

巷道实体的三维建模研究与实现

徐志强^{1,3}, 杨邦荣¹, 王李管^{2,3}, 毕林^{2,3}

XU Zhi-qiang^{1,3}, YANG Bang-rong¹, WANG Li-guan^{2,3}, BI Lin^{2,3}

1.中南大学 信息科学与工程学院,长沙 410083

2.中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083

3.长沙迪迈信息科技有限公司,长沙 410083

1.School of Information Science and Engineering,Central South University,Changsha 410083,China

2.School of Resources and Safety Engineering,Central South University,Changsha 410083,China

3.Digital Mine Co. LTD,Changsha 410083,China

E-mail:emailer.xu@yahoo.com.cn

XU Zhi-qiang, YANG Bang-rong, WANG Li-guan, et al. Laneway entity three-dimensional modeling study and realization. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(6): 202-205.

Abstract: The essay elaborates the three dimensional modeling method of median line adding the cross section, and then makes the laneway entities run-through by Boolean operations when they intersect. Proposing the concrete solutions as to the essential technology of the modeling process in three dimensional coordinates transformation of cross section, triangle grid production and Boolean operations between the laneway entities. Finally, it produces the final test result. The experiment confirms the feasibility of three dimensional modeling methods.

Key words: three-dimensional modeling; laneway; coordinates transformation; Boolean operations

摘要: 阐述了中线加断面生成巷道体三维建模方法, 然后对相交情况下的巷道体进行布尔运算生成贯通的巷道。针对建模过程中存在的巷道断面的三维坐标转换、三角网格的生成、巷道体之间的布尔运算等关键技术, 提出了具体的解决方法, 并给出了最终的实验结果, 实验验证了此三维建模方法的可行性。

关键词: 三维建模; 巷道; 坐标变换; 布尔运算

文章编号: 1002-8331(2008)06-0202-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** P208

计算机技术、计算机图形学及可视化技术的发展为三维建模及可视化提供了可行性, 国外在这方面的研究比较成熟, 已经推出了成功的三维建模产品并应用于实际生产中, 比如应用于矿山开采的 Datamine、Micromine、Surpac 部分的实现了三维辅助设计的功能。国内在三维建模方面研究较少, 技术不够成熟, 没有成型的产品应用于实际生产, 而国外软件不适合中国国情, 不易引进, 因此为了更好地服务于国内的实际生产, 进行三维建模的研究是非常必要。

本文结合实际重点对矿山地下巷道三维建模进行了研究, 利用巷道中线加断面生成巷道体, 然后对相交情况下的巷道体进行布尔运算的三维建模方法, 较好地实现了三维巷道的建模。

1 巷道三维建模及数据结构

为了便于巷道的描述, 将巷道分解为多个单一的巷道体, 单一巷道体相互交错构成了整个巷道的拓扑网络。其中巷道体是巷道网络的基本元素, 为了便于巷道体的生成以及巷道体间

的布尔运算需要建立合理巷道体的数据模型和数据结构。巷道体可抽象为巷道中线、巷道断面和巷道的三角网格, 巷道中线是用来描述巷道网络拓扑结构, 断面用来描述巷道的截面的形状, 三角网格最终用来描述巷道体, 它是有相邻断面对应点相连接构成。

1.1 巷道体建模

(1) 巷道中线建模

在井项工程中巷道的中线大致可以分为 3 类: 直线型、弧形、任意曲线。

对于直线型建模, 给定起始点位置, 线长度, 方位角即以确定, 或是给定起点和终点位置, 同样可以确定中线段。弧形中线的建模相对复杂, 弧形中线一般用以描述斜坡道和转弯道, 一般给定弧段的起始点, 旋转弧度, 旋转的半径和坡度即可建立一个弧段模型, 以斜坡道为例, 在三维建模中利用线段逼近的方式通过多段线表达实际意义上的弧段, 如图 1(a)所示, 通过给定的 P_0 点坐标, 角度旋转弧度 α 和坡度 β 以及旋转半径 R ,

