, 0-1 变量 $C_j (j=1, 2, \dots, N)$ 表示有无其他方面的地形因素. $b_j (j=1, 2, \dots, N)$ 表示第 j 个小水坝的安全系数, 则

$$b_j = u_1 A_j + u_2 B_j + u_3 C_j, j = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (5)$$

其中: $u_1 + u_2 + u_3 = 1$. 建立的所有的的小水坝总的安全系数记为 y , 可得第二个目标函数

$$\max y = \sum_{j=1}^N b_j x_j. \quad (6)$$

(3) 约束条件. 小水坝的建立数量应有一个限制, 如介于 m 到 n 之间, 由此可得第一个约束条件为

$$m \leq \sum_{j=1}^N x_j \leq n. \quad (7)$$

若要建立一系列新的小水坝来代替原有的卡里巴大坝, 那么这些小水坝总的管理水能力不能低于原有的卡里巴水坝. 假设每个小水坝的蓄水能力为 c_j , 原来的卡里巴大坝的蓄水能力为 M , 可得第二个约束条件为

$$\sum_{j=1}^N c_j x_j \geq M. \quad (8)$$

综上所述, 可建立如下的多目标 0-1 规划模型: 目标函数

$$\begin{cases} \min z = \sum_{j=1}^N a_j x_j + l, \\ \max y = \sum_{j=1}^N (u_1 A_j + u_2 B_j + u_3 C_j) x_j \end{cases} \quad (9)$$

和约束条件

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^N c_j x_j \geq M, \\ m \leq \sum_{j=1}^N x_j \leq n, \\ x_j = 0 \text{ 或 } 1, j = 1, 2, 3, \dots, N. \end{cases} \quad (10)$$

2.4 模型的求解

由于多目标规划问题难以直接求解, 这里利用

一个简单的加权法将其转化成单目标问题. 将成本和安全系数作用以后的函数记为 f , f 可以表示为 $f = y - z$, 这样便可得到如下的单目标 0-1 整数规划模型: 目标函数

$$\max f = \sum_{j=1}^N (u_1 A_j + u_2 B_j + u_3 C_j) x_j - \left(\sum_{j=1}^N a_j x_j + l \right) \quad (11)$$

和约束条件

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^N c_j x_j \geq M, \\ m \leq \sum_{j=1}^N x_j \leq n, \\ x_j = 0 \text{ 或 } 1, j = 1, 2, 3, \dots, N. \end{cases} \quad (12)$$

接下来便可利用 Lingo 编程软件编程求解了.

3 实例计算

经过查阅资料可得卡里巴原有大坝的蓄水能力 M 为 1.84 亿 m^3 , 由建造水坝的条件选出了 25 个备选坝址, 即 $N=25$, 限制 $m=10$, $n=20$. 将以上数据带入上文建立的 0-1 整数规划模型中, 最终得出在赞比西河流域上建立 13 个小水坝, 具体位置见表 1.

表 1 新多坝系统的具体位置
Tab. 1 The specific location of new dam system

位置	地理坐标(S, E)
Devils Gorge	17.99, 26.82
Mupata	15.62, 30.07
Hwange	17.99, 26.87
Chewore Safari Area	15.62, 30.13
Urungwe	15.61, 29.82
Kazungula	15.87, 29.09
Kazungula	17.92, 26.13
Chewore Safari Area	17.88, 26.22
Chewore Safari Area	15.94, 29.02
Matabeleland North	15.63, 20.62
Matabeleland North	18.00, 26.83
Kalomo	15.87, 29.09
Matabeleland North	17.95, 27.01

4 新多坝系统合理性解释

4.1 多坝系统对水资源的调度

赞比西河位于非洲的中南部, 冬季(5月~7

月) 阴凉而干燥, 夏季(11月~翌年4月) 温和湿润. 雨季容易形成洪水, 冬季容易造成干旱, 如图3. 因此水坝对于沿岸水资源的调度显得尤为重要.

针对不同的季节人们对水量的需求, 运用 Matlab 软件模拟新多坝系统对于水流的管理能力. 模拟结果如图3.

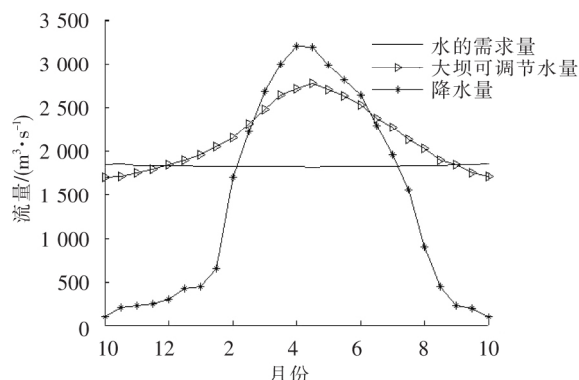


图3 新水坝水调度的模拟图

Fig. 3 Simulation of new dam's water management

从 Matlab 软件模拟出的结果中大致可以看出, 水坝对于水资源的调用基本能满足赞比西河各地区的用水情况.

