

含翻水线的两库系统联合调度优化方法研究

龚志浩

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 丰水地区水库和泵站系统水资源优化调度的目标应该是解决系统季节性缺水、弃水、补水共存的矛盾。针对含有翻水线的两库系统,对系统的联合调度控制参数设计正交试验,然后采用动态规划对子系统模型进行求解,可以同时获得两座水库最优的供、弃水量过程和两座泵站最优的提水量过程。将该方法应用于江苏省南京市六合区山湖水库与泥桥水库及其翻水线的联合调度方案中,以2016年为例,在满足系统需水的前提下,可以减少25.7%的系统年总补水量,节约245 h的泵站运行时间,降低了系统的运行成本。

关键词: 含翻水线的两库系统; 泵站; 联合调度; 动态规划; 正交试验

中图分类号: TV697.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0155-06

Optimization method for joint operation of two reservoirs with a series of pumping stations

GONG Zhihao

(School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The optimization purpose of a reservoir – and – pumping – station system in humid areas should be determining the optimal joint operation policy to reduce water spills of reservoirs, water replenishments of pumping stations, and meeting water demands. An optimization method for joint operation of a two – reservoir system with a series of pumping stations in humid areas is proposed in this paper. The method is based on dynamic programming and orthogonal test, and the dynamic programming is used to solve the subsystem models and orthogonal test is used to derive the joint operation policy between the subsystems, which can finally obtain the operation scheme both of the reservoirs and pumping stations. The proposed method was applied to the joint operation scheme of Shanhu Reservoir and Niqiao Reservoir with their sharing pumping stations in Liuhe District, Jiangsu Province, China. The results showed that the optimization method could reduce water replenishment of the system by 25.7% and save the operation time of pumping stations by 245 h in 2016, which reduced the operation cost.

Key words: reservoir-and-pumping-station system; pumping station; joint operation; dynamic programming; orthogonal test

1 研究背景

水库(群)水资源优化调度是区域水资源管理的重要内容。干旱半干旱地区的水库(群)优化调度的目标主要是合理分配稀缺的水资源,避免产生严重干旱的时段^[1-2]。然而,中国南方地区由于降雨充沛,在一般年份水库(群)的总来水量通常能够满足用水需求^[3-4]。此外,该地区的水库通常还会配套泵站等引提水工程,在必要的时候从其他水源(河流、地下

水、其他水库等)引水补库^[5-6]。因此,对于南方地区的“水库(群) – 泵站(群)”系统,优化调度的目标应该是确定最佳的联合运行策略,在满足需水的前提下,尽量降低水库弃水,减少泵站补水。

国际上,水库(群)和泵站(群)系统的联合优化调度模型常以系统运行成本(主要是泵站的提水成本)最小为目标函数。Yu等^[7]最早提出了以提水成本最小为目标的水库与补库泵站联合运行优化调度非线性规划模型。Pulido – Calvo等^[8]针对“一站

收稿日期:2019-05-06; 修回日期:2019-05-31

基金项目:江苏省研究生科研创新计划(KYCX19_2105)

作者简介:龚志浩(1994-),男,江苏常熟人,博士研究生,研究方向为农业水土工程优化规划与管理。

两库”系统中调水泵站运行费用最小的问题,提出了相应的数学模型与优化算法。Reca等^[9]以提水成本最小为目标提出了水库与补库泵站联合运行优化调度线性规划模型,随后又考虑了水库蒸发损失的影响,进一步优化了该模型^[10]。Dürin^[11]在确定的供水方案下,对水泵运行时间、泵站流量以及水库容量进行回归分析,获得了年费用最小的组合方案。上述研究均在峰谷电价或者季节电价的前提下,通过优化补水泵站的工作期,达到节约运行成本的目的。但是,国内的农业用电尚未实行峰谷电价,因此上述模型所能取得的优化效果较为有限。

