

## 撤稿声明

撤稿文章名: 单目标电阻抗成像的定性分析

作者: 王楠, 惠小强

\* 通讯作者: 邮箱: wnan0216@126.com

期刊名: 应用物理 (APP)

年份: 2016

卷数: 6

期数: 5

页码 (从X页到X页): 106-113

DOI (to PDF): <http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.65015>

文章ID: 1270228

文章页面: <http://www.hanspub.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=175>

32

撤稿日期: 2016-10-24

### 撤稿原因 (可多选):

- 所有作者
- 部分作者:
- 编辑收到通知来自于
- 出版商
- 科研机构:
- 读者:
- 其他:
- 撤稿生效日期: 2016-9-8

### 撤稿类型 (可多选):

- 结果不实
- 实验错误
- 数据不一致
- 分析错误
- 内容有失偏颇
- 其他:
- 结果不可再得
- 未揭示可能会影响理解与结论的主要利益冲突
- 不符合道德
- 欺诈
- 编造数据
- 虚假出版
- 其他:
- 抄袭
- 自我抄袭
- 重复抄袭
- 重复发表 \*
- 侵权
- 其他法律相关:
- 编辑错误
- 操作错误
- 无效评审
- 决策错误
- 其他:
- 其他原因:

### 出版结果 (只可单选)

- 仍然有效.
- 完全无效.

### 作者行为 失误(只可单选):

- 诚信问题
- 学术不端
- 无 (不适用此条, 如编辑错误)

\* 重复发表: "出版或试图出版同一篇文章于不同期刊."

**历史**

作者回应:

是, 日期: yyyy-mm-dd

否

信息改正:

是, 日期: yyyy-mm-dd

否

**说明:**

“单目标电阻抗成像的定性分析”一文刊登在 2016 年 5 月出版的《应用物理》2016 年第 6 卷第 5 期第 106-113 页上。因作者疏忽, 文章部分内容有待进一步确认。根据国际出版流程, 编委会现决定撤除此稿件, 并对此撤稿带来的不便致以歉意。

# Qualitative Analysis of Single Target's Electrical Resistance Tomography

Nan Wang<sup>1</sup>, Xiaoqiang Xi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Institute of Internet of Things and IT-Based Industrialization, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an Shaanxi

Email: wnan0216@126.com

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2016; accepted: May 9<sup>th</sup>, 2016; published: May 13<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

For finding an easy way to obtain the targets information in electrical resistance tomography (EIT) a closed experimental system based on Comsol Multiphysics is designed in which 16 electrodes placed uniformly around a big thin disc with one small target hole. Two nearest electrodes are used as input and output current; the other electrodes are used to measure the boundary voltage. The analyzed results show that the hole's position and radius have unique and clear relation with the boundary voltage. One can use the boundary voltage information to infer the targets information quickly, and this method is effective to judge "yes or no" cases of the target.

## Keywords

Single Objective Localization, Electrical Impedance Tomography, Comsol Multiphysics

# 单目标电阻抗成像的定性分析

王楠<sup>1</sup>, 惠小强<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安邮电大学理学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>西安邮电大学物联网与两化融合研究院, 陕西 西安

Email: wnan0216@126.com

收稿日期: 2016年4月25日; 录用日期: 2016年5月9日; 发布日期: 2016年5月13日

文章引用: 王楠, 惠小强. 单目标电阻抗成像的定性分析[J]. 应用物理, 2016, 6(5): 106-113.

<http://dx.doi.org/10.12677/app.2016.65015>

## 摘要

为了研究一种更简便的方法去获得电阻抗成像中的目标信息, 本文以Comsol Multiphysics 4.3a为工具设计了一个封闭的模拟实验系统, 16个电极均匀分布于内含目标小圆的大圆盘周围, 两个相邻电极作为电流输入和输出端, 其余电极用于测边界电压值, 分析了边界电压和目标小圆圆心的位置及半径之间的对应规律, 并给出了实现这一方法的初步程序流程图。结果表明, 通过边界电压信息可以快速推测目标信息, 这种方法对探测圆盘中目标的有无非常有效。

