



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113687445 B

(45) 授权公告日 2022. 01. 04

(21) 申请号 202111251078.7

(22) 申请日 2021.10.27

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113687445 A

(43) 申请公布日 2021.11.23

(73) 专利权人 成都理工大学
地址 610059 四川省成都市成华区二仙桥
东三路1号

(72) 发明人 王向鹏 张翔 王绪本 沈迪
王堃鹏 杨钰菡 唐强强 李小辉

(74) 专利代理机构 成都东恒知盛知识产权代理
事务所(特殊普通合伙)
51304

代理人 罗江

(51) Int.Cl.

G01V 11/00 (2006.01)

G06N 3/02 (2006.01)

(56) 对比文件

US 5838634 A, 1998.11.17

CN 110765934 A, 2020.02.07

敬荣中等. 一种基于数据融合的地球物理数
据联合反演方法——以VES和MT为例.《地球物理
学报》.2004,第47卷(第01期),第143-150页.

审查员 刘钰薇

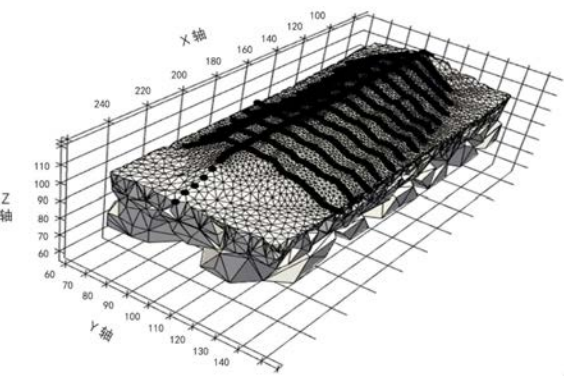
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

基于多源数据融合及电磁震三维反演的注
浆评价方法

(57) 摘要

本发明公开基于多源数据融合及电磁震三
维反演的注浆评价方法,包括以下步骤:S1:获取
原状地层空间的地质信息,所述地质信息包括多
源的物性特征;S2:获取注浆材料的注浆参数;
S3:设计隶属函数和模糊规则,构建模糊神经网
络,并对模糊神经网络进行训练,获得匹配原状
地层空间的模糊神经网络模型;本发明旨在解决
现有注浆工程评价方法的不足,以模糊神经网络
为手段对多参数多尺度电磁震数据进行融合,形
成与注浆扩散半径、密实性、填充性相关联的数
据集合,通过对不同地质环境的钻井、岩石力学
等多信息约束,建立多条对应关系以实现三维空
间注浆效果展示,达到对不同地质条件下多方法
高效精确注浆评价的目的。



1. 基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,包括以下步骤:
S1:获取原状地层空间的地质信息,所述地质信息包括多源多参数多尺度的物性特征;
S2:获取注浆材料的注浆参数;
S3:设计隶属函数和模糊规则,构建模糊神经网络,并对模糊神经网络进行训练,获得匹配原状地层空间的模糊神经网络模型;
S4:基于注浆过程及注浆后地层空间目标体的物性特征变化,通过模糊神经网络模型,建立多源多参数多尺度物性特征的统一化标准;
S5:统一化标准后的数据与注浆参数建立联系,形成基于模糊神经网络的多源数据融合模式,进行三维多参数多尺度联合反演,得到注浆浆液物性特征的三维空间展布图;
S6:通过注浆浆液物性特征的三维空间展布图,对注浆工程的效果进行全面评价。
2. 根据权利要求1所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S1中,所述物性特征包括抗压强度 P 、孔隙率 η 、含水饱和度 Sw 、电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 。
3. 根据权利要求2所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S1中,获取原状地层空间的地质信息,具体步骤包括:S11、采集原状地层围岩,在实验室测试其抗压强度 P 、孔隙率 η 、含水饱和度 Sw ;S12、直流电法采集电阻率 ρ ;S13、瞬变电磁法采集电场强度 E 或磁场强度 H ;S14、微地震监测采集微震波速 V 。
4. 根据权利要求2所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S2中,所述注浆参数包括注浆压力 F 、初凝时间 T 、注浆流量 Q 、扩散半径 r 、扩散速率 S 和填充率 α 。
5. 根据权利要求1所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,步骤S2中,根据原状地层空间的地质信息,选择注浆材料和工艺,在实验室测试并获取不同压力和岩性条件下的注浆参数。
6. 根据权利要求1所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S3中,获得匹配原状地层空间的模糊神经网络模型,具体包括以下步骤:电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 经T-S模糊系统进行融合,经过预处理、神经网络结构选定、初始化网络权值和函数参数、给定网络学习速度和变量系数、典型样本训练、完善模型的模糊神经网络数据融合,得到匹配原状地层空间的模糊神经网络模型。
7. 根据权利要求4所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S5中,统一化标准后的数据与注浆参数建立联系,具体包括:经模糊处理和融合处理的电阻率 ρ 与抗压强度 P 、初凝时间 T 建立关联,经模糊处理和融合处理的电场强度 E 或磁场强度 H 与含水饱和度 Sw 、填充率 α 建立关联,经模糊处理和融合处理的微震波速 V 与注浆过程中扩散半径 r 、扩散速率 S 建立关联;通过电阻率 ρ 异常监测实现注浆过程抗压强度 P 的监测,并与注浆压力 F 对应;通过电场强度 E 或磁场强度 H 异常变化监测实现注浆过程含水饱和度 Sw 、填充率 α 的监测,并与注浆流量 Q 对应;通过微震波速 V 变化值对注浆事件进行定位和监测实现注浆过程扩散速率 S 的监测,并与扩散半径 r 对应。
8. 根据权利要求7所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S5中,还包括:统一化标准后的数据与注浆参数建立联系后,形成以电阻率 ρ 为Z轴,抗压强度 P 为X轴,注浆压力 F 为Y轴的三维图例;形成以电场强度 E 或磁场强度 H 为Z

轴,填充率 α 与含水饱和度 S_w 线性关系综合值为X轴,注浆流量 Q 为Y轴建立三维图例;以微震波速 V 变化值为Z轴,扩散速率 S 为X轴,扩散半径 r 为Y轴建立三维图例。

9.根据权利要求7所述的基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,其特征在于,在步骤S5中,还包括:将电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 经模糊神经网络模型融合后,通过实验室预设的注浆参数进行约束,对比注浆前后的物理场特性,利用地球物理有限元正演模拟方法进行三维建模,利用采集的数据根据标准模型进行三维反演,得到注浆浆液三维空间展布图。

