

冶峪河流域供水水库优化调度及用水补偿研究

高海东, 解建仓, 张永进, 汪妮

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对梯级水库供水优化调度中模型目标的选择往往只重视综合效益的最大而无法协调各方面的利益, 提出梯级水库优化调度与用水补偿相结合的思想, 对用水削减方给予一定补偿。以冶峪河流域为研究对象, 建立流域可供水量之和最大的多水源联合调度数学模型, 采用蚁群算法, 对模型进行求解, 并根据流域实际分析用水削减方的用水补偿方案。结果表明: 上游屯庄水库的运行, 影响下游黑松林水库多年平均灌溉水量从 1022.7 万 m^3 减少到 851.2 万 m^3 , 使黑松林水库灌区供水保证率减小了 13.43%; 而对下游灌区的用水补偿方案可以设定近期和远期两种补给方案后达到平衡。蚁群算法在研究梯级水库调度中计算速度快、收敛性好; 水库调度与用水补偿相结合, 可以最大限度地满足各部门用水需求, 有效解决流域上下游和不同行政区之间的用水矛盾, 为梯级水库供水优化调度提供了一种新的模式。

关键词: 梯级水库; 水库调度; 蚁群算法; 用水补偿

中图分类号: TV697.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)01-0149-05

Research on optimal operation of water supply reservoir and water compensation in Yeyu river basin

GAO Haidong, XIE Jiancang, ZHANG Yongjin, WANG Ni

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of that the choice of target often pay attention to the maximum comprehensive benefits and unable to coordinate all aspects of the interest in the optimal operation of cascade reservoirs, the paper put forward the idea of optimal operation of cascade reservoirs combining with water resources compensation, which is to say to give a certain amount of compensation to water cut square. Taking Yeyu river basin as the research object, it established the mathematical model of water joint scheduling of the largest sum of water supply, and used ant colony algorithm to solve the model, and determined water compensation scheme according to actual basin. The result indicated that the operation of Tunzhuang reservoir in upstream of river will affect the irrigation water on average in Heisonglin reservoir in downstream of river which decreases from 10.227 million m^3 to 8.512 million m^3 , and make the assurance rate of water supply of Heisonglin reservoir irrigation area reduce 13.43%. Aimed at water compensation scheme in downstream irrigation region, it set up two recent and long-term solution so as to reach balance. The colony algorithm shows its advantages of quick computing speed and good convergene in schedule of cascade reservoir. the combination of reservoir scheduling with water compensation can greatest meet the water demand of various department and effectively solve the water contradiction in upstream and downstream of river basin and different administrative regions. The result can provide a new mode for optimal operation of cascade reservoir.

Key words: cascade reservoir; reservoir dispatching; ant colony algorithm; water supply compensation

中国是一个水资源相对贫乏的国家, 随着我国 社会经济的快速发展和人口增长, 对水的需求量也

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51209170); 陕西省科学技术研究发展计划(2012JQ5014)

作者简介: 高海东(1990-), 男, 宁夏吴忠人, 在读硕士, 研究方向为区域经济与水资源管理。

通讯作者: 解建仓(1963-), 男, 陕西眉县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源及水利信息化研究。

