

文章编号: 1001-6791(2001)02-0215-07

# 大型复杂引水系统运行调度仿真模型研究

张 超, 陈 武

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

**摘要:** 万家寨引黄工程运行调度系统是一个大型复杂引水系统。本文以该系统为背景, 建立水资源供需分析、水库调度、地下水资源调蓄、水力瞬变输水过程、水文与工程数据采集处理等三个层次的计算机仿真模型, 提出“水资源可持续利用量”的概念, 研究系统的合理调度方案和特性参数以及满足未来用水需求, 保证环境生态逐步恢复的管理策略, 促进供水区水资源的可持续利用。

**关键词:** 引黄工程; 复杂系统; 仿真模型; 水资源可持续利用

**中图分类号:** TU 991.56      **文献标识码:** A

万家寨引黄工程被称为山西的生命工程, 它不仅建设规模大、投资大, 而且建成后的管理运行调度问题复杂, 工程预计 2002 年实现太原供水, 将使太原严重的缺水情况得到缓解。

本文以一个大型复杂引水工程运行调度系统为背景, 分层次建立水资源供需分析预测、水库调度、地下水调蓄、输水瞬变过程、水文与工程数据采集处理等仿真模型, 集成分析系统的合理管理调度模式和特性参数, 探讨复杂引水系统的一般特征和控制对策。目标是为了促进实现供水区水资源可持续利用和经济社会的可持续发展。

## 1 复杂引水系统的一般特性分析

大型引水工程运行调度系统, 除有特定的工程特性外, 还有复杂巨系统<sup>[1]</sup>所具有的多层次多学科性、开放性、动态性和复杂性。

大型复杂引水系统涉及地区水资源利用、供水工程运行调度和监测管理实施等多个层次, 每一层次具有各自的目标函数和约束条件; 它涉及水文水资源、环境生态、社会经济、水工结构、机电设备、自动控制、监测通讯和计算机应用等多种学科。每一学科都具有各自的理论、定理和应用规则, 而形成了多层次性、多学科性。

大型复杂引水工程调度系统从水源流域输入流量, 经过输送调蓄, 向供水流域输出所需的供水流量。这是一个开放的动态的过程。即: 系统与外界具有信息、能量、质量的交换, 能够通过与其周围环境的交互作用而改变其适应能力。大型引水系统需要不断地调节流域水资源的时

收稿日期: 2000-02-28; 修订日期: 2000-04-10

作者简介: 张 超 (1938-), 男, 山西临猗人, 清华大学水利水电工程系教授, 主要从事水资源系统分析与规划方面的研究。

空不均匀性, 供需的随机性和不确定性。它处理的不仅是简单的水量传输的物理过程, 还要协调水文气象、社会经济、生物需水、环境生态、能源消耗与监测通讯等复杂的过程, 因而具有开放性和复杂性。如果引水系统是封闭的、孤立的, 它就不是复杂引水系统。

应当注意: 大型引水系统中的供水流量, 在高层宏观决策配水子系统中, 和在低层灌溉用水子系统中的作用是不同的, 遵循的运动规律也不同。它象人体中的血液在微循环单元以及在全身循环单元中具有不同的运动规律一样。而且处于高层子系统水流运动的决策周期, 要比处在低层子系统的运动决策周期长, 例如, 在水资源供需分析模型中, 时段步长为年、月或旬, 而在泵站输水瞬变仿真模型中, 时间步长为秒或毫秒。它们需要通过时间和数据接口, 把各模块连接成一个整体。通常, 在宏观决策子系统中, 会遇到各种外部系统传递来的众多不确定性过程, 难于应用传统的解析模型精细定量地描述。需要使用宏观系统仿真模型<sup>[2]</sup>进行战略策略研究, 不局限于一些细节规律分析, 这也是其复杂性的一种外部表现。

## 2 万家寨引水工程的基本情况及其仿真系统框架

万家寨引水工程包括总干线、南干线、联接段和北干线四部分, 引水线路总长 457 km。总引水流量 48 m<sup>3</sup>/s, 分别向太原、大同和朔州地区供水。总干线自万家寨水库起, 到偏关、平鲁交界处的下土寨分水点, 长约 45 km。南干线自分水点向南, 经偏关、平鲁、朔州、神池到宁武入汾河, 长约 103 km, 再经汾河天然河段和联接段到太原市的呼延水厂, 联接段长约 58 km。北干线自分水点向东、向北经平朔到大同市西南的赵家小村水库, 长约 170 km。它的第一期工程向太原供水, 引水流量 25.8 m<sup>3</sup>/s, 干渠总长 285.35 km。其中隧洞总长 130.6 km; 五级泵站扬水工程, 总扬程 583 m, 水泵总功率 44.4 万 KW。<sup>①</sup>

