

基于可视化仿真的水电工程动态信息管理与控制方法

钟登华¹, 张成^{1,2}, 宋洋¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 国电公司昆明勘测设计研究院, 昆明 650051)

[摘要] 阐述了水电工程动态信息的可视化仿真技术、可视化管理方法及对水电工程项目的动态管理与控制方法, 为实现水电工程管理的直观可视化开辟了新的途径。

[关键词] 可视化仿真; 动态信息管理; 水电工程

[中图分类号] TV51; TP391 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)02-0080-05

1 引言

水电工程动态信息管理与控制是水电工程建设管理的核心内容, 但这部分工作涉及到的内容多而且杂, 依靠传统的管理办法难以实现工程信息的有效管理和对工程进度及成本的实时控制, 为工程管理决策提供足够和有效的信息支持。

随着计算机和系统仿真技术的发展, 有可能在计算机上实现水电工程施工动态过程的仿真, 利用先进的可视化手段直观形象地反映仿真成果, 并在预测与计划对比的基础上分析产生偏差的原因, 为工程管理决策提供科学、直观、高效的信息, 及时对计划进行修正, 以保证工程的顺利完成。

2 水电工程施工动态可视化仿真技术

可视化仿真 (visual simulation) 技术是计算机可视化技术和系统仿真技术相结合形成的一种新型的仿真技术^[1], 其实质是采用图形或图像方式对仿真计算过程进行跟踪、驾驭和结果的后处理, 同时实现仿真软件界面的可视化, 具有迅速、高效、直观、形象的特点。

2.1 可视化仿真原理

工程施工系统可以看作仅在离散的时间点发生跳跃性变化的系统, 因而可以作为离散系统进行仿

真研究。全过程仿真即“全程仿真钟”和“本地仿真钟”不断地推进和交互的过程。

仿真开始前将全程仿真钟和每个本地仿真钟都初始化为零。仿真开始, 全程仿真钟启动, 它采用时间步长推进法。当检测到有“仿真工序开始”事件发生时, 全程仿真钟保留当时的状态, 然后将控制权交给更下层仿真模型, 启动它的本地仿真钟, 设置模型初始状态。

本地仿真钟也采用时间步长法推进。以工序准备施工的状态作为初始状态, 以开始施工的時刻作为本地仿真钟的零点。从该点开始, 向前推进一个时间步长 Δt , 然后对工序模型中的所有节点进行扫描, 检测是否有满足条件的活动发生, 同时跟踪各种资源的使用情况。如果有活动发生, 它们被认为发生在 Δt 的终止处, 相应地改变系统的状态, 统计各种资源的使用时间或空闲时间。重复上述作法直到该工序结束, 然后把控制权返回给全程仿真钟, 并把本地仿真钟的状态及资源利用率等信息一同返回给当前事件, 作为当前事件的仿真结果保存起来。然后, 全程仿真钟继续推进, 重复上述过程, 直到整个工程结束。之后对仿真结果进行各种分析、计算与优化, 并输出进度计划、横道图、关键路线、施工强度、施工强度高峰期、资源利用率等结果。

[收稿日期] 2004-08-06; **修回日期** 2005-03-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50539120, 50525927); 教育部博士点基金资助项目 (20030056055)

[作者简介] 钟登华 (1963-), 男, 江西赣州市人, 天津大学教授, 博士生导师, 从事水利水电工程系统仿真与优化研究

2.2 施工进度网络模型时间参数的计算

2.2.1 建立网络模型 网络图最本质的优点是能直观地反映工作项目间的相互关系，使一项计划构成一个系统的整体，图 1 为建立网络模型的流程。

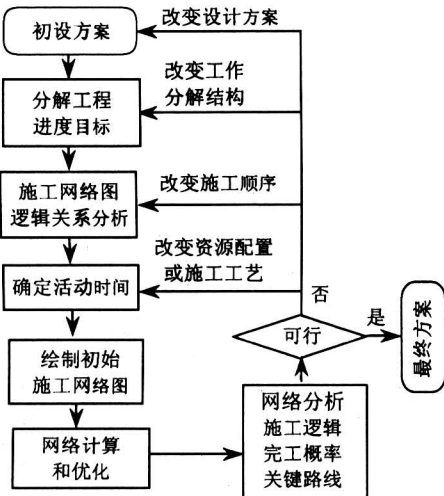


图 1 水电工程施工进度网络模型的建立

Fig.1 The establishment of construction schedule network model for hydropower engineering

