

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.032

权衡供水与发电目标的水库调度建模及优化

李 想¹, 魏加华², 司 源², 尹冬勤³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 3. 电力规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 以供水水库为研究对象, 考虑了水库的供水、发电目标及两目标的权衡, 构建了供水计算、发电计算和多目标计算等三个模型, 并分别通过二次规划、混合整数线性规划、非线性规划对三个模型进行优化求解。研究涉及高维性、非线性、多目标在内的水库优化调度问题求解难点。以某两水库调度问题为例, 应用优化软件 LINGO 高质高效求解, 为以供水与发电作为主要目标的水库调度问题求解分析提供了示范。

关键词: 水库调度; 缺水指数; 多目标; 二次规划; 混合整数线性规划; 非线性规划

中图分类号: TV 697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0973-07

Modeling and optimizing reservoir operation for trade-off between water supply and power generation objectives

LI Xiang¹, WEI Jia hua², SI Yuan², YIN Dong qin³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: This paper focuses on the optimal operation of a water supply reservoir and considers both the water supply and power generation objectives and the trade off between the two objectives. The water supply model, power production model, and multi objective model are formulated and solved by quadratic programming, mixed integer linear programming, and nonlinear programming, respectively. The high dimensional, nonlinear, and multi objective difficulties inherent to the optimal operation of reservoir system are involved in this study. A two reservoir problem is taken as a case study and resolved effectively and efficiently using the optimization software LINGO. The study provides a demonstration for reservoir operation with water supply and power generation as the main objectives.

Key words: reservoir operation; shortage index; multi objective analysis; quadratic programming; mixed integer linear programming; nonlinear programming

水资源规划管理的理念是用系统化、最优化的方法统筹兼顾各部门的用水利益。以水库供水调度为例, 研究对象可以是小到某一地区的供水问题, 如黄强等^[1,2]通过优化水库调度以解决城市供水问题, 大到某一流域的水量分配问题, 如魏加华等^[3]通过建立自适应模型以研究黄河流域水量分配问题, 甚至是跨流域的调水问题, 如游进军等^[4]以国内南水北调等跨流域调水工程为例综述了相关研究方法。已有研究一般通过优化确定水库运行的对冲规则, 目标原则上不仅要平衡受水地区当前的缺水状况, 而且要为远期供水预留

一定的蓄水量, 避免灾难性缺水情景发生^[5]; 这是因为在旱季, 受水地区一次灾难性缺水带来的后果比长期轻微供水不足产生的影响要严重许多^[6]。

水库群优化调度问题具有高维性、非线性、多目标等特征。水资源系统的维数随着水库数和时段数增加而增加, 造成计算时间和计算机内存指数增加; 为克服维数问题, 国内外学者通常采用凸优化、降维分解或并行计算等几种行之有效的解决方法^[5-9]。水库水电站发电是一个强非凸、非线性过程, 存在多个局部极值点, 易使优化搜索陷入局部极

收稿日期: 2013-11-12 修回日期: 2015-08-03 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2106.029.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB05B03); 国家自然科学基金项目(51109114); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放课题(2012-KY-05)

作者简介: 李 想(1986-), 男, 河南郑州人, 博士, 主要从事水资源规划管理方面的研究工作。E-mail: ideal.thu@gmail.com

通讯作者: 魏加华(1971-), 男, 陕西汉中, 研究员, 主要从事水资源规划管理与水利信息化方面的研究工作。E-mail: weijiahua@tsinghua.edu.cn

值^[9]。水库通常具有供水、发电、航运、生态等多个目标,不同目标此消彼长、互为矛盾,需综合考虑各目标,做权衡、取舍分析。

水库调度学科的发展与优化方法、计算机技术的发展密不可分。就优化方法而言,大致分为两种类别,即以线性规划、非线性规划、动态规划等为代表的传统数学规划算法,以及以遗传算法、模拟退火算法、人工神经网络等为代表的启发式优化算法。就计算机技术而言,硬件技术如更高频的 CPU、更大容量的内存,软件技术如数据库、高性能计算平台、优化软件等都推动了这门管理科学的进步。本文正是在优化与计算机技术当前发展状况下,以两水库调度问题为例,考虑供水(含农业、工业、生态用水)和发电两目标,构建供水计算、发电计算和多目标计算等三个模型,并分别通过二次规划、混合整数线性规划和非线性规划进行模型求解,利用约束法^[11]进行多目标分析得到供水与发电两目标的权衡关系(即帕累托最优)。本研究为以供水与发电作为主要目标的、并涉及高维性、非线性、多目标等难点在内的水库调度问题求解分析提供了示范。

1 数学模型的建立

1.1 供水计算模型

在干旱缺水地区,水库供水一般难以完全满足用户用水需求。因此,在优化调度时为平衡供需关系可以采用缺水指数(Shortage Index)最小作为目标函数。缺水指数的概念由美国陆军工程兵团^[12]提出,作为评价缺水程度的量化指标,假定缺水对社会经济影响是二次方的关系,以它作为目标函数能够避免灾难性缺水情景发生。考虑到受水区不唯一,用水优先等级不统一,这里以最小化权重系数组合缺水指数作为目标函数,可表示为:

$$\min \sum_{j=1}^J W_j \cdot SI_j \quad (1)$$

其中:

$$SI_j = \frac{100}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{TS_{j,t}}{TD_{j,t}} \right)^2 \quad \forall j \quad (2)$$

