探地数据可视化研究

原 达[1)], 刘日晨[2)], 袁晓如[2)*]

[1)] (山东工商学院计算机科学与技术学院 烟台 264005)
[2)] (北京大学信息科学技术学院机器感知与智能教育部重点实验室 北京 100871)
(xiaoru.yuan@pku.edu.cn)

摘 要: 由于发展中国家经济增长的驱动, 全球对石油、天然气体的需求在不断地增长, 从而需要越来越纯熟的石油勘探技术. 探地数据可视化在石油、天然气勘探过程中起着举足轻重的作用. 文中主要从可视化的角度对探地数据的解释与展示进行了调研：首先介绍了以二维切片为主的探地数据可视化方法, 包括二维切片纹理映射、二维断层可视化; 其次讨论了以三维体绘制技术为主的探地数据可视化方法; 最后总结了解释性与叙述性可视化, 以及基于 Sketch 的交互式可视化和领域知识辅助的可视化.

关键词：探地数据; 切片可视化; 体绘制; 解释性可视化
中图法分类号：TP391

Seismic Visualization

Da Yuan[1)], Richen Liu[2)], and Xiaoru Yuan[2)*]

[1)] (*School of Computer Science and Technology, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai* 264005)
[2)] (*Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education), School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract: The global demand for oil and gas continues to grow due to the driver of economic growth in developing countries, which requiring more skilled oil exploration technologies. Seismic visualization plays an indispensible role in the explorations of oil and gas. This paper surveys the literatures on the illustration of seismic data from the perspective of visualization. First, slice-based seismic visualizations are introduced which consists of slice-based texture mapping and 2-D fault visualization. Second, the 3-D seismic visualizations on the basis of volume rendering are explained. Third, the methods of illustrative visualization, storytelling visualization, sketch-based visualization, and knowledge-assisted visualization are presented.

Key words: Seismic data; Slice-based visualization; Volume rendering; Illustrative visualization

根据美国能源部能源信息署(EIA)发布的旗舰报告《国际能源展望 2010》[1]的报告, 由于发展中国家经济增长的驱动, 从 2007 年到 2035 年世界能源消费将增长 49%. 可再生能源是世界能源供应

收稿日期：2014-11-10; 修回日期：2014-11-10. 基金项目：国家自然科学基金面上项目(61170204, 61373079), 国家自然科学基金重点项目(61232012). 原 达(1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为可视化、图像处理、模式识别; 刘日晨 (1984—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为科学可视化; 袁晓如(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为可视化与可视分析.

中增长最快的来源，不过到 2035 年，化石燃料(石油燃料 、天然气和煤炭)仍占能源总需求的 3/4 以上，对其的勘探与发掘仍然是一项极其重要的任务与挑战. 在化石燃料尤其是石油燃料的勘探过程中，关键的一步就是在石油储藏地上钻井采样获取地层(seismic layer)结构的样本数据，从而通过模型可视化地层结构，以帮助地质学家更好地研究地层. 因此，探地数据可视化(seismic visualization)就成为石油勘探过程中非常重要的一门技术.

预测石油与天然气等能源的储层位置的主流技术是向地层发射人工地震波，通过收集反射波，就可以确定地下介质分布规律、重建并可视化地层结构，最终辅助地震学专家进行探索与分析.

可视化在复杂数据分析和表现方面具有独特优势，它可以将数据中内蕴的属性信息进行视觉呈现，并借助丰富的人机交互手段辅助用户进行有效的分析[2]. 正如可视化专家 Bill Hibbard 所言，“地球系统的研究综合了各种科学领域的研究工作，诸如气象科学、水文科学学、地质科学等，对于可视化研究来说，每一个科学领域都有其独特性，其中都蕴含着真正的挑战”[3-4].

传统可视化工作流程采用串行的分析结构，经历预处理、建模等一系列处理后，以二维或三维的视觉形式将结果呈现给用户. 在这一处理过程中，用户参与分析的程度很低，基本上只是作为一个信息消费者来观测最后的分析结果. 分析过程中的每一个处理环节可能包含的缺陷都会传递到下一个环节，并影响最后的结果而产生误导信息，进而导致错误的结论. 更为严重的是，因为用户被排除在分析过程之外，即使用户知道分析过程可能存在问题，用户也很难判断和验证是否发生了信息扭曲以及它在哪一个环节出现的. 近年来，随着仪器设备分辨能力的大幅提升，更大规模的信息需要分析和处理，这无疑为可视化技术的研究提出了更大的挑战. 研究人员不断提出新的可视化方法，以满足用户对辨识能力、可靠性、准确性和实时性越来越高的要求. 概括来说，可视化研究呈现出以下几方面的发展趋势：

1) 视觉呈现方式

在传统的图像和体可视化的基础上，针对探地数据及其派生属性的可视化新技术不断的涌现，如解释性的可视化技术，这些技术力图将用户和分析过程有机地结合起来，让用户参与操控各个处理环节，支持用户对从原始数据到处理后数据的整个数据链的多视角观察. 同时，由于用户的参与，可视化内容可以加入传统方法所缺乏的多维、异质和动态信息，进而综合出多样化的视觉呈现方式.

2) 人机交互性与参数控制

可视分析系统通过交互把用户融合到计算系统中，以充分发挥人的判断能力和计算机的数据处理能力，能够更加有效地获得分析结果. 与此同时，各种数据处理方法、可视技术和知识工具的集成度越来越高，交互手段与分析方法之间结合的更加紧密，新的工作流、交互方式与参数控制的研究引起了研究人员的高度重视.

3) 多元化信息整合能力

为了支持对探地数据进行深度的分析、评估和验证，越来越多的知识和辅助信息加入到可视化系统中；与之相关的可视化核心技术也力求对多元数据中动态、不确定甚至相互冲突的信息进行整合，最终帮助用户获得传统方法难以企及的更深层理解.

