

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.014

江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法

闻 昕¹, 黄抒艺¹, 谭乔凤¹, 方国华¹, 薛刘宇², 贾 璐³, 王 浩⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省南水北调工程建设领导小组办公室, 江苏 南京 210029;
3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210018; 4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要:为统筹协调江苏省南水北调水资源调配系统内各方用水要求和矛盾,提升工程效率,降低系统耗电成本,提出了面向多工程多目标的联合优化调度方法,并基于该方法构建了联合调度优化模型,针对丰、平、枯3种典型年提出了联合优化调度方案。与江水北调工程与南水北调东线一期工程实际的独立运行调度模式对比结果表明,联合优化调度方案总耗电成本可分别降低31%、14%和29%,相较于独立运行调度模式,联合优化调度方案能更科学地进行水源及输水线路的选择和切换,更充分地利用沿线湖泊的调蓄能力,通过复杂闸泵系统的联合运行,实现不同类别水源的互济互调,更有效地提升系统效益。

关键词:跨流域调水;多尺度调度;湖泊群调度;梯级泵站运行;南水北调工程;江苏省

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0118-07

A multi-objective joint optimal operation method for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province//WEN Xin¹, HUANG Shuyi¹, TAN Qiaofeng¹, FANG Guohua¹, XUE Liuyu², JIA Lu³, WANG Hao⁴
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Office of Leading Group of South-to-North Water Diversion Project Construction, Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 3. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd., Nanjing 210018, China; 4. Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to coordinate the water demand and contradiction of all parties in the water resources allocation system of South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province, and improve the engineering efficiency and reduce the power consumption cost of the system, a multi-project and multi-objective joint optimization scheduling method was proposed. Based on this method, a joint optimization scheduling model was constructed, and a joint optimal scheduling scheme was proposed for three typical years of abundant, flat and dry water. Compared with the actual independent operation and dispatching mode of the North River Water Diversion Project and the East Route of the first phase of the South-North Water Diversion Project, the total power consumption cost of the joint optimal dispatching scheme can be reduced by 31%, 14% and 29%, respectively. Compared with the independent operation and dispatching mode, the joint optimal scheduling scheme can select and switch the water source and the water transmission route more scientifically, and make full use of the storage capacity of lakes along the route. Through the joint operation of complex sluice pump system, the mutual economy of different water sources can be realized, and the efficiency of the system can be improved more effectively.

Key words: cross-basin water transfer; multi-scale scheduling; lake group scheduling; step pump station operation; South-to-North Water Diversion Project; Jiangsu Province

江苏省南水北调水资源调配系统由江水北调工程与南水北调东线一期工程组成。两工程同属于江苏省苏北水网体系,均以长江、洪泽湖和骆马湖为主

要水源,在调水线路上存在诸多交叉重合之处,但系统内水资源来源复杂,配置目标多样,输水干线与大量连通的支线河道构成了复杂输水网络,加之省内

基金项目:江苏水利科技项目(2019027,2021006)

作者简介:闻昕(1987—),男,青年教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:njwenxin@163.com

通信作者:谭乔凤(1991—),女,青年教授,博士,主要从事水文预报和水库调度研究。E-mail:qiaofengtan@126.com

与省外、区域与流域的多目标用水竞争与协同关系,多重矛盾因素在各时空尺度上呈现复杂的耦合关系。传统独立运行调度模式无法很好地统筹协调各方用水要求和矛盾,在工程降本增效运行等方面仍存在优化空间。因此,只有站在全局的高度梳理不同时空尺度下省内省外、流域区域等各类水资源需求,建立针对多工程、多目标的联合优化调度机制,在多时间尺度、多空间范围、多利益主体、多部门、多运行方式之间进行协调和平衡,统筹调配系统内各类水源,实现不同水源互济互调,才能在提高水资源供给和保障能力的同时,充分发挥江苏省南水北调水资源调配系统的综合效益。

国内外学者对水利工程优化调度已开展了广泛的研究,对目标函数的选择从单目标转向更为复杂的多目标,更多的优化算法也被应用于模型求解中。例如:Jalali等^[1]利用蚁群算法求解了梯级水库调度问题;方国华等^[2]基于改进的多目标量子遗传算法构建了南水北调东线江苏段多目标优化调度模型;王文君等^[3]将改进多目标粒子群算法运用于平原坡水区水资源优化调度问题;李安强等^[4]在梯级电站短期优化调度中使用了粒子群算法;李崇浩等^[5]运用微粒群算法解决了水库长期优化问题;李伶杰等^[6]将改进遗传算法运用于龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度中。然而,跨流域调水系统具有输水线路长、工程类型多、组成结构复杂等特点,要考虑多用水目标协同、输水线路优化、工程调度决策、输水损失和节能运行等诸多因素,因此多采用大系统分解协调、逐步优化等方法研究泵站群、水库群联合优化调度方式^[7-12]。例如:谢新民等^[13]根据大系统分解协调和模糊数学理论,在水电站群模糊优化调度模型基础上,提出了目标协调-模糊规划法求解模型;段富^[14]针对万家寨引黄工程特点,构建了大型梯级泵站优化调度模型,并基于大系统分解-协调理论,对复杂优化调度模型进行分层分解,进而提出了最优的调度方案;黄草等^[15]以长江上游大型水库群多目标调度问题为背景,引入优化窗口和滑动距离两个概念,提出了高求解效率的扩展型逐步优化算法,对涵盖发电、河道供水与用水等目标的非线性优化调度模型进行了求解。

