

自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用

雷声隆 覃强荣 郭元裕

(武汉水利电力学院)

宁远 张静 李燕

(淮河水利委员会规划院)

提 要

本文在常规的模拟技术基础上,增加在线辨识、控制等环节、对模拟过程施行自适应目标控制,提出了一种多水库联合最优调度的自优化模拟模型。并针对南水北调东线一期工程五湖泊大型复杂系统,研究了时、空顺序不同的模拟过程的功能特点,采用顺、逆时序和顺、逆流相结合的模拟控制技术以及交替放松约束并随后收紧的措施,处理决策控制的后效性,提出了“逐次收紧约束自适应目标控制模拟技术”,在实践中成功地实现了模拟模型自行优化的目的。在实例计算中,解决了五个湖泊联合运行的优化调度问题,证明了自优化模拟模型具有仿真性好、收敛速度快、计算时间仅随水库数目线性增加的优点,开辟了一条多水库系统最优调度的新途径。

一、前 言

在多水库的水资源系统分析中,特别在系统的管理运行中,因为系统本身的复杂性,目标间不可公度性,使得一般的数学规划方法的应用受到很大限制,而模拟技术却日益广泛地被采用来处理大型、复杂系统的调度问题,取得可喜的进展。最早的模拟技术应用,开始于1953年,由美国陆军工程师兵团进行了密苏里流域的六个水库的联合运行研究^[1]。60—70年代比较著名的模拟模型有HEC-3、HEC-5、SIM1、SIM2等,用于兴利、防洪的工程规划、管理运行^[2]。当模拟技术应用于优化课题时,一般根据给定的输入条件(包括决策变量),求得相应的输出响应函数,然后通过目标寻优,实现优化。值得注意的是在SIM模型中,包括一个由线性规划完成的最小费用优化子程序,将模拟与数学规划法结合了起来。在后来的模拟技术研究及应用中,或者模拟技术辅助于数学规划,弥补后者仿真性差的缺点;或者模拟技术辅以数学规划法,协助模拟方法进行目标优选。其中,O.T.Sigvaldason 1976年的工作^[3]有较大的意义,他成功地

* 参加本文研究的还有刘光耀、张勇等。

将一个优化的子模型插在模拟模型中,并在惩罚系数的控制下,进行最优运行中不同运行策略的模拟。在W.W.Yeh的综述文献中^[4],曾推崇这种方法,并第一次提出人们期望模拟模型具有一些自优化的功能(Capability of Selfoptimization),以减少计算量,获得最优或近似优化的结果。但是,模拟本身能否自行优化,至今仍然是系统分析科学研究的前沿课题。本文从实际问题出发,论述了模拟模型可以实现自行优化,并提出了一套模拟自优化技术。在南水北调东线一期工程优化调度应用中,自优化模拟模型在仿真性能、计算速度及优化精度上,都获得了十分满意的结果。

二、基本原理及数学模型

(一) 基本原理

一般模拟技术,可通过模拟获得对某一输入的输出响应,其过程可用图1所示的控制系统表示。对水库系统来说,它是在来、用水序列已知,给定初始状态,按一定规则形成的控制线约束下的水库运行过程。

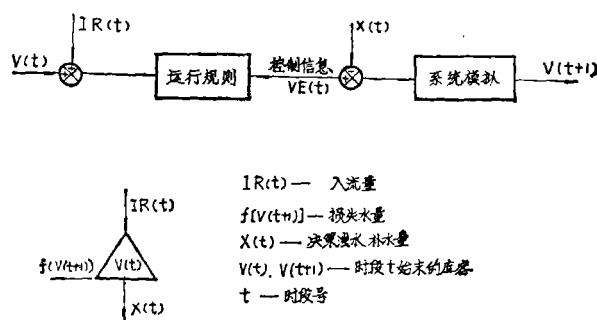


图1 一般模拟系统图

模拟运行方程: $V(t+1) = V(t) + IR(t) - X(t) - f(V(t+1))$ 。

模拟控制线 $VE(t)$ 且 $V(t+1) \in VE(t)$ 。

很显然,这种系统由于其输入序列是不能改变和控制的,其输出响应仅是一种自然响应,不具备使输出响应趋于最优目标的功能,属开环控制方式。这时,只能通过建立响应曲面 $V(t, X(t))$, 然后进行最优搜寻,才能获得近似的最优决策及最优目标值。对于状态、决策维数稍多的被控制系统,响应面的获得及最优搜寻过程都很复杂,需很多的计算机时间。