按照引水工程及调度系统的实际情况, 其第一期工程可概化为五个子系统: ①全系统运行调度管理系统; ②万家寨水库工程系统, 输水干渠工程系统, 总干线一、二、三级泵站, 南干线一、二级泵站扬水工程系统; ③汾河水库, 汾河二库调蓄工程系统; ④太原市地下水资源系统, 太原城市供水管网及工农业供水系统; ⑤水文及工程数据监测管理系统等。相应的决策层、运行调度层、基础数据层的仿真子模型名称, 如图 1 示。

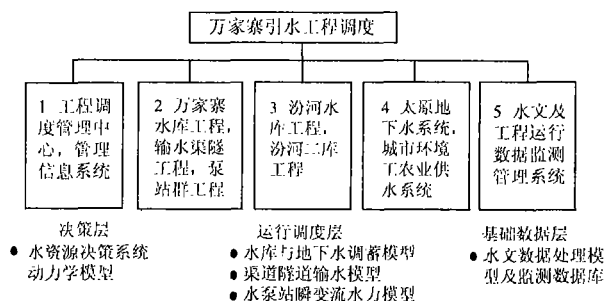


图 1 仿真模型组成示意图

Fig.1. Sketch of the simulation model

① 天津水利勘测设计院, 万家寨引黄工程初步设计说明书: 1996

本文构建了引水工程运行调度仿真系统的框架，建立了8个子系统：①引水工程运行调度仿真子系统；②模型库管理子系统；③系统控制仿真子系统；④系统监测仿真子系统；⑤数据库管理子系统；⑥运行调度图形图像显示子系统；⑦人机交互操作控制子系统；⑧知识库管理子系统等。其总体结构框图如图2示

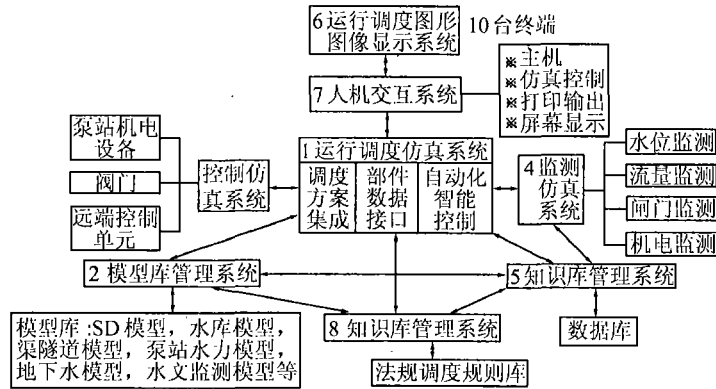


图2 运行调度仿真信息系统结构图

Fig.2. Structure of the operating and scheduling simulation information system

### 3 仿真系统的主要模块简介

本文建立的仿真系统各层次子模型之间，通过流量、控制信息和时间变量等数据相连接，各模型可以根据需要，单独运行、局部联合运行、或全系统联合运行。可以进行非实时运行仿真或实时调度运行仿真。各主要模块的结构原理和计算功能，简介如下：

#### 3.1 基础数据处理模块

通过采集水文气象站、工程运行监测网和各管理单位的水文水资源、环境经济、工程管理和遥感信息等基础资料，使用统计模型方法，分析处理并建立数据库，供其它仿真模块使用。

#### 3.2 决策层的水资源供需系统动力学仿真模块

该模块的结构由两组20个反馈环构成：①可持续供水量-供需差额-缺水环境压力与水价-可持续利用量，共8个正负反馈环；②总需水量-供需差额-缺水环境压力与水价-总需水量，共12个正负反馈环，其供需因果反馈关系如图3所示。模块输入供水区水资源供需规划数据，进行供需动态仿真计算。预测2000~2020年历年的各种需水量，提供给运行调度模块使用。研究供水区水资源利用的年、月、旬调度计划和战略对策方案。

#### 3.3 运行调度层的水库群联合调度模块

模块根据水量连续方程、水库调蓄调度方程、反映水资源分配政策的工业农业生活供水次序的配水矩阵方程以及各种边界约束条件方程，建立水库群联合调度模型。对流域地表来水、地下水、水库供水、引黄水和供水区各种需水方案进行联合调度计算。得出丰、平、枯各种水平年( $P=50\%$ ,  $P=75\%$ ,  $P=95\%$ )历年各旬时段的输水配水结果，制定旬调度计划。该模型节点图如图4所示。

