

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0079

方国华, 陆范彪, 刘飞飞, 等. 平原坡水区梯级闸站联合优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 135-142. FANG G H, LU F B, LIU F F, et al. Research on joint optimal scheduling of cascade sluice stations in plain slope water area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 135-142. (in Chinese)

平原坡水区梯级闸站联合优化调度研究

方国华, 陆范彪, 刘飞飞, 黎玉, 闻昕

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 分析平原坡水区梯级闸站联合优化调度系统特点, 探究其合理的联合优化调度方法, 目的在于使社会、经济和生态环境三方面效益达到最优, 为准确研究特定区域闸站联合优化调度、制定和实施该地区的发展规划提出参考。建立特定区域闸站多目标联合优化调度模型并采用 NSGA- $\text{\textcircled{0}}$ 算法求解得到非劣解集, 运用多属性评价决策进行方案优选。对宿迁市黄河故道及以南地区梯级闸站进行实例研究, 结果表明: 联合优化调度相比常规调度, 通过增加提水量, 有效降低了缺水率, 提高了系统的供水能力, 同时减少了弃水, 充分利用了水资源, 节约了供水成本。这说明平原坡水区梯级闸站的多目标联合优化调度模型及求解方法, 具有较好的可操作性和优越性, 对实际工程具有指导意义和应用价值。

关键词: 平原坡水区; 梯级闸站; 联合优化调度; NSGA- $\text{\textcircled{0}}$ 算法; 多属性评价决策

中图分类号: TV 213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0135-08

Research on joint optimal scheduling of cascade sluice stations in plain slope water area

FANG Guohua, LU Fanbiao, LIU Feifei, DING Ziyu, WEN Xin

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyzed the characteristics of joint optimal scheduling system of cascade sluice stations in plain slope water area, and probed the reasonable joint optimization scheduling method, with a view to achieving the best social, economic, and ecological environmental benefits, and to providing a reference for the study of the joint optimal scheduling of a specific area and the formulation and implementation of the development plan of this area. We established a multi-objective joint optimal scheduling model for cascade sluice stations, and used NSGA- $\text{\textcircled{0}}$ algorithm to obtain a non-inferior solution set, and then used the multi-attribute decision making for optimum scheme selection. The Yellow River and its southern area in Suqian city were chosen for a case study. The results demonstrated that compared to conventional scheduling, the joint optimal scheduling could reduce the rate of water shortage and improve the water supply capacity of the system by increasing the quantity of water delivery, and meanwhile reduce the waste water, make full use of water resources, and save the cost of water supply. The results proved that the multi-objective optimal joint operation model and solution method of cascade sluice stations in plain slope water area are quite maneuverable and superior, with guiding significance and application value in practical engineering.

Key words: plain slope water area; cascade sluice station; joint optimal scheduling; NSGA- $\text{\textcircled{0}}$ algorithm; multi-attribute decision making

随着经济的发展和人口的增加, 水资源问题越来越突出, 已严重地制约了地区、国家乃至全球的经

收稿日期: 2018-01-04 修回日期: 2018-04-01 网络出版时间: 2018-04-27
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180426.1740.004.html>
基金项目: 江苏省水利科技项目(2015084)

Fund: Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province (2015084)

作者简介: 方国华(1964), 女, 安徽定远人, 教授, 博士, 主要从事水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度、水利经济、工程管理、水务规划与水务管理等方面研究。E-mail: hhufgh@163.com

济社会发展。目前我国面临着人均水资源占有量较少且水质污染日益加重等问题,面对未来有限的可供利用的水资源,研究和探讨水资源的优化调度问题,对于提高水资源利用效率、改善水生态与水环境质量、保障区域防洪除涝安全、促进社会经济的可持续发展具有重要意义。

本文研究的平原坡水区属于东部平原河网地区中一类特殊地形,具有一定坡度,但坡度较缓,水流从地势高处流向地势低处,为树状单向输水^[1]。在河道上建梯级闸站,可形成小型的河道型梯级水库,在汛期蓄水,非汛期向周边地区供水。平原坡水区梯级闸站与梯级水库有一定相似之处,区别在于梯级水库以发电为主,而本文研究对象以灌溉供水为主。平原坡水区梯级闸站联合优化调度系统是一个开放式、复杂、高维、非线性系统,涉及社会、经济和生态环境等多个方面,需要统筹防洪、排涝、灌溉、供水、航运、生态等多方面功能^[2,3]。

国内外对水资源优化调度的研究主要从模型构建和模型求解两部分内容重点展开。在水库优化调度方面,模型构建研究进展主要从单一水库优化调度到梯级水库及水库群的多目标联合优化调度^[4,7],模型求解也相应地,由传统的时历法、统计法等简单的方法发展到线性规划方法、动态规划方法^[8]、大系统分解协调技术^[8,9]以及更为复杂的多目标优化技术和启发式智能算法^[10,13]等。在平原河网地区水资源优化调度方面,由于平原河网地区水资源流向的不确定性,其模型构建更为复杂^[14,19],如树状河网闸群防洪体系的优化调度模型、应用系统分析理论和方法的多时段多闸联合的闸群防洪体系优化调度模型等^[17,19]。