本文提出了面向江苏省南水北调水资源调配系统多工程多目标的联合优化调度方法,构建了联合优化调度模型,针对丰、平、枯3种典型年份分别提出联合优化调度方案,并从水源、线路的运用和切换等方面将联合优化调度方案与实际采用的独立运行调度模式进行了对比分析,以期为工程实际调度运行提供参考。

1 研究区域概况

江水北调工程承担了江苏省苏中、苏北地区的水资源供给任务以及航运、生态等综合任务,抽引江水规模 $400\text{ m}^3/\text{s}$,干线输水河道总长 404 km ,由南至北布置9个梯级泵站。南水北调东线一期工程^[16]在江水北调工程的原有基础上,扩大运河线规模,新建运西线,形成了江苏境内双线输水格局,主要承担北方省市的供水任务,长江边一级提水规模达到 $500\text{ m}^3/\text{s}$,年平均新增供水量 36 亿 m^3 。江苏省南水北调水资源调配系统实现了江淮沂沭泗多种水源的统一调度和综合利用,为江苏省苏中、苏北地区及北方省市经济社会快速发展提供了重要保障。

2 联合优化调度机制分析

江水北调工程和南水北调东线工程江苏段同属于江苏省苏北水网体系,在水源、线路、工程等方面有诸多交叉重合之处,但受工程权属和管理体制影响,两工程在日常调度运行中形成了相对独立的运行管理模式。在调水任务方面,江水北调工程主要承担江苏省苏北地区供水及沿线航运、生态等综合保障任务,以省内需求为主,而南水北调东线一期工程主要承担向北方省市的供水任务,以省外需求为主;在调水时间方面,江水北调工程在全年有用水需求时均可进行调水,南水北调东线一期工程仅在枯水期运行;在调水线路方面,两工程存在诸多重合之处,但一般情况下江水北调工程主要使用运河线,南水北调东线一期工程以运西线为主、运河线为辅;在调度要求方面,两工程均需满足沿线河湖水位控制、泵站流量约束等调度要求。

传统独立运行模式难以统筹协调各方用水要求和矛盾,本文提出江苏省南水北调水资源调配系统多工程多目标联合优化调度方法,统筹考虑江苏省内、外不同地区在不同时期的各类用水要求,科学选择主要水源和输水线路,充分利用沿线湖泊的调蓄能力,抓住引、调、蓄、放水时机,通过复杂闸泵系统的联合运行,实现长江、淮河、沂沭泗等不同类别水源的互济互调。独立运行调度与联合优化调度要求对比详见表1。

3 联合优化调度方法

本文提出的江苏省南水北调水资源调配系统多工程多目标联合优化调度方法,通过对江苏省南水北调水资源调配系统进行概化,构建联合优化调度模型^[17],采用融合遗传算法的离散微分动态规划算法^[18-19],生成了不同典型年份不同来水条件下的联

表1 独立运行调度与联合优化调度要求对比

Table 1 Mechanism comparison between joint optimization scheduling and independent operation scheduling

对比项目	独立运行调度		联合优化调度
	江水北调工程	南水北调东线一期工程	
调水时间	全年	枯水期	全年
调水线路	以运河线为主	以运西线为主	运河和运西双线灵活切换
调水量	满足江苏省内用水需求	完成出省调水任务	兼顾江苏省内和出省调水需求
调水控制断面	江苏省内各受水区分水口	出省断面(台儿庄和蔺家坝泵站)	同时满足出省断面和省内各受水区分水断面要求
航运任务要求	保证通航水位等	保证通航水位等	保证通航水位等
生态任务要求	保证河湖生态水位和流量等	保证河湖生态水位和流量等	保证河湖生态水位和流量等
洪泽湖调度运行要求	满足湖泊水位要求,主要提供省内用水	仅在水位高于北调水位时允许使用洪泽湖水源北调出省	保证湖泊水位满足安全约束,打破北调水位限制,统筹使用洪泽湖水源
骆马湖调度运行要求	满足水位安全要求,主要提供省内用水	一般不使用骆马湖水源向省外调水	满足水位安全要求,统筹使用骆马湖水源
泵站调度运行要求	以江水北调泵站为主,南水北调新建泵站配合运行	以南水北调新建泵站为主,江水北调泵站配合运行	以南水北调新建泵站为主,江水北调泵站配合运行
河道调度运行要求	满足防洪、排涝、航运、生态等水位和流量要求	满足防洪、排涝、航运、生态等水位和流量要求	满足防洪、排涝、航运、生态等水位和流量要求
管理主体	江苏省、淮委以及沿线市县水利局等	南水北调东线江苏水源有限责任公司	统一调度、联合运行

