

分类号:
学 号: 2015210740

密 级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



基于声学特性哈密瓜成熟度的无损检测研究

学 位 申 请 人	贺少鹏
指 导 教 师	吴杰 教授
	温浩军 研究员
申 请 学 位 类 别	专 业 硕 士
专 业 名 称	农 业 硕 士
研 究 领 域	农业机械化
所 在 学 院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2017 年 6 月

分类号:
学 号: 2015210740

密 级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



基于声学特性哈密瓜成熟度的无损检测研究

学 位 申 请 人	贺少鹏
指 导 教 师	吴杰 教授
	温浩军 研究员
申 请 学 位 类 别	专 业 硕 士
专 业 名 称	农 业 硕 士
研 究 领 域	农业机械化
所 在 学 院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2017 年 6 月

**Non-destructive Testing of Ripeness of Hami Melon Based on Acoustic
Property**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agricultural

By

He Shao-peng

Dissertation Supervisor: Prof. Wu Jie

Prof. Wen Hao-jun

June, 2017

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：贺少鹏 时间：2017年6月2日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：贺少鹏 时间：2017年6月2日

导师签名：吴杰 时间：2017年6月2日

摘要

哈密瓜是新疆特色瓜果之一，近年来内地引种、瓜农抢占早市而早摘或催熟等原因，致使市场中哈密瓜品质存在较大差异，商品率和声誉受到极大影响。为此，本论文针对哈密瓜成熟度迫切需要无损检测这一问题，搭建了由力锤和麦克风分别激励感测哈密瓜声响应信号检测系统，测试了声响应信号的稳定性，分析了不同激励条件对哈密瓜共振频率的影响，明确了适宜测试条件，采用频响参数计算了哈密瓜的弹性指数和阻尼比，并基于频响参数计算的指标和频带幅值参数分别构建了哈密瓜成熟度预测模型，为哈密瓜成熟度的无损检测提供策略。本研究得到的主要结论为：

（1）在哈密瓜同一点多次激励感测的声响应信号稳定可靠，在哈密瓜赤道部不同位置进行激励感测，其共振频率无显著差异（ $P>0.05$ ）。哈密瓜共振频率不受锤头材料和激励力的影响（ $P>0.05$ ），但采用橡胶材料锤头激励力范围为 6~12 N 时，更适宜激励哈密瓜获得更强的响应信号且易于信号的提取。

（2）可以采用弹性指数和阻尼比联合预测哈密瓜硬度，构建的预测模型相关性达到 0.913，对哈密瓜硬度变化的预测敏感度为 68.99%，非常接近 M-T 穿刺法硬度测量的敏感度（69.79%）；可以采用阻尼比预测哈密瓜可溶性固形物含量的模型，构建的预测模型相关性达到 0.834，对哈密瓜可溶性固形物含量变化的预测敏感度为 46.43%，也非常接近折射计测量的敏感度（47.41%）。

（3）采用频带幅值参数基于 PCR 法预测哈密瓜成熟度时，确定在 40~200 Hz 频段提取了 7 个频带幅值参数和 1 个频带幅值总和参数，这 8 个参数与哈密瓜的可溶性固形物含量不相关，但与哈密瓜硬度有相关性，因此采用幅值参数与哈密瓜质量共同构建了哈密瓜硬度 PCR 预测模型，该预测模型校正集相关系数为 $r=0.891$ ，校正集均方根误差为 $RMSEC=1.04$ N/mm，验证集的相关系数为 $r=0.795$ ，验证集均方根误差为 $RMSEV=1.24$ N/mm，表明该预测模型具有较好的预测性能和稳定性，模型对哈密瓜硬度变化的敏感度为 67.70%，可以适用于哈密瓜硬度无损检测，尽管如此，该模型的检测敏感度较弹性指数和阻尼比联合构建的哈密瓜硬度预测模型的检测敏感度略低。

关键词：哈密瓜；成熟度；弹性指数；阻尼比；频带幅值；无损检测

Abstract

Melon is one of the characteristic fruits of xinjiang. Recently, the larger difference exists in internal quality because farmers occupy the market by cultivating early and using ripening agent. This situation had led a serious decline in commodity rate and reputation of pear. Therefore, there is a highly required to non-destructively detect ripeness of melon. For this situation, an acoustic setup constructed with a hammer and a microphone, respectively operated as exciter and sensor, was developed. Meanwhile, the stabilities of experimental device were test and investigated the influence on response parameters to melon under different excitation conditions. Then, the optimum testing conditions was determined. Frequency response parameters were extracted to calculate elastic index and damping ratio of melon. Detection model of melon ripeness based on index calculated by frequency response parameters and band magnitude parameters was constructed. The results proved that it could provide theoretical support for non-destructively detecting of ripeness of melon using acoustic response method. The main contributions of this research are as follows:

(1) The differences of the resonance frequency measured from same point with repeated excitation and different sensing points at the melon equator were not significant ($P>0.05$). The results of test condition showed that the resonance frequency was not affected by the material of hammer and exciting force ($P>0.05$). While a test condition with a rubber hammer at 8 to 12 N indicated that the acquired response signal was stronger and more easily extracted.

(2) Melon firmness can be assessed by elastic index combined with damping ratio and the correlation coefficient (r) of constructed detection model reached 0.913. The sensitivity of this model was 68.99%, and was very similar to that of M-T test (69.79%). The soluble solids content of melon can be estimated by damping ratio and the correlation coefficient (r) of constructed detection model was 0.834. The sensitivity of this model was 46.43%, and was very similar to that of refractometer test (69.79%).

(3) Seven band magnitude parameters and sum of these could be extracted in 40~200 Hz of frequency domain response signal. These eight band magnitude parameters not related to the soluble solids content of melon analyzed by PCR, while related to melon firmness. The PCR ripeness detection model based on eight band magnitude parameters and mass of melon was established. The correlation coefficient for calibration set (r_c) and validation set (r_v) of model were 0.891 and 0.795, respectively. The root mean square error of calibration set ($RMSEC$) and validation set ($RMSEV$) were 1.04 N/mm and 1.24 N/mm, respectively. The results showed that this model was stable and reliable. The detection sensitivity of this model was 67.70%, and was suitable for non-destructively detecting of melon firmness. Nonetheless, the results lower than firmness detection model based on elastic index combined with damping ratio.

Key words: melon, ripeness, elastic index, damping ratio, band magnitude parameters, non-destructive detection

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 哈密瓜的种植现状.....	1
1.1.2 哈密瓜内部品质检测现状及存在的问题.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 瓜果成熟度无损检测技术研究现状分析.....	2
1.2.2 基于声学特性瓜果成熟度无损检测研究的进展.....	7
1.3 研究内容与技术路线.....	8
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 技术路线.....	9
1.4 本章小结.....	9
第二章 哈密瓜声学特性的测试分析.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 哈密瓜取样.....	10
2.3 哈密瓜声学特性的测试分析.....	10
2.3.1 声学特性测试系统的组成.....	10
2.3.2 哈密瓜声学特性测试的方法.....	11
2.3.3 哈密瓜共振频率的提取方法.....	11
2.4 哈密瓜声响应信号检测的稳定性分析.....	12
2.5 激励条件对哈密瓜声学特性的影响.....	12
2.5.1 锤头材料对哈密瓜声响应信号的影响.....	12
2.5.2 激励力对哈密瓜声响应信号的影响.....	13
2.6 哈密瓜不同检测位置的共振频率差异性分析.....	14
2.7 本章小结.....	14
第三章 基于频响参数哈密瓜成熟度的无损检测方法研究.....	15
3.1 引言.....	15
3.2 哈密瓜成熟度不同指标的测量.....	15
3.2.1 哈密瓜硬度的 M-T 穿刺法测量.....	15
3.2.2 哈密瓜可溶性固形物含量的测量.....	15
3.3 哈密瓜声响应参数的计算方法.....	16
3.3.1 哈密瓜弹性指数的计算.....	16
3.3.2 哈密瓜阻尼比的计算.....	17
3.4 哈密瓜声响应参数及成熟度指标间的相关性分析.....	18
3.5 基于声响应参数哈密瓜成熟度预测模型的构建.....	19
3.5.1 哈密瓜取样.....	19
3.5.2 哈密瓜硬度预测模型的构建.....	19
3.5.3 哈密瓜可溶性固形物含量预测模型的构建.....	20

3.6 哈密瓜成熟度预测模型的敏感度分析.....	22
3.7 本章小结.....	23
第四章 基于频带幅值哈密瓜成熟度的无损检测方法研究.....	24
4.1 引言.....	24
4.2 频带幅值参数的确定.....	24
4.2.1 分析频段的截取及频带的间隔划分.....	24
4.2.2 频带幅值参数的计算.....	25
4.3 频带幅值参数与哈密瓜成熟度指标之间的相关性分析.....	25
4.4 基于频带幅值法哈密瓜成熟度指标 PCR 预测模型的构建.....	26
4.4.1 主成分回归 (PCR) 分析法的原理.....	26
4.4.2 频带幅值参数之间的相关性分析.....	26
4.4.3 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的构建方法.....	27
4.4.4 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的构建.....	28
4.4.5 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的修正.....	29
4.4.6 哈密瓜硬度不同预测模型的敏感度比较.....	30
4.5 本章小结.....	30
第五章 结论与展望.....	31
5.1 主要结论.....	31
5.2 研究特色和创新之处.....	31
5.3 研究展望.....	31
参 考 文 献.....	32
致 谢.....	37
作 者 简 介.....	38
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表.....	39

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 哈密瓜的种植现状

哈密瓜有“瓜中之王”的美称，2009 年荣获国家地理标志产品称号，哈密瓜其品种达 180 多种，以“红心脆”和“黄金龙”品质最佳，远销欧洲、东南亚、中亚及港澳台等 50 多个国家和地区，享誉全球，为我国出口创汇 4523 万美元^[1]。图 1-1 所示为新疆哈密瓜主要种植区域^[2]。近几年哈密瓜的种植面积逐年递增（见图 1-2），据 2015 年统计年鉴，新疆哈密瓜 2000-2015 年种植面积从 2.26 万 hm^2 增长到 6.67 万 hm^2 ，产量从 51.22 万 t 增长到 236.33 万 t^[3]，每年出疆哈密瓜达到 100 万 t，哈密瓜已成为新疆重要的经济作物，是农民的重要收入来源。

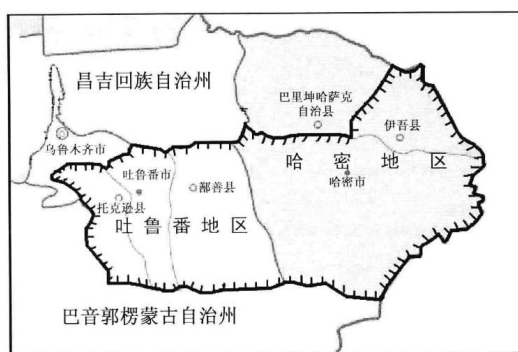


图 1-1 哈密瓜主产区

Fig.1-1 Main cultivation area of melon

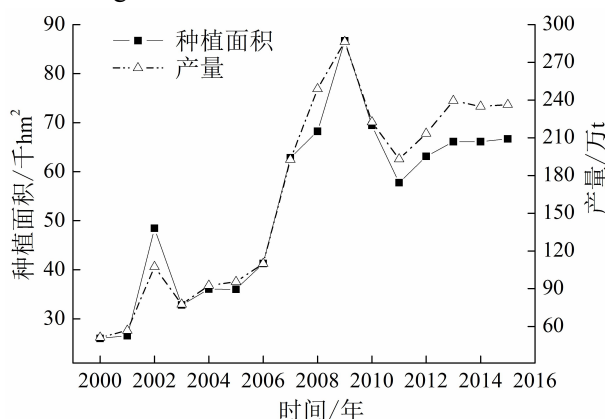


图 1-2 2000-2015 年哈密瓜的播种面积与产量

Fig.1-2 The cultivation area and total yield of melon during 2000-2015

1.1.2 哈密瓜内部品质检测现状及存在的问题

新疆特有的光热、水土等因素使哈密瓜风味独特、香甜多汁，具有较高的等级和商品价值。但是由于其他省区及疆内哈密瓜种植面积和规模极剧扩大，特别是内地“东繁”“南繁”采用新技术、设施手段种植，上市早，运距短，周年生产，成本低，这些产地的哈密瓜外观与新疆哈密瓜难以区分，但内部品质却明显逊于新疆哈密瓜，这对新疆哈

密瓜市场造成很大冲击；此外，在新疆有些瓜农为了抢占早市，在瓜五、六成熟时采摘，有些瓜农还使用“乙烯利”等催熟剂，使生瓜流入市场，以次充好^[4]，这些问题都使新疆精品哈密瓜的声誉受到损害，降低了哈密瓜国际市场竞争力，使我国鲜哈密瓜出口数量从2013年19918.317 t下降至2014年17171.408 t。因此，对哈密瓜的内部品质进行无损检测和分级，以提高哈密瓜的商品价值和瓜农收入，促进新疆瓜果业发展。

哈密瓜内部品质检测传统上依靠时间推断、观察果实外观特征（网纹及颜色）、闻香味、观察其生长特征、抽样品尝等方法^[5]，这些方式主观性太强，检测精度低且容易疲劳，不适宜大批量检测^[6]。经验表明，随着果实成熟度增加，其硬度逐步降低。当瓜身微软时，成熟度比较适中，太硬则欠熟，太软则过熟，因此，硬度可以作为瓜果成熟度检测的重要指标^[7]；当果肉越甜时，瓜果就越成熟，因此，可溶性固形物（SSC）含量也可用来评估瓜果的成熟度^[8]。水果硬度计和糖度计可用来检测哈密瓜成熟度，但这种检测方法属于破坏性检测，不适用于哈密瓜批量在线检测和分级。因此，如何实现哈密瓜成熟度的无损检测，是哈密瓜产业迫切需要解决的问题，对实现哈密瓜分级以提高商品率具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 瓜果成熟度无损检测技术研究现状分析

从20世纪80年代开始，农产品无损检测研究在国内外迅速兴起，经过几十年的研究，出现了多种农产品成熟度无损检测技术，其中包括近红外光谱法、高光谱法、振动法和电子鼻法等检测技术。

近红外光谱法进行瓜果无损检测技术研究热点之一^[9]，Dull等人（1990）选用近红外光谱的880 nm和913 nm两个波段的单色光，采用偏最小二乘法（partial least squares regression, PLS）检测蜜瓜的可溶性固形物（SSC）^[10]。张德虎等（2015）利用可见近红外光谱和图像信息融合技术对河套蜜瓜的糖度和硬度进行建模^[11]。Ito等人（2001）选择两个特征波长建立预测西瓜SSC的多元线性回归方程^[12]。田海清等（2007）采用PLSR法建立了西瓜硬度与漫反射近红外光谱的无损检测模型^[13]。袁琳等（2010）采用6101.9~5446.2 cm^{-1} 范围有效信息波谱，采用PLSR法建立网纹瓜硬度检测模型^[14]。Tian等（2007）采用偏最小二乘法（PLS）和主成分回归法（PCR）建立了漫反射光谱预测西瓜M-T穿刺法测量硬度的无损检测数学模型（见图1-3）。尽管近红外光谱法对瓜果的成熟度指标取得了较好的检测结果，但是近红外光谱法建模困难大，所建模型有时间和空间局限性，需要不断用标样进行校正对比来维护检测模型精度^[15-18]。介邓飞等（2014）认为可见/近红外光谱技术在厚皮类水果检测方面存在一些难解决的问题，例如光源的投射性能有限，检测皮厚、体积大的瓜果需要比较强的光源功率等问题^[19]。郭文川等（2001）则认为近红外光谱法主要适合对水果的糖度和酸度进行检测^[20]。孙通等（2009）还指出近红外仪器移动性差，近红外光谱处理软件价格较高，很难用于实际生产^[21]。

