

Reservoir Operating in Multi-Reservoir for Water Transfer System

Na Liu, Yu Li, Wei Ding, Bo Xu, Chi Zhang

Institute of Water Resources & Flood Control, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning
Email: nicolena1215@163.com

Received: Jun. 2nd, 2015; accepted: Jun. 22nd, 2015; published: Jun. 25th, 2015

Copyright © 2015 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

Abstract

In the inter-basin reservoirs joint scheduling, pilot scale to determine reservoir design reliability after each water user and allowed to happen damage depth of competition. Usually different damage depth of water is allowed to happen and is a constant value, when more or less the same in a continuous impact on reliability of water supply. In this paper, aiming at this problem, consider optimizing damage depth when scheduling rules to improve the reliability of water supply, in order to meet the requirements of water supply. Based on the H reservoir, Dahuofang reservoir and Biliuhe reservoir of inter-basin water transfer project as an example, in conventional scheduling rules and optimization after damage depth of water supply reservoir group of scheduling rules of joint scheduling, and carries on the comparative analysis of two kinds of scheduling schemes. Points out the advantages and disadvantages of two kinds of schemes for reservoir dispatching decision-making department provides a new thought of scheduling.

Keywords

Inter-Basin Water Transfer and Supply, Optimized Dispatching, Combined Dispatching Chart, Destroy Depth

跨流域水库群联合调度规则研究

刘娜, 李昱, 丁伟, 徐博, 张弛

大连理工大学, 水资源与防洪研究所, 辽宁 大连
Email: nicolena1215@163.com

收稿日期: 2015年6月2日; 录用日期: 2015年6月22日; 发布日期: 2015年6月25日

作者简介: 刘娜(1990-)女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事水资源规划及水库优化调度研究。

摘要

在跨流域水库群联合调度中,引水规模确定后水库各用水户的设计保证率和允许发生的破坏深度呈现竞争关系。通常情况下不同用水户所允许发生的破坏深度是一个定值,在遭遇连续枯水年时会对供水保证率产生影响,本文针对这一问题,在制定调度规则时考虑优化破坏深度来提升供水保证率,以满足供水要求。本文以H水库-大伙房水库-碧流河水库的跨流域调水工程为例,分别以常规调度规则和优化供水破坏深度后的调度规则进行水库群联合调度,并对两种调度方案进行对比分析,指出两种方案的优缺点,为水库调度决策部门提供了一个新的调度思路。

关键词

跨流域引水与供水, 优化调度, 联合调度图, 破坏深度

1. 引言

我国在跨流域水库群联合调度方面已开展了大量的理论与实践工作,一批学者相继对库群优化调度进行了研究:周惠成等[1]以受水水库弃水量最小作为目标,建立碧流河水库跨流域引水的调度模型,同时采用动态规划逐次逼近法优化求解;胡尧文等[2]研究浙江省跨流域调水工程中调水水库与受水水库联合调度时,运用聚合分解法以及并行运算制定引水规则;尹正杰、张建云等[3][4]根据水库不同供水目标,设置不同的限制供水线和限制供水系数,而限制供水系数设定在用水户供水允许破坏的深度范围内,对于用水户的损失较小,是目前应用广泛的供水调度图;王银堂等[5]通过调水水库调度图确定引汉水量,运用多层次分解协调的逐步迭代寻优算法使得整个水库联调系统达到效益最优;郭旭宁等[6]针对观音阁、茆窝及汤河水库组成以供水为主的混联水库群构建虚拟聚合水库,优化联合调度图并制定各水库的供水方案;方淑秀等[7]以引滦工程为例,采用聚集解集技术降维指导水库调度,同时还采取分级管理制度进行水库的联合调度。

然而上述研究大都固定了用水户的破坏深度,没有考虑用水户不同的破坏深度对供水保证率的影响,本文针对以H水库、大伙房水库和碧流河水库三库联合调度为实例对象,分别以常规调度规则和优化供水破坏深度后的调度规则进行水库群联合调度,并对两种调度方案进行对比分析,指出两种方案的优缺点,为水库调度决策部门提供了一个新的调度思路。

2. 水库群联合调度模型建立与求解

水库群跨流域引水与供水联合优化调度问题实质上是一个多水源、多用户的水资源优化配置和调度问题,其调度图可认为是各成员水库的引水与供水调度图的组合形式。在求解水库联合调度图时将历史长系列模拟与优化技术相结合[8],运用改进的遗传算法GA,对联合调度图中引水、供水调度规则进行优化,首先采用随机生成的方式产生初始种群,之后进行选择、交叉和变异等遗传操作,产生出新的较优种群,最后收敛到一个拥有最优适应度(目标函数)的解集,即迭代求出优化的水库引水与供水联合调度图。

2.1. 目标函数

水库跨流域调水涉及调水水库和受水水库,调出区水库的主要目的是保证自身供水任务的同时向外调水以满足受水水库工业与生活用水的增加,受水区水库主要是尽可能满足供水需求。因此,以所有水库的“弃水量”之和最小为目标建立水库群调度模型。

$$\min SU = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{SU_{i,t}\} \tag{1}$$

式中： SU 为水库群总弃水量； $SU_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的弃水量； N 为水库个数； T 为时段总数。

2.2. 约束条件

① 水量平衡约束；② 水库水位约束：水库蓄水量应约束在库容上限和死库容之间，库容上限分别为汛限水位和正常蓄水位；③ 跨流域引水量受管道最大引水能力的约束；④ 各用水户受破坏深度和供水保证率的约束。