本文拟在总结吸收前人研究成果基础上,围绕平原坡水区梯级闸站联合优化调度展开研究,构建多目标优化调度模型并用多目标进化算法求解,采用多属性评价决策进行方案优选,最后以宿迁市黄河故道及以南地区梯级闸站为实例进行研究,确定优化调度方案,并与常规调度方案进行对比。研究成果对于满足平原坡水区防洪、灌溉、供水等综合要求,提高水资源利用率具有重要的理论意义和实用价值。

1 平原坡水区梯级闸站联合优化调度模型建立

平原坡水区梯级闸站联合优化调度系统庞大、复杂,河道纵横交错,且各种人工控制性建筑物如水闸、泵站、船闸、涵洞分布其间,在计算时难以考虑所有因素,因此必须对系统进行概化。本文遵循合理

减少河道数量、保留骨干河道、合并部分次要输水河道、保持河道总长不变和维持原有河道水面比降等原则进行系统概化,并构建包括社会、经济和生态环境三方面效益的多目标优化调度模型。

1.1 目标函数

平原坡水区梯级闸站联合优化调度总目标为

$$\max E = \{E_1, E_2, E_3\} \quad (1)$$

式中: E 为综合效益目标; E_1 为社会效益目标; E_2 为经济效益目标; E_3 为生态效益目标。其中,社会效益一般包含防洪效益与供水效益,本文选取供水效益目标作为社会效益目标,而将防洪效益目标作为约束条件。

(1) 社会效益目标。

系统优化调度的主要目的是供水,包括生活需水和生产需水,不包括生态需水,其中生产需水又包括农业、工业和第三产业需水,在一般情况下,平原坡水区农业需水占的比例较大。本文采用系统缺水最小目标来体现供水效益最大化,即:

$$\min E_1 = \min \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^N (1 - \min(0, (G(i, t) - D(i, t)))) \quad (2)$$

式中: E_1 为系统缺水量(m^3); $G(i, t)$ 为第*i*计算单元*t*时段内的供水量(m^3); $D(i, t)$ 为第*i*计算单元*t*时段内的需水量(不包括生态需水)(m^3); T 为调度时段个数; N 为计算单元数目。

(2) 经济效益目标。

在水库优化调度中,通常考虑以发电量最大为目标,而由于本文研究的平原坡水区梯级闸站联合优化调度系统不考虑发电,优化调度的主要目的为供水,需要通过泵站从河道或者湖泊提水,因此经济效益目标可定为泵站提水量最小,即

$$\min E_2 = \min \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T QS(j, t) \quad (3)$$

式中: E_2 表示泵站提水量(m^3); j 为泵站编号; m 为泵站数量; $QS(j, t)$ 为*j*泵站*t*时段的提水量(m^3);其他符号同前。

(3) 生态环境效益目标。

平原坡水区主要位于东部沿海地区,人口密度较大,经济发展较快,同时水流流动性较差,水质恶化较严重。因此,在充分考虑社会效益和经济效益目标的同时,需要考虑生态环境效益目标,以实现生态环境保护的功能,本文考以生态需水缺水最小为目标函数,即

$$\min E_3 = \min \sum_{i=1}^T \sum_{t=1}^N (1 - \min(0, (Q(i, t) - QD_{min}(i, t)))) \Delta t \quad (4)$$

式中: E_3 为生态环境需水缺水量(m^3); $Q(i, t)$ 为第 i 计算单元 t 时段内的流量(m^3/s); $QD_{\min}(i, t)$ 为第 i 计算单元 t 时段内所要求的最小生态环境流量(m^3/s); Δt 为计算步长(s); 其他符号同前。

1.2 约束条件

本文研究的平原坡水区梯级闸站联合优化调度模型的约束条件主要有河道水量平衡、调蓄能力、水位要求、输水能力、泵站提水能力、水闸过流能力等约束。

(1) 河道水量平衡约束。

平原坡水区由于地势较低, 河道规模差距较大, 蓄水能力有限, 因此分为有调蓄能力的河道和无调蓄能力的河道。河道在每一时段均应满足水量平衡约束。式(5)为有调蓄能力的河道应满足的水量平衡方程式, 式(6)为无调蓄能力的河道应满足的水量平衡方程式:

$$V(i, t+1) = V(i, t) + [Q_s(i, t) - Q_u(i, t) + Q_1(i, t) - Q_2(i, t)] \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$Q_s(i, t) - Q_u(i, t) + Q_1(i, t) = Q_2(i, t) \quad (6)$$

式中: $V(i, t)$ 为第 i 个节点 t 时段初的蓄水量(m^3); $Q_s(i, t)$ 、 $Q_u(i, t)$ 分别为第 i 条连线 t 时段内的区间来水和用水流量(m^3/s); $Q_1(i, t)$ 与 $Q_2(i, t)$ 分别为第 i 条连线 t 时段内上游入流量和下游出流量(m^3/s); 其他符号同前。

(2) 河道调蓄能力约束。

$$V_{\min}(i, t) \leq V(i, t) \leq V_{\max}(i, t) \quad (7)$$

式中: $V_{\min}(i, t)$ 、 $V_{\max}(i, t)$ 分别表示第 i 河道 t 时段允许的最小和最大蓄水库容(m^3)。当 $V(i, t) > V_{\max}(i, t)$ 时, 产生弃水, 以此保证河道的防洪工程安全; 当 $V(i, t) < V_{\min}(i, t)$ 时, 产生缺水, 缺水量为 $V_{\min}(i, t) - V(i, t)$, 以确保河道水位始终在最小水位以上。

