

谢飞武,赵不赓,徐雷钧,等. 基于自由空间法的面粉品质介电常数探测[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):214-219.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.040

基于自由空间法的面粉品质介电常数探测

谢飞武, 赵不赓, 徐雷钧, 王 宇

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要:针对面粉的安全问题,获取一种可以快速有效检测面粉品质的方法对于控制面粉安全事故的发生具有极其重要的意义,根据面粉对不同波长电磁波反射率的差异特性,对基于谐振点测量面粉介电属性的自由空间法进行理论分析,并以矢量网络分析仪(VNA)组成测试平台,利用谐振峰/谷位置及其相互关系,测量不同厚度面粉的介电参数,分析正常面粉与霉变面粉的特征谱。在频域范围内利用待测面粉的反射率谐振位置-谐振峰/谷值特性测量面粉的介电常数,对同批次正常面粉的测量结果,1.5、1.8、2.0 cm 厚度的面粉介电常数没有明显差异,通过对其进行误差分析发现,符合测试要求;而 1.5 cm 厚正常面粉和 1.5 cm 厚霉变面粉测得的介电常数差异较大。试验结果表明,基于谐振点测量的自由空间法是一种快速有效测量面粉介电常数和是否霉变的方法。

关键词:自由空间法;矢量网络分析仪(VNA);谐振峰/谷;介电常数

中图分类号: S237;TS211.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0214-05

农产品是来源于农业的未经加工产品。我国人口众多,是农业大国之一,农产品加工规模呈现快速扩张之势,因此对农产品质量检测的高效性要求较高^[1]。传统的检测方法不能根本保证面粉的安全性,测量面粉的介电特性有助于模拟粮食在电磁场中的行为,可以有效地检测面粉的成分和品质,因此对样品介电特性的研究一直是重中之重^[2]。国外在农产品介电特性方面的研究已取得了较大的进展,常见的介电特性测量技术和方法有传输线技术^[3]、波导传输/反射法^[4]、谐振腔法^[5]、探针法^[6]、自由空间法^[7]等,不同的测量方法适用于不同的测量范围,在室内测量时常采用前面 3 种,但这 3 种方法在实验室测量过程中需要使用匹配的介质材料和采集技术,仪器笨重,不适用于携带,测量值与实际值误差较大,通常由数据收集时密度、压力、湿度等外部环境或者是测量对象加工时内在属性变化所引起。探针法虽然具有测量过程稳定、

精度高等特点,但介电常数的测量结果只能限制在一定界限内。与其他材料介电参数的测量方法相比,自由空间法具有非接触、非破坏的特点^[8-12]。关于自由空间法,国外的技术比较成熟,自 1987 年 Cullen 利用菲涅耳反射定律提出在自由空间测量材料电磁参数的一种有效反演方法以来,自由空间法受到了越来越多的关注^[13]。1991 年,Umari 等设计了一种可以大幅度减少收发天线间重复反射的校正方法,从而实现了自由空间法在电磁参数实际测量中的运用^[14]。2002 年,Muhamad 等基于传输系数和反射系数测量了晶体材料在 X 波段的介电常数^[15]。Vilovic 等在测量水泥墙的介电常数时,在基于菲涅耳反射定律的反演公式中引进了非线性最小二乘法来推算水泥墙反射系数的平方,从而计算水泥墙的介电常数^[16]。国内自 20 世纪 80 年代起就有部分科研机构开始研究自由空间法,如中国科学院研究员黄杨等通过实地测量黄淮海平原若干土壤的介电常数,利用反射信号的幅度开展反演计算,同时对计算结果展开分析^[17]。中国科学院东北地理与农业生态研究所的张俊荣等也曾在相关论述中阐述了自由空间法的工作原理、定标过程,并对冰、野草、土壤等典型地物开展测量^[18]。中国科学院电子学研究所的陈志雨等利用菲涅尔反射系数,根据测量获取的幅度及相位反推出介电常数,同时,他们在 20 世纪 90 年代末推导出了金属板处于极化状态时的定标方法和反演计算步骤^[19]。

收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:61874050);江苏省自然科学基金(编号:BK20161352);江苏省第十三批六大人才高峰高层次人才项目(编号:DZXX-018);江苏省农业科技自主创新项目[编号: CX(17)3001]。

