

Multi-Objectives Joint Operation of Reservoirs and Pumping Stations

Xu Ma¹, Tao Bai¹, Tao Qin², Jianxia Chang¹

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

²Hanjiang-to-Weihe River Basins Water Diversion Project Construction Co. Ltd., Xi'an Shaanxi
Email: baitao@xaut.edu.cn

Received: Mar. 23rd, 2017; accepted: Apr. 11th, 2017; published: Apr. 14th, 2017

Abstract

To verify the rationality of the design value in the design report and improve the water use efficiency, the feasibility of the preliminary operation mode, the Huangjinxia and Sanhekou reservoirs and pumping stations of the water diversion project from the Han to the Wei River were selected as the targets in this paper. Multi-objective joint operation model with the largest amount of water transfer and the maximum power generation is established and solved by NSGA-II. To highlight the advantages of optimizing the model, conventional operation model was established as a comparison model. Moreover, reasonability of design value is certified and feasibility of the initial operation rule is revealed by model analysis and calculation. Results showed that the multi-objective joint operation improved the runoff utilization efficiency and increased the amount of water and power generation. Achievements obtained multi-objective equilibrium solution of reservoirs with different typical years, which provided a technical support for the operation of reservoirs and pumping stations, and provided the theoretical basis for reservoirs multi-objective operation.

Keywords

Reservoirs, Multi-Objective Operation, Equal Flow Discharge, NSGA-II, Typical Year

水库和泵站群的多目标联合调度研究

马旭¹, 白涛¹, 秦涛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陕西省引汉济渭工程建设有限责任公司, 陕西 西安
Email: baitao@xaut.edu.cn

收稿日期: 2017年3月23日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

作者简介: 马旭(1994-), 女, 陕西咸阳人, 在读硕士, 主要从事水资源系统工程方向。

摘要

为了验证设计报告中设计值的合理性及初拟运行方式的可行性,提高水资源利用效率,本文以引汉济渭工程调水区黄金峡水库和三河口水库及其泵站群为研究对象,建立了兼顾调水量最大与梯级发电量最大的多目标优化调度模型,采用NSGA-II求解模型。同时,为了凸显优化模型的优越性,建立求解了常规调度模型作为对照模型。通过模型分析计算,论证了设计值的合理性,揭示了初拟调度运行方式的可行性。结果表明:多目标联合优化调度提高了径流利用程度和利用效率,显著增加了调水量和发电量。研究成果获得调水区水库群不同典型年的多目标均衡解,为引汉济渭调水区水库群及其泵站的运行提供了技术支撑,为实现水库群多目标运行调度提供理论依据。

关键词

水库群,多目标调度,等流量,NSGA-II,典型年

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

跨流域调水是缓解水资源供需矛盾,改变水资源时空分配不均的有效措施。目前国内外已有很多调水规划,如美国加利福尼亚调水工程[1],澳大利亚雪山调水工程[2]及中国南水北调工程[3]。引汉济渭工程是为解决陕西关中地区所规划的调水工程,它将汉江丰沛的水资源通过黄金峡、三河口水库群、泵站群调配到水资源短缺的关中地区,以缓解关中地区的水资源短缺问题,促进社会经济可持续发展。针对引汉济渭工程前期规划的研究成果较多。2005年,许晓等对陕西省南水北调工程中线调水规划进行研究[4];2011年,朱兴华开展引汉济渭工程调水区的联合调度研究,调度结果较好的满足了受水区要求[5];2011年,畅建霞等对引汉济渭调水工程水资源配置进行研究[6];2013年,张克强等对引汉济渭调水工程水资源管理问题进行了探讨[7];2015年杨柳等开展基于引汉济渭工程的跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究,结果表明引汉济渭工程实施对受水区具有重要意义[8];2016年,马永胜等基于引汉济渭工程的水库联调系统的开发与应用,确定了引汉济渭各水库的调度运行方式[9]。

前期对引汉济渭工程的诸多研究着重于理论研究和探索层面,主要集中在水资源模拟配置、单目标调度等方面,缺乏在规划设计审批确定的条件下开展水库群、泵站群多目标的联合调度研究。2015年5月,引汉济渭工程初设获批及项目建议书通过水规总院咨询,拉开了工程施工建设的序幕。目前,黄金峡、三河口水库群、泵站群正如火如荼地建设,对于调水区的水库群、泵站群而言,缺少明确有效的优化调度规则和运行方式。鉴于此,本文以引汉济渭调水区黄金峡、三河口水库群、泵站群为研究对象,建立常规和多目标优化模型,分别采用等流量和NSGA-II求解调度模型,以论证优化调度较常规调度的优越性,揭示调水区各调控目标之间的量化规律。研究成果对于提高供水保证率、优化受水区水资源的配置,实现水资源的高效、可持续利用。为引汉济渭黄金峡、三河口水库及其泵站的运行提供了技术支撑,为引汉济渭调水区黄金峡、三河口水库联合调度运行提供了参考依据。

2. 问题描述

2.1. 工程概况及规划

引汉济渭工程分为调水工程、输配水工程两大部分。调水工程由调水区水库群、泵站群及秦岭隧洞组成,

包括位于陕南汉中盆地以东的洋县境内汉江干流的黄金峡水库及其泵站，地处佛坪县与宁陕县交界的子午河中下游的三河口水库及其泵站；秦岭输水隧洞以汉江干流黄金峡水利枢纽的泵站抽水池为起点，出口设置在秦岭北麓渭河支流的黑河金盆水库下游黄池沟，其中，黄三段起点接黄金峡泵站出水池，终点位于三河口水利枢纽坝前约 300 m 处右岸的控制闸，越岭段，起点接输水隧洞控制闸，终点位于渭河支流的黑河金盆水库下游黄池沟。根据引汉济渭工程的《受水区水资源配置》专题报告确定引汉济渭工程受水区内为渭河两岸的城市群工业和城镇、农村生活供水；受水区外为冯家山灌区、石头河灌区、宝鸡峡塬上灌区、宝鸡峡塬下灌区、羊毛湾灌区、金盆水库灌区、交口抽渭灌区。引汉济渭工程示意图如图 1 所示。

