

果蔬粉含水率在线检测系统设计

Design of moisture-content detecting system for the dried powders of the fruits and vegetables

赵 勇¹ 武旭瑶¹ 黄文英¹ 胥慧丽¹ 吴中华^{1,2}

ZHAO Yong¹ WU Xu-yao¹ HUANG Wen-ying¹ XU Hui-li¹ WU Zhong-hua^{1,2}

(1. 天津市科技大学机械工程学院, 天津 300222;

2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

(1. *Department of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology,*

Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line

Monitoring for Light Industry and Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

摘要:目的:为满足低含水率果蔬粉在线检测需求。方法:基于微波透射原理,设计了一套果蔬粉含水率在线检测系统。系统分为进料模块、检测模块、卸料模块和控制显示模块,并进行相应硬件和软件设计。以胡萝卜粉为试验物料,由第三方检测机构进行含水率微波透射和国标法检测比较,以评价装置检测性能。结果:该装置检测每份样品的含水率耗时约 7.33 s,准确度为 98.2%,重复性为 0.15%。结论:基于系统设计的装置能够实现低含水率果蔬粉的在线、连续检测。

关键词:果蔬粉;微波透射;在线检测;装置开发

Abstract: **Objective:** In order to meet the demand of low water-content fruit-vegetable powder online detection, a new detection system was established. **Methods:** Based on the microwave transmission principle, an online moisture detection system of fruit-vegetable powder was designed. The system was divided into a feed module, a detection module, a discharge module and control display module, and the corresponding hardware and software design. Carrot powders were used as the test material, and a third-party testing institution compared the two methods, including water-content microwave transmission and national standard testing, to evaluate the test performance of the device. **Results:** The moisture content of each sample was determined to be about 7.33 s by the new device, with an accuracy of 98.2% and repeatability of 0.15%. **Conclusion:** The system-based device can realize

online and continuous detection of fruit-vegetable powder with low water content.

Keywords: fruit-vegetable powder; microwave transmission; on-line detection; device development

中国是蔬菜和水果生产大国,2019 年蔬菜和水果产量分别为 7.2 亿,2.7 亿 t 左右;但是国内果蔬深加工转化率(不足 15%)远远低于发达国家(60%),资源和经济损失较大^[1]。近年来,由于果蔬粉具有保质期长、种类丰富、原料利用率和营养价值高等优点^[2-4],更多的果蔬被干燥加工成果蔬粉,作为冲泡食品、保健食品、婴幼儿食品辅料。含水率是果蔬粉生产加工过程中的一个重要指标,只有果蔬粉达到安全含水率(5%~14%)才能长期保存。因此在果蔬粉生产过程中,有着快速、准确和实时地测量含水率的实际需求。

含水率测量方法有脱水失重法、卡尔费休法、近红外光法、微波法和核磁共振法等^[5-6]。脱水失重法和卡尔费休法属于间歇检测法,需人工取样,无法满足生产加工过程的快速、在线检测要求。近红外光法和核磁共振法能快速、准确和无损地检测水分含量,但是设备昂贵。微波透射含水率检测方法具有检测速率快、精度高、价格适中、材料无损和可在线检测等优点,因而被国内外众多学者采用^[7-9]。Agranovich 等^[10]设计了一套以微波传感器为核心的水分检测装置,在 40 GHz 下,以 150 多份的牛奶样品进行测量,成功地利用微波功率的衰减来预测牛奶中的水分。Trabelsi 等^[11]利用微波传感器制成微波水分仪,用于测量带壳花生的含水率,测量误差在 5%以内。张秀艳等^[12]设计了一套烟包含水率微波透射在线检测仪,测试结果表明,该测试仪在误差范围内可测量 0%~30%含水率,

基金项目:“十三五”国家重点研发子课题项目(编号:2017YFD0400904-4);天津市研究生科研创新项目资助(编号:2020YJSS061)