合优化调度方案,并与实际采用的独立运行调度模式进行对比,以验证联合调度方法在提高系统总效益方面的可行性^[20]。

3.1 系统概化与模拟

3.1.1 系统概化

江苏省南水北调水资源调配系统概化结果如图1所示。通过分析江苏省南水北调水资源调配系统中湖泊、河道、泵站、闸门等单元的工程特性,根据不同工程单元之间的水力联系,建立空间拓扑关系;以长江、洪泽湖和骆马湖为节点,将系统划分为长江—洪泽湖、洪泽湖—骆马湖2个主要区间,运河线和运西线双线输水。骆马湖以北仅考虑台儿庄站、不牢河线泵站及沿线受水区。系统内共9个梯级,根据泵站和水系空间关系划分13个省内受水区。

3.1.2 系统调度过程流量模拟

通过分析系统湖泊、河道、泵站的调度运行规则和规律,分别对调度过程中各单元流量情况进行模拟,基于不同工程单元上下游之间的水力联系,将不同的单元串联起来,建立模拟模型,实现对系统调度运行状态的模拟。

a. 湖泊模拟。湖泊主要考虑出入湖水量、湖泊水量损失和湖泊水位之间的关系,以水量平衡为基本方程,建立湖泊流量-蓄水量关系模拟模型:

$$(Q_{in,it} - Q_{out,it} - Q_{s,it})\Delta t = W_{i(t+1)} - W_{it} \quad (1)$$

式中: $Q_{in,it}$ 为 i 湖泊 t 时段入湖流量, m^3/s ; $Q_{out,it}$ 为 i 湖泊 t 时段的出湖水量, m^3/s ; $Q_{s,it}$ 为 i 湖泊 t 时段的流量损失, m^3/s ; Δt 为时段长度, s ; $W_{i(t+1)}$ 为 t 时段末湖泊的蓄水量, 亿 m^3 ; W_{it} 为 t 时段初湖泊的

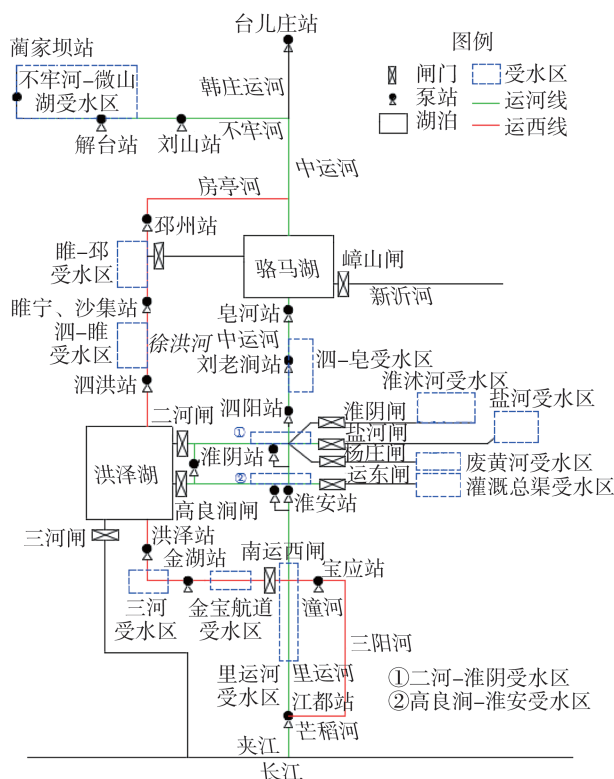


图1 江苏省南水北调水资源调配系统概化图

Fig.1 System schematic diagram of water resources allocation system for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province

蓄水量, 亿 m^3 。

b. 河段模拟。系统中两个泵站之间的河道构成一个河段,在中长期尺度上暂不考虑河道的调蓄能力,仅考虑该河段的输水损失和受水区用水,以水量平衡为基本方程,建立河道流量模拟模型:

$$Q_j - Q_{t,j} - Q_{s,j} = Q_{j+1} \quad (2)$$

式中: Q_j 为 j 泵站调入河道流量, m^3/s ; Q_{j+1} 为 $j+1$ 泵站调出河道流量, m^3/s ; $Q_{f,j}$ 为河道沿线分水流量, m^3/s ; $Q_{s,j}$ 为河道输水损失, m^3/s 。

c. 泵站模拟。根据水量平衡原理, 得到泵站流量模拟公式如下:

$$Q_{\text{in},k} = Q_{\text{out},k} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{in},k}$ 为 k 泵站的调入泵站流量, m^3/s ; $Q_{\text{out},k}$ 为 k 泵站的调出泵站流量, m^3/s 。

3.2 优化调度模型的构建

根据江苏省南水北调水资源调配系统联合优化调度机制, 应在满足江苏省内、外各类用水需求的前提下, 尽量降低梯级泵站运行成本, 因此本文将供水、航运、生态等各类用水作为模型约束, 在目标中主要考虑降低泵站运行成本。

