

水利水电工程施工水流控制过程的仿真与优化方法

钟登华, 刘勇, 黄伟, 李明超*

天津大学水利水电工程系, 天津 300072

* E-mail: lmc@tju.edu.cn

收稿日期: 2007-08-13; 接受日期: 2008-10-28

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2007CB714101)、“十一五”国家科技支撑计划(批准号: 2006BAB04A13)和国家杰出青年科学基金(批准号: 50525927)资助项目

摘要 针对水利水电工程施工水流控制过程中的工程技术问题及其仿真分析中存在的科学技术难题, 通过分析施工导流系统动态、非线性的内外部结构, 综合考虑主体建筑物、导流建筑物与水流控制三者间的复杂约束关系, 建立复杂条件下施工导流系统的时空关系模型和施工导流过程的结构图仿真通用模型, 提出了面向结构图的施工导流过程数值仿真方法和三维动态可视化仿真分析方法, 并实现了集仿真建模、仿真计算和仿真可视化于一体的施工水流控制过程仿真与优化系统环境. 工程实例应用表明, 该方法建模过程便捷, 仿真计算与数据可视化分析能有效地耦合, 仿真与优化分析结果符合客观实际, 为解决复杂条件下水利水电工程施工水流难以控制的问题提供了新的理论方法和技术手段.

关键词

施工水流控制/施工导流
动态仿真
优化分析
结构图
水利水电工程

大江大河上修建水利水电工程, 施工条件复杂, 技术难度大, 整个施工过程中的水流控制(又称施工导流)对整个工程建设的顺利进行有着决定性的影响^[1]. 受地形地质、主体施工方案布置、施工进度、度汛、通航、蓄水等众多因素影响, 施工导流内部组成部分之间关系错综复杂^[2]; 施工水流控制过程是一个复杂的随机动态过程, 是一个半结构化问题, 难以通过单纯的数学解析模型来分析^[3,4], 而仿真手段为其关键技术问题的研究提供了实用的分析技术.

目前, 施工水流控制过程的仿真与优化分析已成为水利水电工程施工导流研究的重要内容^[4], 并取得了一些研究成果. 例如, Abbas 等人^[2]考虑水文随机性和水力随机性提出了施工导流的仿真优化模型与方法, 为 Karoon 水利工程的施工导流方案设计提供

了有效的辅助手段; 胡志根等人^[5,6]采用 Monte-Carlo 方法模拟施工洪水过程和导流建筑物泄流工况, 通过系统仿真进行施工洪水调洪演算, 进而确定导流系统的风险; 舒华英等人^[7]建立了赋时 Petri 网的三峡三期截流施工运输系统模型, 运用仿真方法优化配置施工机械设备, 较好地反映了施工截流系统状态的动态变化情况; 戴会超等人^[8]针对三峡工程对大江截流和导流明渠通航进行实时数值仿真, 并建立了“三峡工程导截流数值实验室”, 为导截流方案比选提供决策支持. 这些成果推动了施工导截流仿真的理论方法与应用研究, 但都有其各自的侧重点, 难以获得对水利水电工程复杂施工水流控制过程的全面描述和分析.

钟登华等人^[9~12]提出了基于 GIS 的施工导流动态

可视化方法、施工导流过程三维图形仿真方法以及基于系统仿真的施工导流不确定性分析方法等理论与技术, 并成功应用于溪洛渡、锦屏一级、糯扎渡、向家坝等多项国家重点工程中. 本文在上述工作的基础上, 针对目前存在的仿真建模复杂, 通用性差, 仿真数据、仿真计算与可视化分析难以耦合等技术难题, 提出了面向结构图的施工水流控制过程仿真与优化方法, 通过分析施工导流系统动态、非线性的时空状态, 建立了复杂施工导流过程的结构图仿真通用模型, 并实现了集仿真建模、仿真计算和仿真可视化于一体的施工水流控制过程仿真与优化系统环境, 为全面描述和分析水利水电工程施工水流控制过程提供了技术平台.

1 施工水流控制系统分析

水利水电工程施工水流控制是一项复杂的动态系统工程, 根据其动态特征和内部各个环节的性质, 整体系统可分为主体建筑物子系统、导流建筑物子系统和不断变化的水流子系统. 这三者间相互制约又相互联系: 一方面, 各时段导流标准对应的来流情况确定了导流建筑物和主体建筑物的施工进度; 另一方面, 导流建筑物和主体建筑物的施工进度又影响着导流各时段导流建筑物的规划及导流标准的确定. 一旦上述这种制约关系被破坏, 则势必会导致导流风险的产生, 甚至可能会引起施工导流的失败.

