

网络出版时间:2013-07-18 16:02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130718.1602.014.html>

梯级水库优化调度模型的 蚁群系统(ACS)算法求解研究

杨文娟¹, 刘任远²

(1 东莞市江库联网工程中心, 广东 东莞 523888; 2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

【摘要】 **【目的】**对梯级水库调度模型的动态、高维、非线性、复杂优化问题进行求解。**【方法】**在传统蚂蚁系统的基础上,将蚁群系统中的蚁密、蚁量系统的局部更新和蚁周系统的全局更新有机结合,提出了一种求解梯级水库优化调度模型的改进蚁群算法,即蚁群系统(ACS)算法,采用 ACS 算法对乌江梯级水库进行了优化调度实例研究。**【结果】**ACS 算法兼顾了计算的时间和精度,优化得乌江梯级发电量为 96.538 亿 kW·h,相比利用动态搜索算法求解的乌江梯级发电量 95.882 亿 kW·h 略大,但均接近于乌江梯级设计多年平均发电量 100.21 亿 kW·h。**【结论】**采用 ACS 算法可快速求解乌江梯级水库优化调度模型,并可得到满意的结果,说明该优化算法是合理、可行的。

【关键词】 梯级水库; 优化调度; 模型; 蚁群系统(ACS)算法

【中图分类号】 TV697.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)08-0228-07

Solution of ant colony system (ACS) algorithm to optimize reservoir operation

YANG Wen-juan¹, LIU Ren-yuan²

(1 Project Center of Dong River and Reservoir Networking, Dongguan, Guangdong 523888, China;

2 Institute of Water Resources & Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** This study aimed to solve the dynamic, high-dimensional and nonlinear complex optimization problems of cascade reservoir operation model. **【Method】** Based on traditional ant system, an improved ant colony algorithm (the ACS algorithm) of solving the optimal operation model for cascade reservoirs was improved by combining the partial innovation of ant density system and ant quantity system with the entire innovation of ant circumference system. **【Result】** The ACS algorithm took into account of both computing time and accuracy. The cascade energy output of wujiang was 96.538 billion kW·h, which was slightly larger than dynamic search algorithm (95.882 billion kW·h) and close to the averaged capacity of Wujiang cascade reservoirs (100.21 billion kW·h). **【Conclusion】** The ACS algorithm was reasonable and feasible to solve cascade reservoir optimal operation model quickly with satisfactory results.

Key words: cascade reservoir; optimal operation; model; ant colony system (ACS) algorithm

20 世纪 40 年代, Masse 提出了水库优化调度问题。50 年代以后, 系统分析、优化模型的引入以及计算机技术的发展, 才使得水库优化调度问题在

理论和应用研究上取得了长足的进展。水库调度随机动态规划模型是水库优化调度开创性的研究成果, 随后被不断改进并日趋完善。随着水资源和水

* [收稿日期] 2012-10-15

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403306); 国家公益性行业科研专项(201001012, 201101043, 201101049-01)

[作者简介] 杨文娟(1982—), 女, 陕西西安人, 工程师, 博士, 主要从事水资源系统工程规划研究。

E-mail: Yangwenjuan0202@163.com

电能源的不断开发利用,新的优化算法相继出现并应用于水库优化调度问题中。为了寻求更科学的水库优化调度算法,众多学者针对水库调度模型求解问题的动态、高维、非线性复杂优化问题,纷纷提出了不同的优化算法,如模糊优化算法、大系统分解协调、遗传算法、蚁群算法、人工神经网络等^[1-3]。但这些算法在优化过程中不同程度存在容易陷入局部最优、参数难以确定、容易产生“维数灾”等局限。本研究针对蚁群算法的不足,在传统蚁群系统的基础上,通过将蚁密系统、蚁量系统的局部更新和蚁周系统的全局更新结合起来,研究提出了一种改进的蚁群系统(ACS)算法,提高了模型求解的搜索效率,并避免了模型求解过程中的“维数灾”问题^[4-5],以期求解优化调度模型提供一种新的思路。

