

南水北调东线工程江苏段水量优化调度研究

王文杰, 吴学文, 方国华, 闻 昕

(河海大学, 南京 210098)

摘要: 在对南水北调东线工程沿线水资源系统进行分析 and 概化的基础上, 建立了江苏段水量优化调度数学模型, 提出了一种基于改进遗传算法的模型求解方法, 并针对三种不同保证率工况进行了模拟计算。结果表明, 对比常规调度, 该方法能有效降低系统总缺水量及工作能耗, 使系统水资源得到更为科学合理的配置, 具有很好的应用价值, 为南水北调东线工程的运行管理及未来实时优化调度提供了新的思路。

关键词: 改进遗传算法; 南水北调东线; 湖泊群; 水量优化调度

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 03-0422-05

Optimal water operation in Jiangsu section of the South to North Water Diversion Project

WANG Wen jie, WU Xue wen, FANG Guo hua, WEN Xin

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of the analysis and schematization of the water resource characteristics along the Eastern Route of the South to North Water Diversion Project, a numerical model of optimal water operation in Jiangsu section of the South to North Water Diversion Project was developed. A new method was proposed based on the improved genetic algorithm, and three working conditions with different assurance rates were simulated. The results showed that this method can decrease the total water deficit and energy consumption of the system compared to the conventional operation, and allocate the water resources more scientifically and reasonably. Therefore, the method has a good application value and can provide new idea for the operation management and real time optimal operation of the Eastern Route of the South to North Water Diversion Project.

Key words: improved genetic algorithm; Eastern Route of the South to North Water Diversion Project; group of lakes; optimal water operation

沿输水干线分布有众多天然湖泊是南水北调东线工程区别于其他跨流域调水工程的重要特点之一。自江都站起, 工程输水干线依次连结洪泽湖、骆马湖、南四湖和东平湖, 构成了总库容达 45.82 亿 m^3 的沿线水量调节系统, 具有优良的水量优化调度条件。这其中, 洪泽湖、骆马湖、南四湖(下级湖)均位于江苏省境内, 库容总和为 45.25 亿 m^3 , 占四湖总库容的 98.76%, 在沿线水量调度中起绝对的主导作用; 另一方面, 江苏省作为承接江水、淮水和沂沭泗流域来水的主要场所, 也是南水北调东线工程中用水部门最多、输水线路最长、水资源系统最为复杂的一个区段。因此, 本文重点探讨研究南水北调东线工程江苏段的水量优化调度问题。

对南水北调东线工程优化调度方法的研究开始于 20 世纪 80 年代。1989 年, 雷声隆等^[1]利用多库联调的自优化模拟模型对南水北调东线一期工程湖泊群的联合优化调度效

益进行了分析研究, 以最小抽江水量作为目标, 考虑了供水需求、水库控制水位及调度规则等约束, 得出了能够基本满足系统用水需求的低能耗调水方案; 在此基础上, 邵东国等^[2]建立了以自由化模拟技术为核心的跨流域调水系统模拟模型, 引入了大系统多层次分解协调和多维动态规划等求解技术方法, 并将其应用于南水北调东线工程, 计算了沿线渠道水流双向流动条件下不同保证率供水目标时的优化调水方案。1995 年, 张建云等^[3]在目标函数中考虑进了不同供水目标、不同灌区和不同灌溉季节等几方面的平衡协调问题, 提出了模拟模型与优化技术相结合的数学模型, 并将其运用于南水北调东线工程的优化调度研究之中。1999 年, 方道南^[4]采用基于逐次优化算法(POA)的目标规划方法, 从江北调水资源系统(南水北调东线工程的子系统)的实际情况出发, 建立了确定型的优化调度数学模型, 给出了有益的

收稿日期: 2014-10-06 修回日期: 2015-04-15 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1518.009.html>

