

基于改进粒子群算法的多水库复杂联合供水优化调度研究

彭方旭, 汪妮, 魏霞

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 丹凤县县城不断增长的用水需求与工程供水能力之间的矛盾日益突出, 为了充分挖掘工程供水的潜力, 解决现有供水工程运行中弃水多、供水保证率低的问题, 以弃水量最小为目标建立模型, 采用改进粒子群算法对青峰水库和龙潭水库的联合供水进行优化求解。以月为计算时段, 在优先考虑河道生态流量、蒸散发和渗漏损失的情况下, 针对青峰水库 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $220 \times 10^4 \text{ m}^3$ 两种拟定兴利库容方案情景进行模拟。结果表明: 迭代次数达 36 次时目标函数趋于稳定; 与常规调度相比, 两库的年平均弃水量明显减少, 供水保证率有所提高; 采用线性递减惯性权重改进的粒子群算法在青峰和龙潭两水库联合优化供水计算中具有优越性和可行性。

关键词: 改进粒子群算法; 优化调度; 生态流量; 青峰水库; 龙潭水库

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0143-06

Optimal operation of multi-reservoir complex joint water supply based on improved particle swarm optimization

PENG Fangxu, WANG Ni, WEI Xia

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The contradiction between the ever-increasing water demand of Danfeng County and the limited water supply capacity of the reservoirs is becoming more and more prominent. To fully tap the project's water supply potential and solve the problems of excessive water abandonment and low water supply guarantee rate in the operation of the existing projects, an optimal operation model is established with the objective of minimum abandoned water, and the improved particle swarm optimization is used to find the joint optimal water supply solution for Qingfeng Reservoir and Longtan Reservoir. Two utilizable capacities of $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ of Qingfeng Reservoir are simulated with a month as the calculation period, under the condition of giving priority to the ecological flow, evapotranspiration and leakage loss of the river. The results show that the objective function tends to stabilize when the number of iterations reaches 36 times. Compared with the conventional scheduling, the average annual water abandonments of the two utilizable capacities are significantly reduced, and the water supply guarantee rate is improved to some extent. It shows that the improved particle swarm optimization based on linear decreasing inertia weight is superior to the other calculation methods and it is applicable to the joint optimization of water supply of Qingfeng and Longtan reservoirs.

Key words: improved particle swarm optimization; optimal operation; ecological flow; Qingfeng Reservoir; Longtan Reservoir

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979221)

作者简介: 彭方旭(1998-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 汪妮(1974-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文及水资源。

1 研究背景

随着丹凤县融入“关中-天水经济区”,其经济转型进程加快,城市规模不断扩大,与此同时,城市的用水量、耗水量也在逐年增加^[1]。丹凤县县城原有主要供水工程为位于涌峪河上的龙潭水库,但龙潭水库入库水量较少,且随着运行年限的增加,有效库容逐渐减少,难以满足丹凤县人口和工业发展的需求,因而于丹凤县资峪河上规划建设新的供水工程——青峰水库,青峰水库建成后与龙潭水库共同承担丹凤县县城生活和工业用水的供给,这两个水库供水的合理调度运行是提高当地水资源利用率和供水保证率的关键。