2.3. 供水规则

供水调度图共有四条控制线，如图 1 所示，调度控制线将其分为三个分区，调度图中水库水位上限和死水位确定调度图的上下区间，农业供水限制线、工业与生活供水限制线确定水库是否限制供水。在一定时段内：当水库水位位于农业限制供水线之上、水库最高蓄水位之下时，水库工业、农业供水均按需供水；当水库水位位于农业限制供水线之下、工业与生活限制供水线之上时，工业正常供水，农业供水按限制系数限制供水；当水库水位位于工业与生活供水限制线之下、死水位之上时，工业、农业供水均按各自的限制系数限制供水。一般农业供水限制系数为 0.7，工业生活供水限制系数为 0.9，即其允许的破坏深度分别为 0.3 和 0.1。

2.4. 引水规则

水库引水涉及调水水库和受水水库，受水水库的引水决策是调水水库的调水调度图和受水水库的引水调度图的一个组合决策过程[9]。

如图 2(a)是受水水库的引水调度图，图中共四条控制线，包括水库水位上限(汛限水位和正常蓄水位)、引水控制线 1 (不引水线)、引水控制线 2 (满引水线)和死水位，四条控制线将调度图划分为三个分区。在一定时段内：当水库水位较高，即位于引水 IV 区时，水库不引水；当水库水位位于引水 V 区时，水位位于引水控制线 1 和引水控制线 2 之间，此时水库按一定的比例引水；当水库水位位于引水 VI 区时，水库按照各时段规划的最大引水能力引水，称为满引。

如图 2(b)是调水水库的调水调度图，图中共有三条控制线，包括水库水位上限(汛限水位和正常蓄水位)、调水控制线和死水位，三条控制线从上至下将调度图划分为可向外调水区 and 不可向外调水区。在一定时段内：当水库水位位于水库水位上限以下调水控制线以上，即可向外调水区，此时水库可向外引水；当水库水位位于调水控制线以下死水位以上，即不可向外调水区，此时水库不可向外调水。

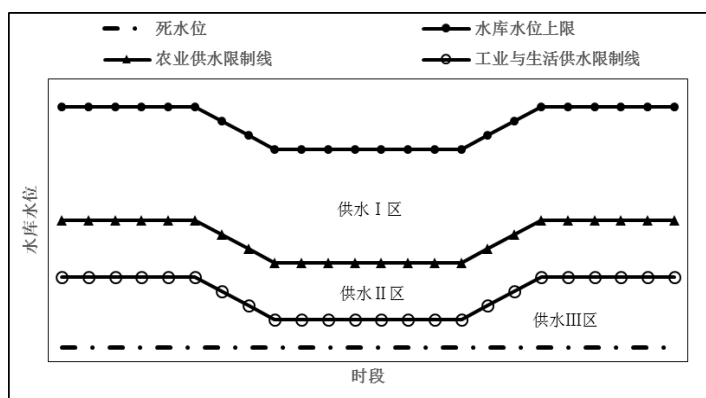


Figure 1. Water supply dispatching chart of joint optimal operation in multi-reservoir water transfer system

图 1. 跨流域水库群联合调度 - 供水调度图

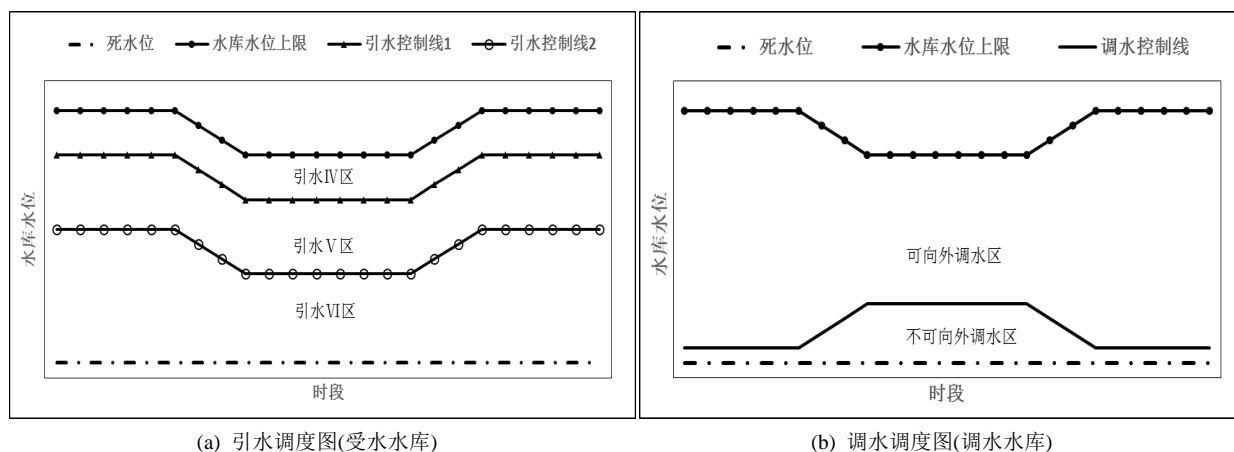


Figure 2. Water transferring chart of joint optimal operation in multi-reservoir water transfer system
图 2. 跨流域水库群联合调度 - 引(调)水调度图

