

金昌二坝渠调水系统水能水量优化调度研究

王鹏全¹, 张永明^{1,2}, 赵廷红¹, 肖大太¹, 石占涛¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省水利厅, 兰州 730000)

摘 要: 针对金昌市二坝渠调水系统中供水水库与受水水库间输水渠有较大落差的特点,为解决输水渠不合理的年调水流量过程造成渠道梯级电站弃水量较大和受水水库供水综合效益低等问题,研究以水库缺水量最小和渠道蕴藏水能资源最大为优化目标,建立了调水系统水能水量联合调度模型。采用基于 Pareto 强度的多目标遗传算法求解调水流量序列的非劣解集,并基于最优调水流量过程利用“优化-模拟-仿真”的技术框架模拟分析了供水水库与受水水库的调度函数与调度规则。结果表明:优化调度方案合理可行,提高了渠道调水的有效性,增加了受水水库的综合效益,获取调水与发电双赢。

关键词: 水库; 输水渠; 水能水量调度; 调度规则; 调水系统

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0148-06

Study on optimal operation of hydropower and water for water transfer system two-dam canal in Jinchang

WANG Pengquan¹, ZHANG Yongming^{1,2}, ZHAO Tinghong¹, Xiao Datai¹, SHI Zhantao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Provincial Water Resources Bureau, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of having higher fall of drain between the reservoir of water supply and that of water demand, and in order to resolve the problem of more generating surplus water of cascade hydropower station and low comprehensive efficiency of water receive reservoirs caused by unreasonable water transfer flow process in water delivery canal project, the paper put forward an optimal operation model of hydropower for two-dam water transfer project in Jinchang city which took the minimum volume of water shortage and the maximum hydropower as optimum goal. The paper used multi-objective genetic algorithm (MOGA) of Pareto strength to solve traffic diversion sequence Pareto, and analyzed operation rules of water supply reservoirs and water receive reservoirs in the framework of optimization, fitting and simulation based on optimal water transfer flow process. The result shows that the optimized operation scheme is reasonable and practice, and can improve the effectiveness of water delivery canal, increase the comprehensive benefits of water receive reservoirs and gain diversion and generation win.

Key words: reservoir; water delivery canal; hydropower and water operation; operation rule; water transfer system

1 研究背景

跨流域调水是水资源时空分配和高效利用的重要工程措施。国内学者有关调水系统的研究大多只针对水库群的调度规则与调水规模,很少考虑输水渠的调水流量过程以及水库供水与跨流域调水的统

一性,对调水系统中输水渠的水能水量最优调度问题和供水水库与受水水库的调度规则研究较少。近年来,周惠成等^[1]针对跨流域引水工程中受水水库引水与供水联合调度问题,采用分解优化的方法研究了受水水库引水与供水联合调度图及其调度规则。郭旭宁等^[2]提出了调水规则和供水规则相结

收稿日期:2015-12-30; 修回日期:2016-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51269009);流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-2013)

作者简介:王鹏全(1989-),男,甘肃静宁人,硕士研究生,主要从事水资源优化配置与高效利用等方面的研究。

合的二层规划模型,研究了跨流域供水水库群联合调度规则。

本文所研究的对象系指由供水水库、受水水库和输水渠组成的金昌市二坝渠调水系统,输水渠首尾落差较大形成梯级电站,并且调水量的多少受流域水权配置框架和调水总量的约束。针对研究对象的特性,本文以水库缺水量最小和输水渠梯级电站发电量最大为优化目标,建立了调水系统水能水量调度模型,利用供水水库和受水水库联合调度的资源优势,采用基于 Pareto 强度的多目标遗传算法(MOGA)和“优化-模拟-仿真”的方法对调水系统水能水量调度问题进行优化求解,从而制定经济合理的输水渠调水流量过程线和供水水库与受水水库的联合调度规则,以实现调水工程的多目标性,更大程度地利用水资源,达到水利调度社会效益和梯级水力发电经济效益双赢的目标,以期为解决类似问题提供新思路。