引汉济渭各水库、泵站参数如表 1。本阶段研究中将黄金峡水库作为径流式水库。在调水过程中，黄金峡

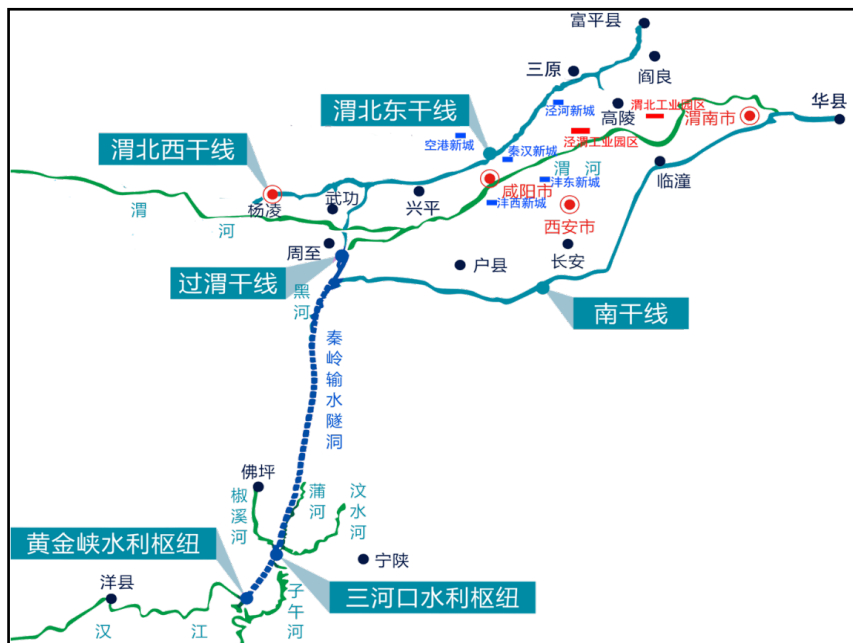


Figure 1. Schematic diagram of water diversion project from Hanjiang River-to-Weiwei River

图 1. 引汉济渭工程示意图

Table 1. Characteristics of reservoir and hydropower station

表 1. 水库电站特征参数

水库名称	黄金峡	三河口	
水库参数	正常蓄水位/(m)	450	643
	死水位(m)	440	558
	总库容亿(m ³)	2.29	7.1
	调节库容亿(m ³)	0.92	6.49
	生态流量	25 m ³ /s	2.7 m ³ /s
泵站特征参数	装机容量(MW)	129.5	27
	装机台数(台)	7	3
	装机容量(MW)	135	45
电站特征参数	保证出力(MW)	8.6	2
	设计流量(m ³ /s)	435.3	72.71
	加权平均水头(m)	36.5	82.8

处为坝前泵站抽水，供水流量不参与发电；三河口水库作为为年调节水库，泵站为自流供水不耗能，并且供水可用于发电。

根据国家发展和改革委员会对引汉济渭工程项建阶段的批复意见(发改农经[2011]1559号文)：引汉济渭工程规划近期多年平均调水 10 亿 m^3 ，远期在南水北调中线后续水源工程建成后，多年平均调水 15 亿 m^3 。初拟采取“一次立项，分期配水”的建设方案，逐步实现 2020 年配水 5 亿 m^3 ，2025 年配水 10 亿 m^3 ，2030 年配水 15 亿 m^3 。

可研阶段针对调水工程调度运行方式水利部水规总院水总设[2012] 33 号文的主要审查意见为：原则同意本阶段初拟的黄金峡水库和三河口水库调度运行方式，即：当黄金峡泵站抽水流量小于受水区需水要求时，由三河口水库通过连接洞补充供水至秦岭隧洞，黄金峡不抽水时，全部需水由三河口水库供水至秦岭隧洞；当黄金峡泵站抽水流量大于受水区需水要求时，多余的水量通过连接洞由三河口泵站抽水入三河口水库存蓄；当黄金峡泵站抽水流量等于受水区需水要求时，泵站抽水直接到秦岭隧洞至黄池沟。

2.2. 现存问题

目前，黄金峡、三河口两座水库均属在建工程，尚缺少明确有效的调度规则。初设及可行性研究报告拟定的调度运行方式是否合理？调水与发电转换之间存在何种联系？黄金峡、三河口水库如何协同调水？相比常规模型，优化模型优化在哪些方面？尚存在诸多问题亟待深入研究。本文采用黄金峡水库先供水，三河口水库补水的原则进行调水，验证拟定的调度运行方式是否合理；建立和求解引汉济渭调水区水库群典型年常规调度模型，分析水库群常规调度转化规律，与设计值对比分析，验证设计值是否合理；建立并求解引汉济渭调水区水库群典型年多目标优化调度模，协同调控外调水量与发电量两个之间的此消彼长，相互矛盾的关系，获得调水区水库群不同典型年的多目标均衡解，分析水库群优化调度多目标转化规律；对比分析常规调度与多目标优化调度综合效益，揭示水库群的发电规律。

