

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.042

便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置

王 凡¹ 李永玉¹ 彭彦昆¹ 杨炳南² 李 龙¹ 尹学清²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 基于可见/近红外局部透射光谱,根据马铃薯大小及形状特征,设计了便携式马铃薯多品质无损检测装置,包括光谱采集模块、光源模块、控制与显示模块、供电模块和黑白参考盒,装置尺寸为11 cm×6.5 cm×9.5 cm。选取大西洋品种马铃薯样品85个,基于装置建立了马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的偏最小二乘定量预测模型,马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数预测模型验证集相关系数分别为0.927 8、0.914 6、0.933 8,均方根误差分别为0.325 3%、0.344 9%、0.041 6%。基于QT开发工具,采用C/C++语言编写了装置实时分析控制软件,将所建预测模型植入到软件中,实现了马铃薯多品质参数实时无损检测一键式操作。最后对便携式马铃薯多品质无损检测装置的检测精度进行了验证。20个马铃薯样品含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的装置预测值与标准理化值的相关系数分别为0.914 1、0.912 2和0.914 0,均方根误差分别为0.352 7%、0.340 4%和0.040 0%,平均偏差分别为0.295 1%、0.253 6%和0.031 6%,重复采样最大变异系数分别为0.006 7、0.012 4和0.123 1。结果表明:马铃薯多品质局部透射无损检测装置可以实现马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的实时无损检测。

关键词: 马铃薯; 多品质参数; 便携式; 局部透射光谱; 无损检测

中图分类号: S379.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0348-07

Hand-held Device for Non-destructive Detection of Potato Quality Parameters

WANG Fan¹ LI Yongyu¹ PENG Yankun¹ YANG Bingnan² LI Long¹ YIN Xueqing²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the visible/near-infrared local transmission spectrum, a handheld multi-quality non-destructive inspection device for potatoes was independently developed, including a spectrum acquisition module, a light source module, a control and display module, a power supply module, and a black and white reference box. The entire device size was 11 cm×6.5 cm×9.5 cm. Totally eighty-five Atlantic potato samples were selected, and a partial least-squares quantitative prediction model of potato water, starch and reducing sugar was established based on the developed device. The correlation coefficients of potato water, starch and reducing sugar prediction model validation set were 0.927 8, 0.914 6 and 0.933 8, and the root mean square errors were 0.325 3%, 0.344 9% and 0.041 6%, respectively. Based on the QT development tool, the device real-time analysis and control software was written in C/C++ language. The potato water, starch and reducing sugar prediction models were built into the software. The real-time non-destructive detection of potato multi-parameter parameters was realized by one-button operation. Finally, the accuracy of the multi-quality non-destructive testing device for handheld potato was verified. The correlation coefficients between the predicted values of water content, starch and reducing sugar content of 20 potato samples and standard physical and chemical values were 0.914 1, 0.912 2 and 0.914 0, the root mean square errors were 0.352 7%, 0.340 4% and 0.040 0%, and the average deviations were 0.295 1%, 0.253 6% and 0.031 6%, respectively. The results showed that the potato multi-quality local transmission non-destructive testing device can realize the real-time non-destructive detection of potato moisture.

Key words: potato; multiple quality parameters; hand-held; local transmission spectrum; non-destructive detection

收稿日期: 2018-04-10 修回日期: 2018-05-07
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401300)
作者简介: 王凡(1992—),女,博士生,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: wangfan0313@126.com
通信作者: 李永玉(1971—),女,副教授,博士生导师,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: yyli@cau.edu.cn

0 引言

马铃薯是我国仅次于小麦、水稻和玉米的第四大主要粮食作物。近些年来,随着我国与周边国家经贸合作关系的不断深化,加工特性优良的鲜马铃薯和薯条、薯片及马铃薯淀粉出口将继续保持增加态势^[1]。马铃薯内部成分不仅决定其营养价值,而且还会影响加工品质。马铃薯中水分占块茎总质量的 70% 左右,主要影响油炸过程中的耗油量、加工中蒸发水所需的能耗及烹饪口感;淀粉占马铃薯块茎总质量的 10% ~ 20%,是马铃薯最主要的营养成分之一;还原糖占马铃薯块茎总质量的 0.1% ~ 5%,它与氨基酸产生的褐变反应会导致马铃薯产品色泽灰暗,甚至产生有害物质。马铃薯品质参差不齐是制约我国马铃薯产业主食化进程的重要因素之一,马铃薯品质快速无损检测对推进马铃薯产业发展有着重要意义。

