

文章编号:0559-9350(2018)07-0795-08

基于水库-河道耦合关系的水库水沙联合调度模型研究与应用

谈广鸣¹, 郜国明^{1,2}, 王远见², 李新杰²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要:为使多沙河流水库既能实现防洪、发电和生态等综合效益,同时又能兼顾下游河道维持一定过流能力的目标,运用动态规划方法构建了基于水库-河道耦合关系的水库多目标优化调度数学模型,集成了水库减淤效益、发电效益、下游河道河床演变3个计算子模块。其中下游河道河床演变计算子模块是整个数学模型的核心模块,它的年度计算结果既作为水库调度寻优的判别条件,又通过实时反馈更新了下一年度水库优化调度计算的边界条件。将该模型应用到黄河小浪底水库水沙联合调度的研究中,结果表明,在维持下游河道4000 m³/s左右的中水河槽的基础上,构建的模型能充分权衡下游防洪、库区减淤、电站发电之间的关系,实现了水库综合效益的优化。该结论为研究多沙河流水库水沙联合优化调度提供了新的思路和理论依据。

关键词:水沙调控;优化调度;耦合模型;泥沙运动;多目标决策

中图分类号:TV 697.1

文献标识码:A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20171195

1 研究背景

在多沙河流上修建的水库改变了天然河道水流结构与河床形态自然平衡状态,造成水库泥沙的淤积,而水库调度的运用又会影响下游河道河床的演变^[1]。因此在水库调度中,不仅需要调节径流,满足防洪发电生活生态用水需求,还需要调节泥沙减少水库淤积,同时还要考虑出库泥沙在下游河道的淤积分布和淤积效益。因此,如何实现水库调度、水库淤积和下游河道河床演变相互协调的水沙联合调度,成为研究的难点问题^[2-3]。

自1974年三门峡水库采用“蓄清排浑、调水调沙”运用方式以来,国内学者开始对多沙河流的水库开展了水沙联合调度的研究^[4];杜殿勋等^[5]构建了考虑供水、发电、潼关高程为约束条件的下游河道淤积量最小为目标函数的水库水沙联调随机动态规划模型;包为民等^[6]将异重流总流微分模型引入到多沙河流水库中,描述水库泥沙的运动过程,探讨了以出库排沙比最大为目标的水沙联合调度问题;练继建等^[7]建立了适于不同目标和预案的异重流过程梯级水库联合调度模型;吴巍等^[8]运用水沙数学模型与优化调度理论,构建了多沙河流水库水沙联合优化调度耦合模型;晋健等^[9]构建了基于SBED扩散一维全沙水库冲淤计算的水库水沙联合调度模型;彭杨等^[10-11]基于水库蓄水和排沙的矛盾,构建了以水库防洪、发电及航运调度为子模块的水沙联合调度多目标决策模型;白涛等^[12]建立了以输沙量、发电量最大的单目标模型及多目标水沙调度模型。以上成果分别从不同方面对水沙联合调度问题进行了研究,但由于多沙河流水库水沙条件的不确定性,使得各研究成果均局限于某一特定问题,且过去的单向优化调度计算仅考虑水库调度对下游河床演变的影响,未能将维持下游河

收稿日期:2017-12-11;网络出版日期:2018-06-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.201580615.0924.001.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404406-03);国家自然科学基金项目(51539004, 51509102,

51509103, 51679104);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(HKY-JBYW-2017-19)

作者简介:谈广鸣(1958-),男,江苏常州人,教授,博士生导师,主要从事水利水电研究。E-mail: tangm@vip.163.com

道中水河槽目标与水库蓄水排沙的响应关系反馈到水库水沙联合优化调度模型中。要使水库调度实现真正的优化，就必须建立包含下游河道恢复中水河槽目标在内的多目标水库优化调度模型，让河道响应的结果实时反馈到目标函数和水沙优化计算中，实现水沙过程的全定义域寻优和下游河道河床演变结果的动态反馈。

本文基于水沙数学模型与优化理论的基本思想，以水库防洪、减淤发电及生态供水为基本目标，应用多目标决策方法，集成了发电效益、水库减淤效益、下游河道河床演变等多个计算子模块，构建兼顾下游河道整治需求与水库综合效益的多沙河流水库多目标优化调度的数学模型，实现了水库-河道动态耦合，完成水库调度随河道响应状态的实时优化，并将该模型应用于小浪底水库优化调度研究中，研究水库的多目标优化调度及下游河道河床演变规律，探讨多泥沙河流水库群水沙联合调度机制。

