



(21) 申请号 202510464750.2

H04N 19/63 (2014.01)

(22) 申请日 2025.04.15

G06N 7/01 (2023.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06N 5/04 (2023.01)

申请公布号 CN 119986830 A

G06F 9/50 (2006.01)

(43) 申请公布日 2025.05.13

(56) 对比文件

(73) 专利权人 中南大学

CN 113177330 A, 2021.07.27

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

CN 117574790 A, 2024.02.20

审查员 刘明进

(72) 发明人 田圣琦 王永斐 郭荣文 柳健新
李健 王旭龙 王登康(74) 专利代理机构 长沙七源专利代理事务所
(普通合伙) 43214

专利代理师 张勇 蔡实艳

(51) Int. Cl.

G01V 3/38 (2006.01)

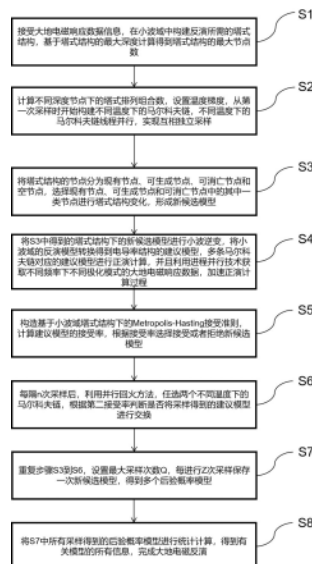
权利要求书4页 说明书12页 附图7页

(54) 发明名称

一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法

(57) 摘要

本发明涉及电磁法勘探技术领域,具体为一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法。本发明方法利用图像压缩实现参数模型的降阶,从而减少了参数的数量,并利用塔式结构自适应改变参数数目,有效避免了反演过程中参数更新受人约束的影响。同时,在迭代过程中,利用进程并行加快正演速度,线程并行加快反演速度,使得反演的采样过程更加简便高效。最终,本发明成功实现了大地电磁高维概率反演,并能够对反演结果进行量化评估,有助于实现高效、大规模的地磁勘探。



1. 一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1:接受大地电磁响应数据信息,在小波域中构建反演所需的塔式结构,基于塔式结构的最大深度计算得到塔式结构的最大节点数;

S2:计算不同深度节点下的塔式排列组合数,设置温度梯度,从第一次采样时开始构建不同温度下的马尔科夫链,不同温度下的马尔科夫链线程并行,实现互相独立采样;

S3:将塔式结构的节点分为现有节点、可生成节点、可消亡节点和空节点,选择现有节点、可生成节点和可消亡节点中的其中一类节点进行塔式结构变化,形成新候选模型;

S4:将S3中得到的塔式结构下的新候选模型进行小波逆变,将小波域的反演模型转换得到电导率结构的建议模型,多条马尔科夫链对应的建议模型进行正演计算,并且利用进程并行技术获取不同频率下不同极化模式的大地电磁响应数据,加速正演计算过程;

S5:构造基于小波域塔式结构下的Metropolis-Hasting接受准则,计算建议模型的第一接受率,根据第一接受率选择接受或者拒绝新候选模型;

S6:每隔n次采样后,利用并行回火方法,任选两个不同温度下的马尔科夫链,根据第二接受率判断是否将采样得到的建议模型进行交换;

S7:重复步骤S3到S6,设置最大采样次数Q,每进行Z次采样保存一次新候选模型,得到多个后验概率模型;

S8:将S7中所有采样得到的后验概率模型进行统计计算,得到有关模型的所有信息,完成大地电磁反演。

2. 根据权利要求1所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S1中,塔式结构为非均匀塔式结构,非均匀塔式结构的最大深度为 $h_{\max}$,最大节点数 $k_{\max} = 4^{h_{\max}-1}$ 。

3. 根据权利要求2所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S2中,非均匀塔式排列组合数 $T_{k,h}$ 的计算公式如下:

$$N_{k,h} = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 & k \leq 0 \\ \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} \sum_{n=1}^{k-i-j+2} N_{n-1,h-1} \times N_{k-i-j-n+3,h-1} & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$T_{k,h} = \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} N_{k-i-j+1,h-1}$$

其中, h 表示为塔式结构深度, k 表示为塔式节点数量, $N_{k,h}$ 表示在 h 深度, k 个节点下的均匀塔式结构排列数。

4. 根据权利要求3所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S3中,新候选模型的形成包括:

选择可生成节点进行塔式结构变化,则表示塔式结构中变化后的节点数量 $k' = k + 1$,新候选模型为 $m' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_k, \theta_{k+1})$,其中, k 表示变化前的节点数量, θ 表示为小波系数值;

选择可消亡节点进行塔式结构变化,则表示新候选塔式结构节点数量 $k' = k - 1$,新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_{k-1})$;

当选择现有节点中的一个进行塔式结构变化时,表示仅仅改变选中的第 n 个节点的值,而节点数量保持不变, $k' = k$,新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta'_n, \dots, \theta_{k-1})$,其中, θ'_n 表示第 n 个节点新的小波系数值。

5. 根据权利要求4所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S4中,所述建议模型为从小波域中转化成物理空间的电导率模型,其包括 $\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{w}\mathbf{m}'$,其中, $\hat{\mathbf{m}}$ 表示逆变换后的电导率模型, $\mathbf{w}$ 表示小波逆变换算子,所述建议模型用于进行正演计算,所述建议模型 $\Phi(\hat{\mathbf{m}})$ 的正演计算包括TE极化模式 $\Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}})$ 和TM极化模式 $\Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$,

$\Phi(\hat{\mathbf{m}}) = \Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}}) + \Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$,其中:

TE极化模式 $\Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}})$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \sigma E_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= i\omega\mu H_y \quad ; \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega\mu H_z \end{aligned}$$

TM极化模式 $\Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= i\omega\mu H_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \sigma E_y \quad ; \\ \frac{\partial H_x}{\partial y} &= -\sigma E_z \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, σ 为介质电导率, μ 为介质的磁导率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率;

计算建议模型的似然比 $L(\hat{m})$,表达式如下:

$$L(\hat{m}) = \exp \left\{ \frac{\Phi(\hat{m})}{2} \right\}^{\frac{1}{T}};$$

其中, T 表示温度因子。

6. 根据权利要求5所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S5中,计算建议模型的第一接受率 α ,若 $0 < \alpha < 1$,则接受新候选模型,即得到第t+1次采样时的现有塔式结构 $m_{t+1} = m'$,否则拒绝新候选模型,即得到第t+1次采样时的现有塔式结构 $m_{t+1} = m$ 。

7. 根据权利要求6所述的大地电磁概率反演方法,其特征在于,在S5中,计算第一接受率 α 的过程如下:

S5.1: 计算给定塔式结构下的当前现有塔式结构的先验分布 $p(m)$ 以及新候选模型的概率分布 $p(m')$;

S5.2: 计算某一采样时刻t时的现有塔式结构模型 m 逆变换得到的电阻率模型 $\hat{m}$ 的似然比 $L(\hat{m})$ 以及某一采样时刻t时的新候选塔式结构模型 m' 经过逆变换得到的电阻率模型 $\hat{m}'$ 的似然比 $L(\hat{m}')$;

S5.3: 计算从现有塔式结构模型 m 到新候选塔式结构模型 m' 的建议分布概率 $q(m'|m)$ 以及从新候选塔式结构模型 m' 到现有塔式结构模型 m 的建议分布 $q(m|m')$;

S5.4: 根据S5.1至S5.3中计算得到的先验分布、似然比和建议分布概率构建接受准则,计算建议模型的第一接受率 α ,第一接受率 α 的表达式如下:

$$\alpha(m', m) = \min \left\{ 1, \frac{p(m')}{p(m)} \frac{L(\hat{m}')}{L(\hat{m})} \frac{q(m|m')}{q(m'|m)} |J| \right\};$$

其中, $|J|$ 表示雅克比矩阵;

S5.5: 根据S5.4计算得到的第一接受率 α 进行判断,若 $0 < \alpha < 1$,则接受建议模型,即 $m_{t+1} = m'$,否则拒绝建议模型,即 $m_{t+1} = m$;

建议模型接受率的计算如下:

选择现有节点的建议模型接受率 $\alpha_{perturb}(\mathbf{m}' | \mathbf{m})$ 的表达式为:

$$\alpha_{perturb}(\mathbf{m}' | \mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \right\};$$

选择可生产节点的建议模型接受率 $\alpha_{birth}(\mathbf{m}' | \mathbf{m})$ 的表达式为:

$$\alpha_{birth}(\mathbf{m}' | \mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k+1} | k+1)}{p(T_k | k)} \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \frac{|S_b|}{|S_d'|} \right\};$$

