

改进粒子群算法在水库优化调度中的应用

丁根宏, 曹文秀

(河海大学 理学院, 南京 211100)

摘要: 水库防洪优化调度模型一般属于高维多峰极值问题, 通常采用智能优化算法加以求解。粒子群算法由于其简单易行被广泛应用于水库优化调度中, 但是该算法存在局部搜索能力不足、早熟收敛、全局收敛性差等问题。针对这些问题, 通过引入 Logistic 方程和变异算子来提高种群的多样性, 采用收敛因子来提高算法的收敛速度, 并将改进的粒子群算法应用到东圳水库与木兰溪流域的防洪优化调度中, 求得关键处河道的最高水位为 6.35 m, 最大流量为 959.2 m³/s。这一结果与现行规则下的运行结果(最高水位 6.93 m, 最大流量 1 139.5 m³/s)和常规粒子群算法计算结果(最高水位 6.51 m, 最大流量 1 066.3 m³/s)相比, 有了很大的改善。

关键词: 防洪调度; 智能优化; 粒子群算法; 混沌思想; 变异策略; 收敛因子

中图分类号: TV 697 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014)01-0118-04

Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Optimal Operation of Reservoir

DING Geir hong, CAO Weir xiu

(College of Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The optimal operation model for flood control of reservoir is a high dimensional multimodal extremum problem in general, and intelligent optimization algorithm is usually used to solve such problems. Particle swarm optimization (PSO) algorithm is widely used in the optimal operation of reservoir due to its simplicity; however, there are shortcomings in the PSO algorithm such as premature convergence, low efficiency in global convergence, and deficiency in local search capability. Logistic equation and mutation operator are introduced to increase the diversity of population and convergence factor is introduced to improve the convergence rate during the iterative process. The improved PSO algorithm was applied in the optimal operation for flood control of the Dongzhen Reservoir and Mulanxi Watershed. The resulted showed that the maximum water level is 6.35 m and the maximum flow rate is 959.2 m³/s at the pivotal watercourse. The solutions were much better than that obtained from the present reservoir control regulations (maximum water level of 6.93 m and maximum flow rate of 1 139.5 m³/s) and that determined by the standard PSO algorithm (maximum water level of 6.51 m and maximum flow rate of 1 066.3 m³/s).

Key words: flood control operation; intelligent optimization; particle swarm optimization; chaotic thoughts; mutation strategy; convergence factor

我国是世界上洪涝灾害发生频率最高、受灾最重的少数国家之一^[1], 水库防洪问题已成为学术界普遍关注的问题^[2-3]。目前在水库调度过程中, 除了采用具有固定调度规则的常规调度外, 普遍采用最优化方法和现代计算技术来求解以水库为中心的满足一定约束条件的数学模型, 实现水库的优化调度^[4-6]。相较于遗传算法和蚁群算法, 粒子群算法的简单易实现、收敛速度快等特点更适合于水库优化调度模型的求解^[7-8]。本文在前人研究的基础之上, 对粒子群算法及其在水库防洪中的应用作了进一步的探索和研究, 旨在为

解决水库优化调度问题提供一些新理论和新方法及相应的实证分析。

1 粒子群算法的改进

粒子群算法(PSO)是一种进化计算技术(evolutionary computation), 最早是在1995年由美国社会心理学家 James Kennedy 博士和电气工程师 Russell Eberhart 博士受人工生命和演化计算理论的研究结果的启发提出的^[9-10]。PSO 模拟鸟群随机搜索食物的行为, 将鸟群的搜索区域对应于设计

收稿日期: 2013-03-29 修回日期: 2013-11-04 网络出版时间: 2013-12-17
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01118.html>
基金项目: 中央高校业务费资助项目(B12020128)
作者简介: 丁根宏(1962-), 男, 江苏泰州人, 副教授, 博士, 长期从事水资源系统规划研究。E-mail: dinggenhong@126.com
通讯作者: 曹文秀(1988-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统规划研究。E-mail: 812683543@qq.com

