

含支线调蓄的调水系统水库群联合调度

马永胜

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 针对调水工程与其支线调蓄工程所面临的复杂水库群联合调度问题,以陕西省引汉济渭调水工程及其支线调蓄工程焦岩水库、玉带河水库构成的联合调度系统为工程实例,运用拓扑概化方式揭示了各水源之间的水利-水量联系,并由此构建了联合调度模型,采用协同粒子群算法求解了10 a长系列调度,提出了单一水库多目标供水方案,解析了耦合系统补给调水效果。结果表明:支线调蓄工程能够在均衡多目标供水效益的基础上,通过耦合系统有效增加补给调水量,显著改善调水过程。

关键词: 调水系统; 水库群; 支线调蓄工程; 多目标联合调度; 引汉济渭调水工程

中图分类号: TV697

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0135-08

Joint operation of reservoir groups in water transfer system with branch storage – regulation

MA Yongsheng

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China)

Abstract: For the operation problem of complex reservoir groups faced by the inter-basin water transfer project (IBWT) and its branch storage – regulation project (BSRP), taking the joint operation system consisted of the IBWT of Hanjiang to Weihe River and its BSRPs of Jiaoyan Reservoir and Yudaihe Reservoir as an example, the hydraulics and water yield connection between the water sources was revealed using topological generalization method. Then a joint operation model was constructed, and the long time series regulation of 10 years was solved by the collaborative particle swarm optimization (CPSO) algorithm. With this model, a multi-objective water supply scheme for an individual reservoir was proposed, and then the effect of IBWT and BSRP coupled system was analyzed. The results show that the BSRP can effectively increase the water supply and significantly improve the transfer process of the coupled system on the basis of balancing the multi-objective benefits.

Key words: water transfer system; reservoir group; branch storage – regulation project; multi-objective joint operation; Hanjiang to Weihe River Water Transfer Project

1 研究背景

随着我国经济社会高质量发展的不断加速,水资源作为保障性的基础资源,其空间分布不均的禀赋特点已然凸显,导致缺水地区水安全矛盾日益突出^[1-2]。跨流域调水工程是实现水资源“空间均衡”的重要工程措施,我国各等级跨流域调水工程的数量及规模与日俱增^[3-4]。此外,为应对我国新发展阶段所带来的变化与需求,已有跨流域调水工程的样式有了新的变化,其功能定位更为多样、拓扑

结构愈发庞杂^[5]。2021年5月14日习近平总书记在推进南水北调后续工程高质量发展座谈会中提出的“后续”保障问题,也已成为跨流域调水领域研究的热点^[6-8]。

在有关跨流域调水系统的构建与功能定位方面,国内外学者均已开展了相关研究。如 Arunkumar 等^[9]参照混沌学理论构建了跨流域多目标调水模型,能够满足具有多个开发任务、多目标调水工程的需求,提高了工程的综合效益;Rani 等^[10]研究了印度北部包含3座水库的 Vaippar 跨流域联合调度

收稿日期:2022-04-12; 修回日期:2022-07-20

作者简介:马永胜(1983-),男,陕西西安人,博士,高级工程师,主要从事大型跨流域调水及水资源优化调度方面的研究工作。

工程,利用动态规划方法寻求跨流域最优调水量,并以水库调度图形式表示,满足了以农业灌溉为主要目标的调水需求。对于跨流域调水工程的“后续”保障形式,一是开发新的跨流域工程直接增加外域调水,如近期正在论证的南水北调中线后续水源工程——引江补汉工程,即从长江三峡水库调水直接补给汉江丹江口水库,以加大中线工程的调水量^[11];另有陕西省引汉济渭调水工程后续水源工程——引嘉入汉工程,即从嘉陵江流域调水补给汉江,增加了汉江的可调水量^[12],该类工程不可避免地涉及水量分配等问题,需要进行优化配置,如 Alahdin 等^[13]基于博弈论中的纳什均衡理论(Nash equilibrium),应用 QRE(quantal response equilibrium)方法,实现了伊朗西南地区 Zohreh 跨流域调水工程中 3 座水库的联合调度。开发新的跨流域工程通过从外部其他流域调水虽然可直接增加调水量,但由于要修建规模较大、距离较长的输水建筑物,大多要穿越流域间的阻隔山脉,工程实施难度大、投资高,还有可能带来不可预见的生态环境威胁,因而存在建造复杂性与运行不确定性,此类工程当前大多处于初期论证阶段^[14]。另一类“后续”水源工程是在原调水流域内,结合已建或拟建调蓄工程开发契机,挖掘补给调水能力,在满足自身目标的前提下,通过联合调度发挥水库综合利用性能,考虑到主要河流的干流段基本上已完成梯级开发,且受生态环境等条件限制不具备修建较大水库的工程建设条件,该类调蓄工程多位于调水流域中较大的支流,因而称之为调水工程的支线调蓄工程(branch storage-regulation project,BSRP)。相较而言,支线调蓄工程不涉及调水区外部制约,且一般具有多任务综合开发价值,加之补给调水分摊投资较低,易于工程建设与实际运行,现阶段可作为跨流域调水工程“后续”水源论证的重点^[15-16]。然而,国内外关于如何构建支线调蓄工程与原调水工程的紧密耦合系统,从而确保两者持续高效运行的研究尚不深入,特别是对支线调蓄工程已有的供水任务与调水工程新增的补水任务之间如何协调保障、优化调度等问题的研究鲜有报道。

