

Short-Term Optimal Operation of Banduo Reservoir in the Source of Yellow River

Xiaoyu Wang¹, Tao Bai^{1*}, Yu Bai², Jianxia Chang¹

¹Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

²Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining Qinghai
Email: xyxaut@hotmail.com, *baitao@xaut.edu.cn

Received: Jan. 26th, 2017; accepted: Feb. 18th, 2017; published: Feb. 21st, 2017

Abstract

Banduo reservoir, located in the source area of the Yellow River, is lack of specific operation schemes. There are many problems such as the freezing of the reservoir surface during the ice prevention period, the large amount of abandoned water in flood season and the drastic decrease of the power generation in dry season. In this paper, the short-term conventional operation model of constant output and the operation model of maximal power generation optimized by the genetic algorithm were established under daily and weekly periods. By comparing the power generation, abandoned water and output in different periods, it is found that the short-term optimal operation reduces the amount of abandoned water and increases the power generation. Initial operation mode of Banduo reservoir is obtained and optimal operation rules are derived. Banduo reservoir has the potential of weekly operation since the weekly results are better than the daily's. This study can guide the actual operation of Banduo hydropower station in different periods, which can improve water resources utilization and economic benefit of power generation enterprises.

Keywords

Short-Term Optimal Operation, Maximal Power Generation, Genetic Algorithm, Banduo Hydropower

黄河源区班多水库的短期优化调度研究

王晓宇¹, 白涛^{1*}, 白钰², 畅建霞¹

¹西安理工大学, 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安

²黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁
Email: xyxaut@hotmail.com, *baitao@xaut.edu.cn

收稿日期: 2017年1月26日; 录用日期: 2017年2月18日; 发布日期: 2017年2月21日

作者简介: 王晓宇(1994-), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 主要从事水资源系统工程研究。
*通讯作者。

摘要

针对黄河源区班多水库尚缺乏指导其运行的具体的调度方案,且存在防凌期库面易结冰、丰水期有大量弃水、枯水期发电量急剧下降等问题,本文对班多水库分别建立了不同典型日、周调度的短期定出力常规调度模型和发电量最大优化调度模型,采用遗传算法求解优化调度模型。通过对比常规与优化的日、周调度中发电量、弃水及出力等结果,短期优化调度减少了弃水量,增加了发电量;获得了班多水库初步运行方式,揭示了班多水库的最优运行规律。研究发现:班多水库的周调度较日调度结果更为理想,具有周调节潜力。研究成果可用于指导班多水电站不同时期的运行调度,可提高水资源利用效率和发电企业的经济效益。

关键词

短期优化调度, 发电量最大, 遗传算法, 班多水电站

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

班多水电站是黄河上游茨哈-羊曲河段的第2个梯级电站,以发电为主。目前,班多水库尚未有具体的操作规程,存在冬季库面易结冰,丰水期有大量的弃水,枯水期来水较小发电量急剧下降等问题,且由于班多上游未建有调节性能水库,受河道天然径流的制约,大部分时段不能满负荷运行[1]。因此,为解决班多冬季库面封冻、水库弃水、运行效率低等问题,充分发挥水电站的发电效益,本文开展班多水电站的短期常规调度和优化调度研究。

国内外对水库调度的研究已十分成熟。Jalali等提出了能处理连续和离散优化问题的多种群蚁群算法,并将其用于解决水库群优化调度的问题中[2]。陈立华等建立遗传算法(GA)求解多阶段最优化问题的数学模型,验证了改进策略在解决水库群优化问题方面的有效性和优越性[3];朱彦刚构建了水沙联合调度多目标模型,采用遗传算法和多目标加权均衡排序相结合的方法进行多目标求解,得出了最佳水沙联合调度方案[4]。目前,对于黄河上游已经开展了大量的水库调度研究。马跃先等建立了黄河上游梯级水库防凌优化调度模型,增加了刘家峡水库防凌库容并提高了梯级电站效益[5];靳少波等通过探讨黄河上游梯级电站(主要是龙羊峡、刘家峡电站)的联合调度方式,提出合理、可行、多方受益的建设性建议[6];金文婷等建立了以梯级水电站水库调沙水量最大为目标的黄河上游梯级水库调水调沙模型,获得了龙羊峡、刘家峡梯级水电站水库相应方案下的合理库容[7];白夏等以黄河上游沙漠宽谷河段为研究对象,建立了基于自迭代模拟优化算法的黄河上游梯级水库多目标水沙联合模拟优化调度模型,得到了黄河上游调水调沙最优方案,最大程度上发挥黄河上游水资源综合利用效益[8]。

