

# 利用感应方法检测西瓜可溶性固形物的研究

杨哪<sup>1</sup>, 金亚美<sup>1</sup>, 宾雍霖<sup>1</sup>, 赵娟娟<sup>1</sup>, 金征宇<sup>2</sup>, 徐学明<sup>2</sup>

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122) (2. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 本研究模拟了降压变压器的基本结构并利用电磁感应原理探索了具有不同可溶性固形物含量西瓜的电学参数, 于室温 22 °C 的环境下进行测试, 采用频率范围 50~400 Hz 以及激励电压 5~20 V 作为初级线圈的激励条件。结果表明: 西瓜汁样品的终端电压和  $\lambda$  值随频率的改变而维持在稳定的范围, 但随可溶性固形物的含量的增加而降低, 激励电压提高则终端电压也呈现提升的趋势。常用极低频 50、120、200 和 400 Hz 及激励电压 10 和 20 V 下的电学参数与西瓜可溶性固形物含量呈现较显著的线性关系 ( $\alpha \leq 0.01$ ), 其中相关系数最高为  $R^2=0.969$  (50 Hz、10 V)。采用该模型对 60 个验证样本进行预测, 其预测标准差(SEP)为 0.893 Brix%, 偏差(Bias)为 -0.238 Brix%。该研究可将液态食品原料作为变压器的次级线圈并通过检测其基于变压器特性的电学参数来量化其可溶性固形物含量, 为食品理化指标检测手段提供了新的参考。

**关键词:** 感应特性; 西瓜; 可溶性固形物; 变压器; 检测; 相关性

文章编号: 1673-9078(2015)3-249-254

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.3.041

## Studies on the Inductive Methodology for Evaluating the Soluble Solid Content of Watermelon

YANG Na<sup>1</sup>, JIN Ya-mei<sup>1</sup>, BIN Yong-lin<sup>1</sup>, ZHAO Juan-juan<sup>1</sup>, JIN Zheng-yu<sup>2</sup>, XU Xue-ming<sup>2</sup>

(1. School of Food Science and Technology, JiangNan University, Wuxi 214122, China)

(2. State Key Lab of Food Science and Technology, JiangNan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Current rapid detection methods based on electrical properties usually use electromagnetic waves or external electrical fields to stimulate food materials. However, the electrical property of fruit juice containing diverse electrolytes, based on transformers, has not been reported. It was suggested that the measurements of the terminal voltage of juices, which acts as the secondary winding (constrained by thin, non-conductive tubing) in alternating magnetic flux, may be a novel method to assess qualitative changes. In the present research, a measurement system based on the principle of electromagnetic induction has been established to simulate the basic structure of the step-down transformer, which is able to assess the electrical properties of watermelons with different soluble solid contents (SSC). All measurements were conducted at a temperature of 22 °C, and the test conditions were as follows: the applied voltage on the primary coil was 5~20 V; the operating frequency range was 50~400 Hz. The results showed that the values of terminal voltage and  $\lambda$  were maintaining at a stable level as the frequency increased, but the increasing SSC of watermelon triggered a decrease in the terminal voltage or an increase in  $\lambda$  value. Simultaneously, the values of terminal voltage were observed to increase along with increasing values of excitation voltage. The effects of eight different combinations of operating frequencies (50, 120, 200, and 400 Hz) and excitation voltage levels (10 and 20 V) on the estimation of the soluble solid content was also analyzed, resulting in a significant level ( $\alpha \leq 0.01$ ). The highest linear correlation between the terminal voltage and the SSC values was obtained at 50 Hz and 10 V ( $R^2 = 0.969$ ). The validation models for the SSC of 60 samples had a bias of -0.238 Brix%, and those for the SEP had a bias of 0.893 Brix%. These results encourage the industrial application of this technique for the rapid assessment of the quality parameters in liquid food products.