3. 实例应用

3.1. 工程背景与意义

为解决辽宁省中部地区严重缺水问题,实现辽宁省各地区的水资源优化调控,位于H流域水量丰沛的H水库向大伙房水库跨流域调水,该工程于1994年8月在《H流域调水工程规划报告》中确定了大伙房水库从H水库的引水流量为 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 。同时,随着大伙房水库跨流域引水工程的实施,大伙房水库向碧流河水库跨流域调水工程应运而生,其规划碧流河水库年引水 3.0 亿 m^3 ,该工程不仅解决大连市工业生活用水,并改善大连的水生态环境。然而,近年来全球气候变化异常,干旱现象频现,对干旱年间跨流域引水工程的可引水量造成威胁,2014年大连遭遇枯水年,辽宁省水利部门相关文件提出大伙房水库无法保证向碧流河水库引水 3.0 亿 m^3 ,从而影响大连市各用水户的用水需求。因此,有必要研究H水库、大伙房水库和碧流河水库三个水库的联合优化调度,建立H水库、大伙房水库和碧流河水库的联合优化调度模型,在原调度规则的基础上,优化供水破坏深度进行优化调度,完善实际调水工程的规划调度。

3.2. 水库来水及用水资料的确定及整理

1) 选取各水库的入库径流:H水库、大伙房水库和碧流河水库选取1958~2006年共49年长系列资料,所采用的H水库入库径流资料来源于H水库管理局,大伙房水库的天然入库径流资料来自大伙房水库的调度工作手册[10],碧流河水库天然入库径流资料摘自碧流河水库的调度工作手册[11],以此为基础数据建立的水库群联合调度模型。

2) 各水库用水资料:H水库主要用水户为分水口下游供水和向大伙房水库的外调水;大伙房水库跨流域引水工程实施后,大伙房水库主要有三个用水户:一是大伙房水库主要负责的直供工业用水,二是下游区间工农业用水,即为大伙房水库与观音阁-稷窝水库联合调度的工农业供水量,由文献[12]得到该用水过程,三是向碧流河水库跨流域调水,用于增加大连地区的工业供水量;碧流河水库自身用水户有农业用水、工业生活用水以及环境用水,当引水工程实施后,碧流河水库的跨流域引水量将用于增加碧流河水库的工业生活供水量,农业用水及环境用水与引水前相同,其中农业和工业生活用水按调度规则供水,环境用水按100%供给。

H水库下游区间的用水包括河道环境生态用水以及少量工、农业用水,首先由下游区间的径流进行供水,不足部分由H水库进行补偿调度,采用历史长系列逐时段计算获得需要水库补偿的过程,即为H水库的需水过程,其多年平均需水量为 2.37 亿 m^3 ,在联合调度中必须100%满足。

按照规划要求, 碧流河水库每年可从大伙房水库满引 3.0 亿 m^3 , 调水用于增加大连市的工业用水, 因此采用采用试算法推求在 95% 保证率约束下的碧流河水库工业生活的最大可供水量, 其工业生活限制供水系数为 0.9, 最终得到碧流河水库工业最大可供水量为 4.81 亿 m^3 , 即确定了碧流河水库的工业需水量。

H 水库-大伙房水库-碧流河水库多年平均来水、用水及保证率要求见表 1。

3.3. 水库群丰枯遭遇频率

按表 2 的划分标准将三座水库的入库径流进行丰水年、平水年、枯水年的划分。其中, $\text{pf} = 37.5\%$ 和 $\text{pk} = 62.5\%$ 为丰枯划分的频率。H 水库、大伙房水库和碧流河水库径流组合的丰枯遭遇可分为 27 种类型, 其中丰枯同步的类型有 3 种, 丰枯异步的类型有 24 种。

根据三个水库的入库径流和表 2 的划分标准计算水库群丰枯遭遇频率: 三库来水丰枯同步频率为 54%, 三库来水丰枯异步频率为 46%。其中, H 水库-大伙房-碧流河水库三库同枯的频率为 16%, H 水库、大伙房水库以及碧流河水库在历史序列中 2000~2004 年发生严重的连续干旱现象。这对每年从大伙房水库引水 3.0 亿 m^3 供给大连市的规划造成威胁, 特别是出现连续枯水系列后大连市供水将面临严峻形势, 其长系列的供水保证率难以达到约束要求, 增加水库联合调度的难度。

3.4. H 水库-大伙房-碧流河水库引水与供水联合调度

调度模型 I: 由上述的目标函数与约束条件构成三库引水供水联合调度模型 I, 其中农业限制供水系数为定值 0.7, 工业与生活限制供水系数为定值 0.9, 优化三个水库的引水供水调度图并分析其调度结果;

调度模型 II: 供水保证率用来表明水库在供水调度过程中缺水时段出现的频率, 而破坏深度是对缺水程度的一种体现, 两者呈现竞争关系。该模型引入了破坏深度这一优化变量, 重新优化求得水库群联合调度的供水规则与引水规则, 使得各受水水库均能满足设计的供水保证率, 确保水库群的供水安全。

按照上述建模和求解方法, 对 H 水库-大伙房-碧流河水库群联合调度模型进行求解, 结合引(调)水与供水调度规则, 不断优化水库群联合调度图, 最终根据优化的水库群联合调度图及调度规则, 对历史序列(1958-2006 年)进行长系列模拟调度。表 3 为不同调度规则下, H 水库-大伙房-碧流河水库长系列模拟调度结果。

Table 1. The average water inflow and water use data of each reservoir's from 1958 to 2006