3.2.1 目标函数

大型泵站群运行成本包括耗电成本、人员成本、养护成本等, 其中耗电成本与调度运行方式关系紧密, 是降本增效的主要环节。根据大型梯级泵站群运行基本规律, 系统的年度总耗电成本计算公式为

$$M_{kt} = Q_{kt} \rho e_k h_k \Delta t p / 1000 \quad (4)$$

$$M_{KT} = \sum_t^T \sum_k^K M_{kt} \quad (5)$$

式中: M_{kt} 为 k 泵站 t 时段的耗电成本, 元; Q_{kt} 为 k 泵站 t 时段的平均流量, m^3/s ; ρ 为水的密度, t/m^3 ; e_k 为 k 泵站的能源单耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{kt} \cdot \text{m})$; h_k 为 k 泵站的扬程, m ; Δt 为 t 时段时长, s ; p 为电费单价, 元/(\(\text{kW} \cdot \text{h}\)); T 为全年时段总数; K 为系统内泵站总数; M_{KT} 为系统全年耗电成本, 元。

由此, 模型目标函数为

$$f(x) = \min \left(\sum_t^T \sum_k^K M_{kt} \right) \quad (6)$$

3.2.2 模型约束条件

a. 湖泊调蓄能力约束:

$$W_{\text{min},it} \leq W_{it} \leq W_{\text{max},it} \quad (7)$$

式中 $W_{\text{max},it}$ 、 $W_{\text{min},it}$ 分别为 i 湖泊 t 时段允许达到的蓄水量上、下限, 亿 m^3 。

b. 泵站输水能力约束:

$$Q_{\text{min},kt} \leq Q_{kt} \leq Q_{\text{max},kt} \quad (8)$$

式中 $Q_{\text{max},kt}$ 、 $Q_{\text{min},kt}$ 分别为 k 泵站 t 时段允许达到的输水能力上、下限, m^3/s 。

c. 出省调度任务约束:

$$W_{1,t-1} + W_{1,\text{in}} \geq W_{1,\text{es}} \quad (9)$$

式中: $W_{1,t-1}$ 为 t 时段初骆马湖内储存的出省水量, 亿 m^3 ; $W_{1,\text{in}}$ 为 t 时段调入骆马湖总水量, 亿 m^3 ; $W_{1,\text{es}}$ 为 t 时段骆马湖出省总水量, 亿 m^3 。

d. 省内调度任务约束:

$$W_{\text{in},at} \geq W_{\text{x},at} \quad (10)$$

式中: $W_{\text{in},at}$ 为 t 时段内供给 a 受水区的水量, 亿 m^3 ; $W_{\text{x},at}$ 为 t 时段 a 受水区需水量, 亿 m^3 。

e. 河道水位约束:

$$H_{\text{min},jt} \leq H_{jt} \leq H_{\text{max},jt} \quad (11)$$

$$Q_{jt} \geq Q_{s,jt} \quad (12)$$

式中: H_{jt} 为 j 河道 t 时段的水位, m ; $H_{\text{min},jt}$ 、 $H_{\text{max},jt}$ 分别为 j 河道保证排涝、生态、通航等功能的最低和最高水位, m ; Q_{jt} 为 j 河道 t 时段的流量, m^3/s ; $Q_{s,jt}$ 为 j 河道的生态流量, m^3/s 。

f. 湖泊生态水位约束。湖泊的水位不可低于生态水位, 需保证其生态用水需求, 即:

$$H_{it} \geq H_{s,i} \quad (13)$$

式中: H_{it} 为 i 湖泊 t 时段的水位, m ; $H_{s,i}$ 为 i 湖泊的生态水位, m 。

3.2.3 模型优化算法

动态规划算法被广泛运用于优化决策中, 但在复杂水资源系统优化调度中常面临“维数灾”问题。离散微分动态规划算法 (discrete differential dynamic programming, DDDP) 可以有效避免“维数灾”问题, 但 DDDP 算法依赖于初始可行解的寻找, 若初始可行解与最优解相差过大, 则所需迭代次数随之增加。故本文将遗传算法与 DDDP 算法相结合, 利用遗传算法求得 DDDP 算法的初始可行解。单独采用遗传算法容易陷入局部最优, 但局部最优解与最优解的差距比随机生成的可行解小, 能有效降低 DDDP 的迭代次数。模型优化步骤如下:

a. 遗传算法求取初始可行解。设定模型所需的种群个体数 N 、精英数 A 、变异率 b 和迭代次数 Y , 离散决策变量生成初代种群, 根据约束条件筛选出个体数为 N 的可行初代种群作为亲代, 对亲代种群进行交叉变异得到子代种群, 反复迭代至设定迭代次数 Y , 选择第 Y 代种群中总耗电成本最小的个体作为初始可行解。

b. DDDP 算法求取模型最优解。在求得初始可行解的基础上, 考虑湖泊水位上下限确定状态增量, 使每个状态下洪泽湖、骆马湖分别有 m 、 n 个可能水位, 组合出 mn 种水位组合。各阶段的水位组合形成求解廊道, 在廊道内使用传统动态规划算法寻优, 再将所得最优解作为初始可行解建造求解廊道寻优, 反复迭代直到所得的两代最优解相同。动态规划过程如图 2 所示, H_0 和 H_{12} 分别为年初、年末两湖泊水位, 为方便与实际调度过程进行对比, 模型控制湖泊总时段初、末水位均与实际调度过程一致, 故 H_0 和 H_{12} 取值已知。 $H_{x,z}$ ($x=1, 2, \dots, 11; z=1, 2,$

