

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

马永胜, 史娟, 潘景辰

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 针对两个调水区联合调水供给同一受水区的复杂跨流域联合调度, 建立了多目标联合优化调度模型, 采用大系统分解协调(LSSDC)理论与方法, 构建了联合调度最优决策制定模式, 并以陕西省汉江与嘉陵江流域内的引汉济渭及引嘉入汉调水工程为例, 通过1955-2010年55 a长系列优化调度, 验证了复杂调水系统内部互补性及其优化调度规则的实用性。结果表明: 通过联合优化调度, 复杂调水系统能够有效提高调水效率, 降低调水过程波动, 更利于工程实际运行管理。

关键词: 复杂跨流域调水; 多目标; 联合优化调度; 引嘉入汉调水工程

中图分类号: TV68

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0142-07

Joint optimal operation of complex inter-basin water transfer systems:

Taking Jialingjiang River to Hanjiang River Water Transfer Project as an example

MA Yongsheng, SHI Juan, PAN Jingchen

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

Abstract: For the complex inter-basin joint operation of water transfer from two water delivering areas to the same water receiving area, an multi-objective model of joint optimal operation was established, with which an optimal operation rule formulation process was constructed based on the theory and method of large system decomposition and coordination (LSSDC). And then, this model was applied to the water transfer projects of Hanjiang to Weihe River and Jialingjiang to Hanjiang River which are located in Hanjiang River Basin and Jialingjing River Basin of Shannxi Province respectively. With the long time series analysis of 55 years, the internal compensation of the complex water transfer system and its capability of joint optimal operation were verified. The results show that the large complex system can effectively improve the efficiency of water transfer, greatly reduce the fluctuation of water transfer process, so it is more conducive to the actual operation of the projects.

Key words: complex inter-basin water transfer; multiple objects; joint optimal operation; Jialingjiang to Hanjing River Water Transfer Project

1 研究背景

近年来国内外跨流域调水工程不断开发, 出现了很多复杂的跨流域调水工程^[1], 例如: 双向调(受)水区, 即调水区和受水区的水资源可以相互调配; 以及1个调水区供水至多个受水区或多个调水区供给1个受水区等各类结构和功能更为复杂的跨流域调水工程。并且随着跨流域调水工程规模的增大, 其内部组件之间复杂性也不断增加, 调、受水区之间特别是不同调水水源的拓扑结构也愈发庞杂,

需统筹调水区各水源之间的水文补偿、调水水库之间的库容补偿以及调水区与受水区之间的水力联系, 实现跨流域调水系统联合优化调度, 完成对受水区联合供水对象的供水任务, 目前该方面已成为相关领域研究的焦点与难点^[2]。Rani等^[3]采用Pamba-Achankovil-Vaippar (PAV)方法研究了印度跨流域系统中3座水库间的联合优化问题; Arunkumar等^[4]基于混沌理论提出了跨流域多目标联合优化的求解方法; 王浩等^[5]针对南水北调中线工程输水线路长、涉及区域广、调水规模大、输水工况多变

收稿日期: 2020-03-06; 修回日期: 2020-05-06

作者简介: 马永胜(1983-), 男, 陕西西安人, 博士, 高级工程师, 主要从事跨流域调水以及水库优化调度研究工作。

等特点,提出了工程智能调控理论及其关键技术,用以中线工程优化调度;彭安帮等^[6]拟定了水库群联合调度图,应用于辽宁省水资源联合调度北线工程的联合优化调度,有效提高了系统调水水量;高学平等^[7]以南水北调东线山东段为研究对象,基于径向基函数(radial basis function, RBF)代理模型建立调水过程优化模型,得到了调水过程方案参数区间内的最优方案。

