

文章编号: 0253-9993(2002)02-0158-06

一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱法

齐安文¹, 吴立新¹, 李 冰¹, 李建民², 杨中东²

(1. 中国矿业大学(北京校区) 3S 与沉陷工程研究所, 北京 100083; 2. 开滦(集团)有限责任公司, 河北唐山 063000)

摘 要: 综合评述了目前 3D GIS 和 3D GM 领域的三维空间构模及三维拓扑关系的研究现状; 进而提出了一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱(ATP)法。该法采用 6 类基本元素和 8 组拓扑关系来描述和表达三维地质现象。讨论了如何利用这 8 组拓扑关系进行地质体查询与分析的基本思路; 给出了程序实现后的 3D GM 实例及其任意剖面图。

关键词: 三维空间构模; 3D GIS; 3D 地学模拟; 类三棱柱(ATP); 三维拓扑

中图分类号: P208 **文献标识码:** A

1 三维空间构模述评

三维空间构模方法以及三维空间拓扑关系研究是目前三维 GIS 领域研究的热点问题。许多专家学者在此领域做了有益的探索^[1~7]。本文将国内外地学与 GIS 领域有关三维空间构模方法总结归纳为单一构模和集成构模两大类。

1.1 单一构模

表面(Surface)构模^[8]。最常用的表面构模技术是在数据点之间构造三角网(TIN), 并以此来描述三维物体的表面; 边界表示(B-rep)构模。通过面、环、边、点来定义形体的位置和形状, 在描述结构简单的三维物体时十分有效, 但对于不规则三维地物则很不方便, 且效率低下; 线框(Wire Frame)构模^[8]。把面上的点用直线连接起来, 形成一系列多边形, 然后把这些多边形面拼接起来形成一个多边形网格来模拟地质边界或开采边界; 多层 DEM 构模^[9]。首先按 DEM 的方法表达每个岩层、土层, 然后根据岩层、土层的属性对多层 DEM 进行交叉划分处理, 形成三维地层模型的骨架结构; 断面(Section)构模^[8]。通过平面图或剖面图来描述矿床, 在地质描述上它也是最方便、使用性最强的, 但它在矿床的表达上是不完整的, 往往需要同其他构模方法配合使用。以上 5 种方法都是基于面的构模方法, 都难以描述地质体的内部信息。

还有下面 5 种基于体的构模方法: 结构实体几何(CSG)构模。由具有规则形状的基本体元通过几何变换和正则布尔操作来组合成一个物体, 在描述结构简单的三维物体时十分有效, 但不易表达地质应用中复杂的不规则三维地物; 八叉树(Octree)构模^[10]。将三维空间区域分成卦限, 且在树上的每个节点处存储 8 个数据元素。非均质卦限细分到每个节点所代表的区域都是均质体为止。结构简单, 操作方便, 但数据量大; 四面体格网(TEN)构模^[11]。用三维 Delaunay 法则将空间中的散乱点剖分成四面体。TEN 可以描述实体内部, 可以表达金属矿体以及复杂地质体等, 但数据量大, 且对于层状矿体则不易表达, 不能表示三维曲面, 而且用 TEN 来生成三维空间曲面也较为困难, 算法设计复杂; 块段(Block)构模^[8]。把要建立的模型分割成规则的三维立方块段, 每个块段在计算机中存储的地址与其在自然矿床中的位置相对应。在编制程序时可以采用隐含的定位技术, 以节省存储空间和运算时间。缺点是不能精确模拟

收稿日期: 2001-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59804006)

矿体边界; 实体 (Solid) 构模^[8]. 采用多边形网格来描述地质和开采过程形成的形体边界, 并用传统的块段模型描述形体内部的品位或质量的分布. 对于具有复杂内部结构的三维实体, 则人工交互工作量巨大.