(3) 河道水位要求约束。

河道水位要求包括防洪排涝水位、航运水位、地下水水位要求, 其中, 防洪排涝水位要求即洪水期河道的水位应低于防洪排涝要求的最高水位, 航运水位要求即河道水位要高于满足航运要求的最低水位, 地下水水位要求即河道水位需满足地下水最低水位。

$$Z_{\min}(i, t) \leq Z(i, t) \leq Z_{\max}(i, t) \quad (8)$$

式中: $Z_{\min}(i, t)$ 、 $Z_{\max}(i, t)$ 分别表示第 i 河道 t 时段允许的最小和最大水位(m)。

(4) 河道输水能力约束。

河道的输水流量需要满足不超过河道的输水能力。

$$Q(i, t) \leq Q_{\max}(i, t) \quad (9)$$

式中: $Q_{\max}(i, t)$ 表示 i 河道 t 时段的最大输水流量

(m^3/s)。

(5) 泵站提水能力约束。

泵站的提水流量应满足不大于相应泵站提水能力的约束。

$$0 \leq DO(j, t) \leq DO_{\max}(j, t) \quad (10)$$

式中: $DO(j, t)$ 表示 j 泵站 t 时段的提水流量(m^3/s); $DO_{\max}(j, t)$ 表示相应泵站的提水能力(m^3/s)。

(6) 水闸过流能力约束。

水闸的下泄流量应满足不大于对应水闸过流能力的约束。

$$0 \leq PR(j, t) \leq PR_{\max}(j, t) \quad (11)$$

式中: $PR(j, t)$ 表示 t 时段由水闸 j 下泄的流量(m^3/s); $PR_{\max}(j, t)$ 表示相应控制水闸的过流能力(m^3/s)。

(7) 非负约束。

以上所有参数满足非负约束条件。

2 多目标优化方法

构建起平原坡水区梯级闸站联合优化调度多目标模型后, 需选取合适的多目标优化方法对模型进行求解。本文采用 NSGA- ϵ 算法对模型求解得到非劣解集并用基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型对方案进行多属性评价决策。

2.1 模型求解方法

2.1.1 NSGA- ϵ 算法

NSGA- ϵ 算法^[20,21] 是由 Deb 等于 2002 年在 NSGA 算法^[22] 的基础上提出的, 主要针对 NSGA 算法的时间复杂度较高、未引入精英保留策略和难以确定维持种群分布性的共享参数值大小三方面问题做了改进。NSGA- ϵ 算法的核心是非支配排序、聚集距离排序和精英保留策略, 其中, 快速非支配排序部分决定了 NSGA- ϵ 算法的时间复杂度为 $O(rN^2)$ 。

NSGA- ϵ 算法的主要流程包括编码及参数设置, 生成初始种群并计算目标函数值、非支配序和聚集距离, 遗传操作(选择、交叉、变异)产生新种群, 采用精英策略对父子两代合并排序并选出前 N 个个体作为新的父代, 判断是否满足终止条件等步骤。其中, 遗传操作主要采用基于偏序关系的二元锦标赛选择机制、模拟二进制交叉和多项式变异组合策略。

2.1.2 NSGA- ϵ 算法求解梯级闸站联合优化调度模型步骤

本文构建的平原坡水区梯级闸站联合优化调度模型求解步骤具体有以下五步:

Step1 编码、参数设置和全局数据的初始化。

采用实数编码, 确定种群规模 N 、最大迭代次数 T , 并将全局数据包括河道库容、水位、泵站提水能力、水闸泄流能力、系统来水与需水情况等初始化操作。

Step2 以相应泵站提水能力为限随机生成一个初始种群 P_0 , 此时令 $t=0$ 。对每个个体所代表的方案进行模拟调度运行, 计算各个目标函数值(供水缺水水量 E_1 、泵站提水量 E_2 及生态需水缺水水量 E_3), 并以此计算个体非支配等级 F_k 和聚集距离 F_{dis} , 然后按偏序关系进行排序。

Step3 基于偏序关系, 计算个体适应度值, 在此基础上对种群进行遗传操作, 包括二元锦标赛选择、模拟二进制交叉和多项式变异, 产生子代种群 Q_t 。

Step4 合并 Q_t 与 P_t 得到 R_t , 对 R_t 按偏序关系进行非支配排序与聚集距离排序, 选取前 N 个个体, 作为最终的子代种群 P_{t+1} 。

Step5 判断是否满足终止条件($t \geq T$), 若满足, 则退出循环并输出最后一代种群作为 Pareto 最优解集; 若不满足, 则继续以 P_{t+1} 作为父代种群, 返回至 Step3, 继续循环运行直到满足判断终止条件。

