

# 基于电阻抗断层成像的酸奶中异物检出方法研究

杨剑雄<sup>1</sup>, 崔猛<sup>1</sup>, 李星恕<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2. 陕西省农业装备工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 本文主要应用电阻抗断层成像技术检测酸奶中的异物, 并在异物大小、电流大小和电流频率这三个因素变化时观察其对重建图像的影响。搭建 16 电极数据采集系统, 采用相邻法激励测量模式获得成像数据, 并采用修正的牛顿-拉夫逊算法将数据进行图像重建, 再采用二值化对重建图像进行后处理, 最后定量分析比较成像结果坐标和面积与实际异物的偏差。实验结果表明: 本方法能检测出酸奶中的塑料异物, 但不能准确反映异物的位置和形状, 并且对异物大小比较敏感, 只能检测一定大小范围内的异物; 在直径 100 mm 的检测域中, 异物直径 25 mm 时检测效果最好, 电流大小在 15 mA 时检测效果较好, 电流频率在 30 kHz 时检测效果较好; 对重建图像二值化处理, 尽管这种处理方法会丢失原有重建图像的一些细节, 但是所得的图像更易观察, 便于对不同条件下的成像结果进行对比。

**关键词:** 食品安全; 酸奶; 电阻抗断层成像; 异物检测; 图像重建; 二值化处理

文章编号: 1673-9078(2014)8-157-162

## Foreign Body Detection in Yoghurt Using Electrical Impedance Tomography

YANG Jian-xiong<sup>1</sup>, CUI Meng<sup>1</sup>, LI Xing-shu<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In this study, electrical impedance tomography was used to detect a foreign body in yoghurt. It was found that variations in the size of the foreign body, applied current, and current frequency showed corresponding changes in the reconstructed image. A 16-electrode data acquisition system was established to obtain image data using an adjacent excitation/measurement scheme. The Modified Newton-Raphson algorithm was applied to reconstruct the image data, binarization was performed for post-processing of the reconstructed images, and a quantitative analysis was performed by comparing the deviations of both the coordinates and area of the images with those of the actual foreign body. The results showed that this method could detect plastic foreign objects within yoghurt, but could not determine the location and shape of the foreign body accurately. In addition, this method was sensitive to the size of the foreign body, but only within a certain range. Optimum detection was possible within a detecting region diameter of 100 mm, under the following conditions: 25 mm size of the foreign body, 15 mA current, and 30 kHz current frequency. Although some details of the original reconstructed image might be lost with this processing method, the image obtained allowed for easier observation and convenience in comparison of imaging results under different conditions.

**Key words:** food safety; yoghurt; electrical impedance tomography; foreign body detection; image reconstruction; binarization

食品安全问题关系到民生大计, 关系到国家经济健康发展和社会稳定<sup>[1]</sup>。食品中的异物是食品安全的重大威胁之一(如酸奶中吃出塑料异物), 占食品安

收稿日期: 2014-03-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研项目(201003063-07); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(Z109021106, Z109021303)

作者简介: 杨剑雄(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农业电气化及农产品无损检测

通讯作者: 李星恕(1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农业装备研制和农产品无损检测

全类投诉的比例最大。为确保食用安全, 必须对所有食品进行检测, 从而剔除食品中的异物。

我国目前奶制品主要是机械加工, 在加工中会接触到金属、玻璃、塑料等材料, 难免会在奶制商品中出现此类异物。目前根据食品中异物特点已经发展了相应的检测技术, 如红外线检测<sup>[2]</sup>、高光谱检测<sup>[3]</sup>、超声成像检测<sup>[4]</sup>和x射线技术检测<sup>[5]</sup>等。大型工厂在奶制品中应用较多的是超声成像和x射线技术, 但这些方法设备昂贵且需要专业知识, 所以检测成本较高, 许多小型工厂普遍使用开放式检测, 这种粗放式检测虽然

