

## 便携式苹果糖度光谱检测仪的设计与试验

樊书祥<sup>1,2</sup>, 黄文倩<sup>2</sup>, 张保华<sup>2</sup>, 郭志明<sup>2</sup>, 赵春江<sup>1,2</sup>

- (1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;  
2. 北京市农林科学院 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 为快速、便捷地利用近红外光谱检测苹果糖度, 设计了以 ARM9 处理器为核心、以微型光谱仪和自制果托作为光谱检测装置、以 WinCE 为操作系统的便携式苹果糖度光谱检测仪。以 80 个苹果样品作为试验对象, 采用平滑、多元散射校正、标准正态变量变换等方法对原始光谱进行预处理, 结合无信息变量消除法和连续投影算法进行有效波长的筛选, 建立基于所选特征波长和全波段的苹果糖度近红外光谱偏最小二乘模型。结果表明, 偏最小二乘结合原始光谱信息建模效果最好, 其预测相关系数  $R_p=0.853$ , 预测均方根误差  $RMSEP=0.534$ 。该检测仪能较好地满足苹果糖度的快速无损检测。该研究为快速、便携的苹果糖度光谱检测仪设计提供了参考。

**关键词:** 糖度; 苹果; 近红外光谱; 嵌入式系统

**中图分类号:** O657.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0219-06

## Design and experiment on portable apple soluble solids content spectrometer

Fan Shuxiang<sup>1,2</sup>, Huang Wenqian<sup>2</sup>, Zhang Baohua<sup>2</sup>, Guo Zhiming<sup>2</sup>, Zhao Chunjiang<sup>1,2</sup>

- (1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;  
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

**Abstract:** In order to detect soluble solids content (SSC) of apple conveniently and rapidly, a portable apple soluble solids content spectrometer was designed with ARM9 as controller, miniature spectrometer as spectrum detector, WinCE as embedded operating system. The total number of 80 apples was for the calibration ( $n=60$ ) and prediction ( $n=20$ ) sets. Different spectral pretreatment methods, including smoothing, standard normal variate (SNV) and multiplicative scatter correction (MSC) were performed. Uninformative variable elimination (UVE) and successive projections algorithm (SPA) were proposed to select effective wavelength variables. Partial least squares (PLS) models combined with whole wavelength and selected wavelengths were established to detect SSC of apple. The results indicated that the best model was developed using PLS with respect to the spectra in whole wavelength range. The correlation coefficient ( $R_p$ ) and root mean square error of prediction (RMSEP) for prediction sets were 0.853, 0.534 for SSC.

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAD21B01)

作者简介: 樊书祥(1989-), 男, 博士生, 主要从事基于嵌入式与光谱技术的农产品品质与安全检测方面的研究。

Email: fanshuxiang8903@163.com

导师简介: 赵春江(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业机械化与自动化、农业信息化方面的研究。Email: zhaocj@nercita.org.cn

The model is reliable and the predicted result is effective. The meter can meet the requirement of quick measuring SSC of apple. The study can provide a reference for development of portable apple soluble solids content spectrometer.

Key words: soluble solids content; apple; NIR spectroscopy; embedded system

## 0 引言

苹果的糖度,也称为可溶性固形物含量(Soluble Solids Content, SSC),是苹果内部品质的重要指标,也是影响消费者购买意愿的直接因素。近红外光谱技术的发展,为苹果糖度的快速、无损检测提供了技术支持。国内外许多学者对此进行了大量研究:赵杰文<sup>[1]</sup>等采用正交信号校正法和净分析物预处理法,在保证精度的前提下有效地简化了苹果糖度预测模型;Lammertyn<sup>[2]</sup>等在近红外光波段内检测了Jonagold苹果的糖度和酸度;Zou<sup>[3]</sup>等利用遗传算法、间隔偏最小二乘法(iPLS)进行特征波段的挑选,提高了苹果糖度模型的预测精度;欧阳爱国<sup>[4]</sup>等比较了不同特征波长挑选方法下苹果糖度模型的预测精度;Liu<sup>[5]</sup>等分析了不同测量距离对苹果糖度无损检测的影响。以上研究所建苹果糖度模型稳定可靠,但局限于实验室,不适用于实时快速测量。近年来,一些学者采用便携式光谱设备进行水果糖度的检测:Antonucci<sup>[6]</sup>等采用便携式光谱仪结合PLS建模,检测了小蜜桔和柑橘的可溶性固形物含量;Camps<sup>[7]</sup>等应用便携式光谱仪检测杏的糖度、酸度和硬度;王加华<sup>[8]</sup>等研究了温度变化对便携式近红外光谱仪检测苹果糖度的影响,建立了苹果糖度的温度修正模型;代芬<sup>[9]</sup>等应用便携式光纤光谱仪比较了漫反射法和漫透射法检测荔枝可溶性固形物含量的效果,证明了漫透射法更适合荔枝可溶性固形物含量的检测。上述研究中所使用的便携式光谱设备没有形成一个整体的、便携的水果糖度检测分析系统,且现有水果糖度分析仪价格昂贵、操作复杂。为此,设计了基于嵌入式设备的便携式苹果糖度光谱检测仪,并以嘎啦苹果为试验对象,建立苹果糖度的近红外光谱PLS模型,并对模型可靠性和预测精度进行验证,进而得到适用于该仪器的检测苹果糖度的近红外光谱模型。