变量的变化范围,食物对应于适应度函数的最优解^[11-12]。本文主要从提高种群的多样性和提高收敛速度两个方面对粒子群算法进行改进。

(1) 加入混沌思想以及变异算子。

分析标准粒子群算法可以发现,其初始化是随机产生的,这使得自身最优值 $pbest$ 和全局最优值 $gbest$ 的更新具有很大的盲目性。混沌状态一般是由确定性的方程得到的具有随机性的运动状态^[13],是自然界和社会现象中一种常见的现象。通过对混沌运动的研究发现,混沌变量的遍历性、随机性有助于增强种群的多样性从而提高种群的搜索能力, Logistic 方程是一个典型的混沌系统,其表达式为:

$$x_{n+1} = \mu x_n(1 - x_n) \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

式中: μ 为控制参数,通常取 $\mu = 4$; $x_n \in [0, 1]$ 。

本文采用混沌思想生成粒子群的初始位置和初始速度:在不改变初始粒子群随机性的前提下,利用混沌粒子群提高种群的多样性以及粒子搜索的遍历性;在大量生成的混沌粒子群中选取一定数量的粒子作为初始种群。为了进一步丰富种群的多样性,避免粒子群算法的早熟收敛,在引入混沌思想的基础上再引入变异算子。在每一次迭代产生的粒子群中,以概率 p 选取一定数量的粒子进行变异操作,变异算子为:

$$mut(x_{id}) = x_{id} \times (1 + rand) \quad (2)$$

式中: $rand$ 为 $(-1, 1)$ 区间上的均匀分布的随机数; $mut(x_{id})$ 为变异后粒子的位置。由于变异算子的引入,即使粒子群算法陷入局部收敛,也能通过部分粒子的变异操作跳出局部,在一定程度上避免了早熟收敛^[14]。

(2) 引入收敛因子。

PSO 搜索过程是一个非线性的复杂过程,让惯性权重线性过渡的方法并不能正确地反映真实的搜索过程。文献^[15]中提出了收敛因子的概念,其中收敛因子表示式为:

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2, \quad \varphi > 4 \quad (3)$$

对基本粒子群算法的飞行速度方程稍加改进得到如下算式:

$$v_{id} = \chi[v_{id} + c_1 \times rand() \cdot (P_{id}(k) - X_{id}(k)) + c_2 \times rand() \cdot (P_{gd}(k) - X_{id}(k))] \quad (4)$$

根据算式(4)可以更新粒子的飞行速度。文献^[16]证明采用收敛因子的优化算法相比于采用惯性权重的优化算法有更好的收敛速度。

(3) 改进粒子群算法的步骤。

设寻优问题的目标函数为:

$$\min f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad a_i \leq x_i \leq b_i$$

则应用引入变异算子和收敛因子两种策略改进粒子群优化算法的步骤如下。

a. 初始化加速因子 c_1 和 c_2 , 最大进化代数 T_{max} , 将当前进化代数置为 $t = 1$ 。在空间 R^n 中,利用混沌思想初始化粒子位置和速度得到 pop 个粒子 x_1, x_2, \dots, x_m , 组成初始种群 $X(t)$, 初始化各粒子位移变化 v_1, v_2, \dots, v_m , 组成位移变化矩阵 $V(t)$ 。

b. 评价种群 $X(t)$, 计算每个粒子的适应值。自身最优值 $pbest$ 设置为当前粒子适应值, $pbest$ 对应位置为当前粒子

位置;全局最优值 $gbest$ 为当前适应值最优值,对应粒子位置为 $gbest$ 位置。

c. 随机选取 m ($m < pop$) 个粒子按照公式(2)的变异算子进行变异操作,用变异后的粒子代替原粒子。其余的粒子按式公式(4)更新粒子的速度和位置。由此产生新种群 $X(t+1)$ 。

