

VR-GIS 技术在地面沉降研究中的应用

朱琳^{1,2}, 林学钰³, 宫辉力^{1,2}, 李小娟^{1,2}, 苏耀明^{1,2}

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100037; 2. 首都师范大学 环境与 GIS 北京重点实验室, 北京 100037;
3. 吉林大学 水资源与环境研究所, 长春 130026)



摘要: 将虚拟地理信息系统技术应用于地面沉降研究中, 以 Visual C++ 6.0 为开发工具, 利用 OpenGL (Open Graphics Library) 开放图形库渲染三维空间信息。以苏锡常地区为例, 实现以三维水文地质结构为基础, 虚拟地面沉降动态过程; 在三维水文地质结构模型的基础上构建地面模型, 在虚拟模型中耦合地下水位埋深和地面沉降间的关系模型, 实现地面累计沉降量的模拟预报, 从而, 为地面沉降研究提供一个可视化操作平台。

关键词: 虚拟地理信息系统; 三维水文地质结构; 地面沉降动态过程; 地面累计沉降量的模拟预报
中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2009) 12-3671-04

Application of VR-GIS Technology to Study Land Subsidence

ZHU Lin^{1,2}, LIN Xue-yu³, GONG Hui-li^{1,2}, LI Xiao-juan^{1,2}, SU Yao-ming^{1,2}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China;
2. Key Lab of Resource Environment and GIS of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100037, China;
3. Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Virtual reality geographic information system (VR-GIS) technology was utilized to the study of land subsidence. With Visual C++ as an interface development tool and OpenGL (Open Graphics Library) as a graphic tool, the process of land subsidence was simulated, in Suzhou-Wuxi-Changzhou area, Jiangsu Province, based on the three dimensional hydro-geological structure. At the same time the correlation model between groundwater level and accumulative land subsidence was coupled in the virtual environment and the value of accumulative land subsidence could be calculated when the groundwater level was given. All the work is to build a visualizing platform for researching the land subsidence.

Key words: VR-GIS; 3D hydro-geological structure; process of land subsidence; prediction and simulation of accumulative land subsidence

引言

在天然和人为条件下, 不合理的地下资源开发利用, 导致地质灾害问题日趋严重, 引起了各级政府的广泛关注^[1]。作为一种缓变型的地质灾害, 地面沉降因其影响范围广、后果严重而备受关注。地面沉降已经危及当地人民生命财产安全, 阻碍社会经济的发展。为了及时控制、治理地面沉降问题, 许多生产、研究单位在该区相继开展了大量的有关地面沉降地质灾害的调查和评估、地面沉降形成的地质环境条件分析、地面沉降监测网络建设等一系列工作, 并取得丰硕的研究成果。但迄今为止, 上述这些研究成果均很少展示地面沉降在三维空间上的动态过程, 给直观、深入研究地面沉降灾害带来一定的难度。

1 VR-GIS 技术

20 世纪 90 年代初期, Koller^[2]、Faust 实现虚拟现实技术和地理信息系统的集成, 形成了虚拟 GIS (Virtual Geographical Information System, 简称 VR-GIS), 该技术除

了具有传统地理信息系统的基本功能外, 还结合了虚拟现实技术, 创建以视觉为主的三维虚拟可感知环境。用户能沉浸在虚拟现实环境中, 并与它发生交互作用, 从该环境中得到感性和理性的认识, 避免了传统地理信息系统技术中二维平面图或准三维的表达模式。VR-GIS 是一种用于研究地球科学的、或以地球科学系统为对象的虚拟现实技术, 也是近年来一个新兴的地理信息系统的研究分支^[3]。国内众多学者对 VR-GIS 开展了系统研究, 如高俊院士等应用虚拟现实技术研究虚拟作战地形环境^[4](1996 年), 李德仁院士等研究了数码城市的理论和技术方法^[5](2000 年), 刘先林院士建立三维测量的虚拟现实系统^[6](2005 年), 孙九林院士提出“资源环境科学虚拟创新环境”概念和建立“地球科学虚拟多维信息空间生成系统”^[7](1999 年), 林珏与龚建华建立“虚拟地理环境”概念与方法^[8](2002 年), 闫国年研究与开发“没有围墙的 GIS 实验室”^[9](2002 年)等。到目前为止, 该技术在人文地质研究中应用较少, 主要研究者有 Martin Ross^[10]、Aki Artimo^[11]、颜辉武^[12]、林晨^[13]、朱琳^[14]等, 但在地面沉降研究方面仅由本文作者^[15]做了初步探讨。

