

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.037

基于特征 LED 光源的苹果多品质参数无损检测装置研究

赵娟^{1,2} 全朋坤¹ 张猛胜¹ 田世杰¹ 张海辉^{1,3} 任小林⁴

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了实现对优质果品的快速无损筛选, 设计了便携式苹果多品质一体化无损检测装置。利用可见/近红外光谱检测平台, 获取苹果样本的漫反射光谱信息, 采用随机蛙跳算法提取了可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度的特征波长, 优选出 3 个参数的 10 个共享特征波长。在此基础上, 采用特征窄带 LED 光源与光电二极管相结合的检测方式, 设计了漫反射检测光路、窄带 LED 环形光源、检测探头及控制电路等硬件系统。选取 144 个苹果样本, 通过检测装置获取漫反射特征电压强度, 由传感器感光系数计算出对应的光强, 建立了苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度的多元线性回归模型, 预测集相关系数分别为 0.812 9、0.807 3 和 0.773 6, 均方根误差为 0.603 6°Brix、0.063 6% 和 1.732 5 N。基于 QT 和 Python3 开发工具, 采用 Python 语言开发了装置的实时控制与分析软件, 植入苹果多品质参数预测模型, 实现了多品质参数的同时检测与分析。为测试该装置的检测精度和稳定性, 另选取 46 个样本, 每个样本重复检测 8 次, 预测苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度的相关系数分别为 0.809 6、0.796 2 和 0.758 9, 均方根误差 0.697 3°Brix、0.070 3% 和 1.832 3 N, 装置重复采样最大变异系数分别为 0.010 6、0.011 6 和 0.006 2。结果表明: 基于多特征窄带 LED 光源研发的低成本、便携式无损检测装置可实现对苹果多品质参数的实时无损检测, 可满足农户田间生产及电商销售优质果筛选要求。

关键词: 苹果; 多品质参数; 无损检测装置; 特征波长; 窄带 LED 光源

中图分类号: S237; S379.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)04-0326-07

Design of Apple Quality Integrated Non-destructive Testing Device Based on Multi-band LED Light Source

ZHAO Juan^{1,2} QUAN Pengkun¹ ZHANG Mengsheng¹ TIAN Shijie¹ ZHANG Haihui^{1,3} REN Xiaolin⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the continuous improvement of people's living standards, consumer demand for apple has shifted from quantity to quality. However, for small-scale farmers, the detection equipment developed on the market based on spectrometers is expensive, resulting in difficulty in purchasing, and thus it is impossible to achieve high-quality fruit screening. Therefore, the object was to develop a low-cost, portable apple multi-quality parameter integrated detection device. Firstly, diffuse spectral information of 240 Fuji apples was acquired based on the visible/near-infrared spectroscopy platform. After SG smoothing and multiple scattering correction algorithm pretreatment, the characteristic wavelength of soluble apple solid, titratable acid and pulp firmness was extracted by random frog algorithm. So the ten shared characteristic wavelengths of the three parameters, namely 420 nm, 480 nm, 550 nm, 580 nm, 640 nm, 680 nm, 705 nm, 940 nm, 980 nm and 1 044 nm, were selected. On this basis, a detection method combining a characteristic narrow-band LED light source and a photodiode was proposed. Then, hardware systems such as diffuse reflection detection optical path, narrow-band LED ring light source,

收稿日期: 2018-11-02 修回日期: 2019-02-21

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-NY-017)、国家自然科学基金项目(31701664)和中国博士后科学基金项目(2017M623254)

作者简介: 赵娟(1988—),女,讲师,博士,主要从事农畜产品无损检测技术及装备研究,E-mail: zhaajuan@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 张海辉(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息技术与装备研究,E-mail: zhanghh@nwsuaf.edu.cn

detection probe, control circuit and so on were designed. Secondly, the diffuse reflection characteristic voltage intensity of 144 apple samples was obtained by the detection device. Then the multivariate linear regression models of soluble solids content, titratable acid and firmness were respectively established by the obtained information. The correlation coefficients of the prediction set were 0.812 9, 0.807 3 and 0.773 6, and the root mean square errors were 0.603 6°Brix, 0.063 6% and 1.732 5 N, respectively. Based on the QT development tool, the real-time control and analysis software of the device was developed in Python language, and the multi-quality parameter prediction model of apple was implanted to realize the simultaneous detection and analysis. Finally, to test the precision and stability of the device, another 46 samples were selected and each sample was tested eight times. The predicted results of the device were acceptable, and the correlation coefficients of soluble solids, titratable acid and pulp hardness of apple were 0.809 6, 0.796 2 and 0.758 9, and root mean square errors were 0.697 3°Brix, 0.070 3% and 1.832 3 N, respectively. The maximum variation coefficients of the resampling were 0.010 6, 0.011 6 and 0.006 2, respectively. The results showed that the low-cost, portable non-destructive testing device based on multi-featured narrow-band LED light source can realize the simultaneous detection of multiple quality parameters of apples, which can meet the needs of farmers for field production and e-commerce sales of high-quality fruit screening.

