

南水北调中线供水实时优化调度研究

董延军¹ 蒋云钟² 王浩² 李杰¹

(1. 珠江水利科学研究院 广州 510611; 2. 中国水利
水电科学研究院 北京 100044)

【摘要】 本文介绍了南水北调中线实时调度的理论和总体框架,提出了供水结构的划分和内涵定义。在借鉴国内流域水资源实时调度的理论和方法成果的基础上,构建了南水北调中线供水实时优化调度模型,即“宏观总控、长短相嵌、实时决策、滚动修正”的模式。通过模型的初步运用,能够满足中线供水实际运行服务需要,为南水北调中线供水实时调度提供借鉴参考。

【关键词】 南水北调中线 实时调度 供水结构 流域水资源

水资源系统的优化调度是指根据当前面临阶段的来、用水情况及未来长期的供需水规律确定调度策略,并使其调度策略既适应当前的来、用水情况,又能使其与中长期最优运行策略偏离最小^[1]。随着水资源短缺问题的日益突出,水资源系统实时调度也不单纯局限于单库或者水库群,已向流域乃至跨流域更大一级的方向发展。裴源生、赵勇等实现了基于二元水循环模式的黑河流域水资源配置方案和实时调度方案的耦合与嵌套,提出了“宏观总控、长短相嵌、实时决策、滚动修正”的方法^[2]。王光谦等人^[3]根据自适应控制原理,开发了黄河水量自适应调度模型和相应的决策支持系统,大大提高了黄河水资源调度的科技含量和调度精度,提升了水资源统一管理和水量统一调度水平,为沿黄工农业经济发展、维持河道生命流量提供科学保障。

南水北调中线属于特大型跨流域调水工程,类似这样特大型跨流域跨省市的水资源实时调度研究,目前国内还没有先例可循,本文是在借鉴国内现有的流域水资源实时调度理论成果的基础上,探讨南水北调中线供水实时优化调度模型,为中线供水实时调度提供技术支撑平台。

1 中线供水调度理论及总体框架

1.1 供水类别分析

1.1.1 供水价格机制分析

按照《南水北调中线总体规划》^[4]要求,中线供水调度采用两部制水价,即容量水价和计量水价。容量水价包括工程实施中贷款的还本付息、工程形成的固定资产折旧和基本的维护费。容量水价与用户的用水量多少没有直接联系,它只与规划中受水区认可的需调水量有关。计量水价与实际用水的多少相关联。容量水价反映了固定成本的分摊,是中线实现“保本”的前提。计量水价是变动成本的补偿,是中线供水工程实现运行的基本条件,是中线实现“微利”的保证。两部制水价的制定,实质上就是从供水机制考虑来约束用户需水量。

容量水价虽然与用户用水量没有直接联系,无论用户用不用水,都必须缴纳的费用。但从逻辑和情理上分析,用户既然缴纳了这部分费用,就要享受到这部分水量。本文研究中定义这部分水量为容量水。

计量水价与用户用水量有直接关系。用户总需水量超过容量水的那部分水,则按计量水价收取水费。本文定义这部分水量为计量水。

1.1.2 供水结构划分及内涵

由以上所述,从供水价格机制、水源区提供的水资源、供水保证率和用户对象特点等因

素出发,把中线供水划分成三类^[5-6]。

(1) I类供水:容量水。这部分水量是用户按容量水价必须付费的,换言之,这部分水量也是用户必得的水量,供需双方以合同契约的形式保证交易顺利进行,若一方违约,违约一方向另一方支付违约金。因此,I类供水在调度中应优先得到满足,保证率要求高。I类供水是企业维持生存和运行管理的最重要的支撑。

(2) II类供水:计量水。这部分水量是用户按计量水价付费,用得多就交得多,用得少就交得少。如果以合同契约的方式保证交易,违约金额应比I类供水少一些。对II类供水来说,供水保证率可相对低一些。II类供水的确定是根据受水区当地实际用水情况,综合考虑容量水、计量水及其他水源的情况后,根据生态控制的目标确定。