由于受水区经济社会不断发展导致其对水资源需求日益增加、或调水区气候变化导致水文情势变化以及天然径流量不断减少、亦或受到各种制约因素导致调水区的水资源量虽充足但调水过程变幅较大不利于用水对象接纳等因素,使得已成规模的调水工程任务不易实现,造成工程长期难以充分发挥其效益的现实困境。因此,本文提出增加新的调水区以及调水水源,对受水区进行双水源联合调水供给,由此构成了一种复杂的跨流域调水工程。对于此类复杂跨流域调水工程,原调水区、受水区以及新增调水区之间的调水、供水、用水过程具有动态博弈的特征且构成一个大的协同系统,系统内不同对象间呈现明显系统嵌套关系。若各对象决策仅考虑寻求各自理想解,其决策目的都是在过程中达到一种策略组合的均衡,而对象决策之间相互制约、相互影响,在对象决策最优解下整个系统往往无法达到最优^[8]。因此,必须统筹在整个大系统下,寻求有效的协同解决方案,该方案下对象决策不一定达到最优,但整个系统可能达到资源充分利用,即达到联合调度系统的整体均衡。

2 工程概况

陕西省水资源短缺且时空分布严重不均,位于长江流域的陕南地区占全省面积35%,拥有全省71%水资源量,而秦岭以北的黄河流域占全省面积65%,水资源量却仅占29%^[9-10]。秦岭北麓的关中地区集中了西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南5个大中城市,是全国重点建设8大城市群之一,聚集了全省61%的人口、81%的工业总产值,但是,关中地区人均水量仅为317 m³,相当于全国平均水平的13.8%,水资源短缺已成为严重制约关中经济社会发展的“瓶颈”。而且,由于长期缺水降低了水的稀释自净能力,水质污染严重,渭河生态环境也日益恶化^[11]。因此,陕西省正在实施的引汉济渭调水工程,正是从陕南汉江流域调水至渭河流域的关中地区,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的大型跨流域调水工程^[12]。

引汉济渭调水工程主要包括三河口水库、黄金峡水库和98.3 km的秦岭输水隧洞,秦岭输水隧洞设计输水能力为70 m³/s,两水库主要工程特性指标如表1所示。为了完成多年平均调水量15×10⁸ m³的调水任务,工程充分利用黄金峡水库、三河口水库的库容特性,即黄金峡水库主要解决年内不均匀的缺水过程,三河口水库主要应对年际不均匀缺水过程^[13]。然而,工程调水过程中的流量变幅大,并且改变了受水区原有工程调度运行方式,受水区地表水、地下水供水峰谷变差大,工程实效性较差^[14]。

表1 引汉济渭调水工程两水库主要工程特性指标

水库名称	坝址天然径流/ 10 ⁸ m ³	河道生态基流/ (m ³ ·s ⁻¹)	流域允许调水量/ 10 ⁸ m ³	正常蓄水位/ m	汛限水位/ m	死水位/ m	兴利库容/ 10 ⁸ m ³	泵站抽水能力/ (m ³ ·s ⁻¹)	运行方式
黄金峡水库	66.7	25.00	15.56	450	448	440	0.71	70	日调节,径流式直引调水
三河口水库	8.7	2.71	15.56	643	642	558	6.5	18	多年调节,自流供水

此外,作为单位面积产水率最高的长江一级支流,嘉陵江流域水量较为丰沛^[15],针对上述引汉济渭工程实际运行困难,陕西省近期又规划引嘉入汉工程^[16],作为引汉济渭工程补充水源。初步拟定的调水断面在嘉陵江干流略阳县附近,通过约30 km的隧洞自流到汉江干流北岸的一级支流沮水河,并自流进入黄金峡水库。因此,嘉陵江调水区可作为引汉济渭的一个补充调水区以及新增调水水源,从

而与引汉济渭工程组成了一个复杂联合调水大系统,引汉济渭与引嘉入汉耦合复杂系统联合调水工程示意图如图1所示。

3 多目标优化模型与联合调度规则

3.1 多目标优化调水模型

通过新增调水区水源构建复杂调水系统,不仅要满足调水量上满足联合调水目标,而且要尽可能减

小调水过程的波动,即平稳地实现调水目标。因此,本文选择了联合调水效率最高以及调水过程波动最小为目标,建立多目标优化调水模型。

(1) 目标函数

调水效率最高:

$$\max F_1 = \frac{T_s}{T+1} \times 100\% \quad (1)$$

$$T_s = \sum_{t=1}^T t_s(t) \quad (2)$$

$$t_s(t) = \begin{cases} 1 & (Q_{TW}(t) = Q_{TT}) \\ 0 & (Q_{TW}(t) < Q_{TT}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_1 为调水量效率最高目标函数,用联合调水保证率表征,%; T_s 为联合调水满足目标调水量合计时段数; t_s 为每个时段联合调水满足目标调水时段计数; $Q_{TW}(t)$ 为时段的联合调水量, m^3/s ; Q_{TT} 为联合调水目标值, m^3/s ; T 为联合调水总时段数。

调水过程波动最小:

$$\min F_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_{TT} - Q_{TW}(t))^2} \quad (4)$$

式中: F_2 为调水波动最小目标函数,本文采用联合调水修正标准差表示。

(2) 约束条件

调水区水量平衡:

$$Q_{HI}(t) + Q_{JT}(t) = Q_{TW}(t) + Q_{HEF}(t) + Q_{HL}(t) + Q_{HC}(t) + Q_{HD}(t) \quad (5)$$

式中: $Q_{HI}(t)$ 为汉江流域自产可调水量; $Q_{JT}(t)$ 为嘉陵江流域实际调水量; $Q_{HEF}(t)$, $Q_{HL}(t)$, $Q_{HC}(t)$, $Q_{HD}(t)$ 分别为汉江调水区内: 引水断面环境需水量、汉江调水区域内水量损失(蒸发、渗漏、输水损失等)、水库内水量变化及多余外排水,以上变量单位均为 m^3/s 。

水库水量平衡:

$$V_m(t+1) = V_m(t) + 3600\Delta t \cdot (QI_m(t) - QO_m(t)) \quad (6)$$

式中: $V_m(t)$ 为第 m 个水库于时段 t 的库内水量, m^3 ; $QI_m(t)$ 与 $QO_m(t)$ 分别为水库入库与出库水量, m^3/s ; Δt 为离散时段长度, h 。

采用各时段内水库库容为优化模型的决策变量,并按照上式水库水量平衡方程确定时段内各水库的供水量及蓄水量。

水库库容限制:

$$V_m^{\min}(t) \leq V_m(t) \leq V_m^{\max}(t) \quad (7)$$

式中: $V_m^{\min}(t)$ 与 $V_m^{\max}(t)$ 为第 m 个水库在 t 时段最

小与最大库容限制, m^3 。

水库间补偿限制:

$$0 \leq Q_{m \rightarrow m+1}^c(t) \leq Q_{m \rightarrow m+1}^{c \max} \quad (8)$$

式中: $Q_{m \rightarrow m+1}^c(t)$ 和 $Q_{m \rightarrow m+1}^{c \max}$ 分别为第 m 个水库在 t 时段补偿第 $m+1$ 个水库的水量和最大补偿水量, m^3/s , 补偿关系如箭头所示, 定义为正值表示被补偿水量, 负值表示向外补偿水量。

调水区生态流量限制:

$$Q_{HEF}(t) = \max(Q_{ED}(t), Q_{NF}(t)) \quad (9)$$

式中: $Q_{ED}(t)$ 与 $Q_{NF}(t)$ 分别为引水断面最小生态需水流量与最小过航流量, m^3/s 。

联合调水量限制:

$$0 \leq Q_{TW}(t) \leq Q_{TW}^{cap} \quad (10)$$

式中: Q_{TW}^{cap} 为调水区向受水区联合调水的最大调水量, m^3/s 。

联合调水时段最低供水度限制:

$$Q_{TW}(t)/Q_{TT} \geq 70\% \quad (11)$$

调水系统实际运行中, 为确保每个时段受水对象最低用水要求, 需设置时段最低供水度不低于 70% 限制。



图1 引汉济渭与引嘉入汉耦合复杂系统联合调水工程示意图

3.2 研究理论与方法

本文建立的多目标复杂大系统中的各子系统之间具有相互独立又彼此关联的特性, 子系统的决策动态变化相互影响、相互制约, 很难利用单一优化方法寻求其最优解。然而, 跨流域调水问题通常是非线性凸规划问题, 根据 K-T 条件可判定模型的最优解集^[17]。因此, 利用大系统分解协调理论和方法作为复杂大系统优化调度的基础, 即首先将复杂跨流域调水大系统分解为若干个彼此独立却参数关联的子系统, 通过求解各子系统调度运行的最优解集, 将其动态耦合形成复杂大系统下的跨流域联合调水最优解^[18]。