目前,国内外不少学者对马铃薯内部品质进行了无损检测研究,WALSH 等^[2]、KANG 等^[3]使用透射光谱分别建立了干物质、比重的近红外预测模型,相关系数分别为 0.79 和 0.85,HAASE 等^[4]、SUBEDI 等^[5]、张小燕等^[6]对马铃薯干物质、含水率等主要参数进行了预测,相关系数均在 0.9 以上。但这些研究均属于检测方法实验研究,检测系统体积大、移动不便,不利于实际推广和应用。随着近红外光谱在农产品品质检测领域的推广应用,我国学者设计了各种农产品专用便携式检测装置,如生鲜肉品质检测装置^[7-8]、作物和水果品质检测装置^[9-11]等。但是有关马铃薯品质检测便携式装置的研究在国内未见报道,随着我国马铃薯主食化产业的推进,研究适用于马铃薯产地的马铃薯品质便携式实时检测装置显得尤为重要。

本文基于可见/近红外局部透射光谱,根据马铃薯大小及形状特征,设计便携式马铃薯多品质无损检测装置,编写实时检测分析控制软件,植入马铃薯含水率、淀粉质量分数、还原糖质量分数的预测模型,实现马铃薯内部品质的实时无损检测。

1 无损检测装置硬件设计

1.1 无损检测装置原理

当近红外辐射照射到样品表面时,一部分辐射发生反射,一部分辐射透过样品从另一侧射出,而另一部分辐射被样品散射并返回到表面。反射光谱信号强度较好,但受马铃薯表皮影响较大^[12],透射光谱能较好地反映内部信息,但因马铃薯大小引起的光程差异较大^[13-14]。考虑到马铃薯整体质地较为

均匀,本研究采用局部透射的检测方式。整个装置由光谱采集模块、光源模块、控制与显示模块等构成,如图 1 所示。光源模块由灯珠与反光杯组成,为整个装置提供光照;光谱采集模块由光谱仪和聚焦透镜组成,该部分将透过样品的光收集、转换为电信号并传输给 ARM 处理器,处理器将处理后的光谱和预测值显示在屏幕上,整个装置由供电模块供电。

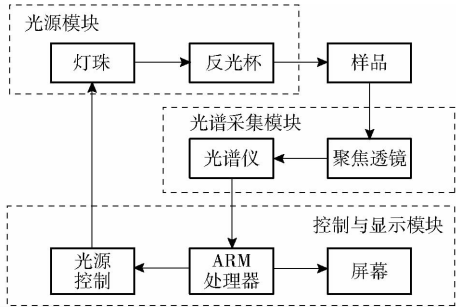


图 1 硬件系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware system

1.2 无损检测装置硬件设计

1.2.1 光谱采集模块

光谱仪是本设备的核心部件,它的优劣很大程度上决定着装置的精度和稳定性。本研究通过多种光谱仪的体积、原理、结构、分辨率、波段范围等对比分析,根据预实验并参照文献[15-18],选择了波长范围为 650 ~ 1 100 nm 的海洋光学公司生产的 STS 光谱仪。它是基于 CMOS(互补金属氧化物半导体)传感器的微型光谱仪,在结构上采用交叉式 Czerny-Turner 结构^[19],拥有较小体积(40 mm × 42 mm × 24 mm),具有较高的信噪比(1 500 以上)和分辨率(1.5 nm)。

在大部分近红外光谱检测系统中,光谱仪与样品之间由光纤连接^[20-23],但研究证明光在光纤中传导时会损失一部分能量,这会导致积分时间的增加,而且光纤脆性较大,为保证其最小弯折半径,往往需要更大的操作空间。光谱仪虽然可以不通过光纤直接接收光信号,但光谱仪接口暴露会导致灰尘进入,且光谱仪体积较大,直接作为探头,布置较为困难。基于以上考虑,本研究选择海洋光学 74-DA 型耦合透镜作为检测探头。耦合透镜结构示意图如图 2a、2b 所示,聚焦透镜由两个带螺纹的扣环固定在螺纹准直筒内,为了验证耦合透镜的效果,使用 3 种不同连接方式,以 100 ms 为积分时间采集白参比的光谱,结果如图 2c 所示。3 种不同方式采集的光谱曲线形状大致相似,但使用聚焦透镜可以明显提升光谱信号强度。