2 基于水库-河道耦合的水沙联合调度模型

本文通过发电效益、水库减淤效益、下游河道河床演变3个计算子模块的耦合构建了联系水库和河道的水沙联调模型。其计算流程如图1所示。

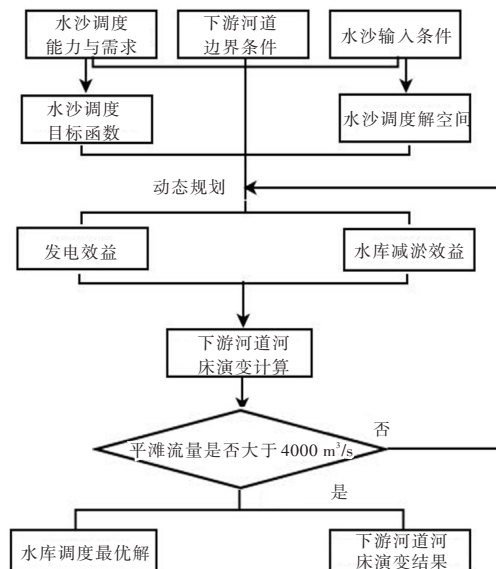


图1 水库-河道耦合的水沙联合调度模型计算流程

由图1可知，水库的来水来沙条件和下游河道边界共同构成了多沙水库调度的外部约束条件，而水库本身的调度能力和兴利需求共同决定了水库的职能和调度目标。现阶段对水库多目标调度的处理方式通常有3种^[13]：(1)将部分目标转化为约束；(2)将原本不可公度的多目标采用数学方式处理后权重相加；(3)采用Pareto最优曲面的方法来表达最优解群。本模型中，将水库调度的供水、生态等效益都作为约束条件处理；而对水库的发电效益和库区减淤效益，则先将其转化成可量度的经济性指标，再相加作为目标函数；而对下游河道河床演变的结果处理最为复杂，一方面将其年度计算结果作为约束条件，如果满足则调度寻优成功，如不满足则调度寻优计算继续；另一方面在约束条件满足后，该年度计算结果又通过实时反馈，更新了下一年度水库优化调度计算的下游河道边界条件，这就构成了完整的水库-河道耦合的水沙联合调度模型。

2.1 水库水沙联合优化调度模型 实现水库综合效益最大化是水库优化调度的基础，因此，本文分时段以发电量最大、库区淤积量最小，实现下游河道维持中水河槽为最优目标，以水库防洪(包括防凌)、供水、灌溉、除害兴利等需求作为约束条件，采用确定性的动态规划模型构建水库多目标优化调度模块。其目标函数形式为：

$$\text{Max}F = aE - b\Delta V = a \sum_{t=1}^T KQ_{\text{out}}^t (H^t - H^0) \Delta t - b\Delta V \quad (1)$$

式中： F 为综合效益函数； a 、 b 为权重； ΔV 为水库累积淤积库容， m^3 。

其中，洪水过程的各个时段作为阶段变量，时段初到时段末的水位蓄水量作为决策变量，各个时段的水位作为状态变量，水库水量平衡方程作为状态转移方程，水量平衡关系如下：

$$V_t = V_{t-1} + (Q_{\text{in}}^t - Q_{\text{out}}^t) \Delta t \quad (2)$$

式中： V_t 为第 t 时段末库容， m^3 ； V_{t-1} 为第 $t-1$ 时段末的平均库容， m^3 ； Q_{in}^t 为第 t 时段的平均入库流量， m^3/s ； Q_{out}^t 为第 t 时段的平均出库流量， m^3/s ； Δt 为 t 时段的计算时长。

其约束条件有：

(1)水位约束。为保证大坝安全，水库的水位不应骤升骤降，在一定时段内，库水位应在某个确定范围内变化。在每年的汛期来临之前，水库应预留出一定的防洪库容，将库水位降至汛限水位以下，以满足防洪要求。即水库水位应满足：

$$Z_{\text{min}}^t \leq Z^t \leq Z_{\text{max}}^t \quad (3)$$

式中： Z_{min}^t 为在 t 时段内水库可能的最低运行水位， m ； Z_{max}^t 为 t 时段内水库达到的最高运行水位， m ； Z^t 为 t 时段内任一时刻水库水位， m 。