2.2.2 基于蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 仿真方法的工期分析和确定^[2] 蒙特卡洛方法也可称为随机抽样法或统计实验法，其基本思想是把确定性问题与某个概率模型相联系，通过统计估计作为原始问题的近似解。笔者采用水电工程全过程动态仿真获得工期的统计数据，然后对统计数据进行拟合，判断概率分布类型，最后用最大似然法估计分布参数。

2.2.3 完工概率分析 根据多次仿真运行所得施工工期的统计特性 (包括均值、方差、最大值、最小值等)，运用概率统计的基本知识，分析在某特定施工工期内完工的概率^[3]。然后根据其数值情况，拟合出经验分布曲线和经验累计曲线，了解施工工期的分布规律。

2.2.4 关键线路 在网络图中，工期最长的线路成为关键线路^[4]，基于仿真的关键线路是指在多次仿真中成为关键线路次数最多的线路；工序关键度是指工序处于关键线路上的次数与仿真次数之比^[5]。

2.3 可视化仿真结构体系设计

将地理信息系统技术 (GIS) 引入到可视化仿真结构体系，设计出基于 GIS 的可视化仿真系统结构框架 (图 2)。集成方式通过建立两者的扩展模块实现彼此数据相互交换和共享信息，这种集成方

式开发简便、费用低廉，而且由于两者的相对独立性及可扩展性，便于系统的维护及进一步开发。

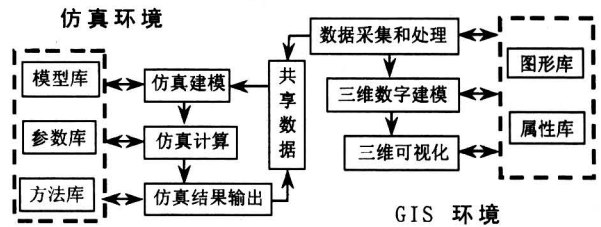


图 2 基于 GIS 的可视化仿真系统框架结构

Fig.2 The frame of visual simulation based on GIS

3 水电工程动态信息可视化管理方法

3.1 基于 GIS 的工程信息的可视化方法

3.1.1 组织方法 GIS 强调对空间数据的处理。工程施工系统仿真不仅涉及施工场地、环境、建筑物布置等静态的具有地理位置特征的空间信息，而且还反映地形填挖、建筑物施工等大量动态的空间逻辑关系，GIS 对描述此类数据具有优越性。GIS 将空间实体对象用图形 (空间) 数据和属性数据共同描述，并分别使用不同的存贮模块。空间数据和属性数据通过内部代码和用户标识码作为公共数据项连接起来，使得构成空间对象的每一个图元与描述该图元的属性建立一一对应的关系 (见图 3)，这种空间数据的组织结构为仿真系统数字模型的建立及其可视化空间表达提供了条件。

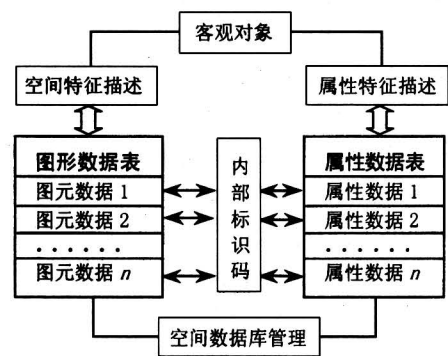


图 3 GIS 数据可视化组织结构示意图

Fig.3 The sketch map of visual organization of GIS data

图 4 为基于 GIS 的工程施工三维动态仿真可视化方案，表示工程仿真数据由原始采集，经 GIS 系统内部转化和衍生，最后反映为具有一定物理意义的可视化信息，并进而为管理和决策服务的过程。