选择可消亡节点的建议模型接受率 $\alpha_{death}(\mathbf{m}' | \mathbf{m})$ 的表达式为:

$$\alpha_{death}(\mathbf{m}' | \mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k-1} | k-1)}{p(T_k | k)} \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \frac{|S_d|}{|S_b'|} \right\};$$

其中, $|S_b|$ 表示当前模型的可生成节点集合数量, $|S_d|$ 表示为当前模型的可消亡节点集合数量, $|S_b'|$ 表示为候选模型的可生成节点集合数量, $|S_d'|$ 表示为候选模型的可消亡节点集合数量。

8. 根据权利要求7所述的大地电磁概率反演方法, 其特征在于, 在S6中, 将不同温度下的马尔科夫链采样得到的建议模型进行交换, 过程如下:

在多次采样后, 随机选择不同温度下的两条马尔科夫链, 通过接受准则来进行判断是否两条链下的建议模型进行交换, 接受准则的表达式如下:

$$\alpha 1 = \min \left\{ 1, \exp \left\{ (1/T_i - 1/T_j) (\Phi(\hat{\mathbf{m}}_i) - \Phi(\hat{\mathbf{m}}_j)) \right\} \right\};$$

其中, $\alpha 1$ 表示第二接受率, $\hat{\mathbf{m}}_i$ 表示温度 T_i 下的建议模型, $\hat{\mathbf{m}}_j$ 表示温度 T_j 下的建议模型;

若 $0 < \alpha 1 < 1$, 则同意两条链进行交换, 即温度 T_i 下的 $\hat{\mathbf{m}}_i$ 与温度 T_j 下的 $\hat{\mathbf{m}}_j$ 交换, $\hat{\mathbf{m}}_i \longleftrightarrow \hat{\mathbf{m}}_j$, 反之则拒绝交换;

执行完并行回火后, 各个马尔科夫链独立进行线程并行采样。

一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电磁法勘探技术领域,具体涉及一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法。

背景技术

[0002] 电磁法勘探在矿产勘查、地质勘探、深部构造、地下金属勘探中具有重要的作用。由于地下介质都是非均匀的,因此,大地电磁测深的每一个测点都可以获得两条极化电磁响应曲线。一条是电场沿构造走向极化的曲线,称之为TE模式极化电磁响应曲线,另一条是电场沿构造倾向极化的曲线,称之为TM模式极化电磁响应曲线。两条极化电磁响应曲线可以用来描述地下构造的不同电磁特征,因此,利用不同极化模式下得到的电磁响应反演具有重要的实际应用意义。

[0003] 在电磁反演中,由于测量干扰比较严重,反演易受噪声影响,从而使其反演结果不稳定,存在多个模型拟合实测数据,反演具有非唯一性。如果通过强行加入人为信息,来得到稳定的解,这种解只是某种意义上的最佳拟合模型,而无法反映反演本身存在的非唯一性这一特性。因此,如何结合不同极化模式,仅从得到的响应数据来量化评估反演解具有重要意义。

[0004] 综上所述,为了能够从不同极化数据中直接提取模型,并对提取的模型进行反演解的量化评估,亟需一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法。

发明内容

[0005] 本发明目的在于提供一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法,本发明方法利用图像压缩实现参数模型的降阶,从而减少了参数的数量,并利用塔式结构自适应改变参数数目,有效避免了反演过程中参数更新受人为约束的影响。同时,在迭代过程中,利用进程并行加快正演速度,线程并行加快反演速度,使得反演的采样过程更加简便高效,从而能够高效获取跟观测数据有关的后验概率模型分布,实现对大地电磁高维反演的量化评估,具体技术方案如下:

[0006] 一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法,包括以下步骤:

[0007] S1:接受大地电磁响应数据信息,在小波域中构建反演所需的塔式结构,基于塔式结构的最大深度计算得到塔式结构的最大节点数;

[0008] S2:计算不同深度节点下的塔式排列组合数,设置温度梯度,从第一次采样时开始构建不同温度下的马尔科夫链,不同温度下的马尔科夫链线程并行,实现互相独立采样,并设置起始采样的塔式结构从仅有一个节点开始;

[0009] S3:将塔式结构的节点分为现有节点、可生成节点、可消亡节点和空节点,选择现有节点、可生成节点和可消亡节点中的其中一类节点进行塔式结构变化,形成新候选模型;

[0010] S4:将S3中得到的塔式结构下的新候选模型进行小波逆变换,将小波域的反演模型转化得到电导率结构的建议模型,多条马尔科夫链对应的建议模型进行正演计算,并且

利用进程并行技术获取不同频率下不同极化模式的大地电磁响应数据,加速正演计算过程;

[0011] S5:构造基于小波域塔式结构下的Metropolis-Hasting接受准则,计算建议模型的第一接受率,根据第一接受率选择接受或者拒绝新候选模型;

[0012] S6:每隔n次采样后,利用并行回火方法,任选两个不同温度下的马尔科夫链,根据第二接受率判断是否将采样得到的建议模型进行交换;

[0013] S7:重复步骤S3到S6,设置最大采样次数Q,每进行Z次采样保存一次新候选模型,得到多个后验概率模型;

[0014] S8:将S7中所有采样得到的后验概率模型进行统计计算,得到有关模型的所有信息,完成大地电磁反演。

[0015] 可选的,在S1中,塔式结构为非均匀塔式结构,非均匀塔式结构的最大深度为 $h_{\max}$,最大节点数 $k_{\max} = 4^{h_{\max}-1}$ 。

[0016] 可选的,在S2中,非均匀塔式排列组合数 $T_{k,h}$ 的计算公式如下:

$$[0017] \quad N_{k,h} = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 & k \leq 0 \\ \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} \sum_{n=1}^{k-i-j+2} N_{n-1,h-1} \times N_{k-i-j-n+3,h-1} & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$T_{k,h} = \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} N_{k-i-j+1,h-1}$$

[0018] 其中, h 表示为塔式结构深度, k 表示为塔式节点数量, $N_{k,h}$ 表示在 h 深度, k 个节点下的均匀塔式结构排列数。

[0019] 可选的,在S3中,新候选模型的形成包括:

[0020] 选择可生成节点进行塔式结构变化,则表示塔式结构中变化后的节点数量 $k' = k + 1$,新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_k, \theta_{k+1})$,其中, k 表示变化前的节点数量, θ 表示为小波系数值;

[0021] 选择可消亡节点进行塔式结构变化,则表示新候选塔式结构节点数量 $k' = k - 1$,新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_{k-1})$;

[0022] 当选择现有节点中的一个进行塔式结构变化时,表示仅仅改变选中的第 n 个节点的值,而节点数量保持不变, $k' = k$,新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k,h}, \theta_1, \dots, \theta'_n, \dots, \theta_{k-1})$,其中, θ'_n 表示第 n 个节点新的小波系数值。

[0023] 可选的,在S3中,所述建议模型从小波域中转化成物理空间的电导率模型,电导率模型包括 $\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{w}\mathbf{m}'$,其中, $\hat{\mathbf{m}}$ 表示逆变换后的电导率模型, $\mathbf{w}$ 表示小波逆变换算

子；建议模型用于进行正演计算，所述建议模型 $\Phi(\hat{m})$ 的正演计算包括TE极化模式 $\Phi_{TE}(\hat{m})$ 和TM极化模式 $\Phi_{TM}(\hat{m})$ ， $\Phi(\hat{m}) = \Phi_{TE}(\hat{m}) + \Phi_{TM}(\hat{m})$ ，其中：

[0024] TE极化模式 $\Phi_{TE}(\hat{m})$ 的计算过程如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \sigma E_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= i\omega\mu H_y \quad ; \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega\mu H_z \end{aligned}$$

[0026] TM极化模式 $\Phi_{TM}(\hat{m})$ 的计算过程如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= i\omega\mu H_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} &= \sigma E_y \quad ; \\ \frac{\partial H_x}{\partial y} &= -\sigma E_z \end{aligned}$$

[0028] 其中， $\mathbf{E}$ 为电场强度， $\mathbf{H}$ 为磁场强度， σ 为介质电导率， μ 为介质的磁导率， $\omega = 2\pi f$ ， f 为频率；

[0029] 计算建议模型的似然比 $L(\hat{m})$ ，表达式如下：

$$[0030] \quad L(\hat{m}) = \exp\left\{\frac{\Phi(\hat{m})}{2}\right\}^{\frac{1}{T}} ;$$

[0031] 其中， T 表示温度因子。

[0032] 可选的，在S5中，计算建议模型的第一接受率 α ，若 $0 < \alpha < 1$ ，则接受新候选模型，即得到第 $t+1$ 次采样时的现有塔式结构 $m_{t+1} = m'$ ，否则拒绝新候选模型，即得到第 $t+1$ 次采样时的现有塔式结构 $m_{t+1} = m$ ；

