

# 虚拟现实技术在隧道开挖工程中的应用

黄地龙<sup>1,2</sup> 邓飞<sup>2</sup> 唐云<sup>2</sup>

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)<sup>1</sup>

(成都理工大学信息科学与技术学院 成都 610059)<sup>2</sup>

**摘要** 针对复杂地质结构与多地质灾害风险的地下隧道开挖安全和科学施工,提出了一种隧道开挖计算机仿真方法。方法首先以地质勘探资料为基础,通过智能推演和人机交互方法进行三维地质建模,然后应用计算机仿真技术虚拟隧道开挖,最终揭示隧道围岩地质结构变化特征,实现隧道开挖过程中的地质灾害风险预警。方法成功地应用于几个大型铁路隧道开挖工程,结果证明该方法能够有效预测隧道围岩地质结构变化与地质灾害可能发生的空间位置、类型与级别。方法为实际隧道科学施工决策、安全开挖提供了可靠依据。

**关键词** 计算机仿真,三维地质建模,信息可视化,隧道灾害风险预警,虚拟现实

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A

## Application of Virtual Reality Technique in Tunnel Excavation Engineering

HUANG Di-long<sup>1,2</sup> DENG Fei<sup>2</sup> TANG Yun<sup>2</sup>

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China)<sup>1</sup>

(School of Information Science and Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)<sup>2</sup>

**Abstract** We proposed an approach to simulate the tunneling process to ensure the safety of the underground-tunnel construction under complicated geological structure and risks of multiple geo-hazards. We first constructed the 3D geological model from the geological exploration data using intelligent deduction and human-computer interaction approaches. Then we simulated the tunneling process to show the geological structure changes of the tunnel surrounding rock. In this way, we can predict the potential geo-hazards in the tunneling process. This approach has been successfully applied to several rail way tunneling projects. It is proved that it can effectively predict the changes of the surrounding rock, the location, type and magnitude of the geo-hazards. This approach could provide accurate information for tunnel construction.

**Keywords** Computer simulation, 3D geological modeling, Information visualization, Tunnel disaster risk warning, Virtual reality

在实际隧道开挖中,隧道围岩地质环境变化、地质结构复杂都将给隧道施工带来不利影响并引发地质灾害,从而造成人员伤亡与财产损失。因此,隧道工程施工前,弄清隧道围岩的地层结构与地质特征分布规律及隧道开挖的地质灾害风险参数,对于安全、科学地规划隧道施工无疑是至关重要的。近年来,随着虚拟现实技术在地学研究领域的应用,国内外学者开展了一系列卓有成效的研究<sup>[1-4]</sup>。GUTIERREZM, DOUG B, JOSEPH D 等人<sup>[1]</sup>提出了从拍摄图像解释技术研究出发,应用摄取隧道图像获取隧道围岩地质特征与属性信息并建立数据库,然后用虚拟现实技术再现隧道开挖的仿真环境来指导前方开挖施工策略。方法应用隧道实景呈现技术与现场分析技术,能有效决策隧道进一步开挖安全施工方案,但尚不能解决隧道开挖施工前地质灾害风险(水淹、崩塌和瓦斯等)重要信息的预测。钟登华等<sup>[2]</sup>开发了一个基于三维地质建模技术的地下洞室施工过程动态仿真系统,系统应用虚拟现实技术模拟了地下工程开挖虚拟场景,有效地揭示了地下工程地质结构特征、环境属性及其洞室施工部署等,从安全、科学和

有效施工上很好地解决了地下工程施工的规划决策问题,但对于动态开挖过程中地质灾害发生的预测性不能给出有效的参考信息,即不能实现地下工程动态开挖过程中先前预测。朱良峰等<sup>[3]</sup>提出了基于三维地质建模与交互技术下隧道生成和隧道开挖虚拟现实思想,方法主要是通过交互剖切、虚拟钻孔、漫游等可视化技术来揭示隧道围岩地质结构,同样不能实现隧道动态开挖可能发生地质灾害风险的预测,而只能通过交互与可视化技术获得所需空间位置的隧道围岩特征与分布规律。因此,上述学者的研究从不同方面提出了隧道虚拟仿真,但未涉及隧道开挖过程动态地层结构、属性特征等实时变化下的地质灾害预警仿真研究。本文从隧道三维地质建模、地质灾害风险建模和风险信息预测处理研究入手,提出了一种隧道开挖动态实时的隧道围岩地质结构与地质灾害风险预警的计算机仿真方法。方法主要思想是以三维地质建模和地质灾害风险建模与评估为基础,应用计算机仿真技术模拟实际隧道开挖中围岩壁地层结构、地质构造特征等分布场景及其可能产生的地质灾害空间位置、类型与级别等风险信息参

