

Optimal Operation of Yalong River's Cascade Reservoirs

Lele Deng, Shenglian Guo*, Shaokun He, Jianting Zhang, Keping Chen, Huanhuan Ba

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *slguo@whu.edu.com

Received: Jan. 10th, 2019; accepted: Mar. 20th, 2019; published: Apr. 9th, 2019

Abstract

The joint operation model of cascade reservoirs in the Yalong River is established with objective functions to maximize power generation, and solved by mixed DPSA-POA algorithm with constraints. Compared with the conventional operation scheme, the mid-long term joint optimal operation of cascade reservoirs can increase annual hydropower power generation in Lianghekou, Jinping-I, Ertan by 0.450 (or 4.14%), 2.014 (or 10.67%), 1.939 billion kW·h (or 11.46%), respectively. Meanwhile, it can reduce 6.591 billion m³ (or 57.49%) spillway discharge annually. Application results show that optimal cascade operation can enhance power generation substantially, as well as advancing economic benefit for Yalong River.

Keywords

Cascade Reservoirs, Optimal Operation, Power Generation, DPSA-POA Algorithm, Yalong River

雅砻江梯级电站发电优化调度研究

邓乐乐, 郭生练*, 何绍坤, 张剑亭, 陈柯兵, 巴欢欢

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: *slguo@whu.edu.com

收稿日期: 2019年1月10日; 录用日期: 2019年3月20日; 发布日期: 2019年4月9日

摘要

以雅砻江梯级电站发电量最大为目标, 综合考虑各约束条件, 建立梯级水库发电调度模型, 采用逐次渐近动态规划-逐次优化混合算法(DPSA-POA)进行求解。研究结果表明: 联合优化调度与常规调度方案对比, 两河口、

作者简介: 郭生练, 二级教授, 研究方向: 水文水资源。
*通讯作者。

文章引用: 邓乐乐, 郭生练, 何绍坤, 张剑亭, 陈柯兵, 巴欢欢. 雅砻江梯级电站发电优化调度研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 109-116. DOI: 10.12677/jwrr.2019.82013

锦屏一级、二滩电站的年均发电量分别提高了4.5亿kW·h (4.14%)、20.14亿kW·h (10.67%)和19.39亿kW·h (11.46%); 雅砻江梯级水库的年弃水量减少了65.91亿m³, 联合优化调度的经济效益巨大。

关键词

梯级水库, 优化调度, 发电量, DPSA-POA算法, 雅砻江

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国民经济和社会发展水平的快速提高, 能源需求量不断攀升[1] [2]。传统化石能源不仅总量有限, 而且还会对环境造成有害影响, 开发利用可循环再生的清洁能源符合社会发展的趋势。截至2017年底, 我国已建各类水库的总库容为9035亿m³, 年末全国水电装机容量34,168万kW, 全年发电量11967亿kW·h [3], 水电已经成为我国重要的清洁能源。

梯级水电站单一调度存在水能利用率不高、补偿效益较弱等典型问题, 而联合调度从整体效益出发, 对梯级水库统一调度和管理、提高综合利用效率具有重要意义。同时梯级水电站联合调度具有大规模、多维度、非线性等特征, 约束条件和水力耦合联系复杂[4], 高效求解一直是研究的热点。传统的动态规划算法能遍历整个可行域, 但随着水库群规模的增大, 会出现“维数灾”问题, 直接影响调度模型的有效求解。为此, 人们依据动态规划算法进行改进, 产生了多种优化算法。逐次优化算法(POA)具有计算效率高、耗时间短、收敛性好等优点, 逐次渐进动态规划算法(DPSA)将多维问题转为多个一维问题, 使原问题得到简化。

