

基于介电特性的鸡蛋品种无损鉴别

孙俊¹, 刘彬¹, 毛罕平², 武小红¹, 高洪燕², 杨宁¹

(1.江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013;

2.江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为更合理有效实现鸡蛋品种分类, 研究一种介电特性无损鉴别鸡蛋品种方法。本实验以4组不同品种鸡蛋(江苏镇江洋鸡蛋、江苏镇江草鸡蛋、安徽老南沟草鸡蛋、江苏东台草鸡蛋)为研究对象, 采用平行极板法测量4组鸡蛋在10~200 kHz条件下的介电特性参数, 并利用支持向量机(support vector machine, SVM)算法建立鸡蛋品种鉴别分类检测模型。研究不同核函数(线性核函数、多项式核函数、RBF核函数和Sigmoid核函数)、不同参数寻优算法(网格搜索法、遗传算法和粒子群算法)选择对分类模型准确率的影响。结果表明, 以线性核函数为SVM核函数、粒子群算法为SVM参数寻优算法时, 建立的鸡蛋品种SVM分类模型的性能最优, 其训练集正确率为95.83%, 测试集正确率为95.83%。利用介电特性无损检测技术结合SVM算法, 取得了很好的分类效果, 为鸡蛋品种鉴别提供了一种新的快速有效的方法。

关键词: 介电特性; 鸡蛋; 品种; 无损检测; 支持向量机

Non-Destructive Identification of Different Egg Varieties Based on Dielectric Properties

SUN Jun¹, LIU Bin¹, MAO Hanping², WU Xiaohong¹, GAO Hongyan², YANG Ning¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: For more reasonable and effective classification of eggs, a method for non-destructive identification of egg varieties based on dielectric properties was developed. In this experiment, four groups of eggs (caged eggs from Zhenjiang, Jiangsu province, and free-range eggs from Zhenjiang, Jiangsu province, from Laonangou, Anhui province, and from Dongtai, Jiangsu province) were measured for dielectric properties in the frequency range of 10–200 kHz by the parallel plate method. A classification model for egg varieties by the support vector machine (SVM) algorithm was established. The effects of different kernel functions (linear, polynomial, RBF, and Sigmoid) and different parameter optimization algorithms (grid search, genetic algorithm, and particle swarm optimization) on the accuracy rate of the classification model were analyzed. The results showed that the performance of the SVM classification model based on linear kernel function and particle swarm optimization was the best, giving a prediction accuracy of 95.83% and 95.83% for the training and test sets, respectively. The non-destructive testing technology based on SVM algorithm using dielectric properties achieved good classification results. This study has provided a new effective method for the identification of egg varieties.

Key words: dielectric properties; egg; variety; non-destructive testing; support vector machine (SVM)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201706044

中图分类号: TS253.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 06-0282-05

引文格式:

孙俊, 刘彬, 毛罕平, 等. 基于介电特性的鸡蛋品种无损鉴别[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 282-286. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201706044. <http://www.spkx.net.cn>

SUN Jun, LIU Bin, MAO Hanping, et al. Non-destructive identification of different egg varieties based on dielectric properties[J]. Food Science, 2017, 38(6): 282-286. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201706044. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31471413); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发2011 6号);

江苏省六大人才高峰资助项目(ZBZZ-019); 江苏大学现代农业装备与技术重点实验室开放基金项目(NZ201306)

作者简介: 孙俊(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事计算机技术在农业工程中研究。E-mail: sun2000jun@ujs.edu.cn

蛋类是我国居民重要的蛋白质来源,禽蛋的供给主要以鸡蛋为主^[1],随着我国经济水平的不断提高,人们对鸡蛋品质的要求越来越高。不同品种的鸡蛋在品质、口感、营养等方面有着较大区别,目前不少无良商贩以次充好,用低价低质蛋冒充高价高品质蛋,损害了百姓利益、扰乱市场,所以实时对鸡蛋品种进行检测对于鸡蛋市场的规范化具有极其重要的意义。目前,鸡蛋品种鉴别主要依靠人工经验,但是这种方法易受主观因素的影响,且成本高,准确识别率低^[2]。

