

激光多普勒测振技术在农产品品质检测中的应用*

崔 笛 张 文 应义斌

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 准确检测农产品品质, 可以为采后保存、分期销售、预测产品货架期以及产品分级提供可靠的依据。激光多普勒测振技术基于多普勒效应测量从振动物体表面散射回来的光所产生的频移, 具有灵敏度高、非接触性测量、不破坏物体振动等优点, 可通过测量农产品的振动特性实现对农产品品质的无损检测。论述了激光多普勒测振技术的进展、原理及其在农产品品质无损检测中的应用。

关键词: 激光多普勒 测振技术 农产品品质 无损检测

中图分类号: S123; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0160-05

Applications of Laser Doppler Vibrometer Technology in
Nondestructive Detection of Agro-product Quality

Cui Di Zhang Wen Ying Yibin

(School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Accurate detection of agro-product quality can provide reliable basis for postharvest preservation, determining when to sell, predicting shelf-life and sorting. Laser Doppler vibrometer (LDV) technology is based on the Doppler-effect sensing the frequency shift of back scattered light from a moving surface, and has the advantages of high sensitivity, non-contact measurement, avoiding mass loading implication and so on. This technology can be used for nondestructive evaluation of agro-product quality by inspecting its vibrational properties. The development and principle of LDV technology, and its applications in nondestructive detection of agro-product quality were introduced.

Key words: Laser Doppler Vibrometer technology Agro-product quality Nondestructive detection

引言

农产品品质与其振动特性直接相关^[1]。准确、无损地检测农产品的振动特性, 对农产品品质的评估具有重要的意义。目前, 振动测量方式分为2种: 接触式和非接触式。传统的振动测量方法需要把振动传感器附着于待测物体表面, 利用其输出的信号实现“加速度-速度-位移”的相关测量, 但加速度传感器的质量会对物体的振动产生影响, 这种接触式的安装方式破坏了原有的振动状态, 影响测量精度^[2]。激光多普勒测振技术(Laser Doppler vibrometer technology)集光机电为一体, 具有灵敏度

高、动态响应快、测量范围大、非接触性测量、对横向振动干扰不敏感等优点, 适用于各种被测物体, 而且对检测振幅微小的振动也很有效^[3~8]。其特点满足准确、无损测量农产品振动特性的需要, 具有在线检测农产品品质的潜力。本文论述激光多普勒测振技术的进展、原理及其在农产品品质无损检测中的应用, 以促进该技术在我国农产品生产和加工中的应用。

1 激光多普勒测振技术的进展

1842年奥地利物理学家多普勒^[5]观察木星卫星运动时发现光波频率偏移, 后人将这一现象称为

收稿日期: 2013-01-14 修回日期: 2013-02-21

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B12)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011FZA6024)

作者简介: 崔笛, 讲师, 博士, 主要从事农产品品质检测研究, E-mail: dicui@zju.edu.cn

通讯作者: 应义斌, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品品质与安全快速检测技术和智能装备研究, E-mail: ybying@zju.edu.cn

“多普勒效应”。1960 年世界上第一台激光器的问世使多普勒效应开始得到应用。1964 年, Yeh 和 Cummins^[9]采用基于多普勒效应的激光流速计测得水流中粒子的散射光频移, 证实了可以用激光多普勒频移来测量流体速度, 此后该项技术得到了多方面的重视并开展了大量拓展研究。1964 ~ 1972 年是激光多普勒技术发展的初期^[10], 但由于光学器件效率不高和光学系统的复杂性而难以得到推广。20 世纪 70 年代是激光多普勒技术发展最活跃的时期^[11]。在此期间信号处理和现代测量技术等方面有了很大发展, 光束扩展、空间滤波、偏振分离、频率分离、光学频移等近代光学技术相继被应用到光学系统中, 使得激光多普勒技术测量范围更为广泛^[6, 12]。国外厂商开始向市场提供比较完备的激光多普勒测速产品。

20 世纪 70 年代后, 激光多普勒技术已从流体和固体的速度测量发展到了振动测量领域^[11]。1983 年, 英国南安普敦大学的光振研究所首次开发出了激光多普勒测振仪, 从单光束、交叉光束测量发展到了多光束测量^[13]。此后, 激光多普勒测振技术逐渐遍及航空、航天、机械、能源、动力、地质、化工、计量、医学等各个领域, 例如用于发动机检测、模态与振动分析、机械结构缺陷与损伤检测、地震波勘探、监测心脏跳动^[14 ~ 18]等。1997 年, 日本学者 Muramatsu 等^[19]首次将激光多普勒测振仪应用到了农产品品质的无损检测中。目前, 激光多普勒测振技术已成为许多领域不可缺少的检测手段, 但在农业中的应用仍处于发展阶段。

