

便携式猪肉阻抗谱检测系统研制

丁强¹, 王忠义¹, 黄岚^{1*}, 何建昕¹, 张根伟¹, 高健¹, 万青²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于生物阻抗谱检测原理, 设计并实现了一个非破坏性的便携式肉品阻抗谱检测系统, 主要包括信号发生单元和检测单元, 信号源能够在 0.1~250 kHz 范围内自动扫频, 检测单元由检测电极和增益、相位检测器构成。探讨了检测电极设计方案, 比较分析了六钢针电极和四针石墨电极的性能, 同时通过试验证明了系统的稳定性, 1 kHz 以上系统的变异系数 $CV < 6\%$; 以组内相关系数 ICC 来评定在不同温度下系统的可靠性, 系统模型中 R_i 、 R_e 、 C 的 ICC 均大于 65%, 系统稳定可靠。选取猪肉样品进行了新鲜度指标与阻抗谱关系的初步研究, 结果表明随着猪肉新鲜程度改变, 猪肉复阻抗值、复阻抗实部值、复阻抗虚部值以及特征频率都表现出减小的趋势。

关键词: 电极, 肉品, 检测, 阻抗谱, 肉品新鲜度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.025

中图分类号: TP212, TP216, TS207

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0138-07

丁强, 王忠义, 黄岚, 等. 便携式猪肉阻抗谱检测系统研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 138-144.

Ding Qiang, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Development of portable bio-impedance spectroscopy system for measuring porcine meat quality[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 138-144. (in Chinese with English abstract)

0 引言

生物阻抗是生物组织基本的物理参数, 反映生物组织、器官、细胞或整个生物机体电学性质。近年来, 生物阻抗分析作为一种快速和非破坏性的方法, 相关理论和技术已逐渐形成。阻抗分析方法已用于肉品成熟期品质因素的分析, 并尝试通过肉品阻抗分析技术来分析肉品 pH 值、脂肪、水分等品质因素^[1-9]。Damez 等^[4]应用电阻抗谱分析方法来测评肉品成熟期的不同阶段, 并且分别在沿肌肉纤维和垂直肌肉纤维方向对比了各向异性, 得到了很好的相关性; Guerreroa 等^[5]2004 年提出将这种方法用于西班牙干腌火腿的生产中, 重点检测 PSE 肉、分析肉品的柔韧性, 进行肉品的筛选分类; Altmann 与 Pliquett^[10]用频谱法设计试验对猪肉和牛肉进行了分析, 期望得到阻抗谱变化与脂肪含量的相关性, 并与传统方法, 如正己烷萃取和近红外分析方法进行了对比, 具有一定相关性; 张军等^[11]采用阻抗分析方法对鲫鱼的新鲜度进行了评价, 结果显示当激励频率为 591 Hz 时阻抗随腐败时间变化规律性强。

然而, 将生物阻抗分析技术应用到猪肉品质的检测, 目前仍存在以下问题: 1) 生物阻抗测量装置多采用体积大、价格较贵的 HP4194A 等阻抗分析仪, 实际应用受到限制; 2) 电极的选择及其可靠性有待研究。本文提出了

一种 0.1~250 kHz 便携式猪肉阻抗谱检测系统, 对电极选择、传感器检测单元等关键技术进行研究, 并对系统的可靠性进行了验证。将这种新系统应用到猪肉阻抗谱检测中, 以便获得与猪肉品质变化相关的有用信息。

1 检测原理

生物组织含有大量不同形状的细胞。这些细胞之间的液体可视为电解质。当直流或低频电流施加于肉品组织时, 大部分电流将绕过细胞, 主要流经细胞外液, 如图 1 中 A 路所示; 当施加于肉品组织电流的频率增加, 细胞膜电容的容抗减小, 一部分电流将穿过细胞膜流经细胞内液, 如图 1 中 B 路所示。肉品组织低频条件下的阻抗值主要是组织细胞外物质的表现, 而电流频率在 200 kHz 以上时, 得到的阻抗值是细胞内外全部物质共同的作用, 当肉品水分改变或发生腐败导致细胞破坏致使品质变化时, 阻抗变化显著^[12]。

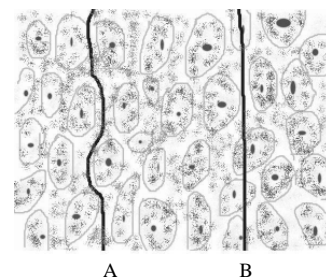


图 1 高低频电流流过猪肉样品组织示意图

Fig.1 Schematic description of electrical current flow circulation through meat sample at low frequencies and high frequencies