随着现代农业和食品加工的快速发展,农产品检测技术显得非常重要。无损检测相对于破坏性检测,具有非破坏性、全面性、可靠性等优点,已成为食品科学的一个重要研究热点。目前,用于无损检测禽蛋的方法有:荧光光谱^[3]、红外光谱^[4]、图像处理^[5]、介电特性检测技术等。光谱用于分子研究的应用还没有得到食品科学尤其是蛋类产品领域的完全认可;图像处理的识别率相对较低,且易受样品外部特征影响^[6];介电特性检测技术是一种应用广泛的快速无损检测技术,它利用待测物质电磁特性变化建立与内含成分的内在联系而实现对物质的检测^[7],利用介电特性对农产品品质检测、分级筛选等方面已显示出特殊的优越性^[8],国内外利用介电特性进行农产品无损检测已有较多成果^[9-21]。冯呈艳等^[9]研究了茶鲜叶介电特性,结果表明,不同茶叶品种间、不同部位芽叶的电容和介电常数差异显著,通过介电参数的测定可以对鲜叶进行分级鉴定。张蕾等^[10]研究鸡蛋贮藏过程中介电特性与新鲜品质的变化,得到鸡蛋新鲜度品质指标——蛋黄指数与相对介电常数和介质损耗因子有极显著的相关性。Ragni等^[11]分析了蛋类物质在不同存贮期内的介电特性变化规律,并建立了一个以存贮时间为自变量的一次线性模型。

有关鸡蛋介电特性的研究报告都旨在寻找介电参数与鸡蛋品质指标变化之间的相关关系^[10-11,16],而基于介电特性的鸡蛋品种分类检测鲜见报道。在我国人们通常将散养鸡所产下的鸡蛋称为草鸡蛋,一般养鸡场生产的鸡蛋被称为洋鸡蛋。两者相比,草鸡蛋口感绝佳,香味自然纯真、营养价值高,其经济价值也高于洋鸡蛋。本实验主要利用介电特性对形态相近的草鸡蛋与洋鸡蛋进行区分,另外识别来自不同产地的草鸡蛋,验证基于介电特性的鸡蛋品种无损鉴别的可行性,为鸡蛋品种无损鉴别提供了一种新的快速有效的方法。

1 材料与方法

1.1 材料

样品来源于镇江市某大型超市4个品种的新鲜鸡蛋,分别为:江苏镇江洋鸡蛋、江苏镇江草鸡蛋、安徽

老南沟草鸡蛋、江苏东台草鸡蛋。4种鸡蛋的外形特征相似,不宜通过外形区分。抽样检测其新鲜度均达到AA级,即蛋黄指数不小于0.42^[1],蛋质量为45~65 g,蛋形指数在1.30~1.35之间。测试前,清除蛋壳表面污渍,剔除破蛋、畸形蛋和裂纹蛋。每种鸡蛋30枚为一组,分为4组,共120枚鸡蛋,进行编号并标记测试电极的夹持位置。在温度20℃左右,相对湿度72%~89%的室内环境中进行介电特性检测。

1.2 仪器与设备

蛋黄指数检测器为实验室自制;HPS2816B型LCR数字电桥测量仪(测量频率60~200 kHz) 常州海尔帕科技公司;CNC1001109912微量天平测量仪(分辨率0.001 g) 杭州万特衡器有限公司;MNT-150游标卡尺(精度0.02 mm) 德国美耐特公司;圆形平行板电极 泰州飞翔制造厂。

无损测试系统^[15]主要由电极板、LCR数字电桥测试仪、应变片、静态应变仪等组成,如图1所示。电桥仪测试介电特性,应变片提供夹持力,静态应变仪监测夹持力大小,有机玻璃板固定电极板,并且不对检测时的电磁场产生干扰。