2 研究区概况

二坝渠调水工程位于石羊河流域金昌市永昌县境内,通过该渠从东大河皇城滩水库向金川峡水库

调水,更大程度地满足金川区“三生”用水需求。二坝渠总长 16.393 km,设计流量 15 m³/s,加大流量 20 m³/s。二坝渠分 8 级梯段开发,每级装机 2 台机组,单机引水流量 4.31 m³/s,全渠线落差为 207.15 m。二坝渠年输水量与东大河天然来水的丰枯变化没有显著关系,而是呈逐年递增趋势,多年平均增长率 4.45%,表现出明显的习惯性和任意性。调水量的多少受石羊河流域水权配置框架和调水总量约束,其现阶段平均调水量为 13 084 × 10⁴ m³。

由于受水区域对水资源需求的时空差异,渠道调水过程具有不合理性:年内小流量调水使渠道水量渗漏损失大导致受水水库的净入库水量减少,水库缺水程度较大;大流量调水易造成输水渠梯级电站弃水而损失发电量;冬季调水则易使渠道衬砌和建筑物受到冰冻破坏,渠道管理成本增加。

金川峡水库来水除二坝渠调水量外,上游灌区回归水、东西大河之间小河及浅山区雨洪补给地下水逸出的泉水和“引疏济金”调水的平均来水流量为 5.17 m³/s。上游皇城滩水库和下游金川峡水库对输水渠的调水量有明显的调节作用,各水库的基本特性参数见表 1。

表 1 水库基本特性参数表

水库名称	死水位/ m	正常蓄 水位/m	校核洪 水位/m	死库容 /10 ⁴ m ³	正常库容/ 10 ⁴ m ³	多年平均 来水量/10 ⁸ m ³	水位-库容关系
皇城滩水库	2520	2540.0	2543.7	800	6185	3.21	$Z = 2511.793 + 0.008V - 5.215 \times 10^{-7}V^2$
金川峡水库	1853	1873.9	1874.4	600	6050	2.95	$Z = 1858.486 + 0.004V - 2.820 \times 10^{-7}V^2$

3 调度模型建立与求解

3.1 调度模型建立

3.1.1 目标函数 皇城滩水库与金川峡水库的来水量在年内分配及年际变化上存在差异性,通过二坝输水渠建立供水水库和受水水库间的主从关系,利用水库联合调度获得径流补偿和水文补偿效益,达到调水的多重目标。针对本文研究对象的特点及其特定的问题,宜以水库缺水量最小和输水渠蕴藏的水能资源最大作为调水系统水能水量调度模型的控制函数^[3-4]。

水库缺水量最小的目标函数为:

$$\min f_1 = \sum_t \omega_m \sum_m [DW_{m,t} - SW_{m,t})^2] \tag{1}$$

式中: DW_{m,t} 为第 m 水库 t 时段的需水量,10⁴ m³; SW_{m,t} 为第 m 水库 t 时段的供水量,10⁴ m³; ω_m 为水库 m 的缺水影响系数, ∑ ω_m = 1; t 为计算时段,以

月作为时间步长; m 为水库序数, m = 1 为皇城滩水库; m = 2 为金川峡水库。

输水渠蕴藏水能资源最大的目标函数为:

$$\max f_2 = \sum_t^T 9.81HQ_t\Delta t \tag{2}$$

式中: H 为输水渠首尾断面落差,m; Q_t 为输水渠在 t 时段的流量,即调水流量,m³/s; Δt 为计算时段,s。

3.1.2 约束条件

(1)水库水量平衡约束:

$$\Delta V_{m,t+1} + LK_{m,t} = (IW_{m,t} - OW_{m,t})\Delta t \tag{3}$$

式中: ΔW_{m,t+1} 为调度时段水库蓄水变化量,10⁴ m³; IW_{m,t}、OW_{m,t} 分别为第 m 水库 t 时段的入库流量和出库流量,m³/s; LK_{m,t} 为水库由于库面蒸发和渗漏产生的水量损失,10⁴ m³。

