

地层的四面体剖分及其数据对象的组织

路明月, 盛业华, 温永宁, 张桂英

(南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 地理科学学院, 南京 210097)

摘要: 为了对非连续地层内部进行有效地表达、分析, 本文基于三棱柱模型对其进行四面体剖分。在对三维对象拓扑关系进行精心设计的基础上, 利用面向对象的思想, 对点、线、面、体在不同层次上进行逻辑分离, 并提出对象管理器的概念进行针对性地组织、管理。采用适当的数据结构描述不同的空间对象及其拓扑关系, 结合有效的索引方式加快拓扑对象唯一性匹配的过程, 很大程度上提高了拓扑对象的生成速度及空间查询效率。最后, 在对地层进行四面体剖分的实例中得到了正确的验证。

关键词: 三维体模型; 四面体剖分; 拓扑关系; 对象管理器

1 引言

随着 GIS 技术的发展, GIS 作为二维空间信息的组织、存储、管理、查询等的平台已经趋于成熟, 但在三维领域功能依然十分薄弱^[1]。三维数据模型与组织作为三维地理空间对象有效表达、查询、显示、分析的关键, 成为国内外相关领域研究的热点。基于不同的应用领域提出了多种数据模型。这些模型, 就数据描述格式而言, 可以分为: 矢量数据模型, 栅格数据模型以及前两者的混合模型; 就三维对象的表达方式而言, 可归纳为: 三维对象表面模型、三维空间剖分或镶嵌模型(三维对象体模型)以及前两者的混合模型^[2]。这些模型大多是在二维空间数据模型和三维实体造型系统基础上发展起来的, 各有侧重及应用领域的限制, 并且属于概念模型和逻辑模型, 尚未以具体的数据结构实现大规模三维数据的组织和存储。其中, 三维体模型以有限分割的规则或不规则体元充满整个对象空间, 以实现三维空间对象内部的描述、分析与可视化。对于岩(地)层或者地质体以及地勘工程一般采用三棱柱^[1]或者准三棱柱^[2]及广义三棱柱^[3]进行建模。这种三棱柱(族)模型在描述连续的地质体具有很多优势, 但描述复杂对象时, 如在断层、褶皱等存在的情况下, 则存在困难。为了更好地表述并分析非连续的三维空间对象, 需要将三棱柱模型转换为四面体

模型。本文在前人研究的基础上, 提出一种易于实现拓扑关联的转换算法。其中, 重点针对大量三维实体的构建及其相互拓扑关系非常复杂, 往往难以明确表示的问题, 按照面向对象的思想, 提出一种三维体模型中空间对象及其拓扑关系的组织与管理方式, 并在应用中得到有效性验证。

2 三棱柱向四面体的转换

2.1 三棱柱转换四面体的方法

将地层以三棱柱进行建模, 然后再将三棱柱剖分为四面体, 已经有很多成熟的算法。唐圣泽提出了 8 种不同的分解方式如图 1 所示(其中第 0, 7 种为无效剖分)^[4]。龚健雅等^[1]在上述的方法的基础上, 设定一个三棱柱中心点, 并将该点分别和三棱柱的顶点连接, 构成 2 个四面体与 3 个金字塔体; 每个金字塔体再分解为 2 个四面体。以上这些算法, 当具备严格拓扑关系的三维对象的数量庞大时, 往往难以实现。文中在此基础上加以改进, 首先以三棱柱的两个三角面的内心的连线中点作为三棱柱的体心, 然后连接三棱柱的各个顶点, 构成 2 个四面体, 与三个金字塔体, 在每一个金字塔的底盘(四边形)中设定一个中心点(本文选定两条对角线中心连线的中点), 分别连接四边形的四个顶点, 构成四个三角形面, 然后和金字塔的顶点相连, 构成 4 个四面体,

收稿日期: 2006-06-15; 修回日期: 2007-03-09.

资助项目: 本项目获国家自然科学基金(40671147), 博士点基金(20060319004), 江苏省高校重大基础研究基金(05KJA17001)资助。

作者简介: 路明月(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为: 虚拟地理环境技术, 三维数据模型。E-mail: lumingyue9@tom.com

这样每个三棱柱就剖分成了 14 个不含拓扑关系的四面体(如图 2 所示)。在对地层进行四面体剖分时,将会产生大量的点、线、面、体元空间对象。为了便于三维对象的查询分析,需要在这些大量的空间对象中建立严格的拓扑关系。

图 1 三棱柱转换四面体的 8 种方法

Fig.1 The eight methods for transforming three- prism into tetrahedron

图 2 三棱柱转换成 14 个四面体的方法

Fig.2 The method for transforming three- prism to tetrahedron

2.2 拓扑关系的组织

文中按照拓扑对象点、线、面、体的顺序,层层构建,层层关联。每一个拓扑对象中都包含着与自身相邻接的拓扑对象的信息。如在拓扑边中,包含了构建自身的邻接节点信息以及由该拓扑边构建的邻接拓扑面的信息,具体组织如图 3 所示。同类拓扑对象之间的拓扑信息,由下一级拓扑对象来体

