

基于GIS的混凝土坝施工可视化仿真技术及其应用

李景茹¹, 钟登华²

(1. 深圳大学建筑与土木工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 天津大学建工学院, 天津 300072)

[摘要] 将可视化技术与仿真技术相结合, 提出了基于GIS的混凝土坝施工可视化仿真技术, 开发了相应的软件GVSS。GVSS是用于制定和优化混凝土坝施工进度计划的工具, 提供了可视化和查询等功能。通过将GVSS应用到实际的混凝土坝施工中, 证明了该项技术和软件的有效性。

[关键词] 可视化仿真; 地理信息系统(GIS); 混凝土坝施工; 进度; 优化

[中图分类号] TP391.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0070-05

1 引言

混凝土坝施工过程复杂, 并且影响到整个水利水电工程的进度和费用, 因而对其进行有效的管理十分必要。但是对于工程管理者来说, 手工地安排每个坝块的施工顺序和施工进度是相当困难的, 因为混凝土坝的浇筑量通常非常大, 坝块的数量很多, 而且坝块的施工受到众多条件的限制。一般混凝土坝施工速度(每月的升高高度)是通过经验和工程类比确定的, 这种仅靠经验来安排的工程进度往往不够准确, 给施工进度管理带来很多困难。随着仿真技术的迅速发展, 对混凝土坝施工过程进行仿真成为可能, 尤其是可视化技术与仿真技术的结合, 为复杂施工过程管理提供了全新的途径。

30年前离散系统仿真就开始用于分析和安排施工过程, 目前已开发了许多通用的仿真工具^[1]。但是, 系统仿真的推广和应用还受到一定的限制: 其一, 仿真建模具有一定的难度, 而且不容易发现模型的错误; 其二, 仿真产生大量数据, 须通过分析和整理才能得到有意义的结论; 其三, 仿真中涉及到海量的数据, 包括空间数据和非空间数据, 目前的仿真软件缺乏对这些数据的有效管理。

笔者采用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)与仿真系统相结合, 研究基于GIS的可视化仿真技术, 为混凝土坝的施工和管理提供有效的工具。

2 基于GIS的3D可视化

2.1 GIS中的3D模型

3D模型是可视化的基础。在混凝土坝施工系统中, 3D模型可分为两大部分: a. 数字地形模型描述了施工现场的地形条件, 通常用不规则三角网络(TIN)表示^[2]。TIN模型由一系列不相交的相邻三角片组成, 很适合描述起伏变化的地形。本文中, TIN模型由AutoCAD等高线文件生成。b. 实体模型包括施工过程中的永久建筑和临时建筑。用GIS提供点、线和多义线可以表示任何复杂的表面, 实体结构通过这些闭合的面表示。由于我们只关心建筑物的几何形状, 这样的模型表示是可行的。另外, 实体模型还要包括时间信息, 以用于对施工全过程进行动态演示。

2.2 3D可视化

静态图片快速播放就变成了动画。利用3D动画可以反映任意时刻的施工过程, 即仿真系统内部

[收稿日期] 2004-10-13; 修回日期 2004-12-17

[作者简介] 李景茹(1977-), 女, 辽宁鞍山市人, 博士, 深圳大学讲师, Email: lij2000@szu.edu.cn;

钟登华(1963-), 男, 江西赣州市人, 博士, 天津大学教授, 博士生导师, Email: dzhong@tju.edu.cn

数据场的动态变化过程。根据与仿真数据交换得到的施工信息数据，在 GIS 中生成系统某环节动态变化单元 i 对应的图元在任意时刻 t 的面貌 $v_i(t)$ ，则 t 时刻的施工整体面貌可表示为 $V(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t)$ ， n 为总的图元数。把工程施工任意时刻的整体面貌储存在图形库中，并与其一一对应的属性数据建立联系，从而在动画演示时，按时间顺序读取图形库中的形体数据及相应的属性信息，不断更新绘图变量和属性变量赋值，并不断刷新屏幕显示。这样高速地显示一系列静止图像，当图像快速连续时，由于视觉的暂留，从而实现了整个混凝土坝施工过程的三维面貌及相应信息的动态显示。

另外，GIS 还提供了多种观察 3D 模型的方法，用户可以选择指定区域进行缩放，或者将模型绕 x, y, z 轴旋转，以从各个角度和方向观察模型，还可以按指定路线穿越漫游。GIS 将模型按属性分层放置，以便于空间分析和查询。

3 混凝土坝施工过程仿真

3.1 混凝土坝施工过程

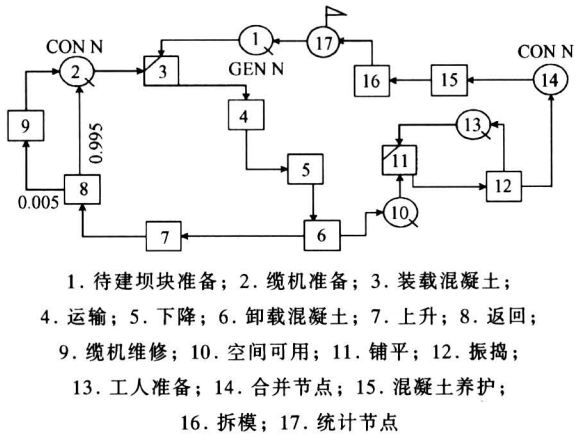
笔者主要分析混凝土坝施工中的浇筑过程。这项工作可以划分为两个过程：一是将混凝土从装料平台运到待建坝块，二是包括浇筑准备工作（如拆立模板、安装冷却水管、立钢筋等）、浇筑、铺平、振捣和养护混凝土。两个过程在浇筑混凝土时相交叉。由于整个施工过程受到天气和工作效率等因素的影响，每项工作的施工持续时间是随机的。

由于混凝土坝浇筑是一个循环过程，以坝块为基本单位，反复进行装载混凝土—运输—浇筑—返回的过程，因此可以将这个过程抽象为一个往返循环的随机排队系统，用循环网络仿真模型 (CYCLONE) 进行仿真^[3,4]。

3.2 仿真模型

如图 1 所示，用 CYCLONE 建立仿真模型。开始时缆机在装料平台处等待运输混凝土，如果缆机能开始装载混凝土，至少有一个坝块可以开始施工。缆机需要往返运输 N 次才能浇筑完一个坝块，次数 N 由坝块的体积和缆机的运输能力共同决定。缆机装载了混凝土之后，先沿着缆索移动到坝块上方，然后慢慢下降到坝块，卸载混凝土，再沿原路返回。混凝土浇完后，要及时铺平和振捣。这个过程进行 N 次后，整个坝块浇筑完成，缆机返回到

装料平台处排队，等待浇筑下一个坝块。在进入队列之前，装载机有 0.5% 的概率进行维修。坝块浇筑完成后开始养护，当达到一定的强度之后就可以拆掉模板，然后在上面建造新的坝块。



- 1. 待建坝块准备；2. 缆机准备；3. 装载混凝土；
- 4. 运输；5. 下降；6. 卸载混凝土；7. 上升；8. 返回；
- 9. 缆机维修；10. 空间可用；11. 铺平；12. 振捣；
- 13. 工人准备；14. 合并节点；15. 混凝土养护；
- 16. 拆模；17. 统计节点

图 1 仿真模型图

Fig.1 Simulation model

需要注意的是，排队节点 1 和 2 有不同的排队规则。节点 2 采用先进先出 (FIFO) 原则，缆机返回到装料平台，排到队列的最后面。而节点 1 是一个优先节点，满足所有限制条件的坝块优先系数为 1，否则为 0。限制条件为：

- a. 只有当已建坝块达到一定强度后，其上面的坝块才能开始浇筑；
- b. 相邻坝块之间要保持必要的高差。一方面为了散热，相邻坝块之间的高差不能小于最小高差；另一方面，为了施工方便，相邻坝块之间的高差也不能大于最大高差；
- c. 为了确保缆机施工安全，施工坝块之间的距离不能小于缆机之间的最小安全距离；
- d. 为了避免施工干扰，相邻坝块不能同时施工；
- e. 如果有几个坝块同时满足上述条件，高程最低者优先系数为 1，其他坝块为 0。

需要注意的是，坝块的优先系数是随施工进行而变化的，因此在每次有坝块施工完成时，应该重新计算所有待建坝块的优先系数，选择优先系数高的坝块进行施工。

4 基于 GIS 的可视化仿真系统

可视化仿真系统 GVSS 采用 Arcview 和 VC++ 编写，通过建立两者的扩展模块 (Windows 的 DDE 技术和数据文件接口)，实现彼此间数据交换和信息共享。这种方式开发简便，费用低廉，而且

由于两者的相对独立性和可扩展性，便于系统的维护及进一步开发，如图 2 所示。在 GVSS 中，主要包括数据采集和管理模块、仿真模块、3D 动画模块、信息可视化查询模块和报表输出模块。

4.1 数据采集和管理模块

数据采集和管理模块负责收集和管理地形和建筑物布置以及形状、尺寸等空间数据及属性等非空间数据。空间数据可采用文件方式采集，如 CAD 文件；非空间数据采用导入表格等手段输入，两类数据分别存放在不同的数据库中。

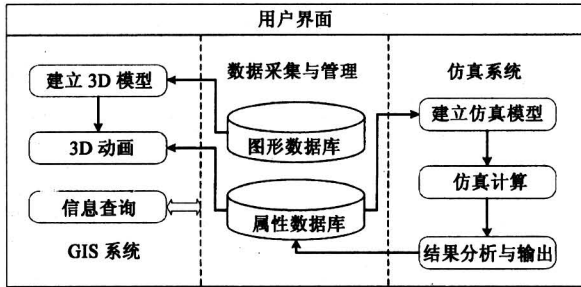


图 2 GVSS 结构框架图
Fig.2 Framework of GVSS

4.2 仿真模块

仿真模块是本软件系统的主要组成部分，主要用于在施工前预测未来的施工进度，也可在施工中根据实际情况实时预测进度偏差。前者有利于制定施工进度计划，后者为施工现场的动态管理和控制提供决策依据。

4.3 3D 动画模块

3D 动画用于解决在引言部分讨论的仿真的局限，即有利于检验仿真模型的合理性，例如通过 3D 动画，很容易判别坝块的施工是否符合上述限制条件；另外，3D 动画是用户直观而全面地理解复杂施工过程的有效工具，有助于工程管理人员与决策者进行更好的沟通。

4.4 信息可视化查询模块

GIS 提供了强大的信息查询功能。例如，用户在数字模型上双击，相关的信息就会显示出来。当选择了模型时，图形数据库引擎做出响应，并输出图形的 ID 号。相应地信息数据库引擎收缩数据库，寻找具有相同 ID 号的记录，然后显示这些记录。如果用户需要更丰富的信息，如设计图纸或报告，可以使用热链接功能。用户选择图形，然后按热链接键，需要的信息就会显示在一个弹出窗口，如图 3 所示。用户也可以查询任意指定时刻的施工

面貌，通过设定查询条件来实现该功能。

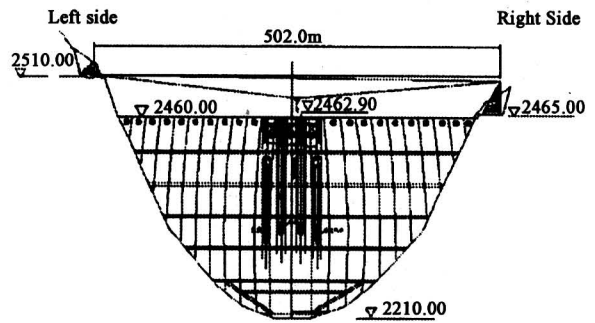


图 3 热链接查询结果

Fig.3 Inquired information by hotlink

4.5 报表输出模块

仿真计算结果除了用 GIS 以三维形式直观显示，还包括大量文字、表格和曲线，用来对施工过程进行更深入的分析和比较。本软件系统主要输出结果有坝块浇筑顺序、坝体工程量、机械利用率、施工浇筑月强度、浇筑强度累计曲线、坝体月升高高度等。

5 实例

5.1 工程概况

某水电站大坝为双曲拱坝，坝高 250 m，布置有 3 个表孔，2 个深孔和 2 个底孔，总浇筑量为 $234.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。大坝分为 24 个坝段施工，采用罐容 9 m^3 高速缆机通仓浇筑。缆机单层布置，设一条供料平台。在基础约束区，坝体分层厚度为 1.5 m，弱约束区分层厚度为 2.0 m，脱离约束区为 3.0 m；浇筑铺层厚度 0.5 m。混凝土浇筑开始 6 个月后进行坝体接缝灌浆。

5.2 仿真结果分析

采用本软件系统，可以对各种施工方案进行比选。表 1 显示了采用不同机械设备数量情况下的施工情况（由于混凝土初凝时间的限制，必须使用 2 台以上的缆机）。大坝施工从第 4 年 10 月开工，发电高程为 2380.0 m。

由表 1 可以看出，方案 2 和方案 3 总工期为 44 个月，而方案 1 总工期为 48 个月。根据设计首台机组发电机时间、高程及接缝灌浆要求，仅方案 2、方案 3 能够满足要求。方案 3 比方案 2 增加 1 台缆机，在工期及形象进度上差别不大，方案 2 在第 7 年 3 月底与第 7 年 6 月底坝体最低高程都处在第 4 坝段（此时第 3 坝段尚未开始浇筑），而且第 4 坝段也达到 2 358 m 与 2 379 m 高程，不影响发

表 1 不同施工方案的比较

Table 1 Comparison of Difference Construction Schemes

方案	方案 1 (2 台缆机)	方案 2 (3 台缆机)	方案 3 (4 台缆机)
大坝施工总工期	第 8 年 10 月 3 日	第 8 年 6 月 5 日	第 8 年 5 月 26 日
达到发电高程的时间	第 7 年 10 月底	第 7 年 6 月底	第 7 年 6 月底
浇筑最低高程/m	2380.0	2379.0	2380.5
达到发电时接缝灌浆高程的时间	第 7 年 10 月底	第 7 年 6 月底	第 7 年 6 月底
浇筑最低高程/m	2361.0	2358.0	2361.0

电要求。方案 2 与方案 3 工期之间差别不明显的原因，主要是由该坝体所处的地形决定的，其所在的峡谷陡峭，因而施工场地范围小，尤其在谷底部分，可浇筑的坝段较少，缆机在浇筑过程中会因选不到合适的坝块而处于闲置状态，而且缆机越多，干扰也就越大，闲置的机会就更多，利用率也就越低。因此，方案 3 相对方案 2 没有优势可言，而且还增加缆机投资。另外，方案 1 采用 2 台缆机，工期比方案 2 延长 4 个月，不仅不能满足设计要求，而且要到 10 月底才能达到发电高程，此时还要进行接缝灌浆，不利于蓄水发电，另外，由于 6 月份汛期水位为 2 370 m，此时，坝体高程才 2 361 m，不满足导流渡汛要求。

通过对比分析发现，推荐采用 3 台缆机进行浇筑。通过仿真得到该方案的坝块浇筑顺序（略），其对应的混凝土月浇筑强度、逐月累计浇筑量曲线

见图 4，图 5 是大坝施工面貌立面图，图 6 是大坝施工典型时刻的面貌。

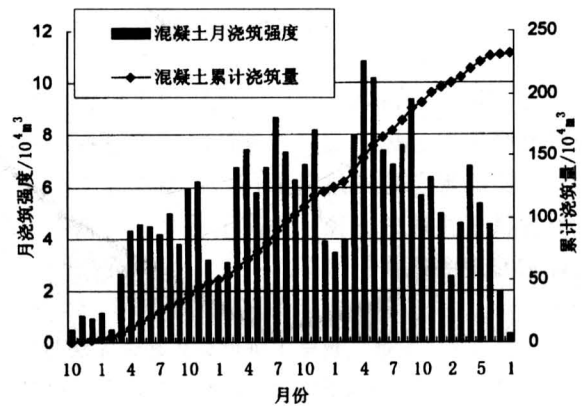
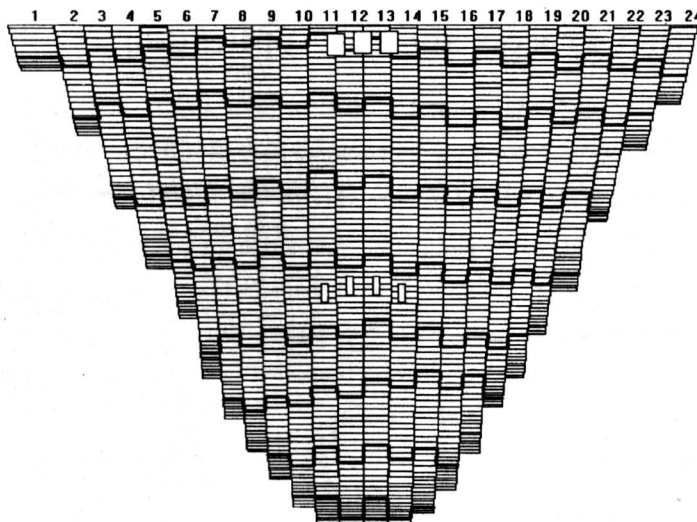


图 4 混凝土月浇筑强度、累计浇筑方量曲线图
Fig.4 Monthly intensity of concrete construction and accumulative volume of concrete construction



- 第 8 年 6 月 最低高程 2460.0
- 第 7 年 12 月 最低高程 2425.0
- 第 7 年 6 月 最低高程 2377.5
- 第 6 年 12 月 最低高程 2339.4
- 第 6 年 6 月 最低高程 2309.9
- 第 5 年 12 月 最低高程 2275.5
- 第 5 年 6 月 最低高程 2247.5
- 第 4 年 12 月 最低高程 2214.5

图 5 大坝施工面貌立面图

Fig.5 Construction appearance at middle and end of each year

6 结语

笔者提出了基于 GIS 的混凝土坝施工可视化

仿真技术，开发了相应的软件 GVSS，并将其应用到实际的混凝土坝施工过程中。通过该软件对大坝施工的不同方案的比选，确定了最为经济合理的机

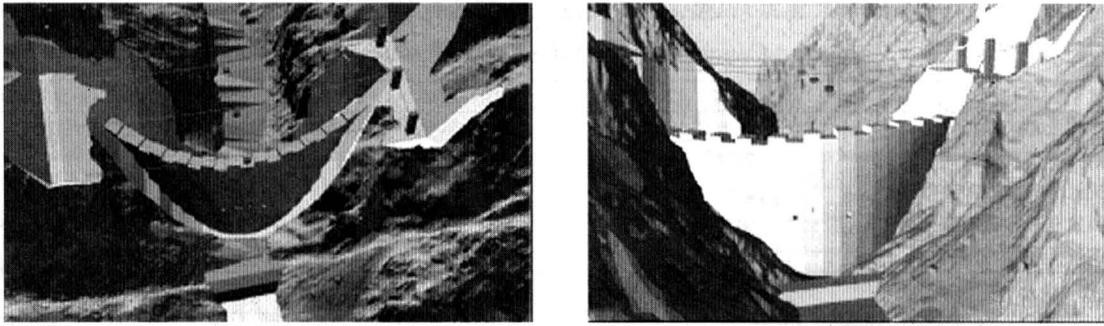


图6 大坝第7年6月底三维面貌 (从不同的角度)

Fig.6 3D construction appearance in June of the 7th year (from different angle)

械配套方案,并得到了相应的坝块浇筑顺序、施工浇筑月强度等指标,同时将复杂的施工过程用运动的三维画面形象地描述出来,为全面掌握复杂施工过程提供了快捷的途径,提高了混凝土坝施工组织设计的现代化水平。

参考文献

- [1] 李景茹. 大型工程施工进度分析理论与应用 [D]. 天津: 天津大学博士学位论文, 2003
- [2] Miles S B, Ho C H. Rigorous landslide hazard zonation

using Newmark's method and stochastic ground motion simulation [J]. *International Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 1999, 18, (4): 305~323

- [3] Halpin D W. CYCLONE-Method for modeling job site processes [J]. *Journal of Construction Division, ASCE*, 1977, 103 (3): 489~499
- [4] 钟登华, 李景茹. 全过程动态仿真技术及其在大型工程施工管理中的应用 [J]. *天津大学学报*, 2003, 36 (3): 347~352

GIS-based Visual Simulation Methodology for Concrete Dam Construction Process and Its Application

Li Jingru¹, Zhong Denghua²

(1. *College of Architecture and Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*; 2. *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

[Abstract] This paper presents a GIS-based visual simulation methodology for concrete dam construction process, in which system simulation techniques are integrated with visualization techniques. GIS-based visual simulation system (GVSS) was developed by the authors. GVSS is a powerful schedule planning tool offering visualizing and querying capabilities simultaneously. GVSS has been applied to a real concrete dam construction project, which verified the feasibility of the methodology and GVSS.

[Key words] visual simulation; GIS; concrete dam construction; schedule; optimization