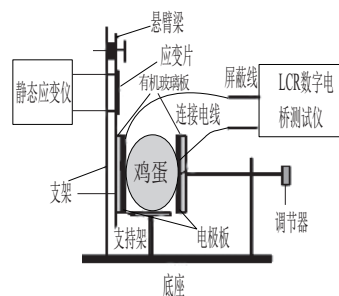


图1 无损测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nondestructive testing system

1.3 方法

1.3.1 参数测定

1.3.1.1 鸡蛋形态的测定

选取适当体型(蛋质量为45~65 g,蛋形指数在1.30~1.35之间)的鸡蛋。用精度0.02 mm的游标卡尺测量蛋的最大横径和最大纵径,蛋形指数=蛋的纵径长/蛋的横径长。用精度0.001 g的微量天平测量仪测量整蛋的质量。

1.3.1.2 新鲜度的测定^[22]

在实际生产中,蛋黄指数作为一项重要指标用于评价鲜蛋品质优劣^[1,23]。保证鸡蛋的新鲜度一致,每种鸡蛋随机抽取10枚检测新鲜度。抽样检测新鲜度达到AA级,即蛋黄指数不小于0.42。自制一个简易的蛋黄指数检测器,在室内环境中,将鸡蛋在中部轻轻打破,剥开蛋壳,将蛋液轻轻倒在洁净的玻璃板上(要求校准水平),把检测器架放在蛋液上,勿使角柱触及蛋液,然

后从槽口插下直尺至蛋黄的最高点,当刚刚触及蛋黄膜时迅速读取直尺与平面相交的刻度,记为 b (cm),则蛋黄高度 $h=6-b$ (6 cm为角柱高度),移开检测器后,用透明直尺水平持在手中,目测蛋黄的宽度,也可用游标卡尺或圆规测定宽度,记为 W (cm)。根据公式(1)计算蛋黄指数^[22]:

$$\text{蛋黄指数}/\% = \frac{h}{W} \times 100 \quad (1)$$

1.3.1.3 介电特性的测定

测量装置包括HPS2816B型精密LCR数字电桥仪,标配的夹具和定制的圆形平行板电极。实验选定测试极板为圆形铜板,厚3 mm,直径65 mm,于鸡蛋最大纵径相当,通过标配的夹具与电桥仪相连接。选择极板给鸡蛋的夹持力为1 N,夹持力由应变片提供,静态应变仪监测,该力既可保证稳固夹持,又不破损鸡蛋。平行极板夹持鸡蛋有2种放置方式,如图2所示。因为竖放与横放相比较,竖放样品与极板的接触面积更大些,对极板的填充效果更好,且空气对介电参数的影响也更小些^[10]。因此,实验中都将鸡蛋竖放来测量其介电参数。

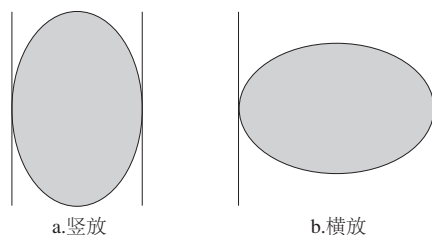


图2 夹持方式
Fig. 2 Holder manner

电桥仪的频率点选择分别为10、12、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120、150、200 kHz。输出信号电压1.0 V。测量系统中数字电桥仪直接给出介质损耗因子和电容 C_p ,根据公式(2)计算相对介电常数^[16]:

$$\epsilon'_r = \frac{C_p}{C_0}, C_0 = \frac{\epsilon_0 \times S}{d} \quad (2)$$

式中: ϵ'_r 为相对介电常数; C_0 为真空电容/F; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_0 为 8.853×10^{-12} F/m; S 为极板面积/ m^2 ; d 为两极板之间距离/m。

1.3.2 分类建模算法

1.3.2.1 支持向量机 (support vector machine, SVM) 算法

SVM分类算法是一种基于统计学习理论的分类算法。目前,SVM已被大量用于多种数据分类问题的处理,且SVM相较传统的分类算法在小样本、非线性以及高维模式等领域中表现出极强的分类性能优势^[24-30]。

