

水库实时防洪调度方案快速生成模型研究

陈见长, 梁国华, 何斌, 祝许珂, 魏国振
(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水库实时防洪调度存在不确定性信息, 决策者往往需通过调整水位、泄量等约束以快速生成不同调度方案进行参考。针对该需求, 首先建立了基于 POA 的防洪优化调度模型, 使该模型具有较快的优化速度和较好的收敛性; 其次将模型与考虑预报降雨级别的启发信息相结合, 使计算结果符合泄流规律, 具有更好适用性; 最后细化模型的约束模式, 使决策者能够方便地调整约束策略, 增强了模型的交互性。以白山水库为工程背景, 计算结果表明, 该模型能够适应多变的决策要求快速生成可行方案, 并有效降低最高水位、最大泄量, 具有一定的参考性。

关键词: 实时防洪调度; 逐步优化算法(POA); 启发信息; 方案快速生成; 白山水库

中图分类号: TV697.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)04-0124-07

Research on the fast model to generate real-time flood-control operation scheme for reservoir

CHEN Jianchang, LIANG Guohua, HE Bin, ZHU Xuke, WEI Guozhen
(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: There are uncertain information in real-time flood-control for reservoir, and decision makers often need to adjust the water level, outflow and other constraints to generate different operation schemes for reference. Aiming at this demand, firstly, this article established optimized dispatching model based on POA, which makes the model has better rate of optimization and astringency. Secondly, in order to make the calculation results accord with laws of outflow and have better applicability, the model is combined with the heuristic information considering the forecasting rainfall level. Last, in order to make decision makers can easily adjust the constraints strategy and add more interactivity of the model, the model's method of constraint is refined. Taking Baishan reservoir as the engineering background, the calculation results show that the model can adapt to the changeable decision-making requirements and quickly generate feasible scheme. It can also reduce the maximum water level and maximum outflow, which can be used as a reference.

Key words: real-time flood-control operation; progressive optimization algorithm(POA); heuristic information; fast scheme-generation; Baishan reservoir

1 研究背景

实时防洪优化调度一直是水库防洪调度研究的热点。为了增强实时调度阶段优化模型的实用性, 目前国内外学者做了大量的研究。例如, 为加强模型的优化特性, 拟态物理学算法^[1]、人工鱼群算法^[2]、多目标免疫算法^[3]等新算法相继运用于防洪

优化调度模型中, 取得了较好的优化效果; 动态规划算法^[4-5]、粒子群算法^[6-7]等经典算法的改进, 提高了模型的优化特性, 较好地解决了水库调度的“维数灾”等问题, 提高了模型的收敛性和计算速度。同时, 为加强模型的智能性, 决策模糊推理与神经网络算法相结合^[8]、预泄经验与启发式 POA 相结合^[9]、事例推理技术与遗传禁忌算法相结合^[10]等建

收稿日期: 2017-04-14; 修回日期: 2017-05-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT16ZD204); 国家重点研发计划课题(2016YFC0400903)

作者简介: 陈见长(1992-), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 研究方向为防洪调度及其系统开发。

通讯作者: 何斌(1977-), 男, 浙江舟山人, 博士, 副教授, 研究方向为洪水预报与调度。

立的防洪调度模型,加入了人的经验因素,提高了模型的交互性与智能性。然而,不可避免的问题是,在水库实时防洪调度过程中,决策者需面临很多不确定性信息。而针对这些信息,决策者会面对多种防洪调度要求(如水库的错峰调度、补偿调节等),因此决策者希望能够通过设置某时间段内的水库水位、泄流量等指标,以做出多种有效的防洪调度方案进行对比和选择,这一过程通常需要优化模型快速生成方案并且合理可行。但是,大部分防洪优化调度模型存在约束条件变化不灵活、交互性缺乏、结果不可行等问题,不能较好地处理决策者多变的防洪调度要求,无法较好地运用在实时防洪优化调度过程中。