科学合理的水库优化调度能够发挥水库更大的效益,这也是水资源利用的重要内容。在水库原有的规划设计标准下,利用多水库联合优化调节作用,可以最大化地发挥水库工程效应。20世纪以来,国内的学者就水库优化调度问题开展了广泛的研究,并取得了丰富的研究成果^[2-7]。总结国内的相关研究成果,水库联合优化调度模型的求解常采用优化算法,主要是通过确定决策变量的值,使目标函数在指定约束条件下寻求最优解。目前水库优化调度研究中最佳的决策方法主要有6大类:线性规划^[8]、非线性规划、网络流^[9]、大系统方法、动态规划和启发式算法^[5]。其中,在启发式算法方面,原文林等^[10]将粒子群算法与差分演化算法相结合,对乌江梯级水库总发电量最大的调度问题进行了求解;戴凌全等^[11]利用NSGA-Ⅱ(non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ)对三峡水电站以发电量最大和下游河道适宜生态流量改变度最小为目标的水库优化调度模型进行了求解;赵晓凤等^[12]采用改进肾脏算法对梯级水库优化调度进行了求解,得到了较优的调度方案;白涛等^[13]分别采用自迭代模拟算法、逐次逼近动态规划算法和改进的非支配排序遗传优化算法求解模型,利用较小的发电量损失使输沙量大幅度增加;钟加星等^[14]以生态改变度和梯级电站总发电量为目标函数建立了梯级水库群多目标优化调度模型,得出了针对非汛期发电和生态两目标的丰、平、枯典型年调度函数。在线性规划法方面,陈森林等^[8]建立了水库防洪补偿调节线性规划模型,实现了水库防洪规划与实时调度优化数学模型的统一,基本形成了覆盖水库全周期的多功能洪水优化补偿调节模型,为构建水库群防洪优化补偿调节模型提供了解决方案。在动态规划法方面,吴昊等^[15]运用

改进的动态规划算法优化了动态规划算法在调度中的运行时间问题,从而提高了求解效率。另外,黄显峰等^[16]针对水库调度图寻优过程中调度线形态畸变的问题,提出了能有效控制寻优过程中调度线形态畸变的改进廊道约束和改进粒子群-逐次逼近法。线性规划法由于与水库群系统存在一定的差异影响,当水库调度中存在兴利目标时不一定能很好地反映出联合调度的基本规律;动态规划法受初始轨迹影响较大,有时很难得到全局最优解,在解决多决策问题时还容易遇到“维数灾”的问题。

基于对上述研究方法及相关研究成果的总结,认为启发式算法具有全局优化性能、稳健性强的优点,其更接近于人类的思维方式,且该方法原理简单、易于理解、容易实现。对于多阶段、非线性、多约束组合形成的多水库联合供水优化调度问题,其求解过程中存在“维数灾”、计算工作量大等缺陷,为了克服此缺陷,本文采用启发式算法中的改进PSO算法对水库联合供水优化调度模型进行求解。目前关于串联梯级水库、并联水库以及单库优化调度问题的研究较多,而对多水库复杂联合调度的优化研究较少。丹凤县青峰水库与龙潭水库在联合供水调度上有着复杂的串、并联关系,本文建立以多水库弃水量最小为目标的复杂水库联合供水优化调度模型,为避免粒子群算法陷入局部最优,引入线性递减惯性权重对粒子群算法进行了改进并对模型进行了求解,将弃水量和供水保证率作为评价指标,从而获得了多水库联合供水优化调度方案,提高了水资源利用率和供水保证率。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

丹凤县位于陕西省东南部的秦岭东段南麓,处于东经 $110^{\circ}7'49'' \sim 110^{\circ}49'33''$,北纬 $33^{\circ}21'32'' \sim 33^{\circ}57'4''$ 之间。县域内的北、中、南部分别有大蟒岭、流岭和新开岭,山脉呈东西方向绵延,主要水系包括丹江及其3条主要支流老君河、武关河、银花河。县境东西长62.1 km,南北长65.5 km,总面积为2438 km²。2009年6月10日,国务院正式批准将商洛市一区三县纳入“关中-天水经济区”规划范围,标志着丹凤县实现经济转型及工业化、城镇化的建设加快。丹凤县城区原主要供水水源为龙驹寨镇的龙潭水库,由于该水库已运行多年,淤积十分严重,供水效益下降,如若仅依靠现有的龙潭水库水源,供水量将严重不足,也将制约丹凤县经济社会的

持续发展^[17]。所以新水源——青峰水库供水工程的兴建对于“关中-天水经济区”的建设十分重要。

青峰水库供水工程位于龙潭水库所在涌峪河东侧的资峪河上,由青峰水库修建引水隧道将资峪河青峰沟的水源引入龙潭水库中,再经现有的水厂供水系统供给丹凤县的生活和工业用水。丹凤县水系分布以及现有的龙潭水库和拟建的青峰水库位置如图 1 所示。