3. 水库和泵站联合调度模型

3.1. 等流量调节的常规模型

黄金峡水库为径流式调节水库，三河口水库为年调节水库，等流量调节时以三河口水库为主，黄金峡水库为辅。调节的思路为：黄金峡水库作为径流式调节水库没有调节能力，在满足保证出力的前提下，优先调水到控制闸，可调水量为 Q_H ，当来水较多，可调水量大于管道最大过流量 $70 m^3/s$ 时，可调水量为 $Q_H = 70 m^3/s$ ，其余水量用于发电，当发电流量大于设计流量 $435.3 m^3/s$ ，多余水量成为弃水直接下泄；三河口水作为年调节水库，根据各典型年的来水情况，对三河口水库进行等流量调节，将整个调节期划分为蓄水期和供水期，通过水量平衡原理进行调节计算[10]，利用水库兴利库容生成平稳的下泄过程，得到供水期调节流量为 Q_P ，蓄水期调节流量为 Q_f ，当黄金峡水库可调水量不足 $70 m^3/s$ ，三河口水库向控制闸补水 Q_s 。

$$W = \sum_{t=1}^T (Q_H + Q_s) \times \Delta t \quad (1)$$

式中： W 为调度期内水库的总调水； Q_H 为黄金峡调水量； Q_s 为三河口调水量。

3.2. 多目标优化调度模型

考虑调水和发电的引汉济渭水库多目标调度模型，以黄金峡与三河口水库引汉济渭总调水量最大和并联水库总发电量最大为目标，兼顾供水和发电的复杂水库多目标调度模型采用 Pareto 最优解的方式计算梯级多目标最优出库过程。

3.2.1. 目标函数

引汉济渭工程的首要目标是在满足保证率等约束条件下使系统调水量最大，在满足调水的情况下增加发电

量。由于黄金峡处为坝前泵站抽水，供水流量不参与发电，所以当黄金峡处调水量增大，将导致发电流量减少，发电量减少，调水量和发电量为两个相互矛盾的目标。因此，本文确定总调水量最大和总发电量最大两个目标函数。

$$\text{Max } W = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M Q_g(m,t) \times \Delta t \quad (2)$$

$$\text{Max } E = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M N(m,t) \times \Delta t \quad (3)$$

式中： W 为调度期内水库的总调水； $Q_g(m,t)$ 为调度期内第 m 水库第 t 时段的调水流量； E 为调度期内水库的总发电量； $N(m,t)$ 为调度期内第 m 水库第 t 时段的出力； T 表示调度时期的总时段数； t 表示调度时期内段编号； Δt 表示调度时长。

3.2.2. 约束条件

① 水量平衡约束

$$V(m,t+1) = V(m,t) + (Q_i(m,t) - Q_o(m,t) - q_t) \times \Delta t \quad (4)$$

式中： $V(m,t)$ 为水库第 i 时段库容； $Q_i(m,t)$ 为第 t 时段的入库流量； $Q_o(m,t)$ 为水库自流出泄流量； q_t 为第 t 时段调水流量。

② 下泄流量约束

$$Q_{o\min} \leq Q_o(m,t) \leq Q_{o\max} \quad (5)$$

式中： $Q_{o\min}$ 为水库下泄流量下限值； $Q_{o\max}$ 为水库下泄流量上限值。

③ 蓄水位约束

$$Z_{\min} \leq Z(m,t) \leq Z_{\max} \quad (6)$$

式中： Z_{\min} 为水库库水位下限值； Z_{\max} 为水库库水位上限值。

④ 电站出力约束

$$N_{\min} \leq N(m,t) \leq N_{\max} \quad (7)$$

式中： N_{\min} 为电站出力下限值； N_{\max} 为电站出力上限值。

⑤ 泵站出力约束

$$0 \leq N_b(m,t) \leq N_{b\max} \quad (8)$$

式中： 0 为泵站出力下限值； $N_{b\max}$ 为泵站出力上限值。

⑥ 供水管道过流能力约束

$$Q_{\min} \leq Q(m,t) \leq Q_{\max} \quad (8)$$

式中： Q_{\min} 为供水管道过流量下限值； Q_{\max} 为供水管道过流量上限值。

4. 模型的求解

4.1. 典型年的选取

黄金峡、三河口水库分别位于汉江的干支流。根据资料情况选取 1954 年 7 月~2009 年 6 月共计 55 年的径流资料作为数据基础。首先，对已有的多年径流量资料排频计算。利用皮尔逊-III 型曲线进行配线，得到各水库入库径流系列的分布参数及特征流量，结果见表 2。

黄金峡水库和三河口水库分别位于汉江的干支流，典型年的选取以干流的黄金峡水库为主。根据表 2 数据 $P = 5\%, 50\%, 95\%$ 所对应的径流量值作为丰、平、枯水年的设计值，从实测系列中选取与设计值相等或接近的年份作为丰平枯代表年。选出的代表年分别为丰水年 1983 年、平水年 1985 年、枯水年 1999 年。

4.2. 等流量调节

表 3 为丰水年三河口水库的入库径流量，根据表 3 数据进行等流量调节计算。

- 1) 根据表 3 来水情况进行试算，确定 7 月、9~10 月、6 月为蓄水期，得到调节流量 $Q_f = 62.7\text{m}^3/\text{s}$ 。
- 2) 试算得到其他月份为供水期，调节流量 $Q_p = 45.5\text{m}^3/\text{s}$ 。

根据上述步骤确定三河口水库平水年 7 月、9~10 月、6 月为蓄水期，调节流量 $Q_f = 30.5\text{m}^3/\text{s}$ ，1~5 月为供水期，调节流量 $Q_p = 27.9\text{m}^3/\text{s}$ ；枯水年三河口水库 6~7 月、9~11 月为蓄水期，调节流量 $Q_f = 13.7\text{m}^3/\text{s}$ ，其他月份为供水期， $Q_p = 29\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.3. 快速非支配遗传算法(NSGA-II)