(2)下泄流量约束。水库下泄流量的下限通常根据下游供水和生态需水的需要综合确定，上限由下游汛期防洪安全要求确定。各时段允许流量变动范围即水库下泄流量应满足：

$$q_{\text{min}}^t \leq q^t \leq q_{\text{max}}^t \quad (4)$$

式中： q_{min}^t 为 t 时段水库允许下泄的最小流量， m^3/s ； q_{max}^t 为 t 时段水库允许下泄的最大流量， m^3/s ； q^t 为 t 时段水库内任一时刻的下泄流量， m^3/s 。

(3)出力约束。水库出力约束应满足：

$$N_{\text{min}}^t \leq N^t \leq N_{\text{max}}^t \quad (5)$$

式中： N_{min}^t 为 t 时段水库发电机组限制最小出力， 10^4 kW ； N_{max}^t 为 t 时段水库发电机组限制最大出力， 10^4 kW ； N^t 为 t 时段内任一时刻的出力， 10^4 kW 。

(4)非负约束。所有变量均为非负。

2.2 水库发电调度子模块 水库的发电量是水库综合效益的基本指标，其计算函数形式为：

$$E = \sum_{t=1}^T KQ_{\text{out}}^t (H^t - H^0) \Delta t \quad (6)$$

式中： E 为年度总发电量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ； K 为电站出力系数； Q_{out}^t 为水库 t 时段内的过机流量， m^3/s 。由于水库发电洞最大过机流量 Q_{max} 通常小于水库设计最大下泄流量，故 $Q_{\text{out}}^t = \min\{Q_{\text{out}}^t, Q_{\text{max}}\}$ ； H^t 为一年中第 t 时段的坝前平均水位， m ； H^0 为发电洞高程， m ； Δt 为每时段的计算时长。

2.3 水库泥沙冲淤模块

(1)库区淤积模块 在本研究中，暂不考虑泥沙在库区的淤积形态对库区水沙输移的影响，而仅采用质量守恒方程计算库区泥沙淤积量，即：

$$\Delta V = \sum_{t=1}^T (Q_{\text{in}}^t S_{\text{in}}^t - Q_{\text{out}}^t S_{\text{out}}^t) \Delta t / \rho \quad (7)$$

式中： Q_{in}^t 为第 t 时段的平均入库流量， m^3/s ； Q_{out}^t 为第 t 时段的平均出库流量， m^3/s ； Δt 为 t 时段的计算时长； ρ 表示水库淤积泥沙的干容重， kg/m^3 。

(2)水库排沙模块 水库排沙从大类上可分为壅水排沙、降水溯源冲刷和敞泄排沙3类^[14]。在水库运用初期，水库水位不断抬升，此时壅水排沙情形较多出现；在库区淤积较严重而来水较丰的条件下，水库多采取降水溯源冲刷方式排沙；在水库达到冲淤平衡转入正常运用期后，则多采用敞泄排沙方式排沙。3种情况下，敞泄排沙的计算最为简单，即水库基本不拦沙：

$$Q_{in}^t = Q_{out}^t, S_{in}^t = S_{out}^t \quad (8)$$

当坝前水位较高, 库区水深满足异重流潜入水深时, 水库的排沙主要是壅水异重流排沙, 泥沙沿程淤积, 出库沙量一般小于入库沙量; 当坝前水位较低, 库区水深不满足异重流潜入水深时, 此时水库的排沙主要是沿程冲刷、异重流排沙相结合或沿程冲刷、溯源冲刷、异重流排沙相结合^[15]。其中, 沿程冲刷采用式(9)计算^[16]:

$$G = \psi \frac{Q_{out}^i J^{1.2}}{B^{0.5}} \times 10^3 \quad (9)$$

式中: G 为沿程输沙率, t/s ; J 为库区内水面比降; B 为库区内河道宽度, m ; ψ 为表征库区河床抗冲性能的系数, $\psi=650$ 表示河床质的抗冲性能最小, $\psi=300$ 表示中等抗冲性能, $\psi=180$ 表示抗冲性能最大。

异重流排沙采用式(10)计算^[17]:

$$S = S_0 \sum_{l=1}^n P_l e^{-\frac{\alpha \omega_l L}{q}} \quad (10)$$

式中: S 表示库区异重流输移到坝前下泄的含沙量, kg/m^3 ; S_0 表示异重流潜入时的含沙量, kg/m^3 ; P_l 为异重流潜入断面级配百分数; α 为饱和系数; l 为粒径组号; ω_l 为第 l 组粒径沉速, m/s ; L 为异重流推进距离, m ; q 为异重流演进时库区内的单宽流量, m^2/s 。