近年来,水库优化调度研究以智能优化算法为主,且主要围绕黄河上游龙羊峡、刘家峡及其下游梯级联合调度展开,鲜有针对龙羊峡上游水库开展的优化调度成果。本文将结合防凌、防洪、发电等目标,以黄河源区班多水电站为研究实例,建立不同典型日、周的短期常规调度和优化调度模型,开展龙羊峡以上高海拔地区水库经济运行的研究,旨在构建班多水电站调度方式,揭示班多水库的最优运行规律。研究成果可用于指导班多水电站不同时期的实际运行,对提高水资源利用效率和发电企业的经济效益具有重要的应用价值。

2. 模型的建立及求解

为了与班多水电站各设计参数进行对比,本文建立定出力调节的常规调度。与此同时,班多作为以发电为

主的水电站,在实际运行中发电量小且在汛期存在大量弃水。鉴于此,本文拟建立发电量最大的优化调度模型。

2.1. 常规调度模型

本文采用定出力求解常规调度模型。对于日调节水库而言,丰水时段尽量利用有限的调节库容多蓄水,减少不必要的弃水;之后利用水库蓄水补充发电流量,提高水量利用率,增加发电量[9] [10]。采用定出力方法的计算步骤如下:

1) 由计算时段内的平均入库径流量确定起始时段的调节流量 Q_p , 计算初始假定的定出力值 N_R ;

2) 由 Q_p 查得下游平均水位 Z_d , 假定发电流量 Q_F , 根据水位库容曲线确定上游平均水位 Z_u , 根据式(1)得到平均水头 H ;

3) 由式(2)计算出各时段平均出力 N_{Rj} , 若 $N_{Rj} \neq N_R$ 则重设 Q_p 并确定发电流量。当入库流量小于发电流量时, 不足水量由水库供给; 当入库流量大于发电流量时, 多余水量储存在水库中, 蓄满后水库弃水;

4) 计算时段结束时, 水库末水位回到起调水位, 否则重新设定 N_R , 如此循环;

5) 按式(3)计算平均电量。

$$H = Z_u - Z_d - \Delta H \quad (1)$$

$$N_R = kQ_F H \quad (2)$$

$$E = 24N_R / 10000 \quad (3)$$

式中: k 为水电站出力系数; ΔH 为平均水头损失; E 为电站日平均发电量。

2.2. 优化调度模型的建立及求解

班多水电站的主要任务为发电, 不承担下游防洪任务。因此, 本文所建立的优化调度模型目标函数为发电量最大, 将防凌、防洪等其他综合利用要求转为约束条件。

(1) 目标函数

$$E_{\max} = \sum_t^T N_t \times \Delta t \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: E 为班多水库调度期内总发电量; N_t 为水库 t 时段平均出力; Δt 为时段长; T 为时段数目。

(2) 约束条件

① 水库水位:

$$Z(t) = Z_c, Z(t+1) = Z_e \quad (5)$$

式中: $Z(t)$ 、 $Z(t+1)$ 分别表示水库 t 时段初和时段末的蓄水位, Z_c 表示调度期初水库蓄水位, Z_e 表示调度期末水库蓄水位。

② 水电站出力约束:

$$N_{\min}(t) \leq N(t) \leq N_{\max}(t) \quad (6)$$

式中: $N(t)$ 、 $N_{\min}(t)$ 、 $N_{\max}(t)$ 分别表示电站 t 时段平均出力、最小和最大出力。

③ 防凌约束: 防凌时段从 11 月初开始, 次年 3 月底结束。

$$QF_{\min}(t) \leq q(t) \leq QF_{\max}(t) \quad (7)$$

式中: $q(t)$ 表示水库 t 时段出库流量; $QF_{\min}(t)$ 、 $QF_{\max}(t)$ 分别表示水库 t 时段防凌限制最小、最大出库流量。