2 激光多普勒测振技术的原理

将具有一定频率成分的声波、电波或者光波对准某一移动物体, 从该物体反射出来的声波、电波或者是光波的频率会随物体的速度成比例地发生变化, 这就是多普勒现象或者称为多普勒效应^[20]。激光多普勒测振技术的基本原理如图 1 所示^[21]。

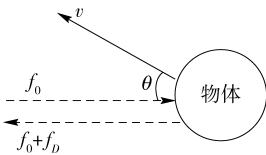


图 1 激光多普勒振动传感器的原理

Fig. 1 Schematic of the principle of laser Doppler vibrometer

将频率为 f_0 的激光照射到移动着的被测物体上, 从移动物体表面反射或散射回来的光会产生多普勒效应, 即除了本身的激光频率 f_0 外还附加了一个频率 f_D (发射波频率与反射波频率之差), 称之为多普勒频率, 该频率满足

$$f_D = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \tag{1}$$

式中 λ ——激光的波长
 v ——被测物体的运动速度
 θ ——入射光与被测物体运动方向的夹角
 $v \cos \theta$ ——被测物体速度在激光入射方向上的分量

由于激光多普勒测振仪所使用的激光波长 λ 非常稳定, 再加上通常测振仪的入射光与被测物体运动方向的夹角呈 0° , 那么多普勒频率 f_D 与 v 的关系可简化为

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \tag{2}$$

根据式 (2) 就能很方便地求出运动物体的运动速度。再通过积分和微分运算就可以得到物体的运动位移和加速度。在实际应用中, 由于激光的频率非常高, 直接测量多普勒频率 f_D 是比较困难的, 通常的做法是将反射光频率 $f_0 + f_D$ 与入射光的频率 f_0 进行相干涉的方法, 把 f_D 检测出来。

3 激光多普勒测振技术在农产品品质检测中的典型实例

为了探索激光多普勒测振技术检测农产品品质的可行性, 科学家们从利用该方法测量水果坚实度开始进行了尝试。Muramatsu 等^[19]最先利用此技术测量了苹果、猕猴桃、日本梨和八朔的坚实度, 并与接触式加速度传感器测得的水果坚实度结果相比较。实验结果表明, 水果坚实度与输出信号相对于输入信号的相移及共振频率有关, 相移随着正弦激励信号频率的增大而增大, 在同一频率下, 果实越成熟, 相移越大。与加速度传感器测量的结果相比, LDV 传感器更加灵敏, 测量结果也更加可靠, 而且在测量过程中无需接触水果的表面, 具有在线检测水果品质和分级的潜力。

Terasaki 等^[22]认为水果坚实度是果肉粘弹特性的函数, 因此可利用 LDV 技术在猕猴桃的不同成熟阶段, 对其粘弹特性进行评估。文献 [22] 准确测量了猕猴桃对不同振动频率的响应, 定义了刚度系数 S 和损失系数 η 。实验结果表明, 刚度系数与猕猴桃芯的坚实度呈极显著相关关系, 决定系数为 0.967; 损失系数与可溶性固形物含量也有很好的相关关系。单独使用 S 或 η 都不能将成熟的猕猴桃与不成熟、稍微成熟、过成熟和腐烂的猕猴桃区分开, 但是将 S 和 η 所反映的信息综合起来, 就可以成功区分猕猴桃的成熟度。图 2 所示的就是实验中所用到的基于激光多普勒传感器的测量系统。此系统主

要由激光多普勒振动传感器、快速傅里叶分析仪、计算机、功率放大器、振动发生器、加速度传感器和电子秤组成。

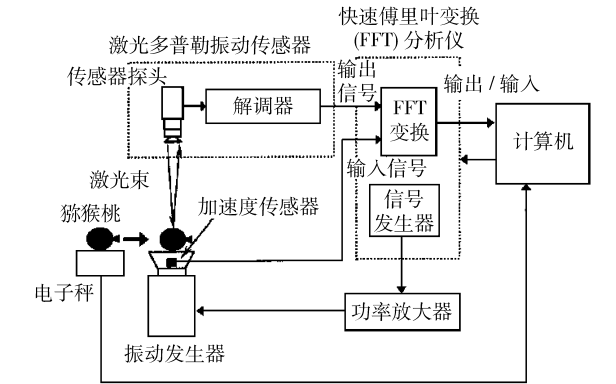


图 2 基于激光多普勒振动传感器测量猕猴桃共振的实验装置

Fig. 2 Experimental apparatus used for resonance measurement of kiwifruit by a laser Doppler vibrometer

