

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.001

基于实时监控的碾压混凝土坝仓面 施工仿真可视化分析

钟登华,张元坤,吴斌平,任炳昱

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要: 结合系统仿真技术、实时监控技术、数据库技术和可视化技术,开展碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析研究,构建仓面施工精细仿真模型。该模型不仅可以通过仿真计算获得详细的仓面施工进度信息,而且实现了可交互的仓面施工三维动态可视化分析。研究成果已应用于西南某碾压混凝土坝工程。

关键词: 水利工程施工;碾压混凝土坝仓面施工;实时监控;精细仿真模型;施工仿真三维可视化

中图分类号: TV52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)05-0377-09

Simulation and visual analysis for construction of storehouse surface of RCC dam based on real-time monitoring

ZHONG Denghua, ZHANG Yuankun, WU Binping, REN Bingyu

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using the techniques of system simulation, real-time monitoring, databases, and visualization, simulation and visual analysis for the construction of the storehouse surface of a roller-compacted concrete (RCC) dam was carried out. An elaborate simulation model for storehouse surface construction was established, through which detailed construction progress information can be obtained. Furthermore, interactive three-dimensional dynamic visualization analysis for storehouse surface construction was realized. These research achievements have been applied in a RCC dam in Southwest China.

Key words: hydro project construction; construction of storehouse surface of RCC dam; real-time monitoring; elaborate simulation model; three-dimensional visualization of construction simulation

碾压混凝土坝是采用超干硬性混凝土经逐层铺填碾压而成的混凝土坝,是将土石坝碾压技术应用于混凝土坝施工的一种新坝型。相对于常态混凝土坝,碾压混凝土坝施工仓面大、施工作业快速连续、机械化水平较高,因此具有施工速度快、工期短、费用低的特点,但与此同时,也要求碾压混凝土坝各施工环节组织调度高度协调,以保证混凝土从拌和、运输到摊铺、碾压等工序可以在较短的时间内完成,施工组织设计与进度计划安排难度较大。碾压混凝土坝施工是一个复杂的随机动态过程,难以通过数学解析方法进行分析,往往采用计算机仿真方法对施工过程进行研究。

国外针对混凝土工程施工的计算机仿真研究开始较早,1973年, Bassgen 结合混凝土重力坝施工进行了缆机浇筑过程仿真;1977年, Halpin^[1]将计算机仿真技术与循环控制网络结合起来,对混凝土运输过程进行了研究。在国内,计算机仿真技术应用于水利工程混凝土施工始于20世纪80年代。1984年,朱光熙^[2]运用系统分析方法对某双曲拱坝浇筑方案进行计算机模拟,仿真成果符合一般施工规律。随着我国碾压混凝

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金创新群体基金(51321065);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB035904);国家自然科学基金青年基金(51409188)

作者简介: 钟登华(1963—),男,江西赣县人,中国工程院院士,教授,博士,主要从事水利水电工程施工仿真与实时控制分析技术研究。
E-mail: dzhong@tju.edu.cn

土筑坝技术的快速发展,当前在碾压混凝土坝的设计、施工及管理等方面我国均处于世界领先水平,针对碾压混凝土的施工仿真研究也取得了一系列成果。在碾压混凝土运输和大坝浇筑方面,王仁超等^[3]采用计算机系统仿真技术和排队随机仿真网格理论进行了深入研究;在碾压混凝土分仓优化方面,巫世晶等^[4]基于离散系统数值仿真的思想进行了理论研究;在施工运输方案优选方面,钟登华等^[5]建构了碾压混凝土施工运输方案选择的专家系统 RCPSES;在可视化仿真及建模方面,吴康新等^[6]以及赵春菊等^[7]借助不同的平台对碾压混凝土坝施工三维动态可视化仿真系统进行了探索研究。

碾压混凝土坝施工系统由许多子系统组成,各子系统间相对独立,又保持着整体的协调统一,但单独针对各子系统的优化并不一定能带来整个系统的整体优化。因此,针对碾压混凝土施工系统的系统耦合建模与精细化仿真研究应运而生。罗伟等^[8-9]构建了基于碾压混凝土生产、运输及仓面作业的多系统复杂边界条件下的耦合赋时 Petri 网动态仿真模型;周宜红等^[10]建立了混凝土拌和生产系统与浇筑系统耦合模型以及资源冲突时的协调模型;赵春菊等^[11]构建了基于碾压混凝土坝施工生产、运输及仓面作业各子系统间相互作用机理的耦合模型。随着碾压混凝土筑坝技术的快速发展,碾压混凝土坝施工仿真理论日益完善,仿真模型中针对某一突出的子系统或者施工环节的模型精度日渐提高,在充分反映碾压混凝土坝施工工艺特点的同时,也提高了仿真模型对原型系统描述的可靠性。常昊天等^[12]实现了耦合动态合仓的碾压混凝土坝施工进度全过程仿真,使仿真结果更贴近实际施工;赵春菊等^[13]构建了仓面作业系统施工仿真与优化模型,确定了有限资源条件下最优仓面作业方案;郝雪莹^[14]基于仿真软件 Anylogic 建立了碾压混凝土坝平层铺筑仓面施工模拟系统。

