

响应电网负荷需求的梯级水电站短期调峰调度

周建中, 吴 巍, 卢 鹏, 李纯龙

(华中科技大学 水电与数字化工程学院 数字流域科学与技术湖北省重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 电网调峰需求日益迫切, 如何利用高效清洁的水电能源调节电网峰谷差异成为缓解电网调峰压力的关键问题之一。本文以电网剩余负荷均方差最小为目标建立梯级水电站短期调峰模型, 并提出一种逐步粒子群优化混合算法, 外层利用逐步优化算法压缩解空间降维, 内层采用粒子群算法随机连续搜索; 同时提出动态约束廊道方法处理模型复杂约束, 自适应更新可行域范围。将所提方法运用于华中电网直调沅水梯级电站短期调峰优化运行中, 实例计算表明, 所提建模思路调峰效果明显, 电网余荷均方差降幅达 93.6%, 经削峰后的负荷曲线趋于平稳, 可为梯级电站短期调峰提供求解思路。

关键词: 梯级电站; 电网负荷; 短期调峰; 逐步优化算法; 粒子群算法; 动态廊道

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

DOI: 10.11660/slfdbx.20160601

Short-term peak shaving of cascade hydropower stations in response to power grid load

ZHOU Jianzhong, WU Wei, LU Peng, LI Chunlong

(Huazhong University of Science and Technology, School of Hydropower and Information Engineering, Key Laboratory of Digital Watershed Science and Technology in Hubei Province, Wuhan 430074)

Abstract: How to make use of efficient clean hydropower for peak-valley adjustment is a key technique to release peak regulation pressure under the circumstance of increasingly urgent demand for peak shaving. A short-term peak shaving model for cascade hydropower stations has been developed in this study considering the minimum of residual load variance. A hybrid progressive particle swarm optimization algorithm is also described herein, combining a progressive optimality algorithm (POA) in the outer layer for compressing solution space and reducing dimension with a particle swarm optimization (PSO) in the inner layer for searching continuously and randomly. To update feasible regions adaptively, a new dynamic corridor technique was used for handling complicated time-space coupling. Application of this model to four stations on the Yuan River shows that the residual load variance of Hunan Grid can be decreased by 93.6% while keeping a steady and smooth curve of residual load. The method is very effective and useful in short-term peak shaving for cascade hydropower stations.

Keywords: cascade hydropower stations; grid load; short-term peak shaving; progressive optimization algorithm; particle swarm optimization; dynamic adaptive corridor technology

0 引言

随着电网调峰需求的日益增大, 传统由火电机组承担主要调峰任务的调度模式将使得机组频繁启停, 火电煤耗急剧增加, 调峰过程响应速度较慢,

不利于电网的经济稳定运行, 而水电机组由于具有爬坡能力强、起停机速度快、不消耗一次能源和 CO₂ 零排放等优点, 将逐步取代火电承担电网调峰调频任务^[1-4]。为此, 进一步开展梯级水电站联合调峰调度研究, 通过利用梯级水电站间的水力、电

收稿日期: 2015-12-09 接受日期: 2016-02-16
基金项目: 国家自然科学基金(51239004; 51579107); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sklhse-2015-A-01)
作者简介: 周建中(1959—), 男, 博士生导师. E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn
通信作者: 周建中; 吴巍(1991—), 男, 硕士生. E-mail: hust_wuwei@hust.edu.cn

力补偿调节作用,充分发挥梯级调峰效益,对减小火电机组出力任务及出力波动,解决调峰需求与电网经济稳定运行间的矛盾,维持电力系统可持续发展具有重大意义^[5-7]。

梯级水电站短期调峰问题具有时间和空间多维,库群间水力、电力联系复杂,寻优空间大等特点,是一个典型的多决策变量、高维度、多约束的大规模非线性规划问题^[8]。目前,相关学者针对此类问题做了大量研究,取得了一定进展。文献[9]针对日调节水电站调峰运行问题,通过聚类分析得到的各相期的流量分布曲线与相应的日均出力分布曲线构建对调峰时长及调峰容量的评价指标曲线,此模型能综合描述调峰运行随时间的变化规律,但其基于统计分析方法得到的评价指标曲线随机性较大,缺少严格的数学模型对问题进行抽象分析;而文献[10]则针对水火电系统短期节能发电调度问题建立了以火电煤耗最小为目标的水火电联合优化数学模型,间接考虑了调峰发电量最大的目标,但未分析证明调峰电量大小与调峰效果之间的关系;文献[11]则进一步以电网余荷峰值最小为目标直接衡量调峰效果并建立调峰模型,能有效减少电网的峰谷差,但最大值最小问题增大了模型的求解难度和收敛速度,降低了可适用性;文献[12]针对调峰问题中最大值最小问题给出了一种简化替代目标函数,降低了模型求解难度,加快了收敛速度,但不能保证电网余荷的均匀性;文献[13]以电网余荷均方差为目标函数建立调峰模型,兼顾了电网余荷的平稳性和均匀性,且有利于模型的高效求解,但其对电站实际运行过程中出力平稳性约束考虑不够全面。

对于梯级电站优化问题模型的求解,目前多采用常规数学规划法和智能算法。数学规划方法中的动态规划法因其最优性被大量运用于水库调度问题,但其难以处理耦合度较高的复杂约束,且在电站规模较大的情况下易产生“维数灾”问题,故文献[14]中利用离散微分动态规划法进行梯级电站的求解,基于高质量初始解及时间维度换取空间维度的思想解决 DP 算法空间维度的“维数灾”问题;文献[15]中则结合 POA 算法和空间简化方法提出逐次逼近动态规划法算法,通过运用逐步优化技术可对模型降维。但此类改进常规数学规划法不能适用于具有后效性的优化问题,且求解精度强烈依赖初始解质量和决策变量离散精度。因此,库群规模

