

面向随钻的井筒可视化方法研究

段友祥¹, 仝兆岐¹, 李 卿¹, 孙歧峰¹, 李洪强²

(1. 中国石油大学计算机与通信工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利油田钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

摘要:针对随钻过程中数据的复杂多样性以及井下信息可视化重要性,以随钻井轨迹数据和随钻测井数据为研究对象,研究并给出随钻井筒可视化建模的方法,建立立体井筒模型。基于成像原理给出钻遇地层可视化建模方法,建立地质属性映射模型,采用纹理技术实现二者的有机融合,真正实现随钻井筒的三维可视化。利用 Open Inventor 图形开发工具包,实现三维井筒的绘制和钻遇地层信息在三维井筒上的展示。

关键词:随钻测井; 轨迹; 井筒; 可视化

中图分类号:TE 24;TP 391 **文献标志码:**A

引用格式:段友祥,仝兆岐,李卿,等. 面向随钻的井筒可视化方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):63-70.

DUAN Youxiang, TONG Zhaoqi, LI Qing, et al. Wellbore visualization method for logging while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):63-70.

Wellbore visualization method for logging while drilling

DUAN Youxiang¹, TONG Zhaoqi¹, LI Qing¹, SUN Qifeng¹, LI Hongqiang²

(1. College of Computer & Communication Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: To address the complex nature and the importance of visualization of downhole data in geosteering, we developed methods for wellbore visualization modeling and established a 3D model of wellbore, using well trajectory data and logging-while-drilling data. Based on the imaging principle, we developed methods for formation visualization modeling while drilling, and built a geological attribute mapping model. Using texture mapping technology, we fully integrated the two models mentioned above, and achieved 3D visualization of drilling wellbore. Using Open Inventor graphics development kit, we illustrated how to draw 3D wellbore and display drilling formation in 3D borehole.

Keywords: logging while drilling; well track; wellbore; visualization

由现代信息技术支撑的随钻地质导向^[1]作为一项综合型的钻井技术逐渐发展起来,它涉及探测仪器、数据传输、数据处理解释和决策等多项关键技术,可以有效解决目前油气资源开发面临的难题。可视化技术^[2],特别是三维可视化技术,作为数据科学计算中处理数据的一种有效手段,逐渐被广泛应用于油气藏开发的复杂数据处理中,如地震数据可视化、地质模型可视化、井轨迹可视化、测井曲线可视化等。在随钻地质导向过程中,把它们统称为随钻信息的可视化。随钻信息可视化已经成为随钻

地质导向的关键技术之一。随钻地质导向中的井眼轨迹数据和测井数据是采用随钻测量技术获取的实时数据,也是了解钻井工程过程和地层属性信息的重要数据。通过对这类数据可视化,可以使油气钻探过程及钻遇地层形象和直观地展现出来^[3],为数字岩心^[4-5]等研究提供帮助,为实时监测、分析、控制和决策提供支持。但是目前针对井轨迹的可视化研究大多基于二维或空间曲线的形式,测井信息多以测井曲线或成像的形式,且二者没有有效的融合,难以达到随着钻井的进程观察到钻遇地层情况的可视

化效果,即没有实现真正的可视化感知。以随钻井眼轨迹数据为基础,建立数字化井筒模型,以随钻测井数据为基础,建立地层属性映射模型,绘制三维立体井筒,并在井筒壁上附着相应的地层信息,实现多信息的融合和可视化,就可以更直观地观察随钻进程,为随钻地质导向奠定基础,真正为生产决策服务。Open Inventor(简称 OIV)^[6]是一个三维图形开发工具包,它可以在多种操作系统中使用,比如 Windows、Unix、Linux 等,并可以支持多种编程语言。由于其良好的跨平台性和高效的程序开发功能,现已被广泛应用于石油钻探、虚拟现实等多种领域,并成为 3D 图形开发的工业标准。笔者基于 Open Inventor 开发环境对面向随钻的井筒可视化方法进行研究。

1 井筒模型构建

三维井筒可视化实际是对井眼轨迹可视化的一个延伸,它可以在更接近真实井的情况下实时显示井轨迹的变化,因此井筒模型是基于井眼轨迹数据建立的。

1.1 构建过程

基本原理:以井眼轨迹作为中轴线,以井眼轨迹上的每个测点为圆心,以相邻两个测点的连线为法向量绘制圆。在每个圆上取适量的等分点,并将相邻两个圆上的等分点进行连接,形成基于三角图元的井壁,从而构成无缝的井筒,亦即将每个圆看作是井筒的一个切片^[7]。建模示意图如图 1 所示。