本文以陕西省引汉济渭调水工程及汉江流域支线调蓄工程——焦岩水库与玉带河水库组成的复杂水库群为例,提出了基于调水背景下复杂水库群联合调度的思路与方法,构建多水源耦合系统及其联合调度模型,论证单一水库均衡多目标供水的合理规模,解析复杂库群联合调度的补给调水效益,旨在

提出支线调蓄工程与调水工程耦合一体化的理论框架,并为耦合系统内原有供水任务与新增补水任务之间的协同满足等提供理论支撑与实践参考。

2 引汉济渭调水系统及流域概况

2.1 引汉济渭复杂调度系统

陕西省引汉济渭工程是从汉江流域调水至渭河流域的关中地区大型跨流域调水工程,旨在缓解关中地区水资源供需矛盾,改善渭河流域生态环境,促进关中地区可持续发展。该工程由调水和输配水工程两部分组成^[17-18]。

调水工程包括黄金峡水利枢纽、三河口水利枢纽及长度为 98.3 km 的秦岭输水隧洞。工程布局为:在汉江干流黄金峡和支流子午河分别修建水源工程黄金峡水利枢纽和三河口水利枢纽,在黄金峡水利枢纽坝后修建黄金峡泵站,抽取汉江干流丰沛的水量通过秦岭输水隧洞“黄三段”(黄金峡—三河口)输水至三河口水利枢纽,其中大部分水量再由秦岭输水隧洞越岭段(穿越秦岭)直接送至陕西省渭河流域关中受水区,少量水(“黄三段”输水流量大于关中用水流量部分)由三河口泵站抽入三河口水库存蓄,当调水系统遭遇枯水状况时,由三河口水库放水补充。

2.2 调水区流域概况

2.2.1 汉江流域 汉江是长江中游的重要支流,发源于秦岭南麓,经汉中盆地与褒河汇合后形成汉江,其干流流经陕西、湖北两省,于武汉市汇入长江,干流全长 1 577 km,流域面积约 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[19]。汉江流域在丹江口以上为上游,丹江口至钟祥为中游,钟祥以下为下游。汉江上游河段水系发育,河网密度大,属于开发性河流,上游干、支流上修建多处引水、蓄水工程。黄金峡坝址位于汉江干流上游,上距洋县水文站(朱家村)约 72 km,下距石泉水文站约 52 km,控制流域面积达 17 070 km^2 。

2.2.2 渭水河流域 渭水河系汉江左岸一级支流,发源于陕西省周至县境内的秦岭光头山,自北向南最终在城固县与洋县交界处的汉王城附近汇入汉江^[20]。渭水河流域面积为 2 299 km^2 ,干流全长为 167.4 km,多年平均径流量为 $9.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。渭水河流域早在汉代即为汉中盆地的主要农业基地,灌溉农田约 8 700 hm^2 。焦岩水库坝址位于渭水河下游段,控制流域面积为 2 143 km^2 ,占全流域的 93.2%。

2.2.3 玉带河流域 玉带河为汉江上游右岸一级

支流,发源于宁强县箭竹岭,自南向北于勉县陈家湾村汇入汉江,河口控制流域面积为 831 km^2 ,河长为 101 km ,多年平均径流量为 $6.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。玉带河水文情势变化较大,径流主要集中在汛期7-10月,占多年平均径流量的70%以上^[21]。规划中的玉带河水库位于玉带河入汉江汇入口处的陈家湾村。

研究区内引汉济渭跨流域调水工程及其支线调蓄工程——焦岩水库和玉带河水库的工程分布如图1所示。

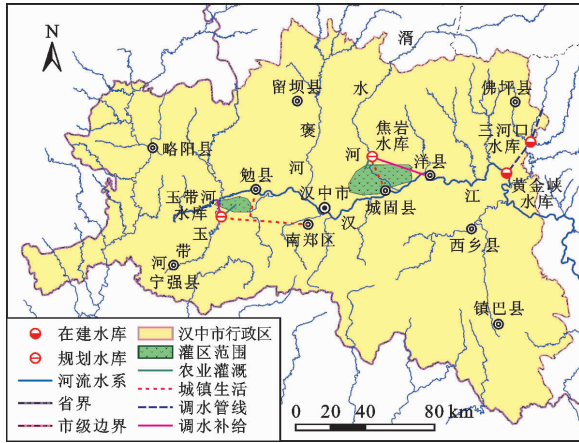


图1 研究区引汉济渭调水工程及其支线调蓄工程分布

3 联合调度模型构建及求解

本文研究了引汉济渭工程及其支线调蓄工程共同构建的调水区复杂水库群联合调度系统。由于本系统内水库组成较多,水源间水利联系较为复杂,用水目标既涉及水库原受水对象又纳含调水区供给水量,系统内水资源管理层级较多^[22],因而难以完全遵照工程布局及调度运行状况实现模型化表示。为了较准确地建立引汉济渭工程水资源管理模型,有必要将本系统进行拓扑概化,从而更为简化清晰地梳理出各水源功能组成及其相互间的拓扑关系。

