基于超声波的芒果成熟度检测研究

摘 要

芒果是一种维生素含量极高的热带水果，在国际市场非常受欢迎。芒果也是广西区的特产水果之一，但国内的芒果多用于鲜销和内销，出口量较之其它国家要小很多。由于水果品质检测手段的落后，仍然大部分依靠人工感官和简单的机械进行经验识别，导致我国的出口水果品质良莠不齐，大小不一，在国际市场上缺乏竞争力。与低效率，误差大的人工检测方法相比，可以无损检测水果内部品质的超声波检测技术有着速度快，信息全面，检测准确，成本小的优势。

超声波无损检测平台主要由超声波发生器，换能器，滤波器，信号转换装置以及安装了信号采集软件的微机组成。在检测时，超声波经由传感器探头穿过芒果中心的果肉，在另一侧被超声波接收器采集并转换为电信号，通过Maxim的Max262滤波器电路和AEDK信号采集系统，在微机上的LCALABACT软件中显示衰减信号。

本项目选用了100个从同一果园成熟度在同一时期的海南椰香芒（鸡蛋芒），在25~27° C的室温条件下储藏480小时，每隔24小时随机抽取5个芒果进行超声波衰减测试后，送广西大学农学院植物生理实验室进行坚实度、可溶性糖含量和酸度的检测。

检测得到的数据用于静态分析芒果的主要生理性特性和超声波参数之间的关系。超声波衰减的检测结果与同一来源芒果的糖酸含量及坚实度测试结果进行对照，从而建立描述超声波的衰减-坚实度以及衰减-生理性特性之间联系的方程。通过这些方程，我们可以在无损检测超声波衰减数值后快速计算库存批量芒果的可溶性糖含量和酸度，并可监视芒果成熟的进程，进而预测芒果的储藏期限。

关键词： 无损检测； 超声波； 波的衰减； 芒果； 成熟度； 坚实度； 糖内容物； 酸度

RESEARCH OF MANGO MATURITY BASED ON ULTRASONIC METHOD

ABSTRACT

Mango is a tropical fruits of very high vitamin content, and it is very popular in the international market. Mango is also the special fruit product of Guangxi Zhuang Autonomous Region. However, China's sales of fresh mango and used for domestic and export volume is smaller than many other countries. Fruit quality due to the backward methods, the majority still rely on manual identification of sensory experience, resulting in the quality of China's exports of good and bad fruits, sizes, lack of competitiveness in the international market. Compared to the manual detection method which is low efficiency and have large errors, the ultrasonic non-destructive detection technology can test the quality of internal pulp, since it is more fast and accurate, moreover it has a comprehensive information and low cost.

The ultrasonic non-destructive detecting platform is made up of the ultrasonic generator, filter, ultrasonic transducer, the signal conversion device of the signal acquisition and a computer which has installed the software of virtual oscilloscope.

The ultrasonic goes through the center of the mango pulp by the probe; on the other side, the ultrasonic receiver collects the ultrasonic and converts it into the electrical signal; the signal gets through the Maxim's Max262 filter and the AEDK signal acquisition system; at last, the LCALABACT virtual oscilloscope software receives the signal and displays the signal attenuation.

In this paper, 100 Dashehari mangos have been selected from the same orchard during the same period, at the 22 ~ 23 ° C room temperature, for 96 to 480 hours. Every time 10 mangos are chosen randomly for ultrasonic testing, and then be sent to the agricultural college for firmness, soluble sugar content and acidity tests at intervals of 24 hours.

These data of detection used for static analysis of the major mango physiological characteristics and the relationship between the ultrasonic parameters. Ultrasonic attenuation of the test results with the same source of sugar mango and a solid acid test results were compared to establish the description equation of the relationship between the ultrasonic attenuation - firmness and attenuation - physiological characteristics. With these equations, the soluble sugar content of mango and acidity of batch mangos can be easily calculated, and the mango's ripe progress can be watched over, and then the storage period of mango could

be predicted by testing the attenuation through the ultrasonic detection technology.

KEY WORDS: non-destructive testing; ultrasonic; wave attenuation; mango; maturity; firmness; sugar content; acidity

广西大学学位论文原创性声明和学位论文使用授权说明

学位论文原创性声明

本人声明：所呈交的学位论文是在导师指导下完成的，研究工作所取得的成果和相关知识产权属广西大学所有。除已注明部分外，论文中不包含其他人已经发表过的研究成果，也不包含本人为获得其它学位而使用过的内容。对本文的研究工作提供过重要帮助的个人和集体，均已在论文中明确说明并致谢。

论文作者签名：贺明妍　　2009 年 5 月 18 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解广西大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

本人保证不以其它单位为第一署名单位发表或使用本论文的研究内容；

按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；

学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

在不以赢利为目的的前提下，学校可以公布论文的部分或全部内容。

请选择发布时间：

☑即时发布　　☐解密后发布

（保密论文需注明，并在解密后遵守此规定）

论文作者签名：贺明妍　导师签名：李国进　2009年 5 月 28 日

第一章 引言

1.1 项目研究的意义

我国是一个农业大国，水果产量居世界之首。但由于水果的采后商品化处理量只占水果总产量的10%左右，使得国产水果基本上仅限于鲜销和内销，出口量的比例比较小，而且出口的水果在国际市场上也大多档次较低；在国内，高档水果市场多被洋水果占领，而国内水果由于在采摘、包装、储运及加工等作业环节中的损失率高达30.45[1]，因而只能流向低档市场。其实国产水果的品质并不亚于国外的同类产品，造成这种现象的主要原因有三：一是果实缺乏严格挑选，不能对水果进行有效分级，使得不同成熟度的水果相互混杂；二是果实质量优劣不齐，病害果掺杂在正常果之间，导致烂果率的上升和整体品质的下降；三是运输作业不够细致，受到各种外界各因素的影响而导致机械损伤的几率偏高。

在西方发达国家，水果采摘后都需要经过详细分级包装等商品化处理才投放市场，这样不但拉开了价格档次，也方便了不同需求的购买者；而我国的水果只有1%进行商品化处理，特别是我国的热带、亚热带水果目前主要是鲜销，加工类的产品较少。在鲜售时，进行分级包装的产品很少，大多是不论生熟、大小、好坏、有无内部缺陷，往往是整筐装运，运到销售市场时品质也是参差不齐，损失严重，极大地影响了产品档次。

若能根据水果的不同物理特性对果品品质进行评定与分级，从而对过熟和尚未成熟的水果及时加工，则可有效提高储藏质量；同时在流通及销售中，实现严格的质量分级和大小分级，既能保护消费者的利益，又可提高水果的加工质量和出品等级，这对加强我国果品在国际市场和国内高档市场的竞争力是非常有利的。

1.2 水果分级采用的无损检测技术简介

传统上的分级一般是根据外观进行分级，评价指标包括直径、长短、粗细、轻重等。在我国，水果分类最常见的是下列三种方法：

1.人工分类：通过人眼直接观测水果进行判断。这种方法非常依赖观测者的经验，且劳动量大，效率不高，没有确定的分类标准，精度也不稳定。而且人在长期用眼的情

况下，必然会造成视觉疲劳和工作情绪的不稳定，造成额外的误差波动。

2.机械分类：主要根据尺寸分类或根据重量分类。这种分类方法一般根据给定的尺寸或重量模型进行比较，从而将同样大小或同样重量的水果放到一起，它在一定程度上减轻了人力劳动的强度，但缺点也很明显，无法完成形状，成熟度，表面缺陷等方面的综合评定，而且仅根据尺寸和重量进行分类也并不能准确反映水果的成熟度。

3.光电分类：这类自动分选方法的原理是利用水果表面对不同波长范围光的吸收反射来分析其颜色特征，进而确定水果的品质等级。但这种方法主要是根据水果的表面色泽情况来进行判断，没有考虑到其它特征，自然也不能确定水果的内部实际情况。

从上面所述的方法可见，传统分类方法的依据仅仅是水果的外观，对水果内部损伤和内部质量指标无法进行识别，实际上并没有达到分级的实质要求——分级应该首先从水果内部品质来考虑。为此，国内外的研究者针对水果的各项生理特性进行了各个方面的研究，以期作为更快，更准确有效的品质分级参考。

要检测水果的内部品质，最直接有效的是化学分析法。但这种方法在批量检测的时候缺陷非常明显，它除了效率低和过程复杂外，还属于有损检测，每次检测必须永久性的破坏一定量的水果，使得成本较高。所以只能将化学分析法作为其它检测手段的辅助参考，而不可能作为商业上的广泛应用。而无损检测技术可在不损坏原材料状态的前提下，对不可见的内部质量进行检查。因此，以无损检测技术为代表的水果检测分级方法逐渐成为研究的主流。目前国内外对水果内部品质进行的检测方法主要从下列几个方面来着手：利用水果的电磁学，力学，光学，放射学和声学等方面进行果品品质估计。

电磁学方面主要有核磁共振检测技术和介电特性检测技术。这两类技术都是利用水果在电磁场中电磁特性的变化来估计水果的品质，因此检测得到的是水果的综合品质。这两类技术在数据的获取和处理上都比较容易，需要的设备也比较简单，前景非常广阔，但目前还没有达到大量应用的阶段；

基于力学特性的检测技术主要是根据动力学的原理进行农产品的硬度检测。其中主要是采用振动频率分析法和冲击力检测法对果品坚实度进行检测，从而判断果实的成熟度。这类技术在判断水果的适宜采收期、按成熟度对水果进行分级、贮藏时比较有利，同时还可以根据对果品内部的检测估计其保鲜期和存放期。但是由于果品品质与物理参数之间的关系相对复杂，要实际达到大规模应用的阶段还需要较长的时间；

在光学方面，有分光分析技术和计算机视觉技术等等。分光分析法是利用光线照射水果后，通过检测光被水果组织吸收、散射、反射和透射等情况下的特性来估计品质的一种方法，这其中主要包括紫外光谱法、可见光谱法和近红外光谱检验分析法，用于果品内外品质的检测。例如近红外光谱方法就是利用水果中糖和酸的官能基吸收近红外线

中分子固有振荡频率一致的特定光线，而其它官能基不能吸收的原理，对水果的糖度和酸度进行有效检测。这方面的研究尽管起步较晚，但是在农产品的品质检测以及分级领域的研究已取得很大进展，有很好的应用开发前景；计算机视觉法侧重于利用其它成像系统代替人类的视觉器官进行判断，并由计算机代替大脑完成数据的处理。该技术在20世纪 70 年代开始出现，并随着计算机速度的提高、硬件成本的下降、以及图像处理技术的专业化，在农产品的品质检测与分级领域应用得越来越广泛。该技术在水果外部品质检测方面的优点是信息量大、功能多，可以完成多种品质指标的检测并可以量化指标。从目前国内外的研究现状看，它在技术上已比较成熟，但检测的精度和速度尚未达到实际应用的标准；

软 X 射线检测技术是基于传统的放射检测技术，它利用了 X 射线良好的穿透力。由于物质密度影响 X 射线穿透量的多少，所以通过对穿透量的分析，可以对果品的内部品质进行估计。因为水果属于食品，检测时的 X 射线强度不能太高，一般称为软 X 射线。近年来这种检测法已成功应用到水果品质的自动化无损检测和分级领域；

利用水果的声学特性进行内部品质的无损检测，是目前国内外都研究得比较多的一种有效方法。主要原理是利用水果在声波作用下的反射特性、散射特性、透射特性、吸收特性、衰减系数和传播速度及其本身的声阻抗及固有频率等参数判断水果的内部品质，并据此进行分级。大多数的热带和亚热带水果其成熟情况都与表面的颜色密切相关，但成熟度的具体值仍取决于果肉组织坚实程度和糖酸度等几项指标。由于水果品种的多样化，对于不同种类的水果也需要使用不同的检测技术才有效。

超声波无损检测技术是在声学特性研究基础上发展起来的，它是利用超声波在固体介质中的衰减特性来检测水果内部品质的新技术，可以有效提高水果的分类质量。超声波与普通声波相比，方向性更好，穿透能力更强。由于超声波的高频特性，其频率和能量在不同介质中的变化非常明显，易于测定，便于与被测物的各种物理参数建立一一对应的关系，从而可以通过测定超声波的衰减来确定所需的各种参数。

综上所述，基于声学的无损检测技术与其它类型的无损检测技术相比，有适应性更强、投资相对较低、操作更简便等优势，可以很好的适用于在线检测，在农产品检测领域的应用前景良好。

1.3 国内外在声学无损检测方面的研究现状

利用水果的声学特性进行水果的无损检测研究从 70 年代就已开始，随着超声波技

术在工业领域的大量应用，这方面的研究越来越多，目前已是国内外研究得最多的有效无损检测方法之一。国外的一些检测项目已正式商业化并投入了实际应用。国内在水果声学特性方面的检测研究从90年代才开始，目前还处于起步阶段。

1.3.1 国外在声学无损检测方面的研究现状

国外从70年代初就开始研究水果的声学特性，而利用超声波进行果品检测的应用研究从80年代开始，并在这一领域做出了大量贡献，主要成果如下：

美国仪表实验室的Finney等（1967年）[2]研究发现香蕉的成熟程度与杨氏模量有很好的相关性，实验以香蕉圆柱形样本做纵向振荡，并以振荡振幅对振荡频率图中的最大振幅为谐振频率，求得杨氏系数。并指出香蕉成熟过程中，淀粉水解为糖使果肉渗透压升高，这与果肉成熟软化过程中细胞间的充实压力变小有关。强迫振动方式曾用于求苹果全果及取样样本的杨氏系数、切变模数、黏性阻尼、内部摩擦等与自然频率的关系，通过研究杨氏模量及其共振频率的关系推出了香蕉硬度随成熟度的变化关系方程。

美国的Abbott等(1968）[3]利用两种音波能量法检测蔬果内部组织结构，并分析了苹果杨氏系数与谐振频率的关系。音波在物体内传播速度视物体杨氏系数、密度及泊松比而定，利用音波在物体内的传递速度，可测出苹果的上述三项机械性质。

日本国家食品研究所的Yamamoto和H.M.Iwamoto等（1980年，1981年）[4,5]研究了通过检测分析声波脉冲的自然频率来评估苹果和西瓜内部品质的方法。实验利用机械式冲击法打击苹果来产生可听到的共振频率，并与Magness-Taylor品种苹果的坚实度比较，发现共振频率、质量或密度等各种组合可以来预估Magness-Taylor品种的坚实度。

苏黎世大学的Salveit等（1984年）[6,7]对苹果、西红柿和西瓜等几种水果进行了研究，发现其声波共振频率均随着贮藏时间的延长而减小，同时也与自身的硬度有着明显的相关性。根据这一点，作者建立了检测西红柿成熟度及苹果硬度的方法。

美国的Sarkar和Wolfe（1983年）[8]在使用超声波对各类水果进行了多次检测后发现，超声波的频率是影响其在果肉中穿透力的重要因素，同时经过试验确定了对于柑橘、西红柿等水果，最佳的超声波频率范围为10～15KHz。作者进一步建立了检测柑橘属水果的果皮光滑度、西红柿表皮裂纹等情况的方法。

Y.Cheng等（1994年）[9]研制成功了检测马铃薯空心情况的超声波无损检测系统。在该系统中，超声波探头直接接触马铃薯表皮，在遇到不连续的组织时，一部分波被反射，另一部分继续传播，穿过马铃薯的超声波被对侧的接收探头接收。通过对信号数据

的分析，可以求出超声波穿过马铃薯所需的时间，以及信号的强弱。因为马铃薯如果具有空心部分，就会使得超声波多次折射和反射，最后接收到的信号比通过实心部分的信号弱，波动时间也更长一些。另外，穿透之后信号的幅值、功率谱密度以及谱动量也要小得多。根据这些差异，就可以很好的区分空心与实心的马铃薯。

R.E.Lacey 等（1994 年）[10]进行了食用油质量的超声波检测，并发现超声波传播速度随油的黏度增大而增加并存在一定的关系。超声波的传播速度将随着油的粘度增大而增加，并存在二次多项式关系。因此，可以利用超声波在油中的传播速度确定油的粘度，继而判断油的质量，决定是否应丢弃。

M.Nielsen 等（1998 年）[11]采用低频超声波检测了失水和贮藏对胡萝卜质构参数的影响。实验在不同温度的环境下对成熟的胡萝卜进行了检查。通过显微镜分析其密度及干物质，比较了结果之间的关系以及各项参数。实验发现了最初时间内声速减少和杨氏模量呈正相关关系。在继续加热的情况下，内部组织中空气和水成分的变化导致了声速的增加和衰减的下降

Muhammad Imran 和 Junichi Sugiyama 等（2004 年）[12]介绍了使用便携式声波检测仪检测 Keitt 品种芒果的一种快速方法。由于 Keitt 种芒果外形和内部组织均比一般芒果要对称，因此采取了在外部四周定点检测果肉坚固程度，然后对检测结果进行快速线性分析的方法。但这种方法对形状不规则芒果的预估效果误差比较大。