针对以上问题,为使生成的防洪调度方案具有可行性和实用性,本文考虑将水雨情信息与启发式相结合,制定水库一般泄流规律作为启发信息,并运用于逐步优化算法(POA)中,建立可行调度方案寻优模型。同时,为使模型能适应多种防洪调度要求,细化模型的约束模式,使得水库水位、泄流量约束能够根据决策者的要求灵活变动,以适应生成多种方案的需求。通过以上两种方式,建立实时防洪调度方案快速生成模型。

2 实时防洪调度方案快速生成模型

2.1 实时防洪调度方案快速生成需求分析

水库实时防洪调度往往面临着多变的水雨工情信息,决策者需根据这些信息制定多种有效调度方案进行参考和选择,以更好地协调水库上游、大坝、下游的防洪矛盾。因此,实时防洪调度所具有的信息多变,时间紧迫等特点,决定了决策者需要一种能够根据其提出的多种约束要求,快速生成多种有效

防洪调度方案的模型。其中,决策者的多种约束要求一般是指水库水位、水库泄量的多种组合,水位决定了水库上游的防洪安全和大坝本身的安全,泄量决定了下游的防洪安全;而有效是指在某约束条件下目标函数较优的方案(非劣解)。

决策者根据水雨情等信息,为协调上下游的防洪矛盾,通常会提出如某几个时段内水库水位、泄流量不高于某值时,水库能否调度、如何调度等类似问题。那么,在实时防洪调度方案求解过程中,若在该约束组合下,方案不可行,则可以再次调整参数,生成其他方案;若方案可行,决策者更希望方案为有效解,且适用性强,符合水库泄流规律。因此,该过程对模型的要求一是优化计算速度要快,二是方便决策者设置约束组合参数,三是生成的可行方案具有有效性、适用性。

针对以上实时防洪调度方案快速生成的需求,本文建立的模型从三个方面入手:(1)建立基于POA的防洪优化调度模型,使该模型具有较高的优化运算速度;(2)细化优化模型的水位、泄流约束模式,使决策者能在某时间区间内设置水库水位、泄流量约束组合,增强模型的交互性;(3)通过考虑预报降雨量级、水库水位、水库入流的状态,制定水库泄流变化的一般规律作为启发信息,运用于POA算法的寻优过程中,使得调度方案具有合理性、适用性。

2.2 加入预报降雨量级的启发信息

水库实时调度阶段存在复杂多变的水雨情信息,对水库泄流过程存在一定的影响。目前,降雨量级的预报达到了较高的水平,可以在实时调度中进行利用^[11]。作为实时阶段重要的水雨情信息之一,本文结合文献[12]中的水库一般泄流启发信息,建立了考虑预报降雨量级的启发规则,如表1所示。

表1 考虑预报降雨量级的启发信息

预报降雨量级	启发规则
无雨	①入流上涨,水位上涨,泄流量保持不变或增加; ②入流上涨,水位下降,泄流量保持不变或增加(最初几个时段,起预泄作用); ③入流减退,水位上涨,泄流量保持不变,或增加,或减少; ④入流减退,水位下降,泄流量保持不变或减少。
小雨	①、②、④与“无雨”量级的启发规则相同; ③入流减退,水位上涨,泄流量保持不变或增加。
中雨及以上	①、②与“无雨”量级的启发规则相同; ③入流减退,水位上涨,泄流量保持不变或增加; ④入流减退,水位下降,泄流量保持不变或增加。

若预报无雨量级,则仍按原一般启发规则进行调度;若水库上游有降雨,根据一般经验,水库有加大泄流量的倾向,则对一般的启发信息进行改变。当预报小雨量级时,将原规则③改为“入流减退,水位上涨,泄流量保持不变或增加”;若预报中雨及以上量级时,则将③改为与小雨级别的③一样,将④改为“入流减退,水位下降,泄流量保持不变或增加”;其中,泄流量增加到允许最大泄量则不再增加。运用改变后的启发信息,能使得生成的调度方案适应雨情的变化,更具合理性、适用性。

2.3 数学模型建立

寻找合理的约束组合是协调上下游防洪矛盾问题的关键。为此,本文根据决策者提出的调度要求,细化传统的约束模式,使其能在不同时间区间内设置不同水位、泄流量等多种约束条件,从而快速生成多种有效调度方案进行对比和参考。

