

# 矿产资源勘查定量化表达的集成模式与关键技术

刘军旗<sup>1</sup>, 毛小平<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

**摘要:** 矿产资源勘查的目的是系统地了解矿产资源的赋存情况, 以进一步支持资源评价和生产. 在这一过程中, 数据的分析与处理可以全面借助信息技术来提高其效率与质量. 通过分析矿产资源勘查信息处理过程和当前发展现状, 认为可以通过数据管理、三维可视化和虚拟现实这3个环节对矿产资源勘查信息处理的全程进行系统集成, 并就其中的关键问题进行比较详细的分析, 提出了一种新的三维数据组织方式和一种基于上述3个环节的系统表达地质实体的新方法, 并应用于多项勘查工作中, 取得了良好的效果.

**关键词:** 矿产资源勘查; 地质体; 三维数据结构.

**中图分类号:** P628

**文章编号:** 1000-2383(2009)02-0375-06

**收稿日期:** 2008-12-10

## Integrated Mode and Key Technique of Quantificational Expressing for Mineral Resource Prospecting

LIU Jun-qi<sup>1</sup>, MAO Xiao-ping<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Mineral resource prospecting aims at providing sufficient information on mine state for further resource evaluation and production. In this process, the information technique can be utilized to increase the efficiency and quality of data analysis and processing. In this paper, the authors consider that data management and three dimensional model and virtual reality are three pivotal taches of information processing, by which we can systematically integrate the information technique for mineral resource prospecting. And the authors put forward a new 3D data structure and a new systematic method for expressing geological solid, which have already been successfully applied to multi-resource perambulation work.

**Key words:** mineral resource prospecting; geological solid; 3D data structure.

矿产资源勘查工作是利用多种技术方法了解、认识和描述所研究范围内地质体的一个过程, 是资源评估与开采的基础, 可以看作是实际工作到抽象数据的一个转换过程, 是一个地质信息的获取、整理、处理、解释和应用的过程. 信息技术作为一种基础性的支持技术, 不断促进着这个过程的发展. 从最初的数据分析与计算, 到数据库技术(DBMS)、辅助设计技术(CAD)的引入, 再到地理信息系统(GIS)的使用和发展, “3S”(GIS、GPS、RS)(李德仁, 1997)

与“5S”(GIS、GPS、RS、数字摄影测量系统 DPS、专家系统 ES)(杜道生, 1995)集成的提出与应用, 三维可视化技术(3DS)的提出与发展等等, 使这一过程逐渐从二维抽象表达向三维乃至四维的综合直观描述过渡. 这个过渡过程实际上是一个多种技术方法的不断结合与集成的过程. 在这一过程中, 存在以下几个问题:

(1)实际工作流程的连续性与应用技术的隔离性问题(刘军旗, 2007);

**基金项目:** 水利水电工程地质三维信息系统研究(No. 000255); 地质过程与矿产资源国家重点实验室自主研究课题; 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.

**作者简介:** 刘军旗(1971-), 男, 博士, 主要从事地学信息方面的研究工作. E-mail: liujqq@126.com

(2) 三维数据结构问题. 一般来说, 三维建模的方式有线框建模(Mun and Surendra, 2003; Bastante *et al.*, 2005)、表面建模(Wang, 2007; Tian *et al.*, 2008)和实体建模(Reed and Allen, 1999; Elber and Shapiro, 2004) 3 种. 实体建模是目前应用广泛的建模方式, 既描述了实体的几何信息, 也定义了点、线、面、体的拓扑信息, 可对实体信息进行全面完整的描述. 构造实体几何法(Lions and Pironneau, 1999; Buchele and Crawford, 2004)、边界表示法(Fleisig and Spence, 2005; Cervera and Trelvelyan, 2005)和扫描法(Shih and Gaddipati, 2005; Sen and Srikanth, 2008)是目前常用的实体表示方法. 构造实体几何法的优点在于数据结构比较简单、数据量小和内部数据的管理比较容易, 但是由于实体的边界几何元素(点、线、面)是隐含表示的, 不便于在计算机上显示与绘制. 边界表示法的优点是表示实体的点、线、面等几何元素是显露的, 能比较快地绘制出来, 并且可方便地对实体进行多种操作和运算, 缺点是数据结构复杂, 需要占用大量的存储空间, 对复杂地质体的处理要耗费大量的时间, 对硬件的要求较高. 扫描表示法通过对简单图形进行平移、旋转及其他对称变换来建造三维实体, 它能容易地表示规则的三维实体, 但难于描述形态较复杂的不规则三维实体.