可采用三元件模型来研究组织阻抗频谱特性, 其模型如图 2 所示, 其中 R_i 、 C 和 R_e 分别为细胞内液电阻, 细胞膜电容和细胞外液电阻。可以直接测量得到的是其

收稿日期: 2009-07-06 修订日期: 2009-12-22

基金项目: 国家 863 项目 (2007AA10Z212)

作者简介: 丁强 (1983-), 男, 甘肃兰州人, 主要研究方向为农业生物信息检测。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: dq_nz@163.com

*通信作者: 黄岚 (1968-), 女, 副教授, 博士, 从事嵌入式系统及应用、农业生物信息检测与处理及生物医学光子学等方面的研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: biomed_hl@263.net

等效阻抗 Z ，以公式 (1) 表示， Z_{real} 为阻抗之实部（等效电阻 R ）， Z_{image} 为虚部（等效容抗 X_c ），可以表征猪肉组织结构和离子导电性的变化，再由阻抗实部和虚部通过拟合算法求出 R_i 、 C 和 R_e 。

$$Z = Z_{real} + iZ_{image} \tag{1}$$

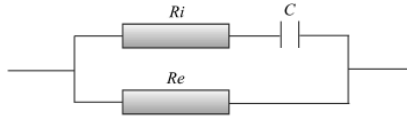


图 2 三元件模型

Fig.2 Electrical Fricke model

2 生物阻抗谱的测量

2.1 生物阻抗谱系统原型

生物阻抗谱检测系统中微控制器采用 AT89C52，以直接数字式频率合成器 DDS 芯片 AD9850 实现自动扫频信号源，幅相检测单元将实现阻抗实部与虚部分离，采用测量电极插入猪肉样品中，系统结构如图 3 所示。由于生物组织的特殊性，所以，用于生物组织复阻抗频谱特性测量的信号源及测量系统有一些特殊要求，是实现生物阻抗测量的关键技术。

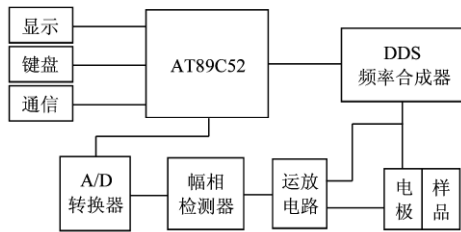


图 3 肉品阻抗谱检测系统结构示意图

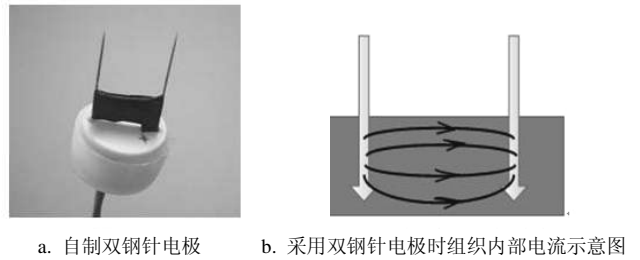
Fig.3 Schematic description of bio-impedance spectroscopy system for measuring meat quality

2.2 检测电极

电极设计是生物阻抗谱检测系统设计极为重要的一个环节。系统和测量单元通过电极与猪肉样品进行耦合，其材料、结构、外形等直接影响到测量数据的精准性和整个系统的稳定性和可靠性。以下就电极针材料选择、电极结构设计进行研究。

图 4a 所示为自制的双钢针电极，将 2 根钢针用胶封装固定，用双绞线将电极与系统连接起来。双针电极结构简单，制作方便，当双针电极连接系统插入猪肉样品后，某一时刻肉品组织内电流分布如图 4b 所示，由图 4b 可见，电流流经肉品组织时，只经过两针之间的组织细胞，电极间距为 2 cm，插入深度为 2 cm，测量有效范围较小，所以，电极使用图 4a 所示的设计方案只能得到肉品阻抗谱的变化趋势，所得结果不能反映整个猪肉样品的内部信息。

