

9-2-2020

## Full-scale Dynamic Simulation for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams

Sherong Zhang

*1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;;*

Chengbo Du

*1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;;2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd. , Chengdu 610051, China;;*

Wenqi Sa

*3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;*

Gaohui Wang

*1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Full-scale Dynamic Simulation for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams

## Abstract

*Abstract: By establishing the dynamic mapping relationship between the set of the construction state and the set of the emulation state of numerical simulation model, the method of three dimension and full-scale dynamic simulation for structure safety and schedule coupling during construction process was built. The method was used to dynamically analyze structure safety under any construction schedule condition of dam. VTK was utilized to realize three dimension and full-scale dynamic visualization for structure safety and schedule status coupling of RCC gravity dam during construction process. A three dimension and full-scale dynamic simulation and visualization system for structure safety and schedule coupling of RCC gravity dam was developed with C#.Net and APDL. The system can quickly provide data support to comprehensive control of structure safety and schedule during construction process.*

## Keywords

RCC gravity dam, coupling dynamic simulation, coupling dynamic visualization, dynamic mapping, structure safety, construction schedule

## Authors

Sherong Zhang, Chengbo Du, Wenqi Sa, Gaohui Wang, and Wang Chao

## Recommended Citation

Zhang Sherong, Du Chengbo, Sa Wenqi, Wang Gaohui, Wang Chao. Full-scale Dynamic Simulation for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 57-62.

## RCC 重力坝全尺度结构安全与进度耦合动态仿真

张社荣<sup>1</sup>, 杜成波<sup>1,2</sup>, 撒文奇<sup>3</sup>, 王高辉<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610051;  
3. 中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

**摘要:** 通过构建施工状态“集合”与数值仿真模型模拟状态“集合”之间的动态映射关系, 建立混凝土重力坝三维全尺度施工过程结构安全与进度耦合动态仿真方法, 动态仿真分析坝段群任一施工进度面貌下的结构安全状态; 运用 VTK 实现了坝段群施工全过程结构安全与进度状态的耦合动态可视化; 采用 C#.Net 和 APDL 开发了一套碾压混凝土重力坝三维全尺度结构安全与进度耦合动态仿真及可视化系统。该系统能够为快速、全面把控坝段群施工过程结构安全和进度提供数据支持。

**关键词:** 碾压混凝土重力坝; 耦合动态仿真; 耦合动态可视化; 动态映射; 结构安全; 施工进度  
中图分类号: TV642.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 01-0057-06

### Full-scale Dynamic Simulation for Structure Safety and Schedule Coupling of RCC Gravity Dams

Zhang Sherong<sup>1</sup>, Du Chengbo<sup>1,2</sup>, Sa Wenqi<sup>3</sup>, Wang Gaohui<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China;  
3. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** By establishing the dynamic mapping relationship between the set of the construction state and the set of the emulation state of numerical simulation model, the method of three dimension and full-scale dynamic simulation for structure safety and schedule coupling during construction process was built. The method was used to dynamically analyze structure safety under any construction schedule condition of dam. VTK was utilized to realize three dimension and full-scale dynamic visualization for structure safety and schedule status coupling of RCC gravity dam during construction process. A three dimension and full-scale dynamic simulation and visualization system for structure safety and schedule coupling of RCC gravity dam was developed with C#.Net and APDL. The system can quickly provide data support to comprehensive control of structure safety and schedule during construction process.

**Keywords:** RCC gravity dam; coupling dynamic simulation; coupling dynamic visualization; dynamic mapping ; structure safety; construction schedule

## 引言

碾压混凝土重力坝施工过程中若对坝体温度



作者简介: 张社荣(1960-), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水电工程安全技术研究、水工结构分析。

收稿日期: 2014-01-05 修回日期: 2014-02-16  
基金项目: 国家自然科学基金(51379141); 国家创新研究群体科学基金(51021004); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCYBJC19400); 水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金资助。

控制不力, 容易出现拉伸裂缝, 影响坝体安全。碾压混凝土重力坝施工过程结构安全动态仿真研究可以模拟出任意施工方案下坝体结构安全状态的变化过程, 帮助工程师进行设计期计划施工方案的优化和施工期后续施工方案的调整, 因此具有重要意义。

