

空间数据 三维建模 与可视化

Spatial Data

王占刚 朱希安◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

空间数据三维建模与可视化

王占刚 朱希安 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

空间数据三维建模与可视化/王占刚, 朱希安著. —北京: 知识产权出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-5130-3761-7

I. ①空… II. ①王… ②朱… III. ①空间信息系统—系统建模 ②空间信息系统—可视化仿真 IV. ①P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 215189 号

内容提要

以空间地质体和虚拟树木等复杂对象为目标, 系统介绍三维地理信息系统中空间数据三维建模及可视化方法。主要内容包括三维地质建模方法、三维地质模型可视化、模型处理与三维交互、基于规则的树木三维建模、模型参数计算等。

责任编辑: 栾晓航

责任校对: 董志英

封面设计: 京华诚信

责任出版: 孙婷婷

空间数据三维建模与可视化

王占刚 朱希安 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号 (邮编: 100088)

天猫旗舰店: <http://zscqcb.tmall.com>

责编电话: 010-82000860 转 8382

责编邮箱: luanxiaohang@cnipr.com

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 720mm×960mm 1/16

印 张: 15

版 次: 2015 年 9 月第 1 版

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

字 数: 266 千字

定 价: 48.00 元

ISBN 978-7-5130-3761-7

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

简 介

三维地理信息系统是在二维地理信息系统基础上，将地理学、遥感、全球定位系统、立体几何、图形学和虚拟现实等学科与技术融为一体，针对具有三维地理参考坐标的空间信息进行采集、组织、编辑、显示、查询、分析、模拟和输出的计算机系统。三维空间数据模型组织及其构建方法是3D-GIS领域内的研究热点和难点，也是空间信息可视化的重要基础。尤其是面向一些复杂的空间实体时，以真三维的形式更能准确表达这些研究对象。

本书以地下的三维地质模型和地上的虚拟树木模型为研究对象，希望通过这两种典型的复杂空间对象介绍空间数据三维建模及其可视化应用的理论、技术、方法和实践。本书内容依据“模型建立-模型构建-可视化表达-模拟应用”的思路进行组织，依据研究对象分为上下两篇，其中上篇介绍了地理信息系统和三维地理信息系统的概念与研究内容，阐述了三维空间数据模型及其可视化的研究现状和发展趋势；重点描述了基于改进三棱柱的三维地质模型、数据结构、拓扑关系及其建模算法；详细介绍了三维地质模型的可视化形式、应用方法和可视化系统设计。下篇重点介绍了面向空间特征的树木三维模型、建模方法及其空间化处理过程；详细阐述了基于树木模型的冠层光合有效辐射分布模拟的过程，并进行了实证研究。

本书的出版得到了国家科技重大专项——煤层气田地面集输信息集成及深度开发技术科研项目（项目编号：2011ZX05039-004-02）的资助，在此表示衷心的感谢。

本书结构安排合理，层次清晰，内容翔实，适合从事煤层气勘探、地质、矿山开采、林业管理、测绘、城市规划等领域的研究开发人员及相关专业的教师、学生参考使用。

前 言

从 20 世纪 60 年代开始以来,地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 作为一门多领域交叉学科,从最初应用于计算机辅助制图,直至今天广泛应用于各行各业, GIS 已经成为世界各国政府部门、科研机构、高等院校和商业公司极为关注的热点领域。地理信息系统结合地理学、地图学、遥感和计算机科学等,主要包含描述、存储、分析和输出地理信息的理论和方法体系。二维地理信息系统 (2D-GIS) 本质上是基于抽象符号的系统,多是以二维或假三维 (2.5 维) 的形式来表达空间对象和地理现象,不能给人以现实世界的三维真实感受,研究人员很难理解真实的地理实体及其分布。尤其是面对一些复杂的空间实体时,例如地质体、地质构造、树木等研究对象在客观世界中均是以三维形式存在的,这就要求我们以真三维的形式来准确描述这些地理对象,而三维地理信息系统 (3D-GIS) 为我们提供了解决的方法。

