

牛奶含水率介电谱结合化学计量学检测方法

郭文川 林碧莹

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了实现牛奶含水率的快速检测,采用网络分析仪和同轴探头测量了室温(25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 下 20 ~ 4 500 MHz 间 105 个牛奶样品的相对介电常数和介质损耗因子。发现基于单一频率下的介电参数很难预测牛奶的含水率。为此,将介电谱与化学计量学方法相结合预测牛奶的含水率。基于 X - Y 共生距离法进行了样本集划分,得到校正集样本 75 个和预测集样本 30 个。采用连续投影算法从全介电谱中提取出了 15 个用于预测牛奶含水率的特征变量;建立了基于全介电谱和连续投影算法提取的特征变量预测牛奶含水率(87.28% ~ 91.30%)的广义神经网络、支持向量机和极限学习机模型。结果发现,基于连续投影算法提取的特征变量所建立的极限学习机模型是预测牛奶含水率的最优模型,其预测相关系数、预测均方根误差和剩余预测偏差分别为 0.988、0.119% 和 6.723。研究表明,介电谱结合化学计量学方法可用于检测牛奶的含水率。

关键词: 牛奶; 含水率; 介电特性; 化学计量学; 人工神经网络

中图分类号: TS252.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0249-07

Detecting Moisture Content of Cow's Milk Using Dielectric Spectra and Chemometrics

Guo Wenchuan Lin Biying

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

Abstract: To explore a rapid method for detecting moisture content of cow's milk, a network analyzer and an open-ended coaxial-line probe were applied to measure the dielectric properties (relative dielectric constant and dielectric loss factor) of 105 milk samples over the frequency range of 20 ~ 4 500 MHz at room temperature (25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$. The low linear correlation coefficient between the moisture content and the permittivities at a single frequency of used milk samples showed that it was difficult to predict the moisture content of milk using a single permittivity value. Therefore, the dielectric spectra combined with chemometrics were used to determine the moisture content of milk. All samples were partitioned into calibration set (75 samples) and prediction set (30 samples) by using set partitioning method based on joint X - Y distances. Fifteen characteristic variables that predicting moisture content of cow's milk were selected by successive projection algorithm from full spectra. The generalized regression neural network, support vector machine and extreme learning machine models were established to predict moisture content of milk (87.28% ~ 91.30%), based on the original full dielectric spectra and characteristic variables. The results showed that the extreme learning machine model established using the characteristic variables selected by successive projection algorithm was the best model in determining moisture content of milk, with the correlation coefficient of prediction, root-mean-square error of prediction, and residual prediction deviation of 0.988, 0.119%, and 6.723, respectively. The study indicates that the dielectric spectra combined with chemometrics could be used to detect moisture content of milk. The research is helpful to develop a new milk moisture detector which could be used in situ or online detection.

Key words: cow's milk; moisture content; dielectric property; chemometrics; artificial neural networks

收稿日期: 2016-06-01 修回日期: 2016-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671935)和江苏省农产品物理加工重点实验室开放基金项目(JAPP2014-2)

作者简介: 郭文川(1969—),女,教授,博士,主要从事农产品和食品品质无损检测技术研究,E-mail: guowenchuan69@126.com

引言

牛奶中富含多种营养物质,如蛋白质、脂肪、糖类和矿物质等,被誉为“白色血液”。牛奶的含水率是反映牛奶品质的主要指标之一,它可以反映牛奶是否掺水以及乳成分的变化。常用的牛奶含水率检测方法有直接干燥法^[1]、微波法^[2]、水分测定仪法^[3]、红外光谱法^[4-5]和热辐气动干燥法^[6]等。国标 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》中规定的直接干燥法虽然具有检测精度高的优点,但其耗时长、仪器笨重、能耗大,不能实现在线检测,难以满足市场快速检测牛奶含水率的要求。同直接干燥法相比,微波法、水分测定仪法、红外光谱法和热辐气动干燥法虽然缩短了测试时间,但仪器设备较昂贵,同样不能应用于现场检测。因此,寻找适合于牛奶含水率实时或在线检测的方法对于检测牛奶的品质具有重要意义。

