

黄河应急调水补偿的仿真计算^{*}

孔珂, 解建仓, 王晓辉, 王双文

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] 针对黄河应急调水对缓解下游缺水地区旱情的同时, 也给上游的发电、灌溉、生态带来一定损失的问题, 建立了应急调水补偿模拟仿真系统, 应用该系统模拟了不同调水方案下的沿程水量变化、水电站发电损失、灌区农业灌溉损失、下游收益情况及补偿过程等, 设计典型调水过程并对其进行模拟计算。结果表明, 本系统基于信息技术, 通过黄河信息门户实现分布式应用, 具有良好的开放性和扩展性, 可用以提高应急调水方案及补偿方案的合理性。

[关键词] 黄河; 应急调水; 经济补偿; 仿真系统; 模拟计算

[中图分类号] TV 697. 1⁺ 2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)09-0121-05

黄河水资源问题的重要性和复杂性一直为人们所关注。近年来, 由于黄河下游经常出现用水危机, 有关部门不得不多次从干流枢纽水库及宁蒙灌区向下游实施长距离的应急调水。如2002-09, 向山东应急调水9亿 m^3 ; 同年10月, 向天津应急调水3.5亿 m^3 ; 2003-09再次向天津应急调水5.1亿 m^3 ^[1]。应急调水对缓解下游旱情、维持社会稳定具有重大意义, 但同时应急调水也在发电、灌溉、生态环境等方面给被调水地区造成了一定的损失, 频繁的无偿调水对上游地区是不公平的。所以本着资源配置的公平性原则, 在调水的同时, 应当根据受损方损失的大小, 由受益方及时地给予经济补偿。

在黄河全流域范围内实施应急调水及调水补偿是一项复杂的系统工程。一次调水涉及多少利益实体, 造成哪些影响, 有什么后果, 都是决策者必须关心的问题。如果能获得这些有效信息, 将大大提高调水的合理性和科学性。但是, 应急调水问题涉及面广、信息量大, 存在着时间、空间、人为影响等多方面的不确定因素, 不可能进行原型试验, 并且以目前的理论水平和资料水平, 建立精确的数学模型也非常困难。近年来, 仿真模拟在水资源领域得到了广泛应用, 李会安等^[2]研究了自优化模拟技术在水量实时调度中的应用, 建立了黄河干流上游梯级水量实时调度自优化模拟模型, 并进行了算例分析。张超等^[3]以万家寨为例, 建立了三层复杂引水系统仿真模拟

系统, 为综合研究复杂引水系统的定量特性和调度方案提供了一条途径; 王晓辉等^[4]研究了GIS在南水北调工程仿真系统中的应用, 提高了水资源调度管理的可视化水平。在这种情况下, 利用系统仿真的方法建立一套补偿测算仿真体系, 通过模拟计算为决策者提供定量的信息支持, 应是一条可行的途径。但由于整个应急调水补偿仿真过程以大量的信息为基础, 涉及宏观和微观、定性和定量、确定和不确定等多方面问题, 为此本系统结合现代信息技术, 对水流演变、水库发电损失、灌区农业损失、下游收益以及补偿量的确定等问题进行了分析, 对不同调水方案带来的损失、收益以及补偿的全过程进行模拟, 旨在为应急调水的补偿决策提供有力的支持。

1 系统平台和仿真内容

Internet已经成为最重要的信息交流手段, B/S结构简化了客户端, 大大提高了系统的灵活性。本系统基于水利信息化建设平台, 利用Web GIS技术和中间件技术, 采用组件开发模式, 可视化程度高, 易于移植, 并且通过Portal技术集成到黄河水利委员会信息门户中, 实现分布式应用。这种开放式体系结构可以方便地将历史资料、实时信息、专家意见、研究成果及决策信息引入到模拟过程中, 从而不断提高仿真结果的合理性和可信性。该仿真系统的总体

^{*} [收稿日期] 2004-12-30

[基金项目] 国家“863”计划项目(2002AA113150); 国家自然科学基金项目(5027904)