(3) 地质体虚拟现实问题. 由于地质体的复杂性、信息不完全性、结构不完整性等问题的存在, 虚拟现实技术在与地下地质体有关的领域中的应用到目前为止还没有形成一套有效的处理流程. 其主要问题是“外视”的平面三维向“内视”的仿真三维的转换与结合的问题.

由此可见, 目前关于三维建模的常用方法都存在十分严重的缺陷, 基于此, 本文提出了一种新的三维数据结构——二体式数据结构, 既保留了 B-Rep 的显著优点, 又克服了其显著的缺点, 并使其成为一种具有普适性的技术方法, 同时将平面三维与虚拟立体三维这两方面的技术结合起来, 探索地质体虚拟现实的合理表达方法.

## 1 数据管理和建模方法

在矿产资源勘查信息处理过程中, 有 3 个技术处理中心(“3C”)值得关注: 数据管理、三维模型和虚拟仿真, 见图 1. 从整个勘查数据流程来看, 数据

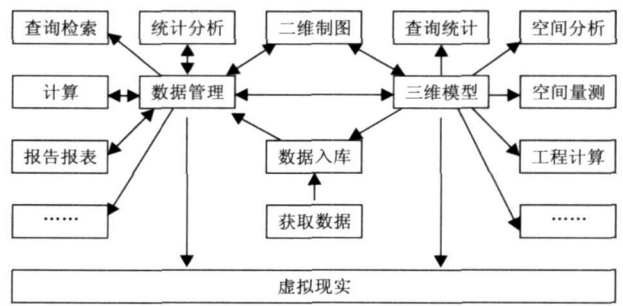


图 1 矿产资源勘查信息处理流程中的 3 个技术处理中心  
Fig. 1 Three information processing centers for mineral resource prospecting

和数据管理是其数据中心, 是三维模型建立和地质体虚拟仿真展示的基础; 三维模型是地质体的实物模拟, 是地质勘查信息处理的载体和应用中心; 地质体虚拟仿真是地质勘查信息处理的展示中心. 地质勘查信息处理的数据采集、数据处理、数据管理、查询检索、统计计算、报告报表生成、勘查图件生成、三维模型建立、三维虚拟仿真、三维空间分析评价等工作可以围绕这 3 个中心进行结合和集成. 这种以“3C”为核心建立的集成与结合体系, 可以有效地把矿产资源勘查的各项信息处理工作集成为一个完整的技术体系, 可以为地质勘查的全程提供直观的支持与服务.

### 1.1 数据管理

矿产资源勘查过程中涉及到大量的数据, 这些数据主要包括历史数据、勘探和现场测试数据、室内实验数据, 以及通过航测、遥感等手段获取的数据等. 这些数据依据时间可以分为历史数据、状态数据(现阶段的状态数据)和影响数据(可能造成现状改变后的数据); 依据几何性质可以划分为点、线、面、体等一维、二维和三维数据; 依据数据表现形式可以划分为数字型、字符型、图形型和多媒体型数据(刘军旗等, 2007), 具有多来源、大数量、多种类、多层次、多维和多应用主题(吴冲龙, 1998)等特点, 同时又具有可采集性(或可推断性)、可存储性、可管理性、可复制性、可共享性等可信息化的特征(刘军旗等, 2008).