和约束的高耦合度带来的求解精度和求解效率低的问题限制了数学规划法在大规模水电站短期联合调峰调度中的应用。同时,智能算法由于求解问题范围广泛、易编程实现等优点,已在水库调度领域取得了大量成果,相较于数学规划的离散寻优过程,智能算法的连续随机寻优能提高求解精度,但其极易陷入局部收敛,故文献[16]结合差分进化算法的全局搜索和混合蛙跳的局部挖掘性能改善差分进化算法的搜索特性;文献[17]利用多精英导向集合改进粒子群算法粒子群更新策略。而此类改进智能算法的求解效率仍受限于决策变量维数和寻优空间范围,而在大规模水电站短期调度问题中,高维决策变量及动态变化的大范围寻优空间严重影响了其在计算耗时及计算效率方面的表现。

本文以华中电网直调沅水梯级电站为研究对象,设定剩余负荷均方差最小为优化目标,建立梯级水电站联合优化短期调峰模型。同时,提出一种逐步粒子群优化混合算法(hybrid progressive particle swarm optimization algorithm, HPPSO),基于改进的跟踪电网负荷的初始解生成策略生成高质量初始解,利用 PSO 算法在 POA 框架的两阶段调整中连续寻优,同时提出了动态自适应约束廊道方法解耦梯级电站间复杂的水力联系,合理压缩并生成可行域寻优空间。实例计算表明,对比原始电网负荷,湖南剩余负荷均方差和峰谷差分别下降了 93.6%和 70.2%;相较于传统 POA 算法和整体 PSO 算法,电网余荷均方差降幅也分别达到 58.6%和 83.9%。调峰效果明显,所提建模思路能兼顾整体和局部调峰目标,充分考虑梯级电站复杂水力电力联系,有效地解决梯级电站短期调峰问题。

1 数学模型

1.1 目标函数

为间接考虑火电机组出力不宜变动太大的特性,以电网余荷均方差最小为调度目标建立梯级电站短期调峰优化模型,使得经水电削峰后的剩余负荷趋于平稳。目标函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } E = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (D_t - \bar{D})^2 \\ D_t = C_t - \sum_{i=1}^M N_{i,t} \\ \bar{D} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T D_t \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $N_{i,t}$ 为电站 i 在 t 时段的出力; M 为梯级电站数; T 为调度时段数; C_t 表示当前电站面临的负荷曲线在第 t 个时段的取值; D_t 表示经梯级电站调峰过后的电网剩余负荷在第 t 个时段的取值; $\bar{D}$ 表示电网剩余负荷平均值; E 表示电网余荷均方差。

1.2 约束条件

1) 水位约束

$$Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \quad (2)$$

式中: $Z_{i,t}$ 、 $Z_{i,t}^{\max}$ 和 $Z_{i,t}^{\min}$ 分别为第 i 个水电站第 t 个时段水位及其上下限。

2) 出力约束

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

式中: $N_{i,t}$ 、 $N_{i,t}^{\max}$ 和 $N_{i,t}^{\min}$ 分别为第 i 个水电站第 t 个时段出力及其上下限。

3) 下泄流量约束

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

式中: $Q_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}^{\max}$ 和 $Q_{i,t}^{\min}$ 分别为第 i 个水电站第 t 个时段下泄流量及其上下限。

4) 水力联系约束

$$I_{i+1,t} = Q_{i,t-\tau} + B_{i+1,t} \quad (5)$$

式中: $I_{i+1,t}$ 为第 $i+1$ 个水电站第 t 时段的入库流量; $B_{i+1,t}$ 为第 $i+1$ 个水电站第 t 时段的区间入流; τ 为水流时滞; $Q_{i,t-\tau}$ 为第 i 个水电站 $t-\tau$ 时段的下泄流量。

5) 水量平衡约束

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (I_{i,t} - Q_{i,t}) \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: $V_{i,t}$ 为第 i 个水电站第 t 时段蓄水量; $I_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为第 i 个水电站第 t 时段入库流量和下泄流量。

6) 末水位控制约束

$$Z_{i,T} = Z_i^{\text{end}} \quad (7)$$

式中: $Z_{i,T}$ 和 Z_i^{end} 分别为第 i 个水电站在时段末 T 时段实际水位及调度期末控制水位值。

7) 水位流量出力变幅约束

$$\begin{cases} |Z_{i,t} - Z_{i,t-1}| \leq \Delta Z_i \\ |Q_{i,t} - Q_{i,t-1}| \leq \Delta Q_i \\ |N_{i,t} - N_{i,t-1}| \leq \Delta N_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: ΔZ_i 、 ΔQ_i 和 ΔN_i 分别为第 i 个水电站时段允许最大水位变幅、流量变幅和出力变幅。

8) 出力最小持续时间约束

$$(N_{i,t-\Delta+1} - N_{i,t-\Delta})(N_{i,t} - N_{i,t-1}) \geq 0 \quad (9)$$

式中: Δ 为最小持续时间, 即第 i 个水电站极值点持续至少 Δ 个时段。

2 模型求解方法

2.1 基础算法

1) 逐步优化算法

逐步优化算法 (POA) 是 1975 年由加拿大学者 Howson 和 Sancho 提出的一种用于求解多状态动态规划问题的方法。其将多阶段的问题分解为多个两阶段问题, 依次求解, 反复循环^[18-19]。算法的终止条件一般为最大迭代次数和适应度阈值。

