

# 粮食水分分布对高频电感的影响研究

李再贵<sup>1,2</sup>, 殷丽君<sup>1</sup>, 高振江<sup>3</sup>, 李法德<sup>4</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2 教育部现代精细农业系统集成重点实验室, 北京 100083; 3 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

**摘要:** 该文研究了在利用高周波线圈的电磁感应检测粮食水分时, 粮食颗粒内部发生水分移动和水分偏在的情况下, 测定所受到的影响。与电阻或电容水分测定法等无损水分检测法一样, 干燥后的非安定水分状态下, 水分由粮食颗粒内部向外部移动, 使测定值与恒温干燥法测得的水分存在较大的差异, 需要对测定结果进行修正。而采用喷雾法增加粮食外侧的自由水会使测定值急剧增加。但是, 高水分粮食在容器内的偏在对测定没有影响。

**关键词:** 粮食; 水分测定; 高频电感; 水分移动

**中图分类号:**           **文献标识码:**           **文章编号:** 1002-6819(2004)03-0149-04

## 0 引言

在粮食的干燥过程中, 由于原粮水分的差异, 干燥后粮食水分可能不均匀。同时, 粮食的外侧自由水的比率较高, 而内侧的水分中, 半结合水和结合水的比率较高。研究发现, 自由水的纯水的介电常数高达 80, 而冻结后的冰(结合水)的介电常数只有 4<sup>[1]</sup>。因此自由水、半结合水与结合水的电特性差异较大。在干燥过程中, 每粒粮食的水分总是被从外侧开始除去, 因此, 干燥后的粮食水分存在由外到内不断增加的倾向。粮食水分的这种非均匀分布对粮食水分在线检测的精度影响很大。伴敏三、笠原正行<sup>[1-5]</sup>等人的研究表明, 利用阻抗 (Impedance) 变化测定粮食水分的电容式谷物水分计对干燥后的粮食进行检测时, 其介电常数随着时间不断增加而增大, 在 48 h 左右达到稳定。也就是说, 粮食外部的水分对介电常数的影响要大于内部的水分, 随着粮食水分向外移动, 水分检测值会越来越高。笠原正行<sup>[2]</sup>等人的研究表明, 水分测定仪的原理不同, 这种影响也不同。C. V. K. Kandala 和 Nelson<sup>[6-8]</sup>等人的研究也表明, 水分 29.9% 的玉米在 60 °C 的条件下通风干燥 1.5 h 水分降低到 18.9% (定温干燥法的测定值) 后, 采用平行平板电容法和粉碎式电阻法连续检测, 水分的测定值不断增加, 前者的测定值由 18.9% 增加到 20.6%, 后者的测定值由 17.5% 增加到 20.4%。高频电阻式水分仪受影响最大, 而直流电阻式、高频电容式和微波吸收式受影响依次减小。但由于单颗粮食中的水分分布无法测量和定量表述, 对它的影响的补偿和校正就变得非常困难, 电阻式和电容式水分测定仪在干燥机在线检测应用中的最大问题便来源于此。笔者在过去的研究工作中曾经用高频线圈的电感来检测粮食的水分变化, 发现粮食水分与电感 (Inductance) 间有良好的相关关系<sup>[9]</sup>。不

过, 电感也同时受到密度等多种因素的影响。为了研究水分的非均匀分布对电感可能产生的影响, 在本研究中, 笔者通过控制干燥条件, 对单粒粮食内的水分非均匀分布进行了模拟分析, 同时, 通过检测不同水分的粮食混合物, 分析了不同批次间粮食水分对电感的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为成都市场上购入的种用杂交水稻粳优 63 号。干燥后的粮食水分含量为 13.7% (湿基)。试验开始前将稻谷泡入水中 2 h 并经常加以搅拌, 使其充分吸水 (稻谷粒的中心部分完全湿润) 后沥去多余水分, 用塑料袋密封并在 7 °C 左右的冰箱中保存 3 d, 使稻谷内部的水分分布均匀。试验开始前将试样从冰箱中拿出, 在常温下放置 1 h, 使其温度与环境温度平衡。在充填试样时为了减少密度的变化对测定的影响, 试样是从线圈的开口处倒入的。堆积状态也保持自然状态, 而不对充填密度进行调整。通过称量装填样品前后线圈的质量变化, 计算试样的质量。