SVM性能的优劣主要取决于模型选择,在模型选择中主要涉及核函数及其相关参数的选取。不同的核函数以及参数会对分类器的性能有着重要的影响,若核函数以及参数选择不当则会使得分类器不能够正确分类。因此,选择什么类型的SVM核函数及最优的参数是建立SVM分类模型必须考虑的问题。本实验通过相同参数条件下,不同核函数建模分析,对比模型的分类准确率,选择出适合本问题的最优核函数。

1.3.2.2 SVM模型参数优化

关于SVM参数的优化选取,国际上并没有公认统一的最好的方法,目前较为常用的SVM参数寻优的方法有:实验法、网格搜索法^[26]、遗传算法寻优法^[27]、粒子群算法寻优法^[28]等。实验法是指通过大量的实验比较来确定参数,这种方法十分浪费时间,且不易寻得最优参数。网格搜索法是将待搜索参数在一定的空间范围中划分成网格,通过遍历网格中所有的点来寻找最优参数。这种方法在寻优区间足够大且步距足够小的情况下可以找出全局最优解。由于网格内多数参数组对应的分类准确率都非常低,只在一个比较小的区间内的参数组所对应的分类准确率很高,所以遍历网格内所有参数组会相当浪费时间。遗传算法和粒子群算法属于启发式算法,它们不必遍历区间内所有的参数组也能找到全局最优解,这2种算法操作比较复杂,可能会陷入局部最优。本实验在确定核函数后,通过不同SVM参数寻优的方法建模分析,对比模型的分类准确率及其运行时间,选择出适合本实验的寻优方法。

2 结果与分析

2.1 鸡蛋的介电特性

2.1.1 频率对介电特性的影响

测量4组不同品种鸡蛋的介电特性,取每组鸡蛋介电参数的平均值作为该组鸡蛋的测试值进行数据分析。利用MATLAB绘制出鸡蛋介电参数随测量频率的变化曲线,如图3所示。由图3A可知,在20℃,10~200 kHz条件下,4组不同品种鸡蛋的相对介电常数基本随频率的增加而下降,但在50、100 kHz频率点处出现反复升降现象。由图3B可知,在20℃,10~200 kHz条件下,4种不同品种鸡蛋的介质损耗因子也基本随频率的增加而下降;在50 kHz频率上也出现了反复升降现象。可以清晰地看出,鸡蛋的介电特性呈现随频率的升高而降低的趋势,但在50、100 kHz频率点处出现了反复升降现象。

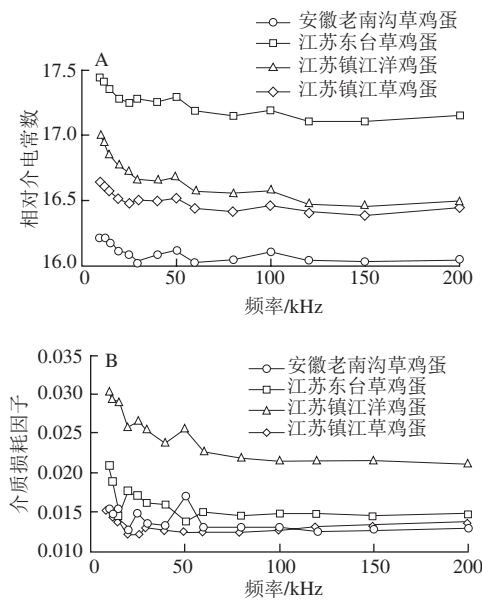


图3 相对介电常数(A)和介质损耗因子(B)随频率变化曲线
Fig. 3 Variations in relative dielectric constant and dielectric loss factor with frequency

2.1.2 不同品种鸡蛋介电特性的差异

由图3A可知,在20℃、10~200 kHz、相同频率条件下,江苏东台草鸡蛋的相对介电常数最高;安徽老南沟草鸡蛋的相对介电常数最低;江苏镇江的2种鸡蛋的相对介电常数处于前两者之间,其中江苏镇江洋鸡蛋的相对介电常数要略高于江苏镇江草鸡蛋的相对介电常数。