近年来, 众多学者对上述算法在水库调度中的应用做了大量研究。陈炯宏[5]利用POA算法求解清江梯级水库汛限水位动态控制模型, 显著增加了汛期发电量。为避免POA求解时造成的“维数灾”现象, 冯仲恺[6]提出了正交逐步优化算法, 较于传统算法, 求解时间大幅降低。张诚[7]基于逐步优化算法的寻优机制, 采用逐步差分和变阶段优化的改进策略, 算法具有较好的全局搜索能力。赵志鹏[8]等利用离散梯度下降法对逐步优化算法子优化问题求解, 该方法能够确定最优搜索方向, 优化计算规模。Zhang [9]等将POA算法和DPSA算法结合起来, 并且将黄金分割法应用到单纯形法中, 能有效计算水库蓄水轨迹。

本文以雅砻江流域为研究对象, 以“两河口~锦屏一级~二滩”梯级水电站为调控主体, 根据雅砻江梯级水电站水库群实际情况, 建立梯级水库联合调度模型, 以DPSA-POA混合算法求解, 探求雅砻江梯级水库最大发电效益潜力。

2. 研究区域及数据资料

2.1. 雅砻江流域概况

雅砻江是金沙江第一大支流, 发源于青海省, 经甘孜、新龙、雅江、木里、冕宁、盐边等县, 在攀枝花市汇入金沙江。雅砻江干流全长约1571 km, 天然落差3830 m, 年径流量约600亿m³。流域呈北西—南东走向, 平均宽度128 km, 略呈“柳叶”状, 面积达13.6万km²。

雅砻江流域水能资源丰富且非常集中, 干流技术可开发量约3000万kW, 占到四川全省的24.93%, 调节补偿性能和技术经济指标优良, 开发成本低于其他流域, 是我国优质的水电能源基地[10]。其中两河口是具有多年调节能力的龙头水库, 锦屏一级具有年调节能力, 二滩水库为季调节水库。

2.2. 梯级水电站资料

两河口水电站，位于四川省甘孜州雅江县境内，为雅砻江中下游梯级电站的控制性水库工程，主要功能为发电，同时具有蓄水蓄能、改善航道枯水期航运条件的作用。锦屏一级水库水电站位于四川省盐源县和木里县境内，雅砻江下游大河湾处，距河口 358 km 主要开发任务是发电，具有良好的调节性能，是雅砻江下游的控制性工程，在雅砻江开发中起着承上启下的关键作用。二滩水库电站位于攀枝花市，距与金沙江的交汇口 33 km，是一座具有季调节能力，以发电为主的大型水力发电枢纽。

Table 1. The main parameters and characteristics water level of cascade reservoirs

表 1. 梯级电站主要参数和特征水位

水电站	两河口	锦屏一级	二滩
汛期	6月~7月	6月~7月	6月~7月
死水位(m)	2785	1800	1155
汛限水位(m)	2845	1859	1190
正常高水位(m)	2865	1880	1200
装机容量(MW)	3000	3600	3300
保证出力(MW)	1050	1086	1000
综合出力系数	8.5	8.5	8.5

2.3. 径流资料

雅砻江流域的径流资料中，两河口、锦屏一级和二滩水库采用 1956 年 6 月~2013 年 5 月的旬入库流量资料(见表 1)。下一级水库的入库径流由上一级水库的出库流量和同期两水库之间的区间入流组成。

3. 联合水库优化调度

3.1. 优化调度模型的建立

1) 目标函数

在满足各约束条件下，以梯级发电量最大为目标函数：

$$\max \sum_{t=1}^T P_t \cdot \Delta t, \quad P_t = \sum_{i=1}^n N_{i,t} \quad (1)$$

式中： T 为总时数； n 表示电站个数； P_t 为第 t 时段梯级电站的出力； Δt 为时段长； $N_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 时段的出力。

2) 约束条件

① 水量平衡方程：

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

式中： $V_{i,t}$ 和 $V_{i,t+1}$ 分别表示第 i 个电站第 t 时段初、末水库的蓄水容积； $I_{i,t}$ 表示第 i 个电站第 t 时段平均入库流量； $Q_{i,t}$ 表示第 i 个电站第 t 时段平均出库流量。