作者简介:谢飞武(1992—),男,江西吉安人,硕士,主要从事农业生物环境与控制工程研究。E-mail:1006907004@qq.com。

通信作者:徐雷钧,博士,教授,主要从事太赫兹集成电路设计与谷物无损探测技术研究。E-mail:xlking@ujs.edu.cn。

2005 年,中国科学院上海高等研究院的魏玮等提出利用单极振子探测介电常数的方法,提高了实地检测的精确度^[20]。2010 年阮开智等利用短路反射法测量介质的复介电常数,避免了测量过程中的无用多值问题^[21]。2015 年王金华等发明了基于 HFSS 的利用液位传感器的同轴传输法,提高了对液态介质介电常数测量的精度^[22]。2016 年姚显春等进行了介电常数的反演递推研究^[23]。与上述方法相比,自由空间法有如下优点:可以对样品进行取向测试,以满足常规测试和某些特殊测试的需要;可以实现对待测样品介电常数的扫频测量;波导壁不必与待测样品进行完全接触。本研究采用自由空间法,通过由微波天线和矢量网络分析仪组成的测试平台对面粉的介电特性进行测试。

1 材料与方法

1.1 试验装置及其样品制备

试验于 2018 年在江苏大学国家重点学科基地进行,试验仪器为中国电子科技集团公司第四十一研究所生产的 AV3656 系列矢量网络分析仪,装置如图 1 所示。

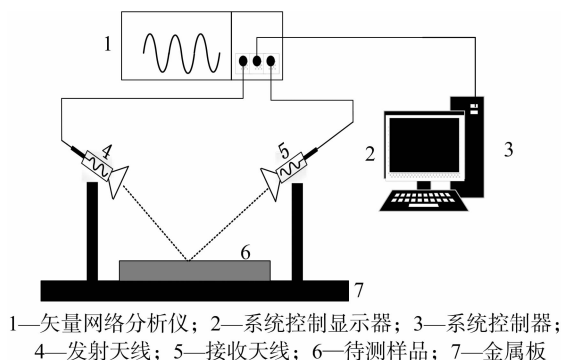


图1 AV3656 系列矢量网络分析仪测试系统

试验设计原理如图 1 所示,根据自由空间法设计的测试系统由系统控制器、系统控制显示器、矢量网络分析仪、发射天线和接收天线组成,2 个天线固定在水平的支架上面,其中发射天线可以移动,用来适应不同厚度的面粉测量需要。在进行待测样品测试之前,必须对测试系统进行校准。传统的短路-开路-负载-直通(SOLT)校准操作方便,测量准确度跟标准件的精度有很大关系,一般只适合同轴环境测量。而直通,反射,线(TRL)校准是准确度比 SOLT 校准更高的校准方式,尤其适合非同轴环境测量。本研究采用 TRL 方法进行校准,该方法不仅适用于多种特殊环境的校准,并且其校准的剩

余误差较小,在校准之前,将矢量网络分析仪内存的校准件参数作相应的修改,以适应自由空间 TRL 方法的校准。为了提高测试精度和稳定性,矢量网络分析仪应选用频综扫源;校准和测试时适当增加矢量网络分析仪的平均扫描次数,以减少噪声对测试结果的影响。

正常和霉变面粉样品均由江苏大学食品与生物工程学院提供,经粉碎、研磨、干燥和过滤获得各样品粉末。经 300 目筛子过滤后用 5 MPa 的压力压制成直径为 6.0 cm,厚度分别为 1.5、1.8、2.0 cm 的质地均匀的平面薄片,表面平滑无痕。对同一样品进行多次测量并剔除异常样品。

1.2 无耗介质的介电特性

对于无耗介质,将其看作是一个无限大且各向同性的介质板,则在各向同性介质中,电磁场频率与波长的关系为

$$f = v/\lambda; \quad (1)$$

$$v = c_0/\sqrt{\epsilon_r\mu_r}。 \quad (2)$$

式中: f 为频率; v 为介质中的电磁波波速; c_0 为真空中电磁波波速; ϵ_r 、 μ_r 分别为介质的介电常数和磁导率; λ 为介质中的电磁波波长。

$$\lambda = v/f = c_0/(f\sqrt{\epsilon_r\mu_r})。 \quad (3)$$

当介质板厚度 d 为 $1/4$ 波长整数倍时,即

$$d = m\lambda/4 = mv/(4f) = mc_0/(4f\sqrt{\epsilon_r\mu_r}), m = 1, 2, 3, \dots。 \quad (4)$$