整个施工水流控制过程中来流、导流建筑物规划、大坝及围堰施工进度等各环节不断动态变化, 逻辑关系极为复杂. 为简化施工导流系统建模, 根据复杂系统分解协调理论, 综合考虑主体建筑物、导流建筑物与水流控制三者间的复杂约束关系, 建立复杂条件下施工导流系统的时空关系模型, 如图 1 所示. 该模型各部分有其特定功能与对应的属性信息, 同时以信息为中介, 通过全过程导流规划、施工进度计划与水流控制等特定关系实现整个系统的耦合. 通过分解与耦合, 使一个纷繁复杂的系统变成了一个相互联系的协调一致的系统. 在整个施工水流控制系统中, 既能抽取各个子系统从局部细节上把握其特有的规律和运动变化过程, 又能将各子系统置于整个施工导流全过程中来考察其相互关系, 从而实

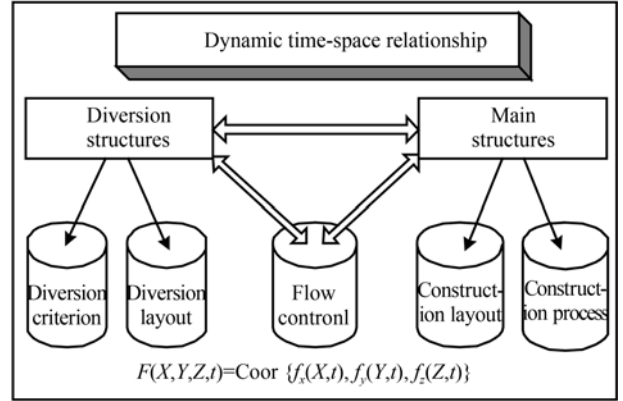


图 1 复杂施工导流系统时空关系模型

现对整个施工过程的统一控制, 直观地了解任一时刻的导流信息.

2 面向结构图的施工导流过程仿真建模

2.1 结构图仿真方法

针对某类系统中各种可能出现的线性或非线性环节, 由环节之间的协调参数来确定结构图的输入与输出, 并根据环节的数学模型编写相应的仿真计算程序, 再以这些仿真结构图为基础, 通过输入、输出相连接构造各个系统的动态仿真模型, 通过人机交互输入各环节的类型、参数等信息进行数字仿真, 称为面向结构图的仿真方法^[13,14].

对于一个动态系统中的任何环节或子系统, 都可以用一个结构图来表示^[14]. 在状态空间模型中, 各环节一般由三个基本元素组成: 输入变量、状态变量和输出变量, 如图 2 所示. 其中输出变量又是输入变量、采样时间以及状态变量的函数, 它们之间的数学关系式如下:

$$y = f_0(t, x, u), \quad (1)$$

$$\dot{x}_c = f_c(t, x, u), \quad (2)$$

$$x_d = f_d(t, x, u), \quad (3)$$

$$x = \dot{x}_c + x_d. \quad (4)$$

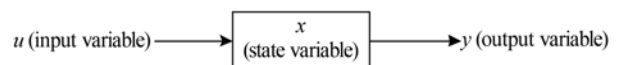


图 2 结构图的基本元素

对于单纯的连续环节或离散环节, (1)~(3)式分别表示结构图中输出变量 y , 连续状态变量 $\dot{x}_c$ 及离散状态变量 x_d 与采样时间 t , 状态变量 x 及输入变量 u 关系; 对于连续-离散混合环节, (4)式表示环节中状态变量由连续状态变量和离散状态变量两部分组成, 不同的环节具有不同的基本元素, 同时对某些特殊环节, 环节的基本元素可能只有其中的 1~2 个. 对系统中的各个环节, 由环节数学模型即可得到结构图中各基本元素之间的以上函数关系. 作为复杂系统仿真模型中的一部分, 环节结构图须通过输入、输出与其他各种环节结构图相连接组成系统的仿真模型, 因此确定合理的结构图输入、输出变量对建立环节的结构图具有重要的意义, 这是环节结构图组成系统仿真模型的基础.

2.2 施工导流过程结构图仿真模型的建立

仿真是基于模型的活动, 进行任何系统的仿真试验研究, 首先须建立系统的数学模型(即系统模型), 然后建立仿真模型, 进而通过计算分析实现仿真试验. 在面向结构图的施工水流控制仿真过程中, 仿真建模不再仅仅针对某一特定水利水电工程的施工导流系统, 而是针对于组成导流系统的各个动态环节建立通用的仿真模型. 在上述对施工导流系统分析的基础上, 根据系统各环节的数学模型及环节之间的相互协调关系, 确定组成导流系统的各种可能的独立环节, 建立各独立动态环节的系统模型, 并在仿真平台上建立环节的结构图, 以此为基础建立导流系统总的仿真模型进行仿真研究.

在建立导流系统各可能独立动态环节的结构图过程中, 既可通过分析各动态环节的基本元素及数学模型建立系统的结构图模型, 也可以各典型动态环节系统模型为基础, 简化建模过程, 具体方法如下.

(i) 将导流系统的各动态环节分为线性环节和非线性环节两大类, 线性动态环节的输入和输出关系是线性微分方程或代数方程, 非线性环节的输入与输出是非线性微分方程或代数方程.

(ii) 对于线性环节, 可以某一种典型动态环节作为基本运算部件, 被仿真系统可以全部用典型的运算部件按一定方式连接起来组成, 通过计算机外部

设备输入各环节的类型、参数和各环节之间的连接关系信息后, 程序可自动形成该环节的仿真计算模型, 然后采用某种数值方法求解, 进行仿真计算.