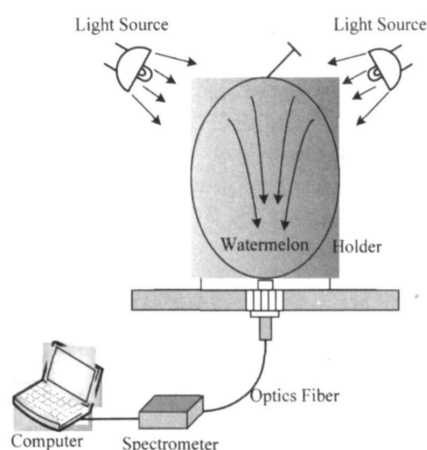


图 1-3 近红外光谱法检测西瓜 (Tian et al, 2007)

Fig.1-3 Schematic of near-infrared spectroscopy method for measuring watermelon firmness

高光谱图像技术把传统的二维成像技术和光谱技术有机的结合起来,也有很多关于瓜果硬度和可溶性固形物含量无损检测的研究报道^[22-37]。马本学等(2012)利用高光谱成像系统,结合图像处理技术建立网纹类哈密瓜的糖度预测模型,通过不同方法对带皮和去皮的哈密瓜糖度预测^[38]。李锋霞等(2013)利用高光谱技术对哈密瓜硬度进行无损检测,用PLS方法建立了硬度预测模型(见图1-4)^[39]。Tsuta等(2002)将光谱理论应用于获得的图像的每个像素,构建了甜瓜表面糖含量的颜色分布图^[40]。高光谱图像技术虽然具有波段数多、光谱分辨率高和数据点大等特点,但是贺艳楠等(2010)在对水果成熟度检测技术研究中指出,高光谱图像数据给数据分析和处理带来不便^[41]。彭彦昆等(2012)也认为高光谱法用于瓜果成熟度的检测时需海量数据处理^[42]。此外,高光成像设备价格比较昂贵,目前我国主要将光谱成像技术应用于遥感领域,还未应用于农产品商业化在线检测(洪添胜等,2007)^[43]。

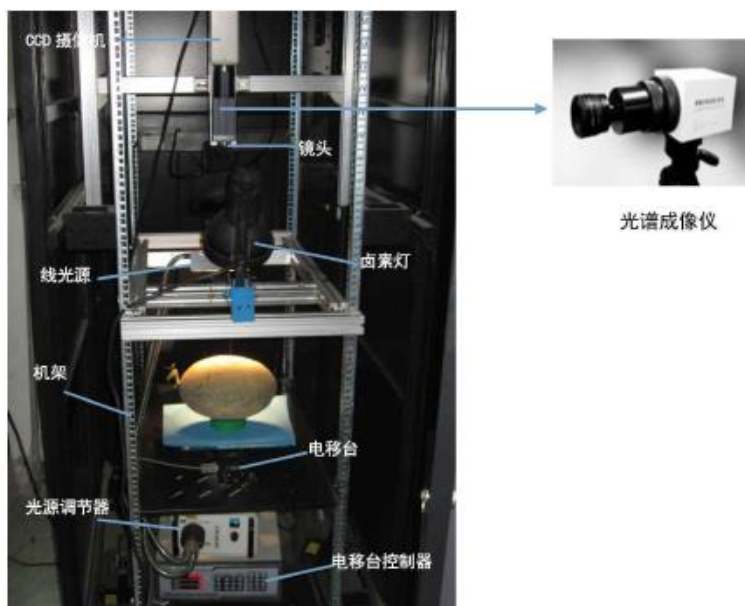
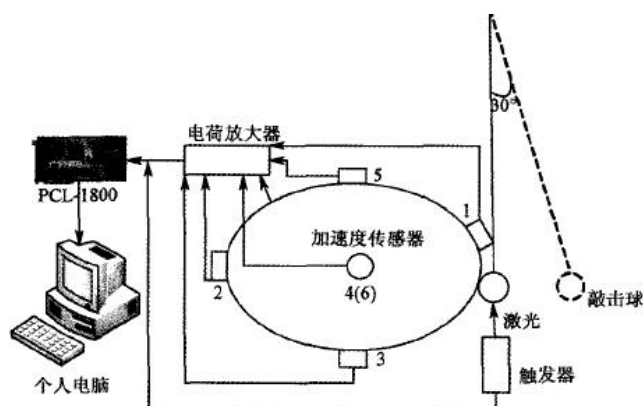


图 1-4 哈密瓜坚实度高光谱法无损检测 (李锋霞等, 2013)

Fig.1-4 Non-destructive testing device for measuring melon firmness based on hyperspectral method

瓜果成熟时总能释放出不同的气味，因此气味也作为瓜果成熟度的一项指标，电子鼻作为一种仿生嗅觉检测器，越来越受人们关注。它通过模仿人的嗅觉器官，对气体或者挥发性成分做定性或定量分析的检测。Benady 等（1995）^[44]、唐晓伟等（2010）^[45]、Simona V 等（2012）^[46]、马永昆等（2004）^[47]采用固相微萃取（solid-phase micro-extraction, SPME）方法对不同成熟度哈密瓜散发的香气分析表明，SPME 方法能充分集中吸收哈密瓜香气，建立哈密瓜成熟度和自身香气特征的关系，可客观判断哈密瓜的成熟度。然而，电子鼻受到成本过高、气敏传感器灵敏度不够高、检测时间长等因素限制，仍未走出实验室^[48]。

振动法也可用于瓜果的成熟度检测，Yamamoto 等（1980）采用冲击的方法使瓜果产生振动提取瓜果的声波特性与瓜果内部品质的关系^[49]。Clark 等（1975）发现声波衰减的时间和瓜果成熟度有着紧密联系^[50]。何东健等（1994）利用单摆打击西瓜测得到西瓜的音波特性，根据共振频率范围评估西瓜未熟、适熟和过熟^[51]。Chyun 等（1996）、王书茂等（1999）利用瓜的振动频率对瓜的成熟度进行判断^[52]。Kuroki 等（2006）等利用声振检测技术研制出了一种便携式检测哈密瓜硬度的仪器^[53]。沈蓉尔等（2010）用 MEMS 加速度传感器贴于西瓜的表面感测敲击西瓜时的振动响应信号来评估西瓜的成熟度^[54]。危艳君等（2012）也用 6 个加速度传感器分别贴于西瓜赤道部、梗部、蒂部提取振动过程的声透过率参数检测西瓜的成熟度（见图 1-5）^[55]。在这些振动测试中，加速度计必须贴在水果表面来测量其振动响应，不仅固连困难，而且会因其附加质量而影响自由振动，检测误差大^[56-58]。



1-6 分别表示贴在西瓜表面的 6 个加速度传感器（6 号在 4 号对侧）

图 1-5 西瓜成熟度振动法检测系统（危艳君等，2012）

Fig.1-5 Detection system for measuring watermelon maturity with acoustic vibration method

为了解决接触式振动测量存在的问题，近年许多学者提出了运用激光多普勒测振仪（laser doppler vibration, LDV）来非接触测量水果的振动响应，该方法灵敏度高、动态响应快、测量范围大、对横向振动干扰不敏感、对检测振幅微小的振动也很有效，具有在线检测水果品质的潜力。Blahovec 等（2007-2008）和 Taniwaki 等（2009）分别利用 LDV 技术对甜瓜成熟度进行了检测，取得了较好的结果^[59-61]。Abbaszadeh 等（2011）采用 LDV 技术以非接触的方式检测西瓜的成熟度，有效评估了西瓜成熟度（见图 1-6）

[62]。Abbaszadeh 等（2015）采用了一种基于振动响应无损检测西瓜成熟度的程序，对成熟和未成熟西瓜进行区分[63]。高宗梅等（2016）通过成熟度指标与振动波普特征参数随成熟度变化的规律，建立了成熟度指标定量检测模型，以及成熟度和空心定性检测模型[64]。虽然该方法在瓜果成熟度无损检测方面有诸多优点，但是目前也有在现有研究中采用的激励信号为正弦扫频信号，频率变化范围为几到几千赫兹，存在检测时间长、检测速度慢的问题；其次，由于激光多普勒振动信号的强度与被测物体表面的光散射特性密切相关，检测精度会受到农产品表面的光散射特性影响[57]。此外，由于设备价格过于高昂，操作较为复杂，目前还难以实现瓜果成熟度在线检测商业化应用[65]。

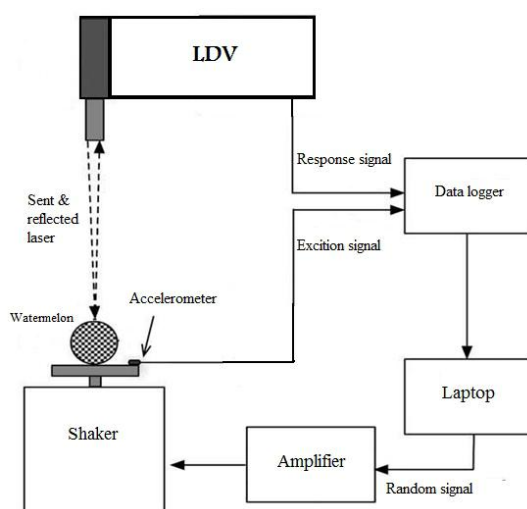


图 1-6 LDV 振动检测西瓜成熟度（Abbaszadeh et al., 2011）

Fig.1-6 Schematic of for measuring watermelon maturity with LDV method

早期很多研究者采用麦克风（声级计）以非接触方式采集声振信号（见图 1-7），利用声音在瓜果中的传播速度对瓜果成熟度进行无损检测，解决了传感器接触测量存在的问题，但这一方法受环境噪声影响大（Sugiyama et al., 1998）[66]；但近年来，声学法检测技术日趋成熟，对瓜果成熟度检测稳定性和精度都不断提高，已开发出图 1-8 的用于西瓜成熟度在线检测分级装置（Shizuoka et al., 2002）[67]。饶秀勤等（2003）也采用如图 1-9 所示的自适应滤波器处理，使西瓜振动的声信号能量更加集中，避免噪声的影响，提高了成熟度检测精度[68]。Tmizawa 等（2004）利用一个声波激发器靠近甜瓜测定声波传递速度，把声速和硬度和可溶性固性物含量进行线性回归，根据声音在甜瓜中的传播速度准确判断施肥量和收获时间[69]。Taniwaki 等（2010）利用 1980 年 Yamampo 等的声学检测装置原理设计声学检测系统，把脉冲激力改为小球激励使声信号更加的集中，精确预测哈密瓜达到成熟度所需的时间。由于声振检测设备也较低廉，有较高的应用开发技术优势[70]。因此，采用麦克风搭建声响应信号检测装置，进行哈密瓜的成熟度无损检测是适宜的。

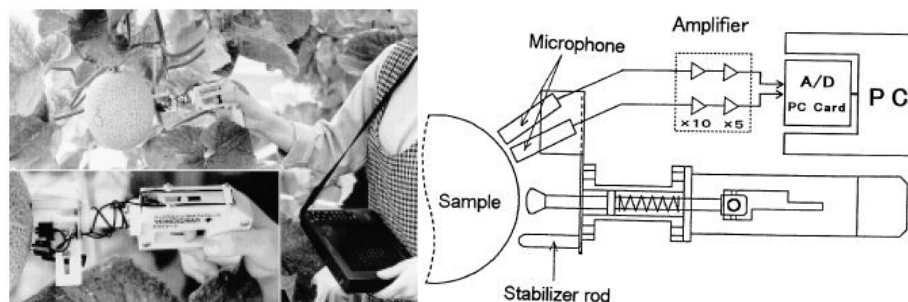


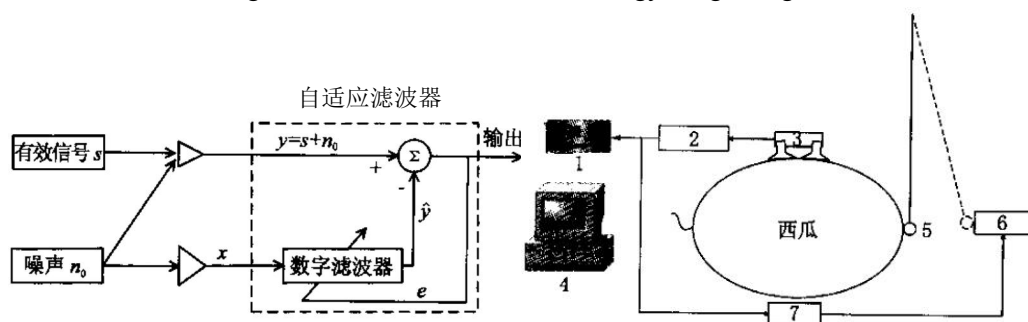
图1-7 麦克风检测哈密瓜硬度(Sugiyama et al., 1998)

Fig.1-7 Measurement of melon firmness by microphone



图 1-8 利用声学技术西瓜分级(Shizuoka et al., 2002)

Fig.1-8 The use of acoustic technology for grading watermelon



1-PCL-1800; 2-信号调理电路; 3-传感器; 4-计算机; 5-冲击钢球; 6-电磁铁; 7-控制器

图 1-9 西瓜成熟度的检测 (饶秀勤等, 2003)

Fig.1-9 Measurement of watermelon maturity by impact setup

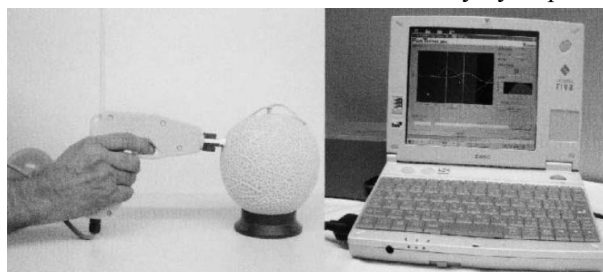


图 1-10 声速法测量甜瓜硬度 (Tmizawa et al. 2004)

Fig.1-10 Propagation methods for measuring melon firmness

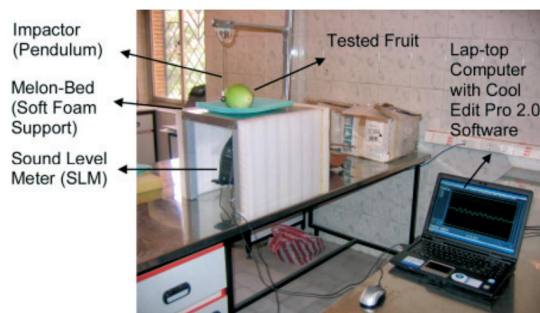


图 1-12 麦克风检测不同成熟度的哈密瓜 (Khoshnam et al., 2016)

