

## 动态规划-粒子群算法在水库优化调度中的应用

李顺新, 杜辉

(武汉科技大学 计算机科学与技术学院, 武汉 430081)

(dh03@163.com)

**摘要:** 水库优化调度是一个典型的具有多约束条件的、动态的、非线性的优化问题。针对这些问题, 利用动态规划-粒子群(DP-PSO)算法加以求解。利用动态规划中的多阶段最优策略原理, 将水库优化调度问题转化为多阶段决策子问题, 各个子问题采用粒子群算法优化求解。数值实验表明, 在计算时段较多时, DP-PSO算法计算的可靠性明显优于一般的动态规划(DP)算法, 在计算时间上, DP-PSO算法用时较动态规划-遗传算法(DP-GA)少。

**关键词:** 水库调度; 粒子群算法; 动态规划

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A

## Optimal operation of reservoir based on dynamic programming and particle swarm optimization

LI Shun-xin, DU Hui

(College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

**Abstract:** Reservoir optimal scheduling is a typical multi-constrained, dynamic, non-linear optimization problem. To solve this problem, a Dynamic Programming-Particle Swarm Optimization (DP-PSO) algorithm was used to solving. This algorithm used the optimal Dynamic Programming (DP) principle to convert the reservoir optimal scheduling problem to multistage decision-making sub-problems; the solution of each sub-problem was got by particle swarm optimization algorithm. The numerical experiments show that with more time in calculation, the reliability of the DP-PSO is superior to the general DP algorithm, and the calculation time of DP-PSO is less than DP-Genetic Algorithm (DP-GA).

**Key words:** reservoir operation; Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm; Dynamic Programming (DP)

水库优化调度属于动态多维的非线性函数优化问题。寻找优化方法, 既要考虑到计算时间, 又要兼顾计算精度, 因此是具有十分重要的学术意义和实用价值的科研课题。如何解决优化调度问题, 关键在于选择能够兼顾计算精度与计算时间的模型。国内外学者曾采用逐步分解算法、动态规划(Dynamic Programming, DP)算法以及遗传算法等。这些算法或多或少具有一定的局限性。如动态规划是水库调度中应用最广泛的方法, 它对优化问题从时间上进行降维, 但避免不了状态空间的维数灾难问题<sup>[1]</sup>。遗传算法可在一定程度上克服维数灾难, 但编程实现比较复杂, 需耗用相当长的计算时间作为代价<sup>[2]</sup>。许多学者致力于粒子群算法<sup>[3-5]</sup>的研究, 并将其应用在水库优化调度中, 取得了明显的效果。文献[6]提出的动态规划-粒子群(Dynamic Programming-Particle Swarm Optimization, DP-PSO)算法能够较好地解决这个问题, 但是该算法容易陷入局部最优解。文献[7]中通过阈值能够较好地选择最优解。本文在文献[5]的基础上, 利用动态规划的贝尔曼最优原理, 在兼顾计算复杂度和计算精确度上, 将问题化为多阶段多目标子问题, 理论上克服了该算法在计算后期陷入局部最优的缺陷, 为水库优化调度提供了新的方法和途径。

### 1 水库优化调度数学模型

#### 1.1 目标函数

$$\max F = \sum_{i=1}^t N_i \quad (1)$$

其中:  $N_i$  = 表示第  $i$  时段的出力,  $F$  表示整个时段的总出力。

#### 1.2 主要约束条件

##### 1) 水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + (QR_t - QD_t - QCH_t) \Delta t \quad (2)$$

其中:  $V_{t+1}$  为水库第  $t+1$  时段的蓄水库容,  $V_t$  为第  $t$  时段的蓄水库容,  $QR_t$ 、 $QD_t$  和  $QCH_t$  分别为水库的入库流量、总发电引用流量和弃水流量。

##### 2) 电站出力约束。

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max} \quad (3)$$

其中:  $N_t^{\min}$ 、 $N_t^{\max}$  分别为水库  $t$  时段的最小允许出力和最大允许出力。

##### 3) 水库水位约束。

将三峡大坝上游水位站(凤凰山)、下游水位站(三斗坪)、葛洲坝上游水位站(5#站)和下游水位站(7#站)分别编号为1, 2, 3, 4。

$$HL_j \leq H_{j,t} \leq HM_j \quad (4)$$

$$\Delta HD_{j,T} \leq HD_{j,c1} \quad (5)$$

$$\Delta HH_{j,t} \leq HH_{j,c2} \quad (6)$$

其中:  $HL_j$  为  $j$  号水位站的允许最低水位;  $HM_j$  为  $j$  号水位站的允许最高水位;  $H_{j,t}$  为  $j$  号水位站  $t$  时段的水位;  $\Delta HD_{j,T}$  为  $j$  号水位站的日水位变幅;  $HD_{j,c1}$  为  $j$  号水位站的允许最大日水位变幅;  $\Delta HH_{j,t}$  为  $j$  号水位站的小时水位变幅;  $HH_{j,c2}$  为  $j$  号水位站的允许最大小时水位变幅;  $j$  的取值一般为1或3, 即一般只控制大坝上游凤凰山和5#站水位。