② 水库的蓄水限制：

$$VL_{i,t} \leq V_{i,t} \leq VU_{i,t} \quad (3)$$

式中： $V_{L,i,t}$ 表示第*i*个电站第*t*时段的最小蓄水，一般为死库容； $V_{U,i,t}$ 表示第*i*个电站第*t*时段的最大蓄水容积，在汛期为汛限水位对应的库容，在非汛期为正常高水位对应的库容。

③水库出库流量限制：

$$QL_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq QU_{i,t} \quad (4)$$

式中： $QL_{i,t}$ 表示第*i*个电站第*t*时段电站放水量下限， $QU_{i,t}$ 表示第*i*个电站第*t*时段电站放水量上限。

④水库之间的水量平衡方程：

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

式中： $QJ_{i,t}$ 表示第*t*时段第*i*个水库至第(*i*+1)个水库区间流量。

⑤电站出力限制：

$$PL_{i,t} \leq N_{i,t} \leq PU_{i,t} \quad (6)$$

式中： $PL_{i,t}$ 、 $PU_{i,t}$ 分别表示第*i*个电站第*t*时段的出力下限和上限。

⑥水库边界条件：

$$\begin{aligned} Z_{i,1} &= Z_{i,b} \\ Z_{i,T+1} &= Z_{i,e} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $Z_{i,b}$ 表示第*i*个调度期初水库蓄水位； $Z_{i,e}$ 表示第*i*个水库调度期末水库蓄水位。本研究均取为死水位。

3.2. 模型求解方法

针对该梯级电站联合调度问题，采用逐次逼近动态规划—逐次优化算法(DPSA-POA)求解。逐次逼近动态规划算法(DPSA)将原来*n*维状态变量的动态规划问题分解成只有一个状态变量的*n*个子问题[11]，并对*n*个子问题逐步求解，使这些子问题的优化序列收敛于原问题的解，可大大降低问题的维数，也可减少所需的存储空间。

逐次优化算法(POA)将一个多阶段的决策问题分解为多个两阶段问题，使原问题得到简化[12]。固定其他阶段的变量，只对所选两阶段的决策变量寻优，在解决该两阶段问题后再考虑下一两阶段问题，有效地降低了问题的维度。

如图1所示，DPSA-POA算法的步骤为：

- 1) 输入基本资料。
- 2) 采用单库最优的方法计算初始状态变量和决策变量，拟定初始调度轨迹。
- 3) 先对水库1进行优化，其余*n*-1个水库的运行决策和状态变量保持不变。利用一维优化算法POA对水库1优化调度进行求解，从而可得水库1的运行策略。
- 4) 按照水库顺序依次对后续水库进行优化，优化第*n*个水库时，第1~*n*-1个水库保持更新后的策略，其余水库仍然保持初始策略，同样利用POA算法求解第*n*个水库的最有运行策略。
- 5) 遍历所有水库得到所求的优化调度线，并以该调度线为初始调度线，重复上述步骤不断寻优，若优化调度线与初始调度线差异满足精度要求则输出最优调度轨迹；否则，重复步骤(3)~(4)，直到满足精度要求为止。

4. 联合调度结果分析

采用DPSA-POA算法进行优化计算，得到梯级联合优化调度结果如表2所示，可知：

- 1) 通过梯级补偿，各电站不仅可满足各自的其他用水要求，而且梯级发电保证率、发电量均有较大程度提高，其中梯级年均发电量510.77亿kW·h，发电保证率达到97.61%。

2) 各年发电量相差较大,最大年份(2012)达到 598.88 亿 kW·h, 超过均值约 17.25%; 最小年份(1956)仅 341.91 亿 kW·h, 仅为均值的 57.09%。雅砻江梯级年发电量~保证率关系如图 2 所示, 可知在理想情况下, 雅砻江梯级年发电量超过 469.77 亿 kW·h 的经验频率约为 80%。