1.2.2 光源模块

卤素灯是近红外光谱检测中常用的光源,其发

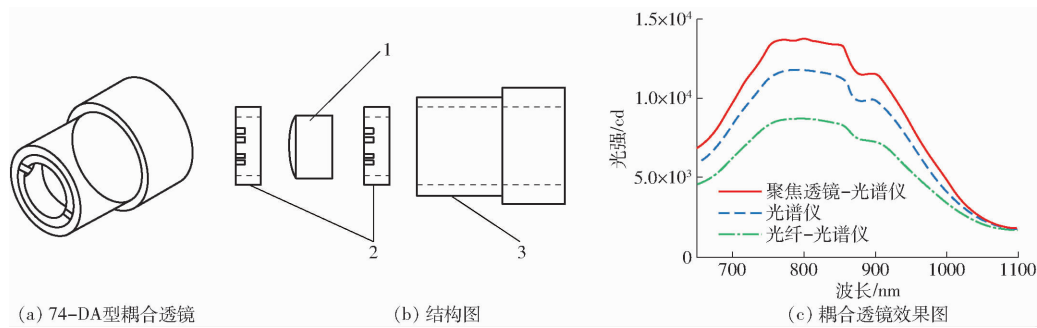
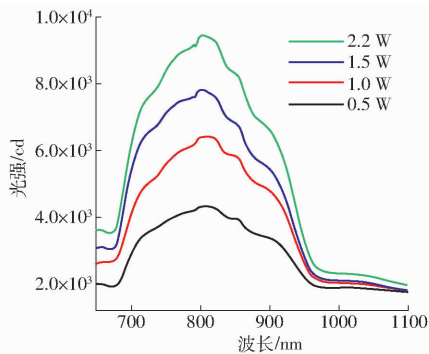


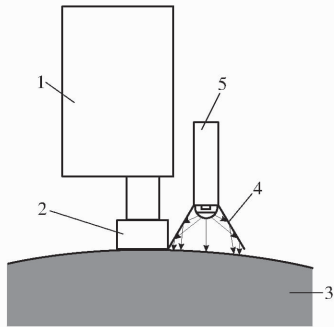
图2 耦合透镜示意图
Fig.2 Diagrams of coupling lens

1. 聚焦透镜 2. 螺纹扣环 3. 螺纹准直筒

射波长涵盖 200 ~ 2 500 nm,为了选择合适功率的光源,分别测试了 0.5、1.0、1.5、2.2 W 的灯珠在 100 ms 下的样品光谱响应。如图 3a 所示,功率小于 1 W 的光源发光较弱,样品光强占光谱仪满量程光强(14 000 cd)不足 40%,信噪比差,容易受到光谱仪噪声的干扰,当光源功率为 2.2 W 时,因光源与样品距离较近,样品表皮出现略微灼伤。本文采用了 1.5 W(3 V、0.5 A)998070-1 型超高亮卤素灯(美国 Welch Allyn 公司)加反光杯的集成化设计,如图 3b 所示。



(a) 不同功率光源响应图



(b) 探头部分示意图

图3 光源模块示意图

Fig.3 Schematic of light source

1. 光谱仪 2. 耦合透镜 3. 样品 4. 反光杯 5. 灯珠

1.2.3 控制与显示终端

控制单元不仅要实现对光谱仪的控制,还要对采集的数据进行计算处理并传输到显示终端,因此控制单元需要较快的运行速度和合适的外接接口。

本研究选择 Raspberry Pi 3b 作为控制单元,它是一款基于 ARM 的微型计算机主板,以 SD/MicroSD 卡为内存硬盘,卡片主板周围有 4 个 USB、1 个 100 MB 以太网接口和 HDMI 高清视频输出接口,可以实现大量数据流畅运算,但其尺寸只有 85 mm × 56 mm × 17 mm,满足设备小型化的需求。