不断增加,水资源供需矛盾日趋尖锐^[1]。水库调度是根据水库承担的任务和主次关系,以及规定的调度原则,运用水库的调蓄功能,在保证安全的前提下,有计划的对水库天然来水进行蓄泄,以达到除害兴利、综合利用水资源,最大限度满足国民经济各部门对水需求的目的。为了缓解水资源供需矛盾给人类带来的用水压力,最早的水库调度的研究于20世纪40年代由Masse提出,1955年美国学者Little提出了水库随机优化调度模型,之后,随着系统理论在水库优化调度领域的发展,针对不同问题的各种形式的模型也相继出现。1962年,Maass等提出了单目标非线性静态规划模型,直到20世纪90年代以来,智能优化算法如遗传算法^[2-4]、蚁群算法^[5-7]、粒子群算法^[8-10]、神经网络算法^[11-14]等在水库调度中的应用已经取得了显著的效果。然而,水库优化调度中模型目标的选择往往只是注重综合效益的最大,不能有效协调各方面的利益,从而易产生用水矛盾,尤其是新建水库对原有水库来水的影响以及流域上下游之间、不同行政区之间的用水矛盾。而用水补偿是以实现水资源可持续利用和区域经济平衡发展为目的,水资源过度使用方给予水资源使用数量削减方的资源禀赋利益再分配政策^[15-17]。基于以上研究成果,本文以冶峪河流域为研究对象,建立流域可供水量之和最大的多水源联合调度数学模型,采用蚁群算法对模型进行求解,并根据流域实际特性分析用水削减方的用水补偿方案,最大限度的满足了各个部门的用水需求。旨在为水库优化调度中有效解决整体与局部用水方利益最大化问题提供参考。

1 梯级水库优化调度模型及求解方法

1.1 目标函数

系统的主要功能是提供城镇的生活用水、灌区灌溉用水以及生态用水等各部门用水,因此,确定系统的目标是流域各用水户可供水量最大,建立流域可供水量之和最大的数学模型,其目标函数可以表示为:

$$W = \max \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^M \sum_{j=1}^N W_y(i, j, t) \quad (1)$$

式中: T 为时段,按月为周期可划分为12个时段; M 、 N 分别为供水水库的数量、用水部门的数量。 $W_y(i, j, t)$ 为第 i 个水库 t 时段在第 j 个用水部门的供水量, 万 m^3 。其中:

$$W_y(i, j, t) = W_{gy}(i, t) + W_{ggy}(i, t) + W_{sty}(i, t) +$$

$$W_{qly}(i, t) \quad (2)$$

式中: $W_{gy}(i, t)$ 、 $W_{ggy}(i, t)$ 、 $W_{sty}(i, t)$ 、 $W_{qly}(i, t)$ 分别为 i 库 t 时段的城镇生活用水、灌溉用水、生态用水和其他用水, 万 m^3 。

1.2 约束条件

(1) 系统水量平衡约束。

$$W_y(j, t) + W_{qs}(j, t) = W_x(j, t) \quad (3)$$

式中: $W_y(j, t)$ 为 j 库 t 时段的总用水量; $W_{qs}(j, t)$ 为 j 库 t 时段的缺水量; $W_x(j, t)$ 为 j 库 t 时段的总需水量, 以上单位均为 万 m^3 。

(2) 水库水量平衡约束。

$$V(i, t+1) = V(i, t) + W_1(i, t) + W_2(i, t) - W_3(i, t) - W_4(i, t) \quad (4)$$

式中: $W_1(i, t)$ 为 i 库 t 时段的天然来水量; $W_2(i, t)$ 为 i 库 t 时段的上游来水量; $W_3(i, t)$ 为 i 库 t 时段的水库出水量; $W_4(i, t)$ 为 i 库 t 时段的损失量; $V(i, t)$ 、 $V(i, t+1)$ 分别为 i 库 t 时段初和 t 时段末、 $t+1$ 时段初水库库容, 即水库蓄水量。以上单位均为 万 m^3 。

(3) 水库库容约束。

$$\text{汛期: } V_s(i) \leq V(i, t) \leq V_x(i)$$

$$\text{非汛期: } V_s(i) \leq V(i, t) \leq V_z(i) \quad (5)$$

式中: $V_s(i)$ 、 $V_z(i)$ 、 $V(i, t)$ 、 $V_x(i)$ 分别为 i 库的死库容、正常库容、 t 时段的库容和汛限库容。以上单位均为 万 m^3 。