根据电磁场理论,电磁波从光密媒质入射到光疏媒质中时,存在半波损失,因为测试样品为面粉层,考虑到电磁波从面粉层反射回空气中时的半波损失, m 为偶数时,面粉层上下 2 个界面反射的电磁波相位正好相反,产生相消干涉,而 m 为奇数时,则产生相长干涉,因此式(4)可以改写为

$$\epsilon_r\mu_r = [(mc_0)/(4fd)]^2, m = 1, 2, 3, \dots。 \quad (5)$$

式(5)可用来计算面粉的介电参数。

对于大部分非磁性材料而言, $\mu_r = 1$,因此式(5)可以化简为

$$\epsilon_r = [(mc_0)/(4fd)]^2, m = 1, 2, 3, \dots。 \quad (6)$$

对于无耗非磁性介质材料而言,由此即可直接得到介电参数的实部。

1.3 面粉的介电特性

对于面粉,则有其介电常数 $\epsilon = \epsilon_r - i\epsilon'$,其中 ϵ_r 和 ϵ' 为介电常数的实部和虚部,根据电磁波理论,其传播常数 α 和衰减常数 γ 为

$$\gamma = \alpha + i\beta; \quad (7)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_r \varepsilon_r}{2}} \left(\sqrt{1 + \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r}} - 1 \right). \quad (8)$$

式中: β 为相移常数,体现了波沿传播方向的相位滞后因素,其中 ε_r 和 ε_r' 为介电常数的实部和虚部。

设沿面粉厚度 Z 方向的反射率为 $\Gamma(z)$,根据微波传输线理论有:

$$\Gamma(z) = |\Gamma_L| e^{-2\alpha z} e^{i(\varphi - 2\beta z)}. \quad (9)$$

式中: Γ_L 为电压反射系数。

电场幅值 $E(z)$

$$E(z) = E_L^+ e^{\alpha z} e^{i\beta z} [1 + |\Gamma_L| e^{-2\alpha z} e^{i(\varphi - \beta z)}]. \quad (10)$$

$$|E(z)| = |E_L^+| e^{\alpha z} [1 + |\Gamma_L| e^{-2\alpha z} + 2|\Gamma_L| e^{-2\alpha z} \cos(\varphi - 2\beta z)]^{1/2}. \quad (11)$$

式中: E_L^+ 为入射波振幅。

则电场幅值的最大值和最小值分别为

$$|E(z)|_{\max} = |E_L| e^{\alpha z} [1 + |\Gamma_L| e^{-2\alpha z}]; \quad (12)$$

$$|E(z)|_{\min} = |E_L| e^{\alpha z} [1 - |\Gamma_L| e^{-2\alpha z}]. \quad (13)$$

1.4 波谷比值法

定义驻波比 $\rho = E_{\max}/E_{\min}$,即将相邻波峰波谷幅值之比称之为驻波比值法,这种方法可以用来测量介电常数,但是从实际测量情况来看,由于波峰不够尖锐,采用上述方法测量引起的误差比较大,而波谷的对应点更加尖锐,因此采用相邻波谷点幅值之比进行测量应该会更加准确一些。由式(13)可知,相邻波谷点的电场幅值之比为

$$\frac{|E(z)|_{\min 2}}{|E(z)|_{\min 1}} = \frac{|E_L| e^{\alpha \lambda} (1 - |\Gamma_L| e^{-2\alpha \lambda})}{|E_L| e^{\alpha \lambda / 2} (1 - |\Gamma_L| e^{-\alpha \lambda})}. \quad (14)$$

由于在测试过程中,待测样品的背面衬贴金属板,金属板的反射系数 $\Gamma_L = -1$,于是式(14)可化简为

$$\frac{|E(z)|_{\min 2}}{|E(z)|_{\min 1}} = \frac{e^{\alpha \lambda} (1 - e^{-2\alpha \lambda})}{e^{\alpha \lambda / 2} (1 - e^{-\alpha \lambda})} = e^{\alpha \lambda / 2} (1 + e^{-\alpha \lambda}). \quad (15)$$

因此可解得衰减常数:

$$\alpha = \frac{2}{d} \ln \frac{E_{\min 2}/E_{\min 1} - \sqrt{(E_{\min 2}/E_{\min 1})^2 - 4}}{2}. \quad (16)$$