从矿产资源勘查的实际工作内容与流程上来看, 地质勘查包括获取数据和对获取的数据进行分析和总结两部分工作, 即通过测绘与勘探等手段获取地质体地表与地下数据, 并在所获取数据的基础上进行图件编制和报告编写等工作. 在这个过程中, 图件编制和报告编写等都是围绕所获取的数据来进行的.

从信息处理角度来看,矿产资源勘查信息处理分为数据采集与管理 and 数据应用(如编制地质图、建立三维模型等等)两部分工作。首先采集数据,所有搜集到的数据和地质勘探获取的数据都通过数据库来进行管理。二维地质图制作过程是一个从数据库中提取数据,对所提取的数据进行加工,并把加工好的数据(做好的地质图)返回到数据库的过程。三维建模过程是通过提取数据库中的数据,包括原始数据和经过二维子系统加工过的数据(剖面图、平面图等),加工成三维模型,并把建好的三维模型存储到数据库中。分析、统计、计算、查询等过程也是提取数据、加工并显示加工过的数据的过程,因而数据及数据库是所有数据应用工作的依据和出入中心。即从地质勘查数据流程上来看数据或数据库是整个信息处理过程的基础和中心,以数据管理为中心,接收多种格式和类型的数据,管理所有地质勘查的原始数据和其他环节的成果数据,同时为二维辅助制图、三维建模、空间分析、报告编制和其他数据应用环节或其他软件系统提供所需要的数据,形成数据流流程中的数据中心。

一般来说,以数据为中心的集成可以采用两种方式进行:一是通过数据库为各种数据应用提供接口文件,即数据库响应各数据应用部分提交的数据需求申请,并以数据交换文件的形式为其提供所有的需求数据;另一种方法是各种数据应用工作直接从数据库中提取需要的数据。

## 1.2 三维建模

随着三维可视化技术的逐渐成熟,从勘查初期就可以开始建立部分三维模型了,如地表模型可以利用搜集到的数据和前期的测绘数据来建立。此时平面图的制作就可以通过地表模型在零平面或水平面上的投影而得到,原来在平面图上进行的勘探布设等工作,也可以直接在三维模型上进行。可以通过三维模型(开始也许只是一个简单地表模型)进行勘查数据的采集(通过属性关键字把三维模型与属性数据库关联,从而可以通过三维模型来调用数据库相关处理界面)、处理、切制或编制二维图、完善三维模型、进行空间分析和勘查数据统计、计算等多项应用工作。随着获取数据的逐渐丰富,三维模型逐渐完善,很多工作就可以直接围绕三维模型而展开,从而使三维模型成为矿产资源勘查信息处理的应用中心(刘军旗等,2008)。

### 1.2.1 一种新的三维数据结构——二体式三维数据结构

本文采用“二体式三维数据结构”来组织三

维数据,这种结构是对边界表示法的优化与改进,将空间三维实体分为线对象、多边形对象、曲面对象、标注对象和体对象等,实体的三维模型由大量的体单元组成,每个体单元不必都要有完全独立的各个面,所有相邻的体单元都有一个共同拥有的公共面,即在“二体式”数据结构中,相邻两个体单元接触部分的两个面被合并成为一个面,由一个共用面代替两个体单元相接触的两个面,构成二体共面结构,公共面具有两个体单元的属性。