根据控制单元,选择了与之匹配的树莓派 3.2 英寸电阻屏(3.2inch RPi LCD (B)),85 mm × 56 mm × 17 mm),该屏幕分辨率为 320 像素 × 240 像素,与树莓派之间通过 I/O 接口相连,除了显示功能,该屏幕附带 4 颗按钮,在本设备中利用其中 3 颗按钮分别作为黑参考、白参考和样品光谱的采集外触发。

1.2.4 供电模块

为了满足现场检测的需求,需要配备可充电式电池。光谱仪、控制器、显示器的输入电压为 5 V,光源的输入电压为 3 V,选用输出电压为 5 V 的可充电锂电池,一路直接为控制器供电,另一路经稳压板(LTC3780 为芯片)转换为 3 V 电压后为卤素灯供电。经计算选择电量为 6 A·h 的锂电池,可保证装置续航时间达到 3 h 以上。

1.2.5 整机设计

基于对光源单元、光谱采集单元、开发板以及稳压板大小的综合考虑,将开发板沿壳体的长度方向横向设置,然后将光谱采集单元和光源竖向设置,电源和光源之间设置稳压板,在整机右侧设置电池,达到最大限度节省空间的目的。便携式马铃薯多品质无损设备如图 4 所示,该装置整机尺寸 11 cm × 6.5 cm × 9.5 cm,可单手操作。

1.2.6 黑白参考盒设计

光谱仪的工作状态及电源性能等均会影响近红外光谱的稳定性,为消除这些外部因素对检测结果的影响,采集光谱时一般先进行黑白参考的校正。因便携式装置无支架、暗箱等,设计了黑白参考校正盒,如图 5a 所示。校正盒分为盒体和盒盖,盒体顶面设置通孔,通孔的形状恰好与探头外轮廓相匹配

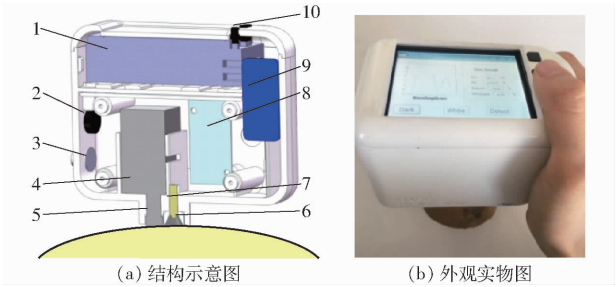


图 4 便携式马铃薯多品质无损检测设备
Fig. 4 Images of potato hand-held equipment
1. ARM 处理器-屏幕 2. 充电接口 3. 开关 4. 光谱仪 5. 耦合透镜 6. 反光杯 7. 灯珠 8. 稳压板 9. 电池 10. 按钮

形成暗室,盒盖防止灰尘落入并起保护作用。参考盒的内部底面设置材料为聚四氟乙烯的白板,如图 5b 所示。

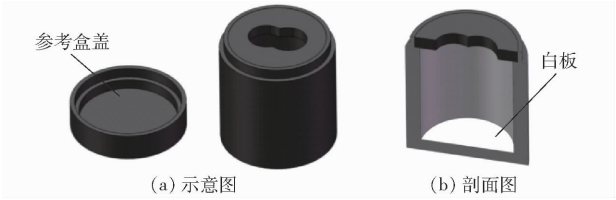


图 5 参考盒结构图
Fig. 5 Structure diagrams of reference box

2 马铃薯多品质参数预测模型

2.1 材料与方法

选用由中国农业科学院花卉蔬菜研究所(北京)提供的大西洋品种马铃薯样品 85 个,其中 65 个用于建模,20 个用于验证。采摘后送往实验室 4℃ 条件下冷藏待用,采集光谱前将马铃薯块茎洗净置于室温(20℃)中放置 24 h(相对湿度 60%)以消除温度对实验的影响。

2.2 光谱采集及标准理化值测定

利用自行设计的便携式马铃薯多品质检测装置采集所有马铃薯样品的局部透射光谱。采集前将装置预热 10 min,采集黑、白参考并保存,每个马铃薯样品避开芽眼和缺陷在赤道上间隔 90°取 4 个采集