图 3 空间对象的拓扑信息组织

Fig.3 The structure for the topological information of spatial objects

现。如果两个拓扑面同在一条拓扑边的邻接面列表中,则该两个面以该边为公共边相邻接。如果两个拓扑面各有一边共用顶点,则该两面为顶点邻接。同理,体元之间的相邻、相离等拓扑属性也是通过构成这个体的拓扑面来体现的。这样,点、线、面、体元之间的拓扑关系便可以清晰表现。这些具备严格复杂拓扑关系的对象在存储中必须遵循唯一性原则,才能保证整个拓扑系统的有效性。

3 三维空间数据管理方案

在三维体模型中,空间拓扑对象的数据量庞大,相互之间的拓扑关系严格而复杂,并且要确保其在存储空间中的唯一性,这就给空间对象的管理带来困难。为此,文中在对空间对象进行逻辑分离(层)的基础上,引入对象管理器进行组织、管理。

3.1 三维空间对象的逻辑分离(层)

为了将真实世界的三维实体对象及其相互之间复杂的拓扑关系在数据组织中更好的表达、实现从而达到分析的目的,对其进行逻辑上的分离(层)(如图 4 所示)。

图 4 三维空间对象的逻辑分离(层)

Fig.4 The logical classification for the 3D spatial objects

普通对象是指不存在空间拓扑信息或其他语义属性的对象,在该对象中只有顶点;即普通对象是由各个顶点组成;而拓扑对象,顾名思义,即具备拓扑信息以及其他语义属性的对象。它的构建符合拓扑构建的规则(点、线、面、体层层构建);由于拓扑对象在构建中的唯一性要求,将已经通过唯一性检测,并且按照一定的数据结构存储到列表中的拓扑对象归为固态拓扑对象;对尚未进行唯一性匹配检测的拓扑对象称为游离态拓扑对象。将游离态拓扑对象进行唯一性匹配,从而转化为固态拓扑对象的过程称为游离态拓扑对象的固化。任何游离态拓扑对象固化后都会产生一个与之对应的固态拓扑对象。其固化过程如图 5 所示。在实现中,只有固态拓扑对象才可以构建高一级的拓扑对象,成为拓扑

关联或者被关联的对象。也就是说,空间对象的拓扑系统是由固态拓扑对象及其相互间的拓扑关系构成的。

空间对象快速创建的瓶颈,而固化过程中的匹配是以顶点为依据,控制好顶点的快速匹配,是解决这一问题的关键。所以,对节点采用了平衡二叉树结构,这种结构的查询匹配具备对数复杂度,可以大大缩短拓扑节点匹配固化的过程。在此基础上,利用拓扑关系进行游离拓扑边的固化,进而快速固化拓扑面、拓扑体。这种平衡二叉树存储节点结合拓扑关系的方法可以大大缩短三维对象匹配固化过程,加快拓扑对象的生成速度。特别当大量的拓扑对象生成时,其功效是十分显著的。对象管理器使得对三维对象的管理具有针对性、可扩展性,以及良好的可操作性。

图 5 游离态拓扑对象的固化流程

Fig.5 The flow chart for solidifying the dissociative topological object

3.2 对象管理器

文中引入对象管理器以实现空间数据的分离(层)思想,并对三维空间对象及其拓扑关系提供针对性的组织管理。在剖分阶段,采用合适的数据结构对不同的三维对象进行组织存储,以加快游离拓扑对象的固化过程,从而实现大规模空间拓扑对象的快速构建,并提供一系列必要的操作,维系空间对象及其相互间的拓扑关系。其设计逻辑模型如图 6 所示。考虑到在剖分阶段,拓扑对象的固化是大量

图 6 对象管理器的逻辑模型

Fig.6 The logical model of object-manager

3.3 三维对象组织与管理的逻辑模型

按照以上的设计理念,空间三维空间对象的组织管理逻辑模型如图 7 所示。

在该模型中,游离态拓扑对象通过固化存储在

图 7 空间对象组织管理的逻辑模型

Fig.7 The logical model for the structure and management of the spatial objects

对象管理器中,由固态拓扑对象层层构建高一级的拓扑对象,最后实现空间实体对象的体模型。在层次关系上,拓扑对象继承于基本(普通)对象。这样在类库的结构上,可以层次分明。将一些普通对象所具备操作,如空间三角形求外接圆、内心等,放在普通对象类中进行管理,而将与拓扑或语义属性相关的操作放在拓扑类中进行管理。让拓扑对象除了包含拓扑信息外,还包含顶点坐标信息,一方面考虑到三维空间对象的分析在很多情况下是基于顶点的,例如前面提到的唯一性检测。这样设计,就省去了顶点查找的繁琐,另一方面,也便于普通对象向顶点坐标相同的拓扑对象转换,使拓扑对象的构建更加灵活。