图2是使用二体式结构的三维模型表达示意图,为了方便说明,以二维切面图来进行说明。图中共有5个分界面,A、BCD、E、F、G,G为透镜体边界,包含6个体单元V1、V2、V3、V4、V5、V6。BCD面与体单元V2、V3、V4及V5有关,这时为满足上述二元结构要求,需将它拆分为B、C及D3个独立的面。其中曲面A为体单元V1和V2的分界面,界面A里包含V1、V2两个体单元的属性;分界面E和F尖灭于BCD面,BCD面共涉及了4个体单元(V2、V3、V4、V5),显然不符合前述“每个面最多允许邻接两个体单元”的原则,因此,用分界面E与分界面F在面BCD上的尖灭点(交点)将BCD面一分为三:B面、C面及D面。这样,分界面B仅涉及两个体单元:V2和V3,并将V2和V3两个体单元的属性赋予B公用面,同理,分界面C赋予V2和V4的体拓扑属性,分界面D赋予V2和V5的体拓扑属性。G涉及V5和透镜体V6,故具有V5和V6的属性。从体单元的角度来看,V1仅包括曲面A;V2则由分界面A、B、C、D合围而成;V3由分界面B、E合围而成;V4由分界面C、E、F合围而成;V5由分界面D、F、G合围而成;透镜体由分界面G封闭形成。若透镜体V6内物性还有所不同,可以再给定一个分界面将它划分为不同的体来继续细分该体,直至所有的体单元都满足“二体式”数据结构的要求。

二体式数据结构具有以下特点:(1)体与体相接触处只有一个公共面,公共面上的结点也是公用的,而三维模型是由大量的体单元组成的,很显然,这种

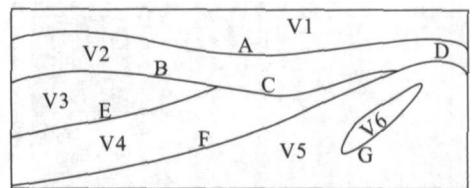


图2 二体式结构的三维模型表达示意图

Fig.2 Sketch of 3D model of Two-body

结构比所有体单元都有独立的结点和面,能够较大幅度地节省存贮空间。(2)由于减少了大量要处理的对象,因而可以较大幅度地提高体单元运算的处理速度,也就较大幅度降低了对硬件的要求。(3)由于二体共有一部分结点,拥有共同的分界面,其面上的所有的结点由两个体单元共有,因而体之间无缝。(4)由于各体单元是无缝接触,因而不但便于管理,而且也提高了模型的精度。图 3 是依据二体式结构原理建立的三维模型。

**1.2.2 二体式数据结构的建模方法** “二体式结构”的提出和使用,提供了一种新的三维建模技术,即把三维建模问题转换为采用各个单元的分界面对一个简单的规则实体进行反复切割的过程。具体步骤如下:

(1)搜集研究区测绘与地质资料;

(2)确定研究区的边界,选择建立一个比研究区稍大的长方体或正方体(要求完全包含研究区三维空间),作为初始的体对象(即原始体)。图 4 是原始体对象的剖面示意图,此时的原始体是一个简单的单一空间体;

(3)建立各个地质分界面,如地表面、各地层界面、岩浆侵入界面、地上或地下水位面、各级风化面、各断层等构造界面;

(4)以地表面剪切原始体,并叠加地表各类信息形成地表面;

(5)以一定的顺序(如各地质单元产生的先后顺序),用各地质界面剪切原始体,并赋予相应的地质属性,如地层类就赋予相应的地层属性等等;从而建立各个地质单元体,并形成初步的研究区三维模型。见图 5,用 S1 面剪切原始体后,此时的原始体被切割成两个体 V1 和 V2, S1 面是分界面,也是两体的公用面。见图 6,用 S2、S3、S4 面切割体 V2;首先用

