

基于改进的 MOQGA 算法的南水北调东线工程江苏段 水资源优化调度研究

方国华^{1*}, 郭玉雪¹, 闻昕¹, 黄显峰¹

1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098

摘要 考虑南水北调东线工程供水目标及经济成本特点, 本文以受水区需水满足度最大、系统总抽水量最小为优化目标, 构建南水北调东线江苏段工程水资源优化调度模型, 采用改进的 MOQGA 算法求解, 运用基于组合赋权方法对非劣解集进行多属性决策, 提出南水北调东线工程江苏段水资源优化调度方案。在平水年、枯水年和特枯水年三种典型年来水条件下, 相对于常规调度, 优化调度的受水区总缺水量分别减少了 0.89 亿 m³、0.87 亿 m³ 和 0.08 亿 m³; 系统总抽水量分别减少 21.04 亿 m³、39.14 亿 m³ 和 50.76 亿 m³。表明优化调度方案能够充分利用湖泊的调蓄能力, 提高各用水户的需水满足度, 降低抽水成本, 为南水北调东线工程江苏段的运行管理提供理论依据和科学支撑。

[关键词]: 多目标优化; 南水北调东线工程江苏段; 改进的多目标量子遗传算法; 水资源优化调度

Study on Water Resources Optimal Operation of Jiangsu Section of South - to - North Water Transfer Project Based on Novel Multi-objective Quantum Genetic Algorithm

Fang Guohua^{1*}, Guo Yuxue¹, Wen Xin¹, Huang Xianfeng¹

1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Considering the water supply and economic cost of Jiangsu Section of South - to - North Water Transfer (E-SNWT) Project, this paper develops a water resources optimal operation model of E-SNWT Project with minimizing the total pumpage and maximizing the water supply rate as the objective functions, and explores the novel multi-objective quantum genetic algorithm, and proposes the

作者简介: 方国华 (1964-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度、水利经济等

multi-attribute decision-making method, and proposes an optimal operation scheme for E-SNWT Project. Under normal, dry and extremely dry inflow conditions, compared with the conventional dispatching, the water shortage could be reduced by 0.89 billion m^3 , 0.87 billion m^3 , and 0.08 billion m^3 , respectively; the pumping amount of the system could be reduced by 20.14 billion m^3 , 39.14 billion m^3 and 50.76 billion m^3 respectively. It shows that the optimal operation solution can make full use of lakes, improve the water of water requirement, and reduce the cost of pumping, which can provide theoretical basis and scientific support for the operation management of E-SNWT Project.

Key words: Multi-objective optimization, Jiangsu Section of South - to - North Water Transfer, novel multi-objective quantum genetic algorithm, water resources optimal operation

0 引言

跨流域调水作为调节区域水资源时空分布不均、实现水资源合理配置的重要手段,正逐渐被广大水利工作者和各国政府决策者关注与重视。南水北调东线工程江苏段地处淮河及沂沭泗流域的下游,是我国重大跨流域调水工程之一。工程沿线有洪泽湖、骆马湖、南四湖下级湖等调蓄湖泊,构成了总调节库容达 45.25 亿 m^3 的沿线水量调节系统;从长江至南四湖下级湖共可分为 3 个大段,每段设 3 级提水泵站,共计 9 个提水梯级。这些调蓄湖泊和各级泵站,使南水北调东线水资源系统具有较大的调蓄能力,一方面能统筹调配江水、淮水及沂沭泗水,实现系统内水资源的互济互调,另一方面能形成沿输水线路的水量调节系统,具有实现预调水、合理利用洪水资源、保障峰量供水等多种实际用途^[1]。因此,着重研究南水北调东线工程江苏段水资源优化调度,提高工程的运行管理水平,是十分必要和紧迫的。

南水北调东线工程江苏段优化调度方法的研究开始于 21 世纪,在研究南水北调东线工程江苏段的优化调度问题时,学者们主要从系统的概化方式、优化目标的选择以及模型的求解方法三个方面入手进行分析和改进。2013 年,侍翰生

在对南水北调东线江苏段工程进行分析概化的基础上,采用基于动态规划与模拟退火相结合的混合算法对江苏受水区水资源调度方案进行了优化,模型运算结果良好且优于系统常规调度结果^[2];2015年,王文杰等在对南水北调东线工程水资源系统概化的基础上,建立江苏段水量优化调度数学模型,模拟计算了三种不同保证率工况下的水量调配方案^[3];2016年,王攀等提出了一种改进的量子遗传算法,并以南水北调东线工程江苏段水资源优化调度为例,确定湖泊群优化调度方案^[4]。之后,开始有学者针对南水北调东线工程江苏段考虑多目标并行结合多目标属性决策的优化调度研究。2016年,于凤存等构建了缺水量最小与系统总抽水量最小的多目标优化调度模型,并利用 NSGA-II 算法进行求解,采用基于组合权重的多属性决策方法对非劣方案集进行评价得到南水北调东线工程江苏段湖泊群系统的最优水量调配方案^[1];2017年,闻昕等构建了以系统缺水量和抽江水量为目标的联合优化调度模型,研发基于改进多目标粒子群算法的模型求解方法,建立组合赋权-TOPSIS 方法进行多属性决策方法,提出了以大型泵站工程为核心的骨干枢纽联合调度方案^[5]。