此外,现有的水库和泵站系统的优化调度模型并未从水权的角度约束补水泵站的提水总量。而在水价改革的新形势下,区域水权被严格划分^[12-13],年内补水泵站引提外水的总量受到严格控制,这就对模型的构建提出了新的要求。

本文针对南方丘陵山区含有翻水线的两库系统,以系统各时段缺水平方和最小为目标函数,水库年可供水量以及泵站水权为约束条件,水库供水量及补库泵站提水量为决策变量,构建水资源优化调度模型。通过模型求解,提出水权受限条件下系统最佳的调度方法,以期在满足需水的前提下,达到减少水库弃水,控制泵站补水的目标。

2 研究方法

2.1 系统概化

中国南方丘陵山区过境水资源丰富,水库等蓄水工程通常配套有引提水工程,可以在水库缺水时引水补库。然而,还有一些地势较高的小型水库或塘堰由于集水面积较小且没有过境水资源补充,调度期内出现缺水时就需要从其他大中型水库引水补库。典型的含有翻水线的两库系统如图1所示,水库1为输水水库,水库2为受水水库。水库1和水库2各自有独立的灌溉面积,水库1蓄水量不足时由泵站1从河道里提水补库,水库2地势较高,蓄水量不足时,则通过泵站2从水库1引水补库。

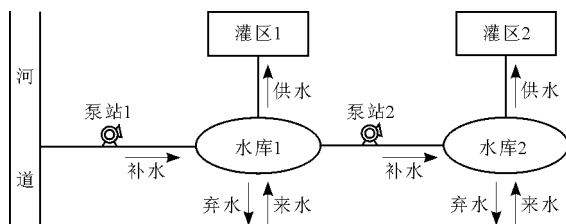


图1 含翻水线的两库系统示意图

该系统的调度策略通常根据管理者的经验确定,易导致系统产生补水、弃水和缺水共存的矛盾。这样的矛盾,在实行水资源总量管理前尚不明显,而当系统引提河道水资源的水权被严格限制以后,就有必要对系统的调度方法进行优化,提高系统对自身径流的利用率,减少弃水,从而控制泵站补水量。

2.2 数学模型

2.2.1 目标函数 以满足系统需水为前提条件,因此以系统各阶段缺水平方和最小为目标函数,即:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^2 (X_{j,i} - YS_{j,i})^2 \quad (1)$$

式中: F 为系统各时段缺水平方和; i 为时段编号; T 为总时段数; j 为水库编号; $X_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段的供水量, 10^4 m^3 ; $YS_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段的需水量, 10^4 m^3 。

2.2.2 约束条件

(1) 系统年可供水量约束:

系统年可供水量包括两座水库的年可供水量和年内引提过境水资源的水权。

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^2 X_{j,i} \leq \sum_{j=1}^2 SK_j + BZ \quad (2)$$

式中: SK_j 为水库 j 的年可供水量, 10^4 m^3 ; BZ 为系统年内引提过境水资源的水权, 10^4 m^3 。

(2) 泵站水权约束:

$$\sum_{i=1}^T Y_{j,i} \leq BZ_j \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

式中: $Y_{j,i}$ 为泵站 j 在时段 i 的提水量, 10^4 m^3 ; BZ_j 为泵站 j 的年允许提水量(水权), 10^4 m^3 ,其中泵站1从系统外的河道内提水,因此泵站1的水权即为系统引提过境水资源的水权($BZ_1 = BZ$);泵站2为系统内部泵站,其水权 BZ_2 由水库管理单位内部协商决定。

(3) 最大供水量约束:

$$X_{j,i} \leq YS_{j,i} \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

(4) 水库库容约束:

$$V_{j(\min)} \leq V_{j,i} \leq V_{j,i(\max)} \quad (j = 1, 2) \quad (5)$$

根据水量平衡方程:

水库1:

$$V_{1,i} = V_{1,i-1} + LS_{1,i} + Y_{1,i} - Y_{2,i} - X_{1,i} - PS_{1,i} - EF_{1,i} \quad (6)$$