Morinobu MATSUO 等（2005 年）[13]利用超声波穿透法对新鲜谷物进行了检测，研究发现，如果超声波的中心频率在 20 kHz 左右时，谷物在一定时间域内的平均声压与其含水率有着良好的线性关系（其相关系数大于 0.95）。根据谷物的密度不同，接收的超声波也有较大的差异。结果证明在被测物厚度和密度相同的情况下，只有矩形波和脉冲波能穿透被测物。这也证明了对于不同的被测对象，需要采用不同的检测方式才能得到预期的结果。

美国农业工程学会的 A.Mizrach 等（1997 年，1999 年-2002 年）[14-18]对 Tommy Atkins 品种的芒果进行了超声波检测，并参考其糖酸度进行静态分析，建立了联系超声波衰减和硬度物理指数值的校准方程。此方程可用于批量检测芒果糖酸度和监视其坚实度的软化进程，并通过校正标准差显示出其预测灵敏度偏移范围在 12%-18%之间，即检测的有效度为 82%-88%。之后对鳄梨和芒果内部组织的方法进行了研究，评估了与鳄梨、芒果成熟度，坚实度和其它品质相关特性有定量关系的传输参数。对超声波衰减系数，果肉坚实与衰减的比例系数和衰减温度比例系数建立了数学模型，推导出了衰减量与鳄梨油量和酸度的关系式。在对 Jonagold 和 Cox 品种的苹果进行了随机采样并进行超声波检测后，通过绘制能量变化曲线，发现基于能量变化的统计图对 Jonagold 品种 3 种粉化程度

（未熟，成熟和过熟）的区分非常明显，但对于 Cox 品种几乎看不出区别，这说明对不同的水果品种可能需要采用不同的检测方法。

1.3.2 国内在声学无损检测方面的研究现状

相对于国外研究而言，国内在水果声学特性方面进行的相关检测研究起步较晚，且主要致力于水果声学振动特性方向的分析检测。近年来在借鉴国外成功经验的基础上，也取得了众多成果：

江苏理工大学的葛苇，徐凌等（1998 年）[19]利用声振动理论和空心球理论对西瓜的成熟度进行了无损检测研究，方法是将西瓜作为空心球看待，将其按经纬线划分为 864 个单元，应用动力有限方法，导出西瓜动弹性模量估算式，并根据检测到的共振频率及半功率带宽求得弹性模量，然后根据用空心球理论模型计算得出成熟瓜和未成熟瓜的各阶振型。对比发现，计算得到的成熟瓜振型除了椭球式、呼吸式以外，还存在独特的多边形振型；而按未熟瓜则不存在这类多边形振型，这从结构理论上提供了一个重要的判断西瓜成熟与否的标志，即以第三阶振型是否为三角形振型作为确定西瓜成熟度的标志。

中国农业大学的王书茂，焦群英等（1999 年）[20]对西瓜的力学和物理特性进行了分析研究，并提出了利用西瓜的振动频率响应来判断其成熟度的检验方法。由于西瓜质量对振动频率有很大影响，实验中考虑到这一因素建立了西瓜的成熟度指数，同时初步确定了“京欣”品种的成熟度指数范围。研究说明冲击振动法对于西瓜来说是一种比较有效的成熟度无损检测方法，这对于在线测量应用和分机处理都有着较完备的基础意义。

浙江大学的应义斌，吕飞玲等（2003 年）[21]对利用西瓜的声学特性进行品质无损检测的方法作了研究，建立了基于声学特性的农产品检测平台。研究中还开发了与平台配套的数据采集和分析处理软件。该平台与配套软件的可靠性通过西瓜等试验材料得到了验证。此外在西瓜声学特性品质测试中，为了克服外界噪声的影响，提高测试的精度，设计了自适应滤波器。

浙江大学的饶秀勤，应义斌等（2004 年）[22]研制了利用声学特性测试水果内部品质的试验台。声波信号由传声器接收后转换为电信号 ,经信号调理电路放大和滤波后由数据采集卡转换为数字信号存贮于计算机 ,采样频率为 10 k Hz。测试了 14 只麒麟西瓜 ,测试数据采用 Matlab 软件分析。西瓜内部空心存在与否对声波传播速度的测量结

果有重要影响。研究发现测量的结果受西瓜生长状态的影响较大。

华中农业大学的王树才，任亦林等（2004 年）[23]利用微型话筒和声卡采集蛋在敲击时的声脉冲信号，将采集到的声脉冲信号送计算机处理和分析。研究显示不同类型的蛋敲击声音信号在衰竭时间、最小共振峰频率和四点最大频率差等参数上存在模糊边界差异。利用最大隶属度原则进行模糊识别，破损蛋的识别准确率可达 95%。

西北农业大学的李小昱和孙骊等（1992 年）[24]通过分析苹果固有频率的分布规律和特点，得到了苹果晶质和成熟情况。并结合了正弦激振法和捶打激振法进行了对比。

南京农业大学食品科技学院的屠康（2005 年）[25]等采用了冲击共振法对砀山酥梨、水晶梨和雪梨进行了检测，通过对比其采后硬度参数的变化，结合可溶性固形物等实验的结果，发现冲击共振所测的硬度系数可以较好的反映梨的硬度，比起插入型破坏性实验测得的硬度能得到更好的正相关性，无损硬度系数与梨的可溶性固形物也有较好的负相关性，证实了通过冲击振动法可以测定梨的固有频率，进而用硬度系数来判断梨的成熟度。

江苏大学的张索非，陈斌等（2007 年）[26]提出一种以检测苹果受敲击后所发出声音的频谱特性为手段对果品品质进行评价和分类的无损检测方法,并用该方法对苹果进行了声学测定试验。研究发现随着存放时间的延长苹果受敲击发声的频谱峰值逐渐减小,而质量越小的苹果受敲击后发出声音的基频越低。实验结果证明了基于声学特性对苹果进行无损检测的有效性和可行性，对几种常见水果的声学特性比较试验说明了该方法作为水果品质检测的适用性。

从目前可检索到的学术信息来看，目前国内在水果无损检测的领域中，主要集中于从声学振动方面对其进行研究，对于超声波技术在水果检测方面的系统研究非常少。因此本项目在国内水果无损检测领域中有较大的创新意义。

1.4 本文的研究目的和内容

本文的研究目的是利用超声波技术对芒果进行检测，通过检测得到的衰减系数和坚实度、糖酸度等数据，构造出描述衰减系数与芒果成熟度之间关系的方程。从而可以通过这些方程，预估芒果的成熟度和储藏期限。

本文所完成的主要工作有如下几点：

1) 选择超声波发生器和换能器；

2) 设计滤波器电路并选择滤波器参数；
3) 设定信号采集装置，搭建超声波检测平台；
4) 选取芒果品种，决定检测方式；
5) 测量芒果的各项物理特性；
6) 送农学院植物生理实验室进行芒果坚实度，可溶性糖含量和酸度的检测；
7) 处理检测数据，建立回归模型，构造用于描述芒果各参数间联系的回归方程。

1.5 本章小结

本章介绍了国内水果分级技术的现状和发展无损检测技术的意义。水果的内在品质是分级的重要依据，而我国在这方面的研究还处于起步阶段，而且大部分的研究是针对某一种产品的某一特性进行检测，在对于多种生理特性进行综合检测方面研究的较少。实际上，结合多种检测手段对水果品质进行综合检测才能达到准确估计各项指标的目的。第二部分通过对国内外在声学方面进行水果无损检测的研究现状介绍，说明了本项目在国内研究的创新意义。本章的最后列出了本文的研究目的和所完成的主要工作。

第二章 超声波检测技术与检测平台的搭建

无损检测技术的基础是物质的各种物理性质或它们的组合以及与物质相互作用的物理现象。迄今为止，包括在工业领域获得实际应用的和在实验室阶段获得成功的无损检测方法已达五、六十种以上。其中超声波检测技术以其灵敏度高，速度快，成本低，对人体无害的优点，成为了目前工业领域应用最为广泛的常规无损检测技术之一。

2.1 超声波检测原理及其技术优势

人耳能听到的声波频率范围为 20Hz-20KHz。当声波的频率低于 20Hz 时就叫做次声波，高于 20KHz 则称为超声波。超声波的本质与声波相同，是由机械振动源在弹性介质中激发的一种机械振动波，其实质是以应力波的形式传递振动能量，其必要条件是要有振动源和能传递机械振动的弹性介质（实际上包括了几乎所有的气体、液体和固体），它能透入物体内部并可以在物体中传播。利用超声波在物体中的多种传播特性，例如反射与折射、衍射与散射、衰减、谐振以及声速等的变化，可以测知许多物体的尺寸、表面与内部缺陷、组织变化等等，因此是应用最广泛的一种重要的无损检测技术--超声检测技术。例如用于医疗上的超声诊断、海洋学中的声纳、鱼群探测、海底形貌探测、海洋测深、地质构造探测、工业材料及制品上的缺陷探测、硬度测量、测厚、显微组织评价、混凝土构件检测、陶瓷土坯的湿度测定、气体介质特性分析、密度测定等领域。

超声波具有如下特点：

1) 超声波声束能集中在特定的方向上，在介质中沿直线传播，具有良好的指向性。

2) 超声波在介质中传播过程中，会发生衰减和散射。

3) 超声波在异种介质的界面上将产生反射、折射和波型转换。利用这些特性，可以获得从缺陷界面反射回来的反射波，从而达到探测缺陷的目的。

4) 超声波的能量比声波大得多。

5) 超声波在固体中的传输损失很小，探测深度大，但在异质界面上会发生反射、折射等现象，尤其是不能通过气体固体界面。

从超声波的上述特性可知，如果金属中有气孔、裂纹、分层等缺陷（缺陷中有气体）或夹杂，超声波传播到金属与缺陷的界面处时，就会全部或部分反射。反射回来的超声

波被探头接收，通过仪器内部的电路处理，在仪器的输出设备上就会显示处不同高度和有一定间距的波形，可以根据波形的变化特征判断缺陷在工件重的深度、位置和形状。

超声波在弹性介质中传播时，视介质支点的振动型式与超声波传播方向的关系，可以把超声波分为以下几种波型：

1) 纵波（又称作压缩波、疏密波）。纵波的特点是传声介质的质点振动方向与超声波的传播方向相同；

2) 横波（也称为切变波或剪切波）。横波的特点是传声介质的质点振动方向与超声波的传播方向垂直，并且视质点振动平面与超声波传播方向的关系又分为垂直偏振横波（工业超声检测中最常应用的横波）和水平偏振横波（也称为乐甫波，实际上就是地震波的震动模式）；

3) 表面波。在工业超声检测中应用的表面波主要是指超声波沿介质表面传递，而传声介质的质点沿椭圆形轨迹振动的是瑞利波，瑞利波在介质上的有效透入深度只有一个波长的范围，因此只能用于检查介质表面的缺陷，不能像纵波与横波那样深入介质内部传播，从而可以检查介质内部的缺陷。此外，水平偏振横波也是一种沿表面层传播的表面波，是地震波的振动模式，不过目前在工业超声检测中尚未获得实际应用；

4) 兰姆波。是一种由纵波与横波叠加合成，以特定频率被封闭在特定有限空间时产生的制导波。在工业超声检测中，主要利用兰姆波来检测厚度与波长相当的薄金属板材，因此也称为板波。兰姆波在薄板中传递时，薄板上下表面层质点沿椭圆形轨迹振动，而薄板中层的质点将以纵波分量或横波分量形式振动，从而构成全板振动，这是兰姆波检测的显著特征。根据薄板中层的质点是以纵波分量或横波分量形式振动，可以分为对称型非对称型两种模式的兰姆波。在细棒和薄壁管中也能激发出兰姆波，此时称为扭曲波、膨胀波等。

5) 除了上述四种主要的应用波型外，现在已经发展应用的还有头波和爬波，特别是后者能够以纵波的速度在介质表面下传递，适合用于检测表面特别粗糙，或者表面存在不锈钢堆焊层等情况下的近表层缺陷检测[27]。

超声波在介质中的传播速度（与介质、波型等有关）、振动频率（单位时间内完成全振动的次数，以每秒一次为 1Hz）和超声波的波长（超声波完成一次全振动时所传递的距离）三者的关系与声波是一样的：传播速度是振动频率与超声波波长的乘积。不同的超声波波型在不同的介质中具有不同的传播速度。

超声波具有波长短、沿直线传播（在许多场合可应用几何声学关系进行分析研究）、指向性好，能在固体中传播，并能进行波型转换等特点，其传播特性包括反射与折射、衍射与散射、衰减、谐振、声速等多种变化，因此其适用范围非常广泛，包括了金属、

非金属，锻件、铸件、焊接件、型材、胶接结构与复合材料、紧固件等等。超声波检测的优点是穿透力强、设备轻便、检测成本低、检测效率高，能即时知道检测结果（实时检测），能实现自动化检测和实现永久性记录，在缺陷检测中对危害性较大的裂纹类缺陷特别敏感等等。因此在工业检测领域发展迅速，应用也十分广泛。

超声波检测目前也存在一些缺点：通常需要耦合介质使声能透入被检物，需要有参考评定标准，对于小而薄（即声程过短）或者形状较复杂（即声程不易确定）的工件检测还存在一定的困难[28]。

超声波检测技术因为属于无损检测，又具有对人体无害和检测效率高的优点，可以很好的应用于农产品的无损检测。根据超声波在不同介质中衰减不同的特性，可以通过检测超声波在不同成熟度水果中的衰减情况，建立特定品种水果的成熟度与超声波衰减之间的关系，从而可以在检测衰减值后估计水果的成熟度，甚至水果的糖内容物和酸度。但由于农产品属于食品，因此对超声波的频率和检测精度都有更严格的要求：超声波的能量必须较低，不会引起被检物的物理性质和化学特性的变化；检测精度必须达到 3 位数以上，才能获得较可靠的数据。

在农产品无损检测领域，超声波无损检测技术与其它无损检测技术相比具有一些特殊的优势。例如，近红外光谱吸收法和声振法等由于检测的元素（近红外光子和声波等）能量很低且易受外界干扰，因此需要很严格的工作环境；X 射线法由于需要实现无损检测，采用的软 X 射线强度很低，对采集装置的灵敏度有较高的要求，同时 X 射线对人体也有一定影响；介电特性检测法和核磁共振检测法的前景很好，但目前研究的检测系统还没达到实用阶段。相比这些无损检测技术，超声波检测技术成熟，可以从工业检测领域汲取经验，同时适应性很强，检测灵敏度高，对人体无害，成本低廉，容易实现自动化操作，因此是目前农产品无损检测技术发展的重点领域。

2.2 超声波平台的构成

在本项目中，所采用的超声波检测平台包括超声波发生器，超声波换能器，滤波器，和数据采集模块四个部分。检测平台的组成及检测流程示意图如下：

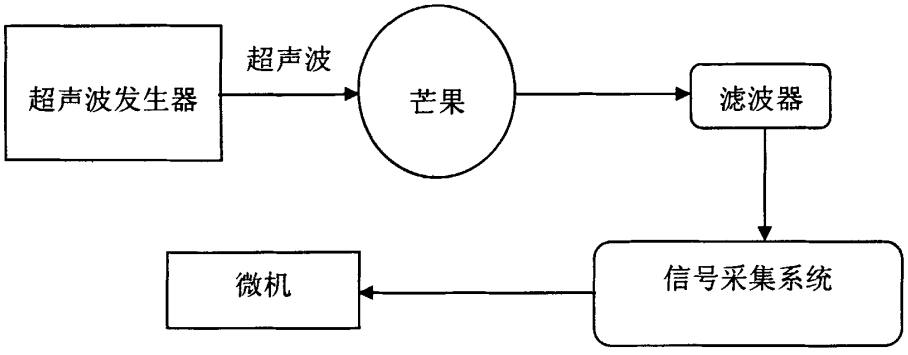


图 2-1 超声波检测平台示意图

Fig 2-1 the flow chart of ultrasonic detecting plateform

2.3 超声波发生器和换能器的选择

超声波发生器又称为超声波功率源或超声波电源。它的作用是将市电（220V，50Hz）转换成与超声波换能器相匹配的高频交流电信号。其电路形式一般采用线性放大电路和开关电源电路，对于大功率的超声波电源，从转换效率方面考虑一般采用开关电源的电路形式；而线性电源的优点是可以不严格要求电路匹配，允许工作频率连续快速变化，因此也有特定的应用范围。目前超声波电源主要分为自激式和它激式电源。