随着系统分析理论的发展和计算机技术的成熟,水资源优化调度技术及方法的相关研究更加丰富,包括线性规划方法^[6]、动态规划方法^[7]、多目标优化技术^[8,9]、大系统分解协调技术^[10]以及启发式智能算法^[11]在内的一系列技术和方法得到广泛的应用与发展。随着多目标优化算法的发展,各种多目标遗传算法相继被提出。20世纪90年代初 Srinivas 和 Deb 提出了 NSGA, Deb 于 2002 年提出了 NSGA-II^[12]。量子遗传算法(Quantum Genetic Algorithm, QGA)是一种基于量子计算原理的概率优化的遗传算法^[11,13],是由 Narayanan^[14]等受量子计算思想启发,将量子多宇宙的概念引入遗传算法研究后提出,在遗传算法领域中发展迅速,备受重视。多目标量子遗传算法(multi-objective Quantum Genetic Algorithm, MOQGA)是在量子遗传计算原理和多目标进化算法的基础上提出的^[15],虽在一定程度上改善了多目标遗传算法缺点,但仍然存在局部收敛、Pareto 前沿分布不均匀等问题。通过对量子旋转门的改善、加入量子交叉、加入量子突变操作以及外部档案集维护策略等方式是实现 MOQGA 改进的一种新思路。

在前人研究成果基础上,本文以受水区需水满足度最大、系统总抽水量最小

为优化目标，构建南水北调东线江苏段工程水资源优化调度模型，采用改进的 MOQGA 算法求解，运用基于组合赋权方法对非劣解集进行多属性决策，提出南水北调东线工程江苏段水资源优化调度方案。

1 研究区域概况及系统概化

南水北调东线工程江苏段地处淮河及沂沭泗流域的下游，涉及扬州、淮安、盐城、宿迁、连云港和徐州六市，输水干线长达 404km。该工程是在已有的江水北调工程基础上逐步扩大调水规模并向北沿伸，新建宝应站、淮安四站等 11 座泵站，改扩建泗阳站、刘山站等 3 座泵站，加固改造江都三站、四站等 4 座泵站，形成了运河线、运西线双线输水格。根据南水北调东线江苏段主要组成以及骨干河渠间的连接关系进行系统概化，将受水区划分为了 18 个计算分区，其中安徽与山东两省分别作为一个计算分区，江苏省内的计算分区在江淮区间、洪泽湖区间、洪骆区间、骆马湖区间、骆微区间和南四湖区间的划分基础上细分为 16 个计算分区，见图 1。