(1) 目标函数。本模型采用最大削峰准则,其目标函数为:

$$\min \sum_{t=0}^{t=N} (q_t + \Delta Q_t)^2 \quad (1)$$

式中: t 为时段; N 为总时段数; q_t 为 t 时段泄流量, m^3/s ; ΔQ_t 为 t 时段区间入流, m^3/s 。

(2) 约束条件

① 水量平衡约束

$$V_t = V_{t-1} + (\bar{Q}_t - \bar{q}_t) \Delta t \quad (2)$$

式中: V_t, V_{t-1} 为 t 时段始末水库库容, m^3 ; \bar{Q}_t 为 t 时段水库平均入流, m^3/s ; \bar{q}_t 为 t 时段水库平均泄流, m^3/s ; Δt 为时段长, h 。

② 水位约束

$$\begin{cases} Z_{\min} \leq Z_{\min}(t) \leq Z_{\max}(t) \leq Z_{\max} \\ Z_{\min}(t) \leq Z_t \leq Z_{\max}(t) \\ t_c \leq t \leq t_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z_{\max} 为最高水位, m ; Z_{\min} 为最低水位, m ; $Z_{\max}(t), Z_{\min}(t)$ 为第 t 时段末允许的最高、最低水位, m ; Z_t 为第 t 时段末水位, m ; t_c 为时间区间初值; t_m 为时间区间末值。

③ 泄流约束

$$\begin{cases} q_{\min} \leq q_{\min}(t) \leq q_{\max}(t) \leq q_{an} \\ q_{\min}(t) \leq q_t \leq q_{\max}(t) \\ t_c \leq t \leq t_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_{an} 为安全泄量(或最大泄量), m^3/s ; q_{\min} 为最小下泄量, m^3/s ; $q_{\max}(t), q_{\min}(t)$ 为第 t 时段允许的最大、最小下泄量, m^3/s ; q_t 为第 t 时段泄量,

m^3/s 。

④ 其他约束

调度期末水位约束:

$$Z_{end} \quad (5)$$

水库下泄能力约束:

$$q_t \leq q(Z(t)) \quad (6)$$

下泄流量变幅约束:

$$|q_t - q_{t-1}| \leq \Delta q_m \quad (7)$$

式中: Z_{end} 为末水位, m ; $q(Z(t))$ 为 t 时段末水位下的水库泄流能力, m^3/s ; Δq_m 为泄流变动幅度, m^3/s 。

以上约束条件能够体现防洪调度的基本要求。通过加入 $Z_{\max}(t), Z_{\min}(t), q_{\max}, q_{\min}(t), Z_{end}$ 等约束,可设置 t 下的允许最高水位、最低水位、最大下泄量、最小下泄量和末水位,以协调水库上下游防洪风险之间的矛盾;通过添加时间区间 $[t_c, t_m]$ 约束,使得决策者可根据上下游情况,设置哪些时间区间内需采用哪些约束值,以制定水库多种调度策略。其中, $Z_{\max}(t), Z_{\min}(t)$ 用来控制优化模型中水位的变动区间; $q_{\min}(t), q_{\max}(t)$ 用来控制泄流变化的范围; Z_{end} 用来控制末水位高低。通过这种方式来多次调整泄流过程以生成相应要求下的可行方案。

(3) 惩罚函数

由以上目标函数和约束条件可知,待求解问题实际为如下约束问题:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

$$h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, l$$

式中: $f(x), g_i(x), h_j(x)$ 均连续。

针对该约束问题运用外点罚函数法构造辅助函数 $F(x)$,将原约束问题转化为求极小化辅助函数的无约束问题,公式如下:

$$\begin{aligned} \min F(x) = \min [f(x) + \mu_1 \sum_{j=1}^l (h_j(x))^2 + \\ \mu_2 \sum_{i=1}^m (\min\{0, g_i(x)\})^2] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: μ_1, μ_2 为惩罚系数,是很大的正数。由于水量平衡公式用来由水位计算泄量,因此不用参与惩罚函数中,而其余约束均可转化为不等式约束。