④ 出库流量约束:

$$q_{\min}(t) \leq q(t) \leq q_{\max}(t) \quad (8)$$

式中： $q_{\min}(t)$ 、 $q_{\max}(t)$ 分别表示水库 t 时段最小、最大允许出库流量。

⑤ 水量平衡约束：

$$V(t+1) = V(t) + (Q_{i1} - Q_{i2})\Delta t \quad (9)$$

式中： Q_{i1} 、 Q_{i2} 分别表示水库 t 时段入库、出库流量； $V(t)$ 、 $V(t+1)$ 分别表示水库 t 时段初和时段末的库容。

⑥ 其他非负约束。

班多水库的优化调度为单目标问题，采用遗传算法求解。日调度时以小时为计算时段；周调度时以日为计算时段。求解发电量最大模型的步骤为：

Step 1: 确定种群规模，最大迭代代数。 M 为群体大小，本文中日调度为 50，周调度为 10； T 为遗传算法的终止进化代数，日调度为 200，周调度为 100。

Step 2: 在水库水位可行变化范围内，随机选取 t 时段水库水位变化序列生成 $popsiz$ 组初始母体群。

Step 3: 以发电量作为适应度函数值，计算各染色体的发电量，找出最优个体。

Step 4: 采用“轮盘赌”模式的比例选择操作，找出适应度较高的一组染色体，即发电量最大的个体。

Step 5: 对群体进行交叉、变异和精英选择策略操作，得到新一代群体。本文交叉概率 P_c 为 0.3，变异概率 P_m 为 0.1。

Step 6: 判断是否满足终止条件，日调度拟定的最大进化代数为 200，周调度为 100。若满足条件，则比较每代个体的最优值，保存到目前为止的最优值，退出循环，并输出最优个体即最优解；若不满足条件，则以新一代群体为母体，转入 Step 3 继续执行。

3. 实例研究

黄河上游按地域划分为 2 段：龙羊峡以下至青铜峡河段为黄河上游的中下段，河段全长 918 km；龙羊峡以上为黄河上游的上段，即黄河源区，其中从鄂陵湖湖口以下至龙羊峡库尾的羊曲坝址，河段全长 1360 km [11]。黄河上游梯级电站是目前国内综合利用任务最多、涉及区域最广、调度运行最复杂的梯级水电站群，承担着向陕、甘、青、宁电网供电以及下游地区防洪、防凌、灌溉等综合利用的任务[12]。现阶段，黄河上游电站以防洪、防凌和发电为主[13]。

本文考虑黄河上游综合利用任务及水文气象资料，查阅相关文献[14] [15]，将调度时段分为春汛期(4~5 月)、汛期(6~10 月)和防凌期(11~翌年 3 月)。

研究区域概况示意图如图 1 所示。班多是黄河龙羊峡以上、海拔 3000 m 以下水电规划的第 2 个梯级电站，位于青海省兴海县和同德县交界处[16]，距下游龙羊峡水电站 176 km，坝址以上控制流域面积 10.8 万 km²。2010 年班多水电站首台机组投入运行，2011 年竣工。目前，班多为“以水定电”的单一运行方式：在非汛期保持均匀发电；枯水期来水减少，发电量减少；汛期来水较大，兼顾经济运行和安全运行，水库以中低水头运行，产生大量弃水。

班多水库正常蓄水位 2760 m，死水位 2757 m，死库容 880 万 m³，调节库容 200 万 m³；电站装机容量 360 MW，保证出力 46.1 MW。

本文以军功站 2010 年 1 月至 2015 年 12 月以小时为尺度的径流资料作为班多水库的入库径流过程，从中选取了 3 个典型日及典型周，分别为防凌期 2013 年 1 月 25 日，2013 年 1 月 22~28 日；春汛期 2012 年 4 月 1 日，2012 年 4 月 1~7 日；汛期 2012 年 9 月 7 日，2012 年 9 月 4~10 日。