3) 各年的发电保证率也有一定差异, 最小的年份为 1956 年, 发电保证率为 77.78%。雅砻江梯级出力~保证率关系如图 2 所示, 可知通过优化调度, 大概有 97.56% 的时段满足保证出力要求, 有 5% 的时段保证满发。

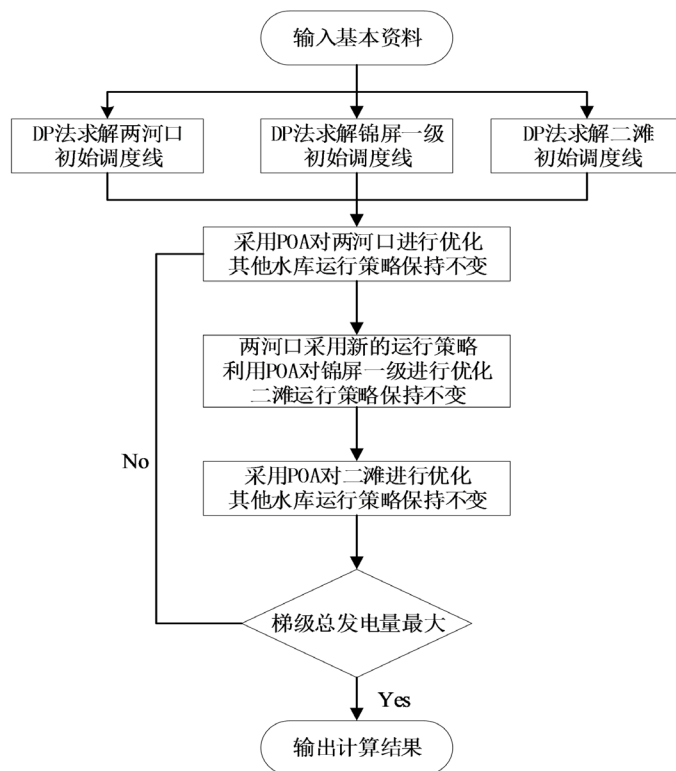


Figure 1. Flow chart of optimal reservoir operation based on DP-SA-POA

图 1. DP-SA-POA 法求解水库优化调度流程图

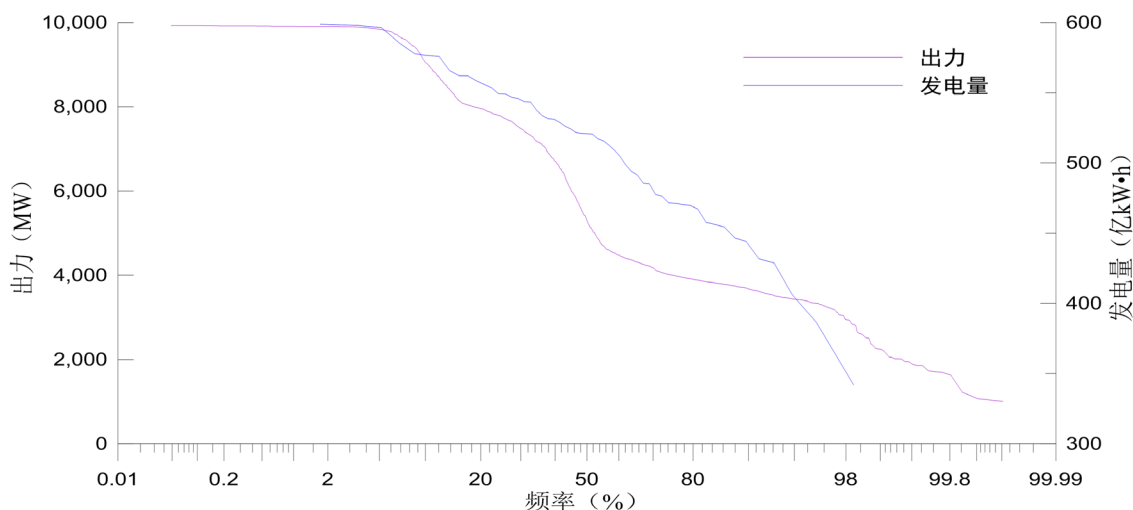


Figure 2. Relationship between optimized power generation and output with guarantee probability

