

跨流域调水工程中调蓄工程的调度研究

陈柯明 韩义超 李 波

(辽宁省水利水电勘测设计研究院 沈阳市 110006)

摘要 在跨流域调水工程中,调入区的调蓄工程由于其功能及入流的变化,调蓄工程原有的调度运用方式已难以满足跨流域调水的要求,因此需重新研究调水工程中调蓄工程的调度运用。通过分析某调水工程中主要调蓄工程在调水前后的功能及水文条件的变化,结合工程的具体特点,编制了适合调水工程的运用方式。

关键词 跨流域调水 调蓄工程 调度

Research on the Regulation of the Regulating - and - Storing Works for Inter - Basin Water Transfer Project

Chen Keming Han Yichao Li Bo

(Reconnaissance and Design Institute of Water Resources and Hydropower of Liaoning Province, Shenyang City 110006)

Abstract: In the project of inter-basin water transfer, the regulating-and-storing works in the area of receiving water will change due to the variation of the functions and water inflow, and the original regulation and operation ways cannot meet the requirement of the inter-basin water transfer project, so it is necessary to research the regulation and operation of the regulating-and-storing works for the project. Through analysis of the variation of functions and hydrologic conditions before and after the project, and incorporation of the features of the project, the operation mode suiting the water transfer project is proposed.

Key words: inter - basin water transfer regulating-and-storing works regulation

1 跨流域调水工程系统构成

该工程是利用数十公里的输水隧洞将调出区富余的水量调往调入区的 A 水库,经该水库调节后供给调入地区缺水严重的六城市。从调入区与调出区现有工程情况看,在输水工程中起调蓄作用的工程有调出区的 B 水库、C 电站、D 电站,调入区的 A 水库,其中 B 水库虽然对所在河径流起调节作用,但其调度运用服从于发电要求,是按电站的调度图运行,调水工程运

行后 B 电站不改变原有的运行方式,C 电站与 D 电站均为日调节电站,对调水工程的调蓄作用影响不大,因此主要针对 A 水库在调水以后的调度进行研究。

2 A 水库现状承担的任务及调度运用方案

2.1 现状水平年 A 水库兴利任务

A 水库是以防洪、城市供水、农业灌溉为主,发电、养鱼为辅的综合利用水利枢纽工程。水库控制面积 5437 km², 占所

求的状况,依据供水主次关系以及对国民经济的影响,对发电用水仍采取限量供应的办法,即在满足其他部门兴利用水需求后,用多余的水发电。

表 1 水库水量优化配置

名称	农业灌溉	发电	城市	泄洪	环境	合计
需水量/亿 m ³	1.50	3.82	0.95	0.54	0.30	7.11
比例/%	21.1	53.7	13.4	7.6	4.2	100

从表 1 可以看出,提高水库水资源的承载能力,主要是做好全社会节水工作,如农业灌溉供水下降了 47.4%,泄洪水量下降了 63.8%,用节约的水量来满足其他项目的用水需求,如城市供水增加了 79.2%,环境用水增加了 50%,发电用水量增加了 117%。从表 1 与表 3 还可看出,在总供水量变化不大的情况下,不论是自身效益,还是社会、经济效益都有较大的提

高,如果考虑灌区内即将实施的节水改造续建配套计划以及工业用水广泛采用循环水系统等,灌溉供水量还可进一步下降,而发电水量则继续增加,相同的水资源数量,则可发挥更大的效益。因而只要措施得力,提高水库水资源的承载能力就大有潜力可挖。 □

参考文献

- 1 陈崇德. 漳河水库水资源利用变化特点及发展趋势预测[J]. 中国农村水利水电, 1998(10)
- 2 许志方. 论提高灌溉水的利用率[J]. 中国水利, 2001(8)
- 3 邓 莉, 王小林, 洪 林, 等. 节水灌溉对农民投入与产出的影响[J]. 中国农村水利水电, 2000(9)