由图3B可知,在20℃、10~200 kHz、相同频率条件下,洋鸡蛋的介质损耗因子明显大于草鸡蛋,3种草鸡蛋的介质损耗因子相近但也存在着不同,江苏东台草鸡蛋的介质损耗因子略大于其他2种。

运用SPSS软件对不同鸡蛋介电特性数据进行显著性分析。结果显示,不同品种鸡蛋的介电特性相伴概率 P 值为0.00。通常情况下, P 值大于0.05表示差异不显著; $0.01 < P < 0.05$ 表示差异显著; P 值小于0.01表示差异极显著。由此可以看出,不同品种鸡蛋的介电特性数据差异极显著,可以确定鸡蛋的介电特性数据也可以用来鉴别鸡蛋。

由以上分析可知,基于鸡蛋介电特性可以对鸡蛋进行无损鉴别。本实验的想法和思路是可行的,也具有实际意义。

2.2 SVM分类器建模

2.2.1 SVM分类模型

首先从4组不同品种鸡蛋的介电参数数据中随机选取部分样本作为训练样本集(每组24个,共计96个),余下的则作为测试样本集(每组6个,共计24个)。数据归一化处理后,利用SVM算法基于鸡蛋的介电参数数据,利用SVM 4种常见的核函数:线性核函数、多项式

核函数、RBF核函数和Sigmoid核函数,使用默认参数惩罚因子 c 为1、核函数参数 γ 为0.1进行建模分析,分类结果如表1所示。

表1 不同核函数预测正确率对比

Table 1 Comparison of prediction accuracies of different kernel functions		%			
核函数类型		线性核函数	多项式核函数	RBF核函数	Sigmoid核函数
相对介电常数	训练集	56.25 (54/96)	38.54 (37/96)	46.88 (45/96)	38.54 (37/96)
	测试集	58.33 (14/24)	29.17 (7/24)	54.17 (13/24)	45.83 (11/24)
介质损耗因子	训练集	76.04 (73/96)	43.75 (42/96)	59.38 (57/96)	54.17 (52/96)
	测试集	88.54 (85/96)	37.50 (9/24)	54.17 (13/24)	41.67 (10/24)
相对介电常数与介质损耗因子	训练集	88.54 (85/96)	68.75 (66/96)	73.96 (71/96)	60.42 (58/96)
	测试集	83.33 (20/24)	70.83 (17/24)	79.17 (19/24)	50.00 (12/24)

基于相对介电常数、介质损耗因子数据进行建模分析,SVM的分类结果预测正确率都较低,介质损耗因子的预测正确率要大于相对介电常数;基于相对介电常数与介质损耗因子数据进行建模分析,SVM的分类结果预测正确率有了较大提高。因此,选择相对介电常数与介质损耗因子数据进行建模分析。

2.2.2 SVM分类模型优化

建立SVM分类模型既要选择合适的核函数,又要对模型参数进行寻优。在4种核函数(线性、多项式、RBF和Sigmoid)条件下,分别采用网格搜索法、遗传算法寻优法、粒子群算法寻优法对模型参数进行寻优。对比建模结果,确定SVM分类模型的核函数及最优模型参数(惩罚因子 c 和核函数参数 γ),如表2所示。