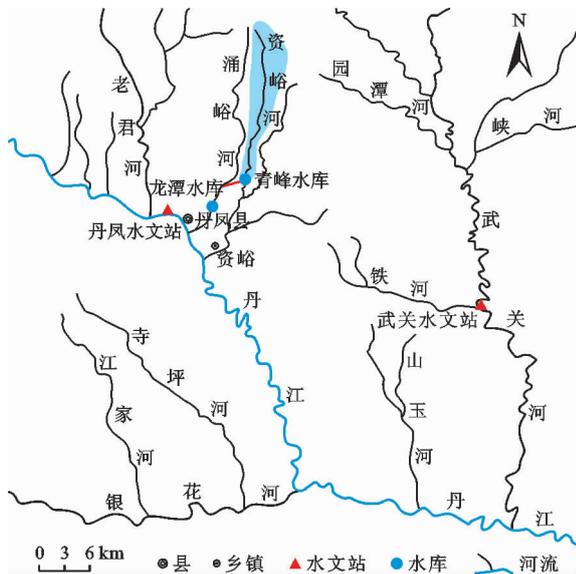


图 1 丹凤县水系分布及龙潭水库与青峰水库位置

规划中的青峰水库建成后,主要供水水源仍为龙潭水库,当龙潭水库供水不足时由青峰水库实施补水,因而青峰水库与龙潭水库组成了一个较为复杂的联合供水调度系统,以减少弃水量并提高供水保证率为目标的两水库联合供水流程如图 2 所示。

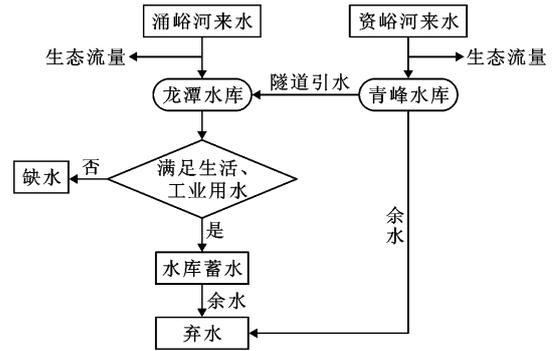


图 2 龙潭水库与青峰水库联合供水流程

龙潭水库因淤积严重,所以在拟建青峰水库时,其泥沙淤积量最终参照龙潭水库实际淤积量的计算结果,对长期水库库容进行了估计。丹凤县龙潭水库和青峰水库的主要工程特性指标见表 1。

2.2 数据来源

因涌峪河和资峪河流域属无资料地区,龙潭水库及青峰水库坝址处多年平均年径流量计算采取水文比拟法。测站选取资峪河东邻流域控制站,即武关河武关水文站(图 1)。武关河流域面积为 724 km²,武关水文站从建设至今有多年的径流资料,本次选取的数据长度为 1959 年 1 月-2014 年 12 月,其多年平均年径流量为 15.65 × 10⁸ m³,以该站相应时段的多年平均降雨量 768.11 mm 作为参证站流域面雨量,同时根据资峪河附近的丹凤水文站(图 1)长系列多年平均降雨量 681.87 mm 作为青峰水库所在的资峪河流域多年平均降雨量,再按面积比拟加雨量修正可推知青峰水库及龙潭水库坝址处的多年平均年径流量。

表 1 丹凤县龙潭水库和青峰水库的主要工程特性指标

水库名称	河道生态基流/ (m ³ · s ⁻¹)	正常蓄水位/ m	死水位/ m	兴利库容/ 10 ⁴ m ³	死库容/ 10 ⁴ m ³	30 a 后淤积库容/ 10 ⁴ m ³
龙潭水库	0.024	539.40	108.3	126.3	108.30	71.52
青峰水库	0.021	720.75	705.5	194.0	105.54	232.40

青峰水库坝址处控制流域面积为 34.17 km²,多年平均年径流量为 655.85 × 10⁴ m³;龙潭水库坝址处控制流域面积约为 40 km²,多年平均年径流量为 767.75 × 10⁴ m³。

2.3 研究方法

2.3.1 改进粒子群算法原理 粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是依据种群进化理论的一种优化算法。鸟群的智能群体行为是自适应的进化

