

多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度的 研究与应用

吴 巍,周孝德,王新宏,程 文

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】分析多泥沙河流供水水库中供水与排沙减淤之间的矛盾,为此类水库合理调度运行方式的确定提供技术支撑。【方法】运用水沙数学模型与优化理论的基本思想,构建多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,并将该模型应用于亭口水库这一典型多泥沙河流供水水库调度运行方式的优化比选研究中。【结果】成功构建了多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,该模型由水库优化调度动态规划子模型及泥沙冲淤计算子模型 2 部分构成,子模型之间通过参数及数据的相互传递,实现对模型定解条件的影响,从而组成一个耦合模型。该模型在亭口水库调度运行方式优化比选研究的应用表明,亭口水库适宜采用“蓄水运用,汛期低水位相机排沙”的调度运行方式。【结论】所构建模型具有较强的合理性及较广的适用性,为多泥沙河流水库水沙联合调度运行方式的制定提供了一条行之有效的解决途径。

【关键词】 多泥沙河流;供水水库;水沙联合优化调度;耦合模型

【中图分类号】 TV145

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)12-0221-09

Research and application on water-sediment coordinative optimized dispatch of water-supply reservoir in the sediment-laden river

WU Wei,ZHOU Xiao-de,WANG Xin-hong,CHENG Wen

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT,Xi'an,Shaanxi 710048,China)

Abstract: 【Objective】 The contradictions between water supply and sediment reduction occurred in the water-supply reservoir of sediment-laden river were analyzed. And the technical support was provided to lay down reasonable operational mode for this type of reservoir. 【Method】 Using the basic idea of flow-sediment mathematical model and optimization theory, the couple model of water-sediment coordinative optimized dispatch was built in the water-supply reservoir of sediment-laden river. And the model was applied to optimize and compare the operational mode of Tingkou reservoir which was a typical water-supply reservoir in the sediment-laden river. 【Result】 The couple model of water-sediment coordinative optimized dispatch was successfully built in the water-supply reservoir of sediment-laden river. The model consisted of the dynamic programming sub-model for reservoir optimized operation and the calculation sub-model of sediment erosion-deposition. Through the transfer of parameters and data, the couple model was formed as the definite conditions were influenced. The couple model was applied to optimize and compare the operational mode of Tingkou reservoir. The results showed that the following operational mode was reasonable to Tingkou reservoir, that is storage operation but low water desilting at the right time of flood season.

* [收稿日期] 2010-09-21

[基金项目] 国家科技重大水专项(2009ZX07212-002-001-04,2008ZX07106-4-01)

[作者简介] 吴 巍(1980—),男,山西寿阳人,在读博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:wuweifirst@126.com

【Conclusion】 The model had strong rationality and wide applicability. An effective way was provided to solve the problem of water-sediment coordinative optimized dispatch in the water-supply reservoir of sediment-laden river.

Key words: sediment-laden river; water-supply reservoir; coordinative optimized dispatch of water and sediment; coupled model

西北地区是我国重要的产能区,蕴藏着丰富的煤、油、气等资源,但该区水资源短缺,现有水资源开发利用不足,严重制约了该地区国民经济的发展及人民生活水平的提高。为扭转此局面,充分合理利用当地现有水资源,兴建以工业、城市生活供水为主要目标,同时兼具发电、防洪等功能的供水水库成为首选措施。

我国西北地区的河流大多是以水少沙多、水沙分布不均等为主要特征的多泥沙河流,要在其上修建供水水库,泥沙淤积问题不容小觑。天然河流的水流结构与河床形态之间相互依存、相互制约,处于一个相对平衡状态,当在天然河流上修建水库时,水流结构与河床形态之间的相对自然平衡被破坏,导致二者重新调整,造成水流挟沙能力降低,大量泥沙在库内淤积,而这种调整至其建立新的相对平衡是一个漫长的过程,在这一过程当中,泥沙淤积将消耗大量库容,危及水库供水效益的发挥,甚至威胁水库寿命,加速水库报废。

鉴于此,在多泥沙河流上修建的供水水库,就必须妥善解决泥沙淤积带来的库容损耗问题,而水库泥沙淤积的数量、部位及形态,在来水来沙一定的条件下,直接与水库的调度运行方式有关。因此,针对水库兴建后上下游新的边界条件,对水库调度运行方式进行完善、调整及优化,分析计算不同水库调度运行方式下,水库库区河道冲淤演变情况、兴利效益发挥程度(如可供水量多寡)等,不仅对实际工程有重要的现实意义,而且在科学研究上也是一个水库泥沙冲淤数值模拟、优化调度等多学科交叉结合的课题,非常值得深入研究。

多泥沙河流上的水库由于河流水体中挟带大量泥沙,其调度运行方式要较清水或少泥沙河流上的水库复杂得多。不仅需要调节径流,蓄盈补缺,满足用水要求,还需要调节泥沙,以减少有效库容淤损,使水库长期发挥效益,而且从某种意义上讲,泥沙调节甚至可以成为调度运行方式的控制因素。因此,如何合理地选择确定多泥沙河流上水库的调度运行方式,一直受到国内外学者的广泛关注,目前也已有了较多的研究成果,例如杜殿勋等^[1]将经验、半