传统 POA 算法通常结合动态规划法 (DP) 进行优化求解, 优化结果的精度强烈依赖决策变量离散精度, 决策变量离散精度过低不能满足工程实际, 过高则直接影响算法优化效率。在求解梯级电站短期优化调度问题时, 算法计算规模将随着电站群规模的增加呈指数增长, “维数灾” 的问题依然难以避免。

2) 粒子群算法

粒子群算法 (PSO) 是 1995 年由 Eberhart 和 Kennedy 源于对鸟群捕食的行为研究提出的一种基于迭代的连续随机搜索智能算法^[20]。其求解步骤是系统初始化一组随机解, 通过以下方法更新迭代搜寻最优值:

$$\begin{cases} V_{i,k+1} = \omega V_{i,k} + c_1 r_1 (P_{i,k} - X_{i,k}) + c_2 r_2 (G_k - X_{i,k}) \\ X_{i,k+1} = X_{i,k} + V_{i,k+1} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $V_{i,k}$ 、 $X_{i,k}$ 和 $P_{i,k}$ 分别为第 i 个粒子在第 k 次迭代的速度、位置和局部最优值; G_k 是第 k 次迭代后的全局最优值; c_1 和 c_2 是社会认知系数; r_1 和 r_2 是 0 到 1 之间的随机数; ω 是惯性权重因子, 通常采用线性递减策略。

算法的终止条件一般为最大迭代次数和适应度阈值。PSO 算法原理简单, 易于实现, 算法参数少且收敛速度快, 但在梯级电站的优化过程中由于寻优空间较大和决策变量的维数随梯级规模线性增长等问题易陷入局部收敛。

2.2 逐步粒子群优化混合算法 (HPPSO)

采用 HPPSO 算法求解梯级短期调峰问题, 需要解决 POA 算法初始解质量、POA 算法框架下两阶段优化过程中 PSO 算法寻优等问题。

2.2.1 初始解的生成

从上游到下游逐电站选择坝前水位作为离散状态量,以电网余荷均方差最小为目标进行单库调峰优化计算:

1) 追踪电网负荷的初始解生成策略

基于出入库流量和约束条件,从时段初正推,时段末逆推,得到基础廊道。在基础廊道范围内,从初始时段 $t=1$ 开始,根据 $t-1$ 时段确定的状态变量正逆推,得到当前调整时段 t 的取值范围,基于此范围确定时段 t 的状态变量寻优空间,直到调度时段末 $t=T$,并进行寻优计算。并记录此时电站的出力过程为初始解。

此方法压缩了可行解空间,避免了搜索不可行状态,提高了初始可行解的质量。

2) 更新下游电站面临的负荷曲线和入库流量

若存在下游电站,则当前电站 m 调峰优化后的余荷曲线和考虑水流时滞的下泄流量更新为第 $m+1$ 电站面临的负荷曲线和入库流量组成部分,循环初始解生成策略。若无下游电站,则输出梯级各电站的初始解。初始解生成过程如图1所示。

2.2.2 POA 算法框架

POA 算法是基于初始解将多阶段问题划分为多个两阶段问题进行逐时段调整,即每个两阶段问题为单时段的梯级电站调峰问题:

1) 初始化

初始化调整时段为 $t=1$ 。

2) 两阶段问题调整

两阶段调整引入启发随机搜索机制,以电网整个调度时段的余荷均方差最小为目标采用单时段 PSO 算法进行求解。

I. 决策变量的确定

以 t 时段所有电站的坝前水位作为决策变量:

$$[Z_{1,t} \cdots Z_{i,t} \cdots Z_{M,t}] \quad (11)$$

式中: $Z_{i,t}$ 为第 i 个电站在第 t 时段的水位; M 为梯级电站数。

决策变量维数固定,避免因梯级电站规模增加导致的求解效率降低的问题,为大规模梯级电站调峰提供一种解决思路。

II. 动态自适应廊道方法生成可行域

如图2所示,从上游到下游逐电站利用动态廊道法生成可行域:从初始电站 $m=1$ 开始,在基础廊道的范围内,综合入库流量和约束条件,根据 $t-1$ 时段和 $t+1$ 的决策变量分别正逆推,形成单时