基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法

技术领域

[0001] 本发明属于数据处理技术领域,尤其涉及基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法。

背景技术

[0002] 注浆技术已经发展成为解决工程水害、矿山透水、岩溶充填、软岩加固、水电大坝测漏等众多问题首选技术手段,而如何对其工程效果进行有效评价一直未得到合理解决。常规的注浆监测只监测了注浆泵的压力和流量等参数并未对浆液在地下空间的扩散范围、密实性、填充性等进行评价;注浆的效果检测也是通过取芯进行验证,只能代表少数几个点的注浆情况,无法对大面积的注浆效果进行评价。现亟需对注浆浆液进行三维空间展布,以便于对注浆工程的注浆效果进行全面评价。

发明内容

[0003] 本发明提供基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,通过融合电磁震多参数建立与注浆压力、扩散范围、孔隙率的对应,确定注浆影响范围,通过加设物性异常参数观测方式,进行多源融合,可以有效评价注浆过程及注浆后效果,提高监测检测的可靠性,从而实现剖面三维精细化处理与解释。

[0004] 本发明是这样实现的,基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法,包括以下步骤:

[0005] S1:获取原状地层空间的地质信息,所述地质信息包括多源多参数多尺度的物性特征;

[0006] S2:获取注浆材料的注浆参数;

[0007] S3:设计隶属函数和模糊规则,构建模糊神经网络,并对模糊神经网络进行训练,获得匹配原状地层空间的模糊神经网络模型;

[0008] S4:基于注浆过程及注浆后地层空间目标体的物性特征变化,通过模糊神经网络模型,建立多源多参数多尺度物性特征的统一化标准;

[0009] S5:统一化标准后的数据与注浆参数建立联系,形成基于模糊神经网络的多源数据融合模式,进行三维多参数多尺度联合反演,得到注浆浆液物性特征的三维空间展布图;

[0010] S6:通过注浆浆液物性特征的三维空间展布图,对注浆工程的效果进行全面评价。

[0011] 进一步的,在步骤S1中,所述物性特征包括抗压强度 P 、孔隙率 η 、含水饱和度 Sw 、电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 。

[0012] 其中,含水饱和度 Sw 为地层的含水饱和度。

[0013] 进一步的,在步骤S1中,获取原状地层空间的地质信息,具体步骤包括:S11、采集原状地层围岩,在实验室测试其抗压强度 P 、孔隙率 η 、含水饱和度 Sw ;S12、直流电法采集电阻率 ρ ;S13、瞬变电磁法采集电场强度 E 或磁场强度 H ;S14、微地震监测采集微震波速 V 。

[0014] 进一步的,在步骤S2中,所述注浆参数包括注浆压力 F 、初凝时间 T 、注浆流量 Q 、扩

散半径 r 、扩散速率 S 和填充率 α 。

[0015] 其中,扩散半径 r 、扩散速率 S 和填充率 α 分别为注浆浆液的扩散半径、扩散速率和填充率。

[0016] 进一步的,步骤S2中,根据原状地层空间的地质信息,选择注浆材料和工艺,在实验室测试并获取不同压力和岩性条件下的注浆参数。

[0017] 进一步的,在步骤S3中,获得匹配原状地层空间的模糊神经网络模型,具体包括以下步骤:电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 经T-S模糊系统进行融合,经过预处理、神经网络结构选定、初始化网络权值和函数参数、给定网络学习速度和变量系数、典型样本训练、完善模型的模糊神经网络数据融合,得到匹配原状地层空间的模糊神经网络模型。

[0018] 进一步的,在步骤S5中,统一化标准后的数据与注浆参数建立联系,具体包括:经模糊处理和融合处理的电阻率 ρ 与抗压强度 P 、初凝时间 T 建立关联,经模糊处理和融合处理的电场强度 E 或磁场强度 H 与含水饱和度 S_w 、填充率 α 建立关联,经模糊处理和融合处理的微震波速 V 与注浆过程中扩散半径 r 、扩散速率 S 建立关联;通过电阻率 ρ 异常监测实现注浆过程抗压强度 P 的监测,并与注浆压力 F 对应;通过电场强度 E 或磁场强度 H 异常变化监测实现注浆过程含水饱和度 S_w 、填充率 α 的监测,并与注浆流量 Q 对应;通过微震波速 V 变化值对注浆事件进行定位和监测实现注浆过程扩散速率 S 的监测,并与扩散半径 r 对应。

[0019] 进一步的,在步骤S5中,还包括:统一化标准后的数据与注浆参数建立联系后,形成以电阻率 ρ 为Z轴,抗压强度 P 为X轴,注浆压力 F 为Y轴的三维图例;形成以电场强度 E 或磁场强度 H 为Z轴,填充率 α 与含水饱和度 S_w 线性关系综合值为X轴,注浆流量 Q 为Y轴建立三维图例;以微震波速 V 变化值为Z轴,扩散速率 S 为X轴,扩散半径 r 为Y轴建立三维图例。

[0020] 进一步的,在步骤S5中,还包括:将电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 经模糊神经网络模型融合后,通过实验室预设的注浆参数进行约束,对比注浆前后的物理场特性,利用地球物理有限元正演模拟方法进行三维建模,利用采集的数据根据标准模型进行三维反演,得到注浆浆液三维空间展布图。

[0021] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0022] 本发明旨在解决现有注浆工程评价方法的不足,利用地球物理直流电法、瞬变电磁法、微地震法等多数段,以模糊神经网络为手段对多参数多尺度数据进行融合,形成与注浆扩散半径、密实性、填充性相关联的数据集合,通过对不同地质环境的多信息约束,建立多条对应关系以实现三维空间注浆效果展示,达到对不同地质条件下多方法高效精确注浆评价的目的。

附图说明

[0023] 图1为本发明中注浆区域电磁采集模型;

[0024] 图2为本发明中网格剖分示意图;

[0025] 图3为本发明中异常体电磁特性第一模拟图;

[0026] 图4为本发明中异常体电磁特性第二模拟图;

[0027] 图5为本发明中注浆过程示意图;

[0028] 图6为本发明中地球物理异常模拟正演响应结果图;

- [0029] 图7为本发明中模糊神经网络数据融合过程示意图；
[0030] 图8为本发明中模糊神经网络模式结构图；
[0031] 图9为本发明中电磁震与注浆参数约束模型建立示意图；
[0032] 图10为本发明中注浆前后直流电测量效果对比图；
[0033] 图11为本发明中三维可视化注浆效果空间展布图。