表2 SVM模型的分类结果

Table 2 Results of classification with different SVM models

类型	寻优算法	惩罚因子 c	核函数参数 γ	时间/s	预测正确率/%	
					训练集	测试集
线性核函数	网格搜索法	24.25	0.000 98	85.06	95.83 (92/96)	87.50 (21/24)
	遗传算法	3.840 0	0.588 4	39.58	92.71 (89/96)	95.83 (23/24)
	粒子群算法	3.056 2	3.123 3	19.52	95.83 (92/96)	95.83 (23/24)
多项式核函数	网格搜索法	79.166 7	0.001 3	50.46	92.71 (89/96)	87.50 (21/24)
	遗传算法	83.355 7	0.047 7	43.54	80.21 (77/96)	75.00 (18/24)
	粒子群算法	7.92	0.600 3	19.24	96.88 (93/96)	79.17 (19/24)
RBF核函数	网格搜索法	111.430 5	0.047 4	71.61	95.83 (92/96)	87.50 (21/24)
	遗传算法	8.479 4	0.491 1	39.59	97.92 (94/96)	75.00 (18/24)
	粒子群算法	5.181 4	0.846 3	19.52	95.83 (92/96)	75.00 (18/24)
Sigmoid核函数	网格搜索法	128	0.023 7	51.01	92.71 (89/96)	79.17 (19/24)
	遗传算法	68.775 9	0.031 5	26.20	83.33 (80/96)	75.00 (18/24)
	粒子群算法	1.504 2	7.155 8	21.39	46.88 (45/96)	41.67 (10/24)

Sigmoid核函数的预测正确率最低,其他3种核函数训练集预测准确率相似,线性核函数的预测集预测正确率最高达到95.83%(23/24)。从模型的泛化能力考虑,即同时衡量训练集和测试集的预测正确率,则线性核函数对应的模型性能最佳。因此,选取线性核函数进行建模分析。

以线性核函数为SVM分类模型核函数, 经过对模型参数进行寻优得到各算法优化条件下的最佳惩罚因子 c 和核函数参数 γ , 以及其运行时间和预测正确率。由表2可知, 经过优化后预测正确率得到较大提升, 其中遗传算法与粒子群算法的优化结果预测正确率最好, 正确率达到95.83% (23/24), 两者的建模分析时间分别为39.58 s和19.52 s。综合模型分类准确率和建模所需时间这两性能指标来看, 采用粒子群算法进行参数寻优并建立的SVM模型的方法最优, 较适合于本实验的实际SVM建模。

3 讨论与结论

在10~200 kHz间, 随着测试频率的增大, 鸡蛋介电参数呈现减小的趋势。不同品种鸡蛋的介电参数差异显著 ($P<0.01$), 鸡蛋的介电特性可以用来鉴别鸡蛋品种。

利用SVM分类器建模鉴别鸡蛋品种, 对比不同核函数预测正确率, 可以看出线性核函数作为核函数的SVM模型最适合鸡蛋品种鉴定的建模分析; 不同寻优算法条件下SVM模型的分类结果对比, 综合模型分类准确率和建模所需时间这两性能指标来看, 采用粒子群算法来进行参数寻优并建立的SVM模型最优。

基于相对介电常数与介质损耗因子数据采用线性核函数的粒子群-SVM建模性能较好, 预测正确率能达到95.83%。利用介电特性结合粒子群-SVM算法可以作为鸡蛋品种鉴别的建模方法。

本实验研究结果显示, 不同品种的鸡蛋介电特性存在着显著差异并有一定的规律可循, 可以基于介电特性对鸡蛋品种进行鉴定。本研究有助于进一步了解鸡蛋的介电特性, 为基于介电特性的鸡蛋品种无损鉴定提供参考和理论基础, 为进一步研发基于介电特性的鸡蛋品种鉴定仪器设备提供参考。

参考文献:

[1] 李晓东, 张兰威. 蛋品科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-152.

[2] 姜正军, 霍兰芝. 我国蛋品加工业的现状与对策[J]. 食品科技, 2004, 29(11): 4-6. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2004.11.002.

[3] KAROU I R, KEMPS B, BAMELIS F, et al. Methods to evaluate egg freshness in research and industry: a review[J]. European Food Research and Technology, 2006, 222(5): 727-732. DOI:10.1007/s00217-005-0145-4.

[4] BAIN M M. Recent advances in the assessment of eggshell quality and their future application[J]. Worlds Poultry Science Journal, 2005, 61(2): 268-277. DOI:10.1079/WPS200459.