过程,根据这一特征,在 PSO 中将每一个粒子比作一只鸟,用粒子的几何位置和速度向量表示其属性,粒子的位置代表被优化问题在搜索空间中的潜在解。每一个粒子参考自己的既定方向、所经历的最优方向和整个鸟群中所经历的最佳方向来决定自己的飞行。简而言之,即为一组相互可以直接或者间接影响的粒子通过合作的方式对问题进行最优解的搜寻^[18]。

粒子群算法的形式描述为:设粒子*i*为一个*n*维的向量, $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 为粒子*i*的当前位置; $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 为粒子*i*的当前飞行速度; $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ 为粒子*i*所经历的最佳位置,即粒子*i*所经历过的适应度最优的位置,称为个体最优位置,记为 P_{best} ;在种群中所有粒子经历的最佳位置即为全局的最优位置,记为 \mathbf{G}_{best} ,则 $\mathbf{G}_{best} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。粒子每次都根据公式(1)、(2)更新位置与速度:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1 Rnd_1[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 Rnd_2[G_{best} - x_{ij}(t)] \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

式中:*t*为迭代次数;*w*为惯性权重系数; c_1 、 c_2 为学习因子,其取值通常根据经验决定,本文中取 $c_1 = c_2 = 2$; Rnd_1 、 Rnd_2 为(0,1)之间的随机数; v_{ij} 为粒子*i*的速度, $v_{ij} \in [v_{i\min}, v_{i\max}]$; x_{ij} 为粒子*i*的位置, $x_{ij} \in [x_{i\min}, x_{i\max}]$ 。

惯性权重系数*w*对于粒子运动速度有很大影响,粒子运动速度与*w*呈正相关^[19]。算法在初始运行时期应该大范围快速搜索,宜适配较大的*w*值;在算法进入后期时,应当降低速度,小范围精细搜索,宜采用较小的*w*值。因此,本次粒子群算法引入了线性递减惯性权重(linearly decreasing inertia weight, LDIW),其计算公式为:

$$w(t) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{Max_iteration}} \cdot t \quad (3)$$

式中:*t*为当前迭代的次数,Max_iteration为最大的迭代次数; w_{\max} 和 w_{\min} 分别为惯性权重的最大和最小值,本文中取 $w_{\max} = 0.9$, $w_{\min} = 0.4$ 。随着迭代次数的不断增加,*w*值逐渐减小,粒子的运动速度减慢,使得粒子在开始时较快地定位最优解的大致位置,而后期又具有局部精细搜索的能力^[20]。

具体参数设置:粒子种群规模为60,迭代次数为100,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$,粒子的维度为调度年份*m* × 12。

2.3.2 模型的构建 粒子群水库优化调度模型构建主要包括目标函数和约束条件的建立。

(1) 模型的目标函数

龙潭水库与青峰水库工程的主要任务是承担丹凤县的供水,系统的供水量应当作为衡量调度优化的一个重要指标,本文将两个水库弃水量最小作为目标,建立优化调度模型的目标函数。

在*m*年内两个水库每年弃水量最小的目标函数表达式为:

$$F = \min \sum_{i=1}^m V_{q,i} \quad (4)$$

式中: $V_{q,i}$ 为第*i*年的弃水量, 10^4 m^3 ; *m*为计算总年数。

生态流量计算方法如下:

$$Q_E = \bar{R} \cdot f \times 10 \% \quad (5)$$

$$S = Q_E \cdot T \quad (6)$$

式中: Q_E 为最小生态需水量, m^3/s ; \bar{R} 为测站多年平均流量, m^3/s ; *f*为面积比拟值; *T*为月份对应的秒数,*s*; *S*为河道所需生态流量, 10^4 m^3 。

两个水库联合供水运行的年弃水量计算方法如公式(7)、(8):

$$V_g = V_l - S \quad (7)$$

$$V_{q,i} = \sum_{j=1}^{12} \left(\sum_{d=1}^2 V_{g,i}^{d,j} - V_{x,i}^j + V_{k,i}^j - V_Z \right) \quad (8)$$