介电特性是物质的固有特性之一。物质的介电特性可用相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因子 ϵ'' 等表示。 ϵ' 反映了物质储存电场能量的能力,而 ϵ'' 反映物质消耗电场能量的能力^[7]。大量研究表明,食品的介电特性受其组成成分的影响,如含水率^[8]、含盐量^[9]、脂肪^[10]等。对蜂蜜^[11]、肉^[12]和果蔬粮食^[13-15]等食品介电特性的研究说明,含水率是影响食品介电参数的主要因素之一。鲁勇军等^[16]在 25℃ 采用同轴传输线技术测量了一些微波频率(2.2、4.5、3 GHz)下市售黄油、奶酪、酸奶和牛奶的相对介电常数,发现乳制品的相对介电常数与含水量呈正相关关系。GUO 等^[17]研究了去离子水对牛奶介电特性的影响,结果表明牛奶的介质损耗因子与掺水牛奶中牛奶的含量成正比。BANACH 等^[18]研究了掺水率对牛奶介电特性的影响,发现牛奶的掺水率与其介电参数的关系接近线性关系。但现有对于牛奶含水率的研究均是对于单一的样品,尚未发现适合于预测大样本牛奶含水率的方法。对果品的介电谱研究说明,介电谱与化学计量学方法相结合可以预测大样本果品的内部品质^[19-20]。

为了给大样本牛奶含水率的检测提供一种实时、在线检测方法,本文采用矢量网络分析仪和同轴探头技术测量室温下,20~4 500 MHz 内含水率在 87.28%~91.30% 间的 105 份牛奶样品的介电谱,将介电谱与化学计量学方法相结合建立预测牛奶含水率的人工神经网络模型,并比较全频谱与连续投影算法提取的特征变量对各个模型预测能力的影响,提出预测牛奶含水率的最佳模型。

1 材料与方 法

1.1 材 料

生鲜牛奶采集于陕西杨凌某一奶牛养殖户所饲养的 15 头“荷斯坦”乳牛,所采样品于 30 min 内运至实验室。将采集得到的每头乳牛的牛奶样品分成 7 份,每份约 200 g,按照每份样品中添加约 0%、2%、4%、6%、8%、10% 和 12% 自来水的的方法共配置得到 105 份样品。试验期间,样品于 4℃ 冷藏室内保存,冷藏时间不超过 24 h。

1.2 测 量 方 法

1.2.1 主要成分的测量方法

测量前,将待测样品搅拌均匀,分别依据 GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》、GB 5413.3—2010《婴幼儿食品和乳品中脂肪的测定》和 GB 5413.39—2010《乳和乳制品中非脂乳固体的测定》测量牛乳中的蛋白质、脂肪和非脂乳固体含量。采用直接干燥法测量含水率。含水率的具体测量方法是:从搅拌均匀的牛奶样品中取 5~10 g 置于 105℃ 的鼓风干燥箱(101-1AB 型,天津市泰斯特仪器有限公司)中干燥 20 h 后取出,放于装有 CaSO₂ 的干燥器中冷却至室温。用精度为 0.000 1 g 的电子天平(FA2104N 型,上海精密科学仪器有限公司)称量每份样品干燥前后的质量,根据干燥前后样品的质量计算样品的初始湿基含水率。以每份样品 6 个含水率测量的平均值作为该样品的含水率测量结果。

1.2.2 介电参数测量方法

本文采用网络分析仪(E5071C 型,Agilent Technology 公司,马来西亚)和末端开口的同轴探头(85070E-020 型)测量介电参数。测试前先将网络分析仪预热 1 h,然后对其依次进行开路、短路和 50 Ω 负载校准。进而用同轴电缆连接网络分析仪与同轴探头,设定测量频率范围为 20~4 500 MHz,测量频率点数为 201 个。最后对同轴探头进行开路、短路和 25℃ 的去离子水校准。

测量前将样品从冷藏室中取出,待其恢复至室温(25±0.5)℃后,搅匀倒入 3 个 50 mL 的试管中,使得牛奶液面低于试管口 1~2 cm。将试管放于一自制的升降台上,调节升降台的高度,使得同轴探头浸入牛奶样品中,然后,测量样品的 ϵ' 和 ϵ'' 。每个试管中的样品测量 2 次,3 个试管中样品 6 次测量的平均值作为介电参数的测量结果。

