

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005414

一种基于图像融合的测井电成像动态图像生成方法

戴乾军 余昌 马海林 李增省 柴瑞华 祁鹏

(中国石油集团测井有限公司吐哈分公司 鄯善 838202)

摘要: 针对测井电成像仪器采集的地层电导率数据在动态图像生成过程中,相邻窗口之间的过渡区域出现明显台阶的问题,设计了基于拉普拉斯金字塔的图像融合方法,在台阶处上下灰度图像生成和逆向扩展等预处理步骤的基础上,采用 OpenMP 并行架构,并行地执行整个井段上多个台阶处上下扩展后的图像混合。在不同地质类型的四口井电成像数据上的实验结果为动态图像的台阶现象得到了有效消除,图像过渡更加自然,且运算速度较串行计算提升了约 4 倍。结果表明,相比于基于网格变形的二维图像渐变方法,所提方法更加简单、高效,具有更大的推广应用价值,为电成像数据的后期解释处理提供了保障,使电成像测井仪器更好地服务于油田的勘探开发。

关键词: 电成像测井;图像融合;拉普拉斯金字塔;OpenMP

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Dynamic image generating method of electric imaging logging based on image blending

Dai Qianjun Yu Chang Ma Hailin Li Zengsheng Chai Ruihua Qi Peng

(Tuha Branch of CNPC Logging Co., Ltd., Shanshan 838202, China)

Abstract: Pointing to the problem of obvious step like pattern appearing in transition regions between neighboring windows during the dynamic image generating by conductivity data acquired by electric imaging logging in stratum, image blending method based on Laplace pyramid is designed. Based on the gray-level images generating up and down step and reverse extending, OpenMP architecture is adopted to execute the blending of extended images up and down on multi-steps of whole well section in parallel. Experimental result is that steps in images are removed effectively, dynamic images are generated with more natural transition and computing speed is improved by about 4 times compared with serial computing on electrical imaging logging data of four wells with different geological types. Results show that compared with two-dimensional image fading method based on mesh morphing, the method is simpler with higher efficiency and more greater application value which ensures post interpretation and processing and provides better service ability for exploration and development of oilfields.

Keywords: electric imaging logging; image blending; Laplace pyramid; OpenMP

0 引言

电成像测井,又称为地层微电阻率扫描井壁成像测井,通过测量推靠在井壁的极板上的纽扣电极发射的聚焦回路电流强度,得到井眼周向地层的原始电导率,通过色彩渐变的色标刻度,形成电成像图像,可直观地在图上分析裂缝分布、地层层理、砂泥薄互层以及砾岩颗粒,并已广泛应用于碳酸盐岩、砂砾岩和火成岩的测井评价^[1-3]。

其中,静态图像需要统计整个井段的电导率数据的最大和最小值,分别映射为色标(可以看作一系列渐变颜色值形成的数组,最左端为白色,对应低值电导率,最右端为黑

色,对应高值电导率,中间位置固定黄色或红色,其余位置的色彩值由渐变算法生成)的最左端和最右端色彩,其余电导率值由线性关系找到色标上对应位置,即映射为该位置处的色彩值。静态图像可表征地层电导率的整体分布。而动态图像则设置一个较短的深度滑动窗口(一般为 2 英尺),统计在该深度窗口内电导率数据的最大值和最小值,同样使用色标,将电导率值映射为色彩值,这样就放大了同一窗长内数据的差异,特别是在数据范围分布较窄的情况下。因此,如电导率较低的高导裂缝等在静态图像上呈现不出的地层细节信息,能够在动态图像上显示。

但实际应用中,发现动态图像在生成后由于上下相邻

收稿日期:2020-11-23

• 120 •

的两个窗口内电导率数据值的不同,在两个窗口之间的过渡区域出现了明显的台阶现象,表现为图像在整个宽度范围内纵向上的色彩突变。目前,文献[4]提出一种基于网格变形的二维图像渐变技术来消除台阶,首先用网格来控制图像扭曲,再采用交融技术获得中间图像。但图像渐变过程中,如果上下对应部分的几何无法对齐时,渐变结果的逼真度会降低,同时,该方法涉及到线性插值网格的设置、网格变换等多个步骤,算法复杂程度高,实用性较差。文献[5]采用窗长内逐点统计分布直方图的方法对数据进行处理,但文献中并没有给出方法的具体描述。