## 关键词

单目标定位, 电阻抗成像, COMSOL

## 1. 引言

电磁学在现实生活中应用非常广泛, 麦克斯韦方程组完美地呈现了电磁互相转化的规律, 电阻抗成像就是其实际应用之一[1]。电阻抗成像是一种可以对探测目标内部阻抗分布进行成像的无损技术, 与 X 射线, 核磁共振, 计算机断层技术相比其具有无可比拟的优点, 人体阻抗的变化可以直接反映人体生理与病理状况[2], 因此其具有重要的研究意义[3]-[5]。通过在被测物表面设置一定的电极, 测各电极的电压与电流, 我们可以利用不同的重构算法来重构被测物内部电阻率分布[6]-[8]。根据成像目标不同, 电阻抗成像分为动态电阻抗成像和静态电阻抗成像[9] [10], 且越高的成像分辨率就需要越复杂的重构算法同时我们投入的时间也更多。在某些领域, 分辨率并不是主要考虑因素, 我们只需判断目标有无或目标的大概位置, 所以只要能找到目标大小位置和边界电压的对应规律就可以解决问题。然而, 这样的实验不太好完成, 在固体内部改变目标区域的位置和大小太难了。COMSOL 仿真软件恰好可以帮我们解决实验难题。

COMSOL 以有限元方法为基础, 通过求解偏微分方程或偏微分方程组来实现对真实物理现象的仿真的软件[11] [12]。目前已广泛地应用于医学, 生物科学、结构力学、波等领域。本文主要以 Comsol Multiphysics 4.3a 为工具研究了目标小圆的变量( $\rho$ ,  $\theta$ ,  $r$ )与边界电压之间的对应关系。

本文所讨论的方法可以应用于解剖学, 判断组织中肿瘤是良性或恶性的从而进行靶向治疗及时探测组织或器官的病理变化, 这对于疾病预防及普查非常有意义。除此之外, 此方法还可以用于检测墙体管道漏水情况等等。

## 2. 系统描述

### 2.1. 电阻抗成像

电阻抗成像的基本原理是: 以被测物体电阻抗变化量为成像目标, 在电流输入固定的模式下, 不同的电阻率分布对应不同的边界电压分布, 通过向该物注入驱动电流, 测量边界电位, 借助测量得到的边界电压及特定的算法来重建被测物体内部的电阻率分布及其变化的图像。

电磁学是电阻抗成像的基础, 为了仿真电阻抗成像系统, 我们对电场做一些假设: 1) 电磁场强度变化缓慢。2) 为了使用欧姆定律及电压与电场强度之间的关系式, 所测场域内只能存在一个激励电源。3) 所测场域内电导率必须是线性及各向同性的。4) 其必须为一个稳定的电场。有了以上假设我们可以分析场内任意一点。当对一个导体施加激励电流时, 导体内部会产生电场和磁场, 场内任意一点都满足

麦克斯韦方程组:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0, \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho.\end{aligned}\quad (1)$$

$\omega$  是电流角频率, 场内任意一点  $u(x, y)$  都满足 Laplace 方程:

$$\nabla \cdot [(\sigma(x, y) + j\omega\varepsilon(x, y))\nabla u] = 0 \quad (2)$$

由于电流激励源的频率很低, 我们可以忽略介电常数带来的影响:

$$\nabla \cdot (\sigma(x, y) \cdot \nabla u) = 0 \quad (3)$$

当对目标物体体表施加电流源时, 其体表就会有电介质电流密度。其 Newman 边界条件为:

$$[\sigma(x, y)] \frac{\partial u}{\partial n} = -\vec{J} \quad (4)$$

假设接触电阻为  $R$ , 目标区域内电导率分布, 电位分布均满足 Laplace 方程, 其边界条件满足:

$$V = u + R \cdot (\sigma(x, y)) \frac{\partial u}{\partial n} \quad (5)$$

$$I = \int_E (\sigma(x, y)) \cdot \frac{\partial u}{\partial n} \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