目前, 已对大体积混凝土结构施工过程的温度

应力仿真方面进行了一定程度的研究。如朱伯芳<sup>[1-2]</sup>自主开发了我国第一个混凝土温度徐变应力的有限元程序，用于混凝土坝施工期的温度控制与防裂；金峰等<sup>[3]</sup>基于 ABAQUS 开发了混凝土坝温度应力计算程序并应用于模拟混凝土坝施工期和运行期的温度和应力场；谢祥明等<sup>[4]</sup>对高温地区碾压混凝土重力坝的施工期温度裂缝控制措施进行了研究；周伟等<sup>[5-6]</sup>基于混凝土坝整体温度仿真分析了大坝诱导缝的工作特性。然而，已有研究主要针对单坝段进行，在温度场计算时简化了相邻坝段间的传热影响和坝体横河向两侧面动态变化的对流边界条件，这导致计算结果与实际相差较大；少数针对整体坝段的研究在如何根据施工状态动态、快速改变数值仿真模型模拟状态进行结构安全与进度的耦合仿真及可视化等方面涉及较少；此外，已有研究对仿真计算结果的展示主要以静态图像的形式，不利于查看坝段群全过程结构安全状态和进度面貌的动态连续变化，而且从图像中获得的信息量有限，且无法交互。

## 1 施工状态与数值模型之间动态映射

碾压混凝土重力坝施工状态包含两部分内容，分别为工程的施工进度状态和施工条件<sup>[7]</sup>。由于施工状态可以由数值仿真模型的几何尺寸、荷载、边界条件及材料模型等进行模拟，故正确建立工程施工状态到三维全尺度结构安全数值仿真模型模拟状态的动态映射关系，是实现碾压混凝土重力坝施工过程安全与进度耦合动态仿真的基础。

### 1.1 动态映射中的元素

引入数学中“集合”的概念，将施工状态集合( $X$ )与数值仿真模型模拟状态集合( $Y$ )之间的“动态映射关系”，记为  $X \rightarrow Y$ 。故实现动态数值仿真的前提就是要建立此动态映射关系，保证在任一施工状态都能找到对应的数值仿真模型模拟状态。

#### 1) 施工进度状态子“集合”元素( $x_{1i}$ )

碾压混凝土重力坝的施工过程就是各坝段混凝土不断碾压浇筑，逐渐升高的过程。为便于模拟

各时刻碾压混凝土重力坝整体施工进度面貌，将各坝段均视为一个单元工程，故这些单元工程进度状态就构成了实际施工进度状态这个子“集合”。

#### 2) 施工条件子“集合”元素( $x_{2i}$ )

碾压混凝土重力坝的施工过程中的施工条件是指与各个施工进度状态相对应的影响混凝土边界条件、热力学参数的外界气候温度、库水温度、风速、日照、温控措施等，共同构成施工条件子“集合”。

#### 3) 数值仿真模型模拟状态“集合”元素( $y_i$ )

采用有限元法建立的数值仿真模型，其基本组成单位是单元，故具有荷载、边界条件和材料模型的各项单元组合之和构成了数值仿真模型模拟状态“集合”。

## 1.2 施工进度状态的动态映射

将碾压混凝土重力坝数值仿真模型分为坝体和基岩两部分，施工进度状态子“集合”只与坝体部分对应。坝体单元主要依据施工单元工程(坝段)，和大坝常用施工浇筑层厚度的公约数进行分段和分层划分，形成能够与各坝段各个浇筑层相对应的单元组，则每个坝段的施工进度状态在三维数值仿真模型中都会对应并且唯一对应一个或一组单元组，如图 1 所示。

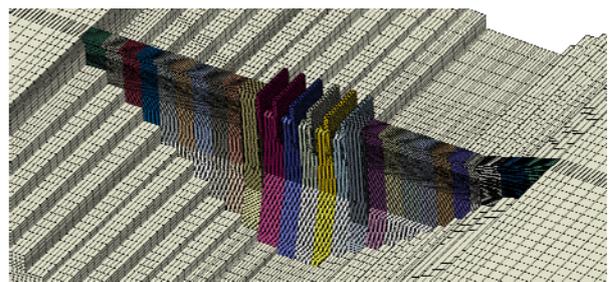


图 1 重力坝映射施工进度状态的数值仿真模型单元划分

故施工进度到数值仿真模型的动态映射可以描述为：读入  $t$  时刻的施工进度数据，首先判断施工进度数据中每个单元工程的施工进度状态，同时根据各单元工程  $t$  时刻的浇筑高度以及  $t-1$  时刻的累计浇筑高度通过单元坐标去搜索数值仿真模型中需要激活的单元。