比较完善的超声波发生器应有反馈环节，主要提供两个方面的反馈信号：

第一个是提供输出功率信号，当发生器的电压发生变化时，发生器的输出功率也会发生变化，这时反映在换能器上就是机械振动忽大忽小，导致发出的超声波能量不稳定。因此需要稳定输出功率，通过功率反馈信号相应调整功率放大器，使得功率放大稳定。

第二个是提供频率跟踪信号。当换能器工作在谐振频率点时其效率最高，工作最稳定，而换能器的谐振频率点会由于装配原因和工作老化后改变，当然这种改变的频率只是漂移，变化不是很大，频率跟踪信号可以控制信号发生器，使信号发生器的频率在一定范围内跟踪换能器的谐振频率点。让发生器工作在最佳状态。

超声波换能器是将电能转换成机械能（超声波）的器件。超声波的发生有多种方法，如机械方法、热学方法、电动方法、磁致伸缩方法或压电方法等，这些方法按种类大体分为两类：一种是机械型，主要是利用高速气流或液流冲击金属簧片或空腔而产生超声

波，把机械能转变为超声能。如旋笛，就是使高压气体在一个高速旋转的圆盘上的气孔喷出而产生超声波的；另一种是机电型，主要是利用机电换能器把高频电能转换成超声能而产生超声波。常用的有：压电式，即利用石英、钛酸钡等材料的压电效应制成压电式换能器；磁致伸缩式，即利用镍及镍合金（如镍铁合金、镍铜合金）等铁磁材料的磁致伸缩效应制成磁致伸缩式换能器。目前在工业领域最成熟可靠的主要是以压电效应实现电能与声能相互转换的器件，称为压电换能器。

压电式超声波换能器实际上是利用压电晶体的谐振来工作的。换能器内部有两个压电晶片和一个共振板，当它的两极外加脉冲信号，其频率等于压电晶片的固有振荡频率时，压电晶片将会发生共振，并带动共振板振动，就会产生超声波。反之，如果两电极间未外加电压，当共振板接收到超声波时，将压迫压电晶片作振动，将机械能转换为电信号，这时它就成为超声波接收器了。因此，利用压电晶体制成超声波换能器（探头），对其输入高频电脉冲，则探头就会以相同频率产生超声波发射到被检物体中去；在接收超声波时，探头就会产生相同频率的高频电信号以便采集数据。

压电换能器由中央压电陶瓷元件，前后金属盖板，预应力螺杆，电极片以及绝缘管组成。这种夹心换能器（螺栓紧固型换能器）在负荷变化时产生稳定的超声波，是获得功率超声波驱动源的最基本最主要的方法。根据不同的设计，它们的形式主要有柱型（前后金属盖板直径相同），倒喇叭型（前盖板直径通过弧型过度缩小），柱型钢后盖，柱型中间有节等。其中广泛应用的是倒喇叭型的探头，这种探头的主要特点是：效率高，机械品质因素高，在谐振频率点工作可获得极高的电声转换效率；振幅大，经电脑优化设计的结构，振速比高，前盖板振幅大；功率大，在预应力螺杆的作用下，压电陶瓷的能量得到最大程度的发挥；耐热性好，谐振阻抗小、发热量小、使用温度范围广，可靠性高，寿命较长。

同样，用于接收超声波的超声波传感器内部结构与换能器是相同的，小功率超声探头多作探测作用。根据其结构的不同，可分直探头（纵波）、斜探头（横波）、表面波探头（表面波）、兰姆波探头（兰姆波）、双探头（一个探头反射、一个探头接收）等。

超声波传感器的核心是其外壳中的一块压电晶片。构成晶片的材料可以有许多种。晶片的大小，如直径和厚度也各不相同，因此每个探头的性能是不同的。超声波传感器主要包括下列三项性能指标：

1) 工作频率。工作频率就是压电晶片的共振频率。当加到它两端的交流电压的频率和晶片的共振频率相等时，输出的能量最大，灵敏度也最高。
2) 工作温度。由于压电材料的居里点一般比较高，特别是诊断用超声波探头使用功率较小，所以工作温度比较低，可以长时间地工作而不产生失效。医疗用的超声探头

的温度比较高，需要单独的制冷设备。

3) 灵敏度。主要取决于制作工艺。灵敏度高，发射功率就可降低，分辨率高，检测距离远。

在比较了各种超声波发生器和探头的技术参数并考虑了本项目的需求后，采用了杭州成功超声设备有限公司定制生产的超声波发生器和超声波探头，技术参数如下：

超声波驱动电源为定制模拟式电箱，可调四级电压，功率模块驱动输出，并采用AC220V 电源直接整流供电；

超声波换能器包含 4 个压电晶片，晶片直径 30mm，电阻 15Ω，电容 3700—4300pF，输出功率为 50W，发生超声波频率为 25kHz；

超声波传感器只包含 1 个压电晶片，其它参数与换能器相同。

2.4 滤波器模块的设计

由于进行芒果检测时存在不可避免的噪声，可能影响到超声波检测的精度。因此需要加入滤波器模块，以便获得理想的超声波检测结果。

本项目中在进行超声波检测时，出现的噪声主要包括电噪声和材料噪声。电噪声源于仪器电路中的随机扰动，如电路中元器件的电子热运动及半导体器件中载流子的不规则运动等。电噪声是一种连续性随机变量，即在某一时刻可能出现各种可能数值。材料噪声一般是指由材料晶界散射引起的微结构噪声，它的幅度和到达时间是随机的。这两种噪声都可能对超声波信号造成干扰。

超声波属于高频信号，本应采用无源滤波器，但无源滤波器对通带内的信号有能量损耗，负载效应比较明显，因此不适于本项目的检测目标。本文的滤波器模块采用了美国 MAXIM 公司生产的 MAX262 滤波器芯片，这种滤波器属于双二阶通用开关电容有源滤波器，具有与微处理器连接的标准接口，可以实现带通，低通，高通，陷波以及全通滤波而不需要外接其它任何器件，而且滤波的特性参数如中心频率 f_0、品质因数 Q 和工作方式等也可以通过编程进行设置。同时它还可实现 fclock/f_0,工作模式以及 Q 值的精确控制，其中心频率 f_0 可达到 75kHz。

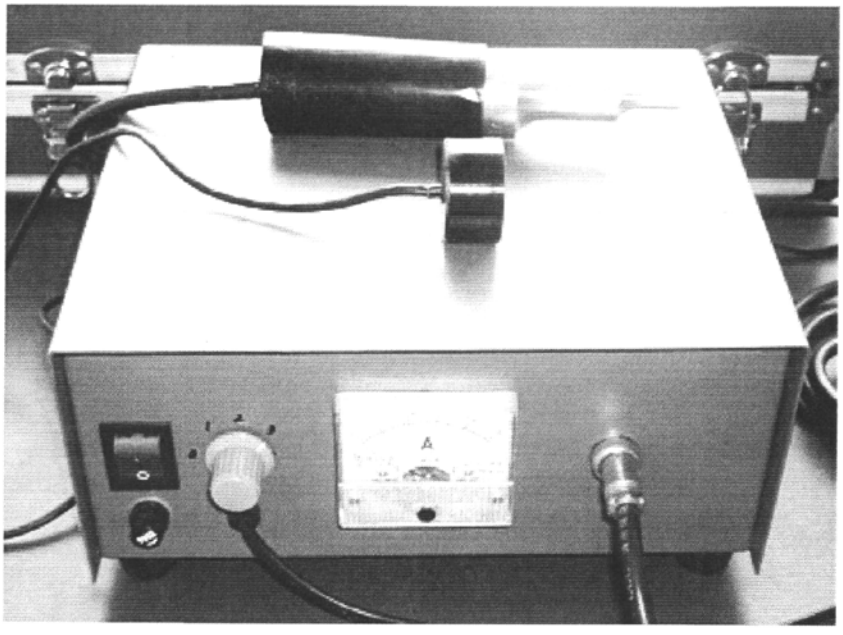


图 2-2 本文采用的超声波电源，换能器和传感器

Fig 2-2 the Ultrasonic power source and the probes used in this experiment

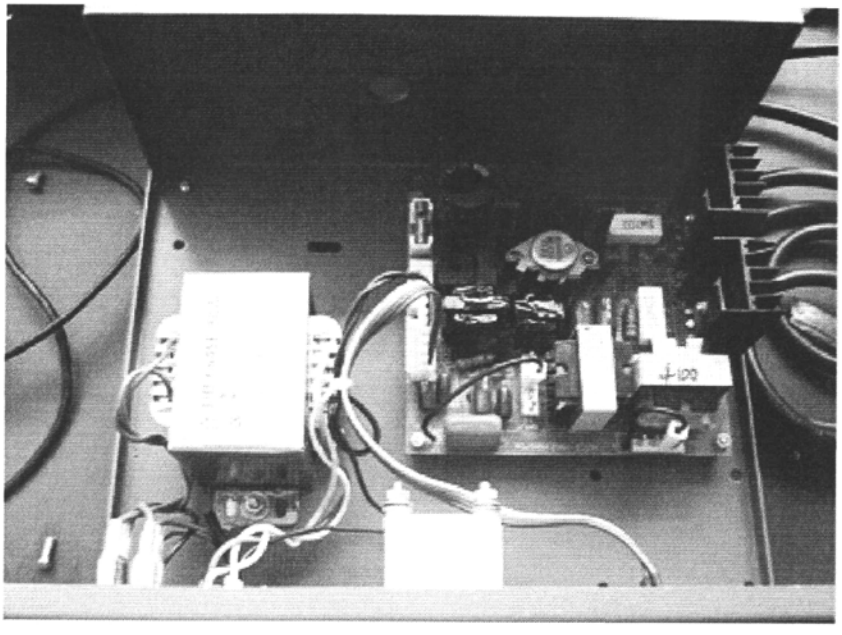


图 2-3 超声波电源的内部电路

Fig 2-3 the internal circuit of the ultrasonic power source

2.4.1 Max262 芯片介绍

MAX262 主要由放大器、积分器、电容切换网络（SCN）和工作模式选择器组成。积分器、电容切换网络（SCN）和工作模式选择器分别由编程数据 M0～M1、F0～F5 和 Q0～Q6 控制。MAX262 内部有 2 个二级滤波器。滤波器 A 和 B 可以单独使用，也可级联成四阶滤波器使用。

MAX262 可工作在四种模式下：

模式 1：可以构成巴特沃思、切贝雪夫、贝塞尔滤波器，实现全极点低通和带通滤波器。由于相对零点位置固定，只能构成二阶带阻滤波器，此模式与模式 4 支持高时钟频率。

模式 2：用来构成全极点低通和带通滤波器，和模式 1 相比，优点在于能够获得更高的 Q 值和低噪声输出。

模式 3：只有此模式能构成高通滤波器，其最大输入时钟频率小于模式 1 中采用的频率。

模式 4：只有此模式提供全通输出，也可用来提供全极点低通和带通滤波器，但此模式具有几种模式中最大的抽样误差。

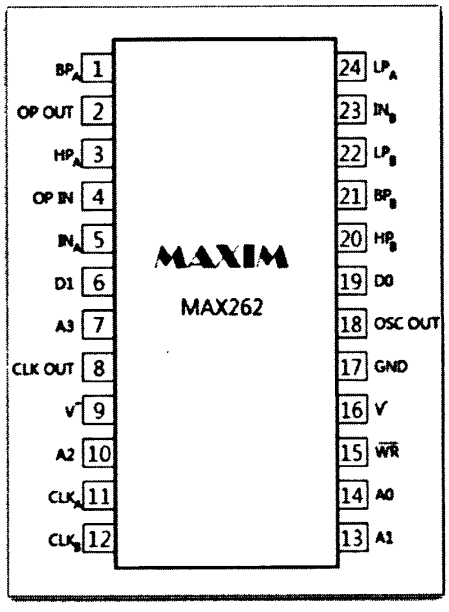


图 2-4 MAX262 芯片的管脚图

Fig 2-4 the pin configuration of MAX262

MAX262 芯片中 fclock/f_0 的最大范围 28.88～139.8，Q 值为 0.707～90.5。时钟可以外接或用晶振形成振荡电路提供。其内部采样频率是输入时钟(CLK_A 或 CLK_B)的一半，原因是在内部进行了二分频。

MAX262 芯片的工作频率为 1Hz～140KHz。当时钟频率为 4MHz，工作模式选择为模式 3 时，芯片可以对 140KHz 的输入信号进行滤波处理。其它工作模式的最高工作频率为 100KHz。滤波器 A 和 B 可以采用内部时钟，也可以采用外部时钟。外部时钟分别从芯片的引脚 CLK_A、CLK_B 引入，对外部时钟无占空比要求。

MAX262 芯片有 3 个编程参数：中心频率 f_0、品质因数 Q 值和工作模式。中心频率由编程数据 F0～F5 控制，共有 64 个不同的二进制数据，每个数据对应 1 个时钟频率 fclk 与中心频率 f_0 的比值 fclk/f_0；Q 值由编程数据 Q0～Q6 控制，共 128 个不同的二进制数据，每个数据对应 1 个 Q 值，最小的 Q 值为 0.5，最大的 Q 值为 64；工作模式由编程数据 M0～M1 控制，分别对应工作模式 1、2、3 和 4。

2.4.2 滤波器的参数选择

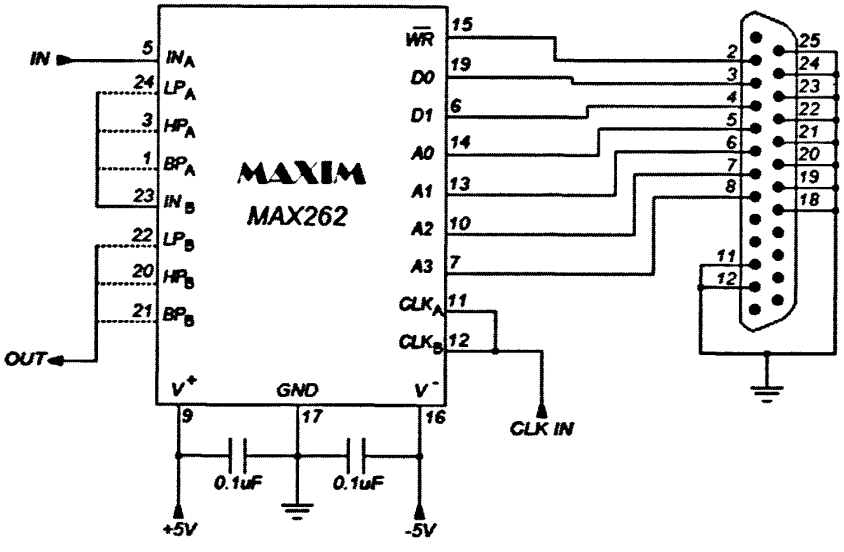


图 2-5 本文采用的 MAX262 滤波器电路

Fig 2-5 the MAX262 filter circuit used in this experiment

本项目中采用滤波器的目的是过滤超声波以外的杂波信号，因此选择了 Maxim 公

司提供的通用电路，该电路通过打印机端口，利用微机进行程序控制，以便于快速设计滤波器参数，如下图 3-5 所示。每个滤波器的工作模式、中心频率、Q 值所需的编程数据，均需要分 8 次写入 MAX262 的内部寄存器才能完成设置。

完成硬件连接后，根据超声波发生器参数可以确定滤波器中心频率 f0 为 25kHz，查阅滤波器技术手册可确定 Q 值为 64，进而确定输入时钟，工作模式，fclk/f0 和 Q 的控制字。此时可以对滤波器进行编程。控制程序运行时会询问滤波方式和每个组件的 f0 和 Q 值。这些系数会以 ASCII 字符的形式加载到滤波器，使其按要求进行工作。写入滤波器电路控制字的程序流程图如图 2-8 所示。

使用滤波器后，波形改善比较明显。图 2-6 和图 2-7 分别为水中空载时未加滤波器和滤波后的波形。可以看出，超声波在芒果中衰减后的波形属于三角波。未加滤波器时，超声波波形受到杂波干扰，振幅并不稳定，且有时会出现毛刺。滤波后，基本去除了杂波信号，振幅稳定在一定范围内，而波形曲线也比较平滑。

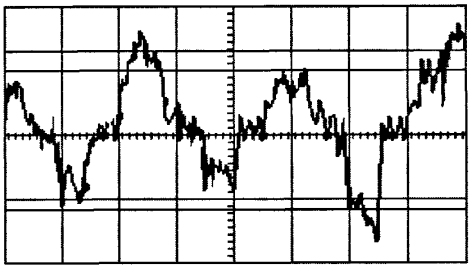
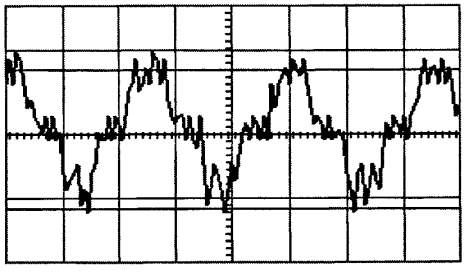