经验泥沙冲淤计算模型嵌入随机动态规划决策模型,建立了水库水沙联合调度随机动态规划模型,对三门峡水库的水沙综合调节优化调度运用进行了研究;练继建等^[2]将遗传优化算法与神经网络快速预测淤积量计算模型相结合,建立了多沙河流水库水沙联合调度多目标规划模型;彭杨等^[3]以水库防洪、发电及航运调度计算为基础,采用多目标理论和方法,提出了水库水沙联合调度的多目标决策模型;包为民等^[4]运用异重流总流微分模型预测水库坝址泥沙的运动过程,再根据坝址洪水的水沙特点,进行了以出库排沙比最大为目标的水沙联合调度模型研究;吴腾等^[5-6]将自适应控制的原理引入到多沙河流水库运用中,建立了多沙水库自适应控制运用模式。以上成果分别从不同角度、运用不同方法对多沙水库水沙联合优化调度问题进行了研究,但由于多沙水库来水来沙条件的随机性、非线性,水沙关系较为复杂,因此各研究成果均局限于某一特定问题,且大多侧重于水电站水库的优化调度,而对西北产能区规划建设众多的以“以供定需”为基本供水原则的供水水库研究涉足不多。为弥补此不足,本研究运用水沙数学模型与优化理论的基本思想,构建多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度的耦合模型,并将其应用到拟建于泾河一级支流黑河、以解决彬长矿区工业及城镇生活用水为主要目标的亭口水库,就水库的调度运行方式选择及供水规模确定等问题展开讨论,以期多泥沙河流供水水库运行方式的选择提供参考。

1 水沙联合优化调度耦合模型的构建

多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,由水库优化调度动态规划子模型及泥沙冲淤计算子模型 2 部分构成,子模型之间通过参数及数据的相互传递,实现对模型定解条件的影响,从而使 2 个子模型组成一个耦合模型,其计算流程^[7-9]如图 1 所示。由图 1 可见,采用多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型对水库调度运行方式选择及供水规模确定等问题进行研究时,其实施步骤可以概括如下。

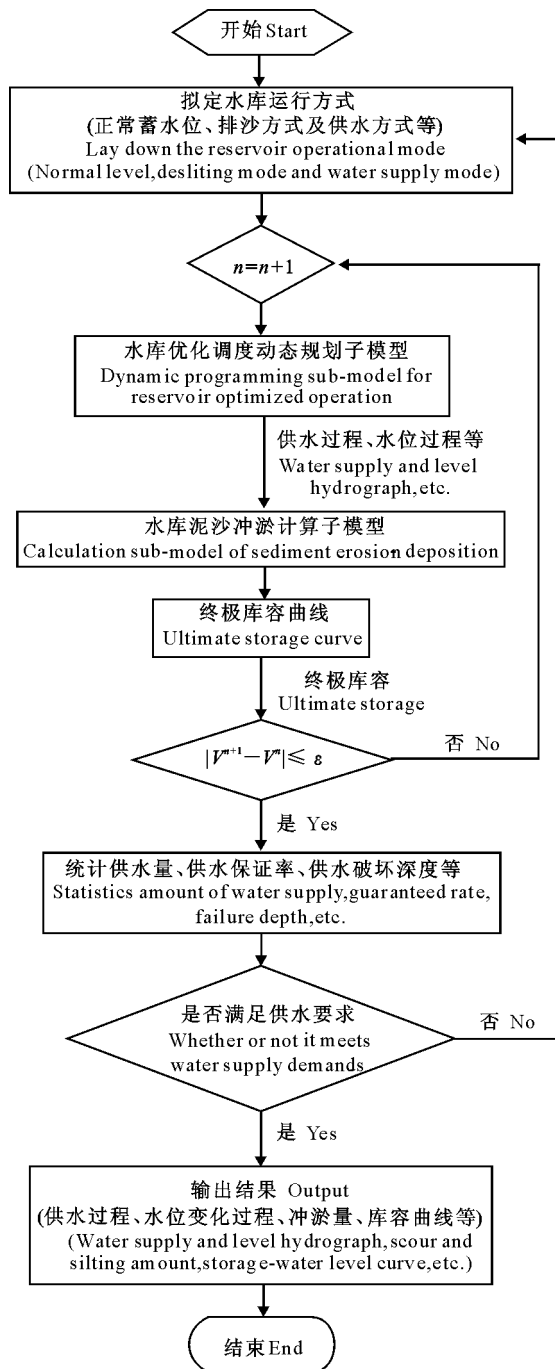


图 1 水沙联合优化调度耦合模型的计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of water-sediment coordinative optimized dispatch

1) 根据长系列(或典型年)历史水文资料,分析入库水沙特性,同时结合水库开发目标要求,初步拟定水库调度运行方式,包括蓄水方式、排沙方式及供水方式等。

2) 运用以调度期内供水量最大为目标,并考虑排沙约束的多泥沙河流供水水库优化调度动态规划子模型,依照步骤 1) 拟定的水库调度运行方式,进

行调节计算,输出水库供水过程、库水位(库容)变化过程等参数。

3) 运用水库泥沙冲淤计算子模型,调入上述水库优化调度动态规划子模型的输出参数,作为其边界条件,进行库区泥沙冲淤计算,输出水库运行若干年后的库容曲线、冲淤量等参数。