异重流排沙有明确的潜入条件, 与浑水运动的弗劳德数有关^[18]。在本文算例中, 已考虑了来水来沙条件是否能形成异重流条件, 并由此选择相应的计算公式展开计算。马怀宝等^[19-20]运用上述公式在计算2008年的小浪底水库异重流排沙时得到了理想的计算结果, 验证了公式的合理性与适用性。

2.4 河道响应模块 本模块着重关注在地貌学宏观尺度上下游河道对水沙过程的响应机制, 以平滩流量作为下游河道排洪能力的表征, 采用吴保生等^[21-23]提出的滞后响应模型计算平滩流量的年际调整过程, 该公式在黄河下游的河床演变中取得了较好的应用成果, 因此选为河道响应模块的核心计算公式。

$$Q_{bf} = K \left(1 - e^{-\beta \Delta \sigma} \right) \sum_{t=1}^n e^{-(n-t)\beta \Delta \sigma} \zeta_{ft}^c Q_{ft}^c + K e^{-n\beta \Delta \sigma} \zeta_{f0}^b Q_{f0}^c \quad (11)$$

式中: Q_{bf} 为选定研究断面当年的平滩流量值, m^3/s ; $\Delta \sigma$ 为滞后时间, a ; n 为由当前年份向前倒推的滞后总年数; ζ_{ft} 为向前倒推 t 年的汛期平均来沙系数(来沙系数=含沙量/流量), $kg \cdot s/m^6$; Q_{ft} 为向前倒推 t 年的汛期平均流量, m^3/s ; ζ_{f0} 为当年的汛期平均来沙系数, $kg \cdot s/m^6$; Q_{f0} 为当年的汛期平均流量, m^3/s ; K 、 β 、 b 和 c 为待定系数。

需要特别指出的是, 式(11)虽然只有流量和来沙系数两个变量, 但来沙级配的影响是隐含在公式中待率定的参数滞后总年数 n 中, 李凌云^[24]的研究表明, 衡量河道冲淤调整速度的参数 M 可表达为如下形式:

$$M = \frac{hJC}{d_{50}} \quad (12)$$

式中: h 为河段平均水深; J 为河段平均比降; C 为悬沙浓度; d_{50} 为悬沙中值粒径。换句话说, 来沙越粗, 下游河床边界的调整越快, 来沙越细, 下游河床边界的调整越慢。因此下游河床的冲淤演变实际上是也同时受到了水库下泄流量、含沙量和泥沙级配的影响。

在本研究中, 理想河床调整目标是作为约束条件出现的。修建多沙河流水库的重要目的之一即为下游河道减淤, 则长时段维持下游具有稳定排洪能力的主河道即为理想河床调整目标。如果当前河床尚未达到理想条件, 则水库应持续拦截泥沙下泄清水, 继续提升河道排洪能力; 如果已达到理想条件, 则水库可适当向下游河道排沙, 在保证下游河道预期排洪能力的基础上, 减少水库淤积库容, 延长水库的使用周期。在本文中, 用下游河道沿程监测水文横断面的平滩流量值来表征其排洪能力, 其表达式为:

$$\min\{Q_{1, bf}, Q_{2, bf}, \dots, Q_{n, bf}\} \geq \hat{Q}_{bf} \quad (12)$$

其中： $Q_{i, bf}$ 表示第*i*个水文站点的断面平滩流量， m^3/s ； \hat{Q}_{bf} 为水库下游河道主槽预期维持的平滩流量， m^3/s 。

2.5 模型求解 如图1所述，本文采用动态规划和权重法对基于水库-河道耦合水沙联合调度模型进行求解^[25]。由于水库的经济效益主要体现在发电效益和水库减淤效益(清淤成本)上，并且都可以体现在经济效益上，因此可对以上两个目标通过赋予权重转化成上述水沙联合调度多目标决策模型进行求解。而水库的防洪、灌溉、供水、生态效益和维持下游中水河槽通过流量、含沙量、泥沙级配约束的交集作为目标函数约束条件，这样，水库-河道耦合多目标水沙优化调度模型就可以转化成水库综合效益最大化的单目标非线性优化问题。