d. 比较新种群粒子的适应值和自身最优值 $pbest$, 如果当前值比 $pbest$ 更优,则置 $pbest$ 为当前适应值, $pbest$ 位置为当前位置,否则,保持不变;比较粒子最优适应值与 $gbest$, 如果当前值比 $gbest$ 更优,则置 $gbest$ 为当前粒子最优适应值,并更新 $gbest$ 位置,否则,保持不变。

e. 检查结束条件,若满足,则结束寻优;否则, $t = t + 1$, 转步骤 b。结束条件为寻优达到最大进化代数 T_{max} , 或评价值小于给定精度。

2 改进粒子群算法在水库调度中的应用

2.1 应用实例简介

为了验证上述改进的粒子群算法应用效果,本文选择福建省东圳水库与木兰溪流域的单一水库防洪优化调度问题进行实证研究。研究目的是寻找一个最优的 48h 下泄流量序列,在满足水库终期水位 80 m 和其它约束条件的情况下,使得下游重要地点 A10 断面处的最高水位达到最小值。涉及的河段从木兰溪的岳公桥到三江口,全长共 14.7km,木兰溪下游断面的实测资料共有 20 个,断面位置见图 1,其中 A2、A3、A4、A12、A14、A19 所表示的断面为水闸。

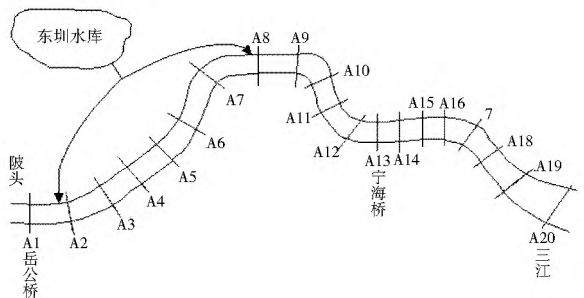


图 1 木兰溪下游断面位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the downstream section of Mulan River

图 1 中东圳水库显示为两条出流路径,分别汇入木兰溪 A2、A8 处。两条出流路径和木兰溪组成河网,根据河网水流计算可得所有河道的洪水演进过程。在洪水调度期间,木兰溪河道中水闸河道截面流量 Q 按照自由出流由下列公式计算, $Q = mbh \sqrt{2gh_0}$, 这里 h_0 为上游水深, b 为闸孔净宽, h 为计算过流水深, g 为重力加速度, m 为综合流量系数。流量 Q 用于普里斯曼隐式差分方程组的迭代。由于闸口堰顶高度一般为 2 m,河道深度一般为 7 m,整个河道有 6 座水闸, A10 上游有 3 座,计算结果表明闸口堰顶对洪水有一定的阻碍,水闸对降低坡头站的洪水过程具有一定的削峰作用,但洪水过程并未发生坦化。

东圳水库现行洪水调度规则如下。

(1) 从主汛期限制水位 80.00 m 起调。

(2) 当入库流量小于 200 m³/s 时,控制下泄流量小于或等于入库流量,使库水位不超过 80.00 m;当入库流量大于

200 m³/s 时, 入库水位高于 80.00 m 而又低于 80.50 m 时, 按 200 m³/s 下泄。

(3) 当库水位逼近 81.00 m 时:¹ 若洪峰未入库, 且入库流量小于当前溢洪道泄流能力, 则控制下泄流量等于入库流量; 若入库流量超过溢洪道泄流能力时, 闸门全开, 自由泄洪。水库的最大下泄流量不得超过本次洪水的洪峰流量。² 若洪峰已入库且入库流量大于溢洪道泄流能力时, 闸门全开, 自由泄洪, 尽快将库水位降至 81.00 m, 此后按 200 m³/s 泄洪, 直至库水位回落至主汛期限限制水位 80.00 m。

