

基于特征断面的复杂巷道段三维建模

齐向明¹, 陈振国^{1*}, 陆全辉²

(1. 辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125100; 2. 黑龙江省地质测绘院, 哈尔滨 150000)

(* 通信作者电子邮箱 chenzg456@163.com)

摘要:为解决巷道断面随工程需要及岩层变化不断改变,导致巷道三维建模程序复杂的问题,提出基于特征断面的巷道三维建模思想,通过建立巷道特征断面模型库,实现变化巷道段的三维建模,以期提高复杂巷道段的建模效率。首先阐述建模数据的采集方法,并对巷道断面进行了细化坐标分析;同时提出拐角处断面变化巷道段的平滑处理算法(通过圆弧来圆滑拐角处巷道中心线),对普通巷道段采用三角剖分形成三角网完成巷道段的建模;而巷道断面发生变化的复杂巷道段存在简单曲面四边形,采用 Bézier 曲面及曲面的拼接完成巷道段的建模,并在实验中进行了验证。

关键词:三维建模;巷道特征断面;断面变化;拓扑关系;Bézier 曲面

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

3D modeling of complex tunnel sections based on characteristic section

QI Xiangming¹, CHEN Zhenguo^{1*}, LU Quanhui²

(1. School of Software, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125100, China;

2. Heilongjiang Minerals Bureau Survey Courtyard, Harbin Heilongjiang 150000, China)

Abstract: To resolve the problem of the complex 3D tunnel modeling generated by the changes of the tunnel sections at different rock formations during the project, the 3D tunnel modeling based on the characteristic sections was proposed. Through establishing the characteristic section model library, the 3D modeling of the changed tunnel sections was realized and the efficiency of the modeling of the complex tunnel sections was improved. Following the illustration of the data collection method and an analysis of the characteristic sections with detailed coordinates, the smoothing algorithm (smoothing the tunnel axis at the corner by an arc) of the changed tunnel sections at the corner was proposed. For the ordinary tunnel sections, the triangulation was applied in the 3D modeling; for the complex sections with simple quadrilateral structure, the 3D modeling was realized by using the Bézier surface method and the surface splicing techniques which has been validated through experiments.

Key words: 3D modeling; tunnel characteristic section; section change; topological relation; Bézier surface

0 引言

巷道是矿山地下工程的生命线,为矿山地下开采提供施工空间,是运输和通风的通道,也是安放开采设备的主要场所。通过三维建模技术实现矿山巷道的三维可视化,不仅反映了巷道中的真实情景,而且为施工排险等工作提供依据,因此巷道的三维建模就显得尤为重要。在数字化矿山相关技术的发展过程中,很多学者致力于矿山地下巷道三维建模技术的研究^[1-6],丰富了井工煤矿巷道的三维建模技术。但针对矿山中部分巷道所存在的巷道断面随着地质构造及施工要求不断改变的情况,并没有给出具体的解决方案。本文从矿山测量角度出发,针对矿山巷道断面变化巷道段的三维建模技术,提出基于特征断面的巷道三维数据模型,即通过建立巷道特征断面模型库,并对部分巷道特征断面进行离散化分析,实现基于巷道中心线及巷道特征断面的建模方法,给出特征断面变化巷道段的具体描述和实现过程,完善矿山地下巷道的三维建模技术。

1 建模数据采集

已有的三维巷道实体建模研究,依据其数据来源可分为两大类:基于中心线(或导线)的巷道实体三维建模和基于实

测底板边界线的巷道实体三维建模^{[1]626}。基于中心线的巷道导线测量在矿山测量中得到充分的利用,其观测数据主要由方位角、高差、平距组成,并通过前、后视棱镜高与仪器高以及地面已知控制点的三维坐标,最终计算出导线控制点的三维坐标,再使用控制点来实现对矿山巷道的二维描述,这是矿山测量中的矢量数据来源。相对二维平面图的绘制,要完成该方法的三维建模还需在控制点处观测其相应断面参数,并在断面变化处添加控制点,加以标注其断面属性,以便在特征断面模型库中提取相应断面模型或构建新的不规则断面模型,完成巷道的三维建模,如表1所示。