(3) III类供水:相机供水。在干渠供水能力允许的条件下,利用汛期弃水或剩余水量向受水区相机供水。III类供水主要从水源相机补水的条件考虑,当出现汛期弃水或剩余水量时,在满足干渠输水条件下,尽可能向受水区供水。III类供水一般用于生态环境保护。因此对保证率没有要求,水价较低甚至免费,可以视工程运行情况考虑。

1.2 中线供水总体框架

借鉴流域水资源实时调度模式,建立以“宏观总控、长短相嵌、实时决策、滚动修正”为特点的南水北调中线供水实时调度模式。其中“宏观总控”是指以长期调度方案为控制基础,保证年、月、旬(周)调度合理性;“长短相嵌”是指根据长期气象和来水预报信息制定长时段调度预案,在长期调度预案的基础上,依据短期预报信息制定短期调度方案,短期调度是以长期调度预案为嵌套条件;“实时决策”就是根据面临时段丹江口水库来水预报信息与受水区需水计划信息,并结合当前工程运行状况,做出当前时段的调度决策;“滚动修正”是根据实际已经发生的水量分配与计划分配之间的偏差对余留期分水计划进行逐时段、逐月、逐年滚动修正,直到调度期结束。供水分配流程图如图1所示。

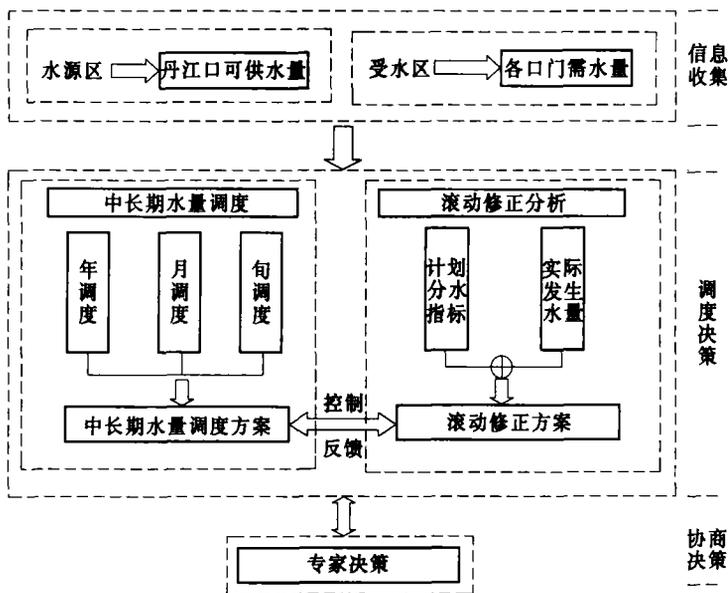


图1 南水北调中线供水总体框架

1.3 各类供水与调度的关系

从各类供水分类特性和供水结构可以得知,年调度模型需要考虑I类和II类供水,通过年调度模型计算各用户的配水量,包括容量水和计量水,以此作为各用户的年度取水指标,并以此制约供需双方的交易。由于中长期预报精度的原因和相机补水的性质,年调度中不考虑III类供

水。Ⅲ类供水在中短期调度中考虑，即在月调度模型中考虑。Ⅲ类供水只能采取计划分配的手段，调度者根据水源情况，相机向受水区输水，以达到保护和涵养受水区生态目标的需要。