将电极插入到猪肉样品中进行测量，根据测量原理可知，肉品阻抗值随着频率增大而减小。试验结果表明，随着频率增大，在整个测量频段范围内，肉品阻抗值都表现出减小的趋势。

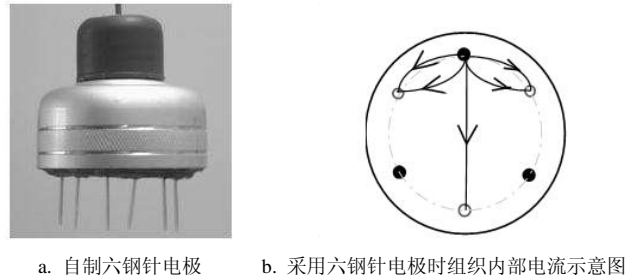


a. 自制双钢针电极 b. 采用双钢针电极时组织内部电流示意图

图 4 自制双钢针电极示意图

Fig.4 Self-made two-needle steel electrodes

图 5a 所示为自制六钢针电极。由于测量采用双端法，6 根电极针中每 3 根串联起来为一端，相邻两针极性相反。将其与测量系统和猪肉样品相连，测量结果较双电极结构稳定。电极针长 2 cm，分布在一个直径为 4 cm 的圆上，所以，测量有效范围与双针电极相比显著增大。图 5b 为采用六钢针电极时通过一根钢针流出的电流在组织内部电流分布示意图，其他 2 根串联钢针流出电流分布图与其一致。



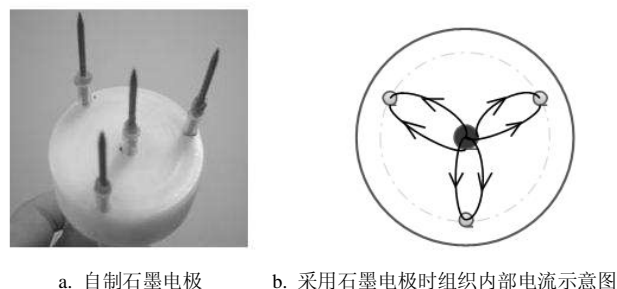
a. 自制六钢针电极 b. 采用六钢针电极时组织内部电流示意图

图 5 自制六钢针电极示意图

Fig.5 Self-made six-needle steel electrodes

图 6a 所示电极选用石墨作为电极针材料，采用 4 针电极结构，中间 1 根电极针为信号源输入端，外围 3 根电极针串联均匀分布在以中间电极针为圆心，半径为 2 cm 的圆上。图 6b 所示为采用这种电极结构进行测量时肉品组织内部的电流分布图。从图中可以看出，电流分布在一个立体形状中，从而肉品组织内有效测量部位更具有代表性。

四针石墨电极很好地解决了上述其他设计方案带来的电极生锈和测量结果代表性不强的问题，实际测量过程中也表现出很好的测量结果，但是由于石墨电极针本身阻值较大，与肉品组织阻抗值为同一数量级，使相位检测的灵敏度明显下降。



a. 自制石墨电极 b. 采用石墨电极时组织内部电流示意图

图 6 自制四针石墨电极示意图

Fig.6 Self-made four-needle graphite electrodes

2.3 0.1~250 kHz 信号源

将生物阻抗技术应用于肉品品质检测是一个新的研究领域, 要得到肉品的阻抗谱, 信号源的设计至关重要。直接数字式频率合成器 DDS (direct digital synthesizer) 是将先进的数字处理理论与方法引入频率合成的一项新技术。由于其分辨率高、变换速度快, 一般都在 ns 级, 而且具有低成本、低功耗和体积小的优点, 近年来在电子测量仪器仪表中得到了越来越广泛的应用。选择测量频率范围在 0.1~250 kHz, 频率范围跨度大, 得到的阻抗值包含了高低频下的不同特性才能够比较全面地反映肉品组织的阻抗特性, 从而跟肉品品质因素相关联。

为了避免电极极化对测量结果的影响, 信号源输出应为对称双极性正弦波。然而, DDS 芯片 AD9850 输出为两路互补单极性信号, 其两路输出端接入差分电路组成的信号源极性转换电路, 从而能够很方便地得到双极性信号源, 图 7 所示为由差分电路构成的极性转换电路示意图, 其中, V_{in1} 和 V_{in2} 分别接 AD9850 的 2 个输出端口, V_{out} 输出端为极性转换后得到的对称双极性正弦信号。

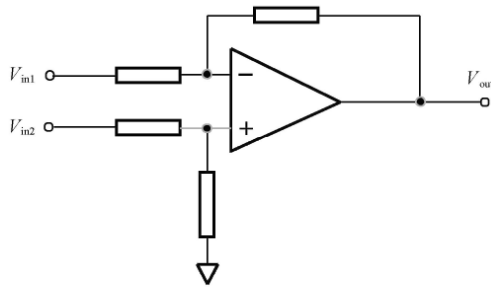


图 7 极性转换电路

Fig.7 Diagram of polarity conversion circuit

2.4 幅相检测处理单元

幅度相位检测单元由 AD8302 幅相检测器和运放电路组成。AD8302 检测两路信号为源信号 V_{inA} 和过肉品组织信号 V_{inB} , 将两路输入信号的幅度比和相位差转化为电压输出, 理论值分别为 V_{mag} 和 V_{phs} 。