Key words: apple; multiple quality parameters; non-destructive detection device; characteristic wavelength; narrow-band LED light source

0 引言

随着人们生活水平的不断提高,消费者对水果的需求已经从“数量型”转向“质量型”,因而对于如何筛选出内部品质更佳的优质果提出了更高的检测要求。

近年来,商品化便携式检测设备在果实品质评价中得到了广泛应用^[1-3]。王加华等^[4]利用日本 Kubota 公司生产的 K-BA100R 型便携式近红外光谱仪检测了洋梨硬度。MARÍA 等^[5]使用基于手持式微电子机械系统红外光谱仪检测柑橘大小、颜色等外部品质参数及收获前硬度、可溶性固形物含量、pH 值等内部品质参数。杨帆等^[6]利用聚光科技有限公司的便携式 SupNIR-1000 型光谱分析仪建立了苹果酸度和抗坏血酸的定量分析模型。MARCO 等^[7]采用一种基于声光可调谐滤波器原理的微型手持式近红外分析仪建立了橄榄果实硬度、叶绿素含量、花青素含量等参数的偏最小二乘模型,用来确定用于初榨橄榄油和食用橄榄的最佳采收时间。ROBERT 等^[8]采用 Thermo fisher 公司生产的手持式近红外光谱仪,检测了“Fuerte”、“Hass”和“Carmen1-Hass”3 个鳄梨品种的成熟度,预测结果与商业方法的判定结果接近。上述结果表明,使用便携式近红外光谱设备不仅可以采前实时检测树上水果成熟期间的内部品质参数变化,也可以用于采后检测。

目前,市场上也已经有一些成熟的水果品质便携式检测仪器^[9-11]。如美国的 ACCUNIR2100 和 ACCUNIR2200 型检测仪,日本的 K-SS300 和 TD-2000C 型检测仪,意大利的 Quality Station 和 QS-300 型检测仪等。但市场上的设备价格昂贵,主要

用于实验室科研分析,对于田间生产及电商销售的个体农户并不适用,相关研究成果无法实际推广生产。因此,本文在可见/近红外光谱检测技术基础上,提出一种基于窄带 LED 光源与光电二极管结合的苹果内部多品质检测方法,并设计一种便携式、低成本的苹果多品质检测设备,为高品质水果的生产及销售提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

从甘肃省静宁县果园里采摘无缺陷、无损伤和无污染的苹果样本 240 个进行试验。样本采摘后运回实验室,在室温下存放 24 h 后,进行光谱采集和理化值测定。

1.2 品质因子理化含量测定

苹果样本的可溶性固形物含量测量使用糖度计(PAL-BX/ACID5 型, ATAGO, 日本),方法参照文献[12]。可滴定酸含量采用苹果酸度计(GMK-835F 型, G-WON, 韩国)测定;果实硬度采用物性测定仪(TA.XT Express 型, Stable Micro Systems, 英国)在标记区域从果皮向果肉穿刺,探头直径 5 mm,预压速度 1.5 mm/s,穿刺速度为 1.0 mm/s,压后上行速度为 1.0 mm/s,测试距离为 10 mm,触发力是 2.0 g。理化测定的取样部位分别为光谱采集所测量的样本 3 个面,每个指标测定 3 次取平均值作为最终样品测定结果,其中,可溶性固形物含量和可滴定酸含量每测完一次需用纯净水清洗仪器。