**Key words:** inductive methodology, watermelon, soluble solids content, transformer, measurement, correlation

收稿日期: 2014-08-04

基金项目: “十二五”科技支撑计划(2012BAD37B01); 农业部公益性行业(农业)科研专项(201303070-02)

作者简介: 杨哪(1982-), 男, 博士, 研究方向为基于变压器原理的食品感应电检测

通讯作者: 徐学明(1968-), 男, 教授, 主要从事食品组分与物性的研究

农产品的电学特性与其内部复杂的有机成分有着密切的关系<sup>[1]</sup>, 目前有研究报道对果蔬的电学特性可采用同轴探头测量其介电特性(相对介电常数  $\epsilon'$ 、损耗因子  $\epsilon''$ 、损耗角正切  $\tan\delta$ ) 或者采用平行板电极测量其电参数(复阻抗  $Z$ 、相位角  $\theta$ 、导纳  $Y$ 、平行等效电容  $C_p$ 、电阻  $R_p$  和电感  $L_p$ ) 来完成对其常规理化

指标的定量表征和相关性研究<sup>[2-3]</sup>。西瓜有较高食用和药用价值,因水分含量高故夏季深受消费者喜爱,除了日常注重的大小、色泽、外观等品质外,其可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)与其成熟度也有着密切的关系,影响着西瓜的营养价值和甜度口感等,是一个非常重要的理化指标。国内外对该指标的测量方法也有广泛的研究,如章海亮等采用静态和动态的近红外分光光谱在线检测苹果的可溶性固形物含量并通过偏最小二乘法建立了数学模型但发现精度不理想<sup>[4]</sup>;袁琳等也通过近红外漫反射光谱检测了网纹西瓜的可溶性固形物含量,同样采用偏最小二乘法回归建模比较取样部位以及7种光谱预处理对模型的影响,发现所建立的模型能满足网纹瓜可溶性固形物含量的快速检测要求<sup>[5]</sup>;郭文川等采用阻抗分析仪的同轴探头对蜜瓜和西瓜汁的射频介电特性以及糖度关系进行了研究,发现1.8 GHz下蜜瓜汁的损耗角正切与糖度有较好的线性关系,但西瓜汁的介电特性与糖度相关性较差<sup>[6]</sup>。Kato等人采用电容和密度结合分类的方法分析了西瓜中可溶性固形物含量并进行多元回归分析,建立了一种新的电学西瓜分级方法以此保证消费者对甜度的要求<sup>[7]</sup>。Roger W针对利用变压器原理来检测海水电导而开展了仿真模拟研究,发现海水作为次级线圈同样具有感应电流,同时,预测海水的电导值可通过基于变压器特性的电学参数来进行表征<sup>[8]</sup>。本研究则将西瓜汁液作为次级线圈(玻璃弹簧为支撑)研究其基于变压器的电学特性,在初级线圈输入不同频率(低频硅钢铁芯正常工作范围:50~400 Hz)和电压幅值的激励电压后,检测西瓜汁在开路状态的终端电压并计算比值。基于降压变压器的特点(初级线圈大于次级线圈)研究了果肉固形物含量与电学参数的相关性并建立数学模型。探索了基于变压器原理的西瓜汁电学特性与内部品质的关系,为液态食品的可溶性固形物含量的品质检测提供一个新的参考方法。

## 1 试验方法与材料

### 1.1 样品准备

西瓜品种为京欣二号和四号,种植于无锡马山,样品采摘于结果期的17~36天期间,每天采集6个果实,取样方法是将西瓜果实作为椭球体,按长轴和短轴的长度均分为外层、中层和内层,如图1所示,即从这3个部位的果肉进行随机取样并榨汁得到120 mL的汁液,收集于烧杯中备用,保证样品集具有较宽泛的可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)

值。当天不能测试的样品密封并储藏于5℃的冷藏环境中。为消除温度对测量造成的误差,下次测试时先取出并于室温22℃下放置4 h,待到样品温度在22±2℃时再进行测试。试验中共用西瓜120个,其中60个作为建模分析样本,另外60个作为验证样本。每个西瓜挤出汁液后搅拌均匀,随即采用PR101A型数字折射计(Atago Co. Ltd.,日本)测样品的可溶性固形物含量。60个样本的可溶性固形物含量见表1。