综上所述,目前碾压混凝土坝施工仿真研究没有考虑仓面施工作业系统各项工艺流程及其约束条件对施工进度的影响,难以全面描述和反映碾压混凝土坝仓面铺筑的复杂施工规律,同时也无法得到仓面施工过程的详细信息,一定程度上降低了仿真成果的精度。此外,当前仿真模型中所用仿真参数多是依靠以往工程经验选取,未能充分挖掘、利用实际施工数据,以致仿真缺乏实时性,难以结合前期施工历程准确预测未来的施工进度。同时,目前的碾压混凝土坝仓面施工仿真研究在成果的可视化表现方面仍有很大的进步空间,需要进行更加深入的研究。因此,针对以上问题,本文结合系统仿真技术、实时监控技术、数据库技术和可视化技术,针对碾压混凝土坝仓面施工可视化仿真进行了探索研究,编制了相应的仿真程序,实现基于 Unity 3D 的三维可视化分析,为优化现场仓面组织设计、指导现场施工提供有力的技术支持。

1 仿真框架

在全面分析碾压混凝土坝仓面施工各项工艺流程及其施工约束条件的基础上,依据离散事件系统仿真原理,构建碾压混凝土坝仓面施工仿真模型。运用数理统计方法对仓面施工实时监控数据进行分析,通过 MATLAB 拟合各施工参数分布函数,在仿真时通过 Monte Carlo 方法生成符合相应分布的随机数进行计算。基于 Unity 3D 引擎搭建碾压混凝土坝仓面施工三维场景,实时演示施工仿真成果。基于实时监控的碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析框架如图 1 所示。

2 仓面施工仿真理论与方法

2.1 仓面施工工艺流程分析

碾压混凝土坝兼有土石坝和混凝土坝的特点,又具有独特的施工工艺。碾压混凝土坝仓面施工主要包括层面处理、埋设冷却水管、卸料平仓、振动碾压、质检、切缝、变态混凝土施工、仓面养护等工序,其中切缝、变态混凝土施工一般与振动碾压工序同时进行,不占直线工期。根据以往工程经验,振动碾压是仓面施工过程中最重要的环节。实际施工时,为提高施工的连续性和施工人员的专业性,通常将仓面划分为若干施工段,组织各工作队进行流水作业施工,如图 2 所示。

2.2 仿真数学模型及其实现

2.2.1 仓面施工仿真数学模型

碾压混凝土坝仓面施工过程十分复杂,仓面施工组织不仅需要考虑质量要求、施工工艺、机械配置等因素,还会受到外界环境的影响。例如,当遭遇多雨、高温、低温等天气时,一方面会影响碾压混凝土的质量,形成安全隐患,另一方面也会使仓面施工工作效率降低,施工复杂程度加剧。此时必须采取适当的措施