1 改进蚁群算法

1.1 蚁群系统(ACS)算法

蚂蚁系统 AS(Ant System)是 ACO 的最早形式,此后陆续出现了多种改进蚁群算法,如带精英策略的蚂蚁系统(Ant System with elitist strategy, ASelite)和基于优化排序的蚂蚁系统(Rank-Based Version of Ant System, ASrank)、蚁群系统(Ant Colony System, ACS)、最大-最小蚂蚁系统(Max-Min Ant System, MMAS)以及最优-最差蚂蚁系统(Best-Worst Ant System, BWAS)^[6-9]。本研究将蚁密系统、蚁量系统的局部更新和蚁周系统的全局更新结合起来,提出了一种改进的蚁群算法——蚁群系统(ACS)算法,在蚂蚁系统的基础上做了3方面的改进。

1)蚁群系统状态转移规则。状态转移规则不同于蚂蚁系统中完全依概率选择路径的随机比例规则,引入了调整参数 q_0 ,用以调节探索新路径的程度和是否使蚂蚁的搜索活动集中于最优解的空间领域内,称为伪随机比例规则。正如1只位于节点 i 的蚂蚁按式(1)选择路径的下一节点 j 。

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in \text{allowed}_k} \{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta\}, & \text{if } q \leq q_0; \\ J, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\text{allowed}_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的城市, l 为蚂蚁选择的路径; $\tau_{ij}(t)$ 为蚂蚁在 t 时刻边 (i, j) 上的信息素轨迹强度; $\eta_{ij}(t)$ 为 t 时刻边 (i, j) 的启发式因子; α 和 β 为2个参数,分别反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息和启发信息在蚂蚁选择路径中的相对重要性; q 为在 $[0, 1]$ 区间均

匀分布的随机数; q_0 为参数 ($0 \leq q_0 \leq 1$), 决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性; J 为概率分布所选出的随机变量。

2)蚁群系统全局更新规则。全局更新规则只应用于最优的蚂蚁路径上,不同于蚂蚁系统对所有蚂蚁都进行更新,这就提高了搜索最优路径的效率,使搜索过程更具有指导性;蚂蚁的搜索主要集中在当前循环为止所找出的最好路径的邻域内。全局更新在所有蚂蚁都完成它们的路径之后执行,应用式(2)对其所建立的路径进行更新。

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t+1) &\leftarrow (1-\alpha) \cdot \tau_{ij}(t) + \alpha \cdot \Delta\tau_{ij}(t, t+1); \\ \Delta\tau_{ij}(t, t+1) &= \begin{cases} (L_{gb})^{-1}, & \text{如果 } (i, j) \in \\ & \text{全局最优路径,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 、 $\tau_{ij}(t+1)$ 为蚂蚁在 t 、 $t+1$ 时刻边 (i, j) 上的信息素轨迹强度; $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ 表示本次循环中路径 (i, j) 的信息素量的增量; α 为信息素挥发参数, $0 < \alpha < 1$; L_{gb} 为到目前为止找出的全局最优路径(与具体问题有关)。式(2)规定,只有那些属于全局最优路径的边上的信息素才会得到增强。

3)蚁群系统局部更新规则。在建立问题解决的过程中应用局部信息素更新规则。在蚁群系统中,蚂蚁在构造路径的同时进行局部更新,类似于蚁密和蚁量模型中的更新规则,而在每次循环后再对路径进行一次全局更新。蚂蚁应用式(3)的局部更新规则对所经过的路径进行信息素更新:

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t, t+1). \quad (3)$$

式中: ρ 是一个参数, $0 < \rho < 1$ 。

局部更新规则的使用,减小了蚂蚁已参观过路径的信息素,使其越来越缺乏吸引力,在算法每个循环的余留阶段,这些参观过的路径能被其它蚂蚁以较低的概率选择,从而扩大了对未参观过路径的搜索。因此,局部更新规则可以有效地避免蚂蚁收敛到统一路径。

1.2 有条件的生成初始种群

蚁群算法在应用时首先要随机生成初始种群,初始种群生成的好坏将影响寻求最优解的速度。对水库调度问题来说,其模型是一个有约束的非线性规划模型,其中目标函数具有高度非线性特点,约束条件则主要为线性约束,且必须考虑水库水量平衡约束。对于非界限约束,主要通过罚函数来解决。然而,已有研究表明,罚函数法对解决线性约束的效果并不好^[10]。