3 计算实例

3.1 小浪底水库概况 小浪底水利枢纽是一座以“防洪(包括防凌)、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，除害兴利，综合利用”为开发目标的枢纽工程，是黄河干流当前库容最大的控制性水利枢纽工程。总装机容量180万kW，多年平均设计发电量为51亿kW·h。小浪底年内调度一般分为三个阶段：第一阶段为上半年11月1日至下年汛前，该期间又可分为防凌、春灌蓄水期和春灌泄水期，期间水位变化不大；第二阶段为汛前调水调沙生产运行期，期间水位大幅下降；第三阶段为主汛期防洪运用、后汛期抬高水位蓄水。本研究针对2009年小浪底水库的调度过程展开，其对应的正常蓄水位为250 m，汛限水位为225 m，死水位为210 m。

3.2 结果与讨论 以2009年小浪底水库实际调度过程为比对方案，采用本文构建的模型进行模拟计算。模型模拟计算小浪底水库2009年的流量过程见图2。

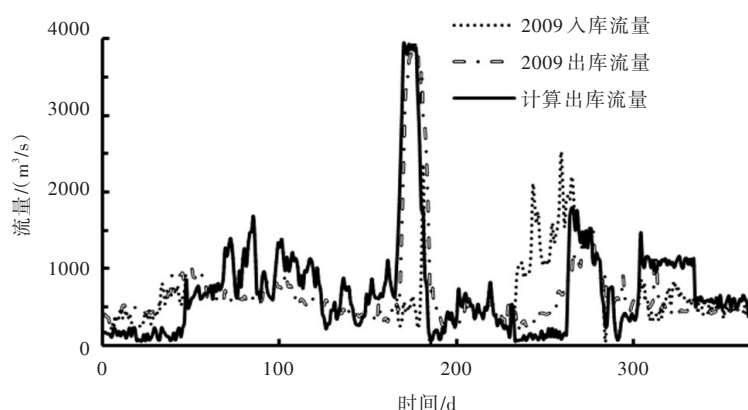


图2 小浪底水库2009年实测与模型计算流量过程

由图2可知，综合效益最大化的水库-河道耦合的水库水沙调度模型计算的小浪底出库流量过程与实际方案趋势一致，仍坚持塑造了一个大流量过程，以便于高效排沙的实现。不同之处在于，塑造的大流量过程时需打开排沙底孔，以长程异重流排沙的方式排沙出库，而不是将几乎所有泥沙全部淤积在库区内。

模拟调度方案的发电，库区减淤等综合效益如表1所示，可以看出，实际调度方案由于库区淤积量大的缘故^[26]，最终的综合效益目标函数为-8.9亿元，即发电产生的效益不足以填补水库淤积造成的经济损失；而优化调度过程的发电量比实际调度过程发电效益增加了10%，淤积量减少近78%，排沙比增大，减小了库区的淤积。综合经济效益达到了11.86亿元，比实际调度增加了20.76亿元。

图3给出真实调度过程与综合效益最大的优化调度结果下黄河下游河道典型断面2009—2010年汛后平滩流量变化图。

由图3可知，对于真实调度过程，平滩流量的年度变化范围不大，花园口、孙口、艾山均有小幅冲刷，高村、利津河段有小幅回淤。利津站的平滩流量降至4000 m^3/s 以下。

表1 实测结果与理论模拟计算结果

	发电量/(亿 kW·h)	库区淤积量/亿 m ³	排沙量/亿 m ³	排沙比/%	综合经济效益/亿元
实际调度方案 ^[26]	41.90	1.62	0.03	1.9	-8.9
模型模拟方案	46.09	0.34	1.28	79	11.86

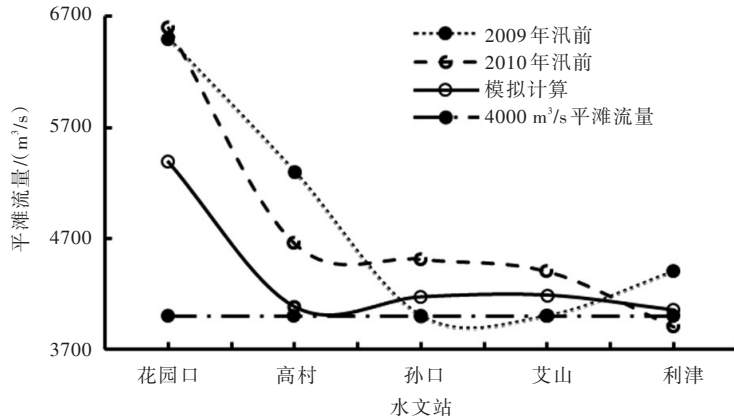


图3 黄河下游河道平滩流量对比

而模拟计算结果表明，黄河下游沿程平滩流量相比真实调度过程均有不同程度回淤，其回淤幅度从上到下逐渐减少，这也符合预期，即在花园口、高村这样平滩流量增大较多的河段可适当回淤，保持全河道过洪能力的平衡。

