

跨流域调水工程实时优化调度模型研究^{*}

卢华友 沈佩君 邵东国 魏山忠 文 丹 吴泽宇 刘志然
(水利学院) (长江水利委员会)

摘要 研究了跨流域调水工程实时优化调度的特点、方法和步骤,建立了基于多维动态规划和模拟技术相结合的大系统分解协调实时调度模型,提出了利用水源区水库调度图控制面临时段的调水决策以考虑余留期效益的建议.以南水北调中线工程为背景进行了实例验算,成果合理,模型可行.

关键词 跨流域引水;实时;动态规划;余留期效益;中长期预报;南水北调;优化调度

中图法分类号 TV 213.4

跨流域调水工程都是涉及两个或两个以上流域和地区、输水距离长、影响范围广,包括多种水源和用户的复杂水资源系统.对于用于这类工程规划阶段的优化调度模型,国内外均有较多的研究^[1~3],提出了各种行之有效的数学模型.但是如何针对已经建成或行将兴建的调水工程,根据预报信息,建立实时优化调度模型,进行面临时段的调水决策,虽在国外已有成功之例,而国内尚处于研究探索阶段.随着我国跨流域调水工程的不断兴建及实施南水北调工程的日益临近,调水工程实时优化调度模型的研究,已成为众所关注的课题之一.

1 实时优化调度建模思路

调水工程实时优化调度的特点可以主要概括为以下两方面:

(1) 实时性.水库运行是根据面临时段初的系统状态(如蓄水位等)和该时段来、用水预报信息,通过优化调度,作出面临时段调水决策.所以,需建立具有较高精度的来用水中长期预报模型和能实时更新、校正预报信息与系统状态,及时作出面临时段决策的优化调度模型.

(2) 复杂性. a. 调水工程涉及两个或两个以上流域和地区的水资源分配,需要正确处理流域间、地区间或水源区与供水区之间因调水引起的利害冲突; b. 决策变量多,维数高,需对实际工程系统进行合理概化和寻求有效、灵活的优化调度模型和降

维技术; c. 工程的功能和目标众多,既要满足供水区内各用户的用水要求,又要兼顾社会、经济和环境的综合效益,是多目标群决策问题; d. 实时调度信息(如预报和工程实时状态)及其处理量大,具有不确定和不确知因素,需要借助专家知识,建立智能决策支持系统等.

针对上述特点,可提出如下建模思路:

(1) 模型能根据不断采集到的最新信息(如工程面临时段状态和预报来、用水数据等)迅速作出校正与实时优化决策.

(2) 模型应有较强的信息交互功能,既可将实时决策成果提供给管理者,又能随时吸取决策者管理经验,随时修正决策.

(3) 模型能在中长期调度策略指导下,进行短历时(旬、日或小时)决策.但由于当前跨流域调水工程一般受到资料条件与预测预报信息的限制,短历时预报调度,待条件具备时再进行研究.

(4) 实时调度中面临时段优化决策,需考虑余留期效益的影响.对一般水库工程调度,其决策目标较简单,余留期效益可用余留期效益函数表达.但跨流域调水工程的优化调度,不仅要求多年平均供水量最大,还要求枯水年调水量最多,因此很难建立其余留期效益函数.为此,我们提出利用水源区水库的调度图(根据多年平均调水量最大和枯水期调水量尽可能多的目标给出)作为其优化调度模型的约束条件,约束水库面临时段的放水量,借以

收稿日期: 1997-04-18

卢华友,男,博士研究生,从事水资源最优规划与管理研究.

^{*} 本文获国家教委博士点基金和长江水利委员会资助,在郭元裕教授指导下进行.

考虑余留期效益的影响.

总之, 本文提出的跨流域调水工程实时优化调度的过程是一个“预报—优化决策—实施”顺时序、逐时段不断向前递推的过程, 即首先根据预报期(如为1年36旬)的预报信息, 利用适当的优化调度模型, 求出该预报期的工程优化运行策略, 然后从这一策略中选取面临时段的决策去实施, 而舍去面临时段以后的所有决策. 待这一面临时段结束之时, 这个面临时段的实际来、用水量和该时段末的工程状态(如水库蓄水量等)均已确知. 于是在进行调水工程下一次预报期的优化策略之前, 还需根据前面几个时段的实际来用水信息, 采用相关分析等技术修正下一个面临时段的来用水预报信息, 并取上一个面临时段末的工程实际状态(如水库的实际蓄水量等)替代上一次计算求出的水库蓄水量等, 作为下一个面临时段的工程状态初值(称实时校正), 然后继续进行下一次预报期的优化调度, 求得相应的优化运行策略, 选取其中第一个时段(也即下一个面临时段)的决策去实施, 舍去其余时段的决策. 如此顺时序不断地更新和校正预报期的预报信息和工程状态, 利用优化调度模型, 就可逐时段地作出实时优化运行决策.