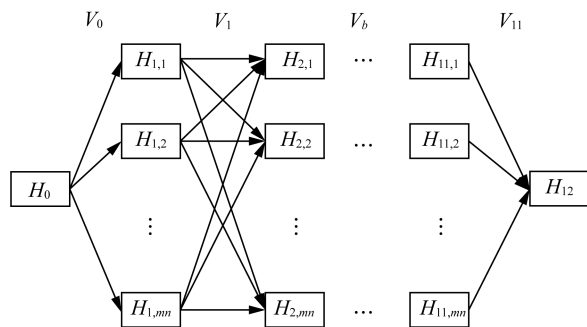


图2 模型动态规划示意图

Fig.2 Dynamic programming diagram of the model

..., mn) 为其余时段初(末)湖泊水位。相邻两个状态转变过程为 V_b ($b=0,1,\dots,11$)。 V_0 和 V_{11} 过程有 mn 种可能转变路径, 剩余 10 个水位转变过程均有 $(mn)^2$ 种可能转变路径。动态规划需要决策每个过程中选择的转变路径, 从而得到从 H_0 转变至 H_{12} 的全局最优路径, 即为最优解。由于使用湖泊水位作为时段状态变量, 在湖泊初水位已知的条件下, 模型决策变量(即泵站流量)取不同数值时也可能得到相同的时段末湖泊水位。即每个状态转变过程 V_b 所包含的每种路径还可能存在多种可行方案, 故模型中嵌套 4 层决策变量取值的遍历过程, 筛选出其中耗电成本最小的方案为该水位转换路径的方案。模型计算流程见图 3。

3.2.4 模型原理

在利用模型生成联合优化调度方案时, 需要输入的数据有湖泊总时段初水位和末水位、河道输水损失、湖泊输水损失、湖泊逐月来水流量。根据输入的来水条件的不同, 模型可通过确定各决策变量逐月的取值(即泵站逐月平均流量)来选择该时段使用的水源与线路, 确保沿线受水区该月用水需求得到保障(即完成省内供水任务), 确保月初骆马湖内蓄水量和该月调入骆马湖的水量之和能够满足该月不牢河线泵站和台儿庄站调出骆马湖的水量(即完成省外调水任务), 同时寻求系统总耗电成本最小, 得到最优解。输出最优解, 即为当前来水条件下的联合优化调度方案。模型输出内容包括系统内各泵站逐月平均流量和逐月湖泊水位、湖泊年度弃水量、不同水源(江水、湖泊水源)年度利用量及系统年度总耗电成本。

4 调度结果与分析

南水北调东线一期工程调水期一般为 12 月至次年 5 月, 为了将完整调水期包含在一个计算年度内, 本文设定一个完整计算年度为 12 月至次年 11 月。根据来水条件不同, 选取平水年(2017 年 12 月

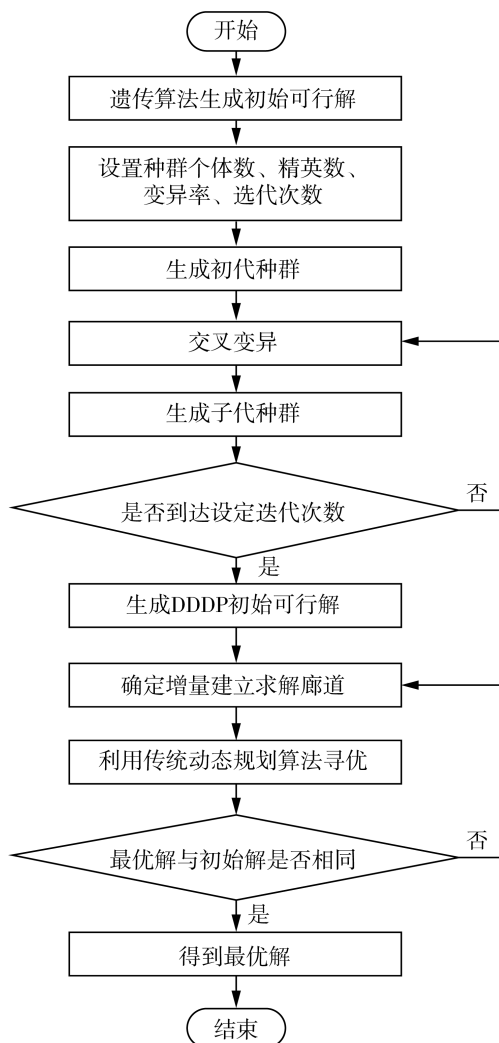


图3 模型计算流程示意图

Fig.3 Calculation flow diagram of the model

至 2018 年 11 月)、枯水年(2018 年 12 月至 2019 年 11 月)、丰水年(2019 年 12 月至 2020 年 11 月)3 种典型年, 输入模型所需数据, 利用联合优化调度模型生成不同典型年联合优化调度方案, 从水源、线路和湖泊利用等方面, 将联合优化调度方案与江南北调工程和南水北调东线工程实际采用的独立运行调度模式进行对比分析。