3D-GIS 是在 2D-GIS 基础上,将地理学、遥感、全球定位系统、立体几何、图形学、虚拟现实等学科与技术融为一体,针对具有三维地理参考坐标的空间信息进行采集、组织、编辑、显示、查询、空间分析、模拟和输出的计算机系统,它突破了二维图形表现形式的约束,为更好地观察和理解客观世界提供了更丰富的选择。3D-GIS 除了能表现空间对象之间的平面关系,还能表达其垂向关系 (z 轴关系),可以进行三维空间分析,向用户真实再现空间对象与地理现象,给人以更逼真的感受。3D-GIS 发展至今,已经在众多领域得到广泛应用,尤其在矿产地质、土地利用、城市规划、地下管线、智能交通、设施管理、环境监测、应急指挥、虚拟旅游等领域备受青睐。

三维空间数据模型是 3D-GIS 领域内的研究热点和难点,也是空间信息可

视觉化的重要基础。三维空间数据模型是人们对于客观世界中各种对象及其关系的一种抽象模拟,它主要描述空间对象的空间形态、空间属性及其相互之间的拓扑关系等信息。三维空间数据可视化就是利用可视化技术将模型的空间形态以及各种属性信息以真三维的形式表达出来,使研究人员能观察和模拟,从而丰富了科学发现的过程,给予人们意想不到的洞察力,为空间数据描述与分析提供支持。

伴随着三维建模、虚拟现实等技术的不断发展,直至现在的广泛应用,本书作者从事三维建模与可视化至今已有15年的时间了,期间也参与了不少三维模拟、虚拟现实系统的研究与开发工作,从地质三维建模、区域虚拟场景、采油区地震勘探三维可视化到树木冠层辐射传输过程模拟,既有理论研究,又有基于虚拟现实、3D-GIS系统的实践开发。使用的三维开发库从早期的OpenGL到现在的OSG、Ogre,三维开发平台从Multigen Creator和Vega到Unity 3D,技术日新月异,工具推陈出新,但其中原理、模型与方法仍然是适用的。本书中的研究内容来源于作者多年来的研究积累,是作者对复杂对象空间数据建模及可视化应用研究成果的总结,当然也借鉴参考了国内外多位同行的学术成果。

本书以地下的三维地质模型和地上的虚拟树木模型为研究对象,希望通过这两种典型的复杂空间对象介绍空间数据三维建模及其可视化应用的理论、技术、方法和实践。本书的研究内容依据“模型建立-模型构建-可视化表达-模拟应用”的思路整理。

全书共分8章,依据研究对象本书可分为上下两篇。上篇以地下的三维地质模型为研究对象,包含第1章至第5章。

第1章作为入门概述,从整体上介绍了地理信息系统和三维地理信息系统的概念、研究内容、特点和组成等,重点阐述了三维空间数据模型和三维空间数据可视化的研究现状和发展趋势。

第2章分析了现有主流三维地质模型研究成果,面向建模需求提出了基于改进三棱柱的三维地质模型,构建了完整的数据结构,并在数据结构中构建了拓扑关系。

第3章提出了两个构建三维地质模型的实现算法。一个是针对连续体与连续体中止的建模方法,可以解决像连续地质体构模、地层尖灭和分叉等地质构造描述的问题;另一个是针对连续体、连续体中止及连续体错断的建模

算法,不仅能够解决前述算法所针对的问题,同时还可以处理断层构造这样的连续体错断问题。

第4章提出了面向三维地质模型的表达方式、模型处理、可视化挖掘方案,除对地质模型本身的可视化外,还能够通过直接三维交互实现对于模型的各种操作,如平移、放缩、旋转、属性查询等;另外,研究了表达地质模型内部信息的任意切割、动态切片、虚拟钻探、虚拟漫游、动画演示、透明切片、透明钻探等功能的实现算法;对于模型的显示,在按地层管理的基础上还实现了反走样、消隐、融合、纹理贴图、透明、显示模式选择和地层颜色定制等三维可视化方式。将直接三维交互作为主导的人机交互方式,并且结合系统提供的可视化功能进行信息交互。最后介绍了三维可视化技术在空间数据挖掘中的应用及其关键技术。