(iii) 对于非线性环节, 由于非线性子系统的存在, 仅通过一些典型动态环节不能形成环节的系统模型, 而需按照系统各环节的连接情况, 以一定顺序对每个环节逐个求解, 但在求解过程中, 各动态环节可采用不同的求解算法.

(iv) 通过导流系统中各环节的相互关系确定环节的输入、输出变量, 继而根据各环节的数学模型, 得到各环节的系统模型. 对于导截流系统中的任何一个环节, 无论是线性环节还是非线性环节, 输入、输出变量都存在确定的函数关系, 这种函数关系可统一表示如下:

$$y_i = F(u_i). \quad (5)$$

(v) 基于导流系统中各环节的系统模型, 建立各环节的结构图, 确定相应于各环节系统模型不同形式的仿真算法, 编制仿真计算模块.

因此, 在面向结构图的仿真过程中, 在系统的结构图中, 各环节的结构图表征了系统中的各相应环节、同时为各相应环节提供相应的仿真建模基础, 通过各环节的结构图来组成系统的仿真模型.

对于实际工程施工导流系统, 集成各环节的结构图来形成系统的仿真模型, 需要根据实际系统中各环节的相互关系建立系统的关系模型, 即系统中各环节之间的关系矩阵. 系统的关系模型或关系矩阵确定了系统仿真模型中各环节仿真模型之间的连接关系, 即确定了如何用各环节对应的结构图形成系统的仿真模型. 由于导流系统的复杂性, 这里建立简化的导流系统结构图仿真模型, 如图3所示. 对导流系统中的各个环节依次编号, 其中第一个环节为洪水过程, 最后一个环节为水文站, 结构图中的 α, β 为环节结构图之间的连接系数, 各环节的输入为 u_i , 输出为 y_i , $i=1,2,3,4$ (即导流系统各环节的依次编号).

根据所建立的导流系统各环节系统模型可知, 导流系统中依次各环节的输入变量与输出变量如下:

环节 1, 洪水过程: $y_1 = [0, Q_1]^T$;

环节 2, 堰前水库: $u_2 = [Q_1, Q_2]^T, y_2 = [0, H_1]^T$;

环节 3, 导流明渠/隧洞: $u_3 = [H_1, H_2]^T, y_3 = [Q_2, Q_2]^T$;

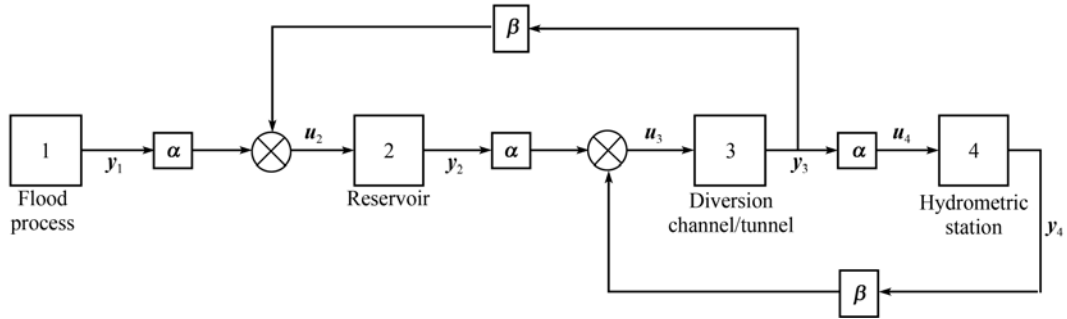


图3 简化的导流系统结构图仿真模型示例

环节4, 水文站: $u_4 = [Q_2, 0]^T$, $y_4 = [H_2, 0]^T$.

以上输入、输出变量中, u 表示环节上游的输入, y 表示环节下游的输出; Q_1 为上游来流量, Q_2 为明渠/隧洞泄流量, H_1 为明渠/隧洞上游水位, H_2 为明渠/隧洞下游水位. 由于导流系统各环节均通过边界处的水头及流量相互联系, 因此系统中的各中间环节均为双输入、双输出环节. 对于系统的边界环节, 由于可能缺少边界处的输出而成为单输出环节, 为了便于程序实现, 我们规定将边界环节的输出视为双输出, 把缺少的输出以零计. 这样, 对于上游边界环节, 上游的输出为零; 而对于下游边界环节, 下游的输出为零. 同时由导流系统各环节之间的逻辑关系可得, 对于上述导流系统各环节的输入输出, 前一环节的下游的输出应等于后一环节上游的输入. 由此, 可以得出以下各环节输入变量与输出变量的关系模型:

$$\text{堰前水库, } u_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} y_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} y_3;$$

$$\text{导流明渠/隧洞, } u_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} y_2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} y_4;$$

$$\text{水文站, } u_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} y_3 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

导流系统下游水文站环节可以假定为一虚输出, 令 $y_5 = [0 \ 0]^T$, 其值不对系统产生作用. 通过以上变换, 则对水文站环节有:

$$u_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} y_3 + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} y_5.$$

令

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

则导流系统各中间环节的输入与输出满足以下关系式:

$$u_i = \alpha y_{i-1} + \beta y_{i+1}, \quad i = 2, 3, 4, \quad (6)$$

任意导流系统各环节之间通常均以水头、流量相互协调, 因此在通常情况下, (6)式中的关系式对不同的导流系统有着相当的普遍性. 本文中将导流系统各环节之间的连接矩阵 α , β 分别称为上游连接矩阵及下游连接矩阵, 它们表述了导流系统中任何环节的输入与上下游相邻环节输出之间的函数关系.