成本低廉,但异物检出率不高,且容易污染产品。因此,亟需一种价格低廉,方便操作的异物检出系统应用于奶制品中的异物检出。

电阻抗断层成像(EIT)是一种近二十年发展的新型图像重建技术<sup>[6]</sup>,通过电极在成像域边界加激励电流,测量分布电压信号,应用成像算法计算得到成像域的电阻抗图谱。这种成像方法具有无损,功能成像特点<sup>[7]</sup>,主要应用在生物医学领域<sup>[8]</sup>或作为监测物体电阻抗分布的传感器<sup>[9]</sup>。近几年来,电阻抗成像技术也逐渐应用于食品工业领域。美国奥克兰大学学者Mohadeseh和Brent将电阻抗成像技术应用于牛奶加工中奶罐的监测,分析牛奶中固形物和脂肪的含量<sup>[10-11]</sup>。印度学者Tushar研究了在不同的电流激励模式下鸡肉组织的成像<sup>[12]</sup>。目前国内对电阻抗成像技术在食品工业领域应用的研究鲜有报道。

EIT重建图像在计算上有很强的病态性<sup>[7]</sup>,很多因素影响重建图像的质量。本文基于自行搭建的实验平台,应用EIT技术进行酸奶中异物的检出成像,并在成像目标的大小,激励电流的大小和频率这三个条件不同时对重建图像质量的影响做一些探讨。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验系统

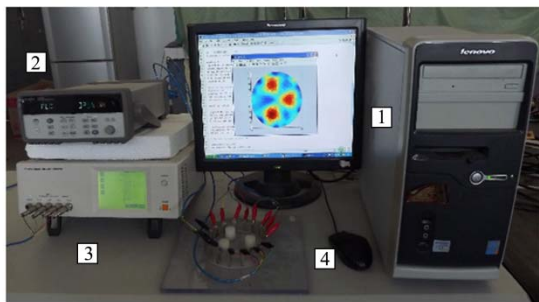


图1 电阻抗成像硬件系统

Fig.1 Experimental hardware system of EIT

电阻抗成像系统包括硬件系统和软件系统。硬件系统如图1所示,包括计算机1、高速开关2(34970A型,美国安捷伦公司)、阻抗测试仪3(3532-50型,日本日置公司)和自制实验容器4(均布16电极)。软件系统是基于matlab环境的修正的牛顿-拉夫逊(Modified Newton-Raphson,简称MNR)成像算法<sup>[13]</sup>,此算法是公认的理论较为完善、实际应用效果较好的迭代重建算法。

系统系统工作流程为:

- (1) 注入激励电流信号测量边界电压信号
- 计算机运行matlab指令,通过GPIB接口卡控制

高速开关的通断和LCR电桥产生激励电流信号,高速开关的通断,使LCR电桥产生的激励电流加在实验容器不同的电极上,LCR电桥测量其它电极对间电压值传送给计算机。本实验为16电极系统<sup>[13]</sup>,采用经典的相邻法测量模式<sup>[6]</sup>,在相邻电极通入激励电流,测量除激励电极外其他电极对间的电压差值,共有13个,再依次切换电流注入电极位置,共16次,一共测量208(13×16)个电压差值数据,这既是图像重建所需的电压数据。

### (2) MNR法图像重建

MNR法通过迭代改变电阻率分布以使目标函数达到最小,目标函数通常选为电压测量值与电压计算值之间残差的某种函数<sup>[13]</sup>。

设 $\rho$ 为电阻率分布矢量, $v_0$ 为目标表面电极位置的测量电位值矢量, $v(\rho)$ 为对应于电阻率分布目标表面电极位置的计算电位。

定义,目标函数为:

$$f(\sigma) = \frac{1}{2} \|v(\rho) - v_0\|_2^2 = \frac{1}{2} (v(\rho) - v_0)^T (v(\rho) - v_0) \quad (1)$$

使目标函数取得最小值,得到雅克布矩阵为<sup>[13]</sup>:

$$[J(\rho)]_{ij} = \frac{\partial v_i(\rho)}{\partial \rho_j} \quad (2)$$

利用Newton法得到 $\rho$ 第k+1次迭代值为:

$$\rho^{(k+1)} = \rho^k + \Delta\rho^k \quad (3)$$

其中:

$$\Delta\rho^k = -[J(\rho^k)]^T J(\rho^k)^{-1} [J(\rho^k)]^T [v(\rho^k) - v_0]$$

MNR迭代将在迭代次数k达到预订次数时或一定收敛条件时停止。本文设定迭代次数K0为迭代终止条件。其计算流程如图2所示:

