

# 虚拟现实技术在都江堰三维信息系统中的应用

张尚弘, 曲兆松, 郑 钧, 王兴奎

(清华大学水利水电工程系河流海洋研究所, 北京 100084)

**摘要:** 以四川都江堰虚拟现实系统的构建为例, 介绍了虚拟现实技术应用于流域模拟的一些关键环节, 重点探索了多比尺地形嵌套建模、水流模拟、场景漫游控制、多专题切换、工程设计仿真以及与外部数据库连接查询等问题的解决方法, 为虚拟现实技术更进一步应用于流域模拟进行了有益的尝试。

**关键词:** 虚拟现实技术; 都江堰; 嵌套建模; 工程仿真; 三维信息系统

**中图分类号:** TV212.4; TV213.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2004)05-0643-07

虚拟现实技术是近年发展起来的一门新型技术, 它主要研究交互式实时三维图形在计算机模拟方面的应用, 该技术为用户提供了一种能在计算机上设计并创建丰富多彩的三维动态虚拟世界, 并交互感应和自由转换视角功能的崭新工具<sup>[1]</sup>, 已在军事、航天等多个领域发挥了有效的辅助设计与决策的作用。

随着“数字地球”、“数字城市”、“数字流域”等概念的相继提出, 虚拟现实技术越来越多的受到人们的关注, 应用的领域也由原来投资较高的军事、航空业逐渐扩展到普通行业, 如地学、医学、制造业、艺术与娱乐等。当前, 虚拟现实技术在地学相关行业的应用主要集中在地域三维漫游、工程规划仿真、三维信息获取等几个方面, 以其独特的表现手段为三维场景的模拟提供了全新的人机交互接口, 也为这些行业的信息化和仿真提供了新的手段和发展方向。

四川都江堰作为中国古代水利史上的瑰宝, 具有重要的历史文化价值和特殊的水利工程价值。为都江堰建立一套基于虚拟现实技术的三维信息系统, 不仅可以通过现代科技手段将这一奇迹展现给世界, 让人们更直观有效地了解都江堰, 而且可与工程实际相结合, 对规划的工程进行科学的模拟和演示, 为评估工程建设对历史文化景观的影响提供真实的三维虚拟场景, 达到运用先进科学技术手段有效地保护这一世界文化遗产的目的。

三维虚拟现实系统构建主要包括系统建模、场景显示与实时驱动、仿真模型设计、与外部数据库相连接等几个方面, 系统采用 Creator 进行实体建模, 在三维场景开发包 OpenGVS 基础上用 Visual C++ 开发集成。下面针对都江堰三维虚拟现实系统, 就上述各个环节中涉及到的关键技术及解决方法加以讨论。

## 1 系统建模

对模拟区域地形地物的建模是三维虚拟现实系统构建的基础, 建模的优劣将直接影响到整个系统模拟的真实性和系统运行的实时性。在硬件水平相对固定, 而数据量又很庞大的情况下, 系统模拟的真实性与实时性往往是一对矛盾, 这就需要通过简化模型结构和优化显示算法来达到大数据量处理和高质量实时显示效果间的平衡。多层细节 (Levels of Details, LOD) 和纹理映射的应用为解决这一矛盾提供了方向。

多层细节是指为同一实体模型构建不同精度的细节层次, 根据人眼观察事物时近处清晰、远处模糊的视觉

收稿日期: 2003-07-15; 修订日期: 2003-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279013; 50221903)

作者简介: 张尚弘 (1977 - ), 男, 甘肃古浪人, 清华大学水利水电工程系博士研究生, 主要从事数值模拟与虚拟仿真技术在数字流域中的应用研究。E-mail: zhangshanghong@tsinghua.org.cn

特点,在虚拟场景中按照一定的规则自动在不同层次间切换的技术。应用该技术不仅可以保持视觉效果,不失模型的真实性和逼真性,而且可以有效控制模型中的数据量,保证系统运行的实时性。

同样,纹理映射的目的也是为了在不增加模型数据量的情况下增强系统模拟的真实性。该技术是将平面纹理图像通过一定的仿射变换,跟相应的模型多边形曲面建立坐标映射关系,使平面纹理“蒙”在模型表面,随模型表面的高低变化而变化,从而配合模型实现三维实体的模拟。

下面结合都江堰三维虚拟现实系统中各种地形地物的建模工作,论述多层细节与纹理映射技术在该系统建模中的应用,重点讨论建模工作中碰到的不同比尺、不同大小地形相互嵌套构造 LOD 的方式及对流动水体的处理方法。