据此, 可以得出非线性导流系统的动态方程为:

$$\begin{cases} y_i = F(u_i), \\ u_i = \alpha y_{i-1} + \beta y_{i+1}. \end{cases}$$

在(5)式中, 函数 F 体现了各导流系统中各环节内输入与输出之间的函数关系, 它表征了各环节的系统模型; 而(6)式则表明了导流系统中各环节输入、输出之间的函数关系.

根据以上导流系统的系统模型式(5)及(6)式, 同时将导流系统上、下游的外部输入视为上、下游端的假想环节, 对于导流系统模型的输入、输出, 可以采用矩阵方程表示为

$$u = WY, \quad (7)$$

方程中的矩阵 $u = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$, $Y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$; 为导流系统模型的输入、输出矩阵, W 称为系统模型的内部连接矩阵, 它描述了系统内部各环节之间的连接关系. 一个 n 阶(导流系统的环节数为 n)导流系统的内部连接矩阵 W 是一个 $n \times n$ 的分块矩阵, 它的每一个元素 W_{ij} 均为一个 2×2 的矩阵, 表示第 j 个环节的输入到第 i 个环节的输入之间的连接系数, 例如 $W_{43} = \alpha$

表示第 3 个环节的输出对第 4 个环节输入之间的连接系数为 α , 而 $W_{11} = W_{13} = W_{14} = O$ 表示 1、3、4 环节对第 1 环节无连接关系, 其中 $O = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.

对图 3 所示的导流系统模型, 可将 (7) 式展开得

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & \beta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & \beta \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}.$$

系统连接矩阵确定了系统模型中导流系统各环节之间输入、输出的关系, 它是导流系统动态仿真时结构图模型与系统模型相互转换的基础, 也是面向结构图的仿真控制程序运行的基础.

根据导流系统中各环节的连接关系模型, 即可建立通用的导流系统结构图仿真模型, 如图 4 所示. 图中, α 为上游连接矩阵, β 为下游连接矩阵, “示波器”结构图为仿真平台中的可视化结构图模块. 由该图可以看出, 在面向结构图的仿真模型中, 各仿真结构图与实际工程导流系统中的相应环节一一对应, 通过各环节对应的仿真结构图在系统仿真平台上的相互连接即可构成实际系统的仿真模型, 此可视化建模过程类似于物理模拟的特点, 大大降低了仿真建模的难度, 提高了复杂控制系统的仿真效率.

3 施工导流三维动态可视化仿真方法

水利水电工程施工水流控制仿真的最终目的是要观察当前确定的导流规划方案是否吻合主体工程及临时挡泄水建筑物的施工进度, 分析在当前施工进度下导流能否顺利完成; 观察 3 个子系统间的协调情况, 为施工导流组织设计与施工决策提供有效的辅助手段. 而且, 在施工导流设计和建设管理中涉及到大量的图形和数据信息, 如坝区地质、地形、水文、

枢纽设计及布置等资料, 如何对这些信息进行高效、简便、直观的管理, 是提高设计效率和施工管理现代化水平的关键^[15]. 因此, 在面向结构图的仿真建模、仿真计算和仿真分析的基础上, 实现能够科学、直观、逼真地表现整个施工水流控制动态控制的可视化仿真与优化分析, 具有很大的实践价值.

根据施工导流系统分析, 主体建筑物施工、导流建筑物施工和动态的水流过程构成了施工水流控制的全过程. 一般而言, 在施工导流年限内, 主体建筑物施工主要表现为大坝的施工过程, 导流建筑物施工反映为围堰、导流隧洞或导流明渠的施工, 动态水流过程就是导流各时段导流标准对应的来流及其水力参数. 因此, 施工导流全过程的三维动态可视化仿真实现就构建在三者仿真协调耦合的基础上, 通过宏观的系统状态变量(时间、主体与导流建筑物施工进度、水流、水力参数等)和决策变量(各时段导流挡泄水建筑物规划)的逻辑关系来描述施工导流系统的整体动态过程, 其实现流程如图 5 所示.