本次研究中, 作者将虚拟地理信息系统技术 (VR-GIS) 用于地面沉降研究中, 不仅在三维空间上虚拟表达了地面沉降的动态过程, 而且在虚拟的环境中耦合相关模型, 实现地面累计沉降量的模拟预测, 为开展地面沉降研究建立一个可

收稿日期: 2007-11-25

修回日期: 2008-05-21

基金项目: “十一五” 973 预研 (2006CB708405); 中国地质调查项目 ([2003]019-02)

作者简介: 朱琳 (1980-), 女, 江苏泰兴人, 博士, 讲师, 研究方向为水文地质和水资源信息技术; 林学钰 (1937-), 女, 福建福州人, 教授, 博导, 中国科学院院士, 研究方向为水文地质及水环境问题。

视化的操作平台。该平台以 Visual C++ 6.0 为主要开发工具, 将 SQL Server 2000 作为地面沉降空间数据的存储介质, 通过 OpenGL 开放图形库实现三维空间信息的渲染, 并以苏州、无锡和常州(简称苏锡常地区)为例进行研究。

2 虚拟表达

苏锡常地区地面沉降的主要发生层位是第四系地层, 正确建立三维水文地质结构模型是虚拟地面沉降的重要基础。由于地下水的长期过量开采是导致该地区产生地面沉降的主要原因, 因此, 建立地下水面虚拟模型可为沉降机理分析提供一个强有力的辅助措施。

2.1 三维水文地质结构的虚拟表达

第四纪地层是苏锡常地区地下水蕴藏的主要空间和产生地面沉降的物质基础, 为此, 正确建立第四纪含水层结构模型尤为重要。本次采用以下步骤建立三维水文地质结构模型:

首先, 概化地层。苏锡常地区第四系松散岩类孔隙含水层是目前区内地下水主要开采的含水层, 而地下水过量开采所引起的区内地面沉降也主要发生于第四系松散沉积物中的粘性土层和砂性土层中, 因此, 在概化地层时, 对前第四系地层没有考虑它的不同时代和不同岩性, 而将其视为

区内第四系地层的基底(基岩地层)。同时, 为了反映第四系松散沉积物中含水砂层与粘性土层的压密过程, 根据区内已有的地质结构研究成果, 将上更新统、中更新统和下更新统均分别概化为上下两部分: 上部为粘性土层, 下部为砂层。

然后, 获取边界数据。利用 ARCGIS 软件数字化研究区边界以及每个地层的缺失边界线数据。

接着, 建立虚拟模型。利用钻孔数据, 结合研究区边界以及所有地层的缺失边界, 从基岩开始“由下向上”依次建立地层模型, 使得构成每个地层的三角网个数、三角网点数目均相同, 所不同的是每个网点的顶、底板高程值不一样。为了保证缺失边界范围内地层厚度为 0, 该范围内三角网点的底板高程值等于顶板高程值。

最后, 虚拟表达。采用四面体结构^[16]作为三维水文地质结构模型的基本体元, 便于查询地质结构内部属性信息、剖面切割和漫游等人工交互操作。同时, 为了增强水文地质结构模型的虚拟效果, 采用了纹理映射技术(将野外采集的地层图像映射到几何模型上)、光照技术^[17]等, 除了运用纹理技术虚拟地层外, 对含水层的表达还可运用纹理结合颜色共同表现的方式, 这不仅便于用户了解地层岩性, 而且还能够迅速地了解含水层的分布层位和空间形态(见图 1)。