表1 导线测量的主要数据

字段标题	字段名	字段标题	字段名
测站点	Os	平距	Hd
前视点	Fv	斜距	Sd
后视点	Rv	仪器高	Hi
方位角	Az	棱镜高	Hp
垂直角	Va	巷道宽	Wt
断面参数	Fs	控制点	Cp
断面属性	Sp	高差	Hd

收稿日期:2013-04-25;修回日期:2013-06-12。

作者简介:齐向明(1966-),男,辽宁阜新,副教授,硕士,主要研究方向:计算机图形学; 陈振国(1986-),男(回族),黑龙江鸡西人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学、工程模型与可视化分析; 陆全辉(1974-),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,主要研究方向:数字矿山。

2 巷道特征断面模型库的建立

巷道断面是建立巷道三维模型的关键依据,因此对断面的研究是十分重要的。影响矿山巷道断面选择的因素有很多种,其中主要因素有:压力的大小和方向、巷道的具体用途和使用时间、采用的支护方式、工程设备及通风的需要。根据上述内容将巷道断面主要区分为:直墙拱形、梯形、矩形,及其拓展样式,如图 1 所示。

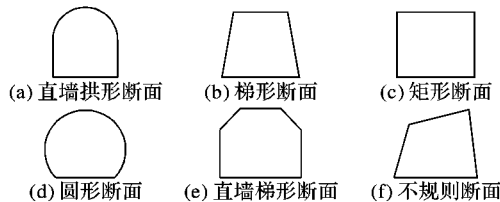


图 1 几种特征断面模型

巷道特征断面模型库,为巷道特征断面模型构建的一个模块,由巷道中真实存在的特征断面构成,除基本断面外也包含对不规则断面的构模设置,并将新的特征断面模型添加到模型库中,为今后的建模工作提供帮助。应用特征断面模型库进行巷道三维建模时,针对不同情况下巷道断面的变化,提取相应的巷道特征断面模型,输入相应参数,来完成巷道段的三维建模。本文采用将每一个巷道特征断面模型离散化为 16 个断面点连线的方法(主要为了满足巷道断面的细化,也可根据实际要求减少特征点数量;断面点离散原则:采用多边形近似拱形或不规则图形,首先保证角点与控制点不变,并按比例将顶板轮廓线离散化为 13 个特征点以满足断面结构的需求),进而将矿山中由于客观需要而形成的各种不规则断面进行细致而准确的表述。在矿山巷道中根据其压力、用途及形状,常见的巷道有三种:直墙拱形巷道,主要为矿山中的永久巷道,其中包含入风巷道、回风巷道、运输巷道等;梯形巷道,主要为临时巷道,即采煤准备巷道;以及由于岩层构造或其他需求形成的不规则断面的巷道。以上述三种巷道特征断面为例给出巷道断面点的具体算法。

如图 2(a) 所示,在 XOZ 平面坐标系中为直墙拱形巷道断面,将直墙拱形特征巷道断面分成 16 段,含 16 个断面点, h 为直墙墙高,拱顶半径为 a ,则断面宽度为 $2a$,原点 O 为断面底板中点,16 号点与 O 重合,1 号点及 15 号点分别为断面的两个角点,2 ~ 14 号点为断面顶板均匀分布的断面点,则其 15 个断面点的坐标依次为式(1) ~ 式(3) 所示, n 为对应点号:

$$\begin{cases} x_1 = -a \\ y_1 = 0 \\ z_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_n = -a \times \cos \frac{(n-2)\pi}{12} \\ y_n = 0 \\ z_n = h + a \times \sin \frac{(n-2)\pi}{12} \end{cases} ; n \in [2, 14] \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{15} = a \\ y_{15} = 0 \\ z_{15} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

如图 2(b) 所示,在 XOZ 平面坐标系中为梯形巷道断面,将一个梯形断面分成 16 段,含 16 个断面点, h 为断面高, a 为顶板宽度, b 为底板宽度,原点 O 为断面底板中点,16 号点为

坐标原点处,1 号点及 15 号点分别为断面的两个角点,2 ~ 14 号点为断面顶板均匀分布的断面点,则其 15 个断面特征点的坐标依次如式(4) ~ (6) 所示, n 为对应点号:

$$\begin{cases} x_1 = -b/2 \\ y_1 = 0 \\ z_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_n = -\frac{2a}{3} + \frac{a}{12} \times n \\ y_n = 0 \\ z_n = h \end{cases} ; n \in [2, 14] \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{15} = b/2 \\ y_{15} = 0 \\ z_{15} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