具体实施方式

[0034] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0035] 在本发明的描述中，需要理解的是，术语“长度”、“宽度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，在本发明的描述中，“多个”的含义是两个或两个以上，除非另有明确具体的限定。

[0036] 实施例1

[0037] 本发明公开一种基于多源数据融合的电磁震多参数多尺度注浆评价技术，包括以下步骤：S1：获取注浆地层空间的电阻率、电磁场强度、波速、电磁波衰减系数等物性参数；S2：根据原状地层地质信息设计注浆材料的配比及性能；S3：基于注浆过程及注浆后地下空间目标异常体物性变化，通过模糊神经网络建立并对比电磁震采集参数的统一化标准，统一化标准后的数据与注浆参数建立联系，以反映注浆效果及扩散状态；形成基于模糊神经网络的多源数据融合模式，进行三维多参数多尺度联合反演，得到统一化标准的注浆评价结果。

[0038] 本发明通过融合电磁震多参数建立与注浆压力、扩散范围、孔隙率的对应，确定注浆影响范围，通过加设物性异常参数观测方式，进行多源融合，可以有效评价注浆过程及注浆后效果，提高监测检测的可靠性，从而实现剖面三维精细化处理与解释。

[0039] 实施例2

[0040] 本发明提供一种技术方案：基于多源数据融合及电磁震三维反演的注浆评价方法，包括：

[0041] 根据地质条件，获取注浆前地层的电阻率、电磁场等原状地层信息；

[0042] 注浆前，在施工区域根据注浆范围布设直流电法和瞬变电磁法采集装置，直流电法使用对称四极装置，即通过供电电极A/B向地下供电，在B/A电极间使用不极化电极M/N进行接收，获取地下不同位置的电阻率异常值；瞬变电磁采用接地线圈供电，在另一端可以采集不同方向的受一次场激发后产生的二次场值，可以是电场强度 E_x/E_y ，也可以是磁场强度 H_x/H_y 。

[0043] 在实验室测试原状地层不同岩性的物性参数；

[0044] 采集原状地层围岩，在实验室测试其抗压强度P、孔隙率 η 、含水饱和度 S_w 、电阻率 ρ 等参数，以约束原状地层测量结果和设计注浆压力F、注浆流量Q、扩散半径r、损耗系数 β 、填充率 α 等参数。

[0045] 根据原状地层参数选取具有物性特征差异的注浆材料,并确保注浆材料满足工程需要;

[0046] 注浆材料有多种类型,其物理性质差异巨大,根据原状地层的岩性、孔隙率、含水饱和度和电阻率值等选取满足工程强度要求的型号,并可根据围岩电磁特征配制差异化的材料。

[0047] 建立合理的注浆压力、流量、扩散速率等物理参数预算值;

[0048] 在实验室测量地层岩性的抗压强度 P 、孔隙率 η 、含水饱和度 S_w 等,并根据所选取的注浆材料进行实验测试,观测不同压力 F 条件下注浆流量 Q 、扩散速率 S 、损耗系数 β 、填充率 α 等实验室准确参数。

[0049] 根据地层岩性特征对地球物理多源数据进行模糊处理,建立神经网络模型,通过模糊神经网络模型开展地球物理多源数据融合;

[0050] 经隶属函数的设计(隶属函数的设计,可以通过T-S模糊神经网络系统编辑器进行设计,也可以通过自行计算机C语言编程进行设计)、模糊规则的设计、模糊网络,将电阻率 ρ 看做输入变量,强度 P 是输出变量,而输出变量看做是输入变量加一个系数项组成的线下组合,最终输出每个规则的加权平均值,即建立起电阻率与强度直接的模糊网络数据融合对应关系,以同样的方法对瞬变电磁数据和填充率 α 建立融合、微地震采集的微震波速 V 与注浆过程中扩散半径 r 、扩散速率 S 建立融合。

[0051] 形成电磁法、直流电法、微地震方法的归一化模式和地区模型网络;

[0052] 直流电法采集的电阻率 ρ 、瞬变电磁法采集的电场强度 E 或磁场强度 H ,微震观测注浆的微震波速 V ,经T-S模糊系统进行融合,经过预处理、神经网络结构选定、初始化网络权值和函数参数、给定网络学习速度和变量系数、典型样本训练、完善模型的模糊神经网络数据融合,形成匹配地区实际的网络。

[0053] 其中,T-S模糊系统是本领域成熟的神经网络结构,是将正常的模糊规则及其推理(基于规则的控制)转换成一种数学表达形式,本质是将全局非线性关系通过模糊划分建立多个简单的线性关系。

[0054] 具体的,电阻率 ρ 、电场强度 E 或磁场强度 H 、微震波速 V 进行预处理,对这些初始数据进行降噪、归一化等数学处理,按照数据的复杂程度和数据结果,以T-S模糊神经网络为处理器,选定其与数据处理复杂程度匹配的初始结构,对选定的初始结构进行网络权值初始化,即让每个神经网络单元的输入的权值和为1,然后对神经网络的模式特征向量进行编码,对网络输入层的节点数加以扩充来控制学习速度,设定每个变量的系数。

[0055] 注浆过程中采集地球物理电磁数据和微地震数据,与注浆参数建立关联,完成注浆过程的监测工作;

[0056] 直流电法电阻率 ρ ,瞬变电磁法电场强度 E_x/E_y ,磁场强度 H_x/H_y 的变化反映注浆前后浆液扩散对地层物性参数的变化,经模糊处理和融合处理的电阻率 ρ 与抗压强度 P 建立关联;经模糊处理和融合处理电场强度 E 或磁场强度 H 与含水饱和度 S_w 、填充率 α 建立关联;微地震采集的微震波速 V 与注浆过程中扩散半径 r 、扩散速率 S 建立关联。即可通过电阻率 ρ 异常监测实现注浆过程抗压强度 P 的监测,并与注浆压力 F 对应;可通过电场强度 E 或磁场强度 H 异常变化监测实现注浆过程含水饱和度 S_w 、填充率 α 的监测,并与注浆流量 Q 对应;通过微震波速差对注浆事件进行定位和监测实现注浆过程扩散速率 S 的监测,并与扩散半径 r 对

应。

[0057] 其中,模糊处理是将数据导入模糊集合,再由模糊集合导出,建立模糊集与数据随机变量之间的关系,在此基础上依托隶属函数中的参数来估计数值范围,是将测量数据模糊化的一种方法;融合处理是按照降噪、标准化等形式对数据进行融合。

[0058] 通过地球物理数据与注浆参数关系建立动态注浆过程监测三维图例;