探地数据有 3 个比较突出的特点：首先是噪音太多. 探地数据向来都是富含噪音，因为振幅数据是通过采用声波反射测速的技术获取的，声波反射具有很大的不确定性. 其次是不连续性. 因为地层构造的复杂性，物质种类丰富，获得的反射数据强度值范围非常广. 最后是获取的数据分辨率相对低. 正是探地数据的这些特点，给其可视化带来了极其大的困难与挑战.

反射波的传播在地壳介质的分界面处，即层位(horizon)，其在地震图像上层位主要以连续线性分布，一般位于振幅最大处会产生速度和方向的

变化；层位包括二维的层位线及三维的层位面．断层(fault)是岩层或岩体顺破裂面发生位移的地质现象，它在石油、天然气运移与聚集的过程中起着非常重要的控制作用．在油田勘探后期或开发阶段，解释和弄清断层的分布对可采储量估计、产能建设、油藏管理和油藏挖潜等具有极为重要的意义．

从可视化技术以及使用目的角度出发，可以将地层可视化划分为探地数据切片可视化、探地数据体绘制(volume rendering)、解释性(illustrative visualization)与叙述式(storytelling)可视化与基于Sketch、领域知识辅助等的其他可视化方法．其中，探地数据切片数据可视化包括二维切片纹理映射(texture-based slice illustration)和二维断层提取(2D fault detection)．体绘制是三维探地数据可视化常用的方法．基于交互设计的可视化技术主要以sketch 为主，让用户辅助获取或编辑可视化结果；而基于领域知识辅助(knowledge-assisted)的可视化方法，更加注重领域专家的介入．因为领域专家可以在可视化过程中加入更多的领域知识，使得用户更加直观、快速地了解领域内知识．

1　探地数据切片可视化

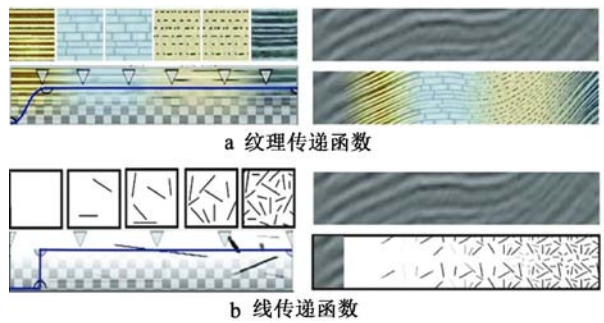
1.1　二维切片层位线可视化

一般而言，二维切片(slice)层位线可视化是先提取切片或截面(section)的层位线(horizon line)，再通过纹理映射的技术将层位线可视化．

相对于三维层位提取，二维层位提取的优点有 3 个：1) 在数据获取的初级阶段，主要提供的是二维切片数据，因此二维层位提取可以稍作处理就直接使用；2) 二维切片的展示是地震学研究中极其常用的方法，具有较强的解释效果；3) 二维层位提取更加直观，以方便地质学家进行更好的交流与展示．

从图像角度看，层位线就是2个地层的边界，因此可以通过计算地层的边界提取层位线．Faraklioti 等[5]使用高斯滤波的二阶导数提取层位线，它不需要预处理数据，从而提高了算法的可有性．

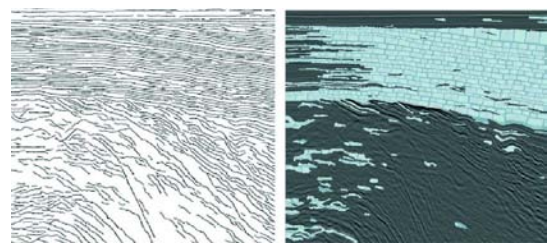
进一步，为了更好地可视化层位线的弯曲变化，Patel 等[6]采用以纹理传递函数(texture transfer function)为主、线传递函数(Line transfer function)为辅的层位线可视化方法．图 1[6]中展示了 2 种纹理传递函数，系统将按照属性值自动选择不同的纹理，图中的蓝线表示的是纹理的透明度值曲线．线传递函数是在纹理传递函数的基础上进一步表示数据的一些属性值，如强度值．首先，该方法用二维切片数据进行层位跟踪(horizon tracing)，与传统的层位跟踪算法不同，它没有使用种子点(seed point)，而是扫描所有切片数据得到垂直方向上 3 个相邻样本中的局部最小值与局部最大值，这些局部最小值与最大值处的点就是层位线经过的点．其次，在得到层位线之后，对其进行参数化，即得到层位线的扭曲参数．最后，结合扭曲参数将纹理映射到切片上，如图 2[6]所示．图 2a 所示为提取的所有层位线；图 2b 表示按照参数化后的层位线进行纹理映射，从而得到随着层位线弯曲的纹理；图 2 c 表示用线传递函数进一步表示地层数据的强度值．其中不同的颜色代表不同的强度，具体的颜色映射由线传递函数指定．



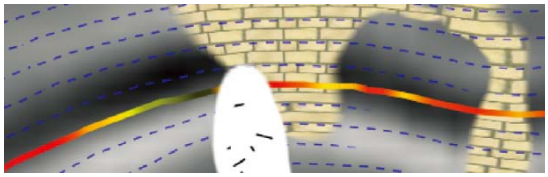
a 纹理传递函数

b 线传递函数

图 1　2 种纹理传递函数



a 提取的层位线　　b 层位线纹理映射



c 用线传递函数表示强度值

图 2 结合层位线弯曲参数进行纹理映射

因为探井周围的数据都是非插值获取的真实数据，为了更好地展现这些数据，可以通过选择多个(一般为 3 个)探井位置进行切片选择[7]. 进一步，为了方便比较，如图 3[7]所示,将这些切片平摊到平面上,用户选择 a, b 和 c 3 个探井位置，并按照这 3 个位置进行平摊，得到图 3 右边子图中的结果. 具体的实例图如图 4[7]所示，用户可以从图 4a 中的三维坐标系统中选择 3 个探井位置，穿过这些探井位置且与深度轴平行的切片平面就被提取出来，并平摊到如图 4b 所示的一个平面上.

