

文章编号:1671-8860(2007)04-0331-05

文献标志码:A

# 一种基于 GTP 的地下真 3D 集成表达的实体模型

吴立新<sup>1,2</sup> 陈学习<sup>2</sup> 车德福<sup>2,1</sup> 徐磊<sup>2</sup>

(1 中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所,北京市学院路丁 11 号,100083)

(2 东北大学 3S 与数字矿山研究中心,沈阳市和平区南湖,110004)

**摘要:**从建模对象、组成元素和拓扑描述三个方面对广义三棱柱(GTP)模型进行了修正和扩展。基于修正与扩展后的 GTP 模型,从地学、几何、拓扑三个层面对地下实体进行了提炼,抽象出 8 种空间构模几何元素,并将地下实体划分为点、线、面和体 4 类,体实体又进一步划分为简单体、复合体和复杂体,进而提出了一种基于 GTP 的地下真 3D 集成表达的实体模型(GTP-based entity model, GTP-EM);采用面向对象的方法,通过构模元素之间拓扑关系的定义实现了地下实体的拓扑描述,并应用实例验证了 GTP-EM 的可行性。

**关键词:**数字矿山;实体模型;GTP-EM;真三维集成

中图法分类号:P208

地下 3D 空间实体的真 3D 集成建模是数字矿山、数字城市和数字岩土工程的关键和瓶颈。国内外已有的空间数据模型可归纳为单一模型、混合模型和集成模型三大类<sup>[1]</sup>。单一模型采用某一种面元或体元模型表达 3D 空间实体,其中面元模型便于可视化和模型更新,但难以进行真 3D 空间分析。一般体元模型虽然是真 3D 的,但难以适应复杂的空间实体情况;混合模型和集成模型虽能利用不同数据模型的优点,但混合模型的数据冗余与几何一致性问题、集成模型的纽带与拓扑一致性问题难以解决,故目前理论上探讨较多,技术实现很少<sup>[1-4]</sup>。本文通过对广义三棱柱(GTP)进行修正与扩展,面向地下真 3D 集成建模的需要,提出了一种基于 GTP 的实体模型(GTP-EM)。

## 1 GTP 模型的修正与扩展

### 1.1 GTP 模型的原理分析

GTP 是针对钻孔偏斜而提出的一种真 3D 地质建模体元模型。GTP 模型提出之初,主要是针对自然地质体建模。兼顾人工开挖体之后,由于数据来源、建模精度、空间尺度和空间分布等方面

的差异,GTP 模型的原始概念与建模方法已不太适用,为此,笔者对 GTP 的建模对象进行了扩展,提出了工程 GTP(engineering GTP, E-GTP)的概念与建模方法<sup>[5]</sup>。与此对应,地质体的 GTP 模型称为 G-GTP(geological GTP)。两者的区别在于:① 数据来源,E-GTP 数据源于施工设计和施工测量,而 G-GTP 数据源于真实钻孔;② 建模精度,E-GTP 表达的工程开挖体比较精细,通常需要 cm 级的精度,而 G-GTP 一般为 dm 级和 m 级;③ 空间尺度,E-GTP 的 3 条棱边距离很有限,而 G-GTP 的 3 条棱边相距一般很远;④ 空间分布,E-GTP 的 3 条棱边可以按工程体控制中心线的方向任意与地层相交或平行,而 G-GTP 的 3 条棱边必须沿钻孔方向,且只能与地层相交而不能平行。两者的联系在于:① 基本几何形态相似;② 均由 6 类基本几何元素组成,即点、TIN 边、棱边、TIN 面、侧面和 GTP 体。为便于描述,本文约定,未加特殊区分时,GTP 包括 G-GTP 和 E-GTP。

### 1.2 GTP 组成元素的修正

为解决 GTP 侧面不是平面带来的空间操作和分析困难,文献[2]在 6 类基本组成几何元素外引入了第 7 个辅助元素——对角线,其目的是将

收稿日期:2007-01-21。

项目来源:国家杰出青年基金资助项目(50525414);国家自然科学基金资助项目(40571137);北京市自然科学基金重点资助项目(4041005);国家教育部高校青年教师奖专项基金资助项目。

GTP 剖分成四面体。而实际进行空间操作和分析时,所面对的是 GTP 剖分后的四面体体元,而不是单纯孤立的对角线元素。因此,四面体应是 GTP 的有机组成元素,在数据组织和空间操作分析时,与 GTP 是一个整体,故 GTP 模型中的对角线辅助元素应修正为四面体元素。

