

# 水下 3 维声场体可视化两种切平面实现方法

王小林 笪良龙 杨廷武 李玉阳

(海军潜艇学院海军战术水声数据中心, 青岛 266071)

**摘要** 为了深入研究海洋水声环境对海军作战的影响, 在水下声场体可视化的基础上对能量场进行 3 维剖分技术研究。根据不同的战术目的, 探讨了两种不同的切平面剖分绘制方法。这两种方法相互补充, 能够使指挥员直观准确地理解水下战场环境。

**关键词** 水下 3 维声场 体可视化 切平面 体绘制

中图法分类号: TP391.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)02-0312-04

## The Realization of Two Clipping Plane Technologies in Underwater Acoustic Energy Fields Visualization

WANG Xiao-lin, DA Liang-long, YANG Ting-wu, LI Yu-yang  
(Navy Submarine Academy Navy Tactical Acoustic Data Base Center, Qing Dao 266071)

**Abstract** This article researches the clipping plane technology during volume visualization in underwater acoustic energy fields to study the influence to naval battles and brings forward two methods to create clipping plane according to different requests of tactics. These two methods supply each other, and commanders can get the underwater sound field environment and battle information quickly.

**Keywords** underwater acoustic energy fields, volume visualization, clipping plane, volume rendering

### 1 引言

海洋水声环境对海军作战具有重要影响, 而海洋水下声传播是决定作战舰艇探测与反探测效果的直接因素, 因此如何直观、有效地刻画和描述水下声学环境对提高作战指挥人员对环境效应的理解和应用具有重要意义。同时随着我军现代化、信息化建设步伐的加速发展, 对战场环境信息保障能力提出了更高的要求, 可视化技术作为海军海洋战场环境信息化建设的重要支撑技术之一, 对水声战场环境的形象描述、直观了解以及智能化辅助决策具有重要作用, 因而得到了广泛应用和快速发展, 并在现代战争中起到了日益显著的作用。

近年来, 一些成熟的体可视化切片技术<sup>[1]</sup>在医学上得到了广泛应用, 但在水下声学能量场的体可

视化技术, 特别是在声场可视化条件下的 3 维切片与定量分析方面的研究还较少。本文探讨了该技术在水下声场可视化切平面中的实现方法。首先利用 PE (parabolic equation) 声传播模型<sup>[2]</sup>仿真计算海洋声学能量场, 然后, 将这些数据体绘制形成直观的 3 维水下声场, 通过利用体可视化切片, 从而可以清楚地得到声场内部结构并对其进行定量分析, 为潜艇战术行动的优化提供可靠的技术支持。同时针对水下 3 维声场可视化过程中不同的战术需求, 提出了两种能量场的切平面绘制方法, 并对其绘制效果进行了比较。

### 2 3 维声场 PE 模型

海洋是一个复杂的系统, 介质往往是分层的, 不同层之间由于声速或密度的不连续而产生了分

基金项目: 国防预研基金项目 (9140A0305206JB1501); 新世纪优秀人才支持计划 (NCET)

收稿日期: 2006-03-09 改回日期: 2006-09-08

第一作者简介: 王小林 (1976~), 男, 海军上尉, 2004 年军事学硕士研究生。主要从事水下 3 维可视化研究。E-mail: sr71blackbird@tom.com

界面, 在分界面上满足界面连续条件。采用 PE 模型来获得可视化 3 维声场的体数据, 优点之一就是可以求解这种声速、密度不均匀、海底地形不规则介质中的声传播问题。另一方面, 这种方法在处理声速和密度的不均匀性时, 提高了抛物方程计算精度。

在柱坐标下, 3 维 Helmholtz 方程表示为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (1)$$

利用 Tappert 引入的分离变量法, 令

$$p = u(r, \theta, z) \cdot v(r) \quad (2)$$

其中,  $v(r)$  为  $p$  中随  $r$  显著变化部分,  $u(r, \theta, z)$  则是慢变部分, 代入式 (1), 可得

$$\left| v_{rr} + \frac{1}{r} v_r \right| + \left| u_{rr} + u_{zz} + \left| \frac{1}{r} + \frac{2}{v} v_r \right| u_r \right| + \left| \frac{1}{r^2} u_{\theta\theta} + k_0^2 n^2(r, \theta, z) u \right| = 0 \quad (3)$$