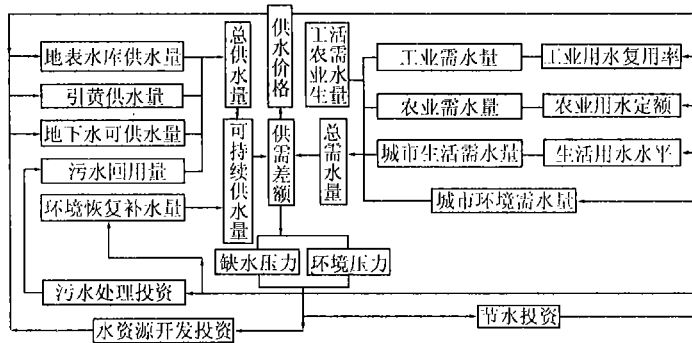


图3 水资源供需因果关系图

Fig.3. Feedback relation diagram of water resources supply and demand

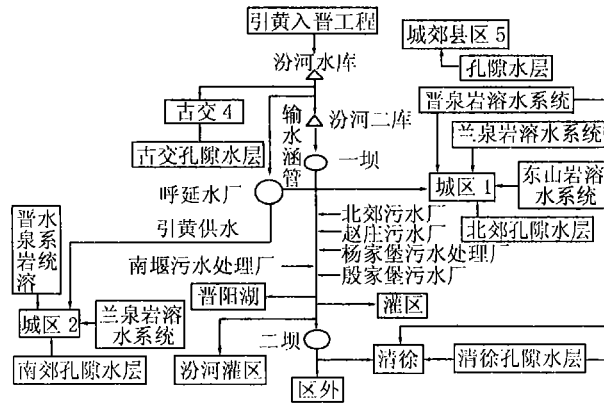


图4 太原水资源系统模型节点示意图

Fig.4. Nodal diagram of Taiyuan water resources system model

### 3.4 运行调度层的水泵站输水瞬变流水力过渡过程计算模块

万家寨引水工程采用五级泵站串联，站内多台机组并联布置，大流量长隧道封闭式输水的运行方式，对供水的可靠性提出了严格的要求。当系统某一部分发生故障时，需实时调节引水流量，即时做出反应，避免出现隧道封顶、前池抽干、水泵飞逸、阀门破坏、溢流弃水、中断供水等严重事故情况。

本文采用 MATTRIX<sub>x</sub> 软件研制可视化输水瞬变流水力过渡过程模型和明流水力演进模型。把水流运动、水泵转动的微分方程组离散化为差分方程组建立计算机模型。当输入工程与机电参数和控制程序，可实时仿真五级泵站的每个部位各种工况下的水位流量动态变化与运行状况，研究确定经济安全的运行调度模式。五级泵站工程布置示意如图5示。

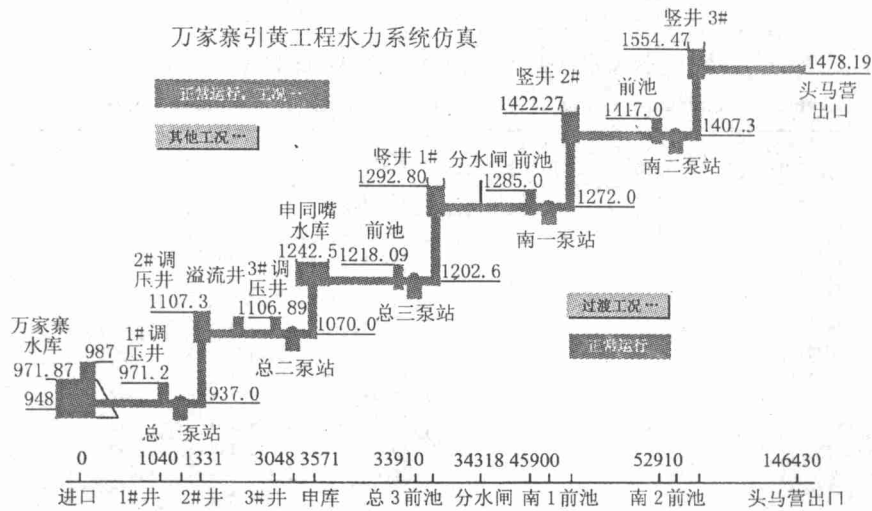


图 5 五级泵站工程布置示意图

Fig.5. Sketch map of 5-grade pump station engineering position

## 4 模型系统应用举例

本文建立的仿真信息系统，实际上是一个仿真平台，可以在它的基础上，进行各种工况方案的仿真试验<sup>①</sup>，研究确定调度方案和对策。下面仅举例给出两个设定数据的仿真结果：

### 4.1 水资源供需仿真举例

使用系统动力学仿真模型和水库调度模型，根据有关资料<sup>②</sup>进行水资源预测与调度计算，得到太原市 2000~2020 年水资源供需方案仿真结果如表 1 示。表中总需水量包括工业、农业、