(4) 非负约束。

上述所有变量均应是非负的。

1.3 模型求解

1.3.1 蚁群算法 1992年, Marco Dorigo 提出了蚁群算法, 它是模拟自然界蚂蚁觅食路径的搜索过程, 利用信息素的正反馈原理进行寻优的算法, 蚂蚁行走路径表示问题可行解, 路径信息素浓度大小决定了蚂蚁选择该路径的概率大小, 信息素浓度最大的路径为最优路径。

1.3.2 模型的求解过程

(1) 设置蚁群算法参数。影响蚁群算法的主要参数有: 种群大小 M 、信息素挥发参数 ρ 、最大进化代数 N 、阈值参数 q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$)、正常数 C 、信息启发因子 α 、期望值启发因子 β 、信息素痕迹初值 δ 、起止温度 T_1 与 T_0 等^[6]。

(2) 初始蚁群。参数设定完毕后, 随机生成 m 只人工蚂蚁及路径, 并将其添加到路径集合 S 中, 初始化 $\delta_i = \delta_0$ ($i = 1, 2, \dots, m$), δ_i 代表路径上的累积信息素。

(3) 迭代次数和终止条件。每次迭代运算中,蚂蚁根据其状态转移选择新的路径,随之产生新的随机数 q , 并与阈值参数 $q_0 (0 \leq q_0 \leq 1)$ 相比较,可以产生以下两种情况:

当 $q \leq q_0$ 时,对人工蚂蚁所在的当前路径随机进行变异,使其成为新的库容离散点,同时应用局部优化算法优化路径,由此产生新的路径 S_{new} , 加入路径集合 S 。

当 $q > q_0$, 按照概率高的原则在路径 S 中选择路径 S_0 。其中概率 p 用下式计算:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}, & j \in \phi_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_{ij}^k 为在 t 时刻蚂蚁 k 从元素 i 转移到元素 j 的跃迁概率; τ_{ij} 为连接元素 i, j 的路径上的信息素浓度; η_{ij} 为由元素 i 转移到元素 j 的可见度。

(4) 迭代结束。计算各个蚂蚁当前路径的目标函数值 $E_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 随后记录当前最优路径。对路径集合 S 按式(7) 更新信息素痕迹 τ_i :

$$\tau_i = (1 - \rho)\tau_i + \rho\Delta\tau_i \quad (7)$$

式中: $\rho (0 < \rho < 1)$ 是信息素挥发参数。若蚂蚁路径 i 是当前最优路径, 则 $\Delta\tau_i = E_i/C$, 否则 $\Delta\tau_i = 0$, 其中 E_i 是当前最优解, C 是正常数。

(5) 检查迭代终止条件。若不满足迭代终止条件, 回到第 3 步继续迭代; 若满足迭代终止条件, 输出迭代结果。

2 应用实例分析

2.1 研究区资本资料

冶峪河流域位于陕西咸阳市, 冶峪河为石川河

一级支流, 渭河二级支流, 流域面积 633 km^2 。所属淳化县流域面积 587.3 km^2 , 所属泾阳县流域面积 45.7 km^2 。冶峪河县城段下游已建有黑松林水库、秦庄水库、泥河沟水库, 正在修建东庄水库。为保证县城及周边群众日常基本生活用水, 淳化县拟在冶峪河县城上游建设屯庄水库。流域各水库间的水利联系如图 1 所示, 水库的特征参数如表 1 所示。

然而, 上游拟建的屯庄水库的建成运行, 必将影响到下游黑松林水库的来水及其供水能力, 从而直接影响泾阳县冶峪河灌区的供水能力。因此需要使工程最大限度地满足各部门用水需求, 有效解决流域上下游和不同行政区之间的用水矛盾。合理解决思路是通过梯级水库优化调度的方法, 确定拟建屯庄水库对下游黑松林水库的影响水量, 再根据流域实际分析下游用水补偿方案。