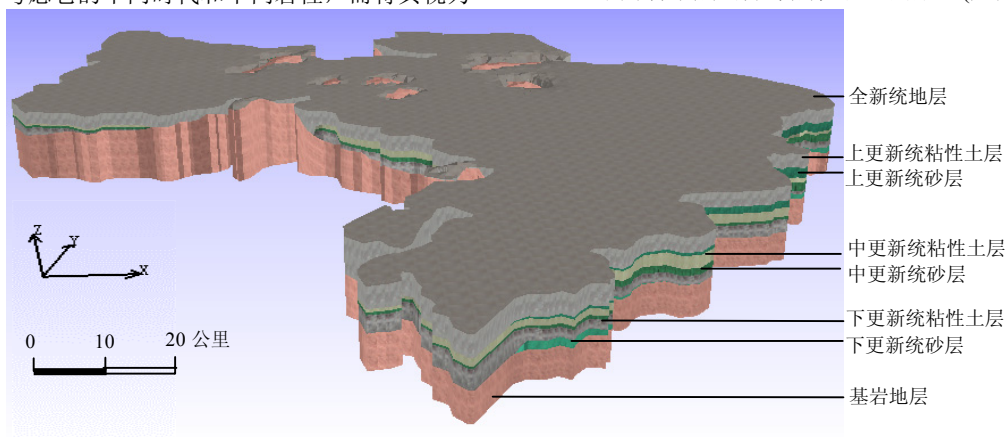


图 1 苏锡常地区三维地质结构模型

Fig. 1 Virtual model of 3D geological solid of Suzhou-Wuxi-Changzhou area

2.2 地面沉降的虚拟表达

虚拟地面沉降过程是本次研究的重点内容, 建立地面沉降虚拟模型同样是以水文地质结构模型为基础。由于用来建立地面沉降虚拟模型的数据是每个地层的累计沉降数据, 该数据由地面沉降数值模型模拟获得, 采用从基岩开始, 由下向上依次处理每个地层的方法, 使得发生沉降后的一个地层的上顶板高程值与该地层上部地层的下底板高程值相等, 以保证沉降后不同地层之间不会出现“悬空”现象。具体建模过程如下:

首先, 由于记录研究区内每个地层沉降量的数据点较

多, 本次直接利用该时刻的原始数据点构建三角网(A), 对地层模型中的三角网(B)进行遍历, 判断 B 中每个三角形($\triangle B$)的三个顶点分别位于 A 的哪个三角形中, 在确定三角形后, 再依据 A 中已知沉降量的三个点, 进行线性插值求出 $\triangle B$ 中三角网点(如 P 点)的沉降量(SubZ)(图 2)。

在得到地层模型中每个三角网点的沉降量(SubZ)后, 为了确保沉降后地层在垂向上的连续分布, 由于每个地层的三角剖分是一样的, 则采用从基岩开始“由下向上”依次计算沉降后每个地层的模型。将构成下部地层顶板三角网中每个三角点(X、Y)的高程值(LdownZ)加上当前地层顶板发生沉降后的地层厚度, 从而求得沉降后, 当前地层顶板三角网点(P)

的高程值(过程见图 3)。

重复上述两个步骤得到某时段内一系列时刻下, 构成每个地层模型的不规则三角网点的顶底板高程值, 从而建立了研究区的地层沉降虚拟模型。

无锡西部(简称锡西地区)是苏锡常地区地面沉降十分严重的地区, 本次采用夸大的方式虚拟该地区地面沉降的动态过程。该区下更新统砂层(第 III 承压水含水层)和上更新统砂

层(第 I 承压水含水层)缺失, 在水文地质结构模型中虚拟一条假想的地下巷道, 用户可以沿着巷道在地层中漫游, 直观地了解多个地层剖面(上、下、左、右、前)的地层沉降过程。图 4 和图 5 分别给出了 1996 年一季度和 2004 年四季度的地层情况, 可以看出弱透水层和含水层砂层均发生了不同程度的形变, 且下更新统粘性土层的压缩量最大。