要实现控制模拟,必须改开环控制为闭环(或负反馈)控制方式,使输出结果反馈到输入端,并生成对系统进行控制的反馈控制量,自动形成模拟控制线,引导模拟结果趋向最优目标值。这种模拟系统可以图2所示的控制方式来描述。它类似于自适应控制系统。对于水库系统来说,由于控制的最优目标值并不知道,这就需要一个具有自动辨识、判断、修正功能的类似“在线辨识”的自适应环节,以根据输出结果,在线识别模拟控制线的导优性能,并通过控制环节,产生引导系统模拟进一步优化的控制修正量,综合系统运行规则及其他约束形成能导致模拟结果进一步优化的模拟控制线,以模拟控制线逐渐收敛于最优控制线的时候,模拟结果趋向最优结果,这是一种自适应的目标控制过程。所以,自优化模拟模型,是根据自适应控制原理,在给定初始控制线的一般模拟模型中,嵌入一个在线辨识环节,自动生成寻优模拟控制线,引导模拟逐渐优化的模

拟迭代过程。这是一个多环反馈控制过程。

(二) 系统的动态方程

在多水库系统的运行中, 主要是控制水库有效库容的蓄、泄, 水库水位的变化 $V(t)$ 完全描述了水库运行的状态。对于 M 个水库构成的系统, 系统的状态由 M 维向量型状态方程表示。为简明起见, 这里仅就单一水库写出其状态空间表示式。

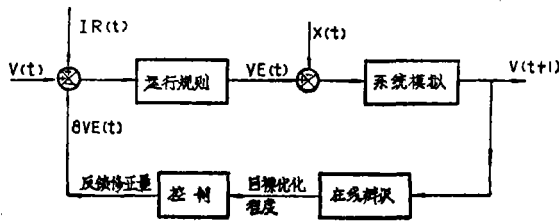
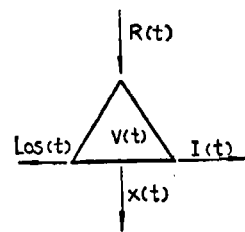


图 2 自适应控制模拟系统图



式中:

$$A=c_1 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, \quad B=c_1 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$X_0 = \begin{pmatrix} R(t) \\ -I(t) \\ X(t) \end{pmatrix}.$$

由于矩阵 A 的特征根 λ_i 成立: $|\lambda_i| = c_1 < 1$. 所以, 式(3)、(4)所描述的水库系统是稳定的, 对系统的控制具有收敛的结果. 还可以判断系统是可控的, 即可以通过决策变量 $X(t)$, 控制系统达到期望的某种状态, 以取得最优的效果.

动态方程(3)、(4)可按递推法求解, 其递推公式为:

$$\begin{cases} Z_1(t+1) = c_1(Z_1(t) + c_1 c_1^{-1} X_0(t)), \\ Z_1(t+1) = V(t+1). \end{cases}$$

$$\text{或: } V(t+1) = c_1(V(t) + c_1 c_1^{-1} X_0(t)), \quad (5)$$

它是模拟模型状态递推的基本方程.

(三) 各阶段决策变量最优控制准则

要使模拟实现自适应目标控制, 收敛于最优目标, 关键在于设计系统的在线辨识和控制线的自动生成环节. 不同的系统目标及特性, 应该有不同的辨识环节. 本文主要针对我国南水北调东线工程湖泊串联抽水北送系统设计在线辨识及控制线生成环节, 具有一定的普遍性.

南水北调东线工程单一湖泊(水库)的数学模拟模型可简要写成:

模拟运行方程: 动态方程式(3)、(4);

模拟控制线: $VE\{t+1\} = VE\{t\} + \delta VE(V(t), X(t))$;

目标函数: $J(x) = \min \left\{ \sum_{t=0}^N F(X(t), V(t+1), t) \right\}$;

约束于: $X(t) \in XE(t), V(t+1) \in VE(t+1)$,

式中: $F(X(t), V(t+1), t)$ ——系尽量提高供水保证程度条件下的抽水费用, 目标 J 为抽水总费用最小. 在扬程变化不大的情况下, 可近似地取抽水总量最小. 这与弃水量最小是等价的; VE 、 XE ——即系统可行状态及可行决策域. 上角标(k)表示第 k 次迭代结果; δVE ——反馈修正量.

这里重要的是实现模拟控制线向最优控制线的自动收敛, 这可在执行优化准则过程中完成. 在南水北调工程优化调度中, 根据抽水总量最小, 尽量减小缺水损失的目标, 应按以下准则控制.

1. 极限最小弃水准则 湖泊的决策变量为

$$X(t) = PO(t) - PI(t) + DO(t) - DI(t) + DL(t) - DE(t), \quad (7)$$

式中: $PI(t)$, $PO(t)$ ——由泵站抽入及抽出湖泊的水量; $DI(t)$, $DO(t)$ ——自流泄入及泄出湖泊的水量; $DL(t)$ ——废弃的水量; $DE(t)$ ——供水不足的缺水量见图4所示.

很显然,在实际调控过程中, $DE(t)$ 及 $DL(t)$ 可以等于零,但不可能同时等于零.在 $DE(t)=0$ 时,有: $DL(t)=\max\{0, V(t+1)-VH(t+1)\}$, 式中 $VH(t+1)$ 为湖泊最大可能蓄水量.