本文受成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究基金项目(119-000022-08)资助。

黄地龙(1955—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机图形学与仿真。

数的预警,以为决策者提供安全科学规划隧道前方的施工策略。方法的研究主要分为三维地质建模、地质灾害分险参数建模和实时裁剪模拟隧道开挖动态过程 3 大步骤。

### 1 三维地质建模与地质灾害风险参数建模方法

三维地质建模是隧道开挖仿真技术的重要基础。目前,三维地质建模方法研究有很多,将其归纳为基于面和实体建模两类方法<sup>[5-9]</sup>,这些建模方法的必要条件是需要大量地质钻孔勘探资料或地层资料与地质剖面资料等。显然,苛刻条件无疑需要高额的地质勘探成本,且并不适用于渐进式隧道工程地质研究。本文提出的三维地质建模方法,首先是利用初始阶段的地表地质勘查和少量地质钻探资料,根据地层产状智能推演,再用交互方法动态建立三维地质模型。其实现思路分为 4 个步骤:1)用地表地质勘查资料获得的地质界线、地质构造(断层、向斜和背斜)、地层产状与地质属性等信息自动追踪划分地层连通域,再结合地形资料构建三维地表地质模型;2)基于地表地质模型切割地质剖面并用地层产状、地质构造信息和少量钻孔作为智能推演约束资料,智能推演与交互式生成地质纵剖面;3)由地表地质模型和纵剖面综合约束推演生成横剖面序列模型;4)依据横剖面序列的同属地层连接原理构建三维地质模型。地质灾害参数模型是以地质建模和岩石坚硬程度、岩体完整程度、地下水状态、结构面状态与地应力为基础,分析划分隧道围岩的类别,并在模拟隧道动态开挖过程中结合开挖汇合资料完成隧道围岩块体稳定性和变形稳定性分析资料,建立地质灾害分险参数数据库。其研究方法原理介绍如下。

#### 1.1 地表地质模型

地表地质模型是一种反映地表地质结构、地层分布及地层产状等地质信息的平面图或三维曲面图(见图 2)。依据地层分布具有区域性特征,可以定义:无论地层的地质构造如何复杂,每个地层属性单元总保持区域的连通性,我们称之为地层属性单元区域连通。如图 1 中 B1—B6 区域,其中 B1 为不受断层切割影响的地层连通区域,为一组地层边界线段、图幅边缘线段有序集合的多边形域;B2、B3、B4 和 B5 为受断层线切割后的地层连通域,为一组地层边界线段、图幅边缘线段和断层线段有序集合的多边形域;显然,上述连通域的提取只需有序追踪出这些线段。而 B6 实际空间上应是封闭地层线构成连通域,但平面上封闭连通性被断层分割。若要恢复,则需要作断层线部分裁剪处理(如裁掉图中虚线段)。为此,地表地质建模的关键方法就是搜索构成地质属性单元的边界线段、断层线段和图幅边缘线段所有集合的多边形和断层线穿越封闭地层的局部裁剪处理。其算法实现步骤如下:

(1)断层裁剪处理,是依据断层穿越封闭地层界线具有仅内交点连接线段需作裁剪的性质。则裁剪算法是:设  $n$  为断层线与封闭地层线各交点相连的线段数,若  $n$  为奇数,则裁剪全部偶数线段;若为偶数,则裁剪全部奇数段。交点计数采用若  $C$  线段落在  $L$  线两侧,则交点计数加 1,落在  $L$  线同侧交点计数不变。

(2)建立拓扑信息表。由图 1 看出,每一个连通域由一组序列的拓扑点(图 1 中的小圆点)构成。因此,追踪连通域就是搜索拓扑点组成的路径,拓扑信息表就是记录每个拓扑的路由信息。拓扑信息表如图 2 所示。

图中变量  $Ltype$  为曲线类型(0 表示图幅边缘线;1 表示开曲线;2 表示封闭曲线); $L_i$  为曲线号; $mVid$  为拓扑点位于  $L_i$  曲线点序号; $mVex$  拓扑点坐标; $mCorssLineSet$  为拓扑点多路径列表,分别记录关联路径的曲线号  $mLineID$  和拓扑点序号  $mJd$ ;PL 和 NL 是一个布尔型变量,分别标记追踪拓扑点正负方向; $count$  是记录拓扑节点使用次数。

