

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.05.008

# 混凝土缺陷检测的电阻成像约束反问题算法优化

余佳干<sup>1</sup>, 陈智俊<sup>2</sup>, 周小勇<sup>1</sup>, 潘 勋<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工学院, 武汉 430074; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

**摘要:**电阻层析成像(ERT, electrical resistance tomography)是一种以对象内部电导率分布为成像目标的可视化技术,具有低成本、无损伤等优点,在混凝土缺陷检测领域具有广阔的应用前景。根据电阻成像基本原理,基于 Matlab 平台编制 ERT 正问题和反问题程序,实现了约束牛顿迭代算法(NCRM, Newton's constrained reconstruction method)。计算过程中,根据混凝土基体及缺陷的电学特性和基体与缺陷的锐化边界条件对算法施加约束,通过逐步修正初值来干预逆运算,从而提高 ERT 反问题的计算稳定性和重构图像质量。试验结果表明:针对混凝土材料的缺陷检测,提出的 ERT 约束算法用较少的迭代次数即获得较好的效果,能较大程度消除成像目标的伪影,提高锐度,实现对混凝土缺陷相对精准的无损检测。

**关键词:**电阻率成像;混凝土缺陷;无损检测;约束牛顿算法

**中图分类号:** TU528.07

**文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2019)05-066-10

## Research on resistance imaging constraint inverse problem in concrete defect detection

YU Jiagan<sup>1</sup>, CHEN Zhijun<sup>2</sup>, ZHOU Xiaoyong<sup>1</sup>, PAN Xun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China; 2. The Second Highway Survey and Design Institute Co.Ltd. of China Communications, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** Electrical Resistance Tomography (ERT) is a kind of medical imaging technology taking the body's conductivity distribution as the target. With the advantages of visualization, low cost and no damage, it has broad prospects in the field of concrete defect detection. Based on the basic principle of resistance imaging, the MATLAB platform is used to compile the ERT forward and the inverse problem program. According to the electrical characteristics of concrete matrix and defects, we apply constraints to the algorithm and interfere with Newton-Raphson iteration process in inverse operation by modifying initial values, so as to improve the computational stability and image resolution of ERT posed inverse problem. The results show that the ERT constraint algorithm can reduce the number of iterations and eliminate imaging artifacts to a large extent, thus improving acuity and realizing relatively accurate nondestructive detection of concrete defects.

**Keywords:** electrical resistance tomography; concrete defect; nondestructive testing; constrained reconstruction method

**收稿日期:** 2018-11-30

**基金项目:** 湖北省交通运输厅科技项目(2017-538-1-1)。

Supported by Science and Technology Project of Hubei Transportation Department(2017-538-1-1).

**作者简介:** 余佳干(1993—),男,主要从事工程结构数值分析和混凝土无损检测技术应用研究,(E-mail)cugyujiagan@163.com。

陈智俊(通讯作者),男,高级工程师,主要从事大跨度桥梁结构理论研究,(E-mail)czjhust@163.com。

混凝土被广泛应用于工程建设,其内部缺陷的准确预测与预报,对于确保结构物的正常工作和避免建筑物的灾难性损伤具有重大意义。目前,混凝土缺陷检测技术主要有超声脉冲法<sup>[1]</sup>、雷达扫描法<sup>[2]</sup>、红外热谱法<sup>[3]</sup>等。这些方法应用广泛,但均存在一定的局限性。如混凝土对超声的强吸收问题影响了超声脉冲技术在混凝土检测中的应用。雷达法检测仪器多采用国外进口,成本较高,且无法对原始数据进行分析,该技术在国内尚处于起步阶段。红外热谱法应用较多,但其主要应用于定性判断和表面质量检测,难以实现对缺陷定量及目标内部的可视化检测。

近年来,电阻率成像技术(ERT, electrical resistance tomography)因其成本低、无损伤及功能成像等优点<sup>[4]</sup>被广泛用于工程检测领域<sup>[5]</sup>。ERT技术是一种新型的图像重建技术。ERT技术是通过向被测对象注入电流,测量边界电压(或电势),经过反演计算,重构被测对象内部的电导率,进而显示物体内部状态的一种成像技术。但是,ERT是一个病态反问题<sup>[6]</sup>,存在着非线性、欠定性、严重不适定性和计算量大等难点,成像的精度和稳定性很难保证。为提高图像重建质量,文献<sup>[7]</sup>提出阈值修正法,可去除部分图像伪影,改善成像质量,但选取阈值大小时,主观因素影响较大,难以寻找到合理阈值。董峰等<sup>[8]</sup>在阈值修正法基础上提出一种快速自适应稀疏重建算法,研究了噪声对图像重建效果的影响,获得了较好效果。肖理庆<sup>[9]</sup>提出一种改进牛顿-拉夫逊绝对图像重建算法,采用灵敏度矩阵自动更新的策略,结合图像结果自动选取阈值修正电阻率,可有效降低图像的相对误差。Cheney等<sup>[10]</sup>提出牛顿单步残差法(NOSER, Newton's one-step error reconstructor),设定均匀分布的电导率为初值,用一次牛顿迭代后的结果进行成像,可实现快速成像,但其成像伪影较大,电阻率与真实值相差较大,仅能定性分析,无法实现定量分析。

将ERT技术应用于混凝土检测领域时,由于混凝土自身电导率较小,测量受外界因素影响较大,且混凝土基体与缺陷间的电导率为突变而不是渐变关系等原因,用于医学检测的传统ERT算法很难将缺陷与基体间的锐利边界重构出来,限制了ERT技术在混凝土无损检测中的应用。

采用ERT技术进行混凝土缺陷检测时,被测对象有两个特点:基体与缺陷有明显边界(即电导率发生突变而不是渐变);混凝土的电导率可事先测量。针对这些特点和上述算法的问题,文中提出一种优化算法——约束牛顿迭代算法(NCRM, Newton's constrained reconstruction method),依据被测对象的这些信息作为先验条件,结合上一次迭代结果来调整初始向量,逐次递进反算初值,通过进一步迭代来得到较为准确的内部电导率分布,实现混凝土缺陷无损检测目的。