水库2:

$$V_{2,i} = V_{2,i-1} + LS_{2,i} + Y_{2,i} - X_{2,i} - PS_{2,i} - EF_{2,i} \quad (7)$$

式中: $V_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段末的蓄水量, 10^4 m^3 ;

$V_{j(\min)}$ 和 $V_{j,i(\max)}$ 分别为水库 j 在 i 时段的蓄水量下限和上限, 10^4 m^3 ; $LS_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段的来水量, 10^4 m^3 ; $PS_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段的弃水量, 10^4 m^3 ; $EF_{j,i}$ 为水库 j 在 i 时段的水量损失, 10^4 m^3 。

(5) 泵站提水能力约束

本文假定泵站始终在其设计工况点下提水, 则各时段泵站的提水能力可由其设计流量和运行时段长度确定。

$$Y_{j,i} \leq Q_j \cdot N_i \times 10^{-4} \quad (j = 1, 2) \quad (8)$$

式中: Q_j 为泵站 j 的设计提水流量, m^3/h ; N_i 为时段 i 内水泵最大运行时长, h 。

(6) 初始条件与边界条件: 水库终止蓄水量应同初始蓄水量保持一致, 以避免最后水库水量被放空。

2.3 求解方法

2.3.1 大系统分解 上述大系统模型可分解为两个由单座水库和单座泵站组成的子系统模型, 如下所示:

(1) 受水水库及其补库泵站(水库 2 和泵站 2)

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^T (X_{2,i} - YS_{2,i})^2 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^T X_{2,i} \leq SK_2 + BZ_2 \quad (10)$$

(2) 输水水库及其补库泵站(水库 1 和泵站 1)

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^T (X_{1,i} - YS_{1,i})^2 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^T X_{1,i} \leq SK_1 + BZ_1 \quad (12)$$

式中: f_1 为输水水库及其补库泵站系统各时段缺水平方和; f_2 为受水水库及其补库泵站系统各时段缺水平方和。

2.3.2 子系统优化 公式(9)~(12)为两个阶段可分的一维非线性模型, 可以采用一维动态规划分别进行求解。

在动态规划递推过程中, 可通过水库常规调度准则修正各阶段水库蓄水量, 以此获得合理的水库弃水量和泵站补水量^[14], 具体过程如下所示:

(1) 若 $V_{j,i} < V_{j(\min)}$, 应由泵站给水库补水, 补水至 $V_{j(\min)} + \Delta_j$, 此时

泵站 j 的补水量为:

$$V_{j,i} = \min(V_{j(\min)} + \Delta_j - V_{j,i}, Q_j \cdot N_i) \quad (13)$$

水库 j 的弃水量为:

$$PS_{j,i} = 0 \quad (14)$$

(2) 若 $V_{j,i} > V_{j,i(\max)}$, 水库应通过溢洪道弃水, 此时泵站 j 的补水量:

$$Y_{j,i} = 0 \quad (15)$$

水库 j 的弃水量:

$$PS_{j,i} = V_{j,i} - V_{j,i(\max)} \quad (16)$$

(3) 若 $V_{j(\min)} \leq V_{j,i} \leq V_{j,i(\max)}$, 则水库不需要弃水和补水为:

$$Y_{j,i} = PS_{j,i} = 0 \quad (17)$$

式中: Δ_j 为泵站 j 的补水量控制参数, 10^4 m^3 ; 其余变量含义同上。

2.3.3 子系统聚合 子系统之间的水力联系主要依靠翻水线形成, 因此子系统聚合的关键在于确定泵站的调度策略, 即解决“泵站什么时候提水, 提多少水”的问题。在 2.3.2 节修正水库蓄水量过程中, 水库的蓄水量下限 V_{\min} 与补水量控制参数 Δ 代表了调度过程中了补库泵站的启、停控制标准, 其取值不仅影响泵站的提水量, 还影响水库下阶段所处的状态。因此, 可令水库蓄水量下限 $V_{j(\min)}$ 和补水量控制参数 Δ_j 为影响因素, 选择合适的因素水平, 构建正交试验方案, 然后求解上述模型, 从而获得最佳的系统联合调度策略。