4.2 不同自然灾害对于新多坝系统的影响

针对不同的自然灾害, 如地震、洪水与干旱, 利用 Matlab 软件模拟自然灾害对于新多坝系统管理水能力的影响(图4).

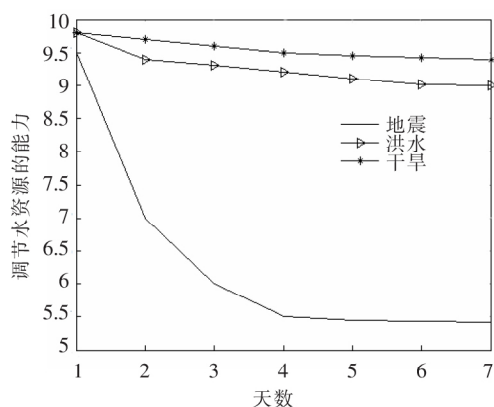


图4 自然灾害对新多坝系统水管理的影响

Fig. 4 Effect of natural disasters on the water management of new dam system

从图4可以看出不同自然灾害对多坝系统管理水能力的影响, 由此得出地震对系统的危害较大, 而干旱、洪水等因素对系统的影响较小. 但赞比西河流

域处于非洲的中西部, 并不处于板块的交界处, 故发生地震的概率较小, 因此可以得出结论: 新多坝系统能够应对自然灾害.

5 结束语

本文在选取了备选坝址的基础上, 建立多目标0-1规划模型, 得出代替原卡里巴大坝的新多坝系统. 通过模拟实验可以看出, 新多坝系统无论在安全度还是在建造成本上都远远优于原有大坝. 此外, 它还具有很高的发电效果和调节水能力, 使得当地居民受益匪浅. 不足的是, 由于在建立此选坝模型时应用了一定的假设再加上无法进行超大规模的模拟实验, 从而在实际问题的解决上可能有一定的偏差, 但是随着科学技术的进步, 如果增加数据量进行大规模的仿真试验, 便可以在很大程度上克服这些问题, 从而将这一简单实用的理论模型应用于实践. 本文在新多坝系统建立过程中应用的0-1整数规划模型, 不仅可以应用在赞比西河流域水坝的建造问题上, 还可应用于其他选址问题.

参考文献:

- [1] 保罗. 地理信息系统(上卷): 原理与技术[M]. 唐中实, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 275-276.
- [2] 孟醒, 张景秋, 朱海勇. 设施选址问题中的基础模型与求解方法比较[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 14-15.
- [3] 刘萌伟, 黎夏. 基于 Pareto 多目标遗传算法的公共服务设施优化选址研究——以深圳市医院选址为例[J]. 热带地理, 2010, 30(6): 650-655.
- [4] 张盛意. 基于改进模拟退火的遗传算法求解0-1背包问题[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(2): 62-64.
- [5] 方青, 潘晓东, 吴中. 基于遗传算法的城市停车换乘设施选址规模研究[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(10): 763-766.
- [6] 王一军, 罗大庸, 张航. 结合遥感图像处理技术的企业选址研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(19): 245-249.
- [7] 殷志祥, 张凤月, 许进. 0-1规划问题的DNA计算[J]. 电子与信息学报, 2016, 1(25): 63-64.
- [8] 曾艳. 0-1规划中并行隐枚举法的实现方式[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(7): 269-289.
- [9] 郑少妹. 基于匈牙利算法的城市商业网点最优布设问题研究[J]. 企业导报, 2015(9): 18-19.
- [10] 孙乔. 下坝水库枢纽布置选择分析[J]. 黑龙江水利, 2016, 2(10): 91-92.

Dam Location Problem Based on 0-1 Integer Programming Model

CHEN Chuan-jun¹, YU Xian-rong¹, WANG Yan-an², SUN Yu-bo¹

(1. School of Mathematics and Information Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. School of Computer and Control Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: With regard to the existing problems of the Kariba dam, this paper develops a new approach applied to dam location problem, which could give the specific location and quantity of new dams. The new method mainly includes a 0-1 integer programming model, in which we choose low cost and high safety factor as the goal function, establish a multi-objective 0-1 integer programming model, then use lingo to solve the model to get specific positions and number of the new dam system on the Zambezi River basin. The new dam system not only can meet the basic water resources utilization of the Zambezi River basin, but also can deal with some unexpected natural disasters. The method overcomes the shortcomings of other methods, such as single number and unclear location, and has the advantages of simple principle and handy calculation. In addition, this model can also be applied to other location problems.

Key words: dam location problem; 0-1 integer programming model; the Zambezi River; Lingo

(责任编辑 李春梅)