前文已述, 优化模型有两个目标, 即调水效率最高与调水波动最小。对于多目标优化求解, 一直是

水库优化调度的难点。本文采用将多目标转化为单目标的方法实现多目标优化,考虑到调水效率可认为是调水工程的保证率,城市生活及工业生产供水保证率一般为时段 95%。因此,可将其作为强约束,作为模型的约束条件,进而实现多目标模型优

化。并且,参照两个调水系统现实运行状况,充分挖掘其间相互补偿性能,对子系统调度规则进行修正,进而最终确定出符合工程实际的联合调度运行规则,用以指导复杂调水系统运行调度,上述联合优化调度规则制定流程如图 2 所示。

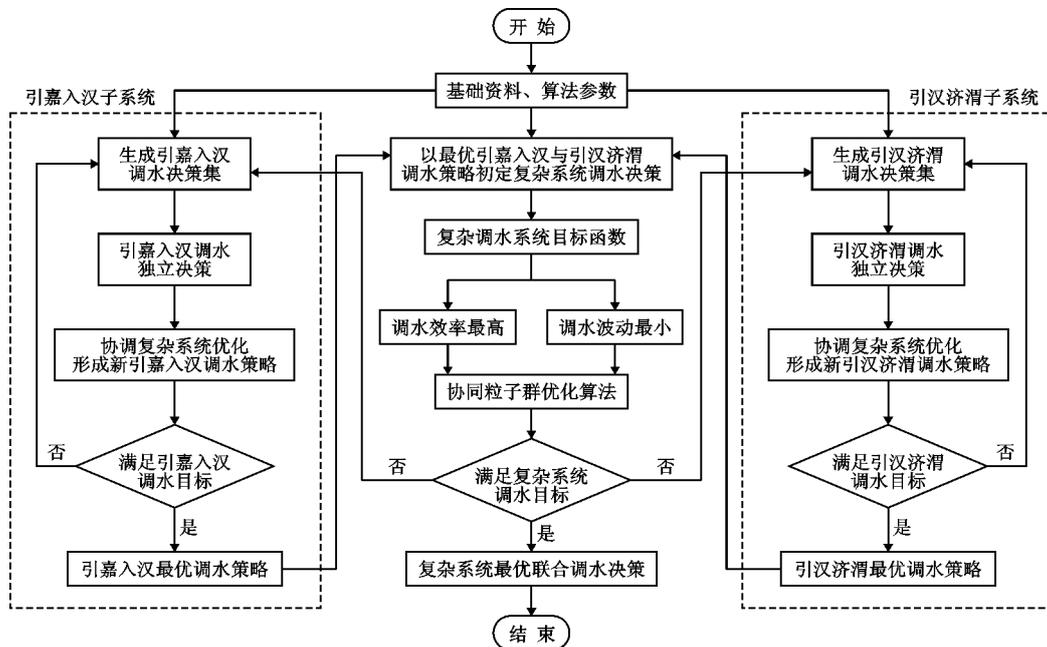


图 2 复杂跨流域调水联合优化调度流程图

3.3 联合调度运行规则

联合调度运行规则的制定,可按照所选用的优化算法在各种既定约束条件下对模型求解,形成满足多目标要求的最优解集。选择出基于复杂大系统联合调度基础上,充分考虑各跨流域调水子系统之间水源互补、水文补偿等联系的最优解,并在此基础上,提取出符合实际调度情况的调度规则。通过反演模拟调度,验证初步确定的调度规则对于复杂大系统联合调度的有效性与合理性。