表 1. 各水库 1958~2006 年年均来水及用水资料

水库	项目	水量(亿 m^3)	保证率(%)	
H 水库	来水量	入库径流	37.14	
	需水量	下游需水	2.37	
		调至大伙房水库	水库调度决定	100
大伙房水库	来水量	入库径流	14.92	
	需水量	H 水库调水	水库调度决定	
		直供工业	20.0	95
碧流河水库	来水量	入库径流	5.38	
	需水量	下游区间工农业	5.68	
		调至碧流河水库	水库调度决定	
碧流河水库	来水量	入库径流	5.38	
	需水量	大伙房水库调水	水库调度决定	
		直供工业与生活	4.81	95
	需水量	农业用水	0.375	75
		环境用水	0.158	100

Table 2. Criteria for partitioning runoff into wet, normal and dry years
表 2. 丰水年、平水年和枯水年划分标准

类型	丰水年	平水年	枯水年
划分标准	$X \geq X_{pf}$	$X_{pk} < X < X_{pf}$	$X \leq X_{pk}$

Table 3. Annual mean regulation results by the combined reservoir dispatching models
表 3. H 水库-大伙房-碧流河水库长系列调节多年平均计算成果

水库	比较项目	调度模型 I	调度模型 II	
H 水库	来水量 (亿 m ³)	入库径流	36.9	36.9
	供水量 (亿 m ³)	下游环境	2.42	2.42
		调至大伙房水库	18.16	17.9
		水库蒸发损失/(亿 m ³)	0.623	0.623
		弃水量/(亿 m ³)	15.69	15.92
		来水量 (亿 m ³)	入库径流	14.77
大伙房水库		H 水库调水	17.44	17.2
		合计	32.21	31.97
		直供工业	19.76	19.83
	供水量 (亿 m ³)	下游区间工农业	5.65	5.65
		调至碧流河水库	2.31	2.14
		合计	27.72	27.62
		工业供水保证率/%	87.7	95.4
		水库蒸发损失/(亿 m ³)	0.595	0.595
		弃水量/(亿 m ³)	3.89	3.75
		缺水量/(亿 m ³)	0.24	0.17
碧流河水库	来水量 (亿 m ³)	入库径流	5.38	5.38
		大伙房水库调水	2.22	2.05
		合计	7.60	7.43
		直供工业	4.75	4.77
	供水量 (亿 m ³)	农业	0.353	0.358
		环境	0.158	0.158
		合计	5.26	5.29
		工业供水保证率/%	87	95.2
		农业供水保证率/%	76	76
		水库蒸发损失/(亿 m ³)	0.483	0.483
	弃水量/(亿 m ³)	1.85	1.67	
	缺水量/(亿 m ³)	0.08	0.06	

求解各调度模型，并分析调度结果(见表 3)：应用调度模型 I 时，大伙房水库直供工业供水保证率 87.7%，

碧流河水库工业生活供水保证率 87%，即保证率小于 95%，H 水库向大伙房水库年均调水 18.16 亿 m^3 ，大伙房水库向碧流河水库年均调水 2.31 亿 m^3 ；大伙房水库工业供水 19.76 亿 m^3 ，限制供水 216 次，碧流河水库工业供水 4.75 亿 m^3 ，限制供水 226 次。

应用调度模型 II 时，其引水规则与调度模型 I 一致，供水规则由于优化了破坏深度，受水水库工农业限制供水系数发生变化，当水库水位处于限制供水区时，大伙房水库工业按照工业限制供水系数 0.82 进行供水，碧流河水库工业和农业分别按工业限制供水系数 0.802 和农业限制供水系数 0.687 进行供水。大伙房水库和碧流河水库的工业生活供水保证率均达到 95% 以上，碧流河水库农业供水保证率达 76%，且在供水保证率均达标的情况下水库群供水未发生深度破坏，大伙房水库和碧流河水库的跨流域引水量和弃水量均小于调度模型 I 的调度结果。由此可见，针对特枯干旱年水库群的引水与供水联合调度，优化破坏深度可以保障水库群满足一定保证率的同时不发生深度破坏，且发挥水库跨流域引水的最大效益。

3.5. H 水库-大伙房-碧流河水库联合优化调度图

图 3 为应用调度模型 II 得到的水库群跨流域引水与供水联合调度图，其使用规则即为调度规则。

1) **供水规则：**大伙房水库和碧流河水库需根据各时段水库初始水位在调度图 3(b)和图 3(c)中的位置做出供水决策，其中大伙房水库仅有直供工业限制供水线，当水库水位处于水库水位上限和工业限制供水线之间，工业生活按需供水；当水库水位处于直供工业限制供水线和死水位之间，大伙房水库直供工业按 0.82 限制供水，碧流河水库工业生活按 0.802 限制供水；当碧流河水库水位处于直供工业限制供水线与农业限制供水线之间时，碧流河水库农业按 0.687 限制供水。

2) **引水规则：**H 水库和大伙房水库均需向外调水，根据某一时段各水库初水位处于其调度图中向外调水线线上或线下，制定水库是否向外调水的决策；大伙房水库和碧流河水库均作为跨流域引水的受水水库，其调度图均有两条引水线，即不引水线和满引水线，根据某一时段各水库初水位处于调度图的分区位置来制定引水决策，其中按“一定引水规则引水”时，引水量根据水库初水位在不引水线与满引水线之间按其比例进行折减。