1.3 光谱特性试验

1.3.1 光谱信息获取

基于实验室搭建的可见/近红外光谱的漫反射

检测平台采集的苹果样本漫反射光谱曲线如图1所示,光谱仪(OFS-1100型, Ocean Optics, 美国)的有效响应范围为200~1100 nm,分辨率为0.43 nm,卤钨灯光源(HL-2000型, Ocean Optics, 美国)波长范围为360~2400 nm,功率为28.8 W。光谱仪与光源通过二分叉光纤连接实现样本检测。设置积分时间为50 ms,光谱平均次数为5,平滑次数为5,对其进行杂散光校正,去除暗噪声处理。每个样本放置方式为果柄轴向方向与光源照射方向垂直,以果柄为轴线,每120°进行一次光谱采集,对获得的3次光谱信息取平均作为该样本的漫反射光谱。为消除系统的噪声影响,选取波长范围为315~1045 nm的光谱信息作为有效信息。

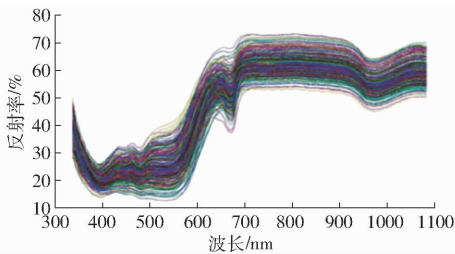


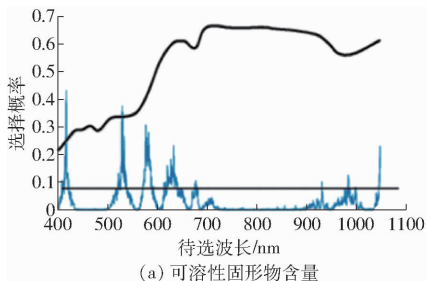
图1 苹果样本的漫反射光谱曲线

Fig.1 Diffuse reflectance spectrum of apple samples

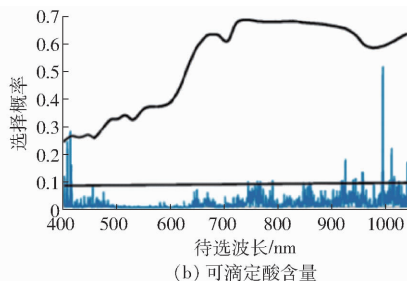
1.3.2 特征光谱波长提取

光谱仪获得的全波段光谱一般包含过多的波长数据变量,通过筛选与待测对象品质相关的特征波长,对于提高检测精度、减小信息采集量,进而构建多光谱系统发挥着重要作用^[13]。

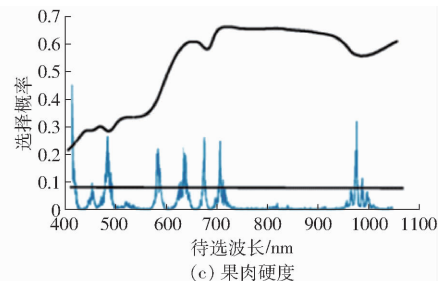
目前波长选择的算法较多,不同算法思路存在差异,选择强度也存在区别^[14-17]。本研究对采集的所有样本原始光谱变量经多元散射校正(Multiple scattering correction, MSC)预处理后利用连续投影算法(Successive projections algorithm, SPA)、竞争自适应重加权算法(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)、随机蛙跳算法(Random frog, RF)等多种特征波长选择算法,分析苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硬度的特征波长分布范围,其中利用随机蛙跳算法^[18-19]进行特征波长提取具体过程如下:



(a) 可溶性固形物含量



(b) 可滴定酸含量



(c) 果肉硬度

图2 随机蛙跳算法提取的各指标特征波长

Fig.2 Extracted characteristic wavelengths of each quality index for apple by random frog algorithm

首先,进行初始化操作,最大进化次数 N 设为500,聚类数目 A 设为6,采用中心化预处理方法进行数据预处理;其次,通过适应度公式计算其适应度值,并进行排序,实现对蛙群分类;然后,对已分类的各个子蛙群进行深度搜索,随机从族群中选择 q 个个体,分入子族群并将子族群进行排序,找出子族群中最优解 P_B 和最差解 P_W ,依据公式

$$S = \Omega(P_B - P_W) \quad (1)$$

$$P'_W = P_W + S \quad (2)$$

式中 S ——跳动步长 Ω ——随机数

P'_W ——更新后的最差解

进行每个子种群的局部深度搜索,并对最差解乘以0~1之间的随机数 Ω 进行改进;最后,在所有子族群完成深度搜索后,再次进行重新混合与排序,进而进行局部深度搜索,直到输出结果达到精度要求。