Fig.1-12 Melon maturity detected by microphone

1.2.2 基于声学特性瓜果成熟度无损检测研究的进展

利用水果的声学特性对其品质进行无损检测是近几年发展起来的新技术^[71]。首先, Yamamoto等(1980)利用响应频率来检测西瓜的内部品质, 试验结果表明, 由一个木球摆敲击西瓜产生声响应的方法要比声波振动共鸣法简便, 发现某一阶频率(f)与水果质量(m)可以很好地表征其硬度($f^2 \times m$)^[49]。根据这一研究, 陈介余等(1990)研制成功了利用西瓜的声响应特性对西瓜的内部裂纹和成熟度等进行无损检测的装置^[72]。Sugiyama等(1994)采用声学特性对甜瓜硬度进行研究时发现, 麦克风和甜瓜之间的距离会影响信号的采集, 麦克风感测哈密瓜响应信号的位置、小球下落的高度不会对水果的共振频率产生影响^[73]。Taniwaki等(2009)根据两种甜瓜的共振频率和质量提出成熟度指标弹性指数($EI=f^2m^{2/3}$), 研究两种甜瓜的弹性指数(EI)随着时间的变化, 表明两种甜瓜的弹性指数都随着时间增加呈现下降趋势, 采用弹性指数与分别两种甜瓜的硬度和糖度进行线性回归分析构建预测模型相关性分别为 $r=0.833$ 、 $r=0.846$ 和 $r=0.855$ 、 $r=0.813$, 最后确定两种甜瓜的最佳食用成熟度所对应的 EI 分别是 $4.2-6.3 \times 10^4 \text{ kg}^{2/3}\text{Hz}^2$ 和 $4.5-5.6 \times 10^4 \text{ kg}^{2/3}\text{Hz}^2$ ^[61]。随后, 张帅等(2011)利用敲击装置敲击香瓜, 麦克风接收声学信号, 对香瓜声波特征值与其硬度进行多元线性回归分析, 建立良好的香瓜的成熟度预测模型, 数据结果表明, 适熟香瓜共振频率范围在246~287 Hz, 完熟香瓜共振频率范围在242~265 Hz, 过熟香瓜共振频率范围在234~244 Hz。结果表明香瓜的声学特性与其硬度系数有很好的相关性, 相关性可达到 $r^2=0.937\ 67$ ^[74]。因此, 采用弹性指数, 开展哈密瓜成熟度的无损检测研究较为适宜。

与响应频率评估瓜果成熟度法相比, 阻尼比不受瓜果质量的影响, Terasaki等(2001)采用奇异果共振频率计算弹性指数, 对其响应频率进行计算得出阻尼比, 采用弹性指数与奇异果的硬度进行线性回归分析, 相关性最高可以达到 $r^2=0.967$, 采用阻尼比与奇异果的可溶性固性物含量进行线性回归分析, 相关系数 $r^2=0.676$, 最后采用弹性指数和阻尼比结合可以清晰的区分奇异果的成熟度^[75]。之后Oveisi等(2012)利用弹性指数和阻尼比分别单独与M-T穿刺法测得梨的硬度进行线性回归分析相关系数分别为 $r^2=0.71$, $r^2=0.64$, 而弹性指数和阻尼比联合与M-T穿刺法测得梨果的硬度采用多元线性回归(MLR)分析法构建了其硬度预测模型, 相关性系数 $r^2=0.803$, 可以发现两参数联合预测其硬度时相关性明显的有所提高^[76]。因此, 弹性指数和阻尼比两参数联合可以更好的

表征瓜果的硬度和可溶性固性物含量。

但频率有分辨率限制, 阻尼比受仪器检测精度制约, 为此有研究者采用频带幅值构建模型检测瓜果的成熟度。Farabee 等 (1991) 率先采用声响应信号的频带幅值进行西瓜硬度评估, 他们将频域响应信号细化为多个频带, 提取频带幅值参数, 通过挑选对西瓜内部品质最相关的频带幅值参数或构建特性向量矩阵的方法, 实现西瓜内部品质的无损检测^[77]。Iglesias 等 (2002) 搭建了一套声学冲击响应检测装置, 检测频谱参数作为内部品质的无损指标, 装置所记录的共振频率与西瓜的空心体积相关性并不显著, 然而频带幅值(BM)与空心体积相关性较高^[78]。在此基础上 Iglesias 等 (2004) 采用声脉冲响应无损检测西瓜的内部品质, 提取了声振频带幅值参数作为测定西瓜品质的声学参数, 研究发现频带幅值 (BM) 在 85~160 Hz 范围的频带幅值能够较好的检测内部品质问题, 也可以对西瓜过熟现象进行分级^[79]。张玉新等 (2011) 通过声振检测系统检测西瓜成熟度, 比较了振动频率、衰减率、频带幅值等声振参数与西瓜成熟度的相关性, 发现相关性不高, 进而提出了新的声振参数频带幅值向量 BMV, 检测结果表明 BMV 可更好检测西瓜成熟度, 检测准确率分别达到了 86.96%、91.67%^[80]。因此, 频带幅值参数可用来表征瓜果的成熟度。王志鹏等 (2016) 以库尔勒香梨为研究对象, 使用相同的参数提取方法, 基于主成分回归 (PCR) 分析法对所提取的频带幅值参数进行多元线性回归 (MLR), 拟合硬度检测模型, 结果表明各硬度检测模型的校正集相关系数较低为 0.77。对模型加入质量参数修正后, 其校正集相关系数提高到 0.81, 对香梨硬度的检测性能和稳定性的得到明显提高^[81]。因此, 频带幅值参数可用来表征瓜果的成熟度。

由上述可知, 根据麦克风采集哈密瓜声响应信号, 可以考虑提取响应信号的频响参数计算弹性指数和阻尼比进行哈密瓜成熟度的评估和预测研究, 也可采用哈密瓜声响应信号的频带幅值参数尝试对哈密瓜成熟度进行评估, 为哈密瓜成熟度在线检测技术开发提供研究策略。

1.3 研究内容与技术路线

综上所述, 本研究采用麦克风基于哈密瓜声学特性开展哈密瓜成熟度的无损检测检测研究, 具体研究内容及技术路线如下:

1.3.1 研究内容

(1) 哈密瓜的声学特性测试分析

研究不同激励力、激励材料、激励位置等对哈密瓜声学响应参数的影响, 找到最稳定可靠的测试条件, 获取哈密瓜的声响应信号。

(2) 基于频响参数哈密瓜成熟度的无损检测方法研究

对哈密瓜成熟度不同指标进行测量, 计算哈密瓜声响应参数, 然后对哈密瓜生响应参数及成熟度指标间进行相关性分析, 最后基于声响应参数对哈密瓜成熟度预测模型的构建, 对构建的哈密瓜成熟度预测模型的敏感度进行分析。

(3) 基于频带幅值哈密瓜成熟度的无损检测研究

先确定频段截取范围与频带的间隔划分, 根据频段截取范围和频带的间隔对频带幅

值参数进行计算，之后对频带幅值参数与哈密瓜成熟度指标进行相关性分析，最后构建哈密瓜成熟度指标预测模型，对不同预测模型进行比较分析，确定最适合哈密瓜成熟度的预测模型。

1.3.2 技术路线

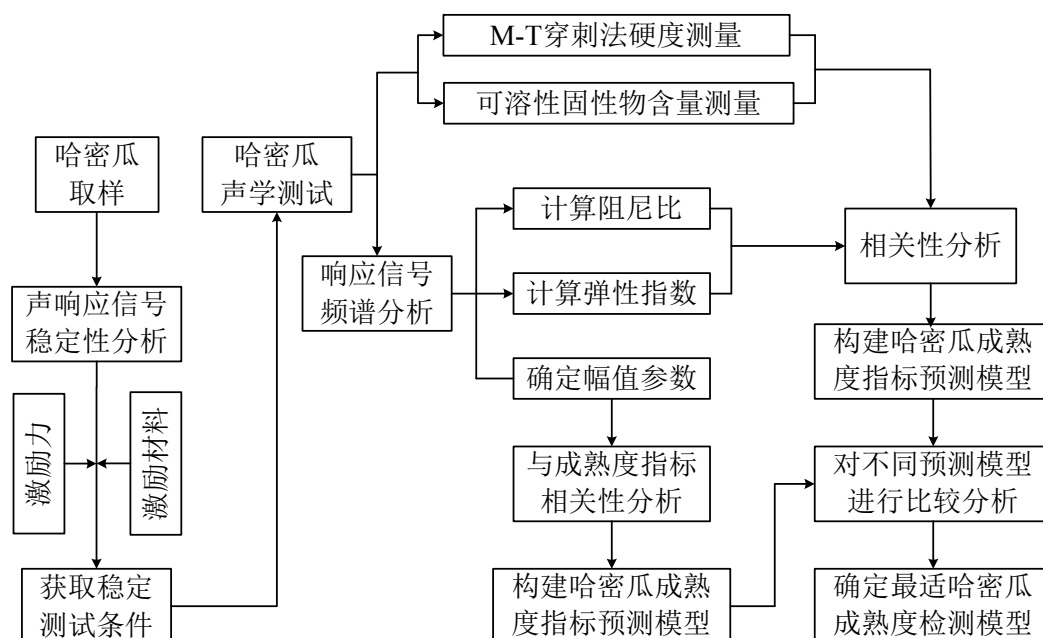


图 1-13 技术路线

Fig.1-13 The framework of study

1.4 本章小结

本章主要阐述了本研究的背景与意义，比较了目前常用的瓜果成熟度无损检测技术方法，介绍了瓜果成熟度无损检测中声学特性的瓜果成熟度无损检测技术研究现状，提出了本文的研究内容与技术路线。

第二章 哈密瓜声学特性的测试分析

2.1 引言

本研究采用力锤激励和麦克风感测完成声响应信号的采集，需要研究如何处理采集声响应信号以滤除外界噪音并获取用于特征参数提取的信号。同时也需要明确力锤材料及激励力不同声响应信号的影响，以获得稳定可靠的检测条件。此外，哈密瓜不同激励感测部位对声响应信号是否有影响也不清楚。因此，本研究搭建了由力锤激励和麦克风感测哈密瓜声学响应信号的试验台架，确定最适合检测哈密瓜声学响应信号以及稳定提取哈密瓜频响参数的检测条件，为哈密瓜成熟度声学响应法无损检测提供基础。

2.2 哈密瓜取样

试验所用哈密瓜为“新蜜 16 号”，于 2016 年 7 月 12 日采自新疆五家渠 103 团。根据瓜农经验挑选七成熟且瓜形椭圆、网纹清晰、无碰伤、无病虫害的试样，放置于 24 ℃ 室温环境下。将 30 个哈密瓜随机分为 3 组，每组 10 个，分别用于不同测试试验。

2.3 哈密瓜声学特性的测试分析

2.3.1 声学特性测试系统的组成

本试验搭建了哈密瓜声学检测系统，如图 2-1 所示，检测系统主要包括放置哈密瓜带圆孔的试验平台、带 LC0505 型微型压电石英力传感器的 LC0408T 型力锤（朗斯有限责任公司，北京）、由 YG-221 型前置放大器和 CHZ-221 型传声器构成的麦克风（传声科技有限公司，北京）、PM60B 型多通道信号调理器（传声科技有限公司，北京）、VibPilot 振动控制与动态信号采集分析仪（m+p 国际公司，德国）、VibPilot 振动控制与动态信号采集分析仪（m+p 国际公司，德国）、振动和噪声测试分析与报告软件 SO Analyzer4.1 版（m+p 国际公司，德国）；计算机等组成。

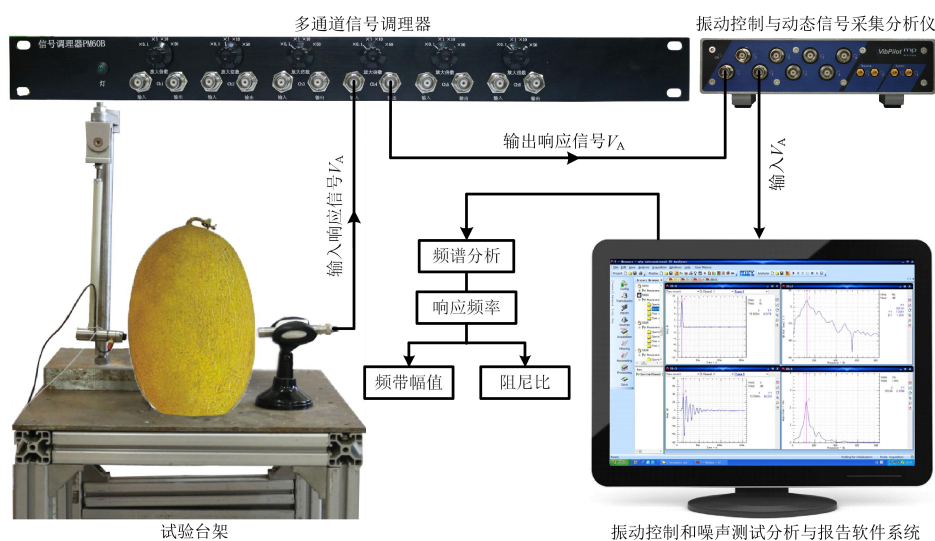


图 2-1 哈密瓜成熟度声学特性检测系统

Fig.2-1 Testing setup of acoustic properties of melon for its maturity evaluation

2.3.2 哈密瓜声学特性测试的方法

哈密瓜试样竖立放置在试验平台上，麦克风放置在力锤锤头相对位置，参考文献[78]麦克风距哈密瓜赤道部表皮 3 mm 处，力锤以不会造成哈密瓜损伤的力敲击哈密瓜赤道部，麦克风采集声响应信号，将采集到的声响应信号 V_A 输入多通道信号调理器经过抗混叠滤波消除了噪声对响应信号的影响，并对采集到的声响应信号放大 10 倍，然后输入 Vibpilot 振动控制与动态信号采集分析仪，SO Analyzer 4.1 软件对采集的声响应信号 V_A 加窗处理、抗混滤波、模数转换（A/D）一系列过程转变成数字信号^[73]，采集到的时域信号经过快速傅里叶变化转换为图 2-2 所示的频域信号，然后进行频谱分析提取试验所需数据。

本研究参考文献[82]，设置有效带宽为 20,000 Hz，采样频率为 51,200 Hz，激励次数为 1 次，激励一次采样时间为 0.16 s，频率分辨率 Δf 为 6.25 Hz，试验触发条件设置为激励信号 V_A 上升沿触发，触发电平 0.05 V^[83]，为了确保信号采集的完整性，预先采集量设置为 5%，截止频率设置为 1,600 Hz，采用贝塞尔低通滤波器滤波。

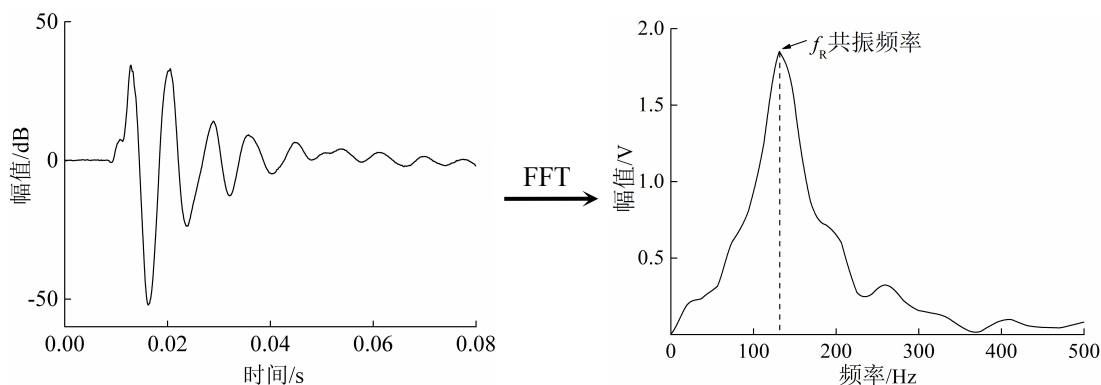


图 2-2 哈密瓜典型的声响应时域和频域信号

Fig.2-2 Typical time domain and frequency signal extracted from acoustic response of melon