平原坡水区梯级闸站联合优化调度模型求解流程见图 1。

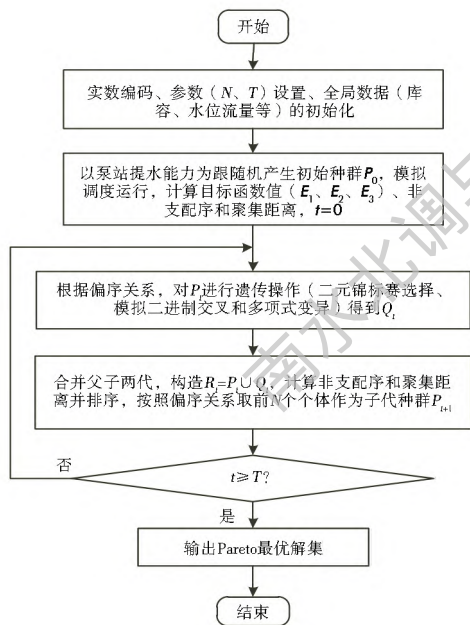


图 1 平原坡水区梯级闸站联合优化调度模型求解流程
Fig. 1 The solving process of joint optimal scheduling model for cascade sluice stations in plain slope water area

2.2 方案多属性评价决策

对模型求解后, 可得到优化调度方案的非劣解集, 此时需要决策者结合实际情况, 采用合适的方法选取能实现整个系统的综合效益最大化的最佳均衡方案。本文选用无偏好信息的投影寻踪法, 该方法不需要决策者提供偏好信息, 避免了人为赋予权重

的弊端, 并采用混沌遗传算法优化投影指标函数。

2.2.1 平原坡水区梯级闸站联合优化调度方案评价指标体系构建

平原坡水区梯级闸站联合优化调度是一个复杂的、涉及多部门多领域的系统, 调度模型包括社会、经济和生态环境效益三个目标, 相应地, 评价指标体系的构建也从社会、经济和生态环境三方面考虑。其中, 社会评价指标包括防洪与供水效益, 本文选取汛末河道总库容(正向)和系统缺水水量(逆向)两个指标; 经济评价指标选取系统提水量(逆向)和系统弃水量(逆向)两个指标; 生态环境评价指标选取生态缺水水量(逆向)一个指标。平原坡水区梯级闸站联合优化调度方案评价决策指标集见图 2。

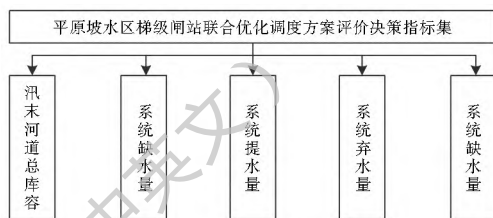


图 2 平原坡水区梯级闸站联合优化调度方案评价决策指标集

Fig. 2 Evaluation decision making index set of joint optimal scheduling schemes for cascade sluice stations in plain slope water area

2.2.2 基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型评价优选方案

投影寻踪(Projection Pursuit, PP)法^[23-24]作为一类新兴的多元数据分析的数学方法, 于 20 世纪 70 年代由美国科学家 Kruscal 提出, 其基本思想是通过在低维空间处理数据的方式以达到研究和分析高维数据特征及结构的目的, 具体思路是将影响问题的多因素指标通过聚类分析, 得到反映其综合指标特性的投影特征值, 然后建立与因变量之间的一一对应关系函数, 从而进行分析与研究, 避免了专家赋权的人为干扰。投影寻踪聚类模型的核心是构造投影指标函数, 本文采用混沌遗传算法优化投影指标函数。

混沌遗传算法(Chaos Genetic Algorithm, CGA)结合混沌运动的遍历性、随机性、规律性和 GA 算法的反演性等特点, 将两种算法耦合, 提高了传统 GA 算法的收敛速度和优化效果。该算法的基本思想是利用混沌优化算法的随机性和遍历性改善初始种群质量, 并对遗传操作即选择、交叉、变异后的种群附加混沌扰动, 以避免搜索过程陷入局部极值^[24-25]。

基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型具体求解步骤^[25]包括: 方案指标集的归一化处理, 构造投影指标函数 $Q(a)$, 利用混沌遗传算法优化投影

指标函数, 根据投影值 $Z^*(i)$ 的大小对方案分类排序并优选方案。基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型评价优选方案基本流程见图 3。

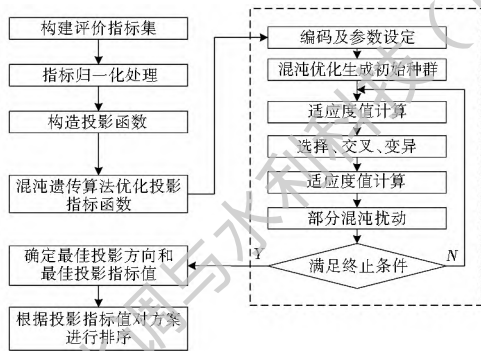


图 3 基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型评价优选方案基本流程

Fig. 3 The flow chart of evaluating the optimization schemes with the Projection Pursuit model based on Chaos Genetic Algorithm optimization