[0059] 在注浆过程中使用模糊神经网络融合处理后的电阻率 ρ 与抗压强度 P 建立联系,同时与注浆材料本身实验抗压强度 N 建立联系,形成以电阻率 ρ 为 Z 轴,抗压强度 P 为 X 轴,注浆材料实验强度 N 为 Y 轴的三维图例;以电场强度 E 或磁场强度 H 为 Z 轴,充填率 α 与含水饱和度 S_w 线性关系综合值为 X 轴,注浆流量 Q 为 Y 轴建立三维图例;以微震事件微震波速 V 变化值为 Z 轴,扩散速率 S 为 X 轴,浆液扩散半径 r 为 Y 轴建立三维图例。

[0060] 注浆完成后对7小时、28小时进行地球物理数据采集,依据第四步所建立的模糊神经网络模型,与注浆前进行对比,完成检测评价工作。

[0061] 建立了地球物理数据与注浆参数直接的内在联系,通过对比注浆前后地球物理数据的变化,可以反推注浆参数的变化,用电阻率 ρ 直接反映注浆效果的强度;用电场强度 E 或磁场强度 H 直接反映注浆的填充效果;用微震监测微震波速 V 直接反映注浆浆液扩散范围。从注浆的强度、密实性、充填性全面评价注浆的工程效果。

[0062] 利用融合后的地球物理多参数数据,利用注浆参数进行约束,对比注浆前地质地球物理数据,展示三维注浆效果。

[0063] 将电阻率数据即电阻率 ρ 、电磁场强度数据即电场强度 E 或磁场强度 H 、微震监测数据即微震波速 V 经模糊神经网络模型融合后,通过实验室预设的注浆参数进行约束,对比注浆前后的物理场特性,利用地球物理有限元正演模拟方法进行三维建模,利用采集的数据根据标准模型进行三维反演,得到注浆浆液三维空间展布图,全面评价注浆的工程效果。

[0064] 其中,地球物理有限元正演模拟方法,以及三维反演中的标准模型,均为本技术领域常规技术,再次不作详述。

[0065] 本发明旨在解决现有注浆工程评价方法的不足,利用地球物理直流电法、瞬变电磁法、微地震法等多数段,以模糊神经网络为手段对多参数多尺度数据进行融合,形成与注浆扩散半径、密实性、填充性相关联的数据集合,通过对不同地质环境的多信息约束,建立多条对应关系以实现三维空间注浆效果展示,达到对不同地质条件下多方法高效精确注浆评价的目的。

[0066] 试验例

[0067] 以理论模型和实测数据来进行验证本发明的有效性,建立一个如图1的三维数据采集模型,该模型的特征为可以采集到三维的电阻率和电磁场强度数据体,微震监测的检波器同样以三维采集模式进行布置。

[0068] 以直流电理论模型进行说明,假设在地表 A 点处,有一点电流源(即将向地下空间供电的发射电源看做一个点;一般的电源还可以是发射线圈,发射板),电流为 I ,电流密度矢量为 $\vec{j}$, A 表示点电源位置, Ω 表示半空间区域, Γ 表示模型边界,满足如下关系式:

$$[0069] \oint_{\Gamma} \vec{j} \cdot d\Gamma = \begin{cases} 0 & A \notin \Omega \\ I & A \in \Gamma \end{cases} \quad (1)$$

[0070] 根据奥高公式,有:

$$[0071] \quad \oint_{\Gamma} \vec{j} \cdot d\vec{\Gamma} = \int_{\Omega} \nabla \cdot \vec{j} d\Omega = \begin{cases} 0 & A \notin \Omega \\ I & A \in \Gamma \end{cases} \quad (2)$$

[0072] 因为 δ 函数满足如下积分关系:

$$[0073] \quad \int_{\Omega} \delta(A) d\Omega = \begin{cases} 0 & A \notin \Omega \\ 1/2 & A \in \Gamma \end{cases} \quad (3)$$

[0074] 将(2)式代入(3)式,对比得出以下关系:

$$[0075] \quad \nabla \cdot \vec{j} = 2I\delta(A) \quad (4)$$

[0076] 因为电流密度矢量 $\vec{j}$ 与电流密度矢量 u 的关系为:

$$[0077] \quad \vec{j} = -\sigma \nabla u \quad (5)$$

[0078] σ 为介质的电导率。

[0079] 将(5)式代入(4)式,得到电位满足的微分方程为:

$$[0080] \quad \nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -2I\delta(A) \quad (6)$$

[0081] 考虑地面 Γ_s 上的电流,因为空气中的电阻率可视为无穷大,所以电流沿着地表流动,流向空气的电流密度为零,也即电流密度的法向分量为零,那么电位的法向导数为零:

$$[0082] \quad \left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_{\Gamma_s} = 0 \quad (7)$$

[0083] 当考虑无穷远处的边界 Γ_{∞} 时,可以假设研究区域的电性不均匀性对 Γ_{∞} 边界上的电位没有影响,那么该边界上的电位可以计算出来,其表达式是:

$$[0084] \quad u|_{\Gamma_{\infty}} = \frac{c}{r'} \quad (8)$$

[0085] 其中 c 是比例系数, r' 是点源点至该边界点的距离。要满足该边界条件,需要有限元求解区域取得足够的大。

[0086] 因为这是一个三维边值问题,需要进行傅里叶变换,变换到二维波数域中进行求解,所以对应的边值问题也应该进行变换,这里直接给出经过傅里叶变换后的二维边值问题:

$$[0087] \quad \begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla U) - k^2 \sigma U = -I\delta(A) & \in \Omega \\ \frac{\partial U}{\partial n} = 0 & \in \Gamma_s \\ \frac{\partial U}{\partial n} + k \frac{K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n) U = 0 & \in \Gamma_{\infty} \\ U_1 = U_2 & \in \Gamma_1 \\ \sigma_1 \frac{\partial U_1}{\partial n_1} = -\sigma_2 \frac{\partial U_2}{\partial n_2} & \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (9)$$

[0088] 其中 σ 是电导率, k 是波数域中的参数, U 是波数域中的电位, I 是供电电流, $\delta(A)$ 是

供电点的位置(A点), $\frac{\partial U}{\partial n}$ 是指波数域中电位对地表边界的外法向, K_0 为第二类零阶修正贝塞尔函数, K_1 为第二类一阶修正贝塞尔函数, $\cos(r, n)$ 即边界上A点到该边界点的矢径 r 与该点的外法向 n 之间的夹角的余弦, Γ_∞ 为无穷边界, Γ_s 为地表观测点边界, Γ_1 为地层连续边界。