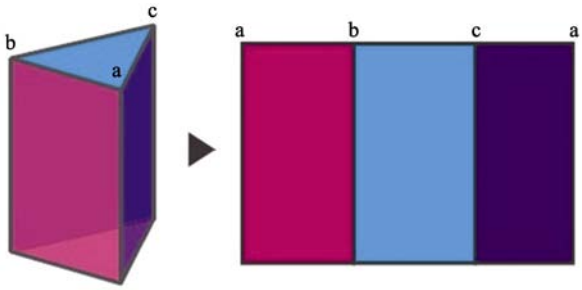
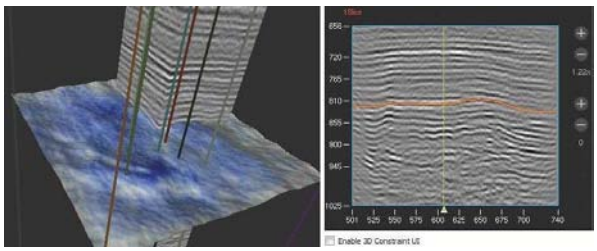


图 3 通过探井位置进行切片选择示意图



a 选择 3 个探井点位置 b 平摊结果

图 4 通过探井位置进行切片选择实例

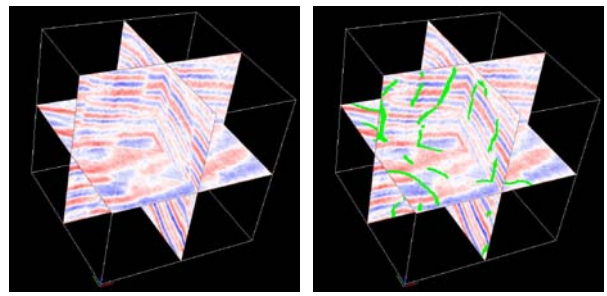
1.2 二维切片断层可视化

大部分二维断层可视化是将二维数据看成图像数据，借助图像处理的技术与方法将断层提取出来，并进一步运用可视化技术进行渲染.

对于断层提取，有很多研究人员提出了各种算法，如相干体技术(coherence cube)[8]，基于该技术，很多研究人员进一步改善了此算法，如基于局部相似性(semblance)的相干估计算法[9]和基于高阶统计量的相干估计算法[10]. 进一步地，McClymont 等[11]提出了基于相干技术计算相关性、地质属性以及灰度共生矩阵(gray-level cooccurrence matrix)，从灰度共生矩阵中可以计算二维纹理的能量、对比度、熵以及逆差距等度量属性，通过这些度量属性，可以抽取出断层的重要特征.

类似地，还可以使用结构张量的方法计算地层数据的朝向(orientation)，并使用非极大值抑制算法(non-maximal suppression)提取断层[12]. 在使用结构张量计算地层数据朝向之后，还可以进一步通过计算局部相似性(semblance)[13]来提取断层. 不仅如此，图像处理技术或计算机视觉中的图像识别技术也可以用于断层提取，例如，可以通过 2 次使用 Hough 变换提取断层，其主要是提取断层数据中的直线并获取参数空间中的点，从而得到断层上的点[14].

由于断层提取的体数据往往比较大，随着体数据规模的变大，性能成为了这类系统的瓶颈. 因此，性能提升在断层提取研究中也是极其关键的，而硬件加速就是其中一种方法. 例如，基于 GPU 的断层提取加速[15]首先利用结构张量矩阵及对其进行特征向量分析，得到地层数据的朝向；其次，使用各向异性微分对二维切片进行去噪；最后使用非极大值抑制算法得到断层数据. 在此过程中，特征向量分析是此算法比较重要且耗时的一步，因此，特征向量分析的 GPU 实现将给该算法带来极大的性能提升. 使用该 GPU 加速算法得到的断层提取结果如图 5[15]所示，其中绿色线条即为提取的断层.



a 原切片数据 b 切片中的断层

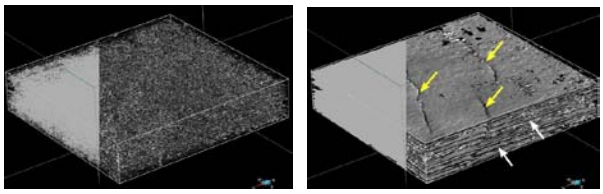
图 5 切片断层可视化

2　探地数据体可视化

三维探地数据可视化主要是将体绘制技术应用于可视化中, 体绘制可以更好地探索探地数据在三维空间中的连续性和层位线跟踪, 并提供更多三维交互(平移、旋转)[16].

对于探地数据的体绘制, 由于所有的层都叠加在一起, 视觉遮挡(visual clutter)就成为探地数据体绘制的一个难题与挑战. 再加上探地数据的范围很广、断层多, 经过传递函数映射之后, 颜色并没有很好的连续性, 从而需要更加复杂并适合的可视化技术. 除此之外, 当三维探地体数据比较大时, 渲染性能将会成为系统瓶颈. Plate 等[17]提出的基于八叉树的层次化页面调度方法, 有效地解决了大体数据渲染时的性能问题.