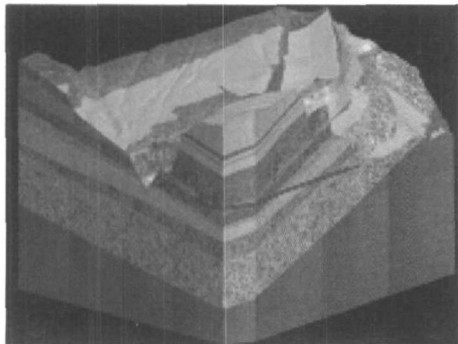


图 3 中国南方某地三维地质模型

Fig. 3 3D model for one place in southern China

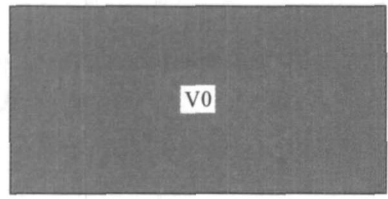


图 4 原始体对象的剖面示意图

Fig. 4 Sketch map of section original object

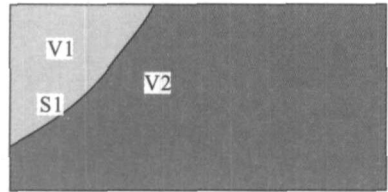


图 5 用 S1 面剪切原始体得到 V1 和 V2 两个体

Fig. 5 V1 and V2 obtained by surface S1 cutting original object

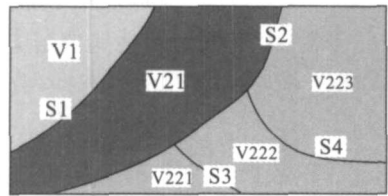


图 6 用 S2、S3 等面切割体 V2 的剖面示意图

Fig. 6 The section sketch map of cutting the object V2 by using surfaces S2, S3 and so on

S2 面剪切 V2, 得到 V21 和 V22 两个体, V22 体再被 S3 和 S4 面切割, 得到 V221、V222 和 V223 三个体。此时原始体已经成为 V1、V21、V221、V222 和 V223 五个体的组合体。依次类推, 用各地质界面多次反复剪切原始体, 使原始体由单一的空间体成为复杂的地质空间实体;

(6)以地表研究区边界线(可以是任意形状)剪切整个三维模型, 形成最终的成果模型。

这种建模方法具有以下几个主要优点:(1)大幅度降低了采用传统 B-Rep 方法建立三维模型的数据量, 又保留了该方法显著的优点;(2)将建模的过程转换为直观的、可由用户控制的剪切过程;(3)上述两条优点可加快建模的速度和可控制性, 使所建三维模型既符合用户的各项要求, 又可以降低对硬件的要求, 提高建模的速度, 具有更广泛的用途。

**1.3 虚拟现实**

矿产资源勘查虚拟现实技术包括数据获取、模型建立和虚拟场景控制三部分。数据获取是地质勘

查虚拟现实实现的基础,模型建立是利用所获取的数据建立研究区的三维模型,虚拟场景控制是把地质体二维或三维数据从外视的平面三维转换为内视的立体三维,使人产生身临其境的沉浸感,有利于更全面、更深入地观察与分析研究对象。

目前虚拟现实的建模方式主要是采用基于图像的建模(IBM:Image-Based Modeling)技术,用一组采样图像来建立VR环境的模型,可以广泛应用于建筑、机械设计、医学等领域。但是,在绝大多数情况下,地下地质体的结构图像基本无法获取,因而单纯的IBM技术在地质勘察虚拟现实方面遇到很大的困难。

在地质领域,传统的建模方式采用基于数据的建模(DBM:Data-Based Modeling)技术,依据获取的地质勘察数据和基于这些数据制作二维地质图(如剖面图和平面图等)等来建立地下地质体的三维模型。因而,矿产资源勘察虚拟现实的实现必须采用DBM技术和IBM技术相结合的思路。这样就可以在技术层面把地学领域传统的三维可视化和空间分析技术与具有沉浸感的虚拟立体三维技术有机地结合起来,在充分利用现有技术的基础上,研究地学领域的虚拟现实技术,把传统的“外视”平面三维上的观察与分析方式转变为“身临其境”的表达、观察与分析方式。