图 2-6 水中空载时未加滤波器的波形图

Fig 3-7 the waveform when idle loaded in water without filter



2-7 水中空载时加滤波器后的波形

Fig 3-8 the waveform when idle loaded in water with filter

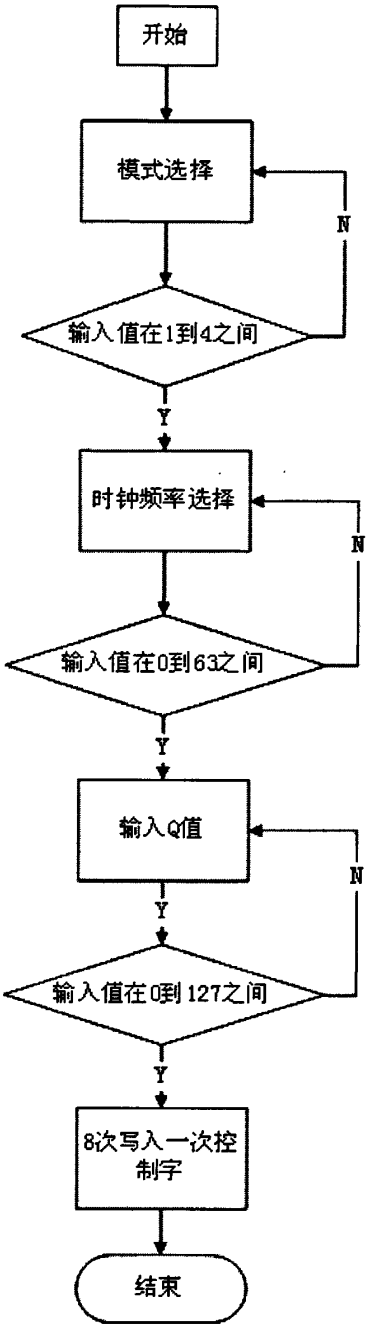


图 2-8 滤波器电路程序的流程图

Fig 2-8 the flow chart of program used in the filter circuit

2.5 数据采集系统的选择

本项目使用了 ADEK labACT-3 型实验开发系统进行超声波数据的采集和处理。该系统包含的虚拟示波器模块提供了两个通道模拟信号检测孔，通过 RS232 接口连接并配合上位机软件的示波器窗口，可以实现波形的显示、存储，可以有效的观察实验中各点信号的波形。

虚拟示波器每个输入通道都配有量程开关，可适用于输入信号输入电压较大的情况。同时示波器提供了时域显示、相平面显示、频率特性显示和计算机控制显示四种显示方式。本项目的检测使用时域显示方式进行。

在启动示波器后开始进行芒果的超声波检测，待波形稳定 5 秒后停止运行，即可进行波形分析和相关测量。该虚拟示波器提供了测量信号幅值和周期的标尺工具，可以方便地测定超声波信号的数据。

2.6 本章小结

本章第一部分介绍了超声波无损检测技术的基本原理，利用超声波在不同介质界面接合处的各项参数变化明显的特点，即可测知对象的内部是否存在缺陷，以及缺陷的具体位置。对于不同的被测对象，需要使用的超声波类型也有不同。由于超声波检测技术的成熟，因此在农产品检测领域也有很广阔的前景。它不仅可以检测农产品内部的缺陷，也可以根据检测的衰减值估计水果的成熟度。

第二部分介绍了超声波检测平台的搭建，平台根据实现的功能可分为发生超声波、滤波、和接收信号三个部分。考虑到本项目是农产品检测，因此没有选取规格过高的超声波电源和换能器，而是使用了 25kHz 左右的超声波发生装置，这样既确保了芒果的无损检测，也能在水中得到较理想的波形；滤波器模块中，采用了 Maxim 公司的 MAX262 滤波器芯片，滤波电路通过打印口与微机连接，可以灵活的设定中心频率和品质因数，对超声波进行的带通滤波效果也比较好，有效去除了实验环境中的杂波。数据采集系统选用了 ADEK labACT-3 型实验开发系统，该系统自带的虚拟示波器可以直接在微机上显示，大大方便了数据的测量和后期处理。

第三章 芒果的检测方法

3.1 芒果的基本介绍

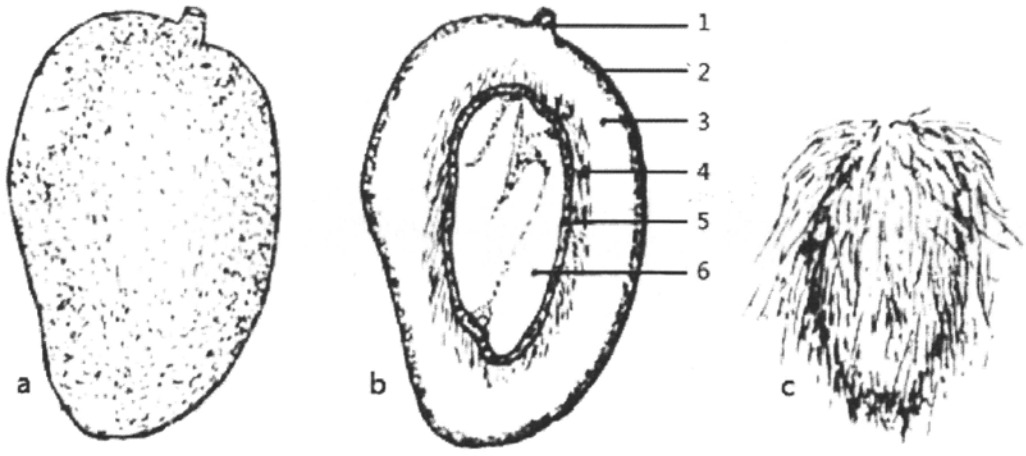


图 3-1 芒果的结构图

a-果实外形　b-果实纵剖面　c-种子

1-果柄 2-外果皮 3-果肉 4-纤维 5-种壳 6-种仁

Fig 3-1 the structural diagram of mango

a-the shape　b-the sheer　c-the seed

1-the stem 2-the peel 3-the pulp 4-the fiber 5-the seed-case 6-the kernel

芒果是一种偏肩肉质核果，其果实由果柄、厚似皮革的外果皮、果肉、纤维、扁形坚硬的种壳以及壳内种仁组成，构造如图 3-1 所示。

不同品种的芒果果实，在果实尺寸、形状、色泽、风味、种仁尺寸、纤维含量及营养成分等方面的差异很大，其单果质量从数克到数千克不等，果实形状也有 9 种之多。由苗木栽培和种植的芒果树，由于果实的皮和核中含有松脂，纤维含量高；而采用无性繁殖技术的改良品种，其果实含纤维量少。芒果种壳的位置一般与外果皮的侧缘线平齐。

芒果的物理性质包括果色、果重、质地、果肉含量、果皮及果核含量等。不同品种，或同一品种不同生长条件及不同成熟度的芒果，其物理性质均有差异。总的来说，果色

越艳丽，果重越大，质地细而硬或松而多汁，果肉含量越高，而果皮和果核含量越少。芒果果肉含量的范围是53%～83%，平均68%；果皮含量的范围是6%～33%，平均20%；果核含量的范围是9%～23%，平均16%，一般果肉含量在65%以上。

芒果的生化指标包括糖类、有机酸类、氨基酸类、食用纤维素类、类酯物、色素类、挥发性物质、酶类共8项。

芒果生长发育期的长短取决于生长的环境条件及芒果品种。通常果实的发育可分为4个阶段：幼果期，最大生长期，成熟期（呼吸跃变和完熟）和衰老期。

在生长期，芒果的皮、肉、核的比例是在不断变化的。芒果皮总的变化趋势是从厚到薄，即在幼果期和最大生长期，果皮所占比例为15.8%～28.1%，而到完熟期会降为11.2%～13.5%；果肉和核仁的比例变化趋势则均由小变大，即在幼果期和最大生长期果肉、核仁的比例分别为67.5%～80.6%和3.6%～12.5%，当果实完全成熟时，它们的比例分别为70%～82%和4%～12.4%[29]。虽然在生长期中果肉、核仁的比例会时增时减，但最终比值是略有增长，果核壳则是在生长期间形成、变硬、水分减少而得到完善的。

芒果果实在不同生长发育阶段其营养成分组成有所不同。总糖和蛋白质的含量为前期高，中期低，后期有所回升。总酸和维生素C的含量随着果龄的增长而减少。淀粉的含量为前期低，中期高，后期有所下降。胡萝卜素的含量是前期高，中期低，后期高。根据1997年Amos Mizrach的研究[10]表明，芒果果肉组织的软化程度，酸的减少和糖类内容物的增加，可溶固形体和总固形体的含量以及胡萝卜素的增加与超声波的衰减程度有直接的联系，同时也是判断芒果成熟度的重要指标。配合其糖内容物和酸度两项指标的测定，可以为每一特定品种的芒果建立一套可有效用于实际生产的分级方法。

3.2 本项目的芒果来源

由于本地芒果成熟期较晚，所以本项目在实验期间订购了当时水果市场最多的海南椰香芒（俗称鸡蛋芒）作为检测原料。这批芒果数量为100，从海南同一果园采摘，大小基本一致，果面基本无损伤和病虫害情况，成熟度也接近同一阶段。采摘后约72个小时左右到达实验室，从第96小时开始，每隔24小时进行一次检测。

芒果颜色根据1971年Hulme提出的5级评估法[30]鉴定：0级——墨绿，1级——淡绿，2级——绿黄（淡绿的果面上出现黄色区域），3级——绿黄各半，4级——黄绿（黄色的果面上残留有绿色区域），5级——黄色。开始检测时，芒果的颜色均在1级左右，个别芒果颜色接近2级，没有其它阶段的颜色。

3.3 芒果的检测方式

由于在初步检测时环境温度较高，超声波在空气中的能量衰减很大，且受杂波信号干扰也比较严重，如图 4-2 所示，无法获得理想的通过芒果后的波形数据。

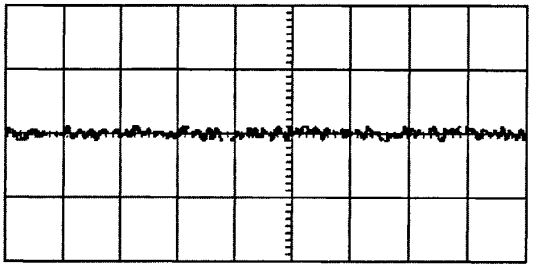


图 3-2 空气中通过芒果后的波形

Fig 3-2 the waveform when gothrough the mango in air

为了获得理想的波形，超声波的检测放在水中进行。检测时，在 43x36cm 的水槽中，超声波探头垂直于水面向下，以 12.4N 左右的压力（与探头在水中的重力相等，不额外施力）紧贴芒果果皮，接收探头则位于水槽底部向上紧贴芒果的另一侧。

当开启超声波发生器的开关时，探头发出频率 25kHz 的超声波，穿过芒果的果肉和果核，被接收探头所采集，经过滤波模块，再进入信号采集系统，最后显示在微机的虚拟示波器软件上，得到超声波波形数据，可以据此计算出超声波的衰减系数。

检测时的周围环境如下：室温 25～27° C，湿度 85%左右，在受光的实验台上放置，芒果间彼此的间隔约为 20cm，储藏的时间从 96 到 480 小时。

储藏的 100 个芒果每隔 24 小时随机抽取 5 个芒果进行一次超声波的检测，每个芒果检测 2 次取其平均值，并计算每次采样的标准差（SD）。测完后送广西大学农学院植物科学系的植物生理实验室进行坚实度，可溶性糖内容物和酸度的检测。可溶性糖使用蒽酮比色法进行测定，酸度使用酚酞试剂滴定法进行测量，二者都需要捣碎芒果取滤液进行测量。

芒果的总测量时间为 480 小时，这个品种的芒果成熟期为 15 天，根据芒果的外观变化情况，将 96 小时到 360 小时的时间段和 360 小时到 480 小时的时间段分为成熟阶段和腐坏阶段分别进行分析。

3.4 芒果在储藏期内的变化情况

芒果属于呼吸跃变型果实，采后迅速后熟，6～8 天后便出现分泌催熟激素乙烯的高峰，大量芒果放在一起会彼此影响以加速成熟的进程，但芒果之间互相催熟的过程比较缓慢。通常采摘芒果进行零售时都会使用其他农产品辅助加速催熟，如将芒果放在大米中或熟苹果旁边等，按这种方法处理的芒果一般在 7 天之内就能达到完熟状态。而本项目采用的芒果放置方法得到的成熟时间应与芒果自然成熟的时间接近。

3.4.1 芒果外观的变化情况

如图 3-3 和 3-4 所示，芒果在储藏期间的表皮外观有明显的变化，采摘后 96 小时的芒果尚未成熟，大部分为青色，有少量略深的黄色斑，随着时间的变化，芒果缓慢成熟。

芒果后熟期间，最突出的变化是颜色由绿变黄，果肉组织变软。King 认为，果肉组织变软是果胶甲酯酶(PE)和多聚半乳糖醛酸酶(PG)催化活性引起果胶质水解和果肉组织及细胞结构发生变化的结果。催化纤维素降解的纤维素酶也有一定作用[31]。在此期间芒果的呼吸速率呈上升趋势（呼吸与果皮颜色由绿变黄的进程一致[32]）到 160 小时左右，芒果果皮变黄的速度达到最大值，之后变黄的趋势减缓。由于实验条件限制，不能精确测出芒果的颜色指数，主要是根据肉眼观察。但可根据可溶性糖内容物和酸度的值进行推算。在此阶段检测到的超声波的能量随着芒果的成熟逐渐减小，即衰减逐渐增大。

储藏期到 280 小时左右，在库的 65 个芒果中只有个别芒果还残留有少数绿斑（即颜色指数 4 级），大多数芒果都已完全变成黄色（即颜色指数 5 级）到 360 小时左右，50 个芒果全部达到完熟状态。

如图 4-5 和 4-6 所示，在 360 小时以后，虽然芒果的可溶性糖内容物仍在持续增加，酸度也在持续下降，但其表皮已从果顶开始出现黑色斑点，表明芒果已经开始腐坏，品质已经开始下降。

到 420 小时左右，虽然芒果表皮的黑斑在持续扩大，但果肉中可溶性糖内容物含量的增加和酸度的减小趋势已经减缓，少数芒果的酸度甚至已开始回升。而芒果的坚实度持续减小，与黑斑的扩大速度基本保持一致。此阶段超声波的能量比较稳定，波动幅度很小。

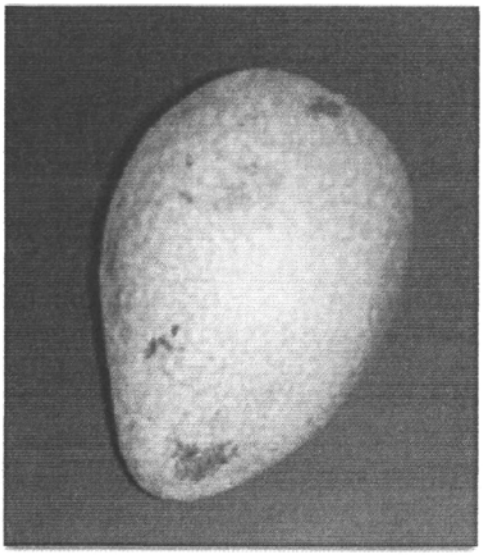


图 3-3 采摘后 96 小时未成熟时的外观

Fig 3-3 appearance of mango when 96 hours post-harvest

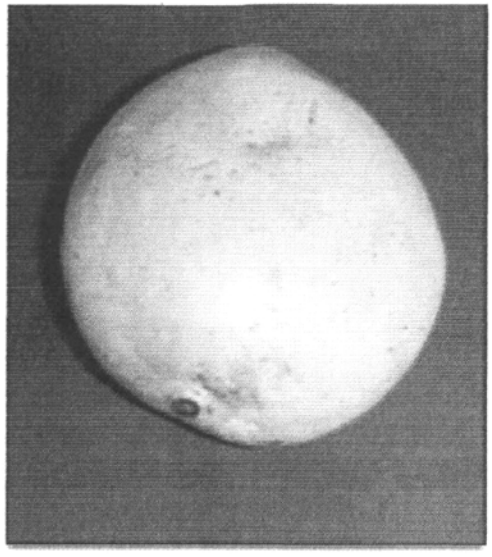


图 3-4 采摘后 360 小时完全成熟时的外观

Fig 3-4 appearance of mango when 360 hours post-harvest

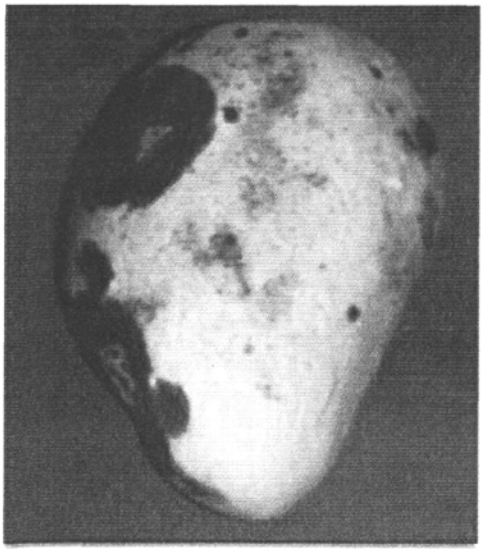


图 3-5 采摘后 380 小时初步腐坏时的外观

Fig 3-5 appearance of mango when 380 hours post-harvest

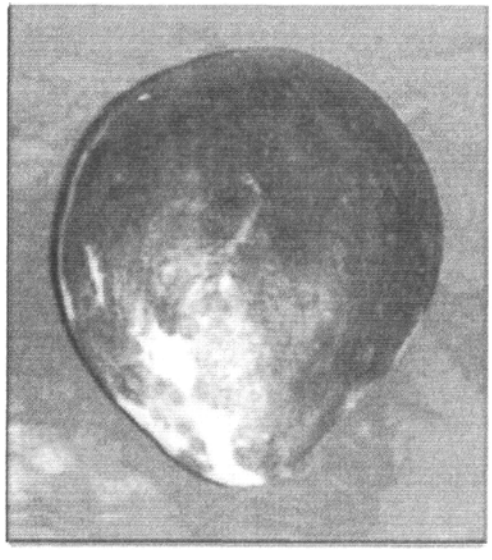


图 3-6 采摘后 480 小时完全腐坏时的外观

Fig 3-6 appearance of mango when 480 hours post-harvest

芒果存放时间到480小时左右时，黑斑基本上已扩大到整个芒果表面，芒果的坚实度也达到最低。此时由于表皮过软，使用仪器已经很难进行准确的检测。但此时芒果内部由于果肉的大部分已腐坏变质，糖内容物和酸度比上一阶段有更大的反弹，使得超声波的衰减突然变小。