[0033] 可选的，在S5中，计算第一接受率 α 的过程如下：

[0034] S5.1: 计算给定塔式结构下的当前现有塔式结构的先验分布 $p(m)$ 以及新候选模型的概率分布 $p(m')$;

[0035] S5.2: 计算某一采样时刻 t 时的现有塔式结构模型 m 逆变换得到的电阻率模型 $\hat{m}$ 的似然比 $L(\hat{m})$ 以及某一采样时刻 t 时的新候选塔式结构模型 m' 经过逆变换得到的电阻率模型 $\hat{m}'$ 的似然比 $L(\hat{m}')$;

[0036] S5.3: 计算从现有塔式结构模型 m 到新候选塔式结构模型 m' 的建议分布概率 $q(m'|m)$ 以及从新候选塔式结构模型 m' 到现有塔式结构模型 m 的建议分布 $q(m|m')$;

[0037] S5.4: 根据S5.1至S5.3中计算得到的先验分布、似然比和建议分布概率构建接受准则, 计算建议模型的第一接受率 α , 第一接受率 α 的表达式如下:

$$[0038] \quad \alpha(m', m) = \min \left\{ 1, \frac{p(m')}{p(m)} \frac{L(\hat{m}')}{L(\hat{m})} \frac{q(m|m')}{q(m'|m)} |J| \right\};$$

[0039] 其中, $|J|$ 表示雅克比矩阵;

[0040] S5.5: 根据S5.4计算得到的第一接受率 α 进行判断, 若 $0 < \alpha < 1$, 则接受建议模型, 即 $m_{t+1} = m'$, 否则拒绝建议模型, 即 $m_{t+1} = m$ 。

[0041] 建议模型接受率的计算如下:

[0042] 选择现有节点的建议模型接受率 $\alpha_{perturb}(m'|m)$ 的表达式为:

$$[0043] \quad \alpha_{perturb}(m'|m) = \min \left\{ 1, \frac{L(\hat{m}')}{L(\hat{m})} \right\};$$

[0044] 选择可生产节点的建议模型接受率 $\alpha_{birth}(m'|m)$ 的表达式为:

$$[0045] \quad \alpha_{birth}(m'|m) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k+1}|k+1)}{p(T_k|k)} \frac{L(\hat{m}')}{L(\hat{m})} \frac{|S_b|}{|S_d'|} \right\};$$

[0046] 选择可消亡节点的建议模型接受率 $\alpha_{death}(m'|m)$ 的表达式为:

$$[0047] \quad \alpha_{death}(m' | m) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k-1} | k-1) L(\hat{m}') |S_d|}{p(T_k | k) L(\hat{m}) |S_b'|} \right\};$$

[0048] 其中, $|S_b|$ 表示当前模型的可生成节点集合数量, $|S_d|$ 表示为当前模型的可消亡节点集合数量, $|S_b'|$ 表示为候选模型的可生成节点集合数量, $|S_d'|$ 表示为候选模型的可消亡节点集合数量。

[0049] 可选的, 在S6中, 将不同温度下的马尔科夫链采样得到的建议模型进行交换, 过程如下:

[0050] 在多次采样后, 随机选择不同温度下的两条马尔科夫链, 通过接受准则来进行判断是否两条链下的建议模型进行交换, 接受准则的表达式如下:

$$[0051] \quad \alpha 1 = \min \left\{ 1, \exp \left\{ (1/T_i - 1/T_j) (\Phi(\hat{m}_i) - \Phi(\hat{m}_j)) \right\} \right\};$$

[0052] 其中, $\alpha 1$ 表示第二接受率, $\hat{m}_i$ 表示温度 T_i 下的建议模型, $\hat{m}_j$ 表示温度 T_j 下的建议模型;

[0053] 若 $0 < \alpha 1 < 1$, 则同意两条链进行交换, 即温度 T_i 下的 $\hat{m}_i$ 与温度 T_j 下的 $\hat{m}_j$ 交换, $\hat{m}_i \longleftrightarrow \hat{m}_j$, 反之则拒绝交换;

[0054] 执行完并行回火后, 各个马尔科夫链独立进行线程并行采样。

[0055] 应用本发明的技术方案, 具有以下有益效果:

[0056] (1) 本发明提供了一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法。本发明方法基于贝叶斯框架的概率反演, 通过概率抽样方法生成实验模型集合, 从模型集合中进行统计推断, 可以体现出反演结果的非唯一性和不确定性, 对反演结果做出量化评价。在传统的贝叶斯框架下, 存在采样时间长, 大地电磁高维反演参数数目多等问题。本发明方法利用MPI并行技术实现了不同极化模式下多频率并行计算, 加速了正演的计算速度, 使得百万级的正演采样耗时大大减小。

[0057] (2) 本发明方法利用图像压缩计算, 大大减小了反演的参数数目, 使得上千反演参数大大压缩为几十个, 使得反演的自由度大大降低。

[0058] (3) 本发明方法利用塔式结构实现了根据数据复杂度来自适应改变模型参数数目, 使得反演更具灵活性。

[0059] (4) 本发明方法通过并行回火方法避免采样陷入局部极值, 而且在多条链并行回火时设置了线程并行技术, 进一步的加快反演速度, 与现有技术相比, 本发明方法可以有效减少模型反演数量, 加快正反演速度, 从而实现利用二维大地电磁不同响应数据进行反演, 并对得到反演结果进行量化评价。

[0060] 除了上面所描述的目的、特征和优点之外, 本发明还有其它的目的、特征和优点。

下面将参照图,对本发明作进一步详细的说明。

附图说明

[0061] 为了更清楚的说明本发明实施例或现有技术的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单的介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0062] 图1是本发明优选实施例中大地电磁概率反演方法的步骤流程图;

[0063] 图2是本发明优选实施例中非均匀塔式结构的示意图;

[0064] 图3是本发明优选实施例中多条马尔可夫链的交换示意图;

[0065] 图4是本发明优选实施例中地下电导率模型的示意图,其中三角形表示测站位置;

[0066] 图5是本发明优选实施例中均值模型的示意图,其中三角形表示测站位置;

[0067] 图6(a)和图6(b)是本发明优选实施例中采样结果在不同测站得到的一维边缘概率密度分布图;

[0068] 图7(a)是本发明优选实施例中不同温度马尔科夫链的拟合差随着迭代次数的变化情况示意图;

[0069] 图7(b)是本发明优选实施例中不同温度马尔科夫链的拟合差的统计分布情况示意图;

[0070] 图8(a)是本发明优选实施例中不同温度马尔科夫链的节点数随迭代次数的变化情况;

[0071] 图8(b)是本发明优选实施例中不同温度马尔科夫链的节点数的概率分布情况;

[0072] 图9是本发明优选实施例中采样过程中某一采样时刻的实际反演参数图;

[0073] 图10是本发明优选实施例中并行结构运行1万次与串行运行1万次的运行时间对比图。

具体实施方式

[0074] 在高维大地电磁概率反演中,由于参数数量庞大,导致在高维空间中难以采样得到模型的后验概率密度分布。为了实现大地电磁高维概率反演,本发明方法基于图像压缩的思想,采用小波图像压缩技术,将反演空间从物理空间模型转化为小波域模型空间,使得反演参数具有不同的尺度特性,减少反演参数的数量。并结合塔式结构,通过基于不同传播特性得到的电磁响应数据,通过自反馈技术来智能决定参数变化,从而实现高维大地电磁反演。此外,为了进一步提高效率,本发明方法还采用了进程并行技术,以减少获取天然场在不同传播特性下得到的大地电磁响应数据信息的时间。在反演过程中,本发明引入了并行回火技术,以避免采样陷入局部极值点,并通过线程并行加速计算过程。

[0075] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步的详细说明。显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0076] 如图1所示,本实施例提供了一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法,包括以

下步骤:

[0077] S1:接受大地电磁响应数据信息,构建反演所需的塔式结构,基于塔式结构的最大深度计算得到塔式结构的最大节点数;具体而言,本实施例中的塔式结构为非均匀塔式结构,非均匀塔式结构的最大深度为 $h_{\max}$,最大节点数 $k_{\max} = 4^{h_{\max}-1}$ 。具体而言,本实施例中的塔式结构如图2所示,本实施例中示例的塔式结构最大深度为3。

[0078] S2:计算不同深度节点下的塔式排列组合数,设置温度梯度,从第一次采样时开始构建不同温度下的马尔科夫链;本实施例中的温度梯度设置为1.5,不同马尔科夫链的温度可表示为 $T = 1.5^i, i = 1, \dots, n$, n 表示马尔可夫链的总数。并且多条马尔科夫链利用线程并行技术进行同时采样。