事实上,上式成立时,有 $DL(t)=0$, 即湖泊不产生废泄; $V(t+1)-VH(t+1)\leq 0$. 利用式(5)有:

$$V(t) \leq \frac{c_2}{c_1} (c_2^{-1} VH(t+1) - RI(t) - DI(t) + DO(t)) + \frac{c_2}{c_1} (PO(t) - PI(t)), \quad (8)$$

式中第一项 $VH(t+1)$ 、 $RI(t)$ 为给定量, DI 、 DO 是应变量,不是真正的决策部分,要使上式成立,就要尽可能按下式进行决策控制:

$$PO(t) = PQO(t), \quad PI(t) = 0. \quad (9)$$

即上游湖泊按最大抽水能力 $PQO(t)$ 自调控湖泊抽出,而调控湖泊尽可能不抽水入湖,可以获得极限最小弃水量.

2. 极限最小缺水准则 在湖泊供水不足时,弃水量 $DL(t)=0$, 此时 $DE(t)=\max\{0, VL(t+1)-V(t+1)\}$, 式中 $VL(t+1)$ ——湖泊允许最小蓄水量.

事实上,在 $VL(t+1)-V(t+1)\leq 0$ 时,成立 $DE(t)=0$. 利用式(5)有:

$$V(t) \geq \frac{c_2}{c_1} (c_2^{-1} VL(t) - RI(t) - DI(t) + DO(t)) + \frac{c_2}{c_1} (PO(t) - PI(t)). \quad (10)$$

要使上式成立,要尽可能按下式控制,即

$$PO(t) = 0, \quad PI(t) = PQI(t). \quad (11)$$

即上游湖泊不从调控湖泊抽出,调控湖泊按最大抽水能力 $PQI(t)$ 抽入,可以获得极限最小缺水量.

3. 单一湖泊实际最优控制准则 事实上,在调控过程中,为使缺水和弃水最小,式(8)、(10)必须取等式,即有逆日历时序模拟水量平衡方程:

$$V(t) = \frac{c_2}{c_1} (c_2^{-1} V(t+1) + RI(t) - DI(t) + DO(t) + PO(t) - PI(t)) - DL(t) + DE(t), \quad (12)$$

或顺日历时序模拟水量平衡方程:

$$V(t+1) = C_1 V(t) + C_2 (RI(t) + DI(t) - DO(t) - PO(t) + PI(t)) + DL(t) - DE(t). \quad (13)$$

由于式(12)、(13)与式(8)、(10)并不矛盾,所以式(9)及(11)所表示的控制准则仍然成立.仅由于湖泊本身的调蓄库容有限,不可避免的弃水及缺水总是存在的.联系到湖泊群的调度,实际湖泊的最优控制准则应修改为:

弃水最小控制准则:

$PO(t)$ = 上游湖泊需要的抽出过程;

$$PI(t) = 0. \quad (9')$$

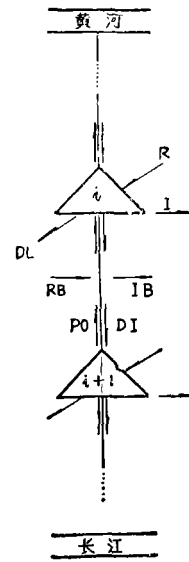


图4 湖泊群概化图

缺水最小控制准则:

$PI(t)$ = 调控湖泊需要抽入过程,

$PO(t)$ = 调控湖泊允许抽出过程. (11')

上述准则是在线辨识环节设计的基础, 在给定初始模拟控制线的基础上, 遵循最优控制准则按单湖泊逐一进行控制模拟, 可获得各湖泊的最小弃水、缺水过程和相应的湖泊蓄水状态. 由于湖泊之间的相互影响, 在进行多个湖泊的联合调控时, 对单一湖泊的调控结果进行修正, 获得相应于初始控制线的输出结果. 这种输出要反馈到模拟控制线的输入端, 并对控制线进行改进, 作为下次模拟的依据. 这是一个迭代和逐步优化的模拟过程. 其中根据最优化准则, 通过对输出结果的辨识、判断, 产生反馈控制量, 自动生成改进模拟控制线的部分, 就是在线辨识控制环节, 是自优化模拟的关键部分. 应该指出, 上述最优决策准则是针对某一时段而言的, 要保证系统在长系列运行中达到整体最优, 还必须对各时段初系统内各水库的蓄水量施行最优控制, 并协调各水库之间不同时段的水量补偿调节关系. 这将在下节自优化模拟技术中着重介绍.