## 1 ERT工作原理

ERT技术实质上是低频电流场的反问题计算,主要包括正问题和反问题的研究。正问题为已知场域电阻率分布,求解边界电极处电压值,计算过程稳定,有唯一解;而其反问题是已知边界电压,通过反运算推测场域内各单元的电阻率分布,一般情况下能获得的边界电压值有限,而单元数远多于电压数量,计算呈现明显的病态性和欠定性,数学上的解决方案多采用Newton-Raphson迭代和正则化方法来降低病态性,用最小二乘法获得近似解。

从物体表面注入低频恒定电流,忽略介电常数,将场域内的电流场认为是准静态场,则电阻率 $\sigma$ 与电势分布函数 $\varphi$ 满足Laplace方程<sup>[11]</sup>,即

$$\Omega: \nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0, \quad (1)$$

$$\Gamma_1: \boldsymbol{\varphi} + z_l \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\mathbf{n}}} = U_l, \quad (2)$$

$$\Gamma_2: \int \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\mathbf{n}}} d\Gamma = -I_l, \quad (3)$$

式中: $\varphi$ 为场域 $\Omega$ 内的电势分布函数; $z_l$ 代表第 $l$ 个测量电极的接触阻抗; $I_l$ 是电极处的电流密度; $\bar{\mathbf{n}}$ 为外法向单位矢量; $\sigma$ 为场域内的电导率分布函数。

正问题是根据边界条件与场域内电导率分布 $\sigma$ 求解电势分布 $\boldsymbol{\varphi}$ 。采用有限元法求解时,可写成矩阵形式

$$\mathbf{S}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{F}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{S}$  为系数矩阵, 是由单元系数矩阵  $\mathbf{S}_{ij}^e$  组装而成, 里面包含单元的电导率, 此处假设每个单元的电导率为常数,  $\mathbf{S}_{ij}^e$  可由单元形函数推导得到;  $\mathbf{F}$  为电流列向量, 电流注入流出的位置分别为  $I$  和  $-I$ , 其余项均为 0。

ERT 的反问题是由边界测量电压计算被测物内部的电导率分布, 一般采用最小二乘法搜索出一合适的电导率分布  $\sigma$ , 使在此电导率分布的计算电压  $U_i(\sigma)$  与测量电压  $V_i$  足够接近, 即  $(V_i - U_i(\sigma)) (i=1, 2, \dots, N)$  达到最小, 即:

$$E(\sigma) = \sum_{i=1}^N ||V_i - U_i(\sigma)||^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (V_{ij} - U_{ij}(\sigma))^2, \quad (5)$$

式中:  $E(\sigma)$  是电导率分布  $\sigma$  的函数;  $v_{ij}$  是第  $i$  次激励第  $j$  次测量得到的测量电压;  $U_{ij}(\sigma)$  是在电导率分布为  $\sigma$  时由 ERT 正运算得到第  $i$  次激励第  $j$  次计算电压;  $N$  是电极数量。

寻找电导率分布  $\sigma$  时, 使  $E(\sigma)$  达到最小, 可令其偏导数为零, 即

$$F_m(\sigma) = \frac{\partial E(\sigma)}{\partial \sigma_m} = -2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (V_{ij} - U_{ij}(\sigma)) \frac{\partial U_{ij}(\sigma)}{\partial \sigma_m} = 0, (m=1, 2, \dots, M)。 \quad (6)$$

根据牛顿迭代法, 有

$$\sigma^{(k+1)} = \sigma^{(k)} - [\mathbf{J}(\sigma^{(k)})]^{-1} \cdot \mathbf{F}(\sigma^{(k)}), (k=0, 1, \dots), \quad (7)$$

式中:  $k$  为迭代次数, 一直到满足精度要求为止;  $\mathbf{J}(\sigma^k)$  为雅克比矩阵, 计算公式为

$$J_{n,m}(\sigma^{(k)}) = \frac{\partial F_N(\sigma^{(k)})}{\partial \sigma_m}, (n, m=1, 2, \dots, M)。 \quad (8)$$

以上是 ERT 正问题和反问题的数学表示, 反问题求解的关键是尽量找到较好的、与真实电导率分布相近的初值  $\sigma^{(k)}$ 。

## 2 NCRM 算法图像重构原理

当采用牛顿类算法计算时, 如果初始电导率分布接近真实电导率分布, 那么迭代次数就会减少很多。NOSER 方法<sup>[12]</sup>用整个区域的平均电导率作为迭代的初值, 仅通过一次迭代来实现 ERT 成像, 结果虽不精确, 但从重建电图中得到场域内目标的位置和大致尺寸, 可实现快速成像。采用的 NCRM 算法在此基础上, 利用已知的先验条件来多次调整初值, 以获得更为准确的结果, 由于被测物体内部电导率分布未知, 初值仍是假设场域内电阻率均匀分布, 计算出第一次的初值  $\mathbf{X}_1$ , 即  $\mathbf{X}_1 = c(1, 1, \dots, 1)^T$ , 设  $\mathbf{l}^{(0)} = (1, 1, \dots, 1)^T$ , 向量  $\mathbf{l}^{(0)}$  为所有元素等于 1 的单位向量, 计第  $k$  次迭代  $\mathbf{l}^{(k)}$ 。  $c$  的大小利用最小二乘法确定, 代入  $E(\sigma)$  中求得

$$E(c\mathbf{l}^{(k)}) = \sum_{i=1}^N ||V_i - U_i(c\mathbf{l}^{(k)})||^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (V_{ij} - U_{ij}(c\mathbf{l}^{(k)}))^2, \quad (9)$$

式中:  $c$  为初始电导率分布中基体的电导率;  $\mathbf{l}^{(k)}$  为第  $k$  次迭代时对单位向量  $\mathbf{l}^{(0)}$  的修正向量;  $V_i$  为相邻电极上的测量电压值;  $U_i(c\mathbf{l}^{(k)})$  为利用有限元方法计算的相邻电极电压值;  $c$  为常数, 可转换为  $U_{ij}(c\mathbf{l}^{(k)}) = cU_{ij}(\mathbf{l}^{(k)})$ , 求得  $c$  值为

$$c = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (V_{ij} U_{ij}(\mathbf{l}^{(k)}))}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (U_{ij}(\mathbf{l}^{(k)}))^2}, (i, j=1, 2, \dots, N)。 \quad (10)$$