作者简介: 徐志强(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 计算机图形学、科学计算可视化; 杨邦荣(1953-), 男, 副教授, 研究方向: 计算机图形学、多媒体、网络通信; 王李管(1964-), 男, 教授, 研究方向: 岩层控制理论与技术、工程模型与可视化分析技术; 毕林(1975-), 男, 博士研究生, 主要从事 GIS、数字矿山方面的研究与软件开发工作。

收稿日期: 2007-06-18 **修回日期:** 2007-08-30

可以确定弧段上各个线段,可通过设定组成弧段的密集程度来生成线段的个数,如图1(b)所示,设置了7个线段来逼近,通过将弧 P_0P_1 在水平面上的投影 $P_0'P_1'$ 均分为7份,在三维环境下在通过解析几何的方法可以求出如图1(b)所示中各个线段的端点坐标进而确定多段线。

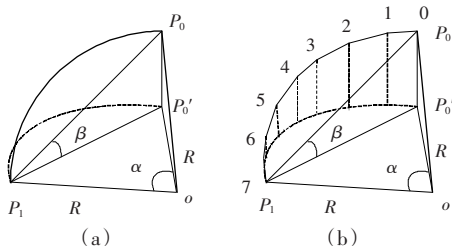


图1 巷道中线三维建模

(2) 巷道断面建模

巷道断面的基本形状是梯形和拱型,有时结合地质条件或其它工程情况,也可选择圆形、多角形和椭圆形等类型,本文以圆弧拱形为例,其它断面可类比直壁拱形进行建模。

图2(a)为一圆弧拱型的一个断面,利用 R 、 W 、 H 就可以确定断面的形状,为了在三维环境下表达巷道断面,将拱顶的圆弧部分也用线段逼近的方法表达,根据实际需要,可以用不同数量的线段来逼近,如图2(b)拱顶用7个线段逼近圆弧的效果图。

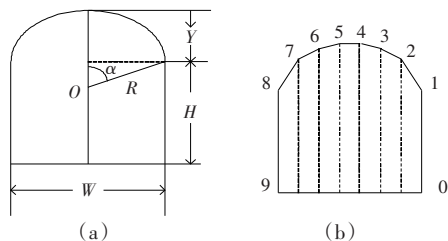


图2 巷道断面三维建模

1.2 巷道数据结构

在三维图形学中最基本要素是点,由点生成线,由线生成面,由面生成体。巷道体模型中中线、断面和网格可用最基本的元素点坐标加其拓扑来描述,本文利用面向对象语言 C++ 定义了辅助类点类、巷道中线类、巷道断面类、巷道网格类和巷道类,为实现巷道的三维建模建立基本的数据结构。

(1) 三维点类:

```
Class CPoints{
double *pointsCoordinateArray;    //存储三维点坐标
long *pointsCell;                //存储点的拓扑
void InsertPoint(long pointID,double *pointXYZ);
void GetPoint(long pointID,double *pointXYZ);
...//其它成员变量和成员函数
}
```

(2) 巷道中线类

```
Class CMidLine{
int midLineType;                //中线类型
CPoints *midline                //存储巷道中线点和拓扑
...//其它成员变量和成员函数
}
```

(3) 巷道断面类

```
Class CSection{
```

```
int sectionType;                //断面类型
CPoint *section;                //存储巷道断面点和拓扑
...//其它成员变量和成员函数
}
(4) 巷道网格类
Class CTriangleGrid{
CPoint *triangleGrid;          //存储巷道三角网格点和拓扑
...//其它成员变量和成员函数
}
(5) 巷道类
Class CLaneWay{
CMidLine **midline;            //存储巷道中线
CSection **section;            //存储巷道断面
CTriangleGrid **triangleGrid;  //存储巷道三角网格
void CreateLaneWayTriganleGrid(); //创建巷道的三角网格
//判断巷道中线是否相交
bool InterSectionWithMidLine(CMidLine*midline0,CMidLine*midline1);
//对于两个巷道中线相交的巷道体进行布尔运算,实现巷道相交贯通
void BooleanOperation(CTriangleGrid *triangleGrid0,CTriangleGrid *triangleGrid1);
...//其它成员变量和成员函数
}
```