## 2.2. 模型建立

本文系统原型包括一个电导率固定半径为  $R$  ( $R = 10 \text{ cm}$ ) 的大薄圆盘, 在其内部挖去一个小圆并补上不同电导率的介质。在大圆盘边界上均匀地添加 16 个电极, 小圆的变量为  $(\rho, \theta, r)$ 。相邻两电极分别为电流输入输出端。大圆盘的电导率为  $1 \text{ S/M}$ , 被挖小圆的电导率为  $0.01 \text{ S/M}$ , 输入电流为  $0.001 \text{ A}$ 。在 COMSOL 软件 AC/DC, 二维模块下设置上文所提到的变量。变量设置完毕后, 在 Comsol 后处理模式下可以得到 16 个电极相应的电势及其分布的模拟效果图(图 1)。

## 3. 目标小圆各变量与电势的关系

### 3.1. 位置分析

#### 3.1.1. $\theta$ 与电势的关系( $\theta = n\pi/16, n = 1, 2, \dots, 32$ )

为了获得目标小圆变量  $\theta$  与电势的关系, 测量了 V3, V4, ..., V16 及其相邻电势差在  $\rho = 1, 2, 3, 5; r = 1, 2, 3, 4, 5$  和  $\theta = n\pi/32$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, 32$ ) 的数值, 并对不同的变量做出了相应的二维图, 分析所得二维图有以下结论。

1)  $\rho, r$  分别为变量时可以得到相同的结论即  $n$  取不同值时可以得到不同形状及不同极值点的电势差曲线图, 当  $\rho = 5, n = 1, r = 1, 2, 3, 4, 5$  时有图 2 ( $\rho = 1, 2, 3, 4, 5, n = 1, r = 5$  时可得类似图)。

由图 2 可知  $n = 1$  时电势差曲线图呈三角形且在 V8-V9 处取得极小值。 $n$  取不同值时由所得二维图有曲线图形及极值所处位置与  $n$  值一一对应, 所以根据曲线图形及极值所在位置可以判断目标小圆  $\theta$  值, 判断表见表 1。

2) 当  $\rho, \theta$  为定量  $r$  为变量或  $r, \theta$  为定量  $\rho$  为变量时由电势差绝对变化量可以判断目标小圆大概位置, 本小节取  $\rho, \theta$  为定量  $r$  为变量为代表说明。表 2 给出了  $(\rho, \theta)$  为  $(5, \pi/4)$  不同  $r$  时相邻电势差取值及其绝对变化量。

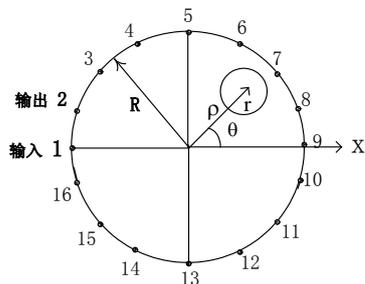


Figure 1. Figure of the model  
图 1. 模型示意图

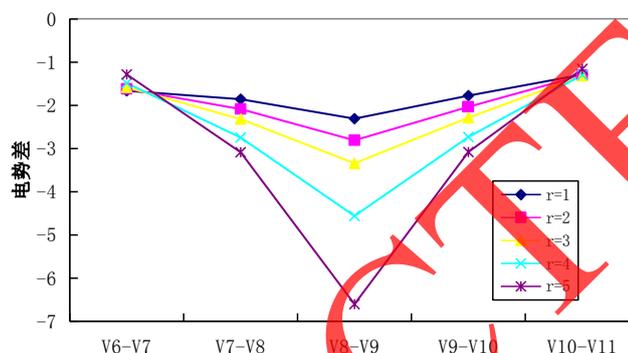


Figure 2. Figure of voltage difference value curves when  $n$  is 1  
图 2.  $n$  为 1 时电势差曲线图

Table 1. Decision table for  $\theta$  of the target circle ( $\theta = n\pi/16$ )  
表 1. 目标小圆  $\theta$  值判断表( $\theta = n\pi/16$ )