水库优化调度是具有强约束、非线性、多阶段特征的组合优化问题，其核心问题就是建立合理的优化调度模型并选择合适的求解模型的方法[11]。目前，水库的优化调度传统方法主要有：线性规划[12]、非线性规划[13]、动态规划[14]、网络流规划[15]等。这些方法不同程度的存在收敛结果不稳定，“维数灾”，等问题。然而，另一些已经广泛应用在水库调度上随机搜索算法，例如：遗传算法[16]，粒子群算法[17]，蚁群算法[18]，差分进化算法[19]布谷鸟搜索算法[20]等具有原理简单，易于实现，全局寻优能力强等优点。其中，遗传算法(NSGA)是模拟自然界生物进化与机制的求解问题的一类自组织、自适应的人工智能技术，是在人工进化中完全模拟自然遗传机制进行优化传递。NSGA-II 主要是对 NSGA 的改进，NSGA-II 提出的精英保留策略，快速非支配排序策略和拥挤度策略很大程度上改善了传统多目标遗传算法收敛速度及全局搜索性能，NSGA-II 进行水库优化调度计算可从多个初始点开始寻优，能以较快速度找到全局最优解。引汉济渭水库群跨流域多目标调度属于多库联合调度，且发电量最大及调水量最大之间呈现出相互矛盾、此消彼长的关系。NSGA-II 计算简单且寻优效率高，尤其适应于两个相互矛盾目标。因此，本文采用 NSGA-II 进行水库群联合调度模型求解，具体流程可参照负汝安的《基于 NSGA-II 的水库多目标优化》[21]。根据文献中的流程求解引汉济渭水库群多目标调度模型，各参数设定为：决策变量个数 $V=12$ ，目标函数个数 $M=2$ ，迭代次数 $maxgen=100$ ，群体数量 $N=100$ ，交叉概率 $P_c=0.9$ ，变异概率为 $P_m=0.1$ 。

Table 2. Characteristics of runoff and frequency of Huangjinxia and Sanhekou reservoirs

表 2. 黄金峡和三河口水库特征径流量及特征频率

水库	多年平均径流量(亿 m ³)	Cv	Cs	Cs/Cv	不同特征频率的年径流量		
					5%	50%	95%
黄金峡	66.54	0.51	1.28	2.51	207.6	57.0	17.1
三河口	8.64	0.43	0.92	2.14	27.4	6.9	1.6

Table 3. Inflow of the Sanhekou reservoir in wet year

表 3. 丰水年三河口来水过程

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
来水/(m ³ /s)	126	19	229	38	11	8	6	5	4	17	60	15

5. 计算结果与分析

5.1. 常规调度

根据建立的常规调度模型，在初拟方案黄金峡优先调水，三河口补充供水的情况下，对三个典型年进行等流量调节，获得各典型年的调度结果，结果包括各典型年各水库水位、下泄流量、调水量、发电量过程。鉴于篇幅有限，本文仅列出丰水年的结果，如表 4。

由表 4 可以看出：丰水年黄金峡水库、三河口水库水量变化满足水量平衡条件，各电站出力均大于保证出力，小于电站装机容量，满足出力要求，下泄流量大于生态流量，满足下游生态需求。黄金峡调水量为 17.80 亿 m³，占总调水量 88.1%；三河口调水量为 2.35 亿 m³，占总调水量 11.2%。

由平水年、枯水年计算结果可知：

1) 平水年黄金峡、三河口水量变化满足水量平衡条件，各电站出力均大于保证出力，小于电站装机容量，满足出力要求，下泄流量大于生态流量，满足下游生态需求。黄金峡调水量为 13.9 亿 m³，占总调水量 83.9%；三河口调水量为 2.74 亿 m³，占总调水量 16.1%。

2) 枯水年个别月份出现出力和生态破坏的情况。主要原因是来水急剧减少。黄金峡调水量为 6.07 亿 m³，占总调水量 57.8%；三河口调水量为 4.44 亿 m³，占总调水量 42.2%。

利用典型年径流资料，代入常规调度模型中，其中各典型年调水量，发电量结果如图 2，图 3 所示。

由图 2、图 3 可知：1) 丰水年调水量 20.22 亿 m³，平水年调水量 16.43 亿 m³，枯水年调水量 10.51 亿 m³。2) 丰水年发电量大于泵站耗电量，净发电量为正值，平水年和枯水年发电量均小于泵站耗电量，净发电量为负值。3) 丰平枯三个典型年平均调水量为 15.75 亿 m³，略大于设计值多年平均调水量 15 亿 m³，统计各月出力情况，黄金峡发电保证率为 97.2%，大于设计保证率 75%，表明设计值可以实现，论证了设计值的合理性。4) 各典型年总调水量、发电呈下降趋势，即：随着来水的减少，调水量减少，发电量减少，与实际情况相符，调度结果合理，可靠。

Table 4. Conventional results in wet year

表 4. 丰水年常规调度结果

月份	黄金峡					三河口					
	入库	发电	调水	出库	出力	入库	发电	调水	出库	出力	水位
	m ³ /s	m ³ /s	亿 m ³	m ³ /s	MW	m ³ /s	m ³ /s	亿 m ³	m ³ /s	MW	m
7	1182	435	1.84	1112	135	144	62.7	0	62.7	18	606
8	684	435	1.84	614	135	85	62.7	0	62.7	32	614
9	1022	435	1.84	952	135	125	62.7	0	62.7	38	628
10	974	435	1.84	904	135	143	62.7	0	62.7	45	643
11	246	176	1.84	176	64	23	45.5	0	45.5	35	639
12	143	144	0	144	52	11	45.5	0	45.5	33	633
1	89	30	1.54	30	11	6	45.5	0.28	35.0	30	624
2	63	30	0.86	30	11	5	45.5	0.95	9.4	27	615
3	56	30	0.68	30	11	5	45.5	1.12	2.7	23	602
4	108	38	1.84	38	14	8	45.5	0	45.5	17	586
5	168	99	1.84	99	36	19	45.5	0	45.5	10	562
6	261	191	1.84	191	69	41	45.5	0	45.5	5	558
合计			17.8					2.35			