本文采用图像融合技术原理,设计了一种基于拉普拉斯金字塔的动态图像生成方法。首先通过色标刻度,将上下窗长内的电导率数据转换为彩色图像,再设定台阶处图像的上下数据处理范围,生成处理范围内的上下两幅灰度图像。接着进行逆向拓展,使用 Fast Marching 图像修复算法^[6],将上部灰度图像向下拓展到下部处理边界,同理对下部灰度图像向上扩展,这样就得到两幅处理范围内同样大小的灰度图像。再采用拉普拉斯金字塔算法,混合两幅图像。最后,将混合后灰度图像像素值,与色标灰度值进行对比,得到色标中的位置索引,再根据台阶处上下窗口的刻度系数,将像素灰度值反变换为电导率数据值。同时,由于整个井段上各个台阶处的数据互无关联和影响,本文采用软硬件兼容性最强的 OpenMP 架构,在多个台阶处,并行执行处理算法。实验表明,本文方法得到的由电导率数据生成的动态图像在窗口的结合区域,过渡效果更加自然,有效消除了动态图像的台阶现象,并且运算效率得到极大提升。本文方法成为电成像测井数据后期解释的基础,为电成像测井仪器的实际应用和推广提供了坚实的保障。

1 灰度图像生成及逆向扩展

如图1所示,左侧的原始动态图像出现了明显的台阶,纵向位置设定为 m 。图1右侧给出了上部深度窗A和下部深度窗B的位置,图1左侧的动态图像就是在A、B窗各自生成的。设定处理范围C,高度如图1右所示,为 $2h$,则边界分别为 $m-h$ 和 $m+h$ 。首先在A、B窗内生成各自的动态图像,得到范围分别为 $m-h \sim m$ 和 $m \sim m+h$ 的两个灰度图像P和Q。对于上部灰度图像P进行逆向扩展,将其高度向下扩展到 $m+h$ 边界,得到扩展后图像ExP;对于下部灰度图像Q进行逆向扩展,将其高度向上扩展到 $m-h$ 边界,得到扩展后图像ExQ。两幅扩展后的图像大小相等,这时还需采用图像修复算法,充填ExP和ExQ图像中拓展后的无值区域,否则拉普拉斯金字塔算法无法正常工作。

本文采用 Fast Marching 图像修复算法,该算法是一种基于偏微分方程的变分方法,主要处理小区域的缺损或以结构特征为主的图像,具有算法简单、速度快等优势,适合本文图像修复精度要求较低的工作场景。

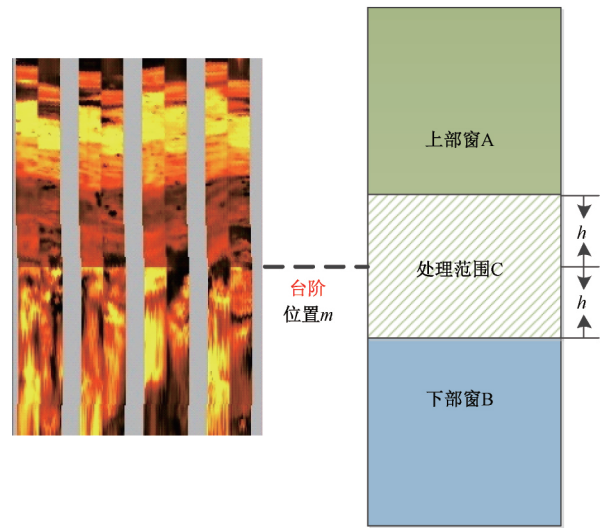


图1 原始动态图像及深度窗混合示例

如图2(a)所示, Ω 为待修复区域,外部为已知图像区域,待修复区域边界为 $\delta\Omega$, p 为边界上的待修复像素点, $B(\epsilon)$ 为点 p 以 ϵ 为半径的已知像素点集合, N 为边界的法向量。Fast Marching 算法,首先通过求解 Eikonal 方程,得到水平集参数 T ,作为所有待修复区域边界上的像素点与初始边界距离的度量。选择 T 最小的边界像素点,如图2(b)所示,由 $B(\epsilon)$ 集合内的所有已知像素点加权统计计算点 p 的值,其中以已知像素点 q 为例,其像素值为 $I(q)$,梯度为 $\nabla I(q)$,则 p 点像素值的一阶估计如式(1)所示。

$$I_p(p) = I(q) + \nabla I(q)(p - q) \quad (1)$$

加权函数为方向因子,几何距离因子和水平集距离因子的乘积。将点 p 加入已知图像区域,更新待修复区域边界和水平集参数 T 。再次选择 T 最小的边界像素点计算。重复这一过程,向待修复区域内部逐步收缩待修复区域边界,直至整个区域都被修复。