幅相检测器 AD8302 理论输出公式如式 (2)、(3) 所示, 由公式可以求得两路输入信号 V_{inA} 和 V_{inB} 的幅度比 V_{inA}/V_{inB} 和相位差 $\Delta\phi$, 再根据公式 (4)、(5)、(6) 可分别求出肉品组织的复阻抗值 Z 以及其实部 Z_{real} 和虚部 Z_{image} 。其中 R ——定值参比电阻。

$$V_{mag} = 600 \lg\left(\frac{V_{inA}}{V_{inB}}\right) + 900 \quad (2)$$

$$V_{phs} = -10\Delta\phi + 1800 \quad (3)$$

$$Z = \frac{V_{inA}}{V_{inB}} R \quad (4)$$

$$Z_{real} = \frac{V_{inA}}{V_{inB}} R \cos \Delta\phi \quad (5)$$

$$Z_{image} = \frac{V_{inA}}{V_{inB}} R \sin \Delta\phi \quad (6)$$

3 系统测试与试验结果

3.1 幅相检测器输出标定

由于电路板中 AD8302 引脚不可避免地会受到分布参数及芯片本身一致性的影响, 所以输出值会偏离理论公式。将采用下述方法对其输出进行标定: 将正弦波信号加载到 RC 串联模型上, 通过数字示波器 (型号 DS1102E) 可以读出两路信号 (源信号 V_{inA} 和经过 RC 网络后的信号 V_{inB}) 的幅度值, 从而得到其幅度比; 同时, 可以由已知的 R 、 C 值和 RC 网络的输入正弦信号频率 f , 可计算得到两路信号 (源信号和过 RC 网络信号) 之间幅度比和相位差 $\Delta\phi$, 计算公式如式 (7) 所示

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_C}{R}\right) \quad (7)$$

式中: R ——RC 串联模型中阻抗值, Ω ; X_C ——RC 串联模型中的容抗值, Ω 。计算公式如式 (8) 所示

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (8)$$

试验共用了 4 组模型, 如表 1 所示。每组模型在 7 个频率点下分别测量, 最终得到 28 组数据, 由这 28 组数据拟合得出 AD8302 实际输出公式, 实际幅度比和相位差电压输出值分别为 V'_{mag} 和 V'_{phs} , 如式 (9)、(10) 所示

$$V'_{mag} = 643.0 \lg\left(\frac{V_{inA}}{V_{inB}}\right) + 932.3 \quad (9)$$

$$V'_{phs} = -9.9\Delta\phi + 1853.2 \quad (10)$$

表 1 幅相检测器标定选择参数

Table 1 Calibrated parameters of gain and phase detector

阻抗值 R/Ω	电容 C/nF	频率 f/kHz
200.1	21.1	1、5、10、20、50、100 和 250 kHz 7 个频率点
200.1	33.9	
1 001.4	21.1	
1 001.4	33.9	

3.2 系统和电极稳定性测试

3.2.1 电极稳定性测试

猪肉样品组织电学参数会随时间变化, 不适于用来证明系统和电极稳定性, 所以, 本试验以恒定均匀的电解质溶液作为样品, 用自制石墨电极 A 和六钢针电极 B 对其进行测试, 来验证系统和电极稳定性。设计试验如图 8 所示: 配置相同浓度的 NaCl 溶液, 装满两个烧杯, 为了避免水分蒸发对溶液浓度造成影响, 用塑料膜将装溶液的烧杯封口, 将 A、B 2 种电极分别穿透塑料膜插入烧杯中, 在相同时间间隔 (1 h) 内, 选择 7 个代表性频率点对 2 份溶液进行了测试。选用变异系数 CV (coefficient of variation, $CV = \text{标准差} / \text{平均值}$) 来表示同一样品多次测量的稳定性。

表 2 所示为 A 瓶中石墨电极稳定性测量结果。由表 2 可见, 随着频率增大, CV 值减小, 说明低频段测量值变异较大, 频率越高, 测量值越稳定。 CV 平均值为 0.28%。

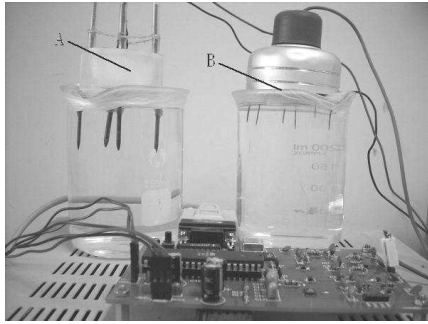


图 8 系统和电极稳定性试验

Fig.8 Experimental setup for evaluating stability of the electrodes and measurement system