2.2 改进粒子群算法在水库调度运用中的算法步骤

利用改进粒子群算法求解水库优化模型时, 具体算法步骤如下。

(1) 利用混沌思想随机生成 *pop* 组下泄流量变化序列 $X_i = (q_{i0}, q_{i1}, \dots, q_{i48})$ 和下泄流量变化速度序列 $V_i = (v_{i0}, v_{i1}, \dots, v_{i48}) (i = 1, 2, \dots, pop)$ 。

(2) 将粒子 *i* 的 49 个分量线性插值为 289 个数值, 求出以粒子 *i* 为水库下泄流量变化序列时, 利用普里斯曼隐式差分方法计算 A10 断面处 49 个时刻的水位, 得到整个水库下泄过程中断面 A10 的最高水位, 即粒子 *i* 的个体适应度函数值; 将适应度值赋值给个体极值 *pbest*, *pbest* 对应位置为当前粒子位置, 即当前下泄策略; 找到 *pop* 个粒子适应度函数的最小值, 即 *pop* 个下泄流量变化序列对应 A10 处最高水位最小值; 将其赋值给全局极值 *gbest*, 其对应的粒子位置设置为 *gbest* 的位置。

(3) 参照前述改进粒子群优化算法的步骤 c 进行变异和更新, 即更新水库下泄流量变化序列和下泄流量变化速度序列, 并验证更新后的下泄策略的可行性, 保留可行的策略, 直至下泄策略总数为 *pop*。

(4) 参照前述改进粒子群优化算法步骤 d 计算粒子的适应度函数值, 比较粒子适应度值与个体极值点的适应度值。

(5) 检验是否满足迭代终止条件。若满足, 则停止迭代, 目前的全局极值点的位置即为水库的最优调度下泄流量过程。否则转步骤(3), 继续迭代, 直至满足终止条件。

2.3 优化调度结果及其分析

采用东圳水库现行洪水调度规则得到的水库防洪调度过程见图 2; 采用常规粒子群算法所求得的水库防洪调度过程见图 3; 将本文提出的改进粒子群算法应用到东圳水库调

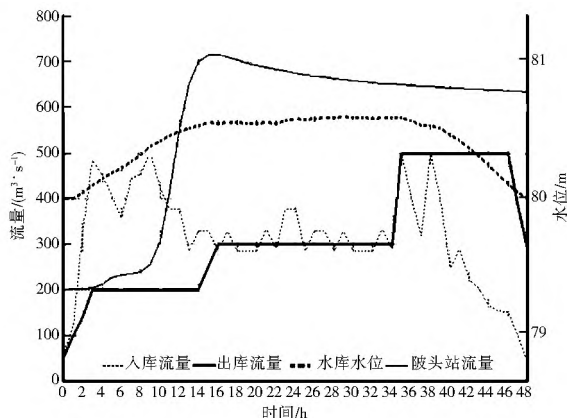


图 2 现行洪水调度规则下的水库调度过程

Fig. 2 Reservoir scheduling process under the present dispatching rule

度中, 求解水库防洪优化调度模型得到水库防洪调度过程见图 4; 对三种不同调度规则或算法调控水库下泄流量所产生的 A10 断面水位和流量过程进行比较, 结果见图 5; 将现行调度规则、常规粒子群算法和改进粒子群算法所求得的调度方案进行比较, 比较结果见表 1。

