

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.02.041

# 粒子群算法在密云水库供水优化配置中的应用

宋健蛟<sup>1,2</sup>, 赵红莉<sup>2</sup>, 蒋云钟<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 作为华北地区最大的水库, 密云水库是保障北京工业和生活用水的重要水源地。为了对密云水库供水进行优化配置, 以不同用户用水需求为依据, 以资源可持续效益指标为目标函数, 建立了优化配置模型。针对建立的非线性约束优化模型, 采用粒子群算法进行求解, 得到了较好的水资源配置方案, 为提高密云水库供水效益提供了技术支持。为了验证粒子群算法的优越性, 同时采用遗传算法进行比较, 结果表明粒子群算法适用于密云水库供水优化配置模型, 可以得到较好的求解效果

**关键词:** 密云水库; 南水北调工程; 粒子群算法; 可持续发展; 优化配置

**中图分类号:** TV 697.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0378-04

## Application of particle swarm optimization in the optimal water allocation of Miyun Reservoir

SONG Jian jiao<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong li<sup>1</sup>, JIANG Yun zhong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As the biggest reservoir in North China, Miyun Reservoir is one of the major water sources to guarantee the water consumption for both life and industry in Beijing. On the basis of users' various demands, with the sustainable resource efficiency as the objective function, the optimization and allocation model of water resources in the Miyun Reservoir was developed. The particle swarm algorithm was used to solve the nonlinear constrained optimization model to obtain a good water resources allocation scheme, which can provide technical support to improve the supply water efficiency of Miyun Reservoir. In order to verify the superiority of particle swarm optimization, the results determined by the genetic algorithm were used for comparison. The results showed that particle swarm algorithm is proved to be an effective solution for the optimal water allocation of Miyun reservoir.

**Key words:** Miyun Reservoir; South to North Water Diversion Project; particle swarm algorithm; sustainable development; optimal allocation

南水北调工程是解决我国黄淮海平原水资源短缺的特大型基础建设项目, 但南水北调工程供水具有年内分配不均、年际变化大、流量大特点<sup>[1]</sup>。在来水条件不确定的条件下, 对北京密云水库水源区供水进行优化配置, 不仅直接影响区内供水和社会经济的长远发展, 而且关系到南水北调工程预期目标能否实现<sup>[2]</sup>。

水资源合理配置大概经过三个阶段<sup>[3]</sup>: 一是以供水量最大为目标的优化配置<sup>[4]</sup>, 主要是依靠修建水利工程增加供水能力来满足用水需求, 是一种以需定供的粗放式水资源优化配置方法; 二是以经济效益最大化为目标的优化配置<sup>[5]</sup>, 水资源短缺和用水需求增大的矛盾, 使得水资源配置的目标转

变追求水资源综合利用的效益最大化; 三是以可持续发展为目标水资源配置方式, 水资源配置的主要目标在追求经济效益的同时, 还必须考虑供水能力和环境的可持续发展<sup>[6]</sup>。

确定性优化配置模型的求解方法主要有以下两类: 一是基于传统数学方法求解, 如动态规划、线性规划和非线性规划, 但是传统算法在实际使用过程中经常会遇到“维数灾”问题<sup>[7]</sup>, 计算效率难以满足实际调度需求; 二是基于智能优化算法进行求解, 这逐渐成为配置模型求解的主要手段, 包括遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)等模拟生物演变过程的算法具有较高的求解效率, 可以有效避免“维数灾”, 例如马光文等人将遗传算法用于水电站群优化调度中<sup>[8]</sup>, 武新宇利

收稿日期: 2014-11-28   修回日期: 2015-03-03   网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1633.008.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAB05B01); 高分辨率对地观测系统重大专项(08Y30B07-9001-13/15-01); 中国水利水电科学研究院科研专项(资基本科研 1401)

作者简介: 宋健蛟(1989-), 男, 甘肃兰州人, 主要从事水利信息化方面研究。E-mail: songjj0412@163.com

用两阶段粒子群算法对云南水电站群进行优化调度<sup>[9]</sup>。

本文从密云水库来水和需求分析出发,考虑南水北调工程调水过程的边界变化,构建密云水库优化供水配置模型,以供水可持续效益指标为目标函数<sup>[10]</sup>,采用粒子群算法进行求解,尝试为水库供水优化配置提供一种新的解决途径。