3 实例研究

3.1 宿迁市黄河故道及以南地区概况与系统概化

宿迁市黄河故道及以南地区梯级闸站联合优化

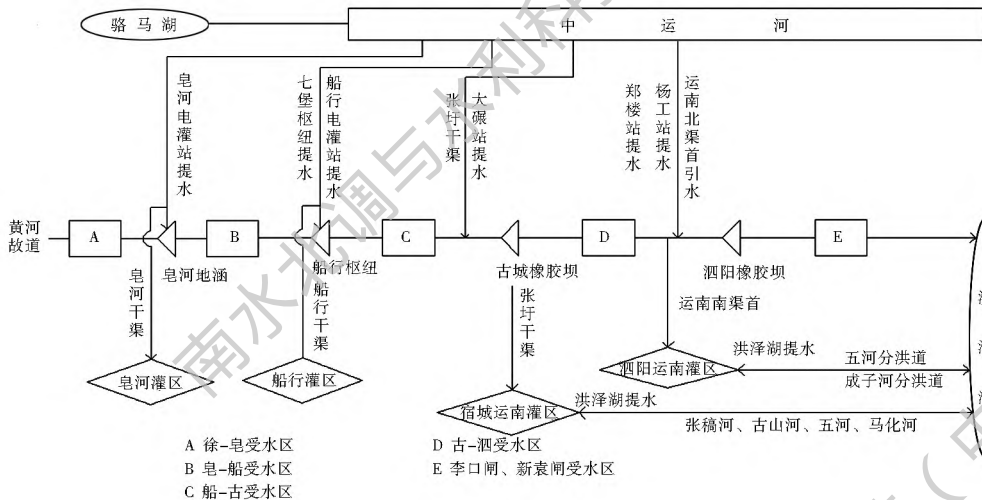


图 4 宿迁市黄河故道及以南地区水资源系统概化图

Fig. 4 The sketch of water resources system in the Yellow River and its southern area in Suqian city

3.2 宿迁市黄河故道及以南地区梯级闸站联合优化调度

3.2.1 梯级闸站联合优化调度模型构建

宿迁市黄河故道及以南地区水资源优化调度所需要解决的主要问题是让沿黄河故道及皂河、船行、运南三大灌区的系统缺水最小, 同时考虑经济成本即提水量最小, 因此将系统缺水最小和泵站提水量最小作为模型的两个目标函数, 而将生态效益目标转化为生态约束。将生态环境效

调度系统由骆马湖、洪泽湖两个主要调蓄湖泊, 中运河、黄河故道、西民便河、西沙河、五河、成子河六条骨干河道以及皂河灌区、船行灌区、运南灌区三大灌区组成。目前, 黄河故道上规划建成 11 级梯级控制, 由西向东依次是皂河地涵、蔡支闸、船行枢纽、古城橡胶坝、仓集闸、陈圩闸、大兴闸、成子河分洪闸、泗阳橡胶坝、李口闸、新袁闸。

该系统庞大且复杂, 影响因素难以全面考虑, 其最显著的特点是除宿城和泗阳运南灌区一部分从洪泽湖提水, 即反向提水外, 其余均为从北向南、由西往东输水, 且系统内并联河道和串联闸站工程较多, 因此根据系统主要组成以及骨干河渠间的连接关系进行系统概化, 使其既能突出区域水资源供需现状, 又能真实反映梯级控制闸站的工作特性。该系统的供水任务主要从骆马湖和中运河提水, 通过皂河电灌站、七堡枢纽等泵站提水至黄河故道, 再通过皂河干渠、船行干渠、张圩干渠、运南南渠首等渠道向皂河灌区、船行灌区、运南灌区供水, 黄河故道上沿途也供水给周边用水户, 且通过 11 级梯级闸站由西向东输水, 最终汇入洪泽湖。宿迁市黄河故道及以南地区水资源系统概化见图 4。

益作为约束条件后, 调度方案的供水首先满足生态需水要求, 再满足农业等其他需水要求, 实例中系统缺水最小目标中的需水包括农业需水和生态需水。

生态约束要求各河道和受水区水量满足一定的生态需求, 包括水系连通、景观环境、生态基流等, 即

$$Q(i, t) \geq Q_{\min}(i, t) \quad (12)$$

式中: $Q_{\min}(i, t)$ 为第 i 河道或受水区 t 时段内的最小生态流量 (m^3/s)。

3.2.2 梯级闸站联合优化调度模型求解与方案优选

结合宿迁市黄河故道及以南地区实际情况,参考《宿迁市水资源公报》(2013 年)和《宿迁市黄河故道及以南地区水资源优化配置与调控研究》,采用定额分析法对研究区域在规划水平年(2020 年)不同保证率下的农业需水进行计算,生态需水量考虑到变化较小,且对需水总量影响较小,因此采用区域现状生态用水量,具体计算结果见表 1。生活和工业用水均来自水厂,而水厂的水取自洪泽湖和骆马湖,为本文研究水资源系统以外,因此不考虑生活与工业需水。

表 1 宿迁市黄河故道及以南地区 2020 年需水量预测

Tab. 1 Forecast of water demand in 2020 of the Yellow River and its southern area in Suqian city

| 片区 | 农业需水量 | | | 生态需水量 | 合计 | | |
|------|-------|------|------|-------|------------------|------|------|
| | | | | | 亿 m ³ | | |
| | 50% | 75% | 95% | | 50% | 75% | 95% |
| 黄河故道 | 1.16 | 1.35 | 1.65 | 0.029 | 1.19 | 1.38 | 1.68 |
| 皂河灌区 | 1.10 | 1.34 | 1.75 | 0.035 | 1.14 | 1.38 | 1.79 |
| 船行灌区 | 1.13 | 1.39 | 1.81 | 0.031 | 1.16 | 1.42 | 1.84 |
| 运南灌区 | 1.61 | 2.00 | 2.63 | 0.073 | 1.68 | 2.07 | 2.70 |
| 合计 | 5.00 | 6.08 | 7.83 | 0.170 | 5.17 | 6.25 | 8.00 |

