

基于近红外稳态空间的苹果病变检测系统设计与试验

赵龙莲^{1,2} 邵志明^{1,2} 薛金丹^{1,2} 原育慧^{1,2} 董志城^{1,2} 李军会^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现苹果内部病变的无损检测,设计了基于近红外稳态空间分辨技术的苹果病变检测系统。系统选用波长 830 nm 的半导体激光器作为光源,选择感光面积大、感光系数灵敏的 FDS1010 光电探测器实现苹果内部病变无损检测。搭建试验平台对检测系统的性能进行了分析,包括电流稳定性、温度稳定性和光强稳定性,系统稳定性满足试验需求。选择 Evans Blue 固体配制不同质量分数的纯吸收溶液,对检测装置的准确性和灵敏度进行验证,发现随着溶液浓度的升高,吸光度呈现线性变化的趋势,在纯吸收溶液中系统表现出了稳定的检测性能,且对不同质量分数也表现出良好的分辨性能。根据稳态空间分辨检测技术原理,设计苹果病变替换试验,通过改变光源的位置,并记录“源-探”之间的距离,依据漫射传输方程求出苹果病变位置的光学参数,与目前已知的苹果内部组织光学参数一致。研究结果表明该系统可以实现苹果内部病变无损检测。

关键词: 苹果; 内部病变; 近红外; 稳态空间分辨技术; 无损检测

中图分类号: S-3; TP202 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0140-08

Design and Experiment of Apple Lesion Detection System Based on Near-infrared Steady-state Spatial Resolution

ZHAO Longlian^{1,2} SHAO Zhiming^{1,2} XUE Jindan^{1,2} YUAN Yuhui^{1,2} DONG Zhicheng^{1,2} LI Junhui^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the nondestructive detection of apple lesions, an apple lesions detection system based on near-infrared steady-state spatial resolution technology was designed. The system used 830 nm semiconductor laser as the light source, and FDS1010 photoelectric detector with large sensitive area and sensitive sensitivity coefficient was selected to realize the nondestructive detection of internal lesions in apple. An experimental platform was built to analyze the performance of the detection system, including current stability, temperature stability and light intensity stability. The system stability met the experimental requirements. Choosing Evans Blue solid preparation of different mass fraction of pure absorption solution, the accuracy and sensitivity of detection device were validated, it was found that with the increase of solution concentration, the absorbance showed linear change trends, and in the pure absorption system in the solution it showed stable detection performance, and with different mass fraction also showed a good resolution performance. According to the principle of spatial resolution detection technology, apple lesions replacing experiment was designed, by changing the position of the light source, and recording the distance between the source-agent, on the basis of the diffuse transmission equation of the optical parameters of apple lesion location, it was consistent with the known apple internal tissue optical parameters, the results showed that the system can realize the nondestructive detection of apple internal lesions.

Key words: apple; internal lesions; near-infrared; steady-state spatial resolution technology; nondestructive testing

0 引言

苹果内部病变的检测对果农和消费者都具有重要意义,基于人工分检的苹果病变检测效率低,且内部病变只有在外观上呈现出来后才能由人工检出^[1]。因此水果品质的无损检测技术非常必要。基于近红外光谱的无损检测方法非常适合于苹果样品的品质检测,包括近红外光谱法^[2]、近红外高光谱成像法^[3-4]、基于近红外组织光学参数的无损检测法^[5-7]等。其中基于近红外组织光学参数的无损检测法是目前最受关注的方法之一,包括频域近红外光学成像法^[8-9]和近红外稳态空间分辨法。

水果的组织光学参数,如吸收系数、散射系数,是其内部品质的一种表征。当水果内部发生病变时,其组织光学参数也会随之发生变化^[10]。因此通过测量水果组织的光学特性参数,可以推断出苹果内部是否发生病变。频域近红外光学成像法通过对入射光进行高频调制,不仅可以得到出射光的光强信息,还可以得到相位延迟信息,因此能更准确地解析出苹果的组织光学参数,且计算结果能以三维成像的方式直观地定位出苹果内部病变的位置和病变形状^[11-12]。但该方法的三维重构精度仍然有待提高,部分内部病变样品重构效果不明显,且频域近红外成像仪价格昂贵、系统复杂,不利于规模化的检测场景。近红外稳态空间分辨技术也可以通过建立模型找到光学参数与水果品质之间的关系,且易设计开发出价位低、体积小、易携带的检测装置^[13]。基于以上考虑,本文选用不经调制的近红外激光器作为光源,设计基于近红外稳态空间分辨技术的苹果病变检测装置,并对装置性能进行分析,同时通过试验对系统性能进行验证。

1 近红外稳态空间分辨法进行苹果内部病变检测的原理

根据漫射近似理论,当近红外光源垂直入射到半无限大介质表面时,可以认为组织体内的光分布是和时间无关的一种稳态分布^[14-15],因为组织体的吸收和散射作用,漫反射率会随着“源-探”距离的增加而下降,因此通过测量不同空间位置处光强随距离变化的关系,能反演解析出生物组织的吸收、散射信息^[16-17]。而吸收系数和散射系数是对组织体吸收和散射能力的表征,吸收系数和散射系数的变化反映出了组织体内部品质的变化,由此苹果内部病变就可以通过组织光学参数的变化体现出来。