4.1 效益分析

由表 2 可知, 联合优化调度方案能更加合理地实现不同水源的互济互调, 显著降低弃水和梯级泵站总耗电成本。在平、枯、丰 3 个典型年份下, 梯级泵站年总耗电成本分别可降低 0.35 亿、0.44 亿、0.65 亿元, 江水利用量分别可减少 15.47 亿、10.53 亿、19.50 亿 m^3 , 洪泽湖水源利用量可分别增加 24.19 亿、3.83 亿、30.88 亿 m^3 , 洪泽湖弃水量可分别减少 37.16 亿、1.35 亿、27.51 亿 m^3 , 骆马湖弃水量可分别减少 1.72 亿、2.49 亿、3.02 亿 m^3 。

4.2 水源选择

江苏省南水北调水资源调配系统内水源主要包

表 2 3 种典型年份调度方式对比

Table 2 Comparison of scheduling modes in 3 typical years

典型年份	调度方式	总耗电成本/ 亿元	江水利用量/ 亿 m ³	洪泽湖水源利用量/ 亿 m ³	洪泽湖弃水量/ 亿 m ³	骆马湖弃水量/ 亿 m ³
平水年	独立运行调度	1.14	16.85	219.04	180.10	14.67
	联合优化调度	0.79	1.38	243.23	142.94	12.95
枯水年	独立运行调度	3.20	81.87	74.83	1.38	17.12
	联合优化调度	2.76	71.34	78.66	0.03	14.63
丰水年	独立运行调度	2.26	56.54	101.36	304.19	49.54
	联合优化调度	1.61	37.04	132.24	276.68	46.52

括长江、洪泽湖和骆马湖,联合优化调度方案可根据不同水源的来水和各片区需水情况,充分利用沿线主要河湖的调蓄空间,统筹调配和科学利用不同水源,尽可能增加洪泽湖、骆马湖水源的利用量,减少江水利用量,有效减少骆马湖以及洪泽湖以南泵站群的运行时间,降低工程运行成本。

例如,在独立运行调度模式中,枯水年 12 月至 1 月初洪泽湖水位较低(未达到北调水位,南水北调工程无法使用洪泽湖水源),南水北调东线一期工程为了完成出省调水任务,直接使用长江水源通过沿线 9 座梯级泵站北调送水出省,但随着 2 月洪泽湖来水增加,产生了 1.38 亿 m³ 弃水。联合优化调度方案突破了北调水位的限制,可统筹使用各类水源同时满足江水北调和南水北调东线一期工程的要求,因此在枯水年 12 月至 1 月南水北调东线一期工程直接利用洪泽湖水源北调出省,仅使用 6 座泵站即可满足北调出省的水量要求,可有效降低工程运行成本,降低洪泽湖水位,可减少洪泽湖弃水量 1.35 亿 m³。

4.3 线路选择

江苏省南水北调水资源调配系统内的调水线路包括运河线和运西线,以长江、洪泽湖和骆马湖为节点,两条输水干线被分成 4 个区段,不同区段相互组合形成了多种调水线路方案。在线路选择时,应综合考虑水源、线路损失和耗电成本等因素,科学决策所使用的线路和各线路调水量,在完成调水任务的同时尽可能降低总耗电成本。

在独立运行调度模式中,两工程在线路选择上往往被人为区分开来,江水北调任务通常由运河线承担,南水北调任务主要由运西线承担。与运西线相比,运河线输水损失较大,耗电成本高,从全年尺度来看,联合优化调度方案可缩短运河线运行时间,提高运西线的利用率,有效降低系统总耗电成本。3 种典型年下,相比独立运行调度模式,联合优化调度方案中运河线调入骆马湖的水量分别可减少 3.61 亿、7.35 亿、2.88 亿 m³,运西线调入骆马湖的水量则可分别增加 4.34 亿、9.34 亿、3.37 亿 m³,运河线使用率降低,运西线使用率提高,可有效降低总

耗电成本。但在某些特定时段内,联合优化调度方案也提高了运河线的利用率,如独立运行调度模式中平水年 12 月和 1 月运河线无调入骆马湖水量。但考虑到 2 月洪泽湖来水增加,会产生弃水,联合优化调度方案在 2 月前开启运河线增加调出洪泽湖水量储存至骆马湖,供未来月份北调出省使用,降低洪泽湖水位以达到减少弃水的目的。