2.4 模型求解步骤

目前应用于防洪调度模型的算法很多,其中 POA 算法原理简单,编程容易,计算速度快,能够较好地处理众多约束条件、维数灾等问题,并能收敛于全局最优解^[13]。因此,本文用 POA 建立实时防洪调

度模型^[14-15],用来寻找较优的调度方案。本模型以水位 Z_t 作为决策变量,调整步长为 ΔZ ,整个调度为 T 个时段。基本决策步骤如下:

(1) 初始可行解的确定:本模型以常规调度水位过程线作为初始可行解。

(2) 水位泄量约束的确定:决策者根据上下游防洪需求,调整水库在 t 时的最高水位 $Z_{\max}(t)$ 、最低水位 $Z_{\min}(t)$ 、最大泄量 $q_{\max}(t)$ 、最小泄量 $q_{\min}(t)$,以及该 t 作用的时间区间 $[t_c, t_m]$ 和水库末水位 Z_{end} ,依此来确定不同调度方案的约束。

(3) 启发信息的确定:实时调度阶段决策者根据预报降雨量级,由表1选择相应的启发式规则。设初始水位 Z_{t-1} 、 Z_t 、 Z_{t+1} ,入流量 Q_{t-1} 、 Q_t 、 Q_{t+1} ,泄流量 q_{t-1} 为已知,求最优水位 Z'_t ,通过调整水位步长 ΔZ 使 Z_t 在水位允许范围内进行变动(注:水位为时段末值,流量为时段平均值)。决策者选择相应的预报降雨量级,而后判断 Q_{t-1} 、 Q_t 之间的大小关系,选择相应的启发规则。以小雨状态下的启发信息为例,若判断 Q_{t-1} 、 Q_t 处于下降状态,以步长 ΔZ 调整 Z_t ,当 $Z'_t = Z_t + \Delta t > Z_{t-1}$ 时,水位上涨;当 $Z'_t = Z_t + \Delta Z < Z_{t-1}$ 时,水位下降。根据水量平衡公式计算时段泄流量 q_t ,当水位处于上涨状态时,需 $q_t - q_{t-1} \geq 0$;当水位处于下降状态时,需 $q_t - q_{t-1} \leq 0$;对不符合要求的 Z'_t 引入惩罚项,则该阶段目标函数见公式(10),以此来选择目标函数最小的水位做为最优水位 Z'_t 。

$$\min [(q_t^2 + q_{t+1}^2) + \sigma (q_t - q_{t-1})^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m \mu_j (\max\{0, g_j(x)\})^2] \quad (10)$$

式中: σ 为惩罚因子,当满足启发规则时 $\sigma = 0$;当不满足时, σ 为一个充分大的数。

(4) 迭代计算:按照上述步骤寻求 Z'_{t+1} ,如此直到 $t = T$,生成新水位调度线 Z_t^* ,再将 Z_t^* 重新导入模型,再次寻优。如此反复迭代至收敛,并输出水位调度线。若方案满足约束要求则可行,否则需重新改变(2)中的约束条件,再次计算。

3 实例分析

白山水库是第二松花江上以发电为主兼有防洪、航运、养鱼等综合效益的大型水利枢纽工程,位于丰满水库上游约 200 km 的吉林省桦甸县境内,控制流域面积 19 000 km²,占丰满水库以上流域面积的 44.7%,与下游的丰满水库构成梯级水库防洪控制性工程。白山水库的主要防洪作用,是通过控制

水库泄流量,调节下游丰满水库的入流,并与其共同承担下游吉林、扶余的防洪任务。水库发电最大过流量为 1 500 m³/s,可参与泄洪,汛限水位为 413 m。其调度原则为:当入流量 $Q \leq 7 220$ m³/s 时(10 年一遇洪水),水位 < 416.50 m,泄量 $q \leq 2 500$ m³/s;当入流量 $Q \leq 10 600$ m³/s 时(30 年一遇洪水),水位 < 416.60 m(征地移民高程);当入流量 $Q \leq 14 200$ m³/s 时(100 年一遇洪水),水位 < 417.50 m;当入流量 $Q \leq 19 100$ m³/s 时(500 年一遇洪水),水位 < 418.30 m(设计洪水位)。