由漫射理论分析可得,连续波在组织体内的光分布满足漫射近似传输方程,即

$$D \nabla^2 \phi(r) - \mu_a \phi(r) + Q(r) = 0 \tag{1}$$

其中

$$D = \frac{1}{3(\mu_a + \mu'_s)}$$

式中 D ——漫射系数

μ_a, μ'_s ——生物组织的吸收系数和约化散射系数

$Q(r)$ ——光源 $\phi(r)$ ——光能流率

不考虑边界条件,则点光源产生的光能流率 $\phi(r)$ 可以表示为

$$\phi(r) = \frac{\exp(-\mu_{eff}l)}{4\pi Dl} \tag{2}$$

其中

$$\mu_{eff} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)} \tag{3}$$

式中 l ——光源与检测器之间的距离

μ_{eff} ——组织体内有效衰减系数

在空间分辨检测技术中,当检测器位于介质表面远离光源某一位置处时,该位置处的漫反射强度 $R(r)$ 为

$$R(r) \approx \frac{\sqrt{3}}{2\pi l^2} \left(1 + \frac{2}{3}A\right) e^{-\mu_{eff}l} \sqrt{\frac{\mu_a}{\mu'_s}} \tag{4}$$

其中 $A = -1.44n^{-2} + 0.71n^{-1} + 0.668 + 0.0636n$

式中 n ——生物组织相对空气的折射率

当测量得到多个位置处的漫反射强度 $R(r)$ 时,即可以求解出生物组织相对的光学参数。

当苹果内部发生病变时,果肉组织中的酚类物质在酚酶的催化下生成醌类物质、水及其他聚合物,随着氧气的大量进入,打破苹果原本的氧化还原动态平衡,使之向醌类物质方向移动,导致醌类物质大量积累,从而使苹果内部组织呈现较深的颜色,即发生褐变^[18-19]。用近红外光对发生病变的苹果样品进行照射时,较深颜色的醌类物质吸收更多光子,使得出射光的能量明显低于非病变样品的能量。因此,内部发生病变的苹果吸收系数通常大于健康苹果的吸收系数^[20-21]。

2 系统设计

不同波长的近红外光源照射到苹果样品时,内部组织对光的吸收和散射不尽相同,选择合适的波长有助于区别苹果内部是否有病变。由图 1^[22] 可知,在波长 500 ~ 1 000 nm 范围内,能有效区分正常苹果与腐变苹果的波段有几处,综合考虑光源和检测等多方面的因素,选用波长为 830 nm 的近红外光作为入射光源。

基于近红外稳态空间分辨技术的苹果病变检测系统,主要由检测模块和控制模块两部分组成,如图 2 所示。

检测模块中选用最大功率 30 mW、波长 830 nm

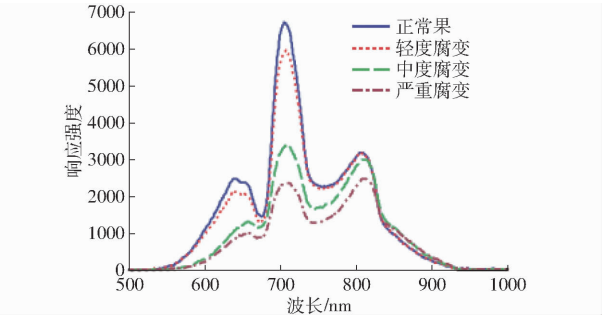


图 1 正常与不同病变程度苹果样品的出射光能量谱
Fig. 1 Ejective light energy spectra of normal and different lesion degree apple samples

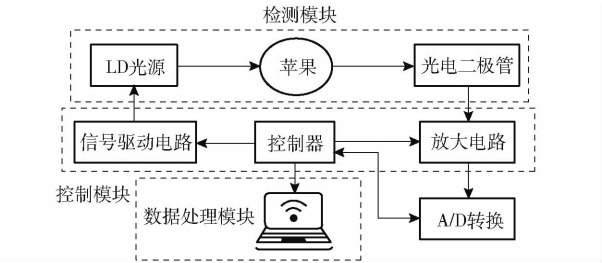


图 2 苹果病变检测系统原理框图
Fig. 2 Principle block diagram of apple's lesion detection system

的半导体激光器作为光源,选用恒流源电路驱动半导体激光器,并整合了保护电路、温度监测及控制电路、恒功率控制电路等,使半导体激光器能够稳定工作。光子在苹果内部组织中的传输会经历吸收和散射,因此出射光会存在较大衰减,为了检测微弱的出