利用式(10)求解系数  $c$ , 将  $\mathbf{X}_1 = c(1, 1, \dots, 1)^T$  作为初值带入方程(7)求得近似电导率分布  $\mathbf{Y}_1 = (\sigma_1^{(1)}, \sigma_2^{(1)}, \dots, \sigma_m^{(1)})^T$ , 同时也获得第一次重构图像, 由结果可以确定最有可能是缺陷的位置(单元), 但伪影较多, 原因是均匀分布的电导率与实际电导率分布相差较大, 没有很好地满足牛顿法对初值的要求。从实验结果看, 缺陷的识别范围也明显大于实际尺寸, 缺陷的中心位置可由此判定, 试验证明中心位置与实际缺陷中心位置也基本一致。以该近似电导率分布  $\mathbf{Y}_1$  为基础, NCRM 算法将混凝土基体及缺陷的电导率( $\sigma_c, \sigma_f$ )作为先验信息, 依据第一次重构图像确定的缺陷中心位置, 将混凝土电导率  $\sigma_c$  和缺陷电导率  $\sigma_f$  作为先验条件代入算法中, 调整分布向量  $\mathbf{l}^{(0)}$  为  $\mathbf{l}^{(1)}$ , 即由第一次的均匀分布  $\mathbf{l}^{(0)} = (1, 1, \dots, 1, \dots, 1)^T$  调整为  $\mathbf{l}^{(k)} = (1, 1, \dots,$

$\frac{\sigma_f}{\sigma_c}, \dots, 1)^T$ ,  $\mathbf{l}^{(k)}$  中  $\frac{\sigma_f}{\sigma_c}$  为缺陷电导率与基体电导率的比值,在向量  $\mathbf{l}^{(k)}$  中的位置(序号信息)就是前一次分析结果中的缺陷中心位置对应的单元编号。将引入先验信息的向量  $\mathbf{l}^{(k)}$  代入公式(10)中,式中  $v_{ij}$  为测量电压值,由试验获得; $U_{ij}(\mathbf{l}^{(k)})$  为假设电导率分布为  $(1, 1, \dots, \frac{\sigma_f}{\sigma_c}, \dots, 1)^T$  时的边界电压值,可通过正运算分析得到,由公式(10)可得到优化后的被测对象电导率分布  $\mathbf{X}_k = \sigma(k)_c \mathbf{l}^{(k)}$ ,显然,  $\mathbf{X}_k$  考虑了第一次成像的结果,也引入了先验信息,相比均匀分布  $\mathbf{X}_1$  更接近于真实电导率分布,将此电导率分布作为初值代入公式(6),计算后可得到更接近于真实值的电导率分布  $\mathbf{Y}_k$ ,按照此方法对第  $k$  次初始电导率分布  $\mathbf{X}_k$  施加约束,以此类推,至所有缺陷都被定位后停止迭代。

需要指出的是,如果测量电压不含噪音,是理想的数据源时,由于有严格的数学推演,采用文中方法可基本消除伪影,获得数学上最优,并与实际相符的反运算结果。该算法原理也适用于多目标成像,如试件中含有多种缺陷(如孔洞、裂缝或其他异物等),  $\sigma_f$  即该缺陷的测量电导率值,将  $\frac{\sigma_f}{\sigma_c}$  代入要调整的先验向量  $\mathbf{l}^{(k)}$ ,即可获得满意的成像结果。此外,作为先验信息的混凝土和缺陷的电导率值并不要求精确,只需取其近似的测量值,能够反映出两者之间的差异程度即可获得较好的成像结果,因为在该算法中,其电导率值被用来调整迭代过程中的初始值,即  $X$ ,且每次调整均需满足公式(9)以及迭代公式(7),所以,调整后的初值均比均匀分布的预估初值更加接近真实解。

为对比施加约束前后重构图像性能指标,文中拟采用相对误差及相关系数进行量化评价。研究中混凝土基体电导率以实测值作为先验条件,所以,在图像指标评定中,试件真实电导率可假设为缺陷位置电导率为  $0 \text{ ms/cm}$ ,其余部分为均匀基体,电导率为实测值。因实验中试件采用的是细集料,均匀性较高,所以假设的真实电导率分布具有参考价值。

相对误差:

$$R_E = \frac{\|x^* - x\|}{\|x^*\|_2}, \quad (11)$$

相关系数:

$$C_C = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})(x_i^* - \bar{x}^*)}{\|x_i - \bar{x}\|_2 \|x_i^* - \bar{x}^*\|_2}, \quad (12)$$

式中:  $x$  为电导率分布测试结果;  $x^*$  为与测试结果对应的真实电导率分布(假设值);“ $-$ ”符号表示平均值。相对误差越小、相关系数越高则成像质量越好。

### 3 实验材料与方方法

实际混凝土检测中,由于模型误差、接触阻抗、测量误差是不可避免的,输入的测量电压一定含有噪音数据。为验证 NCRM 约束算法的可行性和实用性,文中采用预设孔洞的圆盘形水泥试件模拟混凝土缺陷。在重构算法迭代过程中,利用缺陷与混凝土电导率的比值作为先验条件,该缺陷为孔洞,其电导率趋近于  $0$ ,计算时直接采用  $\sigma_f = 0$  作为先验条件干预反运算的迭代过程,即可获得较为理想的重构图像。

#### 3.1 试样制作

水泥砂浆试件的材料为 P42.5 普通硅酸盐水泥和标准砂(粒径范围  $0.25 \sim 0.65 \text{ mm}$ , 密度  $2.59 \text{ g/cm}^3$ ),其中,水灰比为  $0.5$ 。实验中共有  $2$  组试件,如图 1 所示。第 1 组试件为圆盘形试件,直径  $10 \text{ cm}$ ,高  $2 \text{ cm}$ ,分别预设  $1$  个和  $2$  个直径为  $9 \text{ mm}$  的圆孔,用于模拟混凝土缺陷的电阻成像检测实验。第 2 组试件为方块形试件,尺寸为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ,用于检测混凝土电导率,为电阻成像检测试验提供先验信息。 $2$  组试件采用同种配比同时浇筑,在相同条件下养护。