作者简介: 王文杰(1991-), 男, 江苏靖江人, 主要从事水利水电规划与水资源优化配置研究。E-mail: jsjwwj@163.com

通讯作者: 方国华(1964-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划及利用、水利经济等方面的教学与科研工作。E-mail: hhufgh@126.com

调度建议。2006年,张平^[5]以国内生产总值最大、区域总缺水水量最小、区域重要污染物排放量最小为目标,以水源可供水量、水源至用户的输水能力、用户需水量、区域协调发展等为约束条件,结合水源供水次序系数、用户用水公平系数、需水量、水源供水量等参数,构建了南水北调东线受水区的水资源优化配置模型。2013年,侍翰生^[6]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方式时的表现。

总结以上研究成果可以发现,在研究南水北调东线工程的优化调度问题时,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。本文拟在吸收前人研究成果的基础上,结合最新的规划及运行资料对南水北调东线工程江苏段水资源系统进行分析,建立该系统的水量优化调度数学模型,并采用逐步收紧搜索空间的改进遗传算法进行模型求解,研究该系统在江、淮、沂沭泗多水源供水条件下利用湖泊群进行水量调度的方法,以期对南水北调东线工程的运行管理及未来实时优化调度的开展提供新的思路。

1 南水北调东线工程江苏段系统概化

南水北调东线工程江苏境内包括3个调蓄湖泊、9级提水泵站、6条输水河道、5大类用水户(农业、工业、生活、生态环境及船闸用水)及其配套供水设施,沿途还与新通扬运河、苏北灌溉总渠、淮沭河、新沂河等骨干河道相互贯通,系统庞大且复杂,难以考虑所有因素,因此选择对系统进行概化,使其既突出湖泊调蓄功能,又能真实反映南水北调东线工程的运行特点。概化后的系统示意图见图1。

如图1所示,将江苏省内的众多用水部门按各用水户的取水位置划分为长江-洪泽湖、洪泽湖周边、洪泽湖-骆马湖、骆马湖周边、骆马湖-南四湖、南四湖周边6个用水区域;将安徽省、山东省分别作为一个用水户进行概化。所有用水户均以扣除当地可利用水量后的需水量参与水量调配。同时,考虑到河槽槽蓄作用有限,这里不考虑河道的蓄水能力。湖泊间存在双线输水的,也不考虑两线间水量分配的问题。

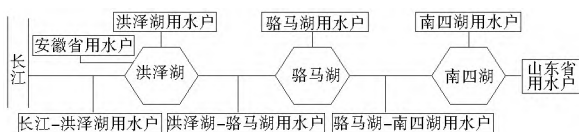


图1 系统用水部门概化示意图

Fig.1 Schematic diagram of the generalized water-use departments in the system

2 水量优化调度数学模型的建立

2.1 目标函数

在对系统水量进行调配时,既要尽可能地满足受水区用水需求,使系统总缺水水量最少,又要充分利用当地水资源,降低工程运行能耗,使系统抽水补给量最少。因此采用下式作

为优化计算的目标函数:

$$OBJ = \min \sum_{t=1}^T (\sum_{n=1}^3 QS(n, t) + \sum_{i=1}^3 \lambda QR(i, t)) \quad (1)$$

式中: n 为泵站编号(1-抽江泵站、2-抽洪泽湖泵站、3-抽骆马湖泵站), i 为湖泊编号(1-洪泽湖、2-骆马湖、3-南四湖), t 为时段数; $QS(n, t)$ 为不同泵站不同时段的抽水量; $QR(i, t)$ 为不同湖泊不同时段的缺水量; λ 为供水优先系数,根据不同区域供水保证率的不同要求确定。

2.2 约束条件

(1) 湖泊水量平衡约束。

据图1系统概化示意图,系统由以湖泊为中心的三个单元组成,各单元在每一时段都应满足水量平衡约束。各单元间水量关系见图2,水量平衡方程式如下:

$$V(i, t+1) = V(i, t) + Q(i, t) + DI(i, t) + PC(i+1, t) - DO(i, t) - W_1(i, t) - PR(i, t) \quad (2)$$