### 1.3 施工条件的动态映射

在施工时间  $t$ , 可将坝段群所承受的施工条件的影响等效转换映射为数值仿真模型中相应单元组的边界条件。

#### 1) 外界环境条件的等效映射

进行碾压混凝土重力坝温度应力的仿真计算, 须知道大坝温度场计算的初始条件和边界条件<sup>[8]</sup>。

外界气温: 混凝土与空气接触时的情况属于第三类边界条件, 因此可将外界气温的影响转换为数值仿真模型中的第三类边界条件。第三类边界条件表示固体与空气接触时的传热条件, 即混凝土的表面热流量和表面温度  $T$  与气温  $T_a$  之差成正比, 数学表达式为:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = \beta(T - T_a) \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为热交换系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

库水温度: 混凝土表面与流水直接接触的情况属于第一类边界条件, 这时可取混凝土表面的温度等于库水的温度; 风速主要影响第三类边界条件里的热交换系数  $\beta$ ; 日照的影响相当于周围空气的温度增高, 同样影响的是第三类边界条件。

基于上述分析, 数值仿真模型中可通过对与水和空气接触的混凝土单元施加相应边界条件的方法, 将外界气候温度、库水温度、风速、日照等外界环境条件进行等效映射。

需要注意的是, 对于坝段群三维全尺度结构安全动态仿真计算, 坝段群中单坝段的边界条件会随该坝段与相邻坝段的浇筑高度相对关系和库水位高度发生变化。

#### 2) 温控措施的等效映射

在大体积混凝土施工中, 目前广泛采用冷却水管来控制温差, 减小温度应力。将冷却水管冷却效果等效映射为影响混凝土温度的等效热传导方程<sup>[8]</sup>, 将冷却水管的冷却效果体现在混凝土生热率的改变, 同时避免了局部单元剖分的问题。

## 2 耦合动态仿真及可视化系统开发

### 2.1 系统主要功能

#### 1) RCC 重力坝结构安全与进度耦合动态仿真

碾压混凝土重力坝结构安全与进度耦合动态仿真可用于不同施工方案下重力坝施工过程结构安全的动态仿真分析, 在满足施工过程结构安全的前提下进行施工进度仿真分析<sup>[9-10]</sup>, 以确定最终的施工浇筑方案; 同时在实际施工过程中若出现结构安全或施工进度不满足要求的情况, 可以快速进行后续施工调整方案下的结构安全与进度耦合动态仿真, 以确定合理的施工调整方案, 反馈施工。

#### 2) RCC 重力坝结构安全与进度耦合动态可视化

系统通过可视化技术将其结构安全与进度耦合动态仿真相关的输入数据、过程数据和输出数据, 以坝段群三维动态可视化信息模型为显示载体, 实现其结构安全与进度状态、信息的耦合动态可视化。

### 2.2 系统功能实现

三维全尺度施工过程结构安全与进度耦合动态仿真子系统包括 2 个仿真计算程序: 结构安全仿真计算程序基于 ANSYS 有限元分析软件平台, 采用 APDL 二次开发实现, 而施工进度仿真预测计算程序基于网络计划仿真技术<sup>[11]</sup>, 采用 C#.Net 编程实现; 结构安全与进度状态耦合动态可视化子系统采用 C#.Net 和 VTK 编程开发实现。

#### 1) 结构安全与进度耦合动态仿真子系统实现

结构安全仿真计算程序包括温度场和温度应力仿真计算 2 大部分。

温度场计算程序算法步骤如下:

(1) 进行“数据读入及程序初始化模块”: 采用 \*VREAD 函数分别读取大坝施工进度数据文件和模型数据文件中的施工进度数据、施工浇筑方案数据、模型数据, 并存储在相应名称的数组中; 初始化累计计算参数和标识参数; 初始化有限元数值仿真模型: 为加快计算效率, 事先将大坝各坝段坝体单元和基岩单元全部杀死, 然后随着坝段开始浇