按照大系统分解协调方法与具体求解流程,制定复杂大系统联合优化调度规则的原则为:首先,利用两个调水区水源联调的水量,通过秦岭隧洞输水至受水区,充分发挥联合调度系统内两流域及其水源之间的互补性;其次,对各调水区内的各水源按照水文与库容补偿特性分级调水;最后,对复杂大系统联合调水量以及调水过程在调水汇流节点进行指标效验。若满足既定的多目标要求,即确定为推荐的联合调度规则,反之,则重新修正调度规则,以此循环反复,直至满足多目标为止。

各子系统调度运行方式如下:

(1)引汉济渭调度子系统:黄金峡、三河口水库

扣除上游耗水及生态水后,先用黄金峡水库满足调水需求。若不满足,再启用三河口水库调水;若调水满足后,黄金峡仍有余水,且在黄三隧洞输水能力限制下,则可通过泵站抽水补蓄三河口水库。

(2)引嘉入汉调度子系统:首先在由取水断面日流量过程考虑沙限超标的日流量过程后,预留取水口以下河道生态基流过程,即为引水断面的可引来水过程,按照优先供给受水对象的调水需要,再补充引汉济渭工程缺水的顺序依次调水。

4 结果与分析

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 以其快速高效的搜索能力,而广泛应用于复杂水资源管理系统的优化求解。其本质是一个自适应寻优过程,每一个粒子即为一个随机解。首先,解集初始化为一群随机粒子,然后通过粒子的不断迭代更新个体最优以及全局最优从而找到群体内的最优解。考虑到复杂跨流域调水大系统优化模型涉及到两个相对独立又彼此关联的调水系统,且该系统具有多层次性、多维复杂性的特点,因此,在粒子群算法的基础上,本文采用具有高效并行性的协同粒子群优

化算法 (coordinated particle swarm optimization, CP-SO)^[19], 即将各个调水子系统之间按照协同优化理论联合调度, 作为一个相对独立的子系统生成联合粒子群进行并行优化, 然后通过求解两子系统目标函数, 得到各自的最优解集, 再将其最优解集合并提取出符合两流域耦合下的联合优化调度规则。

本文应用 VB 6.0 进行编程, 编译出协同粒子群算法的进化方程, 通过多参数试算率定出合适的方程参数, 其中惯性权重为 0.5, 加速的两常数分别为 1.5、2.0, 选取的进化代数数为 100。以各水库时段库容为基本粒子群的优化变量, 逐步更新个体最优及全局最优, 求解出模型最优解。具体过程是选取 1955–2010 年合计 55 a 逐日水沙系列, 按照推荐的联合调度运行规则完成水文长系列优化调度, 并将其结果与仅有引汉济渭调水的情景分别从调水效率与调水波动进行综合对比分析。

4.1 调水效率对比

4.1.1 调水效率指标对比 采用调水量及保障程度指标将引汉济渭调水系统与复杂调水系统的调水效率进行对比, 其结果如表 2 所示。

表 2 引汉济渭调水系统与复杂调水系统的调水效率对比

调水系统	调水量/ 10^8 m^3			保障程度/%	
	多年平均值	年最小值	年最大值	最低供水度	保证率 F_1
引汉济渭系统	15.00	7.68	19.42	3	61
复杂调水系统	15.09	11.25	15.34	70	95

由表 2 可见, 复杂调水系统由于新增了嘉陵江水源, 通过其与引汉济渭调水系统耦合进行两个调水区联合调度, 调水效率有较大提高。考虑到多年平均调水目标 ($15 \times 10^8 \text{ m}^3$) 限制, 复杂调水系统与单独引汉济渭系统的多年平均调水量基本相当, 两者均满足了调水 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 水量要求; 而复杂调水系统年最大调水量为 $15.34 \times 10^8 \text{ m}^3$, 小于引汉济渭系统年最大调水量 $19.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其年最小调水量为 $11.25 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大于引汉济渭系统年最小调水量 $7.68 \times 10^8 \text{ m}^3$, 复杂调水系统工程调水量更为集中, 调度运行效率更高。此外, 复杂调水系统多目标保证率 F_1 为 95%, 大于引汉济渭系统的 61%, 且复杂调水系统最低供水度为 70%, 而引汉济渭系统该指标仅为 3%。因此, 复杂调水系统保障程度明显大于引汉济渭调水系统下的相应指标, 且满足设计规范要求^[20]。