各典型三河口水位变化过程如图 4 所示。

各典型年黄金峡、三河口月下泄流量过程如图 5，图 6 所示。

由图 4 可知：1) 各典型年水位变化过程基本一致，各水位均在死水位和正常高水位之间，满足水位限制条件；2) 平水年和枯水年年最高水位明显低于丰水年。主要原因是：平水年、枯水年来水的减少，水库可蓄水量减少，调度期内无法蓄至高水位，丰水年从死水位 558 m 起调，水库保持高水头运行，平水年和枯水年从死水位 558 m 起调，水库保持中低水头运行。3) 各典型年水库水位在蓄水期上升，枯水期水位回落，体现了水库“蓄丰补枯”的特点，调度结果可靠、合理。

由图 5、图 6 可知：1) 黄金峡水库 7~10 月汛期下泄流量很高，随着来水减少非汛期下泄流量迅速减少，

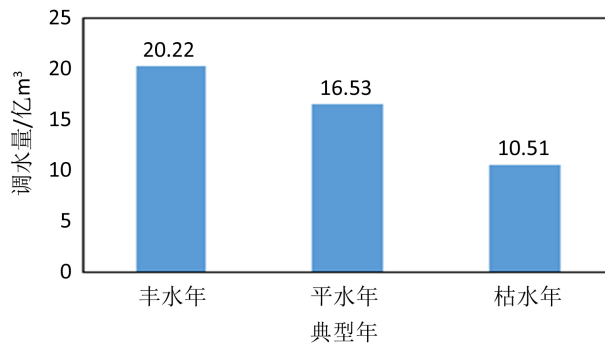


Figure 2. Total amount of water in typical year
图 2. 各典型年总调水量

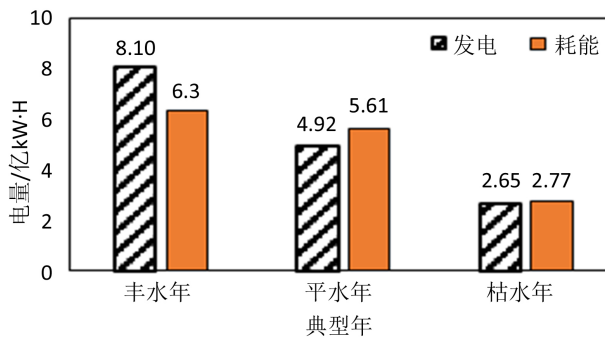


Figure 3. Power generation and consumption in typical year
图 3. 各典型年总发电量 - 耗电量

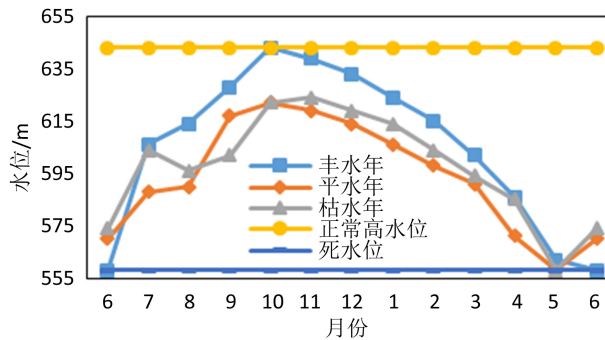


Figure 4. Water level process of Sanhekou under conventional operation
图 4. 常规调度的三河口水位过程

表明汉江干流径流分布不均匀，汛枯界限分明。丰水年、平水年各月下泄流量均大于生态流量 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ，满足下游生态需求，枯水年黄金峡 8 月、3 月、5 月下泄流量小于生态流量，下游生态遭到破坏；2) 三河口水库，典型年各月下泄流量呈现相同的趋势，原因是：三河口水库在未补充调水的月份按调节流量下泄，典型年各月下泄流量均大于等于生态流量 $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ，满足了下游河道的生态需求。

5.2. 多目标调度

根据建立的优化调度模型，在初拟方案黄金峡优先调水，三河口补充供水的情况下，对三个典型年进行调节计算，获得各典型年的优化调度结果如下，结果包括各典型年各水库水位、下泄流量、调水量、发电量过程及各典型年发电与调水的 Pareto 曲线。

利用典型年的径流资料，代入多目标调度模型中，求得各典型年调水量，发电量结果如图 7，图 8 所示，各典型三河口水位变化过程为图 9 所示。

1) 经水量平衡方程验证，黄金峡、三河口调水结果均满足等式要求，计算结果正确；

由图 7、图 8 可知：1) 多目标优化调度丰水年调水量为 20.22 亿 m^3 ，平水年调水量为 17.54 亿 m^3 ，枯水年调水量为 11.90 亿 m^3 ，丰水年和枯水年发电量大于泵站耗电量，净发电量为正值，平水年发电量均小于泵站耗电量，净发电量为负值；2) 各典型年平均调水量为 16.55 亿 m^3 ，大于设计值多年平均调水量 15 亿 m^3 ；黄金峡发电保证率为 97.2% ，大于设计值 75% ，表明设计值可以实现，论证了设计值的合理性。3) 各典型年总调水量、发电量呈明显的下降趋势，即：随着来水的减少，调水量减少，发电量减少，与常规规律相符，调度结果合理，可靠。