三、自优化模拟技术

自优化模拟技术必须通过模拟本身的功能, 实现优化的目标. 它完全不同于模拟技术和数学规划结合的方法, 后者是利用数学规划法进行寻优. 我们利用不同顺序(时间、空间上)模拟的特点设计出在线辨识环节. 另外, 一般模拟技术不易处理决策控制的后效性影响, 我们采用交替放松约束、尔后收紧的措施, 有效地消除后效性影响, 从而建立了“逐次收紧约束的自适应目标控制模拟技术”.

(一) 逆、顺时序模拟及其特点

本文定义按时历年顺序进行调控的模拟为顺时序模拟, 而逆时历顺序的称为逆时序模拟.

逆时序模拟的水量平衡方程是式(12), 已知时段末的湖泊库容, 经决策控制后, 可确定时段初的库容. 当时段初库容达到最大库容时, 说明本时段后将出现供水不足, 需要抽水补给或从上游放水补给或产生缺水. 这一时刻是采取补水或缺水等决策的最早时间. 当时段初库容达到死库容时, 则将出现不可避免的泄水, 也是采取泄水决策的最早时间.

逆时序模拟按最优控制准则式(9)进行. 见示意图5实线部分, 可以得到湖泊蓄水过程 $\bar{V}(t)$ 及最小泄水过程 $\overline{DL}(t)$. 具有最早蓄水、最早泄水的特点, 指示进行决策控制的最早时间, 并提供各水库最适宜的预蓄水量过程.

顺时序模拟的水量平衡方程为式(13), 按最优准则式(10)进行, 并遵循逆时序模拟的结果, 即使时段末水位及时达到逆模拟的湖泊蓄水库容, 可获得湖泊蓄水过程 $\underline{V}(t+1)$ 及泄水过程 $\underline{DL}(t)$.

很明显, 由于成立 $\underline{V}(t) = \bar{V}(t)$ 的时间不同, 蓄水过程 $\underline{V}(t+1)$ 不一样. 若在最后时间使上式成立, 可以获得泄水最晚, 或抽水补给最晚的蓄水过程. 如图5中虚线所示.

逆时序模拟(最早泄水、最早抽水补给)和顺时序模拟(最晚泄水、最晚抽水)这两条蓄水过程, 其泄水和抽水都是必要的, 不能相互利用, 两条蓄水线具有同样的最优效果, 即保证在缺水最小时, 抽水 and 弃水最小, 其间形成一个最优决策域. 正是这一最优

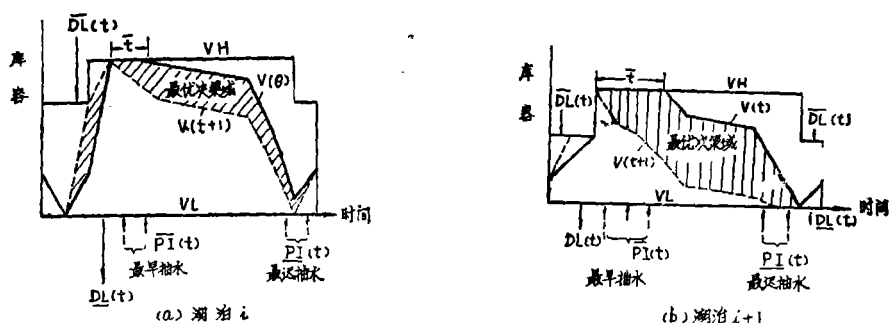


图 5 逆、顺时序模拟

决策域的存在, 提供了上、下游湖泊进行最优耦合的条件. 在顺时序模拟过程中, 选择不同的蓄水达到逆时序蓄水状态的时间, 可使下游湖泊充分利用上游湖泊弃水, 减少抽水补给, 或错开上、下游湖泊抽水补给时间, 节约抽水装机或减少因抽水不及时发生的缺水量.

(二) 顺、逆流模拟及其特点

本文定义按水流重力流向从最上流湖泊向下游湖泊逐一模拟耦合的湖泊群模拟技术为顺流向模拟, 而逆重力流向的为逆流模拟.

一次顺流向模拟, 对每一湖泊包括逆、顺时序两次模拟及一次顺流向的湖泊间协调过程. 它具有下述特点:

(1) 放松调控湖泊抽水量的约束. 即抽入水量仅由调控湖泊需要决定, 只受给定模拟控制线的限制, 从而消除了控制决策的后效性.

(2) 具有当时最优的特点. 即在给定模拟控制线限制下, 达到了缺水量、抽水量和弃水最小的目标.

(3) 顺流向协调耦合, 得到各湖泊的下泄水量过程 $DL(t)$, 这是决策控制的反馈修正量.

逆流模拟也包括对每一湖泊实行逆、顺时序两次模拟及逆流方向的湖泊耦合模拟过程, 具有下列特点:

(1) 将决策控制得到的反馈修正量, 反馈到输入端与原输入量进行叠加. 即各湖泊的天然来水量加上各湖上游的泄水量, 构成新的湖泊入流量.