## 1 苹果糖度光谱检测仪设计

### 1.1 硬件系统设计

苹果糖度光谱检测仪的硬件系统主要由果托、微型光谱仪、ARM处理器及其外围电路、移动电源等组成,硬件结构如图1所示。其中,果托用来固定苹果和提供采集光谱所需的光源,光谱仪用来完成对苹果光谱的采集,ARM及其外围电路主要完成人机交互操作、数据处理等功能。

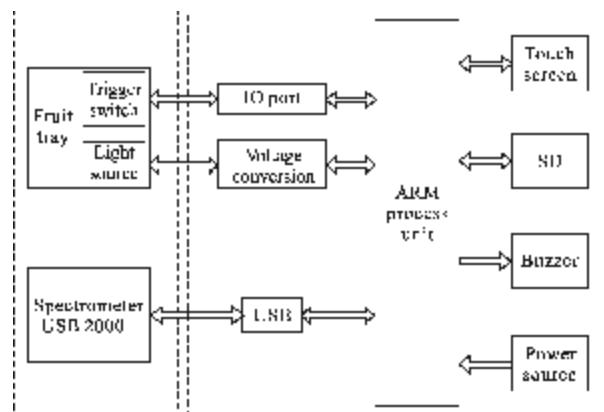


图1 系统硬件结构框图

Fig.1 Hardware architecture of system

#### 1.1.1 光谱仪

光谱仪使用海洋光学的USB2000+微型光谱仪(Ocean Optics, USA),其采用高信噪比的线阵CCD探测器,波长范围487~1147 nm,共2048个波长点。可通过USB对其进行参数设置和提供电能。

#### 1.1.2 果托的设计

根据光谱仪的尺寸和特点,首先使用SolidWorks完成果托的结构设计,然后在工厂进行加工制作。该装置结构示意图如图2所示。其中,通光孔与光谱仪上的光谱接收孔贯通,其上放置待测苹果样品,通光孔中内置光源(低功率卤钨灯,光谱范围350~2000 nm),光源固定在螺纹柱一端,通过旋转螺纹柱在螺纹通孔

中的深度,进而控制光源在透光孔中的光照强度。果托和光谱仪通过固定螺孔连接形成一个完整的光谱采集装置。

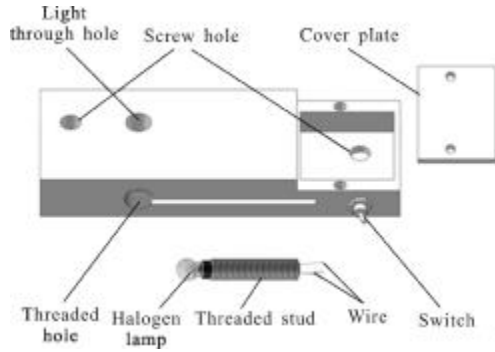


图2 果托结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of fruit tray

### 1.1.3 ARM 处理器及其外围电路

选用以 S3C2440 为核心的 ARM9 作为检测仪的控制器。其外围电路主要由 USB 接口电路、SD 接口电路、电压转换电路、蜂鸣器以及触摸屏等构成。其中,触摸屏主要实现对整个检测仪的控制和信息显示,USB 接口用于 ARM 和光谱仪之间的通信,SD 卡用于光谱数据和糖度数据的存储,蜂鸣器在完成一次完整检测后进行信息提示。ARM 及其外围电路、电源放置在塑料外盒之中,通过数据线和光谱检测装置相连接。