$n$	奇偶	波动形状	极值
(0, 10)	奇数	三角形	$V(n+7)-V(n+8)$
(0, 10)	偶数	梯形	$V(n+7)-V(n+8), V(n+8)-V(n+9)$
(10, 14)		左侧扩散程度大	$V(n+7)-V(n+8)$
(15, 13)		右侧扩散程度大	$V(n+7)-V(n+8)$
(-12, -1)	奇数	三角形	$V(n+7)-V(n+8)$
(-12, -1)	偶数	梯形	$V(n+7)-V(n+8), V(n+8)-V(n+9)$

Table 2. Voltage difference and its absolute values when  $r$  is different ( $\theta = n\pi/16$ )  
表 2. 不同  $r$  时电势差及其绝对变化量

$r$ ( $\rho = 5, \theta = \pi/4$ )	V4-V5	V7-V8	V10-V11	V13-V14
1	-4.097	-1.623	-1.253	-2.476
2	-3.920	-2.166	-1.192	-2.405
3	-3.593	-3.816	-1.024	-2.268
4	-3.033	-4.827	-0.923	-2.034
绝对变化量	1.064	3.204	0.330	0.442

如上表所示当目标小圆( $\rho = 5, \theta = \pi/4$ )半径增大时 V7-V8 的绝对变化值最大, 而此时目标小圆圆心恰好位于电极 7 附近, 即根据电势差绝对变化量可以推测目标小圆圆心位置, 这一结论对定性判断目标小圆位置具有重要意义。

3) 由相邻电势差二维曲线图得当电流加在 1, 2 两电极上时(V2-V3)-(V8-V9)与(V10-V11)-(V16-V1)所得结论相似, 除了极值点取值个数不同, 极值点附近近似对称, 且随着( $r, \rho$ )地增大曲线图的对称性越来越弱等结论完全相同。以下以 V4-V5 为研究对象进行说明。

图 3 分别为  $r$  为定量( $\rho, n$ )为变量所得当  $\rho$  为定量( $r, n$ )为变量可以得到同样的结论, 由于 V5-V6 曲线图关于极值近似对称但不完全对称如图 3 所示, 即 V5-V6 值与  $\theta$  值一一对应, 故只要知道了 V5-V6 值就可以确定  $\theta$  值, 又随着  $\rho, r$  的增大对称性越来越弱即其取值相近度越来越低, 故此方法更适用于  $\rho, r$  较大的情况。

### 3.1.2. $\rho$ 与电势的关系

为了获得  $\rho$  与电势差及电势的关系设( $\theta, r$ )为固定值令  $\rho = 1, 2, 3, 4, 5$  测量各电势差的值, 用所得数据画出了相应的二维图, 经过分析可得当( $\theta, r$ )为不同数值组合时可以得到相似的二维图及规律, 设( $\theta, r$ )为( $\pi/4, 1 \text{ cm}$ ),  $\rho = 1, 2, 3, 4, 5$  分析相邻电势差及各电极电势所得二维图有曲线在 V7-V8 与 V8-V9 之间有了交点, V6, V8 数据构成先增加后减小的曲线, 而其余电极电势构成的均近似为直线且 V7 所构成的曲线斜率最大。事实上该目标小圆( $\theta, r$ )为( $\pi/4, 1 \text{ cm}$ ), 即其位于电极 7 所在区域附近, 故根据以上结论我们首先可以大概判断目标小圆  $\theta$  值, 又当  $\rho$  取不同值时电势差图中的曲线段斜率不同如图 4 中当  $\rho$  取不同值时 V7-V8 与 V8-V9 之间线段斜率不同根据此结论我们可以大概判断目标小圆的  $\rho$  值如表 3 所示。

### 3.1.3. 多目标初步分析

将两目标小圆分别置于(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)象限测各电极电势, 用所得数据画出相应的二维图, 其结果如图 5 所示当两目标小圆位于不同象限时 V7, V8, V9, V10 所构成的曲线高度不同, 由此我们可以判断两目标小圆分别位于哪两个象限。