由式(16)和式(8)可以解得待测样品介电常数的数值。

2 结果与分析

在实际测量中,按自由空间法的具体测量方式不同可以分为单反射测量和传输反射测量^[24],单反射法是在 2 种不同状态(包括角度、厚度与状态)下测出待测样品对电磁波的反射系数,然后利用 2 次数据计算出介电常数(图 2-a);传输反射法是利用收发分置的测试系统分别测出系统的反射系数和透射系数,再计算介电常数(图 2-b)。由于单反射法与传输反射法所测量数据存在差异,因此所用的具体计算公式也不同,但均基于麦克斯韦方程和菲涅尔反射定律进行计算。本研究采用单反射法在不同厚度情况下测量待测样品对电磁波的反射系数,并计算介电常数。图 3 是面粉的反射率测试结果,图 3-a 中 1.5 cm 厚的面粉反射第一谐振峰在 6.31 GHz 处,由式(5)知,当 m 取 2 时,待测面粉上下 2 个界面电磁波相位相反,产生相消干涉。由此可得面粉的介电常数为

$$\varepsilon_r \mu_r = [(mc_0)/(4fd)]^2, m = 1, 2, 3 \dots. \quad (17)$$

$$\varepsilon_r = \left[\frac{mc_0}{4fd} \right]^2 = \left[\frac{2 \times 3 \times 10^8}{4 \times 6.31 \times 10^9 \times 1.5 \times 10^{-2}} \right]^2 = 2.512.$$

图 3-b 是 1.8 cm 厚相同批次面粉反射率的测试结果,1.8 cm 厚面粉的第一谐振峰在 5.24 GHz 处,由此可以计算得出面粉的介电常数 $\varepsilon_r = 2.529$ (表 1)。图 3-c 是 2.0 cm 厚相同批次面粉反射率

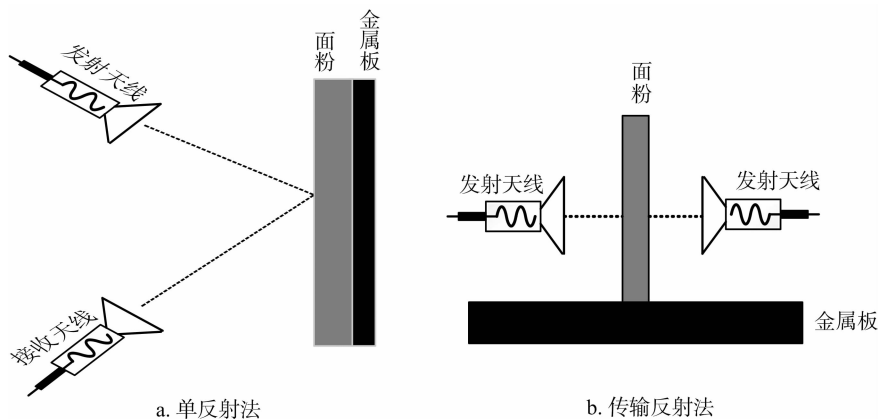


图2 自由空间法测量原理

的测试结果,计算得出面粉的介电常数 $\varepsilon_r = 2.514$ 。由此可知,a、b、c 3 组面粉厚度测试的介电常数基本相同,说明测试结果还是比较精确的。图 3-d 为同一样本面粉发生霉变时测得的介电常数,通过测

试,1.5 cm 厚霉变面粉的第一谐振峰在 5.77 GHz 处,通过计算可得其介电常数 $\varepsilon_r = 3.004$ 。由此可知,在面粉发生霉变的情况下,面粉的介电常数会发生改变,可以通过介电常数判断面粉是否霉变。