4) 将步骤 3) 输出的库容曲线与初始库容曲线($n=1$ 时)或前一计算层次输出的库容曲线($n>1$ 时)进行比较,若两者无限接近至满足计算控制精度 ϵ , 则判定水库冲淤达到基本平衡,步骤 3) 输出的库容曲线即为终极库容曲线,此时可统计相关供水参数(包括可供水量、供水保证率、供水破坏深度等);否则,将步骤 3) 输出的库容曲线调入水库优化调度动态规划子模型,改变模型的库容约束条件,并返回步骤 2) 开始下一层次计算,直至水库冲淤达到基本平衡。

5) 依据实际供水目标要求,判断步骤 4) 输出的可供水量、供水保证率、供水破坏深度等供水参数是否满足供水要求。若满足,则输出模型最终计算成果,包括水库供水过程、库水位变化过程、终极库容曲线、冲淤量等;若不满足,则返回步骤 1) 重新调整拟定水库调度运行方式,并依次重复实施步骤 2)~5), 直至最终满足供水要求。

通过以上步骤,可以对不同调度运行方式下水库的供水情况及泥沙冲淤情况进行预测,据此即可优选出合理的水库调度运行方式,并为水库规模确定提供依据。

1.1 供水水库优化调度动态规划子模型

供水水库的优化调度一般是先按一定的水库调度规则、供水要求等将调度期划分为若干阶段,然后通过蓄、泄水过程的合理调控使整个调度期内的供水量(或供水效益)达到最大,这是一个典型的多阶段决策过程,而动态规划是解决多阶段决策过程最优化的有效方法之一。对于以工业、城市生活供水为主要目标,兼具发电、防洪等目标的供水水库,在已知长系列入库径流过程时,可构建以供水量最大为目标,考虑排沙、等流量(供水过程均匀)等约束条件,并遵循“以供定需”原则的多沙河流供水水库优化调度确定型动态规划模型。模型具体描述如下^[10]:

1) 阶段变量。 $t=1, 2, \dots, N$, 表示调度期内的第 t 个时段(月、旬或日等)。

2) 决策变量。第 t 个时段的水库供水量 x_t (m^3/s)。

3) 状态变量。 t 时段初始水库蓄水量 V_t (万 m^3)。

4) 状态转移方程。根据水库水量平衡方程可得:

$$V_{t+1} = V_t + (Q_t - x_t - WS_t - E_t) \cdot \Delta t \cdot 10^{-4},$$

$$(t=1, 2, \dots, N-1)。(1)$$

式中: V_{t+1} 为 t 时段末水库蓄水量(万 m^3), Q_t 为 t 时段内水库入库水量(m^3/s), WS_t 为水库弃水量(含生态基流)(m^3/s), E_t 为水库蒸发渗漏损失水量(m^3/s), Δt 为当前计算时段长度(s)。

5) 目标函数。以调度期内供水量最大为目标, 即:

$$\max W = \sum_{t=1}^N (x_t \cdot \Delta t \cdot 10^{-4}), (t=1, 2, \dots, N)。(2)$$

式中: W 为供水总量(万 m^3)。

6) 约束条件。

① 蓄水量约束。即:

$$V_{t,\min} \leq V_t \leq V_{t,\max}, (t=1, 2, \dots, N)。$$

式中: $V_{t,\min}$ 为第 t 时段水库的最小蓄水量, 通常为死水位所对应的库容; $V_{t,\max}$ 为第 t 时段水库最大蓄水量, 在特定枯水枯沙年份为正常蓄水位所对应的库容, 其他年份在非汛期为正常蓄水位所对应的库容, 汛期排沙水位所对应的库容(汛期又可细分为汛前期与汛后期, 分别采用不同的排沙水位)。

② 放水量约束。即:

$$x_{t,\min} \leq x_t \leq x_{t,\max}, (t=1, 2, \dots, N)。$$

式中: $x_{t,\min}$ 为第 t 时段水库放水量下限值, 通常为生态基流量; $x_{t,\max}$ 为第 t 时段水库供水量上限值, 与输水建筑物规模有关。

③ 等流量约束。即:

$$x_t = x_{t+1}, (t=1, 2, \dots, N-1)。$$

对于工业、城镇生活供水水库, 为满足其高保证率、低破坏深度的供水要求, 各时段供水量应尽可能拉平, 以使水库供水过程均匀平稳。为达此目的, 可依等流量约束条件逐时段进行水量平衡, 在已知来水系列过程及水库调节库容的前提下, 按照“以供定需”的原则推求水库供水过程。

④ 汛期敞泄排沙约束。即: $x_t = 0$ 。

建于多泥沙河流上的供水水库为确保其有效库容、延长水库使用寿命, 当汛期来流量及含沙量达到一定临界值后, 通常会进行敞泄排沙, 此时水库停止供水, 该约束条件亦可归至放水量约束中, 即将第 t 个时段水库放水量下限值 $x_{t,\min}$ 取为 0, 但鉴于该条