第5章介绍了三维地质模型的可视化系统设计,实现了研究的可视化解决方案。

下篇以地上的虚拟树木模型为研究对象,包含第6章至第8章。

第6章分析树木的主要构件与基本参数,提出面向对象的矢栅混合树木模型。在树木模型的基础上提出骨架拓扑模型,并详细描述了主干、枝段、枝条和树叶之间的五组拓扑关系。结合 L-systems 和三维几何结构方法的优势提出基于规则的三维树木建模方法。在树木形态结构分析的基础上,将分枝策略和叶片空间分布特征转化为规则,利用 L-systems 实现。通过实测数据对已经建立的树木模型进行约束实现校正。约束的主要内容包括树木结构约束、单叶尺寸约束、叶面积指数约束、随机性的约束4个方面。

第7章采用基于个体的方法建立树木群体三维模型,描述树木群体在水平和垂直方向上的空间结构。利用八叉树模型对树木的局部空间环境进行剖分。提出了树木冠层八叉树的剖分算法,并且在剖分过程中利用紧凑八叉树模型为每一个叶结点中的叶片集合建立最小包围盒。基于树木三维模型进行模型参数计算的研究,主要分为两部分:一是基本形态结构参数计算,二是基于三维模型的生物物理参数计算。

第8章针对树木模型提出基于正向光线跟踪的辐射传输模型。详细阐述了太阳辐射空间化模型与冠层辐射传输的过程,在叶片光学特征分析的基础上将该模型应用于树木冠层 PAR 分布模拟中,同时还可以得到冠层的反射率、透射率和吸收率等重要参数。

本书依托国家科技重大专项——煤层气田地面集输信息集成及深度开发技术（项目编号：2011ZX05039-004-02），对复杂对象的空间数据三维建模及其可视化应用进行了系统阐述，并得到了该科研项目的资助，在此表示衷心的感谢。

由于3D-GIS和空间数据三维建模发展迅速，且作者水平有限，成书时间仓促，书中难免出现错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2015年7月10日

目 录

上篇 三维地质建模篇

1 绪 论	3
1.1 引 言 / 3	
1.2 三维地理信息系统 / 4	
1.2.1 地理信息系统 / 4	
1.2.2 三维地理信息系统 / 6	
1.2.3 三维地理信息系统若干思考 / 9	
1.3 三维空间数据模型 / 10	
1.3.1 空间数据模型 / 10	
1.3.2 三维空间数据模型 / 10	
1.3.3 各种模型优缺点 / 14	
1.3.4 三维空间数据模型研究中的若干问题思考 / 14	
1.4 三维空间数据可视化 / 15	
1.4.1 科学计算可视化 / 15	
1.4.2 空间数据可视化 / 16	
1.4.3 三维空间数据可视化 / 19	
2 基于改进三棱柱的三维地质模型	24
2.1 TIN 模型与 TEN 模型概述 / 24	
2.1.1 TIN 模型与其数据结构 / 24	
2.1.2 TEN 模型与其数据结构 / 26	

