

doi:10.3799/dqkx.2010.041

基于规则库的三维空间数据模型

郑坤¹, 袁新莉¹, 刘修国¹, 黄飞²

1. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

2. 武汉中地数码科技有限公司, 湖北武汉 430074

摘要: 三维空间对象的形式复杂多样, 对象之间的空间关系尚未形成共识. 三维空间数据模型的空间及非空间关系的表达更是难以统一. 典型的三维空间数据模型包括面向实体型、面向关系型和混合型3种数据模型, 但这些模型存在诸如拓扑操作困难、对象语义描述不完整、关系表达欠缺等一系列不足. 通过分析、综合3种模型的优缺点, 以顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型为基础, 设计了基于规则库的三维空间数据模型. 这是一个将关系与对象相统一的新型数据模型. 通过对对象关系的分析研究, 引入规则的概念, 进而构建出规则库, 提出对空间对象间关系和结构统一的、完整的表达和管理方式. 结合地质、矿山等应用将该三维空间数据模型在多个城市的三维地质应用中进行成功验证. 通过应用, 说明该模型实现了空间对象的自身结构和对象之间关系的统一表达, 具备自定义、可扩展的空间对象关系表达能力, 能够适应复杂应用要求, 具有良好的应用前景.

关键词: 关系; 规则; 规则库; 三维空间数据模型; 地理信息系统.

中图分类号: TP311; TP751

文章编号: 1000-2383(2010)03-0369-06

收稿日期: 2010-01-15

A 3D Spatial Data Model Based on Rule Base

ZHENG Kun¹, YUN Xin-li¹, LIU Xiu-guo¹, HUANG Fei²

1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Wuhan Zondycyber Co., Ltd., Wuhan 430074, China

Abstract: Three-dimensional objects are in various forms, and opinions differ as to the spatial relationships between objects. It is even more difficult to reach a consensus on the relationship between space and non-spatial three-dimensional data model. There are three kinds of three-dimensional space-oriented, namely, entity type, relationship-oriented and mixed-type, but the traditional models have drawbacks, such as topology difficulties for operation, incomplete object semantics description, lack of relationship expression. Based on a rule-based library, we design a new three-dimensional data model aimed at retaining the advantages and overcoming the disadvantages of the traditional models. The new model takes into account the topology of three-dimensional vector-oriented data model entities, introducing the concept of rules, unifying the relational and object data model, building a rule base for space objects and structures with a unified, complete expression and management. The three-dimensional spatial data model has been applied in a number of cities both in geology and mining and it proves to be successful. The success of applications shows that the model is featured by unities of expression, with a custom, scalable spatial object-relational skills between the space object and the object of its structure, adapting to the complex application requirements, and it has good application prospects.

Key words: relation; rule; rule base; 3D spatial data model; geographic information system (GIS).

随着计算机和地理信息系统(geographic information system, GIS)技术的发展, 人们对空间对象的认识已经不仅仅局限于传统的静态、二维的表达,

而逐步趋向于向动态的、三维的甚至是多维的方向发展. 由于三维空间对象存在形式复杂多样, 对象之间关系的表达尚没有达成共识, 特别是对象语义信

息、对象之间空间及非空间关系更是难以统一完整的表达(郭薇和陈军,1997)。

近年来国内外已有不少的研究和探索,在特定的领域上已有了一些相对成熟的模型。但三维空间数据模型的理论,特别是对于三维空间对象的关系表达都仍未成熟,这很大程度从基础上阻碍了通用 3D-GIS 软件的发展(李清泉和李德仁,1998)。

1 典型三维空间数据模型

传统上,三维 GIS 数据模型可分为拓扑关系数据模型、面向实体的数据模型和混合数据模型(李清泉和李德仁,1998; Molenaar, 1998; 符海芳等, 2002; 叶亚琴等, 2006; 郑坤等, 2006)。