本研究在现有改进蚁群算法的基础上,根据水

资源系统水量平衡方程的特点,提出新的改进思路,采用一种以水量平衡方程为主要线性约束的处理方法有条件地生成初始种群,以提高算法寻求最优解的速度。

水库的水量平衡方程及有关约束见式(4)~(6):

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + I_{i,t} - R_{i,t} - \text{LOSS}_{i,t}; \quad (4)$$

$$V_{\min,i,t} \leq V_{i,t} \leq V_{\max,i,t}; \quad (5)$$

$$V_{\min,i,t+1} \leq V_{i,t+1} \leq V_{\max,i,t+1}。 \quad (6)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 为*i*水库*t*+1时段初的库容,即*t*时段末的库容; $V_{i,t}$ 为*i*水库*t*时段初的库容; $I_{i,t}$ 为*i*水库*t*时段的入库水量; $R_{i,t}$ 为*i*水库*t*时段的出库水量,包括发电引水量和通过溢洪道的下泄水量 2 部分; $\text{LOSS}_{i,t}$ 表示*i*水库*t*时段的损失(例如蒸发、渗漏损失); $V_{\min,i,t}$ 、 $V_{\max,i,t}$ 分别为*i*水库*t*时段初允许库容上、下限; $V_{\min,i,t+1}$ 、 $V_{\max,i,t+1}$ 分别为*i*水库*t*+1时段初允许库容上、下限。

根据约束条件(5)、(6),可确定出库水量 $R_{i,t}$ 的取值范围为 $R_{\min,i,t} \leq R_{i,t} \leq R_{\max,i,t}$,其上界为:

$$\min\{R_{\max,i,t}, (V_{i,t} - V_{\min,i,t+1} + I_{i,t} - \text{LOSS}_{i,t})\}。 \quad (7)$$

下界为:

$$\max\{R_{\min,i,t}, (V_{i,t} - V_{\max,i,t+1} + I_{i,t} - \text{LOSS}_{i,t})\}。 \quad (8)$$

然后,在该区间范围内随机生成 $R_{i,t}^{(j)}$ (上标 *j* 表示进化种群的代数),得到 $R_{i,t}$ 的 1 个初始值,再利用水量平衡方程式确定 $V_{i,t}^{(j)}$ 的值。

$$V_{i,t+1}^{(j)} = V_{i,t} + I_{i,t} - R_{i,t}^{(j)} - \text{LOSS}_{i,t}。 \quad (9)$$

对于年调节水库的初始时段,初始库容 $V_{i,1}$ 为已知,其值可视为 1 个常数。则 V_1 可以表示为:

$$V_1 = V_{T+1}。 \quad (10)$$

式中: V_1 为水库初始库容, T 为总时段数。

按照上述方法可获得初始种群,且该初始种群必须满足水量平衡方程,以及有关的上、下限约束。这就使得初始种群中的每一个个体都是等式约束的可行解,可加速算法收敛。

2 梯级水库优化调度模型求解的蚁群系统(ACS)算法

以发电量最大为目标函数的水库优化调度问题较为复杂^[11-13],概化为蚁群结构,可表示如下。

1)启发式信息。水电站水库优化调度可以电站年发电量最大为目标函数,即:

$$\text{Obj}; \max E = \sum_{t=1}^T k \cdot q_t \cdot H_t \cdot F_t。 \quad (11)$$

式中: E 为电站年发电量; k 为电站综合出力系数; q_t 为电站*t*时段的发电流量; H_t 为电站*t*时段的平均发电净水头; T 为总时段数,如以月为调度周期,则 $T=12$; F_t 为*t*时段平均时间。

