

文章编号 :1672-3031(2012)02-0140-06

基于 DPSA 的梯级水库群优化调度

马立亚, 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 动态规划法是一种求解多阶段决策优化问题的常用方法, 在水库优化调度计算中应用广泛。该方法最大的缺陷就是用于水库群优化调度时易出现 维数灾 问题。逐次逼近动态规划法(DPSA)可以有效克服这一问题, 它采用逐次迭代逼近的思想, 将一个多维问题分解为多个一维问题求解。本文以水库运行模拟模型为基础, 建立了基于 DPSA 的梯级水库群中长期优化调度模型, 以汉江上游梯级水库群为研究对象, 选取发电量最大为目标, 对各水库库容进行离散, 从而求解水库优化运行过程, 其结果对于水库优化调度运行具有指导意义。

关键词: 梯级水库群; 优化调度; 动态规划; 逐次逼近

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

1 研究背景

水库优化调度对提高水能水资源利用效率, 增强水库经济效益具有非常重要的作用。梯级水库群优化调度问题是一个多维、具有多约束条件的、高度非线性的复杂优化问题^[1]。通过国内外学者的大量研究, 现已形成几种较为成熟、应用较多的水库调度优化方法, 其中动态规划(DP)法是水库调度中应用最广泛的方法之一。动态规划是一种系统分析方法, 主要用于解决多阶段决策过程的优化问题^[2], 它可以将问题划分为多个阶段进行决策, 进而求得整个系统的最优决策方案。但是, 动态规划法存在维数灾的缺点^[3], 当参与计算的向量维数增加时, 计算机存储量和计算复杂度也会急剧增加。这使得动态规划法在梯级水库群优化调度求解时具有一定的局限性。

逐次逼近动态规划法(DPSA)是一种有效的降维方法。它采用逐次迭代逼近的思想^[4], 将一个多维问题分解为多个一维问题求解。DPSA 求解时, 先假定其它水库运行状态不变, 每次仅对一个水库采用 DP 求解, 然后更新该水库的运行状态及径流信息, 这样依次对每个水库进行寻优, 不断更新各个水库的最优调度策略, 直至目标函数不能继续改进为止, 所得的最终调度策略即为通过 DPSA 算法求得的最优策略。本文建立了基于 DPSA 的梯级水库群中长期优化调度模型, 并以汉江上游梯级水库群为例, 证明了 DPSA 算法在求解梯级水库群优化调度问题的有效性。

2 梯级水库群中长期优化调度模型

水库群优化调度问题可以描述为: 在设定的调度周期内, 在满足各种约束条件的前提下, 寻求水库调度的最优策略, 使得梯级水库群的总体目标达到最优值。本文根据水库的一系列约束条件以及水库的特征参数关系建立水库优化调度模型, 模型包含目标函数、约束条件和边界条件等内容。

2.1 目标函数 模型的目标函数为梯级水库的总发电量最大:

$$\max f = E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n N_i^t \Delta t \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(资集 1037); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901031, 201001024, 201101026, 201101024)

作者简介: 马立亚(1988-), 女, 湖南湘西人, 硕士生, 主要研究水库优化调度。E-mail: m2mlly@163.com

式中： T 为总时段数目； n 为水库总数目； N_t^i 为第 i 个水库在时段 t 的出力值； Δt 为每个时段的时段长。

2.2 约束条件 模型的约束条件包括水量平衡方程、水位约束、出库流量约束、水电站最大发电流量约束及出力约束等。

(1)水库水量平衡约束：

$$S_{t+1}^i = S_t^i + (Q_{in,t}^i - Q_{out,t}^i) \Delta t \quad (2)$$

式中： S_t^i 、 S_{t+1}^i 分别为第 i 号水库在 t 时段的初、末库容； $Q_{in,t}^i$ 、 $Q_{out,t}^i$ 分别为该水库在 t 时段的入流和出库流量； Δt 为时段长度。

(2)水位约束：

$$Z_{min,t}^i \leq Z_t^i \leq Z_{max,t}^i \quad (3)$$

式中： Z_t^i 为第 i 号水库在 t 时段的水位值； $Z_{max,t}^i$ 、 $Z_{min,t}^i$ 分别为该水库在 t 时段的水位上、下限值。其中上限值通常为水库的正常蓄水位，在汛期则是汛限水位，下限值为死水位。

(3)出库流量约束：

$$Q_{min,t}^i \leq Q_t^i \leq Q_{max,t}^i \quad (4)$$

式中： Q_t^i 为第 i 号水库在 t 时段的出库流量； $Q_{max,t}^i$ 、 $Q_{min,t}^i$ 分别为水库在 t 时段的流量上、下限值。其中上限值为水库允许下泄的最大流量，下限值为下游河道最小流量(如生态流量)。