式中: j 为受水区索引($j = 1, 2, \dots, J$); t 为时段索引($t = 1, 2, \dots, T$); W_j 为受水区 j 的权重; SI_j 为受水区 j 的缺水指数; $TS_{j,t}$ 为受水区 j 在时段 t 的总缺水量; $TD_{j,t}$ 为受水区 j 在 t 时段的总需水量。

以供水为主要目标的水库优化调度问题一般包含如下约束条件。

(1) 水量平衡约束。

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + (I_{i,t} - R_{i,t} - Q_{i,t}) \cdot \Delta t - EV_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (3)$$

(2) 蓄水量约束。

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

(3) 下泄流量约束。

$$R_{i,t}^{\min} \leq R_{i,t} \leq R_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (5)$$

(4) 下游灌溉和非灌溉流量约束。

$$G'_{i,t} + G''_{i,t} = R_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (6)$$

(5) 调水流量约束。

$$0 \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (7)$$

(6) 初始、终止蓄水量约束。

$$S_{i,0} = S_{i,0}^{\text{initial}}, S_{i,T} \geq S_{i,T}^{\text{final}} \quad \forall i \quad (8)$$

(7) 非负约束。

$$S_{i,t}, I_{i,t}, G'_{i,t}, G''_{i,t}, Q_{i,t}, EV_{i,t} \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (9)$$

式中: i 为水库索引($i = 1, 2, \dots, n$); $S_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 末的蓄水量; $I_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的入库流量; $R_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的下泄流量; $Q_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的调水流量; $EV_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的蒸发量; Δt 为时段长; $G'_{i,t}$ 和 $G''_{i,t}$ 分别为水库 i 时段 t 的下游灌溉和非灌溉流量; $S_{i,t}^{\max}$ 和 $S_{i,t}^{\min}$ 分别为水库 i 时段 t 末的初始和终止蓄水量; $S_{i,0}^{\text{initial}}$ 和 $S_{i,T}^{\text{final}}$ 分别为水库 i 时段 t 末的最大和最小蓄水量; $R_{i,t}^{\min}$ 为水库 i 时段 t 的最小下泄流量,由水库下游所需的生态流量控制; $R_{i,t}^{\max}$ 为水库 i 时段 t 的最大下泄流量,由水库泄水建筑物的泄水能力控制; $Q_{i,t}^{\max}$ 为水库 i 时段 t 的最大调水流量,由调水建筑物的输水能力控制。

1.2 发电计算模型

水库下泄的水流经水电站发电,其发电过程可表示为

$$E_{i,t} = N_{i,t} \cdot \Delta t = 9.81 \eta_i (\overline{HF}_{i,t} - \overline{HT}_{i,t} - \overline{HL}_i) \cdot R'_{i,t} \cdot \Delta t \quad \forall i, \forall t \quad (10)$$

其中:

$$\overline{HF}_{i,t} = \alpha_{0,i} + \alpha_{1,i} \cdot \overline{S}_{i,t} + \alpha_{2,i} \cdot \overline{S}_{i,t}^2 + \alpha_{3,i} \cdot \overline{S}_{i,t}^3 + \alpha_{4,i} \cdot \overline{S}_{i,t}^4 \quad \forall i, \forall t \quad (11)$$

$$\overline{HT}_{i,t} = b_{0,i} + b_{1,i} \cdot R_{i,t} + b_{2,i} \cdot R_{i,t}^2 + b_{3,i} \cdot R_{i,t}^3 + b_{4,i} \cdot R_{i,t}^4 \quad \forall i, \forall t \quad (12)$$

$$\overline{S}_{i,t} = (S_{i,t} + S_{i,t-1}) / 2 \quad \forall i, \forall t \quad (13)$$

$$R'_{i,t} + R''_{i,t} = R_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (14)$$

式中: $E_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的水电站发电量; $N_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的水电站出力; η_i 为水库 i 的水电站出力效率; $\overline{HF}_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的坝前平均水位,是水库平均蓄水量的函数^[13]; $\overline{HT}_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的坝后平均水位,是水库下泄流量的函数^[13]; \overline{HL}_i 为水库 i 的水头损失; $\overline{S}_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 的平均蓄水量; $R'_{i,t}$ 和 $R''_{i,t}$ 分别为水库 i 时段 t 的发电流量和非发电流量。水电站出力 and 发电流量约束可表示为

$$0 \leq N_{i,t} \leq N_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (15)$$

$$0 \leq R'_{i,t} \leq R_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (16)$$