人工蚂蚁从路径*i*向路径*j*转移的启发式信息为:

$$\eta_{ij} = E_i - E_j。 \quad (12)$$

式中: E_i 、 E_j 表示*i*、*j*路径对应的目标函数值。

2)适应度函数。通常要求目标函数的优化方向对应适应度函数的增大方向,可对所选择的适应度函数进行某些数学变换,如线性变换、幂变换等。可以利用线性变换将优化目标函数变换为适应度函数的线性函数,即:

$$\text{FIT} = az + b。 \quad (13)$$

式中: FIT 为适应度函数; $z = z(x)$ 为优化目标函数; a 、 b 为系数,可根据具体问题的特点确定。

适应度函数取为幂函数,即将优化目标函数变换为适应度函数的幂函数:

$$\text{FIT} = z^\alpha。 \quad (14)$$

式中: $z = z(x)$ 为优化目标函数,即发电量最大; α 是常数,可取 $\alpha = 1.005$ 。

3 应用实例

3.1 乌江梯级水电站水库概况及基本资料

1)梯级水库概况。乌江发源于贵州省威宁县乡庐山,流经贵州、重庆两省,在重庆涪陵注入长江,是贵州的第一大河,也是长江上游南岸的最大支流。干流全长 1 037 km,流域面积 8.79 万 km²,多年平均水量 534 亿 m³,是我国水电富矿之一。现结合乌江梯级水电站水库进行实例研究,包括洪家渡、东风、索风营、乌江渡水库,其中洪家渡水电站水库是乌江梯级开发的龙头水电站水库,以发电为主,兼顾防洪、供水等任务,是乌江流域梯级水库中惟一具有多年调节的水库;东风水电站水库以发电为主,兼顾灌溉,属于不完全年调节水库;索风营水电站水库是乌江梯级规划开发的第 3 个梯级,水库以发电为主,兼顾灌溉等任务,属于日调节水库;乌江渡水电站水库位于乌江干流中游河段,是乌江干流的第 4 个梯级,以发电为主,兼顾防洪,属于不完全年调节水库。

2)梯级水电站水库特征参数。乌江梯级水电站水库的主要特征参数如表 1 所示。

表 1 乌江梯级水电站水库主要特征参数

Table 1 Main characteristic parameters of Wujiang River cascade hydropower stations

电站水库 Hydropower reservoir station	正常蓄 水位/m Normal water level	有效 库容/ 亿 m ³ Effective storage	死 水位/m Dead water level	死库容/ 亿 m ³ Dead storage	调节 库容/ 亿 m ³ Regulating storage	保证出力/ MW Guaranteed output	装机 容量/MW Installed capacity	最大发 电流量/ (m ³ ·s ⁻¹) Power discharge	多年平均 发电量/ (亿 kW·h) Multi-year average energy production	出力 系数 Output factor
洪家渡 Hongjiadu	1 140	44. 97	1 076	11. 36	33. 61	159. 10	600	490. 5	15. 60	8. 40
东风 Dongfeng	970	8. 64	936	3. 74	4. 90	236	570	498. 0	23. 10	8. 35
索风营 Suofengying	837	1. 68	822	1. 01	0. 67	166. 9	600	994. 5	20. 11	8. 40
乌江渡 Wujiangdu	760	21. 40	720	7. 80	13. 60	254	1 250	1 100. 4	41. 40	8. 17

3)梯级水库径流资料。洪家渡水电站水库的入库径流由洪家渡水文站测得,资料系列长度为 42 年(1952—1993 年),洪家渡—引子渡—东风、东风—索风营、索风营—乌江渡的区间入流资料,与洪家渡入库径流资料序列同步。洪家渡 42 年入库径流资料如图 1 所示,多年平均入库水量为 46.65 亿 m³。

