

基于广义状态分析的水电站群长期优化调度

肖胜贤¹, 伍永刚¹, 章国勇¹, 胡斌奇², 成涛²

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北省 武汉市 430074;

2. 湖南省电力公司电力调度通信局, 湖南省 长沙市 410007)

Long-Term Optimal Scheduling of Multi-Reservoir Plants With Generalized State Analysis

XIAO Shengxian¹, WU Yonggang¹, ZHANG Guoyong¹, HU Binqi², CHENG Tao²

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. Hunan Electric Power Company Dispatching and Communication Bureau, Changsha 410007, Hunan Province, China)

ABSTRACT : An advanced progressive optimality algorithm-dynamic programming successive approximation (POA-DPSA) is proposed to optimize the operation of multi-reservoir plants, which is a typical highly nonlinear, multi-dimensional programming problem. In view of the advantage of POA and DPSA in reducing the dimensions of stages and the cardinal number of multi-reservoir system, the POA-DPSA method is firstly constructed. However, it is found out that conventional POA-DPSA suffers from the disadvantage of pseudo optimization solution. This paper proposes a novel POA-DPSA method with generalized time and space state analysis, in which a combined multi-stage adjustment strategy is applied to provide new search space for the iterative loop when it falls into the pseudo optimization solution. For the above adjustment strategy, the variables of each stage in generalized state move along the boundary constraints under the condition of the same relationship among them, hence ensuring high efficiency. The validity of the proposed approach is demonstrated by applying it to two test systems consisting of 4 and 10 reservoirs respectively and Yushui River in Hunan. Compared to the existing methods, the proposed method is found more effective for multi-reservoir optimal operation with higher accuracy and less computational cost.

KEY WORDS: multi-reservoir system; progressive optimality algorithm; generalized state; pseudo optimization solution

摘要: 针对水库群优化调度这一典型的多维非线性规划问题, 基于逐步优化算法(progressive optimality algorithm, POA)和逐步逼近策略(dynamic programming successive approximation, DPSA)的时间和空间降维优势, 同时考虑到

POA-DPSA 方法输出伪最优解的可能性, 引入广义时间和广义空间状态概念, 对陷入伪最优解下的状态变量进行变阶段联合调整, 提高了算法的全局寻优性能。同时, 为保证算法的高效求解, 在保持广义状态内部一致性的前提下, 提出一种等约束滑行策略对各子阶段状态量进行调整。经典 4 库和 10 座水库群及湖南沅水流域优化调度结果表明, 改进算法能有效提高水电站群联合发电效益, 且寻优效率高, 为水电站群优化调度工程应用提供新的方法。

关键词: 水库群; 逐步优化算法; 广义状态; 伪最优解

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.021

0 引言

水电站群优化调度是水电能源系统优化中的典型优化问题。由于各水电厂间存在复杂的电力及水力联系, 其优化调度是一个多约束、高维非线性问题, 较难获取系统全局最优解。为求解此类问题, 国内外的学者进行了深入研究, 提出了多种求解方法。目前较常用的算法主要有线性规划^[1-2]、大系统分解协调方法^[3]、动态规划类算法^[4-6]、及智能优化算法^[7-9]等方法。动态规划方法由于对目标函数和约束条件没有严格的要求, 不受线性、凸性甚至连续性的限制, 因而在库群优化调度得到广泛应用。但在求解大规模混联水库群优化调度过程中, 传统动态规划算法会陷入因离散状态空间组合所形成的“维数灾”问题。大系统分解协调方法虽然能够较好地避免“维数灾”的出现, 但在一定程度上存在计算速度较慢和优化结果不够理想等问题。而随着人工智能算法的兴起, 大量智能算法被应用于水电站群优化调度中, 如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等。智能算法具有收敛于全局最优解的能力, 但由于其采用随机寻优思想, 对于时段数较多、空间水力耦合复杂的水库群优化调度问题, 算法的

基金项目: 国家自然科学基金(51379081); 国家电网公司科技项目(DKJS-13-00220)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC) (51379081); Key Technology Project of State Grid Corporation of China (DKJS-13-00220).