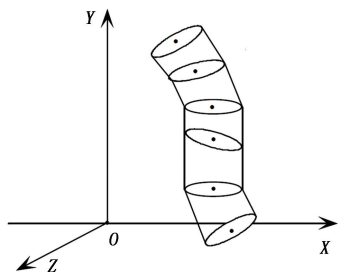


图 1 切片法构建井筒的示意图

Fig. 1 Sketch map of wellbore composition of section-cutting

具体过程:

(1) 计算切片圆上等分点的全球坐标 $Q(x, y, z)$

假设,井筒半径为 r ,井眼轨迹上两个相邻测点为 P_0, P_1 ,且 P_0, P_1 的全球坐标分别为 (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) 。

①求取以 P_1 为圆心的切片圆周上等分点的局

部坐标 $Q'(x', y', z')$ 。将以 P_1 为圆心的圆周切片称为切片圆 p_1 ,首先需要将切片圆 p_1 转换到局部坐标系内。将 P_1 点平移至全局坐标系的原点 O 处,然后将向量 $\overrightarrow{P_1 P_0}$ 分别绕 X 轴和 Z 轴逆时针旋转角度 α, β ,使向量 $\overrightarrow{P_1 P_0}$ 与全局坐标轴正方向重合。将平移之后的坐标系称为局部坐标系,其坐标轴表示为 X', Y', Z' 。

以局部坐标 X' 轴正方向与切片圆 p_1 相交处为起点,沿逆时针方向将切片圆 p_1 等分为 n 等份。因整个圆周的角度为 2π ,则每等份的夹角为 $2\pi/n$ 。假设切片圆 p_1 在局部坐标系下的等分点为 $Q'(x', y', z')$,可得 Q' 的坐标值计算公式。

$$\begin{cases} x' = r \cos(\theta i), \\ z' = r \sin(\theta i), \\ y' = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i \in (0, 1, 2, \dots, n-1)$, $\theta = 2\pi/n$ 。

②将等分点的局部坐标转换为全局坐标。执行第一步的逆操作,使局部坐标系内的切片圆 p_1 回到全局坐标系中原来的位置。首先在全局坐标系内平移以 O 为圆心的切片圆 p_1 ,将圆心 O 移至 P_1 点位置;然后,将切片圆 p_1 分别绕 X 轴和 Z 轴顺时针旋转角度 α, β ,使全局坐标 Y 轴正方向和 $\overrightarrow{P_1 P_0}$ 的正方向相同。经过平移和旋转操作后,可得到切片圆 p_1 上等分点的局部坐标转换为全局坐标的关系式。

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' & y' & z' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

其中, (x', y', z') 为切片圆 p_1 上等分点 Q' 的局部坐标, (x_1, y_1, z_1) 为测点 P_1 的全球坐标, α, β 为切片圆 p_1 绕全局坐标 X 轴和 Z 轴旋转的角度,计算公式为

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{(x_0 - x_1)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}}, \\ \cos \beta &= \frac{(z_0 - z_1)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}}. \end{aligned}$$

坐标转换如图 2 所示。

为了便于算法程序实现,将上述公式进行简化。

设切片圆 p_1 的法向量 $\overrightarrow{P_1 P_0}$ 与全局坐标 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的夹角余弦值分别为 c_1, c_2 和 c_3 ,则根据余弦值不同可将公式(2)表示为 3 种形式。

当 $c_1 \neq 1$ 且 $c_3 \neq 1$ 时,

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} x' & y' & z' \end{pmatrix}}{\sqrt{(1-c_1^2)(1-c_3^2)}} \times$$

$$\begin{pmatrix} c_2\sqrt{(1-c_1^2)} & c_1\sqrt{(1-c_1^2)} & 0 \\ -c_1c_2 & c_2^2 & c_3\sqrt{(1-c_3^2)} \\ c_1c_3 & -c_2c_3 & c_2\sqrt{(1-c_3^2)} \end{pmatrix} + (x_1 \ y_1 \ z_1). \quad (3)$$

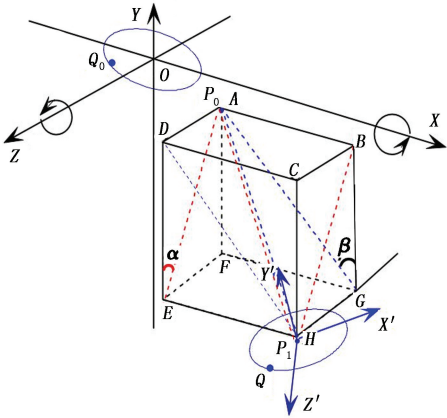


图 2 坐标转换

Fig. 2 Coordinate transformation

当 $c_1 = \mp 1$ 时,

$$(x \ y \ z) = (x' \ y' \ z') \begin{pmatrix} 0 & c_1 & 0 \\ -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (x_1 \ y_1 \ z_1). \quad (4)$$