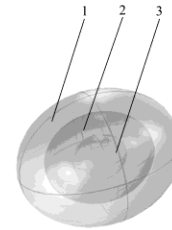


图1 西瓜果实取样部位示意图 1.外层 2.中层 3.内层

Fig.1 Schematic of sampling location in watermelon 1.External, 2.Intermediate, 3.Interior

表1 60个西瓜的可溶性固形物含量统计表

Table 1 Statistic results of soluble solids content of all samples

指标	可溶性固形物含量 SSC/(Brix%)
样本数	60
范围	4.20~12.30
平均值	7.42
标准偏差	1.15

### 1.2 原理和仪器方法

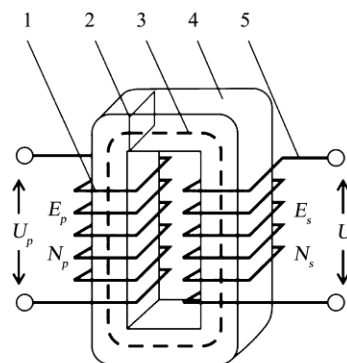


图2 O型变压器示意图

Fig.2 Schematic diagram of o-core transformer

注: 1.初级线圈 2.磁路横截面积 3.平均磁路长度 4.硅钢铁芯 5.次级线圈。

变压器作为磁能转换设备多应用于电力设备,若对由O型硅钢组成的单相变压器的初级线圈( $N_p$ )施加交变电压 $U_p$ 则由电流产生的磁通量正比于线圈,由式1可知<sup>[9]</sup>:

$$U_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

式中： $U_p$ =激励电压， $N_p$ =初级线圈， $d\phi$ =磁通量微分， $dt$ =时间微分。

图2显示出O型变压器的初级线圈 $N_p$ 、次级线圈 $N_s$ 、平均磁路长度 $l$ 和磁路横截面积 $a$ ，其中的感应原理来源于安培环路定律，即在磁场中，对 $H$ 的任意闭合线积分等于穿过闭合路径所界定面的传导电流的代数和，由式(2)和式(3)表征<sup>[19]</sup>：

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i \tag{2}$$

$$\sum_N H \cdot l = Ni \tag{3}$$

式中： $\vec{H}$ =磁场强度， $H$ =磁场强度模量， $l$ =磁路长度， $d\vec{l}$ =磁路微分， $N$ =线圈匝数， $i$ =线圈电流。

变化的磁通在闭合的硅钢磁路中，在次级线圈( $N_s$ )中生产同样频率的感应电动势 $E_s$ ：

$$E_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \tag{4}$$

式中： $E_s$ =感应电动势， $N_s$ =次级线圈， $d\phi$ =磁通量微分， $dt$ =时间微分。

而次级线圈的终端电压 $U_s$ 可由交流毫伏计直接检测到，相互关系为<sup>[10]</sup>：

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} = k \tag{5}$$

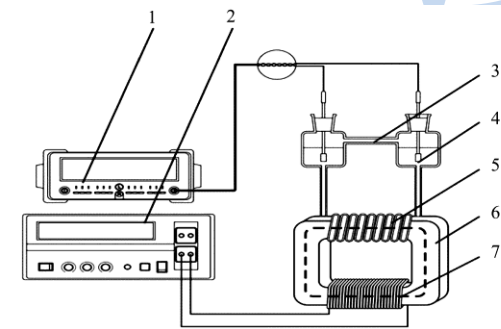


图3 基于变压器特性的电学参数测试系统示意图(上)与实物图(下)