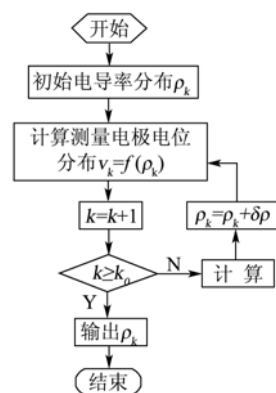


图2 MNR迭代计算流程

Fig.2 MNR iterative process

### 1.2 实验

应用EIT技术进行食品中异物的检测实验,采用

酸奶(银桥牌)作为介质,塑料圆柱作为异物进行实验(分别进行单一异物和多异物实验),如图3所示。

EIT重建图像在计算上有很强的病态性,很多因素影响重建图像的质量,如异物不同大小,注入电流的不同大小和频率。异物大小决定了检测目标的本质属性,激励电流大小影响测量信号的强弱,激励电流的频率影响电流在介质中的传播。实验主要目的是观察上述三个因素对重建图像质量的影响,实验方案为:

a) 在酸奶中放入不同大小的塑料异物进行成像,电流大小为10 mA,电流频率为10 kHz,观察异物变化时成像结果; b) 在酸奶中放入特定大小(直径20 mm)塑料异物,改变激励电流大小(电流频率不变为10 kHz),观察不同电流大小时成像结果; c) 在酸奶中放入特定大小(直径20 mm)塑料异物,改变激励电流频率(电流大小不变为10 mA),观察不同电流大小时成像结果。在上述不同条件下进行数据采集并重建图像,应用1.3所述的二值化处理和评价指标进行定量评价。

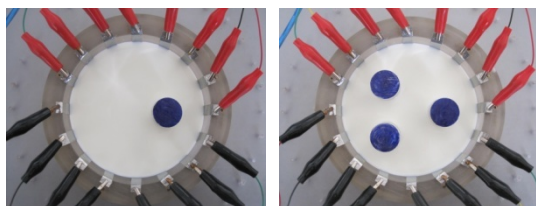


图3 酸奶中检测异物实验

Fig.3 Experiment of detection foreign body in yogurt

### 1.3 重建图像二值化处理

重建图像的边界具有过渡性,图像中有噪点影响,为了便于明确区分异物和介质,定量评价<sup>[14]</sup>不同硬件条件下重建图像的好坏,应用阈值法对重建图像进行二值化处理。其处理流程如图4所示。

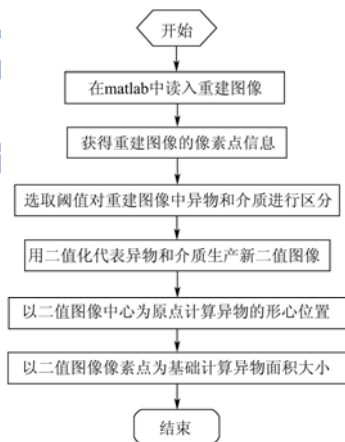


图4 二值化处理流程图

Fig.4 Binarization processing flow chart

二值化处理后得到较为直观的异物位置大小的图

像,用数学方法计算异物形心坐标(以容器中心为原点)和面积大小,为综合评价成像质量好坏,将重建图像异物和实际异物坐标和面积进行比对,引入综合偏差率公式(6),其为坐标偏差(公式4)、面积偏差(公式5)分别赋予权重值0.8、0.2(EIT重建图像分辨率一般较低,反映异物区域边界模糊,其面积偏差较大,食品中异物检测主要反映异物位置,故选择上权重值)后相加。

$$\Delta d = \frac{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}}{r/10 \times D} \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta s = \frac{|S_0 - S|}{S_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\Delta \delta = \Delta d \times 0.8 + \Delta s \times 0.2 \quad (6)$$

式中 $\Delta d$ 表示坐标偏差, $\Delta s$ 表示面积偏差, $(x_0, y_0)$ 为实际异物坐标(实验时可知), $(x, y)$ 为重建图像中异物形心坐标(二值化处理后求出), $D$ 为容器的直径, $S_0$ 为实际异物面积, $S$ 为重建图像中异物面积(二值化处理后求出), $\Delta \delta$ 为综合偏差率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 测量数据

测得电压差值数据共有16组,208个,图5为其中的4组数据得到的电压值折线图,由数据图表看出靠近激励电流的电极对间的电压较高,远离激励电流的电极对间电压较小,这与电场理论相符合。