(4)水电站最大发电流量约束：

$$Q_{E,t}^i \leq Q_{Emax}^i \quad (5)$$

式中： $Q_{E,t}^i$ 为第 i 号水库在 t 时段的发电流量； Q_{Emax}^i 为水电站最大发电流量。

(5)出力约束：

$$N_t^i \leq N_{max} \quad (6)$$

式中： N_t^i 为第 i 号水库在 t 时段的出力值； N_{max} 为机组的最大出力。

2.3 边界条件 本文在求解优化调度问题时，给定水库调度周期的始末水位。因此边界条件为：

$$Z_1^i = Z_{Beg}^i \quad (7)$$

$$Z_T^i = Z_{end}^i \quad (8)$$

式中： Z_1^i 、 Z_T^i 分别为水库在调度周期的初、末水位值； Z_{Beg}^i 、 Z_{end}^i 分别为给定的初、末水位值。

3 求解方法

3.1 DPSA 求解步骤 本文采用 DPSA 求解水库优化调度问题的基本步骤如下：(1)基本资料输入：输入的数据包括水库水位、库容、发电系数、保证出力、最大最小流量、水库的上下游关系、入流信息等；(2)迭代计算：保持其它水库运行状态不变的情况下，每次对一个水库进行库容离散，运用 DP 进行优化；(3)更新水库优化后的库容、水位、出库流量等运行状态；(4)用 DP 继续优化下一个水库，直到遍历完梯级的所有水库，计算梯级水库总发电量，进行下一次迭代计算；(5)不断重复(2)以后的步骤，直到达到设定的迭代次数，或者结果已经基本稳定为止，输出求解结果。其流程图如图 1 所示。

3.2 水库上下游关系处理 对于梯级水库群，在计算水库的入库、出库水量时，需要用到水库群上下游关系。当水库有上游水库时，水库的入库水量等于上游水库的出库水量加上区间入流。在程序计算时，常规的方法是每进行一次计算，就要对参与计算的所有水库进行一次循环判断。在动态规划方法计算过程中，库容(或者水位)被离散成很多份，这样，针对水库的每一个库容离散值，程序都必须进行一次循环判断来计算其对应的入库、出库情况，这使得水库的水量计算十分繁琐，耗用大量计算时间。

为了改进上述问题，使程序更简便，本文采用一种基于水库上下游关系矩阵的方法来处理水库

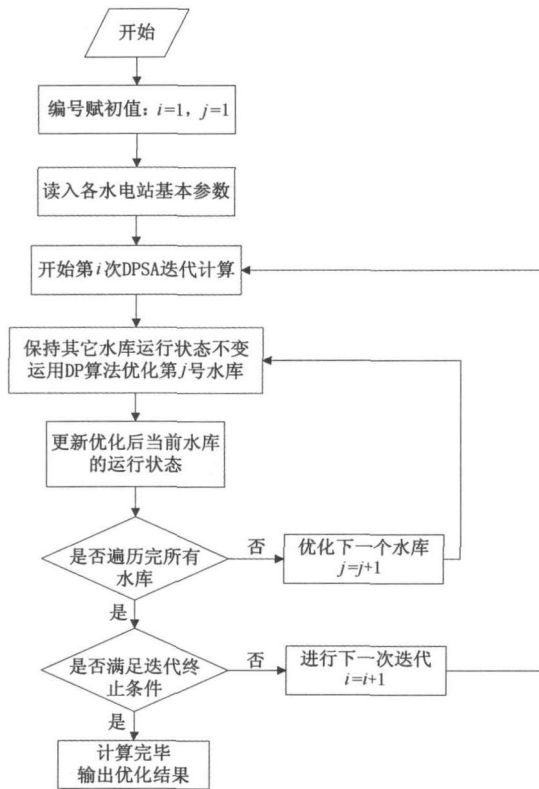


图1 用DPSA进行水库优化调度流程

入库、出库水量计算。

以一个简单的水库群为例，如图2所示，其水库上下游关系矩阵见表1，矩阵对角线的元素为-1，对于某个水库所在的行，如果它有上游水库，则上游水库所在列对应的元素值为1。如3号水库上游为1号和2号水库，于是3号水库所在的第3行对应的1、2列的元素为1，矩阵的其它元素值默认为零。