(1) 拓扑关系数据模型。拓扑关系数据模型以拓扑关系为基础组织,并存储各个几何要素,其特点是以点、线、面间的拓扑连接关系为中心,它们的坐标存储具有依赖关系。该模型的主要优点是数据结构紧凑、拓扑关系明晰、系统中预先存储的拓扑关系可以有效提高系统在拓扑查询等方面的效率;但也有不足,单个地理实体的存储效率不高,难以表达复杂地理实体、实现快速查询和复杂的空间分析(郑坤等,2006)。

(2) 面向实体的数据模型。面向实体的数据模型以独立、完整、具有地理意义的实体为基本单位对地理空间进行表达。模型中的每个对象(独立的地理实体)不仅具有自己独立的属性(含坐标数据),而且具有自己的行为(操作)。该模型能够很好地克服拓扑关系数据模型的缺点,具有实体管理、修改方便、查询检索和空间分析容易的优点。更重要的是它能够方便地构造用户需要的任何复杂地理实体,而且这种模式符合人们看待客观世界的思维习惯,便于用户理解和接受。但这种模型也存在一些缺点,主要表现在:拓扑关系需临时构建,存储冗余较大和难以将管理、分析和处理定位到几何要素一级(郑坤等,2006)。

(3) 混合数据模型。混合数据模型是将两种或两种以上的数据模型加以综合,形成一种具有一体化结构的数据模型。它采取一种折衷的方法,减少了以上两类模型的不足。其中,比较有代表性的有基于八叉树和四面体格网的混合模型(octree+TIN)(李清泉和李德仁,1998)、顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型(郑坤等,2006)等。这类模型的优点是可以描述构造复杂的地理实体,并能有效管理几何实体

间的拓扑关系。但也有其不足之处:对空间对象的语义描述不完整,对空间对象间关系的表达还有欠缺,关系难于扩展(郑坤等,2006)。

总的来说,这些模型在一定程度上解决了对真实世界事物的模拟再现问题。但是对于三维空间对象之间的空间和非空间关系的表达方面,还存在很大的局限性。不同的模型由于其针对性不同,在解决空间关系的表达方面采用不同的方法,并且由于采用针对性的结构化表达,模型的扩展能力受到了很大的限制(郑坤等,2006)。

当前,3D-GIS 的发展急需一种可对三维空间对象进行完整有效语义表达的数据模型,类似于二维 GIS 一样具有通用性的数据模型。利用关系、规则来表达对象的语义信息是三维空间对象语义表达的一种有效的形式之一,可以作为三维空间数据模型研究的借鉴。

2 基于规则库的三维空间数据模型

一个完整的三维空间对象是由空间几何数据对象、属性数据及数据对象之间的关系构成。其中三维空间数据对象之间的关系可以是空间关系或非空间关系,如表示实体对象与面的关系、边与结点之间的关系等(Egenhofer and Franzosa, 1991, 1995; Egenhofer and Sharma, 1993; 郭薇和陈军, 1997; Chen *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2002; 周顺平等, 2006)。并且对于模型中各种复杂的关系信息,可将其抽象成若干种形式化的规则定义。因此,构建基于规则库的三维空间数据模型需要考虑以下 5 个因素:(1) 关系表达的完整性,即尽可能全面反映空间对象之间的关系;(2) 对空间对象语义描述的完备性,具有表达复杂地理实体的能力;(3) 关系的表达要具备较少的冗余信息,保证在不影响性能的情况下,尽可能减少不必要的重复,特别是建立和维护类似空间拓扑关系这类关系,要求性能要好;(4) 较好的通用性,可以表达地形和简单地物的几何特征,为今后的综合应用提供保证;(5) 较强的可扩展性,模型本身具有较强的可扩展性以适应新的数据种类。

综合以上分析,笔者以顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型(郑坤等,2006)为基础,构建了基于规则库的三维空间数据模型(图 1)。

2.1 数据模型的组成

基于规则库的三维空间数据模型以规则为核

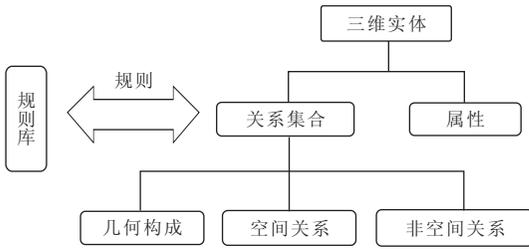


图 1 基于规则库的三维空间数据模型

Fig. 1 The rule base-based 3D spatial data model

心,并结合规则库,将三维实体的空间关系、非空间关系和三维实体的几何构成通过规则统一为空间对象之间的关系,形成关系集合,实现三维实体的完整统一表达。该数据模型由三维实体几何对象模型和规则库模型构成。