2 年调度模型的构建

2.1 节点概化图

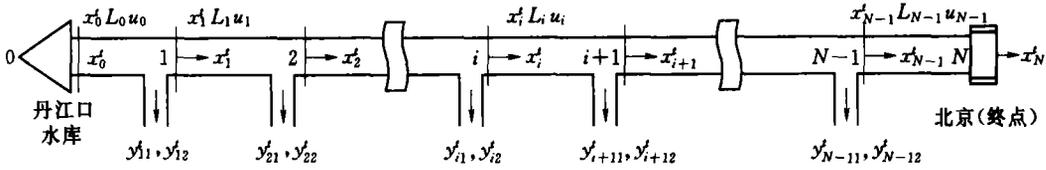


图2 年调度模型节点概化图

图2中： u_i 表示渠段（第*i*分水口门至第*i+1*分水口门）每公里水量损失率； L_i 表示公里数； x_i^t 表示第*t*个月第*i*个分水口门下游渠道断面的过流量； y_{i1}^t 表示第*t*个月第*i*个分水口门Ⅰ类供水分配量（容量水）， y_{i2}^t 表示第*t*个月第*i*个分水口门Ⅱ类供水分配量（计量水）； $x_i^t L_i u_i$ 表示渠段（第*i*分水口门至第*i+1*分水口门）渠道损失水量。

2.2 年调度多目标优化调度模型构建

2.2.1 年度分水比目标

从前面分析可知，Ⅰ类供水是容量水部分，这部分水量是用水户必须付费的，换句话说，这部分水量是用水户应得的水量，在调度当中应优先分足分够。年度分水比一般以国务院批复的文件形式颁布，为水量分配的指导性文件。分水比是一个总量控制的概念，即从年度水资源总量上各省（自治区、直辖市）要满足国务院分水比的要求，将Ⅰ类可供水量按国务院法定的分配方案分配至各用户（口门），但是每一个时段（月）不一定要满足分水比，每一个时段主要从供需差均衡考虑。于是有以下定义：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in HN} \sum_{t=1}^{12} y_{i1}^t &= Y_{HN} \quad (\text{河南年总净分水量}) \\ \sum_{i \in HB} \sum_{t=1}^{12} y_{i1}^t &= Y_{HB} \quad (\text{河北年总净分水量}) \\ \sum_{i \in TJ} \sum_{t=1}^{12} y_{i1}^t &= Y_{TJ} \quad (\text{天津年总净分水量}) \\ \sum_{i \in BJ} \sum_{t=1}^{12} y_{i1}^t &= Y_{BJ} \quad (\text{北京年总净分水量}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

各个省（市）目标都是期望供水方尽最大可能满足其Ⅰ类供水量（容量水），这显然是一个多目标极大化问题，因此采用极小极大法构建评价函数，即考虑在对各个目标来说是最不利的情况下找出最有利的解，即悲观主义（maxmin）决策准则^[7]。具体地说，对于多目标极大化模型（VMP），可以用各个目标 $f_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 中的最小值作为评价函数的函数值来构造它，即取

$$u(F) = \min_{1 \leq i \leq m} \{f_i\} \quad (2)$$

为评价函数，其中 $F = (f_1, \dots, f_m)^T$ 。通过式（2）把求解（VMP）归结为求解数值极大化问题，

$$\max_{x \in X} [f(X)] = \max_{x \in X} \min_{1 \leq i \leq m} \{f_i(X)\} \quad (3)$$

并把它的最优解作为模型（VMP）的解。这种求解方法的特点是对各目标函数作极小值选择之后，再在可行域上进行极大化，故称极小极大化法^[8]。

求解上述问题要先作极小值选择，再进行极大值运算，这在实际求解时是不方便的。为此，引进一个变量，令

$$\lambda = \min_{1 \leq i \leq m} \{f_i(X)\} \tag{4}$$

于是式 (3) 便转化为如下的增加一个变量 λ 和 m 个约束条件的数值极大化问题

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{s. t. } x \in X \\ & f_i(X) \geq \lambda, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{5}$$

数学可以证明式 (5) 与式 (3) 是等价的。由以上的分析讨论, 用于实际求解的极小极大问题式 (3) 可以转化为直接求解式 (5) 即可。

于是根据 I 类供水的特性出发, 多目标数值求解问题转化为下式:

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{s. t.} \\ & \begin{cases} \frac{Y_{HN}}{Y_{规1}} \geq \lambda \\ \frac{Y_{HB}}{Y_{规2}} \geq \lambda \\ \frac{Y_{TJ}}{Y_{规3}} \geq \lambda \\ \frac{Y_{BJ}}{Y_{规4}} \geq \lambda \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $Y_{规1}$ 、 $Y_{规2}$ 、 $Y_{规3}$ 、 $Y_{规4}$ 分别为河南、河北、天津和北京的国务院分水比例。式 (6) 体现的含义是尽量将 I 类供水公平地均匀地分配给用户 (口门)。

2.2.2 供需差均衡目标

供需差适应程度就是要使各用户 (口门) 的水资源在时间和空间上满足程度均衡, 缺失程度大致相同。同样也采用极小极大法构建评价函数, 于是有如下的多目标数值求解问题:

$$\begin{aligned} & \max \gamma \\ & \text{s. t.} \\ & \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^2 y_{1j}^t}{d_1^t} \geq \gamma \\ \frac{\sum_{j=1}^2 y_{2j}^t}{d_2^t} \geq \gamma \\ \vdots \\ \frac{\sum_{j=1}^2 y_{Nj}^t}{d_N^t} \geq \gamma \end{cases} \\ & t = 1, \dots, 12 \end{aligned} \tag{7}$$

式中: γ 为引进变量; d_i^t 为第 i 个口门第 t 需求总量。

2.2.3 约束条件

(1) 水量平衡约束。水量平衡是渠道供水的基本约束条件, 即某一断面的入流量应与下一渠段的分出流量、出流量和渠段水量损失量之和是平衡的, 用下式表示:

$$\begin{aligned} x_i^t &= x_i^t L_i u_i + \sum_{j=1}^2 y_{i+1,j}^t + x_{i+1}^t, t \leq N - 2 \\ x_{N-1}^t &= x_{N-1}^t L_{N-1} u_{N-1} + x_N^t, i = N - 1 \\ x_N^t &= \sum_{j=1}^2 y_{Nj}^t \end{aligned} \tag{8}$$

(2) 输水能力约束。输水能力主要考虑渠道输水能力约束和分水口门设计能力约束，具体来说：

$$x_i' \leq XCAP_i \tag{9}$$

式中：XCAP_i 为渠段（第 i 分水口门至第 i+1 分水口门）设计过水能力。考虑到中线供水冰期输水问题，因此渠道过水能力也会因非冰期和冰期输水的不同而发生改变，即渠道过水能力与时间因素有关。

$$\sum_{j=1}^2 y_{ij}' \leq YCAP_i \tag{10}$$

式中：YCAP_i 为第 i 分水口门的设计过水能力。

3 月调度模型构建

3.1 节点概化图

月调度要考虑启用退水闸，将Ⅲ类供水通过退水闸补给当地生态。节点概化图如图 3 所示。

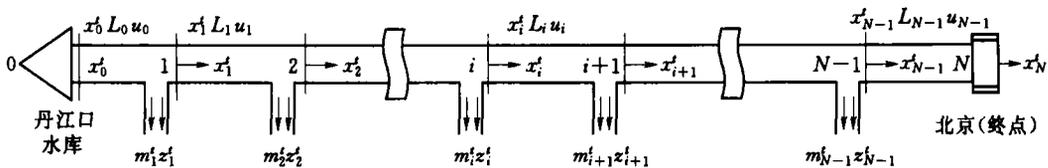


图 3 月调度模型节点概化图

图 3 中，多数参数与年调度图节点图基本相同，不同是多了 m_i' 、 z_i' 、 z_i' 表示退水闸退水量。到月调度时，没有必要区分供水类别了，因为在完成年度计划指标后，这些水都用合同制约。 m_i' 表示各个分水口门分配量。另外时间上表示的含义也不一样，年调度中表示的是月，月调度表示的是旬（周）。