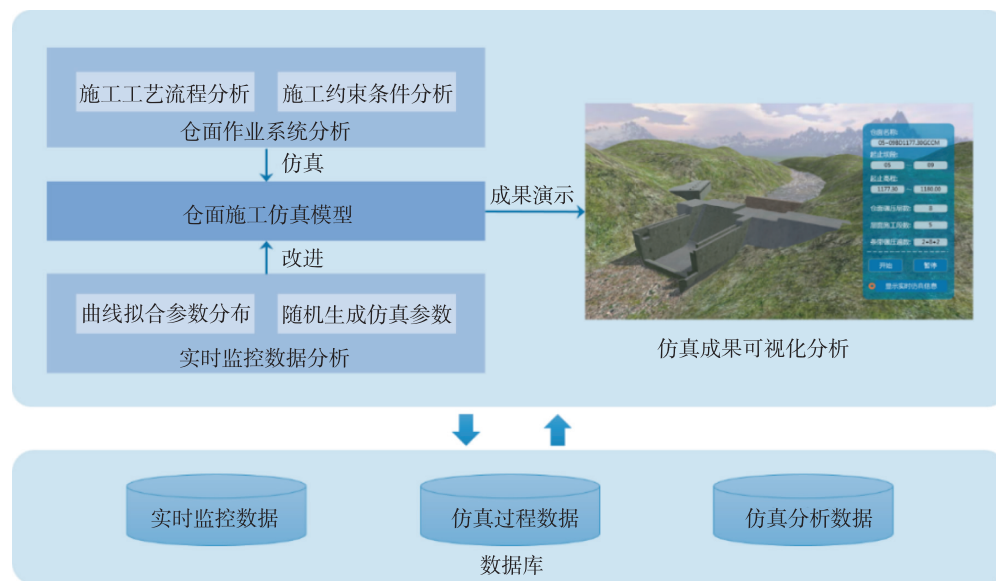


图 1 研究框架

Fig. 1 Frame chart of research

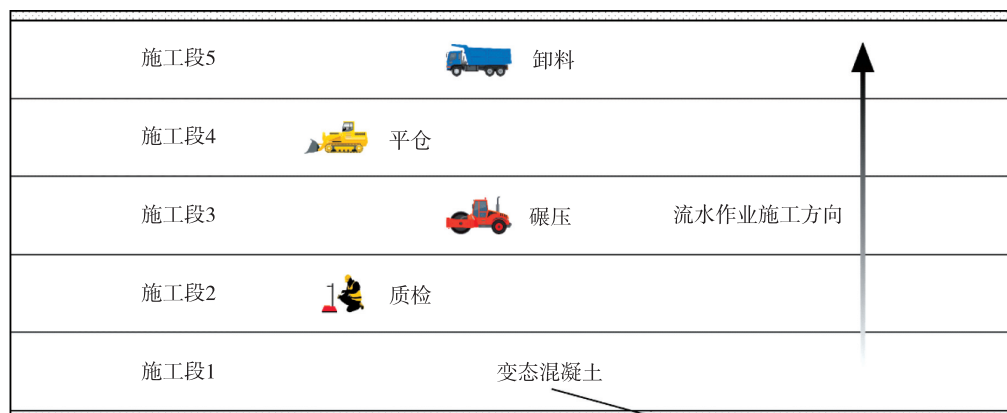


图 2 碾压混凝土坝仓面施工流水作业示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction process of storehouse surface of RCC dam

保证施工质量,气候较恶劣时应暂停施工。在碾压混凝土坝仓面施工仿真系统中,以上因素均可归结为影响仓面施工的约束条件。综合考虑各种复杂的约束条件,可构建碾压混凝土坝仓面施工数学逻辑模型:

目标函数
$$P = f[R(i), S(i), M(i)] \quad (1)$$

约束条件
$$\begin{cases} S(i) = \begin{cases} S_0 & m < n \\ S_1 & m \geq n \end{cases} \\ M(i) \subset M_c \\ T_c \leq T_0 \\ W(T, C) \subset W_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: i ——某一碾压层面编号; P ——仓面施工历时; $R(i)$ ——仓面施工条件参数; $S(i)$ ——仓面铺筑施工方式; $M(i)$ ——仓面施工参数; S_0 ——平行作业施工参数; S_1 ——流水作业施工参数; m ——层面施工段数; n ——仓面施工工序数; M_c ——实时监控对仓面施工过程的控制参数; T_c ——层面施工时间; T_0 ——碾压混凝土从拌和加水到碾压完毕的最长允许历时; $W(T, C)$ ——仓面施工时的气候条件; T ——环境温度; C ——降雨参数; W_0 ——碾压混凝土仓面允许施工的气候条件。

2.2.2 仿真参数分析

仿真模型可以看做是由一系列仿真参数依据一定的逻辑关系组合而成,仿真参数的准确性直接影响仿真成果的可信度。因此,为了确保仿真模型对原型系统描述的准确性,提高仿真模型的精度,对实际施工数据进行统计分析并以此更新仿真参数是必然措施。当前阶段,碾压混凝土坝仓面施工质量实时监控系统已实现对施工过程中振动碾压环节精细化、全天候的实时监控,以及对仓面施工信息的动态高效集成管理与分析^[15],为碾压混凝土坝仓面施工仿真研究提供了大量宝贵的基础数据。本文通过 ADO.NET 技术由数据库中读取实时监控数据,运用 MATLAB、SPSS 等软件对其进行数理统计分析,可以得到振动碾压主要工序各仿真参数的分布函数。

在实际施工中,由于施工员的驾驶水平差异与无法避免的外力干扰等因素,振动碾的运动状态并不是恒定不变的,其行走速度、前进方向时刻发生着改变,振动碾行走速度、偏转角度均为动态随机变量。同理,振动碾错距所用的时间以及错距所产生的条带搭接宽度也是随机值。因此,振动碾压工序中各施工参数均可看做符合某种概率分布的随机变量,即

$$\begin{cases} v(t) = \int g(v) dv & v(t) \in [v_{\min}, v_{\max}] \\ \theta(t) = \int h(\theta) d\theta & \theta(t) \leq \theta_0 \\ t_b = \int p(t_b) dt_b \\ b(t) = \int k(b) db & b(t) \in [b_{\min}, b_{\max}] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v(t)$ ——振动碾行走速度; $g(v)$ ——振动碾行走速度的概率密度函数; $v_{\min}$ ——振动碾行走速度的最小允许值; $v_{\max}$ ——振动碾行走速度的最大允许值; $h(\theta)$ ——偏转角度的概率密度函数; θ_0 ——振动碾偏转角度的最大允许值; $p(t_b)$ ——错距时间的概率密度函数; $k(b)$ ——条带搭接宽度的概率密度函数; $b_{\min}$ ——条带搭接宽度的最小允许值; $b_{\max}$ ——条带搭接宽度的最大允许值。

运用数理统计方法对实时监控数据进行必要的处理分析,得到各施工参数的概率分布,然后通过 MATLAB 曲线拟合工具箱 Cftool 使用一系列的标准分布对数据进行拟合,选取其中拟合程度最高的分布作为各施工参数的拟合函数,如图 3~6 所示。