同年,Terasaki 等^[23]利用 LDV 技术测量了猕猴桃成熟过程中的弹性指数和与粘性有关的阻尼常数,并将这 2 个指标的测量结果与细胞壁多糖的变化作了比较。结果发现,猕猴桃经过乙烯处理之后,其果肉的弹性指数按指数形式衰减,但阻尼常数在第 0~2 天增大,随后减小。实验中还发现,细胞壁中木葡聚糖分子量的减少与水果组织弹性的损失有关,果胶分子量的变化与粘性的变化一致。

2006 年 Terasaki 等^[24]基于 LDV 技术实现了对梨弹性特性的检测。实验中,首先给完整的“La France”梨施加振动,然后用 LDV 传感器检测振动的响应,再利用快速傅里叶变换分析方法估算第 2 个共振峰对应的频率(第 2 共振频率),计算出梨的弹性指数,如图 3 所示。通过分析发现,梨在低温下储存相对短的时间(2 周至 2 个月),质地会比较好。再将梨放到 20℃ 的环境下,随着水果逐渐成熟,弹性指数持续衰减,且遵循倒数模型和传统的指数模型,但倒数模型更为一致地反映实验数据。当梨在低温条件下储存超过 4 个月的时候,即使放置于 20℃ 的环境下,梨也不会成熟,而且表面会出现难看的颜色,同时,水果弹性指数的变化也不规则。文献^[24]还指出,由于果肉的弹性指数变化反映了细胞壁结构和细胞膨压的特性,因此,LDV 方法具有无损检测水果成熟过程中细胞壁代谢变化进程的潜力。

Blahovec 等^[25]利用 LDV 技术对甜瓜进行了检测,提出用最低谐振频率处的峰值 M_0 修正与强迫变形程度有关的幅频响应。2008 年 Blahovec 等^[26]改进了算法,将 M_0 自身的变化加入修正过程中,并提

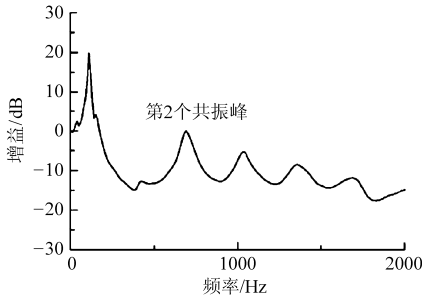


图 3 典型不成熟梨的频谱图

Fig. 3 Typical frequency spectrum of immature pear

出了抛物线或抛物线形状幅频响应曲线峰值位置的求解方法。实验结果表明,修正后峰值位置的偏移与峰的宽度和形状有关。当峰狭窄尖锐且峰顶为抛物线形状时,此方法可以很好地估算出修正后的峰值位置。

Taniwaki 等^[27]进一步探索了 LDV 技术检测质地软的柿子成熟度的可行性,并对实验装置进行了简化。如图 4 所示,简化后的系统使用音频输入/输出适配器代替快速傅里叶变换分析仪采集信号,并由计算机直接发出正弦扫频信号用于激励电动振动台。实验中,分别利用 LDV 技术和声波振动技术测量了 2 个品种的柿子(Fuyu 和 Taishuu),计算了弹性指数和质地指数,并分析了这 2 个指数在采后随时间变化的规律。实验结果表明,2 个品种柿子对应的弹性指数都出现了准指数和双相衰减的情况。但是利用声波振动技术测得的 2 个品种对应的质地指数变化趋势不同,其中 Fuyu 品种对应的质地指数衰减得很快。与感官检测结果相比较,确定了 2 种柿子达到最佳成熟期时对应的弹性指数,分别是: $(2.9 \sim 6.0) \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2$ (Taishuu 品种)和 $(4.8 \sim 6.4) \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2$ (Fuyu 品种)。同年,Taniwaki 等^[28]采用同样的技术对梨进行了测量,并对声波振动传感器进行了改进。实验结果表明,梨对应的弹