将上述各部分进行连接,完成整个苹果糖度光谱检测仪硬件系统的设计,其实物图如图 3 所示。

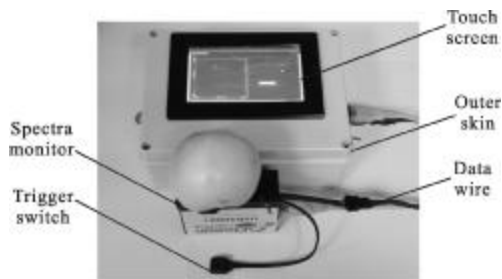


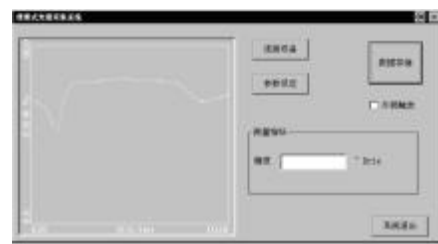
图3 苹果糖度光谱检测仪

Fig.3 Apple soluble solids content spectrometer

### 1.2 软件系统设计

该 ARM 处理器选用 WinCE 嵌入式操作系统,在该操作系统下,编写相应的应用程序,完成光谱仪采集参数设置、光谱数据采集和存储,根据采集的光谱数据计算所测样品的糖度,并将计算结果进行显

示和保存。在 WinCE 系统下运行该应用程序,效果如图 4 所示。其中,图 4(a)为主界面,完成连接光谱仪和采集参数的设置;图 4(b)为参数设置界面,可以设置光谱采集的相关参数,包括光谱采集的积分时间、平均次数、平滑度等;然后,导入系统中存在的参考光谱和暗光谱,或根据实际情况重新采集暗光谱或者参考光谱。参数设置完成后返回主界面,通过此界面显示待测样品的实时光谱反射率曲线,待曲线稳定后,按下数据存储按键,系统根据建立好的 PLS 模型计算待测样品的糖度值,并将测量结果进行显示并在 SD 卡完成测量结果和样品光谱反射率的存储。若勾选外部触发选项,由外部触发开关完成数据存储功能。同时,蜂鸣器鸣响,用于提示数据存储操作完成。



(a)



(b)

图4 系统软件界面

Fig.4 Interface of apple soluble solids content spectrometer

## 2 苹果糖度光谱检测仪试验

### 2.1 材料与方法

#### 2.1.1 试验材料

试验用苹果为山东嘎啦果,采自山东肥城某果园,选取表面没有损伤和疤痕的 80 个,将表皮清洗干净,依次编号,并置于 20℃实验室环境下,待样品达到室温以避免温度对测量结果造成影响。每个样品在赤道部位标记一点进行光谱和糖度值测量。根据 Kennard-Stone 方法,随机选取 60 个样品作为校正集,剩余 20 个样品作为预测集。

### 2.1.2 光谱数据采集

打开苹果糖度光谱检测仪,调整光源强度和光谱采集参数以得到稳定、平滑的苹果光谱曲线,最终确定的光谱采集参数为:积分时间 250 ms,平均次数 4,平滑度 5。在设定的采集参数下,首先完成参考光谱和暗光谱的采集。将苹果样品依次放到果托之上,待其稳定后,在赤道标记点进行光谱采集,得到待测苹果样品的光谱反射率。其计算公式为:

$$\%R_{\lambda} = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{D\lambda} - D_{\lambda}} \times 100\%$$

式中: $R_{\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 下苹果样品的反射率; $S_{\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 下苹果样品的光谱强度; $D_{\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 下的暗光谱强度; $R_{D\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 下的参考光谱强度。为了避免光谱首尾波段噪声区的干扰,选择 620~1020 nm 波长范围内共 1230 个波长数据点进行分析。图 5 为采集到的苹果样品的原始光谱反射率曲线。

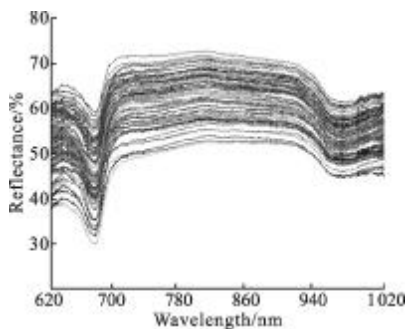


图 5 苹果近红外光谱曲线

Fig.5 NIR spectra of apple samples

### 2.1.3 糖度测量

光谱测量完成后使用数字阿贝折光仪 (ARIAS 500, Reichert Technologies, New York, USA) 在标记点进行糖度测量。每个样品从标记部位切取一定厚度果肉,经纱布过滤挤汁滴于折光仪镜面,读取并记录糖度值作为该苹果样品糖度的实际值,测量结果见表 1。

表 1 苹果糖度实际测量值分布

Tab.1 Soluble solids content(SSC, °Brix) measured values

Data set	Sample	Max	Min	Mean	S.D.
Calibration set	60	14.52	10.49	12.45	0.81
Prediction set	20	14.08	11.73	12.96	0.51