当 $c_3 = \mp 1$ 时,

$$(x \ y \ z) = (x' \ y' \ z') \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \\ 0 & -c_3 & 0 \end{pmatrix} + (x_1 \ y_1 \ z_1). \quad (5)$$

(2) 构建切片圆之间的侧面

经过第一步,可以得到井眼轨迹上每个测点对应的切片圆以及切片圆上的 n 个等分点。依据这些等分点,便可以利用三角面片构建出相邻切片圆的侧面。

假设切片圆 p_0 对应的 n 个等分点为 $P_{00}, P_{01}, \dots, P_{0n}$, 切片圆 p_1 对应的 n 个等分点为 $P_{10}, P_{11}, \dots, P_{1n}$, 则切片圆 p_0 与切片圆 p_1 构建侧面的具体过程为:

从点 P_{00} 开始,依次加入 P_{10} 和 P_{01} ,顺次连接 P_{00}, P_{10} 和 P_{01} 形成第一个三角形。然后加入 P_{11} ,同样顺次连接 P_{10}, P_{01} 和 P_{11} 形成第二个三角形,以此类推,每新加入一个点,就与前两个点连接为一个三角形,直至加入最后一个点,完成第 $2n$ 个三角形的连接,从而完成了相邻两个切片圆的侧面构建。用同样的方法,将所有相邻的两个切片圆侧面都连接起来,首尾相接就完成了整个井筒的建模。图 3 为相邻两个切片圆连接的侧面展开示意图。

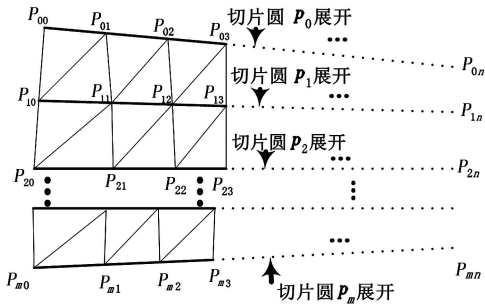


图 3 井眼轨迹侧面展开示意图

Fig. 3 Sketch map of lateral surface of wellbore trajectory

1.2 平滑处理

使用上述切片法构建的井筒模型会存在一定的问 题,比如,井轨迹存在曲率时,所生成的井筒有明显的折痕,如图 4(a)是在弯折处的建模效果;井眼轨迹曲率越大,折痕越明显,图 4(b)就是一种较极端情况。这种情况在实际生产中一般不会发生,如果建模后出现这种情况,多是因测量数据有误,或计算井轨迹的方法有缺陷而导致的,要进行具体分析和处理。对于可能出现的折痕,采用合适的算法进行平滑处理,以使所构建的井筒模型更符合实际要求。

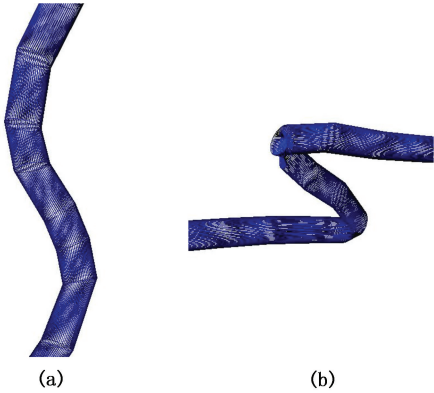


图 4 井筒弯折处

Fig. 4 Bending place of wellbore

研究和分析^[8-9]可以发现,产生上述问题的主要原因是离散测点太少,尤其是在有弯度的地方。因此对井筒模型的平滑处理可以转化为对井轨迹测点的插值处理,井轨迹插值数据越密,生成的井筒模型就越平滑,越接近真实井的效果,尤其是针对弯折处。但若对整个井段都做同样的插值处理,就会使计算量大大增加,建模效率会很低。所以,采用了分段局部插值的策略,即对每个井段采用三次贝塞尔曲线的方法进行插值^[10]。通过判断每个井段弯曲角度的不同,设置三次贝塞尔曲线的插值步长(对于弯曲度较小的井段,设置较大的步长,弯曲度较大的井段,设置较小的步长),从而确定每个井段插值