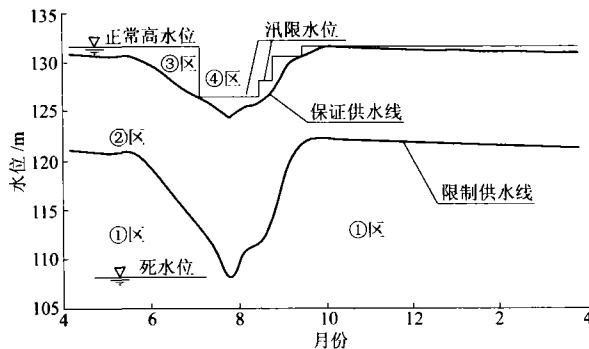
[作者简介] 陈崇德,男,49岁,高级工程师

(收稿日期:2002-11-31)

在流域面积的 47.4%, 是调入区的控制性骨干工程。目前, 水库的兴利任务主要是承担下游两市的城市工业与生活用水及补偿水库以下 140 多万亩的农业灌溉用水。现状水平年下游水库供水范围内的各业用水经与水库下游区间来水平衡后, 须由 A 水库直供和补偿的水量为 10.19 亿 m^3 , 其中直供两城市工业与生活 4.76 亿 m^3 , 补偿区间工业 0.16 亿 m^3 , 补偿区间农业 5.27 亿 m^3 。

2.2 现状水平年 A 水库调度运用方式

A 水库的兴利调度研究起步很早, 早在 1977 年就编制了 A 水库的调度图, 该调度图是通过相关分析插补, 获取了 38 年的水库入库水量资料, 利用时历法及简化数理统计法, 绘制了 A 水库的多年调节调度图。A 水库目前采用的供水调度图, 见图 1。调度图分成 4 个区: ①区为限制供水区, 即减少对各用水户的计用水; ②区为正常供水区; ③区为加大供水区; ④区为防洪调度区。目前 A 水库日常供水运行时, 基本参照此调度图进行。应该说, 这些研究成果对 A 水库多年来的运行都起到了积极的指导作用, 产生了一定的经济和社会效益。



①区—减少供水区; ②区—保证供水区;
③区—加大供水区; ④区—防洪调度区

图1 A 水库现状调度图

3 调蓄工程调度研究

3.1 调水工程实施后 A 水库的工程任务、人流条件的变化

调水工程实施后, A 水库除担负原有的防洪、城市供水及农业灌溉任务以外, 还担负对调入水量的调节任务, 并将调节后的水量供给调入区的六城市。

调水工程实施后, A 水库的入流发生较大的变化, 外流域调入水量已达总入库水量的 55.65%, 由于入库水量的变化使 A 水库情况发生变化, 由图 2 调水前、调水后多年平均径流对比图看, 由调出区调入的水量在年际间变化不大, 而 A 水库所在流域的年径流量在年际间变化相对较大。A 水库所在流域年径流量的变差系数为 0.44, 由调出区调入的年调水量的变差系数为 0.09, 调水后总入库径流的年径流变差系数为 0.17, 由此可见, 输水工程实施后改善了 A 水库年际间的径流变化。

3.2 修改调度运用方案的必要性

调入区的缺水形势严峻, 使得调水工程势在必行, 实施调水工程之后, A 水库在调水工程中起到主要的调节作用, 由上述情况看, 其承担的任务及入流均发生较大的变化, 原有无调

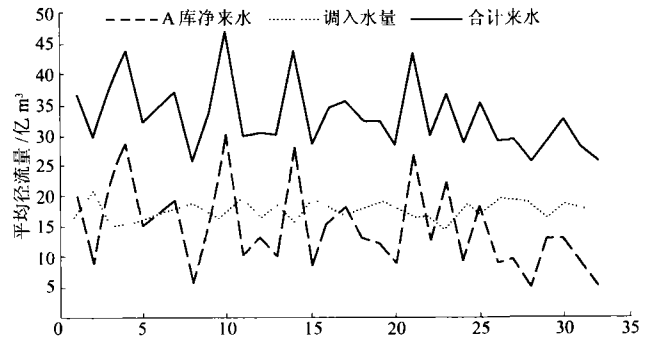


图2 调水前、调水后多年平均径流对比图

水情况下的运行调度规则将不再适用, 在 A 水库天然入流和调出区调水有限的情况下, 调入区的生活、工业、农业、环境等用水户之间水量如何分配, 如何通过调蓄工程的优化调度以最大限度地满足调入区用水户的用水需求, 以及最大限度的减少对调出区的影响, 将是调蓄工程调度研究的关键。