3.4.2 芒果内部组织的变化情况

在芒果的表皮颜色变化的同时，芒果的果肉组织的颜色变化并不如果皮明显，但通过对比可看出腐坏的果肉颜色较深。果肉的组织状态变化很大，未熟的芒果果肉质地紧密，切开时剖面平滑整齐且无杂质，果核与果肉之间分界明显；而腐坏的果肉结构疏松，剖面粘稠不平，果核基本上与果肉混合在一起。此时也可以直接根据气味来判断果肉是否已腐坏。未熟的芒果气味芳香但较淡，完全成熟时芳香浓烈，而腐坏时会混有较明显的异味。

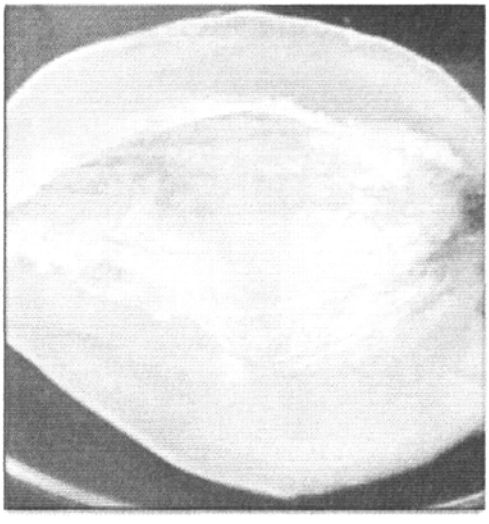


图 3-7 采摘后96小时的剖面图

Fig 3-7 the section plan of mango when 96 hours post-harvest

图 3-8 采摘后480小时的剖面图

Fig 3-8 the section plan of mango when 480 hours post-harvest

如图3-7和3-8所示，采摘后96小时和采摘后480小时的内部组织形状变化明显，但颜色并没有特别大的变化。由于腐坏时的芒果果肉组织疏松，因此超声波通过时不会

有太大的能量损失，其衰减反而会减小。

3.5 本章小结

本章介绍了芒果的生理特性以及本课题采用的芒果品种，由于选用的超声波能量较低，在空气中检测时的波形很不理想，因此采用了水中检测的方式，从而也避免了一些空气中的杂波干扰。芒果在存放期间外观变化很明显，从青绿色逐渐转变为黄色，在腐坏时会从果顶开始出现黑斑，进而蔓延到整个果皮；而芒果内部组织在存放期间颜色虽然变化很小，果肉的疏密程度却变化明显，正是由于果肉的疏密变化才导致超声波衰减的变化。

第四章 检测数据的处理

4.1 芒果的超声波检测结果

芒果在储藏期内检测到的波形如图 4-2～4-17 所示，虚线为超声波的振幅范围。由于超声波的声强与振幅成正比关系，在成熟阶段，超声波的能量逐渐减小，即平均衰减值随着时间逐渐增加；而在腐坏阶段，超声波的能量保持了一段时间的稳定，但在最后芒果全面腐坏时，超声波的衰减突然性的减小。这是芒果腐坏后内部组织的大幅变化导致的。从第四章可以看到，芒果开始腐坏时，其果肉组织会变得疏松，从而会使超声波的衰减变小，而果肉腐坏的变化位置与表皮的黑斑变化位置相对应。在腐坏初期，芒果的黑斑从两端开始，逐渐向中间蔓延，而超声波检测时的探头始终与芒果侧平面中心相垂直，所以在测量的末期超声波的衰减会突然性的减小。

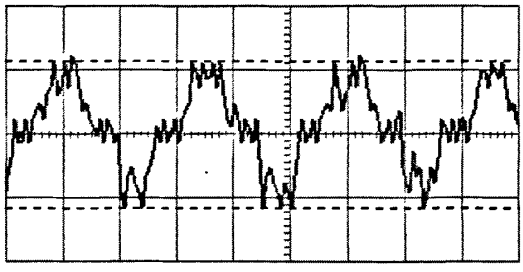


图 4-1 水中空载时的波形

Fig 4-1 the waveform when idle loaded in water

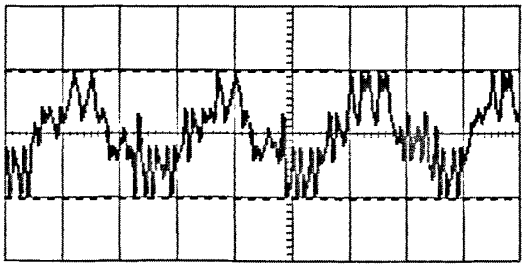


图 4-2 采摘后 96 小时的波形图

Fig 4-2 the waveform when 96 hours post-harvest

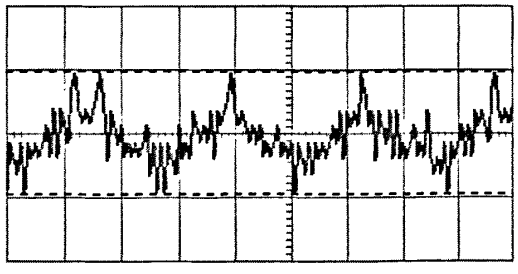


图 4-3 采摘后 120 小时的波形

Fig 4-3 the waveform when 120 hours post-harvest

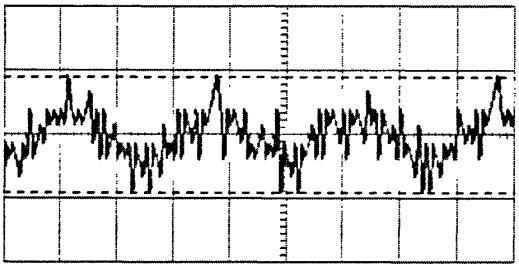


图 4-4 采摘后 144 小时的波形

Fig 4-4 the waveform when 96 hours post-harvest

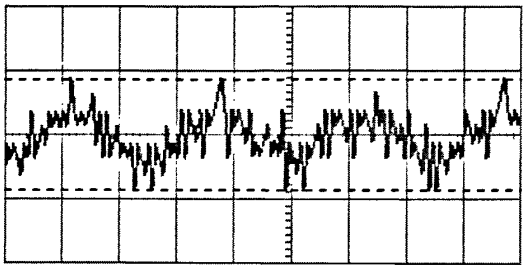


图 4-5 采摘后 168 小时的波形

Fig 4-5 the waveform when 168 hours post-harvest

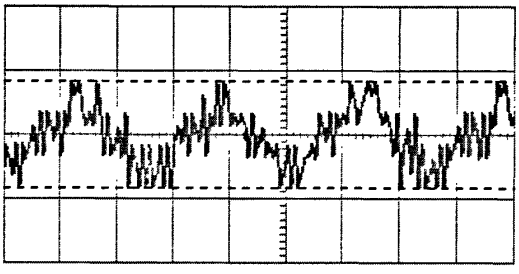


图 4-6 采摘后 216 小时的波形

Fig 4-6 the waveform when 216 hours post-harvest

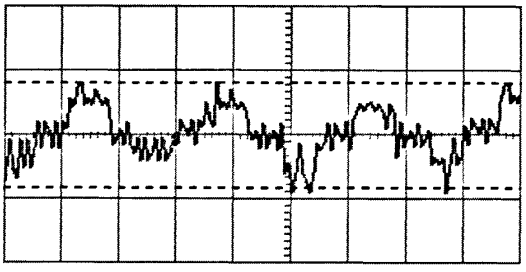


图 4-7 采摘后 240 小时的波形

Fig 4-7 the waveform when 240 hours post-harvest

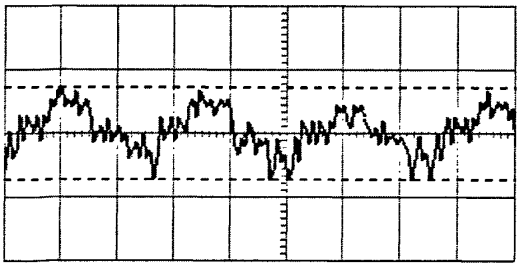


图 4-8 采摘后 264 小时的波形

Fig 4-8 the waveform when 264 hours post-harvest

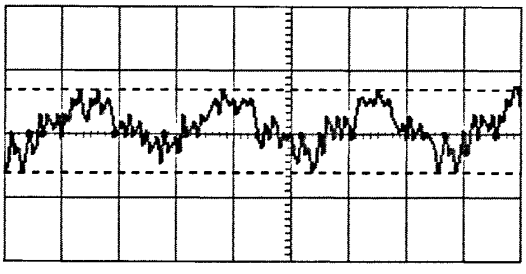


图 4-9 采摘后 288 小时的波形

Fig 4-9 the waveform when 288 hours post-harvest

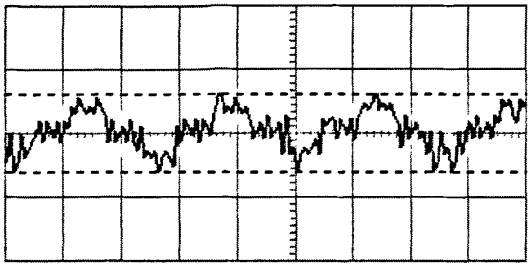


图 4-10 采摘后 312 小时的波形

Fig 4-10 the waveform when 312 hours post-harvest

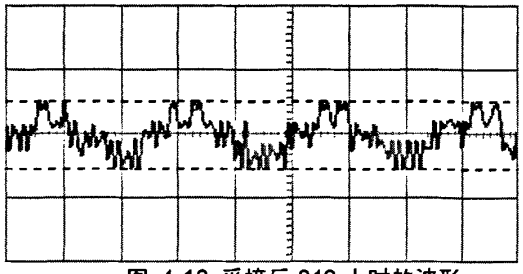


图 4-11 采摘后 336 小时的波形

Fig 4-11 the waveform when 336 hours post-harvest

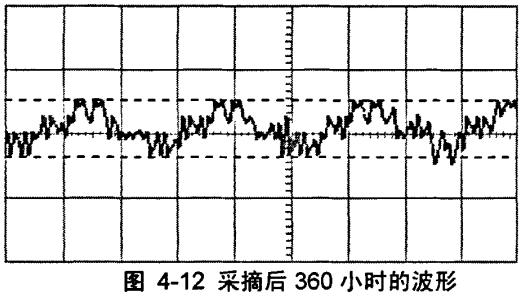


图 4-12 采摘后 360 小时的波形

Fig 4-12 the waveform when 360 hours post-harvest

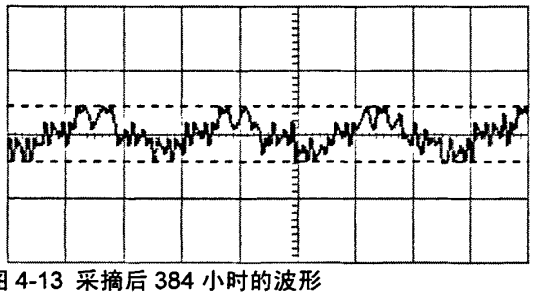


图 4-13 采摘后 384 小时的波形

Fig 5-13 the waveform when 384 hours post-harvest

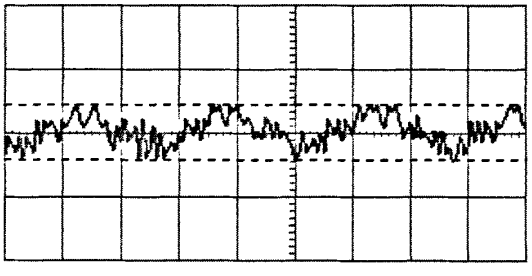


图 4-14 采摘后 408 小时的波形

Fig 4-14 the waveform when 408 hours post-harvest

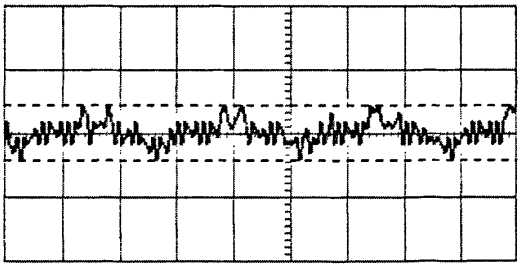


图 4-15 采摘后 432 小时的波形

Fig 4-15 the waveform when 432 hours post-harvest

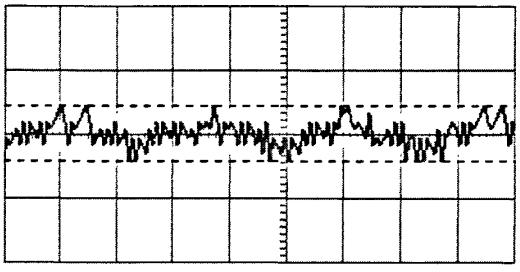


图 4-16 采摘后 456 小时的波形

Fig 4-16 the waveform when 456 hours post-harvest

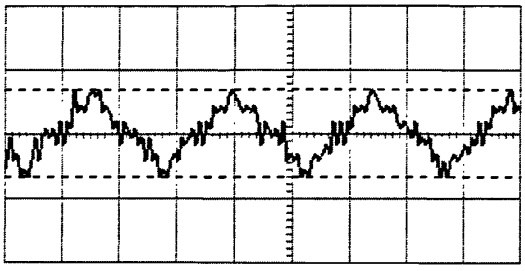


图 4-17 采摘后 480 小时的波形

Fig 4-17 the waveform when 480 hours post-harvest

4.2 芒果物理属性和衰减特性的检测数据

表 4-1 芒果在成熟阶段（96 小时到 360 小时）的超声波衰减，糖容量，酸度等参数的变化

Tab 4-1 table of the parameters of mango including the attenuation, TSS and acidity in stage of maturity

收获后时间 T（h）	96	120	144	168	216	240	264	288	312	336	360
重量（N）	38.73	38.64	38.64	38.61	38.22	38.19	38.10	37.92	37.35	37.34	37.34
标准差	2.16	1.73	1.98	1.68	1.39	1.35	1.21	3.12	0.76	2.33	1.77
衰减系数 A（dB/mm）	0.881	1.062	1.154	1.181	1.284	1.350	1.408	1.447	1.526	1.638	1.752
标准差	0.14	0.121	0.061	0.056	0.036	0.034	0.066	0.083	0.090	0.090	0.082
坚实度 FR（N）	110.7	105.6	95.4	83.2	77.5	71.2	67.1	62.3	58.9	56.3	52.7
标准差	8.8	10.4	15.9	10.2	12.3	14.6	12.2	7.3	10.7	9.9	11.2
可溶性糖含量 S（%TSS）	5.588	5.797	6.623	6.957	7.535	8.262	9.048	9.884	10.841	12.415	13.578
标准差	0.068	0.087	0.086	0.314	0.321	0.219	0.362	0.302	0.362	0.576	0.645
酸度 H(%)	3.975	3.376	3.030	2.798	2.275	1.974	1.711	1.249	0.963	0.802	0.672
标准差	0.063	0.138	0.087	0.096	0.175	0.078	0.072	0.055	0.045	0.105	0.071