(3)追踪地层连通域。事实上,追踪地层连通域,主要是搜索连通域路径上的拓扑节点,其关键又是计算选择路径。本文依据逆时针追踪方式,采用当前追踪路径与待选路径的夹角  $\theta$  为最小判别方法。由此,逆时针追踪连通域上的每一个拓扑节点,并记下两拓扑点间内坐标顶点,直到回到出发点。

(4)分解封闭连通域的包含关系。由于自封闭连通域具有多层包含性,将直接影响地层属性定义,因此需要作包含地层分离处理。依据若连通域 A 包含连通域 B,则有 A 的外接矩形包含 B 的外接矩形。根据这一性质,连通域分解可简化为判别外接矩形的包含关系获取。

(5)标定连通域地层属性。每一个连通域具有各自的地层标注,判断标注点是否在连通域多边形内方可定义地层属性。

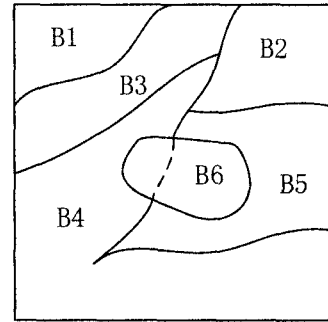


图 1 连通域示意图

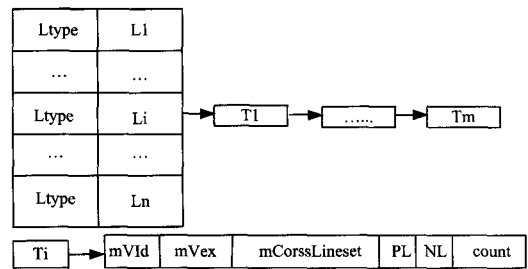


图 2 拓扑表



图 3 地表地质模型

(6)构建地表地质模型,由地层连通域综合地形坐标点资料,采用边界限定三角构网算法即可生成如图 3 所示的某隧道工区的三维地表地质模型(上部窗口为平面地表地质模型,

下部窗口为三维曲面地表地质型)。

### 1.2 智能推演剖面模型

由地质学知识可知,岩层产状位置、走向、倾向和倾角描述了地质岩层局部空间平面,如图4所示,其数学表示式为:

$$\text{走向量: } \vec{a} = \sin\theta\vec{i} + \cos\theta\vec{j}$$

$$\text{倾向量: } \vec{b} = \sin\phi\vec{i} - \cos\phi\vec{j}$$

$$\text{倾斜向量: } \vec{c} = \vec{b} - \tan\alpha\vec{k}$$

则岩层空间平面的法向方程为:

$$\vec{N} = \vec{c} \times \vec{a} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \sin\phi & \cos\phi & -\tan\alpha \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \end{vmatrix}$$

式中, $\theta$ 为岩层走向与正北的夹角; $\phi$ 为岩层倾向面投影线与正北的夹角; $\alpha$ 为岩层真倾角。 $\vec{i} = x - x_0, \vec{j} = y - y_0, \vec{k} = z + z_0; P(x_p, y_p, z_p)$ 为岩层出露点。

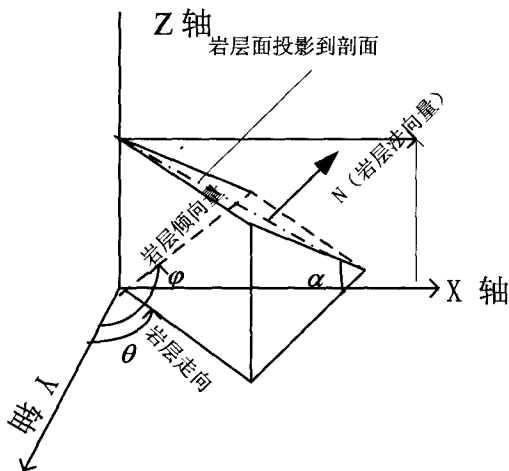


图4 地质剖面与岩层的关系

设地质剖面线与岩层走向的夹角为 $\varphi$ , $P$ 为起点,沿剖面方向取长度为 $L_i$ ,则有: $x = L_i * \cos\varphi, y = L_i * \sin\varphi$ 。

将 $(x, y)$ 代入岩层空间平面法向方程,则可求得 $Z_i$ ,若 $Z_i > z_p$ ,则反向沿剖面方向取值,依次将岩层面投影于剖面即可智能推演生成初始地质剖面,再经地质专家交互编辑生成如图5所示的有效地质剖面图。