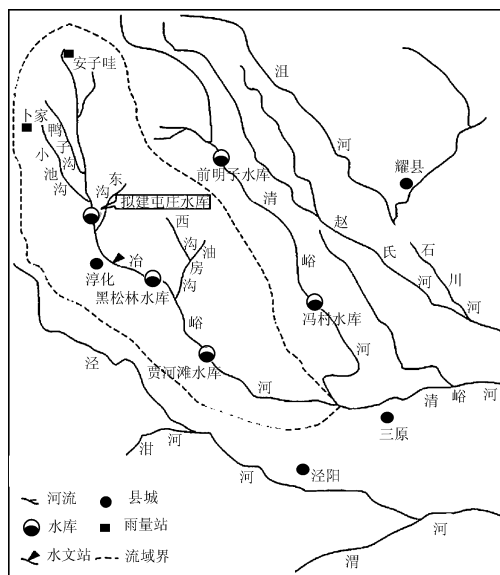


图 1 冶峪河流域水系分布图

表 1 水库主要特征参数

水库名称	校核洪水位/m	设计洪水位/m	总库容/万 m^3	兴利库容/万 m^3	正常蓄水位/m	死库容/万 m^3	死水位/m
屯庄水库	919.7	916.7	905	510	915.4	202	900
黑松林水库	771.8	766.8	1430	790	764.5	70	741.5

2.2 参数选择

蚁群算法参数设置为 $m = 15, \alpha = \beta = 1, q_0 = 0.7, \rho = 0.1$ 。取 200 倍估计最优值, 参与调节水库的水位离散精度为 0.005 m 。其中, m 是蚂蚁数目, α, β 是信息素痕迹强度与启发函数对蚂蚁决策的影响参数, q_0 是决定搜索或利用的阈值参数, ρ 是信息素挥发参数, 所有数据根据经验选配。

2.3 优化调度结果及分析

基于以上建立的模型, 已知水库的水位、库容关系曲线, 下游水位与流量关系曲线, 采用淳化站 1952 - 2012 年的年径流系列, 以月为调度时段进行优化调度, 将编制的蚁群算法应用于求解冶峪河流域水库优化调度中, 为了验证蚁群算法的正确性, 分别用蚁群算法和动态规划法在不同的库容离散情况下进行计算, 其中蚁群算法每种离散情况计算 5 次,

结果取平均值。两种算法得出的最优解和花费时间如表2所示,两者计算结果基本一致,但蚁群算法明显提升了求解速度。

表2 蚁群算法与动态规划计算结果对比

水库库容 离散/点	蚁群算法		动态规划法	
	最优值/万 m ³	时间/s	最优值/万 m ³	时间/s
200	1207.9	1	1207.4	7
500	1208.4	4	1208.2	29
1000	1208.7	13	1208.7	312

为了反映蚁群算法的收敛速度,取不同的迭代次数计算,结果见表3。由表3可见,在蚁群算法蚂蚁数目没有增加,仅增加迭代次数时,蚁群算法很快收敛。

表3 不同迭代次数的蚁群算法计算结果

水库库容离散/点	迭代次数/次	最优值/万 m ³
1000	20	1192.3
1000	40	1206.8
1000	60	1207.8
1000	80	1208.6
1000	100	1208.7

对模型求解可知,屯庄水库建设前,黑松林水库多年平均灌溉供水量为1022.7万 m³,灌溉供水保证率为62.1%。屯庄水库建设后,导致黑松林水库灌溉供水量减少至851.2万 m³,比建库前减少了171.5万 m³,供水保证率减少到48.69%。表明按照屯庄水库用水方案运行会对黑松林产生一定的影响,导致淳化县与泾阳县用水需求产生矛盾,直接影响泾阳县灌溉缺水与农作物减产,不利于下游经济的可持续发展。具体对照结果如表4所示。

表4 建库前、后黑松林水库供水量计算结果

工 程	运行状态	供水量/ 万 m ³	保证率/ %
建库前 黑松林水库	灌溉用水	1022.7	62.10
屯庄水库	城关镇生活用水	184.8	97.88
	灌溉用水	172.7	92.48
建库后 黑松林水库	灌溉用水	851.2	48.69
黑松林水库供水减少		171.5	13.43