射光,选择感光面积大、感光系数灵敏的 FDS1010 光电探测器,加入放大电路,对微弱信号进行放大,实现对苹果内部品质检测的目的。

控制模块主要实现对光源以及检测器的驱动,其中光源部分在控制器驱动下会发出波长 830 nm 的激光,通过光纤垂直照射在苹果的表面,在光源同侧距离光源一定位置处,由光电二极管接收经过苹果内部的出射光实现光电转换,并对微弱信号进行放大,经 A/D 转换后在上位机进行存储。

2.1 光源驱动电路设计

检测系统中光源工作的稳定性会对检测结果有较大影响,根据需求分析,系统要求能够输出稳定的波长 830 nm 的光,工作温度为 25℃,输出功率为 15 mW。由于半导体激光器的工作性能易受到工作温度、驱动电流的影响^[23-24],因此采用恒流驱动的方式,直接控制半导体激光器的工作电流,并加入温度控制电路和功率控制电路,使半导体激光器的工作状态稳定。

恒流驱动电路主要由两部分构成:恒流控制电路和保护电路,如图 3 所示。

恒流驱动电路采用串联负反馈的方式,在电路中加入运算放大器、场效应管和采样电阻。运算放大器先对输入电压和反馈电压进行对比,再经过场效应管,调节驱动电流,使驱动电路保持良好的稳定性。

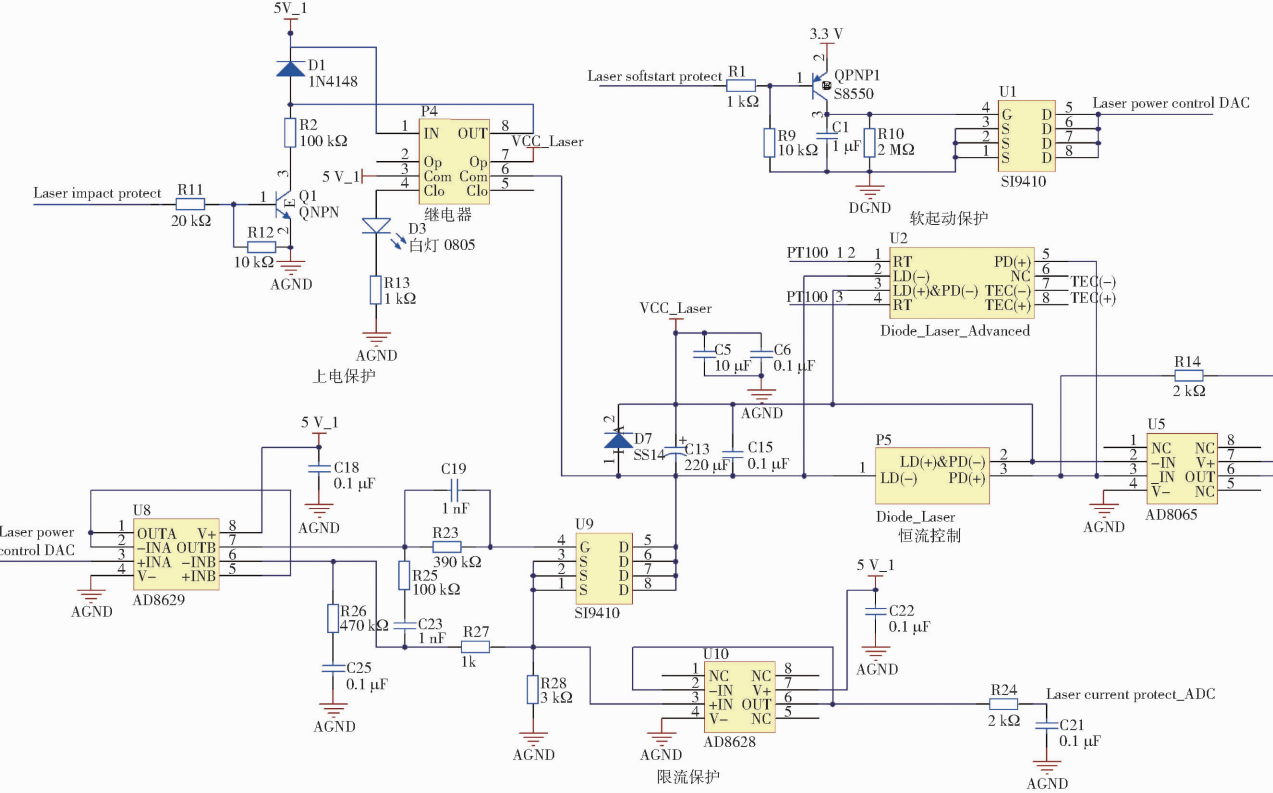


图 3 恒流驱动电路
Fig. 3 Constant current drive circuit

保护电路由上电保护电路、软启动保护以及限流保护电路 3 部分构成。当系统初上电时,继电器无电流通过,半导体激光二极管不工作,上电一段时间后继电器触点打开,激光二极管加入电路开始工作。其中肖特基二极管 D1 起续流作用,为防止工作时电流过大加入电阻 R2 起限流作用。软启动电路输出端口的电压从零慢慢增大至设定值,对半导体激光器起到保护作用,消除阶跃电压对半导体激光器的影响。在半导体激光器的驱动电路中加入的限流保护电流,主要是防止工作电流超过其最大工作电流,对半导体激光器造成损伤。