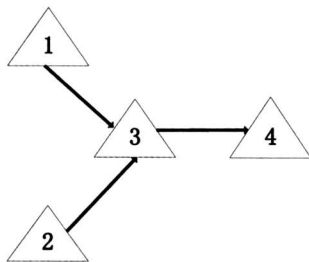


图2 简单水库群示例

表1 水库上下游关系矩阵

水库编号	1	2	3	4
1	-1	0	0	0
2	0	-1	0	0
3	1	1	-1	0
4	0	0	1	-1

下面来说明水库上下游关系矩阵在计算中如何应用。在计算水库入库、出库水量时，有如下一些关系式：

$$R_{out,t}^i = S_{ini,t}^i + S_{end,t}^i + R_{in,t}^i \quad (9)$$

式中： $R_{out,t}^i$ 为水库在 t 时段的出库水量； $S_{ini,t}^i$ 和 $S_{end,t}^i$ 分别为水库的时段初、末库容； $R_{in,t}^i$ 为水库的入库水量。

如果水库有上游水库，则有区间入流公式：

$$R_{L,t}^i = R_{in,t}^i - \sum_{n=1}^N R_{out,t}^n \quad (10)$$

式中： $R_{L,t}^i$ 为水库 i 在 t 时段的区间入流量； N 为水库 i 的上游水库个数； $R_{out,t}^n$ 为编号为 n 的上游水

库在 t 时段的出库水量。

根据上述关系，将水库的上下游关系矩阵加以应用，即：

$$S_{end,t} - S_{ini,t} - R_{L,t} = Linkage \times R_{out,t} \quad (11)$$

式中： $S_{ini,t}$ 和 $S_{end,t}$ 分别为参与计算的所有水库在 t 时段的初、末库容； $R_{L,t}$ 为所有水库的区间入流； $Linkage$ 为水库的上下游关系矩阵； $R_{out,t}$ 为所有水库的出库水量。

在具体计算时，通常对式(11)进行变形，在等式两侧左乘水库上下游关系矩阵的逆矩阵，得到：

$$R_{out,t} = Linkage_inv \times (S_{end,t} - S_{ini,t} - R_{L,t}) \quad (12)$$

式中， $Linkage_inv$ 为水库上下游关系矩阵的逆矩阵。

下面来进行验证：例如，对于3号水库，其上下游水库关系在表1所示的矩阵中位于第3行，将其带入式(12)，稍作变形以后得到：

$$S_{ini,t}^3 - S_{end,t}^3 + R_{L,t}^3 = R_{out,t}^3 - R_{out,t}^1 - R_{out,t}^2 \quad (13)$$

根据式(10)，各水库水量存在以下已知关系：

$$R_{L,t}^3 = R_{in,t}^3 - R_{out,t}^1 - R_{out,t}^2 \quad (14)$$

将式(14)带入式(13)即可得到式(9)，这说明利用水库上下游关系矩阵可以进行水库水量计算公式之间的转换，用这种方式来处理水库入库、出库水量的方法是可取的。

在计算程序中运用式(12)，即可一步求解所有水库的出库水量，不用每次针对一个水库进行循环判断，节省了计算量，增加了程序的可读性。

4 计算与分析

4.1 汉江上游梯级水库群概况 汉江全长1577km，为长江第一大支流，流域面积15.9万 km^2 。目前流域内建成大中小型水库2700余座，总库容近 $330 \times 10^8 m^3$ 。本文选取陡岭子、鄂坪、松树岭、黄龙滩、丹江口、潘口共6座省调水电站1979—2008年共30年的历史入流资料进行优化调度计算。其中，在优化调度计算期内陡岭子、潘口、鄂坪具有年调节性能，丹江口、黄龙滩和松树岭具有不完全年调节性能。水库和主要支流空间分布关系见图3。



图3 汉江上游水库和主要支流空间分布

4.2 优化调度结果 在DPSA进行优化调度求解时采用对库容进行离散的方式，根据各水库库容大小的不同，设定不同的库容离散值，如表2第2列所示。经过10次迭代计算，结果收敛，得到水库优化调度结果。将DPSA优化得到的各水库多年平均发电量与根据现有调度图模拟得出的各水库多年平

均发电量值进行对比,由表2可见,经过DPSA优化的各水库多年平均发电量要高于模拟值,说明水库发电效益得到了优化。其中,增发比率最高的是鄂坪水库,增发比率为17.36%,增发比率最低的是丹江口水库,增发比率为6.91%。总体而言,对于这个由6个水库组成的梯级水库群,增发电量达到5.15亿kW·h,增发比率达到9.04%。

表2 长系列DPSA优化多年平均发电量与模拟结果对比 (单位:亿kW·h)

水库名	库容离散值	DPSA 优化结果	根据现有调度图模拟结果	增发电量	增发比率/%
陡岭子	30	1.82	1.55	0.27	17.34
鄂坪	25	2.36	2.01	0.35	17.36
松树岭	15	1.31	1.12	0.19	17.26
潘口	80	9.45	8.59	0.87	10.11
黄龙滩	60	8.73	7.74	0.98	12.72
丹江口	120	38.38	35.90	2.48	6.91
合计		62.05	56.91	5.15	9.04