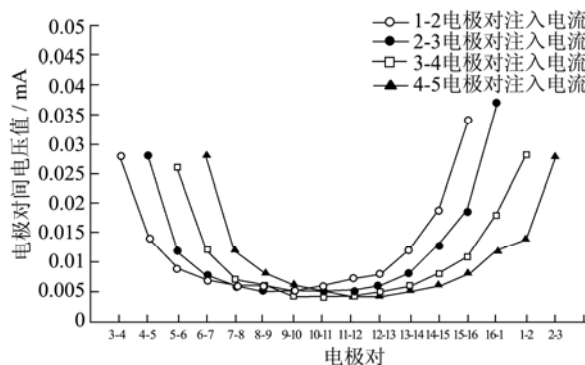


图5 电压数据图表

Fig.5 Voltage datas chart

### 2.2 二值化处理图

图5中的电压数据经成像算法计算后得到如图6左侧的重建图像,分别为单一异物和三个异物,对其进行二值化处理得到如图6右侧的黑白二值图,可以看出,二值化处理后可以很方便的看出异物的位置和大小,但是通过二值化处理后重建图像会再一定程度上丢失一些信息,但对整体而言影响不大。



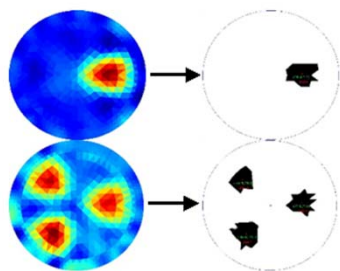


图6 重建图像二值化处理

Fig.6 Binary process of reconstructed image

文中采用二值化图像处理对重建图像进行后处理,重建图像是以有限元剖分单元为基础,网格剖分的疏密对其有一定的影响,因此重建图像的二值化处理结果与网格的疏密有关,稠密的网格划分会使二值化图像更接近真实异物大小和形状;但有限元网格不能过分细化,因为网格越稠密,EIT 图像重建的计算量越大,从而影响成像的实时性并可能造成计算不收敛而不能成像。所以应在保证 EIT 图像重建实时性和计算收敛性的前提下尽可能使有限元网格稠密,使重建图像及其二值处理后的图像更能反映真实信息。

### 2.3 硬件条件不同时的重建图像

#### 2.3.1 异物大小不同时重建图像

选取不同大小异物,直径分别为 10、15、20、25、30、35、40 (单位为 mm),放入有酸牛奶的实验容器中,异物中心所在位置相同,激励电流大小为 10 mA,频率为 10 kHz,进行实验后得到重建图像如图 7 所示,其中图 7a 为实际异物,图 7b 为异物示意图,图 7c 为重建图像,图 7d 为二值化处理后的重建图像。计算其坐标、面积和综合偏差率如图 8 所示。

由图 7 可看出,用 EIT 的方法可以检测出牛奶中的异物,并可在一定程度上反应出异物的大小和位置,由图 8 可以看出,在直径为 100 mm 的实验容器中,放入异物直径在 25 mm 时所得的重建图像的坐标偏差和面积偏差最小,异物变小或变大,其重建图像的坐标偏差和面积偏差都变大。

#### 2.3.2 电流大小不同时重建图像

选取异物为直径 20 mm,激励电流频率为 10 kHz。激励电流大小分别为 1、3、5、10、15、20、25、30 (单位为 mA),测量数据并重建图像如图 9 所示,同样的方法,对图 9 进行二值化处理,并计算其坐标、面积和综合偏差率如图 10 所示。

由图 9 可看出,其他条件相同,当激励电流大小变化时,所得的重建图像变化较为明显;由图 10 可看出,在本实验系统中,当激励电流大小为 15 mA 时所得重建图像效果较好。

### 2.3.3 电流频率不同时重建图像

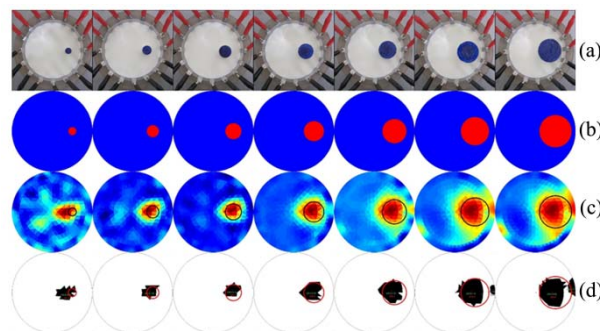


图7 不同大小异物实验图 (a)、示意图 (b)、重建图像 (c) 和二值化图 (d)