2.2 检测电路设计

由于经过苹果的出射光信号极其微弱,因此在选择出射光检测器时,需要考虑其感光系数及感光面积。选择 Thorlabs 公司生产的 FDS1010 光电探测器作为出射光的检测器件,其感光面积较大,能够较完整地接收到苹果表面的出射光,通过将光功率转化为电流实现光强检测功能。

基于 FDS1010 的光电检测电路设计如图 4 所示,其中电阻 R67 和 C67 构成了一个简单的 RC 滤波电路,消除电源频率波动的影响,R69 为采样电阻。

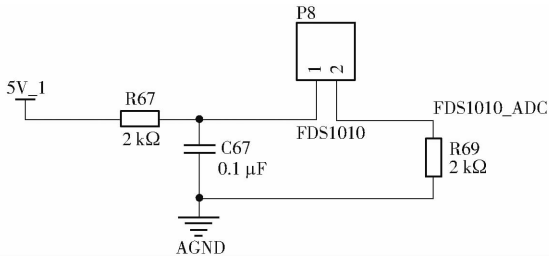


图 4 检测电路图
Fig. 4 Detecting circuit diagram

由光电检测电路可知,采样电压 $V = R_{69} I_p$, 其中 I_p 为给定波长下的光电流,因此可通过检测电压得到出射光强 P ,可表示为

$$P = \frac{V}{R_{69} R_\lambda} \tag{5}$$

式中 R_λ ——检测器光响应灵敏度

则 $P = \frac{I_p}{R_\lambda}$ 。

3 试验

3.1 系统稳定性分析

对设计完成的检测系统稳定性进行分析,包括电流稳定性、温度稳定性和光强稳定性。稳定度 γ 计算式为

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\bar{I}} \tag{6}$$

式中 $I_{\max}$ ——电流最大值

$I_{\min}$ ——电流最小值

$\bar{I}$ ——电流平均值

电流稳定性:为了获得半导体激光器及驱动电路工作的稳定性,首先对电流的变化率及长期工作状态下的稳定性进行测试。半导体激光器的工作电流通过驱动电路中的采样电阻 R28 进行检测,设置驱动电流为 40 mA,采样间隔为 2 min,采样时长 4 h,在系统运行 30 min 达到半导体激光器的稳定工作状态时,测得系统长时间工作状态下的电流。结果表明,4 h 内半导体激光器的工作电流平均值为 40.15 mA,电流稳定度 γ 为 0.045,满足系统测试要求。

温度稳定性:半导体激光器在工作时,温度的变化会使半导体激光器的输出波长发生偏移,且阈值电流也会随着温度的升高而升高,因此需要对系统工作时的温度稳定性进行分析。设定系统工作在 25℃,在系统工作 30 min 达到稳定状态下,每 10 s 采集一次温度数据,采集 1 h,得到温度数据分析系统的温度稳定性。监测结果表明,检测系统的温度均值为 24.99℃,长期工作状态下的温度稳定度为 0.008,达到系统温度稳定性需求。

系统在工作时,不仅需要保持工作状态下温度稳定,也需要检测系统能够对温度变化迅速做出响应,控制半导体激光器内置的 TEC 对温度进行调节,使温度恢复到正常工作状态下的温度。当半导体激光器工作在 25℃ 稳定状态下,设置其温度为 20℃,发现经过 10 s 能快速降温至目标温度。设置目标温度为 25℃,半导体激光器从稳定工作状态 19℃ 下也能迅速升温至目标温度。

光强稳定性:系统采用 FDS1010 光电探测器检测经过样品的出射光,输出光强的稳定性反映了系统的总体性能,输出的光强稳定性越好,则表示系统驱动电流越稳定,检测电路的灵敏度更高。在电流的稳定性满足需求的基础上对电流进行调节,因为在不同的驱动电流下,半导体激光器的发光强度及功率不同,为满足不同样本的检测需要,可以通过调节驱动电流改变其发光功率,不对样品造成生物性损害。

在检测系统工作 1 h 达到稳定状态时,设置采样间隔为 1 min,采样时长 4 h,对系统在 90 mA 工作电流下的光强进行数据采集。采集到的光强曲线如图 5 所示。

监测结果表明,系统输出光强均值为 876.7 mV,稳定度为 0.009,输出光强的稳定性满足系统需求,检测器能够获取到有效出射光。

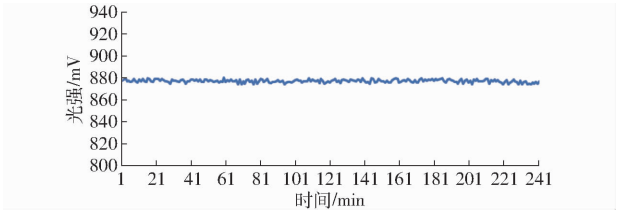


图 5 光强稳定性曲线
Fig. 5 Stability curve of light intensity

3.2 系统性能试验

3.2.1 试验材料

在稳定性测试的基础上,选用 Evans Blue(伊文思蓝)固体配制纯吸收溶液,对检测装置的准确性与灵敏度进行进一步分析,该溶液清澈透明,对近红外光只发生吸收作用,不会发生折射作用,溶液吸光度与待测指标的浓度符合朗伯比尔定律。