## 3.2. 大小分析

由于不同  $r$  情况下仅是电势差电势幅值不同,  $r$  对电势差电势均成正影响且其变化趋势完全一致如图 2~4 所示, 故仅研究 V1 与  $r$  的关系我们就可以判断出目标小圆大小。由上文结论我们可以得到( $\rho, \theta$ ), 当( $\rho, \theta$ )确定后我们可以得到电势与半径关系图, 图 6 为( $\rho, \theta$ )为(5 cm,  $\pi/4$ )时  $r$  与 V1 的关系图, 将图 6 曲线进行曲线拟合我们可以得到以下拟合关系式。由此关系式我们也可以确定目标小圆的半径(拟合度为 100%)。

$$y = 0.00001x^5 - 0.00021x^4 + 0.00178x^3 - 0.00109x^2 + 0.00847x + 174.5$$

### 3.3. 初步程序流程图(图 7)

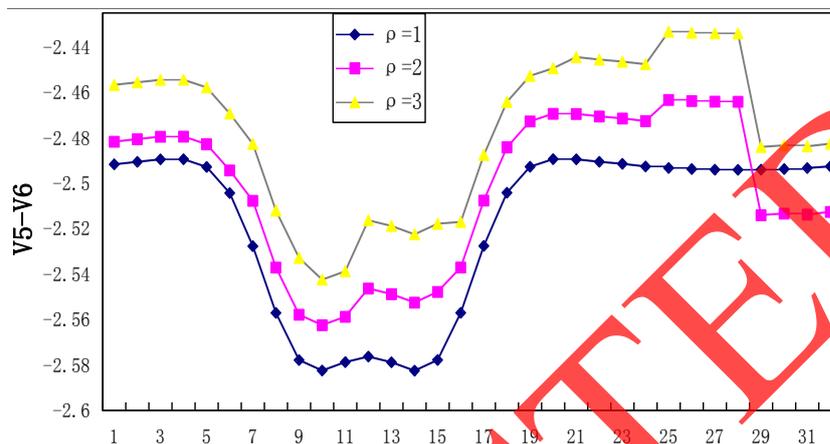
上文讨论了( $\rho, \theta, r$ )与电势及电势差的关系, 并由所得结论反推目标小圆的( $\rho, \theta, r$ )值从而判断目标小圆的位置。计算机具有速度快, 精度高, 存储容量大, 数据处理能力高等优点, 用计算机实现本文结论对快速确定目标小圆位置有着非常重要的意义。

## 4. 结论

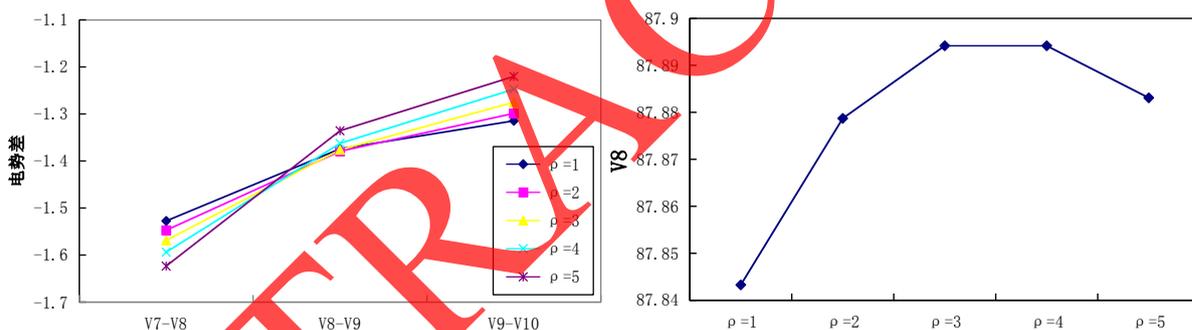
本文主要解决了封闭电阻抗成像中单目标的定位, 通过分析电势, 电势差与单目标小圆各变量之间关系, 找到了单目标小圆圆心的近似位置和半径与电势, 电势差之间的对应关系并给出了其初步程序流程图。实验结论表明, 由相邻电极电势差波动图形状及极点所处位置可以判断目标小圆极角, 由部分电势差所构成线段斜率可判断目标小圆极半径, 在得出目标小圆极角及极半径的前提下可以得到任意电极与目标小圆半径间的关系从而反推目标小圆半径大小。在实际情况中, 目标小圆变量有多种取法, 获得目标小圆位置及半径需要大量数据, 利用计算机运行速度快, 存储容量大的特点即可解决这一难题。