### 1.1 多比尺地形嵌套建模

对于大面积地形如何构造 LOD 建立模型的问题,国内外学者已作了大量的研究工作<sup>[2~4]</sup>,许多商用软件也提供了相应的模块,但这些方法多针对同一高程数据,对不同高程数据自动嵌套生成 LOD 的问题尚无很有效的方法。在实际工作中,由于各种条件的限制,往往只能获得局部范围的大比尺数据,对其它大面积的地形只能用小比尺数据来生成,而这也恰恰符合大部分用户的需求,只关心局部区域,对其它部分只是作大概了解。因此运用多比尺高程数据生成相应地形,再相互嵌套构成 LOD,是解决上述问题的可行办法。

都江堰三维虚拟现实系统希望在小比尺上体现四川省、都江堰的地理位置及流域水系,大比尺上反映岷江、都江堰工程及灌区,所以在地形建模中准备了全国 1:400 万地形图,四川省岷江流域 1:25 万地形数据及其中部分地区的 1:5 万地形数据。为重点模拟都江堰景区,收集了自紫坪铺至外江青城桥范围的 1:1 万地形数据和其中渠首地区的 1:2000 地形数据,从而形成了从全国至都江堰的金字塔式多层数据支持。

建模软件采用 MultiGen 公司的 Creator,该软件支持 OpenFlight 格式,在三维实时系统建模方面功能强大。具体的建模过程分以下几个步骤:

(1) 将各个不同比尺的地形高程数据进行数据预处理,转换为 Creator 所支持的数字高程数据(Digital Elevation Data, DED)格式。

(2) 将转换后的高程数据导入 Creator,分别生成相应地形,在地形生成过程中,运用 Creator 所提供的 LOD 功能为地形添加层次细节。

(3) 为了将各比尺地形进行嵌套并构造 LOD,对具有包含关系的相邻精度地形按公共边界进行分割处理,如以 1:1 万地形的分割为例,将 1:2000 地形的边界作为公共边界,把 1:1 万地形总体分割为 1:2000 地形对应范围和其余地形范围两大部分。

(4) 将各个大比尺地形作为相邻小比尺地形的层次细节拷贝至同一地形文件中,并按坐标对应关系使其水平位置与对应分割边界重合,高程误差在允许范围内。

(5) 对各个新建的 LOD 层次地形进行边界缝合接边工作,并设定相应 LOD 的可见范围。经过上述操作,就可生成金字塔式的具有多个层次细节的地形模型,如图 1 所示。建模中所采取的将高精度地形作为上一级地形中相应区域层次细节的措施,不但可以提高系统在不同位置显示的实时性,而且可通过平滑过渡,随视点靠近而步入更为精细的地形场景,增强了系统的真实性。对不同细节切换中可能出现的地形裂缝问题,采用共享公共边界的方式加以解决。

### 1.2 纹理映射优化地物模型

通过上述建模即可对地形进行模拟,但要达到逼真的视觉效果,还应在地形地物上贴上相应的纹理,下面以水流、林木、天空等模拟为例,说明其纹理映射实现方法。

虚拟现实系统中对水流的建模表现有许多方法,如静态贴图、动态纹理和粒子模拟等。静态贴图最容易实现,只需将水流图片贴在表示水体的面上即可,系统开销小,适合于远景显示,但该方法在近景显示中缺乏生动性;粒子模拟技术可较生动地表现水流运动的细节,但系统开销很大,无法大范围使用;动态纹理的方式则居二者之间。动态纹理包括多纹理替换和单纹理多面替换两种,多纹理替换是指对同一水流模拟面,创建一套