作者简介:赵勇,男,天津科技大学在读硕士研究生。

通信作者:吴中华(1977—),男,天津科技大学教授,博士。

E-mail: wuzhonghua@tust.edu.cn

收稿日期:2021-03-10

最高测量精度达 0.18%，单次测量转换时间小于 100 ms。伟利国等^[13]设计了一套粮食水分微波在线检测系统，以小麦、玉米、水稻等粮食作物进行试验，结果表明水分检测范围为 10%~21%，测量精度 $\pm 0.5\%$ ，可满足粮食烘干过程中含水率在线连续检测的需要。尽管已有前人对含水率微波检测方法和装置进行研究，但研究对象主要集中于高含水率物料，对于果蔬粉之类的低含水率物料的在线检测还未发现，不能完全满足实际检测要求。

试验拟设计一套微波含水率在线检测系统，该系统通过利用微波水分检测技术与生产线相结合，在保证检测精度的同时进行快速检测，将检测数据实时反馈给生产线，从而调整优化果蔬干干燥制粉中的工艺参数以达到节约能源、提高生产效率的目的。

1 总体方案设计

系统整体结构设计如图 1 所示，主要由进料模块、检测模块、卸料模块、控制显示模块组成。进料模块包括漏斗和振动器，用于实现进料量和进料速度的调节。检测模块包括介质振荡器、隔离器、发射接收天线、波导同轴、数控衰减器、检波器、信号放大器、A/D 转换器和单片机等单元，用于检测果蔬粉的含水率。卸料模块包括集成器和风机，用于及时排出已检测的果蔬粉。控制显示模块为 PLC+触摸屏的一体机，用于对整个检测操作过程的精确控制。

系统工作流程为开机后，进料模块从生产线取出一定量的果蔬粉进入检测料盒。此时，由介质振荡器产生微波信号，经隔离器和喇叭口发射天线发出，通过料盒后被接收天线接收。因为果蔬粉中含有水分，接收到的信号功率会发生衰减。接收天线收到衰减后的信号，通过波导同轴传输到数控衰减器，调频后对信号进行隔离处理，达到检波器检波出直流电压。直流电压经运算器放大和 A/D 转换器转换为数字信号后，上传至单片机。利

用单片机中含水率校正程序得到具体的含水率值，然后被上传至上位机进行采集和处理。测量完成后，卸料模块排出物料，然后开始下一个检测流程。

2 系统硬件设计

2.1 进料模块

进料模块由漏斗和振动器组成，振动器的作用是防止物料下落阻塞，通过提供振动力使物料顺利下落。通过试验发现对于胡萝卜粉，振动器(型号为 R-370，深圳新永泰电机有限公司)工作电压为 24 V，6 000 r/min 可满足条件。

2.2 检测模块

基于微波透射原理的硬件设计中，能产生稳定微波信号的发射源是较为关键的一个单元，使用介质振荡器产生微波，具有功耗小、可靠性高、频率和功率稳定等优点，试验设计针对的物料是低含水率果蔬粉，经过前期试验，发现选用 X 波段($8.20 \times 10^9 \sim 1.09 \times 10^{10}$ Hz)作为微波发射源较为合适，其输出功率为 80 mW，工作电压 +12 V。数控衰减器是用来控制信号输出大小，保证传输出合适功率的微波信号，衰减范围包括 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 dB，总衰减量为 31.5 dB。隔离器只允许微波沿一个方向通过，不能反向通过，反向的微波都被吸收，降低了微波的消耗。该设计采用外置 BJ100 隔离器，工作带宽一般到 20% 左右，插入损耗为 0.25 dB，隔离度 25 dB，驻波比 1.12。发射接收天线采用喇叭口传输通道，能减少微波的损耗。检波器的作用是检测到微波信号并进行调节，实现微波频率的装换。使用的检波器是由波导同轴加上微波检波二极管及调配螺钉组成，当微波输入信号是连续波，整流后输出为直流，当微波信号为方波调制，则输出低频信号。