的个数,进而达到对弯度较大的特殊井段进行重点插值的目的。

三次贝塞尔曲线由4个控制点确定,若要在测点 P_i 和 P_{i+1} 之间建立一条过 P_i 和 P_{i+1} 的三次贝塞尔曲线,可以将 P_i 作为起点, P_{i+1} 作为终点,因此在起点和终点之间只需再确定两个控制点 A_i 、 B_{i+1} 。

假设井眼轨迹上的3个测点分别为 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 、 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 。 P_0 和 P_1 之间可确定控制点为 A_0 、 B_1 ,可定义贝塞尔曲线为 p_{01} ; P_1 和 P_2 之间可确定控制点为 A_1 、 B_2 ,可定义贝塞尔曲线为 p_{12} ;

由贝塞尔曲线生成的原理可知,为了使每段贝塞尔曲线光滑地拼接,必须要求曲线函数式的一阶导数连续,对于图5来说,就是点 P_0 、 P_1 确定的曲线 p_{01} 和点 P_1 、 P_2 确定的曲线 p_{12} 在 P_1 点处的一阶导数连续,即切线斜率相同。又由于控制点一定在过 P_1 的切线上,因此只需要将位于 P_1 点前面的控制点 B_1 和位于 P_1 点后面的控制点 A_1 都取在过 P_1 点的切线上即可。

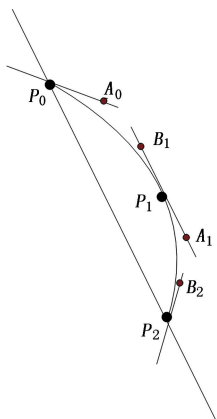


图5 求取控制点示意图

Fig. 5 Sketch map of getting control point

令线段 P_0P_2 的斜率与过 P_1 点的切线斜率相同,即线段 P_0P_2 与过 P_1 点的切线平行,则控制点 A_1 就可以由 P_0 、 P_2 两个点确定,可表示为 $A_1(x_1+a(x_2-x_0), y_1+a(y_2-y_0), z_1+a(z_2-z_0))$ 。

同样,控制点 B_1 就可以由 P_1 、 P_3 两个点来确定,可表示为

$$B_2(x_2-b(x_3-x_1), y_2-b(y_3-y_1), z_2-b(z_3-z_1)).$$

其中, $a, b \in (0, 1)$,可以任意指定,但是 a, b 的取值决定着曲线最终的效果。若 a, b 的值越接近于1,则曲线就会越偏离实际井眼轨迹;若取值越接近于0,则曲线优化效果就越不明显。经调试发现,当 a, b 的值取0.2~0.4时,平滑处理的效果比较好。

图6是平滑处理后的井筒模型。左图为某一段

弯折处的井筒使用贝塞尔曲线优化后的效果图,右图为放大后的效果图,可以看出,弯折处已经没有明显的折痕。

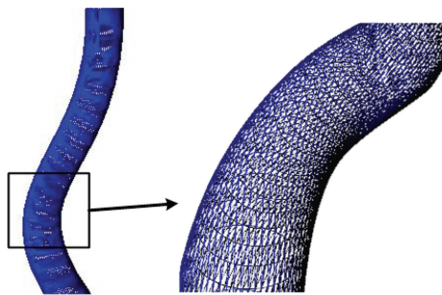


图6 井筒优化图

Fig. 6 Wellbore optimization

2 井壁信息展示与漫游

随钻过程中一般要通过探管获取一些钻遇地层的属性数据,例如各种测井数据等,它们可以反映出钻遇地层情况。若将这些信息直观形象地显示到三维井筒上,可以实现井筒模型和地质属性的融合可视,实现真正的数字化井筒。

以随钻测井^[11]数据为研究对象,采用成像的方法实现地质属性的可视化,并把成像结果在井筒模型上进行展示,通过在井筒内漫游,就可以很直观地观察钻遇地层情况。

2.1 测井数据成像

本文中方位伽马测井数据^[12-13]作为数据源,将这些伽马数据按照一定的映射规则转换为一组像素颜色值,生成伽马测井成像图,不同的地层被赋予专业人员认同的各种伪色彩,表示地层岩性和油藏位置等信息。基本方法是:首先对原始伽马数据做插值处理,将插值后的伽马数据转换成色标数据,然后通过一定的映射规则映射到特定的色谱上,即把伽马数据转换成不同的颜色,最后将这些颜色值以图像的形式显示到画板(如屏幕)上。成像实现流程见图7。