[0089] 使用加权余量法求边值问题(9), 对应的变分问题为:

$$[0090] \quad \begin{cases} F(U) = \int_{\Omega} \left[\frac{\sigma}{2} (\nabla U)^2 + \frac{1}{2} k^2 \sigma U^2 - I \delta(A) U \right] d\Omega + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_\infty} \sigma \frac{k K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n) U^2 d\Gamma \\ \delta F(U) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

[0091] 当使用异常电位法时, 对应的变分问题为:

$$[0092] \quad \begin{cases} F(U) = \int_{\Omega} \left[\frac{\sigma}{2} (\nabla U)^2 + \frac{1}{2} k^2 \sigma U^2 + \sigma \nabla U_0 \cdot \nabla U + \sigma' k^2 U_0 U \right] d\Omega + \\ \int_{\Gamma_\infty} \left[\frac{1}{2} \sigma \frac{k K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n) U^2 + \sigma' \frac{k K_1(kr)}{K_0(kr)} \cos(r, n) U_0 U \right] d\Gamma \\ \delta F(U) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

[0093] 其中 U_0 为均匀半空间, 背景电导率为 σ_0 时的正常电位, σ 为地下电导率, σ' 为地下异常电导率, $\sigma' = \sigma - \sigma_0$, U 为异常电位, 求解之后, 总电位为 $V = U + U_0$ 。

[0094] 如图2所示, 进行网格剖分处理, 将异常体的三维正演结果与均匀背景场正演结果模拟, 分析得图3-4, 第一次设置电阻率500欧姆米, 表层设置150欧姆米, 二层设置40欧姆米, 注浆位置使用低阻浆液, 设置为5欧姆米, 所得的结果。

[0095] 如图5-6所示, 其中,

[0096] 注浆前地层模型参数为: $\rho_1 = 1000 \Omega \cdot m$, $h_1 = 20m$, $\rho_2 = 500 \Omega \cdot m$, $h_2 = 20m$, $\rho_3 = 10000 \Omega \cdot m$;

[0097] 注浆中地层模型参数为: $\rho_1 = 1000 \Omega \cdot m$, $h_1 = 20m$, $\rho_2 = 500 \Omega \cdot m$ ($\rho_{\text{浆}} = 10 \Omega \cdot m$), $h_2 = 20m$, $\rho_3 = 10000 \Omega \cdot m$;

[0098] 注浆后地层模型参数为: $\rho_1 = 1000 \Omega \cdot m$, $h_1 = 20m$, $\rho_2 = 10 \Omega \cdot m$, $h_2 = 20m$, $\rho_3 = 10000 \Omega \cdot m$;

[0099] 如图7-8所示, 模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network, 简称FNN) 将模糊系统和神经网络相结合, 充分考虑了二者的互补性, 集逻辑推理、语言计算、非线性动力学于一体, 具有学习、联想、识别、自适应和模糊信息处理能力等功能。

[0100] 图8中, x 为输入变量, y 为输出变量, n 是输入变量的维数, m_i 是 x_i 的模糊分割数(规则数)。第一层 λ 表示输入层; 第二层每个节点代表一个语言变量, μ 表示语言变量值模糊集合的隶属度函数; 第三层每个节点代表一条模糊规则, α 表示规则适用度; ω 表示连接权值。

[0101] 第一层为输入层, 为精确值。节点个数为输入变量的个数。第二层每个节点代表一个语言变量值。用于计算各输入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数。图中 n 是输入变量的维数, m_i 是 x_i 的模糊分割数(规则数)。第三层的每个结点代表一条模糊规则, 用于

匹配模糊规则的前件,计算出每条规则的适用度。第四层结点数与第三层相同,实现适用度的归一化计算。第五层是输出层,实现清晰化计算。

[0102] 其中

$$[0103] \quad y = \sum_{j=1}^m \alpha_j y_j / \sum_{j=1}^m \alpha_j = \sum_{j=1}^m \bar{\alpha}_j y_j$$

$$[0104] \quad \bar{\alpha}_j = \alpha_j / \sum_{j=1}^m \alpha_j$$

$$[0105] \quad y^j = p_0^j + p_1^j x_1 + \cdots + p_n^j x_n$$

[0106] 规则1:如果x是A₁且y是B₁,则f₁=p₁x+q₁y+r₁

[0107] 规则2:如果x是A₂且y是B₂,则f₂=p₂x+q₂y+r₂

[0108] 式中j表示线性组合维数,下标n表示变量个数,A、B表示不同模糊规则,A、B的下标1和2表示不同的组合形式,x为输入变量,y为输出变量,α表示规则适用度, $\bar{\alpha}_j$ 表示适用度的归一化,p、q、r表示线性组合的常数参数,m为积分上限,f表示线性相关函数。

[0109] 具有两条规则的隶属度函数关系输入一介模糊神经网络模型,前件网络用来匹配模糊规则的前件,后件网络用来产生模糊规则的后件,每个结点代表一条规则,用于计算每条规则的后件。

[0110] 如图9所示,电磁震与注浆参数模型建立,模糊隶属度函数在模糊数学中的地位是非常突出的,在对客观事物进行描述和度量的过程中,通常是用隶属度函数来表示该事物的模糊程度。在构造隶属函数的过程中,应该充分考虑主观因素和客观因素,使隶属函数能全面反映事物的本质。经常使用的模糊隶属函数主要有三类,分别为三角函数、梯形函数和高斯函数。本次使用三角函数如下式:

$$[0111] \quad \mu_A(x) = \text{triangle}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{x-c}{c-a} & b \leq x < c \\ 0 & x \geq c \end{cases}$$

[0112] 式中 $\mu_A(x)$ 为隶属函数表达式,模糊集合为A,x为变量参数,a/c表示x的上下界值,b是模糊集合A的隶属度为1时的取值。

[0113] 网络的输入输出及连接权均为模糊集,可以将其视为一种纯模糊系统,模糊集输入通过系统内部的模糊集关系而产生模糊输出。模糊系统的规则集和隶属度函数等设计参数只能靠设计经验来选择,利用神经网络的学习方法,根据输入输出的学习样本自动设计和调整模糊系统的设计参数,实现模糊系统的自学习和自适应功能。此次设计以电阻率ρ和电磁场E/H及微震波速V为输入样本,以模糊融合处理后归一化为输出。