图 2. 梯级电站优化的年发电量和出力与保证率关系图

对雅砻江梯级水库 1956~2012 年长系列历史资料进行优化调度, 得到理论优化值如表 3 所示。保证出力取 3136 MW 时, 梯级电站年均发电量为 510.77 亿 kW·h, 较常规调度方案可年均增加发电量 44.03 亿 kW·h, 提高发电量约 9.43%; 较常规调度减少弃水量 57.49%。从对社会效益的贡献看, 所增发的电量相当于节约标准煤 178 万吨, 减少 CO₂ 排放量 440 万吨, 对国家节能减排政策以及环境保护具有重要意义。可见, 雅砻江梯级水库群调度存在优化的空间, 得到的最优调度轨迹过程线可作为分析水库调度规则的基础。

Table 2. Joint optimization results of cascade power generation

表 2. 梯级电站联合优化调度历年结果

年份	年发电量(亿 kW·h)				年弃水量(亿 m ³)				保证率(%)
	两河口	锦屏一级	二滩	梯级	两河口	锦屏一级	二滩	梯级	
1956	91.37	136.46	114.08	341.91	0.00	0.00	0.00	0.00	77.78
1957	119.03	216.22	198.36	533.61	0.00	1.36	4.81	6.17	100.00
1958	93.91	191.16	171.12	456.19	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
1959	89.47	193.35	171.51	454.33	0.00	0.00	0.00	0.00	94.44
1960	124.01	219.89	199.42	543.32	0.00	24.48	21.21	45.69	94.44
1961	106.83	200.82	177.98	485.62	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
1962	131.75	215.74	196.11	543.60	0.65	62.05	67.26	129.97	100.00
1963	130.84	216.72	199.24	546.80	0.04	14.02	7.99	22.06	100.00
1964	124.44	229.51	211.82	565.77	0.05	43.56	42.09	85.70	100.00
1965	157.27	230.80	209.95	598.02	5.53	156.56	172.98	335.07	100.00
1966	123.06	221.42	201.35	545.82	0.00	62.24	65.57	127.81	100.00
1967	98.55	190.36	168.76	457.67	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
1968	102.66	218.23	196.37	517.25	0.00	45.83	45.21	91.04	100.00
1969	93.54	202.56	180.23	476.33	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
1970	106.19	217.07	197.54	520.80	0.00	1.11	0.63	1.74	100.00
1971	94.57	203.73	179.28	477.58	0.00	0.00	0.06	0.06	94.44
1972	89.48	179.79	159.52	428.79	0.00	0.00	0.00	0.00	88.89
1973	86.92	203.15	180.28	470.36	0.00	0.00	0.00	0.00	94.44
1974	119.23	225.83	204.06	549.12	0.00	80.27	87.32	167.59	100.00
1975	111.10	191.76	168.73	471.60	0.00	0.00	0.00	0.00	94.44
1976	110.84	200.99	179.68	491.51	0.00	0.05	0.06	0.11	97.22
1977	112.88	219.54	199.10	531.52	0.00	0.00	0.16	0.16	97.22
1978	91.87	223.20	200.66	515.73	0.00	0.84	0.00	0.84	100.00
1979	112.88	213.94	194.34	521.16	0.00	1.42	0.06	1.48	97.22
1980	134.05	231.12	210.68	575.85	0.04	54.73	56.23	111.00	100.00
1981	118.64	214.47	195.86	528.97	0.00	16.61	15.28	31.88	100.00
1982	119.08	209.85	192.71	521.63	0.00	1.56	0.52	2.09	100.00
1983	91.77	180.68	159.20	431.65	0.05	0.00	0.00	0.05	94.44
1984	92.50	207.72	184.90	485.11	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1985	118.91	209.48	192.18	520.58	0.00	23.49	21.31	44.80	100.00