(2) 收紧全部约束条件. 即调控湖泊的抽入量要受下游湖泊允许抽出的控制.

(3) 进行逆流方向的湖泊耦合, 建立新的模拟控制线.

所以, 逆流模拟过程, 即在线辨识和新的模拟控制线自动生成的过程. 每次生成的控制线综合了前次模拟过程的优化的结果, 具有当时最优的性质, 随着模拟迭代的进行, 控制线逐渐收敛于最优控制线, 模拟被引导到自行优化的目标, 实现对系统长系列运行总体最优控制, 并获得模拟自优化的结果.

很显然, 对于不同的研究对象, 会有不同的模拟自优化技术, 即使对同样的对象, 具体优化技术也可能不一样. 这里存在广阔的研究内容. 但模拟能够实现自行优化, 是可以肯定的.

四、应用实例

南水北调东线工程是一项解决我国北方地区缺水最现实、有利的战略性工程。它的第一期工程自长江下游扬州附近引水，逐级抽水北调直至黄河，第二期工程过黄河送水至天津，全长1200km。第一期工程在长江抽水流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ ，经过五个湖泊，13个抽水梯级，共有泵站25座，总扬程64m，沿途灌溉面积2139万亩，包括沿线城市生活、工矿、企业、航运养殖等用水，年平均总供水量为169.4亿 m^3 ，其中抽取长江水63亿 m^3 （规划值）。本文主要针对第一期工程进行优化调度，以下简称为“南水北调工程”（图6）。

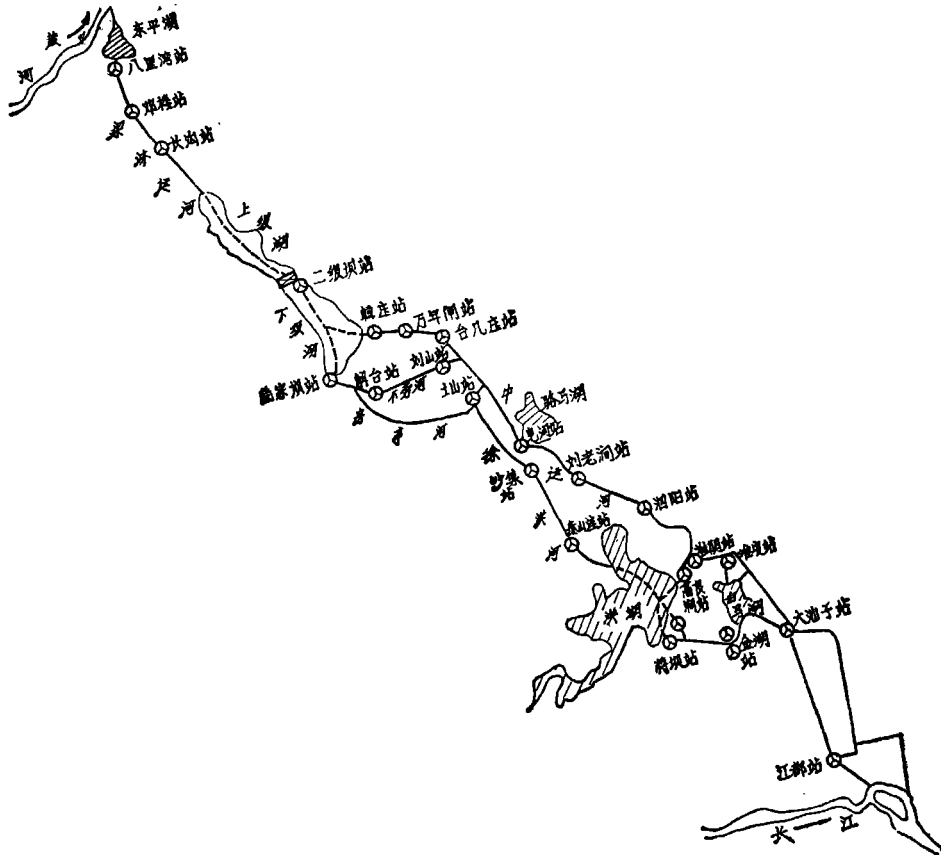


图6 南水北调东线一期工程示意图

该工程是一项大型跨流域、跨地区、多目标的复杂系统，今后如何进行科学的管理，实现工程效益，不仅是工程建成后亟待解决的问题，而且系统的合理管理运行方案，在工程建设阶段也有十分重要的意义。进行系统优化调度的研究的目的，是提出系统在长期运行调度和日常运行调度中的调度控制线及调度规则，以达到充分利用当地径流，合理调控湖泊蓄泄，减少抽水耗能，实现科学管理，最大限度地发挥工程效益。