式中: V_l 为河道天然来水量, 10^4 m^3 ; V_g 为入库流量, 10^4 m^3 ; *d*为水库编号; *i*、*j*分别为年份、月份; V_x 为水库所供水区域的需水量, 10^4 m^3 ; V_k 为水库现水位对应的库容量, 10^4 m^3 ; V_Z 为正常蓄水位对应的库容量, 10^4 m^3 。

(2) 模型的约束条件

① 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + V_{g,t} - V_{q,t} \quad (9)$$

式中: V_{t+1} 、 V_t 分别为水库*t* + 1、*t*时段的蓄水量, 10^4 m^3 ; $V_{g,t}$ 为水库*t*时段的入库流量, 10^4 m^3 ; $V_{q,t}$ 为水库*t*时段的弃水量, 10^4 m^3 。

② 水库蓄水量约束

$$V_{\max} \geq V_t \geq V_{\min} \quad (10)$$

式中: V_{\min} 和 V_{\max} 分别为两个水库允许的最小和最大蓄水量, 10^4 m^3 。

③ 供水量约束

$$0 \leq V_C \leq V_x \quad (11)$$

$$0 \leq \sum_{d=1}^2 V_C^d \leq V_x \quad (12)$$

式中: V_x 为水库所供水区域的需水量, 10^4 m^3 ; V_C 为水库的供水量, 10^4 m^3 ; *d*为水库编号。

3 结果与分析

本文对武关站长系列的径流资料进行分析,以1959–2014年共56a的月入库流量资料进行供水优化调度。以月为计算时段,以年为计算周期,以月入库流量、蒸发与渗漏量之和、生态流量和需水量作为输入,其中青峰水库与龙潭水库日生态流量分别

为 0.18×10^4 、 $0.21 \times 10^4 \text{ m}^3$, 丹凤县日需水量为 $1.186 \times 10^4 \text{ m}^3$, 以多年的弃水量最小为目标函数, 对龙潭水库和青峰水库进行优化调度研究。生态流量的计算运用 Tennant 方法^[21-22], 该方法的核心是确定每年或每月的自然河流平均流量, 并通过提供阶段的百分比来分类河流的生态用水需求^[23]。本文将年平均径流量的 10% 作为河流的最小生态需水量。由于青峰水库坝址与龙潭水库坝址处均无实测水面蒸发资料, 利用距离最近的丹江丹风水文站蒸发测量数据, 将水面蒸发转化成为库区水面蒸发; 根据青峰水库的降雨量和径流深计算地表的蒸发量; 两个库区的地质条件较好, 渗漏量按水库月蓄水量的 1% 估算。

对青峰水库 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $220 \times 10^4 \text{ m}^3$ 两种兴利库容方案进行了供水优化调度, 所采用的改进粒子群算法迭代次数与目标函数的关系见图 3, 将优化调度供水的弃水量和保证率与常规方式供水的弃水量和保证率进行比较^[17], 结果如表 2 所示。