稳定性和有效性难以保证。

逐步优化算法(progressive optimality algorithm, POA)作为动态规划的改进算法,将多阶段决策问题分解为若干两阶段子问题,在时间尺度上进行降维,运算效率大幅提高,可有效避免动态规划“维数灾”问题,且相比智能算法具有实现简单、收敛性好、计算速度快等特点,故其在水库群优化调度中得到广泛应用^[10-14]。然而,由于 POA 采用逐阶段搜索策略,随着水库数目的增多,优化调度决策变量剧增,其收敛速度较慢,且优化结果往往到达了约束边界,容易陷入寻优死点^[15]。文献[12]针对水库群多维优化问题,结合正交试验设计方法提出一种改进 POA 算法,但算法求解精度与正交表的选择和算法参数选取有关。文献[13-14]引入逐次逼近法(dynamic programming successive approximation, DPSA)在空间上进行降维,避免了优化变量随库群数呈指数增长,有效提高模型求解效率。但由于 POA-DPSA 混合算法在对子优化问题寻优时一般采用坐标轮换法,考虑的水库上下游联系比较简单,不能保证收敛到全局最优解。

本文基于逐步优化算法和逐步逼近策略的时间和空间降维优势,同时对 POA-DPSA 算法因到达约束边界而输出“伪最优解”的可能性进行深入分析,提出一种基于广义时间和广义空间状态的改进 POA-DPSA 算法。时间尺度上,在保持广义时间状态内部各阶段一致性的前提下,对陷入伪最优解下的状态变量进行变阶段联合调整,使其沿约束边界滑行;空间尺度上,在保持广义空间状态各出库流量汇流后的总下泄流量不变的前提下,对多水库进行上下协调调整,为算法寻优提供新的搜索空间。

1 水库群优化调度模型

1.1 目标函数

本文参照文献[7]建立水库群长期优化调度效益最大模型。具体可描述为在满足水库的流量约束、库容约束、调度初末状态等条件下,求解水库群的蓄水量决策序列使水库群在调度期的总效益最大。设研究对象为 N 个水库组成的系统,以月为单位将调度期分为 T 时段,建立水库群长期优化调度效益最大模型。具体表达式如下

$$F = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T p_{i,t} Q_{i,t} \quad (1)$$

式中: t 为时段编号; i 表示水库编号,依次编号为 $1 \sim N$; $p_{i,t}$ 表示 i 号水库时段 t 时段的效益系数; $Q_{i,t}$ 表示 i 号水库时段 t 时段的出库流量。

1.2 约束条件

1) 水量平衡约束

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t})\tau - L_{i,t} \quad (2)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 表示水库 i 在 t 、 $t+1$ 时刻的库容(单位: 10^6m^3); $I_{i,t}$ 为电站 i 在 t 时段的入库流量(单位: m^3/s),包括天然径流和上游放水; τ 是单位转换系数; $L_{i,t}$ 表示 t 时段的水量损失。

2) 库容约束

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_{i,t} \quad (3)$$

式中 $\underline{V}_{i,t}$ 、 $\overline{V}_{i,t}$ 表示水库 i 在 t 时刻的库容上下限。

3) 下泄流量约束

$$\underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \overline{Q}_{i,t} \quad (4)$$

式中 $\underline{Q}_{i,t}$ 、 $\overline{Q}_{i,t}$ 分别表示水库 i 在 t 时段的最小下泄流量与最大下泄流量(单位: m^3/s)。

4) 边界条件。

水库群在调度期初和调度期末的库容一般是给定的,即调度期初状态 $V_{i,0}$ 和调度期末状态 $V_{i,T}$ 数值在优化调度过程中保持不变。

2 水库群优化调度改进算法求解

2.1 混合 POA-SA 算法

混合 POA-DPSA 算法充分吸收了 POA 算法在处理多阶段问题的时间尺度降维优势和 DPSA 算法在求解多库群问题时的空间降维优势。其主要思想为:将水库群优化调度这一多阶段问题转化为多个两阶段问题,在求解每一个两阶段问题时采用逐次逼近策略,其有效地解决了每一步中的多决策变量问题,大大减少计算量,对大规模水库群优化调度求解具有明显效果。

POA-DPSA 的详细求解步骤可参照文献[13-14]。通过对算法寻优机理的进一步分析可知,POA-DPSA 方法的实质是基于坐标轮换法^[15],即通过改变坐标轴方向确定寻优方向。而当算法寻得边界点时,如果坐标轴均位于目标函数等值线的切线夹角外侧,则不能沿坐标轴方向寻得可行下降点到达图中所示的约束极值点,从而造成“伪最优解”的出现。图1给出了 POA-DPSA 在求解一个二维约束优化问题时产生伪最优解的示意图。

由图1可以看出,从初始解 $X^{(0)}$ 出发,采用 POA-DPSA 算法按给定步长进行搜索。当算法搜索到靠近边界的某点 $X^{(K)}$,由于 POA-DPSA 采用逐阶段搜索,即每次搜索只能沿图中横(纵)坐标进行搜索。而从图中 $X^{(K)}$ 到达图示 A、B、C、D 4 点均为非可行下降方向,此时继续搜索也得不到更好的解,