(2) 水库之间水量连续性约束:

$$IW_{m+1,t} = Q_t + RW_{m,t} \tag{4}$$

式中： $IW_{m+1,t}$ 为受水水库的入库流量， m^3/s ； $RW_{m,t}$ 为第 m 水库与第 $m + 1$ 水库间的区间径流， 10^4 m^3 。

(3) 水库调蓄能力约束：

$$V_{m,\min} \leq V_{m,t} \leq V_{m,\max} \tag{5}$$

式中： $V_{m,\min}$ 为水库死库容， 10^4 m^3 ； $V_{m,\max}$ 为兴利库容， m^3 。

(4) 调水总量约束：

$$\sum_t^T Q_t \cdot \Delta t \leq W_p \tag{6}$$

式中： W_p 为调水总量， 10^4 m^3 ，受区域水权配置框架约束。

(5) 渠道输水能力约束：

$$0 \leq Q_t \leq Q_{j,\max} \tag{7}$$

式中： Q_t 为输水渠 t 时段的调水流量， m^3/s ； $Q_{j,\max}$ 为输水渠的设计最大过流能力， m^3/s 。

以上(1) ~ (7) 式则构成了调水系统水能水量优化调度的数学模型。

3.2 调度模型求解

水库群和输水渠组成的调水系统水能水量调度是一个典型的多阶段、多目标决策问题，宜采用基于 Pareto 强度^[5-6]的多目标遗传算法^[7-8]求解调水流量序列的非劣解集(Pareto 解)。阶段变量可以将调度年按月划分为 12 个阶段，则每个阶段 t 为阶段变量，即 $t = 1, 2, \dots, 12$ 。选择输水渠的调水流量序列

作为决策变量，以水库蓄水量作为状态变量，通过水量平衡约束方程将 3 种变量联系起来。根据由式(1) ~ (7) 组成的水能水量调度模型，两个目标函数均由输水渠在 t 时段的调水流量 Q_t 决定，其决策变量数目为 12 个。

根据供水能力和水量平衡等约束条件在解空间随机生成一组决策变量，并采用实数编码将其种群初始化为：

$$X = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{12}) \tag{8}$$

采用轮盘赌个体选择方法，从当前种群中根据个体的适应度值，将适应度值最优的个体挑选出来进入下一代种群。交叉算子和变异算子是影响遗传算法性能的关键参数，以自适应调整的方法确定^[9-13]，这里不再赘述。经遗传操作产生的新个体计算其适应度，设定恰当的最优前端个体系数，保存 Pareto 解。

对于劣解经过种群修剪操作后，再次进行遗传操作，判断终止条件，结束循环迭代过程。模型求解参数设置：最优前端个体系数设为 0.1，种群规模 $NP = 100$ ，最大进化代数 $NG = 500$ ，停止代数 $NS = 500$ ，交叉系数 $P_c = 0.75$ ，变异系数 $P_m = 0.07$ 。利用上述模型对二坝渠调水过程进行求解，得到某次运算的调水流量过程的非劣解集如表 2 所示，每组非劣解则代表一个调水方案。