3.1. 计算结果

图 2 和图 3 分别绘出班多水库日、周调度的水位过程。由图可知：

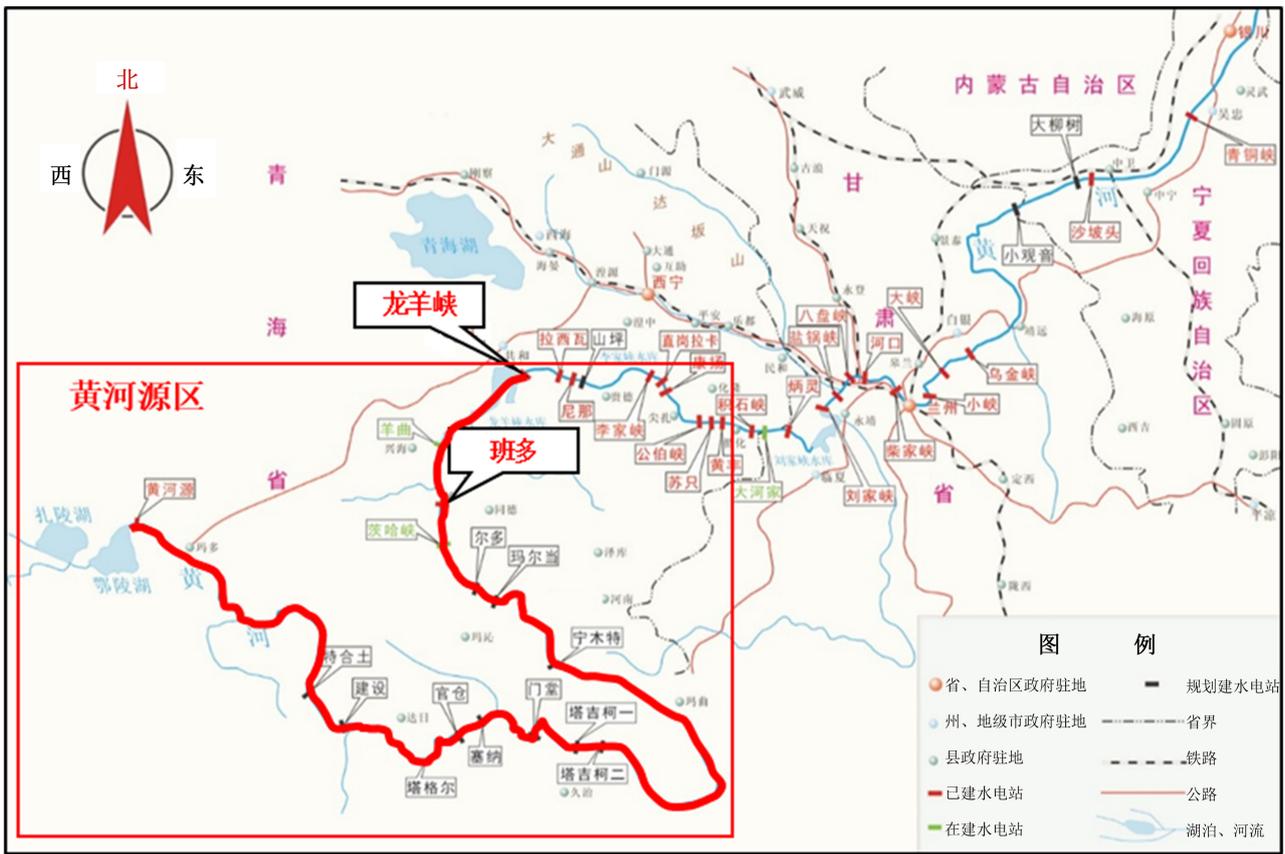


Figure 1. Schematic diagram of study area
图 1. 研究区域概况示意图

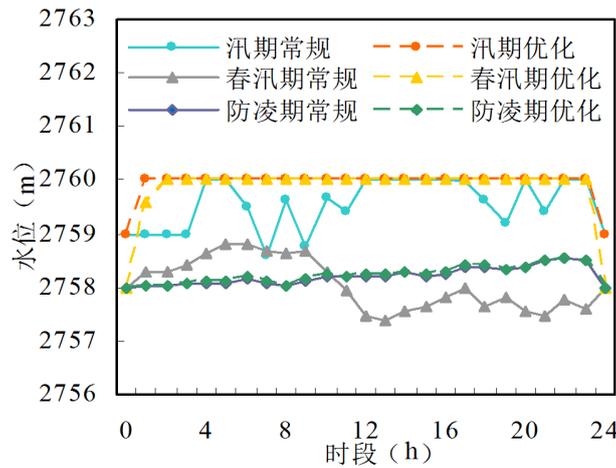


Figure 2. Water level processes of daily operation
图 2. 日调度水位变化过程

- 1) 防洪限制水位即正常高水位 2760 m，各调度期水位均在死水位和正常蓄水位之间，满足水位限制条件；
- 2) 春汛期水位从 2758 m 起调，常规调度时，水库保持中低水头运行；优化调度时，水库保持高水头运行；
- 3) 汛期，水位从 2759 m 起调，常规调度时，水库水位在 2759~2760 m 上下波动；优化调度时，水库始终保持高水头运行；