4 实验分析

本文提出的仿真方法在 Windows 平台, Visual C++6.0 和 Matlab Simulink 环境下编程实现. Matlab Simulink 工具可为用户提供可视化、模块化的仿真环境和解决仿真控制问题的功能库, 支持多种计算方法并具有完善的仿真程序调试、运行功能, 同时可提供一些基本环节的仿真结构图. 本文首先以 Simulink 作为仿真建模平台, 为导流系统各环节建立仿真结构图, 然后通过系统模块接口, 与利用 Visual C++6.0 工具编写的仿真计算、优化分析以及可视化输出模块程序相耦合, 将导流系统结构图与仿真模型关联起来, 集成开发复杂工程施工水流控制过程的仿真与优化系统平台, 建立仿真建模、仿真计算、优化分析

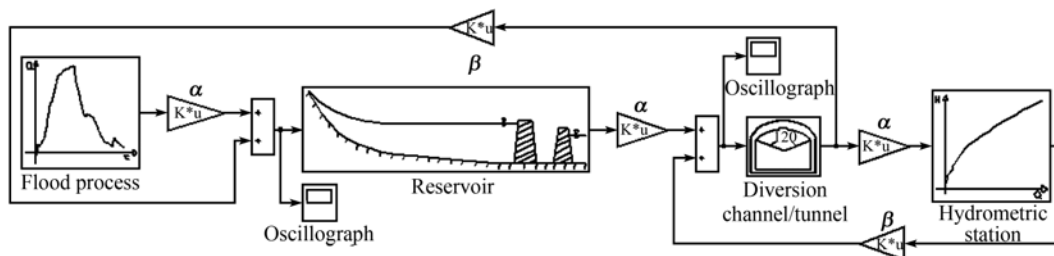


图 4 面向结构图的导流系统通用仿真模型

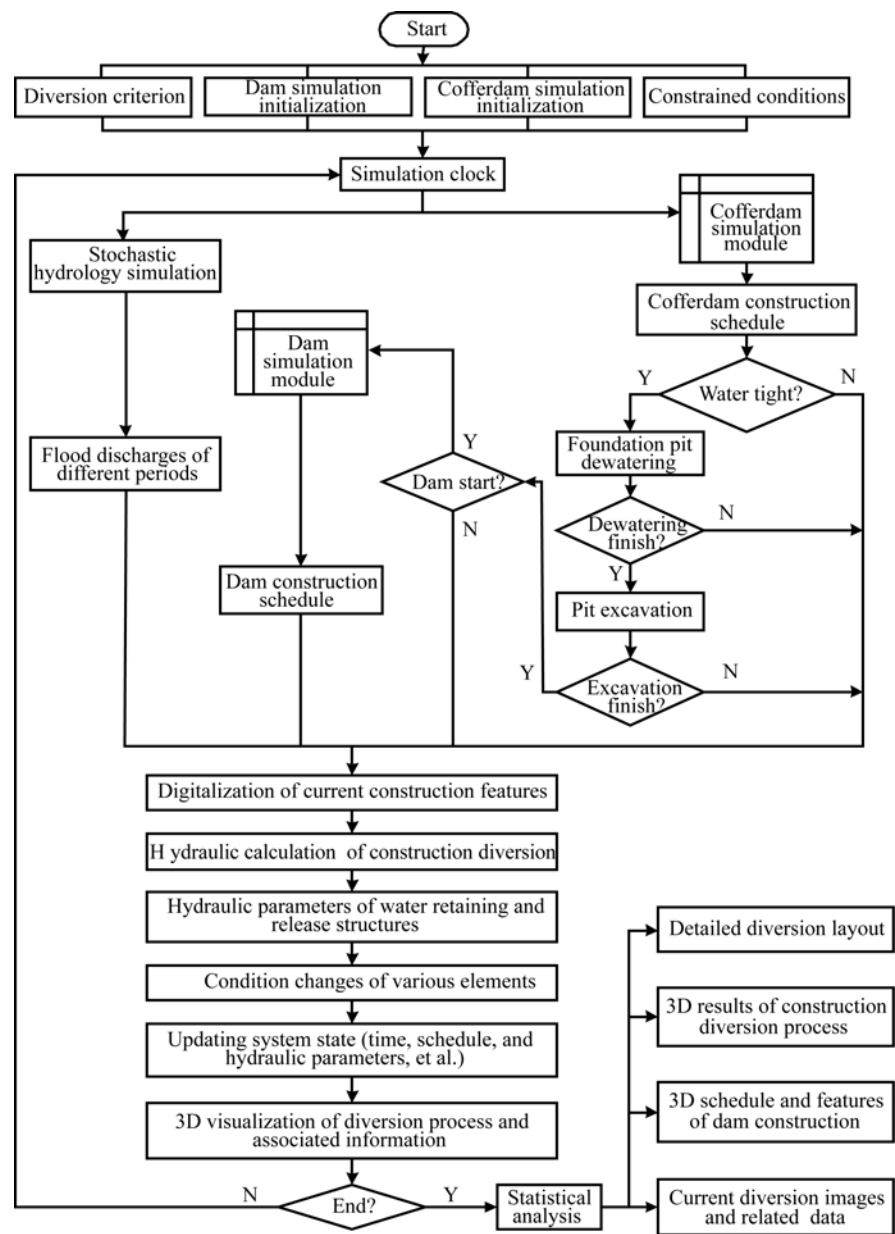


图5 施工水流控制三维动态可视化仿真流程图

与可视化输出的一体化仿真环境，完成实际导流工程的仿真试验。

某水利枢纽工程处于三江两岛的分汊河道上，施工导流分为三期五段方式：第一年一期截外江，中江通航，中江和内江天然河道导流；第二年二期截内江，中江通航，中江和已修好的外江14孔泄水闸过流；第三年三期截中江，外江船闸通航，由已建成的外江16孔泄水闸和内江12孔泄水闸过流。该导流系统相互之间耦合关联，非常复杂，其工程施工导流布置总