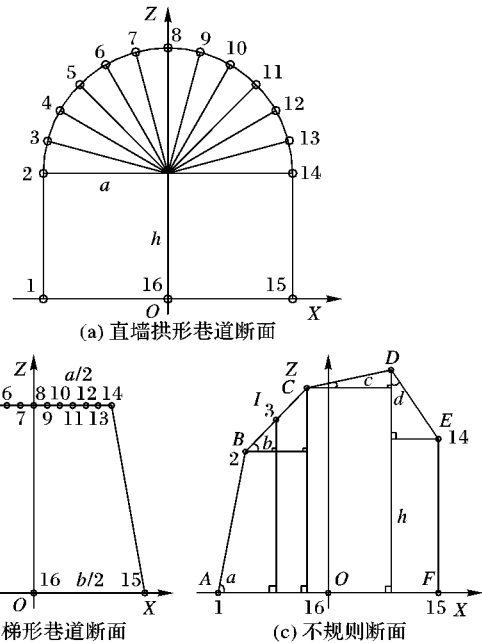


图 2 巷道特征断面计算

如图 2(c) 所示,在 XOZ 平面坐标系中,以任意不规则断面为例,首先根据断面信息获得构成该不规则断面的各边长及内角,断面底板宽度为 s , h 为断面高, l 为 BC 段边的长度, a 为 $\angle BAO$, $b = \angle CBA - (180^\circ - a)$,点 3 为该边上的第二个断面特征点,即与点 2 形成第一条断面线。根据 $BC:CD:DE = i:j:k$ 将顶板线按长度比例分为 12 条断面线,13 个特征点,由式(7) 求得每条边中所含断面线条数,且要求 p, q, r 均为整数, $p + q + r = 12$ (采用四舍五入原则,出现差值问题由最长边补点或最短边减点来满足要求);以 BC 段上的断面点为例求其平面坐标,每条边中的断面点均以断面边起点为坐标基础求得,如图 2(c) 中 BC 段断面边上的断面点求取方法式(8),式中 n 为该断面边上断面点点号, p 为该段断面边中所包含的断面线条数, l 为该断面边的具体长度, b 为 BC 边与过 B 点至 Z 轴垂线的夹角, (x_2, y_2, z_2) 为 B 点即 BC 断面边起点坐标,以此方法可求出其各断面点坐标。

$$\begin{cases} BC = \frac{i}{i+j+k} \times 12 \approx p \\ CD = \frac{j}{i+j+k} \times 12 \approx q \\ DE = \frac{k}{i+j+k} \times 12 \approx r \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_n = \frac{l}{p} \times (n - 2) \times \cos b + x_2 \\ y_n = 0 \\ z_n = \frac{l}{p} \times (n - 2) \times \sin b + z_2 \end{cases}; n \in [3, p + 2] \quad (8)$$

在计算出巷道断面的平面坐标后,还要考虑到巷道均处于三维坐标系中,当把特征巷道断面模型应用到实际情况中时还需要平移、旋转来实现与巷道底板的真实关系。首先根据其巷道控制点的空间位置确定原点 O 的实际坐标,经旋转使测量中心线与特征断面相垂直,且垂足为点 O ,进而通过其旋转角度求得其断面点在相应坐标系下的真实坐标^{[7]251}。如式(9)中 (x_0, y_0, z_0) 为控制点 O 的实际三维坐标, (x_n, y_n, z_n) 为断面点的平面坐标, α 为断面的旋转角度(α 由加载断面处中心线相邻的两个控制点确定), (x'_n, y'_n, z'_n) 为断面点的真实三维坐标如式(9)所示:

$$\begin{cases} x'_n = x_n \cos \alpha + x_0 \\ y'_n = x_n \sin \alpha + y_0; 1 \leq n \leq 15 \\ z'_n = z_n + z_0 \end{cases} \quad (9)$$

3 拐角处断面变化巷道段的平滑处理

断面变化巷道段发生在拐角处是巷道中常见的现象。以直墙拱形巷道为例,首先解决拐角处巷道段的平滑问题^[7]。如图 3 所示, E, F 分别为两条相交于 C 的不等宽巷道段,可知内角 $\angle ACB$ 及 A, C, B 三点坐标,由以上三点可求出过该三点的圆心坐标 O 及半径 R ,且可由点 O, A, B, C 及半径 R 求得其对应方位角 A_1, A_2, A_3 。