A/D 转换器的作用是将电信号转换为数字信号便于后期处理；该设计选用 8 位逐次逼近式 A/D 转换器

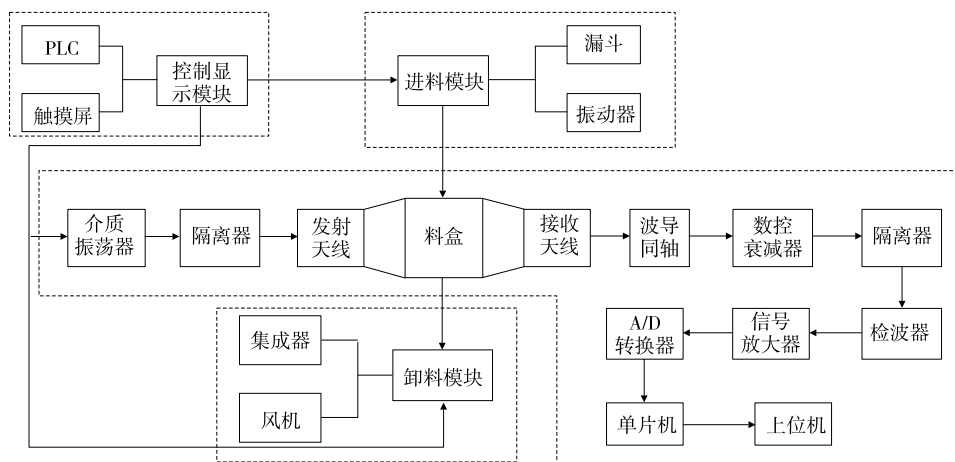


图 1 果蔬粉水分在线检测装置结构示意图

Figure 1 Structure diagram of the on-line moisture content detection device for dried fruits and vegetable powders

ADC0809,其功耗 15 mV,时钟频率范围为 $1.00 \times 10^4 \sim 1.28 \times 10^6$ Hz。单片机型号选用 AT89C51,拥有 8 位中央处理器(CPU),32 个可编程 I/O 口线,2 个 16 位定时/计数器。上位机使用台式计算机[Intel(R) Xeon(R) CPU, 10 GB RAM]与单片机通过串行线 USB 连接,用于收集数据,便于后期分析处理。

2.3 卸料模块

卸料模块包括风机和集尘器,风机选用 LH-50P 型(九叶风管道风机工厂),其风压为 570 Pa,功率 18 W,噪音 58 dB。检测物料重量为 30 g/次,重力则为 0.3 N。该设计中,风机提供的吸力大于检测粉末重量,以便果蔬粉顺利排出;风机可根据实际使用情况调节转速,破坏卸料途中可能产生的“拱桥现象”(粉末在下降过程中由于相互交错咬合易形成拱桥空间,造成粉末流动不畅)。集尘器采用自制旋风集尘器。

2.4 控制显示模块

控制显示模块负责控制物料的进入、含水率检测和排出,综合考虑选用型号为 MC-24MR-4MT-500-FX-A 的 PLC 触摸屏一体机(中达优控),输出点 Y1~Y5 分别接振动器、第一个电动球阀、介质振荡器、第二个电动球阀和风机。PLC 内程序控制整个流程的运行,系统执行部件选用 220 V 电动球阀。

3 系统软件设计

3.1 含水率与微波信号关联模型

使用微波透射法检测果蔬粉含水率,需建立含水率与微波信号之间关联数学模型(也称标定曲线模型)。以胡萝卜粉为物料,通过试验建立关联数学模型。首先,通过控制干燥时间制备不同含水率(5%~14%)胡萝卜粉;对某个含水率胡萝卜粉样品,利用微波测试单元测量并取得微波电压值,多次测量取平均值;然后将含水率与微波电压值进行拟合回归,得到以下数学模型:

$$X = 33.63 - 5.546 \times M, \quad (1)$$

式中:

X ——含水率,%;

M ——微波电压值,V。

该拟合模型中,胡萝卜粉含水率和微波电压值呈线性关系,相关系数(R^2)为 0.957。在实际测量胡萝卜粉含水率时,通过测得的微波电压值,依据关联模型即可换算成对应的含水率。

微波信号处理与含水率换算通过内置程序实现。该程序采用 C++ 语言编写,含水率换算流程如图 2 所示。对果蔬粉样品进行含水率测量,若测量的含水率(C_1)与标定曲线方程中电压对应的参考含水率(C_{ref})差值大于 1%,则进行定标曲线的校正,若小于 1%,则记读数为 C_1 ,再次测量读数记为 C_2 ,若两次测量差值小于 0.5%,