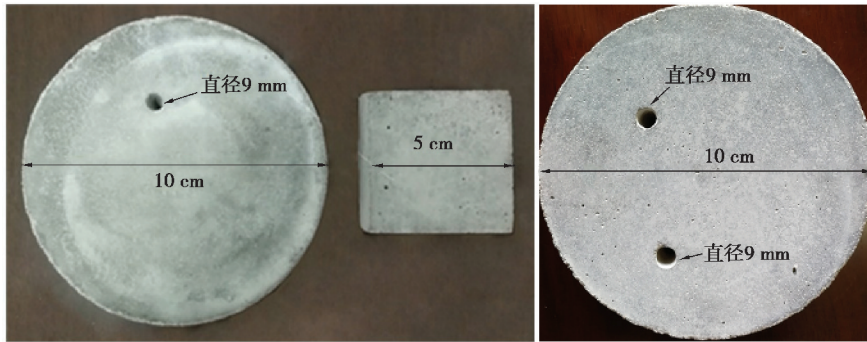


图 1 水泥砂浆试件

Fig. 1 Cement mortar specimen

### 3.2 成像硬件系统简介

电阻层析成像系统主要由电极组件、电流源及数据采集系统、数据处理系统组成。文中采用自行搭建的电阻成像系统,如图 2 所示。硬件部分包括:①计算机(包含数据处理和成像算法程序);②可编程控制转换开关;③电流源(美国吉时利 Model 6221,能够为各种元件和材料的交流特征分析提供 2 pA~100 mA 的交流电流源);④电压采集仪(安捷伦 34 970 A);⑤电极夹具。软件部分是基于 Matlab 环境下自编译的 NCRM 约束算法程序。工作原理为注入激励电流,用可编程控制转换开关实现相邻激励模式<sup>[13]</sup>,计算机通过接口将指令传达给控制开关和电压采集仪,控制开关执行指令从 16 个电极中选择激励电极对,同时电压采集仪测量其他电极对电压并将电压测量值返回计算机作为图像重建的原始数据。

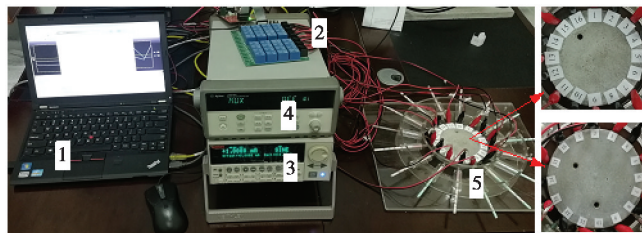


图 2 电阻成像系统

Fig. 2 Experimental setup of ERT system

因混凝土表面粗糙且坚硬,为保证电压测量精度,在电极接触方面尤其重要。考虑混凝土表面特性,自制电极夹具可有效减小电极之间的接触阻抗差。每个电极端部用导电泡沫(导电布包裹泡沫),导向杆采用激光钻孔精确定位(见图 2),通过弹簧施加压力,使导电泡沫与混凝土试件表面接触良好并受力均匀。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 试件电阻检测试验

NCRM 约束算法利用了缺陷电导率及混凝土电导率范围的先验信息,试验中的缺陷为孔洞,室内环境下空气电导率接近零,在计算中缺陷电导率选取为  $\sigma_f = 0$  ms/cm。混凝土电导率采用 LCR 精密电桥(Applent AT 2818)测得,如图 3 所示。

电阻层析成像中交流电频率需尽可能低,以避免由于连接到测量单元的电缆过长而产生的电极电感效应,另外,频率必须足够高,以避免电极极化效应。对于电阻成像来说,当相位角最小时,电阻抗虚部最小,对应的交流电频率最为合适。将试件从标准养护箱中取出置于实验室 12 h,实验室

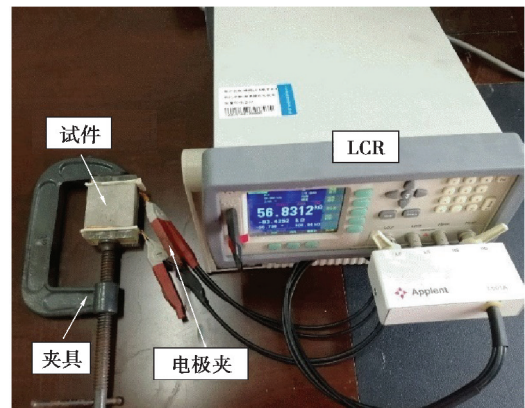


图 3 试件电阻抗测量

Fig. 3 Impedance measurement of the specimen

环境为 23 ℃,相对湿度 70%,此时,试件中含水率较高,电阻较干燥状态小,有利于验证 NCRM 约束算法的可行性。利用 LCR 仪器检测试件电阻抗时采用 1~300 kHz 的交流电压,检测结果如表 1 所示,根据相位角的大小,采用激励电流频率为 50 kHz。实验测得电阻抗为 4.082 kΩ,相位角 8.48°,电阻为 4.037 kΩ,根据试件尺寸计算其电导率为  $\sigma_c=0.123$  ms/cm。

表 1 试件电阻抗测量

Table 1 Impedance of cement mortar specimen

频率/kHz	电阻抗/kΩ	相位角/(°)
1	5.936	13.982
2	5.470	12.171
5	4.972	10.160
10	4.659	8.979
50	4.082	8.480
100	3.840	9.276
200	3.566	10.652
300	3.357	11.695

### 4.2 图像重建结果与分析

与电阻抗测量试件一致,试件从标准养护箱中拿出来后置于室内环境下 12 h 后开始试验,室内湿度 70%,温度 23 ℃,实验中电极布置方式如图 4(a)所示。重构成像在 Matlab 平台上进行,有限元模型如图 4 所示。单元数量 256 个,节点数 145,16 个电极均匀分布在试件边缘。