表 2 二坝渠调水流量优化调度 Pareto 解集

方案	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)												缺水量/ 10^4 m^3	水能/ $10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7	Q_8	Q_9	Q_{10}	Q_{11}	Q_{12}		
S_1	2.19	0.62	3.83	2.91	0.12	0.84	12.00	7.60	3.89	0.95	8.31	10.65	646.9	8063.9
S_2	2.12	0.04	3.84	1.46	5.02	1.20	11.55	7.55	4.91	1.74	6.53	7.06	865.9	7946.8
S_3	0.82	0.77	9.83	0.82	0.82	0.82	9.84	0.00	10.65	0.00	9.82	9.83	982.9	8048.3
S_4	0.38	0.37	3.85	0.38	1.36	0.38	9.40	10.92	9.38	0.38	7.84	9.36	778.4	8071.2
S_5	3.32	1.80	7.71	2.02	0.59	1.91	10.25	7.86	5.81	0.25	6.90	5.89	826.7	8103.7
S_6	4.44	0.57	0.85	0.88	8.83	3.79	11.00	8.56	0.97	3.26	2.26	8.61	754.7	8120.5
S_7	4.73	1.72	7.58	1.09	3.97	1.61	7.07	8.56	5.48	0.87	6.22	5.12	761.4	8068.3
S_8	5.76	1.52	3.95	1.59	3.38	1.43	6.78	7.96	5.08	0.87	6.31	9.39	734.3	8074.8
S_9	4.98	1.94	3.84	0.66	4.60	0.36	8.11	7.02	4.82	1.42	8.71	7.55	815.8	8066.5
S_{10}	3.15	3.90	2.43	0.73	0.73	2.10	10.08	11.97	5.82	0.43	5.10	6.69	834.7	7908.7

对表 2 中非劣解集的优选应考虑以下原则：在金川区工业用水保证的前提下，冰冻期和冬灌期尽可能不调水，通过皇城水库的调节增加调水期流量，力求均匀调水，减少输水损失；灌溉临界期尽可能不调水，保证皇城水库下游东河灌区的综合用水。由

目标优化结果易知方案 1 和方案 4 均为较优调水方案，结合上述原则，按照年内输水渗漏损失量最小的原则筛选最优方案。经计算损失水量方案 4 比方案 1 少 $18.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，故选取方案 4 的流量序列作为二坝渠年内最优调水过程，年内调水过程线见图 1。

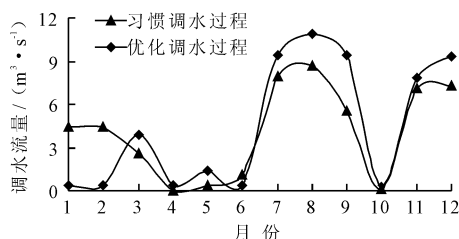


图1 二坝渠调水过程

3.3 优化结果分析

3.3.1 水量调度分析 根据以上的优化流量系列,推求皇城滩水库出库流量过程和金川峡水库入库流量过程分别见图2、3,金川峡水库水量供需流量过程见图4。

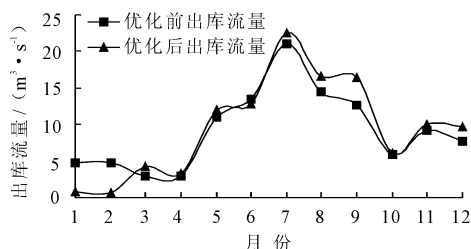


图2 皇城滩水库出库流量过程

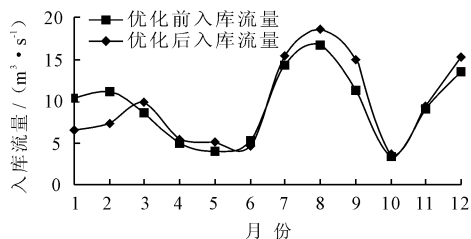


图3 金川峡水库入库流量过程

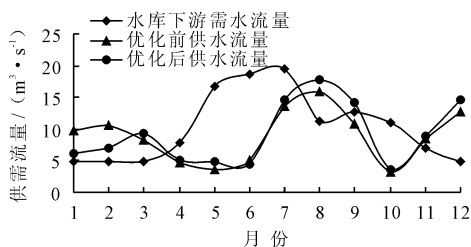


图4 金川峡水库供需流量过程

由图1~4可知,二坝渠习惯性年平均调水流量为 $4.15\text{ m}^3/\text{s}$,优化后年内平均调水流量增加至 $4.53\text{ m}^3/\text{s}$,调水总量比习惯调水增加 $1\,198.37\times 10^4\text{ m}^3$;优化调度后水量渗漏损失为 $383.95\times 10^4\text{ m}^3$,比习惯调水水量损失减少 $34.15\times 10^4\text{ m}^3$ 。优化后输水量在时间尺度上基本满足调水原则与要求,冰冻期1、2月,灌溉临界期4、5、6月及冬灌期10月调水流量微小,皇城滩水库的出库流量只需满足下游东河灌区的综合用水。