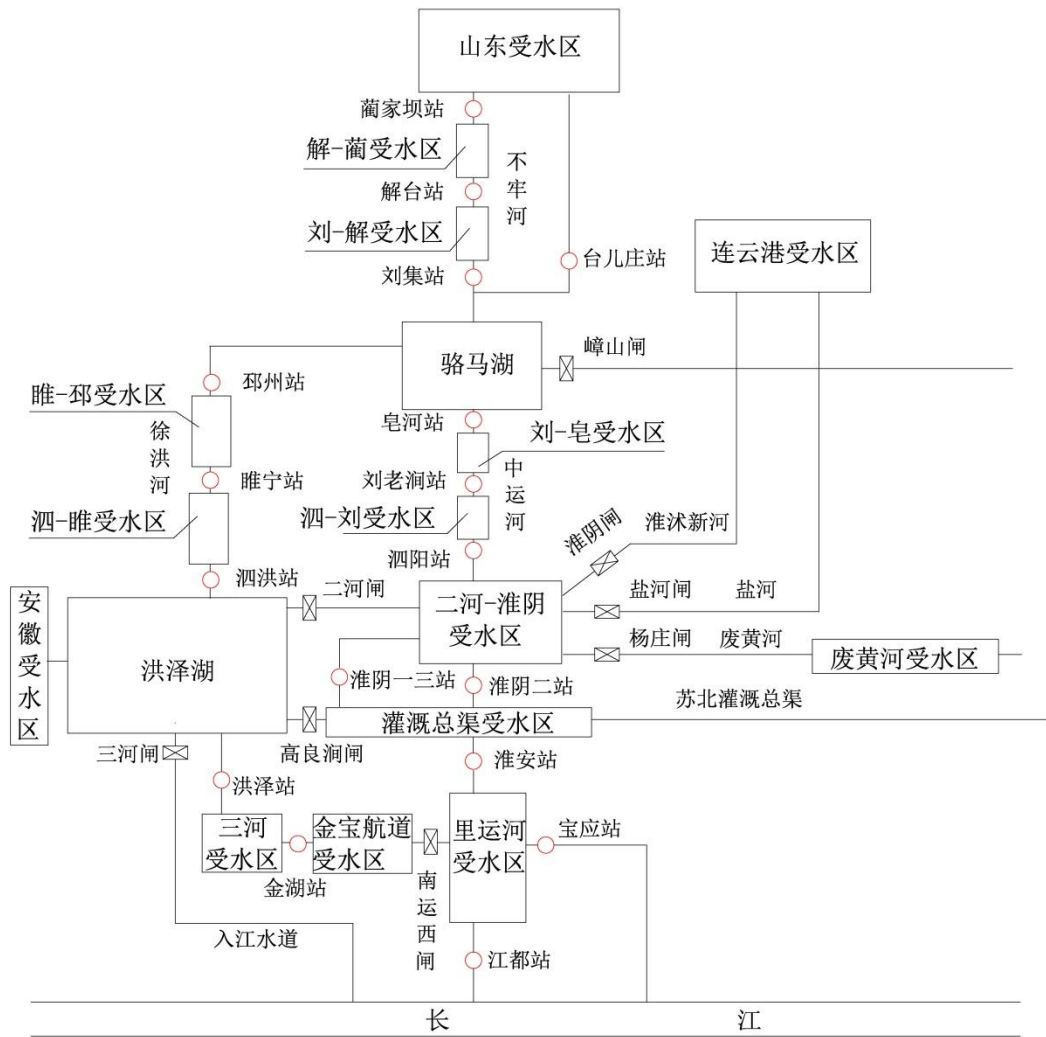


图 1 南水北调东线工程江苏段系统概化图

2 南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型建立

2.1 目标函数

从南水北调东线工程的自身性质角度出发,作为国家公益性的跨流域调水工程,系统缺水情况应作为衡量优化效果的一个重要指标;其次,由于工程主要依靠市场化手段进行运作,需要考虑运营成本的问题,泵站抽水量也应作为一个优化目标进行考虑。因此本文综合考虑受水区需水满足度最大和系统总抽水量最小两个目标,确立优化调度模型的目标函数,详见式(1)和式(2)。

(1) 目标 1: 受水区需水满足度最大

$$OBJ_1 = \min \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N QG(i, t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N QX(i, t)} \quad (1)$$

式中： t 为时段序号， $t = 1, 2, \dots, T$ $T = 12$ ； i 为分区编号， $i = 1, 2, \dots, N$ $N = 16$ ； $QX(i, t)$ 为 t 时段 i 分区的需水量（亿 m^3 ）； $QG(i, t)$ 为 t 时段 i 分区的实际供水量（亿 m^3 ）。

(2) 目标 2：系统总抽水量最小

$$OBJ_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M QS(j, t) \quad (2)$$

式中： j 为泵站编号， $j = 1, 2, \dots, M$ $M = 16$ ； $QS(j, t)$ 为 t 时段 j 泵站的抽水量（亿 m^3 ）。

2.2 约束条件

(1) 湖泊水量平衡约束

湖泊通过图 2 的“湖-河网”子系统方式运行，并满足如下水量平衡方程式：

$$S(i, t+1) = S(i, t) + Q(i, t) + PI(i, t) + FI(i+1, t) - PO(i, t) - W_1(i, t) - FO(i, t) \quad (3)$$

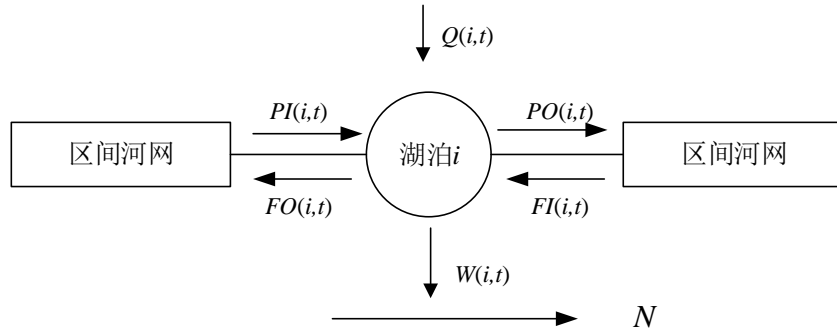


图 2 “湖-5 河网”水量交换子系统示意图

图中， i 为湖泊编号（1-洪泽湖、2-骆马湖、3-下级湖）； t 为时段序号， $t = 1, 2, \dots, T$ $T = 12$ ； $Q(i, t)$ 为 i 湖泊 t 时段的入湖径流量（亿 m^3 ）； $W(i, t)$ 为 t 时段 i 湖泊供水量（亿 m^3 ）。 $PI(i, t)$ 表示 t 时段 i 湖泊的抽河网北调入湖量（亿 m^3 ）； $PO(i, t)$ 表示 t 时段 i 湖泊的抽湖北调水量（亿 m^3 ）； $FI(i, t)$ 为 t 时段河网泄入 i 湖泊的水量； $FO(i, t)$ 为 i 湖泊 t 时段下泄入河网的水量（亿 m^3 ）。

(2) 湖泊调蓄能力约束

$$S_{min}(i, t) \leq S(i, t) \leq S_{max}(i, t) \quad (4)$$

式中 $S_{min}(i, t)$ 、 $S_{max}(i, t)$ 分别为相应湖泊 t 时段的最小蓄水能力(死库容)和最大蓄水能力(蓄满库容)(亿 m^3)。