## 1 密云水库供水优化配置模型

### 1.1 水库基本概况

密云水库位于北京市密云县境内,由白河上游潮河和白河汇流而形成,水库坝址以上流域面积 15 788 km<sup>2</sup>,占潮白河流域面积的 81.6%。密云水库 1960 年建成,是一座以供水、防洪为主要目的多年调节大型水利枢纽工程<sup>[11]</sup>,按千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核,总库容为 43.75 亿 m<sup>3</sup><sup>[12]</sup>。作为华北地区最大的水库,密云水库是保障首都工业生活用水的重要水源地。但是,1999 年后由于北京地区遭遇连续干旱,密云水库入库流量持续偏枯<sup>[13]</sup>,特别是近十年来,水库蓄水量减少了 20 亿。

### 1.2 目标函数

近年来,北京地区用水量持续增长,人类需水和自然环境之间的矛盾日益凸显。为了实现可持续发展战略,本文以水资源可持续效益指标(Sustainability Index)为目标函数<sup>[14]</sup>,考虑在现有条件下,使水资源可持续发展效益最大化。在实际供水过程中,需水无法满足的部分可利用其他水源。

$$SI^i = Rel^i \cdot Res^i \cdot (1 - Vul^i) \quad (1)$$

式中: $SI^i$  为  $i$  用户的可持续效益指标; $Rel^i$  为供水满足需求的程度; $Res^i$  指  $i$  用户对于缺水的恢复能力; $Vul^i$  指  $i$  用户的缺水情况。

式(1)中的可持续效益指标取值范围为 0~1,如果右侧某个指标取值为零,则  $SI^i$  也为零,而且右侧三个指标中最差的一项具有额外的权重。

$$Rel^i = \frac{S}{N} \quad (2)$$

式中: $Rel^i$  指在供水过程中供水满足需求的程度,具体表示为满足供水需求,即供水量满足需水量( $D_i = 0$ )出现的次数  $S$  在总的供水次数  $N$  中出现的概率。在每个时段  $t$ ,针对用户  $i$ ,当供水量  $X_{\text{Supplied},t}^i$  小于需水量  $X_{\text{Target},t}^i$  时,缺水量  $D_i$  为正;如果供水量  $X_{\text{Supplied},t}^i$  满足需水量  $X_{\text{Target},t}^i$ ,缺水量  $D_i$  为零。

$$Res^i = \frac{F}{M} \quad (3)$$

式中: $Res^i$  指  $i$  用户对于缺水的恢复能力,具体表示为一个缺水周期后出现一个满足需求的供水周期的次数  $F$  (在  $D_i$  后出现  $D_i = 0$  的次数)在总的缺水次数  $M$  ( $D_i > 0$  出现的次数)中出现的概率。

$$Vul^i = \frac{\sum_{t=0}^k D_i}{M \sum_{t=0}^k X_{\text{Target},t}^i} \quad (4)$$

式中: $Vul^i$  指  $i$  用户的缺水情况,期望的缺水量是每个时段的缺水量( $D_i > 0$ )累加起来除以总的缺水次数  $M$  ( $D_i > 0$  出现的次数),再除以总的需水量  $X_{\text{Target},t}^i > 0$ 。

由于本研究涉及到工业、农业和生活三个用水户,通过加权的思路可把三个指标值统一起来,得到加权的可持续效

益指标值:

$$SG = \sum_{i=1}^k W^i \cdot SI^i \quad (5)$$

式中: $SG$  为多个用户整体指标; $k$  为用水户总数; $W^i$  为  $i$  用户权重值,且  $\sum_{i=1}^k W^i = 1$

### 1.3 约束条件

(1) 水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - O_t) \Delta t \quad (6)$$

式中: $V_t$  为水库时段  $t$  的水库库容(m<sup>3</sup>); $I_t$  为水库时段  $t$  的入库流量(m<sup>3</sup>/s); $O_t$  为水库时段  $t$  的出库流量(m<sup>3</sup>/s); $\Delta t$  是时段长度(s)。