2 实时优化调度数学模型

跨流域调水工程的实时优化调度, 是在实时信息(系统状态和来、用水实时预报)条件下, 运用优化调度数学模型, 作出调水工程面临时段的最优运行决策. 显然, 这是一个已知来、用水和系统蓄水状

态条件下的确定性优化决策问题. 为了便于说明, 下面以南水北调中线工程为背景具体介绍实时优化调度模型的建立. 模型中有关来、用水的预报模型及其实时校正方法, 可参见文献[4].

2.1 南水北调中线工程概化网络图

南水北调中线工程包括20余座大型水库, 20余座中小型水库和大量堰坝、井泉以及渠道等输水工程, 是一个控制范围广、水源及其调节性能多样, 渠系联结复杂以及各地区、各部门用水保证率要求各异的大系统. 为建立优化调度模型, 首先本着仿真性好、便于运行管理等, 对中线工程进行合理概化如下:

- (1) 将所有供水区概化为16个子系统, 即北京、天津各1个, 河南省和河北省按地区分别概化为8个和4个, 湖北省汉江中下游和清泉沟灌区各1个.
- (2) 各子系统的大型水库, 一般不进行复合, 但对于个别子系统, 因大型水库较多, 为节省计算时间, 在不致影响调节成果前提下予以复合.
- (3) 中小型水库, 可根据其反调节和补偿两种调节类型, 分别按子系统进行复合. 拦河坝则复合到各子系统的反调节中小型水库中.
- (4) 整个系统内分散的地下水取水设施, 均以子系统为单位, 作为补偿水源.
- (5) 忽略输水干渠调蓄作用和输水滞时因素. 输水干渠与各蓄水设施和各供水片的联结, 可作如图1所示的概化.

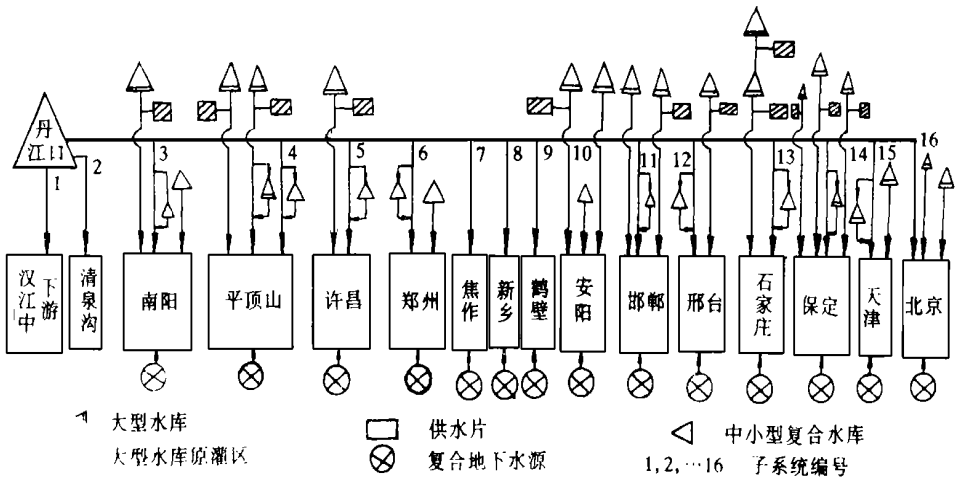


图1 南水北调中线工程概化网络图

2.2 中线工程实时优化调度大系统分解协调模型

中线工程实时优化调度建模的原则与前述一般跨流域调水工程的建模是一致的. 需要强调的是: 针对中线工程这一大型复杂跨流域调水工程, 所建模型, 应能适应工程运行管理集中控制与分散控制相结合的模式, 满足降维和快速、灵活地作出实时优化决策的要求. 对此, 建立了大系统分解协

调模型. 这一模型分为 2 层(见图 2), 第 1 层为 16 个子系统, 主要进行优化调度; 第 2 层为整个中线工程的协调层. 第 1 层与第 2 层之间的协调变量则为丹江口水库各时段调给各子系统的水量. 下面分别介绍子系统的实时优化调度模型和整个系统的协调模型.