2.1.1 三维实体几何对象模型 面向实体的三维拓扑矢量数据的几何数据模型中不仅包含了三维实体的几何对象组成,也包含了几何对象之间的空间拓扑关系。为了全面反映空间对象之间的关系,就必须将模型中三维实体的几何对象组成与几何对象之间的空间拓扑关系相剥离开,仅考虑空间关系和非空间关系,这样有利于关系形式的统一表达。

模型的简化方式为:去掉环、边和结点及相关的空间拓扑关系,仅保留构成三维实体的基本几何对象类型和它们之间的构成方式。

如图 2 中所示,空间三维实体是由描述自身的属性信息和描述空间位置形态的几何信息构成。其中,几何信息是由线、面和体 3 种基本几何形体构成。并且面是由三角形构成;三角形和线是由空间三维离散点构成。根据数据组织的需要,又将体分为简单体和复杂体。其中,简单体只由面构成,复杂体只由简单体构成。

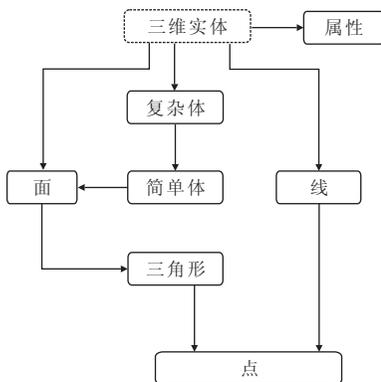


图 2 三维实体几何对象模型

Fig. 2 The simplified three-dimensional solid geometry objects

2.1.2 规则库模型 为了实现三维空间对象之间关系的统一表达,笔者在分析关系形式表达的基础上,提出了规则库模型。规则库模型是由对象之间的关系、规则和规则库等元素组成。

关系是对象在空间和非空间上的联系。从三维实体几何对象组成中可看出,三维实体的组成结构是由几何对象之间的组成联系构成的,也符合关系的定义。在这里,笔者将几何对象组成、对象之间的空间关系和非空间关系用对象之间的内在联系来统一。也就是说,它们都是关系,对象之间关系的表达涉及相关联的几何对象、关系的种类和关系的衡量。在对关系的表达形式上,关系可由 3 个部分构成:对象的组合、关系算子和关系度量,表达式为:

$$Relation = \langle OID, OP, M \rangle, \tag{1}$$

式(1)中 Relation 代表关系;OID 代表对象的组合;OP 代表关系算子;M 代表关系度量。

为统一关系的形式化表达和抽象关系的内在规律,模型引入了规则的概念。规则是对象关系表达形式的组织方式和原则。在三维实体的各种关系中,某几种关系的表达形式满足相同的组织方式和原则,即它们的对象组合方式和关系的度量方式是相同的。笔者将这种相同的方式抽象出来,构成这几种关系所特有的规则,并利用这种规则来扩展新的关系。不同的规则定义不同的对象组合方式和度量方式,每一种关系的形式化表达都是符合某种特定的规则。那么,规则的形式化表达包括规则标识、对象组合方式定义和度量定义。表达式为:

$$Rule = \langle RID, OD, MD \rangle, \tag{2}$$

式(2)中 Rule 代表规则;RID 代表规则标识;OD 代表对象组合定义;MD 代表度量定义。

三维实体的关系表达形式多样性决定了规则的多样性,为统一管理规则的集合,模型又引入了规则库的概念。规则库为存储规则集合的库,它提供对规则的定义、判断和存储等管理功能。通过规则库,对规则的形式化表达提供统一的管理方式。其中,规则定义是规则扩展的前提;规则判断为规则的正确性和存在性提供有效的方法;规则存储为规则提供数据支持。

2.2 数据模型的特点

基于规则库的三维空间数据模型是由拓扑关系数据模型、面向实体的数据模型和混合数据模型发展而来的。这种数据模型除了具有以上 3 种数据模型的优点以外,还具有自己独特的特征。它不仅可以根据需要来组织任意的地质实体,而且还能根据需

要来组织空间和非空间的对象关系.除此以外,这种模型还具有以下特点:

(1)基于规则库进行建模,提供了统一的方法,避免不同建模方法之间的模型转换问题,涵盖了空间对象与周围对象之间的关系,方便模型查询和提高了模型分析效率.