本文取白山水库“2010·7”洪水进行实例分析,该洪水洪峰接近百年一遇洪水量级,令起调水位、末水位为 413 m。首先,生成该洪水的常规调度方案作为参照,以进行模型约束设置和结果对比;其次,针对启发信息生成多方案进行对比,以检验启发信息对方案的影响;最后,制定多套约束组合,模拟决策者实时决策过程,以检验模型的可行性。

3.1 常规调度结果

将该场洪水进行常规调度,结果如图1所示。其调洪最高水位为 416.69 m,该水库泄流过程经历了3个阶段。阶段1:从第0个时段到第26个时段,最大泄量为 2 500 m³/s;阶段2:从第27个时段到第33个时段,最大泄量为 5 900 m³/s;阶段3:从第34个时段到第47个时段,最大泄量为 7 800 m³/s。本文规定优化模型泄流约束的最大值不超过常规调度各阶段最大泄量值,最高水位不大于常规调度最高水位。

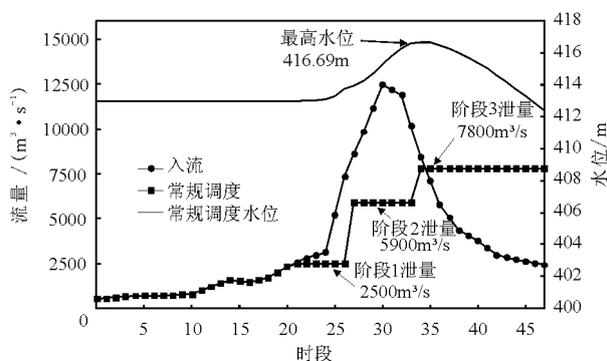


图1 常规调度过程

3.2 加入启发信息的调度结果

为分析考虑预报降雨量级的启发信息对调度结果的影响,现制定3种方案,分别为无雨无启发信息、无雨有启发信息、中雨有启发信息。3种方案均采用相同的约束条件,且设置预泄最低水位为 412 m。为尽量减少预泄段弃水的发生,规定当入流量小于 1 500 m³/s 时,最大泄量不得大于 1 500 m³/s,

各阶段约束设置如表2所示。运用POA优化调度模型进行计算,水位步长 $\Delta Z = 0.01$ m,起调水位413 m,末水位413 m,泄流变幅 $3\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$,调度结果如图2所示。

将图2(a)与图2(b)进行对比:当 $t \in [14, 16]$ 时,图2(a)中水位下降,入流下降,泄流增加,图2(b)中水位下降,入流下降,泄流不变,显示了无雨状态下有无启发信息的调度方案区别。将图2(b)与图2(c)进行对比:当 $t \in [14, 16]$ 时,图2(b)中水位下降,入流下降,泄流不变,图2(c)中水位下降,入流下降,泄流增加;当 $t \in [34, 47]$ 时,图2(b)中水位下降,入流下降,泄流不变,图2(c)中水位下降,入流下降,泄流增加或不变,显示了无雨、有雨状态下有启发信息的调度方案区别。因此考虑了预报降雨量级的启发式信息能引导优化的方向,使得优化调度结果符合经验规律,更加合理。

表2 约束条件设置

时段 t [t_c, t_m]	$Z_{\min}(t)/$ m	$Z_{\max}(t)/$ m	$q_{\max}(t)/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$q_{\min}(t)/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$q_{\text{an}}(t)/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
[0, 13]	412.00	413.00	1500	1200	2500
[14, 26]	412.00	413.00	2500	1500	2500
[27, 33]	412.00	416.69	5900	2500	5900
[34, 47]	412.00	416.69	7800	2500	7800