2 检测设备基础平台设计

2.1 特征LED光源选取

基于苹果内部品质的光谱特性分析,设计了检测设备的基础平台,实现果实漫反射特征光谱强度的快速检测。通过随机蛙跳算法提取与苹果果实硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量的特征波长如图2所示。

通过对多种特征波长提取算法结果的分析,依据波长被选择的概率,优选出3个品质参数各自最优的特征波长,兼顾3个指标的特征波长,最终确定了10个共享波长,分别为420、480、550、580、640、680、705、940、980、1044 nm。这10个独立波长的窄带LED光源将作为检测光源,采用光电二极管作为感应元件,通过特征波长光源与光电二极管相结合的方式测量苹果不同波长漫反射光强度对应的特征电压强度。

2.2 整体结构设计

2.2.1 外型设计

基于已知苹果内部品质特征波长和光谱检测方式,设计了检测设备的外型结构,主要包括设备上下外壳与检测探头结构。检测主设备由光源模块、光

源稳压模块、光源驱动模块、光电检测模块、处理器模块、处理器供电模块、电源模块、用户交互模块构成。光源模块包括：光源支架、LED 灯架、外圈挡光圈、凸台挡光圈。检测设备如图 3 所示。

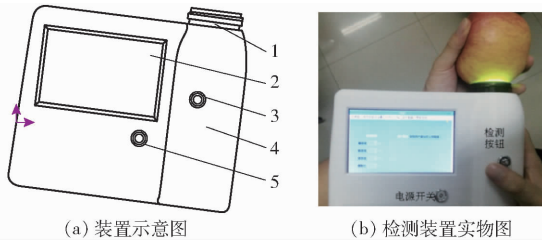


图 3 检测装置结构

Fig. 3 Diagrams of detection device structure

1. 检测探头
2. 显示屏
3. 检测开关
4. 设备外壳
5. 电源开关

检测外壳中间偏左的位置嵌装有显示屏，显示屏下部为检测电源开关，显示屏右侧为检测按钮，检测外壳上部嵌装灯头，灯头最上部为圆形挡光圈，圆形挡光圈下部嵌装着与灯头轴线呈 45° 环形阵列分布的窄带 LED。依次为第 1 光源至第 10 光源，位于灯头中央的为凸台挡光圈，凸台挡光圈下部为扩散板，扩散板正下方 1 cm 处为光电二极管，二维码打印机通过转接线和设备连接。

2.2.2 检测探头设计

检测探头结构包括有光源支架、LED 支架、挡光圈和凸台挡光圈。检测探头设计 10 个窄带 LED 光源环形分布在检测器周围，第 1 至第 10 个特征光源的中心波长分别为 420、480、550、590、660、690、700、940、980、1 045 nm。一个灯帽下分布着两个波段的窄带 LED，共 5 组。光束与轴线呈一定角度照射向检测样品，并且光束轴心会聚在一点上，以保证光源照射的一致性；光源支架设置有检测凸台，其上装有弹性挡光圈，同时在支架周围布置挡光圈结构，在放置水果时依靠力的作用与挡光圈紧密配合形成一种特殊的结构，避免 LED 发出的光直接进入检测通道到达传感器表面以及外界光进入检测区域影响检测结果。检测探头结构如图 4 所示。

2.3 光路设计

LED 光源辐射的光能量须反射后进入光电二

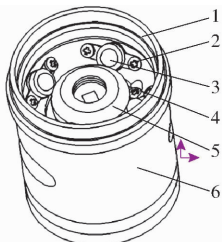


图 4 检测探头结构

Fig. 4 Diagram of detection probe structure

1. 挡光圈
2. 螺钉 1
3. LED 光源
4. 螺钉 2
5. 凸台挡光圈
6. 光源支架

极管，光进入苹果内会发生吸收、反射、散射等变化，从而使得反射强度极其微弱，若加大光源功率则会造苹果烧伤，因此要对检测光路进行设计与优化，最大程度地利用 LED 组光源的发光强度，图 5 为漫反射检测光路示意图。