1.2 集成构模

TEN + Octree 构模^[12]. 在这个结构中, Octree 作整体描述, TEN 作局部描述, 它适合用于地质体中断层或结构面较少的情况, 但对于空间实体间的拓扑关系不易建立; TIN + 平行剖面构模^[13]. 首先是利用一系列的平行剖面, 然后将相邻剖面上属性相同的界线用三角面片 (TIN) 连接, 构成三维曲面, 难以表达三维物体内部结构; TIN + CSG 构模^[12]. TIN 模型表示地形表面, CSG 模型表示建筑物实体, 两种模型的数据是分开存储的. 这种集成是一种表面上的集成方式, 难以表达复杂断层、褶皱和节理裂隙等精细地质结构; TIN + Octree 构模^[14]. TIN 表达三维空间物体的表面, Octree 表达内部结构. 用指针建立 TIN 和 Octree 之间的联系. 拓扑关系搜索很有效, 但八叉树数据须跟随 TIN 数据的改变而改变, 否则指针引起混乱.

2 三维拓扑研究述评

基于三维矢量图的形式化数据结构 (3D FDS)^[15]. 定义了结点、弧、边和面 4 种几何元素之间的拓扑关系及其与点、线、面和体 4 种几何目标之间的拓扑关系, 对几何未知的不规则目标则难以表达; 三维矢量结构拓扑关系^[16]. 基于有限 - 互斥 - 完整划分的概念提出应用于矿山、地质领域的 3 维矢量结构 GIS 的概念模型, 并提出了关于结点 - 边 - 环 - 曲面 - 体之间的 5 组拓扑关系, 程序实现非常困难; 顾及空间剖分的三维拓扑^[17]. 认为 0, 1, 2, 3 单纯形和平面是组成三维空间实体的 5 种基本几何元素, 兼取了矢量数据模型和镶嵌数据模型的优点, 较好地表达了三维实体及其相互间的空间拓扑关系; 三维栅格与矢量混合数据结构拓扑^[18]. 以八叉树结构作整体描述, 三维拓扑矢量边界表示作局部描述. 阐述了结点 - 边 - 环 - 曲面 - 体之间的拓扑关系, 有利于三维图形的显示, 能精确表达拓扑关系; 面向对象的三维矢量 GIS 拓扑关系^[19]. 定义点、线、面、体等各种基本元素类, 并详细阐述了基本元素类之间的拓扑关系, 面向对象的空间操作与分析; “层次树”三维 GIS 矢量拓扑结构^[20]. 用弧 - 结点 - 环 - 曲面 - 复杂地物 - 体关系之间的 6 组关系来描述矿山 GIS 三维矢量结构的拓扑关系, 拓扑关系明确, 层次分明, 能大大降低软件算法实现难度.

3 新的 3D 空间构模方法——类三棱柱

针对地学与矿业应用, 建立了一种新的三维地学构模方法——类三棱柱法. 由于由上、下不平行的 2 个 TIN 三角形面和 3 个侧面空间四边形所组成的空间单元与三棱柱近似, 故称为类三棱柱 (analogic tri-prism, ATP). 利用 ATP 数据模型, 可以用 ATP 的上、下底面的三角形集合所组成的 TIN 面来表达不同的岩 (煤) 层面, 然后利用 ATP 侧面的空间四边形面来描述层面间的空间关系, 用 ATP 柱体来表达层与层之间内部实体. 可以在 TIN 面上增加地形特征线作为约束, 或将沿勘探线的钻孔连线作为约束, 这样就可以得到有约束条件的 TIN, 来表达有特征约束的地形. ATP 数据结构具有易于扩充的特点. 当有新的钻孔数据加入时, 只需在局部修改 TIN 和 ATP 的生成, 而不需改变整个体的结构. 图 1 为类三棱柱数据结构的空间拓扑结构.

