

# 全球地壳结构数据的三维可视化建模与应用<sup>\*</sup>)

郑学锋<sup>1,2</sup> 沈钧毅<sup>1</sup> 靳平<sup>2</sup> 郑江铃<sup>2</sup> 孙鹏<sup>2</sup>

(西安交通大学 西安 710049)<sup>1</sup> (西北核技术研究所 西安 710024)<sup>2</sup>

**摘要** 利用可视化技术表现地壳结构,形象地模拟地震波在地壳内部的传播,对于增强地震事件解释具有重要意义。通过分析改进的 CRUST5.1 全球地壳结构数据特征,提出了基于长方体与四棱柱相结合的三维可视化建模方法。利用 OpenGL 建模技术,建立了全球地壳结构数据的可视化模型,在 Delphi 中基于 OpenGL 三维图形库实现了 CRUST5.1 全球地壳结构数据的三维可视化表达,结合 OpenGL 的人机交互功能完成了多视角观察以及基于地表剖切线的三维剖切功能。

**关键词** 地壳结构, CRUST5.1, 可视化建模, OpenGL

## 3D Visualization Modeling and Application of Global Crustal Structure Data

ZHENG Xue-Feng<sup>1,2</sup> SHEN Jun-Yi<sup>1</sup> JIN Ping<sup>2</sup> ZHENG Jiang-Ling<sup>2</sup> SUN Peng<sup>2</sup>

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)<sup>1</sup> (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)<sup>2</sup>

**Abstract** It is of significance to represent crustal structure and simulate the propagation of seismic wave in crust and mantle with visualization technique for interpreting seismic events efficiently. Based on analysis for improved CRUST5.1 global crustal structure data, the visualization modeling method of combining cuboids with quad-prism is presented, and the visualization model of global crustal structure data is also established with OpenGL modeling techniques. Furthermore, the three-dimension representing of CRUST5.1 crustal structure data, the viewing from different directions and the cutting along an arbitrary plane have been implemented in Delphi with OpenGL.

**Keywords** Crustal structure, CRUST5.1, Visualization modeling, OpenGL

在地震学研究领域,一个好的地壳与上地幔密度和地震速度结构模型,是成功监测区域地震事件的关键组成部分。近年来,已经有学者提供不同详细程度的地壳模型<sup>[1~4]</sup>,尤其是 Walter D. Mooney et al. 提出的全球范围的  $5^\circ \times 5^\circ$  的地壳与上地幔结构模型<sup>[5]</sup>,这个模型基于近年来刚刚公布的一些新的深钻孔和主动地震方法勘探资料,这些资料提供了丰富的关于沉积盆地厚度和物理性质方面的信息,以及海洋盆地、边缘和内陆等地壳结构信息,使得这个模型具有更高的可信性。

另一方面,利用可视化技术表现地壳结构,形象地模拟地震波在地壳内部的传播,正成为地震数据处理与解释中越来越重要的工具。F. J. Serón<sup>[6]</sup> 利用有限元模拟了一个简单盐丘模型,并对地震数据可视化技术作了初步探讨。T. M. Sheffield 等<sup>[7]</sup> 基于 Texaco 可视化中心的集成环境探讨了颜色在地震数据可视化解释手段中的应用。G. D. Kidd<sup>[8]</sup> 则指出三维地质体数据可视化中的一些基本问题,诸如利用数据的 RGBA(红、绿、蓝及融合)属性来表示三维数据体。R. M. Dalley<sup>[9]</sup> 介绍了利用三维图像处理与数据体描述技术,并结合三维可视化环境,以提取、观察和存储具有相似属性的地震数据体。程朋根等<sup>[10]</sup> 发展了三棱柱结构的三维空间数据体建模方法,提出了似三棱柱结构模型,较好地实现了基于钻孔数据的地质体的三维空间建模与可视化表达。

本文利用科学计算可视化技术,通过对 CRUST5.1 地壳结构模型的数据分布特征进行分析,结合其数据体特点,提出了基于长方体与四棱柱相结合的建模技术,建立了 3D 表达