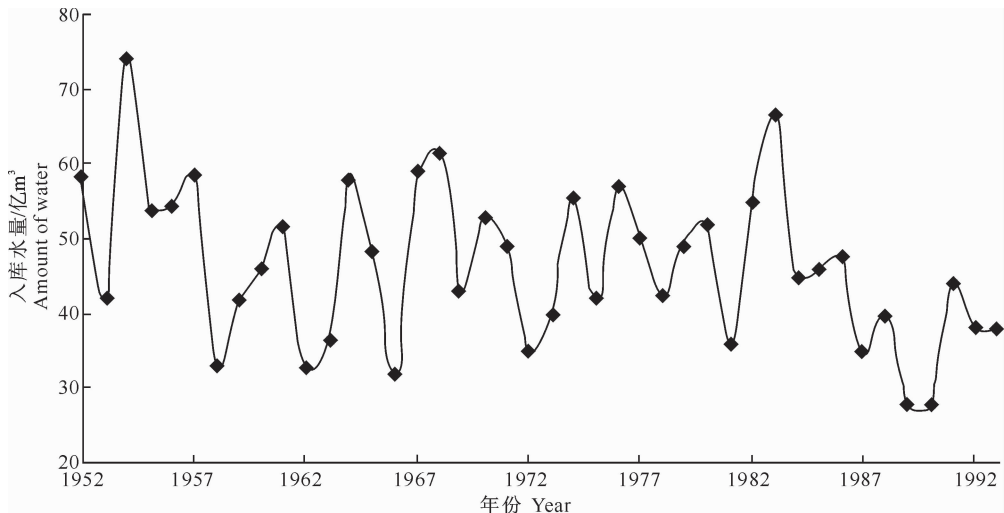


图 1 洪家渡水库 1952—1993 年的入库水量
Fig. 1 Anural inflow of Hongjiadu reservoir

3.2 乌江梯级水电站水库优化调度模型的建立

采用改进的蚁群算法——ACS 算法进行水库优化调度研究,并在生成初始种群时考虑水量平衡方程等线性条件的约束,有条件地生成初始种群,以提高算法寻求最优解的速度^[14]。本研究以乌江梯级水电站水库为例,进行梯级水库优化调度计算。如前所述,乌江梯级水电站水库群优化调度研究包括洪家渡、东风、索风营和乌江渡 4 座电站,由于索风营为日调节水库,调节能力差,在长期优化调度模型中只考虑利用其水头发电,所以在建立乌江梯级水电站中长期发电优化调度模型时,将其概化成 3 个梯级水库联合调度问题。以乌江梯级水电站发电量最大为目标函数,即:

$$Obj: \max E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M k_i \cdot q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot F_{i,t} \quad (15)$$

式中: E 为梯级水电站总发电量; T 为总时段数; M 为水电站数目,取 $M=3$; k_i 为第 i 电站的综合出力系数; $q_{i,t}$ 为第 i 电站 t 时段的发电流量; $H_{i,t}$ 为第 i

电站 t 时段的平均发电净水头; $F_{i,t}$ 为第 i 电站 t 时段平均时间。本研究考虑的约束条件如下。

水量平衡约束:

$$V(i,t+1)=V(i,t)+(Q_I(i,t)-Q_O(i,t))\times\Delta t;$$

流量平衡约束:

$$Q_I(i+1,t)=Q_O(i,t-p)+q(i,t-q);$$

特征水位约束:

$$Z_{\min}(i,t)\leq Z(i,t)\leq Z_{\max}(i,t);$$

下泄流量约束:

$$Q_{O\min}(i,t)\leq Q_O(i,t)\leq Q_{O\max}(i,t);$$

出力约束: $\underline{N}_{i,t}\leq N_{i,t}\leq \overline{N}_{i,t}$ 。

式中: $V(i,t)$ 、 $V(i,t+1)$ 分别表示 i 水库 t 时段初、末的库容; $Q_I(i,t)$ 、 $Q_O(i,t)$ 分别表示 i 水库 t 时段的入库和出库流量; $q(i,t)$ 为 i 水库和 $i+1$ 水库 t 时段的区间入流; p 、 q 为上游水库出库流量和区间流量到达下游水库的流达时间; $Z_{\max}(i,t)$ 、 $Z_{\min}(i,t)$ 分别表示 i 水库 t 时段允许水位上、下限; $Q_{O\max}(i,t)$ 、

$Q_{O\min}(i,t)$ 表示 i 水库下泄流量限制上、下限; $N_{i,t}$ 、 $\bar{N}_{i,t}$ 分别表示 i 电站 t 时段保证出力和机组额定出力。

有限个蚂蚁随机分布在初始库容的不同等级上,可行路径的选择必须要满足水量平衡方程以及库容约束限制等主要约束条件。所有蚂蚁完成第 1

次环游,就将产生目标函数的有限个可行解,在进行下一个往复过程时必须进行信息素的更新。当信息素更新完成时,下一轮往复开始。用蚁群系统 ACS 进行水电站水库优化调度的流程如图 2 所示。