引入四面体元素后,GTP 与单纯四面体模型不同:① 在建模单元上,GTP 仍然是主体体元,四面体只是它的一个几何元素,两者是包含与被包含的关系;而四面体模型中,四面体是惟一体元,其基本组成元素是点、边和三角形;② 在数据来源上,GTP 采用的是钻孔或规则设计数据,而四面体通常基于空间域的离散采样点数据;③ 在建模方法上,GTP 模型中的四面体是分两步完成的,即先构建 GTP,然后由 GTP 剖分成四面体,构建算法简单;而四面体模型一般采用 3D Delaunay 法则或 3D Voronoi 对偶图来生成,当有断层、分叉和尖灭等复杂地质构造时,其生成算法十分复杂。

### 1.3 GTP 拓扑描述的扩展

四面体引入后,GTP 本身及其构建的地学模型均由 0~3D 单纯形构成,且所表达的地下实体的表面皆由 2D 单纯形(三角形)组成。GTP 构模后,根据 GTP 几何要素之间的拓扑关系,采用一定的算法即可搜索出实体边界(TIN 集合)。因此,地下实体可用 GTP 体元集合或其边界两种方式来表达,实体之间的拓扑关系则可通过实体边界面之间的关系来描述。两种表达方式并存,虽多占用了存储空间,但便于可视化和空间分析。

## 2 地下真 3D 集成表达的实体模型

### 2.1 基于 GTP 的地下实体抽象

建立面向实体的真 3D 数据模型,需要从地学层面、几何层面和拓扑层面 3 方面进行抽象和分析<sup>[6]</sup>。本文将地下实体划分为点、线、面和体 4 类,体实体又进一步划分为简单体、复合体和复杂体。简单体指在建模范围内属性连续、均匀分布、边界相对简单的单个地质体,如简单地层、透镜体等;复合体是指由边界连续但属性不同的简单体组合而成的地下实体,如穿越不同地层的巷道、隧道等;复杂体是指属性相同但边界复杂的地下实体,如倒转褶曲,或由多个边界独立的简单体组成的地下实体,如离散分布于某一地层中的透镜体群,以及由于断层切割而被分隔的地层断块组。

按面向对象的观点,复杂体是同一类型简单

体的联合,复合体则是不同类型简单体的聚集,因此,复合体与复杂体可由简单体来定义,简单体可由面实体来定义,面实体可通过线实体来定义,线实体可由点实体来定义。这种地下实体描述方式的层次结构明确,便于组织管理。点实体在 3D 空间的惟一性保持了数据的一致性。由于复杂实体和复合实体由简单实体聚集或联合而成,相互邻接的面可以被相互邻接的两个实体对象同时索引,保证了地下实体模型拓扑关系的一致性,并最大限度地减少了数据冗余。

文献[7]在 3D 形式化数据结构(3D FDS)中定义了 4 种基本几何元素:结点、弧、边和面;Geotoolkit 软件<sup>[8]</sup>则基于拓扑学理论定义了 7 种几何元素,即 4 种空间单纯形(点、线段、三角形、四面体)和 3 种空间单纯复形(曲线、曲面、实体),作为构模的几何元素。本文根据 GTP 模型修正和扩展后的几何元素构成,结合地下实体集成表达的需要,将 GTP 的 TIN 边、侧边统一成边元素,侧面元素隐含表达在三角形元素信息中,同时增加实体拓扑描述需要的复合元素,进而抽象出实体构模的 8 种几何元素,即结点、边、弧、三角形、超面、GTP、四面体、超体。其中,① 结点是 GTP 模型的顶点,惟一确定 1D、2D 和 3D 空间中的一个位置;② 边是由两个结点定义的 2D 或 3D 空间中的一段;③ 弧是由两条或两条以上的边首尾相连成不封闭的曲线,本文定义的弧用于界定超面的边界,便于超面间拓扑关系的表达;④ 三角形是由 3 条首尾相连的边封闭而成的,它是 GTP 的上、下底面,或由侧面剖分而来;⑤ 超面是由一系列三角形按一定规则组织在一起所构成的空间曲面,是进行 GTP 实体拓扑描述的关键面;⑥ GTP 是空间建模的核心体元;⑦ 四面体由 GTP 剖分而来,是空间集成、操作和分析的关键元素;⑧ 超体是由超面封闭而成的 3D 空间区域,或是由 GTP 集合组成的几何体。