体面貌如图6所示。

这里以一期导流(外江)为例进行仿真计算与分析，一期导流采用10年方案，导流时段为2004年12月至2005年11月，设计洪水标准10%，设计流量40700 m³/s，由中江和内江天然河道导流。

1) 研究设计流量下的水库水位(即围堰设计挡水位)。根据实际导流系统的构造，将表示导流系统各环节的仿真结构图按照相应的输入、输出关系连接起来，在各组成环节之间增加一些实时图形输出结构

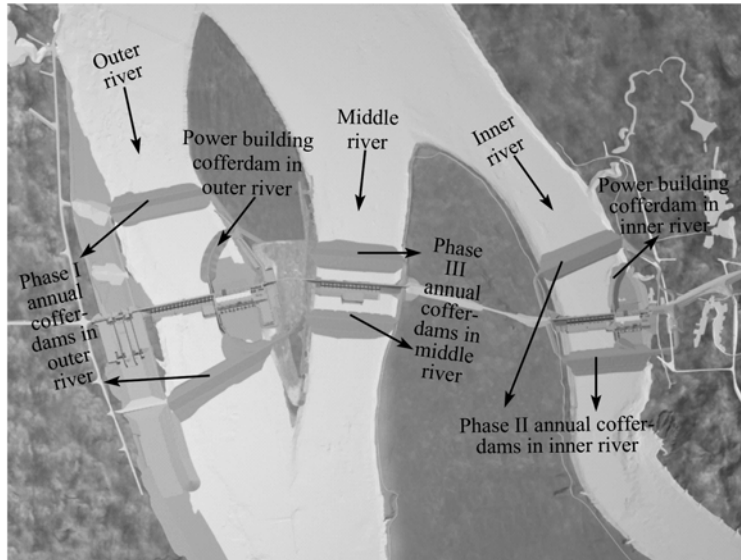


图 6 工程实例施工导流布置三维总体面貌图

图, 即可得一期导流系统泄流仿真模型, 如图 7 所示。

输入各结构图的仿真参数, 其中上游来流为设计流量 $40700 \text{ m}^3/\text{s}$, 水库的起调水位为 23.000 m (可任意设定), 仿真时间间隔为 0.25 d , 仿真步长为 1, 仿真总时间为 10^4 d (即时间足够长), 当前后两次仿真值之差的绝对值小于 10^{-4} m 时终止仿真。通过显示器输出可得, 最终仿真时间为 65.0 d ($260 \times 0.25 \text{ d}$), 水库水位为 26.243 m , 下游河道水位为 25.654 m 。这表明, 在上游来流量 $40700 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水库初始水位为 23.000 m 时, 经过 65.0 d , 水库的输入输出流量达到平衡, 水库水位为 26.243 m 。将仿真结果与设计成果比较, 该

时段导流规划设计水库水位为 26.330 m 、下游河道水位为 25.600 m , 上、下游设计围堰高度为 28.0 m 和 27.3 m , 两者之间相差不超过 0.5% , 这表明仿真计算的结果是可靠的。

2) 研究上游来流洪水标准为 10% 的洪水过程。洪水过程共 37 个截口, 截口时间间隔 1 d , 历时 30 d , 假定起调时刻水库上游来流等于泄流量, 水库达到平衡, 建立洪水过程调洪演算仿真模型如图 8 所示。

输入各结构图的仿真参数, 其中上游来流通过洪水文件读取数据, 输入水库的起调水位 9.300 m (可由泄流仿真模型确定), 采样周期为 1 d , 仿真总时

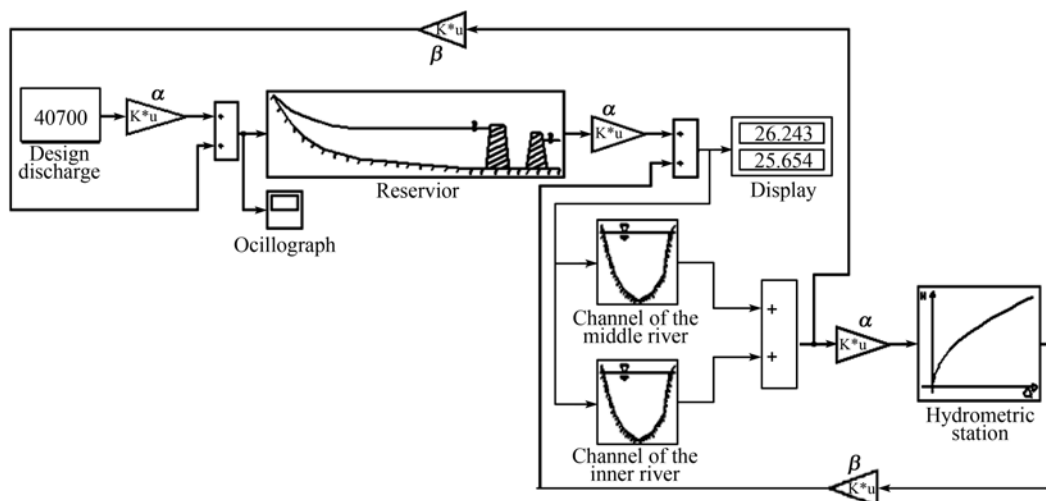


图 7 一期导流系统泄流仿真模型

间为 30 d. 通过流量示波器输出, 可以得到调洪流量曲线, 如图 9 所示; 由水位示波器输出, 可得水库水位随时间变化曲线, 如图 10 所示, 上游最高水位 23.375 m, 下游最高水位为 22.783 m. 仿真结果表明, 通过堰前水库的调洪, 最高水库水位比设计值 (26.330 m) 降低了 2.955 m, 最高下游水位比设计值 (25.600 m) 降低了 2.817 m.