由图 9 可知：各典型年各水位均在死水位和正常高水位之间，满足水位限制条件；丰、平、枯三个典型年最高水位逐渐降低，原因是：随着典型年来水的减少，可蓄水量减少，最高水位逐渐降低，符合实际情况，调度结果合理可靠。

根据调水量 - 发电量绘的各典型年 Pareto 曲线如图 10 所示。

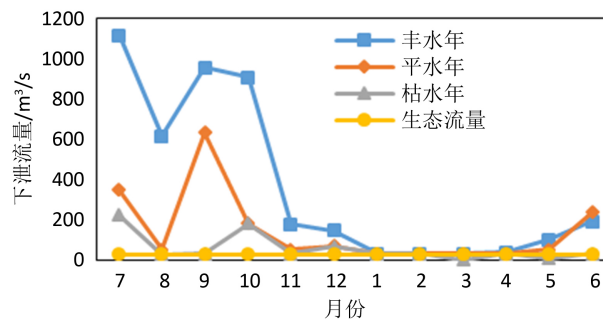


Figure 5. Monthly discharge in Haungjinxia reservoir

图 5. 黄金峡各月下泄流量

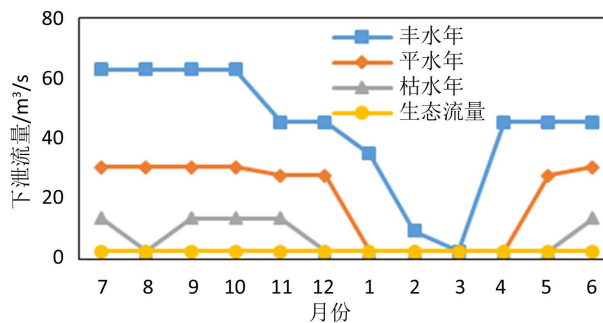


Figure 6. Monthly discharge Sanhekou reservoir

图 6. 三河口各月下泄流量

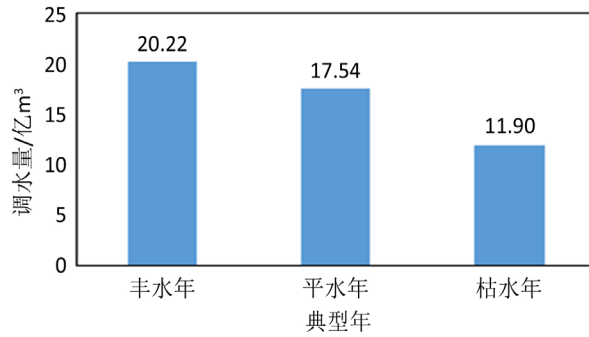


Figure 7. Total amount of water in typical years
图 7. 各典型年总调水量

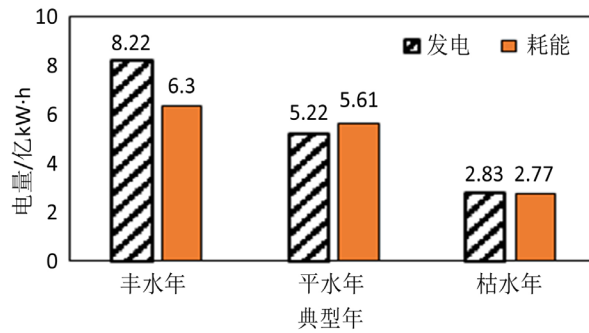


Figure 8. Power generation and consumption in typical years
图 8. 各典型年总发电量 - 耗电量

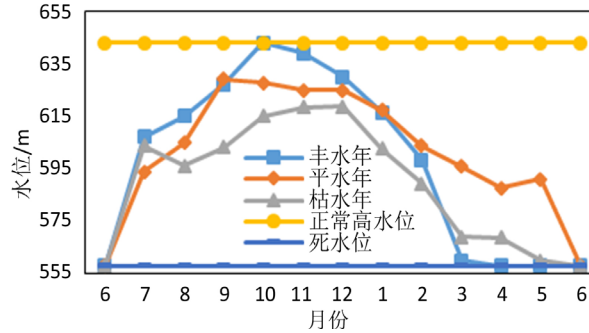


Figure 9. Water level process of Sanhekou under optimal operation

图 9. 优化调度下三河口水位过程

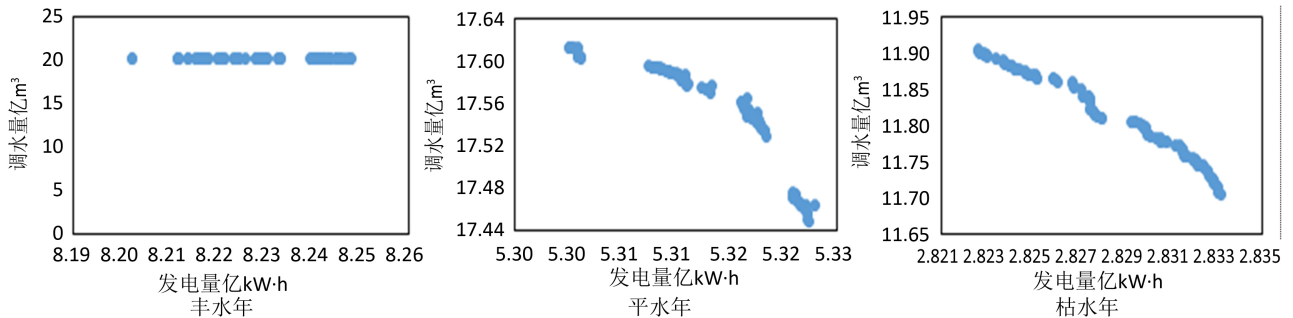


Figure 10. Pareto Curve of water transfer and power generation
图 10. 调水量 - 发电量多目标模型 Pareto 曲线