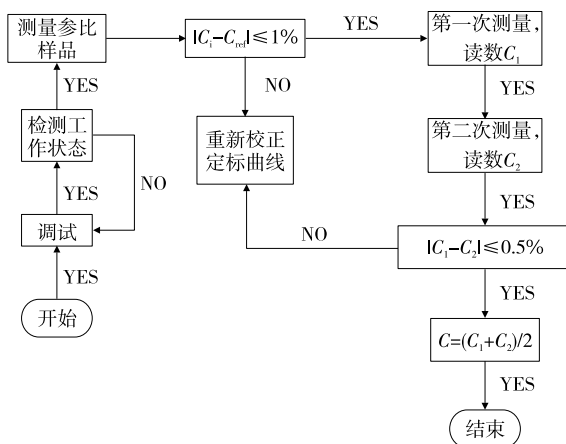


图 2 含水率计算程序流程图

Figure 2 Flowchart of content calculation program

则最终含水率(C)为两次读数的平均值。若两次测量结果大于 0.5%,则重新进行定标曲线的校正。

3.2 上位机软件的开发

上位机软件的开发是为了将所测量的含水率在电脑上采集和处理,需要编写一套上位机软件,以 STC12 系列 LE5A56S2 为主控芯片,利用 STC-ISP 软件,将单片机插入编程器并与电脑连接进行程序编写,具体过程:

- (1) 选择单片机型号和确定数据写入范围。
- (2) 装入编译好的 BIN 或 HEX 文件。
- (3) 选择串口,并设置波特率。
- (4) 设置工作模式与下载条件。
- (5) 点击下载按钮进行下载,然后再接通编程器的电源。

3.3 时序控制和组态设计

果蔬干燥粉的进出和检测时序控制由 PLC 完成,内控程序使用三菱 GX Works2 进行编程,采用梯形图设计,根据系统要求分为手动和自动控制两种运行模式,手动控制运行模式是人为控制果蔬干燥粉的进出和含水率的检测;自动控制模式是按照程序进行。触摸屏是整个系统的显示操作界面,分为启动、停止和终止工作状态。操作界面包含首页、手动操作和自动操作 3 个界面。自动操作时,只需在自动操作界面打开开关,PLC 中的程序会自动控制整体系统运行。

4 装置评价

果蔬粉微波快速检测装置开发调试后,2019 年 8 月委托有检测资质第三方——中国农业机械化科学研究院标准与质量检测中心,进行装置检测性能评价。以含水率范围 5%~14%的胡萝卜粉(山东佐缘食疗科技有限公司)为试验物料,分别利用微波水分检测方法和按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的第一法,检测试验物料含水率。国标法测量得到的

含水率为 10.09%，微波水分测量重复进行 20 次，结果如表 1 所示，并比较检测数据，检测准确度计算公式为：

$$\eta = \left(1 - \frac{|B-A|}{A}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中：

η ——装置水分检测准确度，%；

A ——国标法测量含水率，%；

B ——试验装置测量含水率，%。

表 1 微波水分检测含水率表

Table 1 Water content table of microwave water detection

序号	时间/s	含水率/%	序号	时间/s	含水率/%
1	7.35	10.23	11	7.33	10.23
2	7.36	10.23	12	7.38	10.34
3	7.31	10.23	13	7.32	10.34
4	7.33	10.23	14	7.27	10.34
5	7.30	10.23	15	7.35	10.29
6	7.28	10.23	16	7.33	10.34
7	7.36	10.23	17	7.32	10.29
8	7.36	10.23	18	7.35	10.29
9	7.31	10.18	19	7.33	10.29
10	7.34	10.23	20	7.32	10.29

