

跨流域水资源系统自优化模拟规划模型

吴泽宁 丁发 蒋水心

(郑州工业大学水环系, 450002)

摘要 研究了一般流域及跨流域水资源系统的特点, 将模拟技术和数学规划方法相结合, 建立了具有自优化功能的通用流域水资源系统模拟规划模型。在此基础上, 建立了跨流域调水工程系统规划模型。实例计算表明, 本文所建立的模型实用、有效、优化成果可靠。

关键词 自优化模拟 数学规划 水资源

Selfoptimization Simulation and Planning Models of Multi-basin Water Resources System

Wu Zening Ding Dafa Jiang Shuixin

(Zhengzhou University of Technology, 450002)

Abstract Characteristics of a multi-basin water resources system are researched, combining simulation technique with mathematics planning, the selfoptimization simulation and planning models of multi-basin water resources system. The results of a case study show that the models and solution technique are available can be used widely.

Keywords selfoptimization simulation; mathematics planning; water resources

1 跨流域水资源系统的特点

跨流域(指相邻多流域, 下同) 水资源系统由各独立流域水资源子系统组成。流域水资源系统是自然界水资源系统中独立性较强的重要子系统, 其具有如下特点: ① 流域水资源系统分布范围广, 流经的地区多, 一般有干流和一些支流组成; ②结构复杂。流域水资源包括地面水和地下水, 用水部门一般包括城市生活、工业、农村人畜、发电、灌溉、航运、环境等; 流域中有众多的水库、引水口、分水口、电站等。水库之间的联系, 串联、并联与混联并存; ③流域水资源系统的影响因素众多, 既有确定性因素, 又有不确定因素。跨流域水资源系统除具有上述特点外, 还有一个最突出的特点, 即不同流域水资源系统间水量分布不均, 以及它们之间的经济、社会和环境发展不均衡。为此, 非常有必要研究如何使各流域内地表水和地下水及相邻流域间水量的相互补偿作用得到充分发挥, 实现整个跨流域系统内综合效益最佳。

2 解决跨流域水资源系统规划的途径

2.1 跨流域水资源系统规划的模型体系

解决具有上述特点跨流域水资源系统的优化规则问题, 仅用某种数学规划方法是难以实现的, 应将仿真性能强的模拟技术和寻优技术成熟的多种数学规划方法相结合, 构成解决跨流域水资源系统规划中不同子问题的模型体系。通过这些模型各施其责, 互相配合, 共同完成跨流域水资源系统整体优化规划的任务。

务。模型体系包括: 用于模拟流域水资源系统宏观运行状况的具有自优化功能的模拟模型——模型 , 用于流域内各水源及输配水工程规划的数学规划模型——模型 , 用于流域内各工程开发顺序优选的整数规划模型——模型 , 用于跨流域调水工程系统规划的线性规划模型——模型 。

模型 的功能是分析在流域水资系统的各种约束下, 水资源的供需状况, 获得水资源的余缺情况; 模型 是在分析模型 提供的信息的基础上, 规划各可能工程的最佳型式及规模; 模型 是在分析模型 、 提供的信息基础上, 规划跨流域调水工程系统的最佳规模; 模型 是在前述三个模型提供的信息基础上, 考虑跨流域系统内的各种资源及社会等约束, 排出实现水资源合理开发利用的工程实施顺序。

2.2 跨流域水资源系统规划的过程

前已述及完成跨流域水资源系统规划这样复杂的问题, 须依靠上述四个模型相互配合, 反复交替运用方能实现, 规划过程框图如图 1 所示。

四个模型中, 关于模型 和模型 的研究成果已较成熟, 可根据系统的特点, 适当调整即可运用, 此不详述。以下重点叙述模型 和模型的建立及求解技术。

3 流域水资源系统分析模拟模型

3.1 结点类型

用模拟模型研究水资源系统, 必须对真实的物理系统进行概化。把流域水资源系统中, 干流和支流上由于各种原因使河流流量发生变化的地点称为“结点”, 如起始结点, 水库结点, 汇流结点, 灌溉结点, 分水结点, 水电站结点等。这些结点中, 有些可以对来水进行调节, 在丰水期蓄水, 在枯水期供水, 如水库结点; 有些不能对来水进行调节, 只能对某个时段的来水进行控制、利用, 如供水、灌溉、分水结点等。因此, 可以把众多的结点概化为两类, 一类是水库结点, 其余的结点都归于另一类, 称为一般水量平衡结点。