### 2.1.4 特征波长选取算法

无信息变量消除法(UVE)是基于 PLS 回归系数  $b$  建立的用于消除冗余信息变量的算法,可降低建模变量数,提高模型预测精度<sup>[10]</sup>。连续投影算法(SPA)利用向量的投影分析,在众多波长变量之间寻找含有最少冗余信息的变量组,提高建模效率<sup>[11]</sup>。

### 2.1.5 建模方法及模型评价

采用 UVE、SPA 从光谱数据中提取有效特征波长后建立苹果糖度的偏最小二乘(PLS)模型,并与全波长参与的模型进行对比。选择校正均方根误差(RMSEC)、预测均方根误差(RMSEP)和校正相关系数  $R_c$ 、预测相关系数  $R_p$  作为模型的评价标准。相关系数越大, RMSEC 和 RMSEP 越小且两者越接近,说明模型的预测性能越好<sup>[12]</sup>。

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 光谱预处理

光谱仪所采集的光谱除样品的自身信息外还包含了其他无关信息。因此,在用化学计量学方法建立模型前,对原始光谱信息进行适当的预处理是必要的。应用窗口宽度为 5 的移动平均平滑(Moving Average)、5 点 1 次 Savitzky-Golay 卷积平滑、多元散射校正(MSC)、标准正态变量变换(SNV)等预处理方法对光谱进行 PLS 建模分析,结果表明采用原始光谱建模效果最好。

### 2.2.2 特征波长选取

采用 UVE 对预处理后的光谱数据进行筛选,变量选择过程如图 6 所示,竖线左侧为波长变量的稳定性分布曲线,右侧为 UVE 中产生的 1230 个随机变

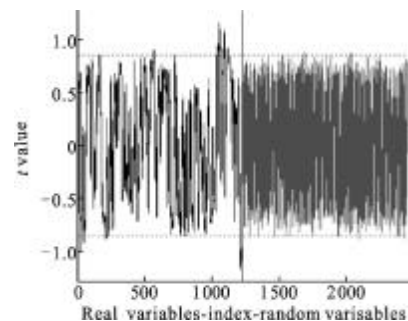


图 6 UVE 的稳定性分布曲线

Fig.6 Stability distribution of UVE

量的稳定性分布曲线。阈值的选择为随机变量稳定性最大值的 99%,如图中水平曲线所示。稳定性在阈

值外的变量将用于建模。经 UVE 最终选取 85 个特征波长变量。

利用 SPA 对经过预处理后的光谱数据进行挑选,SPA 波长筛选是根据校正集内部均方根误差 RMSE 确定最佳建模变量数。经过 SPA,得到最优的 15 个特征波长变量,分布如图 7 所示。

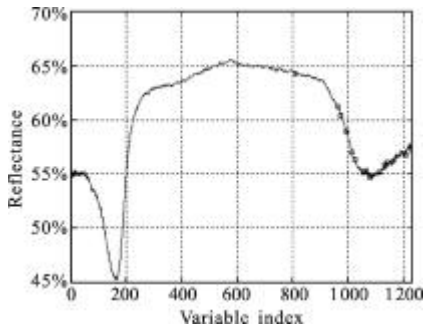


图 7 SPA 挑选的波长

Fig.7 Selected wavelengths using SPA

### 2.2.3 模型建立及预测

针对校正集样品,基于筛选的特征波长和原始光谱建立苹果糖度的近红外光谱 PLS 模型,为验证模型的精度和稳定性,分别用所建模型对预测集 20 个样品进行预测,各模型建模及预测结果见表 2。

表 2 不同波长选择方法下苹果糖度的建模结果

Tab.2 Modeling results of SSC of apple with different selected wavelengths

Method	No. of variables	No. of factor	$R_c$	RMSEC	$R_p$	RMSEP
None	1230	7	0.897	0.360	0.853	0.534
UVE	85	7	0.845	0.436	0.830	0.469
SPA	15	11	0.848	0.431	0.809	0.430

从表中可以看出,经 SPA 筛选的 15 个特征波长建立的模型,虽建模变量数最少,但其  $R_p$  只有 0.809,大大低于其他模型,建模效果最差。UVE-PLS 模型相比于全谱建立的 PLS 模型,虽然建模变量数由 1230 减少到 85,但  $R_c$  和  $R_p$  均有所下降。出现上述结果的原因可能是 UVE 和 SPA 进行特征波长挑选时,在剔除大量无关信息的同时也剔除了与苹果糖度相关的波长信息,导致所建模型较原始光谱精度有所下降。因此,选择在全波段范围内建立的 PLS 模型作为苹果糖度光谱检测仪的最优模型,其糖度