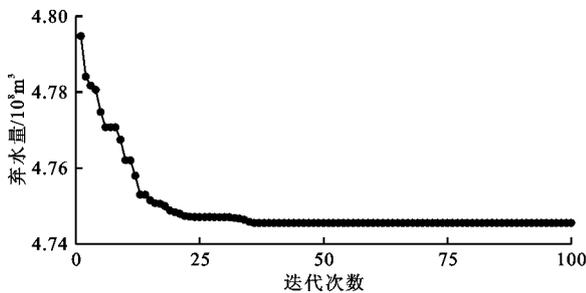


图 3 目标函数随迭代次数的变化关系

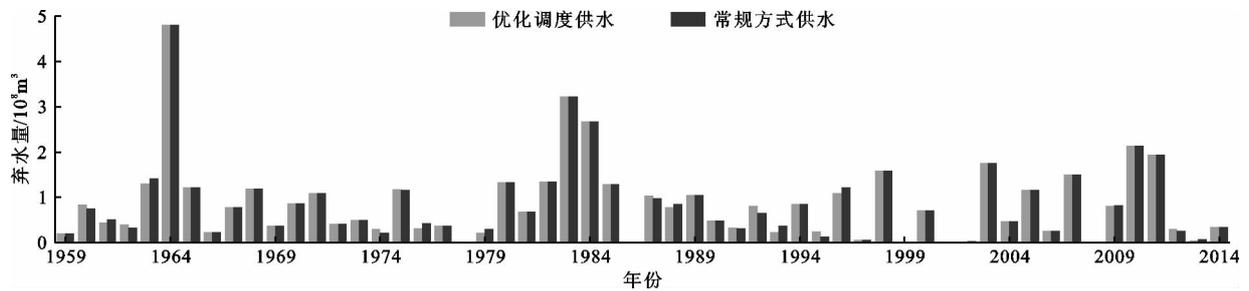


图 4 1959 - 2014 年各年份两种供水方式的弃水量比较 (青峰水库兴利库容为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$)

由图 3 可知, 改进粒子群算法迭代次数达到 36 次时目标函数已趋于稳定, 表明所采用算法的收敛速度较快。表 2 表明, 在两种兴利库容方案下, 优化调度后的供水保证率均高于常规方式的供水保证率, 且弃水量均低于常规方式供水的弃水量。当青峰水库的兴利库容为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时, 优化调度后的供水保证率为 95.83%, 较常规供水方式的保证率提高了 0.69%, 且弃水量减少了 $175.37 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水资源利用率为 33.3%, 已满足了城市生活和工业供水设计保证率的要求; 当青峰水库的兴利库容为 $220 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时, 供水保证率为 96.88%, 较常规供水方式的保证率提高了 0.58%, 弃水量减少了 $127.17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 水资源利用率达到 33.6%。

以青峰水库兴利库容为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的方案为例, 比较 1959 - 2014 年各年份优化调度供水与常规方式供水两种供水方式的弃水量, 结果见图 4。由图 4 可以看出, 在常规方式供水因调度不合理而导致供水破坏的年份, 相应采用优化调度供水后, 则弃水量有所减少。

表 2 不同兴利库容方案下两种供水方式的调度结果

兴利库容 方案/ 10^4 m^3	常规方式供水		优化调度供水	
	保证率/ %	弃水量/ 10^4 m^3	保证率/ %	弃水量/ 10^4 m^3
200	95.14	47630.13	95.83	47454.76
220	96.30	47411.10	96.88	47283.93

4 讨论

粒子群算法对于水库优化调度求解问题有较好的适用性, 且优化效果较好。但优化调度问题本身存在上限, 而且对于不同的优化调度问题所得到的优化效果也有一定差距。

已有相关文献表明, 水库运行调度问题的优化效果是有一定限度的, 如周华艳等^[24]利用烟花量粒

子群算法对梯级水库的联合优化调度进行了计算, 在丰、平、枯不同来水情形下, 发电量增加比例分别为 0.29%、0.15%、0.11%; 丁根宏等^[25]利用改进粒子群算法对水库进行了优化调度计算, 在原本运行规则上将最高水位降低了 8.4%, 最大流量降低了 15.8%; 刘涵^[26]利用 PSO 算法对乌江梯级电站进行了优化调度计算, 计算结果比蚁群系统 (ant colony system, ACS) 算法提升了 0.5% 的发电量; 张忠波

等^[27]利用改进粒子群算法对三峡水电站进行了优化调度计算,优化后对于长系列供水期可增加2%的发电量;吴文惠^[28]的研究结果表明利用改进粒子群算法优化出的年发电量比标准粒子群算法增加了2.75%。因此,本文计算的弃水量和供水保证率的优化效果属于正常现象。

根据数据分析,由于拟建青峰水库后所增加的库容量已经初步满足丹凤县的供水需求,所以本文对青峰水库与龙潭水库联合供水调度优化后的供水保证率的提升相对较少,对于供水调度效果很难进行大幅度优化,只有改变水库现状才能更好地提升供水效率。目前龙潭水库淤积严重,大大减少了水库的有效库容,如果对拟建的青峰水库泥沙淤积问题进行研究并采取有效的处理措施,可以使工程的供水率有明显提升,其中的相关问题还有待进一步研究。