[作者简介] 孔珂(1972-), 男, 山东德州人, 博士, 主要从事水资源系统工程研究。

结构如图 1 所示。

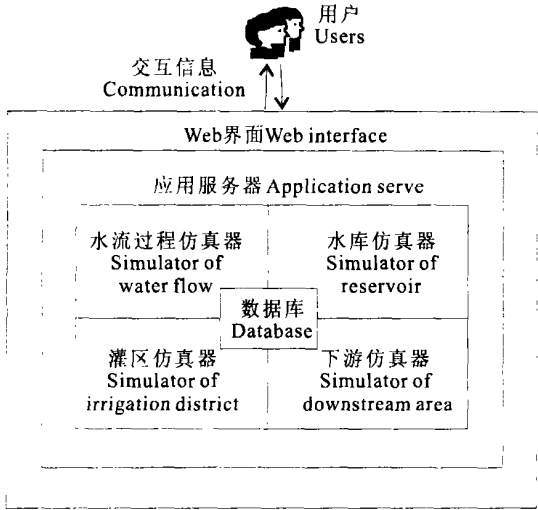


图 1 仿真系统的总体结构

Fig 1 Main system frame

应急调水的来源是黄河干流有调节能力的大型水库的库容和宁蒙灌区压减的灌溉用水。这些水库分别是黄河上游的龙羊峡、刘家峡,中游的万家寨、三门峡和小浪底。其中,三门峡水库由于泥沙问题,其兴利运用受到影响,所以不作为研究的重点。按照从流域上游到下游的顺序,仿真研究的对象依次是:

表 1 不同流量应急调水流注各河道的流达时间和沿程损失

Table 1 Arrival time and water loss of different flux in emergent water dispatch

流经河道 Watercourse	不同流量流达时间/h Arrival time of different flux						年水量 损失/亿m ³ Annual water loss
	100 m ³ /s	300 m ³ /s	500 m ³ /s	1 000 m ³ /s	1 500 m ³ /s	2 000 m ³ /s	
龙羊峡- 刘家峡 Longyangxia-L iujiaxia	185	103	24	48	40	35	0.49
刘家峡- 宁蒙灌区 L iujiaxia-N ingmeng irrigation districts	275	200	161	104	91	78	0.67
宁蒙灌区- 万家寨 N ingmeng irrigation districts-W anjiazhai	622	503	388	258	218	194	6.37
万家寨- 小浪底 W anjiazhai-X iao langdi	410	269	202	144	121	104	0
小浪底- 山东(高村) X iao langdi-Shandong (Gao cun)	273	163	111	76	64	55	3.7
小浪底- 天津(九宣) X iao langdi-T ianjin (J iuxuan)	413	379	303	220	184	151	5.21

2.2 发电损失核算

正常情况下,水库在防汛、防凌、供水、冲淤、灌溉等条件约束下,按发电效益最大化的调度方式运用。应急调水发生时,水库原有的工作方式受到破坏,发电效益受到影响。按发生的先后顺序,调水损失分为当时损失和后期损失。当时损失指调水流量大于水电站最大过机流量或调水期间的发电量大于装机容量时,水电站被迫弃水所造成的损失,其大小

龙羊峡、刘家峡、宁蒙灌区、万家寨、小浪底和下游受水地区。仿真的主要内容有:①流经各节点的水量变化过程和水量平衡分析;②不同调水方案下的水电站发电损失、灌区农业损失、下游经济收益的仿真计算;③不同补偿模式的补偿量计算(图 1)。

2 仿真过程的实现

2.1 流达时间和沿程水量损失的估算

应急调水要耗时几十天,流经几千公里的河道,流达时间和沿程水量损失必须加以考虑。利用文献[5]中“黄河贵德站至龙门各段不同流量级的传播历时”和文献[6]中“宁蒙河段和下游河段的水量损失”等研究成果,结合最近的统计资料,推算出系统仿真所需要的“龙羊峡- 刘家峡”、“刘家峡- 宁蒙灌区”、“宁蒙灌区- 万家寨”、“万家寨- 小浪底”、“小浪底- 山东(高村)”和“小浪底- 天津(九宣)”这 6 段河道的流达时间和沿程损失,结果见表 1。

用户输入调水时间、调水水库、调水流量、调水总量和受水地区等参数后,系统根据表 1 数据,用水量平衡法可模拟出流经各节点的水量变化过程。值得说明的是,表 1 数据可以根据最新研究成果随时更新。