从图 3~6 可以看出,振动碾行走速度服从正态分布,相关系数为 0.9827,拟合度较高;错距时间服从二次多项式分布,相关系数为 0.9546,拟合度较高;条带间搭接宽度服从均匀分布,相关系数为 0.8713;振动碾偏转角度较为离散,难以用曲线拟合,可采用离散概率密度函数进行描述。

对于层面处理、卸料平仓、质量检测等次要工序,在实际施工中未对其具体施工过程进行实时监控,可以根据各工序施工规律并结合以往的工程经验确定其施工参数分布情况。

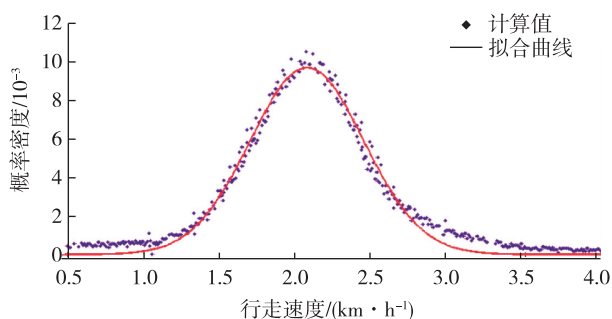


图3 行走速度概率密度曲线

Fig. 3 Probability density curve of rolling speed

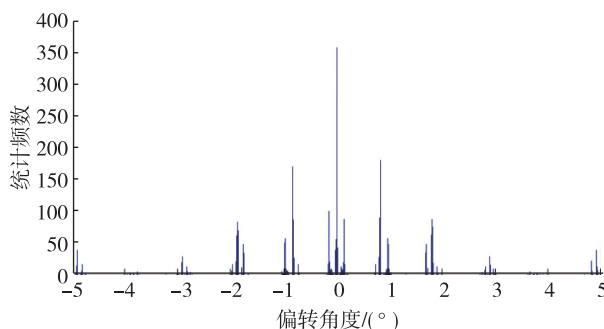


图4 偏转角度直方图

Fig. 4 Histogram of deflection angle

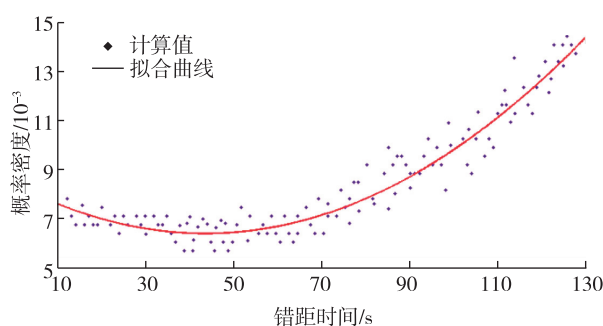


图5 错距时间概率密度曲线

Fig. 5 Probability density curve of time of offset

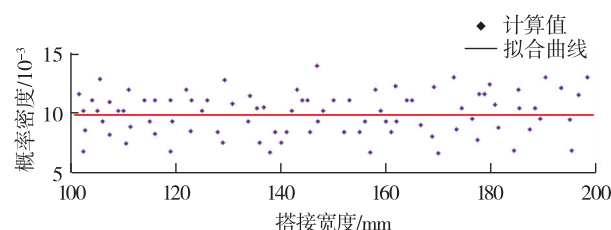


图6 搭接宽度概率密度曲线

Fig. 6 Probability density curve of overlapping width

2.2.3 施工历时计算

2.2.3.1 各工序作业时间分析

对于振动碾压工序,在实际施工中振动碾行进方向一般与坝轴线方向平行,错距方向与坝轴线方向垂直,同时要求各碾压条带间搭接宽度为 100~200 mm,因此可以根据仿真过程中振动碾的实时位置与施工段形状间的相对关系来判断错距的发生和施工段碾压活动的结束。

假定某铺筑层面某施工段划分为 h 个条带进行碾压,每个条带碾压遍数为 k ,振动碾在第 j 个条带第 i 次从仓面一端行驶至另一端所用时间为 t_{ij} ,第 i 次由前一条带错距至下一条带所用时间为 t_{bi} ,则该施工段振动碾压工序施工时间计算公式为

$$T = \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^k t_{ij} + \sum_{i=1}^{h-1} t_{bi} \quad (4)$$

行进时振动碾的状态转移方程为

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} \pm v(t) \cos \theta(t) \\ y_t = y_{t-1} \pm v(t) \sin \theta(t) \end{cases} \quad (5)$$

错距时振动碾的状态转移方程为

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} \\ y_t = y_{t-1} + b(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x_t, y_t) ——振动碾 t 时刻的位置; (x_{t-1}, y_{t-1}) ——振动碾 $t-1$ 时刻的位置; $v(t)$ ——振动碾 t 时刻随机行驶速度; $\theta(t)$ ——振动碾 t 时刻随机偏转角度。

对于层面处理、卸料平仓、质量检测以及铺设冷却水管等次要工序,根据以往工程经验,各工序施工历时服从不同的分布规律。其中,层面处理、卸料平仓施工历时服从确定性分布,质量检测、铺设冷却水管施工历时服从一定区间上的均匀分布,计算公式为

$$\text{确定性分布} \quad T_1 = \frac{sh}{lp} \quad (7)$$

$$\text{均匀分布} \quad T_2 \sim U(t_{\min}, t_{\max}) \quad (8)$$

式中: s ——施工段面积; l ——施工机械数量; p ——施工机械工作效率; $t_{\min}$ ——施工历时最小值; $t_{\max}$ ——施工历时最大值。