表 2 石墨电极测试数据

Table 2 Stability results at different frequencies using four-needle graphite electrodes

频率/ kHz	复阻抗值/ Ω								变异系数 CV/%
0.1	193.5	193.5	194.2	192.1	192.1	192.8	192.8	191.4	0.44
0.2	182.1	182.1	183.4	181.4	181.4	182.1	182.1	180.8	0.39
0.3	176.9	177.5	178.2	176.9	176.9	176.9	176.9	176.3	0.30
0.5	171.9	172.5	173.2	172.5	172.5	172.5	172.5	171.9	0.21
1	167.1	167.7	168.3	167.7	167.1	167.7	167.1	167.1	0.25
5	159.5	160.0	160.6	160.6	160.0	160.0	160.0	160.0	0.21
10	157.8	157.8	158.3	158.3	158.3	158.3	158.3	158.3	0.15

表 3 所示为 B 瓶中六钢针电极稳定性测量结果。CV 值随着频率增大而减小，与石墨电极测量值表现出的变化趋势一致，CV 平均值为 8.33%，在使用 1 kHz 以上频率时的变异系数 $CV < 6\%$ 。

表 3 六钢针电极测试数据

Table 3 Stability results at different frequencies using six-needle steel electrodes

频率/ kHz	复阻抗值/ Ω								变异系数 CV/%
0.1	172.5	172.5	168.9	125.9	124.1	129.6	135.7	138.2	13.82
0.2	150.6	155.0	109.1	121.0	120.2	123.7	126.8	128.6	11.30
0.3	142.2	145.3	107.5	118.0	118.0	120.2	122.3	123.7	9.58
0.5	133.3	134.3	104.9	115.1	115.1	116.4	117.6	115.5	7.80
1	123.7	122.8	101.6	111.5	111.5	112.3	112.7	111.9	5.79
5	111.5	108.7	92.9	100.5	100.8	101.2	102.7	102.3	5.12
10	106.8	101.9	89.3	95.6	95.9	95.9	97.6	97.6	4.89

对比表 2、3 可以得出 2 点结论：1) 随着时间变化，测量系统能够稳定的进行阻抗值检测；2) 石墨电极稳定性明显优于钢针电极。

3.2.2 系统稳定性测试

用 5 个 RC 阻容模型对系统稳定性进行测试。在同一温度下 (20℃) 对每个模型进行了 3 次测量，得到模型 R_i , R_e , C 测量值，比较分析 3 次测量值得到了 5 个模型在同一温度下三元件的变异系数。从表 4~6 可以看出，对于不同阻容三元件模型，系统多次测量的结果表现出

很好的稳定性：5 个模型 R_e 的测量值， $CV \leq 0.92\%$ ；5 个模型 R_i 的测量值，得到 $CV \leq 1.01\%$ ；5 个模型 C 的测量值， $CV \leq 0.92\%$ 。

表 4 20℃时各模型 R_e 测量值的变异系数

Table 4 Coefficients of variation of R_e value for different Cole-Cole circuit models at 20℃

模型	细胞外液电阻 R_e/Ω			变异系数 CV/%
	测量次数			
	1	2	3	
1	211.67	213.60	213.60	0.52
2	202.07	201.26	202.00	0.22
3	201.88	199.50	198.26	0.92
4	198.78	198.65	197.16	0.45
5	97.07	97.37	97.20	0.15

表 5 20℃时各模型 R_i 测量值的变异系数

Table 5 Coefficients of variation of R_i value for different Cole-Cole circuit models at 20℃

模型	细胞内液电阻 R_i/Ω			变异系数 CV/%
	测量次数			
	1	2	3	
1	128.99	130.67	130.67	0.75
2	107.16	106.69	107.10	0.24
3	102.28	100.86	100.30	1.01
4	99.77	99.69	98.88	0.50
5	51.33	51.46	51.40	0.12

表 6 20℃时各模型 C 测量值的变异系数

Table 6 Coefficients of variation of C value for different Cole-Cole circuit models at 20℃

模型	细胞膜电容 C/nF			变异系数 CV/%
	测量次数			
	1	2	3	
1	2.30	2.34	2.34	0.92
2	5.02	5.05	5.03	0.23
3	10.49	10.39	10.45	0.49
4	33.53	33.56	33.83	0.48
5	40.34	40.24	40.29	0.13