超声波的衰减公式为：

$$A_x = A_0 e^{-\alpha l} \tag{1}$$

式中，A_x为检测芒果时的振幅；A_0为不检测芒果，水中空载时的振幅；e为自然对数；α为衰减系数，不同介质的衰减系数是不同的；l为测距（声程）。

而衰减系数α由3个主要部分组成，即：

$$\alpha = af + bf^2 + cf^4 \tag{2}$$

式中，f为超声频率(MHz)；

a代表介质弹性磨擦吸收系数，与频率的1次方成正比；

b代表介质粘滞性与热传导的吸收系数，与频率的2次方成正比；

c代表介质内散射体的瑞利散射吸收系数，与频率的4次方成正比。

由于衰减系数与实际的声强衰减成正比，因此只需计算衰减系数即可反映超声波的衰减变化情况。在实际数据处理中，只需用（1）式进行计算即可。从表格4-1可看出，超声波的衰减从96小时的0.88db/mm增长到成熟时的1.752db/mm；而从表格4-2可看出，在腐坏阶段，衰减仍然增长了一段时间，而由于芒果果肉全面腐坏时组织成分的突变，使得超声波的衰减突然性的减小。这一衰减根据芒果个体的不同有较大的不同，且受到外部环境各种因素的影响。

表4-2 芒果在腐坏阶段（360小时到480小时）的超声波衰减，糖内容物，酸度等参数的变化

Tab 4-2 table of the parameters of mango such as attenuation, TSS and acidity in stage of rot

收获后时间T（h）	384	408	432	456	480
重量（N）	37.21	37.13	37.09	36.51	36.02
标准差	1.53	2.01	2.25	1.96	0.93
衰减系数A（dB/mm）	1.984	2.125	2.233	2.236	1.882
标准差	0.147	0.131	0.187	0.165	0.382
坚实度FR（N）	49.0	45.1	41.2	34.3	21.83
标准差	13.1	10.3	8.6	11.7	10.3
可溶性糖含量S（%TSS）	14.757	15.127	14.243	12.715	10.805
标准差	0.839	0.997	1.522	2.012	1.24
酸度H（%）	0.609	0.612	0.623	0.727	0.869
标准差	0.054	0.048	0.049	0.027	0.086

4.3 芒果各项参数的变化曲线和趋势图

根据表格 4-1 和 4-2 的数据绘制超声波衰减、芒果坚实度、糖内容物和酸度随时间变化的曲线，并作出趋势线。其中每个点显示的是 5 个芒果的平均值。垂直线和水平线为置信区间。

根据数据分布的描点，可以利用最小二乘法进行线性回归处理，并有经验拟合方程。但此方程的计算比较复杂，本文采用了 Matlab 的 polyfit 函数进行线性回归处理。例如，如果有检测数据如下：x|a b c d e f；y|u v w x y z

则直接在 Matlab 中输入：

x=[a,b,c,d,e,f]

y=[u,v,w,x,y,z]

polyfit(x,y,1)　//其中 1 为回归多项式的次数，在这里要求的是多项式 y=ax+b

即可得出 a 和 b 的值。相应提高多项式的阶次，即可得到很好的相关性。相关系数越接近 1，则多项式越能表示数据的变化曲线。也就是说，多项式用于预测时就越精确。

4.3.1 超声波衰减随时间变化的曲线

从图 4-18 可看出，在成熟阶段超声波衰减的程度与储藏时间存在一一对应的关系，因此我们可以通过测量衰减值来预测芒果的储藏期限。

在成熟阶段，芒果的衰减值较为集中，置信区间很小，而在腐坏阶段，由于芒果个体腐坏的进程不同，使得衰减值较为分散；同时由于条件限制，腐坏阶段的测量数据较少，不足以用于详细分析芒果的腐坏情况，且对于本项目的目标而言，分析芒果腐坏的情况意义不大。因此数据处理仅针对成熟阶段，腐坏阶段主要是作为定性参考。

图 4-19 显示了芒果在 25～27° C 室温下成熟阶段的总体衰减变化。通过设定多项式的不同阶数和形式，得到的对比如下，其中 A 为衰减系数（db/mm），T 为时间（h）：

指数形式：$A = 0.7914e^{0.0022T}; R^2 = 0.9543$

对数形式：$A = 0.5668\ln T - 1.705; R^2 = 0.9491$

幂形式：$A = 0.1191T^{0.4472}; R^2 = 0.9676$

线性形式：$A = 0.0028T + 0.683; R^2 = 0.9712$

二次形式：$A = 8\times10^{-7}T^2 + 0.0025T + 0.7176; R^2 = 0.9716$

可以看出，二次多项式形式在计算的方便和相关系数方面都有较大的优势。

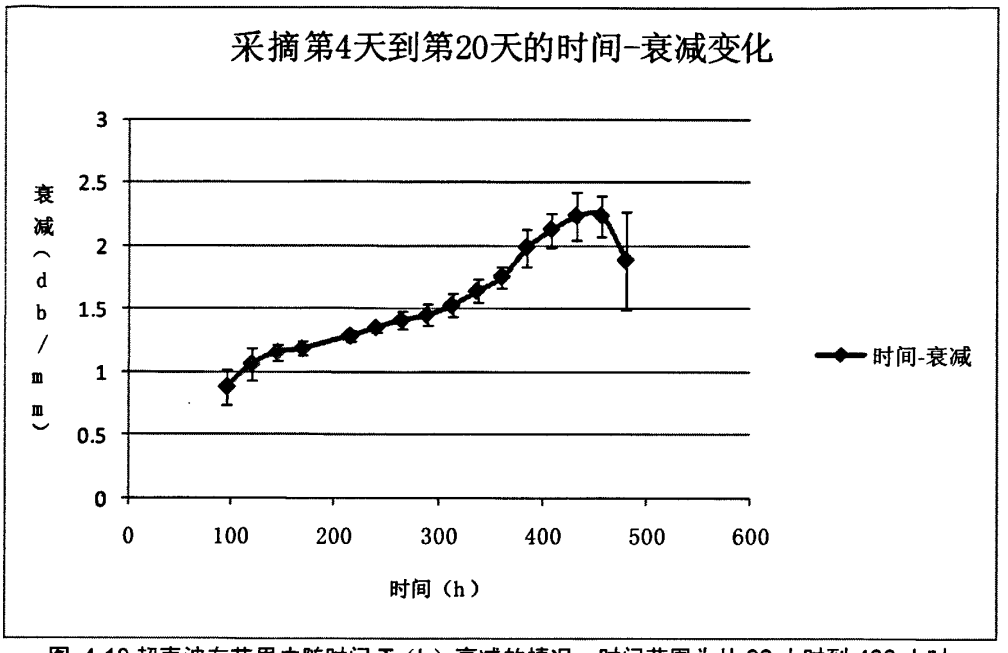


图 4-18 超声波在芒果中随时间 T（h）衰减的情况，时间范围为从 96 小时到 480 小时

Fig 4-18 the average ultrasonic attenuation A (in dB/mm) in mango; time is 96 to 480 hours

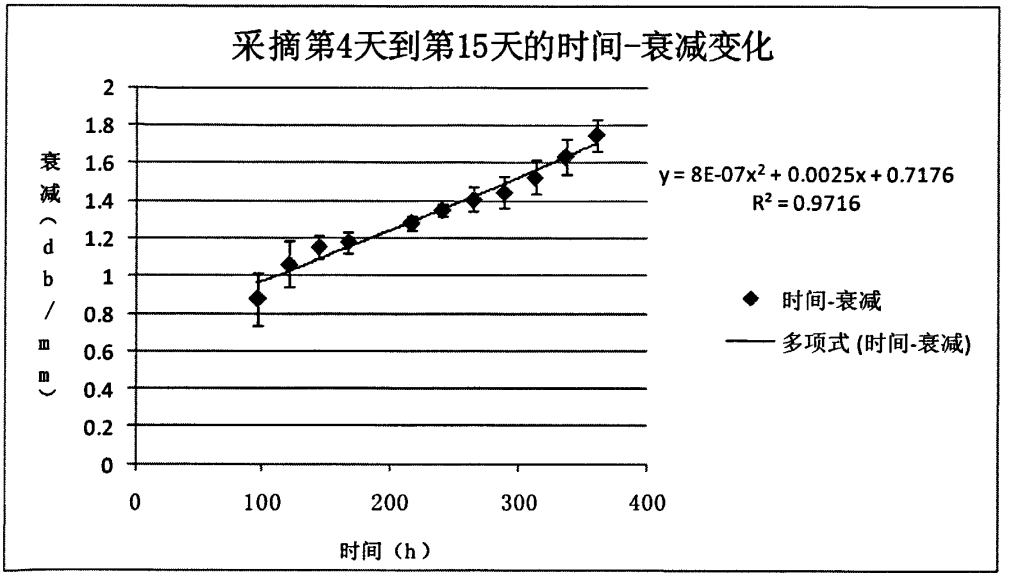


图 4-19 超声波在芒果中随时间 T（h）衰减的情况，时间范围为从 96 小时到 360 小时

Fig 4-19 the average ultrasonic attenuation A (in dB/mm) in mango; time is 96 to 360 hours

通过对比，选用二次多项式的形式来描述时间与衰减的关系。即：

$$A = 8\times10^{-7}T^2 + 0.0025T + 0.7176 \quad (3)$$

由(3)式可计算得出时间 T 与衰减系数 A 的关系式：

$$T = 625\sqrt{3.95 + 3.2A} - 1562.5 \quad (4)$$

通过(4)式，我们可以根据测量超声波衰减得出衰减系数 A，进而预测芒果存放的时间 T。

4.3.2 超声波衰减和芒果坚实度之间的关系曲线

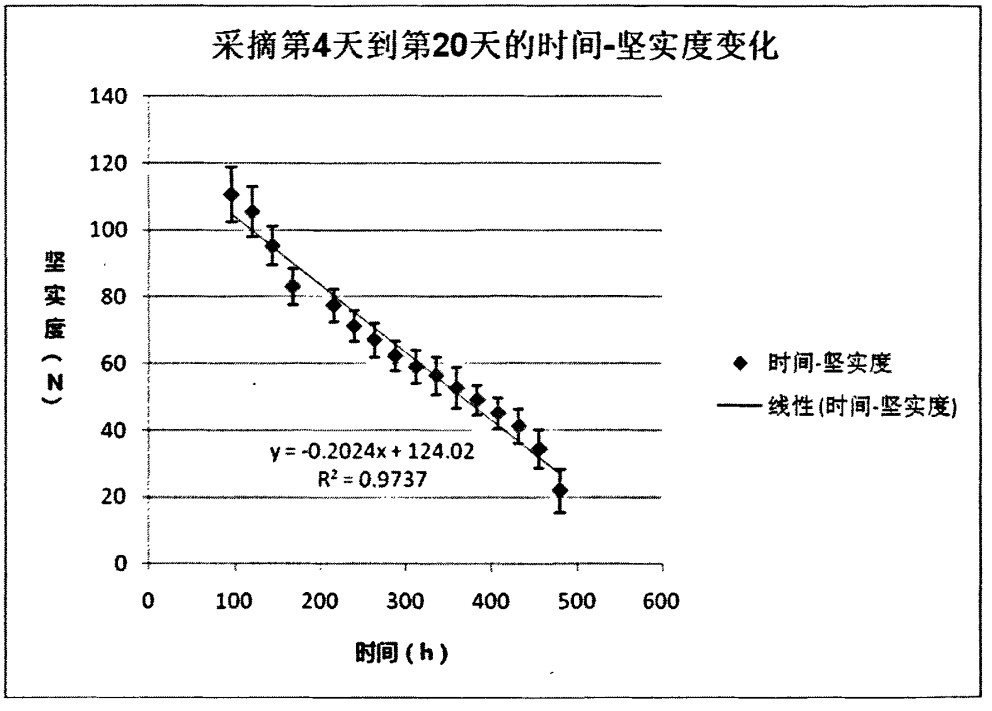


图 4-20 芒果的平均坚实度随时间 T（h）的变化下降的情况。时间取值为从 96 小时到 480 小时

Fig 4-20 the averaged firmness FR (in newtons), time is taken from 96 hours to 480 hours

从图 4-20 可看出，芒果在室温下储藏期间总体的坚实度随时间的增长单调下降，对总阶段的变化情况进行线性回归处理。在这一阶段坚实度与时间总体呈线性关系。

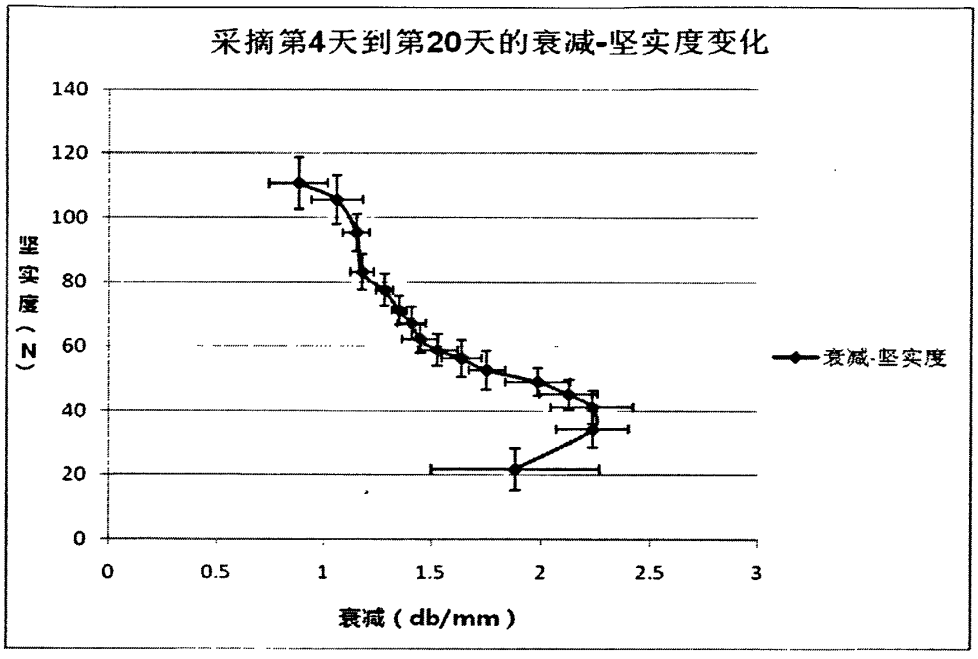


图 4-21 芒果坚实度随超声波衰减下降的情况。时间取值为从 96 小时到 480 小时

Fig 4-21 firmness FR (in newtons) vs NDT ultrasonic attenuation A (in dB/mm), time is 96 to 480 hours

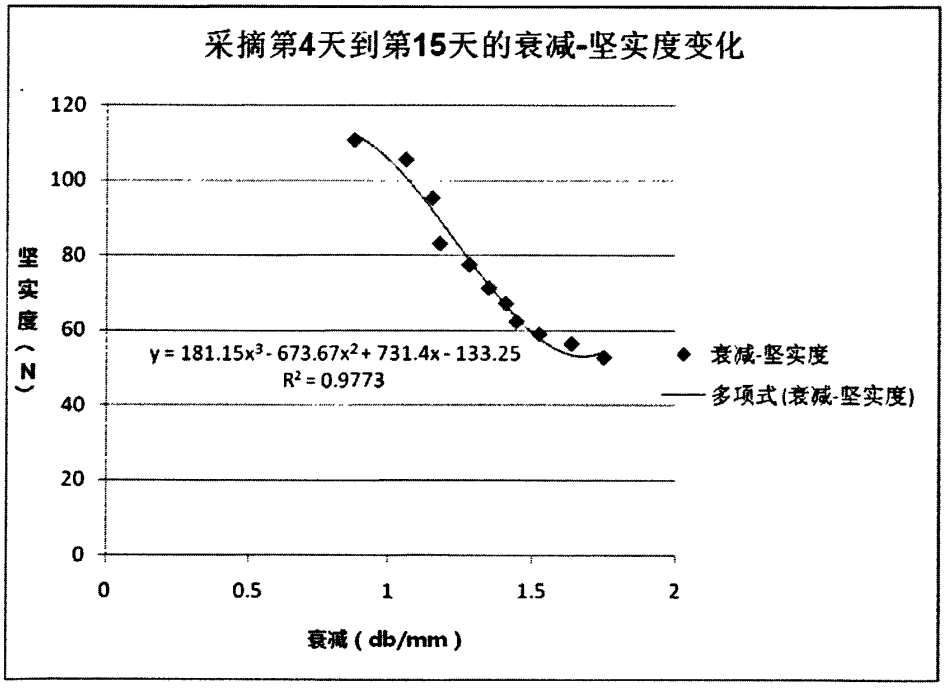


图 4-22 芒果坚实度随超声波衰减下降的情况。时间取值为从 96 小时到 360 小时

Fig 4-22 firmness FR (in newtons) vs NDT ultrasonic attenuation A (in dB/mm), time is 96 to 360 hours