用  $k_0$  作为分离常数和通过远场近似, 并在考虑 1 维扩散波动方程的基础上, 由式 (3) 可得以下方程:

$$u_r = ik_0 \left( -1 + \sqrt{1 + X + Y} \right) u \quad (4)$$

其中

$$X = [n^2(r, \theta, z)] + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$Y = \frac{1}{(k_0 r)^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (6)$$

对于上式根号下部分采用不同近似展开, 得到不同的抛物方程, 在这里采用 LSS(lee-saad-schultz) 展开。采用线性多项式近似:

$$\sqrt{1 + X + Y} \cong 1 + \frac{1}{2}X - \frac{1}{8}X^2 + \frac{1}{2}Y \quad (7)$$

代入式 (4), 考虑 1 维扩散波动方程:

$$u_r = ik_0 \left| -1 + \left| 1 + \frac{1}{2}X - \frac{1}{8}X^2 + \frac{1}{2}Y \right| \right| u \quad (8)$$

LSS 3 维宽角波动方程。相应地, 式 (8) 变为

$$u(r + \Delta r, \theta, z) = e^{-\delta} e^{\left| 1 + \frac{1}{2}X - \frac{1}{8}X^2 + \frac{1}{2}Y \right|} u(r, \theta, z) \quad (9)$$

采用有限差分的方法通过上式来解 LSS 方程, 就得到了水下 3 维声场体可视化数据。

### 3 3 维声场体可视化

首先利用基于硬件加速的 3 维纹理直接体可视化<sup>[3]</sup>方法, 对水下 3 维声能量场进行体可视化, 其过程如图 1 所示。

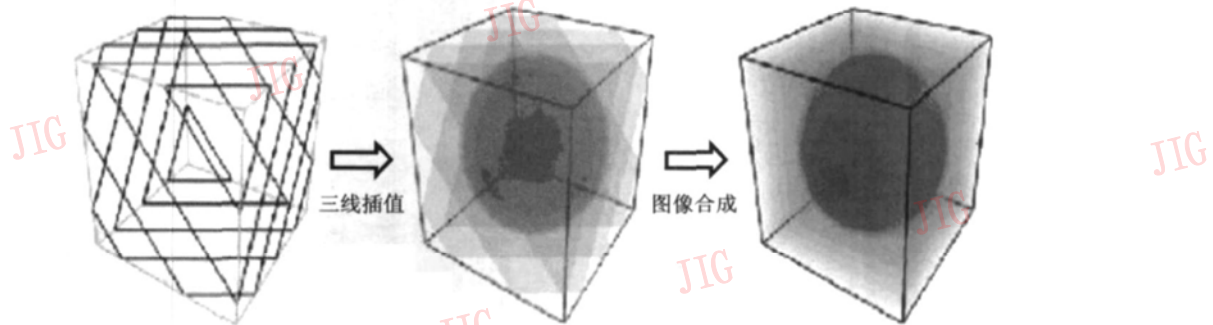


图 1 基于 3 维纹理硬件的直接体可视化方法

Fig 1 The pre-integrated volume rendering method in 3D texture graphic hardware

(1) 纹理生成 3 维数据场本身作为 3 维纹理图, 装入纹理内存。体数据的中心与物体空间的坐标原点重合, 其边界分别平行于物体空间的 3 根坐标轴。

(2) 三线性插值——重采样 在纹理空间内定义一系列采样多边形, 这些多边形彼此平行且与视线方向垂直。由于多边形的间隔及其采样密度与原始数据不同, 因此必须通过硬件的三线性插值即重采样才能获得这一系列平行多边形平面上各采样点的数值。

(3) 图像合成 首先将采样多边形上各采样点的数值按照给定的传递函数转换为相应的颜色值和不透明度值, 然后再根据适当的混合函数利用硬件的混合功能按照从后向前的顺序进行合成, 投影于视平面而形成最后的图像。图 2 为典型深海海域水下 3 维声场体可视化效果图。

从图 2 中, 可以清楚地看到处于声场中心的舰艇所产生声能量的传播情况。中心区域为声能量集中的海域, 声能量不断向外传播扩散, 渐渐减弱。声能量在大洋海底和海面经过多次反转, 并在海面产

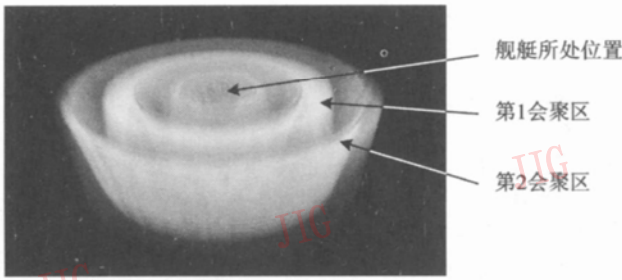


图 2 典型深海海域水下 3 维声场体可视化效果图  
 Fig 2 The typical 3D visual picture of a deep-water sound field environment