2.4 用水补偿方案

《水法》对水资源开发利用原则做出明确规定:“开发、利用水资源,应当坚持兴利与除害相结合,

兼顾上下游、左右岸和有关地区之间的利益,充分发挥水资源的综合效益”。由上分析,基于解决冶峪河流域上下游之间以及淳化县与泾阳县之间的用水矛盾,必须对黑松林水库灌区及泾阳县用户用水量给予补偿。

补偿方案的确定,必须根据流域基本特点以及咸阳市水中长期供求规划出发,遵循公平和公正的原则,充分考虑流域与行政区域水资源条件、供用水历史和现状、未来发展的供水能力和用水需求、节水型社会建设的要求,妥善处理上下游、左右岸的用水关系,协调地表水与地下水、河道内与河道外用水。经论证,本研究设定近期及远期两种补偿方案,对影响水量进行补偿。

2.4.1 近期补偿方案 利用冶峪河县城段下游、地处淳化境内的秦庄水库、泥河沟水库2座水库补给屯庄水库运行后对黑松林水库的影响水量。根据泾阳县冶峪河灌区近10年(2004-2013)水源利用汇总资料,秦庄、泥河沟2座水库多年平均供给泾阳县冶峪河灌区水量为102.53万 m³,在此情况下,可以基本消除对黑松林水库的影响,见表5。

秦庄、泥河沟水库联合供水后,黑松林灌区年供水量为953.73万 m³,灌溉保证率提高到52.82%。保证率均满足农业灌溉要求的50%以上。

表5 建库前后黑松林水库供水量计算结果
(秦庄、泥河沟补给)

工 程	运行状态	供水量/ 万 m ³	保证率/ %
建库前 黑松林水库	灌溉用水	1022.7	62.1
建库后 屯庄水库	城关镇生活用水	184.8	97.88
	灌溉用水	172.7	92.48
黑松林水库	2座水库补给供水	953.7	52.82

2.4.2 远期补偿方案 根据咸阳市水利发展十二五规划,到规划水平年2020年,淳化县需要积极争取东庄水库用水指标,远期以东庄水库给淳化县的用水指标进行置换,作为对黑松林水库的补偿水源。

泾河东庄水库工程是国务院近期批复的《黄河流域防洪规划》和《渭河流域重点治理规划》中的控制性防洪骨干工程,总库容29.87亿 m³,属大(I)型水利工程,计划建设工期8年。

具体置换应当同时通过法律、法规对水资源补偿主体、补偿双方权利与义务、补偿规模、补偿形式等做出明确规定,有利于稳定地区间水资源补偿行为预期。同时做到“高水高用、低水低用,合理利用、综合

调度”,对下游用水和长远发展不会造成影响。

3 结 语

本文通过对冶峪河流域屯庄水库与黑松林水库供水矛盾问题的研究,提出水库优化调度与用水补偿相结合的研究思路。研究表明,这种新思路在满足自身取用水时还能兼顾对其他用水权益的保护,最大限度地满足各部门用水需求,有效的解决了研究区用水矛盾,使梯级水库优化调度的研究更加深入和全面。但是,这种新思路在用水补偿数量基准和补偿价格制定等关键问题的合理解释等方面还需要深入探讨。

参考文献:

- [1] 张勇传. 推荐一本好书——复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用 [J]. 水电能源科学,2003,21(1):7-8.
- [2] 王小安,李成军. 遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用 [J]. 长江科学院院报,2003,36(1):13-15.
- [3] 张双虎,黄强,黄文政,等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定 [J]. 西安理工大学学报,2006,22(3):229-233.
- [4] 杨道辉. 基于育种算法的水库优化调度研究 [J], 水电自动化与大坝监测,2009,33(5):72-74.
- [5] 吴庆洪,张纪台,徐心和. 具有变异特征的蚁群算法[J]. 计算机研究与发展,1999,36(10):1240-1245.
- [6] 段海滨,王道波,朱家强,等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. 控制与决策,2004,19(12):1321-1326+1340.