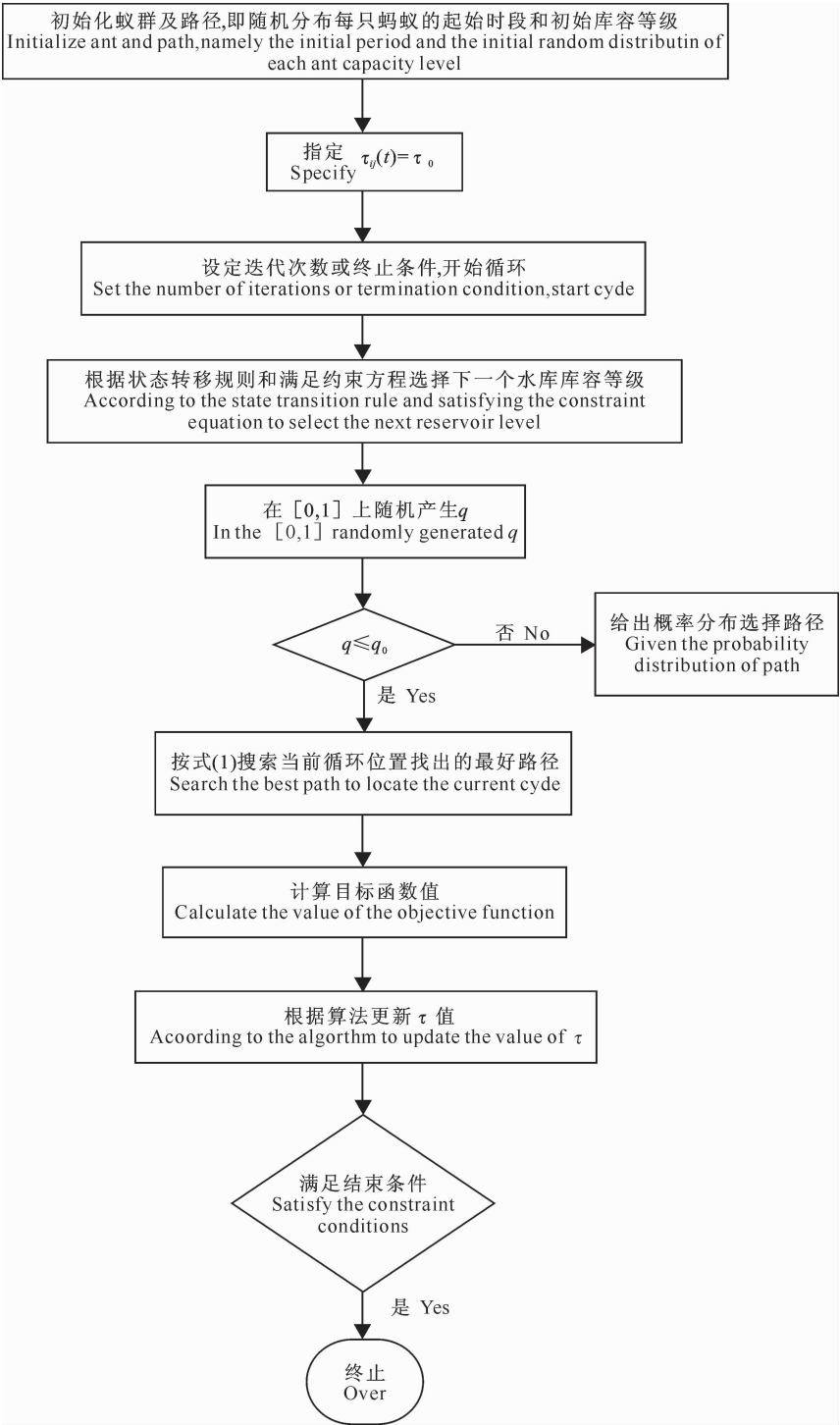


图 2 ACS 算法应用于水库优化调度时的流程图

Fig. 2 Flow chart of ACS optimization for optimum reservoir operation

3.3 结果分析

洪家渡、东风和乌江渡水库从死水位到正常蓄

水位均以 0.1 m 为间隔进行离散,3 座水库分别离散为 640,340 和 400 个等级。根据经验设置主要参

数: $\alpha=1,\beta=4,q_0=0.9,\rho=0.75$,运行时的往复次数限制为 100 次。分析洪家渡水库 1952—1993 年 42 年长系列入库资料,选取平水年 1985 年($P=51.16\%$)进行典型年计算,该年入库水量为 45.93 亿 m^3 ,比洪家渡多年平均入库水量(46.65 亿 m^3)略小。以 12 个月为调度期,多年调节水库洪家渡起调水位 1 124 m,东风起调水位 936 m,乌江渡起调水位 723 m,得到各水库优化调度计算结果见表 2,其中,东风水库区间入流包括引子渡出库和洪家渡-东风区间入流,即洪家渡-引子渡-东风区间入流。从表 2 可以看出,采用 ACS 算法兼顾了计算的时间和

精度,优化得乌江梯级发电量为 96.538 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。同时,本研究采用动态搜索算法对乌江梯级调度模型进行了求解,优化得乌江梯级发电量为 95.882 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。上述研究结果表明,采用 ACS 算法求解的乌江梯级发电量比动态搜索算法的求解结果略大,但均接近于乌江梯级设计多年平均发电量 100.21 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$;在算法求解过程中,ACS 算法搜索速度更快、结果更准确。说明 ACS 算法具有一定的有效性和可行性,可广泛应用于梯级水电站水库的优化调度研究。

表 2 用 ACS 算法得到乌江梯级水电站水库典型年调度计算结果

Table 2 Results of reservoirs operation of Wujiang River at a typical year by ACS algorithm

月份 Month	洪家渡 Hongjiadu					东风 Dongfeng				
	入库流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Reservoir inflow	末水位/m Final water level	发电流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Power discharge	弃水流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Abandon discharge	发电量/ 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ Generated energy	区间入流/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Inter- zone inflow	末水位/m Final water level	发电流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Power discharge	弃水流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Abandon discharge	发电量/ 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ Generated energy
5	88.2	1 124.1	87	0	0.784	182.02	936	269.02	0	1.566
6	482	1 138	101.62	0	0.958	362.66	970	278.34	0	1.908