适当加大下泄沙量并没有导致黄河下游河道的严重淤积，尽管相比真实调度过程，模拟方案向下游多输送了1亿多吨泥沙，但由于尽可能利用了汛期的人造洪水，也增大了洪水在下游河道输移泥沙的能力，最终黄河下游淤积情况与实际调度方案相差不大，且各典型断面基本维持在4000 m³/s左右的平滩流量。

需要特别指出的是，本文虽然仅选取2009年一年作为算例，但事实上清晰体现了下游河床演变结果的反馈影响。因为造成本文的优化计算结果和实际调度方案之间效益巨大差异的原因就在于对下游河道河床演变结果的认识理念和处理方法上。实际调度方案中，由于没有考虑下游河床的现状相比1999年小浪底水库建成时已发生了巨大变化，而仍然坚持了清水下泄、冲刷下游河床的调度方式；优化调度方案则充分考虑了新的河床边界条件和维持下游中水河槽的目标，敢于加大下泄沙量，最终实现了库区-水库-河道效益的兼顾和多目标的优化。

4 结论

本文以水库发电、库区淤积、下游河道过流能力计算为基础，构建了兼顾水库综合效益和维持下游河道中水河槽的水沙多目标调度模型及求解方法，并以小浪底水库为研究对象进行了模拟计算，结果表明：(1)本文建立的模型实现了动态循环的水库-河道耦合计算，可将下游河道随水库调度发生的变化实时反馈到优化过程中来，实现更精细化的水库调度；(2)以小浪底水库2009年的水库调度方案为例，分析了该水库调度运行的各项边界条件，确定了其数学表达及临界阈值，给出了兼顾水库综合效益与下游减淤效益的综合效益最大的优化调度方案。计算结果表明，模拟方案相比真实调度方案，其发电量增加10%，而排沙比增至79%，下游河道维持了4000 m³/s左右的中水河槽。

因此，从科学角度，水库-河道耦合的水沙联合调度模型，在多沙河流的水库调度中能够有效兼顾库区-水库-河道效益，体现了该模型的合理性和适应性；从工程应用角度，利用好水库大流量排沙过程，在下游河道维持中水河槽的前提下适当排沙出库，延长多沙河流水库的使用寿命，从本研究看是完全可能的，现有的小浪底水库调度方案仍有进一步提升的潜力。

参 考 文 献:

- [1] 韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 169-178.
- [2] 郭庆超, 胡春宏, 李景宗. 黄河中下游大型水库对下游河道的减淤作用[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 511-518.
- [3] 胡春宏, 陈建国, 郭庆超, 等. 论维持黄河健康生命的关键技术与调控措施[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(1): 1-5.
- [4] 李文家, 许自达. 三门峡、陆浑、故县三水库联合防御黄河下游洪水最优调度模型探讨[J]. 人民黄河, 1990(4): 21-26.
- [5] 杜殿勛, 朱厚生. 三门峡水库水沙综合调节优化调度运用的研究[J]. 水力发电学报, 1992(2): 12-24.
- [6] 包为民, 万新宇, 荆艳东. 多沙水库水沙联合调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 101-105.
- [7] 练继建, 万毅, 张金良. 异重流过程的梯级水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 18-23.
- [8] 吴巍, 周孝德, 王新宏, 等. 多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度的研究与应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010(12): 221-229.
- [9] 晋健, 马光文, 吕金波. 大渡河瀑布沟以下梯级电站发电及水沙联合调度方案研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 210-214.
- [10] 王帅, 彭杨, 刘方, 等. POA算法在水库水沙联合调度中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 29-31.
- [11] 彭杨, 纪昌明, 刘方. 梯级水库水沙联合优化调度多目标决策模型及应用[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1272-1277.
- [12] 白涛, 阚艳彬, 畅建霞, 等. 水库群水沙调控的单-多目标调度模型及其应用[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 116-127.
- [13] DEEPTI Rani, MARIA Madalena Moreira. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation[J]. Water Resources Management, 2010, 24: 1107-1138.
- [14] 伊晓燕, 张超, 张翠萍, 等. 三门峡水库溯源冲刷对水沙及边界条件的响应[J]. 人民黄河, 2016, 38(1): 28-30.
- [15] ASAMI K, SHIMIZU Y, NELSON J, et al. Numerical simulation of river meandering with self-evolving banks [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(4): 2208-2229.
- [16] 江恩惠, 万强, 曹永涛. 小浪底水库拦沙运用九年后黄河下游防洪形势预测[J]. 泥沙研究, 2010(1): 1-4.
- [17] 韩其为, 何明民. 泥沙数学模型中冲淤计算的几个问题[J]. 水利学报, 1988(5): 18-27.
- [18] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 马怀宝, 张俊华, 张金良, 等. 2008年调水调沙小浪底水库异重流排沙分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(11): 27-30.
- [20] 王婷, 马怀宝, 陈书奎, 等. 2007年调水调沙小浪底水库异重流排沙分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 54-56.
- [21] WU Baosheng, WANG Guangqian, XIA Junqiang. Case study: delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(5): 482-494.
- [22] WU Baosheng, WANG Guangqian, XIA Junqiang, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2008, 100(3/4): 366-376.
- [23] WU Baosheng, XIA Junqiang, FU Xudong, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33: 1585-1601.
- [24] 李凌云. 黄河平滩流量的计算方法及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [25] 胡铁松, 万永华, 冯尚友. 基于知识的交互式多目标动态规划决策方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 1994(1): 24-29.
- [26] 王玲, 王怀柏, 潘启民, 等. 黄河泥沙公报(2009)[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2010.

Research and application of water–sediment co–scheduling model of reservoir based on reservoir–channels coupling relationships

TAN Guangming¹, GAO Guoming^{1, 2}, WANG Yuanjian², LI Xinjie²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. MWR Key Laboratory of Yellow River Sediment, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to raise comprehensive benefit of reservoir on sediment–laden river, considering flood control, power generation, ecological remediation and discharge capacity maintenance of downstream channel, a mathematical model of multi–objective optimization of reservoir has been established by using dynamic programming method on the basis of reservoir–channels coupling relationships. It is composed of computation modules of sediment scour, power benefit and riverbed evolution in downstream channel. Among them, the riverbed evolution module is the focus of the whole mathematical model. The result of calculation is regarded as not only the critical state for the optimization dispatching, but also the boundary conditions for the next year. The model has been applied to the research of water–sand joint operation of Xiaolangdi reservoir. The results show that the model can effectively coordinate the benefits of flood control and power generation, and achieve comprehensive benefit on the basis of maintaining discharge capacity around 4000m³/s. It is of great significance to solve the problem of water–sediment coordinative optimized dispatch in the reservoir of sediment–laden river.

Keywords: water and sediment regulation; optimal operation; coupled model; sediment movement; multi–objective decision–making

(责任编辑: 李福田)

(上接第 794 页)

Two–dimensional numerical simulation for surface runoff in catchments based on Godunov scheme

ZHANG Dawei, QUAN Jin, MA Jianming, XIANG Liyun

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: When the two–dimensional fully dynamic water equations (SWEs) are used to simulate the surface runoff propagation, the problem of drying and wetting conversion is encountered. To resolve this problem, a new numerical model has been developed using Godunov scheme based on the sheet flow concept. In this model, the corrected Roe’s approximate Riemann solver for the calculation of fluxes in triangulated unstructured grid is used; the bottom slope terms are calculated directly by applying the Green’s theorem, and the semi–implicit discretization method is adopted to deal with the highly nonlinear friction terms. The main advantage of this model is that the drying and wetting treatment becomes extremely simple, and no special reconstruction is required for the water surface and topography of the unit. The new model provides more comprehensive calculation capabilities, which are proved by four case studies. Finally, the model is applied in the Xiejiawan catchment for S curve calculation and rainfall runoff process simulation, and the result is reasonable and reliable. Therefore, the model has been proved that it has the ability to simulate surface runoff propagation in real–world catchments and it can provide a new way for the calculation of surface runoff in small watershed.

Keywords: surface runoff; two–dimensional numerical simulation; shallow water equations; unstructured grid; Godunov scheme

(责任编辑: 王成丽)