的数学模型,并利用 OpenGL 图形库平台进行地壳结构的图形化重现、旋转、平移与剖切。

## 1 CRUST5.1 全球地壳结构模型及其数据结构

CRUST5.1 按照  $5^\circ \times 5^\circ$  网格区片构建了全球模型<sup>[5]</sup>,生成了一个地壳与上地幔的地震速度( $V_p$  和  $V_s$ )和密度结构,依此在尽可能大的尺度上(非统一的)适应全球分布的地震场观测,并且也能够足够小的尺度上解决主要的地壳属性横向变化问题。该  $5^\circ \times 5^\circ$  模型将全球划分为 2592 小区片,每个小区片在赤道是  $550\text{km} \times 550\text{km}$ 。在每个小区片之中,地壳特性被描述为 7 层(图 1 所示):(1)冰层;(2)水层;(3)软沉积层;(4)硬沉积层;(5)上部地壳;(6)中部地壳;(7)下部地壳。这些分层信息是通过地震反射资料获得的。每一层的压缩波速基于场地测量,由于有多于 2000 个可用的海洋与陆地地壳结构场地测量数据,可以归纳出一定数量的主结构类型,而剪切波速度和密度则应用经验公式  $V_p$ - $V_s$  和  $V_p$ -密度关系获得。为了兼顾散射问题研究,这里使用了改进的 CRUST5.1 模型数据,改进模型扩展到地幔区域,每个小区片的结构涉及的深度大约为 600 公里,并按照地震波速度和密度值大体细分为 35 层左右,每层对应一组速度与密度参数。每一个  $5^\circ \times 5^\circ$  小区片都有一个地壳结构,不同的区片可以有相同的结构。每个速度与密度结构具有不同的数据体,但具有相同的数据项,主要有层厚, P 波速度, S 波速度, 密度, 剪切波 Q 值, 体形变 Q 值。每一组参数唯一地确定了该区片某层的速度、密度结构(图 2 所示)。全球 2592 个区片共享 154 个速度与密度

<sup>\*</sup> 国防预先研究项目。郑学锋 高级工程师, 博士生, 现主要从事计算机软件、数据库与系统集成。

结构(图3所示)。在进行地震事件定位与波形分析的过程中,可以直接引用传播路径的速度及密度数据于分析程序之中,也可以利用可视化技术重构地壳结构,建立形象化模拟地震波传播以及有效分析地震事件的图形化平台。

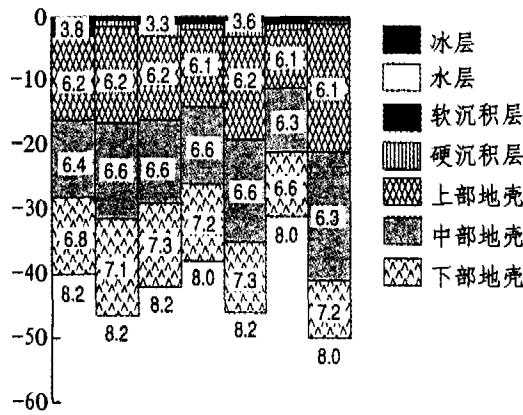


图1 7层地壳结构特性描述

A1 normal oceanic 0.5 km sed.					
35	1				
3.81	1.500	0.000	1.020	1000	0.
0.50	1.900	0.800	1.900	80	0.
1.70	5.000	2.500	2.600	250	0.
2.30	6.600	3.4731	2.900	365	0.
2.50	7.100	3.6946	3.050	390	0.
10.30	8.150	4.3333	3.350	465	0.
10.30	8.076	4.3377	3.364	532	0.
10.30	8.001	4.3467	3.379	600	0.
18.54	7.980	4.3512	3.377	600	0.
18.54	7.959	4.3453	3.375	600	0.
10.00	7.959	4.3342	3.375	80	0.
13.33	7.933	4.3240	3.372	80	0.
23.33	7.906	4.3181	3.370	80	0.
23.33	7.880	4.3176	3.367	80	0.
23.33	7.853	4.3214	3.365	80	0.
23.33	7.827	4.3269	3.362	80	0.
23.33	7.800	4.3296	3.359	80	0.
10.00	8.559	4.644	3.436	143	0.
12.50	8.602	4.660	3.449	143	0.
22.50	8.646	4.675	3.463	143	0.
22.50	8.689	4.691	3.476	143	0.
22.50	8.732	4.707	3.490	143	0.
22.50	8.775	4.723	3.503	143	0.
22.50	8.819	4.738	3.516	143	0.
22.50	8.862	4.754	3.530	143	0.
22.50	8.905	4.770	3.543	143	0.
10.00	9.134	4.933	3.724	143	0.
15.00	9.262	5.005	3.755	143	0.
25.00	9.390	5.078	3.787	143	0.
25.00	9.518	5.151	3.818	143	0.
25.00	9.646	5.224	3.850	143	0.
25.00	9.774	5.297	3.881	143	0.