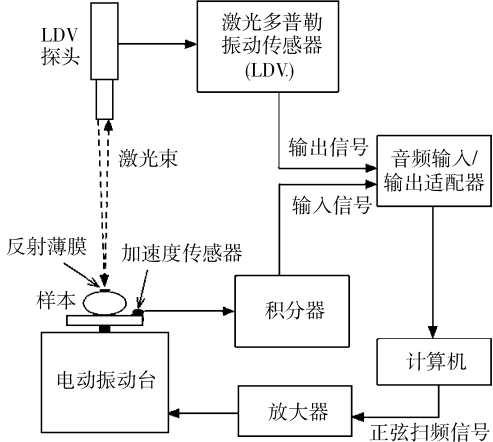


图 4 无损检测甜瓜弹性指数的实验装置

Fig. 4 Experimental setup of nondestructive measurement of elasticity index for melon samples

性指数出现双相衰减的情况,质地指数则在一个宽的频率范围内随着梨的成熟逐渐减小。

除了柿子和梨这种小型水果之外,Taniwaki 等^[29]还探索了 2 个品种甜瓜(Andes 和 Quincy)达到最佳成熟期时对应的弹性指数及其在采后期间随时间变化的规律。文献[29]首先利用 LDV 技术测得了甜瓜样品的第 2 个共振频率,计算得到了弹性指数。通过观察弹性指数随时间变化的曲线,发现 2 个品种甜瓜对应的弹性指数都出现了准指数和双相衰减的情况。通过比较弹性指数与甜瓜成熟度的感官评价结果,还发现 Andes 品种和 Quincy 品种甜瓜达到最佳成熟期时对应的弹性指数分别是 $(4.2 \sim 6.3) \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2$ 和 $(4.5 \sim 5.6) \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2$ 。文献[29]认为此方法可以帮助消费者通过测定弹性指数,推测出 2 个品种甜瓜的最佳成熟期。2010 年,Taniwaki 等^[30]检测了另外一种甜瓜(Miyabi-Haruaki)的成熟速度和最佳成熟度。用相同的方法测得了甜瓜的弹性指数,并定义了水果的成熟速度。实验中发现,Miyabi-Haruaki 甜瓜达到最佳成熟期时对应的弹性指数为 $(5.3 \sim 7.1) \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2$,其成熟速度为 $0.36 \times 10^4 \text{ kg}^{2/3} \text{ Hz}^2/\text{d}$,比 Andes 和 Quincy 品种甜瓜的成熟速度慢。文献[30]认为,通过确定甜瓜成熟的速度,可以预测甜瓜的贮藏寿命和达到最佳成熟度所需要的时间。

4 结论

(1) 激光多普勒测振技术作为非接触式测振方法的代表,具有精度高、动态响应快、测量范围大、非接触性测量、对横向振动干扰不敏感等优点,满足农产品快速、无损检测的需要,在农产品无损检测领域是一项正在发展且极具潜力的新技术。

(2) 国外利用 LDV 技术检测农产品品质的研究大多是在实验室内开展的,学者们采用频谱分析的方法对激光多普勒振动信号和激振信号进行分析,根据幅频响应第 2 共振频率、农产品质量和粘弹特性之间的关系,计算出弹性指数和质地指数,用来预测农产品的坚实度和成熟度。当然,目前该技术用于农产品品质检测方面也有其局限性。首先,现有研究中所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,因此存在检测时间长、检测速度慢的问题。此外,由于激光多普勒振动信号的强度、噪声与被测物体表面的光散射特性密切相关,因此该方法最终的检测精度受到农产品表面的光散射特性影响。

(3) 除了上述文献中提到的研究内容、研究方法和实验装置之外,基于 LDV 技术检测农产品品质还可以在如下方面开展进一步研究:探索基于该技术检测其他农产品品质指标的方法,例如农产品内部缺陷的检测;采用除频谱分析之外新的信号处理方法对激光多普勒振动信号进行分析,提取能够反映农产品品质的特征参量;研究农产品表面的光散射特性对检测精度的影响;运用不同信号预处理和校正方法,提高检测精度;改进检测装置,缩短检测时间,提高检测速度,使该方法满足农产品品质在线检测的需求。