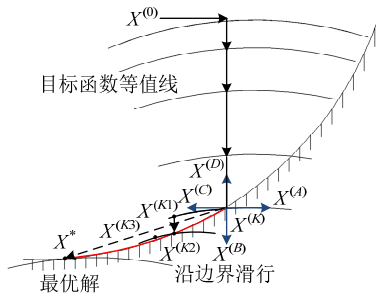


图1 伪最优解产生示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pseudo optimization solution
算法会因此将 $X^{(k)}$ 作为最优点输出，不能收敛到最优点是 X^* 。这种由于 POA-DPSA 逐阶段搜索特点而导致寻优过程因到达约束边界处而陷入寻优死点的情形，称之为“伪最优解”。从图中可看出“伪最优解”并非寻优极值点，因而有别于传统意义的局部最优解。

考虑到水库群优化调度问题是高维度、非线性、多约束问题，采用 POA-DPSA 求解时收敛到伪最优解的情况可能性更大。为此，本文拟通过引入广义时间和空间状态概念，对陷入伪最优解下的状态变量进行变阶段联合调整，为算法迭代提供新的搜索空间。

2.2 改进思路

约束优化问题的一般形式可表示为

$$\begin{aligned} F &= \max f(X) \\ \text{s.t. } g(X) &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

当 POA-DPSA 算法在求解上述问题过程中搜索到了疑似最优值 X_k ，记 X_k 函数值为 $f(X_k)$ ，约束值为 $g(X_k)$ 。如果直接将此点作为最优解输出，则算法将很有可能陷入伪最优解。设在可行域内还存在一点 X'_k 满足下列条件：

$$g(X'_k) = g(X_k) \quad (6)$$

$$f(X'_k) \geq f(X_k) \quad (7)$$

则称 X'_k 为 X_k 的替代点。用 X'_k 代替 X_k 进行下一轮搜索，本质上相当于变换了算法的初始解，使得状态变量沿约束边界滑行以寻找新的替代点，为算法迭代提供新的搜索空间。

基于此改进思路，本文提出广义时空状态概念，对陷入伪最优解下的状态变量进行联合调整。对应示意图 1 中的伪最优解点 $X^{(k)}$ ，广义状态的出发点为同时对横轴和纵轴进行联合调整，并选取约束边界方向进行滑行以保证算法的求解效率。本文所述广义状态不同于文献[16-17]中采用的多阶段策略在于：文献[16]旨在通过联合调整使其沿目标函数等值线移动到可行域内部(图 1 中点 $X^{(k1)}$)，但可能出现如图 1 所示的锯齿搜索现象($X^{(k1)} - X^{(k2)} - X^{(k3)}$)；文献[17]通过时间窗口将两阶段优化拓展为

多阶段优化，对时间窗口内所有状态同时优化，但此种搜索难以给出确定的寻优方向，寻优效率较低。针对具体的水库群优化调度，本文将水库库容当作阶段变量，考虑式(2)~(4)的约束条件，提出广义时间状态和广义空间状态，具体描述如下。

1) 广义时间状态。

传统的 POA 算法中通常将一个阶段当作一个时间状态，每次计算时保持其余状态不变而优化一个阶段。为避免上节所述伪最优解的出现，改进算法将其中一个或多个时间状态作为一个广义的时间状态进行同时优化，且保持广义状态内部各子阶段的一致性，即广义时间状态内部所有阶段同时调整相同蓄水量，以保证广义状态内部子阶段间的下泄流量不变，如图 2 所示。

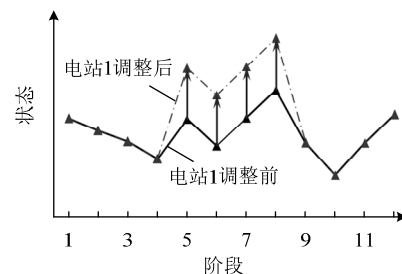


图2 广义时间状态示意图

Fig. 2 Schematic diagram of generalized time state

在广义时间状态中，组成广义时间状态的原始状态之间保持相对关系不变，即满足式(6)；通过 POA 调整状态的位置，使之满足式(7)，以寻找到合适的替代点。调整中若子状态变量破坏库容约束，则取相应约束边界值。定义变量 G_T 表示广义时间状态包含的原始状态数目，在水库群优化调度中，依次设 $G_T=1, 2, 3, \dots, 10, 11$ ，对状态变量进行变阶段联合调整，以避免传统 POA 算法因陷入伪最优解而出现寻优死点。