(3) 泵站工作能力约束

$$PI(i, t) \leq PI_{max}(i, t) ; PO(i, t) \leq PO_{max}(i, t) \quad (5)$$

式中 $PI_{max}(i, t)$ 、 $PO_{max}(i, t)$ 分别为相应泵站的抽水能力(亿 m^3)。

(4) 控制闸站最大过流能力约束

$$FO(i, t) \leq FO_{max}(i, t); FI(i, t) \leq FI_{max}(i, t) \quad (6)$$

式中 $FO_{max}(i, t)$ 、 $FI_{max}(i, t)$ 分别为相应控制闸站的最大过流能力(亿 m^3)。

(5) 北调控制水位约束

一般情况下,当湖泊水位低于此水位时,停止抽湖泊既有蓄水北调,具体如下表 1 所示。

表 1 调蓄湖泊北调控制水位表

单位: m

湖泊	7月上旬-8月底	9月上旬-11月上旬	11月中旬-3月底	4月上旬-6月底
洪泽湖湖	12.0	12.0-11.9	12.0-12.5	12.5-12.0
骆马湖	22.2-22.1	22.1-22.2	22.1-23.0	23.0-22.5
南四湖下级湖	31.8	31.5-31.9	31.9-32.8	32.3-31.8

(6) 非负约束。

3 基于改进的多目标量子遗传算法(MOQGA)的模型求解方法

本文利用改进的多目标量子遗传算法(MOQGA)对南水北调东线工程江苏段多目标调度模型进行求解。目前传统的 MOQGA 存在易陷入局部最优解,全局寻优效率低, Pareto 前沿分布不均匀的缺点。因此本文所采用的方法主要作了如下改进: (1) 通过对量子旋转门的改进、加入量子交叉、加入量子突变操作等方式对传统的 QGA 进行改进; (2) 基于 Sigma 选取策略选择全局向导维护外部档案集。该改进算法收敛性好,能够避免陷入局部最优、高效搜索外部存储库中新粒子获得均匀的 Pareto 前沿。

3.1 算法设计

3.1.1 改进的量子遗传算法

QGA 将量子力学中的量子比特 (quantum bit, qubit)^[16]、量子态叠加等概念运用于遗传算法中, 通过将量子旋转门作用于染色体基因的更新调整, 完成进化操作。在传统 QGA 中, 染色体的表示使用量子比特表示, 它是一种随机概率的表示方式, 将量子比特的概率幅表示应用于染色体的编码, 比传统遗传算法更具并行性与多样性。一个量子比特的状态主要分为基态、叠加态, 即量子比特不仅可以表示 $|1\rangle$ 或 $|0\rangle$ 两种基态, 还可以表示这两种状态之间的任意中间态, 即叠加态 $|\Psi\rangle$ 。

因此, 一个量子位的状态可表示为

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (7)$$

上式中, α 和 β 可以是复数, 为相应状态的概率幅, 且满足下列归一化条件:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (8)$$

上式中, $|\alpha|^2$ 为 $|\Psi\rangle$ 坍塌到 $|0\rangle$ 的概率, $|\beta|^2$ 为 $|\Psi\rangle$ 坍塌到 $|1\rangle$ 的概率。

由此, IQGA 算法中的染色体可用下式进行定义:

$$q_k^t = \begin{bmatrix} \alpha_{k1}^t & \alpha_{k2}^t & \dots & \alpha_{km}^t \\ \beta_{k1}^t & \beta_{k2}^t & \dots & \beta_{km}^t \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式中, $k=1, 2, \dots, g$; g 为种群大小; m 表示染色体长度, t 表示为第 t 代子代种群。

传统的 QGA 中, 种群更新和染色体的交叉是最关键的进化方式, 一般采用量子门完成更新操作, 如下式所示, 即

$$U(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = U(\theta) \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

上式中, θ 为旋转角。 $\theta = S(\alpha_i, \beta_i) \times \Delta\theta$; 其中 $S(\alpha_i, \beta_i)$ 和 $\Delta\theta$ 分别表示为旋转的方向和旋转角度的大小; $[\alpha_i \ \beta_i]^T$ 和 $[\alpha'_i \ \beta'_i]^T$ 分别表示为量子比特更新前后的染色体中第 i 位量子比特。

目前对于旋转角度大小 $\Delta\theta$ 的理论指导较为缺乏，只有一个在 $[0.001\pi, 0.05\pi]$ 区间的固定值，存在明显的局限性。同时在传统的量子旋转门操作中，基因位的值可趋近于 0 或 1，容易使得算法陷入局部最优解，从而使算法过早收敛。故本文通过采用自适应性旋转角度 $\Delta\theta$ 、修正概率幅值两方面对传统量子旋转门进行改进。

(1) 自适应性旋转角度 $\Delta\theta$ ，表达式为：

$$\Delta\theta = \theta_{min} + K * (\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (12)$$

$$K = \frac{f_{max} - f_x}{f_{max}} * e^{-\frac{gen}{MAXGEN}} \quad (13)$$

式中， θ_{min} 为 $\Delta\theta$ 的固定值的最小值，取 0.001π ； θ_{max} 为 $\Delta\theta$ 的固定值的最大值，取 0.05π ； K 为调整系数； f_{max} 和 f_x 分别指搜索到的最优个体适应度和当前个体的适应度值； gen 表示当前的代数； $MAXGEN$ 表示最大迭代次数。