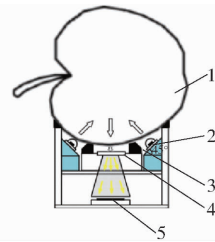


图 5 检测装置漫反射检测光路示意图

Fig. 5 Schematic of diffuse reflection detection

optical path of device

1. 苹果
2. LED 灯珠
3. 挡光圈
4. 扩散板
5. 光电传感器

10 个与灯头呈 45° 方向布置的窄带 LED 光源、扩散板、45° 设计的圆锥形通光孔、光电二极管组成了整个检测探头光路系统。10 个波长的窄带 LED 光源呈环形阵列排布，光源轴心和灯头轴心呈 45°，光电二极管位于水平位置灯头轴心下 1 cm 处，光源发出的光在 45° 方向进入苹果内部，经过漫反射从苹果下部传出，经过扩散板，将垂直于扩散板的光通过 45° 圆锥形通光孔均匀照射在光电二极管上，有效地避免了光源直接照射光电二极管。

2.4 硬件电路设计

以树莓派三代作为中央处理器协调各模块工作，首先 PWM 控制光源实现亮度调节，光电检测模块实现漫反射光谱检测，采样模块将光电检测的模拟量转换成数字量返回到处理器，经中央处理器处理后在显示模块进行相关结果的显示与其他信息的反馈。图 6 为苹果内部品质一体化检测设备硬件电路结构框图。

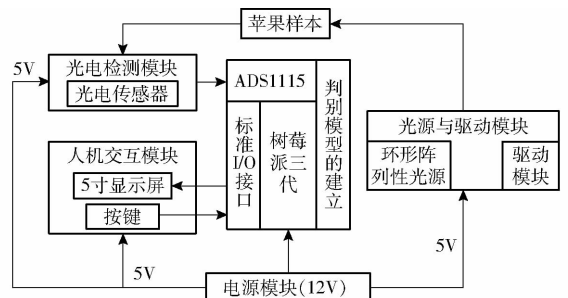


图 6 检测设备硬件电路结构框图

Fig. 6 Hardware structure diagram of detection device

光源与驱动模块中，每个 LED 灯珠 (F42 型，深圳市超自然科技公司) 中心波长为所选特征波长，半波宽度为 20 nm。驱动芯片采用输出电流可调节的 BP1360 芯片，单片机通过输出不同占空比的 PWM 信号调节 BP1360 的输出电流，PWM 信号额

定占空比为 0.5,使单个灯珠输出电流为 0.4 A,从而实现 LED 光源发光强度的稳定定量调节。光谱检测模块中,采样模块采用硅光电二极管(FDS10 * 10 型, THORLABS, 美国),感应波长范围为 340 ~ 1100 nm。在光电转换电路电压输入端采用电阻和电容组成的 RC 低通滤波器,消除电源带来的高频噪声;采用运放芯片 OP07 将采样电阻端的电压进行放大,而在输出电压端接滤波电容,最终获取实际有效电压,其电压输出范围为 0 ~ 5 V。

3 判别模型建立

3.1 数据采集

从市场购买 144 个大小均匀,表面无损伤、无污染的静宁富士苹果进行试验,将表皮清洗干净,依次进行编号,随机选取 104 个样本作为校正集,40 个样本作为集。

由于光电检测器响应较敏感,在安装挡光圈,提供暗环境的条件下,为进一步消除外界光的干扰,在开启光源前,盖上探头盖,获取当前暗环境下的光电转换电压后,以不同波长光源下采集的电压与

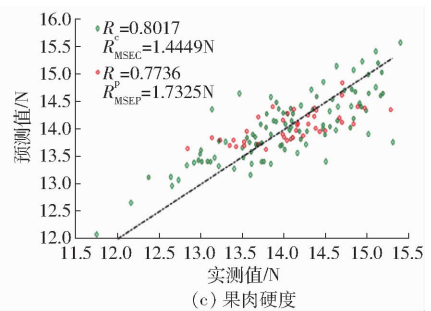
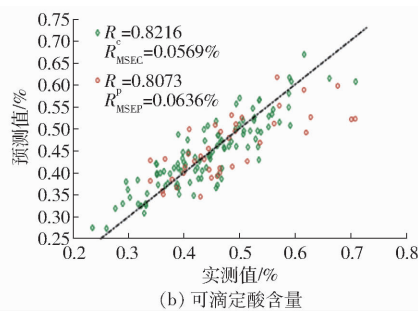
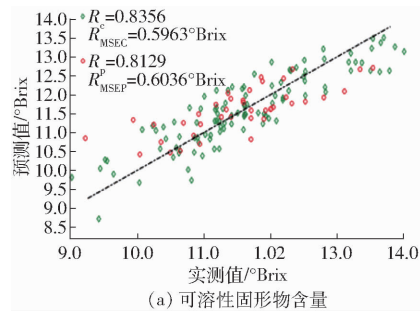