式中: $N_{i,t}^{\max}$ 为水库 i 时段 t 的水电站限制出力; $R_{i,t}^{\max}$ 为水库 i 时段 t 的水电站限制出力对应流量,可根据式(10)得到:

$$R_{i,t}^{\max} = N_{i,t}^{\max} / [9.81 \eta_i (\overline{HF}_{i,t} - \overline{HT}_{i,t} - \overline{HL}_i)] \quad \forall i, \forall t \quad (17)$$

考虑水库的下泄流量尽可能用于发电,所以有

$$\lambda_{i,t} \cdot R_{i,t} \leq \lambda_{i,t} \cdot R_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (18)$$

$$R'_{i,t} = \lambda_{i,t} \cdot R_{i,t} + (1 - \lambda_{i,t}) \cdot R_{i,t}^{\max} \quad \forall i, \forall t \quad (19)$$

式中: $\lambda_{i,t}$ 为0/1变量。当下泄流量小于限制出力对应流量时, $\lambda_{i,t} = 1$,发电流量等于下泄流量;当下泄流量大于限制出力对应流量时, $\lambda_{i,t} = 0$,发电流量等于限制出力对应流量。

1.3 多目标计算模型

水库调度通常涉及多目标优化,相对于单目标优化而言,它是优化一组目标函数向量而非一个目标函数。考虑两目标最大化问题,数学模型可以表示为式(20)–式(22)

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [F_1(x), F_2(x)] \quad (20)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad \forall k \quad (21)$$

$$x_l \geq 0 \quad \forall l \quad (22)$$

式中: \mathbf{x} 为决策变量向量; l 为决策变量索引($l = 1, 2, \dots, L$); $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为目标函数向量, 这里包含目标函数 $F_1(\mathbf{x})$ 和 $F_2(\mathbf{x})$ 为约束条件, $g_k(\mathbf{x})$ 为约束条件, k 为约束条件索引($k = 1, 2, \dots, K$)。

本文采用约束法做多目标分析, 将式(20) - 式(22)转化为其等价式(23) - 式(26):

$$\max F_1(\mathbf{x}) \tag{23}$$

$$F_2(\mathbf{x}) \geq F_2^{\min} + \sigma \cdot \Delta \tag{24}$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall k \tag{25}$$

$$x_l \geq 0 \quad \forall l \tag{26}$$

式中: F_2^{\min} 为目标函数 2 的最小值; Δ 为目标函数 2 的增量; σ 为整数常量 $\sigma = 0, 1, 2, \dots$, 求解模型在不同 σ 时的目标函数值, 即可得到两目标问题的帕累托最优。

对于供水水库, 在满足受水区需水要求前提下, 尽可能提高水库水电站系统的发电量, 因而有:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T E_{i,t} \tag{27}$$

以式(1)作为优化的主要目标, 式(27)可参照式(24)转化为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T E_{i,t} \geq E^{\min} + \sigma \cdot \Delta E \tag{28}$$

式中: E^{\min} 为系统最小发电量; ΔE 为系统发电量增量。

1.4 模型分析

根据前面所述, 有如下三个模型, 其输入和输出条件如图 1 所示。

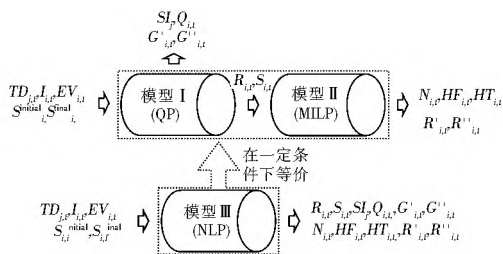


图 1 三个模型的输入和输出条件

Fig. 1 Inputs and outputs of the three models

模型 I: 供水计算模型, 包含式(1) - 式(9)。模型 I 是由目标函数为最小化二次函数(即凸函数), 约束条件为线性组合(即凸集)组成的凸优化问题, 可采用二次规划(QP)方法求解, 理论上可保证解的全局最优性。

模型 II: 发电计算模型, 包含式(10) - 式(19)。模型 II 以模型 I 的输出(即下泄流量 $R_{i,t}$ 和蓄水量 $S_{i,t}$) 作为输入, 由于各式均可由和计算得到, 所以模型 II 不存在非线性约束, 可采用混合整数线性规划(MILP)方法求解。如是处理的原因是: 水库水电站出力计算具有强非凸、非线性等特征, 存在多个局部极值点, 直接包含在模型 I 中易使优化搜索陷入局部极值; 以供水作为主要目标的水库调度问题, 可以分步计算供水和发电, 每步都能够保证解的可靠性。

模型 III: 多目标计算模型, 包含式(1) - 式(9)、式(10) - 式(15)、式(28)。模型 III 由于同时考虑供水和发电计算目标, 计算难度极大, 需要采用非线性规划(NLP)方法求解。由于模型 III 具有多个局部极值, 常用优化软件(或方法)无

法判定计算结果的最优性, 所以人为判定就显得极为必要。这里令式(28)中最小系统出力 E^{\min} 为分步计算模型 I 和 II 得出的所有时段、所有水库水电站的发电量之和、令 $\sigma = 0$, 此时模型 III 可看作是联合求解模型 I 和 II 的等价模型; 若模型 III 的目标函数值与模型 I 相等, 就可以认为使用的优化软件(或方法)对该问题具有全局搜索能力。