2 巷道体算法实现

巷道体建模是采用中线加断面生成的方法来实现,首先根据巷道中线模型在世界坐标系中建立所需的巷道中线,在中线节点的局部坐标原点处根据巷道断面模型生成巷道断面数据,然后将节点的局部坐标变换到世界坐标系中,最后有相邻断面对应点相连构成三角网格,完成巷道体的生成。对于巷道中线建立和巷道断面数据生成比较简单,下面只针对局部坐标系生成、坐标变换和三角网格的生成进行阐述。

2.1 确定局部坐标系

在建模中,物体通常在局部坐标参数系中描述,然后将物体重定位到世界坐标系中。在每个节点处建立局部坐标最简便的方法是根据中线本身来形成类似于 Frenet 框架^[9]的正交框架,根据正交框架确定此节点处巷道断面的方向和变换的位置。

假定巷道中线有三个点 P_0 、 P_1 、 P_2 组成的多段线形成,如图3(a)所示, P_0 、 P_2 为巷道中线的起始点和终点,其中 P_1B 是 $\angle P_0 P_1 P_2$ 角平分线,面 π 是中线段 P_1P_0 和 P_1P_2 的平分面,其局部坐标的 $X'Z'$ 面和 P_1B 均位于面 π 中。在 P_1 为原点建立局部坐标系 $X'Y'Z'$,其中 $X'Y'$ 是与世界坐标系中的 XY 面平行(为了确保巷道断面均平行于 XY 面),可通过 P_1 点和其前后两点计算正交框架,得到三个互相垂直的向量 N_1 、 B_1 、 T_1 ,构成右手局部坐标系。其中 N_1 为 X' 方向的单位向量, B_1 为 Z' 方向的单位向量, T_1 是 Y' 方向的单位向量。

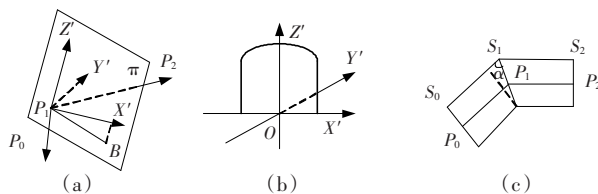


图3 三维坐标变换

可通过已知条件求得向量 N_1, B_1, T_1 , 设 v_0 是角平分线 P_1B 的单位向量, v_1 是 $\Delta P_0P_1P_2$ 所在平面上的法线单位向量, v_2 是 π 面法线单位向量, v_3 是中线段 P_1P_0 单位向量, v_4 是中线段 P_1P_2 的单位向量。 P_0, P_1, P_2 点在世界坐标系中坐标值已知, 即可求得向量 v_3, v_4 , 由向量的叉乘公式求得 $v_1=v_3 \times v_4$, 有角平分线的向量计算公式求得 $v_0 = \frac{v_3}{\|v_3\|} + \frac{v_4}{\|v_4\|}$, 通过已知向量 v_0, v_1 求得向量 $v_2=v_0 \times v_1$ 。 其中 $T_1=v_2$, 则 N_1 是单位向量 v_0 在世界坐标中的投影向量, 即 v_0 向量的 Z 方向的分量为 0 时等于 $N_1, B_1=T_1 \times N_1$ 。

2.2 坐标变换

为了描述从一个系统变换到另一个系统, 需要建立让两个坐标系对齐的变换矩阵, 首先, 建立关于坐标轴的一系列旋转, 接着是将局部坐标原点变到世界坐标原点位置变换。 然而为了保持巷道侧面相互平行, 需要在旋转变换前对巷道断面在 X' 轴方向进行缩放。

(1) 缩放变换

图 3(c) 为图 3(a) 巷道中线放置断面后的俯视图, 巷道侧面相互平行, 起始点和终点断面与中线垂直, 其中角 α 为局部坐标 X' 与 P_1P_0 夹角, 缩放的比例可以通过如下求得: 缩放比例 $k=1/\cos\alpha$ ($\cos\alpha$ 可以有 v_3 和 N_1 的叉乘公式求得), 然后通过缩放矩阵^[2]对巷道断面上的点 X 坐标值扩大 k 倍。