2) 广义空间状态。

传统 DPSA 算法将一个水库当作一个状态，对子优化问题寻优时一般采用坐标轮换法，即优化其中一个水库而保持其他水库状态不变。由于其考虑的水库上下游联系比较简单，往往不能保证收敛到全局最优解^[10]。改进算法引入广义空间状态，将一个或多个水库作为一个空间状态，在保持广义空间状态各出库流量汇流后的总下泄流量不变对各子阶段进行上下协调调整。在水库群优化调度中，用广义的空间状态替代原始的两阶段状态进行 DPSA 策略处理。定义变量 G_S 表示广义空间状态内部水库数，图 3 为 $G_S=2$ 时的广义空间状态调整示意图。

从图 3 中可看出，广义的空间状态内部 2 个水

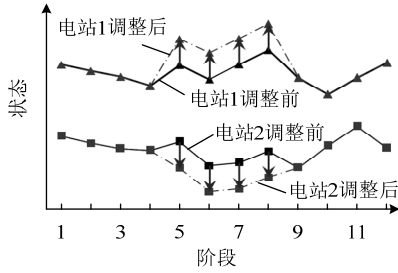


图3 广义空间状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of generalized space state

库的状态均发生了变化,且两水库变化幅度相同,方向相反,两水库总下泄流量保持不变,即满足式(6)。通过调整多个水库的状态,寻找能够满足式(7)的新的状态变量值,避免输出伪最优解。在实际水库群优化调度中,若两水库是串联关系,按上下游关系构造广义状态;若两水库是并联关系,如果水库间存在耦合关系则可构造一个广义空间状态,状态内部水库顺序不予考虑,若两水库不存在耦合关系则不考虑此组合。

2.3 改进算法在水库群优化调度中计算流程

本文引入广义时间状态和广义空间状态,在时间维度上,用广义时间状态的 POA 算法进行降维;在空间维度上,用广义空间状态的 DPSA 策略进行降维。将改进算法应用于水库群优化调度中,计算流程如图 4 所示,主要实施步骤如下:

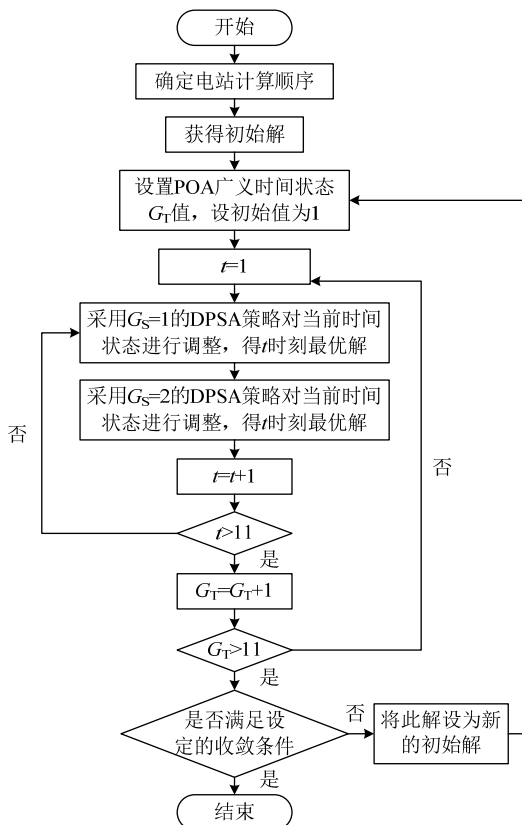


图4 改进 POA-SA 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed approach

1) 确定水库优化顺序,并确定广义空间状态的计算组合,给出优化调度初始解。

2) 按 $G_T=1$ 的广义时间状态进行 POA 计算:

①从 $T=1$ 开始计算,在水库之间先采用 $G_S=1$ 的 SA 策略优化,再按照 $G_S=2$ 的寻优策略进行优化迭代至整个逐步逼近策略结束;② $T=T+1$,执行步骤①直至最后一个时段,输出目标函数值 f_1 。

3) 按 2) 的方式依次进行 $G_T=2, 3, \dots, 11$ 的优化计算,记新的目标函数值 f_2 。

4) 若 $f_2 - f_1 < \varepsilon$ (ε 为预定阈值),则认为算法已经收敛,结束搜索;否则转步骤 2) 继续计算。

3 实例仿真

3.1 经典四库优化问题

本文参照文献[7]给出的 4 个水库实例进行优化调度实例计算,水库群拓扑结构如图 5 所示。4 个水库包含了串并联结构,其中水库 1、水库 2、水库 3、水库 4 的出库流量都可用于发电,水库 4 的出库流量还用于下游的灌溉。为了方便计算,本文把水库 4 的发电效益系数与灌溉效益系数作为水库 4 的总效益系数。调度目标是求解 4 个水库的蓄水量状态实现 4 个水库的效益最大。四库优化问题的调度期为一天,包括 12 个调度时段。