件的特殊性, 这里将其单独列出。

⑤ 库水位日消落幅度约束。即: $\Delta z \leq 10 \text{ m}$ 。

式中: Δz 为库水位日消落幅度。

依据相关规范, 为安全起见, 水库水位日消落幅度不能过大, 一般不应大于 10 m。

⑥ 非负约束。即上述所有变量均为非负。

7) 边界条件。水库初始、最终蓄水量均为死库容 V_d , 即 $V_1 = V_N = V_d$ 。

1.2 多沙水库泥沙冲淤计算子模型

泥沙冲淤计算数学模型是目前研究水库泥沙问题的重要手段之一, 模型以水流、泥沙运动力学及河床演变基本规律为基础而建立, 所依据的基本控制方程有水流连续方程、水流运动方程、泥沙连续方程和河床变形方程, 同时辅以水流挟沙力、水流阻力等计算公式以封闭方程组。

考虑工程实际应用对模型计算运行速度的要求, 本研究以目前比较成熟的一维非均匀悬移质不平衡输沙理论为基础, 构建多沙水库泥沙冲淤计算子模型。该模型可模拟长历时、长河段河床变形(泥沙冲淤)过程, 能够给出库区冲淤量及一维纵向冲淤形态、水位、流速、悬移质含沙量、悬移质级配等水力泥沙要素。

模型所依据的基本控制方程^[11-12]具体描述如下。

水流连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0。(3)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_1 \frac{Q^2}{A} \right) + u_l q_l + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J \right) = 0。(4)$$

泥沙连续方程:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \gamma'_s \frac{\partial A_d}{\partial x} - q_d = 0。(5)$$

河床变形方程:

$$\gamma'_s \frac{\partial A_d}{\partial t} = \alpha \omega B (S - S_*)。(6)$$

式中: A 为过水断面面积(m^2), t 为时间(s), x 为流程(m), Q 为断面平均流量(m^3/s), α_1 为动能修正系数, u_l 为侧向入流流速在主流方向的分量(m/s), q_l 为侧向入流量(m^3/s), g 为重力加速度(m/s^2), Z 为水位(m), J 为能坡, Q_s 为输沙率(kg/s), γ'_s 为淤积物干容重(N/m^3), A_d 为冲淤面积(m^2), q_d 为单位长度内侧向输沙率($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$), α 为恢复饱和系数, ω 为沉速(m/s), B 为河宽(m), S 为断面平均含沙量(kg/m^3), S_* 为断面平均水流挟沙力(kg/m^3)。

考虑到模型主要是基于多沙水库而构建,因此模型中涉及的一些有别于一般清水或少沙水库的关键问题,如非均匀沙沉速、水流挟沙力、水流分组挟沙力、挟沙力级配等,需加以特别处理。

1) 非均匀沙沉速。考虑到多泥沙河流中泥沙对泥沙悬浮液介质容重和粘滞性的影响,以及群体泥沙沉降时颗粒间的相互阻尼作用,各粒径组泥沙在浑水中的沉速计算公式须通过相应粒径组泥沙在清水中的沉速计算公式修正而得。

当粒径等于或小于 0.062 mm 时,泥沙沉降处于层流区,采用修正后的斯托克斯公式计算沉速,即:

$$\omega_i = \frac{g}{1800} \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_m} \frac{d_i^2}{\nu_m} (1 - S_V)^{4.91} \quad (7)$$

式中: ω_i 为第 i 粒径组泥沙在浑水中的沉速 (cm^2/s), ρ_m 、 ρ_s 分别为泥沙密度及浑水密度 (g/cm^3), d_i 为第 i 粒径组泥沙代表粒径 (mm), ν_m 为浑水的运动粘滞系数 (cm^2/s), S_V 为浑水的体积比含沙量。其余符号意义同前。

当粒径介于 0.062~2.0 mm 时,泥沙沉降处于过渡区,采用修正后的沙玉清天然沙沉速公式^[13]计算沉速,即:

$$\omega_i = Sa_m g^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} \right)^{\frac{1}{3}} \nu_m^{\frac{1}{3}} (1 - S_V)^{4.91}, \quad (8a)$$

$$\lg Sa_m = \sqrt{39.0 - (\lg \Phi_m - 5.777)^2} - 3.790, \quad (8b)$$

$$\Phi_m = \frac{g^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} \right)^{\frac{1}{3}} d_i}{10 \nu_m^{\frac{2}{3}}} \quad (8c)$$

式中: γ_s 、 γ_m 分别为泥沙和浑水容重 (N/m^3), Sa_m 、 Φ_m 分别为沉速判数及粒径判数。其余符号意义同前。

非均匀沙的群体沉速采用下式计算:

$$\omega = \sum_{i=1}^n P_i \omega_i \quad (9)$$

式中: ω 为非均匀沙在浑水中的平均沉速 (m/s), P_i 为第 i 粒径组泥沙占全沙的重量百分比。其余符号意义同前。

2) 水流挟沙力。采用张红武等^[14]提出的全沙挟沙力公式计算,该公式不仅适用于一般挟沙水流,而且适用于高含沙紊流,在工程实际中有着重要的意义,公式如下:

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_V) U^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} g h \omega} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62} \quad (10)$$