### 1.2 试验装置

在图 1 所示线圈系统中, 线圈容器采用厚度为 3.5 mm, 公称直径为 75 mm, 高度为 210 mm 的聚乙烯塑料管; 线圈为直径为 0.6 mm 的紫铜线在塑料管上的 180 匝密绕线圈。质量采用北京医用天平厂生产的 DT-5000 电子秤称量, 其测定范围为 0~5000 g, 精度为 ±1 g。电感采用惠普公司生产的 4285A 型 LCR 测定仪 (电感、电容与电阻测定仪) 检测。为了减少环境的影响, 采用 4 线屏蔽电缆连接 LCR 测定仪与线圈。在测定时除将 LCR 测定仪和连接电缆的位置固定外, 并在每次接通电源后进行校正 (包括零校正和开放校正)。按照我们过去的研究取得的相关结果, 测定频率为 100~1000 kHz 与线圈的圈数为 180 匝时, 系统的灵敏度和精确度最佳<sup>[9]</sup>, 因此, 本研究依然采用测定频率 100~1000 kHz 和 180 匝的密绕线圈。测定过程为: 由 LCR 测定仪按照设定的程序对线圈施加高频电压, 同时测定在此电压作用下线圈的电感。测定回路采用串连回路, 所测定的电

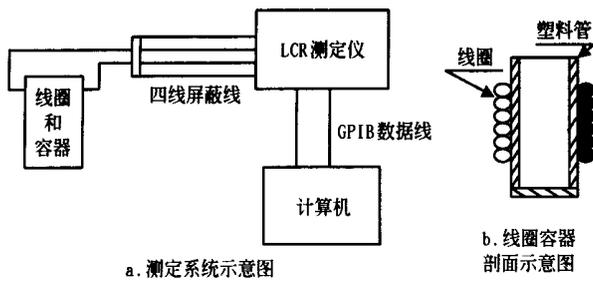
收稿日期: 2003-11-14 修订日期: 2004-03-05

基金项目: 国家自然科学基金 (20276079)

作者简介: 李再贵 (1964-) 男, 副教授, 主要从事谷物加工与品质评价研究。北京市海淀区清华东路 17 号 中国农业大学 40 号信箱, 100083, Email: lizg@cau.edu.cn



感也是串连电感。所有的测定由计算机控制,测定结果也由计算机自动记录。



a. 测定系统示意图

b. 线圈容器剖面示意图

图1 线圈结构及测定系统示意图

Fig 1 Schematic diagram of coil structure and experimental system

### 1.3 试验方法和内容

冰箱中保存的稻谷取出 1 kg 左右,塑料袋密封后放置 1 h,使稻谷的温度与环境温度一致。为了考察稻谷表面自由水对测定的影响,采用喷雾的方法在稻谷的表面喷洒一定量的水分,并考察喷水量的变化的影响。为了考察稻谷粒内水分分布不均对测定的影响,采用水分含量一定的稻谷在一定条件下干燥,使外部自由水和半结合水的一部分失去,从而调节稻谷粒内部的水分分布状况,同时通过密闭测定,还考察了水分由内向外移动时的电感变化。采用常温通风干燥以避免稻谷温度变化对测定的影响。同时,通过在容器内不同位置插入装满水的小塑料管,考察了高水分稻谷在线圈容器内偏在时的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷雾加水后线圈的电感的变化

如果下雨后或者在早晨有露水时收割粮食,则在粮食颗粒的外侧含有自由水。为了考察这种情况对电感的影响,以含水率为 27.6% 的试样 460 g 充满线圈容器。测定后将试样取出,并尽可能均匀地边搅拌边在其表面喷雾加水。喷雾后立即将试样充填再次进行测定。每次加水量通过称量充填后线圈容器的重量变化来计算。加水量达到 30 g (相当于稻谷水分提高了 6.5%) 以上时,在 800 kHz 以上的测定频率时就发生了共振,所以选择 500 kHz 测定频率研究了加水量较高时的影响情况。测定的电感变化如图 2 (实线部分) 所示。由图可以看出,随着加水量的增加,电感几乎呈直线增大。