Evans Blue 固体样品(1 g 装)购于北京 Coolaber(酷来搏)科技有限公司,样品纯度大于等于 75%,选择一个 100 mL 的干净烧杯作为样品池进行溶液的配制,其他试验器材包括:10 mL 离心管、10 mL 移液枪、玻璃棒等。用精密天平分别称取对应质量的 Evans Blue 固体粉末。为了获取 Evans Blue 不同质量分数下的溶液,配制不同质量分数范围内的溶液。配制方法如下:依次称取 Evans Blue 固体粉末配制溶液,溶液质量分数为 0.2% ~ 2%,梯度为 0.2%;同理配制质量分数为 2% ~ 14% 的溶液,梯度为 2%,共得到 16 份样品。

搭建的试验平台如图 6 所示,将光源和检测器调节至相同的高度,分别放置于样品池两侧,样品池光程为 10 mm,采集经过溶液的透射光。以空样品池为参比,进行检测时,每组样品采样 1 000 次,然后对采集到的数据进行均值处理,以减小试验误差。使用遮光布遮盖系统,降低外界自然光对试验结果的影响。

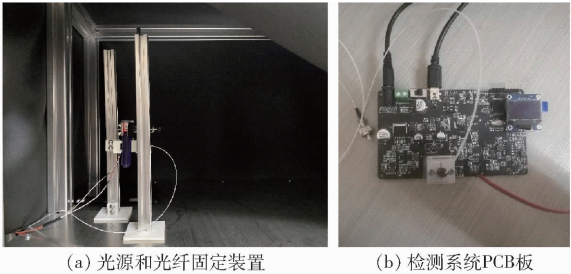


图 6 试验平台
Fig. 6 Experimental platform

3.2.2 试验结果分析

对配制的质量分数 0.2% ~ 2.0%、梯度 0.2% 的溶液,以及质量分数 2% ~ 14%、梯度 2% 的溶液出射光进行分析,同时将两类溶液的测试结果合并到一起进行分析,得到如图 7 ~ 9 所示的趋势线。

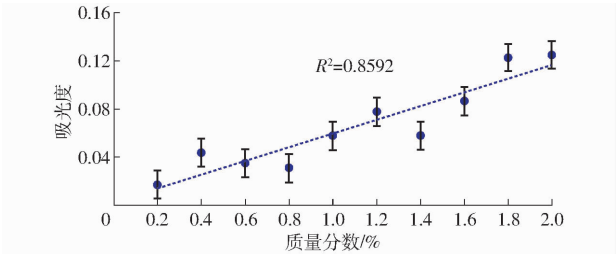


图 7 质量分数 0.2% ~ 2.0% 溶液吸光度变化曲线
Fig. 7 Changing curve of absorbance of solution with mass fraction of 0.2% ~ 2.0%

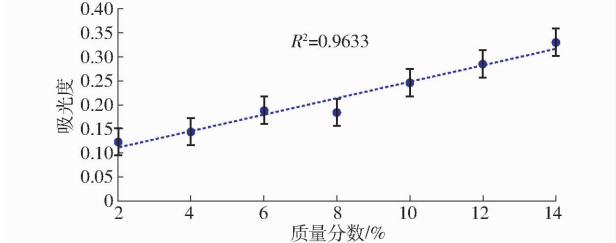


图 8 质量分数 2% ~ 14% 溶液吸光度变化曲线
Fig. 8 Changing curve of absorbance of solution with mass fraction of 2% ~ 14%

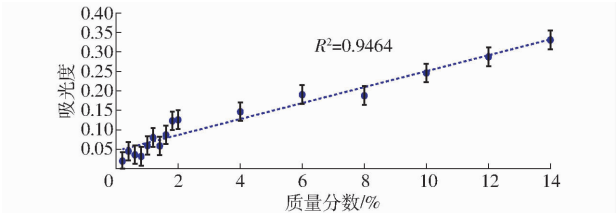


图 9 质量分数 0.2% ~ 14% 溶液吸光度变化曲线
Fig. 9 Changing curve of absorbance of solution with mass fraction of 0.2% ~ 14%

由图 7 ~ 9 可知,质量分数为 0.2% ~ 2% 的低浓度溶液、质量分数为 2% ~ 14% 的较高浓度溶液,其吸光度均随着溶液浓度的升高呈现线性变化趋势,在纯吸收溶液中系统表现出稳定的检测性能,且对不同质量分数也表现出良好的分辨性。