2.3.3 哈密瓜共振频率的提取方法

通过自谱分析的方法将采集到的声响应时域信号通过快速傅里叶变换转换为频域信号，得到频谱中的每一个频率都对应着声响应信号的一个周期谐波分量。一般情况采用一定长度的快速傅里叶变换（FFT）对时域信号进行自谱分析，其公式为^[84]：

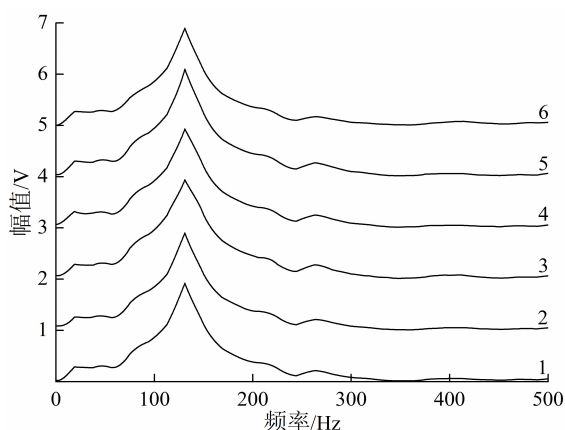
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2-1)$$

式中， $\omega = 2\pi f$ ， $F(\omega)$ 表示频域的普函数序列， $f(t)$ 表示时域的数据序列。由于频率分辨率限制或者时域信号的长度有限，导致快速傅里叶变换分析结果可能有所泄露，为了防止这样的问题出现，本试验需要对所取样本函数进行加窗函数处理。

本试验采集的声响应信号是瞬态信号，所以采用指数窗函数对声响应信号进行频谱分析，获取哈密瓜声响应信号的频谱，如图 2-2 所示，本试验选用哈密瓜响应频率中的一阶响应频率作为哈密瓜的共振频率 f_R 。

2.4 哈密瓜声响应信号检测的稳定性分析

随机选择 5 个哈密瓜，对哈密瓜赤道部同一检测点重复 6 次激励感测，以测试哈密瓜声学特性信号的稳定性，测试结果如图 2-3 所示，可以看出，所得频域信号具有非常好的一致性，这说明本试验装置采用力锤激励和麦克风感测能够稳定地获取哈密瓜的声响应信号。



注：图中 1~6 为同一位置每一次激励感测时对应的信号，为了便于观察，每次信号幅值平移 1 个单位。

图 2-3 同一激励点重复激励的信号

Fig.2-3 Response signal of melon obtained by repeatedly exciting at the same point

2.5 激励条件对哈密瓜声学特性的影响

为了能够获得有利于分析的声响应信号，需要确定更适合激励哈密瓜的锤头材料和激励力度。

2.5.1 锤头材料对哈密瓜声响应信号的影响

力锤锤头的材料分别选用钢、铝、橡胶、尼龙、聚四氟乙烯(PTFE)5 种材质的锤头，采用相同激励力敲击哈密瓜赤道部，获得了各个锤头材料的激励响应频谱曲线，如图 2-4 所示。从表 2-2 的方差分析结果表明，不同的锤头材料激励哈密瓜时，对哈密瓜的共振频率无显著影响。尽管如此，图 2-4 所示可以看出，锤头材料不同，激励出的声响应信号强弱也有所不同，采用聚四氟乙烯、尼龙、铝材料锤头激励时，哈密瓜的动态响应信号较弱，因此不适合作为哈密瓜的激励材料。与之相比，橡胶和钢两种材料能激励出较强的声响应信号，其中橡胶要比钢锤头能更容易激励出较强的声响应信号，因此，本试验选用了橡胶材料的力锤激励哈密瓜获得理想的动态频谱曲线。

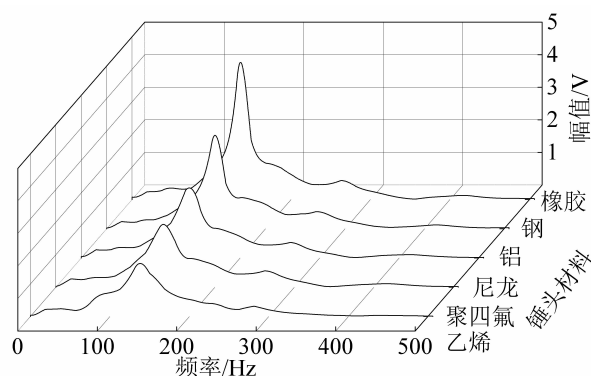


图 2-4 不同锤头材料激励时的响应频谱曲线

Fig.2-4 Frequency response curve obtained by exciting melon with different hammer tip materials

表 2-2 不同锤头材料对哈密瓜共振频率的影响

Table 2-2 Effects of different hammer tip materials on the resonance frequency of melon

	聚四氟乙烯	钢	尼龙	橡胶	铝
共振频率/Hz	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a

注：同行不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

2.5.2 激励力对哈密瓜声响应信号的影响

采用橡胶锤头激励哈密瓜，激励力选择 5 个水平，即：2、4、6、8、10、12、14、16 N，其中 16 N 是钢质锤头不造成哈密瓜损伤的临界力（预备试验测试确定）。由表 2-3 方差分析结果表明，不同激励力时哈密瓜的共振频率变化不显著。如图 2-5 所示，哈密瓜动态响应频谱的幅值随着激励力增大而变大，当激励力为 2~4 N 时得到的声响应信号非常弱，而且响应主频率的幅值都与第二响应频率的幅值相差不大，这样会对试验所需信号提取造成一定的困难，因此不适合作为试验时的激励力；当激励力在 14 N 以上时虽然声响应信号很强，但是第一阶共振频率和第二阶共振频率的振幅相差不大，也会给哈密瓜声学响应信号分析带来困难。因此力锤激励哈密瓜的力度水平应在 6~12 N 可以稳定的取出所需的声响应信号。

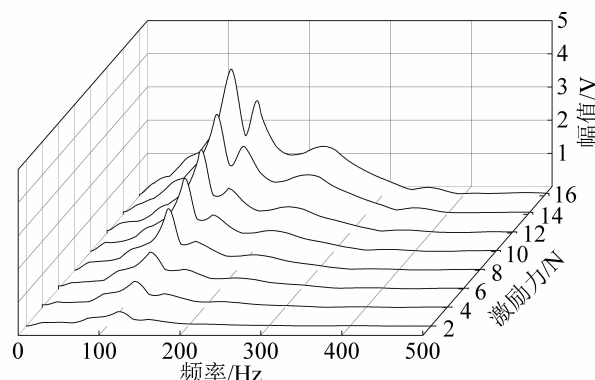


图 2-5 不同激励力的响应频谱曲线

Fig.2-5 Frequency response curve obtained by exciting melon with different excitation forces

表 2-3 不同激励力对哈密瓜共振频率影响的显著性水平

Table 2-3 Significance levels for effects of different excitation forces on the resonance frequency of melon

激励力/N	2	4	6	8	10	12	14	16
共振频率/Hz	131.0 ^a	135.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a	137.5 ^a

注：同行不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

2.6 哈密瓜不同检测位置的共振频率差异性分析

随机选取 5 个哈密瓜，如图 2-6 所示，在哈密瓜赤道部以阴面（瓜皮略显白色为阴面）为起点均匀分布 8 个点，分析赤道部不同激励感测点的响应信号有无显著性差异。

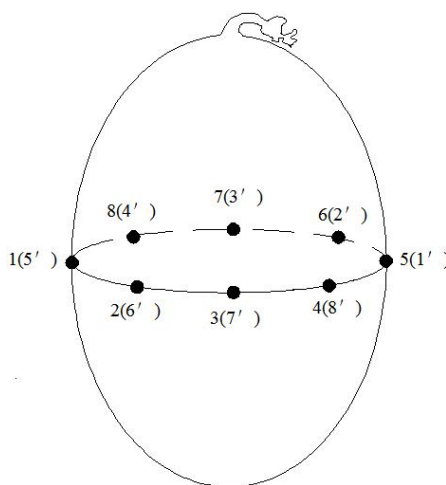


图 2-6 哈密瓜不同激励和感测点的布置

Fig.2-6 Locations of different actuation and sensing points of melon

试验结果如表 2-4 所示，结果表明对哈密瓜赤道部 8 个点进行激励和感测时，得到的共振频率无显著差异（ $P>0.05$ ）。因此，对哈密瓜赤道部进行激励和感测试验时，对测点不需要特殊的定位要求。

表 2-4 不同测点对声响应参数的影响

Table 2-4 Effects of different sensing points on the response parameters of melon

激励（感测）点	1（1'）	2（2'）	3（3'）	4（4'）	5（5'）	6（6'）	7（7'）	8（8'）
共振频率/Hz	138.50 ^a	137.25 ^a	137.50 ^a	136.25 ^a	137.50 ^a	136.25 ^a	138.50 ^a	137.25 ^a

注：同行不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

2.7 本章小结

本章采用力锤激励和麦克风感测哈密瓜声响应信号，分析了哈密瓜的声学特性，取得如下结果：

（4）在哈密瓜同一点多次激励感测的声响应信号稳定可靠，在哈密瓜赤道部不同位置进行激励感测，其共振频率无显著差异（ $P>0.05$ ）。

（5）哈密瓜共振频率不受锤头材料和激励力的影响，但采用橡胶材料锤头激励力范围为 6~12 N 时，更适宜激励哈密瓜获得更强的响应信号且易于信号的提取。

第三章 基于频响参数哈密瓜成熟度的无损检测方法研究

3.1 引言

哈密瓜成熟度的变化主要引起含水率、可溶性固形物含量、硬度等理化特性变化，其中硬度和可溶性固形物含量是评价瓜果内部品质的两个重要指标。在上一章的研究中，采用力锤激励和麦克风感测哈密瓜声响应信号可以提取哈密瓜的共振频率，它是众多研究用来评估瓜果硬度的频谱参数。此外，根据共振频率还可以进一步计算得到哈密瓜的阻尼比，由于阻尼比反映了材料的黏弹特性，它与瓜果的硬度、可溶性固形物含量的变化也有不同程度相关性。因此，本章分析了哈密瓜共振频率和阻尼比这两个参数与其硬度和可溶性固形物含量的相关性，并建立可以预测哈密瓜成熟度不同指标的预测模型。

3.2 哈密瓜成熟度不同指标的测量

3.2.1 哈密瓜硬度的 M-T 穿刺法测量

哈密瓜的硬度采用 TA.XT Plus 质构仪（Stable Micro System 公司，英国）在哈密瓜赤道部进行带皮穿刺测试，参考文献[73]选用直径 5 mm 的圆柱探头，穿刺深度设定为 20 mm，穿刺速度为 1 mm/s。如图 3-1 所示，其中硬度根据哈密瓜穿刺破裂前曲线的斜率计算得出，取赤道部均匀分布的 8 个点穿刺测得的硬度平均值作为哈密瓜硬度 S_{M-T} 。

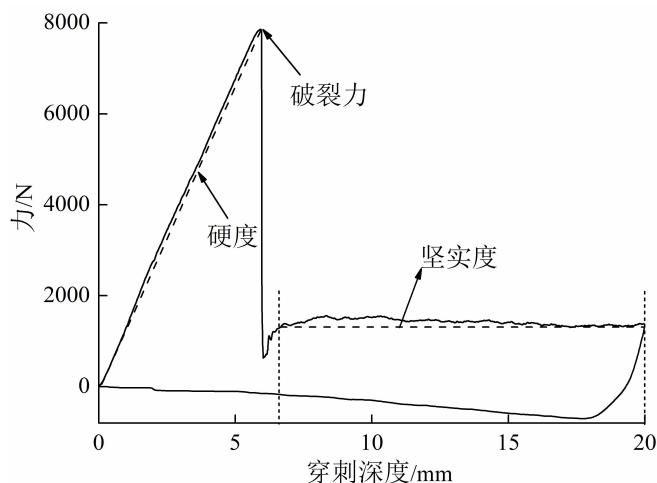


图 3-1 典型的哈密瓜穿刺力-变形曲线

Fig.3-1 Typical force-deformation curve of melon

3.2.2 哈密瓜可溶性固形物含量的测量

哈密瓜的可溶性固形物含量采用折射计（ATAGO 公司，日本）测量，首先将折射计清洗干净滴入蒸馏水把折射计清零校准，然后参考文献[85]，在哈密瓜梗端、赤道部和萼端各部位，分别均布 4 个位置取总计 12 块中层果肉，放入压蒜器中每次压出 2~3 滴的汁液滴入折射计与平面平齐，最后测量记录数字，重复测量取平均值作为哈密瓜可

溶性固形物含量的值。

3.3 哈密瓜声响应参数的计算方法

3.3.1 哈密瓜弹性指数的计算

哈密瓜可以被视为多层球状弹性体,当哈密瓜受到瞬态激励时,将会产生声学响应。按照弹性体振动理论[86],由激励产生声响应的频率是弹性体的固有频率。球体的固有频率和本身的弹性模量相关,其关系可用 Navier–Lamé公式解出^[87,88]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \rho = \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) \quad (3-1)$$

式中, μ 为二阶 Lamé 常数,表示试验材料的剪切模量,大致等同于材料剪切模量 G , Pa; ∇ 表示梯度算符, ∇^2 为拉普拉斯算符; ρ 为试样的密度, kg/m^3 ; λ 表示为一阶 Lamé 常数,为材料的可压缩性,和弹性模量 E 等价, $\vec{u}$ 为变形位移量, m; 将变形量 $\vec{u}$ 分解用矢量和标量表示^[87]:

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla x \vec{\psi} \quad (3-2)$$

式中, ϕ 表示标量势; x 表示质点空间位置; $\vec{\psi}$ 表示矢量势

将公式 (3-2) 导入公式 (3-1) 得:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\nabla \phi + \nabla x \vec{\psi}) = \mu \nabla^2 (\nabla \phi + \nabla x \vec{\psi}) + (\lambda + \mu) \nabla [\nabla \cdot (\nabla \phi + \nabla x \vec{\psi})] \quad (3-3)$$

整理方程后得:

$$\nabla \left[(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right] + \nabla x \left(\mu \nabla^2 \vec{\psi} - \rho \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (3-4)$$

该方程有解的条件有两个:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{v_l^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3-5)$$

$$\nabla^2 \vec{\psi} = \frac{1}{v_t^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2} \quad (3-6)$$

其中,

$$v_l = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (3-7)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3-8)$$

在式 (3-5) ~ (3-8) 中, v_l 表示纵波波速, m/s; v_t 表示横波波速, m/s。其中, 由公式 (3-8) 可知:

$$G = \mu = v_t^2 \rho \quad (3-9)$$

剪切模量 G 标准定义为:

$$G = \left(\frac{\omega r}{\Omega} \right)^2 \rho \quad (3-10)$$

式中, Ω 表示无量纲的固有频率; ρ 表示材料密度, kg/m^3 ; r 表示球体半径, m ; ω 表示扭转角频率, rad/s , 和共振频率的关系为:

$$\omega = 2\pi f \quad (3-11)$$

因此根据公式 (3-9) 和 (3-10) 得下式为:

$$\Omega = \frac{\omega r}{v_t} \quad (3-12)$$

根据球体体积的公式可由下式 (3-13) 计算球体半径 r :

$$r = \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{1/3} \quad (3-13)$$

把公式 (3-11)、(3-13) 引入 (3-10) 可得:

$$G = \left[\frac{\rho^{1/3} (6\pi^2)^{2/3}}{\Omega^2} \right] f^2 m^{2/3} \quad (3-14)$$