Fig.7 Experimental figure (a), schematic diagram (b), reconstructed images (c) and binarization figure (d) for different sizes of foreign body

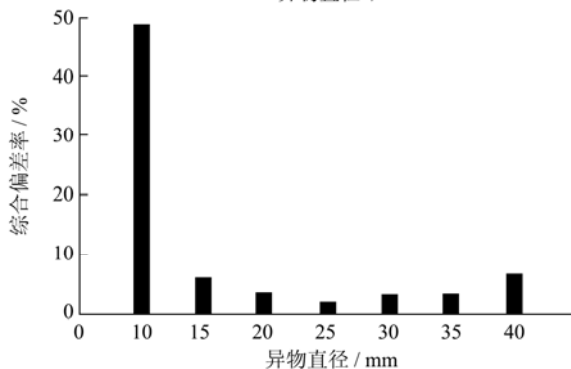
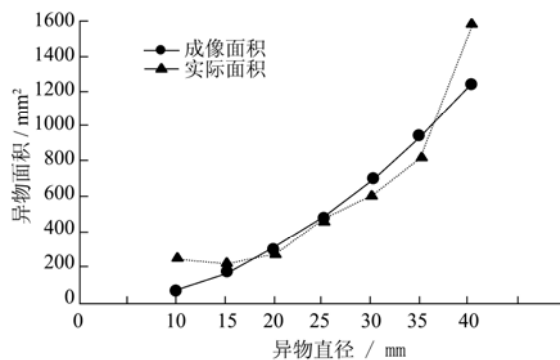
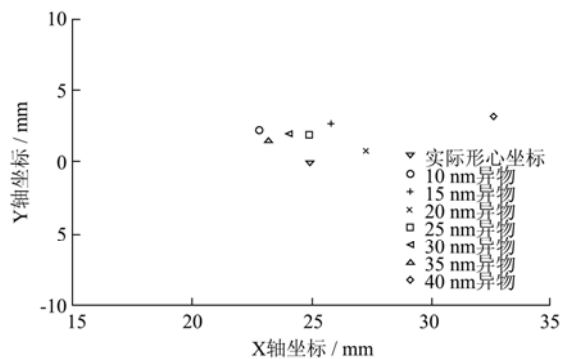


图8 异物大小不同时异物成像坐标、成像面积和综合偏差率  
Fig.8 The coordinates, area and comprehensive deviation rate for different sizes of foreign body

选取异物直径 20 mm，激励电流大小为 10 mA。电流频率由小到大，分别为 2.5、5、10、15、20、25、30、50、100、200（单位为 kHz）。进行测量数据并重建图像如图 11 所示（和频率大小对应关系为先左后右，先上后下）。同样的方法，对图 12 进行二值化处理，并计算其坐标、面积和综合偏差率如图 12 所示。

由图 11 可知，其他条件相同，当激励电流频率变化时，所得的重建图像对异物反映变化不明显，异物周边伪影变化明显；由图 12 可看出，在本实验系统中，当激励电流频率为 30 kHz 时所得重建图像效果较好。