平面三维到立体三维的转换至少要满足3个条件:有透视效果、有正确的明暗虚实变化和双眼的空间定位效果。传统的显示方式(平面三维)可以实现前两点,但是无法实现第三点,因而,虚拟现实的立体显示技术也就是能够再现空间定位感的显示技术。立体显示技术主要有分色、分光、分时和光栅4种(方小峰,2007;侯庆和陈孝威,2007)。这4种技术都是采用相应的技术手段,实现基于双眼视觉的立体观察与显示效果,一般需要经过两个步骤:(1)通过间隔渲染出供左眼和右眼观看的画面;(2)将画面输送给双眼,给左眼观看的画面只能让左眼看到,给右眼观看的画面只能让右眼看到,从而产生与画面对应的立体感。

本文采用DBM和IBM相结合的方法,把地质体的三维仿真分为3个层次:简单转换方式、静态演示方式和动态分析方式。简单转换方式是利用现有的仿真软件,对一些图片或图像进行立体转换并演示;静态演示方式采用IBM技术把DBM产生的图像立体化,对需要的静态成果(如三维模型)以一定的既定方式进行演示;动态分析方式是对目前地质

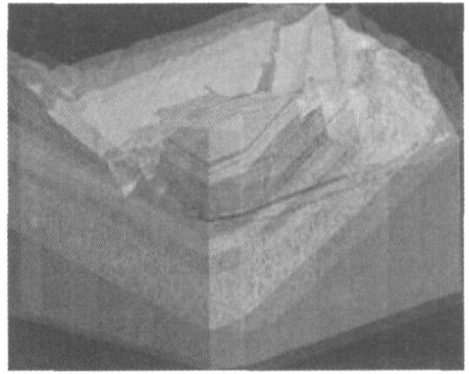


图7 对图3进行立体转换后的三维模型

Fig.7 3D model for virtual reality of fig.3

勘察领域常用的软件进行立体仿真改造,适用于实时分析演示,对计算机的性能、硬盘调用速度和网络传输速度(带宽)有较高的要求。本部分的主要技术是立体像对的产生和立体输出技术,立体像对的产生即三维场景的立体显示是把要显示的所有对象转化为立体像对,使画面具有立体感,从而为虚拟现实的逼真输出奠定基础;立体输出技术是把产生的立体像对通过虚拟现实设备表达出来,营造一种身临其境的沉浸感。

图7是把图3进行立体转换后的立体三维图,通过立体眼镜或三维仿真设备可以看到鲜明的立体效果(因不同设备的最佳设置不同,其他类似设备观察的效果会有所区别)。

## 2 结论

数据管理、三维模型和虚拟现实分别是矿产资源地质勘查信息处理的数据流中心、应用中心和展示中心,基于“3C”的结合与集成,可以提高表达地质体的多种技术方法的集成度,从而降低实际工作流程的连续性与应用技术的隔离性问题的影响,有效地为地质勘查的全程提供数据支持和直观的空间研究支持;二体式数据结构及其衍生的二体式数据结构的矢量剪切建模方法,提出了一种新的从数据组织到地质实体三维建模的技术方法,在地质三维空间描述方面,比传统的CSG、B-Rep和扫描法具有更好的适用性;“外视”平面三维向“内视”仿真三维的转换与结合以一种身临其境的虚拟环境对地质实体的空间表达与分析研究提供了更直观、更全面的技术支持。