基于规划水平年(2020 年)水资源供需平衡情况,从汛期 6 月初开始,以月为调度时段,分别对平水年($P=50\%$)、枯水年($P=75\%$)和特枯水年($P=95\%$)采用 NSGA-0 算法进行模型求解得到调度方案非劣解集,再用基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型对三个水平年分别选取的 10 个非劣解进行多属性评价决策,最终确定相对较好的调度方案。

(1) 采用 NSGA-0 算法求解时,设置种群大小为 100,最大迭代次数为 10 000 次。以平水年为例,迭代 10 000 次即最后一代的非劣解集见图 5。由于实例中主要考虑水量平衡关系,因此两者总体呈现线性负相关关系。图 5 为最后一代的 100 个非劣解,两个目标函数值分布范围较广,其中缺水量目标范围为[0, 2 879]亿 m³,提水量目标范围为[0 062, 2 975]亿 m³,可供决策者选择的方案较多,具体可结合区域实际或者决策者偏好进行方案选择。

(2) 采用基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型对调度方案集进行方案优选时,由于实例主要目的为满足区域供水,在尽量保证缺水量较小的前提下,使得提水量最小,成本最低,因此选取非劣解集中缺水量最小的前 10 个方案进行多属性决策。实例中将生态环境目标转化为约束条件处理,即计

算时必须首先满足生态需水要求,同时由于选择缺水量最小的前 10 个方案进行优选,缺水主要表现为农业缺水,因此这 10 个方案生态缺水量指标均为 0,在实例中生态缺水量不作为多属性决策指标。

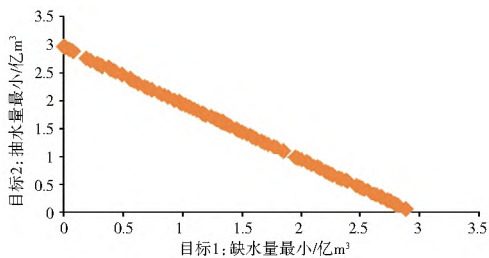


图 5 平水年下迭代 10 000 次后的非劣解集

Fig. 5 Non inferior solution set after 10000 iterations in a normal year

根据基于混沌遗传算法优化的投影寻踪聚类模型的平原坡水区梯级闸站联合优化调度方案优选的流程,先将三个水平年下 10 个方案的 4 个指标归一化处理(本文将各指标的最大值和最小值分别取为该指标在非劣解集中实际能达到的最大值和最小值,因此三个水平年是相互独立的),然后构造投影指标函数,并用混沌遗传算法求解最佳投影方向。求解时,设定各参数为:变量取值范围[0, 1]、种群规模 500、最大迭代次数 500、交叉概率 0.9、变异概率 0.1,然后分别将程序在 MATLAB 2012a 版本中运行。以平水年为例,最大指标函数值为 0.052,最佳投影方向 $a^* = [0.210, 0.131, 0.308, 0.918]$,最佳投影值见表 2,根据 z^* 值的大小,最终确定平水年下 z^* 值最大的方案 1 为最佳方案;同理,枯水年下得到最大指标函数值为 0.355,最佳投影方向 $a^* = [0.235, 0.311, 0.183, 0.902]$,最终确定方案 1 为最

表 2 平水年下方案评价指标集及排序结果

Tab. 2 Evaluation index set and sorting results of the schemes in a normal year

| 序号 | 系统缺水量 | 系统提水量 | 系统弃水量 | 汛末河道总库容 | z^* | 排序 |
|----|---------|----------|---------|---------|-------|----|
| 1 | 0.0 | 29 753.8 | 3 700.0 | 1 082.2 | 0.639 | 1 |
| 2 | 123.8 | 29 624.9 | 3 694.8 | 1 075.2 | 0.632 | 2 |
| 3 | 444.5 | 29 268.5 | 3 659.1 | 955.2 | 0.515 | 3 |
| 4 | 783.0 | 28 945.0 | 3 674.2 | 846.9 | 0.405 | 4 |
| 5 | 1 818.2 | 27 669.2 | 3 491.6 | 781.5 | 0.354 | 7 |
| 6 | 2 203.1 | 27 241.1 | 3 436.1 | 824.9 | 0.400 | 6 |
| 7 | 2 735.3 | 26 701.7 | 3 443.8 | 745.2 | 0.319 | 8 |
| 8 | 2 793.3 | 26 646.8 | 3 446.1 | 745.2 | 0.319 | 10 |
| 9 | 3 030.5 | 26 413.6 | 3 437.4 | 745.2 | 0.319 | 9 |
| 10 | 3 227.2 | 26 245.0 | 3 424.9 | 828.9 | 0.402 | 5 |

优方案;特枯水年下得到最大指标函数值为 0.371,最佳投影方向 $a^* = [0.169, 0.185, 0.132, 0.959]$,最终确定方案 2 为最优方案。