式中: U 为流速 (m/s), h 为水深 (m), κ 为浑水卡门常数, D_{50} 为床沙中值粒径 (mm)。其余符号意义同前。

3) 挟沙力级配及水流分组挟沙力。河流中的泥沙一部分由上游来水挟带而来,另一部分则是由于水流的紊动扩散作用从床面上扩散而来。因此,悬移质挟沙力级配既与床沙级配有关,又与上游来沙级配有关,基于这样的认识,采用韩巧兰等^[15]提出的公式计算挟沙力级配,即:

$$P_{*i} = \theta P_i + (1 - \theta) P'_{*i}, \quad (11a)$$

$$P'_{*i} = P_{bi} \left[\frac{\omega}{\omega_i} \right]^m / \sum_{i=1}^n P_{bi} \left[\frac{\omega}{\omega_i} \right]^m \quad (11b)$$

式中: P_{*i} 为分组挟沙力级配; θ 为加权因子,取决于上游来沙和床沙条件; P_i 为来沙级配; P'_{*i} 为床沙级配; P_{bi} 为原床沙级配; m 为由实测资料率定得到的指数。其余符号意义同前。

由式(11)计算出分组挟沙力级配 P_{*i} , 式(10)计算出总挟沙力 S_* , 则分组水流挟沙力 S_{*i} 可用下式计算:

$$S_{*i} = P_{*i} S_* \quad (12)$$

上述子模型的定解条件包括初始条件和边界条件,初始条件为水库库区初始地形及床沙级配等;边界条件为上游入口水沙过程、沿程水沙汇入(或流出)过程以及下游出口水位过程等。模型采用非耦合解法,即先求解水流连续方程和水流运动方程,得出相关水力要素后,再求解泥沙连续方程和河床变形方程,解得河床冲淤成果,然后计算悬移质泥沙级配等,如此交替进行。

2 水沙联合优化调度耦合模型的应用

2.1 算例概况

黑河亭口水库工程地处陕西省咸阳市长武县境内,位于彬(彬县)长(长武县)矿区中部,处于泾河一级支流黑河干流末端,水库坝址距黑河入泾河口仅 2 km。工程开发目标以工业及城镇生活供水为主,同时兼具防洪、发电等功能,是解决彬长矿区生产、生活用水的重要水源工程之一。亭口水库所在流域地处黄土高原强侵蚀区,径流多由暴雨形成,入库流量变幅大、含沙量高,属多泥沙河流水库。据 1954—2005 年共计 52 年的入库水沙过程统计,亭口水库多年平均入库流量为 7.62 m^3/s , 入库含沙量为 60.18 kg/m^3 , 水少沙多的问题极为突出。

作为一座典型的多泥沙河流供水水库,亭口水库供水与排沙减淤之间的矛盾尤其尖锐。首先,水

库的开发目标决定其供水保证率要求比较高,设计供水月保证率不小于 90%,供水破坏深度不大于 20%;其次,水库入库沙量大、库沙比小,如不适时进行排沙,库区泥沙淤积将会十分严重,难以保持长期终极有效库容,水库效益发挥也将受到极大制约;第三,水库排沙方式的合理与否将直接影响水库供水要求的满足程度。

综合考虑上述 3 方面因素,认为亭口水库工程规模的确定,不但受水量调节的制约,亦受泥沙调节的影响,因此拟采用前文构建的水库水沙联合优化调度耦合模型,对不同运行方式下水库的供水、冲淤情况进行比较计算,进而确定出水库的合理工程规模及运行方式。

2.2 计算方案

在确保亭口水库大坝防洪安全的前提下,以充分利用来水资源、优先保证生态用水、最大限度地满足工业城镇供水需求、尽量减少库区泥沙淤积为基本原则,同时考虑保持水库长期有效库容,使水库长期发挥效益,来拟定水库的调度运行方式。拟定过程中,需考虑的问题包括:合理设置排沙期,对入库水沙进行多年调节;设置反调节库,解决相机敞泄排沙期间的供水问题;优选排沙流量及沙限,协调供水与排沙的矛盾;尽量提高供水保证率。

依据上述原则及条件,拟定如下 4 种水库运用方式作为计算方案,分别进行水沙联合调节计算,通过方案比选确定合理的水库运行方式。

1)方案 1。分期蓄水运用,相机排沙。

① 正常蓄水位:第 1~10 年为 875 m;第 11~20 年为 880 m;第 21~30 年为 885 m;第 31~40 年为 890 m;第 41~52 年为 893 m。

② 排沙方式。7—8 月为排沙期,排沙期内 $Q \geq$

$30\text{ m}^3/\text{s}$ 且 $S \geq 50\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,敞泄排沙;特枯年份不排沙。

③ 供水方式及要求。以水库供水为主,敞泄排沙期不能供水时由 700 万 m^3 辅助反调节池供水;供水月保证率不小于 90%,破坏深度不大于 20%。

2)方案 2。分期蓄水运用,汛期低水位相机排沙。

① 正常蓄水位。同方案 1。

② 排沙方式。7—8 月为排沙期,排沙期内 $Q \geq 30\text{ m}^3/\text{s}$ 且 $S \geq 50\text{ kg}/\text{m}^3$ 时,敞泄排沙,且 07-01—08-10 低水位运行,有效库容不大于 200 万 m^3 ;特枯年份不排沙。

