

文章编号:0559-9350(2013)01-0091-06

基于动态规划与模拟退火算法的河-湖-梯级泵站系统 水资源优化配置研究

侍翰生¹, 程吉林¹, 方红远¹, 陆小伟²

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009;
2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 提出了具有多决策变量的河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置动态规划数学模型, 以各区间缺水量(弃水量)的平方和最小为目标函数, 各阶段的湖泊蓄水量为状态变量, 各阶段抽水入湖量、湖泊放水量为决策变量。以南水北调长江-洪泽湖段调水工程为例, 针对状态变量离散点少、决策变量可行域大且离散点多的特点, 采用基于动态规划与模拟退火相结合的混合算法(DP-SA)对该模型进行计算, 结果表明: 采用该模型进行优化调度, 不但可以提高供水保证程度, 而且可以减少系统的总抽水量, 降低供水系统运行成本; 通过与动态规划逐次逼近法(DPSA)进行比较, 可以得出混合算法在求解此类问题方面具有计算结果好、收敛速度快等优点。

关键词: 动态规划; 模拟退火; 水资源; 优化

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

1 研究背景

南水北调东线工程是一个涉及多个调蓄湖泊、多个泵站群联合运行的大型跨流域调水工程, 随着东线工程的加快建设, 如何有效地对各湖泊进行优化调度, 从而实现水资源的合理配置, 显得尤为紧迫和重要。近年来, 国内外一些学者已采用动态规划方法(DP)^[1-2]、遗传算法(GA)^[3-4]、蚁群算法(ACA)^[5-6]和粒子群算法(PSO)^[7]等优化方法对水库及水库群等进行优化调度研究, 并取得了一定的成果, 然而对各阶段具有多决策变量的河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置的数学方法研究尚不多见。

本文根据所研究系统存在湖泊蓄水状态离散点少、决策变量可行域大且离散点多的特点, 考虑将动态规划与模拟退火算法相结合, 提出基于两者的混合算法(DP-SA), 并将该方法应用于南水北调东线江苏境内长江-洪泽湖段工程当中, 为各阶段具有多决策变量的动态规划问题提供一种新的求解路径。

2 一类问题的DP-SA算法

研究的问题:

$$\max Z = \sum_{i=1}^n \phi_i(x_i, y_i) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974099); 教育部博士点基金项目(20093250110002); 江苏省属高校自然科学重大项目(09KJA570001); 江苏省水利科技重点项目(2010060); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX8Z12-0901)

作者简介: 侍翰生(1986-), 男, 江苏宿豫人, 博士生, 主要从事水利规划与管理研究。E-mail: shier86@163.com

通讯作者: 程吉林(1963-), 男, 江苏常熟人, 教授, 主要从事水利规划优化理论与应用研究。E-mail: jlcheng@yzu.edu.cn

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^n h_i(x_i, y_i) \leq b \quad (2)$$

$$x_i, y_i \geq 0; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

此模型可理解为各阶段有一个状态变量(以 λ_i 表示)、两个决策变量(x_i 和 y_i)的动态规划模型,可以采用传统的动态规划逐次逼近法进行求解。但针对本文求解问题具有状态变量离散点少、决策变量可行域大且离散点多这一特殊性,本文提出了一种基于动态规划与模拟退火法的混合算法,即采用一维动态规划的递推方法,各阶段各状态变量对应目标值采用模拟退火法进行求解。参考文献[8-11],其求解问题的具体步骤如下。

阶段 $i=1$:

$$g_1(\lambda_1) = \max \phi_1(x_1, y_1) \quad (4)$$

其中,状态变量 λ_1 可在对应可行域内离散: $\lambda_1=0, b_1, b_2, \dots, b$ 。对于每个 λ_1 ,有:

$$0 \leq h_1(x_1, y_1) \leq \lambda_1 \quad (5)$$

则由式(4)一式(5)构成了一个以 $g_1(\lambda_1)$ 为目标函数, x_1 和 y_1 为决策变量的优化问题,可以采用模拟退火算法寻找其目标值。即:在对应可行域内任意假定 x_1 和 y_1 ,将其作为初始解,求出对应目标值,从而在初始解的基础上利用新解生成器产生新解,并依据 Metropolis 准则接受新解,通过选择合适的冷却进度表,循环计算,直至满足某个停止准则时结束运算。