(2)能够完整表达空间对象间的语义关系,解决了模型语义的不连续、不完整问题.通过式(1)的语义描述,完整表达了空间对象间的关系.

(3)关系表达的冗余信息少,能有效的减少不必要重复和关系建立和维护的效率问题.

(4)较好的通用性和较强的可扩展性,可以表达地形、地物的几何特征和适应新的数据种类和关系种类.

通过以上描述,基于规则库的三维空间数据模型可以解决多类地理实体几何建模的问题,并具有较好的适用性,较强的可扩展性,是能够完整表达空间对象语义的数据模型.它提供了对象之间关系的扩展机制,为三维数据的空间分析应用提供实现基础.

2.3 模型的数据结构设计

图 2 表示的只是各几何元素和实体对象之间的组成关系,图 3 中表示的是规则库模型的基本构成.实际上为了更好地建立基于规则库的三维空间数据模型,必须设计更为详细的数据结构.模型的对象分为两个部分:几何数据对象和规则库相关对象.

2.3.1 几何数据对象

几何数据对象由点、线、面

和体 4 种几何实体组成.这 4 种元素的数据结构包含的主要信息如下:

(1)点对象数据结构,包含标识 X 、 Y 和 Z ;

(2)线对象数据结构,包括线对象标识、组成点个数和点位置序列;

(3)面对象数据结构,可以分为简单面和组合面.简单面由一个或一组三角形组成,其数据结构包含面标识、点集标记、三角形个数和三角形标识集合.组合面由子面组成,其数据结构包含组成子面个数和组成面标识集.如果面对象不是由子面构成,那么三角形的个数、三角形标识集合无效,如果是子面,那么组成子面个数和组成面标识集记录无效;

(4)体对象数据结构,可分为简单体和复杂体.简单体对象数据结构包含简单体标识、组成面个数、组成面标识集合和属性.复杂体对象数据结构包含复杂体标识、简单体个数、组成简单体标识集合和属性.

2.3.2 规则库相关对象

规则库相关对象包括关系、规则和规则库.这 3 种对象的数据结构定义如下:

(1)关系对象数据结构.包括对象标识结构、关系算子结构和关系度量结构.其中,对象标识结构包含了对象类型和对象存储标识;关系算子结构包含关系算子名称和关系算子存储标识;关系度量结构为多属性字段定义结构,提供多个方面因素的度量参考.

(2)规则对象结构.包括规则标识结构、对象组合定义结构、关系算子标识列表和度量定义结构.其中,规则标识结构包含规则名称和规则存储标识;对象组合定义结构包含对象的个数和对象类型的组合列表;关系算子标识列表记录该规则下包含的关系存储标识列表;度量定义结构包含度量值的个数和度量值类型的组合列表.

(3)规则库对象结构.包含规则存储标识列表、规则库名称和规则库存储标识.

2.4 数据模型应用示例

基于规则库的三维空间数据模型可应用于城市三维地质、数字矿山的三维建模、可视化与分析等应用领域中(Mello and Henderson, 1997; 奚大平和江文萍, 2002; 朱良峰, 2005).以三维地质模型的表达为例,可将三维地质模型中的地质元素划分为位置、地质边界、层块、层、块和地质模型 6 个层次,与模型相对应.其中,地质实体与三维几何的对应关系如图 4a 所示,层块是地质模型中最基本的地质元素(Mello and Henderson, 1997; 李清泉等, 2003).每个层块实际上是沉积地层中的一段,侧面被断层或