3.2 目标函数

跨流域水资源系统规划的目标是系统的综合效益最大, 其包括多个方面, 如经济、社会、环境等诸方面, 其中, 社会及环境方面的效益不易量化, 可作为约束条件处理。因此, 一般以经济效益最大作为目标。由于跨流域水资源系统涉及国民经济的各个方面, 目前我国经济资料状况尚难满足建立目标函数的要求, 所以, 在有条件的情况下, 应尽可能采用经济目标, 在建立经济目标有困难的情况下, 也可采用在尽可能满足重要用水部门用水要求的前提下, 适当安排非重要用水部门用水(在模拟过程中考虑), 以水资源利用量最大作为目标。以水资源利用量最大为目标的目标函数如下:

$$WA = \max \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{KU} \sum_{t=1}^M USE2(i, k, t)$$

(1)

式中, WA 表示水资源系统的总供水量; $USE2(i, k, t)$ 表示 i 结点 k 用水部门 t 时段的供水量, M 为时段总数, i 为结点号, N 为节点总数, k 为用水部门编号, KU 为用水部门总数

3.3 约束条件

3.3.1 水量平衡约束

1. 一般水量平衡结点水量平衡约束

$$WL(i, t) = WI(i, t) + \sum_{l \in (i)} R(l, t) - \sum_{k=1}^{KU} USE2(i, k, t), \forall t$$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. (http://

(2)

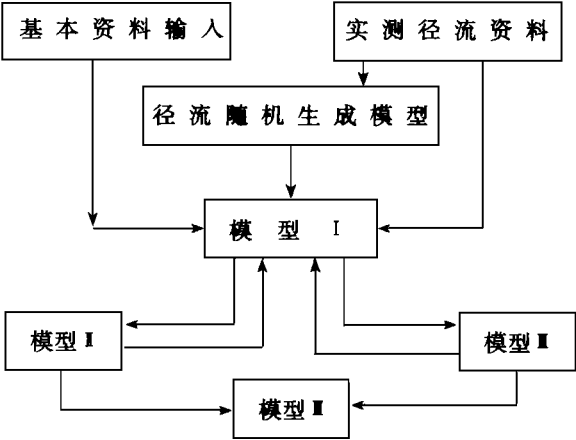


图 1 跨流域水资源系统规划过程框图

式中, $WL(i, t)$ 表示 i 结点 t 时段的放水量; $WI(i, t)$ 表示 i 结点 t 时段的来水量; $R(l, t)$ 表示 i 结点 t 时段能够利用的上游 l 结点的回归水量; $\cong(i)$ 表示回归水能够被 i 结点利用的结点集合; i 为一般水量平衡结点, 其余符号意义同前。

2. 水库结点水量平衡约束

$$V(i, t+1) = V(i, t) + WI(i, t) + \sum_{l \in \cong(i)} R(l, t) - \sum_{k=1}^{KU} USE2(i, k, t) - WL(i, t), \forall t \quad (3)$$

式中, $V(i, t+1)$ 表示 i 水库结点 $t+1$ 时段初的蓄水量; $V(i, t)$ 表示 i 水库结点 t 时段初的蓄水量; i 为水库结点; 其它符号同前。

3.3.2 用水约束

$$USE2(i, k, t) \leq USE1(i, k, t) \quad \forall i, k, t \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{KU} USE2(i, k, t) \leq USEP(i, t), \forall i, t \quad (5)$$

式中, $USE1(i, k, t)$ 表示 i 结点 t 时段 k 部门的需水量; $USEP(i, t)$ 表示 i 结点 t 时段的可供水量; 其余符号同前。