阶段 i :

$$g_i(\lambda_i) = \max [\phi_i(x_i, y_i) + g_{i-1}(\lambda_{i-1})] \quad (6)$$

其中,同样离散状态变量 $\lambda_i, \lambda_i=0, b_1, b_2, \dots, b$ 。由式(2)可得状态转移方程为:

$$h_i(x_i, y_i) = \lambda_i - \lambda_{i-1} \quad (7)$$

式中, $i=2, 3, \dots, n$ 。

对于每个 λ_i ,同样有:

$$0 \leq h_i(x_i, y_i) \leq \lambda_i \quad (8)$$

则由式(6)一式(8)构成了一个以 $g_i(\lambda_i)$ 为目标函数, x_i 和 y_i 为决策变量的优化问题,同样采用模拟退火算法寻找其目标值。以此类推,依次求出各阶段所有状态变量下的近似最优解,最后得出近似最优策略 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\}$ 和最终目标值 Z 。

3 南水北调长江-洪泽湖段河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置

3.1 系统概况 南水北调长江-洪泽湖段工程主要是包括长江、洪泽湖、引水河网及沿线提水泵站等在内的河-湖-梯级泵站系统,通过对该系统进行科学合理的调度,使系统在解决当地工农业用水的前提下,在北方需水时调水北送,最大限度地解决北方地区水资源紧缺问题。供水系统运行如图1所示。图中: PO_t^1 、 PO_t^2 分别为第 t 时段从湖泊和河网抽出外调水量; I_t^1 、 I_t^2 分别为湖泊和河网在第 t 时段扣除蒸发渗漏损失后的天然净来水量; PI_t^1 、 PI_t^2 分别为第 t 时段泵站抽入湖泊和河网的水量; DI_t^1 、 DI_t^2 分别为第 t 时段自流泄入湖泊和河网的水量; DO_t^1 、 DO_t^2 分别为第 t 时段自流泄出湖泊和河网的水量; R_t^1 、 R_t^2 分别为第 t 时段向湖泊和河网区间的用水户提供的实际水量; NI_t^1 为第 t 时段泵站从引水河网直接抽水不经过调蓄湖泊的直补北调量。

3.2 模型的建立 以供水系统在计算时段内各区间缺水量(弃水量)的平方和最小作为目标函数,建立优化调度数学模型。目标函数及约束条件具体形式分述如下。

3.2.1 目标函数

$$\min f = \sum_{t=1}^T \left((P_t - ND_t)^2 + \sum_{j=1}^2 (X_t^j - PO_t^j - D_t^j)^2 \right) \quad (9)$$

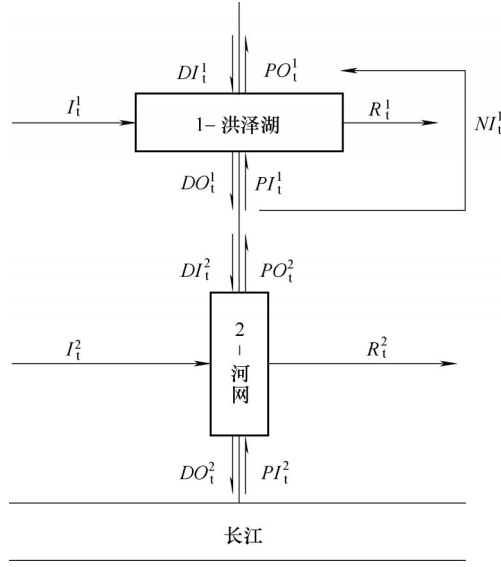


图1 南水北调长江-洪泽湖段供水系统

式中：\$T\$为时段总数；\$P_t\$为第\$t\$时段向供水系统以外地区调水总量，\$P_t = PO_t^1 + NI_t^1\$；\$ND_t\$为第\$t\$时段的外调任务；\$X_t^j\$为第\$j\$区间的湖泊或河网在第\$t\$时段的放水决策，包括向本区间用水户提供的实际水量、抽出外调水量以及下泄至下游区间的水量，\$X_t^j = R_t^j + PO_t^j + DO_t^j\$；\$D_t^j\$为第\$t\$时段第\$j\$区间的用水户需水量，其余参数同前。