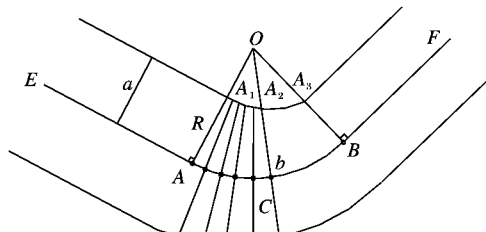


图 3 拐角处断面变化巷道段的平滑处理

拐角处断面变化平滑处理算法:

1) 将拐角处平滑中心线 OC 的左弧段 AC (右弧段方法相同) 均匀离散化为 m 个控制点,则每个控制点的方位角为 $[n \times (A_1 - A_2)] / m + A_2$,由 O, A, C 点坐标 $(x_0, y_0, z_0), (x_A, y_A, z_A), (x_C, y_C, z_C)$ 及控制点的方位角可求得各控制点坐标 (x_n, y_n, z_n) ,如式(10)所示:

$$\begin{cases} x_n = x_0 + R \times \cos \left(\frac{n \times (A_1 - A_2)}{m} + A_2 \right) \\ y_n = y_0 + R \times \sin \left(\frac{n \times (A_1 - A_2)}{m} + A_2 \right); 0 \leq n \leq m \\ z_n = z_C + (z_A - z_C) \times \frac{n}{m} \end{cases} \quad (10)$$

2) 在每个控制点处加载巷道特征断面模型,巷道段 E 的断面宽度为 $2a$,高度为 h_1 ,拐角巷道段 C 处的断面宽度为 $2b$,高度为 h_2 ,则拐角处控制点添加的特征断面模型参数(断面宽度 d 和高度 h) 为式(11)所示:

$$\begin{cases} d_n = \left(b + \frac{a - b}{m} \times n \right) \times 2 \\ h_n = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{m} \times n \end{cases}; 0 \leq n \leq m \quad (11)$$

3) 根据断面参数完成相关断面的建模,加载到对应控制点上,通过断面离散化实现该处巷道段的建模。

4 巷道段各元素间的拓扑关系

为了将巷道段的三维模型在计算机中构造出来,可将构成巷道段的主要元素进行抽象的描述,主要为:点类、线类、面类和体类。以直墙拱形断面与梯形断面构建的巷道段为例,其主要关系有直墙拱形—直墙拱形,梯形—梯形,直墙拱形—梯形。以直墙拱形—梯形巷道段(如图 4 所示)为例给出其相应的拓扑关系描述:

1) 点类:它是三维巷道模型中最基本的元素,它将断面模型离散化为 16 个断面点,而断面点主要由角点、控制点、离散特征点构成。离散特征点,即特征点是巷道段前、后剖面轮廓线上的点,主要用于构建特征连接线及断面轮廓线^{[1]627}。每个特征断面模型中都有其相应的 16 个断面点,其中角点与控制点是不变的,分别处于巷道底板的两侧边界线及中心线上,其他 13 个离散特征点根据特征断面形状均匀分布。

2) 线类:主要有断面轮廓线、巷道边界线、中心线和特征线。巷道底板边界线主要有 2 条,即左侧边界线和右侧边界线(底板边界线,即对应角点连接线),中心线 1 条(相邻断面控制点连接线),特征线 13 条(即相邻断面对应离散特征点 2~14 连接线)。

3) 面类:是构成三维体域的组成部分,它是由点和线构成的一个封闭的图形。而面类中有三角形基础面元和四边形基础面元,由于这两类是构造任何物体最基本的面单元,所以三角形和四边形可以表达出巷道段模型中所有面类结构^[8]。图 4 中主要包括底板、前剖面(梯形断面)和后剖面(直墙拱形断面)及曲面部分的侧面和顶板。底板由 2 部分构成,由中心线将底板分为左底板和右底板;侧面由左侧面及右侧面构成,均为曲面四边形,且分别与底板相交于底板边界线,与顶板相交于特征线(直墙拱形断面 2 号点—梯形断面 2 号点)及(直墙拱形断面 14 号点—梯形断面 14 号点);顶板由 12 个特征面构成,每个特征面都是相邻离散特征点及其特征线构成的曲面四边形,12 个特征面彼此相交于其对应特征线。