(2) 旋转变换和平移变换

一旦计算出了 P_1 处的正交框架的向量 N_1, B_1, T_1 , 这样可以很容易得到巷道断面变换到的位置和方向的变换矩阵 M , 矩阵 M 必须把 i, j, k 分别变换到 N_1, B_1, T_1 , 还必须把局部坐标原点变换到巷道中线的节点上, 则这个矩阵的列值直接由 N_1, B_1, T_1 和节点坐标值 C_1 组成, 均匀坐标表示为: $M=(N_1|B_1|T_1|C_1)^{[1]}$ 。

对于巷道中线起始节点和终结节点, 巷道断面法线方向与巷道中线的向量的方向相同, 其坐标变换的原理相似, 不再阐述。

2.3 巷道三角网的生成

由于巷道的断面形状比较规则, 因此巷道断面的三角网络的生成相对比较简单, 现在以两个简化的拱顶断面 S_0, S_1 为例阐述三角网络的生成方法, 如图 4 所示, 每个断面都有 8 个坐标点组成, 断面数据存储在数据结构 $CSection$ 中, 首先取得断面 S_0 的点 $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$, 有 P_8, P_9, P_0 生成一个三角形, P_0, P_1, P_2 生成一个三角形, 然后将这两个三角形分别存储在三角网络的数据结构 $CTriangleGrid$ 中, 再分别取得 S_0, S_1 的下两个点, 用同样的方法生成三角形存储到三角网络数据结构中, 直到所有的点取完, 就完成巷道三角网的生成。

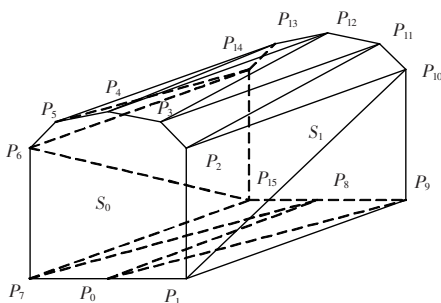


图 4 三角网生成

3 巷道体之间交叉处理布尔算法实现

对于巷道体之间相互交叉的情况要实现巷道的贯通, 以便

于矿山开掘量的计算, 对巷道交叉处理已经有解决方法, 例如魏占营提出的在节点处进行曲线插值方法^[3]等, 但其方法会出现扭曲的现象, 本文通过对巷道体的三角网格实体进行布尔运算实现巷道贯通。 首先由 $CLaneWay$ 类的 $InterSectionWithMidLine()$ 函数判断各个巷道体的中线之间是否存在相交的情况, 遇到相交的情况利用 $BooleanOperation()$ 函数对其三角网格进行布尔运算, 实现巷道体相交部分的贯通, 下面针对两个三角网格实体之间的布尔运算算法实现的步骤及基本原理阐述如下:

(1) 根据相交测试求出两两相交的三角形面片之间的交线。

本文首先利用 Rapid 算法^[4]提供的 OBB 树层次结构算法可以快速地得到三角网格体的相交三角形, 进一步通过空间三角形相交交线算法^[5]计算相交三角形队列的交线, 此时可以直接建立并记录其交线邻接关系, 三角形相交存在如下两种情况: ①平行共面; ②不平行。

对于第①种情况两个三角形没有实际的交点和交线, 本算法不作为交线考虑。

对于第②种情况如图 5 所示, 两个三角形 T_0, T_1 分别位于平面 π_0, π_1 中, 如果 T_0, T_1 存在相交部分必然会在面 π_0, π_1 的交线 L 上, 假设 T_0 与 π_1 的交线 $S_0=I_{00}I_{01}$, 假设 T_1 与 π_0 交线为 $S_1=I_{10}I_{11}$, 然后求 S_0 与 S_1 的公共部分, 则 T_0 与 T_1 的交线 $I=S_0 \cap S_1$ 。