4.4 湖泊利用

江苏省南水北调水资源调配系统内主要包括洪泽湖和骆马湖两个大型调蓄湖泊,调度运行过程中应科学利用湖泊调蓄空间,科学合理选择蓄放水时机,降低抽江水量,减少耗电成本。独立运行调度模式难以有效统筹和科学利用两湖泊水量和调蓄能力,可能造成弃水等浪费现象。例如,丰水年 12 月至 6 月独立运行调度模式在骆马湖中储存了 2.91 亿 m³ 水,水位升高导致 7 月和 8 月上旬来水增多产生弃水。联合优化调度方案中,丰水年前 7 月在骆马湖中储存的水量可比实际减少 0.84 亿 m³,留出更多调蓄空间在上游来水多时使用,不仅可减少 3.02 亿 m³ 弃水,同时能有效降低梯级泵站抽水成本。从全年尺度来看,相比实际独立运行调度模式,联合优化调度方案在不同典型年份下分别可增加洪泽湖水源利用量 24.2 亿、3.8 亿、30.9 亿 m³,可增加骆马湖水源利用量 1.77 亿、2.38 亿、3.18 亿 m³,可减少洪泽湖弃水量 37.16 亿、1.35 亿、27.51 亿 m³,可减少骆马湖弃水量 1.72 亿、2.49 亿、3.02 亿 m³。

5 结 语

本文针对江苏省南水北调水资源调配系统中存在的各方用水矛盾,为了提升工程整体效率,降低系统耗电成本,提出了江苏省南水北调多工程多目标联合优化调度方法。通过梳理不同工程单元的调度运行要求,提出了统筹调水时间、线路、总量以及生态、航运等不同目标之间的协同机制,建立了联合优化调度模型。针对丰、平、枯 3 种典型年提出了联合优化调度方案,联合优化调度方案和实

际独立运行调度过程对比结果表明,联合优化调度方案在保障系统内各项工程任务顺利完成的同时,能更合理高效地分配和利用水资源,有效提升系统总效益。

参考文献:

- [1] JALALI M R, AFSHAR A, MARIÑO M A. Multi-colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problem[J]. Water Resources Management, 2007, 21(9): 1429-1447.
- [2] 方国华,郭玉雪,闻昕,等.改进的多目标量子遗传算法在南水北调东线工程江苏段水资源优化调度中的应用[J].水资源保护,2018,34(2):34-41. (FANG Guohua, GUO Yuxue, WEN Xin, et al. Application of improved multi-objective quantum genetic algorithm on water resources optimal operation of Jiangsu Section of South-to-North Water Transfer East Route Project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 34-41. (in Chinese))
- [3] 王文君,方国华,李媛,等.基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J].水资源保护,2022,38(2):91-96. (WANG Wenjun, FANG Guohua, LI Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 91-96. (in Chinese))
- [4] 李安强,罗斌,付湘,等.乌江梯级水库联合优化调度方案[J].水电自动化与大坝监测,2010,34(6):53-56. (LI Anqiang, LUO Bin, FU Xiang, et al. Joint optimal dispatch scheme for cascaded reservoirs in Wujiang Basin [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(6): 53-56. (in Chinese))
- [5] 李崇浩,纪昌明,李文武.改进微粒群算法及其在水库优化调度中的应用[J].中国农村水利水电,2006(2):54-56. (LI Chonghao, JI Changming, LI Wenwu. Modified particle swarm algorithm and its application in reservoir operation optimization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(2): 54-56. (in Chinese))
- [6] 李伶杰,王银堂,马敬梅,等.基于改进NSGA-II的龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度[J].水资源保护,2022,38(2):83-90. (LI Lingjie, WANG Yintang, MA Jingmei, et al. Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA-II [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 83-90. (in Chinese))
- [7] 张海荣,姚华明,鲍正风,等.雅砻江和金沙江中下游梯级水库联合优化调度建模及应用I:联合优化调度潜力分析[J].长江科学院院报,2022,39(9):30-37. (ZHANG Hairong, YAO Huaming, BAO Zhengfeng, et al. Modeling and application of joint optimal scheduling of cascade reservoirs on Yalong River and the middle and

downstream of Jinsha River I: potential analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(9): 30-37. (in Chinese))