4.1.2 调水效率长系列对比 对两系统 1955–2010 年 55 年水文长系列逐年调水量进行对比, 并绘制其逐年调水过程线如图 3 所示。

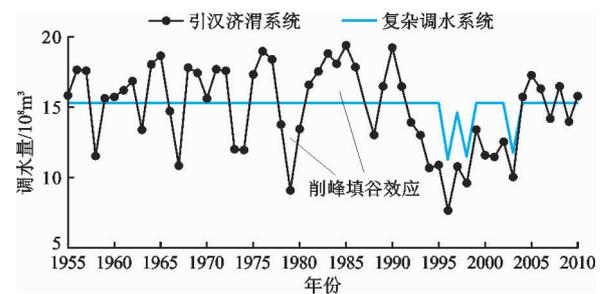


图 3 1955–2010 年引汉济渭与复杂调水两系统联合调度逐年调水过程线

由图 3 分析得出: 复杂调水系统逐年调水过程基本为直线型, 保持在调水量 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 目标线上, 仅在 1995–2005 年共 10 a 连续特枯年内的 3 a 调水量低于目标值, 丰水年份“削峰”枯水年份“填谷”效应明显; 与此相反, 引汉济渭系统逐年调水过程在目标线上下起伏, 变化很大, 且不满足目标调水量的年份有 24 a (占全系列的 43.6%); 特别是遭遇水文特枯年份, 复杂调水系统能有效补充引汉济渭系统调水缺口, 以 1978–1979 年特枯年份为例, 引汉济渭调水系统年调水量为 $9.09 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而复杂调水系统在该年调水量为 $15.30 \times 10^8 \text{ m}^3$, 多调水量为 $6.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相对于 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 目标调水量增大 41.4%, 有效提高了调水系统应对特枯年份的调水效率。

4.2 调水过程波动对比

4.2.1 调水波动指标对比 针对调水过程波动评价, 除考虑上述调水流量最大值、最小值之外, 本文提出采用调水集中度的方法用以评判调水过程的均匀性, 以此评价复杂调水系统对引汉济渭调水过程的改善程度。调水集中度分为最大集中度与最小集中度, 其值分别为调水流量中最大 (最小) 流量与平均流量的比值。因此, 调水集中度越接近 1, 表明调水过程越均匀稳定, 调水效果越好, 受水区用水对象也越易于接纳。引汉济渭和复杂调水两系统调水波动指标对比见表 3。

表 3 引汉济渭和复杂调水两系统调水波动指标对比

调水系统	调水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		集中度		
	最小值	最大值	最小值	最大值	F_2
引汉济渭系统	13.94	70.0	0.29	1.47	7.45
复杂调水系统	33.95	48.5	0.71	1.02	1.42

从表3结果表明,复杂调水系统最大调水流量为 $48.5 \text{ m}^3/\text{s}$,低于引汉济渭工程的最大调水流量 $70 \text{ m}^3/\text{s}$,最大集中度由1.47降低到1.02,表明其调水过程峰值流量较引汉济渭工程偏低;复杂调水系统的最小调水流量为 $33.95 \text{ m}^3/\text{s}$,大于引汉济渭工程的最小调水流量 $13.94 \text{ m}^3/\text{s}$,最小集中度由0.29降低为0.71。由此可见,采用最大、最小调水集中度对调水流量过程进行表征,复杂调水系统最大、最小调水集中度均更接近1,调水波动较小;此外,按照本文提出的调水波动最小目标函数 F_2 对两系统调水波动进行对比,由公式(4)得出的 F_2 为修正的标准差,其值越大,表明其系列离散化程度越高,通过计算得出复杂调水系统 F_2 值为1.42远小于引汉济渭系统的7.45。因此, F_2 值同样表现出在复杂调水系统联合优化调度下的调水过程波动较小,流量分布更为均匀,易于实际调度运行。