3.1 3D 数据结构

(1) 点的数据结构

Type

TPoint = Record

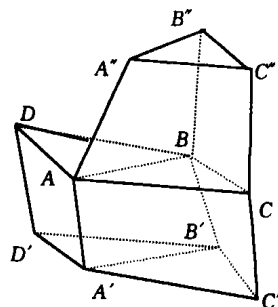


图1 ATP拓扑关系

Fig. 1 Sketch map of analogic tri-prism topology

```

x, y, z: float; // x, y, z 坐标
next: ^long; // 指向下一个点的指针
TINEdge [n]: array of TTINEdge; // 周围 TIN 边
UpPsmEdge, DownPsmEdge: TPrismEdge; // 上、下棱边
End;

```

(2) TIN 边的数据结构

```

Type
TTINEdge = Record
Brestrict: Boolean; // 是否为约束边
Pstart, Pend: TPoint; // 起点、终点
LeftTriangle, RightTriangle: TTriangle; // 左右三角形面
UpQuadrangle, DownQuadrangle: TQuadrangle; // 上、下侧面
End;

```

(3) 棱边的数据结构

```

Type
TArrisEdge = Record
Pstart, Pend: TPoint; // 起点、终点
NeighbourQuad: array of TQuadrangle; // 相邻的多个侧面
End;

```

(4) TIN 三角形面的数据结构

```

Type
TTriangle = Record
TriID: Integer; // 标识号
Point [3]: TPoint; // 3 个顶点
TINEdge [3]: TTINEdge; // 3 条边
NeighbourTri [3]: Array of Integer; // 相邻的 3 个三角形面的标识号
UpAnatriPrism, DownAnatriPrism: TAnatriPrism; // 相邻的上、下 ATP
End;

```

(5) 侧面空间四边形面的数据结构

```

Type
TQuadrangle = Record
QuadID: integer; // 标识号
Point [4]: TPoint; // 4 个顶点
TINEdge [2]: TTINEdge; // 2 条 TIN 边
ArrisEdge [2]: TArrisEdge; // 2 条棱边
LeftTriPrism, RightTriPrism: TAnatriPrism;
// 左右 ATP
End;

```

(6) ATP 体的数据结构

```

Type
TAnatriPrism = Record
PrismID: Integer; // 标识号

```

Ppoint [6]: TPpoint; // 6 个顶点
UpTri, DownTri: TTriangle; // 上、下 TIN 面
Quad [3]: TQuadrangle; // 3 个侧面
NeighbourPsm [5]: Array of integer; // 相邻的 5 个 ATP 标识号
End;

3.2 3D 拓扑空间关系

ATP 数据结构的特点之一就是充分考虑了组成 ATP 体的各空间元素之间的拓扑关系，便于三维空间拓扑分析的实现。基本拓扑关系由表 1~表 8 详细表达。

表 1 点 - TIN 边 - 棱边之间的拓扑关系
Table 1 Topology relationship among point, TIN edge, and arris

点	TIN 边	棱边
A	AB, AD, AC	AA, AA
B	BD, BA, BC	BB, BB
C	CA, CB	CC, CC
D	DA, DB	DD
A	AD, AB, AC	AA
B	BD, BA, BC	BB
C	CB, CA	CC
D	DB, DA	DD
A	AB, AC	AA
B	BA, BC	BB
C	CB, CA	CC

表 3 棱边 - 点 - 侧面空间四边形面之间的拓扑关系
Table 3 Topology relationship among arris, point and lateral quadrangle

棱边	点	侧面空间四边形面
AA	A, A	ADBA, ACCA, ABB A
BB	B, B	BDD B, BAA B, BCC B
CC	C, C	CAA C, CBB C
DD	D, D	DAA D, DBB D
AA	A, A	ABBA, ACCA
BB	B, B	BAB B, BCB C
CC	C, C	CBBC, CACA

表 2 TIN 边 - 点 - TIN 三角形面之间的拓扑关系
Table 2 Topology relationship among TIN edge, point and TIN

TIN 边	点	TIN 边三角形面
AD	A, D	ADB
AC	A, C	ABC
AB	A, B	ABD, ABC
BC	B, C	BCA
BD	B, D	BDA
AD	A, D	ADB
AC	A, C	ABC
AB	A, B	ABD, ABC
BC	B, C	BCA
BD	B, D	BDA
AB	A, B	ABC
AC	A, C	ABC
BC	B, C	ABC