段 PSO 算法的寻优廊道,基于电站 m 决策变量的下泄流量更新电站 $m+1$ 的入库流量,重复寻优廊道生成步骤,直到末电站 $m=M$ 。

此方法能根据上游电站下泄变化动态自适应更新下游电站的寻优空间,充分考虑并解耦了梯级电站之间的水力联系,简化了算法的约束处理过程。

III. 单时段 PSO 算法优化

基于生成的可行域内进行 PSO 算法更新迭代寻优。

如图2所示,算法寻优空间缩小,且能随机连续寻优。同时,POA 框架下逐步迭代减小单次优化不准确对整体结果的影响。

IV. 更新调整过后的梯级各电站时段出力

基于优化结果,更新初始解和调整时段 $t=t+1$ 。

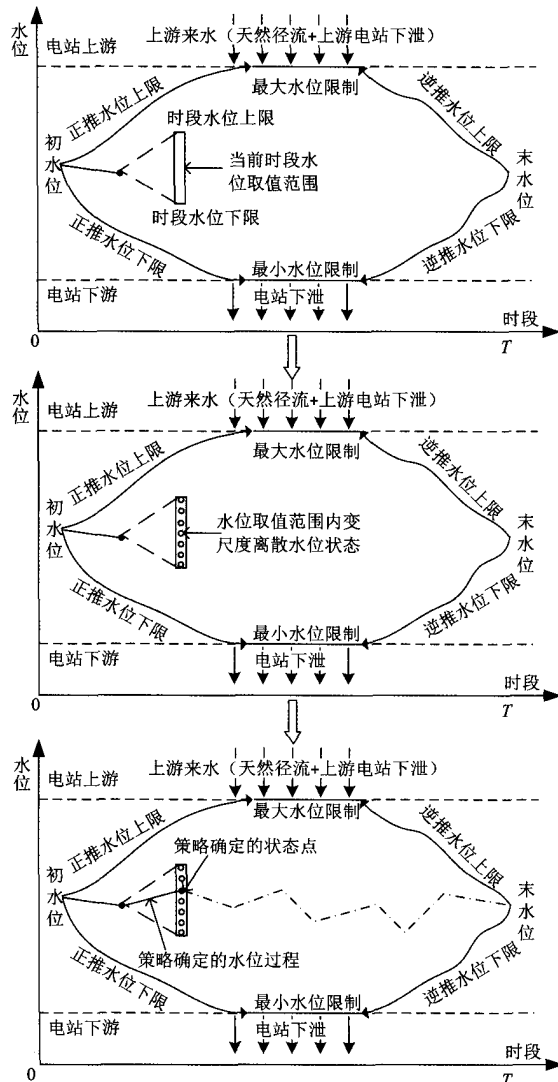


图1 初始解生成示意图

Fig. 1 Sketch of initial solution generation

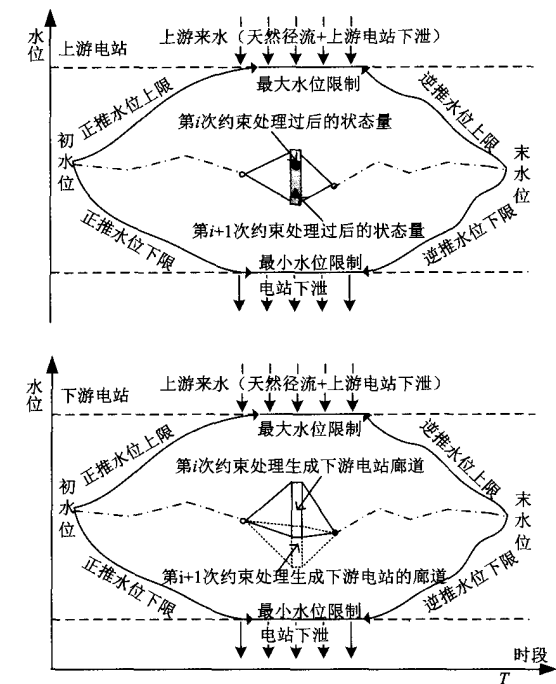


图 2 动态廊道技术

Fig. 2 Sketch of dynamic corridor calculation

3) 更新迭代判断

若 $t = T$ ，则当达到 POA 算法终止条件时，调整过程结束，输出最终结果；当未达到时，转入 1)，进行下一次迭代优化。否则，转入 2)，进行下一时段的两阶段调整。

综上所述，求解具体流程如图 3 所示。

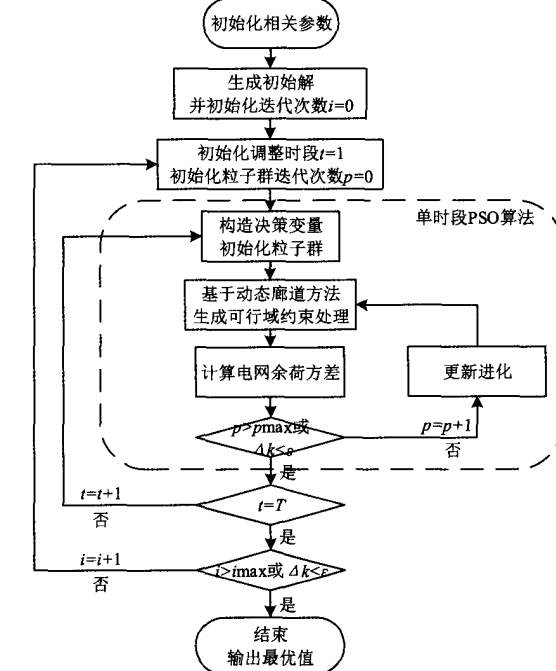


图 3 HPPSO 算法求解流程示意图

Fig. 3 Flowchart of HPPSO solution

3 实例研究

华中电网开展了水火联合调度及实时发电控制技术研究工作，承担湖南电网大量调峰调频任务的电网直调的沅水梯级三板溪、白市、托口和五强溪电站成为重点研究对象。研究实例选取 2014 年 5 月某日的电站及湖南电网数据进行优化计算，水电站特征参数如表 1 所示，并且采用 HPPSO 算法、整体 PSO 算法和传统 POA 算法三种不同的求解方法对模型进行求解，以验证建模方法和求解方式的有效性。

表 1 水电站特征参数

Table 1 Characteristic parameters of hydropower stations

电站名称	初水位/m	末水位/m	装机容量/MW	保证出力/MW
三板溪	446.55	446.33	1000	234.9
白市	297.5	297.65	420	89.7
托口	243	242.99	800	129.3
五强溪	100.5	99.89	1200	255

本文将对 HPPSO 算法在模型优化结果及算法性能两方面分别进行对比分析，部分对比指标如表 2 所示，模型优化结果对比如图 4~图 6 所示；算法性能分析如图 8~图 11 所示。

由表 2 可知，在具体的衡量指标中，方差从原始负荷的 774030.7 减少到 49518.2，降幅达到 93.6%；峰谷差也由 3176.41 减少到 947.81，降幅达到 70.2%。数据显示电网日负荷曲线的离散程度大幅度的降低，调峰过后的曲线趋于平稳。同时，算法总耗时 4181 ms，其中初始解生成耗时 2013 ms，HPPSO 算法优化部分耗时 2168 ms。