经优化调度后,金川峡水库的受水量为 $30\,590\times 10^4\text{ m}^3$,比原来增加 $1\,090\times 10^4\text{ m}^3$,明显改善了金川峡水库的入库径流过程和下游水量供需问题。扣除库面蒸发损失和水库渗漏损失后,金川峡水库的出库供水水量可达 $29\,060\times 10^4\text{ m}^3$,下游金川区综合需水量为 $32\,692.32\times 10^4\text{ m}^3$,缺水量为 $3\,068.32\text{ m}^3$,缺水率为 11.1% ,较原来减少 3.1% 。

优化调水方案在增加调水总量的同时,利用皇城滩水库的调节作用将调水量在年内重新分配,将习惯性的调水流量过程转变为最优调水流量过程,实现调水期内大流量均匀集中调水,减少调水水量损失,有助于灌溉制度和梯级电站参数的优化设计,提高调水效益。

3.3.2 能量调度分析 二坝渠调水优化后年内渠道水能蕴藏过程见图5。输水渠蕴藏水能总量为 $8\,071.2\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,比习惯调水流量相应的渠道蕴藏水能增加 $689.23\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。通过皇城滩水库调节和金川峡水库反调节作用,二坝渠梯级电站年内可发电量调度过程见图6。优化后二坝渠年发电量为 $6\,942\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,比原来增加 16.3% ;发电引水流量为 $12\,602.24\times 10^4\text{ m}^3$,水能利用率达 88.2% ,比原来增加 5.2% ,电站弃水量减少 $313.13\times 10^4\text{ m}^3$ 。

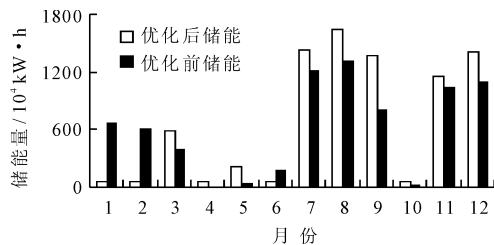


图5 二坝渠年内水能调度过程

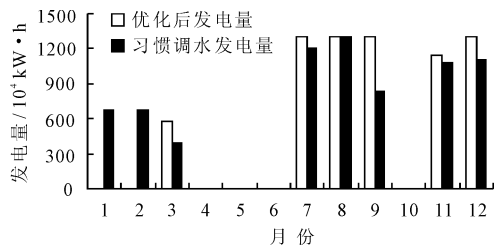


图6 二坝渠年内发电量调度过程

4 水库调度规则研究

水库调度函数是其调度规则研究的常见工具。调度函数模拟采用线性回归法对优化样本进行拟合,推求调度函数的系数,在时间尺度上更具有连续性。以调度时段作为阶段变量,水库蓄水量作为状

态变量,水库出库流量作为决策变量,利用上文优化计算样本作为调度函数输入,分析水库运行的径流输入(IW)、水库蓄水量(V)、水库下泄流量(OW)三者的关系,拟合水库下泄流量、径流输入及水库蓄水量之间的函数关系,将其描述为: $OW = f(V, IW, t)$ 。则水库调度线性矩阵函数为:

$$OW_{m,t} = A_{m,t} + B_{m,t}V_{m,t} + C_{m,t}IW_{m,t} + \varepsilon_m \quad (9)$$