(2) 概率幅值修正，对 $[\alpha'_i \ \beta'_i]^T$ 进行再次更新，具体操作如下：

1.若 $|\alpha_i|^2 \geq 1 - \varpi$ ，且 $|\beta_i|^2 \leq \varpi$

$$[\alpha''_i \ \beta''_i]^T = [\sqrt{1 - \varpi} \ \sqrt{\varpi}]^T \quad (14)$$

2.若 $|\alpha_i|^2 \leq \varpi$ ，且 $|\beta_i|^2 \geq 1 - \varpi$

$$[\alpha''_i \ \beta''_i]^T = [\sqrt{\varpi} \ \sqrt{1 - \varpi}]^T \quad (15)$$

3.若 $|\alpha_i|^2 \geq \varpi$ ，且 $|\beta_i|^2 \leq 1 - \varpi$

$$[\alpha''_i \ \beta''_i]^T = [\alpha'_i \ \beta'_i]^T \quad (16)$$

式中 $\varpi \in (0, 1)$ ；当 ϖ 取值过大，将影响算法的收敛，本文取为 0.01。

本文采用全干扰交叉操作增加种群的多样性，防止未成熟收敛；为了避免传统量子遗传算法陷入局部最优解，使用群体灾变策略避免算法陷入局部寻优^[4]。

3.1.2 基于 Sigma 选取策略选择全局向导维护外部档案集

在单目标粒子群优化算法中，全局最优粒子的选取可以通过比较适应度函数进行优劣比较，而在多目标优化问题中，迭代求解得到的 Pareto 非劣解集无法通过一个标准的方法来判断优劣，使得全局向导的选取变得复杂。Sigma 选取策略来选择全局向导是目前常用的方法^[17]。

以双目标问题为例， f_1 和 f_2 分别代表两个目标， $f_2 = \alpha f_1$ ($\alpha > 0$) 表示在二维空间中斜率为 α 的直线公式，则在该直线上的点均被赋予同一个 Sigma 值，如下式定义：

$$\sigma = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (17)$$

将 $f_2 = \alpha f_1$ 带入式 (3-24) 可得到：

$$\sigma = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2} \quad (18)$$

首先将 sigma 值 σ_a 赋予给外部档案 N_p 里的每一个成员，种群里的每一个粒子均被赋予一个 sigma 值 σ_i ，通过计算所有 σ_a 与 σ_i 的欧氏距离，选取 sigma 值最为接近粒子 i 的档案成员便作为该粒子的向导，可用式 (19) 表示：

$$g_{i,best}^t = (N_a : \varepsilon(\sigma_i, \sigma_a) = \min_{l=1, \dots, P} \{\varepsilon(\sigma_i, \sigma_l)\}) \quad (19)$$

这种方法可以使得种群里的各个粒子被各自离得近的非支配解导向，趋向于 Pareto 前沿。

3.2 改进的 MOQGA 算法流程

综上所述，改进的 MOQGA 的基本步骤如下：

Step1, 设置初始种群规模 g ，量子位数目 m ，全局迭代次数 $MAXGEN$ ，旋转角度算子 $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ ，外部归档集规模 N_{eA} ；

Step2, 基于量子二链编码方案生成初始解种群，初始全局迭代次数 $GEN = 1$ ，外部归档集 (EA) 赋空集；

Step3, 对种群 $Q(t)$ 概率幅编码的染色体进行一次观测，获得相应的确定解 $q(t) = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$ ，修正 $q(t)$ ；

Step4, 进行解空间的转换，计算每个个体的各个目标函数值，并对种群各个个体实施非支配排序，基于 Sigma 选取策略选择全局向导维护非劣解外部档案集；

Step5, 根据本文的量子旋转角的调整策略计算旋转角 $\Delta \theta$ ，并用 H 门对量子

旋转门操作后的概率幅进行修正，实现 $Q(t)$ 更新；

Step6，进行量子交叉操作，判断是否需要进行量子灾变，如果满足，则进行量子灾变操作；如果不满足，则进行 Step7；

Step7，检查是否满足算法终止条件，若满足终止条件，停止迭代并输出结果，否则转到 Step3。

3.3 算法测试

为了验证算法的可行性与优越性，本文采用 ZDT 测试函数（ZDT1、ZDT2、ZDT3 以及 ZDT6）^[18]对改进的 MOQGA 进行测试，并与传统的 MOQGA 求解结果进行对比。两种算法的参数设置为：粒子种群规模为 50，迭代次数为 1000，外部档案 N_p 为 50，量子位数 M 为 20，交叉概率 P_c 为 0.95，变异概率 P_m 均为 0.05。

图 3 是基于改进的 MOQGA 所得到的 ZDT 测试函数实验的 Pareto 曲线和传统的 MOQGA 算法求解结果、真实 Pareto 曲线的比较图。由图可以看出，对于 ZDT 测试函数，改进的 MOQGA 的非劣解集均能够收敛到最优前沿，所得到的解优于传统 MOQGA 算法求解结果。