同时，在 5、20、30℃ 3 个不同温度下对 5 个阻容模型进行了测量，用组内相关系数 ICC (intra class correlation) 来表示测量的可靠性，当 $ICC > 60\%$ 时，表示数据可靠^[13]。ICC 可表示为

$$ICC = \frac{\delta_s^2}{\delta_s^2 + \delta_D^2} \quad (11)$$

式中： δ_s^2 ——模型间方差； δ_D^2 ——不同温度下测量产生的方差。

结果如表 7~9 所示， R_e 、 R_i 和 C 组内相关系数都达到了 65% 以上。

表7 不同温度下模型 Re 测量值的 ICC Table 7 Intra-class correlation coefficient (ICC) of Re value for different temperature in Cole-Cole circuit models

模型	细胞外液电阻 Re/Ω			组内相关系数 $ICC/\%$
	5℃	20℃	30℃	
1	209.77	209.82	272.78	72.52
2	203.81	201.03	229.43	
3	205.13	201.70	210.47	
4	193.59	198.24	200.73	
5	96.90	97.76	97.53	

表8 不同温度下模型 Ri 测量值的 ICC Table 8 Intra-class correlation coefficient (ICC) of Ri value for different temperature in Cole-Cole circuit models

模型	细胞内液电阻 Ri/Ω			组内相关系数 $ICC/\%$
	5℃	20℃	30℃	
1	150.00	128.54	97.58	65.10
2	117.50	106.75	94.62	
3	106.74	102.28	95.34	
4	101.40	99.59	100.35	
5	51.79	51.82	50.28	

表9 不同温度下模型 C 测量值的 ICC Table 9 Intra-class correlation coefficient (ICC) of C value for different temperature in Cole-Cole circuit models

模型	细胞膜电容 C/nF			组内相关系数 $ICC/\%$
	5℃	20℃	30℃	
1	2.16	2.33	2.53	94.71
2	4.76	5.10	5.35	
3	10.14	10.50	10.59	
4	35.39	33.60	33.30	
5	39.09	41.08	40.84	

3.3 试验方法与试验结果

目前,新鲜度评价主要依据感官指标,也可以用电子鼻、电子舌等智能感官仪器来检测^[14]。在系统可靠性测试的基础上,进行了肉品阻抗谱与肉品新鲜度关系试验研究。

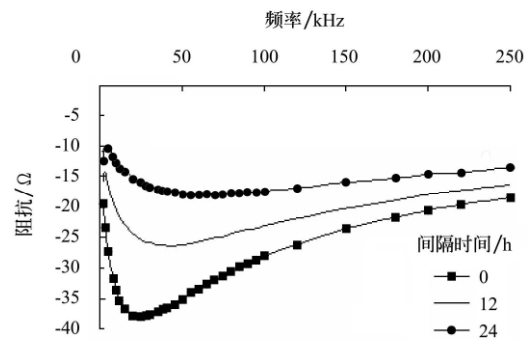
3.3.1 试验方法

1) 在25℃环境下,电极穿过保鲜膜扎入肉品中,以保鲜膜覆盖肉品避免水分蒸发对此试验的影响。测量时以一定时间间隔(12 h)连续测量3次得到肉品复阻抗频谱图。

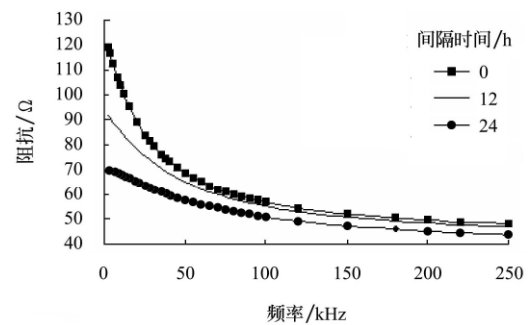
2) 测量结果与鲜(冻)畜肉卫生标准 GB2707-2005 感官标准进行对比。

3.3.2 试验结果

随着时间的推移(0~24 h),发现肉品表面开始泛白,后来逐渐产生异味和酸败的味道。根据 Cole-Cole 模型理论,复阻抗虚部的最小值所对应频率点为特征频率 f_c ^[15],如图 9a 所示,随着肉品新鲜程度变化阻抗谱虚部值在整个频段内呈减小趋势,特征频率逐渐消失。图 9b 所示为复阻抗实部值随新鲜度变化的趋势图,由图可以看出,随着肉品腐败的加剧,肉品复阻抗值总体表现出下降的趋势,在整个频段有显著差异。



a. 阻抗虚部谱随肉品新鲜度变化趋势



b. 阻抗实部谱随肉品新鲜度变化趋势

图9 室温下24 h内肉品新鲜程度变化时的阻抗谱变化趋势
Fig.9 Variation tendency of bio-impedance spectra with the change of meat freshness at room temperature in 24 hours