3.2 月调度多目标优化调度模型构建

3.2.1 月度分水任务目标

月调度模型中，各用水户（口门）希望按照自己的要求最大量满足当前月的年度分水指标。定义公式如下（按旬）：

$$\sum_{i=1}^3 m_i' = M_i \text{ (第 } i \text{ 个分水口门月总净水量)} \tag{11}$$

根据极小极大法原理，月度分水计划的多目标问题转化为：

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & s. t \\ & \begin{cases} \frac{M_1}{my_1^T} \geq \lambda \\ \frac{M_2}{my_2^T} \geq \lambda \\ \vdots \\ \frac{M_N}{my_N^T} \geq \lambda \end{cases} \end{aligned} \tag{12}$$

式中： my_i^T 为各用户（口门）调整后的指标量。

3.2.2 供需差均衡目标

$$\begin{aligned} & \max \sum_{t=1}^3 \gamma \\ & s. t \\ & \left\{ \begin{array}{l} \frac{m_1^t + z_1^t}{d_1^t} \geq \gamma \\ \frac{m_2^t + z_2^t}{d_2^t} \geq \gamma \\ \vdots \\ \frac{m_N^t + z_N^t}{d_N^t} \geq \gamma \end{array} \right. \quad (13) \\ & t = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

3.2.3 约束条件

(1) 水量平衡约束。

$$\begin{aligned} x_i^t &= x_i^t L_i u_i + m_{i+1}^t + z_{i+1}^t + x_{i+1}^t, i \leq N-2 \\ x_{N-1}^t &= x_{N-1}^t L_{N-1} u_{N-1} + x_N^t, i = N-1 \end{aligned} \quad (14)$$

(2) 输水能力约束。与年调度一样，输水能力也要考虑渠道输水能力和分水口门能力，约束形式同式(9)和式(10)。因为考虑有为生态相机补水的Ⅲ类供水，因此在式(9)中 $XCAP_i^t$ 可以放宽到渠道加大输水能力。同时也要满足下式：

$$z_i^t \leq ZCAP_i \quad (15)$$

式中： $ZCAP_i$ 为第 i 个口门附近退水闸的设计过水能力。

4 年、月调度相嵌耦合逻辑关系

前面介绍了中长期水量年、月调度决策模型的原理和基本框架。由于在实时调度过程中，调度是一个“前向滚动”式的决策过程，需要不同尺度（如长、中、短期）来、用水预报信息，利用中、长期水量调度决策模型（年、月），求出相应预报信息下的系统运行策略。在实施面临阶段的决策过程中，用水户可以根据当地受水区水文情势的预报情况，在总量控制原则下，灵活进行调整用水指标，形成“预报—决策—实施”不断向前卷动的递进工程，从而更好地满足实时调度的需要，达到提高供水效益和工程管理的目的。修正模型根据当前面临阶段实际发生的结果，对余留期调度计划进行修正，修正的原则按照总控原则进行。

月调度中每个用户（口门）的计划分配量为 $\sum_{t=1}^3 m_i^t$ 。根据月度水量统计可以得知每旬实际发生的量，在此定义为 $\sum_{t=1}^3 pm_i^t$ ，那么面临阶段第 T 月各个用户（口门）计划量与实际发生量的偏差为：

$$\epsilon_i^T = \sum_{t=1}^3 m_i^t - \sum_{t=1}^3 pm_i^t \quad (16)$$

那么由年度总量控制原则和水量平行放缩原则，对余留期逐月计划用水指标做出修正。修正的总量为：

$$\sigma_i^T = \epsilon_i^T + \delta_i^T \quad (17)$$

式中： δ_i^T 表示各个用户的用水计划调整值，可正可负，也可为 0。于是各口门的修正公式为：

$$\begin{aligned} my_i^{T+1} &= \sum_{j=1}^2 y_{ij}^{T+1} + \frac{\sigma_i^T}{12-T} \\ my_i^{T+2} &= \sum_{j=1}^2 y_{ij}^{T+2} + \frac{\sigma_i^T}{12-T} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (18)$$

$$my_i^{12} = \sum_{j=1}^2 y_{ij}^{12} + \frac{\sigma_i^T}{12-T}$$

(i = 1, 2, \dots, N)