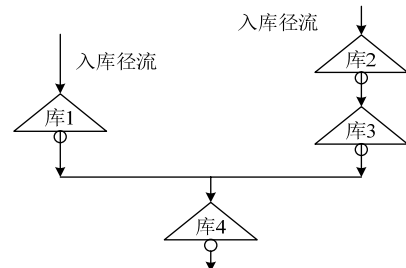


图5 四库优化问题的拓扑结构

Fig. 5 Topology of four-reservoir problem

经典四水库问题中库容与流量的转化系数 τ 取 1,不考虑时段水量损失,即 $L_{i,t}=0$ 。由于篇幅限制,各水库的入库径流系数、效益系数,库容约束、下泄流量约束参照文献[7]。算例中 4 个水库调度期初的库容均为 5,调度期末水库 1、水库 2、水库 3 的库容为 5,库容 4 的库容为 7。改进算法求解四水库问题时,根据 2.2 节中广义空间状态的确定规则,可确定 $G_S=2$ 的水库计算组合: (S_1, S_4) , (S_2, S_3) , (S_3, S_4) , (S_2, S_4) 。本文改进算法和传统 POA-DPSA 算法的计算结果如图 6 所示,其中算法的寻优初始解均按照文献[18]给出的定值。

对比传统 POA-DPSA 方法与本文改进算法的水库最优运行方式可以发现,改进算法获得的各水库运行过程合理,上游电站 1 和电站 2 均维持高水

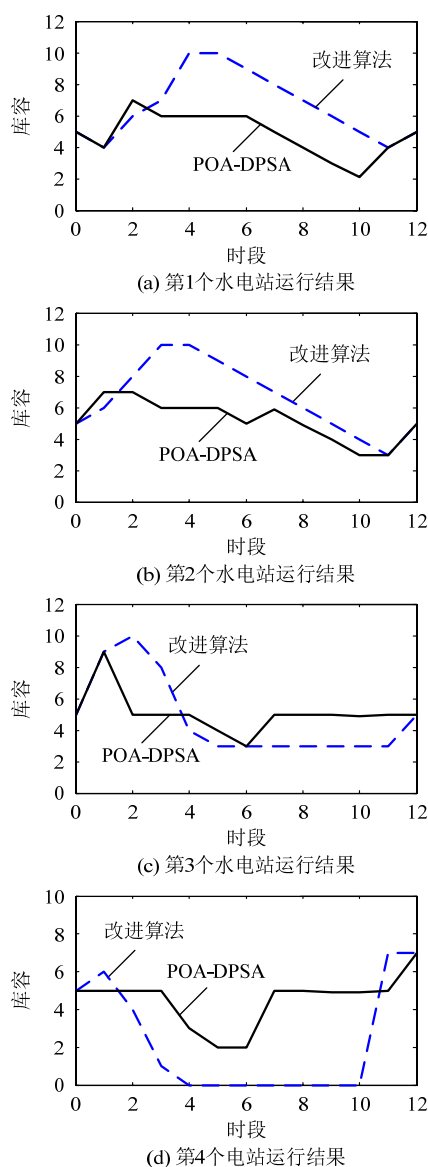


图6 四库优化问题计算结果

Fig. 6 Simulation results for four-reservoir problem

位运行,增大了发电水头,提高了系统发电效益。此外,从图6可以看出,传统 POA-DPSA 方法输出的最优解大多围绕在给定的调度期初始库容附近,这是由于采用固定步长的逐时段调节,在约束边界处仅通过调整一个状态往往会破坏约束,从而导致算法陷入寻优死点。而本文通过引入广义状态,在保持约束不变前提下进行同步调整,以获得更大的搜索空间,进而有助于算法跳出伪最优解。此外,由于相关时段状态的同步变化是在遵从约束值不变的前提下进行的,即沿着约束边界滑行(参照 2.1 节图 1),因此不会出现破坏约束的情况。

由于该问题的目标函数和约束条件都是线性的,通过相关线性规划方法可得到理论最优解为 401.3。为验证本文所述方法的寻优性能,选取 POA-DPSA 算法、离散微分动态规划(DDDP)算法、遗传算法(GA)^[7]、多核并行动态规划算法^[19]与本文改进