1.3 数 据 分 析 与 处 理 方 法

1.3.1 X-Y 共生距离算法

为了使划分的样品集更具代表性,本文选用

X - Y 共生距离算法 (Sample set partitioning based on joint X - Y distances, SPXY) 划分样本。该算法同时考虑了各样品浓度 (本文为含水率) 间与频谱间的欧氏距离, 使划分得到的校正集样品能够充分包含预测集的样品信息, 从而能有效地提升模型的泛化能力^[21]。

1.3.2 连续投影算法

连续投影算法 (Successive projection algorithm, SPA) 是由 ARAÚJO 等^[21]提出的一种前向循环的变量选择方法, 能有效地选出较少的更具代表性的变量, 降低模型的复杂度。该算法的思想是首先选择一个初始变量, 每次迭代增加一个变量, 通过多次迭代直到变量数达到设定数后终止迭代, 最终选择出冗余信息最少的变量组, 从而解决信息重叠、共线性等问题。众多研究表明, 基于 SPA 所选变量建立的模型具有良好的预测性能。

1.3.3 广义神经网络

广义神经网络 (Generalized regression neural Network, GRNN) 是一种以径向基函数 (Radial basis function, RBF) 为核函数的一种局部逼近网络。该网络由输入层、模式层、求和层和输出层构成。一些研究表明^[22], 该网络具有高度的容错性和鲁棒性, 并且在学习能力和学习速度上都优于经典神经网络, 且对小样本的训练集表现出绝对优势。

1.3.4 支持向量机

支持向量机 (Support vector machine, SVM) 是基于风险最小化思想的机器学习算法。它通过在多维空间建立超平面实现不同模式之间的最大化隔离, 从而达到分类的目的^[23]。SVM 可以有效克服经典神经网络模型中模型复杂、求解速度慢、易陷入局部极小、过拟合等弊端, 从而提高建模效率, 且能较好地解决小样本、非线性等实际问题, 可以有效地改善定性、定量模型的预测精度^[24]。

1.3.5 极限学习机

极限学习机 (Extreme learning machine, ELM) 是由 HUANG 等^[25]提出的一种针对单隐层前馈神经网络的算法, 具有收敛速度快、泛化性能好等特点。ELM 网络的输入层与隐层间的连接权值和神经元间的阈值都是随机确定的, 因此只需设置各层神经元数就可以经校正集训练后获得最优解。ELM 已经在许多领域得到了广泛应用。

1.4 模型评价

模型的校正和预测性能用校正集样品的相关系数 (R_c)、校正集样品的均方根误差 (RMSEC)、预测集样品的相关系数 (R_p) 和预测集样品的均方根误差 (RMSEP) 表示, 以剩余预测偏差 RPD 作为评价

模型预测性能的指标。NICOLAÏ 等^[26]指出当某一模型的 RPD 值小于 1.5 时, 该模型的预测性能很差; 当 RPD 在 1.5 ~ 2.0 时, 模型仅能给出预测值的大小情况; 当 RPD 在 2.0 ~ 2.5 时, 模型可用于粗略预测; 而当模型的 RPD 大于 2.5 和 3.0 时, 模型分别具有良好的和极好的预测准确性。

2 试验结果和分析

2.1 生鲜牛奶的主要成分

本研究所用的 15 份生鲜牛奶的主要成分如表 1 所示。表 1 说明, 所用样品的主要成分有一定的差异, 说明所选取的样品具有一定的代表性。基于该 15 份生鲜牛奶制备的 105 份样品的含水率范围为 87.28% ~ 91.30%, 含水率的平均值为 89.03%, 标准偏差为 0.84%。

表 1 本研究所用的 15 份生鲜牛乳的主要成分

Tab.1 Main ingredients of 15 samples of

| 参数 | raw fresh milk | | % |
|-----------|----------------|-------|--------------|
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 ± 标准偏差 |
| 含水率 | 87.28 | 90.11 | 88.33 ± 0.76 |
| 蛋白质质量分数 | 2.82 | 3.20 | 3.05 ± 0.12 |
| 脂肪质量分数 | 2.75 | 6.10 | 4.43 ± 0.76 |
| 非脂乳固体质量分数 | 7.18 | 8.20 | 7.79 ± 0.32 |