上式各变量的含义同上。

5 模型求解

从模型组成来看,模型求解属于多目标决问题。多目标决策问题的特点是各目标往往存在相互矛盾、彼此竞争的关系,这种关系表现在必须以牺牲其他目标的利益为条件,来获得某一目标的改善。因此侧重不同目标和不同利益的考虑,就会形成不同的备选方案集。备选方案的形成实质上就是多目标非劣解的形成。

权重法是求解多目标问题较为流行的方法。权重法的基本思想是对各个目标值分别赋予权重系数,然后进行累加,就可将多目标向量问题转化为标量问题即单目标问题。通过赋予一组权重系数将目标函数标量后,可求出一个对应的非劣解,如此,通过系统地、有一定规则地调整权重系数的比值,则可相应地生成一系列的非劣解。假如调整权重系数时采用的摄动步长适当加细,则可使生成的非劣解接近于全集。在实际应用中,由于问题复杂,难以且没有必要找出问题的全部非劣解,常常是通过一定方式给出部分非劣解组成备选解集来供决策者优选决策^[9]。

本文中介绍的年调度模型涉及变量 3209 个,约束条件 5835 个;月调度模型变量 975 个,约束条件 1946 个,都属于超大规模线性规划。Lingo8.0 (Extended) 版本对约束条件、变量不受限制,而且相比 Gams (Dos 版) 来说,增加了可视化功能,便于 Windows 平台下使用、分析和计算。本文选用 Lingo8.0 (Extended) 作为模型求解的工具^[10]。

6 结论

本文以南水北调中线为基础,建立了跨流域水资源实时优化调度模型。南水北调实时优化调度模型不同于水资源配置模型,是立足于中线供水运行调度生产实际,研究中线供水水量的合理分配问题。本文借鉴国内现有的流域水资源实时调度成果,建立了中线供水的实时调度模式,即“宏观总控、长短相嵌、实时决策、滚动决策”,给出了模型的构建详细过程。

需要指出的是,实时优化调度模型应包括预报模型、修正模型和优化调度模型三部分,本文重点介绍的是后面两部分。

以本文介绍的模型理论和方法为指导,笔者还进行了中线干线水量调度方案编制与实例分析^[11],通过实例验证,充分验证了模型的可行性和正确性,满足中线供水实时调度的需要。

参 考 文 献

- [1] 邵东国. 多目标水资源系统自化模拟实时调度模型研究 [J]. 系统学报, 1998, 16 (5): 19-24.
- [2] 裴源生, 赵勇, 王建华. 流域水资源实时调度研究 [J]. 水科学进展, 2006, 3 (17): 395-401.
- [3] 蔡治国, 王光谦, 魏加华. 黄河流域水量调度的自校正控制模型. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 12 (44): 1660-1663.
- [4] 水利部长江水利委员会. 南水北调中线工程规划 [R], 2001.
- [5] 董延军, 蒋云钟, 王浩, 等. 南水北调中线需求侧供水负荷管理调度初探 [J]. 水利水电技术, 2007, 3 (38): 65-68.
- [6] 蒋云钟, 赵红莉, 董延军, 等. 南水北调中线水资源调度关键技术研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2007, 4 (5): 1-5.
- [7] 钱颂迪. 运筹学. 北京: 清华大学出版社 [M], 1990.
- [8] 胡毓达. 实用多目标最优化. 上海: 上海科学技术出版社 [M], 1990.
- [9] 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用, 华中理工大学, 1990, 11.
- [10] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO. 清华大学, 2005, 7.
- [11] 董延军. 南水北调中线供水调度理论与应用研究 [R]. 中国水利水电科学研究院博士学位论文, 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007.