3.2.2 约束条件

(1)水量平衡约束：供水系统重点突出调蓄湖泊的径流调节能力和水量调配作用，而区间引水河网由于要考虑航运等要求，一般都要求具有一定的水位，因此，相对于湖泊而言，引水河网的调蓄能力较小，考虑不参与调蓄，将湖泊之间的复杂状况简化为单一的引水河网^[12]。由图1可知，湖泊水量平衡方程为：

$$V_{t+1}^1 = V_t^1 + I_t^1 + DI_t^1 + PI_t^1 - R_t^1 - PO_t^1 - DO_t^1 \quad (10)$$

且

$$DO_t^1 = DI_t^2, PO_t^2 = PI_t^1 + NI_t^1, I_t^2 + DI_t^2 + PI_t^2 - R_t^2 - PO_t^2 - DO_t^2 = 0 \quad (11)$$

式中：\$V_t^1\$、\$V_{t+1}^1\$分别为湖泊在第\$t\$时段的初、末库容。

(2)湖泊库容约束：湖泊各时段蓄水量不低于湖泊下限库容也不高于湖泊上限控制库容，同时规定计算时段末的湖泊终止库容必须大于或等于初始库容。

$$V_{t, \text{下限}}^1 \leq V_t^1 \leq V_{t, \text{上限}}^1, V_{T+1}^1 \geq V_1^1 \quad (12)$$

式中：\$V_{t, \text{上限}}^1\$、\$V_{t, \text{下限}}^1\$分别为第\$t\$时段湖泊的上限和下限控制库容；\$V_1^1\$、\$V_{T+1}^1\$分别为湖泊的计算时段初始库容和终止库容。

(3)外调控制线约束：为了使当地用水利益不致因调水而受损害，保证各区现有用水利益不受破坏，同时，为提高全线供水保证程度，调度中规定了湖泊不同时段的外调控制水位，当湖泊水位低于此水位时即停止从湖泊内抽水外调，使湖泊在死水位以上保持一定的水量。

(4)供水次序约束：各时段的区间总放水量必须优先满足本区间内用水户需求，其次抽水外调以供北方使用，余水则自流下泄。

(5)供水保证程度约束：各区间每个时段供应的实际水量与需求量的比值，应达到用水户水量配置供水目标。根据文献[13]，本区间实际供水量应首先实现各时段工业、生活等非农业用水户的供水保证程度不低于97%，其次再向农业用水户供水，实现各时段农业用水户在非特枯年份的供水保证程度不低于75%。

(6)工程能力约束：包括泵站抽水能力、河道过水能力等，不能超出工程的实际允许能力。

3.3 优化分析

3.3.1 参数确定 选取2020年作为规划水平年，取规划水平年各梯级泵站的设计抽水能力、各区间用水户的规划用水量以及 $P=50\%$ 、 75% 和 95% 来水频率下的径流过程进行分析计算。根据文献[14]，长江水位和水量可以满足东线工程在规划水平年的抽江要求。洪泽湖以年调节水库来考虑，现状死水位11.3m(废黄河高程，下同)，汛期蓄水位12.5m，非汛期蓄水位规划抬高至13.5m；参照现有江水北调工程的调度运行原则，拟定洪泽湖北调控制水位按不同季节变化：7月上旬—8月底为12.0m，9月上旬—11月上旬为12.0~11.9m，11月中旬—翌年3月底为12.0~12.5m，4月上旬—6月底为12.5~12.0m。模型求解按水文年(7月—翌年6月)逐时段进行，各时段均以旬计，即 $T=36$ 。

3.3.2 常规调度 即系统在运行时遵循“闲时补库，忙时水库、泵站联合供水”的原则，闲时若水库水位低于时段上限水位，则考虑对水库进行预抽蓄，在保证水库蓄水位不超过上限水位的前提下，梯级泵站以设计抽水能力向水库补水；忙时由于水库水位偏低，考虑由水库、梯级泵站联合向用水区供水，最大限度地提高供水保证程度。规划水平年各来水频率条件下南水北调长江—洪泽湖段河—湖—梯级泵站系统的常规调度汇总结果见表1。