[0079] 进一步地,本实施例中的非均匀三节点塔式排列组合数 $T_{k,h}$ 的计算公式如下:

$$[0080] \quad N_{k,h} = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ 1 & k \leq 0 \\ \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} \sum_{n=1}^{k-i-j+2} N_{n-1,h-1} \times N_{k-i-j-n+3,h-1} & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$T_{k,h} = \sum_{i=1}^k N_{i-1,h-1} \sum_{j=1}^{k-i+1} N_{j-1,h-1} N_{k-i-j+1,h-1}$$

[0081] 其中, h 表示为塔式结构深度, k 表示为塔式节点数量, $N_{k,h}$ 表示在 h 深度, k 个节点下的均匀塔式结构排列数。

[0082] S3:将塔式结构的节点分为现有节点、可生成节点、可消亡节点和空节点,选择现有节点、可生成节点和可消亡节点中的其中一类节点进行塔式结构变化,形成新候选模型;

[0083] S4:将S3中得到的塔式结构下的新候选模型进行小波逆变换,将小波域的反演模型转换得到电导率结构的建议模型,多条马尔科夫链对应的建议模型进行正演计算,并且利用进程并行技术获取不同频率下不同极化模式的大地电磁响应数据,加速正演计算过程;

[0084] S5:构造基于小波域塔式结构下的Metropolis-Hasting接受准则,计算建议模型的接受率,根据接受率选择接受或者拒绝新候选模型;

[0085] S6:利用并行回火方法,基于不同温度的马尔科夫链对空间进行充分探索;每个 n 次采样,随机选择两条不同温度下的马尔科夫链,根据第二接受率,判断是否对两者采样得到的建议模型进行交换;

[0086] S7:重复步骤S3到S6,设置最大采样次数 Q ,每进行 Z 次采样保存一次新候选模型,得到多个后验概率模型;在本实施例中, $10 \leq Z \leq 20$, Q 不小于1000000, Z 和 Q 取自然数。

[0087] S8:将S7中所有采样得到的后验概率模型进行统计计算,得到有关模型的所有信息,完成大地电磁反演。

[0088] 具体而言,在S3中,新候选模型的形成包括:

[0089] 选择可生成节点进行塔式结构变化,则表示塔式结构中变化后的节点数量

$k' = k + 1$, 新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_k, \theta_{k+1})$, 其中, k 表示变化前的节点数量, θ 表示为小波系数值;

[0090] 选择可消亡节点进行塔式结构变化, 则表示新候选塔式结构节点数量 $k' = k - 1$, 新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta_{k-1})$;

[0091] 当选择现有节点中的一个进行塔式结构变化时, 表示仅仅改变选中的第 n 个节点的值, 而节点数量保持不变, $k' = k$, 新候选模型为 $\mathbf{m}' = (T_{k',h}, \theta_1, \dots, \theta'_n, \dots, \theta_{k-1})$, 其中, θ'_n 表示第 n 个节点新的小波系数值。

[0092] 进一步地, 在S3中, 所述建议模型从小波域中转化成物理空间的电导率模型, 电导率模型表达式为: $\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{w}\mathbf{m}'$, 其中, $\hat{\mathbf{m}}$ 表示逆变换后的电导率模型, $\mathbf{w}$ 表示小波逆变换算子; 建议模型用于进行正演计算, 在本实施例中, 为了能够利用电磁所有的数据形式, 所述建议模型 $\Phi(\hat{\mathbf{m}})$ 的正演计算包括TE极化模式 $\Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}})$ 和TM极化模式 $\Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$, $\Phi(\hat{\mathbf{m}}) = \Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}}) + \Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$, 并且本实施例方法利用了进程并行技术减少获取天然场不同传播特性得到的大地电磁响应数据信息的时间, 即同时获取不同频率下不同极化模式的大地电磁响应数据, 从而减少该步骤的正演计算时间, 其中:

[0093] TE极化模式 $\Phi_{\text{TE}}(\hat{\mathbf{m}})$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \sigma E_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= i\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega\mu H_z \end{aligned} \quad ;$$

[0095] TM极化模式 $\Phi_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{m}})$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega\mu H_x \\
 [0096] \quad & \frac{\partial H_x}{\partial z} = \sigma E_y \quad ; \\
 & \frac{\partial H_x}{\partial y} = -\sigma E_z
 \end{aligned}$$

[0097] 其中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, σ 为介质电导率, μ 为介质的磁导率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率;

[0098] 计算建议模型的似然比 $L(\hat{\mathbf{m}})$, 表达式如下:

$$[0099] \quad L(\hat{\mathbf{m}}) = \exp\left\{\frac{\Phi(\hat{\mathbf{m}})}{2}\right\}^{\frac{1}{T}};$$

[0100] 其中, T 表示温度因子。

[0101] 需要说明的是, 在S4中, 本实施例中采用MPI并行技术实现不同进程同步计算, 具体而言, 本实施例利用MPI并行技术将不同模型下的不同频率分配到不同进程中进行同步计算, 加速正演计算时间。本实施例可以根据需要计算的频点数目, 来分配电脑的进程数, 比如需要计算TE极化模式和TM极化模式下4个频率的正演电磁响应。本实施例可以给出9个进程(进程号为0-8), 然后0号进程视为主进程, 用来汇总信息, 其余进程号按奇偶数编号来分别计算TE极化模式和TM极化模式。

[0102] 可选的, 在S5中, 计算建议模型的第一接受率 α , 若 $0 < \alpha < 1$, 则接受新候选模型, 即得到第t+1次采样时的现有塔式结构下的小波域参数模型 $\mathbf{m}_{t+1} = \mathbf{m}'$, 否则拒绝新候选模型, 即得到第t+1次采样时的现有塔式结构下的小波域参数模型 $\mathbf{m}_{t+1} = \mathbf{m}$ 。

[0103] 可选的, 在S5中, 计算第一接受率 α 的过程如下:

[0104] S5.1: 计算给定塔式结构下的当前现有塔式结构的先验分布 $p(\mathbf{m})$ 以及新候选模型的概率分布 $p(\mathbf{m}')$;

[0105] S5.2: 计算某一采样时刻t时的现有塔式结构模型 $\mathbf{m}$ 逆变换得到的电阻率模型 $\hat{\mathbf{m}}$ 的似然比 $L(\hat{\mathbf{m}})$ 以及某一采样时刻t时的新候选塔式结构模型 $\mathbf{m}'$ 经过逆变换得到的电阻率模型 $\hat{\mathbf{m}}'$ 的似然比 $L(\hat{\mathbf{m}}')$;

[0106] S5.3: 计算从现有塔式结构模型 $\mathbf{m}$ 到新候选塔式结构模型 $\mathbf{m}'$ 的建议分布概率

$q(\mathbf{m}'|\mathbf{m})$ 以及从新候选塔式结构模型 $\mathbf{m}'$ 到现有塔式结构模型 $\mathbf{m}$ 的建议分布 $q(\mathbf{m}|\mathbf{m}')$;

[0107] S5.4:根据S5.1至S5.3中计算得到的先验分布、似然比和建议分布概率构建接受准则,计算建议模型的第一接受率 α ,第一接受率 α 的表达式如下:

$$[0108] \quad \alpha(\mathbf{m}', \mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{p(\mathbf{m}')}{p(\mathbf{m})} \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \frac{q(\mathbf{m}|\mathbf{m}')}{q(\mathbf{m}'|\mathbf{m})} |J| \right\};$$

[0109] 其中, $|J|$ 表示雅克比矩阵,本实施例中优选的 $|J| = 1$;

[0110] S5.5:根据S5.4计算得到的第一接受率 α 进行判断,若 $0 < \alpha < 1$,则接受建议模型,即 $\mathbf{m}_{t+1} = \mathbf{m}'$,否则拒绝建议模型,即 $\mathbf{m}_{t+1} = \mathbf{m}$ 。

[0111] 建议模型接受率的计算如下:

[0112] 选择现有节点的建议模型接受率 $\alpha_{perturb}(\mathbf{m}'|\mathbf{m})$ 的表达式为:

$$[0113] \quad \alpha_{perturb}(\mathbf{m}'|\mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \right\};$$

[0114] 选择可生产节点的建议模型接受率 $\alpha_{birth}(\mathbf{m}'|\mathbf{m})$ 的表达式为:

$$[0115] \quad \alpha_{birth}(\mathbf{m}'|\mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k+1}|k+1)}{p(T_k|k)} \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \frac{|S_b|}{|S_d'|} \right\};$$