4) 体类:是立体几何模型,由面类组成,是三维的几何空间。在同一条巷道中不同断面的变化必然存在一个缓冲体域(即使巷道段由一种特征断面变换到另一种特征断面的变换区域),使巷道断面产生变化时能够缓和、真实。该缓冲体域由前剖面和后剖面决定其具体空间形状,如图 4 所示的巷道特征断面发生变化的巷道段。

5 基于巷道特征断面模型库的三维巷道段建立

通过采用中心线加载巷道特征断面的方法来建立三维巷道体模型。

- 1) 根据巷道控制点建立所需的巷道中心线模型。
- 2) 在中心线的控制点处,根据巷道断面参数提取巷道特征断面模型库中对应模型生成巷道断面数据。
- 3) 根据其巷道特征断面变化采取不同的建模方法。
 - a) 巷道特征断面未发生变化的巷道段,将相邻特征断面对应点相连,构造三角网,完成巷道体的生成;
 - b) 巷道特征断面发生变化的巷道段,应用 Bézier 曲面及 Bézier 曲面的拼接来实现模型的构建。

5.1 巷道段三角网的建立

针对一般面结构采取三角剖分的方法。利用物体表面三

维空间点集,通过三角划分的方法重建物体表面,是计算几何的一个基本问题,它实际上是在物体表面进行三角形划分^[9]。通过对每种巷道特征断面采取特定的离散化,每个特征断面均有 16 个断面点,如图 4 所示,提取直墙拱形断面的断面点 15、16 与梯形断面的断面点 15、16,由直墙拱形断面 15—直墙拱形断面 16—梯形断面 16 构成一个三角形,直墙拱形断面 15—梯形断面 15—梯形断面 16 构成一个三角形,将三角形提取到面类中,再分别提取断面中相邻的对应下两个点,即将每个四边形分解成两个三角形,直至所有点取完,形成三角网^[10]。

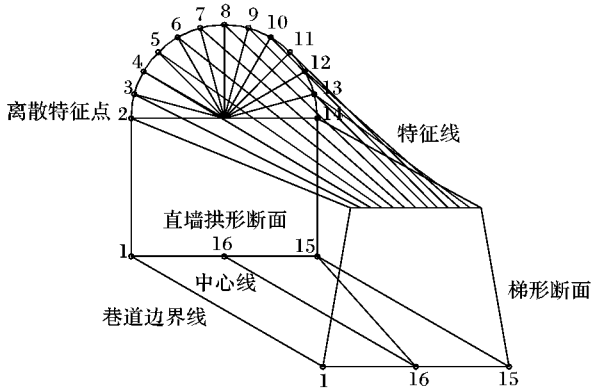


图 4 巷道特征断面发生变化的巷道段

5.2 通过 Bézier 曲面实现特征断面变化巷道段的建模

在 OpenGL 中可通过较少的控制点实现曲面四边形的绘制方法有 NURBS 曲面与 Bézier 曲面等,而 Bézier 曲面具有更好的数值计算特性和稳定性,且更为简单,容易实现。本文采用 Bézier 曲面实现对特征断面变化巷道段的曲面建模。Bézier 曲面是由 Bézier 曲线交织而成的曲面,一个复杂的曲面往往不能用单一的 Bézier 曲面来实现,要用几块 Bézier 曲面拼接起来。在特征断面变化巷道段中两个侧面及由 12 个特征面构成的顶板部分均为曲面四边形,因此曲面四边形的建模是对该巷道段建模的关键部分之一。在完成曲面四边形建模的同时也要将相邻的 Bézier 曲面进行拼接^[11],相邻的两个曲面四边形满足一阶连续性即可保证图形的要求,进而实现特征断面变化巷道段的整体建模。

6 建模方法的实现

首先,通过矿山测量中心线(或导线)即控制点连线,将巷道单一地表述出来,形成复杂的三维巷道网络结构。将巷道网络分成巷道段,建立巷道特征断面模型库,根据测量数据提取中心线和巷道特征断面数据,在巷道控制点处加载相应巷道特征断面,将断面离散化为断面点(以 13 个特征点、2 个角点及 1 个控制点共 16 个断面点为例),对断面点进行编号,同时将巷道段分为普通巷道段(特征断面未发生变化的巷道段)和特征断面变化的复杂巷道段,普通巷道段采取生成三角网进行建模,特征断面变化巷道段采用 Bézier 曲面建模,流程如图 5 所示。