4 讨论

肉品阻抗谱检测系统实现了便携式设计,由电池供电,相比现有的阻抗仪,该系统体积小(13 cm×8 cm×4 cm),系统在工作模式下瞬时功耗电流小于300 mA,测量对象专一,能够实现现场检测。扫频范围选择0.1~250 kHz,测量结果涵盖了肉品阻抗的高低频不同特性,而且系统在使用1 kHz以上频率时的变异系数 $CV < 6\%$,能够比较准确地反映肉品变化。系统完成一次测量所需时间在20 s以内,实现了快速测量,而相比于其他能够完成快速检测的仪器,电极设计直径为(0.12±0.01) cm,长度为(2.5±0.01) cm,既能实现非破坏性检测,又能够检测到肉品深层信息。

测量系统扫描频率范围为0.1~250 kHz,设计扫频步进可变,当频率在1 kHz以内时扫频间隔为100 Hz,1~10 kHz时扫频间隔选择1 kHz,10 kHz以上时扫频间隔选择10 kHz,这样既保证了在各个频率段内频率点的有效个数,同时又将一次完整测量时间控制在20 s以内,实现快速检测。

在实际应用中,电极设计必须考虑2个问题:1) 经过22 d共102次试验,每次持续时间2 h,钢针电极均出现电极针生锈,生锈后的钢针不仅会影响到试验结果的准确性,而且钢针容易发生断裂,因此,普通不锈钢针不适合作为长期检测使用;2) 电极结构设计应使电流流过肉品组织内的有效体积更大,从而能更完整地反映肉品组织信息。

肉品阻抗谱检测系统测量电极设计直接影响到检测结果的精确程度。通过试验验证了几种方案各自的特点, 电极设计要能够实现非破坏式测量, 又要求测量得到的数据能够反映出肉品组织内部更大体积内的信息。由试验数据可见, 石墨电极要明显优于钢针电极, 分析主要原因是钢针在测量中生锈造成的。由于石墨电极本身电阻的影响, 在水分测试和新鲜度测试试验中最终选用的是六钢针电极。综合以上各电极设计方案的优缺点, 今后可以对电极作进一步的改进。

试验结果表明, 随着肉品新鲜度变化, 肉品阻抗也随之变化, 阻抗谱能够反映出品质因素的变化, 并且能够与多项品质因素建立关系。肉品阻抗谱检测系统能够定性分析肉品新鲜度等品质因素, 而要定量给出新鲜度等肉品品质因素指标, 还需要进行大量试验, 得到可靠的数据来建立模型。

5 结 论

可将生物阻抗分析方法应用于肉品品质检测, 针对肉品品质检测设计并研制了一个便携式的阻抗谱分析仪器, 信号源能够在 0.1~250 kHz 范围内自动扫频, 完成快速非破坏性检测, 采用电极方式与肉品接触, 能够检测到肉品深层品质信息。通过试验对测量系统电极稳定性进行了分析, 石墨电极在多个频率点的变异系数 CV 平均值为 0.28%, 表现出很好的稳定性, 而钢针电极在 1 kHz 以上的变异系数 $CV < 6\%$, 表现稳定, 并对电极设计时应该考虑的问题进行了研究。用阻容模型对系统的稳定性进行了验证, 多次测量结果显示三元件 $CV \leq 1.01\%$, 对 5 个阻容模型 ICC 进行了分析, 三元件 $ICC > 65\%$, 证明了系统稳定可靠。

针对猪肉样品新鲜度设计试验并进行了检测, 试验结果表明, 随着肉品组织新鲜度的变化, 肉品组织复阻抗以及复阻抗实部和虚部值都在发生规律性变化。由于肉品脂肪、水分含量不同会对试验结果产生影响, 因而要定量描述这一规律还有待进一步的试验验证。

[参 考 文 献]