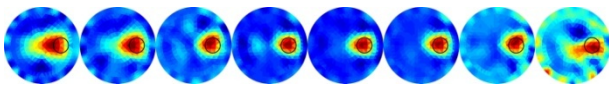


图 9 激励电流大小不同时的重建图像

Fig.9 Reconstructed images with different excitation currents

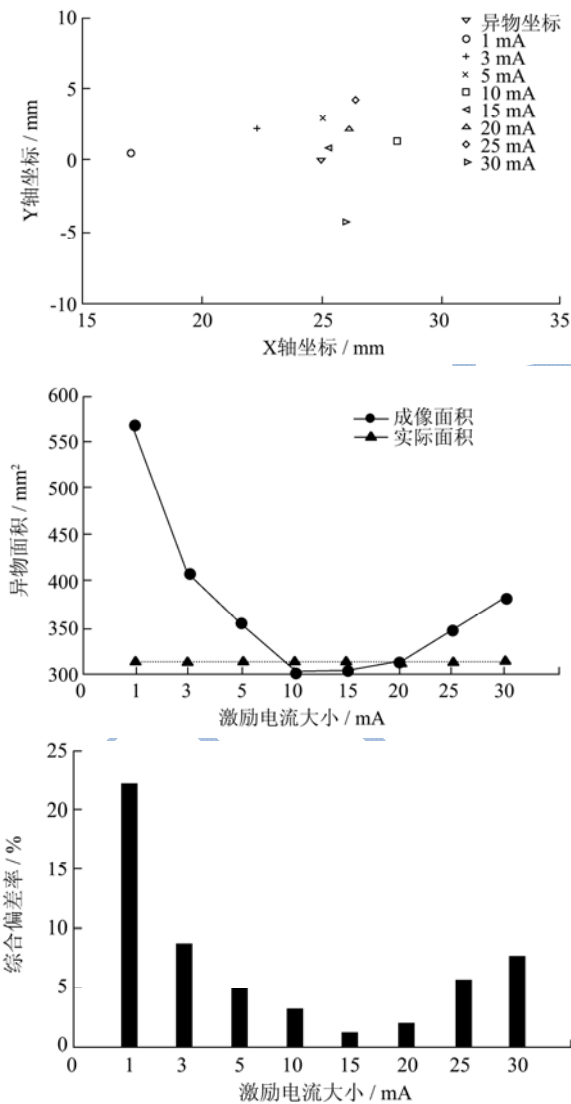


图 10 激励电流大小不同时异物成像坐标、成像面积和综合偏差率

Fig.10 The coordinates, area and comprehensive deviation rate of reconstructed images with different excitation currents

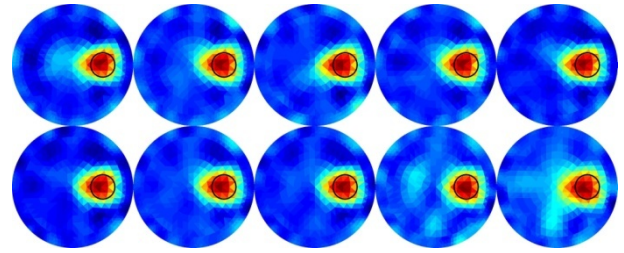


图 11 电流频率不同时的重建图像

Fig.11 Reconstructed images with different excitation current frequencies

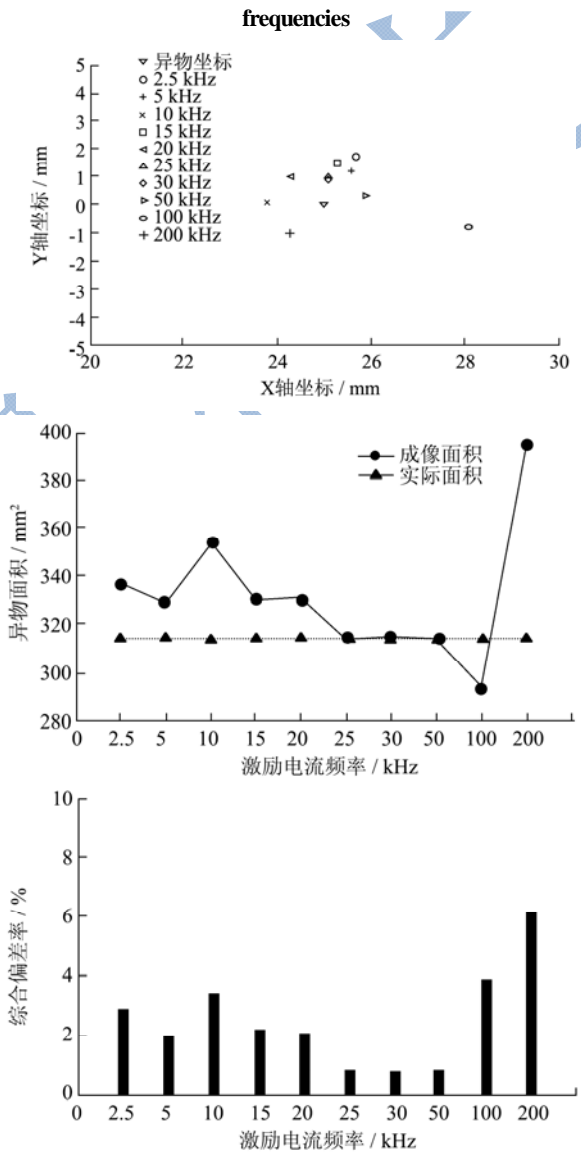


图 12 激励电流频率不同时异物成像坐标、成像面积和综合偏差率

Fig.12 The coordinates, area and comprehensive deviation rate of reconstructed images with different excitation current frequencies