综合上述两部分的仿真计算结果, 考虑水库调蓄作用, 我们提出上、下游挡水围堰高程均降低 2 m 的优化方案, 并对不同工况下的风险进行模拟分析, 结果表明, 在围堰降低 2 m 的情况下堰前最高水位风险在合理范围内. 实际施工中此方案被采纳, 且顺利完成了施工任务, 降低了投资.

同样地, 对于二期、三期导流通过仿真计算与分析可以得到类似的结果, 进而可以优化得到整个工程的施工导流方案. 基于所确定的优化方案, 运用施工导流三维动态可视化仿真模块, 能够动态模拟该工程从河道截流到水库蓄水、第一批机组发电的全过

程, 为施工导流方案的决策提供可视化信息支持和新的辅助技术手段. 图 11 为该工程施工导流过程一些典型时刻的面貌及相关信息.

5 结论

针对水利水电工程施工水流控制过程中的工程技术问题及其仿真分析中存在的科学技术难题, 通过分析施工导流系统复杂、动态、非线性的内部结构和外部联系, 综合考虑主体建筑物、导流建筑物与水流控制三者间的复杂约束关系, 建立复杂条件下施工导流系统的时空关系模型和施工导流过程的结构图仿真通用模型, 提出了面向结构图的施工导流过程数值仿真方法和三维动态可视化仿真分析方法, 并实现了集仿真建模、仿真计算和仿真可视化于一体的施工水流控制过程仿真与优化系统环境, 为全面描述和分析水利水电工程施工水流控制过程提供了技术平台.