**Table 3.** The slope of the segments between V7-V8 and V8-V9  
**表 3.** V7-V8 与 V8-V9 之间线段斜率

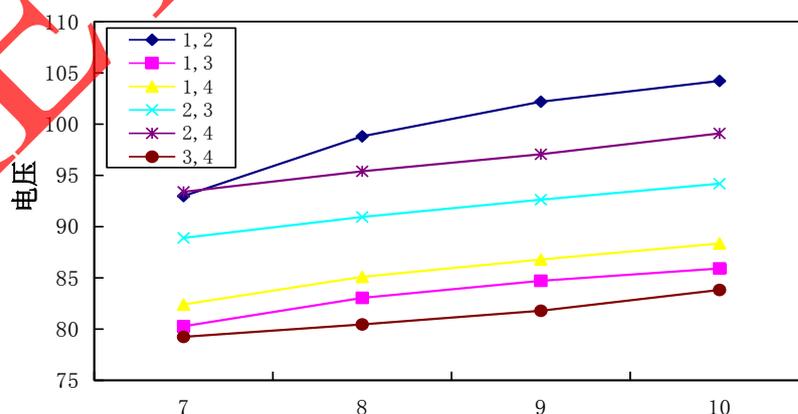
$\rho$	1	2	3	4	5
斜率	0.153	0.167	0.192	0.231	0.287



**Figure 3.** The relational figure of V5-V6 and  $\theta$  ( $\theta = n\pi/16, n = 1, 2, \dots, 32$ )  
**图 3.** V5-V6 与  $\theta$  关系图( $\theta = n\pi/16, n = 1, 2, \dots, 32$ )



**Figure 4.** Figure of the voltage difference and voltage values when  $\rho$  is different  
**图 4.** 不同  $\rho$  下电势差与电势变化图



**Figure 5.** The figure of voltage values when the two targets located in different quadrants  
**图 5.** 两个目标小圆分别位于不同象限的组合

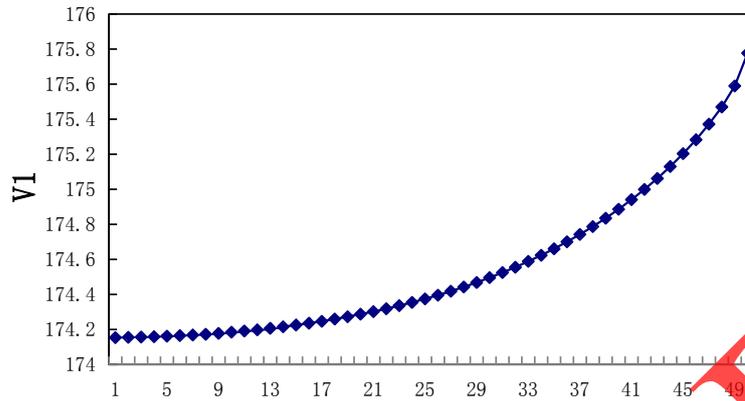


Figure 6. The relations between V1 and the radius of the target circle  
图 6. 目标小圆半径与 V1 的关系