3.6. 水库群联合调度模型 I 和模型 II 的结果分析

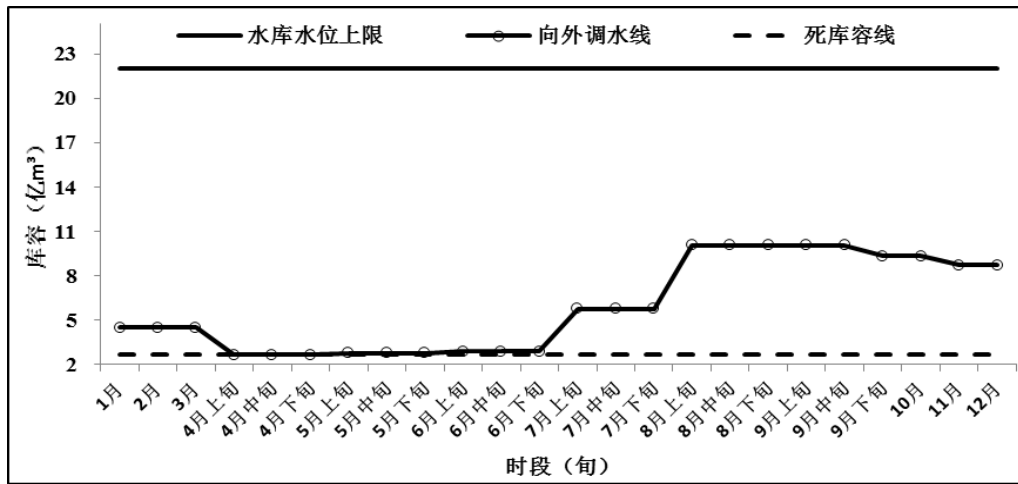
1) 受水水库的供水量对比分析

应用调度模型 II 优化破坏深度后，大伙房水库年均直供工业供水量增加了 800 万 m^3 。大伙房水库在 49 年历史调度过程中，有 34 个年份水库直供工业供水量相等，有 10 年调度模型 II 的供水量大于模型 I，其余 5 年调度模型 II 的供水量小于模型 I，见图 4 为不同求解模型下大伙房水库的供水量变化图，图中仅列出模型 I 和模型 II 供水量不等的 15 个年份。

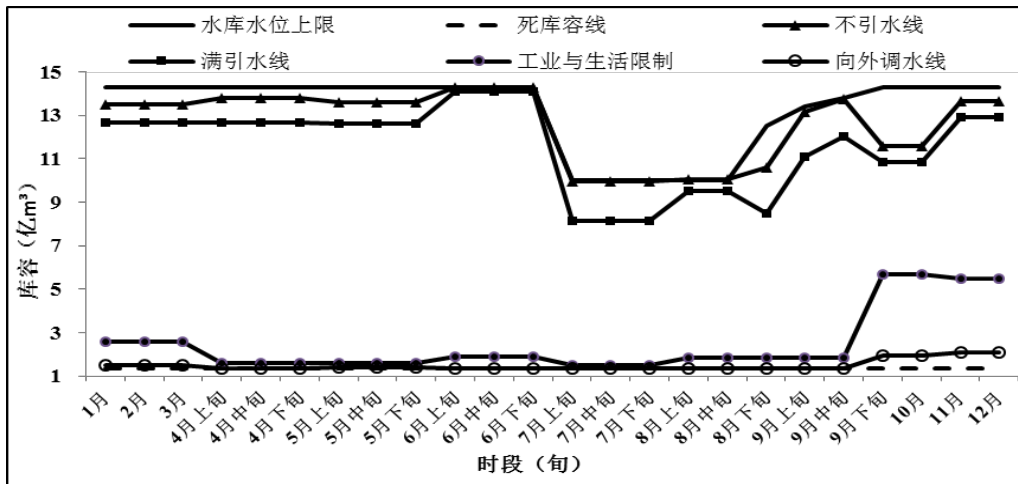
从图 4 可直观的看出：大伙房水库在枯水年份 1989、1992、1997、2001、2002 年调度模型 II 的供水量小于模型 I，这是由于优化破坏深度后，大伙房水库直供工业限制供水系数由 0.9 降为 0.82，枯水年水库水位较低，水库直供工业限制供水，导致供水量减少，但保证了大伙房水库的工业供水保证率，保证率由 87.7% 增加到 95.4%。

同理，碧流河水库作为跨流域调水工程的受水水库，当优化破坏深度后，水库的年均直供工业供水量也增加了 300 万 m^3 。碧流河水库在 49 年历史调度过程中，有 32 个年份水库工业生活供水量相等，有 15 年调度模型 II 的供水量大于模型 I，仅有两年调度模型 II 的供水量小于模型 I，图 5 为不同求解模型下碧流河水库的供水量变化图，图中仅列出模型 I 和模型 II 供水量不等的 17 个年份。