图2 模型数据文件格式

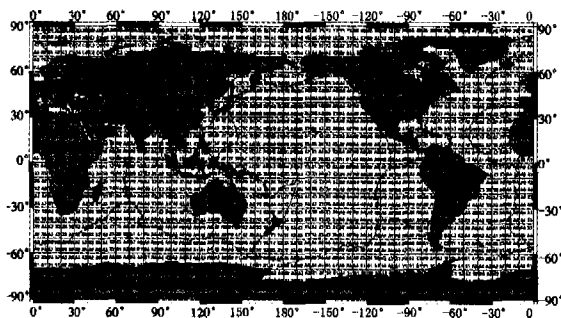


图3 全球 2592 个区片共享 154 个速度与密度结构

## 2 CRUST 5.1 地壳结构的三维可视化建模方法

### 2.1 三维构模方法的研究现状

目前,三维空间数据模型总体上可以分为面模型、体模型及混合(集成)模型 3 大类型。面模型数据结构侧重于三维空间表面的表示,它通过表面表示形成三维空间目标,其优点是数据存储空间小,建模速度快,且便于显示和数据更新,不足之处是空间分析难以进行,目前基于面模型的方法主要有以下几种:表面构模法(Surface)、边界表示法(B-rep)、线框构模法(WireFrame)、断面构模法(Section)和多层 DEM 法。体模型数据结构侧重于三维空间体的表示,通过对体的描述实现三维空间目标表示。其优点是适于空间操作和分析,但数据结构复杂,存储空间占用大,构模速度慢。有关体模型方法目前有结构实体几何构模(CSG)、八叉树构模(Octree)、四面体格网构模(TEN)和块段(Block)构模法。有些专家学者也将上述两种模型进行混合或集成来描述三维物体<sup>[11,12]</sup>,如:TIN+CSG 法,八叉树+TEN 法及矢量与栅格集成法。最近以来也出现了一些新的基于体构模法,张煜等<sup>[13]</sup>采用三棱柱体作为基本体元进行地层三维建模。程朋根等<sup>[10]</sup>分析了三棱柱建模方法的局限性,提出了似三棱柱为基元的建模方法,在三维地质表达方面取得了良好应用。

### 2.2 基于四棱柱的建模方法

CRUST5.1 地壳结构模型提供的数据体,在 XY 坐标平面内是按照 5°见方的网格提供的,具有规则分布特性,而在 Z 方向的厚度是变化的。因此,此类数据虽然属于结构化数据,但不属于规则网格体数据,可以称之为矩形网格结构化数据。其特点是数据分布于长方体组成的三维网格上,但是,长方体的大小不同,没有规则可循。对于这类数据的每个数据点的描述,传统的方法是建立三维数组,除了给出每个数据点在三维数组中的下标外,还必须给出它所在的空间坐标,这样的描述方法或数据结构极其复杂。

本文采用长方体与四棱柱相结合的方法来建立三维空间模型。该方法的主要思想是:首先在 XY 平面内将全球按照地理坐标划分为 72×36 共计 2592 个 5°×5°的方格(图 4A 所示),对于每个 5°×5°小片结合深度信息建立一个四棱柱体元,四棱柱体元又由多个厚度层划分为一组长方体基元,每个长方体范围相当于一个网格格点,具有唯一的地震波速度和密度参数(图 4B 所示),从而完成全球 360°×180°范围的四棱柱体元表达。就四棱柱体元的几何元素来看,主要包括顶点、线段(棱边、四边边)、四边形、长方体、四棱柱,它们可以看成是数据模型的基本元素,并对应空间的节点、速度体元、区片地壳结构等对象。根据面向对象建模的观点,可以将上述空间对象设计成不同的对象类,并在此基础上概括出更高层次的超类,即空间对象类,以这些类作为模型设计的基础。用统一建模语言(UML)设计出一个基于四棱柱体的面向对象概念的数据模型,如图 5 所示,其中栅格对象是描述地壳表面的影像或内部纹理,以属性形式存在。