可以用文献[7]中的水能出力公式直接计算。后期损失是指在调水之后水电站的损失,最极端的情况是调水动用了水库的死库容,水电机组停发,其损失量就等于其正常发电量,这种情况应尽力避免。一般情况下,调水后水电站都能维持运行,但由于水头的降低和水量的减少,发电耗水率上升,优化调度能力下降,水电站因此要承受一定的损失,其大小就是正常运用的效益与调水后非正常运用的效益之差。计算

正常效益和非正常效益时,应采用相同的调度模型,只是其初始条件不同。水库调度模型有很多种形式,本系统默认的是确定性长期优化调度模型^[8],该模型的形式如下:

$$\text{目标} \quad ob = \max \sum K \overline{h(t)} QF(t) \quad (1)$$

其约束条件为:

①水量平衡约束

$$V(t+1) = V(t) + QR(t) - QF(t) - QS(t) \quad (2)$$

②出力约束

$$\underline{N(t)} \leq N(t) \leq \overline{N(t)} \quad (3)$$

③水位约束

$$\underline{H(t)} \leq H(t) \leq \overline{H(t)} \quad (4)$$

④流量约束

$$QE \leq QF(t) \leq \overline{QF} \quad (5)$$

$$Q(t) \leq QS(t) + QF(t) \quad (6)$$

(1)~(6)式中, T 为计算期总时段数; K 为水库出力系数(N/m^3); $\overline{h(t)}$ 为 t 时段的平均水头(m); $QF(t)$ 为 t 时段的发电流量(m^3/s); $V(t+1)$ 为 $t+1$ 时段初的库容(m^3); $V(t)$ 为 t 时段初的库容(m^3); $QR(t)$ 为 t 时段入流量(m^3/s); $QS(t)$ 为 t 时段的弃水及其他损失流量(m^3/s); $\underline{N(t)}$ 为时段 t 内的最小出力($N \cdot m/s$); $\overline{N(t)}$ 为 t 时段内的最大出力($N \cdot m/s$); $\underline{H(t)}$ 为 t 时段末的水位下限(m); $\overline{H(t)}$ 为 t 时段末的水位上限(m); QE 为水轮机的最小过机流量(m^3/s); $\overline{QF}$ 为水轮机的最大过机流量(m^3/s); $Q(t)$ 为时段 t 的最小综合用水量(m^3/s)。

在水流过程模拟的基础上,用户通过交互系统输入水库初始水位、入库径流过程、计算时段、计算期、模型类型等参数,系统便可模拟出水库的运用过程,并计算出发电损失量。

2.3 灌溉损失核算

为服从流域水量统一调度,在实施应急调水时,宁蒙灌区因为压减指标内的水量而使得农业生产受到损失。灌溉损失计算需要大量的数据支持,为了使其具有可操作性,必须作必要的简化处理,本系统采用的计算公式为

$$AIL = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^n Q_{k,t} \times b_{k,t} \quad (7)$$

式中, AIL 为应急调水造成的灌区农业灌溉损失(元); $Q_{k,t}$ 为时段(旬)应急调水减少的灌区 k 作物的用水量(m^3); $b_{k,t}$ 为 t 时段(旬)灌区 k 作物的综合平均水分生产率($元/m^3$)。

系统模拟计算步骤如下:①输入灌区因应急调水的用水分布和压减水量;②结合灌区的灌溉制度,确定应急调水发生时灌溉受影响的作物类型;③根据灌区作物灌溉水量分配比例,确定受影响的不同类型作物分别压减的水量;④根据灌溉制度确定的旬灌溉水量比例,将各类作物在调水期间的压减水量进行旬分配;⑤根据作物各旬水分利用效率,结合压减水量来估算各类作物由于压减水量而影响的农业总产值。

2.4 调水收益核算与补偿量的确定

下游受水地区是应急调水的受益者,其经济收益主要体现在工农业生产和居民生活用水上。收益量的计算公式如下。

$$PEB_I = PFB_{i,l} + PEB_{a,l} + LEB_I = b_{i,l} \times SPW_{i,l} \times \beta_{i,l} + b_{a,l} \times SPW_{a,l} \times \beta_{a,l} + p_{wl} \times SLW_I \quad (8)$$