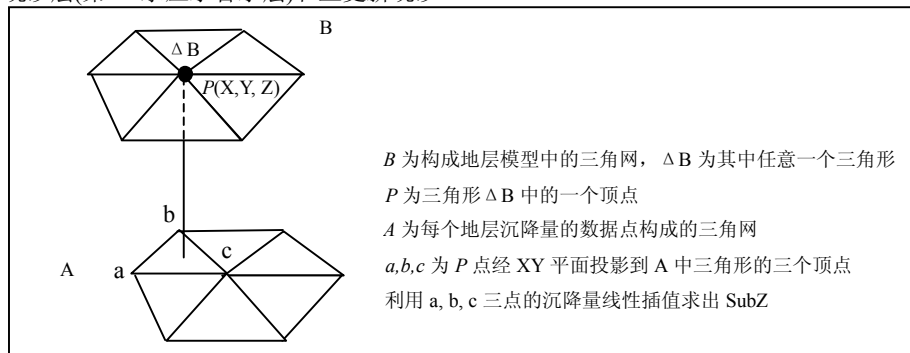


图 2 构成地层模型的三角网点沉降量的计算方法示意图

Fig. 2 Sketch map of calculating the settlement of crunodes in triangulate network of a stratum

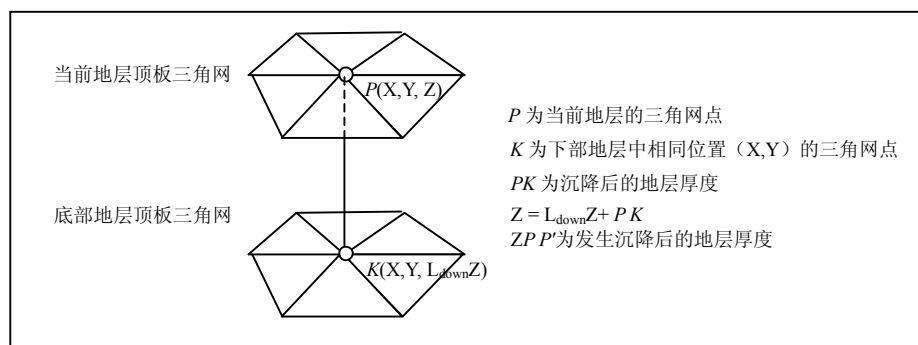


图 3 当前地层顶板三角网点高程值计算方法示意图

Fig. 3 Sketch map of calculating the elevation of crunodes in triangulate network of current stratum

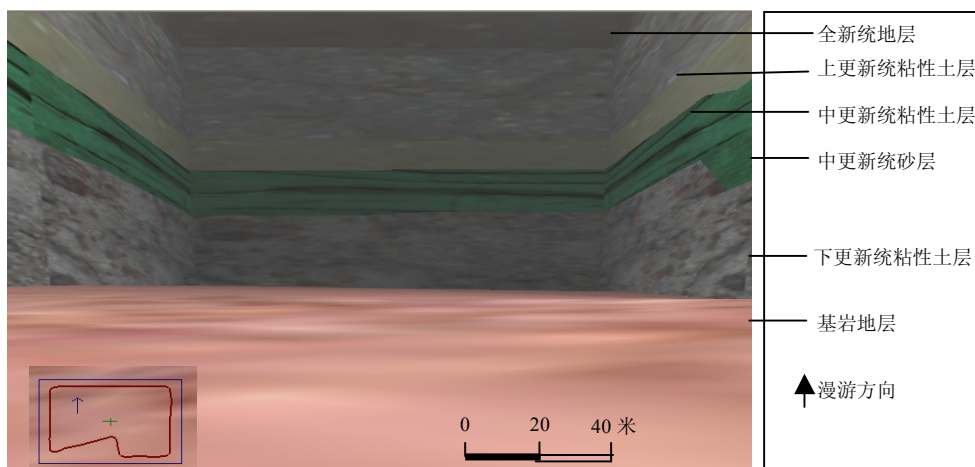


图 4 1996 年第一季度的巷道漫游地层剖面图

Fig. 4 Profile of walking through the hydro-geologic solid at the first quarter of 1996