筑,仅激活当前浇筑坝段坝体和基岩单元以及相邻坝段基岩单元。

(2) 以一天为一个计算步,开始大坝施工工期内  $T=1$  时的温度场计算。

(3) 施工进度状态到数值仿真模型的映射。循环每一个坝段:首先根据当前坝段当天的施工进度数据,判断需要激活的数值仿真模型单元;由于不同的施工组合方案下的混凝土单元会产生不同的生热率变化规律,为实现坝段各浇筑层单元的生热率的循环更新,将坝段各浇筑层按照其施工浇筑方案属性进行分块;然后循环各个分块中的每一个浇筑层依次进行单元生热率的更新。待循环完成所有坝段单元的更新,则进入第(4)步。

(4) 施工条件到数值仿真模型的映射。循环每一个坝段:根据当前数值仿真模型模拟的施工进度面貌,为各坝段坝体、基岩单元施加第三类边界条件和第一类边界条件。待循环完成所有坝段,则根据当前已激活的数值仿真模型范围,施加基岩 4 个侧面和底面的绝热边界条件。

(5) 进行 ANSYS 温度场计算的参数设置,并开始本次计算步温度场计算。

(6) 待计算完成,删除当前数值仿真模型单元的所有边界条件。

(7) 更新计算步  $T=T+1$ ,并判断是否完成整个施工工期的数值仿真计算,是则程序终止,否则返回第(3)步。

温度应力计算采用间接法进行实现,即将温度场仿真计算求得的节点温度作为节点体荷载应用于温度应力仿真计算中。温度应力计算程序与温度场计算程序算法流程的框架基本一致,由于需要考虑混凝土徐变,则需要建立相应的每天单元材料模型分块分层更新模块。

施工进度仿真预测计算程序基于网络计划仿真技术编程实现,在此不做详细介绍。

2) 结构安全与进度耦合动态可视化子系统实现  
结构安全与进度状态耦合动态可视化功能的实现主要包括 2 大步骤:(1) 通过 APDL 读取各个

计算时间步(施工时间)的有限元模型数据和计算结果数据并录入数据库;(2) 通过 C#.Net 和 VTK 编程实现各个计算时间步模型结构安全和进度状态耦合动态可视化。

第 1 个步骤需要读取的数据主要包括:模型中所有节点的编号及其坐标,所有单元的编号及其节点编号,各个时间步新激活单元编号,各个计算步激活单元节点的计算结果。读取后的数据存储在本文件中,然后自动导入数据库,分别存储在“节点表”,“单元表”,“单元改变表”和“计算结果表”4 个数据表中。

第 2 个步骤是运用 VTK 可视化流水线<sup>[12-13]</sup>设计实现结构安全与进度状态耦合动态可视化:

(1) 时间步  $T=1$ , 可视化开始;

(2) 采用 `vtkPoints` 类、`vtkHexahedron` 类依次存储从数据库中获取的各个时间步的节点数据、单元数据,进而采用 `vtkUnstructuredGrid` 类生成各个时间步的整体可视化模型;采用 `vtkFloatArray` 类存储各个节点对应的仿真计算结果数据。

(3) 采用 `vtkDataSetMapper` 类同时将可视化模型映射成图像模型,将节点计算结果数据映射成不同显示颜色。

(4) 时间步  $T=T+\Delta T$ , 判断是否达到最终时间,是则终止程序,否则返回第 2 步。

### 3 工程实例应用

以某碾压混凝土重力坝工程为例进行上述理论和开发系统的应用。该碾压混凝土重力坝坝底高程 1 166.00 m,坝顶高程 1 334.00 m,最大坝高 168 m,共分为 23 个坝段,全尺度数值仿真模型共包含 326 174 个节点,302 576 个单元,如图 1 所示(从左至右分别为 1~23 #坝段),典型坝段混凝土分区如图 2 所示。

大坝浇筑计划从第 1 年 9 月 12~14#溢流坝段浇筑开始,第 2 年 10 月第一次蓄水至高程 1 290.00 m,到第 2 年 2 月所有坝段浇筑完毕,计划工期 535 d。坝体垫层及其他常态混凝土浇筑层厚为 1.5 m,间