③ 供水方式及要求。同方案 1。

3)方案 3。蓄水运用,汛期低水位相机排沙。

① 正常蓄水位。893 m。

② 排沙方式。同方案 2。

③ 供水方式及要求。同方案 1、2。

4)方案 4。控制蓄水运用,汛期低水位相机排沙。

① 正常蓄水位:第 1~40 年水位在 880~893 m,且库容不大于 4 000 万 m^3 ;第 41~52 年为 893 m。

② 排沙方式。同方案 2、3。

③ 供水方式及要求。同方案 1、2、3。

2.3 计算结果及分析

采用前文构建的多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,分别依照上述拟定的 4 种不同水库调度运行方式进行水沙联合调节计算。计算结果主要包括各方案下亭口水库冲淤、供水两方面的情况,详见表 1。

表 1 不同运行方式下亭口水库水沙联合调节计算结果

Table 1 Results of water-sediment coordinative dispatch in different operational modes

方案 编号 Plan number	冲淤情况 Scour and silting condition			供水情况 Water supply condition		
	剩余有效库容/ (万 m^3)	排沙比/% Sediment evacuation ratio	累计淤积量/ (万 m^3) Accumulated deposit volume	多年平均供水量/ (万 m^3) Amount of water supply	月保证率/% Monthly guaranteed rate	最大破坏深度/% Maximum failure depth
	Residual storage					
1	2 502	68.5	17 892	6 320	93.63	19.99
2	3 964	69.5	17 347	7 203	95.23	19.97
3	3 093	66.4	19 089	7 181	94.07	19.99
4	3 755	70.7	16 637	7 210	94.81	19.98

由表 1 可以看出,亭口水库依照方案 1 运行 52 年后,累计淤积量相对较大,剩余有效库容、多年平均供水量均最小,在供水保证率及破坏深度要求下

无法满足供水目标。方案 2 水库运用 52 年后,亭口水库累计淤积量虽相对较小,剩余有效库容、多年平均供水量亦均较大,但是分期逐步抬高蓄水位的运

行方式过于死板,难以适应亭口水库入库水沙变幅大的特点,导致运行期内出现蓄水位低、库容过小的不利状况,运行期内无法满足供水目标的年份较多。方案 3 与方案 4 相比,在水库冲淤方面,方案 4 优势较大,亭口水库运行 52 年后,其剩余有效库容大、累计淤积量小;在水库供水方面,两方案则相差无几,但就水库运行管理的难易度、可操作性而言,方案 3 明显优于方案 4。综合上述比选分析,从冲淤、供水及实际运行 3 方面考虑,确定亭口水库的运行方式以方案 3 为佳。

表 2 方案 3 运行方式下亭口水库不同正常蓄水位时水沙联合调节计算结果

Table 2 Results of water-sediment coordinative dispatch in the plan 3 operational mode and the different normal storage level conditions

项目 Item	指标 Index	正常蓄水位/m Normal storage level		
		892	893	894
水库参数 Reservoir parameters	初始库容/($\times 10^8\text{ m}^3$)	1.91	2.02	2.14
	Initial storage			
运行情况 Operational aspect	运行年限/年 Operating period	52	52	52
	排沙水位/m Sediment evacuation level	892	893	894
冲淤情况 Scour and silting condition	冲淤平衡年限/年 Silt stable age limit	42	42	42
	多年平均淤积量/(万 m^3) Multiannual mean deposit volume	372	382	390
	多年平均排沙比/% Multiannual mean sediment evacuation ratio	67.2	66.4	65.8
	52 年后剩余有效库容/(万 m^3) Residual storage 52 years later	2 747	3 093	3 328
供水情况 Water supply condition	多年平均可供水量/(万 m^3)	7 094	7 181	7 189
	Multiannual mean water supply amount			
	月供水保证率/% Monthly guaranteed rate	95.51	94.07	93.36
	最大破坏深度/% Maximum failure depth	19.95	19.99	19.97

由表 2 可以看出,随着正常蓄水位的升高,运行 52 年后亭口水库剩余有效库容及多年平均可供水量均逐渐增大,但增幅呈递减趋势。其中,当正常蓄水位由 892 m 抬高至 893 m 时,剩余有效库容增大 346 万 m^3 (增幅约 13%),多年平均可供水量增大 87 万 m^3 (增幅约 1.2%);当正常蓄水位由 893 m 抬高至 894 m 时,剩余有效库容增大 235 万 m^3 (增幅约 8%),多年平均可供水量增大 8 万 m^3 (增幅约 0.1%)。据此可以判断,从供水角度而言,正常蓄水位由 893 m 抬高至 894 m 时,多年平均可供水量增幅已微乎其微,徒升水位对可供水量的增加无益;就冲淤而言,情况类似,即随着蓄水位的抬升,剩余有效库容虽有所增加,但增幅不大。因此,确定亭口水库的正常蓄水位为 893 m。

至此,采用本研究构建的多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,通过方案比选确定了亭口水库的合理运行方式及工程规模。依照“蓄水运用,汛期低水位相机排沙”(方案 3)的水库调度运行方式,在正常蓄水位为 893 m 时,亭口水库运行 52 年间入流及供水变化过程见图 2,水位变化过程