点,4 点的平均光谱作为该样品的原始光谱,并换算成马铃薯样品局部透射率,公式为

$$T = \frac{I - D}{R - D} \times 100\%$$

式中 T——马铃薯样品的局部透射率,%
I——马铃薯样品的局部透过光谱强度,cd
D——黑参考光谱强度,cd
R——白参考光谱强度,cd

光谱采集完成后,分别用直接干燥法^[23]、酸解法^[24]和滴定法^[25]测定马铃薯样品的含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数。

2.3 光谱预处理和预测模型建立

马铃薯样品的原始光谱先用五点 S - G 卷积平滑(Savitzky - Golay smooth, SG)进行平滑处理,因实际检测过程中存在样品表皮散射及光程的变化,对 SG 平滑后的光谱进行标准正态变量变换(Standard normal variable transformation, SNV),原始光谱曲线、SG 平滑预处理及 SNV 处理后的光谱曲线如图 6 所示。

基于 SG - SNV 预处理后的光谱曲线分别建立了马铃薯含水率、淀粉质量分数、还原糖质量分数的偏最小二乘预测模型(Partial least squares regression, PLSR),模型结果如图 7 所示。含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的校正集相关系数 R_c 分别为 0.937 9、0.913 7 和 0.937 1,校正集均方根误差(Root mean square error of calibration, RMSEc)分别为 0.316 1%、0.309 0% 和 0.034 8%;验证集相关系数 R_v 分别为 0.927 8、0.914 6 和 0.933 8,验证集均方根误差(Root mean square error of validation, RMSEv)分别为 0.325 3%、0.344 9% 和 0.041 6%。基于自行设计的马铃薯多品质无损检测装置所建立的马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数 3 个参数的预测模型,其预测精度与相关的近红外漫透射光谱研究^[2-3]有所提升,能满足实际现场检测需求。