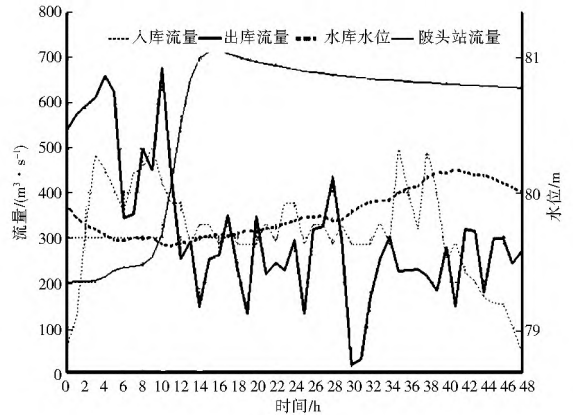


图 3 常规粒子群算法所求的水库调度过程

Fig. 3 Reservoir scheduling process obtained from the standard PSO algorithm

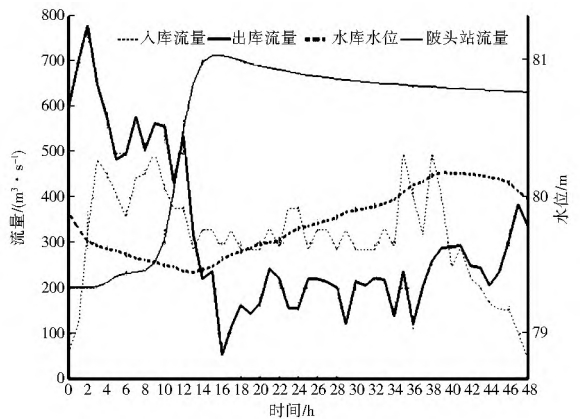
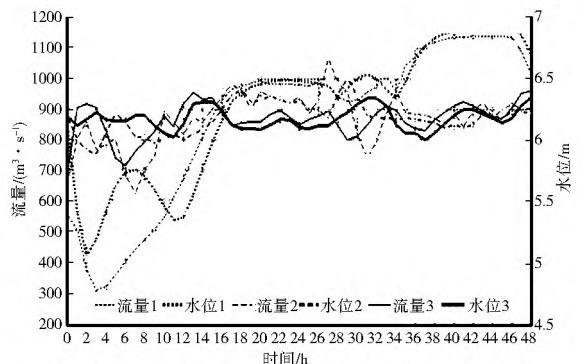


图 4 改进粒子群算法所求的水库调度过程

Fig. 4 Reservoir scheduling process obtained from the improved PSO algorithm



注: 流量1, 水位1, 流量2, 水位2, 流量3, 水位3分别为现行规则下、PSO和改进PSO的流量与水位

图 5 比较三种调度方案在 A10 断面的水位和流量

Fig. 5 Comparison of the water levels and flow rates at section A10 obtained from three different scheduling schemes

从表 1 可以看出, 应用改进粒子群算法求解东圳水库与木兰河流域防洪调度模型, 得出的 A10 处最高水位明显小于现行洪水调度规则实际运行结果和常规粒子群算法的运算

表1 现行调度规则、常规粒子群算法与改进粒子群算法下 A10 处的运行结果

Table 1 Comparison of the operation results at section A10 obtained from the present scheduling rules, standard PSO algorithm, and improved PSO algorithm

使用规则	最高水位/m	最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)
现行调度规则	6.93	1139.5
常规粒子群算法	6.51	1066.3
改进粒子群算法	6.35	959.2

结果,水位过程线和流量过程线比较平缓、上下波动幅度不大。表明改进粒子群算法应用于水库防洪优化调度中具有广阔的应用前景。

3 结语

本文提出的改进粒子群算法运用到东圳水库及木兰溪流域防洪优化调度中,得到的水库下泄过程使 A10 处最高水位为 6.35 m,最大流量为 959.2 m³/s,该结果明显优于采用现行水库调度方案所得到的 A10 处最高水位 6.93 m 以及最大流量 1 139.5 m³/s,也优于采用常规粒子群算法调度方案所得到的 A10 处最高水位 6.51 m 以及最大流量 1 066.3 m³/s,表明改进粒子群算法在水库防洪调度中有很好的应用,充分显示了改进粒子群算法的优良性能。

参考文献(References):