根据剪切模量 G 与弹性模量 E 的关系为:

$$E = 2G(1+\nu) \quad (3-15)$$

式中, ν 表示材料泊松比。将公式 (3-15) 带入到 (3-14) 中, 可计算得:

$$E = \left[\frac{2(1+\nu)\rho^{1/3} (6\pi^2)^{2/3}}{\Omega^2} \right] f^2 m^{2/3} \quad (3-16)$$

一般无量纲的固有频率 Ω 通常是定值 ($\Omega^2=4.9955$)^[88]; 材料泊松比 ν 和密度 ρ 的变化较小, 亦可作定值^[89], 根据公式 (3-16) 计算简化为下式评估哈密瓜硬度:

$$EI = f_R^2 m^{2/3} \quad (3-17)$$

式中, f_R 为哈密瓜的共振频率, Hz ; m 为哈密瓜质量, g ; EI 为哈密瓜的弹性指数, $\text{kg}^{2/3}/\text{s}^2$ 。

3.3.2 哈密瓜阻尼比的计算

阻尼比是指阻尼系数与临界阻尼系数之比, 表达结构体标准化的阻尼大小, 表示材料的粘弹性。对阻尼比进行计算时, 参考文献^[90]将共振频率 f_R 所对应的幅值向下平移

$1/\sqrt{2}$ V, 提取频谱中对应的两个频率 f_a 和 f_b 且 $f_a > f_b$ 。由于 $1/\sqrt{2}$ 不易找到, 对 f_a 和 f_b 提取造成困难, 因此将纵坐标的幅值经过对数运算转换为相对幅值, 如图 3-2 所示, 将共振频率 f_R 所对应的相对幅值向下平移 3 dB 得到 f_a 和 f_b 值^[76], 然后根据式 (3-19) 计算阻尼比来评估哈密瓜成熟度。

$$\eta/\% = \frac{f_a - f_b}{f_R} \times 100 \quad (3-19)$$

式中: η 为阻尼比, %; f_a 为 a 点所对应的频率值, Hz; f_b 为 b 点所对应的频率值, Hz; f_R 为共振频率, Hz。

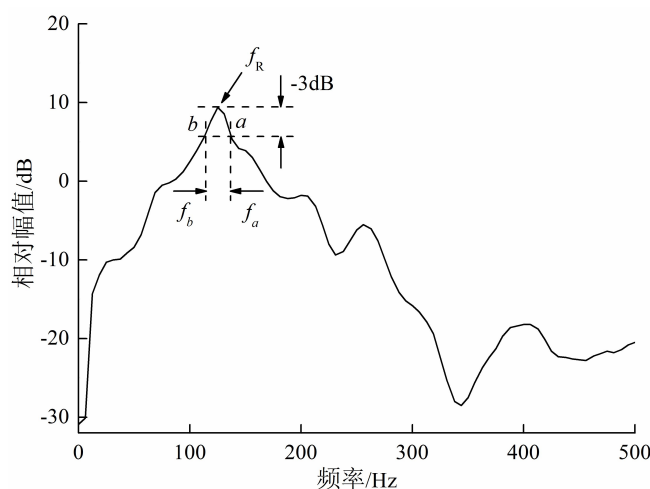


图 3-2 哈密瓜典型的响应信号频谱图

Fig.3-2 Typical acoustic response signal of melon

3.4 哈密瓜声响应参数及成熟度指标间的相关性分析

哈密瓜声响应参数与成熟度指标的相关性分析结果如表 3-1 所示, 弹性指数和阻尼比之间的相关性为 0.31, 相关性较低, 说明这两响应参数表示哈密瓜的弹性和粘性, 可以共同参与预测哈密瓜的成熟度, 若联合预测时也不会有较大的共线性。哈密瓜的硬度和可溶性固形物含量之间的相关性为 0.61, 相关性不高, 因此评估哈密瓜成熟度时, 有必要构建分别预测哈密瓜硬度和可溶性固形物含量的模型。另外, 从表中还可以看出, 弹性指数与硬度的相关性为 0.85, 而阻尼比与可溶性固形物含量相关性 0.83, 这说明弹性指数和阻尼比这两个声响参数分别表征哈密瓜成熟度的硬度和可溶性固形物含量有较高相关性, 有可能实现对哈密瓜成熟度较准确的预测。相对而言, 弹性指数与可溶性固形物含量的相关性为 0.45, 阻尼比与硬度相关性 0.51, 尽管相关性都较低, 但是考虑到本试验可同时获取哈密瓜的弹性指数和阻尼比这两个参数, 增加参数构建预测模型不会影响预测效率, 因此可以尝试探索研究声响两个参数联合分别预测哈密瓜的硬度和可溶性固形物含量。

表 3-1 声响应参数及成熟度指标之间相关性分析

Table3-1 Relationships between acoustic response parameters and maturity index

	弹性指数 EI	阻尼比 η	硬度 S_{M-T}	可溶性固形物含量 SSC
弹性指数 EI	1.00			
阻尼比 η	0.31*	1.00		
硬度 S_{M-T}	0.85**	0.51*	1.00	
可溶性固形物含量 SSC	0.45*	0.83**	0.61*	1.00

注：**表示在 0.01 的水平下存在显著差异 ($P<0.01$)；*表示在 0.05 的水平下存在显著差异 ($P<0.05$)。

3.5 基于声响应参数哈密瓜成熟度预测模型的构建

3.5.1 哈密瓜取样

试验所用哈密瓜为“新蜜 16 号”，于 2016 年 7 月 12 日采自新疆五家渠 103 团，根据瓜农经验和推算播种、授粉时间挑选七成熟哈密瓜 140 个，放置于 24 °C 室温环境下。如图 3-2 所示，哈密瓜的硬度和可溶性固形物含量常温环境下在 14 d 内随着储藏时间变化的规律。每次随机选取 10 个试样，试验间隔 1 d，共进行 14 次。每次试验先进行声响应检测计算哈密瓜的弹性指数 EI 和阻尼比 η ，然后立刻测量硬度和可溶性固形物含量。

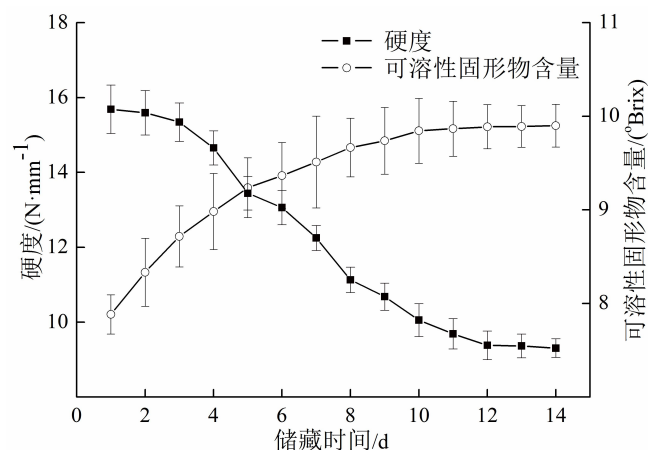


图 3-3 室温条件下哈密瓜硬度和可溶性固性物含量随储藏期时间的变化

Fig.3-3 Changes of firmness and soluble solids content of melon during storage time at room temperature

3.5.2 哈密瓜硬度预测模型的构建

对弹性指数 EI、阻尼比 η 与硬度 S_{M-T} 进行逐步多元线性回归（step multiple linear regression, SMLR），建立如下的预测模型形式：

$$S_{M-T} = \gamma_0 + \gamma_1 EI_i + \gamma_2 \eta_i \quad (3-20)$$

式中， i 表示第 i 个试样， $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； γ_0 表示回归方程的截距， γ_1 、 γ_2 表示回归方程的系数。

为了验证线性回归方程的可信度，设置显著性水平为 0.01，自由度为 138 (140-2)，对于方程截距 γ_0 和回归系数 γ_1 、 γ_2 分别进行单侧 t 检验， t 检验临界值为 $t_{0.005,138}=2.601$ 。此外，回归方程进行 F 检验，并计算其方差膨胀系数 VIF，来评估回归参数 EI、 η 的共

线性，若 $VIF > 10$ ，则说明 EI 和 η 存在较强的共线性，显著性检验结果不可信^[9]。

根据回归方程的相关系数 r 和决定系数 R^2 采用下式对回归方程的校正决定系数 R^2_{adj} 进行计算：

$$R^2_{adj} = R^2 - \frac{1 - R^2}{n - 2} \quad (3-21)$$

经统计分析，弹性指数 EI 和阻尼比 η 联合预测哈密瓜硬度结果如图 3-4 所示，其预测模型为：

$$S_{M-T} = 2.561 + 2.127 \times 10^{-4}EI + 1.938\eta \quad (3-22)$$

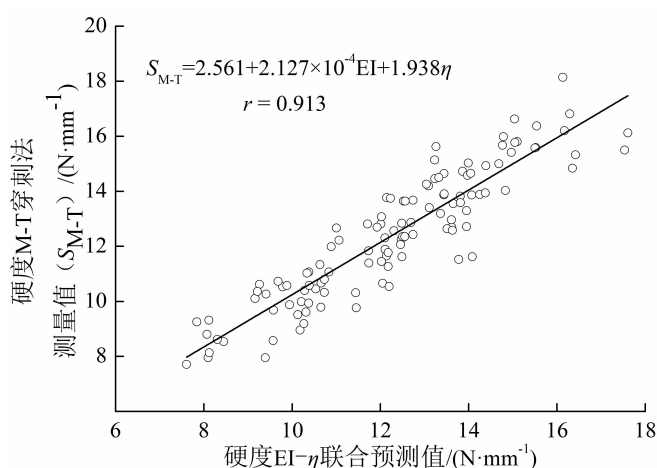


图 3-4 哈密瓜硬度的测量值(S_{M-T})与弹性指标 (EI)、阻尼比 (η) 联合预测值的关系

Fig.3-4 Relationship between firmness with M-T method (S_{M-T}) and firmness based on elastic index (EI) and damp ratio (η)

如表 3-2 所示，截距 γ_0 和回归系数 γ_1 、 γ_2 的 t 检验结果都高于 $t_{0.005,138}$ 的临界值(2.601)，方程的显著性检验 F 值为 223.418， $P_{sig} < 0.01$ ，表明拟合参数和方程都可信；检测 EI 和 η 共线性的方差膨胀系数 $VIF = 1.94 < 10$ ，表明 EI 和 η 共线性很小，在允许范围之内；EI 和 η 联合构建的硬度预测模型的相关系数 $r = 0.913$ ，决定系数 $R^2 = 0.879$ ，校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.878$ ，因此 EI 和 η 联合建立的回归方程可以用于哈密瓜硬度的预测。

表 3-2 哈密瓜硬度预测模型方程及方程参数的显著性检验

Table3-2 Significant test of predicted model equation and parameters for melon firmness evaluation

回归方程	F 检验	截距 t 检验	回归系数 t 检验	相关系数 r
$S_{M-T} = 2.561 + 2.127 \times 10^{-4}EI + 1.938\eta$	223.418 ($P_{sig} < 0.01$)	$t_{\gamma_0} = 4.035$	$t_{\gamma_1} = 19.922$ $t_{\gamma_2} = 5.968$	0.913

3.5.3 哈密瓜可溶性固形物含量预测模型的构建

与 3.5.2 节类似，采用逐步多元线性回归分析法，弹性指数 EI、阻尼比 η 联合预测哈密瓜可溶性固形物含量的模型形式为：

$$SSC = k_0 + k_1EI_i + k_2\eta_i \quad (3-23)$$

式中， i 表示第 i 个试样， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ； k_0 表示回归方程的截距， k_1 、 k_2 表示回

归方程的系数。

经统计分析，弹性指数 EI 和阻尼比 η 联合预测哈密瓜可溶性固形物含量的结果如图 3-7 所示，其预测模型为：

$$SSC = 0.584 + 0.062EI + \eta \quad (3-24)$$

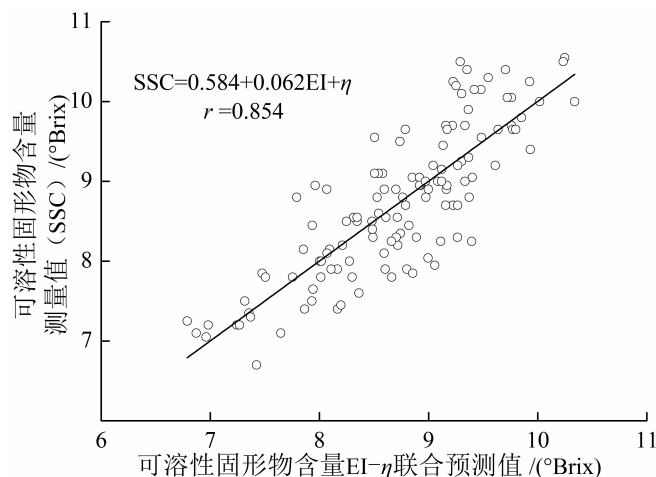


图 3-5 哈密瓜可溶性固形物含量的测量值 (SSC) 与弹性指标 (EI)、阻尼比 (η) 联合预测值的关系

Fig.3-5 Relationship between actual soluble solids content (SSC) and predicted value based on elastic index (EI) and damp ratio (η)

如表 3-3 所示，回归方程 (3-24) 截距 k_0 和回归系数 k_1 、 k_2 的单侧 t 检验，检测结果为： $|t_{k_0}|=0.878$ ， $t_{k_1}=16.150$ ， $t_{k_2}=1.111$ ， $|t_{k_0}|$ 、 t_{k_2} 值都小于 $t_{0.005,138}$ 的临界值 (2.601) 显著性检测值 $F=138.727$ ， $P_{sig}>0.05$ ，表明拟合参数不可信。

在回归方程中，由于弹性指数 EI 的回归系数单侧 t 检验值 $t_{k_2}=1.111$ ，明显小于 t 检验的临界值， $P_{sig}=0.269>0.05$ ，导致预测模型不可信，因此将 EI 排除，对 η 和 SSC 进行线性回归分析，结果如图 3-8 所示，其预测模型为：

$$SSC = 4.588 + 2.461\eta \quad (3-25)$$

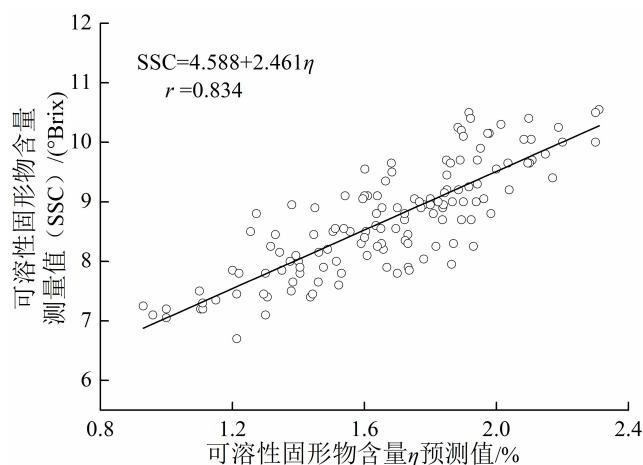


图 3-6 哈密瓜可溶性固形物含量的测量值 (SSC) 与阻尼比 (η) 预测值的关系

Fig.3-6 Relationship between actual soluble solids content (SSC) and predicted value based on damp ratio (η)

表 3-3 哈密瓜可溶性固形物含量修正前后的预测模型方程及参数的显著性检验

Table3-3 Significant test of modified predicted model equation and parameters for soluble solids content evaluation of melon