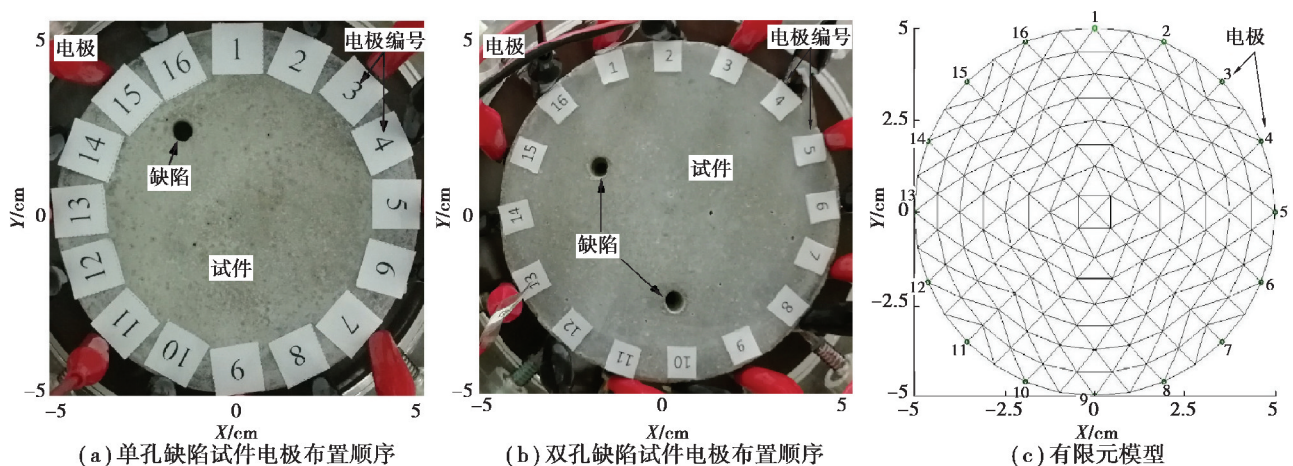


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

实验采用直径为 10 cm 的混凝土试件,设置了 1 个直径为 9 mm 的空心孔来模拟单个缺陷(见图 4(a)),设置 2 个直径为 9 mm 的空心孔来模拟多个缺陷(见图 4(b)),将前面测得的混凝土试件电导率(0.123 ms/cm)作为先验信息,得到缺陷与混凝土机体的电导率比值  $\frac{\sigma_f}{\sigma_c}$ 。实验采用电流相邻激励模式,电流源提供 10 mA,50 kHz 的正弦交流电源,通过转换开关在 16 电极上进行切换,每次切换过程中通过数据采集模块得到 16 个电压数据,整个数据采集可获得  $16 \times 16 = 256$  个电压数据,扣除无效电压数据(即在每次电流注入电极位置采集的 3 个电压含有较大的接触阻抗,误差较大,视为无效电压不进行运算),由于对称性,有效电压值为  $16 \times 13 / 2 = 104$  个,其中,最大电压值为 8.05 V,最小电压值为 0.06 V。将测量结果代入初值计算式(9),得到第 1 个试探值,  $\sigma_c^{(1)} = 0.116$  ms/cm,与测量得到的电导率 0.123 ms/cm 相差较小,第 1 次迭代假设试件的

电阻率全范围均匀分布,第 1 次迭代的初值采用实际测量值  $0.123 \text{ ms/cm}$ ,当然也可以采用约束公式的计算值。通过第 1 次计算后的结果  $Y_1$  可以获得重建图像(见图 5(a)和图 5(b)所示),图像中颜色最深的位置与试件圆孔位置大致相同,按照 NCRM 算法,选取  $Y_1$  结果的最小值以及所对应的单位编号,将已知的约束条件将计算结果  $Y_1$  代入公式(10)进行重新计算,这里的已知约束条件包括:混凝土的电导率、孔洞的电导率(假设为 0)以及孔洞和混凝土的锐利边界关系。得到  $X_2(1,1,1,0, \dots, 1,1,1)$ ,这里“0”所在的位置即为  $Y_1$  结果最小值所在位置(即对应单元编号)。将  $X_2$  代入程序计算得到  $Y_2$ ,如图 5(c)和图 5(d)所示。根据  $Y_2$  的成像结果可以看出伪影明显减少,缺陷的位置也更加明确,计算结果  $Y_2$  中仍然有比基体数值明显大的,但考虑到实验试件中缺陷实际大小与划分的有限元模型单元不能完全匹配重合,所以,实验中只进行了 2 步迭代。若需进一步约束迭代计算,此时再设置  $X_3$  的列向量  $(1,1,1,0, \dots, 0, \dots, 1,1,1)$ ,即第 1 次试探得到的单元位置保持不变,第 2 次找到的单位位置赋值为 0,得到  $X_3$ ,计算结果  $Y_3$ 。