其中:

$$DI(i, t) - PR(i, t) = DO(i-1, t) - W_2(i, t) - PC(i, t) \quad (3)$$

式中: $V(i, t+1)$ 、 $V(i, t)$ 分别表示湖泊时段湖泊的时段初库容和时段末库容; $Q(i, t)$ 表示 i 湖泊 t 时段的入湖径流量; $DO(i, t)$ 、 $DO(i-1, t)$ 、分别表示 t 时段 i 湖泊和 $i-1$ 湖泊的抽湖北调水量; $DI(i, t)$ 表示 i 湖泊 t 时段抽水入湖水量; $PC(i, t)$ 、 $PC(i+1, t)$ 表示 i 时段下泄进入 $i-1$ 湖泊和 i 湖泊的水量, $PR(i, t)$ 表示 t 时段由 i 湖泊自流入湖的水量; $W_1(i, t)$ 、 $W_2(i, t)$ 分别表示 i 湖泊 t 时段湖区和区间的需水量,为扣除当地可用水量后需由南水北调工程补充的水量。

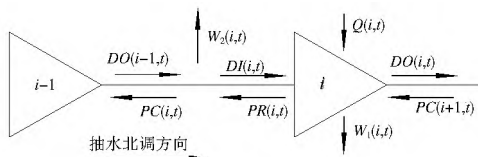


图2 各湖泊单元间水量关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of the water exchange between lakes

(2) 泵站工作能力约束。

北调抽水水量应不大于相应泵站最大工作能力:

$$0 \leq DO(i, t) \leq DO_{max}(i, t); 0 \leq DO(i, t) \leq DI_{max}(i, t)$$

式中: DO_{max} 、 DI_{max} 分别表示相应泵站的抽水能力。

(3) 湖泊调蓄能力约束。

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

式中: $V_{min}(i, t)$ 、 $V_{max}(i, t)$ 分别表示相应湖泊时段的最小和最大蓄水能力。在进行系统模拟时,当时段末库容 $V(i, t) < V_{min}(i, t)$ 即认为产生缺水 $QR(i, t) = V_{min}(i, t) - V(i, t)$,确保水位始终在死水位以上。

(4) 北调控制水位约束。

为了使当地的用水利益不致因北调抽水而受到损害,在实际的试行调度方案中还规定了湖泊不同时段的北调控制水位。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。各湖泊分时段北调控制水位见表1。

(5) 其余约束。

包括河道输水能力约束、自流入湖能力约束等。

2.3 边界条件

江苏地区汛期从每年6月开始持续到9月底,因此将起

表 1 调蓄湖泊北调控制水位

湖泊	m			
	7 月上旬至 8 月底	9 月上旬至 11 月上旬	11 月中旬至 3 月底	4 月上旬至 6 月底
洪泽湖	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	32.0	31.7~32.1	32.1~33.0	32.5~32.0

调时间选择在 6 月初,同时考虑到 6 月中、下旬是农业用水的高峰期,因此选择从各湖汛限水位起调。另外,对于无法令末水位(翌年 5 月末水位)等于起调水位的方案应进行适当处理,以确保两水位相等:若末水位低于起调水位,则需在末尾时段相机进行增抽补给,若高于起调水位,则盈余部分应算作弃水。

3 基于改进遗传算法的模型求解方法

由于南水北调东线工程的水量调度管理主要通过控制各级提水泵站进行,因此将各入湖、出湖泵站的翻水量序列看作遗传算法中的个体(染色体),求解过程即为:随机生成组染色体;输入系统模拟模型,统计各组染色体对应方案的缺水量与泵站抽水量;按预定的适应度评价方法评价各组染色体的优劣;通过一定的遗传操作(选择、交叉和变异)进行优胜劣汰,直至满足给定的终止规则。