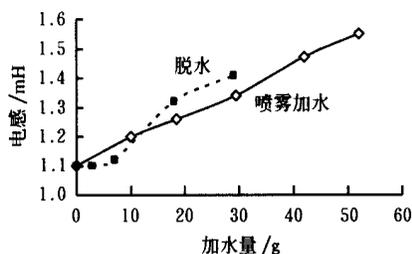


图2 500 kHz 喷雾加水及脱水后稻谷测定电感的变化

Fig 2 Variation of inductance of grain with spraying of water or dehydrating at 500 kHz

在加水量达到 52 g 并进行测定后,将试样在报纸上摊开,除去稻谷表面的水分,测得的电感变化情况如图 2 (虚线部分) 所示。随着稻谷表面水分的除去,自由水的减少,测得的电感也不断减少。但是,喷雾加水时的测定值与脱水时的测定值并没有完全重合。从图中可以看出,即使是计算含水量相同时,除去水分时比喷雾加水时的电感要大。这主要是因为,在除去水分时,部分谷芒也被除去而使样品的质量减少,使实际的水分除去量比通过称量质量变化而计算的理论水分除去量稍有减少。

图 3 是刚收获的没有进行水分调整的稻谷 (虚线部分) 与喷雾加水进行水分调整后的稻谷 (实线部分) 的线圈电感测定结果。由图可以看出,即使利用恒温干燥法测得的水分相同,喷雾加水后测得的电感比刚收获的稻谷要大的多。这是因为喷雾加水时增加的水分都以自由水的形态存在于稻谷的表面,而刚收获的稻谷的水分均匀的分布在颗粒内部,自由水的比例较小。

可以认为,粮食表面的自由水要比结合水和半结合水的活性高,对测定的影响也比较大。在采用高周波线圈检测稻谷水分时,应该避免稻谷的表面比颗粒内部存在较高水分的情况,即雨后和晴天的早上收获的稻谷无法得到正确的测量结果。

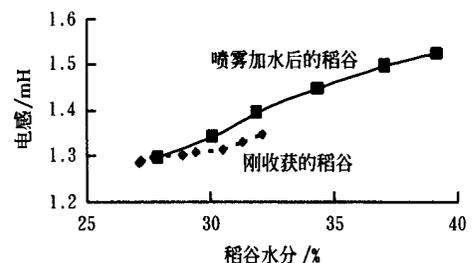


图3 喷雾加水与刚收获的稻谷的电感变化

Fig 3 Variation of inductance of water sprayed grain and grain without treatment

### 2.2 稻谷颗粒内水分移动时电感的变化

充分吸水后的粮食用报纸将表面水分除去,测得水分含量为 33.96%。然后,将粮食在桌面摊开,同时用两台电风扇强制通风 1 h。此时粮食水分分为 27.98%,而且可以认为粮食颗粒的外部水分要远低于内部水分。将线圈容器充满粮食后,用保鲜膜将开口密封,同时开始每半小时测定一次。所测得的电感随时间的变化如图 4 所示。从图中可以看出,在前 8 h 内,稻谷颗粒的水分从较高的内侧向外侧移动,电感不断增加,而且在最初的 4 h 内这种增加更为显著。与 2.1 的结论相同,试样外侧的水分比颗粒内部的水分对电感的影响更为显著。随着水分移动的减缓和试样水分的散失 (即使是密闭条件下,试验前后试样水分也减少 0.58%),测定值会轻微下降。从这个结果可以得知,利用高周波线圈水分检测系统在线检测干燥过程中的稻谷水分时,由于稻谷颗粒的外部水分低于其内部水分,因此,对稻谷的实际水分存在过低评价的问题,低估的幅度和补偿方法还有待于进一步研究。

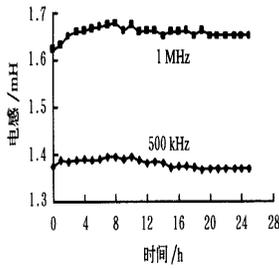


图 4 水分从稻谷颗粒的内部向外部移动时线圈电感的变化 (水分 33.96% 的稻谷通风干燥到水分 27.98% 后密闭在线圈中进行测定)

Fig 4 Variation of inductance of coil as water moving from inside to outside of dried grain (grain dried from moisture content of 33.96% to 27.98% by ventilation and closed in coil)