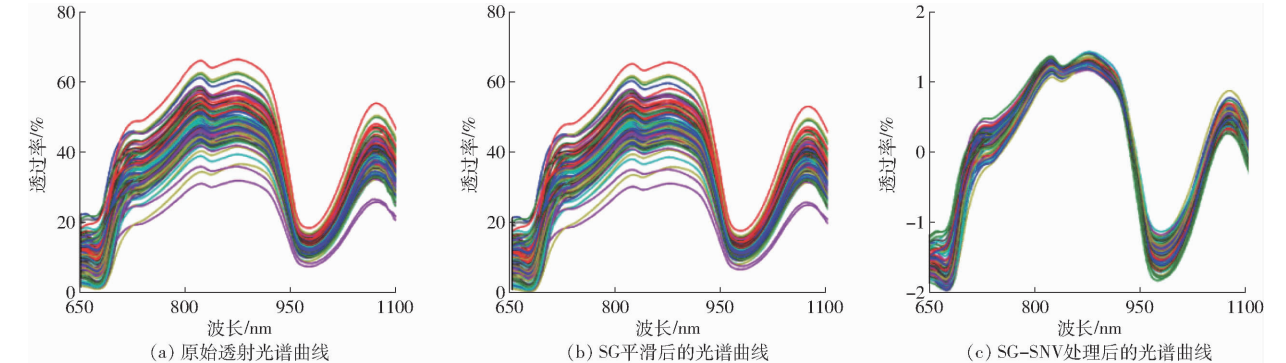


图 6 马铃薯局部透射光谱
Fig. 6 Partial transmission spectrum of potato

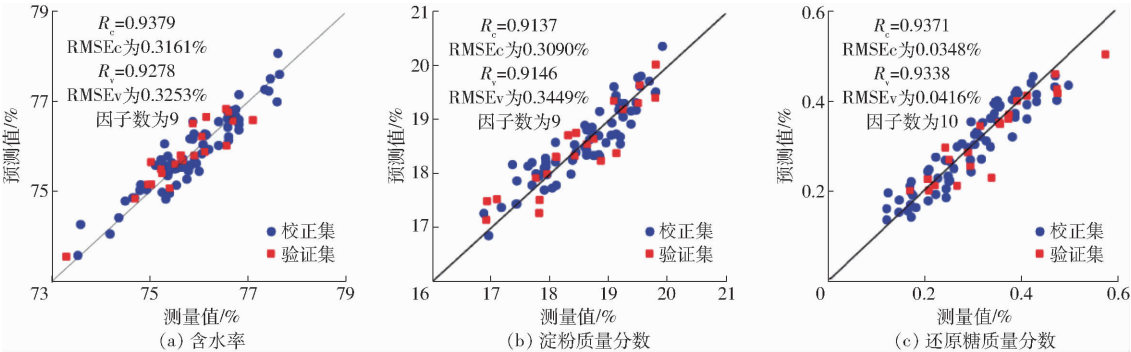


图 7 测量值和预测值对比

Fig. 7 Comparison charts of measurements and predictions

3 实时分析控制软件

基于 QT 开发工具,采用 C/C + + 语言编写了检测装置实时分析控制软件,软件采用模块化思想,分为光谱仪控制模块、光谱处理模块和结果显示模块,光谱仪控制模块对光谱仪采集参数(如积分时间、平均次数等)进行设置并采集光谱数据;光谱处理模块自动对光谱数据进行透过率的转换和预处理,并通过内置的模型预测样品含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数;结果显示模块将预处理后的光谱和品质预测值显示在屏幕上。软件工作流程如图 8 所示。采集样品光谱前,先点击“Dark”和“White”按钮分别对光谱仪进行黑白校正并保存校正结果。探头对准样品,采集样品的局部透射光谱,自动进行 SG 平滑和 SNV 预处理并分别代入植入模型进行马铃薯各品质参数的预测,样品光谱曲线和检测结果实时显示在 LCD 屏幕。

4 无损检测装置性能实验

选取与建模样本无关的大西洋品种马铃薯样品 20 个,对便携式马铃薯多品质无损检测装置的稳定性和预测精度进行了验证。利用检测装置预测马铃薯样品含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数,每个样品采集 4 次,以 4 次的变异系数衡量仪器的稳

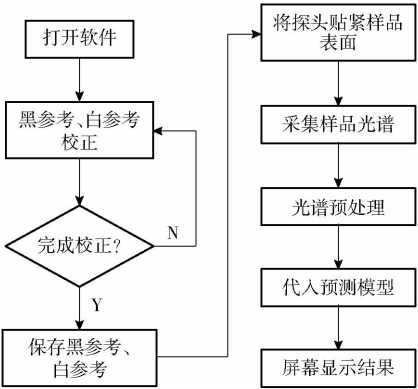


图 8 便携式装置软件工作流程图

Fig. 8 Working flow chart of software in hard-held device

定性,再用化学分析方法检测马铃薯 3 个品质参数的标准理化值,并进行对比分析,装置预测值与标准理化值散点图如图 9 所示。马铃薯样品的含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的预测值与标准理化值的相关系数 R_p 分别为 0.914 1、0.912 2 和 0.914 0,预测均方根误差分别为 0.352 7%、0.340 4% 和 0.040 0%,平均偏差(Average deviation, AD)分别为 0.295 1%、0.253 6% 和 0.031 6%。每个样品重复采集 4 次光谱,分别预测含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数,其最大变异系数分别为 0.006 7、0.012 4 和 0.123 1。结果表明,便携式马铃薯多品质无损检测装置稳定性和检测精度均能满足现场实