式中: m 为水库序数; t 为调度时段数(月或旬); $A_{m,t}$ 、 $B_{m,t}$ 、 $C_{m,t}$ 为调度函数的模型参数,采用多元回

归法确定; ε_m 是拟合残差。

按照式(9) 计算出的决策变量,进而根据式(3)、式(4)及水位-库容关系求得其它水能参数,并对其进行模拟修正。

根据 MOGA 优化计算确定的最优调度样本,采用式(9)经多元回归法拟合得到模型参数和水库调度函数,但是发现枯水期拟合程度并不太高。调度函数模型参数及经验调度、MOGA 优化和调度函数计算结果分别见表 3 和表 4。

表 3 水库调度函数模型参数

模型参数	A_t	B_t	C_t	$OW_t = A_t + B_t \cdot V_t + C_t \cdot IW_t$
皇城水库	4.3704	- 0.0016	0.9546	$OW_t = 4.3704 - 0.0016V_t + 0.9546IW_t$
金川峡水库	1.4682	- 0.0004	0.9124	$OW_t = 1.4682 - 0.0004 V_t + 0.9124IW_t$

表 4 水库和输水渠水能水量调度结果

水库	方案	水库出库流量(渠道调水流量)/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)												缺水率/ 发电量/	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	%	$10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$
皇城滩水库	经验调度	4.83	4.83	3.00	2.98	10.95	13.55	21.04	14.42	12.59	5.84	9.28	7.68	4.02	2137
	MOGA 优化	0.75	0.74	4.22	3.36	11.99	12.79	22.47	16.69	16.46	6.10	9.99	9.73	2.50	2364
	调度函数	5.34	4.13	4.71	5.22	9.69	13.62	21.93	19.50	13.43	6.00	4.92	6.26	2.77	2254
金川峡水库	经验调度	9.84	10.59	8.18	4.62	3.71	5.01	13.56	15.80	10.78	3.20	8.53	12.81	14.20	1435
	MOGA 优化	6.14	6.90	9.34	5.12	4.79	4.40	14.68	17.70	14.19	3.53	8.90	14.51	11.10	1516
	调度函数	6.56	6.66	8.95	5.66	4.53	4.13	14.91	17.76	13.26	3.01	8.12	13.91	13.60	1448
二坝输水渠	经验调度	4.46	4.46	2.63	0.00	0.32	1.14	7.97	8.65	5.52	0.12	7.13	7.31	7.84	5938
	MOGA 优化	0.38	0.37	3.85	0.38	1.36	0.38	9.40	10.92	9.38	0.38	7.84	9.36	5.48	6942
	调度函数	4.97	3.76	2.84	2.24	0.00	1.22	8.86	9.73	6.35	0.27	6.77	7.49		6205

由于多元线性回归模型计算调度函数仅仅是对优化样本的拟合,得到流量序列、缺水率和年发电量相对于优化值存在误差是可以解释的。由水库调度函数确定的渠道年内调水量比经验调水量增加 $1\,238.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,水量损失比经验调水减少 $6.91 \times 10^4 \text{ m}^3$;年发电量比经验调水增加 $267 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。水库调度函数模拟仿真图可作为指导水库实时运行

的工具,结合水库入库径流测报系统及时做出水库出库流量和水库库容等相关数据,并对其及时进行修改,制定水库调度计划方案。在实际操作中,MOGA 优化方案和调度函数模拟仿真结果的结合,可为实际调度提供决策支持。水库调度函数模拟仿真见图 7,水库调度规则见图 8。