3 应用实例

3.1 工程概况

以位于江苏省南京市六合区的山湖水库与泥桥水库及其翻水线的联合调度方案作为实例进行研究。山湖水库是六合区的第二大水库, 主要功能是供水, 调度期内水量不足时可由库下肖庄站从八里河提水补库。此外山湖水库还设有翻水线, 通过胡庄站向地势更高的泥桥水库翻水补库。水库特性见表 1, 泵站特性见表 2。

表 1 应用实例两水库特性

水库	死库容/ 10^4 m^3	兴利库容/ 10^4 m^3	总库容/ 10^4 m^3	最大水域 面积/ km^2	集水面 积/ km^2	灌溉 面积/ hm^2
山湖水库	800	1357	2473	5.5	30.8	2067
泥桥水库	80	218	500	1.7	7.2	667

表 2 应用实例两泵站特性

泵站	设计流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大日运行 时间/ h	水权/ 10^4 m^3
肖庄站	2.76	18	800
胡庄站	1.50	18	200

3.2 来水量和需水量

系统来水量和需水量均采用 2016 年的实际数据, 见表 3。

表3 2016年各月份两水库实际来水量和需水量

10⁴ m³

水库	类别	月份												合计
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
山湖水库	来水	36	20	10	10	10	15	25	110	433	393	470	98	1630
	需水	40	40	40	80	80	60	40	150	610	200	180	140	1660
泥桥水库	来水	8	5	2	2	2	4	6	26	68	71	50	22	266
	需水	11	10	9	13	13	10	10	13	127	60	60	40	376

3.3 蒸发

蒸发损失根据该时段的蒸发深度和水库平均水域面积确定,其中蒸发深度采用六合站实测的蒸发数据(见表4),并利用折算系数进行修正,如公式(18)所示:

$$E_i = 0.1kE_{601}A_i \quad (18)$$

式中: E_i 为水库*i*时段内的蒸发量,10⁴ m³; E_{601} 为蒸发器蒸发量,mm; k 为水面蒸发折算系数(采用《江苏省水文手册》中的计算成果); A_i 为水库在*i*时段内的平均库面面积,km²。

水域面积根据水库管理人员提供的水域面积—蓄水量关系函数确定,如公式(19)所示:

$$A = \alpha V + \beta \quad (19)$$

式中: A 为库面面积,km²; V 为水库蓄水量,10⁴ m³; α, β 为系数(山湖水库: $\alpha = 1.194 \times 10^{-3}, \beta = 2.575$;泥桥水库: $\alpha = 1.657 \times 10^{-3}, \beta = 0.862$)。

表4 2016年各月份六合站 E_{601} 蒸发量 mm

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
蒸发量	56	42	38	23	28	41	58	86	98	115	110	71

3.4 实际调度结果

在实际调度过程中,水库管理者通常在灌溉期到来前通过肖庄站将山湖水库补至较高的水位,保证灌溉期用水。而当地势较高的泥桥水库缺水时,山湖水库通过胡庄站向其调水,并控制泥桥水库水位不低于死水位。在2016年的实际调度方案中,山湖水库的蓄水量下限为900 × 10⁴ m³,补水量控制参数为540 × 10⁴ m³,泥桥水库的蓄水量下限为80 × 10⁴ m³,补水控制参数为0,系统实际调度结果如表5所示。在该调度方案下,虽然保证了系统各时段的用水,但系统仍弃水229 × 10⁴ m³,如果能减少弃水并加以利用,就能相应减少补水量,从而降低系统的运行成本。