选取一个典型水库进行长系列发电过程对比。如图4所示为鄂坪水库根据DPSA优化的年发电过程和根据现有调度图模拟得出的结果,从图中可以看出,优化值所表示的年发电量过程线位于模拟值之上,说明优化的年发电量大于模拟值。同时,对于来水较多的年份,如1983 1985年、2001 2004年,优化值相比模拟值增加的幅度很大,而对于来水较少的年份,如1988年、1990年等,优化值和模拟值差距不大。这说明通过DPSA的优化,可以更好地利用水库的调蓄能力,有效利用丰水年的来水创造更多的发电效益。

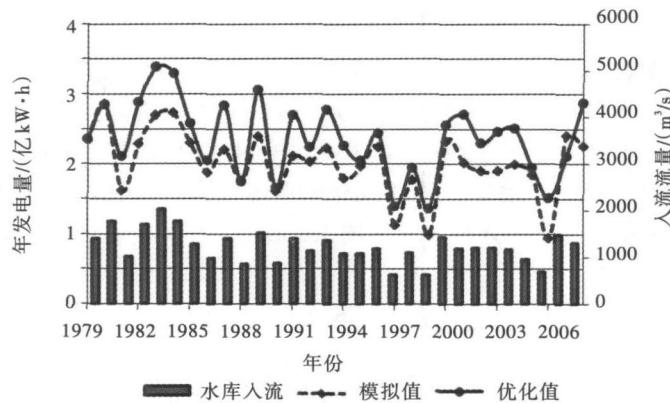


图4 鄂坪水库年发电量过程

图5所示为鄂坪水库的年弃水量过程,从图中可以看出,优化值所表示的弃水量过程曲线位于模拟值的下方,说明通过DPSA的优化可以有效减少弃水,增大水资源的利用效率。

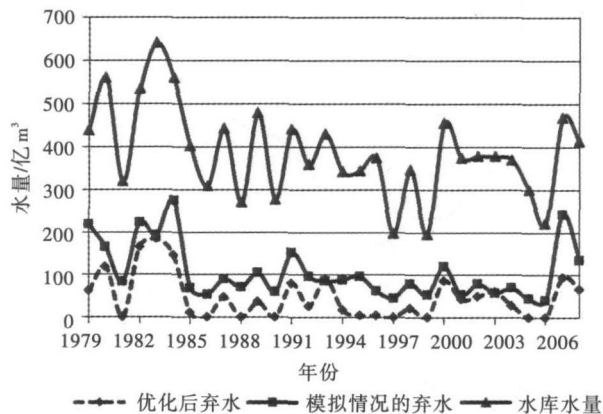


图5 鄂坪水库年弃水量过程

5 结语

本文以发电量最大为目标建立了基于逐次逼近动态规划(DPSA)的梯级水库群中长期优化调度模型,以汉江上游6座水库组成的梯级水库群为例,通过DPSA迭代计算得到一组优化解。计算结果表明:各水库计算多年平均发电量均高于根据现有调度图模拟得出的发电量,经过优化,梯级总发电量可增加5.15亿kW·h,同时水库的弃水量减少,证明了模型的有效性。另外,本文将水库上下游关系矩阵应用于水库入库、出库水量的计算中,提高了模型求解的效率。

参 考 文 献:

- [1] 李顺新,杜辉.动态规划-粒子群算法在水库优化调度中的应用[J].计算机应用,2010,30(6):1550-1551.
- [2] 张淑祥,苏弈文,张国良.大伙房水库兴利调度的多目标动态规划模型研究[J].水利水电技术,2006,37(3):67-69.
- [3] 余炳,王金文,李彩林,等.逐次逼近动态规划法求解水电机组组合问题[J].华中电力,2004,17(6):1-3.
- [4] 王金文,王仁权,张勇传,等.逐次逼近随机动态规划及库群优化调度[J].人民长江,2002,33(11):45-47.

Optimal operation of cascade reservoirs based on DPSA

MA Li-ya, LEI Xiao-hui, JIANG Yun-zhong, WANG Hao
(China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Dynamic Programming is a common method of solving multistep decision optimization problems and is widely used in reservoir optimal operation. The main disadvantage of DP is the curse of dimensionality when it is applied to cascade reservoirs. Successive Approximation Dynamic Programming (DPSA) can alleviate the problem by breaking the multidimensional problems into a number of single dimensional problems. Based on reservoir operation simulation model, this paper presents a long-term reservoir optimal operation model. With the upstream of the Hanjiang River cascade reservoirs as the study object, this paper takes the generated power as the objective, discretizes the storage of each reservoir and realizes the optimization by means of DPSA. It is proved that this model has significant value for reservoir operation.

Key words: cascade reservoirs; optimal operation; dynamic programming; successive approximation

(责任编辑:李琳)