### 2.3 高水分稻谷在线圈容器内部分偏在时的电感的变化

采用高频线圈测定时, 如果线圈的长度足够长, 则线圈内的磁场为磁力线呈平行线状分布的均匀磁场。不过, 线圈长度较短时, 线圈的中心线附近的磁场强度最大。考虑到测定的稻谷的水分差异较大的情况, 考察了高水分稻谷偏在时的影响。

用与线圈容器材质相同的塑料管(内径 21.75 mm, 外径 26 mm)注入 76 g 水, 按图 5 所示改变其在线圈内的位置, 所测定的电感变化见图 6。无论是放置在线圈的中心还是靠近容器的边缘, 电感也基本没有变化。这说明试样水分偏在不会影响测定结果。也就是说,

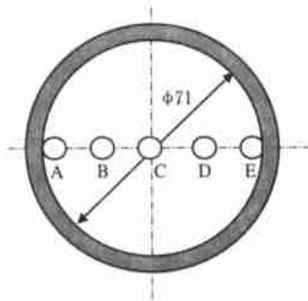


图 5 装水塑料管在线圈内的位置

Fig 5 Positions of pipe with full water in coil

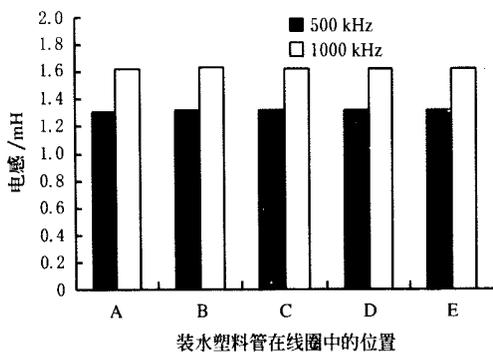


图 6 水分在线圈内部分偏在时对电感的影响

Fig 6 Influence of unbalanced bad of water in coil on inductance

如果稻谷颗粒内部的水分分布均匀, 而稻谷颗粒间的水分存在差异(如一部分已经干燥的稻谷和一部分水分较高的稻谷混合并缓苏后重新干燥时), 那么, 利用本文提供的方法可以较准确地测定其平均水分。

### 3 结论

1) 由于水分活性不同, 被测定物的外部自由水的影响远较内部水分的影响大。因此在测定降雨后或带露水收割的粮食时, 准确度将受到很大的影响。

2) 干燥过程中或者干燥后立即进行粮食水分测定时, 不但要注意温度的影响, 还要注意由于稻谷颗粒外部水分低于内部水分, 使检测的稻谷测定水分远低于实际水分。

3) 由于线圈内的磁场强度基本均匀一致, 高水分稻谷在容器中的部分偏在对测定结果没有影响。即利用本系统可以正确测定不同水分的稻谷混合缓苏后的粮食水分。

通过本研究, 发现与阻抗法等其他谷物水分测定法相同, 要将高频线圈测定法应用到干燥系统的在线检测, 必须对测定结果进行补偿, 对测定值低估的幅度和补偿的方法将待进一步研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 伴敏三, 铃木光雄 人工干燥过程中粮食含水率的电学检测方法的研究[M] 日本农业机械化研究所报告: 农业机械化研究所报告第 11 号, 1997, 1- 58[日]
- [2] 笠原正行 稻谷的状态对水分检测装置的测定精度的影响[J] 日本农业机械学报, 1989, 51(6): 63- 69[日]
- [3] 笠原正行, 猪原明成 稻谷干燥过程中的水分自动检测装置的精度[J] 日本农业机械学报, 1982, 44(3): 507- 511[日]
- [4] 森邦男 干燥控制系统中的粮食含水率检测装置(第 1 报) - 影响检出电流的诸因素[J] 日本农业机械学报, 1971, 32(4): 306- 321[日]
- [5] 矢田美 稻谷干燥机的含水率自动检测装置的性能[J] 日本农业机械学报, 1984, 46(4): 553- 557[日]
- [6] Nelson S O, Lawrence K C, Kandala C V K. Comparison of RF impedance and DC conductance sensing for single-kernel moisture measurement in corn[J]. Transactions of the ASAE, 33(2): 637- 641.
- [7] Nelson S O, Kandala C V K, Lawrence K C. Single-kernel moisture determination in peanuts by complex RF impedance measurement[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(4): 1308- 1313.
- [8] Kandala C V K, Nelson S O, Lawrence K C. Nondestructive moisture determination in single kernels of popcorn by radio-frequency impedance measurement[J]. Transaction of the ASAE, 1992, 35(5): 1599- 1562.
- [9] 李再贵, 藤木德实, 内田进, 等. 利用高周波线圈检测谷物水分的研究(第 1 报) - 水分与试制的线圈的电磁感应强度间的关系[J]. 日本农业设施学会学报, 1999, 29(4): 181 - 186[日]