歇期为 5 d; 强约束区范围内, 每铺层碾压压实厚度 0.30 m, 连续碾压 5 层(计 1.5m 层厚)后间歇 5 d; 强约束区范围以外, 每铺层碾压压实厚度 0.30m, 连续碾压 5 层(计 1.5 m 层厚)-10 层(计 3.0 m 层厚)后间歇 5~7 d, 具体施工组合方案计划如表 1 所示。

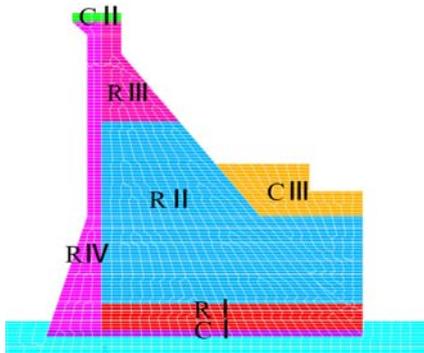


图 2 典型坝段混凝土分区图

表 1 大坝施工组合方案

混凝土种类	浇筑层厚度/m	间歇期/d	冷却水管间距/m×m	冷却水温/°C	冷却时间/d	
垫层	CI	1.5	5	1.5×2.0	12	15
强约束区	RI	1.5	5	1.5×2.0	12	15
	RII					
	RIV					
弱约束区	RII	1.5	5	1.5×2.0	12	15
	RIV					
脱离约束区	RII	3.0	7	1.5×3.0	12	10
	RIII					
	RIV					
	CII					
	CIII					

根据“施工过程结构安全与进度耦合动态仿真子系统”中提供的温度场动态仿真计算程序, 将大坝浇筑每一天的施工状态向数值仿真模型进行快速映射, 并计算出每一天温度场结果, 然后通过“结构安全与进度状态耦合动态可视化子系统”进行动态交互式显示、分析。

用户不仅能够以交互式的方式跟踪查看坝段群在施工过程中连续、动态的结构安全状态和进度面貌概况, 还可以从系统界面上获取其他更为详细、重要的施工进度、方案信息和结构安全信息,

包括已开工坝段施工进度信息, 施工组合方案信息, 最高温度值及其出现位置, 基础温差等(如图 3~4 所示); 还能够通过单击关注部位获取热点所属坝段、所在位置、混凝土分区和当前温度值, 也可以追溯其浇筑日期、施工组合方案等信息(如图 4 所示); 此外, 系统在三维动态可视化过程中, 动态绘制出已开工坝段温控指标(最高温度及基础温差<sup>[14]</sup>)的变化曲线(如图 5 所示), 为分析施工方案的合理性提供数据支持。若发现某一施工时段内温控指标不满足规范标准, 则可再次利用“耦合动态仿真子系统”快速进行调整施工方案下的全过程温度仿真和施工进度预测分析, 重新确定施工方案。

可以看出, 系统将数值仿真计算和后处理进行快速、无缝衔接, 实现了宏观(坝段群)进度面貌和细观(节点处)结构安全信息的耦合动态交互式展示和跟踪分析, 为决策者全面把控碾压混凝土重力坝坝段群结构安全和进度, 进行施工方案的确定提供了一套辅助工具。