图7 成像流程

Fig. 7 Flow chart of imaging

(1)数据预处理。随钻方位伽马测井获取的数据是环绕井周不连续的8条测井曲线数据,即井周的每个深度上都有8个方位的伽马值。若通过成像的方式显示伽马属性值的变化,进而分析地层岩性,则需要对这8条曲线进行插值处理,得到井周360°方位上完整的伽马数据,然后对插值结果进行成像化处理,得到完整的井周成像图。本文中在分析和实验比较多种插值算法^[14]后,最终选取三次样条插值^[8-9]方法对8条伽马测井曲线做插值处理。使用该方法插值后生成的图像平滑过渡自然。

(2)定义色谱。颜色值通常用(R,G,B)三原色表示,叫做色标。若要生成成像图,就要将伽马值映射为相应的色标。在映射之前首先需要定义一条用来映射的色谱,即一组颜色由浅到深的色标。色谱的选择与成像图的最终显示效果有非常密切的关系,因此为了生成更专业的测井成像图,需要生成特定的色谱。

(3)建立映射规则。建立映射规则是指确定伽马数据与RGB颜色值的对应关系。常用的方法有静态和动态两种。静态映射是指根据整个井段上的所有伽马数据建立映射规则,这种映射方法的目的是反映整个井段伽马值的变化趋势。具体实现过程如下:

首先,找出整个井段中伽马数据的最大值和最小值,分别表示为 $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$;

其次,建立伽马值和色标值的对应关系。假设色标最大值和最小值分别为 $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$,则色标对应关系为

$$M = (C_{\max} - C_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}), \quad (6)$$

$$C_{\text{offset}} = C_{\min} - V_{\min} M. \quad (7)$$

最后,得到伽马数据对应的色标。

$$C_i = V_i M + C_{\text{offset}}. \quad (8)$$

式中, V_i 为某个伽马值, C_i 为 V_i 伽马值经映射后得到的色标值。

动态映射方法的提出是为了解决有限的颜色刻度与全井段大范围伽马值变化之间的矛盾,该方法可以生成分辨率更强的图像。其基本原理是将整个井段进行分段处理,每段分别应用静态映射法,这种方法可能会失去整个井段伽马的整体变化特征,但是却可以更详细突出地层局部的变化特征。其每个井段的具体映射过程与静态映射过程相似。

(4)图像生成。成像图实际上是一幅二维图像,由一系列的像素点组成,纵坐标表示深度,横坐标表示方位。在经过一系列的预处理和颜色映射

后,在每个记录的深度点上都有一个方位数据和代表伽马值的像素数据。图像生成,即将已有的像素数据以图像的形式显示出来,生成一幅二维图像,即位图。但这样直接生成的图像在进行放大等操作时会失真。为此本文中使用了四相邻点方法生成最终的成像图,即将每个像素点信息(深度、方位、颜色值)记录下来,在生成图像时,用相邻的4个像素点确定并填充一个四边形区域的颜色,从而完成图像的生成。图8所示为某井井段深度范围为2780~2800 m的成像图。

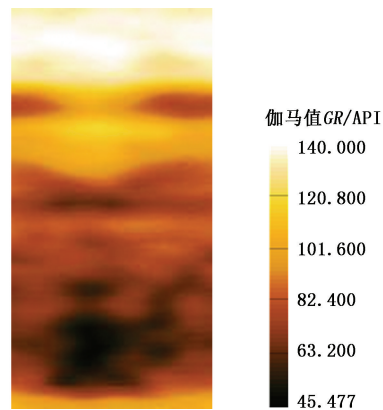


图8 成像图

Fig. 8 Mapping results

2.2 井壁属性渲染

生成测井成像图的最终目的是要附着到三维井筒上,即将测井信息在井壁上展示出来。本文中采用纹理映射技术,以测井成像图作为纹理,以使用切片法生成的井筒模型作为空间中的三维物体,把测井成像图映射到三维井筒模型上。主要尝试了两种方式完成纹理映射。

(1)直接给定纹理坐标。其基本原理为:为井筒模型上的所有三角网格顶点指定纹理坐标。由于井筒模型与圆柱面类似,因此可以使用常用的圆柱面映射方式,得到映射函数。假设,已知三角网格顶点坐标为 (x, y, z) ,则纹理空间中对应的坐标 (u, v) 计算公式为

$$(u, v) = \begin{cases} (y, z), & x = 0, \\ (x, z), & y = 0, \\ \left(\frac{a(\tan(\frac{y}{x}))^2}{2\pi}, z \right), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

(2)使用纹理坐标函数。OIV 提供了一个纹理坐标函数节点,在该函数中可以指定两个方向向量:directionS 和 directionT。通过这两个方向向量可以自动计算每个顶点对应的纹理坐标值,完成纹理映射。其实现的基本原理为:首先,遍历所有三角网格