Fig.3 Details of the test system

注：1.交流毫伏计 2.变频电源 3.玻璃联通器 4.铂片电极 5.玻璃弹簧 6.O型硅钢铁芯 7.初级线圈。

本试验的测试系统由图3所示，所有测试均于室温 22℃进行，将取得的西瓜汁液(去籽)注入特制的玻璃联通器中，形成开路状态。不同于传统单相变压器，本系统次级由西瓜汁液组成(玻璃弹簧中 $N_s=14$ )，PS61005 变频电源(普斯电子有限公司，台湾)于初级线圈( $N_p=140$ )施加不同频率 50~400 Hz 和不同幅值 5、10、20 V 的激励电压，然后采用连接于 UT631 交流毫伏计(优德利电子有限公司，上海)的铂电极检测不同固形物含量的西瓜汁液样品的终端电压值，记为 $U_w$ ，每个样品重复 5 次，其中 O 型铁芯采用材料牌铭为 30Q120 的低频硅钢，平均磁路长度为 520 mm，磁路横截面积 3.6 cm<sup>2</sup>，初级线圈与次级线圈(玻璃弹簧螺旋)之比 $k=N_p/N_s=10$ 。测试的激励电压与西瓜汁终端电压之比 $U_p/U_w$ 作为 $\lambda$ 值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于变压器的电学参数分析

选取不同固形物含量(4.23、5.84、6.79、7.54、8.77、10.12、11.25、12.43%)的西瓜汁于极低频 50~400 Hz 下进行终端电压测定。图4和图5为激励电压为 5V 时的电学特性，可以看出每种样品汁液的终端电压随频率变化的改变较小，这一规律符合变压器的电磁感应特性即次级电压不受频率影响，只与激励电压和线圈匝数比有关。因线圈匝数比一定( $k=10$ )且激励电压不变，则理论上所有样品的终端电压应相等，但实测情况是随着样品固形物含量的提高，终端电压呈现下降的趋势，分别为 446.8、427.4、387.1、379.7、299.6、269.5、245.1、222.7 mV。同时， $\lambda$  值出现上升趋势即分别为 11.2、11.7、12.9、13.2、16.7、18.5、20.4、22.4。这是因为当在此含复杂电解质成分的有机溶液中存在交变的感应电动势时，其离子传导占主要地位，同时存在少量的电子，体系中的带电离子受交变电势的影响往复运动且彼此碰撞，热力学运动加剧，固形物含量越高则易造成不同电性的离子聚集在果胶或可溶性纤维等大分子中形成大的胶体粒子，如图6所示，从而离子传导减弱，所以终端电压降低，因此时激励电压不变故 $\lambda$ 值升高。

图7a和7b为 50 Hz 和 400 Hz 时，不同激励电压下(5、10、20 V)西瓜汁样品两端的终端电压变化情况，可以看出随激励电压的提高，不同样品的终端电压均提升，但增加的趋势随着固形物含量的增加而减小。从图7c和7d可以看出，激励电压和终端电压之比呈现上升趋势，可溶性固形物含量的增加则 $\lambda$ 值也



呈现提高的趋势。50 Hz 时, SSC 值为 4.23% 的西瓜汁样品  $\lambda$  值从 11.57 提高到 25.77, 而 SSC 值为 12.43% 的样品  $\lambda$  值从 22.90 提高到 71.81。