本文基于拓扑学理论,通过对引汉济渭调水工程与其支线调蓄工程耦合系统的组件概化及拓扑关系构建等实现复杂水库群联合调度模型拓扑概化描述^[23-24],如图2所示。

3.1 模型构建

3.1.1 目标函数

(1) 联合调水量最大

$$\max W = \sum_{t=1}^T (w_H^g(t) + w_J^g(t) + w_Y^g(t)) \quad (1)$$

式中: $\max W$ 为调水区水库群联合供水量最大目标函数, m^3 ; $w_H^g(t)$ 、 $w_J^g(t)$ 、 $w_Y^g(t)$ 分别为调水区水源

黄金峡水库以及新增的调蓄工程焦岩水库和玉带河水库在 t 时段的调水量, m^3 ,其在时间 T 内供水量合计为调水区联合调水量。联合调水量目标值越接近于调度上限规模 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$,则表明联合供水量越多,联合调度获取的经济效益越好。

(2) 改善满足需求量的时段数最多

$$\max N = \sum_{t=1}^T n(t) \quad (2)$$

$$n(t) = \begin{cases} 1 & (w^g(t) = w^x(t)) \\ 0 & (w^g(t) < w^x(t)) \end{cases} \quad (3)$$

式中: N 为通过调水区水库群联合调度使得调水过程中时段 t 水源供水量 $w^g(t)$ 原不满足时段总需水量 $w^x(t)$ 现改善为满足的计数个数, $w^g(t) = w_H^g(t) + w_J^g(t) + w_Y^g(t)$ 。为确保联合调水改善效果,目标值提升比例应占未满足总时段数的50%以上,且该值越大,表明联合供水过程变幅越小,更易于与生态水等的稳定需求相匹配,有利于发挥工程生态效益。

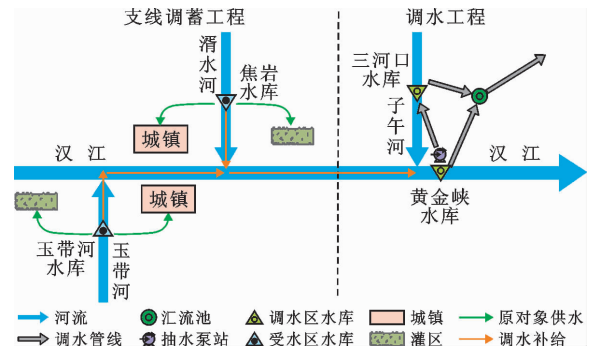


图2 引汉济渭调水工程与其支线调蓄工程联合调度系统对象拓扑关系示意图

3.1.2 约束条件 采用联合调度时段内各水源工程供水量作为模型决策变量,并按照以下约束条件实现联合调度。

(1) 水库水量平衡

$$V_i(t+1) = V_i(t) + (Q_i^{\text{in}} - Q_i^{\text{out}} - Q_i^{\text{loss}}) \cdot C \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_i(t+1)$ 为 i 水库在下一个时刻 $t+1$ 的水库库容值, m^3 ,由当前 t 时刻水库库容 $V_i(t)$ 与水库在 $t \sim t+1$ 时段内蓄、供水变化量之和确定; Q_i^{in} 、 Q_i^{out} 和 Q_i^{loss} 分别为入库流量、出库流量和水库运行过程中的损失量, m^3/s ; C 为流量转化为水量的时间单位换算常数, $C = 60 \times 60 = 3600$; Δt 为离散化的时段长度, h 。

(2) 水库库容约束

$$V_i(t) = \{V_i^{\min}(t), V_i^{\max}(t)\} \quad (5)$$

式中: $V_i(t)$ 为水库 i 在任一时刻 t 的库容, m^3 , $V_i^{\max}(t)$ 和 $V_i^{\min}(t)$ 分别为水库正常蓄水位(汛期为汛限水位)对应的最大库容和水库死水位对应的最小库容, m^3 。即水库库容分别以 $V_i^{\max}(t)$ 、 $V_i^{\min}(t)$ 为上、下限。

(3) 生态流量约束

$$Q_i^{\text{ece}}(t) = \max\{Q_i^{\text{base}}(t), Q_i^{\text{ship}}(t)\} \quad (6)$$