图 7 基于检测设备的苹果多品质建模预测结果

Fig. 7 Prediction results of apple multi-quality modeling based on detection device

4 检测设备软件设计

基于 QT 和 Python3 开发工具,采用 Python 语言开发了苹果多品质实时检测与分析软件。基于窄带光源要实现特征波长的漫反射光谱强度检测获取,需设置较短的光谱检测时间,该时间要大于光源达到稳定的时间,使得漫反射强度达到稳定状态。软件系统包括设置模块、采集模块、处理模块和显示模块,软件流程如图 8 所示。

仪器开机后初始化 LED 光源、驱动电路、检测按键、测量装置与光电二极管等 I/O 接口器件。首先进行白板校正和测量指标的选择。校正时,控制 PWM 信号占空比达到设定的光强度,使其每次开机检测的光强度相同。当按下检测按键后,首先控制光谱强度检测模块获取暗光谱值,然后输出校正后的 PWM 信号占空比设定输出电流,调整第 1 个窄

暗环境下的电压差值作为样本在该波长下的反射光强度值。

数据采集时,将检测探头对准试验样本沿赤道方向的一个面,依次循环采集 10 个特征 LED 光源下的反射强度值,每个样本沿赤道方向旋转 120°共采集 3 个面的反射信息,每个波段 3 次测量值取平均,作为其特定波长下的反射强度信息。采集完样本的光谱信息,再依次理化测定样本的果肉硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量。

3.2 模型建立

利用仪器获取校正集 104 个苹果漫反射光谱强度,采用多元线性回归建立苹果内部多品质预测模型。此模型自变量数目少,不存在共线性问题,建模速度快,稳定性好、易于维护修正和扩展,移植性好。

将样品所获得的 10 个特征波长下的电压强度与对应的苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量及硬度,利用多元线性回归算法建立预测模型,其预测集相关系数分别为 0.812 9、0.807 3 和 0.773 6,均方根误差为 0.603 6°Brix、0.063 6% 和 1.732 5 N,预测结果散点图如图 7 所示。

带 LED 灯输出强度,待光源输出稳定后(150 ms),控制光谱强度检测模块在此获取漫反射强度,最后处理器将获得的光谱漫反射光谱强度解析成电压,采集 3 次,求取平均值。接着以此种方法点亮第 2 个窄带 LED 灯,以此循环,最后处理器获得 10 个不同波长的光谱强度,并实时调用移植在设备中的苹果各品质参数预测模型,在界面实时显示出检测样本果肉硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量的预测值。

5 试验验证

从市场购买 46 个静宁富士苹果对检测设备的预测性能进行验证。试验开始,先从软件界面选取要预测的苹果品质参数,再将检测探头对准验证样本,按下检测按钮,实时获取苹果品质参数的预测值。每个苹果重复测定 5 次可溶性固形物含量、可