2.2	基于改进三棱柱的数据模型 / 28	
2.3	基本数据结构 / 29	
2.4	拓扑关系描述 / 33	
3	三维地质模型建模算法	40
3.1	典型建模方法概述 / 40	
3.1.1	基于 TIN 模型的建模方法 / 40	
3.1.2	基于 TEN 模型的建模方法 / 42	
3.1.3	本书提出的两种建模方法 / 42	
3.2	针对连续体与连续体中止问题的建模方法 / 43	
3.2.1	连续体边界面的三角剖分 (TIN) / 43	
3.2.2	垂直连体 / 45	
3.3	针对连续体、连续体中止及连续体错断问题的建模 / 47	
3.3.1	连续体边界面的三角剖分 (TIN) / 47	
3.3.2	垂直连体 / 47	
3.3.3	关于断层处理的几点说明 / 49	
3.4	拓扑关系的建立 / 50	
3.4.1	点与线、线与三角形的拓扑关系建立 / 51	
3.4.2	三角形与三棱柱的拓扑关系建立 / 51	
4	三维地质模型可视化与应用	53
4.1	模型的可视化形式 / 53	
4.1.1	真三维显示 / 53	
4.1.2	真实感显示 / 54	
4.1.3	动态显示 / 55	
4.1.4	多种模式显示 / 55	
4.1.5	其他可视化形式 / 56	
4.2	模型的几何变换 / 57	
4.2.1	平移 / 58	
4.2.2	旋转 / 58	
4.2.3	放缩 / 58	

- 4.3 模型切割 / 59
 - 4.3.1 切割定义 / 59
 - 4.3.2 切割原理 / 60
 - 4.3.3 切割算法流程 / 62
 - 4.3.4 算法描述 / 63
- 4.4 模型应用 / 63
 - 4.4.1 切片 / 63
 - 4.4.2 虚拟钻探 / 65
 - 4.4.3 虚拟漫游 / 68
 - 4.4.4 透明切片与透明钻探 / 69
- 4.5 直接三维交互的实现 / 70
 - 4.5.1 直接三维交互原理 / 71
 - 4.5.2 几何变换的三维交互 / 71
 - 4.5.3 切割及应用的三维交互 / 72
- 4.6 可视化空间数据挖掘 / 76
 - 4.6.1 可视化与空间数据挖掘 / 76
 - 4.6.2 可视化在空间数据挖掘中的应用 / 79
 - 4.6.3 可视化空间数据挖掘实例 / 82
- 5 三维地质模型可视化系统设计与实现 83
 - 5.1 三维地质模型可视化相关软件 / 83
 - 5.1.1 国内外相关软件 / 83
 - 5.1.2 存在的问题 / 84
 - 5.2 系统开发环境 / 85
 - 5.2.1 Visual C++ / 85
 - 5.2.2 三维图形开发库 OpenGL / 86
 - 5.3 系统总体设计 / 87
 - 5.3.1 系统总体流程 / 87
 - 5.3.2 系统框架 / 88
 - 5.4 数据库结构设计 / 88
 - 5.4.1 原始数据 / 88
 - 5.4.2 数据表设计 / 89

- 5.5 系统功能模块 / 91
 - 5.5.1 系统功能模块概述 / 91
 - 5.5.2 模块设计 / 92
- 5.6 系统界面设计 / 96
 - 5.6.1 界面设计依据 / 96
 - 5.6.2 主体界面描述 / 97
- 5.7 三维地质模型可视化系统应用结果 / 101
 - 5.7.1 总体模型 / 101
 - 5.7.2 多种模式的模型展示 / 101
 - 5.7.3 多种应用的模型展示 / 102
- 参考文献 / 107

下篇 虚拟树木建模篇

- 6 面向空间特征的树木三维建模方法 115
 - 6.1 研究背景和意义 / 115
 - 6.2 虚拟树木建模研究进展 / 118
 - 6.2.1 虚拟树木模型 / 118
 - 6.2.2 虚拟树木建模方法 / 120
 - 6.3 树木形态结构特征分析 / 124
 - 6.3.1 树木主要构件及其形态参数 / 124
 - 6.3.2 形态结构特征分析 / 126
 - 6.4 面向对象的矢栅混合树木模型 / 129
 - 6.4.1 模型描述 / 130
 - 6.4.2 模型数据结构 / 131
 - 6.4.3 拓扑结构描述 / 138
 - 6.5 基于规则的三维树木建模方法 / 139
 - 6.5.1 典型树木建模方法 / 140
 - 6.5.2 建模规则与策略 / 142
 - 6.5.3 基于规则的建模算法 / 145
 - 6.5.4 树木模型校正 / 150