表 4 TIN 三角形面 - TIN 边 - ATP 之间的拓扑关系
Table 4 Topology relationship among TIN, TIN edge and analogic tri prism

TIN 三角形面	边	ATP
ACB	AC, CB, AB	ACBB CA
ABD	AB, AD, BD	ABDD B A
ABC	AB, AC, BC	ABCBA
ADB	AD, AB, BD	ADBDA
ACB	AC, CB, AB	ABCBA

表 5 ATP - 空间面 - 点之间的拓扑关系
Table 5 Topology relationship between analogic tri prism, spatial face and point

ATP	面	点
ADDB DA	ADB, ADB, DBB D, ABB A, ADD A	A, D, B, B, D, A
ACBC BA	ACB, ACB, BCC B, ABB A, ACCA	A, B, C, C, B, A
ABCC BA	ABC, ABC, ACCA, ABBA, BCB C	A, B, C, C, B, A

表 6 侧面空间四边形面 - 边 - ATP 之间的拓扑关系

Table 6 Topology relationship among lateral spatial quadrangle, edge and analogic tri prism

侧面空间四边形面	边	ATP
ABB A	AB, BB, BA, AA	ABDB DA, ABCC BA
ACC A	AC, CC, CA, AA	ACBB CA
ADD A	AD, DD, DA, AA	ADBB DA
DBB D	DB, BB, BD, DB	DBAA BD
BCC B	BC, CC, CB, BB	BCAA CB
AB BA	AB, BB, BA, AA	ABCC BA
AC CA	AC, CC, CA, AA	ACBB CA
BC CB	BC, CC, CA, AA	BCAA CB

表 8 点 - ATP 之间的拓扑关系

Table 8 Topology between point and analogic tri prism

点	ATP
A	ACBB CA, ABDD BA, ABCC BA
B	ABDD BA, ACBB CA, ABCC BA
C	ABCC BA, ABDD BA
D	ABDD BA
A	ACBB CA, ABDD BA
B	ACBB CA, ABDD BA
C	ABCC BA
D	ABDD BA
A	ABCC BA
B	ABCC BA
C	ABCC BA

表 7 TIN 面 - 上 ATP - 下 ATP 之间的拓扑关系

Table 7 Topology between TIN and analogic tri prism

TIN 面	上 ATP	下 ATP
ABC	ABCC BA	ABCC BA
ABD	ABCC BA	ABDD BA
AB C	ABCC BA	
AB D	ABDD BA	
AB C		ABCC BA

4 ATP 构模方法实例

用实验数据将 ATP 地学构模方法进行了程序实现。钻孔数据库由以下字段组成：钻孔号、岩层编号、岩层倾角、岩层方位角、岩层名称、岩性描述、岩层厚度、岩层界面坐标。从钻孔数据库里提取数据，运用 ATP 数据结构生成三维地质体，图 2 即为程序实现的结果



图 2 真三维地质体切割剖面并揭层显示

Fig. 2 True 3D geology body cut section and throwing off several layers

和在此基础上生成的煤层（黑色含夹矸）及其顶、底板任意地质剖面以及揭层显示。

5 结 语

提出的 ATP 构模方法结合层状矿体和钻孔数据的特点，以钻孔数据作为基本的数据源，并利用 TIN 的数据结构特点。ATP 构模方法不但描述了三维地质体的表面，而且表达了三维地质体的内部结构。该法可以表达有特征约束的地形，并且易于扩充。此外，该法充分考虑了各个要素之间的拓扑关系，便于建立空间拓扑结构。基于 ATP 数据体的 3DGM 研究与系统开发，是数字矿山^[21]工程的关键技术之一，有关组合地质剖面切割、工程开挖、储量计算、采掘规划、支护设计及三维空间拓扑分析等项研究及成果，将在后续论文中陆续介绍。

参考文献：

- [1] Bogdan Orlie. Predicting subsurface conditions for geotechnical modeling [D]. Netherlands: ITC, 1997.
- [2] 龚建华. 地学可视化——理论、技术及其应用 [D]. 北京：中国科学院地理研究所，1997.
- [3] 胡金星，吴立新，杨可明，等. 三维地学模拟体可视化技术应用研究 [J]. 煤炭学报，1999，24（4）：345～349.