	回归方程	F 检验	截距 t 检验	回归系数 t 检验	相关系数 r
修正前	$SSC=0.584+0.062EI+\eta$	138.727 ($P_{sig}>0.05$)	$t_{k_0}=0.872$	$t_{k_1}=16.150$ $t_{k_2}=1.111$	0.854
修正后	$SSC=4.588+2.461\eta$	306.869 ($P_{sig}<0.01$)	$\lambda_0=19.087$	$\lambda_1=17.518$	0.834

对修正后的回归方程（3-25）截距 λ_0 和回归系数 λ_1 分别进行单侧 t 检验，检测结果为： $\lambda_0=19.087$ 和 $\lambda_1=17.518$ ，都明显大于 $t_{0.005,138}$ 检验的临界值 2.601，表明拟合参数可信；相关系数 $r=0.834$ ，决定系数 $R^2=0.696$ ，校正决定系数 $R^2_{adj}=0.694$ ，表明回归方程拟合程度较好，可以适用于哈密瓜成熟度预测。

3.6 哈密瓜成熟度预测模型的敏感度分析

为了了解成熟度不同指标预测模型的预测能力，可采用下式计算各个预测模型对哈密瓜硬度和可溶性固形物含量变化的敏感度^[89]：

$$P_{S_{M-T}} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max}} \times 100\% \quad (3-26)$$

$$P_{SSC} = \frac{SSC_{\max} - SSC_{\min}}{SSC_{\max}} \times 100\% \quad (3-27)$$

式中： $P_{S_{M-T}}$ 、 P_{SSC} 分别代表哈密瓜硬度和可溶性固形物含量预测模型的敏感度，%； $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为不同预测模型获得的哈密瓜硬度的最大值、最小值； $SSC_{\max}$ 、 $SSC_{\min}$ 分别为不同预测模型获得的哈密瓜可溶性固形物含量的最大值、最小值。

表 3-4 为哈密瓜硬度和可溶性固形物含量预测敏感度分析结果，M-T 穿刺法检测哈密瓜硬度的敏感度为 69.79%，弹性指数 EI 和阻尼比 η 联合构建的哈密瓜硬度预测模型预测敏感度可达到 68.99%，与 M-T 穿刺法检测的硬度检测敏感度非常接近；可溶性固形物含量测量的敏感度为 47.41%，阻尼比 η 构建的哈密瓜可溶性固形物含量预测模型预测敏感度为 46.43%，也与测量敏感度很接近。这表明，构建的哈密瓜硬度和可溶性固形物含量的两个预测模型都适宜预测哈密瓜成熟。

表 3-4 不同硬度和可溶固形物含量预测模型的敏感度

Table 3-4 Sensitivities of different firmness predicted models

预测模型	硬度 ($N \cdot mm^{-1}$)		可溶性固形物含量 ($^{\circ}Brix$)	
	实测值	EI- η 预测模型	实测值	η 预测模型
敏感度(%)	69.79	68.99	47.41	46.43

3.7 本章小结

(1) 可以采用弹性指数和阻尼比联合构建预测哈密瓜硬度的模型, 相关性达到 0.913, 对哈密瓜硬度变化的预测敏感度为 68.99%, 与实际测量值变化的敏感度(69.79%) 非常接近;

(2) 可以采用阻尼比构建预测哈密瓜可溶性固性物含量的模型, 相关性达到 0.834, 对哈密瓜可溶性固形物含量变化的预测敏感度为 46.43%, 与实际测量值变化的敏感度 (47.41%) 也非常接近。

第四章 基于频带幅值哈密瓜成熟度的无损检测方法研究

4.1 引言

在上一章开展了基于频响参数检测哈密瓜成熟度不同指标的研究,由于受到采样点数、频率分辨率和频带宽度的限制,使得不能更加准确检测哈密瓜的内部品质较小差异。为了解决这一问题,国外曾有学者采用频带幅值法对西瓜的空心度和成熟度进行了研究^[79];国内高冠东等(2010)提出了新的音频特征(频带幅值向量)^[92],发现与西瓜成熟度有很好的相关性,适于西瓜成熟度的判别。因此,本章从麦克风采集到哈密瓜声响应信号中提取了频带幅值的信息,构建了哈密瓜成熟度指标的预测模型,并与第三章频响参数构建的哈密瓜成熟度各预测模型进行比较,最终确定适合哈密瓜成熟度无损检测的方法。

4.2 频带幅值参数的确定

4.2.1 分析频段的截取及频带的间隔划分

当试验测试时,力锤接触哈密瓜瞬间,麦克风则开始感测哈密瓜的声响应信号,在 500 Hz 之后幅值信号趋近于零(可忽略其幅值信息)。因此,频率取 0~500 Hz 范围波段用于分析,如图 4-1 所示。在不同储藏期内哈密瓜的共振频率虽然在 81.25~162.5 Hz 之间变化(见图 4-2),但是在这个频段的幅值总和只占整体频段幅值的 83.5%,为了更加全面提取信号幅值信息,参考文献[80]选取 40~200 Hz 作为提取信号的频段,并设置 7 个频带幅值参数 BM 和 1 个 SUM 参数组成,频带间隔划分及其包含频率范围如表 4-1 所示,在这个频段内幅值之和占整体频段幅值之和的 96.8%。

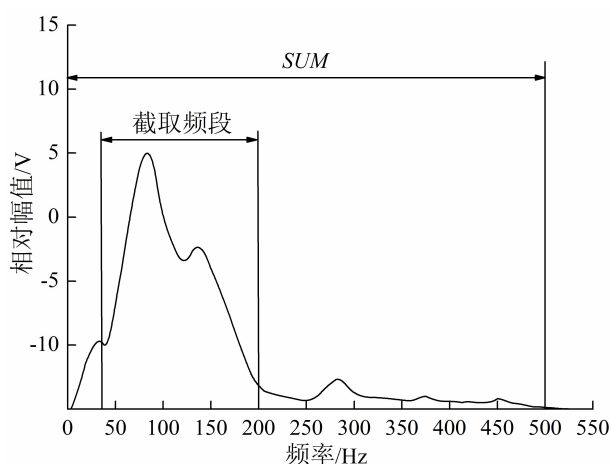


图 4-1 频段的截取范围

Fig.4-1 Intercepted range of encompassing requency

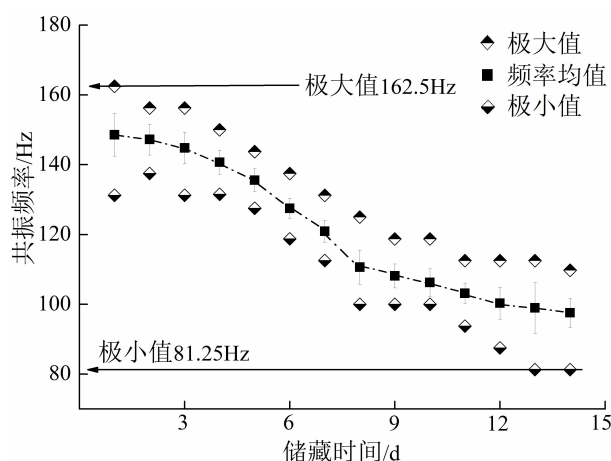


图 4-2 室温条件下哈密瓜的共振频率随储藏时间的变化

Fig.4-2 Change of the resonance frequency of melon with storage time at room temperature

表 4-1 频带间隔大小及其包含频率范围

Table 4-1 Band magnitude variables and their encompassing frequency range

	BM_1	BM_2	BM_3	BM_4	BM_5	BM_6	BM_7	SUM
频率范围 /Hz	40~90	60~110	70~120	80~130	85~160	100~180	120~200	0~500

4.2.2 频带幅值参数的计算

频带幅值是指频带能量之间的比值，Farabee 等^[93,94]最早提出了该计算方法，本章根据 Farabee 等所提出的算法进行频带幅值参数的计算。首先把 0~500 Hz 频谱范围内幅值中的最大值标准化为 1^[77]，然后采用下式（4-1）计算 0~500 Hz 范围截取信号的幅值总和参数 SUM 。依据表 4-1 频带间隔将频段划分为 7 个频带和 1 个 SUM 参数，频带幅值参数 BM_n ($n=1, 2, \dots, 7$)， n 表示第 n 个频带幅值参数，频带幅值参数按照下式（4-2）计算得出。

$$SUM = \sum_{i=0}^{500} A_i \quad (4-1)$$

$$BM_n = \frac{\sum_{i=a_n}^{b_n} A_j}{SUM} \quad (4-2)$$

式（4-1）和（4-2）中， A 为频率响应信号转化的相对幅值； a_n 、 b_n 为每个带宽的起始频率和结束频率，Hz。

4.3 频带幅值参数与哈密瓜成熟度指标之间的相关性分析

幅值参数分别与哈密瓜硬度和可溶性固形物含量进行相关性分析，如表 4-2 所示，可以发现只有 BM_1 与硬度相关性较高，而其余幅值参数和哈密瓜硬度的相关性都较低，这说明单个频带幅值参数不能充分代表哈密瓜的幅值信息，而幅值参数与哈密瓜可溶性固形物含量的相关性都极低，最高也只有 0.24，而且还不稳定，因此频带幅值参数不能

用来预测哈密瓜的可溶性固形物含量。

表 4-2 各个回归参数与硬度(S_{M-T})和可溶性固形物含量(SSC)的相关性

Table 4-2 Correlations between different regression parameters and the actual firmness (S_{M-T}) and actual soluble solids content (SSC)

	BM_1	BM_2	BM_3	BM_4	BM_5	BM_6	BM_7	SUM
$r_{S_{M-T}}$	-0.802**	-0.298*	0.689**	0.593**	0.392*	0.319*	0.457**	0.329*
r_{SSC}	-0.048	0.143*	-0.079	-0.24	0.093	0.071	0.074	-0.094

注: **表示在 0.01 水平下存在显著差异 ($P<0.01$); *表示在 0.05 水平下存在显著差异 ($P<0.05$)。

4.4 基于频带幅值法哈密瓜成熟度指标 PCR 预测模型的构建

4.4.1 主成分回归 (PCR) 分析法的原理

采用频带幅值进行哈密瓜成熟度指标建模时, 由于频带数量及幅值参数较多, 参数之间可能存在相关性, 通常会采用主成分分析的方法对参数降维。主成分回归 (principal component regression, PRC) 分析是设法将原来众多具有一定相关性的 P 个指标, 重新组合成一组新的相互无关的指标代替原来的指标。通常数学上的处理就是将 P 个指标做线性组合, 作为新的综合指标。最经典做法就是用选取的第一个线性组合, 即第一综合指标 F_1 的方差来表达, 即 $\text{Var}(F_1)$ 越大, 表示 F_1 包含的信息越多。因此在所有的线性组合中选取的 F_1 应该方差最大, 故作为第一主成分; 如果第一主成分不足以代表原来 P 个指标的信息时, 将会考虑选取第二主成分 F_2 , 其中 F_1 已有的信息就不再出现在 F_2 中, 要求 $\text{Cov}(F_1, F_2) = 0$, 以此类推可以构造出第三、第四, ...第 P 个主成分, 最后利用提取的主成分与成熟度指标标准化的数据进行多元线性回归 (MLR) 分析并建立预测模型。

4.4.2 频带幅值参数之间的相关性分析

首先对提取的 7 个频带幅值参数 BM 和 1 个 SUM 参数进行的相关性分析, 由表 4-3 可知, 有 5 个幅值参数之间存在相关性, 相关性达 0.75 以上。根据幅值参数共线性诊断可知 (见表 4-4), 参数 BM_1 、 BM_3 、 BM_4 和 BM_7 的方差膨胀因子 $VIF>10$, 存在严重的共线性问题, 这说明幅值参数不完全适用于 MLR 分析构建预测模型。因此, 本章采用主成分回归 (PCR) 分析法进行模型的构建。

表 4-3 各个回归参数间相关系数矩阵

Table4-3 Correlation coefficient matrix of different regression variables

	BM_1	BM_2	BM_3	BM_4	BM_5	BM_6	BM_7	SUM
BM_1	1.000							
BM_2	0.139**	1.000						
BM_3	-0.806**	-0.174**	1.000					
BM_4	-0.763**	-0.505**	0.754**	1.000				
BM_5	-0.451**	-0.229**	0.061	0.442**	1.000			
BM_6	-0.389**	-0.310**	-0.110	0.195**	0.597*	1.000		
BM_7	-0.801**	-0.348**	0.269**	0.137*	0.206**	0.512*	1.000	
SUM	-0.313**	-0.441**	0.033	0.404**	0.450**	0.793**	0.274**	1.000

注: **表示在 0.01 的水平下存在显著差异 ($P<0.01$) ; *表示在 0.05 的水平下存在显著差异 ($P<0.05$) 。

表 4-4 共线性诊断结果

Table4-4 Result of collinearity diagnosis

	BM_1	BM_2	BM_3	BM_4	BM_5	BM_6	BM_7	SUM
VIF	20.822	3.606	13.165	14.569	2.463	5.030	18.730	1.925

4.4.3 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的构建方法

继续采用第三章哈密瓜声响测试的频谱数据, 提取频带幅值参数。试验样品按照 3:1 划分为校正集和验证集 2 组^[95], 选用校正集 105 个试样, 用来构建哈密瓜硬度预测模型; 选用验证集 35 个试样, 用来验证所构建的哈密瓜硬度预测模型。校正集和验证集哈密瓜硬度统计值如表 4-5 所示。

表 4-5 哈密瓜试样校正集和验证集的硬度

Table4-5 Stiffness of melon in calibration and validation set

样本数	硬度(N/mm)			
	均值	最大值	最小值	标准偏差
校正集 105	12.46	18.50	6.51	2.47
验证集 35	12.25	17.64	6.83	2.08

本章对校正集所有试样的幅值参数及哈密瓜硬度进行主成分回归 (PCR) 分析, 根据特征值和主成分方差累计贡献率, 确定要选取主成分的个数, 然后对各个主成分与哈密瓜硬度标准化后的数据进行多元线性回归 (MLR) 分析, 其回归方程形式为:

$$Z_{S_{M-T}} = \alpha_0 + \sum_{n=1}^k \alpha_n F_n \quad (4-3)$$

式 (4-3) 中, $Z_{S_{M-T}}$ 为哈密瓜硬度标准化后的数据, α_0 和 α_n 分别为回归方程的截距和系数, F_n 为要选取的主成分, k 为要选主成分的个数, $n=1, 2, \dots, k$ 。

对回归方程的截距 α_0 和回归系数 α_n 分别进行单侧 t 检验, t 检验临界值为 $t_{0.005,108}=1.98$ 。此外, 对多元线性回归方程进行 F 检验。判定回归方程的可信之后, 将回归方程各个参数转化为原始变量从而获得哈密瓜硬度预测模型^[96]:

$$S_{M-T} = a_0 + a_1BM_1 + a_2BM_2 + a_3BM_3 + a_4BM_4 + a_5BM_5 + a_6BM_6 + a_7BM_7 + a_8SUM \quad (4-4)$$

式(4-4)中, S_{M-T} 为哈密瓜的硬度。 a_0 和 $a_1 \sim a_8$ 分别为回归方程的截距和系数。为了评估该模型的预测性能,分别计算校正集和验证集的相关系数 r_c 、 r_v 和均方根误差 $RMSEC$ 、 $RMSEV$,当预测模型的相关系数越大,均方根误差越小,说明模型的预测性能越好;当模型的校正集和验证集间相关系数、均方根误差差异越小,说明预测模型的稳定性越好。