城市和农村生活用水与环境用水。可供水量包括地表径流、地下水、水库供水、引黄供水和污水回用水等。本文提出的‘可持续供水量’是指保证地区可持续发展所必须的环境生态用水量和河流可持续下泄量前提下的可供水量。本模型以达到水资源可持续利用要求作为目标函数，着重考虑环境生态用水，控制水资源利用量在可持续利用量之内，研究满足用水需求，保证环境生态逐步恢复的对策方案，促进供水区经济社会可持续发展。

表 1 中方案一仅考虑当地水资源，在  $p = 75\%$  的偏枯年份，2000、2010、2020 年缺水量分别为 1.05、2.56、4.55 亿  $\text{m}^3$ 。方案二考虑有引黄水 2000、2010、2020 年分别为 0、2.43、5.78 亿  $\text{m}^3$  时，2010 年后其可供水量已超过需水量。当考虑环境恢复补水量 0.44、0.72、2.02 亿  $\text{m}^3$  时，供需差为 -1.29、-0.27、0.23 亿  $\text{m}^3$ ，即 2010 年后供需差不大，小量的正差值可补充用于恢复环境需水，可在保证环境生态逐步恢复的情况下，达到供需总量平衡。

① 陈武. 万家寨引黄工程对太原市供水全线自动化运行调度仿真模型与信息系统研究. 清华大学硕士学位论文, 1999. 6

② 天津水利勘测设计院. 万家寨引黄工程初步设计说明书. 1996.

表 1 太原市水资源仿真模型供需平衡计算结果

亿 m<sup>3</sup>

Table 1. Simulation results of water resources supply and demand models

项 目		供需平衡方案一 无引黄水, 不考虑恢复环境需水			供需平衡方案二 有引黄水, 考虑恢复环境需水		
		2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年
		可供					
水量	P = 50%	5.12	5.12	4.63	5.32	8.13	11.43
	P = 75%	4.87	4.87	4.47	5.07	7.88	11.27
	P = 95%	4.59	4.59	4.21	4.79	7.60	11.01
其中	引黄水量	0.0	0.0	0.0	0.0	2.43	5.78
	污水回用量	0.0	0.0	0.0	0.2	0.58	1.02
预测 需水 量	P = 50%	5.86	7.36	8.93	6.309	8.094	10.99
	P = 75%	5.92	7.43	9.02	6.360	8.15	11.04
	P = 95%	5.99	7.51	9.21	6.421	8.215	11.19
其中	环境恢复需水	0.0	0.0	0.0	0.44	0.72	2.02
供需 差	P = 50%	-0.74	-2.24	-4.30	-0.989	0.036	0.44
	P = 75%	-1.05	-2.56	-4.55	-1.29	-0.270	0.23
	P = 95%	-1.20	-2.92	-5.0	-1.631	-0.615	-0.180

#### 4.2 使用泵站输水瞬变流模块计算特殊工况的系统运行参数

例：计算总干三级泵站，当一台泵运行，第二台泵启动时的非恒定流水力过渡过程。计算条件为：上游蓄水库放水闸在水泵启动前 183.33 min 开启，要求在 0~2 min 内使渠道流量由 6.45 m<sup>3</sup>/s 增加到 12.9 m<sup>3</sup>/s，然后保持流量不变。水泵由停机状态进入额定状态（额定流量 6.45 m<sup>3</sup>/s）。仿真运行结果显示：当第 2 台水泵启动时，进水前池水深是 3.69 m；启动后 150~200 s 产生波峰水深 3.75 m，以后下降为 3.32 m，均在安全范围之内，在这种条件下，不会发生隧洞断流和进水前池溢流弃水。

又例：对全系统启动进行充水过程计算，整个五级泵站顺次启动，过程需要 22 h，正常运行后，如果突然全线事故停机，将会在总干三级泵站前池产生弃水 16.86 万 m<sup>3</sup>，因此建议在这一渠段增加设置节制闸，可减少这部分弃水。

## 5 结 语

(1) 应用系统仿真方法，综合研究复杂引水系统的定量特性和调度方案。联合运行该系统，得到仿真结果。它是水资源可持续利用战略和运行策略研究的一条可行途径。本文研究的方法和框架可供同类研究参考。

(2) 提出了“水资源可持续利用量”的概念，有利于保证地区生态环境可持续发展所需的用水量，可在供水调度模型中应用，并可促进水资源的可持续利用。

(3) 水泵站输水瞬变水力过渡过程的仿真，只在特殊事故情况下才对高层次的调度运行策略产生影响。在稳定运行的情况下，它不需要与宏观模型联合运行。单独运行系统动力学模型和水库调度模型，可得到运行调度的战略对策方案，为决策提供依据。

#### 参考文献：

- [1] 钱学森, 等. 开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1):3-10.