3.3.3 优化调度计算 针对阶段变量为 $t(t=1, 2, \dots, T)$ ，各阶段状态变量为湖泊末库容 V_{t+1}^1 ，各阶段决策变量为湖泊抽入量 PI_t^1 、放水量 X_t^1 的动态规划问题，在每次计算迭代过程中，一旦给定湖泊决策 PI_t^1 、 X_t^1 ，利用供水优先次序，即可确定 R_t^1 、 PO_t^1 和 DO_t^1 的值；同时根据“缺(弃)水的平方和最小”的目标，确定河网抽入量 PI_t^2 ，结合式(11)，河网放水量 X_t^2 也就随之确定。 PI_t^2 值的具体计算式为：

$$PI_t^2 = \begin{cases} \min(PQ, D_t^2 + PI_t^1 + ND_t - PO_t^1), & DO_t^1 = 0 \\ \min(PQ, D_t^2 - DO_t^1), & 0 < DO_t^1 < D_t^2 \\ 0, & DO_t^1 \geq D_t^2 \end{cases} \quad (13)$$

因此，此类问题可采用传统的动态规划逐次逼近法(DPSA)进行求解，具体思路为：(1)首先假设各阶段湖泊的抽入量 PI_t^1 已知，采用常规一维动态规划方法求解，确定在此状况下的各阶段湖泊放水量 X_t^1 和相应目标值；(2)将上述求得的各阶段湖泊放水量 X_t^1 作为已知，重复应用一维动态规划方法，确定各阶段新的湖泊抽入量 PI_t^1 和相应目标值；(3)如此循环往复，直至求得的目标值相对变幅小于确定的精度，即可认为达到优化效果，从而得出各阶段最终的湖泊抽入量 PI_t^1 、放水量 X_t^1 及最优目标值。同时，还采用了本文提出的基于动态规划与模拟退火法的混合算法(DP-SA)对模型进行了计算，并将优化结果同常规调度、动态规划逐次逼近法所得结果进行比较。采用动态规划逐次逼近法及混合算法所得优化调度结果同样见表1所示。

表1 各来水频率下的常规调度及优化调度结果比较(2020水平年) (单位：万 m^3)

调度方式	来水频率	外调量 $\sum P_t$	供水量 $\sum R_t^1$	缺水量 $\sum(D_t^1 - R_t^1)$	供水量 $\sum R_t^2$	缺水量 $\sum(D_t^2 - R_t^2)$	弃水量 $\sum DO_t^2$	抽江水量 $\sum PI_t^2$
常规调度	50%	398 650	447 696	114 384	165 438	33 392	1 533 117	213 460
	75%	481 170	574 289	156 581	196 585	43 775	619 785	663 430
	95%	528 360	563 265	302 195	189 251	84 699	41 724	1 271 650
优化调度 (DPSA)	50%	398 650	523 552	38 528	188 957	9 873	1 289 159	68 867
	75%	481 007	574 474	156 396	196 832	43 528	322 730	366 624
	95%	528 360	560 174	305 286	190 196	83 754	0	1 224 819
优化调度 (DP-SA)	50%	398 650	523 577	38 503	188 957	9 873	1 289 135	68 867
	75%	481 170	574 685	156 185	196 832	43 528	322 682	366 998
	95%	528 360	563 265	302 195	190 204	83 746	0	1 228 018

3.3.4 结果比较与分析

(1)不同来水频率条件下,采用DP-SA混合算法对南水北调长江-洪泽湖段河-湖-梯级泵站系统进行优化调度,与常规调度相比:①系统供水量均有一定程度提高。在50%、75%来水频率时,工业、生活等非农业用水户在各时段的供水保证程度均不低于97%,农业用水户不低于75%;在95%来水频率时,采用优化调度使系统在增加了供水总量的同时,将干旱期非农业用水户在各时段的供水保证程度保持在97%以上,同时为各时段农业用水户用水提供一种优化分配制度,实现了干旱期水量的均衡调配,从而避免了某一时段或少数时段的严重缺水所造成的巨大经济损失;②系统抽水及弃水总量均明显减少。50%、75%和95%来水频率下,系统在整个计算时段内的总抽江水量较常规调度分别减少了14.46、29.64和4.36亿 m^3 ,总弃水量较常规调度分别减少了24.40、29.71和4.17亿 m^3 ,可以看出,如果调度不当,系统在整个计算时段增加的弃水基本上系抽江水量,多抽则多弃。