2.2 生鲜牛奶的介电谱

图 1 是 20 ~ 4 500 MHz 范围内, 某一原奶的 ϵ' 和 ϵ'' 的变化规律。由图 1 看出, ϵ' 随着频率的增大逐渐减小。在双对数坐标下, ϵ'' 随频率的增大先减小后增大。牛奶是一种非均质胶体分散系, 其中的偶极子、电子和原子的极化及 Maxwell - Wagner 效应是引起牛奶介电参数变化的主要原因^[27]。大量的研究表明, 离子的导电性是引起低频下 (小于等于 300 MHz) 介电损耗的主要原因, 而偶极子的极化是引起微波频段下 (300 ~ 4 500 MHz) 介电损耗的主要原因。在所研究的频段内, 牛奶 ϵ'' 的变化规律与纯水的介电行为基本相同^[28], 说明水是引起牛奶介电参数变化的主要成分。此外, 牛奶中的蛋白质^[29] 和脂肪^[10] 的含量对牛奶的介电参数也有一定的影响。因此, 牛奶的介电特性是牛奶中所有成分综合影响的结果, 但是同水相比, 蛋白质、脂肪和非脂乳固体的影响较小。

2.3 生鲜牛奶的介电特性与含水率的线性关系分析

为了解大样本牛奶的介电参数是否与含水率存在线性关系, 本文建立了 201 个频率点下的 ϵ' 和 ϵ'' 分别与含水率的线性关系式 $y = aw + b$, 其中 y 代表 ϵ' 和 ϵ'' , w 代表含水率, a 和 b 为拟合系数, 并计

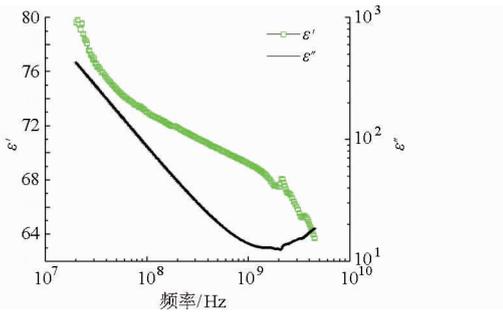


图1 室温下20~4 500 MHz范围内某一原奶样品的 ϵ' 和 ϵ'' 的变化规律

Fig. 1 Obtained ϵ' and ϵ'' of a raw milk sample over the frequency range of 20~4 500 MHz at room temperature

算了各拟合式下 ϵ' 和 ϵ'' 分别与含水率的拟合系数 $R_{\epsilon'}$ 和 $R_{\epsilon''}$,结果如图2所示。由图2可知, ϵ' 和 ϵ'' 均与含水率间有正的线性相关性,但 $R_{\epsilon'}$ 小于0.4,说明相关性很弱。在20~3 000 MHz间, $R_{\epsilon''}$ 大于0.5且小于0.7,说明有一定的线性相关性,当频率大于3 000 MHz时, $R_{\epsilon''}$ 小于0.5。

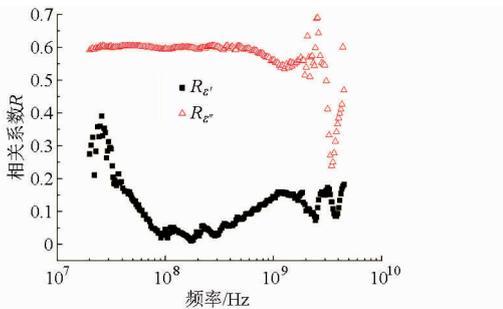


图2 20~4 500 MHz范围内 ϵ' 和 ϵ'' 与含水率在201个频率点下的线性相关系数

Fig. 2 Linear correlation coefficients between permittivities and moisture content at 201 discrete frequencies from 20 MHz to 4 500 MHz

综上所述,单一频率下的 ϵ' 和 ϵ'' 均与含水率间的线性相关性较弱,很难应用单一频率下的介电参数值预测牛奶的含水率。因此,有必要探讨是否能用更多的介电参数甚至全介电谱预测生鲜牛奶的含水率。