式中: $Q_i^{\text{ece}}(t)$ 为水库 i 在 t 时刻的生态流量, m^3/s ; $Q_i^{\text{base}}(t)$ 和 $Q_i^{\text{ship}}(t)$ 分别为水库坝址处下游河道生态基流和水库所在河道航运保障流量, m^3/s 。即河道生态流量为 $Q_i^{\text{base}}(t)$ 与 $Q_i^{\text{ship}}(t)$ 的最大值, 生态基流 $Q_i^{\text{base}}(t)$ 取值为多年平均径流量的 10%。

(4) 水库群间补水约束

$$Q_{i \rightarrow i+1}^{\text{com}} = \{0, Q_{i \rightarrow i+1}^{\text{max}}\} \quad (7)$$

式中: $Q_{i \rightarrow i+1}^{\text{com}}$ 为水库 i 给水库 $i+1$ 的补水流量, m^3/s ; $Q_{i \rightarrow i+1}^{\text{max}}$ 为水库 i 与水库 $i+1$ 间的允许补水能力, m^3/s 。由于补水具有指向性, 补水量顺箭头方向 $i \rightarrow i+1$ 取为正值; 反之, 逆箭头方向 $i \leftarrow i+1$ 取为负, m^3/s 。

(5) 水库满足自身用水对象约束

$$\begin{cases} Q_i^{\text{life.g}}(t) \geq Q_i^{\text{life.x}}(t) \\ Q_i^{\text{agr.g}}(t) \geq Q_i^{\text{agr.x}}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Q_i^{\text{life.g}}(t)$ 和 $Q_i^{\text{agr.x}}(t)$ 分别为水库 i 在时段 t 对城镇生活和农业灌溉的供水流量, m^3/s ; $Q_i^{\text{life.x}}(t)$ 和 $Q_i^{\text{agr.x}}(t)$ 分别为时段 t 城镇生活和农业灌溉对水库 i 相应的需水流量, m^3/s 。即水库在每个供水时段应保障城镇生活和农业灌溉供水满足各自相应的需水量。

(6) 水库供水平衡约束

根据上述水库供水组成构建供水平衡方程如下:

$$Q_i^{\text{out}}(t) = Q_i^{\text{life.g}}(t) + Q_i^{\text{agr.g}}(t) + Q_i^{\text{yh.g}}(t) + Q_i^{\text{ece}}(t) + Q_i^{\text{com}}(t) \quad (9)$$

式中: $Q_i^{\text{out}}(t)$ 为水库 i 在 t 时刻对外供水总流量, m^3/s ; $Q_i^{\text{yh.g}}(t)$ 为水库 i 在 t 时刻供给调水区的流量, m^3/s ; 其他变量含义同上。

3.2 模型求解

本模型包含引汉济渭调水工程与支线调蓄工程两大模块, 各模块内部调、供水求解属于多变量、高维复杂问题, 且还涉及模块之间的耦合互馈, 进一步增加了模型求解难度。因此, 采用传统数理算法难以获得模型最优解。考虑到具有“种群”与“进化”核心概念的粒子群算法(particle swarm optimization,

PSO)求解多变量、多维解的效率较高^[25], 且为了应对日益复杂的系统问题, 在传统粒子群算法基础上又发展出了新变形^[26]。其中, 协同粒子群算法(collaborative particle swarm optimization, CPSO)是应用较多的一种变形型式, 该算法在保留传统粒子群核心算法的基础上, 增加了高效并行处理机制, 更便于求解平行相关的几组变量^[27]。

本文采用协同粒子群算法, 主要是从框架整体性方面实现原调水工程与支线调蓄工程两大模块之间的耦合搭接; 其次, 借助其内嵌的经典粒子群算法, 可实现调水量最大与改善时段数最多两个目标。由于调水需求对象主要为城市生活及工业生产用水, 故需水过程相对稳定。实际上, 联合调度系统在各个时段内若能充分满足既定较为均匀的需水过程, 则可同步实现调水量最大以及调水过程改善时段数最多两个协同目标。

具体联合调度方案为: 在支线调蓄工程模块中, 焦岩水库与玉带河水库以满足各自城镇生活与农业灌溉任务为预设边界, 进而择机联合补给引汉济渭调水工程; 对于引汉济渭调水工程黄金峡与三河口两水库, 在受纳调蓄补给水量后, 以相互补蓄方式实现对需水对象的联合调水。上述联合调水运行成果求解流程详见图 3。

采用 VB.NET 编译协同粒子群算法方程试算率定出适宜的方程参数。计算过程中选取粒子群进化代数 200, 其中, 惯性权重为 0.5, 两加速常数分别为 1.5、2.0。此外, 以水库调度时段的库容值为粒子群优化变量, 按照协同粒子群运行原则更新全局以及个体最优解, 最终以收敛性原则获得模型最优解。

4 结果与分析

在运算过程中, 模型所涉及的各水源工程均选取水库坝址处 10 a 逐旬同步径流系列。遵循上述模型构建与求解所确定的调度运行方式, 实现引汉济渭调水区长系列复杂水库群联合调度。基于调度系统空间拓扑属性以及模型模块化设计方式, 本文调度结果应聚焦讨论两大重点问题: 以支线调蓄为工程背景的单一水库多目标供水合理性及其与引汉济渭调水工程耦合后的复杂库群联合调度效率。