传统的体绘制方法是从成像平面出发, 沿着三维投影的逆方向进行采样并遍历逐个体元素、计算颜色积分; 在积分计算过程中, 为了尽量减少信息丢失, 就需要大大地提高采样率. 然而, 提高采样率将带来额外的性能开销, 而解决办法就是采用预积分体绘制技术(pre-integrated volume rendering). 预积分体绘制考虑的是由一系列点形成的点对(slab), 而不是单个体元素. 结合三维探地数据, Castanie 等[18-19]首次使用了预积分体绘制技术, 并结合光照效果, 如图 6[18]所示.



a 传统的体绘制　　b 预积分体绘制提取地质属性

图 6　预积分体绘制

但是预积分体绘制只是从算法改进的角度将三维数据体绘制出来, 从可视化角度上看, 并没有做进一步的探索与设计. 为了进一步探索三维探地体数据, Ropinski 等[20-21]提出了结合 Focus+Context 思想的体绘制技术, 通过模拟球形镜头、立体镜头以及遮挡镜头的效果, 突显用户感兴趣区(region of interest, ROI).

层位线的提取与可视化几乎成为所有二维探地数据可视化技术不可或缺的一步; 类似地, 层位片(horizon patch)的提取与可视化在三维探地数据可视化中有着异曲同工的作用. 在三维探地数据中提取层位片, 首先可以随机指定探地数据中一个体元素(voxel)作为种子点, 将其加入到层位片集合中; 其次, 在该点周围寻找与之最相似的点, 也加入到层位片集合中, 依次迭代, 最终获得整个层位片[22], 具体示意图如图 7[22]所示. 在得到层位片之后, 可以进一步采用基于层次的曲面分割[23]算法将层位片聚类并分割成不同的小块, 且赋予层次等级值, 用户可以交互地控制当前系统的层次等级值, 该等级值直接控制最终聚类的组数. 通过层次等级值的设置, 用户可以交互地一部分一部分显示层位片, 如图 8[22]所示为从简单的曲面开始到获得一个相对大的层位面的 6 个步骤. 也就是说, 在整个可视化过程中, 用户可以参与到其中, 使得可视化结果更加准确.

一些传统的三维可视化技术也可引入到三维探地数据可视中. 例如, Hollt 等[24]采用了爆炸图(exploded view)技术将体绘制中的层分开, 以致可更清晰地探索体数据的内部结构与层与层之间的关系. 对于单独层的体绘制, 可以使用实际深度值(depth domain)而不是原始的时间域(time domain)深度值. 而在实际情况下, 直接获取的深度数据是通过声波测定的时间域的深度值, 该值并不是实际深度值, 它是实际深度值的一种逼近, 实际深度值是将时间域深度值经过深度转换(depth conversion)获取的. 需要深度转换的原因是因为声波在不同固定物质中的传播速度不同, 导致获取的时间域深度值与实际深度值产生一定的偏差. 使用实际深度值有 2 个优点, 首先, 它更加逼近现实地层; 其次, 从三维易造成视觉遮挡的角度看, 它可以使层与层之间更好地分开. 如果仅仅使用时间域深度值进行体绘制, 将引起更多的视觉遮挡, 结果如图 9a 所示. 与之相比, 如果使用图 9b 所示实

际深度值，同一层的深度值会有一定的扭曲，它们并不共面．根据这种扭曲就可以进一步采用爆炸图(exploded view)技术将不同的层分离，从而大大地减少视觉遮挡，方便用户对数据的分析与探索．

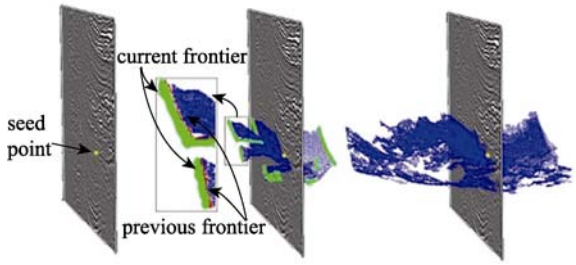


图 7　通过种子点提取层位片层位片提取

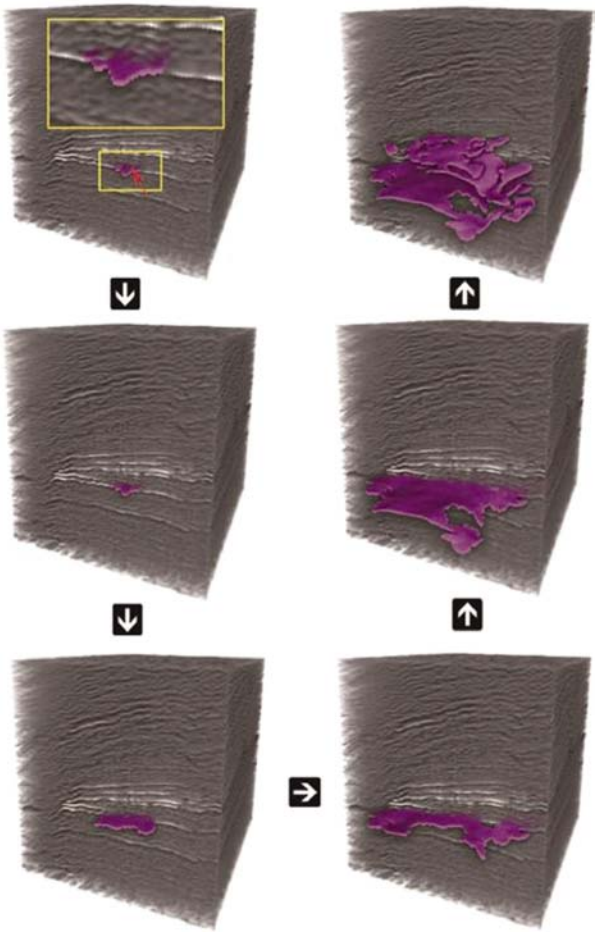
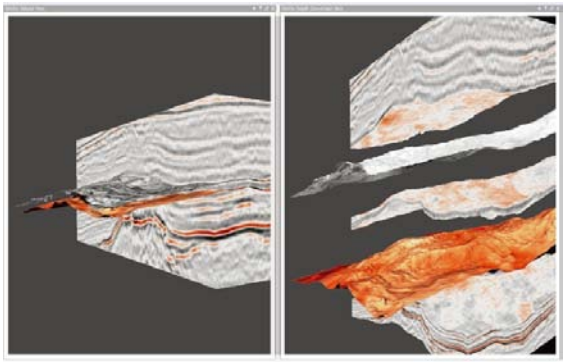