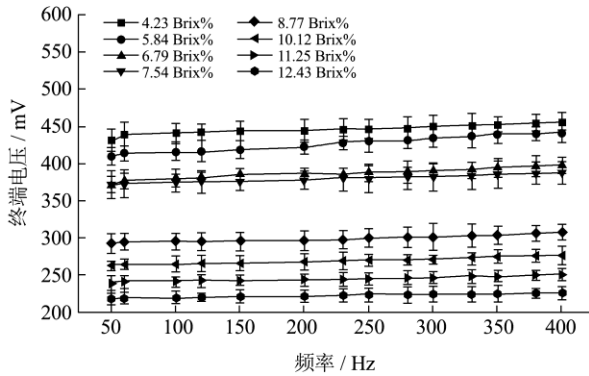


图 4 西瓜汁在极低频下的终端电压

Fig.4 Terminal voltage of watermelon in extreme-low frequencies

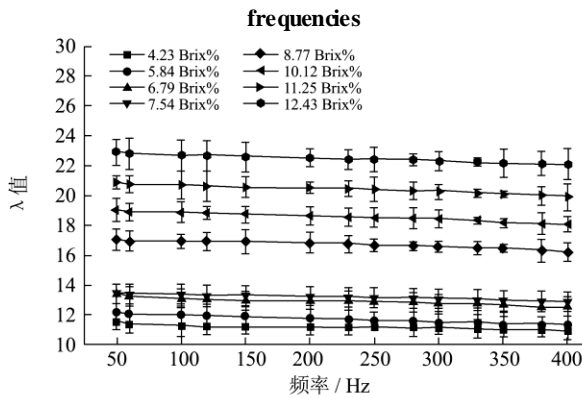


图 5 西瓜汁在极低频下的  $\lambda$  值

Fig.5  $\lambda$  value of watermelon in extreme-low frequencies

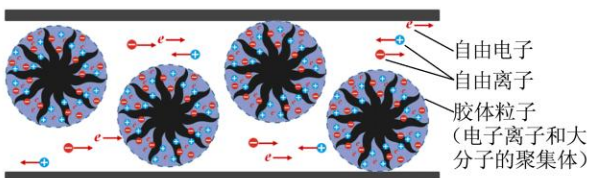


图 6 感应电动势影响下西瓜汁在螺旋状管路中的离子传导

Fig.6 Ionic conduction of watermelon juice in spiral tube by the action of inductive electromotive force

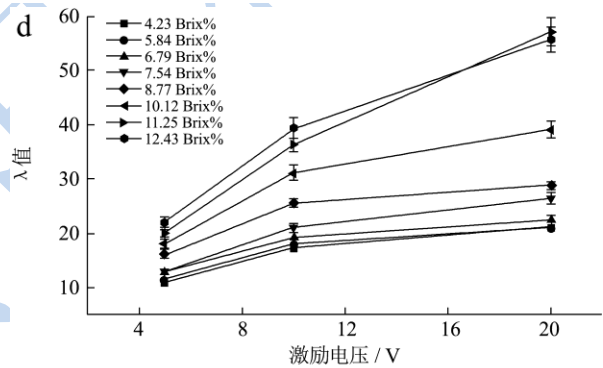
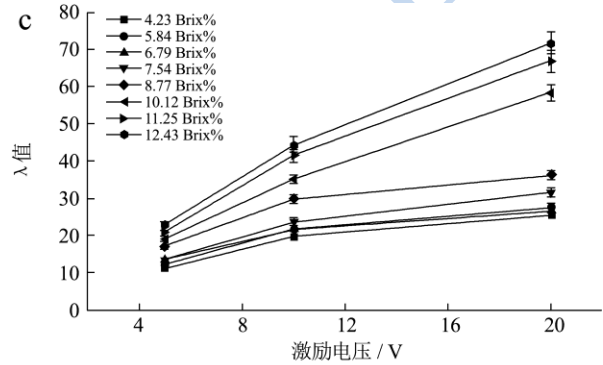
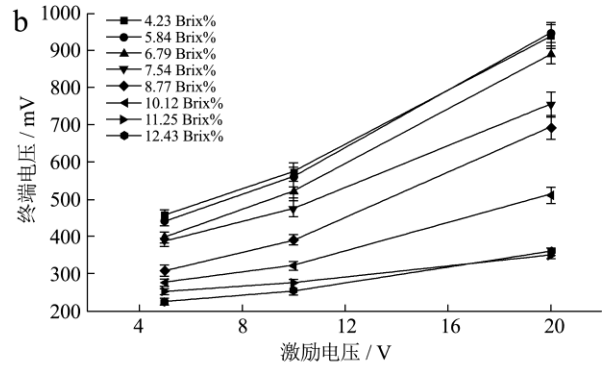
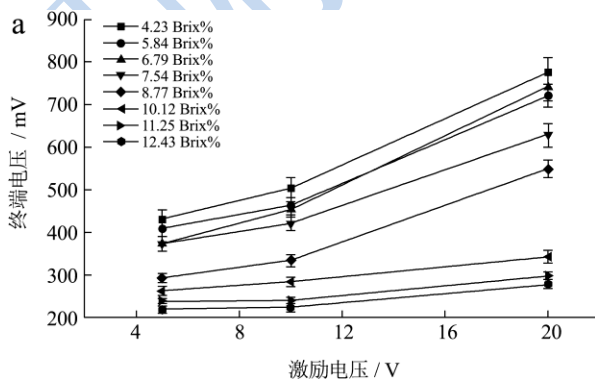