3.3 调蓄工程调度方案的研究

调蓄工程的调度方案采用了两种数学手段, 一是采用自优化模拟模型, 二是采用多目标动态规划模型。

3.3.1 A 水库兴利调度的自优化模拟模型

A 水库兴利调度自优化模拟模型, 用该模型对 A 水库进行长系列模拟运行, 编制多用户、多保证率的水库调度图; 模拟是对一个系统功能的仿真技术, 它试图重现或预演某一系统的运营情况, 而不实地去建造并运转该系统。模拟模型不仅可用于研究水资源系统开发前的系统优化与设计, 也可用于工程建成后的水资源系统管理与运行。

(1) 数学模型。多目标跨流域调水工程, 可采用在系统弃水量最少和调水量最大等目标约束下, 以系统供水量最大为目标函数。数学表述为:

$$Z = \max \sum_{t=1}^N W_{(t)}$$

式中: $W_{(t)}$ 为 t 时段各供水子系统的供水列向量, 且 $W_{(t)} = U_{(t)} - D_{(t)}$, $U_{(t)}$ 、 $D_{(t)}$ 分别是需水列向量和缺水列向量; N 为运行时段总数, 它受水库供水区的水量平衡方程约束。水量平衡方程为:

$$V_{(t+1)} = V_{(t)} + Q_{(t)} + D_{I(t)} - W_{(t)} - D_{L(t)} - L_{S(t)} + K_B \cdot (X_{I(t)} - D_{O(t)} - X_{O(t)})$$

式中: $V_{(t)}$ 、 $V_{(t+1)}$ 分别是水库在 t 时段的始、末蓄水量列向量; $Q_{(t)}$ 是当地水资源量列向量; $D_{I(t)}$ 是调入水量列向量; $D_{L(t)}$ 是水库弃水量列向量; $L_{S(t)}$ 是损失水量列向量; 对串联水库系统, 即当 $K_B = 1$ 时, 还有上游其他水库的下泄入库水量列向量 $X_{I(t)}$, 和本水库的下泄水量列向量 $X_{O(t)}$, 以及调出水量列向量 $D_{O(t)}$; 对并联系统 $K_B = 0$ 。^[1]

(2) 数据预处理。根据 A 水库输水工程的具体情况, 将各项用水合并处理成为两个系列, 第一系列用水: 环境用水 + 直供需供水 + 区间工业需供水 (统称工业用水), 第二系列用水: 第一系列用水 + 农业需供水 (统称工、农总用水)。

分别对两个用水系列进行 32 年逆序模拟运算, 并统计各调节年度蓄水量过程 $S \sim t$ (或水位过程 $Z \sim t$)。按工业供水保证率 95% 要求, 取 32 年 $S \sim t$ 的上、下包线, 即分别为工业加大

线和工业限制线。按农业供水保证率 75% 要求,再取 $S \sim t$ 的上、下包线,即分别农业加大线和农业限制线。上述 4 条调度线将水库兴利区分成 5 个运行区,构成初步综合利用兴利调度图,由于“工业限制线”接近死库容,故可忽略“工业限制线”,认为调度图只有 3 条调度线,再加上上限 $V_{\text{正常蓄水位}}$ 、 $V_{\text{防洪限制水位}}$ 和死库容,由此得到初始调度图。