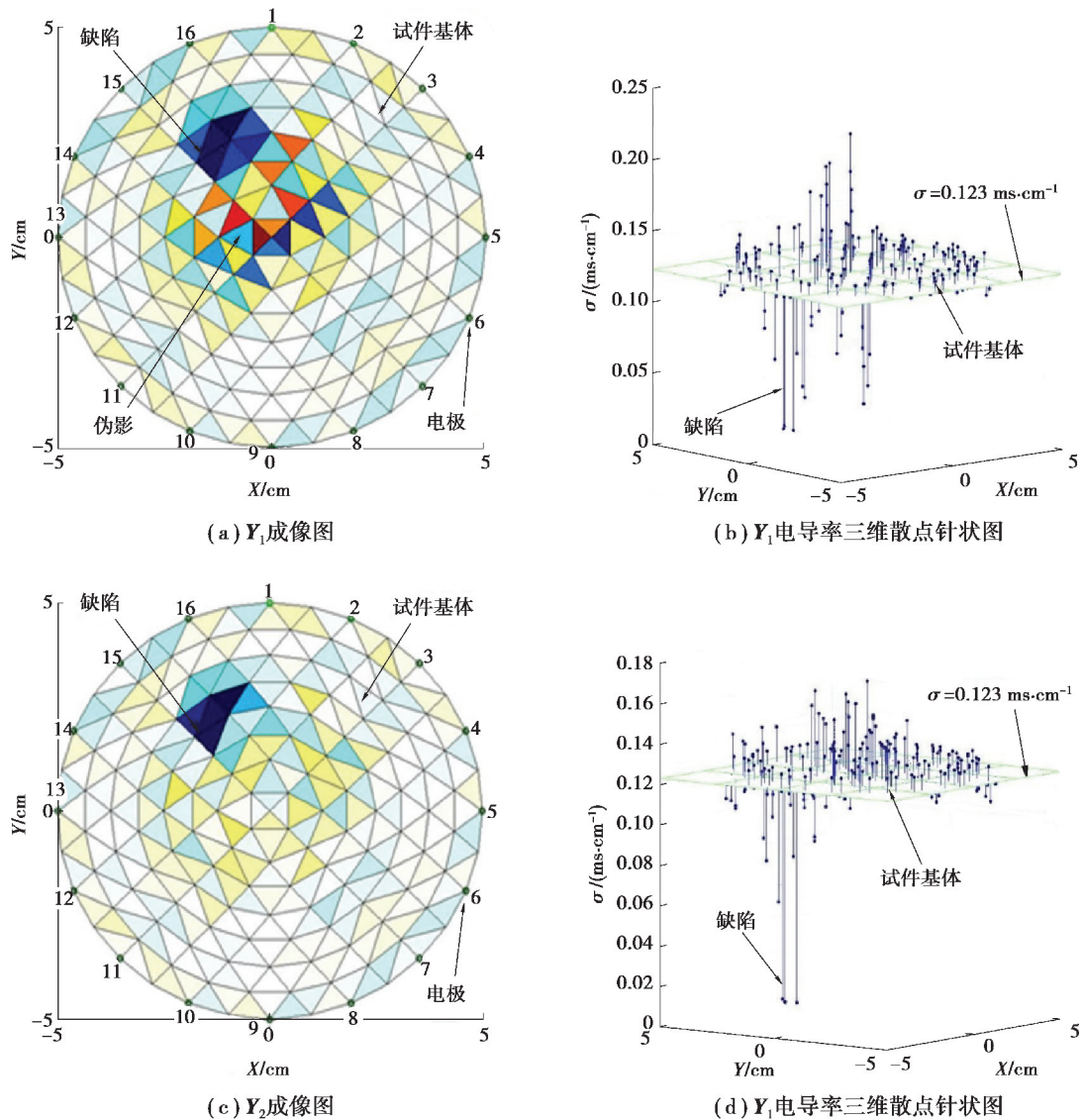


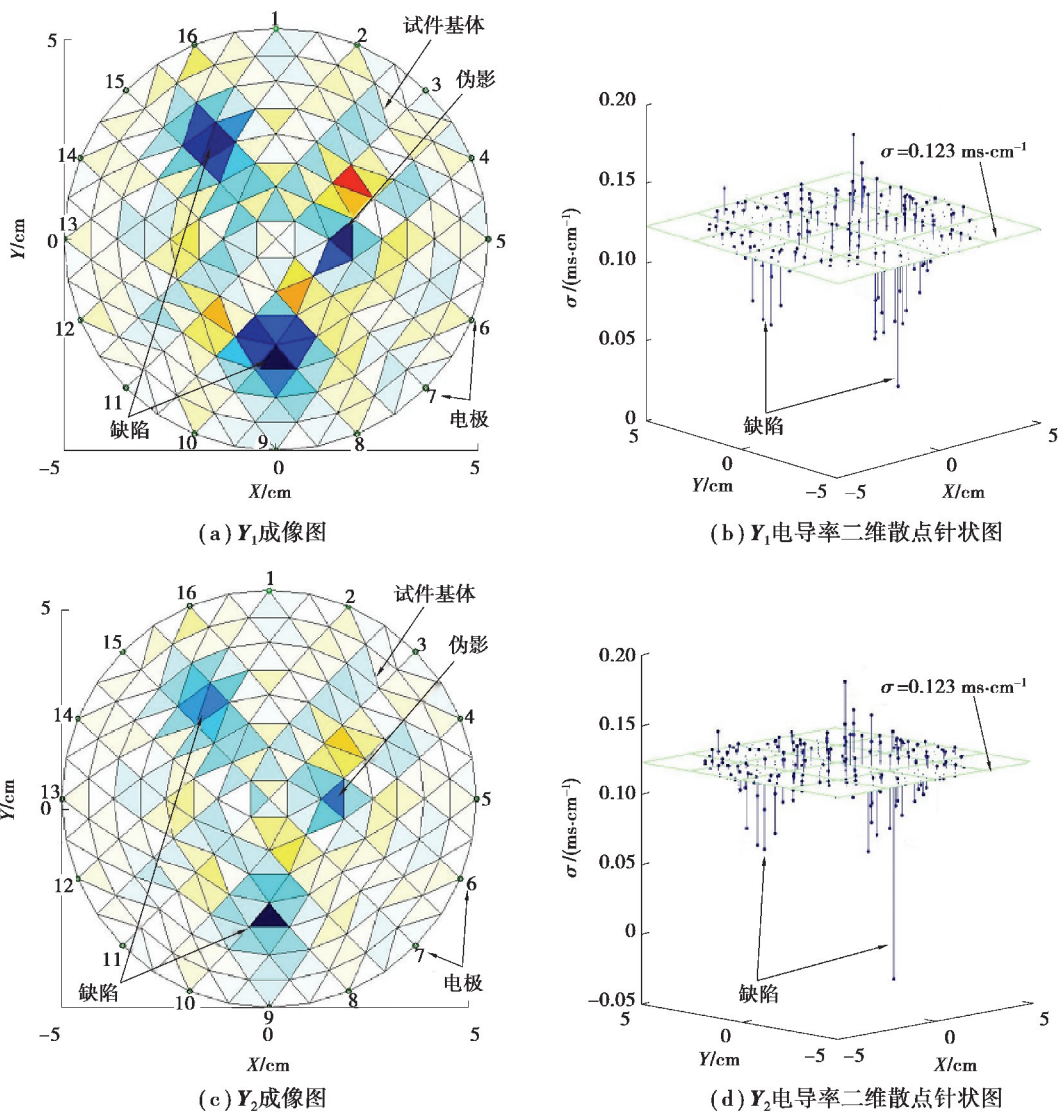
图 5 NCRM 算法计算结果(单孔缺陷)