可供水量包括地表水量 $W1(i, t)$ 和抽用的地下水量 $W2(i, t)$, 即

$$USEP(i, t) = W1(i, t) + W2(i, t) \quad (6)$$

3.3.3 地下水可采量约束

$$\sum_{t=1}^{M1} W2(i, t) \leq WG(i) + \Delta W(i), \forall i \quad (7)$$

式中, $WG(i)$ 表示 i 结点的地下水年可开采量; $\Delta W(i)$ 表示 i 结点的地下水年允许过采水量; $M1$ 为年内的时段总数; 其余符号同前。

3.3.4 水库最大、最小蓄水量约束

$$VMIN(i, t) \leq V(i, t) \leq VMAX(i, t), \forall t \quad (8)$$

式中, $VMIN(i, t)$ 表示 i 水库 t 时段初的允许最小蓄水量; $VMAX(i, t)$ 表示 i 水库 t 时段初的允许最大蓄水量; i 为水库结点。

3.3.5 水库供水能力约束

$$WL(i, t) + \sum_{k=1}^{KU} U1(i, k, t) \leq WLT1(i), \forall t \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{KU} U2(i, k, t) \leq WLT2(i), \forall t \quad (10)$$

其中,

$$U1(i, k, t) + U2(i, k, t) = USE2(i, k, t), \forall k, t \quad (11)$$

式中, $U1(i, k, t)$ 表示通过水库放水 i 结点 t 时段 k 用水部门的供水量; $U2(i, k, t)$ 表示通过水库直接引水 i 结点 t 时段 k 部门的供水量; $WLT1(i)$ 表示 i 水库的放水能力; $WLT2(i)$ 表示 i 水库的直接引水能力; i 为水库节点。

3.3.6 灌溉渠道引水能力约束

$$USE2(i, j, t) \leq AG(i), \forall i, t \quad (12)$$

式中, $USE2(i, j, t)$ 表示 i 结点 t 时段灌溉用水部门的供水量; j 表示灌溉用水部门; $AG(i)$ 表示 i 结点灌溉渠道的引水能力。

3.3.7 供水保证率约束

在模拟过程中, 按照用水保证的优先次序, 依次满足各用水部门的用水要求。

3.3.8 弃水最小约束

弃水最小约束主要是反映在模拟过程中。各水库只有在两种情况下才允许放水: 一是该下游地区或该

水库控制地区存在着缺水;一是水库已达到该时段的蓄水上限,必须弃水。

3.3.9 其它约束

其它约束指系统内的一些特殊条件或要求。如:由于某种原因,某部门用水有特殊要求等。

3.3.10 非负约束

模型中所有变量大于等于零。

流域水资源系统的影响因素有确定性因素和随机因素。由于不确定性因素的存在,有时要建立流域水资源系统的随机模拟模型。随机模拟模型的结构和确定性模拟模型完全相同,所不同的是要考虑来水和用水的随机性,采用多站年、月随机系列生成模型生成的来水和用水资料作为模拟模型的输入即可。

4 流域水资源系统分析自优化模拟技术

传统的模拟模型用一般的模拟技术求解^[1]。对于流域水资源系统这样复杂的系统,一般含有较多的水库结点,流域内水库运行控制参数的各种组合情况不胜枚举,计算工作量非常庞大,运用一般的模拟技术求解存在着困难^[2]。为此,要研究流域水资源系统分析自优化模拟技术,用于流域水资源系统模拟模型的求解。该自优化模拟技术仅通过基本资料的输入,在模拟中自动生成并不断改进水库的控制线,使控制线趋于最优,经模拟运行,实现流域内水资源总利用量最大的目标。

自优化模拟技术是在一般模拟技术的基础上,增加反馈过程,使输出结果反馈到输入端,变一般模拟技术的开环控制为闭环控制^[3]。然后,通过输入输出的辩证处理,产生系统寻优反馈信息,进而对决策变量作出修改,逐步使模拟结果趋于优化。其控制过程如图 2 所示。