2.4 样本划分

基于Matlab R2013a软件平台,根据105个牛奶含水率(87.28%~91.30%)的实测值数据,采用SPXY算法将样本按照5:2的比例划分校正集与预测集,得到校正集样品75个和预测集样品30个。样本划分结果见表2。从表2可以看出,校正集样品中牛奶含水率的变化范围充分覆盖了测试集样品中的含水率范围,说明经SPXY法划分的样本集是合理有效的。

2.5 连续投影算法提取特征变量

设定提取的特征介电变量数的范围为1~19,

表2 基于SPXY法划分样本的含水率结果统计

Tab. 2 Statistics of moisture content in different sample sets determined by SPXY

| 样本集 | 样本数 | 最小值/% | 最大值/% | 平均值±标准偏差/% |
|-----|-----|-------|-------|------------|
| 总样本 | 105 | 87.28 | 91.30 | 89.03±0.84 |
| 校正集 | 75 | 87.28 | 91.30 | 89.04±0.86 |
| 预测集 | 30 | 87.75 | 90.91 | 89.02±0.80 |

计算各特征变量数下的RMSEC,根据最小的RMSEC确定最佳特征变量数。不同特征变量数下的RMSEC的计算结果如图3所示。结果说明, RMSEC随变量数的增多而减小,但当变量数大于15时, RMSEC基本保持不变。由于过多的变量会增加模型的复杂性,为此,本研究以RMSEC不再显著减小(在0.05显著水平下)时的特征变量数作为最终的选择结果。因此,SPA选择的最优特征变量数为15。图3中“■”对应的横坐标值表示经SPA优选出的最佳特征变量数。所选出的15个特征介电变量见表3。

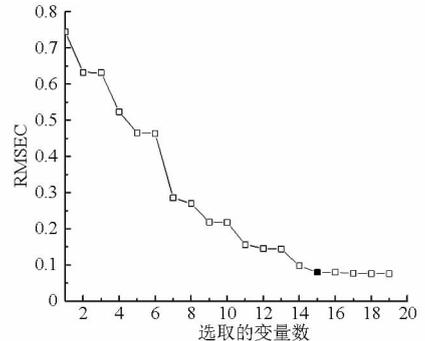


图3 SPA在不同特征变量数下的校正均方根误差

Fig. 3 Calculated RMSEC at different characteristic variable numbers of SPA

表3 SPA选取的15个特征变量

Tab. 3 15 characteristic variables selected by SPA

| 变量号 | 介电变量 | 变量所在频率/MHz | 变量号 | 介电变量 | 变量所在频率/MHz |
|-----|--------------|------------|-----|--------------|------------|
| 1 | ϵ' | 20.00 | 9 | ϵ'' | 2 070.71 |
| 2 | ϵ' | 20.72 | 10 | ϵ'' | 2 508.66 |
| 3 | ϵ' | 22.16 | 11 | ϵ'' | 2 806.33 |
| 4 | ϵ' | 24.31 | 12 | ϵ'' | 3 182.70 |
| 5 | ϵ' | 27.91 | 13 | ϵ'' | 3 464.98 |
| 6 | ϵ' | 31.50 | 14 | ϵ'' | 4 123.63 |
| 7 | ϵ' | 2 399.17 | 15 | ϵ'' | 4 500.00 |
| 8 | ϵ'' | 1 013.66 | | | |

2.6 GRNN模型建模结果

GRNN网络的关键参数为扩展系数。本文采用交叉验证方法训练GRNN,并根据最小RMSEC循环找出梯度为0.001,范围为0.1~2.0时的最佳扩展

系数。在全频谱和 SPA 选取的特征变量下,分别获得的 GRNN 的扩展系数见表 4,所建立的 GRNN 模型对牛奶含水率的预测结果见表 5。

表 4 GRNN、SVM 和 ELM 的建模参数

Tab. 4 Modeling parameters of GRNN, SVM and ELM

| 变量 处理 方法 | GRNN 扩展系数 | SVM | | ELM | | |
|----------------|--------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | | 惩罚 因子 c | 松弛变量 g | 输入 节点数 | 隐层 节点数 | 输出 节点数 |
| FS | 1.13 | 8 | 0.015 625 | 402 | 45 | 1 |
| SPA | 0.013 | 64 | 0.015 625 | 15 | 38 | 1 |