2 实例应用

2.1 实例描述及建模

实例包含两座水库($n = 2$), 见图 2。水库 $i = 1$ 和 $i = 2$ 都具有灌溉、调水、发电等功能, 主要特征指标见表 1。水库群调度的目标是在满足下游各自灌区($j = 1$ 和 $j = 2$)用水的前提下, 尽可能保证调水区($j = 3$)的工业用水需求($J = 3$)。

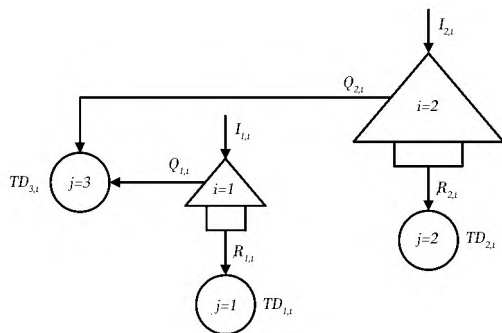


图 2 两水库供水问题示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the water supply problem of two reservoirs

表 1 水库的主要特征参数

Tab. 1 Main characteristics of the two reservoirs

水库	建设调节情况	多年平均径流量/亿 m^3	坝高 / m	正常蓄水位 / m	死水位 / m	装机容量 / MW
$i = 1$	已建多年	7.7	40.0	365.4	342.0	12.8
$i = 2$	规划多年	18.0	53.9	381.0	351.0	45.0

数据采用 2000 年 4 月至 2010 年 3 月 10 年以月为步长的两水库入库径流资料($T = 120$)。两水库年入库径流量和下游灌区年需水总量对比见图 3, 容易看出两水库的径流量年际变化极不均匀, 水库 $i = 1$ 的来水明显难以满足下游用水需求。根据问题描述, 目标函数可表示如下:

$$\min \frac{100}{T} \cdot \sum_{i=1}^T \left[W_1 \left(\frac{TS_{1,t}}{TD_{1,t}} \right)^2 + W_2 \left(\frac{TS_{2,t}}{TD_{2,t}} \right)^2 + W_3 \left(\frac{TS_{3,t}}{TD_{3,t}} \right)^2 \right] \tag{29}$$

其中:

$$TS_{1,t} = TD_{1,t} - G'_{1,t} \quad \forall t \tag{30}$$

$$TS_{2,t} = TD_{2,t} - G'_{2,t} \quad \forall t \tag{31}$$

$$TS_{3,t} = TD_{3,t} - Q'_{1,t} - Q'_{2,t} \quad \forall t \tag{32}$$

$$Q'_{1,t} = Q_{1,t}(1 - \rho_{1,t}) \quad \forall t \tag{33}$$

$$Q'_{2,t} = Q_{2,t}(1 - \rho_{2,t}) \quad \forall t \tag{34}$$

$$0 \leq G'_{1,t} \leq TD_{1,t} \quad \forall t \tag{35}$$

$$0 \leq G'_{2,t} \leq TD_{2,t} \quad \forall t \tag{36}$$

$$0 \leq Q'_{1,t} + Q'_{2,t} \leq TD_{3,t} \quad \forall t \tag{37}$$

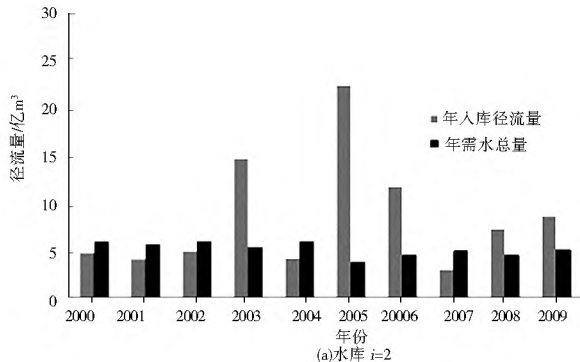
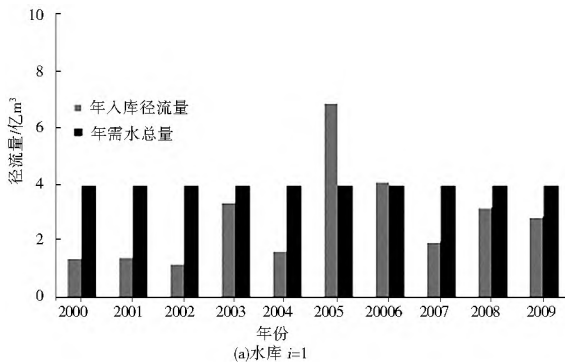


图 3 两水库的年入库径流量和需水总量

Fig. 3 Annual total inflows and water demands of the two reservoirs

式中: $Q'_{1,t}$ 和 $Q'_{2,t}$ 为水库 $i=1$ 和 $i=2$ 调水到受水区 $j=3$ 的有效调水流量; $\rho_{1,t}$ 和 $\rho_{2,t}$ 为调水损失百分比。由于受水区 $j=1$ 和 $j=2$ 的用水优先级高于 $j=3$, 令 $W_1=W_2=10, W_3=1$ 。除前述约束外, 问题的其它运行约束还包括以下内容。