图 8　交互式地探索探地体数据的过程

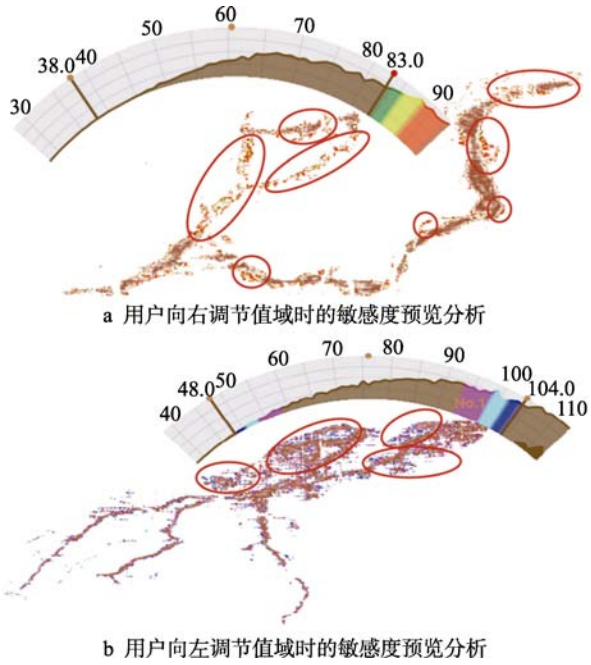


a 时间域深度值体绘制　　b 实际深度值体绘制

图 9　结合爆炸图的实际深度值体绘制

基于探地数据噪音大的特点，Zhou 等[25]提出基于 GPU 渲染的高效率的数据过滤方法．用户可以通过平行坐标对多维数据进行传递函数设计，在预处理阶段使用高斯混合模型(gauss mixture model GMM)对每个数据块估计数据的分布特性．

正因为体可视化给交互带来大量的困难，尤其是视觉遮挡引入的一系列问题，Liu 等[26]提出基于多尺度敏感分析对用户将要得到结果先得到一个预览，以帮助用户调整传递函数，如图 10[26]所示．该方法在探地数据的二维切片之后，在切片上进行基于敏感度分析的传递函数设置，然后再对提取的地下暗流进行体可视化时，采用所见即所得的交互操作[27-28]来进一步得到更加精确的结果．



a 用户向右调节值域时的敏感度预览分析

b 用户向左调节值域时的敏感度预览分析

图 10　多尺度敏感度分析提取地下暗流的传递函数

3　解释性与叙述式可视化

为了让非领域内用户更清楚地了解地层结构以及地质学相关的一些知识，很多研究人员提出了解释性(illustrative visualization)与叙述式(story-telling)的探地数据可视化技术.

3.1　解释性可视化

探地数据解释性可视化是采用解释性技术(illustrative techniques)描述探地数据，它采用了地理书籍中的关于地层插图的绘制方法. 如图 11[29]所示，它主要是将断层、层位线和其他地层结构用简

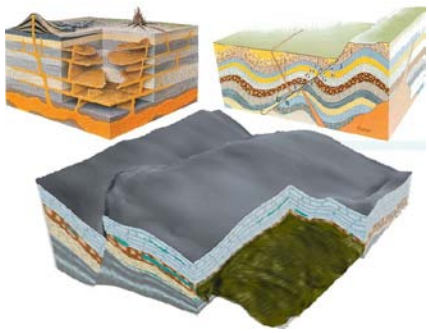


图 11　地理书籍中的地层解释方法

单易懂的艺术化方法表达出来，并将侧重点从具体的可视化技术转移到可视化对象的信息传递上，即采用简单的可视化技术将更重要的元素对象强调出来，从而使读者获取更多知识性信息.

在解释的过程中，需要用户通过交互操作对可视化模型进行参数控制、反复实验和对比. 由于体可视化计算过程耗时大，用户等待时间过长，影响了整个系统的交互性，导致其效率不高. 此外，受到体可视模型复杂程度的限制,重要特征信息的增强显示能力会被弱化. 解释性可视化力求弥补传统解释流程中存在的不足，并将可视技术和解释过程集成到一起，建立灵活、易控的交互可视界面，将数据中动态、不确定甚至相互冲突的信息整合，以直观的、易于理解的增强显示方式辅助用户快速获得对目标数据的总体认知. 解释性可视化流程的显著特点之一是，用户可以通过指向性更强的参数控制与解释性可视化模型直接交互，不仅可以增强显示用户关注的兴趣信息，而且提高了响应时间. 一般而言，解释性方法常常会用到三维体绘制技术.

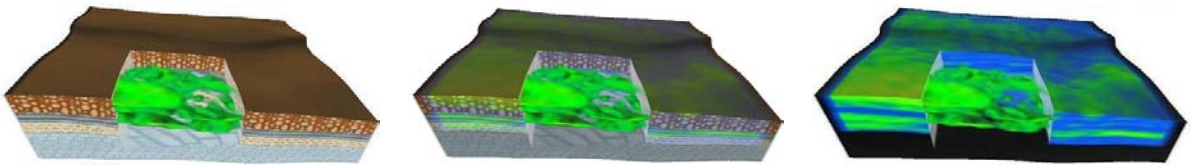
鉴于解释性可视化技术在可视化领域的重要作用，Patel 等[29]首次将该技术与基于二维切片的纹理映射技术结合起来，用以描述探地数据. 该方法的主要步骤如下：

Step1. 参数化层(layer parameterization)以获取当前层中每个点在参数空间中的局部坐标.