表 5 不同的特征变量选择方法下各模型对牛奶含水率的建模结果

Tab. 5 Moisture content determination results of different models based on different variables selection methods

| 建模 方法 | 变量 处理 方法 | 校正集 | | 预测集 | | RPD |
|----------|----------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | | R_c | RMSEC/ % | R_p | RMSEP/ % | |
| GRNN | FS | 0.980 | 0.232 | 0.915 | 0.322 | 2.485 |
| | SPA | 0.996 | 0.157 | 0.966 | 0.221 | 3.620 |
| SVM | FS | 0.998 | 0.045 | 0.960 | 0.210 | 3.810 |
| | SPA | 0.993 | 0.087 | 0.989 | 0.132 | 6.051 |
| ELM | FS | 0.988 | 0.131 | 0.949 | 0.260 | 3.077 |
| | SPA | 0.997 | 0.066 | 0.988 | 0.119 | 6.723 |

由表 5 可以看出,基于 SPA 所建立的 GRNN 模型(SPA-GRNN)的 R_c (0.996) 和 R_p (0.966) 均高于基于全频谱所建立的 GRNN (FS-GRNN),且 SPA-GRNN 比 FS-GRNN 具有较小的 RMSEC (0.157%) 和 RMSEP (0.221%),说明 SPA-GRNN 具有较好的校正性能和预测性能。SPA-GRNN 的 RPD 为 3.620,大于 3,说明 SPA-GRNN 具有极好的含水率预测能力。而 FS-GRNN 的 RPD 为 2.485,在 2.0~2.5 之间,表明 FS-GRNN 可用于粗略地预测牛奶的含水率。

2.7 SVM 模型建模结果

本研究以 RBF 函数作为 SVM 的核函数。SVM 建模中的关键建模参数为惩罚因子 c 及 RBF 函数中的松弛变量 g 。设定各参数的取值范围为 $2^{-6} \sim 2^6$,增量为 $2^{0.5}$,根据留一交互原则结合最小 RMSEC 确定二参数的值,结果见表 4。所建立的 SVM 模型对牛奶含水率的预测结果见表 5。

表 5 说明,模型 FS-SVM 相比于 SPA-SVM 有较大的 R_c (0.998) 和较小的 RMSEC (0.045%),说明 FS-SVM 有较好的校正性能。但是 SPA-SVM 具有较大的 R_p (0.989) 和较小的 RMSEP (0.132%),且 RPD (6.051) 远大于 FS-SVM (3.810),故 SPA-SVM 比 FS-SVM 具有较优的预测牛奶含水率的能力,且能保证具有极好的预测精

度。

2.8 ELM 模型建模结果

本研究中,ELM 网络的激活函数为 sigmoidal。ELM 网络的隐层节点数是根据多次重复试验获得的。其方法是:设定初始节点数为 1,每次增加 1,直到增加到 100 为止。计算每个隐含层节点数下的 RMSEC,以最小的 RMSEC 或 RMSEC 开始缓慢变化所在处的节点数作为 ELM 的隐含层节点数。确定的 ELM 的隐层节点数见表 4,所建的 ELM 模型对牛奶含水率预测结果见表 5。

表 5 说明,同 FS-ELM 模型相比,SPA-ELM 模型具有较高的 R_c (0.997) 和 R_p (0.988) 以及较小的 RMSEC (0.066%) 和 RMSEP (0.119%)。虽然 FS-ELM 及 SPA-ELM 模型的 RPD 均大于 3.0,但 SPA-ELM 的 RPD (6.051) 远大于 FS-ELM (3.077),说明 SPA-ELM 对牛奶含水率的预测性能远优于 FS-ELM。

2.9 结果比较

在所建立的 6 种含水率预测模型中,虽然 SPA-ELM 模型的 R_p (0.988) 略小于 SPA-SVM (0.989),但具有最小的 RMSEP (0.119%) 以及最大的 RPD (6.723),且 RPD 大于 3.0,说明 SPA-ELM 是预测牛奶含水率的最优模型,且具有极好的预测精度。FS-GRNN 模型的 RPD 最小,且小于 2.5,说明该模型能粗略地预测生鲜牛奶的含水率。其余 4 种模型的 RPD 均大于 3.0,表明这 4 种模型也具有极好的预测牛奶含水率的能力。