[0116] 选择可消亡节点的建议模型接受率 $\alpha_{death}(\mathbf{m}'|\mathbf{m})$ 的表达式为:

$$[0117] \quad \alpha_{death}(\mathbf{m}'|\mathbf{m}) = \min \left\{ 1, \frac{p(T_{k-1}|k-1)}{p(T_k|k)} \frac{L(\hat{\mathbf{m}}')}{L(\hat{\mathbf{m}})} \frac{|S_d|}{|S_b'|} \right\};$$

[0118] 其中, $|S_b|$ 表示当前模型的可生成节点集合数量, $|S_d|$ 表示为当前模型的可消亡节点集合数量, $|S_b'|$ 表示为候选模型的可生成节点集合数量, $|S_d'|$ 表示为候选模型的可消亡节点集合数量。

[0119] 需要说明的是,由于大地电磁反演问题是非线性问题,其解空间存在多个局部极

值点,因此,使用并行回火方法,利用不同温度链可以实现对空间进行充分探索。

[0120] 进一步地,在S6中,为了避免陷入局部极值,本实施例方法将不同温度下的马尔科夫链采样得到的建议模型进行交换,过程如下:

[0121] 本实施例采用OpenMP并行技术,基于不同的线程来控制不同温度的马尔科夫链,同时进行采样,如图3所示,不同的温度 T_i 代表不同线程,在n次采样后,随机选择不同温度下的两条马尔科夫链,通过接受准则来进行判断是否两条链下的建议模型进行交换,接受准则的表达式如下:

$$[0122] \quad \alpha 1 = \min \left\{ 1, \exp \left\{ (1/T_i - 1/T_j) (\Phi(\hat{m}_i) - \Phi(\hat{m}_j)) \right\} \right\};$$

[0123] 其中, $\alpha 1$ 表示第二接受率, $\hat{m}_i$ 表示温度 T_i 下的建议模型, $\hat{m}_j$ 表示温度 T_j 下的建议模型;

[0124] 若 $0 < \alpha 1 < 1$, 则同意两条链进行交换,即温度 T_i 下的 $\hat{m}_i$ 与温度 T_j 下的 $\hat{m}_j$ 交换, $\hat{m}_i \longleftrightarrow \hat{m}_j$, 反之则拒绝交换;

[0125] 执行完并行回火后,各个马尔科夫链独立进行线程并行采样。

[0126] 为了对本实施例提出的方法进行反演效果的验证,从而证明能够得到所需要的不确定性信息,进行模型检验。本实施例基于上述方法设计了如图4所示的地下电导率模型,其中三角形表示测站位置,基于地下电导率模型构建跨维采样器,通过跨维采样器进行采样得到后验概率模型,详细介绍如下:地下电导率模型的探测范围为 **20km*20km**,背景电导率为 **0.01S/m**,异常体的电导率为 **0.1S/m**。使用的频率为8个频率值为:0.1, 0.25, 1.0, 2.0, 5.0, 12.5, 20.0, 100 Hz。

[0127] 本实施例的跨维采样器利用Fortran语言编程实现,利用高性能平台进行计算,利用了9个核。图5为本实施例的跨维采样器采样得到的有关地下介质分布的均值模型,其中三角形表示测站位置,可以看到和实际模型基本一致,其异常体大小和位置都能很好的体现出来。图6(a)和图6(b)分别表示本实施例采样得到的结果在不同测站得到的一维边缘概率密度分布,其边缘概率密度分布的阴影颜色的深浅表示该深度下的某一区域电导率概率大小,颜色越深表示概率越高。从反演得到的结果来看,无论是在异常体范围内,还是在背景区域,其结果与真实分布结果一致。并且通过图7(a)、图7(b)、图8(a)和图8(b)可知,本实施例中跨维采用器的采样具有很好的混合性以及参数数目的约束性,且大大减少了参数数目,其中图7(a)表示为随着反演迭代次数的增加,数据拟合差迅速降低,并多条并行回火链基本下降到同一范围,并在在范围内静态采样,说明其混合性好。图7(b)表示为不同并行回火链下的拟合差的统计分布,随着温度T的增加其分布范围变广,说明其并行回火的性能较好。图8(a)表示为不同并行回火链下的节点数随迭代次数的变化情况,其不同回火链的节点基本在同一范围说明其收敛到同一反演目标,并且仅用几十个节点就能表示1024个反演参数,说明其具有良好的参数压缩性。图8(b)表示为不同并行回火链下的节点数统计分布,不同链的分布基本一致,说明其收敛性好。通过图9可以看出,在反演过程,其中实际的

反演节点分布情况,同时也能明显的发现原本反演所需的反演参数模型为 $32 * 32 = 1024$,在图像压缩下的小波域中仅需要几十个参数(图中灰色表示其数值,颜色越深表示其值越大,白色部分表示无参数)。图10可以明显的看出,本发明设计的并行结构算法具有高效性,计算速度能够提高3.3倍。

[0128] 本发明实施例提供了一种基于图像压缩的大地电磁概率反演方法,通过并行回火方法,加速正演速度,并利用并行回火方法避免采样陷入局部极值。与现有技术相比,本发明方法可以有效减少模型反演数量,加快正反演速度,从而实现利用二维大地电磁不同响应数据进行反演,并对得到反演结果进行量化评价。