Step2. 基于纹理传递函数的纹理映射采用层纹理传递函数(layer texture transfer function)、标量纹理传递函数(scalar texture transfer function)以及颜色传递函数(color transfer function). 最终的纹理映射结果是将上述 3 种传递函数渲染的结果混合起来.

具体而言，层纹理传递函数设计是根据 Step1 中获取的参数空间中的局部坐标进行纹理映射；标量纹理映射将地层属性值编码成透明度纹理；颜色传递函数是用颜色编码一些地层数据的属性值，如声阻抗(acoustic impedance)，从而用解释性方法强调一些对象，给用户传达更多知识性信息. 如图 12[29]所示，图 12a 主要用层纹理传递函数渲染探地数据，图 12c 结合了标量纹理传递函数和颜色传递函数将声阻抗高之处用绿色强调出来. 可以看出，不同的传递函数有不同的功能与优缺点.

从图 12a 中可以看出，纹理传递函数更直观，用户可以快速判断地层结构并解释地层结构；而图 12c 的可视化结构更加贴近原始数据，因为它是对原始数据直接进行颜色映射；而图 12b 介于它们之间.



a 用纹理传递函数渲染　　b 用纹理、标量纹理、颜色传递函数渲染　　c 用标量纹理、颜色传递函数渲染

图 12　解释性渲染探地数据

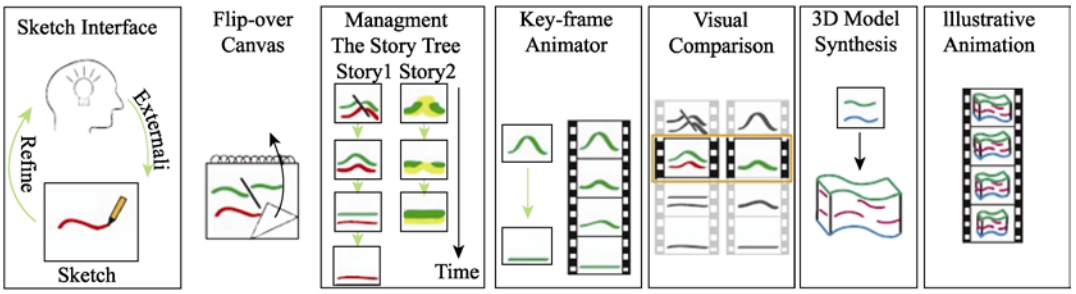


图 13　叙述式可视化流程图

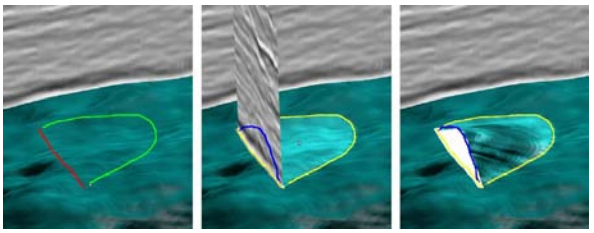
3.2　叙述式可视化

叙述式(storytelling)的可视化建模方法[30]旨在采用导向性更强的交互可视建模技术，克服传统结构化可视化建模方法存在的病态(ill-posed)问题. 该方法加入了以情节(story)为中心的可视化建模组织方法，以指导用户建模和评估，工作流程如图 13 所示. 通过叙述式方法，系统建立故事树(story tree)来管理一系列需要讲解的情节，结合动画技术，将每个情节用关键帧来表示，从而为非领域内专家提供知识普及甚至决策支持.

4　基于 Sketch 的可视化

虽然大部分探地数据可视化方法都结合使用二维与三维可视化技术进行渲染，但是其中多数都有一定的倾向性，如以二维为主或以三维为主. 除此之外，还有一些可视化方法是从其他角度来改善可视化效果. 如基于 sketch 的方法[31]是从交互的角度(手绘)提升可视化体验与效果的， 将 sketch 操作应用到探地数据可视化将带来更直观的体验与效果. 换言之，sketch 操作将给用户带来所见即所得的可视化效果，在用户自己探索或编辑探地数据过程中，在可以人为地辅助系统展现更多地质属性的同时，可以让用户对数据产生更深的印象与理解.

传统的半自动或自动层位提取方法得到的结果往往是不尽如人意的，其原因与本文前面所述的探地数据的 3 大特点有关. 因为探地数据富含噪音而带来很大的不确定性[32]，使得自动化方法得到的结果未必正确. 此时就需要人工操作的介入，让用户自己去编辑可视化结果. Amorim 等[33]设计了断层变形操作和磁性操作 2 种 sketch 操作，探索或编辑探地数据.



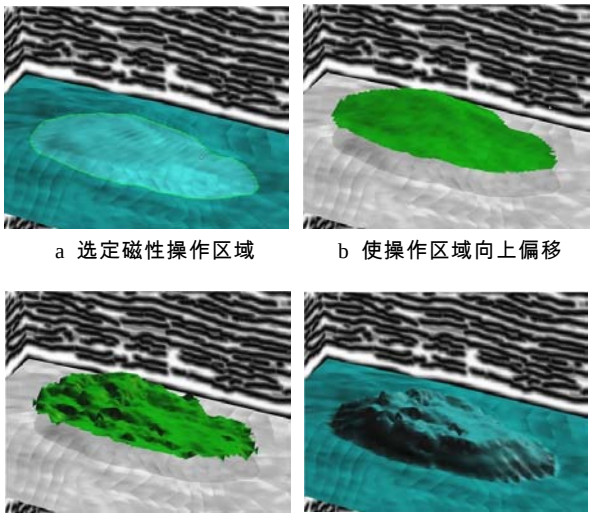
a 选择范围　　b 选定变形程度　　c 变形结果

图 14　断层变形操作

图 14[33]表示的是断层变形操作，用户首先用红线表示错位区，即断层变形时错位发生之处，如图 14a 所示；其次如图 14b 所示用绿线表示断层变形的整个区域；最后用户用划线表示断层变形的程度，最终的断层变形结果如图 14c 所示. 图 15[33]表示的是磁性操作，用户首先选定一个图 15a 所示区域，之后如图 15b 所示让这块区域偏离原来的高度，再使