图 7 西瓜汁的降压感应电学特性

Fig.7 Step-down properties of watermelon

注: a: 50 Hz 下终端电压随激励电压的变化规律; b: 400 Hz 下终端电压随激励电压的变化规律; c: 50 Hz 下  $\lambda$  值随激励电压的变化规律; d: 400 Hz 下  $\lambda$  值随激励电压的变化规律。

### 2.2 基于变压器特性的电学参数与固形物含量的相关性

从上述规律可知当样品可溶性固形物含量呈现梯度上升时电学参数也出现规律性变化, 为了确定可溶性固形物含量和终端电压及  $\lambda$  值的关系, 分别对所有测试的西瓜样品进行可溶性固形物和电学参数的拟合, 其中选取常用的极低频 50、120、200、400 Hz, 激励电压为 10 和 20 V, 各自的线性方程描述见表 2、

3.发现此测量条件下样品的终端电压值和λ值都与可溶性固形物含量有较好的线性相关性,而终端电压值与可溶性固形物含量的相关性整体高于λ值。其中50 Hz和10 V下,终端电压值与可溶性固形物含量相关性最好,其决定系数 $R^2=0.969$ ,显著性水平 $\alpha \leq 0.01$ 。这一现象为基于变压器特性的电学参数表征果汁品质

提供了可能。另选取60个西瓜样本并采用此模型来验证其预测精度和稳定性,从图8可以看出计算预测值和实际值的决定系数 $r=0.908$ ,计算预测标准差(SEP)为0.893 Brix%,偏差(Bias)为-0.238 Brix%。说明该模型具有较高的预测精度,能够对不同成熟度的西瓜汁可溶性固形物含量进行检测。

表2 西瓜固形物含量SSC-终端电压 $U_w$ 相关性分析

Table 2 Regression analysis of soluble solid content as a function of the terminal voltage ( $U_w$ ) of watermelon

频率/Hz	激励电压/V	回归方程	$R^2$	$\alpha$
50	10	$SSC = -0.025 \pm 0.003 \times U_w + 17.636 \pm 1.423$	0.969	0.000**
	20	$SSC = -0.013 \pm 0.002 \times U_w + 15.404 \pm 1.732$	0.931	0.000**
120	10	$SSC = -0.024 \pm 0.003 \times U_w + 17.629 \pm 2.152$	0.967	0.000**
	20	$SSC = -0.013 \pm 0.002 \times U_w + 15.670 \pm 2.349$	0.934	0.000**
200	10	$SSC = -0.024 \pm 0.004 \times U_w + 17.519 \pm 3.080$	0.965	0.000**
	20	$SSC = -0.012 \pm 0.002 \times U_w + 15.649 \pm 2.007$	0.935	0.000**
400	10	$SSC = -0.021 \pm 0.003 \times U_w + 17.395 \pm 2.660$	0.967	0.000**
	20	$SSC = -0.011 \pm 0.001 \times U_w + 15.817 \pm 2.681$	0.938	0.000**

注:终端电压 $U_w$ 为自变量,固形物含量SSC为因变量, $R^2$ 为相关性系数, $\alpha$ 显著水平;\*\*在 $\alpha \leq 0.01$ 水平上差异显著。

表3 西瓜固形物含量SSC-λ值相关性分析

Table 3 Regression analysis of soluble solid content as a function of the λ value of watermelon