(1) 水库 $i=1$ 向受水区 $j=3$ 的年调水总量不超过最大年调水总量, 可表示为

$$\sum_{m=1}^{12} Q_{1,12 \cdot (y-1) + m} \cdot \Delta t \leq T Q_{1,t}^{\max} \quad \forall y \quad (38)$$

式中: $T Q_{1,t}^{\max}$ 为水库 $i=1$ 的最大年调水总量; 时段 t 由年索引 y ($y=1, 2, \dots, 10$) 和月索引 m ($m=1, 2, \dots, 12$) 确定。

(2) 水库 $i=2$ 的入库流量大于下游所需的生态流量时, 最小下泄流量按生态流量控制, 反之按入库流量控制, 可表示为

$$\begin{cases} R_{2,t}^{\min} = EC_{2,t} & I_{2,t} \geq EC_{2,t} \\ R_{2,t}^{\min} = I_{2,t} & I_{2,t} < EC_{2,t} \end{cases} \quad \forall t \quad (39)$$

式中: $E_{i,t}$ 为水库 i 时段 t 下游所需的生态流量。

在多目标计算中, 为加速收敛, 假设考虑系统最小发电量时每个水库水电站的发电量都较不考虑系统最小发电量时有所增加, 可表示为

$$\sum_{i=1}^2 E_{i,t} \geq E_i^{\min} \quad \forall i \quad (40)$$

式中: E_i^{\min} 为不考虑系统最小发电量时水库水 i 电站在所有时段的发电量之和。

2.2 结果及分析

使用优化软件 LINGO 14.0 Beta 64 bit^[14] 分别编写并求解上述三个模型, 计算全过程在 ThinkPad W510(Intel Core(TM) i7 CPU 1.60 GHz, 4 GB 内存) 上完成。表 2 所示为三个模型的计算维数和计算需求, 可以看出三个模型都包含数以千计的变量和约束, 问题具有高维特征。

表 2 计算维数和计算需求

Tab. 2 Computational dimension and requirement

模型	求解方法	变量数量	整数变量数量	约束数量	非线性约束数量	内存需求 /K
I	QP	2 163	0	1 336	3	496
II	MILP	960	240	1 441	0	458
III	NLP	3 963	0	2 539	723	824

依次对三个模型求解, 不同方案计算结果见表 3。可以看出, 尽管模型 I 包含大量的变量和约束, 凸性构造能够保证在极短的计算时间内(本例 1 s)得到问题的全局最优解(39.54); 模型 II 的解状态为可行解, 但容易判定其全局性。

依次求解两个模型得到的所有时段、所有水库水电站的发电量(6.75 亿 kW·h) 为系统最大限度满足供水目标的发电结果, 并将其视作系统最小发电量。

随后, 令 $E^{\min}=6.75$ 亿 kW·h、 $E_1^{\min}=1.77$ 亿 kW·h、 $E_2^{\min}=4.98$ 亿 kW·h、 $\Delta E=0.36$ 亿 kW·h, 求解模型 0 不同方案(即 $\sigma=0, 1, 2, \dots$) 的计算结果。当时 $0 \leq \sigma \leq 8$, 模型 III 的解状态为局部最优解, 但通过对比模型 I 和 II 与模型 III 方案 $\sigma=0$ 的结果可以发现它们的解是一致的, 说明了 LINGO 对该问题的全局寻优能力。当时 $\sigma \geq 8$, LINGO 已无法找出该问题的可行解, 说明所有时段、所有水库水电站最大发电量应介于 9.27 亿 kW·h 和 9.63 亿 kW·h 之间。

从表 3 还可以看出, 当水库水电站发电量增加时, 受水区的用水需求逐渐难以得到满足; 其中水库下游各自灌区 ($j=1$ 和 $j=2$) 的供水保证率减少较受水区 ($j=3$) 小, 符合先保证下游灌溉后保证调水的目标; 当 $\sigma=7$ 时, $SI_3=100$, 说明两水库都不再对受水区 ($j=3$) 调水。图 4 为供水目标(以组合缺水指数表示)和发电目标(以发电量表示)的权衡关系(帕累托最优)。

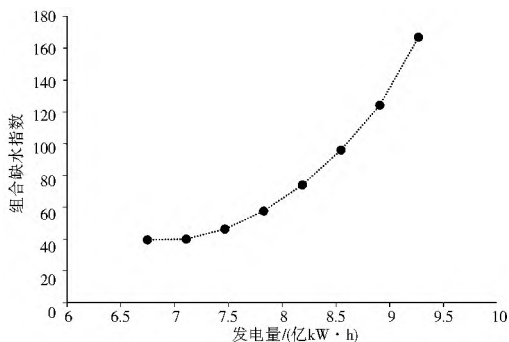


图 4 供水目标和发电目标的权衡

Fig. 4 Trade off between water supply and hydropower generation objectives

模型 III 不同方案的水量分配情况见表 4。由于水库 $i=1$ 的来水量极少, 水库对来水量的调蓄基本用于灌溉和发电, 几乎没有调水。从方案 $\sigma=0$ 到 $\sigma=7$, 水库 $i=2$ 起初发挥灌溉、发电和调水等多项目标, 随后水库调水量逐渐转化为水库下泄量, 以灌溉和发电目标为主。两水库的逐月入库、需水和下泄流量过程见图 5($\sigma=0, 3, 6$)。