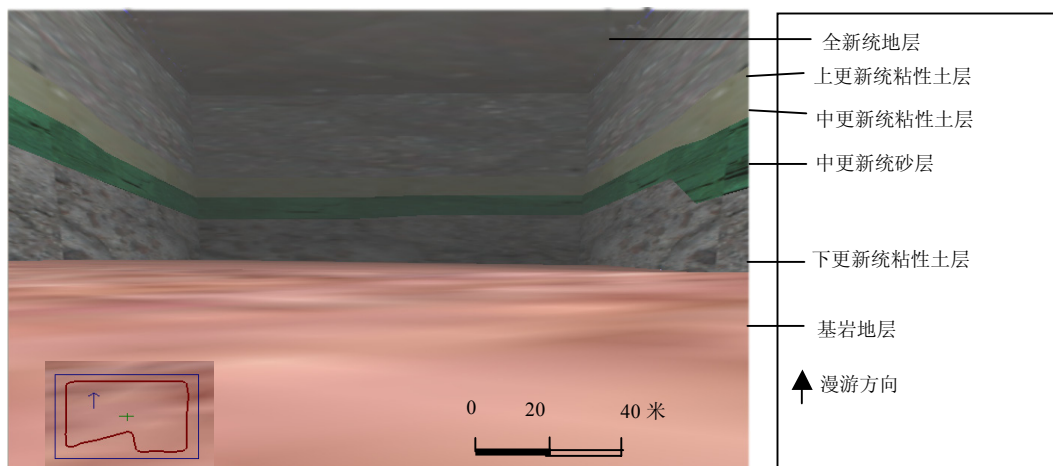


图 5 2004 年第四季度的巷道漫游地层剖面图

Fig. 5 Profile of walking through the hydro-geologic solid at the forth quarter of 2004

2.3 地面沉降的模拟预报

在虚拟的水文地质结构模型上, 结合区域分解法(于军等, 2004 年^[18])实现地面累计沉降量的模拟和预报。该方法不仅可以反映苏锡常地区地面沉降的基本状况, 而且避开了地面沉降研究中一些复杂问题(如地面沉降与抽水、灌水等的回弹变形, 土层变形的参数变化等), 为认识地面沉降提供了直观的尺度。

根据苏锡常地区地貌所在的北部沿江新长江三角洲平原、中部冲洪积高亢平原和东南部湖沼积平原等三个单元。在每个单元内进一步划分为多个亚区, 以每一个亚区作为研究对象, 建立地面累计沉降量与地下水水位相关模型, 使复杂问题得以简化, 该模型的一般表达式(于军等, 2004 年^[16])为:

$$S = \frac{S_{\max}}{1 + \exp[-k(S_i - S_c)]} \quad (1)$$

式中, S 为地面累计沉降量(mm); S_{\max} 为最大理论沉降量(mm); k 为传导系数(m^{-1}); S_i 和 S_c 分别为地下水位埋深和对应 $S_{\max}/2$ 时的地下水水位埋深(m)。

本次将这个模型耦合到已建立的虚拟模型中, 首先, 在虚拟环境下, 通过文件读取的方式获得亚区分区图的空间几何信息以及属性信息(包括压缩系数、最大累计沉降量 S_{\max} 和对应 $S_{\max}/2$ 时的地下水水位埋深)。然后, 判断需要进行预测的区域在地面沉降分区中属于哪几个亚区, 分别对这些亚区利用公式 1, 计算出给定地下水位下的地面累计沉降量, 图 6 给出锡西地区, 在给定 2005 年第一季度地下水位埋深值情况下的地面累计沉降量立体图, 从图中可以看出该区的一部分地带, 其地面累计沉降量已经达到 1200mm。