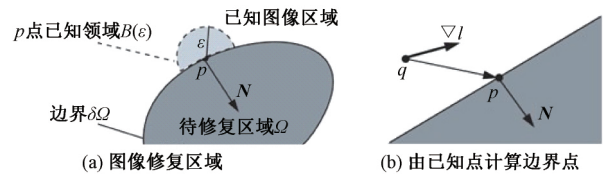


图2 Fast Marching 图像修复算法原理

2 拉普拉斯金字塔图像融合算法

本文采用基于拉普拉斯金字塔的图像融合算法,将上节扩展并充填的两幅图像ExP和ExQ进行混合。拉普拉斯金字塔算法是一种塔形分解和重构的图像融合方法,具有多尺度、多分辨率的优点,已广泛应用于图像融合^[7]、夜视图像增强^[8]、工件表面图像分割^[9]和图像去雾^[10-11]等场

景。本文首先计算两幅图像 E_{xP} 和 E_{xQ} 的高斯金字塔序列,得到各自的拉普拉斯金字塔序列,根据图像混合掩膜模板,将两个拉普拉斯金字塔序列逐层混合,再从混合后的拉普拉斯金字塔顶层逐层向下递推,最终得到原图像尺寸的输出结果图像。具体算法如下:

1) 计算图像混合的高斯金字塔层数,如式(2)所示。

$$N = \log(\min(W_{img}, H_{img}) / \log(2.0)) \quad (2)$$

式中: W_{img} 和 H_{img} 分别为图像原始宽度和高度(像素表示)。

2) 通过高斯卷积并下采样方法,计算多尺度的高斯金字塔序列,如式(3)所示。

$$G_L(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m, n) G_{L-1}(2i+m, 2j+n) \quad (3)$$

式中: G_L 表示高斯金字塔第 L 层图像; $W(m, n)$ 为 5×5 大小的高斯核函数; R_L 为该层图像的行数; C_L 为该层图像的列数。

3) 计算拉普拉斯金字塔序列,即拉普拉斯金字塔第 L 层图像 LP_L 为同一层高斯金字塔图像减去上一层的高斯金字塔图像上采样并高斯卷积的结果 G_{L+1}^*, G_L^* 如下计算:

$$G_L^*(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 W(m, n) G_L((i+m)/2, (j+n)/2) \quad (4)$$

当拉普拉斯金字塔层数从第 0 层到第 $N-1$ 层时, $LP_L = G_L - G_{L+1}^*$; 拉普拉斯金字塔最高层 N 的图像即为高斯金字塔最高层图像。

4) 将两幅图像 E_{xP} 和 E_{xQ} 的拉普拉斯金字塔进行逐层混合。混合后的拉普拉斯金字塔第 L 层图像 HLP_L 的上半部分为 E_{xP} 拉普拉斯金字塔第 L 层图像的上半部分, HLP_L 的下半部分为 E_{xQ} 拉普拉斯金字塔第 L 层图像的下半部分,在台阶位置 m 处,为 E_{xP} 和 E_{xQ} 拉普拉斯金字塔第 L 层图像在该处的平均值。

5) 从第 $N-1$ 层到第 0 层,对混合后的拉普拉斯金字塔序列逐层向下递推,即第 L 层的输出图像为混合拉普拉斯金字塔第 L 层图像 HLP_L 与上一层输出图像上采样并高斯卷积结果之和;在第 $N-1$ 层,上一层输出图像初始化为混合拉普拉斯金字塔第 N 层图像。第 0 层的输出图像即为最终的 E_{xP} 和 E_{xQ} 混合结果。

3 OpenMP 并行计算

在整个井段上,由于深度窗口的滑动,会出现多个深度位置的台阶,而这些台阶处的电成像数据,由本文的处理方法,不存在相互联系,也就是说每个台阶处的数据处理都可以单独进行。因此,本文提出并行处理策略,提升整个井段动态图像生成的运算效率。

目前主流的并行计算架构主要有 OpenMP、MPI 和 GPU 三种。OpenMP^[12] 是一种适用于多核 CPU 和共享内

存系统的多线程并行程序开发库,支持 C、C++、Fortran 等多种语言,并得到目前大多数编译器的支持,已应用在蒙特卡洛模拟^[13]、多普勒成像^[14]、Turbo 码译码^[15] 和图像自动分割^[16] 等研究方面。MPI 是在多主机联网的硬件环境下,基于主机之间消息传递编程模型的分布式并行程序开发库,由于 MPI 要协调多台主机间的通信,其并行效率较低、内存开销大、编程复杂。GPU 则是相对 CPU 运算,在图形处理器 GPU 中加入数量众多的计算单元和超长的流水线,除了 GPU 显卡的硬件配置外。GPU 必须在 CPU 的控制调用下工作,而且必须在 CUDA 框架下进行软件编程。