表 2 调峰前后部分指标比较表

Table 2 Comparison of peak shaving indexes

比较指标	HPPSO	整体 PSO	原始 POA
方差	49518.2	119695.3	309060.7
方差降幅	93.60%	84.50%	60.10%
峰谷差/MW	947.81	1274.29	2177.66
峰谷差降幅	70.20%	59.90%	31.50%
发电量/MW	187186.4	178403.9	258426.3
算法耗时/ms	4181	5311	1077

注：方差降幅的基准值为原始负荷方差 774030.7；峰谷差降幅的基准值为原始负荷峰谷差 3176.41 MW

从调峰结果角度分析，由图 4 可知，HPPSO

算法优化结果梯级电站总出力能很好地跟踪电网曲线的趋势,基本在谷段减小出力,在峰段增大出力,使得整体调峰效果较为显著。

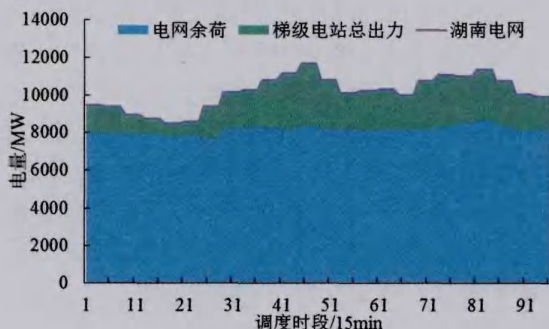


图4 HPPSO 算法优化结果图

Fig. 4 Optimization result by HPPSO

由图5可知,与整体 PSO 算法对比, HPPSO 算法能够更好的跟踪电网负荷曲线的趋势;在具体指标上,也优于整体 PSO 算法调峰电网余荷曲线的方差 119695.3 和峰谷差 1274.29。主要原因是 HPPSO 算法中基于 POA 框架的单时段 PSO 算法低维的决策变量和更小的搜索空间较好地解决整体 PSO 算法在电站数目较多、寻优空间较大的实际工程应用项目上容易陷入局部最优和优化效率不高的缺点。同时, HPPSO 算法在总发电量上提升了 5%,在调峰容量不足的情况下,发电量的增加意味着调峰容量的增加,也从侧面印证了 HPPSO 算法能获得更好地调峰效果;此外在算法耗时方面,粒子种群数和迭代次数设置虽相同,分别为 100 和 30,但由于采用动态廊道生成技术,压缩搜索空间范围,考虑上初始解生成时间,整体算法耗时仍低于整体 PSO 算法的 5311 ms。

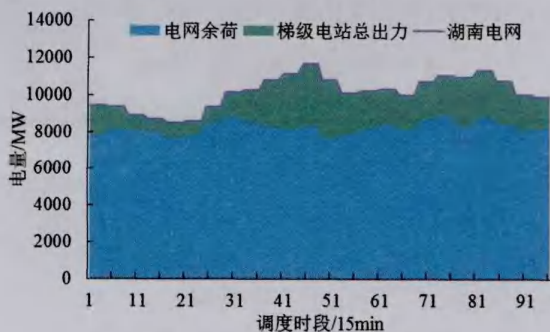


图5 PSO 算法优化结果图

Fig. 5 Optimization results by PSO

由图6可知,与原始 POA 算法对比, HPPSO 算法和整体 PSO 算法在调峰结果衡量指标上均更

优。本研究中原始 POA 算法的精度取值为 0.001, 上下各离散 300 个点,离散的精度和调整范围较高,算法耗时虽为三者中最低的 1 077 ms,但整体调峰效果较差,原因是采用水位作为决策变量,而水位的小范围波动会导致流量较大地改变,直接影响到原始 POA 算法中的离散寻优的出力最小调整范围。但局部上看,从湖南电网第一个峰段出现的时段开始分析数据,原始 POA 算法的方差为 53989.2, 优于 PSO 算法的 110362.6, 对比结果反映出原始 POA 算法在调峰过程中“填谷”的能力不够,这也是原始 POA 算法总发电量较大的原因。HPPSO 算法局部方差为 18619.2, 均高于其他方法,验证了算法充分综合 POA 算法和 PSO 算法的优点,既能整体达到最优,又能在局部力求平稳,达到较优的调峰效果。

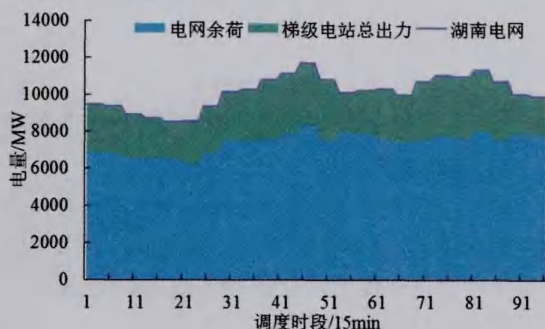


图6 POA 算法优化结果图

Fig. 6 Optimization result by POA

图7为各电站调峰优化水位和出力过程。图中水位过程线都达到保证优化调度的周期性控制末水位和满足最大水位变幅约束。其变化趋势与出力过程一致,在对应的出力变化的情况下会有相应的斜率变化情况。原因是出力变化导致出库流量改变,在短时间内入库流量变幅不会太大,所以水位线斜率会变化。但当出力变化幅度不大时,由于梯级电站之间复杂的水力联系,上游电站下泄的影响,入库流量变化相较于出库流量变化更大,则出现例外情况。图中出力过程基本都满足在峰段增大出力,谷段减小出力的趋势。综合电网余荷过程线,调峰容量还是存在不足的情况。但三板溪、托口电站的调峰容量还未完全发挥作用,其主要原因是控制末水位的设置问题。而在工程实际应用中,末水位的设置需要考虑多方面因素,比如防洪、生态、航运、下游水位影响等。因此纳入更多的水电站进行联合调峰势在必行。