3.3 苹果病变检测试验

3.3.1 试验材料

为了控制病变果肉的位置,选择果肉替换的方式对苹果内部病变进行设置。首先选取若干个黄元帅和红富士苹果,对其进行敲击,放置一周后使其发生腐烂病变得到病变果肉,用于下述果肉替换试验,如图 10a 所示。试验选用表面无损伤、大小基本一致的黄元帅苹果 6 个,红富士苹果 7 个,在室温下放置 2 d 并用 75% 的酒精对苹果表面进行清洗,消除苹果表面杂质对试验的影响。

3.3.2 试验结果分析

首先选取黄元帅苹果表面某一处进行正常苹果检测,采集其出射光数据进行保存,标记光源和检测器的位置。在同一检测位置处进行病变果肉替换,



图 10 试验样品

Fig. 10 Experimental sample preparation diagrams

用预先制备好的病变果肉替换健康果肉,病变距离苹果表面约 2 mm,病变果肉为直径 12 mm 的圆柱体,采用同样的方法检测替换后该位置处的出射光信息。将采集到的信息进行处理得到其吸光度,再使用欧氏距离对所有样品进行系统聚类分析,结果如图 11 所示。正常样品序号为 1 ~ 6,病变样品序号为 7 ~ 12。由图可以看出,基于欧氏距离的聚类可以很好地对正常苹果与病变苹果进行区分。

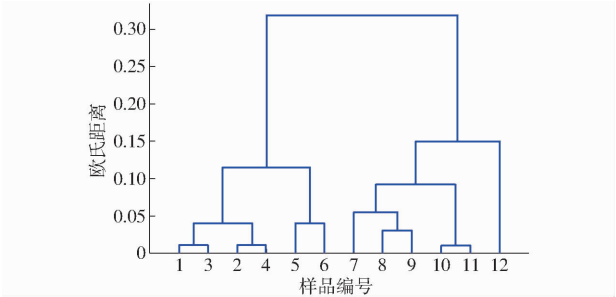


图 11 黄元帅品种正常苹果与病变苹果聚类分析

Fig. 11 Cluster analysis of normal and pathological apples of Yellow Yuanshuai variety

采用同样的正常苹果与病变苹果制备方法,可以得到红富士苹果样品 7 个,正常样品序号为 1 ~ 7,病变样品序号为 8 ~ 14,使用欧氏距离对所有样品进行聚类分析,如图 12 所示。从图中可以看出,序号为 2 和 7 的样品分类错误,可能是因为在进行病变果肉替换时较难控制导致的,但整体仍能较好地对正常苹果与病变苹果进行分类。

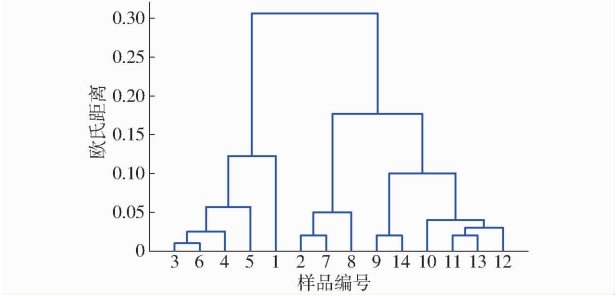


图 12 红富士品种正常苹果与病变苹果聚类分析

Fig. 12 Cluster analysis of normal and pathological apples of Red Fuji varieties

将黄元帅与红富士两个品种苹果的所有样品混合,并根据“是否病变”对样品进行标号,正常苹果

样品序号为 1 ~ 13;病变苹果样品序号为 14 ~ 26。对所有样品的出射光数据进行处理后得到样品的吸光度,使用欧氏距离对所有样品进行聚类分析,如图 13 所示。

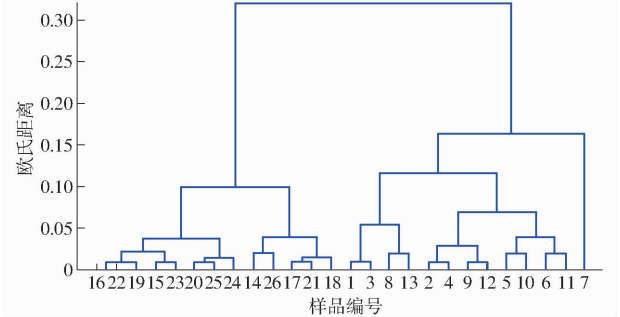


图 13 正常苹果与病变苹果聚类分析

Fig. 13 Cluster analysis of normal and diseased apples

由图 13 可以看出,采用聚类分析可以将正常苹果与病变苹果准确的划分为两类,且在本试验范围内苹果品种的差异对结果无影响。

在对样品的吸光度进行聚类分析的基础上,再次设计试验,改变光源与检测器之间的距离,得到不同“源-探”距离下出射光光强信息,根据漫射传输理论求解样品的光学参数进行求解。能求出的病变苹果的吸收系数在 $0.02 \sim 0.05 \text{ mm}^{-1}$ 之间,该结果与 BLIZNYUK 等^[25]的研究结果相符合,也与课题组基于频域扩散光学成像法得到的病变苹果的吸收系数一致。所设计开发的基于近红外稳态空间分辨检测技术的苹果病变检测系统能够用于苹果的病变检测。