通过前述比选分析确定水库运行方式后,需对水库规模进行进一步的明确与优化,为此在方案 3 的基础之上再拟定 3 种水库正常蓄水位方案,3 种方案正常蓄水位分别为 892,893 及 894 m。针对此 3 种正常蓄水位方案,同样采用前文构建的多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,依照方案 3 水库调度运行方式进行水沙联合调节计算,综合分析不同水库规模下冲淤、供水等结果(表 2),据此确定水库的合理工程规模。

见图 3,逐年累计淤积量见图 4,库容见图 5。

由图 2 可以看出,在满足设计供水月保证率不小于 90%、供水破坏深度不大于 20%的条件下,按照“以供定需”的原则推求出水库供水过程,在水库运行的 52 年间,供水过程均匀平稳,最大年供水量约为 7 261 万 m^3 ,最小年供水量约为 6 464 万 m^3 ,多年平均供水量约为 7 181 万 m^3 。

由图 3 可以看出,亭口水库由运行初的死水位开始蓄水,运行 52 年间,由于受汛期低水位相机排沙运行方式的影响,水位变化幅度较大,其间历经了若干次的蓄满、放空过程,至运行期末库水位降至死水位,完成整个水量调节过程。

由图 4 可以看出,亭口水库运行初期淤积增加较快,运行约 23 年后,由于汛期低水位不定期相机排沙的运用,有效抑制了水库淤积发展的速度,淤积增加逐渐趋缓,至运行 42 年后,淤积已基本不再发生大的变化,水库接近冲淤平衡状态。

由图 5 可以看出,水库运行初期,由于淤积量较大,库容曲线变化幅度较大,当进入正常运行阶段后,淤积增加逐渐趋缓,库容曲线亦相应趋缓。

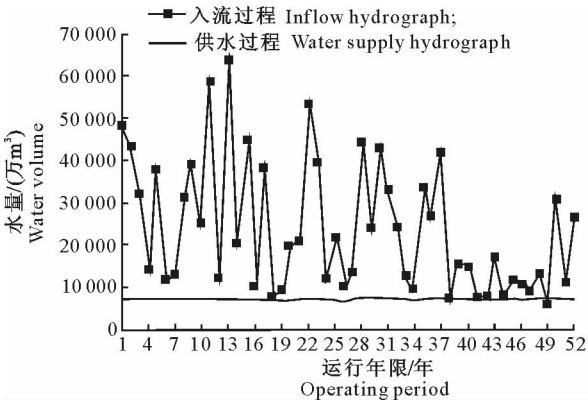


图 2 亭口水库运行 52 年间的入流与供水变化过程
Fig. 2 Inflow and water supply hydrograph of Tingkou reservoir during the 52 operation years

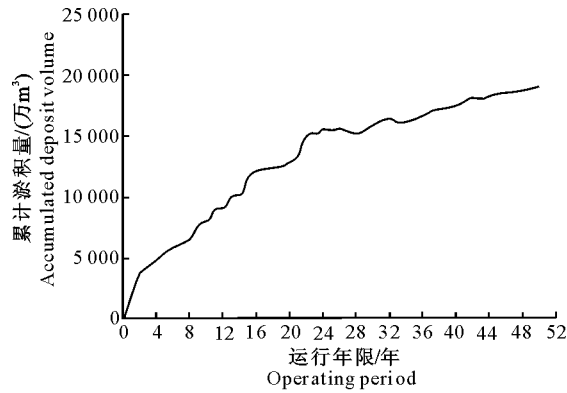


图 4 亭口水库运行 52 年间逐年累计淤积量
Fig. 4 Accumulated yearly deposit volume of Tingkou reservoir during the 52 operation years

3 结 语

建于多泥沙河流上的供水水库,始终存在供水与排沙减淤这一矛盾,为协调二者之间的关系,使水库既能充分发挥供水效益,又不至于因泥沙淤积而损耗过多库容,拟定合理的水库调度运行方式至关重要,为此本研究运用水沙数学模型与优化理论的基本思想,构建了多泥沙河流供水水库水沙联合优化调度耦合模型,据此模型可有效开展水库调度运行方式的优化比选研究。

该模型由水库优化调度动态规划子模型及泥沙冲淤计算子模型 2 部分构成。其中,前者以供水最大为目标,考虑排沙、等流量等约束条件,并遵循“以供定需”的调节原则;后者以一维非均匀悬移质不平衡输沙理论为基础,同时针对多沙特性,就模型中非均匀沙沉速、水流挟沙力、挟沙力级配等关键问题给予了特别考虑。2 个子模型之间通过参数及数

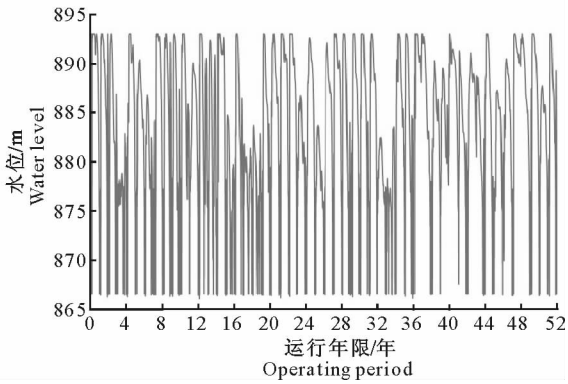


图 3 亭口水库运行 52 年间库水位的变化过程
Fig. 3 Water-level hydrograph of Tingkou reservoir during the 52 operation years