南水北调工程的优化调度,是一个多湖泊、多泵站、多决策、多层次的决策问题,无论在模型建立和求解方法上,都是一个极其复杂的问题。其复杂性主要表现在实际系统复杂,模型维数多,用一般数学规划法模型,仿真性差,模型求解计算时间极长,又不便于应用。我们采用自优化模拟模型和逐次收紧约束的自适性目标控制模拟技术,很好地解决了这一复杂大型系统的优化调度问题。

(一) 工程简化及概化图

在建立优化调度模型时,对原型系统进行了必要的简化,以保留原型的主要结构、机能,简去一些次要影响因素,包括:(1)突出五个湖泊本身调节径流的能力和湖泊之间的水量调配和补偿作用,忽略了输水河网的调蓄功能和输水滞后影响;(2)突出了系统抽水补给性能,忽略了扬程变化及抽水站效率变化等环节的影响;(3)以湖泊运行为核心,将湖泊之间的区间复杂状况简化为单一河道联系,区间泵站复合到湖泊出口、入口处;(4)系统的随机性主要表现为来、用水的不确定性。由于历史系列较长(32年)、且代表性较好,系统的随机性将以长系列确定性模拟操作的统计分析所取代;(5)多目标问题拟转化为单目标,以抽水费用最小作为系统的主要目标,在此基础上,同时争取缺水最小的结果。其他目标转化为约束条件。

这样,原型系统被转换成下列系统概化图(见图4)。这种简化保持了系统的主要特征,被忽略的部分,经验证,不会引起较大的误差,模型具有较好的仿真性能。

(二) 数学模型

南水北调工程自优化模型包括类似一般的模拟模型部分及在线辨识反馈控制部分。

1. 目标函数 系总抽水量最小

$$J(x) = \min_{x \in xE} \left\{ \sum_{t=1}^{N_0} \left(\sum_{i=1}^5 PI(t,i) + \sum_{i=1}^6 PO(t,i) \right) \right\}.$$

式中: i ——湖泊数, $i=6$ 指工程首端长江; t, N_0 ——时段(旬)及调度年限内总时段数; x, xE ——运行控制决策变量(各湖泊抽泄过程)和可行决策集。

2. 约束条件

(1) 目标转换约束

① 供水保证率约束

$$P\{SP(t,i) \geq (I(t,i) + IB(t,i))\} \geq P_i, \quad i=1,2,3,4,5$$

式中: $SP(t,i)$ ——系统实际供水量; $P\{\cdot\}$ ——大括号中事件概率,即湖泊、区间实际供水量等于或大于(指尽量提高供水保证率要求)实际要求水量的概率; P_i ——设计供水保证率; $IB(t,i)$ ——区间供水量。

② 缺水量最小的约束 为了控制破坏年的破坏程度,模型中尚考虑使缺水总量最小的要求,嵌入下述子目标:

$$DE = \min \sum_{t=1}^{N_0} \sum_{i=1}^5 \{I(t,i) + IB(t,i) - SP(t,i)\},$$

式中: DE ——在不保证年份的最小缺水总量; IB ——湖泊间区间供水量。

③ 其他目标约束 其他目标约束如防洪、航运、养殖、环境等要求,可统一写成: $V(t) \in VE(t)$ 。

(2) 工程能力约束 包括湖泊蓄水能力、河道泄水能力、抽水能力等,它们都不应超过允许的实际能力。

(3) 其他约束 包括湖泊水位库容关系、初终值条件、边界条件等。另外,还包括非负约束以及有关习惯、效益均衡、政策协议等;其中一部分是约束常量,一部分是无法用方程表示,被列于调度原则之中考虑。

3. 控制模拟的基本方程 模拟的基本方程(5)及控制准则式(9)、(11),构成控制模拟的基本方程,描述系统状态变化。

4. 在线辨识环节 如图2所示,在线辨识环节,在南水北调系统中包括目标优化程度识别,是根据模拟迭代中目标值的收敛程度来辨识的;反馈量的产生,本例是各湖泊下泄水量过程;控制线的修正或新的控制线的生成,这是在模拟迭代过程中完成的。南水北调中的控制线,又称北调线,即允许向北抽水的湖泊最低水位线。