5 结论

(1)改进了丹凤县以龙潭水库为供水源、青峰水库辅助补水的调度方式,以年弃水量最小为优化目标,建立了水量平衡约束、供水量约束等约束条件,构建了龙潭水库与青峰水库联合供水优化调度模型。

(2)PSO算法具有参数少、易于实现等优点,在优化问题方面有较好的实用性。为了改进PSO算法易于陷入局部最优和后期收敛速度慢的不足,参考相关文献引入了线性递减惯性权重(LDIW)的方法,从而提出了供水优化调度的改进粒子群算法。计算过程表明,改进粒子群算法具有较好的收敛速度。

(3)提出的龙潭水库和青峰水库联合供水优化调度是在考虑到生态流量、蒸散发以及渗漏的情况下进行的方案调度。在青峰水库兴利库容为 200×10^4 和 $220 \times 10^4 \text{ m}^3$ 两种方案下,经过优化调度后的年弃水量分别减少了 175.37×10^4 和 $127.17 \times 10^4 \text{ m}^3$,供水保证率分别增加了0.69%和0.58%。在兴利库容越大的情况下,弃水量相比于常规调度方式减少得越小,供水保证率的提升也越小。

综上所述,本文在青峰水库和龙潭水库联合供水系统的基础上进行了改进,提出了龙潭水库与青峰水库同时供水的调度方案,对青峰水库在不同兴利库容规划方案下进行了供水调度优化,证明了改进粒子群算法在优化供水调度上的可行性。最终的计算结果也表明,基于改进粒子群算法的供水优化

调度后,供水保证率有所提升,从而提高了龙潭水库和青峰水库的供水效益。

参考文献:

- [1] 肖杰,郑国璋,郭鹏军,等.基于主成分分析的关中——天水经济区水资源承载力评价[J].中国农业资源与区划,2018,39(7):159-67.
- [2] 黄草,王忠静,李书飞,等.长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I:模型原理及求解[J].水利学报,2014,45(9):1009-1018.
- [3] 明波,黄强,王义民,等.基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J].水利学报,2015,46(3):341-349.
- [4] 邹强,王学敏,李安强,等.基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J].水利学报,2016,47(8):967-976.
- [5] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等.水库群联合优化调度研究进展与展望[J].水科学进展,2010,21(4):496-503.
- [6] 黄草,王忠静,鲁军,等.长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 II:水库群调度规则及蓄放次序[J].水利学报,2014,45(10):1175-1183.
- [7] 谢云东,章四龙,王红瑞,等.基于NSGA-II算法的碛口水电站多目标调度研究[J].中国农村水利水电,2022(3):207-211.
- [8] 陈森林,李丹,陶湘明,等.水库防洪补偿调节线性规划模型及应用[J].水科学进展,2017,28(4):507-514.
- [9] 叶舟,周旦娜,陈芳.基于网络流模型利用台风雨资源的舟山岛地下水水库调度研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):18-30.
- [10] 原文林,万芳,吴泽宁,等.梯级水库发电优化调度的改进粒子群算法应用研究[J].水力发电学报,2012,31(2):33-37+164.
- [11] 戴凌全,王煜,蒋定国,等.基于NSGA-II方法的三峡水库汛末蓄水期多目标生态调度研究[J].水利水电技术,2017,48(1):122-127.
- [12] 赵晓凤,翁朝晖,陈华.基于改进肾脏算法的梯级水库长期发电优化调度研究[J].中国农村水利水电,2021(3):179-185.
- [13] 白涛,阚艳彬,畅建霞,等.水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J].水科学进展,2016,27(1):116-127.
- [14] 钟加星,董增川,姚弘伟,等.梯级水库群多目标优化调度规则研究——以溪洛渡-向家坝为例[J].水力发电学报,2021,40(9):46-54.
- [15] 吴昊,纪昌明,蒋志强,等.梯级水库群发电优化调度的大系统分解协调模型[J].水力发电学报,2015,34(11):40-50.
- [16] 黄显峰,吴志远,李昌平,等.基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J].水利水电科技进展,2021,41(2):1-7. (下转第155页)