[0114] 由于每个特征的数量级是不一样的,因此在融合所有特征的相似性度量之前,需对每个特征的相似性度量做归一化处理,归一化公式如下:

$$[0115] \quad f'_i = \frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$$

[0116] 式中 f 和 $f' \in [0, 1]$ 分别为归一化前后的相似性度量值, i 为特征量编号, $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别为归一化前的种群中最大、最小相似性度量值。经归一化后,就可以在同一量级上融合每个特征的相似性度量值,得到在 $\{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ 位置处的匹配相似性度量值。融合公式为 $F_I = \max(\omega_1 f'_{I,1}, \omega_2 f'_{I,2}, \dots, \omega_N f'_{I,N})$,式中, F_I 为个体 I 的最终融合相似性度量, F_I 越小,则越匹配 $f'_{I,j}$ 为个体 I 在特征 j 的归一化相似性度量值;因为每种特征的测量精度有差异,因此引进权值 $w \in [0, 1]$, w 越大,则对应特征的信噪比越高,该特征的可信度越大。

[0117] 如图10-11所示,经模糊神经网络融合处理后的电阻率 ρ 与抗压强度 P 建立联系;电场强度 E 或磁场强度 H 与注浆量建立联系;微震事件微震波速 V 浆液扩散半径 r 建立联系,形成某一特定值范围内的空间注浆效果。

[0118] 图10中, $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T-3$ 分别代表注浆前地下空间三处高阻异常位置编号, $T'-1$ 、 $T'-2$ 、 $T'-3$ 分别表示表示注浆后对应编号 $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T-3$ 处地下空间位置。