4 结论

(1)设计了基于近红外稳态空间分辨技术的苹果病变检测系统,系统选用波长 830 nm 的半导体激光器作为光源,FDS1010 光电探测器作为检测器。搭建试验平台并对检测系统的性能进行了分析,包括电流稳定性、温度稳定性和光强稳定性,系统稳定性满足试验需求。

(2)在检测系统的稳定性满足需求的基础上,选择 Evans Blue 固体配制不同质量分数的纯吸收溶液,对检测系统的准确性和灵敏度进行验证,发现随着溶液浓度的升高,吸光度呈现线性变化趋势,检测系统在纯吸收溶液中表现出了稳定的检测性能,且对不同质量分数也表现出良好的分辨性能。

(3)以红富士和黄元帅两个品种的苹果作为样品,设计苹果病变替换试验,根据系统测得的样品吸光度对正常苹果和病变苹果进行聚类分析,聚类结果表明,该苹果病变检测系统可以较好地区分正常苹果与病变苹果。改变光源和检测器之间的距离,

得到不同“源-探”距离下的出射光光强信息,根据漫射传输理论求解出病变苹果的光学参数,解析得到的不同病变苹果的吸收系数范围与文献结果相符

合。试验结果表明,所设计的基于近红外稳态空间分辨检测技术的苹果病变检测系统能够用于苹果的内部病变检测。

参 考 文 献

[1] 李志成,郑晓冬,闫新焕,等. 果蔬品质无损检测技术研究进展[J]. 中国果菜, 2021, 41(3):34-40.
LI Zhicheng, ZHENG Xiaodong, YAN Xinhuan, et al. Research progress of nondestructive testing technologies for fruit and vegetable quality[J]. China Fruit and Vegetable, 2021, 41(3):34-40. (in Chinese)

[2] 欧阳思怡,谢小强,刘燕德.水果内部品质近红外动态在线检测研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(10):2242-2245.
OUYANG Siyi, XIE Xiaoqiang, LIU Yande. Research progress of on-line detection of fruit quality using near infrared spectroscopy[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(10):2242-2245. (in Chinese)

[3] SUN Y, GU X Z, SUN K, et al. Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75:557-564.

[4] KERESZTES J C, GOODARZI M, SAEYS W, et al. Real-time pixel based early apple bruise detection using short wave infrared hyperspectral imaging in combination with calibration and glare correction techniques[J]. Food Control, 2016, 66(1):215-226.

[5] 刘燕德,陈兴苗. 光学特性参数的测量方法在水果组织中的应用[J]. 农产品加工(学刊), 2006(10):90-94.
LIU Yande, CHEN Xingmiao. Application of measurement methods for optical property parameters in fruit tissue[J]. Agricultural Product Processing (Academic Journal), 2006(10):90-94. (in Chinese)

[6] LU R, CEN H, HUANG M, et al. Spectral absorption and scattering properties of normal and bruised apple tissue [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(1):263-269.

[7] HE X, FU X, RAO X, et al. Assessing firmness and SSC of pears based on absorption and scattering properties using an automatic integrating sphere system from 400 to 1 150 nm [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121:62-70.

[8] 胡栋,孙通,应义斌. 基于结构光反射成像的水果果皮和果肉光学特性参数测量[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7):284-291.
HU Dong, SUN Tong, YING Yibin. Measurement of optical characteristic parameters of fruit peel and pulp based on structural light reflection imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7):284-291. (in Chinese)

[9] 胡文雁,刘慧,王宇恒,等. 频域近红外光谱法研究生物组织内部光子传输特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4):1074-1080.
HU Wenyan, LIU Hui, WANG Yuheng, et al. Study for the photon propagation properties in biological tissue based on frequency-domain near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4):1074-1080. (in Chinese)

[10] ZERBINI P E, GRASSI M, CUBEDDU R, et al. Nondestructive detection of brown heart in pears by time-resolved reflectance spectroscopy [J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 25(1):87-97.

[11] HU Wenyan, LI Jiangtao, ZHU Xiaoqiong, et al. Nondestructive detection of underlying moldy lesions of apple using frequency domain diffuseoptical tomography[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 153:31-42.

[12] 李江涛,胡文雁,赵龙莲,等. 频域近红外光学成像法的苹果内部病变检测精度[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9):2836-2841.
LI Jiangtao, HU Wenyan, ZHAO Longlian, et al. Study of the accuracy of apple internal lesion detectionbased on frequency domain diffuse optical tomography[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9):2836-2841. (in Chinese)

[13] 腾轶超. 近红外空间分辨光谱技术及其在脑氧无损检测中的应用[D]. 北京:清华大学, 2006.
TENG Yichao. Spatially-resolved near infrared spectroscopy and its applications in non-invasive monitoring of cerebral oxygenation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)

[14] PIAO Daqing, ZHANG Anqi, XU Guan. Photon diffusion in a homogeneous medium bounded externally or internally by an infinitely long circular cylindrical applicator. V. Steady-state fluorescence[J]. Journal of the Optical Society of America, 2013, 30(4):791-805.