通过比较发现,由于目前大多数计算机都采用了多核 CPU,很容易满足 OpenMP 的硬件配置需求,同时,软件编程语句简洁直观,编译器实现简单,只需要在编译器添加 OpenMP 支持,在原程序中包含 OpenMP 库的头文件,以及在 for 循环前添加如下语句。

```
omp_set_num_threads(n);
#pragma omp parallel for
```

可对 for 循环中的代码,开启设定的并行线程数 n ,进行多线程并行运算。在这一过程中,CPU 负载均衡和线程粒度等问题,完全由 OpenMP 库自行调度和处理,不需要软件开发人员考虑。因此,本文采用软硬件兼容性最强的 OpenMP 架构。

4 实验结果与分析

本文实验选择不同地质类型的 4 口井,根据各井的电成像数据,分别采用静态图像生成方法、原始动态图像生成方法以及带台阶消除的动态图像生成方法在各井的整个井段生成对应的电成像图像,验证本文动态图像生成方法的有效性。同时,统计各井整个井段的动态图像生成算法运行时间,目的是对比串行和并行运算方式的效率。

实验的软件环境为 Win7 32 位操作系统,硬件为四核 Intel 酷睿 i5-3210M CPU,主频 2.5 GHz,内存 4 G,编译器为 Visual C++ (Visual Studio 2010)。实验中,设置动态图像生成的滑动窗长为 2 ft,本文的台阶处上下数据点扩展范围为 100, Fast Marching 图像修复算法的图像邻域半径为 3。实验的 4 口井如表 1 所示。图 3 所示为 B440 井两个井段的处理成果图。图 3 中,左侧第 1 道为静态成像图,中间一道为未经处理的动态图,最右侧道为本文方法生成的动态图。可以看到,动态成像图比静态图,呈现了更加丰富的地层细节信息,但原始的动态成像方法,出现了明显的上下色彩不连续现象,如图 3(a) 的 3 992 m 和 3 993 m 附近,第 2 道动态图中可以看到明显的色彩突变,图 3(b) 中 3 817.5 m 和 3 818.5 m 附近,也出现了台阶。采用本文方法,生成原始电成像数据的动态图,如图 3(a)、(b) 中最右侧道图像,可以看到在台阶处,图像过渡更加平滑、自然,上下两个窗口呈现出更加和谐的整体性变化。

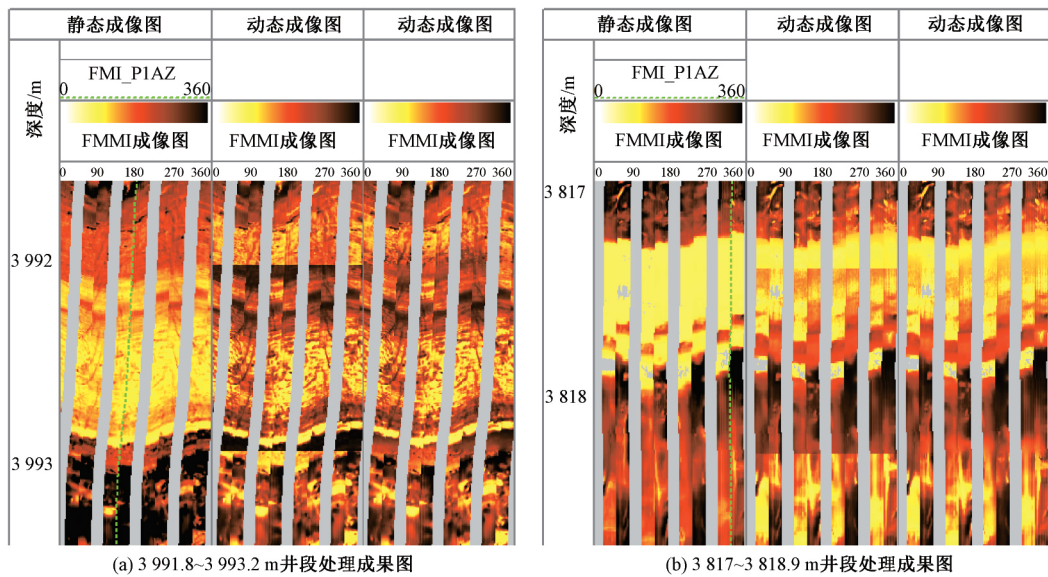


图3 B440井处理结果比较

表1 串行与并行运算时间结果比较

井号	B440	ZX169	Y920	Y936
井段长度/m	200	650	885	820
串行时间/ms	8 690	28 626	38 547	35 896
并行时间/ms	2 041	7 487	9 631	9 179