算法进行对比分析。其中 GA 算法种群数为 100,迭代 500 次;多核动态规划中选用 300 核计算机;POA-DPSA 与改进算法的状态离散精度均为 0.1;DDDP 中将廊道每次离散 3 点。采用 C++编制了水库群优化调度的求解程序,并在双核 2.0 GHz PC 机上完成算例测试,求解结果如表 1 所示。

表 1 四库优化问题不同算法求解结果
Tab. 1 Optimization results of four-reservoir problem based on different algorithms

算法	结果	耗时/ms
本文算法	401.3	577
POA-DPSA	382.19	312
DDDP	401.3	1 901
GA ^[7]	400.5	5 219
DP ^[19]	401.3	11 400

从效益值来看,本文算法与 DDDP 和多核并行 DP 均能到达理论最优解,POA-DPSA 效果最差。从计算时间上看,本文算法与 POA-DPSA 相近,明显少于 GA 和 DDDP。分析各算法的寻优特性可知,GA 由于采用随机寻优思想,解的稳定性较差,且个体适应度计算与种群进化耗时较长;DDDP 可收敛到真正的总体最优解,其对所有状态组合进行计算,故寻优能力较好但耗时较长;POA-DPSA 算法依次对各个水库进行计算,避免单时段状态组合,可以大大提高计算速度,但是由于减少了搜索空间,算法解的性能较差;本文改进算法引入广义状态节点进行变阶段调整,能有效改善 POA-DPSA 寻优性能,且本算法的计算时间也相当令人满意,这是因为在进行广义状态调整时内部各节点状态量是同时调整,即保持相对关系不变的前提下,因此其计算时间相比传统的 POA-DPSA 算法并没有大幅度的增加,兼顾了运算效率。

考虑到不同初始解对算法寻优的影响,为进一步分析本文方法对初始解的敏感性,表 2 给出了 3 组不同初始解下本文方法与 POA-DPSA 的寻优结果,其中后 2 组初始解为采用不同离散精度的单库动态规划(dynamic programming, DP)按图 5 所示水库顺序依次对各水库进行计算求得。从中可以看出,传统 POA-DPSA 方法对初始解的依赖性较强,较好的初始解有助于改善其寻优性能。但对于本文算法

表 2 不同初始解生成方法下算法寻优结果
Tab. 2 Optimization results of different methods with different initial solution

初始解产生方式	优化结果	
	POA-DPSA	本文算法
文献[18]给定值	382.19	401.3
单库 DP(离散精度 0.2)	400.60	401.3
单库 DP(离散精度 0.1)	400.87	401.3

而言，对于不同的初始解，广义状态概念的引入使其均保持了较好的寻优结果，具有良好的通用性，因而更适用于水库群优化调度工程实际中。

3.2 10 个混联水库群优化问题

为进一步验证算法的普遍实用性，本文选取了水利耦合更加复杂的 10 个水库群进行联合优化调度计算。水库群拓扑结构如图 7 所示，由于篇幅限制，各水库群的计算参数见文献[7]。仿真过程中分别采用 DDDP、POA-DPSA、GA 和改进算法进行求解，其中初始解的产生采用单库动态规划(离散精度 0.1)计算给出，各求解算法得到的水库群联合优化调度结果如表 3 所示。

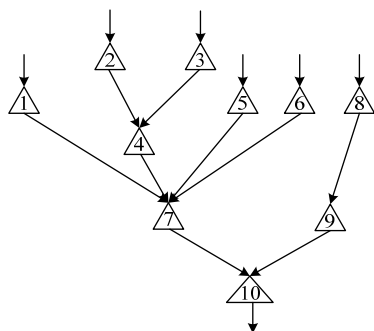


图 7 十库优化问题的水库拓扑结构
Fig. 7 Topology of the ten-reservoir problem

表 3 十库优化问题不同算法求解结果 Tab. 3 Optimization results of ten-reservoir problem based on different algorithms		
算法	结果	耗时/s
本文算法	1 193.300	2
POA-DPSA	1 187.458	1.6
DDDP	1 190.652	87.1
GA ^[7]	1 190.250	539.7

针对此测试实例，相关文献已给出通过线性规划软件求得的理论最优解为 1 194。从表 3 中可以看出，本文改进算法较其他算法均有更好的求解精度。相比理论最优解，改进算法能在极短的时间达到最优解的 99.94%，且相比传统的 POA-DPSA 提高了 0.49%。而从求解效率来看，图 8 给出了改进算法迭代过程。可以看出，本文算法在进行 5 次 POA-DPSA 迭代后即可达到收敛精度。因此，本文