Continued

1986	92.46	210.99	190.67	494.12	0.00	2.88	0.00	2.88	97.22
1987	111.90	222.08	203.42	537.41	0.20	67.69	75.00	142.88	100.00
1988	99.53	214.77	194.88	509.18	0.00	2.05	0.42	2.47	97.22
1989	133.24	230.44	212.67	576.35	0.22	42.20	40.21	82.63	100.00
1990	137.59	231.55	208.55	577.69	0.10	64.77	70.84	135.71	100.00
1991	130.43	220.04	203.09	553.57	0.00	69.28	73.63	142.91	100.00
1992	100.83	197.11	171.84	469.78	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
1993	122.42	222.58	204.26	549.25	0.00	74.27	81.85	156.12	100.00
1994	95.02	187.65	163.96	446.63	0.00	0.00	0.00	0.00	94.44
1995	108.34	223.09	199.74	531.17	0.00	1.19	0.00	1.19	100.00
1996	110.15	217.44	198.51	526.09	0.00	2.49	0.53	3.02	100.00
1997	102.96	209.36	186.17	498.49	0.00	0.16	0.06	0.22	100.00
1998	141.36	230.61	213.22	585.18	5.83	142.16	155.52	303.51	100.00
1999	142.85	235.87	217.57	596.29	0.23	66.13	69.68	136.05	100.00
2000	141.13	220.00	200.93	562.05	0.00	60.50	61.20	121.70	100.00
2001	119.44	213.97	190.83	524.23	0.04	34.21	18.78	53.04	100.00
2002	85.08	206.76	175.39	467.22	0.00	0.00	0.10	0.10	100.00
2003	138.65	220.91	196.50	556.06	0.00	49.15	33.21	82.35	100.00
2004	129.70	226.68	202.25	558.64	0.00	22.15	4.85	27.00	100.00
2005	155.79	214.77	191.52	562.09	2.51	56.66	40.35	99.52	100.00
2006	87.21	162.24	137.13	386.58	0.00	0.45	0.00	0.45	80.56
2007	89.89	188.74	165.41	444.04	0.00	0.00	0.00	0.00	97.22
2008	107.60	213.52	191.56	512.68	0.00	0.36	0.17	0.53	100.00
2009	121.94	200.28	182.61	504.83	0.00	0.68	0.33	1.01	100.00
2010	101.66	193.46	176.09	471.22	0.00	0.05	0.00	0.05	94.44
2011	98.51	152.37	155.11	405.99	0.00	0.00	0.00	0.00	91.67
2012	156.37	223.29	219.22	598.88	1.09	11.42	64.74	77.25	100.00
平均	113.32	208.87	188.56	510.77	0.29	23.87	24.56	48.73	97.61

Table 3. Results of cascade hydropower joint optimization scheduling (1956~2012)

表 3. 雅砻江梯级水库电站优化调度结果(1956~2012 年)

项目	水库	两河口	锦屏一级	二滩	梯级
发电量亿(kW·h)	常规调度	108.83	188.74	169.17	466.74
	优化调度(变幅)	113.33 (4.14%)	208.88 (10.67%)	188.56 (11.46%)	510.77 (9.43%)
弃水量(亿 m ³)	常规调度	5.94	54.57	54.14	114.65
	优化调度(变幅)	0.29 (-95.1%)	23.88 (-56.24)	24.57 (-54.63)	48.74 (-57.49)
保证率(%)	常规调度	74.07	97.76	99.56	87.18
	优化调度(变幅)	70.57 (-4.74%)	98.59 (0.85%)	98.34 (-1.23%)	97.61 (11.96%)