4) 防凌期水位从 2758 m 起调，由于防凌期来水过少，前期按保证出力发电，多蓄水以抬高水位，最后加大出力发电，将水位回落至 2758 m；常规调度中，均按保证出力调节，前期出库流量少，故水位变化过程与优化调度基本一致。

图 4 为班多水库日、周调度不同调度期的弃水流量。可以看出：(1) 在进行优化后，调度期内弃水显著减少；(2) 在防凌期，定出力常规调度的出力为 46.2 MW，最后一刻水位回落至死水位后产生了少量弃水，而进行优化后无弃水产生。

图 5 为班多水库日、周调度不同调度期的出力值。可以看出：采用优化算法后，各调度期内平均出力均大于定出力，即发电量明显加大。

通过水位、弃水和出力的对比，各调度期的发电量均有明显提高，且弃水大幅减少，证明了在各时段入库流量不变的情况下，运用优化算法能在短期调度期内提高水电站的综合发电效益和弃水利用率。对比水位过程线可知：优化调度前期抬高水位多蓄水、后期高水位多发电的情况，充分反映了调节性能小的电站短期优化调度规律。

日优化调度与周优化调度的对比结果如表 1。由表 1 可知：1) 与日调度相比，周调度在春汛、汛期和防凌

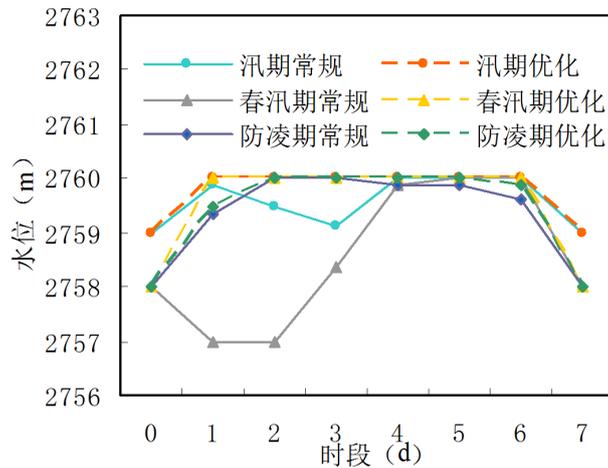


Figure 3. Water level processes of weekly operation
图 3. 周调度水位变化过程

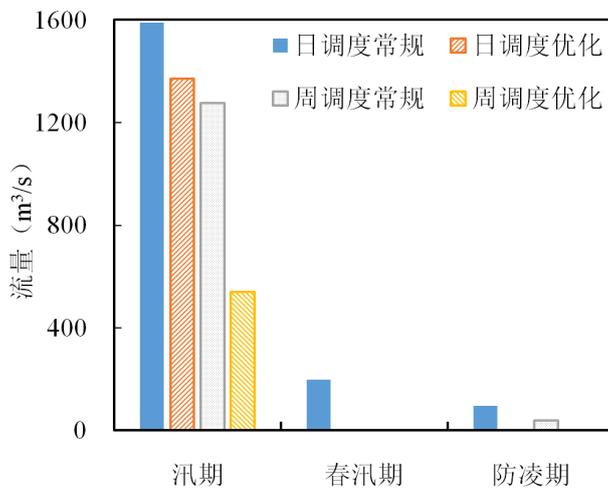


Figure 4. Abandoned water in different periods
图 4. 不同调度期弃水流量

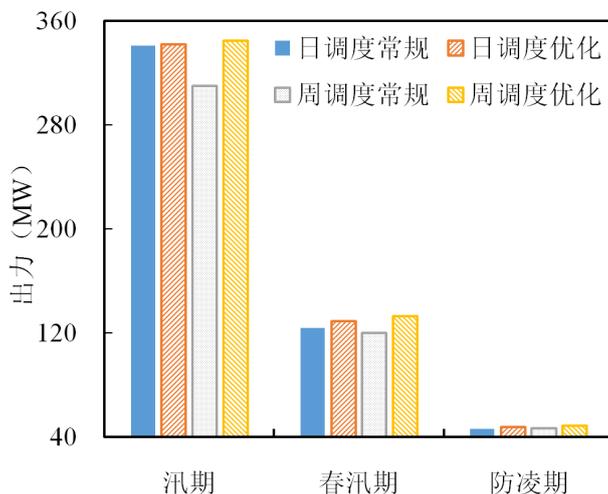


Figure 5. Output processes in different periods
图 5. 不同调度期出力值

Table 1. Comparison of daily and weekly optimal operation results

表 1. 日和周优化调度结果对比表

调度期	日优化		周优化	
	发电量/万 kW·h	弃水/(m ³ /s)	日平均发电量/万 kW·h	日平均弃水/(m ³ /s)
