

蚁群算法求解梯级水电厂日竞价优化调度问题

徐刚, 马光文, 涂扬举

(四川大学 水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 应用蚁群算法(Ant Colony algorithm, ACA), 即利用蚂蚁群体相互协作和邻域搜索寻找功能, 求解梯级水电站日竞价优化调度问题。计算中定义水库调度线为蚂蚁路径, 利用状态转移、信息素更新和邻域搜索, 不断调整路径逐步向最优值逼近。计算结果表明, 梯级电站电量时空分配合理, 并且满足约束条件, 该算法可以求解具有复杂约束条件的非线性梯级优化调度问题。

关键词: 梯级水电厂; 电力市场; 优化调度; 蚁群算法

中图分类号: TV697 **文献标识码:** A

电力市场竞争上网要求发电商向交易中心申报次日每一时段的电价、电量。水电厂预测出次日各时段系统边际电价, 根据来水情况确定日内用水量, 如何申报梯级中各电站相应的时段电量, 达到日内梯级发电预期收入最大, 这是梯级调度机构在电力市场条件下将面临的一个问题。为解决这一问题, 目前提出了许多方法, 如动态规划及各种改进方法^[1]、分解协调方法、遗传算法^[2]等。

本文应用蚁群算法求解梯级水电厂日竞价优化调度问题, 建立用于求解具有非凸、非线性约束特征的梯级水电厂日竞价优化问题的蚁群算法模型。探讨为解决梯级水电厂日竞价优化调度问题提供一种有效的方法。

1 梯级水电厂短期优化调度模型

已知电网次日 96 点(电力市场规则规定每 15min 为 1 个竞价时段, 每时段一个电价, 一天 24h 共 96 个时段, 即 96 点边际电价, 下同)边际电价, 梯级各电站库初水位, 日内各电站总的用水量, 求各站的 96 点时段电量, 使调度期内梯级电站总的发电收入最大^[3]。

目标函数:

$$J = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (A_i \cdot p_t \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot M_t) \quad (1)$$

收稿日期: 2004-10-19

作者简介: 徐刚(1974-), 男, 四川成都人, 博士生, 主要从事水电经济运行和电力市场研究。

E-mail: xgzj2002365@hotmail.com

约束条件:

水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (q_{i,t} + q_{i-1,t-\tau} - Q_{i,t} - S_{i,t})\Delta t \quad \forall t \in T \quad (2)$$

水库蓄水量约束

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

水库下泄流量约束

$$Q_{i,t,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

电站出力约束

$$N_{i,\min} \leq A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

总用水量约束

$$3600 \sum_{t=1}^T Q_{i,t} \leq W_i \quad (6)$$

式中: J 为梯级电站控制期内发电收入; A_i 为第 i 个电站综合出力系数; p_t 为 t 时段预测系统边际电价; $Q_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段发电流量 (m^3/s); $H_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段平均发电净水头 (m); T 为日内计算总时段 (计算时段为 d , $T=96$); M_t 第 t 时段小时数 (0.25h); $V_{i,t+1}$ 为第 i 个电站第 t 时段末水库蓄水量; $V_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 时段初水库蓄水量; $q_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 时段平均入库 (区间) 流量; $q_{i-1,t-\tau}$ 为第 $i-1$ 个电站第 $t-\tau$ 时段平均下泄流量 (τ 为流达时间); $S_{i,t}$ 为第 i 个电站在 t 时段弃水流量; $V_{i,t,\min}$ 为第 i 个电站第 t 时段应保证的水库最小蓄水量; $V_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 时段水库蓄水量; $V_{i,t,\max}$ 为第 i 个电站第 t 时段允许的水库最大蓄水量; $Q_{i,t,\min}$ 为第 i 个电站第 t 时段应保证的最小下泄流量; $Q_{i,t,\max}$ 为第 i 个电站第 t 时段允许的最大下泄流量; $N_{i,\min}$ 为第 i 个电站允许的最小出力; $N_{i,\max}$ 为 i 个电站的最大出力限制。