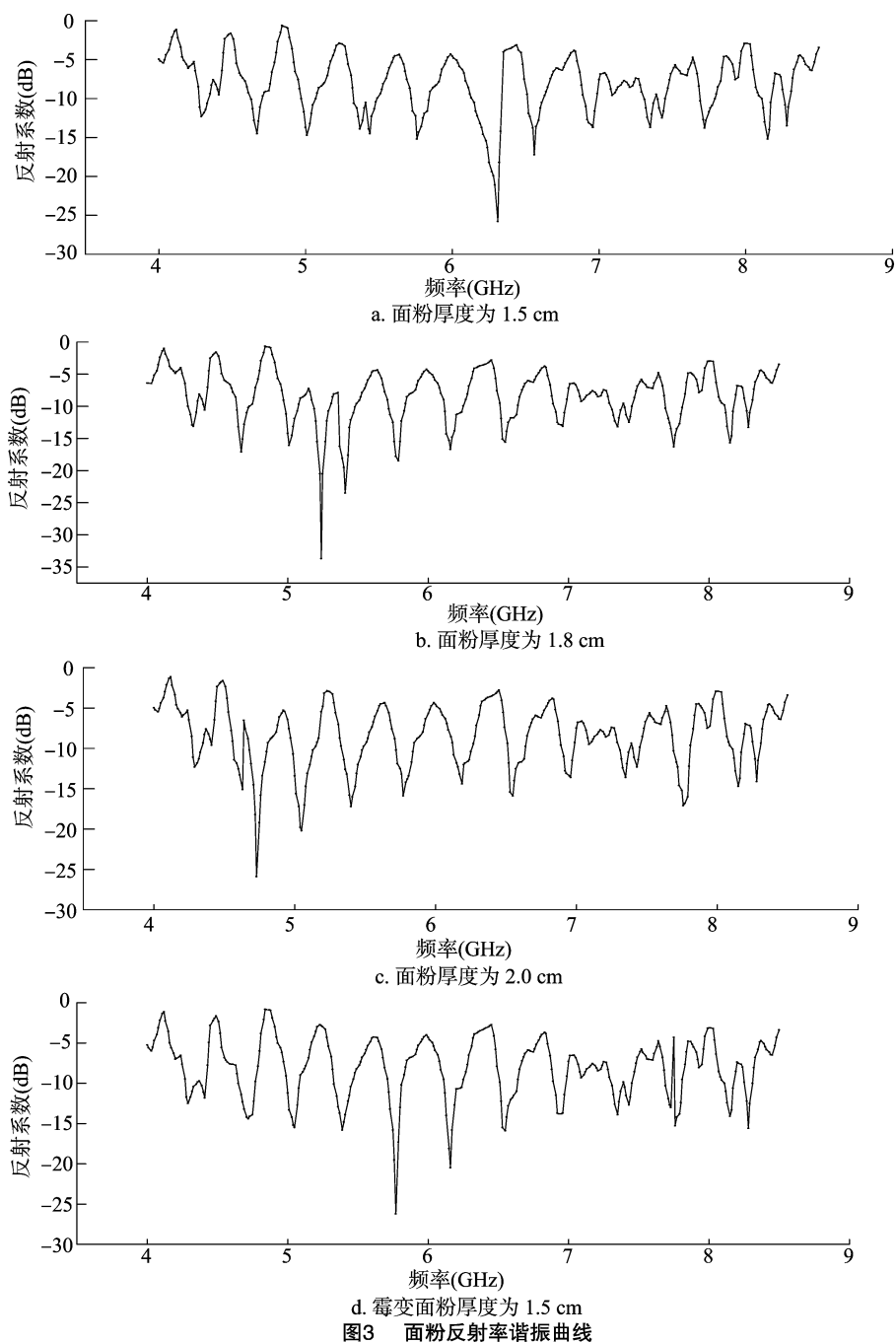


图3 面粉反射率谐振曲线

3 讨论

魏兵等采用时域有限差分 (FDTD) 法计算了介质板的时域后向瞬态散射波形,然后通过傅里叶变换将其变换到频域,在频域反射率曲线呈现出谐振

特性,他利用该谐振特性反演了介质板的介电常数,并论证了该方法的可行性^[25]。该方法与本研究采用的测试方法基本相同,由此知本研究方法在理论上有充分依据的。对于测试误差,由式(17)计算材料的介电常数时,从误差传递理论可知,介电

表 1 不同厚度下的面粉和霉变面粉测得的
第一谐振峰及其介电常数

面粉厚度 (cm)	面粉厚度标号	第一谐振峰 (GHz)	介电常数
1.5	a	6.31	2.512
1.8	b	5.24	2.529
2.0	c	4.73	2.514
1.5(霉变)	d	5.77	3.004

常数测试的误差主要来源于谐振频率和厚度。

$$\Delta \varepsilon_r = \left| \frac{\partial g(f,d)}{\partial f} \Delta f \right| + \left| \frac{\partial g(f,d)}{\partial d} \Delta d \right| = 2hd^{-2}f^{-3}$$

表 2 在常温条件下多次测得的面粉厚度

面粉厚度理论值 (cm)	面粉厚度实际测量值(cm)					面粉厚度均值 (cm)	均方根误差 (%)
	1	2	3	4	5		
1.5	1.512	1.508	1.510	1.515	1.515	1.515	2.0
1.8	1.809	1.812	1.814	1.816	1.814	1.813	2.6
2.0	2.017	2.013	2.011	2.015	2.014	2.014	2.2