[0119] 以上仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

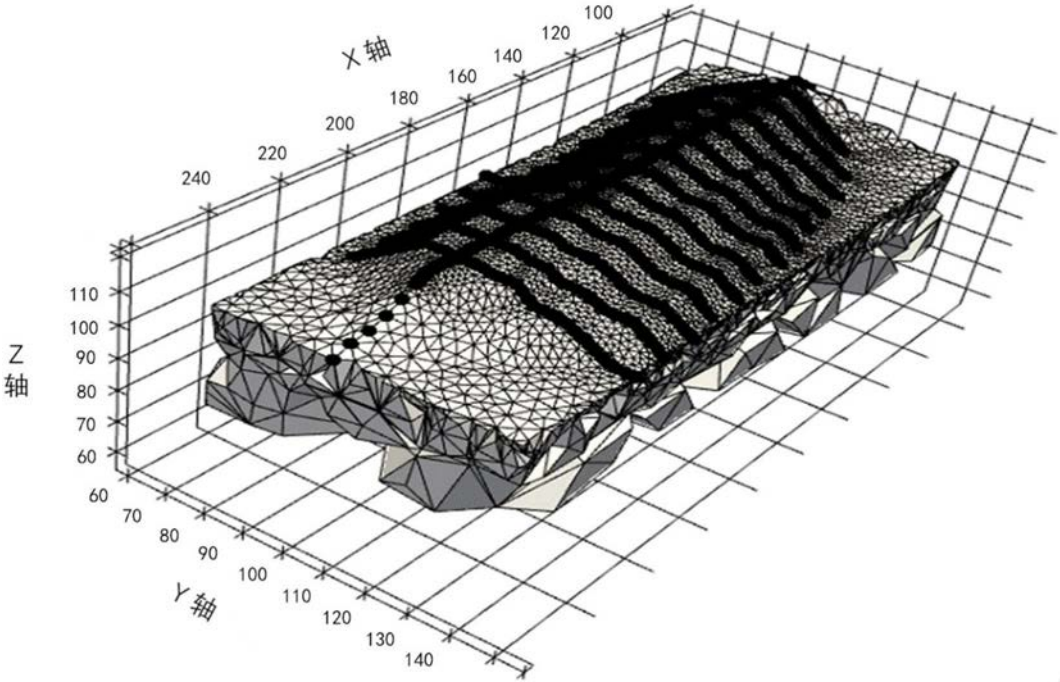


图1

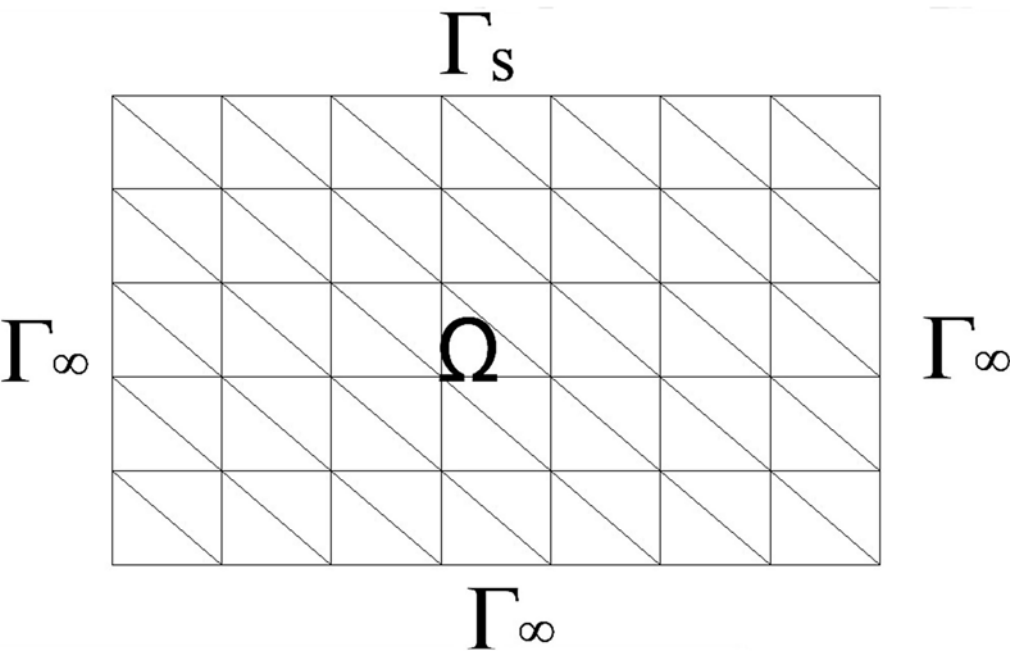


图2

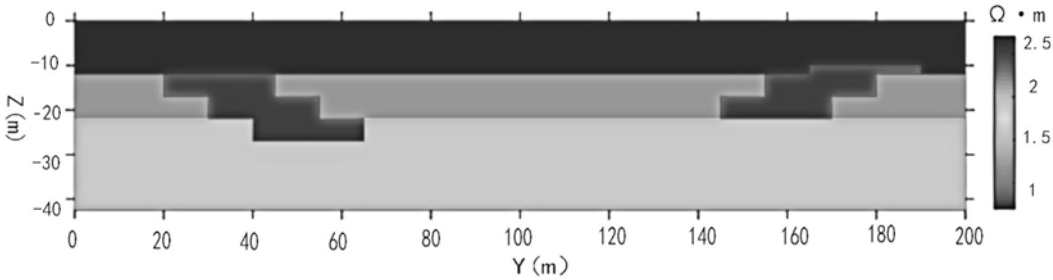


图3

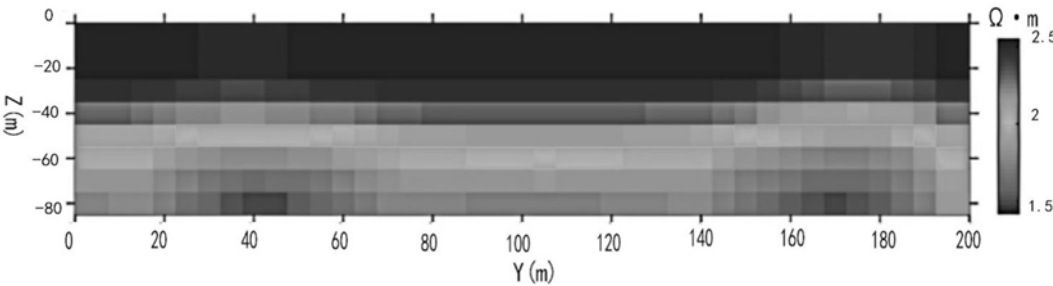


图4

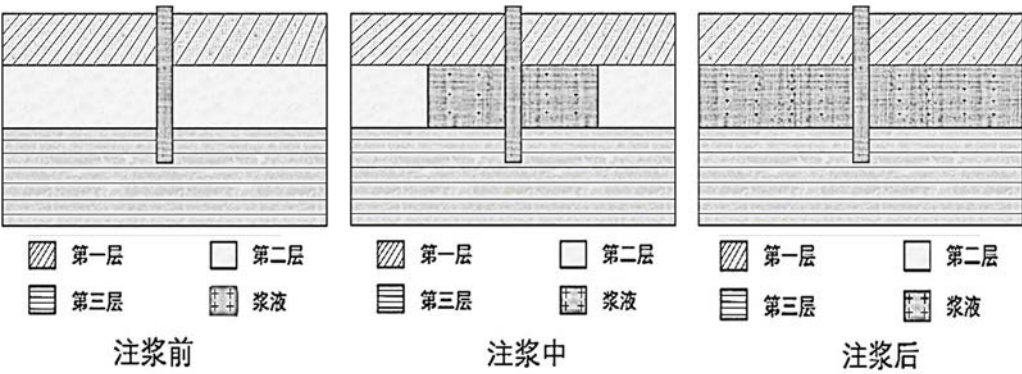