表 3 不同方案计算结果

Tab. 3 Computational results of different scenarios

指标	解状态	计算 时间/s	SI_1	SI_2	SI_3	$\sum_{j=1}^3 W_j \cdot SI_j$	$\sum_{i=1}^{120} E_{1,i} / \text{亿 kW} \cdot \text{h}$	$\sum_{i=1}^{120} E_{2,i} / \text{亿 kW} \cdot \text{h}$	$\sum_{i=1}^{120} \sum_{j=1}^3 E_{1,i,j} / \text{亿 kW} \cdot \text{h}$	
模型 I	全局	1	3.733	0.131	0.901	39.54	—	—	—	
模型 II	可行	1	—	—	—	—	1.77	4.98	6.75	
模型 III	$\alpha=0$	局部	209	3.733	0.131	0.901	39.54	1.77	4.98	6.75
	$\alpha=1$	局部	122	3.740	0.088	1.743	40.03	1.79	5.32	7.11
	$\alpha=2$	局部	135	3.758	0.167	7.109	46.35	1.80	5.67	7.47
	$\alpha=3$	局部	300	3.786	0.305	16.739	57.66	1.81	6.02	7.83
	$\alpha=4$	局部	94	3.828	0.481	30.962	74.05	1.82	6.37	8.19
	$\alpha=5$	局部	151	3.891	0.660	50.516	96.02	1.83	6.72	8.55
	$\alpha=6$	局部	174	4.048	0.928	74.458	124.21	1.83	7.07	8.91
	$\alpha=7$	局部	56	4.972	1.723	100.000	166.95	1.90	7.36	9.27
	$\alpha=8$	无解	—	—	—	—	—	—	—	—