的顶点坐标,得到 X 、 Y 坐标上的最大、最小值,分别记为 $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$,然后,取两个方向向量的值为: $\text{direction}S = X_{\max} - X_{\min}$, $\text{direction}T = Y_{\max} - Y_{\min}$ 。经过函数计算后,当前顶点 (x, y, z) 的纹理坐标为: $u = (x - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, $v = (y - Y_{\min}) / (Y_{\max} - Y_{\min})$ 。

如图 9 为某一口井在 3 个不同井段上纹理贴图之后的效果图。

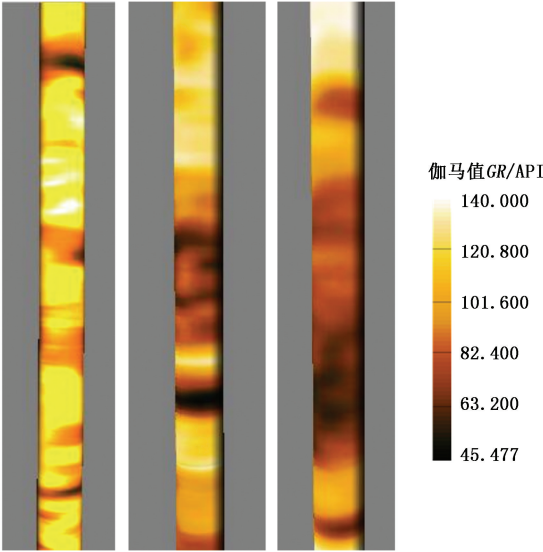


图 9 井筒贴图效果

Fig.9 Wellbore results after texture mapping

2.3 信息漫游

可视化的最终目的是观察数据中隐藏的信息和规律,并对其进行解释和分析。井筒可视化的目的

同样是为了可以真实地观察井轨迹以及井壁的地层属性信息,并通过解释和分析,实时调整钻头走向。为了可以更方便和直观地观察井壁地层属性信息,采用虚拟漫游技术在井筒内部观察井壁信息,实现井壁信息漫游^[15]。

主要的方法是:通过不断改变视点位置对视图进行变换,实现信息的漫游,并且视点位置的改变通过设置键盘命令实现。实现原理为:以井眼轨迹测点位置作为相机视点位置,以井轨迹的路径作为相机视点的移动路径,实现井筒内部的漫游。用户可以根据漫游命令移动视点位置,从而漫游井筒,观察井壁信息,主要命令包括向井底方向移动、向井口方向移动和复原到井口位置等。

3 实现和应用

基于 Open Inventor 开发包,对井筒建模和井壁信息展示进行了原型实现,并选取了多口井进行了随钻井筒可视化试验。图 10(a)为某一口井的井筒绘制效果,该井实际测深为 4 046.8 m,垂深为 2 705.15 m,井眼轨迹测量参数共有 250 组实测数据,图 10(b)为井筒某段放大后的效果。

如图 11(a)为井筒的相应井段附加上测井属性信息之后的井筒效果,图 11(b)为该井段逐渐放大后的效果。图 12 为从井内不断向井底移动时观察井壁伽马测井信息的效果,图 12(a)、图 12(b)为在井内从井口向井底的漫游效果,其中井筒内部有一条井轨迹。