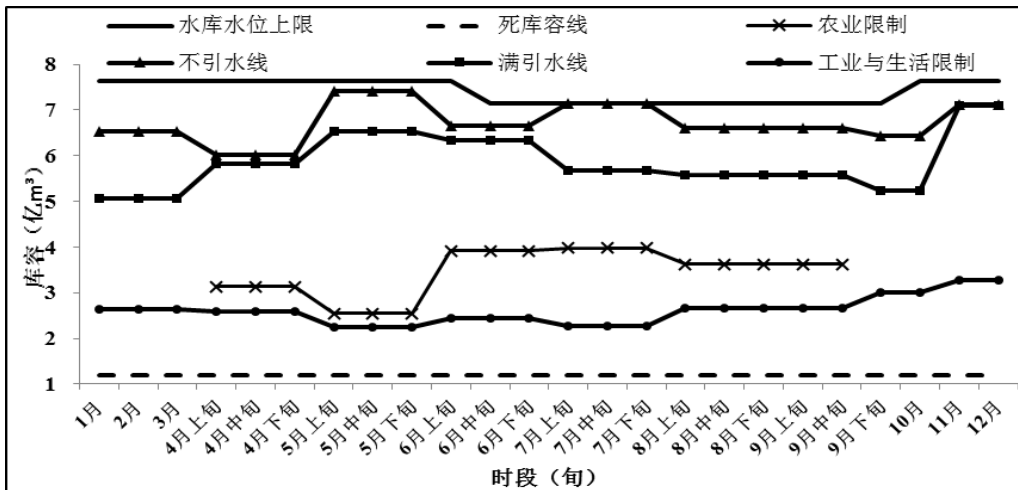
从图 5 可直观的看出：碧流河水库在 2003 和 2004 年调度模型 II 的供水量小于模型 I，是由于碧流河水库经历了 1999~2003 年的枯水系列，为满足水库的供水保证率，水库在增大引水的同时还需适度的限制供水，即优化破坏深度后，碧流河水库工业限制供水系数由 0.9 降为 0.802，农业限制供水系数由 0.7 降为 0.687，枯水年水库水位较低，水库工业生活与农业限制供水，导致供水量减少，但保证了碧流河水库的工农业供水保证率，



(a) H 水库-引水调度图



(b) 大伙房水库-引水与供水联合调度图



(c) 碧流河水库的引水供水联合调度图

Figure 3. Inter-basin water diversion for reservoir group and water supply chart of combined dispatching model II

图 3. 调度模型 II——H 水库 - 大伙房 - 碧流河水库跨流域引水与供水联合调度图

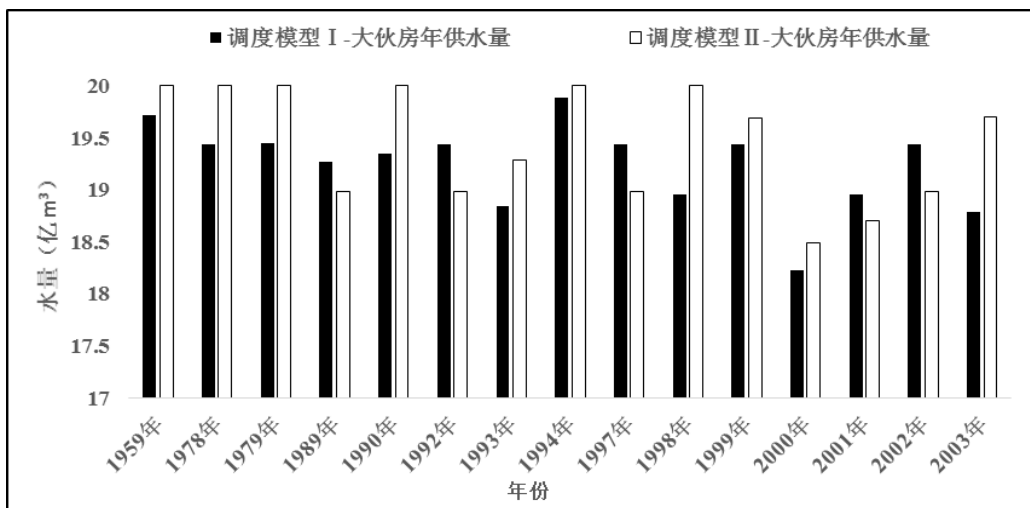


Figure 4. Change process of Dahuofang reservoir's industrial water restrictions years based on different model solutions

图 4. 不同求解模型下大伙房水库供水量不相等年份的变化过程

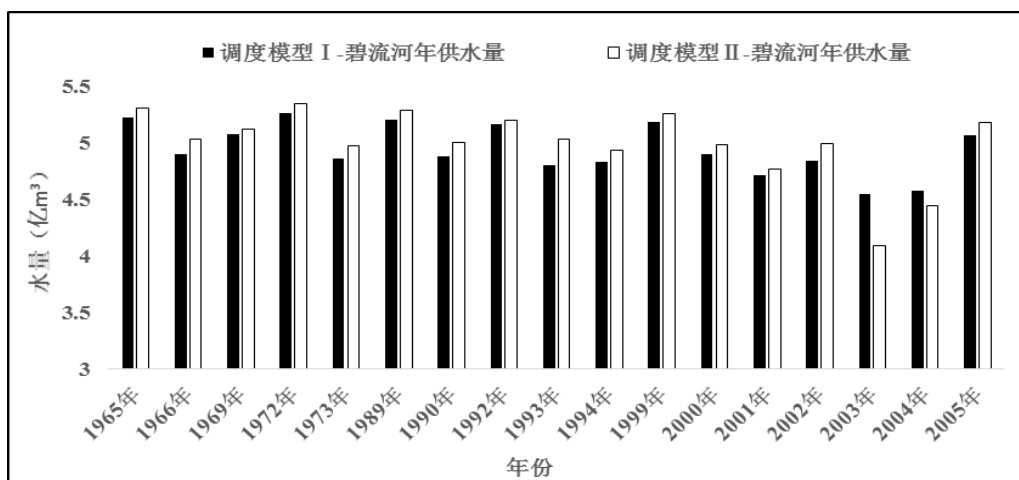


Figure 5. Change process of Biliuhe reservoir's industrial water restrictions years based on different model solutions