生了会聚区,这就是会聚区现象。图 2 将科学计算所得的庞大无规律的体数据中隐含的科学规律和信息直观形象地展现到指挥员面前,大大提高了对作战海域声场环境的理解速度。同时,也为下一步深入研究声场内部的复杂结构奠定了基础。

### 4 能量场切平面

处于大洋深处的潜艇唯一能够利用的探测手段就是应用水声传播规律发现敌方目标。根据水声环境预报,详细深入地研究所处海域的声场环境及其内部结构是十分必要的。下面以会聚区声场模型为例,探讨两种对可视化声场的两种剖分方法。

#### 4.1 切平面实现方法一

直接利用 OpenGL 切割平面生成函数 `glClipPlane` 对 3 维声场进行剖分,切片效果如图 3 所示。代码如下:

```
glClipPlane(GL_CLIP_PLANE0, clip0);
glClipPlane(GL_CLIP_PLANE0+ 1, qb); //生成切片 qb clip
glEnable(GL_CLIP_PLANE0)。
```

在眼坐标系下,人的眼睛是看向 Z 轴的负方向的,如视点 1。在坐标原点 O 处,体绘制出水下 3 维声场。在声场的周围生成一个切片 qb clip 这个切

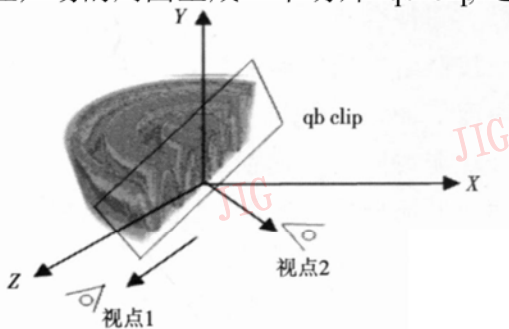


图 3 声场切平面实现方法一原理图  
 Fig 3 The theory picture of sound field environment clipping planes

片是受鼠标控制的,在鼠标的拖动下,切平面一侧的纹理不再显示出来,形成一个 3 维剖面。同时,通过鼠标的拉伸, qb clip 切片可沿法线方向平移。根据这个剖面,就直观地看到声场内部的结构,而且可以看到任意方向和深度上、切面上的变化情况。

该方法随着切片的拖动,可以任意方向和深度剖分能量场,但不能正视切平面。只有当观察者在视点 2 时才能观察到切平面。在实际应用中,采用了视点转移的方法,即时获得切平面 qb clip 的法向量,将视点 2 定位在切平面的法线上。因此,随着切平面的旋转,视点也跟踪其进行旋转。正视后的效果如图 4 所示。

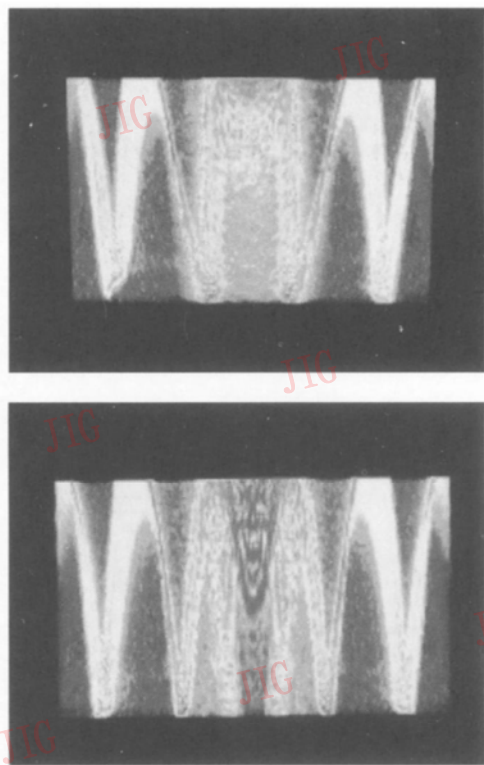


图 4 利用 OpenGL 切割平面生成切片效果  
 Fig 4 The pictures of OpenGL clipping plane

该方法是应用切平面函数生成剖面,随着切平面的空间移位,可以生成空间上的任意切平面,剖分声能量场。采用这种方法,指挥官可以清楚地了解所处海域的水声环境,并对可能存在的水面舰艇的反潜防御区进行深入的剖分研究,为下一步战术行动的制定提供依据。但在实际应用中,除了要了解声能量场的空间结构,有时还需要了解切平面在空间能量场上的空间分布情况(具体区域的情况),如潜艇突破水面舰艇反潜封锁占位机动所需的具体位置声能量分布情况。因此提出第二种切平面实现方法。