春汛期	309.79	0	319.21	0
汛期	819.72	1370	826.64	77
防凌期	114.07	0	116.08	0

期的增发电量分别是 9.42、6.92、2.01 万 kW·h；2) 周调度汛期的弃水较日调度减少了 1293 m³/s。可见，周调度的发电量效益与弃水利用率均高于日调度，其调度结果更为理想，说明班多水库具有周调度的潜力。

3.2. 水库运行规律

1) 防洪减灾要求

防洪减灾要求包括防洪和防凌要求，黄河源区班多水电站至龙羊峡河段防洪和防凌任务主要由下游多年调节水电站龙羊峡控制。因此，班多水库一般不承担水库下游防洪和防凌任务，只需预留足够防洪、防凌库容，以保证自身运行安全。

2) 水库水位运行规律

从发电量和弃水两方面，通过对比常规算法与优化算法的结果，考虑班多水电站单独工作时，春汛期水库从 2758 m 起调，前期少发电多蓄水，尽量维持正常蓄水位 2760 m，根据来水情况发电；汛期，水库从 2759 m 起调，前期多蓄水以抬高水位，高水头天然径流发电；防凌期水库从 2758 m 起调，由于来水过少，前期按保证出力发电以抬高水位，最后加大流量发电。

通过分析黄河上游各电站资料及班多水库实际情况，班多水库应预留部分防洪库容和防凌库容。因此，汛期从 2759 m 起调合理；防凌期为使水库库区不结冰或冰层较薄，以免增加水库库区的冰压力，从 2757 m 起调更为合理，且要避免防凌期库区水位不动；春汛期水库从 2760 m 起调，维持高水头运行，且要满足下游生态流量的要求。

4. 结论与建议

1) 短期优化调度极大的减少了弃水量，显著地增加了发电量，提高了水资源利用率和发电企业的经济效益；

2) 班多水库周调度结果较日调度更理想, 证明其具有周调节的潜力, 为班多水库开展日、周优化调度提供了技术支撑;

3) 结合班多水电站的实际运行情况, 获得了水库水电站初步的运行方式。下一步将深入开展黄河上游梯级水库群短期联合优化调度研究。

基金项目

水利公益性行业科研专项经费项目(201501058); 国家自然科学基金(51409210, 51179149, 51190093)。

参考文献 (References)