频率/Hz	激励电压/V	回归方程	$R^2$	$\alpha$
50	10	$SSC = 0.282 \pm 0.027 \times \lambda - 0.004 \pm 0.005$	0.940	0.000**
	20	$SSC = 0.137 \pm 0.017 \times \lambda + 2.461 \pm 0.425$	0.886	0.000**
120	10	$SSC = 0.290 \pm 0.036 \times \lambda + 0.032 \pm 0.004$	0.935	0.000**
	20	$SSC = 0.150 \pm 0.018 \times \lambda + 2.333 \pm 0.407$	0.878	0.001**
200	10	$SSC = 0.293 \pm 0.040 \times \lambda + 0.050 \pm 0.003$	0.938	0.000**
	20	$SSC = 0.152 \pm 0.002 \times \lambda + 2.383 \pm 0.419$	0.877	0.001**
400	10	$SSC = 0.313 \pm 0.057 \times \lambda + 0.220 \pm 0.037$	0.939	0.000**
	20	$SSC = 0.172 \pm 0.023 \times \lambda + 2.511 \pm 0.273$	0.854	0.001**

注:λ值为自变量,固形物含量SSC为因变量, $R^2$ 为相关性系数, $\alpha$ 显著水平;\*\*在 $\alpha \leq 0.01$ 水平上差异显著。

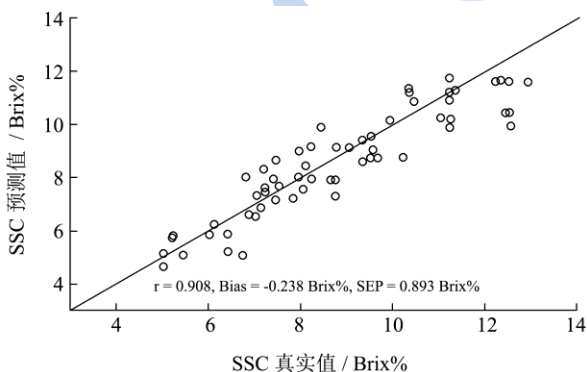


图8 不同终端电压下可溶性固形物的预测值与真实值的关系

Fig8 Relationship between the predicted and actual soluble solid contents at different terminal voltages

### 3 讨论

变压器可实现交流电压的变换,铁芯磁路中的交

变磁通可使次级线圈具有感应电动势。因西瓜可溶性固形物中含有复杂的有机物成分其中包含大量的电解质离子如 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $Mg^{2+}$ 等阴阳离子和少量的电子<sup>[11-12]</sup>,本试验发现将此西瓜汁液体作为变压器的次级线圈导体,基于该技术原理下的样品终端电压可被检测。金属导体作为变压器的次级线圈工作时依靠自由电子的传导实现,当次级线圈为复杂的电解液时,可以看出终端电压随固形物含量的增高而出现减小的趋势,即有λ值偏离于k值的现象。这可能是因离子传导和电子传导同时存在于有机电解质溶液,而可溶性固形物含量增加即体系中有有机物质和自由离子增加显著,在感应电动势的影响下其部分离子、溶剂分子和有机物质形成大的胶体粒子并捕获了一定数量的电子和离子,即传导减弱而造成体系终端电压的降低<sup>[13-14]</sup>。

在铁芯的工作范围内, 频率升高则感应电压也轻微升高, 这是因为体系中离子受感应电动势的影响往复运动, 频率提高则往复运动的自由程降低, 聚集成较大胶体粒子的数量相对较少, 故离子传导有所提高, 从而终端电压也微小提升。同时, 因西瓜汁中固形物含量一定, 即带电离子数量有限, 激励电压提高的同时体系中的离子传导效应则受感应电动势的影响而提升有限, 所以随激励电压增加则终端电压增加趋势变缓。本试验的测试系统属于降压变压器模型( $N_p > N_s$ ), 将来进一步的试验也可采用高频铁芯进行更高频率范围的分析研究。技术应用可针对液态食品的品质分析, 如各类食用油的酸价, 过氧化值与掺假分析, 淀粉乳液的冻融性评估, 不同脂肪含量的乳品掺水和储藏期测试等。