本文利用时间和空间的不同顺序模拟的特点设计模拟过程,构成流域水资源系统模拟的闭环控制系统,来实现模拟自身的优化。定义自上而下沿河流水流方向逐结点进行的模拟为顺流向模拟,与顺流向模拟相反,自下而上沿水流相反的方向进行的模拟为逆流向模拟。定义按水文年顺序逐时段进行的模拟为顺时序模拟,逆水文年顺序逐时段进行的模拟为逆时序模拟。针对流域水资源系统规划分析问题的特点,设计了逆、顺流向交替的模拟方法。即先从流域的最下游结点开始,逐结点向上游进行逆流各模拟,(除第一结点外)每进行一个结点的模拟,都要从该结点向下进行顺流向模拟,从该结点开始,直到最下游结点,完成一次顺流向结点间的协调过程。对具有调节水库的结点,还设计了逆、顺时序模拟。逆时序模拟是生成水库控制线;顺时序模拟是在逆时序模拟的基础上,在控制线约束下,模拟水库的运用过程,以获得水库的蓄放过程、供水过程及其控制地区的缺水过程。一般水量平衡点只进行顺时序模拟,以获得该节点的供水过程、泄水过程和缺水过程。

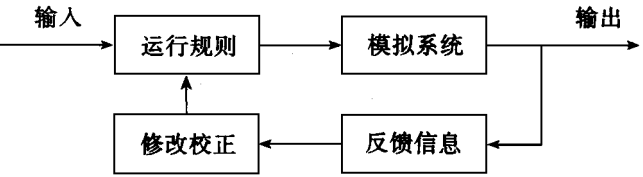


图 2 闭环控制系统控制过程示意图

4.1 逆时序模拟生成水库控制线

为获得流域水资源利用总量最大的目标,模拟生成水库运行的控制线,并使控制线趋于最优,至关重要。水库控制线的作用是协调水库控制地区和下游的用水、水库控制地区现时段用水和后续时段用水。既维护水库控制地区的利益,又兼顾下游的补水要求;既保证水库控制地区现时段的用水,又尽可能安排后续时段的用水要求。此控制线是在综合考虑水库各时段的来水和用水情况下,结合水库的调蓄能力。通过逆时序模拟获得。

水库逆时序模拟的方程为式(13),它表示要满足*i*水库控制地区*t*及*t*以后时段的用水需求,在*t*时段初*i*水库必须具有的最小蓄水量。

$$V_L(i,t) = V_L(i,t+1) + \sum_{k=1}^{KU} USE1(i,k,t) - W I(i,t) - \sum_{l \in (i)} R(l,t), \quad \forall t \quad (13)$$

式中, $VL(i, t)$, $VL(i, t+1)$ 分别表示 t 和 $t+1$ 时段初 i 水库应有的最小蓄水量; i 为水库结点; 其余符号同前。

在逆流模拟中, 上游和支流结点的放水、回归水均取零; 在顺流向模拟中, 上游和支流节点的放水、回归水不为零, 并且在每次顺流向模拟中是变化的。来水不同, 水库的控制、运用过程也要相应改变, 因此水库控制线在每次顺流向模拟中应根据来水情况的变化重新生成。控制线的变化反映了流域内各结点之间水量协调的变化。当控制线逐渐收敛, 就可控制水库运用过程趋向最优。

4.2 顺时序模拟决策(运行)过程

一般水量平衡点顺时序模拟的平衡方程为

$$WL(i, t) = WI(i, t) + \sum_{l \cong (i)} R(l, t) - \sum_{k=1}^{KU} USE1(i, k, t), \quad \forall t \quad (14)$$

式中, i 为一般水量平衡点。其余符号同前。

水库结点顺时序模拟的平衡方程为:

$$V(i, t+1) = V(i, t) + WI(i, t) + \sum_{l \cong (i)} R(l, t) - \sum_{k=1}^{KU} USE1(i, k, t) - WDD(i, t), \quad \forall t \quad (15)$$

式中, i 为水库结点; $WDD(i, t)$ 为 i 结点下游需其补偿的缺水量; 其余符号同前。

根据(14)、(15)式, 确定各结点相应的决策过程: 一般水量平衡结点包括供水过程、缺水过程和泄水过程; 水库结点包括供水过程、缺水过程、蓄水过程和放水过程。

为了完成逆、顺流向交替进行的模拟过程, 设计了流域结点编号的方法和相应的控制措施, 对不同流域或同一流域不同的结点组合, 均能实施有效的控制。

5 跨流域调水工程系统规划模型

用模型 可对流域水资源系统进行全面、深入的研究。根据其研究成果, 寻求产生流域水资源利用矛盾的关键所在, 结合流域经济发展状况, 提出新的规划方案 and 解决水资源供需紧张的第略。若流域内有进一步开发的潜力, 应用模型 对各种可行的规划方案进比较、筛选, 确定最佳开发方案; 若流域内的水资源已无开发潜力, 可考虑从邻近流域调水的跨流域调水方案, 以解决缺水问题。