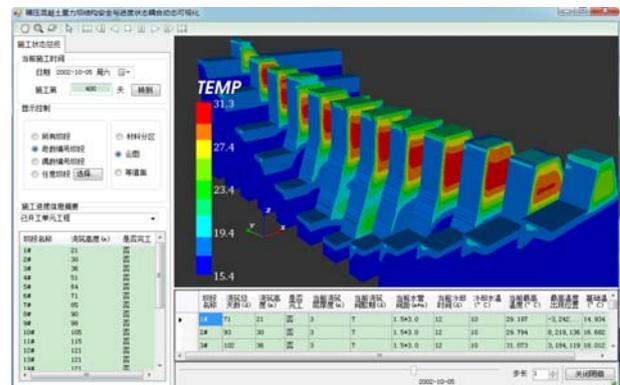


图 3 第 400 d 奇数编号坝段群结构安全和进度状态查看

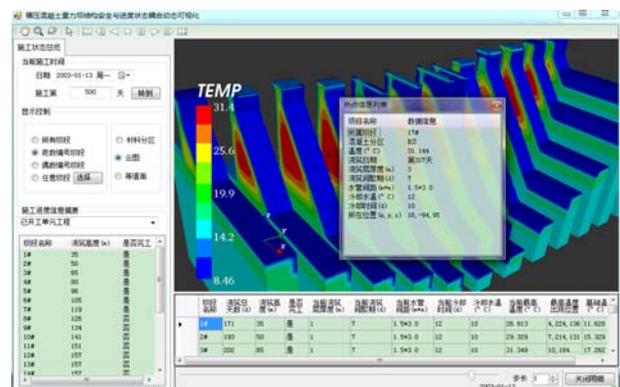


图 4 第 500 d 关注部位结构安全与进度信息查看

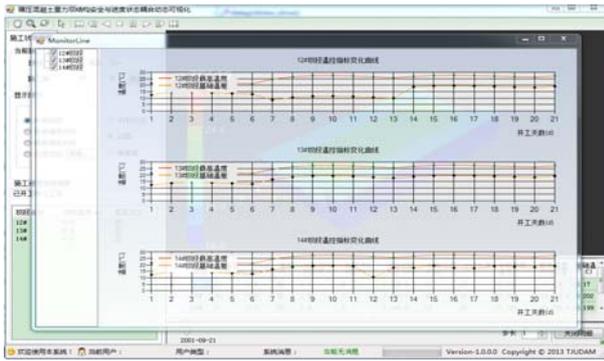


图 5 温控指标变化曲线动态绘制

## 4 结论

(1) 基于有限单元法和“集合”映射理论，建立施工状态“集合”与数值仿真模型模拟状态“集合”之间的动态映射方法，实现了施工进度状态与施工条件状态在数值仿真模型上的动态、准确、快速映射。

(2) 基于动态映射方法和 ANSYS 有限元分析平台，采用 APDL 二次开发实现三维全尺度施工过程中结构安全与进度耦合动态仿真计算程序，考虑了坝段群施工进度和结构安全的相互影响；采用 C#.Net 为编程语言，VTK 为可视化工具，以坝段群三维动态信息模型为显示载体，开发了结构安全与进度状态耦合动态可视化子系统。

(3) 工程实例应用表明，该系统能够方便地实现碾压混凝土重力坝拟定施工方案下三维全尺度结构安全与进度耦合动态仿真，坝段群全过程结构安全和进度状态、信息的交互式、连续、动态查看，以及安全控制指标信息全过程可视化跟踪分析。

(4) 全尺度结构安全与进度耦合动态仿真在追求计算结果质量的同时也提高了计算的复杂性，降低了计算效率。对于具有复杂施工过程的大型重力坝工程来说，若要实现工程结构安全的高效实时监控，需要开发利用并行计算或云计算技术。

## 参考文献:

- [1] 朱伯芳, 王同生, 丁宝瑛, 等. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1976.
- [2] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望 [J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1424-1432.
- [3] 金峰, 周志丹, 周元德, 等. 基于 ABAQUS 平台的混凝土坝温度应力计算程序的开发与应用 [J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 75-78.
- [4] 谢祥明, 郭磊. 高温地区碾压混凝土重力坝的施工温度裂缝控制 [J]. 天津大学学报, 2011, 44(6): 504-510.
- [5] 周伟, 常晓林, 刘杏红, 等. 基于温度应力仿真分析的碾压混凝土重力坝诱导缝开裂研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 122-127.
- [6] 周伟, 常晓林, 喻建清, 等. 基于施工期温度仿真的小湾高拱坝结构诱导缝设置效果分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(1): 51-57.
- [7] 撒文奇, 张社荣, 杜成波, 等. 大型地下洞室群施工期结构安全与进度耦合实时仿真研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 98-106.
- [8] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [9] 钟登华, 吴康新, 练继亮. 基于多 Agent 的混凝土坝施工仿真与优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 485-489, 498.
- [10] 吴斌平, 任炳昱, 钟登华. 基于边缘优先和空间冲突的拱坝浇筑仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1560-1567.
- [11] 刘武成. 复杂桥梁工程施工动态的可视化仿真 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 207-212.
- [12] 周振环, 伍云智, 赵明. 医学图像编程技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [13] Will S, Ken M, Lorensen B. The Visualization Toolkit: An Object Oriented Approach to 3-D Graphics [M]. New York, USA: Kitware Inc, 2003.
- [14] 中华人民共和国水利部. SL319-2005 混凝土重力坝设计规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.