5. 结论和展望

以雅砻江流域两河口, 锦屏一级和二滩水库为研究对象, 建立联合优化调度模型, 采用 DPSA-POA 法求解, 得出如下结论:

1) 采用 1956~2012 年的资料进行分析计算, 梯级水电站联合优化调度的年均发电量达到 510.77 亿 kW·h, 较常规调度增加 44.03 亿 kW·h (9.43%), 减少弃水量 65.91 亿 m³ (57.49%)。

2) 结合雅砻江梯级水库实际情况, 对梯级水库优化调度研究的重要性进行了探讨, 优化调度能显著提高水能综合利用效率。下一步将考虑梯级调度生态等问题, 深入开展梯级水库长系列多目标优化调度研究。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFC0402206), 国家自然科学基金(51879192)资助项目。

参考文献

- [1] ZHOU, Y., GUO, S., et al. Boosting hydropower output of mega cascade reservoirs using an evolutionary algorithm with successive approximation. *Applied Energy*, 2018, 228: 1726-1739. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.078>
- [2] APICHONNABUTR, W., TIWARY, A. Trade-offs between economic and environmental performance of an autonomous hybrid energy system using micro hydro. *Applied Energy*, 2018, 226: 891-904. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.012>
- [3] 中华人民共和国水利部. 2017 年全国水利发展统计公报[R]. 2018. Ministry of Water Resources, People's Republic of China. 2017 Statistic bulletin on China water activities. 2018.
- [4] CHENG, C. T., SHEN, J. J., WU, X. Y., et al. Operation challenges for fast-growing China's hydropower systems and dependence to energy saving and emission reduction. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2386-2393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.056>
- [5] CHEN, J., GUO, S., LI, Y., et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for cascade reservoirs. *Water Resources Management*, 2013, 27(3): 749-763. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0213-z>
- [6] 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 optimal algorithm for long-term optimal operation of multi-reservoir system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(8): 903-911. (in Chinese)
- [7] 张诚, 周建中, 王超, 等. 梯级水电站优化调度的变阶段逐步优化算法[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(4): 12-21. ZHANG Cheng, ZHOU Jianzhong, WANG Chao, et al. Variable period progressive optimality algorithm for optimal dispatch of cascade reservoirs. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4): 12-21. (in Chinese)
- [8] 赵志鹏, 廖胜利, 程春田, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 61-71. ZHAO Zhipeng, LIAO Shengli, CHENG Chuntian, et al. Discrete gradient progressive optimality algorithm for mid-long-term optimal operation of multi-reservoir system. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 49(10): 61-71. (in Chinese)
- [9] ZHANG, W. J., HAO, L. U., YUAN, X. F. Study on the model of short-term cascade hydropower optimization based on energy-conservation power generation dispatch. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013.
- [10] 黄炜斌, 马光文, 王和康, 唐明, 王立明. 雅砻江下游梯级电站群中长期优化调度模型及其算法研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(1): 1-4. HUANG Weibin, MA Guangwen, WANG Hekang, TANG Ming, WANG Liming. Study on the mid-long-term optimal operation model and its algorithm for cascade hydropower stations on the lower-reach of Yalong River. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(1): 1-4. (in Chinese)
- [11] 孙晓懿, 黄强, 康田, 等. 汉江上游梯级水电站水库优化运行研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3). SUN Xiaoyi, HUANG Qiang, KANG Tian, et al. Optimized operation of the cascade power station reservoirs in the upper reaches of the Hanjiang river. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3). (in Chinese)
- [12] 刘新, 纪昌明, 杨子俊, 等. 基于逐步优化算法的梯级水电站中长期优化调度[J]. *人民长江*, 2010, 41(21). LIU Xin, JI Changming, YANG Zijun, et al. Study on mid-long term optimal dispatching of cascade hydropower stations based on progressive optimality algorithm. *Yangtze River*, 2010, 41(21). (in Chinese)