通过静态图像生成方法、原始动态图像生成方法以及带台阶消除的动态图像生成方法的对比,实验结果表明,本文的动态图像生成方法消除了原始动态图像生成方法的局部突然变化,不但可以得到类似静态图像的整体性呈现,并且局部的地层细节信息得到了凸显。

如表1所示,从4口井的实验结果来看,并行运算时间较串行有了大幅度缩短。经统计,并行的计算效率较串行平均提升了3.98倍,验证了OpenMP并行运算方法的有效性。

从方法的实用性来看,基于网格变形的二维图像渐变方法需要变形网格设置等人工参与步骤,而且这些步骤对最终结果影响很大,不适于初学用户的使用;而本文方法只需设置台阶上下扩展范围、图像修复算法的邻域等少量参数,且拉普拉斯金字塔图像融合算法完全不需要手工设置参数,方法的人工干预很少,初学用户和熟练用户几乎能得到相同的处理结果,具备更强的实用性。同时,本文方法采用了OpenMP并行架构,在运算时效性上,也要优于复杂程度高的二维图像渐变方法。

5 结 论

针对电成像测井数据动态成像过程中,出现的上下窗口交界处图像色彩突变问题,本文基于图像融合原理,在台阶上下灰度图像生成和逆向扩展的基础上,采用拉普拉

斯金字塔,有效消除窗口过渡区的台阶现象,并采用OpenMP架构有效提升方法时效,完善了电成像测井数据后期解释的基础工作。本文方法的有效性和可行性通过了实验结果的验证。下一步工作,针对Fast Marching图像修复算法适合处理小区域缺损的特点,拟采用高精度的大面积图像修复算法,进一步提升动态图像的生成效果。

参考文献

- [1] 李志虎,张翔,罗利,等. 碳酸盐岩复杂背景孔洞自动识别及参数计算[J]. 断块油气田,2016,23(3):314-319,323.
- [2] 袁志龙,陈曦,张洪江. 电成像测井资料在砂砾岩油气藏岩性识别中的应用[J]. 科学技术与工程,2012,12(4):758-761.
- [3] 胡刚,张翔,王智,等. 基于成像测井图像纹理特征的火成岩岩性识别[J]. 国外测井技术,2011,182(2):50-52.
- [4] 赖富强. 电成像测井处理及解释方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [5] 王晓峰,彭天慈,雷刚,等. XRFMI动态增强及全井眼成像方法研究与应用[J]. 测井技术,2015,39(4):432-437.
- [6] HUAN X, MURALI B, ALI A L. Image restoration based on the fast marching method and block based sampling[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(8):847-856.
- [7] 高少忠,沈小林. DT-CWT优化边缘特征和自适应PCNN的图像融合[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):114-120.
- [8] 孙锐,陈效华,陈军. 基于虚拟融合的夜视图像增强

- 与眩光抑制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(4):368-372.
- [9] 王延年, 程燕杰. 基于对比度增强与最大熵的工件表面图像分割算法[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12):37-40.
- [10] 杨德坤. 基于拉普拉斯金字塔的图像去雾算法的研究[D]. 北京:中国地质大学,2019.
- [11] 王奕权. 图像去雾与图像增强算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2015.
- [12] 任小西,唐玲,李仁发. OpenMP 多线程负载均衡调度策略研究与实现[J]. 计算机科学, 2010, 37(11):148-151,183.
- [13] 柳建, 孙胜军, 毛国平, 等. 蒙特卡洛模拟的并行实现及并行效率研究[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(1):295-297,333.
- [14] 张艳华, 魏桂敏. 基于 OpenMP 的 SAR 距离多普勒成像算法的研究与实现[J]. 计算机与现代化, 2011(8):71-73,95.
- [15] 赵梦伟, 陈永锋, 刘凯, 等. 基于 MIC 的 Turbo 码译码并行加速[J]. 电子测量技术, 2019, 42(1):126-131.
- [16] 于宁波, 刘嘉男, 高丽, 等. 基于深度学习的膝关节 MR 图像自动分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):142-151.

作者简介

戴乾军, 本科, 工程师, 主要从事测井资料野外采集工作。
E-mail: h7211550@126.com