(2)采用DP-SA混合算法编程对系统进行优化调度,计算效率高且优化效果明显;而通过DPSA算法编程对此系统进行优化调度时,初始解的选择是否得当将直接决定最终解的优劣,因此势必要进行一定的重复试验,方可使计算结果逐步收敛于某一个解,而从最终结果可知,采用DPSA算法所需计算时间较长,且往往仅获得一个局部最优解。本算法不但在求解此类问题时花费的运算时间较少,而且可获得近似全局最优解;同时也为各阶段具有多决策变量的动态规划问题提供了一种新的求解路径。

4 结论

本文采用动态规划与模拟退火相结合的混合算法对各阶段具有多决策变量的河-湖-梯级泵站系统水资源优化配置模型进行求解,并通过与动态规划逐次逼近法计算结果分析比较,证明了混合算法在求解该问题方面具有计算效果好、收敛速度快等优点。

采用本文建立的数学模型对南水北调长江-洪泽湖段河-湖-梯级泵站系统进行优化调度,一方面可以提高整个系统的总供水量,并使总供水量在空间和时间上实现均衡分配,提高各区间各时段的供水保证程度;另一方面,在充分利用湖泊天然来水的同时,减少系统的抽江水量,降低沿线泵站工程运行成本,实现水资源的优化配置。

参 考 文 献:

- [1] Hall W A, Butcher W S, Erogbue A . Optimization of the operation of a multi-purpose reservoir by dynamic programming[J] . Water Resources Research, 1968, 4(3): 471-477 .
- [2] Cristiano C, Victoria C P Chen, Aihong Wen . Optimization of a large-scale water reservoir network by stochastic dynamic programming with efficient state space discretization[J] . European Journal of Operational Research, 2006, 171(3): 1139-1151 .
- [3] Indrani Gupta, A Gupta, P Khanna . Genetic algorithm for water distribution systems[J] . Environmental Modelling & Software, 1999, 14(5): 437-446 .
- [4] 方红远,邓玉梅,董增川 . 多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法[J] . 水利学报, 2001, 32(9): 22-27 .
- [5] Yasin H, Mike C, Vasily D . Ant colony optimization for history matching and uncertainty quantification of reservoir models[J] . Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 77(1): 78-92 .
- [6] 徐刚,马光文,梁武湖,等 . 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J] . 水科学进展, 2005, 16(3): 397-400 .
- [7] 谢维,纪昌明,等 . 基于文化粒子群算法的水库防洪优化调度[J] . 水利学报, 2010, 41(4): 452-457 .
- [8] Cooper L, Cooper Mary W . Introduction to Dynamic Programming[M] . New York: Pergamon Press, 1981 .
- [9] 程吉林 . 大系统试验选优理论与应用[M] . 上海: 上海科技出版社, 2002 .
- [10] 康立山,谢云,等 . 非数值并行算法(第一册)模拟退火算法[M] . 北京: 科学出版社, 1994 .

- [11] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [12] 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(5): 1-13.
- [13] 江苏省水资源服务中心. 江苏省南水北调用水户水量配置研究[R]. 2009.
- [14] 中水淮河工程有限责任公司, 等. 南水北调东线第一期工程可行性研究报告[R]. 2005.

Research on optimal water resources allocation of river-lake-pumping stations system by Dynamic Programming and Simulated Annealing approach

SHI Han-sheng¹, CHENG Ji-lin¹, FANG Hong-yuan¹, LU Xiao-wei²

(1. Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Surveying & Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract: A dynamic programming model with multiple decision variables for optimal water resources allocation of river-lake-pumping stations system is proposed, in which minimum sum of squares of water shortage (discarded water) in each section is set as the objective function, the water storage of the lake of each stage is defined as the state variable, and the water volume to be pumped into the lake and the water release from the lake are expressed as decision variables. The Yangtze River-Hongze Lake section of South-to-North Water Transfer Project is taken as a case study. According to the characteristics that the discrete values of the state variable are relatively less while the feasible solution space of each decision variable is large and its more discrete values, this paper applies a hybrid method (DP-SA) using dynamic programming and simulated annealing combined by the authors to calculate the model. The application results show that using the proposed model to make optimal operation not only can improve the water-supply guaranteed rate, but also can decrease the water volume to be pumped which can reduce the operation cost of the water supply system. In comparison to dynamic programming with successive approximations (DP-SA), we can obtain that the proposed hybrid method has better calculation results and faster convergence rate in solving this kind of problem.

Key words: dynamic programming; simulated annealing; water resources; optimization

(责任编辑: 王成丽)