4 结论

本研究根据待测面粉反射率谐振峰特性,说明了采用自由空间法测量面粉介电特性的理论和试验方法,然后按照试验方法测量了不同厚度的面粉样品的介电常数和霉变面粉的介电常数,给出了试验结果,并进行了误差分析。通过以上分析得出,在频域范围内利用待测面粉的反射率谐振位置-谐振峰/谷值特性测量材料的介电常数是可行的;通过测量对比同批相同厚度的正常面粉和霉变面粉样品的介电常数,可以得知,在面粉霉变时,介电常数变化非常明显。结果表明,自由空间法是检测面粉介电常数和品质十分有效的方法,对食品监管部门监管面粉品质有着重要的意义。

参考文献:

[1]罗印斌,蔡艳丽,兰 菡,等. 农产品无损检测方法应用现状[J]. 食品工业科技,2018,39(15):340-344.

[2]杨茗惠. 微波测量介电常数方法研究及应用[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.

[3]陈 蕊. 基于动态扫频介电常数的测量研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.

[4]刘立国,陈永刚. 全部填充波导法测量介电常数[J]. 电子测量技术,2003(1):22-24.

[5]傅世强,姜家宏,李婵娟,等. 基于谐振腔微扰理论的电介质测量创新实验设计[J]. 实验科学与技术,2015,13(5):25-28.

[6]贾 晔. 用同轴探针法测量部分生物材料的复介电常数试验[J]. 真空电子技术,2011(2):54-57.

[7]Chu W,Dan S,Gao Y G,et al. A new free-space method for the

$$\Delta f + 2hd^{-3}f^{-2}\Delta d = 2hd^{-2}f^{-2}(f^{-1}\Delta f + d^{-1}\Delta f). \quad (18)$$

式中: $h=(mc_0/4)^2$ 。

由式(18)可知,由于频率 f 比较大,为纳米量级左右,而 d 的值一般比较小,为厘米量级,故厚度的传递误差比较大,因而测试时必须精确测得待测面粉的厚度,一般采用游标卡尺测量其厚度,待测面粉的厚度可精确到0.001 cm,按照面粉的测试条件(表2),计算得到1.5、1.8、2.0 cm厚度的均方根误差分别为2.0%、2.6%、2.2%。在文献[26]中, $\Delta \varepsilon_r < 3.0\%$,与本研究结果相符。

permittivity measurement of walls in indoor environments [C]//Beijing: IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility,2017.

[8]张云祥,赵志钦,史维光,等. 自由空间法分析介质蜂窝等效复介电常数[J]. 电讯技术,2013,53(11):1518-1522.

[9]陈 振,刘 勇,邹 澎. 基于自由空间法的液体等效电参数测试系统的研究[J]. 电子设计工程,2012,20(9):134-136,140.

[10]胡大海,赵 锐,杜刘革,等. 太赫兹平板材料介电常数测试技术[J]. 微波学报,2016,32(5):1-5.

[11]Haddadi K,Lasri T. Geometrical optics-based model for dielectric constant and loss tangent free-space measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2014,63(7):1818-1823.

[12]Zhao M,Shea J D,Hagness S C,et al. Calibrated free-space microwave measurements with an ultrawideband reflectometer-antenna system[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters,2006,16(12):675-677.

[13]Khosrowbeygi A,Griffiths H D,Cullen A L. A new free-wave dielectric and magnetic properties measurement system at millimetre wavelengths [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest,1994(5):23-27.

[14]Umari M H,Ghodgaonkar D K,Varadan V V,et al. A free-space bistatic calibration technique for the measurement of parallel and perpendicular reflection coefficients of planar samples[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,1991,40(1):19-24.

[15]Muhamad F,Baba N H,Awang Z,et al. Microwave non-destructive testing of semiconductor wafers in the frequency range 8-12.5 GHz[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing,2002.