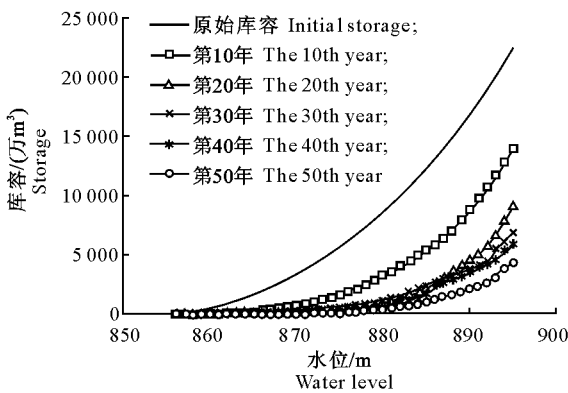


图 5 亭口水库运行 52 年间的库容变化
Fig. 5 Storage-water level curve of Tingkou reservoir during the 52 operation years

据的相互传递,实现对模型定解条件的影响,从而组成一个耦合模型。

为检验模型的实际应用效果,本研究将其应用到亭口水库调度运行方式的优化比选工作中,结果表明,对于亭口水库这一典型的多泥沙河流供水水库而言,适宜采用“蓄水运用,汛期低水位相机排沙”的调度运行方式。在方案优选的过程中,本研究构建的模型具有较强的合理性及较广的适用性,为多泥沙河流水库水沙联合调度这一难题提供了一条行之有效的解决途径。

[参考文献]

[1] 杜殿勋,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.
Du D X, Zhu H S. A study on the optimal operation scheme of the Sanmenxia reservoir through comprehensive regulation of incoming runoff and sediment [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1992(2):12-24. (in Chinese)
[2] 练继建,胡明罡,刘媛媛. 多沙河流水库水沙联调多目标规划研

- 究 [J]. 水力发电学报, 2004(2): 12-16.
- Lian J J, Hu M G, Liu Y Y. Research of multi-objective operation of water and sand in reservoir on sandy river [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004(2): 12-16. (in Chinese)
- [3] 彭 杨, 李义天, 张红武. 水库水沙联合调度多目标决策模型 [J]. 水利学报, 2004(4): 1-7.
- Peng Y, Li Y T, Zhang H W. Multi-objective decision-making model for coordinative dispatch of water and sediment in reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4): 1-7. (in Chinese)
- [4] 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(6): 101-105.
- Bao W M, Wan X Y, Jing Y D. Study on joint scheduling model of water and sediment in sediment-laden reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(6): 101-105. (in Chinese)
- [5] 吴 腾. 多沙河流水库自适应控制运用研究与应用 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- Wu T. An adaptive control method of reservoir operation in sediment-laden rivers and its application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [6] 吴 腾, 钟德钰, 张红武. 水库自适应控制运用模型及其在亭口水库的应用 [J]. 水力发电学报, 2010(3): 97-102, 131.
- Wu T, Zhong D Y, Zhang H W. An adaptive control model of reservoir operation and its application to Tingkou reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010(3): 97-102, 131. (in Chinese)
- [7] John W N, Larry W M. Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000, 126(4): 232-242.
- [8] Carlos C C, Larry W M. Optimization modeling for sedimentation in alluvial rivers [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1993, 121(3): 251-259.
- [9] Carlos C C, Larry W M. Optimal control approach for sedimentation control in alluvial rivers [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1994, 121(6): 408-417.
- [10] 尚松浩. 水资源系统分析方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 116-122.
- Shang S H. System analysis of water resources: methods and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 116-122. (in Chinese)
- [11] 王新宏. 冲积河道纵向冲淤和横向变形数值模拟研究及应用 [D]. 西安: 西安理工大学, 2000.
- Wang X H. Development and application of a numerical model for bank erosion and sediment transport in alluvial Rivers [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [12] 江恩惠, 赵连军, 张红武, 等. 多沙河流洪水演进与冲淤演变 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 195-204.
- Jiang E H, Zhao L J, Zhang H W, et al. Numerical models of flood routing and morphological changes in sediment-laden rivers and applications [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2008: 195-204. (in Chinese)
- [13] 沙玉清. 泥沙运动学引论 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996: 40-55.
- Sha Y Q. Introduction to silt kinematics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996: 40-55. (in Chinese)
- [14] 张红武, 吕 昕. 弯道水力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 35-42.
- Zhang H W, Lü X. Bend hydraulics [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1993: 35-42. (in Chinese)
- [15] 韩巧兰, 张启卫. 分组水流挟沙力级配计算方法初探 [J]. 吉林水利, 2006(1): 1-3.
- Han Q L, Zhang Q W. Primary research on calculation method for gradation of sediment-laden capacity of sediment fluid flow [J]. Jilin Water Resources, 2006(1): 1-3. (in Chinese)