图5

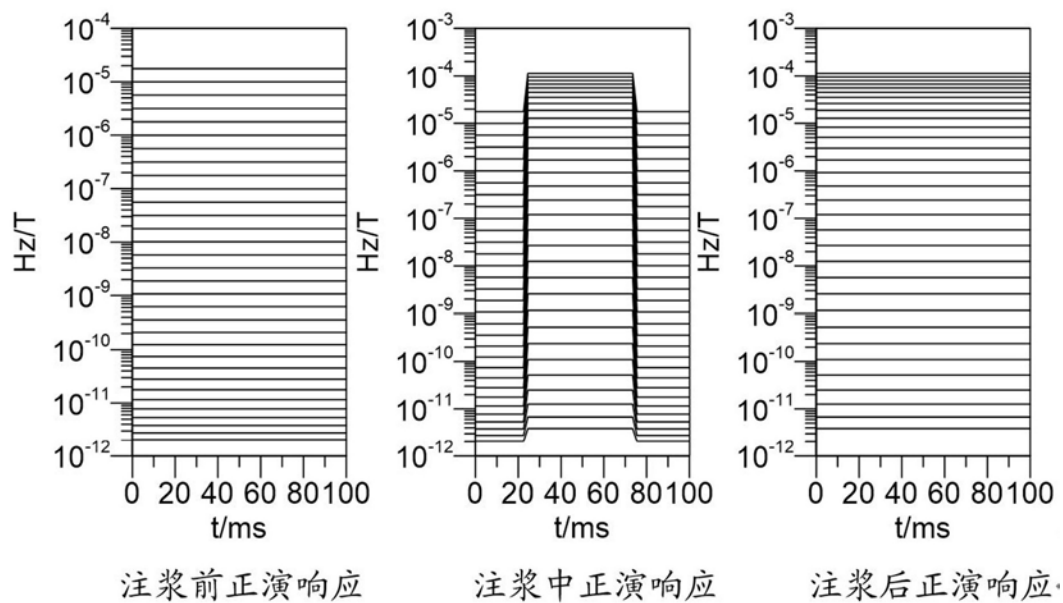


图6

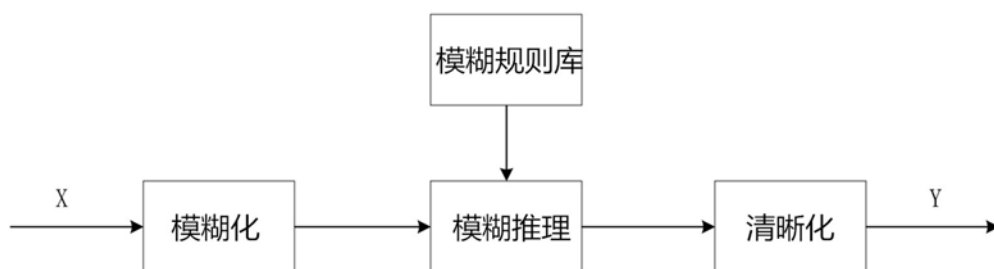


图7

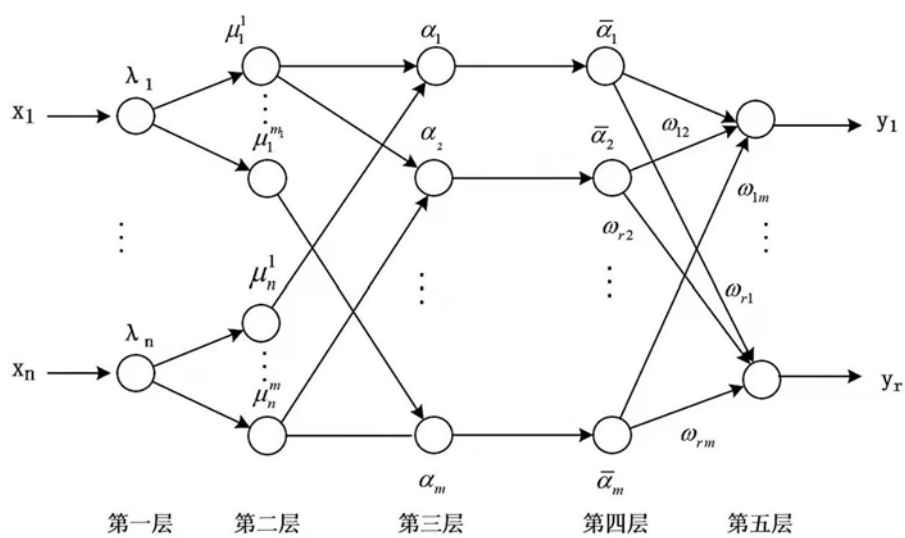


图8

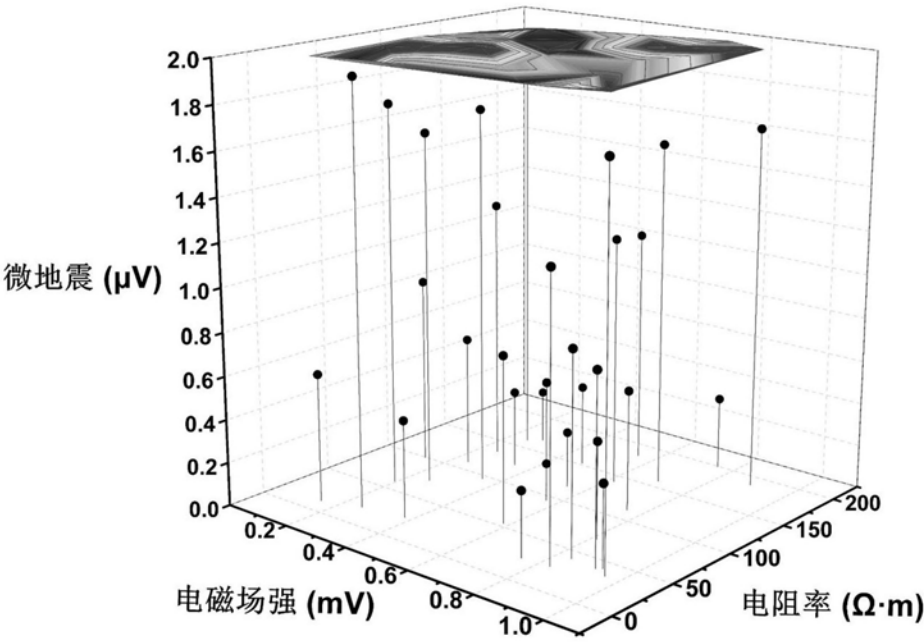


图9

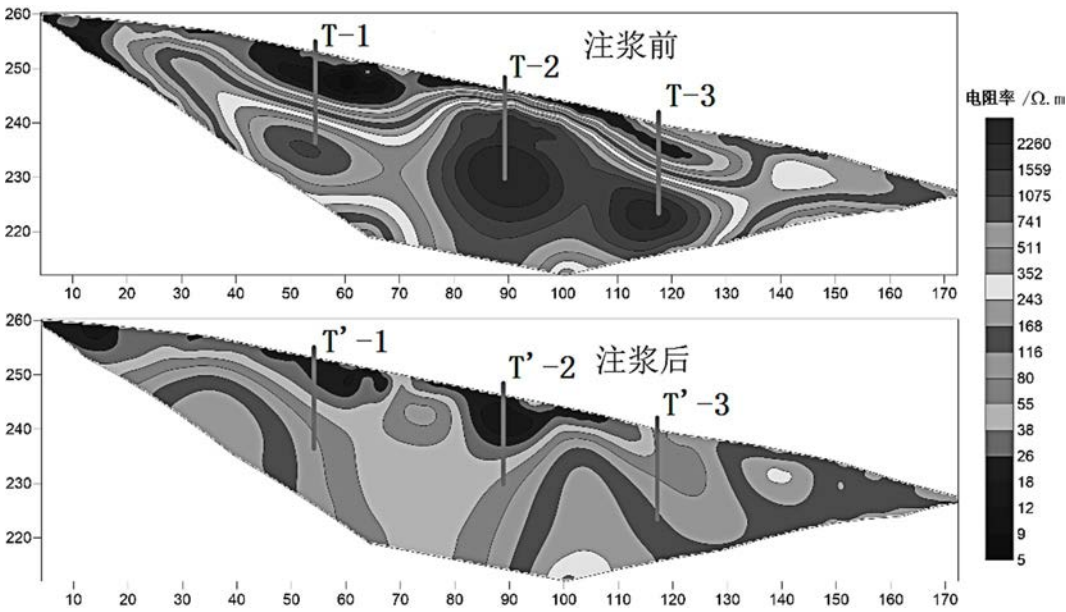


图10

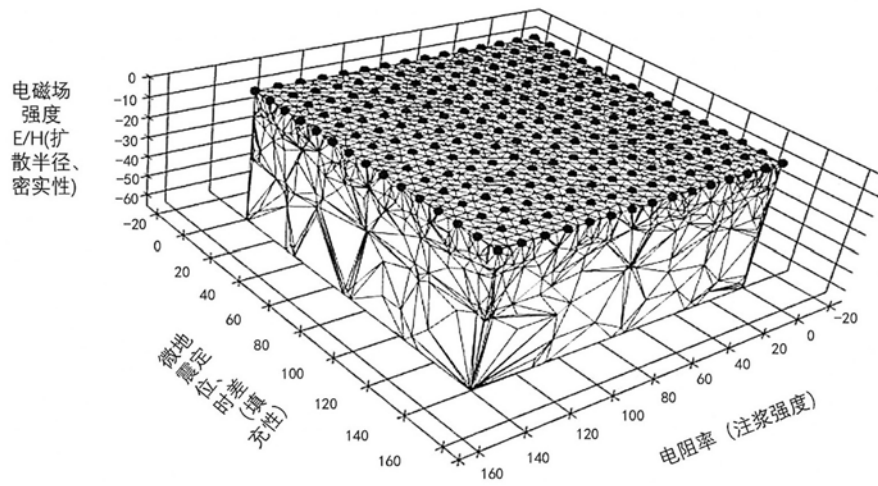


图11