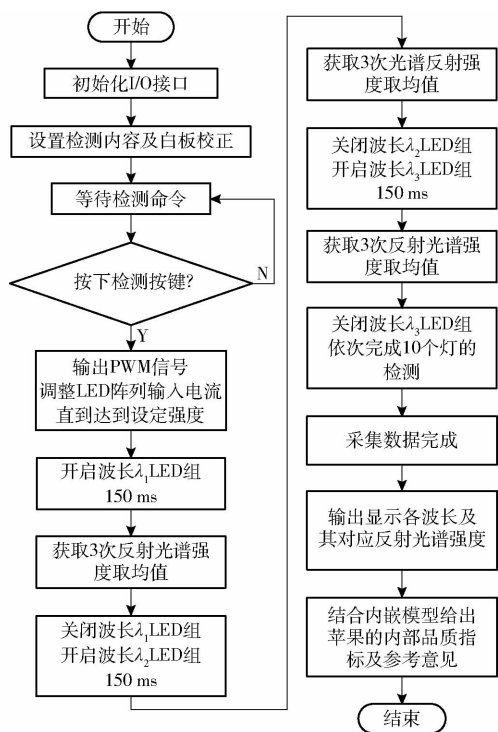


图 8 苹果内部多品质检测设备软件流程图

Fig. 8 Software flow chart of device for detecting multi-quality of apple

滴定酸含量和果肉硬度,同时与实测值进行相关性

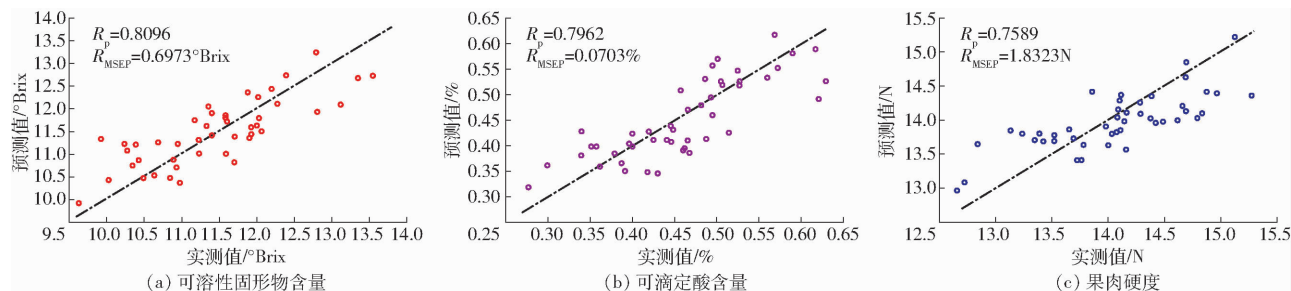


图 9 设备预测性能验证结果

Fig. 9 Verification results of prediction performance for device

6 结论

(1) 基于可见/近红外漫反射光谱技术,采用随机蛙跳算法,提取了苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量及果肉硬度的特征波长,最终优选 3 个内部品质参数的 10 个共享特征波长,为 420、480、550、580、640、680、705、940、980、1 044 nm。

(2) 基于苹果内部品质特征波长,采用特征窄带 LED 光源与光电二极管相结合的检测方式,设计了苹果多品质参数检测装置,其硬件系统包括了光源模块、采集模块、光源驱动模块、信号处理模块、电源模块、散热模块和打印模块。

(3) 基于苹果内部多品质检测装置,建立了苹果多品质预测模型。采集了苹果 10 个特征波长下的漫反射光谱电压强度,分别对苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度建立了多元线性回归模型,其

分析,预测散点图如图 9 所示,果肉硬度预测相关系数为 0.758 9,均方根误差为 1.832 3 N,可溶性固形物含量预测相关系数为 0.809 6,均方根误差为 0.697 3 $^\circ\text{Brix}$,可滴定酸含量预测相关系数为 0.796 2,均方根误差为 0.070 3%。

同时,对检测装置的稳定性进行了测试,每个样品检测 3 个不同位置,每个位置重复检测 8 次,用重复检测最大变异系数衡量仪器的稳定性^[20]。结果显示,可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度检测的最大变异系数分别为 0.010 6、0.011 6 和 0.006 2,各个参数检测结果重复性好。该装置单个苹果单参数检测时间约为 1 s,3 个品质参数同时检测时间约为 3.1 s。通过试验测试,设备在检测状态下可持续工作 8 h,稳定性较好。

该检测装置具有低成本、便携式、快速等优点,可为农户及农业合作社销售优质果提供技术支撑,提高农户线上销售信誉,进一步稳固地区品牌价值效益。但与基于近红外光谱仪研发的检测设备相比,检测精度需要进一步优化,后续可在检测波段选取、数据建模分析方面进行优化,同时扩大样本量,在满足实际生产需要的基础上进一步提高仪器的预测性能。

预测集相关系数分别为 0.812 9、0.807 3 和 0.773 6,均方根误差为 0.603 6 $^\circ\text{Brix}$ 、0.063 6% 和 1.732 5 N。

(4) 基于 QT 和 Python3 开发工具,采用 Python 语言开发了检测装置实时分析控制软件。实现了特征光源的循环点及漫反射电压强度获取,并将建立的苹果可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度预测模型植入到软件中,实现了苹果品质单参数及多参数的实时无损检测与分析。

(5) 验证了苹果多品质参数无损检测装置的性能。苹果样本可溶性固形物含量、可滴定酸含量和果肉硬度装置预测值与理化值的相关系数分别为 0.809 6、0.796 2 和 0.758 9,均方根误差 0.697 3 $^\circ\text{Brix}$ 、0.070 3% 和 1.832 3 N,装置重复采样最大变异系数为 0.010 6、0.011 6 和 0.006 2。结果显示,该低成本、便携装置可以实现苹果内部多品质一体化实时无损检测。