2 算法应用

蚁群算法是基于群体的随机启发式优化算法^[4~6], 算法基本思想是蚁群总是寻找食物源与蚁巢间的最短路径: 当蚂蚁寻找食物时会沿途释放称为信息素的物质, 后续的蚂蚁倾向于向信息素浓度高的路径移动。这种集体行为最终导致产生食物源与蚁巢间的最短路径。

为了实现上述思想, 算法引入了“人工蚂蚁”概念, 具备下列特征^[4]: (1) 它依概率 p 在存在的路径中选择路径, 而概率 p 是路径信息素痕迹的函数; (2) 它能够寻找没有走过的新路径; (3) 每次迭代完成, 它释放一定数量的信息素, 其大小与优化结果改善值成函数关系。

蚁群中个体随机选择路径,相互间通过信息素协作达到信息正反馈和局部搜索目的。个体通过邻域搜索产生新的路径,在搜索中加入了全局搜索能力。

2.1 初始化 将梯级各水库库容离散为若干点,各时段库容离散点组合形成水库调度线,各水库调度线连接起来定义为路径,即各时段各水库库容离散点组合 $V\{V_{11}, V_{12}, \dots, V_{NT}\}$ 。初始路径随机产生。所有路径上的信息素初值设为相同,其大小为^[7]

$$\tau_0 = \frac{1}{C} \quad (7)$$

式中: C 是估计的目标函数最优值。

2.2 构建路径 每只蚂蚁根据状态转移规则选择新路径,产生 $[0, 1]$ 上的随机数 q ,与阈值参数 q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$)作比较,分为两种情况。

(1) $q \leq q_0$,对人工蚂蚁所在的路径 S_{old} 随机地变异,即对库容离散点组合 $V\{V_{11}, V_{12}, \dots, V_{NT}\}$ 中的 v_{ij} ($i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, T$) 进行变异操作,随机变异为新的库容离散点 v'_{ij} ,由此产生新的路径 S_{ne} ,加入路径集合 S 。

(2) $q > q_0$,按路径上信息素痕迹浓度高、概率高的原则依概率 p 在路径集合 S 中选择路径 s 。其中概率 p 为

$$P = \begin{cases} \frac{[\tau_i]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in S} [\tau_s]^\alpha [\eta_{is}]^\beta} & i, j, s \in S \\ 0 & s \notin S \end{cases} \quad (8)$$

式中:集合 S 代表蚁群的路径集合; τ_i 、 τ_s 分别代表与路径 i 、 s 相关的信息素痕迹; η_{is} 用于评价蚂蚁从路径 i 向 s 移动的局部启发函数,定义为

$$\eta_{is} = E_i - E_s, \quad i, s \in S \quad (9)$$

式中: E_i 与 E_s 分别代表路径 s_i 与路径 s_s 的目标函数值;参数 $\alpha > 0$ 和参数 $\beta > 0$ 分别描述信息素痕迹强度与启发函数对蚂蚁决策的相对影响。

2.3 更新信息素 计算蚂蚁构建的路径目标函数值 E 。对路径集合 S 按式(10)更新信息素痕迹 τ :

$$\tau_i = (1 - \rho) \cdot \tau_i + \rho \cdot \Delta \tau_i \quad i \in S \quad (10)$$

式中: ρ ($0 < \rho < 1$) 是信息素挥发参数;若蚂蚁路径 s 为当前最优路径则 $\Delta \tau_i = E_i / C$, 否则 $\Delta \tau_i = 0$, 其中 E_i 为当前最优解, C 为前面定义的常数。

2.4 算法实现说明 算法实现的核心思想是对水库调度线作不断调整,逐步逼近最优解。在调整水库调度线时要考虑下面几个因素。

(1) 梯级间水力联系,即梯级间下泄流量和流达时间影响。每次调整水库调度线上某阶段离散点时,

根据该点所在的梯级 i 和阶段数 $P_{i,t}$, 再加上流达时间 τ , 推算出下游梯级受影响的阶段数 $P_{i+1,t+\tau}$, 即:

$$P_{i+1,t+\tau} = P_{i,t} + \tau, \quad P_{i,t} + \tau < 96 \quad (11)$$

调整时根据上一级电站下泄流量重新计算受影响的下一级电站阶段的目标函数值。

(2) 水位约束, 在库容离散过程中, 把水位约束直接转换为库容约束, 直接以库容约束作为库容离散时的上下界, 也就在方案中自然地满足了水位约束。

(3) 出力约束, 在每次调整水库调度线计算目标函数值时, 检验是否满足出力约束。本文采用了协同进化算法^[8], 即问题的解组成解种群, 约束条件组成测试种群, 两个种群协同进化, 较好的解满足更好的约束, 而较优的约束被更多的解所违背, 有效地解决了约束满足问题。