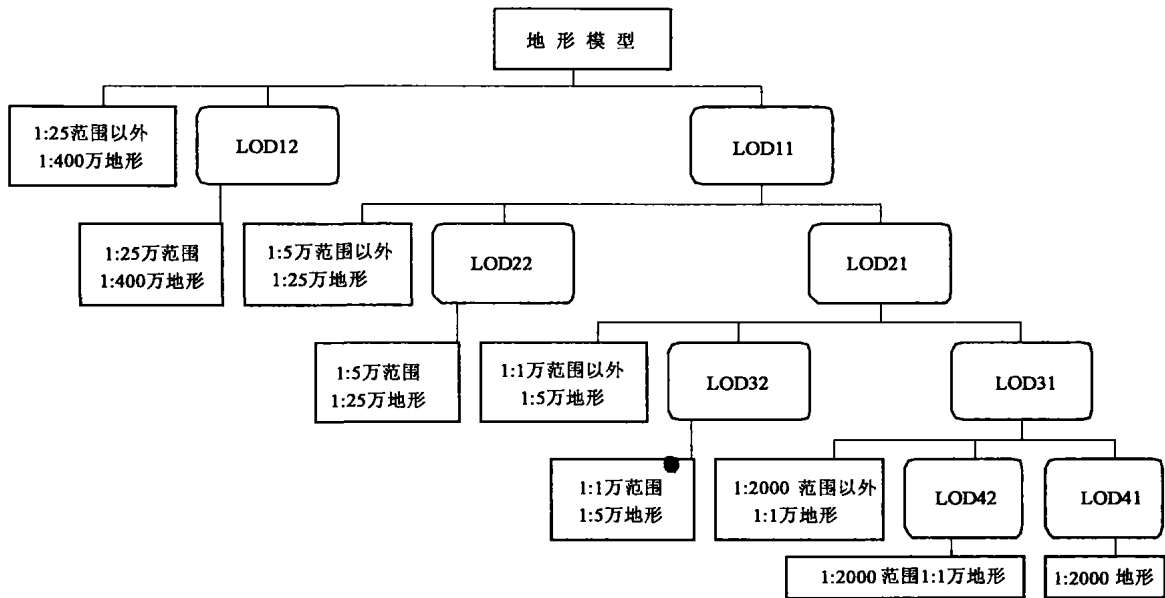


图 1 多层细节地形结构示意图

Fig. 1 Sketch of multilevel terrain

表示水流的纹理图片，在三维场景下随时间将这些图片依次设为水流模拟面的纹理，从而实现水面流动效果；单纹理多面是指对同一水流模块，用相互重叠的多个面组成，每个面都用同一水流纹理贴图，对纹理贴图的位置依次在相邻面之间进行变化，最后通过各个面的循环显示实现流动的效果。在都江堰三维系统的水流建模中，综合考虑显示效果和系统开销两方面的因素，近景采用动态纹理技术，远景则采用静态贴图。

图 2 为利用纹理图像生成静态地理环境中林木模型的实例。林木是一种很不规则的物体，利用大量的多边形来构造林木的模型在实时系统中是不现实的。利用纹理映射技术，在两个相互垂直的面上贴上树木的透明纹理，当视线转动的时候，将产生比较真实的视觉效果，在三维场景中就可以较好地模拟单棵树木。同样，天空、透明水体等建模也可以采用透明纹理，达到既生动逼真，又减小建模量和系统开销的目的。

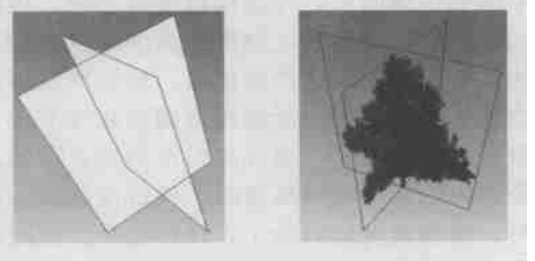


图 2 运用两个垂直面映射树的纹理模拟技术

Fig. 2 Mapping the texture of a tree with two perpendicular polygons

## 2 场景显示与实时驱动

将地形地物模型调入场景，并使之随视点改变而实时驱动虚拟场景动态变化，实现虚拟场景的动态漫游，是虚拟现实系统构建的又一重要组成部分。场景的驱动有许多不同的编程方法可以实现<sup>[5-7]</sup>，如用 OpenGL，VRML，Vega，WTK 等，本文采用 OpenGIS 来实现场景的实时驱动。OpenGIS 是 Quantum3D 公司提供的视景开发软件包，该软件提供了构建虚拟场景的总体框架和大量的 C 函数接口，对视景开发的效率很高。

### 2.1 程序框架

OpenGIS 提供了构建虚拟场景的多个接口，主要有 Frame，Channel，Scene，Camera，Object，Light，Fog 等。如图 3 所示，这些接口正如一个实景拍摄现场，场景 (Scene) 中加入了多个实体模型 (Object)，以及一些光照 (Light) 和雾化 (Fog) 效果，连接到 3D 图像通道 (Channel)，通过多台摄像机 (Camera) 位置角度的移动变换，渲染出

不同的场景视觉效果，最终在一个屏幕窗体 (Frame) 中显示出来。程序的设计主要就是在这个框架下对每个接口加入相应的控制模块，模拟特定的场景，实现所需的专用功能。