(4) 在我国,激光多普勒测振技术在工业、医学等领域已有较广泛应用,但在农产品的生产和加工中还未引起足够的重视,因此有必要利用国外已取得的经验,深入研究农产品的振动特性与其品质之间的关系,以便应用该技术对农产品进行无损检测和在线分级,增强我国农产品处理和产后加工的能力。

参 考 文 献

- Murayama H, Konno I, Terasaki S, et al. Nondestructive method for measuring fruit ripening of 'La France' pears using a laser Doppler vibrometer [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2006, 75(1): 79 ~ 84.
- 陈长纓. 一种新型激光多普勒振动传感器[J]. 光电工程, 1997, 24(2): 12 ~ 17.
Chen Changying. A new type vibration sensor of laser Doppler technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 1997, 24(2): 12 ~ 17. (in Chinese)
- Watrasiewicz B M, Rudd M J. Laser Doppler measurement [M]. London: Butterworths, 1976.
- Aksel N, Schmidtchen M. Analysis of the overall accuracy in LDV measurement of film flow in an inclined channel [J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(8): 1 140 ~ 1 147.
- Drain L E. 激光多普勒技术[M]. 王仕康, 沈熊, 周作元, 译. 北京:清华大学出版社,1985.
- 姚欣. 激光多普勒振动检测技术的研究[D]. 天津:天津大学,2004.
- 洪昕. 远距离固体散射体面内位移激光多普勒测量技术的研究[D]. 天津:天津大学,1999.
- 孙义雁. 国外用于位置和振动测量的激光干涉测量法[J]. 测控技术, 1990 (3): 28 ~ 30.
- Yeh Y, Cummins H Z. Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer [J]. Applied Physics Letters, 1964, 174 (4): 176 ~ 178.
- 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 刘明. 激光多普勒在粒子散射测量中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.

- 12 朱磊. 基于 PGC 解调激光多普勒干涉仪的噪声分析和算法改进研究[D]. 合肥:安徽大学, 2011.
- 13 吕宏诗,刘彬. 激光多普勒测振技术的最新进展[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 176 ~ 179.
- 14 晏素平. 振动测量用的激光多普勒测振仪[J]. 现代科学仪器, 1991 (4): 41 ~ 42.
- 15 杜振辉,陶知非,蒋诚志,等. 激光多普勒效应在地震波勘探中的应用研究[J]. 光电子·激光, 2004, 15(8): 955 ~ 958.
- 16 Valliapau R, 徐振高. 用激光多普勒测振仪检查轴承的表面缺陷[J]. 国外计量, 1992 (3): 5 ~ 8.
- 17 De Melis M, Grigioni M, Morbiducci U, et al. Optical monitoring of the heart beat [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Modeling in Medicine and Biology, 2005: 181 ~ 192.
- 18 Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P. Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6): 1 265 ~ 1 285.
- 19 Muramatsu N, Sakurai N, Wada N, et al. Critical comparison of an accelerometer and a laser Doppler vibrometer for measuring fruit firmness [J]. HortTechnology, 1997, 7(4): 434 ~ 438.
- 20 Durst F, Melling A, Whitelaw J H. 激光多普勒测速技术的原理和实践[M]. 沈熊, 许宏庆, 周作元, 译. 北京:科学出版社, 1992.
- 21 刘习军,贾启芬. 工程振动理论与测试技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- 22 Terasaki S, Wada N, Sakurai N, et al. Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 81 ~ 87.
- 23 Terasaki S, Sakurai N, Yamamoto R, et al. Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by a laser Doppler method [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2001, 70(5): 572 ~ 580.
- 24 Terasaki S, Sakurai N, Zebrowski J, et al. Laser Doppler vibrometer analysis of changes in elastic properties of ripening 'La France' pears after postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 42(2): 198 ~ 207.
- 25 Blahovec J, Akimoto H, Sakurai N. Laser Doppler forced vibrology of soft agricultural products[J]. Applied Rheology, 2007, 17(2): 25111-1 ~ 25111-7.
- 26 Blahovec J, Kuroki S, Sakurai N. Precise correction in laser Doppler forced vibrology of soft products [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 156 ~ 160.
- 27 Taniwaki M, Hanada T, Sakurai N. Postharvest quality evaluation of "Fuyu" and "Taishuu" persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 80 ~ 85.
- 28 Taniwaki M, Hanada T, Tohro M, et al. Non-destructive determination of the optimum eating ripeness of pears and their texture measurements using acoustical vibration techniques [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(3): 305 ~ 310.
- 29 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.
- 30 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.