平水年时,宿迁市黄河故道及以南地区泵站共计提水 2.975 亿 m^3 ,系统供水 5.170 亿 m^3 ,缺水

量为 0,总弃水量为 0.370 亿 m^3 ,汛末(9 月末)河道总库容为 0.108 亿 m^3 。其中,汛期(6 月-9 月)共计提水 2.603 亿 m^3 ,供水 4.920 亿 m^3 。平水年、枯水年和特枯水年三个水平年的调度方案对比具体见表 3。

表 3 不同水平年宿迁市黄河故道及以南地区调度方案对比

Tab. 3 Comparison of scheduling schemes for the Yellow River and its southern area in Suqian city in different level years

| 水平年 | 提水量 | | | 供水量 | | | 缺水量 | 弃水量 | 汛末河道总库容 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| | 汛期 | 非汛期 | 合计 | 汛期 | 非汛期 | 合计 | | | |
| 平水年 | 2.603 | 0.373 | 2.975 | 4.920 | 0.250 | 5.170 | 0 | 0.370 | 0.108 |
| 枯水年 | 4.853 | 0.408 | 5.261 | 5.974 | 0.276 | 6.250 | 0 | 0.335 | 0.152 |
| 特枯水年 | 6.714 | 0.478 | 7.192 | 7.605 | 0.320 | 7.925 | 0.085 | 0.359 | 0.158 |

3.3 联合优化调度优势分析

宿迁市黄河故道及以南地区梯级闸站常规调度与优化调度的计算工况相同,主要遵循水资源开发利用与社会经济发展相适应、优先使用地表水、优先满足生活用水、优水优用等原则进行配置和调度水资源。优先使用地表水,根据区域需水情况再从骆马湖、中运河和洪泽湖提水,通过各级泵站和水闸向各个受水区供水。河道中若水位高于最高水位,则通过水闸泄水。平水年、枯水年、特枯水年优化调度与常规调度结果对比见表 4。

年、枯水年和特枯水年均小于常规调度,说明优化调度有效减少了弃水,充分利用了水资源,从而节约了供水成本。

4 结论

水资源是人类赖以生存的自然资源,研究和探讨水资源的合理配置与调度,对于提高水资源利用效率,促进社会经济可持续发展具有重要意义。本文围绕平原坡水区梯级闸站联合优化调度,构建了以社会、经济和生态环境三方面效益为目标的多目标优化调度模型,以宿迁市黄河故道及以南地区为实例进行了研究,并将求解结果与常规调度进行了对比。结果表明:联合优化调度相比常规调度,能够保证可供水量在各区域间的科学合理分配,提高整个系统的供水保证率,充分利用水资源,减少弃水,节约供水成本。因此,本文构建的多目标优化调度模型及求解方法具有较好的可操作性和优越性,对实际工程尤其是平原坡水区优化调度具有指导意义和应用价值。

表 4 不同水平年优化调度与常规调度结果对比

Tab. 4 Comparison between optimized and conventional scheduling results in different level years

| 水平年 | 平水年 | | 枯水年 | | 特枯水年 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 优化调度 | 常规调度 | 优化调度 | 常规调度 | 优化调度 | 常规调度 |
| 提水量 | 2.975 | 2.900 | 5.261 | 5.010 | 7.192 | 6.580 |
| 供水量 | 5.170 | 4.970 | 6.250 | 5.700 | 7.925 | 7.240 |
| 缺水量 | 0 | 0.200 | 0 | 0.550 | 0.085 | 0.760 |
| 弃水量 | 0.370 | 0.520 | 0.335 | 0.490 | 0.359 | 0.470 |

根据表 4,将联合优化调度与常规调度方式相对比:(1)平水年下,常规调度只能提供 4.97 亿 m^3 的水量,缺水率为 0.2 亿 m^3 ,缺水率为 3.87%,而优化调度求解得到的缺水量为 0;(2)枯水年下,常规调度只能提供 5.7 亿 m^3 的水量,缺水率为 0.55 亿 m^3 ,缺水率为 8.8%,而优化调度缺水量为 0;(3)特枯水年下,常规调度只能提供 7.24 亿 m^3 的水量,缺水率为 0.76 亿 m^3 ,缺水率为 9.5%,而优化调度求解得到的缺水量为 0.085 亿 m^3 ,缺水率为 1.06%,远远小于常规调度,因此,优化调度通过增加提水量,有效降低了缺水率,提高了系统的供水能力。同时,从弃水量的角度,优化调度弃水量在平水

参考文献(References):

[1] 乐红玲,张萍霞,王船海,等.平原河网区坡面汇流分布式单位线研究[J].水电能源科学,2015,33(2):25-28. (LE H L, ZHANG P X, WANG H C, et al. Study on slope confluence distribution unit line in plain river network area[J]. Hydropower Energy Science, 2015, 33(2): 25-28. (in Chinese))

[2] 潘理中,芮孝芳.水电站水库优化调度研究的若干进展[J].水文,1999(6):37-39. (PAN L Z, RUI X F. The research progress for reservoir optimized operation of hydropower station[J]. Journal of China Hydrology, 1999(6): 37-39. (in Chinese))

[3] 裴哲义,姚志宗,郭生练,等.中国水库调度工作近年来的成就与展望[J].水电自动化与大坝监测,2004,28(1):1-3. (PEI Z Y, YAO Z Z, GUO S L, et al. Achievements and prospects of hydropower operation automation in China[J]. Hydropower Automa