### 2.2 模拟控制

Open GVS 的模拟是以实体为单位和中心的，无论是实体本身的图形和动作模拟，还是摄像机、灯光、雾化模拟，都是为整个场景的实体模拟服务的。对实体的模拟手段类似于面向对象中类的概念，由实体属性和成员函数构成。实体属性是指为模拟实体动作和属性而提供的描述变量，而成员函数则为模拟实体运动提供了规则。如在船只模拟中，船只应随水位的升降而升降，因此就要通过回调函数实时检测所在水面高程，从而随时调节自身位置。同时船只之间是否发生碰撞以及相撞后的反应也可以通过定义回调函数进行模拟。

具体实现时，首先调用 `GV-obi-inq-position` 函数得到船只位置，然后调用 `GV-geo-inq-face` 函数得到船只所在位置处水面实体标识，而后调用 `GV-geo-inq-face-elevation` 获得该水面高程，依据该高程调节船只位置和角度，模拟船只晃动和吃水深浅等状态。对不同船只相撞的探测可调用 `GV-geo-inq-obi-collision` 函数，当探测到相撞发生后，可按照具体的模拟规则触动其他模拟函数。如可根据船只速度和质量设定不同的撞击效果，可以通过调节船只位置和角度，实现位置移动以及倾覆、下沉等效果，还可调入烟、火等模块模拟特殊的效果。

场景的漫游是通过控制摄像机位置和角度来实现的，同样也具有模拟回调函数，实现诸如漫游过程中视点不能低于地面、进行碰撞检测等功能。摄像机视点由鼠标或键盘操作控制，实现调整视点的高低变化及变向移动等功能。因为系统地形涉及多个层次细节，所以在不同高程漫游时其移动速度应该不同，高空时漫游速度快，可以很快到达指定地点，地表则漫游速度慢，以便仔细观察相关实体；同时俯视角度的也应该随之改变，高空观看俯视角大，地面浏览则俯视角变小，达到平视的视觉习惯。图 4 即为视点在不同高程时系统所显示的场景。具体实现时，通过实时检测视点距地面垂直距离的方法动态改变漫游速度与视角，即当视点距地面的垂直距离大于某一设定高度时，漫游速度设为最大值，俯视角垂直于地面，当该距离减小至接近地面的某一预定值时，漫游速度达到最小，视角水平，中间过程按线性插值，从而达到漫游时速度与视角的自动渐变效果，增强了系统操作的友好性能。

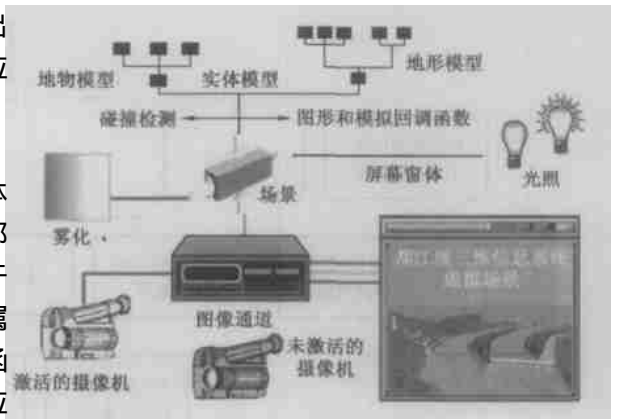


图 3 Open GVS 程序框架示意图

Fig. 3 Sketch of Open GVS application



图 4 视点在不同高程时系统所显示的场景示意图

Fig. 4 View scene at different altitudes

在构造虚拟场景时，为了达到逼真的模拟，常常在场景中加入雾化效果，使一定范围以外的实体视觉模糊，随距离的增加逐渐不可见，这种自动消隐远景实体的方式无论对系统的实时性还是场景的真实性都大有好处。但对大场景漫游而言，也存在一定问题，即当视点转移至高空，想对总体进行浏览时，会因距离过大，在

雾化效果下图形发生了消隐,达不到预期的浏览目的。同样,天空中云彩的存在也会阻碍这一目的的实现。因此在系统设计时采用视点距地面高差为判距,通过调用实体状态设定函数 GV-fog-set-state,自动对雾和云的效果进行开关处理。当视点在高空时,两者都关闭,可以直接总览全局,当视点靠近地面,则自动启动两者效果,使模拟的场景更为逼真。