(2) 水位约束。

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (7)$$

式中: $Z_{\min}$ 、 $Z_t$ 、 $Z_{\max}$  分别为水库最低水位、时段水位和最高水位(m)。

(3) 库容约束。

$$V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max} \quad (8)$$

式中: $V_{\min}$ 、 $V_t$ 、 $V_{\max}$  分别为水库最小库容、 $t$  时段的库容和最大库容(m<sup>3</sup>)。

(4) 水库出库流量约束。

$$Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max} \quad (9)$$

式中: $Q_{\min}$ 、 $Q_t$ 、 $Q_{\max}$  分别为水库的最小出库流量、 $t$  时段出库流量和最大泄流流量(m<sup>3</sup>/s);

## 2 基于 PSO 的模型求解

粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法是一种模拟群体智能行为的适合于复杂系统优化计算的自适应概率优化技术<sup>[15]</sup>。作为一种全局优化的智能算法,PSO 具有收敛速度快,简单易求解等特点,适合于水库优化配置模型的求解<sup>[16]</sup>。

设粒子群由  $L$  个粒子组成,粒子的编号为  $l$ ,总用水户个数为  $M$ 。应用 PSO 算法进行模型求解时,每个时段不同用水户供水量为决策变量进行编码。每一个粒子的位置向量以每个用水户的供水量序列  $V^k(l)$  来表示,表示优化问题的一个解,其中  $V^k(l)$  的元素  $v_{m,t}^k(l)$  表示  $m$  用户  $t$  时段末的供水量, $V^k(l) = (v_{1,1}^k(l), \dots, v_{1,T}^k(l), v_{2,1}^k(l), \dots, v_{m,t}^k(l), \dots, v_{M,T}^k(l))$ 。速度向量用供水量序列来表示  $S^k(l) = (s_{1,1}^k(l), \dots, s_{1,T}^k(l), s_{2,1}^k(l), \dots, s_{m,t}^k(l), \dots, s_{M,T}^k(l))$ ,向量元素  $S_{m,t}^k(l)$  表示寻优过程中  $m$  用水户  $t$  时段供水变化量,其中  $l$  为粒子编号; $m$  为用水户编号; $k$  为迭代次数。

## 3 结果分析

### 3.1 输入条件

以密云水库坝址站 1976 年-2006 年共 31 年的年径流量为基本数据,运用加权马尔科夫链进行径流预测,具体步骤可参考文献[17]。将预测结果与 2007 年-2013 年实测数据进行比较,对误差的均值做单样本  $t$  检验  $t = -1.268$ ,  $p = 0.25$ ,在  $\alpha = 0.05$  水准上,不能认为误差的均数不为 0,即可认为,预测结果与实测结果无统计学差异。

通过以上模型计算 2016 年-2025 年径流序列,结果见

表 1。

表 1 密云水库径流预测序列

Tab. 1 The predicted sequence of runoff in the Miyun Reservoir

年份	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
径流量	2.98	4.98	3.38	2.98	4.98	3.38	2.98	4.98	3.38	2.98

在密云水库的水资源配置中,工业、农业和生活三个用水行业的需水过程受不同因素影响,同时具有不确定性。本文根据现有 2001 年-2010 年密云水库供水区用水统计数据,综合分析供水区用水趋势与未来经济发展指标,并在此基础上采用指标定额法获得 2016 年-2025 年供水区工业、农业、生活的需水数据(表 2)。

表 2 需水过程

Tab. 2 Water demand process

年份	工业	农业	生活
2016	1.84	2.76	2.44
2017	1.52	2.7	2.34
2018	1.68	2.64	2.74
2019	1.52	2.52	2.7
2020	1.38	2.46	2.9
2021	1.24	2.36	3.04
2022	1.16	2.38	3.32
2023	1.04	2.54	3.58
2024	1.02	2.52	3.48
2025	0.86	2.52	3.58

### 3.2 供水配置结果及讨论

南水北调中线供水是北京市水资源的重要补充,本次研究根据以往各部门研究成果,只计调入水资源量变化对密云水库供水效益的影响,即年规划调水量 3.98 亿 m<sup>3</sup>。