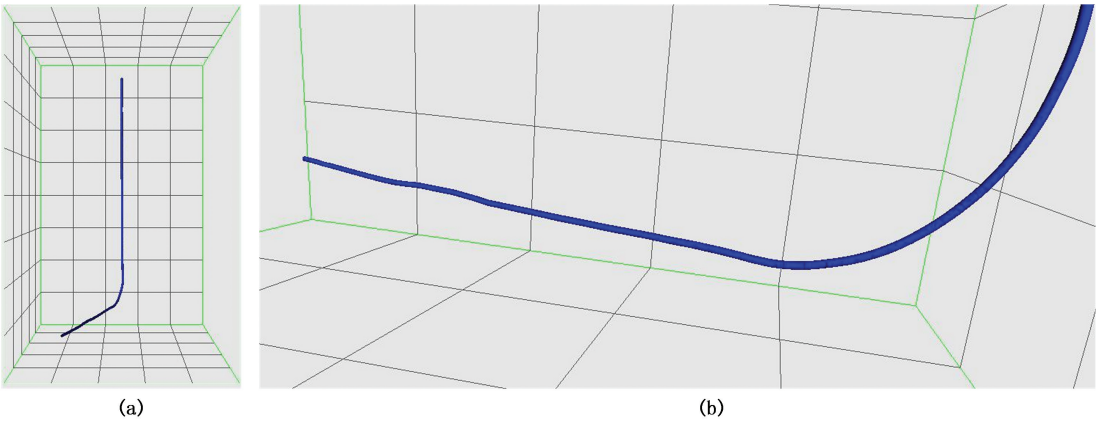


图 10 井筒整体效果

Fig.10 Program running chart of wellbore result

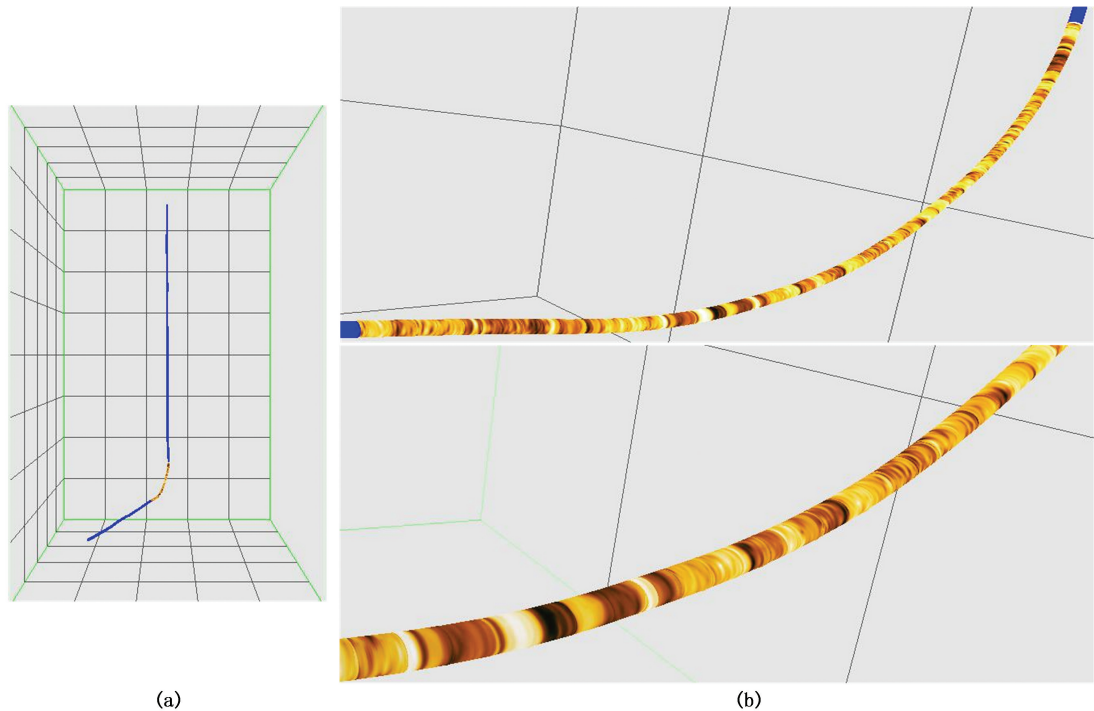


图 11 井壁属性渲染效果

Fig. 11 Program running chart of attribute rendering

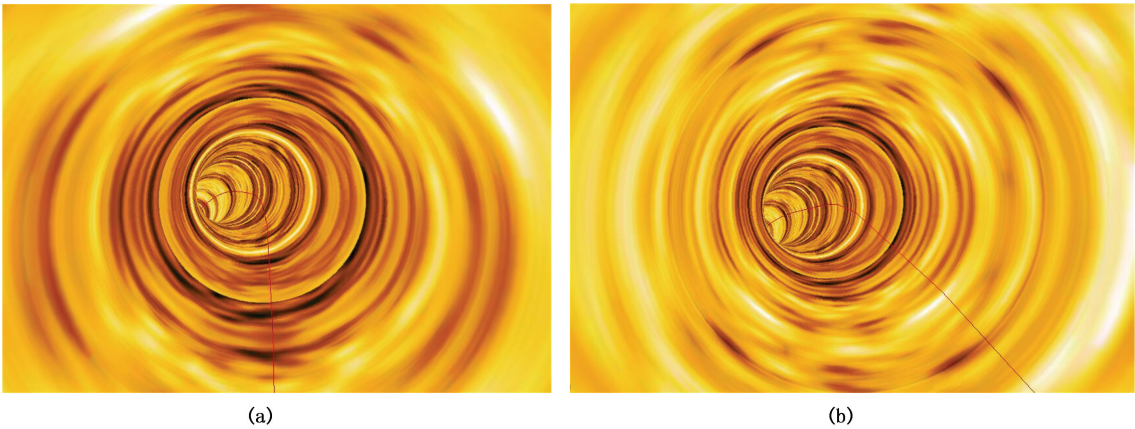


图 12 井内观察

Fig. 12 Observation result of well inside

4 结束语

针对目前线状井轨迹以及二维井信息显示的缺陷,提出了一个全新的井轨迹和地层属性信息的三维可视化解决方案。采用不同的方法对井筒和钻遇地层属性分别进行建模,然后将二者进行有机融合,实现随钻井筒的三维可视化。利用 OIV 开发工具包进行原型开发实现,使用户可以身临其境地在井筒中漫游,观察钻遇的井壁地层属性。采用的算法效率高,操作响应快,设计了操作界面,交互性好,为随钻地质导向技术的深入研究和应用奠定了坚实的基础。

参考文献:

[1] SHAO C, ZHANG F, CHEN G, et al. Study of real-time LWD data visual interpretation and geo-steering technology[J]. Petroleum Science, 2013,10(4):477-485.

[2] 荣海波,贺昌华. 国内外地质导向钻井技术现状及发展[J]. 钻采工艺,2006,29(2):7-9.

RONG Haibo, HE Changhua. State of the art and development of geosteering drilling at home and abroad[J]. Drilling & Production Technology, 2006,29(2):7-9.

[3] LIU J P, YAN F, ZHAO H L. Application of visualization in scientific computing technology [C]//Advanced Materials Research. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech

- Publications, 2011.
- [4] 孙建孟, 闫国亮, 姜黎明, 等. 基于数字岩心研究流体性质对裂缝性低渗透储层弹性参数的影响规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 39-44.
- SUN Jianmeng, YAN Guoliang, JIANG Liming, et al. Research of influence laws of fluid properties on elastic parameters of fractured low permeability reservoir rocks based on digital core[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(3): 39-44.
- [5] 魏凯, 管志川, 马金山, 等. 钻井地质参数的不确定性表征及分析方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 89-93.
- WEI Kai, GUAN Zhichuan, MA Jinshan, et al. Assessment method for uncertainty of geological parameters in well drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 89-93.
- [6] 詹炜, 戴光明. 数据可视化程序开发包 OpenInventor 及其应用[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(11): 2705-2707.
- ZHAN Wei, DAI Guangming. Data visualization programming toolkit open inventor and its application[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(11): 2705-2707.
- [7] 陈刚, 杨雪, 潘保芝, 等. 井眼轨迹计算及可视化研究现状[J]. 世界地质, 2015, 34(3): 830-841.