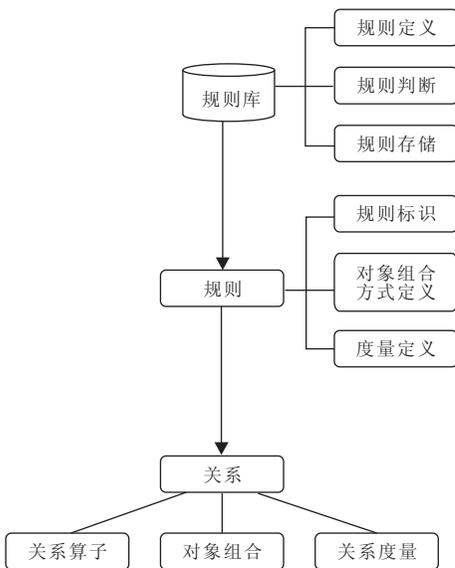


图 3 规则库模型

Fig. 3 The rule base-based 3D spatial data model

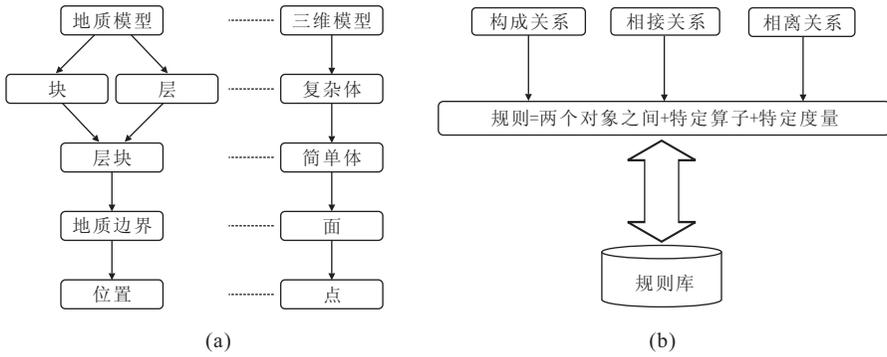


图 4 地质模型与数据模型的对应关系

Fig. 4 The relation between geological model and data model

a. 地质实体与三维几何的对应关系; b. 地质模型中的规则库建模



图 5 数据模型应用实例

Fig. 5 Illustration of data model application

a. 三维地质实体效果图; b. 三维地质实体切割效果图; c. 三维地质实体爆炸效果图

模型边界所包围,可看作是由层顶面、层底面以及断层面、边界面所围成的一个封闭面。层由相同地质年代的层块组成。块是由垂直向上相连接的层块组成。在三维地质模型中,构成层块的各个面存在相接关系;层块与层块之间存在相离关系;层、块之间存在相离关系。如图 4b 中所示,通过上两步得到的关系,抽象出规则:两对象之间+特定关系算子+关系度量,并利用规则库定义出这些规则。

图 5 即为基于该模型构建的某城市三维地质信息系统的部分效果。该系统利用现有的工程钻孔、工程地质剖面等地质数据,结合基于本文设计的数据模型,采用“钻孔—层面模型方法”(朱良峰,2005)来实现对模型的构建。该模型的内部结构、空间关系和非空间关系,都是通过特定的规则统一起来的。该系统综合使用了规则库的统一操作可实现三维建模、三维分析和三维可视化功能。通过这种形式,既可以查询结构信息,也可以查找空间关系信息。例如:可以通过地层模型的对象标识和“构成关系”算子查询该地层所包含的地层块体;可以通过地层面和“相接关系”算子查询与地层面相接的地层块体。

3 结论

(1)基于规则库的三维空间数据模型,是将空间对象的结构和空间对象之间的关系进行综合和统一表达的数据模型。它克服了面向关系模型不能很好地表达复杂模型等缺点,同时克服了面向结构模型对拓扑关系难以表达等缺点;具备了面向关系和面向结构模型的优点。

(2)基于规则库的三维空间数据模型,不仅能够完整表达空间对象之间的关系,解决空间对象表达不完整、不连续的问题,还能根据需要自定义空间对象之间的关系,以适应新的对象数据类型和应用。