在定义几何构模元素的同时,还定义了相互之间的约束条件。这些约束条件是进行 3D 空间分析、可视化和查询的基础,也是几何对象 3D 重构的统一性、正确性和惟一性的保证。地下实体的集成首先应保持各模型的基本几何对象及构造元素之间的一致性,并在几何层面上无缝集成起来。

### 2.2 基于 GTP 的地下实体拓扑描述

构模元素之间的拓扑关系是推导几何对象及地下实体之间拓扑关系的基础。采用面向对象的方法,通过 8 类几何构模元素之间的拓扑关系可实现对地下实体的拓扑描述,如图 1 所示。图 1

中,几何元素对地下实体的定义又分两个层次,第一个层次为边界几何层,即表达的几何元素为结点、弧、超面、超体等,该层次上的几何元素主要用于表达地下实体间的拓扑关系;第二个层次为体元几何层,即表达的几何元素为结点、边、三角形、GTP 和四面体等,该层次的几何元素主要用于地下实体内部几何拓扑结构的变动表达,一般不涉及地下实体之间的拓扑关系。

上述地下实体间拓扑关系的层次细分使空间

关系的描述更加清楚,便于把握拓扑关系的本质。对于复杂地下实体(如复合体、复杂体),可以从复杂到简单逐层划分,高一级的地下实体(如复合体、复杂体)可以引用低一级地下实体(如简单体)的拓扑处理,不涉及低一级地下实体的处理细节。对于复杂地下实体,存在与其结构相对应的拓扑处理引用结构。信息隐藏机制使引用结构保持良好的独立性,局部拓扑关系的改变不会强烈影响全局的拓扑关系<sup>[7]</sup>。

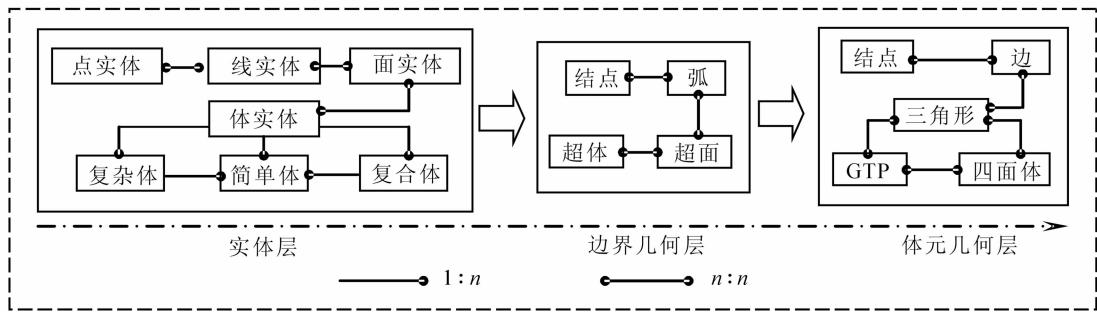


图 1 地下实体之间拓扑关系的描述

Fig. 1 Description of Topological Relations Among Underground Spatial Entities

### 2.3 基于 GTP 的地下实体表达

可按维数划分 0~3D 共 4 类地下实体。0D 和 1D 实体主要指点实体和线实体。点实体包括钻孔点、断层点、采样点、开挖体断面形状控制点、开挖体外围轮廓控制点等,通过结点几何元素来表达。线实体包括钻孔迹线、地层面与断层面的交线、开挖体轮廓线、地层面与开挖体边界的交线等,通过边或弧来表达。

2D 实体指面实体,包括地表面、地层界面、断层面、开挖体断面与侧面等。以 G-GTP 构建地质体模型时,地表面和地层界面的表达通过 G-GTP 的上、下底面的三角形集合(超面)来实现。通过内插虚拟钻孔,可以将断层面数据融入到原始钻孔数据库中,在三角形向下扩展构建 G-GTP 的过程中,利用超面来拟合断层面。开挖体断面是指能表达开挖体形状特征的有限面,如巷道断面、隧道断面、采空区横断面等。开挖体的特征断面有规则的,也有不规则的。巷道、隧道断面一般看作规则的面实体,而采空区断面则看作不规则的多边形。对于开挖体断面,一般在局部坐标系下描述其断面轮廓,如 Lynx 软件中采用图纸数据结构描述巷道断面形状,断面轮廓记录为一系列弧段<sup>[8]</sup>。由于计算机图形学中的所有曲线均可由线段逼近得到,因此在 E-GTP 模型表示下,开挖体断面轮廓可表达为闭合线段,断面表达为 E-GTP 顶底面的三角形集合(超面)。