## Effects of moisture conditions of grain on inductance of high frequency coil

Li Zaigui<sup>1,2</sup>, Yin Lijun<sup>1</sup>, Gao Zhenjiang<sup>3</sup>, Li Fade<sup>4</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Modern Precision Agricultural System Integration, Ministry of Education, Beijing 100083, China;

3. College of Engineering, China Agricultural University, 100083 Beijing, China;

4. Mechanical and Electronic Engineering College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract** Moisture moving in grain kernel and partial distribution of high moisture grain in the coil affected measured value of moisture content of grain by using high frequency coil. In the case of instability state after dried by ventilation, while moisture moved from inside to outside of the kernel, moisture content of grain measured by using high frequency coil system was larger than the value measured by using heated drying method. On the surface of grain kernel, if the free water was increased by spraying, measured moisture contents increased much with the increasing of quantity of spraying water. It is found that even if high moisture grain was unbalancedly loaded in the coil, measured moisture content was not affected.

**Key words:** grain; moisture measurement; high frequency inductance; movement of water

## 关于“北京 2004 国际农业工程大会(2004 CIGR BEIJING)” 的征文通知

各位理事, 各省、自治区、直辖市农业工程学会, 各专业(工作)委员会, 各有关单位:

由国际农业工程学会(简称 CIGR)、中国农业机械学会和中国农业工程学会联合主办, 中国农业大学、中国农业机械化科学研究院和中国农业工程研究设计院(农业部规划设计研究院)共同承办的 2004 国际农业工程大会将于 2004 年 10 月

11 日~ 14 日在北京国际会议中心召开。大会组委会热忱欢迎各界人士前来参加此次盛会。有关大会的详细筹备情况, 请登陆网站 [www.2004cigr.org](http://www.2004cigr.org) 查询。

一、分会、论坛及其主题

本次大会设有五个分会和一个教育发展论坛, 分会主题和会议征文联系方式如下:

分会及主题	联系人	电话及传真	手机	地址、邮编及 E-mail
第 1 分会 节水与水土环境管理	黄权中	62337144 62337138(F)	13651142065	北京中国农业大学东区 151 信箱, 100083 Ciicta@public.bta.net.cn
第 2 分会 农产品加工与食品安全	张兰芳	64882358 64883508(F)	13910672502	北京德外北沙滩 1 号 8 信箱 Susanna2cn@yahoo.com.cn
第 3 分会 数字化农业	王定成	82377321 82377326(F)	13522827316	北京中国农业大学东区 63 信箱, 100083 dcwang@im.ac.cn
第 4 分会 保护性耕作与小规模可持续农业	王晓燕 周兴祥	62337300 62336889(F)	13311320408 13301139251	北京中国农业大学东区 46 信箱, 100083 xywang@cau.edu.cn    xxzhou@cau.edu.cn
第 5 分会 现代农业装备与设施	杨敏丽	62337333 62337333(F)	13701326650	北京中国农业大学东区 102 信箱, 100083 qyang@cau.edu.cn
农业与生物系统工程教育发展论坛	罗锡文	020-85280002 85511393(F)	13902277193	广州市五山华南农业大学校办, 510642 xwluo@scau.edu.cn
大会学术委员会	董仁杰	62336482 62324370(F)	13601387967	北京中国农业大学东区 184 信箱, 100083 rjdong@cau.edu.cn
	王宝济	62336490 62336908(F)	13621186957	北京中国农业大学东区 101 信箱, 100083 wbj@cau.edu.cn

(下转第 170 页)