### 4 2 切平面实现方法二

为了简化绘制进程, 直接观察到切平面, 方法二从直接体可视化的原理出发, 直接生成了正对于视点切平面。

在三线性插值——重采样过程中, 在纹理空间内定义一系列采样多边形, 这些多边形彼此平行且与视线方向垂直, 即垂直于视线的一组平面, 通过控制该平面组的绘制数量, 即可将最近一个平面作为切平面, 实现了深度上剖切。通过获得旋转纹理矩阵, 可以使用鼠标控制 3 维纹理在图像空间任意方向旋转。这样就现实在任意方向上剖切。该方法切片效果如图 5 所示。代码如下:

```

r = -0.5 + (float) i / 100.0 // 用 clip_num 控制平面数量
if (r < clip_num)
{
    glBegin(GL_TRIANGLE_STRIP);
    glVertex3f(-1.0, -1.0, r);
    glVertex3f(1.0, -1.0, r);
    glVertex3f(-1.0, 1.0, r);
    glVertex3f(1.0, 1.0, r);
    glEnd();
}
float * m; // 实现纹理旋转
m = ballGetMatrix();
cgGLSetMatrixParameterf(TrackMatrix, m);

```

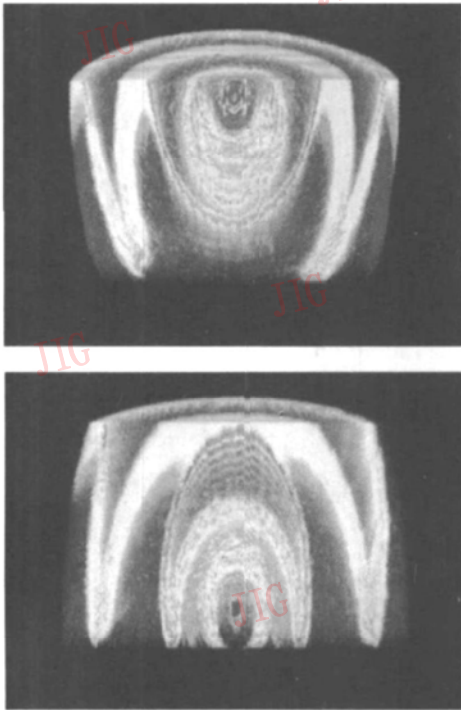


图 5 采用体绘制过程中控制切平面数量的效果图

Fig 5 The pictures acquired by controlling the clipping plane number

该方法原理简单, 切面直接正对于视点。潜艇指挥员制定接敌机动方案时, 可以以我艇为中心剖分声场, 在相对敌水面舰艇不同的方位和距离上采用不同的航线和航行状态进行机动。

## 5 结 论

利用两种不同切平面方法实现对水下 3 维声能量场的可视化切平面操作并获得了较好的切片效果。切平面绘制方法一可以在任意方位和深度上切割能量场, 受控的是切平面本身, 过程直观, 但正视后不能直观了解切平面在能量场中的空间位置分布。而切平面绘制方法二以控制绘制切片数量来达到剖切目的, 由于是纹理转动而切片不动, 因而解决了正视化问题, 视觉效果更好。因此, 实际应用中, 应根据需求不同而选择相应方法。

### 参考文献 (References)

- 1 Tang Sheng-ze, Chen Li, Deng Jun-hui. Volume Visualization of 3D Data Field[M]. Beijing: Qinghua University Publishing Company, 1999: 239 [唐泽圣, 陈莉, 邓俊辉. 三维数据场可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 239.]
- 2 Ding Lee, Martin H. Schulte. Numerical Ocean Acoustic Propagation in three Dimensions[M]. Singapore: World Scientific, 1995: 14
- 3 Van Gelder, Kim K. Direct volume rendering with shading via three-dimensional textures[A]. In: ACM/IEEE Symposium on Volume Visualization[C], San Francisco, USA, 1996: 22~30
- 4 Westermann R, Ertl T. Efficiently using graphics hardware in volume rendering applications[J]. Computer Graphics (SIGGRAPH'98), 1998, 32(4): 169~179