3D 实体指体实体。对地质体可采用两种方式表达,一种是通过上、下地层界面的三角形对应形成的 G-GTP 或 G-GTP 剖分成的四面体集合表达。在地层模型构建初期,采用上、下地层界面的三角形对应形成的 G-GTP 便于地层的整体性描述;当需要进行可视化与集成建模等操作时,将 G-GTP 剖分成四面体,相应的地层则由四面体集合描述。另一种是通过上、下地层界面的三角形集合(超面)及侧边界的三角形集合(超面)所围成的封闭曲面来表达。由超面构成封闭曲面的表达方式便于拓扑关系的分析,同时可在不需地层实体内部信息时简化可视化操作,提高可视化与分析效率。在 GTP 扩展模型下,3D 开挖体的表达也可采用两种方式,一是采用棱边共用开挖体中心线的 E-GTP 簇描述;当开挖体不需表达内部信息或仅进行开挖可视化操作时,可以断面和侧面轮廓的三角形集合(超面)所围成的封闭曲面来表达。

### 2.4 基于 GTP 的实体模型

按面向对象的方法,地下真 3D 集成表达的实体模型的设计应包括两方面的内容:①根据地下实体的语义属性和几何特征的关联确定地下实体的对象类及其属性特征,实现对地学对象的描述;②根据地下实体的几何特征确定地下实体的几何对象类及其几何元素构成,以及几何元素之间的 3D 拓扑关系。为此,基于 GTP 模型的修正与扩展,设计提出一种新的实体模型,即 GTP-EM,以满足

地下真3D集成建模的需要。其原理如图2所示。

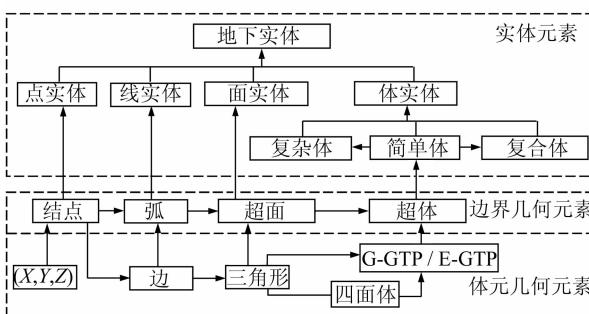


图2 地下真3D集成表达的GTP-EM模型

Fig. 2 GTP-EM for Underground Real 3D Integral Modeling

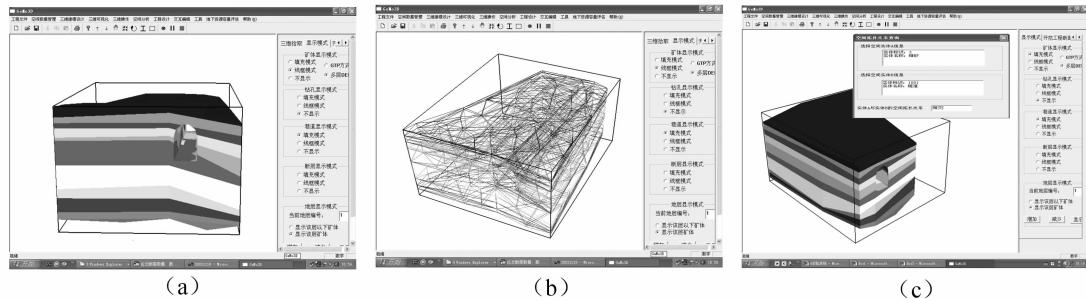


图3 北京CBD地下真三维集成建模中的GTP-EM应用实例

Fig. 3 Case of GTP-EM Application for Underground Real 3D Integral Modeling in Beijing CBD

显示,从中可以清楚地观察到地层与隧道的空间关系;图3(c)为集成模型中地下实体间空间拓扑关系的查询界面。

## 4 结语

目前,基于GTP的地下真3D集成表达的实体模型已应用到所开发的3D地学建模系统Geo-Mo<sup>3D</sup>中。下一步将完善基于该模型的3D空间查询、空间分析、地学统计、数据挖掘、空间推理与知识发现等功能,并进行相关专业分析模型(如3D FEM、地下施工设计、地下施工影响等)的接口研究,使之逐渐成为数字矿山、数字城市和数字岩土工程的3D空间信息基础平台。