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-04-13。

作者简介: 李顺新(1972-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 主要研究方向: 软件工程、计算机图形学、CAD、GIS; 杜辉(1984-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线网络协议、计算机图形学。

4) 水库出库流量约束。

$$QC_i^{\min} \leq QC_i \leq QC_i^{\max} \quad (7)$$

其中:  $QC_i^{\min}$  和  $QC_i^{\max}$  分别为第  $t$  时段的保证通航和防洪安全的最小出库流量和最大出库流量。

5) 优化调度初末库水位  $H_{初}$  和  $H_{末}$ 。

## 2 算法设计

### 2.1 粒子群算法

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法是基于种群进化理论的优化算法。以模拟鸟的群体智能为特征, 以求解连续变量优化问题为背景, 在 PSO 中, 每只鸟被称之为一个粒子, 每个粒子以其几何位置与速度向量表示, 在问题求解中, 每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所公共认识到的最优方向来决定自己的飞行, 也可以表述为: 一组相互之间可以直接或者间接影响的主体, 能够通过合作对问题进行分布求解。

以算法形式描述, 设  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$  为微粒  $i$  当前位置,  $V_i = (v_{i2}, v_{i2}, \dots, v_{im})$  为微粒  $i$  当前的飞行速度,  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$  为微粒  $i$  所经历的最好位置, 设  $f(X)$  为最大化的目标函数, 则微粒  $i$  当前的最好位置由式(8) 确定:

$$P_i(t+1) = \begin{cases} P_i(t), & f(X_i(t+1)) \leq f(P_i(t)) \\ X_i(t+1), & f(X_i(t+1)) > f(P_i(t)) \end{cases} \quad (8)$$

设群体中的粒子数为  $s$ , 群体中所有微粒所经历过的最好位置为  $P_g(t)$ , 称为全局中的最好位置。则:

$$\begin{cases} P_g(t) \in \{P_0(t), P_1(t), \dots, P_s(t)\} \\ f(P_g(t)) = \max\{f(P_0(t)), f(P_1(t)), \dots, f(P_s(t))\} \end{cases} \quad (9)$$

则粒子群算法的进化方程可描述为:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (10)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (11)$$

其中:  $t$  表示第  $t$  代,  $c_1 \sim U(0, 2)$  和  $c_2 \sim U(0, 2)$  为加速常数,  $j$  为微粒的第  $j$  维,  $r_1 \sim U(0, 2)$  和  $r_2 \sim U(0, 2)$  为两个独立的随机函数。

动态规划的实质就是将一个问题分解为多个阶段, 不论初始状态和初始决策如何, 对于任一阶段, 余留的和已经采取的决策都必定最优, 也就是说, 当前状态和已获得的状态必定组成一个多目标的非劣解。

### 2.2 DP-PSO 算法的设计与实现

#### 2.2.1 问题的设计与分解

以三峡水电站调度为例说明 DP-PSO 算法的原理。对于第  $i$  阶段, 由目标函数以及调度末水位必定构成一个非劣解。对于第  $i$  阶段的决策构成多目标优化问题。

1) 对于第  $i$  到  $i+1$  阶段, 以发电量效益为最大, 在满足式(10) 情况下, 目标函数可以递推为:

$$\max F_{i+1} = F_i + E_{i+1} \quad (12)$$

2) 为了更精确地计算和更好地体现粒子群优化算法, 采用水库的末库容而不是水库的总蓄水量, 即式(12) 中  $V_{i+1}$  代

表第  $i$  时段的末水位库容。

#### 2.2.2 算法的实现步骤

DP-PSO 算法的计算过程如下。

1) 以时间段为限, 将调度问题划分为若干子问题。

2) 对于第  $i$  阶段的决策问题, 可从状态  $V_{i,j}, F_{i,j}$  组成的非劣解中取出某一解(采用整数代替), 以  $F_{i+1,j}$  以及  $V_{i+1,j}$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, n$ ) 最大化构成的多目标问题为目标, 以原有的水量平衡约束、库容上下界约束、始末状态等边界条件作为约束, 建立优化模型, 采用 PSO 算法优化计算。