(3) 顺时序模拟检验与调整:通过顺时序模拟的结果可以检验逆时序使用的调度图是否达到各用水户供水保证率要求,若不合理则需要适当调整调度图的控制线的位置及运行调度规则。经过多次的调整比较得出,在工业加大线~农业加大线区加大系数取 1,即不调整工业加大线。通过对农业限制线的多次调整,在降低农业的保证率降时,其它用水户的供水保证率均显著提高,且调水量和弃水量相对减小,但缺水量相应加大,由此可见,适当提高农业限制线,限制农业供水,是提高工业用水保证率的有效手段。对于调水方案比较分析认为,不同调水方案可通过在农业加大供水线以上的农业加大供水区采用不同的调水系数来实现,也可通过在农业加大供水区引入一条限制调水线,在限制调水线之下、农业加大线之上调水,而在限制调水线之上则不调水,以减少可能导致的弃水。经过多方案分析比较,认为用限制调水线进行控制比较好操作,故采用此方法。

在满足直供、工业、农业供水保证率及控制一定的破坏深度的基础上,以多年平均调水量最小,多年平均亏水量、弃水量最小为目标,通过多次调整,得到 A 水库的供水调度线及 A 水库自优化模拟方案的兴利调度图,见图 3。

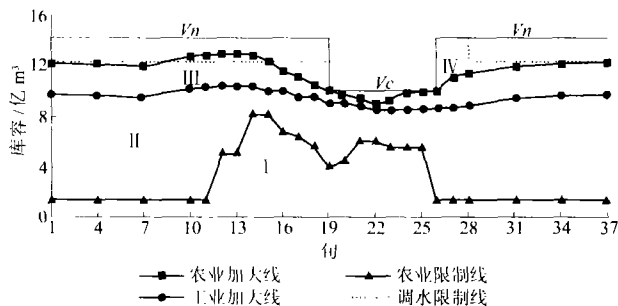


图 3 自优化模拟方案兴利调度图

3.3.2 A 水库兴利调度的多目标动态规划模型

动态规划 DP 是一种系统分析方法,主要用于解决多阶段决策过程的优化问题。多阶段决策过程是根据时间、空间或变化的特征,将过程分为若干阶段,在每一阶段都需做出决策,而使过程取得最优的结果。即它把一个包含 n 个决策变量的问题,分为 n 个只包含一个决策变量而相互联系的子问题,顺序地加以解决,最后一个子问题所得的最优解就是这个原始问题的最优解。

采用多目标动态规划模型确定 A 水库兴利调度运用方式分三个步骤,一是建立 A 水库兴利调度的多目标动态规划模型,二是用该模型确定 A 水库初始调度图,三是采用坐标轮换法进行初始调度图的调整。

(1) A 水库兴利调度动态规划模型。根据动态规划的基本理论,建立 A 水库兴利调度多目标动态规划模型,并采用权重法和约束法将部分目标转化为决策约束和运行规则,将一个多

目标问题转化为单目标问题进行求解。按时间(汛期以旬、非汛期以月)划分阶段,以时段初水库的蓄水量为状态变量,记为 $S(k)$,以时段 k 内水库的放水量为决策变量。建立如下的系统方程:

$$S(k+1) = S(k) + L_{v,1}(k) + L_{v,2}(k) + R_{v,3}(k) -$$

$$X(k) - K_{sun}(k)$$

其中: $X(k) = X_I(k) + X_L(k) + X_U(k) +$

$$X_H(k) + X_J(k) + X(k)$$

式中: $L_{v,1}(k)$ 为第 k 时段来水量; $R_{v,3}(k)$ 为第 k 时段外流域实调水量; $X(k)$ 为第 k 时段 A 水库放水量; $K_{sun}(k)$ 为第 k 时段 A 水库的蒸发渗漏损失量; $X_I(k)$ 为第 k 时段 A 水库对农业的供水量; $X_L(k)$ 为第 k 时段 A 水库直供工业、生活的水量; $X_U(k)$ 为第 k 时段 A 水库对区间工业的供水量; $X_H(k)$ 为第 k 时段 A 水库对环境供水量; $X_J(k)$ 为第 k 时段需 A 水库补偿的径流缺水量; $X(k)$ 为第 k 时段 A 水库的弃水量。