- tion and Dam Monitoring, 2004, 28(1): F 3. (in Chinese)
- [4] LITTLE J D C. The use of storage water in a hydroelectric system[J]. Operation Research, 1955, 3(2): 187-197.
- [5] REDDY M J, KUMAR D N. Optimal reservoir operation using multi objective evolutionary algorithm[J]. Water Resources Management, 2006, 20(6): 861-878. DOI: 10. 1007/s11269-005-9011-1.
- [6] 张勇传, 李福生, 熊斯毅, 等. 水电站水库群优化调度方法的研究[J]. 水力发电, 1981, (11): 50-54. (ZHANG Y C, LI F S, XIONG S Y, et al. Study on optimal dispatch method of reservoir group in hydropower station[J]. Hydroelectric power, 1981, (11): 50-54. (in Chinese))
- [7] 覃晖, 周建中, 肖炯, 等. 梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 377-384. (QIN H, ZHOU J Z, XIAO K, et al. Multi-target generation optimal scheduling of cascade hydropower stations[J]. Water Science Progress, 2010, 21(3): 377-384. (in Chinese))
- [8] 畅建霞, 黄强, 王义民. 水电站水库优化调度几种方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2000, 18(3): 19-22. (CHANG J X, HUANG Q, WANG Y M. A discussion on methods of single reservoir optimal operation[J]. Water Resources and Power, 2001, 18(3): 19-22. (in Chinese))
- [9] 张双虎. 梯级水库群发电优化调度的理论与实践——以乌江梯级水库群为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (ZHANG S H. The theory and practice of cascade reservoirs power generation optimized operation with Wujiang cascade reservoirs as the study objective[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [10] 畅建霞, 黄强, 王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2001(3): 85-90. (CHANG J X, HUANG Q, WANG Y M. Optimal operation of hydropower station reservoir by using an improved genetic algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001(3): 85-90. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-1243. 2001. 03. 010.
- [11] 马玉新, 解建仓, 罗军刚. 基于方向自学习遗传算法的水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 43-48. (MA Y X, XIE J C, LUO J G. Study on optimal operation of reservoir based on directional self learning genetic algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 43-48. (in Chinese))
- [12] 刘卫林, 董增川, 王德智. 混合智能算法及其在供水水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38(12): 1437-1443. (LIU W L, DONG Z C, WANG D Z. Hybrid intelligent algorithm and its application in dispatch optimization for water supply reservoir group[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12): 1437-1443. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2007. 12. 005.
- [13] ROBIN W, MOHD S. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(1): 25-33.
- [14] 林宝新, 苏锡祺. 平原河网闸群防洪体系的优化调度[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1996, 30(6): 652-663. (LIN B X, SU X Q. Optimal dispatch of flood prevention system in plain river gateway[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1996, 30(6): 652-663. (in Chinese))
- [15] 刘芹. 平原河网水力计算及闸群防洪体系优化调度研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (LIU Q. Study on hydraulic calculation of flood plain network and flood control system optimal regulation of floodgate group[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [16] GU Z H, CAO X M, LIU G L, et al. Optimizing operation rules of sluices in river networks based on knowledge driven and data driven mechanism[J]. Water Resources Management, 2014, 28(11): 3455-3469. DOI: 10. 1007/s11269-014-0679-y.
- [17] 胡振鹏. 大系统多目标分解聚合算法及应用[D]. 武汉: 武汉大学水利电力学院, 1985. (HU Z P. Multi-objective decomposition and aggregation algorithm for large system and its application[D]. Wuhan: Wuhan Hydraulic and Electric Power Institute, 1985. (in Chinese))
- [18] 张建云, 陈洁云. 南水北调东线工程优化调度研究[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 198-204. (ZHANG J Y, CHEN J Y. Study on optimal dispatch of east route of south north water transfer project[J]. Water Science Progress, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese))
- [19] 于凤存, 方国华, 王文杰, 等. 基于多目标遗传算法的南水北调东线工程湖泊群优化调度研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 78-85. (YU F C, FANG G H, WANG W J, et al. Study on optimal scheduling of lake groups in eastern route of south to north water resources projecting based on multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 78-85. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2016. 03. 015.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] 黄晓敏, 雷晓辉, 王宇晖, 等. 基于 NSGA-II 的水文模型参数多目标优化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 16-21. (HUANG X M, LEI X H, WANG Y H, et al. Study of multi-objective optimization of parameters of HYMOD model using NSGA-II algorithm[J]. People Yangtze River, 2012, 43(2): 16-21. (in Chinese))
- [22] SRINIVAS N, DEB K. Multi objective optimization using non dominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [23] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, C-23(9): 881-890.
- [24] 方国华, 黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 164-167. (FANG G H, HUANG X F. Multiobjective decision making theory, Method and Application[M]. Beijing: Science Press, 2011: 164-167. (in Chinese))
- [25] 刘飞飞, 方国华, 高颖, 等. 基于最严格水资源管理制度的水质型缺水地区节水型社会建设评价[J]. 水利经济, 2016, 34(5): 42-46. (LIU F F, FANG G H, GAO Y, et al. Evaluation of water saving society construction in water quality and scarcity areas based on the most stringent water resources management system[J]. Water conservancy economy, 2016, 34(5): 42-46. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1003-9511. 2016. 05. 010.