图 5. 不同求解模型下碧流河水水库供水量不相等年份的变化过程

其中工业保证率由 87% 增加到 95.2%。

2) 跨流域引水量的对比分析

对比调度模型 I 和调度模型 II 两种调度规则的调度结果，分别得到大伙房水库和碧流河水水库年内各时段的引水和弃水变化过程，如图 6 和图 7 所示。

对于“调度模型 II”即优化破坏深度的模型求解，由表 3 可知：大伙房水库作为跨流域调水的受水水库，年均跨流域引水量为 17.20 亿 m³，比“调度模型 I”少引水 0.24 亿 m³；从弃水量来看，在满足下游河道生态环境的用水量后，大伙房水库弃水量减少了 0.13 亿 m³；分析图 6 中大伙房水库引水与弃水的变化，从年内引水量的对比可看出：大部分时段内两种调度模型的跨流域引水量基本一致，而在汛期调度模型 II 的引水量相对较小；从年内弃水量的对比可看出：水库弃水量主要集中在汛期，而调度模型 II 的弃水量相比调度模型 I 较小。

由表 3 可知：碧流河水水库作为跨流域调水的受水水库，年均跨流域引水量为 2.05 亿 m³，比“调度模型 I”少引水 0.16 亿 m³；从弃水量来看，在满足下游河道生态环境的用水量后，碧流河水水库弃水量减少了 0.19 亿 m³；

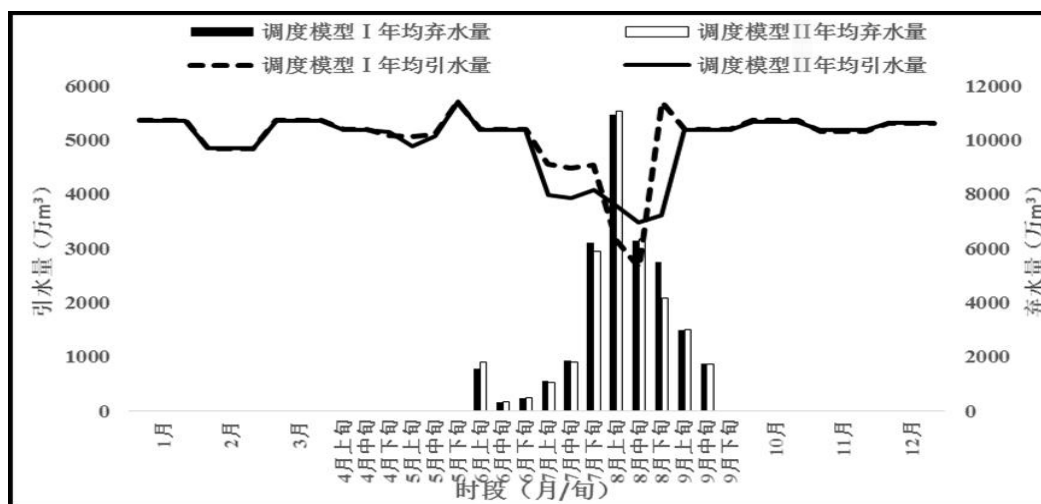


Figure 6. Change process of Dahuofang reservoir's each period water diversion and water surplus through a year based on different model solutions

图 6. 不同求解模型下大伙房水库年内各时段引水与弃水变化过程

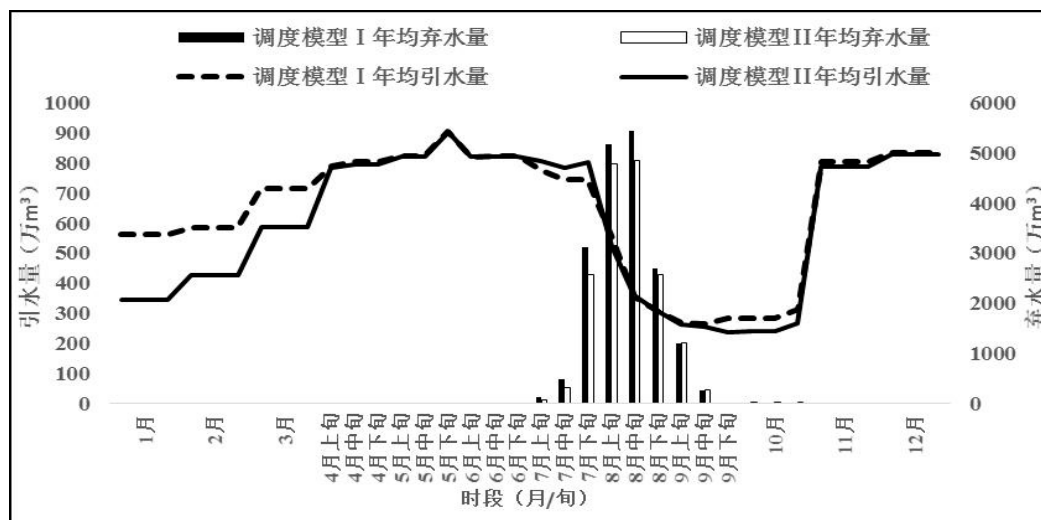


Figure 7. Change process of Biliuhe reservoir's each period water diversion and water surplus through a year based on different model solutions

图 7. 不同求解模型下碧流河水库年内各时段引水与弃水变化过程

分析图 7 中碧流河水库引水与弃水的变化, 从年内引水量的对比可看出: 大部分时段内两种调度模型的跨流域引水量相近, 而汛期和 1~3 月调度模型 II 的引水量相比调度模型 I 略有减小, 是由于优化破坏深度后, 非汛期水库限制供水量相对略有降低, 汛期和非汛期水库引水适当减小; 从年内弃水量的对比可看出: 水库弃水量主要集中在汛期, 而调度模型 II 的碧流河水库弃水量相比调度模型 I 较小, 在 49 年的历史调度模拟中, 碧流河水库有 20 年弃水量为零, 且碧流河水库应用模型 II 时每年的弃水量均小于模型 I, 说明应用调度模型 II 进行水库群跨流域联合调度, 引水过程更加合理有效, 水库群在满足保证率的同时, 增加供水减少弃水, 体现跨流域引水工程的实际意义。