根据表 2 的需水过程,采用粒子群算法求解有无北调水条件下密云水库优化供水模型,得到最优供水过程(表 3)。

表 3 有无北调水条件下优化供水过程

Tab. 3 Difference of optimal water supply with and without water diversion

年份	无北调水				有北调水			
	总供水	工业	农业	生活	总供水	工业	农业	生活
2016	3.77	1.80	0.32	1.65	8.00	4.00	0.00	4.00
2017	4.52	1.80	0.92	1.80	6.51	2.43	0.91	3.16
2018	3.74	1.80	1.80	0.14	7.29	2.81	3.53	0.94
2019	1.51	1.51	0.00	0.00	5.13	1.43	0.95	2.75
2020	4.42	1.70	0.92	1.80	9.80	1.80	4.00	4.00
2021	3.51	1.80	0.00	1.71	7.14	4.00	1.93	1.21
2022	5.28	1.68	1.80	1.80	6.29	2.29	0.00	4.00
2023	2.68	1.80	0.08	0.80	10.90	4.00	3.87	3.03
2024	3.38	1.02	1.80	0.56	9.43	2.08	3.35	4.00
2025	1.80	1.80	0.00	0.00	3.83	1.18	2.65	0.00

为了验证粒子群算法有效性,本文同时采用遗传算法求

解有无北调水条件下密云水库优化供水模型,得到可持续效益指标见图 1。

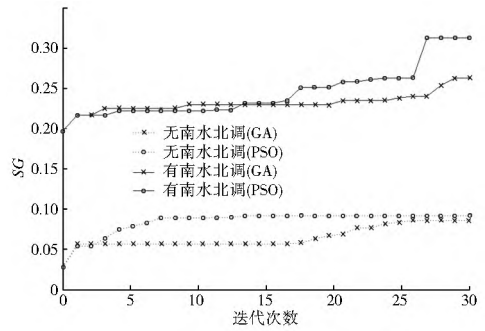


图 1 目标函数值

Fig. 1 Objective function value

从图 1 可以明显看出,两种情景下粒子群算法的求解精度均高于遗传算法,充分说明了粒子群算法在求解优化调度模型中的高效性、鲁棒性。

### 4 结语

本文从密云水库不同用户用水需求出发,以可持续效益指标最大为目标函数,建立优化配置模型,以资源可持续效益指标为目标函数,使用粒子群算法对模型进行求解。随着粒子群算法迭代,目标函数值不断增大,表明智能算法寻优机制不断调整配水过程,从而改善了供水效益。为了验证粒子群算法的求解精度,对比了遗传算法求解结果,在有无南水北调工程两种情景下,粒子群算法都具有更高的求解精度。

#### 参考文献(References):

- [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].水力学报,2014,45(7):844-849. (ZHANG Yan nan, TIAN Fu qiang, HU Hong chang, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 844-849. (in Chinese))
- [2] 齐子超.南水北调来水条件下北京市多水源联合调度研究[D].北京.清华大学,2011. (QI Zi chao. Study on joint operation and allocation of multiple water sources in Beijing[D]. Beijing. Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [3] 李少华,董增川,李玉荣.水资源统筹配置综述与展望[J].水利经济,2007,25(2):1-5. (LI Shao-hua, DONG Zeng-chuan, LI Yu-rong. Summarization and prospect of integrated planning of water resources[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2007, 25(2): 1-5. (in Chinese))
- [4] 李令跃,甘弘.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2000,11(3):307-313. (LI Ling yue, GAN Hong. Remark on the relationship between water resources rational allocation, carrying capacity and sustainable development[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3): 307-313. (in Chinese))
- [5] 关业祥.对水资源配置的认识与思考[J].中国水利,2002(5):25-26. (GUAN Ye xiang. Thought on water resource allocation [J]. China Water Resources, 2002(5): 25-26. (in Chinese))
- [6] 任光照.水资源可持续利用与合理配置[J].资源管理,2001(2):11-13. (REN Guang zhao. Sustainable utilization and ra