式中, $PEB_{i,l}$, $PEB_{a,l}$ 分别为调水获得的工业与农业的经济效益增加值(元); LEB_I 为生活用水效益(元); $SPW_{i,l}$, $SPW_{a,l}$, SLW_I 分别为工业、农业、生活接受的调水量(m^3); $b_{i,l}$, $b_{a,l}$ 分别为受水区工业与农业单方水发挥的效益($元/m^3$),工业效益以正常情况下单方水的工业增加值来确定,农业效益用分摊系数法或用单方用水量的农业产值近似确定; p_{wl} 为生活用水价格($元/m^3$); $\beta_{i,l}$, $\beta_{a,l}$ 为水在工业、农业生产中的贡献率。不同地区以上参数并不相同,以山东为例,其取值为: $b_{i,l} = 126.6$ 元/ m^3 , $b_{a,l} = 1.6$ 元/ m^3 , $p_{wl} = 1.40$ 元/ m^3 , $\beta_{i,l} = 0.1$, $\beta_{a,l} = 0.4$ 。进行调水补偿的原则是公平、公正。正常情况下,补偿量应该与损失量相当,但考虑调水时上下游遭受的旱情不同,应该有1个折算系数,其数值由决策者根据情况选定,系统默认的补偿折算系数见表2。

表2 上中下游不同旱情时的补偿折算系数

Table 2 Compensation rebate coefficients of upstream, middlestream and downstream in different arid degrees

上(中)游旱情 A rid degree of upstream or middlestream	下游旱情 A rid degree of downstream	折算系数 Rebate coefficient
中等干旱 Mean arid	中等干旱 Mean arid	1.0
	枯 A rid	1.2
	特枯 Severe arid	1.4
枯 A rid	中等干旱 Mean arid	0.8
	枯 A rid	1.0
	特枯 Severe arid	1.2
特枯 Severe A rid	中等干旱 Mean arid	0.6
	枯 A rid	0.8
	特枯 Severe arid	1.0

3 典型过程设计及仿真计算

利用仿真模拟平台,决策者可以对各种不同情

况进行模拟计算, 以确定合理的调水及补偿方案。不同调水过程涉及的主体不同, 水库的损失类型及灌区的损失类型也不相同。因此要考虑以下实际情况: ①调水顺序是从下往上, 先小浪底最后龙羊峡, 下游水库无水可调时, 才从上一级的水库调水; ②尽量不完全破坏死库容, 避免弃水损失; ③龙羊峡是黄河干流梯级水库群的龙头水库, 应尽量避免对其的影响;

④灌溉的影响主要控制在作物生长期与耕地冬灌保墒期。所以可设计 2 个典型应急调水过程进行模拟计算, 过程一(表 3)从刘家峡与万家寨调水, 时间是 09-20 至翌年 01-16, 影响灌区的冬灌保墒; 过程二(表 4)从万家寨与小浪底调水, 时间是 04-11~05-10, 影响灌区的春灌。

表 3 刘家峡与万家寨调水过程模拟计算

调水Water dispatch					受水Water receive		
刘家峡水库 L iujiaxia reservoir		宁蒙灌区压减 水量/亿m ³ A bating water in ningm eng irrigation districts	万家寨水库 W anjiazhai reservoir		农业用水/ 亿m ³ A gricultural water	生活用水/ 亿m ³ Domestic water	工业用水/ 亿m ³ Industrial water
泄水量/ 亿m ³ D ischarge water	泄水流量/ (m ³ ·s ⁻¹) D ischarge flux		泄水量/ 亿m ³ D ischarge water	泄水流量/ (m ³ ·s ⁻¹) D ischarge flux			
9.6	≥900	4.0	2.4	≥700	5.0	2.5	2.1

表 4 万家寨与小浪底调水过程模拟计算

调水Water dispatch					受水Water receive	
万家寨水库 W anjiazhai reservoir		宁蒙灌区压减 水量/亿m ³ A bating water in ningm eng irrigation districts	小浪底水库 X iaolangdi reservoir		生活用水/ 亿m ³ Domestic water	工业用水/ 亿m ³ Industrial water
泄水量/ 亿m ³ D ischarge water	泄水流量/ (m ³ ·s ⁻¹) D ischarge flux		泄水量/ 亿m ³ D ischarge water	泄水流量/ (m ³ ·s ⁻¹) D ischarge flux		
2.2	≥700	2.0	1.3	≥900	1.7	1.6