3.3 水库防洪调度多方案生成

假设此时预报有中雨降雨发生,采用建立的模型生成多种调度方案。决策者根据实时情况提出4种调度要求,例如,决策者希望能进一步减小水库最大泄量,可在约束中设置减小最大泄量,同时在满足调度原则的前提下,调整其他阶段水位、泄量的设置以配合进一步降低最大泄量的要求(如方案1、2);再如,决策者考虑到下游区间入流,希望实行错峰调度、补偿调节等措施,可在约束中改变时间区间,并在符合调度原则前提下,设置各时间阶段内的水位、泄量约束,实现相应的调度要求(如方案3、4),具体约束如表3所示。

在方案1和方案2中, $q_{\min}(t)$ 、 $q_{\max}(t)$ 具有控制泄流波动的作用,例如,对于方案2,当 $t \in [27, 33]$ 时,泄流约束区间设置为 $[5\ 400, 5\ 600]$,则可使泄流值维持在该范围内,控制波动幅度。同时,在前几个时段将 $q_{\min}(t)$ 与 $Z_{\max}(t)$ 相结合,相互调整可以起到控制预泄大小的作用。通过以上方式,不断调整参数快速生成相应约束要求下的调度方案。计算

结果见图3(a)、表4。

在方案3和方案4中,方案3与方案1相比,使第3个时间区间向后推延两个时段,方案4与方案3相比,使第2个时间区间向前提前两个时段,同时设置相应的水位、泄流约束要求。通过不断调整参数,生成的计算结果见图3(b)、表4。

由结果可知,各方案计算的最大泄量、最高水位均小于设置的最大泄量、最高水位,且各方案均满足时间区间、水位、泄流的约束条件,说明优化模型生成的方案不但能满足决策者的调度要求同时能使方案具有有效性。若方案不满足约束要求,则说明决策者的调度要求不可行,需改变调度要求再次计算。因此该模型可根据决策者的调度要求,通过调整 t 、 $Z_{\max}(t)$ 、 $Z_{\min}(t)$ 、 $q_{\max}(t)$ 、 $q_{\min}(t)$ 、 Z_{end} ,快速生成调度可行方案供决策者参考,具有良好的交互性。

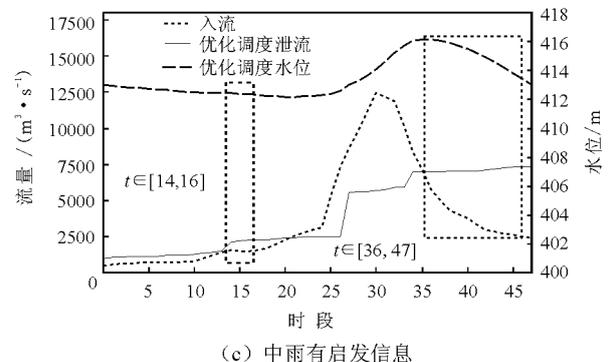
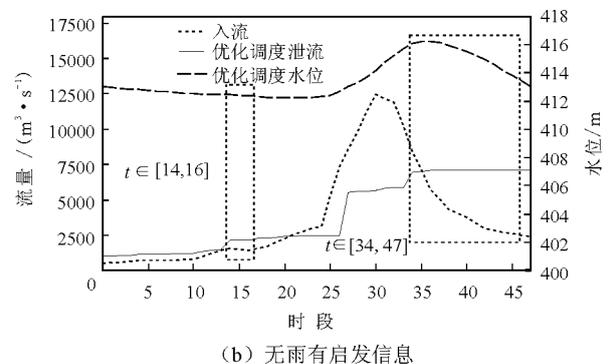
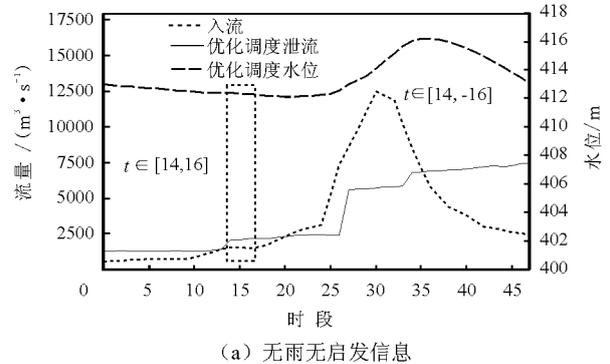
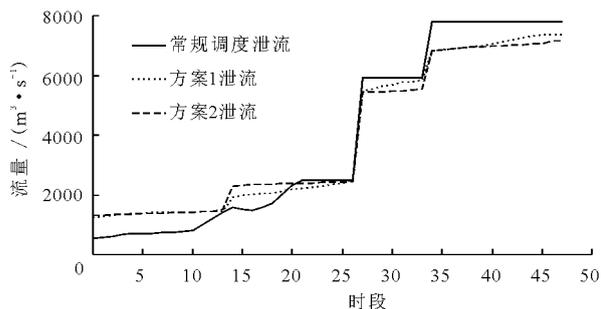