4.1 单一水库多目标供水

对于焦岩水库与玉带河水库两支调蓄工程, 均优先确保城镇生活与农业灌溉等自身供水对象的目标需求, 继而水库功能余量可择机补给引汉济渭调水工程。然而, 水库工程规划设计之初, 通常大多

集中论证自身供水对象的目标需求,其工程规模一般通过技术与经济综合比选确定,在满足既定目标基础上,尽可能达到技术可行、经济合理、规模适宜的“工程平衡”状态。若增加新供水对象,上述“工程平衡”状态极可能遭到破坏,水库整体效益的发挥受到影响,而为了确保既能保障自身对象供水需要,又能满足供水补给新增目标,势必需要在水库原工程规模基础上追加投资,增大规模,提高水库供水能力。因此,单一水库多目标供水论证的重点在于阐述新增对象供水量与追加工程投资之间的关系,探寻合理的工程规模,从而建立新的“工程平衡”,实现多目标之间的均衡博弈。

考虑到“新增对象供水量-增加水库规模-追加工程投资”与“自身对象供水量-水库原工程规模-原工程投资”之间具有“本底”与“新增”两者彼此纳含、功能相互影响的特征,构成了多目标综合性水库工程,难以从功能属性与对应量化分析角度直

接将规模与投资剥离。因此,本文借鉴综合利用工程的投资费用分摊的原则和方法,即针对同时面向供水、灌溉、发电等多种目标服务的综合水利工程或多目标水利工程的投资分摊时,总体基于“有受益即分摊,多受益多分摊”的原则,根据经济学上常用的独揽专用设施投资,采用各方受益比例分摊公用部分投资的可分离费用-剩余效益(separable cost-remaining benefits, SCRB)的方法。

支线调蓄工程焦岩水库与玉带河水库满足自身供水目标是后续补给调水的先决条件,其相应的工程投资可计为综合水利工程固定部分投资。在满足自身目标基础后,可拟定不同工程规模,调算增加补给调水量,并通过费用分摊的方法获得相应追加工程投资,从而建立新增补给调水量-增加水库规模-追加工程投资之间的关系,以此探寻适宜的工程规模“平衡点”,三者所形成的空间三维关系曲线如图 4 所示。