3.5 优化调度结果

本文以两座水库的蓄水量下限和补水量控制参

数为因素,各因素取3种试验水平,构建4因素3水平正交表 $L_9(3^4)^{[15]}$ 。其中,水库的蓄水量下限 $V_{j(\min)}$ 在水库死库容与兴利库容之间确定,初拟 $V_{1(\min)} = 900 \times 10^4, 850 \times 10^4, 800 \times 10^4 \text{ m}^3, V_{2(\min)} = 80 \times 10^4, 90 \times 10^4, 100 \times 10^4 \text{ m}^3$;补水量控制参数 Δ_j 的试验水平在泵站允许的提水负荷范围内确定,初拟 $\Delta_1 = 540 \times 10^4, 480 \times 10^4, 420 \times 10^4 \text{ m}^3, \Delta_2 = 0, 10 \times 10^4, 20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。将因素水平组合代入优化模型中对系统的调度方案进行优化,试验组合及其优化结果如表6所示。

表5 系统实际调度结果

10⁴ m³

水库	供水量	弃水量	补水量	缺水量	蒸发量
	X_i	PS_i	Y_i	QS_i	EF_i
山湖水库	1660	229	756	0	308
泥桥水库	376	0	189	0	79
合计	2036	229	945	0	387

表6 试验组合及其优化结果

10⁴ m³

组合	蓄水量下限		补水量控制参数		总补水量 $\sum Y$
	山湖水库	泥桥水库	山湖水库	泥桥水库	
	$V_{1(\min)}$	$V_{2(\min)}$	Δ_1	Δ_2	
1	900	80	540	0	945
2	900	90	480	10	847
3	900	100	420	20	806
4	850	80	480	20	759
5	850	90	420	0	703
6	850	100	540	10	745
7	800	80	420	10	700
8	800	90	540	20	756
9	800	100	480	0	703

注:表中水库蓄水量下限所对应的水位均能满足自流灌溉要求。

对9个试验方案进行极差分析^[16],取指标值(总补水量)均值较小的水平为较优水平,获得最优的因素试验水平组合为 $V_{1(\min)} = 800 \times 10^4 \text{ m}^3, V_{2(\min)} = 100 \times 10^4 \text{ m}^3, \Delta_1 = 420 \times 10^4 \text{ m}^3, \Delta_2 = 10 \times$

10^4 m^3 。将最优的因素试验水平组合代入模型中,求解获得系统优化调度结果如表 7 所示。在该因素水平组合下,水库弃水量已减小到 0,系统调度方案已达到最优,因此无须进一步调整因素水平进行正交试验。

水库	供水量 X_i	弃水量 PS_i	补水量 Y_i	缺水量 QS_i	蒸发量 EF_i
山湖水库	1660	0	511	0	290
泥桥水库	376	0	191	0	81
合计	2036	0	702	0	371

4 结果分析与讨论

系统优化调度结果(表 7)与实际调度结果(表 5)相比,在充分满足需水量(缺水量为 0)的前提下,系统总弃水量从 $229 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减少至 0,总补水量从 $945 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减少至 $702 \times 10^4 \text{ m}^3$ (减少 25.7%),按泵站提水流量 $2.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 计,可节省泵站运行时间约 245 h,大大降低了系统的运行成本。

为研究模型中水库的蓄水量下限 V_{\min} 与泵站补水量控制参数 Δ 的取值对系统调度结果的影响,根据正交试验的结果,分别绘制系统总补水量 $\sum Y_i$ 与水库蓄水量下限 V_{\min} 的关系曲线以及系统总补水量 $\sum Y_i$ 与补水量控制参数 Δ 的关系曲线,如图 2 ~ 3 所示。