- [1] Higbie A D, Bidner T D, Matthews J, et al. Prediction of swine carcass composition by total body electrical conductivity (TOBEC)[J]. *Animal Science*, 2002, 80(1): 112—113.
- [2] Kanekia N, Miuraa T, Shimadab K, et al. Measurement of pork freshness using potentiometric sensor[J]. *Talanta*, 2004, 62(1): 217—221.
- [3] Altmann M, Pliquett U. Prediction of intramuscular fat by impedance spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2006, 72(4): 666—671.
- [4] Damez J L, Clerjon S, Abouelkaram S, et al. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(1): 116—122.
- [5] Guerreroa L, Gobantesa I, Olivera M, et al. Green hams electrical impedance spectroscopy (EIS) measures and pastiness prediction of dry cured hams[J]. *Meat Science*, 2004, 66(2): 289—294.
- [6] Damez JL, Clerjon S, Abouelkaram S, et al. Dielectric behavior of beef meat in the 1–1500 kHz range:Simulation with the Fricke/Cole–Cole model[J]. *Meat Science*, 2007, 77(4): 512—519.
- [7] Altmann M, Pliquett U. Prediction of intramuscular fat by impedance spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2006, 72(4): 666—671.
- [8] Suzuki K, Irie M, Kadowaki H, et al. Genetic parameter estimates of meat quality traits in Duroc pigs selected for average daily gain, longissimus muscle area, backfat thickness, and intramuscular fat content[J]. *Animal Science*, 2005, 83(9): 2058—2065.
- [9] Byrne C E, Troy D J, Buckley D J. Postmortem changes in muscle electrical properties of bovine *M. longissimus dorsi* and their relationship to meat quality attributes and pH fall[J]. *Meat Science*, 2000, 54(1): 23—34.
- [10] Marchello M J, Berg P T, Swantek P M, et al. Predicting live and carcass lean using bioelectrical impedance technology in pigs[J]. *Livestock Production Science*, 1999, 58(2): 151—157.
- [11] 张军, 李小昱, 王为, 等. 用阻抗特性评价鲫鱼鲜度的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 23(6): 44—47.
Zhang Jun, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Experimental research on evaluation of freshness of crucian with bio-impedance characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 23(6): 44—47. (in Chinese with English abstract)
- [12] 黄海滨, 任超世. 生物电阻抗分析法(BIA)测量人体成分[J]. *国外医学生物医学工程分册*, 2000, 23(3): 151—156.
Huang Haibin, Ren Chaoshi. Measurement of body composition by bioelectrical impedance analysis[J]. *Foreign Medical Sciences Biomedical Engineering*, 2000, 23(3): 151—156. (in Chinese with English abstract)
- [13] Kollmitzer J, Ebenbichler G R, Kopf A. Reliability of surface electromyographic measurements[J]. *Clinical Neurophysiology*, 1999, 110(4): 725.
- [14] 韩剑众, 黄丽娟, 顾振宁, 等. 基于电子舌的鱼肉品质及新鲜度评价[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 141—144.
Han Jianzhong, Huang Lijuan, Gu Zhenyu, et al. Evaluation of fish quality and freshness based on the electronic tongue[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张国鹏, 董秀珍, 尤富生, 等. 小猪血液的多频电阻抗特性及其等效电路模型的研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2006, 19(1): 51—55.
Zhang Guopeng, Dong Xiuzhen, You Fusheng. Study on multi-frequency electronic impedance characteristics and equivalent circuit of piglet blood[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2006, 19(1): 51—55. (in Chinese with English abstract)

Development of portable bio-impedance spectroscopy system for measuring porcine meat quality

Ding Qiang¹, Wang Zhongyi¹, Huang Lan^{1*}, He Jianxin¹, Zhang Genwei¹, Gao Jian¹, Wan Qing²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the principle of bio-impedance spectroscopy, a non-destructive portable bio-impedance prototype system for measuring meat quality was developed. The system consisted of a signal generator unit and a detection unit. The former unit could output sinusoidal signal with automatic frequencies scanning, which is range from 0.1 kHz to 250 kHz. The detection unit included detection electrodes and a gain and phase detector. In this work, the performance of six-needle steel electrodes and four-needle graphite electrodes in detecting bio-impedance was compared. Also, coefficients of variability (CVs) were applied to assess the stability of the system. Experiment showed that the coefficient of variation (CV) of the system was less than 6% if the frequency was above 1 kHz. Intra class correlation (ICC) procedures were applied to assess the reliability of the system due to temperature variability. Values of R_i , R_e , C in the system model were reliable with intra class correlations of more than 65%. Furthermore, pork samples were selected to investigate relation between bio-impedance spectroscopy and meat quality attributes, i.e. meat freshness. Results showed that bio-impedance value, real part value of bio-impedance, imaginary part value of bio-impedance and characteristics frequency of pork decreased with the change of meat freshness.

Key words: electrodes, meats, measurements, bio-impedance spectroscopy, meat freshness