由于超声波的衰减和芒果的坚实度均随着时间而变化，因此这二者之间应该有直接的联系。图 4-21 显示了芒果在室温下储藏期内坚实度随衰减变化的情况。在测量初期和测量末期，数据的分布相对较分散，但大致的趋势是在衰减增加的同时坚实度逐渐减小。在完全腐坏的阶段附近，坚实度持续减小的同时，衰减值突然性减小。其原因在 5.1 一节已做说明。

在成熟阶段，芒果的坚实度与衰减系数呈一一对应的关系，通过设定多项式的不同阶数和形式，得到的对比如下，其中 A 为衰减系数（db/mm），FR 为坚实度（N）：

指数形式：$FR = 270.45e^{0.969A}; R^2 = 0.9561$

对数形式：$FR = -97.01\ln A + 102.71; R^2 = 0.9473$

幂形式：$FR = 103.71A^{-1.238}; R^2 = 0.9518$

线性形式：$FR = -75.203A + 176.8; R^2 = 0.9322$

二次形式：$FR = 41.259A^2 - 184.39A + 246.56; R^2 = 0.9535$

三次形式：$FR = 181.15A^3 - 673.67A^2 + 731.4A - 133.25; R^2 = 0.9773$

可以看出，由于数据较为分散，因此选用三次多项式来描述衰减 A（db/mm）和坚实度 FR（N）之间的联系，才能获得较好的相关性。因此选用方程为：

$$FR = 181.15A^3 - 673.67A^2 + 731.4A - 133.25 \quad (5)$$

在方程(5)中没有出现时间参数，但可以根据该方程直接测量超声波衰减，从而估计出批量芒果的坚实度。

4.3.3 糖酸度随时间变化的曲线

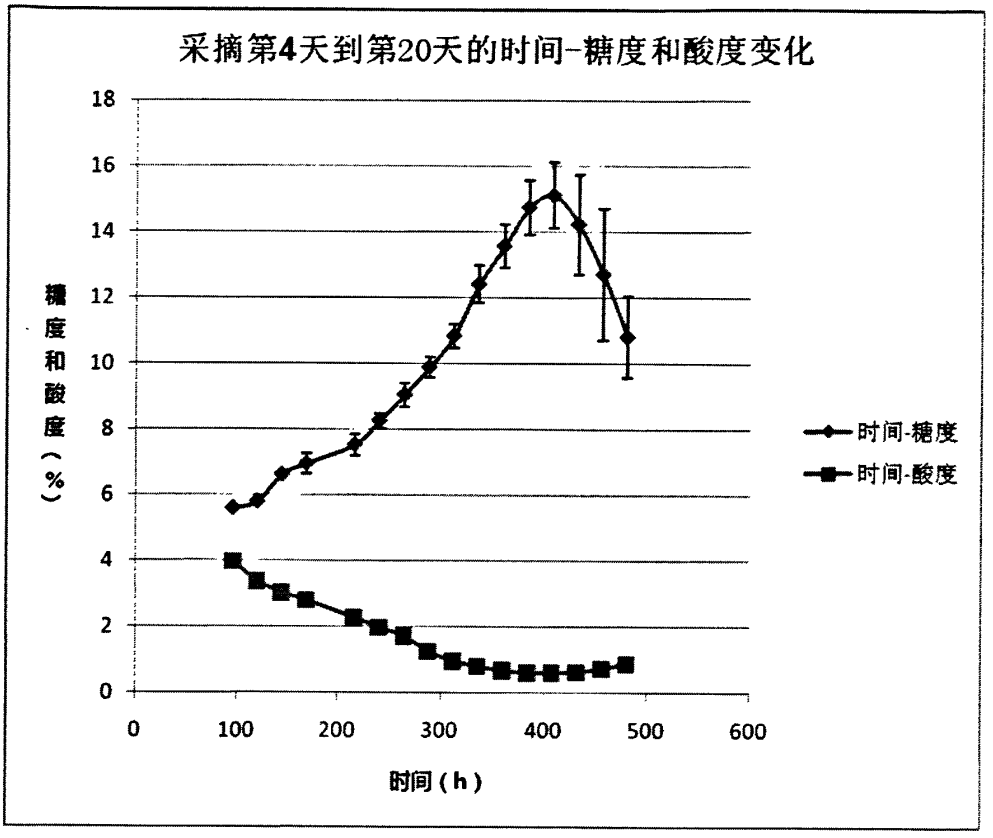


图 4-23 芒果可溶性糖内容物和酸度随时间下降的情况。时间取值为从 96 小时到 480 小时

Fig 4-23 the averaged sugar contents S (in % TSS) and acidity H (in %) values of 80 vs storage time T (in hours), time is 96 to 480 hours

在存放期间，芒果果肉的两项参数与其表皮的变化趋势一致：果肉的糖内容物从最初的 5.588%TSS 增长到最高 15.127%，同时酸度从 3.975%下降到 0.609%。而在腐坏阶段，这两个值有一定的反弹。糖内容物，酸度和时间三者之间的关系已在图 4-23 中表示出来。其中，酸度的置信区间相对糖内容物而言要小很多，说明在同一阶段酸度的分布比糖内容物的分布要集中。另外，糖度和酸度是在成熟期过后立即开始反弹的，与超声波在最后阶段才突然衰减不同。这也证明了在 4.1 节超声波波形衰减变化情况的解释与实际情况相符。

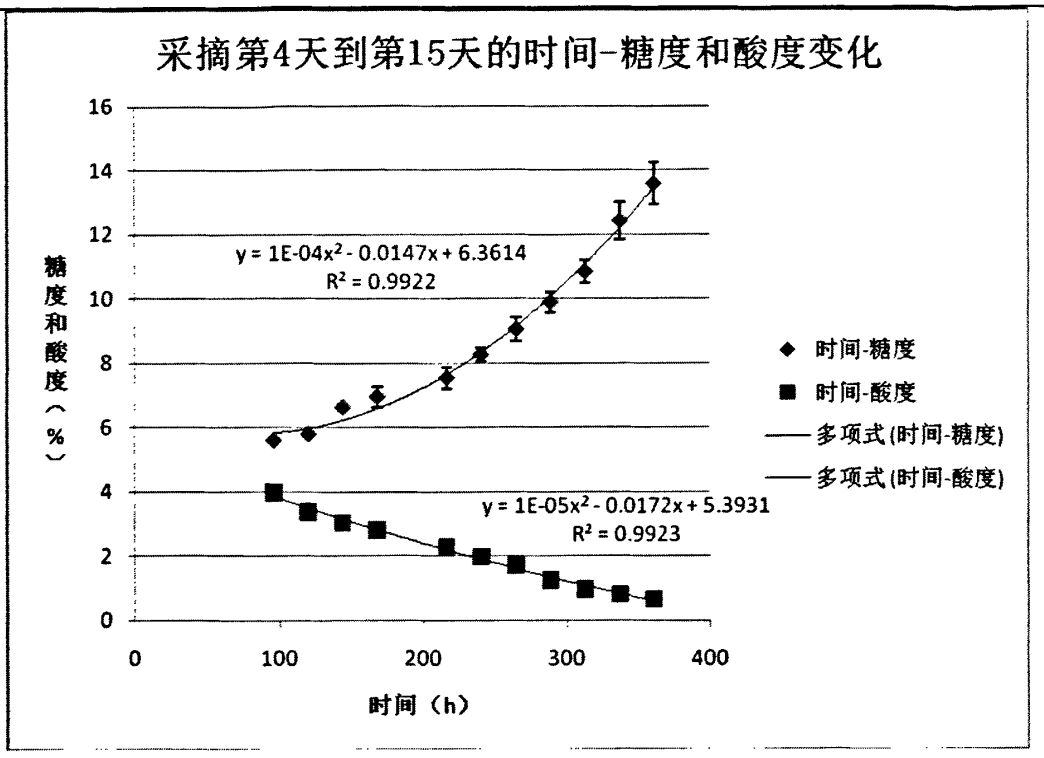


图 4-24 芒果可溶性糖内容物和酸度随时间下降的情况。时间取值为从 96 小时到 360 小时

Fig 4-24 the averaged sugar contents S (in % TSS) and acidity H (in %) values of 80 vs storage time T (in hours), time is 96 to 360 hours

图 4-24 显示了成熟阶段芒果糖内容物和酸度随时间的变化。不同形式的时间与糖内容物的关系式对比如下，其中 S 为糖内容物（%TSS），T 为时间（h）：

指数形式：$S = 3.9453e^{0.0033T}; R^2 = 0.9811$

对数形式：$S = 5.5287 \ln T - 20.872; R^2 = 0.8456$

幂形式：$S = 0.2624T^{0.6469}; R^2 = 0.9212$

线性形式：$S = 0.0286T + 2.1535; R^2 = 0.9393$

二次形式：$S = 10^{-4}T^2 - 0.0147T + 6.3614; R^2 = 0.9922$

而酸度与时间关系式的各种表现形式如下，其中 H 为酸度（%TSS）：

指数形式：$H = 8.2674e^{-0.007T}; R^2 = 0.9645$

对数形式：$H = -2.499 \ln T + 15.475; R^2 = 0.982$

幂形式：$H = 1850.1T^{-1.295}; R^2 = 0.8859$

线性形式：$H = -0.0123T + 4.9241; R^2 = 0.9885$

二次形式：$H = 10^{-5}T^2 - 0.0172T + 5.3931; R^2 = 0.9923$

从上面的对比可看出，可见糖内容物与时间的关系以及酸度与时间的关系用二次多项式来描述效果最好。

糖内容物的方程如下：

$$S = 10^{-4}T^2 - 0.0147T + 6.3614 \tag{6}$$

酸度的方程如下：

$$H = 10^{-5}T^2 - 0.0172T + 5.3931 \tag{7}$$

4.3.4 糖酸度与超声波衰减的关系曲线

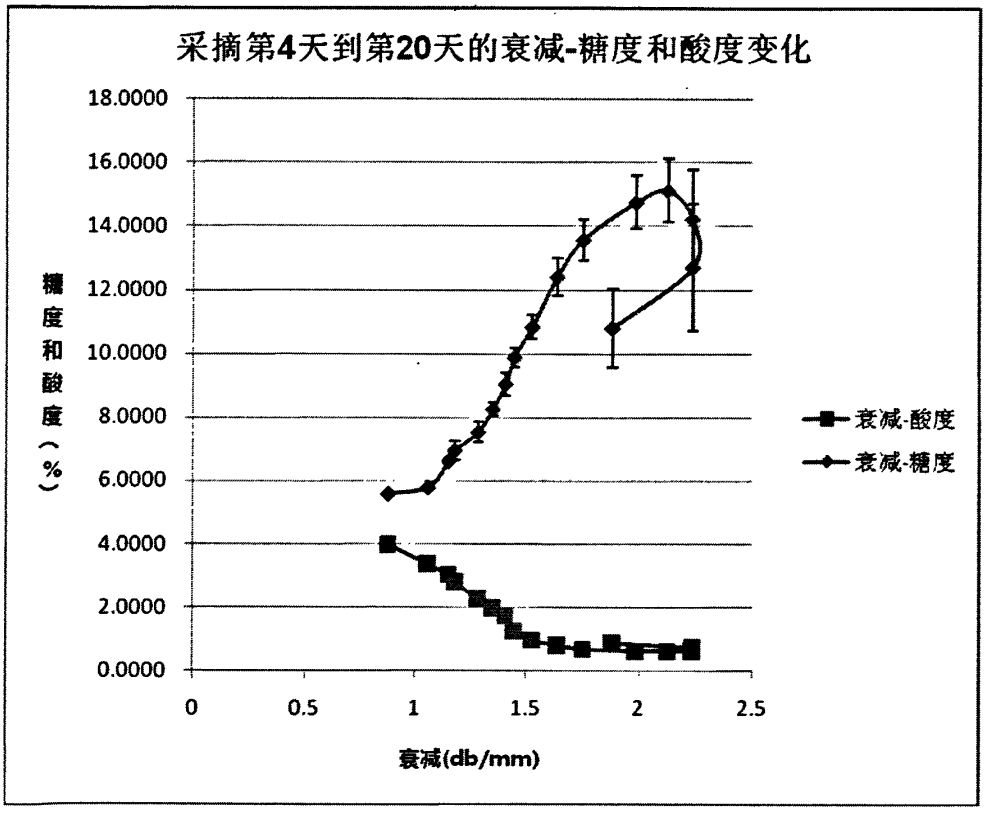


图 4-25 芒果的可溶性糖内容物和酸度随着超声波衰减下降的情况。时间取值为从 96 小时到 480 小时

Fig 4-25 the averaged sugar contents S (in % TSS) and acidity H (in %) values vs NDT ultrasonic attenuation A (in dB/mm), time is 96 to 480 hours

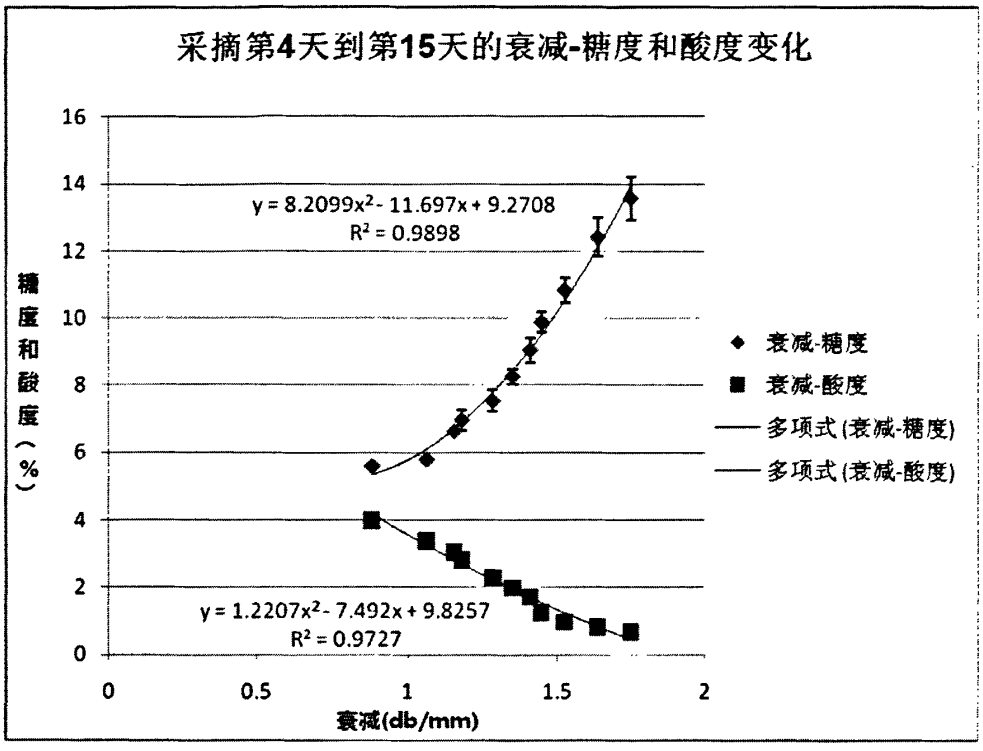


图 4-26 芒果的可溶性糖内容物和酸度随着超声波衰减下降的情况。时间取值从 96 小时到 480 小时

Fig 4-26 the averaged sugar contents S (in % TSS) and acidity H (in %) values vs NDT ultrasonic attenuation A (in dB/mm), time is 96 to 480 hours

最后，根据超声波衰减的变化情况，以及糖内容物和酸度随时间变化的情况，有必要建立这三者之间的直接关系式。图 4-26 显示了芒果的衰减和糖内容物及酸度之间的联系。时间因素在该图表中没有直接表示，但数据显示了时间轴均值和均值周围的置信空间。糖内容物与衰减的关系经过线性回归处理的各种表现形式如下：