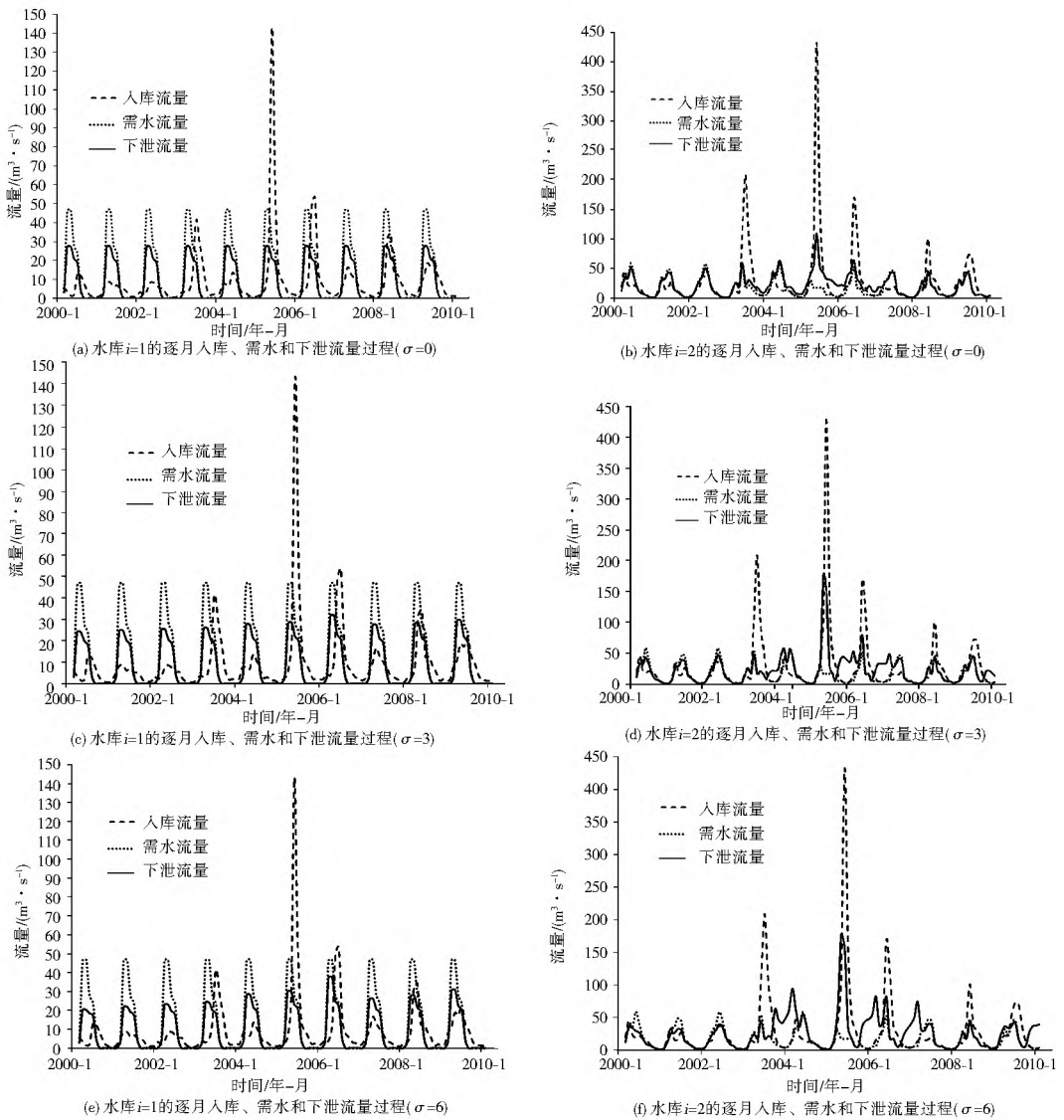


图 5 两水库的逐月入库、需水和下泄流量过程

Fig. 5 Monthly inflows, water demands, and outflows of the two reservoirs

图 6 为两水库的逐月水位和发电量过程。结合表 3 和表 4 可知, 水库 $i=1$ 水电站在不同方案下的总发电水量几乎未发生改变, 增发发电量来自于水库水头在所有时段