图5 纵剖面地质模型

### 1.3 三维地质模型

三维地质模型实体是一个空间三维块状体的集合<sup>[6]</sup>,即可定义: $G = H_u \cup H_d \cup S_b$ , $H_u$ 为层块上层界面; $H_d$ 为层块下层界面; $S_b$ 为围成层块上下层界面的闭合界面。由此,三维地质模型满足构造几何(CSG, Constructive Solid Geometry)集合运算性质。不难认为,任意复杂的三维地质模型是一组结构简单、互不相交的地质单元体集合。由定义及集合运算可知,三维地质建模方法:1)由纵剖面、地层连通域及产状要素和地质构造等信息智能推演生成初始横剖面序列并由地质专家交互编辑,生成有效横剖面序列;2)分别追踪横剖面地层连通域并定义地质属性、生成地质横剖面序列;3)根据地层结构规律,相邻剖面同属性地质单元体连接为一个几何形体,运用CSG集合运算生成如图6所示三维地质模型。



图6 三维地质模型

建模方法具有以下优点:1)对基础资料要求不高,能够满足不同地质勘查阶段的三维地质建模要求,被认为是与地质工程研究进展有同步勘探精度的三维地质模型方法;2)具有较高的地质空间分布的一致性和空间整合的合理性。

### 1.4 地质灾害风险参数建模

地质灾害风险参数建模是建立在三维地质建模基础上,采用铁路隧道设计规范(TB 10003-2001),以隧道围岩岩石坚硬程度、岩体完整程度、地下水、结构面状态和地应力影响等主要因素为依据,地质灾害风险参数分析建模分为静态和动态两大步骤。第一步建立隧道围岩质量基本信息,该步骤主要依据隧道围岩地面地质调查与钻孔勘探等初始静态资料,定性分析出隧道岩体的坚硬程度、完整程度、地下水、地应力和岩体结构等岩体质量和环境状态信息,建立如表1所列。

表1 隧道围岩质量基本信息表

位置	岩石坚硬程度			岩体完整程度			环境状态信息		
区段	岩性	风化程度	节理发育程度	节理组数	节理间距	岩体结构类型	地下水的影响程度	结构面产状的影响	地应力的影响

第二步建立隧道围岩质量参数表,以隧道动态开挖揭示的隧道围岩为样本,应用力学测试、物理学参数测试及其他数

学统计测试等方法,定量分析获得隧道围岩岩体质量的测试参数与环境状态参数,如表2所列。

表2 隧道围岩质量参数表

位置	岩石的坚硬程度			岩体完整程度			环境状态信息			
区段	抗压强度	岩石点荷载	无侧限抗压强度	岩体完整系数 Kv	岩体体积节理数 Jv	岩石质量指标 RQD	结构面状态	地下水的	结构面产状	地应力的
	强度	抗压强度	抗压强度	系数 Kv	节理数 Jv	指标 RQD	状态	影响程度	的影响	影响

依据很好岩体、好岩体、较好岩体、较差岩体和很差岩体5个隧道围岩质量等级规范指标,以表1和表2中的一个记录作为特征向量,分别计算出特征向量各变量参数值。综合特征向量各变量参数值,依据工程岩体分级标准(GB50218-94)划分出该区段隧道围岩级别。在仿真模拟隧道开挖过程中,依据隧道开挖位置对应关系,可动态地预警围岩分类级别、地下水、地下应力等地质灾害风险信息。

## 3 隧道开挖仿真实现方法

虚拟现实是一门集成人与信息的科学<sup>[10-14]</sup>。有了虚拟现实技术,复杂或抽象系统的概念的形成可以通过将系统的各子部件以某种方式表示成具有确切含义的符号而成为可能。隧道开挖虚拟仿真是以三维隧道地质模型、地质灾害风险数据库为仿真隧道开挖基础场景,以隧道空间交互式漫游

仿真隧道开挖过程、隧道围岩地层结构特征、分布规律和预警开挖前方可能发生的地质灾害风险为目的。仿真开挖方法思路是：以隧道开挖设计模型为开挖裁剪多边形，隧道设计线路为漫游方向，空间动态地裁剪三维地质模型的空间地层属性元素重构隧道开挖模型空间，揭示隧道围岩地质结构特征分布规律和地质灾害风险。具体实现步骤：1)由用户交互式建立隧道开挖设计模型并以此作为裁剪多边形模型；2)沿隧道设计线路，用多边形裁剪算法<sup>[15]</sup>，对三维地质模型作空间剖面裁剪生成地质属性多边形序列剖面；3)依据地层结构关系、断层结构关系和属性位置关系作同地质属性单元连接，生成隧道虚拟开挖场景模型；4)漫游仿真隧道开挖施工，依据开挖位置与地质灾害风险数据库同步处理计算，预警报告当前位置的地质灾害风险信息。图7给出了某里程位置的隧道虚拟开挖的场景，隧道底部为隧道里程标记，开挖前方标出了该里程段的地质灾害类别与级别；用虚线标注断层发生的部位。同时这些信息在右部窗口显示列出。