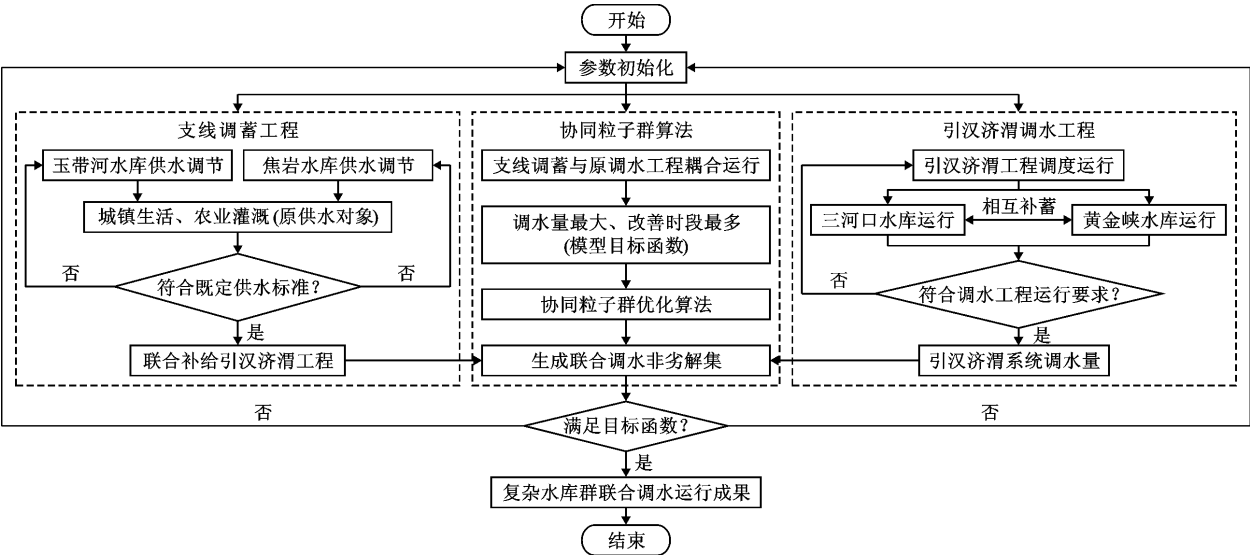


图 3 引汉济渭调水工程与支线调蓄工程复杂水库群联合调水运行成果求解流程图

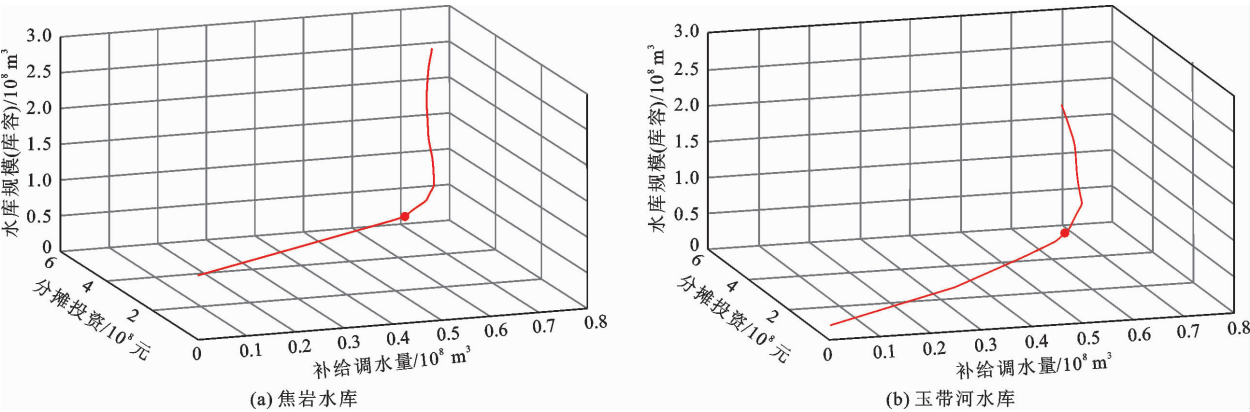


图 4 支线调蓄工程单独供水效益-工程规模-经济性关系曲线

由图 4 可见,焦岩水库和玉带河水库仅满足自身的城镇生活与农业灌溉供水目标时,水库规模分别为 0.9×10^8 和 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (即空间曲线最低点相应的水库规模);在该“基础方案”下,随着水库规模的不断增大,水库调蓄能力提高,支线调蓄两水库可增加调水工程补给水量,同时产生增加补给调水相应的分摊投资,且水库规模 and 分摊投资均与补给调水量呈正相关关系。进一步分析可知,该关系在补给调水量变化的不同区段而不尽相同:当曲线位于较低补给区段时,水库规模 and 分摊投资随着补给调水量的增加而增大,但增幅较小,表现为较“低矮”的空间曲线形式;随着补水量不断增加,水库规模与分摊投资增幅显著加大,空间曲线表现为明显的“翘起”特征。上述曲线变化揭示出当水库补给调水量增加至一定阈值时,所需调蓄能力继续增大将致使水库规模 and 相应分摊投资大幅增加。因此,既要达到目标调水量,实现多目标之间均衡受益,又要控制工程投资,平衡综合受益与费用投入,选择合

理可行的水库规模。显然,图 4 曲线中标出的圆点为曲线上、下段“拐点”,与其相应的水库规模即为合理水库规模的推荐方案。由此,推荐焦岩水库和玉带河水库规模分别为 1.15×10^8 和 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,与之相应补给调水量、分摊投资分别为 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 3.20×10^8 元和 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 2.75×10^8 元。

4.2 复杂水库群联合调度

引汉济渭调水工程及其支线调蓄工程构成的复杂库群联调系统的调水效率不仅取决于单个工程多目标供水效果,更与单一工程与引汉济渭工程耦合成的调水系统整体运行效能有关。由于引汉济渭工程本身为一个独立运行的调水系统,调水区支线调蓄工程应充分适应引汉济渭工程既有的运行方式,并尽可能择机补充引汉济渭工程缺水状况,从而实现支线调蓄工程与引汉济渭工程的有机融合,提高引汉济渭工程的调水能力。对上述复杂水库群联合调度系统,采用与支线调蓄工程中单一水库同步联合调度,联合调水效果见表 1。

表 1 支线调蓄工程补充改善引汉济渭调水成果表

年均调水量/ 10^8 m^3			调水过程			不同流量区段改善数		
引汉济渭	支线调蓄	合计	引汉济渭需水 不满足时段数	支线调蓄需水 满足时段增加数	改善比 例/%	0 ~ 10 m^3/s	10 ~ 20 m^3/s	20 ~ 30 m^3/s
13.29	1.05	14.34	72	37	51.39	8	20	9

由表 1 可见:(1)引汉济渭调水工程独立运行多年平均调水量为 $13.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,当焦岩水库和玉带河水库参与联合调度时,后两者耦合构成复杂水库群系统的多年平均调水量为 $14.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。值得注意的是,支线调蓄两库均衡其多目标供水时,各自独立补给调水量分别为 0.64×10^8 与 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,合计为 $1.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,略大于耦合系统内两库调水量 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。主要由于两支线调蓄水库及其与引汉济渭调水工程之间多个水源应对同一调水目标时,产生了彼此“对冲”效应,表现为单一水源调水量略有减少,但耦合系统的总体调水效果更优。(2)从调水过程满足度统计来看,长系列联合调度中引汉济渭工程需水不满足时段数为 72 个,借助支线调蓄有效补充后,需水满足时段增加了 37 个,改善占比达 51.39%,验证了复杂水库群联合调度中各水源之间的互补性能,以及改善调水过程的有效性。(3)剖析调水过程改善量化效果,即其流量变幅过程,对调水过程改善时段相应的流量分布排频,从而划定不同的流量区段。可见,改善的流量变幅