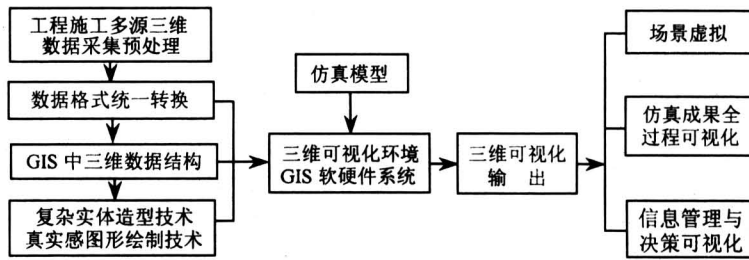


图 4 基于 GIS 的工程施工动态仿真可视化方案

Fig.4 The visual scheme of engineering construction dynamic simulation based on GIS

3.1.2 工程信息的三维数字建模 笔者充分利用 TIN (不规则三角网格) 模型适于表达复杂表面和 B-Rep (外包菱形网格) 模型能很好描述三维建筑物的特点, 集成这两种数据模型, 用以描述复杂的施工过程。

1) 三维数字地形模型建立。地形模型表现为整个工程施工场地的地形、地貌, 不仅是整个工程施工三维数字模型的重要组成部分和所有工程建筑物布置及施工活动的场所, 而且还是施工过程中地形动态填挖的受体。通过 GIS 开发平台, 使用 TIN 将带有高程属性的 CAD 工程地形图转化为三维数字高程模型 (DEM), 再经过纹理贴图、光照等加工操作, 便能真实地表现地形的高低起伏, 形象地反映山川、河谷等地貌特征。

2) 三维地物模型建立。在大型水利工程中, 地物实体包括主体工程建筑物、相关土建工程建筑物、附属工程建筑物等。地物实体模型属静态空间数据模型, 包括空间位置、形状和空间拓扑关系等信息, 静态空间实体之间的空间关系通过 GIS 内建的拓扑结构来维护。笔者针对不同类型的建筑物, 分别采用有针对性的建模技术建立三维可视化数字模型, 主要的建模技术有参数化实体建模, CAD 实体建模以及特征建模。

3.1.3 三维动态数字模型及其可视化管理

1) 三维动态数字模型的构造。三维动态模型也称时空模型, 可以用四维时间-空间参考坐标系描述, 将时空数据表示为 $v = f(x, y, z, t)$, 其中前三维 (x, y, z) 表示空间信息, 记录地理现象的空间变化, t 表示时间维, 记录地理现象的时间变化。本文中地理现象指工程施工过程, 称工程现象。工程现象在空间上则由若干的空间实体 (建筑物等对象) 所组成, 在时间上则由一系列状态组成, 状态的转换称作“事件”, 在一个工程现象中只要所包含的对象中有一个发生变化, 就构成一次

事件, 意味着一次状态的转换。在一个状态内, 工程现象的时间特征是相对稳定的, 所表现出的是其空间变化特征, 即对象的空间差异。每一个状态都对应一个工程面貌。这样状态、工程面貌、事件、对象就构成了一个时空数据的基本概念框架。

2) 基于 GIS 的三维动态演示方法。利用仿真模块得到工程系统的动态信息, 结合已有的三维数据模型, 构造时空数字模型。工程系统作为离散系统进行仿真, 获得的仿真信息也是离散的, 可以按天、周、旬、月或季为单位显示。根据仿真进度, 对应建筑物几何形状及其属性等, 生成工程施工系统各环节某一动态变化单元 i 对应的图元任意时刻 t 的面貌 $v_i(t)$, 则 t 时刻的工程整体面貌可表示为

$$V(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t), n \text{ 为总的图元数。其中, } v_i(t) = f_i(X_i, Y_i, Z_i, t),$$

表示在动态施工过程中, 包含时间信息 i 的图元的几何形状, 它随时间的变化而变化。把工程施工任意时刻的整体面貌贮存在图形库中, 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对应的属性信息, 不断更新绘图变量和属性变量赋值, 同时不断刷新屏幕显示。这样就实现了整体工程施工过程的三维面貌及相应信息的动态显示。

3) 可视化三维空间查询。空间查询包括双向查询、条件查询与热链接等。双向查询是根据相应图层中的图素查找与之相对应的属性, 或由属性表中的某一属性查询某对应图层中的图素。其方法如下: 打开并激活查询的对应图层, 用鼠标在屏幕上拾取任意一点, 则可弹出与该点相对应的属性信息; 相反, 拾取属性数据库中的某一条记录, 即可查询到图层中对应的图素, 被查询到的图素颜色变得鲜亮, 以示突出。这一功能实现的基础是数字模型属性数据与空间数据的一一对应性。但由于在二

维屏幕上的点和屏幕所显示的三维模型实际点之间不是一一对应的关系，所以，还应根据可视点的判断方法，确定屏幕上点与三维点的唯一对应关系。如果鼠标捕捉到的二维坐标 (x, y) 所对应的属性信息为地形点的 z 坐标，则该点屏幕对应的三维坐标为

$$(X, Y, Z) = (x, y, z) T^{-1}$$

其中， T 为三维向二维投影的变换矩阵。如果鼠标捕捉到的屏幕坐标对应的属性信息为建筑物的 ID 号，则可用下述查询语句获取建筑物的属性：

Select (*, *, from database, where ID = " * * ")

从而实现在三维数字模型上的图 - 属性查询。属性 - 图查询是以特定的逻辑表达式为查询条件，查询图中符合该逻辑条件的图素分布。对于随时间不断变化的工程施工动态信息及施工面貌的查询，使用条件查询尤为方便，按时间查询语句可表达如下：

Select (*, *, from database, where time = " * * ")。

热连接是把某一图素和另外的图形、文本文件、数据库、图层或应用模型等对象连接起来。当启动热连接，用鼠标点中该图素时，能立刻显示出与该图素相连接的对象，其原理是根据连接中提供的文件路径打开此文件。比如施工建筑物的设计 CAD 详图的查询就可通过热连接实现。

3.2 系统信息的集成管理模式

自 20 世纪 70 年代起，人们就开始研究工程进度、工程投资、工程质量等管理系统之间数据和信息的自动化传递与转换问题以及工程数据的可视化表现，即 PVD MIS 集成技术^[4]。由于有的子系统采用了不同的开发软件，最终各子系统组合成一个完整的软件，涉及到系统集成的有关技术，集成方式，如有封装式、接口型集成方式^[5]。

集成模式通过系统结构树的详细分析，制定统一的系统数据之间的结构关系，只要其中之一的结构关系发生了变化，另一个自动随之改变，始终保持各系统的同步一致。PVD MIS 环境提供了一整套结构化的面向对象的公共服务集，构成了集成化的基础，以实现以产品对象为核心的信息集成。利用 PVD MIS 实现用户间的对象共享，应具有统一的数据结构。把 PVD MIS 看作面向各子系统的管理环境，采用标准数据接口来建立 PVD MIS 的各子系统之间的联系，在 PVD MIS 统一管理下，多子系统共享同一系统结构。

4 基于可视化仿真的水电工程项目动态管理与控制

4.1 水电工程项目进度与成本管理的内容

水电工程进度控制是指管理人员为了保证实际工作进度与计划一致，有效地实现目标而采取的一切行动。根据进度控制方式不同，可以将进度控制过程分为预先进度控制、同步进度控制和反馈进度控制^[6]。一般在工程建设中采用同步进度控制，即项目施工过程中进行的进度控制，是施工进度计划能否付诸实现的关键过程。

施工项目的成本控制，通常是指在项目成本的形成过程中，对生产经营所消耗的人力资源、物质资源和费用开支进行指导、监督、调节和限制^[7]，及时纠正将要发生和已经发生的偏差，把各项生产费用，控制在计划成本的范围之内，以保证成本目标的实现。

4.2 基于可视化仿真水电工程进度与成本实时控制

针对上述水电工程项目进度与成本控制内容，提出基于可视化仿真的工程进度与成本控制方法，其工作流程如图 5 所示。

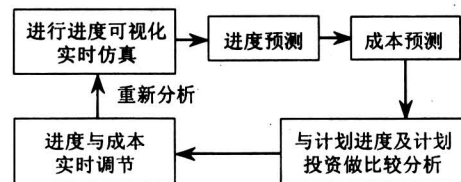


图 5 基于仿真的工程进度成本实时控制流程
Fig.5 The real time control flow scheme of schedule and cost based on simulation

在施工过程中根据工程进展情况，包括现场采集的进度统计分析资料和进度报告等，使用基于仿真的网络计划技术，根据施工全过程动态仿真计算，可以确定施工过程中各工序的持续时间，并通过多次仿真得到各工序持续时间的多组观测值，通过统计分析、拟合优度检验确定随机分布类型、均值、方差等具体参数，可以对进度进行预测，并将预测结果输入 Project 2002（一种进度管理软件）中以便进行管理，有了进度预测，就可以根据其结果进行相应的成本预测；有了进度与成本的预测值，就可以在 Project 2002 中与计划进度及成本进行可视化的直观对比，对二者的差值进行分析，从而对

施工现状及未来进度动向加以分析和预测,发现并解决施工过程中的问题,适当的调整进度计划,实现进度与成本的实时控制,在调整的基础上对施工进度进行重新分析,再次进行进度仿真。

在计划进度与实际进度对比的基础上,对已开工的未完作业和未开工的作业重新研究降低费用和加速进度的措施,确定新的计划参数,修改网络,进行优化计算,制定未完工程的进度计划。然后再将后续工程的进度预测结果与进度计划进行对比分析,再次调整进度计划,如此往复,不断地对实际进程进行监督、控制和调整,以保证达到预期的目标和最佳效果。

5 应用实例

以西南地区某大型水电工程作为实际的研究对象,建立及开发了该工程的基于可视化动态信息管理与控制系。该工程电站为引水式,空间跨度大,建筑物类型多,包括首部枢纽、引水暗渠、沉沙池、引水隧洞、压力钢管和厂房,且布置复杂,整个输水线路总长 7.8 km。实现了进度与投资高效实时管理与控制,可进行可视化信息查询,动态演示,场景漫游;还可以输出工程进度的其他数字信息,包括具体某分项工程的完成日期、工程量等等,并能输出与进度紧密相关的得成本曲线图。

6 结语

水电工程的项目管理与控制是一项复杂的系统

工程,且涉及众多的工程动态信息。根据水电工程的特点,阐述了基于可视化仿真的水电工程动态信息管理与控制方法,实现了直观的水电工程动态信息的管理与控制,可为工程建设提供高效的管理和决策信息。在实际工程中的成功应用验证了该系统的科学性和有效性,同时也为该系统的进一步完善和推广开辟了广阔的空间。

参考文献

- [1] 钟登华,郑家祥,刘东海,等. 可视化仿真技术及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002
- [2] Tamotsu kamigaki, et al. An object-oriented visual model-building and simulation system for FMS control[J]. Simulation, 1996, 67(6):261~268
- [3] Cilliers P. Complexity and postmodernism: understanding complex systems[M]. Routledge, 1998. 221~225
- [4] Gowda R K, et al. Holistic enhancement of the production analysis of bituminous paving operations[J]. Constr Mgmt and Econ, 1998,(16):81~87
- [5] Martinez J C, Ioannou P G. General-purpose systems for effective construction simulation [J]. Constr Eng and Mgmt, ASCE,1999, 125(4): 265~276
- [6] 贾兰香,陈宝谦,荆洪刚,等. 管理系统仿真[M]. 天津:天津大学出版社,1997
- [7] 熊伟,黄丽华,薛华成. 基于BPR的信息系统规划方法[J]. 系统工程理论方法与应用,1999, 8(1): 27~32

Dynamic Information Management and Control Method for Hydropower Engineering Based on Visual Simulation

Zhong Denghua¹, Zhang Cheng^{1,2}, Song Yang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Kunming Hydroelectric Investigation & Design Institute, State Power Corporation of China, Kunming 650051, China)

[Abstract] The methodology of management and control of dynamic visual information for hydropower engineering is presented in this thesis. Visual dynamic information management method and visual simulation technology are lucubrated. Engineering dynamic visual management and control method based on engineering visual simulation is presented. A new way for hydropower engineering visual management is inaugurated.

[Key words] visual simulation; dynamic information management; hydropower engineering