由图 2 ~ 3 可知:对于山湖水库和肖庄站,在满

足水位要求的前提下,降低水库蓄水量下限,延迟补库泵站开机时间,同时降低补水量控制参数,减少一次开机补水量,就能减少系统总补水量。这是由于延迟泵站开机并控制补水量后,相对降低了山湖水库同期的蓄水量(水位),从而提高了水库容蓄洪水的能力,减少了弃水量。但是对以供水为主要功能的水库,水库管理员习惯上总是倾向于维持水库较高的水位,减小后期缺水的可能性。从图 2(a)中也可以看出,当山湖水库 $V_{1(\min)}$ 减小到 $850 \times 10^4 \text{ m}^3$ 后,曲线斜率减小,说明 $V_{1(\min)}$ 对 $\sum Y_i$ 的影响开始减弱,因此在实际管理中也没有必要将水库的蓄水量降低过多,以免水域面积的收缩和库面蒸发的减少会对当地生态环境造成不利影响。

对于泥桥水库和胡庄站,在满足水位要求的前提下,提高水库蓄水量下限,提前开机补库,并适当增加一次开机补水量,就能减少系统总补水量。这是由于提前从山湖水库提水补库同样可以帮助山湖水库降低前期蓄水量,减少山湖水库发生弃水的可能性。但是从图 3(b)中可以看出,泥桥水库的一次开机补水量并非越大越好,当大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时,系统总补水量开始产生回弹。实际上,从表 5 和表 7 的对比就能发现,调度方案优化后虽然系统总补水量减少了,但泥桥水库补水量却有所增加,这是因为提高蓄水量下限并增加一次开机补水量以后,泥桥水库的水位较同期有所提高,导致其水域面积增加,库面蒸发增大。