图2 有无启发信息的调度结果对比

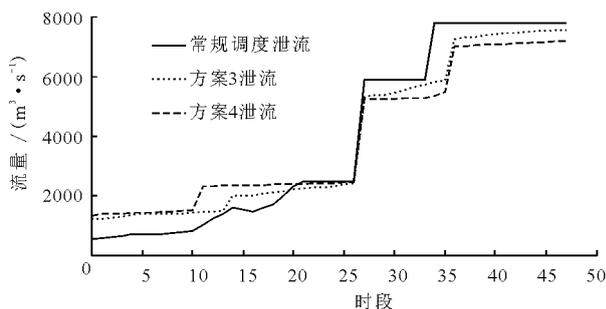
表3 多方案约束条件表

方案号	时段 t [t_c, t_m]	$Z_{\min}(t)/$ m	$Z_{\max}(t)/$ m	$q_{\max}(t)/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$q_{\min}(t)/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	备注
1	[0,13]	412.00	413.00	1500	1200	
	[14,26]	412.00	413.00	2500	1500	
	[27,33]	412.00	416.50	5900	2500	
	[34,47]	412.00	416.50	7800	2500	变动 水位约束 泄流约束
2	[0,13]	412.00	413.00	1500	<u>1300</u>	
	[14,26]	<u>411.50</u>	413.00	2500	<u>2300</u>	
	[27,33]	412.00	<u>416.10</u>	<u>5600</u>	<u>5400</u>	
	[34,47]	412.00	<u>416.10</u>	<u>7200</u>	<u>6800</u>	
3	[0,13]	412.00	413.00	1500	1200	
	[14,26]	412.00	413.00	2500	1500	
	<u>[27,35]</u>	412.00	416.50	5900	2500	变动
	<u>[36,47]</u>	412.00	416.50	7800	2500	时间区间
4	<u>[0,10]</u>	412.00	413.00	1500	<u>1300</u>	水位约束
	<u>[11,26]</u>	<u>411.50</u>	413.00	2500	<u>2300</u>	泄流约束
	<u>[27,35]</u>	412.00	<u>416.20</u>	<u>5500</u>	<u>5200</u>	
	<u>[36,47]</u>	412.00	<u>416.20</u>	<u>7200</u>	<u>7000</u>	

注:加下划线数值为方案2、方案3、方案4与方案1约束不同之处。



(a) 方案1和方案2泄流过程



(b) 方案3和方案4泄流过程

图3 各方案泄流过程对比

表4 各方案最高水位、最高泄量汇总表

项目	常规调度	方案1	方案2	方案3	方案4
最大泄流/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	7800	7351	7161	7543	7190
最高水位/m	416.69	416.20	416.09	416.46	416.18
末水位/m	412.37	413.00	413.00	413.00	413.00

4 结论

面对水库实时防洪调度阶段多变的水雨工况信息,决策者需要一种能够根据其提出的调度要求快速生成可行、合理、有效调度方案的模型。针对该需求,本文建立了一种水库实时防洪调度方案快速生

成模型。运用该模型对白山水库“2010·7”洪水进行实例计算,结果表明:

(1)加入了考虑预报降雨量级的启发信息能使调度结果符合泄流规律,更具合理性、适用性。

(2)POA 防洪优化调度模型中改进的约束模式能够满足决策者多变的约束要求,快速生成多种有效的调度方案,因此该模型具有一定的参考性。

(3)本文模型并未考虑闸门的开启情况,并且实时防洪调度阶段的水雨情信息也有很多种,因此如何将闸门的开启情况考虑到模型中和更多的实时信息加入到启发信息中,是今后需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 贾本有,钟平安,朱非林. 水库防洪优化调度自适应拟态物理学算法[J]. 水力发电学报,2016,35(8):32-41.
- [2] 彭勇,唐国磊,薛志春. 基于改进人工鱼群算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(6):1118-1125.
- [3] Luo J, Chen C, Xie J. Multi-objective immune algorithm with preference-based selection for reservoir flood control operation[J]. Water Resources Management,2015,29(5):1447-1466.
- [4] Kumar D N, Baliarsingh F, Raju K S. Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming[J]. Water Resources Management,2010,24(6):1045-1064.
- [5] 万星,丁晶,张少文,等. 基于灰色动态规划的梯级电站防洪发电优化调度研究[J]. 水电能源科学,2005,23(3):17-19.
- [6] 纪昌明,吴月秋,张验科. 混沌粒子群优化算法在水库防洪优化调度中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2008,35(6):103-107.
- [7] 邹强,王学敏,李安强,等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. 水利学报,2016,47(8):967-976.
- [8] 王本德,许海军. 水库防洪实时调度决策模糊推理神经网络模型及其应用[J]. 水文,2003,23(6):8-11.
- [9] 王森,程春田,李保健,等. 防洪优化调度多约束启发式逐步优化方法[J]. 水科学进展,2013,24(6):869-876.
- [10] 罗军刚,解建仓,陈田庆,等. 基于事例推理技术的水库洪水调度研究与应用[J]. 水科学进展,2009,20(1):32-39.
- [11] 王本德,朱永英,张改红,等. 应用中央气象台24h降雨预报的可行性分析[J]. 水文,2005,25(3):30-34.
- [12] 程春田,王本德. 启发式与人机交互相结合的水库防洪模糊优化调度模型[J]. 水利学报,1995,26(11):71-76.
- [13] 董子敖. 水库群调度与规划的优化理论及应用[M]. 济南:山东科学技术出版社,1989.
- [14] 秦旭宝,董增川,费如君,等. 基于逐步优化算法的水库防洪优化调度模型研究[J]. 水电能源科学,2008,26(4):60-62.
- [15] 钱镜林,张松达,夏梦河. 逐次优化算法在梯级水库防洪优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电,2014(8):22-25.

(上接第123页)

- [8] Meneghini J R, Bearman P W. Numerical simulation of high amplitude oscillatory flow about a circular cylinder[J]. Journal of Fluids & Structures,1995,9(4):435-455.
- [9] Placzek A, Sigrist J F, Hamdouni A. Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations[J]. Computers & Fluids,2009,38(1):80-100.
- [10] 梁亮文,万德成. 横向受迫振荡圆柱低雷诺数绕流问题数值模拟[J]. 海洋工程,2009,27(4):45-53+60.
- [11] 李薇. 格子 Boltzmann 方法研究近壁面圆柱涡激振动[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [12] 赵静,吕林,董国海,等. 亚临界雷诺数下圆柱受迫振动的数值研究[J]. 计算力学学报,2012,29(1):74-80.
- [13] 吴浩,孙大鹏,吕林. 低雷诺数下多根圆柱横向受迫振动的数值模拟研究[J]. 中国海洋平台,2015,30(2):48-56.
- [14] 王俊高,付世晓,许玉旺,等. 正弦振荡来流下柔性立管涡激振动发展过程[J]. 力学学报,2014,46(2):173-182.
- [15] 邓跃. 低雷诺数下均匀流和振荡流共同作用的圆柱体受迫振动和涡激振动研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [16] 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [17] 盛磊祥. 海洋管状物结构涡激振动流体动力学分析[D]. 东营:中国石油大学(华东),2008.
- [18] Braza M, Chassaing P, Ha M H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity field in the near wake of a circular cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics,1986,165:79-130.
- [19] Stewart B, Leontini J, Hourigan K, et al. Vortex wake and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number[J]. Anziam Journal,2005,46(6):181-195.