为模拟光照变换下的场景,需要在场景中加入光源并控制其位置、方向等属性。如为了模拟一天中不同时刻的场景状态,可根据时间将场景中的太阳光光源按圆弧移动位置,并调整光照的方向,使实体生成不同的影子。局部光源的加入还可以描述车灯、路灯等效果,逼真地模拟各种场景。

通过上述各个接口函数的设计,即可以实现模型导入、视点切换、光照投影、碰撞检测等一系列操作,为虚拟场景的漫游与模拟提供友好的软件平台。

### 3 多专题切换仿真

对系统小比尺大范围的场景,用户往往不满足于内容单一的纹理表面,高精度纹理图片虽然包罗万象,能描述地形的细节,但仍存在一些不足,一方面对小比尺大范围的场景使用高精度纹理,会增加系统开销,对系统实时性影响太大;另一方面包罗万象的纹理,其信息含量虽然很大,但杂乱无章,不利于专题信息的有效表达。因此,需要对同一地形预备不同类型的专题纹理,在不同的信息需求情况下显示不同专题的纹理。

在都江堰信息系统的设计中,为实现直观有效地了解地理位置、流域水系等信息的目标,准备了全国和四川的行政区划及流域水系图作为专题纹理。用户在全景浏览时,不仅可以了解三维情况下行政区划信息,还可以切换至流域水系专题查看相应的流域水系状况,达到从不同角度全方位获取信息的目的。

在三维虚拟场景下,纹理是由纹理名唯一标识的,只要将不同专题的纹理设定为与原专题对应纹理相同的纹理名,就可实现专题切换。例如对全国地图,假设初始纹理是行政区划图,定义其纹理名为“专题图”,若要切换至流域水系图,只需将流域水系纹理文件读入,同样定义该纹理的纹理名为“专题图”,并设为当前显示纹理,从而实现从行政区划图到流域水系图的切换。

因为纹理替换不改变其坐标映射关系,所以不同专题替换纹理的大小应该一致,否则就会出现纹理的拉伸变形,使模拟出现偏差。对专题纹理图的获取,可考虑与GIS的专题图配合。GIS在各类专题图的生成方面功能强大,可以作为三维虚拟现实系统的纹理源,按坐标输出一系列大小相同的专题图作为纹理,这样不仅可以提高专题图表达的真实直观性,而且对系统多类型专题图的生成切换也提供了很大方便。

### 4 杨柳湖水利枢纽工程方案比选

由于紫坪铺水库的运行需要反调节,拟在都江堰鱼嘴以上修建杨柳湖反调节水库。因受地形的限制,坝址需要往下游一些才能满足反调节库容的要求。但另一方面,为了保护都江堰文化遗产,该水库的修建应尽量减少对都江堰原有景观的影响,即要求坝址往上游一些。

设计单位提出了杨柳湖水利枢纽上、中、下3个坝址设计方案以供论证比选。本系统对3个坝址进行虚拟仿真,采用虚拟现实系统动态交互地对各设计方案进行仿真建模,观察工程修建后与周边环境协调的整体效果,以各项工程在视觉和功能上与原有工程互相协调统一为原则,以便保持都江堰原有风貌,为坝址的确定提供参考依据。

首先对3种情况下的枢纽工程进行实体结构建模,包括相应方案中枢纽工程与原始地形的连接段建模,然后将所建模型调入三维虚拟场景的特定位置,通过程序控制场景中相关实体的可见性,实现不同方案场景的动态切换。如当用户选择“中坝址方案”菜单项时,屏蔽上下两坝址枢纽实体和中坝址原始地形,显示中坝址枢纽和其地形连接段的模型,使整个场景体现中坝址方案实施后的视觉效果。对其它两种方案的处理亦与此类

似,可通过菜单项切换方案,再借助系统漫游功能,最终实现在三维虚拟场景下通过不同的视点视角观察比较 3 种坝址方案,为方案选择提供参考。图 5 为视点在鱼嘴位置时上中下 3 种坝址方案的场景。



图 5 视点在鱼嘴位置时的上中下(从左至右)3种坝址方案场景

Fig.5 View scenes for three layouts of the Yangliuhu Dam

从图中的视觉直观效果看,上坝址几乎没有影响,中坝址与原有景观基本协调,而下坝址对原有景观已有显著的影响。综合比较,中坝址较为合理。

## 5 与外部数据库的连接与查询

为实现虚拟现实系统与其他各种信息系统的沟通融合,增强各类信息的高度共享,必须实现与外部数据库的连接,只有这样才能使三维信息系统摆脱孤立,通过数据库与其他信息源建立起广泛的联系。都江堰虚拟现实系统构建时就将各种实体的标识名、地理坐标、属性说明等信息存入后台数据库中,通过连接数据库实现基于三维场景的实体属性查询、空间定位等功能。