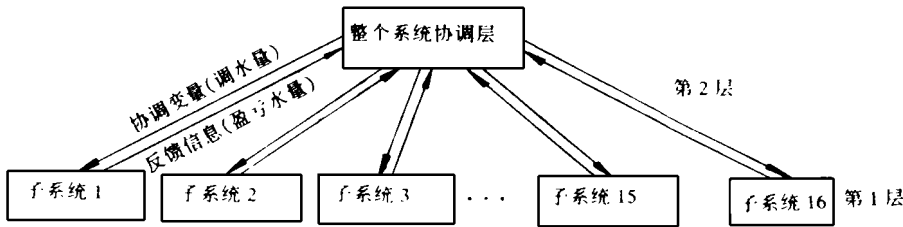


图 2 实时优化调度大系统分解协调模型结构示意图

2.2.1 子系统多维动态规划模型(第 1 层优化)

由图 1 可见, 中线工程的子系统可归纳为 4 类: **a.** 无调蓄子系统, 如子系统 7, 8, 9; **b.** 2 库调蓄子系统, 如子系统 5, 6, 12, 15, 16; **c.** 3 库调蓄子系统, 如子系统 3, 10, 11, 13; **d.** 4 库调蓄子系统, 如子系统 4, 14. 另外, 汉江中下游和清泉沟引水 2 子系统, 在整个系统调度时, 只提出调水要求, 不要求进行子系统的优化调度计算. 因此, 除上述不须进行调蓄计算的子系统外, 其余均可建立通用的多维动态规划实时优化调度模型分别进行调度, 模型描述如下:

- (1) 阶段变量. 以时段(旬)划分阶段, 时段序号 I 为阶段变量, $I = 1, 2, \dots, T$, 如计算时间为 1 年, $T = 36$.
- (2) 决策变量. 以各时段、各水库的放水量 $DN(I, J)$ 为决策变量; J 为水库序号, $J = 1, 2, \dots, M$, M 为子系统内水库总数.
- (3) 状态变量. 以各水库各时段初的蓄水容积 $V(I, J)$ 为状态变量.
- (4) 系统方程. 反调节水库和补偿调节水库的系统方程分别为

$$\begin{aligned} DN(I, J) &= V(I, J) + R(I, J) + \\ &RR(I, J) + TR(I, J) - V(I + 1, J), \quad (1) \\ DN(I, J) &= V(I, J) + R(I, J) - V(I + 1, J), \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $DN(I, J)$ 、 $R(I, J)$ 分别为时段 I 内水库 J 的放水量和入库净水量(已扣去水库损失), 入库净水量由预报给出; $V(I, J)$ 、 $V(I + 1, J)$ 分别为水库 J 时段 I 的初和末库容; $RR(I, J)$ 、 $TR(I, J)$ 分

别为时段 I 内上游水库和引汉水量(即调水量)对水库 J 的充库水量.

(5) 目标函数. 对各子系统而言, 通过引汉水量的补给, 要求子系统的供水量和蓄水量最大、亏水量和弃水量最小. 故子系统目标函数可表达为

$$\begin{aligned} \min & \left\{ \sum_{I=1}^T [A(I) + K_1 B(I) + \right. \\ & K_2 C(I) + K_3 D(I)] \}, \\ \text{当 } & \sum_{J=1}^M DN(I, J) \geq DC(I), \\ \text{则 } & A(I) = \sum_{J=1}^M DN(I, J) - DC(I), \\ & B(I) = 0; \\ \text{当 } & \sum_{J=1}^M DN(I, J) < DC(I), \\ \text{则 } & A(I) = 0, B(I) = DC(I) - \sum_{J=1}^M DN(I, J); \\ \text{当 } & DN(I, 1) < DR_1(I), \\ & \text{且 } V(I + 1, 1) > V_{\min}(1), \\ \text{则 } & C(I) = DR_1(I) - DN(I, 1), \\ & \text{否则 } C(I) = 0; \\ \text{当 } & DN(I, 2) < DR_2(I), \\ & \text{且 } V(I + 1, 2) > V_{\min}(2), \\ \text{则 } & D(I) = DR_2(I) - DN(I, 2), \\ & \text{否则 } D(I) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $A(I)$ 、 $B(I)$ 分别为 I 时段子系统总弃水量和总亏水量; $DC(I)$ 为 I 时段子系统经引汉水量

(即调水量) 补给后的需水量; $DR_1(I)$ 、 $DR_2(I)$ 分别为 I 时段子系统内高库 1 和高库 2(即高于输水干渠的补偿调节水库) 灌区的需水量; $C(I)$ 、 $D(I)$ 分别为 I 时段高库 1 和高库 2 灌区的亏水量; $V_{min}(1)$ 、 $V_{min}(2)$ 分别为高库 1 和高库 2 的死库容; K_1 、 K_2 、 K_3 为罚系数, 由试算确定. 其中 $DC(I) = DW(I) - TW_0(I)$, 式中, $DW(I)$ 为 I 时段子系统的总需水量, 由预报给出; $TW_0(I)$ 则