用磁性操作将这块区域中高度值与聚类后产生的最近小区域的最低高度值产生如图 5c 所示偏移；最后在磁性操作的基础上产生如图 15d 所示“乱抓”的效果，使得最终的结果更逼近真实的地层沉积现象．此外，该 sketch 方法还包括平滑操作、腐蚀效果操作以及 pinch 等操作．

Lidal 等[34]提出了基于 sketch 的地质建模的方法，它使用了基于 sketch 的交互手段，更生动直观



a 选定磁性操作区域　　b 使操作区域向上偏移

c 使用磁性操作　　d 随机“乱抓”的效果

图 15　磁性操作

地将地层曲面可视化出来．该方法使得用户可以简单地画几条曲线指定地层曲面的边界范围以及法向，进一步再使用插值的方法将曲面光滑地构造出来，如图 16 所示．

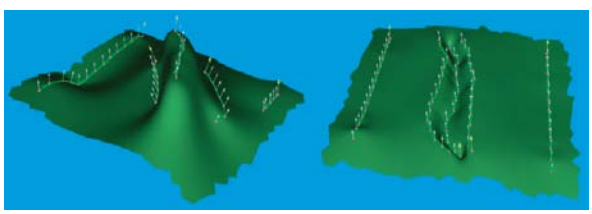


图 16　基于 sketch 的地层曲面构造

5　领域知识辅助的可视化

领域知识辅助的可视化由 Chen 等[35]在 2007 年首次提出的，它指的是利用相关的领域知识来提高可视化效果或指导可视化设计，从而向用户传递更多的信息．领域知识辅助的可视化的目标是领域内专家向非领域内用户解释领域知识时尽量降低他们理解信息的门槛，使用户更清楚、直观、快速地了解数据，其工作流程如图 17 所示．

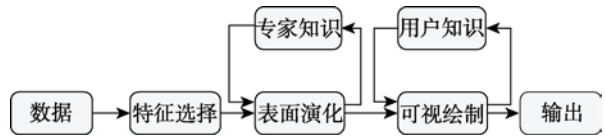
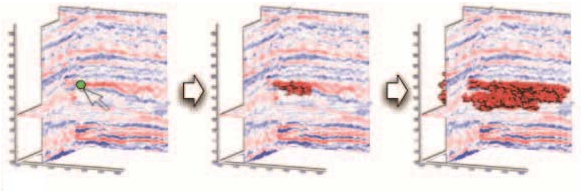


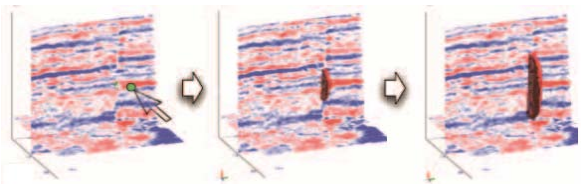
图 17　领域知识辅助的可视化工作流程

进一步地，Patel 等[36]介绍了基于领域知识的解释性渲染，针对传统的自下而上(bottom-up)的解释性方法费时的缺点，他们提出了自上而下(top-down)的解释方法，该方法首先在整体上，即一个相对高且抽象的层次上对一个探地数据进行初步可视化，此时的可视化结果更加贴近整体的原始数据本身．与此同时，让领域内专家引入领域相关的知识，给出进一步可视化的建议，使得最终的可视化结果给用户传递更多的领域知识．相比之下，自下而上的方法却是在细节上已被渲染之后让领域内专家介入，此时看到的可视化结果更不精确且具有不确定性，往往会使可视化过程陷入重新渲染、重新让领域内专家给出建议的循环中．

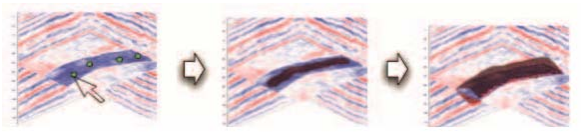
在地质结构分割提取方法中，也可以让领域专家介入，从而引入领域知识．例如，Kadlec 等[37]于 2010 年提出了基于领域知识的地质结构分割提取方法，他们首先是获得探地数据的二维切片，并在二维切片上让领域内专家查找上面的地质结构，如地缘实体(geobody)、断层(fault)与水道(channel)等，只需要在切片上点击鼠标投放种子点，并指明该区域含有哪种地质结果，就可以增加相应地质结构的大小，如图 18[37]所示．在此过程中，他们使用了 PDE 的方法提取相应地质结构的边缘，用户可以交互地控制分割与提取的程度．



a 地缘实体



b 断层



c 水道

图 18 分割并提取地质结构的过程

6 结 论

本文主要从可视化的角度对探地数据的解释与展示进行了调研与分析. 首先介绍了以二维切片为主的探地数据可视化方法, 包括二维切片纹理映射、二维断层可视化; 其次介绍了以三维体绘制技术为主的探地数据可视化方法; 最后介绍了向非领域内专家普及知识的解释性与叙述性可视化、以及基于 sketch 的交互式可视化和领域知识辅助的可视化.

基于探地数据噪音大与强度值范围广等特点, 我们可以从 2 个方面进一步改善探地数据可视化方法. 首先, 可以用将二维图像处理的最新技术拓展到三维体数据中, 去除噪音. 另外, 可以使用机器学习的方法进一步对目标数据进行聚类、分割或重建. 此外, 在算法精度或稳健性不强的情况下, 可以使用更有效的、更直观的交互技术进一步辅助算法提高精度, 尤其是特殊情况下, 例如特定的目标提取精度不高时.