#### 4 结论

采用模拟降压变压器结构的测试系统对含有不同可溶性固形物含量西瓜样品其基于变压器特性的电学参数进行了测量, 发现在常用极低频下 50、120、200、400 Hz, 西瓜汁的可溶性固形物含量可用终端电压或激励电压与终端电压比值进行量化。当激励电压为 10 V, 频率 50 Hz 时, 线性方程模型相关系数最高为  $R^2=0.969$ , 预测样本的标准差 (SEP) 为 0.893 Brix%, 偏差(Bias)为-0.238 Brix%。将果蔬汁液作为变压器的次级线圈导体并利用电磁感应原理来检测其电学参数可作为一种潜在的快速检测技术来测定其可溶性固形物含量。

#### 参考文献

- [1] Pliquet U. Bioimpedance: a review for food processing [J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(2): 74-94
- [2] 金亚美, 杨哪, 张晋芳, 等. 真空醋渍黄瓜品质的介电检测[J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2762-2767  
JIN Ya-mei, YANG Na, ZHANG jin-fang, et al. Dielectric detection of salted cucumber treated with vacuum acetic impregnation [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(11): 2762-2767
- [3] ZHU Xin-hua, GUO Wen-chuan, WU Xiao-ling. Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(2): 258-266
- [4] 章海亮, 孙旭东, 刘燕德, 等. 近红外光谱检测苹果可溶性固形物[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 340-344  
ZHANG Hai-liang, SUN Xu-dong, LIU Yan-de, et al. Measurement of soluble solid content in apples using near infrared spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 340-344
- [5] 袁琳, 徐怀德, 李钰金. 近红外漫反射光谱检测网纹瓜可溶性固形物含量的研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(4): 272-277  
YUAN Lin, XU Huai-de, LI Yu-jin. Studies on the rapid measurements of soluble solids content in Nutmeg Melon by near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(4): 272-277
- [6] 郭文川, Stuart O Nelson, Samir Trabelsi, 等. 蜜瓜和西瓜果汁的射频介电特性及其与糖度的关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 289-292  
GUO Wen-chuan, Stuart O. Nelson, Samir Trabelsi, et al. Radio Frequency (RF) dielectric properties of honeydew melon and watermelon juice and correlations with sugar content [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 289-292
- [7] Kato K. Electrical density sorting and estimation of soluble solids content of watermelon [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(2): 161-170
- [8] Pryor R W. Inductive conductivity measurement of seawater [C]. In proceedings of the COMSOL Conference 2013, Boston
- [9] Hurlley W G., Wolfle W H.. Transformers and inductors for power electronics [M]. First edition, Chichester, UK: John Willey and sons, Ltd., 2013, pp 3-4
- [10] Kulkarni S V., Khaparde S A. Transformer engineering design, technology, and diagnostics [M]. Second edition, Boca Raton: RC Press, 2012, pp 13-14
- [11] 季宇彬, 郭守东, 汲晨锋. 野西瓜成熟果实中多糖的含量测定及毛细管电泳分析[J]. 中国药学杂志, 2006, 41(15): 1186-1189  
JI Yu-bin, GUO Shou-dong, JI Chen-feng. Determination and analysis of polysaccharide from capparid ripe fruits by HPCE [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2006, 41(15): 1186-1189
- [12] Gongadze E, Velikonja A, Perutkova Š, et al. Ions and water molecules in an electrolyte solution in contact with charged and dipolar surfaces[J/OL]. Electrochimica Acta, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.07.147>, 2014-03-03
- [13] Geletii Y V, Gueletii A, Weinstock I A. Electron capture and transport by heteropolyanions: Multi-functional electrolytes for biomass-based fuel cells [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2007, 262(1): 59-66
- [14] Nakade S, Kambe S, Matsuda M, et al. Electron transport in electrodes consisting of metal oxide nano-particles filled with electrolyte solution [J]. Physica E, 2002, 14(1-2), 210-214