[0129] 需说明的是,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。

[0130] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

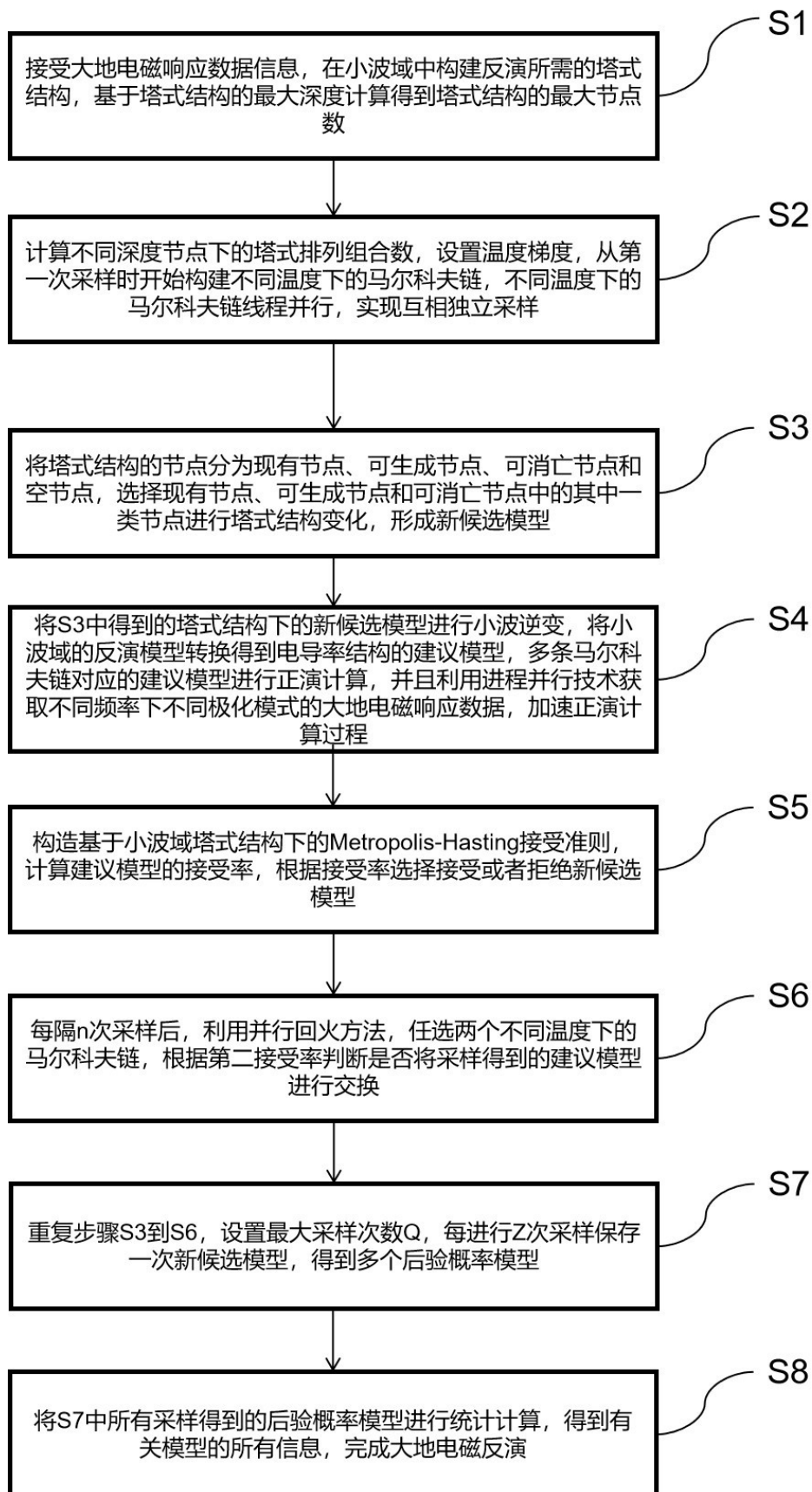


图 1

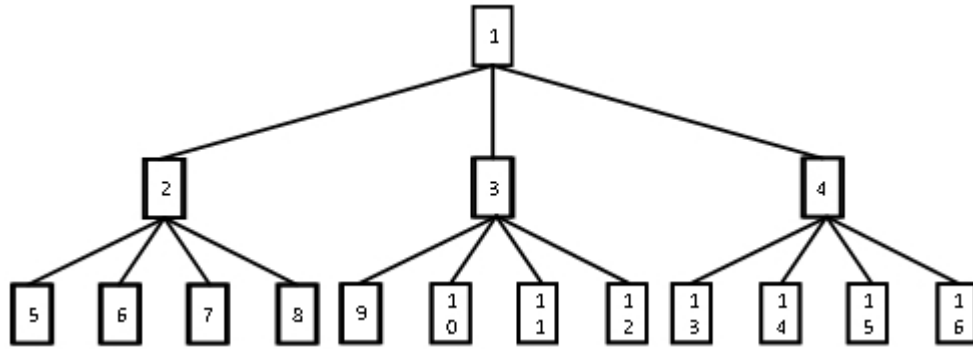


图 2

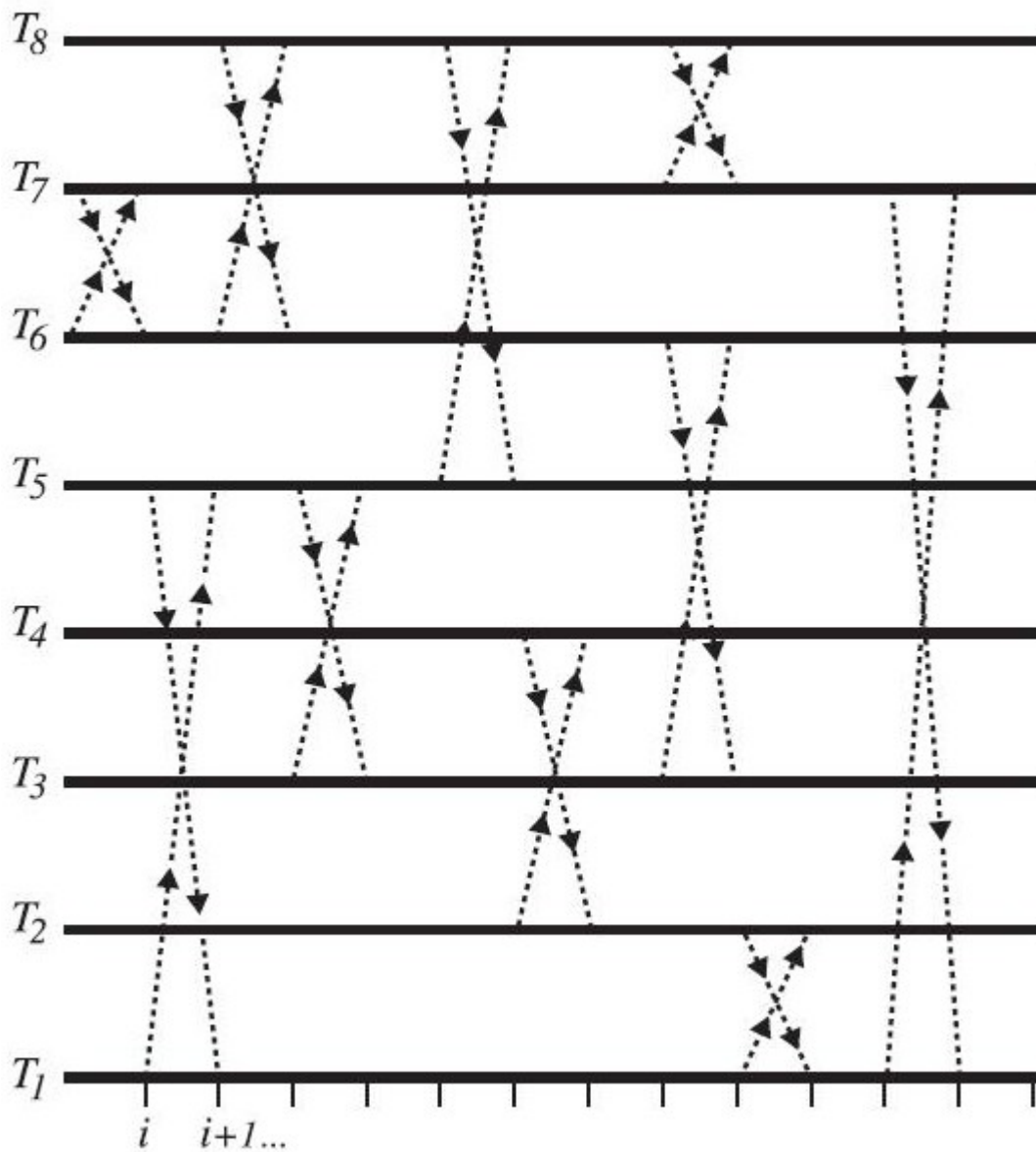


图 3