2.2.3.2 各层面施工时间计算

当某一铺筑层面采用平行作业施工时,该层面施工时间为各施工工序施工历时之和。

当某一铺筑层面采用流水作业施工时,假定该层面划分为 m 个施工段、 n 道施工工序,第 i 道工序在第 j 个施工段上的施工作业记为 $S(i, j)$,其施工历时记为 $t_{i,j}$,施工结束时刻记为 $T_{i,j}$, $S(i, j)$ 是 $S(i+1, j)$ 和 $S(i, j+1)$ 的紧前工序。设该层面的施工起始时刻为 T_s ,则 $T_{i,j}$ 的递推公式为

$$\begin{cases} T_{1,1} = T_s + t_{1,1} \\ T_{i,j} = \max(T_{i-1,j}, T_{i,j-1}) + t_{i,j} \end{cases} \quad (9)$$

因此,可推算出该层面施工时间为最后一个施工段最后一个工序的施工结束时刻减去层面施工起始

时刻。

整个仓面的施工总历时等于铺筑前层面处理时间、各层面施工时间、层间处理时间以及仓面养护时间之和。连续铺筑上升的临时施工层面一般不进行层间处理,但在全断面碾压混凝土坝上游面防渗区必须铺砂浆或水泥浆,以防止层面漏水。

2.2.4 仓面施工仿真流程

仿真程序基于 Visual Studio、SQL Server 平台进行开发,以 C#作为主要编程语言。程序开始,首先初始化仿真模型,确定仓面施工方案后进行仿真计算。整体上以下一事件推进法推进仿真时钟,依次进行仓面施工各施工工序历时的计算,中途需要判断是否需要通水降温以及是否连续铺筑上升。对于振动碾压工序,采用固定时间推进法推进仿真时钟,产生随进速度和偏转角度,计算振动碾位置坐标。根据振动碾位置与施工段形状的相对关系来判断是否需要错距。若需要错距,则产生随机错距距离和错距时间,更新振动碾位置信息,将仿真时钟推进相应时长;若不需要错距,则正常推进仿真时钟。重复以上步骤,直到完成振动碾压工序。仿真流程如图7所示。

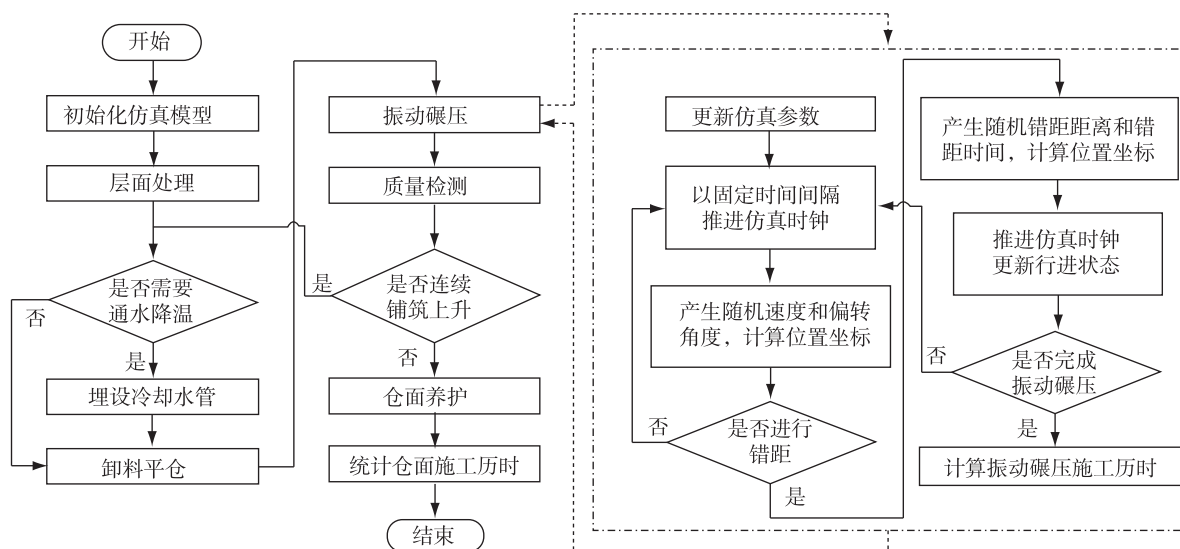


图7 仿真流程

Fig. 7 Flowchart of simulation

3 仓面施工三维动态可视化的实现

基于 Unity 3D 引擎构建碾压混凝土坝仓面施工三维场景,用户可以在相对真实自然的虚拟环境中自由漫游,与场景进行交互,并可实时查看仓面施工仿真信息。构建三维交互场景的一般步骤为:首先运用实体几何构造法、细分曲面法等建模技术,创建地形、坝体、水工建筑物、仓面施工机械等三维模型,导入 Unity 3D 工程文件;然后在场景中添加光源,设置纹理贴图,运用实时全局光照技术模拟自然光照效果;最后通过内置的物理引擎为模型设置碰撞检测等规则,使物体运动过程符合客观规律。