- [4] 侯恩科, 吴立新. 三维地学模拟几个方面的研究现状与发展趋势 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28 (6): 5~7.
- [5] 吴健生. 地质体三维可视化及空间数据探索 [D]. 北京: 中国科学院地理研究所, 2001.
- [6] 赵树贤. 煤矿床可视化构模技术 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京校区), 1999.
- [7] 夏炎. 三维矢量结构地质模型及其微机可视化图形显示系统研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京校区), 1997.
- [8] Simon W Houlding. 3D geoscience modeling——computer techniques for geological characterization [M]. Springer - Verlag: [s. n.], 1994.
- [9] 陈健. 三维地层空间信息系统结合三维有限元的研究与实现 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土工程研究所, 2001.
- [10] 韩国建, 郭达志. 矿体信息的八叉树存储和检索技术 [J]. 测绘学报, 1992, 21 (1): 13~17.
- [11] Plout M, Tempfli K, Molenaar M. A tetrahedron-based 3D vector data model for geoinformation [A]. In: Advanced Geographic Data Modelling [C]. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, 1994 (40): 129~140.
- [12] 李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究 [J]. 测绘学报, 1998, 27 (4): 325~330.
- [13] 王海峰. 三维空间信息的数据生成算法研究和实现 [D]. 北京: 北京大学, 2000.
- [14] SHI Wen-zhong. Development of a hybrid model for three-dimensional GIS [J]. Geo-Spatial Information Science, 2000, 3 (2): 6~12.
- [15] Molenaar M A. Topology for 3D vector maps [J]. ITC Journal, 1992 (1): 25~33.
- [16] 李青元. 三维矢量结构 GIS 拓扑关系及其动态建立 [J]. 测绘学报, 1997, 26 (3): 235~240.
- [17] 陈军, 郭薇. 基于剖分的三维拓扑 ER 模型研究 [J]. 测绘学报, 1997, 22 (1): 7~15.
- [18] 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22 (1): 7~15.
- [19] 孙敏, 唐小明, 赵仁亮. 面向对象的三维矢量 GIS 数据模型及拓扑关系的建立 [J]. 测绘通报, 1998 (7): 11~14.
- [20] 陈云浩, 郭达志. 一种三维 GIS 数据结构的研究 [J]. 测绘学报, 1999, 28 (1): 41~44.
- [21] 吴立新, 殷作如, 邓智毅, 等. 论 21 世纪的矿山——数字矿山 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (4): 337~342.

作者简介:

齐安文 (1972-), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 从事矿山 GIS、数字矿山、3DGM 理论与方法等方面的研究与开发工作, 发表论文 10 余篇.

Analogic tri-prism: a new 3D geo-spatial modeling methodology

QI An-wen¹, WU Li-xin¹, LI Bing¹, LI Jian-min², YANG Zhong-dong²

(1. 3S & Subsidence Engineering Institute of Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Kailuan Limited Group, Tangshan 063000, China)

Abstract: Based on the review of current 3D spatial modeling and 3D spatial topology methodologies related to 3D GIS and 3DGM, a new 3D geo-spatial modeling methodology, named as Analogic Tri-Prism (ATP), is presented. ATP represents for 3D geology bodies and structures with 6 elements and 8 groups of topological relationships. The ATPs 3D data structure and topological table are designed; the 3D geo-spatial query and analysis method based on ATP are also introduced. A experimental software of ATP is programmed and a 3D geologic model by the software is also introduced.

Key words: 3D spatial modeling; 3D GIS; 3D geological modeling; analogic tri-prism (ATP); 3D topology