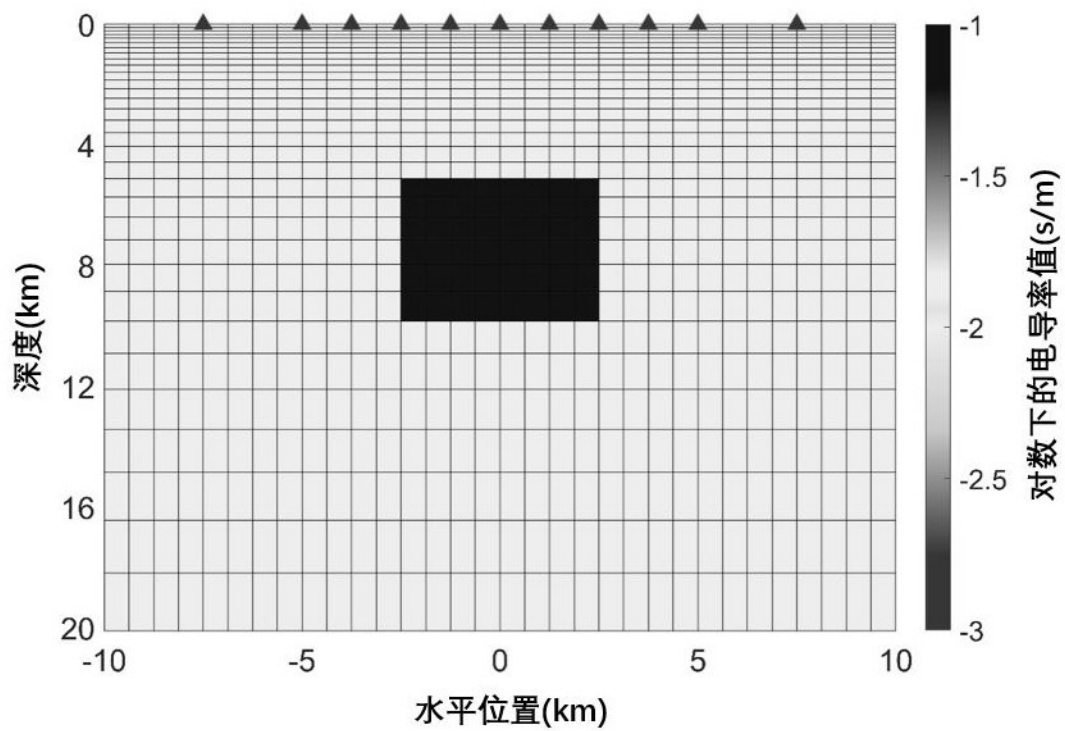


图 4

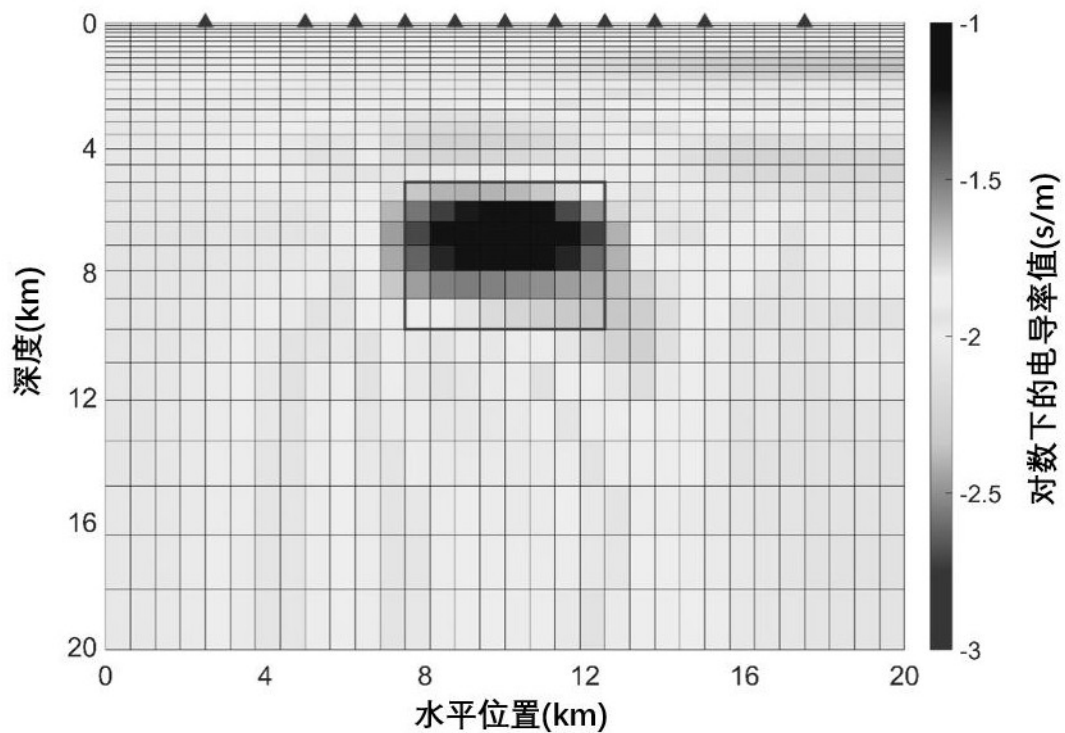


图 5

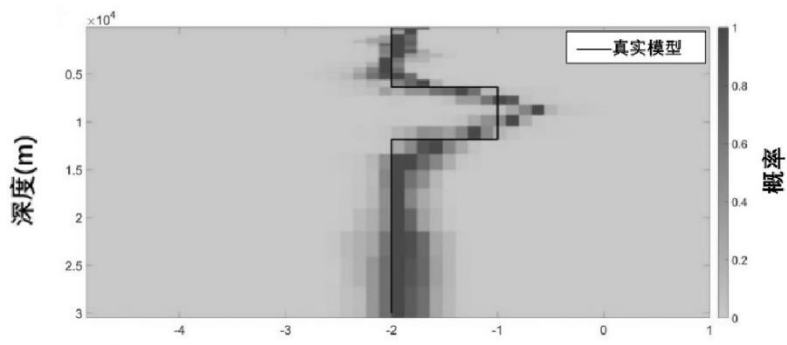


图 6(a)

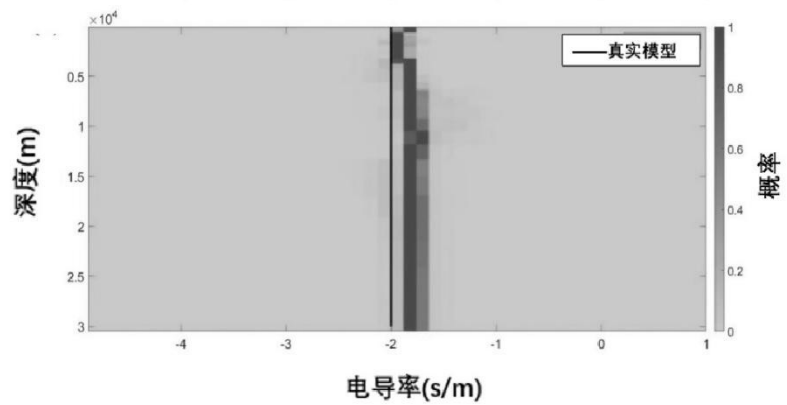


图 6(b)

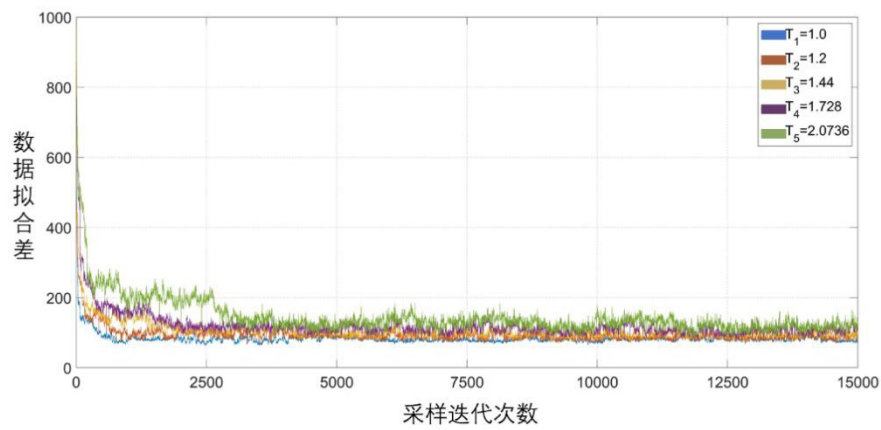


图 7(a)

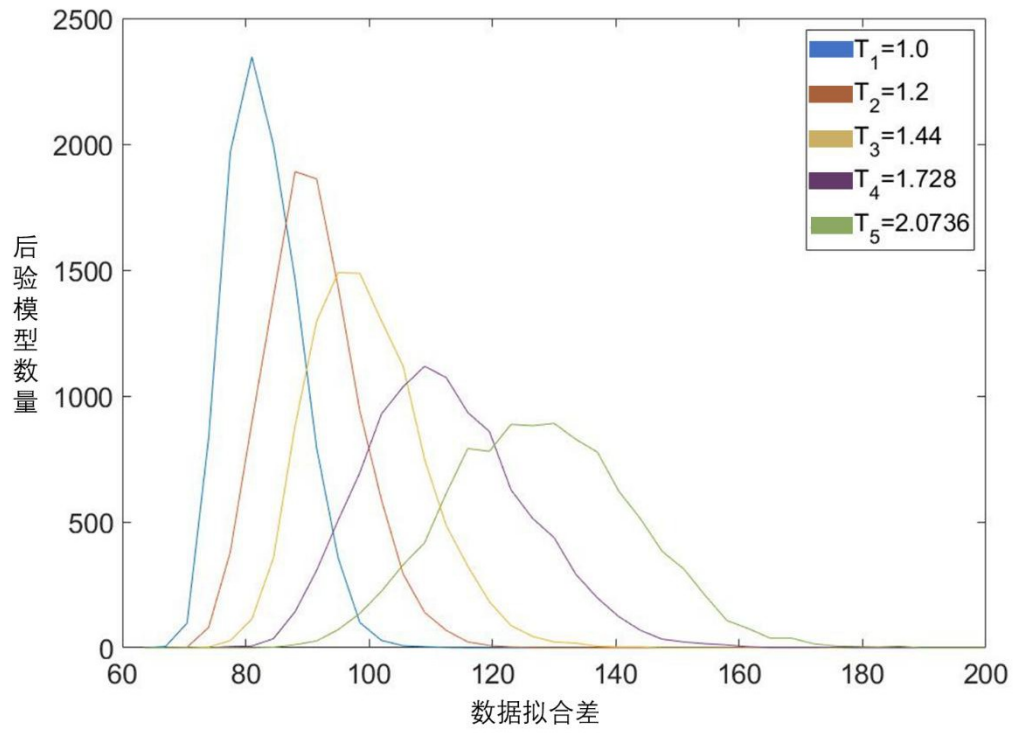


图 7(b)