2 次调水过程的各种损失与收益的仿真计算结果如表 5, 水流过程的仿真结果从略。从表 5 的结果看, 仿真计算的过程还是基本合理的。如果上、中、下游丰枯组合为: 枯、枯、特枯, 按 2.4 表 2 所列的系统

默认比例, 应按 80% 进行补偿。计算出的下游补偿总量和上、中游受补量见表 6。其他丰枯组合的计算过程与此类似。

表 5 2 次典型调水过程引起的总经济损失、收益分析

调水过程 W ater dispatch procedure	发电损失/亿元 Power loss	灌溉损失/亿元 Irrigation loss	受水区调水收益/亿元 Income of downstream	调水损益比 Income and loss ratio
1	0.68	1.63	33.28	14.41
2	0.19	3.67	22.70	5.88

表 6 设计典型调水过程经济补偿量

调水过程 W ater dispatch procedure	补偿刘家峡/亿元 Compensation for L iujiaxia	补偿宁蒙/亿元 Compensation for N ingm eng	补偿万家寨/亿元 Compensation for W anjiazhai	补偿小浪底/亿元 Compensation for X iaolangdi	受水区支付/亿元 Payment of downstream
1	0.39	1.31	0.15	-	1.85
2	-	2.94	0.10	0.06	3.10

4 结 论

仿真系统能够将应急调水中的水流过程和效益

迁移过程模拟出来, 从而为决策者制定调水及补偿方案、实施方案以及评价方案提供有力的决策支持。通过对典型过程的设计和仿真计算, 初步验证了本

系统的可靠性。然而,系统还很不完善,存在以下亟待解决的问题:①黄河干流各段的流达时间和沿程水量损失的计算还很粗略;②调水的社会效益和生态效益未能够量化;③应急调水不仅影响水电站的发电量,而且影响水电站的发电容量。由于水电机组起闭灵活,所以水电站在电网中一般承担着调频和调峰的任务。因此,对于龙羊峡、刘家峡这样的水电

站而言,发电容量的损失甚至比发电量的损失还重要,但是发电容量的损失不能直接核算,如何将其合理量化,还需要深入研究。

随着我国南水北调工程的实施,必将出现规模更大、距离更长、牵扯主体更多的水量调度行为。合理地实施调水并且合理地进行补偿,将有更大的研究意义。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国水利部网站 黄河水流抵津门[EB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn>, 2003-09-23
- [2] 李会安,黄强,沈晋,等.黄河干流上游梯级水量实时调度自优化模拟模型研究[J].水力发电学报,2000,(3):55-61.
- [3] 张超,陈武.大型复杂引水系统运行调度仿真模拟模型研究[J].水科学进展,2001,12(2):215-221.
- [4] 王晓辉,魏明,解建仓.南水北调仿真系统——GIS子系统的设计与实现[J].系统仿真学报,2002,14(12):1591-1594.
- [5] 黄强,沈晋.黄河干流水库调度及智能决策支持系统[M].陕西西安:陕西科学技术出版社,1996.
- [6] 黄委勘测规划设计院.黄河水资源实时水量分配研究[R].河南郑州:黄河水利委员会,1998.
- [7] 黄强.水能利用[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [8] 田峰巍,解建仓.梯级水电站群的规划与调度[M].北京:科学技术文献出版社,1992.

Simulation for economic compensation of emergent water dispatch in Yellow River

KONG Ke, XIE Jian-cang, WANG Xiao-hui, WANG Shuang-wen

(Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University Of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The emergent water dispatch in the Yellow river brings up stream losses in such fields as power generation, irrigation and environment when it alleviates the arid in downstream. A simulation system is established to simulate the losses of power stations, the losses of irrigation districts, the incomes of downstream, and the economic compensations in different dispatch projects; typical procedures are designed and calculated. The result shows that this system is based on information technology, distributed through the information portal of the Yellow River and is applicable and expected to improve the rationality of the plans of emergent water dispatches and economic compensations.

Key words: Yellow River; emergent water dispatch; economic compensation; simulation system; simulation calculation