Fig. 5 The result of experimental elements' conductivity by NCRM (one flaw)

图 5 为 NCRM 算法进行试样缺陷检测的 2 次计算结果  $Y_1$  和  $Y_2$  的成像图和电导率散点图。图 5(a)和图 5(b)为  $Y_1$  的结果,图 5(c)和图 5(d)为  $Y_2$  的结果。当采用均匀电导率分布为初值计算时, $Y_1$  成像图有较多的伪影,但可以准确定位缺陷的中心位置,由对应的图 5(b)针状图可以看出,反运算后电导率的分布呈阶梯状逐渐变化,虽可以定位缺陷位置,但无法分辨缺陷与基体的边界,也就无法判断缺陷的大小程度、分布范

围;当对初值  $X_1$  进行约束一次后,计算结果  $Y_2$  成像图明显减少了伪影,显示的缺陷位置集中分布在实际孔洞处,对应针状图(图 5(d))可以看出,基体与缺陷的电导率呈大致的二值性,梯度渐变的趋势减弱,反映在成像图(见图 5(c))上即出现了更符合真实情况的较为锐利的边界过渡。对于单目标缺陷检测,仅迭代 2 次即可获得较为满意的结果。

图 6 为 NCRM 算法进行试样缺陷检测的 4 次计算结果  $Y_1, Y_2, Y_3$  及  $Y_4$  的成像图和电导率散点图。图 6(a)、图 6(c)、图 6(e)、图 6(g)为电导率重构图像,图 6(b)、图 6(d)、图 6(f)、图 6(h)为电导率二维散点图。当采用均匀电导率分布为初值计算时, $Y_1$  成像图有较多的伪影,如图 6(a)所示,但可以准确定位缺陷的中心位置,由对应的图 6(a)针状图可以看出,逆运算后电导率的分布呈阶梯状逐渐变化,虽可以定位缺陷位置,但无法分辨缺陷与基体的边界,也就无法判断缺陷的大小程度、分布范围;对初值  $X$  依次进行 3 次约束后,可以看到,计算结果  $Y_2, Y_3$  及  $Y_4$  成像图的伪影成递减状态,显示的缺陷位置集中分布在实际孔洞处,虽然重构得到的缺陷中心与实际有一定的偏差,但是相对于不加约束前的重构图像,成像质量有了明显的改善。同样,从对应图 6(d)、图 6(f)、图 6(h)可以看出,基体与缺陷的电导率呈大致的二值性,梯度渐变的趋势减弱,反映在成像图上即出现了更符合真实情况的较为锐利的边界过渡。对于 2 个目标缺陷检测,经过 3 次迭代可获得较为满意的结果。





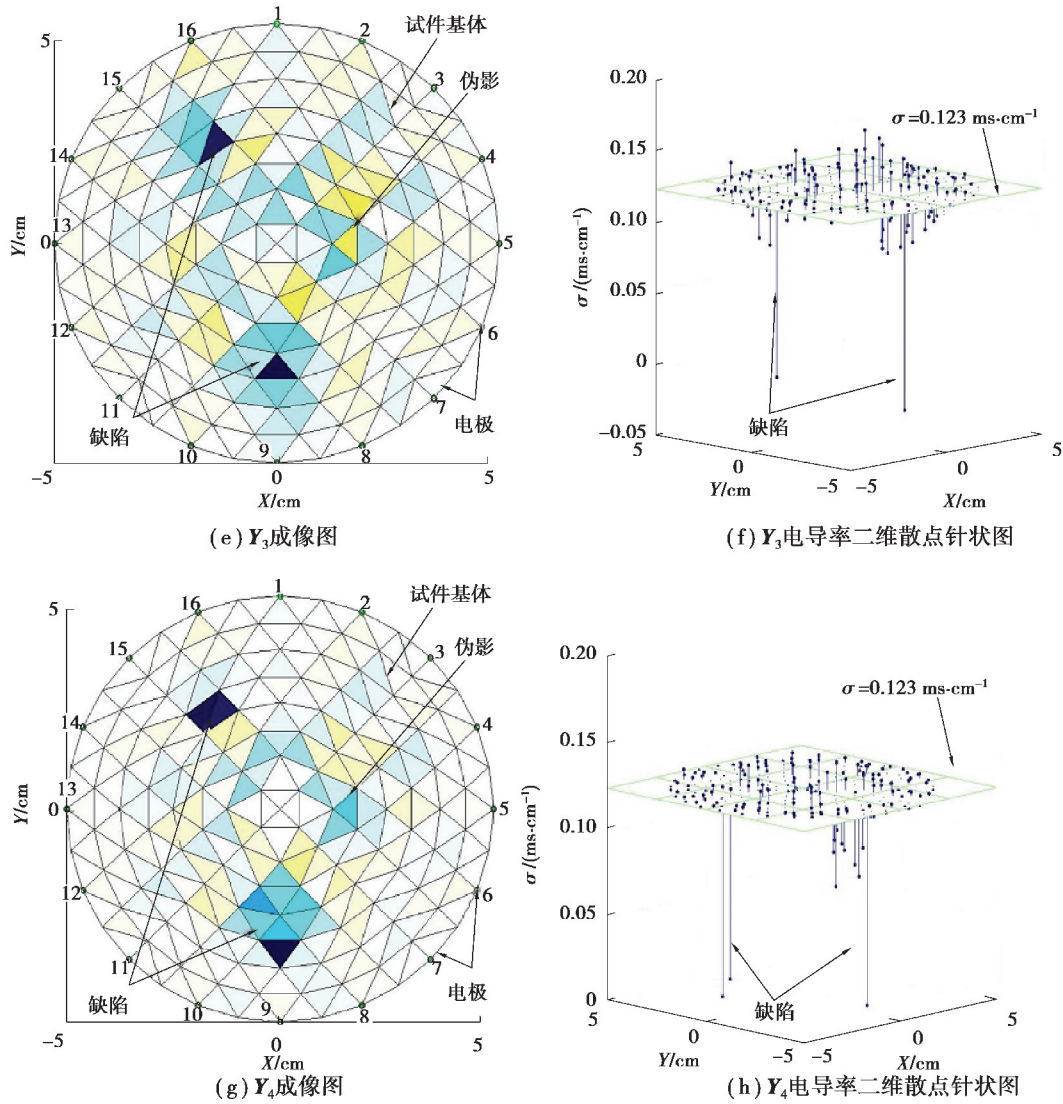


图 6 NCRM 算法计算结果(两孔缺陷)