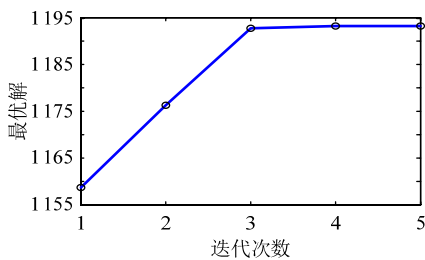


图 8 十库优化问题算法收敛过程
Fig. 8 Converging process for the ten-reservoir problem

算法在兼顾运算效率的同时，可有效避免传统逐阶段搜索方式易陷入伪最优解的缺点，是一个实用可行的求解方法。

3.3 工程实例

本文选择沅水流域湖南省内的 5 座主要电站进行优化计算，包括：三板溪、铜湾、碗米坡、凤滩、五强溪。电站的拓扑结构和相关参数如图 9 所示。选择沅水流域 2012 年 5 月—2013 年 4 月的径流资料，以月为调度时段，求解水库最优决策以使水库群总发电量最大。采用单库动态规划方法计算初始解，所得结果与传统的 POA-DPSA 及 DDDP 的对比结果如表 4 所示。从中可以看到，本文算法相比 POA-DPSA 本文算法在优化性能上有明显优势，总发电量提升 1.5%；此外相比于 DDDP，本文算法在计算时间和优化性能上都有一定的优势，计算时间缩短 61%，优化结果提高 0.7%，进一步验证了本文算法的寻优效果和工程实用价值。

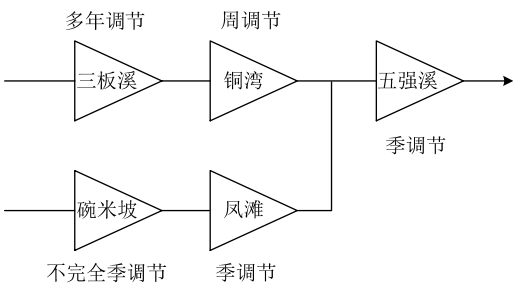


图 9 沅水流域电站拓扑结构
Fig. 9 Topology of hydropower plants in YuanShui River

表 4 沅水流域优化结果 Tab. 4 Optimization results of Yuanshui River		
算法	结果/亿(kW·h)	耗时/ms
本文算法	140.52	873
POA-DPSA	138.49	581
DDDP	139.48	2264

4 结论

本文结合 POA 和 DPSA 方法在时间和空间维度上的降维优势，引入广义时间和空间状态，在保持广义状态内部各子阶段一致性的前提下进行变阶段联合调整，有效解决了 POA-DPSA 求解库群优化调度时存在的“伪最优解”问题，为大规模水库群优化调度的求解提供一种新的思路。经典四库和十库优化问题的仿真结果表明，本文所述改进算法能有效提高传统 POA-DPSA 的寻优性能，广义时空状态的引入增大了算法的搜索范围，且由于采用等约束滑行策略进行高效搜索，使得算法保持了较好的运算效率，是一种新的高效、可靠的大规模水库群优化调度求解方法。