[16]Vilovic I,Nad R,Sipus Z,et al. A non-destructive approach for extracting the complex dielectric constant of the walls in building

阎园园,陈 华,姜 波. 基于群智能算法分类模型的番茄病害识别[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):219-224.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.041

基于群智能算法分类模型的番茄病害识别

阎园园,陈 华,姜 波

(新疆大学电气工程学院,新疆乌鲁木齐 830047)

摘要:作物病害分类识别模型一直受被研究对象自身特性影响,为验证智能分类器在番茄常见病害中的识别效果,选择不同群智能分类器进行分类识别。采用主成分分析(principal component analysis,简称 PCA)法对样本集的 31 个数据进行降维,筛选 7 个贡献率较高的主成分作为 PCA-支持向量机(support vector machine,简称 SVM)模型的输入;遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)具有全局寻优特点,正交变换可使变异率、交叉率、种群规模等参数之间快速最优化,构建 GA-SVM 智能分类器提高识别率;由于 GA-SVM 分类器增加了交叉变异计算,参数确定时间相对较长,而粒子群优化(particle swarm optimization,简称 PSO)算法不存在交叉变异因子计算过程,因此选择 PSO-SVM 群智能分类器,把种群中具有最大适应度函数值的惩罚系数(r)和核函数参数(σ^2)作为支持向量机模型的最优参数,试验证明,PCA-SVM 模型对 3 种病害类型中的分类效果总体较好。

关键词:主成分分析;遗传算法;粒子群优化算法;群智能分类器;番茄病害;识别

中图分类号: S126;TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0219-06

针对作物病害的图像处理技术研究及科技农业发展给农业生产带来的巨大帮助。在 1989 年穗波信雄已经提出,图像分析技术与模式识别技术将成为诊断作物病害的研究发展趋势^[1-2]。作物病害在颜色、形状、大小等一些外在特征上存在差异性,通过视觉可以直观地获取这些差异。如今在作物病害类型辨别方面,分类识别技术的研究已经取得不错的成果。基于分类器的识别技术主要包括主

成分分析(principal component analysis,简称 PCA)、BP(back propogation)统计分类模型识别、粒子群优化(particle swarm optimization,简称 PSO)算法等。田有文等提取玉米和葡萄叶片的色度矩特征信息,选择不同核函数对支持向量机(support vector machine,简称 SVM)模型进行训练,结果表明,当样本数量在几十之间,径向基函数(radial basis function,简称 RBF)下的 SVM 分类器对病害分类效率较高,样本集数量较大或作物种类发生变化时,该方法实用性降低^[3-4];张建华等用 RBF-SVM 模型对棉花病害进行识别,将小波变换图像在 HIS(hue-saturation-intensity)颜色空间的特征值作为分类器的输入,结果证明,RBF-SVM 分类器的分类率达 88%,为分类器最优核函数的选择提供了参

收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:61064005)。

作者简介:阎园园(1990—),女,河南永城人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与智能识别。E-mail:xj15276659054@163.com。

通信作者:陈 华,硕士,教授,主要研究方向为智能控制与系统开发。E-mail:xj15699200329@163.com。

[C]// The 50th International Symposium ELMAR,2008.

[17]黄 扬,杨习荣,耿淮滨. 土壤含水量与其微波反射特性关系的研究[J]. 环境遥感,1986(2):101-106.

[18]张俊荣,张德海,王丽巍,等. 微波遥感典型地物介电常数实地测量[J]. 电子科学学刊,1997(4):566-569.

[19]陈志雨,周冬青. 双极化位相法测量半空间介质介电常数[J]. 电子科学学刊,1999(6):851-855.

[20]魏 玮,张德海. 实地测量介电常数的简易系统[J]. 遥感技术与应用,2007(5):657-660.

[21]阮开智,韦 高,袁晴晴. 短路反射法测量复介电常数的研究[J]. 测控技术,2010,29(11):97-99.

[22]王金华,尤丽华,安 伟,等. 基于 HFSS 同轴线式液位传感器

的仿真[J]. 江南大学学报(自然科学版),2015,14(4):439-442.

[23]姚显春,郭炳焯,吕 高,等. 地质雷达数据介电常数递推反演研究[J]. 西安理工大学学报,2016,32(2):199-206.

[24]Xie T,Perrie W,Fang H,et al. Effective dielectric constant model of electromagnetic backscattering from stratified air-sea surface film-sea water medium[J]. Chinese Physics B,2017,26(5):124-129.

[25]魏 兵,葛德彪. 各向异性有耗介质板介电系数和电导率的反演[J]. 物理学报,2005,54(2):648-652.

[26]陈 静. 复介电常数及介电常数测量[J]. 光电对抗与无源干扰,1997(4):22-25.