目标函数:以灌溉、区间工业、直供工业及生活三者的缺水量的加权和最小为基本目标。当某时段有亏水产生时,优先保证直供工业、生活,其次是区间工业,最后是农业,即先限制农业用水,再限制区间工业,最后限制直供用水。将弃水量最小的目标转化为以下运行规则:

①在丰水期,能够满足所有用户正常供水的条件下,即使水库没有达到蓄水量上限,也不调或少调水;

②在枯水期,尽量调水到水库达到蓄水量上限,则停止调水。

约束条件分为 3 个:一是状态约束,即水库特征水位的约束;二是决策约束,即各项用水的需水量约束;三是外流域可调水量约束。

(2) 初始调度图的编制。按第一用水系列进行计算,可得水库 32 年的运行轨迹过程(水库蓄水状态),按保证率的要求,去掉几个年份,取其上包线,即为直供加大供水线;取其下包线,即为直供限制供水线 $L(i+1)$ 。按第二用水系列进行计算,并按区间工业保证率 95%,取 32 年过程上包线,即为区间工业加大供水线;取其下包线,即为区间工业限制供水线。按第三用水系列进行计算,并按农业保证率 75%,去掉 7 个破坏最严重的年份,取其上包线,即为农业加大供水线;取其下包线,即为农业限制供水线。区间工业由于本身的区间径流较大,需要水库提供的供水较小,故工业加大线与直供加大线非常接近,工业限制线与直供限制线也非常接近。简化起见,将工业加大线与直供加大线合为一条线,统称为工业加大线,将工业限制线与直供限制线合在一起,称为工业限制线,这样四根调度线加上死库容线及水库蓄水上限(汛期为防限库容;非汛期正常库容)便构成了大伙房水库的初始调度图。

(3) 对初始调度图的调整。按动态规划的求解过程,确定 A 水库初始调度图,并以获得的初始调度图按各区运行方式顺序进行长系列模拟计算,以检验各用水户是否达到设计保证率,分析顺序模拟运行成果存在的问题,并对初始调度图进行分析调整。

①供水控制线的调整:调度图调整的基本思想是:当农业保证率偏低时,适当降低农业限制线,特别是供水期的农业限

制线,同时提高蓄水期农业加大供水线;当工业保证率偏低时,应适当提高农业供水限制线,同时提高蓄水期的工业加大供水线。

对于加大及限制供水系数,经过试算预先设定一组值;限制供水系数以不超出用水破坏深度为准,农业限制系数取 0.7,区间工业和直供水限制系数都取 0.9。在这些条件设定的情况下,按初始调度图进行顺时序调节计算,从其结果看,直供水破坏的时段较多,且一半左右超出了破坏深度,而农业只破坏了三年,大大高于 75%(破坏 7 年)的保证率,这说明农业供水保证率偏高、区间工业和直供水偏低,农业用水限制的潜

力还很大,因此应适当地调高农业用水限制线,通过多次调整比较,发现提高农业用水限制线后,直供用水的破坏时段数减少了,提高工业加大线以后,农业保证率一致,对于直供供水和工业的保证率影响不大,提高农业加大供水线对供水几乎没有影响,这是因为农业加大线已经很高了,水库运行状态落在农业加大区的频次不多,单纯提高农业加大供水线的作用并不大。事实上,调度图调整过程中,各影响因素间存在交互作用,一般需要从几个因素同时着手。

②调水限制线的调整:对调水限制线的研究是通过 5 个拟定的调水规则来完成的,5 个调水规则及相应的计算结果见表 1。

表 1 调度图不同限制调水线的调节计算结果

各项指标	限制调水线 11.0 亿 m ³	限制调水线 11.5 亿 m ³	限制调水线 12.0 亿 m ³	限制调水线 12.5 亿 m ³	限制调水线 13.0 亿 m ³
农业破坏年数	11	9	7	6	6
区间工业破坏时段数	3	3	0	0	0
直供供水破坏时段数	4(2)	6(2)	0	0	0
多年平均缺水量	62.56	56.70	48.45	46.10	44.14
水库多年平均弃水量	331.53	353.00	360.68	379.69	382.42
浑江多年平均调水量	1 736.50	1 767.67	1 788.75	1 813.65	1820.55