3.1 全局光照

全局光照(global illumination)是考虑到环境中所有表面和光源相互作用的光线照射效果,是对光线传输物理特性的一种模拟,表现为直接照明和间接照明的综合效果。相对于传统的烘焙光照效果,全局光照可以获得更为逼真自然的光影交互效果,极大地提高场景的仿真度。

全局光照中光线在场景中传播的整个物理过程可以通过光能传递方程(式(10))来描述,方程求解的过程就是对场景的渲染过程。光能传递方程所表达的含义为:一个观察点 x 在某个方向上对外辐射的总能量 $L(x, \omega)$ 是由自体激发的能量 L_e 和反射的能量(对 L_i 的积分)2 部分组成。

$$L(x, \omega) = L_e + \int_{\Omega} \rho(x, \omega, \omega') L_i(x, \omega') \cos(\mathbf{N}, \omega') d\omega' \quad (10)$$

式中: Ω —— x 点所有半球方向的集合; $\rho(x, \omega, \omega')$ ——双向散射分布函数; ω ——光线出射方向; ω' ——光线入射方向; $\mathbf{N}$ —— x 点法向量。

3.2 碰撞检测

刚体(rigidbody)、碰撞体(collider)均属于 Unity 3D 引擎中物理组件的一类。刚体组件可使对象在物理系统的控制下运动,碰撞体组件与刚体组件一起添加到对象上时才能触发碰撞事件。在物理模拟中,没有碰撞体的刚体在相互撞击时会彼此穿过。因此,为有效地限制场景中各物体的活动范围,保证施工机械在仓面内的运动贴合实际,避免出现相互穿越的现象,需要采用碰撞检测技术。

根据三维场景中物体自身体型的差异,可分别添加不同类型的碰撞体,如盒碰撞体、网格碰撞体、地形碰撞体等。碰撞体组件覆盖在物体的表面,负责处理与其他物体间的碰撞事件。当2个物体相互接近时,物理引擎自动检测物体的碰撞体组件是否相交;如果不相交,则不发生碰撞;如果2个物体的碰撞体组件相交,则触发碰撞事件,阻止物体继续行进。

4 工程实例

4.1 基本施工信息

以西南某水电站工程为例,其拦河坝段为碾压混凝土重力坝。本文所选仓面形状为矩形,沿坝轴线方向长度为86 m,垂直于坝轴线方向长度为34 m,仓面面积约为3 000 m²,浇筑高度为2.7 m,分8层连续铺筑,每层厚度约为0.34 m,第3层及第7层施工前需铺设冷却水管。仓面铺筑采用流水作业施工方式,施工时将仓面划分为5个施工段,其中第1~4施工段宽度为7 m,第5施工段宽度为6 m。振动碾压施工采取先静碾2遍、再振碾8遍、最后静碾2遍的方式。仓内施工机械有2台推土机、3台振动碾以及1台切缝机。

4.2 施工仿真成果

初始化仿真模型,更新仿真参数,输入相应的施工参数,对该仓面的施工过程仿真计算51次,仿真成果统计如图8所示。通过SPSS软件对仓面施工历时仿真成果进行K-S检验,可知该仓面施工历时服从正态分布,平均值为85.9307 h,标准差为15.3083。

以往的碾压混凝土坝施工仿真通常采用仓面铺筑土方量比施工机械工作效率来计算仓面施工历时,无法得到仓面施工过程的详细信息。本文通过全面分析仓面施工各项工艺流程及其约束条件,构建了仓面施工精细仿真模型,通过仿真计算可以得到较详尽的仓面施工进度信息。仓面某铺筑层各施工段各工序施工历时计算结果如表1所示。从表1可以看出,该铺筑层各施工段碾压工序施工历时之和占层面施工总历时的94%,符合碾压工序是仓面施工主控工序的实际施工规律。

为检验仿真模型能否反映真实的施工情况,采用独立重复多次试验的方法对可视化仿真系统进行置信度检验。取置信度为95%,即 $\alpha=0.05$,计算可得仓面施工历时的置信区间为(81.6571 h, 90.2043 h)。仓面施工实际历时为88.0583 h,落入仿真成果置信区间内,说明仿真计算成果比较准确,仿真模型能够反映仓面的实际施工情况。

借助基于 Unity 3D 引擎构建的碾压混凝土坝仓面施工虚拟场景,可实现对仓面施工仿真成果的三维可视化分析。图9显示某时刻仓面施工仿真三维场景,此时仓面正在进行第8铺筑层的施工,该铺筑层共划分为5个施工段,其中第1施工段正在进行质检工序,第2施工段正在进行振动碾压,第4施工段正在进行卸料平仓。通过仓面施工仿真三维可视化场景可以较直观地获得当前施工仿真进度信息。

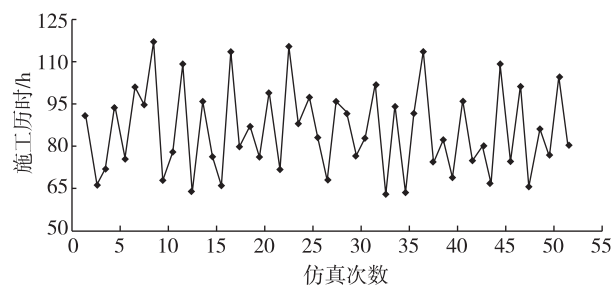


图8 仓面施工历时仿真计算结果

Fig. 8 Simulation results of construction duration of storehouse surface

表1 仓面某铺筑层施工历时计算结果

Table 1 Calculated results of construction duration of a paved layer h

工 序	各段施工历时				
	施工段 1	施工段 2	施工段 3	施工段 4	施工段 5
卸料平仓	0.3500	0.3500	0.3500	0.3500	0.3000
振动碾压	2.0639	1.9656	2.0136	2.1169	1.6822
质量检测	0.3667	0.3167	0.2833	0.3833	0.3667
总 计	2.7806	2.6323	2.6469	2.8502	2.2489

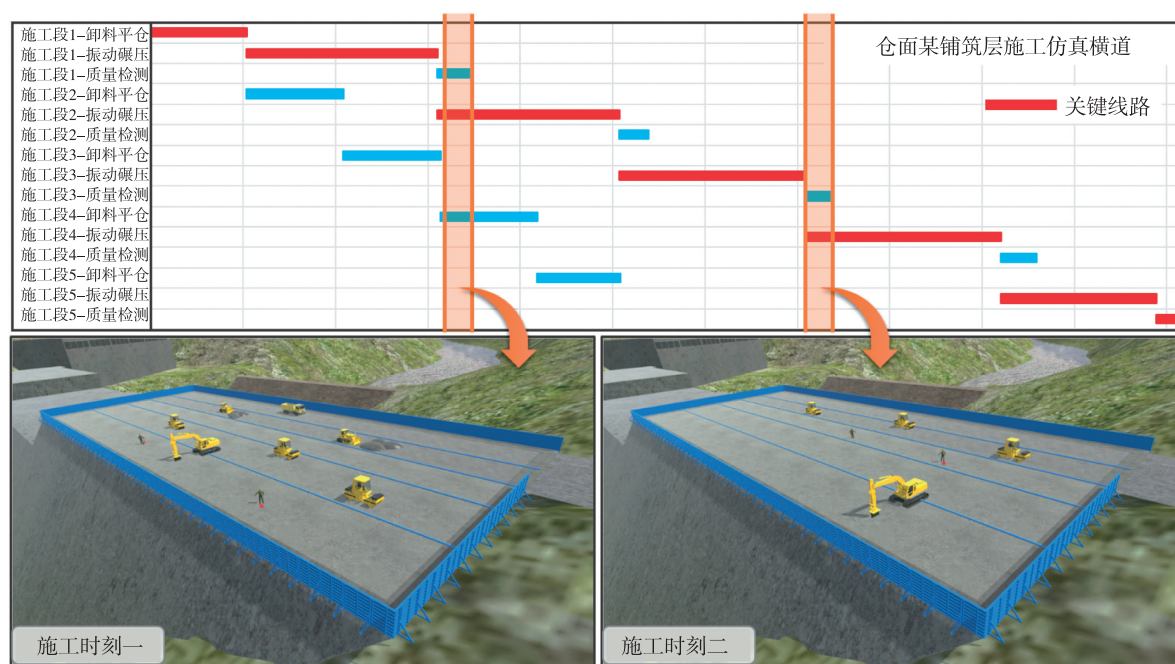


图9 仓面施工仿真三维可视化效果

Fig. 9 Three-dimensional visualization of storehouse surface construction simulation

5 结 语

仓面施工是碾压混凝土坝施工中的关键组成部分,在坝体施工仿真过程中,仓面作业系统仿真贯穿始终。本文对仓面施工过程进行系统的分析与研究,对于控制碾压混凝土坝施工进度、保证施工质量具有重要意义。目前的碾压混凝土坝施工仿真一般采用仓面铺筑土方量与机械工作效率之比求得仓面施工时间,仿真参数的选取主要依靠以往的工程经验,未能充分挖掘、利用工程实际施工数据,同时仿真成果的表现形式也比较单一。本文依据离散事件系统仿真原理,构建了碾压混凝土坝仓面施工精细仿真模型,对实时监控数据进行统计分析,更新仿真参数,进行仿真计算,获得了详细的仓面施工进度信息,同时基于 Unity 3D 平台对仿真成果的三维可视化进行了探索研究。研究成果在实际工程中得到具体应用,为工程现场的施工组织管理提供了一种科学、形象的分析手段,有助于推动水利水电工程施工向数字化、智能化方向发展。

参考文献:

- [1] HALPIN D W. CYCLONE:a method for modeling job site process[J]. Journal of the Construction Engineering and Management, 1977, 103(3): 489-499.
- [2] 朱光熙. 二滩水电站双曲拱坝混凝土浇筑的计算机模拟[J]. 系统工程理论与实践, 1985, 25(3): 25-32. (ZHU Guangxi. Computer simulation of the Ertan hydropower station hyperbolic arch dam concreting[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1985, 25(3): 25-32. (in Chinese))
- [3] 王仁超, 钟登华, 查京民. 高碾压混凝土坝施工过程仿真研究[J]. 水力发电学报, 1995, 24(1): 25-37. (WANG Renchao, ZHONG Denghua, ZHA Jingmin. Simulation study on the construction process of high roller compacted concrete dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995, 24(1): 25-37. (in Chinese))
- [4] 巫世晶, 吴庆鸣, 彭卫平. 碾压混凝土坝施工分仓的优化研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(2): 7-11. (WU Shijing, WU Qingming, PENG Weiping. Study on optimization of pour dividing rooms of roll compacted concrete dam [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1996, 29(2): 7-11. (in Chinese))
- [5] 钟登华, 周钧平, 林鸿镁. 碾压混凝土施工运输方案选择专家系统[J]. 水利水电技术, 1997, 28(2): 42-45. (ZHONG Denghua, ZHOU Junping, LIN Hongmei. Expert system for the transport plan selection in roller-compacted concrete construction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28(2): 42-45. (in Chinese))
- [6] 吴康新, 蔡绍宽, 董标, 等. 碾压混凝土坝施工三维动态可视化仿真系统研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(4): 111-113, 119. (WU Kangxin, CAI Shaokuan, DONG Biao, et al. Study on 3-D visual dynamic simulation system for construction of roller-

- compacted dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005,36(4):111-113,119. (in Chinese))
- [7] 赵春菊,胡超,周宜红. 基于 OGRE 的碾压混凝土坝施工过程可视化仿真系统[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 41-45. (ZHAO Chunju, HU Chao, ZHOU Yihong. Visual simulation system of RCC dam construction process based on OGRE [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(4):41-45. (in Chinese))
- [8] 罗伟,刘全,胡志根. 基于 Petri 网的碾压混凝土坝施工系统耦合研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 2053-2056,2060. (LUO Wei, LIU Quan, HU Zhigen. Study on RCC dam construction system coupling based on Petri Net [J]. Journal of System Simulation, 2009,21(7): 2053-2056,2060. (in Chinese))
- [9] 罗伟,刘全,胡志根. 基于工序排队的 RCC 坝施工 Petri 网耦合模型仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 19(7): 6280-6283, 6289. (LUO Wei, LIU Quan, HU Zhigen. Simulation of RCC dam construction Petri Net coupled model based on process queuing[J]. Journal of System Simulation, 2009,19(7): 6280-6283,6289. (in Chinese))
- [10] 周宜红,定兰,赵春菊. 碾压混凝土坝施工浇筑系统仿真模型研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(1): 50-51,89. (ZHAO Chunju, DING Lan, ZHOU Yihong. Research on concrete pouring simulation model of RCC gravity dam construction [J]. Water Resources and Power, 2006,24(1): 50-51,89. (in Chinese))
- [11] 赵春菊,周华维,周宜红. 系统耦合机制在碾压混凝土坝施工仿真中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(4): 458-463. (ZHAO Chunju, ZHOU Huawei, ZHOU Yihong. Application of system coupling mechanism to RCC dam construction process simulation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013,46(4): 458-463. (in Chinese))
- [12] 常昊天,钟登华,王双起,等. 耦合动态合仓的碾压混凝土坝施工进度全过程仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(1): 29-37. (CHANG Haotian, ZHONG Denghua, WANG Shuangqi, et al. Schedule simulation coupled with dynamic combination of working units for roller compacted concrete dam construction process [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013,46(1): 29-37. (in Chinese))
- [13] 赵春菊,董慧,周宜红. 碾压混凝土坝施工仓面作业系统仿真与优化研究[J]. 水利水电技术, 2013, 34(1): 79-82. (ZHAO Chunju, DONG Hui, ZHOU Yihong. Study on simulation and optimization of concrete placement system on construction surface of RCC dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013,34(1): 79-82. (in Chinese))
- [14] 郝雪莹. 碾压混凝土坝平层铺筑仓面施工模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [15] 钟桂良. 碾压混凝土坝仓面施工质量实时监控理论与应用[D]. 天津:天津大学, 2012.

· 简讯 ·

河海大学 3 名教授入选第 2 批国家“万人计划”领军人才

中共中央组织部办公厅公布的第 2 批国家“万人计划”领军人才入选名单中,河海大学唐洪武教授入选百千万工程领军人才,王媛教授、苏怀智教授入选科技创新领军人才。

“万人计划”即国家高层次人才特殊支持计划,是与引进海外高层次人才“千人计划”并行、面向国内高层次人才的重点支持计划。该计划由中国共产党中央委员会组织部牵头实施,分杰出人才、领军人才和青年拔尖人才 3 个培养层次。其中,领军人才计划又分为百千万工程领军人才、教学名师、科技创新领军人才、科技创业领军人才、哲学社会科学领军人才 5 个大类。本次全国共遴选确定百千万工程领军人才 97 名、科技创新领军人才 620 名。

(本刊编辑部供稿)