(3)模型可提供统一的操作能够实现快速空间查询、提高空间分析能力。模型能够表达地质学领域的空间对象,如矿山等,广泛地应用于地质学领域。

该模型在三维城市地质、矿山、景观建筑等方面的应用具有很大的潜力。同时该模型提供的基于规则库的管理方法,再结合语义描述,为解决一系列复杂问题提供了一种有效的思路。

References

Chen, J., Li, C. M., Li, Z., et al., 2001. A voronoi-based 9-

- intersection model for spatial relations. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(3): 201—220. doi:10.1080/13658810151072831
- Egenhofer, M. J., Franzosa, R. D., 1991. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Science*, 5(2): 161—174. doi:10.1080/02693799108927841
- Egenhofer, M. J., Franzosa, R. D., 1995. On the equivalence of topological relations. *International Journal of Geographical Information Science*, 9(2): 133—152. doi:10.1080/02693799508902030
- Egenhofer, M. J., Sharma, J., 1993. Topological relations between regions in R and Z. In: Abel, D., Ooi, B. C., eds., Third International Symposium on Large Spatial Databases, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 316—336.
- Fu, H. F., Zhu, J. J., Cui, W. H., 2002. The current of 3D-GIS data model. *Geo-Information Science*, 4(2): 45—49 (in Chinese with English abstract).
- Guo, W., Chen, J., 1997. The formal description of topological spatial relationship in 3D based on point set topology. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 26(2): 122—127 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Q., Li, D. R., 1998. Research on the conceptual frame of the integration of 3D spatial data model. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 27(4): 325—330 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Q., Yang, B. S., Shi, W. Z., et al., 2003. Real-time three-dimensional spatial data acquisition, modeling and visualization. Wuhan University Press, Wuhan, 288 (in Chinese).
- Li, Z. L., Zhao, R. L., Chen, J., 2002. A Voronoi-based spatial algebra for spatial relations. *Progress in Natural Science*, 12(7): 528—536.
- Molenaar, M., 1998. An introduction to the theory of spatial object modeling for GIS. Taylor & Francis, London.
- Mello, U. T., Henderson, M. E., 1997. Techniques for including large deformations associated with salt and fault motion in basin modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 14(5): 551—564. doi:10.1016/S0264—8172(97)00015—9
- Xi, D. P., Jiang, W. P., 2002. Research and application of three-dimensional visibility based on digital map. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 27(3): 278—284 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Y. Q., Zuo, Z. J., Chen, B., 2006. Orient-entity spatial data model. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 31(5): 595—599 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, K., Liu, X. G., Wu, X. C., et al., 2006. A topology-concerned and entity-oriented 3D vector data model. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(3): 474—479 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. P., Li, H., Du, X. P., 2006. Building the topology of spatial entities. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 31(5): 590—594 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. F., 2005. Study on key techniques of 3D geological modeling and visualization system based on GIS. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(19): 3601 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 符海芳, 朱建军, 崔伟宏, 2002. 3D-GIS 数据模型的研究. *地球信息科学*, 4(2): 45—49.
- 郭薇, 陈军, 1997. 基于点集拓扑学的三维拓扑空间关系形式化描述. *测绘学报*, 26(2): 122—127.
- 李清泉, 李德仁, 1998. 三维空间数据模型集成的概念框架研究. *测绘学报*, 27(4): 325—330.
- 李清泉, 杨必胜, 史文中, 等, 2003. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化. 武汉: 武汉大学出版社, 288.
- 奚太平, 江文萍, 2002. 数字地图的三维可视化研究及其若干应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(3): 278—284.
- 叶亚琴, 左泽均, 陈波, 2006. 面向实体的空间数据模型. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(5): 595—599.
- 郑坤, 刘修国, 吴信才, 等, 2006. 顾及拓扑面向实体的三维矢量数据模型. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(3): 474—479.
- 周顺平, 李华, 杜小平, 2006. 空间实体的拓扑构建. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(5): 590—594.
- 朱良峰, 2005. 基于 GIS 的三维地质建模及可视化系统关键技术研究. *岩石力学与工程学报*, 24(19): 3601.