3.1 个体编码与不可行个体的处理方法

针对本系统具体问题,选择采用实数编码方式,染色体中包含抽江水量 $DO(0, t)$ 、抽洪泽湖水量 $DO(1, t)$ 、抽骆马湖水量 $DO(2, t)$ 、骆马湖下泄量 $PC(2, t)$ 、南四湖下级湖下泄量 $PC(3, t)$ 五个变量的逐时段水量真值,当时段数为 T 时,染色体长度为 $5T$ 。

与应用于水库群调度类似,将遗传算法应用于本模型求解时,也需要注意对个体可行性的校核。对于操作过程中生成的不可行个体,通常采用罚函数予以淘汰或按约束条件直接对个体的部分基因位进行修正。但在本问题中,由于北调控制水位这一特殊约束的存在(修正值始终为 0),若直接对原个体进行修正将会无控制地束窄搜索空间,可能使计算结果陷入局部最优,所以本方法尝试采用了一种新的不可行个体处理方式,即:把满足除北调控制水位约束以外的其他约束的个体视为准可行个体,当其输入系统模拟模型时,逐时段计算湖泊时段末水位,并根据北调控制水位约束修正相应基因位,由此生成该准可行个体对应的实际可行个体,求解时以准可行个体参与遗传操作,以对应实际可行个体的适应度作为该个体适应度,实际可行个体本身仅作记录待用,由于准可行个体与实际可行个体始终是一一对应的关系,因此这样做不会影响到最终优化结果。这是本方法有别于一般遗传算法的重要一点。

由于本方法始终采用准可行个体参与遗传操作,因此生成初始种群时可暂时忽略北调控制水位约束,则上述 5 个变量的可取值范围均为 $[0, Q_{i, \max}]$,其中 $Q_{i, \max}$ 为对应闸控工程的最大翻水能力,该范围即构成初始搜索空间,在该范围内随机生成 n 组翻水量序列,即可构成 n 组准可行个体,作为

后续遗传操作的初始种群。

3.2 适应度函数与遗传参数的选取

对于本问题,目标函数值越小则对应方案越优,与适应度的概念恰好相反,因此采用下式处理目标函数值,作为个体的适应度来标识该个体的优劣。

$$Fit(x) = \frac{OBJ_{\max} - OBJ(x)}{OBJ_{\max} - OBJ_{\min}} \quad x = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由于目标函数值与系统弃水量和缺水量有关,因此首先需要进行系统模拟,根据输入的抽(泄)水量序列计算各湖泊逐时段的弃水量、缺水量、库容及水位,并逐时段校核模拟结果,根据每时段末的湖泊水位判断下一时段能否北调,及时修正相应基因位值,在无法满足末水位等于起调水位时,还应对末段几个时段的抽(泄)水量序列进行调整,以生成实际可行个体并记录。

在遗传操作中,交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 是影响遗传算法性能的关键,本研究比较了定值与遗传参数自适应调整两种策略,发现基于个体适应度值的参数自适应调整策略在优化结果和搜索效率上均具有一定优势,即遗传参数根据个体适应度的不同按如下公式选取:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{k_1(f - \bar{f})}{f_{\max} - \bar{f}} & f \geq \bar{f} \\ p_{c1} & f < \bar{f} \end{cases} \quad (5)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{k_2(f_{\max} - f')}{f_{\max} - \bar{f}} & f' \geq \bar{f} \\ p_{m1} & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{\max} 为种群中适应度的最大值; \bar{f} 为种群适应度的平均值; f 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f' 为要变异的个体的适应度值; $p_{c1} = 0.9$ 、 $p_{m1} = 0.1$; $k_1, k_2 \in (0, 1)$ 。