对于三维模型的实现,在 VC++6.0 平台,利用 OpenGL 开发工具包进行编制,以直墙拱形—直墙拱形特征巷道断面、直墙拱形—梯形特征巷道断面、拐角处变化特征巷道断面为主要巷道段进行了实验,基本达到了预期的效果,如图 6 所示。

7 结语

基于特征断面的巷道三维建模技术为矿山巷道断面的多样化建模提供了方便。首先,对矿山测量数据即主要数据来

源进行了介绍,给出相应数据的具体描述,并对巷道断面变化原因及基本特征进行了分析,得出巷道特征断面模型库对三维建模的重要性。同时,描述了以直墙拱形断面、梯形断面和不规则断面为例的坐标计算公式及拐角处圆滑处理算法,对在同一条巷道中前两种巷道断面之间的变化给出了相应的拓扑关系,并通过对不同巷道段采用不同的建模方法,最终在实验中实现了该方法的建模技术,为下一步的虚拟漫游奠定了基础。

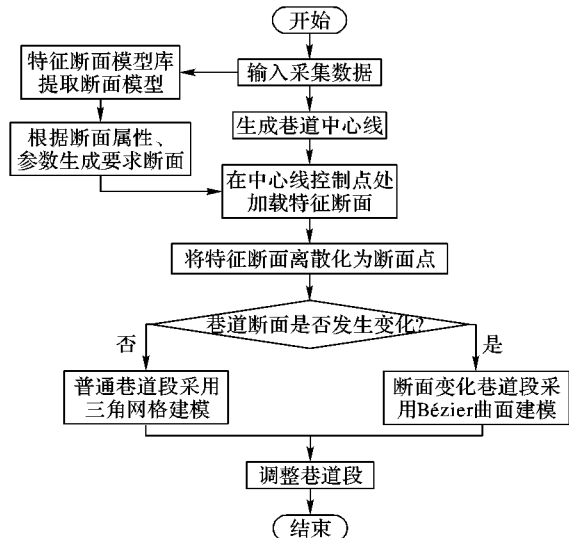


图 5 三维巷道段建模流程

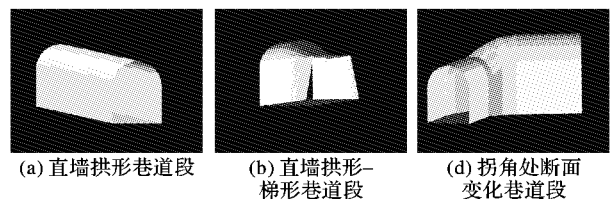


图 6 巷道段建模效果

参考文献:

- [1] 谭正华, 李王管, 熊书敏, 等. 基于实测边界线的地下巷道三维建模方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(2): 626-631.
- [2] 张志华, 侯恩科, 赵洲, 等. 一种新的 3D 巷道建模方法—对称建模法[J]. 金属矿山, 2009, 395(5): 107-111.
- [3] 侯恩科, 张志华, 邓念东, 等. OpenGL 环境下两种巷道三维建模方法的比较[J]. 矿业研究与开发, 2009, 29(5): 59-62.
- [4] 万金, 张凯, 陈建勋. 一种三维地下巷道建模的改进方法[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(8): 85-87.
- [5] 葛永慧, 王建民. 矿井三维巷道建模方法的研究[J]. 工程勘察, 2006, (10): 46-49.
- [6] 魏占营, 王宝山, 李青元. 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.
- [7] 孙中昶, 卢秀山, 田茂义. 矿山巷道 3 维建模算法研究及实现[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 250-254.
- [8] 张志华, 侯恩科, 罗晓霞, 等. 三维巷道网络数据模型的形式化描述[J]. 计算机工程, 2012, 38(19): 285-289.
- [9] 周焰, 李德仁, 徐长勇. 一种基于区域分割的三角划分方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(2): 227-231.
- [10] 徐志强, 杨邦荣, 王李管, 等. 巷道实体的三维建模研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(6): 202-205.
- [11] 陈爱国, 秦素敏. 保证 C1 连续的 Bézier 曲面拼接方法[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2005, 4(1): 37-40.