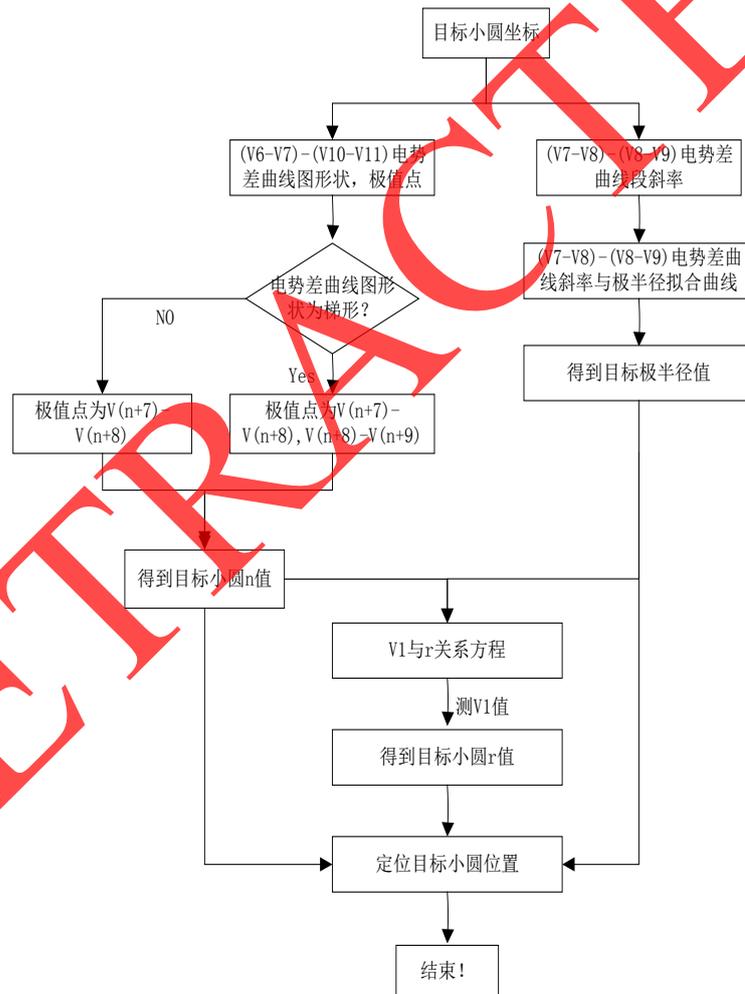


Figure 7. Computation program flow chart  
图 7. 计算程序流程图

此外, 本文的结果是在目标区域及背景区域规则且忽略边界效应的条件下得到的, 改变这一条件文中所提到的方法同样适用, 该方法对单目标定位的定性研究有重要的意义, 对解决医疗及建筑等领域的

一些实际问题有很大的帮助。

下一步工作: 1) 研究非均匀不规则背景及多目标情况下此方法的应用; 2) 用计算机程序实现该方法。

## 基金项目

国家自然科学基金(Grant Nos. 11275099, 11475135)。

## 参考文献 (References)

- [1] Maxwell, J.C. and Niven, W.D. (1890) *Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] 彭源. 医学电阻抗成像研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2004.
- [3] 徐管鑫. 电阻抗成像技术理论及应用研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [4] 吴小明. 脑组织电阻抗测量的基础研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 第四军医大学, 2001.
- [5] Edic, P.M., Saulnier, G.J., Cheney, M., Isaacson, D., Newell, J.C., Gisser, D. and Cook, R.D. (1993) Implementation of a Real-Time Electric Impedance Tomograph. *Proc. 15th Annu. Inr. Con. IEEE Eng. Med. Bid. Soc.*, San Diego, California, 84-85.
- [6] 侯雪. 基于 Comsol 的肺部电阻抗断层成像仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] 付峰, 董秀珍, 尤富生, 史学涛, 刘锐岗. 实时电阻抗断层成像系统中的一种动态成像算法[J]. *北京生物医学工程*, 2003, 22(2): 109-112.
- [8] Aristovich, K.Y., Packham, B.C., Koo, H., dos Santos, C.S., McEvoy, A. and Holder, D.S. (2015) Imaging Fast Electrical Activity in the Brain with Electrical Impedance Tomography. *Neuro Image*, **124**, 204-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.08.071>
- [9] 李冰. 三维电阻抗成像数值算法和技术基础研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [10] 王骞. 电阻抗成像算法的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2006.
- [11] Cheney, M., Isaacson, D., Newell, J.C., Simske, S. and Goble, J.C. (1990) NOSER: An Algorithm for Solving the Inverse Conductivity Problem. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, **2**, 66-75. <http://dx.doi.org/10.1002/ima.1856020203>
- [12] 王晖, 高建波, 骆剑平. 电阻抗成像技术[J]. *北京生物医学工程*, 2006, 25(2): 209-212.