在各种建模方式下,基于 SPA 提取的特征变量所建模型的 R_p 和 RPD 均分别大于基于全频谱所建的模型,说明 SPA 能够有效地从全频谱中提取表达牛奶含水率的有效信息。图 4 所示是预测集中牛奶含水率的实测值与应用 SPA-ELM 模型预测的含水率的比较,说明应用 SPA-ELM 模型可以很好地预测牛奶的含水率。

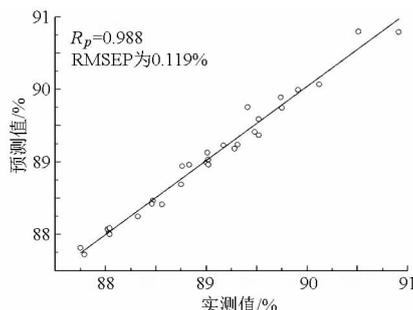


图 4 预测集中牛奶含水率的实测值与 SPA-SVM 模型预测值的比较

Fig. 4 Comparison between measured moisture content and predicted ones using SPA-ELM in prediction set

3 结论

(1)在20~4500 MHz内,生鲜牛奶的 ε' 随着频率的增大而减小; ε'' 随着频率的增大先减小后增大,介质损耗因子的最小值出现在2000~2500 MHz间。

(2)在20~4500 MHz内,介电参数和生鲜牛奶含水率之间的线性关系较弱,很难应用单一介电参数预测牛奶含水率。

(3)采用SPA法从全介电谱中提取出了15个

用于预测含水率的特征变量,且基于特征变量所建模型的牛奶含水率预测效果均优于基于全介电谱所建模型。

(4)基于全介电谱和SPA提取的特征变量建立的预测含水率的GRNN、SVM和ELM模型中,SPA-ELM模型具有最好的含水率预测性能,其 R_p 、RMSEP和RPD分别为0.988、0.119%和6.723。

(5)介电谱与化学计量学方法相结合可以很好地预测牛奶含水率。本研究为实时或在线牛奶含水率检测仪的研发提供了基础。

参 考 文 献

- GB 5009.3—2010 食品中水分的测定[S]. 2010.
- 李倩,董有尔. 用微波法测量牛奶含水量研究[J]. 实验技术与管理,2010,27(6):45-46.
LI Qian, DONG Youer. A microwave measurement of the water content in milk[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(6): 45-46. (in Chinese)
- 郭亚东,沈园,木妮热,等. MB45型卤素水分测定仪快速测定牛奶、酸奶中全乳固体[J]. 中国卫生工程学,2008,7(4):234-235.
GUO Yadong, SHEN Yuan, MU Nire, et al. Rapid determination of total milk solids in milk and yoghurt by MB45 halogen moisture analyzer[J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2008, 7(4): 234-235. (in Chinese)
- NY/T 2659—2014 牛乳脂肪、蛋白质、乳糖、总固体的快速测定 红外光谱法[S]. 2014.
- 李晓云,王加华,黄亚伟,等. 便携式近红外仪检测牛奶中脂肪、蛋白质及干物质含量[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(3):665-668.
LI Xiaoyun, WANG Jiahua, HUANG Yawei, et al. Determination of fat, protein and DM in raw milk by portable short-wave near infrared spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 665-668. (in Chinese)
- 赵敏,周聪. 热辐射气动干燥法快速测定牛奶中总固体和水分[J]. 食品科学,2015,36(2):142-144.
ZHAO Min, ZHOU Cong. Rapid determination of total solids and water in milk by hot radiation pneumatic drying method[J]. Food Science, 2015, 36(2): 142-144. (in Chinese)
- 郭文川,朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报,2009,25(2):308-312.
GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Foreign dielectric property measurement techniques and their applications in agricultural products and food materials[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 308-312. (in Chinese)
- GUO Wenchuan, WANG Shaojin, TIWARI G, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(2): 193-201.
- AHMED J, RAMASWAMY H S, RAGHAVAN V G. Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 351-358.
- ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, LIANG Zhibin. Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1485-1494.
- GUO Wenchuan, ZHU Xinhua, LIU Yi, et al. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 275-281.
- 郭文川,谷洪超,吕俊峰. 水和盐对猪里脊肉糜介电特性的影响[J]. 食品科学,2009,30(23):171-175.
GUO Wenchuan, GU Hongchao, LÜ Junfeng. Effects of water and salt on dielectric properties of minced pork loin[J]. Food Science, 2009, 30(23): 171-175. (in Chinese)
- 郭文川,王婧,刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. 农业机械学报,2012,43(3):113-117.
GUO Wenchuan, WANG Jing, LIU Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 113-117. (in Chinese)
- 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.
GUO Wenchuan, WANG Jing, ZHU Xinhua. Moisture content prediction of oat seeds based on dielectric property[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 272-279. (in Chinese)
- GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Dielectric properties of red pepper powder related to radiofrequency and microwave drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(12): 3591-3601.
- 鲁勇军,朱彤,郭亚峰. 乳制品微波介电性能的测量[J]. 食品科学,2000,21(9):8-11.
LU Yongjun, ZHU Tong, GUO Yafeng. Measuring the microwave dielectric properties of dairy product[J]. Food Science, 2000, 21(9): 8-11. (in Chinese)