3.3 逐步收紧搜索空间的改进策略

标准遗传算法易出现早熟等不良现象,使结果陷入局部最优,因此当解空间未知或较为复杂时,常常会对标准遗传算法进行改进,以弥补原始方法的不足。本研究尝试采用了一种逐步收紧搜索空间的改进策略,在实际计算中也有不错的表现。该策略的思路为:每当种群达到最大迭代代数或目标值收敛时,以存储的当前最优染色体为中心上下加减一个变量,构成新的搜索空间,并在该搜索空间内重新生成初始种群并执行遗传操作,如此循环往复直到满足给定的终止条件。由于经过多次的初始种群生成过程,因此种群的多样性得到了有效保证,逐步收紧搜索空间又能逐渐提高搜索效率,节约运行时间。搜索空间的大小按照下式确定

$$Q_{\max}(i) = Q_{\text{best}}(i) + w \quad (7)$$

$$Q_{\min}(i) = Q_{\text{best}}(i) - w \quad (8)$$

$$w = [Q_{\max}(i-1) - Q_{\min}(i-1)]\beta/2 \quad (9)$$

式中: $Q_{\max}(i)$ 、 $Q_{\min}(i)$ 分别表示第 i 次迭代时染色体各基因位值的最大值与最小值; $Q_{\text{best}}(i)$ 代表第 i 次迭代时最优染色体各基因位值; β 为空间收缩系数。

如图 3 所示,首次循环时,搜索空间为整个决策变量的可行域,当第一次循环结束输出最优解后,在该最优解上下各加减 w ,构成新循环的搜索空间,如此迭代运行,并以循环次数控制结束条件。

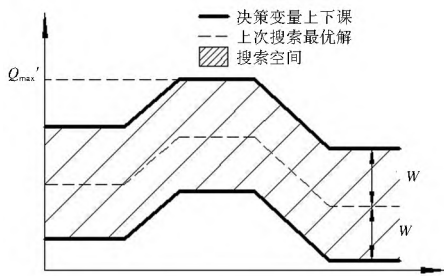


图3 收紧后的搜索空间示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the searching space

4 结果分析

南水北调东线工程的常规调度方式为：首先假设时段内没有抽(泄)水,根据来水和需水情况进行水量平衡计算求得湖泊时段末水位 $V(i, t)$ 。再根据该水位进行抽(泄)水量决策:

(1) 当 $V(i, t)$ 大于湖泊上限水位时, 停止上级湖泊的北调抽水, 本湖泊下泄水量取 $\max(DI_{max}(i, t) V(i, t) - V_{max}(i, t))$;

(2) 当 $V(i, t)$ 在北调控制水位与湖泊上限水位之间时, 停止本湖泊泄水, 上级湖泊抽水量取为

$$DO(i-1, t) = \begin{cases} 0 & V(i-1, t-1) < V_{beidiao}(i-1, t) \\ \min(DO_{max}(i-1, t), V_{max}(i, t) - V(i, t)) & V(i-1, t-1) \geq V_{beidiao}(i-1, t) \end{cases}$$

(3) 当 $V(i, t)$ 低于北调控制水位时, 停止本湖泊抽水及泄水, 上级湖泊抽水量取为

$$DO(i-1, t) = \begin{cases} 0 & V(i-1, t-1) < V_{beidiao}(i-1, t) \\ DO_{max}(i-1, t) & V(i-1, t-1) \geq V_{beidiao}(i-1, t) \end{cases}$$

采用上述常规调度方式时同样需注意, 当湖泊末水位与起调水位不一致时, 需要通过调整最后几个时段的抽(泄)水序列确保其相等。

本研究将优化调度结果与上述常规调度结果进行了对比分析。在进行优化调度计算时, 时段数 $T=36$, 种群内个体数目 $m=200$, 空间收缩系数 $b=0.85$, 计算结果见表2, 其中优化调度结果均为多次计算的平均值。优化调度与常规调度结果对比见图3。