### 2.3 数据结构设计

为了使基于四棱柱的数据模型能够更好地表现具有空间位置、拓扑关系及属性信息的 CRUST5.1 地壳结构,其关键是构造可行的数据结构。对此,我们构造了基于结构体的二维数组型数据结构,良好地表达了该地壳结构数据。数据结构的构建对应于上述主要几何元素,其主要数据结构如下:

(1) 网格节点结构体;

```

type TVector3d = record // 三维空间的点
X, Y, Z : double;
end;
(2)长方体的数据结构体;
type box = record // 定义一个小长方体结构体
cpnt : TVector3d; // 小长方体上表面中心点坐标
length : single; // 小长方体长
width : single; // 小长方体宽
height : single; // 小长方体高
val : single; // 小长方体特征值
end;
(3)四棱柱二维数组;
boxList : array[0..2591] of array of box; // 2592个元素的数组,每个元素是一个box型数组,用于记录每一个由长方体组成的四棱柱数据。
(4)模型索引列表;
idxList : array[0..2591] of string; // 2592个元素的数组,对应每个空间位置的模型号。
    
```

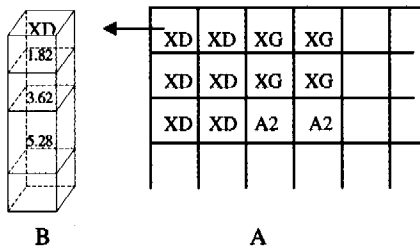


图4 四棱柱体元模型

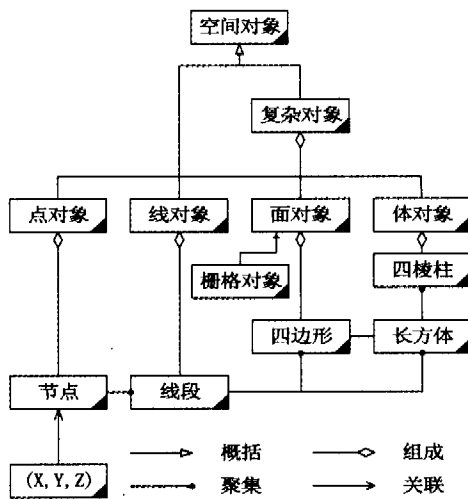


图5 UML表示的四棱柱体概念模型

### 3 基于OpenGL的地壳模型三维实体显示与剖切

#### 3.1 OpenGL技术

OpenGL即开放的图形库(Open Graphics Library),是近年发展起来的一个性能卓越的三维图形工业标准<sup>[14]</sup>。它最初来自于SGI公司为图形工作站开发的IRIS GL,后在体系评审委员会的赞助下继续发展。它具备以下优势:①能确保在多种平台间的顺利移植而不必以牺牲绘图性能为代价,也不影响用户对硬件的控制能力;②能提供一种简洁自然的方式以简化编程的复杂度;③具备足够的柔韧性和连续性,易

于扩展,使得OpenGL在短短几年中迅速发展成为被广泛认可的三维图形设计接口标准。

##### 3.1.1 OpenGL的主要功能

OpenGL能够对整个三维模型进行渲染着色,从而绘制出与客观世界十分相似的三维景象,其主要功能有:

(1)几何建模。在OpenGL中提供了绘制点、线、多边形等基本形体的函数,还提供了绘制复杂三维曲线、曲面(如Bezier,Nurbs等)和三维形体(如球、锥体和多面体等)的函数,可构造出几乎所有的三维模型。

(2)坐标变换。通过变换矩阵的存储状态控制实现取景——模型变换、投影变换、视口变换及视图裁剪等操作,实际上相当于一系列矩阵顺序相乘的运算。

(3)颜色模式。包括RGBA模式和颜色索引模式。

(4)光照和材质。可设置四种光,即辐射光,环境光,镜面光和漫反射光。材质用模型表面的反射特性表示。

(5)纹理映射。使用纹理映射功能可十分逼真地再现物体表面的细节。

(6)显示列表。显示列表项提供了对OpenGL命令组的预编译功能,在复杂数据体绘制以及交互式应用程序中可以有效地提高绘图性能。

(7)双缓冲区技术。后台缓冲区计算场景、生成画面;前台缓冲区显示后台缓存已画好的画面,以提高绘制效率并避免画面闪烁现象。

(8)交互技术。方便的三维图形交互接口(选择、拾取、反馈),可进行平移、旋转、缩放等人机交互操作。

##### 3.1.2 OpenGL的工作流程

使用OpenGL技术开发图形应用程序,生成屏幕图形、图像的基本过程大致可分为以下几步:

(1)视点设置和物体变换:建立放置物体的三维空间,其中包括视点和视角的设置,用于控制物体的显示角度;然后对物体做相应的变换,以实现平移、旋转等。

(2)物体建模:使用OpenGL技术,首先必须建立物体的几何模型,即构造物体的形状。在OpenGL中,使用点、线、多边形、图像、位图等图元以及数学描述来合成物体的几何框架,这一步是产生OpenGL图像的基础。

(3)体元颜色:根据物体表面材质、纹理和光照条件等属性信息确定物体的颜色。

(4)建立显示列表:综合物体建模与色彩表达,建立物体显示列表,使用双缓存技术,提高绘图性能。

(5)屏幕光栅化:把物体形状和颜色信息转换成屏幕像素值,在屏幕上显示出物体图像。

#### 3.2 三维地壳结构数据实体显示与剖切

基于以上的四棱柱建模思想以及数据结构,在Delphi中利用OpenGL建模技术,构建长方体基元组成的四棱柱体模型,按照地壳结构模型的排列规律建立显示列表,进行CRUST5.1地壳结构的三维实体显示(图6A),充分利用OpenGL的双缓冲技术,提高显示效率。结合OpenGL的交互处理能力,实现显示实体的旋转、移动以及缩放操作。为了能够实现三维实体的任意剖切,首先在二维平面上捕捉鼠标轨迹,确定剖切线的方程 $y = ax + b$ 。沿X,Y方向逐个扫描三维实体的网格,将与剖切线相交的网格分解成显示部分和不显示部分,根据网格对应四棱柱中长方体特征值确定显示部分的色彩与纹理,绘制三维实体剖切面,结果如图6B所示。

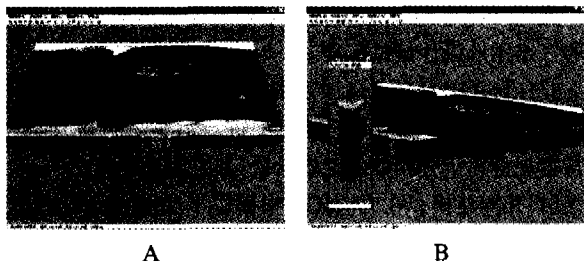


图6 三维模型数据表达

**结论** 分析了 CRUST51 全球地壳结构数据特征,提出了基于长方体与四棱柱相结合的三维可视化建模方法。利用 OpenGL 的强大的建模功能,建立了全球地壳结构数据的可视化模型,在 Delphi 中基于 OpenGL 三维图形库实现了 CRUST51 全球地壳结构数据的三维可视化表达。结合 OpenGL 的人机交互功能完成了多视角观察以及基于地壳剖切线的三维剖切功能,为仿真研究地震波传播规律以及精确地震走时计算提供了研究环境。

**参考文献**

- 1 Soller D R, Ray R D, Brown R D. A new global crustal thickness model. *Tectonics*, 1982(1): 125~149
- 2 Hahn A, Ahrendt H, Meyer J, Hufen J H. A model of magnetic sources within the Earth's crust compatible with the field measured by the satellite Magsat. *Geol Jahrb, Reihe A*, 1984, 75: 125~156
- 3 Tanimoto T. Crustal structure of the Earth. In: *Global Earth*