- [1] 丁学林. 经济运行方式在班多、苏只水库调度中的应用[J]. 青海电力, 2012(S2): 45-47, 51.
DING Xuelin. Application of economical operation mode in regulation of the Banduo and Suzhi reservoirs. Qinghai Electric Power, 2012(S2): 45-47, 51. (in Chinese)
- [2] JALALI, M. R., AFSHAR, A. and MARINO, M. A. Multi-colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problem. Water Resources Management, 2007, 21(9): 1429-1447.
- [3] 陈立华, 梅亚东, 董雅洁, 等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008(5): 550-556.
CHEN Lihua, MEI Yadong, DONG Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(5): 550-556. (in Chinese)
- [4] 朱彦刚. 白石水库调度方案探析[J]. 东北水利水电, 2016(3): 36-39, 71.
ZHU Yangang. Discussion on dispatching scheme of Baishi reservoir. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2016(3): 36-39, 71. (in Chinese)
- [5] 马跃先, 于健, 李生俊, 等. 黄河上游梯级水库防凌优化调度方案研究[J]. 人民黄河, 2012(2): 4-6.
MA Yuexian, YU Jian, LI Shengjun, et al. Optimal operation schemes of cascade reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River for preventing ice jam. Yellow River, 2012(2): 4-6. (in Chinese)
- [6] 靳少波, 沈延青. 黄河上游梯级电站水库联合调度方式探讨[J]. 电网与清洁能源, 2014(2): 98-100.
JIN Shaobo, SHEN Yanqing. Discussions on the joint scheduling mode for the reservoirs of cascade hydropower stations in the Upper Reaches of the Yellow River. Power System and Clean Energy, 2014(2): 98-100. (in Chinese)
- [7] 金文婷, 黄强. 龙羊峡和刘家峡梯级水电站水库调水调沙合理库容研究[J]. 水利水电快报, 2015(4): 38-41.
JIN Wenting, HUANG Qiang. Study on reasonable storage in water-sediment regulation of Longyangxia and Liujiaxia cascaded hydro-plant reservoirs. Express Water Resources & Hydropower Information, 2015(4): 38-41. (in Chinese)
- [8] 白夏, 戚晓明, 汪艳芳. 黄河上游梯级水库多目标水沙联合模拟优化调度模型[J]. 人民珠江, 2016(10): 12-17.
BAI Xia, QI Xiaoming and WANG Yanfang. Multi-objective joint simulation and optimization operation model of water and sediment for cascade reservoirs in the Upper Yellow River. Pearl River, 2016(10): 12-17. (in Chinese)
- [9] 周之豪. 水利水能规划[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
ZHOU Zhihao. Water resources and hydropower planning. 2nd Edition. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 邓胜权. 山区日调节小水电站水能计算[J]. 水电与新能源, 2015(11): 36-39.
DENG Shengquan. Hydropower energy calculation for small daily regulation hydropower stations in mountainous areas. Hydropower and New Energy, 2015(11): 36-39. (in Chinese)
- [11] 宋臻. 关于黄河上游水电开发的若干构想[J]. 西北水电, 2001(3): 7-10, 73.
SONG Zhen. Thoughts on hydropower development of the Upper Yellow River. Northwest Water Power, 2001(3): 7-10, 73. (in Chinese)
- [12] 畅建霞, 黄强, 田峰巍. 黄河上游梯级电站补偿效益研究[J]. 水力发电学报, 2002(4): 11-17.
CHANG Jianxia, HUANG Qiang and TIAN Wei'e. Study on compensation benefits of cascade hydroelectric power stations on Yellow River Upstream. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(4): 11-17. (in Chinese)
- [13] 王天宇, 董增川, 付晓花, 等. 黄河上游梯级水库防洪联合调度研究[J]. 人民黄河, 2016(2): 40-44.
WANG Tianyu, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Research on Upper Yellow River cascaded reservoirs in flood control operation. Yellow River, 2016(2): 40-44. (in Chinese)
- [14] 李雪梅, 王玲, 林银平, 等. 龙刘水库调节对黄河上游汛期水量变化的影响[J]. 人民黄河, 2008(11): 65-66.
LI Xuemei, WANG Ling, LIN Yinping, et al. Influences of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs regulation on water change in flood season of Upper Yellow River. Yellow River, 2008(11): 65-66. (in Chinese)

- [15] 李五勤, 吴成国, 王义民, 等. 基于风险分析的刘家峡水库最优防凌库容配置方案研究[J]. 水力发电学报, 2013(6): 76-82.
LI Wuqin, WU Chengguo, WANG Yimin, et al. Study on optimal allocation scheme for ice control capacity of Liujiaxia reservoir based on risk analysis. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013(6): 76-82. (in Chinese)
- [16] 张太祥, 许栋, 初云鹏. 班多水电站调速器事故配压阀的设计与应用[J]. 液压气动与密封, 2013(10): 9-11.
ZHANG Taixiang, XU Dong and CHU Yunpeng. The design and application of emergency distributing valve for Banduo hydropower plant governor system. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2013(10): 9-11. (in Chinese)