水库群联合调度优化破坏深度后, 其受水城市需在枯水期相应的减少水库工业供水量。大连市作为资源性缺水城市, 是水库群联合调度的受水城市之一, 大连市严格执行用水总量控制, 充分考虑节水措施, 并适当限制高用水、高耗水行业发展, 在节水措施落实的基础上提高用水水平, 因此优化破坏深度后, 大连市在枯水期

减少的工业供水量可通过节水措施等实现,即限制供水在其可承受的范围內。

因此,为保障受水城市的供水安全,即在枯水期水库供水不发生深度破坏,本文提出“水库群调度模型 II”作为跨流域调水工程的另一个规划方案,当运用调度模型 II 时,严格控制枯水期受水城市高用水、高耗水行业的供水,该调度模型在保证水库的供水保证率的同时提高了跨流域引水的有效性;“水库群调度模型 I”虽然未能保障水库群供水保证率,但采取了行业供水规定的破坏深度进行优化调度。以上两种调度方案均可作为水库调度决策者制定调度计划提供依据。

4. 结语

本文针对水库群引水与供水的联合调度,建立联合调度模型,合理优化破坏深度,研究推求满足各水库供水保证率的水库群联合调度图及其调度规则。以 H 水库、大伙房和碧流河水库三库引水供水联合调度为实例,依据本文建立的调度模型及求解方法,先后求解未优化破坏深度和优化破坏深度的水库群联合调度模型,为水库群联合调度规划制定多个方案;水库群联合“调度模型 I”保证了行业用水破坏深度而舍弃了水库供水的设计保证率,而“调度模型 II”通过优化破坏深度,在受水城市可承受的范围內增加破坏深度保障了水库群的供水保证率,并有效减小水库跨流域引水量,减少弃水,且两种方案均未发生深度破坏。因此,本文提出的两种调度模型从不同角度制定了水库群规划调度方案,完善规划调度方案的同时为水库调度决策者制定调度计划提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 周惠成, 刘莎, 程爱民, 等. 跨流域引水期间受水水库引水与供水联合调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 883-890.
ZHOU Huicheng, LIU Sha, CHENG Aimin, et al. Joint operation of water transfer-supply for the reservoir in intake area during inter-basin water transfer. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 883-890. (in Chinese)
- [2] 胡尧文, 郑雄伟, 周芬, 等. 跨流域水库联合供水调度研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(5): 26-29.
HU Yaowen, ZHENG Xiongwei, ZHOU Fen, et al. Joint water supply dispatching of inter-basin reservoir group water transfer. Water Resources and Power, 2006, 24(5): 26-29. (in Chinese)
- [3] 尹正杰, 胡铁松, 吴运卿. 基于多目标遗传算法的综合利用水库优化调度图求解[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 40-44.
YING Zhengjie, HU Tiesong, WU Yunqing. Deriving multipurpose reservoir operating rule curves using multi-objective genetic algorithms. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 40-44. (in Chinese)
- [4] 张建云, 陈洁云. 南水北调东线工程优化调度研究[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 198-204.
ZHANG Jianyun, CHEN Jieyun. Study on optimum operation of the east-route south-to-north water transfer project. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese)
- [5] 王银堂, 胡四一, 周全林, 等. 南水北调中线工程水量优化调度研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 72-80.
WANG Yintang, HU Siyi, ZHOU Quanlin, et al. Optimal water operation for the water transfer project from south to north (middle route). Advances in Water Science, 2001, 12(1): 72-80. (in Chinese)
- [6] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 705-712.
GUO Xuning, HU Tiesong, HUANG Bin, et al. Joint operation rules for multi-reservoir water supply system based on the model of simulation and optimization. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 705-712. (in Chinese)
- [7] 方淑秀, 黄守信, 王孟华, 等. 跨流域引水工程多水库联合供水优化调度[J]. 水利学报, 1990, (12): 1-8.
FANG Shuxiu, HUANG Shouhua, WANG Menghua, et al. Optimal operation of multi-reservoir of inter-basin diversion project. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, (12): 1-8. (in Chinese)
- [8] 郭旭宁, 胡铁松, 吕一兵, 等. 跨流域供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2012, 43(7): 757-766.
GUO Xuning, HU Tiesong, LV Yibin, et al. Multi-reservoir operating rule in inter-basin water transfer-supply project. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(7): 757-766. (in Chinese)
- [9] GUO, X. N., HU, T. S., ZHANG, T., et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project. Journal of Hydrology, 2012, 425: 252-263.

- [10] 大伙房水库管理局. 大伙房水库调度手册[S].
Dahuofang Reservoir Administration in Shenyang. Workbook for operation of Dahuofang reservoir. (in Chinese)
- [11] 大连市碧流河水库管理局. 碧流河水库调度工作手册[S].
Biliuhe Reservoir Administration in Dalian. Workbook for operation of Biliuhe reservoir. (in Chinese)
- [12] 李昱, 彭勇, 初京刚, 等. 复杂水库群共同供水任务分配问题研究[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 83-90.
LI Yu, PENG Yong, CHU Jinggang, et al. Common tasks allocation problem of water supply for a complex multi-reservoir system. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 83-90. (in Chinese)