- [1] 毛德华,邱永红,谢石,等. 洪灾风险分析的国内外研究现状及展望(Ⅰ)—研究展望[J]. 自然灾害学报, 2012, (5): 8-15. (MAO Dehua, QIU Yonghong, XIE Shi, et al. Review and Prospect of Research on Flooding Risk Analysis at Home and Abroad (Ⅰ): Research Prospect[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, (5): 8-15. (in Chinese))
- [2] 李立,朱毅. 工程与非工程措施并举构建现代防洪体系[J]. 湖南水利水电, 2004, (3): 36-37. (LI Li, ZHU Yi. The Construction of Modern Flood Control System in Engineering and Non-engineering Measures[J]. Hunan Hydro & Power, 2004, (3): 36-37. (in Chinese))
- [3] 邹进. 水库长期优化调度的可持续性模型初探[J]. 水文, 2010, (1): 35-38. (ZOU Jin. Discussion on the Sustainable Model for Long-term Optimal Operation of Reservoirs[J]. Journal of China Hydrology, 2010, (01): 35-38. (in Chinese))
- [4] 宋萌勃,岳延兵,陈吉琴. 水库调度与管理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013. (SONG Mengbo, YUE Yanbing, CHEN Jiqin. Reservoir Operation and Management [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2013. (in Chinese))
- [5] 何俊仕,林洪孝. 水资源规划及利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (HE Junshi, LIN Hongxiao. Water Resources Planning and Utilization [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 王万良,周慕逊,管秋,等. 基于遗传算法的小水电站优化调度

- 方法的研究与实践[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 6-11. (WANG Warliang, ZHOU Muxun, GUAN Qiu, et al. Research and Practice of Optimum Operation Method Based on Genetic Algorithm for Small Hydropower Stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 6-11. (in Chinese))
- [7] 徐刚,马光文. 基于蚁群算法的梯级水电站群优化调度[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 7-10. (XU Gang, MA Guangwen. Optimal Operation of Cascade Hydropower Stations Based on Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 7-10. (in Chinese))
 - [8] 李崇浩,纪昌明,李文武. 改进微粒群算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006, (2): 54-57. (LI Chonghao, JI Changming, LI Wenwu. Modified Particle Swarm Algorithm and Its Application in Reservoir Operation Optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (2): 54-57. (in Chinese))
 - [9] 梁旭,黄明. 现代智能优化混合算法及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. (LIANG Xu, HUANG Ming. Modern Intelligent Optimization Algorithm and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese))
 - [10] Maurice Clerc. Particle Swarm Optimization [M]. America: Wiley-ISTE, 2006.
 - [11] N C Chauhan, M V Kartikeyan, A Mittal. A Modified Particle Swarm Optimizer and Its Application to the Design of Microwave Filters [J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2009, 598-610.
 - [12] Eberhart R C, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [A]. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Piscataway [C]. NJ: IEEE Service Center, 2001: 81-86.
 - [13] 徐文星,耿志强,朱群雄,等. 基于SQP局部搜索的混沌粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2012, (4): 557-561. (XU Wenxing, GENG Zhiqiang, ZHU Qunxiong, et al. Chaos Particle Swarm Optimization Algorithm Integrated with Sequential Quadratic Programming Local Search [J]. Control and Decision, 2012, (4): 557-561. (in Chinese))
 - [14] 安晓会,高岳林. 混合变异算子的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2008, (S1): 28-30. (AN Xiaohui, GAO Yue lin. Adaptive Particle Swarm Algorithm with Hybrid Mutation Operator [J]. Journal of Computer Applications, 2008, (S1): 28-30. (in Chinese))
 - [15] Maurice Clerc. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization [C]. Proceedings of International Conference on Evolutionary Computation, 1999: 51-57.
 - [16] 邱林,肖琳. 改进微粒群优化算法在水库防洪调度中的应用[J]. 人民黄河, 2007, 29(10): 18-21. (QIU Lin, XIAO Lin. Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Reservoir Flood Control Operation [J]. Yellow River, 2007, 29(10): 18-21. (in Chinese))