4.4.4 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的构建

采用 PCR 分析方法将校正集所有试样的幅值参数标准化后进行主成分分析,主成分提取结果如表 4-6 所示。根据 Kaiser 准则,所使用的主成分特征值必须大于 1 且累积贡献率在 85%以上,因此提取 F_1 和 F_2 这 2 个主成分代替原来的幅值参数作为新变量,与哈密瓜硬度标准化后的数据 $Z_{S_{M-T}}$ 进行多元线性回归分析,这 2 个主成分的值由表 4-7 中与之对应的系数矩阵求解,回归方程为:

$$Z_{S_{M-T}} = -0.775F_1 - 0.190F_2 \quad (4-5)$$

表 4-6 主成分提取结果

Table4-6 The extraction results of principal components		
主成份	特征值	累积贡献率 %
F_1	3.547	65.333
F_2	1.684	88.381
F_3	0.994	90.804
F_4	0.904	92.109
F_5	0.475	95.052
F_6	0.225	97.870
F_7	0.144	99.670
F_8	0.026	100.000

表 4-7 主成分系数矩阵

Table4-7 Coefficient matrix of principal component								
主成分	原始参数标准化后的数据							
	Z_{BM1}	Z_{BM2}	Z_{BM3}	Z_{BM4}	Z_{BM5}	Z_{BM6}	Z_{BM7}	Z_{SUM}
F_1	-0.820	-0.569	0.548	0.765	0.662	0.658	0.595	0.662
F_2	0.426	-0.166	-0.806	-0.369	0.324	0.611	0.115	0.444

对硬度预测模型回归方程(4-5)显著性检验值 $F=223.42$, $P_{sig}<0.01$ 。回归系数进行 t 检验,结果 $t_{a_1}=22.510$ 和 $t_{a_2}=5.506$,均显著高于 $t_{0.005,105}$ 的临界值 1.98,因此,表明回归方程可信。将硬度预测模型回归方程(4-5)中各参数还原为原始变量,得出频带幅值参数预测哈密瓜硬度模型^[98],回归方程为:

$$S_{M-T} = 17.194 - 23.803BM_1 - 9.342BM_2 + 7.505BM_3 - 9.373BM_4 + 10.326BM_5 - 6.511BM_6 + 3.890BM_7 + 0.045SUM \quad (4-6)$$

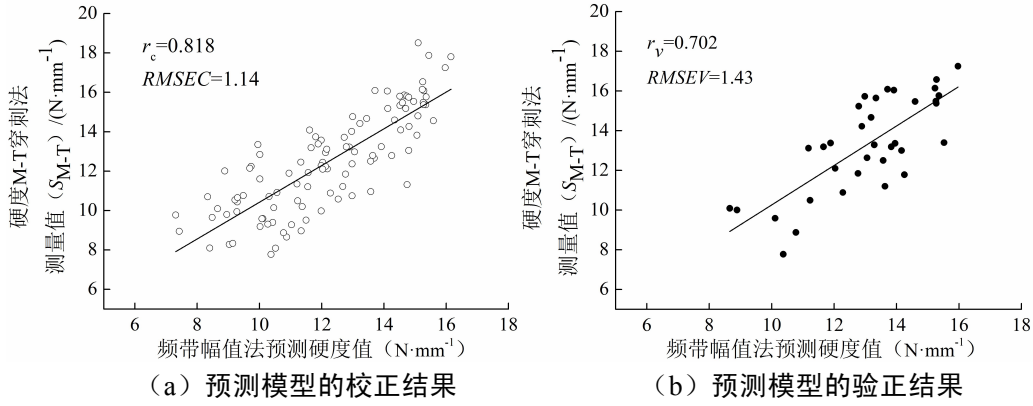


图 4-3 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的校正集和验证集结果

Fig.4-3 Calibration and validation results of melon firmness prediction based on PCR model

如图 4-3 (a) 所示, 哈密瓜硬度预测模型校正集的相关系数 $r_c=0.818$, 校正集均方根误差 $RMSEC=1.14$, 与图 4-3 (b) 验证集的结果相比, 验证集的相关系数 r_v 为 0.702, 降低了 14.18%, $RMSEC$ 为 1.43 N/mm, 增大了 25.43%, 因此说明本次构建的预测模型性能较低, 稳定性差, 这也低于声学特性类似研究所提出预测模型的性能和稳定性^[80], 因此需要对所构建的硬度预测模型进一步修正。

4.4.5 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的修正

以往对瓜果声学特性研究表明, 试样的质量对其共振频率有很大的影响^[81], 因此本试验将哈密瓜的质量引入其硬度预测模型回归方程 (4-6) 进行修正, 方程修正的形式为:

$$S'_{M-T} = c_0 + c_1(17.194 - 23.803BM_1 - 9.342BM_2 + 7.505BM_3 - 9.373BM_4 + 10.326BM_5 - 6.511BM_6 + 3.890BM_7 + 0.045SUM) + c_2m \quad (4-7)$$

式 (4-7) 中, c_0 为回归方程的截距, c_1 , c_2 , 为回归方程的系数, m 为哈密瓜的质量。引入质量参数重新对预测模型回归方程 (4-9) 进行修正, 得到修正回归方程为:

$$S'_{M-T} = 3.325 + 0.988(17.194 - 23.803BM_1 - 9.342BM_2 + 7.505BM_3 - 9.373BM_4 + 10.326BM_5 - 6.511BM_6 + 3.890BM_7 + 0.045SUM) + 1.115m \quad (4-8)$$

对回归方程 (4-8) 的显著性检测值 $F=335.087$, $P_{sig}<0.01$, 对回归系数进行 t 检验, 结果 $|t_{c_0}|=3.649$ 、 $t_{c_1}=25.183$ 和 $t_{c_2}=4.353$ 均显著高于 $t_{0.05,105}$ 的临界值 1.966, 因此, 表明回归方程可信。最后将该修正的回归方程各参数还原回原始变量得出修正后的哈密瓜硬度预测模型方程为:

$$S'_{M-T} = 13.662 + 23.517BM_1 - 9.230BM_2 + 7.415BM_3 - 9.261BM_4 + 10.202BM_5 - 6.433BM_6 + 3.843BM_7 + 0.044SUM + 1.115m \quad (4-9)$$

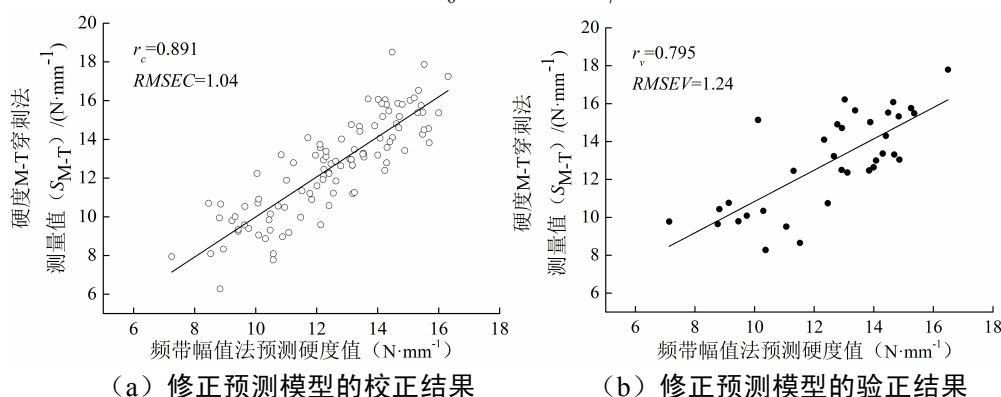


图 4-4 哈密瓜硬度 PCR 预测模型的校正集和验证集结果

Fig.4-4 Calibration and validation results of melon firmness prediction based on modified PCR model

修正后的哈密瓜硬度预测模型回归方程（4-9）的校正集、验证集如图 4-4 所示，与修正前预测模型回归方程（4-6）相比， r_c 、 r_v 分别升高了 8.92%、13.24%， $RMSEC$ 、 $RMSEV$ 分别降低了 8.77%、13.28%，校正集与验证集之间 r 、 $RMSE$ 的差异分别减小了 17.24%、31.03%，这已超过了其他声学特性研究所建硬度预测模型的性能和稳定性^[77]。

4.4.6 哈密瓜硬度不同预测模型的敏感度比较

采用第三章公式（3-26）计算频带幅值法哈密瓜硬度预测模型的敏感度，并与第三章 EI- η 硬度预测模型的敏感度和 M-T 穿刺法的硬度敏感度进行比较分析，结果如表 4-8 所示。频带幅值法预测模型对哈密瓜硬度检测的敏感度为 66.30%，也较为接近 M-T 穿刺法检测哈密瓜硬度的敏感度（69.79%），但低于 EI- η 预测模型对哈密瓜硬度检测的敏感度（68.99%）。因此，尽管频带幅值法预测模型也可以对哈密瓜硬度进行无损检测，但 EI- η 预测模型更适于哈密瓜硬度无损检测。

表 4-8 不同哈密瓜硬度预测模型的敏感度

Table 4-8 Sensitivities of different firmness prediction models

硬度检测方法	M-T 穿刺法	EI- η 预测模型	频带幅值法预测型
敏感度/%	69.79	68.99	66.30

4.5 本章小结

本章基于频带幅值参数进行哈密瓜成熟度的无损检测研究，确定在 40~200 Hz 频段，提取了 7 个频带幅值参数和 1 个频带幅值总和参数，幅值参数与哈密瓜成熟度指标间的相关性结果表明，幅值参数不能用来预测哈密瓜的可溶性固形物含量。引入哈密瓜质量构建了基于频带幅值参数哈密瓜硬度 PCR 预测模型，该预测模型校正集和验证集的相关系数分别为 0.891 和 0.795，校正集和验证集的均方根误差分别为 1.04 N/mm 和 1.24 N/mm，对哈密瓜硬度检测的敏感度为 66.30%，较为接近 M-T 穿刺法硬度检测的敏感度（69.79%），低于 EI- η 预测模型硬度检测的敏感度（68.99%）。

第五章 结论与展望

本论文以新疆特色瓜果哈密瓜为研究对象,针对哈密瓜成熟度迫切需要无损检测这一问题,搭建由力锤激励和麦克风感测的哈密瓜声响应信号检测系统,在确定稳定测试条件和适宜激励部位后,提取不同频响参数计算了哈密瓜的弹性指数和阻尼比,然后采用这两指标及频带幅值参数分别构建哈密瓜成熟度的预测模型,为哈密瓜成熟度的无损检测提供策略。

5.1 主要结论

(1) 测试了声响应信号的稳定性,在哈密瓜同一点多次激励感测,声响应信号稳定,在哈密瓜赤道部不同位置激励感测,共振频率无显著差异($P>0.05$);分析了锤头材料和激励力对哈密瓜共振频率的影响,结果表明锤头材料和激励力对哈密瓜共振频率无显著影响($P>0.05$),但采用橡胶材料锤头以 6~12 N 范围力激励时,更易于提取始于分析的响应信号。

(2) 根据不同频响参数计算了哈密瓜的弹性指数和阻尼比,基于这两个指标联合构建了预测哈密瓜硬度的模型,相关性达到 0.913,对哈密瓜硬度变化的预测敏感度为 68.99%,与 M-T 穿刺法硬度测量的敏感度(69.79%)非常接近;采用阻尼比可以构建预测哈密瓜可溶性固性物含量的模型,相关性达到 0.834,对哈密瓜可溶性固形物含量变化的预测敏感度为 46.43%,与折射计测量的敏感度(47.41%)也非常接近,两模型可共同用来预测哈密瓜成熟度。

(3) 基于频带幅值参数进行哈密瓜成熟度的无损检测研究,确定在 40~200 Hz 频段提取了 7 个频带幅值参数和 1 个频带幅值总和参数,8 个幅值参数与哈密瓜成熟度指标间的相关性结果表明,幅值参数与硬度相关,但与可溶性固形物含量不相关,不能用来预测哈密瓜的可溶性固形物含量。对哈密瓜 8 个幅值参数进行 PCR 分析并引入哈密瓜质量,构建了哈密瓜硬度 PCR 预测模型,该预测模型校正集和验证集的相关系数分别为 0.891 和 0.795,校正集和验证集的均方根误差分别为 1.04 N/mm 和 1.24 N/mm,对哈密瓜硬度检测的敏感度为 66.30%,较为接近 M-T 穿刺法硬度检测的敏感度(69.79%),但低于弹性指数和阻尼比联合构建的哈密瓜硬度预测模型的检测敏感度(68.99%)。

5.2 研究特色和创新之处

构建了基于弹性指数、阻尼比和频带幅值预测哈密瓜成熟度指标的不同模型,为今后哈密瓜成熟度无损检测技术开发提供了多种策略。

5.3 研究展望

由于时间原因,今后可进一步基于声响应法开发哈密瓜成熟度便携式或在线无损检测装置。

参 考 文 献

- [1] 廖新福, 刘曼双. 新疆哈密瓜产业现状及发展对策[J]. 新疆农业科技, 2011, (3): 1-2.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 地理标志产品哈密瓜. 中华人民共和国国家标准: GB/T 23398-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.
- [3] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 1: 203-206.
- [4] 竞中梅. 实施品牌战略, 推动哈密瓜产业发展[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(S1): 264-268.
- [5] 孙丰宝. 厚皮甜瓜成熟的鉴别技巧[J]. 农业知识: 瓜果菜, 2005, (8): 5-5.
- [6] Brosnan T, Sun D W. Improving quality inspection of food products by computer vision-a review [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 1(61):3-16.
- [7] 中华人民共和国科学技术部. 日研发出非接触检测装置判断水果成熟度 [DB/OL], http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201112/t20111230_91686.htm, 2011.
- [8] 危艳君, 饶秀勤, 漆兵. 基于声学特性的西瓜糖度检测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 283-287.
- [9] Clark C J, McGlone V A, Requejo C, et al. Dry matter determination in 'Hass' avocado by NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 29(3): 301-308.
- [10] Dull G G, Leffler R G, Birth G S. Near-infrared spectrophotometry for measurement of soluble solids in intact honeydew melons[J]. HortScience, 1990, 25(9): 1132-1132
- [11] 张德虎, 田海清, 武士钥, 等. 河套蜜瓜糖度可见近红外光谱特征波长提取方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2505-2509.
- [12] Ito H, Morimoto S, Yamauchi R, et al. Potential of near infrared spectroscopy for non-destructive estimation of soluble solids in watermelons[C]/II International Symposium on Cucurbits 588. 2001: 353-356.
- [13] 田海清, 应义斌, 陆辉山等. 可见/近红外光谱漫透射技术检测西瓜坚实度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(6): 1113-1117.
- [14] 袁琳. 网纹瓜可溶性固形物、总酸和坚实度近红外光谱检测技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [15] 段民孝, 邢锦丰, 郭景伦, 等. 近红外光谱 (NIRS) 分析技术及其在农业中的应用[J]. 北京农业科学, 2002, 20(1): 11-14.
- [16] 胡晓男, 彭云发, 罗雪宁, 等. 果品质量近红外光谱检测技术应用与研究进展[J]. 农业工程, 2014, 4(5): 53-58.
- [17] 王蒙, 冯晓元. 梨果实近红外光谱无损检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 681-690.
- [18] 王敏, 付蓉, 赵秋菊, 等. 近红外光谱技术在果蔬品质无损检测中的应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 174-178.
- [19] 介邓飞. 麒麟瓜内部品质在线无损检测技术的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [20] 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[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 1-5.
- [21] 孙通, 徐惠荣, 应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 122-126.
- [22] 刘木华, 赵杰文, 郑建鸿, 等. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 139-142.