- 17 GUO Wenchuan, ZHU Xinhua, LIU Hui, et al. Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 344–350.
- 18 BANACH J K, ŻYWICA R, SZPENDOWSKI J, et al. Possibilities of using electrical parameters of milk for assessing its adulteration with water[J]. *International Journal of Food Properties*, 2012, 15(2): 274–280.
- 19 GUO Wenchuan, SHANG Liang, ZHU Xinhua, et al. Nondestructive detection of soluble solids content of apples from dielectric spectra with ANN and chemometric methods[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 1126–1138.
- 20 郭文川, 房丽洁, 董金磊, 等. 介电谱无损检测梨内部品质方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 233–239.
GUO Wenchuan, FANG Lijie, DONG Jinlei, et al. Nondestructive detection of internal qualities for pears using dielectric spectra [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 233–239. (in Chinese)
- 21 ARAÚJO M C U, SALDANHA T C B, GALÃO R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2001, 57(2): 65–73.
- 22 MAIER H R, DANDY G C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, 15(1): 101–124.
- 23 BURGESS C J. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 121–167.
- 24 BRERETON R G, LLOYD G R. Support vector machines for classification and regression[J]. *Analyst*, 2010, 135(2): 230–267.
- 25 HUANG Guangbin, ZHU Qinyu, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1): 489–501.
- 26 NICOLAI B M, BEULLENS K, Bobelyn E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(2): 99–118.
- 27 SACILIK K, COLAK A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz[J]. *Powder Technology*, 2010, 203(2): 365–370.
- 28 朱新华, 郭文川. 影响食品射频-微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 410–414.
ZHU Xinhua, GUO Wenchuan. A review of affecting factors and their mechanisms of the radio frequency-microwave dielectric properties of foods[J]. *Food Science*, 2010, 31(17): 410–414. (in Chinese)
- 29 ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng, et al. Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(3): 670–680.

~~~~~  
(上接第 233 页)

- 27 周学成, 罗锡文. 基于 XCT 技术的原位根系三维可视化研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 202–205.  
ZHOU Xuecheng, LUO Xiwen. 3-D root system in situ based on XCT technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.): 202–205. (in Chinese)
- 28 BO J, BRITT W, PAUL L. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 95(1–3): 221–234.
- 29 LECH G. Hydrodynamics of aggregated media[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 178(1): 80–86.
- 30 刘建禹, 陈泽兴, 李文涛. 厌氧发酵反应器一维稳态传热模型的建立与验证[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 217–222.  
LIU Jianyu, CHEN Zexing, LI Wentao. Development and verification of one-dimensional model of steady-state heat transfer for anaerobic fermentation reactor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(17): 217–222. (in Chinese)
- 31 付鹏, 胡松, 向军, 等. 气化过程中谷壳焦颗粒孔隙结构及分形特性的演化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 276–281.  
FU Peng, HU Song, XIANG Jun, et al. Evolution of pore structure and fractal characteristics of rice husk char particles during gasification[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 276–281. (in Chinese)