- [3] 何良德,王晨晨,张成君,等. 船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):246-252.
- [4] 何良德,张成君,王晨晨,等. 考虑船闸闸室宽度影响的横向渗流阻力系数法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):146-152.
- [5] 侯晓萍,徐青,杨志明. 黄河山坪电站船闸地基渗控措施优化[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(5):584-589.
- [6] BUKENYA P, MOYO P, BEUSHAUSEN H, et al. Health monitoring of concrete dams; A literature review[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2014, 4(4): 235-244.
- [7] 何吉,徐青,陈胜宏. 裂隙岩体渗透特性反演分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2730-2735.
- [8] GAN Lei, CHEN Guanyun, SHEN Zhenzhong. A new approach to permeability inversion of fractured rock masses and its engineering application[J]. Water, 2020, 12(3): 734.
- [9] 黄铭,陆迎寿,蓝祝光,等. 海堤非稳定渗流场渗透参数反演分析[J]. 上海交通大学学报,2016,50(3):443-447.
- [10] LI Changzheng, YANG Yong, WANG Rui, et al. Inversion of river-bottom sediment parameters using mechanically sampled specimens and subbottom profiling data[J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 225-235.
- [11] 王学武,党发宁,蒋力,等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报,2010,41(9):1074-1078+1086.
- [12] 周青,王晓东,吴梦喜. 阿青水电站沥青心墙坝渗流分析与控制[J]. 岩土力学,2015,36(S2):469-477.
- [13] 周邵鹏,柴军瑞,雷艳. 黑河金盆水库坝区三维渗控效应评价与材料参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):207-215.
- [14] ZHANG Wenbing, SHEN Zhenzhong, CHEN Guanyun, et al. Optimization design and assessment of the effect of seepage control at reservoir sites under karst conditions: A case study in Anhui Province, China[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29: 1831-1855.
- [15] 杨金孟,赵兰浩,沈振中,等. 某抽水蓄能电站上水库防渗帷幕深度优选研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):209-216.
- [16] 沈振中,江流,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报,2009,40(9):1091-1095.
- [17] 张文兵,任杰,杨杰,等. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(1):147-154.
- [18] 李炎隆,张敬华,张再望,等. 基于正交试验法的高模量区E-B模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):34-38+45.
- [19] 沈振中. 三维粘弹塑性位移反演的可变容差法[J]. 水利学报,1997,28(9):66-70.
- [20] XU Zengguang, LIU Yang, HUANG Jian, et al. Performance assessment of the complex seepage-control system at the Lu Dila Hydropower Station in China [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(3): 05019001.
- [21] 许增光,曹成,李康宏,等. 某抽水蓄能电站上水库局部防渗渗控分析[J]. 应用力学学报,2018,35(2):417-422+459.
- (上接第148页)
- [17] WANG Ge, WANG Ni, XIU Yuan. Reasonable determination of the utilizable capacity of water conservancy project based on prediction[C]// The 5th International Conference on Water Resource and Environment, Macao. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 344: 012128.
- [18] 李顺新,杜辉. 动态规划-粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 计算机应用,2010,30(6):1550-1551+1580.
- [19] SHI Yuhui, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C]// EGAN W, ALASKA A. The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1998.
- [20] 张铭,李崇浩,范子武,等. 粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用研究[J]. 水力发电,2010,36(12):60-64.
- [21] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [22] 贾小俊. 基于 Tennant 法的塔里木河河道基流生态需水量计算[J]. 水利科学与寒区工程,2021,4(3):49-53.
- [23] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 397-441.
- [24] 周华艳,周建中,何中政,等. 基于烟花量粒子群算法的水库群联合优化调度[J]. 水电能源科学,2018,36(10):84-87+38.
- [25] 丁根宏,曹文秀. 改进粒子群算法在水库优化调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(1):118-121.
- [26] 刘涵. 水库优化调度新方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [27] 张忠波,何晓燕,耿思敏,等. 改进的粒子群算法在水库优化调度中应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(5):338-345.
- [28] 吴文惠. 乌江梯级水电站联合调度发电效益考核评价研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2016.