参 考 文 献

- [1] WU D, SUN D W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review—part I: fundamental [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 19:1–14.
- [2] 傅霞萍, 应义斌. 基于 NIR 和 Raman 光谱的果蔬质量检测研究进展与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8):148–164. FU Xiaping, YING Yibin. Application of NIR and Raman spectroscopy for quality and safety inspection of fruits and vegetables: a review[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8):148–164. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130826&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.026. (in Chinese)
- [3] EBRAHIEMA A, OLANIYI A F, LEMBES M, et al. Non-destructive prediction of internal and external quality attributes of fruit with thick rind: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 217:11–23.
- [4] 王加华, 陈卓, 李振茹, 等. 洋梨硬度的便携式可见/近红外漫透射检测技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11):129–133. WANG Jiahua, CHEN Zhuo, LI Zhenru, et al. Evaluation of european pear (*Pyrus communis* L.) firmness based on portable vis/NIR transmittance technique[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11):129–133. (in Chinese)
- [5] MARÍA T S, MARÍA J D L H, DOLORES P M. Internal and external quality assessment of mandarins on-tree and at harvest using a portable NIR spectrophotometer [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 92:66–74.
- [6] 杨帆, 李雅婷, 顾轩, 等. 便携式近红外光谱仪测定苹果酸度和抗坏血酸的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(9):2386–2389. YANG Fan, LI Yating, GU Xuan, et al. Determination of acidity and vitamin C in apples using portable NIR analyzer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9):2386–2389. (in Chinese)
- [7] MARCO C, ANDREA B, STEFANIA U, et al. On-field monitoring of fruit ripening evolution and quality parameters in olive mutants using a portable NIR – AOTF device[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199:96–104.
- [8] ROBERT J B. Evaluation of avocado fruit maturity with a portable near-infrared spectrometer [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 121:101–105.
- [9] 孙通. 梨可溶性固形物和酸度的可见/近红外光谱静态和在线检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [10] 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)
- [11] 刘燕德, 周延睿. 便携式近红外水果内部品质检测仪原理及应用进展[J]. *中国农机化学报*, 2013, 34(4):204–209. LIU Yande, ZHOU Yanrui. Principle and application of nondestructive evaluation for fruit internal quality using portable near-infrared spectrometry [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(4):204–209. (in Chinese)
- [12] GB/T 10651—2008 鲜苹果[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [13] KLEYNEN O, LEEMANS V, DESTAIN M F. Selection of the most efficient wavelength bands for ‘Jonagold’ apple sorting [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(3):221–232.
- [14] 郭志明, 黄文倩, 彭彦昆, 等. 自适应蚁群优化算法的近红外光谱特征波长选择方法[J]. *分析化学*, 2014, 42(4):513–518. GUO Zhiming, HUANG Wenqian, PENG Yankun, et al. Adaptive ant colony optimization approach to characteristic wavelength selection of NIR spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2014, 42(4):513–518. (in Chinese)
- [15] 杨海清, 祝旻. 基于可见近红外光谱特征波长选择的土壤有机质快速检测研究[J]. *红外*, 2015, 36(2):42–47. YANG Haiqing, ZHU Min. Study of rapid detection of soil organic matter based on characteristic wavelength selection of visible-near infrared spectra[J]. *Infrared*, 2015, 36(2):42–47. (in Chinese)
- [16] 王海龙, 杨国国, 张瑜, 等. 竞争性自适应重加权算法和相关系数法提取特征波长检测番茄叶片真菌病害[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3):2115–2119. WANG Hailong, YANG Guoguo, ZHANG Yu, et al. Detection of fungal disease on tomato leaves with competitive adaptive reweighted sampling and correlation analysis methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3):2115–2119. (in Chinese)
- [17] LIU F, HE Y. Application of successive projections algorithm for variable selection to determine organic acids of plum vinegar [J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(4):1430–1436.
- [18] YUN Y H, LI H D, WOOD L R E, et al. An efficient method of wavelength interval selection based on random frog for multivariate spectral calibration [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013, 111:31–36.
- [19] 陈立旦, 赵艳茹. 可见-近红外光谱联合随机蛙跳算法检测生物柴油含水量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8):168–173. CHEN Lidan, ZHAO Yanru. Measurement of water content in biodiesel using visible and near infrared spectroscopy combined with random-frog algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(8):168–173. (in Chinese)
- [20] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7):348–354. WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Research on hand-held device for nondestructive detection of potato quality parameters[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):348–354. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180742&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.042. (in Chinese)