7 树木群体三维建模及其空间化处理	156
7.1 树木群体空间结构 / 156	
7.2 研究方法 / 156	
7.3 树木群体三维模型 / 157	
7.3.1 模型描述 / 157	
7.3.2 建模方法 / 158	
7.3.3 树木群体拓扑结构描述 / 161	
7.3.4 结果与分析 / 163	
7.4 基于八叉树的树木空间剖分 / 164	
7.4.1 树木空间化处理 / 164	
7.4.2 八叉树基本原理 / 165	
7.4.3 八叉树在树木空间剖分中的应用 / 166	
7.4.4 结果与分析 / 169	
7.5 三维模型空间计算方法 / 171	
7.5.1 模型形态结构参数计算 / 171	
7.5.2 基于三维模型的参数计算 / 173	
8 树木冠层光合有效辐射分布模拟	184
8.1 冠层辐射分布模型研究进展 / 184	
8.1.1 指数递减模型 / 184	
8.1.2 基于三维模型的辐射分布模拟 / 185	
8.2 冠层辐射分布研究方法 / 186	
8.3 太阳辐射空间化模型 / 187	
8.3.1 太阳辐射概述 / 188	
8.3.2 太阳辐射位置参数 / 190	
8.3.3 太阳辐射空间化模型 / 191	
8.4 光线跟踪技术在辐射传输中的应用分析 / 195	
8.4.1 光线跟踪与辐射度的比较 / 195	
8.4.2 光线跟踪基本原理 / 196	
8.4.3 应用分析 / 197	

8.5	基于正向光线跟踪的辐射传输模型 / 198	
8.5.1	模型假设 / 198	
8.5.2	冠层辐射传输过程 / 198	
8.5.3	叶片光学特征 / 199	
8.5.4	模型建立 / 203	
8.6	树木冠层 PAR 分布模拟结果检验与分析 / 209	
展望	212
1.	三维地质模型研究展望 / 212	
2.	虚拟树木模型研究展望 / 213	
参考文献	214



上 篇

SHANG PIAN

三维地质建模篇



1 绪 论

1.1 引 言

空间信息获取技术的快速发展，特别是地理信息系统（Geographic Information System, GIS）、高分辨率遥感遥测、全球定位等技术的广泛应用，使得地理空间的数据量快速增长，并且有加速增长的趋势。首先，空间数据具有空间特性（如拓扑、距离、方位等），其分析处理大都基于空间位置关系，同属性数据不同，空间多维数据是相互关联且不可以分开处理的；其次，空间数据本身具有海量、多尺度、多维、位置相关、自相关、非结构化等特点，这使得面向空间知识的处理分析更加困难。三维可视化、虚拟现实、增强现实等技术的应用有力促进了空间数据表达技术的发展，使得空间数据应用的深度和广度得到了前所未有的发展。

由于地学现象的复杂性以及地理过程的不确定性，利用传统的数据查询检索、空间分析和统计等方法难以有效而迅速地处理和分析日益丰富的数据，解译这些数据已经远远超出了人的能力范围，隐含在数据背后的知识和信息不能被充分认识和利用，于是导致了“数据丰富、但信息贫乏”、“人们被数据淹没，但却饥饿于知识”等现象。因此，人们迫切需要一件强有力的工具来处理和分析这些日益复杂的海量空间数据并挖掘和利用隐藏在它们背后的信息与知识，为我们的科学研究与决策提供服务。

数据可视化正是在这样的应用需求环境下应运而生，并在蓬勃发展的过程中越来越显示出其强大的生命力。可视化技术涉及计算机图形学、图像处理、计算机辅助设计、计算机视觉及人机交互技术等众多领域，其基本思想是“用图形图像来表示数据”。可视化技术将计算机图形学、图像处理和人机交互技术结合起来，从复杂的多维数据中产生图形展示客观事物及其内在的