7	444	1 138	444	0	4.275	585.31	970	498	531.31	3.782
8	154	1 140	95.18	0	0.944	161	970	256.18	0	2.025
9	206	1 140	206	0	2.037	163	970	369	0	2.896
10	83.8	1 137.8	148.80	0	1.468	83	970	231.8	0	1.835
11	74.1	1 135.3	148.50	0	1.443	72.5	970	221	0	1.751
12	46.1	1 131.4	155.50	0	1.480	67.80	970	223.3	0	1.769
1	36.5	1 126.5	166	0	1.533	69.02	970	235.02	0	1.861
2	41	1 121.7	159	0	1.422	70.79	970	229.79	0	1.820
3	42.3	1 120.7	66.5	0	0.589	69.14	958.1	213.64	0	1.616
4	48.4	1 120.0	66.5	0	0.586	91.57	936	266.01	0	1.728
年发电量 Annual energy production					17.519					24.557

月份 Month	索风营 Suofengying					乌江渡 Wujiangdu				
	入库流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Reservoir inflow	末水位/m Final water level	发电流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Power discharge	弃水流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Abandon discharge	发电量/ 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ Generated energy	区间入流/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Inter- zone inflow	末水位/m Final water level	发电流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Power discharge	弃水流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) Abandon discharge	发电量/ 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ Generated energy
5	111	829.5	380.02	0	1.588	57	723	437.02	0	2.482
6	240	829.5	518.34	0	2.145	230	760	259.57	0	1.774
7	180	829.5	994.5	214.81	3.901	320	760	1 100.4	428.91	8.417
8	53	829.5	309.18	0	1.299	25	760	334.18	0	2.647
9	40	829.5	409	0	1.706	63	760	472	0	3.721
10	14	829.5	245.8	0	1.043	16	760	261.8	0	2.079
11	20	829.5	241	0	1.022	37	760	278	0	2.207
12	10.6	829.5	233.9	0	0.992	39	760	272.9	0	2.166
1	9.5	829.5	244.52	0	1.037	5.5	760	250.02	0	1.986
2	9.3	829.5	239.09	0	1.014	33.9	760	272.99	0	2.167
3	5.4	829.5	219.04	0	0.929	12.3	747.1	436.34	0	3.275
4	8.9	829.5	274.91	0	1.157	24	723	582.68	0	3.708
年发电量 Annual energy production					17.833					36.629