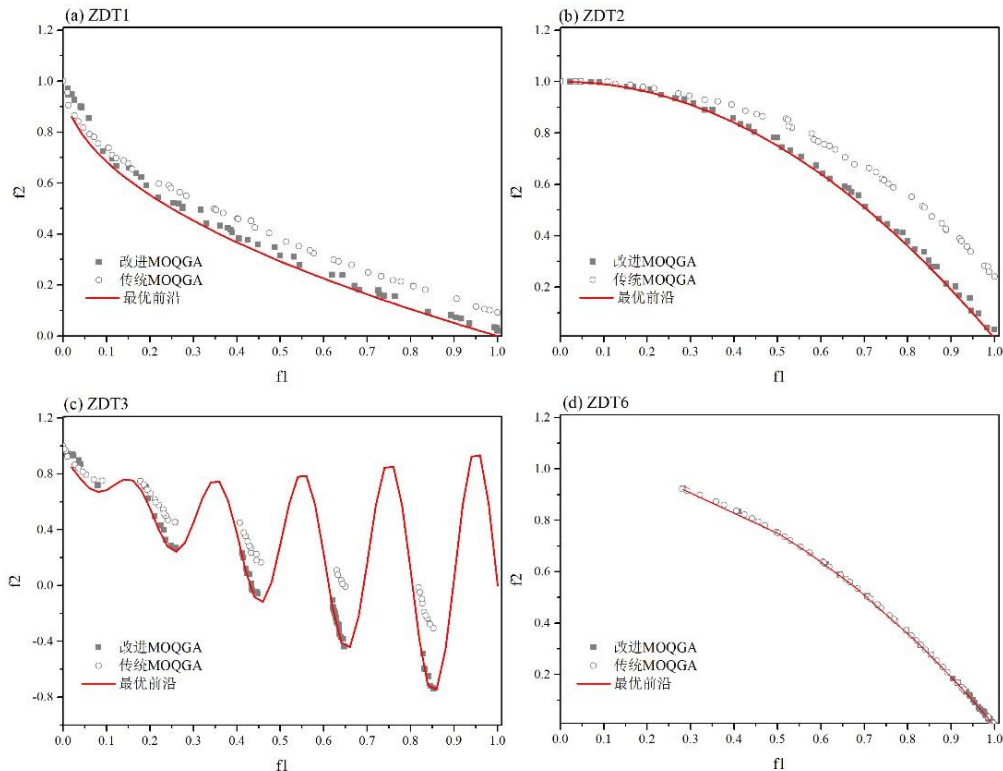


图 3 ZDT 测试函数的 Pareto 曲线比较结果 (a) ZDT1; (b) ZDT2; (c) ZDT3; (d) ZDT6;

4 基于组合赋权的多属性决策方法

通过南水北调东线工程江苏段优化调度模型建立与求解,可生成多属性指标集构成的非劣解集。在此基础上,本文首先建立优化调度方案多属性决策指标集,通过组合权重法确定各指标的权重,基于组合赋权多属性决策技术方法从诸多可行方案中选取最佳均衡解。

本文采用层次分析法根据各指标的相对重要程度分析确定主观权重,通过优化调度多属性决策指标数据之间的相关关系求得客观权重。CRITIC 法^[19]同时考虑指标变异对于权重的影响以及指标间的冲突性,在应用效果上优于熵权法等其他客观赋权法,故本文采用 CRITIC 法来计算多属性决策指标的客观权重。在分别确定主观、客观权重之后,按式(20)计算组合权重。

$$w_i = \beta w_{subj,i} + (1 - \beta)w_{obj,i} \quad (20)$$

式中, w_i 为指标 i 的组合权重; $w_{subj,i}, w_{obj,i}$ 分别表示指标 i 的主观、客观权重; β 为为主观权重和客观权重之间的偏好系数, $\beta \in (0,1)$ 。

南水北调东线工程江苏段水资源优化调度方案的决策选取需考虑经济、社会等多方面要求,因此本文选取系统总抽水量、需水满足度、弃水量、抽江水量、汛末总蓄水量五个指标。由层次分析法计算的主观权重具体见表 2。

表 2 南水北调东线工程江苏段优化调度方案决策指标权重计算表

指标	系统总抽水量	需水满足度	弃水量	抽江水量	汛末总蓄水量
权重	0.29	0.35	0.15	0.12	0.09

5 南水北调东线工程江苏段水资源优化调度结果及对比分析

5.1 模型求解结果

本文对南水北调东线江苏段历史长系列径流资料进行分析,确定平水年、枯水年、特枯水年三个典型水文年,以水文年为计算周期,以月为计算时段,以洪泽湖、骆马湖以及下级湖入湖径流量资料为输入,各调蓄湖泊的起调水位为近年来对应时段多年平均水位,对南水北调东线江苏段进行优化调度研究。