- Physics: A Handbook of Physical Constants, AGU Ref Shelf, vol 1, Ahrens T J. Ed. AGU, Washington, D C, 1995. 214~224
- 4 Nataf H C, Ricard Y. 3SMAC: An apriori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling. *Phys Earth Planet Inter*, 1996(95): 101~122
- 5 Mooney W D, Laske G, Masters T G. CRUST 5. 1; A global crustal model at 5°×5°, *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B1): 727~747
- 6 Serón F J. Visualization and finite element techniques for seismic interpretation. *Computer & Graphics in Spain*, 1992, 16(4): 383~394
- 7 Sheffield T M, Meyer D, Lees J, et al. Geovolume visualization interpretation; *Color in 3-D volumes*. The Leading Edge, 1999, 18(6): 668~674
- 8 Kidd G D. Fundamentals of 32D seismic volume visualization. *The Leading Edge*, 1999, 18(6): 702~709, 712
- 9 Dalley R M, 等著. 3D 图像/数据体处理新方法[J]. 王忠, 等译. 石油物探译丛, 1998, 1: 43~46
- 10 程朋根, 龚健雅, 史文中, 等. 基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2004, 29(4): 602~607
- 11 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
- 12 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
- 13 张焜, 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]. *中国图形图象学报(A)*, 2001, 6(3): 285~290
- 14 朱亚平, 杨慧珠, 董渊, 等. OpenGL 技术在地震数据可视化中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 35(4): 403~414

(上接第 240 页)

相应的处理,将其分割成多个凸多边形,再用凸多边形的裁减法来裁减,这样即便是能利用计算几何中关于图形分割的方法找到最优的分割方案,在裁减过程中也要对线段进行多次不必要的裁剪,特别是对于在裁减框内部的线段,要进行多次不必要的裁剪,处理代价比较大;与中点法相比<sup>[8]</sup>,中点法在处理线段穿过多条边界时,判断中点是否在多边形内是一个多次求交的过程,而这些交点都是辅助交点,不能影响裁减结果。而本算法在处理凹多边形的时候只计算实际交点,因此不会对线段有多余的裁减和求交点过程。

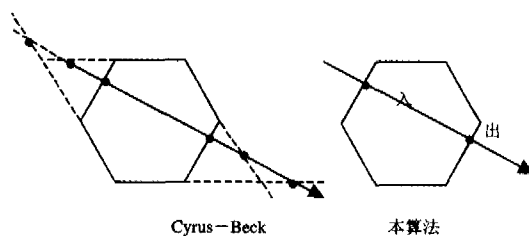


图 11

**总结** 本算法对多边形的各个顶点进行凹、凸判断,通过判断线段于多边形的交点是入点或出点的情况决定是否保留该线段,因此该算法可以对任意多边形窗口进行处理。算法中在对每条边进行判断的时候,先利用快速排斥法排除明显与边界不相交的线段,在通过相交判断(不要求交点)排除不相交的线段,只对相交的线段计算交点,有效地减少了交点的计算次数,并且不会产生参数的中间运算结果(即只计算了实际交点的次数,除去了延长线上交点的计算)。

该方法有以下几个优点:

(1)同样采用参数化方法求交,并且由于事先判断线段是否相交后对于有交点的才求交点,因此求交点的次数是最少的。虽然判断的过程中有一些运算,但是比起求交的运算来说还是比较快的,另外,当线段与多边形所交的点很少时,该算法的优势很明显,很快能够排除不在内部的部分。

(2)能够适用与任意的多边形,对于凸多边形,该算法的效率高于 Cyrus-Beck 算法的效率。

对于该算法,采用更简洁的线段相交性判断和减少判断凹点时的向量外积和内积的计算是进一步优化改进的方向所在。

**参考文献**

- 1 Newman W M, Sproull R F. *Principles of Interactive Computer Graphics*. New York: McGrawHill, 1979
- 2 Sproull R F, Sutherland I E. A clipping divider[M]. In: Washington; Thompson Books, 1968. 765~775
- 3 Liang Y D, Barsky B A. A new concept and method for line clipping[J]. *ACM Trans on Graphics*, 1984, 3(1): 12~22
- 4 Cyrus M, Beck J. Generalized two-dimensional clipping[J]. *Computer and Graphics*, 1978, 3(1): 23~28
- 5 Nicholl T M, Lee D T, et al. An Efficient New Algorithm for 2D Line Clipping. In: *SIGGRAPH' 87, Computer Graphics*, 1987, 21: 4
- 6 刘勇奎, 颜叶, 等. 一个有效的多边形窗口的线裁剪算法[J]. *计算机学报*, 1999, 22(11): 1209~1214
- 7 刘勇奎, 刘桂英. 一般多边形窗口的线裁剪[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1993, 5(4): 269~274
- 8 赵平, 冯春, 等. 一种一般多边形窗口的有效线裁剪[J]. *西南交通大学机械工程学院*, 2002, 29(4): 34~48