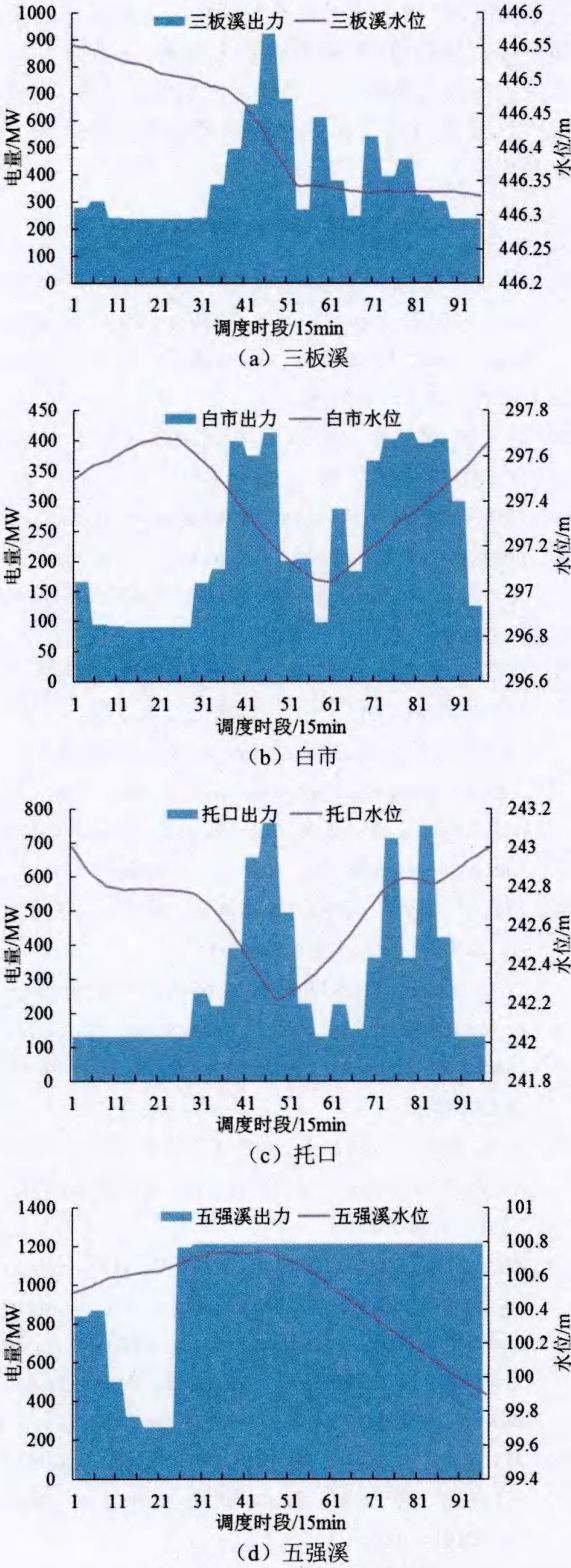


图7 各电站出力水位过程

Fig. 7 Time variations in power output and water level at different hydropower stations

从算法角度分析, 由图 8 可知, 初始解目标函数值为 171773.8, 达到整体 PSO 算法优化结果的量级, 并且 HPPSO 算法克服了整体 PSO 算法在此目标函数值量级下陷入局部最优的问题, 进一步搜索更优的区域。HPPSO 算法基于 POA 框架, 故初始解的生成策略是算法的重要组成部分, 高质量的初始解是算法高性能的基础, 本文提出的初始解策略有效地提升了算法的初始解质量。

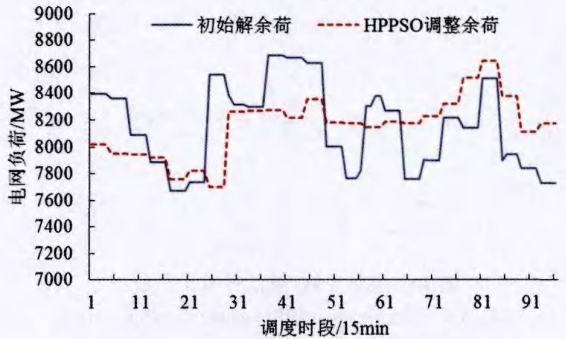


图8 HPPSO 算法结果与初始解对比
Fig. 8 Comparison of HPPSO calculations with initial solution

图 9 为两种算法的收敛过程, 由于两种算法不同初始解策略造成的初始目标函数值数量级差异, 故将迭代过程中的目标函数全局最优值归一化处理 (将最大值定义为 1, 最小值定义为 0) 作为图 9 的评价指标, 相较于整体 PSO 算法, HPPSO 算法在收敛速度及收敛稳定性上更优, 在 20 次迭代过后已收敛, 并且收敛过程中评价指标稳定下降, 不易陷入局部收敛。其原因为 HPPSO 算法是多个两阶段问题的低维决策变量在压缩的可行域内的寻优过程, 避免了搜索不可行区域, 加快了更新和搜索速度, 降低了算法陷入局部收敛的概率。