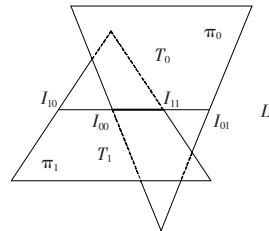


图 5 三角形相交

(2) 根据三角形之间的相交线计算巷道三角网格实体相交曲线。

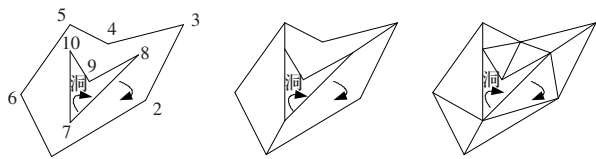
在计算出了网格相交三角形交线后, 相交三角形交线成对存储在数组中。 由于 OBB 树相交检测算法是按照分离轴分割原则进行检测求交的, 所以计算出的三角形交线队列之间没有必然的物理位置关系, 需计算相交线的拓扑关系, 从而得到三角网格实体之间相交曲线。

通过如下方式计算相交曲线: 取出一条交线 I_1 , 判断它的下一条交线是否存在, 如果不存在就从剩下的交线中取出一条, 并判断该条交线的上一条交线是否存在, 如果存在, 再取另一条交线, 直到该交线的上一条交线不存在, 记为 I_2 ; 计算 I_1 的尾端点与 I_2 的头端点的距离并判断是否足够小, 如果是足够小则表明两点重合, 在 I_2 与 I_1 建立邻接关系, 并将 I_1 的尾端点与 I_2 的头端点记为重合点; 重复上述过程直到取出所有交线。

(3) 经相交曲线切割后得到的多边形进行三角化并加入巷道的三角网格中。

通过相交曲线对巷道实体进行分割会生成多边形, 多边形既可能是简单的凸多边形, 也可能是凹多边形, 而且其中可能存在洞, 所以必须对其进行三角化。 多边形三角剖分的算法很多, 其中至少有三种比较流行的算法, 比如 Toussaint 等提出来的 Recursive Ear Cutting 算法; Garey 等提出的 Sweep Line 算法^[6], Sediel 等提出的 Incremental Randomized 算法^[7]等。 Sweep Line 算法在实际应用中使用最广泛, 本文采用该算法进行多边

形的三角化。Sweep Line 算法的基本原理是:首先将多边形进行分割,使其成为一个或多个单调多边形,然后再对单调多边形进行三角化。为了将多边形分割为单调多边形,需要将多边形顶点分为5种类型:起点、终点、分离点、合交点、常规点,如图6(a)所示,(1,8)为起点,(4,10)为终点,(3,5)为分离点,(7)为合并点,(2,6,9)为常规点。将多边形分割成单调多边形是通过添加对角线消除分离点与合并点来实现的,如图6(b)所示。



(a)顶点的5种类型 (b)添加对角线单调化 (c)三角化结果
图6 交域多边形形成

(4)最后通过网格间的邻接关系判断非相交网格的取舍,得到最终三角网格。

相交三角形的交线有如图7所示的4种情况:(a)两条边有交点,另一条边保留;(b)两条边有交点,而另一条舍弃;(c)三条边都有交点;(d)三条边都没有交点。

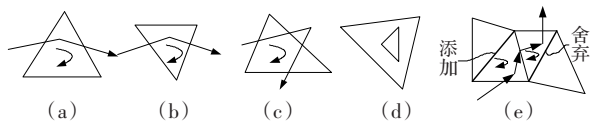


图7 交域多边形形成

进行非相交三角形取舍的方法是:以一条保留边为种子,取共享该边的相邻三角形,判断其是否作其它任何标记(包括“相交”标记),如果还没有就将其加入保留数据中,并作“加入”标记,然后再以该三角形一条边进行以上操作;以一条舍弃边为种子,取共享该边的相邻三角形,判断其是否作标记,如果没有就将其作“舍弃”标记,再以该三角形一条边进行以上操作,

直到所有三角形都被标记。

4 实验及结论

利用 VC++6.0 编程工具和 VTK(Visualization Toolkit)可视化工具包,通过中线加断面方法初步实现了三维巷道建模,并可以实现对于整个矿山巷道一次性的生成,基本满足井项工程建模的需要,图8是三维环境下的巷道建模效果图,图9是巷道体之间通过布尔运算实现贯通的效果图。今后研究的重点在于如何更好地解决井巷的优化设计,建立巷道的网络拓扑结构支持更好的井巷中的虚拟漫游功能等。