4 拓扑体元对象的构建

考虑到灵活性,本文设计了两种方法创建拓扑对象:一种是按照一般的拓扑创建规则,由下一级的固态拓扑对象创建。另一种是直接由普通顶点坐标创建(由普通对象升级为拓扑对象的方法)。以四面体为例,创建过程如下:

(1) 根据顶点坐标,产生游离态拓扑节点,对象管理器对其进行唯一性检测。检测失败,即固态节点列表中已经存在(数值)相同的对象,返回该固体节点对象的存储位置信息;检测成功,将该节点存

入对象管理器的节点列表中,返回该节点对象在管理器中的存储位置信息。

(2) 由固态拓扑节点构建游离态拓扑边,对象管理器对其进行唯一性检测(利用对象之间的拓扑关系),返回对应固态拓扑边的存储位置信息。然后设定其拓扑节点的邻接边信息(本拓扑边的存储位置信息)。

(3) 由固态拓扑边构建游离拓扑面,对象管理器对其进行唯一性检测,返回对应固态拓扑面的存储位置信息,然后设定其拓扑边的邻接面信息(本拓扑面的存储位置信息)。

(4) 由固态拓扑面构建游离拓扑体,鉴于体元对象的复用率很小,所以,对拓扑体元对象不进行唯一性检测,直接进行固化存储。最后设定构建该体元的固态拓扑面的邻接体的信息(本固态拓扑体的存储位置信息),基本体元构建过程结束。

这种用空间换取效率的做法,使得顶点数据重复存储,有可能出现数据的不一致性。在按照一般拓扑对象创建原则来构建拓扑对象时(如由固态拓扑边构建拓扑面),需要用面数据反推出顶点坐标。这就需要加强对象的点、线、面、体的对应关系的设置。在体模型组织方案中,三角面中的第*i*个边所对的为第*i*个顶点;四面体的第*i*个三角面对应的顶点为第*i*个顶点。若干拓扑对象的设定如图 8a, b, c 所示。

图 8 拓扑对象的点面体的对应设定

Fig. 8 The relationship among vertexes, facets and volumetric elements in topological objects

5 应用实例

文中采用实际地层进行四面体的剖分构模,其地表数据中共有 719 个点,1422 个三角面。首先构建地层对象的(类)三棱柱模型,然后再采用上述的

剖分方法,对每个三棱柱体元进行四面体剖分,并将生成的一系列普通四面体转换成具备严格拓扑关系的固态对象,从而完成了对地层的具备完整拓扑体系的四面体模型构建。按照上述三维对象组织与管理的方法,在 VC++.NET 下进行实现,结果在基于 OpenGL 开发的三维可视化平台上展现,如图 9

所示。图中,共产生了 5 000 个固态拓扑节点,26357 个固态拓扑边,41 266 个固态拓扑三角面,19 908 个固态拓扑四面体。经过检验,在整个模型的拓扑体系中,每个固态拓扑对象(拓扑节点、拓扑边、拓扑三角面片以及拓扑体元)都唯一性存在,并且相互之间的拓扑关系完全正确。这种具备完善拓扑体系的四面体模型的成功构建为关于模型的各种几何拓扑分析奠定了基础。

图 9 对单地层进行四面体剖分的结果

Fig.9 The result of partitioning stratum into tetrahedrons

6 结论

上述的应用实例,说明文中基于三棱柱模型进

行四面体剖分算法的正确性,以及基于空间对象逻辑分层并采用对象管理器进行数据组织与管理模式的有效性。文中四面体剖分的算法,可以有效地对地层中非连续复杂构造,如断层、褶皱等进行精细网格的表达、显示、分析。对象管理器为复杂的三维拓扑对象进行具有针对性、可扩展性的组织与管理创造了条件,并且能够为以后不同时期的不同需求,提供最有效的管理服务。

参考文献

- [1] 张煜,白世伟.一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用.中国图象图形学报,2001,6(3):285~290.
- [2] Gong J Y, Cheng P G. Three-dimensional modeling and application in engineering. *Computers & Geosciences*, 2004, 30,391~404.
- [3] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP)model for a 3D geosciences modeling system. *Computers & Geosciences*, 2004,30 ,405~418.
- [4] 唐泽胜.三维数据场可视化.北京:清华大学出版社,2000.

Stratum Segmentation with Tetrahedrons and Its Data Organization

LU Mingyue, SHENG Yehua, WEN Yongning, ZHANG Guiying

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, MOE, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: In this paper, discontinuous stratum is partitioned into tetrahedrons for better representation and analysis of its inner structure. In the process, topological relationships of the spatial primitive data objects, such as nodes, edges, faces and voxels, are carefully designed and decomposed topologically at different levels. An object-oriented object manager is proposed to manage these spatial data. Considering the object manager, appropriate data structure and efficient indexing are adopted to organize the spatial objects so as to accelerate the process of confirming the uniqueness of any topological object in the storage list. With the object manager, both the generation of different levels of topological objects and the spatial inquiry efficiency are greatly improved. A case study proved that this method is efficient in real stratum segmentation.

Key words: 3D volume model; tetrahedron decomposition; topological relationship; object manager