为 I 时段预分给子系统的调水量, 它由该时段丹江口水库的调出水量 $DW(I)$ 和各子系统的调水比例初值 $\alpha_0(n)$ 确定, 即 $TW_0(I) = \alpha_0(n) \cdot DM(I)$, 其中 $DM(I)$ 根据 I 时段丹江口水库预报来水量及其调度图确定, $\alpha_0(n)$ 是由省、市间协商分水比例结合采用层次分析法确定的省市内各地区的分水比例(见表 1), n 是子系统编号, $n = 1, 2, \dots, N$; N 为子系统总数, $N = 14$. 限于篇幅, 层次分析法从略.

表 1 中线工程内各地区调水量预分比例表

地区名称	河南省								河北省				天津	北京
	南阳	平顶山	许昌	郑州	焦作	新乡	鹤壁	安阳	邯郸	邢台	石家庄	保定		
预分比例 $\alpha_0(\%)$	4.00	10.60	3.88	7.24	3.72	3.88	4.20	2.48	4.36	3.24	14.83	13.57	12.00	12.00

(6) 递推方程. 按顺序递推算法写出递推方程为

$$f_{I+1}^*[V(I+1, J), DN(I, J)] = \min\{H[V(I+1, J), DN(I, J)] + f_I^*[V(I, J)]\}, \tag{4}$$

式中, H 为面临时段 $(I+1)$ 的目标值; f_{I+1}^* 、 f_I^* 分别为时段 $I+1$ 和时段 I 到计算起始时刻的最优目标累计值.

(7) 约束条件. 约束条件有水库库容约束、水库放水量约束、边界约束和其它约束等.

根据以上模型, 可应用多维离散微分动态规划法(MDDDP)或双状态动态规划法(BSDP)等求解.

2.2.2 整个系统协调模拟模型

考虑到中线工程的复杂性, 难于采用数学规划法进行整个系统的优化协调, 故建立协调模拟模型如下:

(1) 目标函数. 在中线工程实时优化调度中, 整个系统协调的目的是要求在丹江口水库调度图控制下, 亦即满足中线工程多年平均调水量大、特别枯水年调水量尽可能多的前提下, 使预报期内整个系统的供水量(包括调水量和系统内当地水源的供水量)最大, 写出目标函数为

$$\max\{\sum_{n=1}^N \cdot \sum_{I=1}^T W(I, n)\}. \tag{5}$$

式中, $W(I, n)$ 为子系统 n 、时段 I 的供水量, 其余符号意义同前.

(2) 模拟协调方程. 在前述子系统调度模型中, 已给出了预分给各子系统的调水量, 即协调变量初值为 $TW_0(I, n) = \alpha_0(n) DM(I)$ (对某一指

定子系统时为 $TW_0(I) = \alpha_0(n) DM(I)$). 但是这一预分给各子系统的调水量 $TW(I)$, 一般并不能恰好满足各子系统面临时段 (I) 的需水要求和充库要求, 往往会产生余水或亏水, 这就需要在整个系统内调盈补缺, 修正预分给各子系统的调水量, 即协调变量初值 $TW_0(I, n)$, 如此反复迭代, 直到使面临时段的引汉水量在各子系统之间达到合理优化分配和尽可能满足. 如果经反复协调后, 某些子系统在面临时段仍有亏水时, 则以该子系统的地下水允许可开采量补偿其亏水量. 因此, 可写出如下模拟方程:

$$TW(I, n) = TW_0(I, n) - QW(I, n) + RW(I, n) + RT(I, n), \tag{6}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \sum_{n=1}^N QW(I, n) \geq \sum_{n=1}^N RS(I, n) + \sum_{n=1}^N DD(I, n) \text{ 时,} \\ RW(I, n) = DD(I, n), \\ RT(I, n) = RS(I, n); \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \sum_{n=1}^N RS(I, n) + \sum_{n=1}^N DD(I, n) > \sum_{n=1}^N QW(I, n) \geq \sum_{n=1}^N DD(I, n) \text{ 时,} \\ RW(I, n) = DD(I, n), \\ RT(I, n) = [\sum_{n=1}^N QW(I, n) - \sum_{n=1}^N DD(I, n)] \cdot RS(I, n) / \sum_{n=1}^N RS(I, n); \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