多处于 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 区段,既可保证调水流量有所增大从而增加调水量,又不至于使流量变化过于激烈而对工程运行造成困难。

考虑到调水为一持续过程,各水源之间互补性随时程相关关系是决定调水效果的另一决定性因素。因此,有必要进一步研究复杂水库群系统内支线调蓄工程的补水时程分布。针对长系列联合调度成果,选取表 1 中所列支线调蓄工程调水补给改善的 37 个时段,绘制其流量改善与时程分布关系图,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,通过焦岩水库与玉带河水库调水补给,联合调水系统有效改善过程均分布于枯水期。这一结果表明:丰水期联合调水系统水资源较为丰沛,引汉济渭工程自身水量即可满足调水需求,支线调蓄工程多余水量可先蓄存于支线水库中,因此丰水期支线水库无需补给引汉济渭工程调水量;当联合调水系统遭遇枯水期时,先期蓄积在支线水库内的充裕水量可加大下泄补给引汉济渭工程调水量,因而复杂水库群系统内枯水时段缺水状况将

得到显著改善,支线水库的联调能力得到充分发挥。同时,经补给后调水改善流量集中度较高,可将原未满足需求的流量提高至 $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 区段,较为稳

定的调水流量更易于调水工程的实际运行,并且,若干时段(合计 12 个)经补给调水后,可达到最高调水流量值(图 5 中菱形散点)。



图5 支线调蓄工程改善引汉济渭调水的时程分布

5 讨论

本文研究表明,调水区未增加新水源,仅靠引汉济渭调水工程的调水区现有水源运行时,多年平均调水量为 $13.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,且调水保证程度较低,该结果与白涛等^[28]、魏娜等^[29]对引汉济渭调水区调度运行分析结果基本一致。因此,为充分保障引汉济渭调水工程供水安全,提高调水系统的供水保障程度,有必要在调水区寻找有可能的新水源,如李瑛^[30]、Ma等^[31]提出的通过新增嘉陵江调水,以补充引汉济渭工程水源区调水量、改善调水过程的方案。

为充分发挥水源工程综合利用效益,选取的新水源应尽可能与现有工程相结合,从而构成水库多目标供水方式,但相应水库规模的确定比仅满足自身任务更为复杂,如高晨等^[32]、贺晓英等^[33]研究了调水工程多目标博弈中存在的风险、效益、价值等问题。本研究论证了确定水库工程规模的重点在于厘清新增对象供水量与追加工程投资之间的关系,从工程经济学角度探寻性价比比较优的工程规模,平衡综合受益与费用投入,实现多目标均衡受益。

本研究中,焦岩水库和玉带河水库以支线调蓄水库形式通过与引汉济渭工程耦合构建多水源调水系统,以补充引汉济渭调水量,改善枯水年和枯水时段的调水过程。研究结论揭示出多水源间的互补性能,集中表现为支线调蓄工程新增水源对于引汉济渭工程补水互济及时程补充的作用。

本研究内容主要集中于支线调蓄工程适宜工程规模的确定及其对本流域内干流调水工程的调水补给效果方面。然而,鉴于本流域内干、支流径流丰枯变化趋势通常基本相似,即使考虑了支流水库蓄丰补枯调蓄性能,其对于干流的补给效果也仍然有限。建议根据调水实际需求以及工程布置情况、流域水

文情势、区域经济社会发展水平等诸多因素,尽可能采用域内支线调蓄与域外调水补给相结合的方式,多措并举,综合保障调水系统运行安全稳定。

6 结论

本文以陕西省引汉济渭调水工程及其支线调蓄工程—焦岩水库和玉带河水库所组成的复杂水库群为例,通过构建多水源耦合系统及其优化模型,研究了长系列联合调度下多任务均衡目标补给调水的合理性和有效性。主要结论如下:

(1)焦岩水库和玉带河水库各自仅保障自身城镇生活与农业灌溉供水目标时,对应的水库工程规模(库容)分别为 0.9×10^8 和 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$;增加补给引汉济渭调水目标后,通过均衡多目标受益与工程投资得出:焦岩水库的工程规模、补给调水量、分摊投资分别为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 3.20×10^8 元,玉带河水库分别为 $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 2.75×10^8 元。

(2)支线调蓄工程耦合引汉济渭调水工程可有效增加补水量 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,受“对冲”效应影响,联合调度合计增加补给水量虽较两库单一补给水量之和略低,但其调水效果更优,有 51.39% 的原未满足需水时段有所改善。

(3)复杂水库群联合调度改善的调水过程均分布于枯水期,可直接缓解枯水时段的工程缺水状况;且提升后的调水流量多集中于 $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 区段,更易于工程实际调度运行。

参考文献:

- [1] 关 炜. 南水北调工程关键技术研究进展[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 167–174+181.
- [2] 陈克恭, 师安隆. 南水北调西线工程调水与用水的统一性思考[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 7–11+26.