- [7] 修春波,张雨虹. 基于蚁群与鱼群的混合优化算法[J]. 计算机工程,2008,34(14):206-207+218.
- [8] 王宪,王伟,宋书林,等. 基于蚁群粒子群融合的机器人路径规划算法[J]. 计算机系统与应用,2011,20(9):98-102.
- [9] 沙金霞,刘彬,谢新民,等. 基于粒子群算法的水资源优化配置研究[J]. 水电能源科学,2012,30(9):33-35+69.
- [10] 刘波,王凌,金以慧,等. 微粒群优化算法研究进展 [J]. 化工自动化及仪表,2005,32(3):1-7.
- [11] 舒卫民,马光文,黄炜斌,等. 基于人工神经网络的梯级水电站群调度规则研究 [J]. 水力发电学报,2011,30(2):11-14+25.
- [12] 李承军,陈毕胜,张高峰. 水电站双线性调度规则研究 [J]. 水力发电学报,2005,24(1):11-15+46.
- [13] Panuwat P, Ashim D G, Mukand S B. Improved reservoir operation using hybrid genetic algorithm and neurofuzzy computing [J]. Water Resources Management, 2009, 23(4):697-720.
- [14] 胡铁松,万永华,冯尚友. 水库群优化调度函数的人工神经网络方法研究 [J]. 水科学进展,1995,6(1):53-60.
- [15] 程伶俐. 水资源价值补偿理论与川西民族地区可持续发展 [J]. 西南民族大学学报(人文社科版), 2004,25(6):22-26.
- [16] 李锦秀,李羽中,吴剑. 水资源保护经济补偿对策探讨 [J]. 水利水电技术,2005,36(6):22-24.
- [17] 秦雨杰,邱红. 松辽流域水资源区域补偿对策研究 [J]. 自然资源学报,2005,20(1):14-19.

(上接第 148 页)

参考文献:

- [1] 蔡宁,黄晨,曹伟武. 大空间下送风分层空调的同步求解模型的研究 [J]. 制冷学报,2011,32(3):42-47.
- [2] 王昕. 大空间建筑不同上开口形式室内热环境研究 [D]. 上海:上海理工大学,2004:1-10.
- [3] 刘迎云,王汉青,高建民. 盐水溶液模拟非等温室内气流组织的试验研究 [J]. 流体机械,2005,33(11):77-79.
- [4] 崔恒. 流体二维图像测速技术的研究 [D]. 大连:大连理工大学,2006:1-5.
- [5] 赵宇. PIV 测试中示踪粒子性能的研究 [D]. 大连:大连理工大学,2004:7-45.
- [6] Ayati A A, Kolaas J, Jensen A, et al. A PIV investigation of stratified gas-liquid flow in a horizontal pipe [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2014, 61:129-143.
- [7] Hadad T, Gurka R. Effects of particle size, concentration and surface coating on turbulent flow properties obtained u-

- sing PIV/PTV [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 45: 203-212.
- [8] 高建民. PIV 在室内气流组织模型实验中的应用研究 [D]. 衡阳:南华大学,2004:21-39.
- [9] TSI Incorporated. Insight 3G & 4G user's guide [M]. Shoreview, Minnesota, USA: TSI Incorporated, 2011.
- [10] 陈钊,郭永彩,高潮. 三维 PIV 原理及其实验方法 [J]. 实验流体力学, 2006, 20(4):77-82.
- [11] 阮驰,孙传东,白永林,等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究 [J]. 实验流体力学,2006,20(2):72-77.
- [12] 李志平. 激光粒子图像测量中示踪粒子特性及实验方法研究 [D]. 天津:天津大学,2007:31-51.
- [13] 胡华,刘书亮,王天友,等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究 [J]. 小型内燃机与摩托车,2002,31(1):5-8.