3 算例

利用某梯级水电站某日的数据计算。该梯级包含 3 个水电站 A、B、C, A 为多年调节电站, B、C 为日调节电站, B、C 电站水库有区间入流汇入。A 电站水库正常蓄水位 2650m, 死水位 2600m, 最大引水流量 $52.4\text{m}^3/\text{s}$, 电站综合出力系数 8.56, 装机容量 240MW; B 电站水库正常蓄水位 1678m, 死水位 1666m, 最大引水流量 $53.4\text{m}^3/\text{s}$, 电站综合出力系数 8.75, 装机容量 132MW; C 电站水库正常蓄水位 1369.5m, 死水位 1363.5m, 最大引水流量 $53.4\text{m}^3/\text{s}$, 电站综合出力系数 8.03, 装机容量 120MW。已知梯级入流量、区间来水量、梯级间流达时间, 以及预测的系统边际电价为: 0:00~6:45 为 75 元/MW, 7:00~10:45 为 200 元/MW, 11:00~18:45 为 150 元/MW, 19:00~22:45 为 200 元/MW, 23:00~23:45 为 75 元/MW。给定 A 电站日允许消落水位确定梯级日用水量, 求梯级时段电量分配使梯级电价收入最大。

算法用 C++ 语言实现, 蚁群算法参数设置为 $m=5$, $\alpha=\beta=1$, $q_0=0.7$, $P=0.1$ 。A, B, C 水库库容离散 1000 点。利用蚁群算法求解出梯级发电收入最大化时的 A、B、C 电厂水库调度线如图 1 所示。

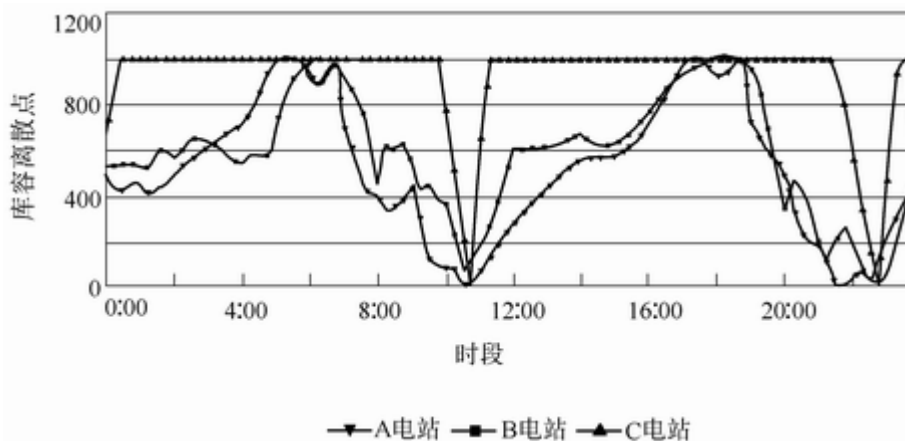


图 1 电厂水库库容变化曲线

梯级电厂 96 点时段优化发电量如图 2 所示。

分析图 1 可以看出, 电厂间水位变化过程相互对应, 均在高电价时段加大下泄量, 低电价时段蓄水。同时 A 电站发挥了龙头水库的优势, 通过水库蓄放, 调配更多的水量在 B、C 电站高电价时段发电。图 2

中高电价时段(7:00~10:45与19:00~22:45)梯级明显多发电,低电价时段(0:00~6:45与23:00~23:45)少发电,时间与边际电价时段对应,梯级发电效益相应增大,可见蚁群算法求解结果是合理的。