4 结 论

研究提出了一种改进的蚁群系统(ACS)算法。该算法是在传统蚂蚁系统的基础上,通过将蚁密系统、蚁量系统的局部更新和蚁周系统的全局更新结合进行改进的。同时,采用一种以水量平衡方程为主要线性约束的处理方法来有条件地生成初始种群,从而快速获得最优的调度结果。最后,采用上述改进蚁群算法对乌江梯级水库进行了水库优化调度的实例研究,应用局部搜索和全局搜索相结合的机制优化路径,提高了算法的搜索效率,容易找到全局最优解,避免了求解确定性问题时出现的“维数灾”问题。

[参考文献]

- [1] Raheleh A, Seyed J M, Abbas G. Reliability-based simulation optimization model for multi-reservoir hydropower systems operations; Khersan experience [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2008, 134(1): 24-33.
- [2] Chang F J, Chen L, Chang L C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithm [J]. *Hydrology Process*, 2005, 19(11): 2277-2289.
- [3] 李小芹, 李延频, 赵梦蝶, 等. 梯级水库群发电优化调度评述 [J]. *人民黄河*, 2008, 30(4): 78-80.
- Li X Q, Li Y P, Zhao M D, et al. Review on generation optimal operation of cascade reservoirs [J]. *Yellow River*, 2008, 30(4): 78-80. (in Chinese)
- [4] 代 琼, 王吉伟, 杨 广, 等. 群库优化调度研究综述 [J]. *水科学与工程技术*, 2008(2): 13-16.
- Dai Q, Wang J W, Yang G, et al. Summary for the study of the multi-reservoir optimum operation and dispatch [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008(2): 13-16. (in Chinese)
- [5] 裴哲义, 唐 勇, 和 青. 第 29 届中国电网调度运行会水库调度专业综述 [J]. *水电自动化与大坝监测*, 2006, 30(1): 5-7, 17.
- Pei Z Y, Tang Y, He Q. Hydropower operation specialty summarization on the 29th China Grid Dispatching Operation Con-

- ference [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2006, 30(1): 5-7, 17. (in Chinese)
- [6] 李士勇. 蚁群算法及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- Li S Y. Research on ant colony algorithm and its application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [7] Abbaspour K C, Schulin R, van Genuchten M T. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization [J]. *Adv Water Resour*, 2001, 24(8): 827-933.
- [8] Maier H R, Simpson A R, Zecchin A C, et al. Ant colony optimization for design of water distribution systems [J]. *J Water Resour Plng and Mgmt*, 2003, 129(3): 200-209.
- [9] 刘 涵. 水库优化调度新方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- Liu H. New methods study of reservoir optimal operation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 宋朝红, 罗 强, 纪昌明. 基于混合遗传算法的水库群优化调度研究 [J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2003, 36(4): 28-31.
- Song C H, Luo Q, Ji C M. Hybrid genetic algorithm-based optimal operation of reservoirs system [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003, 36(4): 28-31. (in Chinese)
- [11] 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 G, Ma G W. Optimal operation of cascade hydropower stations based on ant colony algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(5): 7-10. (in Chinese)
- [12] 徐 刚, 马光文, 梁武湖, 等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用 [J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 397-340.
- Xu G, Ma G W, Liang W H, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation [J]. *Advance in Water Resource*, 2005, 16(3): 397-340. (in Chinese)
- [13] 畅建霞, 黄 强, 王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度 [J]. *水力发电学报*, 2001, 20(3): 85-90.
- Chang J X, Huang Q, Wang Y M. Optimal operation of hydropower station reservoir by using an improved genetic algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001, 20(3): 85-90. (in Chinese)
- [14] Biswas A K. Water for sustainable development in the 21st century [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.