三维环境下与数据库进行交互的关键技术在于如何通过鼠标操作获取实体的标识信息,只要得到所选择实体的标识信息,就可以通过数据库建立与其相关的各种信息之间的联系,实现基于三维场景的查询功能。介于在 OpenFlight 格式的实体模型中,各个实体或其组成部分都是由对应结构树实体名唯一标识的,因此可以通过对鼠标所指向实体的实体名信息的获取,实现不同实体区分与相关数据库信息的连接查询。本文运用射线相交的方法实现这一目标,即通过遍历模型结构树,检测视点与鼠标选择点所确定射线与哪个实体相交,从而确定被选中实体,得到其标识信息,为进一步的各种查询操作奠定基础。

## 6 结 论

将虚拟现实技术用于构建流域信息系统,无论对海量数据的直观表达还是各种信息的相互融合,都具有积极的意义。本文通过对都江堰三维虚拟现实系统构建过程的阐述,重点探索了多比尺地形嵌套建模、场景驱动、多专题切换、工程仿真、与外部数据库系统挂接等关键技术,为虚拟现实技术在流域信息系统中的深入应用进行了有益的尝试。当然,虚拟现实技术本身就是一门多学科交叉的新型技术,在流域信息系统中的应用尚属起步阶段,还有大量的具体问题有待解决,如虚拟现实与 GIS 基础数据的共享与结合问题、工程方案的智能化虚拟规划设计问题、依据数学模型的实时动态模拟问题等等,都将是虚拟现实技术与流域信息系统深入结合所必须解决的课题,这些将是笔者下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 韦有双,王 飞,冯允成. 虚拟现实与系统仿真[J]. 计算机仿真, 1999, 16(2): 63 - 66.
- [2] 李凤霞,王尚洋,黄都培. 大规模地形模型的多分辨率显示技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2002, 15: 244 - 246.
- [3] 宋友历,李 辉,王丹霞,等. 大地形三维可视化系统设计 with 关键技术方案[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2002, 39(3): 439 - 442.
- [4] 淮永建,郝重阳,罗 冠,等. 一个交互实时的多分辨率地形绘制系统[J]. 计算机工程与科学, 2002, 24(6): 42 - 45.

- [5] 尚建嘎, 刘修国, 郑 坤. 三维场景交互漫游的研究与实现[J]. 计算机工程, 2003, 29(2): 61 - 62.
- [6] 申闫春, 才庆祥, 张幼蒂, 等. 虚拟现实技术在露天矿生态重建仿真中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 1 - 5.
- [7] Quantum3D, Inc. OpenGVS Programming Guide (Version 4.4) [M]. California: Quantum3D, Inc. 2001. 20 - 22.

## Application of virtual reality to Dujiangyan 3D information system<sup>\*</sup>

ZHANG Shang-hong, QU Zhao-song, ZHENG Jun, WANG Xing-kui

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As a new kind of technology, the virtual reality is more and more recognized by geographical industries in recent years. In this paper, several key points on the application of virtual reality to valley simulation are discussed based on the construction of Dujiangyan virtual-reality system, including multilevel terrain construction, fluid simulation, scene roaming controlling, multi-subject switching, project simulation and database connection, the research of all these aspects would be significant to the virtual reality application to valley simulation.

**Key words:** virtual reality; Dujiangyan; multilevel terrain construction; project simulation; 3D information system

---

## 欢迎订阅《水电能源科学》(双月刊)

《水电能源科学》是由国家教育部主管、中国水力发电工程学会和华中科技大学共同主办的学术刊物——中国水力发电工程学会会刊。刊物面向从事水、电、能源开发与研究的科研、教学、管理人员及大专院校师生,主要刊登有关水、电、能源及其相关学科的新理论、新技术、新方法以及工程应用的新成果。主要栏目有:水文水资源与环境、水情测报与优化调度、水利水电工程、大坝安全与监测、水工水力学、机电与控制工程、电力市场等。

大 16 开本,正文 88 页,每册定价 6.00 元,全年 36.00 元。全国各地邮局均可订阅,邮发代号:38 - 111。若有漏订者,也可直接汇款到编辑部函购。

编辑部地址: 武汉华中科技大学主校区 邮编: 430074

电话: (027) 87542126

E-mail: sdney @x263. net

---

\* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50279013 ;No. 50221903).