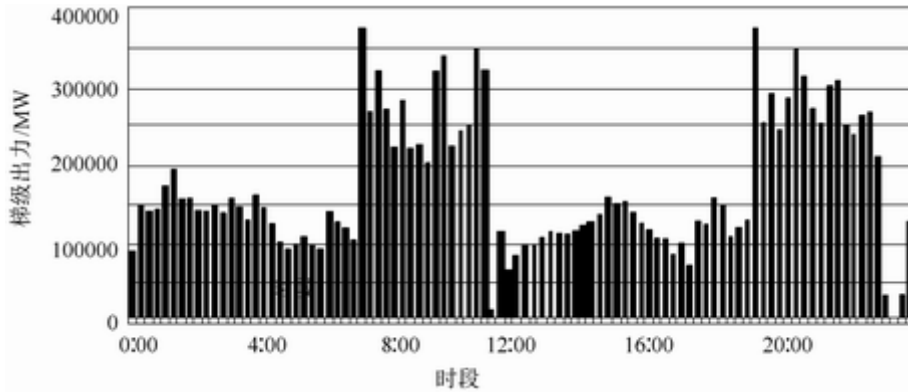


图2 梯级电厂时段电量曲线

为了进行比较,本文使用了POA方法,其目标函数、约束条件与蚁群算法相同,在同样的计算机配置下(P-M1.4G, 256MB)算法结果对比如表1。

表1表明,蚁群算法计算速度快,求解时间3s,算法收敛性好,10次计算结果标准偏差小于0.01,计算精度高,与同等情况下用POA求解结果接近,但求解时间大大缩小。

表1 蚁群算法与POA计算结果对比

方法	蚁群算法	POA
发电收益/万元	65.933	65.9782
计算时间/s	3	12

4 结论

本文提出了用于梯级水库短期优化调度问题的蚁群算法,该算法计算速度快,搜索效率高;收敛性能好;算法自然体现了水库调度线的概念,易于考虑如出力限制、水位限制等和梯级间的水力联系。

本文结合蚁群算法研究了梯级水电站日竞价的优化调度问题。分析梯级96点优化电量计算结果,梯级电站高电价时段多发电,低电价时段少发电,梯级发电效益相应增大,表明蚁群算法求解结果合理,并且满足水量平衡等约束条件。与POA法比较,求解结果接近而计算耗时减少,表明蚁群算法可以成功用于求解梯级水电站日竞价优化调度问题。

参考文献:

- [1] 李义,等.POA2D PSA混合算法在短期优化调度中的应用[J].水电能源科学,2004,(3):37-39.
- [2] 陈建春,马光文,等.梯级水电厂日竞价优化运行方式研究[J].水力发电学报,2004,23(8):11-15.
- [3] 马光文,王黎,等.水电竞价上网优化运行[M].成都:四川科学技术出版社,2003.
- [4] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Trans on SMC, 1996,

26(1): 28-41.

- [5] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computing, 1997, 1(1): 53-56.
- [6] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Ant colony system for job-shop scheduling [J]. Belgian J of Operations Research Statistics and Computer Science, 1994, 34(1): 39-53.
- [7] Gambardella L M, Taillard E D, Dorigo M. Ant colonies for the QAP[J]. Journal of Operational Research Society, 1999, 50(2).
- [8] Paredis J. Coevolutionary Computation, Artificial Life 2 [M]. MIT Press, 1995.

Optimal operation of cascade hydropower plants in competitive electricity market based on ant colony algorithm

XU Gang, MA Guang-wen, TU Yang-ju
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The ant colony algorithm is applied to optimize the operation of cascade hydropower plants in competitive power market. In this method, a set of cooperative ants can automatically search for the best operation scheme. The reservoir operation curve is defined as the ants' paths. The transition rule, global pheromone-updating rule and searching of neighbor domain are utilized to ensure the achievement of optimal solution. Case studies show that this method is feasible and suitable for solving the nonlinear optimal operation of cascade hydropower plants with complicated constrained conditions.

Key words: cascade hydropower plants; optimal operation; competitive electricity market; ant colony algorithm
(责任编辑: 王成丽)