- CHEN Gang, YANG Xue, PAN Baozhi, et al. Status of calculation and visualization research on well trajectory[J]. Global Geology, 2015, 34(3): 830-841.
- [8] 黄志强, 田海, 郑双进, 等. 定向井实钻井眼轨迹三维可视化描述[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(4): 79-82.
- HUANG Zhiqiang, TIAN Hai, ZHENG Shuangjin, et al. 3D visualization of hole trajectory in directional well drilling[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(4): 79-82.
- [9] XU Y, ZHANG M. Research of 3D visualization for well-bore trajectory[C]. Web Information Systems and Mining (WISM), 2010 International Conference on. IEEE, Washington: IEEE Computer Society, 2010.
- [10] 符祥, 郭宝龙. 图像插值技术综述[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1): 141-144.
- FU Xiang, GUO Baolong. Overview of image interpolation technology[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(1): 141-144.
- [11] 张辛耘, 王敬农, 郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 10-15, 100.
- ZHANG Xinyun, WANG Jingnong, GUO Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10-15, 100.
- [12] 杨锦舟. 基于随钻自然伽马、电阻率的地质导向系统及应用[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 285-288.
- YANG Jinzhou. Application of geosteering system based on GR and resistivity LWD[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(4): 285-288.
- [13] 杜志强, 郝以岭, 张国龙, 等. 方位伽马随钻测井在冀东油田水平井地质导向中的应用[J]. 录井工程, 2008, 19(1): 18-21.
- DU Zhiqiang, HAO Yiling, ZHANG Guolong, et al. The application of the azimuth gamma logging while drilling for the geosteering in the horizontal wells in Jidong Oilfield[J]. Mud Logging Engineering, 2008, 19(1): 18-21.
- [14] 丁宇胜. 数字图像处理中的插值算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(16): 4502-4503.
- DING Yusheng. Interpolated algorithm research in digital image processing[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(16): 4502-4503.
- [15] 孔洁琼. 基于几何模型的数据场漫游可视化方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- KONG Jieqiong. Research on technology of geometric-model-based data field walk-through visualization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.

(编辑 修荣荣)