由图 10 可以看出：丰水年 Pareto 曲线为一条斜率为 0 的直线，发电量改变，供水量不变，即供水量为引汉济渭供水管道设计过水流量对应的最大年调水量值 20.2 亿 m³，在此条件下，发电量目标与供水量目标的敏感性很低，随着发电目标的优化，供水目标不再变化；

平水年 Pareto 曲线是一条分段曲线，前半段发电量 5.300 亿 kW·h 增加到 5.318 亿 kW·h，调水量从 17.61 亿 m³ 减少到 17.53 亿 m³，发电增加 0.018 亿 kW·h 供水量减少了 0.08 亿 m³，后半段前半段发电量 5.318 亿 kW·h 增加到 5.324 亿 kW·h，调水量从 17.53 亿 m³ 减少到 17.45 亿 m³，供水量减少 0.08 亿 m³，发电增加 0.004 亿 kW·h，相比前半段下降幅度较大，反映出：平水年调水量对发电量的敏感性有一个逐渐增强的过程；枯水年多目标供水量的最优值为 11.9 亿 m³，发电量的最优值 2.834 亿 kW·h，由 Pareto 曲线可知：发电从 2.821 亿 kW·h 增加大 2.834 亿 kW·h，调水从 11.90 亿 m³ 减少到 11.70 亿 m³，曲线为一条斜率接近-15 的直线，斜率较大，表明发电量的增加对调水量的影响较大，说明枯水年调水区水库总调水量目标对发电目标的敏感性极强。

各典型年 Pareto 曲线的变化趋势合理，表明调度结果是可靠的。丰水年 Pareto 曲线斜率为 0，表明发电量的增加对调水量没有影响，调水目标对发电目标的敏感性极低；平水年 Pareto 曲线为一条分段的曲线，前半段较平缓，后半段下降趋势明显，发电的增加对调水量的影响逐渐增强；枯水年 Pareto 曲线接近一条下降的直线，斜率约为-17。说明发电量的增加将导致调水的显著减少，调水目标对发电目标敏感性极强。可见，当水资源量有限时，多目标之间的敏感性越强，多目标优化调度的重要性就愈加突出。

5.3. 对比分析

图 11 为常规模型和多目标优化模型调水量对比情况，图 12 为发电量对比情况。

由图 11、图 12 可知：丰水年优化模型和常规模型调水量相同，平水年优化比常规多调水 1.01 亿 m³，调水增加 6.11%；枯水年优化比常规多调水 1.36 亿 m³，调水增加 12.9%。丰水年优化比常规多发电 0.12 亿 kW·h，

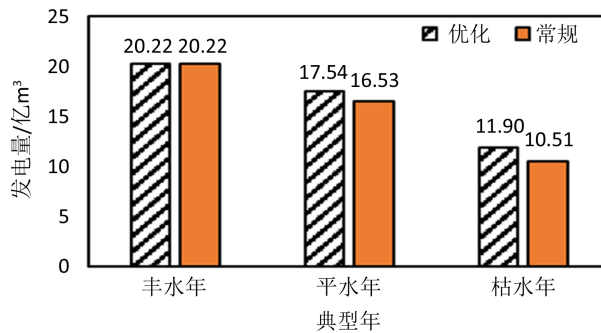


Figure 11. Total amount of water in each model

图 11. 各模型总调水量

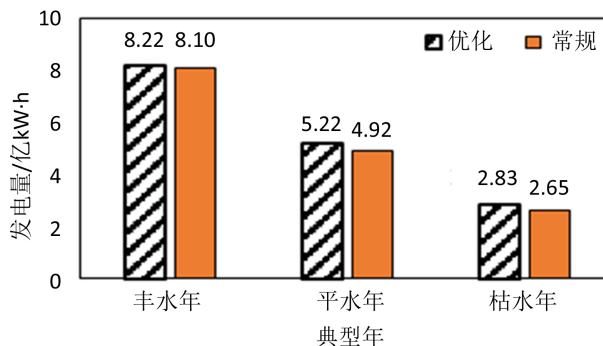


Figure 12. Total amount of electricity generated in each model

图 12. 各模型总发电量

发电增加 1.50%；平水年优化比常规多发电 0.3 亿 kW·h，发电增加 6.10%；枯水年优化比常规多发电 0.18 亿 kW·h，发电增加 7.0%。可见，优化模型的调水量和发电量均优于常规模型；同时，随着来水的减少，调水增加和发电增加率都成递增趋势，表明随着来水的减少，优化模型对调水和发电的优化效果越来越明显。

6. 结论与展望

本文以黄金峡、三河口水库群为研究对象，针对其实际运行中存在的问题，开展了常规调度和优化调度的研究，取得了以下成果：

1) 采用常规调度方法对水资源量进行调度，计算结果与设计值相比，与设计值相接近且略高于设计值，表明设计值是可以实现的，论证了设计值的合理性。

2) 根据常规调度和优化调度结果可知，在初拟的黄金峡先调水三河口补充调水的调度运行下，可以实现工程规划的调水目标，证实了初拟调度运行方式是可行的。

3) 优化模型通过对有限的水资源量进行优化计算，提高了径流利用程度和利用效率，各目标较常规调度均有提升和优化，同时根据 Pareto 曲线的变化论证了调水与发电之间是互相矛盾，此消彼长的关系。