3) 令  $i$  从 1 至  $t-2$ , 重复第 2) 步逐步递推计算得到最优的多目标调度策略。

4) 当  $i = t-1$  时, 由于调度末状态给定, 只需从  $k = 1, 2, \dots, m$  中选择最优的可转移到末状态的轨迹作为最终计算结果, 并逆向寻找对应的最优解。

#### 2.2.3 DP-PSO 算法特点

1) 相对于 DP 算法, DP-PSO 计算可靠性高, 计算结果更加优化; 相对于遗传算法, 则具有计算简单, 编程易于实现, 计算时间少, 效率高的特点。

2) 将多阶段问题转化为若干个阶段的子问题, 在每个阶段内寻找最优解, 因此可以大大缩短单独的遗传算法或者粒子群算法复杂度随着时间段的增加, 克服计算时间指数增长的缺点。

3) 理论上避免了算法可能陷入局部最优解。粒子群算法虽然具有全局收敛性, 但在计算后期, 个体极值和群体相对固定, 粒子速度越来越慢, 最后大部分粒子的速度趋近于零, 粒子位置得不到更新, 计算可能整体陷入局部最优解。DP-PSO 算法通过划分若干子问题, 从根本上解决了这个问题。

### 2.3 DP-PSO 算法收敛性分析

算法收敛性分析:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (13)$$

一般情况下取  $j = 1$ , 则

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(t)[p_i(t) - x_i(t)] + c_2r_2(t)[p_g(t) - x_i(t)] \quad (14)$$

为方便分析粒子群算法, 将式(14) 改写为:

$$V_i(t+1) = G_1 + G_2 + G_3 \quad (15)$$

从式(15) 中可以看出, 右边可以分成 3 部分:  $G_1$  为原先速度项, 后面两部分分别表示对原先速度的修正。其中:  $G_1$  保证算法具有全局搜索能力,  $G_2, G_3$  使得粒子群算法具有局部收敛能力, 即粒子群算法以概率 1 收敛于全局最优解。在 DP-PSO 算法中, 设多阶段粒子群算法可以寻出所有非劣解, 且每次计算各次收敛的概率都是独立的, 则在  $t$  时段的计算中, DP-PSO 算法的收敛概率为  $1^{t-1}$ , 即算法仍以概率 1 收敛于全局解。

## 3 数值验证

已知三峡水电站水库的水位库容曲线, 单机额定出力, 初始、末库容, 入库流量, 单机引用流量等, 要求水库水位在规定时间内最大不超过 148m, 最小不低于 144m, 在保证防洪、航

(下转第 1580 页)

在三维场景中设置恰当的光照,可以使虚拟三维隧道获得更真实的视觉效果。图 8 为某矿区的地表、钻孔及隧道组合图与实际隧道漫游效果,为更进一步从内部验证隧道拓扑结构的正确性,漫游时隧道表面采用透明显示,利用 OpenGL 文字显示技术输出前 30 个面片的编号,可以看出该方法使面片存放的编号螺旋式向前,确保隧道建立的拓扑有序,便于进行空间查询与邻接性分析。例如在隧道某侧面片存放的顺序依次为 0、9、18、27、36...,以此类推。

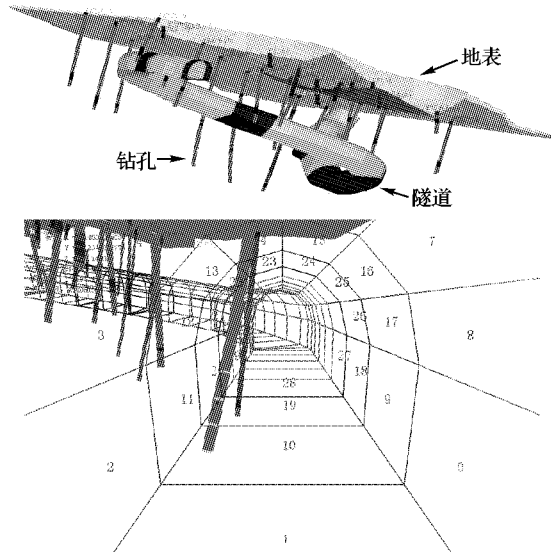


图 8 任意三维隧道虚拟显示

## 5 结语

任何复杂的隧道都可以看作是直管和弯管的组合。本文从这两种基本模型出发,采用从中心线到隧道断面再到隧道体的方法,每一个构成边框的线段都是从上一个线段的终点出发,确保了两种基本模型的无缝连接以及空间拓扑结构的正确性,继而推广到其他复杂情况。本方法同样适用于中心线在空间任意角度旋转扭曲的情况,并达到令人满意的效果,但中心线中如果包含过于短小的折线,可能会使生成的隧道发生形变,因此,必要时在隧道生成之前对输入的中心线数据进行相应的预处理,避免此种情况的产生。

### 参考文献:

- [1] 吴信才. 地理信息系统原理与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 崔阳, 王华. 基于 GIS 的城市地下管线数据结构设计[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(36): 230-232.
- [3] 王建民. 三维巷道建模及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [4] 魏占营, 王宝山, 李青元. 地下巷道的三维建模及 C++ 实现[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(7): 650-653.
- [5] 孙中昶, 卢秀山, 田茂义. 矿山巷道 3 维建模算法研究及实现[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 250-254.
- [6] 徐志强, 杨邦荣, 王李管, 等. 巷道实体的三维建模研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(6): 202-205.
- [7] 陈涵, 郭群勇, 王钦敏. 切片级管线表面三维重建[J]. 计算机应用, 2005, 25(9): 2196-2199.
- [8] 李清泉, 严勇, 杨必胜, 等. 地下管线的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(3): 277-282.

(上接第 1551 页)

道畅通等情况下,寻求以发电量最大为目标的最优解。

### 3.1 DP-PSO 算法与 DP 算法的比较

设置优化时间段,比较 DP-PSO 算法和 DP 算法<sup>[8]</sup>的计算结果,粒子群飞行的步长为 0.1 m,则计算结果如表 1 所示。

表 1 三峡水库发电量数值实验

平均入库流量/(Gm <sup>3</sup> )	平均出力/GWh	
	DP-PSO	DP
0.159	1210	1203
0.175	1283	1278
0.228	1575	1570
0.249	1680	1675
0.256	1680	1680

### 3.2 DP-PSO 算法与 DP-GA 的比较

DP-PSO 算法与动态规划-遗传算法(DP-GA)发电量实验对比如表 2 所示。

表 2 DP-PSO 与 DP-GA 发电量数值实验对比表

时段数	平均发电量/GWh	
	DP-PSO	DP-GA
10	123.7	124.1
20	247.5	248.2
30	373.2	374.4
40	495.5	496.8
50	619.9	621.9

从表 1~2 的比较可知:

1) 在相同的条件下,DP-PSO 算法较 DP 算法<sup>[8]</sup>计算可靠性更高,优化的结果更加理想。

2) 在相同的条件下,DP-PSO 算法劣于 DP-GA<sup>[2]</sup>计算的精确度和优化的结果,但是在计算时间上,DP-PSO 算法则具有明显的优势。

综上,DP-PSO 算法为水库的优化调度提供了一个新的解决方法。

## 4 结语

结合动态规划和粒子群算法的优点,DP-PSO 算法不仅在实现上较遗传算法容易,而且在计算结果上较动态规划明显提高。分析结果表明,DP-PSO 算法能够克服粒子群算法容易陷入局部最优解的缺点,使全局搜索优化解的可靠性进一步提高,为水库优化调度问题求解提供了一个新的方法与思路。

### 参考文献:

- [1] 黄强, 王义民. 水电站水库优化调度几种方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2000, 18(3): 19-22.
- [2] 刘攀, 郭生连, 刘心愿. 求解水库优化调度问题的动态规划-遗传算法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(5): 1-6.
- [3] 陈功贵, 杨俊杰, 高侍红. 基于混合 PSO 的梯级水库优化调度研究[J]. 水力发电, 2007, 33(10): 86-88.
- [4] 黎晓峰, 薛保菊, 李维乾. 基于改进粒子群算法的水库优化调度研究[J]. 水力发电, 2008, 34(11): 107-109.
- [5] 胡建秀, 曾建潮. 具有惯性权重的 PSO 算法[J]. 计算机工程设计, 2006, 23(8): 164-167.
- [6] 莫愿斌, 陈德钊, 胡上序. 动态规划粒子群算法解 PCB 数控钻孔最佳走刀路线问题[J]. 机床与液压, 2006, 28(8): 18-22.
- [7] 彭勇. 变需求车辆路线问题建模及基于 Inver-over 操作的 PSO-DP 算法[J]. 系统工程理论与实践, 2008(10): 76-81.
- [8] 邹进, 张勇传. 三峡梯级电站短期优化调度的模糊多目标动态规划[J]. 水力学报, 2005, 36(8): 925-931.