注:供水规则区间工业和直供及农业用水的加大系数都取 1.02;直供供水破坏时段数后括号里的数为超过破坏深度的时段数。

经上述计算分析可以发现,在农业供水加大区的调水有相当一部分只是变成了无益的弃水,在库容处于 12 亿 m³ 以上时,调入的水 80% 左右成为弃水,而当限制调水线在 12 亿 m³ 以下时,虽然多年平均调水量减少,但无论农业、直供及工业的保证率都不能满足。故以 12 亿 m³ 的库容线作为调水限制线,即若时段初水库蓄水状态在该线以上,本时段不调水,否则,按系数 1.0 调水。供水规则为区间工业和直供及农业用水的加大系数都取 1.02 时,以 12 亿 m³ 的限制调水线进行顺时序模拟检验,结果为农业破坏 7 年,区间工业与直供水没有一个时段破坏,多年平均调水量 17.88 亿 m³,年平均缺水 0.484 5 亿 m³,多年平均弃水 3.606 8 亿 m³。

经过上述供水控制与调水限制线的调整后,A 水库调度图见图 4。

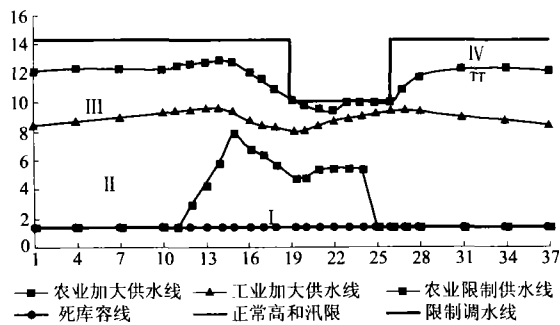


图 4 调蓄工程调度图(动态规划方法)

3.3.3 A 水库调度的选择

根据两种模型所得推荐调度图进行顺序模拟得到的运行结果可以看出,在工业、农业及直供水保证率相同的情况下,按动态规划调度图运行的多年平均调水量为 17.888 亿 m³,多年平均弃水量为 3.607 亿 m³,多年平均缺水量为 0.485 亿 m³;按自优化模拟调度图运行的多年平均调水量为 18.005 亿 m³,

多年平均弃水量为 3.767 亿 m³,多年平均缺水量为 0.509 亿 m³。这说明按动态规划确定的调度图运行时,这三项都较自优化模拟调度图的运行结果小,调水利用率高,满足相同的供水保证率需调的水量少;同时供水与实际需水过程吻合得较好,从而使弃水和缺水都小。因此,推荐采用动态规划模型确定的调度图。

4 结 语

通过上述两种数学模型的分析,动态规划编制的调度图与自优化模拟编制的调度图在调水调度方面都采用调水调度线控制,自优化模拟的调度线高于动态规划的调水调度线,其调入水量较动态规划调入水量大,引起调出区电能损失增大;在供水调度方面,两种方法的供出水量基本相同,但动态规划弃水量较自优化模拟弃水量小,说明调入水的利用率高。因此,推荐的调度运用方案是合理的,它将对工程实施后调水工程的调度运行起到积极的指导作用。

参 考 文 献

1 邵东国,李苏杰.梯级泵站供水系统水资源优化调度模型研究[J].中国农村水利水电,2000(2)
2 王 平.灌溉水库兴利调度图长系列计算方法的改进[J].农田水利与小水电,1997(7)
3 郭元裕.灌排工程最优规划与管理[M].北京:水利水电出版社,1994
4 栾春婴,程传国.亭子口水利枢纽库区防洪及航运问题的研究[J].中国农村水利水电,2001(1)
5 周树春,廖继立,张国新,等.流溪河灌区渠首枢纽管理信息系统[J].中国农村水利水电,2001(3)

[作者简介] 陈柯明,男,42岁,高级工程师
(收稿日期:2003-01-25)