- [3] 王浩,雷晓辉,尚毅梓. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 1-8.
- [4] 张金良,马新忠,景来红,等. 南水北调西线工程方案优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 109-114.
- [5] 马永胜,史娟,潘景辰. 复杂跨流域调水系统联合优化调度研究——以陕西省引嘉入汉调水工程为例[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 142-148.
- [6] 蒋旭光. 扎实推进南水北调后续工程高质量发展[N]. 生态周刊, 2021-10-28(5).
- [7] 李嘉,唐河,饶维龙,等. 南水北调工程对华北平原水储量变化的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6): 775-783.
- [8] 席海洋,陈克恭,鱼腾飞,等. 南水北调西线一期工程调水新增水资源利用[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 158-166.
- [9] ARUNKUMAR R, JOTHIPRAKASH V. Optimal crop plans for a multi-reservoir system having intra-basin water transfer using multi-objective evolutionary algorithms coupled with chaos[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 34-47.
- [10] RANI D, SRIVASTAVA D K, GULATI T R. A set of linked optimization models for an inter-basin water transfer[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(2): 371-391.
- [11] 黄会勇,张娜,万蕙,等. 引江补汉工程引江规模初步分析[J]. 人民长江, 2018, 49(18): 15-19.
- [12] 王晨晖,魏娜,解建仓,等. 基于多目标模糊优选模型的引嘉入汉工程调蓄方案优选[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 144-148.
- [13] ALAHDIN S, GHAFOURI H R, HAGHIGHI A. Derivation of conflict resolution rule-curves in multi-purpose multi-reservoir system for inter-basin water transfer during drought[J]. Environmental Resources Research, 2018, 6(1): 51-67.
- [14] 黄绳,农翕智,梁建奎,等. 南水北调中线工程运行的环境问题及风险分析[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 46-51.
- [15] 刘孟凯,郭晶. 调水工程水源区与受水区利益演化博弈分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 58-61.
- [16] ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, HONG Xingjun, et al. Systematic impact assessment on inter-basin water transfer projects of the Hanjiang River Basin in China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 584-595.
- [17] 李佩成. 引汉济渭是陕西当代水利建设的一项杰作[J]. 中国水利, 2015(14): 51-53.
- [18] MA Yongsheng, CHANG Jianxia, GUO Aijun, et al. Optimizing inter-basin water transfers from multiple sources among interconnected river basins[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590(2): 125461.
- [19] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 13-19.
- [20] 王慧,张建新,田翊霏,等. 渭水河国家级水产种质资源保护区鱼类资源调查与评价[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(11): 54-59.
- [21] 马永胜,刘哲,史娟,等. 汉中市玉带河水库综合利用研究[R]. 西安:陕西省水利电力勘测设计研究院, 2021.
- [22] 秦仪婷,杨侃,何琦,等. 优化引调水规则的跨流域水库联合调度研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 61-71.
- [23] 张晓,肖瑜,宋晗,等. 引汉济渭工程运行调度综合服务平台的应用实践[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 18-23.
- [24] 李献忠,张社荣,王超,等. 基于 BIM + GIS 的长距离引调水工程运行管理集成平台设计与实现[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 91-95.
- [25] DONG Wenyong, ZHANG Ranran. Stochastic stability analysis of composite dynamic system for particle swarm optimization[J]. Information Sciences, 2022, 592: 227-243.
- [26] CHANG Jianxia, KAN Yanbin, WANG Yimin, et al. Conjunctive operation of reservoirs and ponds using a simulation-optimization model of irrigation systems[J]. Water Resources Management, 2017, 31(3): 995-1012.
- [27] 万芳,周进,原文林. 大规模跨流域水库群供水优化调度规则[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 448-457.
- [28] 白涛,喻佳,魏健,等. 考虑不同需水过程的三河口水库调度风险研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 12-22.
- [29] 魏娜,卢锟明,解建仓,等. 基于时变耦合模型的引嘉入汉工程调蓄方案研究[J]. 西安理工大学学报, 2019, 35(4): 420-426.
- [30] 李瑛. 基于引嘉济汉-引汉济渭的复杂跨流域调水工程协同调度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [31] MA Yongsheng, CHANG Jianxia, GUO Aijun, et al. Conjunctive operation of inter basin transferred water and local water in a multisource diversion-supply-allocation system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2021, 147(10): 05021018.
- [32] 高晨,任梦之,刘登峰,等. 陕西引汉济渭工程的多目标调度方案风险评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(10): 81-87.
- [33] 贺晓英,谷耀鹏. 基于不确定性理论的水期权交易及其定价研究——以引汉济渭工程为例[J]. 干旱区高晨资源与环境, 2020, 34(7): 119-124.