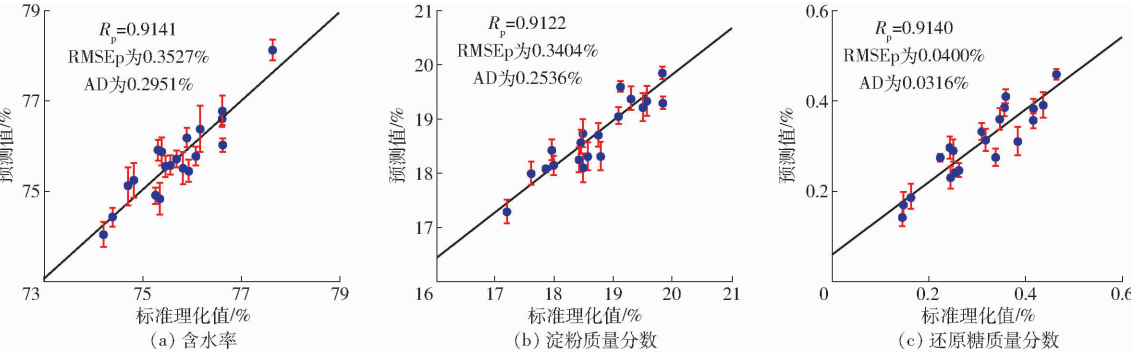


图 9 装置测试结果散点图

Fig. 9 Model result of external prediction

时检测要求。

5 结论

(1)基于可见/近红外局部透射光谱,根据马铃薯大小及形状特征,设计了便携式马铃薯多品质无损检测硬件装置,包括光谱采集模块、光源模块、控制与显示模块、供电模块,并设计了专用黑白参考校正盒。整个装置尺寸为 11 cm×6.5 cm×9.5 cm,易于携带。

(2)基于便携式马铃薯多品质无损检测装置,建立了马铃薯多品质预测模型。采集马铃薯 650 ~ 1 100 nm 的可见/近红外局部透射光谱,对原始光谱进行 SG 平滑和 SNV 处理后,建立了马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的偏最小二乘预测模型。马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数预测模型验证集相关系数分别为 0.927 8、0.914 6

和 0.933 8,验证集均方根误差分别为 0.325 3%、0.344 9% 和 0.041 6%。

(3)基于 QT 开发工具,采用 C/C++ 语言编写了装置实时分析控制软件。将所建马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数预测模型植入到硬件装置中,实现了马铃薯多品质参数实时无损检测一键式操作。

(4)验证了便携式马铃薯多品质无损检测装置的检测精度。马铃薯样品含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的装置预测值与标准理化值的相关系数分别为 0.914 1、0.912 2 和 0.914 0,均方根误差分别为 0.352 7%、0.340 4% 和 0.040 0%,平均偏差分别为 0.295 1%、0.253 6% 和 0.031 6%,重复采样最大变异系数分别为 0.006 7、0.012 4 和 0.123 1。结果表明,该装置可以实现马铃薯含水率、淀粉质量分数和还原糖质量分数的实时无损检测。

参 考 文 献

1 周向阳,张晶,彭华,等. 2017 年马铃薯市场形势分析及 2018 年前景展望[J]. 中国蔬菜,2018(2):6-9.

2 WALSH K B, GOLIC M, GREENSILL C V, et al. Sorting of fruit using near infrared spectroscopy: application to a range of fruit and vegetables for soluble solids and dry matter content[J]. Near Infrared Spectrosc,2004, 12(3):141-148.

3 KANG S, LEE K J, CHOI W, et al. A near-infrared sensing technique for measuring the quality of potatoes[C]//Proceedings the ASAE Annual International Meeting, 2003, Las Vegas, Nevada, USA.

4 HAASE N U. Prediction of potato processing quality by near infrared reflectance spectroscopy of ground raw tubers[J]. Near Infrared Spectrosc, 2011, 19(1):37-45.

5 SUBEDI P P,WALSH K B. Assessment of potato dry matter concentration using short-wave near-infrared spectroscopy[J]. Potato Research, 2009,52(1):67-77.

6 张小燕,杨炳南,刘威,等. 马铃薯主要营养成分的近红外光谱分析[J]. 食品科学, 2013,34(2):165-169.

ZHANG Xiaoyan,YANG Bingnan,LIU Wei,et al. Analysis of main nutrients in potatoes by near infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2013, 34(2):165-169. (in Chinese)

7 杨秀娟,赵金燕,赵家松,等. 便携近红外检测仪测定鲜猪肉含水率含量的研究[J]. 食品科技, 2012(7):267-270.

YANG Xiujuan,ZHAO Jinyan,ZHAO Jiasong,et al. Study on portable near-infrared detection to measure the moisture content of fresh pork[J]. Food Science and Technology,2012(7):267-270. (in Chinese)

8 王文秀,彭彦昆,郑晓春,等. 便携式猪肉营养组分无损实时检测装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(9):303-311. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170938&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.038.