参考文献(References):

[1] International energy outlook 2010 [R]. Washington DC: U.S. Energy Information Administration (EIA). 2010

[2] Kidd Gerald D. Fundamentals of 3-D seismic volume visualization[J]. The Leading Edge, 1999, 18(6): 702-709

[3] Hibbard B, Böttinger M, Schultz M, *et al*. Visualization in earth system science [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 2002, 36(4): 5-9

[4] Yuan Xiaoru, Xiao He, Guo Hanqi, *et al*. Scalable Multi-variate analytics of seismic and satellite based observational data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1413-1420

[5] Faraklioti M, Petrou M. Horizon picking in 3D seismic data volumes [J]. Machine Vision and Applications, 2004, 15(4): 216-219

[6] Patel D, Giertsen C, Thurmond J, *et al*. The seismic analyzer: interpreting and illustrating 2D seismic data [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(6): 1571-1578

[7] Hollt T, Beyer J, Gschwantner F, *et al*. Interactive seismic interpretation with piecewise global energy minimization [C] // Proceedings of the IEEE Symposium on Pacific Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 59-66

[8] Bahorich M, Farmer S. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube [J]. Leading Edge, 1995: 1053-1058

[9] Marfurt K J, Kirlin R L, Farmer S L, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm [J]. Geophysics,1998, 63(4): 1150-1165

[10] Lu Wenkai, Li Yandong, Zhang Shanwen, et al. Higher-order-statistics and supertrace-based coherence-estimation algorithm [J]. Geophysics, 2005, 70(3): 13-18

[11] McClymont A F, Green A G, Streich R, *et al*. Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: an example from the alpine fault zone [J], Geophysics, 2008, 73(2): B11-B23

[12] Bakker P. Image structure analysis for seismic interpretation [D]. Delft: Technisch Universiteit Delft, 2002

[13] Gibson D, Spann M, Turner J. Automatic fault detection for 3D seismic data. //Proceedings of VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003: 821-830

[14] Jacquemin P, Mallet J L. Automatic faults extraction using double hough transform [C] //Proceedings of SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005: 755-758.

[15] Jeong W K, Whitaker R, Dobin M. Interactive 3D seismic fault detection on the graphics hardware [J]. Volume Graphics, 2006: 111-118

[16] Aziz I A, Mazelan N A, Samiha N, *et al*. 3-D seismic visualization using SEG-Y data format [C] // Proceedings of International Symposium on Information Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008: 1-7

[17] Plate J, Tirtasana M, Carmona R, *et al*. Octreemizer: a hierarchical approach for interactive roaming through very large volumes [C] //Proceedings of the symposium on Data Visualisa-

tion. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002: 53-64

[18] Castanie L, Bosquet F, Levy B. Advances in seismic interpretation using new volume visualization techniques [J]. First Break Journal, 2005: 69-72

[19] Castanie L, Levy B, Bosquet F. VolumeExplorer: Roaming large volumes to couple visualization and data processing for oil and gas exploration [C] //Proceedings of IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 247-254

[20] Ropinski T, Hinrichs K. Interactive Visualization of Subsurface information [C] //Proceedings of International Conference on Visual Information Systems, 2005: 121-131

[21] Frank Steinicke T R, Hinrichs K,. Visual exploration of seismic volume datasets [J]. Journal of WSCG, 2006: 73–80

[22] Patel D, Bruckner S, Viola I, *et al*. Seismic Volume Visualization for Horizon Extraction. Proceedings of the IEEE Symposium on Pacific Visualization. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2010: 73-80

[23] Attene M, Falcidieno B, Spagnuolo M. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives [J]. The Visual Computer, 2006, 22(3): 181–193

[24] Hollt T, Freiler W, Gschwantner F M. *et al*. SeiVis: an interactive visual subsurface modeling application [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(12): 2226-2235

[25] Zhou Liang, Hansen C. Interactive Rendering and Efficient Querying for Large Multivariate Seismic Volumes on Consumer Level PCs [C] //In Proceedings of the IEEE Symposium on Large-Scale Data Analysis and Visualization (LDAV). Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 117-118

[26] Liu R C, Guo H Q, Yuan X R. Seismic Structure Extraction Based on Multi-scale Sensitivity Analysis [J]. Journal of Visualization, 2014, 17(3):157-166

[27] Guo H Q, Mao N Y, Yuan X R. WYSIWYG (What You See is What You Get) Volume Visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(12):2106-2114

[28] Guo H Q, Yuan X R. Local WYSIWYG Volume Visualization [C]. //Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 65-72

[29] Patel D, Giertsen C, Thurmond J, *et al*. Illustrative rendering of seismic data [R]. Vienna, Austria: Vienna University of Technology. 2007

[30] Lidal E M, Natali M, Patel D, *et al*. Geological storytelling [J]. Computers & Graphics, 2013, 37(5): 445-459

[31] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, *et al*. Sketch-based modeling: A survey [J], Computers & Graphics, 2009: 85-103

[32] Bond C E, Gibbs A D, Shipton Z K, *et al*. What do you think this is? “conceptual uncertainty” in geoscience interpretation [J]. GSA Today, 2007, 17(11): 4-10

[33] Amorim R, Brazil E V, Patel D, *et al*. Sketch modeling of seismic horizons from uncertainty [C] //Proceedings of the International Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2012: 1-10

[34] Lidal E M, Patel D, Bendiksen M, *et al*. Rapid Sketch-based 3D Modeling of Geology [C] //Workshop on Visualisation in Environmental Sciences (EnvirVis). Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2013: 1-5

[35] Chen M, Ebert D, Hagen H, *et al*. Data information and knowledge in visualization [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2009, 29(1): 12-19

[36] Patel D, Sture O, Hauser H, *et al*. Knowledge-assisted visualization of seismic data [J]. Computers & Graphics, 2009, 33(5): 585-596

[37] Kadlec B J, Tufo H M, Dorn G A. Knowledge-assisted visualization and segmentation of geologic features using implicit surfaces [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2010, 30(1): 30-39