段里的重新分配; 而水库 $i=2$ 水电站在不同方案下增发发电量来自于总发电水量的增加和水库水头在所有时段里的重新分配。

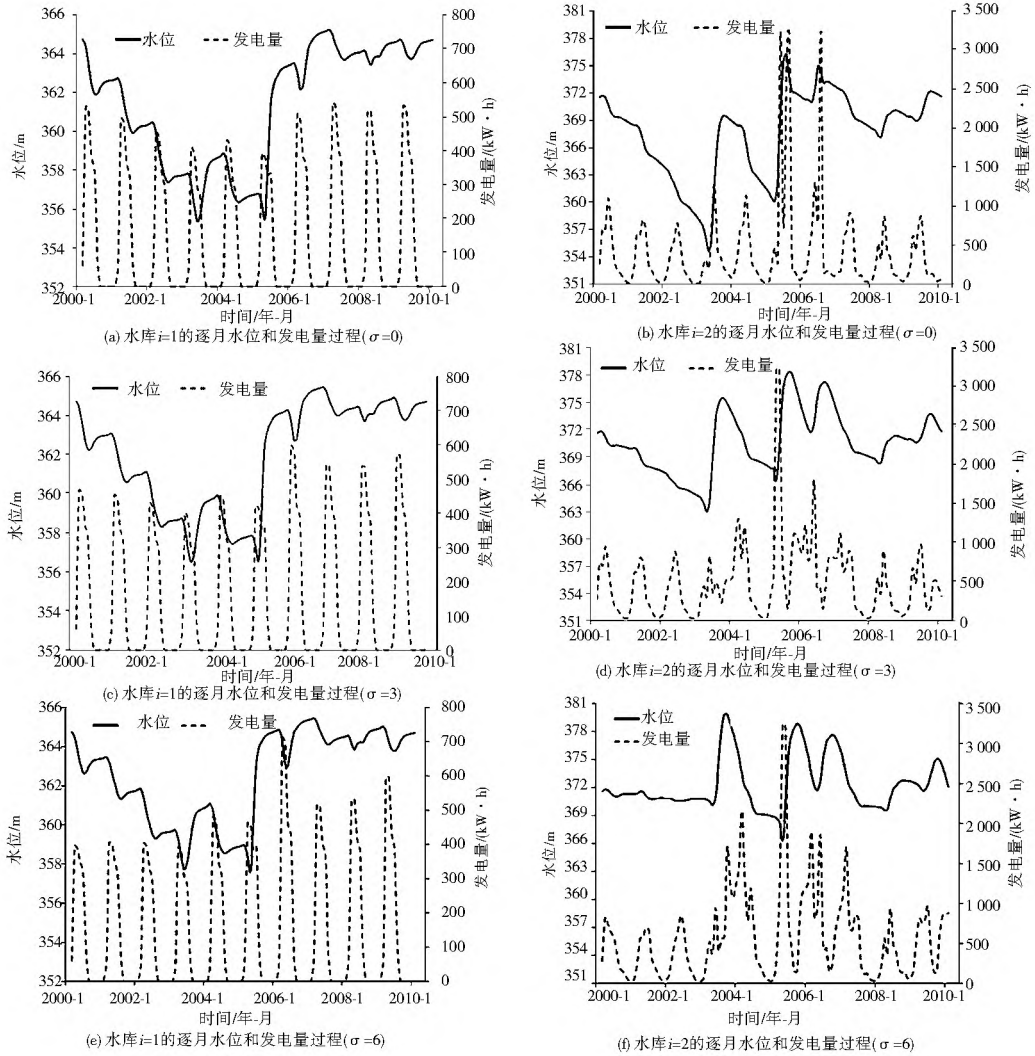


图 6 两水库的逐月水位和发电量过程

Fig. 6 Monthly fore bay elevations and power productions of the two reservoirs

表 4 模型 III 不同方案的水量分配情况

Tab. 4 Water allocations of different scenarios of model III

亿 m³

方案	水库	总下泄水量	总灌溉水量	总非灌溉水量	总发电水量	总非发电水量	总调水量
σ=0	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	166.27	49.48	16.79	64.57	1.70	17.97
σ=1	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	67.27	49.80	17.47	67.27	0	16.97
σ=2	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	69.89	49.25	20.64	69.89	0	14.36
σ=3	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	72.63	48.42	24.21	72.63	0	11.62
σ=4	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	75.45	47.70	27.75	75.45	0	8.80
σ=5	i=1	26.41	26.41	0	26.41	0	0
	i=2	78.38	47.27	31.11	78.38	0	5.86
σ=6	i=1	26.30	26.30	0	26.30	0	0.11
	i=2	81.55	46.54	35.01	81.55	0	2.69
σ=7	i=1	26.41	25.70	0.71	26.41	0	0
	i=2	84.25	44.37	39.88	84.25	0	0

3 结语

水库供水调度对平衡区域内或跨区域水量供需关系, 避

免因发生灾难性缺水而造成社会经济损失具有极为重要的意义。以系统化和最优化的方法建模求解涉及到高维性、非线性和多目标等计算难题。本文构建二次规划(QP)和混合

整数线性规划(MILP)模型分步计算水库的供水和发电目标,模型属凸优化范畴,保证了解的全局最优性;采用约束法将多目标问题转化为单目标问题,构建非线性规划(NLP)模型权衡水库的供水与发电目标;由于NLP模型具有高维性、强非线性、强非凸性等复杂特征,利用QP和MILP模型的计算结果对NLP模型的计算结果最优性做人为判定,为常用优化软件(或方法)无法判定结果可靠性问题提供了思路;应用于实例诠释整个解决方案,做多目标分析指导调度决策。

参考文献(References):

[1] 黄强,王增发,畅建霞,等.城市供水水源联合优化调度研究[J].水利学报,1999(5):57-62.(HUANG Qiang, WANG Zengfa, CHANG Jianxia, et al. Study on joint optimal operation of municipal water supply[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(5): 57-62. (in Chinese))

[2] 黄强,黄文政,薛小杰,等.西安地区水库供水调度研究[J].水科学进展,2005,16(6):881-886.(HUANG Qiang, HUANG Wenzheng, XUE Xiaojie, et al. Research on water supply operation of reservoir in Xi'an area[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 881-886. (in Chinese))

[3] WEI Jiahua, WANG Guangqian, WENG Weibin, et al. Adaptive control model of water resources regulation in the Yellow River[J]. Science in China Ser. E Engineering & Materials Science, 2004, 47(Supp. 1): 224-234.

[4] 游进军,王忠静,甘泓,等.国内跨流域调水配置方法研究现状与展望[J].南水北调与水利科技,2008,6(3):1-4,8.(YOU Jijun, WANG Zhongjing, GAN Hong, et al. Current status and prospect of study in China on water allocation of inter-basin diversion projects[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(3): 1-4, 8. (in Chinese))

[5] TU MY, HSU NS, TSAI FTC, et al. Optimization of hedging rules for reservoir operations[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134(1): 3-13.

[6] LUND JR. and REED RU. Drought water rationing and transferable rations[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(6): 429-437.

[7] 陆列寰,温进化.长藤结瓜式水利系统配水过程优化研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(3):46-48.(LU Liehuan, WEN Jiahua. Optimization of water allocation scheduling for melon on the vine water resource system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(3): 46-48. (in Chinese))

[8] 李想,魏加华,傅旭东.粗粒度并行遗传算法在水库调度问题中的应用[J].水力发电学报,2012,31(4):28-33.(LI Xiang, WEI Jiahua, FU Xudong. Application of coarse grain genetic algorithm to reservoir operation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 28-33. (in Chinese))

[9] 李想,魏加华,姚晨晨,等.基于并行动态规划的水库群优化[J].清华大学学报:自然科学版,2013,53(9):1235-1240.(LI Xiang, WEI Jiahua, YAO Chenchen, et al. Parallel dynamic programming for multi reservoir system optimization[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2013, 53(9): 1235-1240. (in Chinese))

[10] LABADIE JW. Optimal operation of multi reservoir systems: state of the art review[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(2): 93-111.

[11] YEH WGW and BECKER L. Multi-objective analysis of multi reservoir operations [J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1326-1336.

[12] Hydrologic Engineering Center (HEC), HEC-3 Reservoir system analysis for conservation: user's manual. U. S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 1981.

[13] BARROS MTL, TSAI FTC, YANG SL, et al. Optimization of large scale hydropower system operations [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(3): 178-188.

[14] LINDO Systems Inc., LINGO User's Guide, 2011.

《南水北调与水利科技》优先数字出版声明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年起,将《南水北调与水利科技》印刷版期刊出版的定稿论文在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《南水北调与水利科技》编辑部