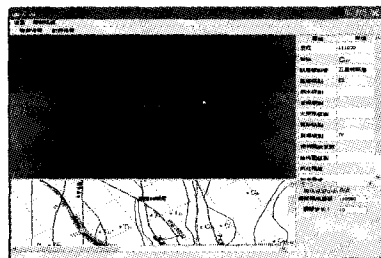


图7 隧道虚拟开挖

**结束语** 紧密结合隧道工程建设的实践，有效地应用计算机信息处理、数据库管理、可视化和虚拟现实等技术，研发了一套适应解决隧道工程3D复杂地质结构的隧道仿真开挖软件系统。系统提供的三维地质建模与隧道仿真开挖功能，能可视化地揭示隧道围岩内部地质结构特征及空间分布规律，清晰地标记出隧道围岩分类、地质灾害风险(灾害源类型、位置、强度级别和影响规模等)等信息。系统提供的各种可视化图形工具和交互编辑工具，能够实现地质专家扩展逻辑思维空间和知识推理，且能实现地质空间分布的一致性和合理性解释。系统运行在几个大型铁路隧道开挖工程中，结果证明：其对于隧道开挖科学规划与安全施工起到了极为重要的作用。

虚拟仿真技术在地下隧道工程的应用有着极大发展与应

用空间，更进一步将地球物理勘探资料、隧道超前预报资料等综合于三维地质模型同步建模并融入系统一体化，无疑将对地下工程地质状态的动态分析、风险评估和隧道实时施工的安全措施规划与决策发挥更大作用。

## 参考文献

- [1] Gutierrez M, Doug B, Joseph D, et al. An IT-based system for planning designing and constructing tunnels in rocks[J]. Tunneling and Underground space Technology, 2006, 21(3/4): 221
- [2] 钟登华, 王忠耀, 李明超, 等. 复杂地下洞室群工程地质三维建模与动态仿真分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(11): 1436-1441
- [3] 朱良峰, 任开蕾, 潘信, 等. 地质实体模型的三维交互与分析技术研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1959-1963
- [4] 王宝军, 施斌, 宋震. 基于GIS与虚拟现实的三维地质建模方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3563-3568
- [5] 钟登华, 李明超, 杨敏敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575-580
- [6] 黄地龙, 邓飞. 复杂地层结构模型三维重构与可视化方法研究[J]. 成都理工大学学报, 2008, 35(5): 553-558
- [7] 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[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(3): 285-290
- [8] 柴贺军, 黄地龙, 黄润秋, 等. 岩体结构三维可视化及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 217-220
- [9] 王李管, 尚晓明, 曾庆田, 等. 三维可视化建模技术在岩石质量评价中应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3554-3559
- [10] 李邵军, 冯夏庭, 王威, 等. 基于地层信息的三维洞室可视化仿真技术研究[J]. 岩土力学, 2008, 1(29): 235-239
- [11] 戴会超, 田斌. 科学计算可视化仿真及其在水电行业中的应用[J]. 水利发电学报, 2005, 24(6): 88-94
- [12] 张建斌, 朱合华, 朱岳明, 等. 厦门翔安海底隧道数字化建模技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1237-1242
- [13] 刘涛, 沈明荣, 陶履彬, 等. 连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1802-1808
- [14] 谭德宝, 张煜, 孙家柄. 滑坡区域的真三维数字仿真[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(6): 67-70
- [15] 刘勇奎, 高云, 黄有群. 一个有效的多边形裁剪算法[J]. 软件学报, 2003, 14(4): 845-856
- [3] Roesh M. Snort-lightweight intrusion detection for networks[C]// Proceedings of the USENIX LISA'99 Conference. Seattle, WA, November 1999
- [4] Axelsson S. punBB-fast fallacy and its implications for the difficulty of intrusion detection[C]// Proceedings of the 6th ACM Conference on Computer and Computer and Communications Security. Singapore, 1999
- [5] Sidiroglou K A S, Akritidis P, Xinidis K, et al. Detecting targeted attacks using shadow honeypots[C]// Proceeding of the USENIX Security Symposium Baltimore, MD, August 2005
- [6] Common vulnerabilities and exposures[OL]. <http://www.cve.mitre.org>, 2003
- [7] Breache Security Breachgate [OL]. <http://www.breach.com>, 2006-08
- [8] Citrix. Citrix application firewall [OL]. <http://www.citrix.com>, 2006-08

(上接第348页)