### 3 结论

3.1 在本实验中，应用电阻抗成像的方法可以检测出酸牛奶中的塑料异物，能较准确的反应出异物的位置和大小信息，但是不能很好的反应出异物形状信息，

并且对异物大小比较敏感,只能检测一定范围内的异物,异物太小或太大都会使检测产生较大误差。

3.2 作为重要的硬件系统条件,激励电流的大小和频率对重建图像的质量影响很大,针对不同的实验对象和实验条件,存在较好的电流大小和频率数值,使得所得成像结果质量较好。

3.3 应用二值化方法处理重建图像,所得二值化图像更加直观明了,而且便于对不同条件下的成像结果进行定量评价,但这种处理方法会在一定程度上丢失一些重建图像细节。

3.4 EIT中重建图像分辨率较低,对检测对象的大小和形状信息损失较多,可通过细化重建图像有限元网格,优化重建图像算法改善重建图像分辨率;并通过提高测量系统信噪比改善测量数据精度,降低图像重建计算的病态性,扩大异物检测的范围。EIT技术已经应用在除生物学以外的其他领域,针对目前食品安全问题,将其广泛应用于食品工业中食品中异物检出有一定的实用性和很好的社会意义。

## 参考文献

- [1] 李锦生,张霞,李琳.重视广东省食品安全的现状与发展[J].现代食品科技,2010,26(1):1-4,13  
Li Jin-sheng, Zhang Xia, Li Lin. Promotion and development of food safety in Guangdong province [J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(1): 1-4, 13
- [2] L Senni, M Ricci, et al. On-line automatic detection of foreign bodies in biscuits by infrared thermography and image processing [J]. Journal of Food Engineering. 2014, 128: 146-156
- [3] R Diaz, L Cervera, et al. Hyperspectral system for the detection of foreign bodies in meat products [J]. Procedia Engineering. 2011, 25(0): 313-316
- [4] Edward Hægström, Mauri Luukkala. Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products [J]. Food Control, 2001, 12(1): 37-45
- [5] Nielsen M S, et al. X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food [J]. Food Control. 2013, 30(2): 531-535
- [6] Bera T K, J Nagaraju. Resistivity imaging of a reconfigurable phantom with circular inhomogeneities in 2D-electrical impedance tomography [J]. Measurement. 2011, 44(3): 518-526
- [7] 徐桂芝,李颖.生物医学电阻抗成像原理[M].北京:机械工业出版社,2010  
Xu Gui-zhi, Li Ying, et al. Electrical impedance tomography in biomedical engineering [M]. BeiJing: China Machine Press, 2010
- [8] J.Riera, P.J.Riu, P.Casan, et al. Electrical impedance tomography in acute lung injury [J]. Medicina Intensiva, 2011: 35(8): 509-517
- [9] 蒋明霞,李伟华,张良,等.基于EIT技术的气流传感器及其实验研究[J].东南大学学报,2012,42(6):1117-1121  
JIANG Ming-xia, LI Wei-hua, ZHANG Liang, et al. Gaseous flow sensor based on EIT and its experimental study[J]. JOURNAL OF SOUTHEAST UNIVERSITY, 2012, 42(6): 1117-1121
- [10] Mohadeseh S, Brent Y. 3-Dimensional spatial monitoring of tanks for the milk processing industry using electrical resistance tomography [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105: 312-319
- [11] Mohadeseh S, Brent Y. Qualitative visualization and quantitative analysis of milk flow using resistance tomography electrical [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112: 227-242
- [12] Tushar K B, Nagaraju J. Studying the resistivity imaging of chicken tissue phantoms with different current patterns in Electrical Impedance Tomography (EIT) [J]. Measurement, 2012, 45: 663-682
- [13] 何为,罗辞勇,徐征,等.电阻抗成像原理[M].北京:科学出版社,2009  
HW We, LUO Ci-yong, XU Zheng, et al. The principle of Electrical Impedance Tomography [M]. BeiJing: Science Press, 2009
- [14] Ashkan Javaherian, Amir Movafeghi, et al. An exhaustive criterion for estimating quality of images in electrical impedance tomography with application to clinical imaging [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation. 2013, 24(7): 773-785