参考文献

- [1] 吴杰康, 郭壮志, 秦砺寒, 等. 基于连续线性规划的梯级水电站优化调度[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 24-29.
Wu Jiekang, Guo Zhuangzhi, Qin Lihan, et al. Successive linear programming based optimal scheduling of cascade hydropower station[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 24-29(in Chinese).
- [2] Ge X L, Zhang L Z, Shu J, et al. Short-term hydropower optimal scheduling considering the optimization of water time delay[J]. Electric Power Systems Research, 2014(110): 188-197.
- [3] 郝永怀, 杨侃, 周冉, 等. 三峡梯级短期优化调度大系统分解协调调法的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 70-75.
Hao Yonghuai, Yang Kan, Zhou Ran, et al. Application of large-scale system decomposition-coordination method to short-term optimal operation of Three Gorges cascade hydropower stations[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 70-75 (in Chinese).
- [4] 刘攀, 郭生练, 雒征, 等. 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.
Liu Pan, Guo Shenglian, Luo Zheng, et al. Optimization of reservoir operation by using dynamic programming-genetic algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(5): 1-6(in Chinese).
- [5] 梅亚东, 熊莹, 陈立华. 梯级水库综合利用调度的动态规划方法研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 1-4.
Mei Yadong, Xiong Ying, Chen Lihua. A dynamic programming method for the multi-purpose operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 1-4 (in Chinese).
- [6] 蒋志强, 纪昌明, 孙平, 等. 多层嵌套动态规划并行算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(9): 70-75.
Jiang Zhiqiang, Ji Changming, Sun Ping, et al. The application of multi-layer Nested parallel dynamic programming algorithm in cascade reservoirs operation optimization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(9): 70-75 (in Chinese).
- [7] Wardlaw R, Sharif M. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(1): 25-33.
- [8] 武新宇, 程春田, 廖胜利, 等. 两阶段粒子群算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 25-28.
Wu Xinyu, Cheng Chuntian, Liao Shengli, et al. Application of two-stage particle swarm optimization algorithm in optimized dispatching of hydropower station group[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 25-28 (in Chinese).
- [9] 张智晟, 董存, 吴新振. 基于量子粒子群优化算法的水电系统经济运行[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 68-72.
Zhang Zhisheng, Dong Cun, Wu Xinzen. Economic operation of hydropower system based on quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 68-72(in Chinese).
- [10] 许银山, 梅亚东, 魏婧, 等. 梯级水库群长期优化调度的逐次优化-遗传算法[J]. 中国农村水利水电, 2008(9): 25-27.
Xu Yinshan, Mei Yadong, Wei Jing, et al. Long-time reservoir optimal operation based on progressive optimality algorithm-genetic algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(9): 25-27(in Chinese).
- [11] 周佳, 马光文, 张志刚. 基于改进 POA 算法的雅鲁江梯级水电站群中长期优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 18-22.
Zhou Jia, Ma Guangwen, Zhang Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong river based on POA modified adaptive algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3): 18-22 (in Chinese).
- [12] 冯仲恺, 廖胜利, 程春田, 等. 库群长期优化调度的正交逐步优化算法[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 903-911.
Feng Zhongkai, Liao Shengli, Cheng Chuntian, et al. Orthogonal progressive optimality algorithm for long-term optimal operation of multi-reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 903-911 (in Chinese).
- [13] 李义, 李承军, 周建中. POA-DPSA 混合算法在短期优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2004, 22(1): 37-39.
Li Yi, Li Chengjun, Zhou Jianzhong. POA-DPSA algorithm for short-term hydro scheduling of cascaded hydroelectric stations[J]. Water Resources and Power, 2004, 22(1): 37-39(in Chinese).
- [14] 许银山, 梅亚东, 杨娜, 等. 大规模混联水库群长期优化调度[J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(4): 58-63.
Xu Yinshan, Mei Yadong, Yang Na, et al. Optimal operation method of large-scale multi-reservoir group[J]. Hydro Power Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(4): 58-63(in Chinese).
- [15] 范春起. 约束坐标轮换法的修正算法[J]. 河北科技大学学报, 1998, 19(4): 74-78.
Fan Chunqi. The amend method of the constrained coordinate supersede technic[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 1998, 19(4): 74-78 (in Chinese).
- [16] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I: 模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014(9): 1009-1018.
Huang Cao, Wang Zhongjing, Li Shufei, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin I. Principle and solution of the model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(9): 1009-1018 (in Chinese).
- [17] 廖胜利, 程春田, 王静, 等. 中期火电机组开机优化的改进逐步优化算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 83-88.
Liao Shengli, Cheng Chuntian, Wang Jing, et al. An improved progressive optimality algorithm for medium-term thermal unit commitment optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 83-88 (in Chinese).
- [18] Murray D M, Yakowitz S. Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control[J]. Water Resour Res, 1979, 15(5): 1017-1027.
- [19] 李想, 魏加华, 姚晨晨, 等. 基于并行动态规划的水库群优化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(9): 1235-1240.
Li Xiang, Wei Jiahua, Yao Chenchen, et al. Parallel dynamic programming for multi-reservoir system optimization[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology: Science and Nature Edition, 2013, 53(9): 1235-1240 (in Chinese).



肖胜贤

收稿日期: 2015-01-20。

作者简介:

肖胜贤(1990), 硕士研究生, 研究方向为大规模水库群优化调度模型及求解算法, E-mail: zhoukanx@163.com;

伍永刚(1963), 博士, 教授, 研究方向为多元电源并网下电力系统优化调度、梯级水电站自动发电控制, E-mail: ygangwu@163.com;

章国勇(1989), 博士研究生, 研究方向为新能源发电预测、风电并网协调发电调度模型及求解算法, E-mail: zgyhust@163.com;

胡斌奇(1980), 硕士, 高级工程师, 主要从事水火电联合优化调度工作;

成涛(1971), 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统水火电协调工作。

(责任编辑 王晔)