根据这一数学模型,采用逐次收紧约束的自适应目标控制模拟技术,建立图7所示的程序框图及求解程序。

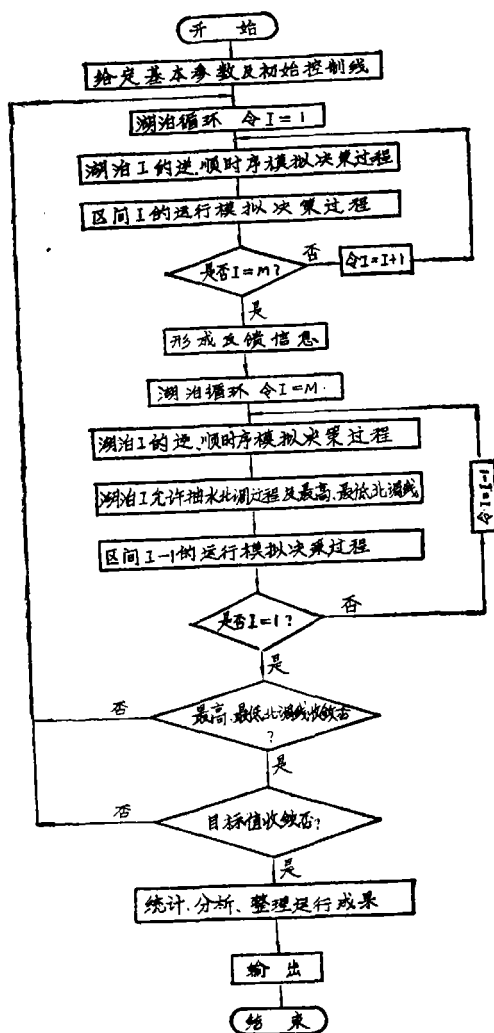


图7 南水北调东线一期工程优化调度程序框图

五、成果分析

系统来、用水系列为32年,按旬为计算时段,共计1152个时段,任意给定初始控制线,进行自优化模拟,全部计算在VAX750/II上进行。

实例计算表明,自优化模拟模型及技术在求解复杂大系统优化问题,具有鲜明的特点:

1. 仿真性好 相当真实地反映了实体工程的运转特点:比较详尽地包括了系统各方面的约束条件;还考虑了一些不能量化的政策性限制;严格地遵守了流体运动及水量平衡的基本方程,湖泊与区间分开调节,比较真实地反映了来、用水的时空分布。

2. 通用性强 软件是针对同一类工程编制的,不受湖泊数目多少、湖泊区间是否分开、湖泊可能的入流、出流条件等影响,适用于同类工程的最优规划或优化调度,或进行无预报条件下的日常调度控制。

3. 应用灵活 软件系统的主要程序能容纳多种功能的运算。对于同一功能的计算,其计算精度和计算条件都备有转换参数控制。

4. 计算效率高 程序编排较紧凑,迭代反馈信息量对目标值反映灵敏;计算时间少,仅随湖泊数目线性增长,有效地解决了大系统维数灾问题,像南水北调这种五个湖泊的串联工程,一次最优调度方案的制定在VAX750/II机上约五分钟,2—3次迭代即可收敛,与多维动态规划比较,仅为后者计算时间的1/50—1/1000。

对于自优化模拟模型,我们还采用数值检验的方法,即应用多维动态规划法对东线一期工程进行优化调度运算,以检验其最优性。经验算,无论对于单一湖泊的调度或多个湖泊的联调,动态规划法所得的优化调度线(策略)与自优化模拟技术所得到的基本趋于一致。如果继续减少动态规划离散状态点的步长,则两法优化成果可以完全趋于一致。这充分说明了自优化模拟技术可以直接求得优化调度线(策略)。

采用上述自优化模拟模型,我们完成了南水北调东线一期工程的优化调度,并提出该系统两条最优控制线(最优调度北调线),即不许北调线和必须北调线,相当于水库调度中的防破坏线及防弃水线。在两条控制线中,形成最优调度状态域,为日常调度的

表1 常规调度结果

控制工程	抽入 时段数	缺水 时段数	供水保 证年数	年均抽 入水量 (亿m ³)	年均缺 水量 (亿m ³)	年均泄 水量 (亿m ³)	年均弃 水量 (亿m ³)	初始蓄 水量 (亿m ³)	终止蓄 水量 (亿m ³)	保水保 证率 (%)
东平 湖	191	0	32	1.8	0	1.8	0.1			100
上级湖—东平湖	1035	27	18	6.6	0.2	0.2	0			55
上 级 湖	932	6	29	22.1	0.2	13.9	1.8	2.42	2.42	90.4
下 级 湖	979	2	30	31.5	0.1	6.4	10.2	4.7	4.7	93.8
骆马湖—下级湖	1009	2	30	40.1	0.1	4.3	0			93.8
骆 马 湖	889	3	30	35.7	0.3	10.3	34.2	2.8	2.8	93.8
洪泽湖—骆马湖	920	2	31	41.3	0.2	7.0	0			96.8
洪 泽 湖	629	0	32	46.1	0.0	25.0	185.9	20.0	20.0	100
长 江—洪泽湖	773	0	32	63.9	0	11.4	11.4			100
总 和				289.1	1.1		243.6			