- [8] 曹明霖,徐斌,王腊春,等.跨区域调水多水源水库群系统供水联合优化调度多情景优化模型研究与应用[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):54-61. (CAO Minglin, XU Bin, WANG Lachun, et al. Research and application of multi-scenario optimization operation model for water supply of multi-reservoir in an inter-basin water transfer system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 54-61. (in Chinese))
- [9] 孔波,付少杰,黄强.大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J].水资源保护,2020,36(6):67-72. (KONG Bo, FU Shaojie, HUANG Qiang. Multi-objective optimal operation of hydropower plant-reservoir-pumping station group in large complex inter-basin water transfer projects [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 67-72. (in Chinese))
- [10] LIU Kelin, WANG Zongzhi, CHENG Liang, et al. Optimal operation of interbasin water transfer multireservoir systems: an empirical analysis from China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(7): 238.
- [11] 何中政.水库群中长期发电调度优化方法研究[D].武汉:华中科技大学,2020.
- [12] 董增川,陈牧风,倪效宽,等.考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [13] 谢新民,陈守煜,王本德,等.水电站水库群模糊优化调度模型与目标协调-模糊规划法[J].水科学进展,1995,6(3):189-197. (XIE Xinmin, CHEN Shouyu, WANG Bende, et al. Fuzzy optimizing dispatching model for multireservoir power system and interaction balance-fuzzy programming method [J]. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 189-197. (in Chinese))
- [14] 段富.大型梯级引水工程自主优化调度模型及其仿真研究[D].太原:太原理工大学,2010.
- [15] 黄草,王忠静,李书飞,等.长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究I:模型原理及求解[J].水利学报,2014,45(9):1009-1018. (HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin I: principle and solution of the model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9): 1009-1018. (in Chinese))

(下转第134页)

- precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332 (1/2): 144-157.
- [19] HONG S, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134 (9): 2318-2341.
- [20] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004, 43 (1): 170-181.
- [21] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1983, 22 (6): 1065-1092.
- [22] TIAN Jiyang, LIU Jia, WANG Jianhua, et al. A spatio-temporal evaluation of the WRF physical parameterisations for numerical rainfall simulation in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 191: 141-155.
- [23] TIAN Jiyang, LIU Jia, YAN Denghua, et al. Ensemble flood forecasting based on a coupled atmospheric-hydrological modeling system with data assimilation[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 224: 127-137.
- [24] TIAN Jiyang, LIU Jia, WANG Yang, et al. A coupled atmospheric-hydrologic modeling system with variable grid sizes for rainfall-runoff simulation in semi-humid and semi-arid watersheds: how does the coupling scale affects the results? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24 (8): 3933-3949.
- [25] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF (version 3) [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2005.
- [26] GOCHIS D J, BARLAGE M, DUGGER A, et al. The WRF-Hydro modeling system technical description (version 5.0) [R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2018.
- [27] LAHMERS T M, GUPTA H, CASTRO C L, et al. Enhancing the structure of the WRF-Hydro hydrologic model for semiarid environments [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20 (4): 691-714.
- [28] VEHTARI A, GELMAN A, GABRY J. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC [J]. *Statistics and Computing*, 2017, 27 (5): 1413-1432.
- [29] LIN P, LARRAY J H, YANG Z L, et al. Insights into hydrometeorological factors constraining flood prediction skill during the May and October 2015 Texas Hill Country flood events [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19 (8): 1339-1361.
- [30] CASSIRAGA E, GÓMEZ-HERNÁNDEZ J J, BERENGUER M, et al. Spatiotemporal precipitation estimation from rain gauges and meteorological radar using geostatistics [J]. *Mathematical Geosciences*, 2021, 53 (4): 499-516.
- [31] TOLSON B A, SHARMA V, SWAYNE D A. A parallel implementations of the dynamically dimensioned search (DDS) algorithm [M]. Prague: Czech Republic, 2007.
- [32] GUPTA H V, WAGENER T, LIU Y. Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 22 (18): 3802-3813.

(收稿日期: 2022-06-23 编辑: 熊水斌)

(上接第 124 页)

- [16] 闻昕, 李精艺, 谭乔凤, 等. 南水北调东线工程江苏段中长期优化调度研究[J]. *水力发电学报*, 2022, 41 (6): 65-77. (WEN Xin, LI Jingyi, TAN Qiaofeng, et al. Study on medium and long-term optimal dispatching of Jiangsu section of eastern route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41 (6): 65-77. (in Chinese))
- [17] OUYANG Shuo, QIN Hui, SHAO Jun, et al. Multi-objective optimal water supply scheduling model for an inter-basin water transfer system: the South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China [J]. *Water Supply*, 2022, 20 (2): 550-564.
- [18] 艾学山, 冉本银. FS-DDDP 方法及其在水库群优化调度中的应用[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2007, 31 (1): 13-16. (AI Xueshan, RAN Benyin. FS-DDDP method and its application to optimal operation of groups of reservoirs [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2007, 31 (1): 13-16. (in Chinese))
- [19] 冯仲恺, 廖胜利, 牛文静, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的正交离散微分动态规划方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35 (18): 4635-4644. (FENG Zhongkai, LIAO Shengli, NIU Wenjing, et al. Orthogonal discrete differential dynamic programming for mid-long term optimal operation of cascade hydropower system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (18): 4635-4644. (in Chinese))
- [20] 李振, 吴兆丹, 郭伟建, 等. 南水北调东线一期工程运行成本降低途径与措施[J]. *水利经济*, 2020, 38 (2): 7-11. (LI Zhen, WU Zhaodan, GUO Weijian, et al. Approaches and measures to reduce operation costs of eastern Route Phase I Project of South-to-North Water Diversion [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38 (2): 7-11. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-10-17 编辑: 熊水斌)