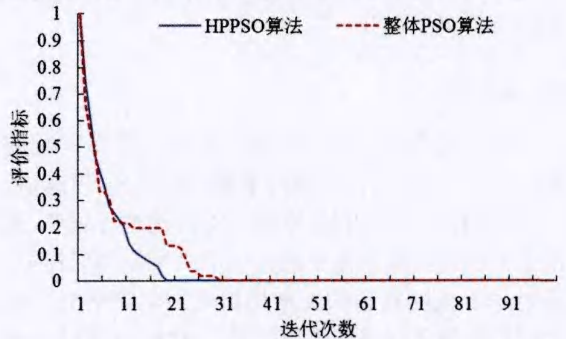


图9 HPPSO 算法与 PSO 算法收敛过程
Fig. 9 Convergence of HPPSO and PSO

图 10 和图 11 分别为使用 PSO 算法和 HPPSO

算法对实例进行 100 次优化计算结果除以各自 100 次计算结果平均值, HPPSO 算法与均值的差值在 ± 0.005 之内, 较于 PSO 算法的 ± 0.05 , 在稳定性上有较大的提升。主要原因是 POA 框架的降维及连续迭代寻优减少了单次 PSO 算法计算误差对整体计算结果的影响。

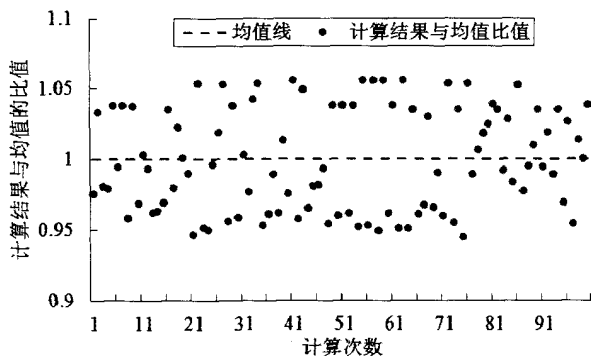


图 10 整体 PSO 算法计算结果统计

Fig. 10 Summary of PSO optimization results

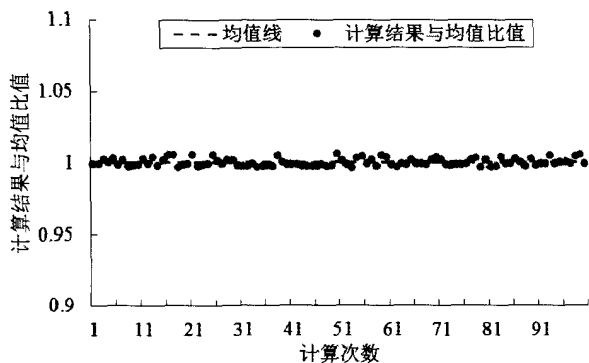


图 11 HPPSO 算法计算结果统计

Fig. 11 Summary of HPPSO optimization results

综上所述, HPPSO 算法由于良好的初始解生成策略, POA 框架的降维及约束处理方法的寻优范围压缩, 在模型求解效果及算法稳定性和收敛性上都有显著的提升。

4 结论

本研究在深入探讨梯级电站短期调峰问题的基础上, 对现阶段存在的约束条件复杂和可行域较广导致的优化精度和效率较低等问题进行思考, 提出了响应电网负荷需求的梯级电站短期调峰模型。通过华中电网直调的沅水梯级电站实例研究表明本研究建模思路调峰效果明显, HPPSO 算法在调峰目标上也明显优于整体 PSO 算法和传统 POA 算法, 在算法稳定性和收敛性上也表现优异。随着电网峰谷差的增大, 梯级电站调峰规模将不断扩大,

基于 HPPSO 算法的优化模型能较好地跟踪电网负荷曲线变化趋势, 解耦复杂水力联系, 并在压缩可行域内启发式连续寻优提高优化精度和效率, 为将来大规模水电站联合优化调峰提供了一种解决方法和思路。

参考文献 (References)

- [1] Wang Q, Yang T. Sustainable hydropower development: International perspective and challenges for China [C]// International Conference on Multimedia Technology (ICMT). 2011: 5564-5567.
- [2] 陈云华, 吴世勇, 马光文. 中国水电发展形势与展望 [J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 1-4.
CHEN Yunhua, WU Shiyong, MA Guangwen. Trends and prospects of hydropower development in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 1-4. (in Chinese)
- [3] 李树山. 富水电网短期与实时节能发电调度控制方法及策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
LI Shushan. Methods and strategies for short-term and real-time energy-saving generation dispatch control of power grid with rich hydropower [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 唐新华, 周建军. 梯级水电站联合调峰调能数学模型 [J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 38-45.
TANG Xinhua, ZHOU Jianjun. Peak-load and intermittent power regulations by cascade hydropower- models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 38-45. (in Chinese)
- [5] 张睿, 周建中, 肖舸, 等. 金沙江下游梯级和三峡梯级水电站群联合调度补偿效益分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2738-2744.
ZHANG Rui, ZHOU Jianzhong, XIAO Ge, et al. Analysis on complementary benefit from combined dispatching of cascaded hydropower stations at lower reaches of Jinsha River with those at Three Gorges [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2738-2744. (in Chinese)
- [6] 卢鹏, 周建中, 莫莉, 等. 梯级水电站发电计划编制与厂内经济运行一体化调度模式[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1914-1922.
LU Peng, ZHOU Jianzhong, MO Li, et al. An integrated dispatching mode for daily generation scheduling and inner-plant economic operation of cascade hydropower