注:32年总运行时段数1152。

表 2 优化调度(自优化模拟模型运行)结果

控 制 工 程	抽 入 时段数	缺 水 时段数	供水保 证年数	年均抽 入水量 (亿m ³)	年均缺 水 量 (亿m ³)	年均泄 水 量 (亿m ³)	年均弃 水 量 (亿m ³)	初始蓄 水 量 (亿m ³)	终止蓄 水 量 (亿m ³)	供水保 证 率 (%)
东 平 湖	164	0	32	1.6	0	1.7	0.0			100
上级湖—东平湖	947	97	10	5.4	1.1	0	0			31.1
上 级 湖	819	8	30	17.6	0.2	11	1.3	2.42	2.42	93.4
下 级 湖	892	1	31	24.6	0	4.8	6.4	4.7	4.7	96.8
骆马湖—下级湖	1052	1	31	33.7	0	9.9	0			96.8
骆 马 湖	735	1	31	26.3	0	6.7	30.4	2.8	2.8	96.8
洪泽湖—骆马湖	960	2	31	32.0	0	30.6	0			96.8
洪 泽 湖	317	0	32	22.2	0	15.9	155.1	20.00	20.00	100
长 江—洪泽湖	701	0	32	39.1	0	187.59	15.9			100
总 和				202.5	1.3		209.1			

注: 32年总运行时段数1152.

运行状态空间. 按照最优调度线进行湖泊调控, 抽长江水量可由原规划的 63.9亿m³ 减少到39.1亿m³, 且供水保证率有一定提高. 若以平均扬程5m、平均效率65%计算, 优化调度比常规调度方法每年可节约抽水耗能1.85亿kW·h, 是常规调度的 70%, 优化调度效果是明显的. 常规调度及优化调度结果分别见表 1, 2.

全系统计算弃水量由243.6亿m³减至209亿m³, 少弃水34.6亿m³相当于减少抽水的水量. 可见, 调度不当, 增加的弃水大部分系抽江水量, 多抽多弃.

此外, 本文还对系统工程潜力及其开发作了分析计算, 对系统备用机组安排, 对向黄河以北调水的方案也作了分析.

结 语

1.应用模拟技术模拟多水库系统运行具有仿真好、运算速度快的优点, 且模拟过程容易进行控制, 利用现代控制论的基本原理, 对模拟过程进行最优控制、引导, 完全可以实现自行优化的目的. 在南水北调东线一期工程优化调度研究中, 我们提出并采用了自优化模拟模型, 取得了满意的成果, 在实践中成功地解决了模拟技术能够自优化的问题, 从而开辟了一条利用模拟技术进行优化调度的途径.

2.对于不同的多水库系统, 应该有不同的自优化模拟技术. 本文针对南水北调东线工程所提出的逐次收紧约束自适应目标控制模拟技术, 很好地解决了决策后效性问题; 特别其计算机时仅随系统中水库数目成线性增加, 它为克服维数灾提供了一条途径.

3.自优化模拟模型应用于南水北调东线工程优化调度是成功的. 按最优调度控制线(北调线)运行, 抽江水量比常规调度方法减少36%, 抽水耗电节约23.7%, 扩大了工程效益.

4.本文提出的自优化模拟技术程序具有层次结构简明、紧凑、收敛速度快、计算时间少, 且可用于工程规划、管理阶段进行最优规划和优化运行.

5.自优化模拟模型及求解技术, 是一项有广阔前景的研究, 尚需进一步发展提高, 方法技术需要规范化.

参 考 文 献

- [1] Hall, W. A. and J. A. Drawp, Water Resources System Engineering. McGraw-Hill, New York, 1970.
- [2] Eichert, B. S. and V. R. Bonner, HEC contribution to reservoir system operation. Tech pap.63, Hydro. Eng. Cent. U. S. Army Corp Eng., Davis Calif., November, 1975.
- [3] Sigvaldason, O. T., A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. W. R. R., Vol.12, pp.263—278, 1976.
- [4] Yeh, W. W., Reservoir management and operations models: A state of the art review. W. R. R., Vol.21, No.2, pp.1797—1818, 1985.
- [5] 郭元裕、白宪台、雷声隆, 湖北四湖地区除涝排水系统规划的大系统优化模型和求解方法. 水利学报, 1984年第11期.
- [6] 胡寿松主编, 自动控制原理. 国防工业出版社, 1984年.

Self-optimization simulation and its application in the Project of South-to-North Water Transfer

Lei Shenglong Qin Qiangrong Guo Yuanyu

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

Ning Yuan Zhang Jing Li Yan

(Planning and Design Institute of Huaihe River Commission)

A new self-optimization simulation model is developed for optimum operation of multireservoir systems by adding the feed-back elements of on-line identification and control into a common simulation model for self-adaptive control. Based on studying different sequences of simulating derrection in time and space, considering time-forwards and time-backwards as well as the main current and the adverse current sequences with measures of losing and lightening up constraints alternatively, a self-adaptive control simulation technique is presented. It is satisfactorily used in the optimum operation study for the Project of South-to-North Water Transfer which is a large, complex water resources system with five lakes. It has been indicated that the self-optimization simulation model behaves better in imitation and convergence as compared with other mathematical models. The CPU time cost increases linearly with the number of reservoirs.