表2 不同保证率模拟计算结果

Tab. 2 Simulation results of simulation under different assurance rates 亿 m³

项目	50% 保证率		75% 保证率		95% 保证率	
	优化调度	常规调度	优化调度	常规调度	优化调度	常规调度
缺水量	2.047	2.160	28.104	31.246	71.886	83.989
抽水量	87.620	97.577	123.391	128.643	208.407	182.772
弃水量	116.365	120.238	38.449	42.339	0.000	0.000
抽江水量	5.891	12.186	45.785	48.897	120.750	111.468

由表2、图4可以看出, 在50%和75%保证率下, 优化调度在总抽水量和抽江水量均更低的情况下, 仍能使系统总缺水量低于常规调度, 表现出很好的优化效果; 95%保证率下, 优化调度表现出了更为积极的水资源配置过程(泵站总抽水

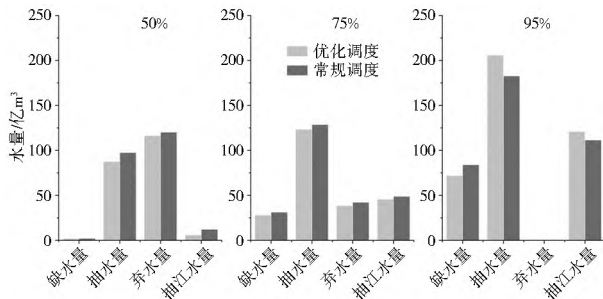


图4 优化调度与常规调度结果对比

Fig. 4 Comparison of the results between optimal and conventional operation

量与抽江水量均更大), 有效降低了系统总缺水量, 优化调度效果更加突出。此外, 虽然没有将弃水量作为优化目标, 但优化调度相比常规调度仍具有更小的总弃水量, 说明优化调度能兼顾弃水量这一因素, 对水资源的利用更加充分。由此可见, 采用该改进的遗传算法进行南水北调东线水量优化调度计算, 能有效地提升系统水资源优化配置效果, 具备很好的实际应用价值。

5 结语

随着南水北调东线工程的工作重心逐渐由工程建设转向运行管理, 工程的优化调度问题也开始受到学界的广泛关注。本文以南水北调东线工程江苏段湖泊群系统为研究对象, 构建了水量优化调度的数学模型, 并针对不同保证率工况采用一种逐步收紧搜索空间的改进遗传算法进行了模型求解。结果显示由该方法确定的水量调度方式相比常规调度在各保证率下均具备良好的优化效果, 能有效降低系统总缺水量及工作能耗, 使系统水资源获得更为科学合理的配置, 体现了该模型的可行性和优越性, 为南水北调东线工程的优化调度和运行管理提供了新的思路。

但是, 该方法是在对系统进行了诸多概化的基础上进行的, 与系统实际运行情况不可能完全相符, 因此在模型的细节和精度方面仍需作进一步的研究和改进。此外, 目前所采用的都是确定的年来、需水过程, 但在实际运行中, 往往需要根据未来未知的来、需水过程调整调度决策, 因此将来、需水预报模型与本方法结合, 形成真正适合管理人员使用并能指导实际调度的决策支持系统, 也是未来可以深入研究开发的一个方向。

参考文献(References):

[1] 雷声隆, 覃强荣, 郭元裕, 等. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用[J]. 水利学报, 1989, 18(5): 1-13. (LEI Sheng long, QIN Qiang-rong, GUO Yuan-yu, et al. Self optimization simulation and its application in the Project of South to North Water Transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 18(5): 1-13. (in Chinese))

[2] 邵东国. 跨流域调水工程优化决策模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(5): 500-505. (SHAO Dong-guo. Study on optimization decision models of interbasin water transfer engineering[J]. Wuhan University of Hydropower & Electricity, 1994, 27(5): 500-505. (in Chinese))