[5] 王巧华, 任奕林, 文友先. 基于BP神经网络的鸡蛋新鲜度无损检测方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 104-106. DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2006.01.028.

[6] 舒国伟, 陈合, 张璐, 等. 鸡蛋新鲜度评价方法研究现状[J]. 食品科技, 2008, 33(10): 233-236. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2008.10.067.

[7] JHA S N, NARSAIAH K, BASEDIYA A L, et al. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(4): 387-411. DOI:10.1007/s13197-011-0263-x.

[8] 马荣朝, 秦文, 吴维雄, 等. 食品电物性在无损检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 278-283. DOI:10.3321/j.issn.1002-6819.2007.05.053.

[9] 冯呈艳, 余志, 陈玉琼. 茶鲜叶介电特性的初步研究[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 111-115. DOI:10.3969/j.issn.1000-2421.2014.02.020.

[10] 张蕾, 郭文川, 马严明. 鸡蛋储藏过程中介电特性与新鲜品质的变化[J]. 农机化研究, 2008(4): 146-148. DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2008.04.044.

[11] RAGNI L, AL-SHAMI A, BERARDINELLI A, et al. Quality evaluation of shell eggs during storage using a dielectric technique[J]. Shami, 2007, 50(4): 1331-1340. DOI:10.13031/2013.23610.

[12] NELSON S O, GUO W C, TRABELSI S, et al. Sensing quality of watermelons through dielectric permittivity[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007: 85-288. DOI:10.1109/APS.2007.4395486.

[13] 蔡骋, 李永超, 马惠玲, 等. 基于介电特征选择的苹果内部品质无损分级[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 279-287. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.035.

[14] 郭文川, 商亮, 王铭海, 等. 基于介电频谱的采后苹果可溶性固形物含量无损检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 132-137. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.024.

[15] 郭文川. 果蔬生物体电特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003: 15-20.

[16] 张蕾. 鸡蛋介电特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 20-35.

[17] 商亮, 谷静思, 郭文川, 等. 基于介电特性及ANN的油桃糖度无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 257-264. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.17.033.

[18] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃电特性与生理特性关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 97-102. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.019.

[19] 马红章, 柳钦火, 王合顺, 等. 基于微波干涉技术的土壤介电特性测量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 159-163. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.028.

[20] 席新明, ZHANG Naqian, 何东健. 基于介电特性的水中钾盐浓度检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 124-129. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.021.

[21] 郭文川, 王婧, 朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 272-279. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.24.037.

[22] 金亚美, 王浩月, 杨娜, 等. 低频波段对鸡蛋贮藏期间介电特性的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 220-225. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.06.030.

[23] 李俊营, 詹凯, 吴俊峰, 等. 不同储藏方式对鸡蛋品质的影响[J]. 家畜生态学报, 2012, 33(1): 47-49. DOI:10.3969/j.issn.1673-1182.2012.01.010.

[24] 陆宁, 武本令, 刘颖. 基于自适应粒子群优化的SVM模型在负荷预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 43-46. DOI:10.3969/j.issn.1674-3415.2011.15.009.

[25] 孙俊, 张梅霞, 毛罕平, 等. 基于高光谱图像的桑叶农药残留种类鉴别研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 251-256. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.036.

[26] 刘祥楼, 贾东旭, 李辉, 等. 说话人识别中支持向量机核函数参数优化研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(7): 1669-1673. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2010.07.019.

[27] 王春林, 周昊, 李国能, 等. 基于支持向量机与遗传算法的灰熔点预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 11-15. DOI:10.3321/j.issn.0258-8013.2007.08.003.

[28] 宋志强, 沈雄, 郑晓, 等. 应用近红外光谱对低碳数脂肪酸含量预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2079-2082. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2013)08-2079-04.

[29] 栢凤女, 刘建学, 韩四海, 等. 基于支持向量机的食源性致病菌近红外光谱鉴别[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 179-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201412036.

[30] 于英杰, 王琼琼, 王冰玉, 等. 基于高光谱技术的铁观音茶叶等级判别[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 159-163. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422030.