采用改进的 MOQGA 求解多目标调度模型,迭代 10000 次后得到的 Pareto 前沿,在平水年、枯水年、特枯水年三种来水条件下受水区需水满足度的目标值

范围分别为[81.10, 97.27]、[70.67, 97.24]、[29.64, 84.19] (%), 抽水量的目标值范围为[59.74, 132.68]、[95.72, 282.29]、[160.29, 543.89] (亿 m³), 详见图 4。在此基础上采用上述多属性决策方法, 进行方案优选, 得到不同典型年来水条件下的最优调度决策方案, 各方案下主要抽水线路年调水量以及受水区全年实际供水情况分别详见表 3 及表 4。优化调度之后, 平水年来水条件下系统总缺水量为 3.44 亿 m³, 总抽水量为 132.68 亿 m³, 其中抽江 0 亿 m³, 总弃水量为 49.83 亿 m³; 枯水年条件下系统总缺水量为 4.78 亿 m³, 总抽水量为 268.57 亿 m³, 其中抽江 43.80 亿 m³, 总弃水量为 12.94 亿 m³; 特枯水年来水条件下系统总缺水量为 30.45 亿 m³, 总抽水量为 525.43 亿 m³, 其中抽江 140.27 亿 m³, 总弃水量为 0 亿 m³。

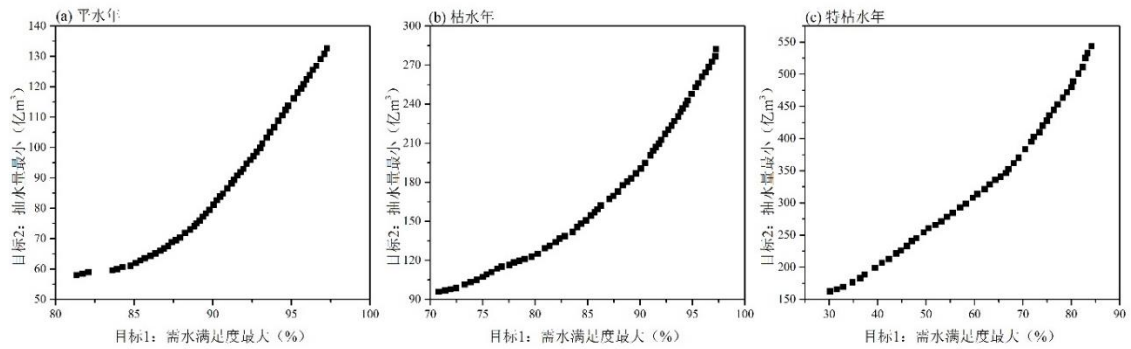


图 4 不同来水条件下优化调度模型 Pareto 前沿求解结果 (a) 平水年; (b) 枯水年; (c) 特枯水年

表 3 三种典型年下各主要抽水线路年调水量

出入湖	总水量 (亿 m ³)			湖间两线	分水量 (亿 m ³)		
	平	枯	特枯		水文年	平	枯
入下级湖	15.36	16.37	21.85	抽不牢河	5.65	4.01	5.38
				抽韩庄运河	9.71	12.36	16.47
出骆马湖	23.28	25.15	24.62	入不牢河	13.57	12.79	8.15
				入韩庄运河	9.71	12.36	16.47
入骆马湖	18.85	27.45	21.68	抽徐洪河	8.53	10.54	5.84
				抽中运河	10.32	16.90	15.84
出洪泽湖	63.81	85.11	103.93	入中运河	54.66	73.33	86.06
				入徐洪河	9.15	11.78	17.86
入洪泽湖	0.02	24.90	110.05	抽里运河	0.00	7.84	35.21
				抽金宝航道-三河	0.01	17.06	74.84
入里运河	6.80	35.92	125.59	入里运河	3.46	25.74	87.09
				入金宝航道-三河	3.34	10.18	38.49



表 4 三种典型年下各受水区全年实际供水情况

受水区	总水量 (亿 m ³)			受水区	总水量 (亿 m ³)		
	平	枯	特枯		平	枯	特枯
南四湖用水区	10.55	11.04	4.77	连云港受水区	32.23	37.74	50.04
解-藕受水区	7.34	7.92	1.52	洪泽湖周边	6.10	7.50	10.19
刘-解受水区	0.58	0.86	1.25	废黄河受水区	3.99	4.03	4.12
骆马湖周边	17.03	19.10	22.90	二河-淮阴受水区	3.13	3.81	5.32
睢-邳受水区	2.28	2.42	2.70	三河受水区	0.61	0.67	0.67
泗-睢受水区	3.35	3.66	4.37	金宝航道受水区	1.79	2.08	2.62
刘-皂受水区	7.49	7.92	8.03	灌溉总渠受水区	12.03	12.73	12.25
泗-刘受水区	2.72	2.93	2.73	里运河受水区	11.21	11.96	14.12