- plants [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1914-1922. (in Chinese)
- [7] 李纯龙, 周建中, 欧阳硕, 等. 基于改进分解协调的大规模水电站群优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3445-3452.
LI Chunlong, ZHOU Jianzhong, OUYANG Shuo, et al. Large-scale hydropower plants optimal scheduling based on improved decomposition-coordination method [J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3445-3452. (in Chinese)
- [8] 袁旭峰, 韩士博, 熊炜, 等. 计及梯级水电站群的水火电节能调度策略[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 616-621.
YUAN Xufeng, HAN Shibo, XIONG Wei, et al. Energy-saving generation scheduling strategy of hydropower and thermal power plants considering cascaded hydropower stations [J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 616-621. (in Chinese)
- [9] 袁杏莲, 戴国瑞. 水电站调峰运行态势分析模式和方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(4): 10-12.
QIU Xinglian, DAI Guorui. Study on the model and method of peak regulation's dynamic analysis in hydroelectric station [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(4): 10-12. (in Chinese)
- [10] 杭乃善, 郭小璇, 郑斌, 等. 基于互补机制的水火电力系统短期节能发电调度[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 107-114.
HANG Naishan, GUO Xiaoxuan, ZHENG Bin, et al. Complementary mechanism-based short-term energy conservation generation scheduling for hydrothermal power system [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 107-114. (in Chinese)
- [11] 吴正佳, 周建中, 杨俊杰, 等. 调峰容量效益最大的梯级电站优化调度[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 74-76.
WU Zhengjia, ZHOU Jianzhong, YANG Junjie, et al. Optimal regulation for maximization of peak-energy capacity benefits in cascade hydropower stations [J]. Water Power, 2007, 33(1): 74-76. (in Chinese)
- [12] 王金文, 范习辉, 张勇传, 等. 大规模水电系统短期调峰电量最大模型及其求解[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 29-34.
WANG Jinwen, FAN Xihui, ZHANG Yongchuan, et al. Short-term generation scheduling for the peak-energy maximization of large-scale hydropower systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 29-34. (in Chinese)
- [13] Cheng C, Shen J, Wu X, et al. Short-term hydroscheduling with discrepant objectives using multi-Step progressive optimality algorithm [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2012, 48(3): 464-479.
- [14] 何莉, 伍永刚, 张勇传, 等. 梯级水电站短期调峰运行方式研究[J]. 水力发电, 2006, 32(5): 71-73.
HE Li, WU Yonggang, ZHANG Yongchuan, et al. Research on peak modulation modes of short-term scheduling for cascade hydropower stations [J]. Water Power, 2006, 32(5): 71-73. (in Chinese)
- [15] Bai T, Chang J X, Chang F J, et al. Synergistic gains from the multi-objective optimal operation of cascade reservoirs in the Upper Yellow River basin [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 758-767.
- [16] 郑慧涛, 梅亚东, 胡挺, 等. 双层交互混合差分进化算法在水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 54-62.
ZHENG Huitao, MEI Yadong, HU Ting, et al. Double-tier interaction shuffled differential evolution algorithm and its application to optimal operation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 54-62. (in Chinese)
- [17] Zhang R, Zhou J, Ouyang S, et al. Optimal operation of multi-reservoir system by multi-elite guide particle swarm optimization [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48(6): 58-68.
- [18] 周佳, 马光文, 张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻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)
- [19] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 78-84.
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Joint operation of the Three Gorges cascade reservoirs and the Qingjiang cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric

Engineering, 2010, 29(6): 78-84. (in Chinese)

- [20] Jadoun V K, Gupta N, Niazi K R, et al. Enhanced particle swarm optimization for short-term non-convex economic scheduling of hydrothermal energy systems [J]. Journal of

Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(5): 1940-1949.

(责任编辑: 尚松浩)

特邀作者简介

周建中, 男, 1959 年 12 月生, 华中科技大学首届校内特聘教授, 博士生导师, 德国布伦瑞克理工大学客座教授, 水电与数字化工程学院院长, 享受国务院政府特殊津贴, 入选国家首批“新世纪百千万人才工程国家级人选(第一层次)”、“教育部跨世纪优秀人才”计划, 全国百篇优秀博士学位论文指导教师。任国际一般系统论研究会中国分会信息系统与信息理论专委会副理事长, 全球水伙伴(中国)技术委员会委员, 国际水文科协水文过程工作组 IAHS WG_MHPC 成员, 中国水利教育协会高等教育分会第四届理事会常务理事, 中国水资源战略研究会理事, 湖北省水力发电工程学会副理事长, 湖北省系统工程学会常务理事, 湖北省水土保持学会常务理事, 湖北省振动学会秘书长, 中国农业机械学会排灌机械分会第九届委员会委员, 全国中文核心期刊《水电能源科学》副主编、国际学术期刊《水资源研究》、《水电与新能源》、《水资源与水工程学报》、《排灌机械工程学报》编委。

长期致力于水电能源及其复杂系统分析的先进理论与方法, 发电生产过程控制、诊断与仿真领域的研究、教学和人才培养工作。多次赴美国、德国、英国和法国等国访问讲学, 从事国际合作研究工作。主持和承担了国家“六五”至“十五”科技攻关计划、国家“973”重大基础研究计划课题、国家“863”高技术研究发展计划引导项目、国家“十一五”科技支撑计划课题、国家自然科学基金重点和面上项目、国防预研基金、教博点基金, 以及水利部、国家电网公司、长江水利委员会、中国长江三峡集团公司、雅砻江水电开发有限责任公司、国网新源公司、华电集团公司和国家电网电力科学研究院等科研机构资助和企业委托的研究项目。出版专著 4 部, 在国内外重要学术刊物发表论文 300 多篇, 其中被 SCI、EI 和 ISTP 收录 200 多篇次。研究成果获国家科技进步二等奖 2 项、湖北省科技进步特等奖 2 项、省部级科技进步一等奖 6 项。近年, 研究成果在长江三峡梯调中心、金沙江调控中心、国网华中调通中心等获得成功应用, 产生了显著的社会经济和生态效益。