模型公式为:

$$Y=17.353 0+0.000 5X_1+0.002 1X_2+0.000 3X_3+\dots+0.046 1X_{1229}+0.036 2X_{1230}$$

式中:Y 为苹果样品的糖度值,°Brix; $X_1 \dots X_{1230}$  为原始光谱信息 1230 个波长点下对应的光谱反射率。模型的校正相关系数和校正均方根误差分别为 0.897 和 0.360,预测相关系数和预测均方根误差分别为 0.853 和 0.534。校正集和预测集样品实测值和预测值的散点图如图 8 所示。

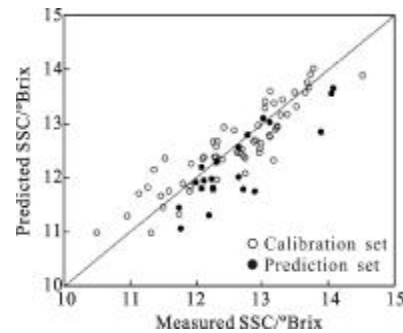


图 8 校正集和预测集样品预测值和实测值散点图

Fig.8 Reference measurement versus NIR prediction in calibration set and prediction set

### 3 结论

为了更加便携地检测苹果糖度,设计了基于嵌入式操作系统和微型光谱仪的便携式苹果糖度光谱检测仪。以采自山东的 80 个嘎啦苹果为试验对象,经过预处理后,采用 UVE 和 SPA 进行有效波长的筛选,建立所选波长和全波段的苹果糖度 PLS 模型。结果表明,利用原始光谱信息在全波段范围内建立的苹果糖度模型最好,其预测相关系数  $R_p=0.853$ ,预测均方根误差  $RMSEP=0.534$ 。该检测仪价格低廉、携带方便、操作简便,能快速、便捷地检测苹果糖度。同时,通过该检测仪可以将经试验得到的不同品种水果的糖度模型导入系统,从而实现不同类型水果的糖度检测,为便携式水果糖度光谱检测仪的设计提供了参考。

### 参考文献:

[1] Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Preprocessing methods of near-infrared spectra for simplifying prediction model of sugar content of apples [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 136-140. (in Chinese)

- 赵杰文, 张海东, 刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 136-140.
- [2] Lammertyn J, Nicolai B, Ooms K, et al. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(4): 1089-1094.
- [3] Xiaobo Z, Jiewen Z, Xingyi H, et al. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of soluble solid contents (SSC) of 'Fuji'apple based on different PLS models [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2007, 87(1): 43-51.
- [4] Ouyang Aiguo, Xie Xiaoqiang, Zhou Yanrui, et al. Partial least squares regression variable screening studies on apple soluble solids NIR spectral detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10): 2680-2684. (in Chinese)  
欧阳爱国, 谢小强, 周延睿, 等. 苹果可溶性固形物近红外光谱检测的偏最小二乘回归变量筛选研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2680-2684.
- [5] Liu Y, Ying Y, Fu X, et al. Experiments on predicting sugar content in apples by FT-NIR technique[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 986-989.
- [6] Antonucci F, Pallottino F, Paglia G, et al. Non-destructive estimation of mandarin maturity status through portable VIS-NIR spectrophotometer[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4: 809-813.
- [7] Camps C, Christen D. Non-destructive assessment of apricot fruit quality by portable visible-near infrared spectroscopy [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(6): 1125-1131.
- [8] Wang Jiahua, Qi Shuye, Tang Zhihui, et al. Temperature compensation for portable Vis/NIR spectrometer measurement of apple fruit soluble solids contents [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1431-1434. (in Chinese)  
王加华, 戚淑叶, 汤智辉, 等. 便携式近红外光谱仪的苹果糖度模型温度修正 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1431-1434.
- [9] Dai Fen, Cai Bokun, Hong Tiansheng, et al. Non-destructive measurement of soluble solid content in litchi by visible/near-infrared transmission spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 287-292. (in Chinese)  
代芬, 蔡博昆, 洪添胜, 等. 漫透射法无损检测荔枝可溶性固形物[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 287-292.
- [10] Centner V, Massart D L, Noord O E, et al. Elimination of uninformative variables for multivariate calibration [J]. Analytical Chemistry, 1996, 68(21): 3851-3858.
- [11] Araújo M C U, Saldanha T C B, Galvã R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis [J]. Chemom Intell Lab Syst, 2001, 57: 65-73.
- [12] Li J, Huang W, Zhao C et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/NIR spectroscopy [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116: 324-332.