5.2 与常规调度对比分析

本文依据工程现行调度方案,模拟三种典型年来水条件下南水北调东线江苏段调度过程,从系统总抽水量、受水区缺水量、弃水量、抽江水量、汛末总蓄水量五方面对优化调度和常规调度结果进行对比分析,结果见图 5。相对于常规调度,优化调度的受水区总缺水量在平水年来水条件下减少了 0.89 亿 m³,在枯水年来水条件下减少了 0.87 亿 m³,在特枯水年来水条件下减少了 0.08 亿 m³,说明面对不同来水条件,优化调度模型均能通过合理调度减少受水区缺水状况,提高各用水户的需水满足度;三种典型年下系统总抽水量分别减少 21.04 亿 m³、39.14 亿 m³和 50.76 亿 m³,抽江水量分别减少了 13.97 亿 m³、27.18 亿 m³和 30.62 亿 m³,表明优化调度方式在充分利用淮河流域及沂沭泗流域的天然来水基础上,有效发挥湖泊的调蓄能力,使水资源得到合理分配。

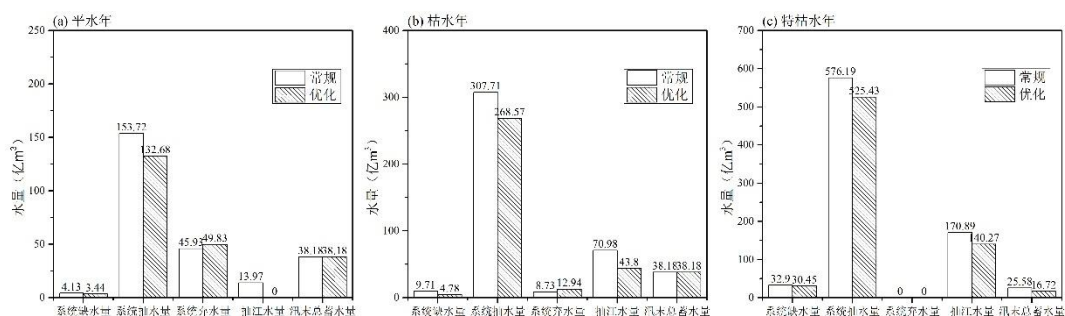


图 5 不同水平年下南水北调东线江苏段优化调度与常规调度结果对比图 (a) 平水年; (b) 枯水年; (c)

特枯水年

6 结论

本文研究南水北调东线江苏段工程水资源调度问题,以受水区需水满足度最大、系统总抽水量最小为优化目标,构建了南水北调东线工程江苏段水资源优化调度模型,采用改进的 MOQGA 算法求解,运用基于组合赋权方法对非劣解集进行多属性决策,提出南水北调东线工程江苏段水资源优化调度方案。优化调度方案能够充分利用湖泊的调蓄能力,提高各用水户的需水满足度,降低抽水成本。相对于常规调度,在平水年、枯水年和特枯水年三种典型年来水条件下,优化调度的受水区总缺水量分别减少了 0.89 亿 m^3 、0.87 亿 m^3 和 0.08 亿 m^3 ; 系统总抽水量分别减少 21.04 亿 m^3 、39.14 亿 m^3 和 50.76 亿 m^3 ,抽江水量分别减少了 13.97 亿 m^3 、27.18 亿 m^3 和 30.62 亿 m^3 , 具有显著效益。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 侍翰生. 南水北调东线江苏境内工程水资源优化配置方法研究 [D]; 扬州大学, 2013.
- [3] 王文杰, 吴学文, 方国华, 等. 南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 422-426.
- [4] 王攀, 方国华, 郭玉雪, 等. 水资源优化调度的改进量子遗传算法研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 7-13.
- [5] 闻昕, 王志, 方国华, 等. 基于改进多目标粒子群算法的南水北调东线江苏段工程联合优化调度研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, (03): 110-116.
- [6] 都金康, 李罕. 防洪水库(群)洪水优化调度的线性规划方法 [J]. 南京大学学报(自然科学), 1995, (02): 301-309.
- [7] 王丽萍, 孙平, 蒋志强, 等. 并行多维动态规划算法在梯级水库优化调度中的应用 [J]. 水电能源科学, 2015, (4): 1327-1335.
- [8] TSAI W P, CHANG F J, CHANG L C, et al. AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 634-644.
- [9] CHEONG T S, KO I, LABADIE J W. Development of multi-objective reservoir operation rules for integrated water resources management [J]. Journal of Hydroinformatics, 2010, 12(2): 185.
- [10] 李桂香, 王挺, 温进化. 水资源优化配置的大系统分解协调模型研究 [J]. 电脑知识与技术, 2010, 06(26): 7346-7349.
- [11] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):

182-197.

[13] YANG J, BIN L I, ZHUANG Z, et al. Quantum Genetic Algorithm and its Application Research in Blind Source Separation [J]. Mini-micro Systems, 2003,

[14] NARAYANAN A, MOORE M. Quantum-inspired genetic algorithms; proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, F, 2002 [C].

[15] 车海军, 王亮亮, 顾佳琪, 等. 基于自适应网格多目标量子遗传算法的轧制规程优化 [J]. 塑性工程学报, 2016, (6): 79-86.

[16] 张葛祥, 金炜东. 量子遗传算法的改进及其应用 [J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 717-722.

[17] MOSTAGHIM S, TEICH J. Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) [M]. 2003.

[18] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results [M]. MIT Press, 2000.

[19] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法 [J]. 统计与决策, 2015, (22): 65-68.