[15] ZHANG Anqi, GUAN Xu, CHATHURI D, et al. Photon diffusion in a homogeneous medium bounded externally or internally by an infinitely long circular cylindrical applicator. II. Quantitative examinations of the steady-state theory[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2011, 28(2):66-75.

[16] 文星,梁志宏,张根伟,等. 基于稳态空间分辨光谱的猪肉新鲜度检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):334-339.
WEN Xing, LIANG Zhihong, ZHANG Genwei, et al. Measurement of pork freshness by steady spatially-resolved spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):334-339. (in Chinese)

[17] SAEYS W, VELAZCO-ROA M A, THENNADIL S N, et al. Optical properties of apple skin and flesh in the wavelength range from 350 to 2 200 nm[J]. Applied Optics, 2008, 47(7):908-919.

[18] 李明. 水果品质可见/近红外光谱预测模型优化方法的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
LI Ming. Research of optimization modelling methods on determination of fruit quality by visible and near infrared spectroscopy

- [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 韩东海, 刘新鑫, 鲁超, 等. 苹果内部褐变的光学无损检测研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 86–88.
HAN Donghai, LIU Xinxin, LU Chao, et al. Study on optical non-destructive detection of internal browning of apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 86–88. (in Chinese)
- [20] 韩东海, 刘新鑫, 赵丽丽, 等. 受损苹果颜色和组织的近红外光谱特性[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 112–115.
HAN Donghai, LIU Xinxin, ZHAO Lili, et al. Near-infrared spectral characteristics of damaged apple color and tissue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 112–115. (in Chinese)
- [21] 孙红, 梁媛媛, 田男, 等. 鲜切果品新鲜度可见/近红外快速检测装置设计与实验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 393–398.
SUN Hong, LIANG Yuanyuan, TIAN Nan, et al. Design and experiment of visible/near infrared rapid detection device for freshness of fresh-cut fruits[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 393–398. (in Chinese)
- [22] 郭志明, 黄文倩, 陈全胜, 等. 苹果腐心病的透射光谱在线检测系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 283–288.
GUO Zhiming, HUANG Wenqian, CHEN Quansheng, et al. Design and test of on-line detection system for apple core rot disease based on transmitted spectrum[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 283–288. (in Chinese)
- [23] HU Dong, FU Xiaping, HE Xueming, et al. Noncontact and wide-field characterization of the absorption and scattering properties of apple fruit using spatial-frequency domain imaging[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1387–1401.
- [24] VANOLI M, RIZZLOL A, GRASSI M, et al. Studies on classification models to discriminate ‘Braeburn’ apples affected by internal browning using the optical properties measured by time-resolved reflectance spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 91(Supp. C): 112–121.
- [25] BLIZNYUK V V, PARSHIN V A, RZHANOV A G, et al. Determining the rate of degradation of a high-power laser diode from the dependence of the radiation spectrum on variations in the pumping current[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, 85(2): 184–188.
-

(上接第 124 页)

- [10] 孙俊, 谭文军, 毛罕平, 等. 基于改进卷积神经网络的多种植物叶片病害识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 209–215.
SUN Jun, TAN Wenjun, MAO Hanping, et al. Recognition of multiple plant leaf diseases based on improved convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 209–215. (in Chinese)
- [11] AGARWAL M, GUPTA S K, BISWAS K K. Development of efficient CNN model for tomato crop disease identification[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020, 28: 100407.
- [12] 丁永军, 张晶晶, 李民赞. 基于卷积胶囊网络的百合病害识别研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 246–251, 331.
DING Yongjun, ZHANG Jingjing, LI Minzan. Disease detection of lily based on convolutional capsule network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 246–251, 331. (in Chinese)
- [13] 贾建楠, 吉海彦. 基于病斑形状和神经网络的黄瓜病害识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊 1): 115–121.
JIA Jiannan, JI Haiyan. Recognition for cucumber disease based on leaf spot shape and neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(Supp. 1): 115–121. (in Chinese)
- [14] LIU X, MIN W, MEI S, et al. Plant disease recognition: a large-scale benchmark dataset and a visual region and loss reweighting approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 2003–2015.
- [15] TSUCHIYA H, FUKUI S, IWAHORI Y, et al. A method of data augmentation for classifying road damage considering influence on classification accuracy[J]. Procedia Computer Science, 2019, 159: 1449–1458.
- [16] RUSSAKOVSKY O, DENG J, SU H, et al. Imagenet large scale visual recognition challenge[J]. International Journal of Computer Vision, 2015, 115(3): 211–252.
- [17] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 25: 1097–1105.
- [18] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[C] // International Conference on Learning Representations, 2015.
- [19] HE K, ZHANG X, REEN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016: 770–778.
- [20] HUANG G, LIU Z, LAUREENS V, et al. Densely connected convolutional networks[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 4700–4708.
- [21] LIU W, NGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[C] // European Conference on Computer Vision, 2016: 21–37.