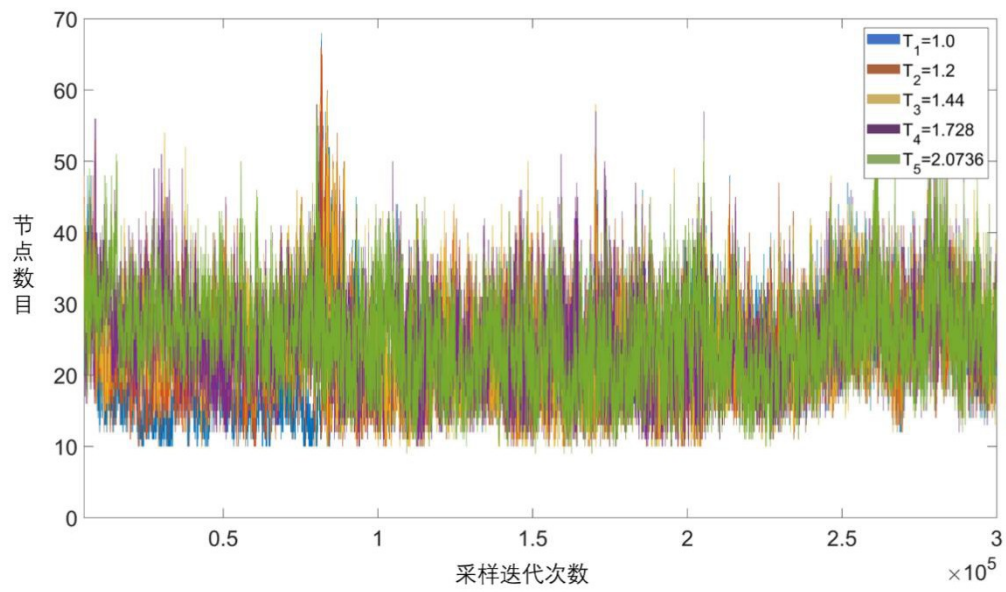


图 8(a)

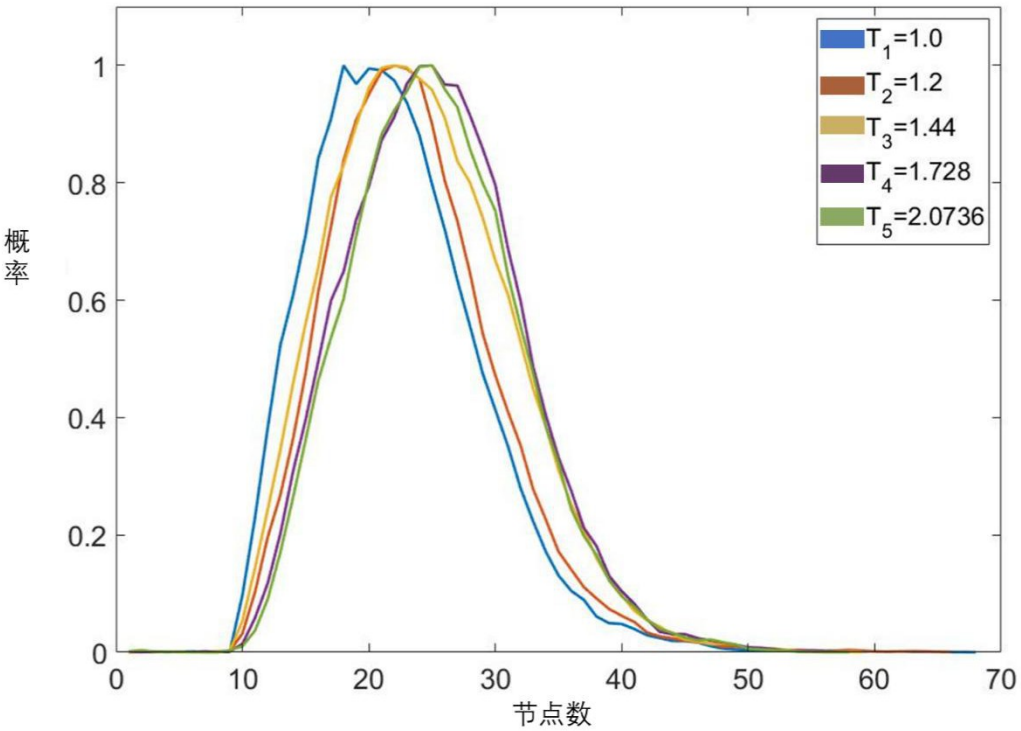


图 8(b)

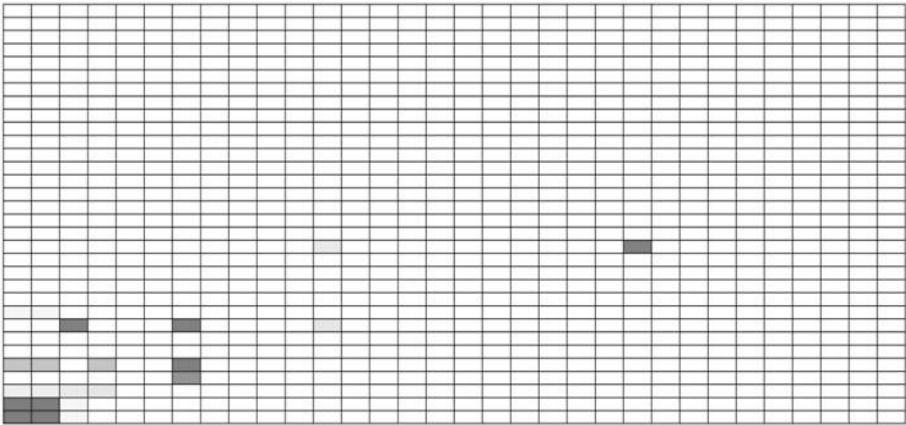


图 9

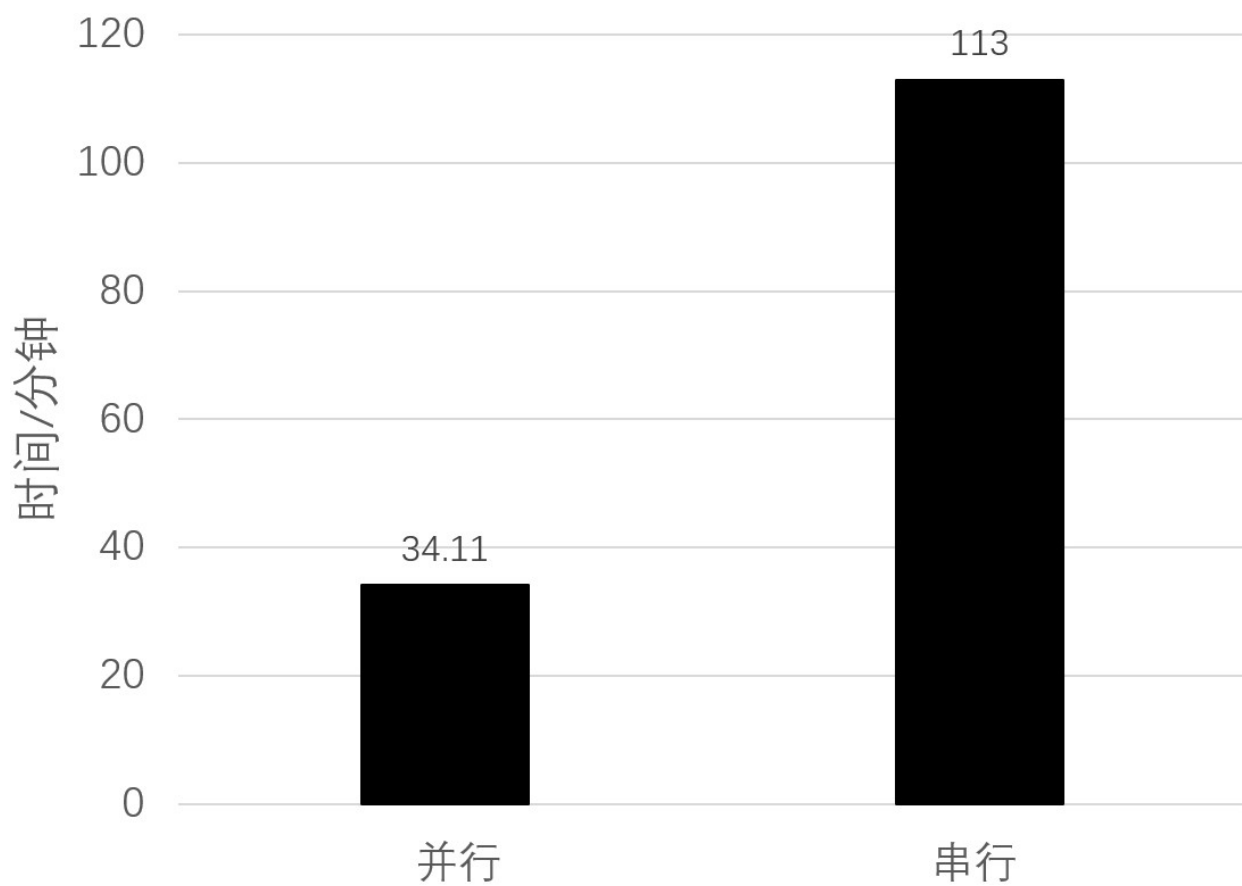


图 10