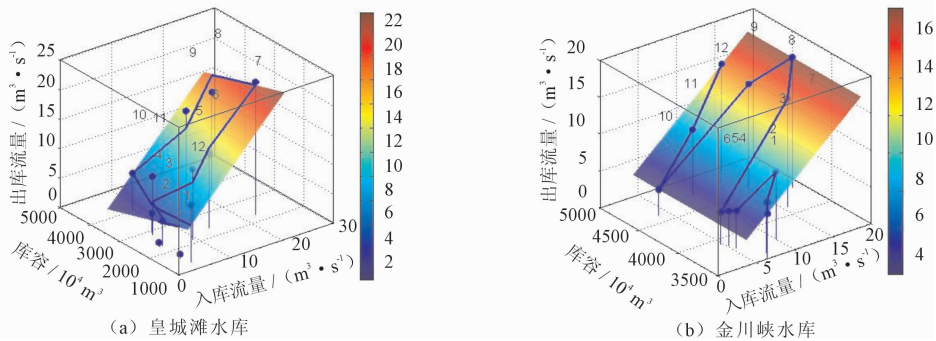


图 7 调度函数仿真图

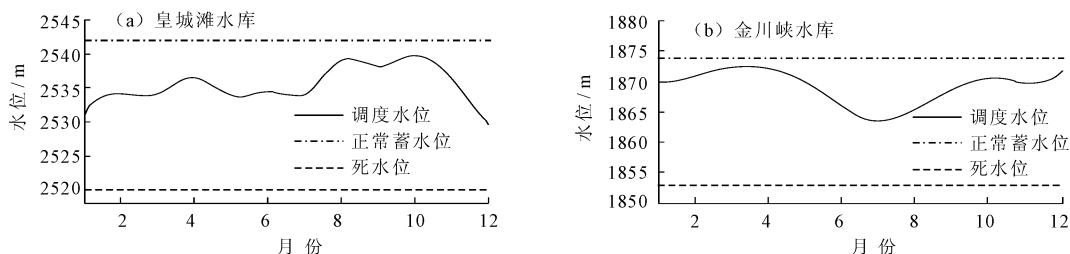


图8 水库调度规则

5 结 论

本文建立了金昌市二坝渠调水系统水能水量优化调度模型,实例应用结果表明:

(1)优化后二坝渠调水总量比习惯调水量增加 $1\,198.37 \times 10^4 \text{ m}^3$,调水水量损失减少 $34.15 \times 10^4 \text{ m}^3$,受水水库的缺水率减少了 3.1%;

(2)优化后输水渠蕴藏的水能总量比原来增加 $689.23 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,发电量比原来增加 16.3%,水量利用率显著提高;

(3)由水库调度函数确定的渠道年调水量比原来增加 $1\,238.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,年发电量比习惯调水增加 $267 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,调度函数具有一定的优势,可为实际调度提供决策支持。

调水工程是由供水水库、受水水库和输水渠组成的多目标复杂系统。本文研究的问题概化相对简单,变量维数较低,如何利用降雨和径流预报信息将该模型推广到解决较小时间尺度的多水源、多用户、多目标的调水系统水能水量优化调度问题有待进一步研究。

参考文献:

[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): 883-891.

[2] 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.

[3] 黄牧涛,王乘,张勇传. 灌区库群系统水资源优化配置

模型研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 93-95.

[4] 马立亚,雷晓辉,蒋云钟,等. 基于 DPSS 的梯级水库群优化调度[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 140-144.

[5] 丁胜祥,董增川,王德智,等. 基于 Pareto 强度进化算法的供水库群多目标优化调度[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 679-683.

[6] 赖红松,董品杰,祝国瑞. 求解多目标规划问题的 Pareto 多目标遗传算法[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 24-28.

[7] 李宗礼,李新攀,赵文举,等. 基于多目标遗传算法的石羊河流域水资源优化配置模型[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 52-55.

[8] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 308-313.

[9] Reis L F, Bessler F T, Walters G A, et al. Water supply reservoir operation by combined genetic algorithm-linear programming (GA-LP) approach [J]. Water Resources Management, 2006, 20(2): 227-255.

[10] Chang J X, Huang Q, Wang Y M. Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching [J]. Water Resources Management, 2005, 19(4): 321-331.

[11] 王少波,解建仓,孔珂. 自适应遗传算法在水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 480-485.

[12] 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, 39(5): 550-556.

[13] 史峰,王辉,郁磊,等. Matlab 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.