- [3] 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 Jianyun, CHEN Jieyun. Study on optimum operation of the East route South to North Water Transfer Project[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 198-204. (in Chinese))
- [4] 方道南. 江西北调优化调度模型的研究[J]. 水道港口, 1999(2): 31-38. (FANG Daonan. Optimal dispatching of South to North Water Transfer System in Jiangsu[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1999(2): 31-38. (in Chinese))
- [5] 张平, 郑垂勇. 南水北调东线受水区水资源优化配置研究[J]. 水利经济, 2006, 24(4): 61-66. (ZHANG Ping, ZHENG Chuyong. Water resources optimum allocation of the east route of South to North Water Transfer Project[J]. Water Conservancy and Economy, 2006, 24(4): 61-66. (in Chinese))
- [6] 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: 扬州大学, 2013. (SHI Hansheng. Study on optimal water resources allocation methods for Jiangsu section of South to North Water Diversion east Route Project[D]. Yangzhou: University of Yangzhou, 2013. (in Chinese))
- [7] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 1-5. (YOU Jijun, GAN Hong, WANG Hao. Advance in water allocation model and prospect[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(3): 1-5. (in Chinese))
- [8] 刘建林, 马斌. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 75-79. (LIU Jianlin, MA Bin. Simulation model of multi reservoir and multi consumer and multi work for water unite regulation of cross drainage basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 75-79. (in Chinese))
- [9] 陈立华, 梅亚东. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 550-556. (CHEN Lihua, MEI Yandong. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 550-556. (in Chinese))
- [10] 郑姣, 杨侃. 水库群发电优化调度遗传算法整体改进策略研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 205-211. (ZHENG Jiao, YANG Kan. Research on overall improved genetic algorithm applied in optimal generation dispatching of multi reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 205-211. (in Chinese))
- [11] 徐良辉. 跨流域调水模拟模型的研究[J]. 东北水利水电, 2001, 19(6): 1-3. (XU Lianghui. Study on simulation model of inter basin water transfer[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast, 2001, 19(6): 1-3. (in Chinese))
- [12] 赵勇, 解建仓, 马斌. 基于系统仿真的南水北调东线水量调度[J]. 水利学报, 2002, (11): 38-43. (ZHAO Yong, XIE Jiancang, MA Bin. Water dispatch of east-route of South to North Water Transfer Project based on system simulation method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (11): 38-43. (in Chinese))
- [13] 习树峰, 王本德, 梁国华. 考虑降雨预报的跨流域调水供水调度及其风险分析[J]. 中国科学, 2011, 41(6): 845-852. (XI Shufeng, WANG Bende, LIANG Guohua. Inter basin water transfer supply model and risk analysis with consideration of rainfall forecast information[J]. Sci China, 2011, 41(6): 845-852. (in Chinese))
- [14] 游进军, 纪昌明. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水利学报, 2003(7): 64-69. (YOU Jijun, JI Changming. New method for solving multi objective problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 64-69. (in Chinese))
- [15] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1174. (WANG Hao, YOU Jijun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1174. (in Chinese))
- [16] 卢厚清. 一种遗传算法交叉算子的改进算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2007(3): 250-253. (LU Houqing. An improved crossover operator of genetic algorithm[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007(3): 250-253. (in Chinese))
- [17] 吴爱华. 水库优化调度中随机动态规划方法的研究与应用[J]. 计算机仿真, 2003(10): 39-42. (WU Aihua. Research and application of stochastic dynamic programming method for hydroelectric station optimal operation[J]. Computer Simulation, 2003(10): 39-42. (in Chinese))
- [18] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1-6. (WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua. Concept of system and methodology for river basin water resources programming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(8): 1-6. (in Chinese))
- [19] 刘国纬. 跨流域调水运行管理南水北调东线工程实例研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (LIU Guowei. Inter basin water diversion operation management-eastern route project case study[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1995. (in Chinese))
- [20] 苑希民, 李鸿雁, 刘树坤, 等. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 中国水利水电出版社, 2002. (YUAN Ximin, LI Hongyan, LIU Shukun, et al. Neural network and genetic algorithm applied in water science[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))