4.2.2 调水流量-频率对比 通过绘制调水过程流量-频率对比图对调水过程波动从流量与频率关系进行对比分析,结果见图4。流量-频率过程线表示调水流量随频率分布状况,调水流量分布越集中,其流量-频率过程线变幅越低,表现为连续直线型或阶梯状多段线型。

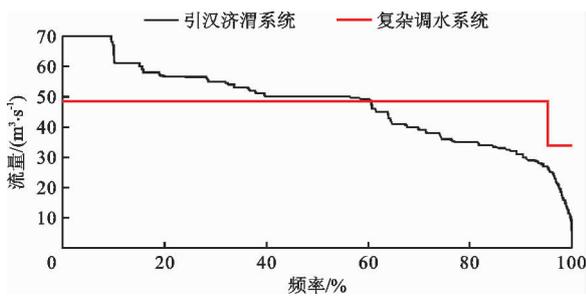


图4 两调水系统长系列调水流量-频率对比图

由图4可见,引汉济渭调水过程流量-频率过程线为无显著规律的下降曲线,过程线流量变化大且分布极为不均;而复杂调水系统调水流量-频率过程线表现为显著的“阶梯形”,调水过程随频率呈梯度变化趋势,梯度间流量区分度明显,更便于调水系统内各组件特别是抽水泵站长期稳定运行,其调水流量较为恒定,抽水系统能耗较低,进而可提高工程整体效益。

4.3 互补性分析

上述结果表明,复杂调水系统调水效率与调水过程波动均明显优于引汉济渭调水系统。分别选取丰、平、枯3种水文典型年(对应频率分别为 $P = 25\%$ 、 $P = 50\%$ 、 $P = 95\%$),对典型年下两个系统