指数形式：$S = 1.8356e^{1.1419A}; R^2 = 0.9714$

对数形式：$S = 12.431\ln A + 5.4094; R^2 = 0.8836$

幂形式：$S = 5.7148A^{1.4336}; R^2 = 0.9351$

线性形式：$S = 10.03A - 4.6091; R^2 = 0.9419$

二次形式：$S = 8.2099A^2 - 11.697A + 9.2708; R^2 = 0.9898$

酸度与衰减的关系经过线性回归处理的各种表现形式如下：

指数形式：$H = 38.594e^{-2.306A}; R^2 = 0.9498$

对数形式：$H = -5.456\ln A + 3.5523; R^2 = 0.9677$

幂形式：$H=3.8824A^{-2.881};R^2=0.9058$

线性形式：$H=-4.2614A+7.7619;R^2=0.9666$

二次形式：$H=1.2207A^2-7.492A+9.8257;R^2=0.9727$

可见，选用二次多项式进行描述的拟合效果最好。

糖内容物和衰减的关系方程如下：

$$S=8.2099A^2-11.697A+9.2708 \tag{8}$$

酸度和衰减的关系方程如下：

$$H=1.2207A^2-7.492A+9.8257 \tag{9}$$

上述两个方程显示了芒果在软化过程中生理参数的变化，根据这两个方程可以检测超声波衰减从而直接估计批量芒果的糖内容物和酸度。这是评估芒果成熟度的关键指标。

4.4 本章小结

本章介绍了芒果的超声波测试波形的变化情况，并列出了芒果的超声波衰减情况、坚实度、可溶性糖内容物和酸度随时间变化的详细数据。根据这些数据绘制了曲线图并进行了线性回归处理，得出了衰减系数和存放时间、坚实度和存放时间、坚实度和衰减系数、糖内容物和存放时间、酸度和存放时间、糖内容物和衰减系数以及酸度和衰减系数的关系式。最终得到的方程有四个，分别如下：

（1）根据超声波的衰减估计芒果的存放时间：

$$T=625\sqrt{3.95+3.2A}-1562.5$$

（2）根据超声波的衰减估计芒果的坚实度：

$$FR=181.15A^3-673.67A^2+731.4A-133.25$$

（3）根据超声波的衰减估计芒果的糖内容物：

$$S=8.2099A^2-11.697A+9.2708$$

（4）根据超声波的衰减估计芒果的酸度：

$$H=1.2207A^2-7.492A+9.8257$$

通过上述关系式，我们可以在检测到超声波的衰减后对批量芒果的坚实度、存放时间、糖内容物和酸度等参数进行估算，从而确定芒果的成熟度。

第五章 研究结果及讨论

5.1 研究结果

芒果是广西区特产水果之一，应用超声波无损检测技术对其进行分类有着重要的实际意义。本项目利用超声波检测技术对芒果的成熟度估计进行了初步研究，得到主要结论如下：

1) 检测用的超声波频率采用 25kHz，对本项目中的椰香芒品种不会产生损伤，同时也能较好地获得超声波衰减后的波形，因此是适于检测的频率；
2) 本项目在进行超声波检测时，采用了水中检测的方式。这样有效避免了空气中杂波的干扰，便于设计滤波器，同时超声波信号也不需要进行放大；
3) 本项目的检测时间包括了芒果的成熟阶段和腐坏阶段，其中腐坏阶段的最后超声波的衰减、糖内容物和酸度都有所反弹，使得同一衰减或糖酸度等数据可能对应两个时间值。但由于腐坏阶段的芒果外观可明显识别，在成熟阶段衰减和糖酸度仍然是一一对应，因此通过测量超声波的衰减从而判断芒果的成熟度并进一步加以分类的方法是可行的；
4) 在对各项检测数据进行线性回归处理后，得到了四个主要方程，通过这些方程，可以根据检测到的超声波衰减、坚实度估计芒果存放的时间以及糖内容物和酸的含量。

5.2 本项目的进一步讨论

本课题对椰香芒品种的芒果进行了超声波检测，并根据相关数据推导了预测公式。但由于实验条件限制，一些目标目前还无法完成。要继续进行本课题的研究，作者有下面几点建议：

1) 由于在前期和后期检测数据较分散，误差较大，需要结合四个关系式，从存放时间、坚实度、糖内容物和酸度四个方面进行综合判断，才能有效估计芒果的存放时间或根据成熟度进行分类。
2) 本课题的超声波检测为使信号易于采集和处理，采用了水中检测的方式。但如果要推广到实用阶段，必须能够在空气中检测到良好的信号。这要求确定更好的超声波

频率，以及设计良好的信号放大电路。

3) 目前课题中检测芒果所用的超声波平台占地面积较大，且移动不便。要实现在果园直接利用仪器检测树上芒果的成熟度以决定采摘与否，需要将各个模块进行集成和精简，达到可以手持的大小，并配有简单的仪表以显示成熟度信息。目前日本已开发了利用声波进行芒果成熟度检测的手持式探测器，但尚未推广；

4) 本课题也可以向批量芒果在线分类的方向发展，这要求利用微机或单片机进行超声波控制，并对信号进行判断，根据信号所在的区间确定芒果的成熟度并进行分类，整个过程不再需要人进行干预；

5) 我们已知水果的存放时间与环境温度有着很密切的关系。目前国内外在同类实验中均是在恒温条件下进行，没有考虑温度因素。如果能推导出包含温度因素的预测公式，对超声波无损检测技术在水果分类方面的推广将有着重大意义。

5.3 本章小结

本章对课题的研究结果进行了总结，并提出了四个预测公式用于批量芒果的成熟度估计。由于本项目在国内的创新性，还有很多远期目标可以完成，在误差处理，频率选择，设备精简，在线分类和考虑温度因素几方面都可以进行进一步的研究。本章对此进行了讨论并提出了建议，为课题的继续研究打下了良好的基础。

参考文献

[1] 滕斌，王俊. 国内外瓜果品质的无损检测技术. 现代化农业. 2001 年, 卷 22.

[2] E.E.Finney JR, Itamar Ben-gera, David R.Massie. An Objective Evaluation of Changes in Firmness of Ripening Bananas Using a Sonic Technique. Journal of Food Science. 1967, Vol. 32, pp. 642-646.

[3] Abbott, J.A., G.S. Bachman, N.F. Childers, J.V. Fitzgeald and F.J. matusik. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. Food Technology 1968, 22(5):101-112.

[4] Yamamoto, H.M.Iwamoto, S.Haginuma. Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluations of apples and watermelons. J.Texture Study. 1980, Vol. 11, pp. 117-136.

[5] Yamamoto, H.M.Iwamoto, S.Haginuma. Nondestructive Acoustic Impulse Response Method for Measuring Internal Quality of Apples and Watermelons. Journal of Japanese Society of Horticultural Science. 1981, Vol. 50(2), pp. 247-261.

[6] Salveit S.J, Lillehammer A. Studies on egg development in the Fennoscandian Isoperla species (Plecoptera). Annales de limnologie. 1984, Vol. 20, pp. 91-94.

[7] Salveit. Determining tomato fruit maturity with nondestructive in vivo nuclear magnetic resonance imaging. Postharvest Biology and Technology. 1991, Vol. 1(2), pp. 153-159.

[8] Sarkar, Wolfe. Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. Transactions of the ASAE. 1983, Vol. 26(2), pp. 624-629.

[9] Y.Cheng, C.G.Haugh. Detecting hollow heart in portatoes using ultrasound. Transactions of the ASAE. 1994, Vol. 37(1), pp. 217-222.

[10] R.E.Lacey, F.A.Payne. Ultrasonic velocity in used corn oil as measure of oil quality. Transactions of the ASAE. 1994, Vol. 37(5), pp. 1583-1589.

[11] M.Nielsen, H.J.Martens, K.Kaack. Low frequency ultrasonics for texture measurements in carrots(Daucus carotà L.)in relations to water loss and storage. Postharvest Biology and Technology. 1998, Vol. 14, pp. 297-308.

[12] Muhammad Imran, Junichi Sugiyama. Uses of Non-Destructive Acoustic Firm Tester in Horticulture and Food Science. s.l. : ASAE/CSAE Annual International Meeting, 2004.

[13] K Shigeta, T Kida, M Matsuo. A New Processing Machine to Increase Digestible Grain Rate for Whole Crop Rice Silage. s.l. : ASAE Annual Meeting, 2005.

[14] Mizrach, A.Flitsanov, U.Fuchs. An ultrasonic nondestructive method for measuring maturity of mango fruit. Transactions of the ASAE.Trans. 1997, Vol. 40(4).

[15] Mizrach, Flitsanov. Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process. Journal of Food Engineering. 1999, Vol. 40, pp. 139-144.

[16] Mizrach. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. Ultrasonics. 2000, Vol. 38, pp. 717-722.

[17] Mizrach, Bechar, Grinshpon, Hofman, Egozi, Rosenfeld. Ultra sonic classification of mealiness in apple. Transactions of the ASAE. 2001, Vol. 46(2), pp. 397-400.

[18] Mizrach, Flitsanov. Ultrasonic mealiness classification of apples. Institute of Agricultural Engineering. 2002, Vol. P.O.Box 6.

[19] 葛茏，徐凌. 利用振动理论对西瓜成熟度进行无损检测的研究. 农业工程学报. 1998 年, 卷 14(2), 页 231-234.

[20] 王书茂，焦群英，籍俊杰. 西瓜成熟度无损检验的冲击振动方法. 农业工程学报. 1999 年, 卷 15, 页 241-245.

[21] 吕飞玲. 基于声学特性的西瓜品质无损检测方法研究. 浙江大学, 硕士学位论文. 2003.

[22] 饶秀勤，应义斌，吕飞玲. 水果声学特性测试系统的研制. 农业机械学报. 2004 年, 卷 35, 页 69-71.

[23] 王树才，任奕林，陈红. 利用敲击声音信号进行禽蛋破损检测和模糊识别. 农业工程学报. 2004 年, 卷 20, 页 130-133.

[24] 李小昱，孙骊. 苹果声波特性的测试研究. 农业机械学报. 1992 年, 卷 23, 页 97-100.

[25] 屠康，马龙，潘秀娟. 敲击振动无损检测 3 种梨果实品质参数的研究. 安徽农业大学学报. 2005 年, 卷 32(1), 页 50-53.

[26] 张索非，陈斌，褚静. 基于声学特性的苹果无损检测方法. 现代仪器. 2007年, 卷 2, 页 11-13.

[27] 北京市技术交流站. 超声波探伤原理及其应用. 机械工业出版社, 1982.

[28] 中国机械工程学会无损检测学会. 超声波检测. 机械工业出版社, 2003.

[29] 余锦春. 芒果加工. 中国轻工业出版社, 1996.

[30] AC Hulme, The mango. The biochemistry of fruits and their products. 1971, Vol. 2.

[31] KING.K. Partial characterization of the in situ activity of pectinesterase in Bramley apple. International Journal of Food Science and Technology. 1990, Vol. 25, pp. 188-197.

[32] 陈志宏，张如莲，陈红梅. 海南秋芒采后贮藏期间的生理变化. 植物生理学通讯. 1998 年, 卷 34, 页 178-180.

[33] 周新仁，丁继高. 果品无损检测技术的研究现状. 食品与发酵工业. 2004 年, 卷 11, 页 84-88.

[34] 周向华，刘东红，叶兴乾. 低能量超声检测技术在食品工业中的应用. 农业工程学报. 2004 年, 卷 20, 页 292-296.

[35] 赵旭博，董文宾. 超声波技术在食品行业应用新进展. 食品研究与开发. 2005 年, 卷 26, 页 3-8.

[36] 张立彬，胡海根，计时鸣，胥芳. 农产品品质无损检测技术研究进展. 中国园艺学会葡萄与葡萄酒分会首届学术年会农业工程学报, 2004.

[37] 应义斌，于海燕. 无出版地 ：中国农业工程学会学术年会论文集, 2005.

[38] 应义斌，刘燕德. 水果内部品质光特性无损检测研究及应用. 浙江大学学报(农业与生命科学版). 2003 年, 卷 2.

[39] 应义斌，韩东海. 农产品无损检测技术. 化学工业出版社, 2005.

[40] 应义斌，蔡东平. 农产品声特性及其在品质无损检测中的应用. 农业工程学报. 1997 年, 卷 13（3）, 页 208-212.

[41] 弯艳玲. 利用力学、声学检测玉米含水量方法的研究. 吉林大学, 硕士学位论文. 2007.

[42] 屠康. 肉类品质无损检测技术的研究进展. 西北农林科技大学学报（自然科学版）. 2005 年, 卷 1.

[43] 孙锴英，李松，张帆，曹阳. 基于 MAX262 的程控滤波器设计. 国外电子元器件. 2008 年, 卷 5, 页 44-46.

[44] 钱永忠，汤晓艳. 农产品质量分级要素及评价技术. 农业质量标准. 2006 年, 卷 1, 页 30-33.

[45] 吕飞玲，应义斌. 声学检测技术在农产品品质无损检测中的应用. 农机化研究. 2003 年, 卷 1.

[46] 刘燕德，曾一凡. 无损检测技术在农产品品质检验中的应用. 江西农业大学学报(自然科学版). 2002 年, 卷 3, 页 114-117.

[47] 刘洪山，李明，汤世友. 瓜果坚实度的冲击响应无损检测方法. 仪表技术与传感器. 2007 年, 卷 10.

[48] 廖宇兰，翁绍捷，张海德，朱伯靖. 基于介电特性的农产品品质无损检测研究进展. 热带作物学报. 2008 年, 卷 2.

[49] 李建平，魏宝刚. 松子开闭声学特性的试验研究. 农业机械学报. 2005 年, 卷 36(12), 页 84-86.

[50] 郭文川，朱新华，郭康权. 果品内在品质无损检测技术的研究进展. 农业工程学报. 2001 年, 卷 5, 页 6-10.

[51] 付兴虎，付广伟，毕卫红. 近红外光谱技术在水果品质无损检测中应用的研究与现状. 红外. 2006 年, 卷 2.

[52] 邓干然. 水果无损检测技术及其在热带水果生产中的应用探讨. 中国热带作物学会第七次全国会员代表大会暨学术讨论会论文集, 2004.

[53] 陈友兴，王召巴. 自适应滤波在多界面超声检测中的应用. 中国测试技术. 2006 年, 卷 32, 页 57-58.

[54] 陈莹，杨明，胡海波. 集成滤波器 MAX275 在超声检测中的应用. 电子元器件应用. 2004 年, 卷 6, 页 43-46.

[55] 陈家焱. 鸭蛋破损声检与分级技术的研究. 华中农业大学, [硕士学位论文] : 2004.

[56] 陈红，丁幼春，文友先. 无损检测技术在禽蛋品质检测中的应用及进展. 第六届中国蛋品科技大会第六届中国蛋品科技大会论文集, 2004.

[57] 卜凡艳，韩剑众. 无损检测技术在食品品质检测中的应用. 食品工业科技. 2007 年, 卷 7.

[58] Zhang, X., Stone, M.L., Chen,D, Maness, N.O. Peach firmness determination by puncture resistance, drop impact, and sonic impulse. Transactions of the ASAE. 1994, Vol. 37(2), pp. 494-500.

[59] SolosJivanuwong. Nondestructive Detection of Hollow Heart in Potatoes Using Ultrasonics. Virginia Polytechnic Institute, 硕士学位论文. 1998.

[60] Petal, Chen. Development of a high-speed NMR technique for sensing maturity of avocados. Transaction of the ASAE. 1996, Vol. 39(6), pp. 2204-2209.

[61] MizrachGan-mor, Flitsanov, PrigozinGalili,. Models of Ultrasonic Parameters to Assess Avocado Properties and Shelf Life. J . agric . Engng Res. 1996 年, 卷 65, 页

261-267.

[62] Mizrach, Flitsanov,Schmilovitch,Fuchs. Determinationof mango physiological indices by mechanical wave analysis. Postharvest Biology and Technology. 1999, Vol. 16, pp. 179-186.

[63] Cheng-Jin Du, Da-Wen Sun. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. Trends in Food Science & Technology. 2004, Vol. 15, pp. 230-249.

[64] 傅霞萍，应义斌，刘燕德. 近红外光谱技术在水果内部品质无损检测中的应用. 农机化研究. 2004 年, 卷 2.

致谢

衷心感谢我的导师李国进副教授。李老师在我的学业上给予了精心指导，对我的论文倾注了很大的心血，他的言传身教将使我终生受益。

另外要特别感谢电气工程及其自动化 061 班的陈真伟同学，他在我们的实验期间积极参与了各项准备工作，从实验器材的购买到实验室的使用，以及检测平台的搭建，都离不开他的热诚帮助。

还需要感谢的是我的父母和家人，谢谢他们多年来给予的巨大支持和理解，以及生活上无私的关怀和照顾。

最后，向所有支持和关心我的老师和朋友们表示感谢。

在学期间发表的学术论文和研究成果

[1] 贺昀轩，李国进，齐佳鑫. 数字 PID 控制器在单相逆变器中的研究. 装备制造技术 2009 年 5 月.(录用)

[2] 齐佳鑫，李国进，詹厚剑，贺昀轩. 基于遗传算法的调制载波比优化研究. 微机算机信息 2009 年 12 月.(录用)

[3] 贺昀轩，李国进，陈真伟. 基于超声波无损检测技术的芒果成熟度检测研究. 农业工程学报.(已投)