当 $\sum_{n=1}^N QW(I, n) < \sum_{n=1}^N DD(I, n)$ 时,
则 $RW(I, n) = \frac{\sum_{n=1}^N QW(I, n)DD(I, n)}{\sum_{n=1}^N DD(I, n)}$,
 $RT(I, n) = 0$. 其中
式中, $TW_0(I, n)$ 、 $TW(I, n)$ 分别为面临时段子
系统 n 协调前后的调水量; $QW(I, n)$ 为面临时段
子系统 n 的多余调水量; $RW(I, n)$ 、 $RT(I, n)$ 分
别为面临时段用于补充子系统 n 缺供水量和对
所有子系统充库的调水量; $DD(I, n)$ 、 $RS(I, n)$ 分
别为面临时段子系统 n 的缺供水量及调节水库的
空库容.

(3) 约束条件.

a. 最大调水量约束:

$$\sum_{n=1}^N TW(I, n) \leq DM_{\max}, \tag{10}$$

式中, $DM_{\max}$ 为根据面临时段丹江口水库预报径
流量以及其调度图确定的系统最大允许调水量.

b. 总干渠各渠段过水能力约束:

$$0 \leq QC(k) \leq QC_{\max}(k), \tag{11}$$

式中, $QC(k)$ 、 $QC_{\max}(k)$ 分别为渠段 k 的过水流
量和最大允许过水能力.

c. 子系统最大引水能力约束:

$$0 \leq TW(I, n) \leq TW_{\max}(n). \tag{12}$$

d. 其他约束条件. 如优先考虑丹江口水库给汉
江中下游及清泉沟供水以及各水库库容约束等.

3 成果与分析

根据上述模型, 针对南水北调中线工程 2000

水平年的丰、中、枯三种预报年型(相应为 1958,
1987, 1966 年)进行了实时优化调度计算, 其成果
主要指标如表 2 所示. 计算资料及参数均采用长江
水利委员会中线工程论证报告(1995 年)中的数
据, 限于篇幅, 本文从略. 如以表 2 中实时优化调度
成果与常规调度成果比较, 可见实时优化调度求得
的调水量均大于常规调度的调水量, 其中枯水年型
(1966)多调 3.80 亿 m^3 , 中水年型(1987)多调 8.48
亿 m^3 , 丰水年型(1958)多调 5.15 亿 m^3 . 由上分
析, 表明本文所提出的实时优化调度模型是合理可
行的, 实时优化调度的效益是显著的.

表 2 南水北调中线工程采用不同调度
模型算得的调水量统计表 亿 m^3

项 目		枯水年型 (1966)	中水年型 (1987)	丰水年型 (1958)
实时优 化调度 调水量	陶岔口	46.51	133.52	139.42
	清泉沟	18.32	10.05	19.00
	合计	64.83	143.57	158.42
常规调 度调 水量	陶岔口	46.21	126.24	136.54
	清泉沟	14.82	8.85	16.73
	合计	61.03	135.09	153.27

参 考 文 献

1 方淑秀, 黄守信, 王孟华等. 跨流域引水工程多水库联合
供水优化调度. 水利学报, 1990(12): 1~ 8
2 沈佩君, 邵东国, 郭元裕. 跨流域调水优化规划调度混合
模拟模型研究. 系统工程学报, 1992(2): 43~ 52
3 张建云, 刘国伟, 韩亦方等. 南水北调东线工程优化调度
和实时优化调度研究. 见: 水资源大系统优化规划与优
化调度经验汇编, 1995. 110~ 112
4 卢华友, 邵东国, 郭元裕. 丹江口水库径流长期预报研
究. 武汉水利电力大学学报, 1996(6): 6~ 10

Study on Real-time Optimal Operation Models of
Interbasin Water Transfer Project

Lu Huayou Shen Peijun Shao Dongguo Wei Shanzhong Wen Dan Wu Zeyu Liu Zhiran
(College of Water Resources) (Changjiang Water Resources Commission)

Abstract This paper studies the characters, methods and steps of real-time optimal operation of interbasin
water transfer project, and sets up a decomposition-coordination model of large scale system for real-time oper-
ation, which is based on multidimensional dynamic programming and simulation technique. In order to consider
the remaining benefit, it proposes a method to control the current-period water transfer decisions by using the
optimal regulation diagram of reservoirs. As a case study of the middle route of South-To-North water trans-
fer, the calcultion results based on the model mentioned are reasonable, and the model is proved feasible.

Key words interbasin water diversion; real-time; dynamic programming; remaining benefits; mid-long-term
forecasting; South-North Water Transfer; optimal operation