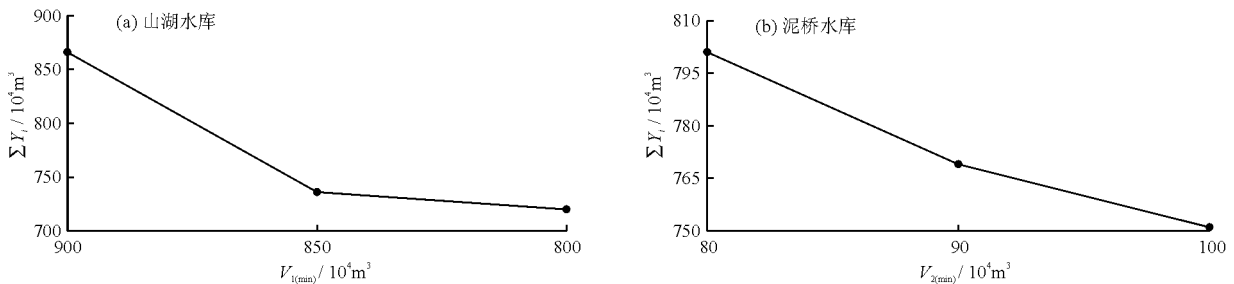


图 2 研究系统两水库 $\sum Y_i \sim V_{\min}$ 关系曲线

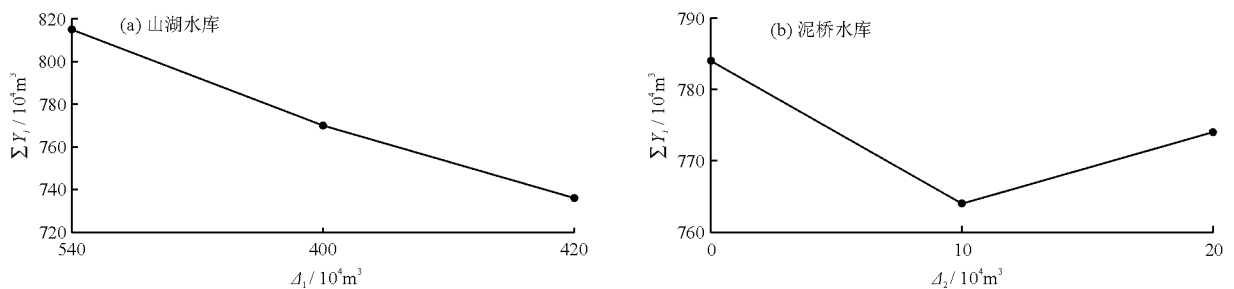


图 3 研究系统两水库 $\sum Y_i \sim \Delta$ 关系曲线

5 结 论

本文针对南方丘陵山区含有翻水线的两库系统,以系统各时段缺水平方和最小为目标函数,水库年可供水量以及泵站水权为约束条件,水库供水量及补库泵站提水量为决策变量,构建了水资源优化调度模型。针对该模型特点,提出了基于正交试验和动态规划的求解方法。将该方法应用于江苏省南京市六合区的山湖水库与泥桥水库及其翻水线的联合调度方案中,可减少系统总补水量 25.7%,节省补库泵站运行时间 245 h,并得出以下结论:

(1)在丰水地区,水库和泵站水资源系统在满足需水的前提下,以降低水库弃水,减少泵站补水作为调度目标可以取得一定的经济效益。

(2)对于含翻水线的两库系统,为减少系统补水量,对于输水水库及其补库泵站,应适当延迟泵站开机补库时间,并减少一次补水量;对于受水水库及其补库泵站,应适当提前泵站开机时间,并增加一次补水量。

该方法对我国南方丘陵山区类似的“水库-泵站”系统的运行管理具有一定的指导意义。今后,还将进一步针对动态来水量和需水量,对水库和泵站的实时调度方法进行研究。

参考文献:

- [1] 代琼,何新林,韩志全,等. 玛纳斯河灌区库群系统水资源优化调度研究[J]. 中国农村水利水电,2009(6):49-53.
- [2] 武见,李克飞,赵麦换,等. 应对干旱的黄河梯级水库群水量调度规则研究[J]. 人民黄河,2017,39(11):34-37+94.
- [3] 姜蓓蕾,耿雷华,徐澎波,等. 南方丰水地区节水型社会建设特点初探[J]. 人民长江,2011,42(17):84-86+90.
- [4] 丁正祥,李文良,周建康. 南京市六合区滁河北部片区水资源配置的思路和方法[J]. 江苏水利,2008(9):43-44.
- [5] 龚嘉秀,王滇红,龚懿,等. 基于 DPSA 算法直接补渠的单库-单站系统水资源优化配置[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2018,21(2):68-72.
- [6] 史振铜,程吉林,杨树滩,等. 基于 DPSA 算法的“单库-单站”水资源优化调度方法研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(2):37-40.
- [7] YU G, POWELL R S, STERLING M J H. Optimized pumping scheduling in water distribution systems[J]. Journal of Optimization and Application, 1994, 83(3):463-488.
- [8] PULIDO-CALVO I, GUTIÉRREZ-ESTRADA J C. Selection and operation of pumping stations of water distribution systems[J]. Environmental Research Journal, 2011, 5(3):1-20.
- [9] RECA J, GARCÍA-MANZANO A, MARTÍNEZ J. Optimal pumping scheduling for complex irrigation water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(5):630-637.
- [10] RECA J, GARCÍA-MANZANO A, MARTÍNEZ J. Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation[J]. Agricultural Water Management, 2015, 148:250-257.
- [11] ĐURIN B. Some aspects of the operation work of pump station and water reservoir[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2016, 60(3):345-353.
- [12] 代小平,仵峰,张亮,等. 灌区农业水权分配存在的问题及对策探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):68-72.
- [13] 王慧. 江西:南方丰水地区水权确权实践与经验[J]. 中国水利,2018(19):46-48.
- [14] 龚志浩,程吉林,杨树滩,等. 山湖水库“一库两站”联合运行优化调度方法[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(2):124-129.
- [15] 程吉林. 大系统试验选优理论与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002.
- [16] TIAN Jiandong, CHENG Jilin, GONG Yi. Optimization of municipal pressure pumping station layout and sewage pipe network design[J]. Engineering Optimization, 2017, 50(3):537-547.