Fig. 6 The result of experimental elements' conductivity by NCRM(two flaws)

### 4.3 图像评价指标

按照式(11)和式(12)分别计算 2 组实验每次迭代计算后的相对误差和相关系数,结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 重构图像评价指标(单孔)

Table 2 Quality evaluation parameters for reconstructed image (one flaw)

重构结果	$R_E/\%$	$C_C$
$Y_1$	22.01	0.417
$Y_2$	16.14	0.624

表 3 重构图像评价指标(两孔)

Table 3 Quality evaluation parameters for reconstructed image (two flaws)

重构结果	$R_E/\%$	$C_C$
$Y_1$	34.80	0.323
$Y_2$	26.14	0.423
$Y_3$	13.29	0.572
$Y_4$	7.43	0.821

由表 2 和表 3 可以看出,施加约束后,电导率分布重构图像的相对误差明显减小,单孔缺陷施加 1 次约束就得到了较好的成像结果。两孔缺陷在施加 3 次约束后,相对误差的减小较为显著,图像相关系数也明显提高,说明 NCRM 约束方法可以用于多目标缺陷的检测。通过实验,验证了文中提出的 NCRM 约束算法相对传统算法能够更好地进行混凝土试件缺陷检测。计算结果仍含有部分伪影,主要原因有:

- 1) 原始测量数据无法完全消除噪音,因为测量误差及接触阻抗在各电极间的差异客观存在;
- 2) 数值建模采用三角形单元,单元划分是任意的,不能事先考虑缺陷的位置和范围,并且有限元分析中

假设同一单元内的电导率是常数,不可避免地出现某些单元同时跨越了实际被测对象的基体和缺陷,而这些单元的电导率应该同时包含两者信息,这些系统误差也会影响成像精度;

3)逆运算并不是单元越密效果越好,对于16电极系统,独立有效的测量数据为104个,通过这些独立测量数据反演模型中各个单元的电导率本身就是一个欠定问题,单元数越大,问题欠定性越强,结果越不可控。

因此,NCRM算法增加的约束条件即为降低反问题病态性,相当于增加了一些有效数据给逆运算系统。

## 5 结 论

对于混凝土检测来说,由于ERT传统算法偏重于解决稳定性问题,不能很好地反映机体与缺陷之间锐利的边界,使得重建图像与真实情况有较大差别。NCRM算法利用先验信息对ERT反问题进行优化,重建结果表明该方法是有效的,可以降低伪影,提高目标位置的定位精度,迭代次数少,计算速度快。

该算法增加了约束条件来干预反演过程,需要事先获知被测对象及缺陷的电导率范围,且只适用于缺陷与基体间有较明显的电导率突变现象的情况。因此,文中NCRM算法用于混凝土孔洞、裂缝的ERT检测效果较好。对于混凝土渗水检测,因其内部电导率在干湿界面处是渐变的,与约束条件不符,故不能用此算法求解。

### 参考文献:

- [1] 王满丰,刘福生. 超声法检测混凝土缺陷技术的发展概况[J]. 黑龙江交通科技, 2008, 31(7): 70-70.  
WANG Manfeng, LIU Fusheng. Development of ultrasonic testing of concrete defects[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2008, 31(7): 70-70. (in Chinese)
- [2] Molyneux T C K, Millard S G, Bungey J H, et al. Radar assessment of structural concrete using neural networks [J]. Ndt& E International, 1995, 28(5): 281-288.
- [3] 黄莉. 基于红外热像的碳纤维混凝土损伤分析与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.  
HUANG Li. Research on damage of carbon fiber reinforced concrete based on infrared thermography[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [4] Daily W, Ramirez A, Binley A, et al. Electrical resistance tomography[J]. The Leading Edge, 2004, 23(5): 409-512.
- [5] Zhou X Y, Bhat P, Ouyang H, et al. Localization of cracks in cementitious materials under uniaxial tension with electrical resistance tomography[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 45-55.
- [6] Borcea L. Electrical impedance tomography[J]. Inverse Problems, 2002, 18: 99-136.
- [7] 陈晓艳, 张静. 采用阈值修正法改善电阻抗图像质量[J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(4): 481-486.  
CHEN Xiaoyan, ZHANG Jing. Using threshold correction method to improve the image quality of EIT[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2011, 30(4): 481-486. (in Chinese)
- [8] 董峰, 赵佳, 许燕斌, 等. 用于电阻层析成像的快速自适应硬阈值迭代算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(4): 305-310.  
DONG Feng, ZHAO Jia, XU Yanbin, et al. A fast adaptive iterative hard threshold algorithm for electrical resistance tomography[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(4): 305-310. (in Chinese)
- [9] 肖理庆. 一种改进牛顿-拉夫逊 ERT 绝对图像重建算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(8): 734-741.  
XIAO Liqing. A modified newton-raphson absolute image reconstruction algorithm for ERT [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(8): 734-741. (in Chinese)
- [10] Cheney M, Isaacson D, Newell J C, et al. NOSER: An algorithm for solving the inverse conductivity problem [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 1990, 2(2): 66-75.
- [11] 徐桂芝, 李颖. 生物医学电阻抗成像技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
XU Guizhi, LI Ying. Electrical impedance tomography in biomedical engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [12] 罗辞勇. 基于快速牛顿一步误差重构的电阻抗成像算法和实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
LUO Ciyong. Algorithm of electrical impedance tomography and experiment research based on fast newton's one-step error reconstructor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [13] Heikkinen L M, Vauhkonen M, Savolainen T, et al. Modelling of internal structures and electrodes in electrical process tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(8): 1012-1019.