的逐月调水过程及其水源构成进行对比分析,结果如图5所示。

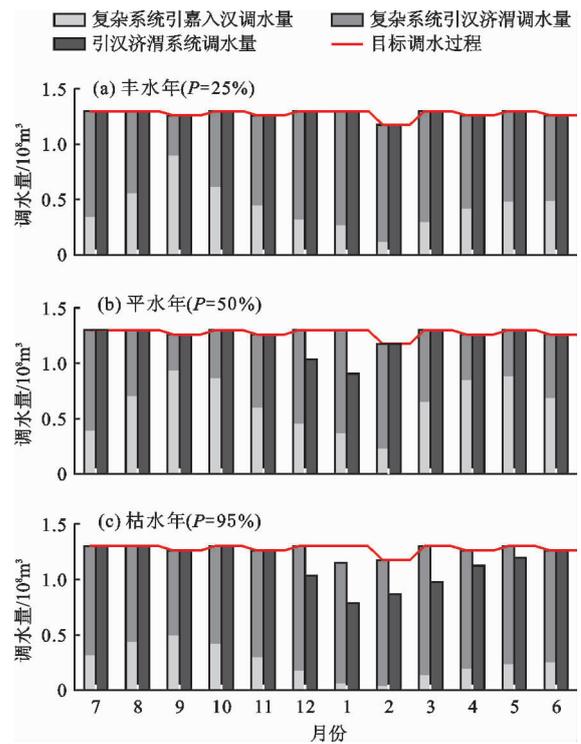


图5 两个调水系统典型年逐月调水过程及其水源构成对比

由图5分析可知:引汉济渭调水系统只有在丰水年(图5(a))能够满足逐月调水量,平水年与枯水年(图5(b)、图5(c))分别有2个月(12-次年1月)与6个月(12-次年5月)未能达到月调水量,即枯水期前、中段调水系统缺水较多,无法实现调水目标;复杂调水系统丰水年与平水年均能满足逐月调水量,仅枯水年1月份1个月未能达到调水量目标,而该月实际调水量为需水量的84.4%,能够满足最低供水度70%的要求;复杂调水系统水源间补偿效果显著,其内部互补机制主要表现在以下两方面:各典型年内,汛期(7-9月)引嘉入汉调水量所占比重较大,使得引汉济渭系统原调水量可充分存贮于调蓄水库内,随着非汛期复杂调水系统内天然径流量的减少,则引汉济渭系统水库先期蓄积的水量可进行补偿调水,弥补非汛期调水缺口,因而非汛期各时段引汉济渭调水量占比提高;各典型年际间,引嘉入汉调水量在平水年份最多,丰水年份次之,枯水年份最少,这是由于丰水年份,引汉济渭天然径流量充沛,基本能够满足调水目标要求,过多引嘉入汉调水反而会造成弃水浪费,而枯水年份,引嘉入汉天然径流量偏枯,有效引水量减少,因此,造成平水年份引嘉入汉调水量最多,其水量互补效应最为明显。

5 结 论

针对跨流域调水工程,由于各种因素导致工程任务无法完全实现、工程效益长期难以充分发挥的问题,本文提出了复杂调水系统及其多目标联合优化调度规则的制定模式,并与原调水系统进行综合对比分析,主要得到以下结论:

(1)复杂调水系统能够有效提高调水效率,在实现工程调水目标 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的前提下,其调水保证率为 95%,最低供水度为 70%,调水保障程度更高;且其长系列逐年调水过程较为坦化,丰水年“削峰”和枯水年“填谷”效应显著。

(2)复杂调水系统能够降低调水过程波动,最大、最小调水集中度均更接近于 1,且目标函数 F_2 值为 1.42,小于引汉济渭系统相应指标 7.45;此外,流量-频率过程线表现出典型的“阶梯形”,调水过程随频率呈梯度变化趋势,梯度间流量区分度明显,表明其调水过程波动更小,流量分布更为均匀,易于实际调度运行。

(3)复杂调水系统能够挖掘内部补偿机制,系统内部互补性突出,通过不同丰、平、枯典型年逐月调水过程对比分析,其典型年际间及年内调水均能够发挥各水源时空分布特点。

参考文献:

- [1] 万文华,郭旭宁,雷晓辉,等. 跨流域复杂水库群联合调度规则建模与求解[J]. 系统工程理论和实践, 2016, 36(4):1072-1075.
- [2] 曹玉升,畅建霞,黄强,等. 南水北调中线输水调度实时控制策略[J]. 水科学进展, 2017, 28(1):133-136.
- [3] 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):371-392.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 彭安帮,彭勇,周惠成. 跨流域调水条件下水库群联合调度图概化降维方法研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5):35-43.
- [7] 高学平,朱洪涛,闫晨丹,等. 基于 RBF 代理模型的调水过程优化研究[J]. 水利学报, 2019, 50(4):439-447.
- [8] 万芳,周进,邱林,等. 跨流域水库群联合供水调度的聚合分解协调模型及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6):54-58.
- [9] 班璇,朱碧莹,舒鹏,等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2817-2829.
- [10] 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.
- [11] 畅建霞,姜瑾. 引汉济渭调水工程水资源配置研究[J]. 自然资源学报, 2011, 16(1):110-118.
- [12] 刘玘玘,尚宇梅,张宇,等. 引汉济渭来水条件下西安市多水源联合调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1):25-30.
- [13] 马永胜,惠蕾,高小芳. 基于引汉济渭工程的水库联调系统开发与应用[J]. 陕西水利, 2016, 12(2):122-123.
- [14] 苏丹,费良军,杨晓茹. 陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4):46-49.
- [15] 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.
- [16] 马永胜,彭穗萍,朱兴华,等. 陕西省引嘉入汉调水工程规划[R]. 西安:陕西省水利电力勘察设计研究院, 2016.
- [17] SADEGH M, MAHJOURI N, KERACHIAN R. Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy shapley games [J]. Water Resources Management, 2010, 24:2291-2310.
- [18] 黄强,畅建霞. 水资源系统多维临界调控的理论与方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [19] 万芳,原文林,黄强,等. 基于免疫进化算法的粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 19(1):202-206.
- [20] 中华人民共和国水利部. 水利工程水利计算规范:SL 104-2015 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.