5.1 跨流域调水工程系统规划模型

5.1.1 目标函数

跨流域调水系统一般由被引水流域的调节水库、需调水流域的蓄水水库和连接两库的输水系统组成, 规划的目的是合理确定系统中各工程的规模。规划目标应是在满足一定引水要求的条件下, 整个工程系统的费用最小。在资料不足的情况下, 亦可用两库有效库容最小, 且保证输水系统按设计流量连续引水。目标函数表达式为:

$$\min V1 + V2 \quad (16)$$

式中, $V1$, $V2$ 分别表示调节水库和蓄水水库的有效库容。

5.1.2 约束条件

1. 调节水库水量平衡约束

$$VA(t) + WP(t) - WQ(t) - R1(t) = VA(t+1), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (17)$$

式中, $VA(t)$, $VA(t+1)$ 分别表示 t 及 $t+1$ 时段初调节水库的蓄水量; $WP(t)$ 表示 t 时段调出流域调水结点的多余水量(由模型 得到); $WQ(t)$ 为 t 时段跨流域引水量; $R1(t)$ 表示 t 时段调节水库的可能多放水量(满足本流域和调水要求后的泄水量); T 为时段总数。

2. 调节水库库容约束

$$VA(t+1) \leq V1, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (18)$$

式中, 各符号同前。 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://

3. 蓄水水库水量平衡约束

$$VB(t) + WQ(t) + WI(t) - WD(t) - R2(t) = VB(t+1), \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (19)$$

式中, $VB(t)$, $VB(t+1)$ 为 t 及 $t+1$ 时段初蓄水水库的蓄水量; $WI(t)$ 为 t 时段蓄水水库的区间来水量; $WD(t)$ 表示 t 时段需调水补偿的缺水量; $R2(t)$ 表示 t 时段蓄水水库的可能多放水量; $WQ(t)$ 同前。

4. 蓄水水库库容约束

$$VB(t+1) \leq V2 \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (20)$$

式中, 各符号意义同前。

5. 输水工程的过水能力约束

$$WQ(t) \leq \alpha \cdot QMAX \quad T = 1, 2, \dots, T \quad (21)$$

式中: $WQ(t)$ 同前; α 为流量转换为水量的系数; $QMAX$ 为输水工程的设计过水能力, 求解中通过试算确定。

5.2 跨流域调水工程系统规划模型求解

5.1 所建立的模型是一个线性规划模型, 可用线性规划的求解方法求解。但在约束条件中, 输水工程的设计过水能力是待定的, 只有在其确定后方能求得最优解。因此, 要专门研究这个模型的求解过程。通过分析和实际应用得到该模型的求解过程为: 假设一系列的输水能力, 构成一系列的线性规划模型, 从多个线性规划模型最优解中选出满足两库库容最小的解作为最后规划成果, 与其相应的设计流量作为最优设计引水流量。设计流量的假设值可由缺水流域各时段缺水所需补给的最小流量, 通过适当的步长, 增加到被调水流域各余水时段中最大可供引用流量。

6 结语

对黄河上游的湟水及大通河流域所构成的跨流域水资源系统, 选用 2000 年作为规划水平年进行模型的实例验证。结果表明: 本文所建立的模型结构灵活, 模型通用, 求解方便, 成果可靠。

参 考 文 献

- 1 苏锡祺. 综合利用水库优化调度的模拟模型. 水能技术经济, 1987, (3).
- 2 William W G, Yeh. Reservoir management and operations models: A State-of-the-Art Review, Water Resour. Res., 1985, 21(12), 1797-1818.
- 3 雷声隆等. 自优化模拟及其在南水北调在线工程中的应用. 水利学报, 1989, (5).