- tional allocation of water resources [ J ]. Resources & Industries, 2001( 2 ): 11-13. ( in Chinese )
- [ 7 ] 涂启玉, 梅亚东. 遗传算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(1): 16-18. ( TU Qi yu, MEI Ya dong. Development of computer supervision and control system for hydropower stations with giant generators [ J ]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32 ( 1 ): 16-18. ( in Chinese ) )
- [ 8 ] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中应用[J]. 水科学进展 1997, 8(3): 275-280. ( MA Guang wen, WANG Li. Application of a genetic algorithm to optimal operation of hydropower station [ J ]. Advances in Water Science, 1997, 8( 3 ): 275-280. ( in Chinese ) )
- [ 9 ] 武新宇. 不确定环境下水电系统多维优化理论和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. ( WU Xin yu. Multidimensional optimization theory and application for hydropower system under uncertain environment [ D ]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. ( in Chinese ) )
- [ 10 ] Loucks D P. Quantifying trends in system sustainability [ J ]. Hydrology. 1997. 42( 4 ), 513-530.
- [ 11 ] 卢丽, 徐千军, 保其长, 等. 密云水库错峰调度的可行性分析 [ J ]. 水力发电学报, 2008, 27( 2 ): 1-5. ( LU Li, XU Qian jun, BAO Qichang, et al. Feasibility of flood peak staggered regulation for Miyun reservoir [ J ]. Journal of China Hydroelectric engineering, 2008, 27( 2 ): 1-5. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] 钟永华, 鲁帆, 易忠, 等. 密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析 [ J ]. 水文, 2013, 33( 6 ): 81-84. ( ZHONG Yong hua, LU Fan, YI Zhong, et al. Change trend and period of annual runoff in upstream watershed of miyun reservoir [ J ]. Journal of China Hydrology, 2013, 33( 6 ): 81-84. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 左丰收, 綦中跃, 姜明辉. 密云水库入库径流演变特性及成因分析 [ J ]. 北京水务, 2011( 2 ): 34-37. ( ZU O Feng shou, QI Zhong yue, JIANG Ming hui. Evolution characteristics of the Miyun Reservoir inflow and its cause factors analysis [ J ]. Beijing Water, 2011, ( 2 ): 34-37. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] S Sandovař Solis. Sustainability Index for Water Resources Planning and Management [ J ]. Journal of Water Resource Planning and Management, 2011( 5 ): 381-390.
- [ 15 ] Shi Y, Eberhart R, Chen Y. Implementation of evolutionary fuzzy systems [ J ]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 1999, 7( 2 ): 109-119.
- [ 16 ] Van den Bergh F. An analysis of particle swarm optimizers [ D ]. South Africa: Department of computer science, University of Pretoria, 2002.
- [ 17 ] 夏乐天. 马尔可夫链预测方法及其在水文序列中的应用研究 [ D ]. 南京: 淮海大学, 2005. ( XIA Le tian. Research of Markov Chain prediction method and its application on hydrology series [ D ]. Nanjing: Hohai University, 2005. ( in Chinese ) )

(上接第 288 页)

- [ 13 ] 林箬, 朱亮, 吴炳方, 等. 基于 WebGIS 三峡干流水质模拟平台研究 [ J ]. 长江流域资源与环境, 2012, 21( 8 ): 987-993. ( LIN Zhong, ZHU Liang, WU Bing fang, et al. Numerical simulation platform of main stream water quality within the Three Gorges Reservoir area based on Webgis [ J ]. Resources and environment in Yangtze river basin, 2012, 21( 8 ): 987-993. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 徐敏, 曾光明, 苏小康. 混沌理论在水质预测中的应用初探 [ J ]. 环境科学与技术, 2004, 27( 1 ): 51-54. ( XU Min, ZENG Guang-ming, SU Xiao kang. A preliminary study on application of chaos theory to prediction of river water quality [ J ]. Environmental Science and Technology, 2004, 27( 1 ): 51-54. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 裴木凤, 李适宇, 胡嘉膺. 丰、枯水期珠江河口水体交换的数值模拟 [ J ]. 热带海洋学报, 2013, 32( 6 ): 28-35. ( PEI Mu feng, LI Shi yu, HU Jia tong. Simulation of the water exchange in the Pearl River Estuary during wet and dry seasons [ J ]. Journal of tropical Marine, 2013, 32( 6 ): 28-35. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] 唐宗鑫, 简文彬. 闽江下游水质预测的时间序列模型 [ J ]. 水利科技, 2002( 2 ): 7-10. ( TANG Zong-xin, JIAN Wen-bin. Min river downstream water quality prediction of time series model [ J ]. Water Conservancy Science and Technology, 2002( 2 ): 7-10. ( in Chinese ) )