所提出的理论方法和实现的系统平台成功应用于一个非常复杂的、按三期五段导流方式施工的实际

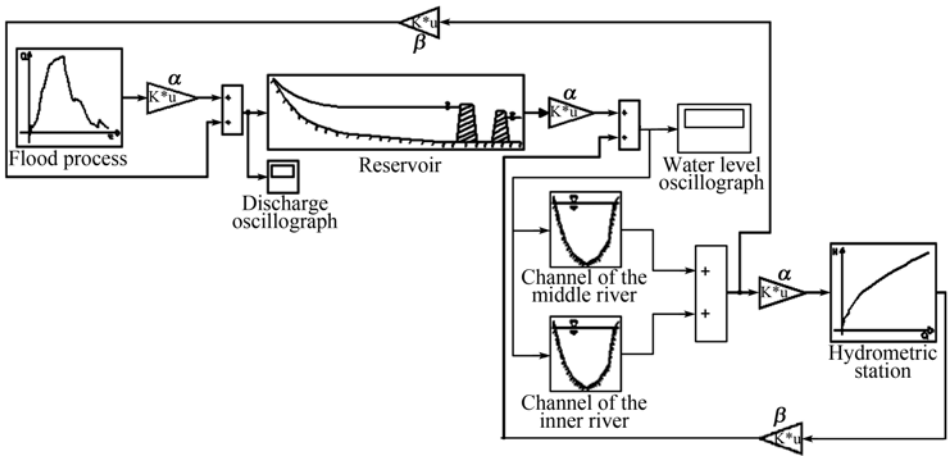


图 8 洪水过程调洪演算仿真模型

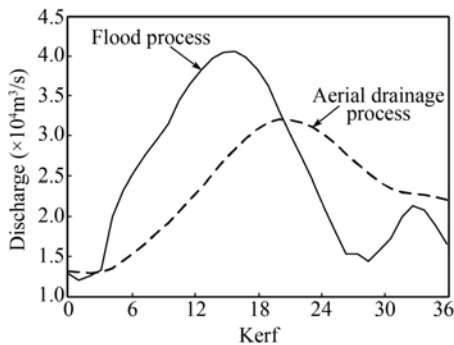


图 9 流量示波器

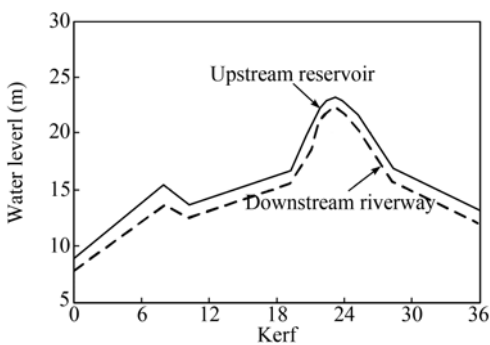


图 10 水位示波器

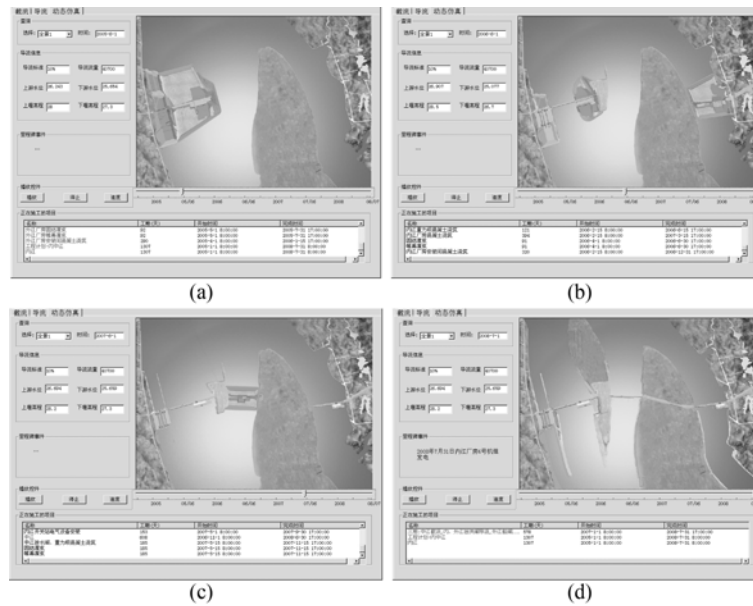


图 11 施工水流控制过程典型时刻三维面貌图

(a) 外江渡汛 (2005 年 6 月); (b) 内江渡汛 (2006 年 6 月); (c) 中江渡汛 (2007 年 6 月); (d) 内江 6 号机组发电 (2008 年 7 月)

水利枢纽工程中, 对于不同的导流时段, 从导流风险、大坝挡水、分期围堰、调洪演算等多方面进行仿真分析与论证, 优化选择了合理的实施方案, 并对该方案进行了三维动态可视化仿真分析。而且, 在外江、内江和中江 3 年的施工导流过程中, 采用本系统对实施方案进行跟踪仿真优化, 提出了不填筑内江厂房上游围堰的方案并得以实施, 节省了工程投资。尤其是在 2005 年 11 月遭到 10 年一遇的洪水, 一期外江全年围堰已拆除, 外江厂房围堰是否能抵御洪水

受到极大关注, 我们按保证率 90% 进行仿真计算, 要求外江厂房围堰挡水位必须达到 12.347 m, 与实际情况吻合, 安全度过洪水期。在本系统仿真与优化分析的技术支持下, 该工程的三期施工导流目前均已顺利完成。实践应用表明, 该方法建模过程便捷, 仿真计算与数据可视化分析能有效地耦合, 仿真与优化分析结果符合客观实际, 为解决复杂条件下水利水电工程施工水流难以控制的问题提供了新的理论方法和技术手段, 具有重要的理论和实用价值。

参考文献

- 1 袁光裕, 胡志根. 水利工程施工(第四版). 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- 2 Abbas A, Ahmad B, Miguel A M. Optimizing river diversion under hydraulic and hydrologic uncertainties. J Water Res, 1994, 120(1): 36—47
- 3 Gui S X, Zhang R D, Wu J Q. Simplified dynamic reliability models for hydraulic design. J Hydr Eng, 1998, 124(3): 329—333[doi]
- 4 钟登华, 郑家祥, 刘东海, 等. 可视化仿真技术及其应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- 5 胡志根, 范锡峨, 刘全. 施工导流系统综合风险分配机制的设计研究. 水利学报, 2006, 37(10): 1270—1277
- 6 胡志根, 刘全, 贺昌海, 等. 基于 Monte-Carlo 方法的土石围堰挡水导流风险分析. 水科学进展, 2002, 13(5): 634—638
- 7 舒华英, 胡志根, 刘全. 施工截流运输系统的赋时 Petri 网模型及其仿真实现. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1501—1505
- 8 戴会超, 王玲玲, 朱红兵. 三峡工程导截流数值实验室的建立及关键技术(I). 长江科学院院报, 2004, 21(5): 7—9, 13
- 9 石明华, 钟登华. 施工导流超标洪水风险率估计的水文模拟方法. 水利学报, 1998, 124(3): 30—33
- 10 刘东海, 钟登华, 周锐, 等. 基于 GIS 的水电工程施工导流三维动态可视化. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1051—1055
- 11 钟登华, 黄伟, 朱慧蓉. 施工导流过程三维动态可视化图形仿真研究. 水利水电技术, 2004, 35(4): 33—37
- 12 钟登华, 黄伟, 张发瑜. 基于系统仿真的施工导流不确定性分析. 天津大学学报, 2006, 39(12): 1441—1445
- 13 Rausand M, Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. New York: Wiley-Interscience, 2003
- 14 陈宗海. 过程系统建模与仿真. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997
- 15 Zhong D H, Li J R, Zhu H R, et al. Geographic information system-based visual simulation methodology and its application in concrete dam construction processes. J Cons Eng, 2004, 130(5): 742—750[doi]