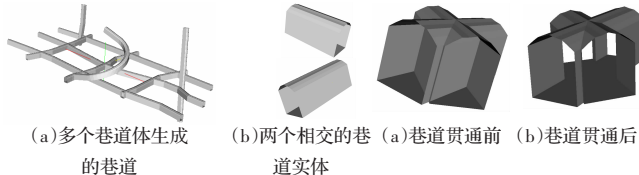


图8 巷道建模效果图

图9 巷道贯通效果图

参考文献:

- [1] Hill F S.计算机图形学[M].罗霄,商青华,袁春阳,译.北京:清华大学出版社,2006:316-321.
- [2] Dunn F,Parberry I.3D 数学基础:图形与游戏开发[M].史银雪,陈洪,王荣静,译.北京:清华大学出版社,2005:94-98.
- [3] 魏占营,王宝山,李青元,等.地下巷道的三维建模及 C++实现[J].武汉大学学报:信息科学版,2005,30(7):650-653.
- [4] Alford,Sackett, Neldeerg. Mass customization an automotive perspective[J].Int Jour Production Economics,2000,65:99-110.
- [5] Sunday D. Intersections of rays, segments, planes and triangles in 3D[EB/OL].http://geometryalgorithms.com/algorithms.htm.
- [6] Garey.Triangulating a simple polygon[J].Information Processing Letters,1978,7(4).
- [7] Seidel R.A simple and fast incremental randomized algorithm for computing trapezoidal decompositions and for triangulating polygons[J].Computational Geometry:Theory and Applications,1991(1):151-154.

(上接 78 页)

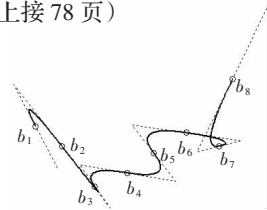


图2 $\kappa_s(0)=-6, \theta=2.2$ 时的 B 样条插值曲线

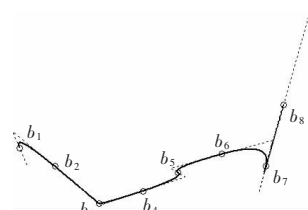


图3 $\kappa_s(0)=6, \theta=2.2$ 时的 B 样条插值曲线

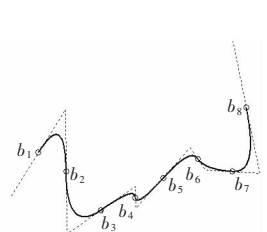


图4 $\kappa_s(0)=2, \theta=-1.78$ 时的 B 样条插值曲线

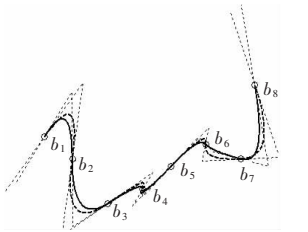


图5 $\kappa_s(0)=2, \theta=-1.78$ 时的 B 样条插值曲线

5 结束语

本文给出了构造二次均匀 B 样条插值曲线的方法,由该

方法构造的插值曲线除保持二次均匀 B 样条曲线的优点外,还具有如下优点:

(1)若给出某段曲线的首端端点曲率和该段曲线的首端切矢量的方向角,则二次均匀 B 样条插值曲线的控制顶点可以由式(20),式(21)求得,它不需要做近似计算或者求解大型的方程组来反求控制顶点,从而减小了计算量;

(2)曲线的整体形状可以通过改变第 k 段曲线首端的相对曲率 $\kappa_k(0)$ 与夹角 θ 的值进行调整,有效而且直观。

参考文献:

- [1] 王国瑾,汪国昭,郑建民.计算机辅助几何设计[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [2] 施法中.计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条(CAGD&NURBS)[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [3] 朱心雄.自由曲线曲面造型技术[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] Yamagushi F.A new curve fitting method using a CRT computer display[J].Graphics and Image Processing,1978(7):425-437.
- [5] 林意,熊汉伟,骆少明,等.过控制顶点的 B 样条曲线[J].江南大学学报,2003,2(6):553-555.
- [6] 彭家贵,陈卿.微分几何[M].北京:高等教育出版社,2002.