WANG Wenxiu,PENG Yankun,ZHENG Xiaochun,et al. Portable nondestructive detection device for nutrient components of pork [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9):303-311. (in Chinese)

9 刘国良,张涛,曹彦波,等. 便携式短波近红外漫透射玉米成分快速分析仪的研制和应用[J]. 现代科学仪器, 2006, 16(6):37-39.

LIU Guoliang,ZHANG Tao,CAO Yanbo,et al. Development and application of portable short wave NIR corn component analyzer [J]. Modern Scientific Instruments,2006,16(6):37-39. (in Chinese)

10 叶华俊,刘立鹏,张学峰,等. 便携式近红外光谱分析仪的研制及应用[J]. 光学技术, 2008,34(增刊1):66-68.

YE Huajun,LIU Lipeng,ZHANG Xuefeng,et al. Development and application of a portable near infrared spectroscopy analyzer [J]. Optical Technique,2008,34(Supp.1):66-68. (in Chinese)

11 袁雷明,郭珍珠,陈孝敬,等. 基于可见/近红外光谱技术的便携分析仪的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2017,8(9):3455-3460.

YUAN Leiming, GUO Zhenzhu, CHEN Xiaojing, et al. Application of a portably analyzer based on visual/near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety and Quality,2017,8(9):3455-3460. (in Chinese)

12 FRASER D G,JORDAN R B,KUNNEMEYER R,et al. Light distribution inside mandarin fruit during internal quality assessment by NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology & Technology, 2003,27(2):185-196.

13 KAWANO S,FUJIWARA T,IWAMOTO M. Nondestructive determination of sugar content in Satsumandar in using near in-frared

transmittance[J]. Japan. Soc. Hort. Sci. ,1993,62(2):465 – 470.

14 LAMMERTY J,PERIS A,BAERDEMAEKER J D,et al. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 18(2): 121 – 132.

15 樊书祥,黄文倩,张保华,等. 便携式苹果糖度光谱检测仪的设计与试验[J]. 红外与激光工程, 2014,43(增刊1): 219 – 224. FAN Shuxiang, HUANG Wenqian, ZHANG Baohua, et al. Design and experiment on portable apple soluble solids content spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering,2014,43(Supp. 1):219 – 224. (in Chinese)

16 郭亚,程亮,秦斌. 一种便携式苹果糖度无损检测仪的研制[J]. 安徽农业科学,2017,45(14):191 – 198. GUO Ya,CHENG Liang,QIN Bin. Development of a portable nondestructive testing instrument for apple sugar content[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. ,2017,45(14):191 – 198. (in Chinese)

17 HUA S H,CHEN C P,HAN P. Design of a simple non-destructive detection system using P-wave lasers for determining the soluble solids content of apples[J]. Applied Optics, 2017,56(22):6235 – 6243.

18 刘燕德,高荣杰,孙旭东. 便携式水果内部品质近红外检测仪研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2874 – 2878. LIU Yande,GAO Rongjie,SUN Xudong. Review of portable NIR instruments for detecting fruit interior quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(10):2874 – 2878. (in Chinese)

19 SHAGER A B,MEGILL L R,DROPPELMAN L A. Optimization of the Czerny – Turner apectrometer [J]. Journal of the Optical Society of America, 1964,54(7):879 – 886.

20 孙宏伟,彭彦昆,林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. 农业工程学报,2015,31(20):268 – 273. SUN Hongwei,PENG Yankun,LIN Wan. Development of a portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of fresh pork[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(20):268 – 273. (in Chinese)

21 RADY A M,GUYER D E. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes;a review[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015,117:31 – 48.

22 刘燕德,肖怀春,孙旭东,等. 基于可见与近红外光谱联用的柑桔黄龙病快速无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018,38(2):528 – 534. LIU Yande,XIAO Huaichun,SUN Xudong,et al. Study on the quick non-destructive detection of citrus Huanglongbing based on the spectrometry of VIS and NIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(2):528 – 534. (in Chinese)

23 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

24 国家食品药品监督管理总局. 食品中淀粉的测定:GB 5009.9—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

25 国家卫生和计划生育委员会. 食品中还原糖的测定:GB/T 5009.7—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.