4) 优化模型和常规模型对比分析发现：随着来水减少，优化效果越来越明显，当水资源量愈有限时，多目标之间的敏感性越强，多目标优化调度的重要性就愈加突出。因此，相比常规模型，当水资源量很少时，优化模型能够很大程度提高调水量和发电量。

基金项目

国家自然科学基金(51409210, 91325201)；水利部公益性行业科研专项(201501058)；陕西省水利科技计划项目(2016slkj-8, 2017slkj-16)；西安理工大学水利水电学院科研项目(2016ZZKT-15)。

参考文献 (References)

- [1] 汪秀丽. 国外流域和地区著名的调水工程[J]. 水利电力科技, 2003, 30(1): 1-7.
WANG Xiuli. Foreign watershed and regional famous water transfer project. Water Resources and Electric Power, 2003, 30(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 李学森, 于程一, 李果峰. 澳大利亚雪山调水工程管理综述[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 109-110.
LI Xuesen, YU Chengyi and LI Guofeng. A summary of management of snow diversion project in Australia. Yangtze River, 2008, 39(6): 109-110. (in Chinese)
- [3] 陈西庆. 跨国界河流跨流域调水与我国南水北调的基本问题[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(1): 92-97.
CHEN Xiqing. Inter-basin Water transfer across cross-border rivers and basic problems of South-to-North water diversion in China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(1): 92-97. (in Chinese)
- [4] 许晓. 陕西省南水北调工程中线调水规划方案研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2005.
XU Xiao. Study on the schemes of South-to-North water transfer within Shaanxi province. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] 朱兴华. 引汉济渭工程水源联合调度应用研究[J]. 水利规划与设计, 2012(6): 13-16.
ZHU Xinghua. Study on application of joint operation of the South-to-North water transfer project in Shaanxi province resources. Planning and Design, 2012(6): 13-16. (in Chinese)
- [6] 畅建霞, 姜瑾. 引汉济渭调水工程水资源配置研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 110-118.
CHANG Jianxia, JIANG Jin. Water dispatch of the South-to-North water transfer project in Shaanxi province. Journal of Nature Resources, 2011, 26(1): 110-118. (in Chinese)
- [7] 张克强, 杨耕读. 引汉济渭调水工程水资源管理问题探讨[J]. 中国水利, 2013, 22: 17-18.
ZHANG Keqiang, YANG Gengdu. Discussion on water resources management. China Water Resources, 2013, 22: 17-18. (in Chinese)
- [8] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 49-56, 212.
YANG Liu, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Joint water supply simulation of multiple local water sources and inter-basin water diversion. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6):49-56, 212. (in Chinese)

- [9] 马永胜, 惠蕾, 高小芳. 基于引汉济渭工程的水库联调系统开发与应用[J]. 陕西水利, 2016(2): 122-123.
MA Yongsheng, XI Lei and GAO Xiaofang. Development and application of reservoir joint system based on the South-to-North water transfer project in Shaanxi province. Shaanxi Water Resources, 2016(2): 122-123. (in Chinese)
- [10] 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 Ed. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999. (in Chinese)
- [11] 陈立华, 梅亚东, 董雅洁, 等. 改进遗传算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 550-556.
CHEN Lihua, MEI Yadong, DONG Yajie, et al. Adaptive genetic algorithm and its application in reservoir optimal dispatching. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 550-556. (in Chinese)
- [12] SHAWWASH, Z. K., SIU, T. K. and RUSSELL, S. O. D. The B.C. Hydro short term hydro scheduling optimization model. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1125-1131. <https://doi.org/10.1109/59.871743>
- [13] GUAN, X., LUH, P. B. and ZHANG, L. Nonlinear. Approximation in lagrange relaxation-based for hydrothermal scheduling. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 10(2): 772-778. <https://doi.org/10.1109/59.387916>
- [14] TRAVERS, D. L., KAYE, R. J. Dynamic. Dispatch by constructive dynamic programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(1): 72-78. <https://doi.org/10.1109/59.651616>
- [15] FRANCO, P. E. C., CARVALHO, M. F. and SOARES, S. A network low model for short term hydro-dominated hydrothermal scheduling problems. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 1016-1022. <https://doi.org/10.1109/59.317642>
- [16] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟. 结合广度搜索的遗传算法在水库调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 85-88.
ZHANG Zhongbo, ZHANG Shuanghu and JIANG Yunzhong. Genetic algorithm based on deep search and its application of reservoir optimal operation. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 85-88. (in Chinese)
- [17] 邓显羽, 彭勇, 叶碎高. 粒子群算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 90-94.
DENG Xianyu, PENG Yong and YE Suigao. Application of particle swarm optimization in the optimization of reservoir dispatching. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(5): 90-94. (in Chinese)
- [18] 徐刚, 马光文, 梁武湖. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 397-400.
XU Gang, MA Guangwen and LIANG Wuhu. Review on application of particle swarm optimization to operation of reservoirs. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 397-400. (in Chinese)
- [19] 郑慧涛, 梅亚东, 胡挺, 等. 改进差分进化算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(1): 57-61.
ZHENG Huitao, MEI Yadong, HU Ting, et al. Improved differential evolution algorithm and its application to optimal operation of cascade reservoirs. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(1): 57-61. (in Chinese)
- [20] 明波, 黄强, 王义民, 刘登峰, 白涛. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 341-349.
MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, LIU Dengfeng and BAI Tao. Cascade reservoir operation optimization based-on improved Cuckoo Search. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese)
- [21] 贲汝安, 董增川, 王好芳. 基于NSGA2的水库多目标优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 124-128.
YUN Ruan, DONG Zengchuan and WANG Haofang. Multi-objective optimization of reservoir based on NSGA2. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese)