

研究报告

溪洛渡施工总布置三维动态可视化图形仿真研究

钟登华¹, 朱慧蓉¹, 郑家祥^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 成都 610072)

[摘要] 溪洛渡水电站是在金沙江拟建的最大水电站, 为直观准确地描述其施工总布置设计所涉及的各项施工环节之间复杂的动态空间关系, 将施工总布置系统分为若干子系统, 对整个设计施工过程进行动态可视化图形仿真研究。设计3维动态图形仿真数据流向, 将溪洛渡施工总布置动态图形仿真数据分为空间数据和属性数据, 以GIS为平台组织数据结构, 构造施工总布置3维动态可视化数字模型; 在3维动态可视化数字基础上实现施工总布置3维动态可视化图形仿真演示和动态图形仿真数据可视化查询, 给施工总布置设计与决策提供一个科学、直观的可视化分析途径。

[关键词] 溪洛渡工程; 施工总布置; 图形仿真; 地理信息系统; 数字水利

[中图分类号] TV73; TV741 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)11-0065-06

1 引言

溪洛渡水电站是《长江流域综合利用规划要点报告》推荐的金沙江开发第一期工程之一, 该工程以发电为主, 兼有防洪、拦沙和改善下游航运条件等综合效益, 是金沙江“西电东送”距离最近的骨干电源之一, 也是金沙江上最大的一座水电站。拦河大坝为混凝土双曲拱坝, 最大坝高278m; 泄洪采取“分散泄洪、分区消能”的布置原则, 在坝身布设7个表孔、8个深孔与两岸4条泄洪洞共同泄洪, 坝后设有水垫塘消能; 发电厂房为地下式, 分设在左右岸山体内部, 各设装机9台, 单机容量为700MW的水轮发电机组; 左右岸各布置有3条导流隧洞; 施工场区内设6个渣场, 场内交通以公路为主。

溪洛渡工程施工总布置是一项复杂的系统工程, 内部各组成部分之间关系错综复杂, 其中不确定性问题难以用简单图表或数学模型表达, 布置所

涉及的大量施工信息随时间动态变化, 传统2维图形文字在表述设计成果和动态施工信息上有相当大的局限性。因此, 方案设计和决策人员试图对整个施工总布置动态过程进行可视化图形仿真研究, 不仅直观表达设计成果, 而且科学、逼真地表现整个施工总布置动态过程。

2 施工总布置系统分析

施工总布置并非是一个具体的施工过程, 而是融合了地下洞室群施工、砂石料场规划、场内交通运输以及大坝混凝土浇筑等的一个抽象过程, 对于溪洛渡这样大型的水利水电工程, 施工总布置过程更为复杂。因此, 一般仿真模型很难描述这样复杂的过程。本项目研究针对施工总布置系统的具体特点, 运用大系统分解协调与控制理论^[1], 将施工总布置系统分为大坝施工、导截流施工、动态水流、地下厂房施工、渣场堆存回采、场内道路交通等6个子系统, 构造一个包含上述多个过程子系统

[收稿日期] 2003-05-05; **修回日期** 2003-07-14

[基金项目] 国家自然科学基金(50179023), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划(2001272), 国家“九五”科技攻关项目(96-221-05-03-02-02)

[作者简介] 钟登华(1963-), 男, 江西赣州市人, 天津大学建筑工程学院教授, 博士生导师

的施工总布置图形仿真系统。

因布置工作是为枢纽施工服务，按照水电站施工规划一般方法，即按照以单位建筑物为体系划分，先将坝区枢纽的大坝施工、导截流施工、地下厂房各作为一个子系统；渣场为上述3个子系统施工提供取料和堆料的场所，渣场堆存回采情况对于前3个子系统施工具有重要影响，亦将其单独作为一个子系统；道路交通子系统通过运输资源、施工机械等将前述4个子系统之间联系在一起；水位及流量的变化影响整个工程施工，其余5个子系统运作均受其牵制，故而动态水流作为一个子系统。

整个施工总布置系统可视化图形仿真表现为各个子系统的可视化图形仿真及其之间的协调，图1所示为施工总布置系统分解协调模式，各子系统之间以仿真动态数据为中介，实现整个系统耦合。

对于溪洛渡水电站施工总布置而言，在施工总布置年限内导截流施工子系统包括导流洞、围堰、泄洪洞等的施工；大坝施工子系统包括坝基开挖、混凝土拱坝浇筑等的施工，动态水流过程即各时段来流及其水力参数；地下厂房施工子系统包括地下厂房及其相关各地下洞室群施工。

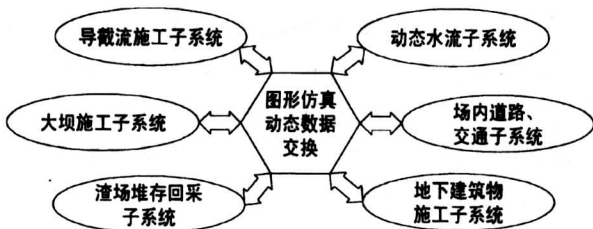


图1 施工总布置系统分解协调模式

Fig.1 Break down mode for construction layout system

3 施工总布置三维动态图形仿真数据流设计

首先将溪洛渡工程施工总布置地形数据、场地施工相关数据及地形开挖数据数字化，由此构建工程施工总布置3维动态可视化数字模型。在此基础上实现施工总布置3维仿真面貌可视化和各时刻相关建筑物综合信息可视化。施工总布置3维动态图形仿真系统采用时间步长推进法，即以某一规定的单位时间为增量，按时间进展一步步地对实际系统的状态及活动进行模拟。首先选取施工总布置系统初始状态，即整个工程开始时间作为系统图形仿真的起始状态，并以此时为仿真时钟的零点，从该起点开始，每推进一个时间步长，须对系统内部所有组成子系统的状态进行分析，再对所有状态发生改变的子系统进行状态更新，从而相应改变整个系统的当前状态，并3维显示当前系统状态面貌及有关信息；然后判断仿真是否结束，若否，则把仿真时钟推进1个单位时间步长，重复上述工作，直至结束，也即整个工程结束时间。图2所示为溪洛渡施工总布置3维动态图形仿真数据流分析图，反映仿真数据流程。

需要单独说明的是时间步长取值问题。仿真系统与真实系统的吻合程度与时间步长有关，时间步长越小，吻合程度越高，但会增加仿真运行时间，并可能产生巨量信息，导致计算机瘫痪；反之，取时间步长过大，虽能缩短运行时间，但容易丢失真实系统的某些行为信息，导致模拟状态失真。因此，仿真系统时间步长的选定极为重要。结合溪洛渡工程实际情况，考虑到其工期为146个月，本项

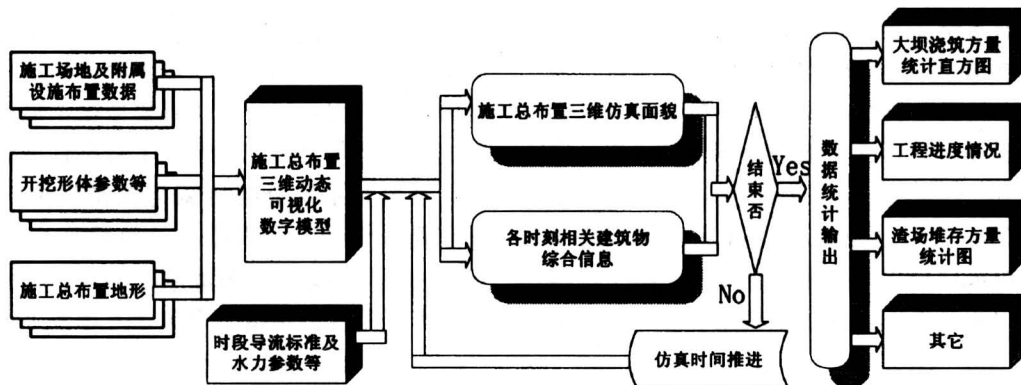


图2 溪洛渡施工总布置三维动态图形仿真数据流分析

Fig.2 Analysis of 3D dynamic visual graphic simulation data flow for constructiton layout of Xiluodu Project

目研究时整个系统动态图形仿真选用半年（6 个月）作为时间步长；拱坝混凝土浇筑、导截流施工、地下厂房施工等相对独立子系统的动态图形仿真根据需要选用天、周、旬、月、季等作为时间步长。

4 施工总布置三维动态图形仿真数字模型建立

溪洛渡施工总布置 3 维动态数字模型融合总布置施工各子系统信息，是实现 3 维动态图形仿真的基础，模型本身亦是当今方兴未艾的“数字水利”之重要部分。对于数字模型不仅要求将仿真数据可视化，更为关键的是，它须能表达 3 维图形仿真数据动态性。

4.1 图形仿真动态数据组织

作为图形仿真的动态数据，既具有空间特性，又具有时间特性。在实现仿真数据 3 维可视化的前

提下，数据时间特性表达成为研究过程中关注之处。此外，仿真数据包含其他一些相关信息，如尽可能反映，将使表达更为全面。目前用于图形处理的软件很多，但其空间数据结构不够清晰，GIS（地理信息系统）特有的空间数据组织结构恰好弥补这一缺陷^[2,3]，故而，本项目研究以 GIS 为平台组织动态数据，研究施工总布置 3 维动态可视化图形仿真。

将溪洛渡施工总布置图形仿真数据分为图形数据和属性数据，即用图形数据库和属性数据库共同存放动态数据^[2]。将时间数据作为非图形数据处理，即作为实体的一个属性值存放在属性数据库中（如图 3 示），图形数据则用来描述施工总布置实体对象空间特征，如几何形状等。图形数据和属性数据通过内部标识码连接，描述图素的属性数据与其图素建立唯一对应的关系。

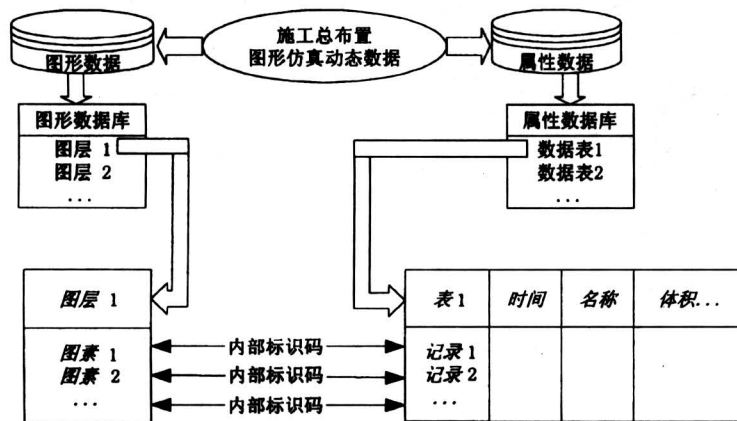


图 3 施工总布置图形仿真动态数据组织结构图

Fig.3 Dynamic data organization structure for graphic simulation of construction layout

4.2 动态地形数字建模

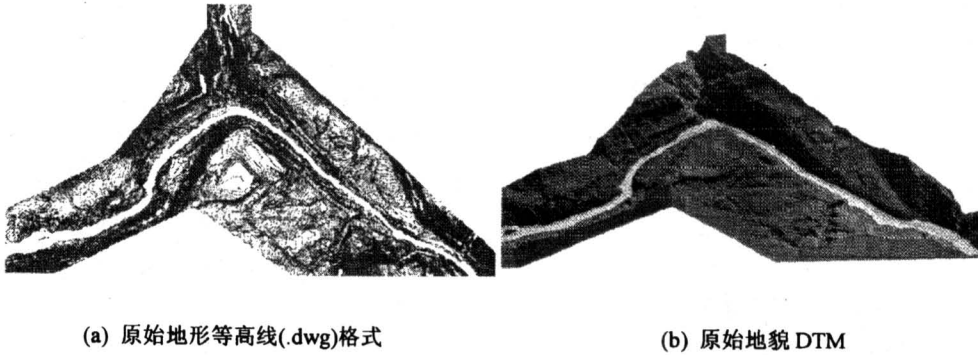
经过地质勘探工作获得溪洛渡施工场地的地形等高线数据，然后转化为 GIS 系统所能识别的 Auto CAD “.dwg” 文件格式，确保每条等高线有高程属性 elevation 值。将此文件导入 GIS 中，用系统模块功能生成不规则三角网格（TIN）^[4]。对生成的初始 TIN，消除由于等高线数据过于密集或采集信息缺乏所造成的细小或狭长的三角形，再通过内插生成高精度的数字地形模型（DTM），经渲染、纹理及光照等操作，建立形象逼真的施工场地原始地表 DTM（示如图 4）。

原始地表 DTM 是一切施工活动的基础，本身不具有动态性，但对于地形开挖和回填，如大坝基坑开挖、各洞室进出口开挖、路面开挖及回填等施

工活动有动态性。用由开挖边坡和底面组成的开挖初始形体面和地形 TIN 生成相交边界^[5]，从原始地形 TIN 上沿相交线切去开挖初始形体面所包含的地形区域 TIN，所切去的地形 TIN 即为不断开挖掉的地形。TIN 文件不便于编辑属性信息，故将其转化成 shape 文件，并将开挖时间作为属性值存储在该 shape 的属性表中，见图 5。

4.3 动态地物实体数字建模

考虑到对整个施工总布置动态过程的描述，图形动态仿真属性数据中既要包括几何特征及空间位置的描述，又要考虑时间特性的体现。几何图形与其属性的关系可利用 GIS 的数据组织结构来建立（图 2 中已说明），每一图素与属性表中记录为一对一关系，由于每一记录有多个属性字段，故图素与

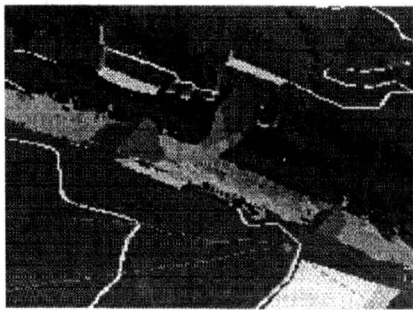


(a) 原始地形等高线(.dwg)格式

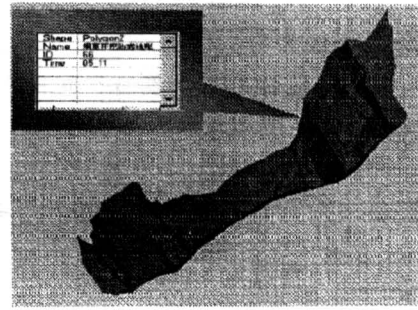
(b) 原始地貌 DTM

图 4 溪洛渡施工场地原始地形数字建模

Fig.4 Digital modeling of construction layout origin terrain of Xiluodu Project



(a) 坝基开挖后地形及基坑边坡



(b) 坝基开挖出的动态地形 shape 文件

图 5 地形动态开挖数字建模

Fig.5 Digital modeling of dynamic terrain digging

属性值为一对多的关系。以拦河大坝混凝土双曲拱坝为例,说明动态实体数字建模及动态图形仿真图形数据和属性数据的对应关系(示如图6)。施工总布置图形仿真中动态地物实体图形数据可分为点、线、面、体4种类型。这4种类型在大坝施工、导截流施工、地下厂房施工、渣场堆存回采、场内道路交通等5个子系统中均有涉及。在数字建模方法上,对于难以用规则模型表达的复杂实体,如渣场、道路等,可用多个面围成的曲面表达其形体面。对于施工总布置中的规则实体,可采取参数化建模方式^[6],此建模方式能简化实体的建模过程,大量减少重复性的建模工作,提高工作效率。

4.4 水流动态数字建模

动态水流难以用传统建模工具描述,目前采用粒子系统建模。其基本思想是:采用大量、具有一定大小和属性的微小粒子图元作为基本元素来描述水流。这些粒子均有自己的属性,如颜色、形状、大小、生存期、速度等^[7]。基于粒子系统的水流模拟将水流看作大量的粒子组成,由一组预先定义

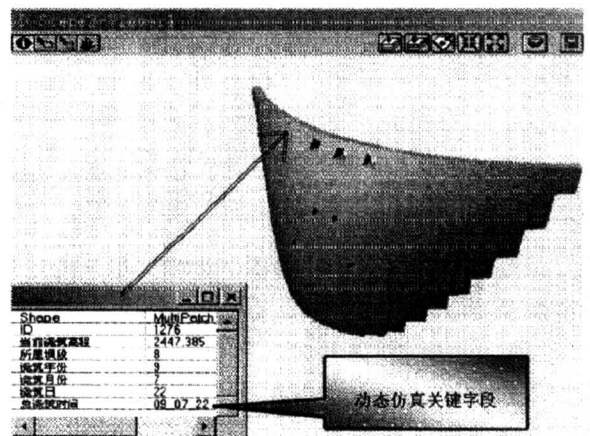


图 6 大坝图形数据和属性数据

Fig.6 Graphic data and attribute data of the arc dam

的随机过程来控制粒子的位置、形状特征、取向及动力学性质。每个粒子运动都具有随机性,对每个粒子参数的取值,首先由给定平均期望值和最大方差确定一个变化范围,然后在该范围内随机地确定其值。这种建模方法考虑了水流微粒的随机扰动、

雾化等因素, 比较符合水流实际情况。

5 三维动态可视化图形仿真演示

基于 GIS 施工总布置 3 维动态可视化图形仿真演示, 是依靠对任意时刻施工面貌的再现实现的。动态图形仿真演示的关键条件是含有时间字段的属性数据库。首先生成溪洛渡施工总布置系统某一动态变化子系统 i 及任意时刻 t 的面貌 $v_i(t)$, 则施工总布置系统 t 时刻的整体面貌可表示为

$$V(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t), \quad (1)$$

其中, n 为施工总布置子系统数目, 本研究将施工总布置分为 6 个子系统, 故取 6。 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$, 分别代表大坝施工、导截流施工、动态水流、地下厂房施工、渣场堆存回采、场内道路交通子系统。

公式 (2):

$$v_i(t) = f_i(x_i, y_i, z_i, t, \Delta), \quad (2)$$

(式中 x, y, z 为实体空间坐标变量)

表示在施工总布置过程中包含时间信息的 i 子系统实体的几何形状, 它随时间的变化而变化。如前所述, 溪洛渡工程工期长 146 个月, 图形仿真时间步长取 6 个月。把施工总布置时刻的整体面貌贮存在图形库中, 并与它所对应的属性数据建立联系, 按时间顺序读取图形库中的形体数据以及对应的属性信息, 不断更新空间坐标变量和属性变量赋值, 同时不断刷新屏幕显示, 从而实现整个工程施工动态过程图形和信息的仿真演示。通过对具体时间属性库的循环, 逐条读取数据库中每条记录的形体数据及其他相关信息, 相应地更新演示属性库中的图形字段值, 就实现施工过程 3 维动态可视化图形仿真演示。

6 动态图形仿真数据可视化查询

6.1 仿真数据双向查询

仿真数据双向查询的原理是基于系统中属性数据与图形数据的唯一对应关系, 可根据相应图层中的图素查找与其相对应的属性, 或由属性表中的某一属性来查询其对应图层中的图素。当鼠标激活图层上某一点所属图素时, 同时也激活了对应该图层属性数据表中对应该图素的记录, 将该记录属性字段的内容显示在查询结果对话框中。反之亦然。

6.1.1 由属性表中属性查找对应图层中图素 拾

取属性数据表中的某一条记录, 被查询到的图层中对应的图素颜色改变, 以示不同, 按住 shift 键可连续查询多个记录对应的图素。

6.1.2 由图素查找与对应属性 打开并激活要查询的对应图层, 用鼠标拾取该图层上任意一点, 则可弹出与之相对应的属性信息, 按住 shift 键可连续查询多个图素对应的属性记录。

6.2 仿真数据条件查询

条件查询是指根据特定的逻辑表达式作为查询条件, 可查询到图中符合该逻辑条件的图素分布。对于按时间的施工总布置动态图形仿真数据及总布置面貌查询, 使用条件查询将更为直观地观察到某一时刻对应的动态信息。若要查询第 6 年第 6 月施工面貌及相关信息, 只需给出逻辑表达式“总浇筑时间” \leq “06-06”作为查询条件即可, 图 7 为所查得面貌及信息。



图 7 第 6 年第 6 月三维面貌及相关信息

Fig.7 3D appearance and related information at 6 th month of 6 th year

6.3 仿真数据热连接查询

热连接 (Hotlink) 就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。如施工总布置中各地物实体的细部图查询及渣场堆存与回采过程图就是通过热连接实现。各个地物实体在相应图层上是以相对粗略的图形表示, 用该地物实体对应属性数据表中某字段的数据作为公共项建立热连接, 即将要表示的结构设计图转换成视图文件, 赋之以与公共数据相同的名称存放在系统文件中, 由此建立热连接关系。通过程序为界面添加一个热连

接工具,建立起实体与相应信息的直接关系,启动热连接后,选择要查询的动态实体,则弹出其相关

信息。图8为马家河坝渣场堆存回采图热连接查询实现。

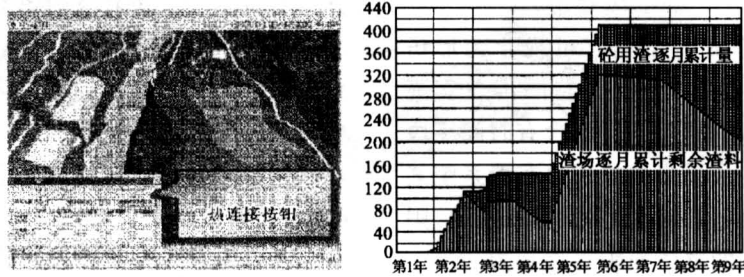


图8 马家河坝渣场堆存回采图热连接查询

Fig.8 Hotlink inquiry of Majiaheba quarry stacking and redigging graphic

7 结语

本项目研究具有如下现实意义:

- 1) 对施工总布置这一复杂系统进行直观仿真与描述;
- 2) 实现施工总布置信息的高效应用与科学管理;
- 3) 实现设计成果的可视化表达,为枢纽施工设计与管理者们的决策分析提供直观、形象、迅速的信息支持。

实践证明,溪洛渡水电站施工总布置3维动态可视化图形仿真研究,为施工总布置设计与决策提供强有力的分析工具和手段。

我国大江大河很多,在大江大河上建坝,其施工总布置设计与决策需要花费大量人力物力,计算机辅助设计、决策是人们长期以来追求的目标。本项目研究不仅给施工总布置设计与决策提供一个科学简便、形象直观的可视化分析手段,有助于推动水电设计工作的智能化、现代化发展,而且将带来显著的经济效益和社会效益,具有较大推广应用价值。

参考文献

- [1] 顾培亮. 系统分析与协调[M]. 天津:天津大学出版社,1998
- [2] 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
- [3] Antenucci, Brown J, Kay, et al. Geograhic information system-A guide to technology [M]. New York: Van Norstand Reinhold, 1991
- [4] Jay Lee. Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models [J]. International Journal of Geographical Information System, 1991, 5(3): 267~285
- [5] Tsai V J D. Delaunay triangulation in TIN creations: An overview and a linear time algorithm [J]. International Journal of Geographical Information System, 1993, 7(6): 501~524
- [6] 肖丽雯,何援军,秦鹏飞. 参数化图库建库工具的开发及应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001,13(5): 444~448
- [7] 詹荣开,罗世彬,贺汉根. 用粒子系统理论模拟虚拟场景中的火焰和爆炸过程[J]. 计算机工程与应用, 2001,(5): 91~92

Research on 3D Dynamic Visual Graphic Simulation for Construction Layout of Xiluodu Project

Zhong Denghua¹, Zhu Huirong¹, Zheng Jiexiang^{1,2}

(1. School of Civil Eng. , Tianjin University, Tianjin, 300072, China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation Institute, State Power Corporation, Chengdu, 610072, China)

(cont. on p.91)

6 结语

在现实生活中,产生一个有价值的原始性创新确实是很不容易的事,而在源头上扼杀一个创新,又实在是太容易了。因此,在十六大精神的鼓舞下,笔者呼吁科技界,特别是工程科学界行动起来,推动进一步健全我国的科技创新管理机制,携手创造一种有利于科技创新转化为现实生产力的良好社会环境,把党中央“尊重知识、尊重人才”的伟大号召真正落到实处,从根本上推进振兴中华民族的伟大事业。

参考文献

- [1] 赵少奎,杨永太. 工程系统工程导论[M]. 北京:国防工业出版社,2000
- [2] 谢光. 当代中国的国防科技事业[M]. 北京:当代中国出版社,1992
- [3] 高卢麟. 准多值逻辑开关网络及智能机(发明专利)[P]. 中华人民共和国专利局,1994
- [4] 中国专利技术博览会暨中国专利产品订货会专家委员会. 一种具有多值态的多功能运算装置[P]. 中华人民共和国专利局,1998

Safeguarding Technology Innovation From Fountainhead

Zhao Shaokui¹, Li Shihui²

(1. Forth Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100085, China; 2. The 4th Design and Research Institute of the Engineer Corps, H. Qs of General Staff of PLA, Beijing 100850, China)

[Abstract] This paper draws real questions on technological innovation from major engineering practices in China, proposes that innovation is the basic motive force of the development of science and technology. The authors bring out the basic principles of safeguarding technological innovation, propose the new thinking to encourage innovation and the suggestions to reform appraisal regulations and so on.

[Key words] innovation; management system; motion mechanism; arbitration mechanism; appraisal regulation

(cont. from p. 70)

[Abstract] Xiluodu hydroelectric plant is the biggest plant to be built on Jinsha River, and also, Xiluodu project is the biggest hydraulic engineering in China except Three George Project. To intuitively and accurately describe the complex and dynamic spatial relationship among all sides interfered in construction layout design of Xi Luodu project, the construction layout system is divided into 6 subsystems: dam construction, diversion and enclosure construction, dynamic water flow, underground structure construction, quarry stacking and redigging, and road and traffic inside construction site, and the research on 3D dynamic visual graphic simulation for construction layout of the designed whole construction process is developed. Flow of the 3D dynamic graphic simulation data is designed. Dynamic graphic simulation data can be divided into graphic data and attribute data, which organized based on GIS, then, 3D dynamic visual digital model for construction layout is built, which itself is an important part of digital hydraulic engineering. 3D dynamic visual graphic simulation demonstration and visual inquiry of dynamic graphic simulation data are realized with this digital model. Practical engineering application shows that a scientific and intuitive visualization analysis way is provided for construction layout design and decision-making by this research, moreover, hydroelectric design work will be promoted to develop in an intellective and modern way, and the research is worth to be spread.

[Key words] Xiluodu Project; construction layout; graphic simulation; geographic information system; digital hydraulic engineering