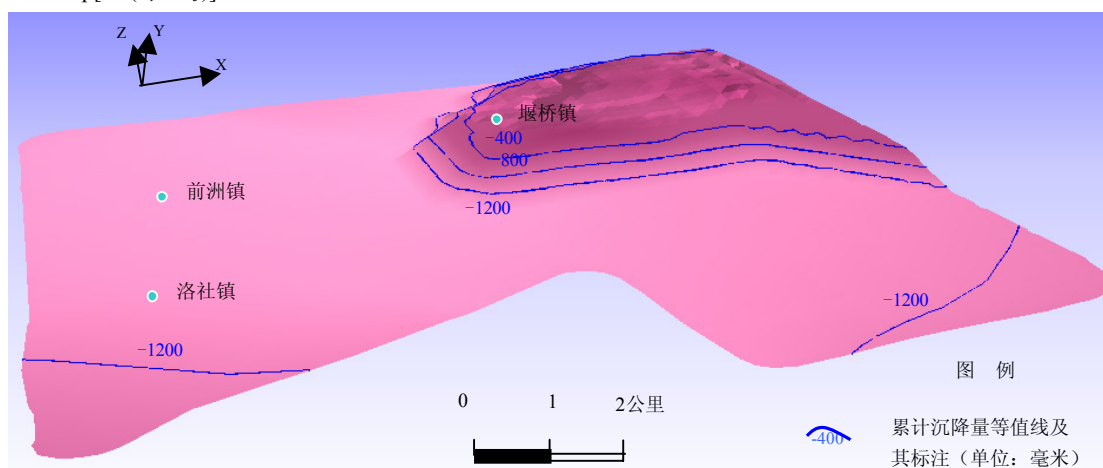


图 6 2005 年第一季度地面累计沉降量分布图

Fig6 Distribution of the accumulative land subsidence at the first quarter in 2005

3 结论

本次研究将 VR-GIS 应用于地面沉降研究中, 采用 Visual C++ 与 OpenGL 相结合的开发模式, 不仅虚拟表达了

苏锡常地区地面沉降的动态过程; 而且在虚拟环境中, 加入相关模型, 实现了地面沉降的模拟预报, 进而为地面沉降研究提供了一个可视化虚拟平台。

$$\tilde{\mathbf{E}}_a = \tilde{\mathbf{E}}_{b0} = \tilde{\mathbf{E}}_{b1} = \tilde{\mathbf{E}}_{b2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

运用状态反馈控制律 $\mathbf{u}_k = \mathbf{K}\mathbf{x}_k$ ，基于本文定理1，通过仿真软件可以得到状态反馈矩阵 $\mathbf{K} = [-2.357 \ -1.597]$ 。利用得到的反馈控制矩阵，当系统初始状态为 $[x_{10} \ x_{20}] = [3.0 \ -1.0]$ 时，仿真结果如图5所示。

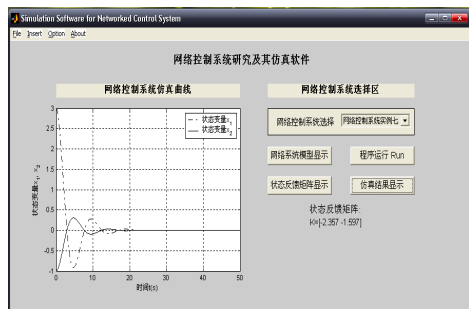


图 5 系统仿真结果图

通过仿真结果可知，网络被控系统的状态量能够较快地收敛至零点，满足系统渐近稳定的结论。对比文献[3]中的结论，其结果不适用于长时延网络控制系统；而文献[4]中的结论仅适用于网络时延满足某一Markov链，但是本文的时延不满足此假设；文献[5]中的结论可以适用于具有长时延的线性定常网络控制系统，但是其对于被控对象具有参数不确定的情况缺乏考虑，也不适用于本文的仿真实例。

因此，通过分析可以看出，本文提出的两条定理能够有效地分析和设计具有参数不确定性的长时延网络控制系统，保证其渐近稳定性，较以往的分析结论有进一步的提高，具有更广泛的适用性。

3 结论

当假设系统的传感机构为时间驱动，而控制器和执行机构为事件驱动时，针对具有参数不确定性的长时延网络控制系统，利用矩阵分析理论，将广义网络被控对象转化为一类含有不确定项的离散系统，设计系统状态反馈控制律，运用离散Lyapunov稳定性理论，推导出此类网络控制系统渐近稳定的充分条件，通过设计的仿真软件，可以方便地求解出状态反馈矩阵和得到相应的仿真结果。仿真结果说明了理论推导的正确性。当然，进一步的工作必须强化仿真软件的功能，使其应用对象更加广泛。

参考文献:

- [1] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于 H_∞ 和 μ 综合的闭环网络控制系统的设计[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 307-311.
- [2] Zhang Wei, Michael S Branicky, Stephen M Philips. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control System Magazine (S0741-3106), 2001, 21(1): 85-99.
- [3] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-884.
- [4] 朱其新, 胡寿松, 侯霞. 长时滞网络控制系统的随机稳定性研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 368-371.
- [5] 樊卫华, 谢蓉华, 陈庆伟, 等. 长时延网络控制系统的建模与分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 278-283.
- [6] 李静, 左斌, 胡云安. 长时延网络控制系统的建模与稳定性研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 7(S): 67-71.
- [7] Xi Li, Carlos E. de Souza. Delay-Dependent Robust Stability and Stabilization of Uncertain Linear Delay Systems: A Linear Matrix Inequality Approach [J]. IEEE Transactions on automatic control (S0081-9286), 1997, 42(8): 1144-1148.
- [8] 李静. 网络控制系统建模、稳定性分析及控制方法研究[D]. 海军航空工程学院, 2008, 9: 54-55.

(上接第 3674 页)

参考文献:

- [1] 张永波, 阎世骏, 周训, 等. 水工环研究的现状与趋势[M]. 北京: 地质出版社, 2001, 130-134.
- [2] David Koller, Peter Lindstrom, William Ribarsky, Larry F. Hodges, et al., Virtual GIS: A Real-Time 3D Geographic Information System [C]// IEEE Visualization, Proceeding of the 6th conference on Visualization'95 (S08186-71874). USA: IEEE, 1995: 94-101.
- [3] 王凤霞, 范士陈, 张超. VR-GIS 技术及其在泥沙运动分析中的应用[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 162-165.
- [4] 高俊, 游雄. 虚拟现实及其在军事测绘与作训模拟中的应用[J]. 解放军测绘学院学报, 1996, 13(2): 133-137.
- [5] 李德仁, 朱庆, 李霞飞. 数码城市, 概念、技术支撑和典型应用[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 283-288.
- [6] 林宗坚, 刘先林, 张续贤, 等. 精确时空立体景观虚拟现实的构建与应用方法研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(2): 16-18.
- [7] 孙九林. 资源环境科学虚拟创新环境的探讨[J]. 资源科学, 1999, 21(1): 1-8.
- [8] 林琿, 龚建华. 论虚拟地理环境[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 1-6.
- [9] 夏秋勤, 张宏, 闫国年. 没有围墙的 GIS 实验室[J]. 地球信息科学, 2002(2): 17-22.
- [10] Martin Ross, Michel Parent, Rene Lefebvre. 3D Geologic Framework Models for Regional Hydrogeology and Land-use Management: a Case Study from a Quaternary Basin of Southwestern Quebec, Canada, Hydrogeology Journal (S10040-0040365x), 2005, 13: 690-707
- [11] Aki Artimo, Joni Mäkinen, Richard C Berg, et al. Three-dimensional Geologic Modeling and Visualization of the Virttaankangas Aquifer, Southwestern Finland [J]. Hydrogeology Journal (S10040-00302566), 2003, 11: 378-386.
- [12] 颜辉武, 祝国瑞, 徐智勇, 等. 地下水资源的三维可视化研究[J]. 水利学报, 2004, (7): 114-118.
- [13] 林晨, 张建立, 潘懋. 基于 OpenGL 的地下水位动态模拟[J]. 勘察科学技术, 2002, 13-16.
- [14] 朱琳, 段福洲, 苏小四, 等. 苏锡常地区含水层结构和地下水位的虚拟表达[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 63-66.
- [15] 朱琳, 苏小四, 段福洲, 等. 苏锡常地区地面沉降的虚拟表现[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 136-140.
- [16] 文学东, 卢秀山, 李青元. 基于三棱柱的三维地质体建模及可视化研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 82-83.
- [17] Richard S Wright, Jr Michael Sweet. OpenGL 超级宝典[M]. Waite Group PRESS, 北京: 人民邮电出版社, 2001: 10-60.
- [18] 于军, 武健强, 王晓梅, 等. 基于“区域分解”思想的苏锡常地区地面沉降相关预测模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 92-95.