装置评价报告显示：该装置检测每份样品的含水率耗时约 7.33 s，样品水分检测准确度为 98.2%，样品水分检测重复性为 0.15%。

5 结论

研究设计了一套果蔬粉含水率在线检测系统，由进料模块、检测模块、卸料模块和控制显示模块组成。进料模块通过振动力消除果蔬粉进料阻塞现象，使得料粉顺利进入检测料盒；检测模块利用微波透射衰减法快速检测出果蔬粉含水率进行处理、收集和显示；卸料模块通过风机提供的风力破坏果蔬粉可能产生的“拱桥现象”加速物料排出；控制显示模块通过 PLC 中的程序自动控制整体运行。软件系统包括含水率标定程序、上位机软件开发、PLC 的时序控制程序和组态设计。以胡萝卜粉为试验物料，进行检测系统第三方评价，结果显示：检测每份样品的含水率耗时约 7.33 s，检测胡萝卜粉含水率准确度为 98.2%，重复性为 0.15%，装置可操作性好，可实现对低含水率的果蔬粉在线、连续检测。

参考文献

[1] 毕金峰, 陈芹芹, 刘璇, 等. 国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J]. 中国食品学报, 2013, 13(3): 8-14.
BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, LIU Xuan, et al. Fruit and vegetable

powder processing technology and industrial status and prospect[J]. China Food Journal, 2013, 13(3): 8-14.
[2] SALEHI F, AGHAJANZADEH S. Effect of dried fruits and vegetables powder on cakes quality: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 95: 162-172.
[3] PANICH S. Total phenolic compounds of fruit and vegetable powders in thailand[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 901: 3-9.
[4] 彭海容. 我国果蔬深加工的发展趋势[J]. 中国食品, 2015(7): 76-78.
PENG Hai-rong. The development trend of fruit and vegetable deep processing in China[J]. China Food, 2015(7): 76-78.
[5] 周显青, 赵希雷, 张玉荣, 等. 谷物水分检测技术现状与展望[J]. 粮食加工, 2015, 40(4): 29-34.
ZHOU Xian-qing, ZHAO Xi-lei, ZHANG Yu-rong, et al. Current status and prospect of grain water testing technology[J]. Grain Processing, 2015, 40(4): 29-34.
[6] 齐翀, 向忠, 胡旭东. 纺织品含水率测量方法研究进展[J]. 现代纺织技术, 2020, 28(1): 52-61.
QI Chong, XIANG Zhong, HU Xu-dong. Research progress in measurement methods of textile water content[J]. Modern Textile Technology, 2020, 28(1): 52-61.
[7] 彭云发, 刘致华, 陈浩, 等. 基于微波水分仪的仓储霉变烟叶检测与研究[J]. 新疆农机化, 2020(2): 8-10.
PENG Yun-fa, LIU Zhi-hua, CHEN Hao, et al. Testing and research based on microwave water meter[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2020(2): 8-10.
[8] 宋禹. 基于微波的大米水分快速检测探究[J]. 食品安全导刊, 2019(30): 97.
SONG Yu. Rice moisture rapid detection based on microwave[J]. Food Safety Guide, 2019(30): 97.
[9] 胥保文, 蔡健荣, 孙力, 等. 粮食水分检测装置设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 81-83.
XU Bao-wen, CAI Jian-rong, SUN Li, et al. Food water detection device design[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 81-83.
[10] AGRANOVICH D, RENHART I, ISHAI B P, et al. A microwave sensor for the characterization of bovine milk[J]. Food Control, 2016, 63(15): 195-200.
[11] TRABELSI S, LEWIS M A, NELSON S. Microwave moisture meter for in-shell peanut kernels[J]. Food Control, 2016, 66: 283-290.
[12] 张秀艳, 崔永俊, 刘坤. 基于微波透射技术的卷烟包含水率在线测试设计[J]. 电子器件, 2020, 43(2): 445-451.
ZHANG Xiu-yan, CUI Yong-jun, LIU Kun. On-line tester design based on microwave transmission technology[J]. Electronics, 2020, 43(2): 445-451.
[13] 伟利国, 张小超, 车宇. 粮食烘干过程中水分在线检测系统研究[J]. 电子产品世界, 2014, 21(增刊 1): 25-26, 33.
WEI Li-guo, ZHANG Xiao-chao, CHE Yu. Research on water on-line detection system in grain drying[J]. Electronics World, 2014, 21(Sup 1): 25-26, 33.