“3C”的结合与集成可以对矿产资源勘查的数

据采集、数据整理、数据分析、地质图制作、三维建模、空间分析、数据或结果的表达等多个环节提供全程技术支持,是一种系统表达地质实体的新方法,具有良好的应用前景。

## References

- Bastante, F. G., Taboada, J., Alejano, L. R., et al., 2005. Evaluation of the resources of a slate deposit using indicator Kriging. *Engineering Geology*, 81(4): 407—418.
- Buchele, S. F., Crawford, R. H., 2004. Three-dimensional halfspace constructive solid geometry tree construction from implicit boundary representations. *Computer Aided Design*, 36(1115): 1063—1073.
- Cervera, E., Trevelyan, J., 2005. Evolutionary structural optimisation based on boundary representation of NURBS. Part II: 3D algorithms. *Computers & Structures*, 83(23—24): 1917—1929.
- Du, D. S., 1995. Integration and application of GPS and RS and GIS. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, Wuhan, 200—209 (in Chinese).
- Elber, G., Shapiro, V., 2004. Editorial to special issue on solid modeling theory and applications. *Computer Aided Design*, 36(1115): 1011—1012.
- Fang, X. F., 2007. 3D simulation designing system for urban planning based on virtual reality. *Computer Simulation*, 24(3): 230—234, 285 (in Chinese with English abstract).
- Fleisig, R. V., Spence, A. D., 2005. Techniques for accelerating B-Rep based parallel machining simulation. *Computer Aided Design*, 37(12): 1229—1240.
- Hou, Q., Chen, X. W., 2007. Simulation about liquid based on OpenGL. *Application Research of Computers*, 24(2): 186—188 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. R., 1997. On definition, theory and key technics of the integration of GPS, RS and GIS. *Journal of Remote Sensing*, 1(1): 64—68 (in Chinese with English abstract).
- Lions, J. L., Pironneau, O., 1999. Domain decomposition methods for CAD. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series I -Mathematics*, 328(1): 73—80.
- Liu, J. Q., 2007. Research and application in 3D information system of water conservancy and electricity engineering geology (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Q., Huang, C. Q., Wu, C. L., 2007. Management strategy and realized methods for geological information of Yangtze River embankment engineering. *Journal of*

*Yangtze River Scientific Research Institute*, 24(4): 38—41 (in Chinese with English abstract).

- Liu, J. Q., Zhou, X. Z., Wu, C. L., et al., 2008. The problem of technology integrated to process geological information for water conservancy and electricity engineering. *The Yangtze River*, 39(12): 58—60, 105 (in Chinese).
- Mun, W. L., Surendra, R., 2003. Pose-invariant face recognition using a 3D deformable model. *Pattern Recognition*, 36(8): 1835—1846.
- Reed, M. K., Allen, P. K., 1999. 3-D modeling from range imagery: An incremental method with a planning component. *Image and Vision Computing*, 17(2): 99—111.
- Sen, D., Srikanth, T. K., 2008. Efficient computation of volume fractions for multi-material cell complexes in a grid by slicing. *Computers & Geosciences*, 34(7): 754—782.
- Shih, F. Y., Gaddipati, V., 2005. Geometric modeling and representation based on sweep mathematical morphology. *Information Sciences*, 171, 1—3: 213—231.
- Tian, Y., Peters, C. D., Kumar, S. V., et al., 2008. High-performance land surface modeling with a Linux cluster. *Computers & Geosciences*, 34(11): 1492—1504.
- Wang, Y., 2007. Periodic surface modeling for computer aided nano design. *Computer Aided Design*, 39(3): 179—189.
- Wu, C. L., 1998. Development and applications of geological and mineral resources point-source information system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 193—198 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 杜道生, 1995. GPS、RS、GIS 的集成与应用. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 200—209.
- 方小峰, 2007. 基于虚拟现实的城市规划三维仿真设计系统. 计算机仿真, 24(3): 230—234, 285.
- 侯庆, 陈孝威, 2007. 基于 OpenGL 的流体交互式仿真. 计算机应用研究, 24(2): 186—188.
- 李德仁, 1997. 论 RS、GPS 与 GIS 集成的定义、理论与关键技术. 遥感学报, 1(1): 64—68.
- 刘军旗, 2007. 水利水电工程地质三维信息系统研究与应用 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 刘军旗, 黄长青, 吴冲龙, 2007. 长江堤防工程地质信息管理策略及实现方法. 长江科学院院报, 24(4): 38—41.
- 刘军旗, 周兴龙, 吴冲龙, 等, 2008. 水电工程地质信息处理技术集成问题探讨. 人民长江, 39(12): 58—60, 105.
- 吴冲龙, 1998. 地质矿产点源信息系统的开发与应用. 地球科学——中国地质大学学报, 23(2): 193—198.