## 参考文献

- [1] 吴立新,史文中. 论3D地学空间建模[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 1-4
- [2] Wu Lixin, Topological Relations Embodied in a Generalized Tri-prism (GTP) Model for a 3D Geoscience Modeling System[J]. Computers and Geosciences, 2004, 30: 405-418
- [3] 程朋根,龚健雅. 地勘工程三维空间数据模型及其

## 3 应用实例

以北京市中央商务区(CBD)地下集成建模为例,进行了基于GTP的地下真3D集成表达的实体模型的应用研究。CBD研究区位于朝阳区内,约4 km<sup>2</sup>,地基土以碎石类土、砂类土、粘性土、粉土层为特征。根据现场钻探、原位测试及室内土样试验,将CBD区地面以下50 m深度范围内的地层划分为10个地层。结合地铁实际工程资料,建立了环境地层与地铁的真3D集成模型,如图3(a)所示;图3(b)是地层和隧道的GTP线框

- 数据结构设计[J]. 测绘学报, 2001, 30(1):74-83
- [4] 边馥苓. 面向对象的栅格矢量一体化的3D数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4):295-297
- [5] 吴立新,陈学习,史文中. 基于GTP的地下工程与围岩一体化真3D空间构模[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3):17-21
- [6] de la Losa A, Bernard C. 3D Topological Modeling and Visualization for 3D GIS[J]. Computers and Graphics, 1999, 23: 469-478
- [7] Molennar M A. Topology for 3D Vector Maps[J]. ITC Journal, 1992(1):25-33
- [8] Simon W H. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994
- [9] Shapiro V. Solid Modeling[M]//Farin G, Hoschek J, Kim M S. Handbook of Computer Aided Geometric Design. Amsterdam: Elsevier, 2002: 473-518

**第一作者简介:**吴立新,教授,博士,博士生导师。现从事GIS理论与算法、3D地学建模、灾害遥感、遥感-岩石力学、数字矿山与数字城市研究。

E-mail:awulixin@263.net

## A GTP-based Entity Model for Underground Real 3D Integral Representation

WU Lixin<sup>1,2</sup> CHEN Xuexi<sup>2</sup> CHE Defu<sup>2,1</sup> XU Lei<sup>2</sup>

(1 Institute of RS, GPS, GIS and Subsiding Engineering, China University Mining and Tech., D11 Xueyuan Road, Beijing 100083, China)

(2 Center for RS, GPS, GIS and Digital Mine Research, Northeastern University, Nanhu, Heping District, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Based on the amended and extended GTP model, the underground entity is extracted in levels of geosciences, geometry and topology, and eight geometric primitives including node, edge, arc, triangle, supper-surface, GTP, tetrahedron and super-body are abstracted. The arc refers to an unclosed curve comprised of two or more end-to-end edges, the supper-surface refers to a spatial surface represented by a group of triangles in order, and the super-body is a spatial region enclosed by a few supper-surfaces or formed by a group of adjacent GTP elements. The geo-entity is 0-3D classified into point entity, line entity, face entity and body entity, and the body entity could be furthermore sorted as simple body entity, compound body entity and complex body entity. A GTP-based entity model (GTP-EM) is presented for underground real 3D integral representation and modeling. With object-oriented method, the topological relations are defined by geometrical elements. With the 3D integral geo-entity representation and modeling for the subway and its surrounding strata located underground, the central business district (CBD) in Beijing city is taken as an example.

**Key words:** digital mine; entity model; GTP-EM; real 3D integral representation

**About the first author:** WU Lixin, professor, Ph. D., Ph. D supervisor. His research interests include theory and algorithms for geographic information system, 3D geosciences modeling, disaster remote sensing, remote sensing rock mechanics, digital mine and digital city.

E-mail: awulixin@263.net

(上接第 325 页)

## Parameter Adaptive Estimation of Bounded $p$ -norm Distribution

PAN Xiong<sup>1</sup> FU Zongtang<sup>1</sup>

(1 Faculty of Engineering, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

(2 Department of Land Science, China University of Geosciences, 29 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The calculating formulas of the monadic  $p$ -norm maximum likelihood adjustment are discussed, the properties of  $L_p$  estimation are introduced. Under the assumption that the distribution of observations is unimodal and symmetry, this method can give the estimated values of parametric. Its numerical characteristics is specifically calculated, and its limit process is ordinary  $p$ -norm distribution.

**Key words:**  $L_p$  estimation; bounded  $p$ -norm distribution; parametric estimations

**About the first author:** PAN Xiong, associate professor, postdoctoral, majors in the theory and application of surveying data processing.

E-mail: pxjh@163.com