- [23] 田有文, 王晓娟. 基于高光谱图像技术的农产品品质无损检测[J]. 农机化研究, 2009, 31(10): 220-226.
- [24] 罗阳, 何建国, 贺晓光, 等. 农产品无损检测中高光谱成像技术的应用研究[J]. 农业化研究, 2013, 35(6): 1-7.
- [25] 彭彦颖, 孙旭东, 刘燕德. 果蔬品质高光谱成像无损检测研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 586-592.
- [26] 吴龙国, 何建国, 贺晓光, 等. 高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 990-996.
- [27] 黄培贤, 姚志湘, 栗晖, 等. 高光谱图像技术在食品无损检测中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 412-417.
- [28] 王雷, 乔晓艳, 董有尔, 等. 高光谱图像技术在农产品检测中的应用进展[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 639-645.
- [29] 马本学, 应义斌, 饶秀勤, 等. 高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 26(6): 1611-1615.
- [30] Nagata M, Tallada J G, Kobayashi T. Non-destructive estimation of firmness of strawberries (*fragaria*ananassa duch.*) using NIR hyperspectral imaging[J]. Environmental Control in Biology, 2006, 44(4): 245-255.
- [31] Nagata M, Tallada J G, Kobayashi T, et al. NIR hyperspectral imaging for measurement of internal quality in strawberries[C]. ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005: 1.
- [32] Lu R F, Peng Y K. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 161-171.
- [33] Lu R F. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2007, 1(1): 19-27.
- [34] Wang S, Huang M, Zhu Q B. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80(8): 1-7.
- [35] 万相梅, 黄敏, 朱启兵. 基于高光谱散射图像的苹果的压缩硬度和汁液含量无损检测[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 71-74.
- [36] 彭彦昆, 李永玉, 赵娟, 等. 基于高光谱技术苹果硬度快速无损检测方法的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(6): 667-671.
- [37] Rajkumar P, Wang N, Eimasry G. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194-200.
- [38] 马本学, 肖文东, 祁想想, 等. 基于漫反射高光谱成像技术的哈密瓜糖度无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(11): 3093-3097.
- [39] 李锋霞, 马本学, 何青海, 等. 哈密瓜坚实度的高光谱无损检测技术[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 592-595.
- [40] Tsuta M, Sugiyama J, Sagare Y. Near-infrared imaging spectroscopy based on the sugar absorption band for melons[J]. Journal of Agriculture land Food Chemistry, 2002, 50(1): 48-52.
- [41] 贺艳楠, 魏永胜, 郑颖. 水果成熟度无损检测技术研究进展[J]. 北方园艺, 2010, (3): 208-212.
- [42] 彭彦昆, 李永玉, 赵娟, 等. 基于高光谱技术苹果硬度快速无损检测方法的建立[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3 (6) : 667-671.
- [43] 洪添胜, 李震, 吴春胤, 等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 280-285.

- [44] Benady M, Simon J E, Charles D J, et al. Fruit ripeness determination by electronic sensing of aromatic volatiles[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 2(38): 251-257.
- [45] 唐晓伟, 张万清, 耿利华等. 电子鼻评价甜瓜成熟度及风味的研究[J]. 中国农学报, 2010, 26(21): 75-80.
- [46] Simona V, Nathan W L, Susan E E, et al. Fruit volatile analysis using an electronic nose[J]. Journal of Visualized Experiments, 2012, (61): 3821.
- [47] 马永昆, 周珊, 陈计峦, 等. 用 SPME 方法分析不同成熟度哈密瓜香气的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 136-139.
- [48] 吕琛, 李锋霞, 马本学, 等. 甜瓜成熟度检测技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 244-246.
- [49] Yamamoto H, Iwamoto M, Haginuma H. Acoustic. impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons[J]. Journal of Texture Studies. 1980, 11(2): 117-136.
- [50] Clark R L. An investigation of the acoustical properties of watermelon as related to maturity[J]. ASAE Paper. 1975, (75): 6004.
- [51] 何东健, 李增武, 王洪群. 西瓜打击音波特性的研究. 西北农业大学学报, 1994, 22(3): 105-107.
- [52] Chyun, A. Acoustic evaluation of watermelon internal quality-maturity, cavity exist existence and orientation. Journal of Agricultural and mechanical. 1996, 5(4); 57-69.
- [53] Kuroki S, Tohro M, Sakurai N. Monitoring of the elasticity index of melon fruit in a greenhouse[J]. Journal of Japan Social Horticultural Science, 2006, 75(5): 415-420.
- [54] 沈蓉尔. 基于 MEMS 加速度传感器的西瓜成熟度无损检测系统设计[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [55] 危艳君, 饶秀勤, 漆兵, 等. 基于西瓜声学特性测定其成熟度[J]. 农产品加工. 学刊, 2012, (1): 8-10.
- [56] 黄语燕, 朱亨银. 西瓜成熟度无损检测技术的研究进展[J]. 福建农机, 2011, (4): 40-43.
- [57] 崔笛, 张文, 应义斌. 激光多普勒测振技术在农产品品质检测中的应用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 160-164.
- [58] Zhang W, Cui D, Ying Y. Nondestructive measurement of pear texture by acoustic vibration method[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 96(2): 99-105.
- [59] Blahovec J, Akimoto H, Sakurai N. Laser Doppler forced vibrology of soft agricultural products[J]. Applied Rheology, 2007, 17(2): 251111-251117.
- [60] Blahovec J, Kuroki S, Sakurai N. Precise correction in laser Doppler forced vibrology of soft products[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 156-160.
- [61] Taniwaki M, Takahashi M, Sakurai N. Determination of optimum ripeness for edibility of postharvest melons using nondestructive vibration[J]. Food Research International, 2009, 42(1): 137-141.
- [62] Abbaszadeh R, Rajabipour A, Delshad M, et al. Application of vibration response for the nondestructive ripeness evaluation of watermelons[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(7): 920-925.
- [63] Abbaszadeh R, Moosavian A, Rajabipour A, Najafi G. An intelligent procedure for watermelon ripeness detection based on vibration signals[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2): 1075-1081.
- [64] 高宗梅. 激光多普勒测振技术用于西瓜成熟度检测的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2016.
- [65] 徐虎博. 不同内部品质库尔勒香梨振动频谱特性分析研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [66] Sugiyama J, Katsurai T, Hong J, et al. Melon ripeness monitoring by a portable firmness tester[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 121-127.

- [67] Shizuoka Shibuya Seiki Co., Ltd., 2002. <<http://www.shibuya-ss.co.jp>>.
- [68] 饶秀勤, 应义斌. 自适应滤波器在水果声学特性研究中的应用[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(2): 143-146.
- [69] Al-Haq M I, Sugiyama J, Tomizawa A, et al. Nondestructive acoustic firmness tester detects the effect of manure on muskmelon texture[J]. HortScience, 2004, 39(1): 142-145.
- [70] Taniwaki M, Tohro M, Sakurai N. Measurement of ripening speed and determination of the optimum ripeness of melons by a nondestructive acoustic vibration method[J]. Postharvest biology and technology, 2010, 56(1): 101-103.
- [71] 吕飞玲. 基于声学特性的西瓜品质无损检测方法研究[D]: 浙江: 浙江大学, 2003.
- [72] 陈介余, 宫里满, 石黑悦雨, 利用声波响应特性检测农产品内部质量的研究[J]. 农业机械学会志, 1993, 55(3): 66-72.
- [73] Sugiyama J, Ootobe K, Hayashi S, et al. Firmness measurement of muskmelons by acoustic impulse transmission[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1235-1241.
- [74] 张帅, 史磊, 张本华. 基于声学特性的香瓜成熟度检测方法[J]. 农机化研究, 2011, 33(10): 126-129.
- [75] Abbaszadeh R, Rajabipour A, Delshad M, et al. Application of vibration response for the nondestructive ripeness evaluation of watermelons[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(7): 920.
- [76] Terasaki S, Wada N, Sakurai N, et al. Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer[J]. Transactions-american Society of Agricultural Engineers, 2001, 44(1): 81-88.
- [77] Farabee M L, Stone M L. Determination of watermelon maturity with sonic impulse testing[J]. Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA), 1991: 91, 3013.
- [78] Diezema-Iglesias B, Ruiz-Altisent M, Orihuel B. Acoustic impulse response for detecting hollow heart in seedless watermelon[C]. Proceedings of the International Conference: Postharvest Unlimited 599, 2002.
- [79] Diezma-Iglesias B, Ruiz-Altisent M, Barreiro P. Detection of internal quality in seedless watermelon by acoustic impulse response[J]. Biosystems engineering, 2004, 88(2): 221-230.
- [80] 张玉新. 基于音频特性的西瓜成熟度无损检测技术研究[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(2): 114-118.
- [81] 王志鹏, 吴杰, 赵正强, 等. 基于声振频带幅值特性香梨硬度无损检测研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 343-349.
- [82] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔, 等. 振动结构模态分析: 理论, 实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001: 69-70.
- [83] Macrellia E, Romani A, Paganelli R P, et al. Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part I I: Statistical and sorting analysis[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201(10): 497-503.
- [84] 杨丽娟, 张白桦, 叶旭桢. 快速傅里叶变换 FFT 及其应用[J]. 光电工程, 2004, 31(12): 1-3.
- [85] 张立虎, 李冠, 张自强, 等. 便携式糖度无损检测仪在甜瓜糖度检测中的应用[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2347-2352.
- [86] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 126~146.
- [87] Armstrong P R, Zapp H R, Brown G K. Impulsive excitation of acoustic vibrations in apples for firmness determination[J]. ASAE, 1990, 33(4): 1353-1359.
- [88] Cooke J R, Rand R H. A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1973, 18(2): 141-157.

- 3-media elastic sphere model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1973, 18(2): 141-157.
- [89] Macrelli E, Romani A, Paganelli R P, et al. Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part I: Theory and development of acoustic techniques[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 487-496.
- [90] Drake B. Automatic recording of vibrational properties of foodstuffs[J]. Journal of Food Science, 1962, 27(2): 182-188.
- [91] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 67-81.
- [92] 高冠东, 滕桂法, 肖珂, 等. 基于 BMV 特征的西瓜成熟度无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 326-330.
- [93] Armstrong P R, Stone M L, Brusewitz G H. Peach firmness determination using two different nondestructive vibrational sensing instruments[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3): 699-703.
- [94] Stone M L, Armstrong PR, Chen D D, et al. Peach firmness prediction by multiple location impulse testing [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 115-119.
- [95] Wen Zhang, Di Cui, Yibin Ying. Nondestructive measurement of pear texture by acoustic vibration method [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 96 (8) : 99-105.
- [96] 郭呈全, 陈希镇. 主成分回归的 SPSS 实现[J]. 统计与决策, 2011, 5(3): 157-159.

致 谢

光阴似箭，日月如梭，两年研究生时光犹如星光在夜空中划过。回首这悄悄溜走的两年，才发觉在我心中已留下来深深的脚印。在这两年的学习和生活之中，我学到了很多以前不明白的道理：这两年承载的不仅仅是个人的愿景，也是师长与父母殷切的期望；付出的不仅仅是一个个不眠之夜，也是一生中两年珍贵的青春；最终所收获的也不仅仅是学位，也是一种踏实稳重的人生态度。值此研究生生活结束之际，谨向给予我帮助、支持与鼓励的老师、父母、同学、朋友们致以我最诚挚的谢意。

首先，我要由衷的感谢我的导师吴杰教授。两年的硕士研究生学习过程中老师给予我无私的教导，从论文选题到文献的阅读，从方法的选取到论文撰写，再从论文章节逻辑的梳理到逐字逐句的修改，无不倾注了老师大量的心血。老师思维敏锐、学识渊博、严谨务实的科研态度、一丝不苟的敬业精神，都深深地感染着我、鞭策着我今后不断努力，虽然只有短短的两年时间，却使我终生受益。在此我再次向我的导师吴杰教授致以最真诚的感谢和最崇高的敬意。

感谢梅卫江副教授和张宏文教授为声振信号测试分析提供的技术支持，感谢张若宇副教授为哈密瓜硬度测试提供的测试条件。感谢我开题报告、中期检测、实践考核和学位论文答辩的所有专家和老师们，感谢你们对我研究的指导、斧正以及提出的宝贵意见。

感谢赵正强、王志鹏师哥对我初入声学测试领域的帮助与引导，在我搭建试验台时提出的建议和指导；特别感谢王志鹏师哥对我的研究内容提供思路；感谢王大成师哥对我撰写专利提供了思路和耐心指导；感谢李玲师姐在我做试验前对我耐心的经验传授；感谢姜来峰师哥和我一起去五家渠 103 团购买哈密瓜试样及在我试验和撰写大论文期间对我的疑惑进行耐心的解答。

感谢和我一起进入实验室，一起上课，一起考试，一起汇报的甘雨、张宣辉、张慧同学，没有你们的陪伴我的生活将失去光泽，感谢和你们经历的点点滴滴；感谢吕吉光、杨雪梅、赵康、周文静师弟师妹们，感谢有你们使我的生活多了很多的欢声笑语。

感谢实验室的同学们及毕智建、吴业北、徐晓刚、孙浩文、郭新峰等在我做试验期间帮助我搬运哈密瓜试样，才能使我的试验顺利完成。

感谢我的舍友朱猛、卫龙、曹恩、李欢、王祥雨、范中建、黄昆鹏、陈渊博等在我的研究生生活中为我提供帮助，在空闲时间我们谈天说地，使我的研究生生活丰富多彩。

特别感谢我的父母，在生活上对我无微不至的关怀，是你们让我没有学习之外的任何烦恼和负担，并一直鼓励我，信任我，让我安心学习；感谢弟弟贺少龙的鼓励和支持，你们的存在使我心中多了一份安宁。

最后，在此向在研究生阶段所有给予我关心帮助的老师、同学、朋友致谢！并祝愿你们福寿安康，诸事如意。

贺少鹏 于石河子

2017 年 6 月

作者简介

贺少鹏，男，出生于 1990 年 6 月，新疆昌吉人，2015 年 7 月毕业于塔里木大学机械电气化工程学院农业机械化及其自动化专业，获得工学学士学位；同年 8 月，进入石河子大学机械电气工程学院农业机械化专业学习至今，主要从事农产品智能检测与分级研究。

在学期间主要参与的研究项目

1. 国家自然科学基金项目：库尔勒香梨内部品质及病害的声振响应参数检测方法研究，项目编号：31560476。
2. 兵团博士基金项目：基于振动频谱特性库尔勒香梨内部品质无损检测关键技术研究，项目编号：2013BB011。

硕士在读期间主要成果

1. 贺少鹏, 吴杰, 王大成, 等. 一种哈密瓜成熟度声学无损检测装置[P]. 中国. ZL2016 2 0717792.9, 2016,07.

石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表

研究生姓名	贺少鹏	学制	两年
专业	农业机械化	研究方向	农产品智能检测与分级

学术评语:

论文以新疆特色瓜果哈密瓜为研究对象,基于声学特性开展哈密瓜成熟度的无损检测研究,选题正确。

论文搭建了由力锤和麦克风分别激励感测哈密瓜声响应信号的无损检测装置,确定了稳定检测条件,提取了声响应参数并计算弹性指数和阻尼比,分别构建了哈密瓜硬度和可溶性固性物含量的预测模型;提取了频域响应信号的8个频带幅值参数,采用主成分回归分析法建立了哈密瓜硬度预测模型;计算了各预测模型的敏感度,确定了适宜哈密瓜成熟度检测的模型。研究结果具有一定参考价值。

论文研究目标明确,内容具体,重点突出,研究方法合理可行,论文层次分明,数据详实,图表规范,体现了作者具有本学科及相关领域扎实的理论基础和系统的专业知识,具有较强的独立分析问题和解决问题的能力。理论深度达到了硕士学位论文的水平。

指导教师签字: 

2017年6月2日